

## 신기후체제에서의 에너지 인프라 변화 방향

### - 독일의 열 및 수송부문의 전력 연계 방안

염광희 책임연구원

● 최근 독일 환경부의 지원을 받아 발표된 보고서는 기후보호라는 전 세계가 직면한 에너지 위기를 극복하기 위한 미래 에너지시스템 구축 방향 제시.

○ 독일의 환경연구소인 도이치 움벨트힐페 (Deutsche Umwelthilfe)는 최근 발표한 보고서 「부문연계 - 열 및 수송부문의 전력이용을 통한 기후보호 (Sektorenkopplung - Klimaschutz mit Strom für Wärme und Verkehr)」를 통해 독일이 향후 신기후체제를 대비해 어떠한 에너지시스템을 준비해야 하는지 과학적으로 전망.

○ 이 보고서를 통해 독일이 향후 어떠한 방향으로 정책을 마련하고, 어떠한 새로운 시장이 만들어질지 전망 가능.

○ 이는 서울에너지공사의 장기적인 사업방향을 마련하는데 참고가 될 수 있을 것임.

### ● 신기후체제란?

- 교토의정서를 대신해 2021년부터 적용될 국제사회의 새로운 기후변화 대응체제를 일컫는 표현.
- 2015년 12월 프랑스 파리에서 열린 제 21차 유엔 기후변화협약 당사국총회에서 신기후체제 합의문인 「파리협정 (Paris Agreement)」 채택.
- 국제사회는 장기목표로 산업화 이전 대비 지구평균기온 상승을 “2℃보다 상당히 낮은 수준으로 유지”하기로 하고 “1.5℃ 이하로 제한하기 위한 노력” 추구.

- 선진국에만 온실가스 감축의무가 부과되었던 「교토의정서」와는 달리, 파리협정은 195개 당사국 모두가 지켜야 하는 첫 합의. 장기목표를 달성하기 위해서는 2060~2080년까지 전세계는 탈탄소화 (decarbonization)를 달성해야만 함.
- 우리나라는 2030년 배출전망치 (BAU, 8억 5,060만 톤) 대비 37% 감축목표 설정.
- 유럽연합은 2030년까지 '90년 대비 최소 40%의 온실가스 감축목표 설정.
- 그러나 독일은 2010년 발표한 장기 에너지계획인 「에너지 콘셉트」에서 온실가스는 '90년 대비 2020년 40%, 2050년 95% 감축, 최종에너지 중 재생에너지 비중은 2050년 60%, 전력 중 재생에너지 비중은 2050년 80% 보급하는 목표 제시.

## ● 신기후체제란? - 주요 내용 요약

- 2050년까지의 기후목표 달성을 위해서는 우선적으로 에너지효율화 및 소비절약을 통해 모든 부문 (전력, 열 및 수송)의 최종에너지 소비를 줄여야만 함.
- 전력부문과는 달리 열 및 수송부문은 재생에너지의 직접적인 이용에 한계가 있음. 그러므로 열·수송부문에서의 전력이용이 확대되어야 함.
- 열·수송부문에서 전력으로 온실가스 감축을 꾀하기 위해서는 전기 생산에 필요한 온실가스 배출<sup>1)</sup>을 줄여야 함. 이를 위해서는 재생에너지를 확대하고 석탄발전을 줄여야만 함.
- 건물에서는 지역난방 및 히트펌프 (COP 3~5 수준) 이용해야 함. 현재의 전력 온실가스배출 수준으로도 히트펌프는 기름보일러에 비해 1/3 가량인 1,400만 톤 온실가스 감축 가능. 가스보일러를 히트펌프로 교체할 경우 추가적으로 1,400만 톤 감축 가능. 전력부문에서 재생가능에너지를 확대 할 경우, 온실가스감축 효과는 더욱 개선.
- 전극보일러 (electrode boiler)는 현재의 전력믹스에서는 효과적이지 않음. 화석연료를 직접 이용하는 것에 비해 두 배나 많은 온실가스 발생.
- 수송부문의 경우, 승용차의 배터리 저장장치는 온실가스 배출에 있어 고효율 휘발유·경유차량 수준에 도달. 그러나 현재의 전력 믹스로는 전기자동차 보급이 온실가스 감축에 큰 효과는 없음. 재생에너지가 확대 보급될 때에만 전기 자동차의 온실가스 감축 효과 발생.

1) 독일의 전력 1kWh 당 온실가스 배출은 565그램 (2015년), 한국은 443그램 (2012년)

- 전력의 수송부문 이용의 좋은 방법은 철도교통의 확대. 여객 및 화물수송의 철도 이용은 온실가스 감축잠재량 상당. 이론적으로 화물수송 전체를 철도로 전환할 경우, 25%에 해당하는 860만 톤 온실가스 감축 가능. 이를 위해서는 철도 인프라 확장 필요.
- 전력의 재생에너지 비중이 100%에 도달할 경우, 재생에너지 전력을 직접 이용하기 어려운 곳에 Power-to-Gas (PtG) 또는 Power-to-Liquid (PtL)와 같은 전력변환연료 적용 가능. 유연성 (flexibility) 및 저장 측면에서 PtG 또는 PtL은 전력의 재생에너지 비중이 60~80% 일 때 경제성 확보.
- 재생에너지에서 생산한 전력으로 변환된 연료는 열·수송부문의 탈탄소화 (decarbonization)에 매우 중요한 역할을 담당하므로, 해당기술에 대한 지속적인 연구개발을 통해 2030년 이후 상용화 가능해야 함.

## ● 2015년 채택된 파리협정은 2050년까지 온실가스 95%이상 감축해야함 강조.

- 전력부문 뿐 아니라 열·수송부문 또한 2050년까지 탄소 중립을 달성해야 함.
- 이를 위해 우선적으로 이 세 부문에서의 에너지효율화가 선행되어야 함.
- 효율화 이후 필요한 에너지 수요는 재생가능에너지로 공급해야 함.
- 태양열 및 바이오매스의 직접 이용에 더해, 태양·풍력에너지 등 재생가능한 전력 생산 필요.

## ● 또한, 열·수송부문에서 전력부문과의 연계 (coupling) 필요.

- 부문연계는 간헐성을 특징으로 하는 재생가능에너지의 전력망 안정화를 위한 유연성 측면에서도 중요.
- 부문연계 연구를 위한 주요 질문
  - 전력-열, 전력-수송의 연계는 어느 정도의 온실가스 감축 잠재량이 있는가?
  - 온실가스 저감을 위한 부문 연계를 위해 어떤 기술이 언제 적용 가능한가?
  - 재생가능에너지 확대를 위해 어떤 의미가 있는가?
  - 유연성 측면에서 부문 연계는 어떠한 기여를 하는가?

## ● 열부문에서의 연계

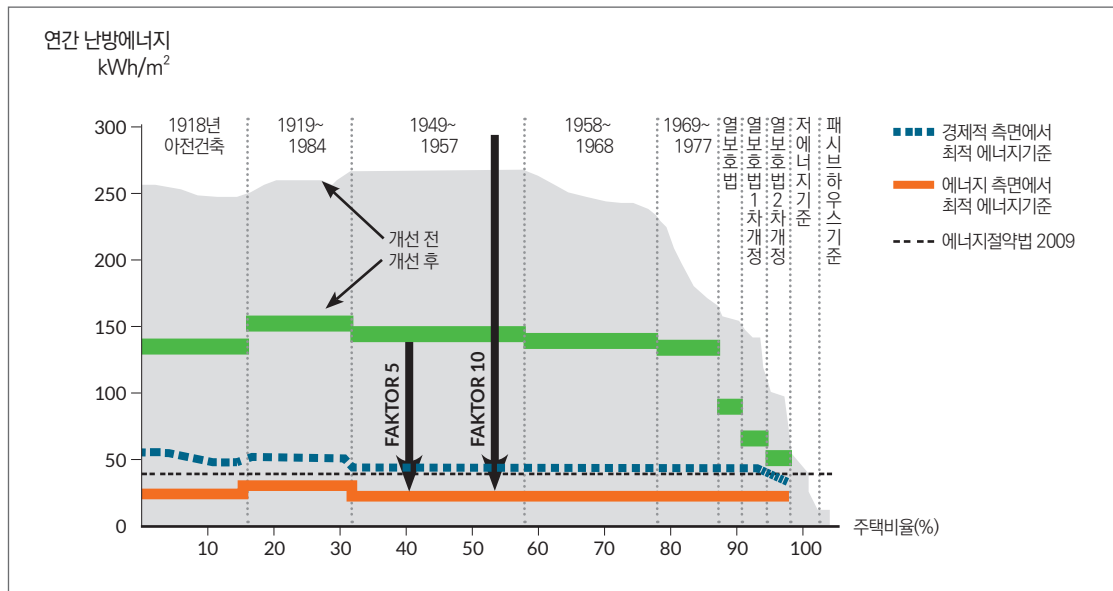
### ○ 열부문의 현 상황 및 목표

- 독일에서의 열부문 (산업, 주택, 상업, 유통 및 서비스)은 전체 최종에너지 소비의 약 50%, 에너지부문 온실가스 배출의 약 32% 차지.
- 전력, 열, 수송부문 중 가장 많은 에너지를 소비하는 열부문은 독일의 기후보호목표를 달성하는데 매우 중요한 역할.
- 그러나 2050년까지 기후중립적 건물보급 외에 열부문과 관련해서 최종에너지 소비절감 및 재생에너지 보급과 관련해 구체적인 목표 부재.
- 에너지 절약과 재생에너지 보급을 통해 2008년 대비 건물의 1차에너지 소비 2050년까지 80% 절감 가능.
- 열 부문 재생에너지 비중은 13%에 불과.
- 2008년 기준 약 1,200TWh에 달하는 건물분야 비재생에너지 수요를 2050년까지 완전히 줄여야 함.
- '90년 이래 독일은 건물개선을 통해 건축물의 최종에너지 소비를 줄였으나, 개선 정도는 매년 1%에 불과.

### ○ 부문연계를 위한 첫 단계로서의 에너지효율화

- 기후보호목표 달성 및 열-전력부문의 연계를 위해서는 에너지효율화 필요.
- 효율화 개선 없이 모든 열에너지를 재생에너지로 공급하기 위해서는 막대한 재생에너지 시설이 필요. 이에 따른 부지 및 주민수용성 갈등 발생.
- 에너지전환을 위한 지속적인 연구·개발을 위해서는 정책적 우선순위 중요.
  - ① “효율화 우선” 목표에 따라 에너지절약 잠재량 분석 및 효율화
  - ② 재생에너지의 직접 이용
  - ③ 마지막 단계로, 열부문에서의 재생가능에너지 이용에 대한 부문연계 실행
- 여러 연구 및 분석에 따르면, 2008년 에너지 기준 2050년까지 난방 및 온수생산에 소요되는 최종에너지 중 40~60% 절약 가능. 건축문화재, 단열에 대한 기술적 제약 등으로 인해 보다 많은 에너지 절감은 불가능.
- 기존 건축물의 경우 에너지절약 잠재량 상당.

[그림 1] 독일 건축연도별 연간 난방에너지 수요



(자료 : Stadtentwicklung im Spannungsfeld zwischen Klimaschutz und Stadtumbau)

- 이를 통해 난방 및 온수에 필요한 최종에너지 수요를 2008년 기준 889TWh에서 2050년 445TWh 수준으로 절감 가능. 그러나 건축물 에너지효율화를 통해 도달 가능한 1차에너지 절감은 한계가 있음.
- 건축물에서의 온실가스 배출을 완전히 감축하기 위해서는 난방 및 온수에 필요한 에너지는 재생에너지로 공급해야 함.

#### ○ 재생가능에너지의 직접이용 : 바이오매스, 태양열, 지열

- 수요 인근에서 태양열을 이용해 건축물의 열공급 잠재량은 연간 약 53~69TWh. 지붕 구조, 하중 등의 기술적 제약조건으로 인해 태양열 이용에 한계.
- 바이오매스는 2050년까지 연간 약 69~139TWh 이용 가능. 그러나 바이오매스 자원 또한 제한적이며, 환경친화적 바이오매스 자원을 확보하는 과제 존재.
- 바이오매스는 가능한 한 효율적인 열병합발전기에서 전기와 고온의 열 생산해야 함.
- 기존의 개별 바이오매스 보일러는 지역열병합 또는 바이오매스 발전시설 등의 집단에너지 방식으로 전환되는 추세.
- 수요 인근에서의 직접이용에 적용 가능한 재생가능에너지는 총 122TWh~208TWh.
- 잔여 237~323TWh 또한 무탄소 에너지로 공급되어야 함.
- 재생에너지 직접이용의 또 다른 방안은 (심층)지열, 대규모 태양열집열기, 바이오매스 및 산업 폐열을 집단에너지로 활용하는 것.

- 집단에너지로 난방 가능한 규모는 연간 100~140TWh. 그러나 2013년 현재 15TWh에 한해 재생에너지로 지역난방 이용.
- 수요 인근 및 지역난방 잠재량을 합산해도 재생에너지의 직접이용을 통해 건물분야의 에너지 수요 충당 불가능.

#### ○ 열부분의 재생에너지 전력 이용

- 건물부분의 잔여 에너지수요를 탈탄소화하기 위해서는 재생에너지 전력의 열부분 연계 필요. 이를 위한 핵심 기술은 저온 전기 히트펌프.
- 히트펌프는 개별 건물 또는 지역난방 네트워크에 적용 가능.
- 기존의 여러 연구를 통해 살펴보면, 히트펌프는 2050년까지 개별 건물의 주요한 열원이 될 전망. 히트펌프는 모든 개별 난방 설비의 80% 이상 보급되어야 함.
- 향후 히트펌프의 COP는 Water to Air의 경우 2.9~4, Water to Water의 경우 3.1~4.9로 개선될 전망.

### ● 공정 열 (Process heat) 분야의 대형 히트펌프 및 PtG 이용

- 공정 열분야에서는 폐열 이용 및 공정과정 최적화를 통해 에너지 절약 가능
- 잔여 공정 열 수요는 Power-to-Heat 또는 장기적으로는 PtG로 고열 공급 가능
- 그러나 변환 손실로 인해, PtG의 경우 전력에서의 재생에너지 비중이 100%에 이르렀을 때에나 경제적이며 생태적
- 그럼에도 불구하고 전력변환연료 기술의 연구와 개발 필요

#### ○ 온실가스 감축 잠재량

- 건축물의 탈탄소화 및 2050년 감축목표 달성을 위해서는 열공급에서의 재생에너지 비중 현재보다 5~6배 확대되어야 함.
- 2015년 현재 약 60만 대 보급된 히트펌프는 2030년 400~800만 대에 이르러야 함. 매년 6만 대 추가 보급되는 현재 추세로는 도달 불가능.
- 노후보일러는 교체되어야 함. 설치된 지 25년 이상인 기름보일러는 370만 대, 가스보일러는 280만 대.
- 현재의 COP 2.3인 Water to Water 히트펌프는 기존 화석에너지 시스템에 비해 온실가스 감축 효과 있음. COP 3.2인 히트펌프는 현재의 전력믹스에서 가스보일러에 비해 약 30% 온실가스 감축 효과. 신축 건물의 경우, 50% 온실가스 감축할 수 있는 COP 5의 히트펌프 설치 가능.

- 그러나 기존 건축물의 단열벽 두께, 지열 활용 가능성 및 각기 다른 주변 환경 등으로 모든 건물에서 히트펌프를 이용할 수는 없음. 현재의 건물 상태로는 최대 60% 보급 가능. 이러한 제한적인 조건에도 불구하고, 2050년까지 약 116TWh 담당 가능.
- 다른 연구에 따르면, 히트펌프를 활용한 대기열 이용 잠재량은 58~100TWh에 달함.

〈표 1〉 열 이용기술에 따른 CO<sub>2</sub> 감축 잠재량

열 이용기술	CO <sub>2</sub> 발생 (g/kWh)	효율 계수	CO <sub>2</sub> 발생 (g/kWh-열)	가구당 연간 CO <sub>2</sub> 발생 (톤)	CO <sub>2</sub> 감축 비교
기름 보일러	319	1	319	8.9	기준
가스 보일러	250	1	250	7	22% 감축
히트 펌프 (COP 3)	565	3	188	4.2	53% 감축
히트 펌프 (COP 5)	565	5	113	2.5	72% 감축
PtG 전해장치	565	0.8	706	15.8	77% 추가 발생

주 : 독일의 가정 평균 연간 열 수요 22,400kWh, 평균 주택 면적 140㎡, 단위면적당 연간 160kWh/㎡, 2015년 독일 전력 믹스에 따른 전력 생산 온실가스 배출량 565g/kWh

## ○ 장애 요인

- 전력요금 중 54% 달하는 세금으로 인해 전력은 가스·석유에 비해 가격 경쟁력 취약. 이는 전력부문과 열 부문의 연계를 어렵게 만드는 요인.
- 현실에서의 히트펌프 COP 매우 상이. 히트펌프의 효율개선 및 건설·설치 과정에서 실수를 줄이고 기술 적으로 정확하게 설치하는 것 필요.

## ○ 정책적 조언

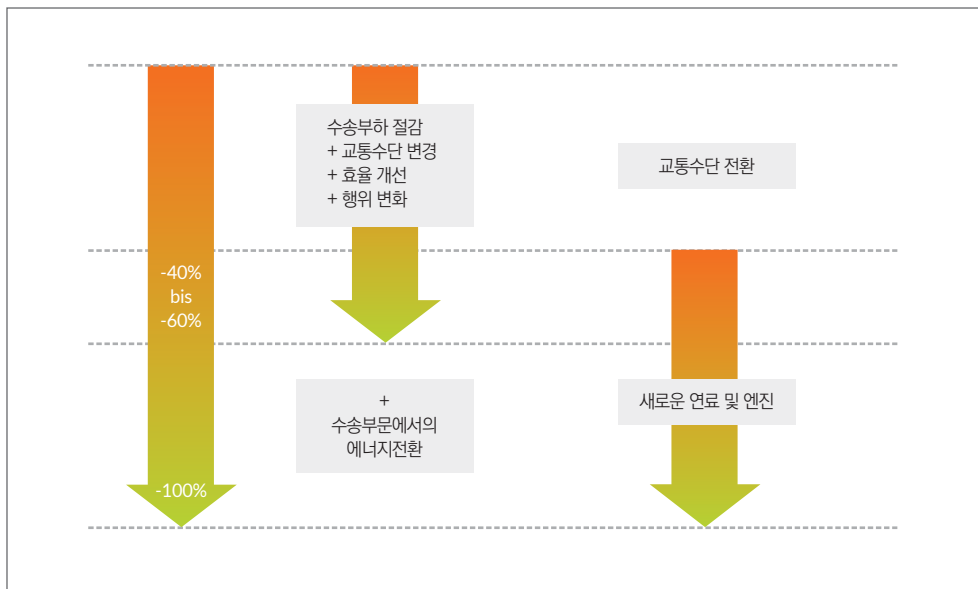
- 온실가스 배출에 따른 화석연료 세제 조정 : 에너지효율화 및 재생에너지의 경쟁력 강화를 위해 온실가스 배출 등의 외부효과를 반영한 새로운 세제 필요.
- 석유 및 가스이용 설비에 대한 정부지원 중단 : 화석연료 연소기술의 효율개선을 위한 정부투자 중단 필요.
- 2025년 이후 기름·가스보일러 설치 금지 : 시행하지 않을 경우, 2050년 온실가스 중립목표 달성 불가능.
- 기술인력 교육 강화 : 히트펌프의 올바른 설치 및 운영을 위한 기술자 교육 필요.
- 지역 열공급계획 강화 : 지역계획을 수립함에 있어 지역난방이 우선적으로 고려될 수 있도록 조치.
- 기존 건축물의 에너지효율화 확대 : 1%에 불과한 현재의 수준으로는 목표 달성 불가능. 최소 2%에 도달 해야 함.

## ● 수송부문에서의 연계

### ○ 수송부문의 현 상황 및 목표

- 독일의 2015년 최종에너지 소비에서 수송부문 비중은 약 30%로, 이 중 94%는 석유에 의존.
- 수송부문의 온실가스 배출은 '90년 이후 큰 변화 없음. 2015년 이 부문의 직접 배출은 약 1억 6,400만 톤이며, 이는 독일 전체 온실가스 배출의 18% 차지.
- 이 중 약 96%는 도로교통에서 발생.
- 독일정부는 수송부문<sup>2)</sup>에서 '90년 대비 2030년 40~42% 감축 목표. 그러나 연방 교통부는 2030년까지 교통수요가 증가할 것으로 전망.
- 2050년 온실가스 감축목표 도달하기 위해서는 수송부하 절감 및 교통수단 변경, 화석연료 의존의 완전한 탈피 요구.
- 그러나 바이오 수송연료는 화석연료를 전부 대체하기에 한계. 그러므로, 교통부문의 에너지 수요는 다른 재생에너지원으로 대체되어야 함.

[그림2] 수송부문에서의 교통수단 및 에너지 전환



(자료 : Deutsche Umwelthilfe 2017)

2) 약 13%의 개인차량 및 약 38%의 화물수송 이용 증가 예상



### ○ 부문연계를 위한 첫 단계로서의 에너지효율화

- 기후보호목표 달성을 위해서는 2030년 30%, 2050년 50~60%의 교통부문 에너지 수요 절감해야 함.
- 화석연료에 전적으로 의존하는 수송부문을 재생에너지 전력으로 대체하기 위해서는 에너지수요 절감이 무엇보다 중요. 그러나 야생동물·자연보호 등의 이유로 재생에너지를 무한대로 보급하기는 불가능.
- 2015년 현재 수송부문은 약 728TWh의 에너지소비. 이 중 600TWh는 도로교통에서 발생.
- 반면, 2015년 현재 독일 전체의 전체 전력생산은 645TWh 수준.

### ○ 수송부문에서의 에너지전환

- 기후보호목표 달성을 위해서는 수송부문에서의 에너지전환, 철도 및 전기자동차의 전력 직접이용, 기존 내연기관에서의 전력변환연료 이용 등 필요.
- 철도는 여객·화물수송에서 매우 효율적인 전력이용 가능성 제공. 따라서 기존 내연기관 중심의 교통수단을 철도로 변경하는 것은 매우 큰 온실가스 감축 기회.
- 2015년 대비 철도교통수요 160% 증가할 경우, 에너지소비는 현재 54PJ에서 61PJ (17TWh)로 단 10% 증가.
- 수송부문에서의 온실가스배출 중 상당 부분은 트럭을 이용한 화물수송에서 발생.
- 전력부문에서 재생에너지 확대될 경우, 2010년 현재 17.7%에 불과한 철도의 화물수송비율을 2030년 25%까지 증가시키는 것 가능. 이를 통해 화물수송에서만 약 860만 톤 온실가스 감축.
- 100km 이내의 근거리 이동에 전기자동차 이용은 현재의 전력믹스 수준에서도 효율적인 내연기관에 비해 온실가스 감축<sup>3)</sup>.
- 전기자동차 모터는 기술적인 한계가 명확한 만큼, 전력변환연료 보급 필요.
- 특히, 항공·선박·일부 화물수송은 현재의 기술수준으로 철도 또는 전기자동차로 변환 불가능.
- PtL 또는 PtG를 통해 전력에서 얻는 메탄으로 기존의 교통수단에 이용 가능.
- 그러나 이러한 전력변환연료는 전력을 직접 이용하는 철도나 전기차에 비해 에너지효율 매우 낮음. 그러므로 전력변환연료를 많이 사용할 경우, 수송부문의 최종에너지 수요 증가.
- 철도이용 증가와 효율화가 진행된 이후에도 존재하는 내연기관은 전력변환연료를 이용해야 함. 온실가스 중립적인 수송연료를 생산하기 위해서는 2050년까지 전력에서의 재생에너지 비율이 73~88% 수준에 도달해야 함.
- 이러한 여러 사항을 고려하면, PtG 또는 PtL이 수송부문에서 중요한 역할을 하기 위해서는 모든 전력은 재생에너지에서 생산되어야 하며, 그래야만 탄소중립<sup>4)</sup>을 달성할 수 있음.

3) 현재의 내연기관 연비는 실험실 조건에서 측정된 것으로, 실제 주행과는 42~50%이상의 차이 발생.

4) 현재의 전력믹스에서는 PtG 또는 PtL이 내연기관에 비해 더 많은 온실가스 배출.

### ○ 수송부문에서의 온실가스 감축 잠재량

- 수송부문에서의 부문연계를 통한 온실가스배출 감축을 위해서는 수송부문의 총에너지 소비를 현저하게 절감하는 것 필요.
- 2010년 17.7%에 불과했던 화물수송의 철도이용 비중을 2030년 25%까지 높일 경우, 약 860만 톤의 온실가스 감축 가능.
- 현재의 전력믹스에서는 전기차 보급으로 온실가스 감축을 기대하기 어려움.
- 2030년까지 온실가스 감축을 최대화하기 위해서는 전력부문의 재생에너지 보급과 철도 및 물류 인프라 혁신 필요.
- 전력변환연료로의 대체를 포함해, 재생에너지 전력비중은 높아져야 함. 한 연구에 따르면, 수요절감 및 기술개발을 고려하더라도 육상교통의 재생에너지 수요는 2,000~2,486PJ, 약 556~691TWh로 전망. 여기에 전력변환연료까지 포함할 경우, 2050년 3,300~3,847PJ, 즉 917~1,070TWh로 수요 증가.

## ● 천연가스차량은 기후보호목표 달성에 도움이 되는가?

- 현재의 기술수준으로도 천연가스차량은 휘발유·경유 차량에 비해 온실가스 감축.
- 가스차량은 질소 산화물·미세먼지를 적게 배출하는 환경적인 장점.
- PtG 또는 PtL 생산이 여의치 않을 경우, 천연가스의 교통부문 이용은 기후보호 측면에서 장점.
- 여객·화물수송에서의 천연가스 이용은 대기질 개선에 긍정적 효과. 질소 산화물 및 미세먼지로 인한 조기 사망자 증가 및 질병 증가는 사회적 비용 상승으로 연결. 이미 독일의 여러 도시에서 대기질 기준치 초과. 유럽연합은 독일의 대기질 수준에 대해 문제 제기.
- 현재 기술 수준으로는 매우 짧은 시간 내에 온실가스 및 대기오염 물질을 배출하지 않는 전력기반의 교통 수단을 보급하기는 어려움.
- 천연가스 차량은 현재에도 시장 경쟁력을 확보한 기술이며, 인프라도 잘 구축.
- 그럼에도 불구하고 추가적인 효율 개선 필요.

### ○ 장애 요인

- 현재까지 수송부문의 수요절감 및 교통수단 변경에 대한 구체적인 계획 미비.
- 중형 상용차량 및 승용차에 대한 온실가스 배출기준 시행 및 강화에 미온적이며, 철도화물수송 인프라 축소 및 대중교통 지원 악화.
- 업무용 차량 또는 경유에 대한 세제 혜택 등 기존 교통체계에 대한 보조금 정책이 환경친화적 교통수단 확대에 걸림돌.
- 교통부문에서의 화석연료 대체에 대한 기술적 문제 존재.

- 현재의 전기차량은 낮은 가성비로 인해 소비자의 자발적 유인을 이끌지 못함.
- 배터리 가격의 하락에도 불구하고, 전기차량의 가격이 여전히 비싸기 때문에 시장 경쟁력 낮음.
- 보다 쉽고 빠른 충전 기술과 같은 인프라 구축 필요.

## ○ 정책적 조언

- 2030년까지 교통부문의 온실가스배출을 줄이기 위해 수송부문의 수요절감, 교통수단 변경, 기존 엔진의 효율개선을 위한 구체적 대책 필요.
- 독일연방환경청 (Umweltbundesamt)이 내놓은 「2050 수송부문 기후보호」연구에 따르면, 모든 교통계획 및 인프라 확대계획에 기후보호목표가 통합적으로 반영되어야 함.
- 대중교통에 무게 중심을 둔 기후친화적인 수송부문 개선은 개별 교통수단에 대한 규제와 병행되어야 함. 세제, 규제, 인센티브 등의 다양한 세부 정책 가능. 특히 도심지역의 대기질 개선이 주요한 사회 의제로 등장한 만큼, 이러한 규제정책에 대한 시민들의 지지 기대 가능.
- 수요절감
  - 통합적이며 지속가능한 도시·지역개발계획 : 계획과정에서 수송부하 절감 가능. 예를 들어, 목적지까지 이동을 위해 도보, 자전거 또는 대중교통의 이용을 세부 계획에 반영할 수 있으므로, 개인차량 이용을 줄일 수 있음.
  - 특히, 화물수송 수요를 줄이기 위한 대책 필요.
- 교통수단 변경
  - 도로 화물수송을 철도로 전환 : 2030년까지 모든 철도의 100% 전기화 및 2035년까지 철도망 확장, 소음저감 및 화물용 기차역 확장 등 필요. 도로이용 부과금 및 화물차량 통행료 인상 등을 통해 교통수단 간의 불공정한 경쟁력을 개선 가능.
  - 여객 교통수단 변경 : 대중교통 확대와 같은 인프라 확대 및 주차장 제한·도심 통행료 징수 등의 규제 대책 가능. 도시 내의 교통수단 전환을 위해 도보 및 자전거 이용 장려정책 가능. 항공연료에 대한 과세는 단거리 항공에 대한 수요를 일정 정도 철도로 전환 가능.
- 효율개선
  - 미래형 엔진 및 대체연료 개발 및 기존 연료에 대한 과세 및 규제 강화 필요.
  - 온실가스 배출 정도에 따른 에너지세제 개혁: 환경부담비용 축소 및 에너지 효율화·재생에너지 보급 확대 목적.
  - 승용차·경상용차 온실가스 배출 기준의 지속적 강화. 실제 주행상태에서의 차량 온실가스배출 측정 및 통제대책 필요. 기준을 초과할 때 부과되는 벌금인상 또한 저탄소 차량 개발 동기로 작용할 수 있음.
  - 중형 상용차에 대한 온실가스 배출 기준 도입 또한 필요.
  - 온실가스 과다배출 차량에 대한 자동차세 인상은 향후 저탄소 차량의 기술 개발과 보급으로 이어질 것.

- 소비행태의 변화

- 대중교통 개선은 다양한 교통수단 이용에 대한 시민인식 전환 및 개인 승용차 이용 절감으로 이어질 것.
- 카-쉐어링 (car-sharing) 등 새로운 교통수단을 유인할 수 있는 교통정보 시스템 및 스마트폰 앱 개발 등의 세부기술 개발 필요.
- 속도제한은 차량 이용자들의 행태변화 및 자동차 업계의 속도제한에 적합한 차량 기술개발 유도 가능.

## ● 부문연계를 통한 시스템의 유연성 전망

○ 히트펌프, 전극보일러, 전기자동차 및 전력변환연료는 에너지시스템에서 전력의 통합을 가능케 하는 유연성 제공.

○ 재생에너지 비중이 높은 전력시스템에서는 전력공급이 수요를 초과하는 시간 증가. 2020년까지는 이러한 초과생산 시간이 그리 길지는 않을 것이기에, 유연성을 고려한 추가적인 대책이 필요치는 않음. 그러나 2030년 이후 재생에너지 전력비중이 60% 이상일 때, 유연성을 고려한 대책 필요.

### ○ 재생에너지 송전제한 완화

- 2015년 독일 북부의 전력망 용량 부족으로 4.7TWh의 전력이 송전되지 못함.
- 송전망 확충이 지연될 경우, 이미 허가를 받은 재생에너지 발전소 뿐 아니라 기존의 대용량 화력발전소의 송전 중단 발생 가능.
- 재생에너지 전력의 송전제한을 줄이기 위해서는 화력발전소의 “우선운전”을 줄여야 함.
- 히트펌프, 전기자동차, 전극보일러 이용과 같이 전력생산지에서 직접 소비하는 개념을 적용할 필요 있음.
- 현재의 전력믹스에서 지열은 온실가스 감축효과를 입증했으나, 전기자동차는 그렇지 못함.
- 전극보일러는 아직까지 기후보호 측면에서 부문연계의 장점이 없음. 그러나 보조적인 수단으로서 전극보일러를 기존의 근거리·원거리 지역난방에 연결해 송전이 제한된 재생에너지 전력을 이용하는 것은 가능.
- 재생에너지 송전제한이 발생하는 지역에서 지열 및 전기자동차로 유연성을 확보하기는 어려움. 불충분한 투자 및 관련 인프라의 미비 뿐 아니라, 이 두 기술의 부하이동 잠재량 또한 제한적이거나 매우 큰 불안정성 내포. 그러므로 이 두 기술 이외의 전력 저장기술 개발 필요.

### ○ 유연성 기술로서의 PtG

- 전력변환연료는 일정부분 (수소) 또는 전량 (합성메탄) 천연가스 망에 투입 가능하며, 열·수송부문 직접이용 또는 전력으로의 재변환 가능.
- 전력믹스에서 재생에너지 비중이 60% 이상일 경우, 전력을 활용해 연료로 변환 가능.

- PtG는 주택에서 전기자동차 및 히트펌프의 수요 조절로 연결될 수 있으며, 산업 및 상업부문에서의 부하 이동 측면에서도 활용 가능.
- 유럽에 걸쳐 연결된 전력망 및 양수발전, 배터리 저장 등도 유연성을 담보하는 좋은 수단.
- 온실가스 95% 감축목표 달성을 위해서는 기존의 화석연료 발전소는 이러한 장기적인 저장기술로 대체되어야 함.

### ○ 정책적 조언

- 실험·실증 허용 : 복잡한 규제의 영향을 받는 현재의 전력시장 상황에서 이러한 부문연계에 관한 새로운 기술개발 필요. 기후보호와 관련한 프로젝트에 대해 실험을 허용해야 함.
- 전환기술에 대한 연구개발 지원 : PtG 또는 PtL과 같은 전환기술은 현재 매우 높은 비용을 수반하며 에너지 전환손실 또한 매우 높음. 그러므로 현재보다 더욱 강력한 파일럿 프로젝트 및 연구개발 지원 필요.

## ● 부문연계를 통한 시스템의 전력수요

### ○ 전력수요 전망

- 수송·열부문에서 탈탄소화를 위해서는 재생에너지 수요의 급격한 증가 필수적.
- 재생에너지 규모에 대해서는 연구마다 전망 상이. 특히, 미래의 에너지시스템에서 PtG의 역할에 따라 차이를 보임.
- 25개 연구를 비교 분석한 독일재생에너지협회 보고서에 따르면, 2050년까지 95% 온실가스 감축을 위해서는 열공급 분야에서만 2030년까지 37TWh, 2050년까지 75TWh의 재생에너지전력 추가적으로 필요. PtG 또는 PtL을 제외한 수송부문에서의 전력화를 위해서는 2030년까지 25TWh의 전력 필요.
- PtL에 필요한 전력은 연구에 따라 상이한데, 30~600TWh로 전망.
- 2050년까지 수송부문의 기후보호를 다룬 최근 연구에 따르면, 2050년까지 모든 교통수단을 전력화하는데 전력변환연료 포함 약 556~691TWh의 전력 필요.
- 2015년 전력의 재생에너지 비율은 31.5%. 2017년 개정된 재생에너지법에 따르면, 2035년까지 재생에너지 비중은 55~60%가 될 전망.
- 이 법에 따른 계획이 실현될 경우, 2030년까지 총 156GW의 재생에너지 발전 설비가 건설되어 약 280TWh의 전력생산. 이 경우 최종전력소비에서 차지하는 비중은 47.5~52.5%에 불과.
- 2010년 발표된 연방정부의 장기 에너지계획인 '에너지 콘셉트'에 따르면, 에너지 소비는 2008년 대비 2020년까지 10% 줄어들 전망. 2015년 현재 3.4%에 불과.

- 효율화목표 달성실패와 더불어, 2030년까지 약 60TWh의 재생에너지 전력이 부족한 만큼, 2035년까지 60% 보급목표 달성은 불확실.
- 그러므로 2030년까지 현재 전망치보다 더 많은 재생에너지 보급 필요.

#### ○ 정책적 조언

- 부문연계에 따른 추가적인 수요를 고려하여, 2030년 재생에너지 보급목표를 최소 65%로 상향해야 하며, 새로운 재생에너지 설비의 계통연계를 위한 송전망확대 필요.
- 부문별 구체적인 효율화 목표 및 화력발전소 폐쇄 필요. 온실가스 배출과 관련한 에너지 세제개혁은 이러한 변화를 더욱 강력하게 유인할 것임.
- 재생에너지 보급은 사회적 수용성이 전제되어야 함. 지역주민들이 보다 적극적으로 참여하기 위해서는 건설지역에서의 시민인식 개선교육 및 총괄적인 계획수립과정 필요.

#### ●● 참고문헌

- 전력거래소, 2012, 전력부문 온실가스 배출계수.
- Deutsche Umwelthilfe, 2017, Sektorenkopplung – Klimaschutz mit Strom für Wärme und Verkehr.
- Koziol, Matthias, 2011, Stadtentwicklung im Spannungsfeld zwischen Klimaschutz und Stadtumbau.

#### 책임연구원 **염광희**

독일 베를린자유대학교 환경정책연구소 박사

**관심 연구 분야** 재생가능에너지 입지 갈등, 기후변화정책

**주요 저서** 「Comparative study on the conflict in RE facility siting in Korea and Germany (2014)」



**서울에너지공사 에너지연구소**

**주소** 서울시 양천구 목동서로 20 서울에너지공사 1층

**전화** 02-2640-5353 / **FAX** 02-2640-5359

**HOME PAGE** [www.i-se.co.kr](http://www.i-se.co.kr)

**발행처** 에너지연구소

**발행인** 박진섭

**담당자** 이재석