

**'95 춘계학술발표회 논문집**  
**한국원자력학회**

**비용-이득 분석을 통한 차세대 원전의 방사선 방호**  
**수치적 지침 개발 방법론 제안**

손기윤, 강창순  
서울대학교

**요 약**

차세대 원전의 합리적 방사선 방호를 위한 수치적 지침 개발을 위해서 기존 방법론을 검토하여, 새로운 수치적 지침 개발시 고려하여야 할 사항을 도출하였다. 또한 이를 비용-이득분석 방법론에 적용하기 위해 필요한 사항들도 함께 도출하여 제시하였다.

**I. 서 론**

방사선 방호의 초창기에는 주어진 문턱선량(threshold dose)이하에서는 방사선 피폭에 의한 인체의 위해가 없는 것으로 간주되었다. 그러나 이후 많은 연구 결과가 나오면서 문턱선량이하의 방사선 피폭에 의해서도 피폭개인 뿐만 아니라 그 후세에게도 위해효과가 있는 것으로 밝혀졌다. 따라서 최근에는 아무리 낮은 수준의 방사선 피폭에 대해서도 이에 해당하는 인체위해의 효과가 있는 것으로 간주되고 있다.[1]

이러한 방사선 피폭의 확률적 효과를 고려하여 ICRP-26(1977)에서는 방사선 방호의 3원칙, 즉, 정당화, 개인선량 한도화, 최적화의 원칙을 처음으로 제시하였다. 특히, 방사선 방호의 최적화 원칙은 합리적 성취최저(ALARA), 즉, "경제적, 사회적 인자를 고려하여 방사선 피폭을 합리적으로 낮게"라는 원칙과 동의어로 받아들여진다. 이러한 합리적 성취최저의 원칙은 방사선 피폭을 수반하는 모든 행위에 대해서 적용되고 있다.

그러나, 합리적 성취최저의 모든 원칙들은 정량적이라기 보다는 정성적이기 때문에 구체적으로 적용하기가 어렵다. 또한 사회적 인자를 고려하는 것은 사회별, 나라별의 수많은 다양성을 포괄하므로 합리적 성취최저의 구체적 적용을 더욱 어렵게 한다. 따라서 이의 일괄적 적용을 위해서 정량적인 해석이 필요하게 된다.[2]

**II. 방사선 방호의 최적화 방법**

### 1. 비용-이득 분석

ICRP-26 및 37에서는 정량적인 해석방법으로 비용-이득분석을 제안하고 있다. 비용-이득 분석은 방사선 피폭을 수반하는 행위에 대해 이로 인한 손해와 이득을 화폐단위로 정량화하여 비교하고, 집단선량을 사회에서 용인될 수 있는 수준이하로 저감하는데 드는 비용의 적정선을 평가하는 방법이다.[1],[2],[3]에 붙들어, 방사선 피폭을 수반하는 어떤행위의 이득이 손해보다 크고, 어떤 기준-에 붙들면, 수치적 지침-을 만족시킨다면 그 행위는 경제적, 사회적 정당성을 부여받게 되는 것이다.

비용-이득 분석방법을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$B = V - (P + X + Y) \quad (1)$$

B = 순이득, V = 총이득, P = 방사선 방호 비용을 제외한 기본생산 비용  
 X = 선택 방사선 수준 달성을 위해서 드는 방호비용  
 Y = 선택 방사선 수준에서의 손해

여기에서 비용에는 경제적 직접비용 이외에 사회적 간접비용도 포함된다.

일반적으로 V 및 P는 선택과는 무관하므로 방사선 방호의 최적화는 X+Y가 최소화되는 점(이득이 최대가 되는 지점)에서 이루어진다. 이것을 그림으로 나타낸 것이 그림 1이다.

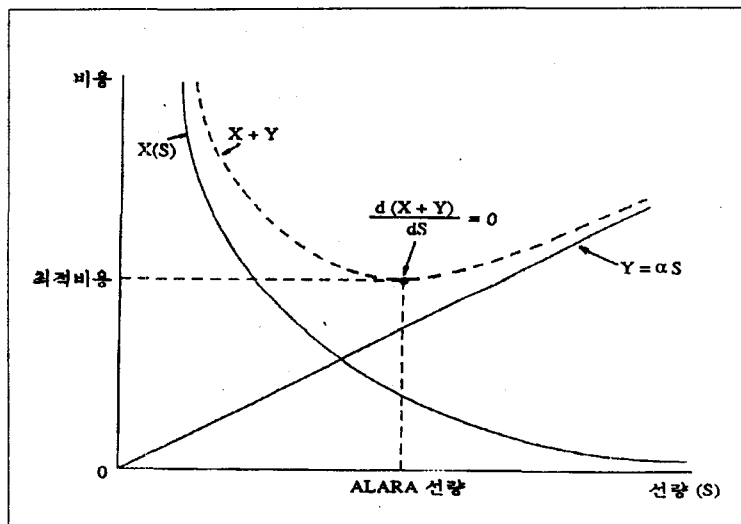


그림 1 : 방사선 방호 최적화를 위한 비용-이득 분석 곡선

여기에서 X는 한계효용의 법칙(law of diminishing returns)을 따른다. 즉, 방호비용 증가에 대한 선량저감의 효과는 점차 감소한다는 것이다. 이 X의 화폐가치로의 정량화는 방사선 시설의 경제적, 공학적 데이터베이스를 이용하여 구할 수 있다.

Y는 방사선 피폭의 손해로 정의되며, 피폭으로 인한 위험도와 이로 인한 인체효과의 집합적인 개념이다. 이것은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Y = aS + \beta \sum_j N_j f(h_j) \quad (2)$$

여기에서 a는 집단선량(S)에 비례하는 방사선 피폭의 객관적 손해비용, β는 방사선 피폭으로 인한 불안등의 심리적 요소를 고려한 부가적인 사회적 손해의 비용으로 정의된다. j는 개인선량에 의존하는 함수이며, h<sub>j</sub> 및 N<sub>j</sub>는 각각 집단 j의 평균선량 및 인구집단수이다.[2]

ICRP-37에서는 경제적, 사회적 인자를 고려한 방사선 방호의 최적화를 이루기 위하여 방사선 피폭의 객관적 비용인 a값의 유도사용을 권고하고 있다. (일반적으로 β항은 무시된다.)

이 a값을 유도하는데에 가장 중요한 것은 인간의 가치를 화폐단위로 표현하는 것이다. 여기서 인간의 가치란 인간의 경제가치를 의미하는 것으로 사회 또는 각나라의 생활수준을 고려한 것이다. 많이 쓰이는 것으로 일인당 국민 총생산(GNP)를 고려하는 방법이 있다. 그 외에도 내포적 대중가치법(implicit public value approach), 자의배상법(willingness to pay approach), 위험도 보상법, 보험 및 법정배상법등이 있으나 객관성 및 일관성이 결여되거나 너무 광범위한 값을 가진다는 단점이 존재한다.[1],[2],[4]

비용-이득분석은 화폐가치라는 매우 간단할 뿐 만 아니라, 정량적이고 이해하기 용이한 값으로 결과를 도출한다는 점에서 장점이 있으나, 일반적으로 사회적 인자를 화폐가치로 환산한다는 것은 난해하고 불확실한 요소를 많이 포함하므로 결과에 대한 신뢰도가 떨어지게 된다는 단점이 있다. 그럼에도 불구하고 비용-이득 분석을 객관적, 제한적으로 사용한다면 방사선 방호의 최적화 프로그램에 의사결정의 보조수단으로 유용하게 사용될 수 있다. 또한 비용-이득 분석은 현재의 인간의 가치를 근거로 한 대중의 수용성(acceptability)을 측정을 내포하고 있으므로 그 적합성을 정기적으로 점검해야 한다.[5]

## 2. 기존의 방법론 검토

현재까지 a값을 정량화 하는 방법에는 IAEA(국제 원자력 기구), NRPB(영국 방사선 방호청), CEPN(프랑스 원자력 방호 및 평가센터) Nakashima(일본) 산정법등이 있다.[1],[6] 이 방법들은 각각 조금씩 다르기는 하지만 방사선 피폭에 의한 치사암 및 비치사암의 발생확률, 치사암에 의한 경제적 손실, 비치사암에 의한 치료기간 동안의 치료비 및 경제적 손실등을 고려하여 계산된다. 네 가지 방법 모두 인간의 가치평가는 일인당 GNP를 기준으로 산정하였고 ICRP-60의 방사선 피폭의 확률적 효과에 대한 인체손해 확률 데이터 및 각국

의 상황에 따른 데이터를 이용하였다. 이를 정리하면 표 1과 같다.

표 1: 기존의  $\alpha$  값 산정 방법

기 관	산 정 법	결과	비고
IAEA	$\alpha = (0.43 \text{ y/man-Sv}) * (\text{일인당 GNP } \$/\text{y}) + C(\$/\text{man-Sv})$	\$3000/man-Sv (1983년 기준)	C=비치사망의 추가 의료비용
NRPB	조기사망으로 인한 손실 + 비치사망에 의한 손실 + 유전장애에 의한 손해 + 암의 예상치료비용		비치사망에 의해 1년동안 경제활동이 불가능하다고 가정
CEPN	$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$ $\alpha_1$ =치사성 암에 의한 손해 (=0.02V) $\alpha_2$ =비치사성 암에 의한 경제적 손실	2300-11300 (\$/man-Sv) (1985, 프랑스)	V=인간의 경제 가치 GNP의 변화에 따라 범위를 가짐
Nakashima	$\alpha = \alpha_{nf} + \alpha_j + \alpha_g$ $\alpha_{nf}$ =비치사망에 의한 손실 $\alpha_j$ =치사암에 의한 손실 $\alpha_g$ =유전장애의 의한 손실	\$5000/man-Sv (1984년)	화폐가치 할인율을 고려하는 현가화해석법 (Present-Value Method)이용

### 3. 기존방법론의 한계

위의 네가지 산정법은 나름대로 다음과 같은 몇 가지 한계점을 가지고 있다.

첫째, 모두  $\alpha$ 값의 정량화에만 몰두하여 개인피폭으로 인한  $\beta$ 항을 무시가능한 것으로 간주하고 있다. 이것은 비록 방사선 방호가 개인의 피폭 제한치 이하로 충분히 낮게 유지되는 상황에서는 개인피폭항을 무시해도 된다는 가정을 사용하고 있지만, 이 가정은 “아무리 작은 피폭이라도 손해를 끼친다”는 합리적 성취최저의 전제에 위배된다.

둘째, 개인피폭의 함수인  $f(k)$ 는 피폭의 증가에 따른 위험도 혐오(risk aversion)의 형태가 될 것으로 예상된다. 이것은 과학기술의 발달로 인해 사회적 위험도의 전반적 감소에 의해 일반대중들의 위험도에 대한 태도가 민감해짐을 의미한다. 따라서 대중들은 아주 자그마한 위험, 특히, 그것이 잘 알려져 있지 못하거나, 대재해의 가능성을 포함하는 것이라면 혐오의 태도를 보이게 된다.[7] 이러한 상황에서  $\beta$ 항의 무시는 위험도에 대한 대중의 인지 위험도(perceived risk)를 반영하지 못함으로써 결과적으로 전문가가 도출한 결과에 대한 대중의 불신 발생의 원인이 될 수 있다.

셋째, 인간의 경제가치 평가를 위해서 GNP를 사용하는 것은 사회의 생활 수준을 비교한다는 점에서는 의미가 있으나 일반적으로 생산활동에 관여하지 않

는 비생산활동 인구에 대한 고려가 반드시 필요하다는 제한점이 있다.

그외에, 인간의 목숨에 대해 특히 중요하게 생각하는 문화적 배경을 가진 동양권 나라에 대해 단지 일인당 GNP로 인간의 가치를 평가 한다는 것은 그 나라의 고유한 문화적 요인을 간과 할 수도 있다는 단점이 있다.

### III. 차세대 원전을 위한 방사선 방호 수치적 지침의 개발

#### 1. 수치적 지침 개발의 필요성

현재 제안되어 있는 대표적인 수치적 지침은 10CFR50 Appendix I에서 규정하고 있는 \$1000/man-rem이다. 이것은 1970년대의 기준이지만 현재까지도 사용되고 있다. 그러나 이 지침을 그대로 우리나라에 적용하는 것은 문제가 있다. 1970년대 달러화 가치의 재평가는 차치하고서라도 다음과 같은 몇가지 이유에서 우리나라의 독자적인 수치적 지침의 개발이 필요성이 제기된다.

첫째, 모든 사회 및 나라에 적용되는 단일한 기준의 설정은 타당하지 않기 때문이다. 단일한 기준의 설정은 합리적 성취최저의 원칙, 즉, 각 사회별, 나라별 경제적, 사회적, 문화적 인자의 고려라는 점에 위배된다. 둘째, 수치적 지침의 개발은 원전 설계시 뿐만 아니라 이후에 추가적으로 설치될 각종 방사선 방호 설비들에 대한 경제성 지표가 마련하여 제한된 경제적 자원을 효율적 사용에 많은 도움을 줄수 있다. 마지막으로, 개발될 수치적 지침에는 순수한 경제적 직접비용 만이 아닌 대중들의 방사선 피폭에 대한 인지 위험도(risk perception)를 고려한 “사회적 안심료”를 책정함으로써 원전의 안전성에 대한 대국민 홍보 효과를 높일 수 있기 때문이다.

#### 2. 수치적 지침 개발 방법론

이상에서 언급된 기존 방법론의 한계 및 개발의 필요성을 고려하여 차세대 원전에 대한 수치적 지침 개발에는 다음과 같은 사항들이 고려되어야한다.

- (i)  $\alpha$ 항은 기존방법론 채용하여 한국실정에 맞는 데이터를 사용하여 계산하되, 인간의 가치 평가에는 GNP이외의 요인을 고려해야 한다.
- (ii)  $\beta$ 항은 설문조사 방법을 이용해서 결정한다. 이것은 두단계로 이루어지는데 우선 위험도 혐오도 조사를 통한 원전자체의 허용도를 구하여 사회적 평균 위험도와 비교하여 원전에 대한 보수적 인자 결정한다. 더불어 피폭준위에 따른 인지 위험도에 대한 손해비용을 구한다. 이때 유의할 점은 설문작성시 응답자가 상응하는 위험도, 혹은 피폭준위에 대한 이해가 가능하도록 작성함이 중요하다.
- (iii) 설문은 전문가와 일반인 집단을 구분하여 수행하고 결과에 대한 두 집단간의 적절한 가중치를 도출해야한다. 이러한 설문조사법은 신뢰성 있는 결과를 획득하기 위하여 객관적인 설문집단 선정 및 설문항목 구성 및 결과 도출과정에 대한 전문가들의 충분한 토론이 선행되어야 할 것이다.

- (iv) 방사선 방호 설비비용(X항)은 PRA 결과 및 기존의 설비비 데이터를 기준으로 산정할 수 있으며 시장가격(원자재 및 노임등)에 따라 변동이 있을 수 있으므로 시설수명등을 참조하여 계산한다.

#### IV. 결 론

비용-이득 분석 방법을 통한 수치적 지침의 개발에는 비용-이득 분석 자체가 가지고 있는 한계, 즉, 사회적 인자의 화폐가치로의 환산의 어려움이라는 단점에도 불구하고 설문조사법의 이용은 이러한 단점을 극복할 수 있는 대안이 될 수 있을 것이다. 왜냐하면, 설문조사법은 의사결정 과정에 대중의 참여를 유도함으로써 대중의 위험도 인지정도 및 그 사회에서 직접 활동하는 대중의 사고를 고려하여 사회적 안심료를 책정하게 되므로 대중이 납득하고, 수용할 수 있는 수준의 지침 개발이 가능하리라고 예상되기 때문이다. 따라서 이렇게 계산된 수치적 지침은 방사선 방호 설비에 대한 경제성 지표가 될 뿐 아니라 원전에 대한 대국민 홍보에 중요한 역할을 할 것이 기대된다.

#### VI. 참고문헌

1. Commission of the European Communities, "Radiation Protection: ALARA from Theory towards Practice", EUR 13796EN, Luxembourg (1991)
2. 과학기술처, "방사선 환경 안전연구: 방사선 방어 및 측정기술 개발, 제 3절 방사선 방어 최적화 기술", KAERI/RR-1328/93
3. Peter Abelson, "Cost Benefit Analysis and Environmental Problems", Macquarie University (1980)
4. D. Okrent, "Risk Benefit Evaluation for Large Technological Systems", Nuclear Safety Vol 20 No. 2 (1979)
5. U.S. Department of Energy, "A Guide to Reducing Radiation Exposure to As Low As Reasonably Achievable", DOE/EV/1830-T5 UC-41, (1980)
6. Y. Nakashima, "Study of the System of Dose Limitation: Long Term Variation of the  $\alpha_0$  Value in Japan", (IAEA-SM-285/06), In Proceedings of a Symposium, Vienna, 10-14 March 1986 jointly organized by IAEA and OECD/NEA, IAEA, Vienna, (1986)
7. Paul Slovic et al., "Facts and Fears: Understanding Perceived Risk", in R. Schwing and W.A. Albers, Jr. (eds.) Societal Risk Assessment: How Safe Is Safe Enough? (1980)
8. Paul Slovic et al., "Modeling the Societal Impact of Fatal Accidents", Management Science Vol 30 No. 4 (1984)
9. Charles F. Keown, "Risk Perceptions of Hong Kongese vs. Americans", Risk Analysis Vol 9 No. 3 (1989)