

## S/G 관막음 작업 선량최적화를 위한 비용-이득 분석

### Cost-Benefit Analysis for S/G Tube Plugging Optimization

김형진, 송영일, 박헌국  
한국수력원자력(주) 영광 2발전소  
전남 영광군 홍농읍 계마리 514

#### 요 약

과거 피폭이력과 방사선측정자료를 토대로 피폭이력을 분석하고 4호기 5차 O/H작업시 단기간 고선량 피폭작업중 증기발생기 관막음 작업시 ROSA 장비의 사용으로 인한 선량 저감, 비용-이득 분석을 시도하였다. 그리고 이를 토대로 최적화 지점을 유도하였다. 또한 plugging 작업의 평균적 선량분포 산출하여 작업전체의 집단선량과 작업자의 선량 level별 분포를 토대로 작업 물량에 따른 방호비용을 평가하였다. 방호비용 외에 작업결과 신뢰도 증가와 작업인력을 대폭 감소에 따른 인건비 절감 등을 고려하면 그보다 훨씬 낮은 선에서 ROBOT을 사용하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

#### Abstract

Individual dose distribution was analyzed based on exposure history and radiation monitoring and dose reduction and cost-benefit analysis using ROSA-III for S/G tube plugging was carried out. Optimization was induced which based on this result. Calculating the average dose distribution, cost of protection was evaluated depending on number of spots which attribute to individual dose distribution and collective dose during whole work.. On account of the labor cost cut down, shortening term of work and improvement of working quality, application of Robot is resonable.

## 1. 서론

ICRP-60에서는 종사자의 방사선방호에 관하여 개인과 집단의 방사선피폭은 경제와 사회적 인자를 고려하여 최적화 할 것을 권고하고 있다[1]. 최근 ICRP는 최적화와 ARARA를 같은 개념으로 취급하고 가능한 피폭을 최소화할 것을 권고하고 있고, 우리나라의 원자력법도 이 권고를 따르고 있다.

우리발전소는 방사선피폭과 방사선측정에 관한 database를 구축하고 방사선피폭저감과 운영 중 방사선안전관리에 활용하고 있다[2][3]. 원자력발전소 종사자의 방사선피폭은 대부분 계획예방정비 기간 중에 집중되어 있다. 영광 2발전소의 경우 동 기간 중 피폭량이 90%를 상회한다[4]. 또 계획예방정비 기간 중 피폭량의 50% 이상이 증기발생기 점검 보수 작업에 집중되어 있다[5]. 2001년도 영광 4호기 5차 O/H시에는 예전보다 더 많은 양의 S/G Tube plugging과 In Core Instrument Seal Table 교체작업이 예상되고 있었다. 이 작업은 고 방사선피폭이 예상되어 O/H 작업에 대한 방사선피폭 최적화 방안을 검토할 필요가 있었다. 정량화 된 비용-이득 분석이 최적화의 바람직한 접근 방법으로 제시되고 있지만, 외국의 사례를 보더라도 방호비용 당 이득이 광범위한 영역에 걸쳐 분포하고 있어 절대적인 방법은 아니다. 물론 이는 그 나라의 다양한 사회적 기대수준과 경제적 환경 등에서 비롯된 것으로 보인다. 한 나라의 원자력발전소의 방사선방호 최적화는 부지, 설계 및 운전특성 뿐 아니라 사회, 경제적 요소 등을 고루 반영하여야 하는 특성 때문에 최적화의 정량적 기준은 발전소마다 상이 할 수밖에 없다. 실제로 최적화의 원칙은 제시되고 있지만 구체적 방법론과 기준에 대해서는 ICRP에서도 제시하지 못하고 있다. 우리나라의 경우도 예외는 아니어서 아직 최적화에 대한 구체적 기준은 마련되어 있지 않고, 방호비용-이득에 관한 기초조사가 미흡한 실정이며, 1995년 단위 피폭당 비용 방호비용이 제시된 적이 있으나, 실효성이 떨어지는 실정이다.

본 논문에서는 과거 피폭이력과 방사선측정자료를 토대로 피폭이력을 분석하고 4호기 4차 O/H작업시 단기간 고선량 피폭작업중 증기발생기 관막음 작업시 ROSA 장비의 사용으로 인한 선량저감, 비용분석 등의 분석을 시도하였다. 과거피폭자료를 토대로 외국자료를 바탕으로 비용효과 분석을 실시하여 최적화 지점을 유도하였다.

## 2. 종사자 집단선량 및 주요 작업별 선량분석

영광3,4호기는 지난 1995년 3월과 1996년 12월 각각 상업운전을 시작했다. 상업운전 이후 현재까지 각각 6회의 계획예방정비를 실시하였다. 상업운전 후 2000년까지는 12개월 주기로 O/H를 실시하였으나, 이후 18개월 주기로 변경하여 시행중이다. 2002년 현재까지 3호기는 6년차 O/H 를 완료하였고, 4호기는 10월중에 계획되어있다. <표 1>은 영광 2발전소 3호기와 4호기의 O/H 피폭이력을 나타내고 있다. 선량 분석 결과 4호기 1차와 2차

선량을 제외하면 O/H 기간 중 선량이 평균적으로 450 man-mSv ~ 480 man-mSv 수준을 보이고 있고, 정상운전 중 선량은 연간 50 man-mSv 수준을 보이고 있다. 계획 종사자 피폭선량은 대부분 계획예방정비 기간에 집중되어 있는데, 연간선량 대비 정상운전 중 차지하는 선량은, 운전 중 특별한 event 가 없으면, 전체선량의 약 5% 를 차지한 것으로 분석되었다.

표 1. 영광 3, 4호기 계획예방정비 기간중 작업자 피폭선량

	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	AVG
YGN2 #3	433.00	432.00	482.72	455.74	478.17		417.30	449.82
YGN2 #4	240.00	210.00		574.93	423.80	445.13		481.29
Nor. Op.	20.00	40.00	41.68	59.20	42.34	107.53		51.79
SUM	693.00	682.00	524.40	1089.87	944.31	552.66	417.30	982.90

계획예방정비 기간 중에는 핵연료 교체작업, S/G tube점검, RCP 및 각종 펌프 밸브점검, 가동 중 검사 등의 주요작업을 수행한다. 그림 1은 전체 O/H 기간 중 주요작업에 대한 평균선량을 보여주고 있다. 그 중 S/G점검작업이 전체선량의 37% 를 차지하고 있다. S/G 점검작업은 Nozzle dam 설치 및 제거, Tube ECT 및 Plugging 작업 중에 받는 선량이 대부분을 차지하고 있다. 특히 Tube Plugging 작업은 Plug Tube의 개소가 전체 선량을 좌우했다.

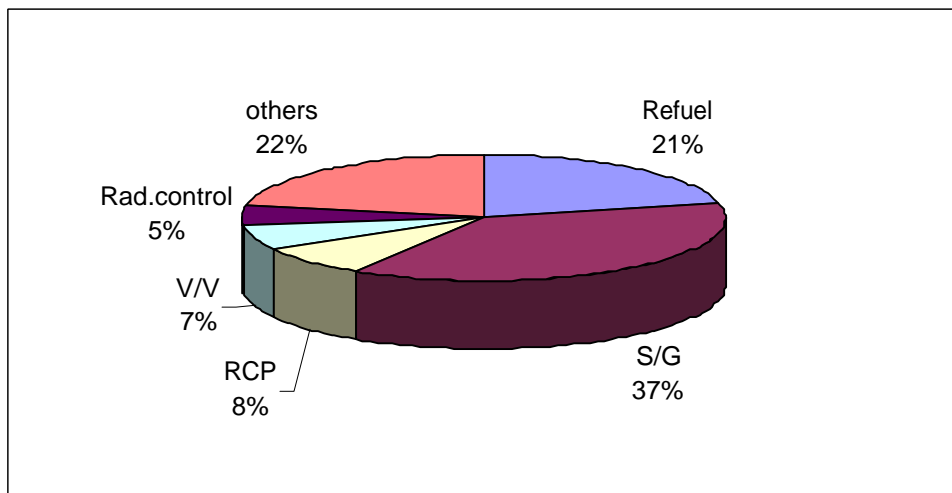


그림 1. 계획예방정비 주요 작업별 피폭선량

4호기 5차 O/H작업 계획에는 S/G관련작업, ICI Seal Table교체작업 등이 단기간에 고 방사선을 받는 작업이었고, Refueling, ISI, V/V 작업등의 일상적인 작업등이 계획되어 있었다. Tube Plugging은 매년 증가하여 #4-5차 O/H 시에는 60 ~ 80 개소의 plugging 이 계획되어 있었으며, 선량은 300 man-mSv이상이 예상되었다. 또 ICI Seal Table교체 작업은 손상된 Seal housing을 교체하는 작업으로 Reactor cavity에서 하는 작업으로 역시 180 man-mSv이상의 선량이 예상되었다.

### 3. S/G 관막음 작업 종사자 선량분포

1999년도와 2000년도에 각각 38개소와 50개소의 manual plugging을 실시하였고, 작업 선량은 185 man-mSv와 112 man-mSv, 개인별 선량분포는 표 2에서 보여주는 바와 같이 3 mSv ~ 5 mSv에 가장 많이 분포하고, 또 동 작업을 위해 동원된 인력은 각각 96명과 60명으로 여타작업에 종사하는 인력을 소집하였다. 이 인력은 해당 tube를 marking-cleaning-sizing-rolling 등의 작업순서별로 mock-up training과 특수방사선 교육을 거쳐 작업에 투입하였다. 이처럼 총 작업선량이 과다하고 개인선량 측면에서 과다할 정도는 아니지만 여타작업에 비해 많은 선량을 유지하고 있고, 많은 인력이 동원되어 다른 작업공정에도 지장을 유발하고 있었다. 또한 지속적으로 Tube plugging 개소가 증가되고 있는 문제점도 있다.

표 2. 영광 4호기 계획예방정비 기간중 관막음 작업시 개인선량 분포

Dose distribution in #4 tube plugging											
년 도	Indi. & collective dose				Dose distribution (person)						
	avg. ind. (mSv)	max. ind (mSv)	CD (man- mSv)	Worker (person)	~ 1mSv	~ 3mSv	~ 5mSv	~ 8mSv	~ 10mSv	~ 12mSv	12mSv ~
98	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
99	1.94	7.04	185.88	96	13	70	12	1			
00	1.87	4.68	111.98	60	16	35	9				

그림 2는 O/H 기간 중 일일단위 피폭선량을 보여준다. 단위 작업으로 고 선량작업은 peak를 치기 때문에 방사선관리 측면에서 최적화해야 할 대상작업을 바로 구분할 수 있다. 그림에 나타난 바와 같이 Nozzle dam 설치 및 해체 작업, tube plugging 작업, 그리고 seal housing inspection 작업이 선량 최적화 대상작업으로 나타난다.

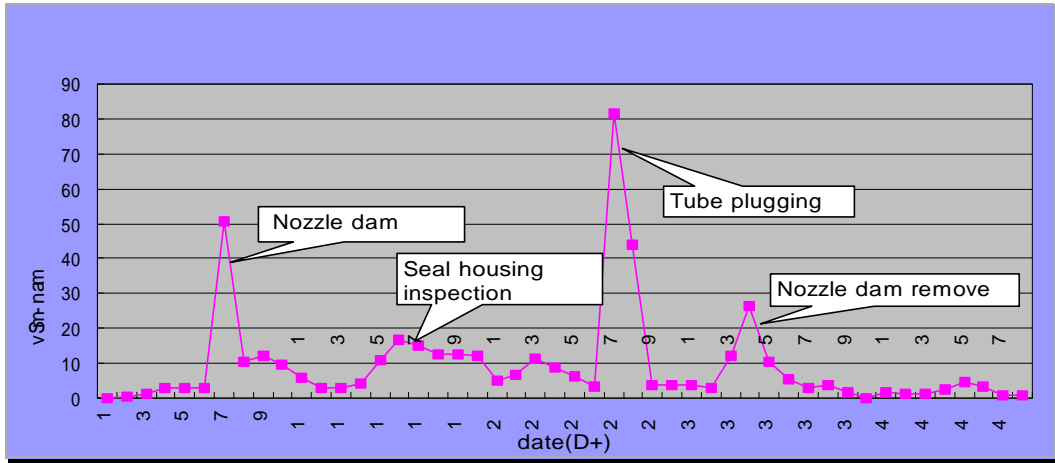


그림 2 영광 4호기 4차 계획예방정비 1간중 일일 집단선량

#### 4. S/G Tube plugging 비용-효과분석

최적화는 방사선피폭을 가능한 낮게 유지하기 위해 인적 물적 자원을 합리적으로 배분하는 것이다. 최적화에 관한 다양한 분석tool이 제시되고 있지만 가장 합리적이고 경제적인 tool 은 비용-효과 분석이다. S/G 의 Tube plugging 작업 선량의 최적화 수단으로 제기된 원격조정 robot 활용여부에 대해 2001년 영광 4호기 5차 O/H시 ROSA 장비의 사용으로 인해 유도된 기초자료를 바탕으로 비용효과 분석을 실시하였다. 표 3에서는 4호기 5차 O/H에서 S/G 관막음 작업에서 이용된 Robot 장비와 이전 O/H시 S/G 관막음 작업에서 사용된 장비에 대한 특성을 보여주고 있다.

표 3. ROSA-III와 수동장비의 특성비교

구분	ABB-Manual Tool	ROSA-III
제작사	ABB	Westinghouse
보유회사	고리1, 영광2	KPS(원전정비센터)
장비 구동방식	Service Air	Electromotor
장비설치	S/G 수실 밖에서 Line-up	수실내를 Rail을 따라서 이동 후 Tube Sheet에 부착
작업방법	수실내에서 작업자가 직접 작업 수행	원격조정을 통한 Robot 작업수행
작업특성	적은 수의 세관 관막음에 유리	많은 수의 세관작업 및 Repair에 유리

최적화를 검토한 배경은 80 ~ 90여명의 작업자가 고 선량의 S/G CHAMBER 내부작업과 체내피폭 오염 가능성, 단시간에 높은 집단선량을 받는다는 방사선적 조건을 고려해야 했다. 또 보수부서에서 작업인원을 총동원하여 작업을 실시함에 따른 여타작업에 미치는 공기지연요소 등을 고려하여야 했다.

동 작업에 대한 집단선량과 개인별 선량분포를 토대로 Extended cost-benefit 분석을 실시하였다. 동 분석은 IAEA safety report와 NRPB R-120, CEPN-R-254에서 제시한 Monetary value of the collective dose (man-Sv) 와 Monetary value of the collective dose depending on the level of annual individual dose를 사용하였다[6][7].

피폭저감 및 작업능률 향상을 위해 ROBOT사용에 대한 논란이 있었고, 사용여부를 판단할 만한 근거를 마련키 위해 IAEA에서 제시한 비용효과 분석 방법중 집단선량과 개인선량 level 별 분포에 관한 위해비용을 평가하였다[8]. 선량준위에 따른 집단선량 및 개인선량은 기관 및 사업자에 따라 서로 다르게 권고되고 있다. 본 논문에서는 사업자(발전소)에 대한 금전가를 채택하여 평가하기로 하였다. 위해비용 계산식은 다음과 같다.

$$Y = a \times S + \sum_i b_i \times S_i$$

$a$  : a cost assigned to unit collective dose(\$/man-Sv)

$\beta_i$  : the additional value assigned to a unit collective dose in the  $i$  th group to take into account the subjective aspects of health detriment

$S_i$  : the collective dose originating from the  $i$  th group

그리고 4호기 5차 O/H시 관막음 작업의 개인선량 분포는 표 4에서 보여지는 것과 같다.

표 4. 영광 4호기 계획예방정비 기간중 관막음 작업시 개인선량 분포

Dose distribution in #4 tube plugging											
년 도	Indi. & collective dose				Dose distribution (person)						
	avg. ind. (mSv)	max. ind (mSv)	CD (man- mSv)	Worker (person)	~ 1mSv	~ 3mSv	~ 5mSv	~ 8mSv	~ 10mSv	~ 12mSv	12mSv ~
01	1.106	6.1	38.71	35	25	7	2	1			

표 4에서 알 수 있듯이 ROSA 장비의 사용은 집단선량 및 개인선량의 감소뿐만 아니라 개인선량 분포도 많은 부분 감소된 것으로 나타나고 있으며, 작업자 수에 있어서도 3,4차 O/H 기간의 동 작업에 비해서 현저하게 감소된 것을 알 수 있다. 따라서 이러한 이익에 부가하여 미국, 캐나다 및 스페인에서 사용되고 있는 금전가 계수와 영광 4호기

계획예방정비기간중 증기발생기 관막음 작업의 피폭이력을 이용하여 집단선량과 개인선량분포에 대한 방호비용을 산출해 보았다.

표 5, 6은 방호비용을 산출하기 위한 미국, 캐나다, 스페인의 금전가 계수를 보여주고 있다.

표 5. 집단선량에 대한 위해비용

국가 및 기관	발전소	US \$ 위해비용(비용/man-Sv)
캐나다	Gentilly	750,000
스페인	Asco,1994	2,000,000
미국	90% of the reactor	최소 500,000 최대 2,810,000 중앙값 1,200,000 평균값 1,000,000

표 6. 개인선량에 대한 위해비용

국가 및 기관	발전소	US \$ 위해비용 (비용/man-Sv)
캐나다(2000)	Darlington 작업자에 따라 상이함	일반종사자 150,000 보수작업자 1,130,000
스페인(1994)	연간 집적 선량에 따라 변함	< 3man-Sv/yr.unit, 3년평균 667,000 > 3man-Sv/yr.unit, 3년평균 667,000
미국(1993)	South Texas	<10mSv 500,000 >10mSv 2,500,000

4호기 5차 O/H 기간중 증기발생기 관막음 작업의 기초자료를 바탕으로 3차 및 4차 대비 저감된 비용을 산출해 보았다. 앞서 언급한 금전가 계수와 4호기 5차 O/H 기간의

집단선량 및 선량분포 등을 고려해 저감되는 방호비용을 살펴본 결과는 표 7과 같다. 물론 우리나라와 사회적, 경제적 여건등이 서로 상이하지만, 간접적으로나마 ROSA 장비의 사용으로 감소되는 선량의 비용-분석은 상당부분 저감되는 것으로 판단된다.

표 7. ROSA 장비 사용시 절감되는 방호비용

	최대	최소	평균
캐나다	-	-	US\$ 234,225
스페인	-	-	US\$ 294,340
미국	US\$ 877,563	US\$ 156,150	US\$ 312,300

## 5. ROSA-III 장비 사용의 타당성 검토

단위 작업별 집단선량에 대한 위해비용을 평가하기 위해, 과거 Tube plugging 작업 시 작업물량과 피폭선량을 토대로 1개소 plugging 당 평균작업시간을 산출하고, 작업장소에서 시간당 피폭 선량률을 산출하였다. 또 보수부서에서 작업개소에 따른 투입인력을 곱하여 단위작업의 집단선량을 구하였다. 다음으로 개인별 선량분포에 따른 선량 준위별 위해비용을 평가하기 위해, 과거 피폭이력을 토대로 plugging 작업의 평균적 선량분포를 구하였다. 작업전체의 집단선량과 작업자의 선량 level별 분포를 토대로 작업 물량에 따른 방호비용을 평가하였다. 작업기간 동안 ROBOT을 임대하여 사용하는데 필요한 비용이 약 142,000\$ 수준으로 robot 사용으로 인한 피폭저감량이 이 수준을 유지해야 한다. Robot 사용시 피폭량 기준을 35man-mSv 수준으로 하면 위해비용이 약 70,000\$이므로, 최적 위해비용은 210,000\$로 관막음 개소로 환산하면 약 35 ~ 45개소 수준이다. 즉 45 spot 정도의 관막음 시 robot을 사용하는 것이 경제적인을 알 수 있다. 그러나 방호비용 외에 작업결과의 신뢰도 증가와 작업인력을 대폭 감소에 따른 인건비 절감 등을 고려하면 그보다 훨씬 낮은 선에서 ROBOT을 사용하는 것이 타당한 것으로 판단된다.



표 8. 작업자에 대한 평균작업시간 및 선량분포

spots	spot/min	dose rate (mSv/hr)	Dose distribution (%)				
			~ 1mSv	1 ~ 3mSv	3 ~ 5mSv	5 ~ 8mSv	8 ~ 10mSv
avg	3.54	0.73	21	65	12	1	1
avg dev.	0.31	0.08					

표 9. 관막음 수에 따른 작업시간 및 선량분포

spot	working time (min)	dose (mSv)	No. of workers	Dose distribution (person) for basic				
				1 mSv	3 mSv	5 mSv	8 mSv	10 mSv
20	70.8	51.68	38	8	25	5	0	0
40	141.6	107.37	52	11	34	6	1	0
60	212.4	155.05	76	16	49	9	1	0
80	283.2	206.74	96	20	62	12	1	0
100	354	258.42	124	26	81	15	1	0
120	424.8	310.10	160	34	104	19	2	1
140	495.6	361.79	180	38	117	22	2	1

표 10. 관막음 개소당 방사선 방호비용

spot	Canada	Spain	USA
20	US\$97,166	US\$137,841	US\$87,863
40	US\$194,332	US\$275,682	US\$175,726
60	US\$291,498	US\$413,524	US\$263,588
80	US\$388,664	US\$551,365	US\$351,451
100	US\$485,830	US\$689,206	US\$439,314
120	US\$582,996	US\$827,047	US\$527,177
140	US\$680,161	US\$964,889	US\$615,040
160	US\$777,327	US\$1,102,730	US\$702,902
180	US\$874,493	US\$1,240,571	US\$790,765

## 6. 결론

2001년도 영광 4호기 5차 O/H 작업의 증기발생기 관막음 작업의 비용-이득 분석을 통하여 ROSA 장비 사용의 최적화 지점을 도출해 보았다. 아직은 우리나라에 금전가 계수에 대한 정확한 기초자료와 방호비용 산출에 있어서의 현실적인 자료들의 부족으로 인해 외국의 자료를 인용하여 방호비용을 계산하여 최적화 지점을 도출하였지만, 향후 지속적인 연구개발을 통하여 국내의 사회적, 경제적 환경을 고려하여 실질적인 금전가 비용의 산출은 이러한 비용-이득 분석을 통하여 국내 원자력발전소의 신기술 및 새로운 설비 도입에 많은 도움이 될 것으로 판단된다.

또한 증기발생기 관막음 작업뿐만 아니라 O/H시 고 선량 작업에 대한 피폭이력분석 및 작업공정 개선, 작업시 Monitoring을 통한 결과의 D/B 등은 후속 O/H시 Feedback을 통하여 지속적으로 방사선 피폭 및 작업절차를 최적화하는데 좋은 도구로 활용될 수 있다고 여겨진다. 아직 국내에는 도입되지 않았지만, 선량제약치는 선량한도와 달리 개인과 집단의 선량 최적화를 달성하기 위한 도구로 주변의 여러 가지 상황에 따라 합리적으로 달성 가능한 한도 내에서 낮게 설정되도록 ICRP는 권고하고 있다. 따라서 과거 작업이력, 집단선량, 소요비용 등을 기반으로 D/B를 구축한 후 비용-효과 및 비용-이득 분석 등을 통한 새로운 설비 도입, 작업절차 개선 등은 자율적인 선량제약치를 운영할 수 있는 하나의 방법으로 제시될 수 있을 것이다.

## 7. 참고문헌

1. International Commission on Radiological Protection, 1990 Recommendation of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, Pergamon Press, 1990
2. NRS: Database for the occupational Exposure management of nuclear power plant, Nuclear Radiation System, KHNP, 1996
3. RPS: Database for the radiation survey and measurement of Young Gwang Nuclear Power Station #2, Radiation Protection System, 2001
4. 방사선관리연보, 한국수력원자력(주), 1996-2001
5. 방사선안전관리 결과보고서, 영광 제2발전소, 1996-2001
6. CLARK, M., FLEISHMAN, A., WEBB, G., Optimization of radiological protection of the public, a provisional frame work of the application of cost-benefit analysis to normal operation, NRPB R-120, Didcot, 1981
7. LEFAURE, C., Monetary value of the person-Sivert-From Concept to Practice : The findings of an International Survey, CEPN-R-254, Paris, 1998
8. Optimization of radiation protection in the control of occupational exposure