



CO₂

무탄소 에너지

CFE (Carbon- Free Energy)



one esg

2024년 4분기 Vol.9

국내 CREDIT 김상만 credinal@hanafn.com

RA 김상인 sanginkim@hanafn.com

하나증권

Contents

Part 1.	무탄소에너지	4
Part 2.	원자력발전	10
Part 3.	돈이 되는 ESS	21
	① ESS 시장 동향	22
	② ESS 비용분석과 기술적 특성	42

Compliance Notice

본 조사자료는 고객의 투자에 정보를 제공할 목적으로 작성되었으며, 어떠한 경우에도 무단 복제 및 배포 될 수 없습니다. 또한 본 자료에 수록된 내용은 당사가 신뢰할 만한 자료 및 정보로 얻어진 것이나, 그 정확성이나 완전성을 보장할 수 없으므로 투자자 자신의 판단과 책임하에 최종결정을 하시기 바랍니다. 따라서 어떠한 경우에도 본 자료는 고객의 주식투자의 결과에 대한 법적 책임소재의 증빙자료로 사용될 수 없습니다.

Summary

- 2024년 부산 기후산업국제박람회의 대주제는 “기후 기술로 열어가는 무탄소 에너지(CFE: Carbon-Free Energy) 시대”였음
- 금번 행사에서 그간 한국정부에서 추진해온 CFE 이니셔티브가 구체적으로 논의되는 기회의 장으로 활용
- 기존의 RE100과 같은 자발적인 민간 이니셔티브는 이행수단을 재생에너지로만 한정함에 따라 국가 또는 지역별 다른 이행 여건과 기업별 다양한 전력 사용패턴을 충분히 고려하지 못하는 단점
- 특히 한국/일본처럼 재생에너지 여건이 불리한 나라에 소재한 기업들은 상대적 비용부담이 커서 또 하나의 무역장벽으로 인식
- 그런 관점에서 한국정부는 2023년부터 탄소중립 이행수단으로 특정 에너지원을 지정하는 방식 대신 기술 중립적 관점에서 탄소배출이 없는 다양한 에너지원을 활용하자는 ‘CFE 이니셔티브’ 개념을 국제사회에 홍보하기 시작. 그리고 한국적 현실에서 무탄소에너지의 현실적 대안은 원자력발전일 수 밖에 없음
- 한국정부의 이와 같은 노력은 '22년 7월 EU의회에서 원자력발전을 EU 택소노미에 포함시킴으로써 탄력을 받게 됨
- EU의회는 원자력과 가스 에너지를 2050년 기후목표인 탄소중립으로 전환하는 과정에서 엄격한 기준을 충족하는 경우 일종의 과도기적 역할을 할 수 있을 것이라는 단서를 제시
- 그에 따라 지리적 여건상 신재생발전에서도 상대적으로 불리한 여건에 있는 한국의 경우 원자력이 EU 택소노미에 포함됨에 따라 Net-Zero로 가는 과정의 에너지믹스 구성에 있어 탄력성을 부여받게 된 효과
- 원자력발전은 국내적으로 재생에너지발전 뿐만 아니라 화석연료에 비해서도 경제성을 확보하고 있는 것으로 평가. 다만, 원자력의 경우 여타 전원과 달리 안전비용/사후처리비용 등 전체수명주기를 감안한 비용접근이 필요한 측면도 존재
- 한편, 무탄소에너지시대를 열어가는 과정에서 한국적 상황에 필요한 것은 에너지발전과정 뿐만 아니라 전력계통상 효율을 높이는 것이 중요한 과제. 그런 측면에서 ESS는 잉여전력을 흡수/방전시킴으로써 재생에너지 등의 ‘간헐성’을 보완하는 기술
- 현재로서는 저장설비를 구축하는 과정에서의 비용문제로 인해 단순원가경쟁력은 떨어지지만, 전력공급 신뢰성을 높이는 이른바 ‘실효용량’ 개념을 감안시 의미가 있음. 결국 배터리용량 확대 등을 통해 방전 지속시간을 연장시킬 수 있는 규모의 경제 확보가 관건

Part 1. 무탄소에너지

(CFE: Carbon Free Energy)

[ONE ESG Vol. 9] 무탄소에너지

하나증권 리서치센터 글로벌투자분석실

크레딧/ESG 김상만 credinal@hanafn.com

2024년 부산 기후산업국제박람회와 CFE 이니셔티브

- 2024 기후산업국제박람회가 2024.9.24~26 부산 벡스코에서 개최
- ‘기후산업국제박람회(World Climate Industry EXPO)’는 기후위기 대응 및 탄소중립 목표 달성을 위해, 세계 기후/에너지 분야의 국제적 논의의 장을 마련하고자 2023년 5월 부산에서 1회 행사를 개최한 이래 '24년 두번째 행사를 개최하게 됨
- 1/2회 공히 기후산업 관련 단체/관련기업의 참여가운데 크게 1) 최신 기술/동향 등에 대한 포럼/세미나개최와 더불어 2) 전시장에서 관련 기업/단체들의 부스를 통해 실제 기후관련 기술이나 동향 등을 파악
- 특히, 한국에서 개최되는 행사의 특성상 한국차원에서 중점을 두고 추진하는 기후변화 이니셔티브에 대한 국제적 관심과 공감대를 이끌어 내고자 하는 것이 행사개최의 또 다른 목적이라 할 수 있음
- 한편 2024행사의 대주제가 “기후 기술로 열어가는 무탄소 에너지(CFE: Carbon-Free Energy) 시대”로 정해짐에 따라 그간 한국정부에서 추진해온 CFE 이니셔티브가 구체적으로 논의되는 기회의 장으로 활용
- CFE 이니셔티브란?
 - 그간 기후위기 대응의 일환으로 기업의 전력수요 100%를 재생에너지로 조달하자는 RE100과 같은 자발적인 민간 이니셔티브가 추진되고 있으나, 이행수단을 재생에너지로만 한정함에 따라
 - 지역별 다른 이행 여건과 기업별 다양한 전력 사용패턴을 충분히 고려하지 못하는 단점
 - 특히 한국/일본처럼 재생에너지 여건이 불리한 나라에 소재한 기업들은 상대적 비용부담이 커서 또 하나의 무역장벽으로 인식
 - 그런 관점에서 한국정부는 2023년부터 탄소중립 이행수단으로 특정 에너지원을 지정하는 방식 대신 기술 중립적 관점에서 탄소배출이 없는 다양한 에너지원을 활용하자는 ‘CFE 이니셔티브’ 개념을 국제사회에 홍보하기 시작
 - 특히 2023년 제28차 기후변화협약 당사국총회(COP28)에서는 합의문 내에 최초로 재생에너지뿐 아니라 원자력, 수소, 탄소포집 · 활용 · 저장(CCUS) 등의 무탄소에너지가 온실가스 감축수단으로 명시

한국정부의 CFE 이니셔티브 추진현황

- 한국정부가 주도하는 CFE 이니셔티브는 기업이 무탄소에너지를 폭넓게 활용할 수 있는 여건을 조성하여 산업부문의 탄소중립 이행을 촉진하고 글로벌 탄소중립 가속화를 목표로 하는 국제적 운동
- 한편 CF연합은 CFE 이니셔티브를 추진하기 위해 결성된 민간 기구로서 2023년 10월 27일 출범. 현재 국내 산업부문 온실가스 배출량의 약 67%를 차지하는 주요 업종의 대표기업 등 20개사가 CF연합 회원사로 참여 중
- CF연합은 출범 이후 현재까지 CFE 이니셔티브에 대한 국제적 공감대 형성과 지지, 협력관계 확대를 위해 세계 각지에서 아웃리치 활동을 전개 중
- 특히 제28차 유엔기후변화협약 당사국총회(COP28)와 국제에너지기구(IEA)본부에서 무탄소에너지에 관한 라운드테이블 미팅을 개최하는 등 CFE 이니셔티브의 글로벌 확산을 위한 활동을 중점적으로 전개
- 한편 한국정부의 이같은 노력에 대한 국제사회의 반응은 비교적 긍정적으로 나타나고 있음. 특히 COP28 합의문에도 역대 최초로 재생에너지 뿐 아니라 원자력, 수소 등이 온실가스 감축의 주요 수단으로 명기된 것은 하나의 큰 성과라고 평가할 수 있음

CFE 이니셔티브 관련 주요국 지지 내역

국가명	지지 내용
사우디아라비아 (2023.10.23)	- 탄소중립 목표 달성을 위한 현실적인 대안으로 원전, 수소 등 고효율 무탄소 에너지를 활용하는 것을 비롯하여 재생, 저감 및 제거 기술을 각국의 사정에 맞게 활용하는 다양한 접근법의 중요성에 공감 - 이러한 측면에서 사우디는 한국이 제안한 CF연합을 환영
영국 (2023.11.21)	- 글로벌 원전 및 재생에너지 설비용량, 에너지효율 개선을 위한 공동 노력 및 CFE 이니셔티브 활동이 이에 기여함을 인정
프랑스 (2023.11.24)	- 마크롱 대통령, 우리의 CFE 이니셔티브 지지 표명
UAE (2023.11.24)	- 우리측 CFE 이니셔티브에 대한 UAE측 지지 선언
네덜란드 (2023.12.13)	- 원전, 재생에너지, 수소를 포함하는 무탄소 에너지원과 에너지 운반체가 탄소중립을 달성하고 에너지 안보를 보장하는데 긴요하다는 점을 인식하고, 양국 간 협력 증진

자료: 산업통상부, 하나증권

CFE 이니셔티브와 기존 국제 이니셔티브 비교

- 탄소중립 이행을 위한 기존 국제 이니셔티브로는 RE100과 24/7 CFE Compact(이하 '24/7')를 들 수 있음
- RE100은 2014년 다국적 비영리단체인 기후그룹(The Climate Group)과 탄소정보공개프로젝트(CDP)가 공동으로 출범하였으며 참여대상은 에너지 생산기업이 아닌 소비기업으로 마이크로소프트, 애플, 구글, 이케아 등 글로벌 428개 기업이 참여 중
- 24/7은 2021년 UN에너지와 지속가능에너지기구(SE4All)의 협력 하에 구글 주도로 출범. 24/7은 연중무휴 탄소를 배출하지 않는 전기 공급원을 통해 전 세계 전력시스템의 탈탄소화를 추구하며 에너지 소비기업 외에도 에너지 공급기업 및 국가/지자체 등 147개 기관 참여 중
- CFE 이니셔티브는 RE100과 달리 재생에너지뿐 아니라 모든 무탄소에너지의 사용을 지향하며, 24/7에서 요구하는 실시간 조달 원칙에 대해서는 실현가능성을 고려하여 초기에는 연간조달을 시작으로 추후 단계적으로 적용해 나간다는 점에서 차이점

주요 국제 이니셔티브 비교

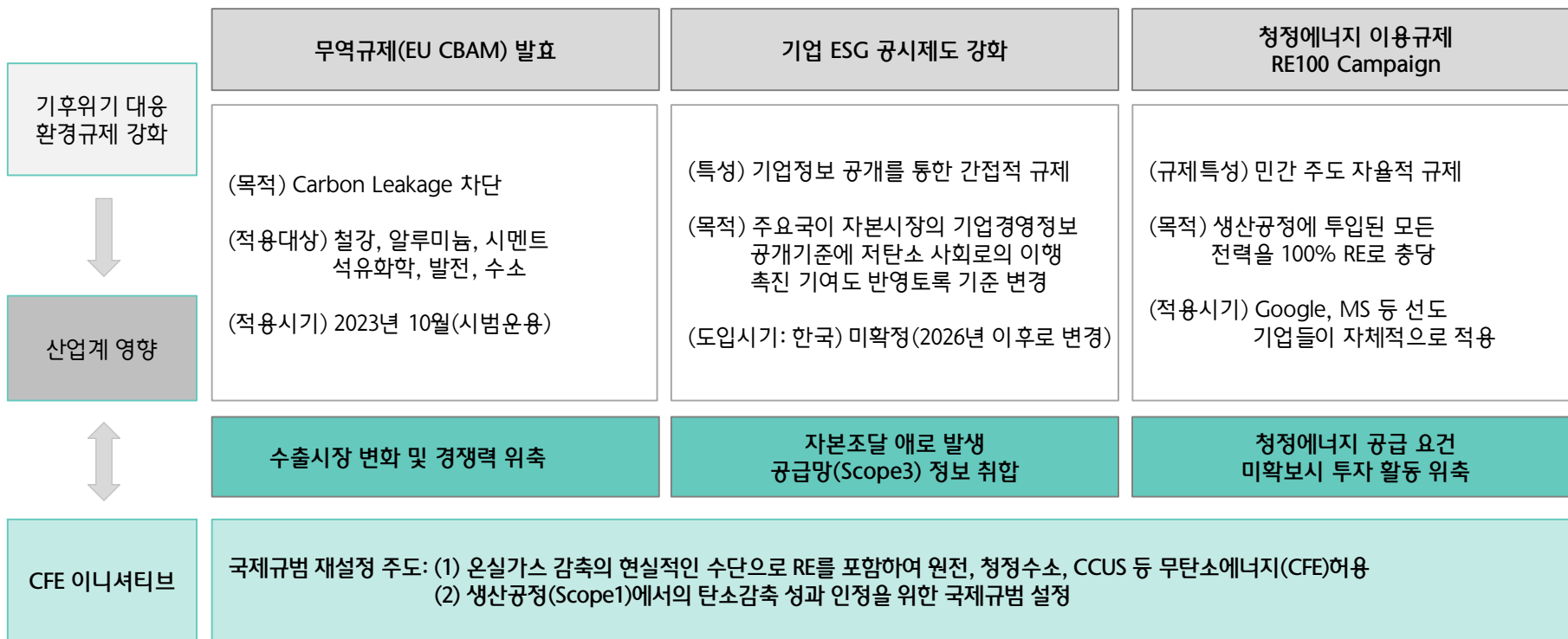
국가명	RE100	24/7 CFE Compact	CFE 이니셔티브
출범	2014년	2021년	2023년
목표	2050년까지 기업 전력수요 100%를 재생에너지로 조달	실시간(24시간-일주일) 무탄소 전력 사용	무탄소에너지 이용 확대
범위	간접배출 (Scope 2)		직접배출 및 간접배출 (Scope 1~2)
주관기관	기후그룹, CDP (민간)	UN 에너지, SE4All (민간 주도, 국제기구 지원)	CF연합 (민간 주도, 정부 지원)
인정 에너지	특정 재생에너지 (태양광, 풍력, 지열, 수력, 바이오매스)	온실가스를 직접 배출하지 않는 모든 무탄소에너지원 (원자력, 수소 등 포함)	
이행 실적 인·검증	有	無 (향후 구축 예상)	有 (구축 중)
참여기업 수	428개	147개	20개

자료: 산업통상자원부, 하나증권

한국 정부의 CFE 이니셔티브 주도 이유 : 산업경쟁력 확보 및 국제규범 주도

- 전술한 한국적 특수한 여건 이외에도 산업부문의 국제 환경규제 대응능력을 강화하면서 부수적으로 국제규범을 주도하고자 하는 의도
- EU 탄소국경세(CBAM) 도입, ESG공시제도 강화 등 환경변화가 국내기업들에 미칠 잠재적/부정적 영향에 대한 선제적인 대응수단으로 활용

산업부문의 국제 환경규제 대응 능력 강화



자료: 산업통상자원부, 하나증권

한국 정부 CFE 이니셔티브의 추진의 명분 내지 당위성

- '22년 7월 유럽의회 본회의에서 EU 탄소노미에 원자력, 천연가스를 포함하기로 결정된 것은 CFE 이니셔티브의 주요 명분으로 작용
- 한국정부는 당초 '21년 12월 환경부가 발표한 한국형 녹색분류체계(K-탄소노미)에서 원자력의 경우에는 국제동향과 국내여건을 고려하여 포함 여부를 결정하겠다는 여지를 둔 바 있었음
- 기후변화 주도국인 EU에서 원자력, 천연가스를 녹색으로 분류함에 따라 기후변화협약 당사국총회에서도 원자력, 수소 등 무탄소에너지가 온실가스 감축수단으로 명시될 명분이 주어지고 CFE 이니셔티브도 추진 당위성이 발생

제28차 기후변화협약 당사국총회(COP28) 합의문 중 CFE관련 발췌(제28항의 e)

28. Further recognizes the need for deep, rapid and sustained reductions in greenhouse gas emissions in line with 1.5°C pathways and calls on Parties to contribute to the following global efforts, in a nationally determined manner, taking into account the Paris Agreement and their different national circumstances, pathways and approaches

(e) Accelerating zero- and low-emission technologies, including, inter alia, renewables, nuclear, abatement and removal technologies such as carbon capture and utilization and storage, particularly in hard-to-abate sectors, and low-carbon hydrogen production

자료: UN, 하나증권

Part 2. 원자력발전

[ONE ESG Vol. 9] 무탄소에너지

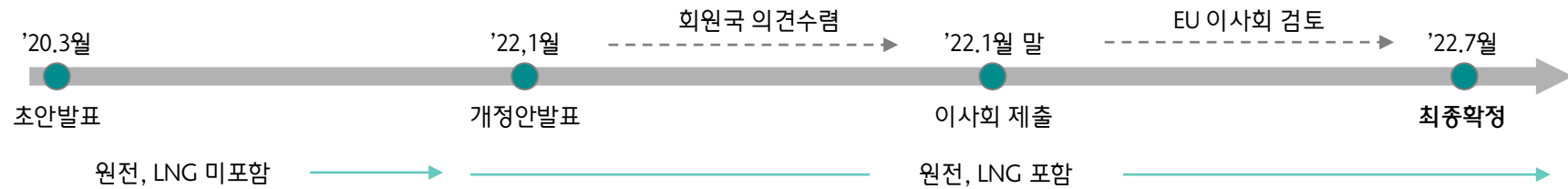
하나증권 리서치센터 글로벌투자분석실

크레딧/ESG 김상만 credinal@hanafn.com

원자력의 EU 탄소노미 포함과정 및 시사점

- EU 탄소노미의 핵심은 원자력 발전의 녹색 분류체계 인정 여부였는 바, EU의회는 '22년 7월 원자력 발전을 EU 탄소노미에 포함하는 것으로 최종 의결
- 당초 2020년 3월에 발표된 EU 탄소노미 최초안에서는 원자력 배제
- 당시 EU의 지속가능금융에 관한 기술전문가그룹(Technical Expert Group on Sustainable Finance, TEG)은 원자력이 기후변화 예방에 실질적으로 기여하나, 원자력이 환경에 중대한 영향을 미치지 않는다는 것에 대한 전문가 그룹의 평가가 필요함을 권고
- 이에 EU 집행위원회는 EU JRC(Joint Research Center)에 전문적인 기술평가를 의뢰('20.6월), JRC는 “원자력은 분류기준에 포함된 다른 에너지원 대비 ‘특별히 건강이나 환경에 더 위험하다’는 과학적 근거가 없음 ”이라는 평가보고서를 제출하며 원자력의 탄소노미 포함 가능성을 염('21.3월)
- EU 집행위원회는 JRC의 연구결과에 동의한다는 입장을 발표('21.6월), 원자력 발전의 EU 탄소노미 편입이 가시화되었고 이후 '21년 12월 발표된 탄소노미 개정안에서 원자력 발전의 녹색 인정기준을 제시, EU 탄소노미에 신규 편입
- 다만, EU 탄소노미에 포함되었다고 해서 모든 원자력 활동이 녹색기술로 인정된다는 의미는 아님
- EU의회는 원자력과 가스 에너지를 2050년 기후목표인 탄소중립으로 전환하는 과정에서 엄격한 기준을 충족하는 경우 일종의 과도기적 역할을 할 수 있을 것이라는 단서를 제시
- 즉, EU 탄소노미에서 원자력 발전의 편입기준은 1) 방사성 폐기물을 안전하게 처분할 계획과 자금, 부지를 갖추고 있으며, 2) 2045년 이전에 건설 허가를 받은 경우 인정받을 수 있음
- 한편, 지리적 여건상 신재생발전에서도 상대적으로 불리한 여건에 있는 한국의 경우 원자력이 EU 탄소노미에 포함된 것은 Net-Zero로 가는 과정의 에너지믹스 구성에 있어 탄력성을 부여받게 된 효과
- 그에 따라 '23년 1월 확정된 제10차 전력수급기본계획상 2030년 목표 발전량 Mix에서 원전 비중은 9차 계획대비 7.4%p 상향된 32.4%로 결정되었으며 2036년까지 34.6%로 확대될 예정

EU 탄소노미 추진 경과 및 내용



EU 그린 탄소노미 개정 주요 내용

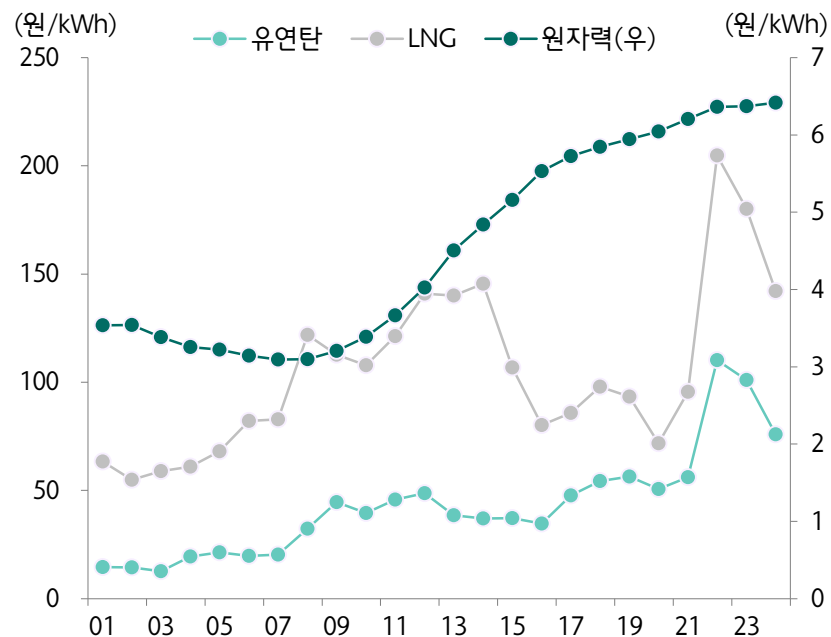
부문	구분	최초안(2020.3)	개정안(2021.12)
기후변화 완화	농림업	복원, 기존 삼림관리, 다년생 작물 재배	좌동
	전기/가스	태양광, 태양열, 풍력, 해양에너지, 수력, 지열, 바이오, LNG ※ 제외 : 석탄화력, 원자력 : 보류	원전 신규 편입 LNG 편입 기준 구체화
	건설/부동산	재생e 시설 설치, 기존 건물 수리, 건물 신축 등	좌동
	제조업	저탄소기술 제품, 원료 플라스틱, 비료와 질소화합물 등	
	수자원/폐기물	이산화탄소 포집, 무독성 폐기물 분리수거·운송 등	
	운송/저장	저탄소 교통인프라, 수상시설 건축 등	
기후변화 적응	정보통신	온실가스 감축 데이터기반 솔루션 등	

자료: 한국전력, 하나증권

원자력발전 경제성

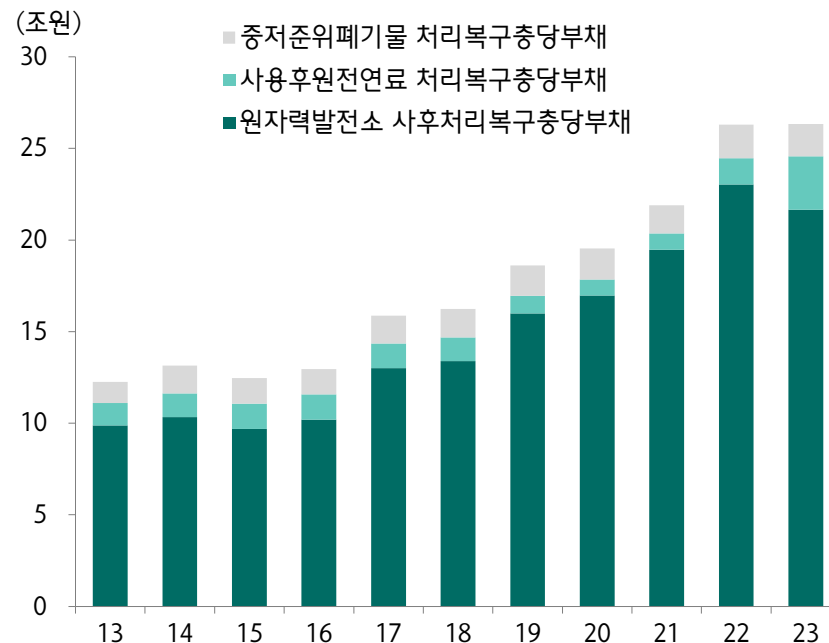
- 원자력발전은 초기 투자비가 석탄발전과 가스발전에 비해 높지만 낮은 변동비(원재료비) 부담으로 인해 일반적으로 가장 값싼 발전원으로 평가 및 인식되고 있음
- 다만, 원자력발전의 경우 타 발전원과 달리 '전체수명주기'를 감안한 잠재비용을 감안해야 함. 즉, 발전과정상 발생하는 방사성 폐기물의 처리비용 + 외부효과를 감안한 사회적비용 등의 산출에 어려움

다른 발전원 대비 크게 낮은 원자력의 연료비 단가



자료: 한국전력, 하나증권

다만, 폐기물 처리비용 발생

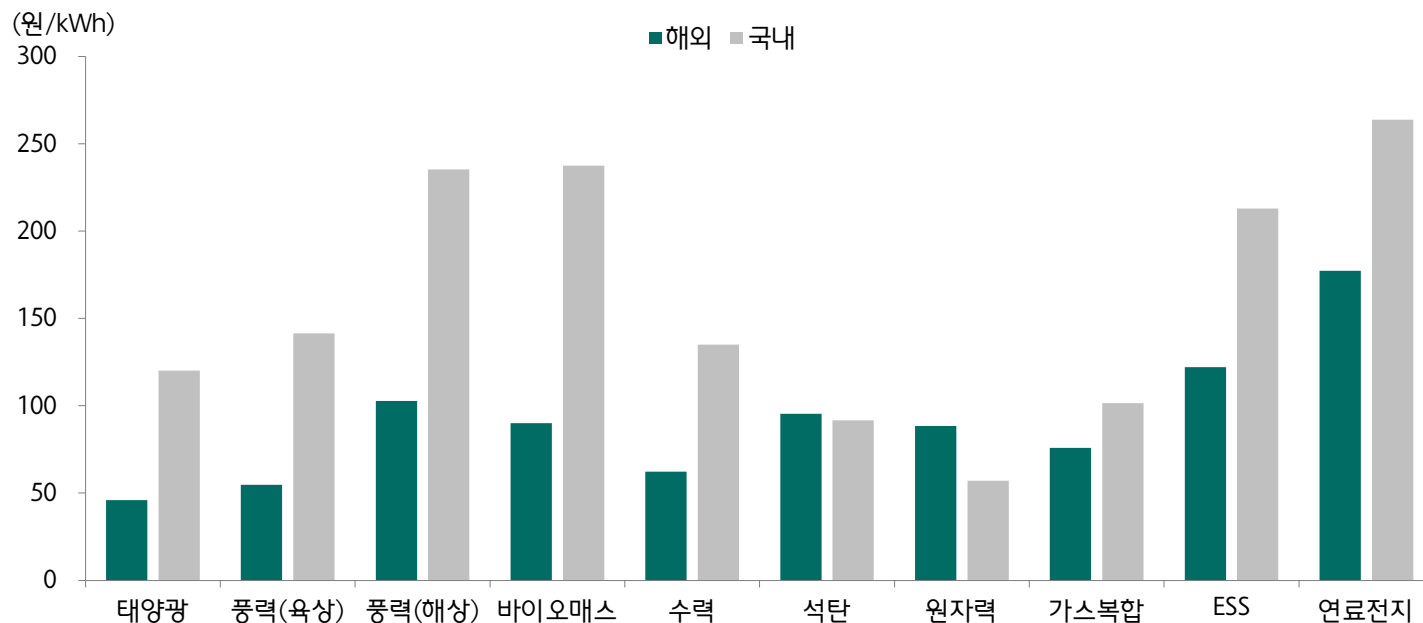


자료: 한국수력원자력, 하나증권

원자력발전, 국내적으로 상대적인 경제성 우위 보유

- 그간 국내외 연구기관의 에너지원별 균등화 발전단가(LCOE: Levelized Cost of Energy) 산정결과에 따르면 해외의 경우 원전보다 신재생 발전단가가 낮고 국내의 경우 원자력<석탄<가스<신재생 순으로 발전단가가 낮은 것으로 나타남
- 해외와 국내간 에너지원별 발전단가가 차이를 보이는 이유는 지리적여건, 전원별 밸류체인차이 등에 기인하는 것으로 진단됨
- 한편, 국내 원전단가는 해외 대비 그리고 국내적으로 타 전원 대비 상대적으로 낮게 산정되고 있음. 그 이유에 대해
- 긍정적인 관점에서는 “정부주도의 발전시장 특성상 밸류체인이 형성되어 있는 등 복합적인 이유”라는 입장과
- 부정적인 관점에서는 “폐기물처리비용 등 사회적/사후비용이 적절히 반영되어 있지 않기 때문”이라는 입장으로 갈림

균등화발전단가LCOE 국내외 비교(중간값 기준)



자료: 한국자원경제학회, 하나증권

주: 국내 해상풍력은 2016년 및 2017년 설비가격 평균

국내외 연구기관, 전원별 균등발전원가(원/kWh) 비교

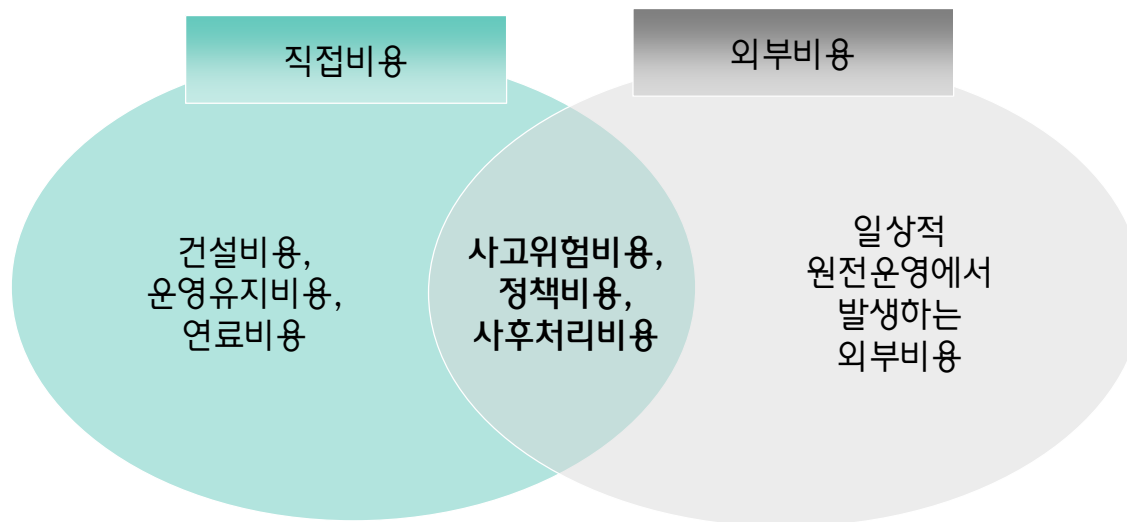
	해외						국내						
	Lazard (2020)	IRENA (2020)	EIA (2020)	BEIS (2020)	BNEF (2020)	IEA (2020)	IEA (2020, Korea)	KPX (2020)	KEPCO (2018)	KPX (2018)	에너지 경제연구원 (2017)	에너지 경제연구원 (2020)	한국자원 경제학회 (2021)
태양광 (발전용)	43.7	80.2	39.1	66.6	59(고정식) 46(추적식)	46.02	118.18	121.9	111.03	133.28		136.1	113.21
풍력(육상)	47.2	62.5	47.1	69.6	51.9	57.5	138.71		132.51	124.25	150	166.8	144.28
풍력(해상)	102.7	135.7	144.2	86.3		79	197.03		204.9		283.2		265.81
태양열	166.4	214.7			92	125.67							
지열	94.4	86.1	41.8			84.77							
바이오매스		77.9	111.9			89.97					231		244.1
수력		55.5	62.3			65.24					135		
석탄	132.1		90.2		71.6	100.64	92.52	90.67	81.35	81.22	101		127.35
원자력	192.3		88.4			69.19	65.24	53.01	56.12	55.52	58		67.84
가스복합	69.6		44.9		82.1	71.55(85% capa) 103.07(35% capa)		101.43	88.09	98.71	137		124.59
저장장치 (배터리)					177	67.18							212.91
연료전지						177.31					285		242.65

자료: 한국자원경제학회, 하나증권

원자력발전의 외부비용 국내외 사례(현황)의 시사점

- 타 발전원과 달리 원자력발전에 대해서는 실제적/잠재적 외부비용 논란이 이슈. 원자력발전의 비용구조는 직접비용+외부비용으로 구성
- 직접비용은 건설비용, 운전유지비용, 사후처리비용(중저준위방사성폐기물), 연료비용, 기타비용(정책비용)으로 구성
- 실제적 외부비용은 안전대책비용, 사고위험대응비용 등을 꼽을 수 있고 잠재적 외부비용은 정책비용, 환경오염비용, 사후처리비용(고준위방사성 폐기물) 등을 들 수 있음
- 다만, 외부비용은 항목의 특성상 정형화하기 힘든 비용. 관련 해외보고서<OECD/NEA(2003) / William D. (2013.11)>에서는 다음과 같은 항목을 원전의 외부비용 혹은 숨은 비용(Hidden Costs)으로 분류하고 있음

원자력 사용의 비용 내역



자료: 에너지경제연구원, 하나증권

외부비용에 대한 해외 연구조사 사례(OECD) (“에너지경제연구원 자료 인용”)

<OECD/NEA(2003, p12)>

"Aspects of nuclear energy that often are suggested to entail external costs include: *radioactive waste disposal, future financial liabilities arising from decommissioning and dismantling of nuclear facilities, health and environmental impacts of radioactive releases in routine operation and effects of severe accidents*"

① **Routine Operation:** In normal operation under independent and effective regulation, nuclear power plants and fuel cycle facilities have relatively small health and environmental impacts

- 일상적 원전운영의 외부비용은 원전 선행연료주기 및 발전, 그리고 후행핵연료주기 등 원전 전주기에서 발생하는 인체건강과 주변 환경오염을 의미

② **Severe Nuclear Accidents**

- 원전사고위험대응에 대한 외부비용은 노심손상(CDF, Core Damage Frequency), 방사성물질의 대량조기방출빈도(LERF, Large Early Release Frequency) 등과 같이 중대한 원전사고 발생 시 외부 비용을 의미함

=====

☞ OECD/NEA(2003) 보고서에서는 원전의 외부비용뿐만 아니라, **외부편익**에 대해서도 언급하고 있으며, 정량적 분석의 애로로 **정성적 분석**만 언급

- Energy security, Environmental protection, Research and development spin-off, Balance of payments, Price stability

※ Energy Security 정의: TEA(국제에너지기구, International Energy Agency)의 정의에 의하면, 에너지안보는 ‘합리적인 가격으로 에너지 자원을 중단 없이 가용할 수 있음’을 의미함

국내 원전 외부비용과 내재화 현황(“에너지경제연구원 자료 인용”)

- 국내 원전의 발전비용에는 건설비, 운전유지비(사용후핵연료폐기물 처리비용과 해체비용 포함), 연료비 등 직접비용과 지역자원시설세(1원/kWh) 및 R&D비용(원자력연구개발기금, 1.2원/kWh), 그리고 지역협력사업비(0.25원/kWh) 및 사업자 지원 등 기타비용이 포함
- 사후처리비용은 2012년 말 개정과 2015년 재개정을 통해 세계 수준으로 대폭 인상하였고, 지역자원시설세 역시 기존 0.5원/kWh에서 1원/kWh로 100% 인상
- 2014년 12월, 원자력손해배상액을 기존 500억원에서 5,000억원으로 상향 조정하는 등 **사고위험대책비용의 외부비용 일부를 이미 내재화**

방사성폐기물 관리비 산정 결과

사후처리비 항목		2012년 말	2014년 말
방사성폐기물 관리비용(200L 드럼당)	중저준위	1,193만원	1,219만원
사용후핵연료 관리부담금(다발당)	경수로	320백만원	동일
	중수로	13백만원	동일
해체충당금(호기당)		6,033억원	6,437억원

자료 : 산업통상자원부 방사성폐기물관리비용산정위원회(2015. 5), 2014년 방사성폐기물 관리비용 산정 최종보고서-방사성폐기물 관리비용, 사용후핵연료관리 부담금, 원전해체 중담금의 내용을 요약·정리

원자력발전의 (국내외) 외부비용 반영사례(현황)의 시사점

- 국내외 사례에서 알 수 있는 것처럼 대부분 국가에서 원자력발전의 외부비용을 일정부분 내재화 또는 기금적립 등의 방식으로 반영하고 있는 것이 사실
- 문제는 정성적인 측면이 고려되어야 하는 외부비용의 특성상 그 적정성을 검증하기가 쉽지 않다는 점
- 특히 사용후핵연료폐기물처리와 관련된 비용의 경우에는 국내외 공히 폐기물 **관리**에 대한 비용은 인식하고 있지만 **궁극적인 처리**에 대한 반영이 되지 않고 있는 실정
- 한국을 포함한 대부분 국가의 경우 사용후핵연료폐기물 영구처분장의 설치가 이루어지지 않고 있는 상황에서 비용산출은 더더욱 어려움
- 한편, 원자력발전에만 외부비용을 감안하는 것 또한 형평성 차원에서 적절하지 않을 수 있음. 기타 발전원(특히 화석연료)의 경우에도 외부비용이 발생한다고 보아야 하기 때문

원전에서 발생하는 폐기물은 어떻게 처리하나?

- ✓ 원자력을 이용하는 과정에서 발생하는 폐기물은 방사성물질 또는 그에 따라 오염된 물질로서 폐기의 대상이 되는 물질
- ✓ 방사성폐기물은 방사능의 세기에 따라 고준위방사성폐기물과 중·저준위방사성폐기물로 구분
- ✓ 고준위폐기물은 원전에서 전기를 생산하고 난 사용후핵연료와 사용후핵연료를 재활용하기 위해 재처리하는 과정에서 발생하는 폐기물로서 방사능 수치가 높음. 현재 우리나라에서는 각 원전 내의 시설에서 사용후핵연료를 저장하고 있으며, 장기적으로 영구 처분할 수 있는 시설이 필요한 상황
- ✓ 중·저준위폐기물은 방사성폐기물 발생량의 90%를 차지하는데 방사선관리구역에서 사용된 작업복 등과 기기교체부품 및 병원이나 산업체에서 발생하는 방사능 수치가 낮은 폐기물. 현재 우리나라에서는 동굴방식으로 건설한 경주 중·저준위 방사성폐기물 처분시설에서 관리중

사용후핵연료는 어떻게 관리하고 있나?

- 원전에서 발생한 사용후핵연료는 원전 내의 관계시설인 임시저장 시설에서 저장·관리 중
- 현재 가동중인 원전 24기 중 경수로형인 20기는 사용후핵연료 저장조(습식시설)에, 중수로형 4기는(월성) 사용후핵연료 저장조 및 건식저장시설에 저장·관리되고 있음
- 우리나라는 2031년 고리,한빛 원전을 시작으로 저장시설이 포화 상태에 이를 것으로 전망됨에 따라 별도의 중간저장 시설 혹은 영구처분 시설이 필요
- 중간저장은 최종처분 이전까지 40~80년 동안 중장기적으로 안전하게 저장하는 것을 말하며, 최종처분은 인간생활과 영구히 격리시키는 것으로 초장기(10만년 이상)의 지질 안전성을 요구
→ 여기서 10만년은 핵연료의 방사선수치가 반감기에 따라 '0' 즉, 자연상태로 돌아가는데 필요한 시간
- 사용후핵연료처분은 지하 500~1,000m 깊이의 심지층에 처분하는 것으로 현재 대부분의 국가들이 심지층 처분 방식으로 선호하고 있으며 실제로 핀란드의 경우 2025년경 세계 최초로 고준위방사성폐기물 저장소 완성국가가 될 예정
- 방사성폐기물 처리시설은 기본계획에서부터 건설까지 최소 30년 이상의 시일이 소요되는 장기 프로젝트
- 한국의 경우 역대 정부에서 방사성폐기물 영구 처분장 건설을 1986년부터 10차례나 시도했으나 지역사회 반발로 모두 무산
- 사용후핵연료 처분시설을 추진하는 과정에서 사회적 갈등을 피하기는 어려우며 프랑스, 영국 등에서도 이 문제를 해결하기 위해 다년간 국민의견을 수렴하는 공론화 과정을 통해 관리방안을 수립 중
- 우리나라 또한 사용후핵연료에 대한 국민적 공감대를 조성하고 관리 방안을 함께 찾아가고자 공론화위원회를 설립하여 운영하였고, 2015년 6월 최종 권고안이 제출되었으며, 정부는 이를 바탕으로 관리계획을 수립 중
- 한편 한국원자력연구원에서는 사용후핵연료 보관처분용기의 테스트모형을 개발하여 '공학적 방벽시스템 성능 실증 실험'을 진행중에 있음

Part 3. 돈이 되는 ESS

자료: 하나증권 리서치센터 [Energy Transition Series #3]
Profitable ESS('24.9.11) 해설 · 요약정리

하나증권 리서치센터 글로벌투자분석실

크레딧/ESG 김상만 credinal@hanafn.com

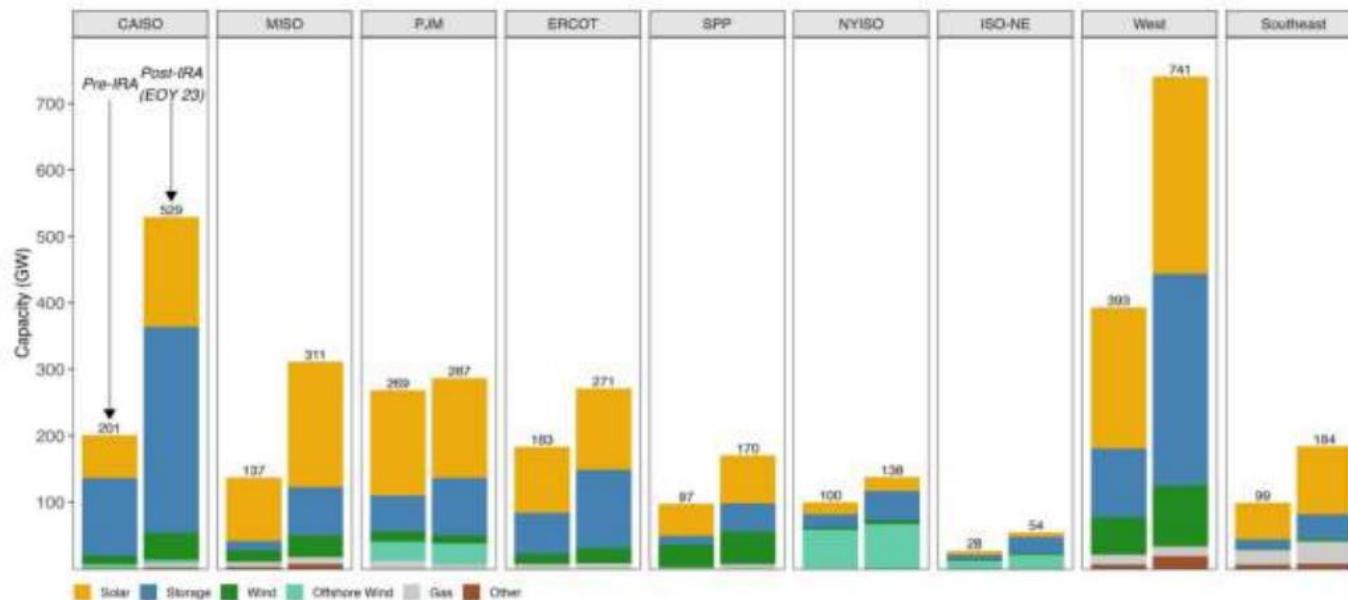
[ONE ESG Vol. 9] ESS

① ESS 시장 동향

정책으로 빠르게 성장한 재생에너지

- 미국 에너지 전환 투자가 크게 성장했던 계기는 IRA(Inflation Reduction Act). 기존 PTC(Production Tax Credit)와 ITC(Investment Tax Credit)는 발전설비의 투자를 견인했었고 IRA 법안은 세액공제 기간 연장 및 강화, AMPC 등 추가 지원을 통해 밸류체인을 내재화
- 반도체, 자동차 등 투자 수요가 충분한 지역에서 인센티브를 제공함으로써 집중적으로 설비 건설. 전력설비 또한 노후 설비의 교체수요뿐만 아니라 신규 증설도 늘어남. 재생에너지에 국한되지 않고 다른 무탄소 전원과 ESS까지 지원 확대
- 트럼프 후보는 IRA 폐지와 재생에너지 예산 삭감을 이야기하고 있음. 정책으로 성장한 시장이기 때문에 동력은 훼손될 수 있지만 여러 상황들을 고려하면 속도는 달라져도 방향은 바뀌지 않을 가능성이 큼

IRA 법안 통과 전후 주요 권역별 재생에너지 프로젝트 변화



자료: Lawrence Berkeley National Laboratory, 하나증권

인플레이션 감축법의 청정에너지 진흥 주요 방안

NO	제도	주요내용	최대혜택	조항
1	에너지자산에 대한 투자세액공제	재생에너지 프로젝트에 대한 투자에 세금 공제를 제공하던 기존의 투자세액공제를 2034년까지 10년간 연장하고 적용 대상과 혜택도 확대	투자액의 50%	13102
2	무배출 원자력발전 생산세액공제	적격 원자력 시설에서 생산된 전기에 대한 세액공제이며 신규 조항	1.5¢/kWh	13105
3	청정 전기 생산세액공제	청정 전기 생산에 대해 기술중립적인 세액공제를 제공하며, 재생자원에서 생산된 전기에 대한 기존의 생산세액공제를 대체	1.8¢/kWh	13101
4	청정 전기 투자세액공제	청정 전기 생산시설에 대한 투자에 대해 세액공제를 제공하며, 이는 재생 자원에서 전기를 생산하는 시설에 대한 기존의 투자세액공제를 대체	투자액의 50%	13702
5	첨단에너지프로젝트 세액공제	내국세법 제48C조 (c)항 (1)절에 정의된 첨단에너지프로젝트 투자에 대한 세액공제를 제공하며, IRA에 의해 100억 달러의 추가 공제가 제공	투자액의 30%	13501
6	첨단제조 생산세액공제	태양광·풍력 에너지용 구성품, 인버터, 배터리 구성품, 핵심광물의 미국내 제조에 대한 생산세액공제를 제공하며, 품목·기술별로 공제율 상이	태양광셀 \$0.02/W 등	13502
7	청정 자동차 세액공제	청정 자동차 구매자에게 세액공제 제공. 미국내 최종조립, 핵심광물, 배터리 구성품, 해외우려집단과 관련된 신규 규칙이 추가되어 공제가 확대되었고, 제조업체당 공제한도는 폐지	차량당 \$7,500	13401
8	적격 상업용 청정자동차 세액공제	적격 상업용 청정 자동차의 구매자에게 세금공제를 제공하며, 차량을 사용 또는 임대하기 위해 구입한 사업체가 대상	차량당 \$40,000	13403
9	국내 제조 전환 보조금	효율적인 HEV, PHEV, EV 및 FCEV 자동차의 국내 생산을 위한 비용을 50% 분담하는 보조금을 제공하며, 보조금 자금의 총 규모는 20억 달러	비용의 50%	50143
10	탄소산화물 격리에 대한 세액공제	미국 내 허용된 최종사용과 결합된 이산화탄소 격리에 대한 공제를 제공하며, 기본공제, 석유회수강화(EOR), 직접대기포집(DAC)별로 공제율 상이	\$17/CO2 DAC는 \$36/CO2	13104
11	첨단산업시설 보급프로그램	첨단산업기술의 설치나 구현, 그리고 이를 위한 시설 준비를 위한 초기단계 공학연구를 통해 시설의 온실가스 배출량을 줄이는 실증 및 배치사업을 완료하기 위해 재정지원 제공, 예산은 58.12억 달러	비용의 50%	50161
12	청정수소 생산세액공제	적격 청정수소 생산시설에서 청정수소 생산에 대한 세금공제	\$0.6/kg	13204

자료: 에너지경제연구원, 하나증권

재생에너지의 ‘간헐성’을 보완하는 ESS

- 전력은 생산되는 동시에 소비. 수요와 공급이 일치해야 하기 때문에 수요는 정확하게 파악해야 하고 공급은 그에 맞춰 이뤄져야 함
- 재생에너지는 ‘햇빛’과 ‘바람’은 통제할 수 없기 때문에 발전량 예측이 어려워 가스터빈과 ESS 등의 백업전원이 필요
- 재생에너지 가운데 변동성 전원에 해당되는 태양광과 풍력 비중이 15~25% 수준이 되면 기저발전의 운영 안정성이 훼손
- 유럽, 미국, 호주 등 일부 재생에너지 보급이 활발하게 이뤄진 지역에서는 전력 수요 비수기 재생에너지 발전 비중이 높아지는 시점에 전력도매가격이 0 이하로 정산되는 경우가 발생함

변동성 재생에너지 비중에 따른 전력계통 특징 및 도전과제

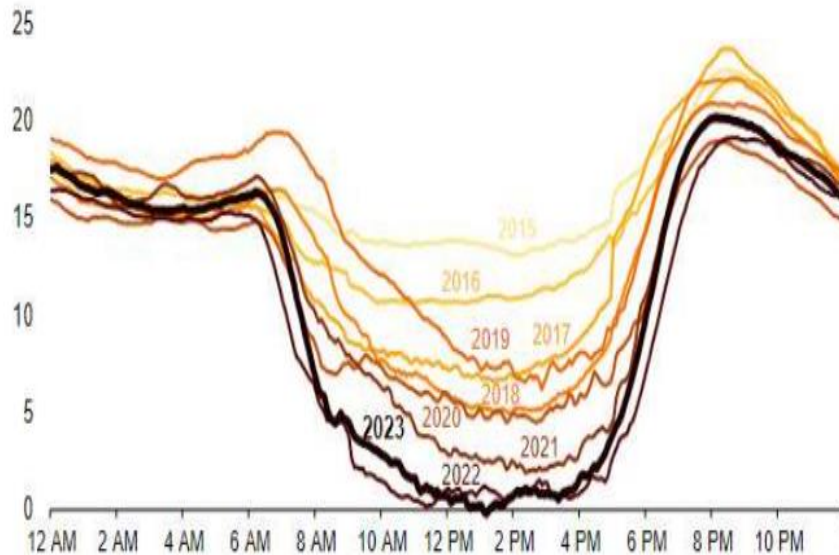
구분	VRE 비중	전력계통 특징	도전과제
1단계	3% 이내	VRE가 전체 계통에 미치는 영향 없음	
		VRE의 계통영향이 거의 없는 상황 접속점 근처 국지적 계통에 일부 영향	Grid Code에 추가사항 고려 국지적 계통영향 검토
2단계	3~15%	VRE에 의한 영향 인지	
		계통운영자가 VRE 용량으로 인한 영향을 인식 VRE 수용을 위해 계통운영 패턴의 변화	혼잡관리 & Grid Code 개선 출력예측 시스템 도입 검토 VRE를 고려한 급전계획
3단계	15~25%	유연성에 대한 우선 고려	
		높은 불확실성과 변동성으로 유연성 자원 중요 순부하 변동성 확대 및 빈번한 역조류 발생	출력예측 시스템 유연성 자원의 확대 송전-배전 운영자간 협조
4단계	25~50%	전력계통 안정도의 중요성 증대	
		VRE가 수요의 100%를 담당하는 시간 발생 VRE가 계통 안정도에 영향을 미치는 상황 넓은 범위의 계통 보강, 복원력 강화요구	계통관성 확보가 최우선 과제 VRE의 계통신뢰도 기여
5단계	-	VRE 발전이 구조적으로 남아도는 상태	
		수요초과 공급 및 대규모 출력제어(Curtailment) 발생	최종소비 부문의 전기화 장주기 공급 과잉·부족
6단계		VRE 공급과 수요간 계절적 불균형	
		계절에 따라 수급부족 현상 발생 저장장치&수요반응 가능량을 초과한 공급부족 발생	전력의 변환/저장 기술(Gas & Hydrogen) 계절수요 저장수단

자료: EIA, 제5차 신·재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획, 하나증권

ESS는 재생에너지의 잉여전력을 흡수/방전

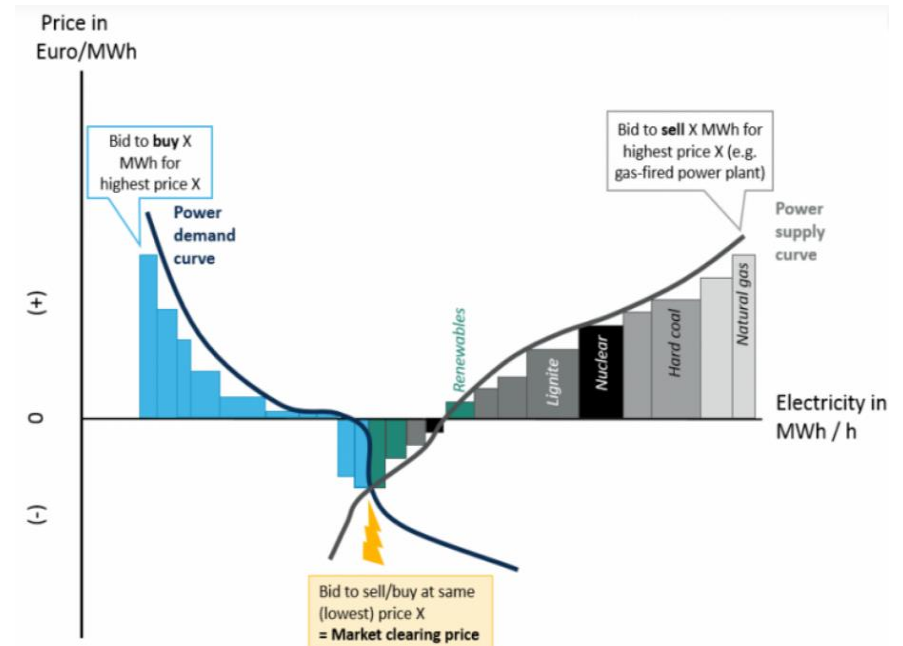
- 햇빛과 바람은 원하대로 조절할 수 없는 발전의 간헐성 문제 존재. 주택용 태양광 보급 등으로 전력분산화가 이루어지면서 미국에서 재생에너지 비중이 높은 지역은 덕커브 현상이 심화됨. 재생에너지의 간헐성이 전력수요에도 영향을 미치는 상황
- ESS는 낮시간대에 낮은 도매가격으로 잉여전력을 흡수해, 주로 밤시간대에 비싼 도매가격으로 전력을 방출하면서 수익을 기록
- 마이너스 도매가격은 에너지정산금의 가격이 '0'이더라도 용량요금을 통해 수익을 기록할 수 있는 재생에너지 설비들로 인해 발생. 낮시간대에 잉여전력 발생으로 돈을 주면서까지 전기를 팔아야하는 상황에서 도매시장에서 ESS가 잉여전력을 흡수. 태양광 전력발전 기여도가 낮아지는 시간대에도 수급 밸런스를 유지를 위한 설비 필요. 해당 시간대의 도매가격은 상승하며 ESS가 전력을 방전하며 수익을 기록

캘리포니아 봄(3~5월) 순부하(GW) 추이: 덕커브 심화



자료: EIA, CAISO, 하나증권
Credit/ESG Analyst 김상만

마이너스 전력도매가격 산정 과정



자료: Clean Energy Wire, 하나증권

주요국의 ESS 지원 정책이 가장 중요한 수요 드라이버

- 아직 ESS는 가스터빈 등 다른 속용성 전원 대비 저장장치 가격경쟁력은 낮은 상황
- 각국은 ESS 설치의무화/보조금지급/전력시장 참여 등의 정책으로 ESS 수요를 이끌고 있음
- 향후에도 신재생에너지 확대에 따라 ESS가 병행될 수 밖에 없으며 친환경 지원정책의 유무 및 강도가 가장 중요한 ESS 수요 드라이버가 될 전망

주요국 ESS 지원정책 현황

	미국	중국	일본	독일	호주	인도
설치의무화	5개 주 ESS 설치의무화	신규 유틸리티 규모 재생에너지 발전설비ESS 연계의무화				2030년까지 총전력수요 4%를 ESS로 충당
보조금지급	ITC 통해 ESS 설치 투자비 세액 공제 (최대 60%)	설비기준 충족하는 ESS 설비에 대해 보조금 지급	설비기준 충족하는 ESS 설비에 대해 보조금 지급	태양광 연계 ESS 설치 보조금 지원	주거용 ESS에 대해 보조금 지급	대형 ESS 수행기업 보조금 지급
전력시장 참여	FERC Order 841 통해 ESS 전력도매 시장참여 지침마련		ESS의 용량시장 참여 가능	ESS의 보조서비스 시장 참여 가능	보조서비스 시장 통해 ESS 설비의 수익 창출	보조서비스 시장 참여에 ESS 설비 포함

자료: 한전경영연구원, 하나증권

미국 외에서도 ESS 시장은 빠르게 확대되는 중

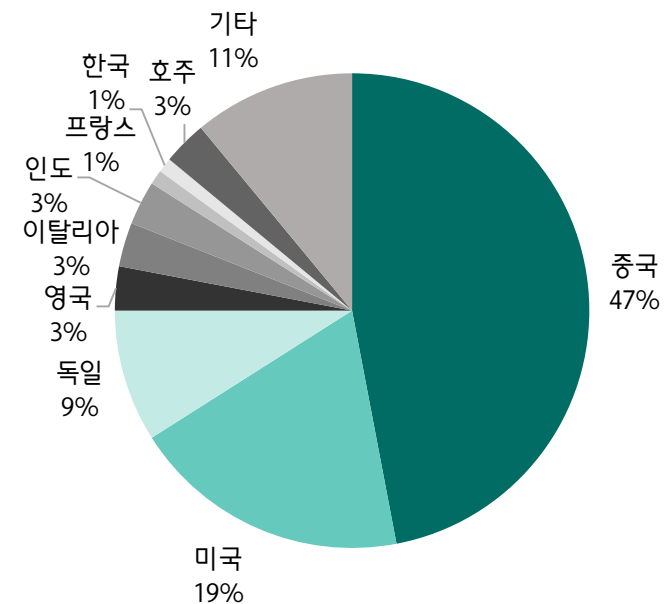
- 글로벌 ESS시장은 2023년 120억 달러(17조원) 규모로 성장. 현재 재생에너지 설비 비중이 높은 중국과 주요 선진국(미국, 독일, 영국, 이탈리아, 호주)을 중심으로 ESS 보급이 확대되고 있음
- 가정용 ESS 보조금 제도(무이자대출, 세금환급, 설치비용지원 등)가 시행되거나 국가단위의 에너지 저장 Mix에서도 ESS 기술을 적용
- 특히 중국은 중앙정부와 지방정부의 ESS 설치의무화등 적극적인 정책지원으로 2023년 미국을 제치고 ESS 설비 세계 1위로 등극했으며 2030년에는 전 세계 ESS 설비용량의 47%를 차지할 것으로 전망됨

국가별 에너지 저장 Mix 방법론 비교

국가	계획수립 방식	방법론	적용기술
미국	주 정부 또는 전력회사가 통합자원계획 수립 시 저장장치를 자원에 포함	설비확장 및 기동 급전 모형	BESS, 양수발전
영국	2021년 7월 저장장치를 포함한 스마트 시스템 유연성 계획 발표	설비확장 및 기동 급전 모형	LiB(4hr), 양수발전
독일	전력망 확장 계획 수립 과정에 ESS 포함	미공개	BESS(2hr), 양수발전
호주	통합 시스템 계획에서 최적 발전믹스 수립 시 저장장치를 자원에 포함	설비확장 및 기동 급전 모형	BESS, 양수발전

자료: 한국전력, 하나증권

2030년 국가별 ESS 설비용량 비중 전망



자료: BNEF, 하나증권

중국의 트리플 크라운. 공급망-제조-수급구조 모두 산업경쟁력 1위

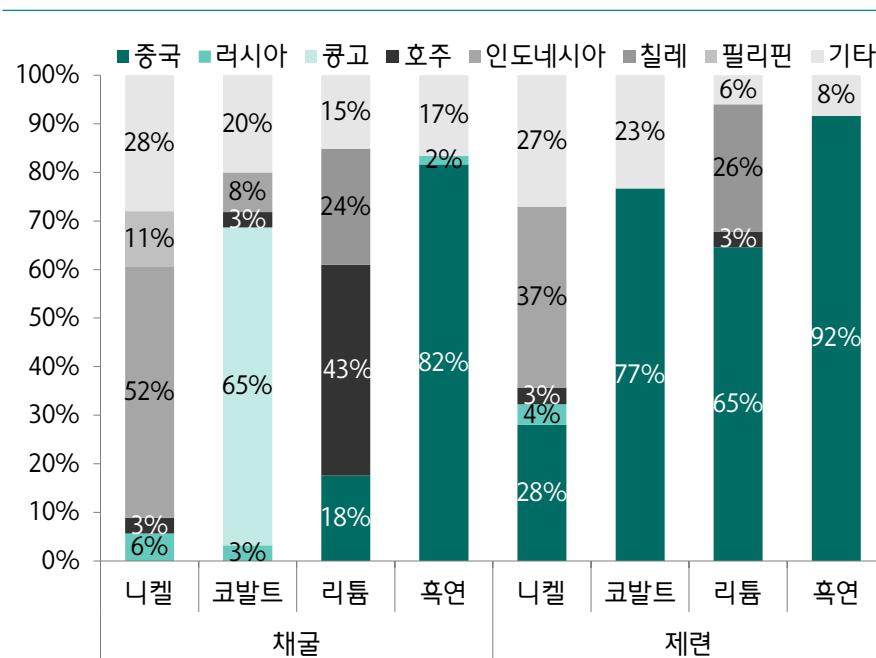
- 중국은 ESS 산업 밸류체인(원재료공급-제조-판매)의 전 부분 세계 1위의 경쟁력을 보유하고 있으며 내수를 기반으로 산업 생태계 확장
- 특히나, 광물 제련에서의 중국의 비중은 절대적. 전기차 및 배터리 산업 지원 정책을 바탕으로 대규모 제련 인프라 확충. 중국은 제련시장에서 실현된 규모의 경제를 바탕으로 광물 시장에서의 공급망을 장악
- IEA에 따르면 핵심광물인 리튬(65%), 코발트(77%) 흑연(92%)의 대부분이 중국 내에서 제련되며, 이를 기반으로 음극재(95%), 양극재(84%), 전해액(83%) 등 핵심 소재시장을 석권

주요국의 ESS 공급망 순위(2024년 기준)

	중국	미국	독일	한국	일본
핵심광물 및 원재료 공급안정성	1	15	22	16	8
Cell & Component 기술 및 제조경쟁력	1	3	5	2	3
ESS 수급구조	1	2	3	9	8

자료: 한전경영연구원, 하나증권

중국 광물 채굴/제련 비중



자료: IEA, 하나증권

중국이 점령한 ESS 시장

- 중국은 유틸리티급 ESS 개발사 120개 이상, 314Ah 셀을 탑재 한 5MWh급 고용량 ESS 생산이 가능한 배터리 제조사 21개 이상 보유
- ESS는 고정된 위치와 안정성이 핵심인 만큼 LFP계열 배터리를 탑재. ESS용 배터리는 상위 8개 중국기업이 86% 점유율을 차지
- '23년 중국 ESS(LFP 2hr turnkey 프로젝트 기준)의 평균 가격은 \$187/kWh 미국(\$376/kWh)과 유럽(\$328/kWh) 평균 가격의 50~57% 수준
- 산업경쟁력과 공급망에 대한 비교우위로 지역간 가격격차는 '25년까지 확대되고, 중국의 가격 경쟁력 우위는 장기간 지속될 것으로 전망
- 국내 기업들도 LFP배터리 양산을 준비하고 있어 향후 중국과 경쟁 불가피. 다만, 중국산 LFP 대비 가격경쟁력을 확보할 수 있을지는 불분명

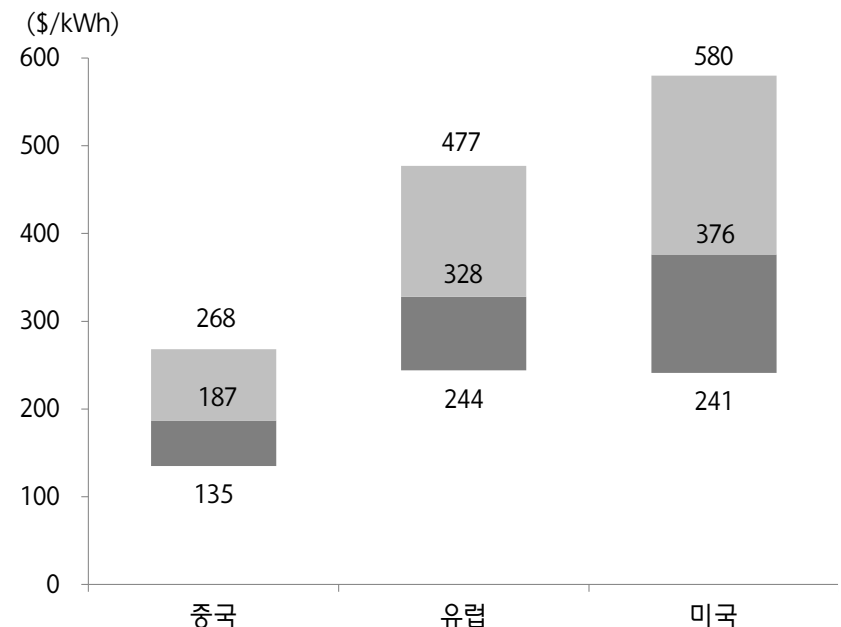
ESS용 배터리 공급량과 점유율

	2022(GWh)	비중(%)	2023(GWh)	비중(%)
CATL	52	43	74	40
BYD	14	12	22	12
EVE	10	8	21	11
REPT	7	6	14	8
HTHIUM	5	4	13	7
삼성SDI	9	7	9	5
LGES	9	7	8	4
Great Power	6	5	6	3
Gotion	5	4	6	3
CALB	2	2	4	2
기타	2	2	8	4

자료: SNE리서치, 하나증권

Credit/ESG Analyst 김상만

지역별 ESS 가격 비교(2hr LFP ESS 기준)



자료: 한전경영연구원, 하나증권

중국의 중앙정부, 지방정부 모두 ESS 보급에 혈안

중국 유틸리티 규모 재생에너지 프로젝트에 대한 저장장치 연계 의무사항

지역	ESS 연계 요구사항	배치/성능 필요조건
산둥	10%*2시간	
칭하이	10%*2시간	
하이난	태양광에 대해 10%	재생에너지 발전소와 배치
푸젠	태양광에 대해 10%	
장시	태양광에 대해 10%*1시간	재생에너지 발전소와 배치
간쑤	5~10%*2시간	
톈진	태양광에 대해 10%, 풍력에 대해 15%	재생에너지 운영 후 2년 이내에 배치
후베이	1GW 이하 프로젝트에 대해 10%*2시간	
허난	10~20%*2시간	
산시(Shaanxi)	10~20%*2시간	5,000회 이상의 수명, 10년 동안 20% 이하의 성능 저하
닝샤	10%*2시간	재생에너지 발전소와 배치
랴오닝	풍력에 대해 10%*3시간, 태양광에 대해 15%*3시간	
안후이	5%*2시간	재활용 전력 배터리 ESS는 에너지 저장에 사용할 수 없으며 10년 동안 성능저하 20% 이하 유지
산시(Shanxi)	10%	
내몽골	15%*2시간	6,000회 이상의 수명, 방전 심도 90% 이상
허베이	10~20%*4시간	재생에너지 발전소와 함께 건설 및 배치
쓰촨	10%*2시간	
광시	20%*2시간	
후난	태양광에 대해 5%*2시간, 풍력에 대해 15%*2시간	재생에너지 발전소와 배치
상하이	풍력에 대해 20%*4시간	연간 평균 저하율 2% 이하, 10년 이상 수명
장쑤	8~10%*2시간	수명동안 20% 이하의 성능 저하, 방전심도 90% 이상

자료: S&P Global, 하나증권

Credit/ESG Analyst 김상만

- 중국은 중앙 정부의 ESS 보급목표가 제시된 가운데 그와 별도로 각 지방정부에서도 ESS 보급 계획을 수립
- 2021년 이후 중국 지방정부들은 신규 재생에너지 프로젝트에 대해 일정 규모 이상 ESS 설치 의무화제도를 도입
- 26개 성이 ESS 보급 목표를 제시하고 있으며 지방정부들의 2025년 ESS 보급 목표는 80GW 수준으로 2025년 국가 목표인 30GW 대비 약 2.7배
- 중앙 및 지방 정부의 정책이 마련됨에 따라 보조금 또는 보조서비스 시장 형성 없이도 ESS 보급 속도가 빨라짐

2023년 중국 전원별 설비규모 및 비중

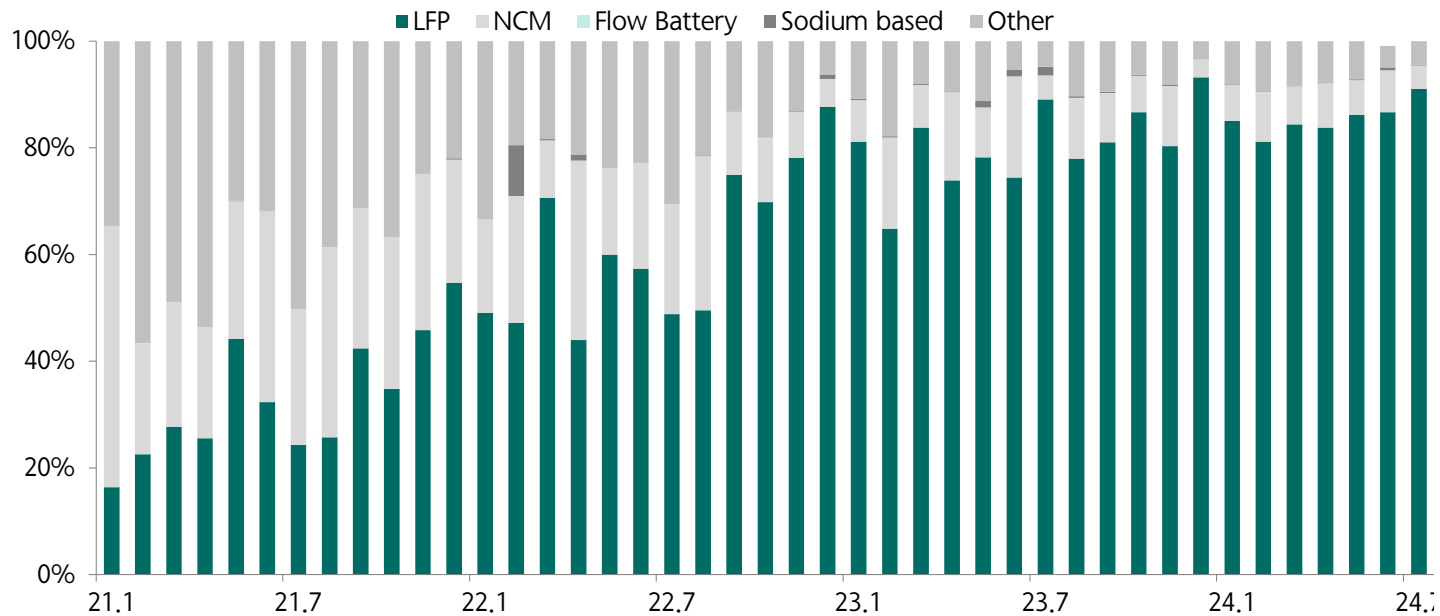
	발전원	설비규모	비중
재생에너지 발전	태양광	609.5	21
	풍력	441.3	15.1
	전동수력	370.6	12.7
	양수	50.9	1.7
	바이오매스	45	1.5
	계	1517.3	52
화력발전	석탄	1164.9	39.9
	가스	125.6	4.3
	기타	55.6	1.9
	계	1346.2	46.1
원자력	원자력	56.9	1.9

자료: CREEI, 하나증권

왜 ESS는 LFP를 채택할 수 밖에 없을까?

- 2021년 25%에 불과했던 ESS 시장 내 LFP 비중은 최근 95%까지 상승. 사실상 신규 ESS 설치량의 대부분이 LFP 배터리
- 이는 ESS 시장의 배터리 조건, 그리고 이에 부합하는 LFP 배터리의 안정성과 장수명 특성에 기인
- 한편 메탈가격, 특히 리튬가격 하락에 따른 수혜도 컸음. 이는 LFP 배터리의 높은 리튬 원가 비중 때문

월별 ESS 신규 설치량 내 타입별 비중 추이

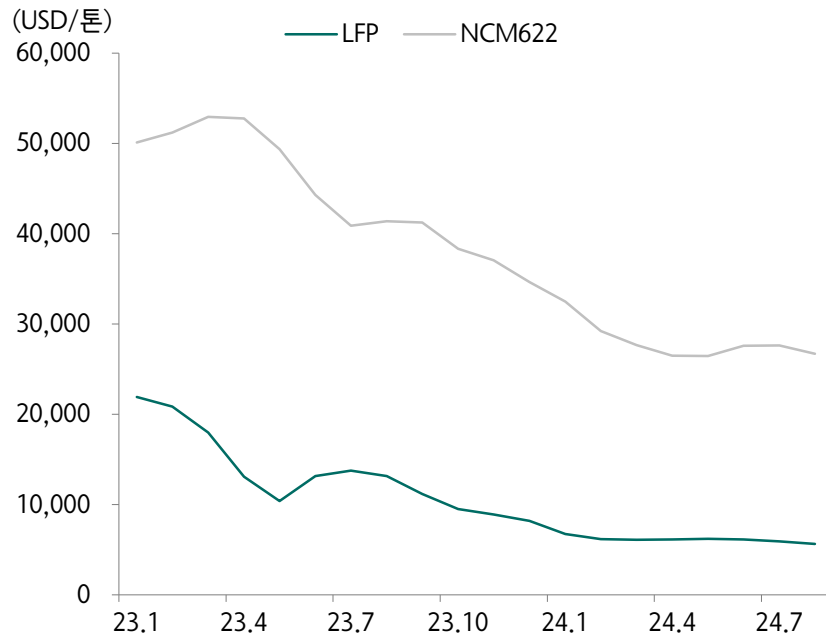


자료: Rhomotion, 하나증권

원가경쟁력 LFP>삼원계

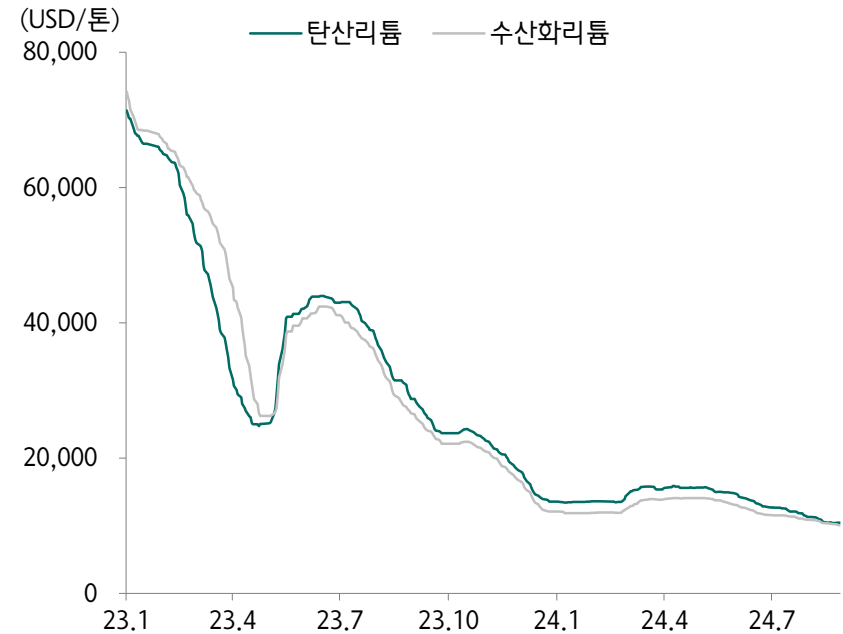
- 탄산리튬과 수산화리튬 모두 지난 2년간 고점 대비 약 -90% 하락하며 양극재 가격 역시 하락
- 원재료 비중의 차이로 인해 동기간 삼원계 양극재는 약 -50% 하락할 때, LFP 양극재는 약 -75% 하락
- 이로 인해 LFP 배터리 가격 하락폭 역시 삼원계 대비 크게 나타났을 것으로 추정되며 ESS 사업부문 매출 이익률 상승에 기여

LFP 및 삼원계 한국 수출 가격 추이



자료: 하나증권

탄산리튬 및 수산화리튬 가격 추이

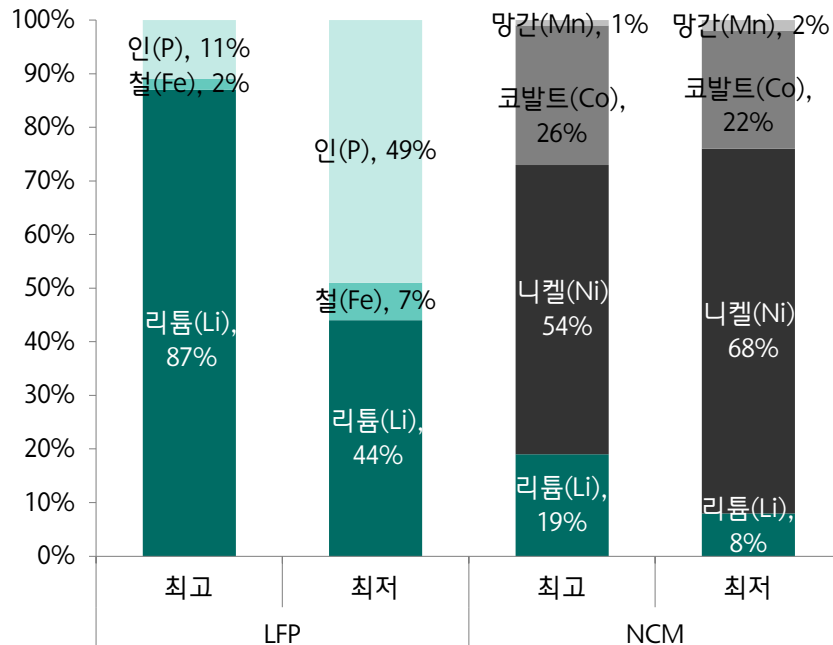


자료: 하나증권

그렇다면 왜 리튬가격 하락이 중요했을까?

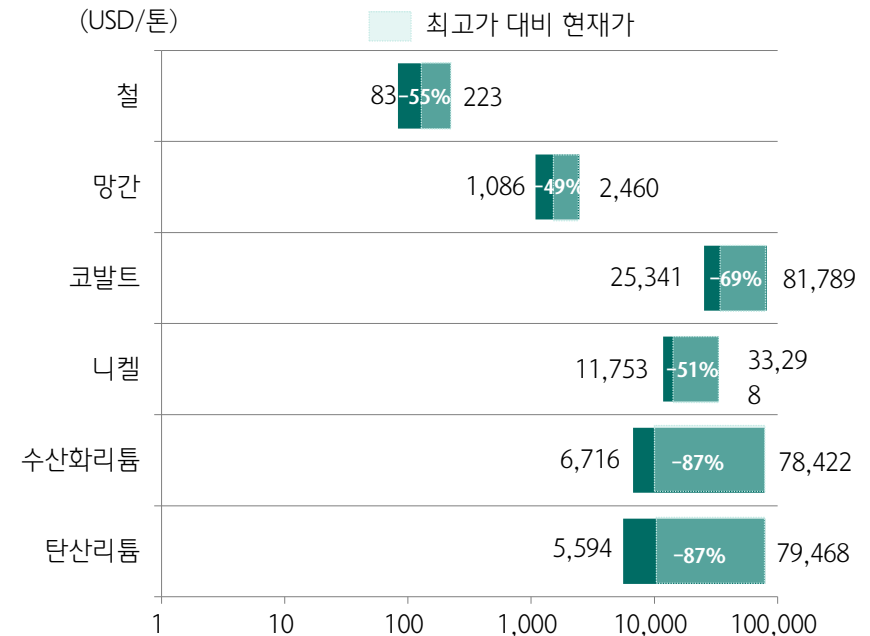
- 배터리 제조 원가의 약 40% 비중 차지하는 양극재의 재료비 원가 비중은 약 90%
- 재료비 원가의 리튬의 비중은 LFP의 경우 44% - 88%, 반면 삼원계는 8% - 19%(리튬 가격 최저가 - 최고가 기준)로, 재료비 원가에서 리튬이 차지하는 비중 차이가 매우 큼. 이는 리튬 외 다른 원 재료들의 가격 차이에 기인
- 리튬의 무게 함량 자체는 LFP와 삼원계간의 차이가 크지 않으나, 삼원계는 리튬을 제외한 원재료들의 톤당 가격이 니켈 1만달러 - 3.5만달러, 코발트 2.5만달러 - 8만달러 수준인 반면에, LFP는 인 2,000달러 - 3,000달러, 철 80달러 - 223달러에 불과

최근 2년 메탈 최고/최저가 기준 양극재별 재료비 원가 비중



자료: 하나증권

최근 2년 메탈 최저/최고가 기준 양극재 재료비 내 원가 비중



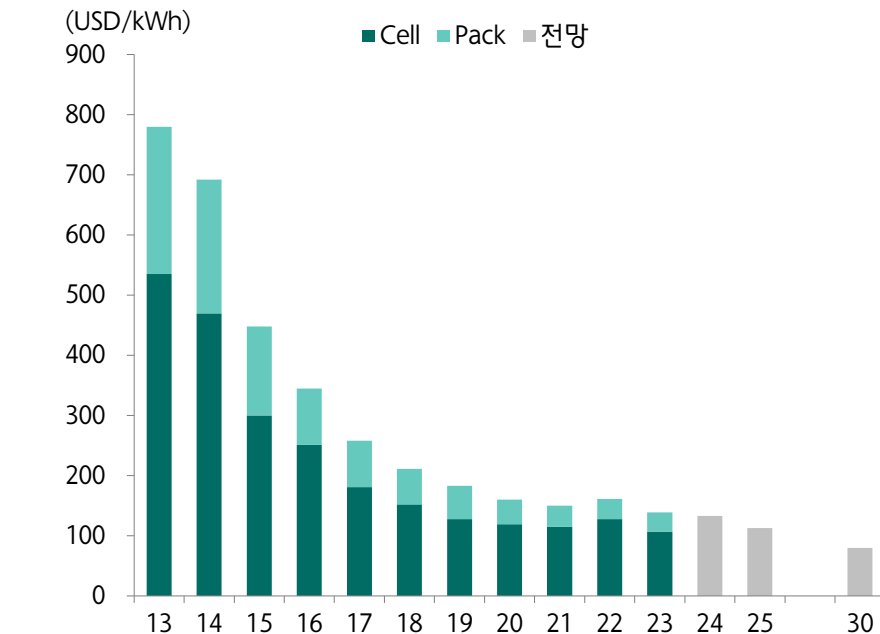
참고: 환율은 일괄 동일 적용(1CNY=0.14USD)
자료: 하나증권, KOMIS, WIND

ESS 시장 전망

- 지난 4년간 ESS 시장 내 LFP 침투율이 상승하면서 ESS 사업자들의 배터리 가용 기간 역시 늘어났을 것으로 추정
- 여기에 더해 리튬 가격 하락으로 LFP 배터리 가격 하락이 타 배터리 대비 크게 나타남에 따라 ESS 사업자들의 수익성도 개선
- 이에 따라 최근 친환경 정책 기조 둔화 불구하고 시장 조사기관들은 여전히 공격적인 ESS 시장 성장 전망치를 제시

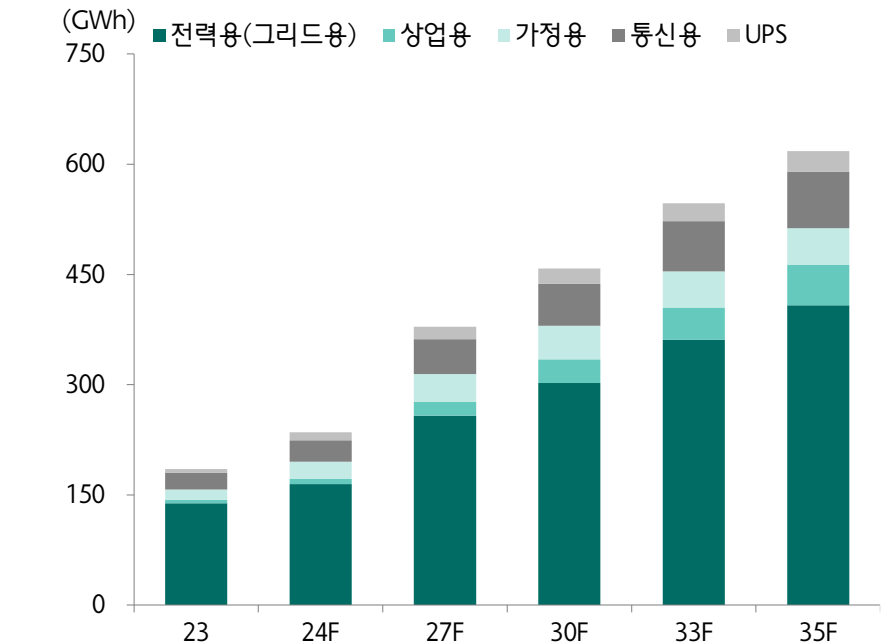
* SNE Research 2035년까지 연평균 +11% 성장 / BNEF 2030년까지 연 평균 +35% 성장 / Yano Research 2032년까지 연평균 +18% 성장

배터리 가격 추이 및 전망



자료: BloombergNEF, 하나증권

ESS 시장 전망치

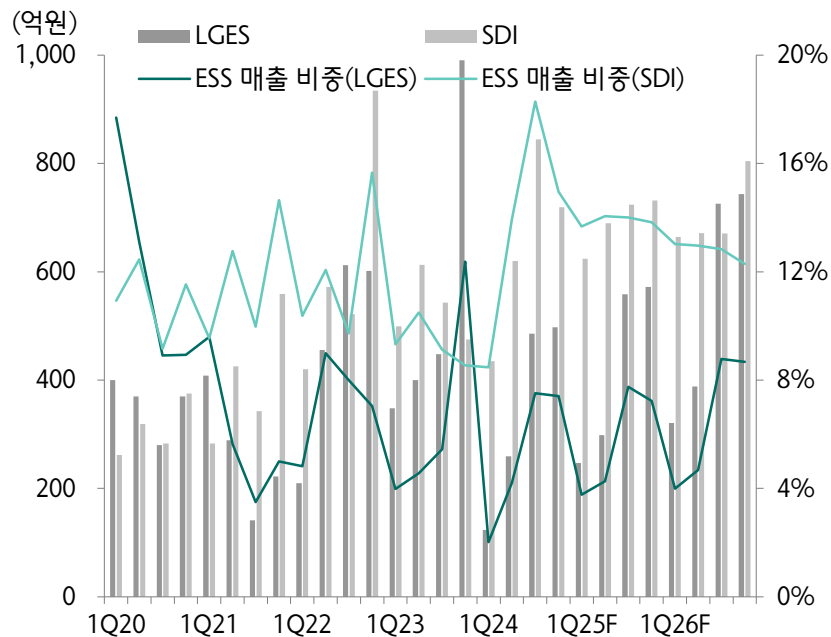


자료: SNE research, 하나증권

한국 배터리 관련 기업 준비 현황

- 한국 배터리 기업들의 ESS 매출 비중은 아직 미미. 2024년 LG에너지솔루션의 ESS 배터리 매출 비중은 5.4%, 삼성SDI는 13.8% 수준
- 다만 국내 배터리 3사 모두 LFP ESS 배터리를 개발 중에 있으며 본격 양산이 예상되는 2026년부터 관련 수혜가 확대될 전망
- 특히 미국 정부가 2024년부터 전기차 배터리에 25% 관세를 부과한 것과 달리 ESS 배터리는 2026년부터 25% 관세 부과 예고한 것은 한국을 포함한 미국 동맹국 등의 LFP ESS 배터리 준비 기간을 고려한 조치로 해석

LG에너지솔루션과 삼성SDI의 ESS 관련 매출 추경



자료: 하나증권

국내 셀사 ESS 사업 현황 및 계획

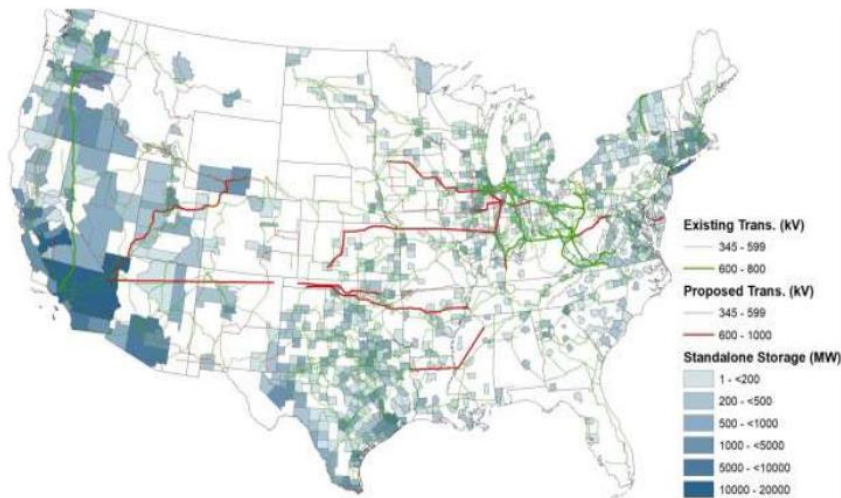
기업	ESS 사업 현황	ESS 사업 계획
LGES	<ul style="list-style-type: none"> '24년 5월 한화큐셀 미국 법인과 4.8GWh 규모 북미 전력망용 ESS 배터리 공급 계약 체결 '24년 6월 미국 애리조나 17GWh 규모 LFP ESS 배터리 전용 공장 건설 일시 중단('26년 완공 예상) 	<ul style="list-style-type: none"> 고부가가치 산업용 ESS 제품 개발 집중 '26년 10월까지 전기차 캐즘 대응 위해 기존 공장 유휴 라인을 ESS 생산 라인으로 전환 추진 (미시건 공장 등 일부 생산라인) 현재는 NCM ESS 배터리 사업 활발하나, 애리조나 공장 완공('26년) 이후 LFP 배터리 사업 본격 추진 계획
삼성SDI	<ul style="list-style-type: none"> '24년 6월 '인터배터리 유럽 2024'에서 NCA ESS 신제품 'SBB 1.5' 공개 미국 NextEra Energy와 6.3GWh 규모 ESS 배터리 장기 공급 협의 중 	<ul style="list-style-type: none"> '26년부터 LFP ESS 제품 생산 예정 및 LFP ESS 시장 공략 목표 북미 고객사 신규 수주를 확보해 ESS 사업 성장 및 수익성 개선 계획
SK On	<ul style="list-style-type: none"> '23년 조직 개편을 통해 ESS 사업부 확대 '24년 3월 '인터배터리 2024'에서 LFP ESS 모듈 첫 공개 	<ul style="list-style-type: none"> 현재는 북미에서 하이니켈 NCM ESS 생산 중이나, '25년부터 북미에서 LFP ESS 배터리 양산 시작 및 사업 확대 목표

자료: 하나증권

IRA 이후의 미국 전력시장

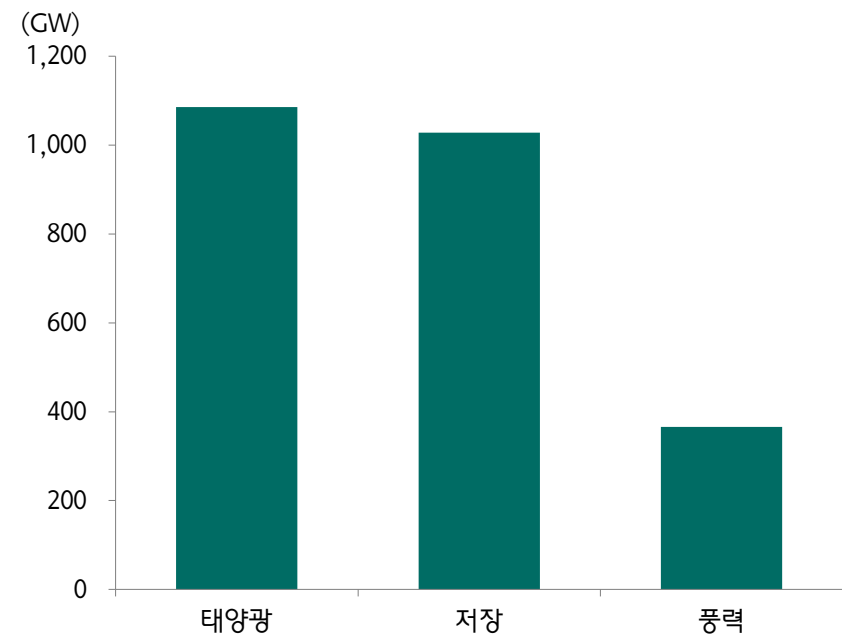
- IRA 이후 1,200GW를 넘는 발전, 저장 프로젝트가 상호연결 요청을 제출. 현재 대기 중인 태양광과 풍력 프로젝트만 고려해도 1,400GW를 상회하는 규모. 이는 미국의 총 발전설비용량을 초과하며 탄소중립 목표 달성에 필요한 1,100GW보다 큰 수치
- 연결 대기 중인 설비용량 중 대부분은 태양광(1,086GW), 저장(1,028GW), 풍력(366GW) 으로 구성되며 약 95%를 차지
- 한편, IRA 법안으로 인해 '22년부터 '32년까지 설치된 독립형 ESS의 경우 주거용 3kWh이상, 상업용 5kWh이상 설치시 투자금의 30% 세액공제 가능. 미 정부는 태양광 연계 ESS 배터리 세금 공제 혜택, 신축 주택 가정용 ESS 설치 권고와 보조금 지원 등 정책적 보조 시행

카운티별 독립형 스토리지 대기 현황



자료: Lawrence Berkeley National Laboratory, 하나증권

연결 대기 중인 설비용량 현황

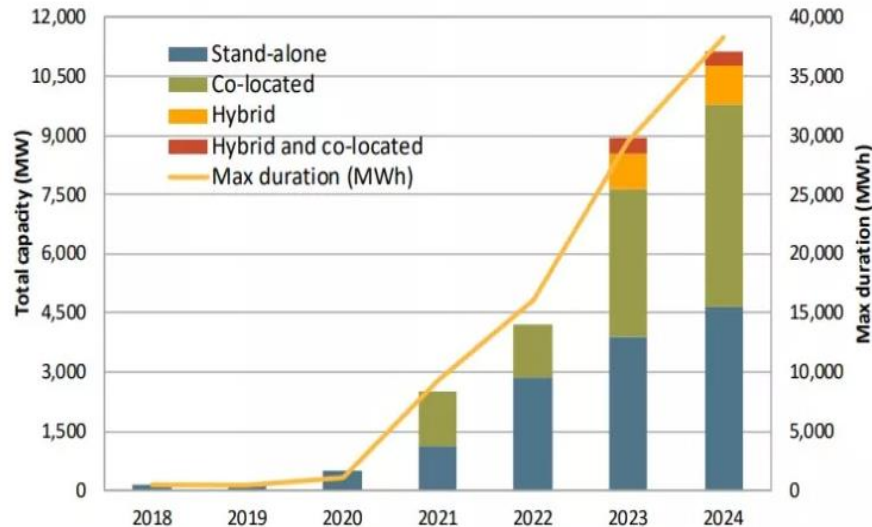


자료: 하나증권

ESS가 빠르게 성장하고 있는 CAISO와 ERCOT

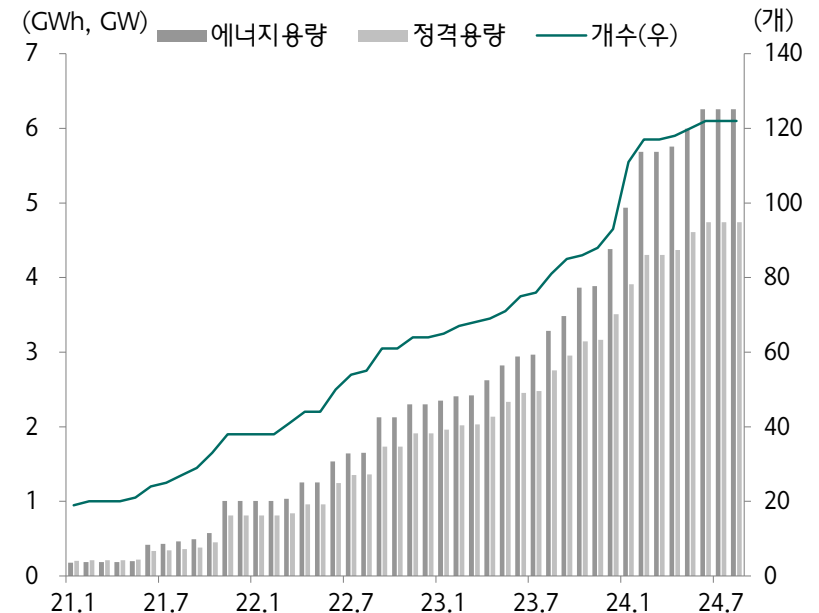
- CASIO는 캘리포니아, ERCOT는 텍사스 지역을 관리하는 전력망 운영기관. 전력 공급의 신뢰성을 유지하고 시장 운영을 담당
 * CASIO: 캘리포니아의 전력망 운영기관(California Independent System Operator) / ERCOT: 텍사스의 전력망 운영기관(Electric Reliability Council of Texas)
- 캘리포니아주와 텍사스주는 기후 재난이 빈번하게 발생하는데, 미국에서 재생에너지 비중이 가장 높은 지역
- 전력망의 안정성이 요구되면서 독립된 에너지저장시설의 중요성 부각. 캘리포니아주는 태양광 비중이 높고 텍사스는 풍력 비중이 높음
- 캘리포니아의 경우 요일별/시간대별 전력가격 차이가 존재하기 때문에 가정용 ESS 수요가 나타날 것으로 기대. 텍사스는 보조서비스 시장 개선을 통해 ESS 시장이 빠르게 성장하는 중

CASIO 밸런싱 시장 배터리 용량 추이



자료: CASIO, 하나증권

ERCOT BESS 설치 용량 추이

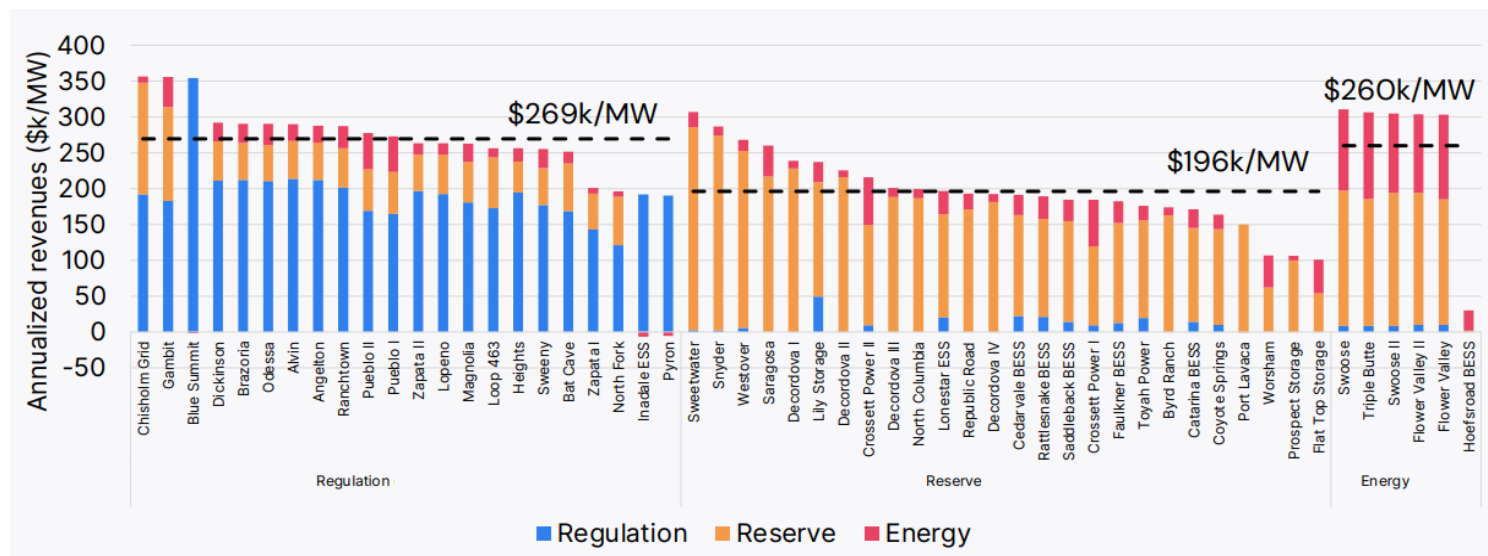


자료: Modo Energy, 하나증권

한국 기업이 많이 진출한 ERCOT

- ERCOT에 조성된 보조서비스 시장은 크게 1) 규제, 2) 비상예비서비스, 3) 반응형예비서비스, 4) 비회전예비서비스 4종류로 구분
- '23년 ERCOT BESS의 연평균 매출은 MW당 19.6만달러(YoY 33%). 연간 매출은 '23년 532백만달러로 '22년(187백만달러) 두 배 이상
- 반응형예비서비스(RRS) 시장에서 BESS는 2021년 26%에서 2023년 65%로 점유율이 확대. 비상예비서비스(ECRS, 2시간)에서는 2023년 14%를 차지. 비상예비서비스는 2023년 6월 10일부터 개시되었지만 연간 BESS 수익의 26%를 기록
- 보조서비스 시장에서 창출한 수익은 2023년 BESS 매출의 85%를 차지 신규 BESS가 많아질수록 개별 보조서비스 시장은 포화되고 수익성은 낮아짐. 공급이 빠르게 증가할수록 BESS 수익은 보조서비스보다 기존 에너지 차익 거래로 이동할 수밖에 없음. 에너지 차익거래 수익은 2022년 6%에서 2023년 15%로 증가

ERCOT BESS 프로젝트 시장별 설비용량 단위 수익성 비교 (2023년 1월~2023년 8월)



자료: Modo Energy, 하나증권

SK E&S가 인수한 KCE

- 2021년 12월 SK E&S는 미국 에너지 저장 시스템 개발/운영업체인 Key Capture Energy(KCE)의 지분 95%를 인수해 미국 ESS 시장에 진출
- 2021년 말 SK E&S가 인수 할 당시 KCE는 총 50MW 수준의 운영자산을 보유. 2024년 현재 Standalone BESS 자산 규모는 420MW(12개)으로 인수 당시 대비 10배 가까이 성장했으며, 2024년 연말 기준으로 는 총 620MW(14개) 이상의 Standalone BESS 자산을 운영할 예정
- ERCOT 지역은 2025~26년까지 전체 누적 설치 용량의 30%를 차지할 전망으로 ERCOT에 11개 자산을 보유한 KCE의 성장 가능성 높음
- 2023년 하반기부터 KCE의 실적 개선세 뚜렷. 이는 KCE의 ESS 포트폴리오가 ECRS(긴급 비상 예비 서비스), NonSpin(비회전 예비 서비스) 등 보조서비스 시장으로 Allocation을 변화한 덕분. 1Q24 KCE 매출액은 평균을 20% 상회했으며 2Q24는 평균을 54% 상회

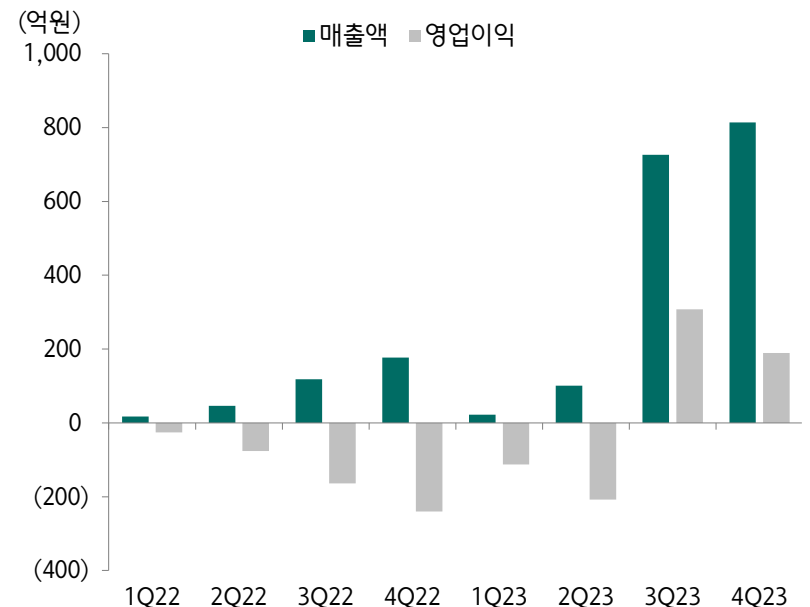
KCE의 주요 프로젝트와 설비 규모

프로젝트명	지역	주소	규모
KCE NY 01(뉴욕 첫 번째)	New York	Saratoga County, NY	20MW
KCE NY 03		Rockland County, NY	3MW
KCE NY 06		Erie County, NY	20MW
KCE TX 02(첫 번째, Gulf Coast)	Texas	Calhoun County, TX	10MW
KCE TX 07(세 번째, West Texas)		Reeves County, TX	10MW
KCE TX 08(두 번째, West Texas)		Reeves County, TX	10MW
KCE TX 10		Denton County, TX	100MW
KCE TX 11		Robertson County, TX	50MW
KCE TX 12		Travis County, TX	100MW
<u>KCE TX 13</u>		<u>Scurry County, TX</u>	<u>50MW</u>
KCE TX 15		Grimes County, TX	100MW
<u>KCE TX 19</u>		<u>Williamson County, TX</u>	<u>50MW</u>
KCE TX 21		Williamson County, TX	50MW
<u>KCE TX 23</u>		<u>Brazoria County, TX</u>	<u>50MW</u>
Total			623MW

주: TX 13/19/21은 2024년 5월 시장 내 매출 기준 1~3위를 차지
자료: 하나증권

Credit/ESG Analyst 김상만

2023년 하반기부터 KCE의 분기 매출액/영업이익 대폭 개선



자료: KCE, 하나증권

SK가스와 SK이터닉스

- SK가스와 SK이터닉스는 2023년 12월 설립한 합작법인 그리드플렉스를 기반으로 미국 ESS 시장에 진출(각각 697억원, 174억원을 출자)
- 그리드플렉스는 미국 신재생에너지 업체 에이펙스클린에너지와 합작법인 SA 그리드솔루션스를 설립하면서 미국 ESS 사업을 본격화. 에이펙스클린에너지는 미국 내에서 누적 발전용량 8.6GW, 총 40개규모의 신재생에너지 발전소를 준공. ESS로 사업포트폴리오를 다각화 시도
- SK가스는 2024년 상업운전 예정인 울산 GPS와 KET LNG 터미널에 이어 미국 ESS로 사업 영역 확장. 미국 텍사스에서 200MW 규모 ESS 설비를 연내 상업 가동하는 것을 목표로 진행 중. 텍사스는 신재생에너지 발전량이 총발전량의 약 30%를 초과하며 ESS 수요 급격하게 증가
- 텍사스의 연간 전력 소비량은 한국의 약 80%에 육박. SK가스와 SK이터닉스는 향후 미국 내 다른 지역으로 ESS 사업을 확대할 전망

공시요약

기업	ESS 사업 계획
공시 주요사항	<ul style="list-style-type: none"> • 미국 ESS 사업 관련 해외 JV 의사결정('23.12.6) <ul style="list-style-type: none"> - 투자대상: GridFle - 투자금액: SK가스의 투자금액 697억원(US\$ 54,600,000) - 지분구조: SK가스 80%, SK디앤디 20% - 출자납입: ESS 사업 진행에 따라 Capital call 형식으로 집행 (~'25년 4월말)
사업추진 목적	<ul style="list-style-type: none"> • SK가스의 Vision 달성을 위한 교두보 역할 기대 <ul style="list-style-type: none"> - 'Net Zero Solution Provider'로 이행 목적 • 미국 텍사스의 지역적 강점 <ul style="list-style-type: none"> - 텍사스 자체 전력소비량은 한국의 80% 수준이며, 신재생에너지 비중 확대로 ESS 사업 수요 증가 예상 • 전력거래 경험 조기 확보로 미래 시장 확대에 대응

자료: SK가스, 하나증권

미 'Apex'와 JV 설립 추진 현황 및 계획

기업	ESS 사업 계획
파트너사 소개 및 JV 추진현황	<ul style="list-style-type: none"> • 미국 ESS 사업 관련 해외 JV 의사결정('23.12.6) <ul style="list-style-type: none"> - 'Apex'는 미국내 누적 8.6GW, 총 40개소의 신재생에너지 발전소 준공 - 당사/SK디앤디와의 현지법인 'GriFlex'와 'Apex'는 각각 60%:40% 투자하여 JV인 'SA Grid Solution' 설립 - SK디앤디는 국내 29개소 800MWh의 ESS자산 구축 및 운영하여 ESS 건설 및 운영 최적화 지원 예정
향후 계획	<p>[SA Grid Solutions]</p> <ul style="list-style-type: none"> • 텍사스 지역에 200MW ESS 설비 건설 목표 - 첫번째로 Great Ksikadee(100MW/200MWh) Project 현재 건설 중으로 금년 9월부터 단계적 상업가동 목표 <p>[SK가스]</p> <ul style="list-style-type: none"> • SK가스/SK디앤디는 추후 미국내 다른 지역으로 추가 진출하여 ESS 용량을 1GW 확대 목표 • 중장기적으로 국내 ESS 시장 확장 및 그린 수소와의 연계 도모

자료: SK가스, 하나증권

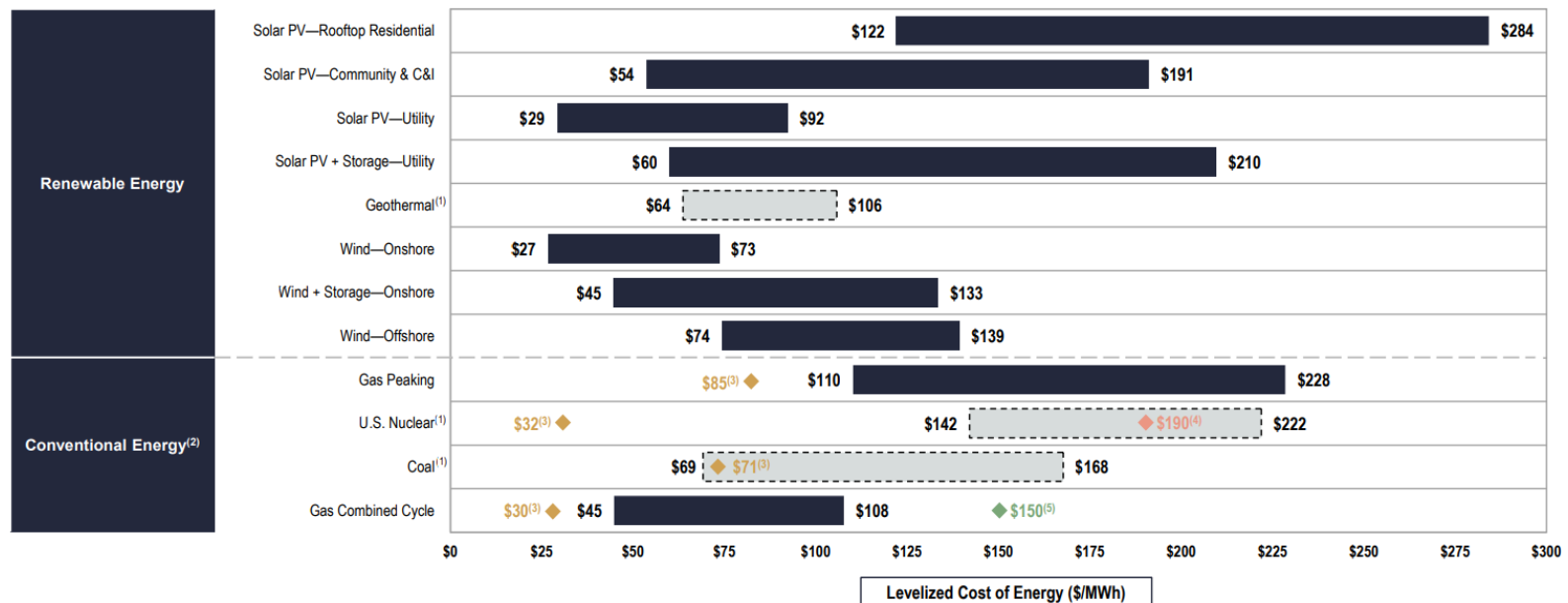
[ONE ESG Vol. 9] ESS

② ESS 비용분석 기술적 특성

LCOE: ESS 동반시 비싸지는 재생에너지의 발전비용

- LCOE(Levelized Cost of Electricity)는 균등화 발전단가(에너지평준화비용)로 수명기간 동안 전력계통에 공급한 전기를 kWh당 비용으로 표현
- 현재 개별 재생에너지의 LCOE는 전통 발전원들에 비해 낮지만, ESS를 동반하는 경우에는 초기 투자와 운영비용으로 인해 전통 발전원들에 비해 LCOE가 높아지는 현상 발생
- 단, ELCC와 Firming Cost 개념을 함께 고려시에는 수익성이 오히려 상승할 수도 있음

발전원별 LCOE 비교: ESS 동반시에는 전통 발전원보다 비싸져



자료: Lazard, 하나증권

ELCC: ESS로 재생에너지의 효율성 증대

- ELCC(Effective Load Carrying Capability)는 유효부하전달용량 또는 실효용량 개념. ESS가 전력공급 신뢰성에 기여하는 정도를 수치화
- 재생에너지는 간헐성으로 인해 공급용량이 확정되지 않음. 이때, ELCC는 ESS가 없을 때와 있을 때의 재생에너지의 전원공급 신뢰성 차이를 평가. ESS를 활용하면 피크 부하를 효과적으로 지원함으로써 ELCC가 상승하게 되며, 그에 따른 용량요금을 지급해 전력 판매 및 수익 증대에 기여
- 배터리용량과 방전 지속시간이 커질수록 공급신뢰도가 증가하기 때문에 방전지속기간별로 구분하여 실효용량을 차등 산정

제주 24/25년 적용 급전가능 재생에너지자원 및 ESS 실효용량비율

	태양광	풍력	ESS(2h)	ESS(4h)	ESS(6h)	ESS(8h)
1월	2.53	22.51	20.67	51.63	71.47	90.00
2월	2.36	19.01	30.80	60.00	90.00	100.00
3월	2.12	16.83	30.00	67.38	94.12	100.00
4월	2.18	21.68	19.77	39.55	58.70	77.47
5월	4.88	15.48	28.21	55.91	73.85	83.15
6월	7.10	19.28	30.59	60.57	80.00	90.83
7월	9.71	15.32	49.07	71.33	100.00	100.00
8월	10.54	10.68	49.46	73.11	100.00	100.00
9월	9.28	6.70	48.03	70.00	90.00	100.00
10월	4.58	10.62	29.13	64.55	85.32	96.10
11월	3.25	21.84	28.56	57.74	76.33	86.70
12월	2.42	24.72	20.00	49.03	68.67	79.24
평균	5.08	17.06	32.02	60.07	82.37	91.96

자료: 전력거래소, 하나증권

미국 PJM 26/27년~34/35년 예비 ELCC 등급

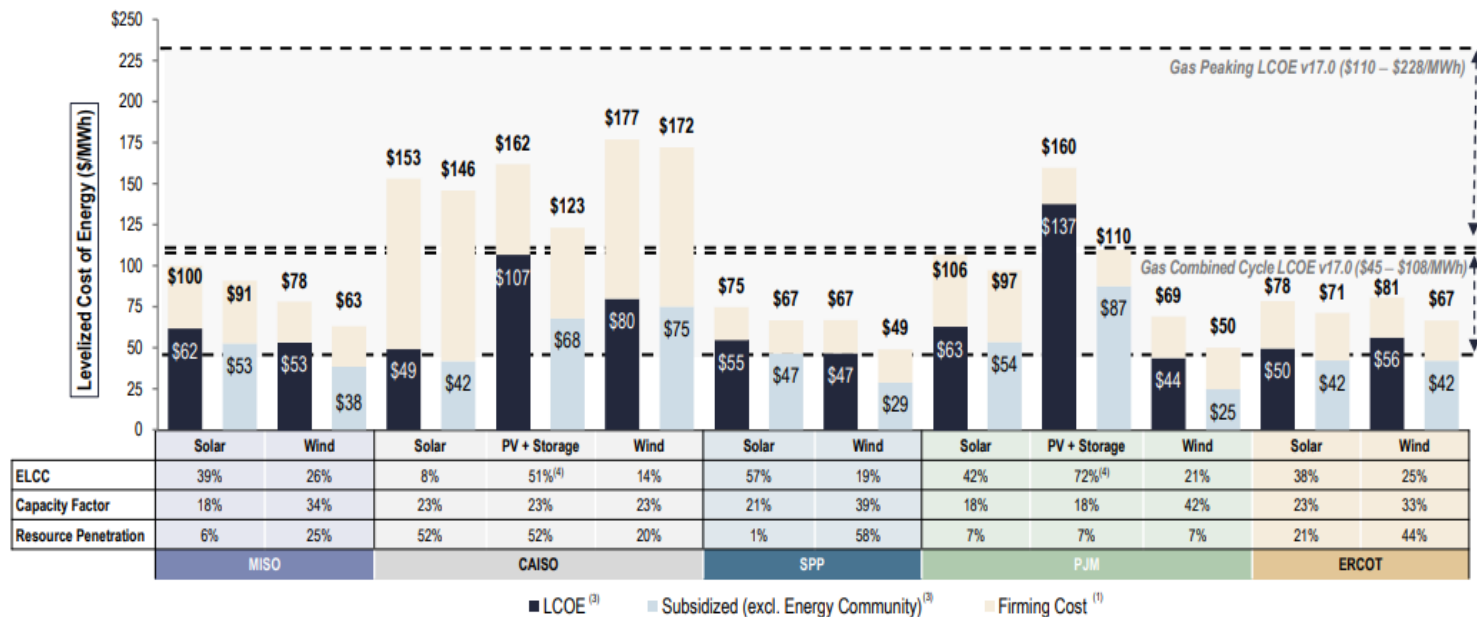
	26/27	27/28	28/29	29/30	30/31	31/32	32/33	33/34	34/35
Onshore Wind	35%	33%	28%	25%	23%	21%	19%	17%	15%
Offshore Wind	61%	56%	47%	44%	38%	37%	33%	27%	20%
Fixed-Tilt Solar	7%	6%	5%	5%	4%	4%	4%	4%	3%
Tracking Solar	11%	8%	7%	7%	6%	5%	5%	5%	4%
Landfill Intermittent	54%	55%	55%	56%	56%	56%	56%	56%	54%
Hydro Intermittent	38%	40%	37%	37%	37%	37%	39%	38%	38%
4-hr Storage	56%	52%	55%	51%	49%	42%	42%	40%	38%
6-hr Storage	64%	61%	65%	61%	61%	54%	54%	53%	52%
8-hr Storage	67%	64%	67%	64%	65%	60%	60%	60%	60%
10-hr Storage	76%	73%	75%	72%	73%	68%	69%	70%	70%
Demand Resource	70%	66%	65%	63%	60%	56%	55%	53%	51%
Nuclear	95%	95%	95%	96%	95%	96%	96%	94%	93%
Coal	84%	84%	84%	85%	85%	86%	86%	83%	79%
Gas Combined Cycle	79%	80%	81%	83%	83%	85%	85%	84%	82%
Gas Combustion Turbine	61%	63%	66%	68%	70%	71%	74%	76%	78%
Gas Combustion Turbine D/F	79%	79%	80%	80%	81%	82%	83%	83%	83%
Diesel Utility	92%	92%	92%	92%	92%	93%	93%	93%	92%
Steam	74%	73%	74%	75%	74%	75%	76%	74%	73%

자료: PJM, 하나증권

Firming Cost: ESS로 계통 안정화 비용은 낮아져

- Firming Cost는 재생에너지(변동성 전원)의 변동성 안정화에 발생하는 비용
- ESS는 재생에너지의 전력계통 안정화에 기여하면서 Firming Cost를 감소시킴. 따라서 LCOE에 ELCC와 Firming Cost를 함께 고려해야 함
- CASIO와 같은 일부 지역에서는 재생에너지 사용 시 ESS를 동반하면 LCOE 상승으로 가스복합화력보다 가격이 높아지는 것으로 나타남. 다만, ELCC는 51%로 유의미하게 상승했으며 Firming Cost는 전력 계통안정화로 크게 감소함
- 즉, 재생에너지에 ESS를 동반할 시 ELCC 상승으로 인한 공급 신뢰성 개선과 Firming Cost 감소로 수익성 개선도 가능해짐

재생에너지 간헐성을 반영한 LCOE 증가분

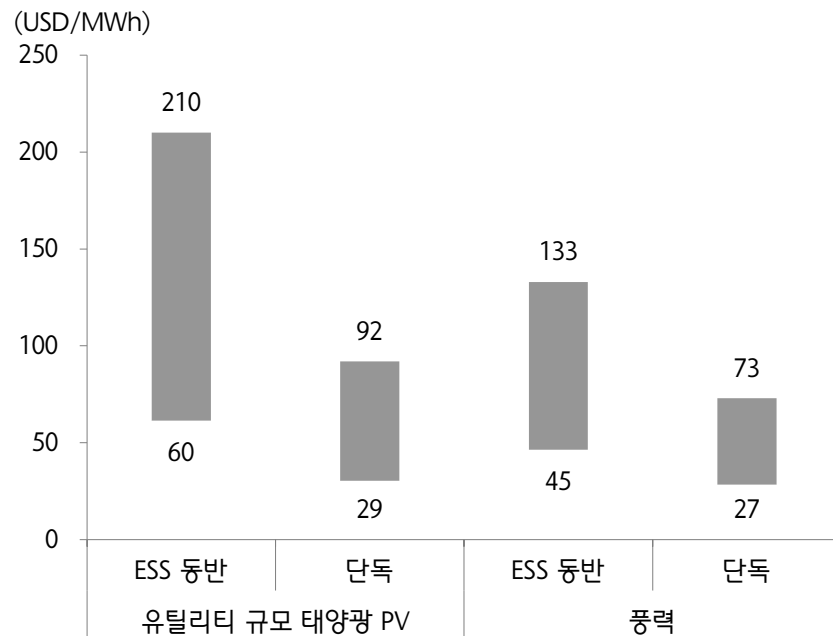


자료: Lazard, 하나증권

LCOS의 부족한 경제성을 극복하는 인센티브

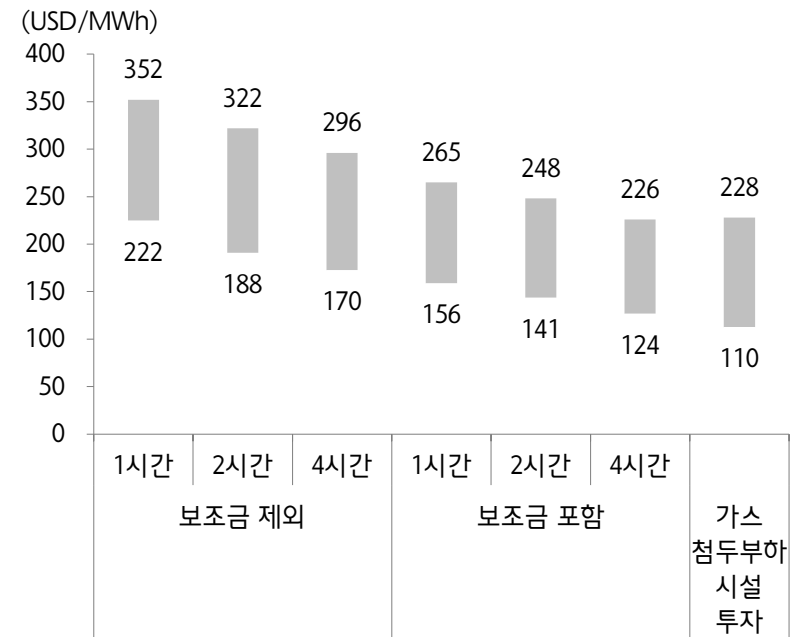
- ESS가 동반된 재생에너지 사용은 비용적 측면에서 불리할 수 있음을 확인. 따라서 ESS 보조금도 함께 살펴볼 필요
- LCOS(Levelized Cost of Storage) 배터리 전체 수명 동안 방전된 전력량을 배터리 총 비용으로 나눈 값
- 재생에너지에 ESS 활용이 가스터빈 등 다른 속용성 전원 대비 LOCE가 높아 가격경쟁력이 낮음. 그러나, IRA 세액공제로 독립형 프로젝트 비용의 최대 50% 절감가능. 인센티브 지급을 통해 LOCS가 개선되었고, 배터리 용량을 키우는 추세로 규모의 경제가 작동하는 점도 LCOS 하락에 기여

ESS 동반 유무에 따른 태양광 PV LCOE 비교



자료: Lazard, 하나증권

독립형 유틸리티 규모 ESS의 LCOS 비교

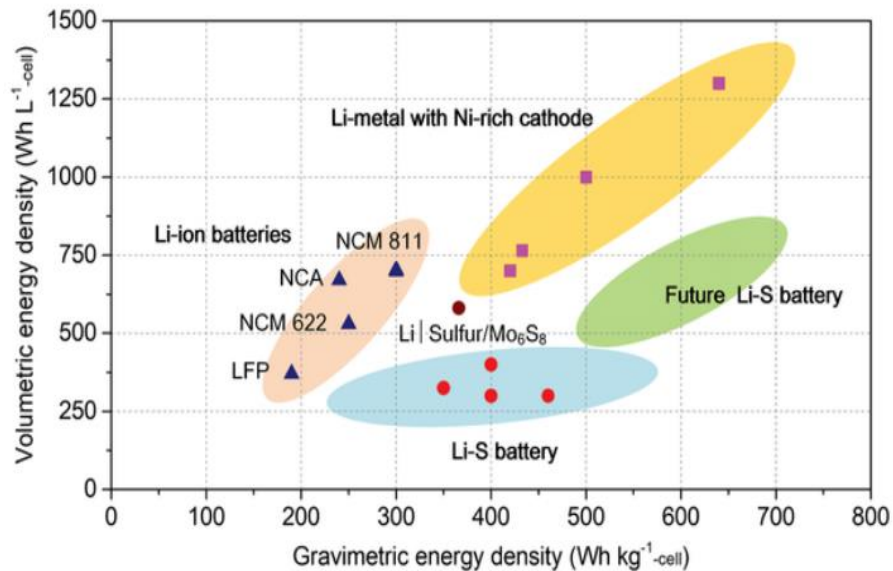


자료: Lazard, 하나증권

Appendix: ESS 배터리는 밀도보다는 용량 그 자체가 중요

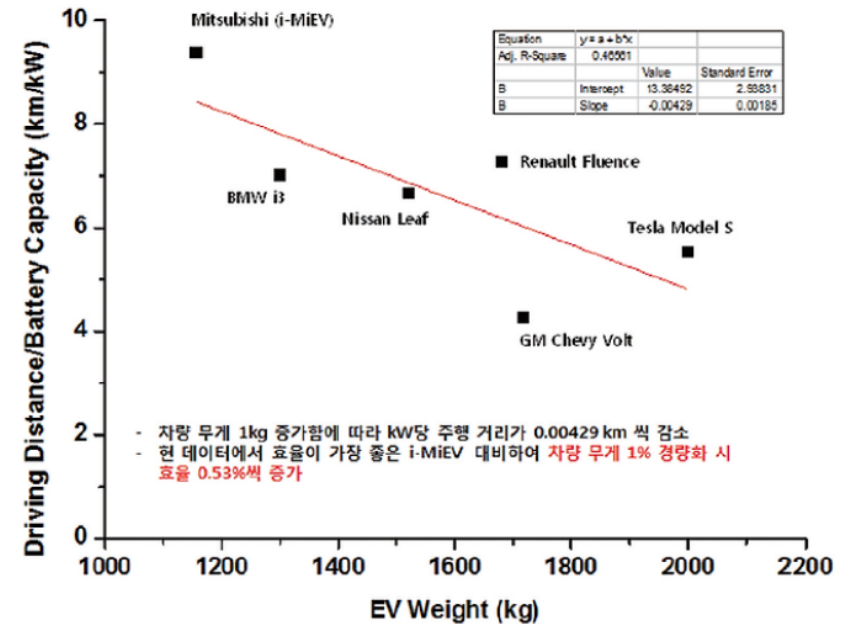
- 전기차는 무게와 부피가 중요. 무거운 배터리는 자동차의 성능을 저하시키고, 주행 거리를 단축시키며, 큰 배터리는 내부 공간을 차지
- 따라서, 전기차 배터리는 에너지 밀도가 높아야 함. 밀도가 높아야 같은 부피나 무게로도 더 많은 에너지를 저장할 수 있기 때문
- 반면 ESS는 고정된 위치에 설치되어 이동할 필요가 없음. 배터리가 크거나 무거워도 전체 시스템의 성능에 큰 영향을 미치지 않음
- 따라서 ESS는 에너지 밀도 보다 총 용량이 중요. ESS는 무겁고 크더라도 전기차보다 더 저렴한 배터리를 탑재할 수 있는 환경

배터리 양극 구조별 에너지 밀도



자료: Kisti, 하나증권

전기자동차(EV) 중량에 따른 주행효율 향상관계

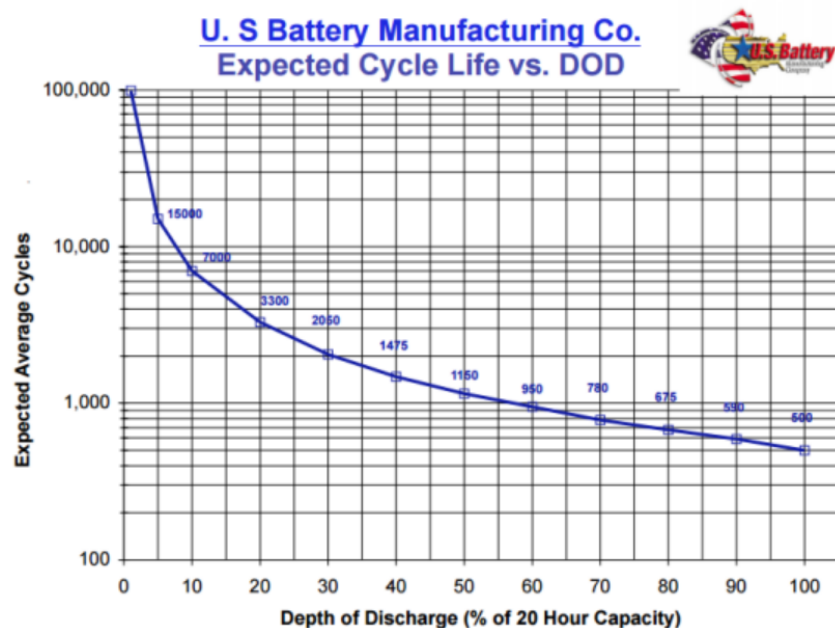


자료: 한국자동차부품연구원, 하나증권

Appendix: ESS 배터리는 장수명(충방전 사이클)이 중요

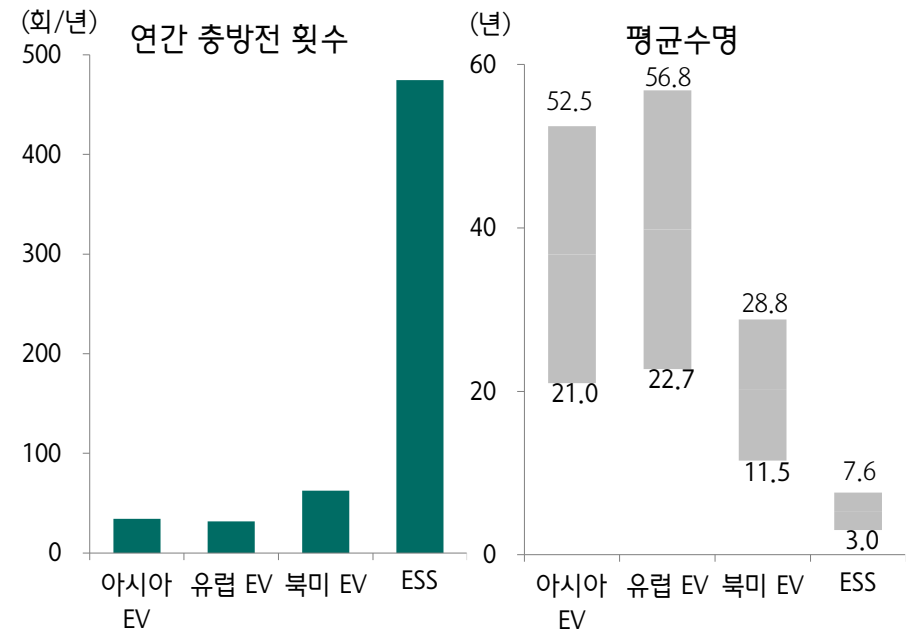
- 배터리의 수명에는 단순히 시간의 경과보다는 충방전 사이클이 중요. 배터리는 충전과 방전을 반복할 때마다 성능이 저하되며, 특정한 사이클 횟수가 지나면 배터리의 용량이 대폭 감소
- 배터리 충방전 횟수는 DoD(Depth of Discharge) 방전깊이에 따라 달라짐. 일반적으로 방전 깊이 80% 정도를 기준으로 수명을 측정
- 전기차 배터리는 보통 2~3일에 한 번 정도 충전. ESS는 1일 평균 1.3회의 충방전, 연평균 환산 시에는 약 475회의 충방전이 사이클이 예상
- 그로 인해 ESS는 배터리의 열화와 수명단축이 더 빨리 진행. ESS 배터리에는 많은 충방전 사이클을 견딜 수 있는 안정적인 결정구조 필요

배터리 방전 깊이(Depth of Discharge)와 충방전 횟수(수명)



자료: US.Battery, 하나증권

연간 충방전 횟수와 평균 수명 비교



자료: 하나증권

Appendix: 장수명 확보를 위한 기술적 특성(1): 산소를 붙잡아야 한다

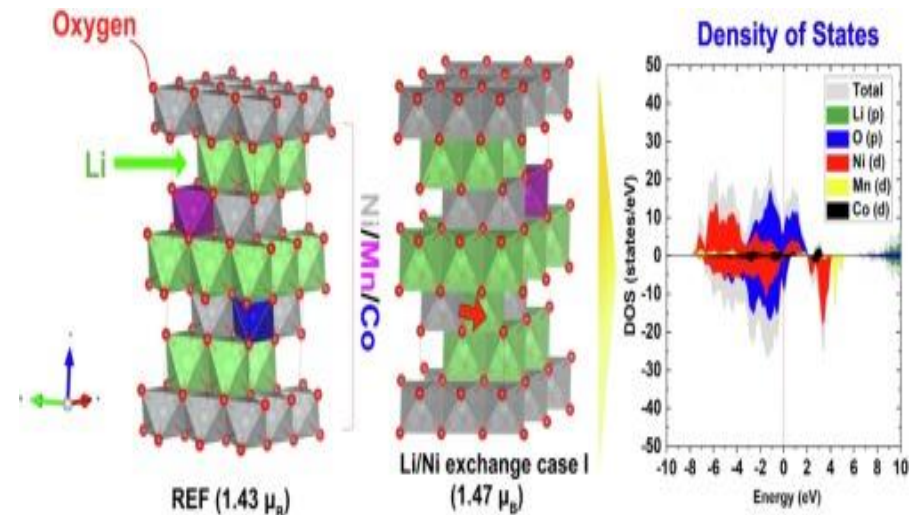
- 장수명을 확보하기 위해 필요한 것은 배터리 열화를 최대한 늦추는 것인데, 열화의 강도를 결정하는 핵심 변수는 산소와 전압
- 코발트(Co), 니켈(Ni), 망간(Mn), 철(Fe) 등 전이금속과 리튬, 인 등 양극재의 주요 구성 물질 모두 자연상태에서 불안정
- 그런데 금속들은 주로 산소와 결합하여 안정화되는 것이 일반적이며, 산소가 결정구조내에서 강한 결합을 유지할수록 배터리 수명 증가
- 리튬이온은 충방전 과정에서 산소가 떨어져 나오면서 전지의 용량 감소, 출력 저하 등의 성능 저하로 이어짐

원소별 전기음성도



자료: 하나증권

양극 결정 구조 내 산소의 역할

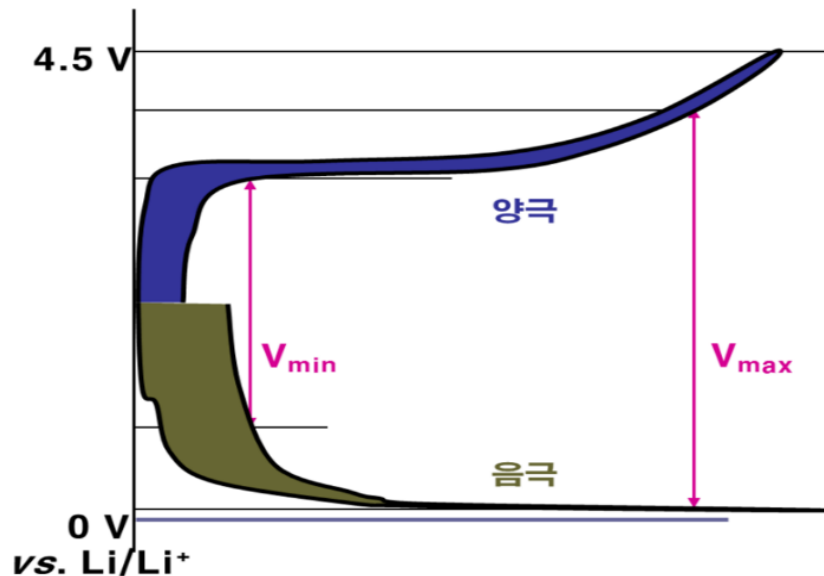


자료: ScienceDirect, 하나증권

Appendix: 장수명 확보를 위한 기술적 특성(2): 전해질 분해 방지

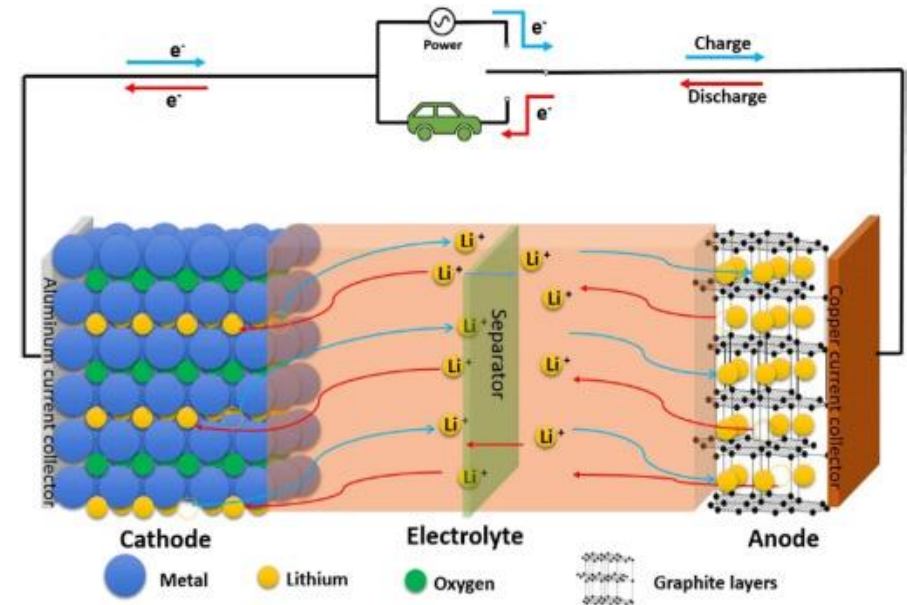
- 전해질 분해는 배터리 열화를 가속화. 충방전 과정에서 고전압이 가해질 경우 전해질이 분해되어 배터리 내부에 불안정한 화합물이 생성
- 전압, 즉 전위차가 크면 에너지 밀도가 높아지고 성능이 개선. 전위차가 클수록 더 많은 에너지를 저장하고 더 많은 전력을 방출하게 됨
- 문제는 전압이 높을 때 화학적으로 불안정해지기 시작하면서 전해질 분해가 빨라져서 열화가 가속화됨
- 특히, 전압이 높아지면 양극재의 산소 결합이 풀리면서 활성 산소가 생성되고 전해질과 반응하여 부반응을 일으켜, 전지 성능을 떨어트림

배터리의 전위차 개념도



자료: REOB, 하나증권

리튬이온전지 내 전해질의 역할



자료: ScienceDirect, 하나증권

Appendix: 장수명 확보를 위해 더 나은 양극구조는?(1): 결합강도 비교

- 배터리 수명은 전극이 긴 충방전 사이클을 견딜 수 있느냐에 달려 있는데, 이를 위해 양극 결정구조가 안정적으로 유지되어야 함
- 삼원계의 전이금속-산소 결합은 대략 400 kJ/mol이지만 인과 산소의 결합은 약 600 kJ/mol 훨씬 강한 수치
- 원자가 머무르는 공간인 오비탈 결합을 통해서도 살펴볼 수 있음. 인(P)은 sp^3 혼성 오비탈로 산소와 결합하는데 최대 600 kJ/mol의 가장 에너지 결합을 보임. 반면, 삼원계 전이금속 산화물(NiO, CoO, MnO)의 d-p 결합은 약 200-300 kJ/mol 정도의 낮은 결합 강도를 보임
- 요약하면, LFP 양극재의 구성 물질인 인과 산소는 sp^3 혼성 오비탈 결합으로 매우 강력한 결합 에너지를 보유

원소별 결합 강도

금속 원소	결합 예시	결합 에너지(kJ/mol)
니켈 (Ni)	Ni-O (니켈 산화물)	약 391 kJ/mol
코발트 (Co)	Co-O (코발트 산화물)	약 400 kJ/mol
망간 (Mn)	Mn-O (망간 산화물)	약 402 kJ/mol
철 (Fe)	Fe-O (산화철, Fe_2O_3)	약 409 kJ/mol
인 (P)	P-O (PO_4^{3-} , 인산염)	약 600 kJ/mol

자료: 하나증권

오비탈 결합 강도

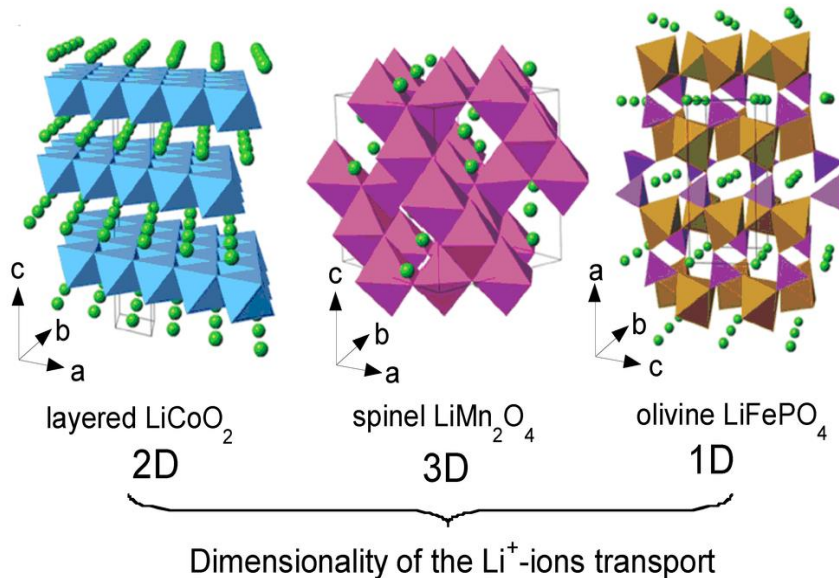
오비탈	결합 예시	결합 에너지 (kJ/mol)	특징
d-p 결합	Ni-O, Co-O, Mn-O (전이 금속 산화물)	200-300 kJ/mol	상대적으로 약한 결합 d오비탈과 p오비탈의 상호작용
d-d 결합	$[CoCl_4]^{2-}$, $[CrO_4]^{2-}$ (전이 금속 복합체)	100-200 kJ/mol	약한 결합 d오비탈 간의 상호작용
sp^3 혼성 오비탈 결합	C-O (탄소-산소), P-O (인-산소)	348-600 kJ/mol	강한 단일 결합 혼성화된 오비탈은 결합을 안정적으로 형성

자료: 하나증권

Appendix: 장수명 확보를 위해 더 나은 양극구조는?(2): 결정구조와 전압 비교

- LFP 양극재는 올리빈 형태의 결정구조. 철 이온(Fe)과 인산 이온(PO_4)이 1차원적인 채널을 형성하고 리튬 이온은 1차원 채널을 통해 수평으로만 이동하며 2차원적 이동 어려움. 이러한 구조로 LFP는 낮은 전도성을 가지지만, 높은 열안정성과 긴 사이클 수명을 제공
- 반면, 층상 구조를 가진 결정 삼원계는 전기화학적 성능이 우수. 전자가 층 내에서 쉽게 이동 가능해 에너지 밀도 높음. 다만, 리튬이온의 2차원적인 층간 이동 과정에서 층상 구조의 열화 가능성 역시 높아지며 올리빈 구조 대비 수명 열위
- 한편, 고전압 양극재는 높은 에너지 밀도 대신 수명 짧음. LFP는 3.2V로 상대적으로 전압은 낮지만 긴 수명이 중요한 ESS 사용에 적합

양극 구조별 결정 구조 비교



자료: MDPI, 하나증권

양극재별 전압 비교

Cathode Material	Nominal Voltage (V)
LiCoO_2 (Lithium Cobalt Oxide)	3.7
LiFePO_4 (Lithium Iron Phosphate)	3.2
LiNiMnCoO_2 (NMC)	3.6
LiNiCoAlO_2 (NCA)	3.6
LiMn_2O_4 (Lithium Manganese Oxide)	3.7

자료: 하나증권

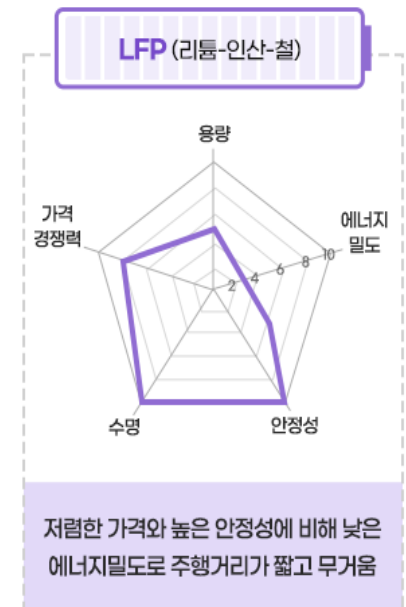
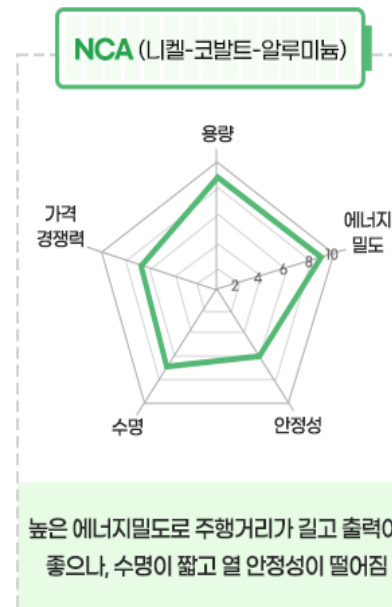
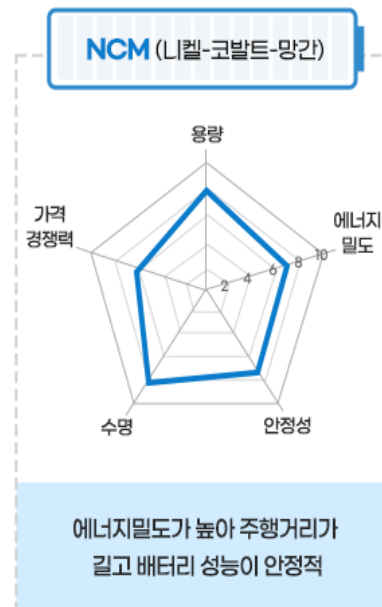
Appendix: 양극재의 특징 정리

- 삼원계는 높은 전압으로 에너지 밀도가 높고 용량이 크지만, 가격이 비싼 것에 더해 수명이 짧고 안정성이 떨어짐
- 반면, LFP는 전압이 낮아 성능은 비교적 열위에 있으나, 저렴한 가격과 긴수명, 안정성이 높은 특징을 가짐

대표적인 2차전지 양극재 특징 비교

	NCM	NCA	LFP
분자식	Li[Ni,Co,Mn]O2	Li[Ni,Co,Al]O2	LiFePO4
용량 (Ah/Kg)	160~260	170~230	110~160
작동전압	3.6V	3.6V	3.2V
수명	중간	높음	높음
안정성	다소 높음	낮음	매우 높음
합성	다소 어려움	어려움	어려움
용도	소형, 중대형	소형, 중대형	중대형
장점	고용량	고용량, 수명	저렴한 가격, 안정성
단점	비싼 코발트 가격, 특허 관련 이슈	낮은 열안정성	낮은 에너지밀도, 낮은 전기전도도

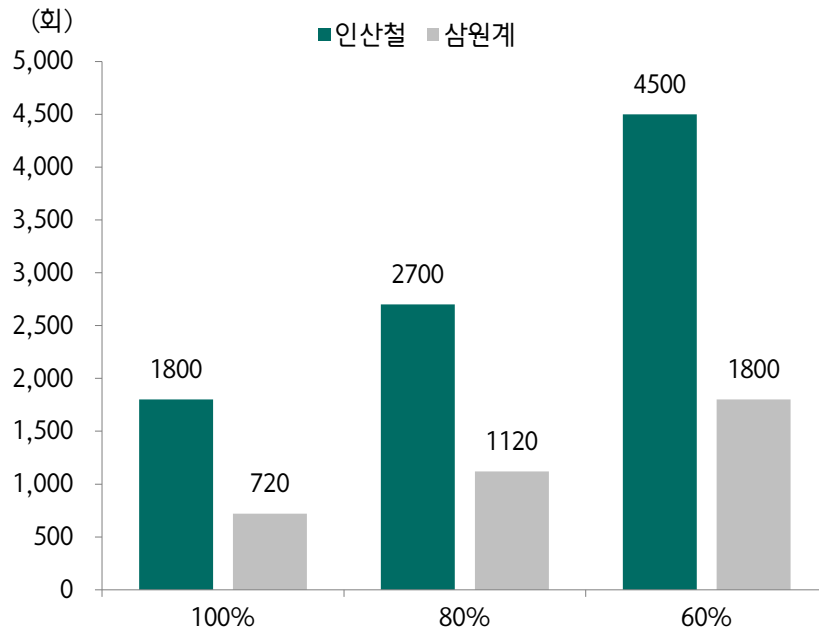
자료: 포스코, 하나증권



Appendix: ESS는 결국 LFP 유리

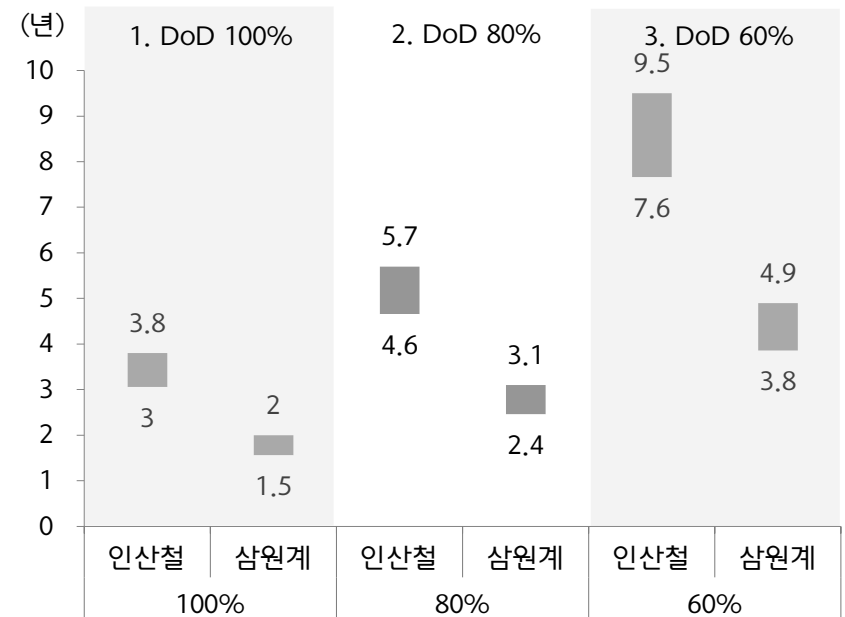
- 테슬라는 공식적으로 LFP의 충방전 사이클을 3,000회로 언급. 일반적으로 80%를 기준으로 충방전 사이클 비교하는 것을 고려할 때 대략 80% 수준을 기준으로 언급했을 가능성이 높으며 이는 삼원계의 1,000회 대비 매우 높은 수준
- 수익성 문제로 DoD를 60% 미만까지 낮추는 경우는 드뭄. 60%까지 낮췄을 때 기대되는 수명을 비교해보면 LFP가 9.5년 삼원계가 3.8년
- 결론적으로 이제껏 내용을 종합하자면, LFP 배터리는 에너지 밀도가 떨어지는 단점 있으나 부피와 무게의 제약 없는 ESS 시장 특성상 장점(장수명)이 부각되며 ESS 시장에서 지배력을 공고히 해나갈 것으로 판단

LFP와 삼원계의 충방전 사이클 비교



자료: 하나증권

DoD 별 ESS 전기차 배터리 수명 비교



자료: 하나증권