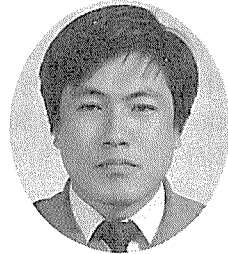


방사선방호 최적화의 개념이해



사 상 덕

과학기술처 방사선안전과 사무관

1. 서 언

ICRP(국제방사선방호위원회)의 권고인 1991년 3월 출간된 이래 관계 학회지 및 협회지등을 통하여 동 권고의 내용요지가 널리 소개되었다. 잘 알려진바와 같이 ICRP의 방사선방호 기본체계는 ① 행위의 정당화, ② 방호의 최적화 ③ 개인의 선량제한으로 되어 있다.

행위의 정당화란, 방사선 피폭을 수반하는 행위를 하는 경우에 피폭에 의한 유해한 영향을 초월하는 이득이 존재할 것이 확실한 경우가 아니면 그 행위를 도입할 수 없다는 개념이다. 방호의 최적화는, 방사선 피폭원으로부터 방사선영향을 가능한 한 낮추기 위하여 피폭선량, 피폭 사람수, 피폭기회등을 사회적·경제적 요인을 고려하여 합리적으로 달성가능한 한 낮게 억제하는 것으로 ALARA와 동의어로 사용된다. 선량한도는 환경(작업자에 대하여는 작업환경, 일반공중에 대하여는 일반환경)중에서 이루어지는 정당화된 행위로부터 개인이 받을 수 있는 선량의 상한치를 의미하며 법정제한치로 사용되므로 방사선방호 관계자에게는 익숙한 개념이다.

이러한 방호체계의 3요소 중, 방호의 최적화는 방사선방호상 가장 중요한 개념으로서

1977년 ICRP publ. 26의 권고이래 그 중요성이 강조되어 왔다. 그러나 방사선방호 최적화를 위한 분석방법으로 그동안 비용이득 분석법이 널리 소개되어온 탓에 이 방법만이 최적화 분석의 유일한 방법인 것처럼 오해되거나 방사선방호 관계자의 경험적 판단에 의존하는등 최적화가 방호실무에 널리 정착되어 있지 않은 실정이다.

이에 따라, 이 글에서는 ICPR publ. 55(방사선방호의 최적화와 의사결정)의 권고내용을 중심으로 몇가지 최적화 기법의 개요에 대하여 해설하였다.

2. ICRP 권고의 최적화 개념

가. 최적화 개념의 도입

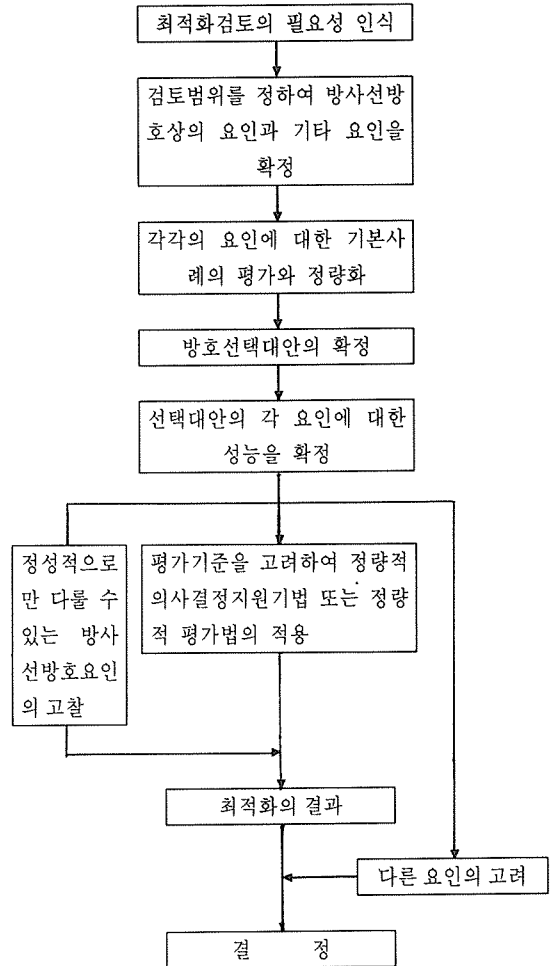
일찌기 ICRP는 1973년의 권고(ICRP publ. 22)에서 전리방사선에 의해 유발되는 손해의 척도로서 집단선량(Collective dose)의 개념을 도입하고 이 값을 금전단위로 표시하는 것이 유용함을 시사하여 방사선방호에 비용이득분석을 적용하는 계기를 만들었다. 이후, ICRP publ. 37 권고(1983년)에서는 방사선방호 최적화에 대하여 전문적으로 이루고 방사선방호 최적화의 일반적 개념의 설명과 함께, 최적화를 위한 한 방법으로 비용이득 분석에 의한 차폐체의 설계, 환기시스

템의 설계, 라돈환경에 대한 환기설계 및 방사성물질의 방출제어의 예처럼 특정 조건하에서 그 평가함수가 미분가능한 문제들을 열거하였다.

그러나 평가함수의 도출이 어려운 점, 모든 평가요인에 대한 금전가치 환산에 따른 제약등으로 비용이득 분석법만으로는 체계화된 의사결정의 프로세스를 제공할 수 없다는 단점이 있다. 이와 관련 ICRP는 대부분의 상황에서 단순한 비용이득 분석법보다 복잡한 분석기법이 요구될 수 있음을 예상하여 적응성이 높은 분석방법의 예로서 다속성 효용분석, 다기준 우위분석등의 적용예를 ICRP publ. 55에 소개하였다.

나. 최적화의 분석절차

최적화 검토의 범위는 어느 조직 또는 시설에서 채용하고 있는 작업절차의 검토로부터 어느 특정과제의 방호측면의 최적화를 기하기 위한 검토까지 여러 레벨의 문제에 대해 다루어진다. 검토범위를 결정한 후 검토에 포함시킬 방호요인(Protection factors)과 최종 결정에 영향을 미칠 수 있는 다른 요인들을 확정한다. 조업시의 최적화 검토에는 작업자의 집단선량, 최대 개인선량, 선량한도등 작업자의 선량분포에 관한 요인을 고려하여야 한다. 다음에 기본사례, 즉 현상의 평가를 가능한 한 정량적으로 행하고 정성적인 요인에 대하여도 기록한다.



[그림1] 조업중의 최적화 검토절차

표. 1 우라늄광산 사례에서 5가지 선택대안에 대한 방호요인의 데이터

방호선택대안	1	2	3	4	5
년간 방호비용(\$)	10,400	17,200	18,500	32,200	35,500
년간 집단선량(manSv)	0.561	0.357	0.335	0.196	0.178
년간 평균개인 선량(mSv)					
I 그룹(4인)	40.8	28.4	26.0	17.5	15.8
II 그룹(4인)	34.5	22.3	21.0	12.6	11.3
III 그룹(9인)	28.9	17.1	16.3	8.4	7.8
환기 불쾌감	문제없음	약간	약간	상당함	작업곤란

3. 방사선방호 최적화 기법

ICRP publ. 55에 예시되어 있는 최적화 검토사례는 우라늄 광산에서의 환기설비에 관한 설계문제이며 작업자의 집단선량, 방호의 비용, 작업자의 개인선량 분포, 환기소음에 의한 불쾌감의 4가지 요인을 고려하고 있다.

가. 비용-이득 분석

비용이득 분석의 특징은 의사결정에 관련

된 모든 요인을 금액으로 나타내어 그 합계 금액이 최소가 되는 선택대안을 최적안으로 결정하는 것이다. 단순한 비용이득 분석에서는 방호비용과 집단선량의 두 요인만을 고려한다.

단위집단선량에 상당하는 금액(α 값)를 20,000\$로 하여 계산하면, 표 1로부터 표 2와 각 선택안에 대한 총 비용을 계산할 수 있어 연간 총비용이 가장 낮은 제1안이 최적안이 된다.

표. 2 단순형 비용이득 분석

방호선택대안	①	2	3	4	5
년간 방호비용	10,400	17,200	18,500	32,200	35,500
년간 손해비용	11,200	7,100	6,700	3,900	3,600
년간 총비용	21,600	24,300	25,200	36,100	39,100

* 주 : $1\text{man} \cdot \text{Sv} = 20,000\$$

나. 확장형 비용-이득 분석

표 1에서 방호비율과 집단선량의 방호요인의외에 개인선량 분포를 고려하기 위하여는 개인선량의 레벨에 따라 서로 다른 금전치를 단위집단선량에 추가한다.

이 때의 손해비용은 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$Y = \alpha S + \sum \beta_j S_j \quad (S = \sum_j S_j, S_j = N_j H_j)$$

이 식에서 S_j 는 j 번째 그룹의 집단선량, N_j 는 개인선량이 H_j 인 사람의 수, β_j 는 j 번째 그룹에 대하여 단위집단선량에 부가된 금액이다.

표 1의 데이터에 이 식을 적용하면 표 3과 같은 결과를 얻을 수 있다.

표. 3 확장성 비용이득 분석

방호선택대안	1	2	3	④	5
년간 방호비용	10,400	17,200	18,500	32,200	35,500
년간 손해비용 α 항	11,200	7,100	6,700	3,900	3,600
β 항	44,904	28,536	26,776	10,460	9,672
년간 총비용	66,504	52,836	51,976	46,740	48,772

$\alpha = 20,000\$ (\text{man} \cdot \text{Sv})^{-1}$; $\beta_1 (< 5\text{mSv}) = 0$; $\beta_2 (5 - 15\text{mSv}) = 40,000\$ (\text{man} \cdot \text{Sv})^{-1}$;
 $\beta_3 (15 - 50\text{mSv}) = 80,000\$ (\text{man} \cdot \text{Sv})^{-1}$

다. 다속성 효용분석

다속성 효용분석은 선택안의 평가결과에 대하여 각 방호요인에 상대적인 점수(효용)를 주는 방식이며, 통상적으로 가장 바람직

한 평가결과에 1, 가장 바람직하지 않는 결과에 0의 값을 준다. 평가결과와 효용과의 관계를 나타내는 효용함수가 반드시 선형일 필요는 없으며, 비용이득 분석보다는 많은

요인들을 고려할 수가 있다. 선택안 i에 대한 총효용 U_i 는 다음식으로 나타낸다.

$$U_i = \sum_{j=1}^n K_j U_j$$

U_j 는 요인 j에 대한 선택안 i의 효용, K_j 는 요인 j의 상대적 중요도를 나타내는 정수이며, $\sum_{j=1}^n K_j = 1$ 이 되도록 규격화 한다

표. 4 다속성 효용 분석결과

방호선택대안	1	2	3	4	5
U(X)	1	0.73	0.68	0.13	0
부분효용 U(S)	0	0.53	0.59	0.95	1
U(d)	0	0.69	0.77	0.97	1
U(V)	1	0.75	0.75	0.25	0
총효용 $U = \sum K_j U_j$	0.43	0.66	0.69	0.62	0.57

X : 연간 방호비용

S : 연간 집단선량

d : 최대 개인선량

V : 환기 불쾌감

$K(X) = K(S) = K(d) = 2/7$: $K(V) = 1/7$

계산(예) : $0.73 = 1 - \frac{17,200 - 10,400}{35,500 - 10,400}$

4. 방호 최적화와 선량제약치 개념

방호최적화 검토에서 그동안 주로 이용되어 온 비용이득 분석은 고려대상의 평가기준 요소를 오직 금전단위로 나타내기 때문에 간편히 사용할 수도 있으나, 평가기준의 성질상 금액으로 표시하기 어려운 상황도 많고 평가요소의 금전환산에 대한 타당성 문제도 있다. ICRP Publ 55에서 새로이 소개된 다속성 효용분석법과 다기준 우의 분석법은 비용이득 분석법의 단점, 즉 모든 평가요소의 금전가치로의 환산등에 제약을 극복할 수 있으나, 기법의 특징이 복잡하고 추상적이어서 최적화 검토대상문제가 극히 간단한 경우이외에는 그 적용성이 높다고 하기 어렵다.

방사선방호 관리실무에서 직면하는 많은 상황에 대하여 검토대상문제의 성격과 범위에 따라 그에 적절한 최적화기법의 적용이 바람직하다. 최적화와 의사결정에 관하여는 경영과학(Management Science), 오퍼레이션 리서치등의 사회과학, 공학으로부터 다양한 기법을 도입하여 이용할 수 있다.

특히, ICRP Publ 60 권고에서는 개인에 대한 선량한도뿐만 아니라 선원관리의 중요성을 강조하여 선량제약치(Dose Constraints)라는 개념을 도입하였다. 선량제약치는 피폭의 원인을 제공하는 선원에 대하여 최적의 방사선방호 대책을 강구할 때에, 그 선원으로 인한 개인의 선량이 부당하게 높게 되지 않도록 설정하는 상한치로서 방호 최적화 판단의 조건으로 되어 있다.

선량한도와 선량제약치의 관계는 표 5와 같다.

이 선량제약치는 개인선량 한도보다 높게 설정될 수 없고 선원(장소)이나 직종마다 최적화할 때의 개인선량의 최대치로서 기능하므로, 어느 한 직업자가 복수의 행위나 선원으로부터 피폭받을 경우에는 개인선량한도값을 복수의 행위(선원)에 대하여 적절히 분배할 필요가 있다.

5. 결 언

이 글에서 ICRP publ. 55권고에 예시되어 있는 최적화 검토기법에 대하여 간략하게나

마 살펴보았다. 지면관계상 보다 상세한 설명을 할 수 없었으나 최적화의 개념정리에 미력이나마 도움이 되기를 바라고, 더 상세한 내용에 관하여는 관계문헌을 참고하시기

바란다. 앞으로 방사선방호 최적화의 적용 정착화를 위한 피폭유형별 케이스 스터디 등 관련연구 및 실무검토의 활성화를 기대한다.

표. 5 선량한도와 선량제약치(Dose Limits and Dose Constraints)

작업자	장 소		선량한도
	1 2 · · · j · · · n		
1		d1j	· · ·
2		d2j	· · ·
·		·	· · ·
i	di1 di2 · · ·	dij · · ·	· · ·
·		·	$\sum_{j=1}^n dij < DL$
·		·	· · ·
·		·	· · ·
m		dmj	· · ·
선량제약치 DC	max [dij] ≤ DC		

