

바이오매스 중심 산림 정책의 재검토와 지속가능한 대안 마련을 위한 연구

2026. 04.

연구기관

협동조합 자연과공생연구소

연구진

연구책임자 윤여창 교수

선임연구원 이수진 박사

선임연구원 김이연

연구원 이세음

요약

본 연구는 산림바이오매스 중심의 기존 산림정책을 재검토하고, 기후변화 대응, 생물다양성 보전, 지역사회 지속가능성을 함께 고려하는 산림정책 전환 방향을 제시하는 데 목적이 있다. 현행 산림바이오매스 정책은 산림자원 총량과 재생에너지 공급 확대 논리에 기반해 추진되어 왔으나, 실제 현장에서는 자원 접근성, 사유림 소유구조, 경제성, 생태적 제약, 이해관계자 간 인식 차이가 복합적으로 작동하고 있다.

분석 결과, 국내 산림은 총면적 약 630만 ha, 총 임목축적 약 10억 4천만 m³ 규모로 상당한 자원 기반을 보유하고 있으나, 이는 곧바로 지속가능한 바이오매스 공급 가능량을 의미하지 않는다. 특히 전체 산림의 상당 부분이 사유림 구조라는 점은 공급정책이 산주 참여 유인을 정교하게 반영해야 함을 시사한다.

또한 산림정책의 기후효과는 산림 내부의 흡수량만으로 판단하기 보다는 산림 내 탄소저장량과 수자원함양 기능과 함께 평가하여야 한다. 벌채된 목재가 제재목, 목질패널, 펄프·제지, 에너지용 목재 중 어떤 제품군으로 이용되는지에 따라 탄소저장 기간과 배출 시점이 달라진다. 따라서 수확목제품(HWP)의 탄소저장 효과, 장수명 목제품 이용, 카스케이딩 이용 원칙을 함께 고려하는 통합적 분석틀이 필요하다.

이해관계자 분석에서는 정책 목표와 현장 실행 사이의 구조적 괴리가 확인되었다. 산주, 지자체, 벌채업자, 칩 생산자, 발전사업자, 시민사회는 산림바이오매스 정책을 서로 다른 가치와 비용 구조 속에서 해석하고 있었다. 특히 REC 가중치 의존, 공급망 정보 비대칭, 중간 유통구조의 불투명성, 지방비 매칭 부담, 고령화된 노동력, 생태 훼손 우려가 주요 쟁점으로 나타났다.

결론적으로 산림바이오매스 정책의 핵심 질문은 “얼마나 더 공급할 것인가”가 아니라 “무엇을, 어떤 기준과 순서로, 누구의 부담과 편익을 고려하여 사용할 것인가”로 전환되어야 한다. 정책 방향은 공급 확대보다 지속가능성, 연료 이용보다 장수명 물질 이용, 단순 보조금보다 검증 기반 인센티브, 단기 경제성보다 생태계서비스와 세대 간 형평성을 우선하는 방식으로 재설계되어야 한다.

따라서 본 연구는 현행 산림바이오매스 정책이 보조금과 REC에 의존한 단기 연료화 구조를 강화하고 있음을 확인하고, 향후 산림정책은 장수명 목재 이용, 카스케이딩, 생태계 서비스 보전, 지역사회 정의로운 전환을 중심으로 재설계되어야 함을 제시하고 있다.

목 차

제1장 서론	9
제1절 연구의 필요성 및 목적	10
제2절 연구 방법 및 연구 문제	14
제2장 이론적 배경	17
제1절 산림 자원 현황·임업 생산 분석 및 미이용 산림바이오매스 공급 잠재력 평가	18
제2절 산업별·재종별 목재 소비 구조	23
제3절 산림·목제품 내 탄소 저장량 변화 분석	25
제4절 산림바이오매스 관련 지원 정책	27
제5절 국외 사례 검토	39
제6절 통합적 검토	46
제3장 산림 자원 현황·임업 생산 분석 및 미이용 산림바이오매스 공급 잠재력 평가	48
제1절 산림자원 현황 분석	49
제2절 산림자원 이용 행태 및 부가가치 분석	67
제3절 미이용 산림바이오매스 공급 잠재력 평가	79
제4장 산업별·재종별 목재 소비 구조 분석	92
제1절 분석의 의의 및 접근 방법	93
제2절 한국 HWP 분야 선행연구 검토	95
제3절 2020~2024년 국내 목재 소비 시계열 구조	97
제4절 한국 목재산업의 구조적 특성	99
제5절 한국 산림의 수종 구성과 차등 환산의 학술적 기반	101
제6절 산업별·재종별 목재 소비 구조 분석 결과	104

제5장 산림·목제품 내 탄소 저장량 변화 분석	109
제1절 분석방법 및 자료	110
제2절 반감기 시나리오 설정	111
제3절 FOD 모형 적용 및 시나리오 시뮬레이션	113
제4절 반감기 민감도 분석	116
제5절 Cascading 이용 구조 일부 반영	119
제6절 환경부 NIR 정합성 검토	127
제7절 통합 시사점	131
제6장 산림바이오매스 관련 이해관계자 분석	137
제1절 이해관계자 분석의 목적과 범위	138
제2절 조사 설계 및 분석 절차	144
제3절 주제 분석	147
제4절 결론	162
제7장 산림바이오매스 공급 정책 개선 방안	165
제1절 REC 의존 완화 및 단계적 일몰 로드맵 수립	167
제2절 생태적 지속가능성 기준 강화	169
제3절 공급망 투명성 제고 및 유통 구조 개혁	171
제4절 장수명 목재 이용 우선 원칙 확립 및 카스케이딩 정책 도입	172
제5절 재정지원 구조 재편: 보조금 왜곡 해소와 공익 경영 보상 실질화	174
제6절 지역사회·노동의 정의로운 전환 지원	176
제7절 통합 이행 방향 및 부처 간 연계 체계	177
제8장 결론 및 제언	178
제1절 결론	179
제2절 정책적 함의	181
제3절 연구의 한계 및 후속 연구 과제	182
제4절 종합 논의	183
[참고문헌]	184

표 목차

<표 2-1> 최근 3년 산림청 예산 현황	27
<표 2-2> 조림·육림 보조금 지원 구조 및 예산 현황 (2022~2026)	29
<표 2-3> 현장기반 보조금 미이용 산림바이오매스 수집·생산 현황 (2022~2026)	30
<표 2-4> REC 정책 지원 RPS 의무공급비율 및 바이오매스 REC 가중치 현황 (2022~2026)	32
<표 2-5> 산림바이오매스 공급 관련 재정 지원 비교	33
<표 2-6> 정합성 차원별 국외 사례	44
<표 3-1> 주요 수종별 연간 이산화탄소 흡수량($tCO_2/ha/년$)	63
<표 3-2> 주요 임업 업종별 가구당 수입 및 비용 구조 비교	73
<표 3-3> 목재 생산 모형의 경제성 분석(IRR) 결과	77
<표 3-4> 수종별 미이용 산림바이오매스 산출용 주요 계수	81
<표 3-5> 수종 및 영급별 ha당 줄기 재적(단위: m^3/ha)	81
<표 3-6> 시나리오 기반 전국 및 시·도별 미이용 산림바이오매스 잠재 가용량	83
<표 3-7> 미이용 산림바이오매스 가용량 및 연간 실효 가용량 산출 결과(강원, 경북 대상)	87
<표 4-1> 산림청 22개 목재제품의 4개 카테고리 매핑	93
<표 4-2> 2020-2024년 국내 전체 목재이용량 시계열	97
<표 4-3> 한국 목재 자급률 시계열 (2010-2023, 산림청)	100
<표 4-4> 2020-2024년 카테고리별 국내 목재이용량 (단위: m^3)	104
<표 4-5> HWP 탄소 전환계수 (장은경, 2021, 표 18 인용)	106
<표 4-6> 2020-2024년 카테고리별 HWP 탄소 유입량 (단위: $t-C$)	107
<표 5-1> Tier 3 산업별 반감기 (장은경, 2021, 표 17 인용)	111
<표 5-2> 한국 HWP 누적 탄소축적량 시계열 (장은경, 2021, 표 28 발췌)	113
<표 5-3> 시나리오 A/B 누적 탄소축적량 및 연간 산화량 비교 (단위: $t-C$)	114
<표 5-4> 반감기 ±변동 시 2044년 누적 stock 변화 (단위: $Mt-C$)	116
<표 5-5> 카테고리별 반감기 단일 변동의 2044년 stock 영향 (시나리오 B 기준)	117
<표 5-6> 국산 제재목의 산업별 투입량 (장은경, 2021, 표 25 인용)	120
<표 5-7> Cascading 47.5% 적용 시 2044년 누적 stock 변화	120
<표 5-8> 2024년 에너지용 즉시 산화 배출량과 HWP 풀 분석 결과 비교(단위: $Mt-C$)	122
<표 5-9> 시나리오 정의(B-C, B-D vs 기준 시나리오B)	124
<표 5-10> 시나리오별 2030-2044년 누적stock 비교(단위: $Mt-C$)	125
<표 5-11> 시나리오별 즉시 산화 회피 효과(단위: $Mt-C$)	126
<표 5-12> NIR vs 본 연구 방법론 비교	128
<표 5-13> Production Approach 변환 결과 (시나리오 B 적용)	128

<표 6-1> 인터뷰 방향	141
<표 6-2> 제도 영역별 이해관계자 인터뷰 분석 초점	143
<표 6-3> 집단별 연구문제 대응에 대한 인터뷰 질문 항목(핵심 개선 사항)	145
<표 6-4> 초기코드 목록(총39개)	148
<표 6-5> 39개 코드·6개 잠정 주제 기준	149
<표 6-6> 주제 통합과 정제 결과	149
<표 6-7> 주제 구조 요약	156
<표 6-8> 이해관계자별 산림바이오매스 정책 인식 비교	157
<표 6-9> 이해관계자별 갈등 매트릭스	158
<표 6-10> 정책수단-행위자-구조적 결과 간 인과관계	160
<표 7-1> 개선 방안별 이행 주체 및 관련 법령·계획	177

그림 목차

[그림 1-1] 연구 체계도	15
[그림 3-1] 2020년 행정구역별 산림면적(단위:ha)	50
[그림 3-2] 2020년 행정구역별 임목축적(단위: m ³)	51
[그림 3-3] 2020년 행정구역별 산림면적 대비 임목축적 밀도(단위: m ³ /ha)	52
[그림 3-4] 2020년 행정구역별 산지구분별 산림면적	53
[그림 3-5] 2020년 행정구역별 산지구분별 임목축적	54
[그림 3-6] 2020년 행정구역별 소유구분별 산림면적	55
[그림 3-7] 2020년 행정구역별 소유구분별 임목축적	56
[그림 3-8] 2020년 행정구역별 임상별 산림면적	57
[그림 3-9] 2020년 행정구역별 임상별 임목축적	58
[그림 3-10] 통계 출처별 천연림 및 인공림 구성 비율 비교	59
[그림 3-11] 연도별 조림 및 숲가꾸기 면적 추이(2000~2024)	59
[그림 3-12] 2020년 행정구역별 영급별 산림면적	61
[그림 3-13] 2020년 행정구역별 영급별 임목축적	62
[그림 3-14] 권역별 연평균 임산물 생산액 및 구성(2016~2024)	68
[그림 3-15] 권역별 주요 임산물 연평균 생산 비율 구성(2016~2024)	69
[그림 3-16] 임산물 생산액 추이(2016~2024)	70
[그림 3-17] 전국 대상 단위면적(ha)당 임산물 수익	71
[그림 3-18] 권역별 단위면적(ha)당 임산물 수익	72
[그림 3-19] 전국 대상 가구당 임산물 수익	73
[그림 3-20] 보호지역과 목재생산림 중첩 현황도	82
[그림 3-21] 미이용 산림바이오매스 공급 현황 분석: 실효 가용량 대비 이용률 추이	84
[그림 3-22] 산림바이오매스 수요처 반경 버퍼 및 잠재량 매칭 지도(시나리오 1)	88
[그림 3-23] 산림바이오매스 수요처 반경 버퍼 및 잠재량 매칭 지도(시나리오 2)	89
[그림 4-1] 2020-2024년 카테고리별 국내 목재이용량	104
[그림 4-2] 2024년 카테고리별 국내 목재이용량 비중	105
[그림 4-3] 2020-2024년 원목 이용량의 침엽수·활엽수 구성	107
[그림 4-4] 2020-2024년 카테고리별 HWP 탄소 유입량 시계열	108
[그림 5-1] FOD 모형 시뮬레이션 결과: 시나리오 A vs B 누적 탄소축적량	114
[그림 5-2] FOD 모형 연간 탄소 산화량: 시나리오 A vs B	114
[그림 5-3] 반감기 민감도 분석 결과	117
[그림 5-4] Cascading 이용 구조 일부 반영의 효과 비교 (2044년 기준)	121
[그림 5-5] 2024년 에너지용 즉시 산화vs HWP 풀 자연 산화 비교	123
[그림 5-6] 시나리오B / B-C / B-D 누적stock 시계열 비교(2020-2044)	125
[그림 5-7] 시나리오별 HWP 풀 누적stock 비교(2030-2044년)	125
[그림 5-8] NIR 정합성 검토 결과	129

제1장 서론

제1절 연구의 필요성 및 목적
제2절 연구 방법 및 연구 문제

제1절 연구의 필요성 및 목적

1. 연구 필요성

기후위기 대응과 탄소중립 이행 과정에서 산림은 탄소흡수원, 생물다양성 보전 공간, 수원함양 및 토양 보전 기반, 지역사회 생활공간으로서 중요한 정책적 의미를 갖는다. 산림은 단순한 목재 생산 기반이 아니라 탄소저장, 기후조절, 토양·수문 조절, 생물다양성 유지, 경관·휴양 등 다양한 생태계서비스를 제공하는 복합 생태계이다. 생태계서비스론은 생태계가 인간 사회에 제공하는 편익을 공급서비스, 조절서비스, 문화서비스, 지지서비스로 구분하며, IPBES 역시 자연의 가치를 물질적 산물뿐 아니라 조절적·비물질적 기여까지 포함해 평가해야 한다고 제시한다(Millennium Ecosystem Assessment, 2005; IPBES, 2019, 2022).

국내 산림정책에서도 산림은 탄소흡수원으로서 중요한 위치를 차지한다. 산림청은 「제3차 탄소흡수원 증진 종합계획(2023~2027)」을 통해 산림부문 탄소흡수원 유지·증진 방향을 제시하고, 목재 및 산림바이오매스 이용 활성화, 국산목재 이용 확대, 산림 탄소흡수원 보전 및 복원 등을 주요 과제로 포함하였다(산림청, 2023). 이는 산림바이오매스 정책이 산림 내 탄소저장, 수확목제품 활용, 바이오매스 에너지 이용 간의 관계 속에서 종합적으로 검토되어야 함을 의미한다.

그러나 최근 산림바이오매스는 재생에너지 확대와 미이용 산림자원 활용의 수단으로 강조되면서, 산림을 목재·연료재 공급원으로 활용하려는 정책 흐름과 결합해 왔다. 정부는 2024년 12월 관계부처 합동으로 「바이오매스 연료·발전시장 구조 개선방안」을 발표하고, 폐목재 재활용 확대, 미이용 산림바이오매스 관리 강화, RPS 정책지원 규모 조정, 상생협의체 운영 및 3년 후 정책 재검토를 주요 방향으로 제시하였다(산업통상자원부·산림청·환경부, 2024). 이어 산업통상자원부는 2025년 10월 「신·재생에너지 공급의무화제도 및 연료 혼합의무화제도 관리·운영지침」(기후에너지환경부 고시 제2025-3호)을 개정하여 RPS 제도와 REC 산정·운영의 제도적 근거를 정비하였다(기후에너지환경부, 2025).

2026년에는 산림청이 「2026년부터 달라지는 주요 산림정책」을 통해 공익직접지불사업,

산림소득사업 시행지침, 보조조림사업 등을 정비하였으며(산림청, 2026a; 2026b; 2026c), 「제3차 목재이용종합계획(2025~2029)」을 수립하여 국산목재 자급률 향상, 수확목제품(HWP)의 탄소저장 기능 활용, 목재의 카스케이딩(cascading) 이용 원칙 도입 등을 추진하고 있다(산림청, 2025). 이처럼 산림바이오매스 정책은 단순한 공급 확대 단계에서 벗어나, 원료 관리, 재활용 우선 원칙, REC 지원체계, 경제적 지속가능성을 함께 검토해야 하는 단계로 전환되고 있다.

산림바이오매스 정책은 재생에너지 공급 확대라는 점에서 일정한 정책적 의미를 갖지만, 산림의 다양한 생태계서비스 중 목재·연료재 생산이라는 물질서비스를 과도하게 강조할 경우 환경조절서비스와 문화서비스의 약화를 초래할 수 있다. 본 연구 제3장의 분석에 따르면 2020년 기준 국내 총 산림면적 약 630만 ha 중 사유림이 전체의 약 66%를 차지하고 있으며, 인공림의 통계상 비중(약 36%)과 실제 전문가 조사 기반 분석 비중(약 15.5%) 사이의 상당한 격차는 조림 중심 정책의 생태적·경제적 한계를 보여준다(산림청 2020 산림기본통계; 국토교통부 국토지리정보원, 2020). 특히 지난 24년간 연평균 약 21,678ha 조림에 조림 면적의 13배에 달하는 연평균 약 301,753ha 규모의 숲가꾸기 사업이 공공재원 96.93%(면적 기준)로 추진되었음에도 불구하고, 실제 생존한 인공림이 15.5%에 그친다는 것은 현행 산림경영 방식의 근본적 재검토 필요성을 제기한다.

목재 소비 구조와 탄소저장 측면에서도 심각한 문제가 발견된다. 본 연구 제4·5장의 분석 결과, 2020~2024년 국내 목재이용량의 약 35.6%가 에너지용(단기 산화 경로)으로 소비되고 있으며, 한국 고유 반감기(장은경 Tier 3 기준)를 적용할 경우 IPCC 기본값 적용 시 대비 탄소저장량이 약 55% 수준에 불과한 것으로 분석된다. 이는 단순히 목재 소비량을 확대하는 것만으로는 장기 탄소저장을 보장할 수 없으며, 장수명 건축재 비중 확대와 카스케이딩 이용 원칙의 실질적 구현이 핵심임을 보여준다.

유럽연합 공동연구센터는 바이오매스의 생산·공급·이용이 환경적·사회적·경제적 영향을 수반하므로, 바이오매스 정책은 공급원, 이용 경로, 비용, 영향에 대한 통합적 근거에 기반해야 한다고 제시한다(Mubareka et al., 2023). IPCC 제6차 평가보고서의 감축 부문 보고서는 토지이용, 산림, 바이오에너지 등 AFOLU 부문의 감축 효과가 토지관리 방식, 생태계 보전, 탄소저장, 식량·생물다양성 등 복수의 목표와 함께 평가되어야 함을 제시하며(IPCC, 2022), 종합보고서는 탄소중립 달성을 위해 배출 감축뿐 아니라 탄소흡수원 유지와 토지·생태계 관리의 중요성을 강조한다(IPCC, 2023).

경제적 측면에서도 산림바이오매스 정책은 면밀한 검토가 필요하다. 산림바이오매스는 재생에너지 공급 확대의 수단으로 활용되어 왔지만, 실제 정책 작동 과정에서는 REC 가중치, 보조금, 원료 조달 구조, 공급사슬의 수익 배분 문제가 복합적으로 얽혀 있다. 특히 바이오매스 생산은 원목, 펄프재, 칩·펠릿 등 목재 이용 단계 간 수익성 차이 속에서 형성되기 때문에, 단순히

잔재물 활용이나 재생에너지 확대라는 관점만으로는 그 경제적 지속가능성을 충분히 설명하기 어렵다. 정부 역시 「목질계 바이오매스 개선방안」에서 바이오매스 이용 확대와 함께 RPS 정산비용 증가, 발전용 원료와 재활용 원료 간 경합, 산림훼손 및 탄소배출 논란을 공식적으로 지적하였다(산업통상자원부·산림청·환경부, 2024). 이러한 점에서 현행 산림바이오매스 정책은 재생에너지 공급 확대 정책을 넘어, 제도적 유인 구조와 공급망, 재정지원 체계, 현장 집행 과정을 종합적으로 검토할 필요가 있다.

이러한 배경에서 본 연구는 산림바이오매스 중심 산림정책을 단순한 재생에너지 확대 정책이 아니라, 산림의 생태계서비스 균형, 경제적 지속가능성, 생태적 허용 한계를 함께 고려해야 하는 통합적 산림정책 전환 과제로 검토하고자 한다. 특히 현행 정책이 산림의 목재·연료재 생산 기능을 과도하게 강조하여 탄소저장, 생물다양성, 토양·수문 조절, 경관·휴양 등 다른 공익적 기능을 약화시키고 있는지, 그리고 보조금과 REC 중심의 지원체계가 산림자원의 지속가능한 이용을 유도하고 있는지를 분석하는 것이 본 연구의 핵심적 출발점이다.

2. 연구 목적

본 연구의 목적은 산림바이오매스 중심 산림정책의 지속가능성을 생태계서비스 불균형, 경제적 타당성, 생태적 타당성의 관점에서 분석하고, 이를 바탕으로 산림바이오매스 정책의 개선방안을 제시하는 데 있다.

첫째, 본 연구는 산림바이오매스 정책이 산림의 다양한 생태계서비스에 미치는 영향을 검토한다. 산림은 목재·연료재를 제공하는 공급서비스뿐 아니라 탄소저장, 수원함양, 토양 보전, 생물다양성 유지 등 환경조절서비스와 경관·휴양·문화적 가치 등 문화서비스를 함께 제공한다. 이에 본 연구는 현행 산림바이오매스 정책이 산림의 물질서비스를 과도하게 강조함으로써 환경조절서비스와 문화서비스를 약화시키고 있는지를 분석한다.

둘째, 본 연구는 산림바이오매스 생산과 이용의 경제적 타당성을 검토한다. 산림바이오매스 공급망에서 발생하는 수집·운반·가공·발전 비용, 보조금 및 REC 의존도, 이해관계자 간 비용·편익 배분 구조를 분석함으로써, 현행 정책이 경제적으로 지속가능한 구조인지 또는 제도적 지원에 의존하는 구조인지를 규명한다. 특히 2024년 관계부처 합동 개선방안과 2025년 고시 개정을 고려하여, 산림바이오매스의 경제성이 자생적 시장 경쟁력에 기반하는지 여부를 검토한다(산업통상자원부·산림청·환경부, 2024; 기후에너지환경부, 2025).

셋째, 본 연구는 산림바이오매스 이용의 생태적 타당성을 검토한다. 산림바이오매스가 탄소저장, 생물다양성, 토양·수문 조절, 산림 생태계 건강성에 미치는 영향을 살펴보고, 목재를 에너지로 직접 이용하는 방식이 장수명 목제품 활용 및 카스케이딩 이용 원칙과 비교할 때

어떠한 한계를 갖는지 분석한다.

넷째, 본 연구는 이상의 분석을 바탕으로 산림바이오매스 정책의 개선방안을 제시한다. 구체적으로는 보조금 및 REC 체계 개편, 산림바이오매스 공급 기준 강화, 벌채 및 잔재물 수거 기준 정비, 장수명 목제품 및 카스케이딩 이용 우선 원칙 도입, 생태계서비스 보상체계 마련 등 지속가능한 산림정책 전환 방향을 도출한다.

제2절 연구 방법 및 연구 문제

1. 연구 방법

가. 연구 방법

본 연구는 산림바이오매스 중심 산림정책의 재검토와 지속가능한 대안 마련을 위한 연구로서, 첫째, 산림청 임업통계연보, 산림기본통계, 목재이용실태조사 등 공식 통계자료의 기초 분석을 통해 국내 산림자원 현황, 임업 생산 구조, 목재 소비 행태 및 산림바이오매스 공급 잠재량을 파악하고자 한다. 둘째, IPCC 「2019 Refinement」의 FOD(First Order Decay) 탄소저장 모형과 내부수익률(IRR) 분석을 통해 산림바이오매스 이용의 탄소저장 실효성 및 산림 경영의 경제적 타당성을 정량적으로 분석하고자 한다. 셋째, 산림바이오매스 공급사슬 전반에 걸친 핵심 이해관계자를 대상으로 심층인터뷰(IDI)를 실시하고 주제 분석(thematic analysis)을 적용하여 현행 정책의 현장 작동 메커니즘과 이해관계자 인식을 심층적으로 탐색하고자 한다.([그림 1-1]).

목적	산림바이오매스 중심 산림정책의 지속가능성을 생태적·경제적·탄소저장 세 차원에서 분석하고, 지속가능한 산림정책 전환의 방향을 제시한다.		
세부주제	(1) 산림자원 현황·임업 생산 분석 및 미이용바이오매스 공급 잠재량 추정	(2) 산림바이오매스 이용의 탄소저장 실효성 및 경제적 타당성 분석	(3) 이해관계자 인식 분석을 통한 현행 정책의 현장 작동 메커니즘 탐색
연구방법 Research Method	통계·GIS 분석 <ul style="list-style-type: none"> 산림청 임업통계연보·산림기본통계·목재이용실태조사 (2016~2024) 인공림 비종 통계 교차 검증 임상도·산림기능구분도·보호지역 GIS 분석으로 미이용 산림바이오매스 공급 잠재량 추정 	IRR 분석 FOD 탄소저장 모형 <ul style="list-style-type: none"> IRR 분석: 5가지 목재 생산 모형 (바이오매스·펄프재·표고자목·장벌기우량재·복합경영), 보조금 배제 조건, 60년 현금흐름 IPCC FOD 모형: 시나리오 A(IPCC 기본 반감기) vs. 시나리오 B(한국 Tier 3 반감기) 탄소저장 동태 비교 시뮬레이션 	심층인터뷰(IDI) + 주제 분석 <ul style="list-style-type: none"> 목적표집(Purposive Sampling): 별채업자·산주·지자체공무원·산림청·칩생산업자·발전사업자·임업후계자·시민단체 8개 집단 Braun & Clarke(2006) 주제 분석 6단계 적용 삼각측정법 (Triangulation): 인터뷰·통계·정책문서 교차 분석
단기목표 Specific Objectives	국내 산림자원·임업 생산 구조 및 미이용 산림바이오매스 공급 잠재량 파악	산림바이오매스 이용의 탄소저장 실효성 및 경제적 타당성 정량 분석	이해관계자 인식 및 현행 정책의 현장 작동 메커니즘 심층 탐색

[그림 1-1] 연구 체계도

나. 연구 범위

본 연구의 공간적 범위는 대한민국 전체 산림이다. 다만 분석 목적에 따라 구체적 범위가 달리 설정하였다. 산림자원 현황 및 임업 생산 분석(제3장)에서는 전국 17개 광역자치단체를 수도권, 강원권, 충청권, 호남권, 영남권, 제주권의 6개 권역으로 구분하여 지역별 특성을 분석하였다. 목재 소비 구조 및 탄소저장 동태 분석(제4·5장)에서는 한국이 목재자급률 17.4%(2023년

기준)에 불과한 목재 순수입국임을 고려하여, 국내산뿐 아니라 수입 원목 및 가공품을 포함한 전체 소비 풀을 분석 대상으로 설정하였다. 이해관계자 분석(제6장)에서는 산림바이오매스 공급사슬 전반에 걸쳐 있는 주요 행위자 집단을 대상으로 하였다.

시간적 범위는 주로 2016년부터 2024년까지이다. 임산물 생산 분석은 산림청 임업통계연보 2016~2024년 자료를 활용하였으며, 목재 소비 구조 분석은 산림청 「목재이용실태조사」 2020~2024년 5개년 자료를 기반으로 하였다. 탄소저장 동태 시뮬레이션은 2020년을 기준 시점으로 설정하고 2044년까지 25년 구간을 분석 대상으로 삼았다. 정책 분석의 경우 2026년 시행지침 및 고시를 우선 기준으로 하되, 관련 정책 변화의 맥락을 파악하기 위하여 그 이전 시기의 자료도 포함하였다.

내용적 범위는 산림바이오매스 정책을 중심으로, 이와 연동된 재생에너지 정책(RPS·REC), 임업 경영 구조, 목재 소비 구조, 탄소저장 회계, 이해관계자 인식 및 행동을 포괄한다. 다만 개별 수종의 생장 생리나 유전자원 등 순수 생물학적 영역은 본 연구의 직접적 분석 대상에서 제외하였다.

2. 연구문제

위와 같은 연구 필요성과 목적에 따라 본 연구는 다음의 세 가지 연구문제를 설정한다.

연구문제 1. 현행 산림바이오매스 정책은 목재·연료재 생산을 과도하게 강조하여 산림의 환경조절서비스와 문화서비스를 약화시키고 있는가?

연구문제 2. 산림바이오매스 생산과 이용은 보조금, 용자, REC 가중치 등 제도적 지원 없이도 경제적으로 지속가능한가?

연구문제 3. 산림바이오매스 이용은 산림 생태계 측면에서 생태적으로 타당한가?

이상의 세 연구문제는 생태계서비스 불균형, 경제적 자립 가능성, 탄소저장 실효성이라는 각각의 문제 영역에 대응하면서도, 제도적 유인 구조와 현장 실행 메커니즘, 탄소저장 동태가 서로 긴밀하게 연결된 복합적 정책 문제임을 반영한다. 따라서 본 연구는 이 세 물음을 개별적으로 검토하는 것을 넘어, 제3장 이후의 실증 분석과 정책 논의를 통해 수행되며, 그 상호 연관 관계 속에서 통합적으로 분석하고자 한다. 이 명제의 실증적 검증과 정책적 함의 도출은 제7장의 결론 및 제언에서 종합될 것이다.

제2장 이론적 배경

- 제1절 산림 자원 현황·국내 임업 생산 분석 및
미이용 산림바이오매스 공급 잠재력 평가
- 제2절 산업별·재종별 목재 소비 구조
- 제3절 산림·목제품 내 탄소 저장량 변화 분석
- 제4절 산림바이오매스 관련 지원 정책
- 제5절 국외 사례 검토
- 제6절 통합적 검토

제1절 산림 자원 현황·국내 임업 생산 분석 및 미이용 산림바이오매스 공급 잠재력 평가

1. 지속가능한 산림경영(SFM)

가. 개념과 원칙

지속가능한 산림경영(Sustainable Forest Management, SFM)은 현세대의 필요를 충족하면서 미래 세대가 누릴 수 있는 산림의 혜택과 기능을 훼손하지 않도록 산림을 관리·이용하는 원칙과 실천의 총체를 의미한다(FAO, 2018). FAO는 SFM을 생태적 지속가능성, 경제적 지속가능성, 사회적 지속가능성이라는 세 축의 균형 위에서 산림의 다기능성을 장기적으로 유지·증진하는 관리 방식으로 정의한다.

SFM의 핵심 원칙은 다음 세 가지로 요약된다. 첫째, 생태적 지속가능성은 산림 생태계의 구조와 기능, 생물다양성이 유지·강화될 수 있는 수준에서만 자원 이용을 허용하는 원칙이다. 둘째, 경제적 지속가능성은 산림 자원의 이용이 외부 보조금이나 인위적 가격 지지 없이도 장기적으로 수익성을 확보할 수 있어야 함을 의미한다. 셋째, 사회적 지속가능성은 산림 경영이 지역사회의 생계와 문화적 가치를 존중하고, 다양한 이해당사자의 참여를 보장해야 함을 전제한다.

나. SFM의 역사적 전개와 국제 정책 흐름

SFM의 역사는 1713년 독일의 von Carlowitz가 제창한 '지속수확량(sustained yield)' 개념에서 출발한다. 이 개념은 산림에서 수확하는 양이 연간 성장량을 초과하지 않아야 한다는 단순한 목재 생산 균형 원리에 기반하였다. 이후 1992년 리우 지구정상회의와 산림원칙선언을 거쳐 1993년 몬트리올 프로세스(7기준 54지표)가 채택되면서 SFM은 목재 생산 이상의 다차원적 산림 가치를 포괄하는 개념으로 확장되었다.

2017년 채택된 유엔 산림전략계획(UN Strategic Plan for Forests 2017-2030)은 SFM을 기후변화 대응, 생물다양성 보전, 지속가능발전목표(SDGs) 달성의 핵심 수단으로 명시하였다. 유럽연합은 재생에너지지침(RED II/III)과 EU 산림전략 2030을 통해 바이오매스 에너지 활용의 지

속가능성 기준을 강화하고, 공급망 추적 의무화 및 노령림 보호를 명문화하였다.

한국은 2012년 신재생에너지 공급의무화제도(RPS)를 도입하고 산림바이오매스를 재생에너지원으로 편입하면서 바이오매스 에너지화 정책을 본격화하였다. 그러나 이 과정에서 SFM의 생태적·경제적 지속가능성 기준에 대한 검토는 상대적으로 미흡하였다는 지적이 제기된다.

다. 단벌기 벌채와 SFM의 관계

본 연구의 분석 대상인 단벌기 산림 벌채와 재조림 정책은 SFM의 관점에서 재검토가 필요하다. 지속가능한 산림자원 관리지침은 수관유효도 유지(80%)와 간벌률 기준(임목축적 대비 20%) 등을 명시하고 있으나, 현행 바이오매스 공급 확대 정책은 이와 상충하는 방향으로 운용되고 있을 가능성이 있다. SFM 원칙에 따르면, 목재 생산량 극대화보다 산림의 총 탄소 저장량 유지, 생물다양성 보전, 장기 생산성 확보가 우선되어야 한다.

2. 산림의 다기능성과 생태계서비스

가. 생태계서비스 개념 틀

산림의 다기능성(multifunctionality)은 산림이 단순한 목재 생산지 이상의 복합적인 생태적·사회적·경제적 기능을 동시에 수행함을 의미한다. 새천년생태계평가(Millennium Ecosystem Assessment, 2005)와 생태계·생물다양성 경제학(TEEB, 2010) 프레임워크는 산림의 생태계서비스를 공급서비스, 조절서비스, 문화서비스, 지지서비스의 네 범주로 구분한다.

공급서비스(Provisioning Services)는 목재, 바이오매스, 비목재 임산물, 식수 등 물질적 산물을 포함한다. 조절서비스(Regulating Services)는 탄소 흡수·저장, 기후 조절, 수원 함양, 홍수 조절 기능을 포괄한다. 문화서비스(Cultural Services)는 휴양·관광, 심미적 가치, 교육, 지역 문화적 가치를 아우르며, 지지서비스(Supporting Services)는 토양 형성, 영양분 순환, 1차 생산(광합성) 등 다른 서비스의 기반이 되는 기능이다.

나. 생태계서비스 간 상충관계(Trade-off)

생태계서비스 간 상충관계(trade-off)는 하나의 서비스를 극대화할 때 다른 서비스가 감소하는 현상을 말한다. 바이오매스 에너지(공급서비스)를 극대화하기 위한 대면적 벌채는 탄소 저장·생물다양성·수원 함양(조절서비스)의 저하로 이어질 수 있으며, 이는 다수의 국내외 연구에서 실증적으로 확인되고 있다(Foley et al., 2005; Raudsepp-Hearne et al., 2010).

본 연구에서 분석 대상으로 삼은 임상별 생태적 가치 분석(3.2절)과 산림자원 이용 행태 및 부가가치 분석(3.4절)은 이 상충관계를 실증적으로 검토하는 데 이론적 토대를 제공한

다. 목재 자원 생산 위주의 정책 하에서 노령림·활엽수림의 탄소저장 기능과 비목재 임산물의 경제적 가치가 과소평가될 수 있음을 이론적으로 예측할 수 있다.

다. 총경제가치(Total Economic Value) 관점

TEEB(2010)는 생태계서비스의 가치를 시장에서 거래되는 직접적 사용가치(목재, 비목재 임산물)뿐 아니라 간접적 사용가치(탄소흡수, 수원함양), 선택가치(미래의 잠재적 이용), 존재가치(생물다양성 보전 자체의 내재적 가치)까지 포함한 총경제가치(Total Economic Value, TEV)로 평가해야 한다고 강조한다. 이 관점에서 현행 바이오매스 중심 산림정책은 시장 가격으로 측정되는 목재·연료재 가치만을 정책 판단 기준으로 삼음으로써 산림의 실질적인 사회적 순편익을 과소평가하고 있을 가능성이 높다.

본 연구의 목재 대 비목재 임산물 부가가치 비교 분석(3.4절) 및 내부수익률(IRR) 분석은 이 총경제가치 관점에서 산림 이용 행태의 경제적 실상을 재평가하려는 시도다.

3. 산림경영의 경제이론

가. Faustmann 모델과 최적 윤벌기

산림경영의 경제적 최적화 문제를 다루는 고전적 이론 틀은 1849년 Martin Faustmann이 제시한 Faustmann 모델이다. 이 모델에서 최적 윤벌기(optimal rotation period)는 수목 가치의 한계 성장률이 이자율과 토지 기회비용의 합과 일치하는 시점으로 결정된다. Faustmann 모델의 핵심적 시사점은 경제적 최적 윤벌기가 생태적 성숙 시점보다 짧게 결정된다는 점으로, 시장 논리만을 따를 경우 조기 벌채 경향이 내재함을 보여준다.

특히 조림 및 육림비에 대한 재정 보조금이 제공될 경우, 갱신 비용이 인위적으로 낮아져 최적 윤벌기가 더욱 단축되는 왜곡 효과가 발생한다. 이는 보조금이 없었더라면 경제적으로 성립하지 않을 단벌기 벌채가 보조금에 의해 인위적으로 유지될 수 있음을 의미하며, 본 연구의 IRR 분석(3.4절)에서 바이오매스 모형(20년 주기)과 일반 용재 모형(30년 주기)이 보조금 없이 모두 적자(-14%, -5%)를 기록한 결과와 이론적으로 부합한다.

나. Hartman 확장 모델과 생태계서비스의 경제적 가치화

Hartman(1976)은 Faustmann 모델을 확장하여 벌채하지 않고 숲을 유지할 때 발생하는 생태계서비스의 가치(흐름 편익, flow benefits)를 최적 윤벌기 결정에 포함하였다. Hartman 확장 모델에 따르면, 탄소 저장·생물다양성·수원 함양 등 조절서비스의 경제적 가치가 클수록 최적 윤벌기는 연장되며, 생태적 성숙 시점과 경제적 최적점이 일치하거나 근접할 수 있다.

이 이론은 본 연구에서 노령림과 활엽수림의 탄소 저장 가치 및 생물다양성 가치를 경

제적 분석에 포함해야 하는 이론적 근거를 제공한다. 나아가 장별기 우량재 모형(60년 주기, IRR 2%)과 복합경영 모형(60년 주기, IRR 3%)이 목재 생산 시나리오 중 유일하게 경제적 타당성을 확보한 결과는, 생태적 성숙에 가까운 벌기령이 경제적으로도 더 합리적임을 시사한다는 점에서 Hartman 모형의 이론적 예측과 정합성이 있다.

다. 재조림 보조금의 경제적 왜곡 효과

재정 보조금이 산림 경영의 경제적 유인 구조에 미치는 왜곡 효과는 다음 네 가지 경로로 나타날 수 있다. 첫째, 조기 벌채 유인으로, 보조금이 갱신 비용을 낮춤으로써 최적 윤벌기가 T^* 에서 $T'(T' < T^*)$ 로 단축된다. 둘째, 생물다양성 감소로 노령림 특유의 서식처가 반복적으로 차단되면서 희귀종 및 균류 등의 종 다양성이 저하된다. 셋째, 토양 탄소 방출로 벌채 후 토양 교란에 의해 미생물 분해가 가속화되어 기존 축적 탄소가 대기 중으로 재배출된다. 넷째, 사회적 후생 손실로 비시장 외부 비용이 편익·비용 산정에 포함되지 않아 실질 순사회편익이 과대평가된다.

본 연구의 조림사업 공공재원 의존도 분석(3.1절)에서 지난 24년간 조림 예산의 대부분이 국비 및 지방비로 충당된 결과는, 이론적으로 예측된 재정 보조금 의존 구조가 국내 산림 정책에서 실증적으로 확인됨을 보여준다.

라. 비목재 임산물의 경제이론적 위치

전통적 산림경제이론이 목재 생산의 최적화에 집중한 것과 달리, 비목재 임산물(non-timber forest products, NTFPs)의 경제적 가치에 관한 연구는 비교적 최근에 발전하였다. NTFPs는 단기 수확 주기와 반복적 소득 창출이 가능하며, 목재 생산처럼 대규모 자본 투자나 장기 자금 고정 없이도 임가 소득을 안정적으로 보장할 수 있다는 점에서 비교경제학적 우위를 갖는다(Shackleton & Shackleton, 2004).

이는 본 연구의 비목재 임산물 부가가치 분석(3.4절)에서 산마늘(IRR 36.2~54.2%), 곰취(IRR 48.6%) 등이 목재 생산 모형과 비교할 수 없는 수익률을 기록한 결과를 이론적으로 설명하는 근거가 된다. 또한 비목재 임산물 수확은 산림 구조를 유지하면서 이루어지므로, 탄소 저장 기능 및 생태계서비스의 손실 없이 경제적 편익을 실현하는 SFM과 부합하는 경영 방식으로 평가할 수 있다.

4. 제3장 연구를 위한 통합적 분석 틀

가. 이론과 실증 분석의 연계 구조

앞서 제시한 이론적 배경은 본 연구 제3장의 실증 분석과 다음과 같이 연계된다. 지속가능한 산림경영(SFM) 이론은 산림 자원의 현황 분석(3.1절) 및 바이오매스 공급 잠재력 추

정(3.6절)에서 간벌 기반 지속가능 수확 시나리오 설계의 규범적 근거를 제공한다. 생태계 서비스 다기능성 이론은 임상별 생태적 가치 심층 분석(3.2절)에서 노령림·활엽수림의 탄소 저장 및 생물다양성 기능을 평가하는 분석 틀로 기능한다. 산림경영의 경제이론 (Faustmann·Hartman 모델)은 목재 생산 모형별 IRR 비교 분석(3.4절)에서 보조금 의존 구조의 경제적 왜곡을 진단하고, 장벌기·복합경영의 타당성을 논증하는 이론적 기반이 된다.

나. 제3장의 이론적 명제

이상의 이론적 검토로부터 본 연구는 다음 세 가지 핵심 명제를 도출한다. 첫째, 목재·연료재 생산(공급서비스)의 강조는 산림의 탄소저장·생물다양성(조절서비스) 기능과 필연적인 상충관계(trade-off)를 발생시키며, 이는 산림의 총경제가치를 감소시킨다. 둘째, 단벌기 바이오매스 생산은 Faustmann 모델이 예측하는 조기 벌채 유인을 재정 보조금이 인위적으로 강화한 구조로, 보조금 없이는 경제적 자생력을 갖기 어렵다. 셋째, SFM의 생태적·경제적 원칙에 부합하는 대안은 장벌기 우량재 경영과 비목재 임산물 복합 경영으로, 이는 산림의 탄소 저장 기능을 보전하면서도 임가 소득을 안정적으로 창출할 수 있다.

제2절 산업별·재종별 목재 소비 구조

본 절에서는 보고서 제4장에서 수행하는 한국 사회 전체 목제품 풀에 대한 「전체 소비」 측면 분석의 이론적 토대를 정리한다. 활동자료 정밀화의 학술적 의미, IPCC HWP 회계 접근법 4종 비교, 수종 차등 환산계수 이론의 세 가지 측면에서 구성한다.

1. HWP 탄소 회계의 4가지 접근법

IPCC 「2006 Guidelines」 및 「2019 Refinement」는 수확목제품(Harvested Wood Products, HWP)의 국가 온실가스 인벤토리 회계에서 적용 가능한 네 가지 접근법을 제시한다(IPCC, 2019, Chapter 12). 각 접근법은 회계 시스템 경계와 배출·흡수 시점 산정 방식이 상이하다.

(가) 생산 접근법(Production Approach): 자국 생산 원목으로 만든 HWP만을 자국 인벤토리에 포함한다. 수입 가공품은 원산국 인벤토리에 귀속된다. 원목 수확 시점에서 탄소 흐름이 인벤토리에 진입하며, 한국·일본 등 다수 국가가 NIR 보고에 적용하는 표준 방법이다.

(나) 재고 변화 접근법(Stock-Change Approach): 자국 영역 내 HWP 풀의 재고 변화를 회계한다. 수입품도 자국 풀에 포함되어 보고 시점이 명확하나, 수출국과의 이중계산 방지를 위한 국제 협의가 필요하다.

(다) 대기 흐름 접근법(Atmospheric Flow Approach): 국경 내 대기로의 실제 배출·흡수 흐름을 회계한다. 화학적 일관성은 높으나 산화 시점·장소 추적이 까다롭다.

(라) 외관소비 접근법(Apparent Consumption): 국내 생산 + 수입 - 수출의 외관 소비량을 기반으로 자국 사회 전체에서 소비되는 HWP 풀을 회계한다. 본 보고서 제4·5장이 채택하는 접근법으로, 한국과 같이 자급률이 낮고 수입 가공품 비중이 높은 국가의 사회 전체 풀 동태 분석에 적합하다.

2. 활동자료 정밀화의 학술적 의미

활동자료(Activity Data, AD)는 IPCC 인벤토리 보고 체계의 핵심 입력 변수로, 본 보고서에서는 한국 사회 전체에서 사용되는 4개 카테고리(제재목류·목질패널류·펄프·제지·에너지용)의 연도별 소비량을 의미한다. 산림청 「목재이용실태조사」가 제공하는 22개 목재제품 분류 체계를 IPCC HWP 회계 분류와 정합하도록 4개 카테고리로 재구성하는 작업이 본 보고서 제4장의 활동자료 정밀화 핵심이다.

이러한 정밀화는 두 가지 학술적 의미를 갖는다. 첫째, IPCC 가이드라인이 권장하는 Tier 2·3 수준의 분석으로 진입하기 위한 전제 조건이다. Tier 1은 기본 계수와 단순 활동 자료를 활용하나, Tier 3는 국가 고유 계수와 정밀 활동자료를 요구한다. 둘째, 본 보고서 제5장의 FOD 모형 입력값(carbon inflow)의 정확도를 결정하는 핵심 단계이다. 활동자료의 카테고리 매핑이 부정확할 경우, 후속 stock 추정의 구조적 편이가 발생할 수 있다 (Skog, 2008; 장은경, 2021).

3. 수종 차등 환산계수의 학술적 도출

체적(m³) 단위로 보고되는 활동자료를 탄소(t-C) 단위 inflow로 변환하기 위해서는 환산 계수가 필요하다. IPCC 가이드라인은 환산계수를 목재 밀도(Mg/m³)와 탄소함유율(0.5)의 곱으로 정의한다(IPCC, 2013). 침엽수와 활엽수는 평균 밀도가 상이하므로(국립산림과학원, 2020), 한국 산림의 임상 구성(침엽수림 36.9%·활엽수림 31.9%·혼효림 26.5%)을 정확히 반영하기 위해서는 수종별 차등 환산계수 적용이 학술적으로 정당화된다고(김은숙 외, 2022).

본 보고서 제4·5장은 IPCC 2013년 권장값과 한국 국립산림과학원 국가고유계수 체계를 결합한 장은경(2021) 박사논문 표 18을 차등 환산계수로 적용한다. 이 접근은 단일 평균계수 적용 시 발생할 수 있는 탄소 환산값의 과소·과대 평가 위험을 방지하며, 향후 RCP 8.5 시나리오 하의 활/혼효림 비중 증가 전망(김은숙 외, 2022)을 고려할 때 그 정책적 중요성이 더욱 커진다.

제3절 산림·목제품 내 탄소 저장량 변화 분석

본 절에서는 보고서 제5장에서 수행하는 FOD(First-Order Decay) 모형 기반 누적 탄소축적량 시뮬레이션의 이론적 토대를 정리한다. FOD 모형의 수학적 구조, 반감기와 분해상수의 관계, Cascading 이용 이론의 세 가지 측면에서 구성한다.

1. FOD(First-Order Decay) 모형의 수학적 구조

FOD 모형은 IPCC 「2006 Guidelines」(Volume 4, Chapter 12)에서 도입되어 「2019 Refinement」에서 표준화된 HWP 풀의 탄소 동태 분석 방법이다. 동 모형은 HWP 풀 내 탄소가 매년 일정 비율로 산화되는 1차 부후 과정을 가정하며, 제품군별로 고유한 분해상수(decay constant)를 적용한다.

기본 갱신식은 다음과 같다.

$$C(i, t+1) = C(i, t) \times \exp(-k_i) + \text{Inflow}(i, t+1) \times [(1 - \exp(-k_i)) / k_i]$$

여기서 $C(i, t)$ 는 t년도 카테고리 i의 누적 stock(t-C), $\text{Inflow}(i, t)$ 는 t년도 i 카테고리로의 신규 탄소 유입량, k_i 는 i 카테고리의 분해상수이다. 우변 첫 항은 기존 stock의 자연 산화를 반영하고, 둘째 항은 신규 inflow의 부분 적치를 반영한다(IPCC, 2019, Eq. 12.1).

연간 산화량(emission)은 다음과 같이 산출된다.

$$\text{Emission}(i, t) = C(i, t) - C(i, t+1) + \text{Inflow}(i, t+1)$$

2. 반감기와 분해상수의 관계

FOD 모형의 핵심 결정 변수는 제품군별 반감기(half-life, $t_{1/2}$)이다. 반감기는 HWP 풀 내 특정 탄소량의 절반이 산화되는 데 소요되는 기간을 의미하며, 분해상수와는 다음 관계를 갖는다.

$$k = \ln(2) / t_{1/2} \approx 0.693 / t_{1/2}$$

동일한 inflow가 입력되더라도 반감기 설정에 따라 장기 stock 추정치가 크게 달라지며, 이는 HWP 회계의 구조적 민감도 요인이다(Skog et al., 2004). IPCC 「2019 Refinement」는 제재목 35년·목질패널 25년·펄프·제지 2년의 기본값을 권고하나, 동시에

가능한 경우 국가 고유 반감기(Tier 3)를 도출하여 적용할 것을 명시한다. 본 보고서 제5장은 이러한 권고에 따라 시나리오 A(IPCC 기본)와 시나리오 B(장은경 한국 Tier 3) 두 가지를 명시적으로 비교하는 방법론을 채택한다.

3. Cascading 이용 이론

Cascading 이용은 HWP 풀의 탄소 적치 기간을 정책적으로 연장하는 핵심 개념으로, 1차 사용이 종료된 목재(폐목재)를 다음 단계 제품의 원료로 재투입하여 단일 산화 경로를 다단계 경로로 전환하는 흐름을 의미한다(Sirkin & ten Houten, 1994; Mantau, 2012). 대표적 흐름은 토목·수송용 제재목 폐기물의 보드재 재활용으로, 한 단계 cascading만으로도 탄소 저장 기간을 최대 수배 연장할 수 있다.

Cascading의 정량적 효과는 1차 사용 제품과 2차 사용 제품의 반감기 차이에 따라 결정된다. 본 보고서 제5장의 분석은 시나리오 A에서 cascading이 미미한 음의 효과(-1.0%)를 보이는 반면 시나리오 B에서는 명확한 양의 효과(+8.9%)를 갖는 것이 단순한 가정 차이가 아니라, 한국 제재목의 단수명 이용 구조에 기인한다는 점을 정량적으로 보여준다.

Cascading 이용의 학술적 의미는 IPCC FOD 모형이 가정하는 단일 풀 내 1차 부후 과정을 다중 풀 간 흐름으로 확장하는 데 있다. 본 보고서 제5장은 1단계 cascading(제재목 → 보드재)만을 반영한 부분 모형을 적용하나, 2차년도 연구에서는 다단계 cascading(건축 폐목재 보드재 재활용, 보드재 폐기 후 에너지 회수 등)을 반영한 모형 확장이 예정되어 있다.

제4절 산림바이오매스 관련 지원 정책

1. 제도의 범위

본 연구는 단벌기 벌채·재조림·산림바이오매스 생산이 개별 산주나 사업자의 독립적 선택만으로 이루어지는 것이 아니라, 산림관리 제도, 재정지원 제도, 목재·바이오매스 유통관리 제도, 에너지정책 인센티브가 결합된 복합적 정책 구조 속에서 실행된다고 본다. 이러한 접근은 정책집행 연구에서 강조하는 바와 같이, 정책의 공식적 설계와 실제 현장 실행 사이에는 집행 주체의 해석, 재량, 자원 조건, 행정역량에 따라 차이가 발생할 수 있다는 이론적 논의에 근거한다(Lipsky, 1980; Hill & Hupe, 2014). 특히 산림바이오매스 정책은 산림정책, 목재산업정책, 재생에너지정책, 탄소중립정책이 교차하는 영역이므로 단일 제도만으로 정책 효과를 설명하기 어렵다.

최근 3년간 직접보조금 구조는 소득보전 중심 확대보다는 재난 대응 및 산업 경쟁력 강화 중심 재편으로 이동하고 있다.

2025년 총예산이 감소함에도 불구하고 재난 대응 및 임업 지원 예산의 경우 유지 증가하였으며 2026년 총예산 3조 원을 돌파하면서 재난 대응 예산이 가장 크게 확대된 것을 알 수 있다. 또한 산림산업 육성 및 임업인 지원 사업의 경우 매년 증가하는 추세를 나타내고 있다.

따라서 예산 총량 내에서 재난 대응·임업 지원·산림복지에 집중하고, 전통적인 산림자원 관리(조림·숲가꾸기 중심) 비중은 축소 조정된 것은 기후위기 시대 산림정책이 ‘탄소흡수원 관리’와 ‘재난 대응’이라는 이중 과제를 동시에 수행하는 방향으로 재편되고 있음을 보여주는 사례로 해석할 수 있다.

<표 2-1> 최근 3년 산림청 예산 현황

구분	2024년	2025년	2026년	비고
산림재난 대응	7,756억 원	약 8,000억 원대	11,191억 원	산불·산사태 대응 등
산림자원 관리	7,755억 원	약 7,500억 원대	6,715억 원	조림·숲가꾸기·임도 등
산림산업 육성· 임업인 지원	2,309억 원	약 2,400억 원대	2,521억 원	임업인 소득·시설 보조 등
산림복지	2,872억 원	약 3,000억 원대	3,404억 원	산림복지 서비스 등
기타	7,849억 원	약 5,300억 원대	6,429억 원	연구·행정·기타 사업
합계	28,541억 원	26,246억 원	30,260억 원	전체 산림분야 예산(보조금 포함)

자료: 산림청 (2026), 2026년도 예산 및 기금운용계획 사업설명자료(Ⅱ-1).

분석 대상 제도는 네 범주로 구분된다. 첫째, 산림경영계획, 입목벌채 허가·신고, 숲가꾸기·간벌, 재조림 등 산림자원의 조성·이용을 규율하는 산림관리 제도이다. 둘째, 조림보조금, 숲가꾸기 보조금, 산림사업 관련 용자 등 산림경영 행위를 유도하는 재정지원 제도이다. 셋째, 미이용 산림바이오매스 수집 허가·증명서 발급 등 원료의 적법성과 유통 경로를 관리하는 공급망 관리 제도이다. 넷째, 발전사업자의 연료 선택과 수요 형성에 영향을 미치는 RPS·REC 제도이다.

2. 주요 제도 및 법적 근거

본 연구에서 검토한 주요 제도와 법적 근거는 아래와 같다. 산림관리 영역에서는 「산림자원의 조성 및 관리에 관한 법률」 제36조 및 시행규칙 제44조에 근거한 입목벌채 허가·신고 제도가 단벌기 벌채와 산물 발생의 행정적 출발점으로 기능한다. 재정지원 영역에서는 조림·숲가꾸기 보조금과 산림사업 정책자금·용자가 인센티브로 작동하는 한편, 공공재원 의존적 산림경영 구조를 강화할 수 있는 양면성을 내포한다. 공급망 관리 영역에서는 「목재의 지속가능한 이용에 관한 법률」 제36조의3·4에 근거한 미이용 산림바이오매스 수집 허가 및 증명서 발급 제도가 원료의 적법성과 거래 경로를 확인하는 공급망 검증 장치로 기능한다. 에너지 수요 영역에서는 RPS·REC 제도가 발전사업자의 바이오매스 연료 수요를 형성하는 핵심 경제 유인으로 작동한다.

3. 보조금·용자·REC 인센티브 구조

단벌기 벌채·재조림·바이오매스 생산을 둘러싼 실행 메커니즘에서 핵심적인 역할을 하는 것은 비용과 수익을 조정하는 재정·금융·에너지 인센티브이다. 이중 산림바이오매스 생산 관점에서 ①조림·육림 보조금 ② 현장기반 수집비 지원 ③ REC 정책 으로 살펴보고자 한다.

가. 조림·육림 보조금: 산림관리 단계의 직접 재정 지원

조림·육림 보조금은 「산림자원의 조성 및 관리에 관한 법률」 및 「임업 및 산촌 진흥 촉진에 관한 법률」에 근거하며, 국고보조 방식으로 산주·조림업체의 비용 부담을 완화하는 직접 보조금이다. 경제림 조성은 국비 60%·지방비 30%·자부담 10% 구조이며, 큰나무·지역특화·복구조림·내화수림대 조성 등은 국비 50%·지방비 50% 구조로 편성된다. 숲가꾸기(간벌·풀베기·산물수집 등)는 사업비의 100%를 국비 50%·지방비 50%로 지원하며, 인건비 등 전 공정을 포함한다(산림청, 2025d).

주목할 점은 긴급별채(산불·재해 피해목)의 경우 전액 국비(100%)가 지원된다는 사실이 다. 산림청(2025c) 예산 자료에 따르면 긴급별채(산불·재해 피해목)에는 전액 국비(100%)가 지원되며, 2026년 산림재난 대응 예산은 전년 대비 44.3% 급증한 1조 1,191억 원에 달한다(산림청, 2025. 12. 2.). 본 연구의 분석에 따르면 2022~2025년 사이 긴급별채량의 77%가 바이오매스 생산으로 연결되었으며, 관련 예산의 98%에 해당하는 1,683억 원이 투입된 것으로 추산된다. 이는 재해 대응 명목의 전액 국비 지원이 바이오매스 공급망 강화로 직결되는 구조적 문제를 보여준다.

2026년 산림청 예산은 개청 이래 최초로 3조 원을 돌파하였으며(3조 260억 원, 전년 대비 +15.6%), 산림재난 대응 예산이 가장 크게 증가(+44.3%)한 반면 전통적인 산림자원 관리(조림·숲가꾸기) 비중은 상대적으로 축소되었다. 또한 2026년부터 산림 기반 탄소흡수원 조성 활동이 한국형 녹색분류체계(K-Taxonomy)에 정식 포함되었으며, 산림경영 용자는 연 1.5%의 저금리와 최대 25년 거치기간이 적용된다(산림청, 2025. 12. 2.; 한국임업신문, 2026. 1. 8.).

<표 2-2> 조림·육림 보조금 지원 구조 및 예산 현황 (2022~2026)

구분	2022	2023	2024	2025	2026
근거 법령	「산림자원의 조성 및 관리에 관한 법률」, 「임업 및 산촌 진흥 촉진에 관한 법률」, 「보조금 관리에 관한 법률」				
보조율 구조	국비	지방비	자부담	주요 대상	
경제림 조성	60%	30%	10%	목재생산 목적 경제수종 조림(낙엽송·잣나무·편백 등)	
큰나무·지역특화·복구조림·내화수림대	50%	50%	없음	대경제·재해복구·지역특화 조림	
숲가꾸기(간벌·풀베기·산물수집 등)	50%	50%	없음	인건비 등 사업비 전액(100%) 지원, 산물수집 포함	
긴급별채 (산불·재해 피해목)	100%	—	없음	전액 국비, 2022~2025년간 1,683억 원 투입 / 77%가 바이오매스 생산으로 연결 ²	
목재수확 점검·친환경 목재생산	50%	50%	없음	별채 행위의 관리·정당화 기반 제공	
예산 현황	2022	2023	2024	2025	2026
산림청 총예산 (억 원)	~24,000	~24,000	28,541	26,246	30,260 (3조 원 최초 돌파)
산림자원 관리 (조림·숲가꾸기·임도)	—	—	7,755	~7,500	6,715 (↓축소)
산림재난 대응 예산 (억 원)	—	—	7,756	~8,000	11,191 (↑대폭 확대)
임업직불제 예산 (억 원)	—	—	620	576	576 (동결)

조림 목표 면적 (천 ha)	22	22	20	22+	22+ / K-Taxonomy 산림부문 포함
산림경영 용자 금리·거치기간	-	-	-	-	연 1.5% / 최대 25년 거치
단별기 유도 가능성	① 벌채 후 재조림 비용 사회화 → 산주 벌채 부담 완화 ② 숲가꾸기 산물수집 지원이 바이오매스 공급망과 연결 ③ 긴급벌채 전액 국비로 벌채 후 바이오매스화 구조 강화 ④ 장별기·보전 보상의 상대적 취약성				

자료: 산림청(2025. 12. 2.); 산림청(2024b, 2025c, 2025d, 2025e); 한국임업신문(2026. 1. 8.)

나. 현장기반 보조금 (미이용 산림바이오매스 수집·운반비 지원)

미이용 산림바이오매스 수집·운반비 지원은 「목재의 지속가능한 이용에 관한 법률」 제 36조의3·4 및 「산림바이오매스에너지의 이용·보급 촉진에 관한 규정」(산림청고시 제 2022-82호)에 근거하여, 가지·초두부·저급재 등 원목 규격 미달 산물의 수집·운반·파쇄·칩 생산 비용을 지자체가 지원하는 제도이다. 실행 구조는 산림청이 정책·기준을 설계하고, 국유림관리소 및 시·군·구청장이 수집 허가와 증명서 발급을 담당하며, 최종적으로 한국임업진흥원이 공급확인서를 발전사에 발급하는 방식으로 운영된다(산림청, 2025a).

지자체별 수집·운반비 단위 지원 단가(톤당·ha당)는 중앙 통일 기준으로 공시된 자료가 현재까지 확인되지 않으며, 개별 지자체 집행 자료에 대한 정보공개청구가 필요하다(산림청, 2025b). 2024년에는 원목 혼입 방지 및 수집·증명 현장 관리·감독 기능 강화를 위해 「목재이용법」과 「사법경찰직무법」이 개정되어 시행 중이다(산업통상자원부·산림청·환경부, 2024. 12. 18.). 미이용 산림바이오매스 증명(생산)량은 2022년 119만 톤에서 2023년 139만 톤, 2024년 약 152만 톤(추정)으로 꾸준히 증가하였으며, 2023년 기준 목질계 바이오매스 전체 사용량은 740만 톤으로 2012년 대비 약 50배 증가하였다(산업통상자원부·산림청·환경부, 2024. 12. 18.; 이재정, 2025).

<표 2-3> 현장기반 보조금 미이용 산림바이오매스 수집·생산 현황 (2022~2026)

구분	2022	2023	2024	2025	2026
제도명 및 근거법령	「목재의 지속가능한 이용에 관한 법률」 제36조의3·4 / 「산림바이오매스에너지의 이용·보급 촉진에 관한 규정」(산림청고시 제2022-82호)				
실행 구조	산림청(정책·기준) → 국유림관리소·시군구청장(수집 허가·증명서 발급) → 한국임업진흥원(공급확인서 발급) → 발전사				
지원 내용	가지·초두부·저급재 등 미이용 산물의 수집·운반·파쇄·칩 생산 비용 지원 (지자체 집행, 단위 단가는 중앙 미공시 - 개별 지자체 정보공개청구 필요)				
생산 (증명) 량 (만 톤)	119	139	~152(추정)	미공표 ¹	미공표 ¹

지표	목재칩 비중(전체 대비, %)	~20	~30	39(3Q)	-	-
	목질계 바이오매스 전체 사용량 (만 톤)	-	740	-	-	-
	RPS 정산비용 (연간, 억 원)	-	~9,000	-	-	-
주요 제도 변화	-	-	목재이용법·사법경찰직무법 개정(7월 시행)	증명업무 지침 개정 적용	3년 후(2027) 정책 재검토 예정	
잠재적 문제	① 지자체별 단가 편차·현장 확인 한계 ② 증명 행정 부담·공급망 투명성 문제 ③ 원목 혼입 방지 실효성 논란 ④ 수집·운반비 부담으로 실제 공급량 제한					

1) 출처

다. REC 정책 지원

REC는 「신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법」 제12조의5에 근거하며, 현행 관리 지침은 「신·재생에너지 공급의무화제도 및 연료 혼합의무화제도 관리·운영지침」(기후에너지환경부고시 제2025-3호, 2025. 10. 2. 시행)이다. RPS 제도는 500MW 이상 발전설비를 보유한 공급의무자에게 총 발전량의 일정 비율 이상을 신·재생에너지로 공급하도록 의무화한 제도이며, REC를 통해 의무 이행을 관리한다(한국에너지공단 신재생에너지센터, n.d.).

RPS 의무공급비율은 2022년 12.5%에서 2026년 15.0%, 2030년 법정상한 25.0%까지 단계적으로 상향 조정된다(산업통상자원부, 2023). 그러나 2024년 12월 산업통상자원부·산림청·환경부 관계부처 합동 「바이오매스 연료·발전시장 구조 개선방안」에 따라 신규 목질계 바이오매스 발전설비에 대한 REC 가중치가 폐지되어 시장 진입이 제한되고 있으며, 2025년부터는 수입산 목재펠릿 REC도 일몰 실행되었다. 기존 설비에 대해서는 가동 시작 연도에 따라 2025년 또는 2028년까지 경과조치가 적용된다(기후에너지환경부, 2025). 2023년 기준 바이오매스는 신재생에너지 발전량의 20%를 차지하는 제2의 신재생에너지원으로 성장하였으며, RPS 정산비용도 연간 9,000억 원 수준에 달하였다(산업통상자원부·산림청·환경부, 2024. 12. 18.).

1) 주: 임업통계연보 기준 2026년 6월 30일 갱신 예정(산림청, 2025b); 이재정(국립산림과학원, 2025); 산업통상자원부·산림청·환경부(2024. 12. 18.); 산림청(2024a, 2025a, 2025b).

<표 2-4> REC 정책 지원 RPS 의무공급비율 및 바이오매스 REC 가중치 현황 (2022~2026)

구분	2022	2023	2024	2025	2026
근거 법령	「신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법」 제12조의5 / 기후에너지환경부고시 제2025-3호(2025. 10. 2. 시행)				
제도 개요	500MW 이상 발전사업자에게 총 발전량의 일정 비율 이상을 신·재생에너지로 공급하도록 의무화(RPS), 이행 수단으로 신재생에너지 공급인증서(REC) 발급·거래				
RPS 의무공급비율 (%)	12.5	13.0	13.5	14.0	
REC 가중치 항목	2022	2023	2024	2025	
미이용 산림바이오매스 - 신규 설비	2.0	2.0	0 (폐지)	0	
미이용 산림바이오매스 - 기존 설비(전소)	2.0	2.0	2.0 (경과조치)	일몰 (2018년 이전 설비)	
미이용 산림바이오매스 - 기존 설비(혼소)	1.5	1.5	1.5 (경과조치)	좌동	
소규모 지역분산형 열병합·열난방	2.0	2.0	2.0	현행 유지 (예외)	
수입산 목재펠릿 REC	지급	지급	지급	일몰 합의·실행 (연 160만 톤·2,400억 원 규모)	
시장 규모 (바이오매스 신재생 발전 비중)	-	신재생 발전량의 20%(제2위 에너지원)	-	-	2026
잠재적 문제	① REC 의존성 심화 - 단일 정책 변수에 산업 존속 종속 ② 원목 혼입·원료 경합 ③ 경과조치로 기존 설비 지원 구조 당분간 유지 ④ 탄소배출 논란(연소 시 탄소 즉시 배출)				

자료: 기후에너지환경부고시 제2025-3호(2025); 산업통상자원부(2023); 산업통상자원부·산림청·환경부(2024. 12. 18.); 르몽드 디플로마티크(2025. 3. 26.).

4. 산림바이오매스관련 보조금간의 관계

현행 산림바이오매스 정책에서 핵심적인 역할을 하는 보조금·REC 인센티브 구조는 상호 연계되는 순환 구조를 형성한다. 조림·육림 보조금으로 조성된 산림에서 산물이 발생하면, 현장기반 수집·운반비 지원을 거쳐 미이용 산림바이오매스로 전환되고, 높은 REC 가중치를 통해 발전사의 수익성이 보장된다. 이 구조는 Salamon(2002)이 지적한 바와 같이, 개별 제도는 산림관리·재조림·재생에너지 보급이라는 정당한 목적을 가지나, 결합 시 '벌채-조림-수집-가공-연소'의 흐름을 경제적으로 가능하게 하는 의도치 않은 결과를 초래할 수 있다. 실제 현장에서는 산주-벌채업자-칩 생산자-발전사업자로 이어지는 가치사슬 안에서 결합되어 작동한다.

이러한 구조는 단별기 별채를 유도하거나 정당화할 수 있다. 첫째, 별채 이후 비용의 사회화이다. 조림·복구조림·숲가꾸기 지원은 공익성을 이유로 공공재정이 투입되는 동시에, 별채 이후 재조림과 관리비용을 낮추어 산주의 별채 부담을 완화한다. 둘째, 부산물의 시장화이다. 과거에는 현장에 잔존하거나 처리비용이 발생하던 가지·초두부·저급재 등이 '미이용 산림바이오매스'로 분류되어 추가 수익원으로 전환된다. 셋째, 발전 수요의 제도적 창출이다. REC는 바이오매스 발전의 경제성을 보완하는 간접 보조금으로 작동하며, 상류 단계에서 지속적 물량 확보 압력을 형성한다. 넷째, 장별기·보전 보상의 상대적 취약성이다. 현행 구조는 별채 후 조림·숲가꾸기·연료화에는 구체적인 지원체계를 갖추고 있는 반면, 산주가 장기 별채를 유예하거나 대경재·고품질 용재 생산을 선택할 때의 기회비용 보상은 상대적으로 미흡하다(Salamon, 2002).

따라서 산림바이오매스 정책의 효과를 평가하기 위해서는 개별 지원사업의 성과뿐 아니라, 이들 인센티브가 결합될 때 단별기 별채, 재조림, 산물 수집, 발전용 연료화가 어떻게 촉진되거나 왜곡되는지를 분석해야 한다. 정책 개선의 핵심은 보조금 총액의 단순 증감이 아니라, 별채·연료화에 유리한 보조 구조를 장별기 경영, 고부가가치 목재 이용, 카스케이딩 이용 강화, 생태계서비스 보상으로 재배열하는 것이다.

이를 개선하기 위해서는 실제 현장 가치사슬에 결합되어 있는 이해관계자들간의 구조적 관계와 인식에 대한 이해를 바탕으로 단계적 개선방안을 마련할 필요가 있다.

<표 2-5> 산림바이오매스 공급 관련 재정 지원 비교

비교 항목	① 현장기반 수집비 지원	② 조림·육림 보조금	③ REC 정책 지원
주관기관	산림청 / 지자체	산림청	산업통상자원부 → 기후에너지환경부
작동 단계	수집·운반·파쇄 단계	별채 후 조림·육림 단계	발전·최종 수요 단계
지원 방식	직접 보조 (수집·운반비)	직접 보조 (조림비·인건비)	간접 보조 (REC 가중치 → 발전 수익 보전)
주요 수혜자	원목생산자·칩 생산자·산주	산주·조림업체·산림사업법인	발전사업자·연료 공급업자
2024년 이후 주요 변화	목재이용법·사범경찰직무법 개정(2024.7), 증명업무 지침 개정(2024.12)	3조 원 예산(2026), K-Taxonomy 산림 포함, 저금리 융자 확대	신규 설비 REC 가중치 폐지(2024.12), 수입산 목재펠릿 REC 일몰(2025)
잠재적 구조 문제	현장 확인 한계·투명성 부족	단별기 별채-재조림 반복 가능성	REC 의존·단기 연료화 유인

자료: 산림청 홈페이지; 기후에너지환경부(2025); 산업통상자원부·산림청·환경부(2024. 12. 18.); 이재정(국립산림과학원, 2025)

5. 정책집행론과 정책수단론

가. 정책집행론(Policy Implementation Theory)

정책집행론은 정책이 공식적으로 설계된 방식과 실제 현장에서 작동하는 방식 사이의 차이를 설명하는 데 유용한 이론적 틀이다. Lipsky(1980)의 일선 관료제 이론은 정책 집행에 직접 관여하는 현장 실무자들이 단순히 규정을 기계적으로 적용하는 존재가 아니라, 제한된 자원과 업무 부담, 불명확한 지침 속에서 정책을 해석하고 조정하는 행위자라고 본다. Hill and Hupe(2014) 역시 정책집행을 중앙정부의 지침이 일방적으로 전달되는 과정이 아니라, 제도적 조건과 행위자의 해석이 결합되어 실제 정책 결과를 만들어내는 과정으로 이해해야 한다고 설명한다.

이 관점은 산림바이오매스 정책에서 지자체 산림 담당 공무원의 역할을 분석하는 데 직접적으로 적용된다. 지자체 공무원은 벌채 허가, 미이용 산림바이오매스 수집 허가, 증명절차 등에서 중앙정부 제도를 현장 조건에 맞게 적용하는 핵심 집행자이다. 산림청의 미이용 산림바이오매스 증명절차에 따르면, 담당 공무원은 벌채예정수량조사서에 기재된 미이용 산림바이오매스 수집 예정수량을 조사·확인하고, 타당하다고 인정되는 경우 수집 허가증을 발급한다(산림청, n.d.-b). 그러나 실제 집행 과정에서는 인력 부족, 현장 확인의 어려움, 민원 대응, 지방비 매칭 부담 등 행정적 제약이 발생할 수 있다. 따라서 본 연구는 지자체를 단순한 행정 전달기관이 아니라, 중앙정부의 제도 설계와 지역 현장의 현실 사이에서 정책을 해석하고 조정하는 집행 행위자로 이해한다.

나. 정책수단론(Policy Instruments Theory)

정책수단론은 정부가 정책 목표를 달성하기 위해 활용하는 보조금, 융자, 인증, 규제, 시장 기반 인센티브 등이 행위자의 선택에 어떤 영향을 미치는지를 분석한다. Salamon(2002)은 현대 정책이 단일 수단이 아니라 여러 정책수단의 결합을 통해 작동하며, 이 과정에서 개별 수단의 설계 의도와 다른 의도치 않은 결과가 발생할 수 있다고 설명한다. 이 관점은 산림바이오매스 정책에서 보조금, 융자, REC 가중치가 결합되어 산주, 벌채업자, 칩 생산자, 발전사업자에게 경제적 유인을 제공하는 구조를 분석하는 데 적합하다.

산림바이오매스 정책은 탄소중립과 재생에너지 확대라는 목표 아래 추진되었지만, 실제 정책 현장에서는 REC 가중치와 보조금 구조가 산업의 존속과 수익성을 좌우하는 핵심 변수로 작동해 왔다. 정부는 「목질계 바이오매스 개선방안」에서 2023년 목질계 바이오매스 사용량이 740만 톤으로 2012년 대비 약 50배 증가했으며, 원목으로 생산한 목재펠릿 340만 톤 중 98%가 수입되었다고 밝혔다. 또한 바이오매스에 대한 RPS 정산비용이 증가했고, 발전용 원료와 재활용 원료 간 원료 경합, 산림훼손 및 탄소배출 논란이 지속되고 있다고 지적하였다(산업통상자원부·산림청·환경부, 2024). 이는 정책수단의 결합이 공급 확

대, 재정 부담 증가, 원료 경합이라는 결과를 낳을 수 있음을 보여준다. 따라서 본 연구에서 정책수단론은 산림바이오매스 정책의 경제적 유인 구조를 설명하는 이론적 기반으로 활용된다.

다. 정책수단-행위자-결과 간 인과 관계

정책집행론과 정책수단론은 산림바이오매스 정책이 현장에서 어떻게 작동하는지를 설명하는 데 유용하다. 정책집행론은 중앙정부가 설계한 제도가 지자체와 현장에서 어떻게 해석·조정되는지를 보여주고, 정책수단론은 보조금, 용자, REC 가중치와 같은 제도적 장치가 행위자의 경제적 선택을 어떻게 유도하는지를 설명한다. 다만 산림바이오매스 정책의 구조적 원인을 보다 입체적으로 이해하기 위해서는 산림의 공유자원적 성격과 다층적 거버넌스 구조를 함께 고려할 필요가 있다.

먼저, Ostrom(1990)의 공유자원 이론(Common-Pool Resource Theory)은 산림바이오매스 정책이 산림이라는 공동의 생태적 기반을 어떻게 관리할 것인가의 문제와 연결되어 있음을 설명한다. 산림이 제공하는 탄소 저장, 생물다양성 보전, 수원 함양, 토양 보전 기능은 특정 개인이나 기업만의 사적 이익으로 환원되기 어려운 공유자원의 성격을 갖는다. 산림바이오매스 이용을 통해 발생하는 단기적 편익은 특정 행위자에게 귀속될 수 있지만, 산림 생태계 훼손이나 탄소 저장 기능 약화에 따른 비용은 사회 전체가 부담하게 된다. Hardin(1968)이 제시한 '공유지의 비극'은 이러한 과잉 이용 가능성을 설명한다. 다만 Ostrom(1990)은 공유자원이 반드시 비극으로 귀결되는 것은 아니며, 자원 이용의 경계 설정, 이용자의 규칙 형성 참여, 모니터링과 제재가 실질적으로 작동할 경우 지속가능한 관리가 가능하다고 보았다.

이 관점에서 현행 산림바이오매스 정책의 핵심 쟁점은 '미이용 산림바이오매스'의 범위가 현장에서 명확하게 해석되고 있는지, 산주와 지역사회가 규칙 형성 과정에 실질적으로 참여하고 있는지, 수집·운반·증명 과정에 대한 모니터링이 충분히 작동하고 있는지의 문제로 연결된다. 따라서 공유자원 이론은 산림바이오매스 정책이 생태적 비용을 충분히 반영하지 못한 채 산림 이용을 확대할 경우 발생할 수 있는 구조적 위험을 설명하는 데 기여한다.

다음으로, Hooghe and Marks(2003)의 다층 거버넌스 이론(Multi-level Governance Theory)은 산림바이오매스 정책이 여러 부처, 중앙정부, 지자체, 민간 행위자가 동시에 관여하는 복합 정책 영역이라는 점을 설명한다. 다층 거버넌스 이론에 따르면 현대 정책 과정에서 권한과 책임은 하나의 정부 수준에 집중되지 않고, 여러 층위의 정부와 비정부 행위자에게 분산된다. 이처럼 의사결정 권한이 분산된 구조에서는 각 층위 간 조정이 충분히 이루어지지 않을 경우 정책 목표와 집행 결과 사이에 불일치가 발생할 수 있다(Hooghe & Marks, 2003).

산림바이오매스 정책도 이러한 다층적 구조를 갖는다. RPS·REC 운영체계는 에너지정책

의 영역에서 작동하고, 벌채 허가와 미이용 산림바이오매스 증명제도는 산림정책의 영역에서 관리된다. 지자체는 앞서 설명한 집행 기능을 담당하며, 산주·벌채업자·칩 생산자·발전 사업자는 민간 공급망 안에서 각자의 경제적 판단에 따라 움직인다. 즉 산림바이오매스 정책은 기후·에너지정책, 산림정책, 지방행정, 민간 시장이 교차하는 정책 영역이다. 이 구조에서는 어느 한 부처의 제도 개선만으로 전체 정책효과를 통제하기 어렵다.

이를 종합하면, 본 연구는 산림바이오매스 정책의 문제를 다음과 같은 인과적 연쇄 속에서 이해한다.

「정책수단의 결합 → 행위자별 유인 형성 → 현장 집행과 공급망 작동 과정의 왜곡 → 산림 공유자원 관리의 취약성 심화 → 구조적 결과의 고착」

이 분석틀에서 정책수단론은 보조금·용자·REC 가중치가 형성하는 경제적 유인 구조를 설명하고, 정책집행론은 제도가 현장에서 해석·조정되는 과정의 간극을 설명한다. 공유자원 이론은 산림의 생태적 비용이 시장 가격에 충분히 반영되지 않는 외부화 문제를 설명하며, 다층 거버넌스 이론은 부처·지자체·민간 공급망 간 조정 실패의 구조를 설명한다 (Salamon, 2002; Hill & Hupe, 2014; Ostrom, 1990; Hooghe & Marks, 2003). 따라서 산림바이오매스 정책의 개선은 개별 제도 조정에 머물지 않고, 미이용 산림바이오매스의 범위 명확화, 이해당사자 참여 구조의 제도화, 현장 모니터링 강화, 중앙정부·지자체·민간 공급망 간 조정 체계 구축을 함께 고려하는 방향으로 설계될 필요가 있다.

6. 국제 비교 기준으로서 EU 재생에너지지침(RED II/III)의 시사점

국내 바이오매스 정책의 문제를 이해하려면 국제사회가 어떤 방향으로 움직이고 있는지를 함께 살펴볼 필요가 있다. 그 점에서 유럽연합(EU)의 재생에너지지침(Renewable Energy Directive, RED) 개정 과정은 중요한 참조점이 된다.

EU는 2018년 RED II를 통해 산림바이오매스에 처음으로 지속가능성 기준을 도입했다. 이전까지는 바이오에탄올·바이오디젤 같은 액체 바이오연료에만 지속가능성 조건이 붙어 있었지만, 목재 펠릿 같은 고체 바이오매스도 이 기준의 적용 범위 안으로 들어오게 된 것이다(European Parliament & Council of the EU, 2018). 이어 2023년에는 RED III가 확정되었는데, 여기서는 기준이 한층 더 강화되었다. 핵심 내용을 간략히 정리하면 세 가지다. 첫째, 온실가스 감축 의무가 강화되었다. 2021년 이후 가동을 시작한 바이오매스 발전소는 화석연료 대비 최소 70%, 2026년 이후 신규 설비는 85% 이상의 온실가스를 감축해야만 재생에너지로 인정된다(European Parliament & Council of the EU, 2023). 둘째, 공급원료에 대한 규제가 생겼다. 일차림(primary forest), 생물다양성이 높은 산림, 탄소 저장량이 풍부한 토지에서 나온 바이오매스는 아예 재생에너지 지원 대상에서 제외된다. 셋째, 공급망 추적 의무가 부과되었다. 바이오매스가 어디서 어떤 방식으로 생산됐는

지를 사전에 확인하고 문서로 증명해야 하며, 독립적인 제3자 인증이 이를 검증한다(산림청, 2024a). RED III는 2021년부터 가동한 발전소는 화석연료 대비 최소 70%, 2026년부터 가동하는 발전소는 85%의 온실가스 배출 감축을 의무화했다. 나아가 2026년부터는 발전 전용 바이오매스 시설에 대한 보조금 지급 자체를 단계적으로 중단한다는 내용도 포함되었다.

반면 국내 상황은 이와 상당한 거리가 있다. 한국 재생에너지 법제에는 바이오에너지의 지속가능성에 대한 기준이 없어 산림바이오매스에 과도한 지원이 이뤄지고 있으며, 온실가스 감축 의무나 대면적 벌채 방식에 대한 제한도 갖추어지지 않은 상태다. 현행 「신·재생에너지 공급의무화제도 및 연료 혼합의무화제도 관리·운영지침」(기후에너지환경부고시 제2025-3호)은 신규 목질계 바이오매스 발전설비에 대한 REC 가중치를 폐지하고 수입산 목재 펄릿 REC를 일몰하는 방향으로 이미 일부 조정을 시작했지만(기후에너지환경부, 2025), 온실가스 감축률 기준이나 공급원료별 지속가능성 인증, 공급망 전 과정 추적 의무화 같은 체계적 기준은 아직 도입되어 있지 않다. 정부 역시 이 격차를 인식하고 있어, 제3차 목재이용종합계획(2025~2029)²⁾에서 EU RED III 등 주요국 동향을 참고하여 한국형 지속가능성 국가지표를 개발하겠다는 계획을 밝힌 바 있다(산림청, 2024a). 그러나 구체적인 실행 기준과 독립적 검증 체계가 마련되지 않는 한, 선언적 목표에 그칠 가능성이 있다. EU의 경험은 바이오매스의 '재생에너지'로서의 자격을 단순히 원료 유형으로 판단하는 것이 아니라, 온실가스 감축 효과를 실증적으로 계산하고 공급망 전체를 추적하는 방향으로 정책 체계를 전환해야 한다는 점을 보여준다. 이는 본 연구가 제기하는 국내 바이오매스 정책의 지속가능성 검토 필요성과 직접적으로 맞닿아 있으며, 향후 정책 개선 방향을 논의하는 제6장의 핵심 참조 기준이 된다.

7. 정책수단의 결합이 만들어내는 구조적 결과

지금까지 살펴본 이론적 논의를 종합하면, 국내 산림바이오매스 정책의 핵심 문제는 어느 하나의 제도가 잘못 설계되었거나 특정 행위자가 나쁜 선택을 했기 때문이 아니라는 점이 분명해진다. 문제는 좀 더 구조적인 곳에 있다. 산림관리 제도, 조림·육림 보조금, 미이용 산림바이오매스 수집·증명 제도, RPS·REC 제도라는 네 가지 정책수단이 각자의 정당한 목적을 갖고 설계되었음에도 불구하고, 이것들이 서로 결합되어 작동할 때 예상치 못한 방향의 결과가 누적되고 있다는 것이다.

이 과정을 단계적으로 따라가면 다음과 같은 인과 연쇄가 드러난다. 먼저 조림 보조금과 숲가꾸기 지원이 벌채 후 재조림 비용을 사회화함으로써 산주의 벌채 부담을 낮춘다. 이렇

2) EU RED III는 2023년 10월 확정·발효되었으며, 2026년 이후 신규 발전소에 대한 85% 온실가스 감축 의무 등 일부 조항은 단계적으로 시행 중이다. 국내에서 한국형 지속가능성 기준을 개발하겠다는 산림청의 계획(제3차 목재이용종합계획, 2024)은 아직 구체적 기준이 확정되지 않은 상태로, 2026년 현재까지 공식 고시된 자료가 확인되지 않는다. 향후 관련 고시 발표 시 수치 업데이트가 필요하다.

게 벌채가 이루어진 현장에서 발생한 가지·초두부·저급재가 '미이용 산림바이오매스'로 분류되어 수집·운반비 지원을 통해 추가 수익원으로 전환된다. 여기에 RPS·REC 제도가 발전사업자의 안정적인 수요를 만들어내면서, 산주-벌채업자-칩 생산자-발전사업자로 이어지는 가치사슬 전체가 하나의 방향으로 정렬된다. 결과적으로 장기적인 산림 보전이나 고부가가치 목재 생산보다 단벌기 벌채와 연료화 쪽이 경제적으로 더 유리한 구조가 만들어진다. Salamon(2002)이 지적한 것처럼, 개별 제도는 각자의 목적에서 정당하지만 결합되었을 때 의도하지 않은 방향의 결과를 구조적으로 산출하게 되는 것이다.

이러한 인과 연쇄를 명확히 하는 것이 중요한 이유는, 그것이 곧 정책 개선의 방향을 알려주기 때문이다. 특정 제도 하나를 손보는 것만으로는 이 구조가 바뀌지 않는다. 보조금·용자·REC 인센티브를 포괄하는 인센티브 체계 전체가 벌채·연료화보다 장기 경영, 고부가가치 목재 이용, 생태계서비스 보전 쪽으로 재배열되어야 한다. 이 문제는 본 연구의 이해관계자 분석(제6장)에서 각 행위자가 현행 구조를 어떻게 경험하고 인식하는지를 살펴봄으로써 보다 구체적으로 확인하고자 한다.

제5절 국외 사례 검토

본 절에서는 한국과 산업 구조·정책 환경이 비교 가능하면서도 HWP 회계와 정책 측면에서 선도적 위치에 있는 일본, 독일, 핀란드의 사례를 검토한다. 세 국가의 접근은 본 연구의 방법론 설계와 정책 시사점 도출에 직접적 참조 기준으로 작용한다.

1. 일본 — Production Approach 기반 NIR 회계와 장수명 구조재 정책

가. NIR 회계 체계

일본은 자국 국가 온실가스 인벤토리 보고서(National Inventory Report, NIR)에서 IPCC가 제시한 Production Approach를 적용하여 HWP 탄소 저장량을 산정한다. 이 접근법은 자국 내에서 수확된 목재가 가공된 제품(국내 사용 또는 수출)에 한해 자국 인벤토리에 회계하며, 수입 가공품은 생산국에 귀속시키는 방식이다(Government of Japan, 2021). Production Approach는 파리협정 하의 표준 보고 방식으로 채택되어 있어, NIR이 비교 가능한 형태로 보고된다.

일본의 HWP 모형은 Tsunetsugu and Tonosaki(2010)와 Hashimoto and Moriguchi(2004)가 구축한 분석 체계를 기반으로 발전해 왔다. 이 모형은 원목 → 제재목·합판·칩 → 건축·토목·가구·종이 등 4개 최종 사용 부문으로 흐르는 물질 흐름을 추적하고, 각 부문별 반감기를 적용하여 stock 변화를 계산한다. Hashimoto and Moriguchi(2004)는 1960~2000년 기간의 일본 HWP 탄소 흐름을 시계열로 산정한 결과, 1990년 약 284 Mt-C, 2000년 약 338 Mt-C로 보고하였으며, 이는 본 연구가 한국 HWP 풀의 동태를 시계열로 분석하는 방법론적 출발점과 정합한다.

나. 모형의 진화: Production Approach + 수입품 통합 분석

일본은 자국 목재 자급률이 낮아(2020년 기준 약 41.8%), 수입 의존도가 높다는 점에서 한국과 유사한 구조적 특성을 갖는다. Kayo et al.(2015)는 이러한 특성을 반영하여 일본 NIR의 Production Approach 결과와 함께, 수입 가공품까지 포함한 Apparent Consumption 기반 분석을 병행하는 모형을 개발하였다. 동 연구는 일본 HWP 수입량이 2013년 기준 전체 공급의 약 71%를 차지함을 보고하면서, 자국 정책 시뮬레이션에는 Production Approach만으로는 부족하며 소비 기반 분석이 필요함을 정량적으로 입증하였다.

이 점은 본 연구의 제5장(NIR 정합성 검토)에서 제시한 "Apparent Consumption 보완 분석 제안"과 정확히 같은 문제의식을 공유한다. 한국 역시 목재 자급률이 약 15~20% 수준에 머무르므로, NIR이 보고하지 않는 수입 가공품 풀의 탄소 저장 효과를 별도 분석할 정책적 필요성이 일본과 동일하게 존재한다.

다. 장수명 구조재 정책: 「제2의 산림」 비전

일본 정부는 2050 탄소중립 실현을 위해 "도시 내 제2의 산림(Second Forest in urban areas) 조성" 비전을 제시하고, 건축물 구조재·내장재·외장재로의 목재 사용을 확대하여 도시 공간 자체를 탄소 저장고로 전환하는 전략을 추진하고 있다(Government of Japan, 2021). 동 정책은 단순한 슬로건이 아니라 NIR HWP 회계와 직접 연동된다. 즉, 장수명 구조재 사용 확대가 NIR Production Approach의 stock 증가로 정량 보고되는 구조이다.

Matsumoto et al.(2022)는 직접 인벤토리 방법(direct inventory method)을 사용하여 일본 건축물 내 HWP 탄소 저장량을 측정한 결과, IPCC 기본 flux-data 방법은 직접 측정값의 약 64% 수준만 추정하는 것으로 나타나 IPCC 기본 반감기가 일본 실태를 과소평가함을 정량 입증하였다. 이 결과는 본 연구의 시나리오 B(장은경 한국 Tier 3 반감기)가 한국 실태에 부합하는 방향이라는 주장과 정확히 같은 구조의 발견이며, 한국·일본·각국이 공통적으로 IPCC 기본 가정의 한계를 보완할 국가 고유 계수 개발이 필요함을 시사한다.

라. 본 연구와의 정합성

- 본 연구의 Production Approach 정합성 검증(VII장)은 일본 NIR 모형과 동일한 회계 접근에 기반한다.
- 본 연구의 Apparent Consumption 분석은 Kayo et al.(2015)이 일본에서 제기한 "Production Approach만으로 부족"하다는 문제의식과 일치한다.
- 일본의 장수명 구조재 정책은 본 연구의 "바이오매스 중심 → 장수명 HWP 중심" 전환 메시지와 정책적으로 동조한다.
- 본 연구가 한국 NIR에 "국가 고유 반감기 계수 도입"을 제언하는 것은 일본 Matsumoto et al.(2022)의 발견(IPCC 기본값 ~64% 과소평가)과 정합한다.

2. 독일 — Cascading 정책의 정량 관리와 「Charta für Holz 2.0」

가. EU Cascading 정책의 발전과 독일의 선도적 역할

독일은 Cascading use 개념을 정성적 정책 구호가 아니라 물질흐름의 전환율과 손실률을 수치로 관리하는 체계로 구현한 대표 사례이다. EU 차원에서 Renewable Energy Directive(2018/2001) 및 Circular Economy Action Plan(2015)이 cascading 우선순위를 명시한 이후, 독일은 이를 가장 정교한 정량 관리 체계로 발전시켜 왔다(Mantau, 2012; European Commission, 2015).

Cascading의 EU 공식 정의에 따르면, 목질 바이오매스는 다음 우선순위에 따라 사용되어야

한다: (1) 목재 기반 제품, (2) 제품 수명 연장, (3) 재사용, (4) 재활용, (5) 바이오에너지, (6) 폐기. 이는 본 연구의 제5장에서 적용한 cascading 원리와 정확히 부합하며, 본 연구가 토목·수송용 폐목재의 보드재 재활용을 정량 모델링한 접근의 정책적 근거를 제공한다.

나. 독일의 정책 도구: 「Charta für Holz 2.0」

독일 연방식품농업부(BMEL)가 주도하는 「Charta für Holz 2.0」(목재 헌장 2.0)은 지속가능한 임업과 목재 이용의 기후변화 대응 기여를 증대시키기 위한 다중 행위자 거버넌스 체계이다(Purkus et al., 2019). 동 헌장은 다음 세 가지 핵심 분야를 정량 지표로 관리한다.

- 목재의 다단계 이용 (Cascading) - 산림에서 가구·건축재로, 다시 보드재 원료로, 마지막에 에너지로 흐르는 흐름의 각 단계 전환을 측정
- 목재 건축 확대 (Bauen mit Holz) - 건축물 신축 시 목재 사용 비중 증가를 모니터링
- 자원 효율성 - 폐목재 회수율, 재활용률, 처리방식별 분배 비율 정량 관리

Thünen 연구소가 헌장 이행 평가를 주관하며, 정기적으로 「Kennzahlenbericht Forst & Holz」(임업·목재 핵심지표 보고서)를 발간하여 정량 지표를 공개한다(Schmitz et al., 2024). 이는 본 연구가 한국의 cascading 가능성을 정량 분석하면서 한국에는 그러한 공식 통계가 부재함을 지적하는 부분(VI.2 분석 가정)과 정확히 대응되는 정책 인프라이다.

다. 정량 분석 사례: Brunet-Navarro et al.(2018)

Brunet-Navarro et al.(2018)는 독일과 EU 전체의 목재 부문 탄소 균형에 대한 cascading 효과를 정량 분석하였다. 동 연구는 다음 두 가지 결과를 제시하였다.

- 재활용률을 현재의 약 40%에서 70%로 증가시킬 경우, 독일 HWP 풀의 누적 탄소 저장량이 EU 전체에서 30년 누적 약 100 Mt-CO₂ 상승
- 이는 cascading 정책의 효과가 "수치로 측정 가능한 양"임을 학술적으로 입증한 첫 번째 사례 중 하나

이 결과는 본 연구의 VI장에서 도출한 "한국 실태(시나리오 B)에서 cascading 47.5% 적용 시 +2.23 Mt-C(+8.9%)"와 동일한 구조의 분석이다. 즉, 본 연구는 독일의 정량 분석 방법론을 한국 데이터에 적용한 사례로 평가될 수 있다.

라. 더 최근의 동향: Bozzolan et al.(2024)

Bozzolan et al.(2024)는 독일·프랑스·핀란드·스페인 4개국을 대상으로 6개 정책 시나리오(Energy, Energy+, Cascading, Material 등)를 비교 분석하였다. 결과는 다음과 같다.

- Material 시나리오(목재의 물질 사용 우선)가 가장 큰 탄소 저장 효과 - 30년 누적 독일

-502 Mt-CO₂, 핀란드 -116 Mt-CO₂

- Energy+ 시나리오(에너지 이용 확대)는 모든 국가에서 HWP 풀 손실 - 독일 351 Mt-CO₂ 손실
- 국가별 산업 구조에 따라 cascading 효과 크기가 크게 달라지므로 "국가 맞춤형 전략"이 필요함.

이 결과는 본 연구가 시나리오 A(IPCC 기본)와 시나리오 B(한국 실태)에서 cascading 효과가 정반대 방향(-1.0% vs +8.9%)으로 나타남을 입증한 발견과 동일한 구조이며, "한국 정책 맞춤형 cascading 의무화"의 정량 근거를 제공한다.

마. 본 연구와의 정합성

- 본 연구의 VI장 Cascading 분석은 독일이 발전시킨 정량 관리 체계와 같은 방법론적 기반 위에 구축되었다.
- Brunet-Navarro et al.(2018)의 분석 구조와 본 연구 cascading 분석은 동일한 학술적 계보에 속한다.
- Bozzolan et al.(2024)의 "국가 맞춤형 전략 필요" 결론은 본 연구가 "IPCC 기본 가정으로는 한국 실태 cascading 효과를 포착할 수 없음"을 입증한 결과와 정확히 부합한다.
- 「Charta für Holz 2.0」의 다중 행위자 거버넌스 모델은 본 연구가 향후 2차년도 정책 시나리오 분석으로 확장할 때 참조 가능한 거버넌스 사례이다.

3. 핀란드 — 침엽수 중심 산림 구조와 수종별 차등 환산의 학술적 출발점

가. 핀란드 산림의 구조적 특성

핀란드는 침엽수 중심 산림 구조(스코틀랜드 소나무 *Pinus sylvestris*·노르웨이 가문비나무 *Picea abies*가 전체 임상의 약 80% 이상)를 가지며, 산림 자원이 국가 경제와 직결된 임업 선진국이다. 2019년 기준 핀란드 산림의 순 탄소 흡수량은 25.6 Tg CO₂-eq로 보고되었으며(Official Statistics of Finland, 2020), 이러한 산림 구조 특성은 수종별 차등 환산 접근의 학술적 출발점이 되었다.

나. Karjalainen et al.(1994, 1999) - 수종 분리 HWP 모형

Karjalainen et al.(1994, 1999)은 핀란드의 침엽수·활엽수 차등 환산을 본격적으로 적용한 초기 학술 연구이다. 동 연구는 다음 세 수종을 분리하여 환산계수와 반감기를 별도 산정하였다.

- 스코틀랜드 소나무 (*Pinus sylvestris*) - 침엽수 주요 종

- 노르웨이 가문비나무 (Picea abies) - 침엽수 주요 종

- 자작나무 (Betula spp.) - 활엽수 주요 종

동 연구는 수종별로 (1) 원목의 산업 분배 비율, (2) 제재목·합판·펄프재 환산계수, (3) 4개 최종사용 부문의 반감기를 별도 산정하여 적용하는 방법론을 제시하였다. 이 접근은 IPCC 2003 GPG-LULUCF 가이드라인의 "수종별 분리 분석" 권고로 이어졌으며, 본 연구가 적용한 침엽수 0.225 / 활엽수 0.280 t-C/m³ 차등 환산의 학술적 계보가 된다.

다. Pingoud et al.(2003, 2010, 2016) - 핀란드 HWP 동태 모형 시리즈

Pingoud의 일련의 연구는 핀란드 HWP 모형의 발전을 보여준다. 주요 연구는 다음과 같다.

- Pingoud et al.(2003) - IPCC 가이드라인의 HWP 회계 방법 4종(stock-change, atmospheric flow, production, simple decay) 비교 분석. 본 연구의 VII장이 Production Approach를 채택한 학술적 근거

- Pingoud et al.(2010) - 산림과 HWP를 결합한 통합 기후 영향 평가. 본 연구의 향후 2차년도 통합 분석 방향과 부합

- Pingoud et al.(2016) - 산림 바이오에너지 시나리오 평가의 상대 탄소(RC) 지표 개발. 단별기 바이오매스 정책의 한계 정량화 방법론 제공

특히 Pingoud and Perälä(2000)는 "기후변화 완화 잠재력은 stock 저장보다 에너지·물질 대체 효과에 더 크게 의존한다"는 결론을 제시하였는데, 이는 본 연구가 단순 stock 분석을 넘어 cascading과 정책 시나리오 분석으로 확장하는 방향과 일치한다.

라. Karjalainen vs Pingoud - 반감기 가정의 검증

핀란드 학계에서는 IPCC 기본 반감기의 적용 가능성에 대한 두 가지 상반된 검증 결과가 있다(IPCC GPG-LULUCF, 2003 인용).

- Karjalainen et al.(1996) - 50년 후에도 초기 저장 탄소의 40% 이상이 사용 종이거나 매립지에 저장되어 있어 IPCC 기본 반감기가 합리적이라는 결과

- Pingoud et al.(2001) - 동일 핀란드 데이터로 IPCC 기본 반감기가 핀란드 stock을 과대 추정한다는 상반 결과

두 연구의 차이는 가정의 차이에 기인하지만, 두 결과 모두 IPCC 기본 반감기가 모든 국가에 보편적으로 적용되기 어렵다는 "국가 고유 반감기 계수 개발의 필요성"을 입증한다. 본 연구의 시나리오 A(IPCC 기본) vs 시나리오 B(장은경 한국 Tier 3) 비교 설계는 이러한 학술적 논의의 한국 적용 사례로 위치한다.

마. Poljatschenko and Valsta(2021) – 수종별 displacement factor

Poljatschenko and Valsta(2021)는 핀란드 임업의 가장 최근 수종별 정량 분석을 제시하였다. 동 연구는 다음 결과를 보고하였다.

- 스코틀랜드 소나무 (Scots pine): 평균 displacement factor 1.28 Mg C/Mg C
- 노르웨이 가문비나무 (Norway spruce): 1.16 Mg C/Mg C
- 자작나무 (Birch): 1.43 Mg C/Mg C

이는 "수종별로 탄소 저장 및 대체 효과가 다르다"는 본 연구의 침/활 차등 환산 가정을 정량적으로 뒷받침한다. 한국에서 본 연구가 침엽수 0.225, 활엽수 0.280 t-C/m³의 환산계수 차이를 적용한 것은 핀란드 학계가 발전시킨 "수종 분리 정밀화" 접근의 한국 적용 사례이다.

바. 본 연구와의 정합성

- 본 연구의 침/활 차등 환산은 Karjalainen et al.(1994, 1999)이 핀란드에서 발전시킨 학술 전통의 한국 적용이다.
- 본 연구의 시나리오 A·B 비교 설계는 Karjalainen-Pingoud 논쟁이 보여준 "국가 고유 반감기 계수 필요성"의 한국 사례 분석이다.
- 본 연구의 향후 정책 시나리오 확장 방향은 Pingoud et al.(2016)의 RC 지표 등 핀란드 학술적 발전 경로와 부합한다.

4. 종합 시사점 및 본 연구와의 정합성

일본·독일·핀란드 세 국가의 사례는 다음 4개 차원에서 본 연구의 방법론과 정책 메시지에 학술적·정책적 정합성을 제공한다.

<표 2-6> 정합성 차원별 국외 사례

정합성 차원	국외 사례	본 연구 대응
회계 방법론	일본 NIR Production Approach + Apparent Consumption 보완 (Kayo et al., 2015)	VII장 NIR 정합성 검토 + Apparent Consumption 분석 병행
국가 고유 반감기	Matsumoto et al.(2022) – IPCC 기본값 일본 stock ~64% 과소평가 Karjalainen-Pingoud – 핀란드 적용 한계 논쟁	V장 시나리오 B (장은경 한국 Tier 3) 적용으로 IPCC 기본값과 110% 격차 확인
Cascading 정량 분석	독일 Brunet-Navarro et al.(2018) – 재활용률 70% 시 +100 Mt-CO ₂ Bozzolan et al.(2024) – 국가별 차등 효과	VI장 Cascading 47.5% 시 시나리오 B에서 +2.23 Mt-C (+8.9%)

수종 차등 환산	핀란드 Karjalainen et al.(1994, 1999) - 침/활 분리 모형 Poljatschenko & Valsta(2021) - 수종별 DF 차이	IV장 침엽수 0.225 / 활엽수 0.280 t-C/m ³ 차등 환산 적용
정책 메시지	일본 「제2의 산림」 비전 (장수명 구조재 확대) 독일 「Charta für Holz 2.0」 (cascading 정량 관리)	"바이오매스 중심 → 장수명 HWP + Cascading 의무화" 이중 전환 제안

위 정합성은 본 연구가 한국 단독의 우연한 발견이 아니라, 일본·독일·핀란드가 학술적·정책적으로 발전시켜 온 분석 체계의 한국 적용·확장 사례임을 보여준다.

제6절 통합적 검토

지금까지 제2장에서는 산림바이오매스 중심 정책을 다각도로 검토하기 위한 이론적 토대를 네 개의 절에 걸쳐 쌓아왔다. 각 절은 독립적인 이론을 소개하는 데 그치지 않고, 모두 하나의 공통된 질문을 향해 수렴한다. 현재 국내 산림바이오매스 정책은 산림이 지녀야 할 생태적·경제적·사회적 가치를 온전히 실현하고 있는가, 그리고 그렇지 않다면 무엇이 문제이며 어떤 방향으로 나아가야 하는가.

제1절에서 검토한 지속가능한 산림경영(SFM) 이론은 산림이 목재를 생산하는 경제적 자원에 머물지 않고, 탄소를 저장하고 생물다양성을 보전하며 지역사회를 지탱하는 복합적 시스템으로 다루어져야 한다는 규범적 원칙을 제시했다. Faustmann 모델과 Hartman 확장 모델은 시장 논리만으로는 산림이 필연적으로 조기에 벌채되는 방향으로 기울어지며, 생태계서비스의 가치를 경영 판단에 포함할수록 더 긴 윤벌기가 경제적으로도 합리적임을 보여주었다. 재조림 보조금이 이 조기 벌채 유인을 더욱 강화할 수 있다는 점도 이론적으로 확인했다.

제2절의 HWP 탄소 회계 이론은 산림에서 나온 목재가 어떤 제품으로 얼마나 오래 사용되느냐에 따라 탄소 저장 효과가 크게 달라진다는 사실을 방법론 차원에서 뒷받침한다. 수입 의존도가 높은 한국 사회의 실질적인 목재 소비 구조를 파악하기 위해 외관소비 접근법을 채택하고, 침엽수·활엽수 간 밀도 차이를 반영한 수종 차등 환산계수를 적용하는 것이 왜 학술적으로 필요한지도 이 절에서 설명했다.

제3절의 FOD 모형과 Cascading 이론은 목재가 단기 연료로 연소되는 것과 장수명 제품으로 활용되는 것 사이의 탄소 저장 효과 차이를 정량적으로 추정하는 방법론적 토대를 제공한다. 반감기 설정에 따라 장기 탄소 축적 추정치가 크게 달라진다는 사실은, 바이오매스 정책의 기후 효과를 단순히 '재생에너지냐 아니냐'의 이분법으로 평가할 수 없음을 시사한다.

제4절은 이 모든 이론적 논의를 실제 정책 구조 위에 올려놓았다. 조림·육림 보조금, 미이용 산림바이오매스 수집·증명 제도, RPS·REC 인센티브가 각자의 정당한 목적을 갖고 있음에도 결합될 때 단벌기 벌채와 연료화를 구조적으로 유도하는 방향으로 작동할 수 있음을 정책집행론(Lipsky, 1980; Hill & Hupe, 2014)과 정책수단론(Salamon, 2002)을 통해 분석했다. 나아가 Ostrom(1990)의 공유자원 이론은 산림이 공유자원으로서 집합행동 실패에 노출되어 있음을, Hooghe & Marks(2003)의 다층 거버넌스 이론은 국가-지역-현장 층위 간 조율 실패가 문제를 심화시키고 있음을 설명했다. EU RED II/III의 사례는 이 문제를 극복하기 위해 국제사회가 어떤 방향으로 나아가고 있는지를 보여주는 참조점으로 제시했다.

이처럼 네 개의 절에서 검토한 이론들은 단독으로 존재하는 것이 아니라, 서로 맞물려

하나의 통합적 분석 틀을 구성한다. 이 분석 틀은 세 가지 원칙 위에 설계된다.

첫째는 다차원성의 원칙이다. 산림바이오매스 정책의 영향은 생태적 차원(탄소 저장, 생물다양성), 경제적 차원(자원 배분 효율성, 외부효과), 사회적 차원(이해관계자 참여)을 동시에 포괄해야 한다. 어느 하나의 차원만으로 평가하면 정책의 실제 영향을 왜곡할 위험이 있다.

둘째는 인과적 연계성의 원칙이다. 산림자원의 현황과 공급 잠재력(제3장), 목재 소비 구조와 탄소 저장량 변화(제4·5장), 이해관계자 인식(제6장), 그리고 정책 개선 방안(결론)은 각각 독립적인 분석이 아니라 하나의 인과 연쇄 속에서 연결된 고리들이다.

셋째는 맥락 특수성의 원칙이다. 국내 산림의 약 66%가 사유림이라는 구조적 특성은 이 연구 전체를 관통하는 핵심 맥락이다. 사유림 소유자의 분산된 의사결정 구조, 정보 접근성의 한계, 단기 수익에 대한 의존은 공유자원 이론과 거버넌스 이론이 지적하는 집합행동 문제를 현실에서 그대로 구현하고 있다.

제3장

산림 자원 현황·임업 생산 분석 및 미이용 산림바이오매스 공급 잠재력 평가

제1절 산림자원 현황 분석

제2절 산림자원 이용 행태 및 부가가치 분석

제3절 미이용 산림바이오매스 공급 잠재력 평가

3

산림 자원 현황·임업 생산 분석 및 미이용 산림바이오매스 공급 잠재력 평가

제1절 산림자원 현황 분석

1. 개요 및 연구 방법

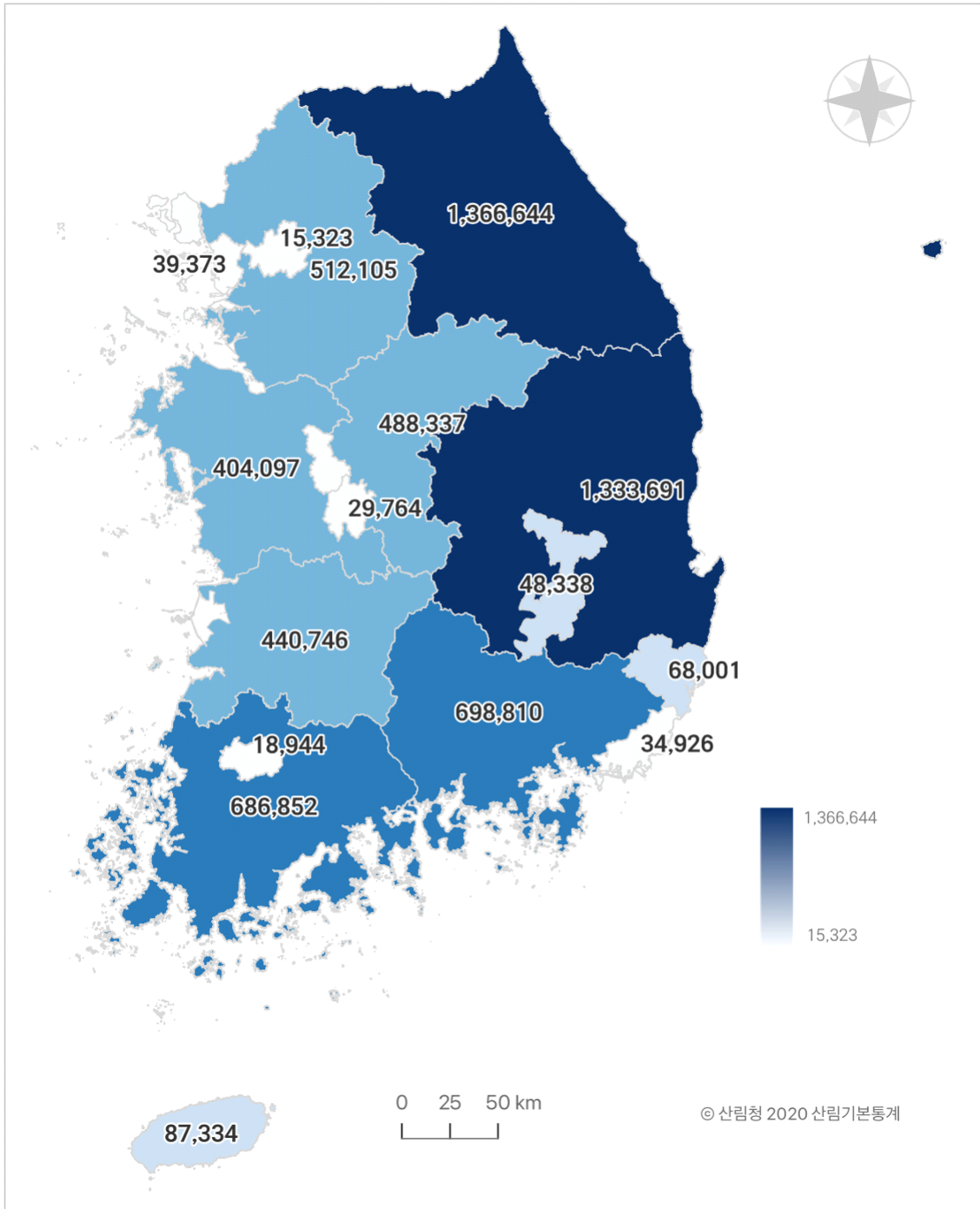
산림 생태계는 대기 중의 온실가스를 흡수하고 저장하는 핵심적인 자연 기반 해법(Nature-based Solutions, NbS)이자 신재생 바이오매스 에너지를 공급하는 공급원으로서 중요성이 강조되고 있다. 하지만 성공적인 기후변화 대응 전략을 수립하기 위해서는 현재 국내 산림이 어떠한 양적·질적 상태에 놓여 있는지에 대해 객관적인 진단이 선행되어야 한다. 이에 국내 산림자원의 현황을 파악하고자 한다. 또한 과거부터 이어져 온 조림 및 순환 벌채와 같은 기존의 산림 정책의 현황과 실효성을 검토하고자 한다. 이를 통해 향후 기후변화 대응을 위한 지속가능한 산림 정책 수립의 기초자료를 마련하는 것을 목적으로 한다.

산림자원 현황 분석을 위해 산림청의 임업통계연보와 산림기본통계, 국립산림과학원의 국가산림자원조사(NFI) 보고서와 목재이용실태조사 등의 통계 자료를 기초 자료로 활용하였다. 수집된 통계자료들은 분석 가능한 형태로 정제하는 작업을 수행하였다. 전반적인 산림의 현황에 대하여 소유주체, 법적 규제 범위, 생태적 특성 등으로 세분화하여 행정구역별로의 추이를 살펴보았으며 이를 통해 지역별 특성 및 국내 산림의 특성을 파악하고자 한다.

2. 산림자원의 공간적 분포 특성 및 구조적 현황

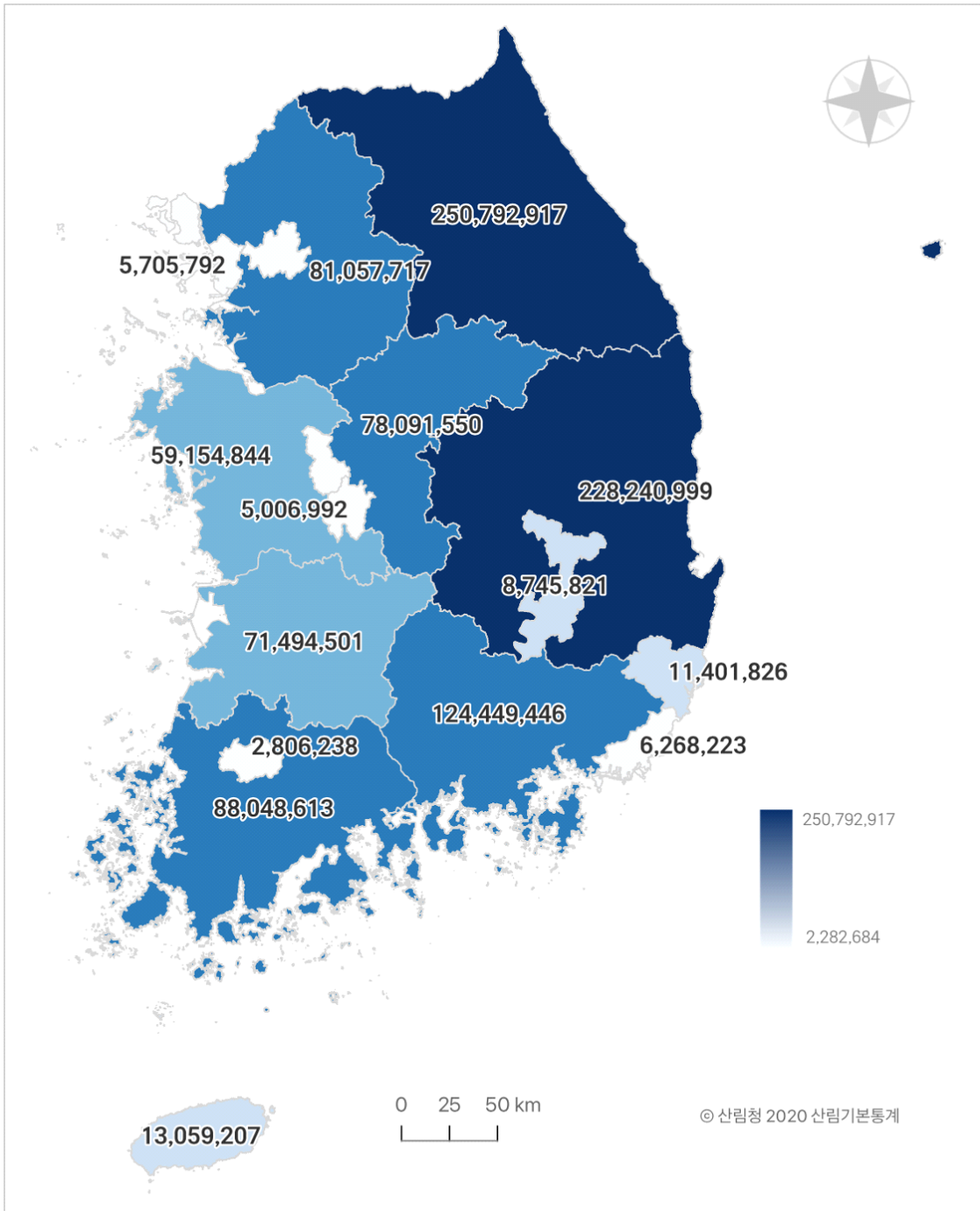
가. 산림면적 및 임목축적

2020년 기준 국내 산림의 총면적은 약 630만 ha이며, 산림 내 수목의 총부피를 나타내는 임목축적은 약 10억 4천만 m³로 집계되었다. 이를 광역자치단체 수준으로 세분화할 경우 산림자원의 지역별 편중 현상이 뚜렷하게 관찰된다. 산림 면적의 경우 강원특별자치도(1,366천 ha)와 경상북도(1,333천 ha)가 전국 면적의 약 43%를 점유하고 있다. 실질적인 자원 보유량을 의미하는 임목축적 역시 강원도(250,569천 m³)와 경상북도(228,521천 m³)가 전체의 약 46%를 차지한다. 이러한 수치는 국내 산림자원의 상당수가 영동 및 영남 지역에 집중되어 있음을 보여준다.



[그림 3-1] 2020년 행정구역별 산림면적(단위:ha)

자료: 산림청 2020 산림기본통계

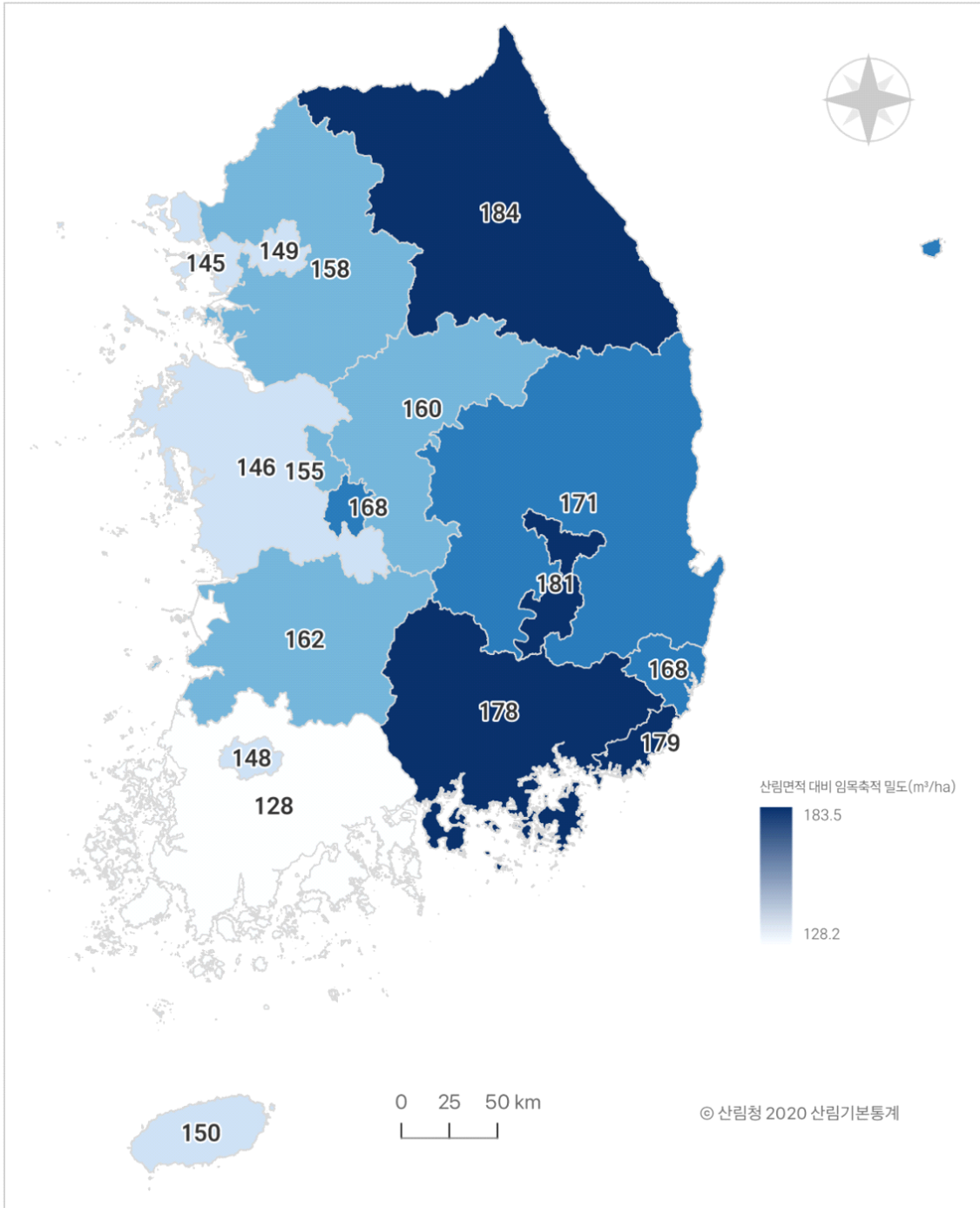


[그림 3-2] 2020년 행정구역별 임목축적(단위: m³)

자료: 산림청 2020 산림기본통계

단순한 총량 지표가 가지는 한계를 보완하기 위해 단위 면적당 자원의 밀집도를 나타내는 임목축적 밀도(m³/ha)를 추가로 산출하였다. 전국의 평균 임목축적 밀도는 약 165 m³/ha 수준으로 나타났다. 전국에서 가장 넓은 산림 면적을 점유한 강원도는 임목축적 밀도 184 m³/ha를 기록하여 양적·질적으로 가장 풍부한 자원을 보유하고 있음을 확인하였다. 강원도에 이어 대구광역시

(181 m³/ha)와 부산광역시(179 m³/ha), 경상남도(178 m³/ha), 경상북도(171 m³/ha) 순으로 높은 임목축적 밀도를 기록하였다.

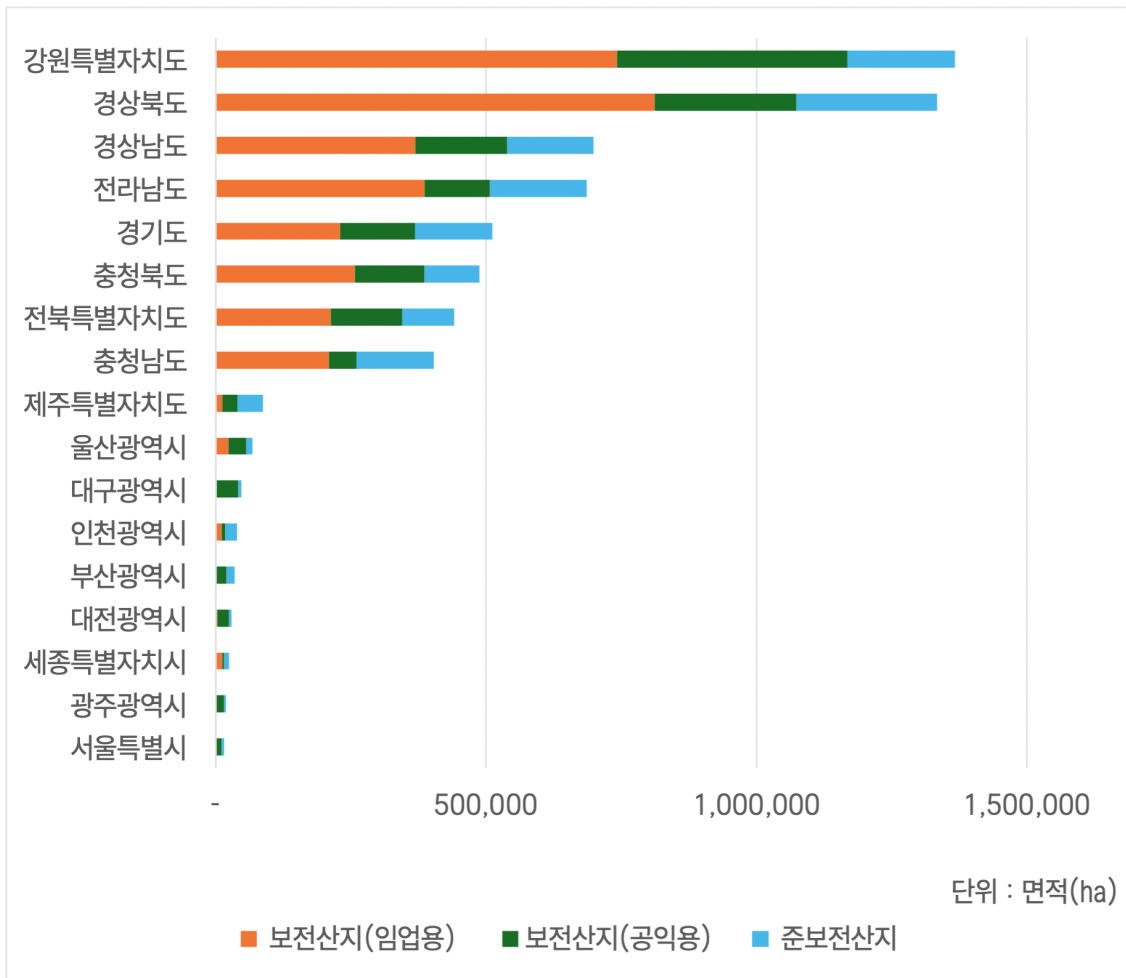


[그림 3-3] 2020년 행정구역별 산림면적 대비 임목축적 밀도(단위:m³/ha)

자료: 산림청 2020 산림기본통계

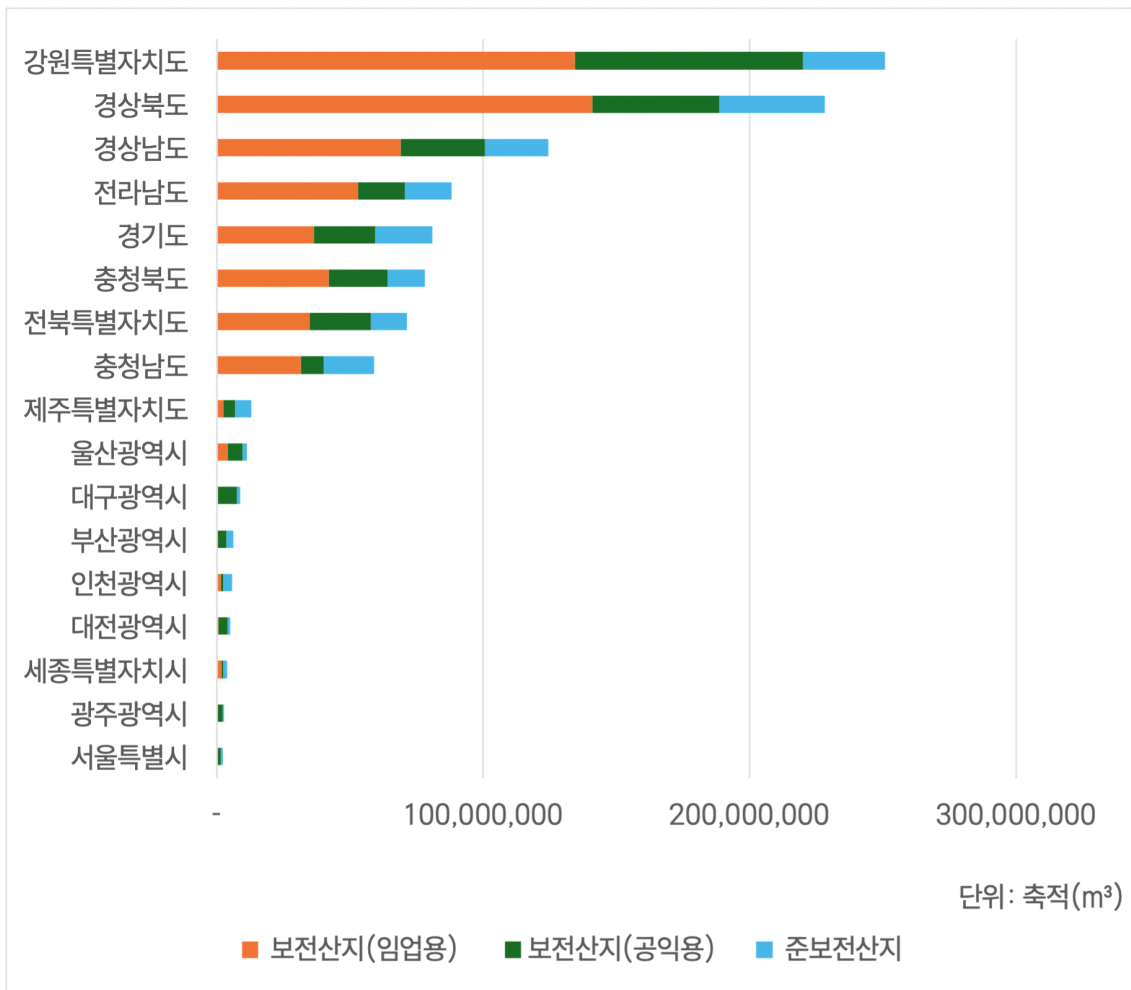
나. 산지구분별 산림면적 및 임목축적

산림자원의 실질적인 활용 가능성을 평가하기 위해서 법률적 규제 환경과 토지 소유 구조를 종합적으로 검토해야 한다. 보전산지와 준보전산지로 구분되는 행정구역별 산지구분 분석 결과, 산림면적과 임목축적 모두 목재 생산 등 임업적 활동이 상대적으로 용이한 임업용 보전산지가 차지하는 비중이 높다. 강원도는 가장 넓은 산림면적을 점유하며 가장 높은 임목축적을 기록하여 다른 행정구역보다 높은 자원량을 가지고 있다. 하지만 [그림 3-4, 3-5]에서 강원도의 경우 임업용 보전산지의 비중이 크지만, 다른 지역에 비해 공익용 보전산지의 비중이 큰 것을 알 수 있다. 이를 통해 법률적 규제 환경이 행정구역마다 경제성 또는 보전으로 다른 성격을 가질 수 있는 점을 확인할 수 있다.



[그림 3-4] 2020년 행정구역별 산지구분별 산림면적

자료: 산림청 2020 산림기본통계



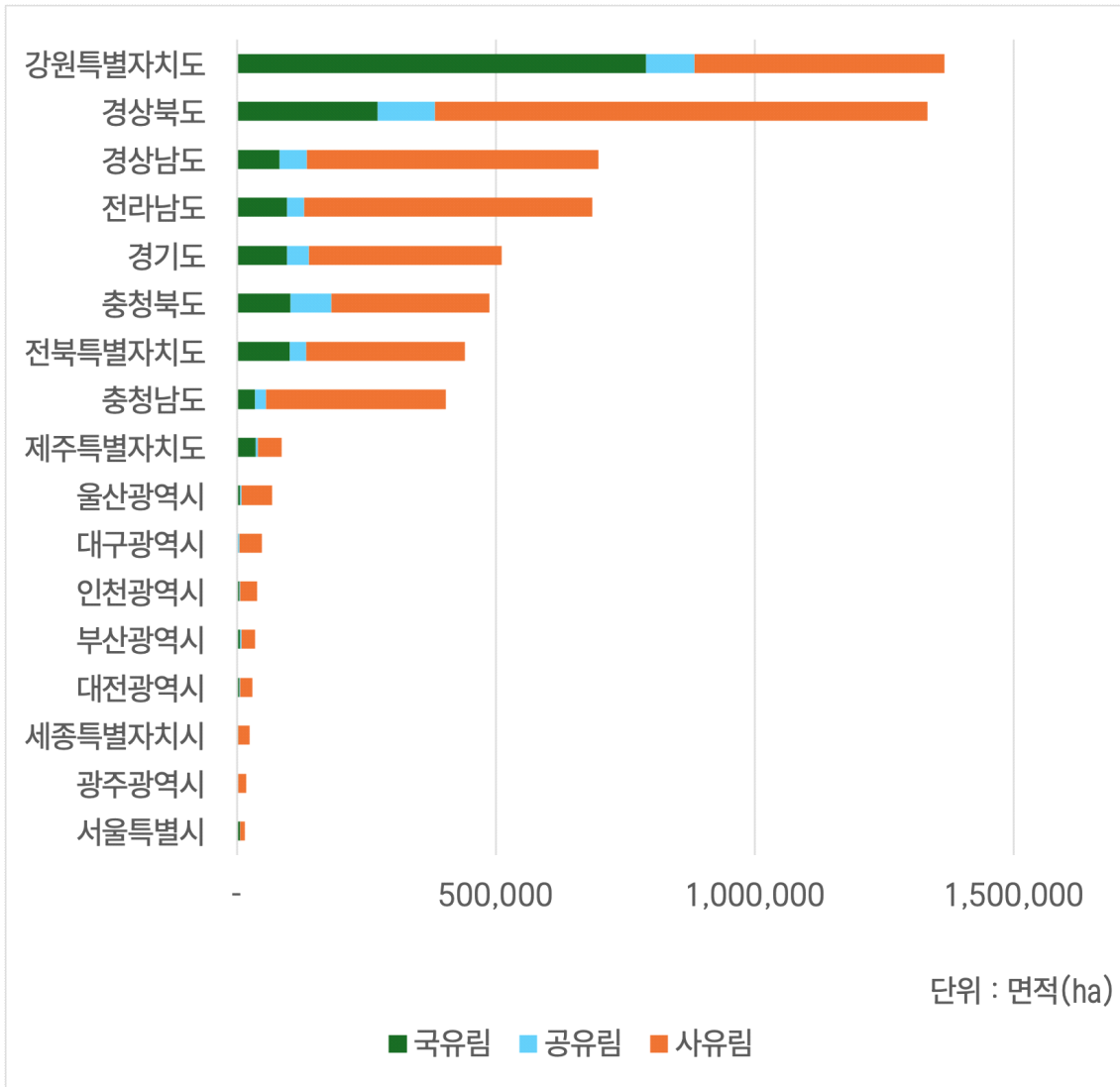
[그림 3-5] 2020년 행정구역별 산지구분별 임목축적

자료: 산림청 2020 산림기본통계

다. 소유구분별 산림면적 및 임목축적

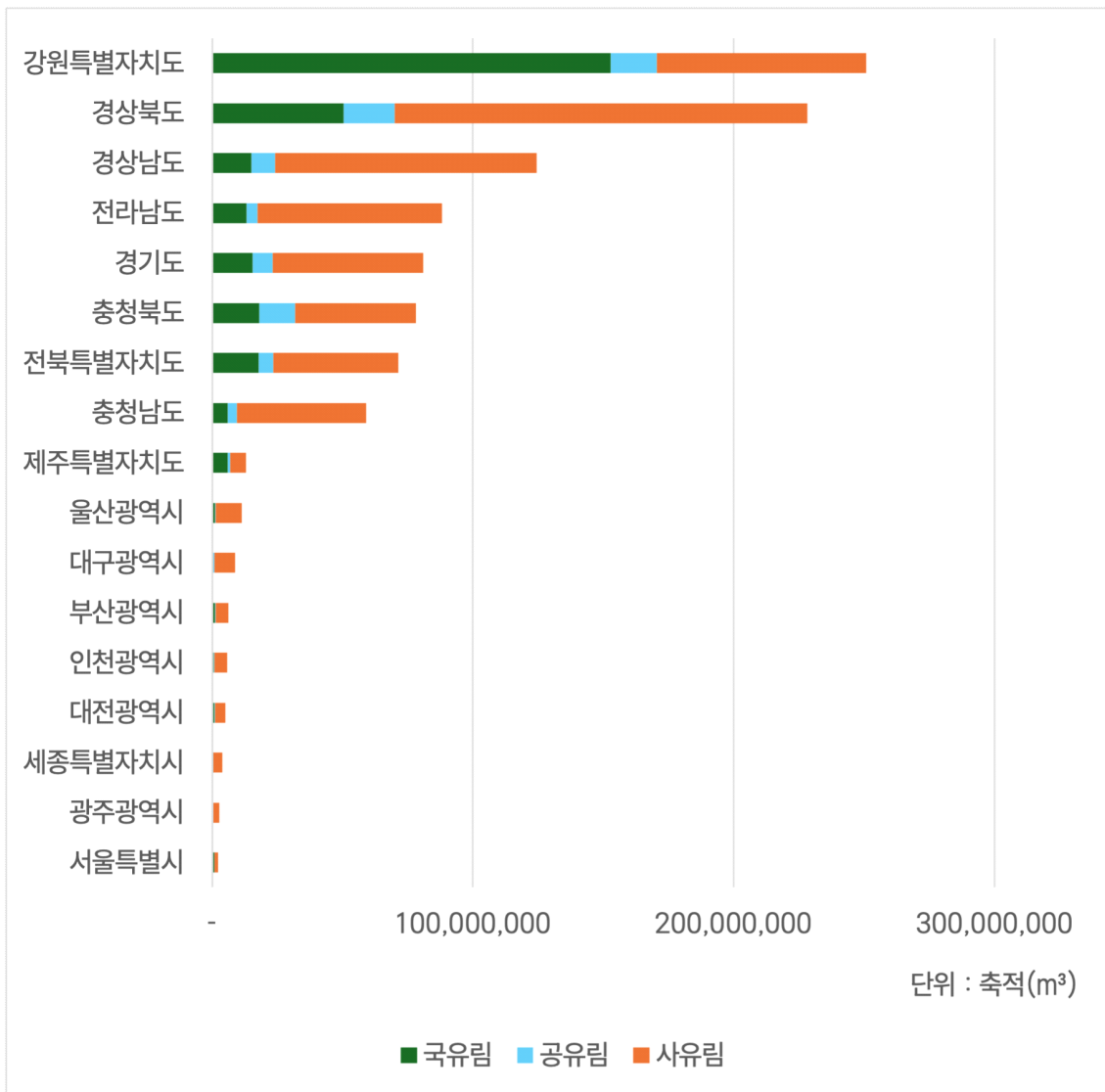
산림 정책의 핵심 대상인 소유 주체별 현황을 파악하기 위해 소유구분(국유림, 공유림, 사유림)에 따른 면적과 임목축적을 분석하였다. 2020년 기준 국내 총 산림면적 6,286천ha 중 사유림이 4,162천ha로 전체의 약 66%를 차지하고 있으며, 국유림은 26.2%, 공유림은 7.6% 순으로 나타났다.

[그림 3-6, 3-7]에서 보듯이, 이러한 사유림 편중 현상은 면적과 임목축적 모두에서 전국적으로 유사하게 나타났다. 이는 산림 정책 수립 시에 정부 주도의 국유림뿐만 아니라 다수의 개인 산주의 참여를 유도하는 방안이 핵심적으로 고려되어야 함을 나타낸다.



[그림 3-6] 2020년 행정구역별 소유구분별 산림면적

자료: 산림청 2020 산림기본통계



[그림 3-7] 2020년 행정구역별 소유구분별 임목축적

자료: 산림청 2020 산림기본통계

3. 산림의 생태적 구조 분석

가. 국내 산림 생태 구조 분석: 임상

산림의 생태적 구조를 파악하기 위하여 국내 산림의 임상에 따른 산림 면적(ha)과 임목축적(m³) 현황을 분석하였다. 면적과 임목축적은 앞의 분석 결과와 마찬가지로 지역별 총량 순위 및 구성비율에 있어 매우 유사한 패턴을 보였다. 이는 특정 임상이 다른 임상에 비해 비정상적으로 밀도가 높거나 낮지 않고 면적과 자원량이 비례하고 있음을 보여준다. 주요 분석 결과는 다음과 같다.

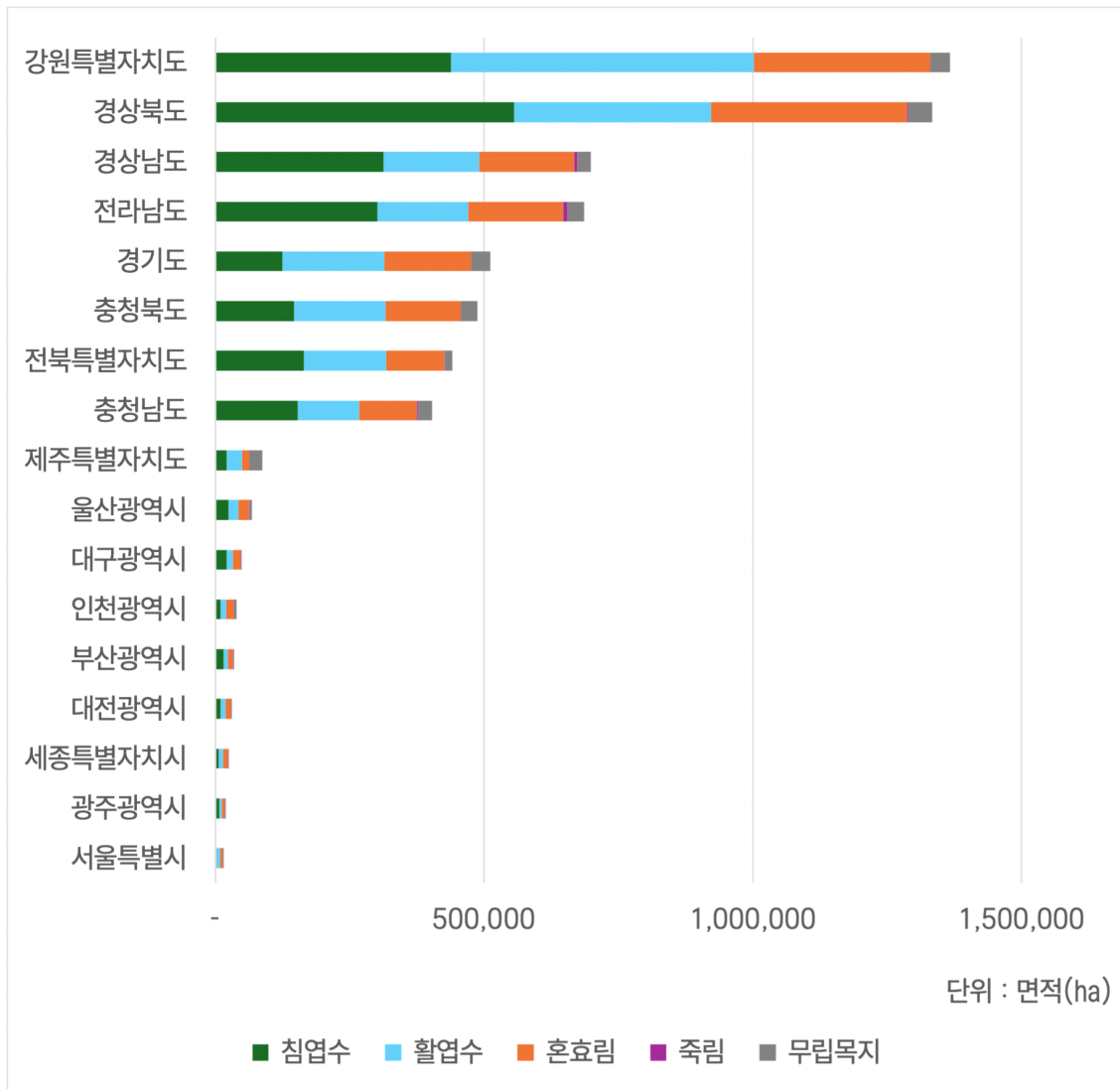
- 1) 침엽수림 우세 지역: 경상북도, 경상남도, 전라남도는 타 시도 대비 '침엽수림'의 비중이 뚜

릿하게 높게 나타났다. 특히 경상남도의 임목축적을 보면 침엽수림 자원량이 활엽수림보다 많아, 국가 주도의 조림 정책 영향을 받은 지역의 침엽수 기반 바이오매스 잠재력이 높음을 시사한다.

2) 주요 임상 공존 지역: 강원특별자치도는 전국 1위의 총 산림 자원을 보유하고 있으며, 면적 상으로는 활엽수림이 가장 넓게 분포하지만 축적량에서는 침엽수림이 가장 높아 침엽수림, 활엽수림, 혼효림 모두 풍부하게 발달한 것이 특징이다. 강원 지역은 특정 수종에 치우치지 않고 거대한 규모의 다양한 임상 자원이 고르게 확보되어 있음을 알 수 있다.

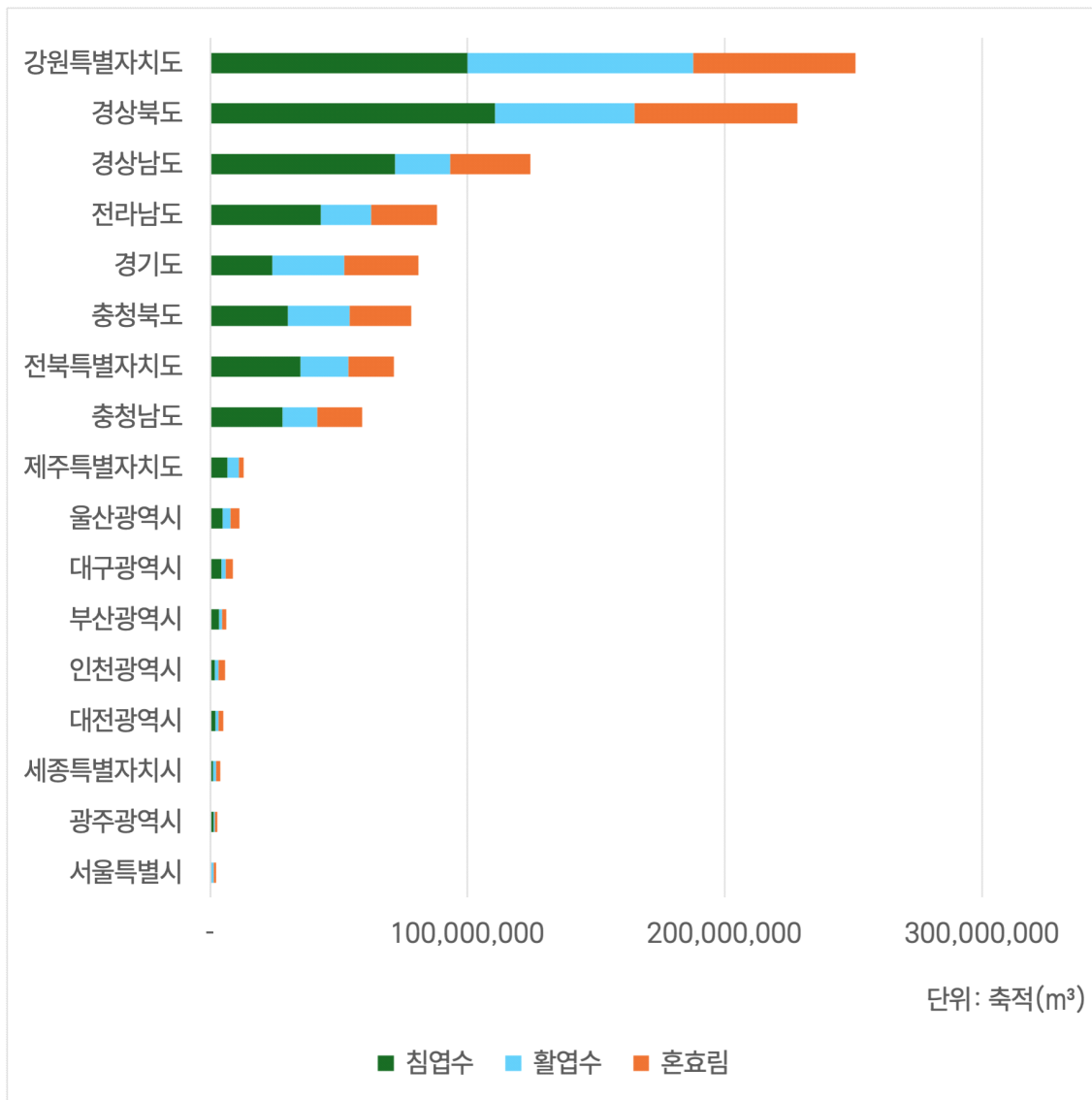
3) 활엽수림 및 혼효림 우세 지역: 경기도, 충청북도 등 중부 일부 지역에서는 앞선 지역들과 달리 활엽수림과 혼효림의 비중이 침엽수림보다 높게 나타났다.

본 분석을 통해 바이오매스 공급 잠재력은 지역별로 상이한 임상 구조에 따라 수종별로 세분화하여 추정해야 함을 확인하였다.



[그림 3-8] 2020년 행정구역별 임상별 산림면적

자료: 산림청 2020 산림기본통계



[그림 3-9] 2020년 행정구역별 임상별 임목축적

자료: 산림청 2020 산림기본통계

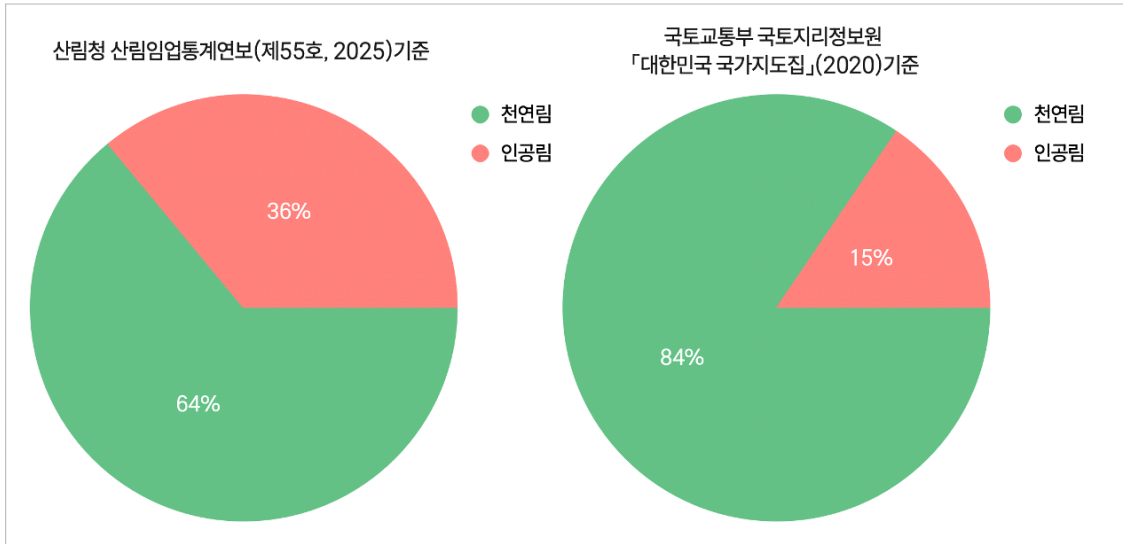
나. 국내 산림 생태 구조 분석: 인공림 및 자연림

본 연구는 국내 산림의 인공림(조림지)과 천연림(자연림)의 분포 현황을 분석하고, 이에 투입된 정책적 노력(조림 및 숲가꾸기) 대비 실제 생태적 성과를 평가하여 향후 정책 전환의 타당성을 검토하였다.

1) 인공림 면적의 통계적 불일치 (36% vs 15.5%)

산림청 산림임업통계연보 제55호(2025)에 따르면 산림 현황 중 전체 산림의 약 36%가 인공림인 것으로 발표했다. 그러나 국토교통부 국토지리정보원에서 발간한 「대한민국 국가지도집(The

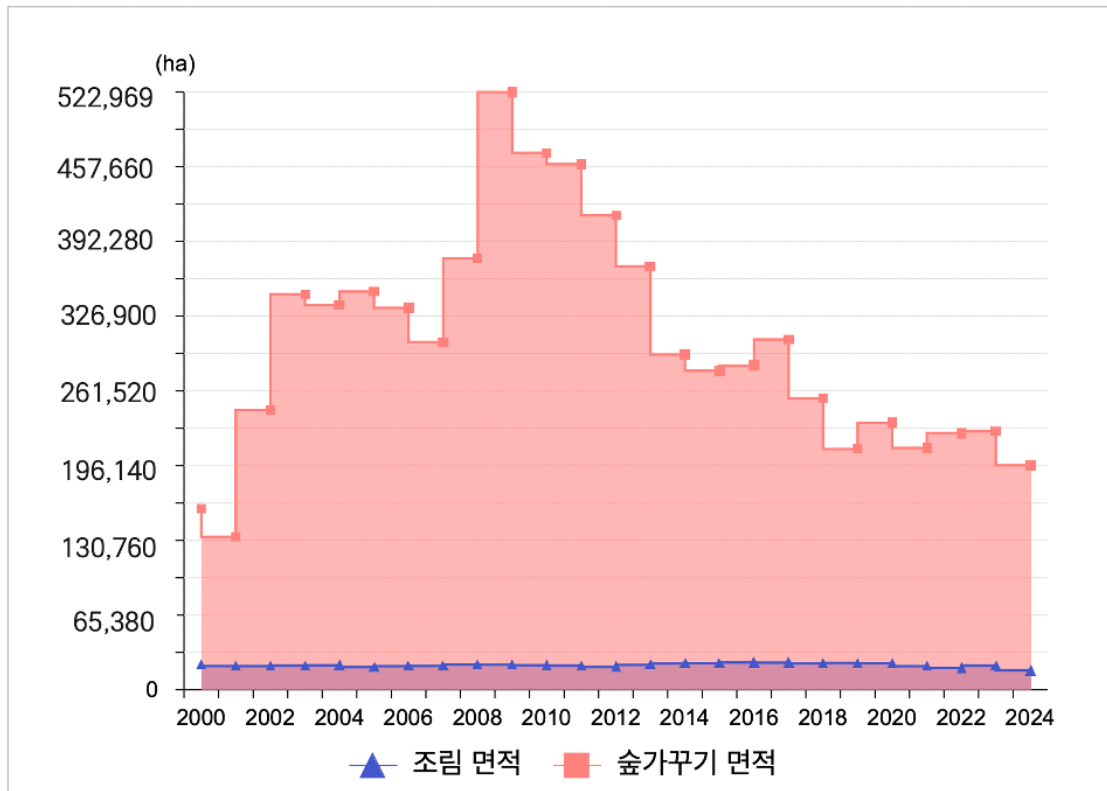
National Atlas of Korea)』(2020)에 따르면 인공림은 약 15.5%이며 이는 지형·지질·생태 등 다양한 분야의 전문가가 참여하여 추산한 결과이다. 이처럼 약 20%p 이상의 통계적 격차는 지난 60여 년간 조림되었으나 실제로는 우리 기후와 토양에 적응하지 못하고 도태되거나 자연림으로 천이된 면적이 상당함을 시사한다.



[그림 3-10] 통계 출처별 천연림 및 인공림 구성 비율 비교

2) 조림 정책의 구조적 모순: 고비용 저효율의 관 주도 사업

이러한 낮은 생존율은 조림 사업의 투입 구조와 비교할 때 비효율성이 나타난다. 본 연구에서 2000년부터 2024년까지의 '재원별 조림실적'과 '숲가꾸기 실적'을 분석한 결과, 지난 24년간 연평균 약 21,678ha의 조림과 조림 면적의 13배에 달하는 연평균 약 301,753ha의 면적으로 숲가꾸기 사업이 지속적으로 이루어졌다. 이는 매년 막대한 행정력과 예산이 투입되었음을 보여준다.



[그림 3-11] 연도별 조림 및 숲가꾸기 면적 추이(2000~2024)

자료: 산림청 산림임업통계연보(2000~2024)

특히 조림 사업비의 재원 구조를 분석한 결과, 국비와 지방비를 합친 공공재원 부담률이 면적 기준 96.93%에 달하는 것으로 나타났다. 전체 산림의 66%가 사유림임에도 불구하고, 산주의 자부담 비율은 약 3%에 그쳤다. 숲가꾸기 사업 또한 100% 보조(국비50%, 지방비50%)로 이루어져, 사실상 산림 경영이 민간의 자발적 투자가 아닌 정부 주도의 보조금 사업으로 유지되어 왔음을 시사한다.

매년 조림 사업비로 약 97%의 공공재원을 투입하여, 연평균 약 31만 ha에 달하는 산림에 대해 조림 및 숲가꾸기 사업을 실행했음에도 불구하고 실제 생존한 인공림이 15.5%에 불과하다는 것은 인공 조림 중심의 산림 정책이 생태적·경제적 한계에 봉착했음을 보여주는 결정적 증거이다.

3) 주요 수종의 생태적 부적응과 자연림의 회복력

- 낙엽송 및 잣나무 조림지의 쇠퇴: 김세미 등(2013)의 연구에 따르면, 과거 대표적 조림 수종이었던 일본잎갈나무(낙엽송) 조림지는 시간 경과에 따라 생장이 둔화되고 신갈나무 등 자생 식생으로 천이되는 경향을 보인다. 이는 낙엽송이 국내 기후 및 토양 환경에서 장기적인 적응에 한계를 보이고 있음을 시사한다. 또한, 잣나무 조림지는 기후변화로 인한 스트레스로 재선충병 등 병해충 피해에 취약해지고 있다.
- 리기다소나무 및 소나무 인공림의 천이 경향: 장예나 등(2019)에 따르면, 과거 사방사업 등

으로 식재된 아까시나무와 리기다소나무, 그리고 일부 소나무 인공림의 세력이 전반적으로 쇠퇴하고 있는 것으로 나타났다. 반면, 이들 군집의 대다수는 갈참나무군락 등 참나무류 중심의 자생 식생으로 천이될 잠재성을 보이고 있어, 인위적인 간섭 없이도 숲이 자연적인 회복 과정을 밟고 있음을 확인하였다.

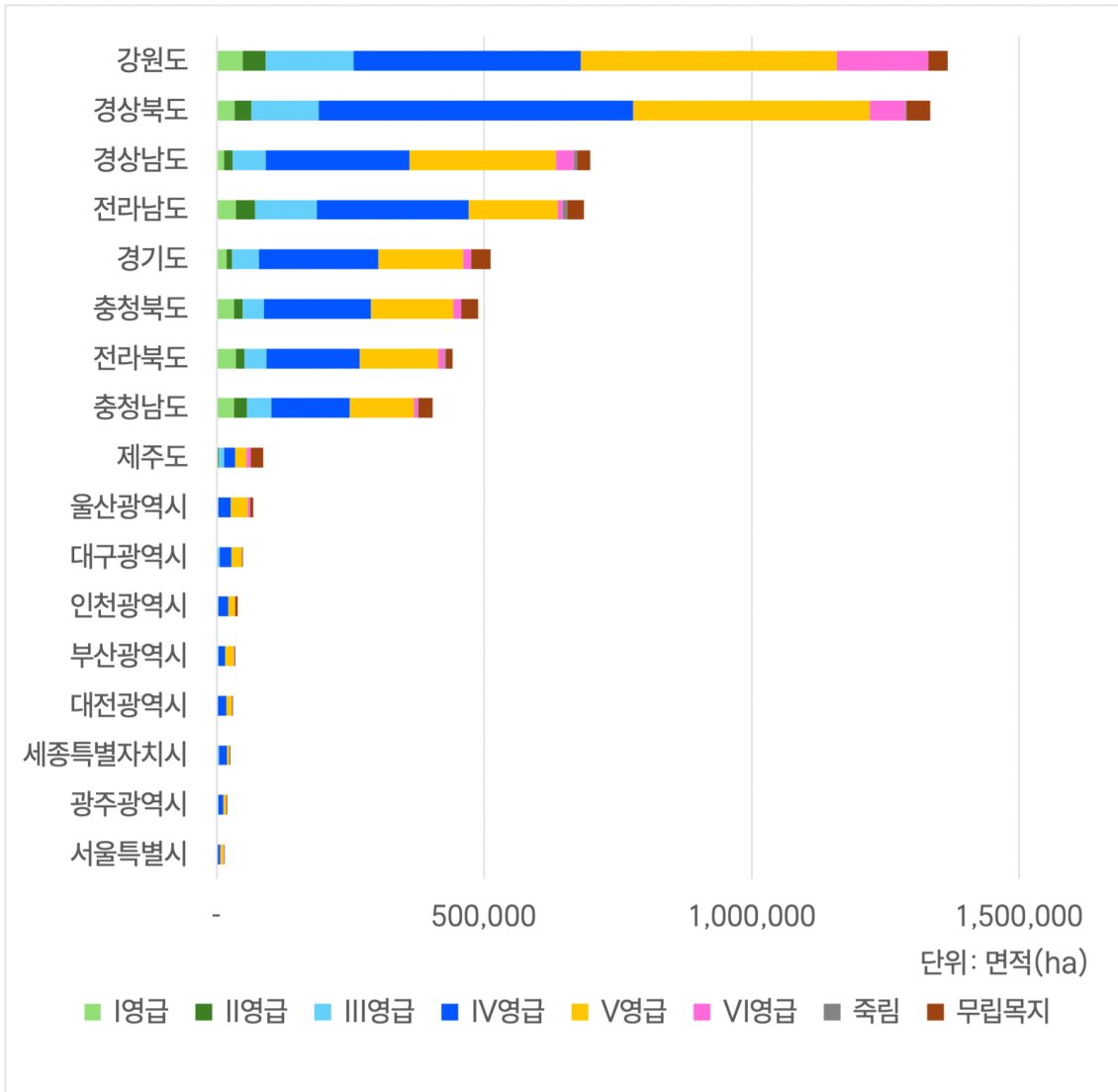
- 참나무류의 우수한 회복력: 이수인 등(2018)의 연구에 따르면, 건조 스트레스 조건에서 상수리나무(참나무류)는 소나무보다 지상부 생장이 더 우수하여 강한 내성을 보였다. 또한 낙엽의 유무, 깊이 등 환경적 요인을 고려할 때 참나무류가 초기 정착에 훨씬 유리한 것으로 나타났다. 이는 인위적인 조림 없이도 자연림(참나무류)이 기후변화(가뭄)에 더 잘 적응하고 스스로 숲을 유지(자연 갱신)할 수 있는 능력을 갖추고 있음을 과학적으로 입증한다.

4) 정책 전환 시사점

따라서 기후변화 대응을 위한 산림 정책은 '베고 심기(인공 조림)'에 과도한 국고를 투입하는 방식에서 탈피해야 한다. 대신 자연 갱신(Natural Regeneration)을 유도하고, 이미 생태적으로 검증된 천연림을 보전·관리하는 저비용 고효율의 정책으로 전환하는 것이 타당하다. 이는 예산 효율성을 높일 뿐만 아니라, 생물다양성과 기후 회복력이 뛰어난 건강한 숲을 조성할 수 있게 할 것이다.

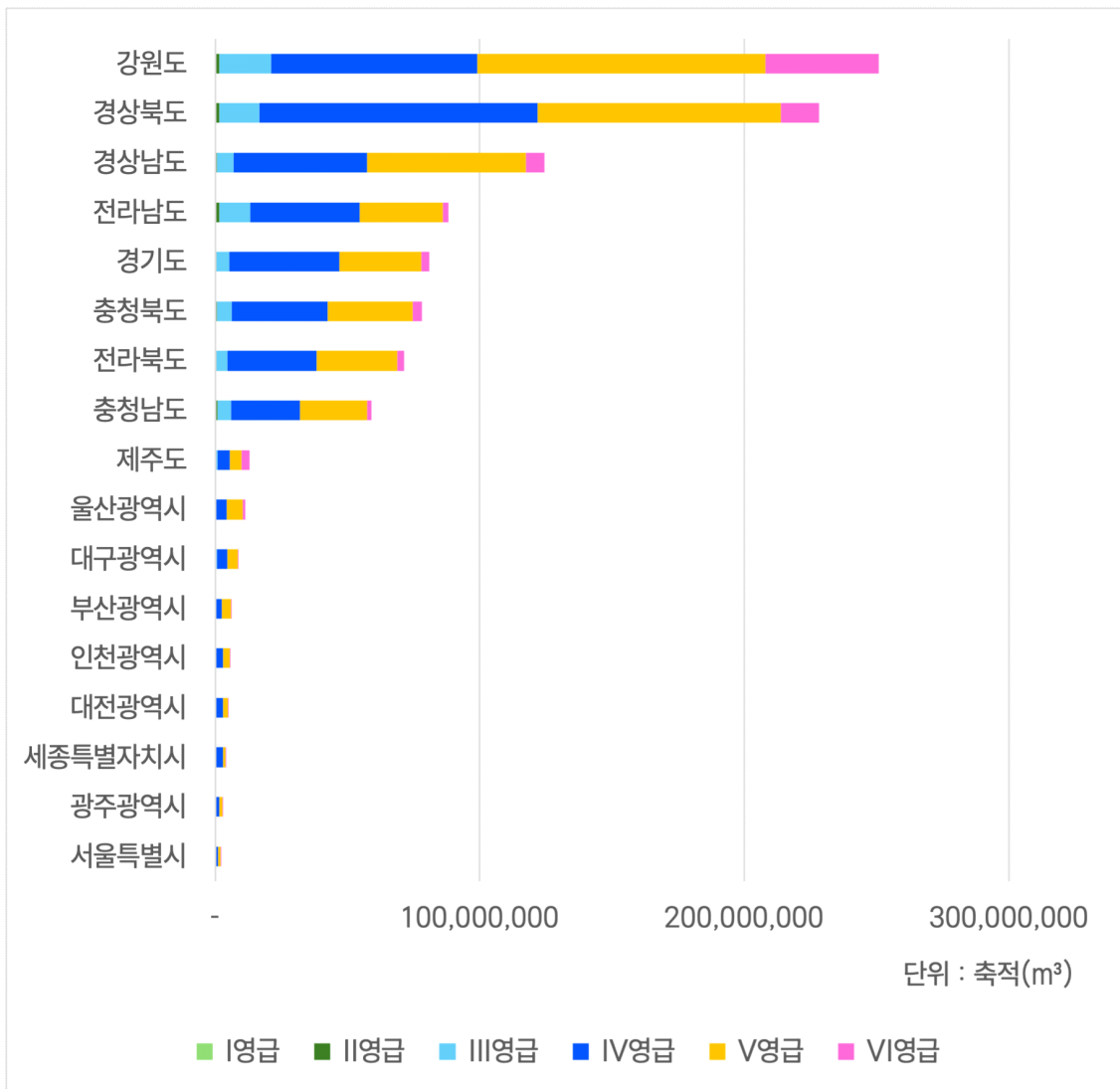
다. 국내 산림 생태 구조 분석: 영급

수확 가능 자원을 정밀하게 파악하기 위하여 영급별 산림 현황과 법적 기준인 기준 벌기령을 연계하여 분석하였다. 국내 산림은 IV영급(31~40년생), V영급(41~50년생)이 전체 산림 면적의 약 77%를 차지하고 있다. 임목축적의 경우도 IV영급과 V영급으로 주로 구성되어 있다.



[그림 3-12] 2020년 행정구역별 영급별 산림면적

자료: 산림청 2020 산림기본통계



[그림 3-13] 2020년 행정구역별 영급별 임목축적

자료: 산림청 2020 산림기본통계

라. 임령별 탄소 흡수량 변화 및 노령림의 생태적 가치

본 연구는 기후변화 대응을 위한 최적의 산림 관리 방안을 도출하기 위해 나무의 임령과 탄소 흡수 능력 그리고 현행 탄소 저장량 산정 방식의 한계를 종합적으로 분석하였다.

<표 3-1> 주요 수종별 연간 이산화탄소 흡수량(tCO₂/ha/년)

수종	임령												
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
강원지방 소나무	7.5*	9.6	10.1	10.0	9.6	9.0	8.2	7.5	6.7	6.0	5.4	4.7	4.2
충부지방 소나무	3.5*	5.2*	6.9*	15.8	12.4	9.0	6.4	4.6	3.3	2.4	1.8	1.4	1.1
잣나무	5.4*	10.6	11.8	11.6	10.8	9.9	9.1	8.3	7.6	7.0	6.5	6.1	5.7
낙엽송	9.1*	9.4	10.5	10.0	9.5	8.9	8.5	8.1	7.9	7.6	7.5	7.3	7.2
리기다 소나무	4.5*	10.5	13.9	13.8	12.4	10.5	8.7	7.1	5.8	4.8	4.1	3.5	3.1
편백	5.2*	8.0	8.8	8.8	8.2	7.4	6.6	5.8	5.2	4.6	4.1	3.7	3.4
상수리 나무	11.2*	13.1*	15.9	14.9	14.0	13.1	12.3	11.6	10.9	10.4	9.8	9.3	8.9
신갈나무	8.6*	11.9*	15.0	11.8	9.3	9.1	8.4	7.9	7.5	7.1	6.8	6.5	6.3

* 임분수확표에 없는 자료로 추정치를 적용한 값임.

** 임분수확표의 임분단위 자료를 활용하였기 때문에 임령기준의 흡수량을 제시함.

자료: 국립산림과학원 <2019 주요 산림수종의 표준탄소흡수량>

1) 기존 관점: 단위 면적당 흡수 효율성

국립산림과학원의 <주요 수종별 연간 이산화탄소 흡수량>에 따르면, 단위 면적(ha)당 연간 탄소 흡수량은 소나무 25년생, 낙엽송 20년생 등 20~30년생 숲에서 정점을 이룬다. 이는 어린 숲이 뼉뼉하게 자라면서 서로 경쟁하며 빠르게 성장하는 시기이기 때문이다. 현행 순환 벌채 정책은 이 데이터를 근거로 “탄소흡수량이 떨어지는 나이 든 나무를 베고 어린나무를 심자”고 주장한다.

2) 현행 탄소 저장량 산정 방식(IPCC 가이드라인)의 한계

그러나 현재 통용되는 탄소 저장량 측정 방식은 구조적 한계를 가진다. 산림을 온실가스 감축 실적으로 인정받기 위해서는 IPCC 가이드라인에 따라 탄소저장량을 산정·보고해야 한다. 현행

방법론은 주로 임목축적에 배출계수를 곱하여 '목재(지상부 바이오매스)'와 '뿌리(지하부 바이오매스)' 부분의 탄소 저장량만을 산정하고 있다. 하지만 이 방식은 숲의 탄소 저장고에서 큰 비중을 차지하는 토양과 낙엽층의 탄소 저장량을 반영하지 못한다. 따라서 토양과 낙엽층에 막대한 탄소를 저장하고 있는 노령림의 가치가 과소평가되고 단순히 성장이 빠른 어린 숲의 가치만이 과대평가되는 결과를 가져온다.

3) 노령림의 절대적 저장 가치와 생태적 기능

현행 측정 방식에서 누락된 가치를 고려하였을 때 노령림은 단순히 노쇠한 숲이 아니라 기후변화에 대응하여 다양한 이점을 가지는 자산이 될 수 있다.

가) 개체목의 지속적 성장

Stephenson et al.(2014)의 연구에 따르면, 전 세계 6대륙의 403종, 67만여 그루의 나무를 정밀 분석한 결과 대다수의 수종에서 나무는 크고 나이가 들수록 탄소 흡수 속도가 지속적으로 증가하는 것으로 밝혀졌다. 이 연구에서는 흉고직경 100cm의 큰 나무 한 그루는 10cm의 작은 나무에 비해 약 52배 더 많은 지상부 질량을 매년 축적한다. 이는 높은 나무 한 그루를 베어내고 어린 나무 수십 그루를 심는 것보다, 기존의 큰 나무를 보존하는 것이 탄소 흡수에 훨씬 효과적임을 시사한다. 이러한 현상은 '대사 스케일링 이론(Metabolic Scaling Theory)'에 의해 뒷받침된다. 나무의 직경이 커짐에 따라 잎의 총면적은 제곱으로 증가하며, 노화로 인한 세포 효율 저하를 압도할 만큼 광합성 총량이 늘어나기 때문이다.

또한 숲 전체의 탄소 흡수량에서 큰 나무가 많은 비중을 차지한다. 미국 서부 노령림 데이터 분석 결과, 직경 100cm를 초과하는 거대목은 전체 개체 수의 약 6%에 불과했으나 숲 전체 연간 성장량(탄소 흡수량)의 33%를 담당하는 것으로 나타났다. 이러한 점은 산림 정책이 단순한 본수 확대가 아닌 대경목 육성 및 보존으로 전환되어야 함을 시사한다.

해당 연구는 한국 산림의 주종을 이루는 소나무속(Pinus), 참나무속(Quercus), 전나무속(Abies) 등을 광범위하게 포함하여 분석되었다. 이는 생물학적으로 동일한 성장 메커니즘을 공유하므로 한국의 40~50년생 숲 또한 벌채 대상이 아닌 핵심적인 탄소 흡수원으로 재평가되어야 한다.

나) 토양 탄소 저장

(1) 노령림의 탄소 흡수 능력

Luyssaert et al.(2008)은 800년 된 숲도 여전히 순 탄소 흡수원으로 기능함을 입증하였다. 특히 이 연구는 200년 이상 된 노령림이 연간 헥타르당 평균 2.4(±0.8)톤의 탄소를 흡수하며, 이 중 절반 이상인 약 1.3(±0.8)톤이 뿌리와 토양 유기물 형태로 지하에 축적된다는 사실을 밝혀냈다. 이는 나이든 나무를 베어내는 것이 지하에 저장되어 있는 탄소를 대기 중으로 탄소를 재배출하는 위험한 행위임을 시사한다. 해당 연구에서는 갱신 벌채 과정에서 벌채 후 오히려 어린 나무를 심

는 초기 단계에서 숲이 이산화탄소 배출원이 될 수 있다고 지적한다. 벌채로 인한 토양 교란으로 기존에 축적된 유기물의 분해 속도(타가 영양 호흡)가 급증하여, 어린 묘목의 탄소 흡수량을 압도하기 때문이다. Luysaert et al.의 분석은 전 세계 519개 지역의 산림 데이터 기반으로 연구 대상의 약 70%가 온대림(Temperate forests)으로 구성되어 있다. 연구 대상지인 온대림과 한대림 모두에서 ‘나이 든 숲이 탄소를 계속 흡수한다’는 일관된 패턴을 밝혀냈다.

(2) 활엽수림의 토양 탄소 저장 능력

국내 산림을 대상으로 한 Lee et al.(2020)의 연구에 따르면, 산림 유형에 따라 탄소 저장 패턴이 뚜렷하게 구분된다. 침엽수림은 낙엽이 잘 분해되지 않아 탄소를 주로 지표면의 낙엽층(4.63 t C ha⁻¹)에 저장하는 반면, 활엽수림은 낙엽 분해가 빨라 유기물이 토양 속으로 유입되면서 토양(44.11 t C ha⁻¹)에 침엽수림(33.96 t C ha⁻¹)보다 월등히 많은 탄소를 저장하는 것으로 나타났다. 이는 인공 조림된 침엽수림보다 천연 활엽수림이 장기적이고 안정적인 탄소 저장고임을 시사한다.

(3) 심토층 저장과 기후 안정성

노령림의 토양 탄소는 기후변화에 대한 저항성도 높다. Gleixner et al.(2009)은 독일의 250년 된 너도밤나무 숲 연구를 통해 노령림이 표토뿐만 아니라 깊은 토양층(Subsoil)에 지속적으로 탄소를 축적함을 밝혀냈다. 침엽수림이 주로 저장하는 낙엽층의 탄소는 산불이나 기온 상승 시 쉽게 대기로 재배출될 위험이 크지만 노령 활엽수림이 광물 토양층(Mineral soil) 깊숙이 저장한 탄소는 외부 교란으로부터 안전하게 격리된다. 또한 이수호 & 박영대(2024)의 연구에서도 신갈나무 우점 임분의 토양 탄소 저장량이 다른 임분에 비해 유의미하게 높게 나타나, 임령이 높고 성숙한 숲일수록 생태계가 안정되어 탄소 저장 효율이 높아짐을 확인하였다.

다) 노령림의 생태적 가치

(1) 생태계 다기능성(Ecosystem Multifunctionality)과 구조적 다양성

Lee et al.(2025)의 연구는 숲이 오래될수록 임분의 구조적 다양성이 높아져 ‘생태계 다기능성(EMF)’이 향상됨을 입증했다. 노령림은 다양한 수고(나무 높이)와 흉고직경을 가진 나무들이 섞여 있고, 숲 틈(Gap)이 형성되는 등 구조적으로 복잡하다. 이러한 이질성은 빛, 수분, 영양분 등 자원의 이용 효율을 높이고 다양한 생물종이 공존할 수 있는 미세 서식지를 제공한다.

(2) 서식지 연속성(Continuity)과 희귀종 보전

노령림 보전의 핵심은 물리적인 숲의 형태뿐만 아니라 ‘시간의 연속성’을 지키는 데 있다. Majdanová et al.(2023)은 목재 서식 균류 연구를 통해, 250년 이상 벌채 없이 유지된 숲(서식지 연속성)이 희귀종 및 적색 목록(Red-list) 종의 생존에 결정적임을 밝혀냈다. 단순히 고사목의 양

을 늘리는 것만으로는 부족하며, 오랜 시간 단절 없이 유지된 숲의 역사가 생물다양성 보전의 필수 조건이라는 것이다.

(3) 기후 회복력 및 재해 방어

JRC/EU(2023) 보고서와 Carroll et al.(2025) 연구에 따르면, 노령림은 단순한 노쇠화 단계가 아니라 시공간적 규모에 걸쳐 생태계의 온전성을 지탱한다. 노령림이 지닌 수직적·수평적 이질성(Heterogeneity)과 울창한 수관은 숲 바닥에 그늘을 드리워 온도를 낮추고 수분을 유지하는 단열 효과(Insulating effect)를 가진다. 이는 기후 재난 상황에서 산불의 발화와 확산을 억제할 수 있다. 특히, 건조한 미세 잔해물로 인해 화재 취약성이 높은 획일적 인공림과 달리 노령림 내의 부해되는 굵은 고사목(Coarse woody debris)은 다량의 수분을 함유하여 불의 기세를 꺾는 역할을 수행한다. Youn et al.(2026)에 의하면 우리나라 산림에서도 임분의 연령이 높아질수록 산불 발생 확률이 낮아지는 것으로 확인되었다.

Cheon et al.(2025)은 계방산 연구를 통해 고해발 지역의 노령림이 갖는 높은 종 다양성을 확인하였으며, 이는 혹독한 환경에서도 환경 여과(Environmental Filtering)를 통해 적응한 종들이 살아남는 결정론적 과정의 결과임을 제시했다.

이처럼 노령림은 다양한 생물종을 위한 기후 피난처(Climate refugia)를 제공함과 동시에 기후 위기 시대에 생태계 전반의 회복탄력성(Resilience)을 담보하는 자연 자산이다.

4) 결론 및 시사점

두 관점을 종합할 때, 목재와 뿌리 바이오매스만을 기준으로 30~40년생 숲을 벌채하는 현행 정책은 기후변화 대응에 오히려 역효과를 초래한다. 이러한 ‘베고 심기’ 식 접근은 토양 및 낙엽층에 축적된 막대한 탄소(Stock)를 일시에 유실시키고, 서식지의 연속성을 끊어 생물다양성을 훼손하며, 기후 재해에 대한 숲의 저항성을 약화시키는 결과를 가져온다. 특히 벌채 후 어린나무가 기존의 탄소 저장능력을 회복하기까지는 수십 년이 소요되므로, 이는 2050 탄소중립 목표 달성을 지연시키는 주요 원인이 된다.

따라서 향후 산림 정책은 단순 목재 생산과 탄소 흡수량(Flow) 위주의 접근에서 벗어나야 한다. 토양 탄소를 포함한 포괄적이고 구체적인 탄소 저장량 측정안을 조속히 도입하고, 전체 탄소 저장량(Stock)과 생태적 가치를 최우선으로 고려해야 한다. 나아가 활엽수림의 자연 갱신 유도 및 윤벌기 연장을 통해 산림의 생태적 건강성과 탄소 고정 능력을 극대화해야 한다.

제2절 산림자원 이용 행태 및 부가가치 분석

본 절에서는 산림에서 생산되는 자원의 이용 행태와 경제적 가치를 분석한다. 목재와 비목재 자원의 생산 현황을 비교 분석하여, 산림 정책 전환을 위한 경제적 기초 자료를 구축하는 데 목적이 있다.

1. 임산물 생산 현황 분석

가. 데이터 구축 및 분류 기준

본 분석은 산림청이 발간하는 <산림임업통계연보>의 2016년~2024년 '임산물 생산실적' 데이터를 기반으로 수행되었다. 분석의 정확도와 연구 목적의 적합성을 높이기 위해 품목을 목재 및 비목재 자원으로 재분류하였으며, 지역적 범위와 국유림 관리 주체를 다음과 같이 설정하였다.

- 목재 자원: 벌채를 통해 생산되며 바이오매스 에너지원이나 목재 제품으로 활용 가능한 품목
 - 포함 품목: 용재, 연료(장작 등), 수목부산물, 톱밥

- 비목재 자원: 산림 생태계를 보전하며 채취 가능한 단기소득임산물 및 부산물
 - 포함 품목: 수실류(밤, 감, 잣 등), 산나물, 버섯, 약용식물, 수액, 농용자재, 목초액, 섬유 원료, 수지(칠액), 은행잎, 자생란, 칩뿌리

- 분석 제외 항목:
 - 비생물/투입재: 토석, 양묘/조림
 - 비수확 자원: 순입목(벌채되지 않은 입목의 성장가치), 조경재/잔디(이식용 또는 관상용)
 - 기타: 기타부산물(성분 불명확으로 제외)

- 권역별 분석 범위
 - 수도권: 서울특별시, 경기도, 인천광역시
 - 충청권: 대전광역시, 충청남도, 세종특별자치시, 충청북도
 - 영남권: 대구광역시, 경상북도, 울산광역시, 부산광역시, 경상남도
 - 호남권: 광주광역시, 전라남도, 전북특별자치도
 - 강원: 강원특별자치도
 - 제주: 제주특별자치도

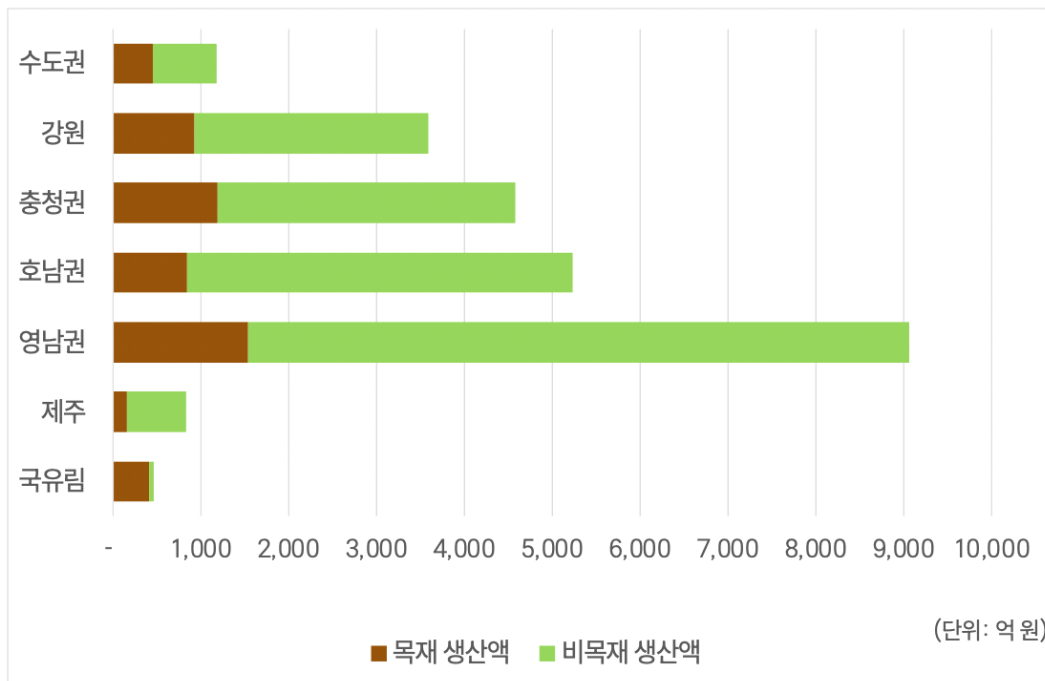
- 국유림 관리 주체 범위

- 지방산림청(5개청): 북부지방산림청, 동부지방산림청, 남부지방산림청, 서부지방산림청, 중부지방산림청
- 국립 연구 및 관리 기관: 국립산림품종관리센터, 국립산림과학원, 국립수목원

나. 임산물 생산액 및 구성 분석

지난 9년치 연평균 임산물 생산액 분석 결과에서 권역별 생산 규모의 격차가 뚜렷하게 나타났다. 영남권은 연평균 약 9,075억 원의 생산액을 기록하며 타 권역 대비 우위를 점하고 있으며, 호남권(약 5,273억 원)과 충청권(약 4,607억 원)이 그 뒤를 잇고 있다. 산림 자원이 풍부한 강원권은 약 3,615억 원으로 집계되었다. 반면, 국유림의 총생산액은 약 481억 원에 그쳐, 개별 권역 중 생산 규모가 가장 작은 제주(약 840억 원)보다도 낮은 수준을 보였다. 이는 국유림이 상업적 이익 창출보다는 자원 보전이나 장기적 경영에 치중되어 있음을 보여주는 지표이다.

임산물 생산 구성을 살펴보았을 때 국유림과 사유림 간의 구조적 차이가 극명하게 드러난다. 국유림을 제외한 모든 권역은 목재보다 비목재 임산물이 산업의 핵심축을 담당하고 있다. 특히 영남권과 호남권은 전체 생산액 중 비목재 임산물이 차지하는 비중이 83%에 달해 단기 소득 작물에 대한 의존도가 매우 높았으며, 제주(81%), 강원·충청(74%) 역시 유사한 경향을 보였다. 이와 대조적으로 국유림은 비목재 비중이 11%에 불과하고 목재 생산 비중이 약 89%를 차지하고 있다. 이는 국내 산림 경제가 비목재 소득 위주의 사유림과 목재 공급 위주의 국유림으로 이원화 되어 있음을 시사한다.



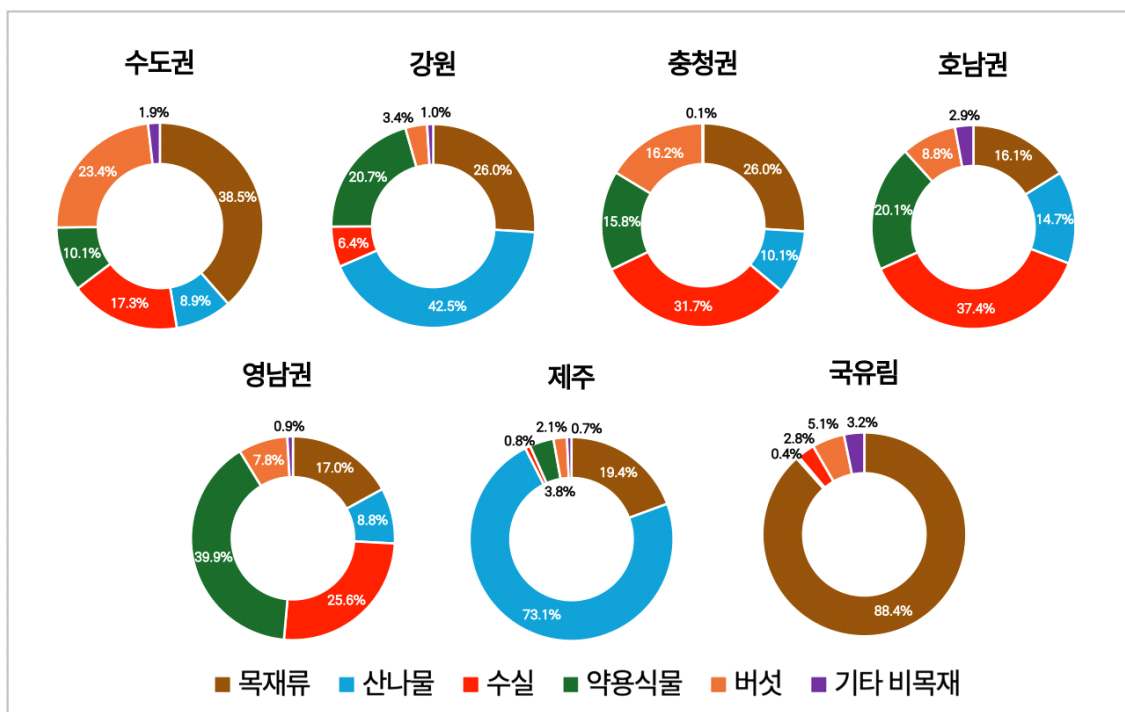
[그림 3-14] 권역별 연평균 임산물 생산액 및 구성(2016~2024)

자료: <산림청 2016~2024년 산림임업통계연보> 임산물 생산실적

어떤 품목이 각 지역의 경제를 부양하는 지 알아보고자 권역별 주력 생산 품목을 살펴보았다. 제주와 강원은 산나물 중심의 생산 구조를 보이고 있다. 특히 제주는 전체 생산의 73%가 산나물에 집중되어 있으며, 강원 역시 산나물이 43%로 가장 높은 비중을 차지한다. 영남권은 약용식물 생산 비중이 40%에 달해 타 권역 대비 월등히 높은 약초 재배 특화도를 보였으며, 호남권(37%)과 충청권(32%)은 수실류가 임산물 중 제1의 소득원으로 자리 잡고 있음이 확인된다. 이는 각 지역의 기후 및 지리적 특성에 따라 주력 임산물이 분업화되었음을 보여준다.

국유림은 타 권역과 완전히 차별화된 생산 구조를 보인다. 약용식물이나 산나물 등의 부가 소득 작물 비중은 0%에 가까운 반면, 목재류 생산 비중이 88%로 압도적이다. 이는 국유림이 상업적 단기 소득보다는 국가 목재 자원 비축 및 공급이라는 공익적·장기적 목표에 집중하고 있음을 나타낸다. 한편, 소비 시장과 인접한 수도권은 목재류(39%) 외에 상품성이 높고 신선도 유지가 중요한 버섯류 비중이 23%로 전국에서 가장 높게 나타났다. 이는 도시 근교라는 입지적 이점을 활용하여 고부가가치 시설 재배가 활성화된 결과로 해석된다.

대한민국 임업은 국유림의 목재 중심 경영과 각 권역의 비목재 소득 경영으로 이원화되어 있을 뿐만 아니라, 지역 별로 강원·제주(산나물), 영남(약용), 호남·충청(수실), 수도권(버섯)으로 주력 품목이 세분화되어 있다. 따라서 향후 임산물 육성 정책은 획일적인 지원보다는 각 권역이 이미 확보한 경쟁 우위 품목을 고도화하고, 권역별 특성에 맞춘 가공 및 유통망을 지원하는 방향으로 설계되어야 할 것이다.

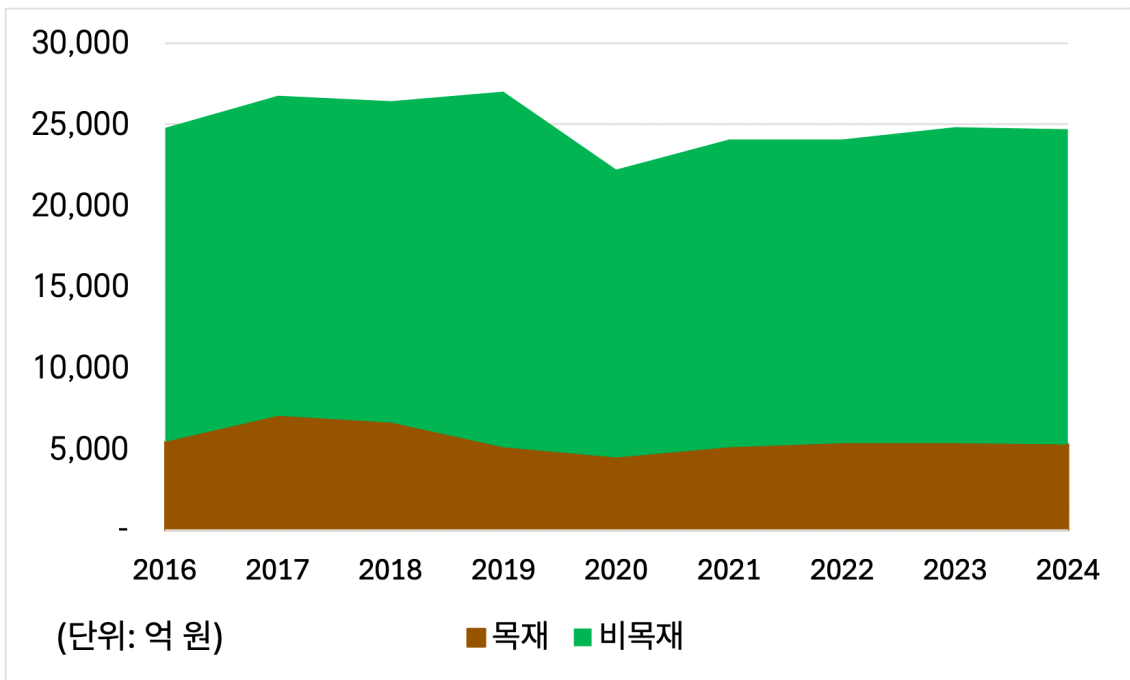


[그림 3-15] 권역별 주요 임산물 연평균 생산 비율 구성(2016~2024)

자료: <산림청 2016~2024년 산림임업통계연보> 임산물 생산실적

지난 9년간(2016~2024)의 임산물 생산액 추이를 분석하였다. 임업의 소득 구조는 비목재 임산물이 시장을 주도하는 것으로 나타났다. 분석 기간 중 비목재 생산액은 연평균 약 1.9조 원 규모를 유지하며, 약 5~6천억 원 수준인 목재 생산액 대비 3배 이상의 격차를 보였다. 이는 국내 임업 생산이 목재 벌채보다는 산나물, 수실류, 약용식물 등 단기 소득 임산물 위주로 형성되어 있음을 보여준다.

세부 시기별로 살펴보면 2020년을 기점으로 시장의 변동성이 크게 나타났다. 목재 생산액은 2017년 7,039억 원으로 정점을 찍은 후 하락세로 전환하여 2020년 4,505억 원으로 최저점을 기록했다. 비목재 생산액 역시 2019년 2조 1,892억 원으로 역대 최고치를 달성했으나, 이듬해인 2020년에는 1조 7,689억 원으로 약 19% 급감하며 동반 부진을 겪었다. 그러나 2021년 이후 회복세를 보이기 시작하여, 2022년부터 2024년까지는 목재(약 5,300억 원대)와 비목재(약 1조 9,000억 원대) 모두 큰 등락 없이 일정한 수준을 유지하였다. 이는 시장이 안정적으로 유지되고 있으나 한편으로는 새로운 성장 동력 없이 정체되어 있다는 의미로도 해석될 수 있다.



[그림 3-16] 임산물 생산액 추이(2016~2024)

자료: <산림청 2016~2024년 산림임업통계연보> 임산물 생산실적

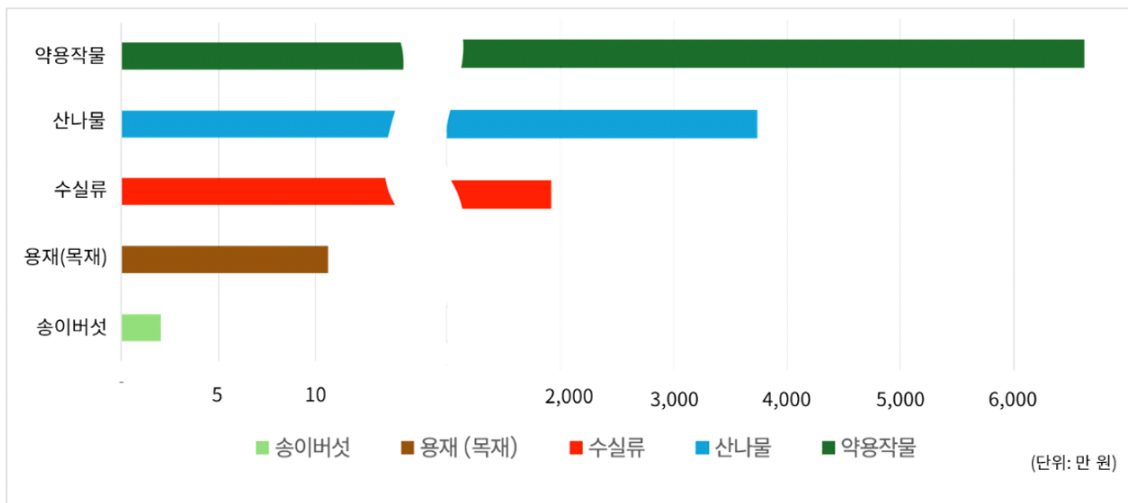
다. 단위면적 및 임가 가구당 부가가치 비교 분석

단순 총생산액 비교가 갖는 한계를 극복하기 위해 산림면적과 재배작물별 재배면적, 그리고 임가 수 데이터를 교차하여 단위면적(ha)당과 임가 가구당 실질 부가가치를 산출하였다. 분석 품목은 비목재 중 주요 품목인 산나물, 수실류, 약용작물, 송이버섯으로 설정하였다.

본 분석은 5년마다 공표하는 농림어업총조사(전수조사)의 2020년도 결과를 기반으로 하여 수

실류, 산나물, 약용작물 재배면적 및 임가수 통계의 대푯값으로 설정하였다. 용재의 경우 2020년 산림임업통계연보 통계에서 국유림을 제외한 공유림과 사유림의 산림면적을 재배면적으로 설정하였다. 송이버섯의 경우 재배 면적을 특정할 수 없는 생태적 특성을 반영하여, 국유림을 포함한 전국의 소나무림 전체 면적을 기준으로 단위면적당 수익성을 산출하였다³⁾. 단기 기상 조건 및 시장 가격 변동에 따른 생산액의 왜곡을 최소화하고자 해당 기준연도인 2020년도를 중심으로 하여 산림임업통계연보의 5개년(2018~2022년) 평균 생산액을 산출하였다.

전국 대상 단위면적(ha)당 임산물 수익성을 분석한 결과, 약용작물(약 6,625만 원/ha)과 산나물(약 3,742만 원/ha)이 목재 생산인 용재(약 10.6만 원/ha) 대비 높은 공간 효율성을 지니고 있음이 나타났다. 이는 국토 면적이 좁고 산림 지형이 가파른 국내 환경에서 토지 생산성을 높이기 위해 비목재 중심의 하층 경영이 필요하다.



[그림 3-17] 전국 대상 단위면적(ha)당 임산물 수익

주: (약용작물: 오미자, 산수유, 산양삼, 헛개나무, 구기자, 오갈피, 당귀, 수액채취작물, 기타약용작물)
 산나물: 취나물, 도라지, 더덕, 두릅, 고사리, 기타산나물
 유실수: 뽕, 밤, 호두, 대추, 잣, 은행, 복분자)
 자료: <2016~2024년 산림임업통계연보> 임산물 생산실적

전국 단위의 단위면적당 수익성이 권역별로 어떻게 발현되는지 확인하기 위해 6개 권역(수도권, 강원권, 충청권, 호남권, 영남권, 제주권)을 기준으로 단위면적당 수익성을 분석하였다.

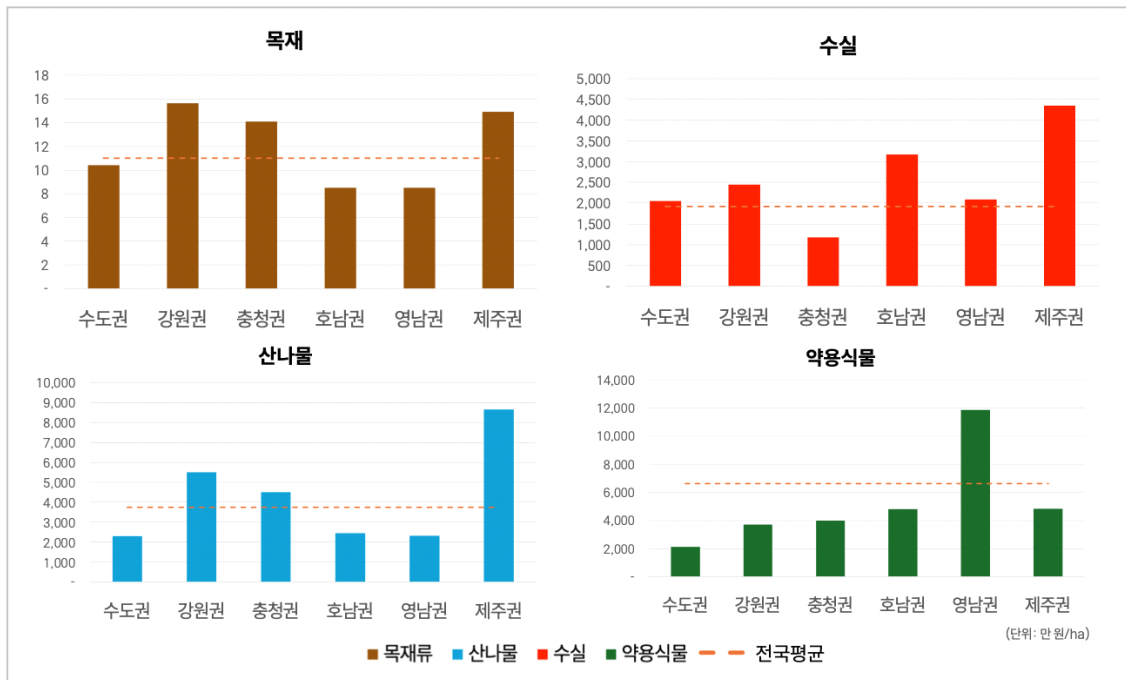
분석 결과로 산림 벌채를 동반하는 목재 생산의 경우 가장 수익성이 높은 강원권조차 15.6만 원/ha 수준에 그쳤다. 호남권과 영남권은 약 8.5만 원/ha 수준으로 타 품목 대비 경제성이 낮은 추이가 모든 권역에서 나타났다.

반면, 숲의 원형을 파괴하지 않고 임내에서 재배 가능한 단기소득임산물은 특정 권역에서 전국 평균 이상의 수익을 창출하고 있다. 약용작물의 경우 영남권이 단위면적당 약 1억 1,863만 원(11,863만 원/ha)이라는 높은 수익을 달성하며 지역 특화 고부가가치 산업으로서의 잠재력을 나

3) 생산액: 2018~2022년도 생산액 평균(산림임업통계연보 임산물생산실적), 소나무림 면적 출처: 2020 대축적 임상도(한국임업진흥원)

타났다. 산나물의 경우 온화한 기후와 지리적 특성을 지닌 제주권(약 8,657만 원/ha)과 강원권(약 5,517만 원/ha)에서 높은 부가가치를 창출하고 있다.

이에 숲을 벌채하고 목재를 생산하는 방식보다 영남권의 약용작물이나 제주·강원권의 산나물 사례처럼 산림 환경을 보존하면서도 임가의 실질 소득을 극대화할 수 있는 '권역별 맞춤형 비목재 임산물 복합 경영'으로 산림 정책의 패러다임과 예산 지원 방향을 전환해야 한다.

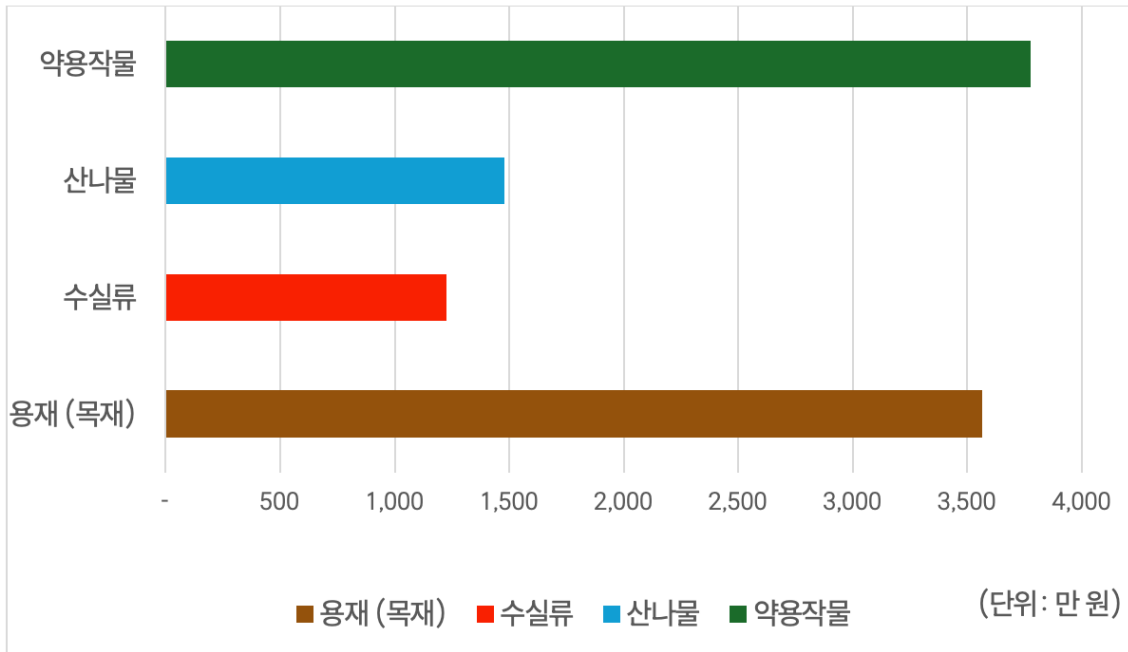


[그림 3-18] 권역별 단위면적(ha)당 임산물 수익

주: (약용작물: 오미자, 산수유, 산양삼, 헛개나무, 구기자, 오갈피, 당귀, 수액채취작물, 기타약용작물)
 산나물: 취나물, 도라지, 더덕, 두릅, 고사리, 기타산나물
 수실: 뽕, 밤, 호두, 대추, 잣, 은행, 복분자)
 자료: 2020년 농림어업총조사, 2018~2022년 산림임업통계연보

임가 단위의 수익성을 보여줄 수 있는 가구당 임산물 수익을 살펴보았다. 약용작물이 약 3,774만 원의 수익으로 가장 높은 수익을 창출하였다. 용재 생산 임가의 가구당 수익의 경우 약 3,565만 원으로 높게 나타났다. 하지만 이는 30~50년 이상의 벌기령을 거쳐 일시적으로 벌채했을 때 발생하는 '장기 투자 자본의 회수액' 성격이 강하다. 즉, 매년 혹은 짧은 주기로 수확하여 지속적인 수익을 창출할 수 있는 단기소득임산물과 달리, 용재는 초장기간 자금이 묶이는 한계를 지닌다. 따라서 영세 임가의 안정적인 연간 소득 보장을 위해서는 짧은 주기로 고수익을 내는 비목재 임산물의 복합 경영이 필요하다.

분석 결과로 단기소득임산물 내에서도 품목별 수익 구조의 차이가 관찰되었다. 산나물은 단위면적당 수익(약 3,742만 원)은 높으나 가구당 수익(약 1,478만 원)은 상대적으로 낮아, 영세 다수 농가가 좁은 면적에서 텃밭 형태로 재배하는 경향이 강함을 유추할 수 있다. 반면 약용작물은 면적당/가구당 수익 모두 최상위권을 기록하여 고부가가치 품목으로 육성할 필요가 있다.



[그림 3-19] 전국 대상 가구당 임산물 수익

주: (약용작물: 오미자, 산수유, 산양삼, 헛개나무, 구기자, 오갈피, 당귀, 수액채취작물, 기타약용작물)
 산나물: 취나물, 도라지, 더덕, 두릅, 고사리, 기타산나물
 수실류: 뽕은감, 밤, 호두, 대추, 잣, 은행, 복분자)
 자료: 산림청 산림빅데이터팀(2023 임가경제조사)

다음으로 업종별 총수입 대비 '임업경영비(투입 비용)' 비중을 분석하여 별목 중심 산림 경영의 실질적인 경제적 한계를 평가하였다<표 3-2>. 바이오매스 발전 및 목재 생산을 주도하는 '육림/별목업'은 가구당 연평균 총수입(약 3,737만 원) 중 61%에 달하는 금액(약 2,269만 원)이 임업경영비로 소모되는 고비용 구조를 나타냈다. 이는 수익의 과반이 별목을 위한 중장비 운용, 인건비 등으로 사용되는 것이다. 이러한 큰 비용 지출 내역은 숲을 벌채하는 과정에서 발생하는 환경 파괴적 비용이라 할 수 있다.

<표 3-2> 주요 임업 업종별 가구당 수입 및 비용 구조 비교

구분 (업종별)	임업경영비 (비용 지출)	임업소득 (순수익)	임업총수입	경영비(%)
육림/별목업	22,690	14,688	37,379	61%
채취업	8,037	7,132	15,169	53%
밤나무	14,903	9,911	24,814	60%
뽕은감나무	7,826	6,918	14,744	53%
수실류 (밤나무, 뽕은감나무 제외)	11,892	8,679	20,571	58%
기타재배업	7,455	8,033	15,488	48%

주: 경영비(%)=임업경영비/임업총수입
채취업: 송이, 기타채취업
수실류: 대추, 호두, 잣, 기타유실수
기타재배업: 산채, 약용식물
자료: 산림청 산림빅데이터팀(2023 임가경제조사)

반면, 숲의 하층 식생을 활용하거나 임내 복합 경영을 가능하게 하는 단기소득임산물 업종은 별목업 대비 우수한 수익 구조를 가진다. 약용작물 등이 포함된 기타재배업의 경우 경영비 비중이 전체 업종 중 가장 낮은 48%를 기록하였다. 또한, 자연 상태의 산물을 활용하는 '채취업'과 '뽕은감나무' 재배업 역시 경영비 비중이 각각 53% 수준으로 나타나 상대적으로 안정적인 구조를 보였다. 이는 숲의 원형을 보존하는 재배 방식이 임가의 소득을 늘리고 있음을 보여준다.

현재 정부의 막대한 보조금이 투입되고 있는 바이오매스 중심의 별채 정책은 실질 소득률은 40%에도 미치지 못하는 산업을 부양할 뿐만 아니라 환경 파괴 문제까지 초래하고 있다. 임가의 경제적 자립과 산림 환경 보전을 동시에 달성하기 위해서는 고비용·환경파괴형 별목업에서 벗어나 비용 대비 효율이 앞서는 기타재배업(비용 비중 48%) 등의 저비용·고수익 단기소득임산물 육성 지원으로 정책적 방향을 고려해야 한다.

2. 목재 및 비목재 경제성 비교 분석

가. 분석 개요 및 기본 가정 (Methodology & Assumptions)

본 장에서는 산림 경영의 실질적인 경제적 타당성을 검증하기 위해 벌기령(순환 주기) 및 생산 목적이 다른 5가지 목재 생산 모형을 설정하고 내부수익률(IRR)을 비교 분석하였다.

- 분석 기간: 60년
- 보조금 배제: 현재 임업 현실의 수익 구조를 파악하기 위해, 정부의 조림 및 숲가꾸기 보조금을 100% 배제하고 순수 자부담을 가정함.
- 수입 산정 기준 (입목가 적용): 수입(+) 항목은 벌목, 산물수집, 운반 등에 소요되는 수확 비용을 모두 공제한 산지 입목가(Standing Timber Value)를 적용하여, 수확 비용의 이중 계산(Double Counting) 오류를 방지함.

나. 모형별 비용 및 수입 산출 근거 (Data Reference)

비용 및 수입 데이터는 산림청 및 한국농촌경제연구원(KREI)의 공식 통계자료를 준용하여 객관성을 확보하였다.

1) 지출 비용(-) 산출 근거

- 조림비: 9,830,000원/ha (산림청 2022 조림비용 고시 단가)

- 육림비 (산림청 2021 육림비용 예시 단가):
 - 풀베기(1~5년 차): 연 1,832,000원/ha (모형 1~4에 적용)
 - 어린나무가꾸기(10년 차 등 주기별): 1,990,000원/ha (모형 1~4에 적용)
 - 가지치기(15년 차 등 주기별): 639,000원/ha (옹이 제거가 필수적인 장별기 우량재 육성용 모형 4~5에 적용)

2) 수익(+) 모형 설정

- [모형 1] 산림바이오매스 (20년 주기/모든 수종 대상): 20년마다 전벌하여 칩용 소경재로 매각
 - 입목가 산출 (약 1,500,000원/ha): KREI(2017)의 30년생 일반 용재 입목가(4,500,000원/ha)를 기초로 하되, 20년생의 생장 특성과 원료재 시장가격을 반영하여 산출함. 모든 수종에 적용 가능하나 목재 시장에서 선호되는 침엽수종인 낙엽송 기준으로 입목가를 도출함.
 - 최근 3년(2022~2024년) 낙엽송 원료재급 평균 시장가격(약 73,400원/m³)에 국립산림과학원(2023) 현실림 임분수확표 기준 20년생의 수확 재적량(79.3 m³/ha, 30년생의 57.8% 수준)을 곱하여 헥타르당 예상 조수익인 약 5,820,000원(79.3m³ × 73,400원)을 도출함. 이후 소경재 벌채 및 바이오매스 원목 운송에 따른 높은 수확·운반 비용(조수익의 약 74~75% 추정)을 공제하여 실질 산지 입목가를 도출함.
- [모형 2] 일반 펄프/용재 (30년 주기/모든 수종 대상): 낙엽송 등 침엽수를 30년마다 수확
 - 낙엽송 입목가 적용: 약 4,500,000원/ha (KREI, 2017)
- [모형 3] 참나무 표고자목 (30년 주기/활엽수 대상): 15년 차에 소경 자목 솟아베기(수익 간벌), 30년 차에 특A급 표고자목 최종 수확
 - 표고자목 입목가 시나리오 설정: 표고버섯 재배용 참나무 자목은 일반 용재 대비 높은 시장 가치를 지님. 실제 임업 현장의 거래 단가(예: 표고자목 1토막당 약 5,000원 내외 형성)를 고려할 때 수익성이 훨씬 높게 나타남.
 - 본 분석에서는 시장의 변동성과 현장 실태를 고려하여 입목가 배수를 기준으로 다음과 같이 3가지 시나리오를 설정하여 수익성을 세분화하여 분석함.
 - [모형 3-1] 일반 용재 입목가의 2.5배 적용
 - [모형 3-2] 일반 용재 입목가의 5배 적용
 - [모형 3-3] 일반 용재 입목가의 10배 적용

- 임지 여건, 굵기, 운반 거리에 따라 편차가 큰 표고자목의 실제 입목가를 정확히 추정하는 것은 변수가 매우 많기 때문에 추후 현장 실태조사를 통한 후속 연구가 필요함. 이에 본 연구에서는 시나리오 기법을 활용하였음.
- [모형 4] 장벌기 우량재 (60년 주기/모든 수종 적용 가능): 20년, 40년 차에 간벌 수익 창출, 60년 차에 건축용 특대경목 최종 수확
 - 최종 주벌 입목가 산출 (약 35,000,000원/ha): 수목이 60년간 성장하여 흉고직경(DBH) 30cm 이상의 우량 대경목으로 도달했을 때 발생하는 가격 프리미엄과 벌채 효율성을 반영하여 다음과 같이 산출함.
 - ① 대경목 프리미엄 시장가격 산정: 대경목은 일반 제재목이나 펄프재 대비 m^3 당 단가가 상승함. 모형 4·5의 대경목 프리미엄 단가 산정을 위해 국립산림과학원 『산림산업경제동향』(2025)에 수록된 산림청 국산재 원목 시장가격동향(2024년 연평균 기준)을 활용하였다. 장벌기 우량 대경목은 단일 수종이 아닌 복수 수종에 적용 가능한 모형인 점을 고려하여, 침엽수 계열의 낙엽송 특용재급(169,558원/ m^3)과 잣나무 특용재급(167,842원/ m^3)의 평균인 약 168,700원/ m^3 , 활엽수 계열의 참나무 1등급(113,725원/ m^3)을 가중 평균하되, 국내 장벌기 대경목 시장의 주력이 침엽수임을 반영하여 침엽수 2 : 활엽수 1의 가중치를 적용하면 약 150,375원/ m^3 이 산출된다. 이를 보수적으로 반올림하여 약 150,000원/ m^3 을 적용함.
 - ② 60년생의 재적량(Volume) 반영: 국립산림과학원(NIFoS) 임분수확표에 따르면 60년생 장벌기 산림의 헥타르당 주벌 수확 재적량은 약 300 m^3 /ha에 달함. 이는 30년생 일반 벌기령 대비 2배 이상 증가한 수치임.
 - ③ 입목가(산주 순수익) 도출: 예상 조수익은 약 45,000,000원/ha(300 m^3 × 150,000원)로 산출됨. 특히 대경목은 소경재(모형 1)와 달리 벌채, 조재, 수집 등 임업 기계화 작업의 효율성이 극대화되어 단위 부피당 수확 비용이 크게 절감됨. 조수익 대비 수확 및 운반 비용 비중을 약 22% 수준(약 1,000만 원)으로 공제한 결과, 산주에게 귀속되는 실질 최종 입목가는 약 35,000,000원/ha으로 도출됨.
 - 경제성 및 단가 근거: 김기동·신현섭·이승우 (2025). 『산림산업경제동향 2025 여름호』. 연구자료 제1171호. 국립산림과학원.
- [모형 5] 참나무 복합경영 (60년 장벌기 우량재 + 표고자목 간벌/활엽수 대상): 표고자목 수익 간벌과 장기 우량재 육성을 결합한 혼합 모형
 - 모형 개요: 참나무를 60년간 장벌기 우량재로 육성하는 동시에, 중간 간벌

산물을 표고자목으로 매각하여 조기에 수익을 창출하는 복합 경영 모델임.

- 수입 산출 구조: 15년 차 (1차 간벌): 수목 밀도 조절을 위한 숲아베기를 실시하고, 생산된 소경재를 표고자목으로 매각하여 1차 수익 창출
 - 30년 차 (2차 간벌): 우량목의 성장 공간 확보를 위해 중경재를 간벌하며, 이를 상품성이 높은 특A급 표고자목으로 매각하여 2차 수익 창출
 - 60년 차 (최종 주벌): 60년간 성장한 참나무를 가구재 및 고급 내장재 용도의 활엽수 대경목(우량재)으로 최종 수확하여 프리미엄 입목가 수익 창출
- 이 모형은 장벌기 경영(모형 4)의 단점인 장기간의 자본 묶임을 간벌 수익(표고자목)으로 상쇄시켜 임가의 경제적 안정성을 도모할 수 있는 대안으로 설정됨.

다. 경제성 분석(IRR) 결과

각 목재 생산 모형의 60년간 현금흐름을 바탕으로 내부수익률(IRR)을 직접 산출하였으며, 산림 존치형 경영과의 기회비용 비교를 위해 비목재 임산물(산채류)의 선행연구 IRR 결과를 대리 지표(Proxy)로 추가하여 종합 비교한 결과는 다음과 같다.

<표 3-3> 목재 생산 모형의 경제성 분석(IRR) 결과

구분	모형1 (바이오매스)	모형2 (펠프재)	모형3 (참나무 표고자목)	모형4 (장벌기 우량재)	모형5 (참나무 복합경영)	모형6 (비목재: 산마늘)	모형7 (비목재: 곰취)
순환 주기	20년 (총 3회)	30년 (총 2회)	30년 (총 2회)	60년 (총 1회)	60년 (총 1회)	매년 수확 (초기 조성 후 지속)	매년 수확 (초기 조성 후 지속)
IRR 결과	-14%	-5%	-2%(모형 3-1) 1%(모형 3-2) 4%(모형 3-3)	2%	3%	36.2%(임간) 54.2%(노지)	48.6%
경제성 평가	원금 손실(적자)		시나리오별 상이	타당성 확보		고수익 달성	
자료 출처	본 연구 직접 산출					박상병 외 (2014)*	박상병 외 (2012)**

주: * 박상병 외 (2014): 12명의 산마늘 재배자를 대상으로 한 심층면접설문조사 결과, 임간재배와 노지재배의 IRR이 각각 36.2%, 54.2%로 도출됨. ** 박상병 외 (2012): 곰취 재배 8개 임가 대상 심층면접 설문 결과, 할인율 3% 적용 시 IRR 48.6%로 도출됨.

다. 경제성 분석(IRR) 소결 및 시사점

본 연구의 경제성 분석(IRR) 결과를 종합하여 대한민국 산림 경영이 직면한 구조적 한계와 향후 나아가야 할 패러다임 전환의 방향성을 다음과 같이 도출하였다.

1) 보조금 배제 시 단벌기 일반 목재 생산의 적자 구조 확인

모형 1(바이오매스)과 모형 2(일반 펄프재)의 IRR은 각각 -14%, -5%로 산출되어, 정부 보조금 없이 시장 논리만으로 유지될 수 없는 원금 손실 구조로 나타났다. 이는 잦은 벌채(20~30년 주기)로 인해 반복적으로 발생하는 조림 및 육림을 할 경우 산물의 낮은 부가가치(소경재, 원료재)보다 더 큰 비용이 발생하기 때문이다. 이러한 결과를 고려하여 단벌기 임업의 전면적인 재검토가 필요하다.

2) 고부가가치 수종(참나무) 및 복합경영 모델의 타당성 입증

상대적으로 시장 가치가 높은 참나무 표고자목(모형 3)의 경우, 현장의 실제 프리미엄 단가를 반영한 시나리오(모형 3-2, 3-3)에서 1%~4%의 양(+)의 수익률을 나타냈다.

단기 소득 창출과 장기 우량재 육성을 결합한 [모형 5] 참나무 복합경영 모델은 IRR 3%를 기록하여 목재 생산 모형 중 가장 우수한 경제성을 확보하였다. 이는 장벌기 경영 시 장기간 수익을 내지 못하는 현상을 간벌 수익으로 상쇄하는 전략이 임가의 실질적 자생력을 높이는 대안이 될 수 있다.

3) 장벌기 우량재 육성으로의 전환 당위성

60년 주기의 장벌기 대경목 육성 모형(모형 4, 모형 5)은 2~3%대의 흑자 구조를 나타냈다. 조림 횟수를 줄여 초기 투자 리스크를 최소화하고 나무가 성장하여 나무의 물리적 부피와 경제적 단가(특대경목 가격)를 극대화하였기 때문이다. 장벌기 우량재를 육성하고 고부가가치를 가지는 목재를 생산하는 방식을 통해 임업의 경제성이 성립될 수 있다.

4) 비목재 임산물의 높은 수익성과 정책적 패러다임 전환

목재 생산 모형(최대 4% 수준)과 달리, 산채류 중심의 비목재 임산물(모형 6, 7)은 36%~54%에 달하는 고수익을 창출하는 것으로 나타났다. 따라서 향후 산림 정책은 수익성이 없는 단기 벌채를 지양하고, 목재 생산을 60년 이상의 장벌기 우량재 및 복합경영(모형 4, 5) 중심으로 재편해야 한다. 또한 접근성이 좋고 보전 가치가 높은 산림은 벌채를 통한 목재 수확 대신 단기 임산물(모형 6, 7) 중심의 지속가능한 소득 창출 공간으로 활용하는 전략으로의 전환이 고려되어야 한다.

제3절 미이용 산림바이오매스 공급 잠재력 평가

1. 미이용 산림바이오매스 공급 잠재력 분석

가. 미이용 산림바이오매스 공급 잠재력 분석을 위한 산림 경영 시나리오의 설정 배경

산림은 탄소 흡수, 생물 다양성 보전, 수원 함양 등 다양한 공익적 기능을 수행한다. 벌채된 산림은 수목이 재조성되어 생태적 안정을 찾을 때까지 이러한 공익적 기능을 일시적으로 상실하게 된다. 이에 본 연구는 산림이 가진 본연의 공익적 기능을 극대화하고 지속가능한 산림경영(SFM)을 실현하기 위하여, 기존의 모두베기(Clear-cutting) 방식이 아닌 간벌(Thinning, 솎아베기) 방식의 산림 경영 시나리오를 설정하였다.

간벌 시나리오는 산림청의 「지속가능한 산림자원 관리지침」상의 솎아베기 기준을 준용하여 설계되었다. 해당 지침에서는 적정 수관울폐도(Crown closure) 유지 범위를 50~80%로 권장하고 있다. 본 연구에서는 산림의 생태적 기능 훼손을 최소화하는 범위 내에서의 간벌을 적용하는 것으로 시나리오를 설정했다. 이에 수관울폐도 상한선인 80%를 유지하는 기준을 채택했다. 이에 임목축적 대비 20%를 간벌률로 적용하였다.

나. 기초 데이터 수집 및 전처리

미이용 산림바이오매스의 정확한 공간적 분포와 가용 면적을 도출하기 위해 공공 공간정보 데이터를 수집하고 전처리를 수행하였다. 주요 수집 데이터는 산림청 산림공간정보서비스에서 2025년 기준 임상도(1:5000), 산림기능구분도, 등산로 데이터를 수집하였다. 한국보호지역 통합 DB 관리시스템에서 보호지역 공간정보를 수집하였으며 강원도와 경상북도의 임도는 정보공개청구를 통해 각 행정구역 담당자로부터 자료를 수집하였다.

공간 전처리 단계에서는 산림기능구분도를 활용하여 분석 대상을 목재생산림으로 한정하였다. 이후 실제 목재 생산이 가능한 정밀 면적을 계산하기 위해, 임상도 데이터 내에서 수목이 존재하지 않는 무림목지와 제지(Non-Forest Areas)를 추출하여 별도의 폴리곤 레이어를 생성하였다. 최종적으로 목재생산림 구역에서 해당 비산림 구역을 제외 처리하여 실제 수목이 분포하는 목재생산림 구역을 도출하였다.

다. 공간 분석 대상 및 제약 조건 설정

구축된 목재생산림 데이터를 바탕으로 미이용 산림바이오매스 수거에 영향을 미치는 지리적·제도적 상충 관계를 분석하였다.

첫째, 목재생산림과 법정 보호지역 간의 상충(Conflict)을 확인하기 위해 목재생산림 레이어와 보호지역 레이어를 중첩(Clip) 분석하여 목재생산림이나 보호지역으로 지정된 공간을 산출하였

다. 또한, 수치표고모델을 활용하여 경사 30도 이상의 지역을 추출하여 제외하였다.

둘째, 지역별(시도별) 바이오매스 산출을 위해 최종 데이터베이스를 구축하였다. 이는 목재생 산림 경계 내에 위치한 시도별 임상도 피처를 공간 선택(Select by Location) 기법으로 추출한 결과물이다. 본 분석은 임상도 피처를 공간적 기준으로 삼았으며, 해당 피처가 순수 목재생산림 경계와 중첩될 경우 이를 목재생산 가능 지역으로 간주하였다. 이 과정에서 임상도와 산림기능구 분도 간의 기하학적 경계 불일치로 인한 미세한 필지 오차가 포함될 수 있으나, 거시적 관점의 지역별 잠재량 산출에는 유의미한 영향을 미치지 않는 것으로 판단하였다.

라. 미이용 산림바이오매스 잠재량 산출 방법

1) 시나리오 설정 및 연간 자원 수확률 도출

도출된 생태적 제약(법정 보호지역 및 OECM)이 제외된 잠재 자원량을 일시에 모두 벌채하는 개별(Clear-cutting) 방식이 아닌, 지속가능한 산림경영(SFM) 원칙에 입각한 숲아베기(간벌) 시나리오를 적용하여 연간 가용량으로 환산하였다. 이를 위해 산림청의 과거 25년간(2000년~2024년) 숲가꾸기 실적 데이터를 기반으로 실질 연간 자원 수확률을 추산하여 모델링에 적용하였다.

연간 간벌 대상 면적률을 산출하기 위해 먼저 대한민국 전체 산림 면적(약 630만 ha) 중 산림의 공익적 가치 보존과 생태계 보호가 우선시되는 육상 보호지역 면적(1,846,670 ha)을 제외하여, 간벌 대상 가용 산림 면적을 약 4,453,330 ha로 정의하였다. 여기에 바이오매스 발생이 미미한 조림지가꾸기(풀베기, 덩굴제거 등)를 제외하고, 실제 부산물이 발생하는 큰나무가꾸기(숲아베기, 천연림보육 등)의 연평균 사업 실적(약 166,820 ha)을 대입한 결과, 최종적인 연간 자원 수확률은 3.75%로 산출되었다.

2) 미이용 산림바이오매스 중량 산출(BDT 기준)

도출된 최종 대상지를 바탕으로 제3영급(21~30년)에서 제7영급(70년 이상)에 해당하는 산림의 미이용 바이오매스 잠재자원량을 산출하였다. 산출의 신뢰성을 확보하기 위해 선행연구(Lee et al., 2003; Son, 2007; Cho, 2019)에서 제시된 건중량(BDT, Bone Dry Ton) 기반의 변환식을 적용하였다. 상품성이 있는 원목(줄기)을 제외하고 에너지원으로 활용되는 가지부(Branch & Foliage)와 초두부(Top-log)를 계산하였다. 구체적인 산출식 (1), (2)는 다음과 같다.

$$\text{가지부}(\text{ton, BDT}) = \text{산림면적} \times \text{ha당 간재적} \times \text{목재기본밀도} \times \text{가지전환계수} \quad (1)$$

$$\text{초두부}(\text{ton, BDT}) = \text{산림면적} \times \text{ha당 간재적} \times \text{목재기본밀도} \times (1 - \text{조재율}) \quad (2)$$

수종별 임상도 면적에 ha당 간재적(m^3/ha)을 곱하여 총 재적을 산출한 뒤, 수종별 목재기본밀도(Basic Wood Density)를 적용하여 순수 목질부의 건중량을 구하였다. 가지부의 중량은 건중량에 수종별 가지전환계수(Branch-to-stem ratio)를 곱하여 산출하였으며, 초두부의 중량은

규격 미달로 버려지는 상단부의 비율을 반영하기 위해 '1 - 조재율(Log yield)'을 곱하여 산출하였다.

최종적인 미이용 산림바이오매스 가용량은 위에서 도출된 가지부와 초두부의 합산 중량에 앞서 설정한 20%의 간벌률을 적용하고, 지형적 제약과 임도 인프라 등 현실적인 수집 여건을 고려하여 60%의 수집률을 추가로 곱하여 도출하였다.

<표 3-4> 수종별 미이용 산림바이오매스 산출용 주요 계수

주요 수종	목재 기본 밀도 (ton/ m ³)	가지 전환 계수 (줄기 대비 비율)	원목 수율 (조재율, %)	초두부 비율 (1-조재율)
강원지방소나무	0.419	0.240	81.6%	18.4%
잣나무	0.408	0.409	83.3%	16.7%
리기다소나무	0.504	0.183	81.4%	18.6%
곰솔	0.481	0.233	81.4%	18.6%
낙엽송	0.453	0.199	82.9%	17.1%
편백	0.427	0.196	81.4%	18.6%
삼나무	0.347	0.131	81.4%	18.6%
상수리나무	0.721	0.341	81.5%	18.5%
굴참나무	0.721	0.262	80.9%	19.1%

자료: 윤상호 외 (2022), "Estimation of unused forest biomass potential resource amount in Korea", Korean Journal of Agricultural Science 재구성.

<표 3-5> 수종 및 영급별 ha당 줄기 재적(단위: m³/ha)

수종	3 영급 (21~30 년)	4 영급 (31~40 년)	5 영급 (41~50 년)	6 영급 (51~60 년)	7 영급 (61~70 년)
강원지방소나무	140.5	203.6	258.1	303.3	340.0
잣나무	121.9	183.0	233.9	276.7	313.3
리기다소나무	153.1	222.3	264.9	289.1	302.7
곰솔	115.8	178.2	218.4	241.7	255.8
낙엽송	109.4	161.7	201.2	230.6	253.1
편백	114.6	181.5	221.6	241.1	250.2
삼나무	232.8	335.3	417.8	559.1	559.1*
상수리나무	93.7	135.4	171.0	200.4	224.5
굴참나무	110.8	175.9	220.4	249.9	269.7

자료: 윤상호 외 (2022), "Estimation of unused forest biomass potential resource amount in Korea", Korean Journal of Agricultural Science 재구성.

마. 미이용 산림바이오매스 잠재량 산출 결과

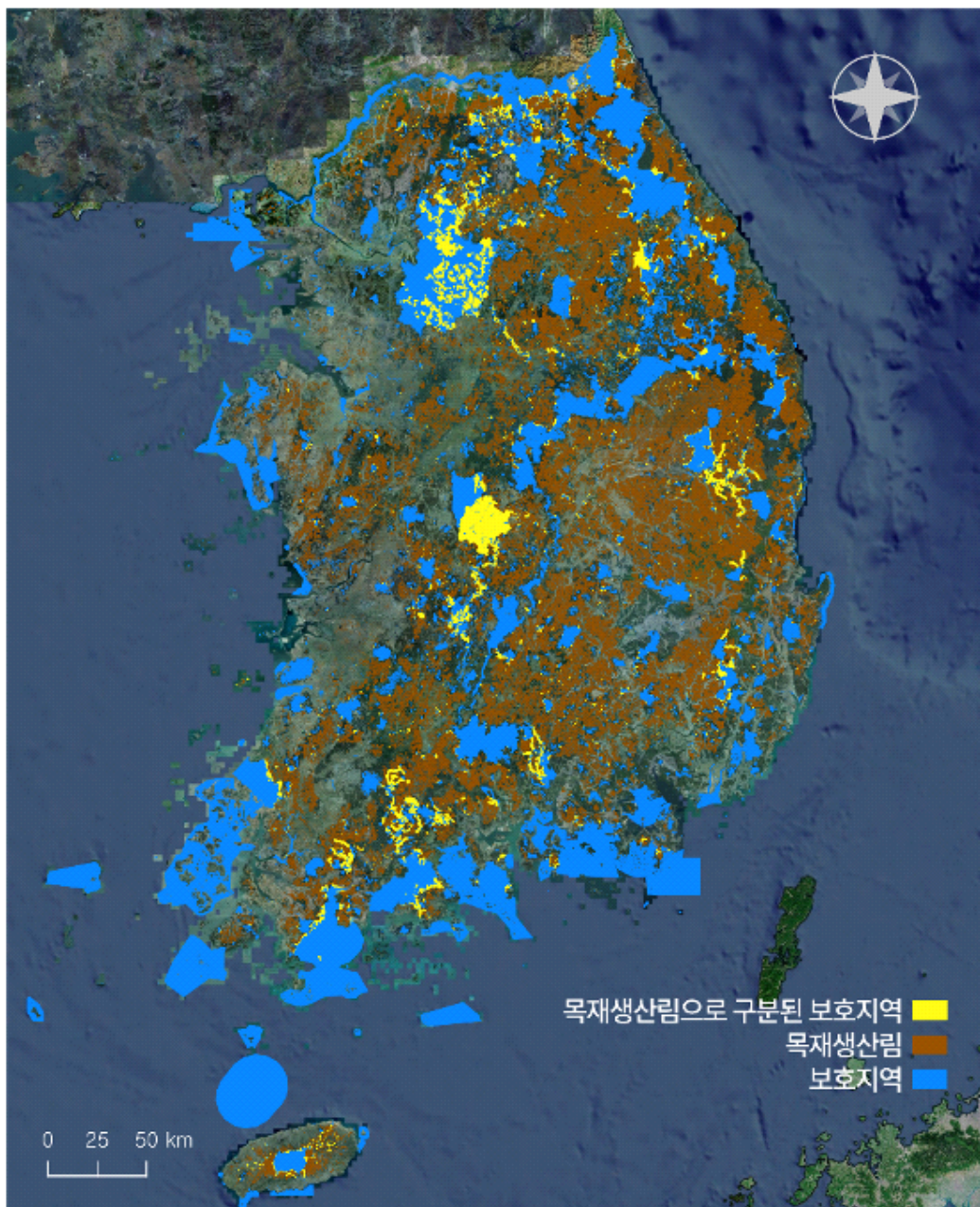
1) 산림 관리 체계 재정비의 필요성

본 연구의 공간 분석 과정에서 국가 산림 관리 체계의 모순점이 확인되었다. 목재 생산을 목적으로 지정된 목재생산림과 생태계 보전을 최우선으로 하는 법정 보호지역(OECM 등 포함)을 중첩 분석한 결과, 전국적으로 약 152,279 ha에 달하는 산림이 두 가지 용도로 중복 지정된 상충 구역으로 도출되었다.

이는 현재 대한민국의 산림 공간 정보 및 용도 지정 체계가 부처 간, 혹은 목적 간 통합적으로 관리되지 못하고 있음을 보여주는 결과이다. 생태적으로 보호받아야 할 구역이 목재생산림으로 지정되어 있다는 것은, 현행 산림 관리가 보호구역의 지정 목적을 제대로 반영하지 못한 채 관행

적으로 이루어지고 있음을 시사한다. 만약 이 상층 구역에서 목재생산림 용도를 근거로 별채가 허가될 경우, 보호지역의 생물 다양성과 산림 생태계는 보호지역임에도 불구하고 훼손될 수 있음을 나타낸다.

따라서 진정한 의미의 지속가능한 산림경영(SFM)과 친환경적인 산림바이오매스 활용을 위해서는, 가장 먼저 이러한 공간 데이터 상의 오류와 행정적 중복 지정을 해소해야 한다. 보전 가치가 높은 산림은 별채 허용 구역에서 원천적으로 배제하는 등 산림 공간 관리 체계를 재정비할 필요가 있다.



[그림 3-20] 보호지역과 목재생산림 중첩 현황도

2) 미이용 산림바이오매스 잠재량 산출 결과 및 연간 잠재 가용량 분석

본 연구는 산림의 생태적 보전 가치를 훼손하는 무분별한 개벌(Clear-cutting) 방식을 엄격히 지양하고, 기후변화 대응을 위한 신재생에너지원 확보 과정에서도 자연 보존을 우선으로 삼는다는 목적하에 수행되었다. 이에 따라 법정 보호지역을 배제한 순수 목재생산림을 대상으로, 숲의 건강성을 유지하는 속아베기(간벌) 시나리오(수관울폐도 유지 및 20% 간벌률 적용)와 수집 제약 조건(60% 수집률)을 반영하여 공간 분석을 진행하였다.

분석 결과, 우리나라 목재생산림 구역 내에 분포하는 미이용 산림바이오매스(원목을 제외한 가지부 및 초두부 기준 건조량)의 총 이론적 가용량은 15,075,992ton/BDT으로 산출되었다. 이는 현재 산림에 축적된 이론적 최대치이며, 숲의 갱신 주기와 생태적 수용력을 고려하여 산림청의 과거 25년간 실질 숲가꾸기 사업 비율인 3.75%의 연간 자원 수확률을 모델에 대입하였다. 그 결과, 시나리오 기반의 연간 이론적 잠재 가용량은 565,349.69톤(BDT/년)으로 평가되었다. 이는 산림을 일시에 벌채하지 않고도 매년 약 50만 톤 이상의 재생에너지원을 확보할 수 있음을 나타낸다.

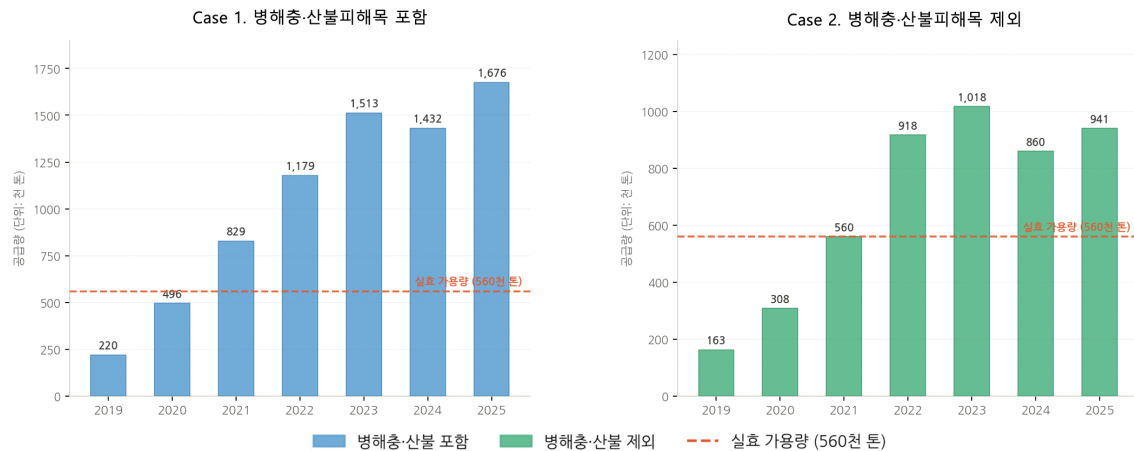
<표 3-6> 시나리오 기반 전국 및 시·도별 미이용 산림바이오매스 잠재 가용량

지역명	총 가용량 (ton/BDT)
서울특별시	-
부산광역시	6,406
대구광역시	221,012
인천광역시	3,364
광주광역시	4,822
대전광역시	13,288
울산광역시	91,997
세종특별자치시	35,090
경기도	673,009
강원특별자치도	3,433,128
충청북도	1,026,756
충청남도	798,290
전북특별자치도	723,374
전라남도	1,469,760
경상북도	4,516,066
경상남도	1,849,563
제주특별자치도	210,068
전국 총 이론적 잠재량 (Total)	15,075,992
연간 자원 수확률 (Application Rate)	3.75%
최종 연간 잠재 가용량 (ton/yr)	565,349.69

주 1: 도출된 가용량은 수분을 제거한 건조량(Bone Dry Ton, BDT) 기준임.

3) 소결 및 정책적 시사점

현재 미이용 산림바이오매스는 목재 수확, 수종갱신, 산지개발, 숲가꾸기 사업을 비롯하여 병해충 피해목, 가로수, 산불 피해목 등 다양한 경로를 통해 수집되고 있다. 별채목적별 미이용 산림바이오매스 증명서 확인 현황을 살펴보면, 2021년 이후 연간 공급량이 이 연구에서 도출한 실효 가용량(연간 약 560천 톤)을 초과하는 추세가 뚜렷하게 나타난다. 여기서 실효 가용량은 임도와 수요처(발전소 및 목재펠릿 업체) 간의 접근성 및 수집 가능성, 경제성 등을 고려하지 않은 이론적 최대 공급 가능량임을 전제한다. 따라서 현실적인 수집 제약을 감안할 경우 실제 활용 가능한 물량은 이보다 낮을 수 있으며, 현재의 공급량이 이 이론적 상한선마저 이미 상회하고 있다는 사실은 그 시사점이 크다고 할 수 있다. 병해충·산불 피해목을 포함할 경우 2021년(829천 톤)에 이미 실효 가용량의 약 1.5배에 달하였으며, 2025년에는 1,676천 톤으로 가용량의 약 3배 수준에 이르렀다. 주목할 점은 재해 변수를 제외한 순수 별채 목적의 공급량만 고려하더라도 2021년(560천 톤)에 이미 실효 가용량에 도달하였고, 2022년(918천 톤)부터는 지속적으로 이를 초과하고 있다는 사실이다. 이는 재해 여부와 무관하게 현재의 산림 이용 추세 자체가 이론적 가용 범위를 넘어서는 공급 과열 상태임을 시사한다.



[그림 3-21] 미이용 산림바이오매스 공급 현황 분석: 실효 가용량 대비 이용률 추이 (단위: 천 톤)

이러한 자원은 기존 화력발전의 화석연료를 대체하는 신재생에너지원으로 주목받고 있으나, 자원 수집 과정에서 실질적인 생태계 파괴나 2차적인 환경 훼손이 발생하지 않도록 관련 정책의 고도화가 요구된다.

선행연구들에 따르면 무분별한 벌채와 인위적인 산림 개입은 산림 생태계와 지반 안정성에 심각한 부작용을 초래할 수 있다. 김정흠(2024)의 연구에서는 지형 및 지질학적 요인과 더불어, 토지 이용 변화 및 산림 벌채와 같은 인위적 요인이 산사태 발생 위험을 증대시키는 원인임을 규명하였다. 또한, 김진용 외(2015)는 산불 피해지 복원 방식이 번식기 조류 군집에 미치는 영향을 분석한 결과, 피해목을 일시에 벌채하고 인공 식재를 실시한 산림사업 복원지역에서 수관 탐색 조류(foliage searcher), 수간 및 나무줄기 천공 조류(timber driller), 1·2차 수동성 조류(primary

and secondary cavity nester) 등 전반적인 조류의 서식 밀도가 타지역 대비 현저히 낮게 나타났음을 보고하였다. 이는 산림 자원의 수확 및 훼손지 복원에 있어 생물다양성을 고려한 자연 친화적 방식의 도입이 필요함을 나타낸다.

이러한 맥락에서, 본 연구의 5장에서 도출한 간벌 시나리오 기반 미이용 산림바이오매스 연간 가용량 분석 결과는 다음과 같은 정책적 의의를 지닌다. 산림을 일시에 훼손하는 모두베기(개벌) 방식이 아닌 솎아베기(간벌) 등 숲의 건강성을 증진하는 지속가능한 산림경영(SFM)을 적용하여 신재생에너지원 잠재량을 정량적으로 파악하였다. 본 연구의 결과는 맹목적인 에너지원 확보를 지양하고 숲의 생태적 보전과 신재생에너지의 활용이 양립할 수 있는 향후 산림 정책 수립의 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 자원 공급망 및 수요처 매칭 분석

가. 서론

미이용 산림바이오매스를 화석연료를 대체하는 실효성 있는 신재생에너지원으로 활용하기 위해서는 산림 내에 존재하는 단순한 물리적 발생량(Theoretical Potential)을 추정하는 것을 넘어, 이를 수집하고 수요처까지 운송하는 전체 공급망(Supply Chain)의 현실적인 제약 요건을 반드시 고려해야 한다. 가 지나 초두부와 같은 미이용 바이오매스는 원목에 비해 부피가 크고 에너지 밀도가 낮아, 수집 난이도와 운송 거리가 사업의 경제성과 수익성을 결정짓는 가장 핵심적인 요인으로 작용한다. 기존의 많은 정책과 선행 연구들은 행정 구역 단위의 거시적인 통계량에만 의존하여 자원량을 과대평가하는 경향이 있었다. 이에 본 절에서는 지리정보시스템(GIS)을 활용하여 통계적 잠재량이 아닌 물리적·경제적 접근성을 반영한 실질적 자원 공급망을 구축하고, 주요 수요처와의 공간적 매칭 분석을 통해 현실적인 자원 가용성을 객관적으로 평가하고자 하였다.

나. 기초 데이터 수집 및 공간 정보 전처리

본 분석은 국내에서 산림 자원이 가장 풍부하게 분포하고 있는 강원특별자치도 및 경상북도 지역을 연구 대상지로 선정하여 수행되었다. 정확한 공간 분석을 위해 다음과 같은 다중 레이어 데이터를 수집하고 전처리하였다.

- 수요처 데이터: 강원·경북 권역 및 그 외 다른 시·도에 위치한 목재펠릿 제조시설 및 바이오매스 화력발전소의 최신 위치 정보를 수집하여 GIS 상에 포인트(Point) 객체로 맵핑(Mapping)하였다.
- 임상 및 임도 데이터: 앞선 필터링 모델을 통해 1차적으로 도출된 목재생산림과 임상도 공간 데이터(수종, 영급, 재적 정보 포함)를 활용하였다. 임도(Forest road) 데이터는 정보공개청구를 통해 각 행정구역 담당자로부터 수집하였으며 데이터를 선(Line) 객체로 구축하였다.

- 데이터 전처리: 거리 계산 및 면적 산출의 위상학적 오류를 방지하기 위해, 모든 공간 데이터는 투영 좌표계(예: EPSG:5179)로 통일하여 변환하는 과정을 거쳤다. 공간 데이터 전처리와 공간 분석은 오픈소스 소프트웨어인 QGIS 3.40.15를 활용하여 수행되었다.

다. 공간 필터링 및 중첩 분석 처리

실질적 공급 가능 구역 도출을 위해 경제적·물리적 제약 조건을 설정하고 공간 중첩 분석(Spatial Overlay Analysis)을 수행하였다. 특히 본 연구에서는 신재생에너지 공급인증서(REC) 가중치 적용 여부에 따른 조달 권역의 변화를 분석하기 위해 두 가지 시나리오를 설정하였다.

1) 수요처 중심의 경제적 조달 권역 설정 (Demand Zone)

수집된 바이오매스를 발전소나 펠릿 공장으로 운송할 때 발생하는 물류비를 제어하기 위해 조달 한계 거리를 설정하였다. 운송 거리 설정은 외부 보조금(REC) 유무에 따라 다음과 같이 구분하여 분석하였다.

- [시나리오 1] 순수 경제적 조달 권역 (REC 미적용): 외부 보조금 없이 바이오매스 자체의 경제성만을 고려한 경우이다. 선행 연구(Lozano-García et al., 2021)에서 제시한 바이오매스의 경제적 최대 공급 거리인 수요처 반경 30km를 기준으로 버퍼(Buffer)를 생성하여 1차 수요 권역을 확정하였다.
- [시나리오 2(추가)] 정책 지원 기반 조달 권역 (REC 적용): 현재 국내에서 시행 중인 '미이용 산림바이오매스 REC 가중치' 적용에 따른 경제성 향상을 반영한 경우이다. 정책적 지원을 통해 확장 가능한 실질적 수요처 조달 범위를 고려하여 수요처 반경 150km를 기준으로 시나리오 1과 비교 분석을 수행하였다.

2) 공급처 중심의 물리적 수집 가능 권역 설정 (Supply Zone)

대한민국의 산림은 경사가 급하고 험준하여, 임도가 확보되지 않은 지역에서의 기계화 수확은 사실상 불가능하다. 이에 따라 시나리오와 관계없이 공통적으로 국내 임업 장비의 실제 작업 반경과 물리적 수집 한계를 보수적으로 적용하였다. 임도 중심선으로부터 양측 500m 이내의 구역만을 실질적 접근 가능 산림으로 추출하였다.

3) 최종 매칭 및 정량화

수요처 반경별(30km 및 150km) 원형 폴리곤과 임도 반경 500m 형태의 폴리곤을 교차 영역(Intersection) 도구로 중첩 분석하였다. 도출된 각 시나리오별 최종 매칭 구역에 기존 임상도의 속성(ha당 재적 등)을 공간 결합(Spatial Join) 하여, 최종적인 BDT(Bone Dry Ton) 기준 가용량을 시나리오별로 비교·정량화하였다.

라. 분석 결과

강원특별자치도 및 경상북도 지역을 대상으로 미이용 산림바이오매스의 잠재 가용량을 분석한 결과, 산림 관리 시나리오(간벌률 등 적용)에 기반한 이론적 최대 가용량은 약 7,949,195 ton/BDT로 산출되었다. 본 연구에서는 공간 필터링을 통해 지리적(임도 접근성 500m 이내) 제약과 경제적(조달 권역 설정) 제약 조건을 결합하여 시나리오별 실질 가용량을 분석하였다.

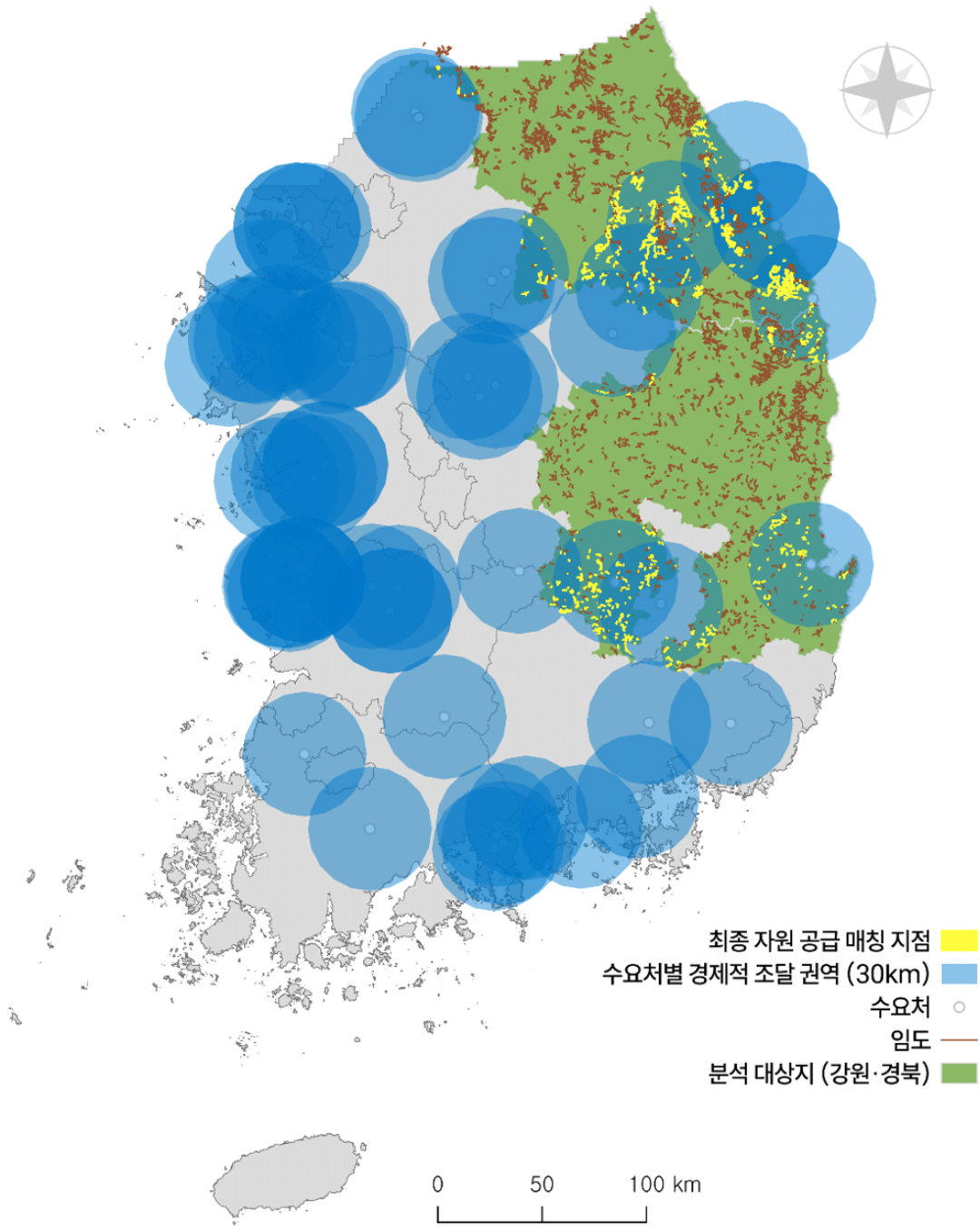
분석 결과, 외부 보조금 없이 바이오매스 자체의 경제적 반경(30km)만을 고려한 [시나리오 1]의 경우, 실제 수집 가능한 잠재 가용량은 약 1,285,033 ton/BDT로 급감하였다. 이는 이론적 잠재량의 약 16% 수준에 불과하며, 연간 자원 수확률(3.75%)을 적용한 실질 공급 물량은 연간 48,189 ton/BDT로 나타났다.

반면, '미이용 산림바이오매스 REC 가중치' 적용에 따른 정책적 지원 범위를 고려한 [시나리오 2]에서는 조달 권역이 150km까지 확장됨에 따라 총 잠재 가용량이 약 2,088,491 ton/BDT까지 증가하는 것으로 분석되었다. 이는 이론적 잠재량 대비 약 26%에 해당하는 수치이며, 연간 실효 가용량은 78,318 ton/BDT 수준으로 확보되었다.

결과적으로 시나리오 1 대비 시나리오 2에서 실질 가용량이 약 1.6배 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 가용량의 확대는 바이오매스 공급망이 자체적인 자생력을 갖춘 결과가 아니라, 외부 보조금(REC 가중치)에 의존하여 원거리 운송에 따른 막대한 물류비를 상쇄하고 있음을 의미한다. 즉, 본래 경제적 타당성이 맞지 않는 먼 거리의 자원 수집을 보조금을 통해 억지로 지탱하고 있는 구조임을 보여준다. 나아가 원거리 물류 이동 과정에서 필연적으로 수반되는 추가적인 온실가스 배출 등을 고려할 때, 이러한 보조금 중심의 산림 정책 효용이 과연 '탄소 배출 저감'이라는 본연의 환경적 목표와 부합하는지에 대한 근본적인 의문을 제기한다.

<표 3-7> 미이용 산림바이오매스 가용량 및 연간 실효 가용량 산출 결과(강원도, 경상북도 대상)

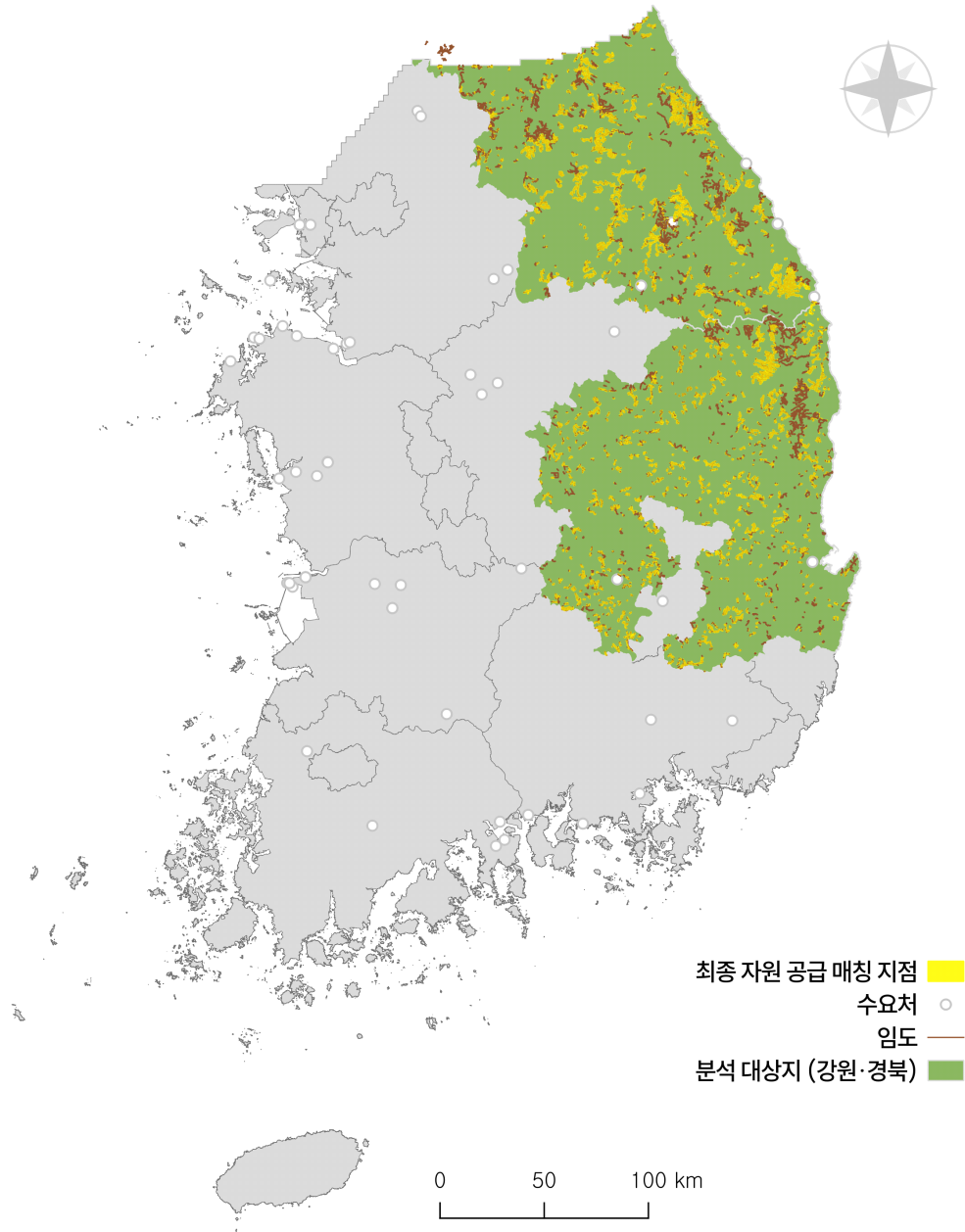
분석 시나리오	구분	총 잠재 가용량 (A) (ton/BDT)	연간 수확률 (B)	연간 실효 가용량 (C = A × B) (ton/BDT)	이론적 잠재량 대비 비율 (② / ①)
기준	이론적 잠재량 (임도 및 수요처 거리 미적용)	7,949,195		298,095	-
시나리오 1	순수 경제적 조달 권역 (임도 500m 반경 및 수요처 30km 반경 적용)	1,285,033	3.75%	48,189	약 16%
시나리오 2	정책 지원 기반 조달 권역 (임도 500m 반경 및 수요처 150km 반경 적용)	2,088,491		78,318	약 26%



[그림 3-22] 산림바이오매스 수요처 반경 버퍼 및 잠재량 매칭 지도(시나리오 1)⁴⁾

4) 바이오매스 화력발전소 출처: 산업통상자원부(2022) 및 전력거래소(2023) 자료; 송한새·윤미향 의원실(2023), 『대한민국 산림의 딸감화』에서 재인용 및 재구성.

목재펠릿 제조시설 출처: 산림청, "목재펠릿 제조시설(주택용, 산업용, 발전용) 현황", https://www.forest.go.kr/kfswweb/kfi/kfs/cms/cmsView.do?cmsId=FC_000811&mn=AR01_04_04_02#:~:text=%EB%AA%A9%EC%9E%AC%ED%8E%A0%EB%A6%BF%20%EC%A0%9C%EC%A1%B0%EC%8B%9C%EC%84%A4%20%ED%98%84%ED%99%A9%20*%20%ED%8F%AC%EC%B2%9C%20:%20EA%B2%BD%EA%B8%B0%EC%95%84%EC%8A%A4%EC%BD%98,%EC%B2%AD%EC%A3%BC%20:%20%EC%8B%A0%EC%98%81%EC%9D%B4%EC%95%A4%ED%94%BC%20*%20%EB%82%A8%EC%9B%90%20:%20%EC%97%90%EC%BD%94%EC%97%90%EB%84%88%EC%A7%80%EC%9B%90 (검색일: 2026.03.10.)



[그림 3-23] 산림바이오매스 수요처 반경 버퍼 및 잠재량 매칭 지도(시나리오2)⁵⁾

주 1: 시나리오 2 에서의 150km 의 수요처 반경을 가정할 시, 수요처별 경제적 조달 권역 버퍼를 생성하였을 때 분석대상지를 모두 포함하는 버퍼가 생성되기 때문에 좌측 지도에서는 수요처별 조달 권역(150km)을 별도로 표시하지 않았음.

5) 바이오매스 화력발전소 출처: 산업통상자원부(2022) 및 전력거래소(2023) 자료: 송한새·윤미향 의원실(2023), 『대한민국 산림의 딸감화』에서 재인용 및 재구성.

목재펠릿 제조시설 출처: 산림청, "목재펠릿 제조시설(주택용, 산업용, 발전용) 현황", https://www.forest.go.kr/kfswweb/kfi/kfs/cms/cmsView.do?cmsId=FC_000811&mn=AR01_04_04_02#:~:text=%EB%AA%A9%EC%9E%AC%ED%8E%A0%EB%A6%BF%20%EC%A0%9C%EC%A1%B0%EC%8B%9C%EC%84%A4%20%ED%98%84%ED%99%A9%20*%20%ED%8F%AC%EC%B2%9C%20:%20EA%B2%BD%EA%B8%B0%EC%95%84%EC%8A%A4%EC%BD%98,%EC%B2%AD%EC%A3%BC%20:%20%EC%8B%A0%EC%98%81%EC%9D%B4%EC%95%A4%ED%94%BC%20*%20%EB%82%A8%EC%9B%90%20:%20%EC%97%90%EC%BD%94%EC%97%90%EB%84%88%EC%A7%80%EC%9B%90 (검색일: 2026.03.10.)

라. 시사점 및 정책 제언

본 공간 매칭 분석의 결과는 산림에 방치된 미이용 바이오매스가 풍부하기 때문에 이를 실질적인 신재생에너지원으로 삼으려는 현행 정책의 가정에 오류가 있을 수 있음을 정량적 데이터로 입증하였다. 수요처 및 임도와의 거리 등 경제적인 여건을 고려하지 않고 산출한 이론적 잠재량(강원도, 경상북도 합산 시 약 795만 톤)과 달리 수요처 및 임도와의 거리를 고려한 경제적으로 조달 가능한 자원의 잠재량은 약 4.8만톤 수준에 불과하다(시나리오 1). 강원도와 경상북도 지역이 잠재 가용량이 전국 대비 52%를 차지하는 것을 고려하였을 때, 경제적으로 조달 가능한 자원의 전국 잠재량은 약 9.23만 톤 수준으로 추정할 수 있다.

나아가 정부의 REC 가중치 부여 등 정책적 지원을 통해 조달 권역을 반경 150km까지 대폭 확장하여 경제성을 강제로 확보한 사례(시나리오 2)를 분석하더라도, 강원도와 경상북도의 연간 실효 가용량은 약 7.8만 톤에 그친다. 이를 전국 단위로 환산할 경우 약 15만 톤 수준으로 추정되는데, 이 역시 실제 시장에서 소비되는 물량과는 차이를 보인다.

최근(2025년 기준) 미이용 산림바이오매스의 전체 연간 이용 실적은 약 167만 톤에 달하며, 그중 본 분석의 기반이 된 숲가꾸기(간벌 등) 산물만 보더라도 약 23.7만 톤이 이용되고 있다. 이는 정책 지원을 최대로 가정하여 추산한 전국 실효 가용량(약 15만 톤)조차 뛰어넘는 수치이다. 이러한 괴리는 현재의 바이오매스 공급망이 자생적인 시장 경제성에 기반한 것이 아니라, 무리한 원거리 수집까지 유도하는 정부의 수집 보조금 및 신재생에너지 공급인증서(REC) 가중치 등 인위적인 재정 지원에 전적으로 의존하여 역지로 지탱되고 있음을 보여준다. 바이오매스 발전 설비와 수요만 지속적으로 확장할 경우, 사업자들은 한정된 보조금 체계 내에서 마진을 남기기 위해 물리적 접근이 용이한 산림에 집중적으로 벌채 및 수집할 여지가 있다. 이러한 무분별한 집중 벌채는 지반 안정성을 저해하여 산사태 발생 위험을 높이고(김정흠, 2024), 조류 및 야생동물의 서식지를 파괴하는 등 생물다양성의 감소(김진용 외, 2015)라는 심각한 2차 환경 훼손을 유발할 수 있다.

본 연구를 통해 미이용 산림바이오매스 수집 과정의 낮은 경제성이 정량적으로 확인되었으며, 현재의 공급망은 신재생에너지 공급인증서(REC) 가중치 및 정부 보조금에 전적으로 의존하는 기형적 구조임이 드러났다. 실제 가용 잠재량을 상회하는 과도한 연간 이용 실적은 자생적 시장 논리가 아닌 재정 지원에 의한 인위적 결과로 판단된다. 향후 정책 당국은 맹목적인 에너지원 확보라는 단기적 목표에서 벗어나야 하며, 산림 정책의 수립에 있어 재해 예방과 생물다양성 보존 등 생태계 서비스 전반을 고려해야 한다.

제4장

산업별·재종별 목재 소비 구조 분석

제1절 분석의 의의 및 접근 방법

제2절 한국 HWP 분야 선행연구 검토

제3절 2020~2024년 국내 목재 소비 시계열 구조

제4절 한국 목재산업의 구조적 특성

제5절 한국 산림의 수종 구성과 차등 환산의 학술적 기반

제6절 산업별·재종별 목재 소비 구조 분석 결과

4

산업별·재종별 목재 소비 구조 분석 <



제1절 분석의 의의 및 접근 방법

본 장에서는 산림청 「목재이용실태조사」 2020-2024년 5개년 통계를 기반으로 산업별·재종별 소비 구조를 정량화하고, 이를 Cascading 이용 경로 분석과 IPCC FOD(First Order Decay) 탄소 저장 모형에 통합 적용함으로써 국내 수확목제품(HWP)의 탄소 저장 동태를 구조적으로 분석하였다. 본 연구의 핵심 목적은 단순한 소비량 통계 제시에 그치지 않고, 목재가 어떤 산업에 투입되어 어떤 제품군으로 전환되고, 사용 및 폐기·재활용을 거쳐 최종적으로 어떤 시간 척도에서 탄소가 저장·배출되는지를 하나의 분석 체계로 연결하는 데 있다.

본 연구의 분석 범위는 본 보고서 제3장의 분석 범위와 명확히 구분된다. 제3장이 한국에서 생산된 산림바이오매스의 공급 잠재력을 평가하는 "국내 생산" 측면 분석이라면, 제4장과 제5장은 한국 사회에서 실제로 사용되는 모든 목제품 풀(국내산 + 수입 원목 + 수입 가공품)을 포괄하는 "전체 소비" 측면 분석이다. 이는 IPCC 「2019 Refinement」가 제시한 4가지 회계 접근법 (Stock-Change, Production, Atmospheric Flow, Apparent Consumption) 중 본 연구가 한국과 같은 목재 순수입국의 실제 탄소 저장량을 가장 정확히 반영할 수 있는 Apparent Consumption(소비 기반) 접근을 채택하였기 때문이다. 한국 목재 자급률이 17.4%(2023년) 수준임을 고려하면, 국내 생산만을 분석 대상으로 삼는 산정 체계는 한국 사회 전체의 HWP 탄소 저장량 약 80% 이상을 누락하게 된다. 본 연구는 이 누락 부분을 포함하여 한국 사회의 실제 목제품 탄소 저장 동태를 정량화한다는 점에서 제3장과 상호 보완적 관계에 있다.

IPCC 가이드라인은 HWP 탄소를 국가 온실가스 인벤토리의 중요한 구성요소로 규정하고 있으며, 특히 「2019 Refinement」에서는 제품군별 반감기 기반 지수감소 구조(FOD 모형)를 적용하도록 명시하고 있다(IPCC, 2019). 본 연구는 통계-산업구조-물질흐름-탄소동태 모형을 결합한 구조적 접근을 통해 한국의 HWP 저장 동태를 추정한다.

특히 본 연구는 다음 두 가지 방법론적 특성을 갖는다. 첫째, 반감기 시나리오를 A(IPCC 기본)와 B(장은경 한국 Tier 3) 두 개로 분리하여 계수 민감도를 정량적으로 점검한다. 둘째, 침엽수·활엽수의 밀도 차등 적용을 통해 동일 체적이라도 수종군 구성에 따라 단위 체적당 탄소량이 달라질 수 있음을 활동자료 단계에서 반영한다.

본 연구의 분석 단위는 산림청 「목재이용실태조사」가 보고하는 22개 목재제품을 4개 카테고리(제재목류·목질패널류·펄프·제지·에너지용)로 재구성한 것이다. 이 매핑은 IPCC HWP 회계 분

류 체계와 정합하도록 설계되었으며, 4개 카테고리는 본 연구의 모든 후속 분석(소비 구조, 탄소 환산, FOD 시뮬레이션)의 기본 분석 단위가 된다. 22개 제품에서 4개 카테고리로의 매핑 기준은 표 4-1과 같다.

<표 4-1> 산림청 22개 목재제품의 4개 카테고리 매핑

카테고리	포함 제품 (산림청 22개 분류 기준)
제재목류	제재목, 방부목재, 난연목재, 집성재
목질패널류	합판, 섬유판, 파티클보드, 목질바닥재, 배향성 스트랜드보드(OSB), 목재 플라스틱 복합재(WPC)
펄프·제지	펄프
에너지용	목재칩, 목재펠릿, 목재브리켓, 성형숯, 숯·목초액, 톱밥·목분, 장작
기타	표고버섯 재배자목 (FOD 풀에서 제외, 즉시 산화 처리)

자료: 산림청 「2024년 기준 목재이용실태조사」의 22개 목재제품 분류 체계를 본 연구에서 IPCC HWP 분류와 정합하도록 4개 카테고리로 재구성. 표고버섯 재배자목은 농업용 단기 사용으로 FOD 풀에서 제외하나, 산업화 가능성 검토는 2차년도 통합 과제임.

1. 국외 사례 비교를 통한 방법론적 정합성

본 연구의 방법론적 방향은 IPCC 표준 FOD에 한국 실태를 반영한 것이며, 일본·독일·핀란드 등에서 수행된 HWP 분석 사례와 정합한다. 일본은 국가 온실가스 인벤토리(NIR)에서 Production Approach 기반 HWP 회계를 적용하며, 장수명 구조재(건축용 제재목) 확대를 통해 저장량을 증가시키고자 하는 전략을 취한다. 독일은 Cascading use를 정성적 정책 구호가 아니라 물질흐름의 전환율과 손실률을 수치로 관리하는 체계로 구현한 대표 사례이다(Mantau, 2012). 핀란드는 침엽수 중심 산림구조를 가지며, 수종별 전건밀도 차이를 반영한 탄소환산 접근을 발전시켜 왔다(Pingoud et al., 2012). 본 연구의 수종군 차등 환산 및 시나리오 비교 설계는 이들 국가 사례와 방법론적으로 정합한다.

제2절 한국 HWP 분야 선행연구 검토

본 연구는 한국에서 수행된 HWP 탄소저장량 산정 선행연구의 학술적 흐름 위에 위치한다. 한국의 HWP 연구는 2010년 전후부터 본격화되었으며, 크게 (1) 회계 방법론 비교 연구, (2) 국가 인벤토리 정밀화 연구, (3) 수종별·산업별 정밀 분석 연구의 세 흐름으로 발전해 왔다. 본 절에서는 이 세 흐름의 주요 연구를 정리하고, 본 연구가 이 학술적 계보 속에서 어떤 위치를 차지하는지 명시한다.

1. 회계 방법론 비교 연구

한국 HWP 연구의 출발점은 IPCC가 제시한 4가지 회계 접근법(Stock-Change, Production, Atmospheric Flow, Simple Decay) 중 한국에 유리한 방법을 식별하는 것이었다. 최수임·이수민·주린원(2010)은 1970-2008년 한국 HWP 자료를 4개 접근법으로 산정한 결과, 접근법에 따라 연간 탄소저장량 변화량이 $-9,023 \text{ Gg CO}_2/\text{yr}$ (Production)에서 $+4,052 \text{ Gg CO}_2/\text{yr}$ (Stock-Change)까지 큰 차이를 보임을 입증하였다. 이 연구의 핵심 결론은 "한국은 목재 순수입국이므로 Stock-Change Approach가 가장 유리하다"는 것으로, 한국이 어떤 회계 방법을 채택할지에 대한 정책 논의의 기초가 되었다.

본 연구의 시나리오 A·B 비교 설계와 5장 6절의 NIR 정합성 검토는 이 학술적 논의의 연장선상에 있다. 본 연구는 한국 NIR이 채택한 Production Approach를 기준으로 정합성을 검증하면서도, Apparent Consumption(소비 기반) 분석을 병행하여 "한국 사회 내 모든 목제품의 탄소 풀"을 정량화한다. 이는 최수임 등(2010)이 제기한 "한국 같은 순수입국에는 소비 기반 분석이 필요하다"는 문제의식의 후속 작업이다.

2. 국가 인벤토리 정밀화 연구

한국 산림부문 온실가스 인벤토리(NIR)의 정밀화는 국립산림과학원을 중심으로 수행되어 왔다. 김영환·이선정·임종수·손영모·김래현(2016)은 국가산림자원조사(NFI) 기반 임목축적 자료의 활동자료 정밀화를 시도하였으며, 기존의 "5년 주기 도별 윤조사"에서 "매년 전국 5분의 1 단위 조사"로 전환된 NFI 시스템에 맞춰 인벤토리 산정 방법을 개선하였다. 동 연구는 본 연구가 사용하는 5개년 시계열(2020-2024)이 한국 NFI의 한 주기 단위와 일치한다는 점에서 활동자료 사용의 정합성을 뒷받침한다.

또한 김영환(2016)은 "국가산림자원조사와 모델을 활용한 우리나라 산림지 온실가스 인벤토리 개선 방안"을 통해 한국 NIR이 임상별(침엽수림/활엽수림) 산정에 머물러 있고 수종별 정밀 산정으로 발전해야 함을 지적하였다. 이는 본 연구가 적용한 침/활 차등 환산

(0.225 vs 0.280 t-C/m³)의 정책적 정당성을 직접 뒷받침하며, 장은경(2021) Tier 3 계수 적용을 통한 본 연구의 정밀화 방향과 부합한다.

3. 수종별·산업별 정밀 분석 연구

한국에서 수종별 탄소배출계수 개발은 국립산림과학원이 2000년대 초부터 22개 수종에 대해 진행해 왔다(Li et al., 2010; Pyo et al., 2010; Seo et al., 2011a; 2011b; Son et al., 2014a, 2014b). 이러한 수종별 국가고유계수 체계는 본 연구가 침엽수·활엽수 차등 환산을 적용할 수 있는 기반이며, 본 보고서 제3장(공급 측면 분석)과 4장과 5장(이용 측면 분석)이 동일한 국가고유계수 체계 위에서 수행되는 정합성의 출발점이다.

산업·이용 측면에서는 장은경(2021) 박사학위논문 「수확목제품의 이용 특성을 고려한 탄소 저장량 산정 연구」가 한국 HWP의 가장 정밀한 학술적 분석으로 평가된다. 동 연구는 (1) 산업별 이용 수명 인터뷰 조사, (2) 한국 Tier 3 가중평균 반감기 도출, (3) 1970-2080년 시계열 시뮬레이션, (4) 산업별 투입 비율과 cascading 가능성 정량화의 4개 측면에서 한국 HWP 연구의 표준을 정립하였다. 본 연구는 장은경(2021)의 표 17(Tier 3 방법에 적용된 산업별 반감기 및 폐기율, 본 보고서 표 5-1로 게재), 표 18(HWP 탄소 전환 계수, 본 보고서 표 4-4로 게재), 표 25(국산 제재목의 산업별 투입량, 본 보고서 표 5-6로 게재), 표 28(산업별 수확된 목제품 탄소 축적량(Tier 3), 본 보고서 표 5-2로 발췌 게재)을 핵심 입력값으로 활용하며, 이 점에서 직접적인 후속 연구로 위치한다.

4. 본 연구의 학술적 위치 및 차별성

본 연구는 위 세 흐름 위에 다음 세 가지 측면에서 새로운 기여를 한다.

- 첫째, 시계열 갱신: 기존 한국 HWP 연구는 대부분 2010년 이전 또는 2010년대 초반 자료까지 분석한 반면, 본 연구는 2020-2024년 5개년 최신 자료를 활용한다. 특히 2022년 30.8백만 m³ 정점 후 2024년 26.4백만 m³로 감소한 최근 변동 추세가 본 연구에서 처음 정량 반영된다.
- 둘째, 시나리오 비교 설계: 기존 연구는 단일 추정값을 제시하는 데 그쳤으나, 본 연구는 시나리오 A(IPCC 기본)와 시나리오 B(장은경 한국 Tier 3)의 명시적 비교 구조를 통해 "한국 실태와 IPCC 기본 가정의 격차"를 정량화한다.
- 셋째, 통합 분석 체계: 본 연구는 활동자료 정밀화(4장) → FOD 시뮬레이션(5장 1-3절) → 민감도 분석(5장 4절) → Cascading 분석(5장 5절) → NIR 정합성 검증(5장 6절)의 일관된 분석 흐름을 한 보고서 안에서 제시함으로써, 기존에 여러 논문으로 분산되어 있던 분석 요소를 통합 시뮬레이션 체계로 결합한다.

제3절 2020~2024년 국내 목재 소비 시계열 구조

산림청 「목재이용실태조사」에 따르면 2020-2024년 국내 전체 목재이용량은 연간 약 26백만 m³에서 31백만 m³ 사이에서 변동하였다(표 4-2 및 그림 4-1).

<표 4-2> 2020-2024년 국내 전체 목재이용량 시계열

연도	총 이용량 (m ³)	전년대비 증감 (m ³)	증감률 (%)
2020	27,265,714	-	-
2021	28,499,494	+1,233,780	+4.5
2022	30,800,395	+2,300,901	+8.1
2023	27,223,189	-3,577,206	-11.6
2024	26,406,606	-816,583	-3.0

자료: 산림청 「목재이용실태조사」 2020-2024년 각 연도 보고서. 본 표의 '총 이용량'은 22개 목재제품의 원목 + 원목 외 원자재 + 수입 목재제품 합계(폐목재 제외) 기준이다.

2022년에 30.8백만 m³로 정점을 기록한 후, 2023년부터 점진적인 감소 추세를 보인다. 이러한 시계열 변화는 단일 산업 요인에 의해 설명되기보다는, 건설 부문, 제조업, 소비재 산업, 에너지 수요 등 복합적인 산업 구조 요인의 영향을 받는 것으로 해석된다. 이용량 변동의 산업별 원인 분석은 2차년도 과제로 둔다.

1. 시계열 변동의 정책·산업 배경 해석

표 4-2와 그림 4-1에서 관측되는 2020-2024년 변동 패턴은 다음과 같이 해석된다.

- 2020년 (27.3백만 m³) - 코로나 팬데믹 영향으로 건설경기 둔화 및 목조주택 착공 감소, 다만 바이오매스용 수입 +14.0%로 전체 공급량 소폭 증가
- 2021년 (28.5백만 m³, +4.5%) - 팬데믹 회복기 건설경기 반등, 바이오매스용 수입 지속 증가
- 2022년 (30.8백만 m³, +8.1%) - 시계열 정점. 코로나 회복 + 주택공급 정책 + 바이오매스용 +21.0% 결합 효과
- 2023년 (27.2백만 m³, -11.6%) - 건설경기 침체 본격화, 제재용재·합판 수요 급감 (제재 -11.9%, 합판 -14.7%, 보드 -11.5%)
- 2024년 (26.4백만 m³, -3.0%) - 건설경기 침체 지속, 제재목 수입 추가 감소 (-2.4%)

이러한 변동 패턴은 본 연구의 "5개년 평균 inflow" 산정에 두 가지 중요한 함의를 갖는다. 첫째, 5개년 평균이 정점(2022)과 저점(2024)을 모두 포함하므로, FOD 시뮬레이션에서 사용하는 평균값이 "정상상태(steady state)"의 합리적 추정치가 된다. 둘째, 그러나 향후 건설경기 회복 시점(2025년 이후 회복 전망, 김기동 2024)을 반영한 미래 inflow 시나

리오는 본 평균값보다 더 큰 값을 사용해야 할 것이다.

장기 추이 측면에서는 한국 목재 자급률이 IMF 위기 이후 점진적으로 상승해 온 (1996년 4%대 → 2023년 17.4%) 추세와 "국산 바이오매스용 수요 증가"와 결합되어 "단기 산화 경로 65%" 구조의 형성 과정과 일치한다. 특히 목재펠릿 산업이 2009년 시작되어 2022년 73만 톤 규모로 확대된 흐름이 본 연구의 핵심 발견과 직결된다.

제4절 한국 목재산업의 구조적 특성

본 절에서는 한국 목재 소비 구조의 분석에 앞서, 한국 목재산업 자체의 구조적 특성을 정리한다. 본 연구의 분석 결과(시나리오 A·B 격차, cascading 효과 등)가 도출되는 산업적 배경을 이해함으로써, 정책적 시사점의 적용 가능성을 평가하는 데 도움이 된다.

1. 산업 규모와 4대 주요 산업 구조

한국 목재산업은 2022년 기준 매출액 약 8조 2,730억 원, 종사자 수 12,797명 규모이다. 이 중 국내 생산업체의 매출액은 약 3조 5,762억 원(업체당 평균 21.0억 원, 종사자 7,539명)이며, 수입·유통업체의 매출액은 약 4조 6,968억 원(업체당 평균 77.6억 원, 종사자 5,258명)으로, 수입·유통 부문이 산업 매출의 56.8%를 차지한다(EG-TIPS, 2024). 이는 한국 목재산업이 국내 원목 생산 중심이 아니라 가공·유통 중심 구조임을 시사하며, 본 연구가 Apparent Consumption(소비 기반) 분석을 병행하는 정당성을 뒷받침한다.

산림청 「목재이용실태조사」 분류에 따르면 한국 목재산업은 다음 4개 주요 산업으로 구분된다.

- 제재목 산업 - 원목을 일정한 두께로 절단하여 건축·가구·포장용재로 가공. 본 연구의 "제재목류" 카테고리에 해당.
- 합판·보드류 산업 - 합판(원목 단판 적층), 섬유판(MDF), 파티클보드(소경재·폐목재 압축), OSB 등 건축·가구용 소재 생산. 2022년 기준 연간 생산량 약 240만 m³. 본 연구의 "목질패널류" 카테고리에 해당.
- 펄프칩·톱밥·목재펠릿 산업 - 국산 소경목·불량목·폐목재를 원료로 펄프칩(국내 펄프업체 공급), 톱밥(축산·비료용), 목재펠릿(에너지용) 생산. 목재펠릿은 2009년 생산 시작, 2022년 약 73만 톤 생산. 본 연구의 "펄프·제지" + "에너지용" 카테고리에 해당.
- 목조주택 산업 - 과거 핀란드·캐나다 등에서 세트 형태로 수입하던 단계에서 국산 구조용집성재·CLT(Cross-Laminated Timber) 등 공학목재 생산으로 발전. 본 연구의 "제재목류" 중 집성재 부문에 해당.

2. 자급률의 구조적 특성

한국 목재산업은 매우 낮은 자급률 구조를 가진다. 2020-2023년 기준 목재자급률은 약 15.9~17.4%, 원목자급률은 약 55.7~64.1% 수준이다(산림청, 2024). 이러한 자급률 격차는 "국내 원목은 일정 수준 생산되지만, 가공된 목제품은 대부분 수입에 의존"하는 구조를 보여준다. 특히 침엽수 원목 수입의 약 80%는 뉴질랜드 라디에타 소나무이며, 이는 한국 목

재산업이 단일 수입원에 크게 의존하는 취약 구조임을 시사한다.

<표 4-3> 한국 목재 자급률 시계열 (2010-2023, 산림청)

구분	2010	2015	2020	2021	2022	2023
목재자급률(%)	13.5	16.1	15.9	15.9	15.0	17.4
원목자급률(%)	46.8	56.5	60.3	55.7	58.6	64.1

자료: 산림청 「목재수급실적」 각 연도 (forest.go.kr). 목재자급률은 가공품 포함 기준, 원목자급률은 원목 기준.

표 4-3에서 확인되듯, 한국 원목자급률은 2010년 46.8%에서 2023년 64.1%까지 꾸준히 상승해 왔으나, 최종 가공품을 포함한 목재자급률은 15~17% 수준에 머물러 있다. 이는 본 연구의 핵심 발견인 "단기 산화 경로 65% 집중"의 구조적 배경과 직결된다 - 국내 원목이 점차 늘어나는 와중에도 그 대부분이 펄프칩·바이오매스 등 단기 산화 경로로 흘러가고, 장수명 구조재 생산은 수입 의존이 높은 구조이다.

3. 건설경기 연동성과 수요 변동 패턴

한국 목재 수요는 건설경기에 강하게 연동된다. 한국은행 건설투자지표는 2018년 -4.6%, 2019년 -2.5%, 2020년 -0.1%로 둔화되었고, 이는 2022년 정점(30.8백만 m³) 이후 2023~2024년 목재이용량 감소(약 27백만 m³로 -11.6%) 추세와 부합한다(나무신문, 2024). 특히 토목 부문보다 건축 부문의 침체가 크며, 이는 본 연구의 "제재목류 + 목질패널류" 풀 형성에 직접적 영향을 미친다.

수입 측면에서는 바이오매스용 수입이 지속 증가 추세이다. 2020-2022년 동안 바이오매스용 목재 수입은 +21.0%(2022), +14.0%(2020) 등으로 증가하였고, 이는 RPS(신재생에너지 공급의무화) 정책 하의 발전사 목재펠릿 수요 증가에 기인한다. 그 결과 "국산 원목자급률은 상승하지만, 수입 바이오매스 비중도 함께 증가하는" 양면적 구조가 나타나며, 이는 본 연구가 "에너지용 35.6%"로 산정한 단기 산화 경로 비중의 정책적 배경이다.

제5절 한국 산림의 수종 구성과 차등 환산의 학술적 기반

본 연구가 적용한 침/활 차등 환산(침엽수 0.225, 활엽수 0.280 t-C/m³)의 정당성은 한국 산림의 수종 구성 특성과 학술적 기반에 의해 뒷받침된다. 본 절에서는 한국 산림의 임상별 면적 구성, 벌채 통계의 침/활 비율, 수입 원목의 수종 편향, 그리고 수종 차등 환산의 학술적 도출 과정을 정리한다.

1. 한국 산림의 임상 구성

산림기본통계(2020) 기준 한국 산림 입목지의 임상별 구성은 다음과 같다.

- 침엽수림: 약 36.9% (소나무·잣나무·낙엽송 등)
- 활엽수림: 약 31.85% (참나무류·기타 활엽수 등)
- 혼효림: 약 26.46% (침엽수와 활엽수가 혼재)
- 기타: 약 4.79% (죽림, 무림목지 등)

이는 한국 산림이 "침엽수 우세 단순 구조"가 아니라 침엽수·활엽수·혼효림이 균형있게 분포하는 구조임을 보여준다. 다만 임령 구조에서는 30년 이상 노령림이 76% 이상을 차지하는 "노령화 추세"가 진행 중이며(본 보고서 제3장 참조), 이는 향후 벌채 가능 자원 측면에서 중요한 변수가 된다.

또한 김은숙 외(2022)는 국가산림자원조사 시계열 자료(제5차~제7차)를 분석한 결과, 한국 산림이 침엽수림 감소·활엽수림과 혼효림 증가의 방향으로 변화하고 있으며, RCP 8.5 기후변화 시나리오 하에서 2055년까지 침엽수림 38.1% → 28.5% 감소, 활엽수림 34.2% → 38.8% 증가, 혼효림 27.7% → 32.7% 증가로 전망된다고 보고하였다. 이는 본 연구의 침/활 차등 환산 적용이 "향후 더욱 중요해질" 분석 단위임을 시사하며, 2차년도 시계열 분석에서 임상 변화 추세가 반영되어야 함을 보여준다.

2. 벌채 통계의 침/활 구성

산림청 벌채 통계에 따르면, 한국 국내 원목 생산의 침/활 구성은 다음과 같이 침엽수 우세 구조이다.

- 벌채 면적 기준: 침엽수 약 68.5~71.4%, 활엽수 약 28.6~31.5%
- 벌채량 기준: 침엽수 약 56.1~60.3%, 활엽수 약 39.7~43.9%
- 주요 수종별: 소나무(33.4~39.0%) > 참나무류(24.9~26.0%) > 기타활엽수(14.6~17.9%) > 낙엽송(9.9~10.5%)

면적 기준과 벌채량 기준의 차이는 활엽수가 ha당 평균 벌채량이 더 큼(참나무류 78~84 m³/ha vs 소나무 25~42 m³/ha)에서 비롯된다. 본 연구가 적용한 활엽수 환산계수(0.280)가 침엽수(0.225)보다 24% 높은 것은 이러한 활엽수의 단위 체적당 탄소 함유량 증가를 반영한 결과이다.

3. 수입 원목의 수종 편향

한국이 수입하는 원목의 수종 구성은 국내 산림 구성과 매우 다르다. 2023년 기준 수입 원목의 95.8%는 침엽수이며, 활엽수는 4.2%에 불과하다(나무신문, 2024). 주요 수입국별로는 뉴질랜드 79.5%(주로 라디에타 소나무 침엽수), 미국·캐나다(주로 조경용재) 순이다.

이러한 "국내는 침엽수 60% 활엽수 40%, 수입은 침엽수 96% 활엽수 4%" 구조는 본 연구의 "국내·수입 원목 분리 분석"이 필수적임을 보여준다. 두 그룹의 침/활 비율이 크게 다르므로, 통합 평균을 적용하면 침엽수 비중이 과대 추정되어 탄소 환산값이 과소평가될 수 있다. 본 연구는 표 4-4(원본 침/활 분리 데이터)에서 두 그룹을 별도 처리하여 이 문제를 해결한다.

4. 수종 차등 환산계수의 학술적 도출

본 연구가 적용한 수종 차등 환산계수는 본 보고서 표 4-4에 정리한 바와 같으며, 이는 IPCC(2013, 2014) Volume 4 Chapter 12 HWP의 권장값과 한국 국립산림과학원 국가고유계수 체계를 결합한 장은경(2021)의 정리를 본 연구에 맞게 적용한 것이다. 구체적인 도출 경로는 다음과 같다.

- 기본 밀도(basic density): 침엽수 0.450 g/cm³, 활엽수 0.560 g/cm³ (IPCC 2014 Table 12.4 권장값과 한국 국가고유계수 일치)
- 탄소함유율(C fraction): 0.500 (전 수종 동일, IPCC 권장값)
- 변환계수 = 기본밀도 × 탄소함유율 = 0.450 × 0.500 = 0.225 t-C/m³ (침엽수), 0.560 × 0.500 = 0.280 t-C/m³ (활엽수)

본 보고서 제3장의 공급 측면 분석에서는 미이용 산림바이오매스 공급 잠재력 추정을 위해 9개 주요 수종(강원지방소나무·잣나무·리기다소나무·곰솔·낙엽송·편백·삼나무·상수리나무·굴참나무)에 대해 국립산림과학원 「2020 입목재적·바이오매스 및 임분수확표」가 제시하는 수종별 목재 기본 밀도를 직접 적용한다(예: 강원지방소나무 0.419, 낙엽송 0.453, 상수리나무 0.721 ton/m³). 본 장의 침엽수·활엽수 차등 환산계수 역시 동일한 「2020 입목재적·바이오매스 및 임분수확표」체계 위에서 IPCC 침엽수·활엽수 권장 평균값과 결합한 결과로, "수종별 기본밀도 ×

0.5(탄소함유율) = 본 장 침/활 그룹 환산계수"의 관계로 정합한다.

다만 제3장은 미이용 부산물(가지·초두부) 발생량 추정을 위해 수종별 정밀 분석이 요구되는 반면, 본 장은 한국 사회 전체 HWP 풀(국산 원목·수입 원목·수입 가공품)을 대상으로 하여 수입 원목·가공품의 수종 정보가 제한적인 점을 반영, 침/활 두 군의 차등 환산을 적용한 것이다. 즉, 본 보고서는 동일한 국가고유계수 체계 위에서 분석 단위(수종별 vs 침/활 그룹)를 분석 목적에 맞춰 차별화하면서 공급 측면(제3장)과 이용 측면(제4·5장)을 일관되게 분석한다.

보드류는 침엽수·활엽수가 혼합되어 사용되므로 "통합 환산계수" 0.269 t-C/m³를 적용한다. 이는 본 연구가 보드류에서 침/활 분리를 시도하지 않은 이유이며, 다만 향후 보드 원료의 수종 구성이 측정될 경우 차등 환산이 가능하다.

제6절 산업별·재종별 목재 소비 구조 분석 결과

본 절의 목적은 5개년 총 소비량을 단순 제시하는 데 있지 않다. HWP 분석에서 가장 중요한 입력은 연도별 제품군별 탄소 유입량(inflow)이며, 이를 위해서는 (i) 소비 총량을 4개 카테고리로 배분하고, (ii) 체적(m³)을 탄소량(t-C)으로 환산하는 과정이 필요하다.

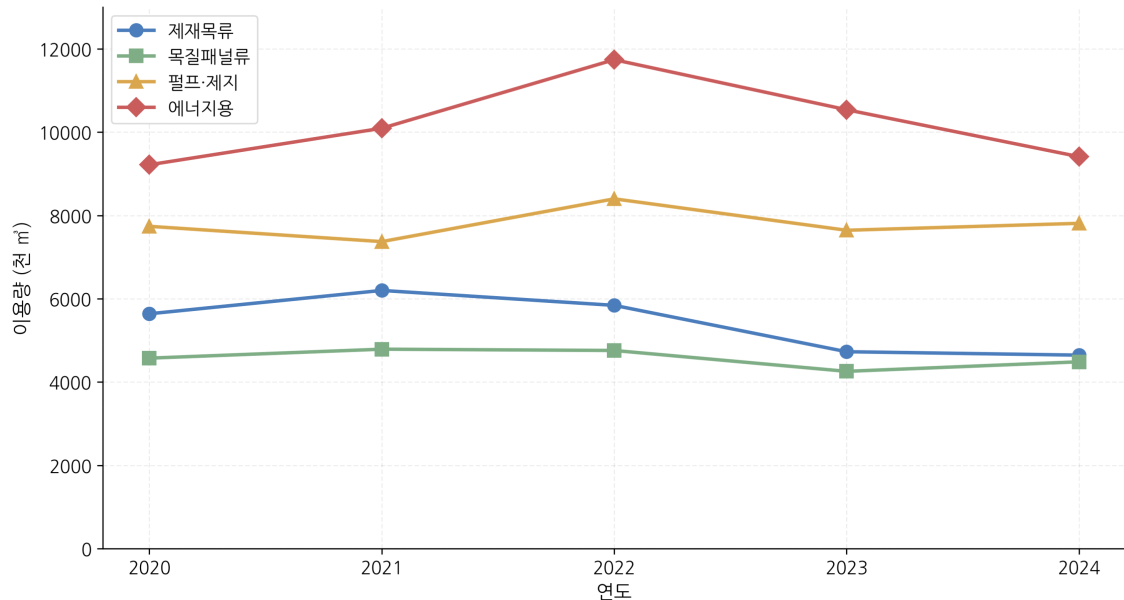
1. 카테고리별 소비 구조 (2020~2024)

산림청 「목재이용실태조사」 5개년 종합지표를 4개 카테고리로 매핑한 결과는 표 4-4 및 그림 4-1과 같다.

<표 4-4> 2020-2024년 카테고리별 국내 목재이용량 (단위: m³)

카테고리	2020	2021	2022	2023	2024
제재목류	5,639,445	6,198,724	5,841,254	4,728,320	4,645,507
목질패널류	4,574,477	4,788,807	4,758,055	4,256,759	4,485,696
펄프·제지	7,737,579	7,370,569	8,398,230	7,643,146	7,809,739
에너지용	9,216,337	10,092,376	11,738,276	10,537,171	9,409,842
기타(표고자목)	97,876	49,018	58,225	57,793	55,822
합계	27,265,714	28,499,494	30,794,040	27,223,189	26,406,606

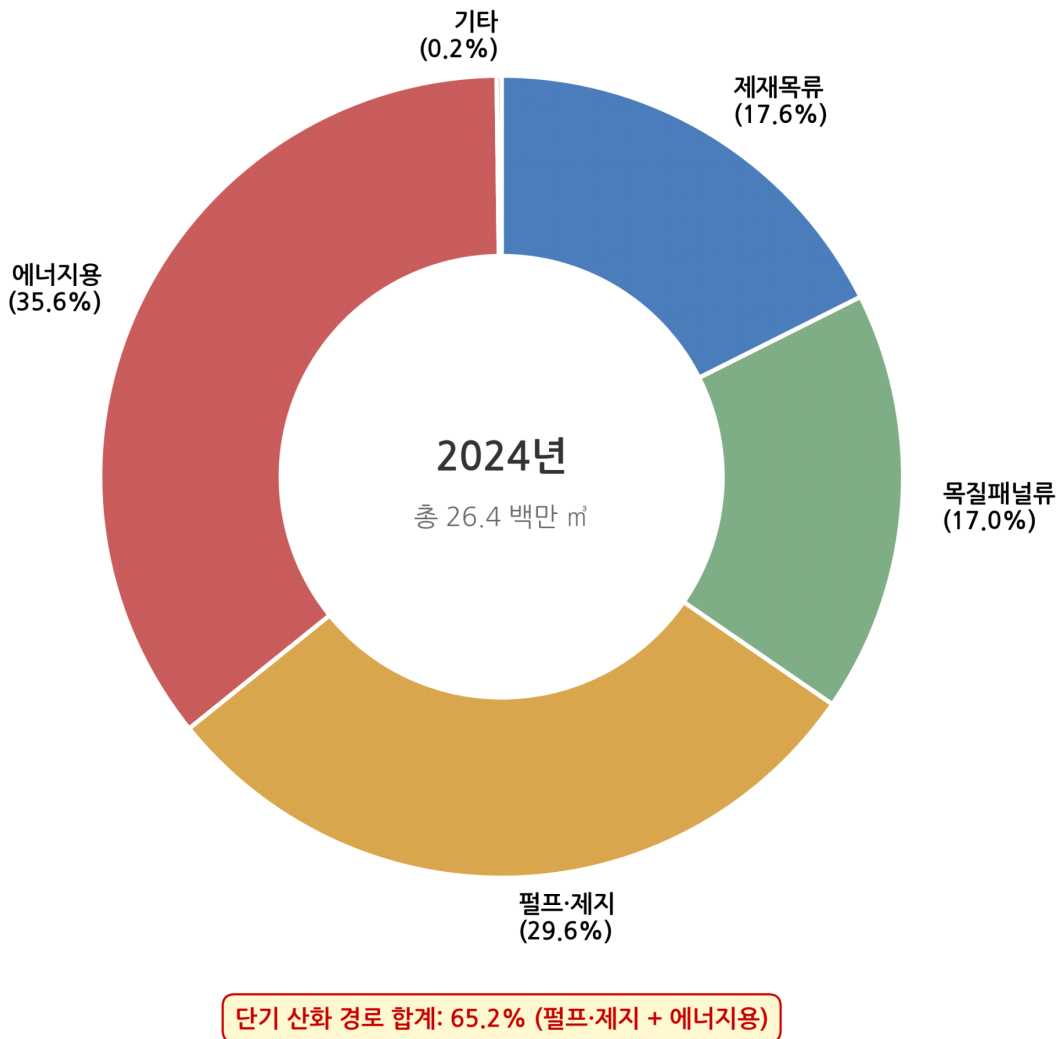
자료: 산림청 「목재이용실태조사」 2020-2024년 각 연도 보고서 종합지표를 본 연구에서 4개 카테고리로 매핑·산출. 2022년 합계 차이(약 6천m³)는 일부 소수 항목의 분류 추정에 따른 잔여 차이임.



[그림 4-1] 2020-2024년 카테고리별 국내 목재이용량

2. 핵심 발견: 단기 산화 경로의 비대칭적 비중

표 4-4와 그림 4-1에서 확인되는 가장 중요한 사실은, 국내 목재 소비가 분산된 구조가 아니라 단기 산화 경로에 비대칭적으로 집중된 구조라는 점이다. 2024년 기준 국내 전체 목재이용량 26.4백만 m³ 중 에너지용이 35.6%(9.4백만 m³)로 가장 큰 비중을 차지하며, 펄프·제지 29.6%를 더하면 단기 산화 경로(반감기 0-2년)가 약 65%에 달한다. 반면 장수명 저장이 가능한 제재목류(17.6%)와 목질패널류(17.0%)는 합쳐도 약 35%에 머문다(그림 4-2).



[그림 4-2] 2024년 카테고리별 국내 목재이용량 비중

이러한 구조는 2020-2024년 5개년 동안 일관되게 관측되며, 특히 에너지용 비중은 2022년 38.1%까지 증가한 이후 다소 감소했으나 여전히 모든 연도에서 1위 카테고리를 유지하고 있다. 이는 본 연구의 출발 문제의식 - 국내 산림바이오매스 정책이 HWP 풀의 장기 탄소 적치를 막고 있다는 가설 - 과 정확히 부합하는 정량적 증거이다.

3. 탄소환산 및 inflow 산정

4개 카테고리별 소비량(m³)을 탄소량(t-C)으로 환산하기 위해, 본 연구는 장은경(2021) 박사논문 표 18에 정리된 한국 적용 HWP 탄소 전환계수를 적용한다. 동 표는 IPCC(2013)의 기본 계수를 한국 목재 이용 실정에 맞춰 정리한 것으로, 제재목·보드류·수종군별 차등 계수를 제공한다.

<표 4-5> HWP 탄소 전환계수 (장은경, 2021, 표 18 인용)

수확된 목제품	밀도 (Mg/m ³)	탄소함유율	전환계수 (Mg C/m ³)
제재목 (통합)	0.458	0.500	0.229
침엽 제재목	0.450	0.500	0.225
비침엽 제재목	0.560	0.500	0.280
보드류 (통합)	0.595	0.454	0.269
MDF	0.691	0.427	0.295
파티클보드	0.596	0.451	0.269
합판	0.542	0.493	0.267

자료: 장은경(2021) 「수확목제품의 이용 특성을 고려한 탄소 저장량 산정 연구」 p.66, 표 18 (IPCC, 2013 인용)

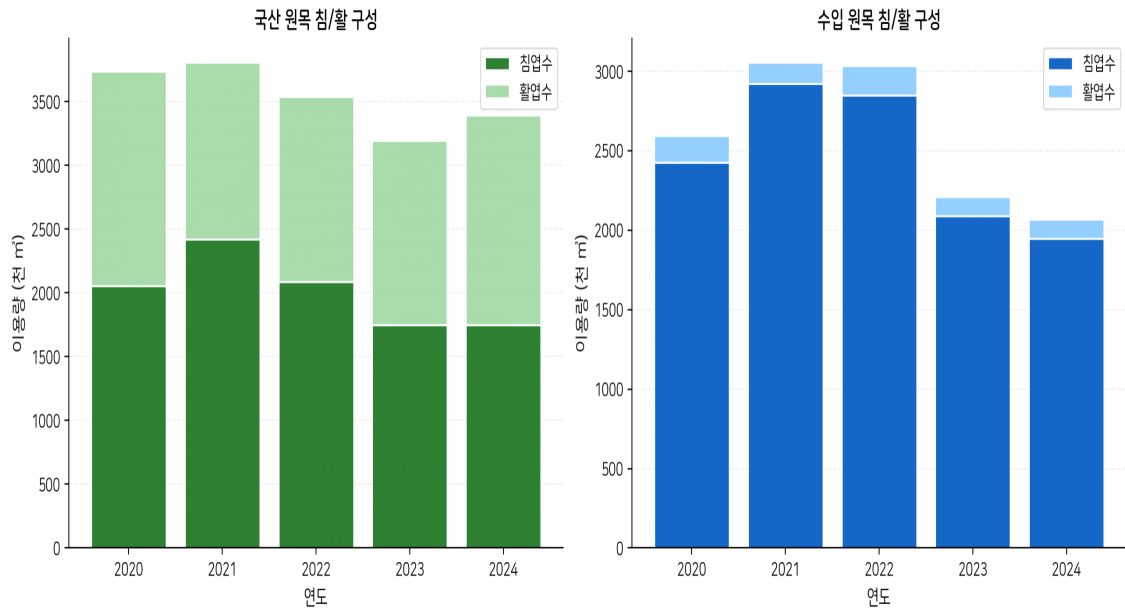
4. 침엽수·활엽수 차등 환산의 적용 범위

표 4-5에서 확인되듯, 동일 체적이라도 활엽수 제재목(0.280 t-C/m³)이 침엽수 제재목(0.225 t-C/m³)보다 약 24% 높은 단위 체적당 탄소량을 갖는다. 따라서 수종군 구성비가 연도별로 변동할 경우, 단일 평균계수 적용은 inflow 추정에 구조적 편의를 유발할 수 있다.

산림청 「목재이용실태조사」는 원목(roundwood) 부분에 대해서는 침엽수·활엽수 분리 통계를 제공하지만, 원목 외 원자재와 수입 목재제품(완제품)에 대해서는 수종 정보가 제한적이다. 이에 본 연구는 다음과 같이 분리 적용한다.

- 원목 부분 (전체의 약 21%): 5개년 종합 침/활 비율을 적용하여 침엽 제재목(0.225) + 활엽 제재목(0.280) 차등 환산
- 원목 외 원자재 + 수입 목재제품 (전체의 약 79%): 수종 분리 자료가 없으므로 통합 계수(제재목류 0.229, 보드류 0.269) 적용
- 펄프·제지: 단순화를 위해 IPCC 기본 단일 계수(약 0.225 t-C/m³) 적용

5개년 원목의 침/활 구성 추이는 그림 4-3과 같다. 2024년 기준 국산 원목은 침엽수 51.5%, 활엽수 48.5%로 비교적 균형을 이루는 반면, 수입 원목은 침엽수가 94.2%로 압도적이다. 이는 본 연구가 수종 차등 환산을 적용하는 방법론적 정당성을 뒷받침한다.



[그림 4-3] 2020-2024년 원목 이용량의 침엽수·활엽수 구성

향후 연구에서 수입 목재제품의 수종 구성 자료가 확보될 경우, 79% 부분에 대해서도 차등 환산을 적용함으로써 추정 정밀도를 높일 수 있다. 이는 2차년도 연구 과제로 둔다.

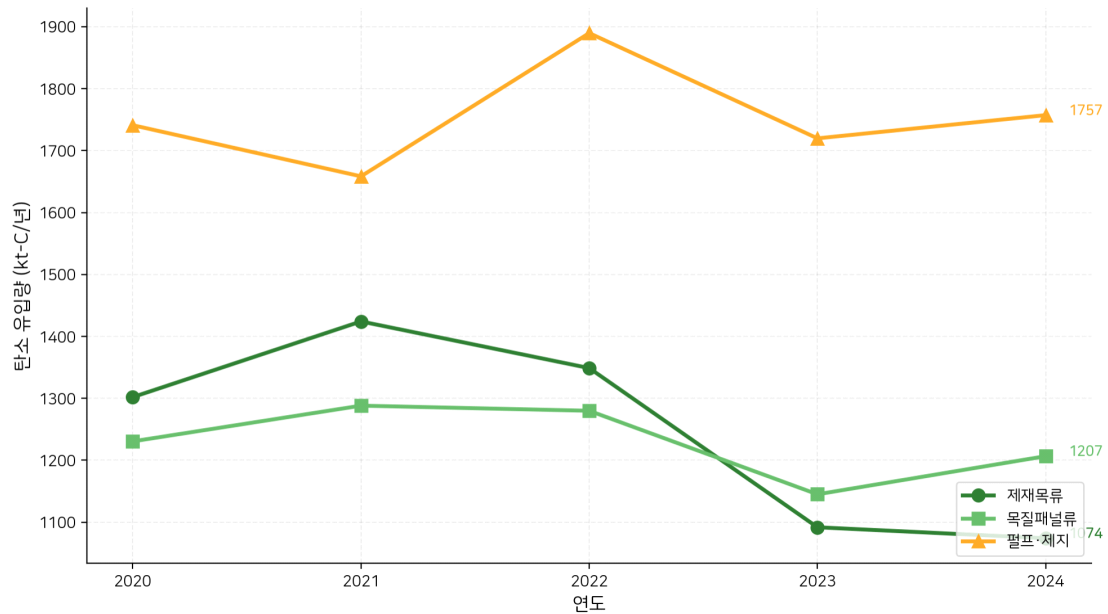
5. 2020~2024년 카테고리별 탄소 유입량(inflow) 산정 결과

위 환산 방법론을 5개년 자료에 적용한 결과는 표 4-6와 그림 4-4에 정리하였다.

<표 4-6> 2020-2024년 카테고리별 HWP 탄소 유입량 (단위: t-C)

연도	제재목류	목질패널류	펄프·제지	합계
2020	1,301,950	1,230,534	1,740,955	4,273,440
2021	1,424,166	1,288,189	1,658,378	4,370,733
2022	1,348,849	1,279,917	1,889,602	4,518,367
2023	1,091,869	1,145,068	1,719,708	3,956,645
2024	1,074,200	1,206,652	1,757,191	4,038,043

자료: 산림청 「목재이용실태조사」 2020-2024 + 장은경(2021) 표 18 차등계수 + 저자 산출. 에너지용은 즉시 산화로 처리하여 장기 저장 풀에서 제외하였다.



[그림 4-4] 2020-2024년 카테고리별 HWP 탄소 유입량 시계열

5개년 평균 inflow는 약 4.2 Mt-C/년이며, 2022년 정점(4.5 Mt-C) 이후 감소세를 보인다. 카테고리별 비중은 펄프·제지가 가장 크지만(연 약 1.7-1.9 Mt-C), 펄프·제지의 반감기가 매우 짧기 때문에 장기 stock 형성에 대한 기여도는 제재목류·목질패널류에 비해 제한적이다. 이는 다음 절의 FOD 모형 시뮬레이션에서 정량적으로 확인된다.

한편, 본 4장의 활동자료 산정과 다음 5장의 FOD 모형 시뮬레이션은 inflow → stock으로 이어지는 통합 분석 구조를 갖는 만큼, 본 4·5장의 분석 한계는 5장 7절 3소절에서 종합하여 다룬다.

제5장 산림·목제품 내 탄소 저장량 변화 분석

- 제1절 분석방법 및 자료
- 제2절 반감기 시나리오 설정
- 제3절 FOD 모형 적용 및 시나리오 시뮬레이션
- 제4절 반감기 민감도 분석
- 제5절 Cascading 이용 구조 일부 반영
- 제6절 환경부 NIR 정합성 검토
- 제7절 통합 시사점

5

산림·목제품 내 탄소 저장량 변화 분석 <

본 장에서는 제4장에서 산정한 카테고리별 탄소 유입량(inflow)을 입력으로, IPCC 「2019 Refinement」의 FOD(First Order Decay) 모형을 적용하여 시간 경과에 따른 누적 탄소축적량(stock) 변화를 정량 분석한다. 분석 단위는 제4장의 체적(m³) 기반 통계에서 탄소(t-C) 기반 동태로 전환되며, 시나리오 A(IPCC 기본 반감기)와 시나리오 B(장은경 한국 Tier 3 반감기)를 비교하여 한국 산업 구조의 단기 이용 비중이 HWP 탄소 저장에 미치는 영향을 정량 평가한다. 이어서 반감기 민감도 분석, Cascading 이용 구조 일부 반영, 환경부 NIR 정합성 검토를 수행하여 분석 결과의 견고성과 정책적 함의를 보강한다.

제1절 분석방법 및 자료

본 분석은 IPCC 「2019 Refinement」가 제시하는 FOD 모형을 적용한다. 동 모형은 제품군별 반감기(half-life)를 기반으로 매년 일정 비율의 탄소가 산화되는 1차 부후 과정을 가정하며, 국가 온실가스 인벤토리 보고서(NIR)의 표준 방법론으로 활용된다. 본 분석에서는 제4장에서 산정한 2020-2024년 카테고리별 inflow를 입력하여 시나리오 A(IPCC 기본 반감기)와 시나리오 B(장은경 한국 Tier 3 반감기)를 비교 시뮬레이션한다.

제2절 반감기 시나리오 설정

HWP 탄소 저장 분석에서 inflow가 동일하더라도 저장량(Stock)과 산화량(Emission)의 장기 추정치는 반감기(half-life) 설정에 따라 크게 달라진다. 따라서 반감기는 FOD 모형의 핵심 결정 변수이며, HWP 회계의 구조적 민감도 요인에 해당한다(Skog et al., 2004).

본 연구는 반감기 설정의 구조적 영향을 분석하기 위해 두 가지 시나리오를 설정하였다.

1. 시나리오 A: IPCC 기본 반감기 적용

시나리오 A는 IPCC 「2019 Refinement」에서 제시한 기본 반감기(default half-life)를 적용한 기준선 시나리오이다(IPCC, 2019, Chapter 12).

- 제재목류: 35년
- 목질패널류: 25년
- 펄프·제지: 2년

이 값은 국제 평균 건축물 수명과 제품 사용 특성을 반영한 기본 계수이며, 국가 고유계수가 없는 경우 적용하도록 권고되는 기준값이다. 국제 비교 가능성과 인벤토리 일관성 확보 측면에서 가장 널리 사용되는 접근이다.

2. 시나리오 B: 장은경(2021) 한국 Tier 3 반감기 적용

시나리오 B는 장은경(2021) 박사논문에서 산출한 한국 Tier 3 가중평균 반감기를 적용한 시나리오이다. 동 연구는 산림청 「목재이용실태조사」 산업별 투입 비율(2017년 기준)을 표 5-1의 산업별 반감기에 가중평균하여 한국 실태 반영 반감기를 도출하였다(장은경, 2021, p.65, 표 17 및 그림 16, 17).

<표 5-1> Tier 3 산업별 반감기 (장은경, 2021, 표 17 인용)

이용 분야	세부	내용	폐기율	반감기	출처
건축	건축재 (구조재)	목조주택 구조재 등	0.012	50년	EFI(2002)
건축	기타 건축재	내장재·바닥재·시설물 등	0.043	16년	EFI(2002)
토목	건축 가설재	거푸집·비계 등	0.693	1년	EFI(2002)
수송	포장재/파레트	목재 파레트·포장재	0.200	3.5년	Hashimo(2004)
가구	목재 가구	주택·사무실 가구 등	0.100	7년	Hashimoto(2004)

자료: 장은경(2021) 「수확목제품의 이용 특성을 고려한 탄소 저장량 산정 연구」 p.65, 표 17

위 산업별 반감기에 한국의 산업별 투입 비율(장은경 2021, 표 25)을 가중평균한 결과는 다음과 같다.

- 제재목류: 2.5년 (장은경 2021, 그림 16)
- 목질패널류: 8.8년 (장은경 2021, 그림 17)
- 펄프·제지: 2년 (IPCC 기본 유지)

국내 제재목의 가중평균 반감기 2.5년은 IPCC 기본값 35년 대비 14배 짧다. 이는 한국에서 제재목의 약 58%가 단수명 산업(토목 33% + 수송 25%)에 투입되는 현실을 반영한 결과이며(장은경, 2021), 국제 평균을 그대로 적용할 경우 한국 HWP 저장량이 구조적으로 과대 추정될 위험을 정량적으로 보여준다.

제3절 FOD 모형 적용 및 시나리오 시뮬레이션

1. 초기조건 설정

FOD 모형은 누적 stock의 동태를 분석하므로, 1970년대 이후 형성된 기존 HWP 풀을 초기조건으로 반영해야 한다. 본 연구는 본 보고서 표 5-2에 정리한 한국 HWP Tier 3 누적 탄소축적량 시계열(장은경, 2021)에서 2010년과 2030년 베이스라인 값을 선형 보간하여 2019년 말 누적 stock을 산정하였다.

<표 5-2> 한국 HWP 누적 탄소축적량 시계열 (장은경, 2021, 표 28 발췌)

연도	Tier 3 합계 (Gg CO ₂ T)	탄소량 환산 (Gg-C)	비고
2010	6,904	1,883	실측
2019 (보간)	12,461	3,398	선형 보간
2030 (BL)	19,253	5,250	BL 시나리오
2050 (BL)	23,296	6,353	BL 시나리오
2080 (BL)	25,422	6,933	BL 시나리오

자료: 장은경(2021) 「수확목제품의 이용 특성을 고려한 탄소 저장량 산정 연구」 p.91. 표 28의 모든 산업·제품 합계 발췌. 탄소량 환산은 × 12/44 적용. 2019년 값은 본 연구에서 2010과 2030 사이 선형 보간으로 산출.

따라서 본 연구의 FOD 모형 초기조건은 C(2019) = 3.40 Mt-C로 설정하며, 이를 카테고리 고리별 2024년 inflow 비율로 분배하여 카테고리 풀에 할당한다(제재목류 26.6%, 목질패널류 29.9%, 펄프·제지 43.5%).

2. 시뮬레이션 설정

분석 기간은 2020-2044년의 25년이며, 2020-2024년은 본 연구에서 산정한 실측 inflow를 사용하고, 2025년 이후는 2024년 inflow가 유지된다는 단순 가정을 적용한다. 이 가정은 장기 전망의 정확성을 의미하기보다는, 반감기 설정에 따른 구조적 차이를 비교하기 위한 방법론적 설정이다.

FOD 모형의 핵심 갱신식과 배출 산정식은 IPCC 「2019 Refinement」 표준 형태를 따른다. 에너지용 카테고리는 당해연도 즉시 산화로 처리하여 장기 저장 풀에서 제외하였다.

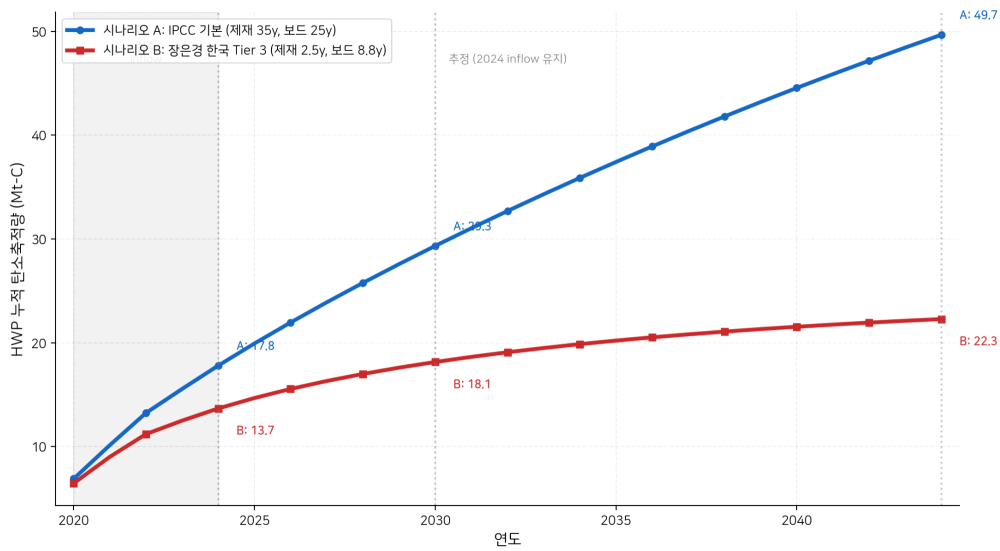
3. 시뮬레이션 결과: 시나리오 A vs B

FOD 모형 시뮬레이션 결과는 표 5-3 및 그림 5-1과 같다.

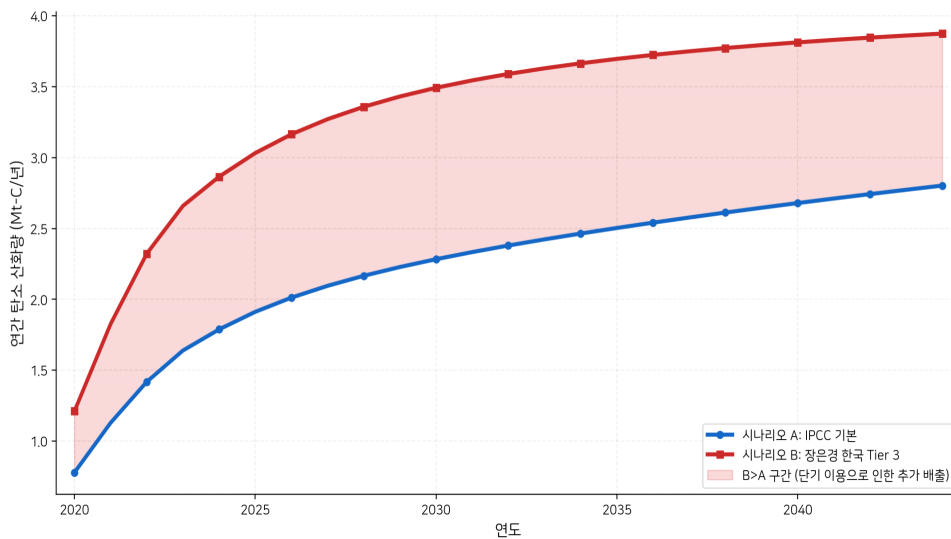
<표 5-3> 시나리오 A/B 누적 탄소축적량 및 연간 산화량 비교 (단위: t-C)

시나리오	연도	Total Stock (t-C)	Total Emission (t-C/년)
A (IPCC 기본)	2024	17,803,977	1,787,983
A (IPCC 기본)	2030	29,335,052	2,283,277
A (IPCC 기본)	2044	49,676,814	2,802,691
B (장은경 한국 Tier 3)	2024	13,671,825	2,865,558
B (장은경 한국 Tier 3)	2030	18,148,270	3,492,763
B (장은경 한국 Tier 3)	2044	22,282,680	3,875,111

주: 분석 기간은 2020-2044년. 초기조건 C(2019) = 3.40 Mt-C (표 5-2 보간). 시나리오 A 반감기: 제재목 35y, 보드 25y, 펄프 2y. 시나리오 B 반감기: 제재목 2.5y, 보드 8.8y, 펄프 2y.



[그림 5-1] FOD 모형 시뮬레이션 결과: 시나리오 A vs B 누적 탄소축적량



[그림 5-2] FOD 모형 연간 탄소 산화량: 시나리오 A vs B

4. 결과 해석 및 정책적 함의

시나리오 A(IPCC 기본 반감기 적용)에서는 제재목과 목질패널의 반감기가 비교적 길게 설정되어 있어 누적 stock이 지속적으로 증가하는 경향을 보였다. 2024년 기준 총 저장량은 약 17.8 Mt-C로 산정되었으며, inflow가 2024년 수준으로 유지된다는 가정 하에 2044년에는 약 49.7 Mt-C까지 증가하는 것으로 나타났다.

반면 시나리오 B(장은경 한국 Tier 3 반감기 적용)에서는 제재목의 가중평균 반감기가 2.5년, 목질패널이 8.8년으로 단축됨에 따라 저장 지속기간이 짧아지고, 동일 inflow에서도 저장량이 더 낮게 추정되었다. 2024년 총 저장량은 약 13.7 Mt-C, 2044년에는 약 22.3 Mt-C로 산정되었다. 이는 시나리오 A 대비 약 55% 수준이다.

산화량(Emission) 측면에서도 차이가 나타났다. 시나리오 B는 저장 지속기간이 짧아 단기적으로 배출이 더 크게 나타났으며, 이는 한국의 목재 이용 구조가 토목·수송 등 단수명 산업에 집중되어 있을 경우 탄소 회계 결과가 IPCC 기본값 적용 시보다 훨씬 보수적으로 산출됨을 보여준다.

이 결과는 다음과 같은 정책적 함의를 가진다.

- 첫째, 단순히 목재 소비량을 확대하는 것만으로는 장기 저장을 보장할 수 없다. 제품군 구조, 특히 장수명 건축재 비중 확대가 핵심 변수이다.
- 둘째, 국내 고유 반감기 자료의 확보는 HWP 회계 정확도를 결정하는 중요한 요소이다. 장은경(2021)의 한국 Tier 3 결과는 가장 권위 있는 국내 분석값이나, 본 연구는 환경부 NIR 정합 정밀화를 2차년도 과제로 둔다.
- 셋째, 국제 기본값을 그대로 적용할 경우 한국 실태 대비 약 2.2배 수준의 과대 추정 가능성이 존재한다(2044년 시점 49.7 vs 22.3 Mt-C).

결론적으로, HWP 저장량은 얼마를 소비했는가보다 어떻게 사용되었는가에 더 크게 의존한다. 따라서 향후 국내 목재 이용 구조의 장기화 전략, 건축물 수명 연장, 재활용 체계 개선 등은 단순 산업 정책을 넘어 탄소중립 전략의 중요한 구성요소가 될 수 있다.

제4절 반감기 민감도 분석

1. 분석 목적과 설계

FOD 모형에서 반감기는 결과의 핵심 결정 변수이다. Skog et al.(2004)은 HWP 회계 결과의 불확실성에서 반감기 변동이 가장 큰 영향력을 가진다고 보고하였으며, 본 연구의 시나리오 A(IPCC 기본)와 시나리오 B(장은경 한국 Tier 3) 사이의 격차도 본질적으로 반감기 차이에서 비롯된다.

본 절에서는 반감기를 $\pm 25\%$, $\pm 50\%$ 변동시켰을 때 2024년·2034년·2044년 누적 탄소 축적량이 어떻게 변하는지를 정량 평가하고, 카테고리별 영향력을 비교한다. 이를 통해 (1) 분석 결과의 견고성을 확인하고, (2) 향후 국가 고유계수 개발 시 우선 정밀화해야 할 카테고리를 식별한다.

2. 분석 결과

1. 시나리오 A·B 동시 변동 $\pm 50\%$

시나리오 A(IPCC 35/25/2년)와 시나리오 B(장은경 2.5/8.8/2년)의 모든 카테고리 반감기를 $\pm 25\%$ · $\pm 50\%$ 동시에 변동시켰을 때 2044년 누적 stock의 변화는 다음과 같다.

<표 5-4> 반감기 \pm 변동 시 2044년 누적 stock 변화 (단위: Mt-C)

반감기 변동	시나리오 A 2044	기준 대비	시나리오 B 2044	기준 대비
-50%	39.49	-24.6%	14.63	-41.7%
-25%	47.17	-9.9%	20.15	-19.7%
기준 (0%)	52.37	기준선	25.07	기준선
+25%	56.29	+7.5%	29.48	+17.6%
+50%	59.48	+13.6%	33.46	+33.5%

주: 모든 카테고리 반감기를 동일 비율로 변동. 기준선($\pm 0\%$) 대비 변화율 표기. C(2019) = 3.4 Mt-C.

표 5-4에서 확인되는 핵심 사실은 다음과 같다.

- 시나리오 B(장은경 한국 Tier 3)는 반감기 변동에 더 민감하다. 이는 시나리오 B의 기준 반감기(2.5/8.8/2년)가 절대값으로 짧기 때문에 같은 비율의 변동이 상대적으로 더 큰 영향을 미치기 때문이다.

- 시나리오 A의 -50% 변동(▼24.6%)도 의미 있는 수준이지만, 시나리오 B의 -50% 변동(▼41.7%)은 거의 두 배 가까이 격차를 보인다.
- 이는 한국 실태 반영 계수(시나리오 B)가 IPCC 기본 계수보다 정밀도가 더 중요함을 시사한다. 향후 한국 고유 반감기 계수 개발이 결과의 신뢰도 향상에 결정적이다.

2. 카테고리별 영향력 (시나리오 B 기준)

어느 카테고리의 반감기가 결과에 가장 큰 영향을 미치는지 확인하기 위해, 시나리오 B를 기준으로 카테고리 단일 변동의 영향을 분석하였다.

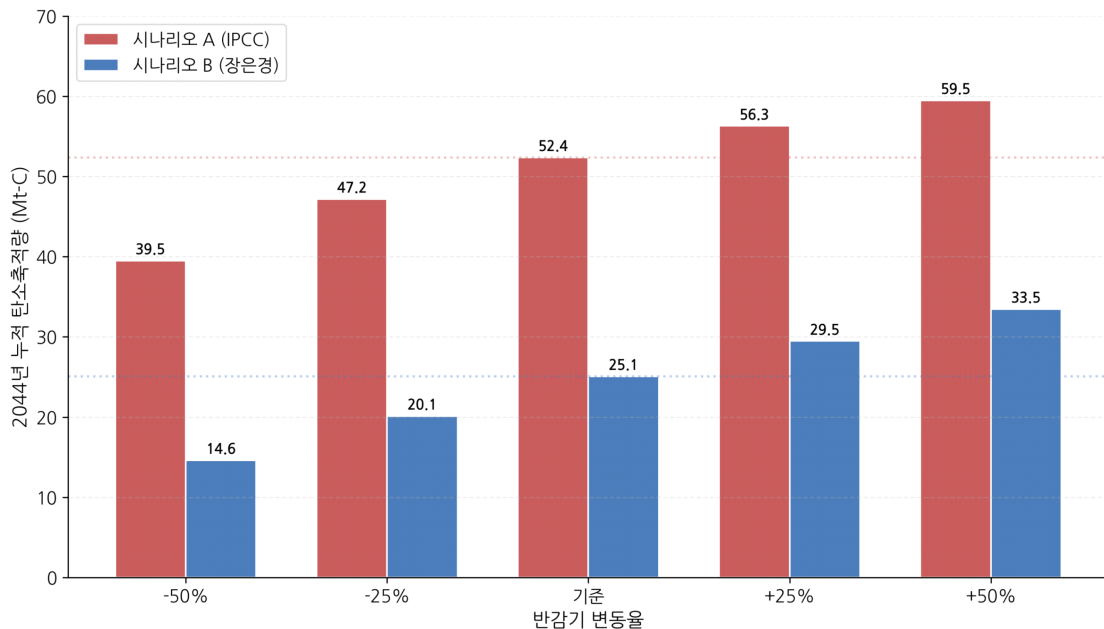
<표 5-5> 카테고리별 반감기 단일 변동의 2044년 stock 영향 (시나리오 B 기준)

변동 카테고리	기준 반감기	-50% 변동	+50% 변동	영향력 순위
목질패널류	8.8년	-22.8%	+14.7%	1위 (가장 큼)
펄프·제지	2년	-11.0%	+11.1%	2위
제재목류	2.5년	-7.8%	+7.7%	3위 (가장 작음)

주: 한 카테고리의 반감기만 ±50% 변동시키고 나머지는 기준선 유지.

표 5-5가 보여주는 핵심 통찰: 본 연구에서 가장 정밀한 반감기 측정이 필요한 카테고리는 목질패널류이다. 목질패널류 반감기 ±50% 변동이 ±22.8%/14.7%의 stock 변화를 야기하는데, 이는 inflow 비중이 큰 동시에 반감기 자체가 중간 길이(8.8년)이기 때문이다.

반면 제재목류는 한국에서 단수명 이용 비중이 높아 반감기가 짧고(2.5년), 펄프·제지도 짧아(2년) 두 카테고리는 반감기 변동에 상대적으로 둔감하다.



[그림 5-3] 반감기 민감도 분석 결과

3. 시사점

- **결과 신뢰성 검증:**

시나리오 B의 $\pm 50\%$ 변동 범위(14.6~33.5 Mt-C)는 시나리오 A의 변동 범위 최저값(39.5 Mt-C)에도 미치지 못한다. 즉, 시나리오 A·B의 차이는 반감기 불확실성으로 설명되지 않으며 구조적·실태적 차이임이 확인된다.

- **우선 정밀화 대상:**

향후 국내 고유 반감기 계수 개발 시 목질패널류(특히 합판·MDF·파티클보드의 산업 투입별 이용 수명)가 최우선 대상으로 식별된다.

- **민감도 한계:**

본 분석은 반감기를 동일 비율로 변동시키는 단순 민감도이며, 실제 측정에서 카테고리별 불확실성 분포가 다를 경우 결과가 달라질 수 있다. 2차년도에 카테고리별 불확실성 분포를 반영한 몬테카를로 분석으로 정밀화 가능하다.

제5절 Cascading 이용 구조 일부 반영

1. 분석 목적과 설계

본 연구의 기준 분석(시나리오 A·B)은 단일 풀(single pool) 구조를 가정하였다. 즉 제재 목류·목질패널류·펄프·제지 풀이 각각 독립적으로 inflow를 받고, 반감기에 따라 산화하는 구조이다. 그러나 실제 한국에서는 제재목으로 사용된 후 폐기 단계에서 일부가 보드재 원료로 재활용되는 cascading 흐름이 존재하며, 이는 동일 inflow 조건에서도 탄소 저장 기간을 연장시킬 수 있다.

장은경(2021) 박사학위논문은 본 흐름의 한국 실태를 다음과 같이 정량적으로 보고하고 있다(p.72).

"우리나라에서 국산 제재목의 58%는 단수명 목재 산업인 토목과 수송으로 투입되어 건축 가설재와 토류판, 거푸집, 수송 상자, 수송용 목재 파레트로 이용되고 있다(표 25 참고). 토목, 수송 부문에서 나온 폐목재의 약 45~50%가 재생칩으로 재활용되어 파티클보드 연료재로 쓰이고 있다(보드업체 담당자 인터뷰)."

본 절에서는 이 한국 실태 자료를 모형에 일부 반영하여, cascading 효과가 시나리오 A와 B에서 어떻게 다르게 나타나는지 정량 분석한다.

2. 분석 가정

- 토목·수송 비중: 제재목 inflow의 58% (장은경 2021, 표 25 인용)
- 재활용 비율: 토목·수송 폐목재의 47.5% (장은경 2021, 인터뷰 자료의 45-50% 중간값)
- 재활용 경로: 제재목류 풀 → 목질패널류 풀 (보드재 원료로 이용)
- 이전 시점: 단순화 가정으로 즉시 이전(1년 내). 실제로는 제재목 사용 기간만큼 지연 발생하나, 본 분석에서는 정량적 영향을 보수적으로 추정

위 가정 하에 2024년 cascading flow는 약 302,950 t-C로 추정되며, 이는 같은 해 제재목류 inflow(약 1,099,636 t-C)의 약 27.6%에 해당한다.

위 분석 가정의 근거가 되는 장은경(2021) 표 25 「국산 제재목의 산업별 투입량」을 본 보고서 표 5-6로 직접 게재한다. 이는 한국 제재목 시장에서 산업 부문별 투입 비율을 보여주는 단일 가장 정밀한 통계로서, 본 연구의 cascading 분석에서 토목·수송 부문(58.0%)의 비중과 보드재 재활용 가능량 산정의 근거 자료이다.

<표 5-6> 국산 제재목의 산업별 투입량 (장은경, 2021, 표 25 인용)

구분	산업	목재량 (m³)	탄소량 (TC)	비율 (%)
제재목 (419,731 m³)	건축	102,944	23,574	24.7
	토목	137,022	31,378	32.9
	가정	6,281	1,438	1.5
	수송	104,438	23,916	25.1
	농업	6,674	1,528	1.6
	기타	59,324	13,585	14.2
합계	전체	419,731	96,061	100.0

자료: 장은경(2021) 「수확목제품의 이용 특성을 고려한 탄소 저장량 산정 연구」 p.86, 표 25 (산림청, 2018a 인용). 토목·수송 부문(붉은색)이 합계 58.0%로 단수명 산업이며, 본 연구의 cascading 분석에서 보드재 재활용 대상 품목 처리됨.

표 5-6에서 토목 32.9% + 수송 25.1% = 58.0%로 단수명 산업 비중이 절반 이상을 차지함이 확인된다. 장은경(2021, p.71-72)은 이 토목·수송용 폐목재 중 약 45~50%가 보드업체에서 재생칩으로 회수되어 파티클보드 연료재로 재활용되고 있다고 보고하였다. 본 연구의 cascading 47.5% 가정은 이러한 학술적 보고에 근거하여 그 중간값으로 설정한 것이다.

3. 분석 결과

<표 5-7> Cascading 47.5% 적용 시 2044년 누적 stock 변화

시나리오	Baseline (Cascading 0%)	Cascading 47.5%	변화량	변화율
A (IPCC)	52.37 Mt-C	51.85 Mt-C	-0.52	-1.0%
B (장은경)	25.07 Mt-C	27.30 Mt-C	+2.23	+8.9%

자료: 장은경(2021) 표 25 + 본문 p.72 인터뷰 자료를 본 연구에서 모형에 반영

표 5-7의 핵심 결과는 두 시나리오에서 cascading 효과가 정반대 방향으로 나타난다는 점이다.

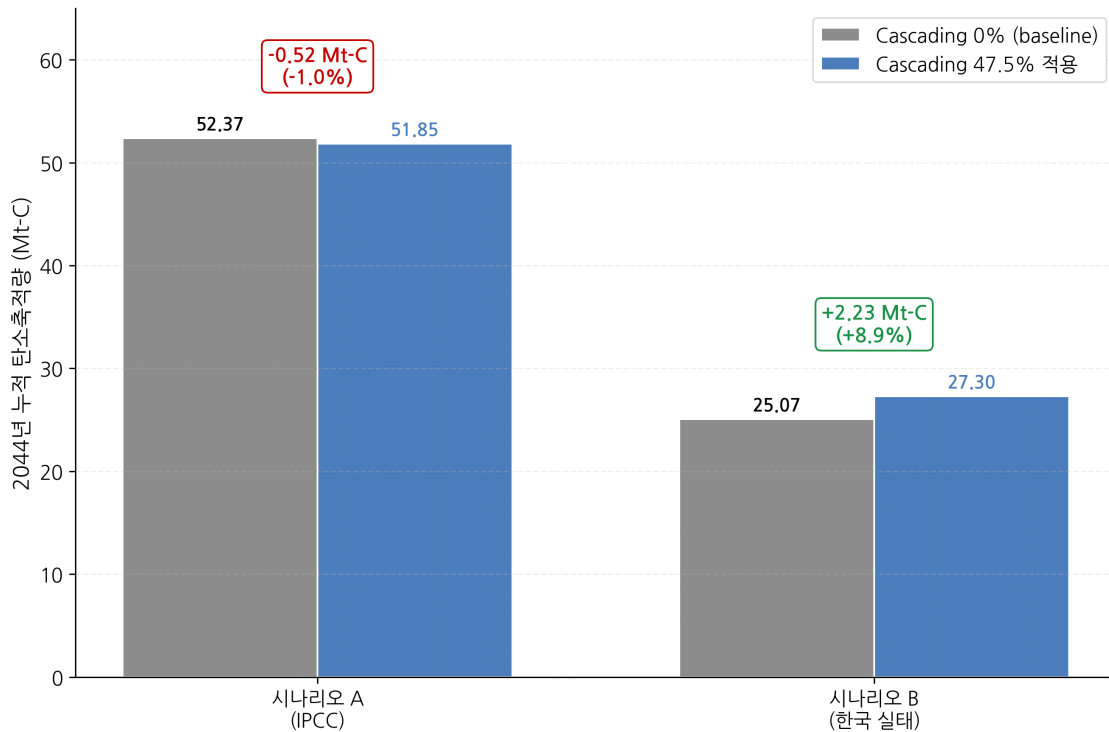
- 시나리오 A (IPCC):

cascading이 오히려 stock을 -0.52 Mt-C 감소시킨다. 이는 IPCC 기본 반감기에서 제재목(35년)이 목질패널(25년)보다 길기 때문에, 제재목 폐기물을 보드재로 옮기면 평균 저장 기간이 짧아져 손실이 발생함을 의미한다.

- 시나리오 B (장은경 한국 Tier 3):

cascading이 stock을 +2.23 Mt-C 증가시킨다(+8.9%). 이는 한국에서 제재목 가중평균 반감기(2.5년)가 보드재(8.8년)보다 짧기 때문에, 단수명 토목·수송용 제재목 폐기물

을 보드재로 옮기면 저장 기간이 약 3.5배 연장되어 명확한 이득이 발생함을 의미한다.



[그림 5-4] Cascading 이용 구조 일부 반영의 효과 비교 (2044년 기준)

4. 시사점

- **한국 실태에서 cascading의 정책적 의미:**
시나리오 B의 결과(+8.9%)는 한국과 같이 제재목이 단수명 산업에 과도하게 투입되는 구조에서 cascading 정책(폐목재 재활용 의무화, 보드업체 원료 우선구매 등)이 명확한 탄소 저장 효과를 가짐을 정량적으로 입증한다.
- **IPCC 기본 가정의 한계:**
시나리오 A에서 cascading이 효과 없거나 미미하게 나타나는 것은 IPCC 기본 반감기가 한국 실태와 정합하지 않음을 보여준다. IPCC 가정 하에서는 cascading 정책의 가치가 과소평가될 수 있다.
- **향후 정량화 과제:**
본 분석은 토목·수송 → 보드재 한 단계 cascading만 반영하였다. 2차년도에는 다음 단계로 확장 가능하다 - (1) 건축 폐목재의 보드재 재활용, (2) 보드재 폐기 후 에너지 회수, (3) 가구재 재활용 흐름. 장은경(2021)의 시나리오 C-1은 이러한 다단계 cascading의 잠재량을 보여주며, 본 연구의 모형 구조에 추가 반영이 가능하다.

5. 단수명 구조 한국에서의 즉시 산화 배출량 참고 평가

가. 분석 목적과 설계

본 절의 cascading 분석은 제재목, 목질패널, 펄프·제지의 3개 HWP 풀 간 단수명 흐름을 보드재로 재투입함으로써 +8.9%의 stock 증가 효과를 확인하였다. 다만 본 1차년도 분석은 IPCC 「2019 Refinement」 권고에 따라 에너지용 목재(연료재)를 당해연도 즉시 산화로 처리하여 HWP 풀에서 제외하였으며, 이는 국가 온실가스 인벤토리 회계 체계에서 바이오매스 연소 배출이 에너지 부문에서 별도 계상되는 것과 정합한다(IPCC, 2019).

그러나 본 연구의 정책적 함의 '한국 목재 이용 구조의 단수명 편향 축소가 시급하다'를 정량적으로 뒷받침하기 위해, 본 절에서는 에너지용 카테고리의 즉시 산화 배출량을 산정하여 본 HWP 풀 분석 결과와의 상대적 크기로 참고 평가한다. 본 분석의 목적은 다음 두 가지이다. 첫째, 에너지용 즉시 산화량의 절대 크기를 산정한다. 둘째, HWP 풀 stock 및 풀 자연 산화량과의 상대 비율을 비교하여 단수명 편향이 갖는 정량적 의미를 보강한다.

분석 방법은 다음과 같다. 본 보고서 표4-3의 2024년 에너지용 카테고리 inflow 9,409,842m³에 표4-4의 제재목 통합 환산계수 0.229 t-C/m³를 적용하여 t-C 단위 즉시 산화 배출량을 산정하고, 이를 동일 연도 시나리오B(한국Tier 3) 시뮬레이션의 누적stock 및 풀 자연 산화량과 비교한다. 이때 'HWP 풀 누적stock'은 시뮬레이션 시점까지 산화되지 않고 제품에 묶여 있는 누적 탄소량을, '풀 자연 산화량'은 누적stock 중 해당 연도에 반감기에 따라 자연 감쇠하여 대기로 배출되는 탄소량을 가리키며, 이는 에너지용 카테고리의 즉시 산화(당해연도 연소 배출)와는 구분되는 풀 내부의 동태이다.

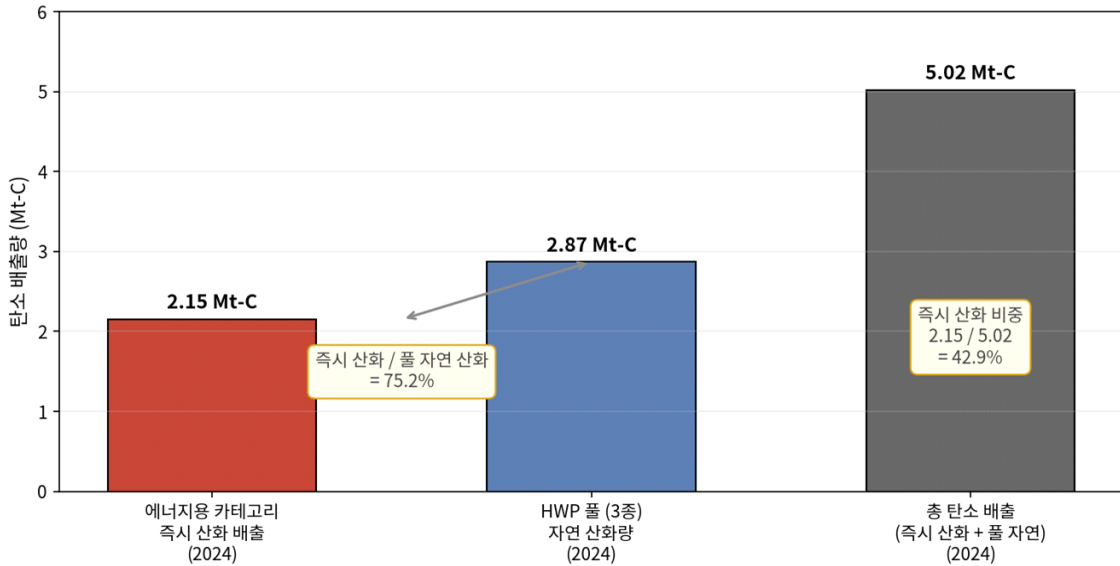
나. 분석 결과

본 분석의 정량 결과는 표5-8 및 그림5-5에 요약된다. 2024년 에너지용 카테고리의 즉시 산화 배출량은 약 2.15 Mt-C로 산정되며, 같은 해 시나리오B의 3개 풀 누적stock 13.67 Mt-C, 풀 자연 산화량 2.87 Mt-C, 단일 연도 총 탄소 배출 5.02 Mt-C와의 비교 결과는 다음과 같다.

<표 5-8> 2024년 에너지용 즉시 산화 배출량과 HWP 풀 분석 결과 비교(단위: Mt-C)

항목	값(Mt-C)	풀 stock 대비	풀 자연 산화 대비	총 배출 대비
에너지용 즉시 산화량(2024)	2.15	15.8%	75.2%	42.9%
시나리오B 3개 풀 누적stock	13.67	100%	-	-
시나리오B 풀 자연 산화량	2.87	21.0%	100%	57.1%
총 탄소 배출(즉시+ 풀 자연)	5.02	36.7%	-	100%

주: 에너지용 inflow = 9,409,842m³, 환산계수 0.229 t-C/m³ 적용. 시나리오B는 한국Tier 3 반감기(제재목 2.5y, 보드 8.8y, 펄프 2y) 적용.



[그림 5-5] 2024년 에너지용 즉시 산화 vs HWP 풀 자연 산화 비교

5개년 평균(2020-2024) 기준으로도 인입 탄소 6.57 Mt-C 중 35.6%가 에너지용으로 즉시 산화되어, 본 보고서 제4장의 m³ 기준 단기 산화 비중 진단(35.6%)과 t-C 기준 분석이 정확히 일치한다. 이는 본 연구의 단수명 산화 비중 진단이 분석 단위에 무관하게 일관성을 갖는다는 추가 증거이다.

다. 시사점

본 분석 결과는 한국 목재 이용 구조의 단수명 편향이 갖는 정량적 의미를 다음과 같이 드러낸다.

첫째, 에너지용 카테고리의 즉시 산화 배출량(2.15 Mt-C)이 같은 해 시나리오B 3개 풀의 자연 산화량(2.87 Mt-C)의 75.2%에 달한다는 사실은, 한국에서 매년 단일 연도에 즉시 산화시키는 탄소량이 그동안 누적된 전체 HWP 풀의 연간 자연 산화량과 거의 동등한 수준임을 의미한다.

둘째, 단일 연도 총 탄소 배출의 약 42.9%가 에너지용 inflow의 즉시 산화에서 발생하는 것으로 평가된다. 즉, 한국 목재 이용 구조에서 에너지용 35.6% + 펄프·제지 29.6%의 단수명 편향은 매년 누적 풀의 자연 산화량과 거의 동등한 즉시 배출을 발생시키는 구조이다.

본 보고서가 5장 4절·5절에서 확인한 두 가지 사실은 다음과 같다. 첫째, 한국 시나리오B의 stock이 IPCC 기준 시나리오A 대비 낮은 것은 제재목의 약 58%가 토목·수송 단수명 산업에 투입되는 HWP 풀 내부 구조 때문이며, 둘째, 에너지용 카테고리는 풀 외부에서 매년 단일 연도 풀 자연 산화량의 75%에 달하는 즉시 산화를 발생시킨다는 사실이다. 이는 서로 다른 정책 축으로 대응해야 함을 시사한다. Cascading 정책의 +8.9% stock 증가 효과는 3개 HWP 풀 내부의 흐름 재배치로 달성되는 효과(풀 내부 정책)인 반면, 에너지용 35.6% 비중 자체를 줄여 일부를 장수명 풀로 재배치할 경우 즉시 산화량의 직접 감축과 동시에 HWP 풀 stock 자체의 증가가 발생한다(풀 외부 정책). 두 정책의 정량 효

과 크기 비교는 다음 소절에서 시뮬레이션으로 확인한다.

본 분석은 한국 목재 이용 구조의 단수명 편향에 대한 정량적 진단을 보강하는 보조 근거로 제시되며, 다단계 cascading 흐름과 정책 시나리오별 동태를 포함한 상세 분석은 본 보고서 5장 7절에서 제시한 후속 과제로 이어진다.

6. 에너지용 비중 축소 시나리오 분석

가. 분석 목적과 설계

본 절의 5번 소절은 1차년도 분석 범위 내에서 에너지용 카테고리의 즉시 산화 배출량(2024년 약2.15 Mt-C)이 풀 자연 산화량의 75.2% · 총 배출의 42.9%에 달함을 정량적으로 확인하였다. 이를 토대로 본 6번 소절에서는 에너지용 inflow를 축소하여 그 일부를 장수명 풀(제재목·목질패널)로 재배치할 경우 한국 HWP 풀 stock이 어떻게 변화할지 FOD 모형 시뮬레이션으로 정량 평가한다. 본 분석을 통해 본 연구가 제안하는 "두 축 정책"의 풀 외부 축(에너지용 비중 축소)에 대한 정량 근거를 보강한다.

분석 설계는 다음과 같다. 본 연구5장 3절에서 구축한 FOD 모형(시나리오B = 한국Tier 3 반감기)을 기준으로, 2025년부터 에너지용 inflow의 30% 또는 50%를 축소하고 축소분을 m³ 기준 50:50 비율로 제재목과 목질패널 풀로 재배치하는 두 개의 신규 시나리오를 설정한다(표5-9). 분석 기간은 시나리오B와 동일한 2020-2044년이며, 2020-2024년은 실측 inflow를, 2025년 이후는 축소·재배치된 inflow를 적용한다.

<표5-9> 시나리오 정의(B-C, B-D vs 기준 시나리오B)

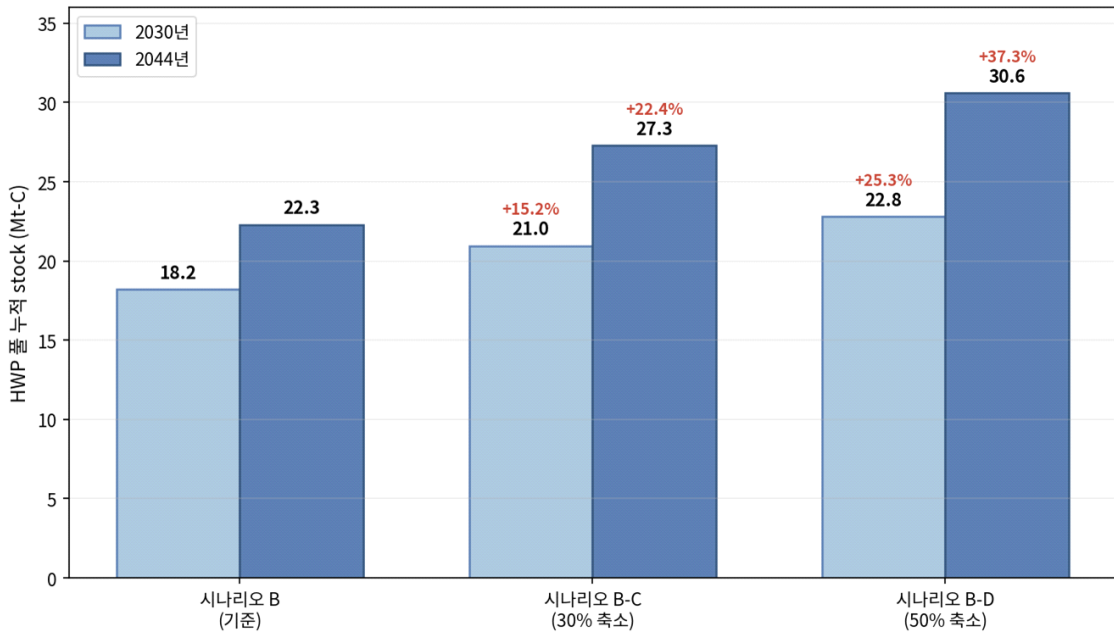
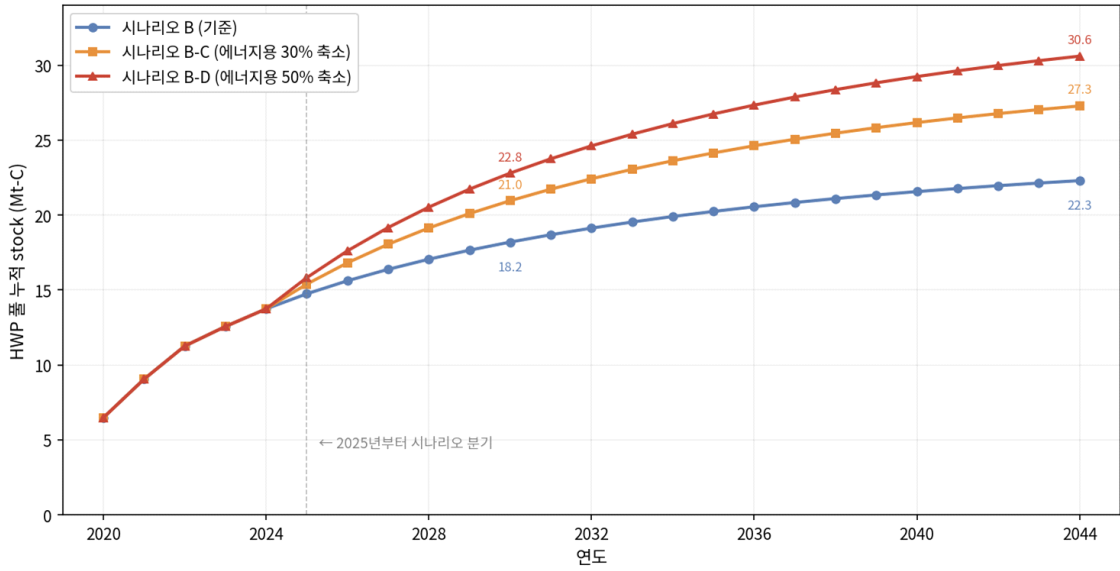
시나리오	에너지용inflow 변화 (2025년 이후)	축소분 재배치 방식	비고
B (기준)	2024년inflow 유지	(재배치 없음)	5장 3절 시나리오B와 동일
B-C	30% 축소(약2,822,953m ³)	제재목50% + 목질패널50%	신규
B-D	50% 축소(약4,704,921m ³)	제재목50% + 목질패널50%	신규

주: 환산계수는 제재목0.229 t-C/m³, 목질패널0.269 t-C/m³를 적용. 반감기는 시나리오B와 동일(제재목2.5y, 목질패널8.8y, 펄프2y).

나. 분석 결과

세 시나리오의 누적stock 시계열 비교 결과는 그림5-6 및 표5-10에 제시된다. 또한 즉시 산화 회피 효과는 표5-11에 별도 정리된다.

[그림 5-6] 시나리오B / B-C / B-D 누적stock 시계열 비교(2020-2044)



[그림 5-7] 시나리오별 HWP 플 누적stock 비교(2030·2044년)

<표 5-10> 시나리오별 2030·2044년 누적stock 비교(단위: Mt-C)

시나리오	2024 (검증)	2030	2044	B 대비 2044 변화
B (기준)	13.74	18.20	22.30	-
B-C (30% 축소)	13.74	20.96 (+15.2%)	27.28 (+22.4%)	+4.98 Mt-C
B-D (50% 축소)	13.74	22.80 (+25.3%)	30.60 (+37.3%)	+8.31 Mt-C

주: 시나리오B 2024 stock 13.74는 본 시뮬레이션 재현 값이며1차년도 보고서 표5-3의13.67과±0.5% 이내로 일치하여 모형 신뢰성을 검증함.

<표 5-11> 시나리오별 즉시 산화 회피 효과(단위: Mt-C)

시나리오	연간 즉시 산화 회피량	20년 누적 회피량(2025-2044)
B-C (30% 축소)	0.65	약13
B-D (50% 축소)	1.08	약22

다. 시사점

본 시뮬레이션 결과는 세 가지 정책적 함의를 제공한다.

첫째, 에너지용(바이오매스) 카테고리 비중 축소가 HWP 풀의 탄소 저장량을 직접적으로 증가시키는 효과를 정량 확인하였다. 에너지용 비중 30% 축소만으로도 2044년 HWP 풀이 약 22% 증가하며, 50% 축소 시에는 약 37% 증가한다. 동시에 즉시 산화 배출 자체의 회피 효과를 동반하여, 20년간 누적 회피량은 각각 약13 Mt-C, 22 Mt-C에 달한다. 즉, 에너지용 비중 축소 정책은 HWP 풀 stock 증가(저장 효과)와 즉시 산화 회피(배출 감축 효과)를 동시에 발생시킨다.

둘째, 본 1차년도 분석은 두 정책 축이 서로 다른 메커니즘을 통해 한국 HWP 풀에 기여함을 확인한다. Cascading 활성화(풀 내부 정책)는 기존 풀 내 흐름 재배치를 통해 +8.9%의 stock 증가를 달성하는 반면, 에너지용 비중 축소(풀 외부 정책)는 새로운 풀 inflow 증가와 즉시 산화 회피를 통해 +22~37%의 효과를 발휘한다. 두 정책은 독립적·보완적 관계이므로 동시 추진 시 효과가 극대화된다.

셋째, 본 시뮬레이션은 단순 가정(축소분의 50:50 재배치)을 기반으로한 1차년도 범위의 정량 평가이다. 에너지용 inflow 축소를 위한 구체적 정책 설계(RPS 가중치 체계 개편, 발전소 일몰 일정 등), cascading 다단계 흐름과의 통합 분석, 산림 재성장에 따른 탄소 재흡수 효과 등은 본 보고서5장 7절에서 제시한 후속 과제로 이어진다. 다만 본 결과는 두 정책 축의 상대적 효과 크기와 인과 방향을 정량적으로 확인하여, 정책 우선순위 판단의 근거로 활용 가능하다.

제6절 환경부 NIR 정합성 검토

1. 분석 목적

본 절은 본 연구 방법론과 산정 결과가 환경부 국가 온실가스 인벤토리 보고서(NIR)와 어느 자릿수 수준에서 정합하는지를 검증하는 절차이다. 여기서 "정합성(consistency)"이란 본 연구의 산정 결과가 NIR과 동일한 결과는 아니더라도, 동일 시점·동일 방법론 조건으로 환산했을 때 결과가 합리적 오차 범위 내에서 일치하고 추세가 같은 방향을 보이는 정도를 말한다. 본 연구와 NIR은 회계 접근법(Apparent Consumption vs Production Approach)과 분석 범위(국내 소비 전체 vs 국산 원목)에서 본질적 차이가 있으므로, 결과 수치를 직접 비교할 수 없으며, 방법론적 변환을 거친 후 자릿수와 추세의 일치를 평가한다.

정합성 검증은 본 연구의 신뢰성·정책 활용성 확보를 위한 필수 절차로서 다음 네 가지 목적을 갖는다. 첫째, 방법론 신뢰성 확보: 본 연구가 적용한 IPCC 「2019 Refinement」 FOD 모형, 4개 카테고리 매핑, 침/활 차등 환산계수가 한국 NIR과 동일한 결과 영역을 도출하는지를 확인함으로써 본 연구 결과의 학술적·정책적 신뢰성을 입증한다. 둘째, NIR 보완 가치 식별: 본 연구의 Apparent Consumption 분석이 NIR이 다루지 못하는 수입 가공품 풀까지 포함함으로써 한국 사회 전체 HWP 탄소 풀을 정량화하며, NIR이 보고하지 않는 정책 적용 영역을 식별한다. 셋째, 결과 추세 검증: 본 연구 결과가 NIR과 같은 경향성을 보이는지 확인하여 본 연구 모형이 장기 정책 시뮬레이션 도구로 활용 가능한지 평가한다. 넷째, 2차년도 정책 시뮬레이션 토대 마련: 본 연구가 NIR과 정합함이 입증되면, 2차년도에 본 모형을 정부 HWP 탄소 정책 평가 도구로 발전시킬 수 있는 방법론적 기반이 확보된다.

환경부 국가 온실가스 인벤토리 보고서(National GHG Inventory Report, NIR)는 한국의 공식 온실가스 통계로, LULUCF 분야 중 HWP 부문은 산림청이 주관한다. NIR의 HWP 산정 방법은 IPCC 「2003 GPG-LULUCF」의 일차부후모형(FOD)을 따르며, IPCC 기본값과 한국 고유계수를 단계적으로 반영하고 있다(GIR, 2024).

본 절에서는 본 연구 결과가 NIR 산정 체계와 어느 정도 정합성을 갖는지 검증한다. 이는 본 연구 방법론의 신뢰성을 평가하는 동시에, 본 연구가 NIR 보완·고도화에 기여할 수 있는 부분을 식별하기 위한 것이다.

2. NIR과 본 연구의 분석 범위 차이

NIR과 본 연구는 분석 범위에서 본질적인 차이가 있다.

<표 5-12> NIR vs 본 연구 방법론 비교

구분	환경부 NIR (산림청 주관)	본 연구
회계 접근법	Production Approach (국산 원목만)	Apparent Consumption (국산 + 수입 원목 + 수입 가공품)
모형	FOD (1차 부후)	FOD (1차 부후) - 동일
수종 분류	임상별 (침엽수/활엽수)	임상별 + 수종군 차등 환산 (침엽수/활엽수 별도 계수)
반감기	IPCC 기본값 + 일부 고유계수	시나리오 A: IPCC 기본 시나리오 B: 장은경 한국 Tier 3
정책 시사점	국제 보고용 (UNFCCC NIR)	국내 정책 시뮬레이션 (소비 구조 분석)

두 접근법은 정책적·회계적 목적이 다르므로 결과 수치 자체는 직접 비교할 수 없다. NIR은 한국 영토에서 수확된 목재만을 자국 인벤토리로 회계하고, 수입 가공품에 저장된 탄소는 생산국 인벤토리에 귀속된다(IPCC, 2014). 본 연구는 한국 사회 전체에서 소비되는 목재 품의 탄소 동태를 분석하므로 수입품도 포함한다. 한국 목재 자급률이 약 15-20%이므로 두 결과의 격차는 약 4-5배 수준이다.

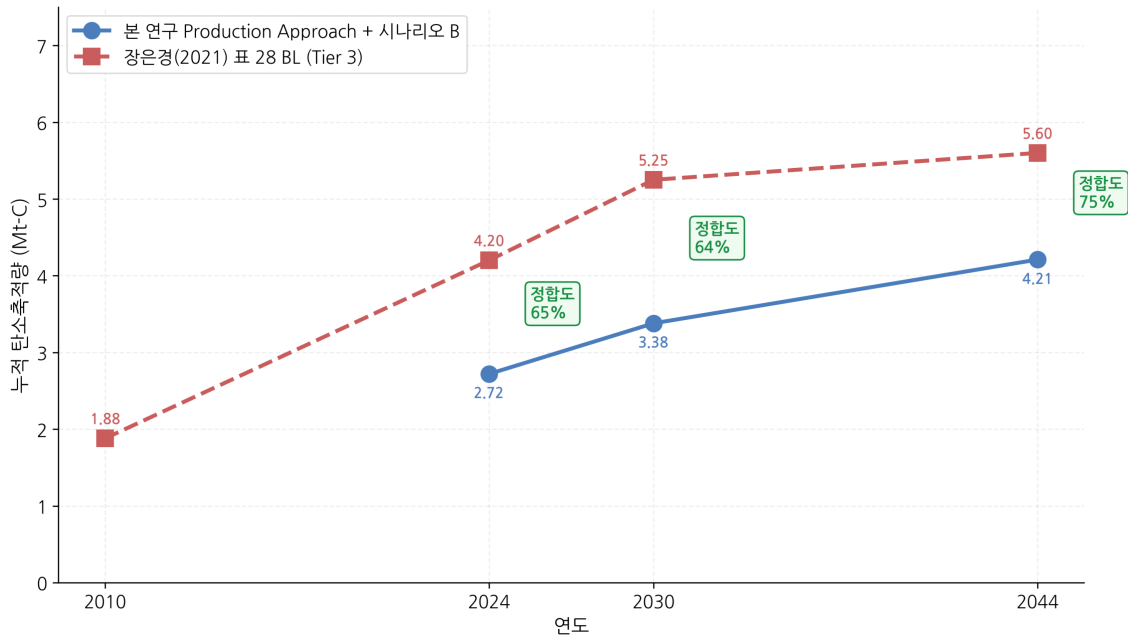
3. 정합성 검증: Production Approach 변환

본 연구 방법론의 신뢰성을 검증하기 위해, 본 연구의 산정 체계를 Production Approach(국산 원목만)로 변환하여 NIR 정합 결과와 비교하였다. 비교 기준은 본 보고서 표 5-2의 한국 HWP Tier 3 누적 탄소축적량 시계열(장은경, 2021)이며, 이는 NIR 산정 체계와 동일한 Production Approach를 적용한 가장 정밀한 학술 분석으로 평가된다.

<표 5-13> Production Approach 변환 결과 (시나리오 B 적용)

연도	본 연구 Prod. + B (Mt-C)	장은경 표 28 BL (Mt-C)	정합도
2010	(시뮬레이션 시작 이전)	1.88	초기조건 도출 근거
2024	2.72	(보간) ~4.2	65% 수준
2030	3.38	5.25	64% 수준
2044	4.21	(보간) ~5.6	75% 수준

주: 본 연구 Production Approach는 국산 원목 부분만 환산해 FOD 모형에 적용한 결과. 장은경 표 28은 1970년부터 시뮬레이션해 얻은 시계열의 BL(베이스라인) 추정치.



[그림 5-8] NIR 정합성 검토 결과

4. 정합성 평가

표 5-13와 그림 5-8에서 확인되는 핵심 사실은 다음과 같다.

- **같은 자릿수 수준의 정합성 확보:**

본 연구 Production Approach 결과는 장은경(2021) NIR 정합 시계열과 같은 자릿수 (Mt-C)에서 일치한다. 2030년 기준 본 연구 3.38 Mt-C 대 장은경 5.25 Mt-C로 격차는 약 36%이나, 두 결과 모두 1~10 Mt-C 범위에 위치하며 IPCC 가이드라인 권장 불확실성(±30%) 수준에 근접한다.

- **격차의 주요 원인:**

- (1) 장은경(2021)은 1970년부터 시계열을 시뮬레이션하여 누적 효과를 반영한 반면, 본 연구는 2020-2024년 5개년 inflow 기반 시뮬레이션으로 더 짧은 기간을 분석.
- (2) 본 연구 Production Approach 변환은 국산 원목 부분만 추출하므로 산림청 보고서 단위 정의 차이에서 일부 격차 발생.
- (3) 카테고리별 C(2019) 분배 가정의 차이.

- **Apparent Consumption의 가치:**

본 연구의 Apparent Consumption 결과(시나리오 B 2030년 약 20.7 Mt-C)는 NIR 직접 비교 대상이 아니지만, 한국 사회가 실제 사용 중인 모든 목제품의 탄소 풀을 보여준다는 점에서 **국내 정책 시뮬레이션에 더 적합한 분석 단위**이다. 수입품 의존도가

높은 한국 상황에서, NIR이 보고하지 않는 수입 가공품 품의 탄소 저장 효과까지 포함한 분석이 필요하다.

4. 본 연구의 NIR 보완 가능성

- **한국 고유계수 개발 기여:**

본 연구가 적용한 표 5-1의 Tier 3 산업별 반감기·폐기율과 표 4-4의 HWP 탄소 전환 계수는 NIR이 아직 완전히 반영하지 못한 한국 고유계수이다. 본 연구 결과는 이러한 고유계수가 NIR 산정에 반영될 경우의 영향을 사전 평가한 자료로 활용 가능하다.

- **Apparent Consumption 보완 분석 제안:**

NIR이 Production Approach만 보고하는 한계를 보완하기 위해, Apparent Consumption 기반 보조 분석을 NIR 부속자료로 추가하는 방안을 제안할 수 있다. 이는 한국과 같은 목재 순수입국에서 더 현실에 부합하는 정책 정보를 제공한다.

- **다중 시나리오 분석 체계:**

본 연구의 시나리오 A·B 비교 구조는 NIR이 단일 추정값만 제시하는 한계를 보완하는 비교 체계로 발전 가능하다. 2차년도 연구에서 NIR 데이터를 본 연구 모형에 직접 입력하여 정합성 시계열을 구축할 수 있다.

제7절 통합 시사점

1. 1차년도 분석 통합 시사점

본 보고서 후반부에서 수행한 3개 분석(반감기 민감도, Cascading, NIR 정합성)은 본 연구의 핵심 결과를 다양한 각도에서 검증·보완하며, 다음과 같은 통합 시사점을 도출한다.

1) 분석 견고성 확보

반감기 민감도 분석(5장 4절)은 시나리오 A·B 차이가 단순한 계수 변동으로 설명되지 않는 구조적 격차임을 정량적으로 입증하였다. 시나리오 B(한국 실태)의 $\pm 50\%$ 변동 범위(14.6~33.5 Mt-C)는 시나리오 A(IPCC)의 변동 범위 최저값(39.5 Mt-C)에도 미치지 못하며, 이는 한국과 IPCC 기본 가정 사이의 격차가 반감기 측정 오차가 아닌 실제 산업 구조 차이임을 시사한다.

2) Cascading 정책 효과의 정량 입증

Cascading 분석(5장 5절)은 한국 실태에서 cascading 정책이 명확한 탄소 저장 효과(+8.9%)를 가치를 정량적으로 보여주었다. 시나리오 A에서는 cascading 효과가 미미하지만, 한국 실태(시나리오 B)에서는 47.5% cascading만으로도 약 2.23 Mt-C의 추가 저장 효과를 확보할 수 있다. 이는 본 연구의 핵심 정책 메시지인 "바이오매스 중심 정책 재검토"를 실행 단계에서 보강하는 정량 근거이다.

3) NIR 정합성 확보 및 보완 가치 식별

NIR 정합성 검토(5장 6절)는 본 연구 방법론이 환경부·산림청의 공식 인벤토리 산정 체계와 같은 자릿수 수준에서 정합함을 확인하였다. 동시에 본 연구의 Apparent Consumption 분석이 NIR이 다루지 않는 수입 가공품 풀까지 포함함으로써 국내 정책 시뮬레이션에 더 적합한 분석 단위임을 입증하였다.

2. 과대추정의 구조적 원인 진단

본 1차년도 연구가 도출한 시나리오 A 대비 시나리오 B의 격차(2044년 +110%)는 단순한 계수 차이가 아니라 한국 HWP 풀의 구조적 특성에서 비롯된다. 그 인과 구조는 다음과 같다. 첫째, IPCC 기본 가정은 미국·유럽 등 장수명 제재목·내구재 비중이 큰 산업 구조를 전제로 제재목 35년·목질패널 25년의 반감기를 권고한다. 둘째, 한국은 제재목 이용량의 약 58%가 토목·수송용 단수명 용도(거푸집·팔레트·임시 시설재)로 투입되어, 가중평

균 반감기가 2.5년에 불과하다(장은경, 2021). 셋째, 이 단수명 이용 구조에 IPCC 기본 반감기를 적용하면 stock 형성 동태가 실제보다 과도하게 추정되어, 25년 누적 시점에서 약 2배의 격차가 발생한다. 따라서 본 연구가 입증한 110% 격차는 한국 산업구조의 단수명 이용 비중을 IPCC 평균치로 가정할 때 발생하는 구조적 과대추정이다.

3. 단기 산화 구조의 정책적 원인 : RPS 기반 바이오매스 정책

한국 목재 소비의 단기 산화 경로 65% 구조는 단순한 산업적 우연이 아니라, 신재생에너지 공급의무화제도(RPS) 도입 이후 형성된 정책적 구조이다. 2012년 RPS 도입 이후 목질계 바이오매스 사용량은 2023년 740만 톤으로 약 50배 증가하였고, 이 중 원목 펄릿 약 340만 톤의 98%가 베트남·러시아·인도네시아 등 해외에서 수입되며 연간 수입금액은 약 7,000억 원에 달한다(산업통상자원부, 2024). 본 4장 카테고리별 분석에서 확인된 에너지용 비중 35.6% 중 상당 부분은 국내 폐목재 재활용만으로는 설명되지 않으며, RPS 가중치에 의해 견인된 수입 목재펠릿 수요에 의존하는 구조이다. 즉, 본 연구가 정량화한 단수명 65% 구조의 직접적 정책 요인은 RPS 가중치 체계이며, 이는 HWP 풀의 장기 탄소 적치를 구조적으로 제약하는 동시에 해외 산림자원의 단기 산화를 한국 회계 체계 외부로 이전시키는 효과를 갖는다. 2024년 12월 정부는 신규 목질계 바이오매스 발전설비 REC 미부여, 기존 설비 가중치 단계적 조정 등을 포함하는 「바이오매스 연료·발전시장 구조 개선방안」을 확정하 바 있어, 향후 본 연구의 단기 산화 구조 진단이 정책 변화에 따라 어떻게 변동할지를 추적할 필요가 있다.

4. 통합 정책 메시지

1차년도 연구를 종합하면 다음 4개 정책 메시지가 도출된다.

- 한국 목재 소비의 65%가 단기 산화 경로이며, 그 정책적 원인은 RPS 기반 바이오매스 정책: 산림청 종합지표 재산출 결과, 에너지용 35.6% + 펄프·제지 29.6% = 단기 산화 경로 65.2%. 이는 단순한 산업 구조가 아니라 RPS 가중치 체계가 견인한 수입 목재펠릿 수요(연간 약 340만 톤, 98% 수입 의존)에 의해 형성된 정책적 결과이다. HWP 풀의 장기 탄소 적치를 구조적으로 제약하는 핵심 요인이며, 2024년 12월 정부의 바이오매스 정책 개편(신규 설비 REC 미부여) 효과를 본 연구 모형으로 정량 평가할 필요가 있다.
- IPCC 기본 가정은 한국 실태와 격차 큼: 시나리오 A·B의 2024년 stock 격차(19.5 vs 15.7 Mt-C, 약 24%)와 2044년 격차(52.4 vs 25.1 Mt-C, 약 110%)는 한국 산업 구조의 단기 이용 비중이 IPCC 평균보다 훨씬 크기 때문에 발생한다.

- 단수명 이용 구조 축소는 cascading 활성화(폴 내부)와 에너지용 비중 축소(폴 외부)의 두 축으로 추진해야 함: (폴 내부 정책) 한국 HWP의 65% 단수명 구조에서 폐목재 보드재 재활용으로 저장 기간 약 3.5배 연장 가능하며, 한국 실태(시나리오 B)에서 cascading 47.5% 가정만으로 +8.9%의 stock 증가 효과를 확보한다. IPCC 기본 가정으로는 -1.0%의 음의 효과로 평가되었던 cascading이 한국 단수명 이용 구조 반영 시 정량적으로 유효한 폴 내부 정책 수단으로 전환됨이 본 연구가 정량적으로 확인한 결과이다.(폴 외부 정책) 동시에 5장 5절 분석에 따르면 2024년 에너지용 카테고리 즉시 산화량(약 2.15 Mt-C)이 같은 해 시나리오 B의 3개 폴 자연 산화량(2.87 Mt-C)의 약 75%, 단일 연도 총 탄소 배출의 약 43%를 차지하므로, 에너지용 35.6% 비중 자체를 줄여 일부를 장수명 폴로 재배치하는 정책이 병행 추진되어야 한다. 폐목재 보드재 재활용 의무화·인센티브 강화(폴 내부 정책 카드)와 RPS 가중치 체계 개편을 통한 에너지용 수요 축소(폴 외부 정책 카드)는 한국 단수명 구조 해소를 위한 양 축으로 직접 활용 가능하다.
- 우선 정밀화 필요 카테고리: 목질패널류: 반감기 $\pm 50\%$ 변동 시 stock 변화 $\pm 22.8\%$ 로 가장 큰 영향력. 향후 한국 고유 반감기 계수 개발 시 목질패널류(합판·MDF·파티클보드)의 산업 투입별 이용 수명 측정이 우선 과제.

5. 분석의 한계

본 연구는 한국 HWP 탄소 저장 동태를 정량적으로 분석하여 정책적 함의를 도출하였으나, 분석 과정에서 자료·방법론·범위 측면에서 다음과 같은 한계를 갖는다. 이러한 한계를 명시적으로 식별함으로써 본 연구 결과의 적정 해석 범위를 제시하고, 후속 연구의 방향성을 명확히 한다.

- 자료의 시간 범위 한계: 본 연구는 산림청 「목재이용실태조사」 2020-2024년 5개년 자료를 활용하였으나, 이는 한국 HWP 폴의 장기 동태를 추정하기에 비교적 짧은 시계열이다. 특히 2020-2022년은 코로나 팬데믹의 영향을 받은 비정상 시기를 포함하므로, 본 연구가 추정한 5개년 평균 inflow가 한국 목재 이용의 정상상태를 정확히 반영하는지에 대한 추가 검증이 필요하다.
- 수입 가공품 수종 정보 한계: 산림청 통계는 원목(roundwood)에 대해서만 침엽수·활엽수 분리 정보를 제공하며, 수입 가공품(완제품 형태로 들어오는 제재목·합판·MDF 등)에 대해서는 수종 정보가 제한적이다. 본 연구는 이를 통합 환산계수(제재목류 0.229, 보드류 0.269 t-C/m³)로 처리하였으나, 실제 수입 가공품의 수종 구성에 따라 탄소 환산값이 달라질 수 있다.
- 반감기 추정의 한계: 본 연구는 장은경(2021)의 산업 투입 비율(2017년 기준)을 5개년

inflow에 가중평균하여 반감기를 산출하였으나, 산업 투입 비율은 시간이 지남에 따라 변화할 수 있다. 또한 민감도 분석에서 식별된 우선 정밀화 대상인 목질패널류(합판·MDF·파티클보드)의 산업별 실제 이용 수명에 대한 직접 측정 자료는 본 1차년도 연구 범위에서 다루지 못하였다.

- Cascading 분석 범위의 한계: 본 연구의 cascading 분석은 토목·수송용 제재목 폐기물의 보드재 재활용이라는 한 단계 흐름만을 반영하였다. 실제로는 건축 폐목재 재활용, 보드재 폐기 후 에너지 회수, 가구재 재활용 등 복수 단계의 cascading이 존재하나, 이는 multi-pool FOD 모형 구축이 필요하므로 본 1차년도 분석 범위 외이다. 또한 cascading 비율 47.5%는 장은경(2021)의 인터뷰 자료(45-50%)의 중간값을 단순 적용한 것으로, 산업별 실측 자료에 의한 정밀화가 필요하다.
- NIR 정합성 검증의 범위 한계: 본 연구는 환경부 NIR과의 정합성을 자릿수·추세 수준에서 확인하였으나, 본 연구의 분석 기간(2020-2044년 25년)이 NIR의 시계열(1990-현재)과 다르고 본 연구 Production Approach 변환 시 국산 원목 부분만을 대상으로 하므로 산림청 보고서의 산정 단위와 일부 차이가 존재한다. 이로 인해 두 결과의 정합도는 64-75% 수준에 머물렀으며, 이는 본 연구 방법론의 신뢰성을 입증하기에는 충분하지만, NIR 정밀화 도구로 활용하기 위해서는 동일 기간·동일 산정 단위로의 추가 환산 작업이 필요하다.
- 정책 시뮬레이션의 한계: 본 연구는 한국 HWP의 현재 구조와 IPCC 기본 가정 vs 한국 실태(시나리오 A·B) 비교를 수행하였으나, 정책 변화(예: 국산 목재 우선 조달 비율 확대, 보드재 재활용 의무화)에 따른 동태적 변화를 본 1차년도 분석에서는 다루지 않았다. 이는 본 보고서 제3장의 산림바이오매스 공급 측면 분석과의 통합 분석을 통해 2차년도에서 다룰 예정이다.

이러한 한계는 본 연구의 결과를 무력화시키는 것이 아니라, 본 연구가 1차년도 단계에서 입증한 견고한 방법론적 토대 위에서 어느 방향으로 정밀화·확장되어야 하는지를 명확히 보여주는 것이다. 다음 4소절에서 제시하는 2차년도 연계 과제는 위 한계점을 직접적으로 극복하는 방향으로 설계되었다.

6. 2차년도 연계

본 보고서의 분석 결과는 2차년도 연구 과업으로 다음과 같이 연계된다. 1차년도 분석을 통해 본 연구 모형이 환경부 NIR과 자릿수·추세 모두에서 정합함이 검증되었으므로, 2차년도에는 본 모형을 한국 산림바이오매스 정책과 목재 이용 정책의 통합 평가 도구로 발전시킨다. 특히 본 연구는 본 보고서 제3장(산림자원 현황·임업·바이오매스 공급)에서 본

석된 국내 산림바이오매스 공급 측면 결과와 본 4·5장의 목재 이용·HWP 탄소 저장 측면 결과를 통합한 '공급-이용 연계 분석'을 2차년도에의 핵심 신규 과제로 제시한다.

- 국내재-수입재 차별성 기반 통합 정책 분석: 본 1차년도 연구가 NIR과 같은 경향성을 보임이 검증된 만큼, 2차년도에는 본 연구 모형을 한국의 지속가능한 목재 공급 정책과 목재 이용 정책의 연계 분석 도구로 발전시킨다. 구체적으로 (1) 국내재와 수입재의 차별적 특성 - 경급 분포, 수종 구성, 산업별 용도 (예: 국산 침엽수 소·중경재의 펄프·보드재·에너지용 집중 vs 수입 활엽수 대경재의 가구·내장재·고급 제재목 집중) - 을 정량화하고, (2) 본 보고서 제3장(국내 산림바이오매스 공급 분석)의 결과와 본 4·5장의 결과를 통합하여 국내재 공급 시나리오별 HWP 탄소 저장 효과를 분석하며, (3) 국내재 활용 확대 정책(예: 국산 목재 우선 조달, 장수명 가공 산업 육성, 미이용 산림바이오매스 활용)이 한국 HWP 탄소 풀과 산림 부문 NDC 기여에 미치는 영향을 정량적으로 평가한다. 이는 그동안 분리되어 다루어진 '산림바이오매스 공급'과 '목재 이용·탄소 저장' 정책을 하나의 분석 체계로 통합하는 시도로서, 본 연구 1차년도가 도출한 정합성·견고성을 정책 도구로 전환하는 작업이다.
- 고유 반감기 측정: 1차년도 민감도 분석에서 우선 정밀화 대상으로 식별된 목질패널류에 대해, 한국 합판·MDF·파티클보드의 산업 투입별 실제 이용 수명을 현장 조사·기업 인터뷰로 측정한다. 이는 본 연구 시나리오 B의 정밀도를 한 단계 더 높이는 작업이다.
- 다단계 Cascading 모형 구축: 1차년도에 적용한 한 단계 cascading(제재목→보드재)을 다단계로 확장한다. 건축 폐목재의 보드재 재활용, 보드재 폐기 후 에너지 회수, 가구재 재활용 등 복수 단계의 흐름을 multi-pool FOD 모형으로 구현하여 한국 cascading 정책의 정량 효과를 더 정확히 평가한다.
- NIR 통합 분석: 환경부 NIR 최신본의 한국 HWP stock 시계열을 본 연구 Apparent Consumption 시계열과 통합하여 비교 가능한 형태로 제시한다. 이를 통해 NIR 보완 분석으로서의 가치를 강화하며, 정부 인벤토리 산정 체계 개선에 기여한다.
- 정책 시나리오 평가 도구화: 1차년도에서 본 연구 모형이 NIR과 정합함이 검증된 만큼, 본 모형을 정부의 HWP 탄소 정책 평가 도구로 발전시킨다. NDC(국가결정기여) 산림 부문 목표 달성 시나리오, 2050 탄소중립 경로상의 HWP 기여 평가 등 정책 결정 과정에서 활용 가능한 분석 도구로 정립한다.

7. 결론

본 1차년도 연구는 한국 HWP 탄소 동태를 단순한 분석 결과의 나열이 아닌, 하나의 통

합된 정책 이야기로 재구성하였다. 첫째, 진단 측면에서 한국 HWP 풀은 65%가 단기 산화 경로에 집중된 구조이며, 이로 인해 IPCC 기본 가정 적용 시 장기 stock이 약 110% 과대 추정된다는 사실을 정량적으로 입증하였다. 둘째, 원인 측면에서 이 단수명 구조는 단순한 산업적 우연이 아니라 RPS 기반 바이오매스 정책이 견인한 정책적 결과임을 본 보고서 제 3장의 공급 분석 결과와 연결하여 식별하였다. 셋째, 정책적 해결 측면에서 cascading 활성화(풀 내부 정책, +8.9% stock 증가)와 에너지용 비중 축소(풀 외부 정책, 30% 축소 시 +22%·50% 축소 시 +37%의 2044년 stock 증가)의 두 축이 서로 다른 메커니즘으로 한국 HWP 풀에 기여함을 정량 시뮬레이션으로 확인하였다. 넷째, 검증 측면에서 본 모형이 환경부 NIR과 자릿수·추세 정합함을 입증하여, 본 연구가 NIR을 대체하는 것이 아니라 보완하는 정책 시뮬레이션 도구로서의 신뢰성을 확보하였다. 본 보고서가 도출한 "진단 → 원인 → 해결 → 검증"의 통합 정책 이야기는 2차년도 연구에서 본 보고서 제3장(공급)과 본 4·5장(이용)의 결과를 통합한 「공급-이용 연계 분석」으로 발전하여, NDC 산림 부문 기여 평가와 2050 탄소중립 경로상 HWP 정책 결정에 활용 가능한 실증 기반 분석 도구로 완성될 것이다.

제6장

산림바이오매스 관련 이해관계자 분석

제1절 이해관계자 분석의 목적과 범위

제2절 조사 설계 및 분석 절차

제3절 주제 분석

제4절 결론

6

산림바이오매스 관련 이해관계자 분석 <



제1절 이해관계자 분석의 목적과 범위

1. 개요

본 장은 단별기 벌채·재조림 및 산림바이오매스 생산을 둘러싼 정책수단이 현장에서 어떻게 인식되고 실행되는지를 분석하는 데 목적이 있다. 앞선 장들이 법·제도, 보조금, 용자, REC 구조와 산림 탄소저장 효과를 중심으로 정책의 공식적 설계와 정량적 영향을 검토하였다면, 본 장은 이러한 정책이 실제 행위자들의 의사결정과 공급망 작동 과정에서 어떻게 재구성되는지를 확인한다.

산림바이오매스 정책은 단일한 제도나 행위자만으로 설명되기 어렵다. 산주는 벌채와 조림의 시기 및 방식을 결정하고, 벌채업자와 원목생산업자는 산림 현장에서 원목과 부산물을 분류·수집한다. 칩 생산자와 유통업자는 미이용 산림바이오매스를 연료화하여 공급망을 형성하며, 발전사업자는 RPS·REC 제도와 연계하여 바이오매스 연료 수요를 만들어낸다. 지자체 산림 담당 공무원은 벌채 허가, 수집 허가, 증명 업무를 수행하고, 중앙부처는 산림·에너지·탄소 관련 제도와 재정지원 체계를 설계한다. 시민사회와 지역사회는 산림훼손, 생물다양성, 주민 건강, 지역 일자리, 탄소중립성 문제를 제기하며 정책의 사회적 수용성을 평가한다.

따라서 본 연구는 공식 문서와 통계자료만으로는 확인하기 어려운 현장 행위자의 경험, 판단 기준, 제도 해석 방식, 공급망 내부의 관행을 파악하기 위해 이해관계자 심층인터뷰를 수행하였다. 심층인터뷰는 응답자가 자신의 언어로 정책 경험과 현장 판단을 설명하도록 유도함으로써, 제도가 실제로 작동하는 맥락을 파악하는 데 적합한 질적 연구 방법이다(Kvale & Brinkmann, 2009; Creswell, 2013; Creswell & Poth, 2018). 특히 산림바이오매스 정책처럼 정책 목표, 경제적 유인, 현장 실행, 생태적 영향, 지역사회 평가가 복합적으로 얽힌 사안에서는 이해관계자별 인식과 경험을 비교하는 접근이 필요하다.

본 장의 분석은 단순히 이해관계자의 의견을 나열하는 데 그치지 않는다. 제도 설계와 현장 실행 사이의 차이, 정책수단이 만들어내는 경제적 유인, 공급망 내부의 가격·물량·증명 구조, 탄소중립 정책과 산림생태계 보전 목표 사이의 긴장을 함께 검토한다. 이를 통해 산림바이오매스 정책의 문제를 현장 행위자의 개별 선택이 아니라, 법·제도, 재정지원, 에너지 인센티브, 공급망 구조가 결합되어 만들어진 실행 메커니즘으로 이해하고자 한다.

2. 연구참여자

본 연구의 인터뷰 대상자는 목적표집(purposive sampling) 원칙에 따라 선정하였다. 질적 연구에서 목적표집은 통계적 대표성보다 연구문제와 직접 관련된 경험과 정보를 풍부하게 제공할 수 있는 참여자를 의도적으로 선정하는 방식이다(Patton, 2015; Creswell, 2013). 산림바이오매스 정책은 정책 결정자, 집행자, 현장 실행자, 시장 행위자, 시민사회 행위자가 서로 다른 위치에서 관여하는 복합 정책 영역이므로, 본 연구는 각 행위자 집단의 경험과 해석을 비교할 수 있도록 다층적 표집을 적용하였다.

주요 인터뷰 대상은 산주, 지방자치단체 산림 담당 공무원, 중앙부처 공무원, 별채업자 또는 원목생산업자, 칩 생산자 및 유통업자, 발전사업자, 시민사회 및 지역사회 관련 행위자로 구성하였다. 이들은 각각 산림바이오매스 정책의 설계, 집행, 현장 실행, 공급망 형성, 에너지 수요, 사회적 평가의 다른 위치에 놓여 있다. 따라서 이들을 함께 분석함으로써 정책 설계 단계에서 전제한 논리와 현장에서 실제로 작동하는 방식 사이의 차이를 입체적으로 파악할 수 있다.

첫째, 산주는 별채·조림 여부와 시기, 산림바이오매스 공급 여부를 결정하는 출발점에 위치한다. 미이용 산림바이오매스 증명절차에서 수집 신청 주체는 원목생산자 또는 산주로 제시되어 있으며, 입목별채 허가 또는 신고 신청 시, 혹은 허가·신고증 발급 후 미이용 산림바이오매스 수집 신청을 할 수 있다(산림청, n.d.-b). 따라서 산주 면담은 보조금, 용자, 별채 규제, 조림 지원, 목재가격, 바이오매스 수요가 실제 산림경영 의사결정에 어떤 영향을 미치는지를 파악하는 데 필요하다.

둘째, 지방자치단체 산림 담당 공무원은 중앙정부 정책을 지역 단위에서 집행하고 조정하는 핵심 행위자이다. 산림청의 미이용 산림바이오매스 증명절차에 따르면, 담당 공무원은 별채예정수량조사서의 미이용 산림바이오매스 수집 예정수량을 조사·확인하고, 타당하다고 인정되는 경우 수집 허가증을 발급한다(산림청, n.d.-b). 또한 수집 확인·점검, 증명서 발급, 증명서 유통 단계에도 지자체의 행정적 역할이 포함된다. 따라서 지자체 공무원 면담은 중앙정부 지침이 지역의 인력, 예산, 민원, 현장 확인 여건 속에서 어떻게 해석되고 집행되는지를 분석하는 데 중요하다.

셋째, 중앙부처 공무원은 산림·에너지·탄소 관련 제도와 정책수단을 설계하는 정책 결정 주체이다. 산림바이오매스 정책은 산림정책만이 아니라 재생에너지 공급정책, 탄소중립 정책, 목재산업 정책과 교차한다. 정부는 2024년 관계부처 합동으로 「목질계 바이오매스 개선방안」을 발표하면서 폐목재 재활용 확대, 미이용 바이오매스 관리 강화, RPS 정책지원 규모 조정 등을 주요 과제로 제시하였다(산업통상자원부·산림청·환경부, 2024). 따라서 중앙부처 공무원 면담은 정책의 목표 설정 논리, 제도 설계 의도, 부처 간 조정 구조, 현장 행위자와 정책 설계자 간 인식 차이를 비교하는 기준점으로 기능한다.

넷째, 벌채업자 또는 원목생산업자는 단벌기 벌채가 실제로 이루어지는 현장의 실행 주체이다. 이들은 벌채 허가·신고, 원목 생산, 산물 분류, 현장 운반, 부산물 처리, 원료 수집 가능성 판단을 통해 정책이 산림 현장에서 실제로 작동하는 과정을 매개한다. 특히 산물 수집률은 벌채 유형과 현장 조건에 따라 크게 달라질 수 있다. 2019년 기준 수확벌채의 원목 수집률은 96.0%, 수종갱신은 90.5%인 반면, 숲가꾸기 산물의 수집률은 14.5%로 나타났다(산림청, n.d.-d). 이는 동일한 산림바이오매스 확대 정책이라도 지형, 작업로, 수종, 벌채 방식, 인건비, 운반비, 산물의 품질과 규격에 따라 실제 수집 가능성이 달라질 수 있음을 보여준다. 따라서 벌채업자 면담은 단벌기 벌채 유도 정책이 작업 관행, 비용 구조, 산물 선별 방식, 규제 준수, 부산물 처리와 어떻게 결합되거나 충돌하는지를 분석하는 데 필수적이다.

다섯째, 칩 생산자와 유통업자는 미이용 산림바이오매스가 발전용 연료로 전환되는 공급망의 핵심 중간 행위자이다. 산림청은 미이용 산림바이오매스를 국내 산림경영활동 등으로 발생한 산물 중 원목 규격에 못 미치거나 수집이 어려워 이용이 원활하지 않은 산물로 정의하고, 수종갱신·목재수확 과정에서 나온 부산물, 숲가꾸기 산물, 산림병해충 피해목 제거 과정에서 나온 벌채 산물 등을 그 범위에 포함한다(산림청, n.d.-a). 칩 생산자는 이러한 산물을 수집·가공하여 발전용 연료로 공급하는 역할을 수행한다. 이 과정에서 원료의 적법성, 물량 증명, 품질 관리, 납품 계약, 가격 형성, 운송비 부담이 중요한 변수로 작동한다. 따라서 칩 생산자와 유통업자 면담은 원료 수급 안정성, 수집·운송비 구조, 품질 기준, 증명제도의 행정 부담, 국내산·수입산 간 가격 경쟁, REC 제도의 시장 유인 효과를 파악하는 데 필요하다.

여섯째, 발전사업자는 산림바이오매스 연료의 최종 수요처이자 REC 제도와 연료시장을 연결하는 행위자이다. 한국에너지공단 신·재생에너지센터는 RPS 제도를 500MW 이상의 발전사업자에게 총 발전량의 일정 비율 이상을 신재생에너지로 공급하도록 의무화한 제도로 설명한다(한국에너지공단 신·재생에너지센터, n.d.-a). REC는 발전량 확인, 공급인증서 발급 신청, 수수료 납부, 공급인증서 발급, 거래 절차를 통해 운영된다(한국에너지공단 신·재생에너지센터, n.d.-b). 따라서 발전사업자는 산림바이오매스 연료를 단순한 연료가 아니라 RPS 의무 이행과 REC 확보 수단으로 인식할 가능성이 높다. 발전사업자 면담은 REC 가중치, 연료 조달 가격, 혼소·전소 설비 운영 조건, RPS 의무 이행 비용이 산림자원 이용 방식에 어떤 수요 압력을 형성하는지를 분석하는 데 활용된다.

일곱째, 시민사회 및 지역사회 관련 행위자는 산림바이오매스 정책의 사회적·생태적 영향을 평가하는 주체이다. 이들은 산림바이오매스 정책이 탄소중립, 생태계 건강성, 경관, 생물다양성, 주민 건강, 지역 일자리 문제와 어떻게 충돌하거나 조정되는지를 보여준다. 따라서 시민사회와 지역사회 면담은 산림바이오매스 정책이 단순한 원료 공급정책이 아니라 생태계서비스, 지역사회 수용성, 정의로운 전환의 문제와 연결되어 있음을 확인하는 데

필요하다.

본 연구는 인터뷰 대상자의 수를 사전에 고정하지 않고, 행위자 집단별 핵심 쟁점과 인식 패턴이 반복적으로 확인되는 정보의 포화(information saturation) 시점을 고려하여 면담 범위를 확정하였다. 이는 질적 연구에서 표본 수를 단순한 숫자가 아니라 분석 주제의 반복성과 자료의 충실성에 따라 판단해야 한다는 방법론적 논의에 근거한다(Guest, Bunce, & Johnson, 2006).

3. 인터뷰 질문지 구성

본 연구의 인터뷰 질문지는 정책·제도 구조, 집행 메커니즘, 생태·사회적 영향, 제도 개선 방향을 중심으로 구성하였다. 질문지는 반구조화 인터뷰 가이드의 성격을 가지며, 실제 면담 과정에서는 응답자의 역할과 경험에 따라 일부 문항을 조정하였다. 이는 공통된 분석틀을 유지하면서도, 각 행위자 집단의 경험과 전문성을 충분히 반영하기 위한 것이다(Kvale & Brinkmann, 2009).

<표 6-1> 인터뷰 방향

구분	질문 방향	
정책·제도 차원	1	단별기 별채·재조림 및 바이오매스 생산을 유도하는 법·제도·보조금·용자의 구조와 특징은 무엇인가?
	2	이들 정책·재정 구조는 산림탄소흡수와 바이오매스 연소 배출에 어떠한 영향을 미치는가(탄소부채, 흡수 감소, 저장 지연 등)?
진행·현장 메커니즘 차원	3	별채·조림 원목생산자, 바이오매스 연료 수요처, 지자체 산림 공무원, 유통업자는 이러한 정책을 “탄소중립 정책”으로 어떻게 인식하고, 어떤 진행 관행과 의사결정 과정을 통해 단별기 별채와 바이오매스 공급을 정당화하는가?
	4	단별기·바이오매스 정책은 생태계 건강·생물다양성·지역주민 건강·기후회복력에 어떤 영향을 미치며, 이해관계자들은 이를 어떻게 경험·평가하는가?
	5	정책 설계와 현장 작동 사이에서 나타나는 괴리·왜곡·의도치 않은 결과는 무엇이며, 이를 개선하기 위한 정책 설계·집행 메커니즘의 개편 방향은 무엇인가?
	6	탄소중립·생태·지역사회 목표를 동시에 충족하기 위해 산림·바이오매스 보조금·용자·REC 구조는 어떻게 재설계되어야 하는가?

위 질문 방향을 바탕으로 본 연구는 여섯 가지 주요 변수를 설정하였다. 첫째, 정책 인식은 단별기·바이오매스 정책을 탄소중립 또는 재생에너지 정책으로 인식하는 정도와 정책 목표에 대한 이해 수준을 의미한다. 둘째, 경제적 유인 구조 인식은 보조금, 용자, REC 등 재정 인센티브에 대한 이해와 의존도를 파악하기 위한 변수이다. 셋째, 실행 메커니즘은 별채, 조림, 수집, 운반, 가공, 발전으로 이어지는 가치사슬상의 의사결정과 관행을 의미한다. 넷째, 영향 인식은 생태계 건강, 생물다양성, 주민 건강과 생계, 경관, 기후회복력에 대한 평가를 포함한다. 다섯째, 괴리·왜곡은 법령과 지침의 설계 논리와 실제 현장 관행 사이의 차이, 그리고 의도치 않은 결과를 파악하기 위한 변수이다. 여섯째, 개선 방안은

탄소중립, 생태, 지역사회 목표를 동시에 고려한 제도와 인센티브 구조의 개편 방향을 도출하기 위한 변수이다.

4. 제도 구조와 이해관계자 인터뷰의 연계

본 연구의 인터뷰 분석은 산림정책·제도 구조가 현장에서 어떻게 인식되고 실행되는지를 확인하는 데 초점을 둔다. 법령과 지침이 규정하는 공식 제도 구조와 실제 산림 현장에서 이루어지는 행위자의 의사결정 사이에는 차이가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구는 제도를 단순한 배경 설명이 아니라, 행위자의 선택을 제약하고 유인하는 구조로 이해한다. 인터뷰는 이러한 제도 구조가 현장에서 어떻게 경험되고 재구성되는지를 보여주는 자료로 활용된다.

산주 인터뷰는 벌채·조림·재정지원 제도가 산림 소유자의 의사결정에 어떤 영향을 미치는지를 파악하는 데 초점을 둔다. 산주는 산림자원의 소유자이지만, 벌채 수익성, 조림비 부담, 보조금 접근성, 유통 정보 부족, 장기 경영 동기 부족 등 다양한 제약 속에서 의사결정을 내린다.

벌채업자와 원목생산업자 인터뷰는 입목벌채 허가·신고, 작업 방식, 산물 분류, 수집·운반 비용, 원목과 부산물의 가격 차이가 단별기 벌채와 바이오매스 공급에 어떻게 작용하는지를 확인하는 데 활용된다. 이들은 벌채 현장에서 산림자원이 원목, 펄프재, 부산물, 바이오매스용 원료로 구분되는 실제 과정을 담당한다.

지자체 공무원 인터뷰는 벌채 허가, 조림·숲가꾸기 보조사업 집행, 미이용 산림바이오매스 수집 허가 및 증명 업무가 지역 행정 현장에서 어떻게 수행되는지를 확인하는 데 목적이 있다. 법령상 지자체는 허가·확인·증명 기능을 수행하지만, 실제로는 인력 부족, 현장 확인의 어려움, 민원 대응, 지방비 매칭 부담 등 행정적 제약을 경험할 수 있다.

칩 생산자와 유통업자 인터뷰는 미이용 산림바이오매스 수집 허가·증명 제도, 원료 수급 안정성, 수집·운반비, 품질 기준, 중간 유통 구조가 공급망 형성에 어떤 영향을 미치는지를 파악하는 데 활용된다. 실제 시장에서는 원료 물량 확보, 운송거리, 가격 경쟁, 증명서류 부담 등이 공급망 유지의 핵심 변수로 작동한다.

발전사업자 인터뷰는 RPS·REC 제도가 바이오매스 연료 수요를 어떻게 형성하는지, REC 가중치 변화가 사업성·연료 선택·설비 운영에 어떤 영향을 미치는지를 확인하는 데 활용된다. 이는 산림바이오매스 정책이 산림정책의 문제를 넘어 에너지정책 인센티브와 결합되어 작동한다는 점을 보여주는 핵심 자료이다.

시민사회 및 지역사회 관련 인터뷰는 산림바이오매스 정책이 탄소중립, 생태계 건강성, 경관, 생물다양성, 주민 건강, 지역 일자리 문제와 어떻게 충돌하거나 조정되는지를 파악하는 데 활용된다. 이를 통해 산림바이오매스 정책의 사회적 수용성과 정의로운 전환 과제

를 함께 검토하고자 한다.

<표 6-2> 제도 영역별 이해관계자 인터뷰 분석 초점

제도 영역	주요 이해관계자	인터뷰 분석 초점
입목벌채 허가·신고	산주, 벌채업자, 지자체 공무원	벌채 결정 요인, 허가 절차, 현장 작업 방식, 단벌기 벌채 유인
조림·숲가꾸기 보조금	산주, 지자체 공무원, 산림사업법인	보조금 의존도, 재조림 실행, 공공재원 부담, 산주 참여 유인
산림사업 용자	산주, 임업인, 목재생산업자	장기 산림경영 기반, 상환 부담, 시설·장비 투자 가능성
미이용 산림바이오매스 수집·증명	벌채업자, 칩 생산자, 지자체 공무원	원료 적법성 확인, 증명 절차, 수집 물량, 행정 부담
목재생산·유통 구조	벌채업자, 목상, 칩 생산자, 산림조합	원목·펠프재·바이오매스 가격 위계, 중간유통, 정보 비대칭
RPS·REC	발전사업자, 칩 생산자, 중앙부처 공무원	REC 의존성, 발전용 수요 형성, 정책 변화에 따른 사업성
지속가능성·사회적 수용성	시민사회, 지역사회, 노동자	생태계 훼손 우려, 탄소중립성 논쟁, 지역 일자리와 정의로운 전환

이를 종합하면, 본 연구의 이해관계자 인터뷰는 단벌기 벌채·재조림·바이오매스 생산의 실행 메커니즘을 법·제도, 재정지원, 에너지 인센티브, 현장 행위자의 상호작용 속에서 분석하기 위한 것이다. 제도는 행위자의 선택을 제약하고 유인하는 구조이며, 인터뷰는 그 구조가 실제 현장에서 어떻게 경험되고 조정되는지를 보여준다.

제2절 조사 설계 및 분석 절차

1. 심층 인터뷰(In-depth Interview, IDI) 설계

본 연구는 산림바이오매스 정책 및 현상에 대한 이해관계자의 인식, 경험, 실천 논리를 심층적으로 분석하기 위해 이해관계자 심층인터뷰(in-depth interview, IDI)를 수행하였다. 심층인터뷰는 설문조사로 포착하기 어려운 현장 경험과 정책 해석, 갈등 인식, 암묵적 판단 기준을 파악하는 데 적합하다(Creswell, 2013). 특히 본 연구의 대상자는 정책 결정자, 실행 주체, 현장 실무자, 수혜자 또는 영향을 받는 행위자로 구성되어 있어, 이들이 보유한 실무 지식과 경험을 분석하는 것이 중요하다.

이해관계자 인터뷰는 전문가 인터뷰(expert interview)의 성격도 함께 갖는다. 산림바이오매스 정책은 벌채, 조림, 목재 유통, 에너지 발전, 탄소정책, 지역사회 수용성이 결합된 복합 영역이므로, 각 분야의 핵심 행위자가 보유한 전문 지식은 정책 작동 구조를 이해하는 데 중요한 자료가 된다. Bogner, Littig, and Menz(2009)는 전문가의 특수 지식이 연구의 탐색 단계에서 핵심 쟁점을 조기에 도출하고, 이론적 가설 검증과 정책 대안 도출의 타당성을 높일 수 있다고 설명한다.

자료 수집은 1:1 대면 심층인터뷰를 기본 원칙으로 하되, 연구참여자의 거리와 시간적 제약을 고려하여 서면 인터뷰를 병행하였다. 인터뷰는 1인당 60~120분 내외를 기준으로 1회 실시하는 것을 원칙으로 하였으며, 분석 과정에서 추가 확인이 필요한 경우 전화 또는 온라인·서면 방식의 보완 인터뷰를 활용하였다. 이러한 방식은 다양한 행위자의 참여를 확보하면서도 자료의 깊이와 분석의 신뢰도를 높이기 위한 것이다.

2. 자료수집 및 분석 방법

본 연구는 단벌기 산림 정책 및 재정 지원 체계가 현장에서 작동하는 메커니즘을 규명하기 위해 질적 연구 방법론(qualitative research methodology)을 채택하였다. 자료수집 단계에서는 목적표집을 적용하여 정책과 현상에 대한 풍부한 경험을 제공할 수 있는 이해관계자를 선정하였다. 표본 설계에서는 양적 연구의 대표성 논리보다 정보의 포화(information saturation)를 기준으로 삼았다. 즉, 핵심 행위자 간 인식 패턴과 주요 주제가 반복적으로 확인되는 시점을 고려하여 인터뷰 범위를 확정하였다(Guest, Bunce, & Johnson, 2006).

심층인터뷰 자료의 해석 과정에서 발생할 수 있는 주관성을 보완하기 위해 삼각측정법(triangulation)을 적용하였다. 인터뷰 결과를 문헌조사, 기존 통계자료, 정책자료와 교차분석함으로써 진술의 맥락과 정책적 의미를 검토하고, 분석 결과의 신뢰도와 타당도를 높

이고자 하였다(Denzin, 1978).

자료 분석은 Braun and Clarke(2006)가 제시한 주제 분석(thematic analysis) 절차에 따라 수행하였다. 주제 분석은 질적 자료에 내재한 반복적 의미 패턴을 식별하고 해석하는 방법으로, 연구 문제와 관련된 핵심 경험과 의미구조를 도출하는 데 적합하다. 본 연구는 다음의 여섯 단계를 중심으로 인터뷰 자료를 분석하였다.

첫째, 데이터 익히기 단계에서는 별채업자, 칩 생산자, 지자체 공무원, 산주 등 이해관계자 인터뷰 자료와 정책 문헌을 반복적으로 검토하였다.

둘째, 초기 코드 생성 단계에서는 현장의 고충, 제도적 한계, 경제적 유인, 공급망 병목, 정책 인식 차이를 보여주는 진술 단위를 추출하였다. 셋째, 주제 탐색 단계에서는 생성된 코드 간의 연관성을 분석하여 상위 개념의 주제를 구성하였다.

넷째, 주제 검토 단계에서는 도출된 주제가 실제 자료의 맥락과 부합하는지를 재검토하였다.

다섯째, 주제 정의 및 명명 단계에서는 반복적으로 나타난 의미 구조를 바탕으로 주요 분석 주제를 정교화하였다.

여섯째, 보고서 작성 단계에서는 분석 결과를 연구문제와 정책 개선 방향에 연결하여 해석적으로 서술하였다(Braun & Clarke, 2006).

<표 6-3> 집단별 연구문제 대응에 대한 인터뷰 질문 항목(핵심 개선 사항)

집단	문제1	문제2	문제3	문제4	문제5	문제6
국가·광역 설계자	제도 구조 분석	탄소 영향 고려	의도-현장 차이	생태·기후 영향	제도 부작용	개편 방향
기초 지자체	주요 사업 구조	지역 영향 인식	집행 절차·현실	생태·재해 영향	괴리 요인	현장 기반 개편
별채·조립 사업자	보조금·인센 티브	탄소 영향 인식(간접)	작업 관행	생태계 영향	지침 준수 애로	지속가능 인센티브
바이오매스 수요처	REC·RPS 영향	탄소중립 논쟁	연료조달 구조	대기오염·지 역 영향	정책·시장 괴리	연료전환 전략
칩생산자, 유통업자	가격·수급·시 장 구조	공급체인 기반 영향	유통 메커니즘	지속가능성 기준	저가 물량·편중	공급망 개선
시민단체	정책 정보 인식	지역 영향 체감	참여 절차 문제	생태·기후 영향	거버넌스 문제	주민중심 대안

이상의 분석 절차는 일회적이고 선형적인 과정이 아니라, 자료 읽기, 코딩, 주제 구성, 주제 검토와 명명을 반복적으로 오가는 재귀적 과정으로 진행되었다. 이를 통해 본 연구는

산림바이오매스 정책의 제도적 구조와 현장 실행 메커니즘, 공급망 이해관계, 탄소·에너지 정책 간 긴장을 종합적으로 분석하고자 하였다.

제3절 주제 분석

1. Braun & Clarke 6단계 주제 분석

본 연구는 Braun and Clarke(2006)의 주제 분석(thematic analysis) 절차에 따라 산림바이오매스 관련 이해관계자 인터뷰 자료를 분석하였다. 분석 대상은 벌채업자, 산주, 지자체 과장, 칩생산업자, 발전사업자 노조, 임업후계자, 시민단체, 산림청 등 8개 이해관계자 집단의 인터뷰 자료이다. 자료 분석은 데이터 친숙화, 초기 코드 생성, 주제 탐색, 주제 검토, 주제 정의 및 명명, 보고서 작성의 순서로 진행하였다.

자료 숙지 단계에서는 인터뷰 전사본과 정리 문서를 반복적으로 읽으면서 각 집단이 산림바이오매스 정책을 어떤 언어와 논리로 이해하는지 확인하였다. 초기 코드 생성 단계에서는 REC 의존, 공급망 금융 불안정, 부채지주화, 수입목재 무관세, 산림조합 납품 구조, 지방비 매칭 부담, 탄소중립성 논쟁 등 총 39개의 코드를 도출하였다. 이후 코드 간 의미적 연계성과 인터뷰 집단 간 반복성을 기준으로 6개의 잠정 주제를 구성하였고, 주제 검토 과정에서 경제성 구조와 공급사슬 문제를 하나의 범주로 통합하였다. 최종적으로 본 연구는 네 가지 핵심 주제를 확정하였다.

최종 주제는 다음과 같다. 첫째, 산림바이오매스 산업은 자생적 경제성보다 REC와 보조금에 의존하며, 공급사슬의 불투명성과 정보 비대칭이 결합된 구조적 왜곡을 보인다. 둘째, 정책 설계의 공식 논리와 현장 실행 사이에는 지속적인 괴리가 존재한다. 셋째, 바이오매스 연소의 탄소중립성, 모두베기, 카스케이딩 이용, 장수명 목재 이용을 둘러싼 생태·환경적 인식 갈등이 나타난다. 넷째, REC 축소와 산업 전환은 발전소 노동자, 산촌 주민, 고령 임업 노동력, 임업 후계자 문제와 결합되어 정의로운 전환의 과제를 제기한다.

가. 데이터 친숙화 (Familiarising Yourself with the Data)

본 연구는 '산림바이오매스 중심 정책의 재검토와 지속가능한 대안 마련'을 목적으로 산림바이오매스 공급사슬 전반에 걸쳐 있는 핵심 이해관계자를 대상으로 심층인터뷰를 수행하였다. 분석 자료는 총 8건의 인터뷰 전사본 및 정리 문서로 구성된다.

전사본을 반복적으로 검토한 결과, 다음과 같은 초기 관찰 사항이 확인되었다. 첫째, 산림바이오매스 공급사슬은 벌채, 집재, 가공, 납품, 발전으로 이어지는 다층적 구조를 가지고 있으며, 각 단계마다 별도의 이해관계자와 정보 비대칭이 존재하였다. 둘째, 모든 인터뷰에서 REC, 즉 신재생에너지 공급인증서 가중치는 사업 존속 여부를 결정하는 핵심 변수로 반복적으로 언급되었다. 셋째, 현장 종사자들은 산림바이오매스의 경제성 부재를 구조적 문제로 인식한 반면, 탄소중립 정책은 이를 정당화하는 정책적 명분으로 작동하고 있어

경제성과 환경성 사이의 긴장이 나타났다. 넷째, 산주들은 자신의 산림자원이 어떤 경로와 가격으로 유통되는지 충분히 알지 못하는 경우가 많았고, 목장과 중간 유통업자는 이러한 정보 비대칭 속에서 거래 우위를 확보하는 것으로 나타났다. 마지막으로 발전소 노동자들은 발전소 폐쇄가 단순한 산업 조정이 아니라 지역 고용과 지역경제의 위기로 이어질 수 있다고 인식하였다. 이는 산림바이오매스 정책 전환이 에너지 정책의 문제에 그치지 않고 지역 고용과 정의로운 전환의 문제를 함께 포함한다는 점을 보여준다.

나. 초기 코드 생성 (Generating Initial Codes)

초기 코드 생성은 귀납적 코딩과 연역적 코딩을 병행하여 수행하였다. 귀납적 코딩은 인터뷰 발화에서 직접 도출되는 의미 단위를 포착하는 방식으로 진행하였고, 연역적 코딩은 산림정책, 탄소중립, 공급사슬, 정책수단론, 정책집행론의 논의를 준거 틀로 활용하였다. 그 결과 총 39개의 초기 코드가 도출되었다.

<표 6-4> 초기코드 목록(총39개)

초기 코드 목록 (총 39개)
① 원목 vs. 바이오매스 수익 비교 ② REC 가중치 의존성 ③ 공급사슬 중간상 마진 ④ 산림조합 독점적 납품권 ⑤ 미이용 산물 수집 비용 구조 ⑥ 보조금 지원의 유인·왜곡 효과 ⑦ 발전소 연료전환 전략 ⑧ 수입산 펠릿 가격 경쟁 ⑨ 산주의 경영 무관심 ⑩ 임업 직불제의 한계 ⑪ 벌기령 단축 압력 ⑫ 용재 생산 vs. 에너지재 생산 선택 ⑬ 지역 일자리 및 정의로운 전환 ⑭ 탄소중립 정책의 현장 괴리 ⑮ LCA·탄소부채 논쟁 ⑯ 국산 목재 경쟁력 부재 ⑰ 임도 인프라 부족 ⑱ 사고 위험과 노동안전 ⑲ 정보 비대칭과 산주 취약성 ⑳ 목재 카스케이딩 이용 ㉑ 생태적 임업의 이상과 현실 ㉒ 재선충·산불 피해목 처리 ㉓ 수입산 규제 필요성 ㉔ 공익기능 vs. 사유재산권 ㉕ REC 일몰 이후 전환 시나리오 ㉖ 산림복합경영 모델 ㉗ 임업 후계자 육성 문제 ㉘ 산림정책 거버넌스 한계 ㉙ 지자체 재정 부담 ㉚ 생태계서비스 직불제 ㉛ 산림수도 브랜드 활용 ㉜ 목재 건축재 이용 확대 ㉝ 단계적 목재 이용 원칙 ㉞ REC 가중치의 부처 간 결정구조 ㉟ 벌기령 단축 부인 및 대경재 활용 강조 ㊱ 지방비 매칭 병목 부인 ㊲ 미이용 산림바이오매스 증명제도 법제화 ㊳ 친환경별채 의무화 ㊴ 선택형 공익직불제·국산목재 장기이용·임도 확충

다. 주제 탐색 (Searching for Themes)

39개의 초기 코드를 내용적 유사성, 의미적 연계성, 인터뷰 간 반복성을 기준으로 군집화한 결과, 산림바이오매스 정책의 쟁점은 여섯 가지 잠정 주제로 정리되었다. 이 잠정 주제는 경제성, 공급사슬, 정책 실행, 생태·탄소 갈등, 지역·노동 전환, 보상체계 재설계가 서로 맞물린 복합적 정책 영역임을 보여준다. 다시 말해, 산림바이오매스 정책의 핵심은 단순히 바이오매스 이용을 확대할 것인가 축소할 것인가의 문제가 아니라, 제도적 유인 구조와 현장 실행, 생태적 지속가능성, 지역사회 영향, 전환 대안이 함께 결합된 구조적 문제로 이해되어야 한다.

개되지 않아 산주와 현장 생산자에게 불리한 구조가 형성되고 있음을 보여준다.

인터뷰 참여자들은 산림자원의 활용 방식에서 수익성 위계가 명확하다고 진술하였다. 원목이 가장 높은 가치를 가지며, 펄프재가 그다음이고, 바이오매스용 칩이나 펠릿은 가장 낮은 단계에 위치한다. 벌채업자는 이를 다음과 같이 설명하였다.

'원목에서 저희가 만약에 100원을 벌면 펄프재로 나가는 물량에서 한 300원 까먹고 뭐 이런 식이죠.' - 벌채업자-

이 진술은 휘어진 나무나 규격 미달 부산물처럼 원목으로 판매하기 어려운 산물이 실제로는 수익을 만들기보다 처리 비용을 발생시키는 경우가 많다는 점을 보여준다. 즉, 산림 바이오매스 생산은 독립적인 수익 사업이라기보다 원목 생산 과정에서 발생한 잔재물을 처리하는 부차적 성격이 강하다.

REC 가중치 의존성도 모든 인터뷰에서 반복적으로 확인되었다. 발전사업자는 우드펠릿 발전의 사업성이 REC 가중치에 의해 좌우되며, 가중치가 축소되거나 폐지될 경우 사업 지속이 어려울 수 있다고 진술하였다.

'우드펠릿 발전의 사업성이 사실상 REC 가중치에 의해 좌우된다... '문을 닫아야 할 수준'이라고 인식하고 있습니다.' - 발전사업자 -

칩생산업자 역시 REC 가중치가 유지될 때에는 국산 바이오매스가 일정한 경쟁력을 가질 수 있지만, 가중치가 축소되면 수입산 펠릿과 가격 경쟁을 하기 어렵다고 보았다. 이는 산림바이오매스 산업이 시장 자체의 자생적 수요보다 제도적 인센티브에 크게 의존하는 산업 구조임을 보여준다.

공급사슬의 불투명성도 중요한 쟁점으로 나타났다. 산림 현장에서 발전소에 이르기까지 벌채업자, 목상, 칩생산업자, 산림조합중앙회, 발전소가 연결되어 있으며, 각 단계에서 납품권, 수수료, 중간 마진이 발생한다.

'저희 납품단가가 19만 원인데 산림조합에서 7천 원씩 먹어요. 엄청나게 많이 먹죠. 그러면 거의 가만히 앉아서.' -칩생산업자-

'중간에 업자들이 있어요. 납품권을 가진 회사들이 있어요.' -벌채업자-

산림조합의 납품코드 배분 구조는 발전소와 생산자 사이의 직접 거래를 제한하고, 중간 유통 단계의 영향력을 강화하는 방식으로 작동한다. 또한 산주들은 자신의 나무가 어떤 경로로, 얼마의 가격에 유통되는지 충분히 알지 못하는 경우가 많다. 이 같은 정보 비대칭은

산주가 협상력을 갖기 어렵게 만들고, 목상이나 중간 유통업자가 더 많은 거래 우위를 확보하는 구조로 이어진다.

'유통 경로랑 그런 산주 입장에서는 좋지만 그 중간에 있는 업자들은 그거에 대해서 투명해지는 것을 아주 별로 안 좋아하죠.' -임업 후계자-

이상의 인터뷰 결과는 본 연구의 정량 분석 및 이론적 논의와도 연결된다. 제3장의 내부 수익률 분석에서 정부 보조금을 전액 배제한 조건의 바이오매스 생산 모형은 IRR -14%, 일반 펄프재 모형은 IRR -5%로 산출되었다. 이는 바이오매스 생산이 보조금과 제도적 지원 없이는 시장 경쟁력을 확보하기 어려운 구조임을 보여준다. 또한 「신·재생에너지 공급 의무화제도 및 연료 혼합의무화제도 관리·운영지침」은 신규 목질계 바이오매스 발전설비에 대한 REC 가중치를 폐지하고 수입산 목재펠릿 REC를 일몰하는 방향으로 개정되었는데, 이러한 정책 변화는 REC 가중치가 산업의 존속 가능성을 좌우한다는 현장 진술이 과장된 인식이 아니라는 점을 보여준다(기후에너지환경부 고시 제2025-3호).

정책수단론의 관점에서 이 문제는 복수의 인센티브가 결합될 때 발생하는 의도치 않은 결과로 해석할 수 있다. 조림 보조금, 수집비 지원, REC가 결합되면서 공급사슬 내 행위자는 각자의 위치에서 제도적 유인을 활용하게 되고, 그 결과 정보 비대칭과 중간 마진 구조가 고착될 수 있다(Salamon, 2002). 또한 공유자원 관리의 관점에서 보더라도 자원 이용의 경계, 이해관계자의 규칙 형성 참여, 실효적 모니터링이 충분히 작동하지 않을 경우 공급사슬 왜곡은 지속될 가능성이 높다(Ostrom, 1990).

2) <주제 2> 정책 설계의 공식 논리와 현장 실행 사이의 구조적 괴리

두 번째 주제는 산림바이오매스 정책의 공식적 설계 논리와 현장 이해관계자가 경험하는 실행 현실 사이의 간극을 포착한다. 산림청은 산림바이오매스를 목재의 단계적 이용 과정에서 최종 연료 단계로 위치시키고, '보호할 산림은 보호하고, 자원으로 활용할 산림은 지속 가능하게 가꾸는 정책'을 추진하고 있다고 설명한다. 또한 '수확된 목재는 건축자재 등 고부가가치 목재부터 바이오매스로까지 단계적으로 이용하는 것을 원칙'으로 한다는 입장을 제시하였다.

산림청은 '별기령을 단축하는 정책을 추진한 바 없으며...' 30년생 미만 산림의 벌채를 지양한다고 밝히고, 미이용 산림바이오매스 수집·증명제도를 2024년 법제화하여 관리의 투명성과 신뢰성을 높이겠다는 입장을 제시하였다. 그러나 현장에서는 이와 다른 체감 현실이 확인되었다. 발전사업자는 국내산 바이오매스 공급량이 제한적이어서 정책 목표와 공급 현실 사이에 괴리가 있다고 보았다. 발전사업자 측은 '국내 최대치로 돌려도 연간 생산 가능량이 매우 제한적이어서, 정책 목표와 공급 현실 사이에 괴리가 있다고 본다' 라고 진술

하였고, 산주는 'REC 탄소중립 그 돈 때문에 이제 다 불쏘시개로 간다' 고 하였다. 지자체 역시 '막 잘 자라고 있는 것도 자른다는 얘기를 하더라구요. 그게 보면 용재 생산이 장기적으로 덜 나오겠죠.' 라고 지적하였다. 지방비 매칭과 관련해서도 중앙정부와 현장의 인식 차이가 나타났다. 산림청은 지방비 매칭 병목이 확인되지 않는다고 응답하였으나, 현장에서는 지방비 부담과 행정적 제약이 주요 애로로 제시되었다. 이는 정책의 공식 목적 자체보다 그 목적이 현장에서 어떻게 해석되고 경험되는지가 정책효과를 좌우한다는 점을 보여준다.

이러한 설계-실행 간 괴리는 정책자료와 이론적 논의를 통해서도 설명된다. 보조금 구조는 공식적으로는 산림 관리와 재조림을 지원하기 위한 장치이지만, 현장에서는 벌채-재조림-바이오매스 생산을 반복시키는 유인으로 작동할 수 있다. 예산 구조에서도 재난 대응, 긴급벌채, 재조림 지원이 결합되면서 산주의 '다 불쏘시개로 간다'는 진술과 연결되는 측면이 있다.

또한 지방비 매칭 부담은 정책집행론의 관점에서 설명할 수 있다. Lipsky(1980)의 일선 관료제 이론에 따르면, 지자체 담당 공무원은 중앙정부의 지침과 지역의 재정·인력·민원 조건 사이에서 재량적으로 정책을 조정한다. 이 과정에서 중앙정부가 인식하는 제도 설계와 지역 현장에서 체감하는 집행 현실 사이에 구조적 간극이 발생한다. 「2026년 산림소득 분야 사업시행지침」에서 지방비 매칭 방식이 유지되고 있다는 점은 이러한 부담이 단기간에 해소되기 어렵다는 현장 판단과도 연결된다(산림청, 2026b).

미이용 산림바이오매스 증명제도의 실효성에 대한 현장 인식도 비슷한 양상을 보인다. 「목재의 지속가능한 이용에 관한 법률」 제36조의3·4는 수집 허가와 증명서 발급 절차를 명문화하고 있으며, 산림청은 합동 점검과 상시 모니터링을 통해 관리 실효성을 높여나가는 방침을 제시하였다. 그러나 칩생산업자와 벌채업자는 증명서류 부담과 원목 혼입 방지의 현장 확인 어려움을 지속적으로 제기하였다. 이는 법령의 강화만으로는 현장 이행 메커니즘이 자동적으로 개선되지 않으며, 중앙-지방-현장 간 조율 체계가 함께 작동해야 함을 보여준다(Hooghe & Marks, 2003).

3) <주제 3> 생태·환경적 지속가능성에 대한 인식 갈등

산림바이오매스 정책이 탄소중립, 생태계 보전, 산림 건강성이라는 목표 사이에서 어떤 갈등을 유발하는지를 보여준다. 이해관계자들은 바이오매스 연소의 탄소중립성과 산림관리 방식에 대해 서로 다른 인식을 보였다.

발전사업자는 산림 부산물을 방치할 경우 결국 탄소가 배출되므로 이를 에너지화하는 것이 총량 차원에서 완전히 비합리적이지는 않다고 보았다.

'어차피 산림에 남겨둔 가지나 부산물도 시간이 지나면 탄소를 방출하므로, 이를 에

너지화하는 것이 총량 차원에서는 완전히 비합리적이지 않다.’ - 발전사업자 -

지자체는 용재로 목재를 오래 사용하는 카스케이딩 방식이 장기적으로 탄소 저장 효과가 더 클 수 있다고 보았다. 이는 산림바이오매스 정책을 단기 연료 공급의 관점이 아니라 장기 탄소저장과 목재 이용 체계의 관점에서 검토해야 함을 시사한다.

모두베기 방식과 생태계 건강성에 대한 인식 차이도 확인되었다. 환경단체는 대규모 모두베기가 생물다양성과 산림 생태계 건강성에 부정적 영향을 미칠 수 있다고 우려하였다. 지자체 과장 역시 보호구역에서는 고사목 유지가 생태학적으로 필요하다고 설명하였다.

‘숲속에 죽은 나무가 한 30%는 있어야 된다. 임분 구조로 따지면, 죽은 나무가 있어야지 잎기도 자라고, 그 속에 애벌레도 자라고, 딱따구리도 잡아먹고...’ -지자체-

산림청은 2023년부터 5ha 이상 벌채 시 친환경벌채를 의무화하였다고 밝혔으나, 현장 종사자들은 이러한 규정이 실제 현장에서 충분히 이행되는지에 대해서는 유보적 태도를 보였다.

또한 대형산주는 잔목을 에너지화하는 대신 땅에 매립하여 산소 공급을 차단함으로써 장기적으로 탄소를 격리하는 ‘우드볼트(Wood Vault)’ 방식을 대안으로 제안하였다.

‘나무를 여기다 저장해서 흙을 묻어버려. 산소 공급 안되게. 이게 나중에 석탄이 되는거지 당장 탄소로 나오지 않아.’ - 산주-

이 제안은 아직 국내 정책 담론에서 충분히 검토된 방식은 아니지만, 현장 실천가의 관점에서 나온 대안적 탄소 격리 아이디어라는 점에서 추가 검토의 필요성이 있다.

탄소중립성 논쟁은 과학적 문헌과 교차해 볼 때 더욱 분명해진다. IPCC(2019)는 수확목제품(HWP)의 탄소저장 효과가 제품 유형별 반감기에 따라 달라진다고 보고, 에너지 연소와 장수명 목제품 이용을 구분하여 산정하도록 한다. 본 연구 제5장의 시뮬레이션 결과에서도 IPCC 기본 반감기와 한국 Tier 3 반감기를 적용한 경우 2044년 탄소저장량 추정치가 49.7 Mt-C와 22.3 Mt-C로 약 2.2배 차이가 나타났다. 이는 목재를 에너지로 직접 연소하는 방식과 장수명 목제품으로 이용하는 방식 사이에 탄소저장 효과의 차이가 있음을 보여준다.

또한 ‘젊은 숲’ 논리는 국내외 과학 문헌과 반드시 일치하지 않는다. Stephenson et al.(2014)은 나무가 크고 오래될수록 연간 탄소 축적량이 증가할 수 있음을 제시하였고, Luysaert et al.(2008)은 노령림도 순 탄소 흡수원으로 기능할 수 있음을 보였다. Lee et al.(2020)의 국내 연구도 활엽수림의 토양 탄소 저장량이 침엽수림보다 높을 수 있음을 확

인하였다. 이러한 논의는 단별기 별채 후 재조림이 항상 탄소흡수 측면에서 유리하다는 주장을 신중하게 검토해야 함을 시사한다.

4) <주제 4> 지역사회·노동의 정의로운 전환 위기

네 번째 주제는 REC 가중치 축소와 바이오매스 발전 축소가 발전소 노동자, 운송 종사자, 산촌 주민, 임업 후계자에게 미칠 영향을 다룬다. 산림바이오매스 정책 전환은 기후·에너지 정책의 정당성만으로 추진되기 어렵고, 지역경제와 노동 전환의 조건을 함께 설계해야 한다는 점이 인터뷰를 통해 확인되었다.

한국남동발전 노동조합 인터뷰에서는 발전소 폐쇄가 직접 고용뿐 아니라 협력업체, 지역 부동산, 인구 감소로 이어질 수 있다는 우려가 강하게 제기되었다.

‘발전소 폐쇄가 지역 일자리, 협력업체, 부동산, 인구 감소까지 연결된다고 반복해서 말합니다.’ - 발전사업자 -

노동조합 측은 탄소중립 정책이 지역소멸 문제를 심화시킬 수 있다고 우려하며, 정의로운 전환의 관점에서 지역과 노동 문제를 함께 고려하는 정책 설계를 요구하였다. 산림 작업의 고령화와 노동안전 문제도 주요 쟁점으로 나타났다. 지자체 과장과 칩생산업자는 산림 작업이 기계화되기 어렵고 사고 위험이 크다는 점을 강조하였다.

‘기계를 할 수 없기 때문에. 예를 들어서 독일처럼 밭같이 평평한 곳이 숲이면 기계하면 사람도 덜 다치겠죠.’ - 지자체 -

‘사망사건 하는 경우에 깔려서 대부분 이제 돌아가시거든요. 근데 그 무거운 것을 끌어내는 비용이 정치에서만 따지면 뭐 더 의미가 없는 이야기예요.’ -지자체 -

중대재해처벌법 강화로 사고 발생 시 기관 책임이 커지면서 지자체가 산림사업 집행을 부담스럽게 느끼는 경향도 나타나고 있다. 이는 안전 규제 강화가 필요하다는 점과 동시에, 현장 인력·장비·책임 구조가 보완되지 않으면 사업 집행 자체가 위축될 수 있음을 보여준다.

임업 후계자 부재와 지식 단절도 중요한 문제이다. 대부분의 산주는 고령이며, 젊은 세대에는 낮은 수익성, 복잡한 규제, 불확실한 보상 구조 때문에 임업 승계를 기피하는 경향이 있다.

‘아버지가 군대 있을 때 돌아가시고 제가 제대를 했는데 유산 중에 산이 있어서... 임업으로 들어가게 되었죠.’ - 임업 후계자-

이 사례는 예외적으로 임업에 진입한 경우이지만, 대다수 산주에게는 산림경영을 장기적으로 지속할 유인이 부족하다. 따라서 임업 후계자 육성과 산림복합경영 모델은 산림바이오매스 정책의 부차적 사안이 아니라 장기 산림관리 체계의 핵심 조건으로 볼 필요가 있다.

산촌 소득 모델의 다변화도 제안되었다. 임업 후계자와 지자체 과장은 임산물 판매, 친환경 직불금, 생태관광, 체류형 쉼터, 소규모 재생에너지 설치 등 다양한 소득 경로를 결합해야 한다고 보았다.

‘산주가 돈이 되면 이분들은 산을 갖고 있는 가치가 좀 달라... 돈이 되게 해야 숲을 가꾸어...’ - 산주-

이 진술은 산림의 공익기능을 유지하려면 규제만으로는 충분하지 않고, 산주가 산림을 관리할 수 있는 경제적 기반을 제공해야 한다는 점을 보여준다. 따라서 정의로운 전환은 발전소 노동자의 고용 대책만이 아니라 산주, 임업 노동자, 산촌 주민의 장기 소득 기반을 함께 고려해야 한다.

바. 최종 주제 요약

Braun and Clarke의 주제 분석 결과와 산림청 인터뷰를 종합하면, 최종 주제 구조는 네 가지로 정리된다. 첫째, 산림바이오매스 산업은 자생적 경제성보다 REC와 보조금에 의존하며, 공급사슬의 불투명성과 정보 비대칭이 결합된 구조적 왜곡을 보인다. 둘째, 산림청은 단계적 목재 이용, 친환경벌채, 공익직불제 확대 등 공식 정책 논리를 제시하고 있으나, 현장에서는 공급 부족, 지방비 부담, 증명제도 실효성 문제를 핵심 쟁점으로 인식하고 있다. 셋째, 바이오매스 연소의 탄소중립성, 모두베기, 카스케이딩, 장수명 목재 이용을 둘러싼 생태·환경적 갈등이 지속되고 있다. 넷째, REC 축소와 산업 전환은 발전소 노동자, 산촌 주민, 고령 임업 노동력, 후계자 문제와 결합되어 정의로운 전환의 과제를 제기하고 있다.

<표 6-7> 주제 구조 요약

구분	최종 주제	핵심 내용 요약
1	구조적 경제성 부재와 공급사슬 왜곡	원목 최우선 수익 위계 / REC 가중치 의존 / 보조금 기반 시장 유지 / 산림조합·중간유통 마진 / 정보 비대칭과 산주 취약성 / 증명제도와 유통 투명성의 한계
2	정책 설계의 공식 논리와 현장 실행 사이의 구조적 괴리	단계적 목재 이용 원칙 / 별기령 단축 부인과 대경재 활용 강조 / NDC 목표와 공급 현실의 괴리 / 지방비 매칭 부담에 대한 인식 차이 / 미이용 산림바이오매스 증명제도의 실효성 논란
3	생태·환경적 지속가능성에 대한 인식 갈등	바이오매스 탄소중립성 논쟁 / 젊은 숲 vs. 카스케이딩 / 모두베기와 친환경벌채 갈등 / 공익기능과 사유재산권 충돌 / 장수명 목재 이용과 탄소저장 우선 필요
4	지역사회·노동의 정의로운 전환 위기	발전소 폐쇄와 지역 일자리 문제 / 고령 인력·산재 위험 / 임업 후계자 단절 / 임도 등 기반 부족 / REC 일몰 이후 전환 시나리오 / 산촌 소득 다변화와 전환 지원 필요

2. 이해관계자별 인식 비교 분석

가. 이해관계자별 산림바이오매스 인식 차이

이해관계자 인터뷰 결과, 산림바이오매스 정책은 집단별 위치에 따라 다르게 해석되고 있었다. 발전소는 산림바이오매스를 재생에너지 목표 달성을 위한 수단으로 보지만, 탄소중립성 자체는 논쟁적이며 핵심 변수는 REC라고 인식하였다. 벌채업자는 산림바이오매스를 원목 생산 이후 발생하는 부산물 처리 수단으로 보며, 원목이 가장 높은 가치를 가진다고 설명하였다. 대형산주는 산림을 장기 자산으로 인식하고, 공익성과 사유재산권이 충돌하는 영역으로 이해하였다. 지자체는 산불 예방, 산림 정비, 지역 고용 측면에서 산림바이오매스 활용의 필요성을 인정하면서도 경제성이 낮고 행정사업 성격이 강하다고 보았다.

칩생산업자는 산림바이오매스 시장을 자생적 시장이 아니라 제도와 공급망이 만든 시장으로 인식하였다. 발전소, 산림조합, REC에 종속되어 있으며, 가장 큰 우려는 사업 지속가능성과 운송비 부담이었다. 임업 후계자는 일반 산주들이 바이오매스 정책 자체보다 ‘얼마를 받는가’, ‘산이 얼마나 정리되는가’에 더 민감하게 반응한다고 설명하였다. 시민사회는 대규모 발전용 바이오매스에 가장 비판적 시각을 보였으며, 탄소중립성과 지속가능성 모두에 의문을 제기하였다. 산림청은 산림바이오매스를 목재의 단계적 이용 과정에서 최종 연료 단계로 한정하고, 지속가능한 산림경영과 공익기능 유지를 강조하였다.

종합하면, 산림바이오매스 정책은 에너지 수단, 제도 의존형 시장, 산림경영과 보전의 문제로 동시에 인식되고 있다. 따라서 향후 정책은 단순한 공급 확대나 축소가 아니라 이해관계자별 위치와 요구를 반영한 다층적 설계가 필요하다.

<표 6-8> 이해관계자별 산림바이오매스 정책 인식 비교

이해관계자	정책에 대한 기본 인식	경제적 유인 인식	주된 우려	선호 또는 제안 대안
발전소	재생에너지 목표 달성 수단이지만 탄소중립성은 논쟁적	REC가 사업성에 결정적	제도 변화 시 사업성 급락, 국산 공급 부족	예측 가능한 제도, 연료전환 옵션 검토
벌채업자	부산물 처리 수단이지만 본질적으로는 부차적 활용	보조금 없이는 반출 불가, 원목이 최고 가치	부산물 반출 비용 과다, 판로 제약	원목 중심 경영 유지, 부산물은 제한적 활용
대형산주	산림은 장기 자산이며 공익성과 사유재산권이 충돌하는 영역	장기 경영 보상 부족, 가격 구조 왜곡	규제는 강하고 수익은 약함	장기경영 보상, 직불제 강화
지자체	산불예방·정비·고용 측면에서 유용	경제성은 낮고 행정사업 성격이 강함	생태적 부작용, 지방비 부담	생태·안전·지역고용을 함께 고려한 차등 지원
칩생산업자	제도와 공급망에 의해 만들어진 시장	발전소·산림조합·REC에 종속	사업 지속가능성 불안, 운송비 부담	다변화된 판로, 공급망 개선
임업 후계자	일반 산주는 바이오매스 자체보다 산 정리와 금전 조건에 반응	가격·위탁·편의성이 중요	유통 불투명성, 산주 정보 부족	투명한 유통, 산주 직접 참여 확대
시민사회	대규모 발전용 바이오매스는 탄소중립성과 지속가능성 모두 의문	현 인센티브가 훼손 유인을 강화	데이터 부재, 검증 실패, 대규모 연소 구조	보전 보상, 생태계서비스 직불제, 지역관리
산림청	산림바이오매스는 단계적 목재 이용 과정의 최종 연료 단계이며, 보호할 산림은 보호하고 활용할 산림은 지속가능하게 경영해야 한다는 입장	REC는 관계부처 협의 사항이며, 공익직불제·국산목재 이용 지원·임도 확충 등도 정책 유인으로 인식	원목 혼입 방지, 공익기능 훼손, 제도 신뢰성과 관리 실효성	친환경벌채, 선택형 공익직불제 확대, 국산목재 장기이용 확대, 임도 확충

나. 이해관계자별 갈등 매트릭스

<표 6-9>는 이해관계자별로 산림바이오매스 정책을 둘러싼 정책 목표, 경제적 이해, 갈등 요인, 대안 선호가 어떻게 다르게 배열되는지를 보여준다. 동일한 정책을 두고도 각 집단은 서로 다른 합리성과 판단 기준을 가지고 있으며, 이 차이가 정책 갈등의 구조를 형성한다.

산주는 산림을 장기적으로 유지·관리해야 할 자산으로 인식하며, 고부가가치 용재 생산과 장기 경영을 중시한다. 지자체는 행정 효율, 산불 예방, 지역 관리, 예산 집행을 중요한 기준으로 본다. 벌채업자는 작업 효율과 수익성을 중시하고, 칩 생산자는 산업 안정과 원료 확보를 우선한다. 발전소는 RPS 이행과 설비 운영 안정성을 중심으로 판단하며, 시민사회는 탄소중립성과 지속가능성 검증을 강조한다. 산림청은 지속가능한 산림경영과 단계적 목재 이용, 공익기능 유지를 정책 방향으로 제시한다.

이 차이는 벌채 주기, 인센티브 구조, 유통 구조에서 더욱 선명하게 나타난다. 산주는 조기 벌채가 장기 자산 가치를 훼손할 수 있다고 보지만, 벌채업자와 칩 생산자는 회전율과 원료 확보의 관점에서 단기 벌채 또는 지속적 물량 확보를 선호할 수 있다. 보조금과 REC 역시 어떤 집단에게는 사업 유지의 조건이지만, 다른 집단에게는 시장 왜곡이나 행정 부담의 원천으로 인식된다. 따라서 산림바이오매스 정책 갈등은 단순한 찬반 대립이 아니라, 장기 가치 대 단기 수익, 행정 목적 대 시장 논리, 보전 대 원료 공급, 공공성 대 사업성이 교차하는 구조적 갈등으로 이해해야 한다.

<표 6-9> 이해관계자별 갈등 매트릭스

구분	산주·임업 후계자	지자체 과장	벌채업자	칩 생산자	발전소	시민사회	산림청
정책 지향점	장기 자산 보전, 고부가가치 용재 생산, 산주 권익 확보	행정 효율, 산불 예방, 지역 고용, 예산 집행	수익 극대화, 원목 우선 판매, 작업 효율	산업 안정, 지속적 원료 확보, 판로 유지	재생에너지 목표 달성, RPS 이행, 설비 운영 안정	탄소중립 성과 지속가능 성 검증, 생태계 보전	지속가능 한 산림경영, 단계적 목재 이용, 공익기능 유지
탄소중립· 정책 인식	바이오매스 자체보다 산림의 장기 가치와 보전이 중요	산불·정비 측면에서 는 유용하나 생태 부작용도 가능	부산물 처리 수단일 뿐, 본질적으 로 부차적 활용	제도와 공급망이 만든 시장으로 인식	재생에너지 목표에는 기여하나 탄소중립성 은 논쟁적	대규모 발전용 바이오매 스는 탄소중립 성과 지속가능 성 모두 의문	바이오매 스는 NDC 내 일부이며, 목재의 최종 단계 활용으로 한정되어 야 한다는 입장
벌채 주기·활용 방식	조기 벌채보다 장기경영 선호, 좋은 나무 보전 지향	중앙 지침과 지역 현실 사이에서 조정	회전율 높은 단기 벌채 선호, 원목 우선·부산 물은 보조적	원료 확보를 위해 지속적 벌채·치핑 물량 필요	연료 조달 기준은 친환경성보 다 가격·제도· 물량 확보	단벌기·대 규모 연료화가 훼손 유인을 키울 수 있다고 판단	벌기령 단축 정책은 없으며, 30년생 미만 벌채 지양, 대경제 활용 장려

구분	산주·임업 후계자	지자체 과장	별채업자	칩 생산자	발전소	시민사회	산림청
인센티브(보조금·REC)	장기경영 보상 부족, 직불제 강화 요구	지방비 50% 매칭 부담, 경제성 낮은 행정사업	수집 보조금 없이 부산물 반출 불가	REC와 발전소 계약 구조에 종속, 시장 유지에 결정적	REC가 사업성에 결정적, 제도 변화 시 수익성 급락 가능	현 인센티브 가 연소 확대와 산림 훼손 유인을 강화한다 고 봄	REC는 관계부처 협의 사항이며, 공익직불 제와 국산목재 이용 지원 확대 추진
유통 구조 인식	산림조합·중 간유통 구조의 불투명성 문제 제기	관리·투명 성 확보와 민원 대응 필요	납품 코드·중간 수수료 구조에 대한 불만	산림조합· 지정업체· 발전소 중심 공급망에 종속	공급망은 복잡하며 국산 공급은 생산성 낮고 불안정	공급망 데이터 부족, 검증 실패, 공개성 부족 비판	증명제도 법제화와 합동 점검을 통해 투명성 강화 필요
핵심 우려	규제는 강한데 장기 보상은 약함, 산주 정보 부족	생태 부작용, 재정 부담, 사고 위험	부산물 반출 비용 과다, 판로 제약, 운반비 부담	사업 지속가능 성 불안, 운송비·금 용 부담, REC 변동 리스크	국산 공급 부족, 수입산 의존, 정책 목표와 현실의 괴리	데이터 부재, '미이용' 정의 모호, 대규모 연소 구조 고착	제도 신뢰성, 원목 혼입 방지, 공익기능 훼손 방지, 관리 실효성
선호 또는 제안 대안	장기경영 보상, 직불제 강화, 산주 직접 참여 확대	생태·안전· 지역고용 을 함께 고려한 차등 지원	원목 중심 경영 유지, 부산물은 제한적 활용	다변화된 판로, 공급망 개선, 제도 예측가능 성 확보	예측 가능한 제도, 점진적 연료전환 옵션 검토	보전 보상, 생태계서 비스 직불제, 지역사회 기반 관리 강화	친환경별 채, 선택형 공익직불 제, 장기 저장형 국산목재 이용 확대, 임도 확충

3. 정책수단-행위자-결과 간 인과도식

본 연구는 단별기 별채·재조림·산림바이오매스 생산을 둘러싼 문제가 개별 행위자의 선택이나 단일 제도의 효과로 환원되지 않는다고 본다. 서로 다른 정책수단이 다양한 행위자에게 상이한 유인을 제공하고, 이들이 공급망과 현장 집행 과정에서 상호작용하면서 구조적 결과를 만들어내기 때문이다. 이러한 관점은 정책수단이 행위자의 선택과 자원 배분 방

식에 영향을 미치며, 실제 정책효과는 제도 설계와 현장 집행의 상호작용 속에서 형성되
는 정책수단론 및 정책집행론의 논의와도 연결된다(Salamon, 2002; Hill & Hupe, 2014).

산림바이오매스 정책은 산림관리 제도, 재정지원 제도, 미이용 산림바이오매스 수집·증
명 제도, RPS·REC 제도가 결합된 복합 정책 영역이다. 「산림자원의 조성 및 관리에 관한
법률」 제36조 및 같은 법 시행규칙 제44조는 입목벌채 허가와 벌채예정수량조사서 제출을
규정함으로써 벌채 행위를 제도적으로 관리한다. 「목재의 지속가능한 이용에 관한 법률 시
행규칙」은 미이용 산림바이오매스 수집 허가 시 수집 대상과 수집예정수량의 적정성을 확
인하고 허가증을 발급하도록 규정한다. RPS 제도는 「신에너지 및 재생에너지 개발·이용·
보급 촉진법」 제12조의5에 근거하며, 관련 관리·운영지침은 공급의무자가 발전량의 일정량
이상을 신·재생에너지로 공급하도록 한다.

이처럼 산림바이오매스 정책은 산림 부문의 벌채·조림 제도와 에너지 부문의 발전 인센
티브가 결합된 구조 속에서 작동한다. 정부가 2024년 관계부처 합동으로 발표한 「목질계
바이오매스 개선방안」 역시 폐목재 재활용 확대, 미이용 바이오매스 관리 강화, RPS 정책
지원 규모 조정을 주요 과제로 제시하였다(산업통상자원부·산림청·환경부, 2024). 이는 산
림바이오매스 정책이 단순한 공급 확대 정책이 아니라, 원료 경합, 공급망 관리, 정책지원
규모 조정, 재활용 체계와의 연계를 함께 고려해야 하는 단계에 이르렀음을 보여준다.

<표 6-10> 정책수단-행위자-구조적 결과 간 인과관계

정책수단	법적·제도적 근거	주요 행위자	중간 메커니즘	구조적 결과
입목벌채 허가· 신고	「산림자원의 조성 및 관리에 관한 법 률」 제36조, 시행규 칙 제44조	산림청, 지자체, 산주, 벌채업자	벌채 행위의 제도화, 벌채예정수량 확인, 산림경영 방향 통제	단별기 벌채 실행의 행정적 출발점
조림·숲가꾸기 보조금	산림청 보조사업, 「보조금 관리에 관 한 법률」	산림청, 지자체, 산주, 산림사업법 인	재조림·육림 비용 부 담 완화, 사업 참여 유도	공공재원 의존, 벌채 -재조림 반복 구조
산림사업 정책 자금·용자	산림청·산림조합중앙 회 정책자금 운용체 계	산림청, 산주, 임 업인, 목재생산업 자	장비·시설·경영 기반 유지	경제성 취약 사업의 정책 의존
미이용 산림바 이오매스 수집 허가	「목재의 지속가능한 이용에 관한 법률」 제36조의3 및 시행 규칙	산림청, 지자체, 산주, 원목생산자	합법벌채 증빙, 수집 예정수량 확인	공급망 진입의 행정 절차 강화
미이용 산림바 이오매스 증명	「목재의 지속가능한 이용에 관한 법률」 제36조의4 및 시행 규칙	산림청, 지자체, 칩 생산자, 유통업 자	수집 확인·점검, 증명 서 발급, 합동 점검·상 시 모니터링	원료 적법성 관리 강 화와 행정 부담 동시 발생
친환경벌채 제 도	2010년 도입, 2023 년부터 5ha 이상 의 무화	산림청, 지자체, 산주, 벌채업자	일정 규모 이상 잔존 목 유지, 생태·경관 고 려 벌채	모두베기 완화 장치 이나 현장 실효성 논 란 지속

RPS·REC 제도	「신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법」 제12조의5, 관련 운영지침	산업부, 발전사업자, 칩 생산자, 산림청(협의 주체)	발전용 수요 창출, REC 확보 경쟁, 연료 선택 유인	REC 의존적 산업구조 형성
목질계 바이오매스 개선방안	산업통상자원부·산림청·환경부 합동(2024)	중앙부처, 발전사업자, 재활용업계, 산림업계	폐목재 재활용 확대, 미이용 바이오매스 관리 강화, RPS 지원 조정	공급 확대 중심에서 관리·검증 중심으로 전환
임업 공익직접 지불제 및 선택형 확대 방향	2022년 도입, 선택형 공익직불제 추진	산림청, 산주	벌채보다 가꾸는 경영에 대한 보상 강화	장기경영·공익기능 유지 유인 확대
국산목재 장기저장형 이용 지원	NDC 내 국산 목재 제품 탄소저장 반영, 이력관리·이용지원 계획	산림청, 목재산업계, 산주	건축·가구재 등 장수명 제품 이용 확대, 저장 중심 인센티브	연소 중심 이용에서 저장 중심 이용으로 정책 축 이동 가능
임도 확충 계획	제5차 전국임도기본계획(2021~2030)	산림청, 지자체, 임업인	물류 개선, 접근성 제고, 수집·운반 효율화	공급 기반 보완, 그러나 경제성 문제를 단독 해결하지는 못함

* 산림청(2026) 연도별 산림청 예산 사업시행지침 다를 수 있음

제4절 결론

본 장은 산림바이오매스 관련 이해관계자 인터뷰를 통해 단별기 별채·재조림·산림바이오매스 생산을 둘러싼 정책수단이 현장에서 어떻게 인식되고 작동하는지를 분석하였다. 분석 결과, 산림바이오매스 정책의 문제는 개별 행위자의 선택이나 단일 제도의 효과로 환원하기 어렵다. 산림관리 제도, 재정지원 제도, 미이용 산림바이오매스 수집·증명 제도, RPS·REC 제도가 결합되면서 각 행위자에게 서로 다른 유인을 제공하고, 그 과정에서 공급망 왜곡, 정책 집행의 괴리, 생태·환경 갈등, 지역사회·노동 전환 문제가 함께 나타나고 있었다.

첫째, RPS·REC 제도는 발전사업자의 바이오매스 연료 수요를 형성하는 핵심 정책수단이지만, 동시에 산업 전반을 REC 가중치에 의존하는 구조로 만들고 있다. 발전사업자와 칩 생산자는 REC 가중치를 산림바이오매스 사업성의 핵심 변수로 인식하고 있었으며, 이는 현행 시장이 자생적 경쟁 구조보다 제도적 인센티브에 크게 의존하고 있음을 보여준다. 따라서 RPS·REC 제도는 단순한 재생에너지 수요 창출 장치가 아니라 산림바이오매스 산업의 존속 가능성을 좌우하는 구조적 변수로 작동하고 있다.

둘째, 미이용 산림바이오매스 수집 허가 및 증명 제도는 원료의 적법성과 물량을 관리하기 위한 장치이지만, 현장에서는 행정 부담과 공급망 불투명성 문제를 동시에 야기할 수 있다. 「목재의 지속가능한 이용에 관한 법률 시행규칙」은 수집 대상의 적정성과 수집예정수량의 적정성을 확인하고 허가를 발급하도록 규정하고 있으나, 실제 거래 과정에서는 산주, 별채업자, 칩 생산자, 발전소로 이어지는 유통 구조 속에서 가격, 물량, 납품권, 중간 마진 정보가 충분히 공개되지 않는 경우가 많다. 따라서 이 문제는 법령 자체의 한계라기보다 제도가 유통 구조와 현장 집행 속에서 어떻게 구현되는가의 문제로 이해할 필요가 있다.

셋째, 산림청의 공식 정책 논리와 현장 이해당사자의 체감 현실 사이에는 구조적 간극이 존재한다. 산림청은 산림바이오매스를 목재의 단계적 이용 과정에서 최종 연료 단계로 제한적으로 위치시키고, 친환경별채, 공익직불제 확대, 국산목재의 장기 저장형 이용, 임도 확충 등을 통해 관리·보상·저장 중심의 정책 보완 방향을 제시하였다. 그러나 현장 이해당사자들은 여전히 REC 의존, 공급망 왜곡, 지방비 부담, 공급 부족, 증명제도 실효성을 핵심 문제로 인식하고 있었다. 결국 이해관계자 분석의 핵심은 정책 목표의 선언적 정당성을 확인하는 데 있지 않고, 정책 설계의 공식 논리와 현장 행위자의 실행 경험 사이의 구조적 이격을 드러내는 데 있다.

넷째, 단별기 별채·재조림 구조와 바이오매스 연료 수요가 결합될 경우 경제성 문제를 넘어 생태적 갈등도 심화될 수 있다. IPCC는 수확목제품을 별도의 탄소 저장고로 다루면

서 제품군별 저장기간과 배출 경로를 구분하고 있으며, 이는 목재가 장수명 제품으로 이용되는 경우와 단기 연료로 이용되는 경우의 탄소저장 효과가 다를 수 있음을 전제한다(IPCC, 2019). 따라서 산림바이오매스 정책은 원료의 연료화만을 중심에 둘 것이 아니라, 장수명 목재 이용, 카스케이딩 이용, 산림 탄소흡수원 유지라는 관점과 함께 검토되어야 한다. 이는 산림자원의 활용 방식이 단순한 에너지 수급 문제가 아니라 탄소저장, 생태계 건강성, 장기 산림경영 방향과 직결되는 문제임을 의미한다.

삼각측정법(Denzin, 1978)의 관점에서 인터뷰 결과와 정책자료, 통계자료, 이론 문헌을 교차 검토한 결과도 같은 방향을 보여준다. 먼저 수렴하는 발견은 REC 의존 구조이다. 인터뷰에서는 대부분의 이해관계자가 REC 가중치를 핵심 변수로 지목하였고, 관련 고시의 개정 방향 역시 정책 당국이 이 의존성을 구조적 문제로 인식하고 있음을 보여준다. 이론적으로도 이는 Salamon(2002)의 정책수단론이 설명하는 복수 인센티브 결합에 따른 의도치 않은 결과와 연결된다. 또한 보조금 없이는 경제적 자생력을 갖기 어렵다는 현장 진술은 제3장의 IRR 분석 결과와도 수렴한다.

반면 발산하는 발견도 확인되었다. 탄소중립성 논쟁에서는 이해관계자 집단 간 인식이 일치하지 않았다. ‘짧은 숲이 탄소흡수에 유리하다’는 논리는 일부 이해관계자에게는 정책적·경험적 판단으로 받아들여지고 있었으나, Stephenson et al.(2014), Luyssaert et al.(2008), Lee et al.(2020) 등 국내외 과학 문헌은 노령림과 대형목의 탄소흡수 기능을 다르게 설명한다. 본 연구 제5장의 FOD 모형 시뮬레이션 결과도 에너지 직접 연소 방식의 탄소저장 효과가 장수명 이용 방식보다 낮을 수 있음을 보여준다. 지방비 매칭 병목에 대해서도 산림청과 지자체·현장 종사자 간 인식 차이가 나타났으며, 이는 중앙-지방 간 정보 비대칭과 집행 역량의 차이를 반영한다(Lipsky, 1980; Hill & Hupe, 2014).

다만 삼각측정에도 한계가 있다. 지자체별 미이용 산림바이오매스 수집·운반비 지원 단가는 중앙에서 통일된 공시 자료가 확인되지 않아 현장의 행정 부담 진술을 정량적으로 뒷받침하는 데 한계가 있다. 또한 Wood Vault 방식과 같은 대안적 탄소 격리 방법은 국내 적용 가능성과 비용·편익을 검토한 공인 자료가 충분하지 않다. 마지막으로 인터뷰가 목적표집으로 진행된 만큼, 소규모 영세 산주나 비조합 소속 별채업자 등 일부 집단의 경험이 충분히 포착되지 않았을 가능성도 있다. 후속 연구에서는 이들 집단에 대한 추가 조사가 필요하다.

이러한 관점에서 향후 정책 개선은 다섯 가지 방향에서 설계될 필요가 있다. 첫째, REC 의존 완화는 신규 설비 REC 폐지 방향과 정합성을 유지하되, 기존 설비의 경과조치 기간 이후 전환 경로를 이해관계자와 협의하여 설계해야 한다. 둘째, 공급망 투명성 제고를 위해 산주, 별채업자, 칩 생산자, 발전소 간 다층적 마진 구조와 정보 비대칭을 줄이고, 납품 코드 배분 구조의 공개화와 거래 정보 공시 체계를 마련해야 한다. 셋째, 재정지원 구조는 장기 산림경영과 공익기능 유지에 대한 보상을 실질화하는 방향으로 조정되어야 한다. 넷

째, 생태적 지속가능성 기준은 ‘젊은 숲’ 논리나 단기 공급 확대 논리보다 국내 실측 데이터에 기반한 수종별·영급별 탄소흡수 기준을 토대로 정립되어야 한다. 다섯째, REC 일몰과 산업 전환이 지역 고용과 산촌 경제에 미칠 영향을 고려하여 지역사회·노동 전환 지원 체계를 선제적으로 마련해야 한다.

결론적으로 산림바이오매스 정책은 에너지 수요 대응만을 목표로 하는 단선적 정책이 아니라, 산림정책·기후정책·지역전환정책이 교차하는 복합 정책 영역으로 재정립되어야 한다. 정책 재설계는 선언적 목표의 반복이 아니라, 본 연구의 이해관계자 분석과 삼각측정을 통해 확인된 구조적 원인, 즉 REC 의존, 보조금 왜곡, 공급망 불투명성, 정책 설계와 현장 실행의 간극, 탄소저장 근거의 부족을 각각 제도적으로 해소하는 방향에서 이루어져야 한다.

제7장

산림바이오매스 공급 정책 개선 방안

- 제1절 REC 의존 완화 및 단계적 일몰 로드맵 수립
- 제2절 생태적 지속가능성 기준 강화
- 제3절 공급망 투명성 제고 및 유통 구조 개혁
- 제4절 장수명 목재 이용 우선 원칙 확립 및 카스케이딩 정책 도입
- 제5절 재정지원 구조 재편: 보조금 왜곡 해소와 공익 경영 보상 실질화
- 제6절 지역사회·노동의 정의로운 전환 지원
- 제7절 통합 이행 방향 및 부처 간 연계 체계

7

산림바이오매스 공급 정책 개선 방안



본 장은 제3장부터 제6장까지 수행된 실증 분석의 결과를 토대로 산림바이오매스 공급 정책의 구조적 문제를 해소하기 위한 여섯 가지 개선 방안을 제시한다. 각 절의 서두에서는 해당 방안이 도출된 분석 근거를 연구문제(RQ)와 명시적으로 연결함으로써 분석과 처방 사이의 인과 논리를 분명히 한다. 본 연구의 세 가지 연구문제는 다음과 같다.

연구문제 1(RQ1)은 현행 산림바이오매스 정책이 목재·연료재 생산이라는 물질서비스를 과도하게 강조하여 산림의 환경조절서비스와 문화서비스를 약화시키고 있는가이다.

연구문제 2(RQ2)는 산림바이오매스 생산과 이용이 보조금·용자·REC 가중치 등 제도적 지원 없이도 경제적으로 지속가능한가이다.

연구문제 3(RQ3)은 산림바이오매스 이용이 산림 생태계 측면에서 생태적으로 타당한가이다.

제1절 REC 의존 완화 및 단계적 일몰 로드맵 수립

1. 현황 및 문제

본 절은 RQ2(경제적 타당성 미흡)와 RQ3(생태적 타당성 미흡)의 분석 결과를 주된 근거로 한다. 제3장 내부수익률(IRR) 분석 결과, 정부 보조금을 전액 배제한 조건에서 바이오매스 생산 모형(20년 주기)의 수익률은 -14%로 산출되었다. 이 수치는 현행 산림바이오매스 시장이 자생적 경쟁력에 기반한 것이 아니라 REC 가중치라는 단일 제도 변수에 구조적으로 의존하고 있음을 정량적으로 보여준다. 제6장 이해관계자 분석에서도 발전사업자와 칩생산업자 모두 REC 가중치를 사업 지속 여부와 직결되는 핵심 변수로 인식하고 있었으며, 정부 공식 자료에 따르면 2023년 기준 목질계 바이오매스에 대한 RPS 정산비용은 연간 9,000억 원 수준에 달한다(산업통상자원부·산림청·환경부, 2024).

제4·5장 탄소 저장량 분석에서는 한국 목재 이용 구조의 단수명 편향으로 인해, IPCC 기본 반감기 가정 적용 시 추정되는 2044년 누적 stock(시나리오 A 49.7 Mt-C)이 한국 Tier 3 반감기 적용 시(시나리오 B 22.3 Mt-C) 대비 약 2.2배 과대 추정됨이 확인되었다. 이는 한국 제재목의 약 58%가 토목·수송 등 단수명 산업에 투입되는 산업 구조를 반영한 결과이다. 나아가 본 보고서 5장 5절의 분석에 따르면, 2024년 에너지용 카테고리의 즉시 산화 배출량(약 2.15 Mt-C)은 같은 해 시나리오 B 시뮬레이션상의 3개 HWP 풀 자연 산화량(약 2.87 Mt-C)의 75.2%에 해당하며, 단일 연도 총 탄소 배출의 약 42.9%가 에너지용 inflow의 즉시 산화에서 발생하는 것으로 평가된다. 더 나아가 본 보고서 5장 5절-6의 에너지용 비중 축소 시나리오 시뮬레이션 결과, 에너지용 inflow를 30% 축소하여 그 절반씩을 제재목·목질패널 풀로 재배치할 경우 2044년 HWP 풀 stock이 현행 시나리오 B 대비 +22.4% 증가하며 20년간 누적 13 Mt-C의 즉시 산화 배출이 회피되고, 50% 축소 시에는 +37.3% 증가에 누적 22 Mt-C 회피의 효과가 산정되었다. 이러한 정량 결과는 REC 의존 구조 완화가 단순한 보조금 정책의 문제가 아니라, 한국 HWP 풀의 탄소 저장 능력을 직접 증가시키는 정책 수단임을 보여준다. 이러한 현황은 현행 에너지 직접 연소 중심의 바이오매스 이용이 미래 세대의 탄소 조절서비스·저장기능을 지속적으로 잠식하고 있음을 의미하며, REC 의존 완화의 필요성이 경제적 측면(RQ2)뿐 아니라 생태계 건강성과 미래 자산 보전의 측면(RQ3)에서도 동시에 뒷받침됨을 시사한다.

이미 「신·재생에너지 공급의무화제도 및 연료 혼합의무화제도 관리·운영지침」(기후에너지환경부 고시 제2025-3호)은 신규 목질계 바이오매스 발전설비에 대한 REC 가중치 폐지와 수입산 목재펠릿 REC 일몰 방향으로 개정되었으나, 기존 설비에 대한 전환 경로와 지역사회 지원 방안은 아직 구체화되지 않아 정책 불확실성이 지속되고 있는 상황이다.

2. 개선 방향

첫째, 신규 바이오매스 발전설비에 대한 REC 폐지를 확고히 이행하는 것이 요청된다. 신규 허가 신청 단계에서 지속가능한 산림경영(SFM) 원칙에 따른 실효 공급 가능량 분석(임도 100m 이내 접근성, 수요처 반경 30km 이내 기준)을 의무 제출 서류로 규정하는 것이 바람직하다.

둘째, 기존 설비에 대한 단계적 일몰 로드맵을 수립하고 공개하는 것이 요청된다. 발전소 노동자·지역 경제·원료 공급망에 미치는 충격을 최소화하기 위해 2~3년 단위의 경과 기간을 설정하고, 발전사업자·칩생산업자·지자체·시민사회가 참여하는 이해관계자 협의체를 통해 일정과 전환 조건을 사전에 공개하는 방식이 검토될 필요가 있다.

셋째, 국내 미이용 산림바이오매스와 수입산 목재펠릿을 제도적으로 분리하는 방안이 검토될 필요가 있다. 수입산 목재펠릿 REC는 일몰을 앞당기는 방향으로 조정하되, 국내 미이용 부산물에 한해서는 SFM 원칙 준수, 임도 기반 실효 가용량 이내 수집, 원목 혼입 방지 모니터링을 조건으로 한시적·제한적 인센티브 유지를 검토할 수 있다. 양지윤 외(2022)가 지적한 원목 혼입 가능성을 차단하기 위한 현장 확인 의무의 명문화가 이 경우에도 선행되어야 한다.

넷째, 절감된 RPS 정산비용의 재배분 연동 메커니즘을 제도화하는 것이 바람직하다. 바이오매스 비중 감소분을 임업 공익직불제 확대, 장수명 목재 이용 시설 투자, 지역사회 전환 지원으로 재배분하는 방향을 법령 또는 지침 수준에서 명시하는 방안이 요청된다.

제2절 생태적 지속가능성 기준 강화

1. 현황 및 문제

본 절은 RQ1(생태계서비스 불균형)과 RQ3(생태적 타당성 미흡)의 분석 결과를 주된 근거로 한다. 제3장 공간 분석 결과, 전국 약 152,279ha에 달하는 산림이 목재생산림이자 법정 보호지역으로 이중 지정되어 있는 행정 모순이 확인되었다. 이 구조적 오류는 탄소저장·생물다양성·토양유기물·수문조절·경관·휴양 기능 등 환경조절서비스와 문화서비스를 제공하는 산림에서도 벌채가 허용될 수 있는 제도적 허점을 형성하고 있다. 현행 정책이 목재·연료재 생산이라는 물질서비스를 과도하게 강조하는 결과, 산림의 환경조절서비스와 문화서비스가 구조적으로 약화되고 있음이 확인되었다(Mubareka et al., 2023).

RQ3의 생태적 타당성 측면에서는, 단벌기 벌채 중심의 바이오매스 공급 확대가 생태계 안전성과 산림 건강성을 훼손하고 있다는 점이 주목된다. 산림은 탄소를 장기적으로 격리하는 탄소 조절서비스와 저장 기능을 수행하는데, 현행 이용 방식은 이 기능을 지속적으로 약화시킴으로써 미래 세대의 생태적 자산을 잠식하고 있는 것으로 평가된다(IPCC, 2022; 2023). 한편, 각 측정 분석은 '젊은 숲이 탄소흡수에 유리하다'는 논리가 온실가스의 배출 저감이라는 기후변화 대응 전략으로서 과학적 근거가 부족하다는 것임을 확인하였다.

2. 개선 방향

첫째, 이중 지정 산림의 행정 모순을 시급히 정비하는 것이 요청된다. 목재생산림이자 법정 보호지역으로 이중 지정된 약 152,279ha에 대한 공간 정보 오류를 우선적으로 정비하고, 보전 가치 평가 결과에 따른 보호지역 우선 원칙을 「산림자원의 조성 및 관리에 관한 법률」에 명문화하는 방안이 검토될 필요가 있다. 동법 제36조에 따른 입목벌채 허가 시 이중 지정 산림 여부를 목재정보서비스가 자동 검토하도록 시스템과 연계하는 것이 바람직하다.

둘째, 국내 실측 데이터에 기반한 수종별·영급별 탄소흡수 기준을 정립하고 이를 벌채 허가 기준에 반영하는 체계를 마련하는 것이 요청된다. 이를 통해 탄소 조절서비스·저장기능 관점에서의 노령림·성숙림 보전 기준이 행정적으로 적용될 수 있으며, 신규 바이오매스 발전시설 입지 허가 시에도 SFM 원칙에 따른 임도 기반 실효 가용량 분석을 의무 제출 서류로 제도화하는 것이 바람직하다.

셋째, 2023년부터 5ha 이상 벌채 시 의무화된 친환경벌채 제도의 현장 이행 실태를 정기적으로 독립 점검하고 위반 사항에 대한 실질적 행정 제재를 규정하는 것이 요청된다. 제6장 이해관계자 분석에서 현장 종사자들이 이 제도의 실효성에 유보적 태도를 보인 만큼, 점검 결과를 공개하고 제도 개선에 환류하는 체계의 구축이 필요하다.

넷째, 현행 탄소 산정 방식에서 벗어나 토양·낙엽층의 탄소 저장량을 포함하는 포괄적 측정 체계를 도입하는 것이 검토될 필요가 있다. 이를 통해 노령림·활엽수림의 실질적 탄소 저장

가치를 정책에 반영하고, 단벌기 벌채가 2050 탄소중립 목표 달성을 저해하지 않도록 제도적 기반을 마련하는 것이 바람직하다. 아울러 산림청 「목재이용실태조사」에 IPCC HWP 회계 전용 부속 분류를 신설하고, 한국 임상 구성(침엽수 36.9%, 활엽수 31.9%, 혼효림 26.5%)을 반영한 차등 환산계수를 표준 적용하여 HWP 회계의 정밀성을 제고하는 것이 요청된다.

제3절 공급망 투명성 제고 및 유통 구조 개혁

1. 현황 및 문제

본 절은 RQ2(경제적 타당성 미흡)의 분석 결과를 주된 근거로 한다. 제6장 이해관계자 분석에서 공급사슬의 불투명성과 정보 비대칭은 조사에 참여한 모든 행위자 집단이 공통으로 지목한 구조적 문제였다. 벌채업자-목상-칩생산업자-산림조합중앙회-발전소로 이어지는 다층적 유통 경로에서 가격·물량·납품권·중간 마진 정보가 충분히 공개되지 않는 구조가 인터뷰 결과와 정책 자료 삼각측정을 통해 실증되었다. 칩생산업자는 납품단가 19만 원 중 산림조합이 7,000원을 수취하는 중간 마진 구조를 직접 진술하였고, 벌채업자는 납품권을 가진 중간업자들의 존재를 확인하였다. Ostrom(1990)이 지적한 공유자원 관리의 핵심 조건인 경계의 명확화, 이해관계자의 규칙 형성 참여, 실효적 모니터링이 현행 공급사슬 구조에서 충족되지 않고 있으며, 이 공급망 불투명성은 원료 조달 비용을 높여 경제적 자생력을 추가로 약화시키는 요인으로 작용하고 있다.

2. 개선 방향

첫째, 산림조합의 납품코드 배분 현황을 행정 정보로 공개하고 칩생산업자와 발전소 간 직접 거래 경로를 제도적으로 허용하는 방안이 검토될 필요가 있다. 납품코드 배분 기준과 절차를 명문화하고 배분 결과를 목재정보서비스에 분기별로 공시하는 체계의 구축이 요청된다.

둘째, 미이용 산림바이오매스 수집량·납품 단가·유통 단계별 마진을 목재정보서비스에 통합하여 분기별로 공시하는 거래 정보 공시 체계를 마련하는 것이 요청된다. 제3차 목재이용종합계획(2025~2029)에서 예고된 미이용 산림바이오매스 증명량 분할 발급 시스템을 2026년 내 실제 운영에 들어가도록 이행 일정을 구체화하는 것이 바람직하다(산림청, 2024).

셋째, 산주가 자신의 산물이 어떤 경로로, 얼마의 가격으로 유통되는지를 실시간으로 확인할 수 있는 정보 시스템을 구축하는 것이 요청된다. 산림조합의 입목 매각 공개입찰제 확대와 연계하여 산주의 직접 시장 참여 경로를 확대하는 방향도 함께 검토될 필요가 있다.

넷째, 양지윤 외(2022)가 지적한 원목 혼입 가능성을 차단하기 위해 「목재의 지속가능한 이용에 관한 법률」 제36조의3·4에 따른 수집 허가 및 증명 단계에서 드론 촬영·현장 확인을 병행하는 원목 혼입 방지 체계를 강화하고, 합동점검단 점검 결과를 정기 보고서 형태로 공개하는 것이 바람직하다.

제4절 장수명 목재 이용 우선 원칙 확립 및 카스케이딩 정책 도입

1. 현황 및 문제

본 절은 RQ3(생태적 타당성 미흡)의 분석 결과를 주된 근거로 하며, 제4·5장의 정책 제언을 직접 반영한다. 제4·5장 분석 결과, 한국 목재 소비의 65.2%는 에너지 연소(35.6%)와 펄프·제지(29.6%)라는 단기 산화 경로에 집중되어 있는 것으로 나타났다. 이 구조는 2012년 RPS 도입 이후 수입 목재펠릿 수요(2023년 기준 340만 톤, 98% 수입 의존)가 급증하며 형성된 정책적 결과이다(산업통상자원부, 2024). IPCC(2019)는 수확목제품(HWP)의 탄소저장 효과가 제품 유형별 반감기에 따라 크게 달라진다고 명시하며, 에너지 연소와 장수명 목제품 이용 사이의 탄소저장 효과 차이를 정량화하도록 요구하고 있다.

제5장 카스케이딩 분석에서 토목·수송용 폐목재(제재목 투입의 58%)를 보드재 원료로 47.5% 재활용하는 시나리오를 적용한 결과, 한국 실태 시나리오(시나리오 B)에서 2044년 탄소저장량이 기준선 대비 +8.9%(+2.23 Mt-C) 증가하는 것으로 나타났다. 이는 에너지 직접 연소 확대보다 폐목재 재활용 중심의 카스케이딩 정책이 탄소 조절서비스·저장기능을 실질적으로 보전하는 효과적 수단임을 정량적으로 보여준다(장은경, 2021).

2. 개선 방향

가. 산림청 「목재이용실태조사」 분류 체계 정밀화

산림청 「목재이용실태조사」가 보고하는 22개 목재제품 분류는 산업 통계 목적으로 설계되어, IPCC HWP 회계 분류 체계와 직접 정합되지 않는다. 본 보고서 제4장은 IPCC 「2019 Refinement」 Chapter 12와 정합하도록 4개 카테고리(제재목류·목질패널류·펄프·제지·에너지용)로 매핑하였으나, 일부 항목(공예용·기타·표고버섯 재배자목 등)에서 분류 모호성이 식별되었다.

산림청은 IPCC 표준 분류와 정합하는 HWP 회계 전용 분류 체계를 「목재이용실태조사」 부속 분류로 신설할 필요가 있다. 단, 산업 통계 본래 목적과의 충돌을 피하기 위해 기존 22개 분류는 유지하고, IPCC 회계 매핑을 부속 분류로 추가하는 방식이 적합하다. 동 분류 체계 정비는 향후 한국 NIR 보고와 NDC 평가의 활동자료 일관성을 확보하는 출발점이다.

나. 한국 산림 임상 구성을 반영한 차등 환산계수 표준화

IPCC 2013년 권장값과 한국 국립산림과학원 국가고유계수 체계를 결합한 장은경(2021) 박사논문 표 18을 차등 환산계수로 적용하였다. 한국 산림 임상 구성(침엽수림 36.9%·활엽수림 31.9%·혼효림 26.5%)은 침엽수 우세 단순 구조가 아닌 균형 분포 구조이며, 침/활 환산계수는 24% 차이를 보인다(침엽 0.225 vs 활엽 0.280 t-C/m³).

한국 NIR HWP 회계는 단일 평균계수 적용 대신, 한국 임상 구성 비율을 반영한 차등 환산계수를 표준 적용하여야 한다. 김은숙 외(2022)가 RCP 8.5 기후변화 시나리오 하에서 활/흔효림 비중 증가를 전망함을 고려할 때, 차등 환산의 정책적 중요성은 향후 더욱 커진다. 환경부 온실가스종합정보센터(GIR)와 산림청 국립산림과학원 간 차등 환산계수 표준화 협의가 필요하다.

다. 한국 Tier 3 고유 반감기 직접 측정 도입

제5장이 적용한 시나리오 B(장은경 2021 가중평균)는 IPCC 기본값 대비 14배 짧은 제재목 반감기 2.5년을 도출하며, 시나리오 A 대비 2044년 누적 stock에서 110% 격차를 발생시킨다. 동 격차는 한국 산업구조의 단수명 이용 비중을 IPCC 평균치로 가정할 때 발생하는 구조적 과대추정이다. 또한 $\pm 50\%$ 민감도 분석 결과, 목질패널류가 stock 변동 $\pm 22.8\%$ 로 가장 큰 영향력을 보인다.

국립산림과학원·환경부는 한국 Tier 3 고유 반감기 직접 측정 사업을 도입하여야 한다. 우선 측정 대상은 민감도 1위 카테고리인 목질패널류(합판·MDF·파티클보드)이며, 산업 투입별 실제 이용 수명 측정이 시급하다. 측정 방법론은 핀란드 Pingoud et al.(2003) VTT 인터뷰 기반 방법을 참조 가능하다. 본 측정 결과는 향후 한국 NIR Tier 3 보고로 직접 활용될 수 있다.

라. 우선 정밀화 카테고리 = 목질패널류 명시

제5장의 $\pm 50\%$ 민감도 분석 결과 1위는 목질패널류($\pm 22.8\%$), 2위는 펄프·제지($\pm 11.0\%$), 3위는 제재목류($\pm 7.8\%$)이다. 목질패널류의 변동성이 큰 이유는 기준 반감기 8.8년이 가장 길고 inflow 비중도 크기 때문이다.

한국 HWP 인벤토리 정밀화 사업의 1순위 우선 과제로 목질패널류 산업 투입별 이용 수명 측정을 명시하여야 한다. 합판은 건축용·가구용·포장용으로 이용 수명이 크게 다르며, MDF·파티클보드 역시 가구용·인테리어용·산업용으로 분리된 측정이 필요하다. 동 측정은 한국임업진흥원 또는 국립산림과학원이 수행 주체로 적합하며, 산업계(목질패널산업협동조합) 협력이 필수적이다.

제5절 재정지원 구조 재편: 보조금 왜곡 해소와 공익 경영 보상 실질화

1. 현황 및 문제

본 절은 RQ1(생태계서비스 불균형)과 RQ2(경제적 타당성 미흡)의 분석 결과를 주된 근거로 한다. 현행 보조금 구조는 단벌기 벌채-재조림 사이클을 반복하도록 유도하는 방향으로 설계되어 있다. 조림·숲가꾸기 보조금, 수집비 지원, REC가 결합될 경우 공급사슬 내 각 행위자가 이를 자신에게 유리하게 전용하는 의도치 않은 결과가 구조적으로 발생한다는 점은 Salamon(2002)의 정책수단론이 이론적으로 예측하는 바와 정합한다. 2022~2025년 사이 긴급벌채량의 77%가 바이오매스 생산으로 연결되었으며, 관련 예산의 98%에 해당하는 1,683억 원이 전액 국비로 투입된 것으로 확인되었다.

「2026년도 임업·산림 공익직접지불사업 시행지침」(산림청, 2026a)에 따르면 임업직불제 예산은 576억 원으로 동결된 반면 산림재난 대응 예산은 전년 대비 44.3% 급증하였다. 이러한 예산 불균형은 장기 경영 보상보다 단기 재난 대응이 정책 우선순위를 차지하고 있음을 제도적 차원에서 확인시켜 주며, 물질서비스 강조 속에서 환경조절서비스와 문화서비스 등 공익기능에 대한 보상 구조가 실질화되지 못하고 있음(RQ1)과, 임가의 경제적 자생력이 구조적으로 약화되고 있음(RQ2)을 동시에 드러낸다.

2. 개선 방향

첫째, 단벌기 벌채를 유도하는 보조금 지급 구조에 대한 전면적 재검토가 요청된다. 제3장 IRR 분석에서 60년 이상 장벌기 우량재(IRR 2~3%) 및 참나무 복합경영(IRR 3%)이 경제적 타당성을 갖춘 대안으로 확인된 만큼, 이러한 경영 방식으로의 전환을 실질적으로 지원하는 보조금 체계 설계가 이루어질 필요가 있다.

둘째, 기본형 공익직불제를 장기 산림경영·탄소흡수원 유지에 대한 실질적 보상 체계로 개편하고 선택형 공익직불제의 도입을 조속히 추진하는 것이 바람직하다. 임업직불제 예산을 576억 원 동결 수준에서 단계적으로 증액하고, 장기 경영 보상 비중을 높이는 방향으로 예산 배분 구조를 재조정하는 방안이 검토될 필요가 있다.

셋째, 미이용 산림바이오매스 수집 보조금 지급 시 SFM 원칙 준수, 임도 접근성 요건, 실질 가용량 범위 이내 수집 여부를 조건으로 명시하는 것이 요청된다. 「2026년 산림소득분야 사업시행지침」(산림청, 2026b)의 국비-지방비 50:50 매칭 구조가 지자체의 사업 기피를 유발하는 요인으로 작용하고 있는 만큼, 취약 지역에 대한 국비 비중 상향 조정 방안이 함께 검토될 필요가 있다.

넷째, 인공 조림 중심 정책에서 자연 갱신 유도 및 윤벌기 연장 정책으로의 전환이 검토될 필요가 있다. 과다하게 투입되고 있는 조림 및 숲가꾸기 보조금의 집행 구조를 재검토하고, 탄소 저장 및 생태적 가치가 높은 성숙 활엽수림을 벌채 대상이 아닌 보전 대상으로 재평가하는

방향으로 보조금 목적을 전환하는 것이 요청된다. 아울러 보조금 지원 사업의 정책 효과를 3년 주기로 독립적으로 평가하고 결과를 공개하는 환류 체계를 도입하는 것이 바람직하다.

제6절 지역사회·노동의 정의로운 전환 지원

1. 현황 및 문제

본 절은 RQ1(생태계서비스 불균형)과 RQ2(경제적 타당성 미흡)의 분석 결과를 주된 근거로 한다. REC 일몰 일정이 이미 법령으로 확정된 상황에서, 산림 관련 지역사회와 노동자의 전환을 지원하기 위한 정책이 사실상 부재한 상태이다. 제6장 이해관계자 분석에서 임업 후계자들은 '규제는 강한데 보상은 없다'는 인식 속에서 후계 의지를 잃어가고 있는 것으로 나타났으며, 중대재해처벌법 강화로 인해 지자체가 임업 사업 집행을 기피하는 역설적 현상도 확인되었다.

제3장 분석에서 지난 9년간(2016~2024년) 비목재 임산물 생산액(연평균 약 1.9조 원)이 목재 생산액(약 5,000~6,000억 원)의 3배 이상을 상회하고 있으며, 단위면적당 수익성에서도 약용작물(약 6,625만 원/ha)·산나물(약 3,742만 원/ha)이 용재(약 10.6만 원/ha)에 비해 수십 배 높은 것으로 나타났다. 또한 비목재 임산물 복합 경영의 IRR(36~54%)이 바이오매스 모형(-14%)에 비해 현저히 높은 것으로 분석되어, 바이오매스에 집중된 지원 구조를 비목재 임산물 중심으로 전환하는 것이 임가 소득과 산림 공익기능 보전을 동시에 달성할 수 있는 방향임이 확인되었다.

2. 개선 방향

첫째, 기후에너지환경부·산림청·고용노동부·지자체·이해관계자가 공동으로 참여하는 산림 부문 정의로운 전환 협의체를 구성하고, REC 일몰 시점과 연계한 단계별 지원 계획을 수립하는 것이 요청된다. 협의체 운영 결과를 공개하고 전환 지원 이행 상황을 연 1회 이상 점검하는 모니터링 체계를 마련하는 것이 바람직하다.

둘째, 현재 바이오매스 보조금이 집중된 재원을 권역별 비목재 임산물 복합 경영 지원으로 전환하고, 권역별로 이미 경쟁 우위를 갖춘 품목의 고도화와 유통망 지원을 강화하는 방향이 검토될 필요가 있다. 「2026년 산림소득분야 사업시행지침」(산림청, 2026b)에 따른 임산물 생산단지 규모화 지원을 바이오매스 사업 중심에서 비목재 임산물 육성 중심으로 목적을 재설계하는 것이 요청된다.

셋째, 장기 경영 보상 체계·컨설팅·초기 투자 지원을 연계한 후계자 육성 프로그램을 운영하고, 「2026년도 임업·산림 공익직접지불사업 시행지침」(산림청, 2026a)상 576억 원에 동결된 임업직불제 예산을 단계적으로 확대하여 장기 경영 보상을 실질화하되, 임업 후계자와 사유림 산주가 이해관계자 분석에서 제시한 유통 투명성 제고·산주 직접 참여 확대를 중심으로 직불제 지급 체계를 재설계하는 것이 바람직하다.

제7절 통합 이행 방향 및 부처 간 연계 체계

앞서 제시한 여섯 가지 개선 방안은 상호 독립적인 과제가 아니라 산림정책·기후정책·에너지정책·지역전환정책이 교차하는 복합 정책 영역에서 연동되는 과제들이다. 각 방안이 개별 부처의 부분적 조정에 그쳐서는 REC 의존, 보조금 왜곡, 공급망 불투명성, 정책-현장 간극, 탄소저장 근거 부재라는 구조적 원인을 해소하기 어려우며, 아래와 같은 부처 간 연계 체계의 선결적 구축이 요청된다.

<표 7-1> 개선 방안별 이행 주체 및 관련 법령·계획

개선 방안	주관 부처	협력 부처·기관	관련 법령·계획
제1절 REC 의존 완화·일몰 로드맵	기후에너지환경부	산림청, 산업통상자원부, 지자체	기후에너지환경부 고시 제2025-3호 신에너지 및 재생에너지법 제12조의5
제2절 생태적 지속가능성 기준 강화	산림청	환경부, 국립산림과학원	산림자원의 조성 및 관리에 관한 법률 제36조
제3절 공급망 투명성 제고	산림청	지자체, 한국임업진흥원	목재의 지속가능한 이용에 관한 법률 제36조의3·4
제4절 장수명 이용·카스케이딩	산림청	환경부(GIR), 목질패널산업계	제3차 목재이용종합계획(2025~2029)
제5절 재정지원 구조 재편	산림청	기획재정부, 지자체	2026년도 임업·산림 공익직접지불사업 시행지침
제6절 정의로운 전환	고용노동부·산림청	기후에너지환경부, 지자체	2026년 산림소득분야 사업시행지침

이상의 여섯 가지 개선 방안은 선언적 목표의 반복이 아니라, 삼각측정을 통해 실증된 구조적 원인을 각각 제도적으로 해소하는 방향에서 설계된 것이다. 산림바이오매스 정책은 에너지 수요 대응만을 목표로 하는 단선적 정책이 아니라, 산림의 물질서비스·환경조절서비스·문화서비스 간 균형을 회복하고, 미래 세대의 생태적 자산을 보전하며, 지역사회의 경제적 자립을 지원하는 복합 정책 영역으로 재정립되어야 한다.

제8장 결론 및 제언

제1절 결론

제2절 정책적 함의

제3절 연구의 한계 및 후속 연구 과제

제4절 종합 논의

8

결론 및 제언 < <

제1절 결론

본 연구는 산림바이오매스 공급 정책의 지속가능성을 생태계서비스 불균형, 경제적 타당성, 생태적 타당성의 세 측면에서 분석하였다. 분석 결과, 현행 정책은 산림을 목재와 연료재 공급원으로 활용하는 물질서비스 중심 구조에 치우쳐 있으며, 그 과정에서 탄소저장, 생물다양성, 토양·수문 조절, 경관·휴양 등 산림의 공익적 기능이 충분히 반영되지 못하고 있음이 확인되었다.

첫째, 생태계서비스 측면에서는 산림의 다양한 기능 간 균형이 충분히 확보되지 못하고 있었다. 제3장의 공간 분석에서 전국 약 152,279ha의 산림이 목재생산림이면서 동시에 법정 보호지역으로 이중 지정된 것으로 나타났으며, 이는 보전 가치가 높은 산림에서도 별채가 허용될 수 있는 제도적 허점을 보여준다. 미이용 산림바이오매스 최대 생산 가능량인 연간 이론적 잠재 가용량은 약 56만 톤(BDT/년)에 그치며, 2025년도 공급량은 이 최대치의 3배에 달한다. 또한, 비목재 임산물 생산액이 목재 생산액보다 큰 규모임에도 정책 지원은 여전히 목재·연료재 중심의 물질서비스 생산에 집중되어 있었다. 이는 산림의 공익적 기능에 대한 제도적 보상이 충분하지 않다는 점을 시사한다.

둘째, 경제적 측면에서 산림바이오매스 생산은 자생적 시장 경쟁력을 충분히 확보하지 못한 것으로 분석되었다. 보조금을 배제한 조건에서 바이오매스 생산 모형의 내부수익률은 -14%, 일반 펄프재 모형은 -5%로 나타났다. 또한 공급망 제약을 반영한 미이용 산림바이오매스의 실질 가용량은 전국 기준 약 9.23만 톤/년에 그쳐, 현행 공급 구조가 제도적 지원에 크게 의존하고 있음을 보여준다. 제6장의 이해관계자 분석에서도 REC 가중치와 보조금은 사업 지속 여부를 좌우하는 핵심 조건으로 인식되었다.

셋째, 생태적 타당성 측면에서도 현행 이용 방식은 한계를 보였다. 제4·5장 분석 결과, 한국 목재 소비의 상당 부분은 에너지 연소와 펄프·제지 등 단기 산화 경로에 집중되어 있었다. IPCC 기본 반감기 적용 시나리오와 한국 실태 기반 반감기 적용 시나리오를 비교한 결과, 2044년 탄소저장량 추정치에서 약 2.2배의 차이가 나타났다. 이는 한국의 목재 이용 구조를 충분히 반영하지 않을 경우 HWP 탄소저장 효과가 과대평가될 수 있음을 의미한다. 특히 에너지용 목재의 즉시 산화 배출은 HWP 풀의 자연 산화량에 근접하는 수준으로 나타나, 에너지 직접 연소 중심의 이용 구조가 산림의 장기 탄소저장 기능을 약화시킬 수 있음을 확인하였다.

종합하면, 현행 산림바이오매스 정책의 문제는 특정 제도 하나의 결함이라기보다 여러 정책수단이 결합하여 만들어낸 구조적 결과로 이해할 필요가 있다. 조림·벌채·수집 보조금, 미이용 산림바이오매스 증명제도, REC 가중치, 다층적 공급망 구조가 함께 작동하면서 단기 원료 공급과 에너지 이용을 강화하는 유인이 형성되었다. 그 결과 산림의 장기 탄소저장 기능과 생태계서비스의 균형이 정책 판단에서 충분히 고려되지 못하고 있는 실정이다.

제2절 정책적 함의

본 연구의 정책적 함의는 크게 세 가지로 정리된다.

첫째, 산림바이오매스 정책은 공급량 확대 중심의 접근을 넘어 산림 생태계서비스의 균형을 기준으로 평가되어야 한다. 산림은 목재와 연료재를 제공하는 자원인 동시에 탄소를 저장하고, 생물다양성을 유지하며, 수원함양과 경관·휴양 기능을 제공하는 복합 생태계이다. 따라서 향후 정책 평가는 산림을 얼마나 많이 이용했는가보다, 산림의 장기적 기능을 얼마나 유지했는가에 초점을 두어야 한다.

둘째, 재정지원의 타당성은 사업 지속성만이 아니라 사회적 편익을 기준으로 판단되어야 한다. 본 연구에서 확인된 IRR 분석 결과와 RPS 정산비용 규모는 산림바이오매스 시장이 독립적 경제성보다 제도적 지원에 크게 의존하고 있음을 보여준다. 따라서 보조금과 REC의 효과는 에너지 생산량뿐 아니라 탄소저장, 생태계서비스 보전, 지역경제 기여, 재정 효율성을 함께 고려하여 평가되어야 한다.

셋째, 산림 탄소정책은 국내 실측자료에 기반한 과학적 기준을 강화해야 한다. 본 연구의 HWP 분석은 국제 기본값을 그대로 적용할 경우 한국의 단수명 목재 이용 구조를 충분히 반영하지 못할 수 있음을 보여주었다. 이는 국가 온실가스 인벤토리와 NDC 이행 평가의 신뢰성과도 연결된다. 향후에는 수종별·영급별 탄소흡수량, 목제품별 실제 이용 수명, 수입 목제품의 수종 정보, 폐목재 재활용 경로 등을 반영한 한국형 자료 체계가 필요하다.

제3절 연구의 한계 및 후속 연구 과제

본 연구는 산림바이오매스 공급 정책의 구조적 문제를 통합적으로 분석하였으나, 자료와 방법 측면에서 몇 가지 한계를 가진다.

첫째, 탄소저장량 분석에 활용한 자료의 시계열이 제한적이다. 제4·5장 분석은 산림청 「목재이용실태조사」 2020~2024년 자료를 활용하였으나, 이는 HWP 품의 장기 변화를 안정적으로 추정하기에는 충분히 긴 기간이라고 보기 어렵다. 특히 코로나19 시기의 목재 수급 변동이 포함되어 있어, 향후 더 긴 시계열 자료를 활용한 검증이 필요하다.

둘째, 수입 가공품의 수종 정보가 충분히 확보되지 못했다. 산림청 통계는 원목에 대해서는 침엽수·활엽수 정보를 제공하지만, 완제품 형태로 수입되는 제재목, 합판, MDF 등에 대해서는 수종 정보가 제한적이다. 한국의 목재 자급률이 낮은 현실을 고려하면, 수입 목제품의 수종·용도·수명 정보 부족은 HWP 탄소저장량 산정의 중요한 불확실성으로 남는다.

셋째, 반감기 추정은 기존 연구의 산업 투입 비율을 활용하였기 때문에 최근의 산업 구조 변화를 충분히 반영하지 못했을 가능성이 있다. 목조건축 확대, 바이오매스 발전 증가, 목질패널 산업 변화 등은 목제품의 실제 이용 수명과 폐기·재활용 경로에 영향을 미칠 수 있다. 특히 목질패널류는 민감도 분석에서 탄소저장량에 큰 영향을 미치는 항목으로 확인된 만큼, 제품별 실제 이용 수명에 대한 실측 연구가 필요하다.

넷째, 이해관계자 분석은 목적표집 방식으로 수행되어 주요 행위자의 경험과 인식을 심층적으로 파악하는 데에는 적합했으나, 모든 정책 대상자의 경험을 대표한다고 보기는 어렵다. 소규모 영세 산주, 비조합 소속 별채업자, 오지 산촌 주민, 지역 노동자 등 정책 주변부 행위자의 경험은 후속 연구에서 더 폭넓게 다룰 필요가 있다.

후속 연구는 이러한 한계를 보완하는 방향에서 추진될 필요가 있다. 우선 단별기 벌채와 바이오매스 공급 확대가 토사유출, 생물다양성, 수원함양, 경관, 탄소저장 기능에 미치는 생태적 외부효과를 정량화해야 한다. 또한 REC와 보조금을 포함한 재정지원 구조의 사회적 비용을 분석하고, 산림바이오매스와 다른 재생에너지원의 경제성 및 탄소감축 단가를 비교할 필요가 있다. 아울러 목제품별 실제 이용 수명, 폐목재 재활용률, 카스케이딩 경로, 수입 가공품의 수종 정보 등 한국형 HWP 회계 체계를 정밀화하기 위한 실측 기반 자료 구축이 요구된다.

제4절 종합 논의

본 연구는 산림바이오매스 정책을 단기 에너지 공급정책이 아니라 산림의 장기 가치 관리 정책으로 재정립할 필요가 있음을 확인하였다. 산림은 연료재 공급원이기 이전에 탄소를 저장하고, 생물다양성을 유지하며, 토양과 수문을 조절하고, 지역사회와 미래 세대의 삶을 지탱하는 복합 생태계이다.

따라서 산림바이오매스 정책의 지속가능성은 공급량, 발전량, 보조금 집행액만으로 평가되어서는 안 된다. 앞으로의 정책 판단은 해당 정책이 산림의 탄소저장 기능을 높이는지, 생태계의 건강성을 훼손하지 않는지, 지역사회와 산주 및 산림경영 주체의 경제적 기반을 약화시키지 않는지를 함께 고려해야 한다. 이러한 기준을 충족하지 못하는 정책은 재생에너지 확대라는 명분만으로 정당화되기 어렵다.

기후위기 시대의 산림정책은 산림을 단기적으로 이용할 자원으로 볼 것인지, 장기적인 탄소저장과 생태계서비스의 기반으로 관리할 것인지에 대한 선택을 요구한다.

본 연구의 분석 결과는 산림바이오매스 정책이 후자의 방향, 즉 산림의 장기 가치와 생태적 지속가능성을 중심에 두는 방향으로 전환되어야 함을 보여준다.

I. 국내 문헌

1. 단행본 및 학술자료

1. 기후솔루션. (2025). 우리 숲, 발전소 연기로 사라지다: 미이용 산림바이오매스의 실태와 개선 방안[정책보고서].
2. 김기동. (2024). *2024 산림임업 전망: 목재산업 부흥발표자료*. 국립산림과학원 산림정책연구과. 2024 산림임업 전망 대회, 전경련회관, 서울.
3. 김기동·신현섭·이승우 (2025). 『산림산업경제동향 2025 여름호』. 연구자료 제1171호. 국립산림과학원.
4. 김세미, 박수배, & 김은식. (2013). 일본잎갈나무조림지의 생태적 변화와 그 결과를 통해 확인된 복원 효과. *생태와 환경*, 46(2), 241-250.
5. 김영환. (2016). 국가산림자원조사와 모델을 활용한 우리나라 산림지 온실가스 인벤토리 개선 방안. *한국기후변화학회지*, 7(2), 117-126.
6. 김영환, 이선정, 임종수, 손영모, & 김래현. (2016). 국가 온실가스 통계 산정을 위한 임목 축적 재계산. *한국기후변화학회지*, 7(4), 391-399.
7. 김은숙, 정병헌, 배재수, & 임종환. (2022). 시계열 국가산림자원조사 자료를 이용한 전국 산림의 임상 변화 특성 분석과 미래 전망. *한국산림과학회지*, 111(4), 461-472.
8. 김정흠. (2024). 산사태 위험도 분석을 위한 영향인자에 관한 연구. *한국지반신소재학회논문집*, 23(4), 31-39. <https://doi.org/10.12814/jkgss.2024.23.4.031>
9. 김진용, 이은재, 최창용, 이우신, & 임주훈. (2015). 산불 후 복원방법의 차이가 번식기 조류 군집에 미치는 영향. *한국환경생태학회지*, 29(4), 508-515. <http://dx.doi.org/10.13047/KJEE.2015.29.4.508>
10. 박상병, 김만조, 박윤미, 황석인, & 김의경. (2012). 곰취 임간재배 수익성 분석. *한국산림과학회지*, 101(3), 426-433.
11. 박상병, 김만조, & 김의경. (2014). 산마늘 임간재배와 노지재배의 수익성 비교 분석. *한국산림과학회지*, 103(1), 122-128.
12. 송한새·윤미향 의원실. (2023). 대한민국 산림의 멸감화: 산림바이오매스 에너지 정책의 문제와 개선방안(2023년도 국정감사 정책보고서).
13. 양현영, 강민석, 김준, 류다운, 김수진, 천정화, 임종환, 박찬우, & 윤순진. (2021). 광릉 낙엽활엽수 노령림의 CO₂ 수지 역학: 15년 관측으로부터의 교훈. *한국농림기상학회지*,

- 23(4), 198-221.
14. 이상민, 김경덕, & 송성환. (2013). *임산물 수급모형 구축 및 전망*(연구보고서 R706). 한국농촌경제연구원.
 15. 이선정, 임종수, 손영모, & 김래현. (2016). 국가 산림자원조사 자료 기반 임목축적 추정 시스템 구축. *한국기후변화학회지*.
 16. 이수동, 조미연, & 김선희. (2019). 도시 산림공원의 체험형 자연교육 프로그램 개발 연구: 수원시 영흥공원을 대상으로. *한국환경생태학회지*, 33(6), 725-738.
 17. 이수인, 이경재, 한봉호, & 김종엽. (2018). 한국에 분포하는 참나무류와 소나무류의 초기 정착에 미치는 요인은 무엇일까? *한국환경생태학회 학술대회논문집*, 28(2), 31.
 18. 이수호, & 박영대. (2024). 가리왕산 천연활엽수림 주요 수종의 탄소저장량 비교. *농업생명과학연구*, 58(5), 59-69.
 19. 이재정. (2025). 국립산림과학원 내부 보고 자료. 국립산림과학원.
 20. 장은경. (2021). 수확목제품의 이용 특성을 고려한 탄소 저장량 산정 연구[박사학위논문]. 서울대학교 농업생명과학대학.
 21. 장예나, 김성희, 한봉호, & 최진우. (2019). 도시 산림공원의 체험형 자연교육 프로그램 개발 연구: 수원 영흥공원을 대상으로. *한국조경학회지*, 47(6), 12-23.
 22. 최수임, 이수민, & 주린원. (2010). 목제품 내 탄소 저장량 추정: 계정 방법 및 시사점. *목재공학*, 38(6), 507-517.
 23. Cheon, K., Lee, E.-S., & Park, B.-J. (2025). Elevation-driven variations in species composition and biodiversity in a protected temperate forest, Mount Gyeongbongsan, Korea. *Diversity*, 17, 828.
 24. Cho, M. J. (2019). Forest biomass supply chain management for regional self-sufficient thermal energy utilization[Doctoral dissertation, Kangwon National University].
 25. Jeong, G., Shim, W., Lee, J., & Ji, D. (2024). Effective sampling design for assessing forest soil carbon stocks and environmental correlations. *Journal of the Korean Geographical Society*, 59(4), 471-486.
 26. Lee, K. H., Lim, J. H., Bae, J. S., Kim, J. M., Chong, S. K., & Son, Y. M. (2003). Second national communication of the Republic of Korea under the United Nations framework convention on climate change(National Institute of Forest Science Research Data No. 211). *National Institute of Forest Science*.
 27. Lee, M.-K., Chun, J.-H., & Lee, C.-B. (2025). Relative importance of biotic, abiotic and stand age factors in influencing ecosystem multifunctionality across forest stand types in South Korea. *Frontiers in Forests and Global Change*. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2025.1675167>
 28. Lee, S., Lee, S., Shin, J., Yim, J., & Kang, J. (2020). Assessing the carbon

- storage of soil and litter from National Forest Inventory data in South Korea. *Forests*, 11, 1318.
29. Li, Y., Han, S. H., & Son, Y. (2010). Development of carbon emission factors for major coniferous species in Korea. *Journal of Korean Forest Society*, 99(4), 543-548.
 30. Mun, G., & Lim, J. (2021). Changes in carbon stocks of coarse woody debris in National Forest Inventories: Focus on Gangwon Province. *Journal of Korean Society of Forest Science*, 110(2), 233-243.
 31. Pyo, J. K., Son, Y. M., Lee, K. H., & Lee, Y. J. (2010). Basic wood density and biomass expansion factor for Korean major tree species. *Journal of Korean Forest Society*, 99(6), 853-859.
 32. Seo, Y. O., Lee, Y. J., Pyo, J. K., Kim, R. H., Son, Y. M., & Lee, K. H. (2011a). Aboveground biomass equations for *Larix kaempferi*(Lamb.) Carr. in central regions of South Korea. *Forest Science and Technology*, 17(4), 145-149.
 33. Seo, Y. O., Lee, Y. J., & Lee, K. H. (2011b). Aboveground biomass and carbon stock estimation for *Quercus mongolica* forests in South Korea. *Journal of Korean Forest Society*, 100(3), 467-473.
 34. Son, Y. M. (2007). Estimation of forest biomass in Korea. *Journal of Korean Forest Society*, 96(4), 477-482.
 35. Son, Y. M., Lee, K. H., Kim, R. H., Pyo, J. K., Park, I. H., Son, Y., Lee, Y. J., & Hwang, J. S. (2014a). *Carbon emission factors and biomass allometric equations by species in Korea*. Korea Forest Research Institute.
 36. Son, Y. M., Lee, K. H., & Kim, R. H. (2014b). Estimation of carbon emission factors for major tree species in Korea. *Journal of Climate Change Research*, 5(3), 213-220.
 37. Youn, Y.-C., Lee, S.-E., Lee, S.-J., & Kim, H.-R. (2026). Human activities and wildfires: The impact of forest roads, trails, and forest management on wildfire occurrence. *Preprints*. <https://doi.org/10.20944/preprints202604.1451.v1>
 38. Yun, S., Choi, S. M., Lee, J. W., & Park, S. M. (2022). Estimation of unused forest biomass potential resource amount in Korea. *Korean Journal of Agricultural Science*.

2. 법령/조례

39. 목재의 지속가능한 이용에 관한 법률, 법률 제19837호 (2024).
40. 목재의 지속가능한 이용에 관한 법률 시행규칙, 산림청령 제107호 (2024).

41. 보조금 관리에 관한 법률, 법률 제20204호 (2024). <https://www.law.go.kr>
42. 산림자원의 조성 및 관리에 관한 법률, 법률 제20354호 (2024). <https://www.law.go.kr>
43. 산림자원의 조성 및 관리에 관한 법률 시행규칙, 산림청령 제103호 (2024). <https://www.law.go.kr>
44. 산림청. (2022). 산림바이오매스에너지의 이용·보급 촉진에 관한 규정 [산림청고시 제 2022-82호, 2022. 8. 26. 시행]. 국가법령정보센터.
45. 산업통상자원부. (2025). 신·재생에너지 공급의무화제도 및 연료 혼합의무화제도 관리·운영지침 [산업통상자원부고시 제2025-79호, 2025. 5. 20., 일부개정]. 산업통상자원부.
46. 신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법, 법률 제20360호 (2024). <https://www.law.go.kr>
47. 임업 및 산촌 진흥 촉진에 관한 법률. <https://www.law.go.kr>
48. 기후에너지환경부. (2025). 신·재생에너지 공급의무화제도 및 연료 혼합의무화제도 관리·운영지침 [기후에너지환경부고시 제2025-3호, 2025. 10. 2. 시행]. 국가법령정보센터.

3. 정부 및 지자체 발간 자료

49. 국립산림과학원. (2019). 주요 산림수종의 표준 탄소흡수량.
50. 국립산림과학원. (2020a). 국가산림자원조사(NFI) 보고서.
51. 국립산림과학원. (2020b). 산림기본통계.
52. 국립산림과학원. (2020c). 임분수확표.
53. 국립산림과학원. (2020d). 산림 분야 국가 고유 탄소 배출·흡수계수.
54. 기후에너지환경부. (2025). 신·재생에너지 공급의무화제도 및 연료 혼합의무화제도 관리·운영지침(기후에너지환경부 고시 제2025-3호). 기후에너지환경부.
55. 산림청. (2020a). 산림기본통계.
56. 산림청. (2020b). 지속가능한 산림자원 관리지침.
57. 산림청. (2020-2024). 산림임업통계연보.
58. 산림청. (2021a). 제5차 전국임도기본계획(2021~2030).
59. 산림청. (2021b-2024). 목재이용실태조사 (2020년 기준~2024년 기준).
60. 산림청. (2023). 제3차 탄소흡수원 증진 종합계획(2023~2027).
61. 산림청. (2024a). 제3차 목재이용종합계획(2025~2029).
62. 산림청. (2024b). 목재수급실적 (시계열 자료). https://www.forest.go.kr/kfsweb/kfi/kfs/cms/cmsView.do?cmsId=FC_003774
63. 산림청. (2024c). 2024년도 성과관리 시행계획.
64. 산림청. (2024d). 입목벌채 통계 (시계열 자료). <https://kfss.forest.go.kr>
65. 산림청. (2025a). 미이용 산림바이오매스 수집·증명 업무 처리 지침.
66. 산림청. (2025b). 산림임업통계연보 제55호.

67. 산림청. (2025c). 산림청 예산 현황 2025년도.
68. 산림청. (2025d). 조림·육림 사업비 지원 기준 및 단가.
69. 산림청. (2025e, December 2). 2026년 산림분야 예산 3조원 시대 개막 [보도자료].
70. 산림청. (2026). 2026년도 예산 및 기금운용계획 사업설명자료(Ⅱ-1).
71. 산업통상자원부, 산림청, 환경부. (2024, December 18). 바이오매스 발전의 수입의존도 완화한다: 국내산림 이용활성화를 위한 목질계 바이오매스 개선방안 [관계부처 합동 보도자료]. 대한민국 정책브리핑.
72. 온실가스종합정보센터. (2024). 2024년 국가 온실가스 인벤토리 보고서(NIR). 환경부 온실가스종합정보센터.
73. 통계청. (2020). 2020년 농림어업총조사.
74. 한국농촌경제연구원. (2017). 목재 수급 현황 및 전망.
75. 한국임업진흥원. (2022). 목재이용실태조사 분류 체계 및 통계 활용 안내.
76. 한국은행. (각 연도). 건설투자지표. 한국은행 경제통계시스템(ECOS).

4. 웹사이트/기타 온라인 자료

77. EG-TIPS. (2024). 목재산업 현황. 에너지온실가스 종합정보 플랫폼.
<https://tips.energy.or.kr>
78. 나무신문. (2024). 제재목·합판 및 보드류 수급 동향과 전망. 나무신문 포커스&트렌드.
<https://www.imwood.co.kr>
79. 르몽드 디플로마티크. (2025, March 26). 수입 우드 펠릿 REC, 2025년부터 일몰 확정.
르몽드 디플로마티크.
<https://www.ilemonde.com/news/articleView.html?idxno=20354>
80. 산림청. (n.d.-a). 미이용 산림바이오매스 정의 및 근거법령.
https://www.forest.go.kr/kfswweb/kfi/kfs/cms/cmsView.do?cmsId=FC_003563&mn=AR01_04_05_01
81. 산림청. (n.d.-b). 미이용 산림바이오매스 증명절차.
https://www.forest.go.kr/kfswweb/kfi/kfs/cms/cmsView.do?cmsId=FC_003564&mn=AR01_04_05_02
82. 산림청. (n.d.-c). 목재생산업 등록 안내.
https://eng-nifos.forest.go.kr/kfswweb/kfi/kfs/cms/cmsView.do?cmsId=FC_001017&mn=AR01_04_01_04
83. 산림청. (n.d.-d). 목재수급 현황 자료 (별채 사업종별 산물 수집률).
<https://www.forest.go.kr>
84. 산림청. (2025f). 목재수급(원목 포함) 실적. e-나라지표.
https://www.index.go.kr/unity/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1303

85. 산림청. (2025g). 국내조림 및 숲가꾸기 현황. e-나라지표.
https://www.index.go.kr/unity/potal/main/EachDtIPageDetail.do?idx_cd=1304
86. 산림청. (2025h). 숲가꾸기 지원 안내.
https://nfsv.forest.go.kr/kfswb/kfi/kfs/cms/cmsView.do?cmsId=FC_000972
87. 한국에너지공단 신·재생에너지센터. (n.d.-a). 신재생에너지 공급의무화제도(RPS) 안내.
<https://www.knrec.or.kr>
88. 한국에너지공단 신·재생에너지센터. (n.d.-b). 신재생에너지 공급인증서(REC) 발급 절차.
<https://www.knrec.or.kr>
89. 한국에너지공단 신재생에너지센터. (n.d.-c). 공급의무화(RPS) 안내.
https://www.knrec.or.kr/biz/introduce/new_rps/intro_rps.do?gubun=A
90. 한국임업신문. (2026, January 8). 2026년 산림금융 대전환. 한국임업신문.
<https://www.kfnews.co.kr/news/articleView.html?idxno=4474>

II. 해외 문헌

1. 단행본 및 학술자료

91. Anderson-Teixeira, K. J., Wang, M. M. H., McGarvey, J. C., & LeBauer, D. S. (2016). Carbon dynamics of mature and regrowth tropical forests derived from a pantropical database (TropForC-db). *Global Change Biology*, 22(5), 1690–1709. <https://doi.org/10.1111/gcb.13226>
92. Bogner, A., Littig, B., & Menz, W. (2009). *Interviewing experts*. Palgrave Macmillan.
93. Bozzolan, N., et al. (2024). Options to improve the carbon balance of the harvested wood products sector in four EU countries. *GCB Bioenergy*, 16, e13104. <https://doi.org/10.1111/gcbb.13104>
94. Braun, V., & Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology*, 3(2), 77–101. <https://doi.org/10.1191/1478088706qp063oa>
95. Brunet-Navarro, P., Jochheim, H., Kroiher, F., & Muys, B. (2018). Effect of cascade use on the carbon balance of the German and European wood sectors. *Journal of Cleaner Production*, 170, 137–146. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.132>
96. Carroll C, Noon BR, Masino SA and Noss RF (2025) Coordinating old-growth conservation across scales of space, time, and biodiversity: lessons from the US policy debate. *Front. For. Glob. Change* 8:1493879. doi: 10.3389/ffgc.2025.1493879

97. Creswell, J. W. (2013). *Qualitative inquiry and research design: Choosing among five approaches*(3rd ed.). SAGE Publications.
98. Creswell, J. W., & Poth, C. N. (2018). *Qualitative inquiry and research design: Choosing among five approaches*(4th ed.). SAGE Publications.
99. Denzin, N. K. (1978). *The research act: A theoretical introduction to sociological methods*(2nd ed.). McGraw-Hill.
100. Eora Multi-Region Input-Output Database. Lenzen, M., Kanemoto, K., Moran, D., & Geschke, A. (2012–2024). <https://worldmrio.com>
101. European Commission. (2015). *Closing the loop – An EU action plan for the circular economy*(COM(2015) 614 final). Publications Office of the European Union.
102. Faustmann, M. (1849). Berechnung des Werthes, welchen Waldboden, sowie noch nicht haubare Holzbestände für die Waldwirtschaft besitzen. *Allgemeine Forst- und Jagd-Zeitung*, 25, 441–455. (Reprinted in *Journal of Forest Economics*, 1(1), 7–44, 1995)
103. Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., Chapin, F. S., Coe, M. T., Daily, G. C., Gibbs, H. K., Helkowski, J. H., Holloway, T., Howard, E. A., Kucharik, C. J., Monfreda, C., Patz, J. A., Prentice, I. C., Ramankutty, N., & Snyder, P. K. (2005). Global consequences of land use. *Science*, 309(5734), 570–574. <https://doi.org/10.1126/science.1111772>
104. Gilhen-Baker, M., et al. (2022). Old growth forests and large old trees as critical organisms.
105. Gleixner, G., Tefs, C., Jordan, A., Hammer, M., Wirth, C., Poulton, P., Gruneberg, E., Bernsdorf, S., & Schulze, E.-D. (2009). Soil carbon accumulation in old-growth forests. In C. Wirth, G. Gleixner, & M. Heimann (Eds.), *Old-growth forests: Function, fate and value*(pp. 231–266). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-92706-8_11
106. Government of Japan. (2021). *Vision for a decarbonized society and the promotion of sustainable wood use*. Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries.
107. Guest, G., Bunce, A., & Johnson, L. (2006). How many interviews are enough? An experiment with data saturation and variability. *Field Methods*, 18(1), 59–82. <https://doi.org/10.1177/1525822X05279903>
108. Hardin, G. (1968). The tragedy of the commons. *Science*, 162(3859), 1243–1248. <https://doi.org/10.1126/science.162.3859.1243>
109. Hartman, R. (1976). The harvesting decision when a standing forest has value.

- Economic Inquiry, 14(1), 52-58.
<https://doi.org/10.1111/j.1465-7295.1976.tb00377.x>
110. Hashimoto, S., & Moriguchi, Y. (2004). Carbon flow and stock in harvested wood products in Japan from 1960 to 2000. *Resources, Conservation and Recycling*, 41(2), 81-91. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2003.08.001>
 111. Hill, M., & Hupe, P. (2014). *Implementing public policy: An introduction to the study of operational governance*(3rd ed.). SAGE Publications.
 112. Hooghe, L., & Marks, G. (2003). Unraveling the central state, but how? Types of multi-level governance. *American Political Science Review*, 97(2), 233-243. <https://doi.org/10.1017/S0003055403000649>
 113. IPCC. (2006). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Vol. 4. Agriculture, forestry and other land use. Chapter 12: Harvested wood products(H. S. Eggleston et al., Eds.). IGES.
 114. IPCC. (2013). *Revised supplementary methods and good practice guidance arising from the Kyoto Protocol*(T. Hiraishi et al., Eds.). IPCC.
 115. IPCC. (2019). *2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Vol. 4. Agriculture, forestry and other land use. Chapter 12: Harvested wood products*(E. Calvo Buendia et al., Eds.). IPCC.
 116. Karjalainen, T., Kellomäki, S., & Pussinen, A. (1994). Role of wood-based products in absorbing atmospheric carbon. *Silva Fennica*, 28(2), 67-80. <https://doi.org/10.14214/sf.a9163>
 117. Karjalainen, T., Pussinen, A., Kellomäki, S., & Mäkipää, R. (1999). Scenarios for the carbon balance of Finnish forests and wood products. *Environmental Science & Policy*, 2(2), 165-175. [https://doi.org/10.1016/S1462-9011\(99\)00008-3](https://doi.org/10.1016/S1462-9011(99)00008-3)
 118. Kayo, C., Tojo, S., Iwaoka, M., & Matsumoto, T. (2015). Climate change mitigation effect of harvested wood products in regions of Japan. *Carbon Balance and Management*, 10, 24. <https://doi.org/10.1186/s13021-015-0034-3>
 119. Kvale, S., & Brinkmann, S. (2009). *InterViews: Learning the craft of qualitative research interviewing*(2nd ed.). SAGE Publications.
 120. Lewis, S. L., Wheeler, C. E., Mitchard, E. T. A., & Koch, A. (2019). Restoring natural forests is the best way to remove atmospheric carbon. *Nature*, 568(7750), 25-28. <https://doi.org/10.1038/d41586-019-01026-8>
 121. Lipsky, M. (1980). *Street-level bureaucracy: Dilemmas of the individual in public services*. Russell Sage Foundation.
 122. Lozano-García, J. M., et al. (2021). Determination of the optimal size and location of an electricity generation plant that uses lignocellulosic residues.

- Energy*, 223, 120017.
123. Luyssaert, S., Schulze, E. D., Börner, A., Knohl, A., Hessenmöller, D., Law, B. E., Ciais, P., & Grace, J. (2008). Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature*, 455(7210), 213-215. <https://doi.org/10.1038/nature07276>
 124. Majdanová, L., Morrissey, R. C., Cada, V., Bace, R., Janda, P., Jamrichová, E., & Svoboda, M. (2023). Long unmanaged forests provide important refugia for old-growth-associated species. *Forest Ecology and Management*, 547, 121373. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121373>
 125. Mantau, U. (2012). *Wood flows in Europe (EU 27)*. EFI Project Report.
 126. Marshall, C., & Rossman, G. B. (2014). *Designing qualitative research(6th ed.)*. SAGE Publications.
 127. Matsumoto, R., Kayo, C., Kita, S., Nakamura, K., Lauk, C., & Funada, R. (2022). Estimation of carbon stocks in harvested wood products of buildings in Japan. *Journal of Wood Science*, 68, 35. <https://doi.org/10.1186/s10086-022-02043-6>
 128. *Millennium Ecosystem Assessment. (2005). Ecosystems and human well-being: Synthesis*. Island Press.
 129. Olsson, O., Bruce, L., Hektor, B., Roos, A., Guissson, R., Lamers, P., Hartley, D., Ponitka, J., Hildebrandt, J., Thrän, D., Hanssen, S. V., Nordin, A., & IEA Bioenergy Task 40. (2016). *Cascading of woody biomass: Definitions, policies and effects on international trade*. IEA Bioenergy.
 130. Ostrom, E. (1990). *Governing the commons: The evolution of institutions for collective action*. Cambridge University Press.
 131. Patton, M. Q. (2015). *Qualitative research and evaluation methods: Integrating theory and practice(4th ed.)*. SAGE Publications.
 132. Pingoud, K., Perälä, A.-L., Soimakallio, S., & Pussinen, A. (2003). *Greenhouse gas impacts of harvested wood products: Evaluation and development of methods(VTT Research Notes 2189)*. VTT Technical Research Centre of Finland.
 133. Pingoud, K., Pohjola, J., & Valsta, L. (2010). Assessing the integrated climatic impacts of forestry and wood products. *Silva Fennica*, 44(1), 155-175. <https://doi.org/10.14214/sf.164>
 134. Poljatschenko, V., & Valsta, L. (2021). Carbon emissions displacement effect of Finnish mechanical wood products by dominant tree species. *Silva Fennica*, 55(5), 10391. <https://doi.org/10.14214/sf.10391>
 135. Purkus, A., Lüdtkke, J., Becher, G., et al. (2019). *Evaluation der Charta für Holz*

- 2.0: *Methodische Grundlagen und Evaluationskonzept*(Thünen Report 68).
 Johann Heinrich von Thünen-Institut.
<https://doi.org/10.3220/REP1553524483000>
136. Raudsepp-Hearne, C., Peterson, G. D., Tengö, M., Bennett, E. M., Holland, T., Benessaiah, K., MacDonald, G. K., & Pfeifer, L. (2010). *Untangling the environmentalist's paradox: Why is human well-being increasing as ecosystem services degrade?* *BioScience*, 60(8), 576-589.
<https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.8.4>
137. Salamon, L. M. (Ed.). (2002). *The tools of government: A guide to the new governance*. Oxford University Press.
138. Samuelson, P. A. (1976). *Economics of forestry in an evolving society*. *Economic Inquiry*, 14(4), 466-492.
<https://doi.org/10.1111/j.1465-7295.1976.tb00437.x>
139. Schmitz, N., Bolte, A., Iost, S., et al. (2024). *Charta für Holz 2.0: Kennzahlenbericht 2022/2023 Forst & Holz*. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe.
140. Shackleton, C., & Shackleton, S. (2004). The importance of non-timber forest products in rural livelihood security and as safety nets: A review of evidence from South Africa. *South African Journal of Science*, 100(11-12), 658-664.
141. Sirkin, T., & ten Houten, M. (1994). The cascade chain: A theory and tool for achieving resource sustainability with applications for product design. *Resources, Conservation and Recycling*, 10(3), 213-276.
[https://doi.org/10.1016/0921-3449\(94\)90016-7](https://doi.org/10.1016/0921-3449(94)90016-7)
142. Skog, K. E. (2008). Sequestration of carbon in harvested wood products for the United States. *Forest Products Journal*, 58(6), 56-72.
143. Skog, K. E., Pingoud, K., & Smith, J. E. (2004). A method countries can use to estimate changes in carbon stored in harvested wood products and the uncertainty of such estimates. *Environmental Management*, 33(Suppl. 1), S65-S73.
144. Stephenson, N. L., Das, A. J., Condit, R., Russo, S. E., Baker, P. J., Beckman, N. G., Coomes, D. A., Lines, E. R., Morris, W. K., Rüger, N., Álvarez, E., Blundo, C., Bunyavejchewin, S., Chuyong, G., Davies, S. J., Duque, Á., Ewango, C. N., Flores, O., Franklin, J. F., ... Zavala, M. A. (2014). Rate of tree carbon accumulation increases continuously with tree size. *Nature*, 507(7490), 90-93.
<https://doi.org/10.1038/nature12914>
145. TEEB. (2010). *The economics of ecosystems and biodiversity: Mainstreaming*

the economics of nature. UNEP.

146. Tsunetsugu, Y., & Tonosaki, M. (2010). Quantitative estimation of carbon removal effects due to wood utilization up to 2050 in Japan. *Journal of Wood Science*, 56(4), 339-344. <https://doi.org/10.1007/s10086-010-1105-y>
147. Yuan, Z., Ali, A., Jucker, T., Ruiz-Benito, P., Wang, S., Cao, M., Lin, F., Shi, H., Ye, J., Hao, Z., & Loreau, M. (2018). Multiple abiotic and biotic pathways shape biomass demographic processes in temperate and tropical forests. *Ecology*, 99(4), 865-875. <https://doi.org/10.1002/ecy.2166>

2. 국제기구 및 정책 자료

148. European Commission. (2021). *New EU Forest Strategy for 2030*. Publications Office of the European Union. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021DC0572>
149. European Parliament & Council of the European Union. (2018). Directive (EU) 2018/2001 on the promotion of the use of energy from renewable sources (Recast) [RED II]. *Official Journal of the European Union*, L 328, 82-209. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32018L2001>
150. European Parliament & Council of the European Union. (2023). Directive (EU) 2023/2413 amending Directive (EU) 2018/2001 as regards the promotion of energy from renewable sources [RED III]. *Official Journal of the European Union*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32023L2413>
151. European Union. (2023). Primary and old-growth forests are more resilient to natural disturbances: *Perspective on wildfires(JRC133970)*. *Joint Research Centre*.
152. FAOSTAT. (2024). *Forestry production and trade statistics*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>
153. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2018). *The state of the world's forests 2018: Forest pathways to sustainable development*. FAO. <https://doi.org/10.18356/c4d9ef80-en>
154. IPCC. (2003). *Good practice guidance for land use, land-use change and forestry*(J. Penman et al., Eds.). Institute for Global Environmental Strategies.
155. IPCC. (2014). *2013 supplement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Wetlands*(T. Hiraishi et al., Eds.). IPCC.

156. Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being: Synthesis*. Island Press.
157. Official Statistics of Finland. (2020). *Greenhouse gas emissions in Finland 1990 to 2019*. Statistics Finland.
158. UNFCCC. (2011). Decision 2/CMP.7: Land use, land-use change and forestry. Durban Climate Change Conference.
159. United Nations. (2017). United Nations strategic plan for forests 2017-2030. United Nations Forum on Forests. https://www.un.org/esa/forests/wp-content/uploads/2016/03/UNSPF_ENG.pdf

3. 웹사이트/기타 온라인 자료

160. International Energy Agency. (2025). Ensuring a strong labour dimension for just and inclusive energy transitions. IEA.