

## A Study of Performance Characteristics for Electronic Personal Dosimeters in Photon and Electron Radiation Field

Hyun-Ki Kim, Bong-Hwan Kim\*, and Jai-Ki Lee  
Depart. of Nuclear Engineering, Hanyang University,  
\*Korea Atomic Energy Research Institute

### 광자 및 베타 방사선에 대한 전자개인선량계의 성능특성연구

김현기 · 김봉환\* · 이재기  
한양대학교 원자력공학과, \*한국원자력연구소

**Abstract**—TLD and film badges have been traditionally used as formal dosimeters in personal monitoring and are still most widely used. Recently, electronic personal dosimeters based upon Si diode or miniature G-M tube were developed and are getting attractions due to their merits of active nature ; indication of dose rates and the cumulative dose, and facilitation of record keeping and radiological control. Response characteristics of the electronic dosimeters including reproducibility, accuracy, linearity, energy and angular dependencies, detection threshold, and response time were examined for three commercial types ; EPD2, STEPHEN6000, and PD-3i. The results were compared with the relevant requirements of IEC standards and Ontario Hydro standards to conclude that their general performances were good. Some specific deficiencies, e.g. incapability of shallow dose measurement of STEPHEN6000, and PD-3i, however, should be corrected to be used as a formal dosimeter.

*Key words* : dosimeter, personal monitoring, electronic personal dosimeter performance, formal dosimeter

**요약**—전통적으로 개인방사선감시에 열형광선량계와 필름배지가 공식개인선량계로 이용되어 왔고 현재까지도 여전히 가장 보편적으로 사용되고 있지만, 최근에는 Si 다이오드와 G-M관을 이용한 능동형 전자개인선량계가 개발 보급되고 있다. 전자개인선량계는 누적선량을 곧바로 알 수 있다는 분명한 장점을 가지고 있을 뿐만 아니라 선량률에 관한 정보도 제공하므로 높은 비용부담에도 불구하고 피폭관리의 용이함으로 인해 주목을 받고 있다. 이에 세 종류의 전자개인선량계 즉, EPD2, STEPHEN6000, PD-3i에 대하여 재현성, 정확성, 선형성, 에너지와 방향 의존성, 반응시간을 포함하는 선량계의 전반적인 성능을 실험적으로 평가한 후 판단기준으로 IEC standard 그리고 Ontario Hydro standard와 비교함으로써 전

자개인선량계가 방사선방호의 핵심인 개인선량측정에 충분한 신뢰도를 제공하여 공식선량계로 적합한가를 논의하였다. STEPHEN6000 및 PD-3i는 표준선량 측정능력의 보완이 필요하였다.

중심어 : 선량계, 개인감시, 전자개인선량계, 성능, 공식선량계

## 서 론

방사선 시설에 종사하는 개인의 외부피폭 방사선량을 측정하는 수단으로 열형광선량계와 필름배지와 같은 수동형 개인선량계(passive personal dosimeter)가 널리 사용되어 왔다. 그러나 이들 선량계는 일정 기간 동안 방사선에 노출된 후 번거로운 판독과정을 거쳐야 선량을 알 수 있어 작업자의 피폭관리를 위해서는 포켓 선량계와 같은 직독식 선량계의 도움을 받아야 했다.

수동형 선량계의 이러한 약점을 보완할 수 있는 능동형 선량계(active personal dosimeter)로 초기에 개인경보선량계가 개발되었다. 1980년대에 들어와 집적회로와 반도체 기술의 급속한 발달로 능동형 선량계의 소형화와 가격저하 그리고 선량감응특성이 크게 향상되었다. 이에 따라 아직은 비용부담이 수동형 선량계에 비해 상당히 크지만 즉각적인 선량 및 선량률 표시, 경보기능, 피폭이력, 선량자료관리의 효율성 등의 고유한 장점으로 인해 영국, 독일 등과 같은 일부 유럽국가에서는 EPD2를 공식선량계로 채택한 바 있다. 특히 사회전반적으로 안전문화에 대한 국민의식이 향상되고 국제방사선방호위원회(ICRP)의 권고[1]에 따라 국제기구나 국가의 방사선방호 책임기관이 권고의 제도반영을 위한 검토와 조치를 강구하고 있어, 능동적이고 적극적인 방사선 관리가 강조되므로 피폭통계의 즉시적이고 효율적 분석이 가능한 능동형 선량계는 미래의 주된 선량계로서 기존의 열형광선량계나 필름배지를 대체할 가능성이 높아지고 있다.

한편 전통적 공식개인선량계인 필름배지나 열형광선량계에 대해서도 그 품질보증의 중요성이 강조되어 미국의 경우 NVLAP, DOELAP 등에서 성능평가 활동이 활발해지고 있으며 국내에서도 1995년부터 개인선량관독기관에 대한 품질평가 프로그램이 시행되고 있다. 위에서 언급한 능동형 선량계의 장점도 그 선량측정성능에 충분한 신뢰도를 부여할 수 있다는 가정을 전제로 한다. Hirning과 Yuen[2]은 EPD2에

대한 성능평가를 실시한 바 있다.

본 연구에서는 EPD2는 물론 중저가 전자개인선량계에 대해 공식선량계와 유사한 성능평가를 수행함으로써 전자선량계의 동작특성을 이해하고 미래의 유망선량계로서의 전망을 평가하고자 하였다.

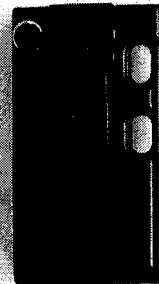
## 선량계 및 성능평가 방법

### 선량계

성능평가에 사용한 전자개인선량계는 Si p-i-n 다이오드를 검출기로 사용하는 SIEMENS사의 EPD2, 소형 보상형 G-M관을 사용하는 R. A. STEPHEN사의 STEPHEN6000 및 SAIC 사의 PD-3i로 종류별로 각각 세 개씩이다. 이중 EPD2는 심부선량과 피부선량을 동시에 측정할 수 있는 특징을 지닌 본격 전자선량계이다. 그림 1은 이들 선량계의 외관이다.



EPD2



STEPHEN6000



PD-3i

Fig 1. Electronic personal dosimeters tested in this study.

시험방사선장 및 피사체

시험을 위한 방사선 조사는 한국원자력연구소에서 이루어졌으며 사용된 방사선장의 제원은 다음과 같다.

(1) β-선장[3]

독일의 Buchler사로부터 도입된 베타조사장치와 <sup>90</sup>Sr/<sup>90</sup>Y( $E_{max}=2.284$  MeV), <sup>147</sup>Pm( $E_{max}=0.225$  MeV) 선원을 이용하였다. 선원으로부터 10 cm 거리에 빔의 균질성을 높이기 위하여 “beam flattening filter”를 사용하였다.

(2) X-선장

NIST X-선 중의 M30( $E_{eff}=18.9$  keV)[4] 및 ISO narrow-spectrum X-선 ( $E_{eff}=48, 63, 81, 97, 114, 163.4, 207.6, 250.2$  keV)[5]을 사용하였다.

(3) γ-선장

3.7 GBq, 185 GBq, 3.5 TBq의 방사능을 갖는 3개의 <sup>137</sup>Cs( $E=662$  keV) 선원을 사용하였다.

(4) 인체에 착용된 상태를 모사하기 위해 ISO의 권고 [5]에 따라 광자에 대해서는 Water 팬텀 (30×30×15 cm<sup>3</sup>)을 사용하고 β-선에 대해서는 PMMA 팬텀(30×30×5 cm<sup>3</sup>)을 사용하였다.

어야 한다.

[베타선에 대한 에너지반응] 0.78 MeV에서 3.5 MeV에 이르는 에너지범위에서 <sup>90</sup>Sr/<sup>90</sup>Y에 대한 Hp(0.07)의 상대반응이 ±30% 이내이어야 한다.

[방향의존성] 0°에서 읽은 값에 대한 -60°~+60° 각도에서의 측정값의 비가 ±20% 이내이어야 한다.

[선량률경보] 설정된 경보선량률보다 20% 낮은 선량률에 10분 동안 놓아 두었을 때 경보가 울려서는 안되고, 20% 높은 선량률에 조사되었을 시에는 5초 내에 경보가 울려야 하며 그 동안 받은 선량은 10 μSv 이내이어야 한다.

[선량경보] 경보선량보다 15% 낮은 선량조건에서 경보음은 발생하지 않아야 하고 15% 높은 조건에서는 경보를 울려야 한다.

[선량률 표시시간측정] 유효범위에서 선량계가 선량률의 갑작스런 증가와 갑작스런 감소가 있을 때 선량계의 측정치는 전자의 경우 5초 내에 그리고 후자의 경우 10초 내에 10% 보다 작은 오차를 가지고 새로운 선량률을 표시해야 하고 새로운 선량을 표시 하는데 걸리는 시간동안 받은 선량은 1 μSv 보다 작아야 한다.

평가의 기준

현재까지 전자개인선량계에 대한 국제적 표준이 확립되어 있지 않기 때문에 IEC(International Electrotechnical Commission) standard[6]와 Ontario Hydro standard[8]를 참조하였고, 선량의 정확성 시험에 있어서는 ANSI N13.11-1993[7]을 참조하여 평가의 기준을 설정하였다. 상이한 부분에서는 IEC standard를 우선하였다. 항목별 기준은 다음과 같다.

[재현성 시험] 1 mSv에 10번 조사했을 때 측정치의 상대표준편차가 5% 이내이어야 한다.

[선량의 정확성] 편중의 절대값이 0.35보다 작거나 같아야 한다.

[선량률의 선형성] 1 Sv/h에 이르는 선량률에서 상대고유오차(relative intrinsic error)가 20% 이내 이어야 한다.

[선량의 선형성] 1 Sv에 이르는 선량에서 상대고유오차가 20% 이내이어야 한다.

[광자에 대한 에너지반응] 20 keV 1.5 MeV의 에너지 범위에서 <sup>137</sup>Cs에 대한 상대반응이 30% 이내

실험결과 및 평가

교정인자의 결정

<sup>137</sup>Cs 감마선장에서 30.66 mGy/h의 공기커마율(air-kerma rate)로 877 μGy를 임의로 선정하여 10회 조사하였다. ICRU-tissue slab에서의 선량당량 환산 인자[8, 9]를 부여된 공기커마에 적용시켜 이론적으로 선량을 계산하고 측정치와 비교하여 결정한 교정인자(calibration factor)는 표 1과 같다.

Table 1. Calibration factors of the electronic dosimeters.

Dosimeter	EPD2		STEPH*	PD-3i
	Hp(10)	Hp(0.07)		
#1	1.018	1.064	0.968	1.025
#2	0.987	1.001	1.003	1.020
#3	1.011	0.982	0.984	1.035

(\* : STEPHEN6000)

재현성 시험

각 선량계를 영점으로 조정하고 팬텀에 부착한 후, <sup>137</sup>Cs 선원을 이용하여 21.9 mGy/h의 공기커마울로 807.9 μGy씩 10번 증가시키면서 측정하였다. 이때 부여선량이 기준인 1 mSv보다 낮은 986 μSv가 사용된 것은 조사제어의 기술상의 문제이며 낮은 선량인 만큼 시험목적에 위배되지는 않는다.

Table 2. Results of the reproducibility test.

Dosimeter	Hp(10) (μSv)			Hp(0.07) (μSv)			
	Mean	SD	SD(%)	Mean	SD	SD(%)	
EPD2	#1	957.3	1.5	0.16	970.4	19.3	1.98
	#2	955.2	3.1	0.32	954.0	25.3	2.65
	#3	958.2	1.9	0.20	951.6	19.8	2.09
STEPH	#1	963.0	1.8	0.19			
	#2	982.3	1.1	0.12		N/A	
	#3	969.6	2.0	0.20			
PD-3I	#1	961.5	4.6	0.48			
	#2	946.9	7.8	0.81		N/A	
	#3	964.6	4.0	0.42			

실험결과를 표 2에 나타내었다. Hp(10)의 경우 PD-3i #2 선량계가 큰 편차를 보였지만 상대표준편차는 ±5% 이내였다. Hp(0.07) 값의 편차가 Hp(10) 값의 편차보다 크게 나타났다.

정확성 시험

선량계를 종류별로 한꺼번에 팬텀에 올려 놓고 <sup>137</sup>Cs 선원을 조사하였다. 부여된 Hp(10)와 Hp(0.07)는 기지의 공기커마(울)에 선량당량 환산인자를 곱해서 이론적으로 구하였다. 각각 10회 측정을 반복한 후 성능지수와 편중을 구한다. 이때 편중은 다음 식으로 표시된다[8].

$$B = P = (1/n) \sum_{i=1}^n P_i$$

여기서 P<sub>i</sub>는 성능지수이다.

(1) 선량률의 정확성

876 μGy/h의 공기 커마울로 조사하고 측정치를

기록하였다. 부여된 Hp(10)는 1069 μSv/h로 계산되었다. 측정결과는 표 3에 나타나 있듯이 편중의 절대값이 0.07이내지만 본 실험에 대한 평가기준은 확립되어 있지않은 상태이다.

(2) 선량의 정확성

78.84 mGy/h로 876 μGy를 조사하여 평가하였다. 부여된 Hp(10)와 Hp(0.07)가 각각 1068.7 μSv와 1060 μSv일 때 편중의 절대값이 0.03이내로 ANSI의 기준을 충분히 만족하였다.

선형성 시험

선량률의 선형성 시험에서는 선량계를 한 개씩, 그리고 선량의 선형성 시험에서는 하나 또는 두 개의 선량계를 팬텀에 부착하여 <sup>137</sup>Cs 선원에 정면입사방향(normal incidence)으로 조사하면서 CCTV를 통해 측정치를 기록하였다.

Table 3. Results of dose rate measurements of the accuracy test.

Dosimeter	Dose rate (μSv/h)	Mean (μSv/h)	SD	B
EPD2	#1 Hp(10)	996	0.049	
	#2 Hp(10)	-*	-*	
	#3 Hp(10)	989	0.040	0.072
STEPH	#1 Hp(10)	1037	0.020	
	#2 Hp(10)	1100	0.023	
	#3 Hp(10)	1067	0.011	0.001
PD-3i	#1 Hp(10)	1090	0.060	
	#2 Hp(10)	994	0.162	
	#3 Hp(10)	1060	0.055	0.019

\* : Mechanical failure

(1) 선량률의 선형성

0.026 mGy/h에서 262.8 mGy/h에 이르는 공기커마울로 조사하면서 측정치가 일정해지면 10초 간격으로 그 값을 기록하였다. 그리고 유효 선량률 범위까지 공기커마울을 높여가며 반복 측정하였다. 선량계는 통계적으로 유효한 자료를 얻도록 고안되었기 때문에 아주 낮은 선량률에서는 종류에 따라 차이는

보이지만 긴 샘플링 시간을 가짐을 알 수 있었다. EPD 2의 경우 선량률 표시 범위가 작아 조사한 최대 선량률은 Hp(10)와 Hp(0.07)에 대하여 각각 7.01 mGy/h과 61.32 mGy/h로 제한되었다.

Table 4. Results of dose measurements of the accuracy test.

Dosimeter	Dose (μSv)	Mean (μSv)	SD	B
EPD2	#1 Hp(10)	1101	0.003	
		Hp(0.07)	1080	0.019
	#2 Hp(10)	1099	0.003	
		Hp(0.07)	1072	0.025
	#3 Hp(10)	1101	0.003	0.029
		Hp(0.07)	1045	0.011
STEPH	#1 Hp(10)	1029	0.004	
	#2 Hp(10)	1036	0.002	
	#3 Hp(10)	1054	0.003	0.027
PD-3i	#1 Hp(10)	—*	—*	
	#2 Hp(10)	1078	0.004	
	#3 Hp(10)	1085	0.005	0.012

\* : Mechanical failure

실험 결과는 그림 2a와 2b에서와 같이 실제 공기커마울에 대한 측정된 선량률의 비를 공기커마울의 함수로써 나타냈다. 이상적인 선량계라면 조사한 선량률 범위에서 Hp(10)의 경우에는 1.22를, 그리고 Hp(0.07)의 경우에는 1.21를 중심으로 평탄한 반응을 나타낼 것이다. 그림에서 보듯이 상대고유오차가 ±9.8%로 세 종류의 선량계 모두 평가기준에 적합하였다. 다만 사용한 방사선장의 제한으로 평가기준인 1 Sv/h까지 평가하지는 못하였다.

(2) 선량의 선형성

0.42 mGy/h~267.18 mGy/h에 이르는 공기커마울로 4.5 μGy에서 700.8 mGy의 범위에 걸친 선량을 조사하면서 측정치를 관찰하였다. 각 선량계를 3~5회 같은 선량을 반복하여 조사하였다. 결과는 선량률의 선형성 실험에서와 같은 방법으로 분석하였으며, 그림

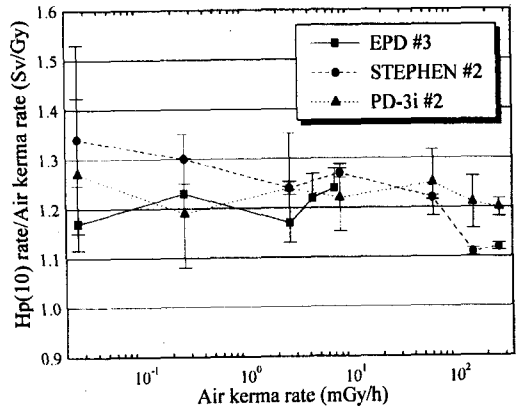


Fig 2a. Response of the linearity of Hp(10) rate as a function of air kerma rate.

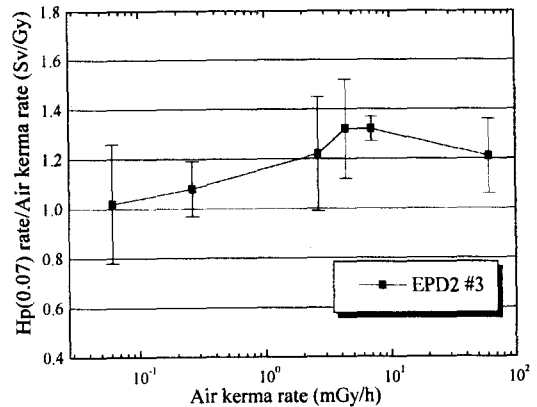


Fig 2b. Response of the linearity of Hp(0.07) rate as a function of air kerma rate.

3a와 3b에 제시하였다. 주어진 선량범위에 대하여 10 mm 깊이에서의 선량반응의 경우 기준을 만족하지만 그림 3b에서 보듯이 4.5 Gy를 조사했을 경우 0.07 mm 깊이의 반응은 평가기준을 다소 벗어나지만 이러한 낮은 선량의 측정능력으로서는 만족스런 것이었다.

에너지 반응

(1) 광자에 대한 에너지 반응

종류별로 한개 또는 두개의 선량계를 팬텀에 부착한 후 18.9 keV의 유효에너지를 갖는 NIST X-선 중 M30과 48, 63, 81, 97, 114, 163.4, 207.6, 250.2 keV의 유효에너지를 갖는 ISO narrow-spectrum X-선, 그

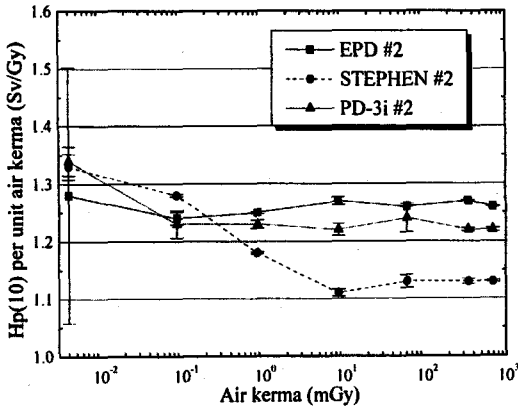


Fig 3a. Response of the linearity of Hp(10) as a function of air kerma.

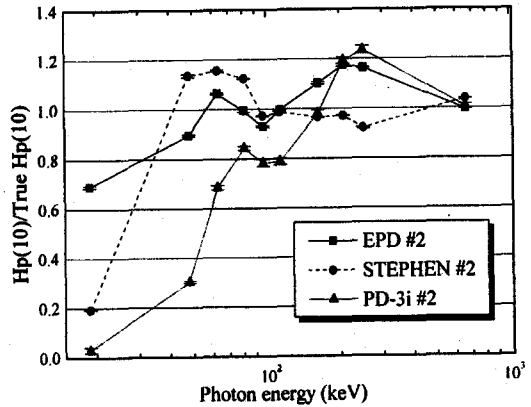


Fig 4a. Hp(10) response as a function of photon energy.

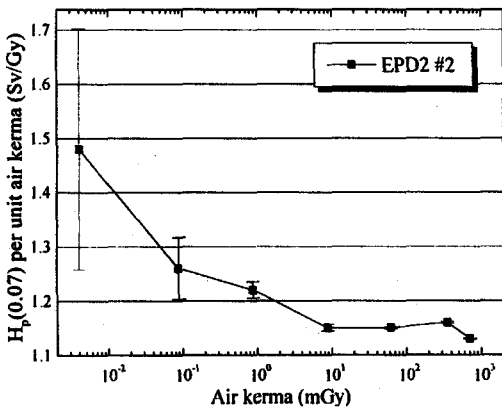


Fig 3b. Response of the linearity of Hp(0.07) as a function of air kerma.

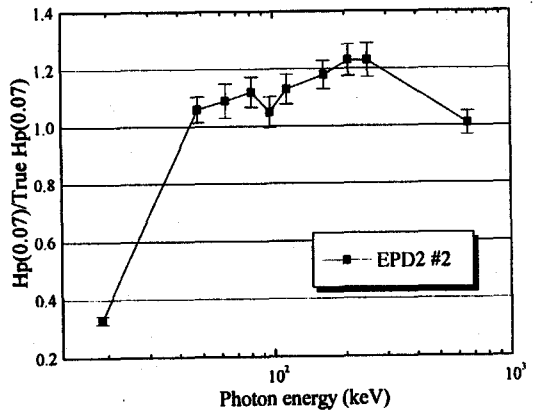


Fig 4b. Hp(0.07) response as a function of photon energy.

리고  $^{137}\text{Cs}$  선원을 이용하여 약  $395 \mu\text{Gy}$ 로 4~5회 반복측정하였다. 부여된 선량은 조사한 공기커마에 에너지에 따른 선량당량 환산인자를 적용하여 구할 수 있다.

측정치를 실제선량으로 나누어 선량계의 반응(response)을 구하고, 또한 각 에너지에서의 반응을  $^{137}\text{Cs}$ 에 대한 반응으로 계산하여 상대반응(relative response)을 구한 결과를 그림 4a와 4b에 제시하였다. 그림에서 보듯이 가스보다 밀도가 크고 이온화에너지가 작은 반도체 검출기를 사용하는 EPD2는 20 keV의 저에너지에 이르기까지  $\pm 30\%$  범위에 있었다. 다만 Hp(0.07)의 경우 18.9 keV에서 -67%로서 기

준을 크게 벗어나고 있다. PD-3i는 70 keV부터 낮은 결과를 보였다.

### (2) 베타선에 대한 에너지 반응

사용한 선량계 중 EPD2만이 베타선을 측정하는 검출기를 갖추고 있기 때문에 2개의 EPD2를  $30 \times 30 \times 5\text{cm}^3$  크기의 PMMA 팬텀에 1개씩 부착하여 실험하였다.  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  ( $E_{\text{max}}=2.284 \text{ MeV}$ )과  $^{147}\text{Pm}$  ( $E_{\text{max}}=0.225 \text{ MeV}$ ) 선원을 이용하여 선원으로부터 30 cm 거리에 선량계의 표면이 위치하도록 하여 조사하였다. 이는 EPD2 선량계의 두께가 3cm 정도가 되므로 선원과 팬텀 사이의 거리를 30cm로 하였을 경우 발생

하는 거리차이에 의한 선량계의 반응증가 효과를 고려하기 위함이다. 조사한 선량과 측정값은 표 5와 같다.

$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  선원에 대한 반응은 1.23으로 실제로 조사된 선량보다 23% 과잉반응을 나타냈다. 이것은 EEPROM(Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory)에 기억되어 있는  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  선원의 반응에 관한 보정상수를 적절히 바꾸어 주어야 함을 의미한다. 저에너지 베타선을 방출하는  $^{147}\text{Pm}$ 의 경우 실제값에 대한 측정값의 비가 2.8%로 매우 낮게 반응하여 저에너지 베타선은 선량계의 창(window)에서 대부분 흡수되었다. 그러나  $^{204}\text{Tl}(E_{\text{max}}=0.763\text{ MeV})$ 에 대한 선량계의 반응특성실험을 수행하지 못하여 기준의 만족여부는 검토할 수 없었다.

Table 5. Delivered and measured beta dose equivalents.

Beta source	Delivered Dosimeter		Measured Hp(0.07) beta response		
	Hp(0.07) ( $\mu\text{Sv}$ )	-eter No.	Hp(10) dose( $\mu\text{Sv}$ )	Hp(0.07)	response
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	4275	#1	173.8	5243.2	1.23
		#2	190.8	5252.2	1.23
$^{147}\text{Pm}$	1440	#1	13.1	40.4	0.03
		#2	12.8	39.6	0.03

방향변화에 따른 선량계의 반응

선량계를 팬텀에 부착한 후 검출기의 중심을 회전축으로하여 빔의 입사각도를 변화시키면서  $^{137}\text{Cs}$ 으로 29.46 mGy/h의 공기커마울로 394.2  $\mu\text{Gy}$ 를 조사하여 선량계의 방향의존성을 평가하였다. 이때 입사각의 변화는 정면입사( $0^\circ$ )를 기준으로  $15^\circ$ 간격으로  $\pm 90^\circ$  (+ : 반시계방향)까지로 하였고 회전축은 수직과 수평의 두 가지로 하였다.

각 방향변화로 부터 얻어진 측정치를  $0^\circ$ 에서의 측정치에 대한 상대값(relative reading)으로 계산하여 그림 5a~5d에 나타내었다. 모든 선량계가  $0^\circ$ 로부터  $\pm 75^\circ$ 까지는 0.8~1.05의 상대감도를 보여 평가기준에 적합하였다. 여기서 수직축을 중심으로 회전시켰을 경우 EPD2와 STEPHEN6000은  $0^\circ$ 를 중심으로 좌

우대칭을 이루지만 PD-3i는 상당한 비대칭성을 나타냈다. 이는 PD-3i 선량계 내에서 G-M관이 오른쪽으로 치우쳐 있어서 반시계방향(+) 회전시 선량계 본체에 의한 차폐효과가 비대칭적이어서 기인한다. 수평축을 중심으로 회전시켰을때 세 종류의 선량계 모두 상하 비대칭성을 보이는 것도 이와 같은 이유이다.

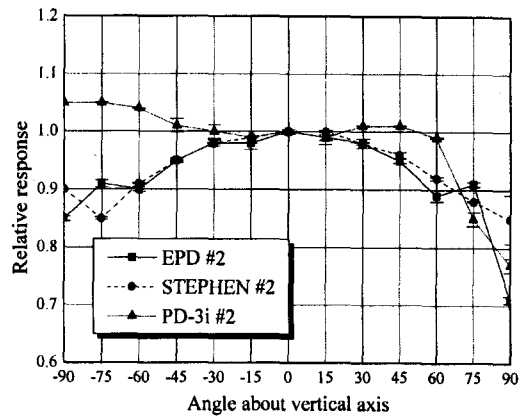


Fig 5a. Hp(10) relative angular response about the vertical axis.

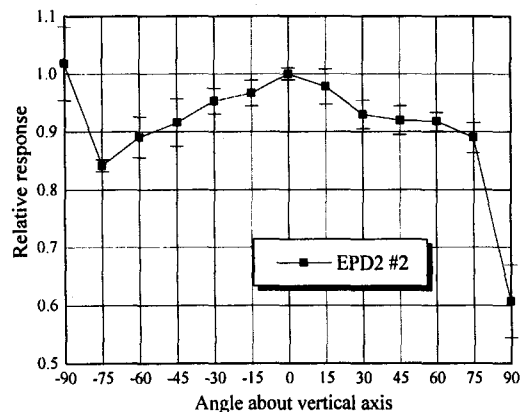


Fig 5b. Hp(0.07) relative angular response about the vertical axis.

반응시간측정

(1) 선량률경보

5 mSv/h(4.1 mGy/h)로 선량계의 선량률경보를 조정후 팬텀에 부착하여  $^{137}\text{Cs}$  선원으로 조사하였

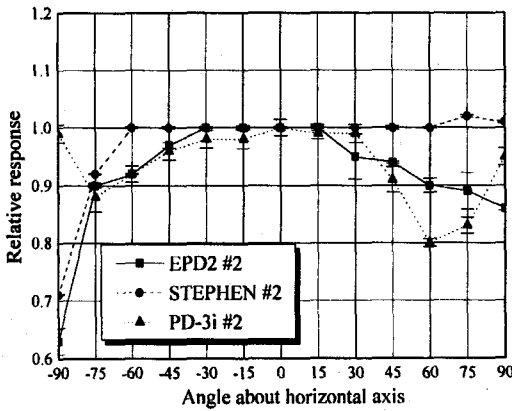


Fig 5c. Hp(10) relative angular response about the horizontal axis.

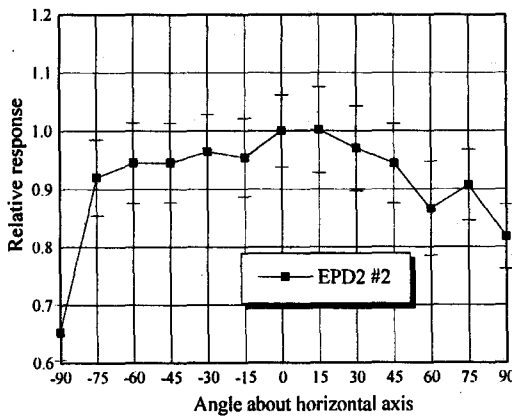


Fig 5d. Hp(0.07) relative angular response about the horizontal axis.

다. 미리 설정한 경보선량률보다 20% 낮은 선량률(3.28 mGy/h)과 20% 높은 선량률(4.92 mGy/h)로 먼저 조사하고 점차 선량률을 7.01, 26.28 mGy/h로 높여 가며 선량계가 경보를 울리는 시간을 측정하였다. 실험 결과는 표 6에 주어져 있다. 표 6에서 보듯이 EPD2가 3.38 mGy/h의 선량률에서 경보를 울리는 것을 제외 하면 각 선량계는 IEC standard를 모두 만족하고 있고 선량률이 증가함에 따라 반응시간도 짧아짐을 알 수 있다.

(2) 선량경보

1 mSv(820 μGy)로 선량계의 선량경보를 조정하면 후 팬텀에 부착하여 <sup>137</sup>Cs으로 48.18 mGy/h의 선량률로

조사하였다. 미리 설정한 경보선량률보다 15% 낮은 선량(0.85 mSv)과 15% 높은 선량(1.15 mSv)으로 조사하면서 경보가 울리는지 여부와 경보가 울리는데 걸리는 시간을 측정하였다. 표 7에 제시한 결과로부터 IEC standard를 만족하고 있음을 알 수 있다.

Table 6. Results of the dose rate alarm test. The last column shows the air kerma received by the each dosimeter by time the alarm came on.

Dosimeter		Air-kerma rate (mGy/h)	Mean(s) time ±1SD	Air-kerma received (μGy)	
EPD2	#1	328	Activate		
		492	431±040	600	
		701	424±068	827	
		2628	301±043	220	
	#2	328	Activate		
		492	359±066	485	
		701	391±046	763	
		2628	309±069	22.6	
	#3	328	Activate		
		492	412±074	596	
		701	410±061	800	
		2628	325±074	23.7	
STEPH	#2	328	Not activate		
		492	211±017	289	
		701	214±050	417	
		2628	156±017	114	
	#3	328	Not activate		
		492	255±021	443	
		701	246±042	480	
		2628	145±015	10.6	
	PD-3i	#2	328	Not activate	
			492	470±106	655
			701	464±157	905
			2628	279±050	20.4
#3		328	Not activate		
		492	469±076	663	
		701	468±165	913	
		2628	288±023	21.0	



Table 7. Results of the dose alarm test. The last column shows the air kerma received by the each dosimeter by time the alarm came on.

Dosimeter	Air-kerma (μGy)	Mean(s) time±1SD	Air-kerma received (μGy)	
EPD2	#1	697	Not activate	
		943	63.50±0.61	865.3
	#2	697	Not activate	
		943	61.87±0.76	817.2
	#3	697	Not activate	
		943	63.73±0.86	862.4
STEPH	#2	697	Not activate	
		943	61.77±0.06	829.5
	#3	697	Not activate	
		943	60.73±0.55	800.0
	PD-3i	#2	697	Not activate
			943	58.87±0.64
#3		697	Not activate	
		943	57.90±0.53	802.1

(3) 선량률 표시시간 측정

선량계를 팬텀에 부착하여 <sup>137</sup>Cs 선원으로 선량률을 달리하면서 조사하는 동안 선량계의 측정치를 CCTV를 통해 관찰하였다. 11.39 μGy/h로 120초 동안 조사하면서 측정값이 안정되었을 때 재빨리 548.75 μGy/h로 선량률을 높여서 120초 동안 조사한다. 마

찬가지로 측정값이 안정화된 것을 확인하고 이번에는 선량률을 11.39 μGy/h로 감소시켜 측정하였다. 360초 동안 5초 간격으로 측정치를 기록하였다. 기록한 데이터로부터 증가시킨 공기커마율(548.75 μGy/h)을 ± 10% 보다 작은 오차를 가진 측정값을 표시하는데 걸리는 시간과 다시 감소시킨 공기커마율(11.39 μGy/h)을 ±10%보다 작은 오차를 가진 측정값을 표시하는데 걸리는 시간을 측정하였다. 표 8과 그림 6에 결과를 정리하였다.

STEPHEN6000 선량계만이 기준을 만족하고 나머지 선량계는 반응시간이 느리게 나타났다. 그만큼 일정한 선량률에서 정보를 얻는데 필요한 샘플링 시간이 STEPHEN6000의 경우 짧음을 알 수 있다. 다른 선량계에 있어서도 감응속도가 심각한 결함으로 지적될 정도로 느린 것은 아니다.

결론 및 논의

최근에 개발되어 이미 개인방사선 모니터링에서 부분적으로 사용되고 있는 전자개인선량계에 대하여 IEC standard와 Ontario Hydro standard 그리고 ANSI를 근거로 설정된 평가기준을 기초하여 세 종류의 전자개인선량계의 성능을 실험적으로 평가한 결과를 표 9에 정리하였다. 표에서 보듯이 시험에 사용된 선량계 모두 표준의 기준을 대부분 만족하고 있다. 그러나 각 선량계들은 각기 다른 특징을 지니고 있다. 즉, 에너지반응 면에서는 Si p-i-n 다이오드로 제작된 EPD2가 저에너지에 이르기까지 선량측정성이

Table 8. Results of the dose rate display test.

Dosimeter	Time to reach within 10% error of high dose(s)	Air-kerma received(μGy)	Time to reach within 10% error of low dose(s)	Air-kerma received(μGy)	
EPD2	#3	15	2.29	35	0.11
STEPH	#1	5	0.76	10	0.03
	#2	5	0.76	30	0.10
	#3	5	0.76	10	0.03
PD-3i	#2	35	5.33	95	0.30
	#3	10	1.52	85	0.27

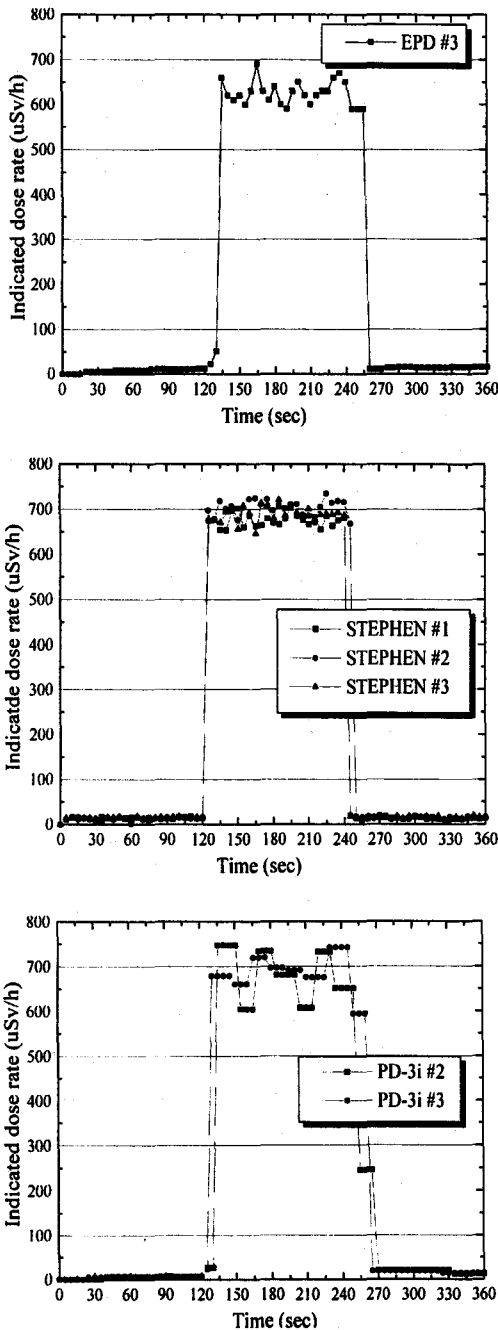


Fig 6. Hp(10) dose rates recorded from each dosimeter display at 5 sec intervals for the dose rate display test.

양호하였고, STEPHEN6000의 경우 정확한 선량정보를 제공하면서도 샘플링 시간이 짧다. 그리고 PD-3i는 얼마간의 방향의존성을 보이지만 가볍고 작아서 착

Table 9. Summary of test results compared with standards.

Test title	Standard requirement met			
	EPD2		STEPH	PD-3i
	Hp(10)	Hp(0.07)		
Reproducibility	Yes	Yes	Yes	Yes
Accuracy				
dose rate	- <sup>a</sup>	- <sup>a</sup>	- <sup>a</sup>	- <sup>a</sup>
dose	Yes	Yes	Yes	Yes
Linearity	Yes	Yes	Yes	Yes
Gamma energy	Yes	Partial <sup>b</sup>	Partial <sup>b</sup>	Partial <sup>b</sup>
Beta energy	- <sup>c</sup>	- <sup>c</sup>	- <sup>c</sup>	- <sup>c</sup>
Angular response	Yes	Yes	Yes	Yes
Response time				
Dose rate alarm	No		Yes	Yes
Dose alarm	Yes		Yes	Yes
Dose rate display	No		Yes	No

<sup>a</sup>: Standards are not available.

<sup>b</sup>: It meets standards partially.

<sup>c</sup>: We can't conclude it from tests.

용시 편리하다는 등의 고유한 장단점을 지니고 있어 성능과 사용의 편의성을 고려할 때 부여된 기능의 범위에서는 어느 것이 우수하다고 판단하기는 어렵다. 단 다음과 같은 점에 있어서는 개선이 이루어져야 할 것이다.

- ① STEPHEN6000과 PD-3i의 경우 Hp(0.07) 측정을 지원할 수 있는 보완이 필요하다.
- ② 복잡한 전자회로로 구성되어 있고, 특히 밧 배터리(battery)를 포함하고 있기 때문에 TLD와 필름 밧지와 비교해서 상당히 크고 무거우며, 장수명 전지문제는 특히 소형화의 제한적 요소가 된다.
- ③ 현재로서는 선량계의 단가가 500,000~800,000원 대로 지급대상자 규모가 크면 비용부담이 커진다.

국제방사선방호위원회(ICRP)의 방사선 방호체계의 중심이 ALARA로 이동함에 따라 능동적 방사선 관리가 중시되고 이에따라 전자개인선량계의 동적 기

능에 대한 관심이 증대되고 있다. 이 연구에서 지적된 기술적 문제점이 기술발전과 함께 빠른 시간 내에 보완이 이루어지고 추가적인 가격저하로 아직은 상대적으로 열세에 있는 비용문제를 극복한다면 전자선량계는 앞으로 주된 개인선량계의 위치를 차지할 수 있을 것으로 전망된다. 본 연구 결과는 이에 대비한 전자개인선량계 성능평가절차와 기준의 수립에 활용될 수 있다. 그러나 실험여건의 미비로 일부 수행하지 못한 평가항목과 다수의 선량계에 대한 편차에 대해서는 보완적인 연구가 필요하다.

### 참 고 문 헌

1. International Commission on Radiological Protection, *1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 60, Pergamon Press, (1990).
2. C. Ross Hirning and Peter S. Yuen, *Type Testing of the Seimens Plessey Electronic Personal Dosemeter*, Health Phys., Vol.69(1), 46-66 (1995).
3. International Standards Organization, *Reference Beta Radiations for Calibrating Dosimeters and Dose Ratemeters and for Determining Their Response as a Function of Beta Radiation Energy*, ISO 6980-1984(E), (1984).
4. International Standards Organization, *X and Gamma Reference Radiations for Calibrating Dosemeters and Dose Ratemeters and for Determining Their Response as a Function of Photon Energy*, ISO 4047 (1991).
5. International Standards Organization, *X and Gamma Reference Radiations for Calibrating Dosemeters and Dose Ratemeters and for Determining Their Response as a Function of Photon Energy*, ISO/TC85/SC2/WG2, (1993).
6. International Electrotechnical Commission, *Direct Reading Personal Dose Equivalent and/or Dose Equivalent Rate Dosimeters for the Measurement of Personal Dose Equivalent Hp(10) and Hp(0.07) for X, gamma and beta radiations*, IEC 1526 Draft, (1996).
7. American National Standards Institute, *Personnel Dosimetry Performance-Criteria for Testing*, ANSI N13.11 (1993).
8. 장 시영 외, "방사선 방어 및 측정기술 개발," KAERI-RR-1513-94, 한국원자력연구소 (1994).
9. B. Grosswendt, *Conversion Coefficients for Calibrating Individual Photon Dosimeters in Terms of Dose Equivalents Defined in an ICRU Tissue Cube and PMMA Slabs*, Radiat. Prot. Dosim. Vol. 32, No.4, (1990).