



국제방사선방호위원회 간행물 101: 2부

# 방사선방호의 최적화 -과정의 확장-

The Optimisation of Radiological  
Protection: Broadening the Process



대한방사선방어학회

이 번역본 발간은 교육과학기술부 지원 아래 대한방사선방어학회가 운영하는 2010년도 방사선방호 정책지원 워킹그룹 사업(한국동위원소협회를 통한 위탁)의 일환으로 이루어졌습니다.

ICRP Publication 101, Part 2

# **방사선방호의 최적화**

## **-과정의 확장-**

**The Optimisation of Radiological  
Protection: Broadening the Process**

ICRP 승인: 2005년 9월

이 ICRP 간행물의 우리말 번역본은  
ICRP의 허락(2010년 8월)을 받았으며  
ICRP 정신에 따라 무료로 배포합니다.

**국제방사선방호위원회**



## 역사서문

ALARA! As Low As Reasonably Achievable.

굳이 우리말로 옮긴다면 ‘합리적으로 달성 가능한 범위에서 (피폭의) 최소’ 정도가 된다. 본래 의미대로 표현하면 지루한 느낌이므로 종종 ALARA로 불려왔다. 1970년대 초반 개념이 정리되고 1977년 ICRP 권고(ICRP 26)에서 본격적으로 방호체계에 도입된 최적화는 지난 30여 년 동안 ‘ALARA’라는 애칭으로 불리면서 피폭 선량이나 위험을 합리적 범위에서 최소화하는데 공헌해 왔다. 그런데 2007년 ICRP 권고에서는 방호원칙은 변함이 없으나 ‘최적화’ 표현을 선호하고 ALARA는 사용을 지양했다. 슬로건처럼 된 ALARA를 받아들일 때 종종 ‘As Low As’는 강조하면서 ‘Reasonably Achievable’이 간과됨으로써 마치 선량의 감축만이 선(善)인 것처럼 주장하는 폐단문제도 지양의 한 이유가 된다.

방호최적화란 무엇인가? 이론적은 답은 비교적 단순하다. 주어진 피폭상황에 대해 방사선방호 비용을 늘이면 원론적으로 피폭은 감소한다. 그러나 투자의 한계효용 법칙에 따라 동일한 비용으로 감축할 수 있는 피폭량은 점점 줄어들어 급기야는 사소한 선량을 줄이는 데도 막대한 비용이 필요하게 된다. 이렇게 비합리적으로 선량만 감축할 수 없기 때문에 방호비용을 중간의 적정선까지 투입하고 잔여 피폭은 감내하는 타협이 최적화이다.

그럼에도 막상 어디까지가 ‘합리적’인 수준인가라고 반문하면 그에 대한 대답은 만만하지 않다. 이 질문은 필경 가치판단을 끌어들이는데 가치에는 주관적 요소도 개입하기 때문이다. 2008년 사회적 혼돈사태까지 이르렀던 ‘광우병 파동’처럼 사람들은 동일한 사안을 두고도 전혀 다른 가치판단을 한다. 나아가 ‘경제사회적 인자를 고려하여’라는 단서까지 달고 있으니 더욱 복잡해진다. 그러니 많은 사람들이 연관되는 방사선 피폭상황에 대해 어디까지 방호가 합리적인가를 판단하는 일은 결코 말처럼 쉽지 않다. 이런 어려움을 완화하기 위해 과거에는 피폭상황과 관련된 여러 인자들을 가능하면 정량화하여 손익을 비교함으로써 합리적인 선을 찾고자 하는 소위 ‘정량적 최적화’에 주목했다.

그러나 최적화 실제에서는 정량화가 곤란하지만 최종 판단에 영향력이 큰 인자들을 접할 때도 있다. 제안된 방호조치에 대한 노동조합의 반대가 한 예일 수 있다. 그래서 현대 최적화는 이처럼 정량화하기 어려운 인자들을 보다 지혜롭게 포괄하도록 ‘이해당사자 참여’를 추구하고 있다. 이 간행물은 ‘과정의 확장’이란 부제를 달고 있는 것도 이러한 배경에 바탕을 둔다.

이해당사자 참여나 일종의 합의도 어렵게 보면 무척 어려운 문제이다. 합리적 사고가 정착된 사회에서는 합의 또는 적어도 암묵적 합의에 이르기가 비교적 용이할 수 있으나 시비와 반발이 팽배한 사회에서는 전혀 그렇지 못하다. 그래도

분명한 것은 어렵다고 그 난관을 기피한 결과는 방호방안을 이행할 때 험준한 난관에 봉착할 수도 있기 때문에 이해당사자 참여를 외면해서는 안 된다는 것이다.

그렇다고 최적화가 명실상부하게 최선의 결과를 낸다고 보장하는 것은 아니다. 판단에는 착오도 있을 수 있다. 보다 중요한 것은 항상 최선의 방호를 지향하는 ‘마음의 틀’이며 이야말로 최적화의 고향이다.

2010년부터 IRPA는 ‘방사선 방호문화’를 정착시키려는 활동을 개시했다. 아직은 방호문화가 무엇이고 왜 이러한 변화가 필요하며 어떻게 문화를 형성할 것인지 골격도 불분명하지만 기존보다 한 차원 더 견고한 방호체계를 구축하려는 것으로 이해하면 틀림없을 것이다. 그렇지 않으면 새삼 방호문화 슬로건을 내 걸 이유가 없기 때문이다.

ALARA이든 최적화이든, 방호문화든 핵심은 분명히 마음의 틀이다. 방호에 관련된 조직과 이해당사자를 포함하는 모든 개인이 항상 방호와 안전에 관심을 가지고 참여를 통해 최선을 추구하는 자세가 모든 문제를 해결하는 원동력이기 때문이다. 특히 의사결정권이 있는 경영진이나 영향력을 발휘할 수 있는 규제자의 마음의 틀은 중요하다. 그러나 현장 작업자 개개인도 안전에 관심을 갖고 의견을 말함으로써 새로운 발전의 전기를 마련할 수 있다. 백짓장도 맞들면 낫다. 현대 방사선방호에서 최적화의 중요성에 비해 이 간행물의 분량은 의외로 작다. 그러나 다양한 피폭상황 예를 들면 비상피폭상황에 대해서는 이를 다루는 간행물(예: ICRP 109)에서 구체적으로 최적화를 다시 거론하게 됨을 고려한다면 이 간행물은 매우 개요만 설명하는 셈이다.

번역 과정에서 보완 설명이 필요한 곳에는 <역주>를 달았다. 부록B는 원문에 없는 내용이지만 부록A에서 설명하고 있는 정량적 최적화 절차에 대한 예시적 설명으로 <역주> 개념으로 첨부한 것이다. 이 번역본의 초고 마련에 애쓴 김지영양(한양대학교 대학원 방사선안전연구실)에게 감사한다. 이 번역물이 우리 방사선방호 발전에 보탬이 되기를 기대해 본다.

2011년 1월

역자 이재기(ICRP위원)  
한양대학교 원자력공학과

## 서 문

2001년 10월 20일, 국제방사선방호위원회(ICRP) 본위원회는 방사선방호 최적화 원리 및 적용 지침을 개발하기 위해 제4분과로 보고할 새 작업그룹 설립을 승인하였다.

사업계획에서 기술한 바에 따르면 이 작업그룹의 목적은 개정된 ICRP 권고와 관련하여 최적화 원리와 그 이행을 위한 요건을 재검토하는 것이었다.

이러한 관점에서, 제약치의 역할, 개인 피폭의 분포, 이해당사자 참여 그리고 규제와 운영에 응용에 특별한 유념해야 했다.

작업그룹의 노고의 결과로 작성될 문서는 새 권고를 위한 기반문서의 하나가 될 것으로 기대했다.

이 보고서는 작업그룹 노력의 결과이며 위에서 언급한 분야를 겨누고 있다.

이 보고서의 지침은 ICRP가 이전에 권고한 방호최적화 개념에 기반을 둔다.

작업그룹 위원은 다음과 같다.

W. Weiss (Chairman)

J.-F. Lecomte

Y. Xia

M.E. Clark

J. Lochard

작업그룹의 객원위원은 다음과 같다.

T. Lazo

작업그룹 회의에 설비와 기타 지원을 제공한 기관과 직원들에게 작업그룹은 감사를 표한다. 여기에는 독일연방 방사선방호청(FORP), 프랑스 방사선방호원자력안전원(FIRPNS), 경제협력개발기구 원자력국(OECD/NEA)이 포함된다.

이 보고서는 2005년 9월 17일 ICRP 베른 회의에서 채택되었다.



# 목 차

역자서문 .....	iii
서 문 .....	v
요 약 .....	ix
1. 서론 .....	1
2. 최적화 원칙의 역사 .....	3
2.1. 원칙의 기반 .....	3
2.2. 개념의 진화 .....	3
2.3. 최근의 발전 .....	6
3. 최적화 과정 .....	9
3.1. 과정의 윤곽잡기 .....	9
3.2. 과정의 특성 .....	10
3.3. 이해당사자 참여 .....	15
3.4. 최선방안 선택 .....	16
4. 피폭 분포 .....	19
4.1. 집단선량의 사용 .....	19
4.2. 피폭의 시공간 분포 .....	20
4.3. 집단선량 매트릭스와 의사결정 과정 .....	21
5. 운영과 규제에 최적화 적용 .....	23
부록A: 최적화와 의사결정 보조기법 .....	25
부록 B. 정량적 의사결정 보조기법 예시 .....	35
참고문헌 .....	49



## 요 약

(a) 방호최적화는 1970년대 이래로 방사선방호체계의 기본원칙 중 하나였다(ICRP, 1973, 1977). 방호최적화의 정의는 대체로 변하지 않았지만 그 응용은 실제 이행으로부터 피드백에 의해 발전해 왔다. 최적화 과정은 초기에는 주로 방호방안의 비용-편익 비교와 같은 정량적 기법에 초점을 맞추었으나, 점차 운영 절차, 모범관행 그리고 정성적 접근을 포함함으로써 보다 판단적 의사결정 과정으로 변해 왔다.

(b) 최적화 원칙은 선원중심 과정으로서 경제적, 사회적 인자를 고려하여 개인선량의 크기, 피폭자 수, 잠재피폭 가능성을 적절한 선량/위험 제약치 아래에서 합리적으로 달성할 수 있는 한 낮게 유지하는 것이라고 ICRP는 정의하고 있다. 개정된 ICRP 권고에 따르면 제약치 아래의 최적화 과정은 계획, 비상, 기존 피폭 상황 어느 것에도 적용되어야 한다.

(c) 특별히 최적화 원칙에 대한 ICRP 권고들(ICRP, 1983, 1988)과 ICRP 60(1991)에서 주어진 최적화 원칙에 관한 내용들은 여전히 유효하다.<sup>1)</sup> 최적화는 효과적인 최적화 프로그램을 통해 조치 요구의 확인(과정의 구성 또는 윤곽잡기<sup>2)</sup>), 피폭을 합리적으로 낮게 유지하기 위해 가능한 방호방안의 식별, 여건에서 최선방안 선정, 선정된 방안의 이행, 나아가 여건이 방호조치 시정을 요구하는지 정규 재검토를 포함하는 계속적이고 순환적인 과정이다. 그러나 현대사회에서 개인의 평등, 안전문화 그리고 이해당사자 참여의 역할이 증대됨을 반영하기 위해 이제 최적화가 이행되는 방법의 폭을 넓게 본다(ICRP, 1998, 1999).

(d) 최적화 원칙에 관한 ICRP 권고는 이 보고서에 제시된 것처럼 통합되고 진화했지만 기본적인 변화는 아니다. 이 보고서는 따로 다루는 환자피폭을 제외하고 피폭의 관리가 용이한 모든 피폭상황을 겨냥한다.

---

1) <역주> 최적화 기법 등에 관한 구체적 보고서들은 유효하다는 표현은 무리가 없으나 직전 기본 권고인 ICRP 60의 내용도 여전히 유효하다는 표현은 적절하지 않다. ICRP 60의 최적화 관련 내용 자체가 부적절하다는 것이 아니라 ICRP 60은 ICRP 103으로 대체된 문서이기 때문에 효력이 상실된 것으로 보아야 하기 때문이다.

2) <역주> 기본권고인 ICRP 103 번역본에서는 'framing of process'를 '과정 구성'으로 표현했다. 그러나 '구성'이란 말이 상당히 광범한 의미로 쓰이므로 최적화에 집중한 이 보고서 번역에서는 보다 구체적 의미를 전달할 수 있도록 '윤곽잡기'라는 용어의 사용을 시도한다.

## 과정의 특징

(e) 방호최적화는 피폭이 발생하기 전에 예방하는 것을 목표로 하는 전망적 반복 과정이다. 최적화는 연속적이며 기술적, 사회경제적 발전을 고려하는 질적 양적 판단 모두를 필요로 한다. 이 과정은 해당되는 모든 관점들이 고려되도록 체계적이어야 하며 신중하게 구성되어야 한다. 최적화란 여건에서 최선을 다했는지 항상 질문하는 마음의 틀이다. 최적화는 적절한 절차와 자원뿐만 아니라 모든 관련 기관에서 모든 계층의 헌신을 필요로 한다.

(f) 방호방안을 평가하고 더 이상 선량 감축이 합리적이지 않음을 판단하는 과정은 개인과 그룹의 계획선량이나 잠재피폭을 줄이기 위한 여러 방호방안의 비교를 포함한다. 관련된 피폭이나 복잡성 수준 모두를 고려하기 위해서는 차등접근이 필요하다. 최적화 과정의 판단적 본질 때문에 여기에는 투명성이 강하게 요구된다. 이러한 투명성은 이해한 결정<sup>3)</sup>을 목표로 모든 해당 정보가 관련 당사자들에게 제공되고 의사결정 과정을 추적할 수 있도록 적절히 문서화됨을 전제로 한다.

(g) 환경으로 방사능 방출을 관리하기 위해서는 과비용을 초래하지 않으면서 가용한 최선기술(BATNEEC)<sup>4)</sup> 원칙이 적용될 수 있다. 최적화 원칙과 BATNEEC 원칙은 서로 보완적이다. 보건에 미치는 영향 견지에서, 추정 방사선량의 최적화에 의해 피폭의 관리<sup>5)</sup>가 이루어질 것이다.

(h) 최적화 과정의 이행 책임을 명확히 하기 위해 절차가 필요하다. 조정자, 작업 그룹 또는 위원회를 포함하는 어떤 조직이 최적화만을 위한 것이든 아니든 관계 없이 전문 분야들 사이의 대화를 조장하기 위한 조직구조가 운영 수준에서 수립되어야 한다.

(i) 당국으로부터 피폭자에 이르기까지 최적화를 효율적으로 이행하기 위한 모든 관계 당사자의 책무란 다음을 의미한다.

- 최적화 규정과 그 시행 의지, 그리고 대화와 통제가 적절히 균형 잡힌 지침 제 공(당국)

3) <역주> ‘informed decision’을 ‘이해한 결정’으로 번역하였다.

4) <역주> BATNEEC: Best Available Technology, Not Entailing Excessive Costs.

5) <역주> 원문은 ‘잔여피폭의 관리’로 표현하고 있으나 잔여피폭은 비상피폭이나 기존피폭 상황에 적용하는 잔여선량과 혼동할 우려가 있어 표현을 수정했다.

- 방사선 정책의 수립, 일반목표 설정, 절차의 개발과 준수, 책임의 위임, 수단과 자원 배정, 그리고 운영으로부터 방사선방호 전문가의 독립성 유지(운영관리)
- 정보 공유, 방심하지 않는 자세 유지, 훈련과 재훈련, 그리고 방사선방호 의식 고취(개인).

(j) 이해당사자(즉, 어떤 상황에 대해 흥미나 우려를 가진 당사자) 참여는 최적화 과정에 중요한 입력으로 간주된다. 당사자 참여는 의사결정 과정에서 가치의 고려, 의사결정의 실질적 품질 향상, 이해 다툼 갈등의 해소, 작업자와 일반인의 공통이해 제고, 그리고 기관의 신뢰 구축 등을 성취하는 데 입증된 방법이다. 나아가 모든 이해당사자 참여는 안전문화를 강화하고, 방사선 위험의 관리에 요긴한 유연성을 제공하는데 이러한 유연성은 보다 효과적이고 지속 가능한 결정에 이르는 데 필요하다.

(k) 최적화 과정에서 의사결정자(일반적으로 운영관리자 또는 책임당국)는 명확하게 정의된 역할과 책임을 갖는다. 다른 개인과 그룹들도 이해당사자로 간주될 수 있다. 예로서 의사결정을 위한 제도적 또는 비제도적 기술지원(공인 선량계측 서비스, 유자격 전문가, 공식적 기술서비스, 공공 전문가 조직, 사설 연구소), 피폭자(작업자나 일반인) 또는 그 대리인(업계 조합, 지역 연합), 그리고 사회 대표자(선출 대표자처럼 선거로 뽑혔거나 환경연합처럼 참여적 과정에 의한)가 있다. 이해당사자의 참여가 운영관리 또는 당국이 가지는 최종 결정 책무나 그 결정에 대한 책임을 포기하는 것을 의미하지는 않는다.

(l) 최선방안은 항상 그 피폭상황에 고유한 것이고 주어진 조건에서 달성할 수 있는 최고 수준의 방호에 상당하게 된다. 그러므로 그 아래에서는 최적화 과정을 멈출 선량 준위를 사전에 결정하는 것은 적당하지 않다. 피폭상황에 따라 최선방안은 해당 제약치를 크게 밀돌 수도 있고 근접할 수도 있다. 이는 최적화 과정이 방사선방호체계로 ‘진입 준위’로 제안될 수 있는 어떤 준위보다도 낮은 선량에 귀착될 수 있음을 의미한다.<sup>6)</sup>

---

6) <역주> 원론적으로 이 말은 그르지 않다. 그러나 방사선방호체계로 ‘진입준위’ 자체도 일종의 일반 최적화 과정을 거쳐 설정되는 것이므로 대개의 경우 최적화 결과가 진입준위 아래로 내려가지는 않을 것이다. 그럼에도 이점을 밝히는 것은 특별한 경우인 작업장 공기 중 라돈에 대해 설정한 직무피폭 관리 ‘진입준위’를 감안했기 때문으로 보인다. 직장 라돈에 대한 이 진입준위는 현재 1000 Bq/m<sup>3</sup>로 권고되어 있는데 실로 이 농도는 종사자에게 연간 10 mSv 이상의 유효선량을 부여한다. 따라서 직장 라돈 방호에 최적화가 이루어질 경우 귀착되는 라돈 농도는 이 진입준위보다도 낮아질 것으로 예상된다.

(m) 최적화는 최소화가 아님을 강조해야 하겠다. 최적화는 방호를 위해 사용가능한 자원과 피폭으로부터 위해(사람, 경제, 사회, 정치 등)의 균형을 신중히 맞춘 평가의 결과이다. 따라서 최선방안이 반드시 가장 낮은 선량을 내는 것은 아니다.

## 최적화와 피폭 분포

(n) 방호방안의 비교는 최적화 과정의 핵심 특성인데 여기에는 피폭자 집단 내 개인피폭 분포의 특징을 신중하게 고려해야 한다. 선원의 영향을 받는 각 인구집단은 평균, 최소, 최대 개인선량, 피폭자 수, 집단선량, 그리고 잠재피폭 가능성과 같은 다양한 피폭 변수뿐만 아니라 나이, 성별, 습관과 같은 여러 속성별로 표현될 수 있다. 단일 피폭 변수로는 다양한 방호 방안을 충분히 비교하기에 일반적으로 충분하지 않다.

(o) 방호방안의 비교에서 고려할 추가 측면은 사회적 가치, 특히 관련된 개인 그룹들 사이에 피폭분포의 공평성이다. 예를 들어, 서로 다른 방호방안들은 작업자 그룹에 대한 평균 개인선량과 집단선량이 비슷하더라도 선량분포의 모양을 달리 하는 것으로 특성화 될 수 있다. 이러한 비교에서 평등성 고려는 대부분의 경우 일부 개인의 피폭이 현저히 높은 방호방안을 버리게 할 것이다.<sup>7)</sup>

(p) 피폭이 대규모 집단이나 광범한 지역, 또는 긴 기간에 걸쳐 일어날 때, 전체 집단유효선량(즉, 모든 개인피폭의 시간과 공간에 대한 합)은 의사결정에 유용한 도구가 되지 못하는데, 그러한 합은 정보를 과도하게 뭉치고 방호조치 선택을 오도할 수 있기 때문이다. 집단선량과 연관된 한계를 극복하기 위해서는, 그 특정 상황에서 관련 집단의 피폭분포를 잘 설명하는 개인 특성과 피폭변수를 확인하기 위해 해당 피폭상황 각각을 신중하게 분석해야한다. 이러한 분석으로부터 특질이 비슷한 사람 그룹들을 발견할 수 있게 되는데, 최적화 과정에서 이들 그룹에 대해 집단선량을 계산할 수 있다.

(q) 해당 그룹을 확인하기 위해, 최적화 과정의 윤곽을 잡는 데 사용하는 것과 같은 접근이 사용될 수 있다. 이 접근에는 언제, 어디서, 누가 피폭을 받는지 하는 질문이 포함된다. 이러한 의문의 결과는 다차원 집단선량 매트릭스에 제시될 수 있다. 일단 매트릭스가 수립되면 경제사회적 고려와 가치, 그리고 최적화 과

---

7) <역주> 원문 표현이 약간 모호하여 수정했다.

정에 포함된 이들의 선호도를 반영하기 위해 집단선량으로 표현되는 각 매트릭스 요소의 상대적 중요도를 가중할 수 있다.

## 운영과 규제에 최적화 적용

(r) 방사선방호체계 내에서, 운영자와 적절한 국가당국 모두가 최적화 원칙을 적용할 책임을 진다. 방호최적화 과정의 이행은 당국의 요건을 적용받는 운영관리자의 책임이다. 운영관리자는 설계, 조직 그리고 진행 중인 최적화 과정 이행에 관한 결정을 한다. 당국은 최적화를 장려하고, 해당되면 운영면허를 발급할 수 있는 수준에 도달하기 위한 한 가지 방법으로서 최적화를 요구할 수도 있다. 또, 당국은 방사선방호 최적화가 운영 중에 효과적으로 이행됨을 확인할 수도 있다. 이러한 이행을 입증할 의무는 운영관리자에 있다. 피폭을 야기하는 활동이나 피폭 경감 수단 이행 및 그 추정 선량 결과를 승인하는 결정은 당국에 있다.<sup>8)</sup> 능동적 안전문화는 운영관리자와 당국 모두에 의해 최적화의 성공적 적용을 지원한다.

(s) 모든 최적화 특성을 규격화할 수는 없다. 최적화는 결과보다 방법에 적용되는 틀이다. 규정 위반인 경우를 제외하고, 당국의 역할은 특정 상황에 대해 구체적인 결과에 초점을 맞추기보다 과정, 절차 그리고 판단에 초점을 맞추는 것이다.<sup>9)</sup> 당국과 경영관리자 사이에 긴밀한 대화가 있어야 한다. 규제는 이러한 대화를 조장하도록 준비된 지침을 제공해야 한다. 최적화 과정의 성공 여부는 이러한 대화의 품질에 크게 의존한다.

---

8) <역주> 피폭원의 추가 즉, 계획피폭상황에 대해서는 당국의 승인이 당연하지만 피폭 경감수단에 대해서는 승인이란 개념은 퇴색된다. 사고와 같은 잠재피폭 상황을 가상하여 이에 대한 방호대책과 예상 잔여선량을 리스크 관리 관점에서 검토하고 승인하는 것은 일반적 관행이지만 실제 비상피폭 상황에서 선량감축을 위한 방안은 당국이 승인할 여유가 없다.

9) <역주> 원문 표현이 오인 소지가 있어 수정했다.



# 1. 서론

(1) ICRP가 권고한 방사선방호체계의 기본적 요건은 피폭상황이 계획<sup>10)</sup>, 비상, 기존 피폭상황 무엇이든 선원중심 선량제약치 아래에서 방호수준을 최적화(제약치 아래 최적화)하는 것이다.

(2) 역사적으로, 1970년대 이래로 방호최적화는 방사선방호체계의 기본원칙 중 하나였다(ICRP, 1973, 1977). 시간이 지나도 최적화 원칙의 정의는 대체로 변하지 않은 반면에, 그 적용은 실제 최적화 이행의 피드백과 함께 발전해 왔다. 주로 방호방안의 비용-편익 비교인 정량적 기법에 초점을 맞추는 것으로 시작했지만, 점차로 최적화 과정은 운영 절차, 모범관행 및 정성적 접근을 포함함으로써 보다 판단적 의사결정 과정으로 발전했다.

(3) ICRP는 특별히 최적화 원칙에 관한 권고를 담은 두 보고서를 출판한 바 있다(ICRP, 1983, 1988). 이들 보고서는 다양한 상황에서 작업자와 일반인 방호를 위해 최적화가 어떻게 적용되는지를 설명한다. 대체로 이들 보고서의 정보는 여전히 적절한데, 특히 분석을 수행하는 정량적 방법 적용에서는 더욱 그러하다.

(4) 이 보고서에서 최적화 원칙을 제시하는 방법은 최적화 원칙에 관한 ICRP 권고에서 제시했던 것의 통합과 발전이지 기본적 변화는 아니다. ICRP 60(1991)에 주어진 기본 정의는 여전히 유효하지만, 최적화를 이행하는 방법은 현대사회에서 개인 평등, 안전문화 및 이해당사자 참여의 역할이 증가함을 반영하는 더 넓은 과정으로 간주된다.

(5) 이 보고서는 환자피폭을 제외하고 방사선피폭의 관리가 용이한 모든 피폭상황(즉, 계획, 비상, 기존 피폭상황)을 겨냥 것이다. 최적화 원칙을 이행함에 개인 선량분포의 취급, 경영관리자와 당국의 소관 책임, 그리고 이해당사자의 참여 기회에 특히 유의하고 있다. 나아가 이 보고서는 최적화 과정 이행에서 의사결정 윤곽잡기, 의사결정 보조, 그리고 의사결정의 해당 역할을 명확히 한다.

---

10) <역주> 원문은 정상(normal)로 표현했으나 이는 이 간행물이 기본권고인 ICRP 103에 앞서기 때문에 ICRP 103에서 정립한 피폭상황 체계를 반영하지 못하고 있어 수정했다. 기존피폭상황도 정상피폭의 일부이므로 이 부분 문맥에서는 계획피폭상황이 적절하다. 이하에서도 정규피폭으로 표현된 곳은 계획피폭으로 수정했다.

(6) 제2절에서는 최적화 원칙의 기반과 진화에 대한 배경 정보를 제공한다. 최적화 과정의 특징이 제3절에 설명되며, 제4절은 최적화 과정에서 피폭 분포의 역할을 설명한다. 끝으로 제5절에서는 운영과 규제에 최적화 적용에 대한 정보를 제공한다. 이 문서의 부록은 최적화 과정 이행을 위한 의사결정 보조 기법을 보완하고 있다.

## 2. 최적화 원칙의 역사

### 2.1. 원칙의 기반

(7) ICRP 권고에서 최적화 개념이 도입된 것은 1940년대에 소위 “확률론적 영향”과 이러한 유형의 비가역성 영향에 문턱의 존재 유무를 증명하는 것이 불가능함을 인식한 직접적인 결과였다. 실로 인식된 방사선의 유해한 영향이 결정적 영향뿐일 동안은 결정적 영향의 발현에 대해 알려진 문턱 아래로 피폭을 제한하는 것으로 바람직하지 않은 방사선 영향을 피하는 데 충분한 것으로 간주했다. 확률론적 영향에서 선량-영향 관계의 불확실성 때문에 한도 적용만으로 위험이 없음을 더 이상 보장하지 못하게 되었다. 이로써 ICRP가 신중한 성향을 취하고 ‘모든 유형의 전리방사선 피폭을 가능한 최저 수준으로 줄이기 위한 모든 노력’을 권고하게 되었다(ICRP, 1955, VI항). 이러한 입장은 20년 후에 ICRP가 최적화 원칙을 도입함을 촉진시켰다.

(8) 확률론적 영향의 관리를 위해 이처럼 신중한 성향의 채택은 피폭의 정당화 문제를 제기했다. 불확실성 관점에서, 개인 그룹에게 위험의 부과는 오직 명백한 사회적 편익이 있을 때만 정당화될 수 있다. 나아가 어떤 사업이 그러한 편익을 낸다면, 두 번째 고려는 얼마나 위험을 줄여야 하고 동시에 위험 유발 활동의 존재를 어디까지 보전할 것인가가 된다. 이러한 고려는 ICRP가 첫 설명을 고쳐 ‘모든 선량을 실행 가능한 한 낮게 유지하고<sup>11)</sup> 모든 불필요한 피폭을 피해야 한다.’고 권고하도록 이끌었다.

### 2.2. 개념의 진화

(9) 최적화 원칙에서 그 다음 발전은 ‘실행 가능한 한 낮게’로 간주될 수 있는 피폭 준위를 결정하기 위한 기준을 정하는 것이었다. ICRP 9에서 도입되고 초기 권고에서 새로 공식화된 설명은 다음과 같다. ‘모든 피폭은 어느 정도 위험을 수반하므로, 불필요한 피폭을 피하고, 모든 선량을 경제, 사회적 사정을 고려하여 용이하게 달성 가능한 한 낮게 유지할 것을 ICRP는 권고한다.’(ICRP, 1966b, 제 52항). 또한 ICRP 9에서 위험에는 개인과 사회 두 측면이 있으며 제안된 활동의 편익과 균형이 맞아야 한다고 언급했다. 나아가 피폭을 ‘용이하게 달성 가능한

---

11) <역주> ‘as low as practicable’이라는 표현이며 ALAP으로 줄여 사용했다.

한 낮게'<sup>12)</sup> 유지하는 목적은 그 목적을 달성하는 데 요구되는 노력과 균형이 맞아야한다.

(10) 원칙의 진화에서 또 하나 중요한 단계는 위 ICRP 9의 설명을 명확히 함에 전념했던 ICRP 22(ICRP, 1973)이다. 특히, 실제로 원칙의 이행을 돕기 위해 비용-편익 모델을 ICRP가 도입했다. ICRP 22에서 요점은 “선량을 추가로 낮춰 얻는 경제사회적 이득이 그 감축을 달성하는 사회적 비용과 같아지는 선량을 선정함으로써 선량이 경제, 사회적 사정을 고려하여<sup>13)</sup> 용이하게 달성 가능한 한 낮다고 말할 수 있는 점을 정의할 수 있다.”고 설명한 것이다(ICRP, 1973, 제11항).

(11) 나아가 위험 감소에 기여하는 노력을 감안하는 ICRP 의도를 더 정확하게 묘사하기 위해 부사 ‘용이하게readily’를 ‘합리적으로reasonably’로 대체하였다(ICRP, 1973, 20항).<sup>14)</sup> 낮은 선량, 낮은 선량률 피폭에 수반되는 신체적, 유전적 위험 크기에 대한 첫 평가치가 1964년 ICRP에 의해 발행되어 가용했기 때문에 그러한 접근이 가능해졌다(ICRP, 1966a). 단위 피폭 당 도출된 위험 값은 ‘방사선량으로부터 발생하는 손해의 기댓값’이라는 수학적 표현으로 정의된 ‘위해’ 개념의 개발을 가능하게 했다(ICRP, 1973, 제21항). 이 개념은 선량 감축이 합리적인지 아닌지를 결정하기 위한 비용-편익 모델의 기본 요소가 된다.

(12) 표현에서 작은 변화가 ICRP 26(1977)에 도입되었는데 용어 ‘사정 consideration’을 ‘인자factor’로 대체했다. 표2.1은 ‘합리적으로 달성 가능한 한 낮게-ALARA’라는 표현의 지난 몇 십년동안 진화를 요약한다.

(13) ICRP 22에 제시된 비용-편익 모델은 10년 이상 일반인피폭이나 직무피폭 관리에 최적화를 내포하기 위한 방법론적이고 실제적인 모든 발전의 기초 개념이 되었다. 그 다음 중요한 단계는 ICRP 37(1983)이었는데, 이 간행물은 비용-편익분석 모델의 수학적 표현과 함께 시설의 설계와 운영에서 그 실제적 적용에 전념했다.

---

12) <역주> 원문 표현은 ‘as low as readily achievable’인데 과거의 ‘practicable’을 지나치게 확대해석하여 방법이 있다면 무조건 선량을 낮춰야하는 것으로 이해하는 폐단을 완화하기 위해 수정한 표현이다.

13) <역주> 원문 표현은 ‘economic and social considerations taken into account’이다.

14) <역주> 즉, 이때부터 ALARA(as low as reasonably achievable)이라는 개념이 정착되었다.

표2.1. 최적화 원칙의 진화

-	가능한 한	최소 수준으로	피폭을 감축	(ICRP, 1955)
-	실행 가능한 한	낮게	피폭을 유지	(ICRP 1, 1959)
경제, 사회적 사정을 고려하여	용이하게 달성 가능한 한	낮게	피폭을 유지	(ICRP 9, 1966b)
경제, 사회적 사정을 고려하여	합리적으로 달성 가능한 한	낮게	피폭을 유지	(ICRP 22, 1973)
경제, 사회적 인자를 고려하여	합리적으로 달성 가능한 한	낮게	피폭을 유지	(ICRP 26, 1977)

(14) 그러나 머지않아 엄격한 비용-편익 접근에서 구체화되는 것보다 많은 변수에 의해 의사결정이 도출됨을 최적화의 실제 이행에 참여한 사람들이 알게 되었다. 추가적 인자를 포함하기 위한 첫 시도는 보다 덜 경직된 의사결정 보조 기법, 특히 다수 인자의 점수와 순위에 기초하는 기법의 탐색이었다. 두 번째 접근은 ALARA 책무를 지는 운영자를 돕기 위한 절차의 개발이었다.

(15) 이러한 노력들은 ICRP가 1988년에 채택한 ICRP 55에 반영되었다. 비록 이 간행물이 이론적 발전과 수식화에는 계속 적용되지만, 방사선방호와 연관된 의사결정 과정에서 보다 넓은 시각으로 더 실제적 접근을 추구하는 진화가 시작되었다. 예를 들어, ICRP 55는 “방호최적화 개념은 본질적으로 현실적이다. 최적화는 여건에서 달성할 수 있는 최선을 얻기 위해 여타 인자와 제약의 배경 위에서 방호에 투입되는 자원과 얻는 방호 수준에 일종의 균형을 맞춤에 적합한 기본적 사고의 틀을 제공한다.”라고 설명한다(ICRP, 1988, 제8항).

(16) 최적화 개념의 추가적 진화는 불과 2년 후에 채택된 1990년 권고에 제시된다. ICRP 60에서 ICRP는 최적화 과정을 이행할 때 “개인 선량의 크기, 피폭자 수, 피폭이 불확실할 때는 그 발생 가능성”을 고려할 필요성을 내세웠다. 나아가 사회에서 편익과 위해의 불평등한 분포로 제기되는 평등성 이슈도 강조했다. 이로써 “방호최적화는 한 사람과 다른 사람 사이에 상당한 불평등을 가져올 수도 있다(ICRP, 1991, 제121항)”는 점이 인식되었다. ICRP는 “최적화절차에서 고려되는 방안의 범위를 제한하기 위해 사용되는 선원중심의 개인선량 값”으로

서 ‘선량제약치’ dose constraint 개념을 도입함으로써 이를 고려하려 했지만, 선량제약치는 오직 행위<sup>15)</sup>에만 사용하고 개입<sup>16)</sup>에는 사용하지 말기를 권고하였다(ICRP, 1991, 제144항). 또한 엄격한 비용-편익 모델을 넘어서, 피폭을 합리적인 달성 가능한 한 낮게 유지하기 위해서 비공식 과정과 실질적 절차의 중요성을 ICRP가 역설한 것도 ICRP 60에서 유의할 점이다.

## 2.3. 최근의 발전

(17) ICRP 60 이래 여러 간행물이 다양한 상황에 최적화 적용과 관련하여 최적화에 관한 새로운 요소들을 소개해왔다. 예를 들어, 방사선 비상사태에서 일반인 방호를 위한 개입의 원리를 다루는 ICRP 63(1993)에서는 사고 영향을 완화하기 위한 방호조치 설계에서 최적화의 핵심적 역할을 강조했다. 최적화 원칙은 종사자 방호에 주목한 ICRP 75(1998)의 주안점이기도 하다. ICRP 75에서 진전은 직장에서 방호 최적화의 실제 이행에서 행정적 대책의 중요성, 특히 안전기반 성향에 대한 명시적 약속의 중요성을 강조한다. 방사성폐기물 처분에 관한 방사선 방호 정책을 겨누는 ICRP 77(1997)에서 ICRP는 최적화 원칙의 판단적 본질을 다시 언급하고, 매우 장기간에 걸쳐 분산되는 작은 개인 선량을 다루는 방호 방안을 비교할 목적으로 집단선량 개념을 오용할 가능성에 대해 강조했다. 장수명 방사성폐기물 처분을 다룬 ICRP 81(1998)에서, ICRP는 1970년대와 1980년대에 개발된 정량적 접근을 넘어 더 넓은 시각을 수용할 것을 주장하고 권고했다.

(18) ICRP는 장기간 방사선 피폭에서 일반인 방호를 다룬 ICRP 82(1999)에서 이러한 방향으로 또 다른 중요한 이동을 했다. ICRP 82에서 ICRP는 피폭준위와 연관된 보건위험의 객관적 평가와 다양한 피폭상황의 해당 속성에 근거하여 방사선방호 권고를 제공하고 있음을 상기시킨다. 그러나 방호수준의 최종결정에 통상 영향을 미치는 정치사회적, 문화적 실정도 ICRP는 인정했다. 결과적으로 의사결정 과정은 “방사선방호와 직접 연관되지 않은 속성도 고려해야 할 것”이며 “방사선방호 전문가가 아닌 해당 이해당사자의 참여도 포함할 것”을 기대했다(ICRP, 1999, 제4항).

(19) 이들 권고에 따라 국가 또는 국제 차원의 실제 경험을 분석하면 방사선방호 의사결정 과정에서 더 넓은 이해당사자 참여와 연관된 도전, 의의 및 이득을

15) <역주> 방사선피폭을 증가시키는 인간 활동을 ‘행위(practice)’로 표현했다.

16) <역주> 행위와 반대로 발생하고 있는 방사선피폭을 경감하는 활동을 ‘개입(intervention)’으로 불렀다.

더 잘 이해할 수 있게 된다(NEA, 1998, 2001, 2004). 결과적으로, 이제 ICRP는 이해당사자 참여를 최적화 과정에 하나의 중요한 입력으로 간주한다. 이해당사자 참여가 보다 효율적이고 지속가능한 결정을 달성하는 데 필요한 방사선 위험 관리의 융통성을 주기 때문이다.



### 3. 최적화 과정

(20) ICRP는 방사선방호 최적화 원칙을 개인 선량의 크기, 피폭자 수, 그리고 잠재피폭 가능성을 경제, 사회적 인자를 고려하여 적절한 선량제약치 아래에서 합리적으로 달성 가능한 한 낮게 유지하기 위한 선원중심 과정으로 정의한다.

(21) 단일선원이나 관련되는 선원 전체 그룹을 간단하게 공식적으로 정의하는 것은 불가능하다. 제약치 아래 최적화의 적용에서 용어 ‘단일선원’은 병원의 X선 장치나 한 시설로부터 배출되는 방사성물질과 같이 넓은 의미로 사용되어야 한다. 대부분 상황은 어떤 개인 또는 대표인에 대해 현저한 피폭원을 제시할 것이며, 이로써 조치를 고려할 때 선원을 분리해서 취급할 수 있도록 한다. 운영관리자와 규제자 모두가 ICRP의 폭넓은 정책을 적용한다면, 단일선원의 정의는 쉬워진다. 예를 들어, 방호조치 요구를 피하기 위해 고의로 선원을 분할하거나, 조치 요구를 확대하기 위해 과도하게 선원을 묶음으로써 정책을 왜곡한다면 어려움이 발생할 것이다.

(22) 여건(계획상황, 관리 가능한 비상 또는 기존 상황)에서 최선의 방호를 제공하기 위해서는 제약치 아래의 최적화 과정이 지속적, 순환적 과정(최적화 과정으로 부름)으로 이행되어야 하는데, 이 과정은 조치 요구를 인식하기 위한 피폭상황의 평가(과정의 윤곽잡기), 피폭을 합리적으로 달성 가능한 한 낮게 유지하기 위해 가용한 방호방안의 확인, 여건에서 최선의 방안 선정, 효과적 최적화 프로그램을 통해 선택된 방안의 이행, 그리고 여건이 방호조치의 시정을 필요로 하는지 피폭상황을 정기적으로 평가하는 것을 포함한다.

(23) 방호최적화 원칙의 이행은 성공적 방사선방호 프로그램의 중심에 있는 과정이다. 최적화 과정은 피폭상황의 해당 특성을 고려할 수 있도록 신중하게 윤곽잡기를 해야 한다. 나아가 피폭상황에 적합하다면 해당 이해당사자 참여를 포함한다. ICRP 82(1999)에서 도입된 이 두 특성이 최적화 과정의 중요한 요소라고 ICRP는 간주한다.

#### 3.1. 과정의 윤곽잡기

(24) 이 목적은 여건에서 최선의 방호방안을 선정하기 위해 필요로 하는 해당 속성을 명확하고 체계적으로 확인하는 것이다. 이러한 관점에서, 피폭 분포(예,

개인 선량, 평균 선량, 피폭자 수)의 특징은 고려할 속성의 한 부분일 뿐이다.

(25) 관련된 속성을 확인하는 데 가장 쉬운 접근은 ‘언제, 어디서, 어떻게 그리고 누가 피폭을 받는지’ 묻는 것이다. 이러한 질문에 대한 대답은 상황에 적합한 기술, 경제, 사회, 환경 및 도덕적 고려사항뿐만 아니라 피폭 집단과 그 피폭의 특성을 표현하는 한 세트의 속성을 제공할 것이다. 사고나 잠재피폭의 회피, 그룹 사이 피폭의 이전, 그리고 먼 후일 또는 원거리 집단에서 피폭의 분포에 주의를 기울이기를 ICRP는 권고한다. 많은 상황에서 윤곽잡기 과정에 이해당사자의 참여는 해당 속성을 인식하는 데 도움을 준다.

(26) 최선의 방호방안 선택에서 고려할 유용한 속성의 대표적 목록이 표3.1에 제시되어있다. 이 목록이 전부는 아니며 피폭상황의 구체적 내용에 따라 다른 특성들도 포함될 수 있다. 반면에, 목록이 전부는 아니지만 어떤 주어진 상황에 대해서는 너무 많은 속성들이 포함된 것일 수도 있다. 많은 상황에서 한정된 수의 속성으로 충분할 것이다. 그러므로 각개 상황에 대해 핵심 방안을 적합하게 다루기 위해서는 경우별로 해당 속성을 선정하는 것이 필요하다. 피폭상황과 관련된 속성의 폭넓은 스펙트럼을 고려하는 것은 그 상황의 포괄적 평가에 중요하다.

## 3.2. 과정의 특성

(27) 방호최적화는 피폭의 사전 예방을 목표로 하는 전망적인 반복 과정이다. 최적화는 기술적, 경제사회적 발전 모두를 고려하는 연속적 과정이며 정성적, 정량적 판단 모두를 필요로 한다. 최적화 과정은 모든 해당 측면을 고려할 수 있도록 체계적이고 신중하게 조직되어야 한다. 최적화는 여건에서 최선을 다하고 있는지를 항상 묻는 마음의 틀이며, 적합한 절차와 자원뿐만 아니라 모든 관련된 기관의 모든 직급에서 헌신을 요구한다.

(28) 방호방안을 평가하는 과정과 추가적 선량감축이 합리적이지 않다고 판단하는 과정은 개인이나 집단의 계획 또는 잠재 선량을 줄이기 위한 실행 가능한 여러 방호방안을 비교하는 것을 포함하게 된다. 선원으로부터 개인과 집단을 방호하기 위한 수단은 선원 자체에, 선원과 사람 사이의 환경에, 또는 사람에게도 적용될 수 있다. 가능하다면 선원에 적용되는 관리가 바람직한데, 이 방법은 덜 교란적이며 모든 피폭자에 대해 모든 경로에 적용된다.<sup>17)</sup> 대조적으로, 환경 또는

17) <역주> 모든 선원에 적용될 수 있다는 원문 표현에 약간 의문이 있다. 선원을 직접 관리하는 것은 항상 가능하지 않을 수 있다. 만약 선원에 작용이 가능하다면 그것은 모든 경로와 모든 피

사람에 적용하는 관리는 포괄적이지 않을 것이다. 나아가 적어도 일반인피폭에서는 선원과 관련된 수단은 예상치 못한 사회-경제적 함의를 가질 가능성이 낮다.

(29) 방호최적화는 ‘요람에서 무덤까지 고려’에 관련한 장기적 관점을 필요로 하는 체계적 과정이다. 예를 들면 시설 설계단계에서 최적화는 퇴역을 포함한 이후의 모든 운영단계까지도 고려해야 한다. 모든 계획 및 기존 상황에서, 관리 가능한 선원에 대해 종종 공학적 관리의 선택을 위해 방안을 평가할 때 대부분 방호는 사업의 설계단계에서 도입된다. 방호최적화 과정은 운영 및 종료 단계까지 걸쳐 계속되어야 한다. 비상상황을 대비해서<sup>18)</sup> 방호방안을 찾고 적절한 수준의 제약치를 선정하기 위한 최적화가 계획단계에서 적용되어야 한다. 비상상황 동안에는 실제 여건을 수용하도록 융통성 있는 방법으로 최적화 과정이 적용되어야 한다. 관리 가능한 기존상황에서는 최적화가 단계적으로 이행되는 것이 보통인데 이러한 접근이라야 장기간 지속될 수 있다(예: 사고후 상황, 라돈 감축 프로그램). 최적화 과정은 광범한 정성적, 정량적인 방법과 도구들을 포괄한다. 이러한 방법이나 도구로서 측정, 모델, 점검표, 실시간 소프트웨어, 업무중 분석, 운용선량계측체계, 방사선학적 성능 목표, 문서화, 데이터베이스, 의사결정 보조 수단 및 man-Sv의 참조 금전가치 등이 흔히 사용되고 있고, ICRP 37과 ICRP 55에 제시된 바 있다(ICRP, 1983, 1988). 정량적 방법은 의사결정 과정에 가치 있는 정보를 제공할 수 있다. 그러나 정성적 인자가 많다면 정량적 결과가 유일한 정보가 되어서는 결코 안 된다(부록A 참조). 불확실성, 어림, 실용적 고려, 기술이나 경제적 제한, 또는 사회적 가치 상충 때문에 정성적 판단 접근도 필요하다. 많은 상황에서, 이러한 접근은 정량적 자료에 의존하는 의사결정 보조 기법에 근거하는 접근을 유용하게 보완할 것이다. 특히, 의사결정 보조 과정에서 관련된 이해당사자 참여는 유효한 입력으로 점차 인식되고 있다(소절 3.3 참조).

(30) 최적화 과정은 주어진 상황을 다루기에 필요한 만큼 노력을 기울여야 한다. 피폭 수준 및 관련된 복잡성을 고려하는 차등 접근이 필요하다. 대다수 피폭상황에서, 건전한 방법, 도구 및 전문 기술을 사용하면 쉽게 의사를 결정할 수 있다. 그러나 과거 경험을 통해 보면 상대적으로 낮은 피폭 수준에서 경제 사회적, 정치적 고려가 지배적일 때 방호 결정에 이르는 데 복잡하고 오랜 과정들이 때때로 필요했다.<sup>19)</sup>

---

독자에게 효력을 미친다.

18) <역주> 원문은 ‘비상상황에서’로 표현하고 있으나 이는 설명에서 계획단계에서 적용한다는 내용과 상충된다.

19) <역주> 선량이 높을 때는 이에 근거한 판단이 용이하나 낮은 준위에서는 선량보다도 다른 조

표3.1. 최선의 방호방안을 선정하기 위한 대표적 속성(전부는 아님)

---

- **피폭 집단의 특징**
    - 성별
    - 나이
    - 건강 상태
    - 민감 집단(예: 임신 여성)
    - 습관
  - **피폭의 특징**
    - 피폭의 시간 및 공간 분포
    - 피폭자 수
    - 개인선량 최소값
    - 개인선량 최대값
    - 개인선량 평균
    - 통계적 이산
    - 개인선량 범위별 집단선량
    - 잠재피폭 가능성
    - 기존 방사선 상태(예: 높은 준위 자연방사선, 과거의 활동 또는 사고로 인해 증가된 피폭 수준)
  - **사회적 사정과 가치**
    - 평등성
    - 관리 능력(측정, 보건 감시 등)
    - 지속성
    - 세대간 배려
    - 개인 편익
    - 사회 편익
    - 피폭자가 가진 정보/지식 수준
    - 사회적 신뢰
  - **환경적 고려**
    - 동식물에 주는 영향
    - 기후에 주는 영향
  - **방사선 외적 위험**
  - **방호 방안의 기술적, 경제적 사정**
    - 실행가능성
    - 비용
    - 불확실성
  - **정치적 측면**
  - **규제 제약**
-

(31) 운영 중에도 방호최적화 과정은 지속되며, 피폭 전, 중, 후에 할 일을 충분히 다했는지를 질문하게 된다. 그림3.1에 보인 것처럼 최적화 과정은 순환적이다. 정기적 정규 검토를 계획하고 이행하는 것이 필수적이다. 과거 성과, 선량(또는 기타 자료)의 경향분석, 자체감사 결과, 동료 검토, 사건 보고 및 교훈 모두가 이 과정에 반영된다. 선택된 방안이 이행된 결과를 검토하면 예상과 다를 수도 있다. 이 경우에는 새로운 평가 순환이 필요할 것이다. 방호방안이 합리적인가를 판단하는 방법 또한 시간에 따라 변할 수 있다.

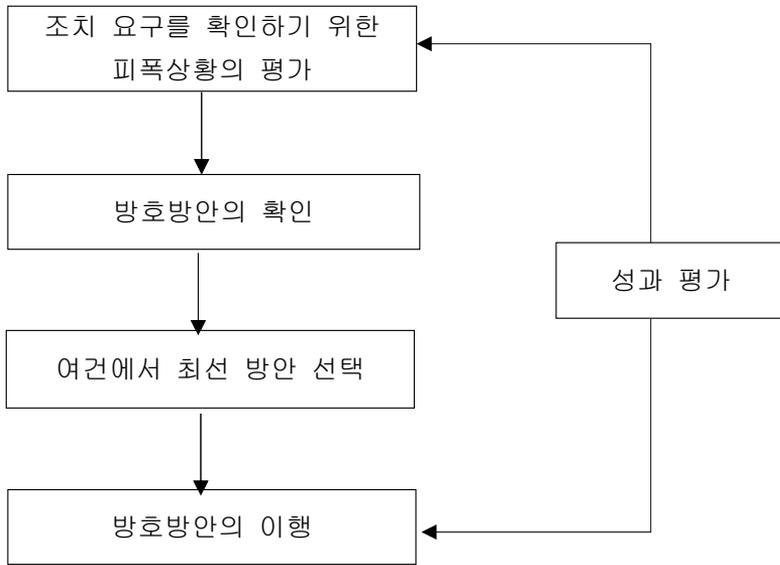


그림 3.1. 최적화 과정의 개요도.

(32) 어떠한 최적화 과정에서도 기술적 실행성, 비용, 사회적 인자, 부정적 영향 잠재성, 장기적 효과, 일반인 또는 종사자의 우려 등 다양한 속성과 그 상대적 중요도를 고려하여 방사선방호와 관련한 많은 결정을 내릴 필요가 있다. 이러한 결정들은 조치가 정말 필요한지, 어떤 방안이 가장 효과적이고 효율적인지, 그리고 그 사업을 완수하는 데 얼마나 많은 자원이 합리적인지 하는 판단을 포함한다.

---

건들의 영향이 상대적으로 증가한다. 특히 낮은 선량을 더욱 줄이려 할 때는 요구되는 비용이 팽창하는 측면도 있다. 이때는 선량 측면만 보면 그 감축이 투자를 합리화하지 못할 경우가 많으나 주민, 대중매체, 정치가, 환경단체 등 외부 압력이 있다면 판단에 작용하므로 쉽게 결론을 내리기 어려워진다.

(33) 최적화는 마음의 틀이다. 최적화과정의 효율적 이행은 관련된 모든 이해당사자들이 방사선방호의 기본 가정을 알고 동의함을 필요로 한다. 어떠한 피폭 수준도 위험을 초래할 수 있다는 인식은 최적화 과정에 관계하는 모든 사람들이 효율적 최적화 이행에 책임을 확인하는 데 도움이 될 것이다.<sup>20)</sup> 나아가 이들은 능동적 안전문화를 고수해야 하는데 안전문화의 핵심 속성은 ‘개인의 헌신, 안전을 생각하고 본능적으로 질문하는 자세(...)’ 등이다. 모범관행 자체는 안전문화의 필수 성분이지만 기계적으로 적용된다면 충분하지 않다. 모범관행의 엄격한 이행을 넘어서 안전에 중요한 모든 책무가 경각심, 숙고, 깊은 지식, 건전한 판단 및 책임의 합당한 의미와 함께 올바르게 실행되어야 한다.’는 요건이 있다(IAEA, 1991).

(34) 이러한 판단 속성 때문에, 최적화 과정에는 그 투명성이 강력하게 요구된다. 최적화 과정에 들어가는 모든 자료, 변수, 가정 및 값은 명확하게 설명되고 정의되어야 한다. 투명성은 모든 관련 정보가 관계 당사자에게 제공되고 이해한 결정을 목표로 의사결정 과정의 추적성이 적절히 문서화됨을 가정하고 있다.

(35) 환경으로 방사능 방출 관리에는 BATNEEC(Best Available Technology, Not Entailing Excessive Costs) 원리가 사용될 수 있다. 최적화 원칙과 BATNEEC 원칙은 서로 보완적이다. 사람 보건에 대한 영향의 관점에서 잔여피폭은 평가된 방사선량의 최적화에 의해 관리될 것이다. 배출물 관리에서, 또는 사람이 직접 영향을 받지 않거나 주된 방호대상이 아닌 상황에서는 최적화가 일반적으로 배출물 관리를 위해 BATNEEC을 적용하도록 할 것이다. 리우 회의(UN, 1992) 이후부터, 국제 환경정책의 중추원칙인 지속가능한 발전이 방사선 외부 분야에서 보건 기반 배출표준을 넘어 BATNEEC 기법으로 이동하고 있는데, BATNEEC은 배출원에서 배출을 감축하거나 가능하면 배출을 없애는 데 초점을 맞춘다. 보건영향 또는 영향확률 감축보다 배출 감소에 방호 목적을 초점을 두는 이러한 접근은 시설이나 운영에서 그 적용 범위를 넓혀나가고 있다. 사회경제적 인자까지 충분히 고려하는 BATNEEC 개념은 합리적으로 달성 가능한 낮게 선량을 유지하는 ICRP 권고(ICRP, 1997, 1998)와 비슷하다.<sup>21)</sup>

---

20) <역주> 그렇다고 지나치게 사소한 선량 준위까지도 최적화에 고민해야 한다고 볼 수는 없다. 선량이 매우 사소하다면 최적화를 고려하는 비용 자체도 합리적이지 않을 수 있다. 따라서 일반적인 최적화 개념에 따라 어떤 수준 이하의 선량 범위는 그 구체적 상황에 대해 별도의 최적화를 고려하지 않아도 무방한 선을 설정할 수 있다. 이러한 기준선에 대한 지침은 규제기관이 제공하는 것이 바람직하다.

21) <역주> 일반적 최적화 개념을 따른다면 환경으로 배출하는 방사능으로 인한 피폭을 줄이기 위한 방안의 비용과 그 방안으로 실현되는 이득(선량 감축뿐만 아니라 회사 이미지 개선 등 사

(36) 최적화 과정 이행에 책임을 명확히 하는 절차가 필요하다. 운영 수준에서, 조정자, 작업반 또는 위원회를 포함하여 운영에 관여하는 전문 분야 사이에 의견 교환을 조성하기 위한 조직구조가 수립되어야 하는데, 결과적 조직은 최적화에만 전념하든 아니든 관계없다.

(37) 끝으로 최적화의 효율적 이행은 당국에서부터 피폭자까지 모든 당사자의 헌신을 필요로 한다. 이러한 헌신을 확보하는 데는 다음의 요소들이 필요하다.

- 최적화를 규정에 담고, 그 집행의지와 함께 대화와 규제 사이에 균형 잡힌 지침을 제공(당국)
- 방사선 정책 설정, 일반목표 수립, 절차의 개발과 준수, 책임 분담, 자원과 재원 할당, 그리고 운영(운영관리)과 방사선방호 전문가의 독립성 유지
- 정보공유, 방심하지 않는 자세 유지, 훈련 및 재훈련, 그리고 방사선방호 인식 고취(개인).

이러한 대책을 이행하는 각각의 책임에 대해 참고문헌(IAEA, 2002) 제6장에 자세히 설명되어 있다.

### 3.3. 이해당사자 참여

(38) ICRP 82에서 어떤 상황에 이해관계가 있거나 관심을 가지는 당사자라는 의미로 도입한 용어인 이해당사자의 참여는 최적화 과정에 중요한 입력이 된다. 의사 결정자(일반적으로 운영경영자나 당국)에 대해서는 이러한 과정에서 역할과 책임이 명확히 정의되어 있다. 다른 개인 그룹 또한 이해당사자로 고려될 수 있다. 예를 들면 피폭자(작업자 또는 일반인)나 그 대리인(노동조합, 지방 연합), 의사결정 과정에 기술을 지원하는 기관이나 개인(인증된 방사선량 측정 서비스, 유자격 전문가, 공식 기술서비스, 공공 전문기관, 사설 연구소), 그리고 선출(선출직 대표)이든 자원(환경연합)이든 사회 대표자 등이 포함된다.

(39) 이해당사자 참여는 의사결정 과정에 가치 내포, 결정 품질의 상당한 향상, 경쟁 이익 사이 충돌 조정, 작업자와 일반인 사이의 공통 이해 구축, 그리고 기관의 신뢰구축을 달성하는 검증된 방법이다. 나아가 모든 관심 당사자 참여는 안

---

회적 이득까지)을 견주어 ‘합리적’이지 않다고 판단하면 그 방안을 채택하지 않을 것이다. BATNEEC 접근은 결과적 이득을 굳이 평가하지 않더라도 그 방안이 여건에서 무리 없이 이행될 수 있다면 이행하는 방향으로 가닥을 잡게 된다. 이렇게 보면 BATNEEC이 최적화보다 더 보수적일 것 같지만 달리 보면 ‘무리 없이’ 이행할 수 있는가라는 판단은 여전히 최적화 정신과 일치한다.

전문화를 보강하고, 보다 효율적이고 지속적인 결정을 위해 필요한 방사선 위험의 관리에 필요한 융통성을 가져온다. 이해당사자는 의사결정 과정의 틀 안에서 방호방안의 식별뿐만 아니라 피폭상황의 속성들과 그 상대적 중요도를 확인하는데도 특히 도움이 될 수 있다.

(40) 이해당사자 참여의 정도는 상황마다 다를 것이다. 여건에 따라 최적화 과정의 모든 측면이나 단계에서 모든 이해당사자나 이해당사자 유형을 참여시키는 것은 필요하지 않을 것이다. 대다수 방사선방호 의사는 복잡하지도 사회적 논쟁 여지도 없어 폭넓은 이해당사자 참여가 필요하지 않을 것이다. 이해당사자 참여를 발전시키는 구체적 접근은 없지만 경험은 증가하고 있다. 의사결정 과정에 이해당사자들을 연결하는 과정을 구축하기 위해 다양한 방법들이 여러 분야에서 발전되어왔다. 그 스펙트럼은 이 끝에 저 끝까지 고전적 자문과정에서부터 제3자 도움 또는 도움 없는 구조적 합의구축 기법<sup>22)</sup>까지 포괄한다(Beierle, 2002; NEA, 2004).

(41) 이해당사자 참여가 경영관리자 또는 당국이 최종 결정을 지을 책무나 결정에 대한 책임을 포기하는 것을 의미하지 않는다. 결정 틀의 공유된 단계나 최적화 과정의 이행에서 결정의 최종책임 문제가 모호해져서는 안 된다. 방호 해법의 적합성과 관련한 ‘최종결정’의 책임은 궁극적으로 운영관리자 또는 당국에게 있다.

### 3.4. 최선방안 선택

(42) 최선방안은 언제나 피폭상황에 고유하며 주어진 환경에서 달성할 수 있는 최선의 방호수준을 나타낸다. 그러므로 그 아래에서는 최적화 과정을 멈출 선량 수준을 사전에 결정하는 것은 적절하지 않다.<sup>23)</sup> 피폭상황에 따르겠지만, 최선방안은 해당 제약치에 근접하거나 훨씬 아래일 수도 있다. 이는 최적화 과정이 방사선방호체계 ‘진입 준위’로 제안될 수 있는 어떤 준위보다도 낮은 선량으로 귀결될 수도 있음을 의미한다.

---

22) <역주> 이러한 기법들은 직선적인 투표에서부터 공청회나 청문회, 여론조사, 규제협상, 합의회의, 시민패널, 자문위원회, 포커스그룹, 시나리오 워크샵 등 다양한 절차와 방법을 포함한다. 이들 기법들을 설명하는 자료로 .참여연대 시민과학센터가 엮은 “과학기술, 환경, 시민참여(한울아카데미, 2002)”가 있다.

23) <역주> 이 우려를 매우 사소한 피폭까지도 무조건 최적화 절차를 적용해야 한다고 해석하는 것은 지나치게 경직된 것이다. 최적방호가 상황에 의존하기 때문에 어떤 일반기준을 정해 두고 거기까지만 최적화를 도모하는 것은 적절하지 않을 수 있다는 주의로 보면 된다.

(43) 어떤 경우에는 기술적, 경제적, 법적 또는 사회적 정황이 이미 합의된 최적화 결과를 바꿀 수도 있다. 예를 들어, 새 기술 도입, 대중의 관심 증가, 또는 방호를 위한 새 자원의 가용성은 상황의 재고, 새 방호안의 이행, 또는 아마도 새로운 귀결점 설정으로 유인할 수 있다. 이러한 변화는 건축 규정이나 건물 화재 방호 규정 분야에서 해왔던 것처럼 사안별로 다뤄야 한다.

(44) 마지막으로 최적화는 최소화가 아님을 강조한다. 최적화는 피폭의 위해(경제적 인간, 사회적, 정치적 등)와 개인의 방호를 위해 가용한 자원 사이에 신중한 균형을 맞춘 평가의 결과이다. 그래서 최선방안은 선량이 가장 낮은 방안이 아닐 수도 있다.



## 4. 피폭 분포

(45) 방호방안 비교는 어떤 피폭집단 그룹에서 개인피폭 분포의 특징을 신중히 고려해야 하는 최적화 과정의 중요한 특징이다. 선원에 의해 영향을 받는 각 인구 그룹은 평균, 최소 및 최대 개인선량, 피폭자 수, 집단선량, 그리고 잠재피폭 가능성과 같은 다양한 피폭 변수뿐만 아니라 나이, 성별, 습관과 같은 다양한 특성으로 묘사될 수 있다. 그러나 단일 피폭 변수로는 다양한 방호방안을 완전히 비교하는 것이 일반적으로 불충분하다.

(46) 방호방안 비교에서 고려되는 추가적 관점은 사회적 가치, 특히 관련된 개인 집단의 피폭분포에서 평등성이다. 예를 들어 개인선량이나 집단선량은 유사하지만 선량 분포가 상이한 단면에 의해 작업자 집단을 위한 여러 방호방안이 특징 지워질 수 있다. 이러한 대부분 비교에서, 평등성 고려는 개인 피폭이 가장 높은 방호방안을 버리도록 만들 것이다.

(47) 직무피폭 상황에서는 대부분 경우 종사자 개인선량에 대한 정보에 접근 가능하며 개인선량 분포를 평가하는 것이 상대적으로 쉽다. 일반인 피폭상황에서는 개인 선량에 대한 정보가 일반적으로 직접 접근 가능하지 않고 선원을 사용하여 평가하는 것만 가능하다. 이러한 접근을 위해, 거주 장소(선원으로부터 거리), 나이와 성별 분포 그리고 각 피폭자 그룹의 생활습관(식이, 여가활동 유형)을 정할 필요가 있다.<sup>24)</sup> 필요하다면 현재와 미래 세대 각각의 그룹에 대해 시간에 따른 피폭의 변화를 평가하는 것도 가능하다.

### 4.1. 집단선량의 사용

(48) 최적화 과정에서 방호방안의 비교 목적으로 집단 내 개인피폭의 분포를 특성화하는 한 방법은 이 분포와 연관된 집단선량을 사용하는 것이다. 집단선량 개념은 주어진 선원이 집단에 미치는 영향을 고려할 필요에 따라 개발되었다. 역사적으로, 집단선량은 원자력산업 개발과 관련하여 환경으로 방사능 배출이나 핵무기 실험으로부터 낙진에 대한 우려로부터 출발하였다. 집단선량은 장수명 방사성 핵종에 의한 관리되지 않는 피폭의 누적을 제한하는 근거가 되고, 최적화 원칙의 이행을 위해 당시 제안된 비용편익분석 수행을 돕도록 1970년대에 도입되었다

24) <역주> 이러한 변수들을 정한다는 것은 평가 대상 그룹을 설정한다는 의미이며, 이는 곧 ICRP 101 제1부에서 제시한 '대표인' 설정이다.

(IPSN 2002).

(49) 집단선량은 하나의 선원으로부터 주어진 인구 그룹의 방사선 피폭에 대한 척도로서 그룹 내 개인선량 분포의 적분이다. ICRP 60에서 ICRP는 피폭그룹의 평균 선량과 그룹 내 개인의 수를 곱함으로써 피폭한 사람 수를 고려해야 한다고 권고했다(ICRP, 1991, 제34항).<sup>25)</sup> 만약 여러 인구 그룹이 연관된다면, 선원이나 피폭상황과 연관된 총 집단유효선량은 그 선원이나 상황에 의해 피폭한 모든 집단의 집단유효선량의 합으로 정의된다.

(50) 직무피폭의 경우, 집단선량은 주어진 기간 시설의 운영이나 특정 유형 작업과 관련된 총 피폭을 특성화하는 ‘성능지표’로 종종 이용된다. 최적화 과정에서 방호방안의 비교를 위해서는 집단선량이 개인선량 분포를 특성화하는 데 충분하지 않을 수도 있는데 특히 피폭 그룹 내 개인피폭 크기가 상당히 차이가 날 때 그러하다. 이러한 여건에서는 평등성 고려는 피폭 분포와 관련된 개인선량과 집단선량 모두를 고려할 필요가 있다(부록A 참조).

(51) 일반인피폭의 경우, 개인선량 분포가 대체로 균질하고 잘 정의된다면 집단선량이 최적화 과정에 유용한 입력이 될 것이다. 그러나 선원에 따라 다르지만 방사선 영향은 지리적(국지 영향부터 지역까지, 때로는 광역까지), 시간적(단기부터 중기, 때로는 장기까지)으로 그리고 개인선량의 넓은 범위에 걸쳐 다소간 펼쳐질 수 있다. 그러한 상황에서 집단선량은 피폭경로 가정에 근거하여 평가될 수 있지만, 방호 결정을 위한 집단선량 평가의 가치는 다소 제한적이다(ICRP, 1997, 1998).

## 4.2. 피폭의 시공간 분포

(52) 피폭이 많은 인구, 넓은 지역, 긴 시간대에 걸쳐 일어났을 때, 총 집단유효선량(즉, 모든 시간과 공간에 대해 합한 개인피폭)은 정보를 과도하게 합치고 방호조치 선택을 오도할 수 있으므로 유용한 의사보조 도구가 아니다. 집단선량 개념의 직설적 적용은 선량분포의 피폭특성은 물론 선량 평가에 내재하는 본질적

---

25) <역주> 집단선량이 같다고 영향이 같다고 볼 수는 없다. 가령 100명 집단의 집단선량 1 man-Sv와 1000명 집단의 집단선량 1 msn-Sv는 의미가 다르다. 그래서 피폭자 수를 집단선량과 함께 고려하기 위해 집단선량의 정의를 집단의 평균선량에 피폭자 수를 곱하는 형식으로 정의하고 있다. 그러나 어떻게 산출하든 집단선량이란 고려하는 집단에 속하는 개인들이 받는 개인선량의 총합이다.

불확실성을 가릴 수 있다. 나아가 그러한 직설적 적용은 방안의 비교와 평가에 특별히 중요한 평등성과 같은 주요 사회정치적 고려를 적절히 배려하는 데 방해가 된다.

(53) 집단선량에 내재한 제한을 극복하기 위해서는, 해당 피폭상황을 신중히 분석하여 특정 상황에서 관심 있는 인구 사이의 피폭분포를 가장 잘 설명하는 피폭 변수와 개인 특성을 식별해야 한다. 이러한 분석은 최적화 과정에서 고려해야 할 동질적 특성을 갖는 다양한 인구그룹을 구별해 낸다. 특히, 매우 광범한 개인 선량에서 얻은 집단선량은 선량분포가 동질적인 부분에 상응하도록 일련의 집단 선량들로 분해되어야 한다(ICRP, 1997, 1998). 이들 집단선량과 상응하는 인구 그룹을 정의하는 적절한 특성은 피폭상황에 따라 경우별로 구성되어야 한다.

(54) 최적화 과정(제3.1절 참조)의 틀을 구성하는 데 사용하는 것과 동일한 접근이 해당 인구그룹을 식별하는 데 사용될 수 있다. 이 접근은 언제, 어디서, 그리고 누가 피폭을 받는가에 대한 질문을 포함한다. 예시로서 그림4.1은 선량분포가 시간, 공간, 그리고 다양한 범위의 개인선량에 걸쳐 펼쳐진 경우 그러한 질문의 결과를 보인다. 결과는 다음의 삼차원 집단선량 매트릭스로 주어진다.

- 피폭집단의 공간분포는 선원으로부터 다양한 거리에서 표현된다: 국지, 지역, 세계
- 피폭집단의 시간분포도 몇 향으로 표현된다: 초기, 중기 장기. 매우 오랜 기간 지속이 예상되는 피폭에 대해서는, 시간 틀을 여러 세대에 걸쳐 표현될 수 있다.
- 피폭집단의 개인선량 분포는 밀리시버 단위로 몇 자릿수로 표현된다: 높은 선량(10 이상), 중간 선량(10과 1사이), 그리고 낮은 선량(1 이하).

매트릭스의 각 요소는 주어진 그룹과 연관된 집단선량에 해당한다. 나이, 성별, 사회직업 범주, 또는 특이 습관과 같은 다른 특징들도 방호방안의 비교에 적절하다고 판단되면 이러한 유형의 매트릭스에 사용될 수 있다.

### 4.3 집단선량 매트릭스와 의사결정 과정

(55) 집단선량 매트릭스가 구성되면, 매트릭스 각 요소의 상대적 중요성을 가중하여 최적화 과정에 관련되는 요소들의 선호도나 경제사회적 고려와 가치를 반영할 수 있다. 고려와 가치의 본질이 경우마다 상당히 다르듯 이해당사자들이 각 요소에 부여하는 중요성도 다를 것이다. 피폭 수준이나 기타 관련된 인자의 불확실성 정도도 고려될 수 있다. 예를 들어, 평등성을 고려하기 위해서는 주어진 인

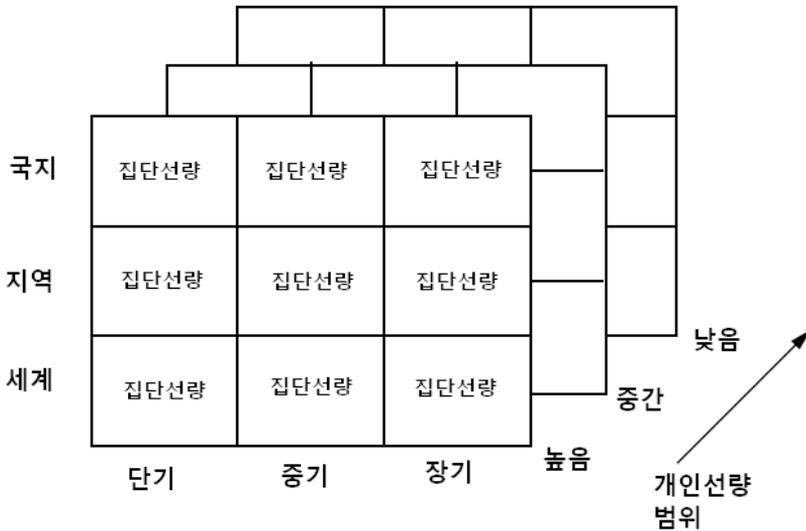


그림4.1. 집단선량 매트릭스의 예시.

구 그룹을 특성화하는 평균 개인선량의 크기를 바탕으로 각 집단에 대해 상대적 가중치를 부여할 수 있다. 이것이 낮은 선량을 받는 개인 그룹보다 높은 선량을 받는 개인 그룹에 더 비중을 주는 방법일 것이다(부록 A참조).

(56) 가중치는 피폭이 일어 날 것으로 예상하는 시점에 따라서 부여할 수도 있다. 먼 미래에 받을 피폭에서는 선량 평가치와 수반되는 위해 증가에 불확실성이 있으므로 예측된 피폭을 의사결정 목적에 사용하는 것은 점점 문제가 된다(ICRP, 1997). 따라서 선량평가 및 수반 위해의 불확실성 증가 때문에 먼 미래에 받게 될 개인의 피폭에는 점차 낮은 중요도를 부여할 수 있다. 선량과 위해 사이의 현재 관계는 미래 인구에게 더 이상 유효하지 않을 수도 있다. 반대로, 특정 피폭상황에서는 세대간 평등성 고려나 아직 예상하지 못한 과학적 증거에 근거하여 미래에 일어날 피폭에 더 중요도를 줄 수도 있다. 피폭은 시간에 대해 평등하게 가중되어야 한다는 다른 판단도 있을 수 있다. 지식의 현수준 및 인구나 피폭경로를 예상하는 우리 능력은 수 세대에 걸치는 시간 동안 일어날 피폭에 대해 결정하는 데는 적절히 기여할 수 있다고 ICRP는 본다. 그 시간대를 넘으면 예측 선량이 의사결정에 주요 부분이 되어서는 안 된다고 ICRP는 권고한다.

## 5. 운영과 규제에 최적화 적용

(57) 운영자와 적절한 국가당국은 방사선방호체계 내에서 최적화 원칙을 적용할 책임을 진다. 방호최적화 이행은 당국의 요건을 적용받는 운영 경영진의 책임이다.

(58) 이는 관리 가능한 모든 선원과 계획, 비상, 기존 피폭상황 모두에 해당된다. 그러나 세 피폭상황에서 ‘운영 경영진’과 ‘국가당국’이라는 개념은 보다 폭넓게 ‘이행 기관’이나 ‘의사결정자’와 비슷하게 해석되어야 함에 유의해야 한다.

(59) 능동적 안전문화는 최적화의 성공적 적용을 뒷받침하며, 운영 경영진과 당국 모두는 효율적 안전문화가 형성되고 유지됨을 보장하는 데 필수 역할을 한다. 특히, 당국은 운영 경영진이 그들 기관에 ‘안전문화’를 발전시키도록 장려해야 한다. 그러한 안전문화는 당국 내에도 존재해야 한다.

(60) 운영 경영진은 최적화 과정의 계획, 조직 그리고 진행되는 이행에 관하여 의사를 결정한다. 당국은 해당되면 운영허가를 받을 수 있는 수준에 도달하는 방법으로서 최적화를 장려하고 요구할 수도 있다. 경영진과 당국은 또한 운영 중 방사선방호 최적화가 효율적으로 이행됨을 확인할 수도 있다. 이러한 이행의 증명 부담은 운영 경영진에게 있다. 피폭을 야기하는 활동을 인가하거나 피폭을 줄이는 수단을 이행한 때 예정되는 잔여선량을 인가하는 결정은 당국에게 있다. 어떤 경우에는 운영 경영진의 직접통제 아래 있지 않은 다른 사람들에 의해 작업이 계획되고, 부여되고, 수행되고 또는 감독된다. 이러한 여건에서는 최적화를 위한 책임의 어떠한 분담은 모두 명확하게 문서화되고 모든 당사자가 이를 충분히 이해해야 한다(NEA, 1997).

(61) 운영 경영진은 모든 수준 관리진과 직원에서 견고한 안전문화의 존재를 확신하기 위해 내부 정책, 우선순위, 규칙, 절차 및 품질보증 프로그램을 수립하고 제공해야 한다. 이러한 맥락에서 경영의 목적은 사고를 예방하고, 잠재피폭 확률을 관리하고, 종사자와 일반인 피폭을 사회적 경제적 인자를 고려하여 합리적으로 달성 가능한 낮게 유지하는 것이다.

(62) 최적화 양상의 모두를 글로 표현할 수는 없다. 최적화는 결과 보다는 방법적 책무이다. 규정 위반 경우를 제외하고는, 특정상황에 대한 구체적 결과에 초

점을 맞추는 것은 당국의 역할이 아니며 과정, 절차 그리고 판단에 초점을 맞춘다. 당국과 운영 경영진 사이에 긴밀한 대화가 반드시 있어야 한다. 규제는 그러한 대화를 조장하기 위한 지침들을 제공해야 한다. 최적화 과정의 성공은 이러한 대화의 품질에 크게 의존한다.

# 부록A

## 최적화와 의사결정 보조기법

### A.1. 서론

(A1) 최적화 과정의 이행에서 방호방안을 정량화하고 비교하는 의사결정 보조기법 사용은 잘 수립된 접근법이다. 이것은 방호수준을 결정해야 하는 사람들이 본질적 불확실성과 가치판단을 고려하여 과정에 관련된 여러 속성 사이에 최선의 거래를 선택할 수 있게 한다. 방안을 적용할 수 있는 상황의 복잡성 정도에 따라 다양한 기법들이 적용될 수 있다.

(A2) 역사적으로, 1970년대 초 방사선 위해와 방호수단 비용의 균형을 맞추기 위해 ICRP가 권장한 첫 번째 기술은 비용편익분석이었다(ICRP,1973). 이것은 계획, 비상, 기존 상황에서 종사자와 일반인 방호의 여러 분야에 적용할 수 있는 간단한 방법이다. 이후 최적화 원칙이 지지를 얻고 실제 이행이 증가하자, 비용효능분석 또는 다속성분석과 같은 다른 의사결정 보조기술도 제안되었다(ICRP, 1989).

(A3) 그림A1에 최적화과정(제3.2절 참조)의 연계적 단계의 개요와 의사결정 보조기법이 들어갈 구체적 위치를 보였다. 의사결정 보조기법 사용은 의사결정 과정에 단 하나의 입력임을 인지하는 것이 중요하다. 단계의 중요한 부분은 해당되는 모든 속성을 확인하고 평가할 가능한 모든 방호조치를 확인할 수 있게 하는 초기 틀 구성이다. 여건에서 최선의 방안을 선택하기 위한 의사결정 보조기법 사용과 관련된 중요한 특징은 다양한 속성을 정량적 항목으로 표현할 필요성이다. 많은 경우에 이 정량화 과정이 가장 어렵고 시간 소모적 단계인데, 여기서 필요한 모든 자료는 수집되거나 막연한 속성에 관한 모델링과 가치판단을 통해 생산되어야 한다.

(A4) 의사결정 보조기법(DAT)의 이행이 고려되는 한, 특정 기법의 선택은 피폭 상황의 범위 즉, 포함될 여러 속성의 다양성과 판단뿐만 아니라 정량화의 정도, 그리고 각 방호방안을 특성화하는 자료에 부수된 불확실성의 중요성에 주로 달려있다.

(A5) 나아가 최종적으로 선택된 기법이 무엇이든 간에 방안의 선택과 비교를 위한 기준을 도입할 필요가 있다. 단위 집단선량(man-Sv)의 금전가<sup>26)</sup>는 가장 잘 알려진 기준인데 이를 통해 방호 증진의 경제적 비용과 선량감축에 의한 편익의 직접 균형을 맞출 수 있다(ICRP, 1973). 다음 문항들에서 최적화 과정의 실제 이행에서 널리 사용되는 세 가지 기본적 의사결정 보조기법과 man-Sv의 금전가 개념에 대해 간략하게 설명한다.

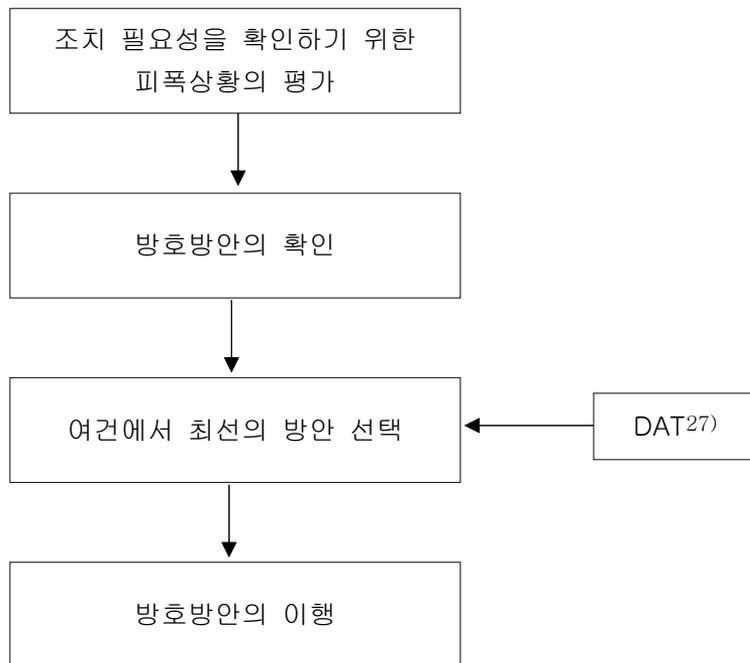


그림 A1. 최적화 절차와 의사결정 보조기법(DAT).

## A.2. 비용편익 분석

(A6) 비용편익 분석을 수행하는 여러 방법들이 있다(ICRP, 1983). 가장 간단한 기법은 한편의 비용, 다른 편익의 편익 사이 균형에 영향을 미치는 다양한 인자들을 금액으로 표현하고 묶어서 그 합계가 최소 금액이 되는 방안을 선택하는 것

26) <역주> 이 번역본에서는 단위 집단선량의 금전가를 다른 표현으로 ‘선량의 금전계수’로도 표현한다.

27) <역주> Decision Aiding Techniques: 의사결정 보조기법.

이다. 방사선 방호방안의 선택에 적용될 때, 이 절차의 핵심 요소는 man-Sv의 금전계수를 사용하는 것인데 이로써 방호의 이득(즉, 어떤 방호방안을 이행함에 따르는 선량의 감축)을 방호비용과 동일한 단위로 표현할 수 있게 한다(A.3절 참조)

(A7) 비용편익분석의 간단한 공식은 집단선량의 경제비용(Y)을 다음과 같이 표현한다.

$$Y = \sum \alpha_j S_j$$

여기서  $\alpha_j$ 는 인구 또는 작업자 그룹 j에 적용되는 man-Sv의 금전계수,  $S_j$ 는 해당 그룹 j의 집단선량이다. j는 피폭집단의 범주, 피폭의 시간 분산, 그리고 개인 선량 수준에 따른다(제4절 참조).

(A8) 각 방안의 총 비용은 관련된 방호비용(X)과 상응하는 집단피폭의 비용(Y)의 합으로서 계산된다. 최적 방호방안은 그림A2에 보인 것처럼 총 비용(X+Y)이 최소값일 때로 주어진다. 최적 방호수준에서는 방호의 한계비용이 회피된 단위 집단선량의 한계비용과 같아짐에 유의하는 것이 중요하다.<sup>28)</sup>

### A.3. 단위 집단선량의 금전가

(A9) 단위 집단선량의 금전가 정의와 사용은 ICRP가 그 개념을 ICRP 22(ICRP, 1973)에서 공식적으로 소개한 이래로 논쟁의 대상이 되어 왔다. 첫째로, 이 개념의 사용은 '생명의 경제가치'와 연관되기 때문에 윤리적 관점으로부터 약간의 유보가 항상 있어왔다. 둘째로, 금전가 정량화를 위해 의존하는 방법론적 교의가 결코 광범한 합의에 이르지 못했다.

(A10) 이러한 제약에도 불구하고 최적화 원칙의 실제 이행과 함께 이 개념은 더욱 발전했으며, 세계의 많은 기관들(운영자와 당국)이 의사결정 보조기법과 관련된 최적화 과정에서 어느 정도 공식적으로 사용할 값을 채택해 왔다.<sup>29)</sup>

(A11) 개념 발전에서 주된 한 단계는 ICRP 37(ICRP, 1983)에서 위험기피 개념을 도입한 것이다. 위험기피 개념을 적용함으로써 피폭집단에서 개인위험 즉,

28) <역주> 그림A2에서 최적해 지점은 총비용(X+Y)의 집단선량 S에 대한 미분이 0인 점이다. 즉,

$$\frac{d(X+Y)}{dS} = 0 \text{ 이므로 곧 } \frac{dX}{dS} = - \frac{dY}{dS} \text{ 가 된다는 의미이다.}$$

29) <역주> 역자가 추가한 부록B를 참조.

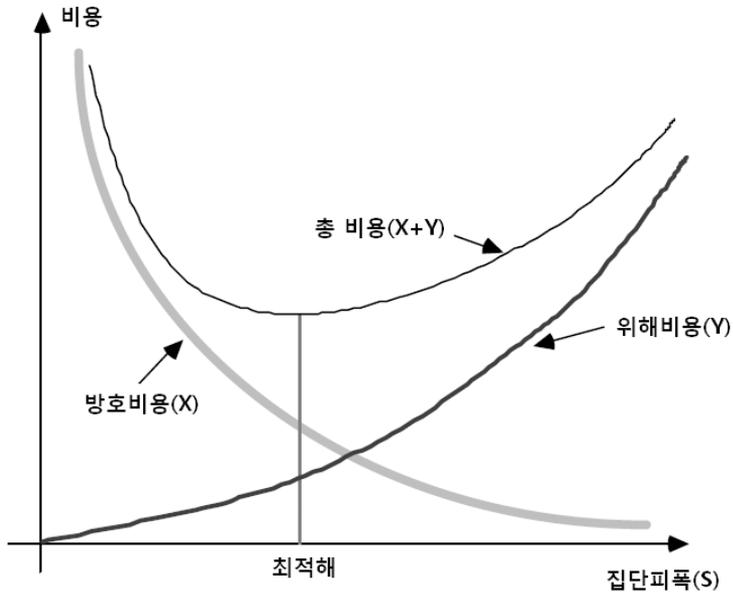


그림 A2. 비용편익분석.

개인선량에 관한 고려가 가능해졌다. 그래서 10명 개인선량 100 mSv로 된 집단선량과 1000명 1 mSv로 된 동일한 집단선량은, 비록 문턱 없는 선형비례관계 가정이 채택된 조건에서 잠재적 보건위험이 집합적 관점에서 대등하더라도 금전 가치와 관련하여 같게 평가되지는 않을 것이다. 개인 위험이 증가하면, 더욱 방어적이 되고 결과적으로 더 많은 자원을 할애하여 위험을 줄이려는 일반적 경향이 있다.

(A12) ICRP 60(1991) 이후, ICRP는 해당 선량제약치 아래에서 경제사회적 인자를 고려하여 개인선량 크기와 피폭자 수 모두를 합리적으로 달성 가능한 한 낮게 유지되어야 함을 주장하면서 선량분포에 대해 평등 고려를 점차 강조해 왔다.

(A13) 단위 집단선량의 금전가에 개인선량 준위의 분포에서 평등과 위험기피를 고려하기 위해 한 모델이 1990년대에 개발되었다(Lochard et al., 1996). 제안된 모델은 주어진 일반인 또는 종사자 그룹의 선량분포에 수반된 집단피폭을 줄이고, 동시에 그 선량분포의 분산과 최고 개인선량을 줄이는 방식으로 설계되었다.

(A14) 해석적 관점에서 이 모델은 다음과 같이 수식화된다.

$$\alpha_{ref}(d) = \alpha_o \left(\frac{d}{d_0}\right)^a$$

여기서  $\alpha_{ref}(d)$ 는 개인피폭 수준  $d$ 에서 man-Sv의 금전계수,  $\alpha_{base}$ 는 man-Sv의 기저 금전계수,  $d_0$ 는 기피현상이 적용될 수 있는 개인선량 범위의 최저치,  $d$ 는 개인피폭 수준, 그리고  $a$ 는 기피도를 나타내는 계수이다( $d < d_0$  일 때  $a = 0$ ,  $d \geq d_0$ 일 때  $a \geq 0$ ).

(A15) 그러므로 이 모델은 개인피폭 수준이 높아지면 man-Sv의 금전가도 증가하는 시스템이다. 기저 man-Sv 금전계수( $\alpha_{base}$ )는 예상 보건영향의 가치를 반영하는데 개인피폭의 수준과 관계없이 1 man-Sv에 수반된 보건영향의 금전계수는 상수로 고려된다. 계수  $a$ 는 위험기피도를 나타내며 개인피폭 수준의 함수로서 증가하는 man-Sv의 금전계수를 도입할 수 있게 한다. 하한  $d_0$ 는 위험기피가 어떤 최소 피폭 수준 이상에서만 고려될 수 있음을 의미하며, 낮은 선량 범위의 경우 개인피폭 약화에 대해 배려할 필요가 없다고 보게 된다.

(A16) 그림A3은 이 모델을 도시한다. y축은 금전 단위로서, 1 man-Sv를 예방하기 위해 소비하는 합리적인 금액을 보여주고, x축은 밀리시버트 단위의 개인선량 수준을 보여준다.

(A17) 실제로 이 모델을 적용하기 위해서는, 세 개의 변수  $\alpha_{base}$ ,  $d_0$  및  $a$ 의 값을 규정해야 한다.

- $\alpha_{base}$  값은 단위 집단선량에 수반되는 보건영향(즉, 1 man-Sv에 따른 기대수명의 손실)의 금전가를 나타낸다. 인간자본 접근(국민 총생산을 근거로 한)을 포함하여 다양한 경제적 방법이 이 평가에 사용될 수 있다(Stokell 등, 1991).
- $d_0$  값은 그 아래에서는 피폭 분산에 대한 기피가 고려되지 않은 개인선량 상한 수준에 해당한다. 이 값은 피폭 인구의 위험 수용도에 달려있다. 예를 들어, 직무피폭의 경우에는 정상 상황에서 일반인피폭에 대한 기본한도<sup>30)</sup>(1 mSv/년)에 상응하는 값을 채택하는 것이 합리적으로 보인다.
- 계수  $a$ 는 개인피폭 분산에 대한 기피정도를 반영한다. 언급한 세 가지 목적을 만족하기 위해  $a$ 는 1보다 커야 함을 증명할 수 있다. 직무피폭경우에 1.2-1.8

30) <역주> 원문은 모호하게 ‘relevant primary constraint’라는 표현을 사용하면서 그 값으로 연간 1 mSv를 제시하고 있다. 그러나 ICRP 103에서 기본 제약치라는 표현을 공식적으로 사용되지 않으며 연간 1 mSv라는 선량은 일반인의 선량한도에 해당한다. 따라서 혼란을 피하기 위해 분명한 표현을 채택했다.

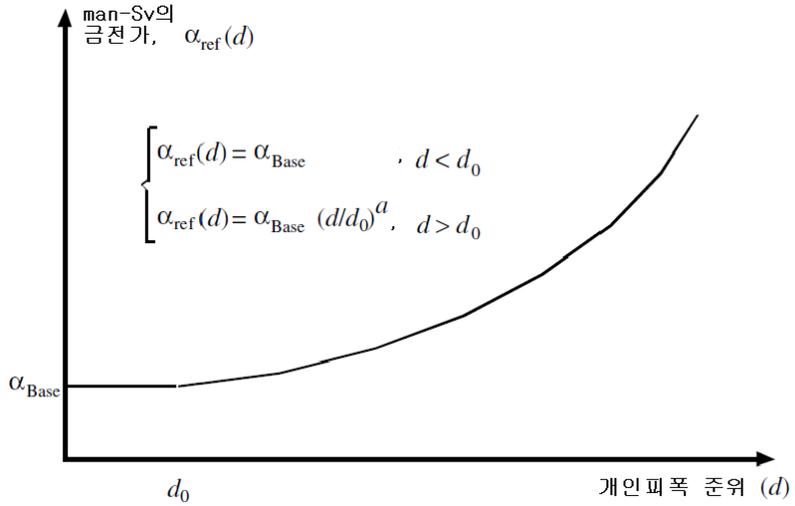


그림 A3. 위험기피와 평등성 고려를 반영한 man-Sv의 금전가 모델.

범위의 값이 합리적으로 보인다(Schneider 등, 1997).

#### A.4. 비용효능분석

(A18) 엄격하게 말해서 비용효능분석은 최적화 기법이 아니라 방안의 집합에서 비효율적 방안을 제거하고 남은 비용효능적 방안을 비교하고 우위를 부여하는 방법이다. 이 방법의 기본원리는 먼저 각개 방호방안을 그 방호비용과 상응하는 잔여 집단선량으로 특성화하는 것이다. 다음 단계는 비용효능적 방안의 선택이다. 즉, 더 낮은 방호비용에서 동일 잔여 집단선량을 주거나, 동일 방호비용 수준에서 더 낮은 잔여 집단선량을 주는 대안이 없는 방안을 선정하는 것이다.

(A19) 이러한 과정은 간단한 방법으로 묘사된다(그림A4.). 각각의 방안은 점으로 나타나고 비용효능적 방안은 모두 비용효능 곡선 상에 있게 된다. 예를 들어, 방안 A는 방안 E보다 낮은 비용에서 어떤 잔여피폭 준위에 도달할 수 있게 하며, 방안 C는 방안 F와 같은 비용에서 더 낮은 잔여 집단선량을 낸다. 곡선위에 있지 않은 모든 방안들은 비용효능적이 아니므로 후속 고려에서 배제되어야 한다.

(A20) 공식적으로 비용효능분석은 각 방안의 ‘한계비용’ 분석에 의존하는데 각 방안보다 바로 덜 혹은 더 비싼 방안과 비교해야 한다. 만약 적은 추가 비용으로

위험 감축에 훨씬 더 높은 효과를 낼 수 있다면 이 방안은 더 비용효능적이 된다. 결국, 각 비용효능적 방안은 하나의 방안에서 다음 방안으로 비용증가[ $\Delta X$ ]와 이에 상응하는 집단선량 감소[ $\Delta S$ ]으로 특성화 될 수 있다. [ $\Delta X/\Delta S$ ] 몫은 비용효능 비율이라 불리는데 이것이 다양한 방안간의 등급 근거를 제공한다. 최선의 방안은 비용효능 비율이 해당 피폭상황에 대해 참조기준으로 설정된 man-Sv의 금전가와 같거나 바로 아래인 방안이 된다.

(A21) 그림에도 불구하고, 비용효능 곡선뿐만 아니라 비용효능 비율을 구하더라도 최적 방안의 선택을 위한 근거를 제공하지는 않는다. 최적 선택은 비용효능 비율을 위한 참조값 즉, 위에서 비용편익분석과 연계하여 정의한 바와 같은 man-Sv의 금전가 도입으로 이루어진다.

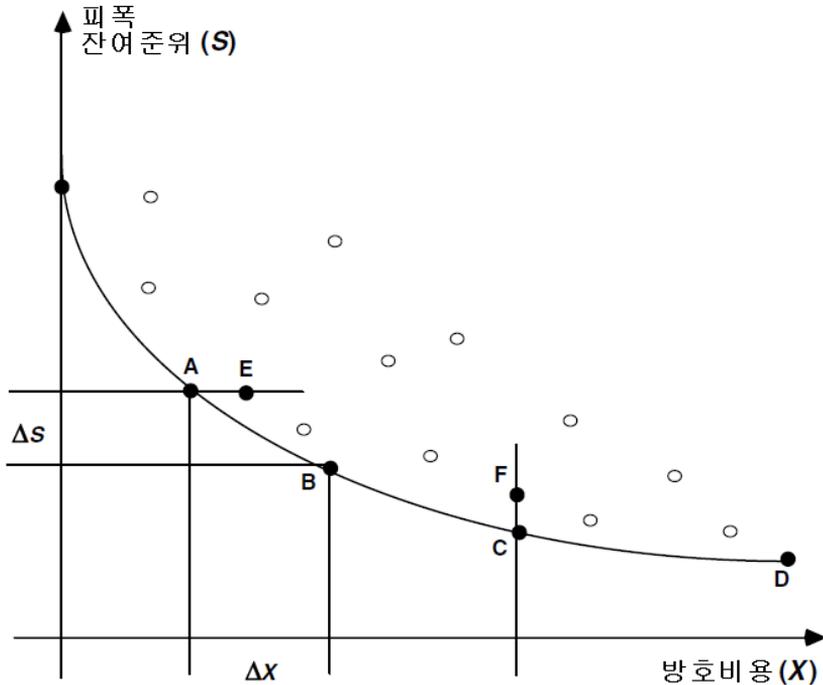


그림 A4. 비용효능분석.

## A.5. 다속성효용분석

(A22) 방사선 위해와 방호비용 외에 피폭상황을 특성화하는 관련 속성이 많거나 금전으로 정량화하기 어렵지만, 다른 기준으로 정량화 가능하거나 정성적 방법으

로 등급을 매길 수 있다면 다속성효용분석multi-attribute utility analysis(MAUA)을 사용하는 것이 더 적합할 것이다(ICRP, 1989).

(A23) 이 기법의 기본원리는 상황을 특성화하는 모든 관련 기준(즉, 방호방안의 비용, 집단선량, 개인선량, 시공간적 피폭의 분산, 위험 수준의 이해 등)의 근거에서 각 방안에 대해 점수를 매기는 방법(또는 다속성효용함수)을 세우는 것이다. MAUA의 첫 단계인 다양한 방호안의 확인은 구체적 의사결정 과정을 위한 관련 기준을 정하는 것으로 구성된다. 그 다음에, 각 방호방안은 다양한 기준에 따라 (정량적 또는 정성적으로) 평가되어야 한다. 기준의 다양성 때문에 방안은 각 기준에 대해서 다르게 등급지어진다. 다음 단계에서는 각 기준에 대해 가중치를 할당하는데, 가중치는 이들 기준과 연관된 상대적 중요성을 표현하는 것이다. 이 단계가 MAUA에서 가장 중요하며 종종 어렵기도 한 단계임에 유의해야 한다. 이러한 값의 세트를 도출하는 몇몇 기법이 있지만, 어떤 방법이 사용되든 가중치 선택은 정당화 되어야 한다.

(A24) 공식적으로 마지막 단계는 각 방안을 그 총 효용( $U_i$ )으로 정량화하는 것인데 총 효용은 다음과 같이 계산된다.

$$U_i = \sum_j k_j u_{j,i}$$

여기서  $i$ 는 방안의 지수,  $j$ 는 기준의 지수,  $k_j$ 는 기준  $j$ 의 상대적 중요도를 표현하는 가중치(정규화 됨:  $\sum k_j = 1$ )이며  $u_{j,i}$ 는 기준  $j$ 의 단일효용<sup>31)</sup>이다.

(A25) 각 기준과 연관된 단일효용은 기준을 표현하는 값의 선형함수로 정의하거나, 분석에 의사결정자의 선호를 주입하기 위해 비선형으로 정의할 수 있음을 아는 것이 중요하다. 예를 들어, 개인피폭의 수준에 따른 위험기피를 포함하는 효용함수를 정의하는 것이 가능하다.

(A26) 끝으로 가장 큰 총 효용을 내는 방호방안이 선택될 것이다.<sup>32)</sup> 대부분 가중치는 일반적으로 의사결정자의 가치판단에 의존하므로, 결과의 '견고도'를 검사하기 위해 다양한 가중치에 세트에 대해 민감도 분석을 수행할 것을 강력히 권고하고 있다.

31) <역주> 저자에 따라서는 '부분효용(partial utility)'이라 부르기도 한다.

32) <역주> 이해를 돕기 위해 추가한 부록B를 참조.

## A.6. 결론

(A27) 많은 피폭상황에서, 의사결정 보조기법의 사용은 최적화 과정에서 최선 방안의 선택을 정형화하고 정량화하는 유효한 수단이다. 주로 가용한 입력자료의 형식과 상황을 특성화하는 다양한 속성을 최종결과에 반영하려는 의지에 의해 특정 기법이 선택된다. 이러한 관점에서, 다속성 접근이 대립 속성이 있는 상황과 의사결정자의 관점이 있는 상황에 더 많이 채택될 것이 당연하다. 그러나 내포된 속성과 연관된 가중 과정이 명백하게 유도되고 결과를 확신하기 위해 폭넓은 민감도 분석이 수행된다면 비용편익의 틀에서 많은 속성을 극복하는 것 또한 가능함에 유념함이 중요하다.

(A28) 마지막으로 의사결정 보조기법의 이행의 어려움은 그 고유의 복잡성 때문이 아니라 다양한 속성, 방호방안 그리고 가치판단으로 의사를 결정해야 하는 상황의 복잡성 때문임이 강조되어야 한다. 사실 비용효능, 비용편익, 또는 다속성 분석의 어떤 의사결정 보조기법이 사용되든 주요 장애물은 해당 속성의 묘사, 적절한 자료의 수집 그리고 정량적 방법으로 불확실성과 가치 판단을 통합하는 데 있다.



## 정량적 의사결정 보조기법 예시

이 부록은 ICRP 55 등에서 설명한 바 있는 정량적 최적화 기법을 참고로 하여 예시적 설명을 통해 의사결정 보조기법에 대한 이해를 도모하고자 역자가 추가했다. 최적화 대상으로서 ICRP 55에 예시된 우라늄광의 방호방안을 실례로 들어 살펴본다. 표 B1은 우라늄광에서 광부들의 방사능 흡입을 줄이기 위하여 갱내 환기설비를 몇 등급으로 구분하여 각각에 대한 인자로서 방호비용, 집단선량 및 개인선량 분포, 작업환경조건을 설정하고 그 정량화된 값을 요약한 것이다. 즉, 방안 1은 비교적 낮은 환기율의 시스템으로서 방호비용이 연간 \$10400 요 구되며 이때 예상 집단선량은 0.56 man-Sv/y이다. 피폭자 개인선량 수준에 따라 세 그룹(그룹 I, II, III)으로 나눈 작업자 소집단별로 그룹 개인평균선량(mSv/y)과 그룹집단선량(man-Sv)이 주어져 있다. 한편 환기 시스템의 정도에 따라 작업자들의 작업환경 상태를 ‘문제없음’, ‘약간’처럼 정성적으로 표현하고 있다.

### B.1. 비용효능분석

이 방법은 그림 B1에 보인 바와 같이 핵심 인자인 비용과 선량을 각각 x, y 축으로 하여 X-Y평면에 각 방안의 해당위치를 잡도록 하고 가장 안쪽에 위치하

표 B1. ICRP 55의 우라늄광산 예제 데이터

방호방안		1	2	3	4	5
총 비용 \$/y		10400	17200	18500	32200	35500
집단선량 man-Sv/y		0.561	0.357	0.355	0.196	0.178
개인선량 분포						
그룹 I (최고 피폭자)	평균선량(mSv/y)	40.8	28.4	26.0	17.5	15.8
	집단선량(man-Sv)	0.163	0.114	0.104	0.070	0.063
그룹 II (다음 피폭자)	평균선량(mSv/y)	34.5	22.3	21.0	12.6	11.3
	집단선량(man-Sv)	0.138	0.089	0.084	0.050	0.045
그룹 III (나머지 종사자)	평균선량(mSv/y)	28.9	17.1	16.3	8.4	7.8
	집단선량(man-Sv)	0.260	0.154	0.147	0.076	0.070
환기로 인한 불편		문제없음	약간	약간	심각	작업곤란

는 점들을 연결하는 비용효능곡선을 그린다. 그러면 비용효능 측면에서는 이 곡선 위에 있는 방안이 선정대상이 된다는 의미이다. 그림 B1은 본질적으로 그림 A4와 동일한 것이며, 예시한 방안들은 표 B1의 방안을 나타내는 것은 아니며 보다 일반적인 상황에서 더 많은 방안들이 고려될 때를 나타내는 것으로 이해하면 된다. 이때 비용이나 선량에 대해 제약이 주어질 수 있는데 그림 B1에서 보인 경우 방안 1은 비용제약을 벗어나고 있으며, 반면 방안 8은 선량제약을 벗어나 있으므로 선택에서 배제된다. 그러면 비용효능 곡선 위에 있으면서 이런 제약 조건을 만족하는 것은 방안 2, 5, 7이 되는데 이중에서의 선택은 무엇을 최소화 하느냐에 달려있다. 즉, 비용을 최소화한다면 방침이라면 방안 7이 선정될 것이며 선량을 최소화한다면 방안 2가 선정될 것이다.

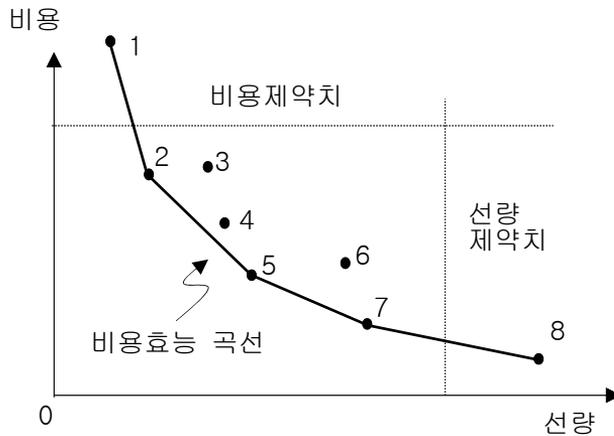


그림 B1. 전형적 비용효능 곡선. 방안 1, 2, 5, 7 및 8은 비용효능 곡선 위에 있다. 방안 1은 비용 제약치를 넘어 배제되고 방안 8은 선량제약치를 넘어 배제된다.

## B.2. 비용편익분석

이 방법은 방호비용과 주어진 방호수준에서 예상되는 잔여피폭의 부담을 정량화한 비용의 합이 최소가 되는 수준의 방호를 선택한다는 개념이다. 즉, 방호 비용을  $X$ , 피폭의 부담을  $Y$ 로 할 때 총비용  $X+Y$ 를 최소화하는 것이 목표이다. 부록A의 그림 A2에서 개념을 도시한 바 있다.

비용편익분석은 피폭부담  $Y$ 를 집단선량  $S$ 에 단순 비례하는 것으로 보느냐 아

니면 선량준위에 따라 위험의 차이, 심리적인 거부감 등까지 고려하여 보다 복잡한 관계를 설정하느냐에 따라 단순비용편익분석과 확장비용편익분석(extended cost-benefit analysis)으로 나눈다.

단순비용편익에서는 Y를 S에 정비례하는 것으로 본다면

$$Y = aS \quad (B.1)$$

로 쓸 수 있다.  $a$ 값 즉, 선량의 금전가 크기는 피폭이 곧 리스크에 연계된다고 볼 때 사람의 생명이나 건강을 금액으로 환산한다는 의미가 있어 이 개념이 거부되기도 하지만 정량적 최적화를 위해서는 긴요한 인자이고 다른 분야에서도 인명을 금전과 연계하는 사례가 없지 않으므로 꼭 부정할 수만은 없다. 이러한 측면 때문에 한편에서는  $a$ 값을 생명의 가치를 부여한다는 관점에서가 아니라 "우리 사회가 보건을 위해 투자할 의지를 나타내는 양"으로 완곡한 표현을 쓰기도 한다. 어쨌든  $a$ 값의 크기는 인명이나 건강에 대해 사회가 얼마나 중시하느냐에 따라 그 수치값이 차이가 날 것은 분명하며 따라서 이는 국제적 공통분모가 있는 것이 아니라 그 사회의 배경에 따라 적정 값이 달리 부여되는 것이다.

그러면 우리나라의 방사선 방호를 위해서는  $a$ 값으로 얼마가 적당한가라는 의문이 있지만 이 문제는 별도의 주제로 다룰 사안이며 이 부록의 후반에서 보완 설명한다. 여기서는 수치적 예시를 위해서는 ICRP 55에 주어진 명목치 \$20000 man-Sv<sup>-1</sup>를 사용한다.

확장비용편익분석에서는 Y를  $aS$ 항 외에 선량준위 또는 선량분포에 따라 제2, 제3의 요소를 추가하게 되는데

$$Y = aS + \sum_j \beta_j S_j \quad (B.2)$$

와 같이 쓴다. 여기서 집단선량 등급을 구분하는 방법은 일률적이지는 않으나 예를 들면 개인선량이 선량한도보다 월등히 낮아 자연방사선 피폭선량에 가까운 경우와 선량한도에 가까운 경우, 그리고 그 중간 경우로 구분할 수도 있다. 이러한 구분의 개념은 같은 1 man-Sv의 집단선량이라도 개인선량이 연간 수 mSv 범위에 있을 경우와 연간 수십 mSv의 범위에 있을 경우 이를 수용하는 사회의 비중부여는 다를 것임을 고려한 것이다. 또 집단선량 성분 중 직무피폭 성분과 일반인의 피폭성분은 같은 비중을 두기가 어려울 것이다. 예시에서는 선량 추정치로 연간개인선량 5 mSv 이하, 5-15 mSv, 15-50 mSv의 세 등급에 대해  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$ 를 각각 0, \$40000/man-Sv, \$80000/man-Sv를 부여했다. 달리 말하면  $\beta$ 항은 부록A에서 논의한 바 있는 높은 선량 기피현상을 어느 정도 반영한 것으로 이해할 수 있다.

표 B2에 비용편익분석의 결과를 보였다. 여기서 보듯이 단순비용편익의 경우에는 방안1이 \$22000/y로 최소 비용인 것으로 나타나며, 확장비용편익의 경우에

는 방안4가 \$47000/y로 최소이다. 특기할 것은 방안1의 경우 단순분석에서는 최소비용이었던 것이 확장분석에서는 방안 중 최대가 되고 있다는 점이다. 이러한 현상은 방안들 사이에 기본적인 격차가 크지 않음으로써 소수의 인자 변화에 따라 서로 다른 결론이 도출되고 있는 것인데, 이럴 경우 민감도 분석이 의미 있는 자료를 제공할 수 있을 것으로 보인다.

표 B2. 비용편익분석 결과

방호 방안	방호비용 (\$/y)	집단선량 (man-mSv)			위해비용 (\$/y)		총 비용 (\$/y)	
		<5 mSv	5-15 mSv	15-50 mSv	α	β	단순	확장
1	10400	0.	0.	0.561	11200	44900	22000	66000
2	17200	0.	0.	0.357	7100	28600	24000	53000
3	18500	0.	0.	0.335	6700	26800	25000	52000
4	32200	0.	0.126	0.070	3900	10700	36000	47000
5	35500	0.	0.115	0.063	3600	9600	39000	49000

### B.3. 다속성효용분석

이 방법은 각 방안의 동일 인자들에 대해 서열에 해당하는 부분효용partial utility 또는 단일효용single utility을 설정하고 각 인자에 대해 가중치를 부여하여 가중된 부분효용의 총합으로 나타나는 총 효용이 최대인 것을 선정하는 방법이다. 즉, 인자 j의 부분효용을  $u_j$ , 그 가중치를  $w_j$ 라 하면 방안 i의 총 효용  $U_i$ 는

$$U_i = \sum_j w_j u_j \quad (B.3)$$

으로 표현된다.  $u_j$ 는 항상 0(불리)과 1(유리) 사이의 값을 갖도록 정규화하는데 인자 j의 변역range에 따라  $u_j$ 가 어떤 형태를 취하느냐는 인자의 특성에 달려있다. 그림 B2는 일반적인  $u_j$ 의 변화 양상을 도시한 것으로서 선형 또는 비선형 형식을 취할 수가 있지만 단조증가 또는 단조 감소하는 형태가 된다. 표 B3의 예시는 선형 증감 방식에 의한 것으로서 예를 들면

$$u(X)_k = \frac{X_u - X_k}{R(X)} \quad (B.4)$$

로 산출된 것이다. 여기서 X는 방호비용,  $X_u$ 는 그 최고치(표 B1의 방안5의 값으

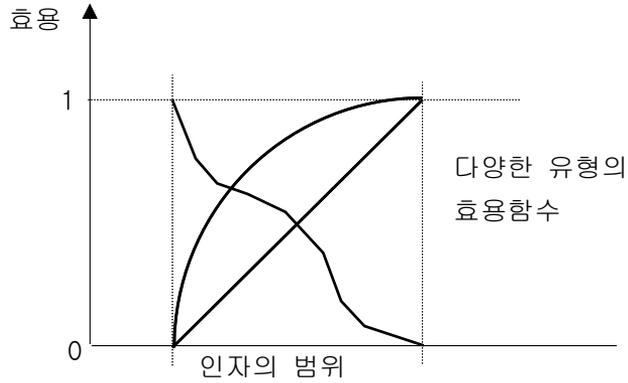


그림 B2. 부분효용(단일효용) 함수의 예시.

로 \$35500),  $R(x)$ 는  $X$ 의 변역으로 최고치 \$35500와 최저치 \$10400의 차이 \$25100,  $X_k$ 는 방안  $i$ 의 방호비용이다. 따라서  $k=1$  일 때는 식(B.4)의 우변 분자가  $X_u - X_k = R(X)$ 가 되어  $u(X)_1 = 1.0$ 이 된다. 같은 방법으로  $u(S)$ ,  $u(S_2)$ ,  $u(S_3)$ ,  $u(V)$ 를 구할 수가 있다. 단,  $u(V)$ 는 표 B1에서 보였듯이 환기상태에 따른 작업환경을 “문제없음”, “약간”, “심각”, “작업곤란”으로 분류하였는데 이를 임의로 다섯 분할을 적용하여(“약간”과 “심각” 사이에 “보통”이 있는 것으로 볼 수 있다)  $u(V)_k$ 를 각각 1.0, 0.75, (0.5), 0.25, 0의 값을 부여한 것이다.

한편 식(B.3)의 가중치  $w_j$ 는 하나의 대표적 인자에 대한 상대적 중요도를 나타내는 것으로 이해할 수 있으므로 가령  $w_1(X$ 에 대한 가중치)를 기준으로 할 때

$$w_j = f_j w_1 \quad (B.5)$$

로 쓸 수 있고 가중치의 정의에서

$$\sum_j w_j = 1.0 \quad (B.6)$$

이어야 한다. 식(B.5)에서 인자  $f_j$ 는 인자 1과 인자  $j$ 의 상대비교로서 직관에 따라 부여할 수도 있고 정량적 근거에 따라 결정할 수도 있다. 예에서처럼 인자 1(방호비용  $X$ )에 대해 상대적으로 평가한다면  $f_2$ ,  $f_3$ ,  $f_4$ 도 금액으로 대응한 값이 도움이 될 것이므로

$$f_2 = f_s = \frac{\alpha R(s)}{R(X)} = 20000 \times \frac{(0.561 - 0.178)}{25100} = 0.305$$

$$f_3 = f_{s_1} = \frac{\beta_1 R(s_1)}{R(x)} = \frac{0 \times 0}{25100} = 0$$

$$f_4 = f_{s_2} = \frac{\beta_2 R(s_2)}{R(x)} = 40000 \times \frac{(0.126 - 0)}{25100} = 0.201$$

표 B3. 다속성효용분석의 예\*

방안	u(X)	u(S)	u(S2)	u(S3)	u(V)	U <sup>1)</sup>
1	1	0	1	0	1	0.47
2	0.729	0.533	1	0.410	0.75	0.59
3	0.677	0.590	1	0.454	0.75	<u>0.60</u>
4	0.131	0.953	0	0.986	0.25	0.59
5	0	1	0.087	1	0	0.53
f <sub>i</sub>	1	0.305	0.201	1.587	0.5	3.593 <sup>2)</sup>
w <sub>i</sub> <sup>3)</sup>	0.278	0.085	0.056	0.442	0.139	1.0 <sup>4)</sup>

\* u(S<sub>1</sub>)은 S<sub>1</sub>이 모두 0이므로 생략되었음.

1)  $U = \sum_i w_i u_i$  2) f<sub>i</sub>의 합(F) 3) f<sub>i</sub>/F 4) w<sub>i</sub>의 합

$$f_5 = f_{s_3} = \frac{\beta_3 R(s_3)}{R(x)} = \frac{80000 \times (0.561 - 0.063)}{25100} = 1.587$$

와 같이 된다. 환기에 대한 f<sub>6</sub>는 정량적 근거로 부여하기는 어려우므로 직관에 의해 f<sub>6</sub> = f<sub>v</sub> = 0.5 를 부여하였다. 이와 같이 각 비값이 결정되면 식(B.6)의 정규화 조건과 함께 w<sub>i</sub>값들이 산출된다. 표 B3에 최종으로 얻은 총 효용 U<sub>i</sub>가 제시되어 있으며 이에 따라 방안3이 최적으로 나타나고 있다.

## B.4. 다범주우위분석

이 방법은 다속성효용분석을 적용하기에 불확실성이 큰 보다 모호한 경우에 적용하는 기법으로서 인자와 방안들을 둘씩 상호 우위를 비교하는 것이다. 이를 위해서 방안 i와 방안 m 사이의 우위지수 advantage index Ad<sub>i,m</sub> 을 다음과 같이 정의한다.

$$Ad_{i,m} = \sum_j k_j a_j \quad (B.7)$$

여기서 a<sub>j</sub>는 인자 j의 방안 i와 m 사이에서의 우위지수로서 방안 i가 방안 m 이 상이면 1을, 그렇지 못하면 0의 값을 갖는다. k<sub>j</sub> 는 앞서와 같이 가중치이다.

문제를 단순화하기 위해 인자로서 집단선량의 소그룹( $S_1, S_2, S_3$ )를 고려하는 대신 최대개인선량  $d$ 를 인자로 채택하여  $X, S, d, V$ 의 4개 인자에 대해 우위지수  $a_i$ 를 표 B4와 같이 결정할 수 있다. 표 B4에서  $a_{2,1}$  값으로 제시된 0 1 1 0은  $Ad_{i,m}$ 값을 한 칸에 보인으로서 방안2가 방안1에 대해 요소1( $X$ )와 요소4( $V$ )에 대해서는 불리(값 0)하고 요소2( $S$ )와 요소3( $d$ )에 대해서는 우위(값 1)에 있음을 나타낸 것이다.

다음으로 식(B.7)에 적용할 가중치를  $k_j$ 를 판단에 의거 차례로 2/7, 2/7, 2/7, 1/7로 부여해 본다. 그러면 식(B.7)으로부터

$$Ad_{1,2} = 2/7 \times 1 + 2/7 \times 0 + 2/7 \times 0 + 1/7 \times 1 = 3/7 = 0.43$$

$$Ad_{2,1} = 2/7 \times 0 + 2/7 \times 1 + 2/7 \times 1 + 1/7 \times 0 = 4/7 = 0.57$$

$$Ad_{3,2} = 2/7 \times 0 + 2/7 \times 1 + 2/7 \times 1 + 1/7 \times 1 = 5/7 = 0.71$$

.....

등으로 계산된다. 이 결과를 요약하여 표 B4에 같이 보였다.

표 B4. 우위지수  $Ad_{i,m}$

i \ m		1	2	3	4	5
1	$a_{i,m}$		1001	1001	1001	1001
	$\Sigma ka$		0.43	0.43	0.43	0.43
2	$a_{i,m}$	0110		1001	1001	1001
	$\Sigma ka$	0.57		0.43	0.43	0.43
3	$a_{i,m}$	0110	0111		1001	1001
	$\Sigma ka$	0.57	0.71		0.43	0.43
4	$a_{i,m}$	0110	0110	0110		1001
	$\Sigma ka$	0.57	0.57	0.57		0.43
5	$a_{i,m}$	0110	0110	0110	0110	
	$\Sigma ka$	0.57	0.57	0.57	0.57	

다음으로는 배제기준  $Ec_{i,m}$ 을 결정하는데, 이것은 방안  $m$  대신 방안  $i$ 를 선택함에 부정적 성격이 “심각”할 경우 1을, 그렇지 않으면 0을 부여한다.  $Ec_{1,2}$ 는 방안 2에 비해 방안 1이 심각한 문제를 동반하지 않으므로 0이되나  $Ec_{1,4}$ 는 최대개인선량이 선량한도에 근접하는 경우가 있어 1로 보았다(개인선량 값은 자료에서 생략함). 반대로  $Ec_{4,1}$ 은 환기문제가 작업조건을 심각하게 만들므로 1로 본다. 이러한 방법으로 부여된  $Ec$ 값이 표 B4에 함께 정리되어있다. 최종적으로  $Ad_{i,m}$  과  $Ec_{i,m}$ 을 이용하여 판단하는 방법은 만약  $Ec_{i,m} = 0$  이고  $Ad_{i,m} > 0.5$  이면 방안  $i$ 가 방안  $m$ 보다 우위에 있다고 본다. 방호방안과 인자들에 대해 배제

표 B5. 배제기준

i m	E <sub>C<sub>i,m</sub></sub> (X)					E <sub>C<sub>i,m</sub></sub> (d)				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1										
2	1					0				
3	1	0				0	0			
4	1	1	1			1	1	1		
5	1	1	1	0		1	1	1	1	
i m	E <sub>C<sub>i,m</sub></sub> (S)					E <sub>C<sub>i,m</sub></sub> (V)				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1										
2	0					0				
3	1	0				0	0			
4	1	1	1			1	1	1		
5	1	1	1	0		1	1	1	0	

기준은 표 B5와 같이 정리된다. 이 결과로부터 인자별로 방안의 우위 관계를 나타내면 다음과 같다.

X: 3 → 2      5 → 4

S: 2 → 1      3 → 2      5 → 4

d: 2 → 1      3 → 1      3 → 2

V: 2 → 1      3 → 1      3 → 2      5 → 4

여기서 3 → 2는 방안3이 방안2보다 우위에 있음을 의미한다. 이를 다시 종합하면 그림 B3와 같은 우위 관계를 얻는다. 여기서 알 수 있듯이 이러한 우위분석은 양자 비교이고 모든 양자 비교가 항상 어느 하나가 우위를 보이는 것이 아니므로 방안들 사이에 최상의 방안이 도출되지 아니하고 방안 그룹간 부분적 우위 방안의 도출에 만족해야 할 경우가 많다. 이는 인자들의 특성상 불확실성이 컸던 데서 기인한다. 따라서 우위분석의 결론인 그림 B3를 놓고 방안3과 방안5 중 어느 것을 택하느냐는 앞서 논의한 비정량적 다른 인자와 최종 의사결정자의 정책 취향에 따르게 된다.

위에서 살펴본 바와 같이 최적화 기법이란 방안과 그 방안에 관계하는 인자를 얼마나 잘 설정하느냐, 관련된 인자들을 어떻게 현실적으로 정량화하느냐, 어떤 최적화 기법을 선택하느냐에 따라 상이한 결론을 얻을 수가 있고 때로는 그 결론이 여전히 모호할 수도 있다. 또 예시에서는 비교적 단순한 문제였지만 실제의 대형 문제에서는 비용이나 피폭의 시간 축이 길게 지연될 수도 있는데 이때 현가 계산 방법도 결과에 영향을 미치게 된다. 따라서 무엇보다도 최적화를 도모

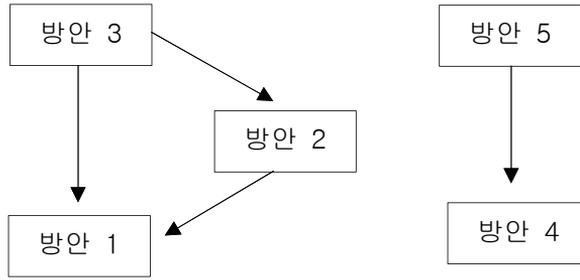


그림 B3. 고려한 방안들의 우위관계.  $i \rightarrow m$ 은 방안  $i$ 가 방안  $m$ 보다 우위에 있다는 표기이다.

하는 실무자의 경험과 전문성이 긴요하며 필요한 정보를 손쉽게 획득할 수 있는 데이터베이스도 큰 도움이 된다. 그러므로 새로운 방호체계로의 성공적 정착을 위해서는 규제기관은 규정요건을 제시하는 차원에서 나아가 최적화 실무를 위한  $\alpha/\beta$  값, 선량제약치 등의 기본적 파라미터와 최적화 지침을 개발, 제공하고 필요한 정보를 찾을 수 있는 정보원을 구축하며 아울러 실무자들의 전문성 제고를 위한 적정 교육훈련 기회를 제공하는 등의 기반 형성에 먼저 노력할 필요가 있다. 이에 추가하여 최적화는 곧 경영방침과 직결되므로 경영주의 방사성방호의 ALARA 달성 의지와 지원대책이 결정적 원동력을 강조한다.

## B.5. 선량의 금전계수

### B.5.1. 피폭선량 금전계수 설정의 접근법

정량적 최적화 평가를 위해서는 선량의 금전계수 값이 필요하다. 단순한 접근에서는 금전계수를 알파항( $\alpha$ ) 하나로 표현하지만 식(B.2)에서 보았듯이 확장된 평가에서는 금전계수를 선량준위와 무관한 상수항  $\alpha$ 와 선량에 어떤 비례관계에 있을 것으로 간주하는 항  $\beta$ 로 나누어서 생각할 수 있다.  $\alpha$ 든  $\beta$ 든 개념적으로는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{금전가계수} = \sum_i (\text{단위선량 당 영향 } i \text{ 가 나타날 확률}) \times (\text{영향 } i \text{ 로 인한 비용}) \quad (\text{B.8})$$

여기서 영향이란 건강영향일 수도 있고 심리적 영향 등 기타의 영향일 수도 있다. 건강영향의 경우 확률적 영향과 결정적 영향으로 구분할 수 있지만 이 계수를 구하는 목적에서는 최적화가 적용되는 저선량 피폭으로 인한 확률적 영향이 관심의 대상이 된다. 방사선 방호의 목표가 결정적 영향은 방지하는 것이기 때문

에 그 목표달성을 위한 방호체계의 일환인 최적화는 결정적 영향과는 연계되지 않는다. 이와 같이 방사선의 위험계수를 바탕으로 하여 피폭의 금전계수를 설정하려는 접근법으로는 다음과 같은 것들이 있다.

#### (1) 인간의 경제가치 근거법 Human capital

이 방법은 한 개인이 방사선 피폭으로 인한 확률적 영향으로 예상 수명보다 조기에 사망한다고 전제하여 그 죽음으로 인해 잃게 되는 미래의 잠재적인 생산을 고려하여 금전가를 산정하려는 시도이다. 여기서 얻는 금전가는 순수하게 경제적인 계산이므로 죽음의 위험을 피하는 관점에서는 최소한의 액수로서 죽음 자체 외에 수반되는 고통, 슬픔, 주위 사람들의 괴로움 등의 객관적이지 않은 손해에 대해서는 고려하기 어렵다.

#### (2) 법정 배상 근거법 Legal compensation principles

이것은 직업상의 죽음에 대해 법정에서 판정하는 배상금을 통해 생명에 대한 금전가를 얻어내려는 시도이다. 법정의 판정이 어느 정도 사회가 가지고 있는 배상에 대한 견해를 반영한다는 가정에서 나온 것이다. 그러나 이 방법이 안고 있는 가장 큰 문제점은 죽음에 대한 배상이 본인이 아닌 유가족들에게 주어진다라는 점이다. 따라서 한 개인의 생명 자체에 대한 금전가라고 보기에는 어려움이 있다. 이외에도 여러 가지 단점들 때문에 전문가들은 법정 판정 배상금이 사회의 견해를 반영하지 못한다고 판단한다.

#### (3) 보험금 유추법 Insurance premium analogies

보험이란 유가족들의 생계에 대한 재정적인 보장으로 간주될 수 있다. 즉 보험료는 한 개인의 생명값이라기 보다는 부양가족을 위해 장래의 위험에 대비하는 그의 관심을 반영하고 있는 것이므로 이 역시 생명에 대한 가치를 제대로 반영하는 것으로 이해되지 않는다.

#### (4) 공공시책 비교법

사회의 다양한 분야에서 위험을 줄이기 위해 또는 생명을 구하기 위해 지출된 방호비용, 또는 적합하다고 거론되었던 방호비용에 대해 소급 분석함으로써 줄어든 위험에 대한 금전계수를 산정하려는 방법이다. 예를 들면 전염병 예방을 위한 투자정책이 구했을 것으로 보는 인명의 수를 조사하는 것이다. 그러나 이러한 정책의 의사 결정자들은 사회의 대표자들이므로 정책결정의 과정에서 은연중에 자신들을 기준으로 한 생명값을 감안하고 있을 가능성이 크다. 또, 여러 가지 정책에 대해 이 방법에 의한 금전계수의 산출결과는 위험에 따라 매우 큰 편차를

보이고 있는 것도 지적할 수 있다.

(5) 투자의지 근거법 Willingness to pay; WTP

이 방법은 방사선 리스크에 준하는 비교적 작은 위험을 경감하기 위해 사회가 얼마나 많은 재화를 투자할 수 있는가에 대해 그 사회의 구성원에 대한 여론 조사로 평가하는 방법으로서 경제학자들은 이 방법이 적어도 이론적으로는 가장 합리적이라고 평가한다. 위의 다른 시도들이 인간의 생명 자체에 값을 매기는 것과 같다는 의미에서 비윤리적이라는 비판을 받고 있다면 이 투자의지 근거법은 스스로가 결정했거나 결정하고자 하는 자신의 의지가 들어있기 때문에 윤리적인 비판에 대해 충분히 용인될 수 있다. 또한 이 값은 앞서 언급한 인간의 경제가치를 평가하는 방법에서 놓쳐버린 경제적 손해 이외의 손해에 대해서도 묵시적으로 고려될 것이라는 장점이 있다. 그러나 이 방법에도 문제는 있는데 우선 조사 대상자가 리스크의 개념을 바르게 이해하는 것이 어렵고 또 질문자의 자세, 설문 의 내용, 조사 시기 등 외부적인 요인이 결과에 상당한 영향을 미칠 우려가 있다. 다시 말해 여론을 결집하는 기술적인 어려움이 크다.

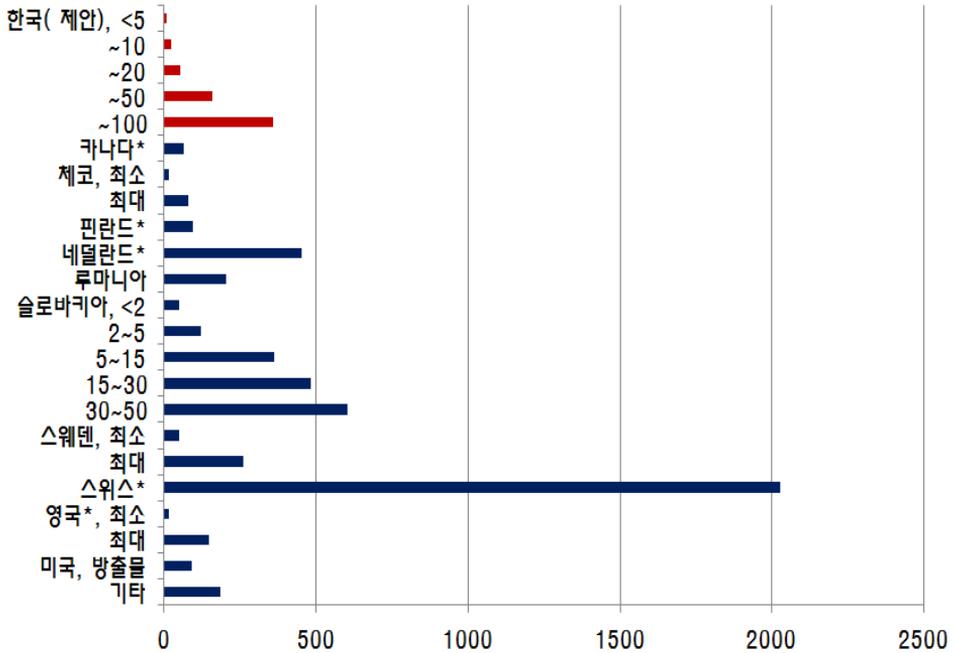
### B.5.2. 선량 금전계수 평가 사례

선량의 금전계수를 설정하기 위한 연구는 개인 연구자는 물론 IAEA를 비롯하여 방사선방호에 관련된 국제기구 및 특정 국가의 방사선 방호 책임관청, 공공 연구기관에서 수행되어 왔다. 그림 B4는 여러 국가의 규제당국이 최적화 목적으로 제시한 피폭선량 금전계수들을 보이고 있다.<sup>33)</sup> 금전계수는 필연적으로 평가 대상이 되는 사회의 여건을 반영하기 때문에 평가자나 평가 대상국에 따라 상당한 차이가 남은 당연한 결과로 이해된다. 여기서 우리나라 금전계수는 규제기관이 공식 채택한 값은 아니며 연구를 통해 제안한 값이다. 이 연구에서도 금전계수 산출 모델로는 부록A에 제안된 것처럼 선량 준위에 따라 증가하는 모델을 적용하였다. 즉,

$$\alpha = \alpha_0 \left( \frac{E}{E_0} \right)^a \quad (B.9)$$

여기서  $\alpha_0$ 는 기본 값이며 E는 유효선량 준위,  $E_0$ 는 그 이하에서는 기본 금전계수 값이 적용되는 기준 유효선량, a는 높은 선량에 대한 위험 기피인자이다. 기본 a값은 인간 경제가치법 등으로 평가하면 Sv 당 대략적으로 그 국가의 개인

33) <역주> 외국 자료는 ISOE Information Sheet No. 34(2003)에서 발췌된 것임. 그림 B5의 자료도 같다.



금전계수 EUR/mSv

그림 B4. 국가 규제기관이 최적화 목적으로 설정한 방사선량의 금전계수 값 (2002년 기준. \*표시 국가는 1997년 기준). 우리나라 값은 공식적으로 채택된 것은 아니며 연구보고서에서 제안된 값이다.

소득 수준이 된다.

$$\alpha_0 \approx \text{GNP per caput/Sv} \quad (\text{B.10})$$

기피인자  $\alpha$ 는 직무피폭의 경우 1.2로 판단했다. 그림 B4의 금전계수 값은 2002년을 기준으로 평가한 값이므로 우리나라의 경우 2011년 현재는 그림 B4의 값에 1.5를 곱한 값이 적절할 것이다.

금전계수 값이 국가에 따라 다르듯이 한 국가 내에서도 적용할 대상에 따라 차이가 있을 수 있다. 원자력발전처럼 막대한 이득을 창출하는 행위에 수반되는 피폭에 대해서는 방호를 위해 더 많은 투자가 가능할 것이므로 금전계수 값이 높아질 수 있다. 그림 B5는 세계의 주요 발전회사가 직무피폭 최적화를 위해 채택하고 있는 금전계수를 보인다. 그림 B4의 규제당국이 일반목적으로 제시하는 값보다 상당히 높음을 알 수 있다(평균적으로 약 2배). 그림 B5에 보인 우리나라 발전회사인 한국수력원자력(KHNP)의 금전계수는 공식적으로 회사가 채택한 값이 아니라 회사가 1990년대 중반에 종사자 선량 감축을 위해 도입한 방호방안

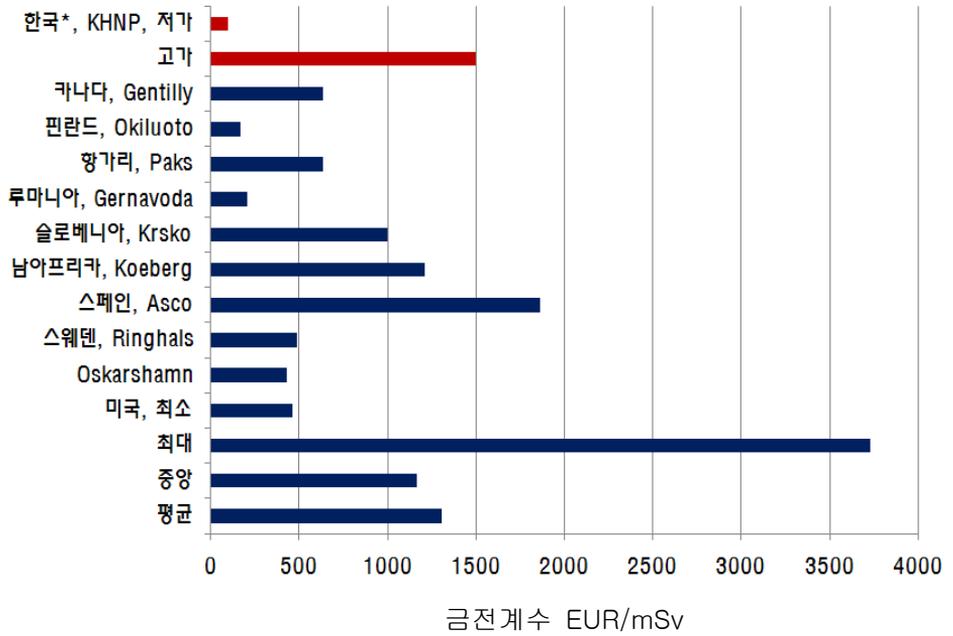


그림 B5. 몇몇 원전 운영자가 적용하는 금전계수 값(2002년 기준. 우리나라 값은 1997년 기준).

들의 비용을 그로 인해 절감한 집단선량 평가치로 나눈 실험적 값이다.



## 참고문헌

- Beierle, 2002. Democracy in Practice - Public Participation in Environmental Decisions. Resources for the Future. Washington DC.
- IAEA, 1991. Safety Culture. INSAG 4. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- IAEA, 2002. Optimisation of Radiation Protection in the Control of Occupational Exposure. Safety Report Series no. 21. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- ICRP, 1955. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (Revised December 1, 1954). Br. J. Radiol. (Suppl. 6).
- ICRP, 1959. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 1, Pergamon Press, Oxford.
- ICRP, 1966a. The Evaluation of Risks from Radiations. ICRP Publication 8, Pergamon Press, Oxford.
- ICRP, 1966b. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 9, Pergamon Press, Oxford.
- ICRP, 1973. Implications of Commission Recommendations that Doses be Kept as Low as Readily Achievable. ICRP Publication 22, Pergamon Press, Oxford.
- ICRP, 1977. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 26. Ann. ICRP 1 (3).
- ICRP, 1983. Cost-benefit analysis in the optimisation of radiological protection. ICRP Publication 37, Ann. ICRP 10 (2/3).
- ICRP, 1988. Optimisation and decision-making in radiological protection. ICRP Publication 55, Ann. ICRP 20 (1).
- ICRP, 1989. Optimization and decision-making in radiological protection, ICRP Publication 55, Ann. ICRP 20 (1).
- ICRP, 1991. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60, Ann. ICRP 21 (1-3).
- ICRP, 1993. Principles for intervention for protection of the public in a radiological emergency. ICRP Publication 63, Ann. ICRP 22 (4).

- ICRP, 1997. Radiological protection policy for the disposal of radioactive waste. ICRP Publication 77, Ann. ICRP 27 (Suppl.).
- ICRP, 1998. General principles for the radiation protection of workers. ICRP Publication 75, Ann. ICRP27 (1).
- ICRP, 1999. Protection of the public in situations of prolonged radiation exposure. ICRP Publication 82, Ann. ICRP 29 (1-2).
- IPSN, 2002. Collective Dose: Indications and Contraindications. Report from a Working Group. EDP Sciences, Paris, France. Lochard, J., Lefaure, J., Schieber, C., Schneider, T., 1996. A model for the determination of monetary values of the man-Sievert. J. Radiol. Prot. 16, 201-204.
- NEA, 1997. Work Management in the Nuclear Power Industry. Prepared for the NEA Committee on  
Radiation Protection and Public Health by the ISOE Expert Group on the Impact of Work Management on Occupational Exposure. OECD/Nuclear Energy Agency.
- NEA, 1998. The Societal Aspects of Decision Making in Complex Radiological Situations. Proceedings of an International Workshop, Villigen, Switzerland, 13-15 January 1998. Organisation for Economic Co-operation and Development/Nuclear Energy Agency, Paris, France.
- NEA, 2001. Better Integration of Radiation Protection in Modern Society. Proceedings of an International Workshop, Villigen, Switzerland, 23-25 January 2001. Organisation for Economic Cooperation and Development/Nuclear Energy Agency, Paris, France.
- NEA, 2004. Stakeholder Participation in Decision Making Involving Radiation-exploring Processes and Implications. Proceedings of an International Workshop, Villigen, Switzerland, 21-23 October 2003.  
Organisation for Economic Co-operation and Development/Nuclear Energy Agency, Paris, France.
- Schneider, T., Schieber, C., Eeckhoudt, L., Gollier, C., 1997. Economics of radiation protection: equity considerations. Theo. Decis. 43, 241-251.
- Stokell, P., Croft, J., Lochard, J., Lombard, J., 1991. ALARA: from Theory towards Practice. Report EUR 13796 EN. Commission of the European Communities, Luxembourg.
- UN, 1992. Report of the United Nations Conference in the Human

Environment, Stockholm, 5-16 June 1992, United Nations Publication  
Sales No. E.73.II.A14 and corrigendum(Chap. 1).