

An Improved Methodology of Monetary Values of the Unit Collective Dose for Intervention Against Long-Term Exposure Following a Nuclear Accident

Won Tae Hwang, Eun Han Kim, Kyung Suk Suh, Young Gil Choi and Moon Hee Han

Korea Atomic Energy Research Institute

원자력 사고후 장기피폭에 대한 개입을 위한 피폭선량 금전가 산정의 개선된 방법론

황원태 · 김은한 · 서경석 · 최영길 · 한문희

한국원자력연구소

(2001년 10월 3일 접수, 2002년 5월 8일 채택)

Abstract - A more practice approach for the determination of monetary values of the unit collective dose for intervention against long-term exposure following a nuclear accident was proposed. In addition, the monetary values of the unit collective dose estimated from the proposed approach were compared with those estimated from the previous model, which are derived from assumptions of routine exposure and the same values are applied in a nuclear accident without modification, using Korean economic data. The monetary values based on the proposed approach showed a distinct difference depending on inequity in the distribution of individual doses. The discounting rate was also an important factor in determination of monetary values of the unit collective dose.

Key words : *monetary value of the unit collective dose, nuclear accident, individual dose, collective dose, discounting rate*

요약 - 원자력시설의 정상 운영시 일반인에 대한 단위 집단선량의 금전가 (피폭선량 금전가) 모델을 기본으로, 사고후 만성피폭에 대해 보다 적용 타당한 모델을 제안하였다. 아울러 우리나라 경제 환경자료를 사용하여 제안된 모델에 근거하여 평가한 피폭선량 금전가를 정상 운영시로부터 유도된 값을 수정없이 그대로 사고후 만성피폭에 적용한 값과 비교, 분석하였다. 제안된 방법론에 근거할 경우 집단선량은 같아도 피폭받은 집단내 개인선량의 불균일성 차이에 따라 피폭선량 금전가는 상당히 다르게 나타났다. 또한 할인율도 피폭선량 금전가 결정에 있어서 중요한 요소로 작용하였다.

중심어 : 피폭선량 금전가, 원자력 사고, 개인선량, 집단선량, 할인율

서 론

원자력시설의 사고로 방사성물질이 환경으로 누출되면 공기 또는 토양과 같은 환경매체의 다양한 경로를 통해 최종적으로 인체에 대한 방사선 피폭영향을 주게된다. 일반적으로 사고영향해석에서는 방사능온과 지표에 침적된 방사성물질

에 의한 외부피폭, 호흡과 오염 음식물섭취에 의한 내부피폭이 주 피폭경로로 고려된다. 환경으로 누출된 방사성물질에 의한 신체적, 경제적, 사회적 영향 등을 최소화하기 위해서는 제 시간에 적절한 대응행위를 취함으로써 수행될 수 있다. 대응행위 수행을 위한 의사결정 보조수단으로 비용-편익 분석법 (cost-benefit analysis)은 현재까지

경제적 이론에 입각하여 잘 확립되어 있고 가장 널리 활용되고 있다[1]. 이 분석법을 사용하여 신뢰성있는 결과를 도출하기 위해서는 피폭선량을 정량화하기 위한 피폭선량 금전가 (α 값)의 합리적 결정이 무엇보다 중요하며, 이 값은 해당 국가뿐 아니라 해당 지역의 경제, 사회적 특성 등에 따라 상이하다. 방사선 위해의 금전적 가치 평가는 방사선 방호 최적화 (ALARA)에 필요한 하나의 요소이며, 이 개념은 국제당사선방호위원회 (ICRP)에 의해 제안된 비용-편익 분석법과 관련하여 ICRP 22[2]에 처음 소개되었다.

ICRP와 IAEA와 같은 원자력관련 국제기구에서는 α 값 산정을 위한 다양한 방법론과 더불어 권고값을 제시하고 있으나, 이는 대부분 상대적으로 저선량이면서 방사성물질의 농도 또는 피폭선량의 변화가 거의 없는 원자력시설의 정상운영 가정하에 유도된 값이다. 이러한 조건하에 유도된 값은 상대적으로 고선량이면서 방사성물질의 누출후 환경에서 시간에 따라 급격한 변화를 나타내는 원자력시설의 비상시에도 적용의 편의성 등으로 동일하게 적용하고 있다. 특히 사고시 개인선량은 해당지역의 환경적 특성과 개인의 생활습관 등에 따라 큰 차이를 나타낼 수 있는데, 최근의 ICRP 60[3]의 권고사항에는 α 값 설정시 이러한 개인선량 분포에 대한 영향의 고려를 강조하고 있다. 따라서 정상 운영 가정하에 유도된 α 값을 수정없이 그대로 비상시 적용은 대응행위 수행에 있어서 비합리적인 결과를 도출할 수 있다.

본 연구에서 방사선방호 최적화를 수행하기 위한 최근의 ICRP 권고사항[3]에 입각하여 원자력시설의 사고시 일반인에 대해 보다 적용 타당한 α 값 산정을 위한 방법론을 제시하고자 한다. 또한 우리나라의 경제 환경자료를 사용하여 제안된 모델로부터 적용결과를 정상운영 가정하에 유도된 값을 수정없이 그대로 비상시 적용한 값 (이하 기존값이라 한다.)과 비교, 논의하였다.

피폭선량 금전가 산정방법론 개선

피폭선량 금전가 산정 방법은 크게 인간의 수명기간동안 생산될 수 있는 상품의 금전가치에 근거한 인적자본 접근법 (human capital approach) 과 사람의 생명보호를 위해 실제로 금전을 투여한 과거 사례의 통계적 추론에 근거한 통계적 생명 가치법 (statistical life value method)이 가장 많이 이용된다[4]. 여러 원자력관련 국제기구에서

는 전통적으로 인적자본 접근법에 근거하여 α 값을 유도하고 있다. 치사암 위험 ($=5.0 \times 10^2 \text{ Sv}^{-1}$), 비치사암 위험($=1.0 \times 10^2 \text{ Sv}^{-1}$), 유전적 효과 ($=1.3 \times 10^2 \text{ man-Sv}^{-1}$), 방사선 유발 임 위험에 따른 평균수명손실 ($=13\text{년}$)을 고려하여 1 man-Sv에 대한 평균 수명손실은 다음과 같다 [1,3].

$$(5 \times 10^2 + 1 \times 10^2 + 1.3 \times 10^2) \times 13 \text{years} \approx 1 \text{year} \tag{1}$$

비용-편익 분석법의 가정에 따르면 1년의 수명손실을 줄이기 위해 사회가 기꺼이 투자해야 할 금전적 비용은 1인당 국민소득 (GNPP)과 같다. 따라서 우리나라의 경제 환경을 고려할 경우 α 값은 대략적으로 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$\alpha \approx 1 \text{year/Sv} \times 10,000 \text{US\$}/(\text{year} \cdot \text{man}) = 10,000 \text{ US\$}/\text{man-Sv} \tag{2}$$

식 (2)에서 나타난 바와 같이 α 값은 단지 집단선량에만 관계한다. 그러나 ICRP 60에서는 α 값 산정에 있어서 피폭받은 집단에 대한 개인선량의 불균일성을 강조하고 있는데, 이는 한 개인이 10 mSv/yr의 피폭을 받는 경우와 두 명이 각각 5 mSv/yr를 받는 경우 비록 집단선량은 동일하지만 전자의 경우 피폭자 개인의 회피 심리가 보다 더 강하게 작용할 뿐 아니라 고선량 저감화를 위한 사회적 노력이 보다 많이 요구된다는 사실을 나타낸다. 이러한 개인선량의 불균일성을 반영하기 위해 Lochard 등[5]은 다음 식을 제안하였다.

$$\alpha_i = \alpha_{base} \left(\frac{D_i}{D_0} \right)^a, \quad D_i \geq D_0$$

$$= \alpha_{base}, \quad D_i < D_0 \tag{3}$$

여기서,

- α_i : 개인선량 i 에 대한 단위 집단선량 금전가 (US \$/man-Sv)
- α_{base} : 위험 회피인자 (risk aversion factor)를 고려치 않았을 때 단위 집단선량 금전가 (US \$/man-Sv)

D_0 : 회피인자를 고려할 필요가 없는 개인선량 (mSv/yr)

D_i : 피폭자의 개인선량 (mSv/yr)

a : 위험 회피인자

원자력시설의 사고시 일반인에 대한 피폭선량은 개인의 생활습관 등에 따라 다양하며, 많은 경우 최대 피폭을 받는 개인의 집단에 우선성을 둔다. 따라서 본 연구에서 언급한 개인선량이라 함은 최대 피폭을 받는 개인집단을 의미하며, a 값은 1.2에서 1.5 범위의 값을 제안하고 있다[6].

원자력시설 사고의 경우 일반인에 대한 피폭선량은 환경적 요인 등에 의해 사고후 시간에 따라 급격히 감소한다. 이러한 효과를 고려하기 위해 본 연구에서 다음 식이 제안된다.

$$\alpha_i = \alpha_{base} \frac{\sum_{t=0}^T \left(\frac{D_{i,t}}{D_0} \right)^a}{T}$$

(단, $D_{i,t} \leq D_0$ 이면 $D_{i,t} = D_0$) (4)

여기서,

T : 피폭기간

현 시점에서 투자한 비용에 대한 향후 피폭선량의 영향을 고려하기 위한 전통적 평가방법은 할인율 (discounting rate)에 근거한다[5]. 일반적으로 상품에 대한 할인율은 금융시장에서 일컫는 이자율 (interest rate)에 해당한다. 그러나 방사선 방호분야에서 금융시장 이자율의 적용은 투자에 대한 미래 영향에 대한 집단의 선호도를 적절히 반영하지 못한다. 일반적으로 미국에서는 환경보호를 위한 투자분석에서 1%에서 3%의 할인율을 적용하고 있다[5]. 할인율 (r)을 적용할 경우 식 (4)는 다음과 같이 수정될 수 있다.

$$\alpha_i = \alpha_{base} \frac{\sum_{t=0}^T \left(\frac{D_{i,t}}{D_0} \right)^a \left(\frac{1}{1+r} \right)^t}{T}$$

(단, $D_{i,t} \leq D_0$ 이면 $D_{i,t} = D_0$) (5)

적용결과

본 연구에서 원자력시설의 사고시 일반인에 대

해 보다 적절한 α 값 산정 방법론을 제안하였으며, 최근의 우리나라의 경제자료에 근거한 적용결과를 논의하였다. α_{base} 는 10,000 US \$/man-Sv 을 적용하였으며, D_0 값은 여러 원자력관련 국제기구에서 권고하고 있는 원자력 사고시 개입 (intervention)이 필요치 않는 선량준위인 연간 개인선량 1 mSv로 설정하였다[6]. 사고후 시간에 따른 피폭선량의 감소는 체르노빌 사고 피폭영향 보고서에 근거하여 $t^{-0.07}$ (피폭선량에 대한 반감기: 약 10년)으로 가정하였다[6]. 일반적으로 유아는 방사선 위해에 가장 민감할 뿐 아니라 사회적 관심도가 가장 높은 연령군이다. 따라서 본 연구에서 α 값 설정을 위한 결정 연령군 (critical age group)으로 0세 유아를 선정하였으며, 평균수명을 70세, 즉 총 피폭기간을 70년으로 가정하였다.

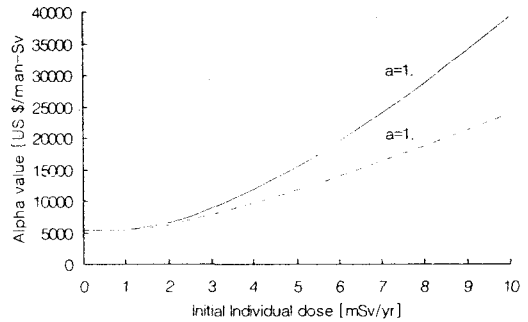


Fig. 1. 제안된 방법론에 근거하여 평가된 위험 회피인자 (α)에 따른 피폭선량 금전가(할인율 = 2%).

그림 1은 2% 할인율을 가정하여 제안된 방법론에 근거하여 위험 회피인자와 사고후 초기 개인선량에 따른 α 값을 나타냈다. 사고후 초기 개인선량과 위험 회피인자에 따라 뚜렷이 다른 α 값을 보여주고 있다. 기존 방법론에 근거할 경우 α 값은 개인선량의 분포에 관계없이 항상 일정한 10,000 US \$/man-Sv로 평가되며, 개인선량이 1 mSv/yr 이하의 저선량에서는 제안된 방법론 근거한 값 (이하 제안값이라 한다.) 보다 할인율의 고려로 기존값보다 약 2배 낮게 평가되었다. 반면 개인에 대해 상대적으로 고선량인 5 mSv/yr에서 위험 회피인자 1.2와 1.5를 적용할 경우 제안값은 각각 12,000 US \$/man-Sv와 15,000 US \$/man-Sv로 기존값보다 각각 1.2배, 1.5배 높았다. 기존값과 비교하여 위험 회피인자

를 1.2와 1.5를 적용할 경우 초기 연간 개인선량이 각각 약 4 mSv와 3 mSv 이하에서는 제안값이 낮게 평가된 반면, 그 이상의 개인선량에 대해서는 높게 나타났다.

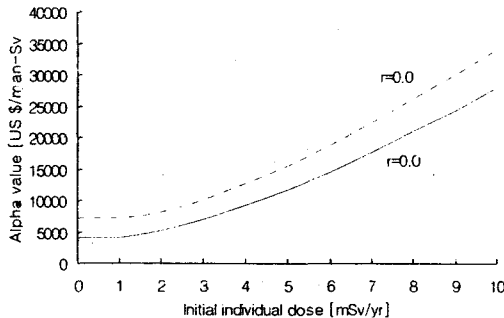


그림 2. 제안된 방법론에 근거하여 평가된 할인율 (r)에 따른 피폭선량 금전가(위험 회피인자 = 1.35).

그림 2는 위험 회피인자 1.35를 가정하여 제안된 방법론에 근거하여 할인율과 사고후 초기 개인선량에 따른 α 값을 나타냈다. 본 연구에서 고려된 초기 연간 개인선량의 범위에서 다른 할인율의 적용에 따라 약 1.2에서 1.7배의 차이를 나타냈다.

결 론

세계 각국에서는 피폭선량 금전가 산정을 위해 많은 연구 노력을 기울여 왔으나, 인간의 생명을 금전적 가치로 평가하고자 하는 사회적, 도덕적 문제 등으로 아직까지도 이에 대한 많은 논란이 있다. 이러한 논란은 향후에도 지속될 것으로 판단되며, 본 연구에서는 기존의 원자력시설의 정상 운영시 피폭선량 금전가 모델을 기본으로, 사고시 만성피폭에 대해 보다 적용 타당한 모델을 제안하였다. 아울러 우리나라 경제 환경자료를 사용하여 적용한 결과를 기존값과 비교, 분석하였다.

제안된 방법론에 근거할 경우 비록 집단선량은 같더라도 집단내 개인선량의 불균일한 분포의 차이에 따라 피폭선량 금전가는 큰 차이를 나타냈다. 이는 집단에 대한 총 방사능 위해는 개인선량의 불균일성에 따라 상당히 다를 수 있다는 것을 나타낸다. 또한 할인율의 고려도 피폭선량 금전가 산정에 있어서 중요한 요소로 작용하였다.

본 연구는 경제적 관점만을 반영한 것으로, 향후 사회적 위해 관리체제를 반영한 보다 심도 깊은 연구가 필요할 것으로 판단된다. 본 연구의 결

과물은 한국원자력연구소에서 개발된 실시간 방사선 피폭해석시스템 (FADAS : Following Accident Dose Assessment System[7])내 비상대응행위 결정지원을 위한 도구로 활용될 예정이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 시행하는 원자력연구 개발사업의 일환으로 방사선안전기술 연구센터의 협조하에 수행되었습니다.

참고문헌

1. IAEA, Intervention Criteria in a Nuclear or Radiation Emergency, IAEA Safety Series No. 109 (1994).
2. ICRP, Implication of Commission Recommendations that Doses be Kept as Low as Reasonably Achievable, ICRP Publication 22 (1973).
3. ICRP, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60 (1991).
4. RISO National Laboratory, Intervention Levels for Protective Measures in Nuclear Accidents : International Intervention Policy and Nordic Status on Intervention, RISO-R-652(EN), Denmark (1992).
5. J. Lochard, C. Lefaire, C. Schieber and T. Schneider, "A Model for the Determination of Monetary Values of the Man-Sievert", J. Radiol. Prot., Vol. 16 (3), 201-204 (1996).
6. International Advisory Committee, The International Chernobyl Project : Countermeasures to Be Taken after 1990 to Ensure Safe Living Conditions for the Population Affected by the Chernobyl Accident, 462-483 (1991).
7. 한문희 외, "방사선 환경방호 기술개발 : 방사선 비상대응 기술개발", KAERI/RR-2034/99, 한국원자력연구소 (2000).