

수요 유연성 자원의 주요 편익 및 확대 동인

2026. 2. 6. (금) 경영연구원 선임 김주한 (☎02-3456-5464)

본 보고서는 The Value of Demand Flexibility(IEA, 2025.12)의 내용을 토대로 작성하였음

1 수요 유연성(Demand Flexibility) 개념 및 작동 메커니즘

- [수요 유연성 개념] 전력 소비자가 가격 신호 또는 계통(운영자)의 신호에 반응하여 전력 소비 시점 또는 양을 조절하는 능력
 - 전력망 제약 심화로 공급 확충만으로는 계통 운영이 비용·시간적 한계에 봉착함에 따라, 소비 패턴 조정(시점과 사용량)을 통해 피크 수요 및 출력제어를 완화하고 전력 시스템의 효율·안보·비용 최적화를 달성하는 핵심 운영 수단으로 부상
- [메커니즘 및 대상] 수요 유연성은 ‘반응 유발 요인’과 ‘사전 약정(계약) 유무’에 따라 크게 ① 사전에 약정된 용량을 기반으로 운영자 요청을 이행하는 **약정형 유연성**과 ② 시간대별·실시간 가격 신호에 자발적으로 반응하는 **가격 반응형 유연성**으로 구분
 - (약정형 유연성) 참여자가 가용용량을 약정하고, 프로그램 운영자가 이벤트를 발동하면 약정 조건에 맞춰 부하를 감축하거나 다른 시간대로 이동시키는 방식
 - (주요 특징) ‘사전 약정-요청 기반 동원-검증-정산’ 구조가 명확해 필요시 확보 가능한 (신뢰성 높은) 유연성으로 평가되며, DR 사업자와 함께 수요관리 사업자가 다수의 소규모 자원을 모아 하나의 발전소처럼 운영하는 VPP 형태의 참여가 활발
 - (주요 참여자) 대규모 산업체, 상업용 냉난방·공조, DR 참여자, VPP, ESS, EV 충전 인프라 등
 - (가격 반응형 유연성) 시간대별 요금(ToU), 실시간 요금(RTP) 등 시간에 따라 변하는 가격 신호에 따라 소비자가 자발적으로 전력 사용 패턴을 조정하는 방식
 - (주요 특징) 별도의 감축 의무나 약정 없이 요금 편차에 따른 경제적 유인을 통해 소비 행태 변화를 유도하는데, 실시간 가격 변동에 따른 소비자의 즉각적인 반응을 유인하기 위해서는 스마트 가전 및 EMS를 활용한 자동제어 기술의 보급 및 확산이 필수적임
 - (주요 참여자) 스마트 가전 및 온도조절기, 주거·상업용 태양광 및 배터리, 가정·건물 EMS 등

2 수요 유연성 자원의 주요 편익

□ [전력시스템 효율성 증대] 피크 완화와 재생에너지 활용 확대를 통해 시스템 운영 효율 개선

- (비효율 운전 회피) 피크 시간대에는 주로 효율이 낮은 발전기가 투입되어 시스템 효율이 저하되는데, 수요 유연성으로 피크 수요를 낮추면 이와 같은 비효율을 완화할 수 있음
- 아래 그림과 같이 피크 시간대에 투입되는 저효율 발전기인 개방형 가스터빈(OCGT)은 기저 부하용 복합화력(CCGT) 대비 발전 효율이 약 30% 이상 낮아, 수요 유연성으로 피크 수요를 완화할수록 연료비 등 운영비 절감 효과가 증대됨

| 발전원별 기저 운전 대비 피크 운전의 효율 변화율 (%) |

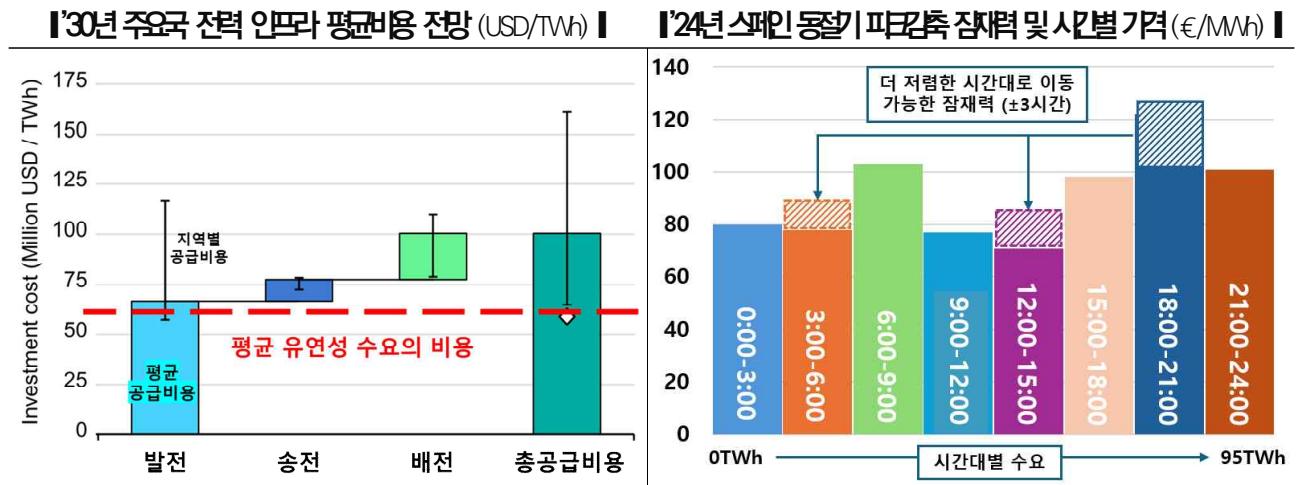


- (재생E 잉여전력 활용) 수요를 잉여전력이 발생하는 시간대(재생E 출력 최대)로 이동시키면 출력제어가 감소하고, 버려지는 전력이 소비되면서 전체 시스템 효율이 향상됨
- '25.10월 캘리포니아에서는 잉여전력을 충전한 ESS가 저녁 피크 시간대 전력의 37% 이상을 공급하여 유연성 자원이 피크 대응과 운영에 효율적으로 기여함을 입증함

□ [경제성 향상 및 시스템 비용 감소] 소비자 요금 및 시스템 총비용(투자·도매가격) 절감

- (자본투자 비용 절감) 1TWh의 전력 확보 시 유연성 자원을 활용하면 물리적 공급설비(발전·송전) 증설 대비 비용을 최대 1/3 수준으로 낮출 수 있음
- 공급설비 확충 시 1TWh당 최대 1억 5,000만 달러 규모의 신규투자가 수반되나, 수요 유연성은 기존 자산을 활용해 낮은 비용으로 동일한 효과(피크 완화·투자회피) 달성
- (도매가격 인하) OCGT와 같은 고비용 한계발전기 가동을 억제하여 시장가격 하락을 유도

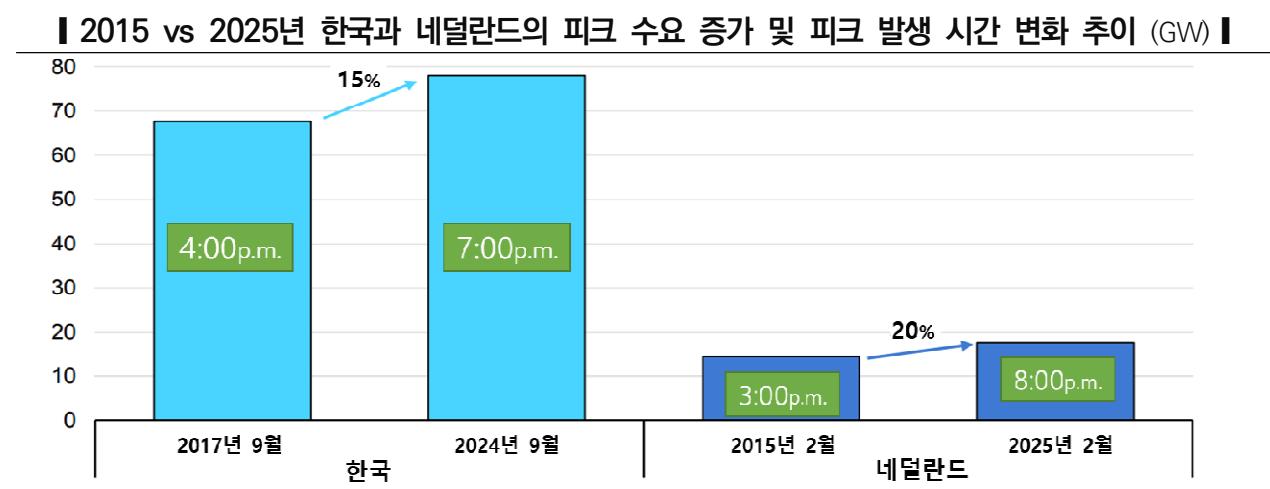
- 스페인은 겨울철 피크 시간대(18:00~21:00) 수요의 일부(1.7%)만 전후 ±3시간대로 이동해도 전체 시스템 비용을 3.4% 낮출 수 있는 것으로 분석됨



- [에너지 안보 강화] 피크 수요 저감과 실시간 부하 조정을 통해 적정성(Adequacy)·운영 안정성(Operational Security)·회복탄력성(Resilience)을 함께 강화하며, 인프라 증설보다 신속하게 동원 가능하므로 전력 시스템의 위기 대응 능력을 강화
 - (공급부족·정전위험 완화) 피크 수요를 낮춰 임계 시간대 공급 부족 위험을 줄이고, 폭염, 한파 등 기상이변에 따른 단기간 수요 급증 시 완충 역할을 수행
 - 캘리포니아주는 수요 유연성 자원을 적극 운용함으로써 5분 내 2,100MW 이상 수요를 절감하며 순환 정전을 회피했고, 프랑스는 '22년 혹한 시 국가 알림을 통해 800MW (피크 수요의 약 1%)의 수요를 절감함으로써 정전을 회피한 바 있음
 - (인프라 투자 지연·대체) 기존 자산을 기반으로 한 수요 유연성은 신속한 배치가 가능하여, 자산의 과부하를 완화해 전력망 보강·증설 투자 시점을 늦추는 효과가 있음
 - IEA는 수요 유연성 강화를 통해 2050년까지 전 세계 전력망 투자 비용을 약 1.8조 달러 가량 지연할 수 있을 것으로 전망함
 - (수입 연료 의존도 감소·시장 안정) 수요 유연성은 재생에너지 비중이 높은 시스템에서 잉여 전력 시간대 수요를 흡수하고 공급이 타이트한 시간대에는 소비를 줄여, 가격 변동성이 큰 화석연료 수입 의존도는 낮추고 가격 스파이크 위험을 완화하는 데 기여함

3 수요 유연성 확대를 이끄는 주요 트렌드

- [피크수요 증가 및 발생 시간 변화] 피크 수요가 급증하고 발생 시간도 구조적으로 이동함에 따라, 설비 비효율 해소 및 피크 완충을 위한 수요 유연성 지원의 전략적 가치 부각
 - (피크 증가·시간 이동) 평균 수요 증가율 보다 평균 피크 수요 증가율이 높으며, 태양광 보급이 확대되면서 피크 수요 발생 시간이 일몰 후로 이동하여 태양광 발전 감소 시점과 중첩됨에 따라 계통 운영 난이도 가중
 - (한국) '17.9월 대비 '24.9월 기준 일평균 전력 수요는 9% 증가에 그친 반면, 피크 수요는 15% 급증하였고, 피크 발생 시간대는 16시에서 19시로 이동
 - (네덜란드) '25.2월 기준 피크 수요는 10년 전 대비 20% 증가하였으며, 발생 시간은 15시에서 20시로 이동
- (기후 변화 영향) 폭염, 한파 등 극한 기상 발생 시 단기간 내 피크 수요가 급증하여 전력 수급의 불안정성이 높아지고 가격 폭등 리스크가 심화되고 있음
 - '25.6월 미국에서는 폭염으로 전력 부족이 발생했고, 북동부에서는 피크 시간대 도매 가격이 \$1,300/MWh를 상회(평균 가격 대비 25배 상승)하는 등 관련 사례 증가



- [전력망 병목 심화] 전력망 확충 지역에 따른 계통 제약이 심화되면서 혼잡비용과 출력제어가 급증하고 있으며, 그 영향이 실물경제 전반으로 확산되고 있는 상황에서 수요 유연성은 NWA(Non-Wires Alternatives) 수단으로서 병목 현상을 완화할 수 있음
 - (혼잡비용·출력제어 확대) 미국과 EU에서 대규모 혼잡비용 및 출력제어 발생

- (혼잡비용) '24년 미국과 EU에서 각각 약 80억 달러, 45억 달러 규모의 혼잡비용 발생
- (출력제어량) '24년 EU 내 출력제어량은 10TWh를 초과(300만 가구 연간 소비량)하였으며, 영국·아일랜드에서도 '25년 상반기에만 5.5TWh 규모의 출력제어 발생
- (사회·산업 파급효과) 계통 접속 지연으로 인해 재생에너지뿐만 아니라 주택 건설, 데이터센터 등 신규 수요의 진입이 지체되면서 지역 경제와 산업 경쟁력을 저해
- (네덜란드 사례) 접속용량 부족으로 신규 주택 500호 이상의 개발 사업에 전력 공급 불가 방침이 발표되었으며(25.5월), 5개 주에서 9,000개 기업이 접속 지연을 겪음
- (신규 부하 지연) 전력망 제약으로 인해 데이터센터 및 신규 산업단지 등 대규모 전력 수요처의 계통 접속이 지연될 것으로 전망됨

□ [전력시장 변동성 확대 및 마이너스 가격 확산] 재생에너지 확대에 따른 시간대별 수급 불균형 심화로 가격 변동성과 극단값(가격 급등·마이너스 가격)이 확대되고 있어 ‘수급 불균형 완화 수단’으로서 ‘비용 효율성’이 높은 수요 유연성의 가치 상승

- (운영 복잡성 및 비용 증가) 변동성 재생E 비중 확대로 호주, 미국, EU 전력시장에서 마이너스 가격 발생 빈도가 잦아지고, 이에 따른 계통 밸런싱 비용이 지속 상승하는 추세
- (남호주) 분산형 태양광 확대로 '25.1월 순수요가 한낮에는 '15년의 절반 수준으로 급감하고 저녁 시간대 급격한 램프(ramp)가 발생하는 덕 커브(duck curve) 현상이 심화되고 있으며, 현물 가격은 -30달러에서 72달러(USD/MWh)를 오가는 등 극심한 등락을 보임
- (유럽) 단기 변동성 심화로 마이너스 가격 발생 빈도가 급증하고 있으며, 이는 밸런싱·운영·리스크 관리 비용 상승으로 이어져 최종 소비자 요금 인상 요인으로 작용

