

열형광선량계에 의한 선량평가 알고리즘 개발

송명재 · 김희근 · 하정우* · 이태영 · 윤석철**

한국전력공사 기술연구원, 한국원자력안전기술원*, 한국원자력연구소**

요 약

본 연구의 목적은 ANSI N13. 11-1983의 시험기준에서 제시한 개인선량계의 선량평가 시험범주를 모두 만족시킬 수 있는 선량평가 알고리즘을 개발하는데 있다. 알고리즘 개발 대상 개인선량계로는 Teledyne Isotopes사의 PB-3 열형광선량계로 하였다. 개발된 알고리즘에 대한 미국 Atlan-Tech사와의 2차례의 검증결과, 본 알고리즘은 ANSI N13. 11-1983의 선량평가 범주를 모두 만족시키는 것으로 나타났다.

Key Words : 선량평가 알고리즘, Teledyne Isotopes사의 PB-3 열형광선량계

서 론

미국 국립표준과학연구소(NIST)는 개인선량계에 의한 체외 피폭선량 평가 결과의 정확도와 신뢰도 확보를 위한 프로그램의 일환으로 개인선량계 성능에 대한 시험기준 [1]을 1983년도에 제정하였다. 이에 따라 미국 원자력규제위원회 (US-NRC)에서는 이 기준을 미국 연방규정(10 CFR 20.202)에 반영하여 1988년도부터는 자국의 기술공인 프로그램(NIST-NVLAP)에 합격한 선량평가 기관들만이 선량평가 업무를 수행할 수 있도록 규정하였다. 또한 국내의 경우, 과학기술처는 ANSI N13. 11-1983[1]에서 제시한 시험기준을 기초로 개인피폭선량 관독에 관한 우리나라의 기술기준을 제정하여 이 기준을 1992년도에 고시화하였다. 따라서 본 연구의 목적은 ANSI N13. 11-1983의 시험기준을 토대로 한 선량평가 알고

리즘을 개발하여 이를 미국 국립표준과학연구소 공인 기관으로부터 검증절차를 마친 후, 개발된 알고리즘을 국내 관련업무에 적용함으로써 선량평가 결과의 정확도와 신뢰도를 향상시키고자 함에 있다.

선량평가 알고리즘 개발 대상 개인선량계로는 베타-감마용으로 $\text{CaSO}_4 : \text{Dy}$ 를, 중성자용으로 ${}^6\text{LiF} / \text{CaSO}_4 : \text{Dy}$ 를 사용하고 있는 Teledyne Isotopes사의 PB-3 열형광선량계로 하였다. 따라서 기준 방사선장으로 PB-3 열형광선량계를 조사하여 이에 대한 교정인자를 결정한 다음, 교정인자를 토대로 PB-3 열형광선량계에 맞는 선량평가 알고리즘을 구성하였다.

본 연구에서 개발한 선량평가 알고리즘은 미국 Atlan-Tech사와의 2차례에 걸친 검증작업을 통해 ANSI N13. 11-1983의 개인선량계 성능시험조건외 모든 범주를 만족시키는 것으로 나타났다.

ANSI의 개인선량계 성능시험 범주

ANSI N13. 11-1983에서 정하고 있는 개인선량계의 검증조건, 시험조사 범위 및 허용준위(L) [1]는 표 1과 같다. 그리고 선량평가 결과에 대한 허용준위는 다음과 같이 정의된다.

$$|B| + S \leq L \quad (1)$$

여기서, B는 성능지수 값들의 평균치, S는 성능지수 값들의 표준편차를 나타내며, 성능지수(Pi)는 다음과 같이 주어진다.

$$P_i = (H_i' - H_i) / H_i \quad (2)$$

여기서, H_i'는 선량계의 성능시험을 위해 기준선량을 조사한 선량계로부터 판독된 측정선량을 말하며, H_i는 선량계의 성능시험을 위해 선량계에 조사한 기준선량을 나타낸다.

선량평가 알고리즘 설계

1. PB-3 배지 시스템의 설계특성

개인모니터링에 있어서의 주요 관심사는 인체 조직내 특정 지점에서의 선량당량[2,3]을 어떻게 개인선량계로 측정할 것인가에 초점이 모여진다. 이에 대한 첫 단계 기술적 방안으로 개인선량계의 배지 시스템은 조사선량의 단위를 갖는 선량계의

판독치에 에너지 의존성 환산계수[1, 4]를 곱한 것이 0.07mm 및 10mm 깊이에서의 인체조직이 받는 선량당량으로 직접 전환될 수 있도록 설계되어야 한다.

이는 개인선량계의 배지 시스템은 측정하고자 하는 방사선의 종류에 따라 도시메트리 특성을 달리하는 여러 영역들로 구성되어야 한다는 것을 의미한다. 따라서 알고리즘 설계를 위한 배지 시스템의 설계요구사항을 만족시키기 위하여 Teledyne Isotopes사의 PB-3 배지 시스템은 그림 1과 같이 4개의 영역으로 구성되어 있으며, 각 영역은 배지 케이스내 각 영역에 존재하는 필터의 재질 및 두께에 따라 서로 상이한 도시메트리 특성을 갖는다. PB-3 배지 시스템의 경우 각 영역의 도시메트리 특성은 [5, 6] 다음과 같이 요약할 수 있다.

- Area 1 (A1) 영역

이 영역의 판독치는 0.07mm 깊이에서 베타입자에 의해 인체조직이 받는 선량당량을 평가하는데 사용되도록 설계되었음.

- Area 2 (A2) 영역

이 영역의 판독치는 베타입자와 광자가 동시에 존재하는 혼합 방사선장에서 베타선량을 평가하는데 보조적 역할을 하도록 설계되었음. 이 영

Table 1. ANSI N13. 11-1983 test categories, test irradiation ranges, and tolerance levels.

TEST CATEGORY	TEST RANGE	TOLERANCE LEVEL	
		DEEP	SHALLOW
I. ACCIDENTS, X-RAY(NBS TECHNIQUE MFI)	10-500 rad	0.3	No test
II. ACCIDENTS, Cs-137	10-500 rad	0.3	No test
III. X-RAY(NBS TECHNIQUES LG, LI, LK, MFC, MFI)	0.03-10 rem	0.5	0.5
IV. Cs-137	0.03-10 rem	0.5	No test
V. BETAS(Sr-90/Y-90)	0.15-10 rem	No test	0.5
VI. PHOTON MIXTURES(III + IV)	0.05-5 rem	0.5	0.5
VII. PHOTON/BETA MIXTURES (IV + V)	0.20-5 rem	0.5	0.5
VIII. D ₂ O MODERATED Cf-252/Cs-137	0.15-5 rem	0.5	No test

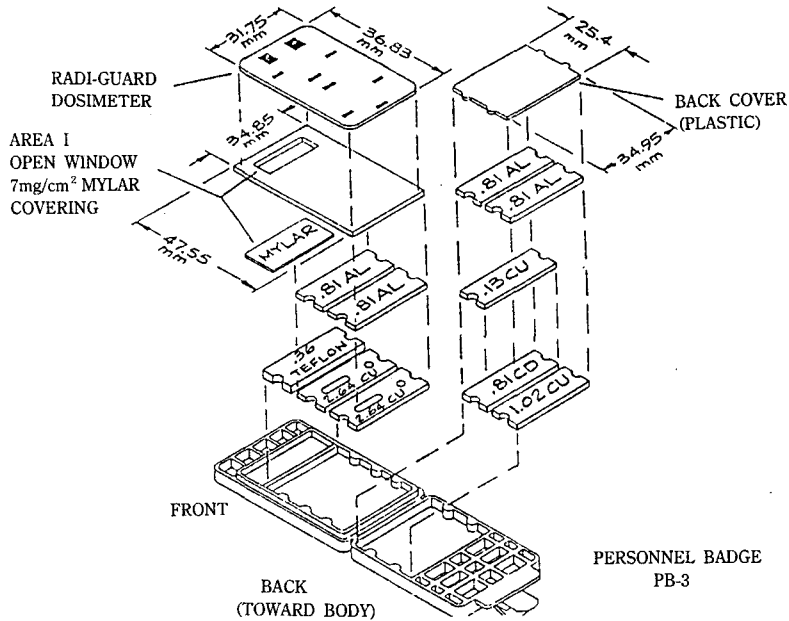


Fig. 1. A Schematic representation of the PB-3 badge system [5].

역의 filtration system은 Sr-90/Y-90에서 방출되는 베타선의 에너지를 거의 차단할 수 있는 차폐능을 지니고 있음.

- Area 3 (A3) 영역

이 영역의 판독치는 혼합 광자장에서 에너지를 분해하는데 보조적 역할을 하도록 설계되었음.

- Area 4 (A4) 영역

이 영역의 판독치는 10mm 깊이에서 인체조직이 받는 선량당량을 평가하는데 사용되도록 설계되었음.

2. 설계자료 및 설계개념

알고리즘 설계자료는 개인선량계의 교정결과로부터 얻어진다. [7] 이를 위해 인체 표면으로부터의 방사선의 산란을 모의하기 위해 교정용 팬텀으로 ANSI N13. 11-1983에서 제시된 PMMA (polymethylmethacrylate)팬텀을 사용하였으며, 팬텀 표면에 개인선량계를 부착하여 설정된 표준 선원 및 조사장으로 일정 시간동안 TL 선량계를

조사한 후 에너지별 반응도를 판독하였다. 그 결과는 표 2와 같이 나타났다. 그리고 표 2에 주어진 에너지별 심부선량당량(Hp)과 피부선량당량(Hs)은 ANSI N13. 11-1983에서 제시된 선량당량환산계수(fp,fs)를 이용하여 다음 식에 의해 계산하였다.

$$H_p = (\text{조사선량}) \times (fp) \quad (3)$$

$$H_s = (\text{조사선량}) \times (fs) \quad (4)$$

표 2의 자료는 단일 방사선장에만 적용될 수 있는 기본 설계자료이므로, 이 자료에 기반을 두어 설계된 알고리즘은 단일 방사선장만을 처리할 수 밖에 없다. 따라서 혼합 방사선장(Cs-137 + X-선, Cs-137 + 베타)을 알고리즘에 반영하기 위하여 Cs-137과 X-선, 그리고 Cs-137과 베타와의 적절한 혼합비를 구성한 다음, 구성비에 대한 각 영역별 판독치, 조사선량, Hp 및 Hs를 표 2의 자료를 이용하여 이론적으로 산출하였다. 이 결과는 표 3과 같다.

다음 단계로는 표 3에 주어진 각 영역에 대한

Table 2. Calibration data of the PB-3 badge system.

energy (keV)	mR Cs equivalent				exposure mR	^c D C F		delivered(mrem)	
	A1	A2	A3	A4		^a _{fp}	^b _{fs}	Hp	Hs
20	8607	2897	537	544	1000	0.40	0.92	400	920
29	10012	5880	1298	1317	1019	0.72	1.02	734	1039
39	9662	6296	1437	1502	993	0.95	1.14	944	1132
54	8328	6296	1629	1724	1001	1.20	1.30	1201	1301
75	6061	4698	1523	1519	999	1.38	1.43	1379	1429
83	2253	1880	725	716	517	1.43	1.47	739	760
117	2908	2448	1355	1288	981	1.35	1.37	1328	1345
164	2017	1737	1272	1192	981	1.28	1.28	1256	1256
207	1882	1570	1214	1153	977	1.24	1.24	1212	1212
Cs-137	1000	1000	1000	1000	1000	1.03	1.03	1030	1030
Beta	1000	30	1	1	1000	-	-	0	1000

* 1 rem = 0.01 Sv

a weighted average conversion factor(rem/R) to dose equivalent in the ICRU sphere at a depth of 10 mm[1].

b weighted average conversion factor (rem/R) to dose equivalent in the ICRU sphere at a depth of 0.07 mm[1].

c dose conversion factor.

이론적 판독치를 조합하여 여러 종류의 서로 다른 비를 작성하였고, 또한 A4의 값, Hp, Hs, A1의 값 및 A2의 값을 사용하여 선량 평가에 필요한 보정인자를 도출하였다. 이 결과는 표 4와 같다. 표 4에 주어진 각종 인자의 용도는 R10 부터 R16 까지는 입사 방사선의 종류와 혼합 방사선장을 구별하는데 필요한 자료를 알고리즘상에서 제공하게 된다. 또한 CF1은 A4 영역의 판독치(mR)를 Hp로 전환하는데 필요한 보정인자로, CF2는 광자에 의한 Hs를 계산하는데 필요한 보정인자로, 그리고 CF3는 A2 영역의 판독치로부터 광자의 기여도를 계산하는데 필요한 보정인자로 사용된다.

3. 알고리즘 구성내용

가. 입사 방사선의 종류 찾기

(1) 순수 베타

선량계가 순수 베타에 조사되었는 지를 알아

내는데 R11과 R16이 사용되었다. 순수 베타일 때 R11의 값은 표 4에 33.33으로 주어져 있으며, 베타가 100%이고 Cs-137이 33%인 혼합장에서의 R11의 값은 3.69이다. 그리고 Cs-137과 X-선과의 혼합장에서의 R11의 값은 모두 2.97 이하이다. 따라서 R11 \geq 15일 때 선량계는 순수 베타에 조사된 것으로 하였다.

또한 순수 베타일 때 R16의 값은 3.33×10^7 으로 주어져 있으며, 베타가 100%이고 Cs-137이 33%인 혼합장에서의 R16은 59.65의 값을 갖는다. 그리고 Cs-137과 X-선과의 혼합장에서의 R16의 값은 모두 753.41 보다 적다. 따라서 R16 \geq 800일 때 선량계는 순수 베타에 조사된 것으로 하였다.

(2) 고에너지 광자(High Energy Photon)와 베타와의 혼합장

순수 Cs-137일 때 R10의 값은 1.0이고 단일 에너지 X-선일 때 R10의 값은 1.36보다 모두 크다. 그리고 순수 베타일 때 R10의 값은 30이고

Table 3. Theoretical performance of the PB-3 badge system to different mixing proportions of low energy X-ray and Cs-137

keV	line #	percent		mR				exposure (mR)	delivered(mrem)	
		X-ray	Cs	A1	A2	A3	A4		Hp	Hs
20	1	1.00	0.00	8607.00	2897.00	537.00	544.00	1000.00	400.00	920.00
	2	1.00	0.33	8937.00	3227.00	867.00	874.00	1330.00	739.90	1259.90
	3	1.00	0.50	9107.00	3397.00	1037.00	1044.00	1500.00	915.00	1435.00
	4	1.00	1.00	9607.00	3897.00	1537.00	1544.00	2000.00	1430.00	1950.00
	5	0.50	1.00	5303.50	2448.50	1268.50	1272.00	1500.00	1230.00	1490.00
	6	0.33	1.00	3840.31	1956.01	1177.21	1179.52	1330.00	1162.00	1333.60
29	1	1.00	0.00	10012.00	5880.00	1298.00	1317.00	1019.00	733.68	1039.38
	2	1.00	0.33	10342.00	6210.00	1628.00	1647.00	1349.00	1073.58	1379.28
	3	1.00	0.50	10512.00	6380.00	1798.00	1817.00	1519.00	1248.68	1554.38
	4	1.00	1.00	11012.00	6880.00	2298.00	2317.00	2019.00	1763.68	2069.38
	5	0.50	1.00	6006.00	3940.00	1649.00	1658.50	1509.50	1396.84	1549.69
	6	0.33	1.00	4303.96	2940.40	1428.34	1434.61	1336.27	1272.11	1373.00
39	1	1.00	0.00	9662.00	6296.00	1437.00	1502.00	993.00	943.35	1132.02
	2	1.00	0.33	9992.00	6626.00	1767.00	1832.00	1323.00	1283.25	1471.92
	3	1.00	0.50	10162.00	6796.00	1937.00	2002.00	1493.00	1458.35	1647.02
	4	1.00	1.00	10662.00	7296.00	2437.00	2502.00	1993.00	1973.35	2162.02
	5	0.50	1.00	5831.00	4148.00	1718.50	1751.00	1496.50	1501.68	1596.01
	6	0.33	1.00	4188.46	3077.68	1474.21	1495.66	1327.69	1341.31	1403.57
54	1	1.00	0.00	8328.00	6296.00	1629.00	1724.00	1001.00	1201.20	1301.30
	2	1.00	0.33	8658.00	6626.00	1959.00	2054.00	1331.00	1541.10	1641.20
	3	1.00	0.50	8828.00	6796.00	2129.00	2224.00	1501.00	1716.20	1816.30
	4	1.00	1.00	9328.00	7296.00	2629.00	2724.00	2001.00	2231.20	2331.30
	5	0.50	1.00	5164.00	4148.00	1814.50	1862.00	1500.50	1630.60	1680.65
	6	0.33	1.00	3748.24	3077.68	1537.57	1568.92	1330.33	1426.40	1459.43
75	1	1.00	0.00	6061.00	4698.00	1523.00	1519.00	999.00	1378.62	1428.57
	2	1.00	0.33	6391.00	5028.00	1853.00	1849.00	1329.00	1718.52	1768.47
	3	1.00	0.50	6561.00	5198.00	2023.00	2019.00	1499.00	1893.62	1943.57
	4	1.00	1.00	7061.00	5698.00	2523.00	2519.00	1999.00	2408.62	2458.57
	5	0.50	1.00	4030.50	3349.00	1761.50	1759.50	1499.50	1719.31	1744.29
	6	0.33	1.00	3000.13	2550.34	1502.59	1501.27	1329.67	1484.94	1501.43
83	1	1.00	0.00	2253.00	1880.00	725.00	716.00	517.00	739.31	759.99
	2	1.00	0.33	2583.00	2210.00	1055.00	1046.00	847.00	1079.21	1099.89
	3	1.00	0.50	2753.00	2380.00	1225.00	1216.00	1017.00	1254.31	1274.99
	4	1.00	1.00	3253.00	2880.00	1725.00	1716.00	1517.00	1769.31	1789.99
	5	0.50	1.00	2126.50	1940.00	1362.50	1358.00	1258.50	1399.66	1410.00
	6	0.33	1.00	1743.49	1620.40	1239.25	1236.28	1170.61	1273.97	1280.80

- Continued -

keV	line #	percent		mR Cs equivalent				exposure delivered(mrem)		
		S-ray	Cs	A1	A2	A3	A4	(mR)	Hp	Hs
117	1	1.00	0.00	2908.00	2448.00	1355.00	1288.00	981.00	1324.35	1343.97
	2	1.00	0.33	3238.00	2778.00	1685.00	1618.00	1311.00	1664.25	1683.87
	3	1.00	0.50	3408.00	2948.00	1855.00	1788.00	1481.00	1839.35	1858.97
	4	1.00	1.00	3908.00	3448.00	2355.00	2288.00	1981.00	2354.35	2373.97
	5	0.50	1.00	2454.00	2224.00	1677.50	1644.00	1490.50	1692.18	1701.99
	6	0.33	1.00	1959.64	1807.84	1447.15	1425.04	1323.73	1467.04	1473.51
164	1	1.00	0.00	2017.00	1737.00	1272.00	1192.00	981.00	1255.68	1255.68
	2	1.00	0.33	2347.00	2067.00	1602.00	1522.00	1311.00	1595.58	1595.58
	3	1.00	0.50	2517.00	2237.00	1772.00	1692.00	1481.00	1770.68	1770.68
	4	1.00	1.00	3017.00	2737.00	2272.00	2192.00	1981.00	2285.68	2285.68
	5	0.50	1.00	2008.50	1868.50	1636.00	1596.00	1490.50	1657.84	1657.84
	6	0.33	1.00	1665.61	1573.21	1419.76	1393.36	1323.73	1444.37	1444.37
207	1	1.00	0.00	1882.00	1570.00	1214.00	1153.00	977.00	1211.48	1211.48
	2	1.00	0.33	2212.00	1900.00	1544.00	1483.00	1307.00	1551.38	1551.38
	3	1.00	0.50	2382.00	2070.00	1714.00	1653.00	1477.00	1726.48	1726.48
	4	1.00	1.00	2882.00	2570.00	2214.00	2153.00	1977.00	2241.48	2241.48
	5	0.50	1.00	1941.00	1785.00	1607.00	1576.50	1488.50	1635.74	1635.74
	6	0.33	1.00	1621.06	1518.10	1400.62	1380.49	1322.41	1429.79	1429.79
Cs-137		0.00	1.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1030.00	1030.00

line #	percent		mR Cs equivalent				exposure delivered(mrem)	
	beta	Cs	A1	A2	A3	A4	(mR)	Hs
1	1.00	0.00	1000.00	30	1	1	1000.00	1000.00
2	1.00	0.33	1330.00	360.00	331.00	331.00	1330.00	1339.90
3	1.00	0.50	1500.00	530.00	501.00	501.00	1500.00	1515.00
4	1.00	1.00	2000.00	1030.00	1001.00	1001.00	2000.00	2030.00
5	0.50	1.00	1500.00	1015.00	1000.50	1000.50	1500.00	1530.00
6	0.33	1.00	1330.00	1009.90	1000.33	1000.33	1330.00	1360.00

* 1 rem = 0.01 Sv

베타가 100%이고 Cs-137이 33%인 혼합장에서의 R10의 값은 1.09이다. 따라서 $R10 \leq 1.3$ 일 때 선량계는 고에너지 광자(HEP) 혹은 HEP와 베타와의 혼합장에 조사된 것으로 하였다.

다음 단계로 R11과 A1영역의 판독치가 다음조건[8]을 만족할 때 선량계가 HEP와 베타와의 혼합장에 조사된 것으로 하였다.

㉠ $A1 > 500$ and $R11 \geq 1.05$

㉡ $100 \leq A1 \leq 500$ and $R11 \geq 1.10$

㉢ $A1 < 100$ and $R11 \geq 1.20$

(3) 고에너지 광자(HEP)

$R10 \leq 1.3$ 이고, (2)의 ㉠, ㉡, ㉢의 항을 만족하지 못할 때 선량계는 HEP에 조사된 것으로 하였다.

(4) Cs-137과 X-선과의 혼합장

$R10 \geq 1.3$ 일 때 선량계는 Cs-137과 X-선과의 혼합장, 그리고 X-선과 베타와의 혼합장에 조사된

Table 4. Results of different area response ratios to different mixing proportions of low energy X-ray and Cs-137

keV	line #	percent		ratios							correction factors		
		X-ray	Cs	R10	R11	R12	R13	R14	R15	R16	CF1	CF2	CF3
20	1	1.00	0.00	5.33	2.97	28.73	5.39	0.99	84.26	753.41	1.36	2.30	2.97
	2	1.00	0.33	3.69	2.77	13.74	3.72	0.99	37.75	291.91	1.18	1.70	2.77
	3	1.00	0.50	3.25	2.68	10.66	3.28	0.99	28.38	205.38	1.14	1.57	2.68
	4	1.00	1.00	2.52	2.47	6.40	2.54	1.00	15.70	95.88	1.08	1.36	2.47
	5	0.50	1.00	1.92	2.17	3.72	1.93	1.00	8.03	37.76	1.03	1.21	2.17
	6	0.33	1.00	1.66	1.96	2.76	1.66	1.00	5.40	20.85	1.02	1.15	1.96
29	1	1.00	0.00	4.46	1.70	20.23	4.53	0.99	33.94	99.84	1.80	1.42	1.70
	2	1.00	0.33	3.77	1.67	14.38	3.81	0.99	23.68	66.43	1.53	1.28	1.67
	3	1.00	0.50	3.51	1.65	12.46	3.55	0.99	20.31	55.73	1.46	1.24	1.65
	4	1.00	1.00	2.97	1.60	8.89	2.99	0.99	14.11	36.45	1.31	1.17	1.60
	5	0.50	1.00	2.38	1.52	5.68	2.39	0.99	8.60	20.11	1.19	1.11	1.52
	6	0.33	1.00	2.05	1.46	4.22	2.06	1.00	6.15	13.23	1.13	1.08	1.46
39	1	1.00	0.00	4.19	1.53	18.37	4.38	0.96	26.96	66.38	1.59	1.20	1.53
	2	1.00	0.33	3.62	1.51	13.56	3.75	0.96	19.73	46.51	1.43	1.15	1.51
	3	1.00	0.50	3.39	1.50	11.91	3.51	0.97	17.23	39.82	1.37	1.13	1.50
	4	1.00	1.00	2.92	1.46	8.73	2.99	0.97	12.43	27.25	1.27	1.10	1.46
	5	0.50	1.00	2.37	1.41	5.72	2.41	0.98	7.89	15.88	1.17	1.06	1.41
	6	0.33	1.00	2.06	1.36	4.30	2.09	0.99	5.76	10.83	1.12	1.05	1.36
54	1	1.00	0.00	3.65	1.32	14.11	3.86	0.94	17.64	32.67	1.44	1.08	1.32
	2	1.00	0.33	3.23	1.31	10.91	3.38	0.95	13.60	24.34	1.33	1.06	1.31
	3	1.00	0.50	3.06	1.30	9.75	3.19	0.96	12.13	21.38	1.30	1.06	1.30
	4	1.00	1.00	2.68	1.28	7.43	2.78	0.97	9.17	15.53	1.22	1.04	1.28
	5	0.50	1.00	2.23	1.24	5.09	2.29	0.97	6.18	9.83	1.14	1.03	1.24
	6	0.33	1.00	1.96	1.22	3.93	2.00	0.98	4.69	7.09	1*10	1*02	1.22
75	1	1.00	0.00	3.09	1.29	9.54	3.08	1.00	12.34	20.49	1.10	1.04	1.29
	2	1.00	0.33	2.72	1.27	7.38	2.71	1.00	9.40	15.15	1.08	1.03	1.27
	3	1.00	0.50	2.57	1.26	6.62	2.57	1.00	8.37	13.30	1.07	1.03	1.26
	4	1.00	1.00	2.26	1.24	5.11	2.26	1.00	6.34	9.72	1.05	1.02	1.24
	5	0.50	1.00	1.90	1.20	3.62	1.90	1.00	4.36	6.31	1.02	1.01	1.20
	6	0.33	1.00	1.70	1.18	2.88	1.70	1.00	3.39	4.69	1.01	1.01	1.18
83	1	1.00	0.00	2.63	1.20	6.81	2.59	1.01	8.26	11.72	0.97	1.03	1.20
	2	1.00	0.33	2.11	1.17	4.43	2.09	1.01	5.22	7.07	0.97	1.02	1.17
	3	1.00	0.50	1.96	1.16	3.80	1.94	1.01	4.43	5.89	0.97	1.02	1.16
	4	1.00	1.00	1.68	1.13	2.80	1.67	1.01	3.18	4.04	0.97	1.01	1.13
	5	0.50	1.00	1.43	1.10	2.03	1.42	1.00	2.24	2.68	0.97	1.01	1.10
	6	0.33	1.00	1.31	1.08	1.71	1.31	1.00	1.85	2.13	0.97	1.01	1.08

- Continued -

keV	line #	percent		ratios							correction factors		
		X-ray	Cs	R10	R11	R12	B13	B14	B15	B16	CF1	CF2	CF3
117	1	1.00	0.00	1.90	1.19	3.43	1.81	1.05	4.29	5.76	0.97	1.01	1.19
	2	1.00	0.33	1.72	1.17	2.83	1.65	1.04	3.44	4.48	0.97	1.01	1.17
	3	1.00	0.50	1.65	1.16	2.62	1.59	1.04	3.14	4.05	0.97	1.01	1.16
	4	1.00	1.00	1.51	1.13	2.21	1.46	1.03	2.57	3.21	0.97	1.01	1.13
	5	0.50	1.00	1.35	1.10	1.79	1.33	1.02	2.02	2.41	0.97	1.01	1.10
	6	0.33	1.00	1.27	1.08	1.58	1.25	1.02	1.74	2.02	0.97	1.00	1.08
164	1	1.00	0.00	1.46	1.16	1.99	1.37	1.07	2.47	3.12	0.95	1.00	1.16
	2	1.00	0.33	1.36	1.14	1.75	1.29	1.05	2.09	2.57	0.95	1.00	1.14
	3	1.00	0.50	1.32	1.13	1.67	1.26	1.05	1.97	2.38	0.96	1.00	1.13
	4	1.00	1.00	1.25	1.10	1.50	1.20	1.04	1.72	2.01	0.96	1.00	1.10
	5	0.50	1.00	1.17	1.07	1.34	1.14	1.03	1.47	1.66	0.96	1.00	1.07
	6	0.33	1.00	1.13	1.06	1.25	1.11	1.02	1.35	1.48	0.96	1.00	1.06
207	1	1.00	0.00	1.36	1.20	1.76	1.29	1.05	2.22	3.03	0.95	1.00	1.20
	2	1.00	0.33	1.28	1.16	1.58	1.23	1.04	1.91	2.49	0.96	1.00	1.16
	3	1.00	0.50	1.25	1.15	1.51	1.21	1.04	1.80	2.30	0.96	1.00	1.15
	4	1.00	1.00	1.19	1.12	1.39	1.16	1.03	1.60	1.95	0.96	1.00	1.12
	5	0.50	1.00	1.13	1.09	1.26	1.11	1.02	1.39	1.62	0.96	1.00	1.09
	6	0.33	1.00	1.10	1.07	1.19	1.08	1.01	1.29	1.45	0.97	1.00	1.07
Cs-137		0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.97	1.00	1.00

line #	Percent beta	Cs	R10	R11	R12	R13	R14	R15	R16
1	1.00	0.00	30.00	33.33	900.00	30.00	1.00	30000.00	3.33e+7
2	1.00	0.33	1.09	3.69	1.18	1.09	1.00	4.37	59.65
3	1.00	0.50	1.06	2.83	1.12	1.06	1.00	3.17	25.37
4	1.00	1.00	1.03	1.94	1.06	1.03	1.00	2.06	7.75
5	0.50	1.00	1.01	1.48	1.03	1.01	1.00	1.52	3.32
6	0.33	1.00	1.01	1.32	1.02	1.01	1.00	1.34	2.33

$R10=A2/A4$ $R11=A1/A2$ $R12=A2^2/A3 \cdot A4$ $R13=A2/A3$ $R14=A3/A4$ $R15=A1 \cdot A2/A4^2$
 $R16=A1^3/A2 \cdot A3 \cdot A4$ $CF1=A4mR/Deep$ $CF2=Shallow/Deep$ $CF3=A1std/A2std$

것으로 하였다. 다음 단계로 Cs-137과 X-선과의 혼합장에 대한 조건만을 재 설정하기 위해 다음 식이[8] 사용되었다.

$R = A1 - (A2 \cdot CF3)$ (5)

식(5)는 베타에 기인된 선량을 계산하는데 적용 되는데, $R \leq (A1 \cdot 0.1)$ 일 때 선량계는 Cs-137과 X-선과의 혼합장에 조사된 것으로 하였다.

(5) X-선과 베타와의 혼합장

$R10 \geq 1.3$ 이고, $R \geq (A1 \cdot 0.1)$ 일때 [8] 선량계는 X-선과 베타와의 혼합장에 조사된 것으로 하였다.

나. 선량평가법

(1) $A1 > 50$ 혹은 $A2 > 50$ 일때

㉠ 베타입자에 기인된 선량

- 베타선량 = A1 영역의 판독치
- 피부선량당량 = 베타선량
- ㉔ HEP에 기인된 선량
 - 심부선량당량 = A4 영역의 판독치/0.97
 - 피부선량당량 = 심부선량당량
- ㉕ HEP와 베타와의 혼합장에 기인된 선량
 - 베타선량 = A1 영역의 판독치 - A2 영역의 판독치
 - 심부선량당량 = A4 영역의 판독치/0.97
 - 피부선량당량 = 베타선량 + 심부선량당량
- ㉖ Cs-137과 X-선과의 혼합장에 기인된 선량
 - 심부선량당량 = A4 영역의 판독치/CF1
 - 피부선량당량 = (A4 영역의 판독치/CF1) * CF2
- ㉗ X-선과 베타와의 혼합장에 기인된 선량
 - 베타선량 = A1 - (A2 영역의 판독치 * CF3)
 - 심부선량당량 = (A4 영역의 판독치/CF1)
 - X-선에 기인된 피부선량당량 = (A4 영역의 판독치/CF1) * CF2
 - 피부선량당량 = 베타선량 + X-선에 기인된 피부선량당량

(2) $A1 \leq 50$ 혹은 $A2 \leq 50$ 일때

- ㉘ $(A1 - A2) \geq 20$ 일때
 - 베타선량 = A1 영역의 판독치 - A2 영역의 판독치
 - 심부선량당량 = (A3 영역에서의 판독치 + A4 영역에서의 판독치)/2
 - 피부선량당량 = 베타선량 + 심부선량당량
- ㉙ $(A1 - A2) \leq 20$ 일때
 - 심부선량당량 = (A3 영역의 판독치 + A4 영역의 판독치)/2
 - 피부선량당량 = 심부선량당량

다. 보정인자(CF1, CF2, CF3)의 결정방법

보정인자의 결정에는 표 4에 주어진 R10, R11, R12, R13, R14, R15 및 R16의 값과 성능시험용 선량계로부터 얻어진 R10, R11, R12, R13, R14, R15 및 R16의 값을 사용하였으며, 보정인자의 결정식은 다음과 같이 주어진다.

$$DOF(j) = \sum_{j=1}^{j=54} \left\{ \sum_{i=10}^{i=16} \frac{Ri_{std} - Ri_{mea}}{Ri_{std}} \right\} \quad (6)$$

j=1 부터 j=54까지 DOF의 값을 계산한 다음, 가장 적은 DOF의 값을 갖는 라인수를 선정한다. 이때 선정된 라인수에 있는 CF1, CF2, CF3가 구하고자 하는 보정인자의 값이 된다.

라. 중성자 선량계산

중성자의 선원과 에너지를 알고 있을 경우 중성자 선량계산에는 Px 코드[5]를 사용하였으며, 선량 계산식은 다음과 같이 주어진다.

$$\text{중성자에 의한 심부선량당량} = \{ A3(n) - A3(\gamma) \} \times Px \quad (7)$$

여기서, A3(n)는 중성자 측정용 TLD(⁶LiF/CaSO₄:Dy)의 A3 영역의 판독치를, 그리고 A3(γ)는 베

Table 5. Neutron energy response of ⁶LiF/CaSO₄: Dy neutron dosimeter.

neutron energy (MeV)	source	mrem/mR (Px)
0.025x10 ⁻⁶	Th column	0.06
0.206	Van de Graff	0.78
1.056	Van de Graff	4.24
2.348	²⁵² Cf(un-mod)	6.67
2.520	Van de Graff	7.25
3.540	Van de Graff	7.81
4.200	Pu/Be	12.82
4.870	Van de Graff	13.16
²⁵² Cf(D ₂ O mod)	²⁵² Cf(D ₂ O mod)	0.69
spectrum		

Table 6. Dose delivered to TLD's for the first dosimetry performance testing.

Category	Irradiation Range	Deep	Shallow
I. Accidents:M150	10-500 rad	31.155	No Test
II. Accidents: Cs-137	10-500 rad	55.231	No Test
III. Low-energy photons-S60	0.03-10 rem	0.660	0.767
IV. Cs-137 gamma	0.03-10 rem	0.099	No Test
V. Sr/Y-90 betas	0.15-10 rem	No Test	0.912
VI. Photon Mixtures	X-ray (S60)	0.273	0.318
	Cs-137	0.330	0.330
VII. Beta-Gamma Mixtures	0.05-5 rem	Total 0.603	0.648
	Sr/Y-90	0.000	0.399
	Cs-137	0.140	0.140
VIII. Neutron-Gamma Mixtures	0.20-5 rem	Total 0.140	0.539
	Cf-252(avg.)	0.100	No Test
	Cs-137	0.082	No Test
	0.15-5 rem	Total 0.182	

Table 7. Dose delivered to TLD's for the second dosimetry performance testing.

Category	Irradiation Range	Deep	Shallow
I. Accidents: M150	10-500 rad	30.594	No Test
II. Accidents: Cs-137	10-500 rad	13.349	No Test
III. Low-energy photons-S75	0.03-10 rem	0.486	0.583
IV. Cs-137 gamma	0.03-10 rem	0.517	No Test
V. Sr/Y-90 betas	0.15-10 rem	No Test	0.292
VI. Photon Mixtures	X-ray(S75)	0.304	0.365
	Cs-137	0.674	0.674
VII. Beta-Gamma Mixtures	0.05-5 rem	Total 0.978	1.039
	Sr/Y-90	0.000	0.183
	Cs-137	0.151	0.151
VIII. Neutron-Gamma Mixtures	0.20-5 rem	Total 0.151	0.334
	Cf-252 (avg.)	0.155	No Test
	Cs-137	0.060	No Test
	0.15-5 rem	Total 0.215	

타-감마 측정용 TLD($\text{CaSO}_4:\text{Dy}$)의 A3 영역의 판독치를, 그리고 Px는 중성자 측정용 TLD에 대한 선량당량 환산계수(mrem/mR)이며, 이 값은 표 5에 주어져 있다.

4. 선량평가 알고리즘의 검증

개발된 선량평가 알고리즘의 건전성을 확인하고 판독절차의 신뢰성을 보증할 목적으로 ANSI N 13.11-1983의 검증 프로그램 및 절차에 따라 선

Table 8. The first dosimetry performance testings result.

Category	DEEP				SHALLOW				Tolerance Level
	B	S	IBI+S	P/F	B	S	IBI+S	P/F	
I.	0.17	0.01	0.19	(P)		No Test			0.30
II.	-0.10	0.02	0.12	(P)		No Test			0.30
III.	0.17	0.02	0.19	(P)	0.20	0.02	0.23	(P)	0.50
IV.	0.00	0.02	0.02	(P)		No Test			0.50
V.		No Test			-0.02	0.02	0.04	(P)	0.50
VI.	0.07	0.01	0.08	(p)	0.09	0.02	0.10	(P)	0.50
VII.	-0.06	0.01	0.07	(P)	-0.03	0.01	0.04	(P)	0.50
VIII.	0.10	0.02	0.11	(P)		No Test			0.50

Code: P=Pass
 F=Fail
 B=Bias
 S=Standard Deviation

Table 9. The second dosimetry performance testings result.

Category	DEEP				SHALLOW				Tolerance Level
	B	S	IBI+S	P/F	B	S	IBI+S	P/F	
I.	-0.10	0.10	0.20	(P)		No Test			0.30
II.	-0.04	0.01	0.06	(P)		No Test			0.30
III.	-0.15	0.03	0.18	(P)	0.01	0.04	0.05	(P)	0.50
IV.	-0.02	0.02	0.04	(P)		No Test			0.50
V.		No Test			-0.05	0.02	0.07	(P)	0.50
VI.	0.00	0.04	0.04	(P)	-0.03	0.03	0.05	(P)	0.50
VII.	-0.10	0.02	0.12	(P)	-0.08	0.02	0.10	(P)	0.50
VIII.	0.15	0.01	0.16	(P)		No Test			0.50

Code: P=Pass
 F=Fail
 B=Bias
 S=Standard Deviation

량평가 알고리즘에 대한 검증작업을 2차례 수행하였다. 검증기관으로는 미국 국립표준과학연구소에서 공인한 개인선량계 조사 및 검증기관인 Atlan-Tech사로 하였다. 검증시 마다 120개의 TLD (15개의 TLD/category × 8 category)와 6개의

control TLD를 Atlan-Tech사에 보냈으며, Atlan-Tech사에서는 control TLD를 제외한 모든 TLD에 1차 검증시는 표 6과 같이, 2차 검증시에는 표 7과 같이 조사시켜 다시 보내왔다. 다음 이들 TLD로부터의 판독값과 개발된 선량평가 알고리즘으로

심부선량당량과 피부선량당량을 계산하여 그 결과를 다시 Atlan-Tech사에 보내 선량평가 결과에 대한 검증을 받았다.

검증결과 각 시험범주별 성능지수의 평균치(B)와 성능지수의 표준편차(S)는 1차 검증시에는 표 8과 같이 평가되었고, 2차 검증시에는 표 9와 같이 평가되었다. 1차 및 2차 평가결과는 모두 허용 준위(L)이내의 분포를 보였다.

결 론

본 연구는 선량평가 결과에 대한 신뢰도와 정확도를 향상시킬 목적으로 선진 외국의 선량평가 규정 (ANSI N13.11-1983)에 맞는 선량평가 알고리즘을 개발하는데 의미를 두었다.

그 결과 본 연구에서 개발한 선량평가 알고리즘은 ANSI N13.11-1983에서 제시한 개인선량계 성능 시험 범주를 모두 만족시킬 수 있음이 확인되었다. 따라서 개인 모니터링용으로 Teledyne Isotopes사의 PB-3 열형광선량계를 사용하고 있는 원전에서는 개발된 선량평가 알고리즘을 적용함으로써 방사 선량평가 결과의 정확도와 신뢰도를 향상시키는데 크게 기여하게 될 것이다.

참 고 문 헌

1. ANSI, "American National Standard for Dosimetry - Personnel Dosimetry Performance - Criteria for Testing," ANSI N13.11 - 1983, American National Standards Institute, New York, N. Y. (1983)
2. ICRU, "Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources," ICRU Report 39, International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD. (1985)
3. ICRU, "Determination of Dose Equivalents

- from External Radiation Sources-Part2," ICRU Report 43, International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD. (1988)
4. ICRP, "Data for Use on Protection Against External Radiation," ICRP Publ. 51, Annals of the ICRP 17(2/3), Pergamon Press, Oxford. (1987)
5. Teledyne Isotopes, TLD 9150 Manual (1985)
6. I.M. Rayes and T. G. Stobe, Mixed Field Multi-element Beta/Gamma Dosimeter Design, Radiat. Prot. Dosim. Vol. 17.(1986)
7. R. Jahr, B. R. L. Siebert and W. G. Alberts, Operational Quantities and Calibration Procedures for Individual Monitoring, Radiat. Prot. Dosim., 28(1/1) 33~36. (1989)
8. Teledyne Isotopes, Private Communications (1992)

Development of Algorithm for Evaluation of the Dose with Thermoluminescence Dosimeter

Myung-Jae Song, Hee-Keun Kim, Chung-Woo Ha*
Tae-Young Lee, Suk-Chul Yoon**

*Research Center, Korea Electric Power Corporation, Korea Institute of Nuclear Safety**
*Korea Atomic Energy Research Institute***

ABSTRACT

The purpose of this study is to develop an algorithm of TLD dose evaluation to meet all requirements stated in ANSI N13. 11-1983. It made the PB-3 TLD of Teledyne Isotopes an object of the development. Personal dosimetry performance testings of the development algorithm have been performed twice through the Atlan-Tech, INC. in accordance with the criteria of testing described in ANSI N13. 11-1983. As a result, it is assured that the developed algorithm has complied with all requirements stated in ANSI N13. 11-1983.

Key words : Algorithm of TLD Dose Evaluation, Teledyne Isotopes PB-3 Thermoluminescence