



KEMRI 전력경제 REVIEW



이전 Review 보기

Vol.319

2025년 9월호

▶ Issue Paper

✧ 미국과 중국의 전력산업 및 AI 경쟁력 비교

▶ Research Activities

✧ 24/7 무탄소 전환 요금제 설계 시 고려 사항

✧ CAISO의 배터리 자원 관련 제도 개선 동향

【 Highlight 】

1. 전력산업 개요

- 중국의 전력 설비(설비용량, 발전량) 및 투자 규모 모두 미국의 2배를 상회함
- 특히 재생에너지 분야의 경우 중국은 대규모 투자와 내수시장을 바탕으로 미국보다 낮은 원가경쟁력(태양광 기준 미국 LCOE의 53%)을 확보

2. 주요 원자재 공급망

- 중국은 핵심 광물의 생산-정제-소비에 대한 글로벌 점유율이 매우 높은 상황으로, 미국은 막강한 중국의 영향력에 따른 리스크를 헷징하기 위한 방안을 모색 중

3. 청정에너지

- [태양광] 중국은 글로벌 태양광 가치사슬 전반에 걸쳐 90% 내외(최소 86%(모듈)~최대 98%(웨이퍼))의 압도적인 점유율을 기록
- [풍력] 중국은 자국 내 신규 설치를 기반으로 가치사슬 전반에서 두각을 보이고 있으나, 태양광에 비해 중국의 가치사슬별 글로벌 시장 점유율은 낮은 편
- [BESS] 중국은 BESS 가치사슬 전 부문에서 미국 대비 압도적인 우위를 보이고 있음
- [청정 수소] 상류(생산) 부문은 중국이, 중·하류(저장, 운송, 활용) 부문은 미국이 각각 우위를 차지, 미국은 정부 지원을 통해 청정수소의 낮은 경제성을 보완하며 성장 중임

3. AI 기술

- 중국은 AI 관련 논문수, 인용률, 특허 점유율 등 양적인 측면에서 우위에 있으나, AI 성능을 보여주는 질적 지표 및 인프라, 인적자본은 미국이 우위

4. 종합

- [전력 산업] 중국은 전력산업에서 양적 축적을 통해 질적 변화를 유도하는 방식을 적용하여 높은 글로벌 경쟁력을 보유
 - 중국은 정부 주도의 대규모 투자, 내수시장에 기반한 규모의 경제 등을 기반으로 태양광, 풍력, 배터리 등 에너지전환 핵심 분야 및 이에 필요한 원자재 공급망에서 80% 이상의 압도적인 글로벌 시장 점유율을 확보
 - 미국은 중국 의존도 감소를 위해 자국 내 산업 활성화 정책 강화, 회피 기술 개발(박막형 PV, 열화학 H₂ 생산 등), 동맹국 중심 가치사슬 재편 추진 중
- [AI 산업] 미국은 민간 투자를 바탕으로 질적 측면에서 앞서 있으나, 중국은 양적 측면의 우위를 바탕으로 미국을 추격 중이며, 향후 AI 부문에서 美-中 간 인력 확보 경쟁이 더욱 심화될 것으로 전망

【 목 차 】

Issue Paper

■ 미국과 중국의 전력산업 및 AI 경쟁력 비교

- 정해영 선임연구원

엄지현 대 리

I. 전력산업 개요	1
II. 주요 원자재 공급망	2
III. 청정에너지	3
IV. AI 기술	9
V. 종합	11

Research Activities

I. 24/7 무탄소 전환 요금제 설계 시 고려 사항	13
II. CAISO의 배터리 자원 관련 제도 개선 동향	18

Research Issue : 미국과 중국의 전력산업 및 AI 경쟁력 비교

I. 전력산업 개요

- [산업 규모] 2023년 중국의 발전 설비용량과 발전량은 미국의 각각 2배 이상이며, 한국과 비교 시 각각 약 20배, 16배 수준

■ 韓-美-中의 2023년 발전 설비용량 및 발전량 비교 ■

구 분	중 국	미 국	한 국
발전 설비용량	2.9TW	1.3TW	144GW
발전량	9,014TWh	4,237TWh	578TWh

※ 출처 : BNEF, 국가별 발전용량 및 발전량

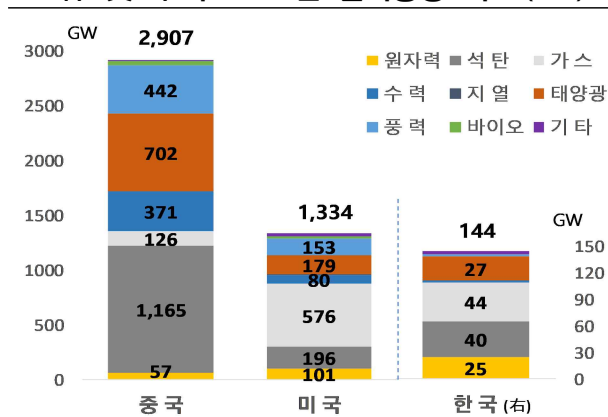
- (전통 전원) 중국은 석탄 중심(설비 비중 40%, 발전량 비중 60%), 미국은 가스 중심(설비 및 발전량 비중 각각 43%), 한국은 석탄·원자력·가스를 비슷한 비중으로 운영

※ 韓 : 설비 비중 석탄 28%, 원자력 17%, 가스 31%, 발전량 비중 석탄 33%, 원자력 31%, 가스 27%

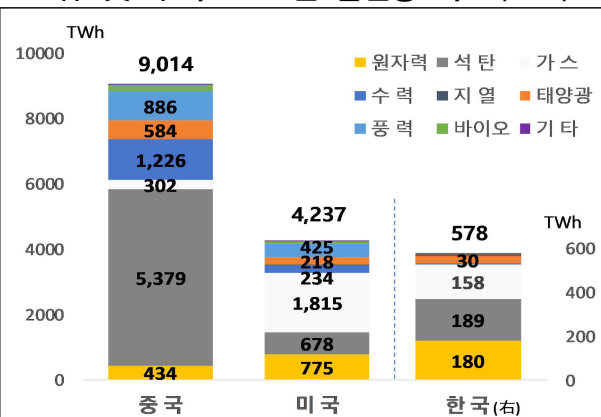
- (재생에너지 전원) 전체 설비용량 중 재생에너지 설비의 비중은 중국 54%, 미국 31%, 한국 21%이며, 발전량 기준으로는 중국 32%, 미국 22%, 한국 8%

- 대표 재생에너지 발전인 태양광과 풍력 발전량 비중은 중국과 미국 모두 15% 내외인 반면, 수력발전의 경우 중국 14%, 미국 6% 수준임
- 한국은 태양광 발전설비(19%), 발전량(5%) 비중이 美·中과 유사하나, 풍력(설비 1%, 발전량 1%)과 수력(설비 1%, 발전량 1%) 비중이 낮음

■ 韓-美-中의 2023년 설비용량 비교 (GW) ■



■ 韓-美-中의 2023년 발전량 비교 (TWh) ■



※ 출처 : BNEF, 국가별 발전용량 및 발전량

- [투자 규모] 2024년 글로벌 투자액(\$2.1조) 중국과 미국의 투자액 비중은 각각 39%(\$8,184억), 16%(\$3,383억)이며, 한국의 투자액 비중은 1.3%(\$276억) 수준

○ (중 국) 2024년 투자액은 전년도(\$6,839억) 대비 20% 증가

- 부문별로는 전기차 \$3,975억(49%) > 재생에너지 \$2,904억(35%) > 전력망 \$871억(11%) > ESS \$188억(2%) > 원자력 \$104억(1%) 순 (전기차, 재생에너지, 전력망에 95% 집중)

○ (미 국) 2024년 투자액은 전년도(\$4,017억) 대비 7% 감소

- 부문별로는 재생에너지 \$967억(29%) > 전력망 \$946억(28%) > 전기차 \$898억(27%) > 전기 난방 \$322억(10%) > ESS \$137억(4%) 순 (재생에너지, 전력망, 전기차에 84% 집중)

○ (한 국) 2024년 투자액은 전년도(\$262억) 대비 5% 증가

- 부문별로는 전기차 \$130억(47%) > 재생에너지 \$62억(22%) > 전력망 \$64억(23%) > 원자력 \$13억(5%) > ESS \$3억(1%) 순 (전기차, 재생에너지, 전력망에 92% 집중)

- [LCOE] 중국은 재생에너지 및 BESS LCOE가 미국의 30 ~ 60% 수준으로, 향후 에너지 다소비 산업의 원가경쟁력 측면에서 유리할 것으로 전망

○ 미국은 중국과 비교해 가스발전(LCOE : 中 \$91/MWh, 美 \$46/MWh)에서만 경쟁력 보유

■ 2024년 전원별 LCOE (단위 : \$/MWh) ■

국 가	석 탄	가 스	태양광	육상풍력	해상풍력	BESS
중 국 (a)	72	91	30	30	59	73
미 국 (b)	143	46	57	63	173	131
中-美 비교 (a/b)	0.50	1.98	0.53	0.48	0.34	0.56
한 국	80	89	98	126	300	-
글로벌 평균	72	84	35	37	79	93

※ 출처 : BNEF, Levelized Cost of Electricity Update 2025, 2025.2

II. 주요 원자재 공급망

- IEA(2025)는 에너지전환 기술에 필수적으로 사용되는 광물을 핵심광물로 지정하고, 안정적인 공급망 확보를 강조

○ 배터리에는 리튬·니켈·코발트·망간·흑연, 재생에너지에는 구리·희토류·실리콘, 수소에는 백금·이리듐이 각각 필요

- [생산·정제] 중국은 1990년대부터 시작된 국가 주도 개발에 따른 관련 기술 투자를 기반으로 여러 핵심광물의 정제 분야에서 압도적인 시장지배력을 보여주고 있음

○ **(생 산)** 중국은 실리콘(글로벌 점유율 79%), 희토류(69%), 보크사이트(23%), 리튬(21%) 등을 생산하는 국가들 가운데 각각에서 상위 3개국에 포함되는 국가임

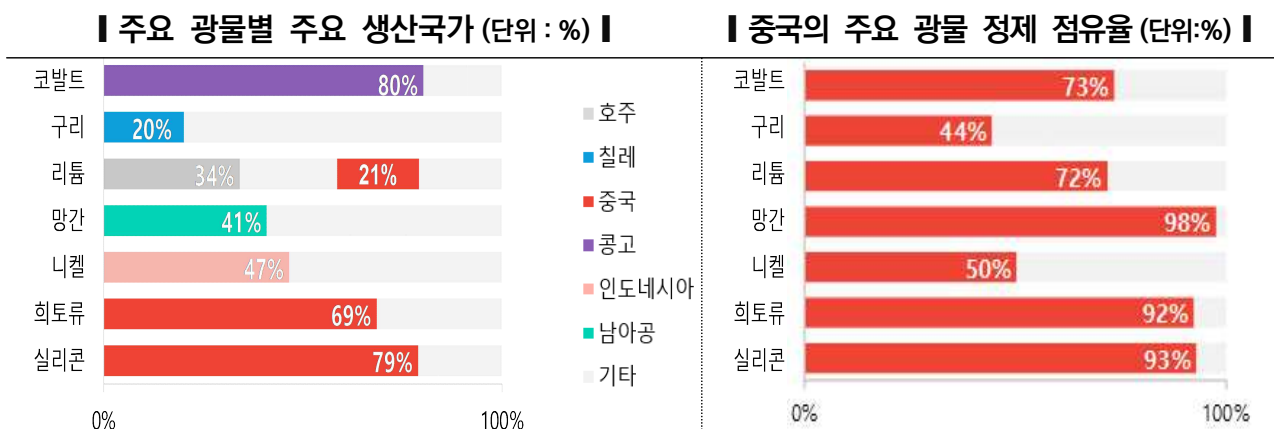
○ **(정 제)** 중국은 글로벌 흑연, 망간, 폴리실리콘, 희토류의 90% 이상, 코발트, 리튬의 70% 이상을 공급하는 등 핵심광물 정제에서도 높은 비중을 차지

※ 한국은 주요 원자재 생산 및 정제 부문에서 상위 3개국 안에 포함된 항목이 없음

■ **[소 비]** 2023년 중국은 글로벌 에너지전환에 필요한 광물(8,100만 톤)의 50%(4,100만 톤), 미국은 10%(800만 톤)를 각각 소비 (韓은 40만 톤 소비)

○ 한편, 2030년 글로벌 수요 전망치 1억 2,800만 톤 중 중국은 6,500만 톤(50%), 미국은 1,300만 톤(10%)을 소비할 것으로 예상됨 (韓은 글로벌 수요의 1%인 1.3백만 톤 수요 전망)

■ 미국은 중국에 대한 핵심광물 의존도 감소를 위해 위해 글로벌 광물 공급망 재편, 동맹국과의 파트너십 강화 등을 추진 중임



※ 출처 : BNEF, Transition Metals Outlook 2024, 2024.10

III. 청정에너지

1. 태양광

■ **[시장 규모]** 글로벌 태양광 발전용량(2.3TW) 중 중국은 46%(1.04TW), 미국은 10%(0.23TW)를 각각 차지하고 있으며, 한국의 비중은 1.3%(0.03TW) 수준임 (2024년 누적 기준)

○ 전 세계적으로 2024년 한 해 동안 599GW(총 누적 발전용량의 26%)가 신규로 설치되었으며, 이 중 중국이 56%(328GW), 미국이 8%(50GW)를 차지

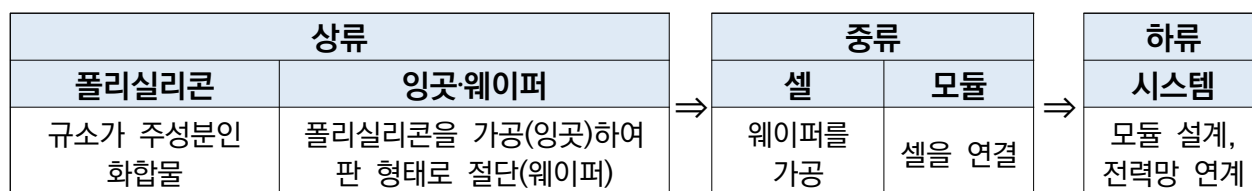
- 한국의 2024년 신규 태양광 발전용량은 3GW(0.5%) 수준임

○ 2035년 글로벌 누적 발전용량 전망치 11.7TW 중 중국이 46%(5.4TW), 미국이 8%(0.96TW)를 각각 차지할 것으로 예상

- 2035년 한국의 누적 발전용량은 67GW(글로벌 비중 0.6%)로 전망됨

- [가치사슬] '폴리실리콘 → 웨이퍼 → 셀 → 모듈' 단계로 구성된 태양광 생산과정 중, 중국은 각 과정에 대해 최소 85% 이상의 점유율을 차지

태양광발전 설비 제조 가치사슬 구조



○ 2024년 글로벌 생산량 중 중국이 폴리실리콘 96%, 웨이퍼 98%, 셀 92%, 모듈 86%를 점유한 반면, 미국은 모든 부문에서 3% 미만

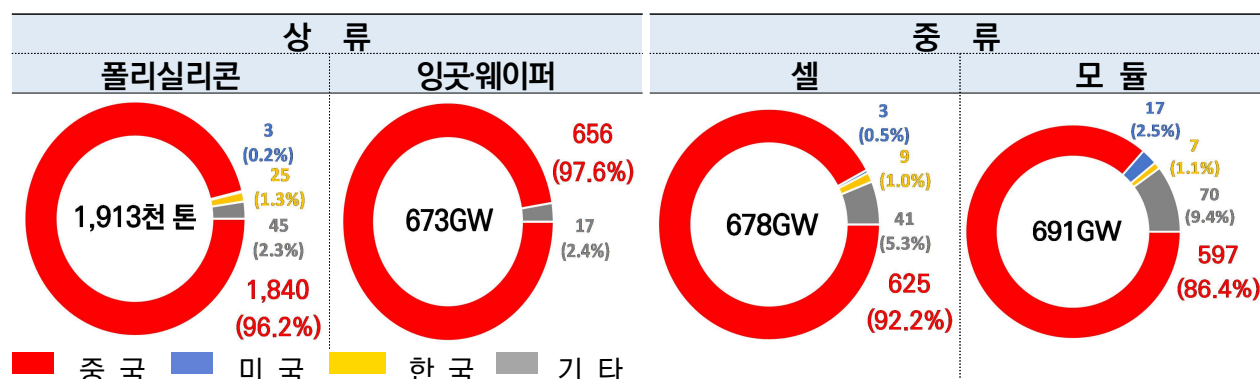
- 특히 높은 기술력이 필요한 웨이퍼 단계의 경우, 중국이 최대 99.9% 독점*

* 주요 생산기업 중 중국 외 기업은 Canadian Solar(캐나다, 점유율 2.4%)와 VSUN(베트남, 점유율 0.03%)이 있으나, Canadian Solar의 창업자(Shawn Qu, 지분 21%) 국적에 따라 중국계 기업으로 분류 시 중국의 점유율은 99.9%에 달함

○ 또한 최근 중국기업을 중심으로 한 대규모 설비 구축으로 2025년 예상 수요(695GW) 대비 평균 약 2배 수준의 설비 과잉이 예상됨

- 가치사슬별 예상 설비 과잉 수준은 폴리실리콘 2.2배(공급능력 1,539 GW), 웨이퍼 1.8배(1,260 GW), 셀 1.9배(1,310 GW), 모듈 2.1배(1,446 GW)

2024년 태양광 가치사슬별 생산량 비교



※ 출처 : BNEF, Solar Manufactures 2024 Production, 2025.6

2. 풍 력

- [시장 규모] 글로벌 풍력 발전용량(1.1TW) 중 중국은 46%(0.52TW), 미국은 13%(0.14TW)를 각각 차지하고 있으며, 한국의 비중은 0.2%(2.2GW) 수준임 (2024년 누적 기준)
 - 전 세계적으로 2024년 한 해 동안 119GW(총 누적 발전용량의 10%)가 신규로 설치되었으며 이 중 중국과 미국이 차지하는 비중은 각각 72%(86GW)와 5%(6GW)임
 - 한편, 한국의 2024년 신규 풍력 발전용량은 0.2GW(0.2%) 수준임
 - 2023~2024년 중국은 미국(12.5GW)보다 12배 더 많은 161.8GW 규모의 풍력설비를 설치하여 양국 간 격차를 확대
 - 동기간 한국의 풍력설비 설치 용량은 0.38GW 수준
 - 2035년 글로벌 누적 발전용량 전망치 3TW 중 중국이 54%(1.6TW), 미국이 10% (0.29TW)를 각각 차지할 것으로 예상
 - 2035년 한국의 누적 발전용량은 14.8GW(글로벌 비중 0.5%)로 전망됨
- [가치사슬] 중국은 풍력발전 설비 제조 가치사슬 (부품 및 소재 제작 → 터빈 제조 → 발전소 개발 및 운영) 전 부문에 걸쳐 미국보다 우위에 있음

Ⅰ 풍력발전 설비 제조 가치사슬 구조 Ⅰ

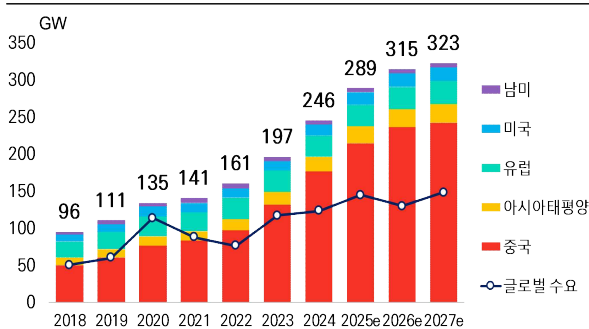
상류				⇒	중류	⇒	하류		
부품 및 소재 제작					터빈 제조		발전소 개발, 운영		
블레이드	나셀*	타워	하부구조물		터빈 설계, 부품 관리, 완제품 조립		사업 개발	EPC	O&M
풍력날개	발전, 변속, 냉각 담당	지지기둥	바다에 터빈 고정 (고정식, 부유식)						

* 로터에 의해 얻어진 회전력을 전기에너지로 변환시키기 위한 장치들을 모아놓은 구조물

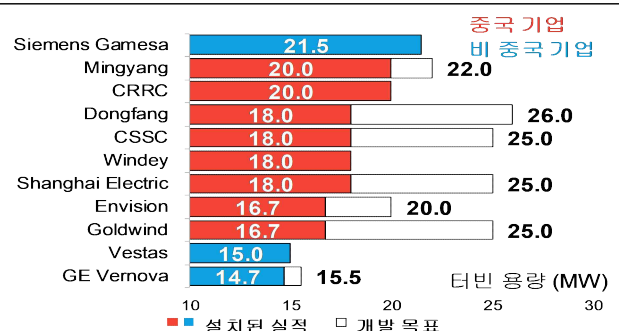
- (나 셀) 2024년 기준 연간 수요(124GW)의 약 2배인 246GW를 생산할 수 있는 설비가 구축되어 있으며, 이 중 중국과 미국이 각각 72%, 6%를 점유하고 있으며 한국은 0.9%를 점유
- 2018년 이후 글로벌 제조사들의 부품 공장 폐쇄(Vestas 5개, GE 5개, Siemens 4개 등 총 23개)가 이어지고 있는 반면, 중국은 131개 공장을 신설
- 한국의 경우 2021년 부품 공장 1개를 신설하였으며, 2025년과 2026년에 각각 1개와 2개를 추가로 신설할 계획임

- (터빈) 글로벌 2~8위 기업*들은 모두 중국기업으로 16.7~20MW급 터빈 설치 실적 보유
 - * 글로벌 1위 기업은 21.5MW 설치 실적을 보유한 독일 Siemens
- 크기가 커질수록 효율이 증가*(발전량↑, 발전단가↓)하는 터빈 특성을 고려, 중국의 Dongfang 등 터빈 제조사는 25MW 이상 대형 터빈을 개발 중
 - * 터빈 크기가 커질수록 터빈의 면적이 증가하여 발전량이 증가하고, 기초 구조물(Balance of Plant) 비용을 하락시켜 전체 비용이 감소하게 됨
(풍력발전기의 발전량 = $1/2 \times \text{공기 밀도} \times \text{터빈의 면적}(=\pi \times \text{터빈 블레이드 반지름}^2) \times \text{풍속}^3$)
- 한국은 10MW 터빈 개발을 완료(유니슨·두산에너지빌리티, 2025년)하고 후속 모델 개발 중

■ 나셀 수요 및 공급 (단위: GW) ■



■ 주요 제작사별 터빈 단위용량 및 목표 (단위:MW) ■



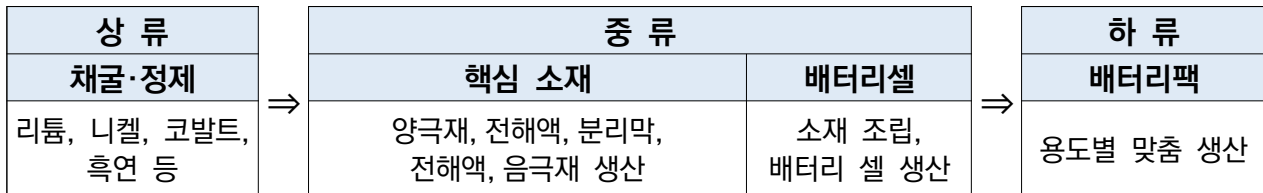
※ 출처 : BNEF, Global Wind Turbine Nacelle Manufacturing Capacity 2025, 2025.3
BNEF, 1H 2025 Offshore Wind Market Outlook, 2025.6

3. 배터리 ESS (Battery ESS)

- [시장 규모] 글로벌 BESS 용량(164GW) 중 중국은 44%(72GW), 미국은 19%(31GW)를 각각 차지하고 있으며, 한국의 비중은 3%(5GW) 수준임 (2024년 누적 기준)
 - 전 세계적으로 2024년 한 해 동안 74GW(총 누적용량의 45%) 규모의 BESS가 신규로 설치되었으며 이 중 중국이 52%(39GW), 미국이 17%(12GW)를 차지함
 - 한국의 2024년 신규 BESS 규모는 0.7GW로 글로벌 용량의 1% 수준임
 - 2023년 중국은 2022년까지 누적용량(11GW)의 2배인 22GW의 BESS를 신규로 설치하여 미국(2023년 누적 19GW)을 제치고 세계 최대 BESS 설치 국가로 등극함
 - 2035년 글로벌 누적용량 전망치 1.8TW 중 중국이 45%(809GW), 미국이 12%(223GW)를 각각 차지할 것으로 전망
 - 2035년 한국의 누적용량은 17.9GW(글로벌 비중 1%)로 전망됨

- [가치사슬] 중국은 내수시장을 기반으로 생태계를 확장 중이며, BESS 생산 가치사슬 전 부문에서 세계 1위 경쟁력을 보유

■ BESS 설비 제조 가치사슬 구조 ■



- (상 류) 중국은 주요 광물 정제 부문에서 용매로 금속을 분리하는 핵심 기술을 보유하여, 핵심광물 대부분이 중국에서 정제*되어 공급
 - * 중국은 원료 확보, 초고순도 광물 획득을 위한 기술 개발, 높은 자원 회수율로 비용효율적 체계를 구축
 - 중국은 BESS에 필요한 흑연 95%, 코발트 73%, 리튬 72%, 니켈 50%를 정제
- (중 류) 2024년 중국은 전 세계 핵심 소재 및 배터리셀 시장을 장악하고 있으며, 특히 음극재의 경우 중국의 생산량 비중은 미국의 960배 수준
 - (핵심 소재) 글로벌 생산량 중 中/美/韓 비중은 양극재 88%/0.1%/8.4%, 음극재 96%/0.1%/1.4%, 분리막 89%/0.9%/4.4%, 전해액 92%/1.8%/1.7%임
 - (배터리셀) 중국은 글로벌 배터리셀 생산량 중 84%를 차지하는 반면, 미국과 한국의 점유율은 각각 6%, 1.1% 수준임
- (하 류) 초기에는 삼원계(NCA, NMC)* 배터리가 글로벌 시장을 주도했으나, 2035년까지 중국을 중심으로 LFP* 배터리가 주도할 것으로 예상
 - * NCA(Nickel Cobalt Aluminum Oxide), NMC(Nickel Manganese Cobalt Oxide)는 에너지밀도는 높지만, 코발트 정제 과정에서의 환경오염, 니켈의 가격 변동성, 상대적으로 취약한 배터리 안정성 등이 문제로 지적됨
 - * LFP(Lithium Iron Phosphate) : 에너지밀도는 낮지만, 안정적인 배터리 구조, 낮은 원재료 가격 등이 장점
 - 2035년 글로벌 배터리 시장에서 LFP 배터리가 차지하는 비율은 2035년 81%로 전망되며, 중국은 LFP 음극재 생산의 98%를 차지할 것으로 예상

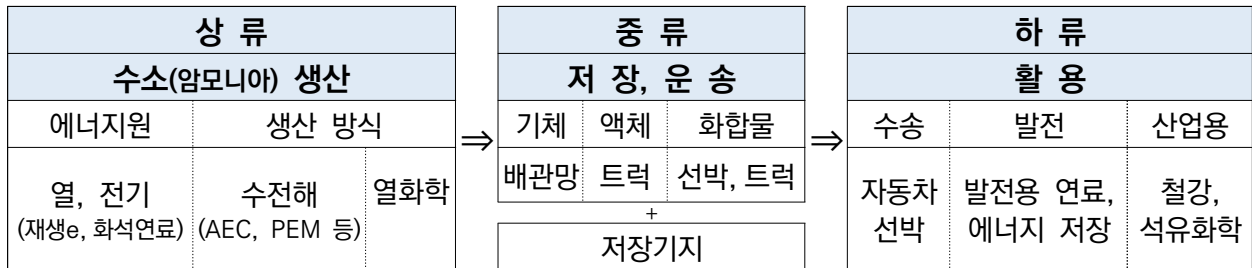
4. 청정 수소

- [시장 규모] 글로벌 청정수소 생산용량 55만 톤 중 중국이 58%, 미국이 19%를 차지 (2024년 누적 기준)
 - 전 세계적으로 2024년 한 해 동안 34만 톤(총 누적용량의 62%)의 생산설비가 신규 설치되었으며 이 가운데 중국과 미국의 비중은 각각 73%와 7%임

- 미국은 정부 지원(\$904억)을 바탕으로 2030년 610만 톤을 공급할 계획인데, 이는 글로벌 생산 규모(1,600만 톤)의 37%, 중국 공급량(312만 톤)의 약 2배에 해당함
- 한국은 2030년 37.3만 톤의 청정수소를 생산할 것으로 전망됨

- [가치사슬] 청정수소 가치사슬 (생산 → 저장 및 운송 → 활용) 중 중국은 상류 부문(생산)에, 미국은 중류 부문(저장, 운송)에서 각각 우위에 있음

■ 청정수소 가치사슬 구조 ■



- (생 산) 중국은 대부분 수전해 방식으로 생산하는 반면(중국 생산량의 99%, 31만 톤), 북미 지역은 열화학 방식*이 주(71%, 8만 톤)를 이룸 (2024년 기준)

* 열화학 방식: 고온의 열에너지를 이용한 다단계 화학반응을 통해 수소를 생산하는 방식으로, 기술적 난이도가 높지만 미래 대규모 청정 열원(SMR, 태양열 등)을 활용하여 수소를 대량 생산할 수 있는 장기적 대안으로 평가

- 중국의 낮은 재생에너지 LCOE가 수전해 방식 확대에 영향을 준 것으로 판단됨
- 반면, 미국은 초고온가스로-열화학 사이클을 연계한 수소 생산 방식을 세계 최초로 고안함에 따라, 이를 활용한 수소 생산 부문에 강점을 나타냄
- 2030년 중국에서는 수전해 방식(99%, 311만 톤)이, 북미에서는 열화학 방식(77%, 539만 톤)이 주요 청정수소 생산 방식이 될 것으로 예상

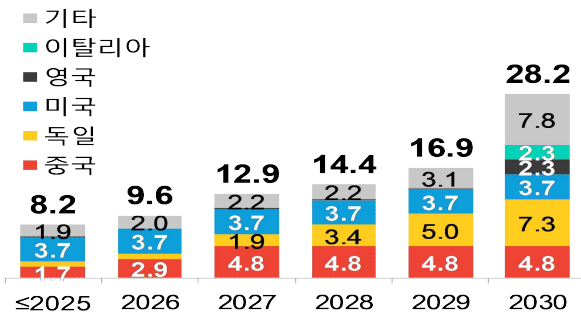
- (배관망) 2024년 기준 배관망 총 연장은 8,200km(美 45%, 中 21%)이며, 2030년까지 독일(7,300km)과 중국(4,800km)이 주도하여 28,200km까지 확장될 전망

- 미국은 배관망 구축에 대한 경제성 부족 등을 고려하여, 2030년까지 현재 수준(3,700km)을 유지할 계획 (한국은 2023년 227km를 구축, 향후 목표 미제시)

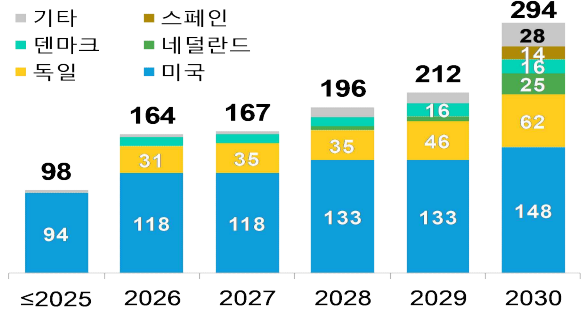
- (저 장) 2024년 글로벌 저장설비는 9.4만 톤(美 96%)으로, 2030년까지 미국(14.8만 톤)과 독일(6.2만 톤)을 중심으로 총 29.4만 톤까지 확장 예상

- 반면, 중국은 후베이성의 4.5톤 규모 저장기지 구축 계획 외에는 알려진 바가 없음

■ 수소 배관망 누적 설치 길이 (단위: 천km) ■



■ 수소 저장기지 누적 용량 (단위: 천 톤) ■



※ 출처 : BNEF, 1H 2025 Hydrogen Market Outlook Year of Natural Selection, 2025.4

IV. AI 기술

- [AI 수준 평가] 세계 주요 기관(스탠포드大, Tortoise Media*, 옥스퍼드大)은 2024년 국가별 AI 수준을 미국 1위, 중국 2위, 한국 6~7위로 평가

* 2018년 설립된 영국의 디지털뉴스 플랫폼

세계 주요 기관의 AI 수준 평가 개요

- ▶ (스탠포드大) 2017년부터 「AI Index」를 크게 8개 부문(연구개발, 책임있는 AI, 경제, 교육, 다양성, 정책, 인프라, 공공 인식) 42개 지표로 평가 **(2024년 36개국 중 미국 1위, 중국 2위, 한국 7위)**
- ▶ (Tortoise Media) 2019년부터 「Global AI Index」를 발간하고 있으며, 크게 3개 부문(환경(인재, 인프라, 운영환경), 혁신(연구, 개발), 투자(정부 전략, 민간)) 122개 지표로 평가 **(2024년 83개국 중 미국 1위, 중국 2위, 한국 6위)**
- ▶ (옥스퍼드大) 2017년부터 「Global AI Readiness Index」를 크게 3개 부문(정부(비전, 거버넌스 및 윤리, 디지털 역량 및 적응성), 기술(규모, 혁신역량, 인적자본), 데이터 및 인프라(데이터 가용성 및 대표성, 인프라)) 188개 지표로 평가 **(2024년 188개국 중 미국 1위, 한국 3위, 중국 14위)**

- 스탠포드大는 교육(中 24위, 美 4위, 韓 18위)과 정책 및 거버넌스(中 33위, 美 6위, 韓 4위) 부문에서 미국과 중국 간에 격차가 있다고 분석
- Tortoise Media는 운영 환경(中 21위, 美 2위, 韓 36위)과 인재 확보(中 9위, 美 1위, 韓 13위) 부문에서 미국과 중국 간에 격차가 있다고 분석
- 옥스퍼드大는 정부 지원(中 46위, 美 2위, 韓 3위)과 인프라(中 34위, 美 3위, 韓 2위) 부문에서 미국과 중국 간에 격차가 있다고 분석

■ **[인적 자본] 상위 AI 인재 중 중국 출신의 비중은 증가 추세에 있으나, 인재 영입 경쟁에서 미국이 여전히 우위를 유지하고 있음 (Paulson Institute, 2023)**

※ Paulson 연구소는 가장 권위있는 AI 컨퍼런스로 알려진 NeurIPS에 제출된 논문을 기준으로 분석, 상위 AI 연구원은 최종 접수된 논문(2,671건)의 저자, 최상위 AI 연구원은 구두 발표자(190건)로 정의하였으며, AI연구 상위 기관은 최종 접수된 논문의 저자 소속으로 분류

○ **(인력 확보)** 2022년 상위 AI 연구원의 출신 국가 비중은 중국이 미국에 비해 2.6배(中 47%, 美 18%) 높지만, 해당 연구원이 일하는 국가는 미국이 1.5배(中 28%, 美 42%) 높아 중국이 인재 영입 경쟁에서 열위에 있음

- 2022년 미국에서 일하는 중국 출신 연구원 비중과 미국 출신 연구원 비중은 각각 2019년 대비 11%p(27→38%), 6%p(31→37%) 증가

- 한국은 2022년 글로벌 최상위 AI 연구원의 2%를 점유하고 있으며, 대부분 자국 내에서 일하고 있는 것으로 추정

○ **(기 관)** AI 연구 상위 25개 기관 중 중국기관은 6개, 미국기관은 15개로 중국이 미국의 40% 수준이나, 2019년(中 2개, 美 18개)에 비해 중국기관의 상위권 진입이 증가

■ **[R&D] 2024년 중국은 양적 평가에서 세계 1위를 차지했으며, 질적 평가의 경우 미국이 중국보다 우위에 있으나 그 격차가 2023년에 비해 대폭 감소**

○ **(양적 평가)** 중국의 AI 관련 ‘논문 점유율’은 2013년, ‘논문 인용률’은 2019년, ‘특허 점유율’은 2017년 이후부터 각각 미국보다 우위*를 기록 중

* **(2024년 실적)** 논문 점유율 中 23.2%, 美 9.2%, 논문 인용율 中 22.6%, 美 13.0%, 특허 점유율 中 69.7%, 美 14.2%

○ **(질적 평가)** 2024년 중국은 주목할 만한 AI 모델 개발 수(中 15개, 美 61개), 상위 100위 논문 수(中 34개, 美 50개), AI 성능평가*에서 미국보다 열위에 있음

* 美-中 AI 성능 격차 (100점 기준, 2023년 → 2024년) : 다중작업 17.5점 → 3.9점, 추론능력 13.5점 → 7.9점, 수학 24.3점 → 1.6점, 코딩 31.7점 → 3.7점

■ **[인프라] 중국은 AI 투자, 데이터센터 구축 등에서 미국을 추격 중**

○ **(투 자)** 2024년 중국의 AI 투자액은 글로벌 2위(\$98억, 글로벌 투자액의 6%)로 1위 미국(\$679억, 글로벌의 44%)의 14% 수준

- 미국과 중국 모두 민간 투자 비중이 높지만(美 99%, 中 79%), 중국은 글로벌 공공 투자액의 42%(\$20억)를 차지할 만큼 국가 주도로 투자가 진행 중임

- 한국의 2024년 AI 투자액은 민간 \$14억, 공공 \$1억으로, 각각 미국(민간 \$672.2억, 공공 \$7.2억)의 2%, 14% 수준임
- (데이터센터) 2024년 중국 데이터센터 용량(24GW)은 글로벌 2위(글로벌 용량 97GW의 25%)로, 1위 미국(42GW, 글로벌 대비 43%)의 57% 수준
- 한국의 2024년 데이터센터 규모는 1.3GW로 글로벌 용량의 1% 수준
- (산업용 로봇) 중국은 2021년 이후 글로벌 로봇 설치의 50% 이상을 차지하고 있으며, 2023년 중국의 산업용 로봇 설치 대수는 글로벌 1위(27.6만 대, 글로벌의 51%)로, 3위인 미국(3.8만 대, 글로벌의 7%) 보다 7.3배 많음 (한국 3.14만 대)

V. 종합

■ [전력 산업] 중국은 전력산업에서 양적 축적을 통해 질적 변화를 유도하는 방식을 적용하여 높은 글로벌 경쟁력을 보유

- 중국은 정부 주도의 대규모 투자, 내수시장에 기반한 규모의 경제 등을 기반으로 태양광, 풍력, 배터리 등 에너지전환 핵심 분야 및 이에 필요한 원자재 공급망에서 80% 이상의 압도적인 글로벌 시장 점유율을 확보
- 최근에는 공급과잉 해결, 경쟁력 있는 기업의 생존 등을 위해 정부 지원을 축소하고, 시장 경쟁을 통한 기술 혁신 및 품질 경쟁 가속화를 유도
- 미국은 중국 의존도 감소를 위해 자국 내 산업 활성화 정책 강화, 회피 기술 개발 (박막형 PV, 열화학 H₂ 생산 등), 동맹국 중심 가치사슬 재편 추진 중
- 한편, IRA 폐지를 위한 법안 개정, 관세 협정으로 인한 물가 상승 등으로 재생에너지 투자가 위축되고 있어 경쟁력 하락에 대한 위험도 증가하고 있음

■ [AI 산업] 미국은 민간 투자를 바탕으로 AI 질적 평가 측면에서 중국에 앞서 있지만, 중국은 AI 특허, 논문 인용률 등 양적 평가 측면에서 우위를 점하면서 미국을 추격 중

- 미국은 AI 개발 모델 수, 상위 100위 논문 수, AI 성능, 인력 확보, 민간 투자 등 질적 평가에서 앞서 있지만, 중국은 논문 점유율, 논문 인용률, 특허 점유율, 공공 투자 등 양적 팽창을 통해 미국을 추격하고 있으며,
- AI 부문에서 우위를 차지하기 위한 미국과 중국 간 인력 확보 경쟁이 더욱 심화될 전망

【참고문헌】

- ▶ BNEF, 국가별 발전용량 및 발전량
- ▶ BNEF, 1H 2025 Energy Storage Market Outlook, 2025.4
- ▶ BNEF, 1H 2025 Global Wind Market Outlook, 2025.6
- ▶ BNEF, 1H 2025 Hydrogen Market Outlook Year of Natural Selection, 2025.4
- ▶ BNEF, 1H 2025 Offshore Wind Market Outlook, 2025.6
- ▶ BNEF, 1Q 2025 Global PV Market Outlook, 2025.2
- ▶ BNEF, 2Q 2025 Global PV Market Outlook, 2025.6
- ▶ BNEF, Energy Transition Investment Trends 2025, 2025.1
- ▶ BNEF, Global Wind Turbine Nacelle Manufacturing Capacity 2025, 2025.3
- ▶ BNEF, Levelized Cost of Electricity Update 2025, 2025.2
- ▶ BNEF, Solar Manufactures 2024 Production, 2025.6
- ▶ BNEF, Transition Metals Outlook 2024, 2024.10
- ▶ Oxford, Government AI Readiness Index 2024, 2024.12
- ▶ Paulson Institute, Global AI Talent Tracker 2.0, 2023
- ▶ Stanford University HAI, Artificial Intelligence Index Report 2025, 2025
- ▶ Tortoise Media, Global AI Index 2024, 2024.9

작성자 : 한전 경영연구원 정해영 선임연구원

엄지현 대리

Research Activities I : 24/7 무탄소 전환 요금제 설계 시 고려 사항

자료 24/7 Carbon-Free Electricity Transition Tariffs (RAP, 2024.3)

1 24/7 무탄소 전환 요금 개요

논의 배경

- [전력 의존도 증가] 건물·교통·산업 부분에서 전기화가 빠르게 확산되면서, 우리의 생활은 저렴하고 신뢰할 수 있는 전력에 대한 의존도가 더욱 높아지고 있음
- [탈탄소화를 향한 도전] 유틸리티와 규제기관은 경제성장에 기여하는 동시에 회복력이 높은 청정 전력 생산 시스템을 구축 및 유지해야 함

정 의

- ‘24/7 무탄소 전환 요금(이하 무탄소 전환 요금)’이란 전력망의 무탄소 전환을 가속화하기 위해 고객의 시간대별 전력소비를 해당 권역에서 조달 가능한 무탄소 전력과 시간 단위로 1:1 매칭하도록 설계된 요금제
 - 기존 녹색요금제*는 연간 상계 방식으로 탄소 배출 감축효과가 제한적인 반면, 무탄소 전환 요금은 시간 단위 매칭을 통해 화석연료 의존도가 증가해 배출량이 많아지는 시간·지역을 대상으로 무탄소 조정자원**에 집중 투자하도록 유도
 - * 유틸리티가 제공하는 옵트인(자발 참여) 요금제로, 고객의 추가 요금 납부를 통해 신재생에너지 추가 조달·투자를 유발하여 고객 전력 사용을 청정전력 조달과 직접 연결되도록 하는 메커니즘
 - ** 계통의 신뢰도·공급능력을 보강하는 무탄소 자원으로서 강화지열시스템, 장주기 저장, 청정 수소, 차세대 원전, 분산자원 집합 등을 포함

도입 필요성

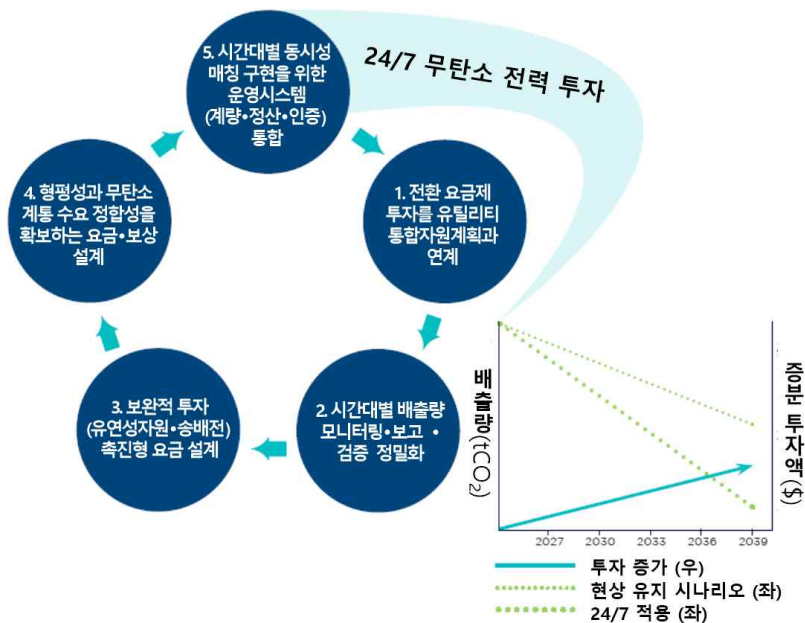
- [기존 정책의 한계] 신재생에너지공급의무화제도(RPS), 배출량 감축목표, 녹색요금제 등은 총배출량 증가세를 완화하는 데는 기여했지만, 전반적인 탄소 감축 효과는 제한적
- [정책 및 규제 역할] 기존 정책 및 규제 틀 내에서는 수요가 많은 시간대의 전력 공급이 여전히 화석연료에 의존하고 있으므로 배출이 가장 높은 시간과 장소를 집중적으로 관리할 수 있는 새로운 조치가 필요

2 유틸리티를 위한 24/7 무탄소 전환 요금: 설계 원칙과 이행 로드맵

설계 원칙

- [고객 참여 메커니즘] 녹색요금제와 같이 고객이 자발적으로 프로그램에 참여함으로써 신재생에너지에 추가 투자하도록 유도
- [시간 정합 목표] 동시성 확보를 핵심 지표로 삼되 동일 계통 운영권역에서 시간 단위로 고객 부하와 무탄소 전원 공급을 대응시키고 그 매칭률과 시간대별 배출을 추적·보고함
- [기술·재원 결함] 무탄소 전환 요금 제도는 공공의 송·배전 투자와 유틸리티·민간 자본의 공동조달·공동계획에 연계되도록 설계되어야 함
 - 비참여 고객의 불이익을 방지하고 공공정책 목표가 비용효율적으로 달성되도록 편익에 따른 비용 배분의 형평성 및 신뢰성 등의 요금 설계 원칙이 반영되어야 함
 - 무탄소 전환요금은 유틸리티의 종합계획(자원·계통·조달·요금 설계)과 연동해 설계 및 운영하는 것을 전제하며, 제도가 시행되면 고배출 시간·지역에 대한 무탄소 자원 투자를 촉발해 중복투자를 줄이고, 고객의 요금 부담을 관리 가능하게 만드는 효과를 기대할 수 있음

24/7 무탄소 전환 요금제의 핵심 원리



유틸리티 준비사항

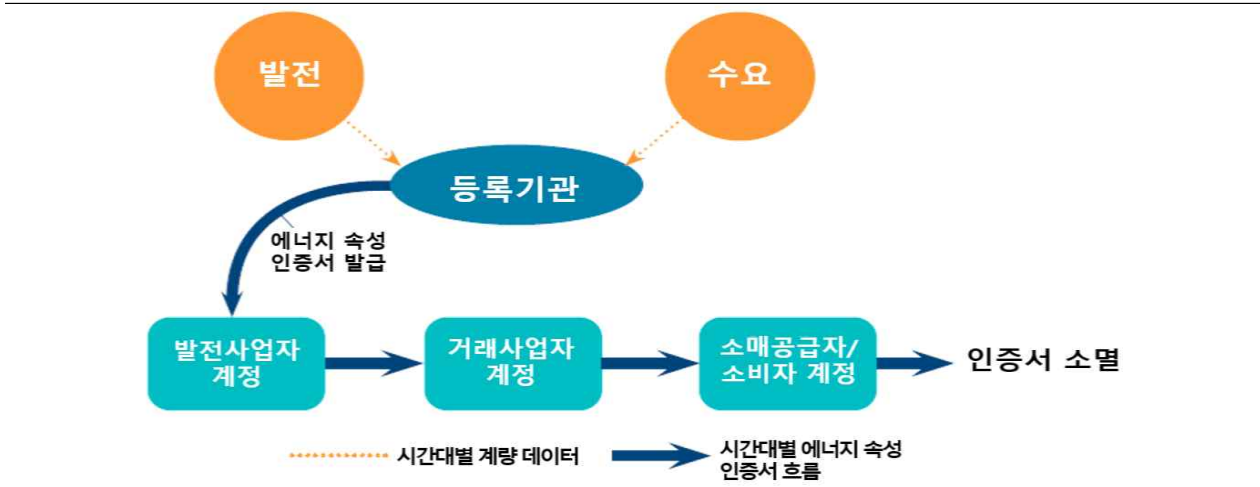
- [데이터·추적 인프라] 계량·부하송전 데이터를 통합하고, 동일 시간대의 에너지속성인증서(EAC^{*})를 자동 매칭하며, EAC 발급·추적·소각 레지스트리^{**} 및 보안·API^{***} 표준을 구축

* 특정 전력의 속성(생산 방식·품질 등)을 증명하는 전자 인증서(예: REC, GO)

** 시간대별 매칭을 위해 시간 표시 EAC를 '발급·추적·소각'까지 처리하는 표준화된 레지스트리·회계 시스템(발전·소비·등록부 연동)을 뜻하며, 거래되지 않은 인증서의 소멸 기록까지 포함한 시간·위치별 소비 전력의 배출 특성 증명을 가능하게 함

*** 상호운영성(interoperability) 표준과 통합(표준화)된 트래킹 시스템

시간대별 무탄소 전력 동시성 매칭 기능



- [무탄소 배분·형평] 기존 무탄소 전원을 배분규칙^{*}에 따라 관리하되, 저소득 및 중소고객(주로 가정·소상공인 등)에 대한 보호장치를 마련해 요금 영향 중립성과 분배적 형평성을 함께 달성해야 함

* 기존 무탄소 전원 관련 지분·비용을 참여·비참여 고객 간에 공정하게 나누는 현재의 배분 원칙을 유지하되, 무탄소 전환요금으로 발생하는 증분 조달(순)비용을 참여 고객이 부담하도록 명문화

- [요금·원가회수] 고배출 시간 신호^{*}를 반영한 요금 구조와 성과연동 인센티브를 설계해야하며, 비용인과성에 따른 합리적 원가 회수와 정산 절차의 일관성을 확립해야 함

* 화석연료 의존도가 증가해 배출량이 많아지는 특정 시간대를 시간 단위로 식별·계량해 보여주는 정보(신호)

- [시범·확대 일정] 고객 대상 파일럿 테스트를 통해 검증 결과를 축적하고, 준비-시범-확대-최적화 일정에 따라 단계적으로 확대함으로써 위험 및 이행 속도를 관리해야 함

- [규제협의·거버넌스] 요금서·약관·보고체계를 규제기관과 사전 합의하고, 정기적인 재검토를 통해 정책의 일관성 및 예측 가능성을 높이는 실무 관리체계를 구축해야 함

3 24/7 무탄소 전환 요금 설계 시 고려 사항

□ 정산구조 선택과 세부 요율 유연화 원칙

- 무탄소 전환요금은 정산구조에 따라 기존 종합요금*, 송·배전 기본요금과 프로그램 전용 발전단가**의 조합형, 별도 독립요금***형으로 구분되며, 지역과 고객 특성에 맞춰 가장 적합한 구조를 선택·적용해야 함
 - * 종합요금: 기존의 발전·송전·배전 등 모든 구성요소를 포함한 요금
 - ** 프로그램 전용 발전단가: 무탄소 전환 요금 참여 고객을 위해 부하공급주체(LSE)가 조달하여 지정한 무탄소 발전 자원에서 생산된 전력에만 적용되는 전용 발전 요금
 - *** 별도 독립요금: 기존 체계와 분리된, 완전히 새로운 별도 요금
- 지역 전원구성과 수요 특성을 반영해 추가 부과금과 크레딧*을 조정 가능한 모듈로 설계하여 세부 요율을 유연화하여 고객 참여 유인과 형평성(비용 배분의 공정성)을 확보해야 함
 - * 프로그램 참여로 인해 발생하는 증분 비용을 회수하기 위한 요금 항목(추가 송전 비용, 계통 통합 비용 등)과 무탄소 자원이 시스템에 주는 증분 편익을 참여자에게 환급·보상하는 항목

□ 대상 부하(참여 고객) 정의와 계약·전환 제도 운영

- 참여 대상 부하의 범위는 ‘신규 부하’, ‘기존 부하’, 또는 ‘신규·기존 결합’ 중에서 정하며, 이 선택은 참여 고객에 대한 증분비용 부과와 요금 설계에 직접적인 영향을 미침
- 표준 계약기간을 중장기로 설정하고 대체공급에서 유틸리티 기본공급으로 전환(복귀) 시 전환 부담금을 부과하며, 24/7 무탄소 전환요금 참여로 발생한 순(증분)비용은 참여 고객이 부담하도록 하여 비참여 고객에게 전가되지 않게 함으로써 계약의 예측가능성과 제도 신뢰성을 높임

□ 비용·편익 정산 및 공정 배분 규칙

- 행정비, 계통 연계·송전망 증설, 계통 통합, 유틸리티 인센티브, 좌초자산 관련 비용 등 추가 비용은 항목별 산정의 투명성을 확보하고 공정한 배분 기준을 사전에 확립해야 함
- 연료·도매전력비 절감 등 편익을 계량하고 추가 비용을 산정한 뒤, 비용에서 편익을 차감한 순증가 비용은 참여 고객이 부담하도록 참여·비참여 고객 간 공정 배분 장치를 명문화함

□ 요금·인센티브 설계와 고객-유틸리티 간 공동투자 최적화

- 고객이 현장 설비·수요관리에 투자하고, 유틸리티가 무탄소 전원·그리드·IT 등에 투자하되, 이를 하나의 통합계획과 요금 설계로 묶어 최적화된 비용배분·인센티브 제도를 설계
 - 수요반응(DR)과 부하관리 인센티브를 포괄하고, 고객과 유틸리티의 공동투자 최적화를 통해 계획·운영·투자를 연계함으로써 탈탄소 목표와 요금 공정성을 동시에 달성 필요
- 요금 설계는 수익 요건 충족, 고객 수용, 형평적 비용 배분, 효율적 가격신호라는 상충하는 목표를 균형 있게 반영한 통합계획에 기반한 표준화 절차를 따라 진행해야 함

□ 시장 구조별 제도 정합성 및 도입 리스크 관리

- 무탄소 전환 요금은 고객의 자유계약이 가능하고 유틸리티의 계량·청구·네트워크 비용 회수 체계가 이미 분리된 소매경쟁 지역에서 별도 상품으로 추가하기 쉬워 도입 및 확산에 유리
 - 반면 수직통합 지역은 참여 대상 부하 정의, 정산 구조 선택, 순(증분)비용의 참여자 부담, 편익 산정, 계약기간·복귀요금 등 핵심 사항을 사전에 설계·명문화하고 이를 규정으로 하여 단계적으로 도입하는 것이 필요
- 수직통합 지역에서는 유틸리티·부하공급자(LSE)가 기존 요금에 프로그램 전용 발전단가의 병행 도입 검토, 단계적 평가 체계 마련, 핵심 과제에 비용과 인센티브 설계, 계약에 신기술 및 분산자원에 대한 성과 보장과 리스크 관리 조항 명시 등을 수행해야 함
 - 수직통합 지역에서는 규제 유틸리티가 요금·계약으로 시간대별 무탄소 포트폴리오와 비용·인센티브·리스크 배분을 설계하지만, 소매경쟁 지역에서는 고객과 소매공급자 간 양자 계약을 통해 이를 구현

4 정책적 시사점 및 기대효과

- 24/7 무탄소 전환 요금제는 고배출 지역 및 시간대의 화석발전원을 대체할 설비·인프라 투자를 유도함으로써 전력부문의 실질 탄소배출량을 구조적으로 감축함
- 수요·공급계획, 배출 추적, 투자 촉진, 요율 설계, EMS 통합을 종합적으로 적용할 경우, 참여 및 비참여 고객 모두에게 계통 신뢰도·탄력성 향상과 총비용 절감 효과 발생
 - (수요·공급계획) 고배출 시간·지역에 필요한 자원(지열·장주기저장·분산자원 등)을 표적 배치하면 중복투자를 줄이고 모든 고객의 비용 효율을 높일 수 있음
 - (배출 추적) 고객의 시간대별 부하를 시간스탬프(EAC)와 매칭해 포트폴리오의 시간·위치별 배출을 입증 관리하면 성과를 정확히 측정하고 고배출 구간을 집중적으로 감축할 수 있음
 - (투자 촉진) 시간·계절 과제를 해결하는 자원(장주기저장·지열 등)에 우선 투자하도록 유도하면 계통 유연성·복원력을 높이고 피크·제약 비용을 완화할 수 있음
 - (요율 설계) 지역 특성을 반영한 가산요금/크레딧을 활용해 세부 요율을 유연화하고, 참여 고객이 순(증분)비용을 부담(비참여 보호)하도록 명문화하면 가격신호 정합성과 비용 회수의 형평성·일관성을 확보할 수 있음
 - (EMS 통합) 고객·시장·운영 영역의 상호운용성을 높이고 EMS/DR과 시간대별 인증을 연계하면 운영 신뢰도를 높이고 불필요한 조달을 줄일 수 있음

작성자 : 한전 경영연구원 오정태 선임연구원

Research Activities II : CAISO의 배터리 자원 관련 제도 개선 동향

자료 2024 Special Report on Battery Storage (CAISO DMM, 2025.5)

1 배터리 자원 시장 참여 현황

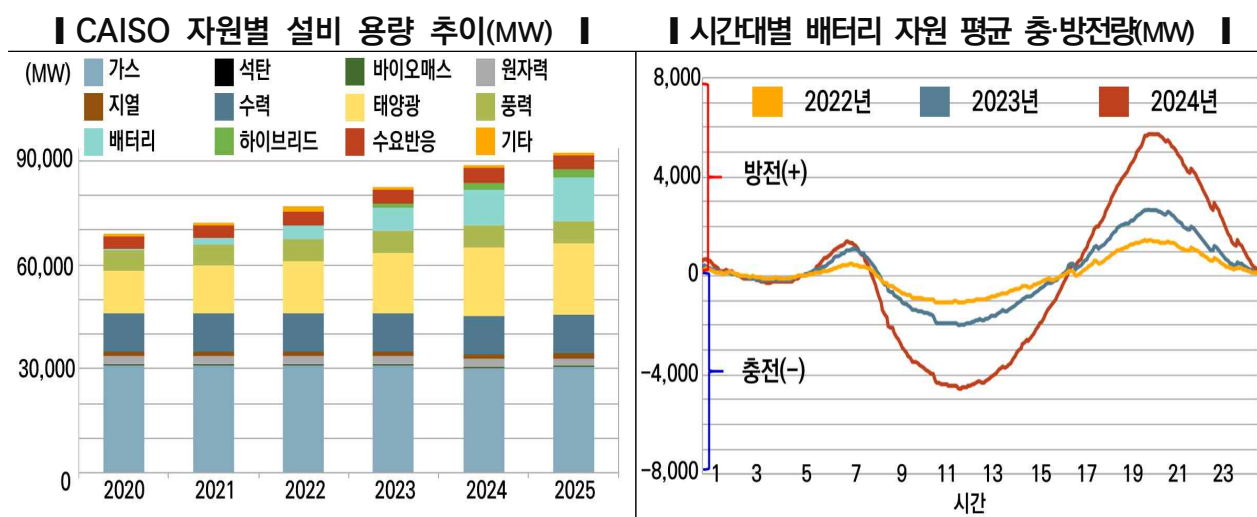
□ 최근 5년간 캘리포니아주에서는 시장에 참여하는 배터리 용량이 가파른 성장세를 보였으며, 앞으로도 이러한 성장세가 이어질 것으로 전망됨

- CAISO 서비스 지역 내 BESS 설비용량은 2020년 500MW에서 2024년 13,000MW로 성장하면서 모든 자원 중 가장 가파른 성장세를 보임
- 2025년부터 2028년까지 CAISO 서비스 지역 내 8,230MW의 배터리가 추가 설치될 계획으로 성장세 유지가 전망됨

□ 배터리는 빠른 응답 성능을 기반으로 순수요*가 급증하는 저녁 시간대 전력 공급 및 계통 보조서비스 제공을 통해 안정적인 계통 운영에 기여하고 있음

* 전체 수요에서 재생에너지 발전량을 제외한 값으로 일반 발전기가 감당해야 하는 수요를 의미함

- 배터리는 주로 10시~13시에 충전하여 전체 수요의 14.7%를 차지하고, 순수요가 가장 높은 17시~21시에 방전하며 전체 전력 공급의 8.6%를 담당
- 2024년 CAISO 시장에서 주파수 조정(Regulation) 서비스의 84%를 배터리 자원이 제공하면서 계통 안정화에 기여



2 배터리 자원 관련 기존 시장 제도의 문제점 및 개선 동향

□ 배터리 자원의 시장 참여가 증가하면서 전통 발전원 중심으로 설계된 시장 제도를 배터리 자원에 맞게 조정하는 과정에서 과도기적 문제점이 나타남

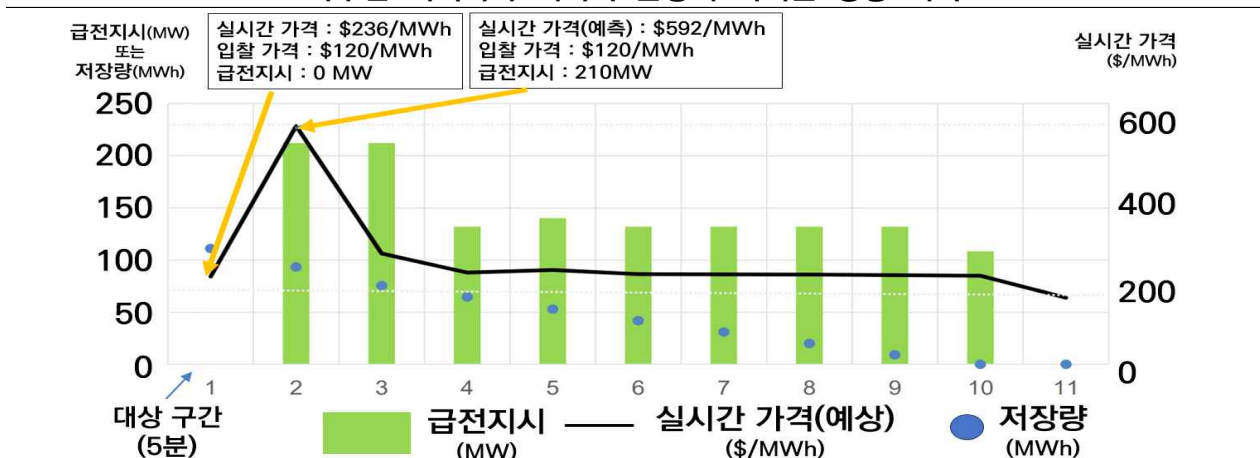
- 실시간 시장 최적화 알고리즘인 ‘범위 최적화’의 한계로 피크 시간대 충전량 부족 발생
- 참여자원의 최소 비용 보장 메커니즘인 ‘입찰비용 회수’ 제도에서 정산금을 부풀리는 전략적 입찰 행위 등의 비효율 발생

1. 다구간 최적화(Multi Interval Optimization, MIO)

□ [개요] CAISO는 전체 시장 운영 비용을 낮추기 위해 여러 시간대의 예상 정보를 반영하여 시장 균형을 도출하는 다구간 최적화를 수행

- 대상 시간(t)의 발전기별 입찰 정보와 미래 시간대($t+1, t+2, \dots$)의 예측 수요 및 제약 변화를 매칭시켜 전체 범위에서 비용이 최소화되는 대상 시간(t)의 발전량과 가격을 도출
- 미래 가격 정보를 반영한 최적화를 통해 배터리 사업자에게 더 높은 수익 기회를 제공 하면, 사업자가 저장 용량 한계로 인해 제한되는 판매 기회를 만회하기 위해 과도하게 높은 방전 입찰 가격을 낼 필요가 없어지므로 시장 효율 개선 가능
- 사업자가 \$120/MWh에 방전(판매) 입찰을 제출했을 때 실시간 시장 가격이 \$236/MWh인 상황에서 단일 구간 최적화였다면 대상구간($t=1$)에서 저장량을 모두 소진하여 판매
- 다구간 최적화 하에서는 대상구간($t=1$)에서 방전하지 않고 더 높은 시장 가격이 예상되는 다음 시간대에 방전함으로써 배터리 사업자의 수익 증대를 보장하여 낮은 입찰 가격 유지 가능

Ⅰ 다구간 최적화가 배터리 운영에 미치는 영향 예시 Ⅰ



※ 출처 : CAISO(2021.10)

□ [이슈] CAISO의 다구간 최적화는 실시간 시장에서 예측 범위가 좁아 피크 시간대 이전에 배터리를 방전시키는 문제 발생

- 급전지시 간격이 5분인 실시간 시장에서는 계산 복잡성으로 인해 예측 가능 범위가 65분 (13개 간격)으로 제한되어 하루 동안의 수요 패턴을 총체적으로 고려한 최적화가 어려움
 - 65분의 제한된 예측 범위로는 하루 중 가격이 가장 높고, 순수요가 급등하는 오후 시간대에 대한 정보 반영이 어려워 그 이전에 충전량을 모두 소진할 수도 있음

□ [개선 동향] 초기에는 예측 범위 한계를 극복하기 위해 별도의 보상 없이 충전량 제약을 두었다면, 최종적으로는 충전량을 강제하는 시간에 배터리가 포기한 기대 수익을 보상하여 시장 원칙을 유지하면서도 운영 안정성을 확보하고 있음

- (임시 조치) 2021년 여름부터 2023년 9월까지 저녁 시간대 급격한 순수요 증가에 대응하기 위한 ‘최소충전상태제약*’을 적용했으나, 충전 상태 강제에 대한 별도의 보상은 없었음
 - * 시장운영자가 정한 ‘핵심 시간’에 배터리 자원이 최소한으로 유지해야 하는 충전량을 강제하는 제약
- (최종 조치) 2023년 9월 ‘예외 급전(Enhanced Exceptional Dispatch)’시 포기한 기대수익을 보상하는 근거를 마련하여, 배터리 자원의 사업성을 보장하면서 전력망 신뢰성을 확보함
 - * 전력망 신뢰성을 확보하기 위해 운영자가 시장 최적화 결과에서 벗어나는 운영 지시를 하는 상황
 - 예외 급전 없이 최적 급전 되었을 때 얻을 수 있었던 최대 수익 예측치와 예외 급전 상황에서 얻을 수 있는 최대 수익 예측치를 비교하여 차액 보상

2. 비용 회수 보장(Bid Cost Recovery, BCR)

□ [개요] CAISO는 전력시장 참여 자원이 시장운영자의 지시나 시스템 제약으로 인해 손실이 발생할 경우 정산금을 통해 최소한의 비용 회수를 보장하고 있음

- 하루 동안 발생한 수입보다 비용이 큰 경우 그 차액만큼을 정산금으로 보전
- 배터리는 전통 전원과 달리 기동비용, 연료비용 등이 발생하지 않아 사업자가 제출하는 입찰가격을 비용으로 간주하고 있으며, 여기에는 저장용량 한계 때문에 특정 시간대 운전 결정 시 포기한 다른 시간대의 기대수익에 대한 기회비용이 포함됨
- 배터리의 충전량 과·부족(충전 상태 제약)은 시장 제약으로 간주되어 비용 회수 대상
 - 사업자가 실시간 시장에서 하루 전 시장의 계획과 다른(시간대, 가격, 방전량) 입찰을 제출하여 낙찰되어 하루 전 시장 계획을 이행하지 못하는 경우에도 이를 시장 알고리즘의 한계로 간주하여 비용 회수 대상이 됨

□ [이슈] 배터리 자원에 적용되는 '비용 회수 보장' 규칙은 하루 전 시장과 실시간 시장 간 급전 과리를 확대시키고, 정산금을 부풀리는 전략적 입찰을 유도하여 시장 비효율 초래

- 충전량 제약이 발생하여 하루 전 시장의 계획을 이행할 수 없게 되어도 비용 회수 보장 정산금을 통해 실시간 시장 음(-)의 수입*을 회수할 수 있기 때문에 하루 전 시장에서 정확한 예측을 기반으로 한 입찰 유인이 떨어져 실시간 시장 간 급전 결과 차이 발생

* 전력시장 참여자원이 하루 전 시장에서 결정된 계획을 이행하지 못할 경우, 시장운영자가 실시간 시장에서 부족량을 조달하고, 계획 미이행 참여자원이 시장운영자의 전력조달 비용(실시간 시장 가격 × 계획량)에 대해 지급하는 대가

- 하루 전 계획 불이행에 따른 음(-)의 수입을 정산금으로 상쇄 가능하기 때문에 정밀한 실시간 시장 예측에 기반한 하루 전 시장 입찰 제출 유인이 떨어짐
- 배터리 사업자의 부정확한 예측이 반영된 입찰 제안을 통해 도출된 하루 전 시장 급전 결과는 실시간 시장에서의 실제 최적 급전과 차이가 있으며, 왜곡된 하루 전 시장 급전 결과는 다른 자원에 대한 계획에까지 영향을 미치면서 시장 비효율 초래
- 배터리 자원의 비용은 사업자가 제출한 입찰 가격을 기준으로 산정되므로, 사업자는 실시간 시장에서 입찰 가격을 조정하여 과대 수익을 얻으려는 유인이 존재함
- 하루 전 시장에서 18시에 100MWh를 방전하기로 한 배터리가 실시간 시장에서 1시간 빨리 방전되고 재충전되지 못하면, 17시에는 방전(판매)을 통해 수입이 발생하지만, 18시에는 하루 전 계획 이행을 위한 비용(=실시간 시장 가격 × 계획량) 발생
- **(비전략적 입찰)** 이때 배터리 사업자가 하루 전 계획을 직접 방전을 통해 이행할 경우 비용은 \$80/MWh이지만, 충전량 제약으로 인해 실시간 시장 가격(\$150/MWh)으로 계획을 이행하면서 \$70/MWh의 손실이 발생했다고 간주하고 17시에 방전을 통해 발생한 수익(\$20/MWh)를 차감한 \$50/MWh를 BCR로 보상
- **(전략적 입찰)** 사업자는 계획 이행 불가 시간의 입찰가격을 낮춤으로써(EX. \$0/MWh) 직접 이행시 발생할 비용과 실시간 시장에서 발생한 실제 비용의 격차를 의도적으로 증가시켜서(EX. \$150/MWh) BCR로 보상받는 손실을 키우는 전략적 행위가 가능

■ 충전상태 제약 발생 시 비용 회수 정산금 예시 ■

구 분	① 하루 전 계획량 (MWh)	② 실시간 시장 급전량 (MWh)	③ 실시간 시장 가격 (\$/MWh)	④ 판매 입찰가격 (\$/MWh)	⑤ 실시간 시장 수입(\$) =(②-①)×③	⑥ 실시간 시장 비용(\$) =(②-①)×④	⑦ 순비용 =정산금(\$) =⑥-⑤
전략적 입찰이 없는 경우							
17시	0	100	100	80	10,000	8,000	-2,000
18시	100	0	150	80	-15,000	-8,000	7,000
합계					-5,000	0	5,000
전략적 입찰이 있는 경우							
17시	0	100	100	80	10,000	8,000	-2,000
18시	100	0	150	0	-15,000	0	15,000
합계					-5,000	8,000	13,000

- [개선 동향] CAISO는 배터리의 과대 수익을 방지하기 위해 입찰 가격에 따라 정산하는 경우를 제한하고, 나아가 배터리 자원이 비용 회수 보장 정산금 지급 대상이 되는 상황 자체를 제한하는 방향으로 제도 개정 논의 중
- 기존에는 항시 사업자의 실시간 시장 입찰 가격을 기준으로 정산금을 지급했다면, 2024년 12월부터 실시간 시장 입찰 가격과 ‘대체 값(Proxy-Value)’ 중 작은 것을 기준으로 산정하도록 제도를 개정하여 전략적 입찰 가격 제출을 통한 과대 수익 방지
 - 대체 값은 ① 하루 전 시장 가격, ② 표준 전력량 입찰가, ③ 실시간 시장 가격 중 최댓값 선택
 - ‘비용 회수 보장’ 관련 전략적 행위가 근본적으로 부정확한 예측에 기반한 하루 전 시장 입찰에서 기인한다고 판단하여, 대부분의 충전 제약 상황에서 비용 회수 보장 정산금을 지급하지 않는 방식으로 개정 논의 중
 - 위와 같은 조치는 더 이상 실시간 시장에서의 손실 회수를 보장하지 않음으로써 사업자들이 하루 전 시장에서 정확하게 입찰 변수를 추정하도록 유인하고, 실시간 시장에서 왜곡되지 않은 기회비용을 반영한 입찰을 하게 만들어 시장 효율성을 개선할 것으로 기대됨

작성자 : 한전 경영연구원 홍원준 선임연구원

KEMRI 전력경제 Review 2025년 9월호 (Vol.319)

발행일 2025. 10. 17.

발행인 원장 강민석

편집인 경영연구원 편집위원회
 편 집 장 책임연구원 원동규(☎국선 : 02-3456-5490 / 사선 : 021-5490)
 편집위원 선임연구원 김범규(☎국선 : 02-3456-5491 / 사선 : 021-5491)

홈페이지 www.kepco.co.kr/KEMRI

문의처 경영연구원 연구기획팀(☎국선 : 02-3456-5490~1 / 사선 : 021-5490~1)

※ 한국전력 경영연구원의 사전 동의 없이 본 보고서의 내용을 무단 전재하거나 제 3자에게 배포하는 것을 금합니다.