

Review on Studies for External Cost of Nuclear Power Generation

원자력발전 외부비용 연구들에 대한 검토

Byung Heung Park^{1*} and Won Il Ko²

¹ Korea National University of Transportation, 50 Daehak-ro, Chungju-si, Chungbuk, Republic of Korea

² Korea Atomic Energy Research Institute, 111 Daedeok-daero 989 beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

박병흥^{1*}, 고원일²

¹ 한국교통대학교, 충북 충주시 대학로 50

² 한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

(Received May 12, 2015 / Revised August 10, 2015 / Approved September 8, 2015)

External cost is cost imposed on a third party when producing or consuming a good or service. Since the 1990s, the external costs of nuclear powered electricity production have been studied. Costs are a very important factor in policy decision and the external cost is considered for cost comparison on electricity production. As for nuclear fuel cycle, a chosen technology will determine the external cost. However, there has been little research on this issue. For this study, methods for external cost on nuclear power production have been surveyed and analyzed to develop an approach for evaluating external cost on nuclear fuel cycles. Before the Fukushima accident, external cost research had focused on damage costs during normal operation of a fuel cycle. However, accident cost becomes a major concern after the accident. Various considerations for external cost including accident cost have been used to different studies, and different methods have been applied corresponding to the considerations. In this study, the results of the evaluation were compared and analyzed to identify methodological applicability to the external cost estimation with nuclear fuel cycles.

Keywords: Cost evaluation, External cost, Accident cost, Economics

*Corresponding Author.

Byung Heung Park, Korea National University of Transportation, E-mail: b.h.park@ut.ac.kr, Tel: +82-43-841-5226

ORCID

Byung Heung Park <http://orcid.org/0000-0002-4808-5811>

Won Il Ko

<http://orcid.org/0000-0003-4212-0716>

외부비용은 재화나 서비스가 생산 또는 소비되는 과정에서 제3자에게 부과되는 비용이다. 원자력 발전을 통한 전력생산에도 외부비용이 발생하며 이들에 대한 연구가 1990년대부터 진행되어 왔다. 비용은 정책결정에 중요한 요소로 전력 생산에 대한 비용 비교를 위해 외부비용이 고려되고 있다. 핵연료주기에서도 선택에 따라 다른 외부비용이 발생되지만 이에 대한 연구는 진행되고 있지 않다. 본 연구에서는 핵연료주기 외부비용 평가 방법 개발을 위해 원자력 발전에 대한 외부비용 평가 방법을 조사하고 분석하였다. 후쿠시마 사고 이전에는 외부비용 연구들은 정상 운전 상태에서의 손상 비용에 초점을 두었다. 그러나 사고 이후 사고비용이 주요 주제가 되었다. 사고비용을 포함한 외부비용 범위는 여러 연구들에서 다양하게 사용되었으며 범위에 맞춰 다른 방법들이 적용되었다. 본 연구에서는 이러한 결과들이 비교되었으며 핵연료주기에 따른 외부비용 추산에 방법적 적용성 판단을 위해 분석되었다.

중심단어: 비용평가, 외부비용, 사고비용, 경제성

1. 서론

외부효과는 재화 또는 서비스가 거래될 때 제3자에게 발생하는 효과로, 일반적으로는 생산과 소비에 직접적인 연관이 없기 때문에 이에 의한 비용은 시장에서 가격에 포함되지 않는다. 외부비용은 이와 같은 상황을 고려하여 제3자가 입는 손해를 비용으로 추산하여 시장가격에 추가적으로 포함시킬 목적으로 연구되고 있다.

전력 역시 재화의 일종으로 전력을 생산하기 위해 사용된 일차 에너지에 의해 사회나 환경에 대한 영향이 발생되어 전파된다. 전력 생산을 중심으로 하는 에너지 시스템들에서 수반되는 보건 및 환경 위험들에 대한 연구들은 1970년대부터 진행되어 왔으며 이 후 에너지와 연관된 환경적 문제들의 이해도 향상에 기여하였다[1-4]. 전력 생산의 경제성 평가에서는 전통적으로 이러한 외부효과에 의한 외부비용이 포함되어 있지 않았으나 1990년대부터는 외부비용을 고려하여 전력 생산 방식에 대한 경제성 비교를 위한 연구가 본격적으로 진행되었다[5,6]. 외부비용이 포함된 경제성 비교는 에너지 정책 결정에 중요한 판단 근거가 된다. 그러나, 이러한 중요성에도 불구하고 외부효과의 범위, 비용의 정량화 등에서 다양한 접근 방법이 가능하기 때문에 단일화된 방법으로 공통적인 결과를 도출하기는 어려우며 아직도 다양한 연구가 진행되는 분야이다. 일부 연구들은 외부비용 범위를 단일 국가 또는 특정 지역으로 한정시킴으로써 일반화시키기 어렵다는 한계를 우회하였다[7-10]. 원자력과 관련된 외부비용 평가는 외부비용의 정의와 정량화부터 대체 에너지와의 비교 등 다양한 목적

으로 진행되어왔다[11-13]. 국내에서는 일본 후쿠시마 원전 사고 이 후 원전에 안전성에 중점을 둔 연구들이 시도되었다.

원자력 발전에 대해서도 어떠한 핵연료주기를 선택하느냐에 따라 경제성이 다르게 나타난다. 유럽에서 진행된 원자력 발전의 외부비용 평가는 유럽의 핵연료주기 즉, 재처리를 기준으로 진행되었다. 그러나, 핵연료주기의 선택에 따라 원자력 발전의 외부비용이 영향을 받게 되며 국내에서 고려될 수 있는 핵연료주기에 대해서는 자체적인 연구가 필요하다.

본 연구에서는 핵연료주기의 경제성 평가에 필요한 외부비용 연구를 위해 기존 원자력 발전에서 발생하는 외부비용 평가 방법을 분석하고 정리하였다. 앞서 언급한 것과 같이 외부비용 평가 방법은 연구의 목적에 따라 연구 범위와 방법들이 다르기 때문에 이를 분석하면 핵연료주기 외부비용 평가에 필요한 부분과 추가적인 부분을 도출할 수 있어 핵연료주기 외부비용 평가의 기초를 마련할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 외부비용(External cost)의 개념

외부비용(external cost)을 이해하기 위해서는 외부효과(externality)가 먼저 설명되어야 한다. 외부효과는 경제학에서 사용되는 용어로 한 경제주체의 행위가 제3자의 경제적 후생에 영향을 미치지만 그에 대한 금전적 보상은 시장에서 고려되지 않는 현상을 설명하기 위해 도입되었다. 예를 들면, 화석연료의 연소로 발생하는 대기 오염은 산성비 등을 통해 환경적 작용으로 주변 농작물에 악영향을 미치지만 화석연료의

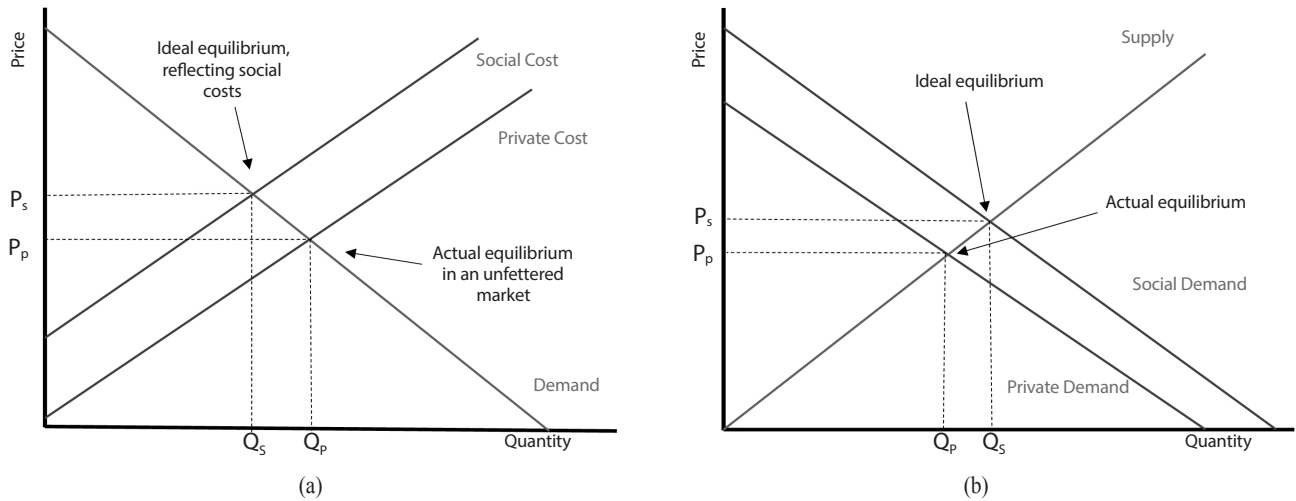


Fig. 1. Supply-demand curve changes due to (a) external cost and (b) external benefit.

연소를 통해 생산된 재화의 시장 거래 가격에는 이러한 영향에 대한 비용이 고려되고 있지 않게 된다. 따라서 시장에서 이 재화의 가격에 외부효과를 감안한 비용이 포함되지 않는다면 낮은 시장 가격으로 인해 거래가 원활하게 이루어질 수 있으므로 시장을 통한 생산과 소비가 제3자가 지닌 경제적 가치를 저해시키는 비효율적인 결과를 가져오게 된다. 때로는 반대의 경우도 발생하여 양봉장 옆의 사과 농장의 수확이 증가하는 것과 같이 의도하지 않게 제3자의 경제적 이익을 유발하는 경우도 있다.

외부효과는 제3자에게 해를 끼치는 경우 외부비용(external cost)으로, 이익을 증대시키는 경우는 외부편익(external benefit)으로 구분될 수 있다. 외부비용은 시장에서 거래되는 사적비용(private cost)에 더해져 (예를 들면, 환경분담금과 같은 세금) 가격을 상승시키고 시장에서 거래량을 낮추는 효과를 기대하여 도입된다. Fig. 1(a)와 같이 수요-공급 곡선의 공급 비용에 사적비용만 포함되는 경우 가격은 P_p 로 결정되어 Q_p 만큼의 재화가 거래되지만 사회비용(social cost)에 외부비용이 포함되는 경우 공급 비용이 증가하여 가격은 P_s 로 상승하고 거래량은 Q_s 로 감소하게 된다. 반면 외부효과가 긍정적인 영향을 미치는 경우 시장에서 반영되지 않는 외부편익을 더한다면 (예를 들면, 보조금 형태로 소비자에게 지급) 높은 가격에서도 소비될 수 있는 여력이 발생하므로 거래량이 증가하게 된다. Fig. 1(b)는 이를 나타낸 것으로 외부편익이 없을 경우 사적수요(private demand)와 공급이 만나는 P_p 의 가격에서 Q_p 만큼이 거래되는 반면 사적수요에 외부편익을

더해 사회수요(social demand)로 수요 곡선을 이동시키는 경우 더 높은 가격인 P_s 에서도 구매 여력이 발생하므로 Q_s 에서 거래가 이루어져 거래량이 증가되는 효과를 얻게 된다.

일반적으로, 외부효과를 고려한 가격은 시장에서 결정되지 않으며 외부효과를 분석하여 정량화 한 후 정부 등 관리기관이 부과하는 방식으로 운용된다. 이러한 과정을 외부비용의 내부화(internalize)로 부르기도 한다.

3. 원자력발전 외부비용에 대한 국외연구

3.1 ExternE 모델

전력산업의 외부비용 측정에 대한 연구는 유럽 EC를 중심으로 진행되어 왔다. 유럽 국가들은 전력산업의 외부비용 계산의 복잡함과 어려움으로 인해 단일 국가가 단독으로 연구를 추진하는 대신 유럽 9개국이 공동으로 외부비용 추정을 위한 ExternE 모델을 개발하여 관련 연구를 수행해 왔다.

ExternE는 외부비용 중 환경 외부비용 계산을 위해 90년대 초반부터 2005년까지 진행되었다. 이를 위해 영향경로 해석(IPA, Impact Pathway Analysis) 방법을 사용하여 Eco-Sense라는 모델로 구현하였다.

IPA 방법은 외부비용을 통화 가치로 표현하기에 앞서 대기, 토양, 수질의 변화를 유발시키는 원천으로부터 물리적 영향에 이르는 과정을 따라 환경적 편익과 손실을 추산하는

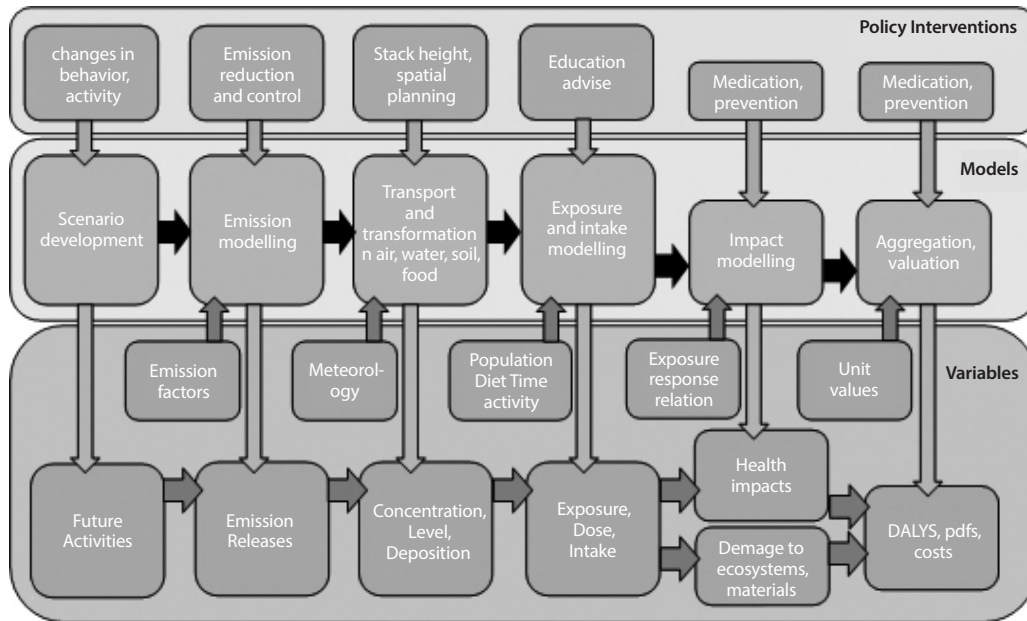


Fig. 2. Stages in IPA method[14].

상향식 접근법이다. 오염물질 배출의 결과를 예로, IPA 방법의 주요 단계들은 Fig. 2와 같다.

Fig. 2를 살펴보면 중앙의 ‘모델(models)’을 중심으로 분석은 좌측에서 우측으로 순차적으로 진행되어 ‘시나리오 개발(scenario development)’부터 ‘가치평가(valuation)’에 이르는 과정으로 단계가 구성되어 있다. 상단의 ‘정책조정(policy intervention)’과 하단의 ‘변수(variables)’가 모델의 각 진행 단계에서 필요한 입력 값들을 제공하고 일부 변수들은 모델에서 생성되어 변수 부분으로 공급된다.

오염물질 배출에는 기준(reference) 시나리오와 분석을 위한 상황(case) 시나리오의 두 시나리오가 필요하다. 기준 시나리오로부터 오염물질의 기본 농도를 계산하고 상황 시나리오에서 발생된 오염물질의 차이를 통해 배출된 주어진 상황에 의해 발생된 오염물질에 의한 물리적 영향을 평가하게 된다. 이 때 환경적 영향을 받는 지형적 범위로 유럽을 설정하면 전 유럽에 걸친 영역에서의 모델링이 필요하다. 다음 단계에서는 노출-반응(exposure-response) 모델들이 사용되어 오염의 수준에 따른 물리적 영향을 유도한다. 마지막 단계에서 복지 이론에 따른 개인의 복지 손실, 농작물의 시장가격 손실 등이 평가되고 이러한 물리적 영향은 통화 가치로 추산된다. 시장에서 가격이 결정되지 않는 손실은 개인의 선호도에 기초한 지불의사(willingness-to-pay) 방법으로

로 정해진다. ExternE에서는 모든 외부 영향들을 다루려고 했으나 실제 현상과는 차이가 발생되며 불확도 역시 존재하게 된다. ExternE에서는 이를 인정하며 IPA를 사용하여 정량화되는 환경영향과 함께 지구온난화 영향, 사고, 에너지 안보를 포함하였다.

ExternE 연구의 결과로 석탄, 석유, 가스, 원자력 등의 방법으로 전력을 생산할 때 발생하는 외부비용이 발표되었다. 원자력의 경우 핵연료 주기의 모든 단계에서 발생하는 손상비용(damage cost)의 합이 할인율 0, 3, 10%일 때 각각 2.5, 0.1, 0.05 mECU/kWh로 계산되었다[14]. 할인율이 0%인 경우 주된 비용은 재처리 단계에서 발생하나 할인율이 높아 질수록 원자로 건설에서 발생하는 비용이 상대적으로 증가되는 결과를 제시하였다. 네 가지 사고 시나리오에 대한 비용 추산 결과 가장 많은 양의 오염물질을 방출하는 경우 0.1 mECU/kWh, 가장 적은 양을 방출하는 경우 0.002 mECU/kWh를 비용으로 산출하였다.

그러나, 전력산업의 외부비용은 대부분 환경효과, 정책비용 추정, 심리·사회적 비용 등의 정성적인 요인들을 고려해야 하기 때문에 ExternE 연구에 있어서도 정확한 추정에 있어 많은 한계점을 드러내 왔다. 이로 인해 유럽 국가들의 외부비용 측정 연구도 현재까지는 명확한 수치를 산정하기 어려운 정성적 요인은 배제하고 비용을 추정해 오고 있다.

3.2 CASES (Cost Assessment for Sustainable Energy Systems)

1984년부터 시작된 EU 회원국 공동 연구개발 사업인 EU Framework Programme(FP)의 제6차(FP6) (2002년~2006년) 프로그램의 일환으로 진행된 CASES(Cost Assessment for Sustainable Energy Systems) 프로그램은 발전방식에 따른 비용산정에 외부비용을 포함한 주요 연구 중 하나이다. 연구의 목적은 다음과 같이 세 가지로 요약된다.

- 2030년까지의 에너지 시나리오 하에서 EU-25 국가들과 일부 비 EU 국가들의 국가 수준에서 상이한 에너지 원으로부터 에너지 생산의 내부 및 외부 비용에 대한 일관성 있고 상세한 추산치 확보
- 전체 비용 자료를 고려한 에너지 사용 효율 향상을 위한 정책 옵션 평가
- 연구 결과를 에너지 분야 생산자와 사용자 그리고 정책 결정 집단으로 전파

위에 정리된 연구 목적 달성을 위해 Fig. 3과 같은 워크 패키지(WP, work package)를 구성하였다. 비용추산 부분에서 외부비용에는 인간과 인간 이외에 연관된 비용과 더불어 특징적으로 에너지 안보 비용을 포함하였다[15].

비용분석의 최종단계인 WP7의 결과로 제시된 발전원별 총비용비교는 2005~2010년 기간을 기준으로 할 경우 Fig. 4와 Fig. 5로 나타났다. Fig. 4는 원자력과 화석연료를 사용하는 발전원들의 비용 비교이며 Fig. 5는 신재생에너지원들의 비용을 나타내고 있다. 전체적으로 외부비용은 화력 발전에서 큰 비중을 차지하고 있으며 신재생에너지를 이용한 발전에서는 거의 나타나지 않고 있다. 그러나, 총 비용을 비교하였을 경우 원자력이 가장 비용이 낮을 것으로 제시되고 있다.

4. 국내연구

원자력 발전과 관련된 외부비용에 대한 국내 연구는 비교적 최근에 관심을 받게 되었다. 외부비용에 대한 연구는 공통적으로 일본 후쿠시마 원전 사고 이후 고조된 원자력 안전에 대한 관심을 계기로 주목하기 시작하였으며 사적비용 이

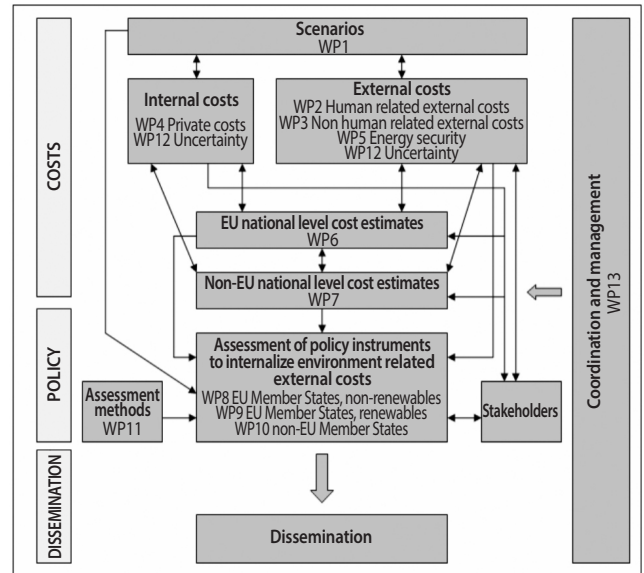


Fig. 3. CASES work package[15].

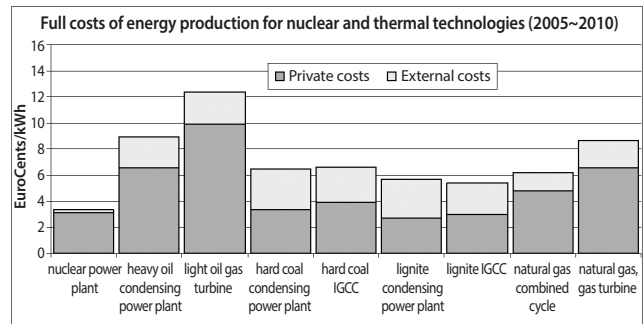


Fig. 4. Total unit cost of nuclear and fossil fuel power generation[15].

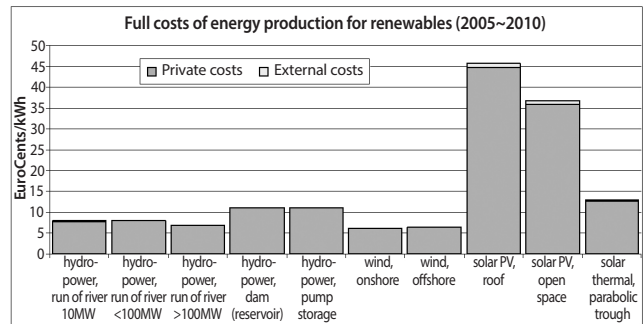


Fig. 5. Total unit cost of renewable energy power generation[15].

외에 외부비용을 고려하였으며 외부비용 중 특히 안전성에 관련된 비용을 포함하여 원자력 발전의 경제성 평가에 활용하기 위한 시도로 진행되었다.

Table 1. Damage costs from severe NPP accident[16]

| | TMI (U.S) | Chernobyl (Russia) | Fukushima (Japan) |
|---|------------------------------------|--------------------------------------|--|
| Year | 1979 | 1986 | 2011 |
| No. of unit | 1 | 1 | 4 |
| Type | PWR | RBMK | BWR |
| Net capacity (MW) (Installed capacity, MW) | 880 (959) | 925 (1,000) | Unit 1: 439 (460) Unit 2: 760 (784) Unit 3: 760 (784) Unit 4: 760 (784) |
| Service time | 4 months | 8 years | 30~40 years |
| Accident rating | 5 | 7 | 7 |
| Restoration cost (Year 2011 basis) | 1.0 billion USD (2 trillion KW) | 235 billion USD (265 trillion KW) | > 5.8 trillion JPY (> 81 trillion KW) |

Table 2. Accident risk cost with availability under damage compensation system for mutual aid[16] (KW/kWh)

| Damage cost | Utilization(%) | | | |
|--------------------------------|----------------|-------|-------|-------|
| | 90 | 80 | 70 | 60 |
| TMI (2 trillion KW) | 0.34 | 0.38 | 0.44 | 0.51 |
| Fukushima (81 trillion KW) | 13.72 | 15.43 | 17.64 | 20.58 |
| World average (58 trillion KW) | 9.82 | 11.05 | 12.63 | 14.74 |

4.1 에너지경제연구원

에너지경제연구원은 2013년도 원자력 발전을 포함하는 적정 전원믹스에 대한 연구 보고서[16]에서 전력산업의 사회적 비용을 정의하고 원전에 대한 사고위험 대응 비용을 계산하였다. 비용 추정 방법으로 1) 상호부조를 고려한 손해 배상제도의 사고위험비용 추정, 2) 손해기대치 접근법을 사용하였다.

상호부조를 고려한 손해배상제도의 사고위험비용 추정 방법은 과거 발생했던 세계 3대 원전사고를 Table 1과 같이 고려하여 원전 1기당 평균 피해비용을 56조원으로 추정하고 국내 원전설비 규모와 이용률에 따른 연간발전량(60, 70, 80, 90%에서 각각 984, 1148, 1312, 1476억kWh)을 구한 후 각 원전 사고에 의해 발생하는 비용 또는 평균비용을 연간발전량으로

Table 3. NPP damage cost with accident probability[16] (KW/kWh)

| Utilization (%) | Reference | Accident probability | TMI | Fukushima | Average |
|-----------------|-----------|----------------------|--------|-----------|---------|
| 90 | IAEA | 0.00001 | 0.0025 | 0.1027 | 0.0736 |
| | World NPP | 0.00035 | 0.0888 | 3.5959 | 2.5748 |
| | Japan NPP | 0.002 | 0.5074 | 20.5479 | 14.7133 |
| 80 | NRC | 0.0001 | 0.0254 | 1.0274 | 0.7357 |
| | IAEA | 0.00001 | 0.0029 | 0.1156 | 0.0828 |
| | World NPP | 0.00035 | 0.0999 | 4.0454 | 2.8967 |
| 70 | Japan NPP | 0.002 | 0.5708 | 23.1164 | 16.5525 |
| | NRC | 0.0001 | 0.0285 | 1.1558 | 0.8276 |
| | IAEA | 0.00001 | 0.0033 | 0.1321 | 0.0946 |
| 70 | World NPP | 0.00035 | 0.1142 | 4.6233 | 3.3105 |
| | Japan NPP | 0.002 | 0.6523 | 26.4188 | 18.9172 |
| | NRC | 0.0001 | 0.0326 | 1.3209 | 0.9459 |

나눔으로서 Table 2와 같이 단가를 계산하였다.

이 방법은 사고 발생의 확률을 고려하지 않고 해당 국가 내의 한 기 이상의 원전에서 사고가 발생하는 것을 전제로 계산하는 것으로 해당 국가의 원전기수가 많아지면 생산되는 전력량이 증가되므로 단위 kWh당 사고비용이 낮아지는 효과가 발생된다. 따라서 대략적인 가격 추산으로 의미를 지니지만 엄밀한 결과로 인정하기는 어려운 방법이다.

손해기대치 접근법은 손해비용과 사고발생빈도 그리고 모델 플랜트의 연간발전량에 대한 값을 적용하여 비용을 추정하는 방법으로 다음과 같은 중대사고 발생 확률을 고려하였다.

- 1.0×10^{-5} /년: 국제원자력기구(IAEA) 및 미국 NRC가 설정하고 있는 기설치된 원자로의 중대사고 발생빈도 10만로년에 1번의 사고 발생 확률.
- 3.5×10^{-4} /년: 세계의 원자력발전소의 운전실적에 기초하는 것으로 14,353로년에 5번의 사고발생이 측정됨. 일본에서는 57년에 1번, 세계에서는 10년에 1번 중대사고가 발생하는 것에 상응함.
- 2.0×10^{-3} /년: 일본의 원자력발전소의 운전실적에 기초, 1,494로년에 3번의 사고발생이 측정. 일본에서는 10년에

Table 4. Government funds for nuclear power in 2011[17] (million KW)

| Account | Detail | | Implementation entity |
|--------------------------------------|--|---------|-----------------------|
| Powder industry foundation fund | Support for NPP community | 65,358 | KHNP |
| | Public relation on nuclear power | 9,400 | KONEPA |
| | Nuclear based core technology development | 94,108 | KETEP |
| | International joint research on energy (nuclear) | 1,489 | KETEP |
| | Nuclear export foundation | 4,400 | MKE |
| | Subtotal | 163,222 | |
| Energy and resources special account | KAERI research support | 115,744 | KAERI |
| | Subtotal | 115,744 | |
| General account | KINS research support | 22,221 | KINS |
| | KINAC research support | 17,783 | KINAC |
| | International cooperation on nuclear | 5,403 | NRF |
| | Nuclear control system implementation | 2,398 | NRF, KIGAM |
| | Nuclear safety infrastructure | 8,380 | |
| | Radiation safety technology development | 8,054 | NSSC |
| | Subtotal | 64,239 | |
| | Total | 351,938 | |

한 번, 세계에서는 거의 1 년에 1번으로 중대사고가 발생하는 것에 상응함.

- 1.0×10^{-4} /년: 미 NRC '확률론적 안전성평가(PSA)'의 노심손상빈도(CDF) 기준에 의거한 기준.

에너지경제연구원은 보고서에서 모델 플랜트로 국내 대표 원전인 OPR1000을 기준으로 하였으며 이용률 60, 70, 80, 90%를 적용하여 계산하였다. 계산식은 식(1)과 같으며 결과는 Table 3과 같이 정리된다.

Table 5. Expected damage cost on nuclear accident[17]

| Damage cost | Probability | | |
|-----------------|-------------------|---------|-------------|
| | | 1/7,000 | 1/1,000,000 |
| 100 trillion KW | Cost (billion KW) | 20.36 | 1.40 |
| | Unit cost(KW/kWh) | 2.2 | 0.1 |
| 500 trillion KW | Cost (billion KW) | 95.64 | 6.10 |
| | Unit cost(KW/kWh) | 10.2 | 0.6 |

$$C = \frac{100 \times p \times D}{365 \times 24 \times \eta \times P} \quad (1)$$

C: 단일원전의 전력생산 당 피해비용 (원/kWh)

p: 사고 확률(/년)

D: 원전사고 피해비용(원)

η : 원전 이용률(%)

P: 원전 설비용량(kW)

Table 3에 제시된 결과는 단일 원전에서 생산되는 전력량과 단일 원전의 사고 확률을 기준으로 계산된 것이므로 외부비용을 쉽게 내부화할 수 있는 장점이 있다.

4.2 한국환경정책 · 평가연구원

2013년 12월 한국환경정책·평가연구원은 화석연료 사용에 따른 온실가스 발생과 기후변화를 해소하기 위한 방법으로 원자력발전의 경제성을 평가하였다[17]. 경제성 평가의 일환으로 원전사업자인 한수원이 부담하고 있는 사적비용뿐만 아니라 원전사고의 위험비용까지 포함하는 사회적 비용을 대상으로 원전 중대사고 위험비용을 종합적으로 연구하였다.

연구에서는 정상적인 핵연료주기과정에서 발생하는 건강 및 환경영향보다 원전의 중대사고 발생 시 나타나는 피해에 초점을 맞추어 원자력발전의 외부비용을 추정하였다. 이를 위해 네 가지 방법을 활용하여 원전사업자가 부담하지 않고, 정부나 국민이 직접 부담하는 원전 중대사고로 인한 원자력발전의 외부비용을 추산하였다.

첫째로는 정부가 중대사고의 발생위험을 줄이기 위해 정부 예산을 투자하여 원자력관련 연구개발을 지원하는 비용이다.

Table 6. Tacit subsidy by liability limitation on damage compensation[17]

| Damage cost | Probability | 1/7,000 | 1/1,000,000 |
|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| | | 100 trillion KW | Cost (billion KW) |
| | Unit cost(KW/kWh) | 3.4 | 0.2 |
| 500 trillion KW | Cost (billion KW) | 151.66 | 9.53 |
| | Unit cost(KW/kWh) | 16.1 | 1.0 |

Table 7. Accident cost by risk aversion[17]

| Damage cost | Probability | 1/7,000 | 1/1,000,000 |
|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| | | 100 trillion KW | Cost (billion KW) |
| | Unit cost(KW/kWh) | 43.2 | 3.0 |
| 500 trillion KW | Cost (billion KW) | 1,912.85 | 121.99 |
| | Unit cost(KW/kWh) | 203.1 | 13.0 |

둘째는 중대사고로 인한 여러 위험은 ‘원자력재산보험’이나 ‘원자력손해배상책임보험’을 통해 일부 보장되고 있지만 의무보험가액의 최저한도 이상의 손해위험에 대해 정부나 국민들이 부담하는 비용이다. 셋째는 단순히 원자력사고와 같은 위험상황에 대한 외부비용을 위험상황의 수학적 기댓값으로 보는 것은 외부비용에 대한 과소평가일 가능성이 크기 때문에 일반 국민들의 ‘위험회피’ 성향을 반영하여 외부비용을 추정하였다. 네 번째로는 설문조사 방식으로 위험상황 회피를 위해 지불하고자 하는 금액으로 추정하였다. 이 방법들 각각은 원전 사고에 의한 외부비용으로 사적비용과 더해져 원자력 발전의 사회적 비용 추산에 사용되었다.

2011년을 기준으로 정부의 원자력 관련 예산 중 한수원이 제공하는 방사성폐기물관리 기금과 원자력연구개발기금을 제외한 총 3,519억을 정부의 명시적 보조금으로 설정한 후 2011년 원자력 총발전량(1,478억 kWh)으로 나누어 외부비용으로 약 2.4원/kWh를 추산하였으며 2011년 기준 원자력발전 정부지원액을 Table 4와 같이 제시하였다.

두 번째 접근 방법인 중대사고피해의 위험중립의 경우 현행 보험료 데이터를 이용하여 원전사고 발생확률(모형)과 기대피해비용을 추정(Table 5)하고 이를 이용하여 원전사업자의 배상책임제한이 원전사업자에게 주는 암묵적 보조금으로

Table 8. Willingness-to-pay to avoid nuclear accident[17]

| | Nuclear accident risk elimination | Avoidance of nearby NPP construction |
|------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| Total amount (billion KW/yr) | 648.9 ~ 904.2 | 493.6 ~ 893.6 |
| Unit cost (KW/kWh) | 3.8 ~ 6.3 | 52.1 ~ 94.9 |

Table 9. Definition of external cost on nuclear power generation[18]

| Item | Detail |
|------------------------|--|
| Siting conflict cost | Conflict cost on siting nuclear-related facilities such as radioactive waste disposal and power transmission lines |
| Accident risk cost | Risk cost on severe accident |
| Safety regulation cost | Additional cost in corresponding to reinforced regulation |
| Policy cost | Financial support for technology development, operation, and promotion of nuclear power generation |
| Future generation cost | Loss cost of future generation due to the siting of high level radioactive waste disposal |

로 규정하여 원자력사고의 사고배상책임제한에 따른 외부비용을 계산하였다. (Table 6 참조)

중대사고피해에서 위험회피를 고려한 위험비용 추정 방법에서는 원자력 발전으로 인해 야기되는 중대사고 발생가능성을 포함하는 위험상황에 대한 국민들의 가치 평가를 반영하기 위해 위험상황에 대한 시나리오에서 출발하여 추정하였다. 시나리오는 주민들의 이주 필요 여부, 건강 영향 여부 등이 고려되었다. 분석결과 Table 7과 같이 중대사고 피해비용을 산정하여 외부비용으로 추산하였다.

국민들의 위험회피 비용을 추산하는 또 다른 방법은 설문조사를 활용하여 원자력의 위험에 대한 일반 국민의 인식을 파악하고, 위험을 회피하기 위해 지불할 의향이 있는 최대 금액을 정량적으로 측정하는 것이다. 1,000명을 대상으로 원자력발전의 사고위험 해소를 위한 지불의사금액과 인근지역 신규원전 건설 관련 지불의사금액으로 나누어 설문을 조사하였으며 통계적인 처리를 통해 지불의사액을 추정하였다. 이 후 원자력 전력거래량을 기준으로 전력 단가 형식으로 Table 8로 제시하였다.

한국환경정책·평가연구원이 사용한 첫 번째 방법에서는 고려되는 모든 비용이 원전의 안전과 직접적인 관계가

Table 10. Comparison of nuclear accident risk cost[18]

| | | Total accident cost (trillion KW) | Accident risk cost (KW/kWh) | Annual additional cost (billion KW) |
|---|---|--------------------------------------|--------------------------------|--|
| Accident risk cost in 2013 | | | 0.03 | 4.2 |
| Recommendations of energy basic plan working group | Mutual aid | 58 | 11.05 | 1,529.4 |
| | IAEA (0.00001) | | 0.08 | 6.9 |
| | World NPP (0.00035) | | 2.90 | 398.3 |
| | Japan NPP (0.002) | | 16.55 | 2,292.7 |
| References to energy basic plan working group | Mutual aid (administrative district) | 136 | 23.7 | 3,285 |
| | Mutual aid (GIS) | 343 | 59.8 | 8,295.1 |
| Korea Environment Institute | General risk avoidance (CVM) | | 3.8~6.3 | 548.9~904.2 |
| | Neighborhood risk avoidance (CVM) | | 52.1~94.9 | 493.6~893.6 |

Table 11. Additional cost to reinforce nuclear facility[18]

| | No. of unit | Safety equipment reinforcement cost | Cost per unit | Investment period |
|------------------|----------------|--|----------------|----------------------|
| Korea | 30 | 7.5 trillion KW | 326 billion KW | 2013~2018 |
| United States | 102 | 27 trillion KW | 265 billion KW | 2013~2018 |
| France | 58 | 14.4 trillion KW | 250 billion KW | ~2018 |

없는 내용들이 많이 들어있으며 이러한 비용을 원전사업자가 부담할 의무가 없기 때문에 내부화하기 어려운 측면이 있다. 두 번째 방법은 보험료 산정의 방법을 차용한 것으로 우리나라 '원자력손해배상법'의 손해배상책임보험 보험가액인 500억원을 기준으로 호기당 보험료를 1.56원으로 산정하고 보험료에 영업비용(30%)과 리스크 프리미엄(10%)을 고려한 후 Table 5로 계산된 기대피해비용 중 보험금을 초과하는 부분을 암묵적 보조금으로 Table 6과 같이 제시한 것이다. 보험은 잦은 사고 자료를 바탕으로 사고 확률과 피해규모를 산정하여 보험료를 책정하는 방식이나 원전사고의 경우는 사고 발생 확률이 매우 낮기 때문에 미래 사고 확률 예측이 매우 어렵다. 따라서, 원전사고의 발생확률과 예상되는 피해금액의 범위에 결과가 크게 의존하게 된다. 세 번째 방법은 프랑스의 중대사고 시나리오에 기초한 것으로 원자력발전소 반경 100 km를 기준으로 지방과 지역으로 나누고 구역별, 이주유무별, 피해유형별로 나눠 위험회피자의 중대사고

비용을 계산한 것이다. 이는 원전별로 주변 거주자들의 특성이 다르기 때문에 동일한 계산을 모두 적용할 수 없는 단점이 있는 것으로 파악되었다. 마지막 방법은 전국 1000명을 대상으로 구조화된 질문지를 통해 면접조사 방식으로 계산된 결과로, 추가적인 전기요금 납부 의사를 묻는 질문으로 설문 조사된 것이다. 이러한 방법은 국민의식과 경제적 상황들이 지속적으로 변화하기 때문에 항상 변화하는 결과가 도출되는 방식으로 일관성 있는 자료를 만들기는 어려운 것으로 분석되었다.

4.3 국회예산정책처

비교적 최근인 2014년 3월 국회예산정책처에서는 '원자력 발전비용의 쟁점과 과제' 보고서를 통해 원자력 발전의 직접비용과 함께 외부비용을 다루었다[18]. 외부비용을 시장가격에 반영되지 않지만 사회적으로 부담할 가능성이 있는 비용으로 정의하여 정부와 현세대, 미래세대가 부담하는 사고위험비용과 입지갈증비용, 규제비용, 정책비용, 미래세대비용으로 Table 9와 같이 구성하였다.

사고위험비용을 원자력 발전소의 중대사고 발생으로 인한 위험을 회피하거나 대응하기 위한 비용으로 정의하고 손해기대치접근법, 상호부조법, 위험회피성향을 고려한 지불의사액 추정법으로 구분하고 현재 원자력 사업자가 부담하는

Table 12. Conflict cost on low and intermediate radioactive waste disposal site[18]

| | Cost |
|---|---------|
| Unit cost of low and intermediate radioactive waste disposal (million KW/m ³) | 65.52 |
| Unit cost of radioactive waste disposal of other countries (million KW/m ³) | 15.31 |
| Difference between the unit costs (million KW/m ³) | 50.21 |
| Accumulated amount of low and intermediate radioactive waste (m ³) | 18,712 |
| Total additional cost (million KW) | 939.459 |

Table 13. Unit cost of nuclear power including policy cost[18]

| | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 |
|---|---------|---------|---------|---------|
| Policy cost (million KW) | 307,580 | 396,200 | 440,805 | 516,942 |
| Power generation (GWh) | 140,876 | 147,167 | 140,557 | 132,465 |
| Policy cost per power generation (KW/kWh) | 2.18 | 2.69 | 3.14 | 3.9 |

Table 14. Summary on external cost of nuclear power[18]

| | |
|------------------------|---|
| Accident risk cost | - Total accident cost 58~343 trillion KW (0.08~59.8 KW/kWh) |
| Safety regulation cost | - Increase of construction and O&M cost due to the reinforced safety regulation - Corresponding cost to Fukushima accident 919.4 billion KW (2014~2015) |
| Siting conflict cost | - Siting conflict cost on low and intermediate level radioactive waste disposal (~2013) 939.5 billion KW - Siting conflict cost on high level radioactive waste disposal |
| Policy cost | - Conflict cost on high voltage transmission lines - Construction cost of transmission line per new NPP: 403.7 billion KW (Assuming 230 km of 765 kV line) |
| Future generation cost | - Financial expenses in 2013: 516.9 billion KW (3.9 KW/kWh) - Available land loss due to high level radioactive waste disposal site |

사고위험비용인 0.03 원/kWh와 제2차 에너지기본계획 민간합동위킹그룹이 손해기대치접근법을 이용하여 제시한 1 kWh당 0.0828~16.5525원, 상호부조법으로 추산한 비용,

사고위험회피비용으로 추산한 비용을 Table 10과 같이 정리하여 비교 제시하였다.

안전규제비용은 규제 강화에 따라 추가 안전설비를 보강하고 운전관리비가 증가함으로써 발생할 것으로 예상되는 비용을 의미하며 후쿠시마 사고 이후 한국수력원자력은 호기당 3,260억원의 안전설비 보강을 계획하고 있으며 한국과 미국, 프랑스의 안전설비 보강비용은 Table 11과 같다. 안전규제비용의 증가는 사고위험의 감소로 이어지므로 사고위험과 배타적이지 않으며 예방 원칙에 따라 내부화할 것이 제안되었다.

입지갈등비용은 원자력 발전과 관련된 시설의 입지 선정 과정에서 발생하는 비용을 의미하며 입지갈등비용에는 입지 선정과정에서 의견 충돌로 인하여 발생하는 비용, 입지를 선정하는데 합의가 이루어지지 않아 사업이 지연되어 발생하는 비용, 합의를 이루기 위한 행정 지원비용 등이 있다. 원자력 발전 관련 시설 중 중저준위방사성폐기물 처분장의 입지 결정에서 큰 사회적 갈등이 있었으며, 원자력 발전소와 연계된 고압 송전선로 경과지, 고준위방사성폐기물 최종 처분장의 입지 결정에서 갈등이 예상되고 있다. 이에 대한 명확한 비용 추산 방법은 제시되어 있지 않으며 중저준위방사성폐기물의 처분단가가 미국, 프랑스, 영국 등에 비하여 크게 높은 것을 입지갈등 때문으로 가정하여 처분단가의 차이를 입지갈등비용의 대리변수로 설정하였다. 보고서 작성 시점까지 발생 누적된 중저준위방사성폐기물에 대한 비용차이는 9,394억원으로 이를 입지갈등의 대리비용으로 제시하였다. (Table 12)

정책비용은 원자력 발전을 유지하기 위해 정부가 재정사업으로 지원하는 각종 재정사업 지원비용을 의미하며 원자력 발전의 안전성 및 성능 향상을 위한 연구개발비, 원자력 발전에 대한 수용성을 높이기 위한 주변지역지원사업, 홍보사업, 원자력 관련 기관 운영비 등으로 발전량으로 나눈 단가는 2013년 3.9원/kWh로 제시되었으며 연도별 변화는 Table 13으로 정리되었다.

미래세대비용은 현재세대가 사용하는 원자력 발전이 미래에 유발할 수 있는 회복할 수 없는 피해에 대한 비용으로 정의하였으나 보고서에서는 이에 대한 비용을 산정하지는 못 했다.

정리하면, 국회예산정책처에서 추산한 원자력 발전의 외부비용에는 다른 연구에서는 포함되어있지 않은 입지갈등

비용과 미래세대비용을 고려했으나 Table 14와 같이 일부 항목에 대해서만 비용을 추산하였다. 국회예산정책처 연구에서는 다른 연구들과 달리 외부비용의 범위를 상당히 넓게 정의하였다. 입지갈등비용과 미래세대비용과 같이 사회적 비용에 대한 주제를 검토한 것에 의미는 있으나 비용의 정량화에 상당한 어려움이 따르므로 대리변수와 같은 방법을 적용할 수 밖에 없었던 것으로 보인다. 그러므로, 사회환경의 변화에 따른 의존성이 큰 사회적 비용을 외부비용으로 추산하기 위해서는 새로운 접근법이 개발되어야 할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 핵연료주기 외부비용 평가 방법 개발을 위해 원자력 발전 외부비용의 주요 연구를 종합하여 정리하였다. 외부비용은 특성상 연구자들이 설정한 범위와 방법에 따라 차이를 나타내고 있다. 원자력 발전의 외부비용에 대해 후쿠시마 사고 이전에 진행되었던 유럽의 연구들인 ExternE와 CASES는 정상적으로 원전이 가동되고 있는 상황에서 발생하는 환경 오염과 이에 따른 피해에 중점을 두었다. 오염물질의 확산과 피해 비용 산정에 대한 IPA 방법을 적용하였으며 전산화된 모델 개발에 성공하였다. ExternE가 오염물질의 전파와 환경에 피해를 정량화하는 것에 초점을 둔 반면 CASES는 ExternE의 방법론을 사용하여 최종 정책 제언의 한 방편으로 외부비용을 사용하였다. 반면, 후쿠시마 사고 이후 국내에서 수행된 연구들에서는 연구자들이 각각의 주제에 맞춰 다양한 외부비용을 포함한 연구 범위를 설정하였으나 공통적으로는 사고위험에 중점을 두고 비용이 평가되었다. 사고위험에 대해서는 상호부조법 등 다양한 방법으로 비용이 산출되었으며 피해비용과 방법에 따라 0.03~94.9 원/kWh의 상당히 넓은 범위의 결과가 제시되었다. 설문조사 방식을 제외하고 사고위험에 대한 비용 평가 방법들은 공통적으로 사고확률과 피해비용이라는 두 값이 요구되며 이들 값들을 어떻게 설정하는가에 결과가 크게 의존하는 것으로 나타났다. 주목할만한 것은 외부비용에 사회적 비용을 고려하려는 시도들이다. 실제로 원자력 발전에 의한 영향이 자연환경뿐만 아니라 원자력 발전을 수용하는 사회적 관심에도 밀접한 관련이 있기 때문에 외부비용으로 포함시켜 연구

될 수 있는 주제인 것은 확실하다. 그러나, 어떤 항목들을 사회적 비용으로 포함할지에 대해서는 각 연구자들이 연구 주제에 맞춰 정의할 수 있기 때문에 범위가 상당히 가변적이며 정량화에 어려움이 있으므로 지속적으로 새로운 방법이 개발되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2014M2A8A5022170)을 받아 수행된 연구입니다.

REFERENCES

- [1] R.J. Budnitz and J.P. Holdre, "Social and Environmental Costs of Energy Systems", in Annual Review of Energy, Vol 1, edited by J. M. Hollander, Annual Review Inc. (1976).
- [2] E.W. Lawless, M.V. Jones, and R.M. Jones, "Methods for Comparing the Risks of Technologies", in Risk Evaluation and Management, edited by V. T. Covello, Plenum Press, New York (1986).
- [3] M.S. Yim, J.S. Evans, and R. Wilson, "Health and Environmental Risks of Energy Systems: Implications of Current Knowledge, Technology, and the Chernobyl Accident", Proc. of the First Saharov Memorial Conference for Peace Progress and Human Rights, Moscow (1991).
- [4] S.M. Rashad and F.H. Hammad, "Nuclear Power and the Environment: Comparative Assessment of Environmental and Health Impacts of Electricity-Generating Systems", Applied Energy, 65, 211-229 (2000).
- [5] R. Friedrich and A. Voss, "External Costs of Electricity Generation", Energy Policy, 21, 114-122, February (1993).
- [6] N. Eyre, "External costs: What do they mean for energy policy?", Energy Policy, 25, 85-95 (1997).
- [7] Q. Zhang, T. Welli, W. Yumei, and C. Yingxu, "External Costs from Electricity Generation of China up to 2030

- in Energy and Abatement Scenarios”, *Energy Policy*, 35, 4295-4304 (2007).
- [8] D. Streimikiene, I. Roos, and J. Rekis, “External Cost of Electricity Generation in Baltic States”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 863-870 (2009).
- [9] D.A. Georgakellos, “Climate Change External Cost Appraisal of Electricity Generation Systems from a Life Cycle Perspective: the Case of Greece”, *Journal of Cleaner Production*, 32, 124-140 (2012).
- [10] D. Streimikiene and I. Alisauskaite-Seskiene, “External Costs of Electricity Generation Options in Lithuania”, *Renewable Energy*, 64, 215-224 (2014).
- [11] Organization for Economic Cooperation and Development Nuclear Energy Agency, “Nuclear electricity generation: What are the external cost?”, NEA4372, OECD/NEA (2003).
- [12] E. Laes, G. Meskens, and J.P. van der Sluijs, “On the contribution of external cost calculations to energy system governance: The case of a potential large-scale nuclear accident”, *Energy Policy*, 39, 5664-5673 (2011).
- [13] A. Rabl and V.A. Rabl, “External costs of nuclear: Greater or less than the alternatives?”, *Energy Policy*, 57, 575-584 (2013).
- [14] J.V. Spadaro and A. Rabl, “External costs of energy: Application of the ExternE methodology in France”, JOS3-CT95-0010 (1998).
- [15] Cost Assessment for Sustainable Energy Systems, Accessed sep. of 2015. Available from: <http://www.feem-project.net/cases/>.
- [16] D.S. Noh, “Study on appropriate power mix considering economic and social cost of nuclear power”, Korea Energy Economics Institute (2013) (in Korean).
- [17] C.H. Lee, M.S. Lee, G.J. Cho, Y.K. Cho, J.E. Kim, S.C. Lee, and J.H. Kim, “External costs of nuclear energy in Korea”, Korea Environment Institute (2013) (in Korean).
- [18] G.H. Hur, “Issues and challenges on nuclear power generation cost”, National Assembly Budget Office (2014) (in Korean).