



대한민국 발전산업의 불확실한 미래

At the crossroads: An uncertain future facing the electricity-generation sector in South Korea

Sanghyun Hong · Barry W. Brook

호주 Tasmania대학교 과학공학기술학부 교수 (환경경제, 에너지경제 분야 연구)

원자력 발전은 지난 수십 년 동안 대한민국에서 가장 중요하고 청정한 전기 에너지 공급원 역할을 감당해왔다. 그렇지만 한국 정부는 원자력 발전의 점유율을 줄이고 재생에너지의 비중을 높이는 것을 목표로 하는 에너지 전환 정책 로드맵을 발표하였다. 그러나 한국의 높은 인구밀도를 놓고 볼 때, 전력 생산의 최대 에너지를 재생에너지로 전환하겠다는 구상은 무리일 수밖에 없다. 그 이유는 재생에너지 발전량만으로는 다 감당할 수 없는 원자력 발전량의 감축 부분을 어떻게 보충하겠다는 언급이 한국 정부의 로드맵에는 없기 때문이다. 암묵적으로 받아들여지고 있는 대안은 결국 화석연료인 것 같은데, 한국정부가 어떤 화석연료를 선택하느냐 하는 문제는 온실가스 배출량 감축이라는 문제와 직결되므로 그것이 최종 결정의 핵심적 요소가 될 것이다. 우리는 시나리오 분석 방법을 통해 한 가지 재생에너지를 선택한다는 가정과 함께 두 종류의 화석연료를 주로 사용하게 되는 경우를 분석해 보았다. 아울러 우리는 다른 나라들의 세 가지 에너지계획과 비교 분석한 사항을 바탕으로 원자력 에너지 외에 한국 정부가 선택할만한 에너지원의 타당성과 각 에너지 별 선택에 따른 제약사항을 밝히면서 최악의 결과를 방지하기 위한 기술-경제상의 필수적인 조건들을 제안하려 한다.

대한민국 발전 산업의 불확실한 미래

지난 수십 년 동안, 원자력은 대한민국에서 청정 에너지 공급량의 대부분을 감당해왔으며 경제 발전의 기

반 역할을 하였다. 그러나 원자력 에너지의 장점과 다른 저탄소 에너지를 이용한 전력 생산의 좋은 점을 놓고 격렬한 공론화 과정을 벌인 끝에 정부에서 지명하는 시민판정단을 통해 이 문제에 관한 여론을 판정

* <Asia and the Pacific Policy Studies>는 호주 국립대학교(Australian National University)의 Crawford 공공정책 대학원과 학술잡지 전문출판 회사 John Wiley & Sons가 공동으로 발행하는 대표적 학술지이다. 이 잡지는 호주 및 아시아 태평양지역 국가의 경제, 정치, 국가 경영, 개발 및 환경 문제 등 다양한 분야를 다루는 정책 연구 논문을 동료학자로서의 관점에서 학술적으로 연구 검토하는 것을 목적으로 하고 있다.



하도록 결정하였다.

2017년 10월 20일, 판정단은 중단시킨 2기의 원자로(신고리 5,6호기)는 공사를 계속해서 완공하도록 결정했지만, 장기적으로는 재생에너지의 발전량을 늘려서 원자력 발전량을 감축시키도록 권고하였다(국무조정실, 2017).

시민판정단의 이런 결정(법적 구속력 없음)에 따라, 정부는 2017년도에 7%였던 재생에너지의 점유율을 2030년까지 20%로 늘린다는 목표를 담은 에너지 전환 정책 로드맵(이하 로드맵)을 발표하였다.

이 로드맵에는 현재 가동중인 원전의 허가 기간에 대한 연장 신청을 불허한다는 조항과 함께 2038년까지 가동 원자로를 14기로 줄이겠다는 목표를 달성하기 위해 모든 새로운 원전 건설 계획을 백지화한다는 조항이 들어 있다(2017년 현재 가동 중인 원자로 24기, 2022년까지 가동될 예정인 28기 대비; 산업통상자원부, 2017).

그렇지만 이 로드맵에는 가장 중요한 문제에 대한 언급이 빠져 있다. 그것은 대한민국이 2015년 파리기후협약에서 약속한대로 발전 산업 부문에서 탄소 배출을 줄이겠다는 의지가 있다면, 감축된 원자력 발전량을 어떻게 메울 것인지, 그리고 재생에너지 발전량의 증대에 제약적인 요소가 되는 한국의 물리적인 한계를 어떻게 극복할 것인가(NRDC, 2015) 하는 점이다.

현재 원자력 발전량 30%와 재생에너지 발전량 7% 이외의 부족분은 거의 전적으로 화석연료를 통해 메우고 있다(석탄 40%와 가스 22%). 만약 원자력 발전량을 화석연료로 모두 대체한다면, 전력 생산에 의한 연간 탄소 배출량은 엄청나게 늘어나며, 재생에너지의 발전량을 현재 원자력 발전량 수준까지만 늘려서 대체한다고 해도(최근 독일의 경우처럼, Amelang, 2017; Reed, 2017), 탄소 배출 감축이란 문제의 해결은 교착

상태에 빠질 것이다.

대한민국의 경제 규모와 탄소 배출량의 추세를 감안해 볼 때, 한국이 감축 목표의 달성에 실패하게 된다면 전 세계의 탄소 배출 감축 노력에 심대한 부정적인 영향을 끼치게 될 것이 분명하다(Normile, 2017).

이런 문제에 관한 대응책을 이끌어내기 위해서, 우리는 한국이 처한 현재의 상황과 한국 정부의 로드맵을 바탕으로 앞으로 한국에서 선택될만한 세 가지 전기 에너지믹스를 예측해보았다. 그런 다음 그 세 가지 사례에 대한 타당성과 제약성, 그리고 필수 조건 등을 다른 OECD 회원국들의 경우와 비교해 보았다.

대한민국의 탄소 배출 문제

한국의 탄소 배출량은 2014년도(최종 집계가 끝난 마지막 연도)에 5억6천8백만톤으로 OECD 회원국 35개 나라 가운데 미국(51억7천6백만톤), 일본(11억8천9백만톤), 독일(7억2천3백만톤)에 이어 4위를 기록했다(OECD, 2017). 이 배출량은 1990년도의 수준에 비해 145% 증가한 것이다.

한국 외에 OECD 회원국 가운데 1990년부터 2014년 사이에 탄소 배출량이 100% 이상 증가한 나라는 터키(142%)와 칠레(158%) 밖에는 없다(이와는 대조적으로, 같은 기간의 25년 동안, OECD 회원국 가운데 18개 나라의 연간 탄소 배출량은 오히려 감소되었다).

한국의 연간 1인당 탄소 배출량도 룩셈부르크(16.6톤), 미국(16.2톤), 호주(15.8톤), 캐나다(15.6톤), 에스토니아(13.3톤)에 이어 11.3톤을 기록해 세계 6위를 차지했다. 또한 1990년부터 2014년 사이에 OECD 회원국 가운데 가장 높은 1인당 탄소 배출량 증가율(108%)을 기록하였다.

그런데 한국은 2030년까지 온실가스 배출량을 37%

감축시켜 평상시 배출 수준을 851Mt CO₂eq 이하로 유지할 것이라고 국제 사회에 공식적으로 제안하였다(NRDC, 2015).

한국의 배출 목표를 다른 OECD 회원국 EU(1990년 배출량의 40% 이하)와 일본(1990년 배출량의 15% 이하, 발전 분야 외의 온실가스 배출량 제외)의 목표 수준과 비교하면, 한국이 제시한 (2030년까지 1990년 배출량의 80%를 상회하는 수준) 감축 목표는 분명하게 실망스러운 수준이다.

만약 모든 나라가 한국처럼 소극적인 감축 목표를 선택한다면, 2050년이 되면 지구의 평균 온도는 산업화되기 이전에 비해 섭씨 2도 이상 상승할 것이다(CAT, 2017).

그러나 한국 이외의 OECD 회원국들이 공동으로 제안한 탄소 배출 감축안대로 시행된다 해도 지구의 평균 온도 상승을 파리협약에 명시한 수준(섭씨 1.5-2도)으로 억제하기에는 불충분한 것이 사실이다.

이와 같이 현실로 닥쳐올 가능성이 상당히 큰 재앙적인 수준의 환경 문제와 이에 따른 경제적 문제를 방지하기 위해서는 탄소 배출량을 더욱 더 많이 좀 더 신속하게 감축할 필요가 절실하다(Figueroes et al, 2017).

따라서 우리는 최대 탄소 배출 국가 중 하나인 대한민국이 국제적인 배출 기준에 부응하기 위해서 현재보다 훨씬 강력한 온실가스 감축 목표를 채택할 것을 주장하고자 한다.

게다가 대한민국에서 원자력 발전이 탄소 배출 없이 전력 생산에서 기저부하를 담당하고 있는 현실을 감안한다면, 전력 생산용 에너지원에서 원자력을 제외시키는 것은 온실가스 배출 감축 목표를 달성하기는커녕 전혀 불가능하게 만들 것이 분명해 보인다.

미래 전력 생산 에너지원의 구성

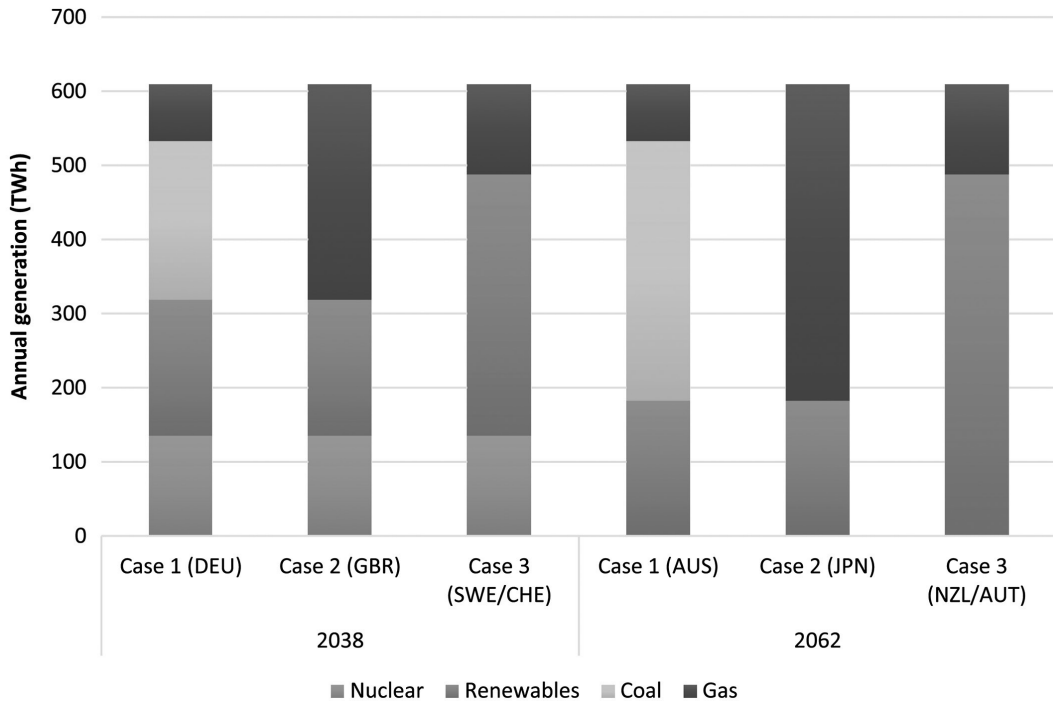
대한민국 정부의 8차 전력수급계획안에 따르면 전력 수요가 정점에 이르는 2038년도에는 수요가 113.5GW에 달할 것으로 예상하고 있는데, 통상적인 전력예비율 22%를 감안하면 최대 발전용량은 138.5GW가 되어야만 한다.

또한 최대 수요까지 도달하는 전력 수요의 증가율과 비례하여 연간 발전량이 늘어나게 된다면, 한국의 연간 전력 수요는 2016년도의 543 TWh에 비해 2038년에는 609 TWh에 달하게 될 것이다(KESIS, 2017). 그렇지만 이 수요 예측은 교통수단에 쓰일 가능성이 있는 전력량은 포함시키지 않은 것이라는 점에도 주목해야 한다(2016년 최종 에너지 소비량 498 TWh).

한국 정부의 로드맵이 제시한 최상의 목표는 2030년도까지 재생에너지의 점유율 20%를 달성하고, 2038년도까지 원전의 발전용량을 16.4 GW로 제한(산업통상자원부, 2017)해서 최종 에너지 136 TWh를 생산(설비이용률 90% 추정)해 내는 것이다.

한편 재생에너지의 점유율이 2030년도 이후에도 같은 비율로 증가한다면 2038년도에는 30%(183 TWh)에 도달하게 될 것이다. 그렇게 되면 원자력 발전과 재생에너지만으로 연간 전력 수요의 대략 절반을 공급할 수 있게 된다.

그렇다면 원자력 발전을 늘리지 않으면서 나머지 절반의 전력 수요 문제는 어떻게 해결할 것인가? 현재와 같은 에너지시장 상황에서 유일하게 실행 가능성이 높은 옵션은 두 가지 화석연료(천연가스와 석탄)를 사용하면서 그에 추가적인 재생에너지를 더하거나 아니면 에너지원을 혼합해서 사용하는 방법뿐이다(도표 1). 이제 우리는 한국에서 화석연료의 사용이 증가할 경우 아래와 같은 2가지 극단적인 사례에서 발생할만한 개



<그림 1> 대한민국의 미래 전력생산 방식의 3가지 시나리오에 따르는 전력 생산량(TWh) 점유율(%). 에너지원을 원자력, 재생에너지, 석탄, 가스로 구성할 경우 OECD 자료에서 유추한 2개의 예상 시점(2038년과 2062) 별 구성 비율.

연성이 상당히 높은 기술적, 경제적, 그리고 환경적인 문제를 조명하고자 한다.

<그림 1>에서 Case 1(현재의 독일과 유사한 방식)은 연간 석탄 발전량이 현 수준(214 TWh)을 유지하면서 가스 발전으로 최대 전기 수요량을 감당하게 하는 방식이며, Case 2(영국이 거처온 과정과 유사한 방식)는 가스가 석탄 발전량을 대체하여 전력 생산의 주 에너지원(290 TWh)이 되는 방식이다.

만약 원자력 발전을 단계적으로 중단시키면서 탄소 배출량까지도 감축하려했다면, 대한민국 전기 에너지믹스에서 에너지원은 가스와 재생에너지 두 가지만 남게 될 것이 분명한데, 가스 발전량을 현재 수준으로 유지

한다면 석탄 발전이 차지하던 몫은 온전히 재생에너지를 늘려서 대체해야만 한다.

Case 3(스위스와 스웨덴이 택한 방식은 재생에너지가 전력 생산의 주에너지원으로 자리 잡고(352 TWh), 가스 발전량을 현재 수준(121 TWh)으로 유지하는 방식이다.

만약 기존의 원전에 대한 가동 연한의 연장이 금지되고, 현재 건설중인 신고리 5호기와 6호기가 완공(2022년 예정, 가동 연한 40년)된 이후 새로운 원전을 짓지 못하게 된다면, 대한민국은 원자력 발전이 없는 전기 에너지믹스를 2062년까지 달성해야 한다.

그렇지만 장기적 전력 수요 예측은 인구의 변동과

생활방식의 변화, 그리고 산업적, 기술적 요인 등 사회경제적인 변화에 의한 불확실성으로 가득 차 있다. 한편 장기적으로 볼 때 한국의 미래 인구는 증가하지 않을 것으로 예상(Raftery, Li, Sevčikova, Gerland & Heilig, 2012)되기 때문에(전기자동차가 보편화되지만 않는다면) 전력 수요가 큰 폭으로 증가할 것 같지는 않다.

따라서 우리는 장기적인 전력 수요가 2038년도 수준(609 TWh)에서 계속 유지될 것이라는 보수적인 가정 위에서 이번 분석 작업을 수행하였다.

이러한 수준의 전력 수요를 기준으로 해서 우리는 2062년까지의 미래 전기 에너지믹스에서 세 가지 가능성에 대한 사고 실험을 하였다(괄호 안에 표기한 OECD 회원국들과 가장 유사하면서 걸맞는 사례를 선택함).

- Case 1 (호주) : 석탄 발전이 원자력 발전을 대체하지만 가스 발전량은 2038년 수준을 유지.
- Case 2 (일본) : 가스를 전력 생산의 주에너지원으로 선택.
- Case 3 (뉴질랜드 또는 오스트리아) 재생에너지가 전력 생산의 주에너지원이 되면서 최대 전력 수요 발생 시에는 부족한 전력을 가스 발전으로 보완.

Case 1 독일 방식을 거쳐 호주 방식으로

이 로드맵은 2022년까지는 모든 원전을 폐쇄하고 2050년까지 재생에너지원의 점유율을 80%로 끌어올린다(Amelang, 2017)는 독일의 에너지 전환 정책('Energiewende')과 목표가 유사하다.

참고로, 현재 독일에서 재생에너지는 연간 발전량의 약 30%를 생산하고 있는데, 원자력 발전과 석탄 발전

은 각각 14%와 44%를 생산하고 있으며(International Energy Agency, 2017) 풍력 발전이 재생에너지의 가장 큰 몫(전체 재생에너지 발전량의 40%)을 차지하고 있다. 그 밖에도 수력 발전(12%) 및 바이오매스/폐기물 연소 발전(28%) 등이 재생에너지의 적지 않은 부분을 담당하고 있다.

재생에너지원의 활용 비율을 늘리기 위해 독일은 2000년 이후 1,890억 유로에 이르는 막대한 돈을 투자했지만, 석탄 발전의 점유율은 낮아지지 않았을 뿐만 아니라 2050년까지 발전용 에너지원의 중요한 부분을 계속 차지할 것이 분명해 보인다(Amelang, 2017; Reed, 2017).

2015년도 호주에서는 석탄(63%)이 전력 생산의 가장 큰 에너지원이었고, 가스(21%)와 재생에너지(14%)가 그 뒤를 이었다. 호주의 재생에너지 점유율은 이 사례 1에서 가정한 2062년도 한국의 재생에너지 점유율보다 낮았지만, 호주는 석탄 발전과 가스 발전의 높은 점유율을 계속 유지함으로써 Case 1에서 나타난 에너지원 비율을 흔들림 없이 나타내고 있다.

그런데 호주의 발전부문에서 배출하는 온실가스 농도는(755kg MWh, 2015) 한국의 발전부문 배출 농도(526kg MWh, 2015; IEA, 2017)보다 40% 이상 높다. 그 뿐만 아니라 석탄 발전의 비율이 더 늘어나게 되므로 원자력 발전에 비해 훨씬 높은 대기 오염을 초래할 것이 분명하기 때문에 건강에 대한 위험 요소가 가중됨은 물론이고 수많은 환경 문제를 일으키게 될 것이다(Hansen et al., 2013).

최신형 원자력발전소의 건설에 비하면 가스발전소나 재래식 석탄발전소의 건설 비용이 더 낮은데다 건설 기간도 짧다는 점을 감안하면 화석연료를 쓰는 발전소가 원자력발전소를 대체하는 것이 당연히 더 용이하다.



그렇지만 점차 증가하는 탄소 배출이 Case 1의 가장 큰 문제이며 이 점은 한국이 국제적으로 동의한 탄소 배출 감축 목표를 달성하지 못하게 만드는 요인이 될 것이다. 이 같은 경우에는 탄소 포집 및 저장 기술이 해결책이 될 수도 있지만, 이에 대한 기술적·경제적 실현 가능성에 대한 의문점이 아직 남아있다(Leung, Caramanna & Maroto-Valer, 2014).

그에 더해 석탄 발전으로 원자력 발전을 대체하게 되면, 현재 한국에서는 원자력이 가장 싼 연료라는 점(KESIS, 2017)을 감안해 볼 때, 전기요금이 상당히 오르게 될 것이다. 또한 재생에너지의 전력 생산 비용은 태생적으로 비쌀 수밖에 없기 때문에 재생에너지의 비율이 높아질수록, 특히 전력 생산 수단의 균형을 유지하고 전력 저장 기술이 반드시 필요해진다는 측면에서 고려해볼 때 전기 가격은 인상될 것이 분명하다(Alexander, James & Richardson, 2015).

Case 2

영국 방식을 경유해서 일본 방식으로

영국의 전력 생산에서 가스 발전이 차지하는 비율은 1990년대 대차 수상에 의한 탄광 폐쇄 조치와 북해에서 원유와 가스 채굴이 확대된 이후 빠르게 증가되어 왔다. 2015년도까지 원자력 발전이 21%를 차지한 반면에 가스 발전의 비율은 30%에 이르게 되었다.

그렇지만 영국의 석탄 발전 의존율은 Case 2(2038년도 한국)보다 여전히 높은 수준을 보이는데, 화석 연료 및 원자력이 차지하는 전체적인 비율이란 측면에서 보면 2015년 현재 영국과 유사한 상황이라고 볼 수 있다.

또한 일본은 후쿠시마 원전 사고 이후, 모든 원전을 비롯 화석연료 발전소의 가동을 중지시키고 가스 발

전의 의존율을 높여서(현 상황의 전력 생산 방식에서 가스 발전의 점유율은 40%, 전체 에너지원에서 화석 연료가 차지하는 비율은 73%), Case에서 나타나게 될 2062년 한국의 상황과 유사한 상황을 보여주고 있다.

현재 한국의 전력 생산에서 가스 발전이 차지하는 비율은 Case 2에서 계획하고 있는 연간 가스 발전 비율보다 훨씬 낮다(2016년 기준 22%). 그러나 매우 낮은 가동률(2016년 기준 41%)을 보이는 한국 가스발전소(KESIS, 2017)의 현 상황과 원전에 비해 짧은 건설 기간과 낮은 건설 비용이란 가스발전소의 이점을 감안하면, 복합가스발전소를 건설해서 원전에서 벗어나겠다는 미래의 목표(2038년도 가스 발전 및 원전 각 38%, 2062년도 가스 70%)는 기술적으로 타당성이 있다고 볼 수 있다.

가스 발전은 석탄(970g CO_{2e} kWh; IPCC, 2006/98.3t CO₂ TJ; NREL, 2017)보다 온실가스 배출 밀도가 낮다(470g CO_{2e} kW/자연 상태의 배출, 64.2 t CO_{2e} TJ/발전용 연소 과정 배출).

원자력은 발전 과정에서 배출되는 탄소가 전혀 없다는 점을 놓고 볼 때, 원자력 발전에서 가스 발전으로 전환하게 되면, 전력 생산 상의 온실가스 배출이 순수 증가할 것이다(예를 들면, 2015년도 영국의 경우 한국보다 낮은 원전 및 석탄 비율, 그리고 높은 가스 비율을 유지해 한국의 배출량 526kg MWh 에 비해 349kg MWh을 기록).

이와는 대조적으로, 후쿠시마 원전 사고 이후 일본은 한국보다 약간 높은 온실가스 배출 농도(540kg MWh)를 기록하였다. 한국보다 높았던 가스 발전 점유율 덕분에 더 낮은 원자력 발전의 점유율에도 불구하고 온실가스 배출 농도를 억제할 수 있었던 것이다.

대한민국에서 일어난 반핵운동의 중요한 이유 가운데 하나는 원전의 사고와 그에 따르는 인체에 유해한

영향에 대한 대중의 공포심이다. 그러나 가스에 의해 발생한 사고는 한국(뿐 아니라 세계 모든 곳)에서 더 심각한 안전상의 문제를 일으키고 있다.

한국에서 아직 단 한 건의 인명 사고도 기록한 적이 없는 원전 사고에 비해서, 대구에서 발생한 가스 폭발 사고는 100명 이상의 목숨을 앗아갔던 것이다(연합통신, 1995).

뿐만 아니라 가스연료 발전소의 균등화된 발전 비용에서 심대한 영향을 받아 발생하는 천연가스의 가격 변동성 때문에 전력 가격의 변동폭 역시 매우 커지게 되고 이는 가스연료 전력 생산 시스템의 가장 큰 경제적 문젯거리가 되고 있다(van de Ven & Fouquet, 2017).

영국은 전체 가스 수요의 45%를 국내에서 조달(British Gas, 2016)함으로써 가스 가격의 변동성에 대한 위험 부담을 줄이고 있으며 일본은 가스 수입원을 다변화하는 대책을 쓰고 있다(EIA, 2017). 보유하는 가스전도 없는 한국은 전력 생산용 가스 수요를 전량 수입에 의존해야만 한다.

이와 같이 가격 변동성이 큰 한 가지 에너지자원에 대한 의존도가 높아지면 경제 조건의 불확실성이 증가한다는 것은 명약관화한 일이다.

Case 3

스위스나 스웨덴 방식을 거쳐서 뉴질랜드 또는 오스트리아 방식으로

아이슬란드, 노르웨이, 뉴질랜드, 오스트리아, 캐나다, 그리고 포르투갈 같은 일부 OECD 회원국은 재생에너지의 비율이 60%를 넘고 있다. 수력 발전을 제외할 경우에 가장 높은 재생에너지 비율은 덴마크의 57%이다.

Case 3에서 원자력 발전의 비율과 재생에너지가 차지할 비율(2038년도 58%, 2062년도 80%)을 감안할 때, 중간 단계인 2038년에 한국의 전형이 될 나라는 스위스 또는 스웨덴이며 2062년도에 한국의 본보기가 될만한 나라는 뉴질랜드나 오스트리아일 것 같다.

수력 발전은 오스트리아(전체 소비 전력의 69%)와 뉴질랜드(56%)의 주 재생에너지원이다. 한반도 남쪽에 자리잡은 대한민국에서 Case 3의 가장 큰 장애물은 재생에너지 발전의 기술적(혹은 지리적) 여건상의 실현 가능성이다.

수력 발전, 풍력, 태양광, 생물에너지 등을 망라한 재생에너지원으로부터 대한민국이 얻을 수 있는 연간 최대 발전량은 사전 모델링 작업을 통해 산출한 결과 단지 150 TWh에 불과하였다(Hong, Bradshaw & Brook, 2013). 더구나 기술 발달로 수력 발전을 제외한 재생에너지의 발전 효율이 대폭 상승한다 해도(예: 2013년까지 33%), 연간 최대 전력 공급량은 200 TWh 수준을 넘지 못할 것이다.

따라서 2062년도의 재생에너지 공급 비율 목표치 80%(즉 487 TWh)는 물론, 2038년도 목표치인 58%의 달성도 한국 내의 풍력 발전, 태양광 발전, 그리고 수력 발전 같은 재생에너지원만을 가지고는 실현될 가능성이 전혀 없는 것이다.

외국의 원료를 수입해서 바이오 에너지를 생산하는 방법이 있기는 하지만, 순수 온실가스 배출의 측면이나 토지 활용도 문제, 그리고 생태계에 미치는 영향 등을 고려할 때 환경 친화적인 수단으로 간주할 수 없는 문제점이 있다(Manning, Taylor & Hanley, 2015).

또한 지리적인 제한이라는 문제를 극복할 수 있다고 가정해도, 풍력 발전과 태양광 발전의 비율이 높을 수밖에 없다는 점은 가동 단축, 주파수 조정, 전압 관리 및 예비전력/전력저장 비용 등에 의해서 발생하



는 전력 공급망 관리 및 전력 부하 분산에 소요되는 경비를 대폭 늘어나게 만들 것이다(Brouwer, van den Broek, Zappa, Turkenburg & Faaij, 2016).

송전망 전반에 대한 전압 관리와 주파수 조정이 부실하게 되면 전력 공급망 전체에 걸쳐 재앙적인 정전 사태를 불러올 수 있는데, 이런 우려는 실제로 2016년 9월28일에 호주 남부에서 발생한 정전사태로 생생하게 증명되었다(AEMO and Manitoba HVDC Research Centre, 2017).

뿐만 아니라, 연구 결과에 따르면 여러 가지 에너지를 사용하는 재생에너지의 비율이 높아짐에 따라 다양한 재생에너지로 생산한 전력 소비가 오히려 감소되는 결과를 보였는데, 이는 전력 공급 상의 미스매치 때문이었다(Steinke, Wolfrum & Hoffmann, 2013).

현재 시장에서의 보급률이 높은 일부 재생에너지원의 비싼 관리 비용, 낮은 설비 이용률, 그리고 높은 균등화 비용 등 전체적으로 과도한 시스템 관리 비용 때문에 Case 3의 방식을 적용할 경우 한국의 평균 전력 가격은 인상될 것이 거의 틀림없다.

문제가 없는 발전 방식은 없다

반면적으로 볼 때, Case 1은 높은 온실가스 배출과 해당 지역의 대기 오염을 증가시키기 때문에 환경적인 폐해가 심각하다. Case 3보다는 전력 공급의 유연성은 높겠지만, 현재의 상황보다 높아질 재생에너지 비율은 Case 1의 큰 문젯거리가 될 공산이 크다.

Case 2는 Case 1보다 온실가스 배출은 적다. 그러나 이 두 가지 사례의 방식을 택한다면 한국은 발전산업의 탈탄소화에 실패하게 될 것이고, 이는 국제적으로 약속한 기후변화협약을 위반하는 것이다.

가스 발전의 비율을 높이면 전력 공급의 유연성을

높이고 Case 2에서 나타나는 균형의 문제를 감소시킬 수는 있다. 2038년도 기준으로(지금으로부터 20년 후) 3가지 사례 가운데 Case 2의 가스발전소 건설 비용에 대한 투자가 가장 낮아 보이지만, 수입해야 하는 가스의 가격 변동성은 가장 큰 경제적인 문젯거리가 될 것이다. Case 3은 온실가스 배출 측면에서는 가장 친환경적인 방식이지만, 재생에너지와 관련되는 한국의 지리적 제약은 심각한 장애물이 될 것이며 이 문제는 현재의 기술적 혁신이나 경제적인 수단으로도 해결하기 어려운 것이다.

더구나 2016년도에만 약 1,792 PJ(498 TWh)에 달했던 교통수단 부문의 최종 에너지 수요 자체가 수요 예측에 포함되지 않았다(KESIS, 2017).

만약 한국이 교통수단의 탈탄소화를 추진하게 된다면 석유를 기반으로 하는 현재의 자동차 연료 부문은 수소연료전지 아니면 배터리로 바뀌어야만 한다. 이를 위해 수소를(물을 전기분해하여) 생산하거나 배터리를 충전하기 위해서는 전력 수요가 대폭 증가할 것이 분명한데, 8차 전력수급계획 초안에는 이에 따른 전력 수요의 증가가 초래할 문제에 대한 평가사항이 전혀 없다.

우리가 검토한 모든 사례에는, 수요 측면의 강력한 에너지 효율 관리 조치(기술적 개선책, 경제적 장려대책 등)를 도입해 미래의 전력 수요 증가를 억제할 필요가 반드시 전제되는 것이다.

한국에서 이론상으로 실현이 가능한 재생에너지를 평가한 모델링 연구(Hong et al., 2013) 결과에 따르면, 연간 최대 전력 생산량은 150 TWh에 불과한 것으로 나타났다. 다만 활용 가능한 땅은 제한적이고 인구 밀도는 높지만, 해안선이 긴 한국으로서는 해상에서 재생에너지를 생산할만한 가능성은 상당하므로 이를 위한 연안의 지도 제작과 평가 작업이 필요하다.

재생에너지 분야는 기술적으로 많이 발전하여 높은 효율성과 낮은 설비 및 관리 비용을 달성하게 되었다(Rubin, Azevedo, Jaramillo & Yeh, 2015). 그러나 그러한 노력과 발전에도 불구하고, 풍력발전기는 바람이 잦아들면 전력을 생산하지 못하며, 태양 전지판은 밤이나 구름이 잔뜩 낀 날에는 전기를 만들어내지 못한다.

한편, 전력 저장 기술을 활용하면 많이 보급된 기존의 다양한 재생에너지 전기공급망의 부하 제어, 수요 관리, 전압 조정 및 주파수 조정 같은 많은 이점을 공유할 수 있다(Luo, Wang, Dooner & Clarke, 2015).

적정 규모와 관련된 조건과 경제적 타당성 문제에 현재까지는 양수 발전 시스템만이 전력 공급상 주요한 전력 저장 및 활용 방식으로 채택되고 있다(Department of Energy, 2015).

그런데 지리적으로 유리하고 용이한 여건 덕분에 한국은 수력 발전과 더불어 이미 양수발전소를 널리 활용하기 시작했다. 기존의 재래식 수력발전소에 양수 발전 시스템을 새로 설치하여 그 규모에 맞는 경제적 효율성을 실현하고 있는 것이다.

그 밖에 큰 규모의 전기화학적 전력 저장 시스템이 상용화될 수도 있겠지만, 규모에 맞는 경제적 타당성은 아직 입증되지 못한 상태이다(Luo et al., 2015).

따라서 정부가 발표한 비핵화 정책이 성공하기 위해서는, 결국 대한민국의 에너지믹스는 주로 수입산 화석연료에 의존할 수밖에 없는 것이다.

신형 석탄가스화 복합발전소 같은 일부 첨단 석탄발전소는 재래식 석탄발전소에 비해서 발전 효율이 높기는 하다(Hoya & Fushimi, 2017).

현재 한국에서는 300 MWe 규모의 석탄가스화 복합발전소가 이미 가동 중에 있고, 400 MWe 규모의 발전소가 추가로 건설되고 있다. 이런 최신 석탄발전소

들은 높은 발전 효율 덕분에 가동 중에 배출하는 탄소의 양이 다소 낮을 수는 있지만(재래식 석탄발전소 배출량의 약 85%), 원자력 발전을 완전히 없애버린 상황에서는 탄소 포집 및 저장 기술을 고도로 발전시켜서 온실가스 배출을 대폭 감축시켜야만 하는 것이 문제의 핵심인 것이다.

그러나 유감스럽게도, 현재의 탄소 포집 및 저장 기술 앞에 버티고 있는 기술적·경제적 난제(이에 더해 사람들의 우려)를 놓고 볼 때(Leung et al., 2014), 예측이 가능할 만큼 가까운 미래에 상업적인 가동이 현실화될 가능성은 없어 보인다.

따라서 만약 탄소 포집 및 저장 기술을 갖춘 석탄발전소의 상용화가 적기에 실현되지 못한다면, 한국이 전체 발전 분야에서 탈탄소화를 이루려는 계획은 사실상 장기적으로도 불가능할 수밖에 없을 것이다.

반면에 원자력 발전은 정책결정자들과 국민들의 지원을 얻어내기만 한다면, 재생에너지 기술이나 탄소 포집 기술, 그리고 탄소 격리 기술 등이 겪고 있는 거의 모든(완전하다고 할 수는 없지만) 기술적 어려움을 극복할 수 있다.

특히 한국의 원자력 발전 기술은 세계 최고 수준의 신뢰성(설비이용률 95% 이상)과 어떤 에너지원에 비해서도 탁월한 안전성(사망자 제로)을 기록하고 있는 역사를 자랑하고 있다.

이에 더해 가장 저렴한 발전 비용(원전 폐쇄 비용과 사용후연료 관리비용을 포함시켜도 한국에서는 수입해야 하는 석탄보다 싸다), 그리고 최저 수준의 온실가스 배출량(자연 상태 배출량 40g CO₂e kWh, 가동 중 배출량 0 t CO₂ TJ; Hong & Brook, 2018)이란 장점을 가지고 있다.

뿐만 아니라 현재 한국의 원전 건설 비용은 다른 서구 여러 나라의 원전에 비해 상당히 낮는데(2010년 기



준 Kwe당 US\$ 3,000 이하) 이는 표준화된 공정과 신형 원전을 반복적으로 건설한 경험에서 비롯된 것이다 (Loving, Yip & Nordhaus, 2016).

원자력 발전 분야의 눈부신 기술적 발전 덕분에 재생에너지원과는 대조적으로 원자력이너지는 신뢰할 만 하고, 안전하며, 청정한 에너지로서 전기와 열 그리고 파생적인 합성연료(예: 수소연료; Brook, Bles, Wigley & Hong, 2018) 등의 형태로 이용할 수 있게 되었다.

갈림길에 선 대한민국의 발전산업

한국의 발전산업은 지금 원자력 발전으로 향하는 길을 포함한 4갈래의 갈림길에 서 있다. 유감스럽게도, 그 중 한 갈래(원자력 발전을 대폭 확장하는) 길은 지금 막 막히는 것 같다.

한국 정부가 2017년도에 발표한 에너지 전환 정책 로드맵에는 장기적인 에너지원 배치의 지향점에 대한 구상이 들어있지 않다. 한국에서는 비효율적일 수밖에 없는 재생에너지의 불리한 지리적 조건과 더불어 이웃 국가와는 고립된 전력 연결망, 높은 인구밀도, 그리고 집중되어 있는 경제 활동 등의 여건은 재생에너지의 비율을 높이려는 길이 매우 험난하고 위험한 운명에 처할 것임을 예고해주고 있다.

또 그 길로 가게 되면, 한국은 석탄과 가스같은 화석 에너지원에 집중하는 방향으로 나아가는 결과를 맞게 될 것이다. 어찌되었건, 그러한 결정은 온실가스 배출과 대기 오염을 증가시키고, 수입 에너지원에 대한 의존도를 심화시켜서 앞으로 국가의 환경적·경제적 그리고 사회적인 문제들을 더욱 더 심각하게 악화시킬

것으로 우려된다.

한 가지 다행스러운 점은 대한민국은 아직 그와 같은 심각한 에너지 문제를 방지하기에 충분한 능력과 시간을 가지고 있다는 것이다. 한국은 향후 수십 년 동안 원자력 발전을 확대시키기에 알맞은 환경 속에서 원전 건설에 대한 전문성, 경험 및 자체적 제조 설비 등을 갖춘 몇 안 되는 나라이다.

그렇지만 원자력 발전을 장기적으로 확장, 발전시키기 위해서는 원전에 대한 국민의 수용이란 문제의 벽을 넘어야 한다. 이 문제는 정치적으로 '뜨거운 감자'일 수밖에 없는데, 이는 가능성은(매우) 낮지만 발생하면(경제적, 심리적) 미칠 영향이 막대한 원전 사고 때문이다.

지난 수십 년 사이에 발생한 소련과 일본에서의 원전 사고는 지금 원자력 발전을 확대하는 데 가장 큰 걸림돌이 되고 말았다(Chung, 2018; Hasegawa et al., 2015; Miyazaki & Hayano, 2017).

신고리 5,6호기를 놓고 벌어진 공청회는 원전에 대한 국민들의 저항을 극복하기 위한 공공교육의 중요성을 보여준 좋은 사례라 할 것이다. 한국의 원자력 발전이 좀 더 유리한 기회를 확보하기 위해서는 논리와 적절한 비유 그리고 과학적 증거를 바탕으로 일반 대중들과 국가의 미래 에너지에 관한 대화를 통해서 소통의 장으로 끌어들이려는 지속적인 노력이 반드시 필요하다.

정부에서 발표한 로드맵을 되돌리기에 지금도 늦지 않았다. 대한민국은 아직도 얼마든지 에너지 전환의 로드맵을 다시 검토할 수 있으며, 그렇게 함으로써 탄소 배출을 감축하려고 최선의 노력을 다하는 훌륭한 본보기가 될 수 있는 것이다. 🌍

〈REFERENCES〉

- AEMO, Manitoba HVDC Research Centre (2017). Report for review of the black system South Australia report. Australia Energy Market Operator.
- Alexander, M. J., James, P., & Richardson, N. (2015). Energy storage against interconnection as a balancing mechanism for a 100% renewable UK electricity grid. *IET Renewable Power Generation*, 9, 131 – 141.
- Amelang, S. (2017). Germany to miss climate targets ‘disastrously’: Leaked government paper [Online].
- Available: <http://www.climatechangenews.com/2017/10/11/germany-miss-climate-targets-disastrouslyleaked-government-paper/> [Accessed 12 October 2017].
- Associated Press (1995). Toll in Korea gas explosion passes 100, mostly students [Online]. Available: <http://www.nytimes.com/1995/04/29/world/toll-in-korea-gas-explosion-passes-100-mostly-students.html> [Accessed Jul 17 2017].
- British Gas (2016). Where does UK gas come from? [Online]. Available: <https://www.britishgas.co.uk/the-source/our-world-of-energy/energys-grand-journey/where-does-uk-gas-come-from> [Accessed Nov 1 2017].
- Brook, B. W., Bles, T., Wigley, T. M. L., & Hong, S. (2018). Silver buckshot or bullet: Is a future “energy mix” necessary? *Sustainability*, 10, 302.
- Brouwer, A. S., van den Broek, M., Zappa, W., Turkenburg, W. C., & Faaij, A. (2016). Least-cost options for integrating intermittent renewables in low-carbon power systems. *Applied Energy*, 161, 48 – 74.
- CAT (2017). Climate action tracker—South Korea [Online]. Available: <http://climateactiontracker.org/countries/southkorea.html> [Accessed Oct 30 2017].
- Chung, J.-B. (2018). Let democracy rule nuclear energy. *Nature*, 555, 415.
- Department of Energy (2015). DOE global energy storage database [Online]. Available: <http://www.energystorageexchange.org/projects> [Accessed Oct 21 2017].
- EIA (2017). Japan’s key energy statistics [Online]. Available: <https://www.eia.gov/beta/international/analysis.cfm?iso=JPN> [Accessed Nov 1 2017].
- Figueres, C., Schellnhuber, H. J., Whiteman, G., Rockström, J., Hopley, A., & Rahmstorf, S. (2017). Three years to safeguard our climate. *Nature News*, 546, 593 – 595.
- Hansen, J., Kharecha, P., Sato, M., Masson-Delmotte, V., Ackerman, F., Beerling, D. J., ... Zachos, J. C. (2013).
- Assessing “dangerous climate change”: Required reduction of carbon emissions to protect young people, future generations and nature. *PLoS One*, 8, e81648.
- Hasegawa, A., Tanigawa, K., Ohtsuru, A., Yabe, H., Maeda, M., Shigemura, J., ... Chhem, R. K. (2015). Health effects of radiation and other health problems in the aftermath of nuclear accidents, with an emphasis on
- Fukushima. *The Lancet*, 386, 479 – 488.
- Hong, S., Bradshaw, C. J. A., & Brook, B. W. (2013). Evaluating options for sustainable energy mixes in South Korea using scenario analysis. *Energy*, 52, 237 – 244.
- Hong, S., & Brook, B. W. (2018). A nuclear-to-gas transition in South Korea: Is it environmentally friendly or economically viable? *Energy Policy*, 112, 67 – 73.
- Hong, S., Qvist, S., & Brook, B. W. (2018). Economic and environmental costs of replacing nuclear fission with solar and wind energy in Sweden. *Energy Policy*, 112, 56 – 66.
- Hoya, R., & Fushimi, C. (2017). Thermal efficiency of advanced integrated coal gasification combined cycle power generation systems with low-temperature gasifier, gas cleaning and CO₂ capturing units. *Fuel*
- Processing Technology, 164, 80 – 91.



- Hulme, M. (2016). 1.5 캠퍼와 climate research after the Paris Agreement. *Nature Climate Change*, 6, 222–224.
- IEA (2017). CO2 emissions from fuel combustion. OECD Publishing.
- International Energy Agency (2017). Statistics [Online]. Available: <http://www.iea.org/statistics/> [Accessed 16 February 2018].
- IPCC (2006). IPCC—Task force on national greenhouse gas inventories.
- KESIS (2017). Korea energy statistical information system [Online]. Available: <http://www.kesis.net/> [Accessed Nov 10 2017].
- Leung, D. Y. C., Caramanna, G., & Maroto-Valer, M. M. (2014). An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 426–443.
- Lovering, J. R., Yip, A., & Nordhaus, T. (2016). Historical construction costs of global nuclear power reactors. *Energy Policy*, 91, 371–382.
- Luo, X., Wang, J., Dooner, M., & Clarke, J. (2015). Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy*, 137, 511–536.
- Manning, P., Taylor, G., & Hanley, M. E. (2015). Bioenergy, food production and biodiversity—An unlikely alliance?
- GCB Bioenergy, 7, 570–576.
- Ministry of Trade Industry and Energy (2017). 정부, 신고리 5, 6호기 건설재개 방침과 에너지전환(탈원전) 로드맵확정 [Translation: Continuing the construction of Shin Kori 5 and 6 nuclear reactors, and the energy transition (nuclear phase-out) roadmap] [Online]. Available: http://www.motie.go.kr%2Fmotie%2Fne%2Fpresse%2Fpress%2Fbbs%2FbbsView.do%3Fbbs_seq_n%3D159746%26amp%3Bbbs_cd_n%3D81%26amp%3BcurrentPage%3D1%26amp%3Bsearch_key_n%3Dtitle_v%26amp%3Bcate_n%3D1%26amp%3Bdept_v%3D%26amp%3Bsearch_val_v%3D%25EC%2597%2590%25EB%2584%2588%25EC%25A7%2580 [Accessed Oct 30 2017].
- Miyazaki, M., & Hayano, R. (2017). Individual external dose monitoring of all citizens of Date City by passive dosimeter 5 to 51 months after the Fukushima NPP accident (series): 1. Comparison of individual dose with ambient dose rate monitored by aircraft surveys. *Journal of Radiological Protection*, 37, 1–12.
- Normile, D. (2017). South Korea’s nuclear U-turn draws praise and darts. *Science*, 357, 15–15.
- NRDC (2015). NRDC: Paris climate conference—South Korea [Online]. Available: <https://www.nrdc.org/sites/default/files/paris-climate-conference-SouthKorea-IB.pdf> [Accessed Oct 20 2017].
- NREL (2017). NREL: U.S. life cycle inventory database [Online]. Available: <http://www.nrel.gov/lci/> [Accessed Oct 20 2017].
- OECD (2017). Air and GHG emissions (indicators). [Online]. Available: <https://data.oecd.org/air/air-and-ghgemissions.htm> [Accessed 30 October 2017].
- Office for Government Policy Coordination (2017). 신고리 5, 6호기 공론화 위원회 [Translation: Public debate commission on Shin Kori 5 and 6] [Online]. Available: <http://www.sgr56.go.kr/npp/committee/data.do> [Accessed Nov 2 2017].
- Park, S. (2017). 윤곽 드러나는 8차 전력수급기본계획령 · 탈원전 가속화 [Translation: Draft of the 8th Electricity Generation Plan includes the phase-out of nuclear]. *JoongAng Ilbo*. Rafferty, A. E., Li, N., Ševčíková, H., Gerland, P., & Heilig, G. K. (2012). Bayesian probabilistic population projections for all countries. *PNAS*, 109, 13915–13921.
- Reed, S. 2017. Germany’s shift to green power stalls, despite huge investments [Online]. Available: <https://www.nytimes.com/2017/10/07/business/energy-environment/german-renewable-energy.html> [Accessed 9 October 2017].
- Rubin, E. S., Azevedo, I. M. L., Jaramillo, P., & Yeh, S. (2015). A review of learning rates for electricity supply technologies. *Energy Policy*, 86, 198–218.
- Steinke, F., Wolfrum, P., & Hoffmann, C. (2013). Grid vs. storage in a 100% renewable Europe. *Renewable Energy*, 50, 826–832. van de Ven, D. J., & Fouquet, R. (2017). Historical energy price shocks and their changing effects on the economy. *Energy Economics*, 62, 204–216.