

이슈페이퍼 24-03

# 섹터 커플링의 탄소중립 기여도 분석 -P2H 기술을 중심으로-

진태영·이태의



QR 코드를 스캔하여  
보고서 전문을  
확인하실 수 있습니다.

이슈페이퍼 24-03

**섹터 커플링의 탄소중립 기여도 분석**  
**-P2H 기술을 중심으로-**

진태영·이태의

## 1 연구의 필요성 및 목적

### □ 연구의 배경 및 필요성

- 기후변화 대응의 중요성이 국제사회에서 지속적으로 강조되면서, 각 국가들은 이를 위한 정책과제를 지속적으로 발굴
  - 이제 기후변화 대응은 국가 정책 수준을 넘어선 글로벌 패러다임이라 할 수 있음.
- 국제사회에서는 기후변화 대응의 시급성을 인지하고 파리협정의 2℃ 감축목표를 1.5℃ 목표로 강화
  - 해당 목표까지 기후변화를 억제해야 한다는 것에 전지구적 동의형성
  - 파리협정의 자발적 감축목표를 달성하고 나아가 탄소중립 달성 필요
- 탄소중립 달성을 위해 섹터커플링(sector coupling) 기술은 필수적인 기술로 주목되고 있음.
  - 특히 에너지 부문의 탈탄소화 노력에는 변동성 재생에너지 확대가 필수적인데, 섹터커플링은 변동성 재생에너지를 효율적으로 활용하기 위한 방안이기 때문
  - 따라서 섹터커플링 기술을 활용하기 위한 다양한 연구 수행이 필요한 상황

### □ 연구 목적 및 방법

- 본 연구의 목적은 섹터커플링 기술 중 전력과 열에너지 간의 결합을 의미하는 P2H(Power-to-Heat) 기술의 탄소중립 기여도를 도출하는 것임.
  - 이를 위해 우리나라 미래 에너지시스템에 대한 합리적인 가정을 도출하고, P2H 기술이 얼마나 활용될 수 있는지 시나리오 분석을 수행함

- 섹터커플링 분석은 재생에너지 초과발전량을 각 부문별로 재분배하기 때문에 에너지의 신규 수요와 공급이 창출되며, 여러 부문과 기술을 함께 고려하여 분석할 필요가 있음.
  - 각 부문별로 에너지 공급과 수요에 대해 재생에너지 전력을 중심으로 상호작용하게 되는데, 섹터커플링 기술이나 부문을 한정시킬 경우 일부 기술이나 부문의 잠재량을 과대평가할 수 있기 때문
- 이에, 본 연구에서는 EnergyPLAN이라는 통합에너지시스템 모형을 도입하여 한국형 에너지시스템을 묘사하고 P2H의 잠재량을 분석코자 함.
  - EnergyPLAN은 전력, 열, 수소에 대한 방대한 데이터를 바탕으로 국가 에너지 시스템을 모의실험하기 때문에 섹터커플링 분석에 적합함.
  - 또한 타 섹터커플링 기술인 P2G(Power-to-Gas), V2G(Vehicle-to-Grid) 등에 대한 고려가 가능하며, 타 국가에 대한 선행연구 및 분석자료 데이터베이스가 구축되어 있어 상대적으로 국가 데이터베이스 구축에 용이함.

## 2 연구내용 및 주요 분석 결과

### □ 섹터커플링 활용 필요성 및 사례조사

- 섹터커플링은 부문 간 통합을 의미하며, 광의 및 협의의 개념이 있을 수 있으나 본 연구에서는 협의의 개념으로 접근
  - 변동성 재생에너지의 초과발전량을 열에너지로 전환하여 활용
- 우리나라에서는 지역별 인구편차로 인한 전력소비 편차가 심한 편이며, 재생에너지 잠재량은 그와 반대로 분포하기 때문에 전력을 타 에너지로 전환해 활용하는 섹터커플링 기술의 중요성이 부각됨.

- 전력을 그대로 활용하고자 할 경우 매우 많은 송배전망을 추가 건설할 필요가 있으며, 이러한 송배전망의 과다용량은 변동성 재생에너지 발전량과 수요가 집중되는 시간대에만 활용하게 되므로 비용효과성이 떨어짐.
- 덴마크와 독일에서는 P2H 프로젝트가 다수 추진 중인 것으로 확인되며, 대부분은 전기보일러와 히트펌프를 활용한 프로젝트임.
  - 2010년대 중반까지 전기보일러를 활용한 P2H 설비가 주류였으나 히트펌프의 에너지효율 향상 효과와 유럽 히트펌프 지원정책 등에 힘입어 히트펌프 P2H 사업이 활성화되고 있음.
- 덴마크의 Rinkøbing 지역난방 시스템 사례
  - 덴마크는 EU 전력망과 연결되어 있어 변동성 재생에너지 초과발전량이 발생하는 시점에 저렴한 전력을 활용해 히트펌프와 보일러 설비로 난방을 공급하고 가스 소비를 줄이는 통합 P2H 시스템을 운영하고 있음.

## □ P2H 기술 및 사업 활성화 동인

- P2H 기술은 전기보일러, 히트펌프로 나눌 수 있으며, 열저장이 가능한 축열조 기술을 함께 활용해야 효과를 극대화할 수 있음.
  - (히트펌프) 히트펌프는 고효율로 전력을 열로 전환해서 활용할 수 있어 핵심 P2H 기술이나 크기와 중량 측면에서 상당히 높은 편으로 부지 확보가 관건
  - (전기보일러) 전기보일러는 열생성 원리에 따라 저항보일러와 전극보일러로 나눌 수 있으며, 크기와 중량, 그리고 응답성 및 경제성 등을 고려할 때 저항보일러보다 전극보일러가 P2H의 핵심 기술일 것임.
  - (열저장) 열저장 기술의 경우 섹터커플링의 유연성을 극대화하기 위해 필요한 설비이나 화학적 열저장 기술의 경우 아직 실용화 연구가 필요

- P2H 사업이 높은 편익과 잠재성을 보유하고 있으나 경제성이 확보되지 못할 경우 이를 활성화하기 위한 동인으로 여러 방안이 조사됨.
  - 대부분은 열생산을 위한 전기요금 감면, 세액공제 및 P2H 설비투자 보조금에 관한 내용이며, P2H의 사회적 편익이 정확히 확인된다면 이를 통한 활성화를 기대할 수 있음.

#### □ 순부하 추정 결과

- 2030년과 2050년을 대상으로 한 순부하 추정 결과 상이한 결과가 도출되었으며, 이 결과를 바탕으로 EnergyPLAN을 활용한 P2H 모의실험 범위를 2050으로 한정함.
  - 순부하 추정에 있어서는 ESS 충방전 패턴을 고려한 백캐스팅 기법을 활용해 실제 재생에너지 발전패턴을 활용함.
- (2030) 순부하 추정 결과 덕커브가 발생하는 것이 확인되었으며, 변동성 재생에너지 발전량만을 고려한 순부하 추정 결과 음(-)의 순부하는 발생하지 않는 것으로 확인됨.
  - 주말에는 주중 대비 전력수요 패턴이 더욱 평활화됨에 따라 순부하의 시간대별 낙차 폭이 더욱 커지는 현상
- (2050) 2050년도에 대한 순부하 모의실험 결과 덕커브가 더욱 심화되는 현상이 목격되었으며, 순부하 추정 결과에서 음(-)의 순부하가 나타남.
  - 낮 시간 음의 순부하 크기는 월에 따라 100GW 이상 차이로 큰 계절성
  - 2030 모의실험 결과와 마찬가지로 주중-주말 간 순부하 차이 심화
- 2030년의 최대 증감발량은 약 30GW 수준이며, 2050년의 최대 증감발량은 180GW 이상인 것으로 나타남.

## □ 에너지시스템 모형 분석 결과

- 본 연구에서는 2019 및 2050의 우리나라 에너지시스템에 대해 모의실험을 수행함. 2019년도는 과거 자료를 활용해 EnergyPLAN 모형이 우리나라 상황을 적절히 묘사하는지 확인한 작업에 가까움.
  - 2019년 에너지시스템 가정사항은 제9차 전력수급기본계획, 한국전력통계 및 집단에너지사업 편람과 개정에너지밸런스 등으로부터 주요 수치 활용
  - 2050년 에너지시스템 가정사항은 제10차 전력수급기본계획, 한국전력통계 및 집단에너지사업 편람 기반 증가함수 가정, 에너지경제연구원 장기전망자료의 주요 수치 활용
- (2019 에너지시스템) 2019년 에너지시스템 모의실험 결과 전력은 기저발전원 및 변동성 재생에너지(VRE)를 활용해 안정적으로 기저발전을 확보하고, 첨두발전원이 부족전력을 설비용량의 과다활용 없이 안정적으로 전력수급에 기여하는 것으로 나타남.
  - 지역난방의 경우 소각열에 대한 일부 가정으로 인해 여름철에 과다공급 경향성이 일부 존재하나 모형의 가정사항을 고려하면 수급불균형 문제점은 나타나지 않을 것으로 판단
  - 결론적으로 2019년의 에너지시스템 모의실험은 EnergyPLAN을 활용해 우리나라 에너지시스템 모의실험이 가능하다는 점을 시사함.
- (2050 에너지시스템) 2050년 에너지시스템 모의실험 결과 2050 탄소중립 시나리오의 전력 믹스 활용을 위해서는 본 연구에서 가정한 유연성 수단보다 많은 설비용량이 필요한 것으로 나타남.
  - 본 연구는 섹터커플링 기술(P2G, P2H, V2G)을 모두 활용하여 전력 수급균형을 확보하기 위해 노력하는 에너지시스템을 구성하였음에도 불구하고 여전히

재생에너지 초과발전량이 존재함.

- 2050 탄소중립 시나리오 기준 모형에서 연간 초과발전량은 89TWh 발생하며, 난방 부문에서 히트펌프를 활용한 전력소비는 17.8TWh, 지역난방에서 재생에너지 초과발전량을 흡수한 전력량은 1.6TWh에 불과함.
  - P2H의 초과발전량 활용도를 더욱 높이기 위해서는 ① 중앙 급전 체계에서는 지역난방 공급 비중을 확대하는 것이 한 방안일 수 있으며, ② 개별난방에서 초과발전량을 흡수하기 위해 Plus DR과 같은 가격신호 제공 방안이 확대될 필요가 있음.
- (민감도 분석) 민감도 분석을 통해 2050 에너지시스템에서 추가적인 전력수급 안정화 가능 여부를 살핌.
- (히트펌프 용량 축소) 기준 모형은 이미 지역난방 히트펌프가 과다한 상태이며, 히트펌프 용량 1,200MW까지 축소하여도 충분한 VRE 흡수 가능
  - (지역난방 확대) 지역난방 130%, 200% 확대 시 P2H가 증가하나 CHP의 열제약발전이 더욱 증가하며, 이에 따라 오히려 초과발전량이 확대됨.
  - (ESS 증설) ESS 확보를 통한 전력수급 안정성은 효과적일 수 있으나 2050 시스템 하에서 확대할수록 한계비용 효과성이 떨어질 것으로 예상
  - (축열조 확대) 축열조는 효율적으로 P2H 확대와 초과전력생산을 확대하는 수단이나, 용량 측면에서 한계가 명확하여 다양한 기술 조합이 필요

### 3 결론 및 정책제언

#### □ 결론

- 2050 탄소중립 시나리오 분석 결과 P2H 기술을 활용하여 지역난방 수요의 약



15%를 공급할 수 있는 것으로 도출

- 2050년에 국내 수소생산을 위한 수전해설비 운영 시 발생폐열을 활용한 열 공급도 고려해볼 수 있는 것으로 분석
- 본 연구에서 가정한 탄소중립 시나리오상 2050년의 변동성 재생에너지 설비 규모가 매우 크기 때문에 P2H와 P2G 기술만으로 흡수가능한 재생에너지 초과발전량은 매우 부족한 상황
  - P2H와 P2G 외 VRE를 충분히 활용할 수 있는 다른 기술도 적극 검토 필요
  - 자원의 배분 효율성을 위해 전력 믹스에 대한 재검토가 요구될 수 있음.
- 민감도 분석 결과 다양한 수단에 대한 적절한 조합이 필요한 것으로 판단
  - 히트펌프 활용이 증가하면 CHP의 발전량이 감소, CHP 발전에 필요한 수소 공급량이 줄고 초과발전량을 활용하는 P2G의 초과발전량 흡수도 감소
  - 지역난방 수요가 급격히 늘어 히트펌프와 CHP가 동시에 늘게 되면 CHP의 열 제약발전이 기저발전 역할을 하기 때문에 초과발전량은 오히려 증가
  - 따라서 수요 창출을 시도하는 등이 능사는 아니며 스토리지 자원을 적절히 활용할 필요

## □ 정책제언

- 변동성 재생에너지 등 미래 전원믹스에 대한 구성을 재검토할 필요
  - 합리적인 전원믹스를 구성하는 방안이 필요함. 현재 보유한 정책자료로부터는 변동성 재생에너지가 과다계상된 것으로 나타남.
  - 에너지시스템 구성에 있어 에너지원 간 상호작용과 트레이드오프 관계를 고려한 설비투자가 필요

- VRE와 원전을 기저발전으로 활용하게 된다면 결국 유연성 설비의 중요도가 증가할 것으로 보임.
- 미래 유연성 설비인 가스터빈, 스토리지 자원이 핵심적인 역할을 수행할 것이므로 해당 기술에 대한 투자가 우선시되어야 할 것임.
- 미래 에너지 시스템에 대한 고민이 필요함.
  - 합리적인 에너지 믹스를 확보하기 위해서는 본 연구와 같은 기초연구가 다수 수행되어야 할 것으로 판단
  - 현재까지 하향식 에너지 시스템 구조로부터 탈피하여 에너지 시스템이 상호작용하는 방향으로(예: 섹터커플링 등) 나아가고 있기 때문에 이를 반영한 분석체계 확보가 시급함.

## □ 연구의 한계점

- EnergyPLAN 모형의 한계점
  - EnergyPLAN은 지역별 분석이 가능하지 않지만, 실제로 변동성 재생에너지를 흡수하는 섹터커플링 분석의 경우 계통에 대한 고려가 필요하며 지역 간 모델링이 가능해야 할 것임.
  - EnergyPLAN에서 이를 구현하려면 육지 계통을 연결계통으로 보고 각 지역별 에너지시스템 모델링을 별도로 수행해야 할 것임.
  - 소프트웨어 구성상 개별난방을 제외한 지역난방이 섹터커플링 모델링에 포함되어 있으며, 에너지시스템의 급전순위와 열공급 우선순위는 변경하는 것이 어려움.