



2050 탄소중립 전환 시나리오

한국형 통합평가모형 분석



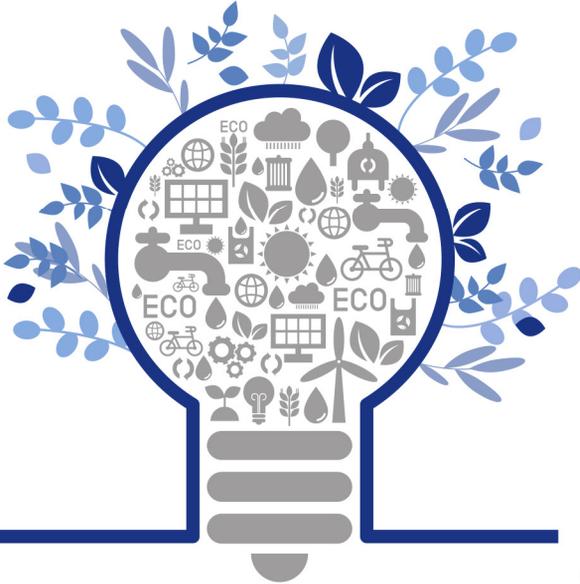
KAIST

SFO°C
Solutions for Our Climate

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 탄소중립 전환 시나리오

한국형 통합평가모형 분석

2050 탄소중립 전환 시나리오 : 한국형 통합평가모형 분석

발간일 2021년 5월

저 자 엄지용, 김한웅, 이한주, 정다운(KAIST),
Haewon McJeon(University of Maryland),
김주진, 권경락, 한가희, 조규리(기후솔루션)

디자인 (주)인디엔피

문 의 (사)기후솔루션 한가희 연구원, gahee.han@fourclimate.org

CONTENTS

2050
탄소중립 전환 시나리오:
한국형 통합평가모형 분석

핵심 요약	04
1. 서론	06
1.1 국가 온실가스 감축목표	06
1.2 기후정책 추진 현황	06
1.3 보고서의 구성	07
2. 본론	09
2.1 시나리오 설계 및 개발	09
2.2 국가 온실가스 배출량 분석 결과	11
2.3 1차 에너지 분석 결과	15
2.4 전력 부문 분석 결과	17
2.5 최종에너지 부문 분석 결과	19
2.5.1 수송 부문 분석 결과	20
2.5.2 건물 부문 분석 결과	22
2.5.3 산업 부문 분석 결과	24
2.6 공기 중 탄소포집 기술(DAC)의 역할	24
3. 결론 및 고찰	29
3.1 탄소중립 달성 방향	29
3.2 정책 권고	30
4. 부록	32
4.1 우리나라의 사회경제 전망	32
4.2 전력 부문 발전기술 비용 전망	33
4.2.1 기존 발전기술의 비용	33
4.2.2 재생에너지 발전기술의 비용	33
4.2.3 공기 중 탄소포집 기술의 비용	33
4.3 수송 수단별 기술 비용 전망	34
4.3.1 승객 수송	34
4.3.2 화물 수송	35
4.4 유연성 자원	36
4.5 GCAM 모형	36
5. 참고문헌	38

핵심 요약

2016년 역사적인 파리협정 체결로 국제사회는 기후위기에 대응하기 위해 산업화 이전 대비 평균 온도 상승을 2°C 미만, 더 나아가 1.5°C 유지를 목표로 노력할 것에 합의했다(UNFCCC, 2015). IPCC 보고서는 2050년까지 세계 온실가스 배출 넷제로 달성을 촉구했고, 이에 2021년 4월 기준으로, 총 120개 국가가 2050 탄소중립 목표를 선언했다.

한국 정부도 2020년 12월 31일 유엔기후변화협약 사무국에 국가 온실가스 감축목표(NDC : Nationally Determined Contributions)(환경부, 2020a)와 장기 저탄소 발전전략(LEDs) (환경부, 2020b)를 제출했다. 이와 더불어, 정부는 “국제사회와 함께 기후변화에 적극 대응하여 2050년 탄소중립을 목표로 나아가겠다”고 선언하며 탄소중립을 위한 비전을 국제사회에 제시하였다(대한민국 정부, 2020).

본 보고서는 국가 온실가스 감축목표(NDC) 달성까지 10년 그리고 탄소중립 목표 달성까지 30년을 남겨 둔 중대한 시점에서, 우리나라의 현 기후정책과 온실가스 배출을 전망하고 탄소중립으로의 전환 시나리오를 평가했다. 현 시점에 발표된 정부 정책(제3차 에너지기본계획, 제9차 전력수급기본계획)을 기반으로 한 현 정책 지속 시나리오, 현재 한국 정부가 설정한 2030 NDC 목표를 달성하는 시나리오, 그리고 온실가스 순배출량 “0”을 위한 사회경제 전반의 노력을 추구하는 탄소중립 시나리오를 개발했다. 본 보고서는 이 세 가지 시나리오를 기반으로 각 부문별 온실가스 감축 노력에 대해 비교·분석했다.

한국형 통합평가모형 GCAM-KAIST1.0을 활용한 에너지-경제-환경 시나리오 평가 결과 우리나라 탄소중립 전환을 위한 세 가지 중요한 시사점이 도출되었다.

첫째, 우리나라에 있어 전력 부문 탈탄소화(Decarbonization)와 연계된 최종 수요부문의 전기화(Electrification)가 탄소중립 목표는 물론 NDC 목표 달성에 중요한 역할을 할 것으로 전망된다. 특히, 석탄발전 조기퇴출 및 재생에너지 확대는 전력 부문의 탄소집약도를 빠르게 감소시키는데, 이는 수송 부문의 전기자동차 보급과 산업 및 건물 부문의 전력사용 확대와 맞물려 경제 전반의 온실가스 배출을 저감하는데 크게 기여할 것이다.

둘째, 탄소중립을 위한 노력에도 불구하고 잔존하는 온실가스 배출을 상쇄하기 위해 탄소 순흡수기술(NETs)을 고려할 수 있다. 2050년 탄소가격이 충분히 상승함에도 불구하고 경제의 각 부문에는 여전히 일부 온실가스 배출이 발생할 수밖에 없는데, 이를 상쇄하기 위해 탄소 순흡수기술인 바이오에너지 탄소 포집·저장기술(BECCS)과 토지이용, 토지이용 변경 및 임업(LULUCF), 공기 중 탄소포집 기술(DAC)의 적용 및 확대를 고려할 수 있다.

셋째, 우리나라가 현재 시행하는 기후정책 수단은 탄소중립 전환은 물론 2030 NDC 목표 달성에도 미치지 못하는 것으로 평가되었다. 장기적으로는 탄소중립 목표, 그리고 단기적으로는 NDC 목표 달성을 위해서라도, 현재 우리 정부가 시행 중인 것보다 더욱 적극적이고 광범위한 정책수단의 도입이 요구된다.

1. 서론



1.1 국가 온실가스 감축목표

한국은 2015년에 국가 온실가스 감축목표(NDC)를 제출했으며, 2018년 국가 온실가스 감축 로드맵 수정안(환경부, 2018)을 마련했다. 그리고 작년 10월, 2050년까지 탄소중립 목표를 선언했다. 한국의 NDC 목표는 2030년까지 2017년 국가 온실가스 총배출량(709.1 MtCO₂e, LULUCF 제외) 대비 24.4%를 감축하는 것인데, 이 NDC 목표가 2050 탄소중립 목표와 정합성을 확보하지 못할 것이라는 견해가 지배적이다. 이에 한국은 2050년 탄소중립을 실현하기 위한 의지를 담아, 2030년 국가 온실가스 감축목표를 추가 상향하여 다시 유엔에 제출할 계획이다.(대한민국 정부, 2021).

1.2 기후정책 추진 현황

에너지 사용에서 비롯된 온실가스 배출량은 2017년 기준 우리나라 온실가스 배출의 87%를 차지하고 있다. 따라서 국가 온실가스 감축목표 달성을 위해서 에너지 부문의 온실가스 배출을 의미있는 수준까지 감축하는 것이 필수적이다. 우리나라 정부는 제3차 에너지기본계획(산업통상자원부, 2019)을 토대로 각 부문별 온실가스 감축 및 목표수요를 달성하기 위한 정책을 도입해 왔다. 건물 부문(7%)과 산업 부문(37%)(환경부, 2020b)에 대해서는 제2차 녹색건축물 기본계획(국토교통부, 2019)과 에너지라벨링제도(한국에너지공단, 2015)가, 수송 부문(14%)(환경부, 2020b)에 대해서는 제4차 친환경자동차 기본계획(산업통상자원부, 2021)과 자동차 평균 온실가스·연비 관리 제도(환경부, 2020c) 등이 수립되었다. 에너지 공급 부문(36%)(환경부, 2020b)에 대해서는 제9차 전력수급기본계획(산업통상자원부, 2020a)과 제5차 신재생에너지 기본계획(산업통상자원부, 2020b)이 각각 수립되었다.

특히 전력 부문은 국가 전체 온실가스 배출량의 36%(환경부, 2020b)를 차지할 정도로 중요한데, 현 정부는 제9차 전력수급기본계획을 수립하여 2034년까지 석탄발전기 60기 가운데 30기(15.3GW)를 폐지하고, 원전은 2020년 23.3GW 에서 19.4GW로 감소시킬 계획이다. 반면 가스발전은 연료 전환되는 석탄발전 24기를 포함해 2034년까지 58.1GW를 확보하며, 신재생에너지의 경우 2020년 20.1GW에서 2034년 77.8GW로 설비용량을 대폭 늘릴 계획이다.

최종에너지 부문은 2017년 기준 국가 전체 온실가스 배출량의 58%(환경부, 2020b)를 차지하고 있는데, 2050 탄소중립을 달성하는데 있어 관건이 될 것이다. 정부는 제3차 에너지기본계획에서 에너지 소비구조 혁신을 통해 2040년까지 최종에너지 소비를 기준수요 전망 대비 18.6% 절감하는 것을 목표로 설정했다. 건물 부문에서는 고효율 기기 보급, 건물 에너지 효율 향상, 에너지효율향상 의무화제도(EERS) 시행을 통해 기준수요 대비 5.2% 감축을 제시했다. 산업 부문에서는 배출권거래제·목표관리제, 중소기업 효율향상 지원을 통해, 수송 부문에서는 자동차 연비 향상 및 전기·수소차 보급을 통해 기준 수요 대비 각각 8.1%, 5.3% 절감하는 것을 목표로 설정했다.

한국이 기존 NDC 목표는 물론, 2050 탄소중립 목표를 달성하기 위해서는 현재 정부가 추진 중인 기후정책이 충분한지, 그렇지 않다면 경제 전반에 어떤 추가적인 노력이 필요한지 면밀한 평가가 필요하다. 비록 학계, 산업계, 시민사회 등 각계 전문가들이 탄소중립 달성을 위한 부문별 온실가스 감축 정책을 제시하고 있지만, 우리나라의 모든 경제활동과 이에 따른 온실가스 배출을 연계한 통합평가모형에 기반한 일관성 있는 시나리오 평가연구는 아직 보고되지 않았다. 본 보고서는 한국형 통합평가 모형인 GCAM-KAIST1.0을 활용해 내적 일관성을 확보한 온실가스 배출 시나리오를 개발하고 국가 온실가스 감축목표 달성을 위해 각 부문에 요구되는 변화를 평가하고 시사점을 제시한다.

1.3 보고서의 구성

본 보고서는 우리나라의 2050 탄소중립 전환 정책을 평가하기 위해, 온실가스 감축에 결정적인 역할을 하게 될 에너지 부문에 요구되는 중장기적 변화를 다양한 각도에서 분석했다. 온실가스 배출 시나리오의 내적 일관성과 설명가능성을 확보하기 위해 통합평가모형(Integrated Assessment Model, IAM)을 활용했는데, 특별히 IPCC 보고서에 지속적으로 활용되어 온 GCAM(Global Change Assessment Model)을 활용해서 국내 에너지 시스템과 정책 현황을 반영한 GCAM-KAIST1.0 모형을 개발해 분석에 활용했다. 이후 보고서의 구성은 다

음과 같다. 첫째, 평가를 위해 개발한 네 가지 시나리오(현정책지속, NDC지속, 탄소중립, 탄소중립_NoDAC)에 적용된 가정을 설명한다. 둘째, 각 시나리오별 온실가스 감축목표에 상응하는 감축 경로를 도출하고 경제 부문별 감축부담을 평가한다. 셋째, 분석을 통해 도출한 감축량과 그에 따른 에너지 시스템 전환을 분석하는데, 먼저 탈탄소화에 핵심 역할을 하는 전력 부문의 에너지믹스 변화를 이후 최종에너지 부문(산업, 건물, 수송)의 전환을 논의한다. 넷째, 시나리오 분석결과에 기반해 NDC 목표의 타당성 및 탄소중립 전환의 방향성 및 정책 대안을 토의한다.

2. 본론

2050
탄소중립 전환
시나리오 
한국형 통합평가모형 분석

2.1 시나리오 설계 및 개발

본 연구는 우리나라의 온실가스 배출을 전망하면서, 단기적으로는 NDC 달성을 장기적으로는 탄소중립의 이행 요건을 기술경제적 관점에서 진단했다. 이를 위해 “현정책지속”, “NDC 지속”, “탄소중립” 이란 세 가지 시나리오와 추가적 민감도 분석을 위한 “탄소중립_NoDAC” 시나리오를 개발했는데 전제는 다음과 같다:

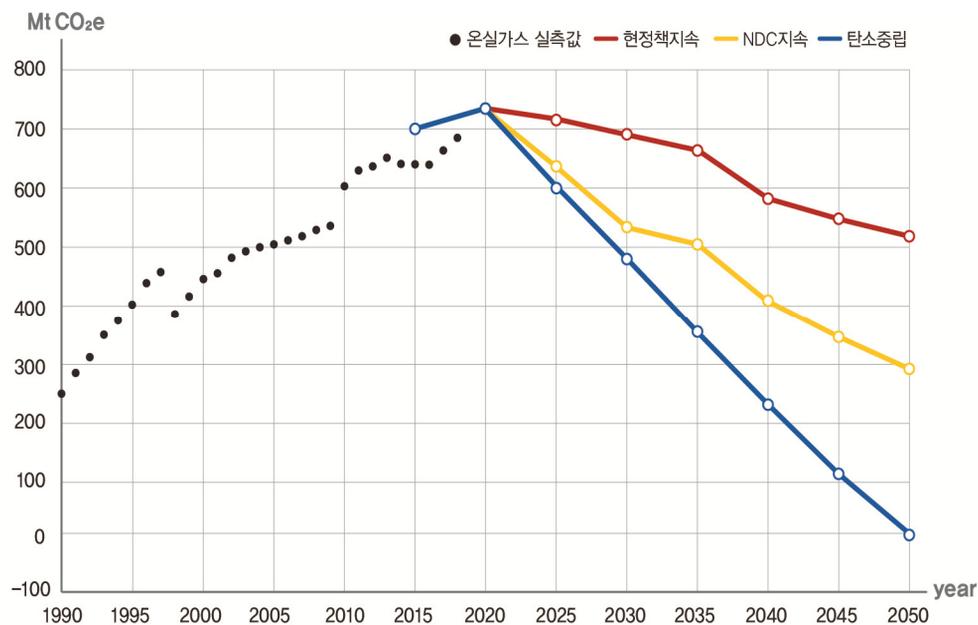
1. 현정책지속: 현재 시행 중이거나 시행이 확정된 에너지 및 기후 정책수단이 반영된 시나리오이다. 전력 부문의 중장기 에너지믹스 전망을 위해 제9차 전력수급기본계획과 제 5차 신재생에너지 기본계획에 명시된 2034년까지의 발전설비계획과 발전량 전망을, 에너지 중장기 수요와 각 부문 에너지 수요 전망을 위해 제3차 에너지기본계획에 명시된 최종에너지 부문(건물, 산업, 수송) 목표 수요를, 수송 부문의 친환경 기술보급 전망을 위해 제 4차 친환경 자동차 기본계획 승용차와 화물차의 온실가스 배출 전망을 위해 자동차 평균 온실가스·연비 관리 제도 상의 관리 목표를 추가로 반영했다. 아울러, 국내총생산(GDP)과 인구 전망은 산업연구원과 통계청의 전망값을 사용했고, 발전원별 자본지출비용(CAPEX)은 BNEF(Bloomberg New Energy Finance)와 NREL(National Renewable Energy Laboratory)의 전망값을 적용했다.
2. NDC 지속: “현정책지속” 시나리오의 정부 에너지 및 기후정책을 전제로 하되, 우리나라가 유엔에 제출한 자발적 온실가스 감축계획을 달성하는 정책 시나리오이다. 경제 각 부문의 추가적인 온실가스 감축 노력으로 2030년 NDC 목표(2017년 배출량 대비 24.4% 감축, 2020년 12월 확정 제출)를 달성하고 이후에도 이에 준하는 노력을 추진한다. 모형에서는 “현정책지속” 시나리오에 탄소가격을 부과해 2030년 NDC를 달성하고, 이후 2050년까지 탄소가격이 경제성장률의 속도로 상승하도록 했다. 결국, 탄소가격 부과로 경제 각 부문의 한계감축비용이 일치되는 비용효과적인 온실가스 감축노력을 지속함을 전제로 한다.

3. 탄소중립: “현정책지속” 시나리오의 정부 에너지 정책을 전제로 하되, 2025년부터 우리나라의 연간 온실가스 배출량을 일정한 속도로 감소시켜 2050년에 온실가스 순배출량 넷제로를 달성하는 시나리오다. 모형에서는 “현정책지속” 시나리오에 탄소가격을 추가로 부과해 2025년부터 2050년까지 선형적으로 감소하는 온실가스 배출 제약을 만족시키도록 했다. 결국, 탄소가격 부과로 경제 각 부문의 한계감축비용이 일치되는 비용효과적인 온실가스 감축노력을 지속함을 전제로 한다.
4. 탄소중립_NoDAC: “탄소중립” 시나리오의 가정을 따르지만, 공기 중 탄소포집 기술(DAC)은 경제성이 확보되지 않아 활용되지 못하는 시나리오이다.

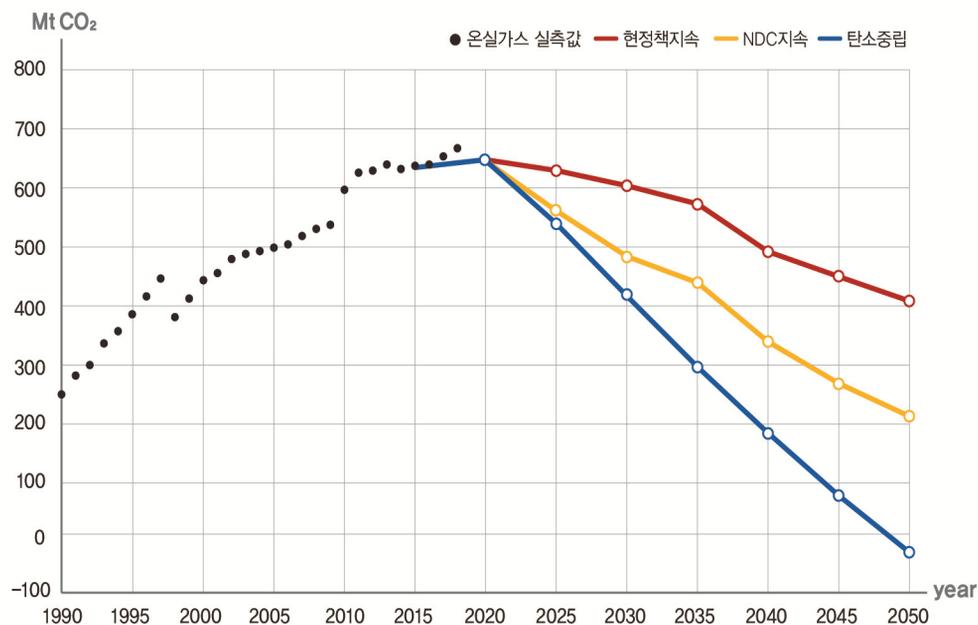
다만, 위의 탄소중립 시나리오 상의 2030년 배출 수준은 IPCC의 1.5도 목표 달성을 위한 2030년 국가 온실가스 감축목표와 차이가 발생하는데, 이는 본 모형 분석의 편의성을 위해 설정한 것으로 이해되어야 한다. 참고로 클라이밋 애널리틱스(Climata Analytics, 2020)에 의하면, IPCC 1.5도 목표 달성을 위해 한국의 2030년 온실가스 배출 수준은 2.9억 톤에서 최대 4억 톤 수준으로 제한되어야 한다고 제시했다.

내적 일관성과 설명가능성을 확보한 정량적인 시나리오 개발을 위해, 본 연구에서는 미국 퍼시픽노스웨스트 국립연구소(PNNL)의 GCAM 모형을 기반으로 한국형 모형인 GCAM-KAIST1.0을 개발했다. GCAM 모형은 IPCC 보고서에 지속해서 활용되어 온 대표적인 통합평가모형으로, 세계 각국의 대표적 경제 부문의 활동으로 온실가스가 배출되고 이 때문에 기후변화가 발생하는 전 과정을 각종 재화의 생산과 소비, 가격을 통한 시장균형, 경제성에 기반한 기술 간 경쟁과 연료대체를 통해 묘사하는 평가 체계이다. GCAM 모형에 대한 간략한 설명은 부록에 첨부했다(부록 4.8 참고). 아래부터는 위 시나리오에 따라 국가 전체의 온실가스 배출과 1차 에너지, 전력 부문, 최종에너지, 그리고 각 부문별 에너지 소비량을 각각 비교, 평가하였다.

2.2 국가 온실가스 배출량 분석 결과



〈그림 1: 시나리오별 우리나라 온실가스 배출 경로〉



〈그림 2: 시나리오별 우리나라 이산화탄소 배출량〉

GCAM-KAIST1.0 모형을 분석한 결과, 현재 정책이 지속될 경우 2020년부터 2050년까지 온실가스 배출량이 약 30% 감소되고, NDC 기조가 유지될 경우 2050년까지 약 60% 감소해, 탄소중립에 도달하지 못하는 것으로 나타났다(그림 1, 그림 2). 즉, 현정책지속 시나리오는 물론 NDC지속 시나리오도 2050 탄소중립 달성과는 상당한 괴리가 있을 것으로 보인다.¹⁾

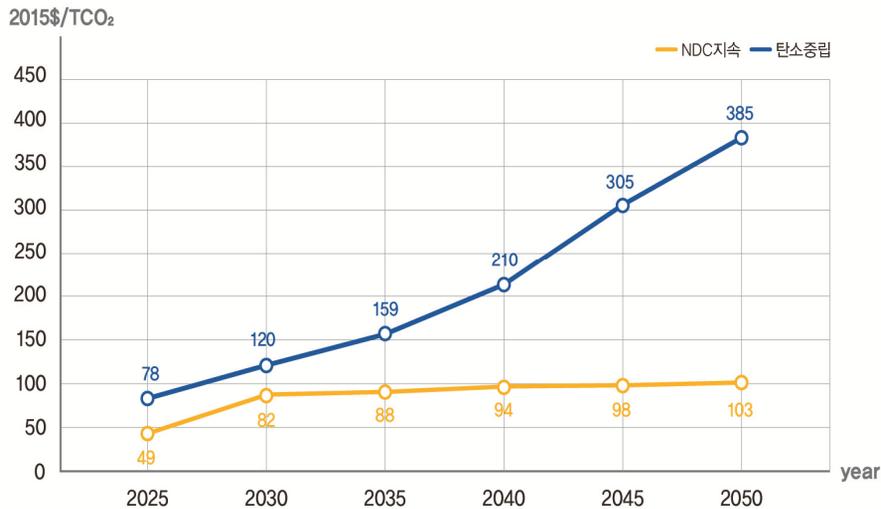
위 시나리오별 온실가스 및 이산화탄소 배출량 분석 결과는 다음과 같이 3가지로 요약할 수 있다.

첫째, 탄소중립은 물론 NDC 목표 달성을 위해서라도, 현재 시행 중인 것보다 훨씬 더 적극적으로 광범위한 온실가스 감축수단이 마련되어야 한다. 이를 위해 배출권거래제 및 탄소세와 같은 탄소가격 정책을 적극적으로 확대하는 것을 고려할 수 있겠다.

둘째, NDC 목표 시점인 2030년에 있어, NDC지속 시나리오와 탄소중립 시나리오의 배출량은 의미 있는 차이를 보인다. 탄소중립 이행을 위해 시점간 균등한 감축노력을 해 나갈 경우 2030년 배출량은 481 MtCO₂e인데, NDC 목표배출량은 536 MtCO₂e(국외감축분 제외)으로 그 수준을 상회하고 있다. 뿐만 아니라 NDC 목표배출량은 클라이밋 애널리틱스가 IPCC 1.5도 목표 달성에 요구되는 2030년 한국의 온실가스 배출 수준으로 제시한 290~400 MtCO₂e에 비하면 더욱 큰 차이를 나타낸다(Climate Analytics, 2020). 이는 현 NDC 목표 배출량이 탄소중립 이행을 위한 즉각적이고 정당한 노력을 추구하는 것에는 미치지 않음을 시사하고 있어, 우리 정부에서 현재 논의되고 있는 NDC 목표 상향 조정의 정당성을 부여하고 있다.

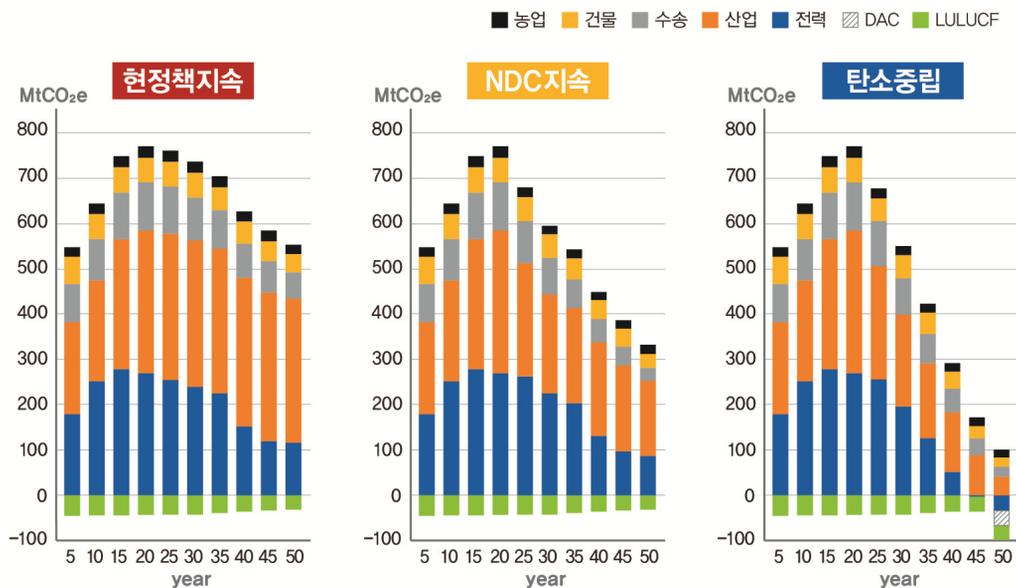
셋째, 국내에서 2050년 탄소중립 달성을 위해서는 비이산화탄소 배출을 상쇄할 수 있도록 사실상 이산화탄소 배출이 순-음수(Net-Negative)가 되어야 하며, 이를 위해 탄소순흡수 기술의 도입이 고려되어야 한다.

1) 그림 2의 온실가스 배출량이 과거치와 약간의 차이를 보이는 것은 상당부분 메탄가스(CH₄)에 적용된 온난화지수 값이 다르기 때문이다. 우리나라는 IPCC 2차 평가보고서의 메탄가스 온난화지수(21)를 사용하는 반면, GCAM-KAIST1.0은 IPCC 4차평가보고서의 온난화지수(25)를 사용하고 있다.



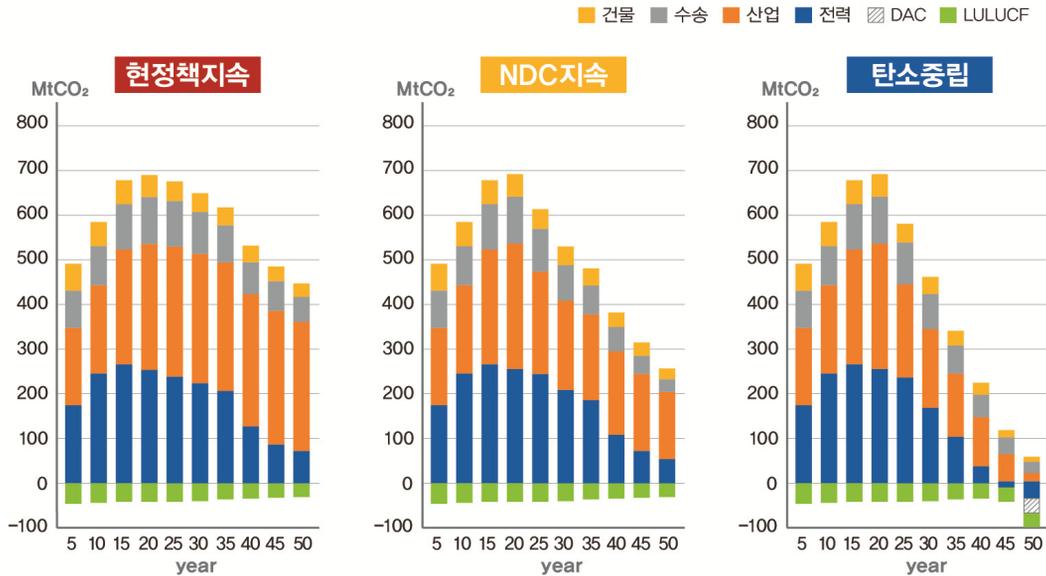
〈그림 3: 정책 이행에 요구되는 탄소가격〉

온실가스 감축을 위해 경제전반에 요구되는 감축노력은 탄소가격으로 평가할 수 있는데, NDC 기조를 유지하는 경우와 탄소중립 전환을 위한 탄소가격은 확연한 차이를 나타내는 것으로 평가되었다(그림 3). 탄소중립 전환을 위한 탄소가격은 NDC 기조를 유지하는 경우에 비해 약 2~3배 빠른 속도로 상승할 것으로 전망된다.²⁾



〈그림 4: 부문별 온실가스 배출량〉

2) 본 연구의 “현정책지속” 시나리오는 정부의 에너지기술 보급계획을 외생적으로 반영해 구현했다. 따라서, 그림의 탄소가격은, 현 정책이 지속됨을 전제로 할 때 NDC 및 탄소중립 이행을 위해 추가로 소요되는 탄소가격으로 볼 수 있다.

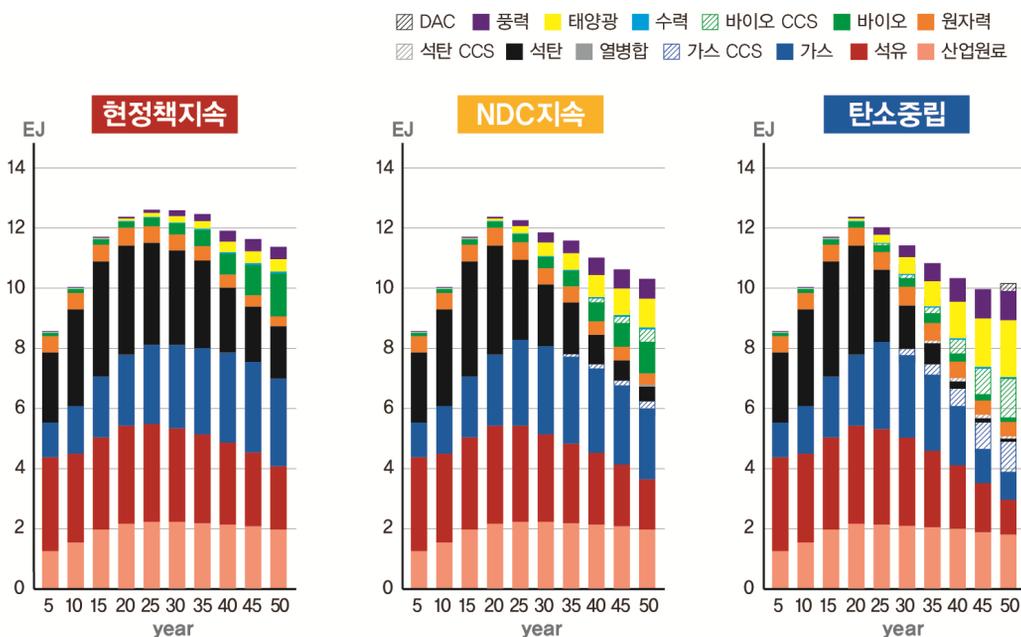


〈그림 5: 부문별 이산화탄소 배출량〉

우리나라의 전력 부문과 산업 부문 그리고 수송 부문은, 온실가스 배출량과 그 감축잠재량 측면에서 중추적인 역할을 할 것으로 전망된다(그림 4, 그림 5). 반면 건물과 농업 부문은 온실가스 배출량과 감축잠재량 측면에서 그 기여가 미미하다.

현 정책이 지속될 경우, 국가 온실가스 배출량은 2020년에 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 유지된다. 반면, NDC를 지속하거나 탄소중립을 추구할 경우, 전력과 산업, 그리고 수송 부문에서 온실가스 감축이 빠르게 진행될 것으로 전망된다. 특히, 현정책지속 시나리오는 불충분하다고 평가받는 2030 NDC지속 시나리오와 비교할 때 현격하게 부족한 것으로 나타나며, 이를 고려할 때 탄소중립 달성을 위해서는 보다 더 급진적인 탈탄소화 정책이 필요할 것이다. 또한 탄소중립 시나리오의 경우, 2050년에 여전히 온실가스 배출이 일부 발생할 수 밖에 없는데, 이를 상쇄하기 위한 토지이용, 토지이용 변경 및 임업(LULUCF), 바이오에너지 탄소 포집 및 저장기술, 그리고 공기 중 탄소포집 기술(DAC) 등 탄소순환 기술 도입을 고려할 필요가 있다.

2.3 1차 에너지 분석 결과



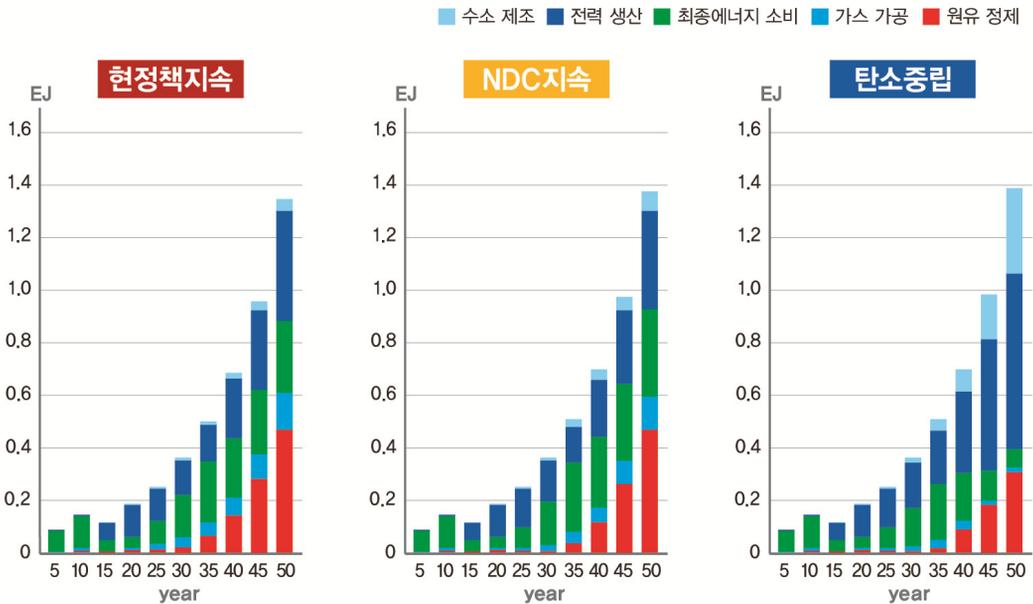
〈그림 6: 에너지원별 1차 에너지 소비량〉

현 정책기조가 유지될 경우, 1차 에너지 소비량은 2030년 무렵에 최대 수준에 도달하고 이후 점차 감소할 것으로 보인다(그림 6). 반면, NDC 혹은 탄소중립에 준하는 기후정책이 시행될 경우 탄소가격 상승의 효과가 에너지 가격에 반영되어 1차 에너지 소비량이 감소세로 전환하는 시점이 약 5년 가량 앞당겨지는 것을 알 수 있다.

에너지원 구성을 살펴보면, 현 정책기조가 유지될 경우, 비록 석탄과 석유 소비가 점차 줄지만 천연가스 소비는 지속 증가해 1차 에너지에서 화석연료가 차지하는 비중에 상당한 변화는 없다(그림 6). 다만, 태양광과 풍력, 바이오에너지 소비는 2050년까지 2020년 대비 각각 약 5배, 9배, 8배 가량 증가한다.

NDC지속과 탄소중립 시나리오의 경우, 1차 에너지 공급에서 화석연료 소비는 2050년까지 2020년 대비 절반 수준으로 현저히 감소하고 태양광과 풍력, 바이오에너지는 각각 10배, 15배, 7배 가량으로 급격히 상승한다(그림 6). 이 같은 에너지 시스템의 탈탄소화 경향은 NDC가 지속되는 경우보다 탄소중립의 경우 현저히 나타났다. 특히, 탄소중립 시나리오의 경우, 2040년 이후에는 탄소포집 기술이 적용되지 않은 천연가스와 바이오에너지의 비중은 대폭 축소되는 것으로 나타났다.

추가로 탄소중립 시나리오의 경우, 2050년에 본격적으로 도입이 예상되는 공기 중 탄소포집 기술(DAC) 가동으로 인해 가스 사용량이 소폭 상승하는 것으로 나타났다(그림 6).

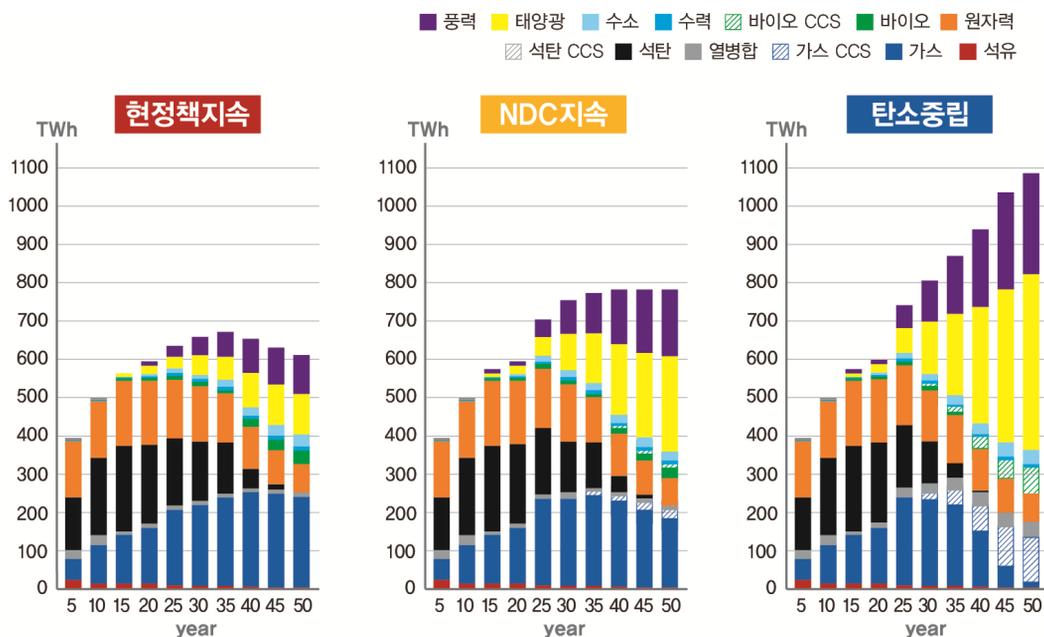


〈그림 7: 부문별 바이오에너지 소비량〉

바이오에너지는 원료 수급에 따른 제약을 고려할 때, 1차 에너지에서 차지하는 비중이 크지 않을 것으로 예상된다. 다만, 바이오에너지는 수소, 전기, 가스 등 다양한 형태로 변환될 수 있으며, 전체 에너지 시스템의 탈탄소화에 일정 수준으로 기여할 것으로 보인다(그림 7). 또한 탄소중립 시나리오에서는 탄소가격이 보다 급격하게 상승하는데, 이로 인해 수송 부문보다는 전력이나 수소 부문의 비중이 보다 높아질 것으로 예상된다.

다만, IPCC의 가이드라인에 따라 바이오매스의 연소 과정에서의 배출량은 산림 부문(LULUCF)에서의 배출량을 고려하여 국가 전체 배출량 산정에 포함되지 않는다는 점을 유념해야 한다.

2.4 전력 부문 분석 결과



〈그림 8: 에너지원별 전력 부문의 발전량〉

전력 부문의 에너지 믹스는 기본적으로 제9차 전력수급기본계획에 따른 발전소 공급계획이 반영되어 있으므로, 석탄발전의 비중 축소가 두드러지게 나타난다(그림 8). 하지만 에너지 믹스의 변화 속도는 시나리오별로 차이를 보인다.

첫째, 현 정책이 지속될 경우에도, 전력 부문의 향후 30년간 배출량이 절반 이상 감소할 정도로 상당한 에너지 믹스 변화를 경험할 것이다. 제9차 전력수급기본계획에 준하는 발전설비를 구성할 경우, 2035년까지 2020년 대비 석탄발전 비중은 35% 감소하고, 재생에너지는 250% 확대되지만, 동시에 가스발전의 비중도 150% 증가하게 된다.

둘째, NDC 혹은 탄소중립에 준하는 기후정책이 본격 시행될 경우, 현 정책이 유지되는 경우 보다 석탄발전 퇴출은 더욱 빠르게, 태양광, 풍력, 바이오 등 재생에너지 발전은 더욱 큰 폭으로 확대될 것이고, 그 변화의 폭은 탄소중립의 경우 훨씬 더 크게 나타난다(그림 8). NDC지속 시나리오의 경우, 2030년 석탄 발전량은 2020년 대비 약 35% 감소하고, 2045년에 95% 이상 감소하면서 퇴출한다. 재생에너지는 2020년 수준보다 2030년에는 약 5배 증가하고, 2050년에는 약 13배 증가한다. 탄소중립 시나리오의 경우, 2030년에 도달하면 석탄의 발전 비중이 전체 발전량의 10% 정도까지 하락하여 사실상 전력시장에서 퇴출될 것으

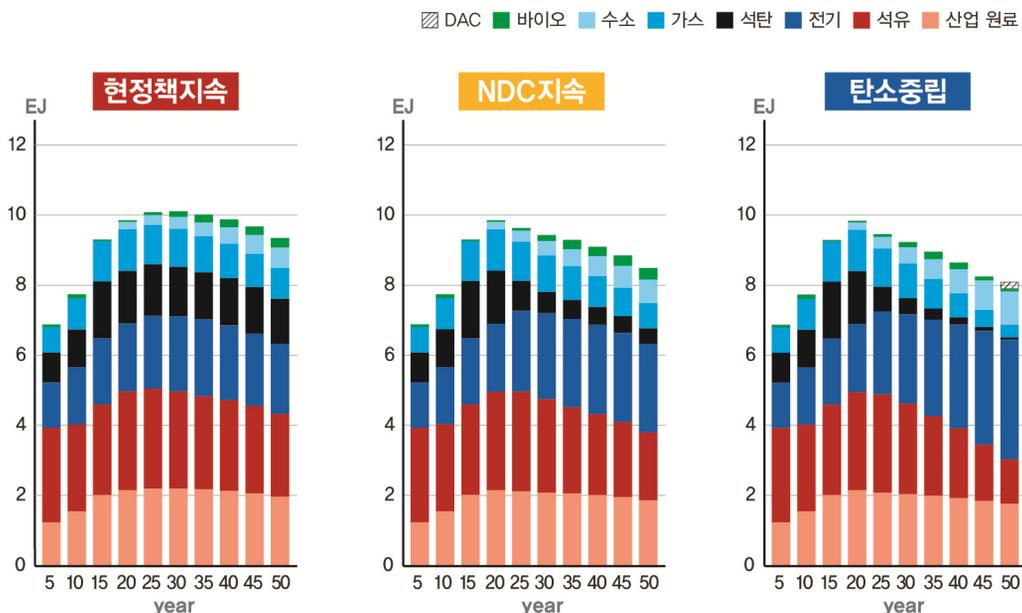
로 예상된다. 재생에너지는 2020년 수준보다 2030년에는 약 7배 증가하고, 2050년에는 약 20배 증가한다. 이에 따라, 국내 전력 부문 발전량은 NDC지속과 탄소중립 시나리오의 경우 각각 2050년까지 현재 대비 30%와 80% 확대될 것으로 예상된다.

셋째, 기후정책 시행에 따른 전력 부문의 탈탄소화는 온실가스 감축에 크게 기여한다. 현재 정책을 지속하는 시나리오 대비 NDC지속 시나리오의 경우, 전력 부문 온실가스 배출량은 각각 2030년 기준 18%, 2050년 기준 68%가 감소하는 것으로 나타났다. 마찬가지로, 현재 정책을 지속하는 시나리오 대비 탄소중립 시나리오의 경우, 전력 부문의 온실가스 배출량은 각각 2030년 기준 31%, 2050년 기준 91%가 감소하는 것으로 나타났다.

넷째, 전력 부문의 탈탄소화 이행 과정에서 두 가지 옵션을 고려할 수 있다. 첫 번째는 이산화탄소 포집기술(CCS)인데, 2030년부터 가스발전을 중심으로 CCS가 도입되고, 이후에는 비중이 증가하게 된다. 특히 탄소중립 시나리오에서는 바이오에너지 발전 및 탄소 포집·저장 기술(BECCS)의 적용에 따라 2045년부터 발전 부문에서의 순-음수 배출이 가능할 것으로 예상된다. 이에 따라, 발전 부문 내 이산화탄소 누적 포집량은 NDC지속과 탄소중립 시나리오에서 각각 2050년까지 1억 5천만 톤과 8억 8천만 톤이 될 것으로 예상된다.

전력 부문의 탈탄소화에 따라 요구되는 두 번째 이슈는 재생에너지의 출력 변동성을 보완할 수 있는 유연성 자원의 도입이다. 향후 재생에너지의 급속한 확대에 따라 계통 안정성 확보를 위한 유연성 자원에 대한 투자도 증가할 것이다. 현재 정책 지속 시나리오 대비, NDC지속 및 탄소중립 시나리오에서는 2020년 대비 2050년 기준으로 유연성 자원에 의한 발전량이 각각 150%, 250% 증가할 것으로 예상된다(부록 4.5 참고).

2.5 최종에너지 부문 분석 결과



〈그림 9: 에너지원별 최종에너지 소비량〉

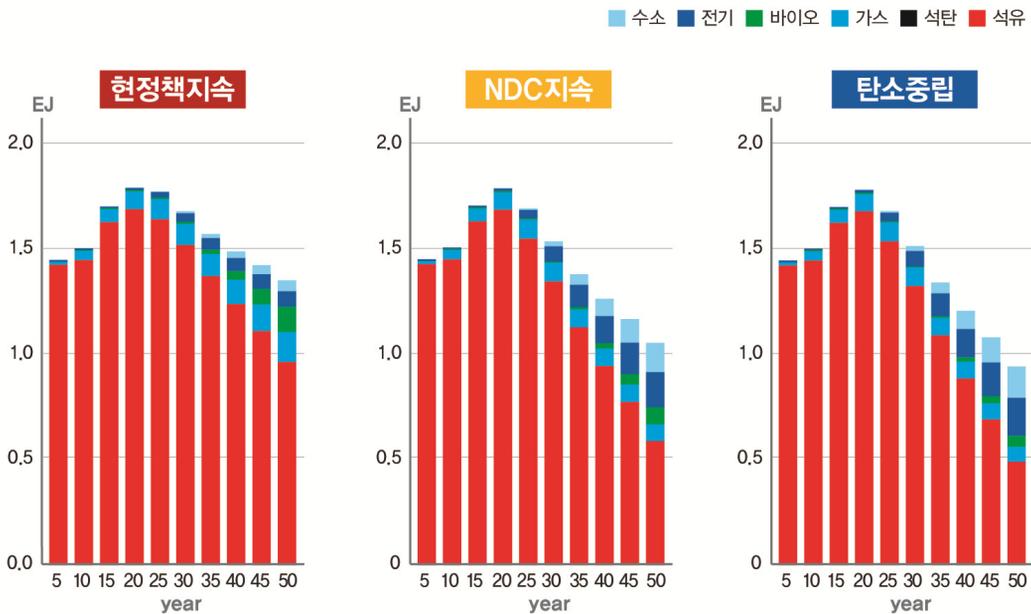
현 정책이 유지될 경우, 최종에너지 소비는 2030년까지 완만히 증가하다가 이후 경제 전반의 지속적인 에너지 효율 향상으로 2050년에는 2020년 대비 약 5% 감소한다(그림 9). 그러나, 각종 에너지원이 차지하는 비중에는 큰 변화가 나타나지 않을 것으로 전망된다.

반면, NDC 혹은 탄소중립에 준하는 기후정책이 시행될 경우, 최종에너지 소비는 이미 2020년대 중반부터 감소세로 접어들게 되고, 2050년까지 2020년 대비 각각 약 14%, 20%로 빠르게 감소한다(그림 9). 이는 경제 각 부문에서 에너지 효율 개선과 더불어 전기화(Electrification)가 가속화되기 때문이다. 특히, 전기화는 탄소중립 정책을 추진할 경우, 더욱 빠르게 진행된다.

2050년 최종에너지에서 전기가 차지하는 비중은 NDC지속의 경우 30% 수준이며, 탄소중립 시나리오의 경우 40% 수준까지 달하게 된다. 이와 동시에 석탄과 석유 소비는 지속적으로 감소하는데, NDC지속 시나리오의 경우, 석탄은 2020년 대비 2050년에 약 35% 수준으로, 석유는 약 75% 수준에 이르게 된다. 석탄 및 석유 소비 감소는 탄소중립 정책 추진 시 더욱 급속히 진행되어 2050년까지 각각 대략 5%와 40% 규모로 축소되면서 최종에너지 부문의 탈탄소화를 견인할 것으로 평가된다. 신기술인 수소는 기후정책을 강화할수록 그 보급 속도가 빨라지는데 탄소중립을 추진할 경우 수소 소비는 2050년까지 현재의 가스 소비량 수준까지 확대될 것으로 보인다.

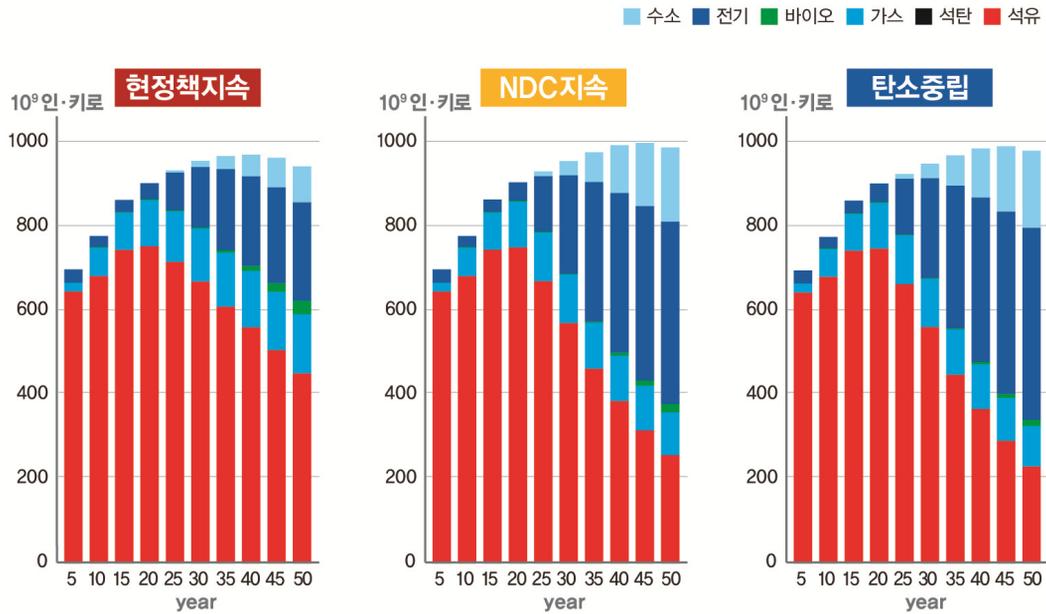
무엇보다, 적극적인 기후정책 시행에 따르는 최종에너지 수요부문의 빠른 전기화(Electrification)는, 앞서 논의한 전력 부문 탄소집약도의 빠른 감소(Decarbonization)와 연계되어 우리나라 NDC 달성은 물론 장기적 탄소중립 목표 달성에 중추적인 역할을 할 것으로 기대된다. 그러나 이 사실은, 전력 부문의 탈탄소화가 전제되지 않음에도 최종수요의 전력화를 추진할 경우, 국가 온실가스 감축 측면에서 그 효과가 미미할 것임을 함께 시사한다.

2.5.1 수송 부문 분석 결과

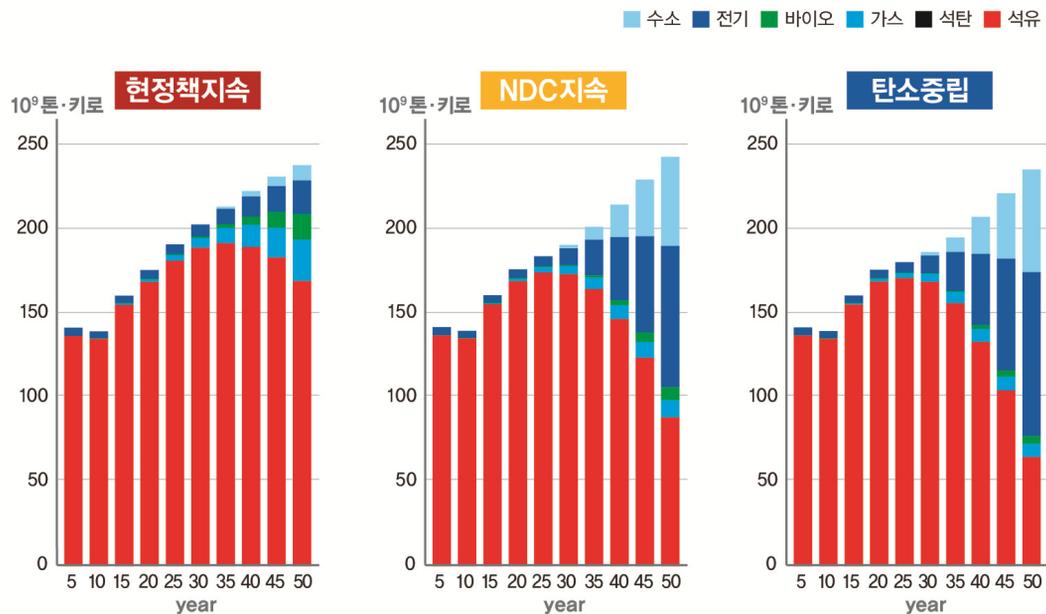


〈그림 10: 수송 부문 원별 에너지 소비량〉

수송 부문은 인구의 감소와 차량의 온실가스 배출 규제, 그리고 연료효율이 상대적으로 높은 전기자동차의 보급 확대로 최종에너지 소비가 점차 감소할 것으로 전망된다(그림 10). 현 정책 기조가 지속될 경우 2050년 석유의 최종에너지 소비는 약 75%를 차지하지만, NDC 혹은 탄소중립에 준하는 기후정책이 본격적으로 시행될 경우 석유의 비중은 각각 55% 및 50%로 감소하고 전력과 수소에너지 소비는 약 30%까지 증가하는 것으로 나타났다. 현 정책 지속 시나리오에 비해, NDC 및 탄소중립 정책을 추진할 경우 최종에너지 감소가 더욱 가속화되는데, 이는 내연기관 차량의 평균 온실가스 배출이 감소하는 동시에 에너지 효율이 높은 전기자동차의 보급이 더욱 확대되기 때문이다.



〈그림 11: 연료별 여객수송량 수요(십억 인킬로)〉



〈그림 12: 연료별 화물수송량 수요(십억 톤킬로)〉

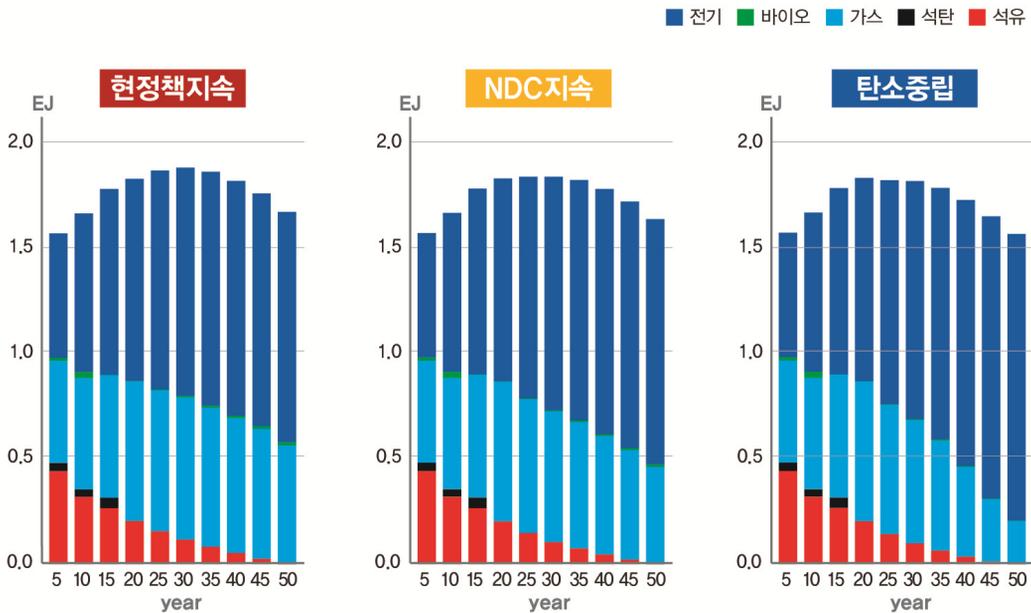
여객과 화물 수송량(인킬로, 톤킬로)에 기반하여 수송 부문의 변화를 살펴보면 그 구조적 변화가 좀 더 분명히 나타난다(그림 11, 그림 12). 본 연구 결과에 따르면, 기존의 내연기관

차량이 담당하던 여객과 화물수송 수요가 전기, 수소, 바이오연료 기반의 친환경 차량으로 대체되는 과정을 통해, 수송 부문의 온실가스 배출이 큰 폭으로 감소할 것으로 예상된다. 이 같은 기술대체 현상은, 친환경 차량이 기술발전으로 경제성이 확보되는 동시에 탄소가격으로 인해 내연기관 차량의 연료비가 상승하는 효과가 동시에 발생하면서 가속화될 것으로 예상된다.

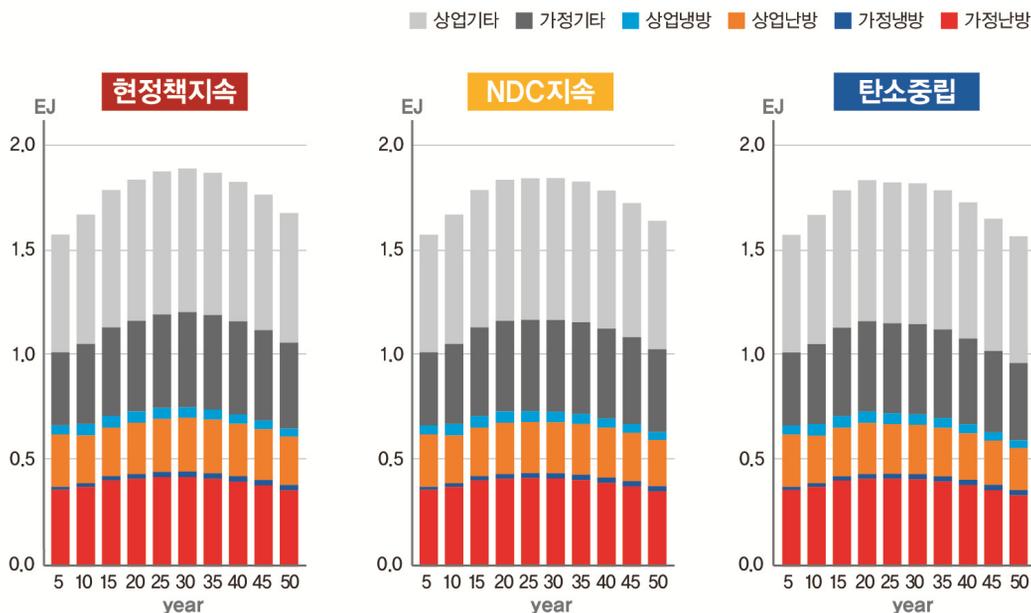
그러나, 수송 부문의 탈탄소화는 다음 두 가지 측면에서 한계를 갖는 것으로 보인다. 첫째, 여객수송과 화물수송 모두 운송수단의 모달시프트(Modal Shift)를 통한 온실가스 감축의 효과는 거의 없는 것으로 평가되었다. 여객수송 면에서는 버스나 철도가 개인차량보다 단위 서비스당 에너지 효율이 높고, 화물수송 면에서는 철도나 해운이 트럭보다 에너지 효율이 높는데, 기후정책 시행은 운송수단 선택에 있어 의미있는 행태 변화를 유인하지는 못했다.

둘째, 내연기관 차량 판매 금지 등의 추가적인 조치가 모형에 반영되지 않았기 때문에, 친환경 차량 확대를 통해 2050년까지 완전 탈탄소화를 달성하는 것은 어려운 것으로 예상된다.

2.5.2 건물 부문 분석 결과



〈그림 13: 건물 부문 원별 에너지 소비량〉

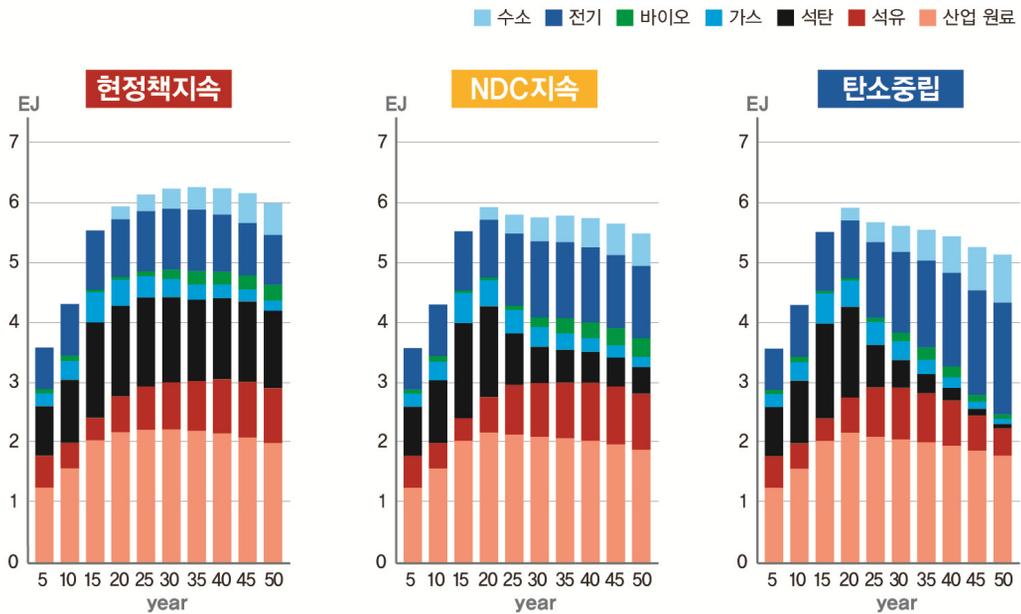


〈그림 14: 건물 부문 서비스별 에너지 소비량〉

건물 부문의 최종에너지 수요는 완만히 증가하다가 2030년부터 점차 감소한다(그림 13, 그림 14). 이는 건물의 단열성능 개선, 에너지 기기의 효율향상, 그리고 연료 효율이 높은 가전기기의 보급 확대에 기인한다. 그러나 시나리오에 반영된 건물의 단열성능 개선 속도로는 최종에너지 소비에서 냉난방 에너지가 차지하는 비중을 감소시키지 못하는데, 이는 단열성능 향상을 위한 좀 더 적극적인 정책 추진으로 건물 부문의 온실가스 감축 노력을 한층 더 강화할 여지가 있음을 시사한다.

다른 부문과 달리, 건물 부문의 원별 에너지소비 변화 추세는 기후정책 시행 여부에 의해 큰 영향을 받지 않는데, 이는 현 정책 하에서도 이미 전기화 및 화석연료 퇴출이 빠르게 진행되기 때문이다. 현 정책 시나리오의 경우 2050년 전력 최종에너지 소비는 약 65%를 차지하지만, NDC 시나리오의 경우 약 70%, 탄소중립 시나리오의 경우 약 85%로 증가하는 것으로 평가되었다. NDC지속 및 탄소중립 정책이 추진되면 전기화가 좀 더 촉진되긴 하지만 이 경우 이미 빠르게 퇴출하는 석탄이나 석유를 대체하기 보다는 소비량이 안정적으로 유지되는 가스를 대체하기에 온실가스 감축 효과는 경감된다.

2.5.3 산업 부문 분석 결과



〈그림 15: 산업 부문 에너지원별 에너지 소비량〉

산업 부문의 최종에너지 수요는, 현 정책이 지속될 경우 2035년까지 증가하다가 이후 경제 활동 전반의 에너지 집약도 감소와 산업 기기의 효율개선으로 완만한 감소 추세를 나타낸다 (그림 15). 이 경우, 수소 연료 소비는 2050년까지 2020년 대비 약 2배 이상 증가하지만, 화석연료의 비중에는 거의 변화가 없어 결국 온실가스 감축을 이끌어내지는 못한다.

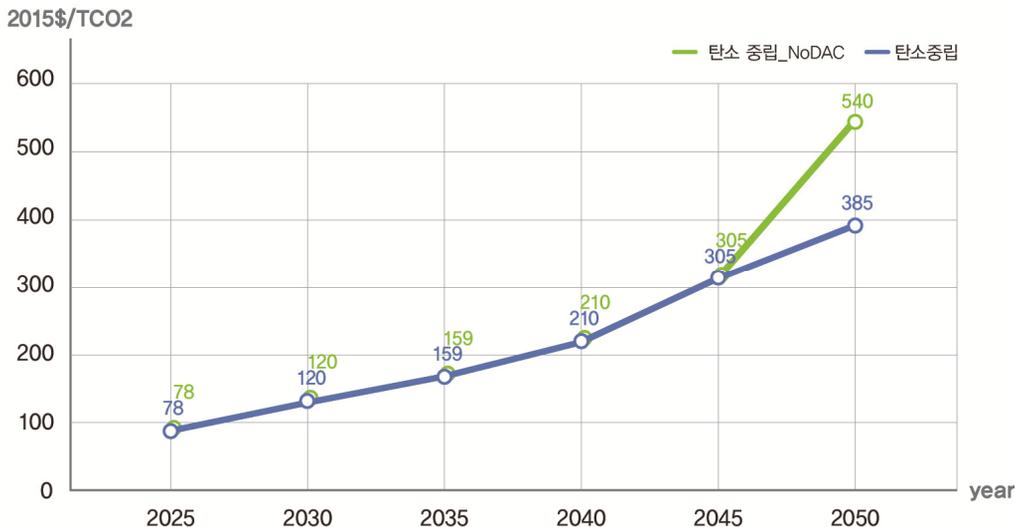
반면, 적극적인 기후정책이 추진될 경우, 산업 부문은 화석연료 소비가 급감하면서 전력과 수소로의 연료 전환이 빠르게 진행되고, 이 같은 변화는 탄소중립 정책의 경우 더욱 가속화 되는 것으로 나타났다. 특히 석탄은 탄소중립 시나리오의 경우, 2030년부터 사실상 퇴출의 수순을 밟게 되는 것으로 보인다.

다만, GCAM-KAIST1.0 모형에서는 우리나라의 산업 구조 변화를 다루지 않았다는 한계가 있으며, 이는 향후 추가 연구를 통해 보완되어야 할 필요가 있다.

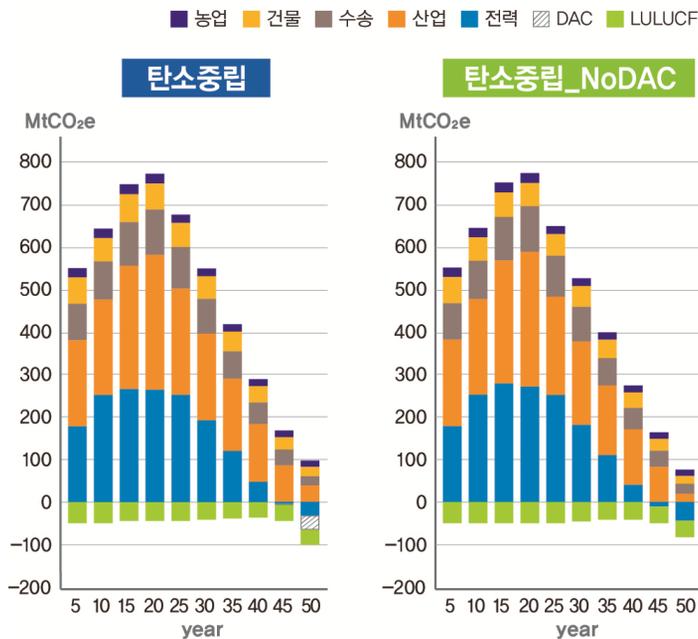
2.6 공기 중 탄소포집 기술(DAC)의 역할

마지막으로, 2050년 무렵 탄소중립 이행에 있어 역할을 담당할 수 있는 공기 중 탄소포집 기술(Direct Air Capture, 이하 DAC)의 가용성 여부에 대한 민감도를 분석하였다. 특히 정책

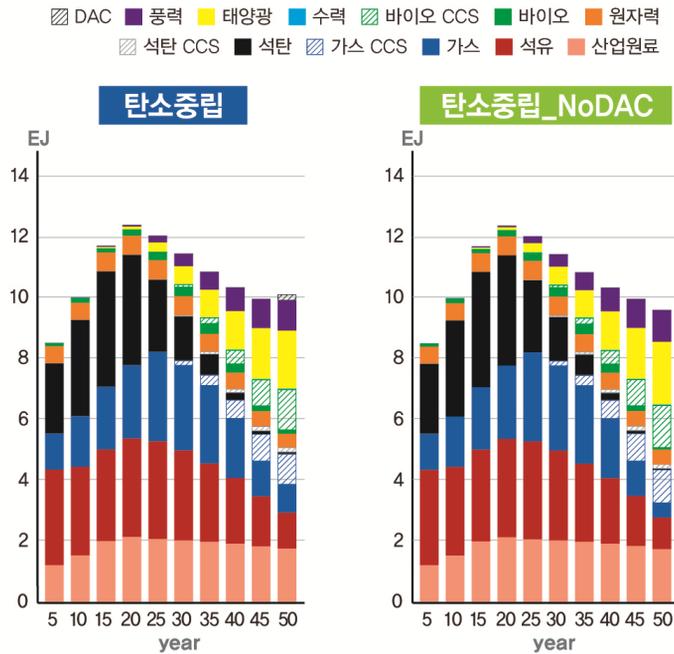
이행을 위한 탄소가격, 1차 에너지 소비, 부문별 온실가스 배출량, 이산화탄소 포집량 측면에서 탄소중립과 탄소중립_NoDAC 시나리오가 갖는 의미를 살펴보았다.



〈그림 16: 탄소중립 전환 시 DAC 유무에 따른 탄소가격 비교〉



〈그림 17: 탄소중립 전환 시 DAC 유무에 따른 부문별 온실가스 배출량 비교〉

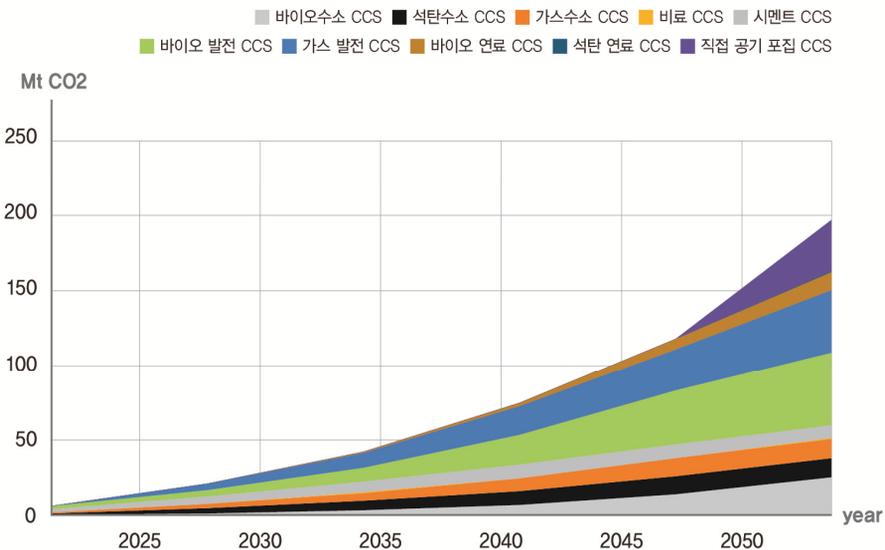


〈그림 18: 탄소중립 전환 시 DAC 유무에 따른 1차 에너지 소비량 비교〉

탄소중립 이행을 위한 적극적인 노력에도 불구하고 DAC 기술이 경제성을 확보하지 못할 경우, 2050년 톤당 550불 수준까지 도달할 것으로 예상된다(그림 16). 이에 따른 에너지 재화의 가격 상승 효과로, 탄소중립_NoDAC 시나리오의 경우 탄소중립 시나리오에 비해 2050년에 1차 에너지소비량이 5% 감소하게 되어 세기 중반 우리 경제 전반에 추가적인 비용 요인으로 작용할 것으로 보인다(그림 18). 또한, 2050 탄소중립 목표 달성에 있어, 순흡수 기술인 DAC가 가용하지 않다는 것은, 온실가스 순-음수 배출의 여지가 축소될 수밖에 없음을 의미한다(그림 17).

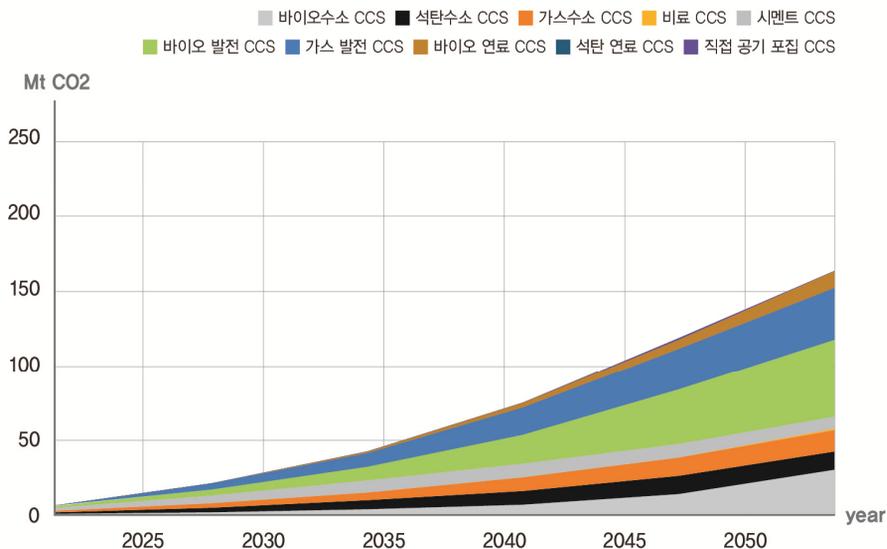
50년 이산화탄소 누적 포집량 : 17억 8천톤

탄소중립 이산화탄소 포집량



50년 이산화탄소 누적 포집량 : 17억톤

탄소중립_NoDAC 이산화탄소 포집량



<그림 19: 탄소중립 전환 시 DAC 유무에 따른 연간 이산화탄소 포집량 비교>

그러나, DAC에 기반해 탄소중립을 이행할 경우, 이산화탄소의 포집 및 저장에 있어 부담을 가중시킬 것으로 예상된다(그림 19). 이산화탄소 포집 및 저장 활용에 대한 수요는 바이오 수소 생산, 바이오에너지 발전, 가스발전 등 다양한 부문에서 지속적으로 증가할 전망이다. 탄소중립 시나리오에서는 2050년까지 이산화탄소 누적 포집량이 약 17.8억톤에 이르게 될 것으로 보인다. DAC를 활용하지 않을 경우, 이산화탄소 포집 및 저장활용에 대한 수요는 약 17억톤으로 감소하게 된다.

본 연구에서는 고려하지 못했지만, 이산화탄소 해상 지중매장 가능 지역과 잠재량에 대한 보다 심도 있는 추가 연구가 필요하며, 해당 연구의 결과에 따라 DAC를 포함한 CCS 기술에 의한 포집량을 제한해야 할 가능성도 있다.

3. 결론 및 고찰

2050
탄소중립 전환
시나리오 
한국형 통합평가모형 분석

3.1 탄소중립 달성 방향

본 연구에서는 한국형 통합평가모형 GCAM-KAIST1.0을 개발하고, 2050년 탄소중립 이행을 위한 시나리오 구성 및 결과를 도출하였다. 이를 통해 다음과 같은 탄소중립 이행의 요건을 도출했다.

첫째, 2050년까지 탄소중립을 달성하기 위해 시점 간 균등한 감축을 이행하려면, 2030 NDC 목표의 상향 조정은 물론, 2050년까지 전 부문(전력, 건물, 산업, 수송)의 포괄적인 온실가스 감축을 위한 명확한 정책 목표 수립과 정책 수단 도입을 필요로 한다.

둘째, 전력 부문의 2050 탄소중립 이행을 위해 재생에너지와 유연성 자원(ESS 등)의 급속한 확대가 요구된다. 특히, 건물과 수송 부문에서의 급속한 전기화에 따라 전력 수요 증가가 예상되는데, 현 에너지 정책 기조를 고려해서 양수발전, ESS, DR 등을 활용한 안정적인 전력계통 운영방안도 마련되어야 한다.

셋째, 전력 부문의 탈탄소화(Decarbonization)와 연계된 최종 수요의 전기화(Electrification)가 탄소중립 달성에 있어 중추적인 역할을 할 것으로 평가되었다. 특히, 온실가스 감축을 위한 경제 전반의 노력은 전력 부문의 탈탄소화를 가속화하는 동시에 최종 수요부문의 전력화 및 화석연료 퇴출을 촉진하는데, 탄소중립 시나리오의 경우 2050년 전력 생산량이 현 수준 대비 80% 정도 증가되어야 함을 의미한다.

넷째, 화석연료 의존성이 높은 우리나라 에너지 부문의 탈탄소화를 위해 재생에너지가 대폭 확대되는 것이 필요하며, 이에 따라 일부 가동이 불가피한 바이오매스와 가스발전에 대한 CCS 도입이 필요할 수 있다. 본 연구 결과에 따르면, 2050년 기준 약 2억 톤의 포집량이

발생하는데, 국내 이산화탄소 저장 잠재량 규모를 고려하여 CCS의 필요성과 도입 수준을 결정해야 한다. 이산화탄소 지중 매장 요구량을 줄이기 위해, 탄소를 자원으로 활용하는 탄소자원화(CCU) 기술의 개발과 보급도 함께 고려할만 하다.

다섯째, 탄소중립 이행을 위한 적극적인 감축 노력에도 불구하고, 장기적으로 잔존하는 온실가스 배출을 상쇄하기 위해서는 탄소 순흡수기술(NETs)인 토지이용, 토지이용 변경 및 임업(LULUCF), 공기 중 탄소포집 기술(DAC), 바이오에너지 탄소 포집·저장기술(BECCS)을 고려할 필요가 있다. 특히, 기술적 불확실성이 비교적 높은 DAC 기술과 BECCS 기술의 가용성은 탄소중립 이행에 따른 경제적 부담을 줄이는 하나의 옵션이 될 수 있으므로, 향후 장기적인 연구개발과 실증사업을 통해 경제성 확보 방안을 모색해야 한다.

3.2 정책 권고

2050 탄소중립을 추진하는 과정에서 가장 시급한 과제는 무엇보다 2030 국가 온실가스 감축목표를 대폭 상향하는 것이다. 현재 감축목표인 2017년 배출량 대비 24.4% 감축 수준은 IPCC의 1.5도 달성을 위한 세계적인 감축 노력과 동떨어진 것이다. 2030 국가 온실가스 감축목표는 2015년부터 시행 중인 배출권거래제의 할당량(Cap) 설정과 긴밀하게 연결되어 있기 때문에, NDC 목표 상향에 따른 즉각적인 감축 효과를 기대할 수 있다.

특히 에너지다소비 업종에 포함되어 있는 대규모 사업장은 대부분 배출권거래제 내의 산업 및 건물 부문에 포함되어 있기 때문에, 할당량 감소에 따른 배출권 가격의 상승은 분명한 가격 신호를 제공해 기업들로 하여금 재생에너지와 효율개선 투자를 확대하게 만드는 주요 동인이 될 수 있다.

또한 2030 NDC 목표는 수송 부문의 온실가스 감축목표와도 연계되어 있다. 2012년부터 자동차 평균 온실가스 규제 제도가 시행 중인데, 2021년부터 10년 동안 장기 목표를 설정한 상황이다. 2030 NDC 목표 상향에 따라 기존에 수립했던 규제 수준도 대폭 수정되어야 하며, 이에 따라 차량 판매사의 친환경차 판매 비중이 강화되어 수송 부문에서의 전기차로의 전환을 촉진시킬 수 있다. 추가로 캘리포니아주처럼 친환경차 의무판매제를 도입하여 전기차 도입 및 확산을 가속화시킬 수 있는 제도 도입도 적극 검토해야 한다.

본 연구 결과처럼, 전력 부문의 에너지 전환 가속화를 위해서는 경제성이 급격히 저하될 석탄발전의 퇴출을 지속적으로 앞당기는 정책이 수립되어야 하며, 재생에너지 변동성을 해소

할 수 있는 유연성 자원에 대한 인센티브 제도를 확대하는 등 제도적 보완 방안을 마련할 필요가 있다. 또한 가스발전의 경우 예비력 확보 및 유연성 자원으로서의 가능성, 온실가스 배출량 등 다양한 측면을 고려하여 현재 제9차 전력수급기본계획 상의 가스발전의 용량이 적정하게 설정되어 있는지 검토가 필요하다.

전력시장도 탈탄소화를 가속화할 수 있는 구조로 전환되어야 한다. 이러한 관점에서 기존 변동비 기반 비용평가 시스템에서 탄소가격을 제대로 반영할 수 있는 가격 기반 도매시장 구조로 대폭 변화가 필요하며, 정부가 통제하는 소매요금에 적절하게 환경 비용이 포함되어 소비자의 행태 변화를 이끌어낼 수 있는 구조가 정립되어야 한다. 장기적으로는 소매요금의 동태성 도입으로 수요자원을 확충해 재생에너지 확대에 따른 전력시장 수급 불안정성을 완화하는 방안도 고려해야 한다.

에너지 사용의 측면에서는 무엇보다 제3차 에너지기본계획에서 명시하는 부문별 최종에너지 목표 수요를 강화하고 에너지 효율 개선에 보다 많은 재정 투자가 이루어질 수 있는 제도적 기반을 마련하는 것이 필요하다. 기존에 추진 중인 에너지효율화 사업의 재원을 확충하여 건물, 산업, 가정 등 전 부문에 걸쳐 에너지 효율 투자가 활성화될 수 있도록 기후대응기금 등의 도입을 적극 추진할 필요가 있다. 이 과정에서 기존 교통에너지환경세 등 세제 개편을 통해 탄소세를 추가로 도입해 탄소중립 전환 투자의 재원으로 활용하는 방안도 고려해야 한다.

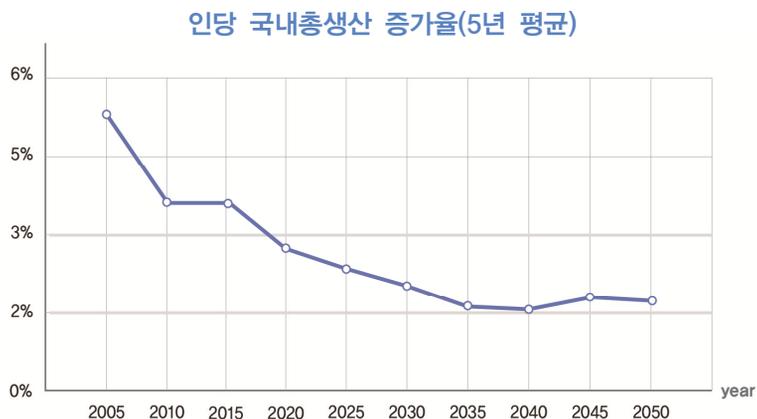
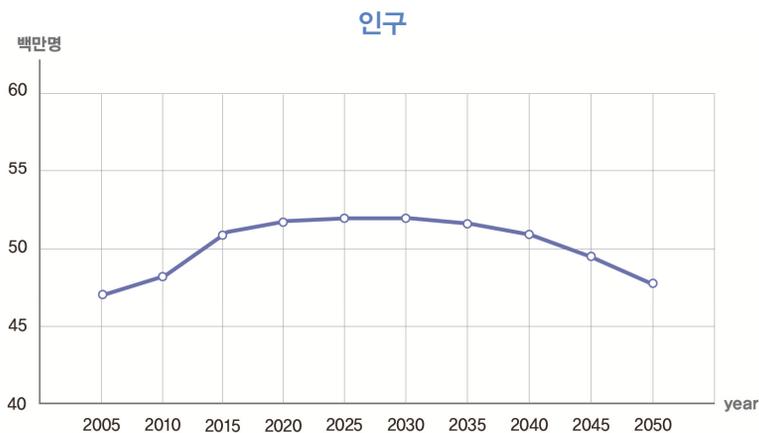
2050 탄소중립 이행 과정에서 일부 도입이 불가피한 바이오매스와 가스발전에서의 이산화탄소를 줄이는 노력도 필요하다. 이미 국가 R&D 차원에서 CCS 기술에 대한 다양한 투자와 지원이 진행되고 있는데, 앞서 언급한 것처럼 확보 가능한 해상 지중매장량과 수준과 경제성, 탄소자원화기술(CCU)의 기획 등 종합적인 관점에서 적정 수준의 CCS 도입 방안을 검토하는 것이 필요하다. 또한 국가 전략적 차원에서 토지이용, 토지이용 변경 및 임업(LULUCF), 공기 중 탄소포집 기술(DAC), 바이오 에너지 탄소 포집·저장기술(BECCS), 토양 탄소저장과 같은 다양한 탄소 순흡수 기술에 대한 장기적인 연구개발 지원이 필요하다.

4. 부록

2050
탄소중립 전환
시나리오 
한국형 통합평가모형 분석

4.1 우리나라의 사회경제 전망

GCAM-KAIST1.0의 우리나라 인구가정은 통계청(2019) 전망을, 경제성장률은 산업연구원 (2019) 전망을 활용했다.



4.2 전력 부문 발전기술 비용 전망

GCAM-KAIST1.0의 우리나라 전력 부문 발전기술 비용과 전망값은 BNEF(2019)와 NREL(2019)의 비용과 전망값을 기반으로 아래와 같이 작성했다.

4.2.1 기존 발전기술의 비용

발전기술	단위	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
석탄	2015\$/kW	3,892	3,892	3,678	3,310	2,943	2,575	2,207	1,839	1,655	1,541
복합화력	2015\$/kW	883	883	817	817	817	817	817	817	817	817
원자력	2015\$/kW	6,268	6,268	6,268	6,154	5,963	5,823	5,665	5,506	5,352	5,157
유류	2015\$/kW	1,195	1,059	1,059	901	864	842	828	817	809	791

4.2.2 재생에너지 발전기술의 비용

발전기술	단위	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
태양열	2015\$/kW	5,470	5,470	5,407	3,939	3,862	3,814	3,752	3,689	3,634	3,546
태양열연계ESS	2015\$/kW	9,119	8,350	8,350	8,350	8,350	8,350	8,350	8,350	8,350	8,350
태양광	2015\$/kW	2,453	2,453	2,453	1,269	1,144	1,019	964	905	857	809
태양광연계ESS	2015\$/kW	5,014	4,079	2,943	2,567	2,122	1,835	1,729	1,618	1,519	1,420
지붕형태양광	2015\$/kW	5,356	3,984	3,984	2,464	2,034	1,593	1,479	1,361	1,287	1,240
바이오매스	2015\$/kW	4,557	4,285	4,164	3,962	3,862	3,814	3,752	3,689	3,634	3,546
육상풍력	2015\$/kW	2,023	2,023	1,659	1,523	1,387	1,247	1,188	1,129	1,070	1,008
해상풍력	2015\$/kW	5,517	3,678	3,807	2,921	2,479	2,108	1,791	1,519	1,291	1,100
풍력연계ESS	2015\$/kW	3,369	3,285	3,285	2,818	2,361	2,064	1,953	1,843	1,732	1,618

4.2.3 공기 중 탄소포집 기술의 비용

GCAM-KAIST1.0은 공기 중 탄소포집 기술의 경제성을 반영하기 위해, 외생적으로 가정한 기술 투자 비용은 물론, 기술을 가동하기 위한 에너지 비용(천연가스 및 전기)을 모두 고려한다. 이 때 사용된 공기 중 탄소포집 기술의 비용은 Fuhrman et al., (2020)을 따랐다. “탄소중립” 시나리오에는 저비용 DAC 기술 가정, “탄소중립_NoDAC” 시나리오에는 고비용 DAC 기술을 가정했다.

2050년 기술	천연가스 (GJ/tCO2)	전기 (GJ/tCO2)	물 (m3/tCO2)	비에너지비용 (2015\$/tCO2)
저비용 DAC	5.3	1.3	4.7	180
고비용 DAC	8.1	1.8	4.7	300

4.3 수송 수단별 기술 비용 전망

GCAM-KAIST1.0에 적용된 수송 수단과 수송 기술 구분은 기본적으로 UC Davis (2013)을 따랐으며 Eom et al., (2010) 및 Eom et al., (2012)의 우리나라 수송 기술별 에너지 밀도, 수송률 가정을 적용했다. 수송 수단별 기술 비용은 우리나라 현실에 맞는 기술 비용을 기준으로 Begero et al., (2021)에 적용된 기술별 비용 감소 추세를 반영했다.

4.3.1 승객 수송

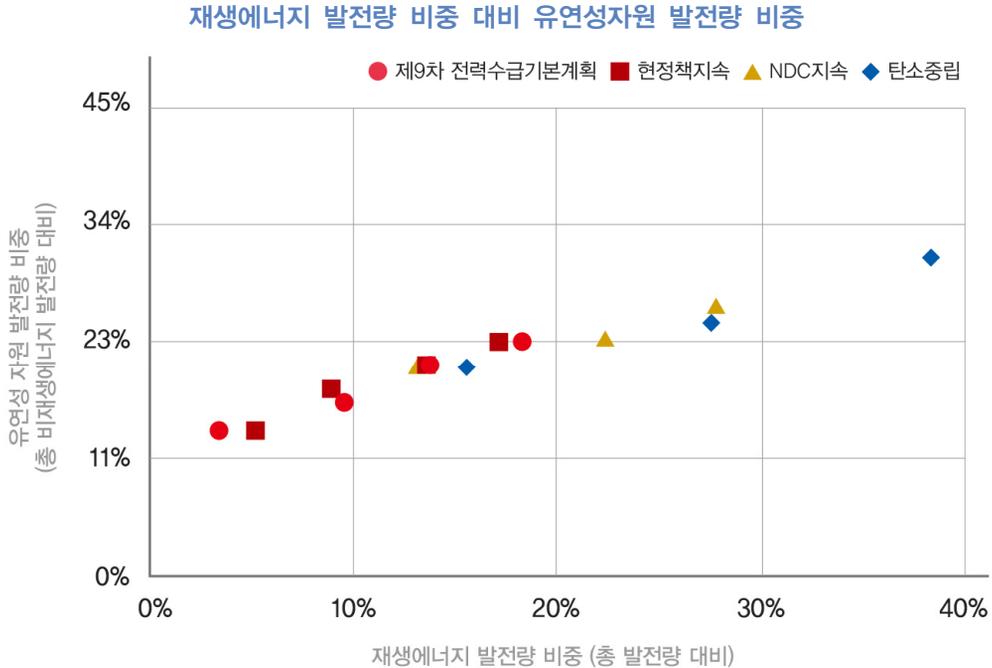
시나리오	수송수단	수송기술	단위	2015	2030	2050
탄소중립/NDC지속	Compact Car	BEV	2015\$/pass-km	0.30	0.20	0.15
탄소중립/NDC지속	Large Car	BEV	2015\$/pass-km	0.55	0.38	0.28
탄소중립/NDC지속	Light Truck and SUV	BEV	2015\$/pass-km	0.59	0.40	0.30
탄소중립/NDC지속	Subcompact Car	BEV	2015\$/pass-km	0.24	0.17	0.12
탄소중립/NDC지속	Compact Car	FCEV	2015\$/pass-km	0.28	0.22	0.16
탄소중립/NDC지속	Large Car	FCEV	2015\$/pass-km	0.52	0.39	0.29
탄소중립/NDC지속	Light Truck and SUV	FCEV	2015\$/pass-km	0.56	0.42	0.31
탄소중립/NDC지속	Subcompact Car	FCEV	2015\$/pass-km	0.22	0.18	0.13
탄소중립/NDC지속	Compact Car	Hybrid Liquids	2015\$/pass-km	0.23	0.24	0.24
탄소중립/NDC지속	Large Car	Hybrid Liquids	2015\$/pass-km	0.41	0.43	0.43
탄소중립/NDC지속	Light Truck and SUV	Hybrid Liquids	2015\$/pass-km	0.43	0.45	0.46
탄소중립/NDC지속	Subcompact Car	Hybrid Liquids	2015\$/pass-km	0.17	0.17	0.17
탄소중립/NDC지속	Compact Car	Liquids	2015\$/pass-km	0.22	0.23	0.23
탄소중립/NDC지속	Large Car	Liquids	2015\$/pass-km	0.40	0.43	0.43
탄소중립/NDC지속	Light Truck and SUV	Liquids	2015\$/pass-km	0.41	0.44	0.45
탄소중립/NDC지속	Subcompact Car	Liquids	2015\$/pass-km	0.16	0.17	0.17
탄소중립/NDC지속	Compact Car	Natural Gas	2015\$/pass-km	0.26	0.27	0.27
탄소중립/NDC지속	Large Car	Natural Gas	2015\$/pass-km	0.45	0.49	0.49
탄소중립/NDC지속	Light Truck and SUV	Natural Gas	2015\$/pass-km	0.47	0.50	0.50

시나리오	수송수단	수송기술	단위	2015	2030	2050
탄소중립/NDC지속	Subcompact Car	Natural Gas	2015\$/pass-km	0.19	0.20	0.20
현정책지속	Compact Car	BEV	2015\$/pass-km	0.31	0.24	0.21
현정책지속	Large Car	BEV	2015\$/pass-km	0.57	0.44	0.39
현정책지속	Light Truck and SUV	BEV	2015\$/pass-km	0.61	0.47	0.42
현정책지속	Subcompact Car	BEV	2015\$/pass-km	0.25	0.19	0.17
현정책지속	Compact Car	FCEV	2015\$/pass-km	0.29	0.25	0.21
현정책지속	Large Car	FCEV	2015\$/pass-km	0.54	0.45	0.39
현정책지속	Light Truck and SUV	FCEV	2015\$/pass-km	0.58	0.49	0.42
현정책지속	Subcompact Car	FCEV	2015\$/pass-km	0.23	0.20	0.17
현정책지속	Compact Car	Hybrid Liquids	2015\$/pass-km	0.23	0.23	0.23
현정책지속	Large Car	Hybrid Liquids	2015\$/pass-km	0.41	0.42	0.42
현정책지속	Light Truck and SUV	Hybrid Liquids	2015\$/pass-km	0.43	0.44	0.44
현정책지속	Subcompact Car	Hybrid Liquids	2015\$/pass-km	0.17	0.16	0.16
현정책지속	Compact Car	Liquids	2015\$/pass-km	0.22	0.22	0.22
현정책지속	Large Car	Liquids	2015\$/pass-km	0.40	0.41	0.41
현정책지속	Light Truck and SUV	Liquids	2015\$/pass-km	0.41	0.42	0.43
현정책지속	Subcompact Car	Liquids	2015\$/pass-km	0.16	0.16	0.16
현정책지속	Compact Car	Natural Gas	2015\$/pass-km	0.26	0.27	0.27
현정책지속	Large Car	Natural Gas	2015\$/pass-km	0.45	0.47	0.48
현정책지속	Light Truck and SUV	Natural Gas	2015\$/pass-km	0.46	0.48	0.49
현정책지속	Subcompact Car	Natural Gas	2015\$/pass-km	0.19	0.20	0.20

4.3.2 화물 수송

시나리오	수송수단	수송기술	단위	2015	2030	2050
탄소중립/NDC지속	Truck	BEV	2015\$/ton-km	0.65	0.45	0.33
탄소중립/NDC지속	Truck	FCEV	2015\$/ton-km	0.62	0.47	0.35
탄소중립/NDC지속	Truck	Liquids	2015\$/ton-km	0.36	0.38	0.38
탄소중립/NDC지속	Truck	Natural Gas	2015\$/ton-km	0.44	0.45	0.45
현정책지속	Truck	BEV	2015\$/ton-km	0.68	0.52	0.46
현정책지속	Truck	FCEV	2015\$/ton-km	0.64	0.54	0.47
현정책지속	Truck	Liquids	2015\$/ton-km	0.36	0.37	0.37
현정책지속	Truck	Natural Gas	2015\$/ton-km	0.44	0.44	0.43

4.4 유연성 자원



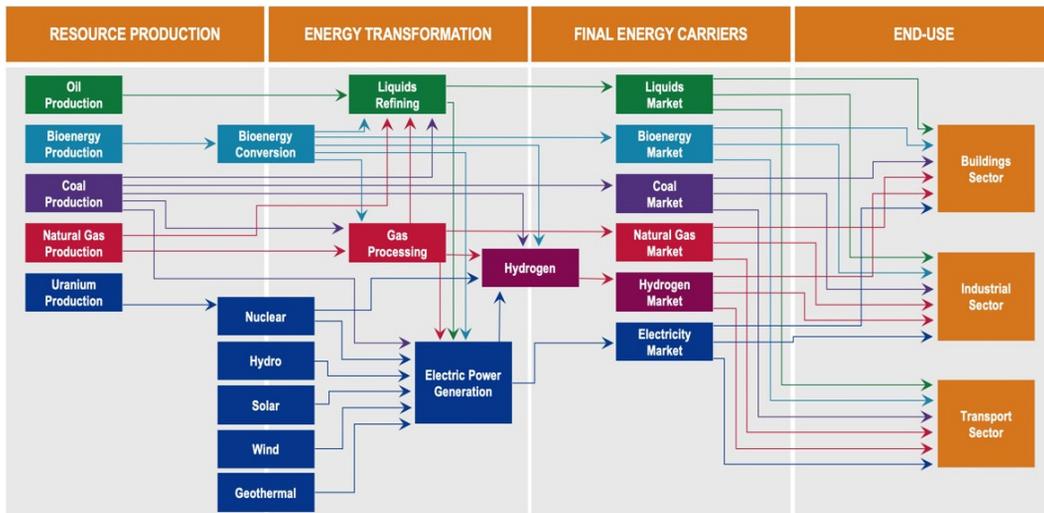
위 그림은 본 보고서에서 평가된 세 가지 시나리오(현정책지속, NDC지속, 탄소중립)의 재생 에너지 발전량 비중 대비 유연성 자원 발전량 비중을 나타낸 그래프이다. Johnson et al. (2017)도 변동성 재생에너지 발전량 비중이 증가함에 따라 필요한 유연성 자원의 발전량 비중의 관계를 도출한 바 있다. 각 시나리오 별로 2020년 부터 2035년까지 5년 단위로 그 추이를 도식화했다. 재생에너지 발전량은 변동성 재생에너지 자원인 태양광과 풍력의 발전량을 더해서 산정했고, 유연성 자원은 연도별 가스발전량의 50%와 에너지저장장치(ESS)의 출력의 합으로 산정했다. 비재생에너지 발전량은 총 발전량에서 변동성 재생에너지(태양광, 풍력)를 제외한 발전량을 의미한다. 그림에서 보듯이 세 가지 시나리오 모두 제9차 전력수급 기본계획에 반영된 유연성 자원 요구조건에 대략 부합하는 것으로 나타났다.

4.5 GCAM 모형

GCAM(Global Change Analysis Model)은 미국 PNNL/JGCR에서 개발되었고, IPCC 보고서를 비롯한 주요 기후정책 평가 연구에 지속적으로 활용되어 온 대표적인 에너지-경제-환경

모형이다. GCAM은 부분균형 모형이면서 (Stanton et al., 2009) 높은 해상도를 갖는 통합평가 모형이다(Edmonds et al., 2012). 또한, RCP(Representative Concentration Pathways)와 SSP(Shared Socioeconomic Pathways) 개발에 사용된 5대 대표모형 중의 하나로 다양한 국가에서 많은 연구자가 활용하고 있다.

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



본 연구에서는 GCAM v.5.2을 근간으로 우리나라의 정책 및 기술현황을 반영해 한국형 통합평가모형(GCAM-KAIST1.0)을 구축했다. 2010년을 기준 년도로 5년 단위로 2100년까지 시뮬레이션 했고, 전력공급, 여객수송 및 화물수송 서비스, 건물의 냉난방 서비스 및 기타서비스, 시멘트, 비료 산업, 석유화학 산업 등 각각의 기술서비스 부문에서 다양한 기술적 대안의 경쟁을 로짓 선택모형을 기반으로 표현한다. 미래의 기술경쟁 구도는 기준 년도에 각 기술이 차지하는 점유율과 기술의 비용 및 성능 전망이 결정하게 되고, 이 과정에서 지역 및 시장 고유의 행태적 특성이 반영된다. 모든 조건이 동일하다면, 탄소정책이 시행될 경우, 기존에 시장 점유율이 낮았던 저탄소 기술의 경제성이 탄소집약적 기술에 비해 상대적으로 향상되면서 저탄소 기술의 점유율이 증대된다.

5. 참고문헌



- 국토교통부(2019). “제2차 녹색건축물 기본계획(2020~2024)”.
- 대한민국 정부(2020). “대한민국 탄소중립선언”.
<https://www.korea.kr/archive/speechView.do?newsId=132032791>
- 대한민국 정부(2021). “기후정상회의(화상) 발언”.
https://www.korea.kr/archive/speechView.do?newsId=132033147&call_from=rsslink
- 산업연구원(2018). “장기(2040년) 산업구조 전망 분석”.
- 산업통상자원부(2019). “제3차 에너지기본계획”.
- 산업통상자원부(2020a). “제9차 전력수급기본계획(2020~2034)”.
- 산업통상자원부(2020b). “제5차 신·재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획”.
- 산업통상자원부(2021). “제4차 친환경자동차 기본계획(2021-2025)”.
- 통계청(2019). “장래인구특별추계 : 2017~2067년”.
http://kostat.go.kr/portal/korea/kor_nw/1/2/6/index.board?bmode=read&aSeq=373873
- 한국에너지공단(2015). “에너지라벨링제도 이해”.
- 환경부(2018). “2030년 국가 온실가스 감축목표 달성을 위한 기본 로드맵 수정안”.
- 환경부(2020a). “2030 국가 온실가스 감축목표(NDC)”.
- 환경부(2020b). “지속가능한 녹색사회 실현을 위한 대한민국 2050 탄소중립 전략”.

환경부(2020c). “2021~2030년 자동차 온실가스·연비 기준 행정예고”.

<http://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?pagerOffset=50&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=&searchValue=&menuId=286&orgCd=&boardId=1393630&boardMasterId=1&boardCategoryId=39&decorator=>

Bergero, C. and Binsted, M. “An integrated assessment of a low coal low nuclear future energy system for Taiwan”. Energy and Climate Change. Volume 2. 100022.

BNEF(2019). “New Energy Outlook 2019”.

<https://about.bnef.com/new-energy-outlook/>

Climate Analytics(2020). “탈탄소 사회로의 전환 : 파리협정에 따른 한국의 과학 기반 배출 감축 경로”.

Eom, J. and Schipper, L.(2010) “Trends in passenger transport energy use in South Korea”. Energy Policy 38, 3598–3607.

Eom, J., and Schipper, L.(2012) “We keep on truckin’: Trends in freight energy use and carbon emissions in 11 IEA countries”. Energy Policy 45, 327–341.

Fuhrman, J. and McJeon, H.(2020). “Food–energy–water implications of negative emissions technologies in a +1.5°C future”. Nat. Clim. Chang. 10, 920–927.

<https://doi.org/10.1038/s41558-020-0876-z>

Johnson, N. and Strubegger, M.(2017). “A reduced–form approach for representing the impacts of wind and solar PV deployment on the structure and operation of the electricity system”. Energy Economics. Volume 64, Pages 651–664.

NREL(2019). “Annual Technology Baseline : Electricity”.

<https://atb.nrel.gov/electricity/2019/>

UC Davis(2013). “Transportation Module of Global Change Assessment Model (GCAM) : Model Documentation Version 1.0”.

UNFCCC(2015). “Paris Agreement”.

2050 탄소중립 전환 시나리오

한국형 통합평가모형 분석

