

2021 인재양성 프로그램  
연구자 최종 결과보고서

# 2050년 탄소중립을 위한 에너지효율 및 수요반응 정책의 효과 분석

Impact Analysis of Energy Efficiency  
and Demand Response Policy for a Carbon Neutral 2050

2024. 01. 31.

신희영



# 제 출 문

재단법인 숲과나눔 이사장 귀하

본 보고서를 “2050년 탄소중립을 위한 에너지효율 및 수요반응 정책의 효과 분석”의 최종 연구 결과보고서로 제출합니다.

2024년 1월 31일

연구 원 : 신희영(특정주제연구자)

※ 본 보고서의 내용은 연구자의 의견이며, (재)숲과나눔의 공식적인 견해와는 다를 수 있습니다.



## 결과보고서 초록

연구원	신희영	구분	특정주제연구자
연구제목	한글	2050년 탄소중립을 위한 에너지효율 및 수요반응 정책의 효과 분석	
	영문	Impact Analysis of Energy Efficiency and Demand Response Policy for a Carbon Neutral 2050	
연구기간	2022.3.1 ~ 2022.12.31		
색인어	한글	수요관리, 에너지효율, 수요반응, 에너지 시스템 모델링, 시나리오 기법	
	영문	Demand Management, Energy Efficiency, Demand Response, Energy System Modeling, Scenario Methodology	

본 연구는 대한민국의 2050년 탄소중립 달성을 위해 에너지효율과 수요반응 정책의 효과를 분석하기 위해 국가 단위 에너지 시스템 모델을 구축하고 시나리오 분석을 실시하였다. 에너지 시스템 모델링 플랫폼인 LEAP를 사용하였고, 상향식 회계형 모델에 발전부문의 용량 계획에 대해서는 최저비용 최적화 기법을 적용하여 시스템 차원에서 발전부문의 비용을 검토하였다. 2050년까지 탄소중립을 달성하는 에너지전환 경로를 전망하기 위해 1) 정부 정책 기준 (Government Policy Reference, GPR, 2) 탄소중립(Net Zero, NZ), 3) 탄소중립 + 에너지효율 정책 시행 (NZ + Energy Efficiency, NZ\_EE), 4) 탄소중립 + 에너지효율 + 수요반응 정책 시행 (NZ + EE + Demand Response, NZ\_EE\_DR) 시나리오를 전망하였다. 우선 GPR 대비 NZ의 변화를 탐색하여 탄소중립 사회로의 전환 과정에서 발전부문에 재생에너지 용량이 어느 정도 추가되어야 하는지 탐색하였다. NZ의 기본 가정은 최종 에너지 소비의 전력화, 발전부문의 탈탄소화, 육상 수송 부문의 친환경차 도입으로 제한하였고, 그 외 GPR와 NZ 시나리오 간의 사회경제적 거시지표는 동일하게 유지하였다. 에너지효율과 수요반응 정책 실행의 비용과 효과는 NZ 시나리오와 NZ\_EE, NZ\_EE\_DR 시나리오의 전망치를 비교하여 도출하였다.

에너지효율 정책에 대해서는 미국 캘리포니아의 우수 사례와 국내 EERS 정책의 시범도입을 검토하여 2050년까지 전년도 대비 에너지집약도 1% 개선이라는 보수적인 정책 목표를 NZ\_EE 시나리오에 반영하였다. 분석에 필요한 정책 실행 비용은 기존 EERS 정책 실적과 에너지 진단 DB의 값에서 도출하고,

캘리포니아의 감축잠재량 보고서에서의 비용과 비교하여 과대 혹은 과소 추정 되지 않았는지 검토하였다.

수요반응 정책은 국내에서 실행하고 있으나 피크 감축에 대비한 수요반응 자원과 입찰 과정을 통한 경제성 수요반응 자원이 주를 이뤄왔다. 본 연구에서 NZ\_EE\_DR 시나리오에서는 향후 재생에너지 도입이 확대되어 재생에너지의 변동성을 수요반응 자원이 안정화시켜줄 수 있다는 가정하에 2050년까지 수요곡선이 NZ 시나리오에서의 발전 곡선에 수렴한다고 전망하였다. 현재 정부가 수요반응 자원에 대해서 절감한 전력 사용량에 대해 정산을 해주고 있지만 향후 이러한 형태의 수요반응 보다는 가격 신호를 이용한 수요반응 정책이 자리잡을 것이라는 가정 하에 수요반응 자원에 대한 비용 산정은 별도로 시행하지 않았다.

2019년을 기준연도로 하여 2050년까지의 탄소중립 달성 경로를 시나리오를 통해 전망하였다. 분석 결과 매년 에너지 집약도가 1% 개선되는 수준의 에너지효율 정책을 실행할 경우 2050년에 발전부문의 총 전력생산비용은 217조 원으로 정책을 실행하지 않을 경우의 283조 원에 비해 23% 감소했고, 수요반응 프로그램을 함께 시행할 경우 171조 원으로 39% 감소하였다.

에너지효율 사업비용을 감안해도 비용절감 효과가 있어 시스템의 총비용을 낮출 수 있는 정책임을 확인할 수 있었다. 전력의 단위당 생산비용은 에너지효율 정책만을 실행했을 때 2050년 152원/kWh에서 161원/kWh로 증가하지만 수요반응 정책을 함께 실행할 경우 138원/kWh로 감소하는 것으로 나타났다. 함께 시행되었을 때 에너지효율과 수요반응 정책은 재생에너지가 확대되는 장기 전망에서 관련 비용을 낮춰줄 수 있는 정책임을 확인할 수 있었다. 에너지효율 정책을 단독으로 시행할 경우 단위당 전력비용이 증가하는 것으로 나타나 더욱 경제적인 에너지효율 사업 모델을 개발해야할 것으로 보인다.

연구 결과 정책 시행의 필요성은 명확해졌으나, 결과의 신뢰도를 확보하기 위한 추가적인 검토가 있으면 더 견고한 전망과 분석이 가능할 것으로 보인다. 따라서 다음과 같은 내용을 향후 연구과제로 제안한다. 우선 에너지 시스템 모델 결과의 신뢰도를 높이기 위한 검증 작업이 필요할 것으로 보인다. 상향식 회계형 모델의 장점을 살리기 위해 에너지효율과 수요반응 정책의 감축 잠재량과 비용에 대한 전수조사가 실행된다면 더욱 구체적인 편익과 사업 실행안을 도출할 수 있을 것으로 보인다. 나아가 모델에 입력한 2050년까지의 거시경제 지표와 외생적으로 입력한 기술특정치의 불확실성을 반영하여 분석한 결과 값의 불확실성을 함께 도출할 수 있다면 더욱 활용도가 높은 분석이 될 것으로 생각한다. 모델의 완결성 측면에서는 재생에너지 확대에 수반되는 송전망

비용에 대한 산정, 향후 도입될 수 있는 다양한 에너지효율 및 수요반응 정책에 대한 구체적인 시나리오 제시 등이 필요할 것으로 보인다.

(영문 초록)

This study constructed a national-level energy system model to analyze the impact of energy efficiency and demand response policies to achieve Net Zero by 2050 for South Korea. LEAP (Low Emissions Analysis Platform) was used to construct a bottom-up accounting based energy system model. Capacity planning in the power generation sector with minimum cost optimization was applied to assess the policy impact to the generation sector at the system level. To project the path to carbon neutrality by 2050, four scenarios were considered: 1) Government Policy Reference (GPR), 2) Net Zero (NZ), 3) Net Zero + Energy Efficiency (NZ\_EE), and 4) Net Zero + Energy Efficiency + Demand Response (NZ\_EE\_DR).

Firstly, changes from GPR to NZ were explored to determine the additional renewable energy capacity required in the power generation sector for the energy transition. The basic assumptions for NZ included electrification of final energy consumption, decarbonization of the power generation sector, and the introduction of eco-friendly vehicles in the land transport sector. The socio-economic macro-indicators between GPR and NZ scenarios were kept consistent.

The costs and effects of implementing energy efficiency and demand response policies were derived by comparing the outlooks of NZ, NZ\_EE, and NZ\_EE\_DR scenarios. For energy efficiency policies, a conservative target of 1% improvement in energy intensity compared to the previous year, based on successful cases in the United States (California) and the introduction of Energy Efficiency Resource Standards (EERS) policies domestically, was incorporated into the NZ\_EE scenario leading up to 2050. The costs of policy implementation were determined based on the performance of existing EERS policies and values from the Energy Diagnosis DB.

Domestic values were compared with the costs reported in California's Potential and Goals Study to ensure accurate estimation.

Demand response policies have been implemented domestically, mainly focusing on peak reduction and electricity market bidding process. The NZ\_EE\_DR scenario was based on the assumption that the expansion of renewable energy in the future could stabilize the variability of renewable energy through demand response resources, leading to the convergence of the demand curve to the generation curve in the power sector by 2050. The cost estimation for demand response resources assumed that the such a large scale demand response policy would be based on price signals and not direct subsidy from the government.

Using 2019 as the base year, the study forecast the path to carbon neutrality by 2050 through scenario analysis. The analysis revealed that if an energy efficiency policy aiming for a 1% improvement in energy intensity each year is implemented, the total electricity production cost of the power generation sector would decrease by 23% to 217 trillion KRW in 2050 compared to not implementation (283 trillion KRW). When implementing demand response programs alongside energy efficiency, the cost would decrease by 39% to 171 trillion KRW.

Although energy efficiency and demand response policies are costly, the study confirmed that there is a net cost-saving effect, if taking into consideration the cost reduction in the generation sector. The unit production cost of electricity is projected to be 152 KRW/kWh in 2050 without any energy efficiency and demand response policies; this will increase to 161 KRW/kWh with energy efficiency policy implementation; and decrease to 138 KRW/kWh with energy efficiency and demand response implementation. It was evident that energy efficiency and demand response policies together could lower costs related to the expansion of renewable energy in the long term. Implementing energy efficiency policies alone would result in an increase in unit electricity costs, highlighting the need to develop more economically viable energy efficiency business

models.

While the pros of policy implementation is clear, this research points the way forward for additional reviews for a more robust outlook and policy implications. Future research suggestions include validating the reliability of the energy system model. Conducting a comprehensive investigation into the reduction potential and costs of energy efficiency and demand response policies in the accounting model would provide more accurate analysis and business plans. Additionally, reflecting the uncertainty of macroeconomic indicators and exogenous technological specifications leading up to 2050 would allow for better interpretation of the model results. From the perspective of model completeness, estimating the transmission and distribution costs to the network associated with the expansion of renewable energy and providing specific scenarios for various energy efficiency and demand response policies that may be introduced in the future would be useful.



# 연구 결과보고서

성 명	신희영	구분	특정주제연구자
연구주제	한글	2050년 탄소중립을 위한 에너지효율과 수요반응 정책의 효과 분석	
	영문	Impact Analysis of Energy Efficiency and Demand Response Policy for a Carbon Neutral 2050	
연구기간	2022.3.1 ~ 2022.12.31		
색인어	한글	수요관리, 에너지효율, 수요반응, 에너지 시스템 모델링, 시나리오 기법	
	영문	Demand Management, Energy Efficiency, Demand Response, Energy System Modeling, Scenario Methodology	

본 연구는 2050년 탄소중립 달성을 위해 에너지효율과 수요반응 정책의 효과를 분석하기 위해 국가 단위 에너지 시스템 모델을 구축하고 시나리오 분석을 실시하였다. 상향식 회계형 모델에 발전부문의 용량 계획에 대해서는 최저비용 최적화 기법을 적용하여 시스템 차원에서 비용을 검토하였다. 2019년을 기준연도로 하여 2050년까지의 탄소중립 달성 경로를 시나리오를 통해 전망하였다. 분석 결과 매년 에너지 집약도가 1% 개선되는 수준의 에너지효율 정책을 실행할 경우 2050년에 발전부문의 총 전력생산비용은 217조 원으로 정책을 실행하지 않을 경우의 283조 원에 비해 23% 감소했고, 수요반응 프로그램을 함께 시행할 경우 171조 원으로 39% 감소하였다. 에너지효율 사업비용을 감안해도 비용절감 효과가 있어 시스템의 총비용을 낮출 수 있는 정책임을 확인할 수 있었다. 전력의 단위당 생산비용은 에너지효율 정책만을 실행했을 때 2050년에 152원/kWh에서 161원/kWh로 증가하지만 수요반응 정책을 함께 실행할 경우 오히려 138원/kWh로 감소하는 것으로 나타났다. 종합적으로 에너지효율과 수요반응 정책은 재생에너지가 확대되는 장기 전망에서 관련 비용을 낮춰줄 수 있는 정책임을 확인할 수 있었다.

※ 첨부: 1. 최종 연구결과물(10권)

이와 같이 연구결과보고서를 제출합니다.

2024 년 1 월 31 일

제출자 : 신희영 (인)



## 목차

I. 연구 개요 .....	1
가. 에너지효율 정책 .....	2
나. 수요반응 정책 .....	4
II. 연구방법 및 절차 .....	7
가. 에너지 시스템 모델링 .....	7
1. 모델의 선택 .....	7
2. 유의점 .....	9
나. 기준 에너지시스템 .....	10
1. LEAP .....	10
2. 모델 구조 .....	13
3. 에너지효율과 수요반응 모델링 .....	19
(가) 에너지효율 모델링 .....	20
(나) 수요반응 모델링 .....	27
다. 시나리오 구축 .....	30
라. 데이터 .....	33
III. 연구결과 .....	34
V. 참고문헌 .....	46

표 목차

<표-1> 캘리포니아의 에너지효율 사업에 대한 설명과 국내 적용 방법 .....	21
<표-2> 시나리오 요약 .....	31
<표-3> 인구, GDP, 유가 전망 .....	33
<표-4> 제조업 부가가치 비중 전망 .....	33
<표-5> 건물부문 연면적 전망 .....	34
<표-6> 제4차 친환경자동차 기본계획 친환경차 보급 목표 .....	34
<표-7> 시나리오별 1차 에너지수요 .....	35

## 그림 목차

<그림-1> 에너지효율향상 사업의 종류 및 분류 .....	3
<그림-2> 수요관리의 유형 .....	5
<그림-3> 수요관리 체계 .....	6
<그림-4> LEAP 분석의 구조 .....	12
<그림-5> 에너지시스템 수요와 공급 부분균형 개념도 .....	13
<그림-6> 기준 에너지 시스템 .....	14
<그림-7> 산업 부문 기준 에너지 시스템 .....	15
<그림-8> 육상 수송 부문 기준 에너지 시스템 .....	16
<그림-9> 건물 부문 기준 에너지 시스템 .....	17
<그림-10> 발전 기술과 기술적 특성 .....	17
<그림-11> 변동성 자원의 이용률 곡선 .....	18
<그림-12> 부문별 수요 부하 곡선 .....	19
<그림-13> 캘리포니아 최종전력수요 및 절감량 전망 .....	23
<그림-14> 캘리포니아 최종 사용 서비스별 누적 감축 잠재량 .....	24
<그림-15> EERS 사업별 절감량 및 CSE .....	26
<그림-16> EERS 사업별 비용 .....	26
<그림-17> 에너지진단DB 제조업 설비별 전력절감비용 및 누적 전력절감량 .....	27
<그림-18> 에너지진단DB 건물 설비별 전력절감비용 및 누적 전력절감량 .....	27
<그림-19> 신뢰성·자발적 DR 참여 현황 .....	28
<그림-20> 자발적DR 감축량 실적 및 정산금 .....	29
<그림-21> 자발적DR 감축량 대비 정산비용 (원/kWh) .....	29
<그림-22> 시나리오별 전력부하 변화 가정 .....	32
<그림-23> NZ_EE_DR 시나리오의 수요 부하곡선의 변화 .....	33

<그림-24> 시나리오별 1차 에너지 수요 .....	35
<그림-25> 시나리오별 에너지원별 최종에너지 수요 .....	36
<그림-26> 시나리오별 화석연료 수입비용 .....	37
<그림-27> 시나리오별 온실가스 배출량 .....	38
<그림-28> 시나리오별 발전용량 .....	39
<그림-29> 시나리오별 발전량 .....	40
<그림-30> 전력 생산 및 에너지효율 사업 비용 .....	41
<그림-31> 전력 단위당 생산 비용 .....	43



## I. 연구 개요

정부는 2050년 탄소중립을 목표로 ‘기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법 시행령안’을 2022년 3월 확정하였다. 이로써 한국은 2050 탄소중립 비전을 법제화한 14번째 국가가 되었다.[1] 중간목표와 마찬가지로 NDC를 달성하기 위해서는 2030년 까지 배출정점인 2018년 대비 40%를 감축해야하고, 이는 2050년까지 연 4.17%의 감축을 뜻한다. 기후위기의 심각성, 특히 1.5°C로 기후변화를 제한하기 위한 여러 경고[2]를 고려했을 때 더 강력한 탄소절감 정책이 필요하겠으나, 국내 여건을 고려했을 때 이마저도 쉽지 않은 목표이다.

탄소중립 사회로의 이행을 위한 탄소중립 시나리오안[3]의 시나리오 총괄표에서는 탄소의 주요 배출 부문이 전환, 산업, 건물, 수송, 농축수산, 폐기물, 탈루로 분류되어 있다. 이 중 전환, 산업, 건물, 수송 부문의 배출량이 전체의 93%를 차지하고, 2050년까지 감축량의 96%를 차지하고 있다. 이때 탄소배출 감축수단 및 정책제언에서 에너지효율 향상 및 수요반응 프로그램은 핵심적이다. 최종에너지 수요의 전력화, 그 외에도 데이터 센터 등 신기술의 발달로 인해 전력수요의 증가가 예상되기 때문에 효율 향상과 수요반응 자원의 활용을 통해 전력수요 증가세를 완화하고, 계통 안정성을 높이고, 소비자들의 에너지 비용을 절감할 수 있다. 에너지효율과 수요반응 정책과 관련해서는 경제적으로 환원하기 어려운 다양한 편익이 있는 것으로 알려져 있기에 더욱더 정책적으로 추진할 필요가 있다.[4]

재생에너지 확대의 비용을 낮추기 위해서는 전력수요의 감축이 필요하고, 이를 위해서는 산업, 빌딩, 수송 부문의 에너지효율 향상이 뒷받침되어야 한다. 나아가 전력 최대부하 시간대에는 모든 분야 전력수요를 감축·분산할 수 있도록 다양한 방안을 마련해야 하고, 이는 수요 반응 프로그램 도입이 필요함을 시사한다. IEA[5]도 에너지효율, 행동변화, 전기화 정책 도입 없이는 2050년의 최종에너지수요가 Net-Zero 시나리오보다 90% 클 것으로 전망하였다. 특히 에너지효율 정책의 경우 단기적으로 확장이 가능하여 2030년까지의 감축 비중이 높아야 함을 강조하고 있다.

국내 장기전망 시나리오 연구를 비교분석한 박년배(2022)[6]에 의하면 2050년 발전량 전망은 기준연도와 비교하여 최소 69%에서 최대 164% 증가하는 것으로 나타났다. 재생에너지·기타의 비율은 2020년 8%에서 2050년 평균 89%로 증가하는데 이를 위해서는 매년 비중을 2.7%p 올려야 한다. 기존 화석 연료 및 원자력 발전에서 재생에너지로의 전환을 위해서는 간헐성, 변동성에 대응하기 위해 에너지저장시스템(ESS) 설비용량 증설과 수요반응 프로그램들

통한 관리가 이뤄져야만 안정적이면서 효율적인 전환이 이뤄질 수 있다. 이렇듯 전력소비와 재생에너지의 비중이 증가하는 과정에서 안정적으로 전력계통을 운영하기 위해서는 에너지절약 및 수요반응 정책이 필수적이다.

본 연구에서는 국가 단위의 상향식 에너지시스템 모델을 에너지 서비스 단위로 구축하고, 탄소중립 경로에서 에너지효율 및 수요반응 정책의 비용과 편익을 분석하고자 한다. 본 연구를 관통하는 연구질문은 ‘2050 탄소중립 목표를 달성하기 위해 에너지효율과 수요반응 정책을 시행했을 때 예상되는 비용과 효과는 무엇인가?’이다. 에너지효율 및 수요반응 프로그램별 경제성 분석 방법을 적용하여 정책 설계자, 대상에게 유의미한 분석 제공을 목표로 한다. 시나리오 기법을 이용하여 에너지효율과 수요반응 자원에 구체적으로 어느 정도의 비용 투자가 필요하고 또 이로 인한 편익이 무엇인지 검토해본다.

## 가. 에너지효율 정책

우리나라의 에너지효율 정책은 1973년에 발생한 제1차 석유파동과 1979년 제2차 석유파동을 거치며 전담부서가 신설되고 관련법의 제정을 통해 구체적인 추진체계를 갖추게 되었다.[7] 초기에는 에너지 절약을 유도하는 단순한 정책이 주를 이루었으나 현재에는 생산자와 소비자에게 인센티브와 규제, 정보제공의 의무 등을 부여하는 형식으로 다각화되어 있다. 에너지이용 합리화법에 의하면 해당 법의 목적은 “에너지의 수급을 안정시키고 에너지의 합리적이고 효율적인 이용을 증진하며 에너지소비로 인한 환경피해를 줄임으로써 국민경제의 건전한 발전 및 국민복지의 증진과 지구온난화의 최소화에 이바지함을 목적으로 한다”고 명시되어 있다.

개념적으로 에너지효율 향상은 최종 에너지 서비스(End Use Service)의 이용은 기존 수준을 충족하면서 이에 필요한 최종 에너지 소비는 줄이는 방법을 뜻한다. 국내에서는 에너지효율 정책에 대한 용어나 분류에 대한 표준화된 기준이 없어 에너지절약, 에너지이용효율, 에너지이용 합리화, 에너지원간 대체, 에너지의 합리적인 이용 등의 용어가 유사하게 쓰이고 있다. 실제로 에너지효율 개선은 신규 기기로의 교체, 기존 기기 개선, 공정 개선, 에너지원간의 대체, 사용자의 에너지 절감 노력 등 다양한 방법으로 이뤄질 수 있다. 정부의 에너지효율 정책도 직접적인 지원에서부터 에너지효율 관련 규제, 관련 지원금의 지급, 장기 융자 지원 등이 있다.

현재 에너지공단에서 시행하고 있는 에너지효율향상 사업은 산업, 건물, 수송, 기기 부문에 걸쳐 매우 다양하다. 에너지이용합리화법에 근거하여 제6차

에너지이용 합리화 기본계획('20~'24)(2020)[8]이 수립되었으며, 2024년 산업, 건물, 수송 부문의 최종에너지 기준수요(194.7백만TOE) 대비 9.3%(18.2백만 TOE) 절감한 176.5백만TOE를 감축목표로 제시하고 있다. 에너지통계월보(2024.01)[9] 기준 2022년의 잠정 부문별 최종에너지소비가 200백만TOE로 보고되고 있어 에너지이용 합리화 기본계획의 목표를 달성하는 것은 어려워 보이는 실정이다. 2030 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향안, 2050 탄소중립 시나리오안, 에너지기본계획, 전력수급기본계획 등 주요 정부 목표와 문서, 계획에서 에너지이용합리화의 중요성이 강조되고 있으나, 성과를 확인하기 어려운 점 또한 에너지효율 정책의 문제라 할 수 있다.

국제적으로 에너지효율 정책은 다양하게 분류되는데, 유럽연합의 에너지효율에 대한 지침(Energy Efficiency Directive)의 Article 7에서는 에너지효율화 의무 제도, 에너지 혹은 온실가스 세금, 정부 지원금 지급, 에너지효율 설비를 위한 대출, 요금제 연계 재정 지원, 세제 혜택, 에너지효율 관련 규제, 자발적 협약, 에너지효율 기준, 에너지 라벨 (의무적 정보 제공)로 분류하고 있다. 국내에서는 다양한 에너지효율 사업을 진행해왔기 때문에 각 분류에 해당하는 다양한 정책들이 시행 중에 있다. 가전기기에 의무적으로 표시되는 에너지소비 효율등급 표시제도는 대표적인 의무적 정보 제공 정책으로 소비자에게 직접적으로 지원하지 않지만 구입 과정에서 에너지효율 관련 정보를 제공하여 효율적인 에너지소비를 도모한다. 이런 사업들은 직접적으로 정부예산이 투입되지 않는데, 본 연구는 이들 정책 분류 중 에너지공급자 효율향상의무화제도(EERS), 에너지공급자 수요관리 투자사업 처럼 직접적인 지원금을 지급하여 에너지효율을 향상하는 사업들에 대해 분석을 실시하였다.

한국 에너지공단의 에너지효율향상 사업		에너지효율 정책의 분류
<p><b>산업 부문</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>에너지경영시스템 인프라 구축 지원</li> <li>자발적 에너지효율 목표제</li> <li>에너지진단제도</li> <li>에너지공급자 수요관리 투자 및 출연</li> <li>집단에너지</li> <li>에너지서포터</li> <li>에너지사용계획 협의</li> <li>지역에너지절약</li> <li>ESS EMS 융합시스템 보급사업</li> </ul>	<p><b>건물 부문</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>건물부문 온실가스 목표관리제</li> <li>건축물에너지효율등급인증</li> <li>제로에너지건축물인증</li> <li>건축물에너지절약계획서</li> <li>친환경주택 성능평가</li> <li>공공기관 에너지이용 합리화</li> <li>건축물에너지평가사</li> <li>건물에너지관리시스템(BEMS)</li> <li>공공기관 ESS 설치의무화 제도</li> </ul>	<p><b>EU의 Energy Efficiency Directive Article 7</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>에너지효율화 의무 제도</li> <li>에너지 혹은 온실가스 세금</li> <li>정부 지원금 지급</li> <li>에너지효율 설비를 위한 대출</li> <li>요금제 연계 재정 지원</li> <li>세제 혜택</li> <li>에너지효율 관련 규제</li> <li>자발적 협약</li> <li>에너지효율 기준</li> <li>에너지 라벨 (의무적 정보 제공)</li> </ul>
<p><b>수송 부문</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>자동차 에너지소비효율 및 등급</li> <li>자동차 평균에너지소비효율</li> <li>타이어 에너지소비효율 및 등급</li> <li>전기차 충전서비스산업육성사업</li> <li>공공기관 환경친화적 자동차 보급</li> </ul>	<p><b>기기 부문</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>에너지소비 효율등급 표시</li> <li>고효율에너지기자재 인증</li> <li>대기전력저감 프로그램</li> <li>전력효율향상사업</li> <li>에너지효율시장 조성사업</li> </ul>	

<그림-1> 에너지효율향상 사업의 종류 및 분류

## 나. 수요반응 정책

수요반응은 아직 국내의 일반 전기소비자에게 생소할 수 있는 개념이지만 2014년부터 도입된 제도이다. 에너지효율은 에너지 소비량을 줄이는 것에 초점이 맞춰져 있다면, 수요반응은 총량이 아닌, 소비 패턴을 바꾸는 것이다. 연방에너지규제위원회 FERC(2012)는 “수요반응이란 전력 수요의 주체가 전기요금이나 전기요금 이외의 금전적 유인에 반응하여 정상적인 전력 소비패턴을 조정하는 것으로써 도매 전력 시장 가격이 높아 전력 소비를 줄이도록 하거나 계통 신뢰성 확보를 목적으로 한다”고 정의하고 있다.[10] 이때 소비패턴의 변화를 다양한 형태로 유도할 수 있는데, 최대수요 억제, 최대수요 이전, 기저부하 증대, 에너지효율향상이 대표적이다.[11] 에너지효율 개선과 수요 반응 개선은 둘 다 수요관리의 한 방편으로, 상호작용을 하게 된다.

국내에서 에너지효율 정책이 이미 다방면에서 실행되고 있듯이, 수요반응 정책도 2000년대 초반에 많은 관심을 받기 시작하였다. 초기에는 의무감축 자원인 신뢰성DR과 입찰 거래를 통해 수요를 감축하는 경제성DR으로 구성되었다. 이후 전기소비자의 자발적 참여를 확대하기 위해 제도를 개편, 확대해나갔다. 2019년부터는 자발적 DR 프로그램이 추가되어 피크수요DR와 미세먼지DR이 생겼고, 국민DR(에너지 절약)을 비롯하여 계통주파수 하락에 대응하는 패스트DR도 도입됐다. 2021년에는 제주도의 재생에너지 발전량 증가에 따른 출력제어를 완화하기 위해 전력수요를 늘리는 플러스 DR이 추가되어 전기소비자들의 접근성이 좋아지게 됐다.[12]

석유나 석탄 등 안정적으로 저장할 수 있는 연료의 경우 소비 패턴이 문제가 되지 않지만 전력은 발전과 수요가 항상 균형을 이뤄야하기 때문에 매 순간 사용하는 전력의 생산 비용이 다르다. 장기적으로 원유와 천연가스 가격의 변동폭이 크듯 전력의 경우 하루 24시간 내에도 사람들의 소비 패턴과 발전원의 발전 패턴에 의해 계속해서 생산가격이 변화한다. 하지만 일반 전력소비자는 전력의 생산가격과 상관없이 항상 같은 가격으로 전력을 공급받는 것이 익숙하다. 이는 매 순간 변화하는 전력 사용량에 대해 요금을 부과하기 어렵다는 기술적 이유로 일괄적으로 요금 체계가 형성된 후 계속되어 온 관행이다. 하지만 재생에너지의 확대와 스마트 전력 제어 시스템의 발달로 수요반응 정책은 세계적으로 에너지전환의 한 축으로 자리 잡고 있다.

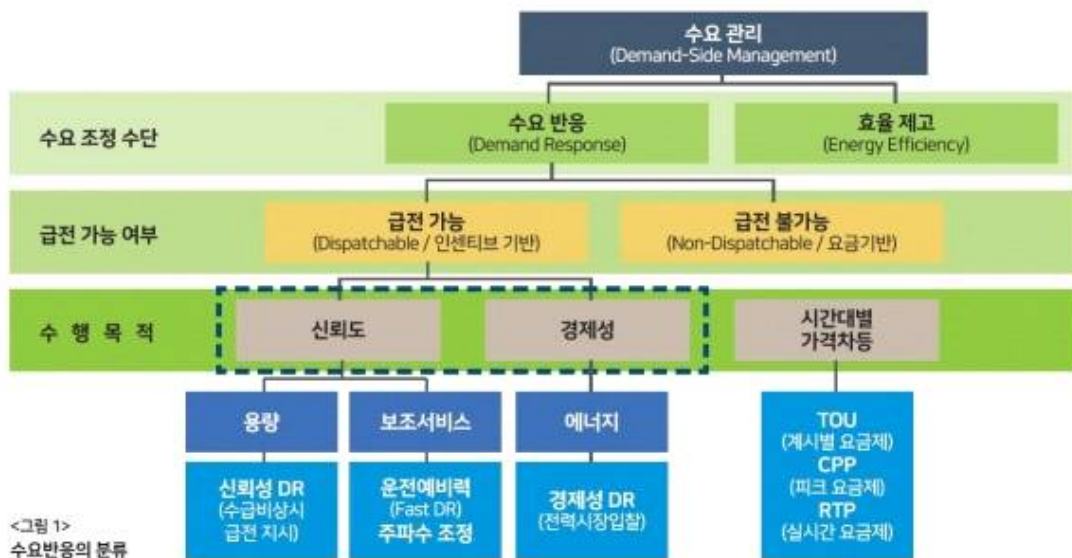
최대수요 억제(Peak Clipping)	최대수요 이전(Peak Shifting)
<p>계절별, 시차별 최대수요를 낮추는 것으로 가장 대표적인 수요관리 유형</p> <p>*긴급절전, 건물냉난방 원격관리, 최대전력관리장치 보급 등</p>	<p>피크시간대 전력수요를 경부하시간대로 이전하여 최대수요는 낮추고, 최저수요는 높이는 방법</p> <p>*심야전력 이용 - 축열식 냉난방설비, ESS식 냉난방설비</p>
기저부하 증대(Valley Filling)	에너지 효율향상(Energy Efficiency)
<p>경부하 시간대의 수요를 증대시켜 설비 이용률을 높이고 판매 전력량을 증대</p> <p>*심야전력을 이용한 축열식 난방기기</p>	<p>고효율기기 보급, 절전정보 제공 등을 통한 전기이용효율 향상으로 전기 절약</p> <p>*고효율기기(LED조명, 인버터, 전동기) 보급 등</p>

<그림-2> 수요관리의 유형

수요반응 정책은 제도의 설계 측면에서 요금제 기반 제도와 인센티브 기반 제도로 구분할 수 있다. 국내의 경우 대부분 전력기반 기금을 바탕으로 한 정부 주도형 형태를 띠고 있다. 하지만 정부 주도형 수요 관리제도는 정부 지원 예산에 따라 사업의 지속성이 결정되며, 자율적 참여 위주의 제도로 인해 감축용량의 신뢰성 확보가 어려운 면이 있다.[13] 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 2014년 11월 25일부터 국내에서 수요자원 거래 시장이 개설되어 운영 중이다. 수요자원 거래 시장은 전력 시장에서의 수요자원 거래를 통해 전력 시장의 효율성을 높이고 전력 공급 불안을 해소하고자 하는 목적을 갖고 있다.

수요관리 요금제도는 1973년 1차 석유 파동 이후 연료비 부담 증가 및 전력 소비 절감의 필요성이 대두되면서 실시되기 시작하였다. 석유 파동 이전에는 사용량이 많을수록 적용 단가가 낮아지는 체감제 요금을 적용하였으나, 1) 전 등 수용 및 비산업용 동력 전력량 요금과 2) 주택용 누진제 시행 및 기타 중

별 기본요금제 체감제를 단계적으로 폐지하며 누진제로 전환해 나아갔다. 1980년대에는 전력 수요가 지속적으로 증가하여 부하 관리를 위한 요금 제도가 도입되기 시작하였다. 이와 함께 효율 향상을 위한 기기 보급 및 개발 활동 역시 병행되면서, 1985년 축열식 난방 기기 및 온수기기 보급 사업이 시작되기도 하였다. 부하가 적은 심야 시간대로 부하를 이전시키기 위해 심야 전력 제도를 도입하기도 하였다.



<그림 1> 수요반응의 분류

<그림-3> 수요관리 체계

출처: 김은환(2023)

수요자원 거래 시장은 수행 목적에 따라 여러 가지 형태로 존재하지만 그림과 같이 신뢰도와 경제성 확보를 목적으로 한다. 신뢰성 DR은 계통 운영 신뢰성 확보 및 미래 피크 발전기 신규 투자를 회피하는 것이 주요한 목적이다. 수급 상황 악화로 전력 시장의 예비력이 감소할 때 비싼 발전기를 가동하는 대신 사전에 등록된 수요자원에 감축 지시를 하여 예비력을 확보하는 형태로 운영된다. 그런 의미에서 신뢰성 DR을 피크 감축 DR로 부르고 있다. 경제성 DR은 발전기와 동등하게 전력시장에 참여하여 발전 연료비와의 가격 경쟁을 통해 낙찰받아 운영된다. 이러한 경제성 DR은 자연스럽게 전력 시장 가격을 인하하는 효과가 있게 되며, 요금 절감 DR로 불리고 있다.

수요반응자원 참여 고객은 수요 관리 사업자와 계약을 체결하고, 수요 감축 지시가 있는 경우 전력 소비를 줄여 아낀 전기를 수요관리 사업자에게 제공함으로써 거래 시장에 참여하게 된다. 이때 수요관리 사업자와 맺은 사전 계약 조건에 따라 전력 소비 감축량에 비례하여 이익을 얻게 되는 구조이다.

수요관리 사업자는 빌딩, 아파트, 공장 등 수요자원을 발굴하여 예상되는 전

기 소비 절감량을 전력 시장에 입찰하게 되며, 전력 시장에서 발전기보다 가격 경쟁력이 있는 경우 낙찰을 받는다. 그 후 해당일에 전력거래소의 감축지시에 따라 고객에게 수요 감축을 지시하여 절약된 전기를 전력 시장에 판매하고, 판매수익을 고객에게 정산금의 형태로 배분하는 역할을 한다. 이 과정은 경제성 DR의 운영 순서이며, 신뢰성 DR의 경우 수집된 수요자원을 사전에 전력거래소에 등록한 후, 수급 상황 급변 시 전력거래소의 감축 지시에 따라 전력 소비를 줄이는 방식으로 운영된다.

## II. 연구방법 및 절차

### 가. 에너지 시스템 모델링

#### 1. 모델의 선택

에너지 시스템 모델링은 1970년대의 오일 쇼크 이후로 장기적 에너지 계획의 중요성이 대두되면서 시작되었다. 이후 유럽과 미국의 주요 기관에서 모델을 개발하였고, 초기에는 에너지 안보와 비용에 초점이 맞춰졌던 분석들이 기후변화 정책 분석으로 이어지게 되었다.[14] 최근에는 에너지전환을 위한 재생에너지의 보급이 가속화되면서 이와 관련된 이슈와 정책 질문에 답하기 위한 모델들이 다양하게 활용되고 있다. 모델의 분류도 연구자에 따라 다양하게 제시되고 있는데, Pfenniger 외(2014)[14]의 분류를 따르자면 (1) 에너지 시스템 최적화 모델, (2) 에너지 시스템 시뮬레이션 모델, (3) 전력 시스템 및 전기 시장 모델, (4) 정성적 및 혼합형 모델을 들 수 있다.

에너지 시스템 최적화 모델은 가장 오랜 역사를 갖고 있으며 에너지 시스템 모델링의 핵심적인 부분을 차지해온 방법론이라 할 수 있다. 상향식 모델은 상세한 데이터를 기반으로 에너지시스템의 기술적 부분에 대한 높은 설명력을 갖는다. 이를 기반으로 시스템이 어떻게 바뀔 수 있는지 다양한 시나리오를 제공할 수 있다. 최적화란 일반적으로 에너지시스템 전반의 비용을 최소화하는 것을 뜻하고, 선형 최적화 혹은 혼합 정수 계획법을 이용해 문제풀이를 시행한다. 에너지 모델 부분을 거시경제 모델과 연결하여 에너지 정책이 경제에 미치는 영향에 대해서 내생적으로 도출할 수 있다는 점 또한 정책효과를 평가함에 있어 큰 장점이다. 대표적인 예로 IEA의 MARKAL/TIMES 모형, IIASA의 MESSAGE 모형들이 있고, 연구자의 연구질문에 맞춰 모델의 세부 설계, 시계, 모델 범주 등을 바꾸고 관련 데이터를 입력하는 것이 일반적이다.

이렇게 최적화로 풀이된 시나리오는 일종의 수학적 정답이라 할 수 있는데, 가장 효율적인 방법으로 에너지시스템이 반응할 경우 어떤 결과가 예상되는지 분석할 수 있다. 즉 설계상 규범적이다. GHG 배출량, 연료 공급, 기술 발전, 발전용량 이용률 등에 대한 제약식을 만들고, 입력한 전제들 하에 미래에 어떤 결과가 예상되는지 도출할 수 있다. 이런 면에서 상향식 에너지-경제 모델은 특정 정책이 목표한 정책효과를 달성할 수 있을지 평가하기에 적합한 방법론이라 할 수 있기에 계속 사용되면서 발전해오고 있다.[15]

같은 상향식 모델이지만 회계형 모델은 규범적일 수도, 서술적일 수도 있다. 규범적 분석일 경우 특정 정책을 실행했을 때 에너지시스템에서 어떤 파장이 있는지 에너지시스템 전반을 살펴볼 수 있다. 서술적 시나리오의 경우 특정 정책의 영향을 모델러가 직접 구성하여 관련 내용을 모델에 입력하는 형식이다. 따라서 회계형 모델은 규범적, 서술적 특성을 모두 갖는다고 할 수 있다. 에너지시스템의 행위자들이 어떤 방식으로 행동하는지에 관한 내용을 모델에 반영하고, 정책이 실행됐을 경우 어떻게 반응하는지 분석하는 것이 아닌, 행위자들의 결정을 모델러가 직접 입력할 수 있는 형식이다.

상향식 모델은 에너지시스템의 행위자를 지나치게 집계하여 그 특성을 제대로 반영하지 못한다던가, 미래에 도입될 기술에 대한 단순 할인율 적용으로 신기술 도입의 실제 의사결정 과정을 지나치게 단순화했다는 비판이 있곤 하다.[9] 이에 대해 회계형 모델에서는 모델러의 주관적 개입으로 더 현실적인 반응을 가정하고 더 타당한 결과값을 모델에 입력하여 문제를 해소할 수 있다는 장점이 있다. 단, 모델러가 적절한 시나리오 전제 및 이에 상응하는 결과를 판단할 수 있다는 전제하에 더 설득력 있는 모델의 구축이 가능하다.

시뮬레이션 모델을 회계형 모델과 별도로 분리하기도 하는데, 이는 에너지 생산과 소비에 대한 정량적 설명력을 갖춘 모델이라 할 수 있다. 최적화 혹은 합리적 행위자의 전제를 기반이 아닌, 모델러가 입력하는 가정들에 대한 결과를 보여준다. 분석하고자 하는 시나리오에 대한 모델 변수 입력값이 확실할 때 적절한 모델 형태라 할 수 있다.

하이브리드 모델은 위 설명한 모델들이 연계되거나 혼합된 형태이다. 회계형 모델이 거시경제 모델과 순차적으로 연계되어 해를 도출할 수 있도록 하는 경우가 한 예이다. 또 다른 예로 각 부문 내에서는 시뮬레이션 모델을 적용하지만 발전용량을 산정하는데는 최적화 기법을 적용할 수 있고, 경제발전율은 회계형으로 반영할 수 있는 식이다. 지속적으로 이용되는 모델링 플랫폼들의 경우 유저들의 모델링 요구에 부응하고자 하이브리드 형으로 개선되어가고 있는 것을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 회계형 모델이면서 최적화가 가능한 LEAP를 활용하여 분석을 진행하고 있다. 분석 플랫폼을 이용하기 전 대표적인 MARKAL/TIMES, MESSAGE, NEMS 등의 특성을 살펴보고자 에너지 시스템 모델링 플랫폼을 리뷰한 논문들을 검토하는 작업을 거쳤고, 각각의 모델 플랫폼을 이용하는 모델러들에게 플랫폼의 선택과 장단점에 대해 문의해보았다. 그 결과 에너지 시스템 모델링에 있어서 특정 모델을 이용하는 데는 (1) 라이선스 비용, (2) 모델링 툴을 학습할 수 있는 환경, (3) 모델링 툴을 이용하는 데 걸리는 시간, (4) 모델링 툴의 적합성 등의 이유를 확인할 수 있었다.

본 연구에서 LEAP를 선택한 이유는 다음과 같다. 우선 이용의 편의성 측면에서 LEAP가 제공하는 인터페이스가 매우 편리했고, 모델의 구조도 연구질문에 맞게 구축할 수 있다는 장점이 있다. 나아가 에너지시스템 모델에서 필수적으로 도출해야 하는 전력수요 증가에 따른 발전용량 증설은 NEMO를 이용해 최적화 풀이가 가능하게 되어 있어 회계형 모델과 최적화 모델의 장점을 고루 갖추고 있다. 재생에너지의 변동성과 간헐성 및 수요반응 자원의 분석을 위해 필요한 시간분할 기능도 모델러가 자유자재로 설정할 수 있게 되어 있다.

여러 모델링 플랫폼을 고려해본 결과, 국가 차원의 에너지 시스템 모델링에서는 모델링 기법 및 플랫폼의 문제보다는 모델링에 필요한 데이터의 존재 여부 및 확보 가능 여부가 더 중요한 이슈라 생각한다. 다양한 기관에서 에너지 시스템 분석 플랫폼을 유/무상으로 제공하고 있고, 오픈소스 플랫폼의 경우 자체적으로 모델링 기법 및 구조를 수정할 수 있다. 때문에 플랫폼에 크게 구애받지 않고 연구질문에 대한 모델링이 가능하다. 그러나 데이터의 경우 정리된 통계가 없어 원하는 구조를 모델링하기 어려울 수 있다. 국내 에너지 통계의 경우 정부가 진행해온 에너지 관련 통계조사 자료, 에너지 수급 업체들의 자료 등이 제공되고, 탄소중립을 위해 필요한 기기 보급, 건물 냉난방과 관련된 통계도 빠른 속도로 구축되고 있다. 이에 대해서는 데이터 부분에서 좀 더 중점적으로 다루도록 한다.

## 2. 유의점

에너지 시스템 모델링을 검토하는 자료에서 반복적으로 언급되는 유의사항을 본 연구에 적용하기 위해 정리하였다. 우선 모델링 방법론과 입력 데이터에 대한 투명성, 즉 외부인의 검증 가능 여부이다.[16,17,18] 최근 2010년대 이후에 개발된 모델들은 오픈소스 혹은 적어도 오픈 액세스이다. 또한 프로그래밍 언어 중에서 파이썬이 가장 많이 쓰이고 있다.[19] 데이터의 투명성도 모델 개발

을 돕고 신빙성을 높이는 데 중요하다. 다만 이러한 모델과 관련된 정보는 개발자 입장에서 자신(들)의 지적 재산이라 할 수 있고, 외부유출이 불가한 데이터가 포함되어 공개가 어려울 수 있다. 그러나 어떻게 보면 모델링의 결과는 모델 데이터와 가정들에서 도출된 것에 불과하므로 이를 공개하지 않고서는 모델 결과에 대한 신뢰가 있을 수 없다. 따라서 가능한 선 내에서 이러한 정보의 공개와 공유를 권장하고 있다. 특히 모델 결과를 기반으로 공공정책을 실행해야 할 경우 더욱 그러하다.[16]

본 연구와 더 직접적으로 연관을 지어 생각해본다면, 에너지효율 정책과 관련하여 효율 사업의 기술적 특징을 어떻게 모델에 반영했는지 명시함으로써 모델링 결과의 신뢰도를 높일 수 있다. 변수와 매개변수, 시나리오에 따른 가정과 모델러의 자의적 판단으로 입력한 값들의 보고를 통해 모델의 이해를 도와야 한다. 모델 시나리오에 대한 정확한 이해가 있어야 모델에서 도출한 정책 효과에 대한 해석이 가능하다. 모델의 장단점과 한계에 대해서 이해를 높일수록 주요 이해관계자들 간의 소통에 더 유용하게 쓰일 수 있다.

에너지전환을 다루는 장기 에너지시스템 모델에서 피할 수 없는 문제가 바로 불확실성이다.[17,18] 거시경제 전망에서부터 기술특성치의 변화까지 다양한 자료를 모델에 입력하지만 데이터 자체가 전망 값이기 때문에 불확실할 수밖에 없다. 따라서 도출한 결과도 불확실성을 내포하고 있는데, 이에 대해서 확률분포함수를 이용하여 특정 변수에 대한 불확실성의 정도가 결과값에 어떻게 반영되는지에 대한 검토가 필요하다. 결정론적 접근으로는 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo simulation)을 통해 특정 변수에 대한 불확실성을 검토할 수 있고, 민감도 분석을 통해 간단하게 고려해볼 수 있다. 확률적 접근으로는 확률분포함수를 프로그램에 적용할 수 있는데, 이는 MARKAL과 MESSAGE 모형에서 일부 변수에 대해 가능하다. 그러나 모든 변수와 관련된 불확실성을 고려할 수 없으므로, 모델이 예측할 수 없는 범위에서 발생할 불확실성에 대한 방지책을 마련할 필요가 있다.[19-21]

## 나. 기준 에너지시스템

### 1. LEAP

LEAP는 스톡홀름 환경연구원에서 개발한 플랫폼으로 에너지전환을 반영하는 장기 에너지 계획, 온실가스 감축 평가, 저탄소 개발 전략 등의 수립에 활용이 용이하다. 사용자 친화적인 인터페이스, 미래 전망 및 정책 분석, 에너지

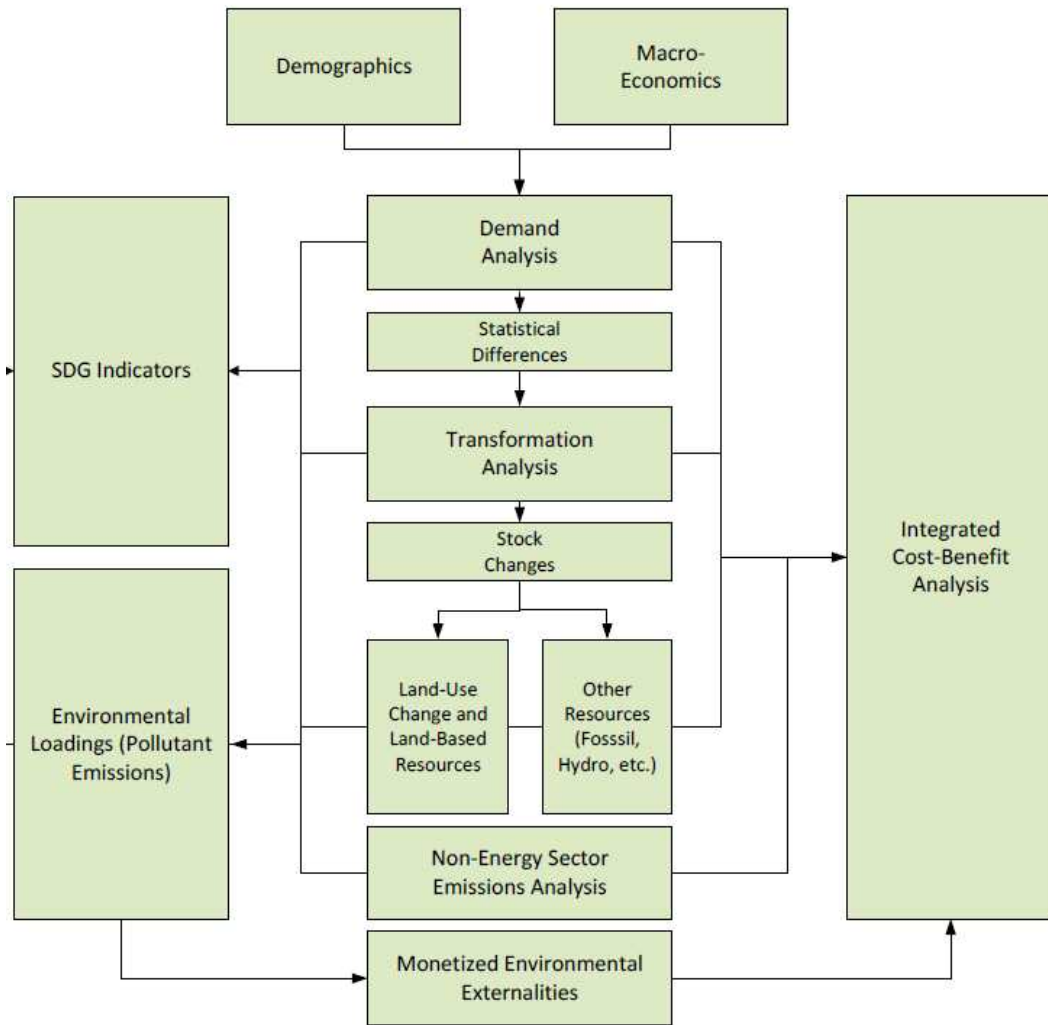
시스템 계획에 필요한 틀을 갖추고 있어 학계 및 정부 관계자, 에너지 관련 실무자 등 다양한 이용층을 형성하고 있다. LEAP는 기술 기반의 상향식 접근을 취하는 회계모형으로 구조를 유연하게 변경하고 에너지 소비 및 공급 기술을 상세히 묘사할 수 있어 연구질문에 맞춰 모델러가 구축을 하면 된다는 장점이 있다.

LEAP 분석의 순서는 <그림-1>에서처럼 순차적으로 이뤄진다. 첫째, 사회·경제적 가정을 입력하고, 둘째, 사회경제적 가정에 부합하는 에너지 수요 및 공급을 계산한다. 이때 발전용량 증설과 관련해서는 NEMO를 이용한 최적화 모듈을 선택적으로 이용할 수 있다. 셋째, 오염물질 배출계수를 토대로 배출량을 계산한다. 마지막으로 결과값을 토대로 시스템 차원에서 비용편익분석이 가능하다.

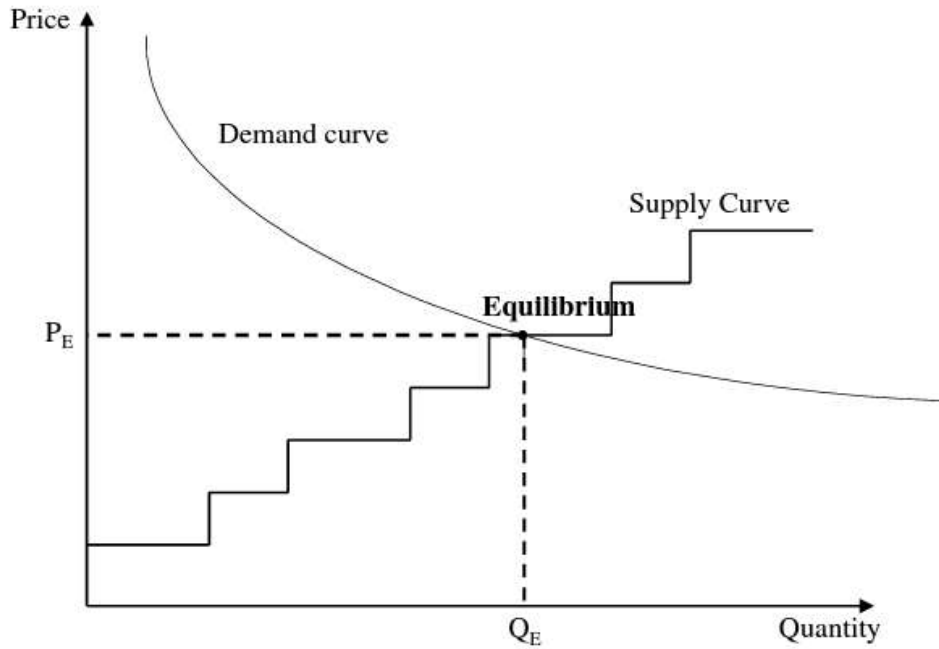
LEAP의 장점은 에너지 기술 특성치(에너지효율, 기기 수명, 관련 비용 등), 오염물질 배출계수 입력자료 등의 입력값들을 LEAP에서 제공하는 기본 데이터베이스를 활용하여 입력하거나 사용자 편의에 맞게 자유롭게 입력이 가능하다는 점이다. 입력 데이터를 토대로 기술 효율 개선, 활동량 변화로 인한 최종 에너지 소비, 온실가스 배출량 분석이 가능하다.

2020년부터 SEI에서 NEMO(Next Energy Modelling system for Optimization)를 제공하고 있다. 앞서 언급했듯이 회계형 모델이지만, 회계형으로 계산한 전력수요에 대해서 분석 기간 발전부문의 비용을 최소화하는 해를 선형계획법으로 도출한다. 이를 통해 장기에 걸친 최적 발전설비, 발전량을 계산할 수 있다. 유의점은, 완전한 예지(perfect foresight)를 전제로 최적화를 한다는 것이다. 시스템 내에서 10년 후에 전력수요가 몇 퍼센트 증가할지 미리 정확히 알고 있고, 미래의 전력수요를 위해 미리 발전소를 건설하는 형식으로 비용 최소화가 이루어질 수 있다. 현실에서 우리는 그러한 예지력이 없기 마련인데, 선형계획법을 이용한 최적화의 한계라 할 수 있다. LEAP에서는 수요와 공급을 동시에 분석하는 것이 아니라, 주어진 수요에 맞게 에너지를 공급하는 부분균형 접근 방법을 채택하고 있다.

아래 그림에서 보이는 균형점에서의 가격과 수량은 수요공급 곡선의 교차점에서 정해진다. LEAP는 모델러가 가격을 입력하는 방식이 아니라 에너지 수요를 입력해주면, 여러 발전원 옵션 중 가장 비용이 낮은 옵션을 선택해서 최적화하는 방식이라 할 수 있다. 즉 여러 개의 공급 곡선을 선형적으로 더해 수요를 충족시킬 수 있는 조합 중 비용이 가장 적은 해를 도출하는 방식이다.



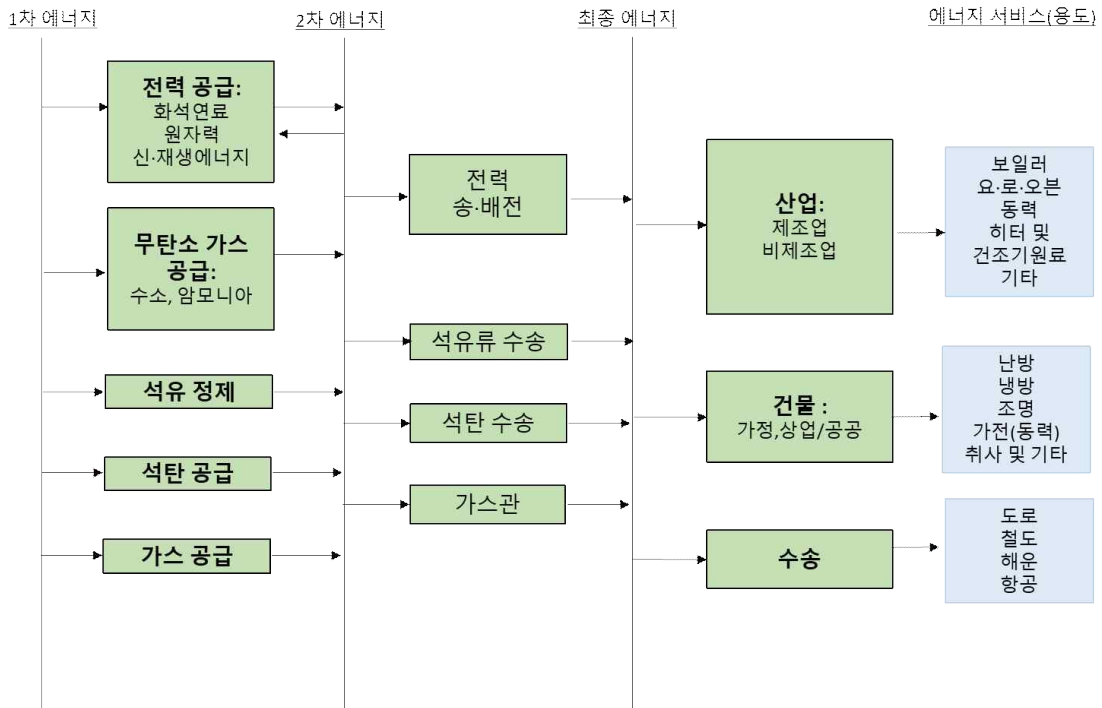
<그림-4> LEAP 분석의 구조



<그림-5> 에너지시스템 수요와 공급 부분균형 개념도

## 2. 모델 구조

앞서 언급했듯이 본 연구를 관통하는 연구질문은 ‘NDC 목표와 2050 탄소중립 목표를 달성하기 위해 에너지효율과 수요반응 정책을 어느 정도 시행해야 하고, 그 효과는 무엇인가?’이다. 이를 분석하기 위해서는 효율 및 수요반응 사업에 투입될 비용과 그로 인한 기술적 효율개선을 반영할 수 있는 모델을 구축해야 한다. 이를 위해서는 크게 두 가지 방법으로 최종에너지 수요를 모델링하였다. 우선 산업과 건물의 경우 최종적인 에너지 서비스, 즉 에너지를 사용하는 용도에 따라 에너지 소비량을 입력하였다. 건물은 가정과 상업 부문으로 세분화하고, 에너지 사용 용도를 난방, 냉방, 조명, 가전, 취사 및 기타로 분류하였다.



<그림-6> 기준 에너지 시스템

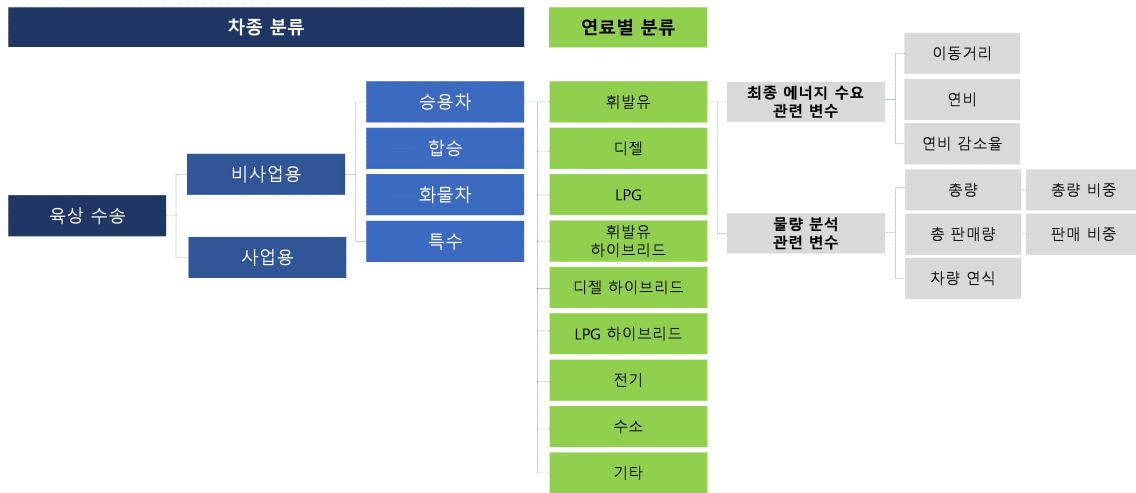
현재 구축한 모델에서는 가정과 상업이 단 하나의 대표 행위자로 구축이 되어 있으나, 가정 부문을 세분화하는 방법은 다양하다. 가구 인원수, 지역, 소득 분위, 가구 건물의 노후화 정도 등으로 나누어 모델링할 경우, 정책 시행 효과를 각각에 대해 다르게 입력할 수 있다. 따라서 어떤 정책의 효과를 분석하느냐에 따라 가정 부문을 나누는 기준도 바뀌어야 하는데, 현재 주요 부문별 에너지 수요 총량을 파악할 수 있는 가장 기본적인 모형으로 구축되어있다. 상업의 경우도 마찬가지로, 사업 형태, 매출 규모, 주 사용 기기 등으로 분류할 수 있을 것으로 생각되나 이에 대한 검토는 아직 부족한 상황이다.

산업부문은 현재 제조업과 비제조업, 그리고 제조업 내에서는 10개의 제조업 분류로 구축하였다. 산업부문도 최종에너지 서비스 기준으로 에너지 소비량을 입력하였다. 분류는 원재료, 수송, 조명 및 기타, 보일러, 오븐, 모터, 히터 및 건조기이다. 이는 에너지 총조사의 분류를 따른 것이다.



<그림-7> 산업 부문 기준 에너지 시스템

LEAP에서는 최종에너지 서비스 기준의 최종에너지 소비 외에도 에너지 사용 기기의 폐기와 신규설치를 모델링하는 스톡 회전 분석(stock turnover analysis)도 가능하다. 이를 산업과 건물 부문에 사용한다면 건물 레노베이션 및 신규 건설, 기기 교체 및 신규 설치 과정에서 에너지효율 개선과 수요반응 자원 활용 정책을 스톡의 변화에 직접적으로 반영할 수 있다. 그러나 모든 기기에 대해서 이 분석을 실행하는 것은 지나치게 데이터 집약적이고, 관련 데이터가 존재하지 않는 현실적인 제약이 있다. 따라서 산업과 건물 부문에서 스톡 회전을 분석보다는 최종 사용 서비스(End-use service) 기준으로 수요를 모델링하였다.

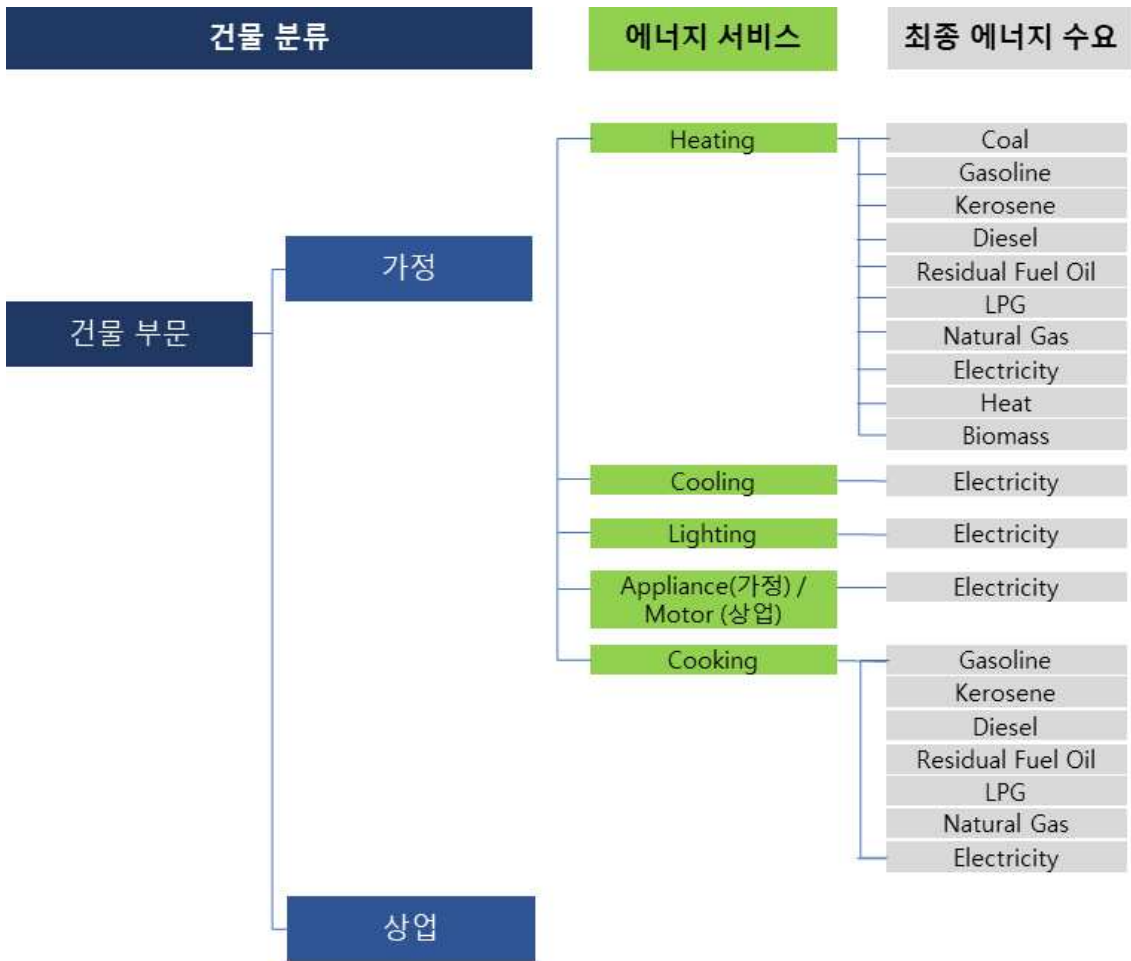


<그림-8> 육상 수송 부문 기준 에너지 시스템

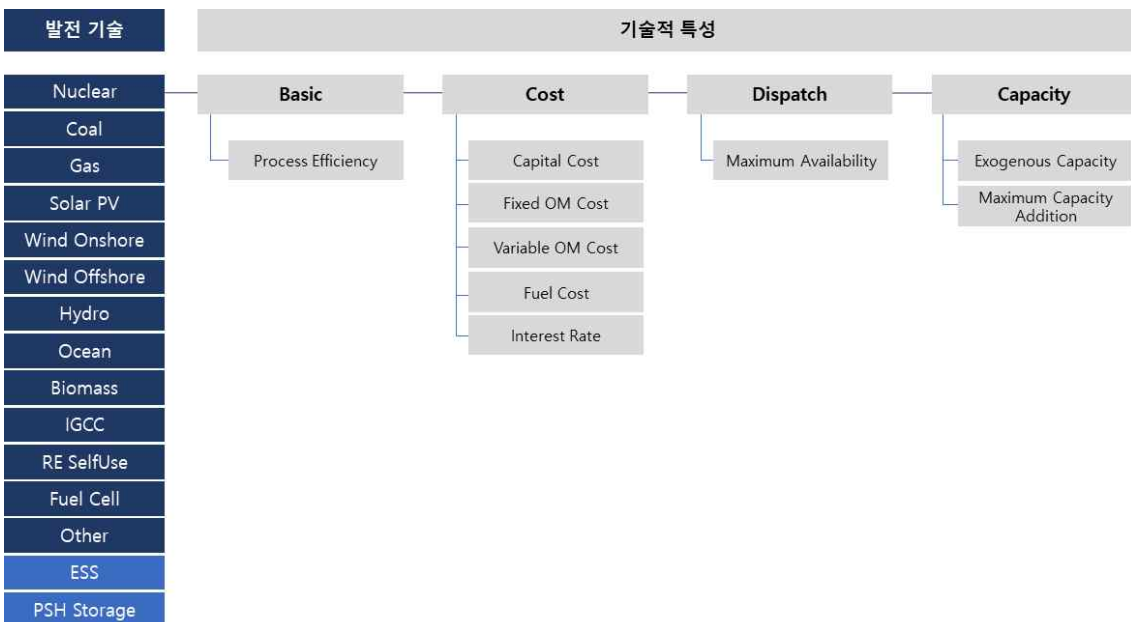
수송 부문의 경우 도로, 철도, 해운, 항공으로 나뉜다. 본 연구에서는 가장 에너지 소비가 큰 도로 부문에 집중하여 분석하였다. 자동차 스톡과 연식, 운행 거리, 연비에 대한 통계가 잘 갖춰져 있기 때문에 스톡 회전을 분석으로 모델을 구축하였고, 이 모델링 기법은 전기차의 보급률에 따른 전기 수요와 연비 개선을 통한 에너지 수요 감소를 확인할 수 있기 때문에 본 연구에 적합하다. 자동차는 사업용과 비사업용, 승용차, 승합차, 물류와 특수로 분류하였다.

건물 부문은 가정과 상업 건물로 분류하였고, 건물에서 사용하는 최종 에너지 서비스는 난방, 냉방, 조명, 기기, 취사로 구분하였다. 이는 에너지 총조사에서 조사하는 에너지 서비스의 기준을 반영한 것이다. 난방의 경우 10가지의 에너지원이 사용되고 있고, 반면 냉방, 조명, 기기의 경우 모두 전력으로 가동이 되고 있다. 취사의 경우에도 다양한 에너지원이 사용되고 있으나 주된 에너지원은 도시가스 및 전력인 것으로 나타난다.

에너지 공급 부문은 1) 전력의 송배전, 2) 발전, 3) 석유의 정제로 구축하였다. 모든 유류의 경우 원유를 수입하여 최종에너지 소비 비중에 맞춰 국내 정제 시설에서 생산한다고 가정하였다. 1차 에너지 중 원유, 천연가스를 비롯한 화석연료 대부분의 수입을 가정하였고, 미래에는 수소와 바이오 에너지의 수입을 가정하였다. 국제 병커링은 기술적으로 통계적 불일치 조정 등이 필요하므로 단순화를 위해 제외하였다.

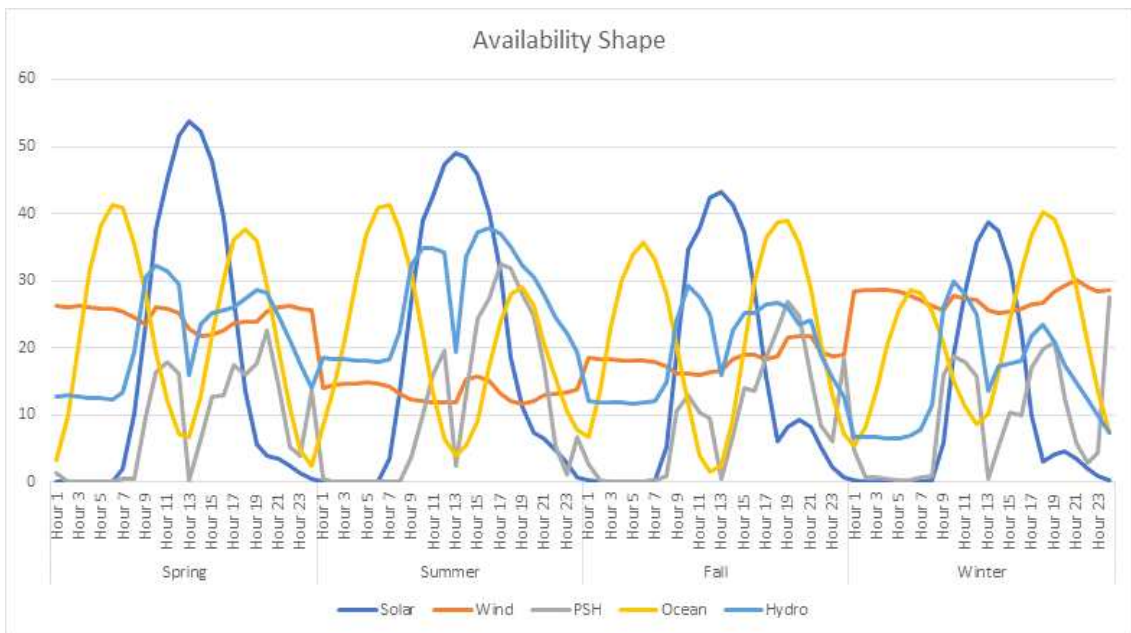


<그림-9> 건물 부문 기준 에너지 시스템

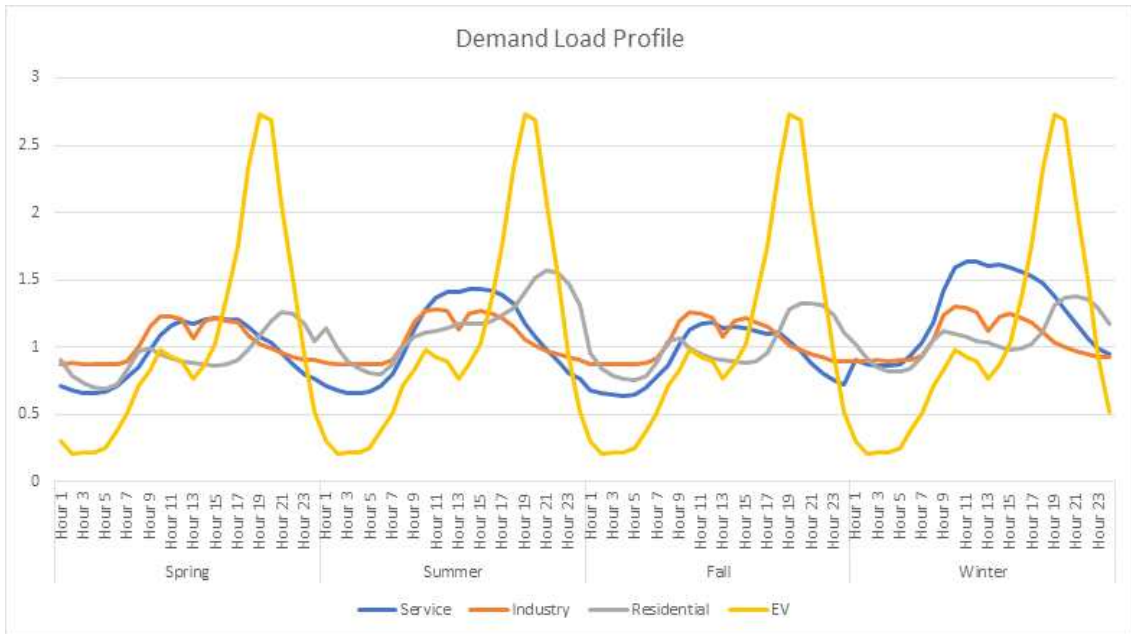


<그림-10> 발전 기술과 기술적 특성

전력은 여타 에너지원과 달리 수요와 공급이 항상 균형을 이뤄야하고, 때문에 일시별 수요와 공급의 변동성이 에너지 시스템 분석에 중요하다. 본 모델에서는 가장 전력 수요가 큰 피크시간대의 전력공급량, 재생에너지의 변동성에 따른 에너지 저장장치 및 수요반응 정책의 필요성을 분석하기 위해 1년을 4계절, 24시간, 즉 96시간 분할로 구축하였다. 이에 따라 아래의 그래프처럼 변동성 자원의 이용률 곡선과 수요의 부하율 곡선을 모델에 입력하였고, 분석에 반영하였다.



<그림-11> 변동성 자원의 이용률 곡선



<그림-12> 부문별 수요 부하 곡선

분석에서 온실가스 종류는 이산화탄소, 아산화질소, 메탄으로 한정하였다. 탄소중립을 위해서는 모든 온실가스의 배출량을 줄여야 하지만, 본 분석에서는 이산화탄소 배출량의 감축, 그중에서도 화석연료 수요의 감축이 탄소중립 달성에 주는 영향을 검토하였다.

### 3. 에너지효율과 수요반응 모델링

에너지효율 정책을 모델링하기 위해서 기존 실행해온 관련 정책들의 국내 실적 자료를 참고하였다. 과거 실행한 사업들의 투입 비용과 절감 실적이 가장 핵심적이지만, 그 외에도 고객 참여도, 목표치 대비 달성량, 사업의 절감 잠재량 등에 대한 정보가 필요하다. 장기적으로는 에너지효율 기술의 개발과 이를 통해 에너지를 어느 정도 절약할 수 있을지에 대한 전망도 고려해야 한다. 그런데 우리나라의 경우 에너지 이용 합리화 기본계획을 1993년도부터 수립·시행해오면서 효율 개선 사업을 다방면으로 시행하고 있지만, 이와 관련된 성과 평가와 투명하고 열려있는 정보제공이 부족한 실정이다. 정부예산이 투입된 에너지효율 사업에 대해서도 투입 비용과 절감 에너지량, 관련 편익 등이 공개되어 있지 않다. 부처별 예산 사업설명 자료에도 에너지효율 향상 관련 사업과 이에 대한 예산이 있으나 관련 사업으로부터 예상되는 실적이라 할 수 있는 에너지 절감량에 대해서는 평가되고 있지 않거나 공개되고 있지 않다. 사업비

투자 실적은 에너지공단을 통해서 일부 제공되고 있으나, 이마저도 효율향상, 부하관리, 기반조성 등의 대분류에 따른 취합자료일 뿐이고, 비용에 상응하는 효과와 하위 단의 개별 사업에 대한 자세한 자료가 공개되어 있지 않다.

이러한 실정을 감안하여 본 연구에서는 에너지효율과 수요관리를 통한 에너지수요 감축 잠재량을 에너지효율 개선 목표에 맞춰 설정하였다. 정부 정책을 통한 에너지효율 개선을 가정한 시나리오에서는 모든 항목별 최종에너지 수요에서 매년 1%의 감축 달성을 가정하였다. 에너지효율 개선 사업을 통한 감축 잠재량을 직접적으로 파악하는 것이 급선무이겠으나 현재 이와 관련된 전수조사를 관련 기관에서 시행하고 있지 않다. 따라서 국내에서 EERS 시범사업을 도입하면서 1차 년도에 0.1% 감축 목표에서 시작하여 점진적으로 2031년까지 목표를 1%로 높일 것이라 계획한 것을 반영하여 본 분석에서는 에너지효율 정책을 통해 매년 에너지 집약도를 1% 개선한다는 가정을 적용하였다. 미국 EERS 실행 실적을 검토해도 연 1%의 수요 감축은 제도가 효과적으로 운영된 우수 사례에 해당하는 주들이 달성하고 있는 도전적이지만 실현 가능한 목표치이다.

우선 에너지효율과 수요반응 사업에 대한 미국사례를 검토하면서 국내 에너지효율 및 수요반응 정책에서 참고할 부분이 많았던 미국 캘리포니아의 감축 잠재량 및 목표 보고서 사례를 소개하면서 향후 국내 정책에의 적용 방법에 대해 검토해본다.

### (가) 에너지효율 모델링

본 연구는 분석 대상이 에너지효율과 수요반응 자원이기 때문에 이에 대한 입력 자료를 어떻게 구축할 것인지가 관건이라 할 수 있다. 이에 에너지효율과 수요반응 정책에 있어 체계적인 거버넌스, 정량적 분석에 근거한 의사결정 과정을 보이는 미국 캘리포니아의 사례를 소개한다. 2021 Energy Efficiency Potential and Goals Study (Guidehouse, 2021; 이하 PG 보고서)[22,23] 보고서는 에너지효율 사업을 기술별로 분석하여 4개의 시나리오에 대해 에너지 절감 잠재량을 도출하고 있다. 이 보고서는 다음 내용을 담고 있다.

- IOU들의 에너지효율 목표를 설정하는 과정에서 CPUC에 필요한 정보를 제공한다.
- 포트폴리오 계획을 세우는 과정에서 IOU와 여타 에너지효율 프로그램 운영자들을 위한 참고문헌 역할을 한다.
- 에너지효율 개선을 할 수 있는 새로운 방법들을 알린다.

- 캘리포니아의 주요 에너지 기관들의 계획을 위한 전망을 제공한다.
- SB350 목표 달성과 관련한 분석 및 회계를 위한 전망을 제공한다. SB350 목표는 2030년까지 에너지효율을 두 배로 증가시키는 것이다.
- 통합 자원 계획 (Integrated Resource Plan)을 통해 에너지효율 자원의 최적화에 대한 접근을 시도한다.

2022년부터 2032년까지의 기간을 대상으로 하고, 현재 및 미래의 에너지효율 개선 기술들의 감축 잠재량을 제공한다. 에너지효율 개선 기술들에 대한 도입 비용과 기술 수준을 고려한 에너지 절약량의 계산이라 할 수 있다. 실현 가능 잠재량은 CPUC의 목표 설정 과정에 사용된다.

캘리포니아의 PG 보고서는 에너지 수요를 가정, 저소득, 상업, 농업, 산업, 광업 여섯 개 부문으로 분류하고 있다. 에너지효율 사업은 크게 지원금 지급 프로그램, BRO(behavioral, retrocomissioning, operational; 행동, 레트로 커미셔닝, 운영), 건축물 에너지효율등급 기준 및 기기 최저효율 기준, 에너지효율 금융, 가정 부문 저소득층 에너지효율 정책으로 분류하고 있다.

아래 표는 각 에너지효율 사업에 대한 설명과 국내에의 적용 방법에 대한 필자의 의견을 적은 것이다.

<표-1> 캘리포니아의 에너지효율 사업에 대한 설명과 국내 적용 방법

사업 종류	사업 설명	국내 적용 방법	
지원금 지급	- 기술 도입	가정, 상업, 공업, 농업, 광업 부문에 상용화되어 계획 기간 내에 도입이 가능한 기술들에 대해서 도입 효과를 분석함	에너지효율을 높일 수 있는 기술들에 대한 유사한 조사를 실시할 필요가 있음. 즉 기술 및 시장 상황을 고려하여 에너지 수요 감축 가능성과 관련 비용에 대한 장기 조사 필요.
	- 건물 전체	건물 전체와 관련된 사업에 대해서 가정 및 상업 부문의 레트로 피팅과 최저 기준보다 에너지효율이 좋은 신규건축을 가정하였음. 건물의 효율을 높이는 개별 기술은 별도로 기술하지 않았음. 가정과 상업 부문에 대해서만 모델링을 진행하였음.	신축 건물의 에너지효율 개선 잠재량과 관련 비용에 대한 검토 필요. 관련 기관들이 내부적으로 참고하는 자료에 대한 공개 필요. 기술별 혹은 사업 시행이 가능한 단위별로 보고하여 에너지효율 개선을 위한 사업 계획에 참고할 수 있어야 함. 레트로피팅의 경우 정부 지원으로 진행된 사업에의 투입 비용과 감축 효과에 대한 tracking & monitoring, 자료 공개가 필요함.
	-	특정 프로세스, 사례에만 적용할	산업과 농업 부문의 경우 지역적, 프

	사례별 에너지 효율 개선	수 있는 에너지효율 기술에 대한 개별 검토를 진행함. 주로 공업, 농업 부문에서 이루어짐. 특정 공정을 개선할 수 있는 다양한 기술의 집합을 총체적으로 검토함.	로세스별 검토가 필요할 경우 이처럼 별도 분석하는 사업 프로세스 필요. 특히 철강, 정유 및 화학 산업 등에서 이뤄지는 에너지효율 개선은 기술 관련 외부공개가 어렵기 때문에 별도 기준이 필요함.
	BRO (Behavioral, Retrocommissioning and Operational)	Guidehouse는 행동 기반 사업을 에너지 사용과 절약에 대한 정보를 제공하는 것으로 지원금, 기기, 혹은 서비스를 제공하지 않는 사업으로 정의함. BRO로 인한 절약은 기기의 변화가 아닌 행동과 운영의 영향으로 나타남.	캘리포니아의 BRO와 국내 BRO는 정책 및 실행되는 건물들의 특성이 다름. 그러나 정량적으로 사업 효과를 산정할 필요가 있음. 국내 BRO 사업에 대한 성과를 알아보고 이를 캘리포니아 및 여타 성공 사례와 비교하여 개선 가능성을 고려할 수 있음.
	에너지효율 등급 기준	건축 기준이 엄격해질수록 신규 건축에 더 효율적인 기술을 적용해야 함. 신규 기기에 대한 최소 기준도 더 높은 효율 수준을 의무화함. Guidehouse의 경우 2006년부터 실행된 기준에 대해서 모델에 적용하였음.	국내 건축물 에너지효율 기준과 기기 기준으로부터 예상되는 에너지효율 개선을 수치화해야 함. 건물 냉난방 효율 및 기기 효율에 대해서 국내 기준이 있지만 이에 대한 tracking & monitoring 자료를 구축하고 대외적 공개를 통한 실적 관리 필요.
	에너지효율 금융	Guidehouse는 에너지효율 금융을 통해 비용 효율적인 에너지효율 사업의 대대적 시장 도입이 가능할 수 있다고 평가하고 있고, 이를 모델 입력 자료에 반영하였음.	국내에서 일부 에너지효율을 위한 융자사업이 진행되고 있지만 규모 면에서 적극적으로 활용하고 있지 않음. 에너지효율 기술이 장기적으로 경제적인에도 도입되지 않음. 소비자들은 비용 회수에 대한 위험을 감지하고 투자를 꺼림. 정부의 금융 사업을 통해 이런 장벽을 낮추는 선에서 금융사업의 비용과 효과 산정 필요.
	저소득층 에너지효율	저소득층 특성화 데이터와 적용 가능 사업 목록을 사용하여 상향식으로 에너지 절감량을 분석하였음. Investor Owned Utility의 Energy Savings Assistance 프로그램 리포트와 전문가 의견을 반영하였음. 효율 사업 도입률 산정이 가정 부문과 다름.	국내에서도 저소득층 대상 에너지효율 프로그램을 별도로 운영하고 있고, 가정, 상업 부문과 별개의 평가가 이루어지고 있음. 국내에서의 저소득층 대상 에너지효율 사업의 비용 대비 효과에 대한 실적 공개 필요.

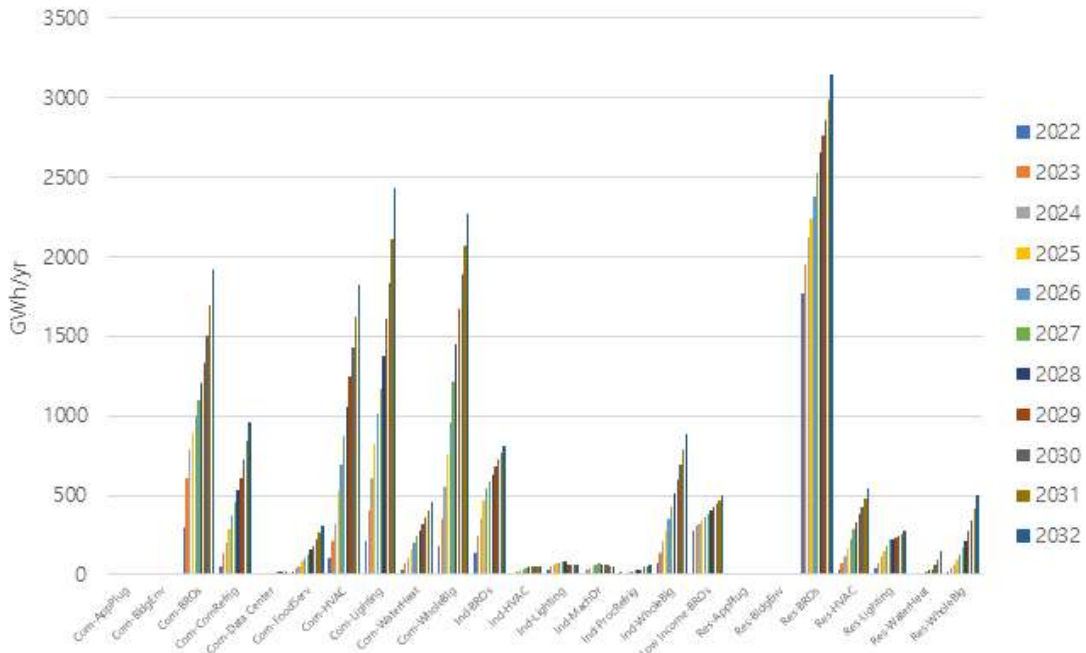
캘리포니아의 감축잠재량 보고서에서는 에너지효율 사업을 통해 절감할 수 있는 절감량이 2032년까지 꾸준히 증가할 것으로 전망하고 있다. 그림에서 처

럼 2032년에는 최종 전력수요 대비 2.7%를 넘어설 것으로 보고하고 있다. 도전적인 목표처럼 보일 수 있으나, 최종 소비 서비스별로 상세하게 예상 절감량을 보고하고 있기 때문에 ISO들이 단기적으로는 개별 사업단위로 프로그램 운용 예산과 실행계획을 구체적으로 세우고, 장기적으로 감축 잠재량이 예상되는 서비스에 대해 준비하고 관련 자원을 확보할 수 있다.

캘리포니아의 감축잠재량 보고서(Guidhouse)처럼 국내에서도 기술별 감축 잠재량과 사업 실행을 위한 예상 투입비용이 연도별로 정리된 보고서가 있다면 에너지효율 사업 시장을 신속하게 키우고 사업을 효과적으로 실행할 수 있을 것으로 보인다. 체계적으로 에너지효율 사업의 주체를 정하고, 사업 목표를 정하고, 실행 방법을 확정하고, 사업의 성과를 관리, 이와 관련된 모든 과정을 전국민에게 공개하여 투명하게 진행할 필요가 있다.



<그림-13> 캘리포니아 최종전력수요 및 절감량 전망



<그림-14> 캘리포니아 최종 사용 서비스별 누적 감축 잠재량

본 연구에서는 에너지효율 모델링을 위해 국내 EERS 시범사업 실적으로부터 에너지효율 사업의 평균비용을 도출하여 시나리오에 반영하였다. EERS는 2018년부터 시범적으로 도입되었다. 2019년부터 공급3사(한전, 가스공사, 한남) 대상으로 EERS 시범사업이 확대되었고, 2022년에 전력공사는 325억원 사업비로 501 GWh를 절감하였다. 이는 64.9원/kWh의 에너지 절감 비용으로 2022년의 평균 정산단가인 152.99원/kWh<sup>1)</sup> 보다 적은 값이다. 전력 한 단위를 절감하는데 드는 비용이 한전이 발전사업자로부터 전력을 사는 비용보다 절반 이상 낮았음을 확인할 수 있다. 이를 기반으로 본 연구에서는 앞으로 EERS의 목표를 확대해나간다면 어떠한 편익이 있는지 시스템 차원에서 분석하였다.

에너지효율 프로그램의 실행비용을 어떻게 산정하는지에 따라 정책의 비용대비 효과의 분석 결과가 크게 좌우된다. 이에 대해서 각 부문별로, 최종 사용 서비스별 혹은 기기별 사업 실행 비용과 예상 감축 효과에 대한 전망치가 없는 실정이기 때문에 기존 에너지효율 정책과 DB 자료를 최대한 검토한 후 이를 분석에 반영하였다.

앞서 언급했던 시범단계의 EERS는 2018년~2022년의 실적이 주요 사업별로 공개되어 있다. 가장 절감량이 많았던 기술은 LED로 184 GWh를 감축하였다.

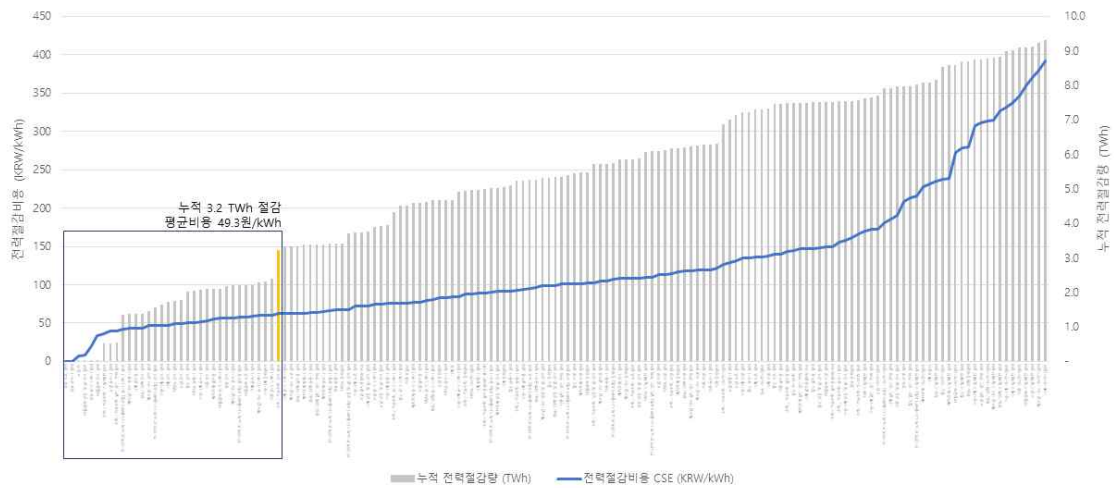
1) 2022년도는 정산단가가 이례적으로 높았던 해로 2021년에는 95.00원/kWh이었다. 석탄, 천연가스, 원유 값의 상승으로 발전비용이 크게 증가하였다.

이어서 인버터, 행동변화-경쟁 및 교육, 전동식 사출 및 성형기가 절감량 순으로 상위 네 개의 사업이었는데, 이들이 EERS 전체 절감량의 83%를 차지하였다. 실적에 비해 소요 비용은 전체의 25%에 불과하였다. 고효율가전 프로그램은 9.1 GWh를 감축한데 그친데 비해 전체 비용의 57%를 차지하였다. 사회복지 지원 프로그램의 비용 대비 절감량이 낮은 것은 정책 목표가 단지 비용 효과성 이외의 형평성을 중요시한 결과이기 때문으로 보인다. 그럼에도 사회복지 지원 프로그램에 대해서도 명확한 사업실행 기준을 제시하고, 사후 평가를 실행해야한다.

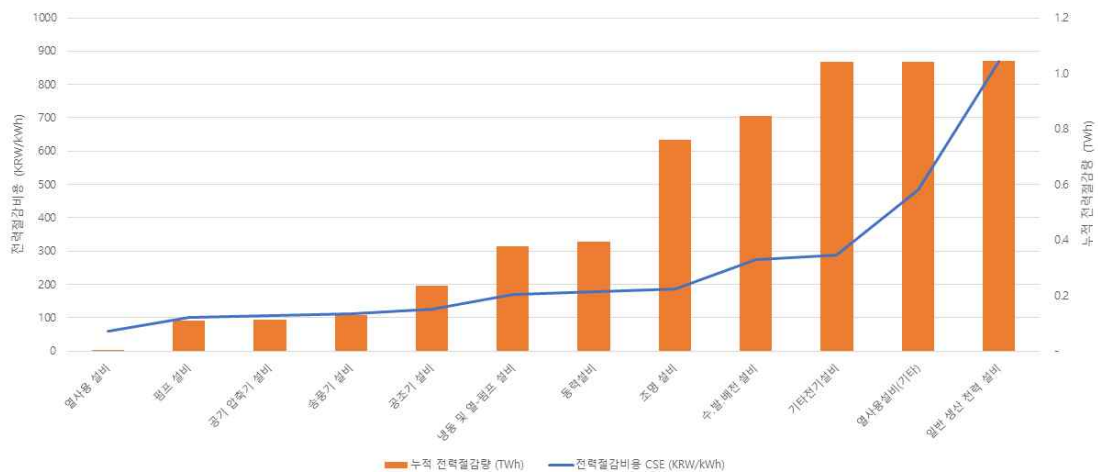
EERS처럼 직접적으로 에너지효율을 개선하는 제도의 과거 실적 외에도 에너지효율 사업 실행에 필요한 비용을 산정할 수 있는 자료로 에너지진단 사업이 있다. 에너지이용 합리화법 제57조 5항에 의거하여 진단대상자의 에너지사용시설에 대한 에너지이용 실태와 손실요인을 파악하여 에너지이용 효율향상 개선방안을 제시하는 진단을 실행한다. 사업 대상은 연간 에너지사용량 2천 toe 이상 에너지다소비업자로, 한국에너지공단에서는 주로 1만toe이상 대규모 사업장 위주로 진단을 수행한다. 2022년 기준 총 2,786개의 사업장에 대해 에너지진단을 실시하였으며, 산업체 2,249개, 건물 515개, 해외 22개에 대해 진단을 수행하였다. 2007년-2022년까지 233개 사업장에 대해 8,202천toe/년 에너지절감 잠재량을 도출하였으며, 절감잠재율은 6.2%로 나타나고 있다.

해당 DB를 분석한 결과, 산업부문의 2021년 전력 소비량인 270 TWh의 1%를 감축하기 위한 평균비용은 49.3원/kWh였다. 에너지 진단 대상인 대규모 사업장만을 대상으로 가장 비용대비 감축 잠재량이 높은 기술들에 대해서 사업을 추진했을 때 에너지효율 개선 비용이 앞서 언급한 한전 정산단가의 절반 이하 수준임을 알 수 있다. 건물부문의 경우 2021년 전력 소비량이 248 TWh인데 에너지 진단에서 확인된 절감 방법을 통해 1.0 TWh를 감축하는 평균비용은 195원/kWh이다. 건물부문의 경우 에너지진단을 통해 확인된 감축잠재량이 전체 전력 소비의 0.4%에 불과했으며, 본 연구의 시나리오 가정에 따라 건물 부문에서 에너지 집약도를 매년 1% 개선하기 위해서는 추가적인 사업 발굴이 필요하다.





<그림-17> 에너지진단DB 제조업 설비별 전력절감비용 및 누적 전력절감량



<그림-18> 에너지진단DB 건물 설비별 전력절감비용 및 누적 전력절감량

### (나) 수요반응 모델링

한국전력거래소의 2015년 연구[12]에 의하면 수요관리사업자들을 대상으로 한 설문조사 결과 2020년경이면 국내 전력시장의 수요반응자원이 포화될 것으로 예상하였다. 포화 시의 용량은 5,100MW 수준으로 이는 피크수요의 5%에 해당한다. 이는 2022년의 실적과 유사한 수치로 기존의 DR 자원만을 활용했을 때 이미 시장이 포화됐을 수 있음을 시사한다. 반면 이는 DR 시장의 규모를 어떻게 규정할 것이냐에 따라 달리 답할 수 있는 문제이다. LBNL의 연구

[24,25,26]에서는 캘리포니아의 DR 잠재량 중 최대수요 이전 잠재량을 평가하였는데 수요반응 잠재량을 제한하는 주요 요인이 값비싼 기술 비용과 낮은 참여율이었다. 우리나라의 경우에도 탄소중립에 대한 의지가 있고 가장 비용효율적인 방안을 찾고자 한다면, 그 가능성을 객관적으로 검토해볼 필요가 있는 자원이라 할 수 있다.

신뢰성·자발적 DR는 2018년 5.3GW로 최대치를 기록하고 2019년 급격히 감소한 후 2023년까지 꾸준한 증가세를 보이고 있다. 2014년 처음 제도가 도입된 이후 초기의 급격한 상승률이 둔화되었다. 수요반응의 경제성은 계절성이 강하기 때문에 감축량과 정산금의 규모는 월별로 일정치 않은 것을 확인할 수 있다.



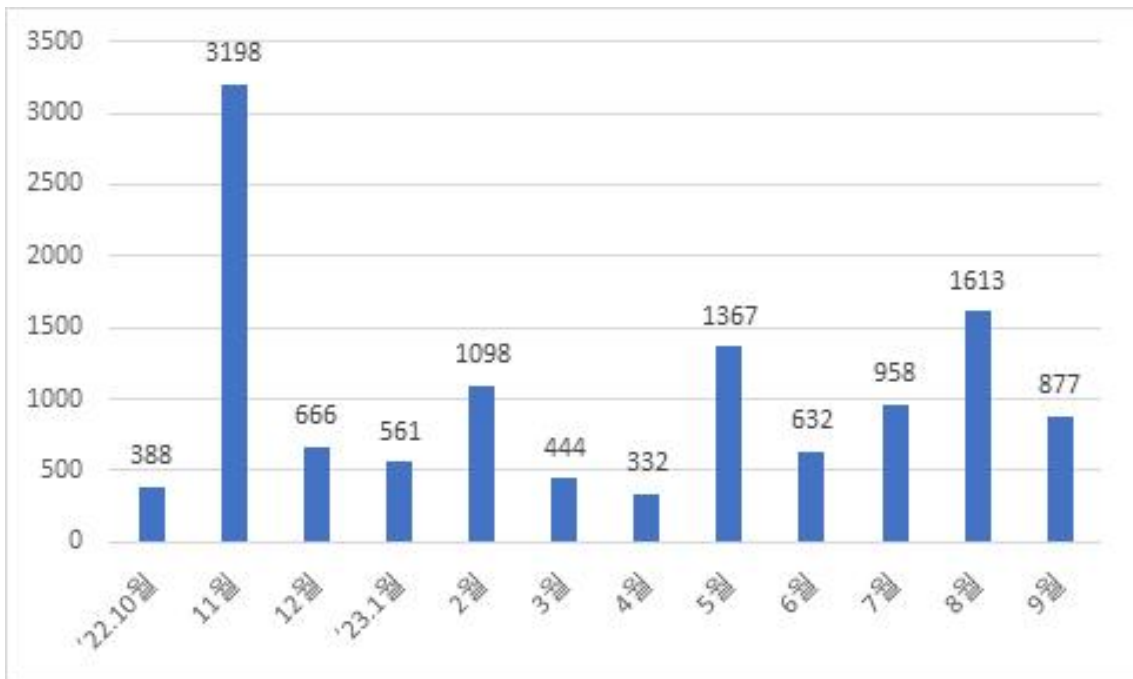
<그림-19> 신뢰성·자발적 DR 참여 현황

출처: 전력거래소 (2023) 자료기반 자체 작성



<그림-20> 자발적DR 감축량 실적 및 정산금

출처: 전력거래소 (2023) 자료기반 자체 작성



<그림-21> 자발적DR 감축량 대비 정산비용 (원/kWh)

출처: 전력거래소 (2023) 자료기반 자체 작성

본 연구에서는 수요반응을 2050년까지 적극적으로 도입하는 시나리오를 구축하였는데, 수요반응 정책실행의 결과를 모델링하였으나 이와 관련된 비용은

별도로 산정하지 않았다. 현재 실행되고 있는 수요반응 정책은 정산금 지급의 형태로 이루어지고 있는데 본 연구에서는 수요반응 정책으로 수요 곡선이 재생에너지가 계통에 추가되면서 예상되는 이용률 곡선으로 수렴한다고 가정하였다. 전면적인 개편인 셈인데, 이러한 수요반응을 유도할 수 있는 프로그램을 성공적으로 도입하기 위해서는 기존 정책처럼 정부가 수요반응 자원에 대해 정산금을 지급하기 보다는 적절한 가격 시그널은 통한 부하 이동이 필수적인데, 이는 비용으로 산정하기 어렵다고 판단하였다. 소비자 측면에서 필요한 기술인 스마트 가전, 소형 에너지 저장 장치, 에너지 관리 시스템 등은 아직 그 비용을 추산하기 어렵기도 하다.

#### 다. 시나리오 구축

정책효과를 분석하기 위해 전력수급기본계획에서 제시하고있는 기준 전망을 반영한 정부정책기준(Government Policy Reference, 이하 GPR) 시나리오를 구축하고, 2050년까지 탄소중립을 달성하는 미래상을 반영하는 넷제로(Net Zero, 이하 NZ) 시나리오를 구축하였다. GPR 시나리오는 탄소중립을 위한 정책 시행이 없으면서 사회경제적 전망이 실현되는 미래상이다. 넷제로(Net Zero, 이하 NZ) 시나리오에서는 최종에너지 서비스 수요에는 변함이 없는 상태에서 재생에너지 도입을 통한 발전부문의 100% 탈탄소화, 산업부문의 원료용 소비를 제외한 최종 에너지소비의 전력화, 제4차 친환경차 기본계획의 친환경차 도입 목표를 달성하는 미래상을 모델링하였다. GPR 시나리오와 NZ 시나리오의 비교를 통해 우리나라의 탈탄소화를 위해 향후 어떤 변화가 필요할지 간음할 수 있다.

다음으로 에너지효율 정책의 효과를 검토하기 위해 NZ\_EE를 구축하였다. 에너지효율 정책의 효과를 분석하기 위한 기준 시나리오는 GPR이 아닌 NZ 시나리오로 하였다. GPR 시나리오 대비 NZ 시나리오에서는 최종 전력소비가 크게 늘어나고 에너지 믹스도 크게 바뀌기 때문에 정책실행의 기준이 되는 시나리오를 GPR로 하는지, NZ 시나리오로 하는지에 따라 분석의 함의가 바뀐다. 현재 우리나라의 탄소감축경로가 본 연구에서 상정한 NZ 시나리오의 방향으로 흐르고 있다고 보기 어렵지만, 2050년까지의 탄소중립 목표를 달성하기 위해서는 하루라도 빨리 과감하면서 흔들림 없는 에너지전환 정책을 도입해야 하는 실정이다. 재생에너지 확대를 통한 넷제로 달성에 비관적인 이해관계자들은 가장 큰 이유로 비용의 증가를 꼽는다. 분석 결과에서 추가적으로 설명하겠지만, 본 연구에서는 에너지효율 정책을 통해 재생에너지로 확대에 인한 비용

증가폭을 줄일 수 있음을 보인다. 즉 NZ 경로를 이행하면서 비용을 줄일 수 있는 다양한 수단이 존재하는 것이다.

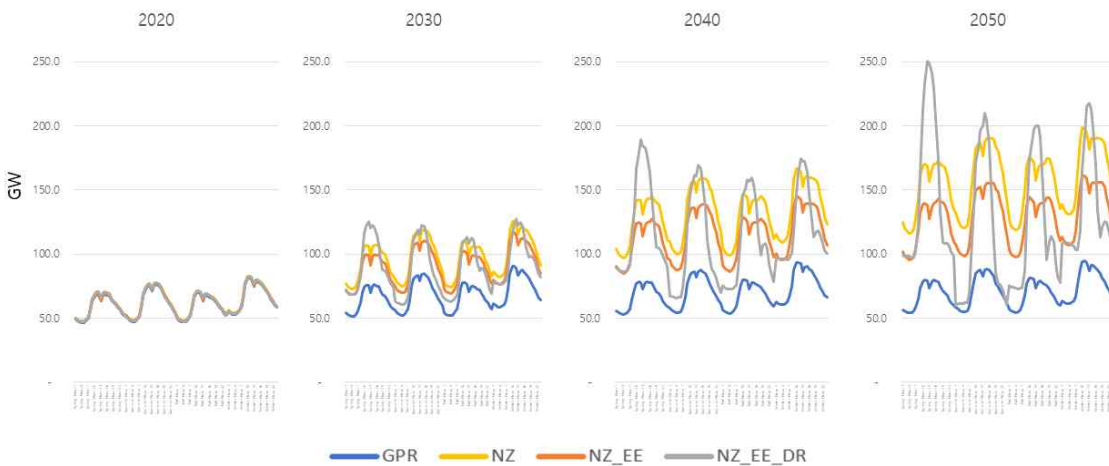
NZ 시나리오는 가장 실현 가능성이 높은 경로가 아니고, 가장 단순하게 전력화와 대대적인 재생에너지 도입으로 탄소중립을 달성할 수 있는 미래상일 뿐이다. 에너지효율정책을 실행하는 NZ\_EE 시나리오가 정책도입을 통한 추가적인 변화를 가정하였듯이, NZ\_EE\_DR 시나리오는 에너지효율 정책과 수요반응 정책을 함께 시행하는 미래상이다. 본 연구에서는 에너지효율 정책과 수요반응 정책의 효과를 검토하지만, 이외에도 더 적극적인 전기자동차의 도입, 집단에너지 확대를 통한 에너지효율 향상, 에너지소비 행태 변화를 통한 효율 향상 등 다양한 변화가 있을 수 있다. 본 연구에서는 다소 단순화된 가정 하에서 에너지효율과 수요반응 정책의 효과를 에너지 시스템 모델링을 이용하여 정량적으로 분석하여 비용과 효용 측면을 조명하는 것이다.

<표-2> 시나리오 요약

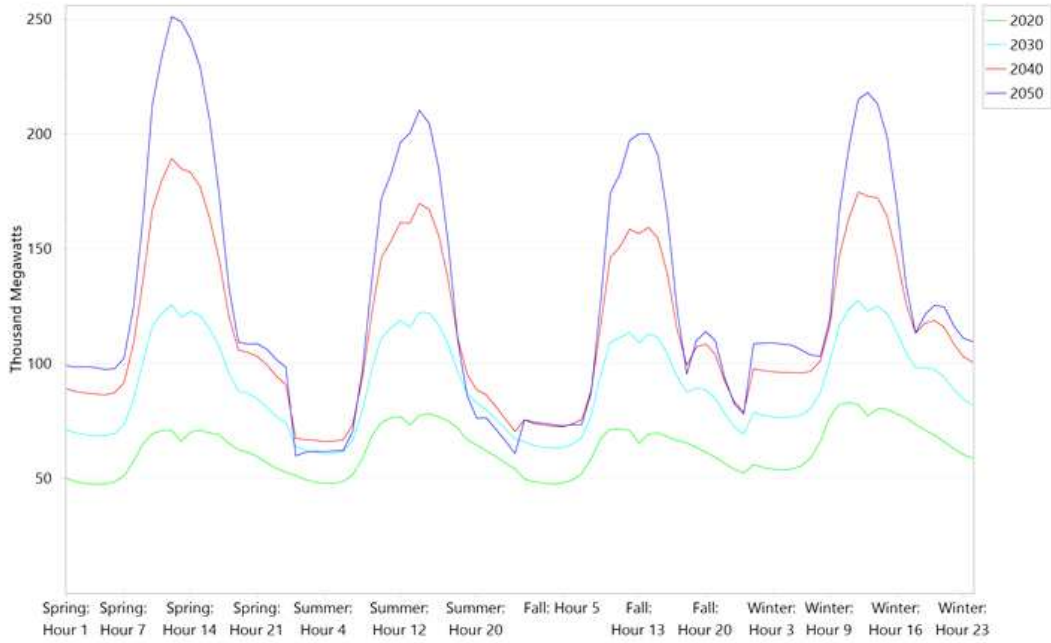
시나리오	내용
Government Policy Reference (GPR)	<ul style="list-style-type: none"> <li>•에너지경제연구원의 2021 장기 에너지 전망의 최종에너지 수요를 산업, 건물, 수송 부문별로 오차범위 +/-5% 범위 이내에서 맞춤</li> <li>•에너지전환이 일어나지 않고 현 상태가 유지되는 미래상을 가정함</li> <li>•거시경제 변수에 연동되어 에너지 수요가 증가함</li> <li>•발전부문은 제10차 전력수급기본계획의 설비계획을 따른다고 가정</li> <li>- 계획 기간 이후로는 LEAP의 최저비용 용량계획에 따라 최적화된 발전믹스를 도출함</li> </ul>
Net Zero (NZ)	<ul style="list-style-type: none"> <li>•GPR 시나리오와 동일한 최종에너지 서비스 수요를 가정하면서 2050년까지 탄소중립을 실현하는 전망</li> <li>•산업, 건물 부문에서 전기로의 연료 전환, 수송부문의 전기차 도입, 발전부문의 재생에너지 도입을 통한 탈탄소화 가정</li> <li>•수송부문의 전기차 도입을 통한 효율 개선을 제외하고는 별도의 효율개선은 없다고 가정</li> <li>•GPR 시나리오와 마찬가지로 10차 전력수급기본계획의 설비계획을 따르지만 탄소중립을 달성하기 위해 2050년까지 추가적인 화력발전소 건설을 제약함</li> <li>- 재생에너지 발전믹스는 LEAP의 최저비용 용량계획에 따라 최적화된 발전믹스를 도출함</li> </ul>
Net Zero with Energy Efficiency (NZ_EE)	<ul style="list-style-type: none"> <li>•NZ 시나리오와 동일한 전제 하에서 에너지효율 개선을 가정함</li> <li>•제조업, 가정, 상업 부문에서 에너지 집약도가 매년 전년도에 대비 1% 개선되는 수준의 에너지효율 사업이 진행된다고 가정</li> <li>•부문별 에너지효율 개선의 비용은 EERS 실적의 평균 값인 114원/kWh로 반영</li> </ul>
Net Zero with	<ul style="list-style-type: none"> <li>•NZ_EE 시나리오에 추가적으로 수요반응 정책이 실행된다고 가정함</li> </ul>

Energy Efficiency and Demand Response (NZ_EE_DR)	<ul style="list-style-type: none"> <li>•이는 첨두부하를 낮추고 재생에너지 출력감발 등의 문제에 대응하기 위함</li> <li>•NZ 시나리오 하에서 재생에너지 발전용량이 급격히 늘어나면서 수요반응 정책을 통해 2050년까지 수요곡선이 재생에너지의 부하곡선에 점진적으로 맞춰지는 것을 가정함</li> </ul>
--------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

NZ\_EE\_DR의 경우 수요반응 정책의 효과를 모델링하기 위해 현재의 재생에너지 이용률 형태로 부하곡선이 점차 맞춰진다는 가정을 하였다. 정부에서 실행하고 있는 수요반응 정책은 피크 감소에 초점이 맞춰져있지만, 향후 재생에너지의 비중이 늘어나는 미래상을 그리는 NZ 시나리오의 경우 발전부문의 시간대별 발전량에 따라 전기의 발전비용이 크게 달라질 수 있다. 수요반응 정책의 구체적인 실행 방안에 대해서는 본 분석에서 심층적으로 다루지는 않고, 발전기술의 한 종류로 에너지 저장장치를 반영하였으나 이러한 저장 장치가 에너지 소비자에게도 보급되는 것을 모델링하지는 않았다. 앞으로 재생에너지의 이용률 곡선이 바뀔 수 있으나 이를 예측하는 것은 본 연구의 논의에서 벗어나는 일이고, 실현될 이용률 곡선이 본 모델에서 사용한 곡선과 상이하더라도 수요반응 정책을 이에 상응하게 설계하면 분석 내용에 큰 차이가 없을 것이라 가정하였다. 따라서 현재의 재생에너지 이용률이 2050년까지 확대되는 추가 재생에너지 설비에도 계속된다고 가정하였고, 그 형태는 아래 그래프와 같다. GPR, NZ, NZ\_EE 시나리오의 전력 부하 그래프는 현재의 부하 곡선이 그대로 유지되는 반면, NZ\_EE\_DR의 경우 재생에너지 이용률 곡선의 형태를 띄게 된다. NZ\_EE\_DR 시나리오에서 2020년-2050년 사이에 전력부하가 변화하는 과정을 다음 그래프에서 확인할 수 있다.



<그림-22> 시나리오별 전력부하 변화 가정



<그림-23> NZ\_EE\_DR 시나리오의 수요 부하곡선의 변화

## 라. 데이터

시나리오의 구축에 필요한 사회경제적 가정은 주요 국가기관의 전망치를 따르고, 가능한 경우 에너지경제연구원의 장기 에너지 전망의 수치를 반영하였다. 통계청(2021), 산업연구원(2018), 3차 에너지기본계획(2019) 전제조건을 사용하여 인구, GDP, 국제유가를 가정하였다. 본 연구는 기후, 날씨로 인한 미래 에너지 소비 변화는 고려하지 않았고, COVID로 인한 단기적 효과 및 우크라이나 전쟁으로 인한 화석연료 가격의 급등 등은 장기적으로 안정화된다는 가정 하에 모델에 반영하지 않았다.

<표-3> 인구, GDP, 유가 전망

구분	2018	2030	2040	2050
인구(천명)	51,607	51,927	50,855	47,745
GDP(십억 원, 2015)	1,663,057	2,113,348	2,418,980	2,725,445
국제 유가(\$/bbl)	60	103	120	136

<표-4> 제조업 부가가치 비중 전망

구분	2018	2030	2040	2050	
제조업	음식, 담배	3.5%	3.2%	3.1%	3.0%
	섬유, 의복	4.0%	4.1%	4.2%	4.3%

	목재, 나무	0.4%	0.3%	0.2%	0.2%
	펄프, 인쇄	1.7%	1.3%	1.0%	0.9%
	석유화학	11.3%	11.2%	11.2%	11.3%
	비금속	6.8%	6.3%	6.0%	5.8%
	1차 금속	5.7%	5.1%	4.6%	4.1%
	비철금속	7.5%	7.0%	6.9%	6.8%
	조립금속	53.3%	55.7%	57.3%	58.6%
	기타제조	1.1%	1.2%	1.3%	1.3%
	기타 에너지	4.8%	4.6%	4.2%	3.8%

<표-5> 건물부문 연면적 전망

구분	2018	2030	2040	2050
주거 연면적(백만㎡)	1,772	1,997	2,085	2,082
비주거 연면적(백만㎡)	1,154	1,289	1,344	1,331

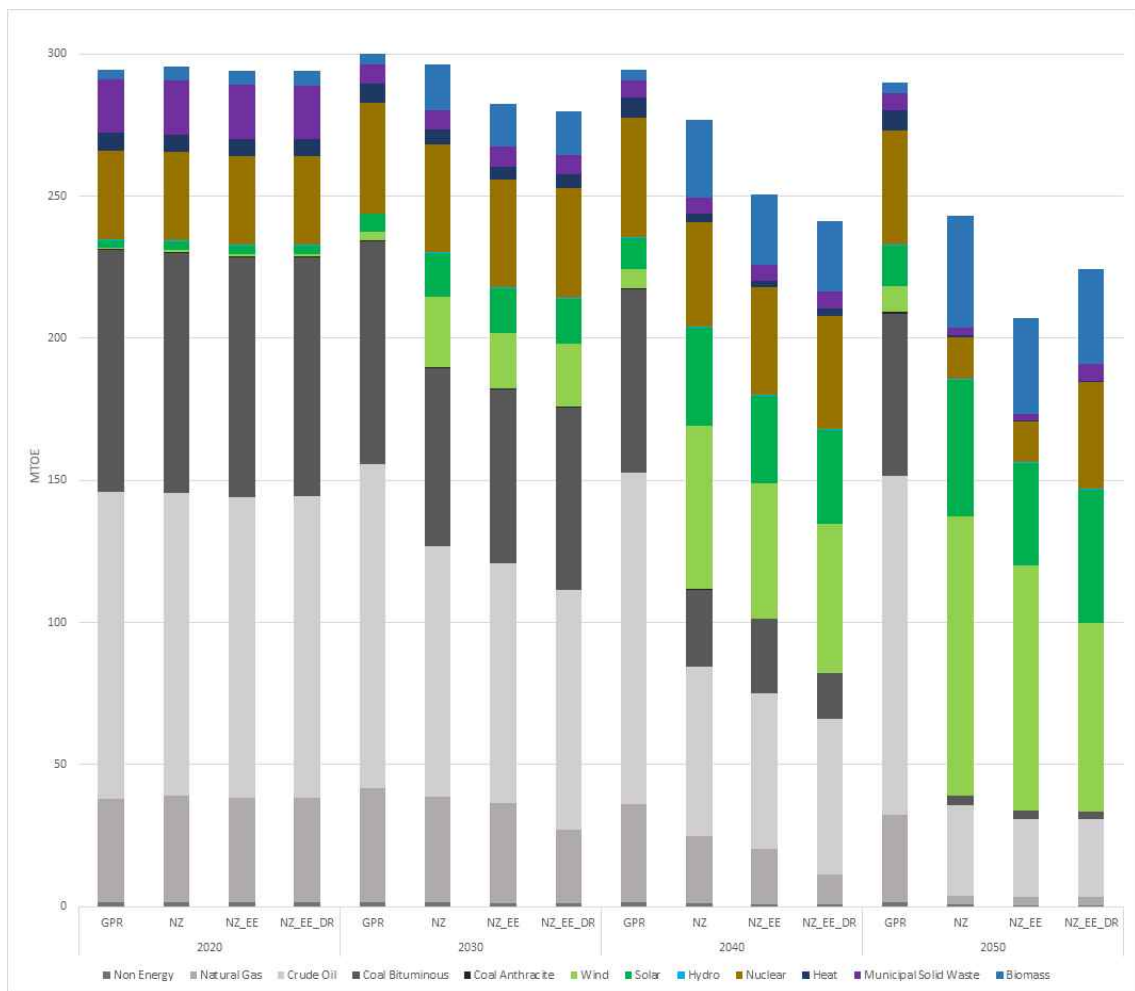
<표-6> 제4차 친환경자동차 기본계획 친환경차 보급 목표

차종	2020년	2025년	2030년
친환경차	82만 대	283만 대	785만 대
전기차	13.5만 대	113만 대	300만 대
수소차	1.1만 대	20만 대	85만 대
하이브리드	67.4만 대	150만 대	400만 대
친환경차 비중	3%	11%	30%

### III. 연구결과

GPR, NZ, NZ\_EE, NZ\_EE\_DR 시나리오를 분석한 결과 에너지전환이 일어나는 세 개의 시나리오에서 1차 에너지 수요가 꾸준히 감소하는 것을 확인할 수 있었다. NZ 시나리오에서의 탈탄소화는 1) 발전부문에서 화석연료 발전에서 재생에너지로의 전환, 2) 최종에너지수요의 전력화, 3) 도로수송 부문에서 전기차 도입을 통해 이뤄진다. 이 때 1)과 2)에서는 에너지효율에 변화가 없지만, 3)의 경우 전기자동차의 연비가 내연기관 자동차보다 좋기 때문에 최종에너지 수요가 감소하게 된다. 따라서 전기자동차 도입을 통해 NZ 시나리오의 1차 에너지소비는 2030년 이후 꾸준히 감소한다. NZ\_EE 시나리오에서는 NZ 대비 매년 1%의 에너지 집약도 개선이 있는데, 이를 통해 2050년 NZ 시나리오에서는 243 MTOE인 1차 에너지소비가 NZ\_EE 시나리오에서는 207 MTOE로 15% 감소한다. 시나리오 분석을 통해 흥미로운 점은 NZ\_EE 시나리오보다 NZ\_EE\_DR의 1차 에너지 소비가 증가한다는 것인데, NZ\_EE 대비 NZ\_EE\_DR가 태양광이 11.0 MTOE, 원자력이 23.0 MTOE 1차 에너지 수요가 크다. 수요반응 정책을 실행하자 재생에너지의 발전 비중이 증가하게 되는

데, 모델에서 가스 발전은 급전가능(dispatchable) 하지만 원자력은 급전불가능(non-dispatchable) 이다. 수요반응 정책 없이는 수요곡선과 재생에너지의 발전곡선이 상이하기 때문에 급전불가능한 원자력으로 전력을 생산하기에 제약이 따르지만, 수요반응을 통해 수요 곡선이 재생에너지 발전의 변동성에 맞춰지게 되면서 급전불가하지만 발전단가가 가스발전보다 낮은 원자력 발전의 이용률이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

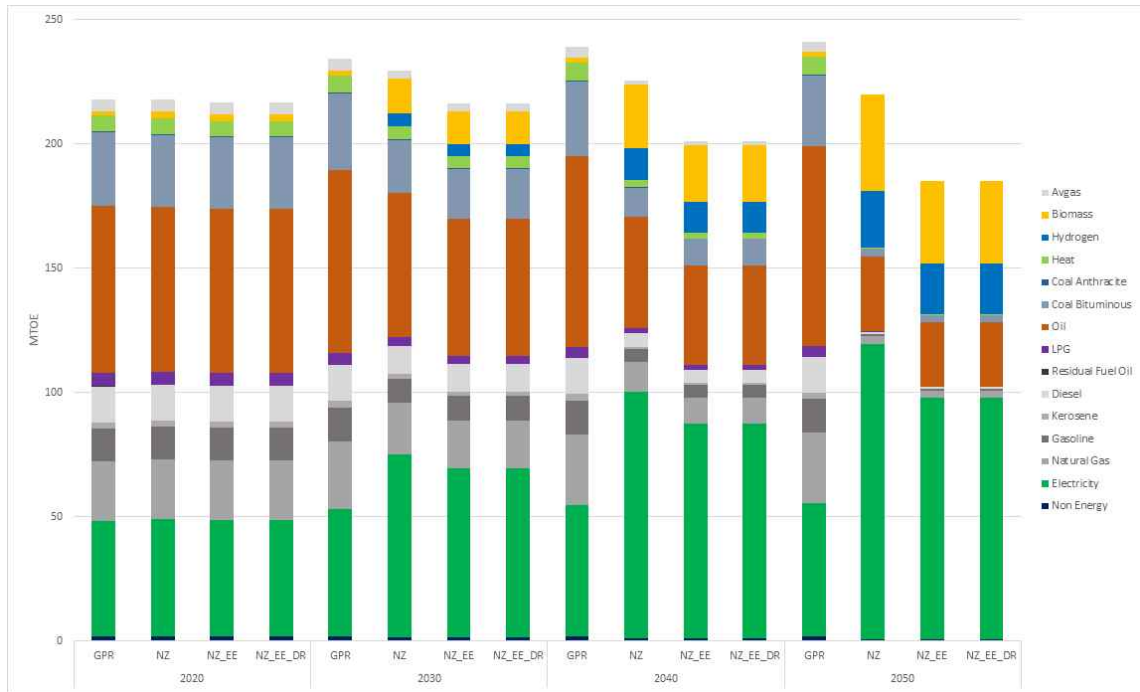


<그림-24> 시나리오별 1차 에너지 수요

<표-7> 시나리오별 1차 에너지수요

단위: MTOE

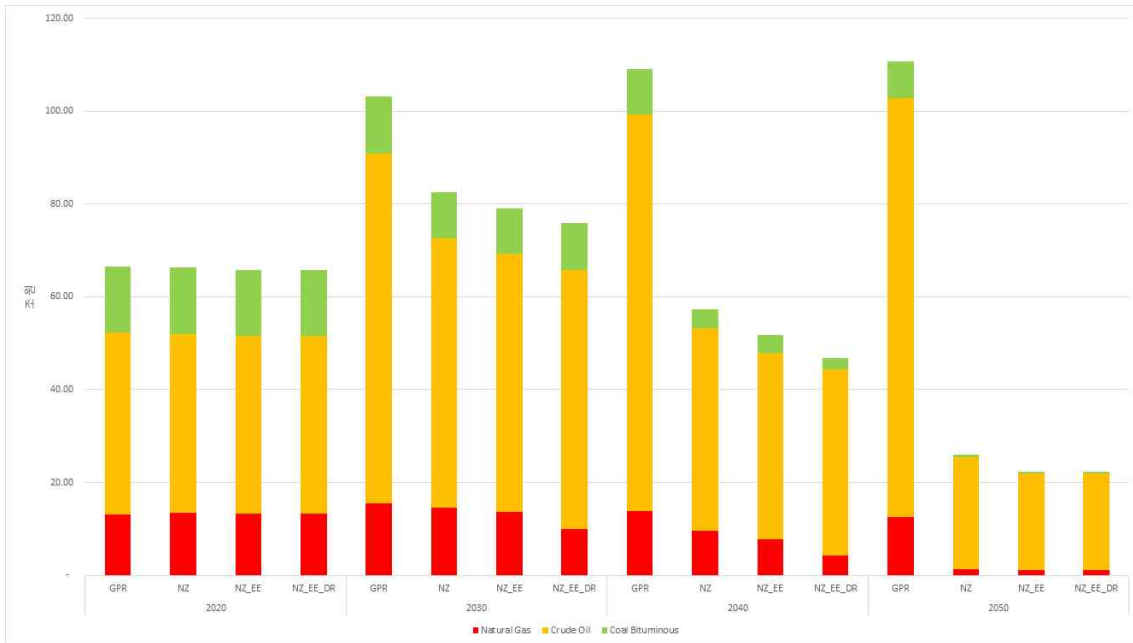
시나리오	GPR	NZ	NZ_EE	NZ_EE_DR
2020	294.5	295.5	294.0	293.9
2030	300.0	296.3	282.6	279.7
2040	294.5	276.7	250.7	241.0
2050	289.9	243.0	207.0	224.5



<그림-25> 시나리오별 에너지원별 최종에너지 수요

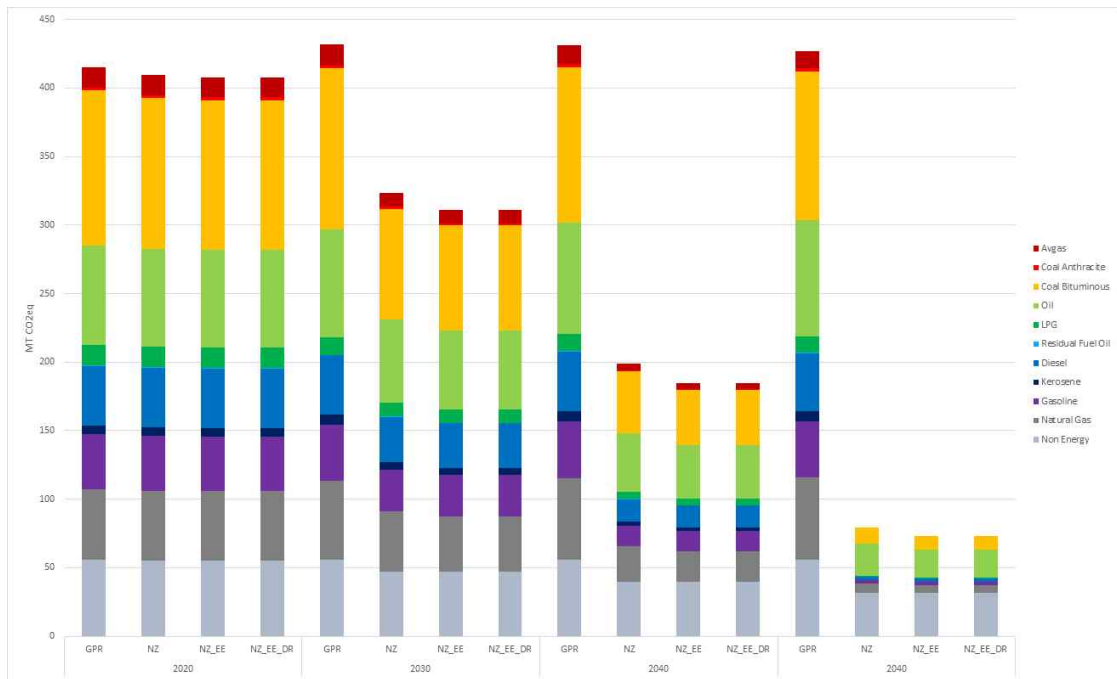
시나리오별 최종에너지수요는 1차 에너지 수요의 변화와 마찬가지로 NZ 시나리오는 GPR 대비 감소하고, NZ\_EE와 NZ\_EE\_DR는 NZ 대비 더 감소한다. NZ 시나리오에서 산업과 빌딩부문의 전력화, 도로 수송 부문에서 전기차 도입을 가정했기 때문에 전력의 최종 에너지 비중이 증가한 것을 확인할 수 있다. 단 산업 부문의 원료용 에너지 소비 때문에 원유와 석탄 소비가 2050년까지 남아있는 것을 확인할 수 있다. NZ 시나리오는 석유화학 산업에서 원유 투입의 일부를 바이오매스로 대체하고, 철강 산업에서 공정에 필요한 석탄을 수소로 대체하는 공정의 탈탄소화를 모델링하였다.

2050년 GPR 시나리오의 최종에너지소비는 241 MTOE이고, NZ 시나리오는 220 MTOE, NZ\_EE와 NZ\_EE\_DR는 185 MTOE이다. 전기차 도입과 건물부문과 산업부문의 전력화로 NZ 시나리오에서는 약 9%의 최종 에너지 소비가 감소한다. NZ 시나리오의 조건 하에서 매년 에너지 집약도 1% 개선이라는 목표를 달성하였을 때 2050년의 최종에너지소비는 16% 감소한다. NZ\_EE의 GPR 대비 최종에너지 소비 감소는 23%에 달한다.



<그림-26> 시나리오별 화석연료 수입비용

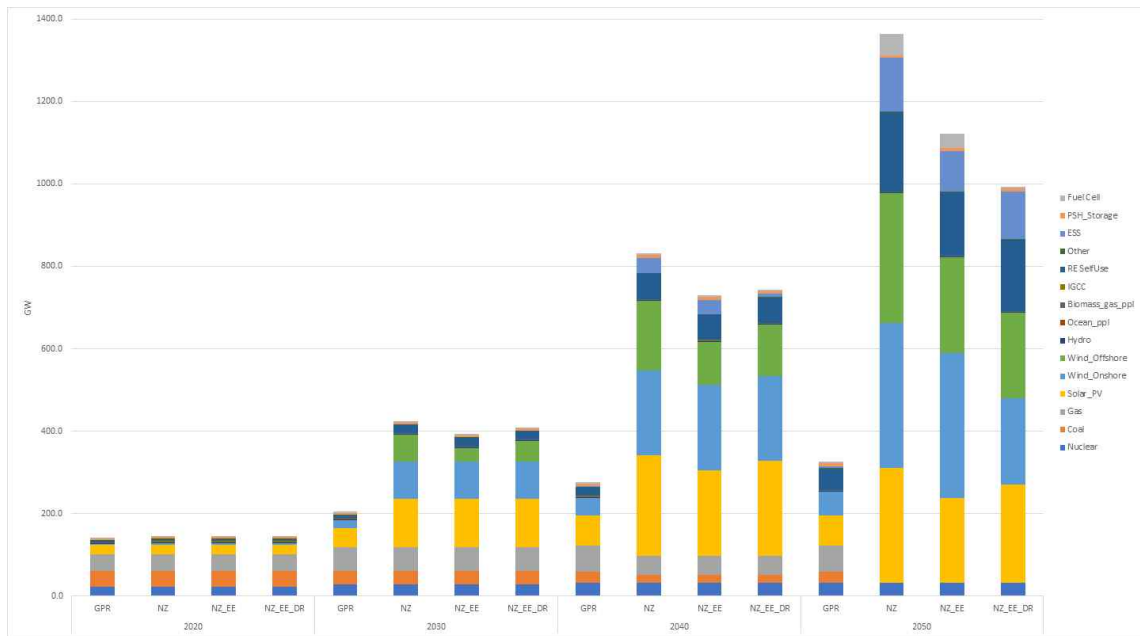
시나리오별 화석연료 수입비용을 검토한 결과 2020년 총 66.5조 원이었던 값이 GPR에서는 2050년 110.7조 원까지 증가하는 반면 NZ의 경우 25.9조 원까지 감소하는 것을 확인할 수 있다. KEEI의 장기 에너지 전망 기준 시나리오의 수입단가를 반영하여 계산하였는데, 이 시나리오의 가정에서 2018년 60\$/bbl이었던 국제유가가 2050년에는 136\$/bbl로 증가할 것으로 예상된다. 화석연료를 거의 전량 수입하는 우리나라의 경우 화석 연료 가격의 변동성으로 경제가 항상 불확실성에 노출되어 있고 에너지 안보의 문제에서 자유로울 수 없다. NZ 시나리오의 가정에서처럼 전력 생산이 재생에너지로 이루어진다면 화석연료 수입비용이 거의 1/4 수준으로 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 단순 비용 이외에도 NZ 시나리오의 경로를 따를 경우 에너지 안보 차원에서 매우 긍정적인 변화라 할 수 있다.



<그림-27> 시나리오별 온실가스 배출량

NZ 시나리오는 2050년까지 탄소중립 목표를 달성한다는 가정 하에 구축하였기 때문에 2020년 410 MT CO2eq였던 배출량이 2050년 80 MT CO2eq로 감소한다. 온실가스 배출이 일부 잔존한다. 정부의 2050 탄소중립 시나리오안에서도 탄소 흡수원과 이산화탄소 포집 및 활용, 저장(CCUS) 기술을 통해 넷제로 달성 경로를 그렸기에 본 분석에서도 탄소 배출량이 흡수량으로 일부 상쇄되는 시나리오를 구축하였다.

NZ 시나리오의 2050년 배출량은 80 MT CO2eq 이고 NZ\_EE와 NZ\_EE\_DR는 73.5 MT CO2eq이다. 에너지효율 정책의 실행으로 7.7%의 탄소배출이 감소하는데, 최종에너지소비의 경우 에너지효율 정책의 실행으로 16%가 감소한 것에 비해 절반 이하에 그치는 수치이다. 에너지 시스템의 맥락에서 해석하면, 재생에너지가 도입되면서 탄소배출량이 감소하기 때문에 최종 에너지 소비량을 감축한 것 대비 탄소배출량의 감소 폭은 줄어드는 것이다. 즉 완벽하게 재생에너지 발전으로 전력이 공급되는 에너지 시스템에서는 에너지 효율 개선을 통해 전력 수요를 줄여도 온실가스 배출량은 변함없이 0인 것이다. 재생에너지의 비중이 높아질수록 에너지효율 정책의 탄소배출량 절감 효과가 감소할 것을 고려할 수 있다. 현재 재생에너지의 비중이 크지 않고 GPR의 에너지 믹스에 가까운 국내 실정에서는 고려할 필요가 없고, 오히려 전환 과정에서 에너지효율 개선을 통한 최종 에너지 수요의 감소는 재생에너지 도입 장벽을 낮춰주기 때문에 결론적으로 탄소중립에 필수적인 정책이라 할 수 있다.

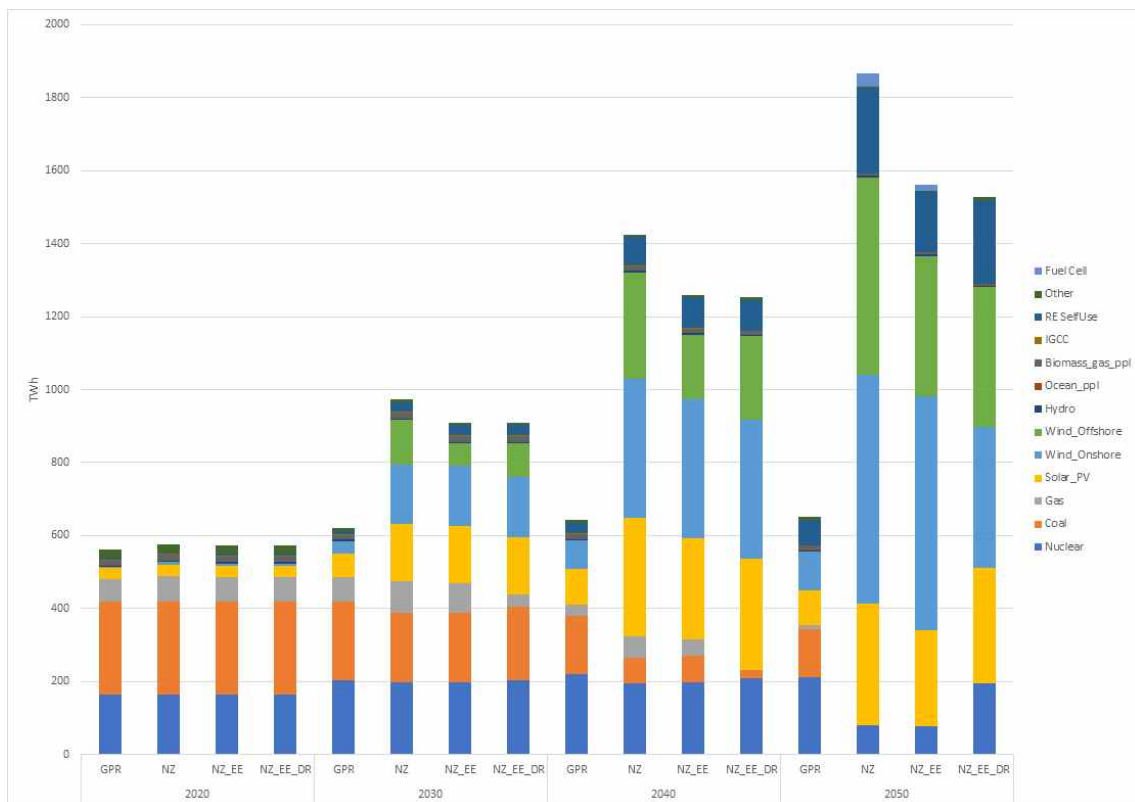


<그림-28> 시나리오별 발전용량

본 분석에서는 탄소중립을 달성하는 미래상을 그려봤을 때, 에너지효율과 수요반응 정책을 효과적으로 실행했을 경우의 편익을 시스템 차원에서 분석하고자 하였다. 시나리오별 발전용량의 차이에서 에너지효율 정책이 장기적으로 발전부문에 큰 영향을 줄 것임을 확인할 수 있었다. 우선 NZ 시나리오 분석 결과 2050년 산업, 건물 부문의 전력화와 전기 자동차의 증가로 전기 수요를 공급하기 위한 발전용량은 총 1364 GW이다. 이는 GPR 시나리오 2050년 총 용량인 325 GW에 비해 4배의 증설이 필요함을 뜻한다. 재생에너지 발전원의 이용률이 기존 화석연료 발전보다 낮은 것을 고려했을 때 앞으로 기존의 방식대로 수요가 증가하면 이에 상응하는 재생에너지 발전용량을 추가하는 방식이 어려워질 것임을 짐작할 수 있다. 특히 재생에너지의 기술적 잠재량에 한계가 있고, 비용이 낮고 발전효율이 좋은 부지들이 선점되면서 한계비용이 증가할 수 있다. 본 분석에서 NZ 시나리오에서 2050년에서의 육상풍력 설치용량은 313 GW인데, 우리나라의 육상풍력 잠재량은 352GW로 거의 포화되어 있는 미래상이다. 이 때 추가 용량 증설 이외에 에너지효율 정책, 수요반응 정책이라는 수단으로 에너지시스템의 변화를 도모해야 하는데, 에너지 집약도를 매년 1% 개선하는 것을 상정한 NZ\_EE 시나리오의 경우 1121 GW의 용량을 필요로 하게 된다. 이는 NZ 대비 18% 적은 수치로, 우리가 에너지효율 정책의 효과를 논의할 때 장기적 편익으로 볼 수 있다.

수요반응 정책을 효과적으로 실행한다면 시스템에서 필요로하는 발전용량이

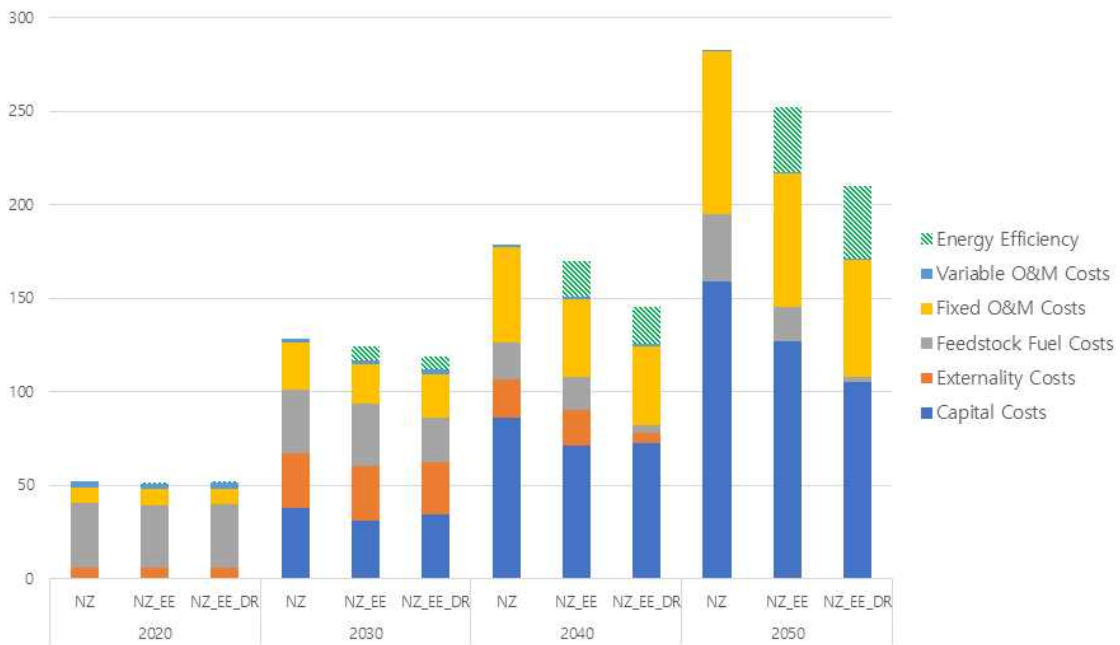
크게 감소하는 것을 NZ\_EE\_DR 시나리오를 통해 확인할 수 있다. 2050년 필요한 발전용량이 NZ\_EE\_DR의 경우 992 GW로 NZ 대비 27% 감소하였다. 특히 감소한 발전원들을 살펴보면 재생에너지의 변동성에 대응하기 위한 에너지 저장 장치와 연료전지 발전원으로 상대적으로 고가의 기술들이다. GPR의 발전용량 대비 NZ 시나리오에서는 발전용량을 세 배 늘려야하지만, NZ\_EE\_DR에서 이를 증가폭을 두 배로 줄일 수 있다.



<그림-29> 시나리오별 발전량

발전원별 발전량을 살펴보면 NZ 시나리오에서 재생에너지의 발전량이 크게 증가한 것을 확인할 수 있다. NZ 시나리오에서 태양광, 지상과 해상 풍력의 발전량이 전체의 93%를 차지한다. 이는 GPR에서 태양광과 풍력 발전량의 비중이 42%인 것과 크게 대비된다. 넷제로 달성을 위해 NZ 시나리오에서는 석탄발전을 2050년까지 폐쇄한다고 가정했기에 재생에너지의 비중이 높아질 수밖에 없는데, 에너지효율 정책을 통해 에너지 소비를 감축하면서 재생에너지 발전량도 감소하게 된다. 흥미롭게도 NZ\_EE\_DR 시나리오에서는 수요반응으로 수요곡선이 재생에너지의 변동성에 맞춰지면서 추가적으로 건설해야하는 재생에너지 발전용량이 감소하게 되고, 재생에너지 발전원은 더 효율적으로 가

동할 수 있게 된다. 그러면서 앞서 1차 에너지 수요를 설명할 때 언급했듯이 원자력발전의 가동률이 높아지면서 전력 생산 비용 총계가 감소하게 된다. 즉 2050년 NZ, NZ\_EE, NZ\_EE\_DR 시나리오에서의 원자력 발전용량은 31.7GW로 동일한데, 발전량은 NZ\_EE\_DR이 181 TWh로 가장 높고, NZ\_EE에서는 76 TWh, NZ에서는 80 TWh이다.<sup>2)</sup> NZ\_EE와 NZ\_EE\_DR 시나리오의 비교를 통해 전력의 수요와 공급 불일치 문제를 해소해주는 수요반응 정책의 경제성을 확인할 수 있다.



<그림-30> 전력 생산 및 에너지효율 사업 비용

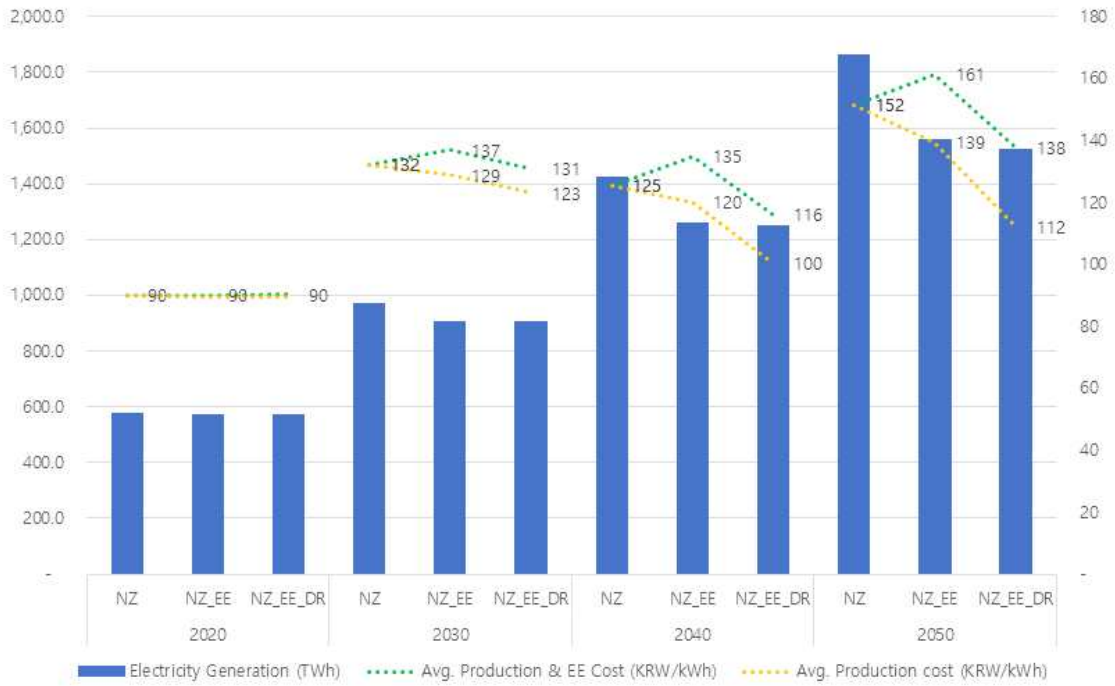
시나리오별로 발전부문의 비용을 분석한 결과 에너지효율 사업의 비용을 전력생산 비용에 추가해도 NZ에 비해 NZ\_EE의 비용이 더 적어 에너지효율 정책이 비용 효과적임을 확인할 수 있었다. 에너지효율이 개선되고 최종에너지 수요가 감소하면서 앞서 설명했듯이 시스템이 필요로하는 발전용량이 감소한다. NZ, NZ\_EE, NZ\_EE\_DR의 2050년 발전비용은 283조 원, 217조 원, 171조 원이다. NZ\_EE는 NZ 대비 23% 비용이 감소하고, NZ\_EE\_DR는 39% 감소한다. 전기수요가 증가하면서 기존의 석탄, 원자력보다 비싼 재생에너지원으로부터 발전된 전기를 써야하는데, 이 비용이 절감되면서 비용이 감소하는

2) 본 모델은 원자력 발전을 둘러싼 찬반 문제를 살펴보고자 하지 않았기 때문에 초기투자비용과 변동비용, 연료비용 등만을 고려한 원자력 발전은 재생에너지에 비해 저렴한 에너지원으로 시스템에 반영이 되어있다. 사용 후 핵 연료 및 방사성 폐기물 영구보관, 원자력발전의 사고 위험성 등에 대한 고려는 하지 않았다.

것이다. 분석 결과 에너지효율 정책을 실행하는 비용을 감안해도 NZ 대비 NZ\_EE의 비용이 더 적은 것으로 나타난다. NZ\_EE\_DR의 경우 정부의 직접 지원이 아닌 다른 방법으로 수요반응 정책을 실행한다고 가정, 별도로 수요반응 정책의 비용을 산정하지 않았기 때문에 총 비용이 NZ\_EE에 비해서 더 적은 것은 당연한 결과이다. 발전비용에 에너지효율 정책비용을 합산한 값이 NZ\_EE, NZ\_EE\_DR 각각 252조 원, 210조 원으로, 이는 NZ 시나리오의 발전 비용 대비 11%, 26% 적다.

시나리오별 분석을 통해 에너지효율 정책을 실행했을 때 2050년까지의 탄소 중립 경로에서 계속해서 NZ\_EE와 NZ\_EE\_DR 시나리오의 총 비용이 NZ 보다 낮은 것을 확인할 수 있다. 발전비용에 에너지효율 정책비용을 합산한 값이 2030년에는 NZ, NZ\_EE, NZ\_EE\_DR 각각 129조 원, 125조 원, 119조 원으로 NZ\_EE, NZ\_EE\_DR가 NZ 대비 각각 3%, 7% 적다. 2040년에는 NZ, NZ\_EE, NZ\_EE\_DR 각각 179조 원, 170조 원, 145조 원으로 NZ\_EE, NZ\_EE\_DR가 NZ 대비 각각 5%, 19% 적다. 즉 단기적으로도 에너지효율과 수요반응 정책은 비용을 낮추는 효과를 갖고, 장기적으로 그 효과가 증가하는 것을 알 수 있다.

비용 산정을 할 때 수요반응 정책의 경우 매년 추가되는 수요반응 자원에 대한 비용을 도출하기에 자료의 한계가 있었다. 현재 피크 시간대에 수요반응 자원에 대한 보조금을 지급하고 있지만 장기적으로 수요반응 자원은 가격 시그널을 통해 개발한다는 가정 하에 비용을 도출하지 않았다. 즉 그래프 상에서 보이는 NZ\_EE\_DR의 정책비용은 NZ\_EE와 동일하다. 이에 대해서는 수요반응 정책의 보조금 지급 체계에 대한 별도의 연구에서 다뤄야할 것으로 보인다.



<그림-31> 전력 단위당 생산 비용

총 비용이 감소하더라도 전력 생산량이 에너지효율 정책을 통해 감소하면서 단위당 생산비용은 증가할 수도, 감소할 수도 있는데, 분석 결과 에너지효율 정책의 비용을 고려하지 않을 경우 단위당 전력 생산 비용은 에너지효율 정책을 통해 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 우선 NZ, NZ\_EE, NZ\_EE\_DR 시나리오에서 2030년~2050년의 전력 단위당 생산비용은 증가한 것을 확인할 수 있다. 2020년도 전력생산의 86%가 원자력, 석탄, 가스 발전인 반면 탄소중립 경로를 전망한 NZ 시나리오에서는 2030년, 2040년, 2050년에 이 세 발전원의 비중은 49%, 23%, 4%로 줄어든다. 이를 태양광과 풍력발전이 대체하게 되는데, 기술발전을 통해 2050년까지 재생에너지의 발전비용이 하락한다 가정하였지만 그림에도 단위당 발전비용은 증가한다. 때문에 우리 사회가 탄소중립을 달성하기 위해서는 이 증가하는 비용을 어떻게 최소화할 것인가에 대한 논의가 필요한데, 에너지효율 정책과 수요반응 정책이 이 과정에서 매우 중요함을 확인할 수 있다.

NZ 시나리오의 단위당 전력생산비용은 2020년, 2030년, 2040년, 2050년에 90원/kWh, 132원/kWh, 125원/kWh, 152원/kWh이다. 재생에너지의 도입이 증가하면서 2030년에 비용이 증가하고, 2040년에는 재생에너지 발전단가가 하락하면서 단위당 비용이 감소하고, 2050년에는 재생에너지 발전원의 비중이 커지면서 다시 단위당 비용이 증가하는 양상을 보인다. NZ\_EE 시나리오의 단

위당 전력생산비용은 2020년, 2030년, 2040년, 2050년에 90원/kWh, 129원/kWh, 120원/kWh, 139원/kWh으로 NZ 대비 적은데, 전력 생산량이 줄어들고 재생에너지 발전원의 건설이 감소하면서 발생하는 결과이다. 여기에 에너지 효율 정책의 비용을 추가했을 때 2020년, 2030년, 2040년, 2050년에 90원/kWh, 137원/kWh, 135원/kWh, 161원/kWh이다. 즉 에너지효율 정책의 비용이 소비자에게 전가될 경우 전력 요금이 증가할 수 있음을 뜻한다. 단 에너지효율 정책에 수요반응 정책도 실행했을 경우, 즉 NZ\_EE\_DR의 경우 단위당 비용이 감소하여 2020년, 2030년, 2040년, 2050년에 각각 90원/kWh, 131원/kWh, 116원/kWh, 138원/kWh로, 단기적으로도 장기적으로도 NZ 시나리오 대비 단위당 비용이 낮다. 이는 재생에너지 도입이 증가할수록 수요반응 정책의 성공적인 실행여부가 재생에너지로 공급되는 전력의 단위당 비용에 큰 영향을 주는 것을 시사한다.

한편으로는 비록 NZ 시나리오에서 전력 생산비용과 단위당 전력 생산 비용이 증가하지만, 에너지효율 정책과 수요반응 정책, 그 외 다양한 정책을 실행하면 발전비용을 낮출 수 있음을 보여준다. 재생에너지 도입으로 비용이 증가한다고 생각하기 쉽지만 이는 재생에너지와 함께 도입할 수 있는 여러 정책들을 고려하지 않은 단순한 결론이고, 재생에너지 도입으로 증가하는 비용을 경감할 방법이 있음을 시사한다.

#### IV. 결론

에너지전환을 위해 세계가 움직이고 있다. 미국, 유럽, 중국의 재생에너지 도입 속도는 매년 기록을 갱신하고 있다. 이런 상황에서 우리가 본 연구에서 NZ 시나리오의 주요 가정, 최종에너지 소비의 전력화와 재생에너지로의 확대를 가정하고 2050년까지의 미래상을 그려보는 것은 비현실적인 일이 아니다. 그런 에너지전환 경로를 전망했을 때 에너지효율 정책과 수요반응 정책의 영향은 긍정적이다. 시스템의 총비용을 낮추고, 전력의 단위당 생산비용을 낮춰준다는 것을 정량적 분석을 통해 확인할 수 있었다.

에너지효율 정책의 에너지 집약도 1% 개선 목표를 달성한다면 총 시스템 비용은 정책실행을 하지 않았을 때에 비해 11% 감소한다. 수요반응 정책을 통해 2050년까지 수요곡선을 재생에너지 발전 부하에 수렴하도록 유도할 수 있다면 26% 감소한다. 전력의 단위당 생산비용도 정책실행을 통해 오히려 낮출 수 있다. 에너지효율 정책만을 실행했을 때에는 단위당 평균생산비용이 증가하지만, 수요반응 정책을 함께 실행할 경우 단기적으로도, 장기적으로도 단위당 비용이

감소하는 것을 확인하였다.

본 연구에서 사용한 가정은 가장 공신력있는 기관들의 전망치를 기초로 했으며, 모델의 도출 과정, 입력 자료는 모두 공개 데이터이다. 미래 전망은 불확실성을 내포하고 있지만 이는 예측의 결과가 아닌 입력 전제를 기반으로 도출한 결과임을 감안하고 해석한다면, 에너지전환 과정에서 에너지효율 정책과 수요반응 정책을 통해 많은 비용을 절감할 수 있음이 명확하다. 에너지효율 정책과 관련해서는 미국 캘리포니아의 우수 사례와 국내 EERS의 2031년도 목표를 반영하여 에너지 집약도 연 1% 개선이라는 보수적인 목표를 설정하였다. 에너지효율 정책 비용은 과거 EERS 시범사업 데이터 및 에너지 진단 DB 데이터를 반영하여 114원/kWh로 가정하였다. 수요반응 정책은 구체적인 실행 방안을 논하기에 시기상조인 상황이기에 비용에 대한 가정은 생략하고, 효과적인 정책 실행의 결과에 대해서 시스템 차원에서 분석하였다.

에너지효율과 수요반응 자원의 중요성에 대한 논의가 멈춰섰던 적은 없다. 그렇지만 이를 통한 에너지수요 감축 잠재량을 민관이 힘을 합쳐 체계적으로 최우선적인 정책과제로 다뤘던 적도 없었다. 수요관리를 통해 추가 발전원을 전력망에 연계하는 데 소요되는 막대한 비용과 노력을 줄일 수 있음을 재차 확인하였다. 국가 단위 에너지 시스템 모델링과 시나리오 분석으로 정책의 비용과 효과에 대한 전망치를 도출할 수 있었다. 후속 연구로 모델의 불확실성에 대한 보고, 에너지 시스템 모델의 정확도 확인, 분석 대상 정책에 부합하는 기준 에너지 시스템의 해상도 설정 등을 제안할 수 있겠지만, 에너지효율과 수요반응 정책의 적극적 도입 필요성을 보이기에 충분한 근거를 제시한 것이 본 연구의 가장 큰 성과라 할 수 있겠다.

## V. 참고문헌

- [1] 탄소중립 녹색성장 위원회. 탄소중립 비전과 온실가스 감축 의지 법제화, 2050 탄소중립 사회로 나아갑니다. 보도자료.  
<https://www.2050cnc.go.kr/base/board/read?boardManagementNo=3&boardNo=631&menuLevel=2&menuNo=16>
- [2] Hoegh-Guldberg, O., D. Jacob, M. Taylor, M. Bindi, S. Brown, I. Camilloni, A. Diedhiou, R. Djalante, K.L. Ebi, F. Engelbrecht, J. Guiot, Y. Hijioka, S. Mehrotra, A. Payne, S.I. Seneviratne, A. Thomas, R. Warren, and G. Zhou, 2018: Impacts of 1.5°C Global Warming on Natural and Human Systems. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 175-312. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.005>.
- [3] 관계부처 합동. 2021. 「국가 2050 탄소중립 시나리오」
- [4] Ryan, L. and N. Campbell (2012), "Spreading the Net: The Multiple Benefits of Energy Efficiency Improvements", IEA Energy Papers, No. 2012/08, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/5k9crzjbpkkc-en>.
- [5] IEA. 2021. Net Zero Emissions by 2050
- [6] 박년배. 2022. 한국의 2050 년 탄소중립 시나리오 문헌 비교분석 및 시사점. 한국기후변화학회지, 13(5), 689-704.
- [7] 이성근, 이성인. 2008. 국가 에너지절약 및 효율향상 추진체계 개선방안 연구 - 가정·상업부문의 에너지효율 평가. 08-10.
- [8] 관계부처합동. 2020. 제6차 에너지이용 합리화 기본계획('20~'24)
- [9] 에너지경제연구원 정기간행물. 에너지통계월보 2024.01. [https://www.kesis.net/sub/sub\\_0003.jsp](https://www.kesis.net/sub/sub_0003.jsp)
- [10] FERC. 2012. Assessment of Demand Response and Advanced Metering, Staff Report, December 2012.
- [11] 임재민, 문희은, 손다원, 이재윤, 허진혁. 2023. 우리나라 전력 수요반응 시장 현황과 개선방안. 에너지전환포럼 수요반응자원시장 연구.
- [12] 정해성, 김도한, 윤필용, 윤정원, 홍수민, 김진호. 2015. 효율적인 전력시장 운영을 위한 수요반응자원 적정용량 산정 및 제도개선 방안 연구. 한국전력거래서. 연구수행기관 장인의 공간.
- [13] 정연제, 김남일. 2015. 수요자원의 전력 시장 참여 효과 분석. 에너지경제연구원. 기본 연구 보고서 15-05.
- [14] Pfenninger, S., Hawkes, A., & Keirstead, J. 2014. Energy systems modeling for twenty-first century energy challenges. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 33, 74-86.
- [15] Mundaca, L., Neij, L., Worrell, E., & McNeil, M. 2010. Evaluating energy efficiency policies with energy-economy models. Annual review of environment and resources, 35, 305-344.
- [16] Laitner JA, DeCanio SJ, Koomey JG, Sanstad AH. 2003. Room for improvement: increasing the value of energy modeling for policy analysis. Util. Policy 11:87-94

- [17] Munson R. 2004. Improving prediction of energy futures. *Issues Sci. Technol.* Spring:26-29
- [18] Worrell E, Rameshol S, Boyd G. 2004. Advances in energy forecasting models based on engineering economics. *Annu. Rev. Energy Environ.* 29:345-81
- [19] Lopion, P., Markewitz, P., Robinius, M., & Stolten, D. 2018. A review of current challenges and trends in energy systems modeling. *Renewable and sustainable energy reviews*, 96, 156-166.
- [20] Savvidis, G., Siala, K., Weissbart, C., Schmidt, L., Borggreffe, F., Kumar, S., ... & Hufendiek, K. 2019. The gap between energy policy challenges and model capabilities. *Energy Policy*, 125, 503-520.
- [21] Fattahi, A., Sijm, J., & Faaij, A. 2020. A systemic approach to analyze integrated energy system modeling tools: A review of national models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133, 110195.
- [22] Sathe, A., Maoz, K., Capps, T., Legett, R., Ghosh, D., Iyer, D., & Turner, M. 2021. 2021 Energy Efficiency Potential and Goals Study, Draft Report. San Francisco, CA: California Public Utilities Commission. <https://pda.energydataweb.com/api/view/2531/2021%20PG%20Study%20DRAFT%20Report,2>.
- [23] California Public Utilities Commission. 2001. California Standard Practice Manual: Economic Analysis of Demand-Side Programs and Projects.
- [24] Lawrence Berkeley National Laboratory Energy Technologies Area - Peter Alstone, Jennifer Potter, Mary Ann Piette, Peter Schwartz, Michael A. Berger, Laurel N. Dunn, Sarah J. Smith, Michael D. Sohn, Arian Aghajanzadeh, Sofia Stensson, Julia Szinai, 2016. 2015 California Demand Response Potential Study - Charting California's Demand Response Future: Interim Report on Phase 1 Results. <https://escholarship.org/uc/item/6s2982kn>
- [25] Lawrence Berkeley National Laboratory - Lawrence Berkeley National Laboratory: Peter Alstone, Jennifer Potter, Mary Ann Piette, Peter Schwartz, Michael A. Berger, Laurel N. Dunn, Sarah J. Smith, Michael D. Sohn, Arian Aghajanzadeh, Sofia Stensson, Julia Szinai, Travis Walter; Energy and Environmental Economics, Inc. (E3) - Lucy McKenzie, Luke Lavin, Brendan Schneiderman, Ana Mileva, Eric Cutter, Arne Olson; Nexant, Inc. - Josh Bode, Adriana Ciccone, Ankit Jain, 2017. 2025 California Demand Response Potential Study . Charting California's Demand Response Future: Final Report on Phase 2 Results. <https://escholarship.org/uc/item/2m68c4xh>
- [26] Brian F. Gerke, Giulia Gallo, Sarah J. Smith, Jingjing Liu, Peter Alstone, Shuba Raghavan, Peter Schwartz, Mary Ann Piette, Rongxin Yin, and Sofia Stensson, 2020. The California Demand Response Potential Study, Phase 3: Final Report on the Shift Resource through 2030. <https://escholarship.org/uc/item/7bx121k6>
- [27] 전력거래소. 2023. 2023년 9월 수요자원거래시장 현황 및 운영정보. <https://www.kpx.or.kr/board.es?mid=a10102090000&bid=0088>