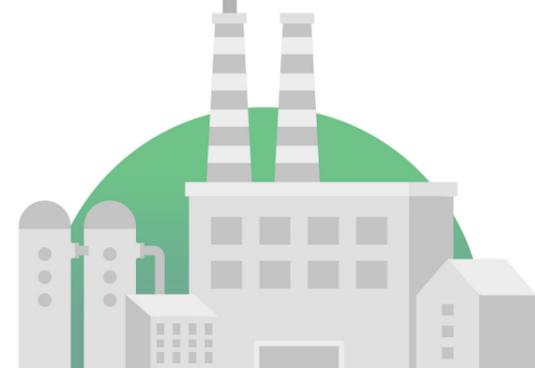




2050 탄소중립을 위한 한국 철강 부문의 탄소중립 경로



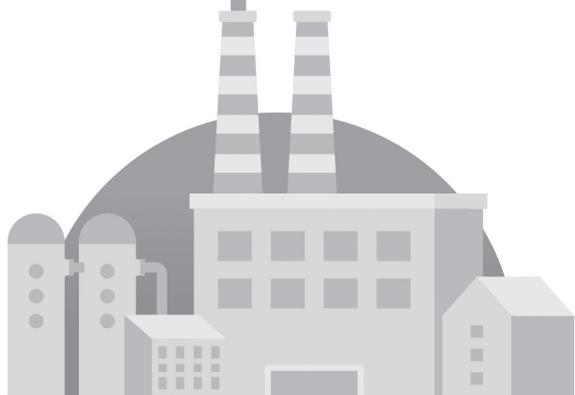


Supported by:

This publication was produced with the financial support of the European Union's Partnership Instrument. Its contents are the sole responsibility of Solutions for Our Climate (SFOC) and do not necessarily reflect the views of the European Union.



2050 탄소중립을 위한 한국 철강 부문의 탄소중립 경로



한국 철강 부문의 2050 탄소중립 경로: 한국형 통합평가모형 분석

발간일 2022년 03월
저자 엄지용, 이한주, 김한웅, 정다운, 류광남 (KAIST)
Sha Yu, Haewon McJeon (PNNL)
김주진, 김근하 (기후솔루션)
디자인 (주)네모연구소
문의 (사)기후솔루션 김근하 연구원 | geunha.kim@fourclimate.org

목차

핵심 요약	2
1.0 서론	3
1.1 2050 탄소중립 선언 및 국가 온실가스 감축 목표	3
1.2 산업·철강 부문 온실가스 배출 현황 및 감축 수단	3
1.3 보고서의 구성	5
2.0 본론	6
2.1 시나리오 설계	6
2.2 철강 부문 세부 기술 표현 및 구조	7
2.3 국가 온실가스 배출량 분석 결과	8
2.4 1차 에너지 분석 결과	10
2.5 전력 및 수소 생산 부문 분석 결과	11
2.6 최종 에너지 부문 분석 결과	13
2.6.1 산업 부문 분석 결과	14
2.6.2 철강 부문 분석 결과	15
3.0 결론 및 고찰	17
3.1 철강 부문 탈탄소 달성 방향	17
3.2 정책 권고	18
4.0 부록	19
4.1 철강 부문 생산기술 비용 전망	19
4.2 GCAM 모형	20
5.0 참고문헌	21

핵심 요약

탄소중립 목표 달성을 위해서는 온실가스 배출이 많고 탄소·에너지 집약적인 산업 부문의 탈탄소가 필수불가결하다. 에너지 집약적인 우리나라의 산업구조 특성상, 전체 온실가스 배출량 중 산업 부문 온실가스 배출량은 에너지 공급 부문과 함께 가장 큰 비중을 차지한다(‘17년 기준). 그 중에서도 철강 부문은 2018년 기준 산업 세부 업종 중에서도 가장 많은 온실가스 배출을 하고 있어(산업 부문 전체 온실가스 배출의 39%, 우리나라 전체 온실가스 배출량의 13.1%) 급격한 탈탄소가 요구되는 영역이다.

2050 탄소중립 선언 이후, NDC 상향안과 탄소중립 시나리오안이 발표되면서 2030년과 2050년 온실가스 감축목표 달성을 위한 철강 부문에서의 온실가스 감축 수단이 본격적으로 논의되기 시작하였고, 학계, 산업계, 시민사회 등 각계 전문가들이 탄소중립 달성을 위한 산업 세부 업종별 온실가스 감축 정책 및 기술개발 계획을 제시하고 있다. 그러나 철강 부문에서는 우리나라 경제 활동 전반과 이에 따른 온실가스 배출을 연계한 통합평가모형 기반의 일관성 있는 탈탄소 시나리오 평가 연구가 아직 제시되지 않았다.

본 보고서는 한국형 통합평가모형인 GCAM-KAIST1.0에서 한국 산업 부문의 세부 업종, 특히 철강 부문을 확장하여 개발한 GCAM-KAIST2.0 모형을 활용해 내적 일관성을 확보한 온실가스 배출 시나리오를 제시하였고, 이를 통해 국가 온실가스 감축 목표 달성을 위해 철강 부문에 요구되는 변화를 평가하고 다음과 같은 시사점들을 제안하였다.

첫째, 2050년 잔존 석탄 및 가스 에너지 소비에 따라 우리나라의 2050 탄소중립 목표 달성이 철강 부문의 탄소중립을 의미하지는 않는다. 2050년 철강 부문에 잔존하는 이산화탄소 직접배출을 상당 부분 상쇄하기 위해서는 간접배출 부문의 개선이 필요하다. 철강 산업의 전기화와 수소 에너지 소비 비중 증가가 이러한 철강 부문의 탈탄소에 핵심적인 역할을 하게 되는데, 이는 동시에 탄소중립을 달성하기 위해 재생에너지 발전량과 그린 수소 생산량을 증가시키기 위한 중장기 투자가 이루어져야 함을 의미한다.

둘째, 우리나라 2050 탄소중립 목표에 부합하는 철강 부문 탈탄소 경로 실현을 위해서는 수소환원제철 기술과 CCS 기술이 탑재된 직접환원철 기반 전기로 공정(DRI-EAF-CCS)의 빠른 확대 그리고 CCS 미탑재 고로의 빠른 퇴출이 필요하다. 또한, 철스크랩을 주 원료로 하는 전기로 역시 상당 부분 확대되어야 한다.

셋째, 철강 소비 효율 향상을 통한 철강 산출량 감소는 철강 온실가스 배출 감소에 크게 기여하지 못하지만, 발전량과 수소 생산량을 감소시킨다. 이는 탄소중립 목표 달성을 위한 전력 부문과 수소 생산 부문의 투자 계획에 있어, 철강의 소비 효율 향상에 대한 고려가 중요하다는 것을 시사한다.

1.0 서론

1.1 2050 탄소중립 선언 및 국가 온실가스 감축 목표

2020년 10월 대통령의 2050 탄소중립 선언(*대한민국 정부, 2020*)에 따라 ‘기후위기 대응을 위한 탄소중립 녹색성장 기본법(이하 탄소중립기본법)’이 2021년 9월 제정되었고, 대통령 직속 2050 탄소중립위원회(이하 탄중위)에서 2021년 10월 탄소중립 시나리오(안)을 공개하였다.

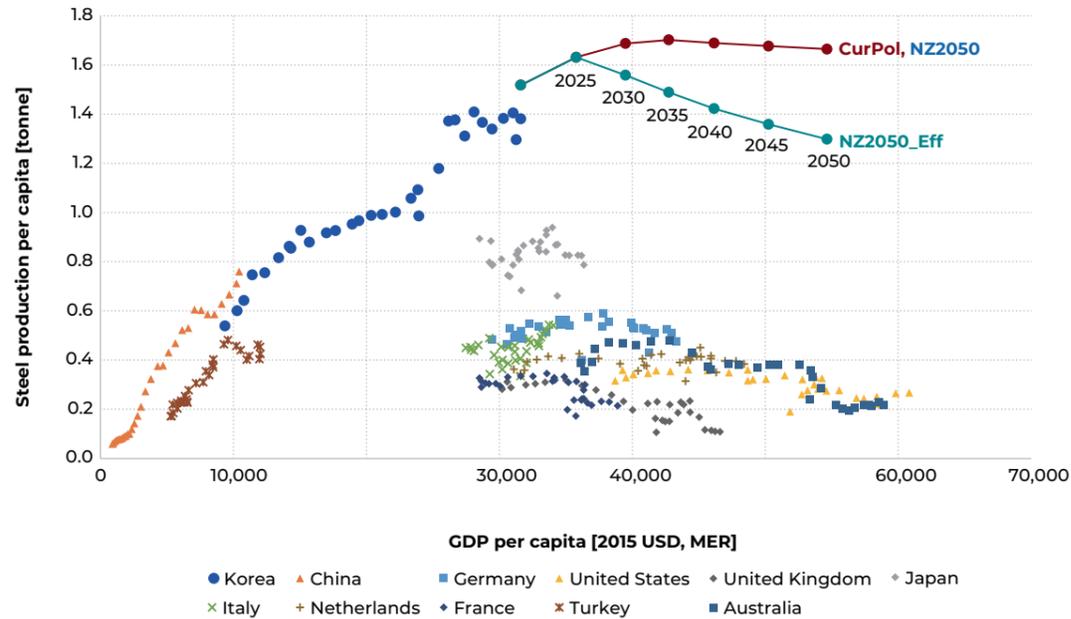
그리고 탄소중립 시나리오, 탄소중립기본법 및 국제 동향 등을 고려해 2018년 온실가스 총배출량인 787.6백만 톤 대비 40%를 감축하여 2030년 순배출량 436.6백만 톤을 달성하겠다는 국가 온실가스 감축 목표(Nationally Determined Contributions, NDC) 상향안을 같은 시기에 발표하였다. 상향된 NDC에 따라 산업 부문에서는 2018년 260.5백만 톤 대비 2030년까지 14.5% 감축한 222.6백만 톤 배출을 목표로 하며, 철강 산업은 배출량 감축을 위해 신 증설 설비를 고로에서 전기로로 대체하고 수소환원철 등 미래기술을 조기 상용화할 예정이다(*관계부처 합동, 2021a; 산업통상자원부, 2021*).

1.2 산업·철강 부문 온실가스 배출 현황 및 감축 수단

산업 부문의 온실가스 배출량은 우리나라 국가 배출량의 36%(2017년 기준, 간접 배출량 포함 시 54%)로, 에너지 공급 부문과 함께 배출량 비중이 가장 높아 대대적이고 급격한 온실가스 감축이 필요한 영역이다(*환경부, 2020*).

산업 부문의 온실가스 배출량 비중이 높은 이유는 에너지 집약적인 제조업 중심의 산업구조 특성 때문이다. 2017년 기준, 제조업의 온실가스 배출량은 철강이 1억 490만 톤CO₂eq, 석유화학 4,080만 톤CO₂eq, 시멘트 3,560만 톤CO₂eq, 정유 1,550만 톤CO₂eq 순이다. 이들 4개 산업이 산업 부문 온실가스의 약 76%를 배출한다. 특히, 우리나라는 대표적 온실가스 다배출 업종인 철강 금속 산업이 차지하는 배출 비중이 주요국 대비 가장 높은 것으로 나타났다(*KIET, 2021*). 그림 1과 같이, 우리나라의 1인당 철강 생산량은 다른 나라들과 비교했을 때 압도적으로 높다. 2018년 기준, 우리나라 철강 산업은 산업 부문에서 약 1억 100만 톤CO₂eq의 온실가스를 배출하였으며, 이는 산업 부문 온실가스 배출량의 39%, 우리나라 전체 온실가스 배출량의 13.1%에 해당한다(*기후솔루션, 2021*).

그림 1. 1990-2020 해외 주요국 1인당 철강 생산량 비교



출처: World Bank (2022), World Steel Association (2022)

2021년 10월 발표된 2030 NDC 상향안과 2050 탄소중립 시나리오안에 따르면, 2018년 기준 산업부문 온실가스 배출량인 260.5백만톤CO₂eq을 2030년까지 222.6백만 톤CO₂eq, 2050년까지 51.1백만 톤CO₂eq으로 감축할 예정이다. 철강 산업의 온실가스 감축을 위한 주요 수단으로는 수소 기술 활용 및 원료 재활용, 에너지 효율 개선, 이산화탄소 포집·저장 활용, 저탄소 연·원료 사용, 산업공정 배출 감축 등이 있다(에너지전환포럼, 2020).

철강 부문의 경우 구체적으로 신·증설 설비 대체(고로→전기로), 철스크랩 활용 전기로 조강 확대 및 수소환원제철 기술을 통한 탄소계 공정(고로+전로) 대체를 주요 감축 수단으로 계획하고 있다. 한국이 2050 탄소중립 목표를 달성하기 위해서는 현재 온실가스 배출 비중이 가장 높은 철강 부문의 전환 방향에 대한 면밀한 평가가 필요하다. 비록 전문가들이 탄소중립 달성을 위한 산업 세부 업종별 온실가스 감축 정책 및 각종 기술개발 계획을 제시하고 있고(관계부처 합동, 2021a; 관계부처 합동, 2021b; 산업통상자원부, 2021), 우리나라 철강 부문에 필요한 변화를 글로벌 단위의 통합평가모형 분석을 통해 제시한 여러 문헌도 있지만(Sha et al., 2021; Bataille et al., 2021), 국내 경제 활동 전반 및 에너지 시스템, 그리고 정책 현황에 따른 온실가스 배출이 연계된 통합평가모형을 기반으로 하는 일관성 있는 시나리오 평가연구는 아직 보고되지 않았다. 이 연구에서는 한국형 통합평가모형인 GCAM-KAIST1.0에서 한국 산업의 세부 업종, 특히 철강 부문을 확장한 GCAM-KAIST2.0 모형을 활용하였다. 이를 통해 내적 일관성을 확보한 온실가스 배출 시나리오를 개발하고, 국가 온실가스 감축 목표 달성을 위해 철강 부문에 요구되는 변화를 평가하여 시사점을 제시하고자 한다(부록 4.2 참조).

1.3 보고서의 구성

본 보고서는 우리나라 2050 탄소중립 목표에 부합하는 철강 부문의 탈탄소 경로를 평가하기 위해, 철강 부문에 요구되는 중장기적 변화를 다양한 각도에서 분석했다. 기존에는 온실가스 배출 시나리오의 내적 일관성과 설명 가능성을 확보하기 위해 통합평가모형(Integrated Assessment Model, IAM)을 사용하였으나, 이번 연구에서는 기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 보고서에 지속적으로 활용되어 온 기후변화 통합평가모형(Global Change Analysis Model, GCAM)을 기반으로 국내 에너지 시스템과 정책 현황을 추가 반영한 GCAM-KAIST2.0 모형을 개발해 분석에 적용했다.

본 보고서의 구성은 다음과 같다. 평가를 위해 개발한 세 가지 시나리오(CurPol, NZ2050, NZ2050_Eff)를 설명하고, 시나리오별 온실가스 감축 목표에 상응하는 감축 경로를 도출하여 모형 부문별 감축 부담을 평가할 예정이다. 이후 분석을 통해 도출한 감축량과 그에 따른 에너지 시스템의 전환을 분석하고자 한다. 이를 위해 먼저 탈탄소화에 핵심 역할을 하는 전력 부문의 에너지믹스 변화를 살펴보고, 이어서 산업 및 철강 부문의 전환을 논의하고자 한다. 마지막으로, 시나리오 분석 결과를 기반으로 철강 부문에서의 전환 방향성과 정책 대안을 제시하고자 한다.

2.0 본론

2.1 시나리오 설계

본 연구에서는 우리나라 철강 부문의 온실가스 배출을 전망하면서, 동시에 2050 탄소중립 목표 달성을 위한 철강 부문의 탈탄소 이행 요건을 기술경제적 관점에서 진단했다. 이를 위해 “CurPol”, “NZ2050”이라는 두 가지 시나리오와 추가 민감도 분석을 위한 “NZ2050_Eff” 시나리오를 만들었으며, 각 시나리오의 전제는 다음과 같다.

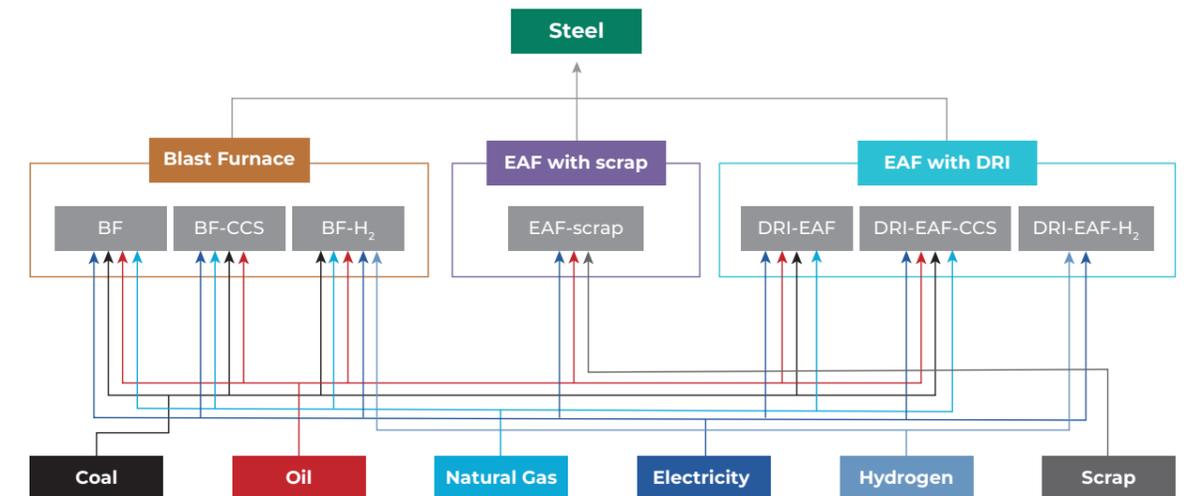
- 1. CurPol:** 현재 우리나라의 제철 기술 현황과 산업연구원의 철강 부문 산출 전망 그리고 현재 시행 중이거나 시행이 확정된 에너지 및 기후정책 수단이 반영된 시나리오이다. 전력 부문의 중장기 에너지믹스 전망을 위해서는 제9차 전력수급 기본계획과 제5차 신재생에너지 기본계획에 명시된 2034년까지의 발전설비계획 및 발전량 전망을, 에너지 중장기 수요와 각 부문에서의 에너지 수요 전망을 위해서는 제3차 에너지기본계획에 명시된 건물, 산업, 수송 부문별 목표 수요를 반영했다. 아울러, 국내총생산(GDP)과 인구 전망은 산업연구원과 통계청의 전망치를 사용하였으며, 발전원별 자본지출비용(CAPEX)은 블룸버그 뉴 에너지 파이낸스(Bloomberg New Energy Finance, BNEF)와 미국 신재생에너지 연구소(National Renewable Energy Laboratory, NREL)의 전망값을 적용했다.
- 2. NZ2050:** “CurPol” 시나리오의 제철 기술 현황과 산업연구원의 철강 부문 산출 전망(KIET, 2018) 그리고 현재 시행 중인 에너지 및 기후정책 수단을 동일한 전제로 하되, 첫 모형 년도인 2025년부터 우리나라의 연간 온실가스 배출량을 일정한 속도로 감소시켜 2050년에 온실가스 순배출량 넷제로를 달성하는 시나리오이다. “CurPol” 시나리오에 탄소 가격을 추가로 부과해 2025년부터 2050년까지 온실가스 배출 제약이 선형적으로 감소하도록 했다. 이 시나리오는 모든 부문에 동일한 탄소 가격을 부과해 각 부문의 한계감축비용을 일치시키는 비용 효과적 온실가스 감축 노력을 지속함을 전제로 한다.
- 3. NZ2050_Eff:** “NZ2050” 시나리오의 가정을 따르지만, 해당 시나리오에 비해 철강 부문의 산출이 2025년부터 2050년까지 선형적으로 22% 감소한다고 전제한 시나리오이다(Yu et al., 2021). 산출의 감소는 건물의 수명 연장, 건물 디자인 개선 및 최적화, 철의 재활용, 고강도 철을 활용한 경량 소재 사용, 철강 생산 효율의 향상 등을 통해 이루어진다.

내적 일관성과 설명 가능성을 확보한 정량적인 시나리오 개발을 위해, 미국 퍼시픽 노스웨스트 국립연구소(Pacific Northwest National Laboratory, PNNL)의 GCAM 모형을 기반으로 한국형 모형인 GCAM-KAIST2.0을 개발했다. GCAM 모형은 IPCC 보고서에 지속적으로 활용되어온 대표적인 통합평가모형으로, 세계 각국의 경제 활동에 따른 온실가스 배출로 인한 기후변화 발생과정을 각종 재화의 생산과 소비, 가격을 통한 시장균형, 경제성에

기반한 기술 간 경쟁과 연료 대체를 통해 설명하는 평가 체계이다. GCAM 모형에 대한 간략한 설명은 부록에 첨부했다(부록 4.2 참고). 위에서 설명한 3가지 시나리오에서 전제하는 한국의 철강 생산량은 다른 선진국들의 1인당 철강 생산량 대비 월등히 높다. 이는 본 연구에서 철강 부문 탈탄소화를 위한 수단으로 철강 산출 감소를 매우 제한적으로 활용하였기 때문이다(그림 1). 위 시나리오에 따라 본 연구에서는 국가 전체 온실가스 배출과 1차 에너지, 전력 및 수소 생산, 최종 에너지, 그리고 산업 및 철강 부문의 에너지 소비량을 각각 비교, 평가하였다.

2.2 철강 부문 세부 기술 표현 및 구조

그림 2. GCAM-KAIST2.0 모형의 철강 부문 세부 기술 표현 및 구조

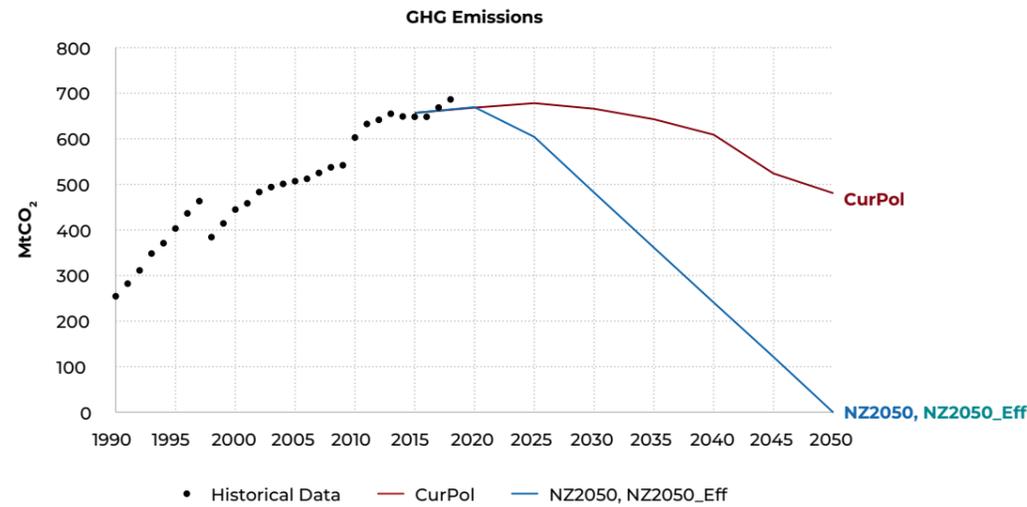


GCAM-KAIST2.0 모형에는 철강 생산을 위한 7가지 제철기술이 표현되어 있다. 제철 기술은 크게 고로(Blast Furnace; BF)와 철스크랩을 주원료로 하는 전기로(Electric Arc Furnace with scrap; EAF-scrap), 직접환원철을 주원료로 하는 전기로(Electric Arc Furnace with Direct Reduced Iron; DRI-EAF) 세 가지로 구분된다. 고로의 세부 기술로는 기존 고로와 더불어 탄소포집저장 기술(Carbon Capture and Storage; CCS)이 탑재된 고로(Blast Furnace with CCS; BF-CCS) 및 고로 가열 시 수소를 투입하는 기술(BF-H₂)이 표현되어 있고, 철스크랩을 주원료로 하는 전기로는 하나의 기술(EAF-scrap)만 표현되어 있다. 직접환원철을 주원료로 하는 전기로(DRI-EAF)의 경우 CCS가 탑재된 기술(DRI-EAF-CCS)과 수소환원제철 기술(DRI-EAF-H₂)이 표현되어 있다. 각각의 기술은 석탄과 석유, 가스, 전기, 수소를 에너지원으로 사용하며, 철스크랩을 주원료로 하는 전기로의 경우 스크랩을 소비하는 구조로 모형화되어 있다. GCAM-KAIST2.0 모형에 사용된 세부 기술별 가정은 E3G와 PNNL의 2021년 철강 부문 탄소중립 시나리오 보고서(Yu et al., 2021)의 가정 내용을 따랐다.¹

¹ 이 보고서는 주로 중국의 철강 산업 탈탄소 관련 논문(Ren et al., 2021)과 국제에너지기구 철강 기술 로드맵 보고서(IEA, 2020)의 가정을 따른다.

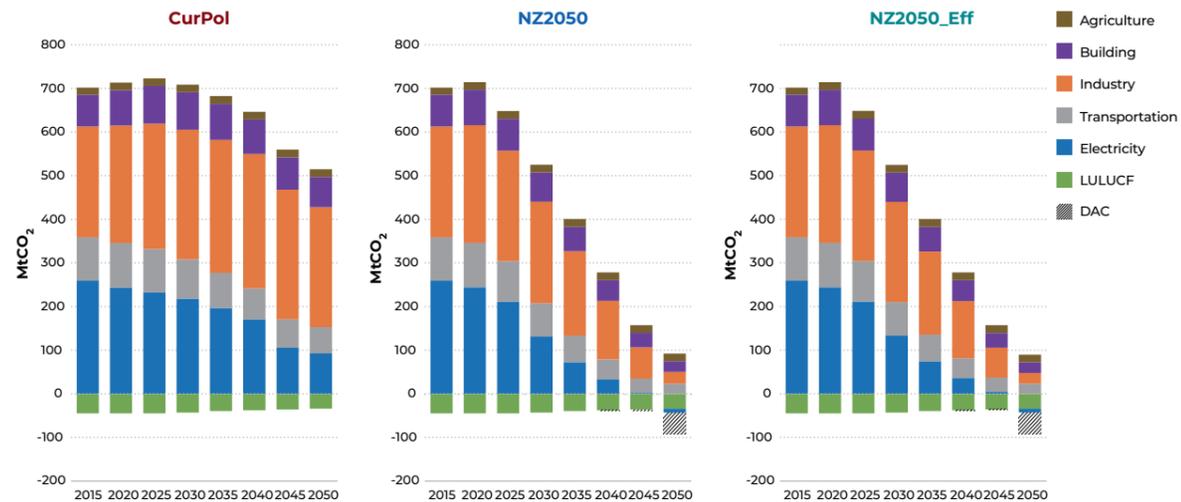
2.3 국가 온실가스 배출량 분석 결과

그림 3. 시나리오별 우리나라 온실가스 감축 경로



GCAM-KAIST2.0 모형을 분석한 결과 현재 정책이 지속될 경우(이하 CurPol), 2020년부터 2050년까지 온실가스 배출량이 약 30%만 감소하여 탄소중립에 도달하지 못하는 것으로 나타났다(그림 3). 이는 탄소중립을 위해서는 현재 시행 중인 것보다 훨씬 더 적극적이고 광범위한 온실가스 감축 수단 및 기후정책이 마련되어야 함을 의미한다.

그림 4. 부문별 온실가스 배출량

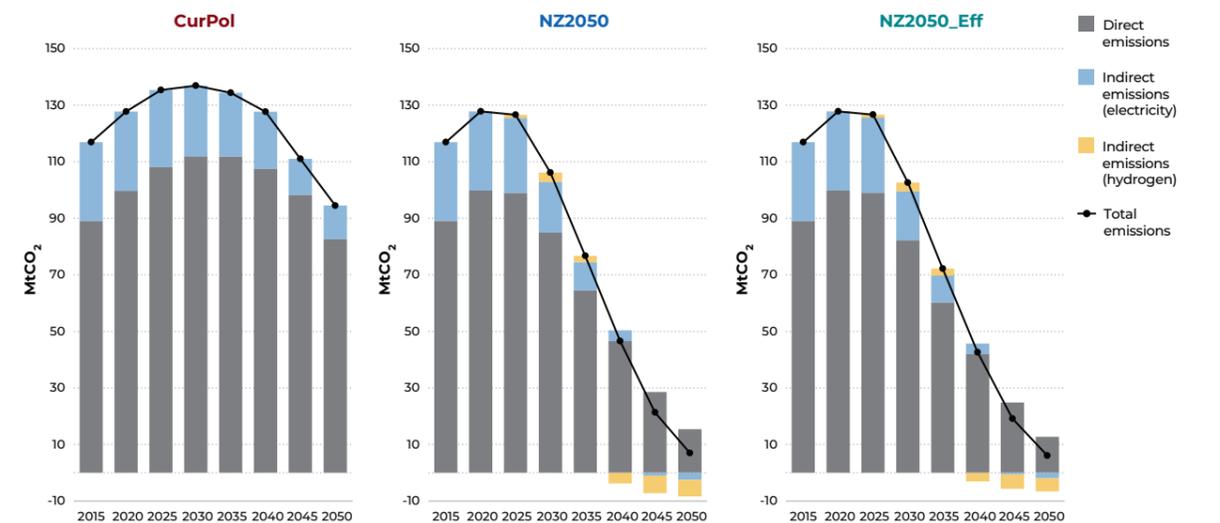


우리나라의 전력·산업·수송 부문은 온실가스 배출량과 그 감축 잠재량 측면에서 중추적인 역할을 할 것으로 전망된다(그림 4). 반면 건물과 농업 부문은 온실가스 배출량과 감축 잠재량 측면에서 기여도가 미미할 것으로 나타났다.

CurPol 시나리오에서 국가 온실가스 배출량은 2025년에 최대치에 도달하고, 이후 완만히 감소할 것으로 전망된다. 전력 부문의 온실가스 배출량 감소가 산업 부문 배출량 증가로 상쇄되는 것을 제외하고는 대체로 모든 산업의 온실가스 배출 비중이 비슷한 수준으로 유지될 것으로 보인다.

반면 탄소중립을 추구할 경우(이하 NZ2050 또는 NZ2050_Eff), 전력과 산업, 그리고 수송부문에서 온실가스 감축이 빠르게 진행될 것으로 전망된다. 또한 GCAM-KAIST2.0 모형에 의하면, 2050년에도 여전히 온실가스 배출이 일부 발생할 수밖에 없는데, 이를 상쇄하기 위해서는 토지이용, 토지이용 변경 및 임업(Land Use-Land Use Change and Forestry, LULUCF), 바이오에너지 탄소 포집 및 저장기술(Bioenergy with Carbon Capture and Storage, BECCS), 그리고 공기 중 탄소 포집(Direct Air Capture, DAC) 등 탄소 순흡수 기술 도입과 활용이 필요하다. 반면 철강의 소비 효율 향상(NZ2050_Eff)을 통한 산출량 감소가 부문별 온실가스 배출량에 미치는 영향은 미미할 것으로 예상된다.

그림 5. 철강 부문 이산화탄소 배출량

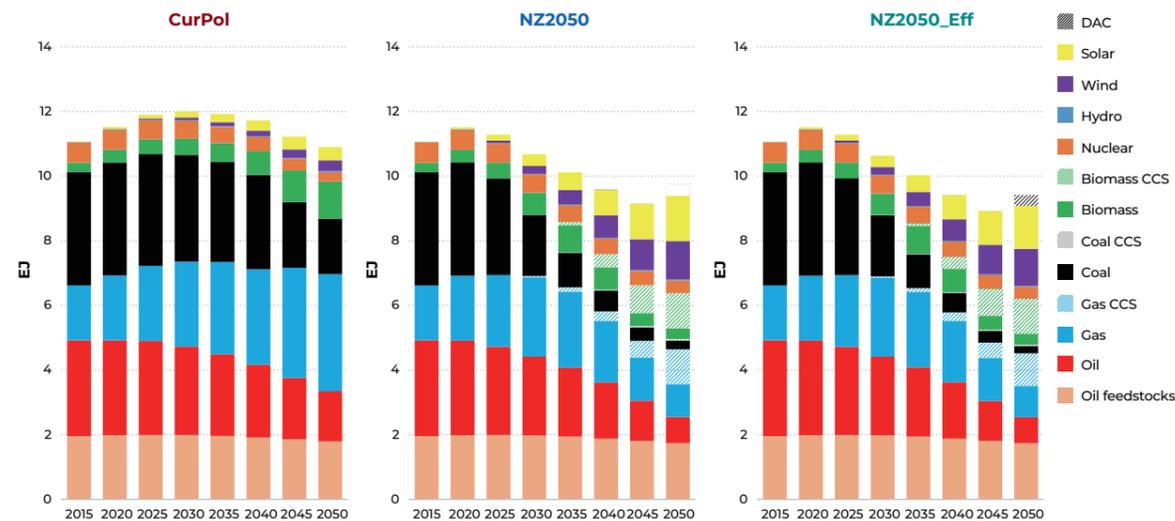


CurPol에서 철강 부문의 이산화탄소 배출량은 2030년 피크에 도달한 후 2050년까지 서서히 감소할 것으로 평가되었다. 2050년까지 재생에너지 및 CCS 기술을 활용한 발전량이 증가하면서 간접배출이 감소하지만, 그럼에도 여전히 상당량의 이산화탄소가 배출될 것으로 전망된다.

NZ2050, NZ2050_Eff 시나리오에서는 2050년 이산화탄소 배출량이 2020년 대비 95% 감소하는 것으로 전망된다. 이는 우리나라가 2050년 탄소중립 목표를 달성하더라도 철강 부문의 이산화탄소 배출이 잔존한다는 것을 의미한다. 하지만 철강 부문의 청정 수소 및 청정 전력 소비 확대에 따른 수소 생산 및 전력 부문에서의 간접배출 기여로 인해, 2050년 철강 부문에 잔존하는 이산화탄소 직접배출 부분이 상당 부분 상쇄되는 것으로 나타났다.

2.4 1차 에너지 분석 결과

그림 6. 에너지원별 1차 에너지 소비량



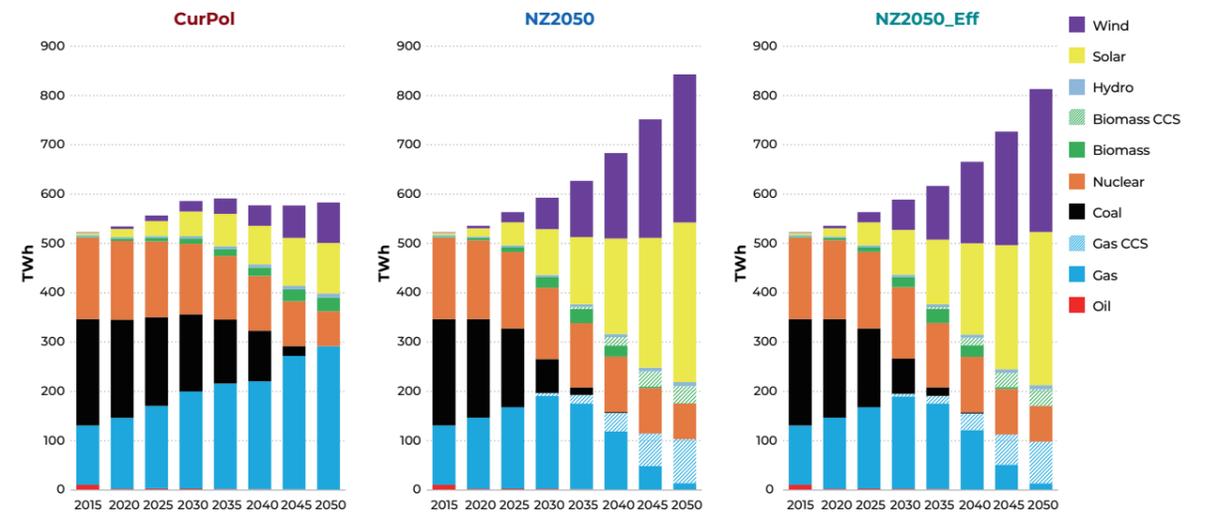
CurPol 시나리오의 경우, 1차 에너지 소비량은 2030년 무렵에 최대 수준에 도달하고 이후 점차 감소할 것으로 보인다(그림 6). 반면, NZ2050, NZ2050_Eff 시나리오의 경우, 탄소 가격 상승의 효과가 에너지 가격에 반영되어 석탄 소비가 감소하고 1차 에너지 소비량이 감소세로 전환하는 시점이 CurPol 대비 약 10년가량 앞당겨진다.

에너지원 구성을 살펴보면, CurPol에서는 석탄과 석유 소비가 점차 줄어들어도 동시에 천연가스 소비가 계속 증가하므로 1차 에너지에서 화석연료가 차지하는 전체 비중엔 큰 변화는 없다(그림6). 다만, 태양광과 풍력, 바이오에너지 소비는 2050년까지 2020년 대비 각각 약 7배, 16배, 3배가량 증가할 것으로 나타난다.

NZ2050, NZ2050_Eff 시나리오에서는 1차 에너지 공급에서 화석연료 소비가 2050년까지 2020년 대비 절반 수준으로 현저히 감소하고, 태양광, 풍력 및 바이오에너지는 각각 22배, 60배, 4배가량으로 급격히 상승한다(그림 6).

2.5 전력 및 수소 생산 부문 분석 결과

그림 7. 에너지원별 전력 부문의 발전량



전력 부문 에너지 믹스에는 제9차 전력수급 기본계획에 따른 발전소 공급계획이 반영되어 있어 석탄발전의 비중 축소가 두드러지게 나타난다(그림 7). 그러나 시나리오별로 에너지 믹스의 변화 속도에는 차이가 있다.

CurPol 시나리오에서도 향후 30년간 전력 부문 배출량이 절반 이상 감소하면서 상당한 에너지 믹스 변화가 나타난다. 제9차 전력수급 기본계획이 이행될 경우, 2035년까지 2020년 대비 석탄발전 비중은 35% 감소하고 재생에너지는 250% 확대되나, 가스발전의 비중 역시 150% 증가한다.

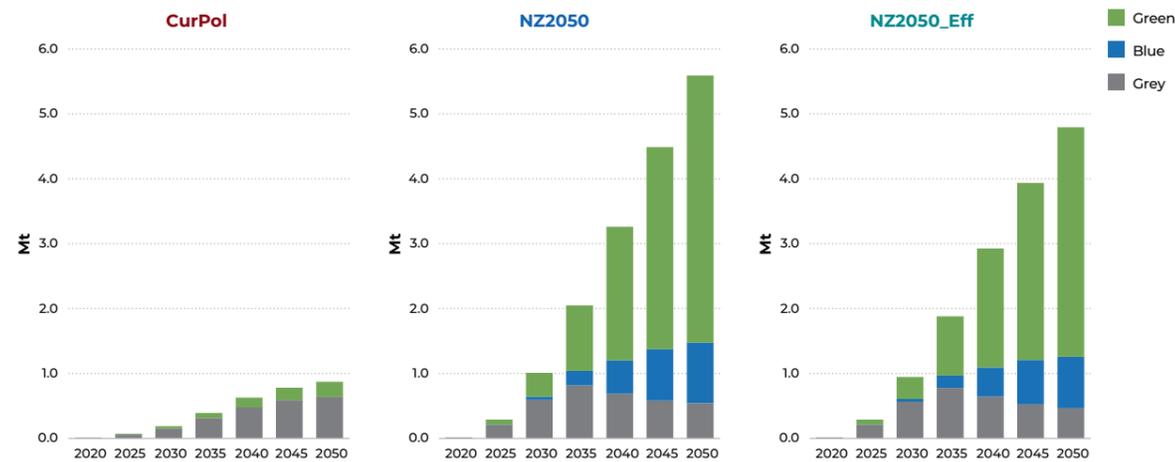
NZ2050, NZ2050_Eff 시나리오의 경우 CurPol에서보다 석탄발전 퇴출이 더욱 빠르게 진행되고, 태양광, 풍력, 바이오 등 재생에너지 발전은 더 큰 폭으로 확대되며 그 변화의 폭도 더 크게 나타난다(그림 7). 이러한 탄소중립 시나리오에서는 2030년에 석탄발전 비중이 전체 발전량의 10% 정도까지 하락하면서 사실상 전력시장에서 퇴출될 것으로 예상된다. 재생에너지는 2020년 대비 2030년에 약 7배 증가하고, 2050년에는 약 20배 증가한다. NZ2050, NZ2050_Eff 두 시나리오에서 국내 전력 부문 발전량은 2050년까지 현재 대비 65% 확대될 것으로 예상된다.

이와 같이 기후정책 시행에 따른 전력 부문의 탈탄소화는 온실가스 감축에 크게 기여한다. CurPol 시나리오 대비 NZ2050, NZ2050_Eff 시나리오에서는 전력 부문의 온실가스 배출량이 2030년 기준 40%, 2050년 기준 110%가 감소하는 것으로 나타났다. GCAM-KAIST 2.0에 의하면, 전력 부문의 탈탄소화를 위해 2030년부터 가스발전을 중심으로 이산화탄소 포집(CCS)이 확대된다. 또한, 바이오에너지 발전과 탄소

포집·저장기술을 결합한 기술(BECCS)이 2045년부터 발전 부문에서 순음수(-) 배출을 가능하게 할 것으로 예상된다. 이에 따라 GCAM-KAIST 2.0의 NZ2050 시나리오에 의하면, 발전 부문 내 이산화탄소 누적 포집량은 2050년까지 8억 톤이 될 것으로 예상된다.

NZ2050_Eff의 경우, NZ2050보다 2050년 발전량이 약 5% 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 발전설비 투자 시 철강의 소비 효율 향상도 함께 고려해야 함을 시사한다.

그림 8. 수소 생산 방식에 따른 수소 생산량



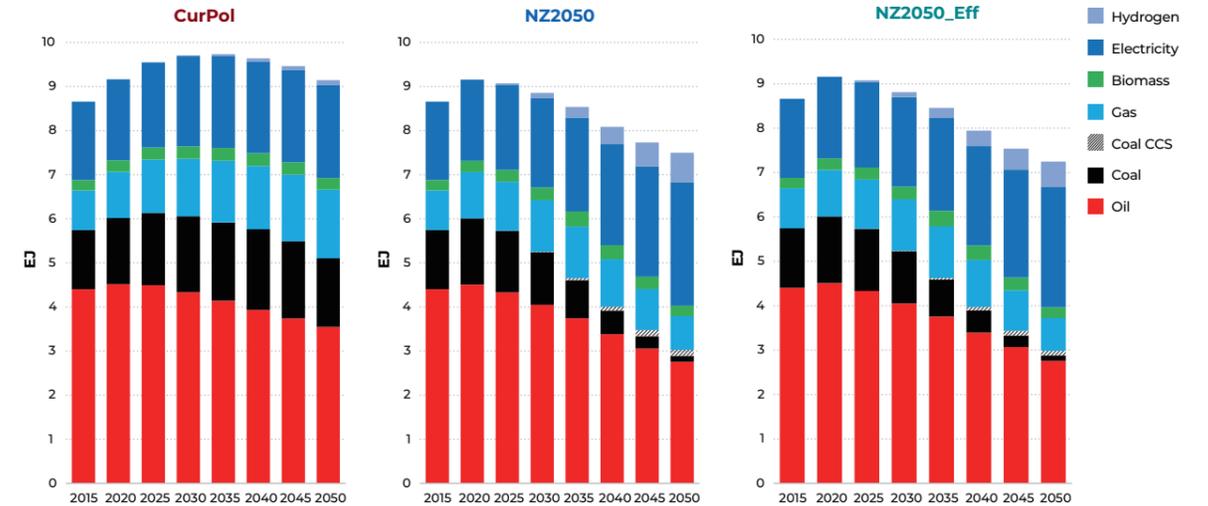
GCAM-KAIST2.0 모형에서 수소는 생산 기술에 따라 그레이 수소(천연가스 개질 수소 및 화학공정 부산물로 발생하는 부생 수소), 블루 수소(그레이 수소에 CCS 기술 활용), 그린 수소(재생에너지 기반의 수전해 생산 수소)로 분류된다.

CurPol의 경우 2050년까지 약 1백만 톤의 수소가 생산되는데, 이 가운데 일부 그린 수소 생산도 있지만 대부분은 그레이 수소 형태로 생산된다. 반면 NZ2050에서는 수소 생산량이 2050년까지 5백만 톤 이상으로 증가하고, 2035년경까지는 그레이 수소가 높은 비중을 차지하다가 2035년부터는 점차 블루 수소와 그린 수소의 비중이 커지는 것으로 전망된다.

마지막으로 NZ2050_Eff의 경우, NZ2050 대비 2050년 수소생산량이 약 15% 감소하지만, 수소 생산 방식의 전환 추세는 NZ2050과 유사하다.

2.6 최종 에너지 부문 분석 결과

그림 9. 에너지원별 최종 에너지 소비량



CurPol에서 최종 에너지 소비는 2035년까지 완만히 증가하다가 이후 경제 전반의 지속적인 에너지 효율 향상으로 2050년에는 2020년 대비 약 5% 감소한다(그림 9). 그러나 각 에너지원이 차지하는 소비량 비중에는 큰 변화가 나타나지 않을 것으로 전망된다.

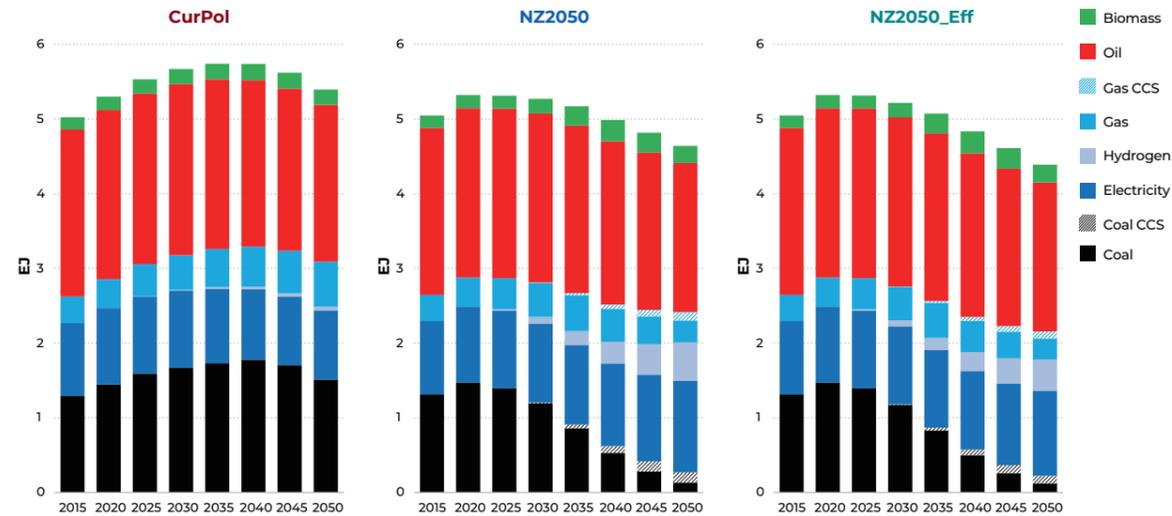
반면 NZ2050, NZ2050_Eff 시나리오의 경우, 최종 에너지 소비는 2020년대 중반부터 빠른 속도로 감소세에 접어들고, 2050년까지 2020년 대비 약 20% 감소한다(그림 9). 이는 경제 각 부문에서 에너지 효율 개선과 더불어 전기화가 가속화되기 때문이다.

NZ2050, NZ2050_Eff 시나리오에서의 2050년 최종 에너지 소비량 내 전기 비중은 40% 수준에 달하게 된다. 석탄과 석유 소비는 지속적으로 감소하는데, 2050년까지 각각 대략 5%와 40% 수준으로 비중이 축소되면서 최종 에너지 부문의 탈탄소화를 견인할 것으로 평가된다. 또한 GCAM-KAIST 2.0이 제시한 NZ2050, NZ2050_Eff 두 가지 탄소중립 시나리오에서는 수소 소비가 2050년 전체 최종 에너지 소비의 10% 수준까지 확대될 것으로 나타났다.

무엇보다 적극적인 기후정책 시행에 따른 최종 에너지 수요 부문에서의 빠른 전기화는 전력 부문에서의 빠른 탈탄소와 연계되어, 우리나라 NDC 달성은 물론 장기적 탄소중립 목표 달성에 중추적인 역할을 할 것으로 기대된다. 동시에 이는 전력 부문의 탈탄소화가 나타나지 않으면 국가 전체 온실가스 감축이 덜 효과적일 것임을 시사한다.

2.6.1 산업 부문 분석 결과

그림 10. 산업 부문 에너지원별 에너지 소비량

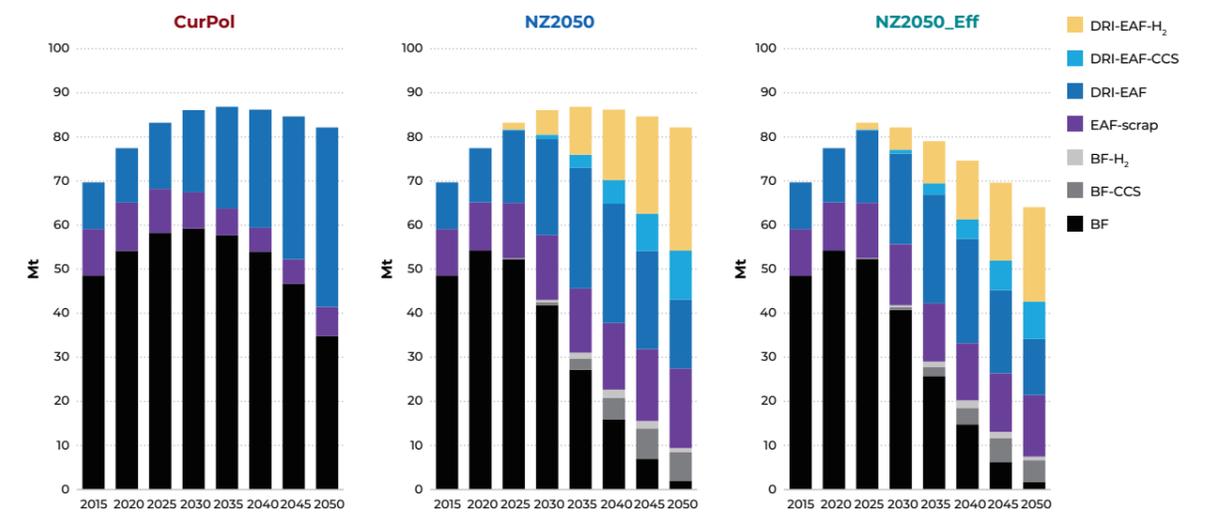


산업 부문의 최종 에너지 수요는 CurPol의 경우 2035년까지 증가하다가, 이후 경제 활동 전반에서의 에너지 집약도 감소와 산업 기기 효율 개선으로 인해 완만히 감소한다(그림 10). 이 경우 수소 연료 소비는 2050년까지 2020년 대비 약 2배 이상 증가하지만, 전체에서 차지하는 비중이 매우 작고 화석연료 비중에 큰 변화가 없어 결국 온실가스 감축이 크게 나타나지는 않게 된다.

반면 NZ2050 시나리오에서는 산업 부문의 화석연료 소비가 급감하고, 전력과 수소로의 연료 전환이 빠르게 진행된다. 특히 철강 소비 효율이 고려된 NZ2050_Eff에서는 탈탄소화가 더욱 가속화된다. 두 탄소중립 시나리오에서 석탄은 2030년부터 사실상 퇴출 수순을 밟게 된다.

2.6.2 철강 부문 분석 결과

그림 11. 철강 생산기술별 철강 산출량

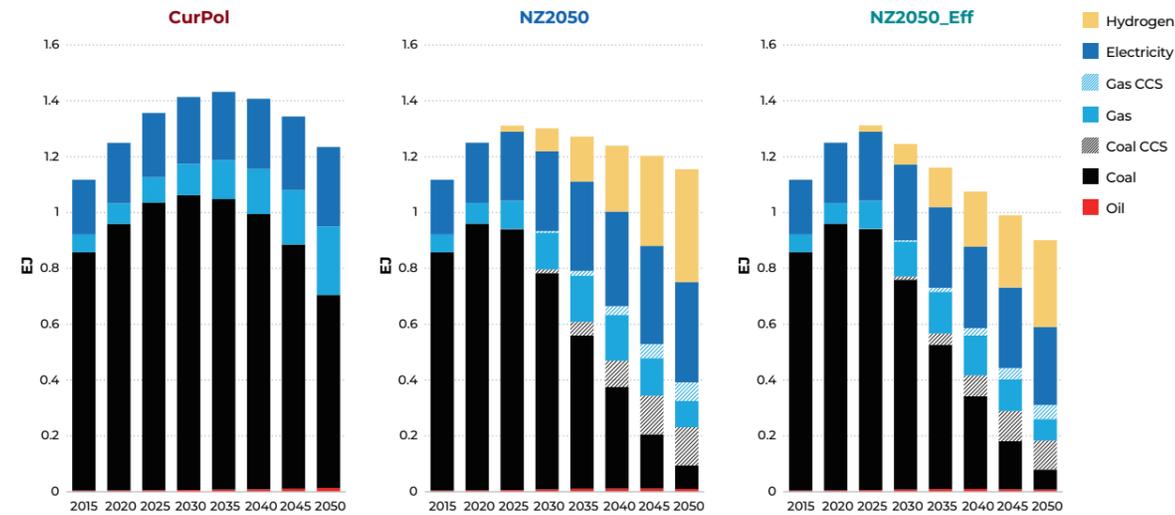


CurPol에서 철강 산출량은 2035년까지 증가하다가 이후 완만하게 감소한다(그림 11). 이 중 고로(BF) 기술에 의한 철강 산출량이 2030년부터 점차 감소하여 2050년에는 2020년 대비 약 35% 감소한다. 이 시나리오에서 직접환원철을 주원료로 하는 전기로 기술(DRI-EAF)에 의한 철강 산출량은 2020년 대비 2050년 약 3배 증가할 것으로 전망된다.

NZ2050에서는 고로(BF) 기술에 의한 철강 산출량 감소 시점이 2025년으로 5년 앞당겨지고 감소 속도가 더욱 빨라져 2050년에는 고로 산출량이 2020년 대비 약 85% 감소하고, 남아있는 고로의 약 70%에는 CCS 기술이 탑재된다. 또한 경제 전반의 탄소 가격 부과로 수소환원제철 기술(DRI-EAF-H₂)의 경제성이 빠르게 향상되면서, 2050년에는 전체 철강 산출량에서 수소환원제철 기술을 통한 철강 산출량이 30%를 넘을 것으로 예상된다(부록 4.1 참고). 이처럼 다양한 철강 생산 기술의 확대에 따라, 직접환원철을 주원료로 하는 전기로 기술(DRI-EAF)에 의한 철강 산출량은 2050년에 CurPol 대비 35%가량 감소하게 되고, 이 중 약 41%에 해당하는 양이 CCS 기술이 탑재된 시설(DRI-EAF-CCS)에 의해 산출될 것으로 예측된다. 철스크랩 기반의 전기로 기술(EAF-scrap)에 의한 철강 산출량의 경우, CurPol 대비 2050년에 약 3배가량 증가하는 것으로 전망된다.

2.1에서 언급한 바와 같이 탄소중립에 준하는 기후정책과 철강 소비 효율 향상이 함께 고려된 경우(NZ2050_Eff), 철강 산출량은 NZ2050 시나리오와 비교했을 때 2050년에 22% 감소하게 된다. 그러나 철강 소비 효율 향상이 각종 세부 철강 생산기술 비중 변화에 미치는 영향은 큰 차이가 없을 것으로 보인다.

그림 12. 에너지원별 철강 부문 에너지 소비량



CurPol의 경우 철강 부문 전체 에너지 소비는 2035년에 정점을 찍고 2050년에는 2020년 에너지 소비와 거의 동일한 수준이 되지만(그림 12), 화석연료의 비중이 비슷하게 나타나 각 에너지원이 전체 철강 부문 에너지 소비에서 차지하는 비중에는 큰 변화가 없을 것으로 전망된다.

반면 NZ2050 시나리오에서 철강 부문 전체 에너지 소비는 2025년에 정점을 찍고 2050년까지 2020년 대비 소비가 약 15% 감소하게 되는데(그림 12), 이는 경제 전반과 철강 부문에서의 에너지 효율 향상과 전기화에 기인한다. 2050년 석탄 소비는 2020년 대비 80% 감소하며, 2050년 석탄 소비량의 약 60%는 CCS 기술이 적용된 석탄 소비인 것으로 나타났다. 또한 친환경 에너지원의 소비가 급증하는데, 수소와 전기 소비는 2050년에 철강 부문 전체 에너지 소비의 각각 35%, 30%가량 차지한다.

NZ2050_Eff에서 철강 부문 전체 에너지 소비는 더욱 빠르게 감소하여, 2050년까지 2020년 대비 약 30% 감소한다(그림 12). NZ2050과 비교했을 때 약 2배 더 감소하는 것으로 평가되었으며, 각종 에너지원이 차지하는 비중에는 큰 변화가 나타나지 않을 것으로 전망된다.

3.0 결론 및 고찰

3.1 철강 부문 탈탄소 달성 방향

본 연구에서는 한국형 통합평가모형 GCAM-KAIST 2.0을 개발하여 2050 탄소중립을 위한 철강 부문의 탈탄소 시나리오를 구성하고 그 결과를 도출하였다. 철강 부문의 탈탄소 이행을 위해서는 다음 요건이 충족되어야 한다.

첫째, 우리나라의 2050 탄소중립 목표 달성이 철강 부문의 탄소중립을 의미하지는 않으며², 2050년 철강 부문에 잔존하는 이산화탄소 직접배출을 상당 부분 상쇄하기 위해서는 간접배출 부문에서의 개선이 필요하다.

둘째, 철강 산업의 전기화와 수소 에너지 소비 비중 증가가 철강 부문의 탈탄소에 핵심적인 역할을 하게 된다. 이는 탄소중립을 달성하기 위해서는 재생에너지 발전량과 그린 수소 생산량을 증가시키기 위한 중장기 투자가 이루어져야 함을 의미한다.

셋째, 우리나라 2050 탄소중립 시나리오에 부합하는 철강 산업의 탈탄소를 위해서는 수소환원제철과 CCS를 탑재한 직접환원철 기반의 전기로 기술(DRI-EAF-H₂ 및 DRI-EAF-CCS)의 빠른 확대와 CCS가 탑재되지 않은 고로의 빠른 퇴출이 필요하다. 또한, 철강 수요 충족을 위해 고로 퇴출과 함께 철스크랩 기반의 전기로(EAF-scrap) 확대가 불가피하다.

넷째, 철강 소비 효율 향상을 통한 철강 산출량 감소는 철강 부문의 온실가스 배출 감소에 크게 기여하지 못한다. 다만 철강의 소비 효율 향상은 발전량과 수소 생산량을 감소시키는데, 이는 탄소중립 목표 달성을 위한 전력 및 수소 생산 투자 계획에 있어 철강 소비 효율 향상에 대한 고려가 중요하다는 것을 시사한다.

다섯째, 철강의 소비 효율 향상을 고려해 22%의 철강 산출량 감소를 가정한 탄소중립 시나리오(NZ2050_Eff)와 그렇지 않은 시나리오(CurPol, NZ2050)에서 철강 생산량이 상당한 차이를 보이고 있지만, 여전히 한국은 2050년에도 선진국의 생산량에 비해 압도적으로 많은 생산을 할 것으로 전망된다. 이는 본 연구가 철강 부문 탈탄소화에 있어 철강 산출 감소의 역할을 매우 보수적으로 전망했음을 시사한다.

2 2050년 일부 석탄 및 가스 에너지 소비로 인한 배출량 잔존

3.2 정책 권고

철강 부문의 탈탄소를 위해 가장 시급한 과제는 정부의 향후 기후정책목표에 2050 탄소중립 목표에 부합하는 철강 산업의 온실가스 감축 목표를 반영하는 것이다. GCAM-KAIST2.0 모형 분석 결과, 현 정책이 지속되는 경우(CurPol) 2050년에 철강 산업에서 약 9천만 톤CO₂eq 이상의 온실가스가 배출되어 탄소중립 목표가 달성되지 못하는 것으로 전망되었다. 따라서 2050 탄소중립에 부합하는 철강 부문의 온실가스 감축 목표 설정은 철강 생산설비 투자와 더불어 전력 및 수소 생산 부문에 합리적인 투자를 유인하여, 비용 효율적으로 2050 탄소중립을 달성하는 방법이 될 수 있다.

철강 영역의 탄소중립 달성을 위해서는 적절한 감축 목표 설정과 함께, 전력 및 수소 생산 영역에서의 빠른 탈탄소화를 이끌어 내는 정책이 함께 뒷받침되어야 한다. 다가오는 제10차 전력수급 기본계획에서는 이와 같은 탄소중립 목표를 반영하여, 전기화와 재생에너지 발전량 증대를 위한 전원구성이 계획되어야 한다. 또한 재생에너지를 활용한 그린 수소 생산 가속화와 함께, 관련 정책 확립 및 체계적인 인프라 구축도 필요할 것이다. 그러나 철강 부문의 탈탄소를 위해서는 무엇보다도 철강 생산기술 자체의 대전환과 이를 촉진하기 위한 정책이 요구된다.

이를 위해서는 우선 수소환원제철 기술(DRI-EAF-H₂), CCS를 활용한 직접환원철 기반 전기로 기술(DRI-EAF-CCS), 철스크랩 기반 전기로 기술(EAF-scrap)과 같은 대체 기술의 개발 및 확대와 해당 기술들의 빠른 상용화를 위한 R&D 시스템 구축 및 지원이 요구된다. 빠른 기술 도입 및 정착을 위해, 기술별 실증 프로젝트 운영 및 개발 비용 지원 방안 등이 고려될 수 있다.

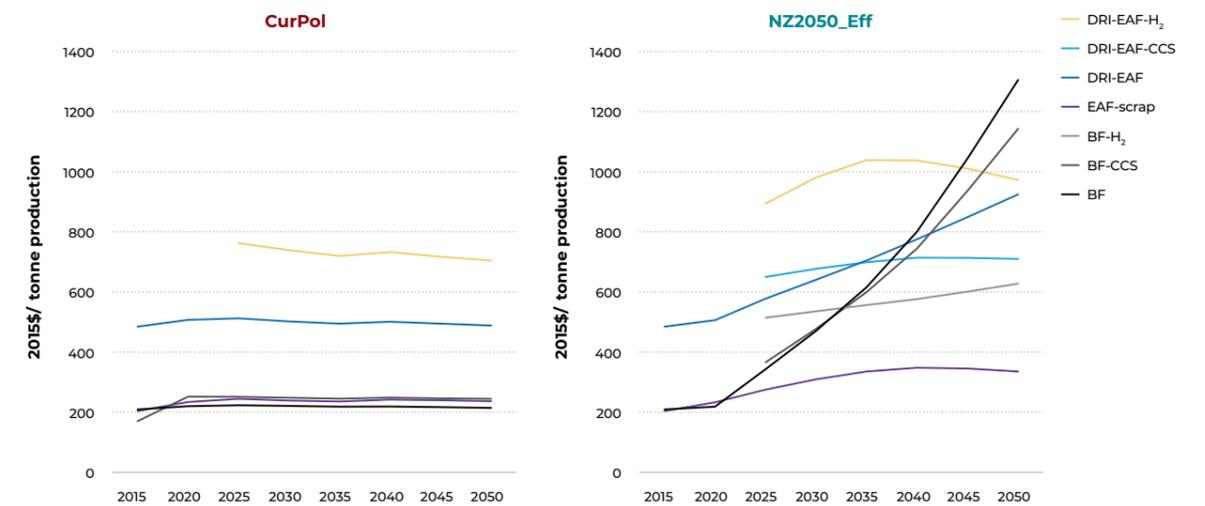
동시에 철강 부문에 대한 온실가스 배출총량 설정 및 배출권 할당 부문 역시 본 연구가 제시하는 탄소중립 시나리오에 부합하는 방향으로 나아가야 할 것이다.

마지막으로, 경제 전반의 철강 소비 효율 향상과 철강 재활용 확대를 독려하는 정책이 필요하다. 건물 수명 연장, 건물 디자인 개선 및 최적화, 철의 재활용, 고강도 철을 활용한 경량 소재 사용, 철강 생산 효율 향상 등을 지원하는 제도 등이 그 예일 것이다. 특히, 철강 기업에서 재활용 철강의 목표 생산량과 사용량을 설정하고, 생산 제품 내 재활용 철강 사용 비율을 설정하는 것은 철강 산업의 순환 경제를 촉진하는 좋은 방안이 될 수 있을 것이다.

4.0 부록

4.1 철강 부문 생산기술 비용 전망

그림 13. 철강 부문 생산기술별 비용 전망

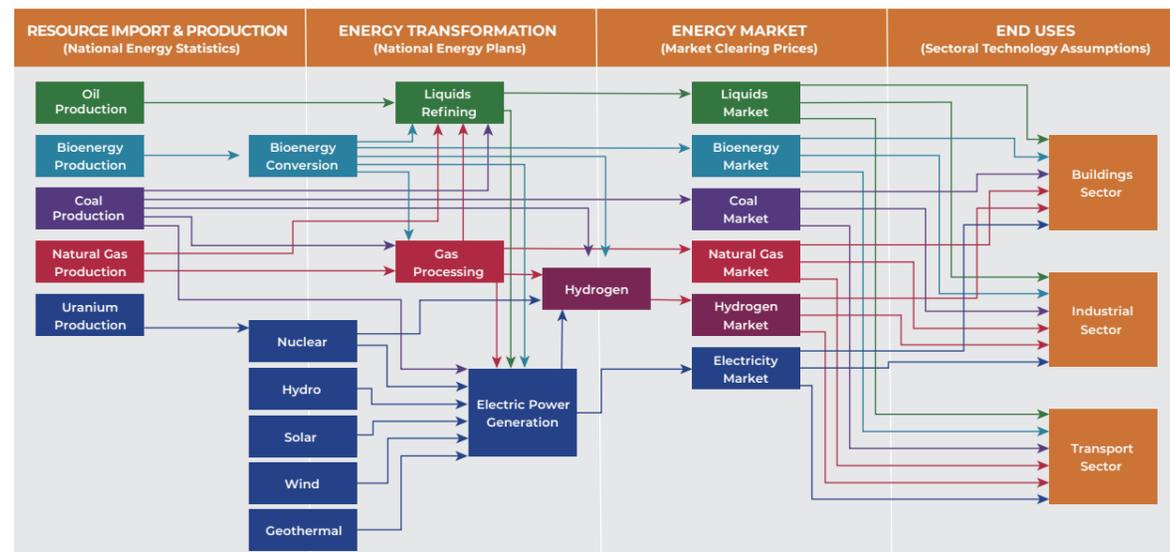


현 정책이 지속되는 시나리오(CurPol)에서 수소환원제철 기술은 시간이 지나도 경제성을 확보하지 못한다. 반면 탄소중립 시나리오의 경우(NZ2050, NZ2050_Eff), 경제 전반에 탄소 가격이 부과됨에 따라 CCS가 탑재되지 않은 고로(BF) 및 직접환원철 기반의 전기로 (DRI-EAF) 철강 생산단가가 급격히 증가하게 된다. 이 시나리오에서 수소환원제철의 경우 2035년경까지는 그레이 수소의 사용으로 철강 생산단가가 증가하다가, 그 이후부터는 그린 수소 생산의 확대에 점차 하락하는 것으로 전망되었다.

4.2 GCAM 모형

GCAM(Global Change Analysis Model)은 미국 PNNL/JGCRI에서 개발되었고, IPCC 보고서를 비롯한 주요 기후정책 평가연구에 지속적으로 활용되어 온 대표적인 에너지-경제-환경 모형이다. GCAM은 부분균형모형이면서(Stanton et al., 2009) 동시에 높은 해상도를 갖는 통합평가모형이다(Edmonds et al., 2012). 또한 대표 농도 경로(Representative Concentration Pathways, RCP)와 공통 사회경제 경로(Shared Socioeconomic Pathways, SSP) 개발에 사용된 5대 대표 모형 중의 하나로, 다양한 국가에서 많은 연구자가 활용하고 있다.

GCAM은 거시경제와 에너지시스템-토지사용-기후시스템을 연계한 평가 체계로, 에너지 및 기후정책을 시행할 때 정책이 각 에너지 및 토지 시스템에 미치는 영향을 다양한 관점에서 통합적으로 평가하는 일관성 있는 시나리오 개발에 활용될 수 있다. GCAM의 에너지시스템은 지역별로 1차 에너지 생산, 에너지 전환, 최종 에너지 소비에 이르는 다양한 연료와 기술의 경쟁, 그리고 지역 간 에너지 재화의 거래를 반영하고 있다. GCAM은 전 세계를 32개의 지역으로 구분하고 있는데, 우리나라는 32개 지역 중 하나의 단일지역으로 구분되어 있다.



본 연구에서는 GCAM v.5.4를 근간으로 우리나라의 정책 및 기술 현황을 반영해 한국형 통합평가모형(GCAM-KAIST2.0)을 구축했다. 2015년을 기준연도로 설정하여 5년 단위로 2100년까지 시뮬레이션을 진행하였고, 전력공급, 여객 및 화물수송 서비스, 건물의 냉난방 및 기타서비스, 시멘트, 비료 산업, 석유화학 산업 등 각각의 기술서비스 부문에서의 다양한 기술적 대안의 경쟁을 로짓 선택모형을 기반으로 표현하였다. 각 연도별 기술 점유율과 기술 비용 및 성능 전망이 미래의 기술경쟁 구도를 결정하고, 이 과정에서 지역 및 시장 고유의 행태적 특성이 함께 반영된다. 모든 조건이 동일하다면, 탄소 정책이 시행될 경우 기존에 시장 점유율이 낮았던 저탄소 기술의 경제성이 탄소집약적 기술에 비해 상대적으로 향상되면서 저탄소 기술의 점유율이 점차 증대된다.

5.0 참고문헌

1. 관계부처 합동(2021a). “2030 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향안”.
2. 관계부처 합동(2021b). “2050 탄소중립 시나리오안”.
3. 기후솔루션(2021). “국내 철강산업 탄소중립 대응 동향과 이슈”.
4. 대한민국 정부(2020). “대한민국 탄소중립선언”.
<https://www.korea.kr/archive/speechView.do?newsId=132032791>
5. 산업통상자원부(2021). “탄소중립 산업-에너지 R&D 전략”.
6. 에너지전환포럼(2020). “대한민국 2050 탄소중립 달성을 위한 부문별 전략 및 정책개발 연구”.
7. 환경부(2020). “지속가능한 녹색사회 실현을 위한 대한민국 2050 탄소중립 전략”.
8. 한국에너지기술연구원(2021). “탄소중립 기술혁신 추진전략 : 10대 핵심기술 개발 방향 - PART2”.
9. C. Bataille; Stiebert, S. P.Eng, and Dr. Li, F. (2021), “Global facility level net-zero steel pathways: technical report on the first scenarios of the Net-zero Steel Project”. IDDRI.
10. IEA(2020). “Iron and Steel Technology roadmap : Towards more sustainable steelmaking”.
11. KIET(2018). “장기(2040년) 산업구조 전망 분석”.
12. KIET(2021). “2050 탄소중립과 제조업이 나아갈 길”.
13. Edmonds J.A. et al. (2012). “Integrated Assessment Modeling”. In: Rasch P. (eds) Climate Change Modeling Methodology. Springer, New York, NY.
https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5767-1_8
14. Ren M, Lu P, Liu X, Hossain M S, Fang Y, Hanaoka T, O’Gallachoir B, Glynn J and Dai H. (2021). “Decarbonizing China’s iron and steel industry from the supply and demand sides for carbon neutrality”. Appl. Energy. 298 117209.
15. Stanton, E.A., Ackerman, F., Kartha, S., (2009). “Inside the integrated assessment models: Four issues in climate economics.”. Clim. Dev. 1, 166-184. doi:10.3763/cdev.2009.0015
16. UNFCCC(2015). “Paris Agreement”.
17. Yu, S., Lehne, J., Blahut, N., & Charles, M. (2021). “1.5°C Steel: Decarbonizing the Steel Sector in Paris-Compatible Pathways.”.
18. World Bank(2022). “World Bank Open Data”.
<https://data.worldbank.org/>
19. World Steel Association(2022). “Steel Statistics”.
<https://worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/>

