

국제상호비교검증을 통한 Teledyne PB-3 개인선량계시스템의 성능시험

이상윤 · 이형섭 · 김장렬 · 윤석철

한국원자력연구소

요 약

최근, 개인방사선피폭선량평가에 관한 기술기준이 과학기술처에 의해 고시됨에 따라 국내에서도 개인선량계를 이용한 체외피폭선량평가결과의 신뢰성 문제가 크게 대두되고 있다. 한국원자력연구소에서는 이러한 국내의 상황을 인식하고 자체적인 신뢰성 확보를 위해 미국의 Oak Ridge 국립연구소의 주관하에 개인피폭선량의 평가에 관한 국제상호비교검증시험(Personnel Dosimetry Intercomparison Study ; PDIS)을 수행하였다. 비교검증시험에는 한국원자력연구소에서 사용하고 있는 Teledyne PB-3 열형광선량계가 사용되었으며 선량계산 알고리즘은 Teledyne PB-3 version 1.5-1989를 사용하였다. 본 연구에서는 지금까지 실시된 PDIS의 결과를 요약하고 현재 PB-3 시스템의 개인선량평가성능에 대해 고찰하였으며, 선량평가절차에 대한 문제점 도출을 통하여 직업적 방사선피폭선량 평가능력의 향상을 위한 방안을 제시하였다.

Keywords : 개인방사선피폭선량평가, PB-3 열형광선량계, 국제상호비교검증시험

서 론

외부방사선 피폭선량 측정용으로 가장 널리 사용되는 측정기로는 필름배지 및 열형광선량계가 있으며, 사용상의 편리함과 평가결과의 높은 신뢰성으로 인해 열형광선량계의 사용이 증가하고 있다. 그러나, 현재 국내에서 개인방사선피폭선량 측정용으로 사용되고 있는 대부분의 측정기들은 선량평가에 대한 성능검증이 수행되지 않은 상

태에서 사용되고 있으며 그 측정결과에 대한 객관적인 신뢰성을 보장할 수 없다. 따라서 개인방사선피폭선량의 정확한 평가를 위한 선량평가시스템의 성능검증은 방사선피폭에 의한 장해를 미연에 방지한다는 측면에서 극히 중요하며, 최근 과학기술처에서는 이러한 국내의 문제점들을 인식하고 개인피폭선량판독에 의한 일반적인 기술 기준을 고시로 제정·공포한 바 있다[1].

현재 국내에서도 많은 기관에서 다양한 종류의

개인선량계시스템으로 개인피폭선량평가에 관한 업무를 수행하고 있으며, 이들 기관들은 자체의 방사선작업자에 대한 피폭관리업무를 수행하거나 타 기관에 대해 관독관리업무를 서비스하고 있다. 향후, 이들 관독서비스 기관들에 대한 성능검증이 과학기술처의 고시에 따라 수행될 예정이나 현재까지는 성능검증에 관한 구체적인 기준이 확립되지 못한 실정이다. 따라서 한국원자력연구소에서는 이러한 국내의 상황을 인식하고 자체적인 신뢰성 확보를 위해 1991년부터 미국의 Oak Ridge 국립연구소(Oak Ridge National Laboratory : ORNL)의 주관하에 개인피폭선량의 평가에 관한 국제상호비교검증시험(Personnel Dosimetry Intercomparison Study : PDIS)을 수행해 오고 있다.

PDIS는 미국의 Oak Ridge 국립연구소의 주관하에 1974년부터 실시되고 있는 개인선량평가에 관한 국제상호비교검증프로그램으로, 다양한 방사선장에 대한 각 참가국들의 개인선량평가능력을 시험하고 개인선량 측정 기기를 교정할 수 있는 기회를 부여하기 위해 추진되어 왔다[2].

본 연구에서 수행한 PDIS 국제상호비교검증시험의 절차는 다음과 같다.

- (1) ORNL에서는 매년 프로그램의 시험항목을 통보한다.
- (2) 참가자는 시험항목을 검토한 후 참가할 시험항목을 ORNL로 통보한다.
- (3) 참가자는 검증용 개인선량계를 각 항목당

3개씩 ORNL로 보낸다.

- (4) ORNL에서는 참가자들의 개인선량계를 조사시켜 조사조건과 함께 다시 반송한다. 이때 조사된 선량은 알려주지 않는다.
- (5) 참가자는 개인선량계를 관독하고 그 결과를 ORNL로 통보한다.
- (6) ORNL에서는 참가자들의 관독결과를 취합·분석한 후 참가자들에게 실제 조사된 선량값을 통보한다.

이와 같이 각 참가자들은 각 시험항목에 대해 3개의 개인선량계를 통해 조사된 방사선원과 피폭선량을 평가하여야 한다. 초기 12년 동안에 총 116개 기관(미국내 78개, 외국 38개)이 ORNL의 상호비교검증시험에 참가하였으며 이 기관들은 정부연구소(40%), 발전소(20%), 대학(14%), 관독서비스업체(13%), 군부대 및 규제기관(12%), 병원(1%)으로 구성되어 있다. 초기 6회까지의 PDIS에는 평균 18개의 기관이 프로그램에 참가하였으며 점차 참가율이 증가하여 최근에는 세계적으로 약 40여 기관이 참가하고 있다[3].

본 연구에서는 1991년부터 1993년 까지 3회에 걸쳐 PDIS 프로그램에 참가하였으며 비교검증시험기간 등의 사항은 표 1에 요약된 바와 같다. ORNL과의 상호비교검증시험에 사용된 열형광선량계는 한국원자력연구소에서 방사선작업종사자의 피폭관리용으로 사용되고 있는 Teledyne PB-3를 사용하였으며 선량계산에 사용된 알고리즘은

Table 1. Summary of ORNL PDIS During a Period 1991~1993

PDIS No	Dates of Studies	No. of Test Categories	No. of Test Participated
PDIS-16	Apr. 15~Aug. 2, 1991	7	4
PDIS-17	Apr. 20~Aug. 12, 1992	7	5
PDIS-18	Apr. 19~Aug. 31, 1993	8	8

Table 2. Filter Materials and Thickness for the PB-3 Badge System

Area	Front	Back
A1	7mg/cm ² Mylar film	Plastic case
A2	Plastic case 3.2mm of Teflon Plastic case	Plastic case
A3	Plasticcase 2.64mm of slotted Cu 0.81mm of Al Plastic case	Plastic case 1.02mm of Cu 0.81mm of Al Plastic case
A4	Plastic case 2.64mm of slotted Cu 0.81mm of Al Plastic case	Plastic case 0.13mm of slotted Cu 0.81mm of Al 0.81mm of Cd Plastic case

Teledyne PB-3 version 1.5-1989를 사용하였다. 또한 선량계 판독시스템은 한국원자력연구소의 국가2차표준교정시설내의 Cs-137 선원을 이용하여 교정하였고, 시험용 선량계의 각 소자별 열형 광체(phosphor) 함유량에 따른 반응도 차이를 보정하기 위해 ⁹⁰Sr/Y 베타선원을 이용하여 소자 보정인자를 도출·적용하였다.

Teledyne PB-3 개인선량계시스템

I. Teledyne PB-3 Version 1.5-1989 알고리즘

Teledyne의 선량평가 알고리즘은 개인선량계의 각 필터구역별 반응도에 기초를 두고 있다. 이는 PB-3 개인선량계의 배지시스템이 측정하고자 하는 방사선의 종류에 따라 에너지흡수 특성을 달리하는 여러 영역들로 구성되어 있다는 것을 의미하고 있다. PB-3 개인선량계시스템은 알고리즘 설계를 위한 배지시스템의 설계요구사항을 만족

시키기 위하여 4개의 영역으로 구성되어 있으며, 각 영역은 배지케이스내 각 영역에 존재하는 필터의 재질 및 두께에 따라 서로 상이한 에너지 흡수 특성을 갖고 있다. 본 연구에 사용된 개인 선량계의 필터재질 및 두께는 표 2와 같으며 선량평가에 이용되는 각 영역의 도시메트리 특성은 다음과 같이 요약된다.

1) A1 : 개방 영역(Open window)

이 영역은 베타선과 감마선에 동시에 반응하는 영역으로서 피부선량당량 $H_p(0.07)$ 을 평가하는데 이용된다.

2) A2 : 베타선 분리 영역(beta shield)

⁹⁰Sr/Y 베타선원($E_{max}=2.3$ MeV)의 대부분을 차폐하여 주로 감마선에만 반응하도록 한다. 이 영역의 판독치와 A1 영역의 판독치를 비교하여 순수 베타선 및 혼합방사선장(베타+감마선)에서의 방

사선 구분이 가능하다.

3) A3 : 에너지 분리 영역(bias filter)

혼합감마선의 스펙트럼을 분석하기 위한 영역으로서 일정 에너지이하의 저 에너지 감마선은 이 필터를 이용해 차폐하고 고 에너지 감마선만 필터를 통과하게 된다. A3 영역의 반응도 값은 A4 필터영역과 함께 입사된 광자의 에너지 구별을 위한 보조적인 자료로 사용된다.

4) A4 : 에너지 보상 영역(energy compensation)

모든 X-선 및 감마선의 에너지 영역에 대한 반응이 평판화(flat)되며, 이 영역의 판독값이 심부선량당량 $H_p(10)$ 의 평가에 사용되게 된다. 또한 후방 필터에는 중성자선량의 측정을 위하여 카드뮴 필터가 포함되어 있다.

열형광체 $\text{CaSO}_4 : \text{Dy}$ 의 경우, 중성자에 대해서는 반응 하지 않고 오직 베타 및 감마선에만 반응을 하므로 중성자 선량을 측정하기 위해서는 추가의 선량계가 필요하다. 따라서 중성자선량 측정에는 $\text{CaSO}_4 : \text{Dy}$ 와 더불어 ${}^6\text{LiF}/\text{CaSO}_4 : \text{Dy}$ 가 동시에 사용되고 있으며, 이 선량계는 테프론, $\text{CaSO}_4 : \text{Dy}$ 및 ${}^6\text{LiF}$ 가 혼합되어 있는 물질로서 중성자뿐만 아니라 광자에도 반응을 하게 된다. PB-3 베지케이스의 경우, A4 영역의 후방필터에는 알루미늄 및 구리와 더불어 중성자선량을 측정하기 위한 카드뮴 필터가 있으므로 중성자 선량계의 A3 영역은 광자, 입사열중성자 및 albedo 중성자에 반응을 하는 한편, A4 영역은 광자와

Table 3. Energy Responses of ${}^6\text{LiF}/\text{CaSO}_4 : \text{Dy}$ Neutron Dosimeter[7]

Neutron Energy (MeV)	Source	mrem/mR
0.025×10^{-6}	Th Column	0.06
0.206	Van de graff	0.78
0.55	D_2O moderated ${}^{252}\text{Cf}$	0.69
1.056	Van de graff	4.24
2.348	Bare ${}^{252}\text{Cf}$	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

입사열중성자에만 반응하며, albedo 중성자는 후방 카드뮴 필터에 의하여 (n, α) 반응으로 흡수된다. 따라서 PB-3 선량계를 이용한 중성자선량 산정시에는 A3와 A4 영역의 반응만 고려되며 A1 및 A2 영역은 사용되지 않는다.

PB-3 개인선량계시스템에서 중성자에 의한 심부선량당량을 평가하기 위해서는 우선 감마선에 의한 선량기여분이 제외된 순수 중성자 기여분을 평가하여야 하며 다음과 같이 계산된다.

아래 식에서 Bcd 값은 영역 A4에서의 중성자 반응도를 나타내며 이 값은 카드뮴 필터에 의한 albedo 중성자의 차폐효과 때문에 항상 TLp 값보다 작게 나타난다. 이러한 TLp와 Bcd 값을 이용한 중성자 선량의 계산방법은 두 가지로 구분된다. 첫째, TLp 값만을 이용하여 중성자선량을 계산하는 방법으로, 이 방법은 특정한 중성자장

중성자선량계

A3 영역 ; (중성자 기여분 + 감마 기여분) - (감마 기여분) = 중성자 기여분 A3 (TLp)

A4 영역 ; (중성자 기여분 + 감마 기여분) - (감마 기여분) = 중성자 기여분 A4 (Bcd)

감마선량계

에서의 일정한 조사조건에 대한 선량계의 반응도를 독립적으로 측정하고 이에 따른 선량환산인자를 도출해 사용하는 것으로서 중성자선량은 식 (1)과 같이 계산되며 관계된 선량환산인자는 표 3에 정리한 바와 같다[7].

$$\frac{\text{중성자선량 (mrem)}}{\text{TLp (mR)}} = \text{mrem/mR 환산인자 (1)}$$

둘째, 다양한 중성자장에서의 Bcd/TLp 비율에 따른 선량환산인자를 사용하는 방법으로, 이 방법은 열중성자장, lucite 감속 중성자장, B₂O 감속 중성자장 등 다양한 중성자장의 스펙트럼에서 도출된 선량환산인자 그래프로 부터 Bcd/TLp 비율에 따른 선량환산인자를 구해 적용한다. 이 방법에 의한 중성자선량의 계산은 식 (2)와 같이 이루어지며 선량환산인자 그래프는 그림 1과 같다 [3].

$$\frac{\text{중성자선량 (mrem)}}{\text{TLp (mR)} \times \text{RCF}} = \text{mrem/mR 환산인자 (2)}$$

$$\text{RCF} = \frac{\text{SCRF}}{\text{MRF}} \quad (3)$$

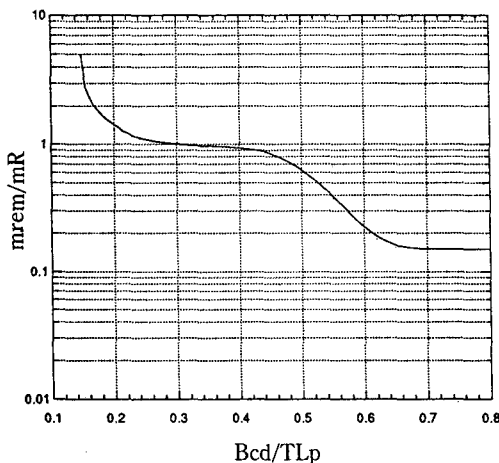


Figure 1. Neutron mrem/mR conversion Factor as a Function of Bcd/TLp Ratio.

여기서, RCF ; Response Correction Factor
(=3.23 for ²⁵²Cf)

SCRF ; Spectrum calculated response factor for 4 conditions
(bare, lucite, concrete, steel/concrete) : 1.037 × 10⁻⁴ mR/N.cm² (²⁵²Cf)

MRF ; Measured response factor :
3.211 × 10⁻⁵ mR/N.cm² (²⁵²Cf)

2. 소정보정인자(Element Correction factor ; ECF)

지금까지 선량계의 반응도 검사는 통상 최초 구매시에만 이루어지고 반복사용 중에는 별로 행해지지 않는 것이 관례였다. 그러나 실제로 선량계는 많은 작업자들에 의해 반복 사용되는 과정에서 여러 가지 물리적 영향에 의해 반응도가 점차 떨어지게 된다. 이처럼 반복사용으로 인한 반응도 저하는 사용조건에 따라 크게 달라지므로 반드시 정기적으로 점검하여 보정할 필요가 있다. 따라서 선량계 최초 구입시에는 물론 사용되는 도중에도 소자보정인자를 도출하여 사용하여야 한다. 이러한 선량계 소자보정법의 사용목적은 새로운 선량계의 반응도를 검사하고 사용중인 선량계의 신뢰도를 확보하는 데 있다[4].

본 연구에서는 PDIS-17('92) 부터 검증용으로 사용되는 개인선량계에 대해 소자보정인자에 의한 반응도 보정의 개념을 도입하였다. 개인선량계의 소정보정인자란 임의로 선정된 기준선량계(Reference TLD)의 각 소자들이 가지는 반응도 평균 값에 대한 개인선량계의 한 소자가 가지는 반응도 비로 정의되며 식 (4)와 같이 표기된다[4].

$$\text{ECF}(i, j) = \frac{e(i, j)}{\text{EM}(i)} \quad (4)$$

여기서, ECF(i, j) : 선량계(j)의 소자(i)가 가지는 소자보정인자,
 e(i, j) : 주어진 방사선에 대한 선량계(j)의 소자(i)가 가지는 반응도,
 EM(i) : 주어진 방사선에 대한 기준 선량계들의 소자(i)가 가지는 반응도의 평균값이다.

소자보정법을 적용하기 위해 본 연구에서는 현재 한국원자력연구소에서 사용중인 선량계를 기준선량계(Reference Dosimeter), 대조선량계(Control Dosimeter) 및 현장선량계(Field Dosimeter)로 분류하였으며 검증용 선량계의 ECF를 도출·적용하였다.

국제상호비교검증시험 결과

I. PDIS-16 ('91)

1991년에 실시된 PDIS-16에는 7개의 시험 항목이 제공되었으며 본 연구에서는 이중 3개의 항목에 참가하였다. 표 4에 제시된 각 시험항목에서의 조사거리인 선원의 중심에서부터 phantom의 전면중심까지의 거리를 나타내며 모든 조사시간은 1시간을 초과하지 않고 있다. 개인선

량계의 조사(irradiation)는 Oak Ridge 국립연구소에 있는 Radiation Calibration Laboratory(RAD-CAL)에서 수행되었으며, 시험항목 6을 제외한 모든 조사에는 40 × 40 × 15cm Lucite slab phantom이 사용되었고, 베타선 조사의 경우에는 30 × 30 × 15cm Lucite slab phantom이 사용되었다[5].

PDIS-16이 실시된 '91년에는 국내에서 ECF의 개념이 정립되지 못한 관계로 선량계에 대한 소자보정인자의 사용은 고려되지 않았으며, 일정선량에 대해 동일한 반응도를 나타내는 선량계를 선별(screen)하여 사용하였다. 또한 PDIS-16에서의 D₂O moderated ²⁵²Cf 중성자선량의 계산에는 표 3의 선량환산인자(=0.69)를 사용하였다. 성능 시험 결과의 해석에 사용된 성능지수는 식 (5) 및 식 (6)과 같이 계산되었으며, 시험결과는 표 5에 요약된 바와 같다.

$$\text{성능지수 } |P_i| = \left| \frac{H'_i - H_i}{H_i} \right|, \quad (5)$$

여기서, H_i는 조사선량, H'_i는 측정된 선량,

$$\text{표준편차 } S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}{(n-1)}} \quad (6)$$

Table 4. Test Categories and Irradiation Conditions of PDIS-16('91)

Exposure Number	Source Description	Distance (meters)	9"/3" Ratio	Average Neutron Energy(MeV)
1	15cm D ₂ O-moderated ²⁵² Cf	0.75	0.34	0.55
2	²⁵² Cf(D ₂ O), non- ⊥ incidence	0.75	0.34	0.55
3	²⁵² Cf(D ₂ O), ¹³⁷ Cs enhanced	0.75-n, 2.0-γ	0.34	0.55-n, 0.662-γ
4	²³⁸ PuBe	0.75	3.09	4.0
5	¹³⁷ Cs	2.0	—	0.662(gamma)
6	⁹⁰ Sr- ⁹⁰ Y	0.35	—	2.28(beta, max.)
7	Accelerator	0.75	8.3	14

Table 5. Results of ORNL Intercomparison Study PDIS-16('91)

Exposure Number	Delivered Dose (mrem)		Reported Dose (mrem)		Performance Quotient(P)		Standard Deviation(S)	
	Neutron	Gamma	Neutron	Gamma	Neutron	Gamma	Neutron	Gamma
1	189	31	167	30	0.0882	0.0437	0.0399	0.0147
			167	30				
			183	33				
3	33	32	31	25	0.0101	0.2084	0.0515	0.0148
			34	26				
			35	25				
5	-	17	-	21	-	0.1961	-	0.0277
			-	20				
6 ⁽¹⁾	-	300	-	115	-	0.6356	-	0.0184
			-	104				
			-	109				

⁽¹⁾ The results are evaluated from beta shallow dose.

Table 6. Test Categories and Irradiation Conditions of PDIS-17('92)

Exposure Number	Source Description	Distance (meters)	9"/3" Ratio	Average Neutron Energy (Mev)
1	15cm D ₂ O-moderated ²⁵² Cf	0.5	0.35	0.55
2	15cm D ₂ O-moderated ²⁵² Cf	0.75	0.33	0.55
3	²⁵² Cf(D ₂ O), non-⊥ incidence	0.5	0.35	0.55
4	²⁵² Cf(bare)	0.75	2.25	2.10
5	Neutron/gamma	0.75	2.20	-
6	Beta/gamma	0.35/1.00	-	-
7	¹³⁷ Cs	2.00	-	0.662(gamma)

표 5에서 나타난 바와 같이 PDIS-16에서는 중성자와 감마선의 단일선량 및 혼합선장에서 모두 우수한 결과를 나타내었다. 이들 선량에서의 성능지수는 최대 0.2 이하로 나타났으며 각각의 선량평가결과에 대한 표준편차는 모두 0.3 이하로 나타났다. 반면, 시험항목 6의 베타선장에 대해서는 평균 64%의 상대오차를 나타냈으며 표준편차

는 약 2% 정도로 나타났다. 베타선량에서의 이러한 판독오차는 판독당시 판독기의 하드웨어적 오류로 인해 발생되었으며, 선량계산 알고리즘의 문제는 아닌 것으로 판단되었다. ⁹⁰Sr/Y 베타선장에 대한 PB-3 선량계시스템의 신뢰성은 선량 판독값들의 표준편차가 0.018인 점을 통해서도 확인 가능하며, 이후의 시험결과를 통해서도 확인되었

Table 7. Results of ORNL Intercomparison Study PDIS-17('92)

Exposure Number	Delivered Dose (mrem)		Reported Dose (mrem)		Performance Quotient(P)		Standard Deviation(S)	
	Neutron	Gamma	Neutron	Gamma	Neutron	Gamma	Neutron	Gamma
1	132	21	80	34	0.4141	0.5873	0.0231	0.0275
			78	33				
			74	33				
4	132	5	60	0	0.5455	1.0	0	0
			60	0				
			60	0				
5	61	21	18	19	0.7049	0.1111	0	0.0275
			18	19				
			18	18				
6	-	183 (73) ⁽¹⁾	-	230(49)	-	0.3005 (0.2466)	-	0.0383 (0.0725)
			-	241(57)				
			-	243(59)				
7	-	56	-	70	-	0.2798	-	0.0372
			-	71				
			-	74				

⁽¹⁾ The values in parentheses are evaluated from shallow dose equivalent.

다.

2. PDIS-17 ('92)

표 6에서 보는 바와 같이 1992년에 실시된 PDIS-17에서는 중성자+감마 및 베타+감마의 혼합선장을 포함하여 7개의 시험 항목이 제공되었으며 본 연구에서는 이중 5개의 항목에 참가하였다. PDIS-17에서의 조사조건은 모두 PDIS-16과 동일하며 ²⁵²Cf(bare)인 경우의 조사조건도 D₂O moderated ²⁵²Cf의 경우와 동일하게 40×40×15cm Lucite slab phantom이 사용되었다.

한국원자력연구소에서는 PDIS-17이 실시된 '92년부터 PB-3 선량계시스템의 알고리즘 성능평가서에 ECF의 개념을 적용하였으며 본 연구에서도 선량계에 대한 반응도를 보정하기 위해 ECF를

적용하였다. PDIS-17에서의 D₂O moderated ²⁵²Cf 중성자선량의 계산에는 PDIS-16의 경우와 동일하게 표 3의 선량환산인자(=0.69)를 사용하였으며, unmoderated ²⁵²Cf 중성자선량의 계산에는 6.67을 사용하였다. 또한 시험항목 5의 선원미상의 중성자선량 시험에서는 선원에 대한 정보가 전혀 주어지지 않았으므로 D₂O moderated ²⁵²Cf 중성자선량의 환산인자인 0.69를 사용하였다. 이상과 같은 방법으로 평가한 PDIS-17의 시험결과는 표 7에 요약된 바와 같다.

표 7에서 나타난 바와 같이 PDIS-17에서는 감마선과 베타선의 단일선장 및 혼합선장인 시험항목 6과 7에서 우수한 결과를 나타내었으며, 그 이외의 항목에 대해서는 성능시험 허용기준을 초과하였다. 중성자 선량환산인자 0.69가 적용된

Table 8. Test Categories and Irradiation Conditions of PDIS-18('93)

Exposure Number	Source Description	Distance (meters)	9"/3" Ratio	Average Neutron Energy (MeV)
1	15cm D ₂ O-moderated ²⁵² Cf	0.5	0.35	0.55
2	²⁵² Cf(D ₂ O), non- \perp incidence	0.75	0.35	0.55
3	²⁵² Cf(bare)/PuBe(bare)	1	2.49	2.6
4	Low Energy X-ray	2	—	—
5	¹³⁷ Cs	0.75	—	—
6	Neutron/Beta Mix	0.75/0.35	0.74	0.86
7	Low Energy X-ray/Beta Mix	2.00/0.35	—	—
8	Photon/Beta Mix	1.00/0.35	—	—

시험항목 1에서 평가된 중성자 선량은 약 40% 정도 과소 평가된 반면, 감마선량은 약 60% 정도 과대평가 되었다. 이러한 결과는 중성자에 의한 2차 감마선의 기여분이 D₂O moderated ²⁵²Cf의 경우 약 18% 정도인 점을 고려할 때 해석이 어려운 결과로서 판독기의 교정이나 기초자료의 처리오류에 기인한 것으로 판단된다. 감속되지 않은 ²⁵²Cf 중성장에 대한 선량환산인자(=6.67)를 사용한 시험항목 4의 경우에도 선량계산 결과는 약 50% 정도 과소 평가된 것으로 나타났으며, 여러 가지 원인을 분석해 볼 때 ²⁵²Cf 중성자선량의 평가에서 표 3의 환산인자를 모든 경우에 적용하는 것은 부적절하다고 판단되었다. 미지의 중성자 선원에 대한 시험항목 5의 경우에는, 이 항목의 선량평가시 D₂O moderated ²⁵²Cf의 선량환산인자가 적용된 반면 ORNL의 실제 조사에서는 Polyethylene moderted ²⁵²Cf와 unmoderated ²³⁸PuBe가 사용되어 결과적으로 약 70% 정도의 과소평가 결과를 나타내게 되었다. 이 항목에서의 결과를 통해, 미지의 중성자 선원의 특성을 구별할 수 있는 기준의 제시가 필요하게 되었으며 이후의 PDIS에서는 선량평가시 열중성자와 속중성자의 fluence 비율인 9"/3" 비율을 고려해야 할 것으로

판단되었다.

3. PDIS-18 ('93)

1993년에 실시된 PDIS-18에서는 중성자+베타 및 베타+감마의 혼합선장을 포함하여 8개의 시험항목이 제공되었고 본 연구에서는 8개의 항목 전체에 참가하였으며 시험항목은 표 8에 요약된 바와 같다. 표 8에서의 조사조건은 모두 PDIS-17과 동일하며 단지 조사에 사용된 phantom이 변경되어, 중성자 및 감마선의 조사인 경우에는 40×40×15cm PMMA slab phantom이 사용되었으며 베타선의 조사에는 30×30×15cm PMMA slab phantom이 사용되었다[6].

PDIS-18에서도 PDIS-17과 같이 선량계에 대한 반응도를 보정하기 위해 ECF의 개념을 적용하였다. PDIS-18에서의 D₂O moderated ²⁵²Cf 중성자 선량의 계산에는 이전의 PDIS에서의 결과와 비교하기 위해 표 3의 선량환산인자(=0.69)를 사용하지 않고 Bcd/TLp 비율 방법을 사용하였으며, 수직으로 조사되지 않은 시험항목 2의 경우에는 조사각도 45°에 대한 PB-3 선량계의 각도보정인자(=0.7)를 사용하여 피폭선량을 평가하였다[7]. 또한 bare 상태의 ²⁵²Cf와 PuBe가 혼합된 중성자

Table 9. Results of ORNL Intercomparison Study PDIS-18('93)

Exposure Number	Delivered Dose (mrem)		Reported Dose (mrem)		Performance Quotient(P)		Standard Deviation(S)	
	Neutron	Gamma	Neutron	Gamma	Neutron	Gamma	Neutron	Gamma
1	115.7	unknown ⁽¹⁾	155	25	0.3195	-	0.0050	-
			152	23				
			153	25				
2	58.1	unknown	72	13	0.2909	-	0.0621	-
			74	12				
			79	13				
3	53.4	unknown	140	0	1.6904	-	0.2415	-
			133	0				
			158	0				
4	-	68 (150.5) ⁽²⁾	-	72(165)	-	0.0343 (0.0742)	-	0.0425 (0.0442)
			-	72(166)				
			-	67(154)				
5	-	29.8	-	31	-	0.0291	-	0.0194
			-	31				
			-	30				
6	16.4	unknown (62.6) ⁽³⁾	20	7(64)	0.3008	-	0.1960	-
			25	6(67)				
			19	7(65)				
7 ⁽²⁾	-	68 (306.4)	-	69(160)	-	0.0147 (0.4822)	-	0.0441 (0.0232)
			-	66(151)				
			-	72(165)				
8 ⁽²⁾	-	111.9 (240.2)	-	131(252)	-	0.1647 (0.0450)	-	0.0186 (0.0110)
			-	132(253)				
			-	128(248)				

(1) The information of test irradiation is not exactly known.

(2) The values in parentheses are evaluated from shallow dose equivalent.

(3) The values in brackets are evaluated from net beta shallow dose equivalent.

선량의 계산(시험항목 3)에는 표 3의 PuBe에 대한 선량환산인자(=12.82)를 사용하였다. 선원미상의 중성자선과 베타선이 혼합된 시험항목 6에서는 9"/3" 비율(=0.74)에 근거하여, 감속된 중성자선 원으로 판단하고 그림 1의 Bcd/TLp 비율에 의한 선량환산인자를 도출하여 적용하였다. 중성자선이

포함되지 않은 그 이외의 시험항목에 대해서는 기존의 선량계산알고리즘을 그대로 적용하여 피폭선량을 평가하였으며, 평가된 PDIS-18의 시험 결과는 표 9에 요약된 바와 같다.

ORNL의 사정으로 인해 국제상호비교검증시험이 PDIS-18을 마지막으로 종료되게 됨에 따라

PDIS-18의 시험결과에 대한 공식적인 통보가 없었다. 따라서 본 연구에서는 ORNL의 담당자를 통해 비공식적인 조사선량 자료를 입수하였으며 확인 가능한 부분에 대해서만 시험결과를 분석하였다[8]. 표 9에서 나타난 바와 같이 PDIS-18에서는 bare ^{252}Cf +bare PuBe의 혼합선장과 감마+베타 혼합선장에서 선량평가를 제외한 모든 시험항목에서 우수한 결과를 나타내었다. 시험항목 3과 7을 제외한 방사선장에서 성능지수는 최대 0.31 이하로 나타났으며 각각의 선량평가결과에 대한 표준편차는 모두 0.2 이하로 나타났다. 시험항목 1과 2의 결과를 통해, Bcd/TLp 비율 방법에 의한 D_2O moderated ^{252}Cf 중성자장에서의 선량평가에 무리가 없음을 확인하였으며 각도보정인자의 적용이 타당하다고 판단하였다. 시험항목 3에의 평가결과를 고려할 때, PuBe 중성자선이 혼합된 경우에도 표 3의 선량환산인자를 그대로 적용해서는 안되며 중성자선원의 평균에너지를 고려해서 선량환산인자를 도출해야 될 것으로 판단되었다. 또한 9"/3" 비율과 Bcd/TLp 비율에 의해 평가한 시험항목 6의 성능지수가 ANSI의 성능시험 기준치 이하로 우수하게 나타남에 따라 미지의 중성자선이 혼합된 방사선장에서의 선량평가에 대한 접근방법이 적절했음을 확인하였다. 반면, 기존 알고리즘을 사용하여 평가한 감마+베타 혼합선장(시험항목 7)에서의 피부선량평가결과는 약 40% 정도 과소평가되어 ANSI의 기준치(=0.5)에 근접하는 것으로 나타났다. 시험항목7에서의 이러한 상대오차는 선량계산 알고리즘에 기인하는 것으로 분석되었으며, ANSI M30 beam code($E_{\text{avg}}=20\text{keV}$)의 X선과 베타선이 혼합된 방사선장에 대한 알고리즘의 보완이 필요한 것으로 판단되었다[9].

결론

이상과 같은 국제상호비교검증시험의 결과들을 종합해 볼 때, Teledyne PB-3 개인선량계시스템은 비감속 중성자의 단일선장 및 혼합선장 그리고 저에너지 X+베타 혼합선장에서의 경우를 제외한 모든 시험 방사선장에서 우수한 재현성을 나타내었다. 이들 시험항목에서의 성능지수는 모두 ANSI의 성능기준을 만족하였으며 선량계 소자보정인자(ECF)의 적용으로 전체적인 상대오차가 감소하였다.

PB-3 개인선량계를 이용한 다양한 중성자선장에서의 선량평가에 관한 연구는 이후에도 실험을 통해 지속적으로 수행되어야 할 것으로 판단되나, 다양한 중성자선원의 확보는 현실적으로 불가능하므로 현재로서는 중성자선량의 평가를 위한 보완적인 방법을 사용하지 않을 수 없다고 판단된다. 따라서 지금까지 수행된 PDIS의 결과를 통해 분석된 보완적인 방법들을 정리하면 다음과 같다. 첫째, D_2O moderated ^{252}Cf 중성자의 단일선장인 경우에는 Bcd/TLp 비율에 의한 선량계산결과와 큰 차이가 없으나 표 3의 환산인자(=0.69)를 사용하는 것이 가장 정확하며, bare ^{252}Cf 중성자의 단일선장인 경우에도 표 3의 환산인자(=6.67)는 유용하게 사용될 수 있다. 둘째, 9"/3" 비율로 보아 감속된(≤ 1.0) 미지의 중성자장의 경우에는 그림 1의 Bcd/TLp 비율에 따른 선량환산인자를 적용하는 것이 가장 정확하다. 셋째, 9"/3" 비율로 보아 비감속된(≥ 2.0) 미지의 중성자장의 경우에는 표 3의 평균에너지에 따른 선량환산인자를 사용하여 선량을 평가하는 것이 가장 오차를 줄일 수 있다.

참고문헌

1. 과학기술처, 개인방사선피폭선량에 관한 기술 기준, 과학기술처고시 1992-15, 과학기술처 (1992).
2. R. E. Swaja, "Performance Characteristics of Neutron Personnel Dosimeters used in Oak Ridge Intercomparison Studies." *Radiation Protection Dosimetry* **23**(1), 211-215(1988).
3. Teledyne Isotopes, *PB-3 Badge Case Algorithm Revision 1.5*, Teledyne Isotopes Inc, Technical Report(1989).
4. Phillip Plato and Joseph Miklos, "Production of Element Correction Factors for Thermoluminescent Dosimeters." *Health Physics* **49**(5), 873-880(1985).
5. C. S. Sims, Personal communication, PDIS-16 Technical information letter(1991).
6. W. H. Casson, Personal communication, PDIS-18 Technical information letter(1993).
7. Teledyne Isotopes, *Teledyne Isotopes TLD System for Personnel and Environmental Monitoring*, Teledyne Isotopes Inc, Technical Report (1981).
8. W. H. Casson, Personal communication, DOSAR, ORNL(1994).
9. American National Standards Institute, *American National Standard for Dosimetry-Personnel Dosimetry Performance-Criteria for Testing*, ANSI Report, ANSI N13.11(1992).
10. International Commission on Radiation Units and Measurements, *Measurement of Dose Equivalents from External Photon and Electron Radiations*, ICRU Report, ICRU 47(1992).

The Performance Test of Teledyne PB-3 Personnel Dosimetry System by Intercomparison Study

Sang-Yoon Lee, Hyung-Sub Lee, Jang-Lyul Kim, Suk-Chul Yoon

Korea Atomic Energy Research Institute

ABSTRACT

Recently, the Ministry of Science and Technology issued a Ministerial Ordinance (No 1992-15) about the technical criteria on personnel radiation dosimetry. In today's climate, it is important to demonstrate and document that the processor's systems and services to others meet national standards of quality. The purpose of this study is to verify the performance of the Teledyne PB-3 personnel dosimetry system that is generally used in Korea Atomic Energy Research Institute(KAERI) by intercomparison with Oak Ridge National Laboratory. The KAERI has been participated in this personnel dosimetry intercomparison study(PDIS) program since 1991 and it could be possible to test and calibrate personnel monitoring system. This report presents a summary and analysis of by about 50 dose equivalent measurements reported for PDIS-16 through 18 (1991-1993) with emphasis on neutron dose equivalent sensitivity, accuracy and precision. Relationships of the PDIS results to occupational neutron monitoring methods to improve personnel dosimetry performance are also discussed.

Key words : Personnel Dosimetry, Teledyne PB-3 TLD, ORNL Intercomparison