

'97 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

원자력발전소내 In Vivo 시스템의 성능 시험

손중권, 이명찬, 송명재
한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

각 사업소의 교정용 팬텀에 대한 유효성 여부를 판정하고, 측정결과의 정확도와 조직적 오차의 발생여부를 확인할 목적으로 현재 국내 원전에서 사용중인 In Vivo 시스템에 대한 성능 시험을 수행하였다. 성능시험의 내용과 절차는 미국의 관련 지침인 ANSI N13.30에 기초를 두었다. 전신 측정에 대한 성능시험 결과, 시험핵종의 편중, 정밀도 및 최소검출방사능은 ANSI N13.30에서 정한 용인한도 이내로 나타났으며, 또 폐, 하복부 및 갑상선 측정에 대한 성능시험결과에 있어서도 성능평가 항목의 값은 모두 용인한도 이내였다. 각 사업소의 교정용 팬텀과 성능시험용 팬텀이 기하학적 구조에서 다소 차이가 있다 할지라도 측정결과의 편중이 용인한도 이하였다는 사실로부터 각 사업소에서 보유하고 있는 교정용 팬텀의 유효성을 간접적으로 입증할 수 있었다.

1. 서론

1959년 국제방사선방어위원회(ICRP)는 체내피폭선량 산정모델과 허용한도를 ICRP 출판물 2[1]에 최초로 제시하였으며, 이에 바탕을 둔 체내 방사선피폭 관리 제도가 방사선방어 실무에 적용되었다. 그러나 그 이후 축적된 관련 자료의 증대와 기술 및 학문이 진보함에 따라 새로운 선량 산정 모델이 개발되었다. 이에 대한 기술적인 사항은 1980년에 간행된 ICRP 출판물 30[2]에 수록되어 있으며, 이후 ICRP 1990년 권고[3]에 따라 다시 하향 조정된 방사선핵종의 연간 섭취한도가 ICRP 출판물 61[4]에 제시되었다.

체내 방사선 피폭선량평가와 관련한 ICRP의 기술적 변천은 체내피폭 방어의 중요성을 재강조할뿐만 아니라 고도의 기술적 대응을 요구하고 있다. 체내 오염에 관한 모니터링은 in vivo 법 또는 in vitro 법으로 행해지며, 방법의 선택은 주로 오염 핵종으로부터 방출되는 방사선의 종류에 의존한다. 또한 체내피폭선량 평가는 복잡한 대사 모델과 선량산정 모델에 기초하지 않으면 안된다. 따라서 선량평가 결과의 불확실성 정도가 매우 높다.

원자력 선진국에서는 국제 공동 연구 또는 국가적 차원의 상호 성능 비교 연구를 통해 in vivo 또는 in vitro 측정 결과의 정밀·정확도 향상에 경주하고 있음은 물론 측정 시스템의 성능 개선 방안을 지속적으로 모색하고 있다. 또한 선량평가와 관련해서는 ICRP 출판물 30의 대사 모델과 선량산정 모델에 기초한 선량평가 소프트웨어를 이미 개발하여 현재 방사선방어 실무에 적용하고 있으며, 자국민에 적합한 대사 모델의 재정립과 선량평가 관련 자료의 생성에 온 힘을 기울이고 있다.

그러나 국내 원전의 경우 체내피폭 관리 프로그램에 전신 카운터가 활용되고 있으나, 측정 결과의 정밀·정확도 향상과 신뢰도 확보를 위한 국가적 차원의 상호비교 연구가 체계적

이고 조직적으로 수행된 적이 없다. 또한 선량산정은 ICRP 출판물 2에서 제시된 모델에 의존하고 있는 실정이다. 따라서 선량평가의 신뢰성 확보와 방사선방어의 신 개념을 반영하기 위한 새로운 모니터링 프로그램의 확립이 요구되어 왔다

따라서 본 연구의 목적은 개정중인 관계 규정에 대비하여 신개념에 토대를 둔 체내피폭관리 프로그램의 설계 및 해석에 필요한 일반 원칙과 지침을 개발하기 위한 일환으로 현재 국내 원전에서 사용중인 in vivo법인 전신계수기와 액체섬광계수기에 대한 측정 성능시험을 수행하여, 그 결과를 토대로 기술수준의 현 주소를 파악하고, 만약 현재의 수준이 요구되는 기술수준에 미치지 못한다면 이에 대한 제반조치를 강구함으로써 기술수준의 향상을 도모하기 위해 수행되었다.

2. In Vivo 측정 시스템의 성능시험

2.1. In Vivo 측정시스템의 개요

In vivo 법이란 체내로 섭취된 방사성핵종으로부터 방출되는 X-선 및 감마선을 체외에서 직접 측정하여 방사성핵종의 종류와 양을 알아내는 방법이다. 측정에는 전신카운터(Whole Body Counter), 또는 특별히 저 에너지를 방출하는 초우란 원소의 폐중 침착량을 측정하는 폐 카운터(Lung Counter)장치가 사용된다. 장치는 검출기, 차폐체, 전자회로계(전치증폭기, 주 증폭기, 고전압공급기 및 파고분석기) 및 데이터처리부로 구성된다. 일반적으로 α 와 β 선만을 방출하는 핵종에 대해서는 이 방법을 적용할 수 없으며, 측정시 피검자의 표면오염 여부에 특별한 주의를 기울여야 한다.

검출기 선택시 고려사항은 검출효율, 에너지 분해능, 측정대상 핵종 및 장기, 유지관리, 경제성 등이 있다. in vivo 측정에 사용되는 검출기의 종류와 장단점은 표 1과 같다.

표 1. 검출기의 종류와 장·단점

검출기의 종류	검출기의 수	에너지 분해능	감도	초우란원소의 측정	유지	경제성
HPGe (≥ 100 keV)	1~2	●	●	×	×	△
NaI (Tl)	2~5	○	○	×	○	○
플라스틱 신틸레이터	1	×	●	×	○	△
LEGe	4~12	●	○	○	×	×
NaI / CsI	2	○	○	○	○	○

● 우수, ○ 양호, △ 약간 나쁨, × 아주 나쁨

In Vivo 시스템은 체내피폭 모니터링 프로그램에 언제라도 활용될 수 있도록 준비가 되어 있어야 하며, 또한 측정결과도 정확해야 한다. 이를 위해 시스템의 정기점검 및 일상점검이 필요하다. 정기점검으로는 기기(전자회로계)의 조정, 에너지 분해능 및 에너지 직선성, FWHM 및 효율 교정, 검출한계 시험 등이 있으며 일상점검으로는 이득(gain) 확인, 백그라운드 측정, 온습도 유지관리, 전원 공급의 안정성 확인 등이 있다.

2.2. In Vivo 측정시스템 성능평가 항목

1) 상대 편중

측정된 방사능에서 기준 방사능을 뺀 값과 기준 방사능과의 비를 말하며, 이의 값은 다음 식에 따라 산출한다.

$$B_{ri} = \frac{A_i - A_{ai}}{A_{ai}} \quad (1)$$

여기서, B_{ri} 는 i 번째 측정의 상대 편중, A_i 는 i 번째 팬텀 측정값, A_{ai} 는 i 번째 팬텀 측정시 팬텀 내에 삽입된 방사능을 나타낸다. 또한 개개의 상대 편중 $B_{r1}, B_{r2}, \dots, B_{rN}$ 의 평균 상대 편중, B_r 는 다음과 같이 정의된다.

$$B_r = \overline{B_{ri}} = \sum_{i=1}^N \frac{B_{ri}}{N} \quad (2)$$

여기서, N 은 반복 측정회수를 나타낸다.

2) 정밀도

상대 정밀도는 평균값 B_r 로부터 $B_{r1}, B_{r2}, \dots, B_{rN}$ 의 분산을 나타내는 척도로 사용되며, 이의 계산 식은 다음과 같이 정의된다.

$$S_B = \left[\sum_{i=1}^N (B_{ri} - B_r)^2 / (N-1) \right]^{1/2} \quad (3)$$

3) 최소검출방사능(MDA)

인체 내부에 방사능이 존재하고 있음에도 불구하고 측정 시스템의 검출 능력이 좋지 않아 이를 검출하지 못한다면, 이 시스템은 체내 방사능 측정에 사용될 수 없다. 따라서 ANSI N13.30[5]에서는 in vivo 측정 시스템이 사용하고자 하는 목적에 부합될 수 있는지를 보기 위한 척도로 MDA의 값을 성능 평가 항목중의 하나로 선정하고 있으며 이의 계산 식은 다음과 같이 정의된다.

$$MDA = 4.65 * \frac{\sqrt{BKG}}{EF * T} + \frac{3}{EF * T} \quad (4)$$

여기서, BKG 는 방사능이 내장되지 않은 팬텀(blank phantom)의 측정으로부터 얻어진 관심 영역(ROI)에서의 카운트 수(counts)를 나타내며, EF 는 측정효율, T 는 측정시간을 나타낸다.

다. 용인 한도

성능시험 항목에 대한 값의 산정은 식 (3-15), 식 (3-16) 및 식 (3-17)에 따르며, 이의 용인 한도는 다음과 같다.

- 상대 편중
 $-0.25 \leq B_r \leq 0.5$
- 정밀도
 $|S_B| \leq 0.4$
- MDA
 ANSI N13.30에 주어진 값

3. 성능시험결과

국내 원전에서 사용중인 WBC에 대한 성능시험 내용은 표 2와 같다. 전신측정의 경우, BOMAB 팬텀이 성능시험용으로 사용되었고 성능시험용 핵종은 Cs-134와 Cs-137이, 그리고 간섭용 핵종은 Co-60과 Mn-54가 사용되었다. 폐측정의 경우, LLNL torso 팬텀이 사용되었고, 성능시험용 핵종은 Mn-54와 Co-60이, 그리고 간섭용 핵종은 Cs-134와 Cs-137이 사용되었다. ANSI N13.30의 성능시험 범주에는 하복부가 포함되어 있지 않다. 그러나 국내 원전에

표 2. 성능시험 핵종, 장기 및 팬텀

Organ	Radionuclides ^b	Test phantom
Total body	Cs-134 Cs-137 Co-60 ^a Mn-54 ^a	BOMAB phantom
Lung	Mn-54 Co-60 Cs-134 ^a Cs-137 ^a	LLNL torso phantom
Lower torso	Cs-134 Cs-137 Co-60 ^a Mn-54 ^a	gut section of BOMAB phantom
Thyroid	Sn-113	ANSI Neck phantom

^aFor interference only.

^bPrimary NIST-traceable source solutions.

서 사용중인 대부분의 WBC는 3개의 검출기 즉, 폐, 하복부 및 갑상선 계측용 검출기로 구성되어 있어 하복부에 대해서도 성능시험을 수행하였다. 하복부 측정의 경우, BOMAB 팬텀의 하복부 부위가 성능시험용 팬텀으로 사용되었고, 성능시험용 핵종은 Cs-134와 Cs-137이, 간섭용 핵종은 Co-60과 Mn-54가 사용되었다. 마지막으로 갑상선 측정의 경우, Sn-113이 시험용 핵종으로, ANSI Neck 팬텀이 시험용으로 사용되었다. 갑상선의 경우 ANSI N13.30에서는 성능시험용 핵종으로 I-131 또는 I-125의 사용을 권고하고 있으나, 이들 핵종은 반감기가 짧아 I-131의 방출에너지와 거의 비슷한 에너지를 방출하는 Sn-113을 성능시험용 핵종으로 사용하였다.

표 3. 전신에 대한 편중과 정밀도 : Cs134, Cs-137

Code	Whole-Body (Cs-134, Cs-137), Bq							Precision	Bias(%)	
		A ₀	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅			\bar{A}
B	Cs-134	16268	14610	16170	16570	16060	15630	15885	0.0460	-2.83
	Cs-137	25422	21660	21510	22840	22070	22970	22745	0.0263	-12.63
C	Cs-134	36065	43559	43398	43398	43398	45330	42525	0.0235	21.50
	Cs-137	56403	53377	53159	53232	52723	52723	53603	0.0054	-5.96
D	Cs-134	16100	16169	17908	16650	18315	16872	17002	0.0557	6.73
	Cs-137	25400	22903	23051	22570	22718	23051	23282	0.0083	-10.01
E	Cs-134	15777	21201	21238	21534	20968	19103	19970	0.0618	31.89
	Cs-137	25365	32238	28279	31713	33459	24809	29311	0.1391	18.67
F	Cs-134	16357	20700	24160	20930	22990	24020	21526	0.1014	37.92
	Cs-137	25431	25910	21540	25520	25740	25170	24885	0.0720	-2.58
G	Cs-134	35933	37420	37823	38754	38867	36254	37509	0.0298	5.26
	Cs-137	56389	56675	56590	55009	55829	57363	56309	0.0160	-0.17

전신측정에 대한 성능시험 결과, Cs-134와 Cs-137의 편중과 상대정밀도는 표 3에 주어져

있다. Cs-134의 편중은 -2.83%~37.92%의 분포를, 정밀도는 0.0235~0.1014의 분포를 보여주었으며 line MDA(795.7 keV)는 121.2~860.2Bq의 분포로 나타났다. 그리고 Cs-137의 경우 편중은 -12.63%~18.67%의 분포를, 정밀도는 0.0054~0.1391의 분포를 보여 주었으며 line MDA(661.6 keV)는 128.6~865.9Bq의 분포로 나타났다

표 4. 폐에 대한 편중과 정밀도 : Mn-54, Co-60

Code	Lung (Mn-54, Co-60), Bq								Precision	Bias(%)
	A ₀	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	\bar{A}			
A	Mn-54	11047	16680	16395	15977	16306	16595	15500	0.0249	0.0232
	Co-60	6516	6915	7259	7071	6690	6938	6898	0.0322	7.0381
B	Mn-54	11574	11420	11190	11290	11290	11350	11352	0.0073	-2.2983
	Co-60	6565	6177	5970	6048	5979	6046	6131	0.0126	-7.9360
C	Mn-54	11574	12145	12324	12983	12983	11607	12269	0.0507	7.2093
	Co-60	6565	7894	7870	8224	8224	8224	7834	0.0286	23.1866
F	Mn-54	11729	12110	13520	13550	14390	12760	13010	0.0738	13.1043
	Co-60	6714	7606	7467	7597	7351	7463	7366	0.0158	11.6592
G	Mn-54	11244	12059	11824	11731	11438	11457	11626	0.0232	4.0715
	Co-60	6525	6769	6589	6743	6419	6646	6615	0.0215	1.6582

폐측정에 대한 성능시험 결과, Mn-54과 Co-60의 편중과 상대정밀도는 표 4에 주어저 있다. Mn-54의 경우 편중은 -2.30%~48.37%의 분포를, 정밀도는 0.0073~0.0738의 분포를 보여 주었으며 line MDA(834.8 keV)는 82.0~127.98Bq의 분포로 나타났다. 그리고 Co-60의 경우 편중은 -7.94%~23.19%의 분포를, 정밀도는 0.0126~0.0322의 분포를 보여 주었으며 line MDA(1173.2 keV)는 78.0~108.6Bq의 분포로 나타났다.

표 5. 하복부에 대한 편중과 정밀도 : Cs-134, Cs-137

Code	GI (Cs-134, Cs-137), Bq								Precision	Bias(%)
	A ₀	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	\bar{A}			
B	Cs-134	7488	6610	6634	8258	7560	6733	7214	0.0974	-4.3937
	Cs-137	11736	9524	9139	9511	8770	9455	9689	0.0277	-20.9288
C	Cs-134	6383	7357	8079	7736	7965	7908	7571	0.0441	22.3406
	Cs-137	9986	9905	9958	9853	9958	9800	9910	0.0069	-0.9133
F	Cs-134	6430	7126	8885	7132	7577	8162	7552	0.1168	20.9393
	Cs-137	9991	9007	9306	8911	9377	9190	9297	0.0197	-8.3355
G	Cs-134	6365	6598	6628	7632	7911	6587	6954	0.1017	11.0951
	Cs-137	9984	10800	11959	10349	11068	9964	10687	0.0762	8.4535

하복부 측정에 대한 성능시험 결과, Cs-134과 Cs-137의 편중과 상대정밀도는 표 5에 주어저 있다. Cs-134의 경우 편중은 -4.40%~22.34%의 분포를, 정밀도는 0.0441~0.1168의 분포를 보여주었으며 line MDA(795.7 keV)는 100.9~134.0Bq의 분포로 나타났다. 그리고 Cs-137의 경우 편중은 -20.93%~8.45%의 분포를, 정밀도는 0.007~0.076의 분포를 보여 주었으며 line MDA(661.6 keV)는 109.4~249.0Bq의 분포로 나타났다.

갑상선 측정에 대한 성능시험 결과는 표 6에 주어저 있다. 편중은 -2.23%~26.29%의 분포를, 정밀도는 0.0047~0.0429의 분포를 보여주었으며 line MDA(391.7 keV)는 46.9~179.5Bq의 분포로 나타났다.

표 6. 갑상선에 대한 편중과 상대정밀도 : Sn-113

Code	Thyroid (Sn-113), Bq							Precision	Bias(%)
	A ₀	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	\bar{A}		
A	9805	11973	12095	12600	12961	12284	11953	0.0409	26.2886
B	11042	11410	11340	11480	11420	11380	11345	0.0047	3.2965
C	10984	10792	10841	10841	10939	10889	10881	0.0051	-1.1253
D	9324	9990	9472	9546	9768	9879	9663	0.0235	4.3651
E	9250	10726	10412	10800	10623	10985	10466	0.0230	15.7751
F	11517	11300	11410	11910	10670	11010	11303	0.0402	-2.2315
G	10837	11414	11812	10952	10583	11120	11120	0.0429	3.1300

4. 결론

효율교정, 시스템의 유지·관리 및 성능시험등은 품질보증프로그램을 계획하는데 있어 고려되어야 할 공통적인 항목일 뿐만 아니라, 이와 같은 행위를 통해서만이 조직적 오차의 발생 방지와 신뢰성이 확보된 측정 결과를 얻을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 체내 방사능 측정기술과 관련하여 각 사업소의 교정용 팬텀에 대한 적합성 여부를 판정하고, 측정결과와 정확도가 유지되고 있는지를 확인함은 물론 조직적 오차의 발생여부를 확인할 목적으로 현재 국내 원전에서 사용중인 In Vivo 시스템에 대한 성능시험을 수행하였다. 성능시험의 내용과 절차는 ANSI N13.30에 기초를 두었다.

전신 측정에 대한 성능시험 결과, 시험핵종의 편중, 정밀도 및 최소검출방사능은 ANSI N13.30에서 정한 용인한도 이내로 나타났으며, 또한 폐, 하복부 및 갑상선 측정에 대한 성능시험결과에 있어서도 성능평가 항목의 값은 모두 용인한도 이내였다. 각 사업소의 교정용 팬텀과 성능시험용 팬텀이 기하학적 구조에서 다소 차이가 있다 할지라도 측정결과와 편중이 용인한도 이하였다는 사실로부터 각 사업소에서 보유하고 있는 교정용 팬텀의 유효성을 간접적으로 입증할 수 있었다. 본 연구에서 수행된 성능시험 프로그램은 교정절차, 분석절차, 시스템의 품질 등 포괄적인 QA 항목을 내포하고 있으므로, 측정결과와 품질을 보증하기 위해서는 정기적으로 이와 같은 성능시험이 수행되어야 할 것으로 사료된다. 또한 체내피폭관리의 중요성과 더불어 WBC가 국내에서 날로 증가되어 가고 있는 실정에 있으므로 WBC 운영, 정보교환 및 신뢰도 확보차원에서 조직적인 체제를 갖춘 WBC 사용자 그룹(WBC User Group)의 형성이 가능한 한 빨리 추진되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. ICRP, "Report of Committee II on Permissible Dose for Internal Radiation," ICRP Publication 2, Pergamon Press, Oxford, New York (1959).
2. ICRP, "Limits for Intakes of Radionuclides by Workers," ICRP Publication 30, Parts 1-3 and Supplements, Pergamon Press, Oxford, New York(1979,1980,1981,1983).
3. ICRP, "1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection," ICRP Publication 60, Pergamon Press, Oxford, New York (1990).
4. ICRP, "Annual Limits on Intake of Radionuclides by Workers Based on the 1990 Recommendations," ICRP Publication 61, Pergamon Press, Oxford, New York (1991).
5. ANSI, "Draft-American National Standard for Performance Criteria for Radiobioassay," ANSI N13.30(1994).