

원자력 발전소 방사선 관리의 최적화에 관한 연구

송종순

조선대학교

요 약

원자력 발전소 작업자의 피폭량은 발전소의 안전 운영에 관한 척도일뿐 아니라, 일반 대중이 원자력 발전의 안전을 평가하는 기본 요소이다. 또한, 최근 ICRP 60에 의한 개인 피폭선량 한도의 하향조정 권고는 지속적인 피폭저감에의 노력을 요구하고 있다. 본 논문에서는 작업자의 피폭저감에 관한 대안선정시 사용할 수 있는 최적화 기법을 제시하고 실제로 원전 운영자에 의해 제안된 대안들을 검토하는데 이 기법을 적용하여 보았다. 분석과정에서 기본 분석이외에 가변 경제변수를 고려한 민감도 분석을 통해 계산 결과의 불확실성을 보완하였다. 분석결과를 살펴보면, 먼저 비용-이득 분석에서는 '증기 발생기 Nozzle Dam 및 Torquing Machine'이 총 이득면에서 가장 우수한 것으로 평가되었고, 다속성 효용 분석의 경우 'Co-No Seal 조임장치'가 가장 높은 효용을 가진 것으로 나타나 약간의 차이를 보이고 있다. 따라서, 최적화 기법의 적용시에는 두 가지이상의 정량적 기법을 보완적으로 사용하고, 정성적 인자도 충분히 고려하는 것이 필요하다.

Key words : 작업자 피폭저감, 최적화, 비용-이득 분석, 다속성 효용분석

서 론

국제 방사선 방어 위원회 (International Commission on Radiological Protection, ICRP)는 1977년의 ICRP 26을 거쳐 1990년말에 ICRP 60을 발행하면서 방사선 작업 종사자의 연간 피폭선량 한도를 종래의 50 mSv(5 rem)에서 5년간 100 mSv (10 rem)로 하향 조정하여 권고함으로써 향후 이 권고안이 법제화될 경우 원자력 발전소의 설계 및 운영 측면에서 상당한 변화가 수반될 것으로

전망된다[1,2]. ICRP 60의 권고치를 실제 적용 하는 데는 기술적인 문제보다 경제적인 문제가 더 크게 대두되며, 종사자의 피폭관리에 있어서도 개인 연간선량 한도 20 mSv 초과는 발전소 이용을 향상과 직접 관련되는 보수작업에서 주로 발생할 소지가 있으므로 국내 원전에서도 원전별 피폭 실적을 분석, 평가하여 이에 대비한 부문별 장·단기 피폭저감 대책의 수립 및 실행이 절실한 실정이다.

따라서, 방사선 방어체계 기본목표의 하나로서

‘방사선 방어의 최적화’는 원전 종사자의 피폭저감 실현을 위한 합리적이고 구체적인 도구로서 그 가치가 크다고 할 수 있는데 이는 방사선 피폭을 저감하려는 일련의 행위 도입시 경제적, 기술적 측면에서 최적의 대안을 도출해내는 일에서부터 비롯된다고 할 수 있다[3]. 그러기 위해서는 현재 국내외에서 추진하고 있는 여러가지 피폭저감 대안들에 대해 ‘최적 방어’ 개념에 입각한 피폭저감 계획 및 수행절차의 확립이 필요하다[4].

방사선 방어 최적화는 ICRP 26 [1]에서 권고하고 있는 방사선 방어 체계의 3가지 기본 목표중의 하나로서 ALARA (As Low As Reasonably Achievable) 개념에 입각하여 개인선량 및 집단선량을 합리적으로 달성 가능한 한도 내에서 가능한 낮게 유지하려는 데 목적이 있으며 방사선 방어수단에 의해 방사선 피폭을 제어할 수 있는 모든 상황에 적용할 수 있다. 여기서 최적화 과정은 방사선 피폭관리에 있어서 무엇이 그리고 어떻게 합리적으로 달성가능한지를 결정하는 일련의 절차이며 최적화 조건에 합당한 방어수준의 선택은 다음과 같은 여러 요소를 고려하여 결정하여야 한다 [5].

- 관련 개인선량 한도
- 비용 및 선택 방어수준의 달성 난이도
- 기존 작업절차에 대한 영향 및 대안결정에
수반될 수 있는 다른 사회 경제적 영향

최적화에 이용하는 기법들의 종류는 여러가지가 있으며 일부는 경제학이나 공학분야에서 유래하는데, 의사결정을 위한 보조기법으로서 어떤 특정 기법을 이용한다는 것은 결정에 영향을 미치는 여러가지 가능한 기준 또는 목표에 대한 직·간접적인 가치판단을 의미하게 된다. 최적 방사선 방어 대안을 선정하기 위해 각 대안의 성능을 정량적으로 평가 분석하기 위한 기법으로서는 다음과 같은 4가지가 많이 쓰이고 있으며, 문제의

성격 및 목적에 따라 적당한 기법을 선택해야 한다[6,7].

- 비용-이득 분석
- 비용-효율성 분석
- 다속성 효용성 분석
- 다기준 우선성 분석

투자비용과 그 효과를 고려함에 있어서 정량적 분석 기법으로서 비용-이득 분석은 일반적으로 많이 이용되고 있으며, 이 기법을 실제 적용하는데 있어서 정량화하기 곤란한 인자까지 수용하는 데는 제한이 따르나 고려 대상의 방사학적 방어 인자가 단순하거나 그 수가 적은 경우 이 기법은 간편하고 적절한 의사결정 보조기법이 될 수 있다. 비용-효율성 분석은 단위선량 감소에 필요한 비용의 단위를 주로 쓰는데, ALARA 해를 구할 때 유용하다. 다속성 효용 분석은 비용-이득 분석에서 정량화 하기 곤란한 인자들의 도입을 가능케 하는 잇점이 있으며 분석 결과가 보다 객관적이기 위해서는 비용-이득 분석에서와 같이 가변 경제 변수에 대한 민감도 분석이 필요하다. 다기준 우선성 분석은 정성적 인자들을 주로 사용하므로 그 결과가 주관적일 위험이 있으므로, 정량적 분석과 병행하여 사용하는 것이 필요하다.

그런데, 방사선 방어 최적화는 기본적으로는 직관적 의사결정 과정 이므로 정량화 기법은 최적화에 실질적인 보조역할을 할 뿐, 이것만으로는 완전한 최적화의 수단은 될 수 없다. 따라서 최적의 방어대안 선정은 대부분의 경우 정성적 및 정량적 요소를 조합하여 수행하는 것이 필요하다. 의사결정 과정에서 이러한 정량화 기법을 이용할 때 주의할 점은 선택된 방어수준의 적정도나 그것을 달성하기 위한 체계의 만족도는 분석 과정에 있어서의 판단과 입력자료의 질에 크게 의존한다는 것이다. 그러므로, 이러한 판단과 입력자료의 변화에 따른 ALARA 해의 민감도를 평가하는 것이

필요한바, 이 민감도 분석은 의사결정에 있어서 주요 인자의 파악을 가능케 하고, 특히 문제가 복잡한 경우 접근을 더욱 용이하게 해준다.

원전 종사자의 방사선 피폭을 ALARA (As Low As Reasonably Achievable) 개념으로 저감시키기 위한 대안으로서는 각종 방사선원 저감화, 설비 및 작업방법 개선, 그리고 우수한 장비의 확보 및 운영과 방사선 관리제도 개선 등 여러가지가 있을 수 있다. 방사선 방어 최적화는 이러한 여러 가능한 대안의 성능을 관련 기준을 고려한 정량적 평가를 사용하여, 대안간 우선순위 부여와 최적 대안 선정에 이르는 일련의 과정이다[8,9].

본 논문에서는 지금까지 개발된 여러가지 정량적 의사결정 보조기법중에서 비용-이득 분석과 다속성 효용함수를 이용하여 국내 원전 피폭저감 대안에 대해 실제 적용해 봄으로써 개선효과를 분석하고 대안간 우선순위 부여 및 최적 대안의 선정작업을 수행하였다.

원자력 발전소의 방사선 피폭

국내 원전 종사자의 방사선 피폭실적 및 그 분석 결과는 다음과 같다. 표 1에서 보는바와 같이 전반적으로 해를 거듭함에 따라 피폭량은 감소 추세에 있으며 해외 원전의 평균치 수준을 유지하고 있는 실정이다[10]. 이는 안정된 설비운영, 방사선 방어 기술 향상, 그리고 꾸준한 작업방법 개선 등에 기인한다고 본다. 여기서 고리 1호기의 경우 평균 피폭선량이 518 Man-rem으로써 다른 호기보다 상대적으로 높은 편인데, 이는 가동년수의 장기화에 따라 설비의 노후화로 인해 피폭선량이 증가하였기 때문인 것으로 판단된다. 월성 1호기는 가압 증수로 원전으로서 타 호기에 비해 상대적으로 피폭선량이 낮은 편인데, 이는 핵연료 교체를 정상 운전중에 수행함으로써 정기 보수

표 1. 국내 원전 호기별, 연도별 피폭실적 ('86~'91)

(단위: Man-rem)

발전소	호기	'86	'87	'88	'89	'90	'91	평균
고리1	#1	635	-	794	595	461	107	518
	#2	239	246	181	-	143	73	176
고리2	#3	118	215	213	174	-	122	168
	#4	-	274	308	194	164	154	219
월성	#1	184	-	169	-	117	56	131
영광	#1	-	267	180	151	107	90	159
	#2	-	-	229	165	267	100	190
평	균	294	251	296	256	210	100	223

*울진 1,2호기 제외

표 2. 계획 예방정비중 주요 작업별 선량분포 (최근 6년간)

주요 작업	피폭선량 (man-rem)	점유율(%)	비고
증기 발생기 관련 작업	2131	36.4	50.7 (%)
핵연료 교체 작업	835	14.3	
일차계통 펌프 점검 정비	315	5.4	
일차계통 밸브 점검 정비	314	5.4	
가동중 검사	241	4.0	
기 타	2023	34.5	
계	5859	100.0	

*울진 1,2호기 제외

*고리 1호기 '91년도분 제외

기간이 다른 PWR 발전소보다 짧기 때문이다. 울진 1,2호기는 가동 초기단계로서 비교 대상에서 제외 하였다.

국내 PWR 원전의 경우 계획 예방정비 동안의 피폭선량이 전체선량의 상당 부분을 점유하며 표 2에서 보는 바와 같이 그 중에서도 증기발생기 검사 및 보수작업 그리고 핵연료 교체작업시의

피폭선량이 전체의 50% 이상을 차지하므로 이 분야에 대한 집중적인 피폭저감 노력이 필요하다.

표 2에서 보는 바와 같이 5개 분야 작업으로 인한 피폭선량이 전체의 65.5%를 점유하는 바, 증기발생기 관련 작업과 더불어 원자로 스테드볼트 결합, 해체 작업 그리고 세척작업등에도 조속한 신행 장비 도입등의 피폭저감 노력이 필요하다.

한편, 연도별 최대 방사선 피폭자의 선량 분포를 보면, ICRP 60에서 권고하고 있는 개인 연간 선량 2 rem 초과자 수가 발전소의 가동년수 및 연간 집적선량에 비례하여 증가하는 경향이 있으며 아직까지는 개인 연간선량 5 rem 제한 체계에 익숙하므로 현재로서는 보수인력 관리에 어려움이 따를 것으로 예상된다[10]. 그리고 연간 2 rem 초과하여 방사선을 받은 작업자의 대부분이 예방정비 기간에 발생되었으므로, 이 기간동안의 피폭저감화를 위해서는 현대화된 장비의 도입이나 작업방법 및 설비의 개선등 구체적인 노력이 필요하다. 참고로 외국의 선량제한 목표를 표 3에 요약해 놓았다[11].

표 3. 국가별 집적선량 제한 (연간)
(단위: Man-rem)

국 가	제한값	비 고
일 본	100	개량형 발전소의 목표
스위스	400	-
미 국	100	개량형 발전소의 목표
유 고	200	ALARA 제한값

국내원전 종사자의 피폭 원인을 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다:

- 노내 핵연료 손상에 따른 냉각재 계통 방사능 농도의 증가
- 증기발생기 튜브의 노후화
- 신행 보수장비 도입의 미흡

국내 원전 종사자들의 방사선 피폭량은 해를 거듭해 감에 따라 전반적으로 감소 추세에 있으며 해외 원전의 평균치를 유지하고 있는데 이는 꾸준한 작업방법의 개선, 방어기술 향상 등에 힘입은 바 크다고 할 수 있다. 그러나 일본이나 스웨덴 등과 비교하면 아직은 높은 수준이며, 특히 계획 예방 정비기간중 '증기발생기 관련 작업'이나 '핵연료 교체작업'과 관련한 피폭량이 상당한 바 이 분야에 대한 집중적인 노력이 필요하다[12,13]. 현재 우리나라의 원자력법이나 방사선 방어 관련 규정에 ICRP 60 권고 사항을 수용할 경우 기존의 방어체계에 상당한 변화가 수반될 것으로 예상되는 바 이러한 변화에 능동적으로 대처하기 위해서는 방사선 관리에 관한 장·단기 대책의 수립 및 시행이 절실하다[14~16].

피폭저감 대안의 최적화 분석

(1) 비용-이득 분석

비용-이득 분석 모델은 각 대안의 개선 효과를 정량적으로 분석하기 위해 필요하며 이 분석모델이 보다 현실적이기 위해서는 최적화의 기준으로서 비용-효율성과 함께 설비의 수명 기간 동안에 발생하는 총 이득을 고려할 수 있어야 한다. 또한, 발생시기가 서로 다른 모든 비용 및 이득을 타당하게 비교하기 위해서는 할인율 및 물가 상승율의 개념 도입이 필요하다[17]. 비용-이득 분석 모델의 종류로는 다음의 세 가지 정도를 들 수 있는데, 먼저 특정 대안의 도입에 따른 총 이득, B에 관한 식은 다음과 같다.

$$B = ({}_nD_2 - D_1) R + A_0 n - C \text{ [\$]} \quad \dots\dots(1)$$

여기서

$$R = \text{피폭비용 [\$ / Man-rem]}$$

$$n = \text{기기 상환기간 [yr]}$$

D_2 =연간선량 이득 [Man-rem/yr]

D_1 =설치시 피폭량 [Man-rem/yr]

A_0 =투자시점에서 인건비, 자재비, 훈련비, 보수비, 폐기물처분비, 전력대체 비용 등의 연간 총 이득 [\$/yr]

K =부금인자 [yr]

C =투자시점에서의 투자비 [\$]

NUREG/CR-4373[18]에서 제시한 대안의 경제성 평가 모델을 운전비용 및 선량이득의 할인여부에 따라 정리하면 다음과 같으며 여기서는 단위선량을 감소시키는데 드는 비용으로 계산한다. 먼저, 기본 모델의 경우, 투자비, 연간운전비 및 연간 선량이 고려될 뿐 기기의 수명기간동안 연간 발생하는 비용 및 선량을 할인하지 않는다. 여기서, 단위 선량을 줄이는데 드는 비용을 D 라고 하면,

$$D = F(C - A_0n) / ({}_nD_2 - D_1) \text{ [$/Man-rem]} \dots\dots(2)$$

$$F = (1+I)^Y$$

여기서

F =인플레이션 인자

I =물가 상승율 (투자시점과 해당년도 사이의 값)

Y =년수(투자시점과 해당년도 사이의 값)

다음으로는 현가화 모델이 있는데, 먼저 선량 비할인의 경우, 시간에 따른 비용의 변화분을 고려하며, 장래 운전비용을 자본의 실제가치를 반영한 할인율 d 를 사용하여 해당년도 가치로 환산한다.

$$D = F(C - A_0K) / ({}_nD_2 - D_1) \text{ [$/Man-rem]} \dots\dots(3)$$

$$K = \frac{(1+d)^n - 1}{d(1+d)^n} \text{ [yr]}$$

여기서

d =할인율

K =부금인자(n 년 동안 연간 1\$를 지불할 경우를 현가화한 값)

이 모델은 투자비와 운전비용에 같은 가중치를 부여하므로 기본 모델 보다는 개선된 모델이라고 할 수 있으며, 운전비용은 할인하였으나 선량이득은 할인하지 않았으므로 논의의 여지가 있다.

마지막으로, 현가화 모델 (선량 할인)의 경우, 장래 발생할 선량이득을 할인하는 데는 약간의 윤리적 문제가 따르나 발전소 운전시 선량의 가치는 건강에 대한 영향에 미치는 비용이 인력대체비용, 훈련 등 다른 요인에 의한 비용보다 훨씬 작아서 이러한 비용에 의해 지배되므로, 선량 비할인 모델의 운전비용에 적용한 할인율과 같은 율로 선량이득을 할인하는 것도 고려할 수 있다 [19].

$$D = F(C - A_0K) / (KD_2 - D) \text{ [$/Man-rem]} \dots\dots(4)$$

ALARA 개념은 방사선 피폭과 관련된 설계, 운전의 모든 분야에 적용되며 비용/이득 분석을 수행하여 이득이 되는 범위까지 피폭량을 줄이도록 한다는 것이다. 이를 위해서는 이미 제시된 피폭저감 방안에 대한 개선효과를 정량적으로 분석하여 최적 방어대안의 선정이 필요하다. 본 연구에서는 식(3)으로 주어지는 선량 비할인 현가화 모델을 이용하여 발전소 수명기간 동안에 발생하는 모든 비용 및 이득을 현가화하여 분석하였으며, 또한 가변성이 있는 발전소 수명, 피폭비용 및 할인율등에 대하여는 민감도 분석을 수행하였다. 대안별 비용/이득 분석을 수행하기 위해 가정한 주요 변수는 표 4와 같다[17].

여기서 기본분석을 수행함에 있어서 물가 상승률과 순 할인율은 일반적으로 사용되는 수치

표 4. 주요 변수값

구분	변수	수치
기본 분석	물가 상승률	년 8%
	발전소 수명기간	25년
	할인율	년 3.6%
	피폭 비용	\$1,000/man-rem
	운전 보수비용	기기 가격의 4%
민감도 분석	발전소 수명기간	25년, 30년, 35년
	할인율	3.6%, 4.0%, 4.3%
	피폭 비용	\$1,000, \$1,500, \$2,000/man-rem

로서 각각 8% 및 3.6%로 하였고 초기 투자비는 인건비 등을 제외한 기기 비용만을 고려하였으며 물가 상승율을 반영하여 1992년의 가격으로 현가화 하였다. 장비의 수명은 발전소의 수명과 동일하다고 가정하였고, 장비 설치시나 작업시 피폭은 고려하지 않았으며, 피폭비용으로는 10 CFR 50 Appendix I 의 지침인 1,000 \$/Man-rem 을 적용하였다. 또한 연간 이득은 보수적으로 연간 보수비만을 적용, 기기비용의 4%로 계산하였고, 작업시간 단축에 따른 인건비 절감효과는 초기 투자비등에 비해 매우 작은 값(2.3\$/시간) 이므로 무시하였다. 그리고, 여기서의 분석기준은 특정

표 5. 대안별 초기투자 비용 및 예상 피폭 저감량 ('91년도 기준)

구분	항목	초기투자비 (\$)	피폭저감량 man-rem/unit	비고
장비 개선	1. 증기발생기 노즐댐 및 토오킹 머신	225,000	6.3	
	2. 증기발생기 Man-way MST	143,750	2.0	
	3. 원자로 스테드볼트 신장기	475,000	2.8	
	4. 증기발생기 ECT 장비 (SM-10)	250,000	6.0	
	5. 원자로 스테드볼트, 너트 세척기	112,500	3.8	
	6. Co-No Seal 조임장치	62,500	2.0	
설비운전 개선	1. RTD by-pass loop 제거	9,125,000	24.4	
	2. RCP 개선 (seal spool piece)	10,000,000	1.0	

*주: 1 \$ = ₩800 적용 (1992.8 환율 기준)

표 6. 기본 비용-이득 분석 결과

구분	개선대안	\$/man-rem	총이득(\$)	비고
장비 개선	1. 원자로 스테드볼트, 너트 세척기	445	55,850	
	2. Co-No seal 조임 장치	470	28,250	
	3. 증기발생기 노즐댐 및 토오킹 머신	537	79,200	
	4. 증기발생기 ECT 장비 (SM-10)	626	63,000	
	5. 증기발생기 Man-way MST	1,081	(-) 25	
	6. 원자로 스테드볼트 신장기	2,550	(-) 95,300	
설비운전 개선	7. RTD by-pass loop 제거	5,622	(-) 2,565,500	
	8. RCP 개선 (seal spool piece)	150,336	(-) 3,455,000	

대안의 도입 전과 후의 개선효과를 비용과 이득 면에서 분석하는 것이다. 현재 기술적으로 적용 가능한 피폭 저감 방안을 열거하면 표 5와 같다 [20].

앞에서 제시한 각종 변수치를 이용한 기본 비용-이득 분석 결과를 단위 선량의 감소시 비용이 낮은 순서대로 정리하면 표 6과 같다. 분석 결과를 보면 개선 대안중 '원자로 스테드볼트 너트 세척기'가 비용면에서는 가장 경제성이 있는 대안으로 나타나나 총 이득면에서는 '증기발생기 노즐댐 및

토오킹 머신'이 가장 우수한 것으로 분석된다. 대안중 1, 2, 3, 4 항목은 어느정도 경제성이 있어 보이나 대안 5, 6, 7, 8은 일면 타당성, 경제성이 없는것으로 나타난다. 그러나 이는 비용 및 총 이득 계산시 관련 자료의 부족으로 대체전력 비용을 고려하지 않았기 때문이며 대부분의 개선 대안이 임계 경로상 (Critical path) 수행되는 작업이기 때문에 총 작업시간의 70%만 임계경로로 환산한다고 하더라도 대체전력 비용으로 인한 운전 이득 증가는 크게 증가할 것으로 추정되며,

표 7. 기기 수명기간 변화에 따른 비용-이득 분석

개선대안	기기 수명 (년)		25		30		35	
	\$/ Man-rem	총이득 ×10 ⁴ (\$)	\$/ Man-rem	총이득 ×10 ⁴ (\$)	\$/ Man-rem	총이득 ×10 ⁴ (\$)	\$/ Man-rem	총이득 ×10 ⁴ (\$)
1. 증기발생기 노즐댐 및 토오킹 머신	537	7.92	350	12.78	234	17.28		
2. 증기발생기 ECT 장비 (SM-10)	626	6.30	408	15.70	273	15.70		
3. 원자로 스테드볼트너트 세척기	445	5.59	290	8.34	194	10.92		
4. Co-No Seal 조임 장치	470	2.83	306	4.30	204	5.68		
5. 증기발생기 Man-way MST	1,081	-0.0025	704	2.09	470	3.95		
6. 원자로 스테드볼트 신장기	2,550	-9.53	1661	-4.52	1,110	-0.27		
7. RTD by-pass loop 제거	5,622	-256.55	3,661	-175.00	2,446	-108.05		
8. RCP 개선 (seal spool piece)	150,336	-345.50	97,920	-269.00	65,417	-208.50		

표 8. 할인을 변화에 따른 비용-이득 분석

개선대안	0.036		0.040		0.043	
	\$/ Man-rem	총이득 ×10 ⁴ (\$)	\$/ Man-rem	총이득 ×10 ⁴ (\$)	\$/ Man-rem	총이득 ×10 ⁴ (\$)
1. 증기발생기 노즐댐 및 토오킹 머신	537	7.92	580	7.29	611	6.84
2. 증기발생기 ECT 장비 (SM-10)	626	6.30	677	5.60	713	5.10
3. 원자로 스테드볼트너트 세척기	445	5.59	480	5.27	506	5.05
4. Co-No Seal 조임장치	470	2.83	508	2.65	535	2.53
5. 증기발생기 Man-way MST	1,081	-0.0025	1,167	-0.41	1,230	-0.69
6. 원자로 스테드볼트 신장기	2,550	-9.53	2,755	-10.86	2,902	-11.81
7. RTD by-pass loop 제거	5,622	-256.55	6,074	-282.10	6,398	-300.35
8. RCP 개선 (seal spool piece)	150,336	-345.50	162,432	-373.50	171,072	-393.50

따라서 단위선량 감소에 드는 비용은 대부분 (-) 값을 나타낼 것이며, 이는 선량 이득 뿐만 아니라 비용면에서도 이득이 있음을 의미하므로 총 이득도 크게 증가 할 것이다.

또한, 기본 분석에서 가변성이 있는 경제변수중 발전소 수명기간 및 할인율 변화에 의한 각 대안의 민감도 분석을 수행하였는데, 그 결과는 표 7과 8에 나타나 있다. 표에서 보는 바와 같이 각 경제변수의 변화에 따라 단위 선량 감소에 드는 비용과 총 이득의 절대값은 큰 변화를 나타내며, 특히, 대체전력 비용을 고려할 수 있다면 이 값은 더욱 증가할 것으로 본다. 그리고 대안간 우선 순위도 기본 분석의 경우와는 서로 다르게 나타났다.

전체적으로 대안간 우선순위 부여는 기본 분석 결과와 같으며 본 분석에서도 기본 분석에서와 같이 '중기발생기 노즐덤 및 토오킹 머신'이 가장 우수한 개선효과를 입증하므로 최적의 대안으로 선정된다. 그러나 여기서 간과해서는 안될 것은 만약 대체전력 비용이나 폐기물 처분비등 연간 총 이득 산출에 관련된 모든 인자들을 비용과 총 이득 계산시 고려할 수 있다면, 상기 분석결과는 달라질 수 있으며, 대안간 우선순위도 변할 여지가 많다는 것이다.

(2) 다속성 효용 분석

이 기법의 본질은 관련 인자에 대해 점수개념 또는 다속성 효용함수를 이용하여 대안을 선정하는 것으로서, 특히 이 효용함수는 반드시 선형적이어야 할 필요가 없는 것이 이 기법의 장점이며, 이러한 유연성은 비용-이득분석에서 금전향으로 정량화하기 곤란한 인자들의 도입을 가능케 한다. 그리고, 각각의 방어대안 j 와 관련한 인자들 n 의 다양한 효용을 나타내는 단일 효용함수 u_j 로부터 다속성 효용함수 U_j 가 구해진다. 즉,

$$U_j = \sum_{i=1}^n k_j u_j \quad \dots\dots(5)$$

여기서 k_j 는 각각의 인자 j 에 부여된 상대적 중요도나 가중치를 나타내는 Scaling constant 이다. 따라서 U_j 가 클수록 대안의 우선순위는 상승하며 분석적 해는 U 를 극대화 하는 대안이 될 것이다.

단순한 비용-이득 분석은 효용함수의 특수한 형태로 간주될 수가 있다. 이 효용 함수를 이용하여 분석적 해를 구하기 위해 우선 전항의 비용-이득 분석에서와 같이 방어 인자로서 방어비용과 집단선량만을 이용한 부분 효용을 구한 다음 이 값에 Scaling constant를 곱한 후 적분하여 총 효용을 구하고자 한다[5].

먼저 Scaling constant, $k(x)$ 와 $k(s)$ 는 다음 식으로 구할 수가 있으며

$$\frac{k(x)}{R(x)} = \frac{k(s)}{\alpha R(s)} \quad \dots\dots(6)$$

보통 $k(x)+k(s)=1$ 이 되도록 일반화 한다. 여기서, $R(x)$ 와 $R(s)$ 는 각각 방어비용과 피폭 저감량의 범위 값으로 \$9,937,500 및 24.4 Man-rem이며, α 값은 1,500 \$/Man-rem으로 가정하면 식(6)으로부터

$$\frac{k(s)}{k(x)} = \frac{1,500 \times 24.4}{9,937,500} = 0.0035$$

이며, 따라서

$$k(x) = 0.996, k(s) = 0.004$$

여기서 구한 Scaling constant를 이용하여 분석한 각 대안의 효용성은 다음 표 9와 같으며 각각의

표 9. 기본 다속성 효용분석 결과

대안	방어비용 ×10 ³ (\$)	선량이득 man-rem	partial utilities		utility
			u(x)	u(s)	
1. Co-No Seal 조임장치	62.5	2.0	1.000	0.043	0.996
2. 원자로 스테드볼트너트 세척기	112.5	3.8	0.995	0.120	0.992
3. 증기발생기 Man-way MST	143.8	2.0	0.992	0.043	0.988
4. 증기발생기 노즐댐 및 토오킹 머신	225.0	6.3	0.836	0.226	0.834
5. 증기발생기 ECT 장비 (SM-10)	250.0	6.0	0.811	0.214	0.809
6. 원자로 스테드볼트 신장기	475.0	2.0	0.585	0.043	0.583
7. RTD by-pass loop 제거	9,125.0	24.4	0.088	1.000	0.092
8. RCP 개선(seal spool piece)	10,000.0	1.0	0.000	0.000	0.000

표 10. 피폭 비용 변화에 따른 다속성 효용분석 결과

대안	Partial utilities		utility		
	u(x)	u(s)	\$1,500	\$10,000	\$20,000
1. Co-no seal 조임 장치	1.000	0.043	0.996	0.978	0.957
2. 원자로 스테드 볼트 너트 세척기	0.995	0.120	0.992	0.975	0.956
3. 증기발생기 Man-way MST	0.992	0.043	0.988	0.970	0.950
4. 증기발생기 노즐댐 및 토오킹 머신	0.836	0.226	0.834	0.822	0.808
5. 증기발생기 ECT 장비(SM-10)	0.811	0.214	0.809	0.797	0.784
6. 원자로 스테드 볼트 신장기	0.585	0.043	0.583	0.573	0.560
7. RTD by-pass loop 제거	0.088	1.000	0.092	0.108	0.129
8. RCP 개선(Seal spool piece)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

방어인자와 관련한 부분 효용성을 구할 수 있게 된다. 표 9의 분석 결과에서 나타난 바와 같이 가장 높은 효용성을 보여준 것은 'Co-No Seal 조임장치' 였으며 이는 이전의 비용-이득 분석 결과와는 다르며 대안간 우선순위도 서로 다르게 나타났다. 그리고 'RCP 개선 (Seal Spool Piece)'의 경우 총 효용면에서 가장 저조한 것으로 드러났다.

본 항에서는 가변 경제변수로 α 값을 10,000 \$/Man-rem 및 20,000 \$/Man-rem 으로 적용하여 Scaling constant, $k(x)$ 및 $k(s)$ 를 구함으로써 민감도 분석을 수행하였으며, 그 결과는 다음 표 10과

같다. 상기 분석 결과에서 α 값을 변경시킴으로써 효용성의 절대치는 조금씩 다르게 나타나나 대안간 우선순위는 기본 분석에서와 같다.

결론

본 연구에서는 원자력 발전소 운전중 종사자의 피폭저감을 위한 대안을 서술하고, 비용-이득 분석 및 다속성 효용 분석 기법등의 최적화 기법을 이용하여 대안간 우선순위의 결정에 관한 분석을 수행하였다.

먼저, 비용-이득 분석에서는 NUREC/CR-4373

[18]에서 제시한 선량 비할인 현가화 모델을 이용하였는데, 관련 자료의 부족으로 비용 및 총이득 계산시 대체전력 비용이나 폐기물 처분비 등 연간 운전이득 산출에 관련된 모든인자를 고려할 수 없어 보수적으로 연간 보수비만을 적용하였다. 대부분의 개선대안이 임계경로상에 수행되는 작업임을 감안한다면, 작업시간의 단축에 의한 운전이득은 크게 증가할 것이므로, 총이득 및 단위 선량 감소비용은 그 절대치가 크게 변할 것이며, 대안간 우선 순위도 변할 여지가 있다. 그러므로, 이러한 대체전력 비용이나 폐기물 처분비용을 구체화 시킬 수 있다면, 한층 더 타당성 있는 분석이 될 것이다.

그리고, 동일한 대안들에 관해 다속성 효용 분석을 수행하였는데, 그 결과는 비용-이득 분석의 경우와 약간의 차이를 보이고 있다. 따라서, 방어 수준의 적정도나 그것을 이루기 위한 대안의 도입에 있어서는 두 가지 이상의 기법을 적용하여 분석한 후, 그 결과에 대한 비교검토가 필요하다.

의사결정 과정에서 이러한 정량적 평가기법은 최적화에 실질적으로 도움을 주며, 완전한 최적화를 위해서는 의사 결정자는 정성적, 정량적 인자를 모두 고려하여 방어대안을 선정해야 한다. 결론적으로 원자력 발전소 운전중 방사선 방어 최적화를 위해서는 설계시부터 이를 충분히 고려하여야 하며, 이미 운전중인 발전소에서도 종사자들의 피폭저감을 위한 방안을 추진하는데 있어서, 투자비용에 대한 효과를 정량적으로 평가하여 타당성, 객관성을 확보하는 것은 중요한 의사결정 과정의 일부라고 할 수 있다.

참 고 문 헌

1. International Commission on Radiological Protection (ICRP), "Recommendations of the International commission on Radiological Protection", ICRP 26, Pergamon Press, Oxford (1977).
2. ICRP, "1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection", ICRP 60, Pergamon Press, Oxford (1991).
3. International Atomic Energy Agency, "Optimization of Radiation Protection" (Proceeding), IAEA, Austria (1986).
4. 방사선 관리 안전 지침, 제5장, "피폭선량 저감화", 한국 전력공사 (1989).
5. ICRP, "Cost-benefit Analysis in the Optimization of Radiation Protection", ICRP 37, Pergamon press, Oxford and New York (1982).
6. 장 창섭, "미국 NRC Region I, Implementation of the ICRP-60 and Macro-Management for Radiation Controls", 방사선 관리 Workshop 한국 전력 공사 (1991).
7. ICRP, "Optimization and Decision-making in Radiological Protection", ICRP 55, Pergamon press, Oxford and New York (1988).
8. European Scientific Seminar, Radiation Protection Optimization, "Present Experience and Methods" (Proceeding), Pergamon Press, Oxford and New York (1979).
9. European Scientific Seminar, Radiation Protection Optimization. "Advances in Practical Implementation" (Proceedings), Commission of the European Communities (1989).
10. 원자력 발전소 방사선 관리 연보, 한국전력 공사 (1991).
11. 권 오술, "ICRP 60 권고사항 국내 원자력법 수용에 대비한 사업소 대응 방안", 방사선 관리 Work shop 한국 전력 공사 (1991).

12. 원자력 발전소 표준화 설계를 위한 조사용역 최종 보고서, 제 16권, "피폭원 감소 방안 검토", 한국전력 기술 주식회사 (1987).
13. 이 경희, "방사선 방호에 관한 ICRP 권고 동향의 분석", 전력기술 통권 제 6호, 한국전력 기술 주식회사(1991).
14. 원자력 기술정보 제 121호, 한국 전력공사 (1991).
15. 원전 방사선 관리 업무개선 사례 발표자료, 한국 전력 공사 (1990).
16. 원자력 동향 ('91년 10월호) "개정된 10 CFR 20의 시행과 작업자 방호의 최적화", 원자력 연구소 (1991).
17. 송 중순, "원자력 발전소의 작업중 방사선 피폭 저감을 위한 최적화 연구", 방사선 관리 Work shop, 한국 전력 공사 (1991).
18. J. W. Baum, "*Compendium of Cost-Effectiveness Evaluations of Modifications for Dose Reduction at NPP*", NUREG/CR-4373, U.S. NRC, Washington (1985).
19. 원자력 발전소 표준화 설계를 위한 조사용역 최종 보고서, 제 17권, "피폭시간 단축 방안 검토", 한국전력 기술 주식회사 (1987).
20. 방사선량 저감화 종합대책 (안), 한국 전력 공사 (1991).

An Optimization Study on the Radiation Management in Nuclear Power Plants

Jong-Soon Song

Chosun University

ABSTRACT

It is a fundamental element of the nuclear power plant operation to assess exactly the occupational radiation exposure. And, according to recently published ICRP 60 recommendation, it is needed to reduce individual radiation exposure limit further. In this paper, an optimization technique was suggested for selection of alternatives for reducing occupational radiation exposure, and used in reviewing alternatives given by a plant utility. After the basic analysis, sensitivity analysis was performed to consider the variabilities of the economic variables. From the result, it was found that an option using steam generator nozzle dam and torquing machine was the best with respect to total benefits, and in case of multi-attribute utility analysis, an option using Co-No seal had the highest utility. Therefore, it was necessary to apply more than one technique together in optimization study and to consider qualitative factors, too.

key words: Occupational Radiation Exposure, Optimization, Cost-Benefit Analysis, Multi-attribute Utility Analysis.