2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

가상가치평가법에 의한 방사선피폭선량 금전환산계수 산정에 관한 연구

- 원자력종사자 대상 인터넷 설문조사 결과분석 -

Determining the value of reductions in radiation risk using the contingent valuation method

최광식[1], 최영성[1], 이건재[2], 이병휘[2]

[1] 한국원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19
[2] 한국과학기술원
대전광역시 유성구 구성동 373-1

요 약

원자력안전의 규제분석에 필요한 방사선피폭선량 금전환산계수 산정 방법론 개발을 위한 연구를 수행하였다. 일반 위험을 대표하는 자동차사고와 원자력 작업 종사자의 방사선 피폭위험의 저감의 가치를 국내 원자력 관련 종사자를 대상으로 조사하였다. 이를 위해 가상가치평가법 중 이단계 양분선택형 설문을 설계하여 인터넷상의 웹사이트에서 설문조사를 실시, 각 위험의 20% 감소에 대한 최대지불용의액을 측정하고 이로부터 통계적 생명가치를 추정하였다. 분석결과 원자력 관련 종사자는 평균 생명가치로 자동차사고에 대하여 24.1억원, 방사선피폭에 대해 39.3억원으로 생각하는 것으로 나타났고 또한 방사선 피폭선량 금전환산계수는 203만원/man.rem으로서 이는 미국 원자력규제위원회가 사용하는 $2000/man-rem과 크게 다르지 않은 걸로 나타났다. 가상가치평가법은 방사선 피폭선량의 금전환산 계수 산정의 유효한 한 방법이 될 수 있다.

Abstract

A study was conducted to develop feasible methodology to obtain Won per man-rem conversion factor that can be used in regulatory analysis in Korea. A comparative analysis of the value placed on reductions in risks from occupational radiation exposure and car accidents was conducted to the employees in nuclear power plants and nuclear institutes in Korea. The double bounded dichotomous choice approach was used in the context of the contingent valuation method(CVM). A web-based on-line survey questionnaire was used to elicit willingness-to-pay(WTP) values for predefined 20% reductions of the risks. WTP for safety

goods to reduce the risks were estimated and values of a statistical life were calculated from the mean WTPs. The mean value of statistical life was 2.41 billion Won for car accidents and 3.93 billion Won for radiation exposure. Conversion factor for radiation dose was calculated as 2.03 million Won per man-rem, which is not different from $2000/man-rem used in US NRC. CVM could be one of the efficient ways to value radiation exposure reduction in monetary term.

1. 서 론

원자력에 대한 안전규제는 정부가 행하는 사회적 규제로서 안전성 확보를 위한 비용을 사업자가 내부화(Internalization)하도록 강제하는 기능을 한다. 그런데 절대 안전은 달성 가능하지 않다는 전제하에서 안전성 확보를 위해 사회적으로 최적인 규제수준을 어떻게 정할 것인가 하는 것이 규제자와 피규제자 사이에서 중요한 논점이 된다. 모든 규제행위의 효과를 계량화하고 이에 대한 일반국민의 수요함수를 도출하여 사회적으로 최적의 자원배분을 이루는 규제수준을 정하는 것은 현실적으로 불가능하다. 대신 개별적인 규제행위의 필요성에 입각하여 총비용과 총편익을 파악하는 비용편익분석을 통하여 규제조치의 정당성을 확보하기 위한 노력을 기울일 수밖에 없다[1].

비용편익분석을 적용하기 위해서는 편익항으로 나타나는, 규제에 의한 원자력의 안전성 향상을 측정하여 이의 가치를 금전항으로 환산하여야 한다. 원자력 안전성의 향상은 주로 원자력시설의 종사자와 국민의 방사선 피폭선량의 저감으로 나타나므로 방사선피폭선량을 금전으로 환산하는 계수를 정하는 것이 필요하다[2, 3]. 본 연구는 인터넷 설문조사 방법을 사용하여 국내의 4개 원전종사자 및 원자력연구소, 원자력안전기술원, 한국전력연구원 직원들을 대상으로 그들이 안전에 얼마만큼의 가치를 부여하는지 조사 분석하여 방사선 피폭선량의 금전환산계수를 산정한 결과를 제시하고자 한다.

2. 가상가치평가법(Contingent Valuation Method : CVM)

방사선 피폭은 인간의 생명가치와 직접적으로 관련되기 때문에 이를 금전항으로 환산하는 것은 매우 어려운 일일뿐만 아니라 거부감을 불러일으키기도 한다. 그러나 비용편익분석의 목적이 생명의 금전가 산정에 있는 것이 아니라 대안들간의 동일한 스케일에 의한 비교평가에 있음을 주지할 필요가 있다. 따라서 인간의 생명과 같은 추상적인 가치를 합당하게 평가하는 것이 비용편익분석의 핵심을 이루게 된다. 이러한 추상적인 가치는 시장에서 공급되지 않는 경우가 많은데, 이를 일반적으로 비시장 재화(Non-market goods)라고 부른다.

비시장 재화의 가치를 추정하는 방법에는 여러 가지가 있는데 그 중에서도 가장 많이 이용되는 방법은 소비자가 재화에 부여하는 가치 혹은 그 재화에 대한 지불용의액(Willingness To Pay: WTP)을 사람들에게 직접 물어보는 방법인데 그 대표적인 것이 가상가치평가법(Contingent Valuation Method : CVM)이다. 비시장 재화와 같이 사회 내에 총체적인 가치측정의

척도가 없는 공공재에 대한 가치를 측정하는 유일한 방법은 그 가치에 대한 개개인의 인식 수준을 측정하는 것인데, 소비자는 그들에게 무엇이 가치 있는가에 대한 최선의 합리적인 판단을 하고 이러한 가치는 그들이 해당재화에 기꺼이 지불하고자 하는 의사를 통해 재화의 가격에 반영되며 이러한 지불의사를 통해 주어진 양의 재화나 서비스에 대한 개개인의 가치 체계를 계량적으로 측정 가능하다는 것이 CVM의 근거이다[4].

CVM의 요체는 체계적인 설문방법에 입각하여, 재화의 사용과 관련된 당사자가 주어진 평가대상을 얼마의 화폐적 가치로 평가하는지 직접 물어보는데 있다. 즉 어떤 평가대상이 거래되는 시장이 존재하지 않을 경우, 현실적으로는 존재하지 않는 가상의 시장을 응답자에게 설명해주고 응답자가 그 대상에 부여하는 가치를 직접 물어보는 것이다. 응답자는 그 재화를 구입하기 위해 지불하고자 하는 가격이나 혐오재(嫌惡材)를 떠맡으면서 보상받으려는 대가를 답하게 되고 이러한 개개인의 지불의사를 집계하여 사회 전체의 지불의사 값을 결정한다. 이렇게 하여 집계된 지불의사 값은 사회의 총편익으로 연결된다.

CVM은 평가대상물에 대한 적절한 설명과 설문서의 신중한 설계가 이루어질 경우 다른 분석기법에 비해 측정치의 신뢰성과 타당성이 높으며, 재화가 가지고 있는 여러가지 추상적인 비사용가치를 보다 충실하게 반영할 수 있는 기법이므로 비시장재의 측정방법으로 널리 권장되고 있다. 이 방법은 응답하는 집단이 이해할 수 있고 신뢰할 수 있는 가상적인 시장의 설정에 제약이 있으며, 응답자가 경험하지 못한 대안을 평가할 때 신뢰성이 감소한다는 점, 가상적인 시장에서 생성된 자료를 사용할 시에 자료 타당성의 인증이 어렵다는 점과 응답자가 전략적으로 행동할 기회와 유인을 제공한다는 점, 설문설계가 잘못될 경우 각종 편의가 발생할 소지가 있다는 점 등의 약점이 지적되고 있기는 하지만 경제학적으로 명확한 이론적 근거를 갖고있다는 점과 근래에 들어 다양한 적용기법이 개발되었다는 점 등 때문에 많이 사용되고 있다[5].

3. 양분선택법(Dichotomous Choice)에 의한 CVM 설문설계

CVM은 여러 가지 방식으로 적용될 수 있다. 보편적으로 사용되는 방식으로는 개방형 질문법(Open-ended Questions), 경매형 질문법(Bidding Questions), 양분선택형 질문법(Dichotomous Choice Questions)등이 있다. 개방형 질문법은 대부분의 응답자들이 추상적 가치에 대해 화폐로 응답하는 것에 익숙하지 못해 대답을 기피하거나 대답하더라도 터무니 없는 금액을 제시하는 경우가 많다. 경매형 질문법은 이를 개선하여 초기 제시 금액을 응답자에게 제시하면서 이 금액을 지불할 의사가 있는지 묻고 응답결과에 따라 제시금액을 높이거나 낮추어 응답자의 실제 지불용의액에 접근해 가는 방식이다. 이 방법은 가장 오래되고 현재까지 많이 사용되는 방법이지만 처음에 제시된 금액이 응답자의 최종 지불용의액에 영향을 준다는 출발점 편의 현상이 생기는 큰 단점을 안고 있다. 한편 양분선택형 질문법은 경매형 질문법과 유사하지만 미리 사전조사된 여러 개의 제시금액을 설정하고 응답자가 한번 혹은 두번만 예/아니오 응답을 하도록 하는 방식이다. 이 방식은 응답결과로부터 직접 지불용의액을 알 수

없고 통계적 추론을 통해 간접적으로 지불용의액을 추정해야 한다.
양분선택법중에서 1단계 양분선택법(Sigle-Bounded Dichotomous Choice : SBDC)은 지불용의액을 묻되 제시한 금액에 대해 단순히 '예', '아니오'로 1번만 응답하도록 하는 방법이다. 이것은 응답자가 쉽게 답변할 수 있어서 우편조사나 전화조사에 사용하기 쉽고 조사자에 의한 편의(bias)를 최소화할 수 있으며 응답자는 단순히 '예' 나 '아니오'라는 대답만을 하도록 되어있으므로 전략적 편의(strategic bias)가 개재될 여지가 적고 또 출발점 편의가 없다. 그러나 이 방법은 결과변수가 단순히 '예', '아니오' 로 단순하므로 얻을 수 있는 정보의 량이 적어 상대적으로 많은 표본이 필요하다. 이에 비해 2단계 양분선택법(Double-bounded Dichotomous Choice : DBDC)은 제시한 금액에 대해 '예' '아니오'로 답변하도록 한 후 그 답변에 따라 다시 그 금액의 2배 또는 1/2의 금액을 제시하여 '예' '아니오'로 답변하도록 한 방법이다. 이것은 1단계 양분선택법의 용이성을 유지하면서 그 효율성을 향상시킨 방법으로서, 모수의 표준편차가 약 60% 정도 줄어들며 신뢰구간은 1/4에 불과하는 등 매우 효율적이고 모형의 적합도 검증도 우수하나 그 분석이 복잡해진다[6]. 본 연구에서는 효율성이 높고 적합도 검증이 우수한 2단계 양분선택법을 사용하는 설문을 설계하였다.

1) DBDC 법에 의한 WTP 의 통계적 모형

DBDC 법은 Hanemann (1985, [7])과 Carson (1985, [8])에 의해 처음 제안되었다. DBDC법에 의한 WTP의 통계적 모형은 다음과 같이 구성된다.
응답자 i (i = 1, 2, …, N)는 초기제시금액 B_i에 대해 ‘예’라고 응답할 경우 이보다 높은 두번째 금액 B_{iH} 를 제시 받고 ‘아니오’라고 응답할 경우 이보다 낮은 두번째 금액 B_{iL} 를 제시 받는다. 이때 응답자 i 는 다음과 같이 분류된다.

1. $i \in$ NN if and only if the response is “no-no” ($WTP_i \le B_{iL}$)
2. $i \in$ NY if and only if the response is “no-yes” ($B_{iL} \le WTP_i \le B_i$)
3. $i \in$ YN if and only if the response is “yes-no” ($B_i \le WTP_i \le B_{iH}$)
4. $i \in$ YY if and only if the response is “yes-yes” ($B_{iH} \le WTP_i$)

응답자 i 가 재화를 구입하기 전(0)과 후(1)의 효용은 랜덤효용모형[1]으로 구성된다. 다음의 (1)식은 Bishop and Heberlein (1979, [9])이 제시한 모형이며 (2)식은 Cameron (1988. [10])이 제시한 모형이다.

$$\begin{cases} u_{i0} = a_0 y_i + d_i \\ u_{i1} = a_1 y_i + d_i + \exp(\dfrac{g + X_i B - e_i}{b}) \end{cases} \qquad (1)$$

[1] 개인의 효용(u)을 결정론적 시각이 아닌 확률적 시각으로 모형화하는 것으로서 효용을 설명하는 설명변수(X)와 오차항(e)에 대해 u = f(X) + e 와 같이 모형화하고 개인의 의사결정 데이터와 X에 대한 데이터를 측정하여 f 를 통계적으로 추정한다.

$$\begin{cases} u_{i0} = a_0 y_i + e_{i0} \\ u_{i1} = a_1 y_i + (g + X_i B) + e_{i1} \end{cases} \tag{2}$$

여기서 u_{i0} 는 i의 재화 구입전 효용, u_{i1} 는 i의 재화 구입후 효용, y_i는 i의 소득, $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \ldots, x_{ip})$는 i의 개인특성을 나타내는 벡터, d_i와 e_i는 에러항, 그리고 a_0, a_1, b, g, $B = (b_1, b_2, \ldots, b_p)^T$ 등은 효용함수를 구성하는 파라메터들이다. 이때 i 의 최대지불용의액(C_i)는 재화구입전의 효용과 재화구입후의 효용을 동일하게 유지시키는 금액이므로 $u_{i0}(y_i) = u_{i1}(y_i\text{-}C_i)$의 관계가 성립한다. 이로부터 (1)식과 (2)식에서 다음과 같이 각각 (3)식과 (4)식으로 최대지불용의액(C_i)가 구해진다.

$$C_i = a y_i + \frac{1}{a_1}\exp\left(\frac{g + X_i B - e_i}{b}\right), \quad a = \frac{a_1 - a_0}{a_1} \tag{3}$$

$$C_i = \frac{(a_1 - a_0)}{a_1} y_i + \frac{g}{a_1} + \frac{1}{a_1} X_i B + \frac{1}{a_1} h, \; h = (e_0 - e_1) \tag{4}$$

여기서 만약 e 이 표준극한분포(standard extreme value distribution)를 따른다면, (3)식의 C_i 는 와이불분포(Weibull distribution)를 따르게 되고 (4)식의 C_i는 로지스틱분포(Logistic distribution)를 따르게 된다. 그러면 최대지불용의액이 임의의 제시값 x 보다 작을 확률은 각각 (5)식과 (6)식으로 주어진다.

$$P\{C_i \le x\} = 1 - \exp[-e^{g' - X_i B}(x - a y_i)^b], \tag{5}$$

(여기서 $g' = -g + b \log a_1$, $0 < a < (x/y_i)_{\max}$)

$$P\{C_i \le x\} = \frac{1}{1 - \exp[g + X_i B + (a_1 - a_0) y_i - a_1 x]} \tag{6}$$

따라서 응답자의 효용함수를 (1)식의 모형으로 가정하면 응답자 i 의 응답형태에 따른 확률은 다음 (7)식과 같이 주어지고 이에 대한 로그우도함수는 (8)식과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} P_{i\in NN} &= P\{C_i \le B_{iL}\} = 1 - \exp[-e^{g' - X_i B}(B_{iL} - a y_i)^b] \\ P_{i\in YY} &= P\{C_i \ge B_{iH}\} = \exp[-e^{g' - X_i B}(B_{iH} - a y_i)^b] \\ P_{i\in NY} &= P\{B_{iL} \le C_i \le B_i\} = \exp[-e^{g' - X_i B}(B_{iL} - a y_i)^b] - \exp[-e^{g' - X_i B}(B_i - a y_i)^b] \\ P_{i\in YN} &= P\{B_i \le C_i \le B_{iH}\} = \exp[-e^{g' - X_i B}(B_i - a y_i)^b] - \exp[-e^{g' - X_i B}(B_{iH} - a y_i)^b] \end{aligned} \tag{7}$$

$$
\begin{aligned}
\log(L) &= \sum_{i=1}^{N} \log(P_{i\in ab}) \\
&= \sum_{i\in NN} \log\left[1-\exp[-e^{g'-X_iB}(B_{iL}-ay_i)^b]\right] \\
&+ \sum_{i\in YY} \log\left[\exp[-e^{g'-X_iB}(B_{iH}-ay_i)^b]\right] \\
&+ \sum_{i\in NY} \log\left[\exp[-e^{g'-X_iB}(B_{iL}-ay_i)^b] - \exp[-e^{g'-X_iB}(B_i-ay_i)^b]\right] \\
&+ \sum_{i\in YN} \log\left[\exp[-e^{g'-X_iB}(B_i-ay_i)^b] - \exp[-e^{g'-X_iB}(B_{iH}-ay_i)^b]\right]
\end{aligned} \tag{8}
$$

만약 응답자의 효용함수가 (2)**식과 같은 모형으로 가정될 경우 응답자** i **의 응답형태에 따른 확률은 다음** (9)**식과 같이 주어지고 이에 대한 로그우도함수는** (10)**식과 같이 주어진다**.

$$
\begin{aligned}
P_{i\in NN} &= P\{C_i \le B_{iL}\} = \frac{1}{1-\exp[\vec{X}\vec{B}-a_1 B_{iL}]} \\
P_{i\in YY} &= P\{C_i \ge B_{iH}\} = \frac{1}{1-\exp[-\vec{X}\vec{B}+a_1 B_{iH}]} \\
P_{i\in NY} &= P\{B_{iL} \le C_i \le B_i\} = \frac{1}{1-\exp[\vec{X}\vec{B}-a_1 B_i]} - \frac{1}{1-\exp[\vec{X}\vec{B}-a_1 B_{iL}]} \\
P_{i\in YN} &= P\{B_i \le C_i \le B_{iH}\} = \frac{1}{1-\exp[\vec{X}\vec{B}-a_1 B_{iH}]} - \frac{1}{1-\exp[\vec{X}\vec{B}-a_1 B_i]}
\end{aligned} \tag{9}
$$

(**여기서**, $\vec{X} = (1, X_i, y_i)$ and $\vec{B} = (g, B, a_1 - a_0)$)

$$
\begin{aligned}
\log(L) &= \sum_{i=1}^{N} \log(P_{i\in ab}) \\
&= \sum_{i\in NN} \log\left[\frac{1}{1-\exp[\vec{X}\vec{B}-a_1 B_{iL}]}\right] + \sum_{i\in YY} \log\left[\frac{1}{1-\exp[-\vec{X}\vec{B}+a_1 B_{iH}]}\right] \\
&+ \sum_{i\in NY} \log\left[\frac{1}{1-\exp[\vec{X}\vec{B}-a_1 B_i]} - \frac{1}{1-\exp[\vec{X}\vec{B}-a_1 B_{iL}]}\right] \\
&+ \sum_{i\in YN} \log\left[\frac{1}{1-\exp[\vec{X}\vec{B}-a_1 B_{iH}]} - \frac{1}{1-\exp[\vec{X}\vec{B}-a_1 B_i]}\right]
\end{aligned} \tag{10}
$$

어떤 모형을 가정하든지 (8)**식과** (10)**식을 최대화하는** a, g', b, B **등의 파라메터 값을 추정하여 최대우도 추정치**(Maximum likelihood estimates: MLE)**를 구하고 통계적 추론을 행하게 된다**.

2) 인터넷을 통한 설문조사

원자력분야 종사자들의 방사선 피폭선량 금전환산계수를 구하기 위하여 1999년 9월부터 2000년 5월까지 인터넷상에 설문조사를 위한 Website를 개설하고 한국전력공사의 4개 지역 원전사업소, 한국전력연구원, 한국원자력연구소, 한국원자력안전기술원을 대상으로 조사를 하였다. 인터넷을 이용한 이러한 온라인 설문조사는 첫째, 응답자에게 동적(dynamic)인 질문을 할 수 있어 흥미를 유발하여 응답자의 진심을 알아내기 쉬우며 둘째, 우편설문조사에서는 하기 어려운 가지치기 질문(Branching Question)이 용이하고 셋째, 응답결과를 바로 보여줄 수 있으며 넷째, 데이터 기록의 오류가 줄어들며 다섯째, 설문조사의 비용이 저렴하다는 장점을 가지고 있다.

그러나 인터넷 설문조사의 한계에 대해서는 유의할 필요가 있다. 우선 가장 많이 이야기되는 문제점, 즉 인터넷사용자가 주로 젊은 층이므로 국민을 대표하는데 한계가 있다는 것은 본 원자력분야 종사자들을 대상으로 한 조사에서는 큰 문제가 되지 않는다고 판단하였다. 그 이유는 원자력 관련 종사자들은 대부분 PC를 보유하고 있고 PC들은 소속기관 네트워크에 연결되어 있으며 이들은 인터넷을 자유롭게 이용할 수 있는 사람들로서 업무수행 중에 책상에서 바로 응답이 가능하므로 인터넷을 통한 설문조사가 대표성을 띌 수 있기 때문이다. 또한 모집단과 표본간의 차이점을 줄이기 위한 가중치 기법을 사용하여 표본오차의 가능성을 줄였다. 즉, 인터넷 설문조사 결과 원자력분야 엔지니어 및 연구기술인력 총 4,250명중에서 527명으로부터 응답을 회수하였는데 이 데이터를 소속기관별, 연령별 인원 구성비로 가중하는 통계기법을 사용하여 데이터를 분석하였다.

응답자 i의 가중치를 Wi라고 하면 (8)식과 (10)식의 로그우도함수는 다음과 같이 Wi가 가중되는 형태가 된다.

$$\log(L) = \sum_{i=1}^{N} w_i \log(P_i)$$

표 1 에 모집단의 수와 본 조사에 응답한 샘플의 소속별, 연령별 분포를 표시하였다.

3) 설문내용

본 연구는 원자력 종사자들이 생각하는 방사선피폭 금전환산 계수를 산정하는 것과 동시에 한국인의 대표적 일반 리스크로 생각되는 자동차사고의 저감에 대한 가치를 함께 조사하여 이 둘을 비교하도록 설문을 구성하였다.

먼저 응답자에게 가상의 시장에 대해 설명을 하였다. 즉 자동차사고와 방사선피폭의 경우 이와 관련된 통계적 데이터를 제시하면서 응답자 집단이 여러 가지 위험도에 어느 정도 노출되어 있는지를 구체적으로 년간 사망률로 환산하여 알기 쉽게 보여주고, 또한 다른 일반 질환들에 의한 한국인들의 사망률과 응답자 연령의 한국사람의 평균 잔여수명, 그리고 한국

인들이 자신의 소득과 관련하여 다른 위험도의 저감을 위하여 얼마나 비용을 지출하고 있는지를 보여주었다. 이러한 자료의 제시와 설명은 응답자들이 안전의 가치에 대한 경제적 감각을 가질 수 있도록 도와준다.

두 번째로, 위의 두가지 종류의 리스크에 대한 응답자들의 인식에 대해 질문하였다. 즉 두가지 리스크의 통제가능성, 광범위성, 심각성, 친숙성, 두려운 정도, 위험하다고 생각하는 정도, 개인의 피폭가능성 및 국민의 피폭가능성의 8가지 인식변수에 대해 질문하여 최대지불용의액의 설명변수로 사용하도록 하였다.

세번째로, 이들 리스크를 20% 저감하기 위하여 최대 얼마까지 지불할 용의가 있는가를 묻기 위해 이 리스크의 저감량을 100만명당 사망률의 감소로 환산하여 구체적으로 응답자에게 보여주면서 최대지불용의액을 측정하였다. 최대지불용의액 측정은 2단계 양분선택법으로 하였다. 즉, 자동차사고의 경우 사고 리스크를 20% 감소시킬 수 있는 자동차안전장구 가격이 표 2에 나와 있는 금액일 때 가족을 위해 이 장구를 구입할 것인지 질문하였고, 방사선피폭에 대해서는 피폭선량을 20% 감소시켜줄 수 있는 가상의 크림의 가격이 표 2에 나와 있는 금액일 때 본인을 위해 이를 구입할 것인지 질문하였다. 이때 자동차사고 사망률은 최근 5년간의 평균 사망률을 제시하였고 방사선피폭의 리스크는 원전 종사자들의 평균 방사선 피폭선량에 위험도계수를 곱하여 계산한 사망률을 제시하였다. 응답자는 표 2에 나와 있는 초기금액 중 하나를 랜덤하게 배정받도록 하였다.

네번째, 응답자 개개인의 특성들에 대한 질문으로서 연령과 원자력계 종사한 햇수를 묻는 질문을 포함시켜 설문분석의 부수적인 자료로 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

우선 최대지불용의액을 설명하기 위한 독립변수 10개에 대한 요인분석(Factor Analysis)를 수행하여 요인의 수를 4개로 줄였다. 4개의 요인은 리스크의 심각성, 위험하다고 생각하는 정도, 리스크의 광범위성, 공포성 등의 4개 변수로 구성되는 PDamage, 개인의 피폭가능성과 국민의 피폭가능성 등의 2개 변수로 구성되는 PExposure, 리스크의 통제가능성과 친숙성 등의 2개 변수로 구성되는 PCont-Fam, 그리고 연령과 원자력계 근무년수로 구성되는 AGE이다. 이들 요인을 설명변수 벡터 X = (PDamage, PExposure, PCont-Fam, AGE)로 구성하였다.

표 3은 Bishop and Heberlein 모형에 대한 추정치이며 표 4는 Cameron 모형에 대한 추정치를 나타낸다. 여기서 최대로그우도치를 살펴보면 Cameron 모형보다는 Bishop and Heberlein의 모형이 더 적합한 것으로 보인다. 따라서 결과분석은 Bishop and Heberlein 모형중 설명변수가 유의미한 것만 채택한 축약형태의 모형을 선정하였다. 즉, 자동차안전장구(가족의 안전)와 방사선방호크림(본인의 안전)에 대한 응답자 i 의 최대지불용의액은 각각 다음 식(11)과 (12)과 같이 추정되었다.

$$C_i = 0.00007 y_i + \exp(\frac{0.689 - e_i}{0.801}) \qquad \text{(단위: 만원/월)} \qquad (11)$$

$$C_i = \exp(\frac{-0.693 - 0.263 PDamage - 0.193 PExposure - 0.168 AGE - e_i}{1.044})$$

(단위: 만원/월) (12)

먼저 여러 가지 변수가 지불용의액에 미치는 영향을 살펴보면 소득이 증가함에 따라 자동차 안전장구를 위한 지불용의액은 증가하는데, 이것은 소득이 많을수록 리스크 저감에 대해 많이 지불하려고 함을 보여준다. 그러나 방사선방호크림의 경우는 소득의 영향이 없었다. 이는 방호크림의 가격이 매우 낮은 것에 기인한다고 생각된다. 그리고 자동차사고의 경우는 소득만이 지불용의액에 영향을 주고 다른 여러 인식변수들은 영향을 미치지 않았다. 이것은 우리 나라에서 자동차사고는 그 경중에 관계없이 대단히 빈번하게 일어나므로 방사선피폭에 대해 상대적으로 자동차사고가 광범위하게 일어난다든가 피해 결과가 심각하다든가, 무섭다든가, 위험하다든가 하는 것과 위험에의 개인의 노출정도, 국민의 노출정도, 통제가능성, 친숙성 등의 인식변수는 지불용의액 응답에 영향을 미치지 않았다고 해석할 수 있다.

그러나 방사선피폭 저감의 경우를 보면 응답자가 방사선의 리스크가 자동차사고 리스크보다 그 피해가 덜 광범위하고 덜 심각하며 덜 무섭고 덜 위험하다고 생각할수록, 그리고 그들과 국민들이 자동차사고의 위험보다 방사선위험도에 덜 노출되어있다고 생각할수록 방사선방호크림을 위한 지불용의액이 적은 것으로 나타났다. 이로부터 원자력관련 종사자들도 그들이 금전을 지출하는 결정을 내릴 때는 피해의 광범위성, 심각성, 공포성, 피해의 친숙성 등과 같은 주관적 위험인식에 의해서 영향을 받는다는 걸 알 수 있었다[11]. 또한 방사선방호크림의 지불용의액은 연령과 근무연수가 증가할수록 감소하였는데 이것은 나이 많은 사람들은 자신들의 잔여수명을 낮게 평가하며 근무년수가 긴 사람은 방사선에 대한 경험과 지식이 축적됨에 따라 방사선에 대한 두려움이 감소하기 때문으로 추정된다. 응답집단 평균인[2]에 대한 식(11)과 (12)는 그림 1과 2로 나타난다. 식(11)과 (12)로부터 다음과 같이 평균 지불용의액을 구할 수 있다.

$$m(Car) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} E(C_i) = 0.00007\bar{y} + \exp(\frac{0.689}{0.801}) E\left\{\exp(\frac{-e}{0.801})\right\}$$

$$= 2.694 \text{ (만원/월)} \qquad (13)$$

[2] 평균인은 모든 변수의 값이 평균치를 갖는 사람으로 정의하였다. 즉 이 사람은 (*y*, *PDamage*, *PExposure*, *PCont-Fam*, *AGE*) = (259.9, 0, 0, 0, 0)로 특징지워진다.

$$m(Radiation) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} E(C_i)$$
$$= \exp(\frac{-0.693}{1.044}) E\left\{\exp(\frac{-e}{1.044})\right\} \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \exp(\frac{-0.263 PDamage_i - 0.193 PExposure_i - 0.168 AGE_i}{1.044})$$
= 0.512 (만원/월) (14)

이러한 평균지불용의액으로부터 통계적 생명가치를 구할 수 있다. 즉 현재 사망률의 20% 감소를 얻는데 지불하고자 하는 금액으로부터 한 사람의 생명가치를 역으로 계산하는 것이다. 자동차사고의 경우 20%의 사망률 감소는 매달 100만명당 4명의 목숨을 구하는 것이고 방사선피폭의 경우 매달 100만명당 1.3명의 목숨을 구하는 것에 해당한다. 또한 원자력종사자의 가족은 평균 2.79명이므로 자동차사고에 대해 원자력 종사자들은 자신의 생명가치를 $(26,940/2.79)/(4/10^6)$=23억4천만원으로 평가하고 방사선피폭의 경우 $5,120/(1.3/10^6)$=39억3천만원으로 평가하는 것으로 나타났다. 미국에서 사용하고 있는 위험도 관련 11개 분야의 생명가치값을 조사하여 NRC가 정한 미국인의 통계적 생명가치 대표값이 300만불로서 2001년 2월 환율 1250원/$을 적용할 경우 37억 5천만원이다. 그러므로 자동차사고 리스크에 대하여 질문한 결과로 구한 우리 나라 원자력종사자의 생명가치 24억 1천만원은 미국에서 사용하는 값보다 낮은 값이며, 방사선피폭에 대해 질문한 결과 구한 39억 3천만원은 그 보다 약간 높은 값이다. 이것을 볼 때 미국과 우리 나라의 일인당 국민소득수준의 상당한 차이에도 불구하고 전체적으로 우리 나라의 원자력 종사자들이 생각하는 자신의 통계적 생명가치는 미국인의 생명가치와 비슷한 수준으로 볼 수 있다. 이것은 원자력 종사자들 중 응답자들의 소득수준 평균이 월 260만원으로서 미국의 근로자들의 소득수준과 비슷한 점을 생각하면 합리적인 값으로 볼 수 있을 것이다.

방사선피폭선량 20% 저감량으로부터 직접 피폭선량 금전환산계수를 구하면 $5,120/(2.52\times10^{-3}$ rem/month)=203만원/man.rem이었으며 통계적 생명가치 39억3천만원에 방사선위험도 계수(7×10^{-4} per rem)를 곱하여 구한 값은 275만원/man.rem이었다. 현재 미국의 원자력규제위원회가 사용하고 있는 2000$/man.rem 값을 환율 1250원/$을 적용, 계산하면 250만원/man.rem이 됨을 생각하면 이 방법으로 구한 우리 나라 원자력 종사자들의 피폭선량 금전환산계수는 NRC가 사용하는 값과 비슷한 수준이라고 볼 수 있다[12]. 표 5에 이들 결과값을 정리하였다.

5. 결론 및 향후 연구과제

방사선피폭선량 금전환산계수는 정부 규제당국이 정책적으로 결정하는 것으로서 이것에는 신중한 접근이 필요하다. 금전환산계수를 실제 결정하기 위해서는 미국 NRC가 시행한 바와 같이 우리 국민들의 생명값에 대한 여러 가지 조사연구가 수행되어야 하며 그 값들을 비교, 분석한 후 적절한 대표값을 결정하는 것이 필요한데 이때 가상가치접근법은 유효한 방법으로 사용될 수 있다.

 본 연구는 우리가 일상생활에서 많이 접하는 일반적인 리스크의 대표적 사례로서 자동차사고의 리스크를 상정하고 이를 방사선피폭의 리스크와 비교하였으며, 원자력안전성의 향상을 공공재의 특성을 갖는 재화로 간주하여 근래 환경경제학에서 많이 사용하며 또 경제학적 이론적 근거를 갖고 있는 CVM 방법론을 적용하여 조사 분석하였다는 점에서 의미가 있다. 또한 방사선에 대하여 원자력 종사자들이 갖는 자신의 생명가치와 방사선피폭에 대해 느끼는 인식을 파악하게 하고 이를 미국 등 선진국의 사례와 비교하여 볼 수 있는 기회를 제공하였다. 이러한 방법으로 구해본 금전환산계수는 앞으로 우리 나라에서 신규규제요건 부과시의 규제영향평가에 사용될 비용편익분석에서 방사선피폭선량 금전환산계수를 결정하는데 기본적인 근거를 제공할 수 있을 것이다.

향후 연구과제로는 다음을 들 수 있다. 첫째, 가상가치평가법에서 제시하는 지불용의액을 측정함으로써 사회 후생변화를 측정할 수 있다는 경제학적 이론이 대형 원자력사고 위험과 같은 저확률-고위험 특성을 갖는 위험에도 적절히 사용될 수 있는지에 대한 고찰이 좀 더 이루어져야 한다. 둘째, 경제적 이론과 통계적 이론의 접목을 통한 보다 정확한 평균 지불용의액 계산을 수행하는 것이다. 일부 사람들은 자신이 돈을 지불할 의사가 전혀 없는 응답을 하는데 이런 경우를 위해 spike model의 개발이 필요하며 또한 지불용의액의 분포에 대한 가정을 하지 않는 비모수적(non-parametric) 기법의 개발도 필요하다. 셋째, 미국의 해양대기관리국(National Oceanic & Atmosphere Administration : NOAA)에서 가상가치평가법의 타당성 검증을 위해 제시하고 있는 'Scope Test'를 수행하여 보는 것이다[13]. 이것은 본 연구의 경우, 위험감소의 폭을 20%보다 크게 제시할 때는 지불용의액이 실제로 높아져야만 하고 위험감소의 폭을 20%보다 작게 제시할 때는 지불용의액이 낮아져야만 한다는 요건인데 이는 응답자들이 경제에 대한 감각을 갖고 원자력안전의 금전가치를 평가하고 있는지를 확인하는 기초 테스트라고 할 수 있다. 넷째, 본 연구는 원자력 종사자들을 대상으로 한 것으로서 그 결과는 작업자들이 받는 방사선 피폭선량의 변화를 유발하는 규제요건의 신설 혹은 변경 시에 사용될 수 있는 금전환산 계수로 사용 가능하나 일반 국민들의 경우에는 그들 전체에 대한 조사가 별도로 시행되는 것이 필요하다.

참고문헌

1. Mubayi, M., Sailor, V., Anandalingam, G. (1995) Cost-Benefit Considerations In Regulatory Analysis, U.S. Nuclear Regulatory Commission Technical Report, NUREG/CR-6349
2. USNRC (1995) Regulatory Analysis Guidelines of the US Nuclear Regulatory Commission : Final Report, NUREG/BR-0058
3. Baum, J.W. (1994) Value of Public Health and Safety Actions and Radiation Dose Avoided: NUREG/CR-6212
4. Mitchell, R. C., Carson, R. T. (1989) Using Surveys to Value Public Goods: The Contingent Valuation Method, Washington D.C.: Resources for the Future
5. Carson, R. T., Flores, N. E., Meade, N. F. (2000) “Contingent Valuation: Controversies and Evidence, University of California”, San Diego, Discussion Paper 96-36R, Forthcoming in Environmental and Resource Economics
6. Hanemann, W. M., Loomis, J. B., Kanninen, B. (1991) “Statistical Efficiency of Double-bounded Dichotomous Choice Contingent Valuation”, American Journal of Agricultural Economics, Vol. 73 No. 4, pp. 1255-1263
7. Hanemann, W. M, (1985) “Some Issues in Continuous- and Discrete Response Contingent Valuation Studies”, Northern J. of Agricultural Economics, Vol. 14, 5-13
8. Carson, R. T. (1985) Three Essays on Contingent Valuation, Ph.D. thesis, University of California, Berkeley
9. Bishop, R.C. and Heberlein, T.A. (1979), “Measuring values of extramarket goods: Are indirect measured biased?”, American J. of Agricultural Economics, 61(5), 926-930
10. Cameron, T.A. (1988) “A new paradigm for valuing non-market goods using referendum data. Maximum Likelihood estimation by censored logistic regression”, J. of Environmental Economics and Management, 15, 355-379
11. Slovic, P. (1987) “Perception of risk”, Science, 236 (17)
12. USNRC 1995(NUREG-1530). Reassessment of NRC’ s Dollar Per Person-Rem Conversion Factor policy: Office of Nuclear Regulatory research: p. 9
13. Arrow, K., Solow, R., Leamer, E., Portney, P., Radner, R., Schuman, H. (1993) “Report of the NOAA Panel on Contingent Valuation”, US Government Federal Register, January 15, Vol. 58 No. 10, pp. 4601-4614

표 1. 설문대상 모집단(비율) / 샘플 수(비율)

	한전 및 원전사업소	연구기관 (KAERI, KINS, KEPRI)
50대 이상	58 (1.4%) / 18 (3.4%)	123 (2.9%) / 6 (1.1%)
40대	586 (13.8%) / 114 (21.6%)	583 (13.7%) / 72 (13.7%)
30대	1456 (34.3%) / 222 (42.1%)	458 (10.8%) / 52 (9.9%)
20대	951 (22.4%) / 35 (6.6%)	34 (0.8%) / 8 (1.5%)

표 2. 양분선택형 설문에 사용된 제시금액

(낮춘 제시금액, 초기제시금액, 높인 제시금액)	
자동차 안전장구의 경우	방사선 방호 크림의 경우
(500; 1,000; 10,000)	(50; 100; 1,000)
(1,000; 5,000; 10,000)	(100; 500; 1,000)
(1,000; 10,000; 20,000)	(100; 1,000; 2,000)
(10,000; 20,000; 50,000)	(1,000; 2,000; 5,000)
(20,000; 40,000; 80,000)	(2,000; 4,000; 8,000)

표 3. 최대우도추정법에 의한 Bishop and Heberlein 모형의 파라메터 추정치

	g'	b_1	b_2	b_3	b_4	a	b	Log(L)
자동차안전장구								
Full	-0.686 (10.86)	-0.081 (1.59)	-0.105 (1.96)	0.055 (1.02)	-0.039 (0.71)	0.00007 *1	0.804 (20.06)	-674.2
Reduced	-0.689 (10.91)	-	-	-	-	0.00007 *1	0.801 (20.05)	-678.2
방사선방호 크림								
Full	0.694 (7.47)	-0.262 (4.37)	-0.194 (2.67)	-0.018 (0.27)	-0.168 (2.56)	0 *2	1.044 (16.33)	-583.8
Reduced	0.693 (7.47)	-0.263 (4.38)	-0.193 (2.66)	-	-0.168 (2.57)	0 *2	1.044 (16.33)	-583.9

<Note> 괄호는 t-value를 나타내며 *1)은 upper boundary value *2)는 lower boundary value를 나타냄.

표 4. 최대우도추정법에 의한 Cameron 모형의 파라메터 추정치

	g	b_1	b_2	b_3	b_4	a_0	a_1	Log(L)
자동차안전장구								
Full	2.144 (18.9)	-0.102 (1.19)	-0.231 (2.65)	0.062 (0.74)	-0.083 (0.90)	0.000086 *1	0.000086 (17.89)	-731.7
Reduced	2.144 (19.7)	-	-0.23 (2.65)	-	-	0.000086 *1	0.000086 (17.92)	-733.1
방사선방호 크림								
Full	2.297 (17.8)	-0.356 (3.96)	-0.299 (3.14)	-0.009 (0.099)	-0.149 (1.50)	0.000494 *1	0.000494 (16.49)	-585.5
Reduced	2.428 (19.7)	-0.351 (3.91)	-0.286 (2.99)	-	-	0.000489 *1	0.000489 (16.54)	-586.6

<Note> 괄호는 t-value를 나타내며 *1은 boundary solution을 나타냄.

표 5. 최대지불용의액과 생명가치 (단위: 원)

자동차안전장구	평균 WTP	26,940/월
	생명가치	24.1억
방사선방호크림	평균 WTP	5,120/월
	생명가치	39.3억
방사선피폭 금전환산계수	직접계산(1)	203만/ man.rem
	간접계산(2)	275만/ man.rem

(1) 직접계산: 피폭선량 20% 저감량으로부터 직접 계산

(2) 간접계산: 통계적 생명가치에 방사선위험도계수(7×10^{-4} per rem) 곱한 것으로부터 계산

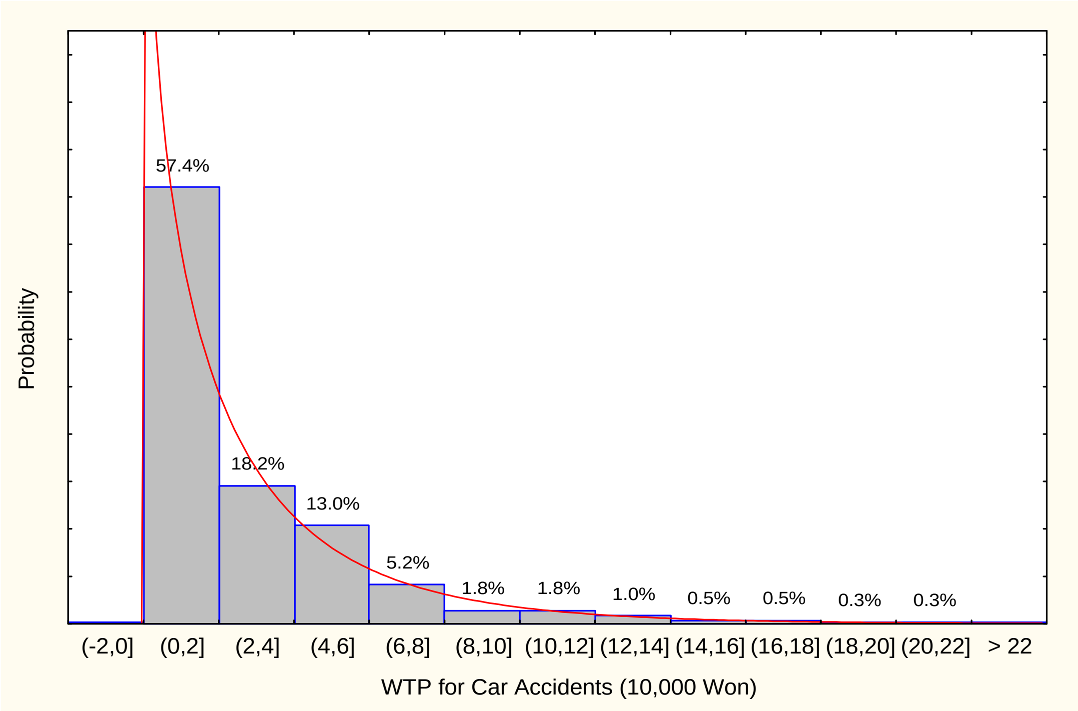

그림 1. **응답집단 평균인의 자동차안전장구에 대한 지불용의액 분포** (*y*, *PDamage*, *PExposure*, *PCont-Fam*, *AGE*) = (259.9, 0, 0, 0, 0)

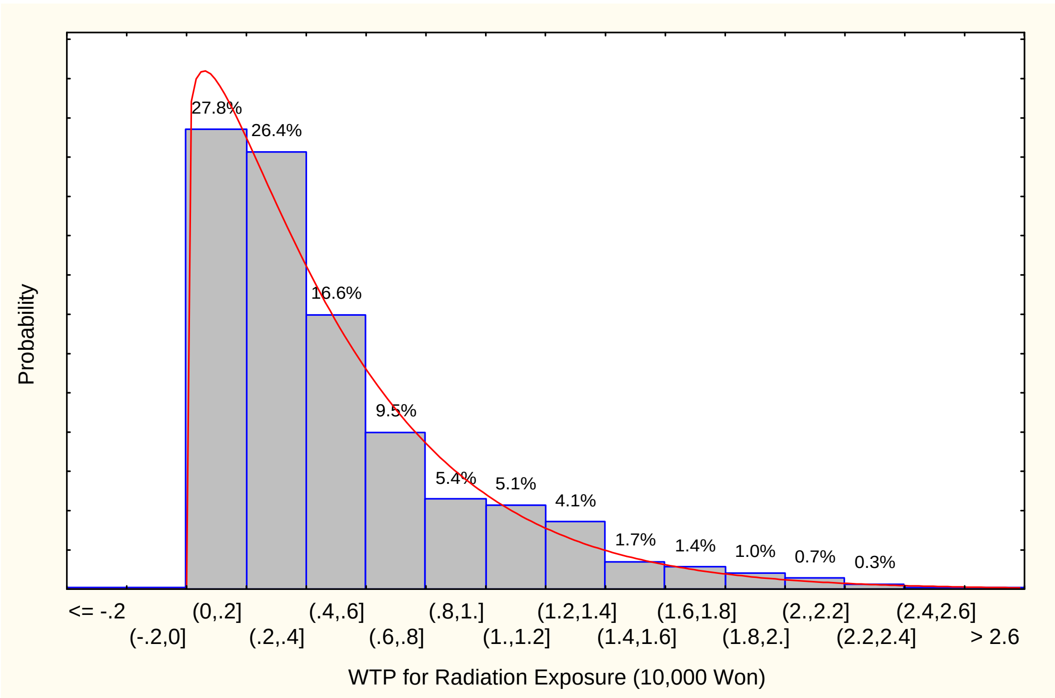

그림 2. **응답집단 평균인의 방사선방호크림에 대한 지불용의액 분포** (*y*, *PDamage*, *PExposure*, *PCont-Fam*, *AGE*) = (259.9, 0, 0, 0, 0)