



## 원전을 가스 발전으로 전환하려는 대한민국 정부의 정책 과연 친환경적이고 경제적인 정책일까?

### A Nuclear-to-Gas transition in South Korea Is it environmentally friendly or economically viable?

Sanghyun Hong · Barry W. Brook

호주 Tasmania대학교 과학공학기술학부 교수 (환경경제, 에너지경제 분야 연구)

재생에너지의 활용 가능성이 제한적이고 인구 밀도가 높은 대한민국의 현실을 놓고 볼 때, 원자력은 온실가스 배출 및 공해를 줄이면서도 충분한 전력을 생산하여 공급해줄 수 있는 가장 신뢰할만한 발전 수단이다.

그러나 한국 정부는 원전과 석탄발전소를 단계적으로 폐쇄하고 이를 대체하기 위해서 다양한 재생에너지를 늘리겠다는 정책을 확고하게 고수하고 있다. 그렇지만 에너지 생산 수단을 전환하겠다는 이 정책의 주요 목표는 액화천연가스(LNG) 발전을 대체 수단으로 삼고 있다. 그 이유는 다른 재생에너지들의 대규모 생산 수단을 개발하는 데는 기술적이고 경제적인 난제들이 걸림돌이 되기 때문이다.

그러므로 미래의 에너지 정책을 결정하기에 앞서, 에너지 전환 정책의 구체적인 사항들을 확실한 근거에 기반해서 검토한 후 계획을 수립하는 것이 매우 중요한 일이다.

이 문제에 관해서 우리는 다음과 같은 점들을 검토하였다 ① 한국이 처해 있는 기술적·경제적인 제약을 전제로 한 재생에너지원의 개발에 대한 정부의 역할, ② 가스 발전으로 인해 발생할 수 있는 환경적이며 경제적인 문제점들, ③ 원전정책을 지속함으로써 얻을 수 있는 이점과 원전 유지에 대한 장애물.

위와 같은 세 가지 사항을 검토한 결과, 한국이 지니고 있는 지리적·경제적인 제약과 함께 탄소 배출로 인해 발생하는 비용까지 효과적으로 줄여야 한다는 점 등을 감안할 때 천연가스 발전으로 집중하겠다는 한국의 미래 에너지 정책은 친환경적이지 못함은 물론 경제적이지도 않기 때문에 적정한 비용의 재생에너지를 포함하는 원전 정책을 지속하는 것만이 현실적인 성공 가능성이 가장 높다고 보는 것이 우리의 결론이다.



## 서론

동일본 대지진으로 인한 2011년 후쿠시마 원전 사고와 더불어 대한민국의 모든 원전을 운영하는 한국수력원자력(KHNP)의 뇌물수수, 허위 안전 검사 및 유사 부품 등과 관련된 사건(Choe, 2013)은 국민들의 원전 정서에 불을 당기는 도화선이 되었다. 이에 따라 원전의 경제적·환경적 이점에도 불구하고(Alonso et al., 2015; Brook et al., 2015; Hong et al., 2014; Kharecha and Hansen, 2013) 동아시아의 경제 강국인 한국의 향후 원전의존성은 매우 불안정한 상황이 되어가고 있다.

원전이 사회적으로 가혹한 낙인의 대상이 되어버린 것처럼, 석탄발전소 역시 여러 가지 환경적 문제에 봉착하고 있다. 석탄연료는 한국에서 온실가스의 주요 배출원이다(KOSIS, 2017). 한국이 합의한 온실가스 배출 감축 목표(2030년까지 평상시 배출량 기준 37% 이하)를 달성하기 위해서는 발전산업 부분의 탈탄소화가 필수적이다.

탄소 포집과 저장 기술을 갖춘 석탄가스화 복합발전소는 기존의 전통적인 석탄화력발전소에 비해 온실가스 배출을 85%까지 줄여줄 수 있다(Hoya and Fushimi, 2017). 그렇지만 탄소 포집 및 저장 기술이 언젠가는 상용화에 성공한다 해도 아직 해결되지 못한 기술적 문제와 경제성(Leung et al., 2014) 등을 감안할 때, 시급히 온실가스를 줄여나가야 하는 한국의 현재 상황에서는 석탄발전소를 폐쇄하는 것이 사실상의 유일한 대책이다.

뿐만 아니라 중국에서 유입되는 공해 물질과 함께 석탄발전소는 한국의 주요 오염원 중 하나이다(Donald, 2016; Kharecha and Hansen, 2013). 그에 더해 계속 더 나빠지고 있는 공기 때문에 한국에서 일

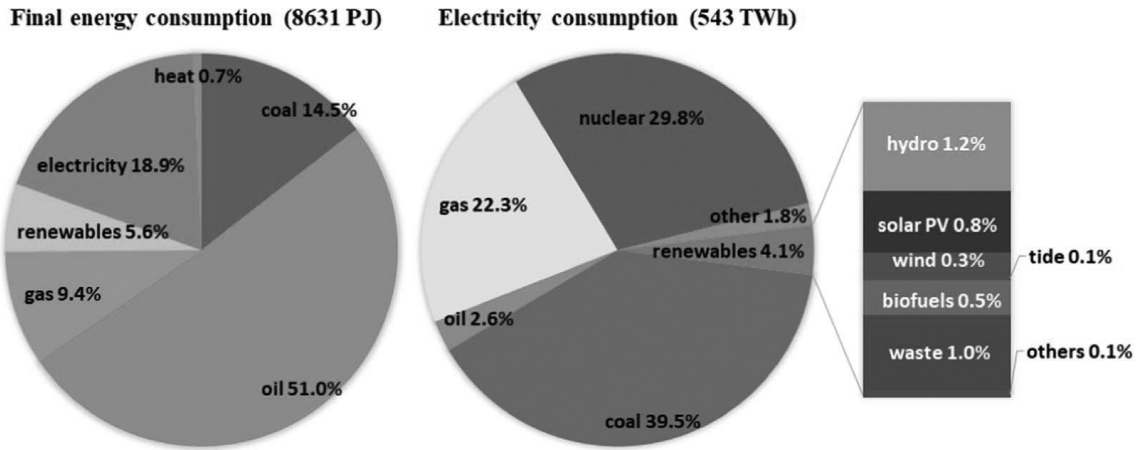
반 대중의 석탄발전소에 대한 반감은 점점 더 심해지고 있다(Park, 2017).

사회적인 압력, 특히 목소리를 높이는 특정 그룹의 요청에 부응하기 위해 새로 출범한 한국 정부는 석탄발전소와 원전을 재생에너지로 대체하겠다는 계획을 발표하였다(Cho, 2017; Democratic Party of Korea, 2017; Normile, 2017). 그렇지만 새로운 정부가 발표한 에너지 대체 계획의 가장 중요한 요소인 대체 에너지는 사실상 친환경 재생에너지가 아니라 천연가스에 의존하고 있다. 그리고 한국의 문재인 대통령은 현재 원전 중심으로 되어있는 전력 정책을 이 새로운 계획으로 바꾸겠다고 2017년 6월 19일 재확인 했다(Kim, 2017).

그 첫 단계 조치로 한국 정부는 모든 신규 원전 건설 계획을 취소하려 하고 있다. 실제로 새 정부는 건설중인 원자로 2기(신고리 5,6호기)의 공사를 중단시켰다(Chung and Jin, 2017). (신고리 5,6호기는 공론화위원회를 통한 국민 의견 수렴 결과 2017년 10월 건설을 재개하기로 결정되었다. - 편집자 주) 처음 30-40년으로 허가한 기존 원전들의 가동연한에 대한 연장 신청도 허용하지 않을 것이라고 발표했다.

최근 한국수력원자력은 한국에서 가장 오래된 원전(1978년부터 가동한 고리 1호기)을 폐쇄하기로 결정했는데 이 원전의 폐로 작업에는 15년의 기간과 8억8천7백만 달러의 경비가 소요될 것으로 예상된다고 한다(KHNP, 2017). 만약 현재 가동중인 다른 원자로들의 가동연한 연장 신청이 허가를 받지 못하게 되면, 발전용량이 총 9.7 GW에 이르는 12기의 원자로들은 2023년에서 2029년 사이에 모두 폐로시켜야 하는 것이다.

한국 정부는 석탄발전소에도 이와 비슷한 방식을 적용하려 하고 있다. 모든 석탄발전소 신규 건설 계획은



〈그림 1〉 2016년 한국의 최종 에너지 소비(왼쪽)와 전력 생산 수단의 구성(오른쪽) (KESIS, 2017)

무효화될 것이며, 이미 공사중이지만 공정률 10% 이하의 석탄발전소 건설 공사 역시 모두 취소가 될 것이다.

장기적으로, 원전과 석탄발전소를 퇴출시키는 데 따라 감축되는 발전 용량을 보충하려면 천연가스발전소의 점유율을 60%까지 끌어올려야만 한다. 한국의 전체 가스 발전 용량은 2016년 12월 현재 33.7 GW였으며 같은 해 가스발전소의 점유율은 41%였다. 또 한국은 2030년까지 풍력 및 태양광 발전이 차지하는 비율을 20%까지 늘리려고 계획하고 있다(Oh, 2017).

아울러 재생에너지 보급을 대폭 늘리기 위해서 대형 발전소에는 재생에너지 생산 목표를 법적 의무사항으로 규정하면서 소규모 발전소에는 재생에너지 생산에 대한 세제 혜택이나 기준 가격 지원 제도를 도입하려고 있다(Democratic Party of Korea, 2017).

그러나 한국의 제한적인 지리상의 여건과 높은 인구 밀도(km<sup>2</sup>당 500명 이상) 등을 놓고 볼 때, 이 정책을 장기적으로 시행한다 해도 경제적인 손실과 환경적인 피해 없이 전력의 100%를 재생에너지로 대체시킬 가능

성은 없다는 것이 모델링 작업을 통해서도 드러났다 (Hong et al., 2013).

지리적 및 경제적인 제약을 감안할 때 한국에서 생산할 수 있는 재생에너지는 약 150 TWh 정도로 이는 2016년도 전체 전력 수요의 30%를 밀도는 것이다.

한국의 새 정부는 8차 전력수급계획을 통해 원전을 2031년까지 단계적으로 폐쇄시키려 하고 있다 (MOTIE, 2017). 새 정부의 구체적인 내용은 아직 발표되지 않았으나, 계획안을 확정짓기 이전에 환경이나 경제적인 측면에서 예견되는 부정적인 영향에 대한 면밀한 분석, 그리고 명백한 증거에 기초한 예상을 내놓는 것이 무엇보다 중요하다. (산업통상자원부는 2017년 12월 29일 ‘제8차 전력수급기본계획’을 확정했다. - 편집자 주)

이를 위해 우리는 정부가 발표한 내용을 기반으로, 한국의 지리적인, 그리고 사회 경제적인 상황을 감안했을 때 예상되는 새 정부 에너지 전환 정책의 특징적인 면을 밝히고자 하였다.



## 전력 생산 수단의 구성

한국은 2016년도에 최종에너지 소비량 총 8,631PJ와 석탄발전으로 40%, 원전으로 30% 생산한 총 543TWh의 전력소비를 기록했다(KESIS, 2017) (<그림 1>) 그렇기 때문에 원전과 석탄발전소를 완전히 대체시키기 위해서는 약 70%의 전력을 다른 에너지원으로 생산해 내야 한다.

앞으로 증가될 전력 수요는 논외로 치더라도, 이를 위해서는 전체적 천연가스 발전량을 현재의 3배로 늘리거나 다른 재생에너지원을 17배 늘려야 한다. 더 엄밀하게 말하자면, 수력발전소의 발전 용량이 현재의 수준을 유지할 경우에 태양광 발전, 풍력 발전, 해상 발전 및 바이오매스 등 비수력 발전 재생에너지원의 발전 용량을 24배 늘려야 하는 것이다.

2016년도에 전체 재생에너지 발전량의 30.1%는 수력 발전이 차지하였고 폐기물 연료 화력 발전과 바이오매스 발전이 나머지 39.5%를 차지하였다. 풍력 발전, 태양광 발전 및 해양 발전 등을 모두 합친 전력 생산량은 전체 재생에너지 전력 생산량의 30.3%가 채 못되었던 것이다.

## 재생에너지의 에너지 효율

한국 정부의 계획안에도 나와 있듯이, 친환경적으로 지속 가능한 에너지정책이란 목표를 달성하는 데 있어 에너지 효율은 매우 중요한 요소이다. 그렇지만 에너지 효율성은 중요한 목표 가운데 하나일 뿐이지, 두 가지의 기술적인 이유로 인해서 탄소 배출을 줄이기 위한 궁극적인 해결책이 될 수는 없다.

첫째, 전력의 수요가 감소될 수 있다고 해도 발전산업 쪽에서 탈탄소화가 선행되지 않는다면 전기 에너지

분야는 여전히 탄소 배출을 극복하지 못한 전력 생산 수단에 의존할 수밖에 없다.

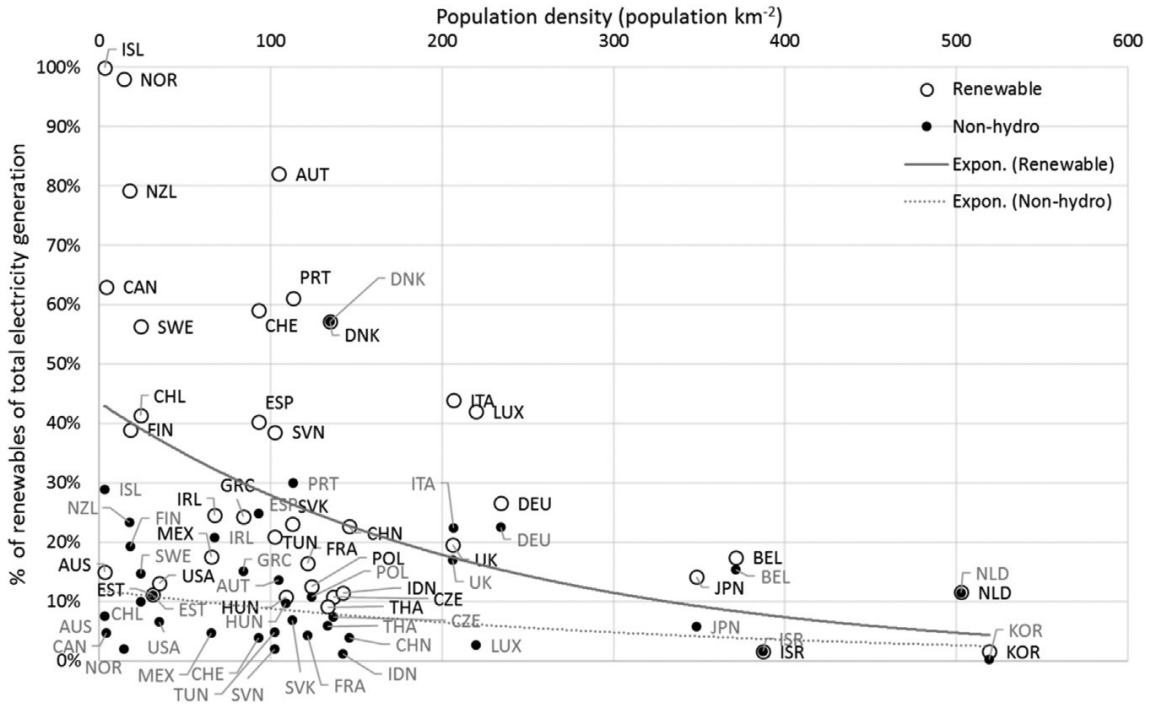
경제 성장과 전력 수요 간의 표면적인 관계를 감안할 때(Apergis et al., 2010; Isa et al., 2017)), 그리고 지난 세월 동안 한국에서 기록한 에너지 수요의 추이를 볼 때, 에너지 효율성을 높이기 위한 기술을 개발하고 에너지 절약을 위한 조치들을 통해 미래의 평시 전력 수요를 감소시킬 수도 있겠지만 절대적 전력 수요가 감소될 것 같지는 않아 보인다.

둘째, 2035년까지 풍력과 태양광의 발전 효율성을 20% 향상시키게 되면(Huber et al., 2017) 재생에너지의 연간 최대 발전량을 30TWh까지 늘릴 수 있을 것이다(Hong et al., 2017). 그러나 수요 측면의 에너지 효율성 제고 조치를 강력히 시행한 결과 2035년도의 총에너지 수요가 현재의 수준(2016년 기준 543 TWh)에 머물러 있다고 해도, 또한 기술적 혁신을 통해 재생에너지 쪽에서 200 TWh의 전력을 더 생산(즉, 33%의 발전 효율성 향상을 가정)한다 해도, 원전과 석탄발전소가 모두 없어지게 된다면 343TWh의 전력은 여전히 가스발전소에서 생산해야 하는 것이다.

지난 10여년 동안 재생에너지 기술은 괄목할만한 발전을 이룩했고 발전비용 또한 매우 낮아졌다는 사실은 반론의 여지가 없으며, 그에 따라 많은 나라에서 에너지 정책의 가장 중요한 항목으로 자리를 잡게 되었다(Bigerna et al., 2016; Connolly et al., 2016; Kemfert, 2017).

또한 일부 국가(예를 들면 호주, 아이슬란드, 노르웨이 등)에서는 낮은 인구 밀도와 더불어 풍부한 자연 자원(바람, 해양, 태양광 그리고 수력 발전에 알맞은 지형 등) 덕분에 재생에너지의 비율을 상당히 높일 수 있게 되었다(Steinke et al., 2013).

‘Super grid’라는 용어로 표현되는 대규모 전력 공



〈그림 2〉 전체 발전량 가운데 재생에너지의 공급 비율(y-축). 수력 발전(곡선)과 비화력발전 재생에너지(검은 원점) 그리고 2014년도 IEA 회원국의 인구 밀도를 보여준다. (IEA, 2016a, 2016b; World Bank, 2016) 국가 코드는 ISO 3166-1 alpha-3를 따른 것임.

급망은 재생에너지를 먼 거리와 광역에 공급해줌으로써 재생에너지의 비율을 더 높일 수 있는 가능성을 한층 더 크게 만들었다(Breyer et al., 2015; Connolly et al., 2016).

그러나 한국에서는 열악한 지리적 제약 조건 때문에 이 모든 선택 사항을 현재로서는 충분한 규모로 실현하기가 어려운 형편이다. 에너지 저장 기술도 재생에너지의 비율을 높여주는 핵심 요소이긴 하지만(Hong and Radcliffe, 2016; Luo et al., 2015; Schwarz and Cai, 2017), 에너지 저장기술 자체는 에너지를 생산하는 것은 아니라 단지 생산한 전력을 소비에게 연결시켜 주는 수단일 뿐이다. 그 밖에도, 전력을 저장

하는 과정에서 발생하는 불가피한 변환 손실 때문에 전하와 출력 과정을 거치는 에너지 저장 자체에서도 5%~40%의 전력을 소비하게 된다(Luo et al., 2015).

세계적으로 한 나라의 인구 밀도는 재생에너지에 의한 전력 생산 비율과 부정적인 관련이 있다. (〈그림 2〉) 대한민국은 인구 밀도가 가장 높은 나라(km<sup>2</sup>당 519명)이며 IEA(국제에너지기구) 회원국 가운데서 재생에너지 비율이 가장 낮다(IEA, 2016; The World Bank, 2016). 반면에 아이슬란드는 인구밀도가 두 번째로 낮은(km<sup>2</sup>당 3.3명) 나라이면서 재생에너지 비율이 가장 높은(100%) 나라이다.

일반적으로 인구 밀도가 낮은 나라들은 인구 밀도



가 높은 나라보다 월등히 높은 재생에너지 비율을 보이는데, 이는 화력 발전에 비해 현저하게 낮은 재생에너지의 에너지 밀도 때문이다(Cheng and Hammond, 2017; Fthenakis and Kim, 2009).

범위를 전 세계 모든 나라로 넓혀서 예를 든다 해도, 단 세 나라만이 재생에너지 비율이 20%를 넘으면서  $\text{km}^2$ 당 인구 밀도가 400명이 넘는 경우에 속하는데, 이 세 나라는 부룬디(80.7%에 421명), 르완다(39.0%에 460명), 그리고 모리셔스(20.3%에 621명)이다(The World Bank, 2016).

그러나 이 세 나라 모두 경제 규모의 크기와 1인당 전력 소비량, 그리고 수력 발전의 분담률 등에서 한국과는 엄청난 격차가 있으므로 대한민국의 미래 에너지 정책 모델이 될 수가 없다. 모리셔스의 1인당 연간 전력 소비량은 2.18 MWh이며 나머지 두 나라는 자료 조차 없는데 반해, 한국의 1인당 평균 전력 소비량은 2014년도를 기준으로 10.56 MWh에 달하기 때문이다(IEA, 2016b).

현재 재생에너지 비율이 높은 나라는 주요 재생에너지원이 거의 모두 수력 발전이거나 바이오매스 혹은 두 가지 모두인 경우이다. 예를 들면, 노르웨이는 총 소비 전력의 95%, 아이슬란드는 71%, 오스트리아는 69%, 뉴질랜드는 56%를 수력 발전으로 공급하고 있다.

크기는 작지만 이웃한 나라들과 전력 공급망이 잘 연결되어 있는 덴마크에서는 수력 발전 외에 재생에너지의 전력 공급률이 최대 57%에 달하고 있다. 그렇지만 IEA회원국 전체의 평균 비수력 발전 재생에너지의 비율은 9.7%(표준 오차 11.1%)에 불과하다. 덴마크를 제외하면 총발전량에서 차지하는 수력 발전 외의 재생에너지 비율은 어느 나라에서도 30%를 넘지 못하는 형편이다.

한편 수력발전소를 건설함으로써 발생하는 환경상의 질적 저하 문제(주거지 및 서식지의 손실, 개간에 따르는 문제 등)와 사회적인 충격(주거지의 이전 등) 그리고 가장 결정적인 수자원 부족의 문제 등 때문에 한국에서는 수력 발전의 비율을 높이는 것도 현실적인 대안이 될 수가 없다.

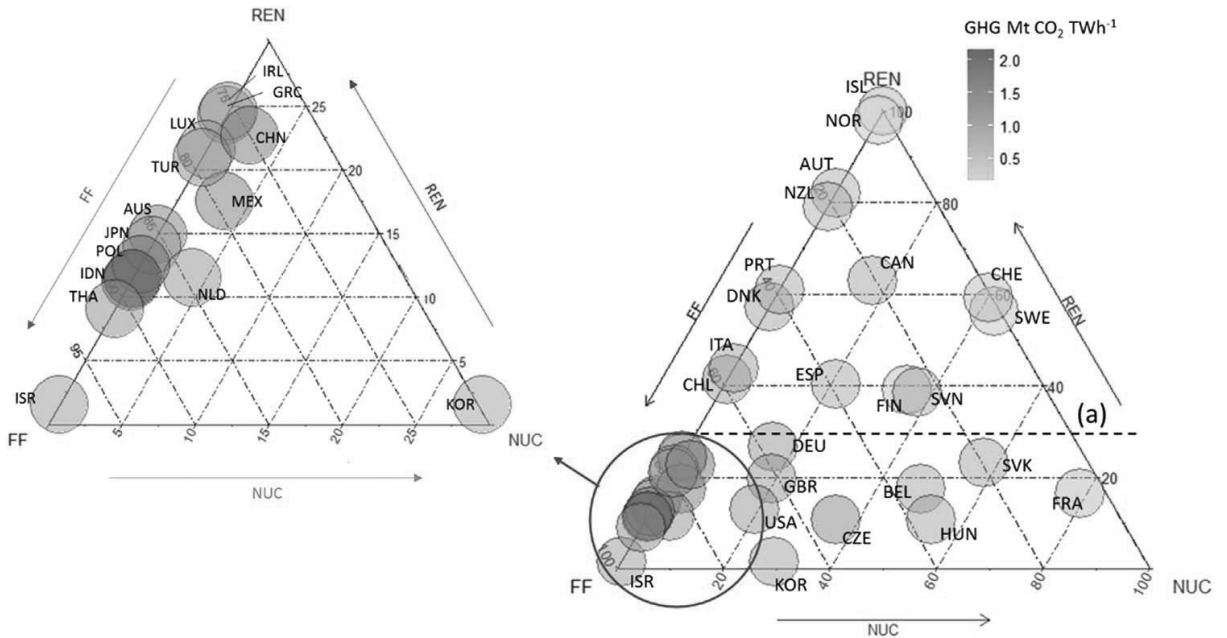
따라서 분명한 사실은, 한국이 화석연료와 원자력을 포기하고 새 에너지원으로 전환할 때 생기는 전력 공급의 공백을 기술적으로 아직 실현 가능성이 희박한 재생에너지원으로 모두 채울 수가 없다는 것이다. 한국의 새 정부에서도 이미 밝혔듯이, 석탄 발전과 원전을 제외시킬 경우에는 가스 발전의 비율을 높이는 것만이 유일한 돌파구인 것이다.

### 온실가스 배출 문제

가스(환경부하;  $470\text{g CO}_2\text{e kWh}^{-1}$  / 발전 과정;  $64.2\text{t CO}_2 \text{ TJ}^{-1}$ )는 석탄(환경부하;  $970\text{g CO}_2\text{e kWh}^{-1}$  / 발전 과정;  $98.3\text{--}107.0\text{t CO}_2 \text{ TJ}^{-1}$ )보다 발전 과정에서는 물론 전 생애주기의 환경부하에서 온실가스 배출이 적은 편이다. 단기적으로 보면 가스도 석탄을 대체하는 에너지원으로서 한국 정부나 여러 환경단체에서 주장하는 것처럼 ‘청정 에너지’로 평가될 수 있다.

그렇지만 가스가 배출하는 온실가스는 적어도 원자력 발전(환경부하;  $40\text{g CO}_2\text{e kWh}^{-1}$  / 발전 과정;  $0\text{t CO}_2 \text{ TJ}^{-1}$ )보다 한 자리 수 이상 높다는 것을 알 수 있다. 따라서 원자력 발전을 가스 발전으로 대체하는 것은 당연히 발전산업 내부의 환경부하에 부담이 되는 자체적인 온실가스의 배출을 증가시키게 되는 것이다.

현재 한국의 원전(42%)과 석탄 발전(28%)의 비율을



〈그림 3〉 국제에너지기구(IEA) 회원국의 화석연료가 차지하는 비율(왼쪽, 기본축), 원전 비율(두 번째 수평축)과 재생에너지의 비율(오른쪽, 삼각형), 그리고 각국의 온실가스 배출 농도, 여기서 (a)는 한국의 지리적 가용 면적과 이론상으로 이용이 가능한 재생에너지 자원을 전제로 하는 한국의 모든 재생에너지의 최대 비율(150 TWh), 국가 코드는 ISO 3166-1 alpha-3 기준임.

놓고 볼 때, 원전과 석탄발전소의 환경부하 상 평균 온실가스 배출 농도는 418.6g CO<sub>2e</sub> kWh<sup>-1</sup> 정도이다. 따라서 원전과 석탄발전소를 가스발전소로 대체한다고 해도 가스 발전 방식으로는 온실가스의 배출을 증가시키는 결과가 되고 말 것이다.

뿐만 아니라 가스발전소의 수명이 30년인 것을 감안하면 경제적인 측면에서도 유리하지 못한 것은 물론, 장기적인 관점에서 온실가스를 감축시키는 것에도 성공할 수 없게 됨으로써 21세기 중반까지 한국은 온실가스 배출 문제에서 벗어나지 못하게 되는 것이다 (Seto et al., 2016).

〈그림 3〉에서 드러나듯이, 한국보다 원전 비율이 낮

은 대부분의 선진 공업국(호주, 이스라엘, 미국 : 〈그림 3〉 왼쪽 하단)들은 온실가스의 배출량이 높은 반면, 원전의 비율이 높은 나라(프랑스, 스웨덴, 헝가리 : 〈그림 3〉 오른쪽 하단)의 온실가스 배출량은 대체로 낮은 경향을 보인다.

여기에서 가로선 (a)는 한국 재생에너지의 최대값을 (150 TWh)을 나타내고(Hong et al, 2013에서 예상한 수치) 있는데, 이는 한국의 현재 전력 수요 543 TWh를 기준으로 한 백분율이다. 만약 한국 정부에서 계획하는 대로 원전의 단계적인 폐쇄를 강행한다면 〈그림 3〉의 왼쪽에 한국의 재생에너지 제한선(a)보다 뒤에 있는 나라들의 자리가 대한민국이 미래에 자리잡게 될



곳에 가장 근접한 위치가 될 것이다.

석탄발전소와 원전을 단계적으로 폐쇄하겠다는 계획과 더불어, 새로 들어선 한국정부는 ‘환경친화적인 자동차’의 비율을 늘리려는 계획도 가지고 있다 (Democratic Party of Korea, 2017).

전통적 연료를 사용하는 휘발유 승용차와 경유 자동차가 줄어들고 새로운 유형의 자동차(수소연료전지 자동차, 하이브리드 자동차, 전기자동차 등) 비율이 대폭 늘어나는 것으로 가정했을 때, 미래의 교통 수단에는 상대적으로 전기가 확실하게 주에너지원으로 등장할 것으로 생각된다. 왜냐하면 수소연료의 생산을 위해 물에서 수소를 분리해내려면 막대한 전기와 열에너지가 필요하고(Dincer, 2012), 그렇지 않으면 정제 천연가스에 의존할 수밖에 없기 때문이다.

한국에서 교통 수단으로 소비하는 연료에만 연 1,972PJ의 최종 에너지가 필요하다(KESIS, 2017)는 사실을 감안할 때, 만약 교통 수단용 연료가 전부 전기 화됨에 따라 이에 필요한 추가 전력 498 TWh를(원전이 아닌) 가스 발전으로 생산해서 공급하게 된다면, 발전산업 부문에서만 연 234.1 Mt의 탄소 배출량이 더 늘어나는 결과를 가져오게 될 것이다.

한국은 평균 기준 851 Mt CO<sub>2</sub>eq인 온실가스 배출량을 2030년까지 37%(315 Mt CO<sub>2</sub>eq) 낮추겠다고 유엔 기후변화협약에서 공식적으로 제안하였고 이 제안은 2016년 12월에 비준되었다(UNFCCC, 2017).

석탄발전소를 가스연료 발전소로 전환하는 것에만 초점을 맞춘다면 단기적으로는 온실가스 배출을 감축시킬 수도 있을 것이다. 그렇지만 장기적인 관점에서 볼 때, 한국의 현재 배출 목표가 온실가스 대량 배출국으로서는 이미 국제적인 기대치보다는 낮게 설정되어

있음에도 불구하고(CAT, 2017), 한국 정부가 지금 계획하고 있는 정책을 그대로 실행하게 되면 유엔 기후 변화협약에서 비준한 온실가스 배출 목표를 달성하지 못할 것이다.

한국의 재생에너지원이 부족하다는 점을 감안할 때, 재생에너지의 적절한 비율을 유지하면서 원전의 비율도 높아서 환경 문제까지 책임지는 모습을 보이고 있는 프랑스 같은 나라가 앞으로 한국이 나아가야 할 가장 현실적이면서 좋은 사례가 될 것이 분명하다고 본다.

### 경제적 비용

원자력은 대한민국에서 가장 값이 싼 발전용 에너지 원이며 그 다음이 석탄이다(그림 4). 2016년 기준으로 풍력 발전과 태양광 발전의 전력 생산 비용은 원전에 비해서 각각 22%와 196% 더 높았다.

한국은 에너지원의 96% 이상을 수입하고(KOSIS, 2017) 있기 때문에 전력 생산에 쓰이는 연료의 수입 가격은 전기요금에 직접적으로 영향을 미칠 수밖에 없다.

2002년 Gcal당 28,653원<sup>11)</sup>이었던 가스의 수입 가격은 가스 공급이 비정상적으로 늘어나 가격이 Gcal당 45,143원으로 떨어지기 전인 2012년도까지 76,196원으로 무려 265.9% 올라갔다(그림 4). 이런 가스 가격의 변화에 따라 가스연료 발전소의 발전 비용은 kWh당 75.6원(2002년)에서 kWh당 168.1원(2012년)으로 치솟았다.

최근 들어 가스 가격이 다소 하락했지만 이 낮은 가격이 계속 유지될 것으로 기대하는 것은 비합리적인

<sup>11)</sup> 1USD=1,222,66원(2017. 6. 2.)



생각이 아닐 수 없다. 왜냐하면 가스 가격을 결정짓는 요인 속에는 다른 에너지원(세일가스, 탄층가스 등)의 기술 개발에 의한 영향, 경제적 사회적인 변화(생산국 국내 수요의 변동, 수입국의 수요 변동 및 국제적 분쟁 등), 그리고 환경적 문제(온실가스 배출 문제, 새로운 에너지원의 생산으로 인한 공해 발생의 문제) 따위가 매우 복잡하게 작용하고 있기 때문이다(van de Ven and Fouquet, 2017).

가스의 경우와는 대조적으로, 핵연료(우라늄)의 가격과 부수적인 핵분열관련 연료에 의한 전력 생산 비용의 현격한 변동은 나타나지 않았다. 2012년도 핵연료 수입 가격은 Gcal당 1,645원이었고 원전의 발전 비용은 kWh당 39.5원이었다.

그러나 정부의 바뀐 정책으로 인해 원전의 발전 비용은 2013년도 이후 눈에 띄게 인상되었다. 2013년부터 인상된 이 발전 비용에는 원전에 부담시키는 핵폐기물 처리 비용과 폐로 분담금이 추가적으로 반영(KORAD, 2017)된 것이었다. 이 정책의 시행으로 원전의 발전 비용은 2016년까지 kWh당 67.9원으로 인상되었지만 그럼에도 불구하고 원전의 발전 비용은 아직 다른 에너지원에 비해 낮은 상태이다.

물론 다른 재생에너지(풍력과 태양광)의 발전 비용도 머지않아 낮아질 수 있을 것으로 보이지만(IEA, 2016a), 발전소가 들어설 부지의 지역적인 조건이 물리적으로 제한 받고 있는 한국의 형편을 놓고 볼 때, 재생에너지만으로는 발전량을 전부 감당하지 못하는 현실적인 문제가 해결되지는 않을 것이다(Hong et al., 2013).

최근에 가스 가격이 하락하고 있지만, 가스 수입 가격의 높은 변동성<sup>2)</sup> 때문에 가스 발전의 비율을 늘리는

정책은 대한민국의 전력 생산 구조를 더 취약하게 만들 것이다.

화석연료는 일반적으로 장기 계약을 통해 수입하므로 가격 변동성의 영향이 비교적 적을 것으로 본다. 그렇지만, 우리는 보수적인 입장을 택하여, 장기 계약의 그러한 점을 감안하지 않고 대신 가격 데이터를 직접 반영하여 그 가격의 변동성을 분석하는 방법을 사용했다(KESIS, 2017).

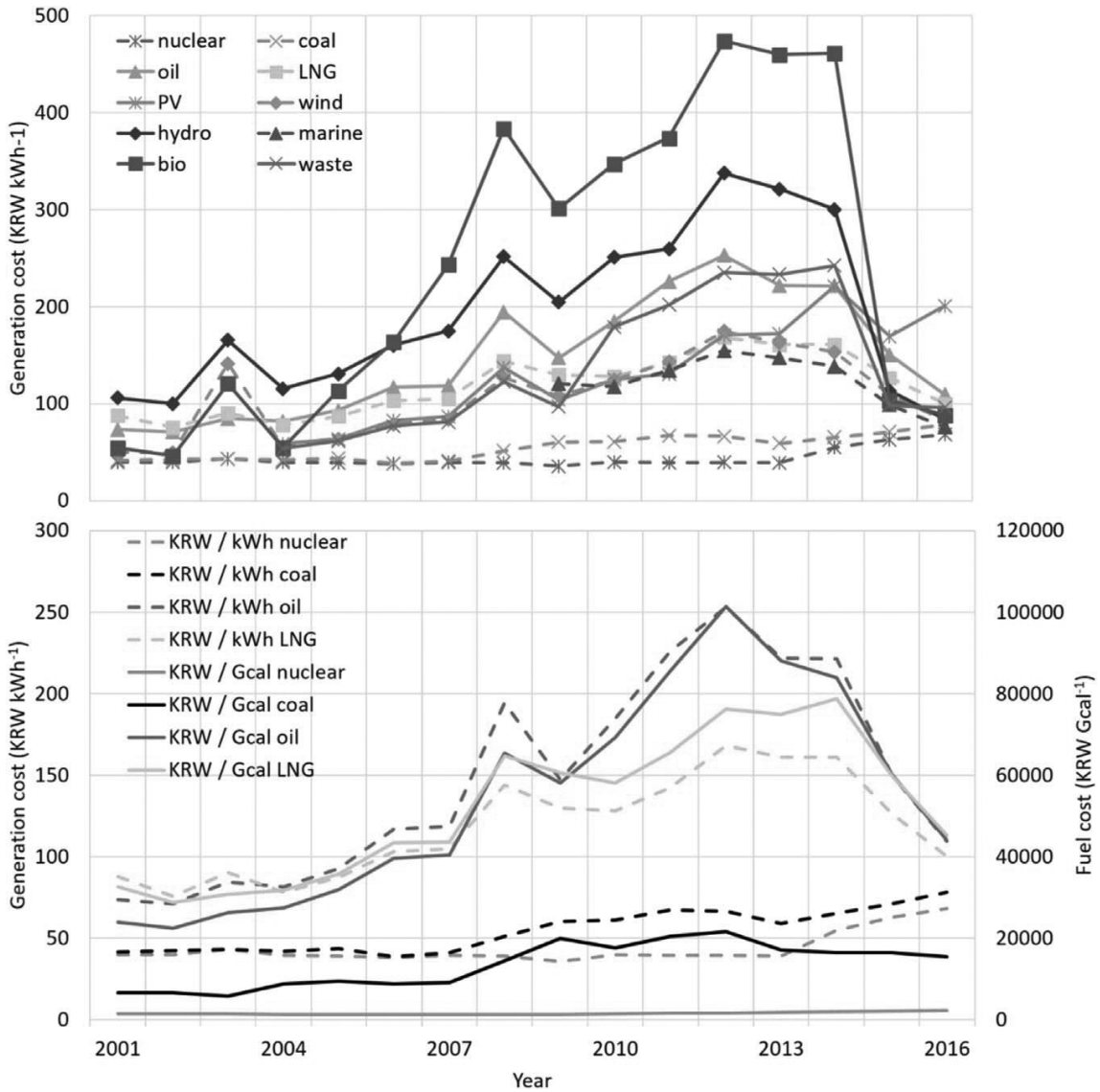
2001년부터 2016년 사이에 원전 핵연료의 가격 변동은 Gcal당 309.6원이었고 가스의 가격 변동은 Gcal당 16,915원이었다. 발전 비용의 경우, 원전은 가장 낮은 전력 생산 비용의 변동값(kWh당 9.2원)을 나타냈으나 가스발전의 변동값(kWh당 30.1원)은 가장 높았다.

일반적으로 화석연료의 발전 비용은 연료의 가격과 매우 밀접한 관계를 가지고 있는데 가스 발전의 연료 가격과 발전 비용 간의 상관 계수는 0.992이며 석탄 발전은 0.964 그리고 석유 발전은 0.994이다. 원전의 상관 계수는 이와는 극명한 대조를 보이면서 2001년부터 2013년까지 0.120에 불과했다.

이상과 같이 제시된 수치를 산출하면서, 정책 시행이라는 외부적인 요인 때문에 발생한 원전 발전 비용의 증가 현상에서 기인하는 자기 상관 계수를 배제시키기 위해 우리는 2001년부터 2013년 사이의 모든 에너지원의 상관 계수를 전부 계산하였음을 밝히고자 한다(한국 원전의 최근의 발전 비용 상승은 앞서 밝힌 바와 같이 대부분 사용후연료의 관리 비용과 폐로 분담금이 포함된 것에서 기인한 것이다.).

모든 에너지원 가운데 원전 건설에 소요되는 자본 비용이 가장 높은 것이 사실이긴 하지만, 대한민국 원

2) 변동성=가격의 가변성



\* 이 도표 상의 선 별 수치를 정확하게 파악하려면 인터넷에 실린 본 논문 기사 참조.

〈그림 4〉 2001년부터 2016년까지 한국 전체 발전용 에너지원의 발전 비용(위 그림), 그리고 화력발전소 발전 비용(점선)과 연료 가격(실선) 및 에너지원 별 연료 가격(아래 그림).

전의 건설 비용은 1970년대에 첫 번째 원전이 건설된 이래 꾸준히 낮아졌다. 건설 비용을 절감할 수 있었던 요인은 엄격하게 표준화된 건설 공정과 한 곳의 원전 부지에 여러 기의 원자로를 세우는 방식을 선택하는 것이었다(Lovering et al., 2016).

원전 건설의 이러한 비용 절감 또는 안정화(kW당 3,000달러 이하) 경향은 이와 유사한 표준화 방식을 채택한 모든 나라(프랑스, 인도, 한국)에서 공통적으로 나타나고 있다. 이에 따라 앞으로 한국에서 시행하는 원전 건설 비용도 대폭 늘어나지는 않을 것으로 생각한다.

### 안전성

한국에서 원전 반대의 움직임이 일어나는 가장 큰 이유 가운데 하나는 예기치 못한 원전 사고로 인한 방사능 피폭의 공포심 때문이다. 그러나 사고 위험 요소의 확률적인 분석과 함께 원전 사고에 관련된 전 세계의 실제적 기록을 놓고 볼 때, 원전은 일부 재생에너지와 비교해서도 가장 안전한 발전 수단(발전량 TWh 당 최저 사망률)인 것으로 드러나고 있다(Burgherr and Hirschberg, 2014; Hirschberg et al., 2016).

후쿠시마 제1원전 사고에 의한 방사선 피폭이 인체에 끼친 영향을 조사한 유엔 산하 「방사선영향에 관한 과학위원회」의 보고서(2013)는 이 원전사고로 인한 방사선 피폭의 잠재적 영향은 무시할만한 수준이라는 결론을 내놓았다.

그 밖에도 후쿠시마 원전 가까운 도시에 사는 사람들의 실제 피폭량을 분석하여 발표한 최근의 한 연구보고서는 개인별 피폭량은 예상한 수치보다 4분의 1에 불과하다 것이 분명한 사실이라고 주장하였다(Miyazaki and Hayano, 2017).

실제로 많은 나라에서 원전 외에는 석탄 발전을 대

체할 수 있는 방안이 없었다는 역사적 사실을 근거로 할 때, 원전을 선택한 덕분에 공기 오염과 온실가스의 배출도 줄이는 결과를 얻음으로써 1971년부터 2009년까지 대략 184만명이 목숨을 잃을 수도 있는 질환에 걸리는 것을 방지할 수 있었다(Kharecha and Hansen, 2013).

한국에서도 원전이 가장 안전한 발전 수단이었다는 사실은 역사적으로 증명되었다. 비록 기술적인 문제(또는 고장)가 있기는 했지만 원전 사고나 방사선 피폭으로 사망한 사람은 한 명도 없었다(Ministry of Public Safety and Security in South Korea, 2017).

이런 원전과 비교할 때 가스연료는 심각한 사고 기록을 가지고 있다. 1995년 대구에서 일어난 참혹한 가스 폭발 사고는 100명 이상의 사망자와 200명 이상의 부상자를 발생시켰다(Associated Press, 1995). 매년 발표되는 연례 사고보고서에 의하면 가스와 관련된 사고는 2015년에 가장 적은 72건에서 2006년의 최대 166건을 기록하고 있다.

따라서 원전 반대론자들과 정부에서 주장하는 것처럼 가스가 원자력보다 안전하다는 논리는 철저한 조사의 결과나 역사적으로 증명된 사실에 비추어 볼 때 전혀 근거가 없는 것이다.

### 원전을 주에너지원으로 유지?

우리는 여기까지 가스 발전을 원전의 대안으로 선택하는 문제에 관해서 신중하게 분석해 보았다. 한편 한국에서 여러 가지 화석연료, 재생에너지, 그리고 원자력에너지의 확장성을 실행에 옮길 수 있는 시나리오들의 자세한 모델링 작업도 다른 기회를 통해서 해 보았다(Hong et al., 2013).

이 모든 작업의 결과, 한국의 환경적인 문제(온실가



스 배출), 경제적인 사유(전기요금 및 에너지 안보), 그리고 안전성과 관련된 요소(사고 발생 가능성과 치사율) 등을 토대로 판단했을 때 가스발전소를 원전의 대안으로 선택하는 것은 친환경적이지도 않을뿐더러 경제적인 이득도 없으며 현재의 한국 에너지믹스에 비해서 더 안전하지도 않다는 것이 우리의 결론이다.

원전을 활용해서 발전 부문 전체를 완전히 탈탄소화하려면, 현재 석탄 발전으로 공급하고 있는 214 TWh의 전력과 현재 보유중인 가스발전소 최고용량인 121 TWh(평균)의 전력을 원전을 통해 추가적으로 생산해야 한다. 이 때 석탄 발전을 완전하게 대체하기 위해서는 발전 설비의 최소 이용률 90%와 설비용량(1.4GW)을 기준으로 20기의 원자로가 더 있어야 하며, 석탄 발전과 가스 발전 전부를 대체하기 위해서는 30기의 원자로가 더 필요하다. 이 때 재생에너지의 비율을 함께 높이면 원전의 부담이 좀 덜어질 수 있게 된다.

한편으로 우리는 화석연료를 쓰는 발전 수단 전체를 원전으로 대체할 수 있는지에 관한 가능성과 그에 소요되는 기간을 어렵잡아 보았다. 한국에서는 2000년부터 2017년 사이에 총 9.9 GW의 발전용량을 가진 9기의 원자로가 새로 가동에 들어갔다(WNA, 2017). 그리고 2022년까지 원자로 6기가 추가로 건설되어 발전용량이 8.4GW 더 늘어나게 되어 있었다.

만약 계획한 대로 2018년부터 2022년까지 원전이 계속 늘어나고 또 그런 추세가 이어져 2022년 이후에도 발전용량 1.4 GW짜리 원자로를 매년 1기씩을 추가로 건설하여 가동하게 된다면, 2030년대 중반까지는 모든 석탄발전소를 원전으로 대체할 수 있을 것으로 예상된다.

우리가 분석한 결과에 따르면 현재 한국에서 가동되는 원자로들이 가동연한의 연장 허가를 받게 되면 2040년 이후에도 가동될 수 있을 것으로 보이는데, 수

요 측면에서 에너지 효율을 향상시키는 기술이 발달할 것이 분명하기 때문에 전력 수요도 그다지 증가하지 않을 것이므로 전력 수급에 별 문제가 없을 것으로 생각된다.

원전을 더 늘리는 사업과 관련하여 기술적으로나 경제적으로는 큰 어려움이 없을 것으로 생각하지만, 만약 원전 설비를 증설하는 결정이 늦어지게 되면, 원전 건설에 5년 이상의 기간이 소요된다는 점을 감안할 때 전력 분야 탈탄소화 사업이 더욱 더 지연되는 것이다.

한편 원전의 비율이 증가하면 사용후핵연료의 처리 문제가 중요한 정치 및 사회적 이슈로 등장할 것이 분명하다. 현재 한국에서 보관하고 있는 사용후핵연료의 누적량은 이미 기존 저장 시설이 가지고 있는 용량의 67%를 차지하고 있다(KHNP, 2017).

지금까지 한국은 미국과 맺은 한미 원자력협정 때문에 잠정 저장 방식을 택할 수밖에 없었지만(Bureau of International Security and Nonproliferation, 2017), 최근에 협정을 갱신한 결과 사용후핵연료의 재처리가 가능하게 되었다.

한국이 모든 핵연료를 수입한다는 사실과 핵연료의 수입 가격이 계속 인상되고 있는 현실을 놓고 볼 때, 이제는 밀폐 사이클 재처리 방식을 택하는 것이 적어도 중장기적으로는 훨씬 경제적일 수도 있다.

장기적으로 보면, 4세대 원자로 기술(나트륨냉각고속로, 초고온원자로, 초임계압수냉각원자로, 용융염 원자로 등)(GIF, 2017)의 상용화가 실현되어야만 한다. 한국수력원자력은 2030년까지 나트륨냉각고속로와 초고온원자로를 상용화하겠다는 계획을 가지고 있다(KHNP, 2017).

4세대 원자로 기술을 실용화하면 사용한 핵연료의 관리 기간을 1,000분의 1까지 줄일 수 있고, 사용한 핵연료를 전력 생산에 재활용할 수 있게 됨으로써 관

리해야 할 사용후핵연료의 양도 20분의 1까지 줄일 수 있게 된다(Brook et al., 2015). 그 뿐만 아니라 통계상으로는 물론 기술적인 면에서 2세대 및 3세대 원자로가 대규모 발전 수단 가운데 가장 안전한 것으로 이미 증명되었지만, 4세대 원자로 기술은 내재적 안전 장치를 채택하여 설계가 더 안전하게 되어 있다. 후쿠시마 원전 사고 같은 비상 사태가 발생하게 되면, 이 4세대 원자로로는 외부적인 개입 없이 자체적인 수동적 폐쇄를 할 수 있게 되어 있는 것이다.

### 결론 및 정책적 대응 방향

석탄발전소와 원전을 동시에 줄이면서 온실가스 문제까지 해결할 수 있는 정책을 찾으려 한다면 곧바로 딜레마에 빠질 수밖에 없다. 이와 같은 난제는 한국처럼 지리적 제한이 심하면서 인구 밀도가 높고 에너지 수요가 큰 산업 구조를 가진 나라에는 더 고통스러운 문제가 되는 것이다.

이런 측면을 고려할 때 한국의 전력 수요가 현재 수준의 3분의 1로 줄어들지 않는 한 재생에너지는 기저 부하 발전량을 감당할만한 대체 수단이 될 수가 없다.

우리는 이번 연구를 통해 원전과 석탄발전소 전부를 단계적으로 폐쇄하게 되면 의도와는 반대로 온실가스 감축에 실패하는 결과를 초래함으로써 환경 문제가 더 커진다는 사실을 입증하였다.

폐쇄하는 원전을 가스 발전으로 대체하면 석탄 발전으로 대체하는 것보다는 온실가스의 배출량이 작아지겠지만, 그렇게 되면 한국은 온실가스 집약적 경제 산업 구조를 떠안고 가게 됨으로써 전력 가격은 더욱 올라가고 에너지 안보는 더 취약하게 될 것이다.

에너지정책을 한층 더 복잡하게 만드는 중요한 원인 중 하나는 각종 자원(물자, 자본, 토지 등)의 부족함

이다. 이를 극복하면서 수립하고자 하는 에너지 정책의 목표에 가장 부합하기 위해서는 선택 대상으로 고려하는 에너지 기술을 과학적이고 공학적인 원칙과 경험적 증거를 기준으로 평가해서 우선순위를 매겨야 한다(Brook and Blomqvist 2016; Hong et al., 2013). 따라서 에너지정책의 초점은 온실가스 배출을 더 많이 줄일 수 있는 에너지 기술에 맞추어야 하는 것이다(Brook et al., 2016; Karlsson and Symons, 2015).

에너지 기술 간의 경쟁의 효율성을 높이고 가장 실용적인 기술을 택하여 제대로 활용하기 위해 공평한 경쟁의 장을 펼치려면, 공해 절감을 목적으로 도입한 세금 제도가 기술 위주로 적용되어야만 한다. 한국의 새 정부는 원전과 석탄발전소에 ‘환경세’를 부과하여 거두는 재원을 친환경적인 에너지를 지원하는 데 쓰겠다는 계획을 발표했다.

그렇지만 원전에 직접 부과하는 세금을 석탄발전소나 가스발전소의 지원에 쓰지 않듯이 환경 문제(온실가스 등)의 해결을 목적으로 하는 환경세를 원전에 부과하지 말아야 한다. 더구나 친환경적 연료라고 과장되게 알려지는 바람에 환경세의 혜택을 받을 가능성이 큰 가스는 친환경적이지도 않을뿐더러 안전하지도 않고 원전보다 저렴하지도 않다(NREL, 2017; Turconi et al., 2013).

요약하자면, 재생에너지를 생산하는 데 지리적인 제약이 존재한다는 점과 더불어 원전의 환경적이고 경제적인 이점을 고려할 때, 대한민국은 적절한 비율의 재생에너지와 함께 원전 정책을 지속적으로 추구(사실은 더 늘려야)하는 것 이외의 현실적인 선택의 여지가 없다는 것이 우리의 결론이다.

한국의 원전 의존율을 높이는 데 가장 큰 장애물은 원전의 기술적·경제적·환경적인 문제가 아니라 재생에너지는 청정한 것이라는 사회적인 믿음과 밀도 끝도



없는 재생에너지 기술에 대한 이미지(특히 한국에서 이에 관한 실증적 증거와 이론적 계산의 뒷받침은 찾아볼 수가 없다), 그리고 반핵단체들이 퍼뜨리는 공포감이다.

이런 상황이 증폭되는 것을 막기 위해서는 개별 발전 수단의 장단점을 반드시 객관적으로 제시하는 데 초점을 맞춘 일반대중에 대한 교육이 필요하다. 🌍

〈참고 문헌〉

- Alemeida Prado Jr., F., Athayde, S., Mossa, J., Bohlman, S., Leite, F., Oliver-Smith, A., 2016. 어느 정도가 적절한 수준인가? 브라질의 수력발전에 관련된 에너지안보, 경제성장 및 기후변화에 대한 종합적 검토. *Renewable & Sustainable Energy Review* 53호 1132–1135쪽.
- Alonso, A., Brook, B.W., Meneley, D.A., Misak, J., Bles, T., Erp, J.B.V., 2015. 원자력 발전은 왜 인위적 온실가스배출의 비율을 줄이는데 꼭 필요한 것일까? *EPJ Nuclear Sciences & Technologies* 1,3.
- Apergis, N., Payne, J.E., Menyah, K., Wolde-Rufael, Y., 2010. 탄소배출과 원자력에너지, 재생에너지 그리고 경제성장 사이의 인과관계성 역학. *Ecological Economics* 69호 2255–2260쪽.
- 연합뉴스, 1995. 한국 가스폭발 사망자 수 100명이 넘다. 대부분이 학생. *The New York Times*.
- Bigerna, S., Bollino, C.A., Micheli, S., 2016. 발전비용 절감을 위한 유럽연합의 재생에너지 시나리오. *Renewable Energy* 96호(Part A), 80–90쪽.
- Breyer, C., Bogdanov, D., Komoto, K., Ehara, T., Song, J., Enebish, N., 2015. 동북아시아의 수퍼그리드: 재생에너지믹스와 경제성. *Japanese Journal of Applied Physics* 54호 08KJ01
- Brook, B.W., Blomqvist, L., 2016. 세계적 환경변화를 예측하는 방법의 혁신과 제한성. *Basic and Applied Ecology* 17호 565–575쪽.
- Brook, B.W., Edney, K., Hillerbrand, R., Karlsson, R., Symons, J., 2016. 유엔 기후변화협약에 기준한 에너지연구: 지속되는 'climate-deadlock(기후문제의 막다른 상황)'을 타개하기 위한 대안제시. *Climate Policy* 16호 803–813쪽.
- Brook, B.W., van Erp, J.B., Meneley, D.A., Bles, T.A., 2015. 핵연료사이클 일체형 고속로의 단계적 상용 실증사례. *Materials Technology* 3, 2–6쪽.
- 미 국무부 국제 핵 안보 및 비확산 국, 2017. 한-미 평화적 핵 협력 협정
- Burgherr, P., Hirschberg, S., 2014. 발전산업 분야의 중대한 사고발생 위험요소에 관한 비교조사. *Energy Policy* 74호, S45–S56.
- CAT, 2017. 기후행동 추적 그룹(Climate Action Tracker) – 대한민국.
- Cheng, V.K.M., Hammond, G.P., 2017. 에너지밀도의 수명주기와 각 발전수단별 소요부지에 대한 영국정부의 시각. *Journal of Energy Institute* 90호 201–213쪽.
- Cho, T., 2017. 문재인 정부 원자력 발전 정책 '전면 재검토'공식화.
- Choe, S., 2013. 한국 원전의 어두운 내막 폭로를 둘러싼 추문. *The New York Times*.
- Chung, J., Jin, H., 2017. 두 원자로의 운명을 결정 짓는 동안 중지시킨 건설공사. 로이터 통신.
- Connolly, d., Lund, H., Mathiesen, B.V., 2016. 유럽의 스마트 에너지: 한 가지 재생에너지로 유럽연합의 에너지 생산수단을 통일하는 경우 발생할 기술적, 경제적 영향. *Renewable & Sustainable Energy Review* 60호 1634–1653쪽.
- Democratic Party of Korea, 2017. 한국 더불어 민주당 대통령선거 공약.
- Dincer, I., 2012. 친환경적 수소생산. *International Journal of Hydrogen energy* 37호 1954–1971쪽.
- Donald, M., 2016. 한국 대기오염 문제의 불투명한 미래. Yale대학교 자료.
- Feamside, P.M., 2014. 브라질 Madeira강의 댐 건설이 미치는 영향: 아마존 강 유역의 수력발전소 개발사업의 폐해로부터 배우지 못한 교훈. *Environmental Science & Policy* 38호 164–172쪽.
- Fthenakis, V., Kim, H.C., 2009. 토지의 이용과 전력생산: 수명주기 분석. *Renewable & Sustainable Energy Review* 13호 1465–1474쪽.
- GfE, 2017. 제4세대 원자력시스템 국제포럼
- Hirschberg, S., Bauer, C., Burgherr P., Cazzoli, E., Heck, T., Spada, M., Treyer, K., 2016. 발전소의 정상적 가동, 중대한 사고, 테러의 위협 등 각 상황들이 인체에 미치는 발전기술별 영향. *Reliability Engineering & System Safety* 145호 373–387쪽.
- Hong, S., Bradshaw, C.J.A., Brook, B.W., 2013. 에너지 생산계획 분석에 의한 한국의 지속 가능한 에너지믹스 선택에 대한 평가. *Energy* 52호 237–244쪽.
- Hong, S., Bradshaw, C.J.A., Brook, B.W., 2014. 원전을 통해 어떻게 미래의 에너지생산 및 환경보호 비용을 절감할 수 있는지 한국의 에너지 생산계획이 보여주고 있다. *Energy Policy* 74호 569–578쪽.
- Hong, S., Radcliffe, J., 2016. 영국과 브라질의 에너지저장.
- Hoya, R., Fushimi, C., 2017. 저온 가스 발생장치, 가스 정화 및 탄소 포집 설비 등을 갖춘 첨단 석탄가스화 연료사이클 발전시스템의 열효율. *Fuel Processing Technology* 164호 80–91쪽.

- Huber, N., Hergert, R., Price B., Zach, C., Hersperger, A.M., Putz, M., Kienast, F., Bolliger, J., 2017. 재생에너지원: 지형변화에 따른 갈등과 새로운 기회. *Regional Environmental Change* 17호 1,241-1,255쪽.
- IEA, 2016a. 국제에너지기구/원자력기구(IEA/NEA)가 예상하는 전력생산비 보고서 - 2015년 판, *Energy Policy* 88호 229-233쪽.
- IEA, 2016b. 국제 에너지기구 통계자료
- IPCC, 2006. UN 기후변화에 관한 정부간 협의체 - 국가별 온실가스 배출상황 조사팀
- Isa, Z., Alsayed, M., Kun, S.S, A.R., 2015. 경제성장의 규모와 에너지소비 사이의 연관성에 관한 조사보고서. *International Journal of Energy Economics and Policy* 5호 385-401쪽.
- Karlsson, R., Symons, J., 2015. 기후변화 문제의 주도적 해결의 중요성: 전세계 탈 탄소화의 핵심인 에너지연구. *Global Policy* 6호 107-117쪽.
- Kemfert, C., 2017. 독일은 미래를 위해 반드시 저 탄소 정책으로 복귀해야 한다. *Nature News* 549호 26쪽.
- KESIS, 2017. 한국 에너지 통계 및 정보시스템
- Karecha, P.A., Hansen, J.E., 2013. 원전에 의해 억제되었던 공해로 인한 사망률과 온실가스의 배출. *Environmental Science & Technology* 47호 4,889-4,895쪽.
- KHNP, 2017. 한국 수력원자력 주식회사.
- Kim, M., 2017. 한국정부 원전정책 전면 재검토. 신규원전 건설 전면 백지화. 머니투데이.
- KORAD, 2017. 한국 방사성폐기물 관리공단
- KOSIS, 2017. 통계청, 국가통계포털
- Leung, D.Y.C., Caramanna G., Maroto-Valer, M.M., 2014. 이산화탄소 포집 및 저장기술의 현황에 관한 개요. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 39호 426-443쪽.
- Lovering, J.R., Yip, A., Nordhaus, T., 2016. 역대 전세계 원전의 건설비용. *Energy Policy* 91호 371-382쪽.
- Luo, X., Wang, J., Dooner, M., Clarke, J., 2015. 전기에너지의 저장기술 및 전력계통 가동에 적용이 가능한 기술개발의 현황에 관한 개괄. *Applied Energy* 137호 511-536쪽.
- Ministry of Public Safety and Security in South Korea, 2017. 국민안전처 통계자료.
- Miyazaki, M., Hayano, R., 2017. 후쿠시마 원전사고 후 5개월에서 51개월간 일자, 도시 별 모든 주민의 수동선량계에 의한 체외선량 조사(연속시행 작업): 1. 항공조사를 통한 대기 중의 선량과 개인별 선량의 비교치 확인. *Journal of Radiological Protection* 37호 1쪽.
- MOTIE, 2017. 통상산업부 제7차 전력생산 기본계획
- Normie, D., 2017 한국의 원전복귀 결정이 찬사를 받다. *Science* 357 (15-15)
- NRDC, 2015. 미국자원협회: 파리 기후회의 - 대한민국
- NREL, 2017. 국립 재생에너지 연구소: 미국 전 과정 평가목록(LC) 데이터베이스 홈페이지.
- Oh, S., 2017. (문재인정부의 경제정책 7.) 화력발전 및 원전을 재생에너지로 대체하려는 정책의 명암은? 메트로신문.
- Park, J., 2017. 국민의 66% 화력발전소 추가건설 반대.
- Schwarz, H., Cai, X., 2017. 재생에너지, 탄력적 전력부하, 전력저장시설 등을 전력공급 망에 통합: 독일 전력시스템 변화의 실제 상황. *Frontiers in Energy* 11호 107-118쪽.
- Seto, K.C., Davis, S.J., Mitchell, R.B., Stokes, E.C., Unruh, G., Urge-Vorsatz, D., 2016. 요지부동 탄소 배출: 여러 유형과 원인 그리고 정책적 의미. *Annual Review of Environment and Resources* 41호 425-452쪽.
- Steinke, F., Wolfrum, P., Hoffmann, C., 2013. 유럽이 100% 재생에너지화 되었을 때 Grid시스템과 Storage시스템 간의 비교. *European Renewable Energy* 50호 826-832쪽.
- The World Bank, 2016. 세계은행 데이터베이스
- Turconi, R., Boldrin, A., Astrup, T., 2013. 각 발전기술별 라이프사이클에 대한 평가: 개요 및 비교 가능한 사항과 제한적인 사항. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 28호 555-565쪽.
- UNFCCC, 2017. 유엔 기후변화협약. 파리협약 - 비준현황
- UNSCEAR, 2013. 2011년 동일본 대지진과 지진해일에 의한 원전사고 발생 이후 전리 방사선의 위험성과 영향 및 방사선피폭의 수준과 영향. 방사선의 영향에 관한 유엔 과학위원회.
- van de Ven, D.J., Fouquet, R., 2017. 역대 에너지가격 급등락의 충격과 가격변동에 경제에 끼친 영향. *Energy Economics* 62호 204-216쪽.
- WNA, 2017. 세계 원자력협회. 원자로 데이터베이스