

# The Value of a Statistical Life and Social Costs of Death due to Nuclear Power Plant Accidents and Energy Policy Implications

Yong-Joo Kim\*

Department of Business Administration, Seoul Digital University

Received: February 01, 2023. Revised: February 24, 2023. Accepted: February 28, 2023.

## ABSTRACT

The study is to estimate the social costs of premature deaths due to nuclear power plant(NPP) accidents, by resorting to the contingent valuation method(CVM) which is used to estimate the value of a statistical life(VSL). The VSL estimate is about 3.55 billion won, which is multiplied by some 1.8 million premature deaths due to the accidents in world history of NPP, to get a maximum social cost of 1,952 trillion won. This estimate is equivalent to the 2022 real GDP of Korea. The annual average number of premature deaths and the resulting average social cost is 26,000 and 28 trillion won, respectively. The social cost of premature deaths due not only to accidents, but also the air pollutants from fired power plants(FPP) during 1987~2021 is estimated to be 26,919 trillion won. This is equivalent to 2021 US GDP, and is about 3,000 times higher than that for NPP of 9 trillion won. In 2021, the estimated social costs of FPP and NPP are 1,075 trillion won and 292 billion won, respectively. For South Korea, the study suggests to adapt an energy mix of increased share of electricity production for NPP relative to FPP, given that the 2050 carbon neutrality strategy of Korea is expected to lead to an increased share of renewable energy in electricity production. The study emphasizes accumulating the number of CVM-based VSL studies to ensure efficient energy policies.

Keywords: Nuclear Power Accident, Fired Power Plant Accident, Mortality Risk, Social Cost, Contingent Valuation Method, Value of a Statistical Life

## I. INTRODUCTION

전력의 소비는 사회적 후생을 증대시킨다. 그렇지만 전력의 생산은 발전시설의 사고나 고장, 오염 물질 배출 등으로 건강위해성(health risk) 문제를 야기하면서 크고 작은 사회적 비용을 발생시킨다. 전력 생산의 사회적 비용을 정확히 평가하면, 주어진 전력 생산 목표의 달성에 필요한 예산을 절감시키거나 주어진 예산규모로 건강위해성을 감소시켜 이환율(morbidity)과 사망률(mortality)을 저감시킴으로써 사회적 효용을 증대시킬 수 있다.

특히 전력 생산의 건강위해성을 감소시키려면 원자력, 화력, 재생에너지 등 사용연료별 전력 생산

량의 결정이 중요하다. 세계 전력생산 통계<sup>[1]</sup>에 따르면, 오늘날 세계의 에너지믹스에서 재생에너지 의존도가 급속히 확대되고 있다. 기후변화 대응과 대기오염 저감을 위한 2050-탄소중립 노력은 회피하기 어려운 물결이기 때문이다. 그 결과 석탄 중심의 화력 발전 비중은 2007년까지 증가하다가 2014년부터 감소하고 있다.

주목할 것은, 원자력 발전 비중이다<sup>[1]</sup>. 최고 국제 원자력사건등급(INES)을 기록한 1986년 우크라이나 체르노빌 원자력발전소(이하 ‘원전’) 사고 직후 원자력 발전 비중의 증가세가 둔화되다가 1996년부터 감소세에 진입하였으나, 최고 INES를 기록한 2011년 일본 후쿠시마 원전 사고 이후 감소세가 오

\* Corresponding Author: Yong-Joo Kim

E-mail: yjkim505050@gmail.com

Tel: +82-2-2128-3059

히려 둔화되고 있다. 이는 두 원전사고로 인해 건강위해성에 대한 우려가 증폭되었음에도 불구하고, 재생에너지가 충분히 생산될 때까지는, 기후변화 위기와 대기오염에 대응하는 현실적인 대안으로서 원자력의 중요성을 엿볼 수 있는 대목이다.

이러한 세계 추세에도 불구하고 각국은 저마다의 대내외 여건에 따라 에너지믹스를 결정해야 한다. 현실적으로는 재생에너지 비중을 증대시켜 나가면서 중장기적으로 사회적 비용을 최소화할 수 있는 원자력과 화력의 적정 비중을 결정하는 것이 중요하다. 그러나 체르노빌과 후쿠시마 원전 사고로 원자력의 건강위해성 인식이 증폭되었기에<sup>12,3)</sup>, 에너지믹스에 대한 사회적 합의를 도출하는 과정에서 원자력의 최적 비중이 화력에 비해 과소평가될 가능성이 있어서 사회적 비용을 최소화하는 데 큰 저해 요인이 될 것으로 보인다.

따라서 원자력과 화력 발전의 사회적 비용을 추정 및 비교하여 어느 비중을 상대적으로 증대시키면 사회적 비용을 얼마나 최소화할 수 있는지 심도 있게 분석하는 것은 매우 중요한 일이다. 이를 위한 핵심 과제는 원자력과 화력을 이용한 전력 생산 단위당 건강위해성을 사망위해성(mortality risk)에 초점을 맞춰 평가하고 그 사회적 비용을 화폐단위로 나타낸 후 비교하는 일이다.

그런데 화력에 비해 원자력의 사망위해성에 대한 과학적 합의는 부족한 편이다. 뿐만 아니라 사망위해성을 근거로 사망의 사회적 비용을 추정한 연구도 화력보다 원자력이 부족한 편이다. 특히 원전 사망의 사회적 비용을 화폐단위로 추정하면 원전이나 에너지 관련 정책의 경제성 평가에 기여할 수 있으나, 원전 사망 자체의 사회적 비용을 화폐단위로 추정한 연구<sup>4)</sup>는 흔치 않다. 원전 사망과 관련한 연구들은 오히려 화력발전이 원자력발전을 대체함으로써 발생하는 대기오염 사망자수 증가 등에 따른 화력발전의 사회적 비용 또는 원전의 사회적 편익을 화폐단위로 추정하는 논문<sup>5)</sup> 형태가 주류를 이룬다.

본 논문의 목적은 원전사고로 인한 사망위해성의 사회적 비용을 화폐단위로 추정하는 데 있다.

그리고 이를 화력발전소의 사회적 비용과 비교하고 정책 시사점도 도출한다. 이를 위해 가장 먼저 통계적 생명가치(VSL: value of a statistical life)를 추정한다. VSL은 선진국들이 규제영향 평가 시에 사용하는 경제학 개념이다<sup>6)</sup>. VSL 추정을 위해 조건부가치추정법(CVM: contingent valuation method)을 이용할 것이다<sup>7)</sup>. CVM은 환경, 생명 등 시장자료가 없어서 VSL을 화폐단위로 추정할 수 없을 때 사용하는 견고한 경제학 방법론으로서 다양한 학문분야에서 널리 활용되어 왔다.

다음 장에서는 VSL 추정을 위한 CVM 설문조사 자료를 생산하고 계량분석 모형을 설정한 후(II), 설문조사 자료를 계량분석하여 VSL을 도출하고 원전의 사회적 비용을 추정한다(III). 그리고 원전과 화력발전소의 사회적 비용을 비교하여 정책시사점을 도출하는 사례를 제시하고(IV), 요약 및 연구의 한계와 해석상 유의할 점으로 결론을 맺는다(V).

## II. MATERIAL AND METHOD

본 장에서는 CVM 자료를 생산하고 이를 분석할 수 있는 계량분석 모형을 설정한다.

### 1. 설문조사 자료

2022년 4월 20~22일에 인터넷조사 전문업체 (주)마크로밀 엠브레인을 통해 원전 지역을 포함한 전국에 대해 인구비례할당 설문조사를 실시하였다. 일반적으로 대면조사는 인터넷조사보다 응답의 신뢰성이 높다고 알려져 있다. 그럼에도 불구하고 본 논문이 인터넷조사를 실시한 이유는 코로나-19 팬데믹으로 인해 대면 접촉이 어려워졌기 때문이다. 다만 요즘은 인터넷조사 기법이 발달한 편이어서 응답자료의 신뢰성이 과거보다는 향상되었을 것으로 여겨진다.

설문조사원이 제시한 원전사고 관련 정보는 Table 1과 같다. 특히 응답자들에게는 한국의 경우 사망위해성이 거의 0에 가깝다는 사실을 알렸다. 사망위해성 저감 방법과 저감 비용에 관한 정보는 지불의사 질문 직전에 제시함으로써 지불의사 응답 시의 거부감을 줄여주고자 하였다.

Table 1. Main information on nuclear power plant accidents delivered to the survey respondents

Information	
Mortality Rate	Nearly 0
Cause of Death	Nuclear power plant accident
Main Features of Mortality Risk	No accident that caused a large number of deaths occurred in Korea
Manner of Death	Dying on a nuclear power accident site Dying after suffering from injury, disease or mental health problem
Method of Mortality Risk Reduction	Expending on nuclear protection kits, household medicine, torch, radio, etc.
Cost of Mortality Risk Reduction	The amount of expenditure as above, effort cost, etc.

VSL 추정 자료를 획득하기 위해 응답자에게 각자의 원전사고 사망위해성을 2/70,000 줄이기 위해 Table 1과 같은 지출 항목에 특정 금액(A)을 지불할 의사(WTP: willingness to pay)가 있는지 질문하였다. 사망위해성의 분모를 70,000으로 정한 것은 관람객이 꼭 들어찬 서울올림픽 주경기장의 최대 수용인원 약 70,000명 중에서 사망할 확률을 쉽게 연상할 수 있도록 하기 위함이었다. A의 규모는 국내의 주요 문헌<sup>[8,9]</sup>의 VSL 추정치들을 참고하여 1만~18만 범위에서 5개로 정하고 연령별, 성별로 균등히 할당하여 응답자들에게 제시하였다.

Table 2는 설문조사를 불신하거나 이해하지 못하는 등의 저항응답(protest bid) 25.6%를 제거한 480개 유효표본의 특성을 보여준다. 65세 이하 모집단의 특성 분포와 매우 유사한 분포를 보이며, A의 선택확률은 50%를 상회하였다.

Table 2. Main features of effective sample

Number of Sample	Effective Sample Rate	Monthly Income	Age
480	74.4%	3.6 million won	45.9
Ratio of Female Respondents	Education Level	Average Bid Amount	Rate of Bid Accepted
49.0%	Senior undergraduate	82,708 won	52.3%

## 2. 계량분석 모형

Eq. (1)은 코로나 사망의 VSL을 추정된 Kim(2023)<sup>[10]</sup>의 모형과 구조가 동일하다. 본 논문의 설문조사 응답자(i)가 자신의 사망위해성을 현재 수준( $q_0$ )보다 낮은 수준( $q_1$ )으로 저감시키기 위해 소득(y)에서 일정한 비용(A)을 지불할 것인지 고민한다고 하자. 경제학의 확률효용극대화 모형에 따르면<sup>[11]</sup>, i의 최대지불의사액( $WTP_{max}$ )은 지불로 인한 효용(v)이 현재의 효용과 같은 지점에서 결정된다.

$$v(q_1, y - WTP_{최대}) = v(q_0, y) \quad (1)$$

다만 연구자가 i의 정확한 효용함수를 알 수 없으므로 v는 확률효용함수가 된다. v는 연구자가 관찰할 수 있는 부분과 관찰할 수 없는 부분( $\epsilon$ )의 합이다. 또 본 논문은 v가 Box-Cox 간접효용함수<sup>[12]</sup>의 가장 일반적 형태인 선형함수라고 가정하고, 표준로짓모형<sup>[13]</sup>을 추정할 것이다. 이를 종합한 v의 구체적 함수 형태는 Eq. (2)와 같다.

$$v = \alpha_q + \beta_q y + \epsilon_q \quad (q=0,1) \quad (2)$$

$\beta_0$ 과  $\beta_1$ 은 화폐의 한계효용으로서 동일한 값이다. 따라서 Eq. (1)과 (2)에서 Eq. (3)이 도출된다.

$$\eta = -\alpha + \beta WTP_{max} \quad (\eta \equiv \epsilon_1 - \epsilon_0, \alpha \equiv \alpha_1 - \alpha_0) \quad (3)$$

v가 확률변수이므로  $WTP_{max}$ 도 확률변수이다. 따라서  $WTP_{max}$ 의 추정을 위해서는 Eq. (4)와 같이 응답자가 A를 수용할 확률(Prob<sub>1</sub>)을 구해야 한다.

$$Prob_1 = Prob(WTP_{max} \geq A) = Prob(\eta \geq -\alpha + \beta A) \quad (4)$$

본 논문은  $\eta$ 이 표준로지스틱(standard logistic) 분포를 따른다고 가정하므로 Eq. (5)가 성립한다.

$$Prob_1 = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha + \beta A)} \quad (5)$$

또한 A의 수용( $y_i = 1$ ) 또는 거부( $y_i = 0$ ) 의사를 묻는 양분선택형(dichotomous choice) 질문을 이용하므로  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 추정하기 위해 극대화할 로그우도함수는 Eq. (6)과 같다.

$$\ln L(\alpha, \beta) = \sum_{i=1}^n [y_i \ln \frac{1}{1 + \exp(-\alpha + \beta A)} + (1 - y_i) \ln \frac{1}{1 + \exp(-\alpha + \beta A)}] \quad (6)$$

표준로지스틱 분포를 하는  $\eta$ 의 평균은  $E(\eta) = 0$ . 따라서 추정된 최적  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 Eq. (3)에 대입하면 Eq. (7)과 같이 평균  $WTP_{\max}$  계산식이 도출된다.

$$E(WTP_{\text{최대}}) = E\left(\frac{\alpha + \eta}{\beta}\right) = \frac{\alpha + E(\eta)}{\beta} = \frac{\alpha}{\beta} \quad (7)$$

### III. RESULT

#### 1. 원전사고 사망의 통계적 생명가치

Table 3은 LIMDEP을 이용하여 모형을 추정한 결과이다. WTP 추정 목적의 CVM 연구들이 주로 이용하는 로짓 기본모형으로써 설문조사 응답자료들을 분석한 결과, 상수와 제시액(bid)이 1% 수준에서 유의하였으며 부호도 경제학 이론에 부합하였다.

Table 3. Logit model estimation results

Var.	Coeff.t	Std. Err.	P-value
Constant	0.501322	0.156028	0.0013
Bid	-0.004936	-0.001513	0.0011

이제 Table 3의  $\alpha$ 와  $\beta$  추정치를 Eq. (7)에 대입하여 Table 4와 같은  $WTP_{\max}$ 를 추정하였다. 비선형제약식 Eq. (7)의 결합검증을 위해 왈드검증 절차(Wald procedure)를 따랐으며, WTP 추정계수와 모형의 유의성이 확보되었다. WTP는 평균 101,559원으로 추정되었다. 신뢰구간은 62,383원 ~ 140,735원이다.

Table 4. WTP for avoiding premature death due to nuclear power accident

Coeff.	Std. Err.	Conf. Int.	P-value	Wald Stat.
101,559	19,988	62,383~140,735	0.0000	25.82

이 추정치를 계산식 Eq. (8)에 대입하면 VSL을 추정할 수 있다<sup>[6]</sup>. VSL은 사망위해성을 100% 줄이기 위한 WTP이기 때문이다.  $\Delta p$ 는 응답자에게 제시한 원전사고 사망위해성 저감 수준 2/70,000이다.

$$VSL = \frac{WTP_{\max}}{\Delta p} \quad (\Delta p = p_1 - p_0) \quad (8)$$

원전사고 사망의 VSL은 Table 5와 같이 35억 5,457억 원으로 추정되었다.

Table 5. Value of a statistical life lost due to nuclear power plant accident

Mean	Lower Bound	Upper Bound
3,554.57	2,183.41	4,925.74

Unit: million won

#### 2. 원자력발전소 사고 사망의 사회적 비용

원전사고 사망의 사회적 비용은 원전사고의 사망위해성에 원전사고 사망자 1인의 VSL을 곱하여 구할 수 있다. 이하에서는 먼저 원전사고의 사망위해성을 도출한다.

##### 2.1. 원자력발전소 사고의 사망위해성

상업용 원전이 최초로 가동된 1954년 이후 크고 작은 원전사고가 발생하였으나 그 사망자수는 추정 기관에 따라 수십 명에서 수백만 명까지 엄청난 편차를 보인다.

역사상 최대 사망자수를 발생시킨 사고는 최고의 국제원자력사건등급(INES)을 기록한 1986년 우크라이나의 체르노빌 원전 사고이다. 국제원자력기구(IAEA), 세계보건기구(WHO), 유엔방사선영향과학위원회(UNSCEAR) 등 유엔 산하기구와 우크라이나 등 피해 당사국들이 참여한 체르노빌포럼의 논의 결과를 담은 IAEA 보고서는, 급성방사선증후군

(ARS)을 보인 현장 근로자와 구호대원 31~50명, 방사능 오염 통제구역 주민의 암 사망자수를 4,000명으로 추정하였다<sup>[13]</sup>.

그런데, IAEA 보고서 작성에 동참했던 WHO와 UNSCEAR는 독자 보고서에서 이와 다른 추정치를 발표하였다. WHO는 사고 현장과 고농도 통제지역의 사망자를 IAEA과 유사한 3,960명으로 추정하고 통제지역 밖의 저농도 오염지역 사망자수 4,970명을 합하여 총 8,930명의 사망자수를 발표하였다<sup>[14]</sup>. 반면에 UNSCEAR은 통제구역 내 현장 근로자와 구호대원 중 ARS 유증상자와 오염된 우유를 마신 자들 중 43~62명만 사망자수로 발표하고, 통제구역 밖의 사망자는 추정의 불확실성을 이유로 발표 수치에서 제외하였다<sup>[15]</sup>.

이상의 UN 산하기구 공식 발표 결과가 과소추정되었다고 비판하는 의견도 있다. 환경단체가 후원한 2006년의 TORCH(The Other Report on Chernobyl) 보고서는 사망자수를 30,000~60,000명으로 추정하였다<sup>[16]</sup>. 한편 2016년의 TORCH 보고서는 UNSCEAR 보고서 자료를 이용하여 2016년 이후 50년간 약 40,000명의 유럽인이 암으로 사망할 것으로 보았다<sup>[7]</sup>. 이 추정치를 앞서 UNSCEAR가 확정적으로 추정한 43~62명과 합하여 2016년 TORCH 보고서가 40,043~40,062명의 사망자수를 추정한 것으로 간주한다.

핵전쟁방지국제회의사회(IPPNW)는 사고 현장 구호요원 사망자수만 50,000~100,000명에 달할 것이며, IAEA 자료를 단순 대입하더라도 고형암 및 혈액암 사망자수는 20,000~69,000명을 기록할 것이라고 주장하였다<sup>[17]</sup>. 환경단체 그린피스(Greenpeace)는 사고 후 70년 간 세계 사망자수가 약 180,000명에 달할 것으로 분석하였다<sup>[18]</sup>. 유럽방사선위험위원회(ECCR)도 사고 후 70년 간 905,016~1,809,768명에 달하는 사망자가 발생할 것으로 추정하였다<sup>[19]</sup>.

2011년의 일본 후쿠시마 원전 사고도 최고 INES 사고이다. 그러나 2018년에 방사선 노출로 사망한 근로자 1명 사례<sup>[20]</sup> 외에는 직접적인 원인에 의한 사망이 공식 인정된 사례는 없다. UNSCEAR<sup>[21]</sup>와 WHO<sup>[22]</sup> 등 UN 산하기관들은 사고 당시 ARS로 인한 사망자가 없으며 암 발병 가능성도 매우 높지 않을 것으로 본다. 기타 연구들도 향후의 사망위해

성을 낮게 보는 것이 일반적이다. 그러나 사망위해성을 높게 평가한 개인 연구들도 있다. Normile<sup>[23]</sup>은 일본의 암 사망자수를 130명으로 추정하고 Fairlie<sup>[24]</sup>는 UNSCEAR<sup>[21]</sup>의 방사선 노출량 자료를 적용하여 약 5,000명까지 추정하였다.

이 두 원전사고 외에도 사망자를 배출한 사고들이 있지만 사망자 수는 미미하다. 특히 1986년 미국 서리(Surry) 원전에서 발생한 스팀 폭발 사고로 인한 사망자수를 미국회계감사원(USGAO)은 4명으로 보고하였다<sup>[25]</sup>.

1978년부터 원전이 가동된 한국의 경우, 환경운동연합은 2000년까지 고리원전에서 2명의 사망자가 발생한 것으로 보고 있으며<sup>[26]</sup>, 에너지정의행동에 따르면, 2000년 이후 원전 산업재해 사망자수는 17명이다<sup>[27]</sup>.

Table 6은 대량의 원전 전력이 최초로 보급된 1954년 이후 현재까지 발생한 원전사고 사망자수 추정 연구들의 최대 및 평균 추정치를 제시한다. 체르노빌 사고 사망자수는 최대 약 181만 명, 평균 28만여 명으로서 압도적으로 많다. 그 이유는 극히 높은 ECCR 추정치가 반영되었기 때문이다. 연평균 추정치도 26,000여 명을 기록하였다. 후쿠시마 원전 사고 사망자수는 최대 5,000명이다. 한국 사망자수는 19명으로서 미미하다. 이 추정치들은 원전 사고 피해의 여파로 발생할 미래 사망자수도 포함한다. 현재 및 미래 사망자의 생명가치는 동일하다고 전제하기 때문이다.

본 논문은 이 중 최대치를 대푯값으로 사용한다. 왜냐하면 일부 연구의 추정치는 미래에 급격히 증가할 암 사망자수를 불확실성의 이유로 제외하였기 때문이다<sup>[13,15]</sup>. 이 경우 원전의 사회적 비용도 최대치로 추정되기 때문에 원전의 필요성이 실제보다 과대평가될 가능성을 사전에 억제할 수 있다.

Table 7은 이상의 사망위해성 추정치를 이용하여 원전사고의 사망위해성을 추정한 결과이다. 원전 역사상 연평균 사망위해성은 100만 명당 최대 3.74명이다. 이는 평균 0.59명의 6배 이상이 되는 수치이나, 앞서 언급한 이유로 이 최대치를 대푯값으로 사용한다.

Table 6. The death toll estimates of nuclear power plant accidents in world history (1954~2022)

Source	Total		Annual	
	Avg.	Max.	Avg.	Max.
Chernobyl				
IAEA (2005)	4,041	4,050	59	59
WHO (2006)	8,930	8,930	129	129
UNSCEAR (2008)	53	62	1	1
TORCH (2006)	45,000	60,000	652	870
TORCH (2016)*	40,053	40,062	580	581
IPPNW (2011)	119,500	169,000	1,732	2,449
Greenpeace (2006)	180,000	180,000	2,609	2,609
ECCR (2006)	1,357,392	1,809,768	19,672	26,229
Avg.	219,371	283,984	3,179	4,116
Max.	1,357,392	1,809,768	19,672	26,229
Fukushima				
ABCNews (2018)	1	1	0.0	0.0
Normile (2012)	130	130	2	2
Fairlie (2015)	5,000	5,000	72	72
Avg.	1,710	1,710	25	25
Max.	5,000	5,000	72	72
Korea				
KFEM (2011)**	2	2	0.0	0.0
EJA (2020)***	17	17	0.2	0.2
Avg.	19	19	0.3	0.3
Max.	19	19	0.3	0.3
Other				
USGAO (1988)	4	4	0.1	0.1
Avg.	4	4	0.1	0.1
Max.	4	4	0.1	0.1

\* The sum of the estimates of TORCH<sup>[7]</sup> and UNSCEAR<sup>[15]</sup> reports.  
 \*\* KFEM: Korean Federation For Environmental Movement  
 \*\*\* EJA: Energy Justice Actions

Table 7. The annual average mortality risks of nuclear power plant accidents in world history (1954~2022)

Average Population	Average Death Toll		Average Mortality Risk per Million People	
	Max.	Avg.	Max.	Avg.
7,024,192,165	26,301	4,141	3.74	0.59

## 2.2. 원자력발전소 사고 사망의 사회적 비용

Table 8은 사망위해성 추정치를 이용하여 원전사고의 사회적 비용을 추정된 결과이다. 역사상 모든 원전사고 사망자수는 최대 약 181만 명이며, 그 사회적 비용은 최대 약 1,952조 원이다. 이는 한국의

2022년 실질 GDP에 비견되는 수준이다. 연평균 사망자수는 최대 약 26,000명, 사회적 비용은 최대 약 28조 원이다. 한국의 사회적 비용은 최대 675억 원, 연평균 10억 원으로서 원전사고의 사망위해성은 미미하다.

한국 VSL 추정치 35.55억 원은 한국의 원전사고 사망에 대해 추정한 값이다. 그러나 국가마다 구매력, 소득 등에 차이가 있으므로 경제학의 편익이전법(benefit transfer)을 이용하여 한국의 VSL을 우크라이나(체르노빌), 일본(후쿠시마) 및 미국(기타)의 VSL로 전환시켜 사용하였다.

Table 8. The social costs of nuclear power plant accidents in world history (1954~2022)

	Chernobyl	Fukushima	Korea	Other	World
	VSL	10.70	32.31	35.55	52.13
Total					
Max. Death Toll	1,809,768	5,000	19	4	1,814,791
Social Cost	19,362,930	161,544	675	209	19,525,358
Avg. Death Toll	283,984	1,710	19	4	285,717
Social Cost	3,038,380	55,259	675	209	3,094,522
Annual					
Max. Death Toll	26,229	72	0.3	0.1	26,301
Social Cost	280,622	2,341	10	3	282,976
Avg. Death Toll	4,116	25	0.3	0.1	4,141
Social Cost	44,034	801	10	3	44,848

\* Unit: 100 million won

Table 9는 한국에 관한 추정치들이다. 지금까지 세계의 일원으로서 한국에 대해 추정한 것과 달리 한국에서 원전이 최초로 사용된 1978년 이후를 분석한 결과, 연평균 사망자수가 0.42명, 사회적 비용은 15억 원으로 다소 증가하였다. 그러나 이는 여전히 매우 미미한 수준으로서, 연평균 사망위해성이 1억 명당 1명 수준에 불과하다는 점에도 여실히 나타나 있다.

Table 9. The social cost and mortality risk of nuclear power plant accidents in Korean history (1978~2022)

VSL	Total		Annual average		Mortality Risk per Mill. People	
	Death Toll	Social Cost	Population	Death Toll		
35.55	19	675	46,123,605	0.42	15.01	0.01

\* Unit: 100 million won

## IV. DISCUSSION

### 1. 원자력과 화력 발전소의 사회적 비용 비교

지금까지 원전사고의 VSL을 추정하여 세계와 한국 원전사고 사망의 사회적 비용을 추정하였다. 그런데 이 VSL의 활용 범위가 원전에 국한되는 것은 아니다. 원전의 사회적 비용을 여타 발전소의 사회적 비용과 비교함으로써 에너지 정책에 중요한 시사점을 제공할 수 있다.

Table 10은 VSL을 이용하여 원전과 화력발전소의 사회적 비용을 화폐단위로 비교한 사례로서, 전력 생산을 위해 어느 에너지원에 치중하는 것이 좋을지 시사점을 제공한다. 다만 전력 생산의 사회적 비용에는 발전소 사고뿐만 아니라 대기오염 배출로 인한 비용도 함께 반영되어 있다<sup>[28]</sup>. 그리고 화석연료의 VSL은 미국, 영국 및 한국의 주요 VSL 추정치들을 평균한 Kim(2023)<sup>[10]</sup>의 38억 1,000만 원을 차용하였다. 외화가치를 한화가치로 전환하기 위해 국가간 구매력평가지수(PPP)와 1인당 GDP의 차이를 반영하였으며, 2022년의 한화가치로 나타내기 위해 국내의 연도별 실질소득과 물가지수를 적용하였다.

Table 10. The social costs of nuclear and fossil fuel power plant operation in the world (1987~2021)

	Nuclear		Fossil Fuel		
		Coal	Oil	Gas	Tot.(Avg.)
Deaths per TWh of EP	0.03	24.62	18.43	2.82	(15.29)
VSL (mill. won)	3,555	3,810	3,810	3,810	(3,810)
2021					
EP (TWh)	2,738	10,111	760	6,318	17,189
Death Toll	82	248,932	14,010	17,816	280,758
Social Cost (trill. won)	0.2920	948	53	68	1,070
1987~2021					
EP(TWh)	85,437	243,437	38,718	127,323	409,477
Death Toll	2,563	5,993,412	713,567	359,051	7,066,029
Social Cost (trill. won)	9	22,833	2,718	1,368	26,919

EP: Electricity Production TWh: Terrawatt-hour

1987년 이후 2021년까지 원전 가동으로 인한 세계의 사회적 비용은 9조 원으로 추정되었다. 반면에 석탄화력발전소는 22,833조 원, 특히 화력발전

소 전체는 26,919조 원을 기록하였다. 이는 원전 가동의 약 3,000배에 달하는 막대한 규모로서 미국의 2021년 GDP와 맞먹는 수준이다. 2021년 한 해만 하여도 원전은 2,920억 원에 불과하나 화력발전소는 그 3,660배 수준인 1,070조 원이나 된다. 그 이유는 전력 1 테라와트시(TWh) 생산 당 사고나 대기오염물질 배출로 인한 사망자수가 석탄, 석유, 석유 화력발전소 각각 약 25명, 18명, 3명임에 반해 원전은 0.03명에 불과한 것으로 평가된 결과를 이용하였기 때문이다<sup>[4]</sup>.

Table 11은 한국의 사회적 비용을 비교한 표로서 세계와 근본적으로 동일한 시사점을 지닌다. 1987년부터 가동한 원전의 사회적 비용은 총 4,082억 원에 불과하였다. 이는 화력발전소 약 523조 원의 0.1%에도 못 미치는 수준이다. 2021년 한 해 원전 가동의 사회적 비용은 161억 원에 불과하나 화력발전소는 22조 원에 달한다.

Table 11. The social costs of nuclear and fossil fuel power plant operation in Korea (1987~2021)

	Nuclear	Fossil Fuel			Tot.(Avg.)
		Coal	Oil	Gas	
Deaths per TWh of EP	0.03	24.62	18.43	2.82	(15.29)
VSL (mill. won)	3,555	3,810	3,810	3,810	(3,810)
2021					
EP (TWh)	151	210	7	175	392
Death Toll	5	5,175	128	494	5,797
Social Cost (trill. won)	0.0161	20	0.5	2	22
1987~2021					
EP (TWh)	3,828	4,826	633	2,432	7,891
Death Toll	115	118,821	11,659	6,859	137,339
Social Cost (trill. won)	0.4082	453	44	26	523

EP: Electricity Production TWh: Terrawatt-hour

### 2. 시사점

본 논문은 원전사고 사망의 VSL을 사망위해성에 초점을 맞춰 추정하였다. 이를 이용하여 원전사고 사망의 사회적 비용을 도출한 결과, 세계 원전 역사상 총 사회적 비용이 한국의 2022년 GDP에 상당하는 규모인 것으로 나타났다. 이는 당연한 결과이

다. 왜냐하면 본 논문은 원전사고에 대한 일반인의 응답 자료를 바탕으로 VSL을 추정하고 사회적 비용도 추정하였는데, 원전에 대한 일반인의 위해성 인식(risk perception)은 전문가의 위해성 인식이나 여타 종류의 위해성인식보다 과대평가되는 경향이 있는 것으로 알려져 있기 때문이다<sup>28)</sup>.

그러나 VSL 추정치를 이용하여 원전 사망의 사회적 비용을 화력발전소와 비교한 결과 화력발전소의 사회적 비용은 원전의 3,000배 정도로서 미국의 2021년 GDP에 비견되는 수준인 것으로 나타났다. 원전의 평가대상 연수가 화력발전소보다 약 2배 정도 길었음에도 불구하고 이러한 결과가 나온 것은 예상 밖이다.

따라서 세계와 한국의 에너지믹스에 대한 메시지는 명확하다. 2050-탄소중립은 회피하기 어려운 길이므로, 재생에너지 발전 비중을 높여 나가는 과정에서 상대적으로 줄어들 수밖에 없는 기타 부문의 발전 비중을, 원자력 대신 화력의 비중을 더욱 줄임으로써 대응해 나가야 한다. 아직도 세계와 국내의 화력발전 비중은 전체의 60%를 상회하고 있는 실정이기 때문이다<sup>29)</sup>.

원자력 발전 의존도를 화력 발전보다 높이거나 더 줄여들지 않게 해야 하는 또 다른 이유들이 존재한다. 첫째, 본 논문에서 화력과 원자력의 사회적 비용을 추정할 때, 온실가스 배출로 인한 기후변화로 발생하는 사망 사례는 고려하지 않았다. 이를 고려하였다면 화력발전의 사회적 비용이 원자력발전보다 높게 추정되었을 것이다. 왜냐하면 화력발전의 발전 단위당 온실가스 배출량이 원자력발전보다 훨씬 많기 때문이다. 둘째, 사망위해성 이외의 건강 위해성이나 경제부문의 손실까지 추정했다면, 화력발전의 사회적 비용이 원자력발전보다 훨씬 더 높게 추정되었을 것이다. 다만, 지금까지는 추정의 어려움으로 인해 방사성폐기물의 사회적 비용을 화폐 가치로 반영하지는 못했다. 이를 화폐단위로 추정할 수 있다면, 지금까지의 결론은 바뀔 수 있다.

본 논문이 VSL을 추정하여 사망의 사회적 비용을 화폐단위로 평가한 것은 예산의 효율적 집행에 기여할 수 있다. 예컨대, 원전 안전 프로그램에 100억 원의 예산을 투입하여 사망자수가 5명 감소하고

VSL이 30억 원이라고 하면, 비용 대비 편익의 비율을 나타내는 비용편익비율(CBR: cost-benefit ratio)이 1이 넘는 1.5가 되어 이 프로그램은 경제성이 있다고 평가된다. 만일 CBR이 1.2인 화력발전소 안전 프로그램의 있다면, 정부가 예산집행의 우선순위를 원전 안전 프로그램에 두는 것이 더욱 효율적인 예산집행이다. 예산의 효율적 집행은 동일 예산으로 사망자수를 더 많이 감소시키든지, 주어진 사망자수 감소 목표를 보다 적은 예산으로 달성하는 것이므로 사망자수 감소는 물론 정부의 재정 건전성 제고 측면에서 매우 중요한 정책평가 기준이다.

사망의 경제적 가치를 나타내는 VSL이 이처럼 중요하므로, VSL 연구가 희소한 원전 안전 분야에 대한 VSL 연구는 반드시 축적될 필요가 있다. 그런데 원전에 대한 일반인의 위해성인식이 과대평가되는 경향이 있으므로<sup>28)</sup>, 이러한 경향을 VSL에 내부화하기(internalize) 위해서는 설문조사를 통해 일반인의 위해성인식을 반영하여 VSL을 추정할 필요가 있다. 이를 위해 본 논문처럼 CVM을 이용하면 좋을 것이다. CVM은 일반인을 대상으로 설문조사를 실시하여 VSL을 추정하는 기법이기 때문이다.

## V. CONCLUSION

본 논문은 원전사고로 인한 사망위해성의 사회적 비용을 화폐단위로 추정하고, 이를 화력발전소의 사회적 비용과 비교하여 양자의 상대적 의존도 설정에 관한 에너지믹스의 시사점을 도출하고자 하였다. 이를 위해 전국 모집단 자료를 CVM 로짓모형으로 계량분석한 후 원전사고 사망의 VSL을 화폐 가치로 추정한 결과, 35억 5,457억 원이 도출되었다.

이 추정치에 원전사고 사망자수를 곱하여 원전사고 사망의 사회적 비용을 도출하였다. 특히 원전사고 사망자수의 범위를 구하기 위해 원전 역사상 기록된 거의 모든 사고에 의한 사망자수를 조사한 결과 체르노빌 원전사고가 최대 약 181만 명으로서 전체 사망자의 거의 절대적인 비중을 차지하였으며 후쿠시마 원전사고는 최대 5,000명을 기록하였다. 한국은 19명으로서 미미하였다. 원전의 연평균 사망위해성은 100만 명당 3.74명이었다. 본 논문은 원전의 필요성이 과대평가될 가능성을 예방하기 위해



사회적 비용 최대 추정치를 대푯값으로 사용하는 보수적인 접근방식을 취하였다.

역사상 모든 원전사고 사망자수를 약 181만 명으로 추정한 결과, 그 사회적 비용은 최대 약 1,952조 원으로서 한국의 2022년 실질GDP에 비견되는 수준이다. 연평균 사망자수는 약 26,000명, 사회적 비용은 약 28조 원이다. 세계 자료에 기초한 한국의 사회적 비용은 675억 원, 연평균 10억 원으로서 미미하였다. 상대적으로 짧은 한국의 원전 역사를 반영하여 추정한 한국의 원전사고 사망자는 연평균 0.42명, 사회적 비용은 15억 원이었다. 특히 연평균 사망위해성은 1억 명당 1명으로서 극히 미미하였다.

원자력과 화력의 에너지믹스에 대한 시사점을 도출하기 위해, 발전소 사고와 대기오염 배출로 인한 사망자수를 함께 고려하여 1987~2021년의 세계 사회적 비용을 추정한 결과, 원전은 9조 원으로 나타났다. 그러나 화력발전소는 26,919조 원을 기록하였는데, 이는 원전의 약 3,000배에 달하는 규모로서 미국의 2021년 GDP에 상당하는 규모이다. 2021년 한 해의 경우, 원전은 2,920억 원에 불과하였으나 화력발전소는 그 3,660배 수준인 1,070조 원이나 되었다. 한국의 경우에도, 원전의 사회적 비용은 4,082억 원에 불과하였으나 화력발전소는 약 523조 원을 기록하였으며 2021년 한 해만 하여도 22조 원을 기록하였다.

본 논문의 에너지 정책에 대한 시사점은 다음과 같다. 원전에 대한 일반인의 위해성인식이 과대평가되어 있음에도 불구하고<sup>[28]</sup> 화력발전소의 사회적 비용은 원전의 약 3,000배에 달하는 것으로 나타났다. 특히, 현재의 화력발전 비중은 여전히 전체 발전량의 60%를 상회하고 있어 원자력발전보다 훨씬 많은 온실가스 배출과 경제적 피해를 초래하고 있다. 따라서 2024년에 수립될 제4차 에너지기본계획에서는 제3차 에너지기본계획(2019)<sup>[29]</sup>의 정책목표를 수정하여 석탄화력 발전 비중을 과감히 축소하는 대신 원자력 발전 비중의 감축 속도를 둔화시킬 필요가 있다. 제3차 에너지기본계획에서는 2040년까지 재생에너지 발전 비중을 30~35%로 확대하기 위해 화력발전과 원자력발전의 비중을 감축하기로 하였다.

기타 시사점으로서, 원전이나 에너지 정책의 효율성을 제고하기 위해 사망의 경제적 가치, 즉 VSL을 적극 활용하는 것을 들 수 있다. VSL을 이용하면 사회적 비용이나 편익을 화폐단위로 평가할 수 있어서 특정 정책의 경제성 평가나 정책대안들의 우선순위 평가가 가능하여 사망자수를 더욱 저감시키거나 정부의 재정 건전성을 제고하는 데 기여할 수 있다. 특히 원자력 분야는 VSL 연구가 희소하므로 VSL 연구를 지속적으로 축적할 필요가 있다. 그리고 일반인의 위해성인식을 VSL에 체화시키기 위해 설문조사 기법인 CVM을 사용하면 좋을 것이다.

본 논문에서 CVM을 이용하여 추정한 원전사고의 VSL은 방사선 재해에 의한 사망의 사회적 비용을 추정하고 방사선 안전 정책을 수립하는 데에도 활용될 수 있다. 다만, 이 활용이 차선택이란 점은 인식될 필요가 있다. 왜냐하면, CVM의 성격상, 원자력이 아닌 방사선 재해는 그에 맞는 설문조사를 새로이 실시하여 VSL을 추정하는 것이 최선이기 때문이다.

본 논문의 사회적 비용 추정치들을 해석할 때 유의할 점은 다음과 같다. 첫째, 사망에 초점을 맞춰 도출한 원전과 화력발전소의 사회적 비용 추정치는 대단히 과소평가된 값이다. 이들은 모두 질병의 고통, 불임과 낙태, 경제적 손실<sup>[9]</sup>, 생태계 파괴 비용 등을 제외한다. 특히 원전은 방사성폐기물 처리 비용, 화력발전소는 기후변화 비용을 제외하고 있어 향후 이에 대한 보완연구가 필요하다. 둘째, 원전의 사회적 비용이 화력발전소보다 훨씬 낮게 추정되었지만, 전문가들이 기존의 객관적 자료만을 이용하여 분석하면 이보다 더욱 낮게 추정될 가능성이 높다. 왜냐하면 VSL을 추정하기 위해 CVM을 이용하면 전문가보다 높은 경향이 있는 일반인의 위해성인식<sup>[28]</sup>이 사회적 비용 추정치에 반영되기 때문이다.

본 논문은 최적의 에너지믹스 결정에 도움을 주고 화력발전소에 비해 상대적으로 과대평가된 원전의 위해성인식을 개선할 뿐만 아니라 CVM을 이용한 VSL 추정 연구의 발전에도 기여하게 될 것이다.

## Reference

- [1] Our World in Data, "Electricity Production by Source, World", Accessed January 19, 2022. <https://ourworldindata.org>
- [2] B. Verplanken, "Beliefs, Attitudes, and Intentions toward Nuclear Energy before and after Chernobyl in a Longitudinal Within-subjects Design", *Environment and Behavior*, Vol. 21, No. 4, 2016. <https://doi.org/10.1177/0013916589214001>
- [3] G. Prati, B. ZaniView, "The Effect of the Fukushima Nuclear Accident on Risk Perception, Antinuclear Behavioral Intentions, Attitude, Trust, Environmental Beliefs, and Values", *Environment and Behavior*, Vol. 45, No. 6, 2012. <https://doi.org/10.1177/0013916512444286>
- [4] H. Ritchie, "What are the safest and cleanest sources of energy?", Our World in Data, Accessed 21 January, 2023. <https://ourworldindata.org/>
- [5] S. Jarvis, O. Deschenes, A. Jha, "The Private and External Cost of Germany's Nuclear Phase-out", *Journal of the European Economic Association*, Vol. 20, No. 3, pp. 1311-1346, 2022. <https://doi.org/10.3386/w26598>
- [6] K. W. Viscusi, *Pricing Lives: Guideposts for a Safer Society*, Princeton University Press, Princeton, 2018.
- [7] I. Fairlie, "TORCH-2016: An Independent Scientific Evaluation of the Health-related Effects of the Chernobyl Nuclear Disaster", Friends of the Earth Austria, 2016.
- [8] S. Ahn et al., *An Integrated Environmental and Economic Analysis of Environmental Valuation via Impact Pathway Analysis: Sectoral Impact Assessment and Valuation*, Korea Environment Institute, Seoul, 2018.
- [9] H. Lindhjem, S. Navrud, N. A. Braathen, *Valuing Lives Saved through Environmental, Transport and Health Policies: A Meta-analysis of Stated Preference Studies*, OECD, Paris, 2010.
- [10] Y. Kim, "Estimating the Value of a Statistical Life Lost due to COVID-19 and Social Costs", *The Journal of Social Convergence Studies*, Vol. 7, No. 1, 2023. forthcoming.
- [11] W. M. Hanemann, "Welfare Evaluations in Contingent Valuation Experiments with Discrete Responses", *American Journal of Agricultural Economics*, Vol. 66, No. 3, pp. 332-341, 1984. <https://doi.org/10.2307/1240800>
- [12] W. M. Hanemann, B. Kanninen, "The Statistical Analysis of Discrete-Response CV Data", Working Paper No. 798, Department of Agricultural and Resource Economics and Policy, University of California at Berkeley, 1998.
- [13] IAEA Division of Public Information, D. Kinley III, "Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-Economic Impacts and Recommendations to the Governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine", IAEA, 2005.
- [14] B. Bennett, M. Repacholi, R. Z. Carr, Eds., *Health Effects of the Chernobyl Accident and Special Health Care Programmes, Report of the UN Chernobyl Forum Expert Group "Health"*, WHO, Geneva, 2006.
- [15] UNSCEAR, *Sources and Effects of Ionizing Radiation, UNSCEAR 2008 Report, Volume II, Scientific Annexes C, D and E*, UN, New York, 2011.
- [16] I. Fairlie, D. Sumner, "The Other Report on Chernobyl (TORCH)", Greens/EFA, 2006.
- [17] S. Pflugbeil, H. Paulitz, A. Claussen, I. Schmitz-Feuerhake, "Health Effects of Chernobyl: 20 Years after the Reactor Catastrophe", German Affiliate of the IPPNW, 2011.
- [18] Greenpeace International, *The Health Effects of the Human Victims of the Chernobyl Catastrophe: Collection of Scientific Articles, 2006*, Amsterdam, 2007.
- [19] R. Bertell, "The Death Toll of the Chernobyl Accident", In C. C. Busby, A. V. Yablokov, Eds., *ECRR Chernobyl: 20 Years On*, Documents of the ECCR 2006 No. 1, Green Audit Press, Aberystwyth, pp. 245-248, 2006.
- [20] ABC News, "Japan Acknowledges First Radiation Death from Nuclear Plant Hit by Tsunami", 6 September 2018.
- [21] UNSCEAR, *Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, UNSCEAR 2013 Report to the General*

*Assembly with Scientific Annexes, Volume 1, Scientific Anex A*, UN, New York, 2014.

- [22] WHO, *Health Risk Assessment from the Nuclear Accident after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami*, Geneva: Switzerland, 2013.
- [23] D. Normile, "Is Nuclear Power Good for You?", *Science*, Vol. 337, No. 6093, pp. 395-396, 2012. (doi:10.1126/science.337.6093.395-b.)
- [24] I. Fairlie, "Summing the Health Effects of the Fukushima Nuclear Disaster", *World Service Information on Energy*, 2015. <https://wiseinternational.org/>
- [25] USGAO, "Nuclear Regulation: Action Needed to Ensure That Utilities Monitor and Repair Pipe Damage", Report to the Honorable Edward J. Markey, House of Representatives, 1988.
- [26] Korea Federation For Environmental Movements, "Nuclear Power Plants and Major Accident Reports of Korea", 2011. <http://kfem.or.kr/>
- [27] Yonhapnews, "Energy Justice Actions "90% of the Deaths due to Nuclear Power Plants Being Part-time Workers", January 10, 2020. <https://www.yna.co.kr/>
- [28] L. Sjöberg, "Risk Perception by the Public and by Experts: A Dilemma in Risk Management", *Human Ecology Review*, Vol. 6, No. 2, pp. 1-9, 1999. <http://www.jstor.org/stable/24707052>
- [29] MOTIE, "The Third Energy Master Plan", Korea Ministry of Trade, Industry and Energy, 2019.

## 원자력발전소 사고 사망의 통계적 생명가치와 사회적 비용 및 에너지정책 시사점

김용주\*

서울디지털대학교 경영학과

### 요 약

본 논문은 원자력발전소(원전) 사고에 의한 조기사망의 사회적 비용을 추정하기 위해 조건부가치측정법(Contingent Valuation Method, CVM)을 이용하여 통계적 생명가치(Value of a Statistical Life, VSL)를 추정한다. VSL 추정치는 약 35억 5천만 원이다. 이에 세계 원전 역사상 발생한 모든 사고 사망자수 약 181만 명을 곱하여 추정한 사회적 비용은 1,952조 원으로서 한국의 2022년 실질 GDP에 비견되는 수준이다. 연평균 조기사망자수와 사회적 비용은 각각 26,000명과 28조 원이다. 1987~2021년간 세계 화력발전소의 사고와 대기 오염물질 배출로 인해 발생한 조기사망의 사회적 비용 추정치는 26,919조 원인데, 이는 미국의 2021년 GDP 규모에 상당하는 규모로서 9조 원을 기록한 원전의 약 3,000배에 달한다. 2021년 한 해만 보더라도, 화력발전소의 사회적 비용은 1,075조 원에 달하지만, 원전은 2,920억 원에 불과하다. 한국의 경우, 2050 탄소중립 정책의 영향으로 재생에너지 발전 비중이 증가할 것이므로, 화력발전 대비 원자력발전 비중을 증가시키는 에너지믹스를 제안한다. 본 논문은 또한 효율적인 에너지 정책을 담보하기 위해 CVM을 이용한 VSL 추정 연구를 지속적으로 축적할 필요가 있음을 강조한다.

중심단어: 원자력발전소 사고, 화력발전소 사고, 사망위해성, 사회적 비용, 조건부가치측정법(CVM), 통계적 생명가치(VSL)

### 연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(단독저자)	김용주	서울디지털대학교 경영학과	교수