

고준위 방사성 폐기물 관리 프로그램을 위한 사고 위험 대응 기금 추정

표 희 동[†]

[†]국립부경대학교(교수)

Estimating Accident Risk Response Fund for High-level Radioactive Waste Management Program

Heedong PYO[†]

[†]Pukyong National University(professor)

Abstract

This paper aims to estimate a response fund of accident risk for high-level radioactive waste management program in Korea using double bounded dichotomous choice(DBDC) question and spike model of contingent valuation method(CVM). To ensure the reliability and the validity of CVM a survey was conducted for 1,000 samples by internet panel method, and respondents would be willing to pay for its response fund at each bid level, ranging from 2,000~10,000 won per month and per household for five years. As a result, the monthly truncated mean willingness-to-pay(WTP) is estimated to be 7,284~7,328 won and 7,302~7,354 won per household for DBDC and Spike model, which values are quite similar, respectively. and monthly median WTP is 6,248~6,288 won and 6,176~6,219 won per household for DBDC and Spike model, which values are quite different from truncated mean WTP, respectively. The aggregated estimates of WTP for 5 years is converted to be 7.42~8.71 trillion won.

Key words : Response fund of accident risk, High-level radioactive waste management, Contingent valuation method, Double bounded dichotomous choice question, Spike model

I. 서론

해외 고준위 방사성 폐기물(이하 고준위방폐물)은 대체로 심층처분을 추진하면서 현재 사용후핵연료 재처리시설 또는 중간저장시설을 보유하고 있다. 이 가운데 프랑스와 일본은 재처리시설을 갖고 있고, 핀란드, 스웨덴, 미국, 캐나다, 스위스 및 국내는 직접처리를 채택하고 있으며, 스웨덴, 미국, 캐나다 및 스위스는 중간처리시설을 갖고 있다.

사용후핵연료처분장 부지의 지질은 대부분 심층처분을 고려하고 있는데 암중의 경우는 응회암, 결정질암, 퇴적암, 점토층 등 다양하고, 미정인 나라도 많다. 심도는 최소 200m에서 최대 1,000m이며, 나라마다 300~500m가 평균이라 할 수 있다.

사용후핵연료 처분실시주체는 전력회사(원자력발전사업자)의 공동출자회사 구성(스웨덴, 핀란드, 캐나다), 연방정부와 원자력발전사업자가 출자하는 공동조합(스위스), 공사(프랑스, 벨기에)

[†] Corresponding author : 051-629-5959, pyoh@pknu.ac.kr/orcid.org/0000-0003-4996-2801

* 이 논문은 국립부경대학교 자율창의학술연구비(2025년)에 의해 연구되었음.

등으로 형태도 다양하다.

중간저장에 대한 국가별 사업비 분석결과 국내의 중간저장 사업의 단위비용은 3.16억원/tU 수준이고, 스웨덴 3.16억원/tU, 미국 0.57억원/tU이다. 이는 중간저장 시설형태(습식 또는 건식), 용기 재질(금속 또는 콘크리트) 및 시설 운영기간 등에서 발생하는 것으로 분석된다. 국내의 처분 사업의 단위비용(7.24억원/tU) 수준은 스웨덴(6.35억원/tU), 핀란드(8.60억원/tU) 등 직접처분을 정책으로 추진하는 국가들과 유사한 수준으로 분석되었다(KRWA, 2018). 국가별로 처분시설의 운영기간과 암종 등에 따라 사업비에 차이가 발생하는 것으로 예상되며, 특히 스위스(30.87억원/t)의 경우는 재처리 물량에 대한 사업비가 반영되어 다른 나라에 비해 높은 수준으로 분석되었다.

고준위방폐물 관리시설사고로는 옛 소련 키슈탐 재처리시설 고준위 폐액저장조 폭발사고(우랄 핵참사)와 미국 헨포드 재처리시설 고준위 폐액 탱크 누출사고가 모두 국제원자력사고 6등급에 해당하는 것으로 평가된다. 방사성물질운반사고도 미국 초란우라닐용액 수송차 전복사고, 프랑스 육불화우라늄 수송선 ‘몬레이호’ 침몰사고 등이 있으나 다행히 큰 피해는 없는 것으로 조사되었다.

향후 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency: IAEA) 차원에서 규정 정비 및 시나리오 연구가 필요한데 고준위방폐물 관리시설의 사고 비용에 대한 기술·공학적 후속연구는 사용후핵연료의 운반·저장·처분과 관련하여 발생가능한 사고에 대한 방사선적 위험의 크기를 원전사고와 비교하여 사고처리 비용을 도출하는 단계적 연구가 필요하다고 본다.

원자력발전의 비용은 직접비용(운전비용, 발전비용)과 외부비용으로 구성되어 있고, 직접비용은 원전의 입지선정으로부터 시작하여 건설, 운전 및 방사성폐기물의 발생 및 저장, 노후 원전의 해체 등과 관련한 일체의 비용을 의미하고, 외부비용들은 부분적으로는 사적비용으로 반영되어

내부화되어 있고, 다양한 내부화 장치에도 불구하고 심각한 사고가 발생할 위험과 그로 인하여 야기될 비용은 여전히 외부비용으로 남아 있다. 한편, 세계적으로 고준위방폐물 관리시설의 사고 위험 대응 비용, 지역지원비와 같은 외부비용을 구체적으로 추정하는 사례는 없는 것으로 앞으로 이와 관련한 활발한 연구가 필요할 것이다. 한편 스웨덴, 일본, 독일 등 해외에서도 사고비용, 환경모니터링 비용 등 사회적 비용을 총사업비에 반영하는 추세이고, 정부의 에너지전환정책과 연계하여 고준위방폐물 총사업비의 적정성 책정에 대한 과학화 및 객관화 필요성을 제기하고 있다.

고준위방폐물 관리시설은 중간저장시설과 영구 처분시설을 포함하고 있는데, 국내는 현재 별도의 관리시설을 갖고 있지 않으며 원전 부지내 임시저장은 한계에 이르고 있다. 따라서 국내는 중간저장시설과 영구처분시설을 하나의 부지에 단계적으로 확보할 계획인데 이와 같은 관리시설에서 사고가 발생할 경우 인명피해, 재산피해 및 자연자원피해 등에 대한 보상 및 복구를 위한 기금을 마련할 필요가 있다. 이 연구는 최초로 장래에 설치될 고준위방폐물 관리시설에 대한 사고 위험회피 또는 사고 위험 대응 기금을 조건부가 치측정법(Contingent Valuation Method: CVM)을 이용하여 추정하는데 그 목적이 있다.

II. 연구 방법

1. 고준위방폐물 관련 사회적 비용

경제학에서 한 경제주체가 자신의 경제행위로 인해 자신의 수익 또는 비용구조에 영향을 받는 것을 내부효과(internalization)라고 하지만, 한 경제주체의 경제활동이 시장가격의 변화를 거치지 않고 다른 경제주체의 수익 또는 비용에 영향을 미침에도 불구하고 아무런 대가를 받거나 지불하지 않는 현상을 외부효과(externality)라고 말한다.

사회적 비용(Social Costs)은 직접비용(Private Costs)

또는 내부화된 비용(*Internalized Costs*)과 외부비용(*External Costs*)을 모두 포함한 비용으로, 직접 비용 또는 내부화된 비용은 시장가격에 반영된 비용을 말하는데, 비시장적 재화와 서비스에 대한 가치나 환경오염피해에 대한 저감비용이 시장가격(발전원가)에 반영될 경우 직접비용은 이를 포함한다.

Zweifel et al.(2005)는 선택실험법(*choice experiment method*)을 이용하여 스위스 원전에서 거리에 따른 WTP(*Willingness-to-Pay*)를 추정하였는데, 원전에서 0km 에서의 100% 보험커버리지 WTP는 \$2,280이고, km당 \$24씩 감소하여 궁극적으로 95km의 거리에서 \$0로 되는 것으로 추정하였다.

Sun et al.(2014)는 CVM을 이용하여 중국 원자력발전소가 인근지역에 건설되는 것을 회피하기 위한 WTP를 추정하였는데, 80km와 30km 떨어진 지역에 원전이 건설되는 것을 회피하기 위해 각각 현재 전기요금의 56.7%와 69.1%를 증가시킬 수 있다고 추정하였다.

Lim et al(2017)은 국내 원자력발전소의 인지적 가치와 경제적 가치를 추정하기 위해 컨조인트분석법을 이용하였는데, 새로운 원전의 건설과 운영으로 인해 야기되는 다양한 문제를 중립화하기 위한 WTP를 조사하였다. 그 결과 원전의 부정적 영향을 해결하기 위해 각 가구는 평균 99,677원/월(연간 19조원)을 추가적으로 지불할 의사가 있는 것으로 나타났다.

Joo(2016)는 다기준의사결정법(*multi-criteria decision making*)을 이용하여 국내 핵연료주기옵션에 따른 사회적 비용을 정상적인 시나리오와 사고 시나리오에 따라 평가하였는데, 그 결과 정상 시나리오에서 입지갈등비용은 핵연료 주기옵션에 따라 0.143원~2.079원/kWh, 사고 시나리오에서의 심각한 사고위험비용은 옵션에 따라 0.075원~0.1원/kWh으로 추정하였다.

Jo(2015)에 의하면 국내 원전의 발전비용에는 건설비, 운전유지비, 연료비 등 직접비용과 지역 자원시설세(1원/kwh) 및 R&D비용(원자력연구개발

발기금, 1.2원/kw, 지역협력사업비(0.25원/kwh) 및 사업자 지원 등 기타비용이 포함되어 있다.

Heo(2014)는 건설비, 운전유지비 및 연료비 등을 직접비용으로, 입지갈등비용, 사고위험비용, 안전규제비용, 정책비용 및 미래세대비용 등을 외부비용으로 분류하였다.

Ham(2014)은 원자력 주변지역 주민들의 지원금을 원자력 위험에 대한 수용가격이라고 전제한다. 원자력 위험의 가격을 원자력 발전소를 회피하기 위해 지불가능한 대가로 설문조사를 하였는데, 그 결과 원자력 위험의 가격은 연간 5조 8,719억원 수준으로 추정하고, '06~'11년 평균 원자력 주변 주민 지원금 2,098억원보다 훨씬 높은 것으로 비교하였다. 하지만, 이 연구는 설문대상을 경북대구지역으로 한정하여 437명으로 최근 양분선택형 CVM이 아닌 개방형 CVM에 의한 단순 회귀분석법을 활용한 한계가 있다.

KEI(2013)은 원전사업자가 부담하지 않고 정부나 국민이 직접 부담하게 될 중대사고로 인한 위험비용을 원자력발전의 외부비용으로 고려하였고, 설문조사에 의한 CVM을 이용하여 응답자들에게 현재 운영 중인 원자력발전의 사고위험을 해소하기 위해 매월 지불하고 있는 전기요금에 추가적으로 얼마를 지불할 것인지 파악하였다. 설문조사결과 원전사고위험해소를 위한 연간 WTP는 5,489억원~9,042억원(3.8원~6.3원/kWh)이고, 인근지역 추가적 1기원전건설회피를 위한 연간 WTP는 4,936억원~8,936억원(52.1원~94.9원/kWh)으로 나타났다.

Kim(2013)은 일본의 후쿠시마 원전사고이후 국민들이 실제로 느끼는 '사회적 안정성' 정도를 알아보기 위해 원전의 경제성과 안전성의 상반가치를 CVM설문조사결과 발전원가 4.75원/kWh 인상 효과로 나타났다.

Jun et al.(2010)는 CVM을 이용하여 핵에너지의 긍정적 외부효과를 추정하였는데, 핵기술 혁신과 사회적 수용성관리와 같은 핵정책을 개발함으로써 대중에 대한 핵에너지에 대한 적합한 정보를

제공한다면 핵에너지의 사회적 가치를 대략 68.5% 증가시킬 수 있다고 추정하였다.

이상에서 검토한 선행연구들을 종합적으로 검토하면 세계적으로 고준위방폐물 관리시설의 사고 위험대응비용, 지역지원비와 같은 외부비용을 구체적으로 추정하는 사례는 없는 것으로 앞으로 이와 관련한 활발한 연구가 필요할 것이다. 따라서 이 논문은 고준위방폐물 관리시설의 사고 위험 대응 기금을 추정하는 최초의 시도로서 이 분야에 대한 프론티어적 기여를 할 수 있을 것으로 기대한다.

2. CVM을 이용한 사고 위험 대응 기금

이 논문에서는 CVM에 의한 고준위방폐물시설의 사고 위험 대응 기금에 대한 추정에 초점을 맞춰 그 방법론적 근거를 제시한다.

Hanemann(1984, 1989)이 이용한 효용격차모형(utility difference model)은 이중경계 양자택일형(double bounded dichotomous choice: DBDC) CV 측정자료로부터 Hicks의 보상수요함수를 측정하는 한 방법을 제공해 준다.

Hanemann et al.(1991)에 의한 DBDC-CV질문은 응답자에게 주어진 환경질의 변화에 대해 제시된 금액을 수용할 것인지 아니면 거절할 것인지를 묻는다. 각각의 응답자들은 두 개의 금액을 제시 받게 되고 따라서 4개의 결과가 나올 수 있다. 즉 a) 두 개의 응답이 모두 Yes인 경우(Yes-Yes); b) 두 개의 응답이 모두 No인 경우(No-No); c) Yes 이후에 No가 뒤따르는 경우(Yes-No); d) No 이후에 Yes가 뒤따르는 경우(No-Yes) 각각의 경우를 나타내는 기호는 다음 식(1)와 같다.

$$\begin{aligned} I_i^{yy} &= 1(\text{response of respondent } i \text{ is Yes-Yes}) \dots (1) \\ I_i^{yn} &= 1(\text{response of respondent } i \text{ is Yes-No}) \\ I_i^{ny} &= 1(\text{response of respondent } i \text{ is No-Yes}) \\ I_i^{nn} &= 1(\text{response of respondent } i \text{ is No-No}) \end{aligned}$$

위 식(1)에서 $1(\cdot)$ 는 만약 괄호안의 주장이

참이면 '1'이고 그렇지 않으면 '0'을 나타내는 지표함수(indicator function)이다.

효용극대화를 추구하는 응답자 N명의 표본을 가정할 경우 i번째 응답자가 최초 제시금액(A_i)에 'Yes'라고 응답할 때 $A_i^u(A_i < A_i^u)$ 는 두 번째 제시금액으로서 A_i 보다 더 높은 금액이고, i번째 응답자가 최초 제시금액(A_i)에 'No'라고 응답할 때 $A_i^d(A_i > A_i^d)$ 는 A_i 보다 낮은 두 번째 제시금액이다. 이것의 로그우도(log-likelihood)함수는 다음 식(2)와 같다.

$$\ln L = \sum_{i=1}^N (I_i^{yy} \ln [1 - G_c(A_i^u)] + I_i^{yn} \ln [G_c(A_i^u) - G_c(A_i)] + I_i^{ny} \ln [G_c(A_i) - G_c(A_i^d)] + I_i^{nn} \ln G_c(A_i^d)) \dots (2)$$

선행연구들처럼 $F_\eta(\cdot)$ 를 로지스틱 누적분포 함수로 만들어 $\Delta v = a - bA$ 와 결합하면 아래 식(3)을 얻을 수 있다:

$$G_c(A) = [1 + \exp(a - bA)]^{-1} \dots (3)$$

그리고 이를 기초하여 WTP의 전체평균(C^+)과 중앙값(C^*) 및 Truncated mean WTP(CC^{++})을 다음 식(4)와 (5)와 같이 도출할 수 있다.

$$C^+ = C^* = a/b \dots (4)$$

$$CC^{++} = (1/b) \ln [1 + \exp(a)] \dots (5)$$

많은 응답자들이 어떤 자원의 보존을 위해 전혀 지불할 의사가 없는 것에 대한 처리방법이 중요한 쟁점이 되고 있다. 실제로, CV에서 흔히 발견되는 '0'의 문제를 처리할 수 있는 하나의 방법은 Kristrom(1997)에 의해 제시된 스파이크 모형을 이용하는 것이다. 스파이크 모형은 '0'에서 WTP분포의 부(-)의 부분을 절단(truncation)하고

‘0’에서의 스파이크를 고려한 것이다.

‘NO-NO’의 응답자들은 실제로 ‘0’의 WTP를 가진 사람들과 양(+)의 WTP를 가지고는 있지만 그것이 A_i^d 에는 미치지 못하는 사람들로 이루어져 있어서 “NO-NO” 응답자들에게는 이어지는 세 번째 질문에서 “당신은 1원이라도 지불할 의사가 있습니까?”와 같은 질문이 추가된다. 이러한 질문에도 “NO”라고 답하는 응답자들은 그들이 생각하는 가치가 없다는 사실을 나타내거나 가상의 시장에 대한 저항을 반영하고 있다(Mitchell and Carson, 1989). 따라서, “NO-NO-NO” 응답은 ‘0’의 가치로 받아들여진다. 각 응답자 i 에게 있어서 식(1)의 I_i^{NV} 는 다음 식(6)의 I_i^{NVY} 와 I_i^{NNV} 로 분류된다.

$$\begin{aligned} I_i^{NVY} &= 1(\text{respondent } i \text{ is No-No-Yes}) \dots\dots\dots (6) \\ I_i^{NNV} &= 1(\text{respondent } i \text{ is No-No-No}) \end{aligned}$$

WTP의 분포를 추정하기 위해서 WTP가 양(+)의 축에 로지스틱곡선으로 분포한다고 가정하면, 공변량(covariate)을 가지지 않은 스파이크모형의 로그우도(log-likelihood)함수는 식(7)과 같다.

$$\begin{aligned} \ln L = \sum_{i=1}^N & (I_i^{YY} \ln[1 - G_c(A_i^u)] \dots\dots\dots (7) \\ & + I_i^{YN} \ln[G_c(A_i^u) - G_c(A_i^d)] \\ & + I_i^{NY} \ln[G_c(A_i^d) - G_c(0)] \\ & + I_i^{NN} \ln[G_c(A_i^d) - G_c(0)] + I_i^{NNV} \ln[G_c(0)] \end{aligned}$$

$$\text{단, } G_c(A) = 0 \quad \text{if } A < 0 \dots\dots\dots (8)$$

따라서, 스파이크는 $[1 + \exp(a)]^{-1}$ 로 정의되고 스파이크 모형에서 Truncated mean WTP와 중앙값을 산출하면 다음 식(9)과 (10)과 같다.

$$C^+ = (1/b) \ln[1 + \exp(a)] \dots\dots\dots (9)$$

$$\begin{aligned} C^* &= a/b, \text{ if } [1 + \exp(a)]^{-1} < 0.5 \dots\dots\dots (10) \\ \text{otherwise } C^* &= 0 \end{aligned}$$

Hanemann(1984)은 평균(mean)이 데이터에 나타나는 지불의사가 없는 응답자들로 인해 발생하는 분포의 작은 변화에도 민감하게 반응하는 반면에, 중앙값(median)은 상대적으로 중앙집약적 경향을 보여주는 신뢰할 만한 추정치라고 주장하였다. 이러한 이유로 인해 중앙값은 평균보다 더 신뢰할 수 있다. 그러나 Johansson et al.(1989)은 Hanemann에 대한 논평에서 평균이 파레토효율과 일치하는 반면에, 중앙값은 대체로 그러지 못하기 때문에 평균이 더 선호되는 추정치라고 주장하였다. 평균추정치는 모집단 크기와 곱하여 총 가치를 산출할 수 있는 반면에, 중앙값의 추정치는 그렇지 못한다. 물론 평균과 중앙값 사이의 선택의 문제는 CVM 연구의 어떤 분야에서도 일어날 수 있다.

III. 연구 결과

이 연구에서는 CVM과 같은 설문조사방법을 이용하여 고준위방폐물 관리시설의 사고 위험 대응 기금을 추정하기로 한다.

1. 설문지 설계

가. 대상재화 선정 및 시나리오 작성

CVM의 WTP 추정은 전적으로 설문조사에 의존하며, 분석결과는 작성방법에 따라 민감한 영향을 받는다.

CVM에 사용되는 설문지는 평가대상의 설명과 응답자가 처한 가상적 상황에 대한 설명, 평가대상에 대한 지불의사를 유도하는 질문, 마지막으로 응답자의 사회경제적 특징과 평가대상에 관한 선호 및 이용여부 등에 관한 질문을 포함한다.

이 연구에서는 지불수단의 선택으로 추가적인 전기요금이라는 일종의 세금을 지불수단으로 제시한다. 보기카드(show card)를 이용하여 고준위방폐물시설에 대한 정보, 응답자의 이해를 돕기 위해 그림과 설명을 병행한 고준위방폐물의 발

생, 운반, 중간저장 및 영구처분 등 고준위방폐물 관리 프로세스를 먼저 제공하고, 고준위방폐물의 정의를 다시금 정리하여 설명하고, 이에 대한 관리시설의 필요성과 사고위험에 대하여 충분한 정보를 제공한다. 또한 설문문의 2단계에서는 고준위방폐물 관리시설에 대한 응답자의 이해를 보다 증진시키고, 일반국민의 인식도를 조사하기 위해 다양한 질문이 고려되고, 설문문의 3단계에서는 이 설문문의 주된 목적인 고준위방폐물 관리시설에 대한 사고 위험 대응 기금에 대한 WTP를 조사하기 위해 응답자들에게 매월 지불하는 전기요금에 향후 5년간(KDI, 2012) 추가적으로 부담할 매월 WTP를 5개 수준의 제시금액에 의거 응답할 수 있도록 시나리오를 작성한다.

나. 지불의사 유도방법 및 제시금액의 선택

이 연구에서는 NOAA의 "blue-ribbon CV panel"에서 제시한 DBDC 질문법으로 지불의사를 유도하였다(Arrow et al., 1993). 무작위로 추출된 표본의 응답자에게 미리 정해진 특정금액을 가정해서 매달 추가적으로 지불할 의사가 있는지를 물어본 후에 “예”라고 응답한 응답자에게는 초기금액의 2배에 해당하는 금액을, “아니오”라고 응답한 사람에게는 초기 제시금액의 1/2에 해당하는 금액을 낼 의사가 있는지를 물어본다. 그리고 초기 제시금액과 1/2에 해당하는 금액 모두 “아니오”라고 응답한 응답자에게는 고준위방폐물시설의 사고 위험 대응 기금을 확보에 대한 지불의사여부를 물어본 후, 지불의사가 있을 시 그 금액을 직접 기입하도록 한다. 그리고 전혀 고준위방폐물시설의 사고위험에 대해 지불의사가 없는 경우에는 다른 문항에서 질문하여 그 이유를 응답하도록 유도한다.

제시금액의 경우 CVM으로 도출되는 WTP의 평균값 및 중앙값에 민감한 영향을 미치게 된다. 따라서 제시금액의 결정에 있어 세심한 결정이 이루어져야 한다. Hanemann and Kanninen(1999)은 관심집단(focus group)과 사전조사(pretest)를 통해

획득된 WTP 분포를 활용하도록 권고하고 있다. 이 연구에서는 원자력발전의 사고위험회피를 위한 설문조사문헌에서 사용하고 있는 제시금액의 범주를 검토하고, 한국환경경제학회 회원 50명을 통한 Delphi기법을 활용함으로써 제시금액 수준에 대한 의견을 수렴하였다. 1차 예비조사는 개방형(open-ended)질문방식을 적용하여 응답자의 자발적 지불의사액을 수집하였고, 대체로 1만원 이내의 수준에 분포하는 경향을 보였으며, 2차 예비조사는 1차 예비조사를 바탕으로 초기 제시금액의 수용가능성과 DBDC 질문구조에서의 응답 일관성 및 단조성(monotonicity)를 충족하는 것으로 나타났다. 따라서 이 연구에서는 고준위방폐물 관리시설의 사고 위험 대응 기금을 확보하기 위한 초기제시금액을 월 2,000원부터 10,000원까지 5개 수준으로 설정하고, 전체 1,000명의 응답자를 각 제시금액에 200명씩 무작위로 할당하여 설문을 수행하였다.

2. 설문방법 및 설문조사결과

이 연구에서는 온라인 패널 개별면접조사 방법을 사용하여, 층화 무작위 표본추출법(Stratified Random Sampling)을 이용하여 1,000명의 표본을 획득하였다. 우선 응답자를 위해 설문지의 이해도 및 완성도를 높일 수 있도록 사전조사를 실시하여 설문지 양식 및 내용을 수정하고 설문조사를 실시한다. 이 연구에서는 20만여명의 패널을 확보하고 있는 ㈜리서치앤리서치 조사기관에 의뢰하여 만 20세에서 65세의 전국 성인남녀 세대주 또는 세대주 배우자를 대상으로 95% 신뢰수준에서 최대허용 표본오차 $\pm 3.10\%$ 포인트로 조사가 이루어졌다. 설문조사를 실시하기 위해 먼저 면접응답자 선정질문을 통하여 이 설문에 적합하지 않은 응답자를 제외하였다. 구체적으로 연령을 20대 이상 65세 미만으로 한정하였고, 세대주 또는 세대주 배우자가 아닌 세대원과 매월 소득이 없을 경우와 외국거주민의 경우 조사에서 제

외하였다. 또한, 본 설문에 편의를 줄 수 있는 업종(광고/홍보회사, 방송 언론기관, 시장조사/컨설팅회사, 발전회사 등 에너지 관련 회사, 환경단체 등 사회단체)에 근무하고 있는 응답자 본인이나 가족이 있을 경우 설문을 종료하도록 하였다.

가. 인구통계학적 분석

남녀 성별비율은 거의 비슷하고, 연령별 분포에선 세대주 또는 세대주 배우자의 가능성이 낮은 20대와 30대가 20% 수준에 미치지 못하였고, 60대 이상은 26% 수준을 나타냈다. 또한, 세대주가 72%, 세대주 배우자가 29% 수준으로 세대주가 세대주 배우자보다 큰 비중을 차지하고 있다.

권역별 인구비중이 고려된 조사결과 서울/경기/인천 등 수도권의 비중이 50% 수준을 차지하고 있고, 소득이 있는 가족수는 1명이 41%, 2명이 43%로 가족원의 1~2명이 대부분 소득이 있는 것으로 구성되어 있다. 응답자의 월평균 소득은 481.6만원(표준편차 228.7만원)으로 300만원에서 500만원 수준이 51%의 분포를 차지하고 있지만 다양한 소득수준의 분포를 나타내고 있고, 응답자의 월평균 지출금액은 248.8만원(표준편차 106.6만원)으로 125만원에서 275만원 수준이 57%의 비중을 차지하고 있는데 이는 소득의 50% 정도를 지출한 것을 의미한다. 한편, 응답자의 자녀 또는 손자녀는 평균 1.0명이고, 응답자의 학력수준은 2년제 대졸 이상 81.5%, 고졸 이하 18.5%를 차지하고 있다.

나. 고준위방폐물 사고대응 WTP의 추정분석

각 첫 번째 제시금액은 2,000원에서 10,000원으로 각각 대략 200명의 표본크기를 갖게 된다. 예컨대, 첫 제시금액이 2,000원인 질문에 대한 ‘YES’의 응답비율은 ‘YY’의 37.5%와 ‘YN’의 33.5%의 합계인 71%가 된다. 한편, 첫 번째와 두 번째 제시금액에 대한 응답분포를 종합적으로 살펴보면 ‘YY’는 23.7%, ‘YN’은 32.2%, ‘NY’는 14.0%, ‘NN’는 30.1%를 차지하고 있다. 즉, 첫 번째 또는 두 번째 제시금액 중 어느 하나의 제시

금액을 기꺼이 지불할 의사가 있는 응답자수는 1,000명 중 699명(69.9%)이고, 제시금액의 어느 것도 지불할 의사가 없는 응답자는 301명(30.1%)이다. 그런데, ‘NN’ 응답자 중에서 99명(9.9%)은 1원 이상 지불할 의사가 있다고 응답하였고, 나머지 202명(20.2%)은 1원도 지불할 의사가 없는 것으로 조사되었다.

<Table 1> Distribution of response

First bid (won)	Sample size	No. of response				
		YY	YN	NY	NN	
					NNY	NNN
2,000	200	75	67	8	9	41
4,000	199	59	73	23	9	35
6,000	202	41	65	40	19	37
8,000	200	35	56	36	28	45
10,000	199	27	61	33	34	44
Total	1000	237	322	140	99	202

3. 사고위험대응비용 추정결과

최대우도(ML)추정방법에 의한 추정결과 <Table 2>에 나타난 바와 같이 공변량(covariate)이 없는 경우 DBDC 모델과 스파이크 모델의 평균(mean) WTP는 각각 7,327.7원과 7,354.3원이고, 중앙값(median) WTP는 각각 6,247.7원과 6,176.1원으로 두 모델간의 평균값과 중앙값은 각각 매우 유사하지만, 평균값이 중앙값 보다 1,000원 남짓 크게 추정되었다. 이는 통계학적으로 제시금액이 낮을 수록 응답분포가 높고, 제시금액이 클수록 응답분포가 낮은 오른쪽 긴 꼬리 자료 분포(skewed to the right)로 일반적 현상이라고 할 수 있다. 또한, DBDC모델과 스파이크모델의 결과가 유사한 이유는 ‘NNN’응답이 상대적으로 낮은 20.2%를 차지하고 있기 때문인 것으로 판단된다. 한편, 모든 모델의 변수(상수와 제시금액), mean WTP와 median WTP 추정치는 1% 수준에서 통계적으로 유의한 것으로 나타났다.

<Table 4>에 나타난 공변량이 있는 경우

DBDC 모델과 스파이크 모델의 평균 WTP는 각각 7,284.3원과 7,302원이고, 중앙값 WTP는 각각 6,282원과 6,219원으로 공변량이 없는 경우와 매우 유사한 결과이다. <Table 3>에 나타난 바와 같이 공변량이 있는 경우의 변수는 여러 변수들 중 통계적으로 유의한 underground(사용후핵연료 영구처분시설 건설 필요성), Inc_level(가구당 월 평균소득수준), Recog_level(고준위방폐물 관리시설에 대한 인지도), Electric_level(가구당 월 평균 전기요금) 등 네 가지 변수들이 최종적으로 선정되어 변수계수는 1% 또는 5%의 수준에서 통계적으로 유의한 것으로 나타났다.

<Table 2> Estimates for WTP without covariates

Variables	DBDC	Spike
Constant	1.3425 (15.80)***	1.2828 (17.28)***
Bid(thous won)	.2149 (26.42)***	.2077 (29.4574)***
No. response	1000	1000
log-likelihood	-1388.51	-1574.65
Wald statistic	722.0849	870.8563
p-value	0.0000	0.0000
Mean WTP	7.3277	7.3543
Standard error	.2210	.2285
t-statistic	(33.1517)***	(32.1915)***
95% Confidence Interval(CI)	[7.226 - 7.386]	[6.924 - 7.822]
Median WTP	6.2477	6.1761
Standard error	.2763	.2772
t-statistic	(22.6112)***	(22.2807)***
95% CI	5.704-6.783	5.641-6.728

Note. *** indicates significant at 1% level.

WTP 추정치의 총합화 또는 집계란 표본의 WTP 추정치를 모집단의 WTP의 가치로 확대하는 것으로 추정된 WTP를 목표모집단의 가구 수를 곱하여 연간 총 WTP를 산출하고, 연간 총 WTP가 5년 동안 발생할 것으로 집계하는 것이다. 이 연구에서 활용할 국내 목표모집단의 가구 수는 19,837,665가구자료를 사용한다. WTP 중 중앙값(median)의 4개 평균값(공변량이 없는 경우와

<Table 3> Definition and descriptive statistic

Variable	Definition	Mean	SD
under-ground	1=no needs ~ 5=very needs	4.02	0.75
Inc_level	1= <1.5 million won, 2= .5~2.5million won, 3=2.5~3.5 million won, 4=3.5~4.5 million won, 5=45~5.5 million won, 6=5.5~6.5 million won, 7=6.5~7.5 million won, 8=7.5~10 million won, 9= >10 million won	4.68	2.11
Recog_HLW	1=very unknown ~ 5=very wellknown	3.28	0.93
Electric_level	(1= >20 thous won 2= 20~30 thous won 3= 40~60 thous won 4= 60~80 thous won 5= 80~100 thous won 6= 100 thous won	2.65	1.20

있는 경우의 DBDC 모델과 스파이크 모델의 각각 중앙값)인 가구당 매월 6,232.7원을 보수적 추정치로 활용하고, 평균(mean)의 4개 평균값(공변량이 없는 경우와 있는 경우의 DBDC 모델과 스파이크 모델의 각각 평균값)인 가구당 매월 7,317.1원을 낙관적 추정치로 활용한다. 결과적으로 5년간 발생할 WTP를 단순 합계할 경우 보수적 추정치의 집계는 7.42조원(=6,232.7원/가구/월×19,837,665가구×12월×5년), 낙관적 추정치의 집계는 8.71조원(=7,317.1원/가구/월×19,837,665가구×12월×5년)이고 방사성 폐기물 관리 기금에 적용되는 1.52%의 할인율을 적용하여 현재가치로 환산할 경우 보수적 추정치의 집계는 7.09조원, 낙관적 추정치의 집계는 8.33조원이다.

IV. 결 론

국내외적으로 원자력발전의 사고위험대응비용 산정방법에 대한 연구는 다양하게 이루어져 왔다. 유럽을 중심으로 전산모델(ExternE, CASES

<Table 4> Estimates for WTP with covariates

Variables	DBDC	Spike
Constant	-1.3478 (-3.499)***	-1.4190 (-3.854)***
BID	.2220 (26.561)***	.2151 (29.698)***
Underground	.4037 (4.946)***	.4267 (5.382)***
Inc_level	.0674(2.248)**	.0541(1.854)*
recog_HWL	.1468(2.198)**	.1551(2.356)**
Electric_level	.1219(2.327)**	.1048(2.065)**
No. response	1000	1000
Log-likelihood	-1360.705	-1546.850
Wald statistic	741.350	895.874
p-value	0.000	0.000
Mean WTP	7.2843	7.3020
Standard Error	.2189	.2256
t-statistic	33.2792	32.8880
95% CI	7.104 - 7.297	6.864 - 7.767
Median WTP	6.2883	6.2187
Standard Error	.2708	.2717
t-statistic	23.2217	22.8880
95% CI	5.727 - 6.812	5.691 - 6.761

Note. ** and *** indicate significant at 5% and 1% level respectively.

등)에 의한 산정방법, 손해배상책임과 같은 보험 산정방법, 일본의 상호부조법, 사고위험회피에 대한 설문조사방법(CVM, CA 등)등이 활용되고 있다. 하지만 고준위방폐물 관리시설 사고위험대응 비용에 대한 산정방법 연구는 전무하다. 이 연구는 처음 장래에 설치될 고준위방폐물 관리시설에 대한 사고위험회피 또는 사고위험 대응기금을 마련하기 위해 국내 국민의 지불의사금액을 CVM을 이용하여 추정하였다.

주지하는 바와 같이 CVM은 대상재화의 선정과 시나리오의 작성, 지불의사 유도방법, 제시금액의 선택 등 설문지 설계가 매우 중요하다. 이 연구에서는 이러한 설문지 설계와 관련하여 여러 차례의 전문가 그룹(한국환경경제학회, 원자력 관련 전문가 등)의 의견을 수렴하고, 전문 조사기관의 층화된 무작위표본추출법을 이용한 온라인 패

널조사방법에 의거 1,000개의 표본을 획득하였다.

이와 같은 자료를 이용하여 추정한 결과는 다음과 같다. 첫째, 첫 번째 또는 두 번째 제시금액 중 어느 하나의 제시금액을 기꺼이 지불할 의사가 있는 응답자는 1,000명 중 699명(69.9%)이고, 제시금액의 어느 것도 지불할 의사가 없는 응답자는 나머지 301명(30.1%)이다. 둘째, DBDC 모델과 스파이크 모델을 이용한 최우우도 추정방법에 의해 추정된 결과 두 모델간의 평균 WTP와 중앙값 WTP는 각각 매우 유사하게 나타났다. 단지 평균 WTP는 중앙값 WTP보다 1,000원 남짓 크게 추정되었는데, 이는 통계학적으로 제시금액이 낮을수록 응답분포가 높고, 제시금액이 높을수록 응답분포가 낮기 때문이다. 평균값과 중앙값 WTP 중 어느 것을 활용하는 것이 적합한가에 대한 논란이 있지만, 사업의 목적에 따라 장단점이 수반될 수 있다. 이 연구에서는 장기적 미래사업에 대한 대응으로서 불확실성이 많이 내재하고 있기에 낮게 추정된 중앙값 WTP를 보수적 추정치, 높게 추정된 평균값 WTP를 낙관적 추정치로 가정한다. 그 결과 보수적 추정치는 가구당 매월 6,232.7원이고 전국 단위로 집계하면 7.42조원으로 집계되었고, 낙관적 추정치는 가구당 매월 7,317.1원이고 전국 단위로 총합할 경우 8.71조원으로 집계되었다.

이 연구는 예측하기 어려운 고준위방폐물 관리시설의 사고 위험 대응 기금의 규모를 설문조사방법의 하나인 CVM을 이용하여 추정하였다는데 그 의미가 있다고 할 수 있다. 하지만 이는 연구의 시발점으로 이와 같은 사고가 발생할 확률과 사고규모 및 물리적·경제적 피해 등 다양한 상황을 고려한 다양한 방법의 연구가 필요할 것으로 판단된다.

보다 상세한 분석을 위해서는 국가별 경제변수, 세부 사업공정 등에 대한 면밀한 비교가 추가로 이루어져야 할 것이다. 실제로 고준위방폐물 관리비용은 국가 고준위방폐물 관리정책, 관리 대상 고준위방폐물, 국가 경제규모, 국가 고준

위방폐물 관리기술 수준 등과 같은 변수들에 따라 규모가 달라질 수 있다. 특히 운반·저장·처분과 관련하여 발생 가능한 사고에 대한 방사선적 위험의 크기 등 사고비용에 대한 기술공학적 후속연구를 통하여 시나리오별 사고대응기금의 규모와 정책방안을 마련하는 것이 장기적으로 바람직할 것이다.

이에 따라 다음과 같은 선결사항에 대한 검토와 정책결정이 필요하다.

첫째, 국가 고준위방폐물 관리정책은 사용후핵연료의 재처리와 심층처분으로 크게 나뉘는데 이에 대해 향후 어떤 방식을 취하느냐에 따라 전체 규모가 달라질 수 있기에 다양한 시나리오 후속연구가 필요하다.

둘째, 관리 대상 고준위방폐물 발생량에 대한 정확한 예측과 관리대상 관련 로드맵이 선행되어야 한다.

셋째, 고준위방폐물 관리사업에 소요되는 비용 중 시설 건설과 운영 등에 필요한 인건비와 비용도출시점의 환율수준에 따라 차이가 있을 수 있는데, 이에 대한 일관성 있는 기준을 마련할 필요가 있다.

넷째, 국가별 관리기술 확보 수준에 따라 사업의 불확실성을 반영하는 예비비 등의 비율 차이로 인해 관리비용에 차이가 발생하는데, 예비비 등에 대한 적합한 기준을 마련할 필요가 있다.

이처럼 이 연구는 고준위방폐물 관리시설의 사고위험대응비용에 대한 전반적인 수준을 추정하였지만 사고가 발생할 확률 등 다양한 요인을 고려하지 못한 한계가 있어 이러한 연구를 확대할 필요가 있을 것이다.

References

- Arrow K, Solow K, Portney PR, Leamer EE, Radner R and Schuman EH(1993). Report of the NOAA Panel on Contingent Valuation, Report th the General Counsel of the US National Ocean and Atmospheric Administration, US Department of Commerce, NOAA.
- European Communities(2005). Externalities of Energy: Methodology 2005 Update.
- Ham YS(2014). Price of Nuclear Risk, *Journal of Local Government Studies* 26(1), 187~215.
- Hanemann WM(1984). Welfare evaluations in contingent valuation experiments with discrete responses, *American Journal of Agricultural Economics*, 66(3): 332~341.
<https://doi.org/10.2307/1240800>
- Hanemann WM(1989). Welfare Evaluations in Contingent Valuation Experiments with Discrete Responses: Reply, *American Journal of Agricultural Economics* 71: 1057~1061.
<https://doi.org/10.2307/1240800>
- Hanemann WM, Kanninen B and Loomis J(1991). Statistical Efficiency of Double-Bounded Dichotomous Choice Contingent Valuation, *American Journal of Agricultural Economics* 73(4), 1255~1263.
<https://doi.org/10.2307/1242453>
- Hanemann WM and Kanninen B(1999). The Statistical Analysis of Discrete-response CV Data.in Bateman, I.J., and Willis, K.G. (eds.). *Valuing Environmental Preferences: Theory and Practice of the Contingent Valuation Method in the US, EU, and Developing Countries*. Oxford: Oxford University Press, 403~491.
- Heo KH(2014). Issues and Problems of Nuclear Power Costs, Current Issues: Analysis of Project 50, National Assembly Budget Organization, Retrieved from
<https://www.nabo.go.kr>
- Herschberg S, Spiekerman G and Dones R(1998). "Severe Accidents in the Energy Sector." Paul Sherrer Institute.
- Jo SJ(2015). Understanding External Cost of Nuclear Power, *Nuclear industry* 35(9), 66~77, Retrieved from
<https://koreascience.kr/article/JAKO201558851730866.pdf>
- Johansson PO, Kriström B and Mäler KG(1989). A note on Welfare Evaluation with Discrete Response Data, *American Journal of Agricultural Economics* 71(4), 1054~1056.
- Joo JE(2017). Social Cost Assessment for Nucleat
- Arrow K, Solow K, Portney PR, Leamer EE, Radner R and Schuman EH(1993). Report of the NOAA Panel on Contingent Valuation, Report th the General Counsel of the US National Ocean and

- Fuel Cycle Options in the Republic of Korea, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Retrieved from <http://hdl.handle.net/10203/243184>
- Jun EJ, Kim WJ, Jeong YH and Chang SH(2010). Measuring the Social Value of Nuclear Energy using Contingent Valuation Methodology, *Energy Policy* 38(3), 1470~1476. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.11.028>
- KDI(2012). A Study on CVM Analysis Guideline for Preliminary Feasibility Investigation.
- KEI(Korea Environment Institute)(2013). LCOE and Potentials of Renewable Energy in Korea.
- Kim DW(2013). A Research on the Economic Feasibility of Korean Nuclear Power under the Condition of Social Acceptance after Fukushima Accident, *Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology* 11(3), 207~212. <http://dx.doi.org/10.7733/jnfcwt-k.2013.11.3.207>
- Krström B(1997). Spike Models in Contingent Valuation, *Journal of Agricultural Economics* 79(3), 1001~1000. <https://doi.org/10.2307/1244440>
- KRWA(Korea Radioactive Waste Agency)(2018). Status of High-level Radioactive Waste Management Program in Korea.
- Lim GH, Jung WJ, Kim TH and Lee SYT(2017). The cognitive and Economic Value of a Nuclear Power Plant in Korea, *Nuclear Engineering and Technology* 49(3), 609~620. <https://doi.org/10.1016/j.net.2016.10.007>
- Mitchell CM and Carson RT(1989). Using Surveys to Value Public Goods: The Contingent Valuation Method, *Resource for the Future*.
- Sun CW, Lyu N and Ouyang X(2014). Chinese Public Willingness to Pay to Avoid Having Nuclear Power Plants in the Neighborhood, *Sustainability* 6(10), 7197~7223. <https://doi.org/10.3390/su6107197>
- Zweifel P, Schneider Y, Wyss C(2005). Spatial Effects in Willingness-to-Pay: The Case of Nuclear Risks, Spatial Effects in Willingness-to-pay, Working Paper No. 0502, Retrieved from <https://hdl.handle.net/10419/76211>

-
- Received : 30 March, 2026
 - Revised : 14 May, 2026
 - Accepted : 21 May, 2026