

원전 계획예방정비기간 고피폭 접촉작업에서 방사선작업종사자의 말단선량 평가 현장시험

김희근, 공태영
한전 전력연구원

2009년 12월 18일 접수 / 2010년 4월 28일 1차수정 / 2010년 5월 13일 2차수정 / 2010년 5월 14일 채택

원전 계획예방정비기간 증기발생기 수실작업, 가압기 전열관교체 또는 압력관피더 제거작업 지역 등은 높은 방사선량을 보이는 지역으로, 짧은 시간 동안의 작업으로 작업종사자는 높은 피폭을 받을 가능성이 있다. 특히, 방사성물질과 접촉하는 손 부위는 높은 피폭이 일어날 수 있다. 이런 점을 고려하여 국내 가압중수로원전과 가압중수로원전의 계획예방정비기간 중 증기발생기 수실 노즐댐 설치와 제거작업, 원자로 냉각재펌프 보수작업, 원자로헤드 보수 및 검사작업 등과 같은 고피폭 접촉작업에서 방사선작업종사자의 말단선량을 측정하기위한 현장시험을 실시하였다. 여기에 참여한 작업종사자는 가슴과 등 부위에 일상적인 절차에 따른 복수선량계를 패용한 것 이외에 손목에 개인선량계를 추가로 패용하였고, 손가락 부위에는 말단선량계 (Extremity dosimeter)를 패용하였다. 그 결과, 손가락이 받는 등가선량은 각각 손목이 받는 등가선량 및 가슴 또는 등 부위가 받는 등가선량과 일정한 비율로 평가됨을 확인하였다.

중심어: 고피폭 접촉작업, 표준 및 심부선량, 말단선량계, 증기발생기 보수작업, 압력관 피더제거작업, 고에너지 광자

1. 서론

국내 원전에서 방사선작업종사자의 피폭방사선량은 열형광선량계(Thermoluminescent Dosimeter: TLD)를 이용하여 월단위로 측정하여 선량한도를 초과하는지 확인하고 있다. 이러한 TLD는 방사선작업종사자가 받을 수 있는 피폭방사선량을 적절히 측정할 수 있도록 설계되었고, 피폭방사선량 측정과 평가과정에서 법적으로 요구되는 신뢰도를 준수하고 있다[1]. 한편 방사선작업종사자의 선량한도(Dose limits)로서 유효선량에 대해 5년간 100 mSv를 선량한도로 정하고 있다[2-4]. 한편 인체조직에 대한 등가선량(Equivalent dose) 한도로 수정체(Lens of the eye)는 150 mSv로 정하고 있으며, 피부(Skin)에 대해서 500 mSv를 선량한도로 정하고 있다[2-4]. 또한 손과 발(Hands and feet)이 받는 등가선량, 즉 인체 조직의 말단선량에 대해 500 mSv를 선량 한도로 정하고 있다[2-4].

원전 계획예방정비기간 증기발생기 수실작업, 가압기 전열관 교체작업 또는 가압중수로원전의 압력관 피더(Pressure tube feeder) 제거작업 등은 높은 방사선량을 나타내는 구역이다. 특히 이들 작업은 방사성물질과 매우 근접하여 작업이 이루어지기 때문에, 비교적 짧은 시간 작업에도 불구하고, 높은 피폭을 받을 가능성이 있다. 따라서 이러한 고피폭작업에서는 가슴과 등 부위에

각각 개인선량계를 패용하여 원전종사자가 받는 선량을 적절히 평가하고 있다[5]. 한편 계획예방정비과정에서 방사성물질과 접촉가능성이 높은 손이 고피폭을 받을 수 있다. 이에 따라 미국원자력발전자협회(Institute of Nuclear Power Operations : INPO)나 세계원자력발전자협회(World Association of Nuclear Operators : WANO)등에서 발간한 원전종사자 방사선관리 지침에 따르면 말단선량계를 이용하여 손과 발이 받는 등가선량을 평가하도록 권고하고 있다[6,7].

이러한 점을 고려할 때 원전 계획예방정비기간 방사선작업종사자의 손에 말단선량계를 패용하여 이들 부위에 대한 등가선량 현황을 파악해볼 필요가 있다. 본 논문은 원전 고피폭 접촉작업에서 말단선량계를 패용하여 시범적으로 손가락이 받는 말단선량을 평가하였다. 이를 위해 원전 계획예방정비기간 원전종사자의 가슴, 등, 손목 그리고 손가락에 TLD를 패용하여 입사되는 방사선의 에너지와 말단선량을 측정하는 현장시험을 실시하였다.

2. 재료, 방법 및 결과

가. 말단선량계 소자보정과 반응도

국내원전에서는 종사자의 피폭방사선량을 측정하기 위해 Panasonic과 Harshaw 등 두 종류의 TLD와 판독시스템(Reader system)을 갖추고 있다[8]. 고리 1발전소, 월성

책임저자 : 김희근, hkkim@kepri.re.kr, 한전 전력연구원
대전시 유성구 문지동 103-16

1발전소, 영광 1발전소, 영광 2발전소, 울진 3발전소에서 Panasonic TLD 시스템을 보유하고 있고, 고리 2발전소, 월성 2발전소, 영광 3발전소, 울진 1발전소, 울진 2발전소에서는 Harshaw TLD 시스템을 갖추고 있다[8]. 따라서 이번 현장시험에는 Harshaw EXTRAD와 Panasonic UD-807 말단선량계가 이용되었다[8]. 이들 국내원전에서 보유하고 있는 말단선량계에 대한 보다 상세한 내용은 대한방사선방어학회의 논문 “원전종사자의 말단선량 평가를 위한 고피폭 접촉 방사선장 특성분석”에 기술되어 있다[9].

한편 이들 말단선량계는 현장시험에 사용하기에 앞서 열형광소자의 반응도를 보정하는 소자보정인자(Element correction factor or element correction coefficient) 산출과정을 거쳤다. 이러한 소자보정인자 산출은 현재 국내원전에서 종사자의 심부선량 측정에 사용되는 전신선량계의 소자보정인자 산출과정과 동일한 방법을 적용하였다. 구입한 말단선량계에 대해 기준용 선량계(Reference dosimeters)를 제외한 대부분 선량계에 대해 소자보정인자를 산출하였다. 그 결과 대부분의 선량계가 10% 이내의 소자반응도를 나타냈다[8]. 그림 1에 Harshaw EXTRAD 선량계의 소자보정인자 산출결과를 나타내었다.

이들 말단선량계 중에서 소자보정인자가 ±10%를 넘지 않는 선량계를 선별하여 표준방사선장에 대한 조사시험을 수행하였고, 반응도를 산출하였다[8]. 말단선량계의 반응도 산출에는 한국원자력연구원이 보유하고 있는 국제기관 등과 소급성이 유지되는 표준방사선장과 국제표준기구(International Organization for Standardization: ISO)와 미국국립표준연구소(National Institute of Standard and Technology: NIST) 규격의 손가락 팬텀(Finger phantom) 등을 이용하였다. 그림 2에 반응도 시험에 이용된 손가락팬텀을 나타내었다. 표준방사선장의 저에너지 광자로 M30, M60, M100, M150, H150 방사선장 등이 이용되었으며, 고에너지 광자로 ¹³⁷Cs과 베타선으로 ⁹⁰Sr/⁹⁰Y 선원 등이 이용되었다. 표준방사선장 조사시험과 반응도 산출과정은 2회로 나누어 수행되었다. 표 1에 Panasonic UD-807 말단선량계의 국내 표준방사선장에 대한 반응도 시험 분석결과를 나타내었다.

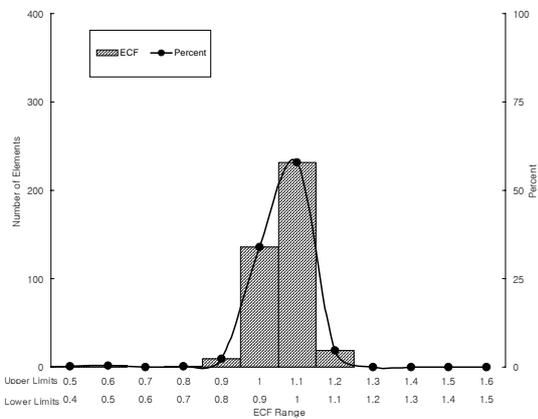
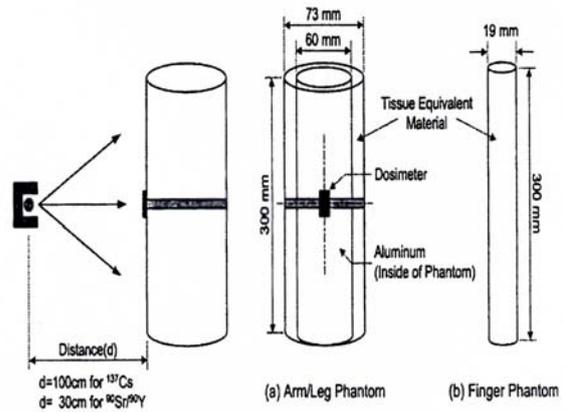
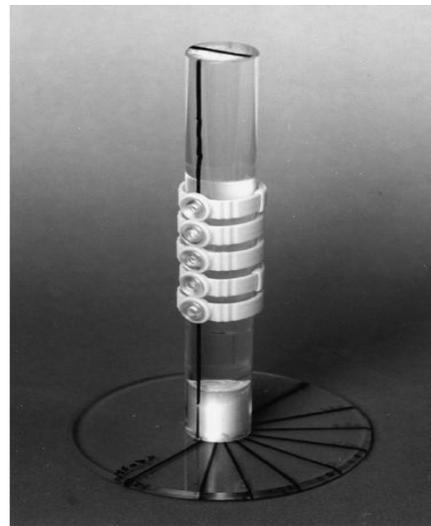


Fig. 1. Distribution of ECF generation for Harshaw EXTRAD dosimeter.



(a) schematic diagram of phantoms



(b) finger phantom



(c) wrist phantom

Fig. 2. Phantom geometry.

Table 1. Comparison of Dose Conversion Factors(DCFs) Results for Panasonic UD-807 Extremity Dosimeters with Those of KAERI, ANSI and the Manufacturer.

Beam Code	KAERI	ANSI (N13.32-1995)	Manufacturer's response*	Response on the field test for Panasonic UD-807	
	Finger Phantom	Finger Phantom			
High-energy photon					
¹³⁷ Cs	0.98	0.98	0.94	0.87	0.91
X-ray					
M30 (20 keV)	0.95	0.95	0.45	0.60	0.55
M60 (35 keV)	0.98	0.98	0.72	0.68	0.62
M100 (53 keV)	1.01	0.99	0.77	0.69	0.64
M150 (73 keV)	1.03	1.01	0.84	0.69	0.64
Beta-ray					
⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y	-	-	1.19	1.08	1.00

* Manufacturer's (Panasonic Industrial Company) response for extremity dosimeter was calculated using X-ray beam code based on the ANSI N13.11-1983 (American National Standard for Dosimetry - Personal Dosimetry Performance - Criteria for Testing). Thus, it is difficult to compare directly between the DCF results from these experiments and the responses provided by manufacturer because X-ray beam used for the tests in this study and the calculation of response by manufacturer was not identical. However, it is possible to estimate the approximate tendency of DCFs which showed similar results.

나. 말단선량계 지급조건 분석

국내원전에서는 방사선작업종사자의 피폭방사선량 평가를 위한 개인선량계는 방사선관리구역에 출입하는 경우 모든 원전종사자에게 지급된다. 한편 높은 선량을 지역, 즉, 방사선량을 1 mSv⁻¹ 인 조건이나 또는 신체 부위별로 방사선량의 차이가 30% 이상인 경우에 대해 단일작업에서 선량한도의 10% 수준인 2 mSv 이상 피폭을 받을 것으로 예상되는 자를 대상으로 복수선량계를 지급하고 있다[5].

한편 국내원전에서는 종사자의 전신선량 평가 외에 손과 발에 대한 등가선량 측정을 위해 Panasonic과 Harshaw 등 2종류의 말단선량계를 이용하고 있다. 이러한 말단선량계를 이용함에 있어 말단선량계 지급조건이 2009년 이전에는 통일된 기준이 정립되거나 수립되어 있지 않았다[8]. 즉, 통상 손과 발의 등가선량이 유효선량보다 높거나, 전신선량의 2배 이상 피폭이 예상될 때, 1회 5 mSv 이상 피폭을 받을 것으로 예상될 때 또는 단일작업으로 50 mSv 이상 피폭이 예상될 때 등 일관성이 부족하게 말단선량계를 지급하였다[8].

따라서 본 논문에서는 이러한 국내외 말단선량계 지급조건에 대해 다양한 검토와 의견 수렴과정을 거쳤다. 특히 주선량계 외에 추가적으로 지급되는 복수선량계의 지급조건인 선량한도의 10% 이상 피폭이 예상될 때 지급조건 등도 병행하여 검토하였다. 최종적으로 방사선작업으로 말단에 대한 등가선량 한도의 10% 이상 피폭을 받을 것으로 예상될 때 말단선량계를 지급하는 것으로 결정하여 현장시험을 수행하였다. 한편 한국원자력안전기술원에서도 최근에 제정된 개인선량계 지침에서 말단선량계는 1회 25 mSv 이상 피폭될 것으로 예상되거나 또는 단일작업으로 50 mSv 이상 피폭될 것으로 예상될

때 지급하는 것으로 결정되었다[10]. 이러한 점을 고려해 볼 때 선량한도의 10% 수준의 피폭이 예상될 때 말단선량계를 지급하는 것은 적절한 것으로 판단되었다.

다. 고피폭 접촉작업의 방사선장 특성분석

국내 원전종사자의 방사선피폭은 대부분 원전 계획에 방정비기간 중에 수행되는 방사선작업으로부터 발생하고 있다[11]. 원전의 대표적인 고피폭 방사선작업으로는 증기발생기 수실내 노즐담 설치와 제거작업, 원자로 냉각재펌프 보수작업, 원자로헤드 보수 및 검사작업 등을 들 수 있다. 또한 월성원전의 압력관 교체작업 등을 들 수 있다. 이런 점을 고려하여 말단선량계의 현장시험도 이러한 고피폭 작업을 대상으로 이루어졌다.

말단선량계 현장시험은 고피폭접촉 작업에서 방사선작업종사자의 말단부위에 입사하는 방사선의 종류와 에너지를 확인하고, 말단부위가 받는 등가선량을 파악하기 위한 두 가지 목적으로 수행되었다. 이들 현장시험에 참여한 방사선작업종사자는 고피폭작업이 이루어지는 실제 환경에서 가슴과 등에 복수선량계와 전자선량계를 원전 방사선관리 절차에 따라 패용하였으며[5], 손목에는 복수선량계와 동일한 개인선량계를 패용하였다. 복수선량계는 고피폭 작업조건에서 복수선량계 지급절차에 따라 선량을 평가하기 위한 목적이며, 손목에 패용한 개인선량계는 종사자의 손에 입사하는 방사선의 종류와 에너지를 구분하기위한 목적이었다. 또한 손가락 부위에는 손가락이 받는 등가선량을 측정하기위해 말단선량계를 추가로 패용하였다.

고피폭 예상접촉 작업에서 방사선작업종사자의 손목 또는 손가락에 입사하는 피폭방사선장을 분석한 결과 고에너지 광자로 확인되었다[9]. 한편 다른 문헌과 보고서

Table 2. Field Test Results (1) of Extremity Dosimeters at Ulchin NPPs (Maintenance on the Nozzle Dam in Steam Generator Water Chamber).

Name	Position	Multi-TLD (mSv)		ADR (mSv)	Wrist TLD (mSv)	Finger TLD (mSv)
		Dose	Effective dose			
A	Chest	0.64	0.79	0.63	0.89	1.31
	Back	0.88		0.95		
B	Chest	1.65	2.12	1.68	2.19	2.92
	Back	2.42		2.55		
C	Chest	0.84	1.03	0.82	1.17	1.43
	Back	1.14		1.16		
D	Chest	1.07	1.26	1.01	1.41	1.77
	Back	1.35		1.40		
E	Chest	0.97	1.20	0.93	1.36	2.00
	Back	1.33		1.41		
F	Chest	0.88	1.07	0.90	1.11	1.66
	Back	1.17		1.23		

* Effective dose was calculated by NCRP(55:50) algorithm[5].

Table 3. Field Test Results (2) of Extremity Dosimeters at Ulchin NPPs (Maintenance on the Nozzle Dam in Steam Generator Water Chamber).

Name	Position	Multi-TLD (mSv)		ADR (mSv)	Wrist TLD (mSv)	Finger TLD (mSv)
		Dose	Effective dose			
G	Chest	1.58	1.89	1.79	2.17	3.31
	Back	2.05		2.37		
H	Chest	1.80	2.13	2.04	2.46	3.18
	Back	2.28		2.70		
I	Chest	0.94	1.19	1.07	1.21	1.85
	Back	1.35		1.58		
J	Chest	0.78	0.95	0.85	1.00	1.56
	Back	1.05		1.20		
K	Chest	2.40	2.83	2.51	2.72	4.02
	Back	3.01		3.34		
L	Chest	0.47	0.53	0.52	0.69	1.21
	Back	0.55		0.64		

* Effective dose was calculated by NCRP(55:50) algorithm[5].

등에서도 고피폭작업의 방사선량률에 기여하는 방사성 핵종으로 ⁵⁸Co과 ⁶⁰Co 핵종을 제시하고 있다[12,13]. 이러한 말단선량계를 이용한 방사선장 특성분석에 대해 보다 상세한 내용은 대한방사선방어학회의 논문 “원전종사자의 말단선량 평가를 위한 고피폭 접촉 방사선장 특성 분석”에 기술되어 있다[9].

라. 말단선량계 패용 현장시험

말단선량계를 패용한 현장시험의 두 번째 목적은 고 피폭 접촉작업에서 방사선작업종사자의 손이나 발이 받은 실질적인 등가선량 현황을 파악하기위해 수행되었다. 또한 선량한도의 10% 이상 피폭을 받을 것으로 예상될 때 말단선량계 지급조건에 대한 적절성 확인 목적으로도 수행되었다[14].

2009년 2월에는 울진원전 4호기 계획예방정비기간중

증기발생기 정비작업에 참여한 작업종사자에 대해 고 피폭 접촉작업(Contact works with high exposure)에서 현장시험(Field test)을 실시하였다. 울진원전에서 실시된 말단선량계 현장시험에 참여한 12명의 피폭방사선량 평가 결과는 표 2~3과 같다[8]. 또한 2009년 7월에는 월성 1호기의 압력관교체(Pressure tube replacement) 작업에 참여한 방사선작업종사자를 대상으로 추가적인 현장시험을 실시하였다. 월성원전에서 실시된 말단선량계 현장시험에 참여한 12명의 피폭방사선량 평가 결과는 표 4~5에 나타내었다[8].

금번 현장시험 결과 방사선량 평가에서 중요한 내용이 확인되었다. 가슴과 등에 패용한 TLD 판독값을 기준으로 계산한 유효선량은 신체 특정 부위에서 받은 피폭의 최대값(주로 등 부위에 패용한 TLD에서 발생함) 보다 항상 낮게 나타났다(최소값<유효선량<최대값). 이들 방

Table 4. Field Test Results (1) of Extremity Dosimeters at Wolsong NPPs (Maintenance on the Removal of Pressure Tube Feeder).

Name	Position	Multi-TLD (mSv)		ADR (mSv)	Wrist TLD (mSv)	Finger TLD (mSv)
		Dose	Effective dose			
A	Chest	0.83	0.82	0.83	0.86	0.87
	Back	0.73		0.82		
B	Chest	0.60	0.63	0.75	0.87	1.03
	Back	0.60		0.67		
C	Chest	0.41	0.42	0.45	0.49	0.58
	Back	0.39		0.33		
D	Chest	0.31	0.30	0.32	0.45	0.45
	Back	0.25		0.29		
E	Chest	0.44	0.43	0.62	0.73	0.77
	Back	0.38		0.41		
F	Chest	0.69	0.60	0.79	0.72	0.75
	Back	0.45		0.47		

* Effective dose was calculated by NCRP(55:50) algorithm[5].

Table 5. Field Test Results (2) of Extremity Dosimeters at Wolsong NPPs (Maintenance on the Removal of Shielding Plug and Feeder Pipe).

Name	Position	Multi-TLD (mSv)		ADR (mSv)	Wrist TLD (mSv)	Finger TLD (mSv)
		Dose	Effective dose			
G	Chest	0.43	0.39	0.30	0.45	0.59
	Back	0.31		0.20		
H	Chest	0.27	0.25	0.16	0.38	0.25
	Back	0.21		0.16		
I	Chest	0.17	0.16	0.20	0.19	0.34
	Back	0.14		0.08		
J	Chest	0.23	0.23	0.19	0.34	0.40
	Back	0.20		0.14		
K	Chest	0.25	0.26	0.18	0.28	0.48
	Back	0.25		0.14		
L	Chest	0.26	0.21	0.23	0.43	0.41
	Back	0.14		0.16		

* Effective dose was calculated by NCRP(55:50) algorithm[5].

사선작업종사자의 말단선량계 등가선량 값은 가슴과 등에 패용한 TLD 판독값을 근거로 계산한 유효선량에 비해 최대 약 2배 정도, 그리고 손목에 패용한 TLD 판독값을 근거로 한 등가선량보다는 최대 약 1.5배 높게 평가되고 있는 것으로 나타났다.

3. 결론

원전 계획예방정비기간 증기발생기 수실작업, 가압기 전열관교체 또는 압력관피더 제거작업 지역 등은 수습에서 수백 mSv⁻¹ 이상으로 매우 높은 방사선량률을 보이는 지역으로, 짧은 시간 동안 작업으로 종사자는 높은 피

폭을 받을 가능성이 있다. 특히, 방사성물질과 접촉작업을 하는 손 부위에서 고피폭이 예상되고 있어 원전에서 말단선량 평가의 필요성이 대두되었다.

이런 점을 고려하여 국내 가압경수로원전과 가압중수로원전의 계획예방정비기간 고피폭 접촉작업에서 방사선작업종사자의 말단선량을 측정하기위한 시험을 실시하였다. 여기에 참여한 종사자는 가슴과 등 부위에 복수선량계를 패용한 것 이외에 손목에 개인선량계를 추가로 패용하였고, 손가락 부위에는 말단선량계를 패용하였다. 그 결과, 말단선량은 예상보다 높지 않게 나타났다. 특히, 손가락이 받는 등가선량은 손목이 받는 등가선량의 1.5배 범위와 심부선량의 2배 범위 내에 있음을 확인하였다.

이러한 연구결과를 적용하여 국내 원전에서 말단선량의 평가가 가능할 것으로 판단되었다. 특히 국내 원전 방사선작업종사자의 말단선량 평가에 대비한 기술축적이 가능할 것이며, 향후 국내 원전에서 방사선안전관리를 더욱 공고히 할 수 있는 토대를 구축하는데 기여할 것으로 판단되었다. 한편 본 시험에서 얻어진 결과와 내용은 차후 원전에서 말단선량계를 이용한 선량평가 절차의 표준화에 반영할 계획이다.

감사의 글

본 논문은 한국수력원자력(주) 안전기술처와 한전전력연구원의 전력사 공동증지기 연구 개발사업에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 교육과학기술부. 고시 제2008-48호: 관독업무 등록 기준 및 검사 규정. 2008.
2. International Commission on Radiological Protection, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, Pergamon Press, 1991.
3. International Atomic Energy Agency, Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, IAEA Safety Series No. 115, Vienna, 1996.
4. 교육과학기술부. 고시 제2008-31호: 방사선방호등

- 에 관한 기준 고시. 2008.
5. 김희근, 공태영. 원전 불균일 방사선장하에서 유효선량 평가를 위한 복수선량계 알고리즘 적용방안 연구. Journal of Radiation Protection 2008;33(4): 151-160.
6. Institute of Nuclear Power Operations, Guidelines for Radiological Protection at Nuclear Power Stations, INPO 91-014(Revision 01), 1995.
7. World Association of Nuclear Operators, Guidelines for Radiological Protection at Nuclear Power Plants, WANO GL 2004-01, 2004.
8. 한국수력원자력(주). 원전종사자 말단선량계 말단선량계 방사선량 측정 평가 기술개발 최종보고서. 2009.
9. 김희근, 공태영. 원전종사자의 말단선량 평가를 위한 고피폭 접촉 방사선장 특성분석. Journal of Radiation Protection 2009;34(4):176-183.
10. 한국원자력안전기술원. KINS 안전규제 기준 및 지침(안): 13.3 개인선량계. 2009.
11. 한국수력원자력(주). 2008 방사선관리연보. 2009.
12. Ocken H. Techniques for Controlling Radiation Exposure. Nuclear News 1993 Feb;43-47.
13. Yoon YH, Shielding Establishment inside Steam Generator, Proceedings of Information System on Occupational Exposure, Asian ALARA Symposium, 2007.
14. 한전전력연구원. 원전 고피폭 접촉작업의 방사선장 특성분석 및 말단선량 현황분석 보고서. TM,S04. P2009.0190, 2009.

A Field Test Assessment on the Extremity Doses of Highly-Exposed Radiation Workers During Maintenance Periods at Nuclear Power Plants in Korea

Hee Geun Kim and Tae Young Kong
KKEPCO Research Institute

Abstract - Maintenance on the water chamber of steam generator, the change of pressurizer heater, the removal of pressure tube feeder, and so on during outage in nuclear power plants (NPPs) has a likelihood of high radiation exposure to whole body of workers even short time period due to the high radiation exposure rates. In particular, it is expected that hands would receive the highest radiation exposure because of its contact with radiation materials. In this study, field tests on extremity dose assessment of radiation workers for contact works with high radiation exposure were conducted during the maintenance periods in Korean pressurized water reactors (PWRs) and pressurized heavy water reactors (PHWRs). In this field test, radiation workers were required to wear additional TLDs on the back and wrist, and an extremity dosimeter on fingers including a main TLD on the chest, while performing maintenance. As a result, it was found that the equivalent dose for fingers was distributed in the fixed range of deep dose and the equivalent dose for wrists.

Keywords : Contact work with high exposure, Shallow and deep dose, Extremity dosimeter, Steam generator maintenance work, Pressure tube removal work, High energy photon