



## 원자력 발전 외부 비용의 이해<sup>1)</sup>

조성진

에너지경제연구원 전력정책연구실 연구위원



- 한양대 경제학 학사
- 미 워싱턴대 경제학 석사, 박사
- 지경부 에너지영리더스포럼 위원
- 산업부 미래성장동력 및 산업엔진 프로젝트 추진단 위원 역임
- 전력거래소 비용평가실무협의회 위원(14~)

### 서론

원자력 발전의 비용은 직접 비용과 외부 비용으로 구성되며, 이를 일반적으로 사회적 비용이라 칭한다. 경제학에서 사회적 비용(social costs)은 내부 비용(internal costs) 혹은 직접 비용(private costs)에 외부 비용(external costs)을 모두 포함한 비용을 말하는데, 만일 외부 비용이 발생하면, 사회적 비용은 직접 비용보다 크게 되고, 이 경우 시장 가격은 사회적 균형 가격보다 낮게 되어, 실제 생산량은 사회적 균형 생산량(파레토 최적)보다 더 많게 되므로, 결과적으로 사회적 후생 손실을 발생시킨다.

원자력 발전의 외부 비용을 논하기 전에, 먼저 외부 효과(externalities)에 대한 이해가 필요하다. 외부 효과란 어떤 경제 주체의 생산 또는 소비 활동이 다른 경제 주체의 생산 또는 소비에 영향을 주지만 이렇게 발생한 편익이나 비용에 대한 보상이 이루어지지 않은 현상을 의미한다.

외부 효과는 다시 편익을 주는 긍정적 외부 효과(positive externality)와 비용이나 손실을 초래하는 부정적 외부 효과(negative externality)로 구분되는데, 외부 비용이 발생하는 경우 사회적 최적 산출량보다 더 많은 생산이 발생하고 이는 사회적 후생 손실로 이어져 비효율적 자원 배분을 초래하게 되고, 외부 편익이 발생하는 경우 사회적 최적 산출량보다 더 적은 생산이 발생하

<sup>1)</sup> 본고는 에너지경제연구원 개원 29주년 기념세미나(15. 9), “원자력발전 외부비용의 이해”의 내용 일부를 요약·정리한 것임.

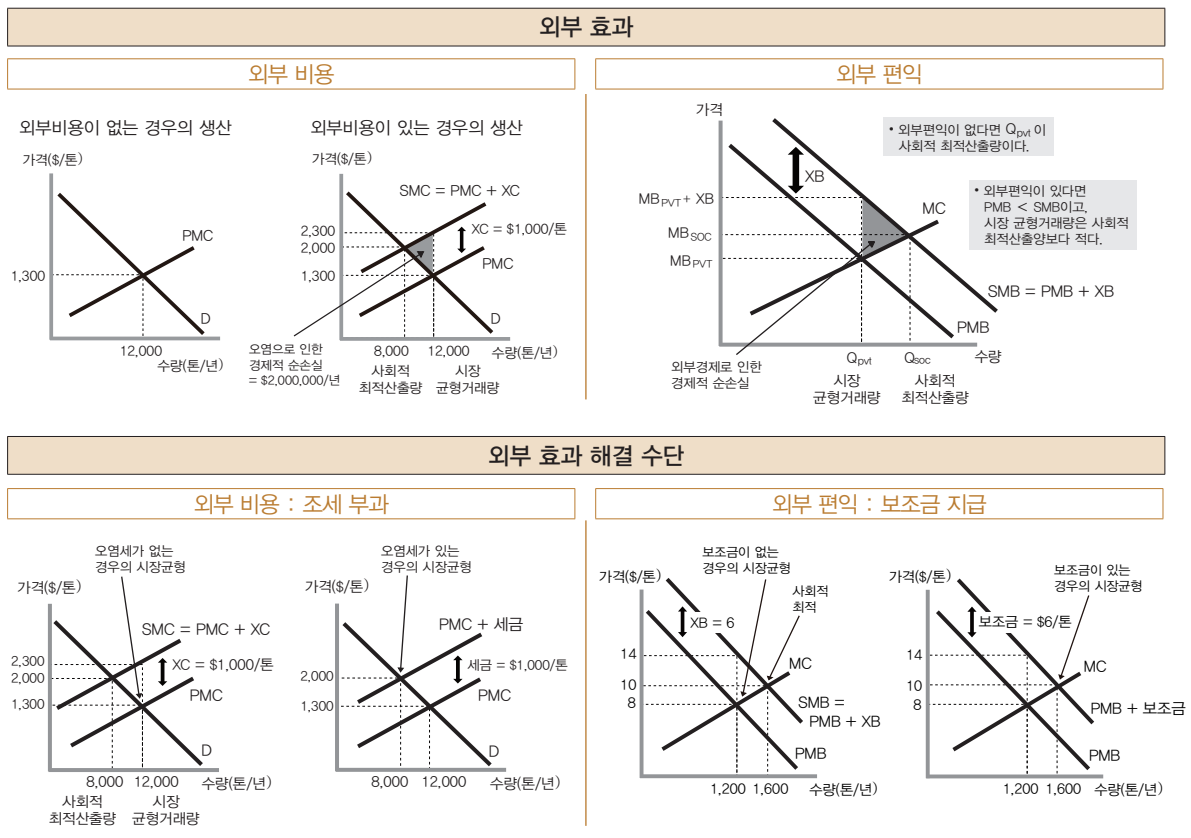
여 이 역시 사회적 후생 순손실이 발생하게 된다.

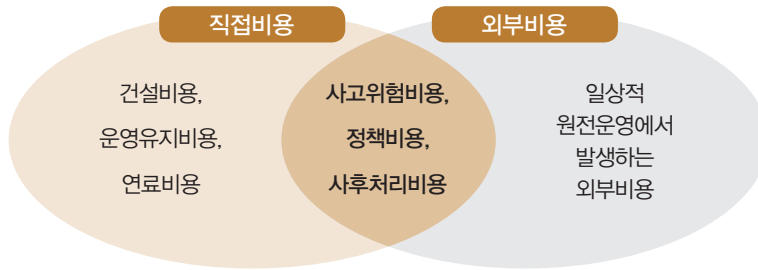
이들 효과에 대한 해결 방법으로는 외부 비용의 경우 교정 조세의 수단으로, 외부 편익의 경우 보조금 지급을 통해 후생 손실을 최소화할 수 있다(피구세, Pigouvian Tax). 외부 비용은 교정적 조세를 부과함으로써 사회적 최적 산출량과 최적 한계 가격을 달성할 수 있으며, 이 경우 사회적 후생 순손실은 최소화된다. 외부 편익 문제는 보조금을 지급함으로써 사회적 최적 산출량과 최적 한계가격을 달성할 수 있다(표 1) 참고).

원자력 발전 비용은 건설 비용, 운전 유지 비용, 연료 비용 등 직접 비용과 일상적 원전 운영에서 발생하는 비용 등 외부 비용, 그리고 사고 위험 대응 비용, 추가 안전 대책 비용, 정책 비용(기타 비용), 사후 처리 비용(후행 핵연료주기) 등 현재 직접 비용으로 기반영되고 있으나, 외부비용 논란이 되는 항목으로 구분된다.

원전의 외부 비용 항목에 대한 명확한 구분은 현재까지 정의되지 않았으나, OECD/NEA(2003) / William D'haeseleer(2013, 11) 보고서에서는 다음과 같은 항목

〈표 1〉 외부 효과 개념과 해결 수단





〈그림 1〉 원자력 발전 비용 구조

〈표 2〉 OECD/NEA의 원전 외부 비용 항목

"Aspects of nuclear energy that often are suggested to entail external costs include: radioactive waste disposal, future financial liabilities arising from decommissioning and dismantling of nuclear facilities, health and environmental impacts of radioactive releases in routine operation and effects of severe accidents" (자료: OECD/NEA(2003, pp. 12))

을 원전의 외부 비용 혹은 숨은 비용(Hidden Costs)으로 정의하고 있다(〈표 2〉 참고).

일상적 원전 운영의 외부 비용은 원전 선행 핵연료 주기 및 발전, 그리고 후행 핵연료주기 등 원전 전주기(life cycle)에서 발생하는 인체 건강과 주변 환경 오염 비용을 의미하고, 원전 사고 위험 대응에 대한 외부 비용은 노심 손상(CDF, Core Damage Frequency), 방사성물질의 대량 조기 방출 빈도(LERF, Large Early Release Frequency) 등과 같이 중대한 원전 사고 발생 시 발생하는 비용을 말한다.

아울러 OECD/NEA(2003) 보고서에서는 위에서 언급한 외부 비용뿐만 아니라, Energy security<sup>2)</sup>,

Environmental protection, Research and development spin-off, Balance of payments, Price stability 등 외부편익에 대해서도 언급하고 있다. 다만 이들 편익에 대한 정량적 분석의 한계로 정성적 분석만을 언급하고 있다.

국내 원전은 앞서 언급한 대부분의 비용 항목을 반영하고 있다. 국내 원전 발전 비용에는 건설비, 운전 유지비(사용후핵연료 처리 비용과 해체 비용 포함), 연료비 등 직접 비용과 지역자원시설세(1원/kWh) 및 R&D 비용(원자력연구개발기금, 1.2원/kWh), 그리고 지역 협력사업비(0.25원/kWh) 및 사업자 지원 등 정책 비용이 포함되어 있다.

<sup>2)</sup> Energy Security 정의: IEA(국제에너지기구, International Energy Agency)의 정의에 의하면, 에너지 안보는 '합리적인 가격으로 에너지 자원을 중단 없이 가용할 수 있음'을 의미함.

〈표 3〉 국내 원전 외부 비용 고려 항목

| 외부 비용 항목                 | 해당 사항                                                                            | 외부 비용 반영 유무                                               |
|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Routine Operation        | Mining and Milling                                                               | 미반영                                                       |
|                          | Conversion                                                                       |                                                           |
|                          | Enrichment                                                                       |                                                           |
|                          | Fuel Fabrication                                                                 |                                                           |
|                          | Electricity Generation                                                           |                                                           |
|                          | Reprocessing                                                                     |                                                           |
|                          | Waste Disposal                                                                   |                                                           |
|                          | Transportation                                                                   |                                                           |
| Nuclear reactor accident | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 중대 CDF 사고</li> <li>- 중대 LERF</li> </ul> | 일부반영: 원자력손해배상법에 의해 사고 발생 시 사업자는 5,000억 원의 손해배상금 지불(유한 책임) |

사후 처리 비용은 2012년 말 개정과 2015년 재개정을 통해 세계 평균 혹은 그 이상으로 대폭 인상되었고, 지역자원시설세 역시 기존 0.5원/kWh에서 1원/kWh로 100% 인상되었다. 아울러 2014년 12월, 원자력손해배상액을 기존 500억원에서 5,000억원으로 상향 조정하는 등 사고 위험 대책 비용의 일부를 기내재화하였다. '발주법'과 '송주법'을 통해 정책 비용 역시 기내재화하고 있으며, 후쿠시마 사고 직후 약 1조 500억원의 자금을 투입하여 원전 시설의 안전성을 보강하였다. 이는 추가 안전 대책 비용의 외부 비용을 기내재화한 것으로 볼 수 있으며, 결과적으로 기술적 측면에서 발전기의 확률론적 사고 발생 빈도를 줄일 수 있을 것이다.

종합하면, 국내 원전은 직접 비용 항목뿐만 아니라 대부분의 외부 비용 항목도 발전 비용에 반영하고 있다. 다만, 국내 원전 외부 비용 항목에서 고려해야 할 부분은 사고 위험 대응 비용(원전 보험 측면)의 적정 수준 여부와 일상적 원전 운영의 인체 건강과 환경 오염 비용의 반영 여부라 판단된다.

해외 국가의 경우 원전 과세를 통해 원전 외부 비용 항목의 일부를 기내재화하고 있는데, 중대 원전 사고 대비를 위한 사고 위험 대응 비용과 일상적 원전 운영에서 발생하는 외부 비용을 직접적으로 반영하는 국가는 현재 없다.

원전 과세는 대부분 원자력 연료에 세금을 부과하는 핵연료세와 방사성폐기물에 부과하는 방사성폐기물세로 부과된다. 일본의 경우 지방자치단체가 법정 외 일반세로 원전연료세, 사용후핵연료세 및 핵연료등취급세를 자치단체 별로 다르게 부과하고 있다. 징수된 세수는 원자력안전대책비와 민생안정대책비로 대부분 충당되며, 일부 세원은 생업안정대책비로 지출된다.

벨기에에는 국세로 부과되는 원자력생산세(Nuclear production tax)와 수수료 형태인 방사능위험부담금(Fees for ionizing radiation), 지방세 형태의 원자력개발위험보상금(Compensation for nuclear exploitation nuisance) 등 3가지의 형태로 원전에 과세하고 있다.

스페인 원자력 발전으로 인한 사용후핵연료 및 방



사성폐기물의 생산에 대한 세금과 원자력 발전으로 인한 사용후핵연료 및 방사성폐기물의 저장에 세금을 부과하고 있는데, 첫 번째 세금은 원자력 발전에 사용된 핵연료와 폐기물이 원자력 발전 원자로에서 영구적으로 제거된 양에 대해 부과하는 것이고, 두 번째 세금은 발전소에 임시로 저장된 사용후핵연료와 방사성폐기물에 대해 부과되는 세금이다.

스웨덴은 1990년대 말 원전 과세를 부과하기 시작하였는데, 세율은 애초 0.30~0.32유로/kWh에서 2006년 1월 0.6유로/kWh로 인상되었고, 2008년에는 0.67유로/kWh로 인상되었다. 과세의 목적은 원전 가격 경쟁력을 다른 발전원보다 낮게 하여 전력시장에서 원전의 단계적 폐지를 유도하기 위함이다<sup>3)</sup>. 헝가리 1998년에 원자력 발전의 사용후핵연료와 방사성폐기물의 처리와 저장 비용을 마련하기 위하여 원자력 발전에 부담금을 부과하고 있다. 부담금은 중앙원자력재정기금(Central Nuclear Financial Fund)으로 쌓이게 되고, 핵연료, 방사성폐기물의 관리와 처리 비용을 충당하게 된다.

원전에 과세하는 국가 중 원전 사고 위험 대응 비용과 일상적 원전 운영에서 발생하는 외부 비용을 조세로 내재화하는 국가는 없고, 국가마다 자국 여건에 맞게 과세 형태를 일반세 내지 목적세 혹은 국세 내지 지방세로 설계하고 있으며, 세율 역시 국가별 환경을 고려하여 다르게 책정하고 있다.

아울러 세수의 활용 방안 역시 국가별로 달라, 일본과 브라질같이 지방 재정으로 이관하는 경우가 있는 반면, 독일과 벨기에, 그리고 프랑스와 같이 세수를 재생 에너지 확대 및 수위 관리 정책에 지원하는 사례도 있다.

이상의 해외 원전 외부 비용 내재화 사례를 근거로 요약하면, 국가마다 원전 과세 대상과 세율이 다르고, 세금 부과 목적 역시 상이하여 정형화가 어려운 관계로 해외 사례를 우리나라에 그대로 적용하여 과세를 부과하는 것은 다소 부적절할 수 있다.

### 원전 외부 비용 선행 연구

일본 후쿠시마 원전 사고 이전에 원전 외부 비용과 관련된 국내 연구는 거의 없는 실정이며, 최근에 몇몇 연구가 수행되었으나, 분석 방법 및 추정 전제 등 포괄적인 연구라고 보기 어려운 측면이 존재한다.

국내 원전 외부 비용 연구 사례는 국회 예산정책처의 보고서(2014. 3)에 일목요연하게 정리되어 있다. 동 보고서에 따르면, 사회적 갈등 비용을 제외한 사고 위험 대응 비용과 정책 비용만을 외부 비용으로 가정했을 때, 국내 원전의 외부 비용은 최소 1,80원/kWh(제2차 에너지기본계획, 이하 에기본)에서 최대 63.7원/kWh(국회 예산정책처 보고서의 '에기본 워킹그룹' 참고자료, 사고 위험 비용+정책 비용)으로 추정되고 있다.

유럽 지역 원전 외부 비용 추정과 관련된 대표적인 연구는 William D'haeseleer(2013. 11)의 보고서다. 동 보고서는 유럽연합 지역의 원전 외부 비용에 대한 주요 연구 사례를 종합적, 포괄적으로 조사·분석하고 있어, 원전 정책 담당자와 사업자의 원전 정책 및 프로젝트 의사 결정의 유용한 지침서를 제공하고 있다.

동 연구에서는 원자력 발전의 외부 비용 항목 중 일상적인 원전 운영에 따라 발생하는 외부 비용과 중대 원전 사고 발생에 따른 외부 비용을 기존 연구 사례 비

3) 스웨덴 정부는 1980년대에 원전의 단계적 폐지 정책을 결정함.

〈표 4〉 국내 선행 연구의 외부 비용 추정 결과

| 연구       | 외부 비용 추정 결과                                   |
|----------|-----------------------------------------------|
| 박원석 의원실  | 7.5원/kWh                                      |
| 김승래      | 사고 위험 비용 : 7원/kWh, 제반 사회 갈등 비용: 17원/kWh       |
| 국회 예산정책처 | 사고 위험 비용 : 0.08 ~ 59.8원/kWh + 정책 비용: 3.9원/kWh |
| 이기본      | 사고 위험 비용 + 정책 비용 : 1.80 ~ 5.75원/kWh           |

주 : 사고 위험 대응 비용과 정책 비용의 외부 비용을 중심으로 정리함

〈표 5〉 국회 예산정책처의 국내 원자력 발전의 비용 구성

|        | 세부 항목    | 내역                                                                                                  |
|--------|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 직접 비용  | 발전원가     | 43.02~48.8원/kWh                                                                                     |
| 사회적 비용 | 사고 위험 비용 | • 총사고비 58조~343조원 (0.08~59.8원/kWh)                                                                   |
|        | 안전 규제 비용 | • 안전 규제 강화에 따른 건설비 및 운전 유지비 증가 (신규 원자력발전소 안전 설계 수준에 따라 달라짐)<br>• 후쿠시마 사고 대응 비용 9,194억원 (2014~2015년) |
|        | 입지 갈등 비용 | • 중준위 방폐장 입지 갈등 비용(~2013) 9,395억원<br>• 고준위 방사성폐기물 처분장 입지 갈등 비용                                      |
|        |          | • 고압 송전선로 경과지의 입지 선정 시 갈등<br>• 신규 원전 1기당 송전선로 건설 관련 비용 4,037억원 (신규 원전 부지에 230km 구간 765kV 설치 가정)     |
|        | 정책 비용    | • 2013년 재정사업비 5,169억원(3.9원/kWh)                                                                     |
|        | 미래 세대 비용 | • 고준위 방사성폐기물 처분장의 국토 손실 비용                                                                          |

자료 : 국회예산정책처(2014, 3)

교 분석을 통해 구분하여 제시하고 있다. 일상적인 원전 운영에서 발생하는 외부 비용에는 방사성폐기물 처분 비용, 원전 해체 비용 및 일상적인 원전 운영 중 발생하는 방사성물질의 방출에 따른 인체 및 환경 피해 비용이 포함되는데, 이와 관련된 외부 비용 추정치는  $1\sim4\text{€}_{2012}/\text{MWh}$ 의 범위이며, 이는 다른 발전원의 외부 비용과 비교할 때 매우 낮은 비용 수준이다. 아울러 중대 원전 사고가 발생했을 때의 추정된 외부 비용은 평

균  $1\text{€}_{2012}/\text{MWh}$ , 최소값은  $0.3\text{€}_{2012}/\text{MWh}$ 이며, 최대값은  $3\text{€}_{2012}/\text{MWh}$ 로 제시하고 있다.

독일 IER(2013, 2)는 일상적인 원전 운영에 따라 발생하는 외부 비용을  $3\sim3.5\text{€}_{2010}/\text{MWh}$ 로 추정하고 있다. IER에서 추정된 석탄 발전의 환경 오염 및 인체에 미치는 외부 비용은  $40\text{€}_{2010}/\text{MWh}$ , 가스 발전은  $20\text{€}_{2010}/\text{MWh}$ , 태양광(PV)  $10\text{€}_{2010}/\text{MWh}$ , 풍력 발전은  $2\text{€}_{2010}/\text{MWh}$ 로 풍력 발전을 제외한 발전 형식의 외부



$$\text{엔 /kWh} = \frac{\text{자본비} + \text{운전유지비} + \text{연료비} + \text{사회적 비용}}{\text{발전전력량 (kWh)}}$$

〈그림 2〉 모델 플랜트 발전 비용 추정법

〈표 6〉 일본 후쿠시마 원전 사고 피해 비용 규모(2015년 기준)

(단위 : 조엔)

| 구분          | 보정 전 피해 비용 규모 | 보정 후 피해 비용 규모 | 비중(%) |
|-------------|---------------|---------------|-------|
| 사고 폐로 비용    | 1.8           | 1.3           | 14.75 |
| 배상 비용*      | 5.7           | 4.3           | 46.72 |
| 제염·중간 저장 비용 | 3.6           | 2.7           | 29.51 |
| 기타 비용       | 1.1           | 0.8           | 9.02  |
| 총계          | 12.2          | 9.1           | 100   |

\* 후쿠시마 원전 반경 30km 이내의 인구는 약 17만2천명 거주로 추정

주 1 : 손해배상 비용 중 일과성의 비용에 관해서는 출력과는 관계없이 계상하고 매년의 비용에 관해서 모델 플랜트와 후쿠시마 1호기부터 3호기까지의 출력의 비로 보정

주 2 : 손해배상에는 생명·신체적 손해, 정부에 의한 운항 위험 구역 및 비행 금지 구역의 설정에 관한 손해 등 정부 지시에 의한 손해, 지방 공동 단체 등의 재산적 손해도 포함

비용이 원자력 발전보다 높게 추정되었다.

IER은 독일의 중대 원전 사고 발생에 대한 외부 비용 역시 추정하고 있는데, 추정한 사고 발생의 외부 비용은 원전 사고 등급에 따라 최소  $0.13\text{€}_{2010}/\text{MWh}$ 에서 최대  $0.15\text{€}_{2010}/\text{MWh}$ 로 도출되었고, 등급별 외부비용을 더한 총합은  $0.23\text{€}_{2010}/\text{MWh}$ 로 보고하고 있다.

Lévéque(2013a, b)의 연구에서는 원전 사고 피해 비용을 430billion€, 연간 발전량을 10TWh로 전제하고, 사고 발생 빈도는 과거 다양한 원전 사고 중 노심 손상 사고만을 중대 원전 사고로 전제하여 ( $2 \times 10^{-5}/\text{reactor year}$ ) 원전 사고 외부 비용을 추정하였는데, 추정된 외부 비용은  $0.86\text{€}/\text{MWh}$ 로 소수점 첫째 자리에서 반올림해서 약  $1\text{€}/\text{MWh}$ 로 보고하고 있다.

Rabl(2013)은 중대 원전 사고 발생 시 원자로 상실

비용, 전력 손실 비용, 암유발 비용, 농작물 피해 비용, 피난민 비용 및 사고 주변 정화 비용 등의 원전 사고에 대한 외부 비용을 정량적으로 추정하였는데, 사고 피해 비용은 체르노빌의 비용 360billion $\text{€}_{2010}$ , 사고 발생 확률은 체르노빌과 후쿠시마 원전 사고 발생 년도 주기인 25년을 전제로 25년에 1회의 사고 발생을 가정하였다. 도출한 원전 사고의 외부 비용은 중간값의 경우  $3.8\text{€}_{2010}/\text{MWh}$ 이며, 최저  $0.8\text{€}_{2010}/\text{MWh}$ , 최고  $22.9\text{€}_{2010}/\text{MWh}$ 로 제시하였다.

또 다른 사례로 프랑스 원전 규제 기관 ASN 산하 기술 지원 기관인 IRSN의 연구가 있다. 동 연구에서는 원전 사고를 두 분류로 구분하고 있는데, 첫째는 심각한 원전 사고(Severe accident)이고, 다른 하나는 중대 원전 사고(Major accident)이다. 심각한 원전 사고의 경

$$\frac{\frac{\textcircled{1} \text{ 손해비용 (円)} / \textcircled{2} \text{ 산정근거(로 · 년)}}{\textcircled{3} \text{ 모델 플랜트의 연간 발전 전력량 (kWh)}} = \frac{\textcircled{1} 9.1 \text{ 조 (円)} / \textcircled{2} 4,000 \text{ (로 · 년)}}{\textcircled{3} 73.6 \text{ 억 (kWh)}} = 0.3 \text{ 円} \sim / \text{kWh}$$

〈그림 3〉 일본 원전 사고 위험 대응 비용 추정 결과(발전비용검증위원회, 2015)

〈표 7〉 2011년과 2015년 일본 원전 발전 비용 추정 비교

| 구 분                  | 비용등평가위원회 추정 (2011년)                                                                                                                                                                                                     | 발전비용검증위킹그룹 (2015년)                                                                                                                                                                                                                       |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 추정 방법                | 상호부조법                                                                                                                                                                                                                   | 모델 플랜트 방식 (균등화발전비용법)                                                                                                                                                                                                                     |
| 산정 방식                | <p>【 2011년 비용등검증위원회의 공제방식 】</p> <p>모델 플랜트 기준                      40년</p> $\frac{A) \text{ 손해비용 (円)} / B) \text{ 지불기간 (년)}}{C) \text{ 사업자의 연간 발전 전력량 (kWh)}}$ <p>2010년에 실제로<br/>가동한 50기                      합해서 표현</p> | <p>【 이번 】</p> <p>모델 플랜트 기준                      2011년 비용등검증<br/>위원회에서는<br/>2,000로 · 년</p> $\frac{A) \text{ 손해비용 (円)} / B') \text{ 산정근거 (로 · 년)}}{C') \text{ 모델 플랜트의 발전 전력량 (kWh)}}$ <p>모델 플랜트에<br/>합침                      모델 플랜트 1기</p> |
| 피해 비용 집계액            | 5.8조엔                                                                                                                                                                                                                   | 9.1조엔                                                                                                                                                                                                                                    |
| 사고 발생 확률             | 1회/2,000로 · 년                                                                                                                                                                                                           | 1회/4,000로 · 년                                                                                                                                                                                                                            |
| 사고 위험 대응<br>비용 추정 결과 | 0.5엔/kWh                                                                                                                                                                                                                | 0.3엔/kWh                                                                                                                                                                                                                                 |

우 추정된 피해 비용은 120billion €<sub>2010</sub>이며, 중대 원전 사고의 피해 비용은 430billion €<sub>2010</sub>이다.

원전 사고 발생 확률은 국제원자력기구(IAEA)의 기준인 방사성물질의 대량 조기 방출 빈도(large early release frequency)를 적용하고 있는데, 제3세대 원전의 대량 조기 방출 빈도 10<sup>-5</sup>/reactor year 적용 시 원전 사고의 외부 비용은 0.12€/MWh~0.43€/

MWh로 추정되며, 이보다 보수적인 사고 발생 빈도 10<sup>-5</sup>/reactor year 적용 시 추정된 외부 비용은 1.2€/MWh~4.3€/MWh이다.

후쿠시마 원전 사고의 직접 피해 당사자인 일본 역시 2011년 ‘비용등검증위원회’와 2015년 ‘발전비용검증위원회’를 통해 외부 비용을 포함한 원전의 발전 비용을 추정하고 있다. 2011년 ‘비용등검증위원회’의 전원별



발전 비용 추정 결과를 업데이트하기 위해 구성된 '발전 비용검증위원회'의 '발전비용검증위킹그룹'에서는 장기 에너지 수급 전망에 참고가 되는 전원별 발전 비용을 재추정하였다. 추정 방법은 OECD, EIA(미국 에너지통계국) 등 전 세계적으로 널리 사용하는 모델 플랜트 방식(균등화 발전 비용법)을 이용하였다.

원전 비용 항목으로는 발전과 직접 관계된 비용뿐 아니라 폐로 비용, 핵연료주기 비용(방사성폐기물 최종 처분을 포함) 등 미래에 발생하는 비용, 사고 대응 비용(손해배상, 제염을 포함), 전원입지교부금·문주 등의 연구개발 정책 비용을 포함하였다. 2015년에 재산정된 사고 피해 비용 규모는 사고 폐로 비용 1.8조엔, 배상 비용 5.7조엔, 제염·중간 저장 비용은 3.6조엔, 그 외 비용 1.1조엔으로 총 12.2조엔이며 이를 출력 규모, 지역성, 인구 비율로 보정하여 도출한 최종 피해 규모는 9.1조엔(86조원)이다.

일본 '발전비용검증위킹그룹'에서 전제한 원전 사고 발생 확률은 추가 안전 대책 시행으로 각국 규제기관과 국제기관의 안전 목표 기준, 안전 대책 실시 후의 위험 평가 개선(5,200로·년에 1회 → 12,100로·년에 1회 : 약 2.4분의 1로 저하) 등을 종합적으로 고려하여, 2011년 '비용검증위원회'의 전제값인 '2,000로·년'의 절반 수준인 '4,000로·년'을 적용하였다. 발전 플랜트 이용률은 70%로 전제하였다. 이상의 전제들을 근거로 도출한 일본 원전의 사고 위험 대응 비용은 0.3엔/kWh이다.

이 결과는 2011년 '비용검증위원회'에서 도출한 결과보다 낮은 수치를 보인다. 2011년 추정에서는 피해 비용을 5.8조엔으로 전제하고 있는데, 이는 2015년 피

해 비용 추정액보다 낮은 수치이다. 그럼에도 불구하고 2011년 원전 사고 위험 대응 비용 대비 2015년 비용이 낮게 추정된 이유는 추정 방식이 다르기 때문이다. 2011년 추정에서는 모델 플랜트 방식이 아닌, 상호부조법을 적용하였는데, 이는 원전 피해 비용을 모든 원전 사업자가 40년 동안 보상하는 방식을 의미한다. 그러나 이 방식은 다른 전원 간의 발전 비용 비교는 불가능하고, 아울러 원전 발전량이 많은 국가의 경우, 외부 비용이 상대적으로 낮게 추정되는 단점이 존재한다. 결과적으로 '발전비용검증위원회'에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 국제적으로 널리 활용되고 있는 모델 플랜트 발전 비용 추정 방법을 차용하여 원전 외부 비용을 추정하였다.

### 국내 원전 외부 비용 추정 : 사고 위험 대응 비용 측면

국내 원전 사고의 외부 비용(사고 위험 대응 비용)은 일본 사례를 벤치마킹하여 모델 플랜트 방식으로 추정할 수 있다. 다만, 현재까지 국내 원전 사고 발생에 따른 피해 규모 산정 연구가 없는 실정이므로, 일본의 피해 비용 규모를 국내의 인구 밀도와 GDP 수준 등을 고려하여 조정하는 방식으로 피해 규모를 산정하고, 이 수치를 외부 비용 산정의 전제값으로 적용한다. 향후 국내 원전 사고 발생에 대한 포괄적인 피해 비용 산정 연구를 통해 이와 같은 추정의 한계를 극복할 필요가 있다.

국내 원전 사고 위험 대응 비용 추정 전제는 <표 8>에 정리하고 있다. 원전 사고 피해 비용은 86조 원<sup>4)</sup>으로 전제한다. 일본 피해 비용 규모(9.1조엔)를 국내의

4) 일본 피해비용 추산액인 9.1조 엔을 환율 940원/100엔으로 환산한 수치임.

〈표 8〉 주요국 인구 밀도 및 1인당 GDP(2013년 기준)

| 지역/국가          | 인구 밀도 (명/km <sup>2</sup> ) | 1인당 GDP (US\$, Current) | 중대 원전 사고 경험 |
|----------------|----------------------------|-------------------------|-------------|
| European Union | 119.68                     | 34,300                  |             |
| Japan          | 349.29                     | 38,634                  | 후쿠시마 원전 사고  |
| United States  | 34.56                      | 52,980                  | TMI 원전 사고   |
| France         | 120.42                     | 42,631                  | 원전 사고 없음    |
| Ukraine        | 78.52                      | 4,030                   | 체르노빌 원전 사고  |
| Korea, Rep.    | 515.87                     | 25,998                  | 원전 사고 없음    |

\* 자료 : WorldBank(2015, 08, 05), World Development Indicators, <http://data.worldbank.org/indicator>.

〈표 9〉 국내 원자력 발전 사고 위험 대응 비용 추정 전제

| 추정 방법                  | 상호부조법                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 모델 플랜트 방법                        |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| 피해 비용 전제 <sup>5)</sup> | 일본 피해비용 동일 적용 : 9.1조엔 (약 86조원, 환율 940원/100엔)<br>※ TMI 원전사고: 약 2조원 / 체르노빌 사고: 체르노빌은 265조원 (2011년 환율기준)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                  |
| 연간 발전량                 | 2014년 원전 총설비 용량 기준(20,716MW)<br>이용률 80, 85, 90%                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 이용률 80, 85, 90% / 1,000MW 원전 발전량 |
| 원전사업자 지불 기간            | 40년                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 40년(설계수명)                        |
| 사고 발생 빈도 전제            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                  |
| 확률론적 빈도                | A) $1.0 \times 10^{-5}$ : IAEA가 설정하고 있는 기설치된 원자로의 조기 대규모 방출 사고에 대한 안전 기준이며, 세계에서는 230년에 한 번만 severe accident가 발생하는 확률<br>B) $1 \times 10^{-4}$ : IAEA가 설정하고 있는 노심 손상 빈도(자료: INSAG-12(IAEA) <sup>6)</sup> )                                                                                                                                                                                                                     |                                  |
| 과거 실적에 근거한 사고 발생 빈도    | A) $3.5 \times 10^{-4}$ : 세계의 원자력발전소의 운전 실적에 기초하는 것임.<br>14,353로 · 년에 5번의 사고 발생이 측정되었음.<br>일본에서는 57년에 1번, 세계에서는 10년에 1번 severe accident가 발생하는 것에 상응<br>B) $2.0 \times 10^{-3}$ : 일본의 원자력발전소의 운전 실적에 기초하는 것임.<br>1,494로 · 년에 3번의 사고 발생이 측정됨.<br>일본에서는 10년에 한 번, 세계에서는 거의 1년에 1번으로 severe accident가 발생하는 것에 상응하는 것으로 매우 보수적인 전제임<br>※ 일본의 원자로 50기, 전 세계 원자로 430기 전제<br>C) $1 \times 10^{-4}$ : 일본 '발전비용검증위킹그룹'이 적용한 사고 발생 빈도 전제임 |                                  |

<sup>5)</sup> 일본 원전 사고 피해 비용 규모의 국내 적용 시 원전 입지 특성 및 인구 밀도 등을 고려하지 않음.

<sup>6)</sup> IAEA(1999, 10), Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants 75-INSAG-3 Rev.1, INSAG-12([http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/P082\\_scr.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/P082_scr.pdf)).



인구 밀도 비율로 비례하게 산정한 피해비용규모는 약 127조원이며, 1인당 명목 GDP까지 포함하여 조정한 피해 비용 규모는 약 85조원이다. 만일 일본 원전 사고 피해 비용 세부 항목 중 배상 비용(총 피해 비용의 46.72%, <표 6>)만을 국내 인구 밀도 비율로 조정하여 재추정한 피해 비용 규모는 105조원 수준이며, 1인당 명목 GDP까지 포함하여 조정하여 집계한 피해 비용은 86조원으로 일본 피해 비용 규모와 유사하다. 보다 정확한 피해 비용 규모 추산은 원전 주변 지역의 인구 밀도와 해당 지역의 부동산 가치 등 배상 기준에 대한 추가 연구로 보완될 필요가 있다.

모델 플랜트의 발전량은 1,000MW 원전의 이용률 80, 85, 90%를 고려하였고, 원전 설계수명은 40년이며, 사고 발생 확률은 확률론적 빈도와 과거 실적에 근거한 사고 발생 확률 등 총 5개의 확률을 적용하였다.

모델 플랜트 방식과 <표 9>의 전제를 이용하여 도출한 원전 사고 위험 대응 비용 추정 결과에 따르면 원전 사고 위험 대응 비용은 사고 발생 빈도 기준과 이용률에 따라 최소 0.1091원/kWh에서 최대 24.5434원/kWh로 나타난다.

세계적으로 공감대가 가장 큰 ‘세계 원전 운영 기준’ 사고 발생 빈도를 이용하여 추정한 외부 비용은 3.8179원/kWh~4.2951원/kWh 수준이다. 이는 ‘제7차 전력수급기본계획’에서 제시한 원전 사고 위험 대응 비용 5.72원/kW, ‘제2차 에너지기본계획’의 원전 외부 비용 추정치인 5.75원/kWh보다는 낮은 수준이지만, 유럽 지역의 원전 외부 비용을 종합적으로 연구한 William D’haeseleer(2013, 11)의 결론(중대 원전 사고 발생에 대한 외부 비용은 평균 1€<sub>2012</sub>/MWh, 최소 0.3€<sub>2012</sub>/MWh이며, 최대 3€<sub>2012</sub>/MWh)과는 유사한 수준이다.

## 결론

원칙적으로 외부 비용을 발생시키는 모든 발전원에 대해서는 종합적인 연구 분석을 통해 관련 외부 비용을 정량화하고, 교정조세 수단으로 가격 내재화하는 것이 자원의 효율적 배분을 달성하는 이상적인 방향이다. 단, 현실적으로 외부 비용에 대한 명확한 정의나 산정 기준, 타전원과의 비교 검토 등이 이루어지지 않고 있고, 기존 선행 연구의 결과마다 원전 외부 비용 항목과 추정결과에서 큰 차이가 존재하며, 개별 외부 비용 항목에 대한 이론적 근거가 부족하다. 따라서 원전 외부 비용 내재화 논의 이전에 먼저 원전 사고 위험 대응 비용 및 정책 비용 등 외부 비용에 대한 객관적이고 정확한 추정 연구가 선행되어야 한다.

원전에 대한 외부 비용 논의는 국제적 기준과 타전원과의 비교 검토, 원전 이용에 따른 긍정적 효과 등이 종합적으로 반영된 상태에서 신중한 사회적 협의와 합의를 통해 도출되어야 하며, 이렇게 도출된 외부 비용은 그 성격에 부합하는 조세의 형태로 반영하여 내재화시켜야 한다. 이를 위해 원전 외부 비용 내재화에 대한 이론적 근거나 타당성 확보, 외부 비용의 정의 수립 및 산정절차, 조세 성격과 형평성 문제, 조세 규모와 부과 방식 등 다양한 해결 과제가 선행되어야 한다.

원전을 포함한 전원별 외부 비용 추정과 내재화 논의는 언제가, 누군가는 반드시 수행해야 할 과제이다. 이에 각계 전문가와 시민단체로 구성된 ‘범사회적 논의기구’ 구성을 통한 중·장기 종합연구가 절실히 필요하다고 판단된다.

전원별 외부 비용 종합 연구에서는 전원별 외부 비용 뿐만 아니라 외부 편익도 함께 고려하여야 한다. 이는 이상적 대안과 현실적 대안 간의 절충점을 찾는 데, 매우 중요한 요인으로 작용하기 때문이다. 🍌

## 〈참고 문헌〉

- 국회예산정책처(허가형), 2014. 3, 원자력 발전비용의 쟁점과 과제, 사업평가현안분석 제50호.
- 김승래, 2013. 9, 에너지세제 현황과 개편방향; 에너지 가격체계 진단과 개선, 경제인문사회연구회 정책현안 종합연구 시리즈, pp 63-98.
- 박원석 의원, 2013. 5, 탄소세 도입을 위한 정책 방향 및 설계: 기후정의세 신설을 중심으로, 진보정의당 박원석 의원 국회 발제문.
- 산업통상자원부, 2014. 1, 제2차 에너지기본계획.
- 산업통상자원부, 2015. 7, 제7차 전력수급기본계획(2015~2029).
- 에너지기본계획 원전 민관워킹 그룹, 2013, 민관워킹 그룹 보고서.
- 일본 경제산업성 자원에너지청 발전비용검증 워킹그룹, 2015. 05. 26, 장기에너지 수급전망소위원회에 대한 발전비용 등의 검증에 관한 보고, [http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic\\_policy\\_subcommittee/#cost\\_wg](http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/#cost_wg).
- 일본 에너지환경회의 비용등검증위원회, 2011. 12. 19, 비용검증위원회보고서.
- 조성진·박찬국, 2015, 원자력발전의 경제적·사회적 비용을 고려한 적정 전원믹스 연구-3차년도, 에너지경제연구원 2015년도 기본보고서.
- 조성진, 2015. 9, 원자력발전 외부비용의 이해, 에너지경제연구원 개원 29주년 기념세미나 발표자료.
- Ari Rabl & Veronika, A. Rable, 2013. 6, External costs of nuclear: Greater or less than the alternatives?, Energy Policy Vol 57, pp 575-584.
- François Lévêque, 2013. 4, Estimating the cost of nuclear power: benchmarks and uncertainties, Working Paper 13-ME-01, Interdisciplinary Institute for Innovation.
- François Lévêque, 2013. 7, The risk of a major nuclear accident: calculation and perception of probabilities, Working Paper 13-ME-02, Interdisciplinary Institute for Innovation.
- IAEA, 1999. 10, Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants 75-INSAG-3 Rev.1, INSAG-12, [http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/P082\\_scr.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/P082_scr.pdf).
- IRSN, Ludivine Pascucci-Cahen, Momal Patrick, 2012, Ludivine Pascucci-Cahen & Momal Patrick, Massive radiological releases profoundly differ from controlled releases, EUROSAFE.
- OECD/NEA, 2003, Nuclear Electricity Generation: What Are the External Costs?.
- Preiss, P., S. Wissel, U. Fahl, R. Friedrich, A., 2013. 2, Die Risiken der Kernenergie in Deutschland im Vergleich mit Risiken anderer Stromerzeugungstechnologien, IER, Arbeitsbericht/Working Paper.
- William, D'haeseleer, 2013. 11, Synthesis on the Economics of Nuclear Energy, Study for the European Commission, DG Energy Final Report.
- WorldBank homepage, World Development Indicators, <http://data.worldbank.org/indicator>, 2015.
- WorldBank homepage, <http://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.PC>, 2015.