

발간등록번호

11-1480906-000012-01

온실가스-에너지 모형 비교연구

최 종 보 고 서

2021. 12



온실가스종합정보센터

Greenhouse Gas Inventory and Research Center

제 출 문

온실가스종합정보센터장 귀하

본 보고서를 '온실가스-에너지 모형 비교연구에 관한 연구' 용역 결과보고서로 제출합니다.

2021. 12. 10

연구기관명 한국과학기술원

연구책임자 조철홍

책임연구원 엄지용
박 찬
(서울시립대학교)

참여연구원 김진태
정향순

모형 비교연구에 기여하신 분

김용건 (한국환경연구원)
안영환 (숙명여자대학교)
최동구 (포항공대)

요 약 문

I. 연구개요

연구과제명	온실가스-에너지 모형 비교연구			
연구기관	한국과학기술원 글로벌전략연구소 지속발전센터	연구책임자	소속	한국과학기술원
			성명	조철홍
연구기간	2021.04.05 ~ 2021.12.10 (9개월)			
연구비	30,000,000원			
참여연구원수	총 5명	내부 : 4명, 외부 : 1명		

II. 연구목적 및 필요성

에너지-기후변화 정책의 과학적 평가를 위한 다양한 분석 모형이 존재하며, 각 모형은 성격, 해를 찾는 방법론, 기술구조, 모형 내 상호작용, 모수 등 다양성과 불확실성이 존재함. 모형 비교연구를 통해 모형간 방법론 및 구조 차이, 불확실성 등에 대한 이해를 증진하고, 미래를 전망하는 다양한 역학(dynamics)을 포괄하는 강건한(robust) 저탄소 전환 경로 발굴이 필요함

III. 연구개발의 내용 및 범위

온실가스-에너지 모형을 활용하여 연구 활동 중인 기관 및 연구자(학계, 공공기관, 국책연구기관 등)들로 구성된 모형 비교 연구 그룹 구성. 모형 비교연구 참가팀들이 공통적으로 관심이 있는 정책 이슈 또는 연구 질문을 확정하여 각 모형팀이 공동으로 분석할 시나리오 구성과 내용을 확정하고 원활한 비교 평가를 위한 공통 시나리오 보고 항목을 도출

IV. 연구 결과

“탄소중립 달성을 위한 전력부문의 역할과 실현가능성 평가”라는 주제로 모형비교 연구를 진행한 결과 수요 부문의 전기화와 병행되는 전력부문의 급격한 탈탄소화가 탄소 중립 달성을 위한 중요한 수단이 될 것으로 평가됨. 전력부문의 발전 믹스는 과거 경험하지 못한 급격한 재생에너지로의 전환이 요구되며, 이로 인한 총 발전설비의 증가, 재생에너지 보급 정도와 속도 등도 전례가 없는 상당히 도전적인 수준으로 평가됨 (2050년까지 재생에너지 발전 비중 50% 이상과 총 전력 설비용량 4배 이상 증가). 원자력발전과 CCS 등의 대규모 저탄소 기술 가용성은 전력부문의 감축 기여도, 전력시스템 전체의 이용률 상승, 저탄소 전환의 실현가능성에 긍정적 영향을 주며, 기술 가용성의 긍정적 영향은 감축 목표가 강할수록 커지는 것으로 평가됨

목 차

<목차>

I. 서론	8
1. 연구 배경 및 필요성	8
2. 연구목적	8
II. 연구내용 및 방법	9
1. 참여 기관 및 모형	9
2. 시나리오 프로토콜	10
3. 시나리오 보고 양식	13
4. 시나리오 분석 및 시각화 도구(PYAM)	14
III. 분석 결과	15
1. 전력부문의 감축 기여도	15
2. 온실가스 배출량	15
3. 발전량과 설비용량	17
4. 설비투자 비용	17
5. 발전 믹스(MIX)	18
6. 설비 믹스(MIX)	18
7. 전력시스템 전체 이용률	19
8. CCS 포집량	19
9. 태양광 설비용량	20
10. 풍력(육상+ 해상) 설비용량	21
11. 재생 발전량 비중	22
IV. 결론	23
부록	24
1. METER 모형	24
2. AIMHUB 모형	29
3. GCAM-KAIST 1.0 모형	30
4. MESSAGEix 모형	50
5. UNICON-2 POWER 모형	60
6. KIER-POSTECH-TIMES 모형	68

<표 목차>

<표 2-1> 모형별 비교 요약표	9
<표 2-2> 시나리오 세부 내용	11
<표 2-3> 시나리오별 기술 가용도 요약표	12
<표 2-4> 시나리오 변수 분류표	13
<표 3-1> 태양광 설비 증가 속도(CAGR)	21
<표 3-2> 풍력 발전 설비 증가 속도(CAGR)	21
<표 부록3-1> GCAM 모형의 기준년도에 적용된 원자력에 관한 기술	38
<표 부록3-2> GCAM 모형 시나리오(열)로 적용된 기술(행) 가정의 조합	38
<표 부록3-3> 태양광 및 풍력 기술의 수준별 투자비용 가정	39
<표 부록3-4> 인구 전망	43
<표 부록3-5> GDP 전망	43
<표 부록3-6> 기존 발전기술 비용	45
<표 부록3-7> 재생에너지 발전기술 비용	45
<표 부록3-8> 공기 중 탄소 포집 기술 비용 가정	45
<표 부록3-9> 승객 수송 비용 가정	46
<표 부록3-10> 화물 수송 비용 가정	46
<표 부록4-1> MESSAGEix 모형 구동 절차	52
<표 부록4-2> 제조업 상세화 MESSAGE 모형 개요	53
<표 부록4-3> MESSAGEix 건물부문 구조	55
<표 부록4-4> MESSAGEix 수송부문 구조	56
<표 부록4-5> MESSAGEix 전환부문 구조	58
<표 부록5-1> 최적화 모형의 시간대 구분	63
<표 부록5-2> 모형 입력자료 출처 요약	63
<표 부록5-3> 발전원별 열 소비율	64
<표 부록5-4> 발전원별 열효율	65
<표 부록5-5> 태양광 총자본비용(CAPEX) 전망	65
<표 부록5-6> 발전원별 건설단가 및 운전유지비	66
<표 부록5-7> 발전원별 운전유지비 비율	66
<표 부록5-8> 발전원별 예방정비일 및 고장 정지율	67
<표 부록6-1> 베이스라인 시나리오에서의 발전원별 설비용량 설정	70
<표 부록6-2> 발전설비 기술 특성치 자료	71

<그림 목차>

<그림 2-1> 시나리오 프로토콜	10
<그림 2-2> 전환부문 시나리오별 배출허용량과 총배출허용량	11
<그림 2-3> 시나리오별 배출허용량과 총배출허용량(전체)	11
<그림 2-4> 시나리오 보고 양식	13
<그림 2-5> PYAM 패키지	14
<그림 3-1> 시나리오별, 기술 가용성에 따른 전력부문 감축 기여도	15
<그림 3-2> 온실가스 배출량	16
<그림 3-3> 시나리오별 기술 가용성의 영향	16
<그림 3-4> 발전량(좌), 설비용량(우)	17
<그림 3-5> 연평균 신규 발전소 투자비용	17
<그림 3-6> 기술 가용성에 따른 발전 믹스 삼각표	18
<그림 3-7> 기술 가용성에 따른 설비 믹스 삼각표	19
<그림 3-8> 시스템 이용률 NZ vs. NDC(좌), 기술 가용성에 따른	19
<그림 3-9> 온실가스 누적 포집량	20
<그림 3-10> 태양광 발전 설비	20
<그림 3-11> 풍력 발전 설비	21
<그림 3-12> 재생발전량 비중 NDC vs. NZ(좌), 기술 가용성에 따른	22
<그림 부록1-1> METER 모형의 구조	24
<그림 부록1-2> 모형 발전부문 메커니즘	24
<그림 부록1-3> 발전부문 RES	25
<그림 부록1-4> 192개 시간별 전력수요	26
<그림 부록1-5> 투자와 발전소 운영 결정	26
<그림 부록1-6> 태양광 계절, 시간별 발전량 예시	26
<그림 부록1-7> 풍력 계절, 시간별 발전량 예시	27
<그림 부록1-8> 타임 슬라이스별 ESS 충방전 예시	27
<그림 부록2-1> AIM/HUB-KOREA 모형 구조	29
<그림 부록3-1> 시나리오를 생성하는 방식에 대한 개념 다이어그램	31
<그림 부록3-2> GCAM 지역 도식도	32
<그림 부록3-3> GCAM v5.2 구동의 개념적 개략도	33
<그림 부록3-4> GCAM 에너지시스템 모형의 구조	34
<그림 부록3-5> GCAM v5.2의 주요 에너지 경로 개략도	34
<그림 부록3-6> GCAM 풍력 발전 글로벌 그리드 잠재량 예시	35
<그림 부록3-7> GCAM 지역별 에너지시스템 개략도	36
<그림 부록3-8> GCAM 전기부문의 중첩구조 개략도	37
<그림 부록3-9> GCAM 모형의 기준년도에 적용된 기술	37
<그림 부록3-10> GCAM 모형의 기준년도에 적용된 기술	40
<그림 부록3-11> GCAM 모형의 정채 부문 모형 구조	40
<그림 부록3-12> GCAM 모형의 수소 부문 모형 구조	41
<그림 부록3-13> GCAM 모형의 건물부문 모형 구조	42
<그림 부록3-14> GCAM 모형의 산업부문 모형 구조	42
<그림 부록3-15> GCAM 모형의 수송부문 결과 예시	43
<그림 부록3-16> 발전부문 예시	44
<그림 부록3-17> 최종에너지 소비 예시	44
<그림 부록3-18> 수송부문 확장 결과 예시	47
<그림 부록4-1> ixmp 모델링 플랫폼의 구성요소 및 상호연결	51
<그림 부록4-2> MESSAGEix의 모형 구조	51

<그림 부록4-3> MESSAGEix 기준 에너지 시스템(RES)	52
<그림 부록4-4> 제조업 상세화 MESSAGEix-KOR 모형 RES	53
<그림 부록4-5> 공통 에너지 서비스 기반 기술표현	54
<그림 부록4-6> 건물부문 RES 구조도 (좌) 주거/ (우) 상업-공공	55
<그림 부록4-7> 난방 유효수요 원단위 전망 방법론	56
<그림 부록4-8> 수송부문 최종에너지 소비 결과 예시	57
<그림 부록4-9> 전환 부문(전력, 열) RES 구조도	57
<그림 부록4-10> Reliability 제약식	58
<그림 부록4-11> Flexibility 제약식	58
<그림 부록4-12> MESSAGEix 전력부문 결과 예시	59
<그림 부록4-13> 배출량 제약식	59
<그림 부록6-1> KIER-POSTECH-TIMS 모형 내 에너지시스템 범위	68
<그림 부록6-2> KIER-POSTECH-TIMES 모형 기준에너지시스템 설계 활용 통계	69

I. 서론

1. 연구 배경 및 필요성

- 에너지-기후변화 정책의 과학적 평가를 위한 다양한 분석 모형이 존재하며, 각 모형은 성격 및 범위, 해를 찾는 방법론, 기술구조, 변수 간 상호작용, 모수 등 다양성과 불확실성 존재
- 모형간 비교연구를 통해 구조 및 해(Solution) 찾는 방법 등에 대한 이해증진과 동시에 단일 모형 결과에 의존하지 않고 여러 모형 결과와 비교에 기반한 강건한(robust) 저탄소 전환 경로 발굴이 필요함
- 통합평가모형컨소시엄(Integrated Assessment Modeling Consortium)을 위시한 해외의 에너지-기후변화 통합평가모형 그룹들은 다년간 모형간 비교연구를 통해 다양한 정책 이슈에 대한 강건한 시사점과 연구 질문에 대한 학술적 결과물들을 생산하고 있음
- 본 과제는 이러한 배경에서 국내 최초로 모형 간 비교연구를 시도하여, 국내의 특정 정책 이슈에 대해 다양한 모형에서 공통적으로 관찰되는 강건한 결과를 도출함으로써 불확실성 하에서 과학적 정책평가와 시사점을 제시하고, 과학(모형)과 정책 결정 간의 소통과 상호작용 강화에 기여

2. 연구목적

- 본 과제는 온실가스-에너지 모형을 활용하고 있는 연구자(학계, 공공기관, 정책연구기관)들로 모형 비교 연구(Model Intercomparison Project, MIP) 그룹을 구성하고, 탄소 중립 달성을 위한 전력부문의 전환과 실현가능성(feasibility)에 대해서 강건한 정책 시사점을 제시하는 데 그 목적이 있음
 - 전력부문과 관련된 모형 결과(전력부문의 감축 기여, 전기화의 속도와 정도, 전력부문 배출경로와 감축 속도, 발전량과 전원 믹스 등)를 중심으로 분석함
 - 대규모 중앙집중형 저탄소 기술(원자력발전과 CCS)의 기술 가용성이 전력부문의 저탄소 전환에 미치는 영향 분석을 통해 재생에너지와 CCS 보급, 화석연료 기반 기술의 퇴출(exit)에 대한 실현가능성 평가함
- 국내 최초로 시도하는 모형간 비교연구로서 향후 유사한 모형 비교 연구의 선례와 전형 확립에 기여

II. 연구내용 및 방법

1. 참여 기관 및 모형

□ 한국 에너지 모델링 포럼(K-EMF)에 참여하고 있는 6개 모형팀으로 구성

- K-EMF는 2020년 4월 발족한 학술 포럼으로 에너지-경제-기후변화 분야 연구자 교류를 확대하고 학술 역량을 강화할 뿐 아니라, 우리나라의 주요 정책 이슈와 연구 질문 해결을 위한 국내외 모형 간 비교연구 플랫폼
- 현재 KAIST, UoS, POSTECH, 숙명여대, 연세대, GIR, GTC, KEI, KEEL, KETEP, KIER, 삼성전자 및 해외연구자(EIEE, Yale 등) 참여 중

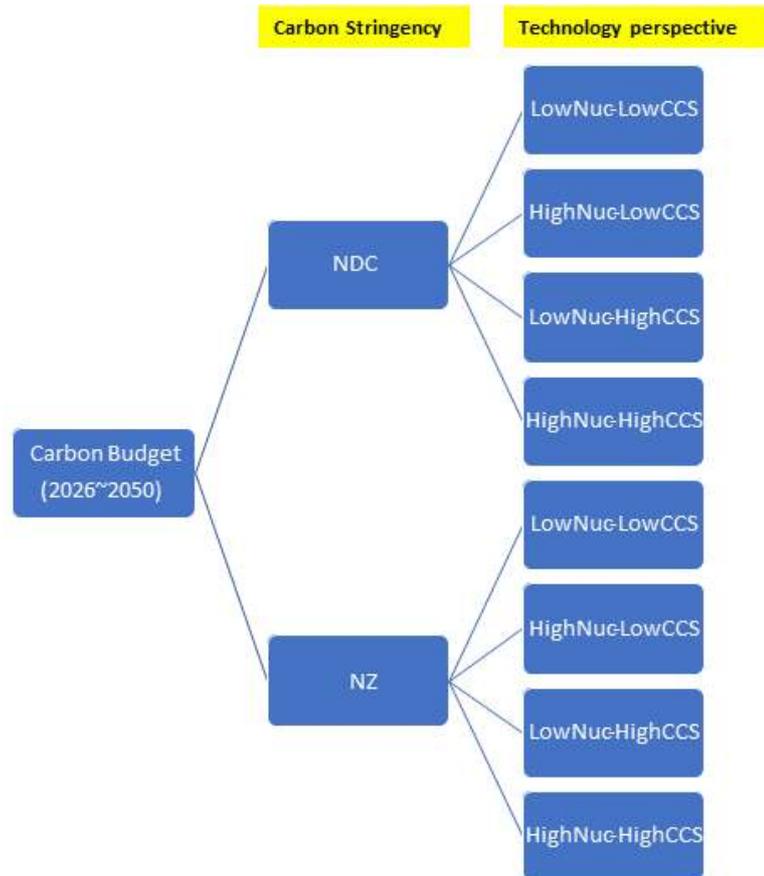
<표 2-1> 모형별 비교 요약표

모형 이름	기관	모형 종류	해를 찾는 방법	모형 범위
GCAM-KAIST	KAIST	Integrated Assessment Model	Recursive dynamics	에너지 전반
MESSAGEix-KOREA	KAIST	Energy System model	Intertemporal optimization	에너지 전반
AIMHub-Korea2	서울시립대	CGE	optimization	경제 전반
UNICON	KEI	Energy System model	optimization	전환 부문
METER	숙명여대	Energy System model	Intertemporal optimization	전환 부문
KIER-POSTECH-TIMES	POSTECH, KIER	Energy System model	Intertemporal optimization	전환 부문

* 모형별 상세 설명은 부록 참조

2. 시나리오 프로토콜

- 탄소 중립 달성을 위한 전력부문의 역할과 그것의 실현가능성을 평가하기 위해 2가지 감축 강도(carbon stringency)와 4가지 기술 가용성(technology perspective)을 조합하여 아래 그림과 같이 총 8개의 시나리오를 개발하고 분석함



<그림 2-1> 시나리오 프로토콜

- 감축 강도는 배출허용량(carbon budget)의 개념을 적용하여 강도가 상대적으로 낮은 ‘NDC’ 시나리오와 2050년 탄소중립에 도달하는 강한 강도의 ‘NZ’ 시나리오로 구분
- 감축 강도에 따라 전력부문의 감축 기여와 전력부문 전환에 미치는 영향을 분석하기 위함

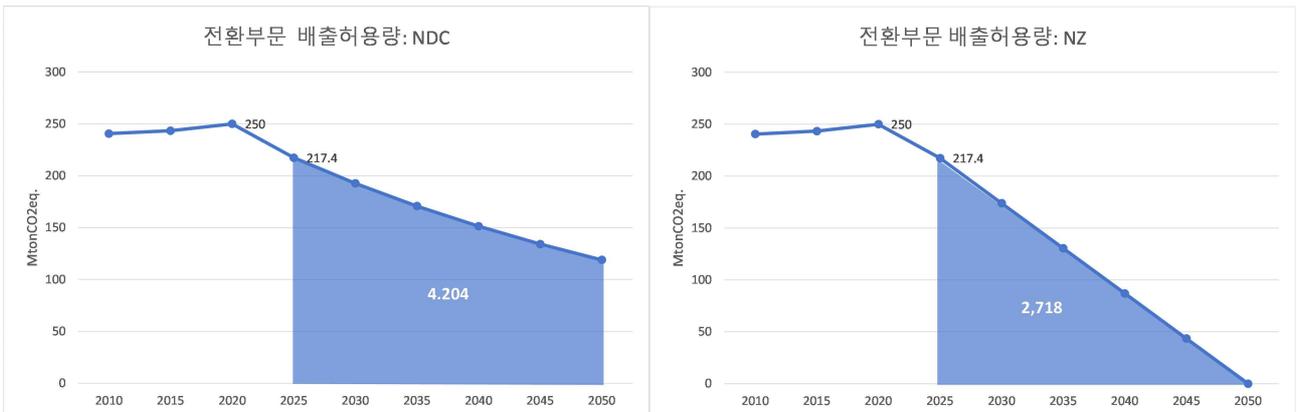
<표 2-2> 시나리오 세부 내용

Carbon Stringency	시나리오 설명
NDC	2025*년부터 2030년(NDC)**까지의 감축률을 2050년까지 선형으로 연장하는 경로의 누적(2026~2050) 배출허용량
NZ	2025년 배출허용량에서 선형으로 2050년에 탄소중립***에 도달하는 경로의 누적(2026~2050) 배출허용량

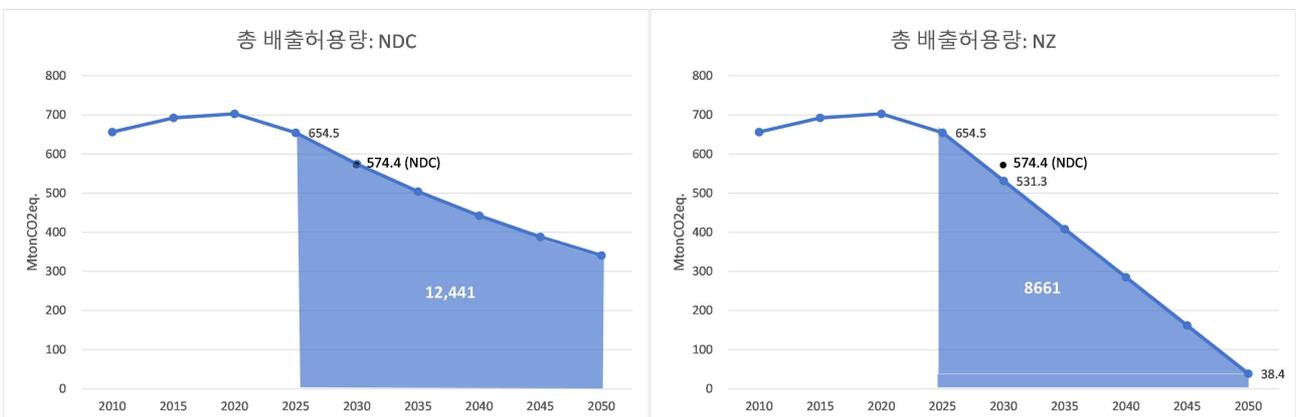
* 654.5백만톤: 24년~26년 감축 후 배출량 평균
 ** 2030년 NDC 목표(총배출량)는 산림흡수와 해외 감축분을 제외한 574 백만 톤으로 가정
 *** 2050년 탄소중립의 잔여 배출량은 약 38.3백만 톤 (산림흡수와 해외 감축분 합)으로 가정
 (출처: 2030 온실가스 감축 로드맵 수정안 (환경부, 2018년 7월))

Note:
 1. 연료 연소만 산정하는 모형은 총배출허용량에서 2018년도 연료 연소 배출 비중(0.863)을 곱하여 배출허용량 조정
 2. 연료 연소 중 이산화탄소만 반영하는 모형은 총배출허용량에서 2018년도 연료 연소 배출 비중(0.863)과 CO2/GHGs 비중(0.985)을 곱하여 배출허용량 조정
 3. 전환(발전+열) 부문 모형의 2030년 NDC 목표는 1백만 톤(출처: 2030 온실가스 감축 로드맵 수정안 (환경부, 2018년 7월)), 2050년 탄소중립 목표는 0으로 가정

□ 시나리오별 전환부문 배출허용량과 총배출허용량



<그림 2-2> 전환부문 시나리오별 배출허용량과 총배출허용량



<그림 2-3> 시나리오별 배출허용량과 총배출허용량(전체)

- 원자력과 CCS는 대규모 중앙집중형 저탄소 기술로서 미래 가용성의 정도에 따라 전력부문의 탄소 감축 기여와 전환에 상당한 영향을 미칠 수밖에 없음. 본 과제에서는 원자력과 CCS 각각에 대해서 가용성 정도에 따라 low(비관)와 high(낙관)으로 구분
- 원자력발전의 경우 비관은 9차 전력수급기본계획에 따라 원자력 설비를 점진적으로 감소시키는 시나리오이며, 낙관의 경우 9차 전력수급기본계획의 최대 설비 (2022년에 26GW)를 2050년까지 유지하는 시나리오
- CCS의 경우 비관은 포집된 CO2의 국내 누적 저장용량은 10억 톤으로 가정한 시나리오이며, 낙관은 20억 톤으로 가정한 시나리오

<표 2-3> 시나리오별 기술 가용도 요약표

Tech Perspective	원자력발전	CCS
LowNuc-LowCCS	9차 전력수급기본계획에 따라 점진적 감소	누적 저장용량 : 10 억 톤 CO2
HighNuc-LowCCS	확대 허용 (원전설비 최대 26GW 유지)	누적 저장용량 : 10 억 톤 CO2
LowNuc-HighCCS	9차 전력수급기본계획에 따라 점진적 감소	누적 저장용량 : 20 억 톤 CO2
HighNuc-HighCCS	확대 허용 (원전설비 최대 26GW 유지)	누적 저장용량 : 20 억 톤 CO2

3. 시나리오 보고 양

□ 시나리오 결과 보고 양식은 아래와 같이 통합평가모형 컨소시엄(Integrated Assessment Modeling Consortium, IAMC)이 개발한 시계열 데이터 포맷 활용

○ 각각의 변수들을 통일된 단위로 2020년부터 2050년까지 5년 단위로 보고

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Model	Scenario	Variable	Unit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
2	[MESSAGEix_KOR]	NDC	Emissions CO2 Energy	Mt CO ₂ /yr				Projection			

<그림 2-4> 시나리오 보고 양식

□ 시나리오 변수는 아래 표와 같이 분류할 수 있으며 각각의 항목에 변수의 개수는 부문, 기술, 에너지원의 조합에 따라 세분화됨

○ 예를 들어, 배출량 항목은 CO2와 GHGs로 나뉘고 각각의 기체에 부문별 배출량으로 확대되는 형태임

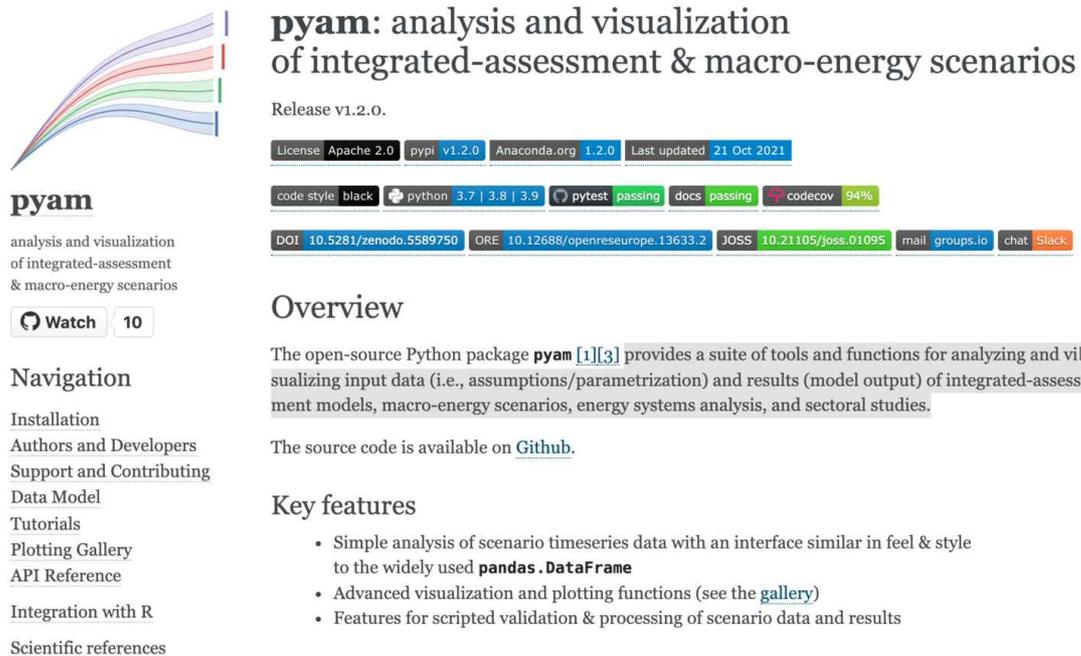
<표 2-4> 시나리오 변수 분류표

시나리오 변수 분류	변수의 개수
부문별 배출량	16
기술별 탄소 포집량	4
기술별 총 설비용량	19
기술별 신규 설비용량	19
기술별 신규 투자	20
에너지원별 1차 에너지사용량	10
부문별/에너지원별 최종에너지 사용량	44
전력 기술별 발전량	19
기술-경제 파라미터	63
1차 에너지 가격	3
탄소세	1

Emissions CO2 Energy
Emissions CO2 Energy Demand Industry
Emissions CO2 Energy Demand Industrial Process
Emissions CO2 Energy Demand Transportation
Emissions CO2 Energy Demand Residential
Emissions CO2 Energy Demand Commercial
Emissions CO2 Energy Demand Other Sector
Emissions CO2 Energy Supply Electricity
Emissions GHGs Energy
Emissions GHGs Energy Demand Industry
Emissions GHGs Energy Demand Industrial Process
Emissions GHGs Energy Demand Transportation
Emissions GHGs Energy Demand Residential
Emissions GHGs Energy Demand Commercial
Emissions GHGs Energy Demand Other Sector
Emissions GHGs Energy Supply Electricity

4. 시나리오 분석 및 시각화 도구(PYAM)

- 모형별로 공통된 양식으로 보고된 시나리오 결과들은 pyam이라는 파이썬(Python) 패키지를 통해 분석 및 시각화됨
- pyam은 오픈 소스 기반의 파이썬(Python) 패키지로 통합평가모형, 거시-에너지 시나리오, 에너지 시스템 분석의 결과(모형 결과)들과 입력 데이터(가정과 파라미터)들을 분석하고, 시각화하는 기능을 제공함
- pyam은 IAMC에 의해 지속해서 개발 및 업데이트되고 있으며, 소스 코드는 github를 통해 공개되어 있음 (<https://github.com/IAMconsortium/pyam>)
- pyam에 대한 설치, 연습 문제(tutorials), 시각화 갤러리 등은 다음 사이트 참조 (<https://pyam-iamc.readthedocs.io/en/stable/index.html>)



pyam: analysis and visualization of integrated-assessment & macro-energy scenarios

Release v1.2.0.

License Apache 2.0 | pypl v1.2.0 | Anaconda.org 1.2.0 | Last updated 21 Oct 2021

code style black | python 3.7 | 3.8 | 3.9 | pytest passing | docs passing | codecov 94%

DOI 10.5281/zenodo.5589750 | ORE 10.12688/openreseurope.13633.2 | JOSS 10.21105/joss.01095 | mail groups.io chat Slack

Overview

The open-source Python package **pyam** [1][3] provides a suite of tools and functions for analyzing and visualizing input data (i.e., assumptions/parametrization) and results (model output) of integrated-assessment models, macro-energy scenarios, energy systems analysis, and sectoral studies.

The source code is available on [Github](#).

Key features

- Simple analysis of scenario timeseries data with an interface similar in feel & style to the widely used **pandas.DataFrame**
- Advanced visualization and plotting functions (see the [gallery](#))
- Features for scripted validation & processing of scenario data and results

<그림 2-5> PYAM 패키지

Ⅲ. 분석 결과1)

1. 전력부문의 감축 기여도

- 에너지시스템 전반을 묘사하는 모형(GCAM, MESSAGE, AIM)의 전력부문 배출 비중 분석을 통해 감축 목표와 기술 가용성에 따른 전력부문의 감축 기여도 변화 평가
 - 감축 목표가 강할수록(NZ) 전력부문의 배출 비중이 작아짐. 즉, 전력부문의 감축 기여도가 증가함(단, AIM 모형은 예외)
 - 기술 가용성이 높을수록(H-H) 전력부문의 감축 기여도가 커짐
- 수요부문의 전력화(즉, 전력생산량 증가)와 전력부문의 저탄소화(배출비중 감소)가 탄소중립 달성에 중요한 수단이며, 대규모 중앙집중형 저탄소 기술의 가용성이 높을수록 전력부문의 감축 기여도는 커짐

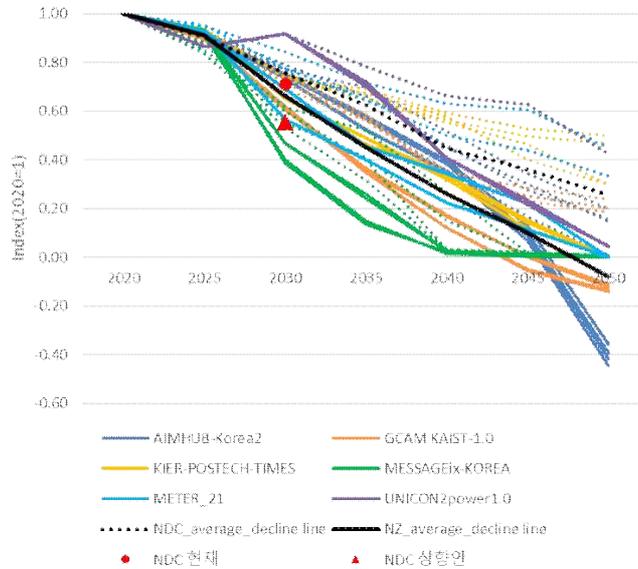


<그림 3-1> 시나리오별, 기술 가용성에 따른 전력부문 감축 기여도

2. 온실가스 배출량

- 배출경로
 - 전력부문의 급격한 탈탄소화가 필요하며, 일부 모형(AIM, GCAM)의 경우 ‘45~’ 50년 순 흡수도달
 - NZ가 NDC보다 감축 정도와 속도 모두 큼
 - NDC 상향안은 탄소 중립 경로(평균)보다 강력한 감축 목표

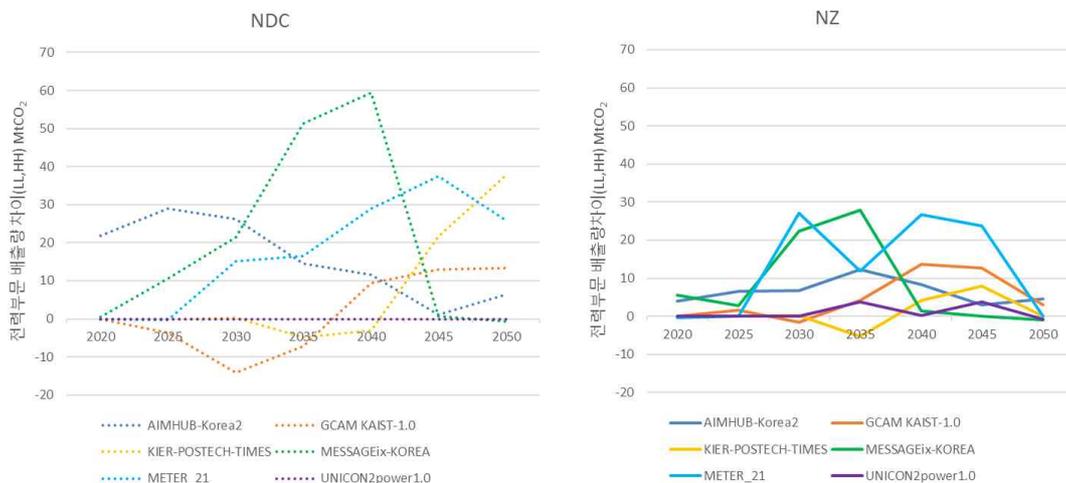
1) 분석 결과는 모형 비교 연구의 최종 결과는 아니며, 각 모형의 시나리오에 대한 진단과 품질 점검 과정에 있는 중간 결과물임



<그림 3-2> 온실가스 배출량

□ 기술 가용성의 영향

- 대규모 중앙집중형 저탄소 기술(원자력, CCS) 가용성에 따른 전력부문의 감축 기여도와 감축 속도 변화 평가
- 양(+)의 값은 기술 가용성이 높을수록(H-H) 전력부문의 감축량이 커진다는 의미
- 기술 가용성이 높을수록 전력부문의 누적 감축 기여가 커지며, 조기 감축 기여가 늘어남 (NDC 시나리오에서 GCAM, TIMES 예외)
- 기술 가용성에 따라 총 감축 기여가 달라지기 때문에 감축 시점 간 상충효과 (inter-temporal mitigation trade-off)는 확인하기 어려움
- 시나리오 프로토콜 수정(배출허용량 고정)을 통해 기술 가용성이 감축 시점 간 상충효과에 미치는 영향 분석 필요



<그림 3-3> 시나리오별 기술 가용성의 영향

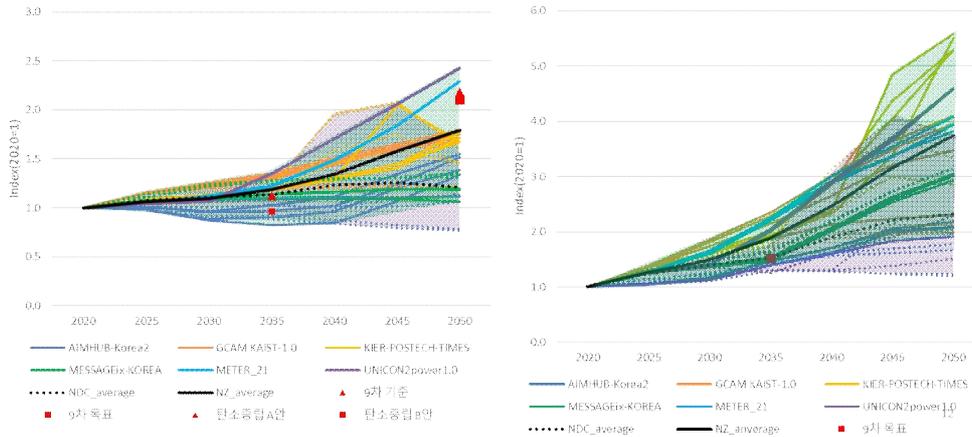
3. 발전량과 설비용량

□ 발전량은 현재 대비 2050년까지 평균²⁾ 약 1.27배(NDC)~1.8배(NZ) 증가

○ NDC, NZ 시나리오 모두 2035년 평균 발전량은 9차 전력수급기본계획의 기준안과 목표안보다 높으며, 2050년 평균 발전량은 탄소중립안 보다 낮음

□ 설비용량은 현재 대비 약 2.6배(NDC) ~ 약 4배(NZ) 증가

○ 간헐성이 높은 재생에너지 설비 증가로 설비 증가율 발전량 증가율의 2배 이상



<그림 3-4> 발전량(좌), 설비용량(우)

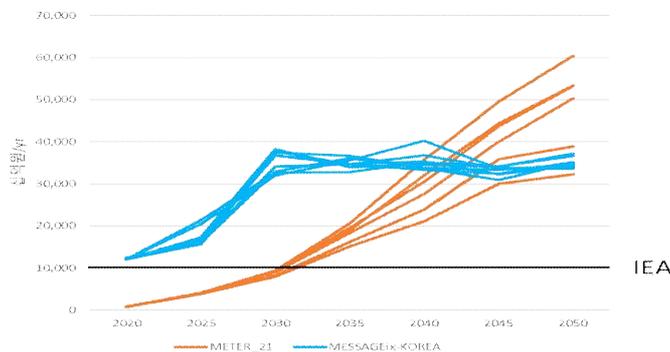
4. 설비투자 비용

□ MESSAGE의 초기 감축 vs. METER의 후기 감축

□ 기준년도 투자비용에 대한 보정 필요

○ IEA의 World Energy Investment 2021에 따르면 우리나라 연평균 전력설비투자비용은 약 10조 원/yr로 추정됨

□ 향후 총 설비투자비용뿐 아니라 투자 포트폴리오(화석, 재생, 원자력, CCS) 구성 상세화 필요

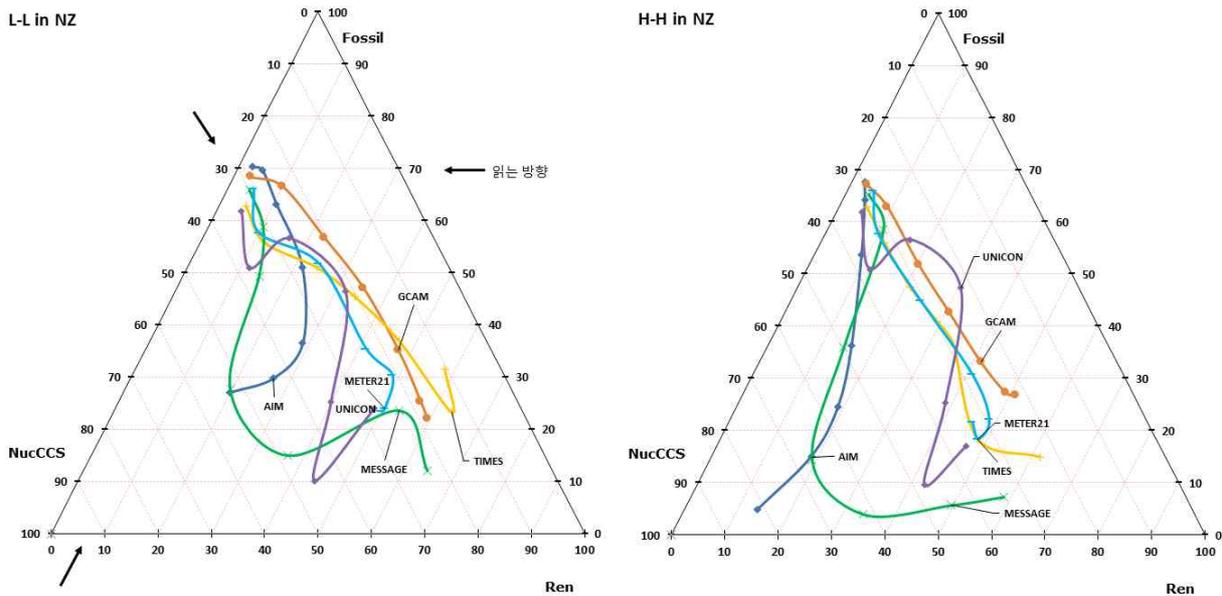


<그림 3-5> 연평균 신규 발전소 투자비용

2) 일부 모형의 이상치(outlier)에 의해 평균이 왜곡되고 있음. 추가적인 진단과 품질 검토 필요

5. 발전 믹스(MIX)

- 모형별, 시간별 발전 믹스 변화를 분석하기 위해 삼각형 그림 활용
- 기술을 Ren(태양광, 풍력, 수력), NucCCS(원자력, CCS w/ 가스, 석탄, 바이오매스), Fossil 세 가지로 구분하고, 시간에 따른 발전 비중 변화를 시각화

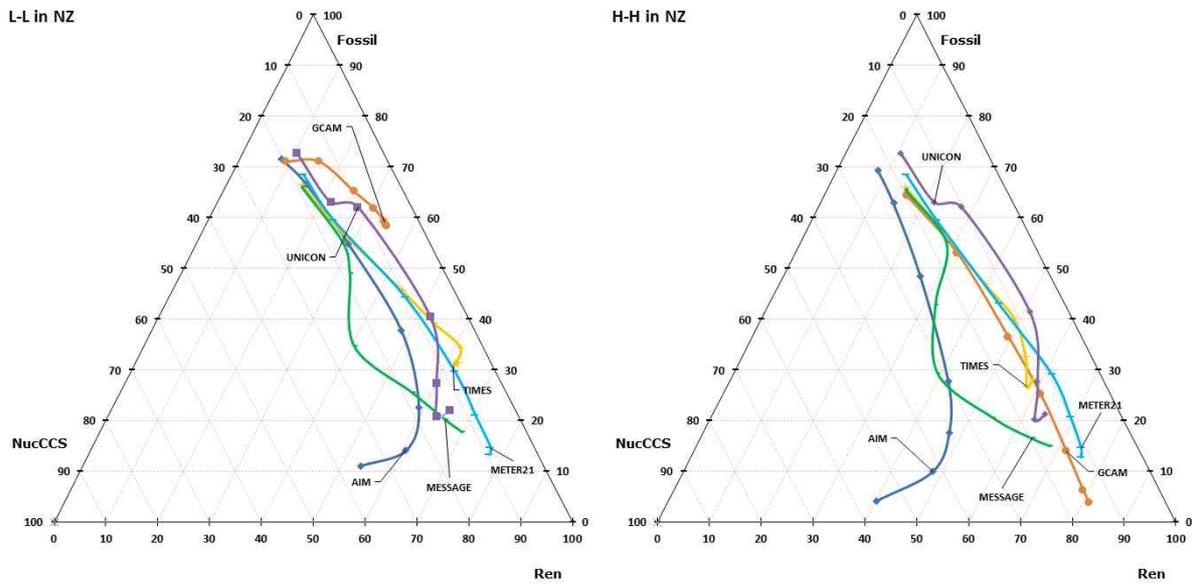


<그림 3-6> 기술 가용성에 따른 발전 믹스 삼각표

- 2020년의 Fossil(60~70%)과 NucCCS(25~35%)중심에서 2050년 Ren(50~65%)과 NucCCS(10~30%)중심으로 이동 (왼쪽 그래프)
- 기술 가용도가 높은 H-H의 경우 2050년 비중이 L-L보다 좌하향(NucCCS 증가, Ren와 Fossil 감소)으로 이동 (오른쪽 그래프)
- 일부 모형의 발전 믹스 변화 경로에 대한 진단 및 품질 점검 필요(AIM, MESSAGE, UNICON)

6. 설비 믹스(MIX)

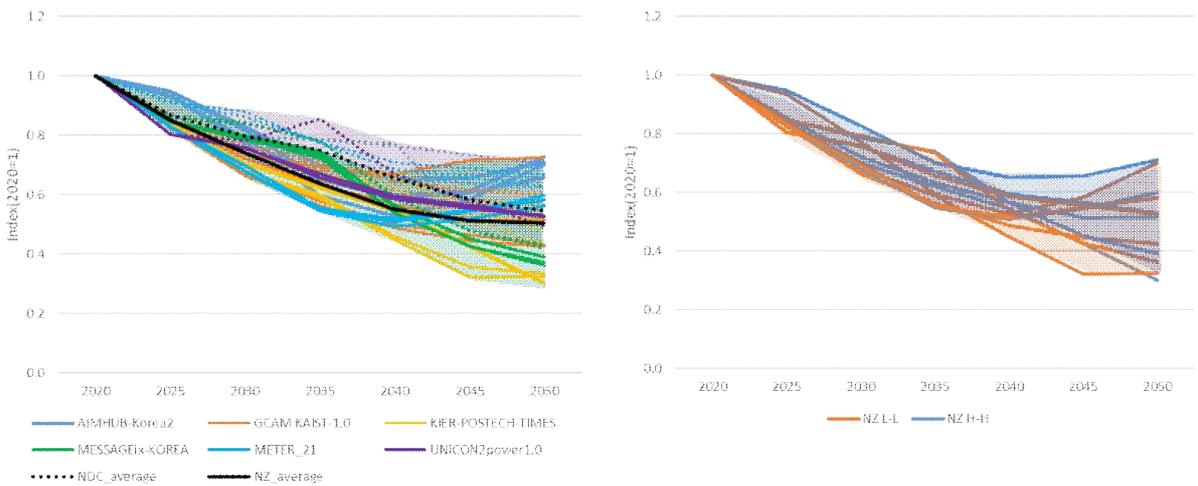
- 발전 믹스와 유사한 전환 경로(transition pathway)를 보임
- 다만, Ren의 간헐성으로 인해 Ren의 설비 비중은 발전 비중보다 더 높지만, Fossil과 NucCCS의 설비 비중은 발전 비중보다 낮음
- 일부 모형의 설비믹스 변화 경로에 대한 진단 및 품질 점검 필요(AIM, MESSAGE, GCAM)



<그림 3-7> 기술 가용성에 따른 설비 믹스 삼각표

7. 전력시스템 전체 이용률

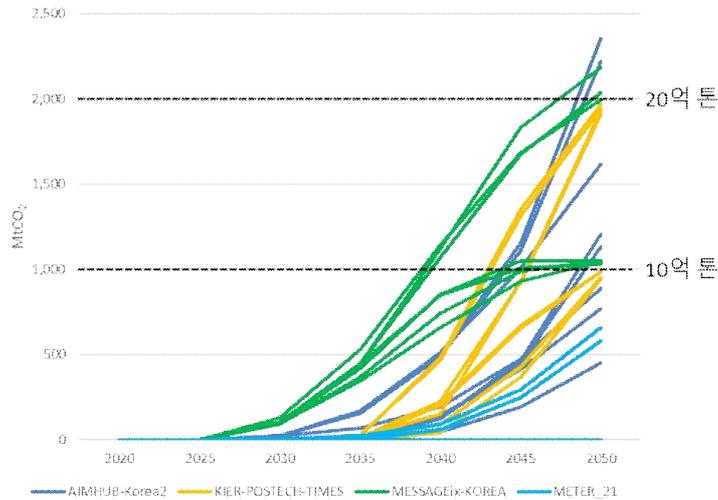
- 감축 목표가 강할수록(NZ) 간헐성이 높은 재생에너지 확대에 발전부문 전체적인 이용률 하락
- 기술 가용성이 떨어질수록(L-L), 발전부문의 이용률 하락



<그림 3-8> 시스템 이용률 NZ vs. NDC(좌), 기술 가용성에 따른 NZ 시나리오 이용률 L-L, H-H (우)

8. CCS 포집량

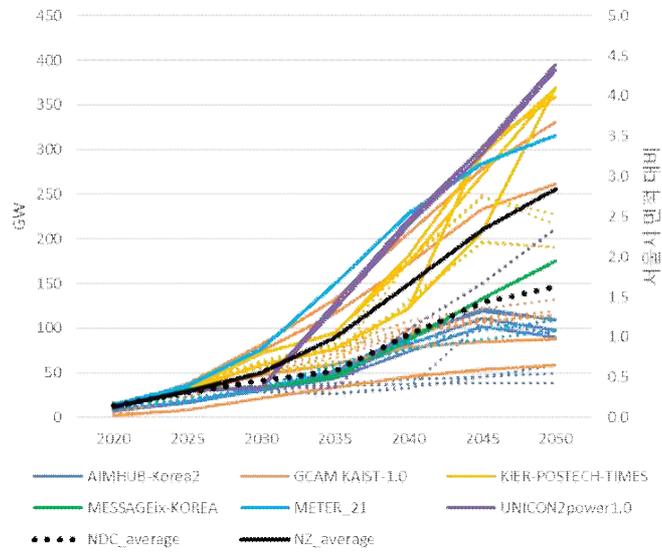
- NDC, NZ 시나리오 모두 저장공간 제약을 대부분 소진하는 것으로 나타남
- CCS 포집량 속도는 지속적인 증가, 정체로 모형간 서로 다른 결과가 도출됨
- MESSAGE 모형에서는 가교(bridge) 기술로 초기에 빠르게 보급된 후 좌초자산이 됨



<그림 3-9> 온실가스 누적 포집량

9. 태양광 설비용량

- 태양광은 과거 경험한 적이 없는 빠른 속도로, 지속적인 확대가 필요하며 상당한 양의 토지가 요구됨(6.6km²/GW 가정)
- 태양광 설비용량이 250GW에 이르면 서울시 면적의 약 3개 필요
- 지난 5년간의 연평균 설비용량 증가속도를 초과하는 속도로 2050년까지 지속적인 증가가 요구됨
- 감축 목표가 강할수록, 기술 가용성이 낮을수록 태양광 보급 속도와 토지 요구량은 커짐



<그림 3-10> 태양광 발전 설비

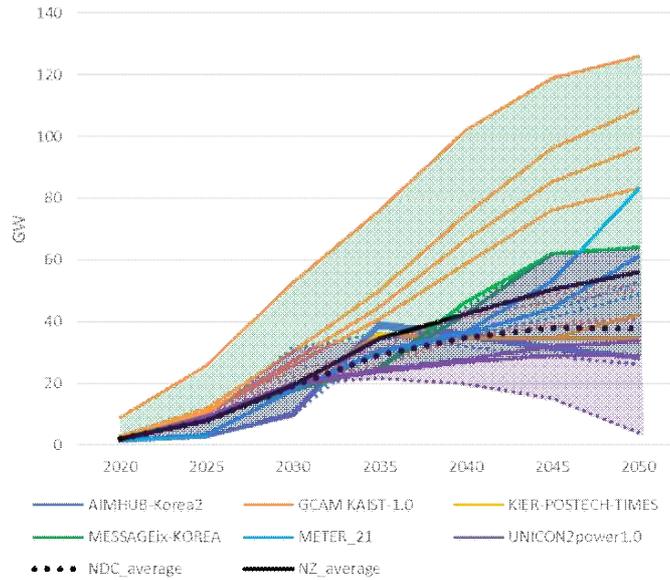
<표 3-1> 태양광 설비 증가 속도(CAGR)

구분	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50
실측(KPX)	42%	-	-	-	-	-	-
NDC 평균	-	72%	68%	61%	110%	104%	78%
NZ 평균	-	76%	84%	109%	126%	128%	115%

10. 풍력(육상+해상) 설비용량

□ 풍력의 확대 속도도 과거보다 훨씬 빨라야 하지만, 확대 속도는 완만해짐

○ 감축 목표가 강할수록, 설비 증가 속도가 빠름



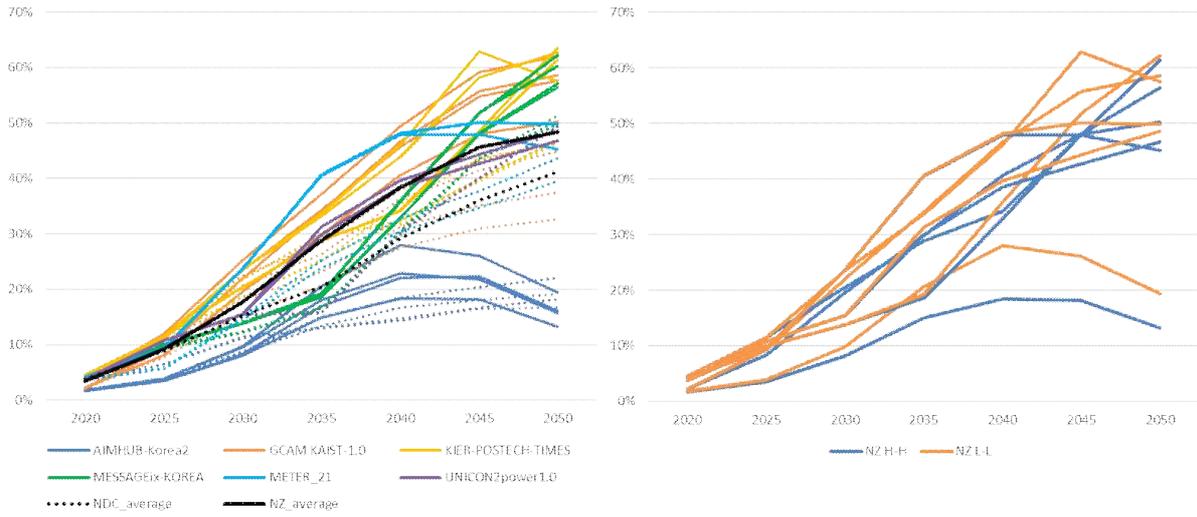
<그림 3-11> 풍력 발전 설비

<표 3-2> 풍력 발전 설비 증가 속도(CAGR)

구분	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50
실측(KPX)	18.5%	-	-	-	-	-	-
NDC 평균	-	32.4%	19.4%	8.8%	3.5%	1.8%	-0.1%
NZ 평균	-	31.2%	19.2%	12.1%	4.2%	3.5%	2.2%

11. 재생 발전량 비중

- 재생에너지 발전 비중은 현재 5%에서 평균 40%(NDC)~50%(NZ) 증가
- 기술 가용성이 높을수록(H-H) 재생 발전 비중이 작아짐



<그림 3-12> 재생발전량 비중 NDC vs. NZ(좌), 기술 가용성에 따른 NZ 시나리오 재생발전량 비중 L-L vs. NZ(우)

IV. 결론

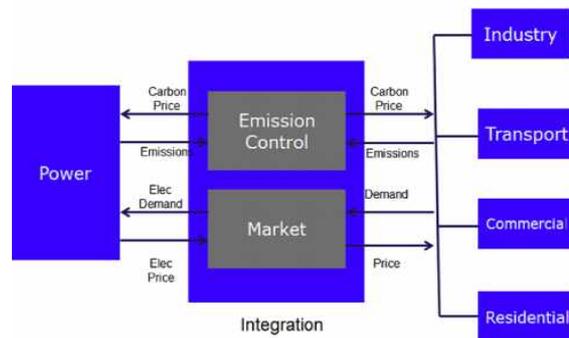
- 한국 에너지모형포럼(K-EMF) 운영을 통하여 국내 최초로 에너지-기후변화 통합평가모형 간 비교연구 추진
 - 국내 6개 모형팀의 자발적인 참여하에 “탄소중립 달성을 위한 전력부문의 역할과 실현 가능성 평가” 모색
 - 미래 가용한 기술 포트폴리오의 영향, 저탄소 전환의 기술적/경제적 실현가능성 평가 시도
 - 통일된 시나리오 프로토콜을 확립하고, 공통된 시나리오 결과 보고 양식 도출
 - 통합평가모형컨소시엄에서 모형간 비교연구에 널리 활용하는 분석과 시각화 도구(pyam)를 통하여 다양한 모형 진단(diagnostics)
- 분석 결과 주요 초기 시사점
 - 상향된 NDC는 2050년 탄소중립 경로보다 강력한 목표
 - 탄소중립 달성을 위한 전력부문의 역할 중요: 전기화로 인한 발전량 증가(2050년까지 현재의 2배)와 완전한 탄소중립 필요(재생에너지 발전 비중 50% 이상 + 설비용량 4배 증가)
 - 석탄발전의 완전 퇴출, 가스발전 w/CCS 일부 잔존
 - 발전부문의 획기적이고 급속한 전환 필요(재생에너지 발전 비중 현재 5%에서 2050년 약 50~65%)
 - 원자력발전과 CCS 등의 대규모 저탄소 기술 가용성은 전력부문의 감축 기여도, 전력시스템 전체의 이용률 상승, 저탄소 전환의 실현가능성에 긍정적 영향을 주며, 기술 가용성의 긍정적 영향은 감축 목표가 강할수록 커짐
- 한계 및 보완 사항
 - 강건한 정책적 시사점 도출과 과학적 실현가능성 평가를 위해서는 모형별 시나리오 결과에 대한 추가적인 진단 및 품질 점검 필요
 - ✓ 일부 모형의 누락된 변수 추가 (예, 신규설비 투자비용)
 - ✓ 특정 변수의 행태(behavior)에 대한 면밀한 검토 및 수정 필요
 - 실현가능성 평가에 관한 후속 연구 및 분석 추진
 - ✓ 기술적 실현가능성 : 재생에너지의 보급 정도와 속도, 화석연료 사용 기술의 퇴출 속도, 탄소집약도(CO2/kWh) 변화, 재생에너지 확대에 따른 유연성 자원 요구량 등
 - ✓ 경제적 실현가능성 : 탄소가격, 신규설비 투자액, 화석연료 사용 기술의 좌초자산 등

부록

1. METER 모형

1.1 모형 개요

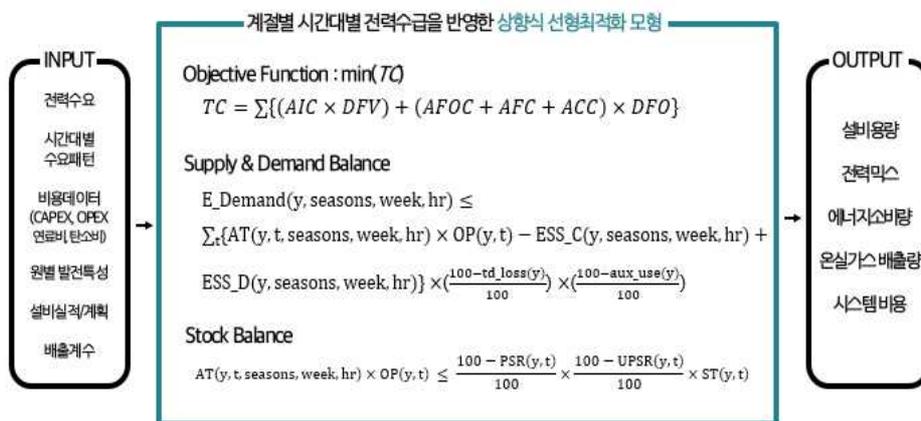
□ METER(Model for Energy Transition and Emissions Reduction) 모형은 에너지 부문 상향식 부분균형 최적화 모형으로 서비스 수요와 공급 균형을 맞추면서 총 시스템 비용이 최소화되는 최적해를 도출한다. 국내 현황에 맞게 연구진이 자체개발한 모형으로, 정책/기술적 환경에 따른 제약의 추가와 제거, 기술 세분화와 및 기술별 특성 반영 등이 쉽다. 모형을 통해 MACC(Marginal Abatement Cost Curve) 추정, 정책효과 분석(봄철가동중지, 신재생에너지 보급확대, 보조금 지원정책) 등이 가능하다.



<그림 부록1-1> METER 모형의 구조

1.2 모형 메커니즘: 발전부문

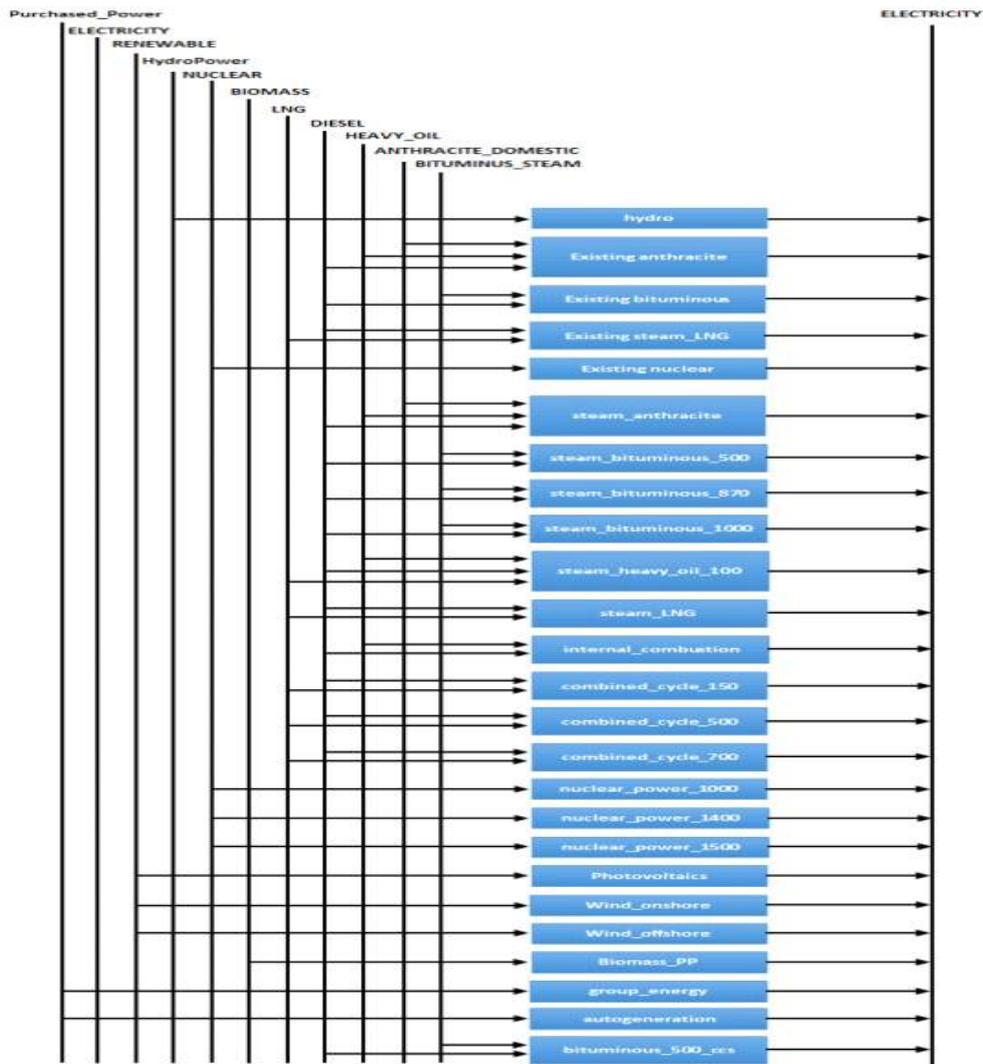
□ 타 부문의 전력수요를 충족하는 동시에 총 시스템 비용을 최소화하는 해를 도출한다. 전력 소비 부문(산업, 수송, 상업, 가정) 모형으로부터 도출된 전력수요에 따라, 전환부문에서는 모델링 기간(2017-2050) 동안 소요되는 총 시스템 비용을 최소화하는 최적의 설비투자와 발전원별 발전량, 이에 따른 연료 소비량과 배출량을 도출함



<그림 부록1-2> 모형 발전부문 메커니즘

1.3 전환부문 RES

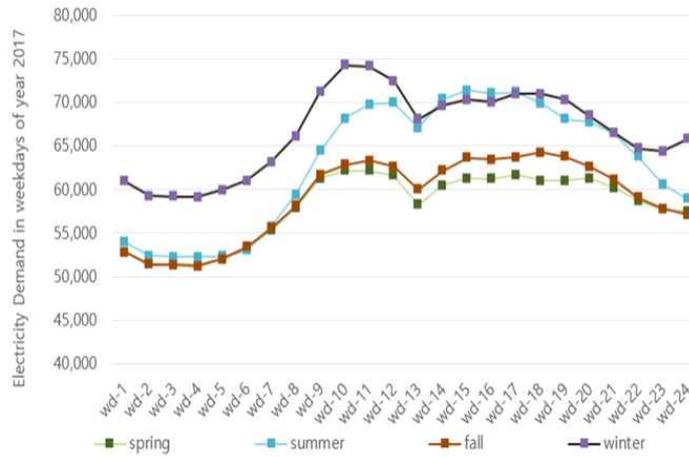
□ 전환부문의 RES는 Service demand-E transition-Service output 3단계, Service output은 전력 1가지로 구성된다. 전환부문 RES는 발전원별 특성에 따른 연료투입에 따라 발전기술별 특성을 통해, 이에 따른 발전량이 도출되는 단순한 형태의 에너지 흐름을 가진다. 전력이라는 단일 Service output을 갖는 점이 타 부문과 다르다. 전환부문은 타 부문 대비 단순한 에너지 흐름을 가지는 한편, 전력 소비와 공급의 동시적 특성, 전력저장의 한계성을 고려하는 특징이 있다.



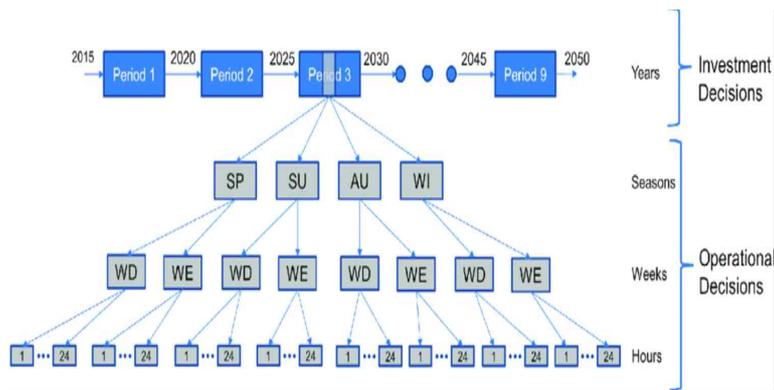
<그림 부록1-3> 발전부문 RES

1.4 모형 최적화 단위

□ 전력공급과 소비의 동시적 특성 반영을 위하여, 수요공급계약은 시간 단위로, 설비투자에는 총 기간에 걸친 총비용이 연간단위로 최소화되도록 설계하였다. 계절별(4), 주중주말별(2), 시간대별(24) 조합으로 총 192개 타임 슬라이스(timeslice) 구간을 도출하여 해당 단위의 수요와 공급이 충족되도록 구현함



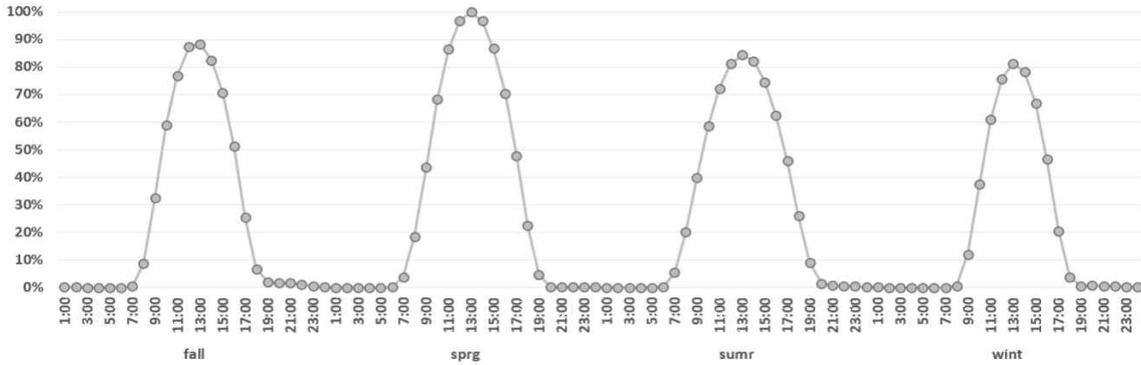
<그림 부록1-4> 192개 시간별 전력수요



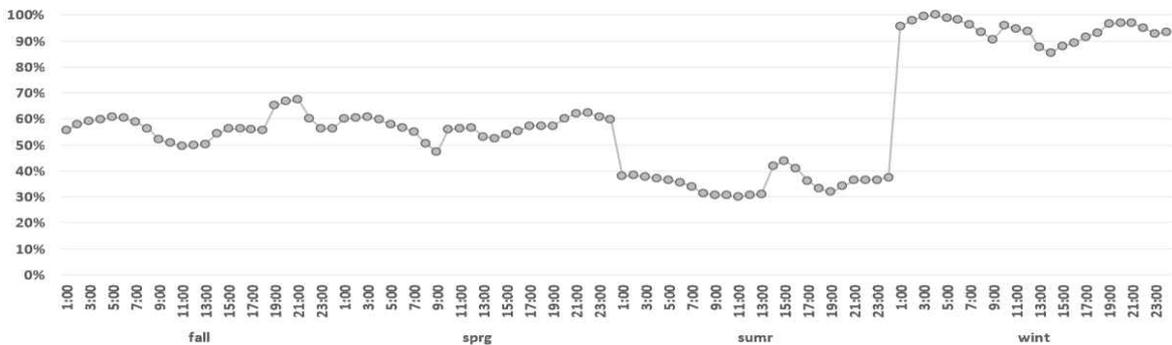
<그림 부록1-5> 투자와 발전소 운영 결정

1.5 METER-21 기술특성 구현 사항

- 2017-2020년 전력거래소의 제주도의 태양광 육상풍력 발전의 계절별 시간대별 평균적 발전실적을 바탕으로 타임 슬라이스의 계절, 시간대에 따른 급전불가능성전원의 발전 추이를 반영했다.

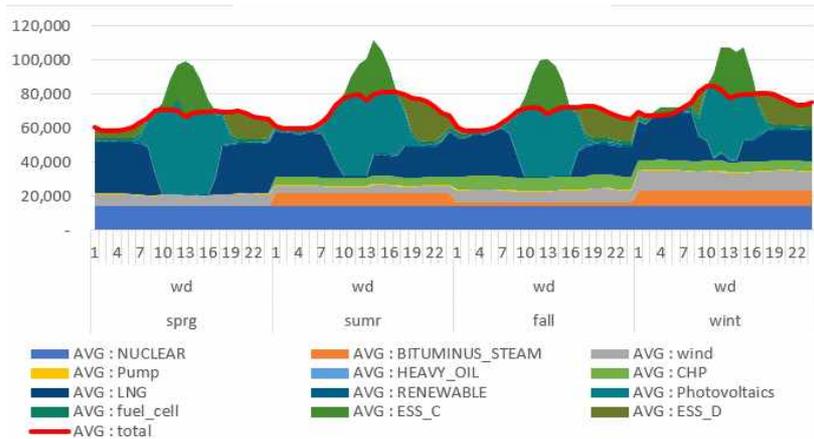


<그림 부록1-6> 태양광 계절, 시간별 발전량 예시



<그림 부록1-7> 풍력 계절, 시간별 발전량 예시

- 변동성 전원(esp. 태양광) 도입 비중 증가에 따른 시간대별 수요 초과 발전량 발생 시, 비용 최적화에 따라 ESS 기술 도입하여 재생에너지(태양광, 풍력)의 비중 증가에 따른 ESS 도입을 통해 계통비용의 일부 반영이 가능하다. 현재 ESS는 수요 대비 공급의 과잉/미달에 따라 하루 단위에서 충·방전하는 단기 저장장치로서, 향후 수소 및 암모니아 등의 화학에너지로 전환하여 저장하는 장기 저장기술을 반영할 예정이다.



<그림 부록1-8> 타임 슬라이스별 ESS 총·방전 예시

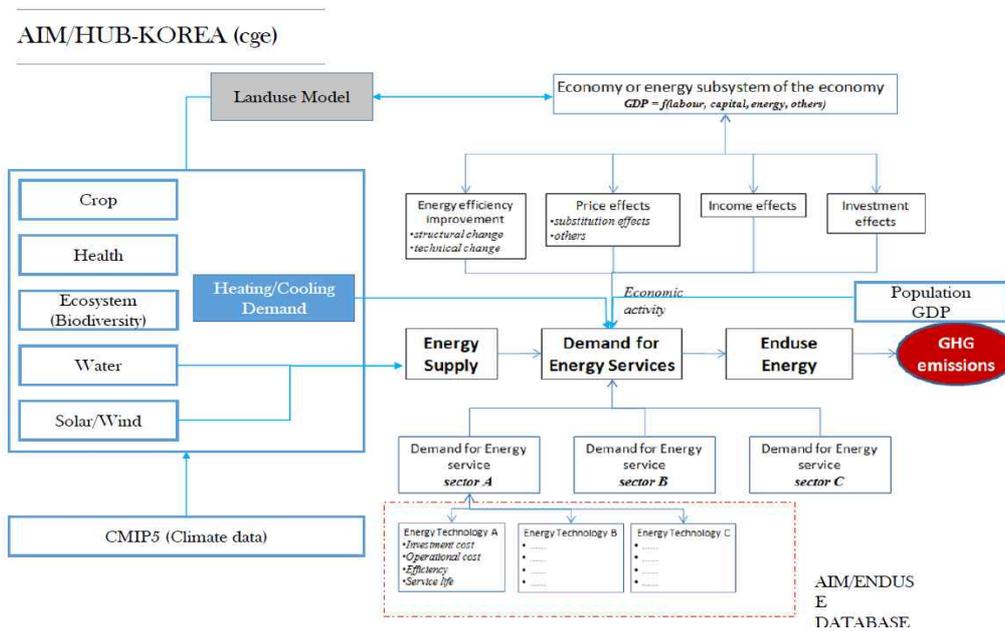
- 국가 탄소중립 시나리오 및 수소선도국가 비전에 따른 수소·암모니아 혼소 전원의 반영을 위해 석탄·가스 발전기의 선택적 혼소 운영을 구현하였다. 석탄·가스 발전기는 수소·암모니아 비용과 기존 석탄·가스 비용, 연료조합에 따라 탄소 비용을 고려하여 비용을 최소화하는 방향으로 연료조합을 선택할 수 있도록 반영하였다. 정부 제시안에 따라 수소-LNG, 암모니아·석탄 발전에 대하여 각 50%, 20% 혼소 기술을 반영해 두었으며, 추후 시나리오에 따라 다양한 혼수 비율 적용 또한 가능하다.
- 석탄발전은 최소 동일한 계절 내 연속발전이 가능하고 원자력발전 대상으로 연간단위 연속발전 제약을 가하는 발전원별 최소 연속운전시간(min up-time)을 반영하였다.
- 시간대별 발전기의 발전량 증감률을 일정 수준 이하로 제약하고 발전원별 유연성 반영이 가능한 Ramp-up/down rate를 반영하였다.
- 봄에 해당하는 타임 슬라이스에 대하여 봄철 석탄발전소 가동중지 확대정책에 따른 석탄 가동률 상한 제약을 반영하였다.
- 이외 계획 및 비계획 정지율에 따른 연간 최대발전량 제약, 송배전손실률 및 소내소비율에 따른 전력 손실 반영, 시장 잠재량에 따른 신재생에너지 최대 설비용량 제약 등이 있다.

1.6 주요 입력 데이터

- 전통에너지원 및 신재생에너지 기술 DB는 다음과 같이 구축하였다. 전통에너지원 원자력, 석탄, 가스복합, 유류 및 내연력, 열병합(석탄, LNG, 유류), CCGT-CCS, COAL-CCS는 전력통계시스템(EPSS)와 한국전력통계연보 등 정부공식 통계량을 주로 활용하였다.
- 신재생에너지 태양광, 육·해상풍력, 연료전지, 수소가스터빈, 수소·암모니아 혼소, 바이오, 조력, 수력, 소수력, 양수, ESS(리튬이온배터리)는 IRENA, NREL, BNEF, 2018-2021 한국전력통계연보, 수소경제활성화로드맵, 수소경제로드맵, 2020 신재생에너지백서 등 국내외 선행연구 및 보고서를 활용하여 구축하였다. 이중 태양광, 육·해상풍력, 연료전지, 수소가스터빈, ESS는 향후 기술진보로 인한 비용하락을 고려하여 연도별 투자비용, 운영비용 전망치를 사용하였다.

2. AIMHUB 모형

- AIMHUB는 에너지 부문의 상세한 부문별 대표성을 다루는 계산 가능한 일반 균형 모델
- 에너지 수요는 산업 활동의 생산 기능과 가정 부문의 소비 기능에 의해 결정됨
- AIMHUB-Korea는 글로벌 모델 부문에서 한국의 상황 조건을 특화한 모델임
- 현재는 장기 저탄소 경로의 실현가능성 분석과 완화 및 영향의 시너지와 트레이드 오프를 분석하는 형태의 모델로 특화되고 있음



<그림 부록2-1> AIM/HUB-KOREA 모형 구조

3. GCAM-KAIST 1.0 모형

3.1 모형 개요

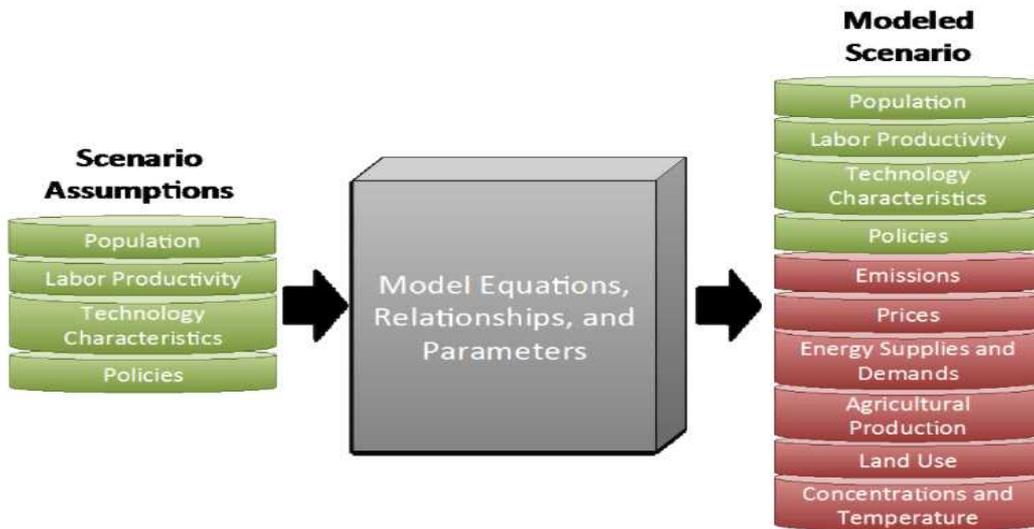
- 본 연구에 사용되는 GCAM-KAIST 1.0 모형은 GCAM v5.2 기본 모형을 바탕으로 한국의 사회경제발전(우리나라 인구, 소득발전), 기후 에너지 정책 (전력 기본계획, 에너지 기본 계획, 부문별 정책), 기술현황 (우리나라의 기술 구분, 비용, 성능)을 반영한 확장형 모형이다. 본 모형 소개 자료에서는 GCAM v5.2의 전체적인 모형 설명과 GCAM v5.2를 확장한 모형인 GCAM-KAIST1.0 모형에 관해 설명한다.
- 본 연구에 사용되는 GCAM 모형의 경우 다른 통합 평가 모형과 비교할 때 첫 번째로, 부문 간 일관성 있는 전망 가능(가격 정보, 감축 잠재량 등)한 부분균형 모형(partial equilibrium model) 이고 두 번째로, 최종에너지 수요의 상세한 기술묘사가 가능한 통합 평가 모형이다. 마지막으로 한국이 독립적인 지역으로 구분되어 있어 한국 시장 실정을 반영할 수 있다는 장점이 있다.
- GCAM 기본 모형의 경우 발전부문, 산업부문, 수송부문의 입력 전제, 기술표현의 한계로 탄소중립에 필요한 부문별 전력수요 및 에너지 소비를 적절하게 전망하지 못하는 한계가 있다. GCAM 기본 모형을 GCAM-KAIST 모형으로 확장하여 발전부문, 산업부문, 수송부문의 한계를 개선함과 동시에 우리나라 사회경제발전, 정책, 기술현황에 맞는 모수(Parameter)를 입력하여 우리나라 실정에 맞는 모형을 개발했다.

3.2 GCAM 기본 모형 소개

- GCAM(Global Change Analysis Model)은 미국 PNNL/JGCRI에서 개발되었고, IPCC 보고서를 비롯한 주요 기후정책 평가 연구에 지속해서 활용되어 온 대표적인 에너지-경제-환경모형이다. 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-토지 사용-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 연료와 기술의 경쟁, 그리고 지역 간 에너지 재화의 거래를 반영하고 있다. GCAM은 전 세계를 32개의 지역으로 구분하고 있는데, 우리나라는 32개 지역 중 하나의 단일지역으로 구분되어 있다.

3.2.1 통합 다중 섹터 모델링

- GCAM은 인간과 지구 시스템 dynamics를 탐구하는 통합된 다중 부문 모델로 알려져 있다. GCAM 모델의 역할은 인간 및 물리적 지구 시스템을 한곳으로 모아 시스템 상호작용을 구현하고 과학적 통찰력을 제공한다.
- GCAM 모형을 통해 가정 시나리오를 탐색하여 가능한 미래 조건의 의미를 정량화할 수 있다. 이러한 결과는 미래에 대한 예측이 아닌, 미래 조건에 대한 다양한 가정의 잠재적 영향을 분석하는 방법이다. GCAM은 주요 가정치 (예: 인구, 경제 활동, 기술 및 정책)에 대한 외부 “시나리오 가정“을 반영하고 과학적 또는 의사 결정 관련 결과 (예: 상품 가격, 에너지 사용, 토지)에 대해 시나리오의 결과를 평가한다.

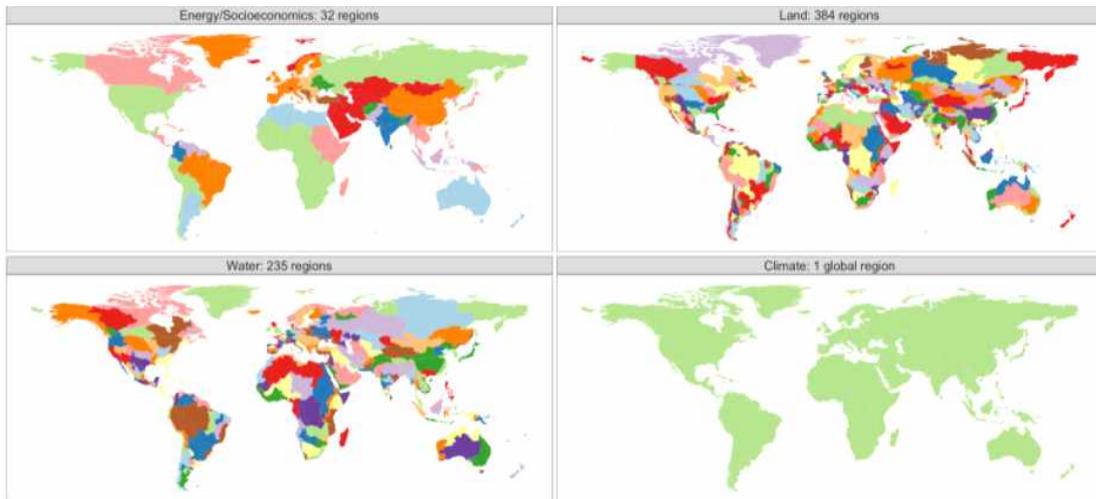


<그림 부록3-1> 시나리오를 생성하는 방식에 대한 개념 다이어그램

3.2.2 GCAM v5.2의 통합 개요

- 거시경제: GCAM 모듈은 인구 및 노동 생산성 가정을 입력으로 사용하고 다른 모듈에 대한 입력으로 지역 국내 총생산 및 지역 인구를 생성한다. 거시경제는 GCAM에서 경제 활동의 규모를 설정한다.
- 에너지시스템: 에너지시스템은 에너지 공급 소스, 에너지 변환, 여객 및 화물 운송, 산업 에너지 사용, 주거 및 상업용 에너지 서비스 수요와 같은 에너지 서비스 수요를 자세히 나타낸다. 이 모듈은 온실가스, 에어로졸 및 기타 수명이 짧은 종의 배출뿐만 아니라 에너지 형태의 수요 및 공급을 도출한다. 에너지시스템은 농업 및 토지 시스템에서 바이오 에너지를 요구하여 반영한다.
- 농업 및 토지 시스템: 농업, 토지 시스템은 토지 사용, 탄소 축적량 및 순 배출량, 바이오 에너지, 식품, 섬유 및 임산물 생산에 대한 정보를 제공한다. 수요는 인구 규모, 소득 수준 및 상품 가격에 의해 결정된다. 모듈은 농업 및 기타 상품의 수요와 공급, 토지 및 온실가스, 에어로졸 배출을 보고한다. 바이오 에너지에 대한 수요는 에너지 부문에서 파생된 수요이다.
- 물 시스템: 물 모듈은 에너지, 농업 및 도시 사용을 위한 취수 및 물 소비에 대한 정보를 제공한다.

- 물리적 지구 시스템: GCAM의 물리적 지구 시스템은 다른 모듈에서 제공하는 배출량, 해양 산성도 및 기후를 기반으로 대기 구성에 대한 정보를 제공하는 물리적 지구 시스템 에뮬레이터인 Hector³⁾를 사용하여 모델링이 된다.
- GCAM v5.2에서 탐색된 모델의 정확한 구조(예: 지역 및 기술의 수)는 데이터 기반이다. GCAM v5.2는 전 세계를 대표하지만 이러한 서로 다른 시스템 각각에 대해 서로 다른 수준의 해상도로 구성한다.
- GCAM의 현재 사용 가능한 버전에서 에너지 경제 시스템은 전 세계적으로 32개 지역에서 작동하고, 토지는 300개 이상의 하위 지역으로 나뉘며, 물은 전 세계 233개 분지에 대해 추적된다. 지구 시스템 모듈은 글로벌 규모로 작동한다.

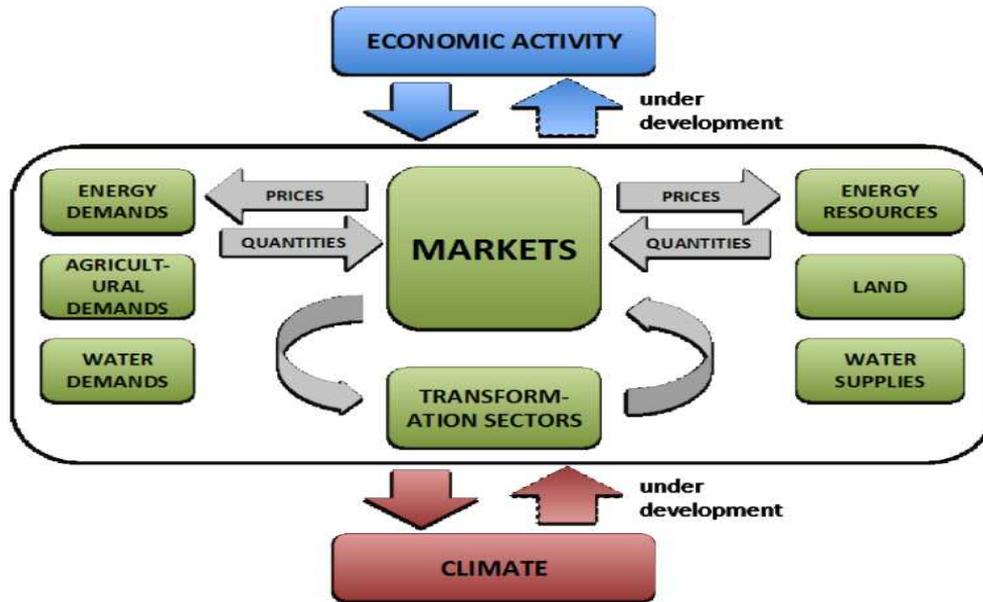


<그림 부록3-2> GCAM 지역 도식도

3.2.3 GCAM v5.2 구동의 개념적 개략도 설명

- GCAM은 동적 재귀 모델 (dynamic recursive model)이다. 즉, 의사 결정자는 오늘 결정을 내릴 때 미래를 알 수 없다. (반대로, 시간 간 최적화 모델은 에이전트가 의사 결정을 내릴 때 전체 미래를 확실히 알고 있다고 가정한다.) 각 기간을 해결(Solve)한 후 모델은 해당 기간에 내린 결정의 결과를 포함하여 미래의 결과를 내릴 때 사용한다. GCAM v5.2는 일반적으로 2010으로 시작하여 5년 단위로 운영된다. 그러나 이 모델은 사용자 매개변수를 통해 다양한 시간 해상도에서 작동할 수 있는 유연성을 가지고 있다.
- GCAM 모델의 에이전트는 자신의 이익을 극대화하기 위해 행동한다고 가정하지만, 모델 전체는 최적화 계산을 수행하지 않을 수도 있다. GCAM의 에이전트들은 “당시에는 좋은 생각처럼 보였지만” 더 큰 사회적 관점에서 최적이지 않은 결정을 내릴 수 있으며, 의사 결정자는 의사 결정권자가 앞으로 일어날 일을 알았다더라면 하지 않았을 결정을 내릴 수 있다. 예를 들어, 모델의 행위자는 미래의 기후 규제에 대해 알지 못하며 그러한 정책을 시행하기 몇 년 전에 화석연료를 기반한 발전소를 건설할 수 있다.

3) Hector 모형은 본질적으로 즉각 실행되는 동시에 중요한 지구 시스템 프로세스를 나타낸다.
출처: <https://jgcri.github.io/gcam-doc/hector.html>



<그림 부록3-3> GCAM v5.2 구동의 개념적 개략도

3.2.4 GCAM v5.2에 대한 주요 시나리오 가정

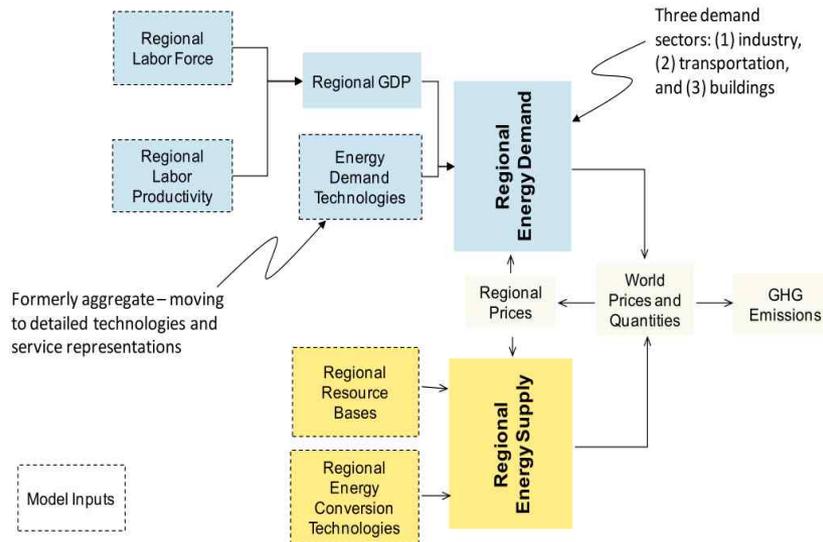
- 사회경제학: 인구, 노동 참여 및 노동 생산성
- 에너지 기술 특성: 비용, 성능, 물 요구 사항
- 농업 기술 특성: 예: 작물 수확량, 비용, 탄소 함량, 물 요구량, 비료 요구량
- 에너지 및 기타 자원: 예: 화석 연료, 풍력, 태양열, 우라늄, 지하수
- 정책: 배출 제한, 재생 가능한 포트폴리오 표준

3.2.5 GCAM v5.2의 주요 시나리오 결과

- 에너지시스템: 에너지시스템 전체의 에너지 수요, 흐름, 기술 배치 및 가격.
- 농업 및 토지 이용: 모든 농산물 및 임산물의 가격 및 공급, 토지 이용 및 토지 이용 변경.
- 물: 에너지 및 가정용 물 수요 및 공급
- 배출: 24개의 온실가스: CO₂, CH₄, N₂O, halocarbons, carbonaceous aerosols, reactive gases, sulfur dioxide.

3.3 GCAM 에너지시스템 모형의 구조

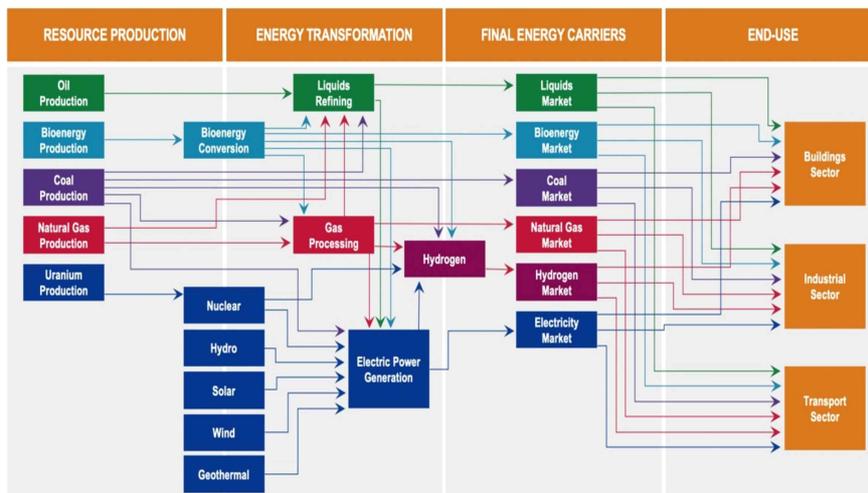
□ 에너지시스템 모형은 경제시스템과 경성연결(hard-linkage)로 연결되어 건물, 산업 및 수송의 세 최종수요 부문의 에너지 수요를 맞추기 위한 에너지 생산 및 전환과정을 상세히 모형화하고 있다. 생산 및 채굴 가능한 에너지와 관련한 물리적 제약은 지역별 차이를 모두 고려하고 있으며, 화석연료, 재생에너지, 원자력, CCS, 폐기물 등의 에너지원 및 이들의 부산물 또한 모두 명시적으로 표현하고 있다.



<그림 부록3-4> GCAM 에너지시스템 모형의 구조

3.3.1 에너지시스템의 전체 구조

□ 에너지시스템의 전체 구조는 에너지 자원, 에너지 변환 및 최종에너지 수요의 세 가지 주요 요소로 구성되어 있다고 생각할 수 있다. 또한, 에너지 상품의 국제 무역을 추적한다. GCAM의 전체 구조와 일관되게 GCAM의 모든 다른 요소는 예를 들어 전기의 시장 가격과 물리적 흐름을 통해 상호 작용한다. 기술 선택은 개별 선택 방법을 사용하여 가격을 기반으로 한다.



<그림 부록3-5> GCAM v5.2의 주요 에너지 경로 개략도

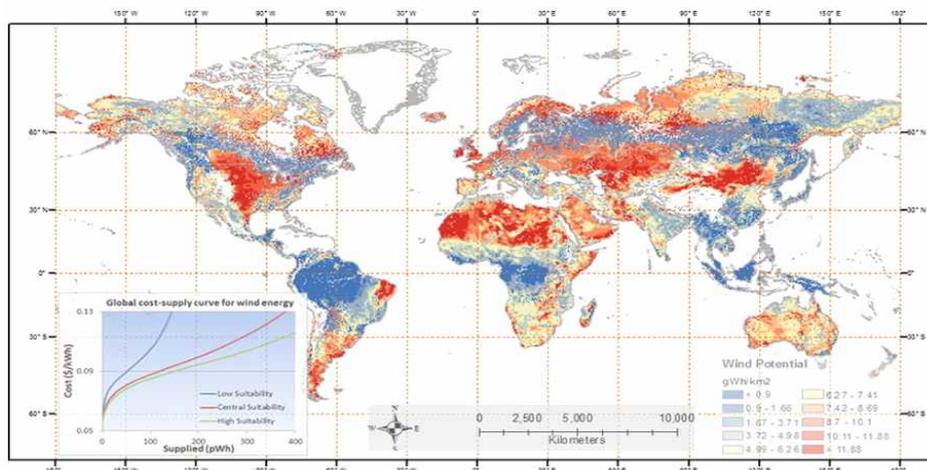
3.3.2 에너지 자원 분류 (1차 에너지)

3.3.2.1 고갈 가능한 자원

- GCAM은 차등 자원 공급 곡선 (Graded resource supply curves)을 사용하여 고갈 가능한 자원 (석유, 비전통 석유, 천연가스, 석탄 및 우라늄)을 모형화한다. 화석 자원은 “자원/비축” 모델을 사용하여 공급 곡선에서 생산된다. 이 접근 방식에서는 자원의 시장 가격이 상승함에 따라 공급 곡선을 찾아 사용 가능한 추가 수량을 결정하고 해당 수량의 “자원”을 “예비 자원”으로 분류된다.

3.3.2.2 재생 가능한 자원

- GCAM의 재생 가능한 자원에는 풍력, 태양열, 지열, 수력 및 바이오매스가 포함된다. 일부 지역에는 “전통적인 바이오매스” 자원도 할당된다. 가용한 자원이 명시적으로 추적되는 고갈 가능한 자원과 달리 GCAM의 재생 가능한 자원 수량은 항상 연간 흐름으로 표시된다. 풍력, 태양열, 지열 및 수력 발전은 전기 생산을 위한 옵션으로만 간주하며 지역 간에 거래되지 않는다. (참고 자료: <https://jgcri.github.io/gcam-doc/v5.2/energy.html>)

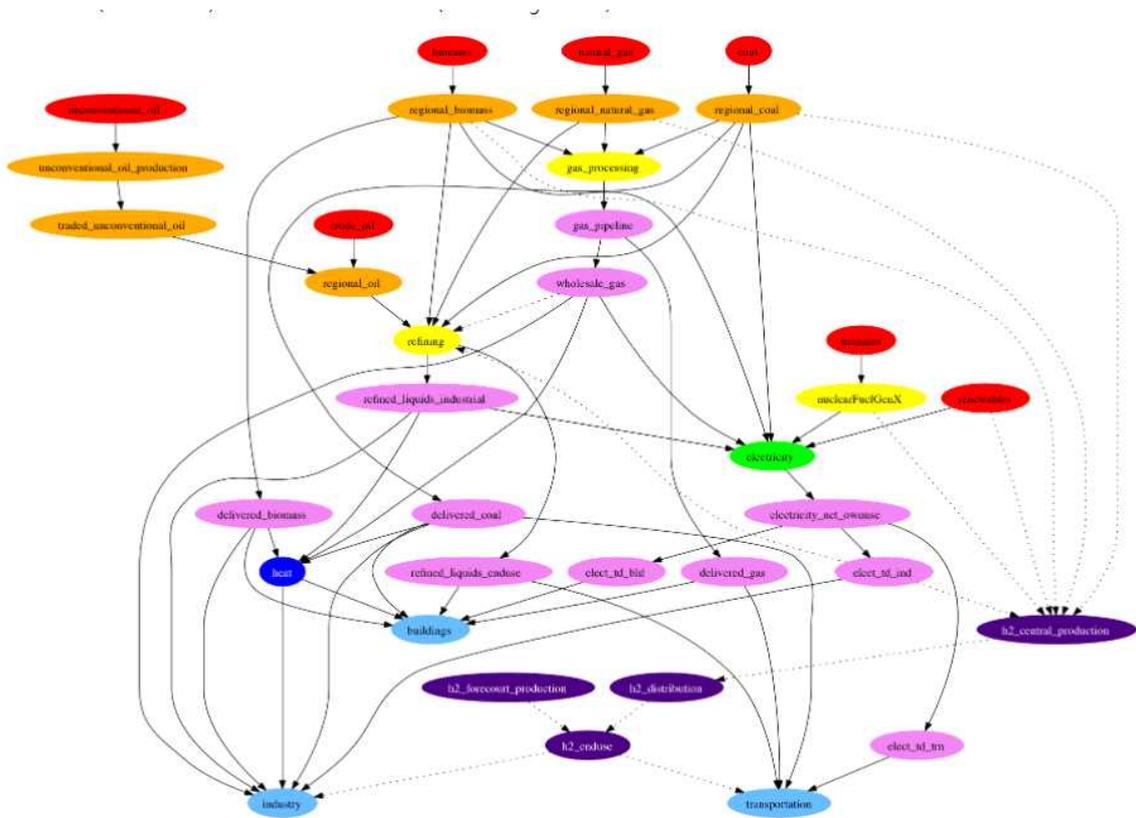


<그림 부록3-6> GCAM 풍력 발전 글로벌 그리드 잠재량 예시

3.4 에너지 변환

- 일반적으로 GCAM의 에너지 변환 부문은 에너지 자원과 최종수요 사이의 모든 공급 부문으로 구성되며, 최종수요는 최종에너지 키워드 “건물”, “산업” 또는 “운송”으로 식별된다.
- 에너지 변환 부문은 자원 또는 기타 에너지 변환 부문에서 공급되는 에너지 상품을 소비하고, 다른 에너지 변환 부문 또는 최종수요 부문에서 소비되는 에너지 상품을 생산한다. 이 범주는 또한 에너지 상품의 부문 간 운송에서 비용 인상 및 효율성 손실을 명시적으로 추적하는 것을 목적으로 하는 다수의 “Pass-through” 공급 부문을 포함하는 것으로 간주한다. 이 문서에서 강조된 주요 에너지 변환 부문은 전기, 정제, 가스 처리, 수소 생산 및 지역 서비스이다. 에너지 변환 부문에서 산출 단위와 투입 단위는 EJ(연간)이고 가격 단위는 산출 GJ당 1975\$이며 하위분류 부문은 다른 연료 (또는 공급원료) 간의 경쟁에 사용된다. 하위 부문 간의 경쟁은 선택 기능에 자세히 설명된 보정된 로짓 공유 기능에 따라 발생한다. 하위 부문 내에는 기술이 일반적으로 다른 효율성

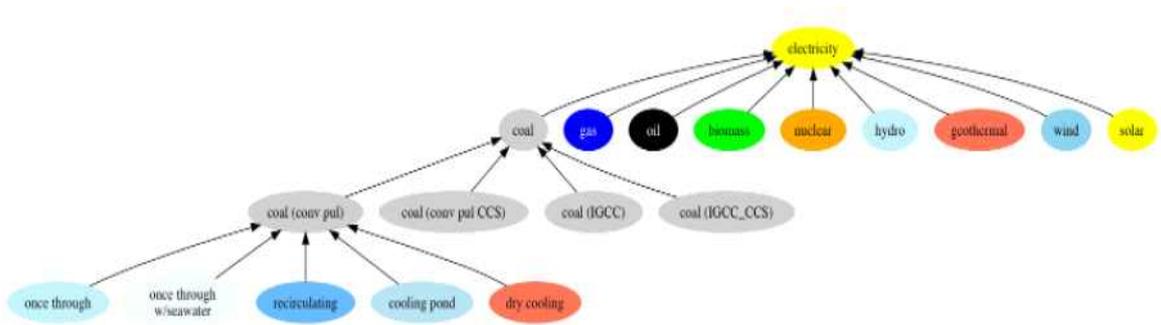
수준 및/또는 이산화탄소 포집 및 저장(CCS)의 적용을 나타내는 여러 경쟁 기술이 있을 수 있다. 위에 표시된 에너지시스템의 개략도에서 에너지 변환 및 분배 부문은 자원(빨간색)과 최종수요(하늘색)를 제외한 모든 부문을 포함한다.



<그림 부록3-7> GCAM 지역별 에너지시스템 개략도

3.4.1 전기

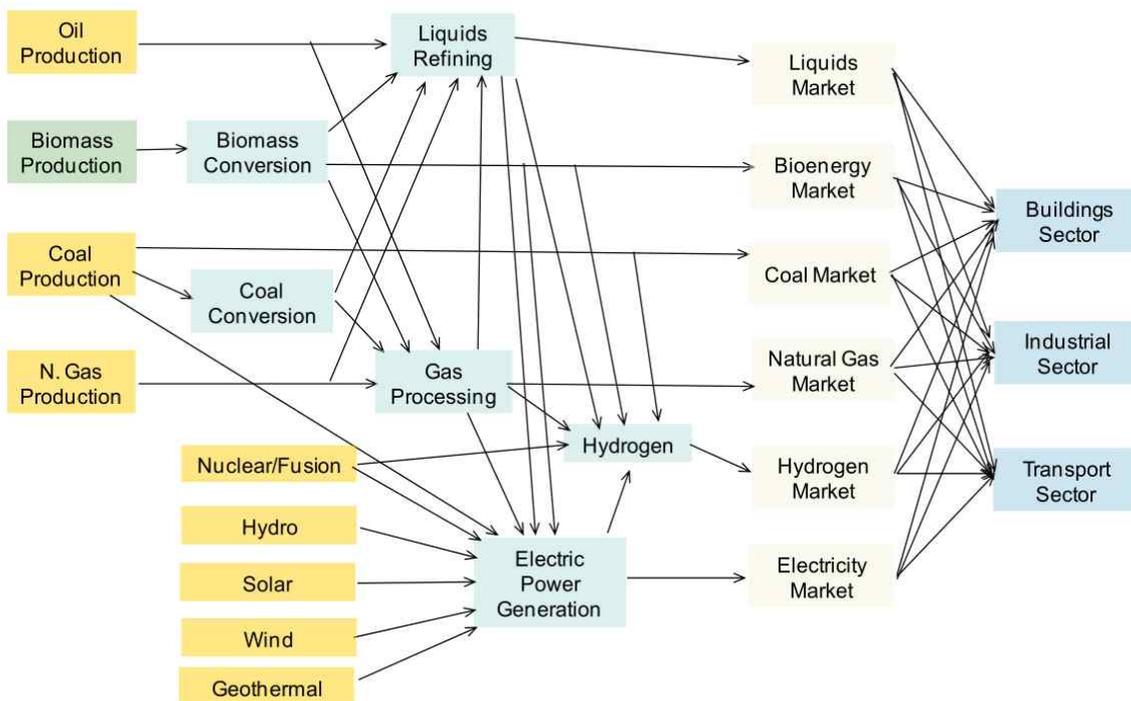
- GCAM 전기부문은 1차 연료 (예: 석탄, 가스, 석유, 바이오 에너지)를 전기로 전환하는 모델이다. 대부분 연료에 대해 GCAM에는 여러 가지 다른 기술 옵션 (예: 석탄 IGCC 등)이 포함됩니다. 개별 기술은 기술적 특성(투입물에서 제품 생산의 변환 효율성), 투입물 비용 및 산출물 가격을 기반으로 시장 점유율을 놓고 경쟁한다. 어떤 기간의 기술 비용은 (1) 외생적으로 지정된 비에너지 비용, (2) 내생적으로 계산된 연료 비용, (3) 기후정책에 의해 결정된 배출 비용에 따라 달라진다. 첫 번째 항인 비에너지 비용은 장비의 수명 동안 발생하는 자본, 고정 및 변동 O&M 비용 (연료 또는 전기 비용 제외)을 나타낸다.
- 전기 기술의 경우 GCAM은 이러한 각 변수를 반영하여 모델 내에서 균등화된 에너지 비용을 계산한다. 예를 들어, 석탄 화력 발전소의 비에너지 비용은 야간 자본 비용, 고정 및 변동 운영의 합계로 계산된다. 두 번째 항인 연료 또는 전기 비용은 각 출력 단위를 생산하는 데 필요한 연료 또는 전기의 양과 연료 또는 전기 비용을 결정하는 기술의 지정된 효율성에 따라 다르다. 전기부문의 중첩구조는 하나의 대표적인 기술을 중심으로 아래 그림과 같다



<그림 부록3-8> GCAM 전기부문의 중첩구조 개략도

3.4.2 GCAM 모형의 기술표현 및 도입 방식

- GCAM 모형의 에너지시스템을 구성하는 모든 부문에서, 모든 기술은 시장 점유율에 대하여 경쟁한다. 즉, 각 기술의 시장 점유율은 로짓 선택구조(logit choice formulation)에 따라 결정되며, 이에 따라 선형최적화 모형 등에서 발생하는 모서리해 (corner solution) 또는 최저 비용 기술의 공급 독점(winner-takes-it-all) 이슈를 회피할 수 있는 특징을 가지고 있다.
- GCAM 모형에서는 개별 기술의 변화를 외생적으로 적용하고 있으며, 이에 따라 기술 비용은 연료비용, 비에너지 비용 및 에너지 전환효율에 대한 모수를 입력받는 형식으로 모형이 구동된다. 이에 따라 에너지 비용의 경우 기준년도 이후 최종 소비부문의 시장 균형 변화에 따라 내생적으로 변화하나, 비에너지 비용과 에너지 효율의 경우 여전히 외생적 입력값에 의존하여 변화하는 것으로 구현된다



<그림 부록3-9> GCAM 모형의 기준년도에 적용된 기술

<표 부록3-1> GCAM 모형의 기준년도에 적용된 원자력에 관한 기술

Reactor class	Gen II	Gen III	Gen III
	Legacy	2005	2095
Burnup (GWd/MTHM)	45	50	50
Enrichment (%)	4.08%	4.51%	4.51%
Uranium Ore Cost	Endogenous	Endogenous	Endogenous
Conversion Cost (\$/kgU)	10	10	10
Enrichment Cost (\$/SWU)	105	105	105
Fuel Fabrication Cost (\$/kgHM)	240	240	240
Interim Storage Cost (\$/kgHM)	300	300	300
Waste Disposal Cost (\$/kgHM)	548	548	548
Capital Overnight (\$/kW)	Legacy	2,300	1,800
O&M Fixed (\$/kW)	Legacy	64	64
O&M Variable (mills/kWh)	Legacy	1.8	1.8
Efficiency (%)	33%	34%	34%
Capacity Factor	0.90	0.90	0.90
Lifetime (years)	60	60	60
Note: \$ year is 2005			
Ref: Advanced Fuel Cycle Cost Basis 2007, INL.			

3.4.3 외생적 기술변화의 활용

□ GCAM 모형을 활용한 Clarke et al. (2009)의 연구에서는 12개 기술 부문 전기차(Electric Vehicles), 연료전지차(Fuel Cell Vehicles), 기타 수송(Other), 건물(Buildings), 산업(Industry), 탄소포집 및 저장(CCS), 농업생산성(Agricultural Productivity), 수소 생산(Hydrogen Production), 풍력(Wind Power), 태양광(Solar Power), 원자력(Nuclear Fission) 및 지열(Geothermal)에 대하여 10개 기술 시나리오를 생성 및 활용하고 있으며, 시나리오는 각 기술부문의 수준을 활용 가능 여부(availability), 기준수준(reference) 또는 진보수준(advanced)의 세 가지로 표현하고 있다.

<표 부록3-2> GCAM 모형 시나리오(열)로 적용된 기술(행) 가정의 조합

Scenario & Naming Convention	Reference (Ref)	Nuclear Reference (Nuc Ref)	Nuclear Advanced (Nuc Adv)	CCS (CCS)	Bio and CCS (BioCCS)	Renewables (RE)	End Use (EE)	End Use & Renewables (EERE)	Hydrogen & Supply (Supply)	Advanced (Adv)
Transportation: Electric Vehicles	Reference	Reference	Reference	Reference	Reference	Reference	Advanced	Advanced	Reference	Advanced
Transportation: Fuel Cell Vehicles	Reference	Reference	Reference	Reference	Reference	Reference	Advanced	Advanced	Advanced	Advanced
Transportation: Other	Reference	Reference	Reference	Reference	Reference	Reference	Advanced	Advanced	Reference	Advanced
Buildings	Reference	Reference	Reference	Reference	Reference	Reference	Advanced	Advanced	Reference	Advanced
Industry	Reference	Reference	Reference	Reference	Reference	Reference	Advanced	Advanced	Reference	Advanced
Electricity and Hydrogen CCS	No CCS	No CCS	No CCS	Advanced	Advanced	No CCS	No CCS	No CCS	Advanced	Advanced
Agricultural Productivity	Reference	Reference	Reference	Reference	Advanced	Advanced	Reference	Advanced	Advanced	Advanced
Hydrogen Production	Reference	Reference	Reference	Reference	Reference	Reference	Reference	Reference	Advanced	Advanced
Wind Power	Reference	Reference	Reference	Reference	Reference	Advanced	Reference	Advanced	Advanced	Advanced
Solar Power	Reference	Reference	Reference	Reference	Reference	Advanced	Reference	Advanced	Advanced	Advanced
Nuclear Fission	No New Nuclear	Reference	Advanced	No New Nuclear	No New Nuclear	No New Nuclear	No New Nuclear	No New Nuclear	Advanced	Advanced
Geothermal	Reference	Reference	Reference	Reference	Reference	Advanced	Reference	Advanced	Advanced	Advanced

□ 개별 기술의 수준(기준 또는 진보)에 따라 시점별로 투자비용의 감소 속도를 다르게 표현하고 있는데, 예를 들어 아래 표의 태양광 및 풍력의 경우, 기준 대비 진보수준에서의 단위 용량당 도입 비용(levelized)이 유의하게 적음을 확인할 수 있다. 특히, 태양광의 경우 지역별로 서로 다른 일사량(insolation)을 보이기 때문에, 평균 일사량에 의한 에너지 균등화 비용(LCOE; levelized cost of energy)을 지역별로 서로 다르게 적용하고 있다.

<표 부록3-3> 태양광 및 풍력 기술의 수준별 투자비용 가정

		Reference				Advanced		
		2005	2020	2050	2095	2020	2050	2095
Central PV								
Capital cost	\$/kW	6875	4525	2468	1758	3446	1381	947
O&M cost	\$/kW-yr	25	25	18	15	22	16	12
Storage cost adder	\$/kW	480	413	342	306	355	225	180
Rooftop PV								
Capital cost	\$/kW	9500	6278	3583	2793	4258	2246	1654
O&M cost	\$/kW-yr	100	50	30	20	30	20	15
CSP								
Capital cost	\$/kW	3004	2786	2397	1913	2219	1770	1413
O&M cost	\$/kW-yr	47	43	37	30	34	27	22
CSP with storage								
Capital cost	\$/kW	6008	5573	4795	3827	3731	2976	2375
O&M cost	\$/kW-yr	47	43	37	30	34	27	22
Wind								
Capital cost	\$/kW	1167	1124	1043	932	1082	931	743
O&M cost	\$/kW-yr	36	30	28	26	30	27	22
Storage cost adder	\$/kW	658	566	469	419	486	309	246

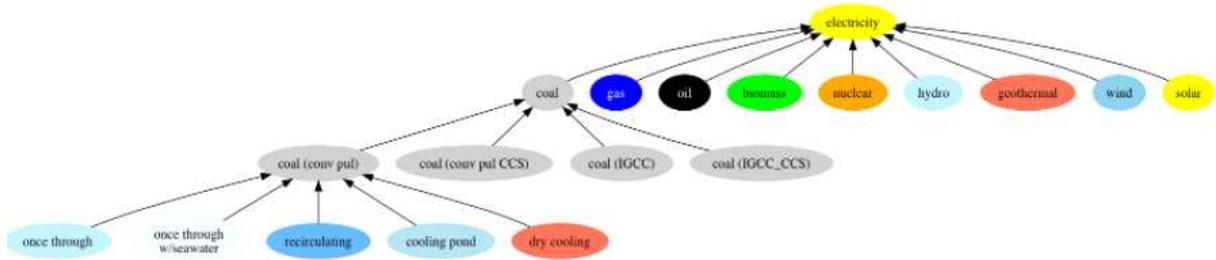
3.5 부문별 데이터 입력 전제와 최종에너지 기본 모형 구조

3.5.1 데이터 입력 전제

- GCAM은 우리나라, 미국, 중국, 유럽국가들을 포함한 32개 국가, 384개 지역, 235개 수역에 대해 모형화하고 있다.
- GCAM은 1971년부터 모형 초기화에 필요한 데이터 세트를 가지고 있으며, 현재 GCAM은 1990년, 2005년, 2010년, 2015년의 데이터를 사용하여 모형을 초기화하고 있다. GCAM은 기본적으로 과거 데이터값으로 IEA 에너지 밸런스를 사용함)
- 또한, GCAM v5.2 는 2015년부터 2100년까지의 미래를 5년 단위로 모델링하고 있으며 시간 해상도는 데이터 시스템에서 변경할 수 있다. 이와 더불어 GCAM에는 최종에너지 부문과 발전부문, 기타 전환 부문과 일차에너지 부문이 모두 연계된 데이터가 세분화되어 있어 부문별, 부문 간 기술 비용 변화에 따른 에너지 소비 변화를 일관성 있게 전망이 가능하다.

3.5.2 발전부문 모형 구조

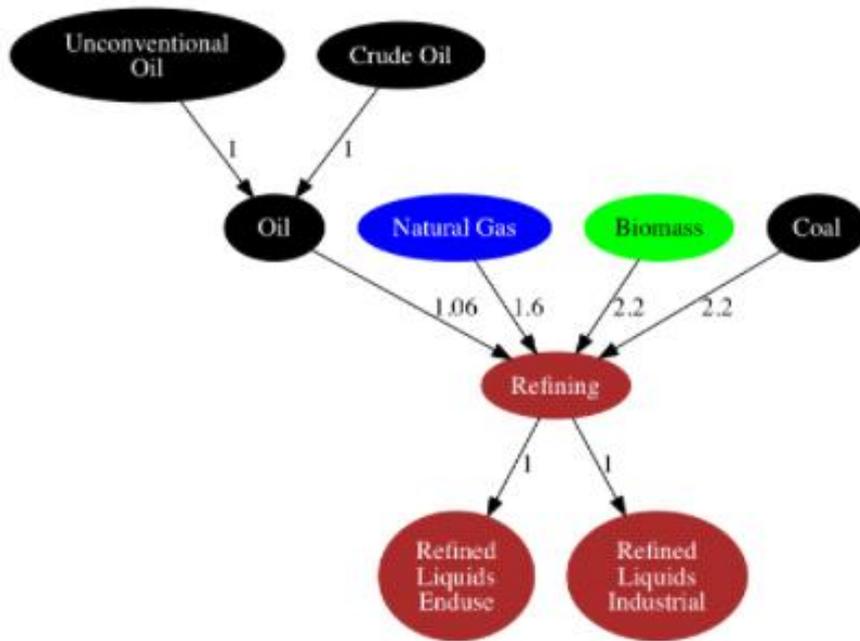
- GCAM에서 발전부문은 1차 에너지 (예시: 석탄, 가스, 석유, 바이오 에너지)를 전기로 전환하는 구조가 모형화 되어있다. 대부분 연료에서 GCAM은 몇 가지 다른 기술 옵션(예시: 석탄 - 미분탄 발전 (pulverized coal), 석탄 가스화 복합발전 (IGCC) 등)을 포함하고 있다.
- 개별 기술들은 기술특성과 에너지원의 비용, 최종에너지의 가격을 바탕으로 시장 점유율을 놓고 경쟁하는 것으로 구현된다.
- 기술 비용을 결정하는 변수: (1) 외부적으로 지정된 비에너지 비용, (2) 내생적으로 계산된 연료 비용 및 (3) 기후정책에 의해 결정된 배출 비용



<그림 부록3-10> GCAM 모형의 기준년도에 적용된 기술

3.5.3 정제 부문 모형 구조

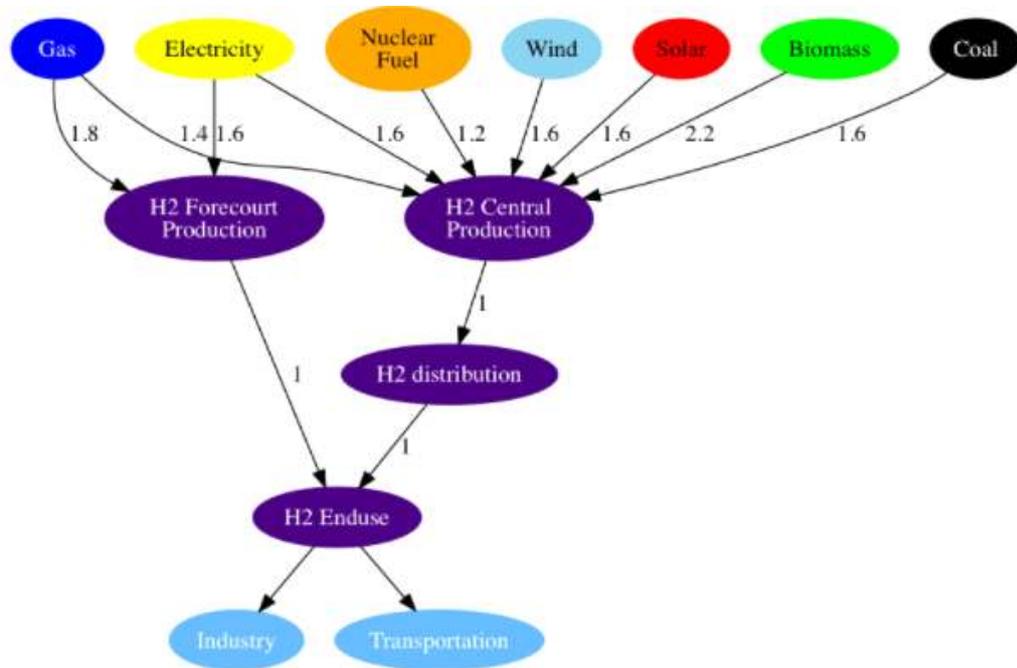
□ 정제 부문은 1차 에너지 형태를 액체 연료로 전환하는 것과 관련된 모든 에너지 입력, 배출 및 비용을 반영하고 있다. (정제 부문은 석유 정제, 바이오매스 액체, 기체에서 액체, 석탄에서 액체까지를 포함). 액체 연료에는 가솔린, 디젤, 등유, 에탄올 및 기타 많은 액체 탄화수소 연료가 포함되어 있고, 이에 대한 전체 에너지 흐름은 IEA 에너지밸런스를 따르고 있다.



<그림 부록3-11> GCAM 모형의 정제 부문 모형 구조

3.5.4 수소 부문 모형 구조

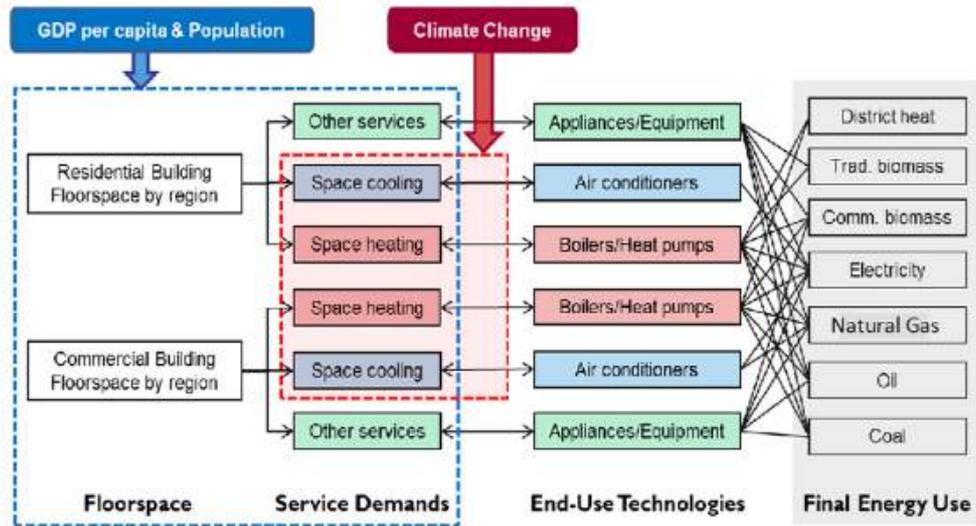
□ GCAM에서 수소 부문은 2개 생산 분야, 10개 생산기술로 표현되며 비용에는 균등화된 인프라 비용과 수소의 이동 비용까지 포함되어 있다. 수소의 생산은 수소 현장 생성(분산형) 및 중앙 생성(중앙집중형) 두 가지 영역에서 일어나며 천연가스, 석탄, 바이오매스, 원자력, 전기분해(전기, 바람, 태양)로부터 생산할 수 있다(석탄, 가스 바이오매스의 경우 CCS 기술도 포함하여 반영함). 재생에너지를 사용한 수전해 기술도 구현이 되어있어 수전해에 투입된 전력사용량도 추적이 가능하다.



<그림 부록3-12> GCAM 모형의 수소 부문 모형 구조

3.5.5 건물부문 모형 구조

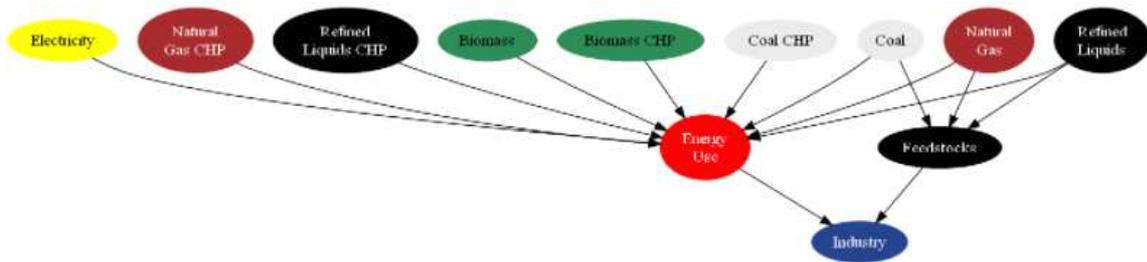
- GCAM에서는 건물부문을 주거 및 상업 부문으로 세분화하고 세 가지 종합 서비스(난방, 냉방 및 기타)를 모델링하고 있다. 각 지역 내에서 각 유형의 건물과 서비스는 에너지를 공급하는 연료의 서로 다른 조합으로 되어있다.
- 건물 에너지 사용의 변화: 1) 층 공간의 변화, 2) 층 공간 단위당 건물 서비스 수준, 3) 소비자의 연료 및 기술 선택, 4) 층 공간은 인구, 소득, 에너지 서비스의 평균 가격 및 외부적으로 지정된 포화 수준
- 추가로, GCAM에는 외생적으로 층 공간을 지정하는 옵션이 포함되어 있으며 층 공간 단위당 건물 서비스 수요 수준은 기후, 건물 셸 전도성, 경제성 및 포화 수준에 따라 달라진다.



<그림 부록3-13> GCAM 모형의 건물부문 모형 구조

3.5.6 산업부문 모형 구조

□ 일반적인 GCAM에서 시멘트 및 비료 산업을 제외하고 산업부문은 일반 에너지 서비스와 공급원료 서비스로 대표된다. 미국을 제외한 모든 지역에서 산업부문은 아래와 같이 일반 에너지 서비스 및 공급원료의 소비자로 나타난다. 에너지 사용 내에서 연료 간에 비용 기반 경쟁이 있지만 대체 탄력성은 낮다. 전기 열 병합 발전은 추적되며 산업부문(전기 제외)에서 소비하는 각 연료에 대한 별도의 기술 옵션으로 표시된다. 모든 시나리오에서 열 병합 발전의 배치는 미래 연료 및 전기 가격에 따라 달라진다.



<그림 부록3-14> GCAM 모형의 산업부문 모형 구조

3.5.7 수송부문 모형 구조

□ GCAM의 수송부문은 장거리 여객 항공 수송, 기타 여객 수송, 국제 화물 수송 및 기타 화물 수송의 네 가지 최종 서비스로 세분화되어 있다. 여객 수송부문은 도로와 철도, 그리고 그 아래에 버스와 경형 차량 등 운송 수단의 크기 등급 및 기술에 해당하는 구조로 구성되어 있다.

□ 수송 서비스에 대한 소비는 소득 수준과 각 서비스의 가격에 따라 달라지며 최종 서비스 수요는 최종적으로 서비스별 수송기술의 에너지원에 따라 경쟁하여 수송거리(pass-km, ton-km)로 나타난다. 또한, GCAM 수송부문은 수송 수단 간의 경쟁을 모형화할 수 있고 소득 증가와 시간 변화에 따라 수송 수단의 변화가 어떻게 나타나는지 전망할 수 있다. 비에너지 비용은 차량 자본 비용, 비에너지 운영 및 유지관리(O&M) 비용, 자금 조달 가정 및 연간 차량 이용률(연간 차량-km)에 대한 외생적 가정으로부터 각 수송기술에 대해 추정 가능하다.



<그림 부록3-15> GCAM 모형의 수송부문 결과 예시 (pass-km, ton-km)

3.6 GCAM-KAIST 1.0 모형

- 본 연구에서는 GCAM v.5.2를 근간으로 우리나라의 정책 및 기술현황을 반영해 한국형 통합평가모형(GCAM-KAIST1.0)을 구축했다. 2010년을 기준연도로 5년 단위로 2100년까지 시뮬레이션했고, 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 년에도 각 기술이 차지하는 점유율과 기술의 비용 및 성능 전망이 결정하게 되고, 이 과정에서 지역 및 시장 고유의 행태적 특성이 반영된다.
- GCAM-KAIST 1.0 모형에 반영되는 우리나라 인구가정은 통계청 전망을, 경제성장률은 산업연구원 전망을 활용하였다. GCAM 기본 모형에 반영되지 않은 국내 에너지시스템과 정책 현황을 반영하여 GCAM-KAIST 모형을 개발해 분석에 활용하였다.

3.6.1 사회경제적 가정치

<표 부록3-4> 인구 전망

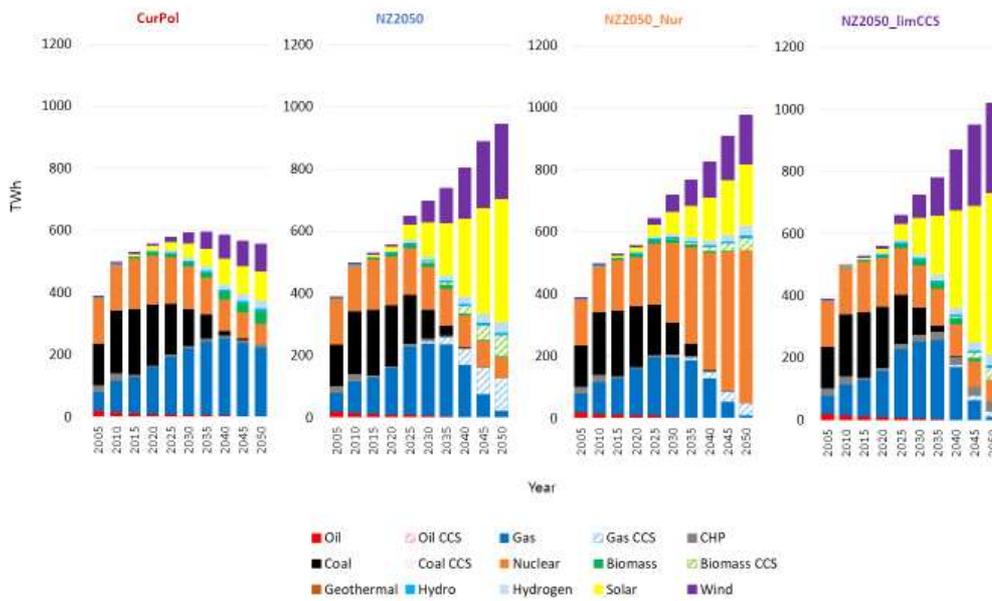
연도	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
천명	47,044	48,184	51,010	51,780	51,910	51,930	51,630	50,860	49,570	47,740

<표 부록3-5> GDP 전망

연도	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
GDP (2015십억원 USD)	875	10,70	1,240	1,438	1,631	1,801	1,938	2,062	2,187	2,286

3.6.2 발전부문

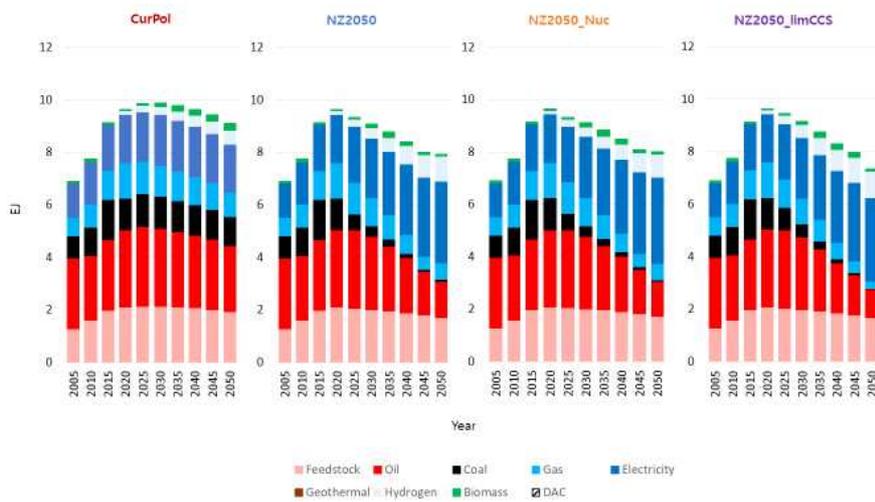
□ 발전부문의 중장기 에너지믹스 전망을 위해 제9차 전력수급기본계획과 제5차 신재생에너지 기본계획에 명시된 2034년까지의 발전설비계획과 발전량 전망을 반영하였다.



<그림 부록3-16> 발전부문 예시

3.6.3 최종에너지 부문

□ 에너지 중장기 수요와 각 부문 에너지 수요 전망을 위해 제3차 에너지기본계획에 명시된 최종에너지 부문(건물, 산업, 수송) 목표 수요를, 수송부문의 친환경 기술보급 전망을 위해 제4차 친환경 자동차 기본계획과 승용차와 화물차의 온실가스 배출 전망을 위해 자동차 평균 온실가스·연비 관리 제도상의 관리 목표를 추가로 반영하였다.



<그림 부록3-17> 최종에너지 소비 예시

3.6.4 우리나라의 기술현황

□ GCAM-KAIST 모형에 반영되는 우리나라 전력부문 발전기술 비용과 전망 값은 BNEF Korea 와 NREL의 비용과 전망 값을 기반으로 반영하였다.

<표 부록3-6> 기존 발전기술 비용

발전기술	단위	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
석탄	2015\$/K W	3,892	3,892	3,678	3,310	2,943	2,575	2,207	1,839	1,655	1,541
복합화력		883	883	817	817	817	817	817	817	817	817
원자력		6,268	6,268	6,268	6,154	55,963	5,823	5,665	5,506	5,352	5,157
유류		1,195	1,059	1,059	901	864	842	828	817	809	791

<표 부록3-7> 재생에너지 발전기술 비용

발전 기술	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
태양열 연계ES S		9,119	8,350	8,350	8,350	8,350	8,350	8,350	8,350	8,350	8,350
태양광		2,453	2,453	2,453	1,269	1,144	1,019	964	905	857	809
태양광 +ESS		5,014	4,079	2,943	2,567	2,122	1,835	1,729	1,618	1,519	1,420
지붕형 태양광		5,356	3,984	3,984	2,464	2,034	1,593	1,479	1,361	1,287	1,240
바이오 매스		4,557	4,285	4,164	3,962	3,862	3,814	3,752	3,689	3,434	3,546
육상풍 력		2,023	2,023	1,659	1,523	1,387	1,247	1,188	1,129	1,070	1,008
해상풍 력		5,517	3,678	3,807	2,921	2,479	2,108	1,791	1,519	1,291	1,100
풍력연 계ESS		3,369	3,285	3,285	2,818	2,361	2,064	1,953	1,843	1,732	1,618

3.6.5 공기 중 탄소 포집 기술의 비용

□ 또한, 직접 공기 포집 기술의 경제성을 반영하기 위해 외생적으로 가정된 기술 투자비용은 물론, 기술을 가동하기 위한 에너지 비용(천연가스 및 전기)을 모두 고려할 예정임. 이때, 반영되는 직접 공기 포집 기술의 비용은 Furman et al., (2020)에 기반하여 구성하였다.

<표 부록3-8> 공기 중 탄소 포집 기술 비용 가정

직접 공기 포집 기술	천연가스 (GJ/ tCO2)	전기 (GJ/ tCO2)	물 (m3/ tCO2)	비에너지 비용 (2020\$/ tCO2)
저 비용	5.3	1.3	4.7	197
고 비용	8.1	1.8	4.7	328

3.6.6 수송 수단별 기술 비용 전망

□ 수송 수단과 수송기술 구분은 기본적으로 UC Davis (2013)을 따랐으며 Eom et al., (2010) 및 Eom et al., (2012)의 우리나라 수송기술별 에너지 밀도, 수송률 가정을 적용하였다. 수송수단별 기술 비용은 우리나라 현실에 맞는 기술 비용을 기준으로 Bergero et al.,(2021)에 적용된 기술별 비용 감소 추세를 반영하였다.

<표 부록3-9> 승객 수송 비용 가정

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

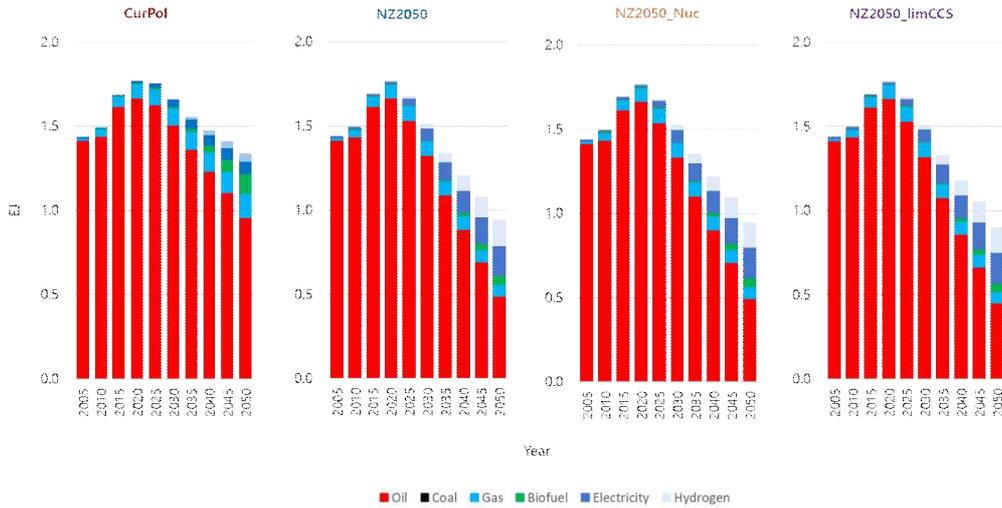
<표 부록3-10> 화물 수송 비용 가정

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

3.6.7 GCAM-KAIST 모형 수송부문 확장

□ GCAM 기본 모형에는 화물수송의 수소에너지 소비가 모형화 되어있지 않아 수송부문의 수소에너지 소비를 합리적으로 전망할 수 없는 단점이 있어, 정부의 계획을 반영하였다. 정부의 제4차 친환경자동차 기본계획(' 21.02)에 따르면 2020년 기준 수소트럭 0대에서 2025년까지 수소트럭 900대로 늘리기 위한 계획을 가지고 있다.

□ 이에, GCAM-KAIST 모형에는 화물수송의 수소에너지 소비 구조를 새로 개발 및 반영하여 수송부문의 합리적인 전력수요와 에너지 소비 전망을 도출하였다.



<그림 부록3-18> 수송부문 확장 결과 예시

3.7 참고 문헌

- Government of Korea. (2020). 2050 Carbon Neutral Strategy of the Republic of Korea: Towards a sustainable and green society (In Korean).
https://unfccc.int/sites/default/files/resource/LTS1_RKorea.pdf
- Ministry of Foreign Affairs of the People's Republic of China. (2021). Statement by H.E. Xi Jinping President of the People's Republic of China At the General Debate of the 75th Session of The United Nations General Assembly.
https://www.fmprc.gov.cn/mfa_eng/zxxx_662805/t1817098.shtml
- MOTIE, Ministry of Trade industry and Energy. (2021). Green Growth Strategy Through Achieving Carbon Neutrality in 2050 (In Korean).
https://www.meti.go.jp/english/policy/energy_environment/global_warming/ggs2050/pdf/ggs_full_en1013.pdf
- Government of Korea. (2020). Submission under the Paris Agreement The Republic of Korea's Update of its First Nationally Determined Contribution (In Korean).
https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Republic%20of%20Korea%20First/201230_ROK%27s%20Update%20of%20its%20First%20NDC_editorial%20change.pdf
- Jay Fuhrman, Andres F. Clarens, Haewon McJeon, Pralit Patel, Yang Ou, Scott C. Doney, . . . Shreekar Pradhan, The role of negative emissions in meeting China's 2060 carbon neutrality goal, Oxford Open Climate Change 1(1) (2021).<https://doi.org/10.1093/oxfclm/kgab004>
- KIET, Korea Institute for Industrial Economics & Trade. (2018). Analysis of long-term (2040) industrial structure outlook, (In Korean).
- BNEF, Bloomberg New Energy Finance, New Energy Outlook 2020 2020-04-28 - 1H 2020 LCOE Data (Online Database), 2020.
- NREL, National Renewable Energy Laboratory. (2019). 2019 Annual Technology Baseline ATB Cost and Performance Data for Electricity Generation Technologies.
<https://data.nrel.gov/submissions/115>
- Sung Jin Cho, A study on the power mix considering the economic and social costs of nuclear power generation, (2015).
<https://scienceon.kisti.re.kr/commons/util/originalView.do?cn=TRKO201600001675&dbt=TRKO&rn=>
- National Assembly budget office (In Korean). (2014). Issues and challenges of nuclear power generation cost.
https://www.nabo.go.kr/Sub/01Report/01_01_Board.jsp?bid=19&arg_id=5114&funcSUB=view
- Jay Fuhrman, Andres F. Clarens, Haewon McJeon, Pralit Patel, Yang Ou, Scott C. Doney, . . . Shreekar Pradhan, The role of negative emissions in meeting China's 2060 carbon neutrality goal, Oxford Open Climate Change 1(1) (2021). <https://doi.org/10.1093/oxfclm/kgab004>
- Gouri Shankar Mishra, Page Kyle, Jacob Teter, Geoffrey M. Morrison, Son Kim, Sonia Yeh. Transportation Module of Global Change Assessment Model (GCAM): Model Documentation (2013).
https://escholarship.org/content/qt8nk2c96d/qt8nk2c96d_noSplash_21a4d6e66ec6017be1d0b2b80a599f1a.pdf

- J. Eom, L. Schipper, Trends in passenger transport energy use in South Korea, *Energy Policy* 38(7) (2010) 3598–3607. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.02.037>
- J. Eom, L. Schipper, L. Thompson, We keep on truckin’: Trends in freight energy use and carbon emissions in 11 IEA countries, *Energy Policy* 45 (2012) 327–341. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.02.040>
- Bergero, Matthew Binsted, Chia-Wei Chao, Kuei-Tien Chou, Cheng-Cheng Wu, Yang Wei, . . . Haewon C. McJeon, An integrated assessment of a low coal low nuclear future energy system for Taiwan, *Energy and Climate Change* 2 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.egycc.2020.100022>
- Korea Energy Agency. (2020). Renewable Energy White Paper (In Korean). https://www.knrec.or.kr/pds/pds_read.aspx?no=326&searchfield=&searchword=&page=1
- Korea Photovoltaic Industry Association KOPIA. (2021). A plan to secure locations for each photovoltaic area to achieve carbon neutrality (In Korean). <https://m.etnews.com/20210827000104>
- National Assembly Budget Office (2017). Report on Area Required by Power Generation Source (In Korean). https://www.keei.re.kr/main.nsf/index.html?open&p=%2Fweb_keei%2Fd_dataroom.nsf%2FXML_Portal%2FFF224F16BAB48CFCC4925836C00837199&s=%3Fopendocument%26memucode%3DD01%26category%3D%25EC%2597%2590%25EB%2584%2588%25EC%25A7%2580%25EB%2589%25B4%25EC%258A%25A4
- MOTIE, Ministry of Trade industry and Energy. (2020). 5th Renewable Energy Basic Plan (In Korean). http://www.motie.go.kr/motie/ne/presse/press2/bbs/bbsView.do?bbs_cd_n=81&bbs_seq_n=163676
- MOTIE, Ministry of Trade industry and Energy. (2019). 3rd Basic Energy Plan (In Korean). http://www.motie.go.kr/motie/ne/presse/press2/bbs/bbsView.do?bbs_cd_n=81&bbs_seq_n=161753
- MOTIE, Ministry of Trade industry and Energy. (2021). 4th Eco-friendly Vehicle Basic Plan (In Korean). http://www.motie.go.kr/motie/ne/presse/press2/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=163830&bbs_cd_n=81¤tPage=1&search_key_n=&cate_n=1&dept_v=&search_val_v
- Ministry of Environment. (2020). The Corporate Average Fuel Economy, and GHG Emissions Management Program. <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>

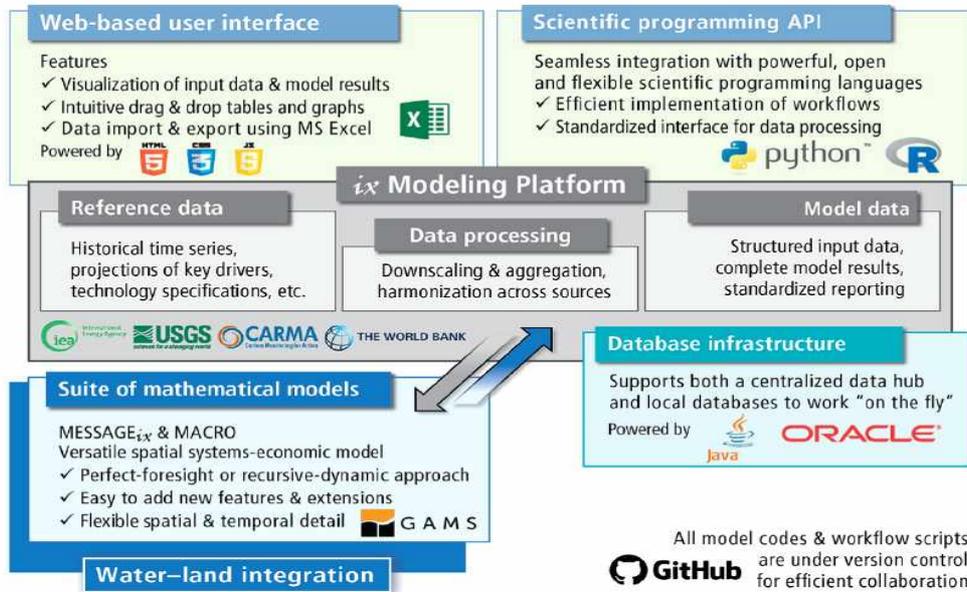
4. MESSAGEix 모형

4.1. MESSAGE 모형 개요

- MESSAGE(Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental impacts) 모형은 대표적인 상향식 에너지시스템 모형으로 중장기 에너지 계획, 에너지 정책 분석, 에너지-환경 연계 시나리오 개발 및 분석에 널리 사용되고 있음
- 연구의 범위와 목적에 따라 에너지원의 채취, 수입/수출, 전환 수송과 배분, 에너지 서비스(열, 동력, 조명, 가전/사무기기, 공간적 이동 등) 제공에 이르기까지 종횡으로 연결된 다양한 에너지 부문의 상호연계성을 묘사·분석할 수도 있고, 특정 부문의 에너지 수요와 공급, 그와 관련된 환경적 영향을 묘사 분석할 수도 있음
- 또한, 동적 선형계획법(Dynamic Linear Programing)에 따라 주어진 제약조건에서 최소비용(least cost) 해를 최적해(optimal solution)로 제시함. 즉, MESSAGE 모형을 활용한 시나리오 분석은 에너지시스템의 경계 안에서 사용자가 정의한 정책 목표(예, 온실가스 감축)를 달성하기 위한 최적의 에너지 흐름, 최적의 에너지 기술 투자와 그에 상응하는 에너지 기술 포트폴리오를 제시함

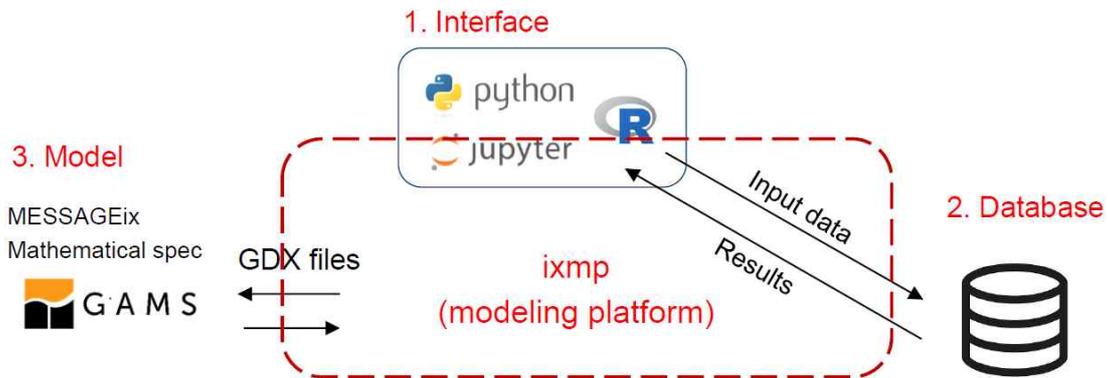
4.2. MESSAGEix

- MESSAGEix는 1980년대 IIASA Energy, Climate and Environment(ECE) 프로그램에서 개발된 통합평가 모형 ‘MESSAGE V’의 확장형 모형임. MESSAGEix에는 MESSAGE-MACRO 두 모형이 탑재되어 있으며 이는 GAMS(General Algebraic Modeling System) 수학 프로그래밍 언어로 구동함. MACRO 모형과 연계를 통해 에너지 및 상품에 대한 가격과 수요의 환류 효과(feed-back)를 반영할 수 있음
- ix는 ‘An integrated modeling platform for x-cutting analysis’의 줄임말로 모델링 플랫폼(ixmp)는 입력 데이터 관리, 수학적 공식 적용, 모형 결과물 분석 전반에 걸쳐 효율적인 업무 흐름을 지원하기 위해 Python, R 프로그램을 인터페이스로 사용함
- 모형 버전 제어를 위한 Java/데이터베이스 백엔드 데이터 관리 방식을 도입함



<그림 부록4-1> ixmp 모델링 플랫폼의 구성요소 및 상호연결

- 인터페이스는 시나리오 생성, 불러오기, 구동의 중요 역할을 담당하며 동시에 입력자료를 수정함. MESSAGEix 입력자료는 사전에 지정된 자료 형식을 바탕으로 엑셀 파일로 입력 가능함



<그림 부록4-2> MESSAGEix의 모형 구조

- 입력자료를 바탕으로 최적해를 찾기 위해 최적화 소프트웨어 GAMS(General algebraic modeling system)를 사용함. GAMS를 통해 최적해 풀이 방법을 ‘Perfect-foresight’ 혹은 ‘Recursive-dynamic’ 적용이 가능하며 상세한 공간적(spatial), 시간적(temporal) 차원 도입이 가능함
- 모형 버전 제어를 위한 Java/ORACLE 데이터베이스 백엔드 데이터 관리방식을 도입함. 모형의 자료 및 결과물은 데이터베이스, GAMS GDX 파일 등으로 업로드가 가능
- MESSAGEix는 높은 수준의 개방성, 투명성, 재현성(Reproducibility) 추구하기 때문에 모형의 소스 코드, 설명서 등을 오픈소스로 공개하고 있음

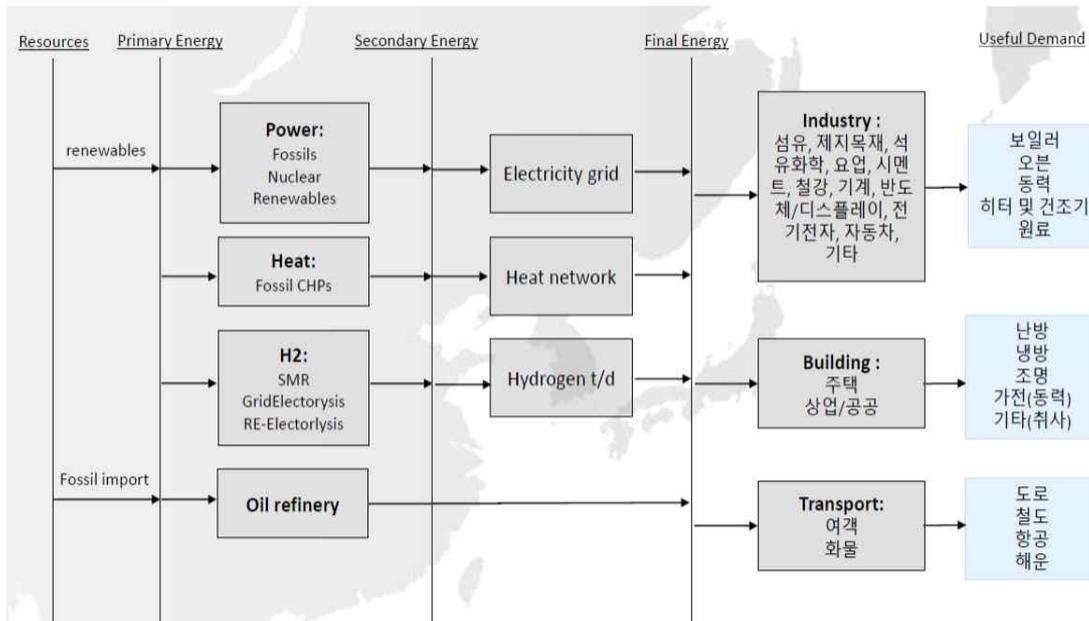
- MESSAGEix 모형 구동 절차는 위 표와 같음. ixmp 패키지를 불러들이고 시나리오를 생성한 다음 모형에 필요한 시간, 기술, 에너지원, 등의 집합과 유효수요, 기술-경제적 모수(투자비용, 고정비용, 효율 등), 제약조건을 입력함. 모형 풀이 방식을 설정하고(LP, MIP 등) 모형 풀이 이후 결과물을 가공함

<표 부록4-1> MESSAGEix 모형 구동 절차

MESSAGEix 모형 구동 절차	
1.	시나리오 생성
2.	집합(Set) 정의
3.	모수(Parameter) 정의 <ul style="list-style-type: none"> - 유효수요 - 기술-경제적 모수 - 제약조건(bounds and dynamic constraints)
4.	모형 풀이(Solving the model)
5.	결과물 가공(Post-processing and plotting)

4.3. 모형의 구조

- 기준에너지시스템(Reference Energy System)은 에너지가 공급, 변환, 전달 과정을 거쳐 최종소비자에 공급되는 유효수요에 이르는 구조체계를 의미함
- 자원(Resource), 1차 에너지원(Primary energy), 최종에너지 소비(Final energy), 유효수요(Useful energy)까지 에너지 단계(Level)와 각 단계에서 사용되는 에너지(commodity or energy form)를 정의하는 과정이 요구됨
- RES(Reference Energy System)는 모형 기술의 투입과 산출 관계를 나타냄. 전기화가 에너지시스템 전반에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 공급(전력, 열 시스템)과 수요 부문(산업)이 유기적으로 연계되어 상호 영향(전기화)을 내생적으로 평가할 수 있는 에너지 시스템 분석 모형이 요구됨



<그림 부록4-3> MESSAGEix 기준 에너지 시스템(RES)

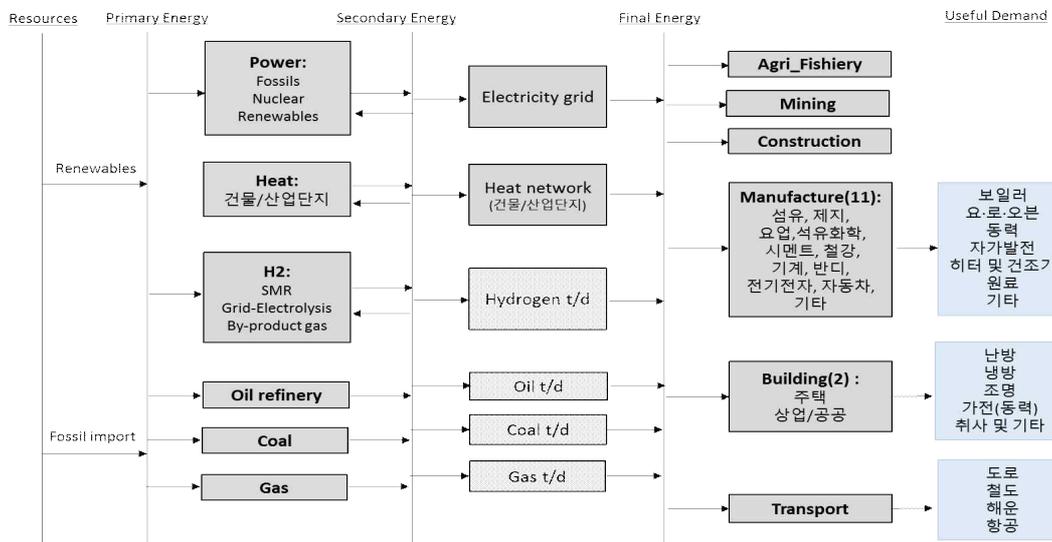
4.3.1 제조업 부문

- 유효수요의 동인 요인은 제3차 에너지기본계획에서 사용된 산업연구원(2018)의 업종별 2040년 산출량 전망을 활용함. 각 유효수요는 산업별 산출량 전망에 따라 변화하는 것으로 가정
- EIA NEMS 모형 IDM(Industrial Demand Module)은 MAM(the Macroeconomic Activity Module)에서는 산업별 연간출하액(Value of Shipment)과 종사자 수를 기반으로 업종별 에너지 유효수요를 전망함 (일부 산업의 경우 연간출하액이 아닌 물리적 산출량으로 전망하기도 함)
- 유효수요(에너지 서비스)는 보일러, 요/로/오븐, 동력, 자가발전, 히터 및 건조기, 원료용, 기타로 구분함

<표 부록4-2> 제조업 상세화 MESSAGE 모형 개요

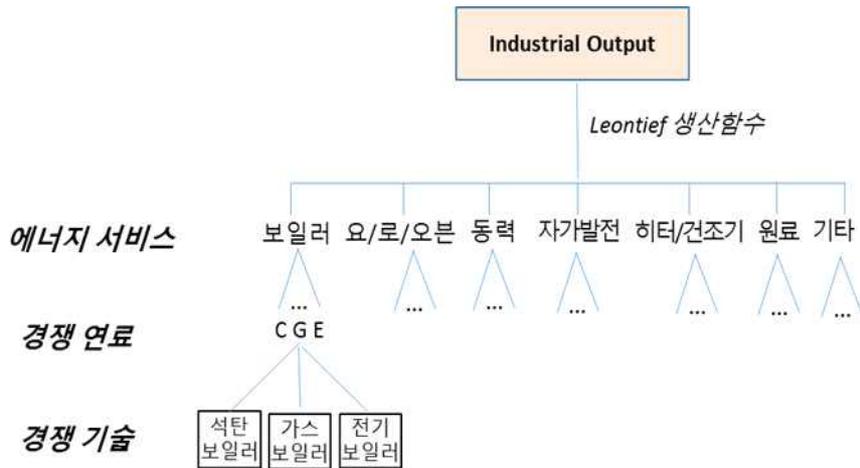
모형의 특징	상세 설명
전망 기간	2020년부터 2060년까지 5년 단위
부문 구분	11개 업종
유효수요의 용도 구분	보일러, 요/로/오븐, 동력, 자가발전, 히터 및 건조기, 원료용, 기타
유효수요 전망의 동인	산업연구원 2040년 업종별 산출량 전망
최종에너지 구분	석탄, 석유류(휘발유, 등유, 경유, 중유, LPG), 전기_Grid, 전기_재생, 열_Grid, 열_재생, 바이오매스, 수소
기술 선택 방법	선형 방정식 기반의 최적화 모형
최종수요 기술의 해상도	에너지원별 대표기술

- MESSAGEix-KOR는 제조업뿐만 아니라 열, 전기 공급 시스템을 묘사하고 있어 제조업 에너지 소비에 따른 공급 부문 변화(온실가스 배출량, 설비, 신규 설비투자 등) 분석이 가능함



<그림 부록4-4> 제조업 상세화 MESSAGEix-KOR 모형 RES

- 해외 선진모형 구조를 참고하여 제조업 전기화 잠재량을 평가하기 위해 아래 그림과 같이 공통 에너지 서비스 기반의 기술표현 방식을 사용함. 에너지 총조사, 에너지 사용 및 온실가스 배출 실태 조사 등 현장 조사내용이 반영된 국가 통계를 활용하여. 11개 업종, 7개 에너지 서비스, 11개 경쟁 연료를 고려한 847개의 기술이 반영된 제조업 모형을 구축함

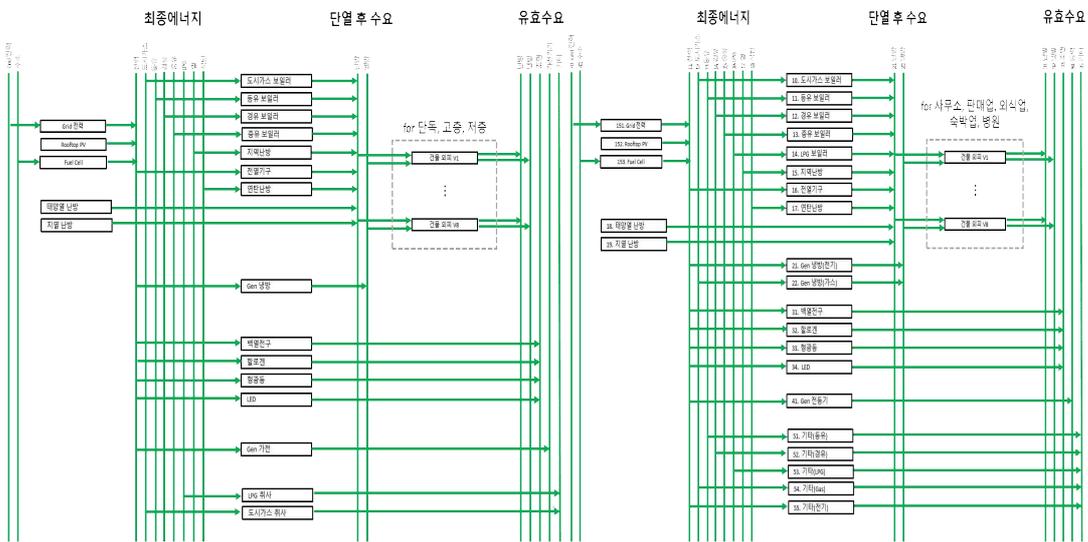


<그림 부록4-5> 공통 에너지 서비스 기반 기술표현

- 보일러용: 생산 공정용 일반 보일러 또는 자가발전용 보일러에서 소비한 연료를 의미함. 단, 공정용 외 보일러(주방 전용, 기타 복리후생시설 및 난방 전용 설비 등)에서 소비한 연료 소비량은 보일러용에서는 제외하고 기타에 포함
- 요/로/오븐: 공업용 오븐 및 각종 가열기에서 소비하는 소비량(철강업의 용광로, 전로, 용해로 및 요업의 킬른 등)
- 동력용: 동력용으로 소비한 전기에너지 소비량
- 자가발전: 자가발전용 디젤기관, 가스터빈 등 내연기관에서 소비한 연료
- 히터 및 건조기: 각종 가열기에서 사용한 연료 및 공정상의 건조를 위한 건조기 등에 사용한 연료
- 원료용: 원료용은 연소를 목적으로 하지 않고 타제품을 생산하기 위해 소비한 것으로 예를 들면 석유화학 제품용 납사(석유화학사), 코크스 제조용 유연탄(코크스 제조 공장 및 철강업) 등이 있음
- 기타: 공정 설비 외 난방, 취사 등의 용도로 사용한 에너지 소비량

4.3.2 건물부문

- 건물부문 모형 구조는 아래 표와 같음. 전망 기간은 2015년부터 2050년까지 5년 단위로 총 8개 시점이 포함됨. 부문의 구분은 주택(가정), 서비스(상업, 공공)로 구분
- 각 부문의 유효수요 용도는 난방, 냉방, 조명, 가전(주택), 동력(서비스), 기타로 구분함. 유효수요 전망의 동인은 인구, 1인당 소득, 연면적을 고려
- 최종에너지 구분은 석탄, 석유류(휘발유, 등유, 경유, 중유, LPG), 전기_Grid, 전기_재생, 열_Grid, 열_재생, 바이오매스, 수소로 구분
- Grid전력, 건물용 태양광, 건물용 연료전지 기술이 전력을 생산하는 것으로 수정



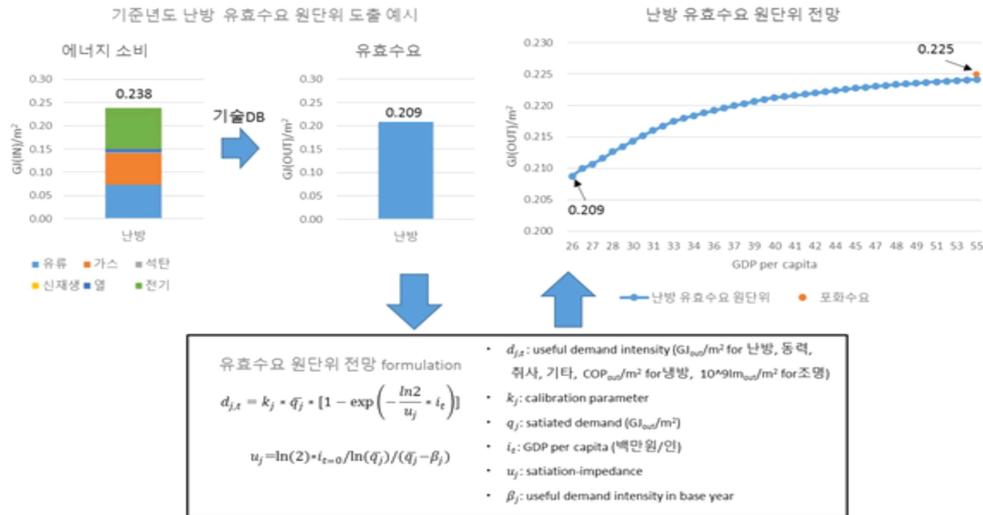
<그림 부록4-6> 건물부문 RES 구조도 (좌) 주거/ (우) 상업-공공

<표 부록4-3> MESSAGEix 건물부문 구조

모형의 특징	상세 설명
전망 기간	2020년부터 2060년까지 5년 단위 (2015년 기준)
부문 구분	주택, 서비스(상업+공공)
유효수요의 용도 구분	주택: 난방(온수) 냉방, 조명, 가전, 취사(5개) 서비스: 난방, 냉방, 조명, 동력, 기타(5개)
유효수요 전망의 동인	인구, GDP, 주택 연면적, 서비스 연면적
최종에너지 구분	석탄, 석유류(휘발유, 등유, 경유, 중유, LPG), 전기_Grid, 전기_재생, 열_Grid, 열_재생, 바이오매스, 수소
기술 선택 방법	선형 방정식 기반의 최적화 모형
최종수요 기술의 해상도	에너지원 별 대표기술

□ 건물부문 유효수요 전망 방법

- 각 유효수요(Useful Demand)는 에너지 전환 손실이 고려된 유용한 서비스의 양으로 MESSAGE 모형에 외생적(Exogenous)으로 입력되는 변수임
- 각 건물부문 MESSAGE 모형은 GCAM(Global Change Assessment Model) 등 선진모형에서 채택하고 있는 포화 유효수요 방법론을 차용함



<그림 부록4-7> 난방 유효수요 원단위 전망 방법론

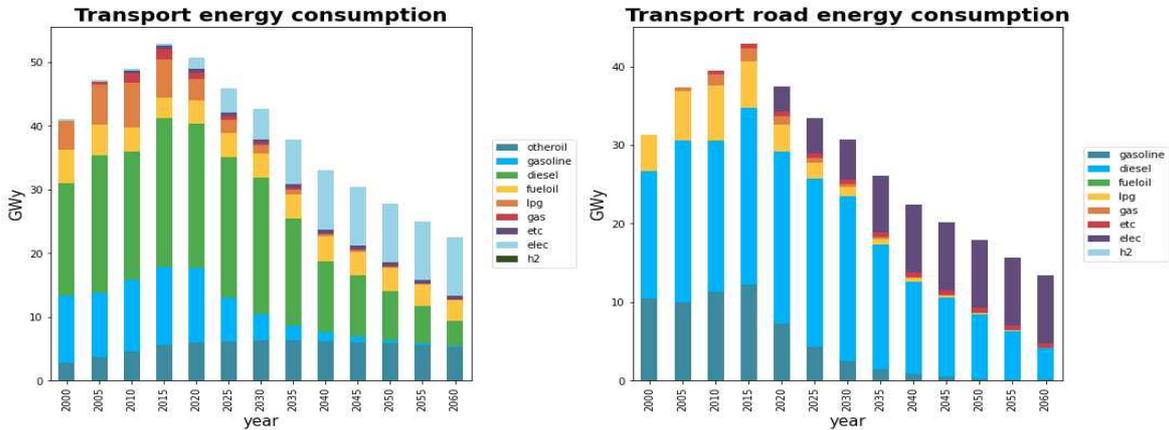
- 기존년도 유효수요 원단위(GJout/m2)는 용도별 에너지 소비량에 기술 DB의 효율을 적용하여 도출
- 유효수요 원단위는 소득 증가에 따라 포화수요에 수렴한다는 가정하에 전망함
- 전망된 원단위에 활동자료(예, 주택부문 연면적) 전망을 곱해 유효수요의 절대량 산정

4.3.3 수송부문

- 수송부문 구조는 아래 표와 같음. 세부 부문은 도로, 철도, 항공, 해운 세분화하여 부문별 에너지원별 비용 경쟁을 통해 수송부문 최종에너지 소비가 결정됨
- 건물, 제조업 부문과 다르게 수송부문은 여객, 화물 용도를 구분하지 않음. 향후 수송부문 고도화를 통해 여객, 화물 등 수단(mode)별 에너지 소비 묘사 가능

<표 부록4-4> MESSAGEix 수송부문 구조

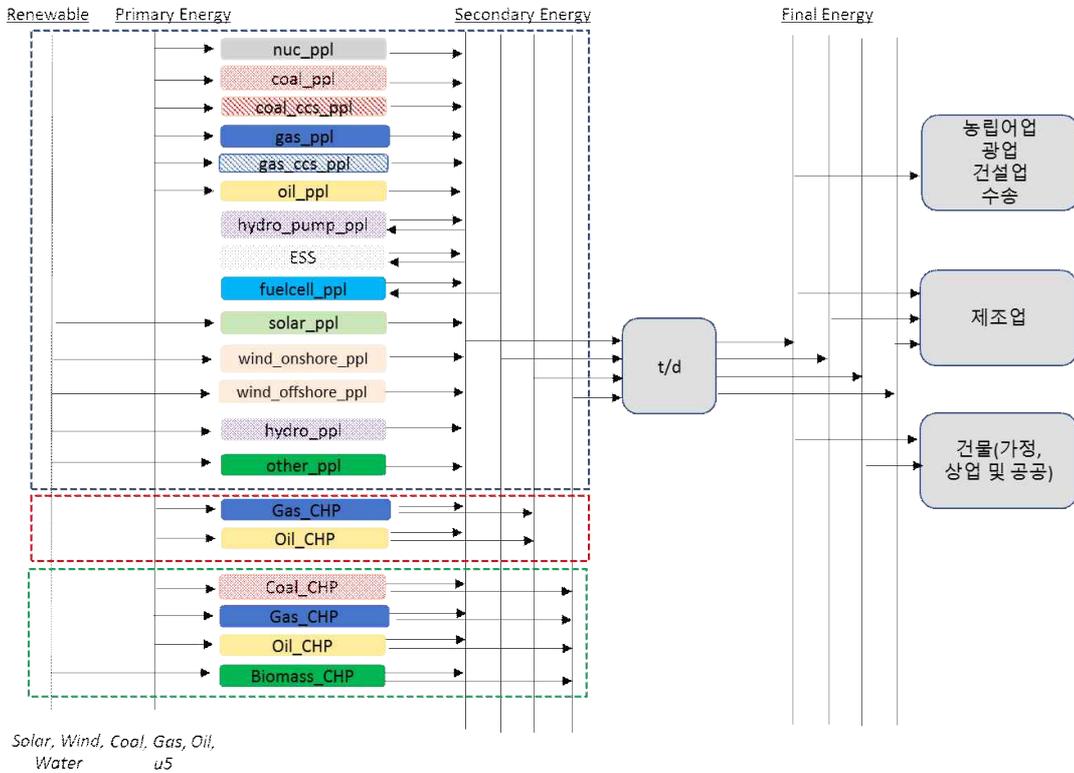
모형의 특징	상세 설명
전망 기간	2020년부터 2060년까지 5년 단위 (2015년 기준)
부문 구분	도로, 철도, 항공, 해운
유효수요의 용도 구분	도로, 철도, 항공, 해운
유효수요 전망의 동인	인구, GDP 전망
최종에너지 구분	석유류(휘발유, 등유, 경유, 중유, LPG), 전기, 바이오매스, 수소, 항공유
기술 선택 방법	선형 방정식 기반의 최적화 모형
최종수요 기술의 해상도	에너지원 별 대표기술



<그림 부록4-8> 수송부문 최종에너지 소비 결과 예시

4.3.4 전환 부문(전력, 열)

- 전환 부문 모형 구조는 아래 표와 같음. 열 부문의 경우 산업, 건물부문에서 소비되는 열 소비 특성을 반영하여 이를 구분함
- 수소 공급은 부생 수소 가스, 가스 개질(SMR), 수입 수소 3개 기술로 공급되는 것을 가정함



<그림 부록4-9> 전환 부문(전력, 열) RES 구조도

<표 부록4-5> MESSAGEix 전환부문 구조

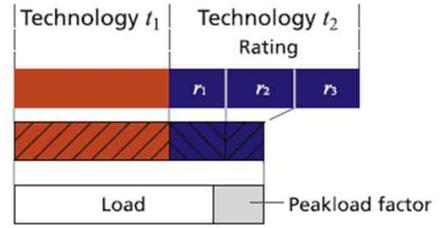
모형의 특징	상세 설명
전망 기간	2015년부터 2050년까지 5년 단위
부문 구분	전력, 열(산업, 건물), 수소
에너지 구분	석탄, 원자력, 가스, 석유류(중유), 수력, 풍력(해상, 육상), 태양광, 수소연료전지, 기타(바이오매스), 양수, BESS(배터리)
기술 선택 방법	최소비용 선택 또는 시뮬레이션
기술의 해상도	에너지원별 대표기술 및 CCS 기술 포함

□ 연간단위 모형 운영에 따른 한계를 극복하기 위해 Peak load factor에 따른 설비, 신재생 발전 간헐성으로 인한 유연성 자원 확보에 대한 기술적 내용을 Stylized 하여 반영

Equation SYSTEM_RELIABILITY_CONSTRAINT

This constraint ensures that there is sufficient firm (dispatchable) capacity in each period. The formulation is based on Sullivan et al., 2013 [6].

$$\sum_{\substack{t,q \in T^{INV} \\ y^V \leq y}} reliability_factor_{n,t,y,c,l,h,'firm'} \cdot CAP_FIRM_{n,t,c,l,y} + \sum_{\substack{t,q,y^V \leq y}} reliability_factor_{n,t,y,c,l,h,q} \cdot ACT_RATING_{n,t,y^V,y,c,l,h,q} \geq peak_load_factor_{n,c,l,y,h} \cdot COMMODITY_USE_{n,c,l,y}$$



This constraint is only active if $peak_load_factor_{n,c,l,y,h}$ is defined.

<그림 부록4-10> Reliability 제약식

Equation SYSTEM_FLEXIBILITY_CONSTRAINT

This constraint ensures that, in each sub-annual time slice, there is a sufficient contribution from flexible technologies to ensure smooth system operation.

$$\sum_{\substack{n^L,t,m,h^A \\ y^V \leq y}} flexibility_factor_{n^L,t,y^V,y,m,c,l,h,'unrated'} \cdot (output_{n^L,t,y^V,y,m,n,c,l,h^A} + input_{n^L,t,y^V,y,m,n,c,l,h^A}) \cdot duration_time_rel_{h,h^A} \cdot ACT_{n,t,y^V,y,m,h}$$

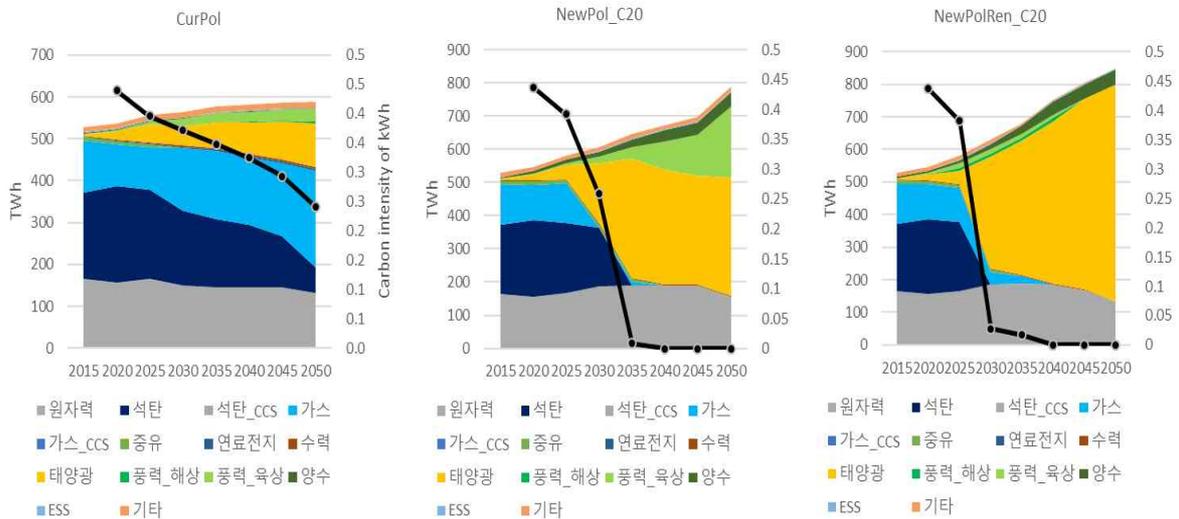
(+) positive contribution

$$+ \sum_{\substack{n^L,t,m,h^A \\ y^V \leq y}} flexibility_factor_{n^L,t,y^V,y,m,c,l,h,l} \cdot (output_{n^L,t,y^V,y,m,n,c,l,h^A} + input_{n^L,t,y^V,y,m,n,c,l,h^A}) \cdot duration_time_rel_{h,h^A} \cdot ACT_RATING_{n,t,y^V,y,c,l,h,q} \geq 0$$

(-) Negative contribution

Technology	Flexibility parameter
Load	-0.1
Wind	-0.08
Solar PV	-0.05
Geothermal	0
Nuclear	0
Coal	0.15
Biopower	0.3
Gas-CC	0.5
Hydropower	0.5
H ₂ Electrolysis	0.5
Oil/gas steam	1
Gas-CT	1
Electricity storage	1

<그림 부록4-11> Flexibility 제약식



<그림 부록4-12> MESSAGEix 전력부문 결과 예시(단위: TWh, kgCO₂/kWh)

4.3.5 오염물질 배출량 제약식

- 모형에서 사용되는 기술에 대해서 오염물질 배출계수를 지정할 경우 오염물질 배출량 총량 혹은 가격에 대해서 제약식을 부과할 수 있음
- GAMS에서 사용되는 Set 기능을 활용하여 배출량 제약을 특정 기간의 합(누적)으로 부과할 수 있음. 기존 배출 제약 이외 Relation 기능을 활용하여 유사한 제약 부과 가능

Bound on emissions

Equation EMISSION_CONSTRAINT

This constraint enforces upper bounds on emissions (by emission type). For all bounds that include multiple periods, the parameter $bound_emission_{n,\hat{e},\hat{t},\hat{y}}$ is scaled to represent average annual emissions over all years included in the year-set \hat{y} .

The formulation includes historical emissions and allows to model constraints ranging over both the model horizon and historical periods.

$$\frac{\sum_{y \in Y(\hat{y}), e \in E(\hat{e})} duration_period_y \cdot emission_scaling_{\hat{e},e} \cdot (EMISS_{n,e,\hat{t},y} + \sum_m historical_emission_{n,e,\hat{t},y})}{\sum_{y \in Y(\hat{y})} duration_period_y} \leq bound_emission_{n,\hat{e},\hat{t},\hat{y}}$$

<그림 부록4-13> 배출량 제약식

- 이외 MESSAGEix 모형 관련 상세한 내용은 <https://docs.messageix.org/en/stable/index.html> 참고. MESSAGEix 모형 설명서는 모형 수식 이외 구동 방법, 지원 소프트웨어 대한 상세한 내용을 설명하고 있음. 모형 개발과 더불어 주기적으로 업데이트되고 있음

5. UNICON-2 POWER 모형

- UNICON-2-Power 모형은 선형계획법(Linear Programming: LP)을 활용한 발전부문 설비 건설 및 운영 최적화 모형이다. 분석대상 기간에 요구되는 전력수요를 충족하기 위한 다양한 발전소의 건설 및 운영을 최적화 문제를 풀어 해로써 도출한다. 이를 위해서 천연가스, 태양광 등 다양한 종류의 발전소를 언제 얼마만큼 짓고, 매일 혹은 매시간 어느 발전기를 얼마의 출력으로 운전할 것인가를 결정해야 한다.
- 최적화 모형의 목적함수는 발전기의 건설·운영에 드는 모든 비용의 합이라 정의할 수 있다. 여기서 고려되어야 하는 비용에는 발전기를 건설하는데 소요되는 초기투자비용, 가동에 따라 발생하는 고정비와 변동비, 그리고 저장장치의 충전비용을 들 수 있다. 여기에서 고정비는 출력과는 관계없이 발전기가 가동됨에 따라 발생하는 비용으로 시간당 특정 수준으로 발생한다. 반면, 변동비는 출력(발전량)에 비례하여 발생된다. 목적함수를 수식으로 표현하면 다음 식(1)과 같다.

○ 최적화 모형 목적함수:

$$\min \sum_{t=0}^T df^t \sum_k [(INV_{k,t} + FC_{k,t}) \sum_{v=t-L_k+1}^t N_{k,v} + \sum_r VC_{k,t,r} P_{k,t,r}] \quad \text{부록5 식(1)}$$

- 식(1)에서 t는 시간을 의미하며, k는 발전기, r은 수요구간, v는 발전기의 건설연도를 뜻한다. df는 할인율, INV_{k,t}는 k발전기의 t기간의 연간 균등화 투자비용을 나타내며, FC_{k,t}는 k발전기의 t기간의 연간 고정비를 뜻한다. N_{k,v}는 v년도에 건설된 k발전기 신규 용량을 뜻한다. VC_{k,t,r}는 변동비를 나타내고 P_{k,t,r}는 발전량을 나타내 VC_{k,t,r} × P_{k,t,r}는 t기간 r의 수요구간의 k 발전기의 변동비용을 뜻한다.

○ 가동제약

$$P_{k,t,r} \leq CF_{k,t,r} \sum_{v=t-L_k+1}^t N_{k,v} \quad \forall k,t,r \quad \text{부록5 식(2)}$$

- 식(2)는 k발전기의 시간기간 t, 수요기간 r에서의 발전량(P_{k,t,r})은 발전설비용량에 최대 이용율(CF_{k,t,r})을 곱한 값보다 작거나 같아야 하는 관계식을 표현한다.

○ 수요제약

$$\sum_k (1 - self_k) P_{k,t,r} - \sum_s st_{s,t,r} \geq D_{t,r} \quad \forall t,r \quad \text{부록5 식(3)}$$

□ 식(3)은 소내소비율(selfk)을 제한 시간구간 t, 수요구간 r에서의 총 발전량에서 충전량을 빼 값은 수요보다 크거나 같아야 하는 관계식을 표현한다.

○ 예비율제약

$$\sum_k RF_{k,t} \sum_{v=t-L_k+1}^t N_{k,v} \geq D_{t,r} (1 + RM_t) \quad \forall t \quad \text{부록5 식(4)}$$

□ 식(4)은 각 발전설비용량(Nk,v)에 피크기여도(RFk,t)를 곱한 값이 전력수요(Dt,r)에 목표 예비율(RMt)을 곱한 값보다 크거나 같아야 한다는 관계식을 표현한다.

○ 저장장치제약

$$\sum_{s,r} P_{s,t,r} \leq \sum_{s,r} stf_s st_{s,t,r} \quad \forall t \quad \text{부록5 식(5)}$$

□ 식(5)은 저장장치의 방전량(좌변)이 저장장치의 충전량에 효율을 곱한 값보다는 작아야 한다는 저장장치 제약이다.

○ 배출량 제약

$$\sum_{t \in cp} \sum_{k,r} CO2coef_{k,t,r} P_{k,t,r} \leq CO2cap_{cp} \quad \forall cp \quad \text{부록5 식(6)}$$

□ 식(6)은 앞서 발전량(Pk,t,r)에 배출계수(CO2coefk,t,r)를 곱하여 계산한 계획기간(cp)별 전력부문 총배출량은 목표배출량(CO2capcp)보다 작거나 같아야 한다는 관계식을 표현한다.

□ 수식에 이용된 집합 및 원소, 매개변수 및 변수에 대한 기호는 다음과 같다.

○ 집합 및 원소(set)

- k : 발전기
- s : 저장장치
- r : 수요구간
- v : 건설연도
- cp : 계획기간

○ 매개변수(parameter)

- df : 할인율
- $INV_{k,t}$: 투자비(연간 균등화 비용)
- $FC_{k,t}$: 연간 고정비
- L_k : 수명기간
- $VC_{k,t,r}$: 변동비
- $CF_{k,t,r}$: 최대 이용율
- $self_k$: 소내소비율
- $RF_{k,t}$: 피크기여도
- RM_t : 목표 예비율
- $D_{t,r}$: 수요
- stf_s : 저장장치 효율
- $CO2coef_{k,t,r}$: CO2 배출계수
- $CO2cap_{cp}$: 계획기간 배출량 변수

○ 변수(variable)

- $P_{k,t,r}$: 발전량
- $N_{k,v}$: 신규발전기 용량
- $st_{s,t,r}$: 전력 저장량

□ 본 연구에서는 1년간 8,760시간에 대한 수요 특성과 신재생에너지 공급 특성 등에 대한 자료를 활용하여 발전기 최적 가동전략을 도출하는 최적화 모형을 적용한다. 이를 위해서 연간 8,760시간 각각을 대상으로 발전기별 가동 여부 및 출력을 결정하는 최적화 모형을 운용하는 것이 바람직하지만, 이 경우 변수의 수가 지나치게 많아져 계산상의 부하가 높아지고 최적해의 발견이 어려워지는 단점이 있다. 따라서 적정한 시간 내에 안정적인 최적해의 도출이 가능하도록 8,760시간을 48개의 집단으로 묶어서 분석 단위를 줄이는 방식을 적용하였다. 시간대별 수요 특성에 대한 군집 분석을 통해 아래의 표와 같이 48개 구역을 설정하였다.

<표 부록5-1> 최적화 모형의 시간대 구분

시간	봄 (3~5)		여름 (6~8)		가을 (9~11)		겨울 (12~2)	
	주중	주말	주중	주말	주중	주말	주중	주말
06~09	1	7	13	19	25	31	37	43
09~12	2	8	14	20	26	32	38	44
12~14	3	9	15	21	27	33	39	45
14~16	4	10	16	22	28	34	40	46
16~22	5	11	17	23	29	35	41	47
22~06	6	12	18	24	30	36	42	48

- 전력수요(연가 총 수요 및 최대수요) 및 발전소 건설·폐지 일정은 「제9차 전력수급기본계획」(산업통상자원부, 2020)을 따랐다. 시간대별 전력수요는 2019년 실적치(KPX), 신재생에너지 이용율은 2018년 실적치(KPX)를 가정하여 반영하였다.
- 본 연구의 최적화 모형에 사용된 입력자료의 목록과 출처는 <표 부록5-2>와 같다.

<표 부록5-2> 모형 입력자료 출처 요약

입력자료	출처	세부 출처
발전설비 현황	전력통계정보시스템(EPSS)	EPSS-발전실적-발전량-발전기
	전력거래소(2018)	발전회사별 건설공사비 실적, pp.249-290.
발전설비 진입 및 퇴출	제9차 전력수급기본계획 (산업통상자원부, 2020)	발전설비 건설계획표, p.89.
전력수요		전력수요 전망-목표수요, p.74.
연도별 전력수요 증가율		전력수요 전망-목표수요, p.74.
발전기별 효율	발전사 정보공개청구	-
	조성진, 박광수(2018)	열 소비율, 발열량 전제(8차 수급계획) p.12.
발전기별 배출계수	발전사 정보공개청구	-
	2018년 국가 대기오염물질 배출량 서비스(CAPSS)	점오염원 배출량
초기 투자비	한국전력거래소(2018)	발전원별 기초자료, p.4
	이근대, 김기환(2020)	태양광 CAPEX 전망, p.120
	Prognos, Öko-Institut and Wuppertal-Institut(2020)	에너지산업 가정 (Energiewirtschaft_Annahmen)
	Wesley and Frazier(2020)	pp. 5-6
	IRENA(2020)	pp. 65-66
	EIA(2021)	p. 6
계통연계비용	OECD and NEA(2012)	p. 127
연료비용	전력통계정보시스템(EPSS)	EPSS-전력시장-열량단가
운전유지비용	U.S. EIA, (2013)	Table 1, p.6.
열간 기동비용	발전사 정보공개청구	-
발전기별 기술특성자료	발전사 정보공개청구	-
양수발전기 기술특성자료	전력거래소 (2013a) 전력거래소 (2013b)	발전방식별 종합효율 비교, p.7.
		양수 발전기 기본 정보, p.11. 국내양수발전 설비 특성, pp.12-14. 양수발전기의 종합효율, p.95.
예방정비일	조성진, 박광수(2018)	8차 수급계획 기초 입력 전제 : 예방정비일(일), p.43.
고장정지일	조성진, 박광수(2018)	8차 수급계획 기초 입력 전제 : 고장정지율(FOR, %), p.43.
신재생에너지 시간대별 이용률	전력거래소 정보공개청구	-

- 발전기명과 정격용량은 전력통계정보시스템(이하 EPSIS)의 자료를 활용했다. 『제9차 전력수급기본계획』에 명시된 발전기의 신규증설 및 폐지계획을 모형 입력자료로 활용하였다. 『제9차 전력수급기본계획』은 ‘발전설비 건설계획표’에 연도별 신규건설 및 폐지 발전기의 설비용량을 명시하고 있어 이를 활용하였다.
- 본 연구에서는 2019년 시간대별 발전단 기준 발전량 자료를 시간대별 전력수요로 활용하였다. 2019년 총발전량 대비 시간대별 발전량을 시간대별 수요 비중으로 하여, 2019년도 대비 수요증가율을 곱하여 2019년 이후 연도의 시간대 별 수요를 계산하였다. 수요증가율은 2031년까지는 『제9차 전력수급기본계획』에서 제시한 목표수요 증가율을 활용하였으며, 이후 2050년까지는 탄소중립위원회의 탄소중립 시나리오에 따른 2050년 전력수요를 가정하고 중간 연도에 대해서는 보간법을 이용하여 추정하였다.
- 발전기명과 정격용량은 전력통계정보시스템(이하 EPSIS)의 자료를 활용했다. 그러나 EPSIS 자료는 석탄 및 원자력 발전기의 경우 발전기 단위로 정보를 제공하고 있지만, 복합화력은 발전기 단위가 아닌 사업장 단위로 제공하고 있어 이에 대한 분리를 진행하였다.
- 『제9차 전력수급기본계획』에 명시된 발전기의 신규증설 및 폐지계획을 모형 입력자료로 활용하였다. 『제9차 전력수급기본계획』은 ‘발전설비 건설계획표’에 연도별 신규건설 및 폐지 발전기의 설비용량을 명시하고 있어 이를 활용하였다.
- 본 연구에서는 2019년 시간대별 발전단 기준 발전량 자료를 시간대별 전력수요로 활용하였다. 2019년 총발전량 대비 시간대별 발전량을 시간대별 수요 비중으로 하여, 2019년도 대비 수요증가율을 곱하여 2019년 이후 연도의 시간대별 수요를 계산하였다. 수요증가율은 2031년까지는 『제9차 전력수급기본계획』에서 제시한 목표 수요 증가율을 활용하였으며, 이후 2050년까지는 탄소중립위원회의 탄소중립 시나리오에 따른 2050년 전력수요를 가정하고 중간 연도에 대해서는 보간법을 이용하여 추정하였다.
- 발전기별 효율을 모형에 반영하기 위하여 발전기별 연료투입량(톤)과 출력량(MWh)을 통해 효율을 계산하였다. 발전기별 연료투입은 발전회사에 정보공개청구를 하여 확보한 자료로, 각 발전기의 연료원별 톤 단위의 월별 연료사용실적이다.
- 정보공개청구 통하여 확보한 자료로는 5개의 발전회사(중부, 동서, 남부, 남동, 서부)의 발전기 효율만을 계산할 수 있음에 따라, 석탄을 발전원으로 사용하는 발전기는 대부분 5개 발전회사 소유로 비교적 정확한 효율을 계산할 수 있었으나 복합화력 발전기의 경우 민자 발전회사 소유 비율이 높아 효율 계산에 어려움이 존재하였다. 발전기별 효율의 계산이 어려운 경우 조성진, 박광수(2018)에서 제시한 열 소비율 자료를 이용하여 계산하였다(표 3 참조). 열소비율을 0.001162kWh/kcal을 곱하여 도출한 값의 역수가 발전원별 효율이 된다(표 4 참조).

<표 부록5-3> 발전원별 열 소비율(단위 kcal/kWh)

원자력	유연탄	LNG 복합	유류(중유)
2,365	2,059	1,588	2,212

자료: 조성진, 박광수(2018); 김용건 외(2019), p.21; 김용건 외(2021) p. 39 재인용.

<표 부록5-4> 발전원별 열효율(단위:%)

원자력	석탄	LNG 복합	유류(중유)
36.4	41.8	54.2	38.9

자료: 조성진, 박광수(2018); 김용건 외(2019), p.20; 김용건 외(2021) p. 40 재인용.

- 발전기를 건설·가동하는 데 발생하는 비용은 크게 초기투자비, 연료비용, 운영비용으로 구분할 수 있다.
- 화석연료 발전기에 대한 초기투자비는 천연가스 복합화력의 경우 한국전력거래소(2018)에서 제시하고 있는 2014년 이후 준공된 가스복합설비의 평균 건설비 단가(924천원/kW)를 적용하였다. 본 연구에서는 원자력과 석탄, 석유 등의 경우는 신규 발전소 건설을 허용하지 않음에 따라 이들 발전기술의 초기투자비는 입력자료에서 제외하였다.
- 전력공급 분야에서 미래에 중요한 역할을 담당할 것으로 예상되는 태양광 및 풍력 발전기술에 대해서는 이근대·김기환(2020)의 연구에서 제시하는 경제성 자료를 적용하였다. 태양광의 경우 이근대·김기환(2020)의 1MW급 기준을 적용하였으며, 육상풍력의 경우 이근대·김기환(2020)의 20MW급 기준 자료를 적용하였다. 해상 풍력의 초기투자비 자료는 가용한 국내 자료가 부족하여 Prognos, Öko-Institut and Wuppertal-Institut(2020)의 2020년 기준 자료를 활용하였으며, Prognos, Öko-Institut and Wuppertal-Institut(2020)의 육상풍력 대비 해상풍력 투자비 비율을 우리나라의 육상풍력 투자비에 적용하여 해상풍력 투자비를 도출하였다.

<표 부록5-5> 태양광 총자본비용(CAPEX) 전망

구분			2020년	2025년	2030년	감소율('20년~' 30년)
태양광	100kW	모듈	400.0	306.4	251.8	-37.0%
		BOS	1,113.3	922.5	803.3	-27.9%
		합계	1,513.3	1,228.9	1,055.1	-30.3%
	1MW	모듈	390.5	299.1	245.8	-37.0%
		BOS	955.3	773.2	661.7	-30.7%
		합계	1,345.8	1,072.3	907.5	-32.6%
	3MW	모듈	380.9	291.8	239.8	-37.0%
		BOS	857.7	694.2	594.1	-30.7%
		합계	1,238.6	986.0	833.9	-32.7%
육상풍력	20MW	합계	2,522.4	2,319.9	2,202.4	-12.7%

자료: 이근대, 김기환(2020), p. 120.

- 변동성이 높은 재생에너지의 비중이 높아지는 미래에는 단기적인 수급 균형을 위해 에너지저장장치(Energy Storage System, 이하 ESS)의 역할이 크게 높아질 것으로 예측된다. 따라서 전력부문 최적화 모형을 통한 탄소중립 시나리오 분석에 있어서 ESS에 대한 경제적·기술적 특성 가정이 매우 중요하다. 하지만 ESS에 대한 경제성과 기술성에 대한 국내 문헌이 많지 않음에 따라 관련 자료를 미국의 국립재생에너지연구소(NREL)에서 발표한 Wesley and Frazier (2020)에서 추정된 결과를 활용하였다. 이에 따르면 지속기간(duration) 4시간 기준 리튬이온전지 기준 초기투자비는 2019년 393\$/kWh에서 2050년 156 2019\$/kWh까지 하락할 것으로 전망된다. 이를 반영하여 2019년부터 매년 2.94%의 비용 감소를 가정하였다.

- 수소가스터빈의 초기투자비는 Prognos, Öko-Institut and Wuppertal-Institut(2020)의 추정치를 반영하였는데, 2030년 1004.7천원/kW, 2050년 900.3천원/kW, 운영비는 2030년 26.2천원/kW, 2050년 23.5천원/kW으로 가정하였으며, 설비 수명 40년, 효율은 60%를 가정하였다. 수전해 수소제조 기술에 대해서는 IRENA(2020)의 추정치를 적용하였다. 또한, CCS 포집 기술은 신규 LNG 발전기에 한해 적용 가능한 것으로 가정하였으며. 경제적·기술적 특성은 EIA(2021)을 활용하였다. 석탄발전은 신규건설이 없는 것으로 가정함에 따라 석탄발전에 대한 CCS 적용 또한 배제되었다.
- 연료비용은 발전원의 급전 우선순위를 결정하는 비용으로, 발전회사들의 연료 도입 가격에는 차이가 발생할 수 있으나, 본 연구는 같은 발전원별 내에서는 가격 차이가 없는 것으로 가정하였다. 정보공개청구를 통하여 5개 발전회사로부터 유연탄 도입가격 정보를 확보하였으나, 가격 차이가 크지 않음을 확인하였다. 다만 LNG의 경우 한국가스공사로부터 연료를 구입하는 경우와 직도입으로 연료 공급하는 경우 가격 차이가 발생하는 것을 확인하였다. 그러나 대부분의 복합화력 발전소가 한국가스공사로부터 LNG를 구입하므로, 가격차이가 없는 것으로 가정하였다. 수소 가격은 김재경(2019)에서 제시된 2018년 추출수소 가격 범위(2,700~5,100원/kg)가 중간값인 3,900원/kg으로 가정하였으며, 2050년 3,000원/kg까지 하락하는 것으로 가정하였다.
- 비용평가 세부운영규정(전력거래소, 2019.9a, p.39)의 운전유지비 항목을 운영비용으로 반영하고자 하였다. 운전유지비는 인건비, 수선유지비, 경비, 일반관리비, 공통비로 구성되나, 국내 발전사의 실적자료 확보에 어려움이 있어 해외 문헌(U.S. EIA, 2013)의 운전유지비(variable O&M costs) 값을 이용하였다(표 6 참조).

<표 부록5-6> 발전원별 건설단가 및 운전유지비

구분	원자력	석탄화력	복합화력
건설단가(USD/MW)	5,530,000	3,246,000	917,000
운전유지비(USD/MWh)	2.14	4.47	3.60

자료: U.S. EIA(2013); 김용건 외(2019), p.25; 김용건 외(2021) p. 42 재인용.

- <표 6>을 기반으로 우리나라의 발전원별 운전유지비 식(7)과 식(8)을 이용하여 계산하였다.

$$\text{운전유지비 비율(\%)} = \frac{\text{운전유지비}(\$/MWh)}{\text{건설단가}(\$/MW)/8760(h)} \quad \text{식(7)}$$

<표 부록5-7> 발전원별 운전유지비 비율(단위:%)

원자력	석탄화력	복합화력
0.34	1.21	3.44

자료: U.S. EIA(2013); 김용건 외(2019), p.25; 김용건 외(2021) p. 43 재인용.

$$\text{추정된 운전유지비(원/kWh)} = \frac{\text{실질건설단가(원/kW)}}{8760h} * \text{운전유지비 비율(\%)} \quad \text{식(8)}$$

- 태양광 및 풍력 발전기술에 대해서는 이근대·김기환(2020)의 연구에서 제시하는 운전유지비용 자료를 적용하였는데, 태양광의 경우 1MW급 기준을 적용하였으며, 육상풍력의 경우 20MW급 기준 자료를 적용하였다. 두 가지 경우 모두 연간 운전유지비용은 설비비용의 1.6%로 추정되었다. 해상풍력의 경우 별도의 자료가 가용하지 않아 육상풍력과 동일한 운전유지비용(1.6%)을 가정하였다.
- 한편, 태양광과 풍력에 대한 계통연계비용으로 OECD & NEA (2012)에서 추정된 한국 기준 자료(육상 \$9.65/MWh, 해상 \$26/MWh, 태양광 \$14.57/MWh)를 반영하였다.
- ESS의 고정운영비는 초기투자비의 2.5%, 변동운영비는 없는 것으로 가정하였으며, 수명기간은 15년, 충방전 효율(round-trip efficiency)은 85%로 가정하였다.
- 발전기의 안정적인 운영을 위해서는 정비 진행이 필요하며, 때로는 고장으로 인하여 급작스럽게 계통에서 분리될 수 있다. 이는 예방정비율 및 고장 정지율을 적용하여 최대발전량을 조절하는 형태로 모형에 반영할 수 있다.

<표 부록5-8> 발전원별 예방정비율 및 고장 정지율(단위: 일, %)

구분	원자력	유연탄	국내탄	복합화력	유류
예방정비율	58	26~28	28	25	33
고장 정지율	6.0	4.4	6.8	5.7	6.2

자료: 조성진, 박광수(2018), 김용건 외(2019), p.32; 김용건 외(2021) p. 44 재인용.

- 신재생에너지는 기후 조건 등에 의한 불확실성(간헐성 및 변동성)을 내재하고 있는 에너지원이다. 이러한 신재생에너지의 특성을 적절히 모형에 반영할 필요가 있다. 이에 과거 발전실적 데이터를 이용하여 신재생에너지의 시간대별 이용률을 계산하여 모형에 반영하였다. 정보공개 청구를 통해 전력거래소로부터 확보한 2018년 시간대별 신재생에너지의 발전량 실적 정보를 이용하여 신재생에너지의 시간대별 이용률을 계산하였으며, 기술 발전 등으로 연도별 이용률 개선은 반영하지 않았다. 다만 2018년도 연평균 이용률이 이근대·김기환(2020)의 이용율 추정치와 차이를 보이는데, 경제성 특성을 이근대·김기환(2020)와 같게 가정함을 고려해서 연평균 이용률이 이근대·김기환(2020)에서 제시하고 있는 수준(태양광 15.4%, 풍력 23.0%)과 동일하게 되도록 시간대별 이용율 수준을 조정하였다. 해상풍력의 경우는 탄소중립위원회의 2050 탄소중립 시나리오에서 가정하고 있는 38.5%를 적용하였다.

6. KIER-POSTECH-TIMES 모형

- KIER-POSTECH-TIMES 모형은 TIMES 모형을 기반으로 대한민국 에너지시스템을 모사하는 상향식 에너지시스템 모형이다. TIMES(The Integrated MARKAL-EFOM System)모형은 국제에너지기구(IEA)의 에너지기술시스템분석프로그램(ETSAP, Energy Technology System Analysis Program)을 통하여 개발되어 전 세계적으로 널리 활용되고 있는 가장 대표적인 상향식 에너지시스템 모형이다.
- TIMES 모형은 최적화(Optimization) 기반의 상향식 에너지시스템 모형으로서 주어진 제약조건을 만족하면서 목적함수를 최소화하는 최적해(Optimal Solution)를 도출하는 다 주기 선형계획(Multi Period Linear Programming)에 기반하고 있다.
- KIER-POSTECH TIMES 모형은 대한민국을 하나의 지역으로 모사하는 단일지역 모형이다. <그림-1>에서 보여주고 있는 것과 같이 현재 모형은 1차 에너지 공급 분야에서부터, 전환, 최종에너지 소비 분야까지 국가 에너지시스템 전체를 시스템 범위로 하고 있다.
- 다만, 현재 세부 기술 수준으로 자세히 구현된 부분들은 회색으로 음영 표시된 발전과 열의 전통적인 전환 부문들과 수소 생산과 관련된 전환 부문이며 최종에너지 소비와 관련된 수송부문이다, 나머지 부분들은 에너지 흐름만을 반영하고 있는 모형이다.
- 모형에서 활용 중인 발열량은 에너지 시행규칙 제5조 제1항에 따라 2017년 개정된 7차 에너지 열량 환산기준을 적용하였으며, 온실가스 배출계수는 국가 온실가스 인벤토리 산정 방식에 따라 정의하였다. 할인율은 국가 예비타당성 조사에 활용하는 사회적 할인율인 4.5%를 적용하였으며, 대미환율은 한국은행이 발표한 2017년 연평균환율인 1,130.5원/USD을 기준으로 설정하고 있다.



<그림 부록6-1> KIER-POSTECH-TIMS 모형 내 에너지시스템 범위

- 먼저 시간과 관련한 분석의 기준을 살펴보면, 모형에서의 기준년도를 2017년으로 설정하였고, 분석주기는 2020년부터 2050년까지를 범위로 5년 단위로 설정하였다. 단, 실제 VEDA-TIMES 모형은 2060년까지 구현되어있고, 결과를 2060년까지 도출하였으나 결과 분석 시에는 2050년까지의 결과만을 활용하였다.

- 단일년도를 시간적으로 세분화하는 기준인 타임 슬라이스(Time Slice)는 4계절, 주중/주말, 24시간을 조합하여 192개로 나누어 정의하였다. 이는 재생에너지의 변동성을 정교하게 모델링하고 부하 추종 기술의 보급 효과를 구체적으로 분석하기 위해 시간대별로 타임 슬라이스를 세분하여 전력수요 부하 패턴 및 신재생에너지 발전량 패턴을 반영하고자 하였다.
- 기준년도의 에너지 흐름을 의미하는 기준에너지시스템(RES, Reference Energy System)의 설계는 다음과 같이 수립되었다. <그림-2>와 같이 에너지통계연보의 2017년 국가 에너지 밸런스를 기준으로, 에너지 총조사보고서, 한전 통계, 집단에너지통계, 신재생에너지통계 등을 활용하여 47종의 에너지원과 기술 분야를 세분화하여 기준에너지시스템을 정의하였다.
- 다음으로 1차 에너지 공급 및 전환 분야에 대해서는 현재까지 확정된 정부의 보급이나 믹스에 대한 정책을 반영하였으며, 최종에너지 소비 분야에 대해서는 기준에너지시스템에서 정의된 기준년도 에너지 소비량과 3차 에너지기본계획에서 제시된 에너지원별 연평균 증가율을 이용하여 베이스라인 시나리오를 설정하였다.
- 발전 분야의 베이스라인은 2030년까지는 제9차 전력수급기본계획을 기반으로 정의하였으며, 2035년 이후는 재생에너지 보급과 ESS의 역할 분석에 초점을 맞추기 위하여 태양광, 풍력 그리고 천연가스를 제외한 석탄, 석유, 원자력 등의 에너지를 기반으로 하는 발전기술은 2030년 설비용량이 유지되거나 기술수명에 따라 감소하는 것으로 정의하였다.
- 태양광과 풍력의 경우에는 2020 신재생에너지 백서에서 제시된 시장 잠재량을 고려하여 태양광, 육상풍력, 해상풍력의 설비용량이 각각 369GW, 24GW, 41GW를 넘지 못하도록 제약하였다.

	석탄	석유	가스	수력/원자력	열/전력(고온열)	신재생에너지(세분화)
국내생산/수입/재고/오차						신재생 에너지 통계
1차에너지공급량						
에너지 전환 정유(석유수입량, 납사소비량) 발전(지역난방용 발전량) 지역난방 산업단지 가스제조(도시가스제조용 천연가스소비량) 자가소비/손실		석유류 수급통계			한전통계 집단에너지통계	
최종에너지공급						
최종에너지소비						
산업(정유산업, 산업단지 소비량 제외) 업종 용도		총조사보고서				
수송 Mode						
가정 주택형태 용도					가전기기 보급현황	
상업 용도						
공공						

<그림 부록6-2> KIER-POSTECH-TIMES 모형 기준에너지시스템 설계 활용 통계

- 다음으로 분석의 기준이 되는 미래전망 시나리오로서 최종에너지 소비 수요에 대한 베이스라인 시나리오는 3차 에너지기본계획의 기준수요와 목표 수요를 기반으로 각각 고에너지수요와 저에너지수요 시나리오로 설정하였다. 또한, 미래 에너지 가격에 대한 베이스라인 시나리오는 에너지통계연보, 세계 에너지 시장 인사이트, 한국석유공사(Petronet), e-나라지표, 한국도시가스협회 등의 자료를 이용하여 2017년도 기준가격을 설정하고 EIA의 최신 Annual Energy Outlook의 가격 변화율 전망을 적용하여 활용하고 있다.
- 현재 세부 기술 수준으로 자세히 구현된 부분들을 구현하기 위하여, 해당 부문들에 해당하는 각종 국내외 최신 자료들을 기반으로 기술 DB를 구축하였고 주요 기술적 온실가스 감축 수단의 효과를 분석할 수 있도록 모형이 구현되어 있다. 지금부터는 본 연구의 주요 대상으로 고려한 발전부문의 구현 방식에 대해서 자세히 설명하고자 한다.
- 우선, 베이스라인 시나리오에서의 발전원별 설비용량 설정을 위해 산업통상자원부에서 발간한 제9차 전력수급기본계획의 전원구성 전망을 반영하여 2017년부터 2034년까지의 발전원별 설비용량을 설정하였고, 2035년 이후에는 최근 정부의 정책 방향을 반영하여 원자력, 석탄, 석유 발전은 신규건설 없이 수명에 따른 폐지만 고려하고 천연가스 및 신재생에너지 발전원이 확대되도록 해당 발전원의 하한 제약만을 고려하여 모형에서 전원구성을 결정하도록 하였다. 이 경우, 제9차 전력수급기본계획의 대상 연도에 포함되지 않은 2017년~2019년의 계획은 해당 연도를 포함하는 제8차 전력수급기본계획(2018)과의 정합성을 고려하여 설정하였다. <표-1>에서 베이스라인 시나리오에서의 발전원별 설비용량 설정을 요약하고 있다.

**<표 부록6-1> 베이스라인 시나리오에서의 발전원별 설비용량 설정
(*: 하한으로만 제약된 설비용량)**

구분	발전 설비용량 (GW)				
	2017	2020	2030	2040	2050
에너지원					
원자력	22.5	23.2	20.4	15.4	11.4
석탄	35.3	34.1	30.6	19.9	8.3
석유	3.9	3.7	1.1	1.1	1.1
천연가스CC	31.8	35.5	48.1	51.7*	48.0*
천연가스CT	-	-	1.0	1.0	1.0
태양광	5.1	14.3	34.0	45.6*	45.6*
풍력	1.2	1.4	7.1	14.3*	14.3*
해상풍력	-	0.5	10.6	10.6	10.6
기타재생	4.0	4.6	5.0	5.3	5.3
연료전지 수소터빈	0.3	0.6	2.6	8.0	8.0
양수	4.7	4.7	5.2	6.5	6.5
ESS	-	-	0.7	0.97*	0.97*
집단에너지	9.1	9.1	9.1	3.8	3.8

□ 다양한 발전기술들의 기술 특성치 자료로 투자비용, 고정비용, 변동비용, 효율, 이용률, 기술수명 등 다양한 기술 특성치가 필요한데, 현재 모형에서 활용 중인 비용 관련 정보는 에너지경제연구원의 기본연구 보고서, 전력거래소의 발전설비현황, 신재생에너지 백서, EIA의 Annual Energy Outlook 2019, NREL의 2018 Annual Technology Baseline, IRENA의 Renewable Power Generation Costs in 2018, Lazard의 Levelized Cost of Storage Analysis와 같은 국내외 자료를 참고하여 추정하였다. 다음으로 효율, 이용률, 피크기여도의 경우에 제9차 전력수급기본계획에 제시된 수치 또는 에너지 경제연구원 보고서 등 국내외 문헌들에서 제공하고 있는 제7차 전력수급기본계획 수립과정에서 활용되었던 수치들에 기반하여 추정하였다.

<표 부록6-2> 발전설비 기술 특성치 자료

기술명	투자비	고정유지비	변동유지비	효율	가동률	피크 기여도	기준년도 용량
	백만원/GW	백만원/GW-y	백만원/천 TOE	%	%	%	GW
천연가스터빈	1,052,000	34,200	94.9	42	87	100	24.340
천연가스복합	593,000	37,470	19.6	42	87	100	0
태양광	1,610,833	37,365	0.0	40	시간대별 세분화	16	5.062
육상풍력	2,526,228	72,193	0.0	40	시간대별 세분화	2	1.215
해상풍력	6,476,258	132,321	0.0	40	시간대별 세분화	2	0
ESS	1,669,749	변동유지비에 포함	723.0	88.5	96	100	0

□ 현재 개발된 모형은 재생에너지 보급확대에 따른 ESS 및 가스터빈 등 부하변동에 대응하는 기술들의 역할을 보다 정밀하게 분석하기 위하여 발전기술별로 부하추종성을 차별화하였다. 원자력 발전기술은 계절 단위에서만, 석탄화력발전기술은 주 단위에서만 출력 변화가 가능하며, 기타 발전기술들은 시간 단위에서 출력 변화가 가능하다고 가정하였다. 또한, 천연가스 복합발전의 경우는 시간당 최대 출력 변화율을 0.5로 가정하였으며, 유류발전, 가스터빈, 그리고 ESS는 1로 가정하였다.

□ 마지막으로 최근 ESS 화재 방지를 위하여 최대 충전율을 제약하고 있으나, 장기적으로 기술개발 때문에 해결 가능한 문제로 판단하고, 최대 충전율은 100%로 가정하였다. 또한, 현재 모형은 수소연료전지 및 CCS 등 탄소중립 달성을 위한 기술들도 포함하고 있으며, 최신 국내외 자료들을 바탕으로 기술 특성치 자료가 구성되어 활용되고 있다.

주 의

1. 이 보고서는 온실가스종합정보센터에서 시행한 연구용역과제 결과 보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 온실가스종합정보센터에서 시행한 연구용역과제의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개 하여서는 아니 됩니다.
4. 이 보고서와 관련된 문의사항은 주관부서인 온실가스종합정보센터 감축목표팀(전화 043-714-7564)으로 하시면 됩니다.