

Domestic Intercomparison Study for the Performance of Personnel Dosimeters

Jang-Lyul Kim, Si-Young Chang, Bong-Hwan Kim

Korea Atomic Energy Research Institute

(Received 1 October 1996 ; Accepted 28 February 1997)

개인선량계 성능의 국내 상호비교

김장렬, 장시영, 김봉환*

한국원자력연구소

Abstract - The Korea Atomic Energy Research Institute(KAERI) conducted a intercomparison study for personnel dosimetry services in Korea to enhance the accuracy and precision of the dosimetry system. Nine types of dosimeters(6 TLD, 3 film badge) from 7 institutions took part in this intercomparison study. Each participant submitted 30 dosimeters including transit control for irradiations. Both TLDs and film badges were irradiated with Cs-137 gamma, Sr/Y-90 beta and 4 X-ray beams in ISO wide series. Four dosimeters were irradiated on phantom with same dose equivalent for each field category. The delivered dose equivalent was in the range of 0.1 ~ 10 mSv. The participants assessed the results of their dosimeter readings in terms of the ICRU operational quantities for personal monitoring, Hp(10) and Hp(0.07). Most participants except 1 dosimeter estimated the delivered dose equivalent with biases less than $\pm 25\%$ for Cs-137 and Sr/Y-90. But for X-rays, the biases exceeded $\pm 35\%$ in some cases because the dose evaluation algorithm was based on the ANSI N13.11 X-ray fields which are different from those given by ISO.

Key words : domestic intercomparison, dose evaluation technique, personal dose equivalent

요약 - 한국원자력연구소에서는 국내 개인선량계 판독기관들의 선량판독평가기술의 정밀·정확도 향상을 위한 국내 상호비교시험을 실시하였다. 본 시험에 참가한 기관은 모두 7개 기관으로 총 9종의 선량계(TLD 6종, 필름배지 3종)가 참가하였다. 사용된 방사선장은 Cs-137 감마, Sr/Y-90 베타 및 ISO의 wide series X-선장중 4종등 6개의 방사선장 이었으며, 참가기관당 30개의 선량계를 제출하여 각 시험조사당 4개씩 PMMA 팬텀위에서 같은 선량이 조사되었다. 조사선량의 범위는 하한 ~10 mSv 이하였다. 참가기관은 판독선량을 ICRU가 정한 개인선량당량 Hp(10) 및 Hp(0.07)로 평가하였다. 시험 결과 Cs-137 및 Sr/Y-90의 경우 1개 기관을 제외한 모든 기관의 판독선량과 부여선량의 비가 $\pm 25\%$ 이내에서 잘 일치하고 있었으나 X-선장의 경우, 모든 판독기관의 선량평가 알고리즘이 ANSI N13.11의 X-선장에 기초하여 개발되었기 때문에 판독선량과 부여선량의 편차가 $\pm 35\%$ 를 초과하는 경우들이 발견되었다.

중심단어 : 국내 상호비교시험, 평가선량판독기술, 개인선량당량

서론

방사선방어 활동에서 가장 중요한 기본기술중의 하나는 방사선작업종사자가 피폭된 방사선량의 정확한 측정과 평가이다. 국제방사선단위 및 측정위원회(ICRU)에서 방사선방어를 목적으로 개인모니터링을 위한 실용량(1,2,3)을 정의한 이래 개인선량당량 Hp(10) 및 Hp(0.07)을 정확히 측정하기 위한 노력이 국내외적으로 계속되어 왔다.

1990년 이후에 한국원자력연구소는 3년간에 걸친 1단계 IAEA/RCA 국제상호비교시험에 참가하였으며 현재 2년간에 걸친 2단계가 진행중이다. 또한 미국 Oak Ridge 국립연구소와 1991년부터 3년간에 걸친 3차례의 국제상호비교시험, 호주 방사선방어연구소와의 아시아/태평양지역 상호비교시험 및 미국 성능검사 조사기관인 Atlan-Tech 및 Pacific Northwest National Laboratory등과의 상호비교시험을 통하여 꾸준한 기술의 축적을 이루어 왔다.

그러나 국내의 많은 개인선량 판독기관이 있음에도 불구하고 이러한 기관들의 판독능력을 향상시키기 위한 국내 상호비교시험은 적극적으로 이루어지지 않았다. 단지 1996년도에 이르러서야 비로소 국내 판독기관들에 대한 성능검사(4) 및 품질보증계획(5)에 대한 고시가 발표되었고 1995년도에 과학기술처 고시 제92-15호(6)에 의거하여 국내 전 판독기관에 대한 성능검사가 실시되었다(7).

1995년도에 실시된 판독기관의 성능검사에는

미국 ANSI N13.11(8)에서 제시하고 있는 방사선장을 한국원자력연구소에서 동일하게 제작하여 사용하였다. 그러나 미국에서도 차후 국제적으로 공인된 국제표준기구(ISO)의 방사선장(9)으로 성능검사를 실시할 예정이며 실제로 미국 표준과학연구원(NIST)은 ANSI N13.11을 대체할 몇 개의 ISO X-선장을 선택하여 표 1과 같이 예시한 바도 있다.

따라서 본 국내 개인선량평가의 상호비교시험 연구의 목적은 국내 전 판독기관에게 선량판독 평가기술의 정밀·정확도 향상을 위한 기회를 부여하고 국내 성능검사항목 이외의 방사선장에 작업자가 피폭되었을 경우 선량평가가 알고리즘의 변화없이 정확한 선량평가의 가능성 여부를 확인하기 위한 것이다. 이를 위하여 사용된 방사선장은 ISO에서 권고된 방사선장이었으며, 사용된 팬텀과 조사조건 등은 ANSI N13.11에 제시된 방법을 사용하였다.

참가기관 및 개인선량계 조사방법

① 국내상호비교시험 참가기관

현재 국내에는 과학기술처로부터 판독업으로 승인받은 4개기관(필름사용 3개기관, TLD 사용 2개기관, 이중 한 기관은 필름과 TLD 모두 승인) 및 자체판독으로 승인받은 10개 기관(모두 TLD 사용)등 총 14개 기관에서 개인선량판독을 수행하고 있으나, 본 상호비교시험에는 7개 기관(판독업 4개 기관, 자체판독 3개 기관)에서 9가지 중

Table 1. Comparison of Selected NIST and ISO X-Ray Beams

NISTR Code	E _{ave} (keV)	HVL(mm)		선량환산인자*		ISO Code	E _{ave} (keV)	HVL(mm)		선량환산인자	
		Al	Cu	C _{k,d}	C _{k,s}			Al	Cu	C _{k,d}	C _{k,s}
M30	20	0.36		0.42	1.02	N20	16	0.32		0.27	0.98
M60	35	1.68		1.00	1.21	N30	24	1.15		0.79	1.10
M100	53	5.00	0.2	1.52	1.49	N60	48		0.24	1.65	1.55
M150	73	10.2	0.67	1.78	1.64	N80	65		0.58	1.88	1.72
H150	118	17.0	2.5	1.71	1.60	N150	118		2.36	1.73	1.61

*선량환산인자 : ICRU Slab Phantom, mSv/mGy

류의 선량계가 참가하였다. 참가기관 및 선량계 종류를 표 2에 나타내었다.

TLD의 경우 현재 국내에서 가장 많이 사용되고 있는 Panasonic, Harshaw 및 Teledyne사 제품이 참가하였으며, 필름의 경우는 판독업으로 승인받은 3개의 자체모델 선량계 전체가 참가하여 상호비교시험의 선량계별 결과 비교에 충분한 기본자료로 사용할 수 있었다.

참가기관별 선량평가 결과에 최대한의 비밀을 보장하기 위해 참가기관에 각각 고유번호를 부여하여 각 참가기관 이외에는 타기관의 평가결과를 알지 못하도록 하였으며 본 연구결과에서도 단지 고유번호만을 사용하여 결과를 평가하였다.

Table 2. List of Participations and Dosimeters of Intercomparison

참가기관*	선량계 종류
한일원자력(주)	TLD(Panasonic)/Film(자체모델)
일진방사선(주)	Film(자체모델)
대한설비(주)	Film(자체모델)
서울방사선서비스(주)	TLD(Harshaw)
고리2원자력발전소	TLD(Harshaw)
포항가속기연구소	TLD(Teledyne 300)
한국원자력연구소	TLD(Teledyne 9150, 300)

*표에 열거된 순서는 고유번호와 무관함.

② 상호비교시험용 선량계 수

각 참가기관은 조사선원 및 에너지당 각 4개씩의 조사용 선량계와 예비용 3개 및 자연방사선 보정용 3개등 총 30개의 선량계를 제출하였다.

③ 조사 방사선장

Cs-137 3.57 TBq 감마선원, Sr/Y-90 74 MBq 베타선원 및 4 종류의 X-선을 사용하여 총 6개 종류의 방사선에 대한 상호비교시험을 수행하였다.

X-선은 ISO-4037(9)에서 권고한 wide beam series중 4개의 에너지를 선택하였다. 선택한 X-선의 평균에너지는 45 keV, 57 keV, 79 keV 및 104 keV였다. 표 3에 개인선량계의 조사 방사선장 및 선

량환산인자를 수록하였다.

Table 3. Radiation Qualities and Conversion Coefficients for Irradiation of Dosimeters

Radiation	E _{ave} (keV)	선량환산인자 ⁽¹⁾		선량환산인자 ⁽²⁾	
		C _{k,d}	C _{k,s}	C _{k,d}	C _{k,s}
Cs-137	662	1.21	1.21	1.21	1.21
Sr/Y-90	2280(Max.)				
W60	45	1.55	1.49	1.80	1.66
W80	57	1.77	1.64	2.00	1.79
W110	79	1.87	1.71	2.04	1.82
W150	104	1.77	1.64	1.91	1.73

⁽¹⁾C.F. for ICRU Slab Phantom

⁽²⁾C.F. for PMMA Slab Phantom

④ 팬텀

ICRU 39(1)에서는 개인선량계의 교정을 위한 팬텀으로 직경 30 cm의 조직등가구를 권고하였으나 실제로 많은 수의 선량계를 동시에 조사시킬 경우 이 팬텀은 실용적이지 못한 것으로 나타났다. 최근 ICRU 47(3)에서는 선량계 조사시 30 cm x 30 cm x 15 cm의 PMMA slab 팬텀의 사용과 ICRU tissue slab 팬텀의 선량환산인자를 사용하도록 권고하였다. PMMA slab 팬텀은 주로 미국과 스위스에서 성능검사시 사용해 오던 팬텀이지만 실제로 PMMA와 ICRU slab 팬텀 사이의 후방산란인자는 특히 저에너지 X-선 부분에서 많은 차이를 보여주고 있다. 따라서 후방산란인자가 ICRU slab과 유사한 물팬텀(1 cm 두께의 PMMA 물질로 구성, 입사면은 2.5 mm 두께)의 사용을 ISO에서 권고하였고 미국 ANSI 에서도 ISO와 같은 팬텀을 사용할 예정이지만 본 연구에서는 국내 판독기관의 성능검사시 사용하였던 PMMA 팬텀을 사용하여 상호비교시험을 수행하였다.

⑤ 조사조건

모든 선량계의 조사는 PMMA(Polymethyl methacrylate) 팬텀을 사용하여 이루어 졌으며 정열·확장 방사선장이 충분히 유지될수 있는 거리에서 수행되었다. 선량계는 양면테이프로 팬텀표면에

부착되었으며 1회 조사당 같은 기관의 4개 선량계에 같은 방사선량이 동시에 조사되었다. 조사선량은 참가기관을 임의로 3개의 군으로 나누어 약간씩 다른 선량을 조사시켰다. 조사선량범위의 선택은 방사선방어 측면에서 주로 고려되는 0.1 ~ 10 mSv 사이에서 결정하였다.

상호비교시험에 부여선량측정을 위하여 사용된 전리함은 한국표준과학연구원과 소급성을 유지하고있는 기준측정기를 이용하여 선량계 노출위치에서 선량률을 측정하였으며, 모든 조사는 3일 간에 걸쳐 수행되었다.

• Cs-137 조사

3.57 TBq Cs-137 감마선원을 사용하여 조사가 이루어졌다. 팬텀표면으로부터 선원까지의 거리는 2 m 였으며, 부피 3.6 cm³의 Shonka-Wychoff 전리함(Exradin Model A3)를 Keithley 35617Electrometer에 연결하여 조사선량률을 측정하였다. 조사선량률의 측정은 팬텀표면의 선량계 조사위치에서 방사선빔의 중심에 전리함을 위치시켜 수행하였다. 각 참가기관별로 4개의 선량계가 같은 선량으로 조사되었으며 3개의 군별 부여선량을 표 4에 나타내었다.

Table 4. Delivered Dose Equivalent(Hp(d)) with Energies

X-Ray Beam	Delivered Dose Equivalent(mSv)		
	Hp(10)	Hp(0.07)	
Cs-137	2.310, 2.772, 3.233		
Sr/Y-90	1.993, 2.492, 3.043		
W60	2.059, 2.470, 2.882	1.905, 2.285, 2.666	
W80	0.915, 1.099, 1.281	0.818, 0.983, 1.146	
W110	3.299, 3.958, 4.618	2.937, 3.524, 4.111	
W150	1.550, 1.861, 2.171	1.406, 1.688, 1.969	

• X-선 조사

MG-325 X-선 발생장치(독일 Philips, Model MG-325N)를 이용하여 ISO 표준 X-선을 발생시켰다. X-선 역시 Cs-137과 같은 방법으로 조사선량률을 측정하였으며 조사거리는 X-선 튜브내

타겟 중심으로부터 팬텀 표면까지 2 m 였다. 1개기관 4개의 선량계가 동시에 조사되었으며 군별 부여선량을 Cs-137과 함께 표 4에 나타내었다.

• 베타선 조사

독일 Buchler사에서 제작된 Sr/Y-90 베타선원(74 MBq)과 beam flattening filter를 사용하여 선원과 팬텀표면 사이의 30 cm 거리에서 모든 조사가 이루어졌다. 흡수선량율은 독일 표준기관인 PTB(Physikalisch Technische Bundesanstalt)에서 제공한 성적서를 이용하였으며 군별부여선량을 역시 표 4에 나타내었다.

⑥ Operational Quantities의 계산

개인선량당량 Hp(10) 및 Hp(0.07)의 계산은 먼저 선량계의 조사지점에 위치한 전리함으로부터 측정된 조사선량값, X_{air}, 을 다음식에 의하여 air kerma, K_{air}, 로 변환한다.

$$K_{air} = \frac{X_{air} \cdot (w/e)_{air}}{(1-g)}$$

여기에서 (w/e)_{air}=33.97 J/C이고 g는 제동방사선으로 상실된 이차전자의 에너지분율로 입사방사선의 에너지에 따르는 상수이다. g값은 Cs-137에 대해서는 1.5 × 10⁻³, X-선장에 대해서는 0을 적용하였다(8).

Hp(10) 및 Hp(0.07)은 K_{air}에 선량환산인자를 곱하여 다음과 같이 계산된다.

$$Hp(10) = K_{air} \times C_d$$

$$Hp(0.07) = K_{air} \times C_s$$

여기에서 Cd와 Cs는 각각 심부 및 표층에 대한 선량환산인자를 나타낸다.

전술한 바와 같이 PMMA slab 팬텀과 ICRU slab 팬텀의 선량환산인자는 특히 저에너지 영역에서 많은 차이를 보이고 있으므로 본 연구에서는 Grosswendt(10)의 PMMA slab 팬텀에 대한 선량환산인자를 사용하여 선량당량을 계산하였다. 사용된 방사선에 대한 선량환산인자는 표 3에 나타나 있다.

결과 및 토의

각 참가기관의 결과를 요약해서 표 5 및 6에 나타내었다. 표에 나타낸 결과는 참가기관의 평가선량($\tilde{H}_p(d)$)과 부여된 선량당량($H_p(d)$)과의 비로서 나타내었다. 즉 값이 1 보다 작으면 과소평

Table 5. Ratios of each participant's reported dose equivalent ($\tilde{H}_p(10)$) to the delivered dose equivalent ($H_p(10)$).

Participant No.	Radiation Beams				
	Cs-137	W60	W80	W110	W150
1	0.931	0.571	0.723	0.605	1.182
2	0.937	0.780	0.837	0.805	0.867
3	0.708	0.919	0.648	0.706	0.716
4	1.002	0.717	0.924	0.816	0.791
5	0.878	1.047	1.046	0.946	0.877
6	0.894	0.901	0.812	0.934	1.077
7	0.810	1.015	1.028	0.898	0.859
8	0.996	1.069	0.941	0.954	0.833
9	1.079	0.965	0.882	0.917	0.895

가된 것을 의미하며 1 이상이면 과대평가된 것을 나타낸다.

Table 6. Ratios of each participant's reported dose equivalent($\tilde{H}_p(0.07)$) to the delivered dose equivalent ($H_p(0.07)$).

Participant No.	Radiation Beams				
	Sr/Y-90	W60	W80	W110	W150
1	0.861	0.636	0.767	0.632	1.22
2	0.952	0.910	0.973	0.941	0.801
3	0.760	1.201	0.679	0.729	0.748
4	1.104	0.760	0.984	0.879	0.826
5	0.937	1.223	1.200	1.078	1.067
6	0.901	1.043	0.959	1.077	1.003
7	1.846	1.455	1.862	1.209	1.290
8	0.939	1.137	1.034	1.008	0.882
9	1.043	1.029	0.970	0.980	0.961

① Cs-137 감마선 평가

참가기관별 결과분포도를 그림 1 및 그림 2에서 $H_p(10)$ 및 $H_p(0.07)$ 로 구분하여 나타내었다. 9종류의 참가선량계중 56%인 5종류가 조사선량과

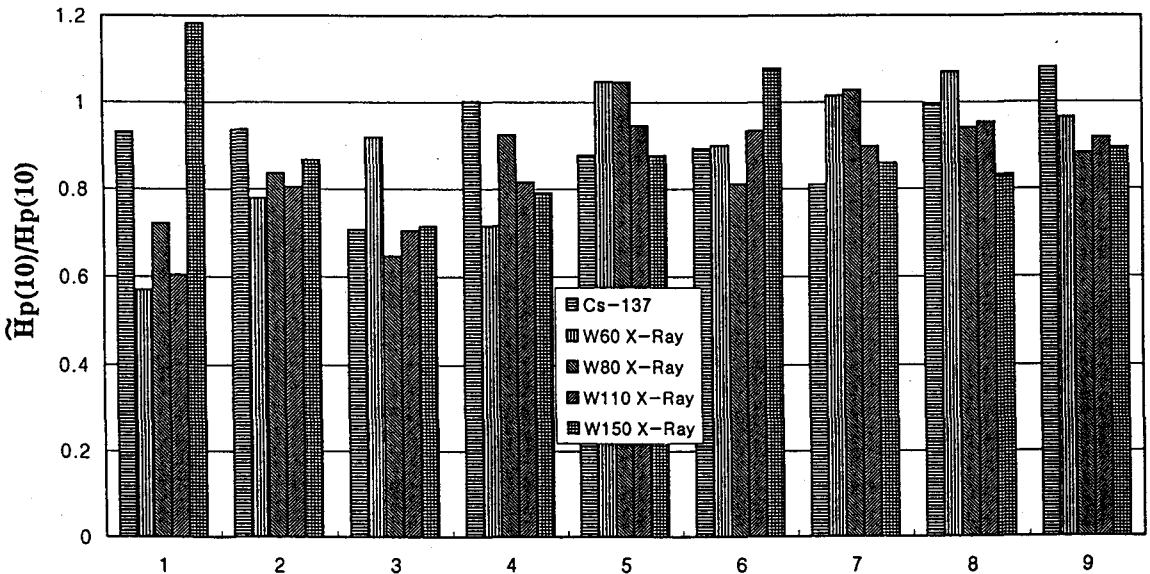


Fig. 1. Ratios of Reported($H_p(10)$) to Delivered Dose($H_p(10)$).

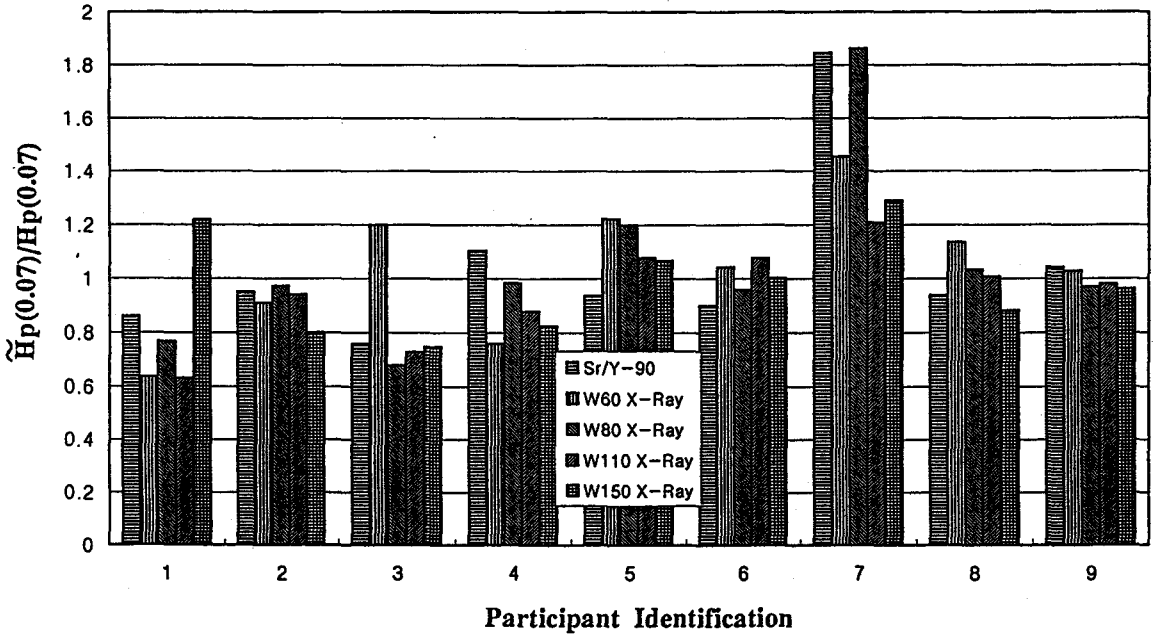


Fig. 2. Ratios of Reported(Hp(0.07)) to Delivered Dose(Hp(0.07)).

± 10% 이내의 판독결과를 보여주고 있다. 편중(B)의 절대값과 표준편차(S)중 어느것도 0.35를 벗어나지 않아야 한다는 과학기술처장관 고시에 의하여 평가할 때 ± 35% 이내에는 9종류의 선량계가 모두 이를 만족하고 있는 것으로 나타났다.

② X-선 평가

선량계 편차에 의한 평가결과와 결과분포도를 표 7과 그림 1 및 그림 2에서 보여주고 있다. Cs-137의 경우와 같이 평가치의 ± 35%를 기준으로 할 때 이를 벗어나는 경우가 에너지별로 한 개 내지 두 개의 선량계가 발생하였다. 이는 현재 각 기관에서 사용하고 있는 선량평가 알고리즘의 선량환산인자가 본 연구에서 조사된 ISO X-선장에 대한 것이 아니고 ANSI N13.11에서 사용되고 있는 X-선장의 환산인자를 사용하였기 때문에 주로 발생된 것으로 보인다.

또한 필름배지의 경우 최근의 알고리즘 개발로 ANSI X-선장에 대한 최근에 발표된 새로운 선량환산인자(11)를 사용하고 있는 반면 TLD의 경우 대부분 1983년도에 발표된 ANSI N13.11(12)의 선량환산인자를 사용하고 있어 Hp(10) 및 Hp(0.07)가 잘못 평가된 경우가 많으므로 새로운

선량환산인자 적용이 필요한 것으로 나타났다.

Table 7. No. of Dosimeters with the Biases for X-Ray Beams.

X-Ray	Biases (%)					
	± 0~10 %		± 10~35 %		± 35~50 %	
	Hp(10)	Hp(0.07)	Hp(10)	Hp(0.07)	Hp(10)	Hp(0.07)
W60	6	3	2	4	1	2
W80	4	5	4	3	1	0
W110	4	5	4	3	1	1
W150	1	3	8	6	0	0

③ Sr/Y-90 베타선 평가

Sr/Y-90의 경우 모든 기관이 베타에 의하여 선량계가 조사된 것으로 판별하였으며, 1개 기관을 제외한 전 선량계가 ± 25% 이내의 좋은 결과를 얻어 베타의 경우 크게 문제가 없는 것으로 밝혀졌다. 단지 1개 기관의 경우 오차가 약 85%를 보이고 있는데 이는 새로운 장비도입에 따른 교정미비로 밝혀졌다.

차후 Tl-204와 같은 저에너지 베타와 관련된 알고리즘 개발연구 및 상호비교시험에 의한 결과분석이 필요할 것으로 판단된다.

결 론

현재 대부분의 관독기관의 선량평가 알고리즘이 ANSI N13.11의 방사선장에 기본을 두고 있는 상황에서 ANSI 선장 이외의 방사선에 조사되었을 경우에도 알고리즘이 정확히 선량을 평가할수 있어야 하는 것은 매우 중요한 문제이며, 이러한 상황에서 실시된 본 상호비교시험 연구의 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) ISO X-선장에 대해서는 현 선량평가 알고리즘의 적용이 용이하지 않으나 정확한 교정과 품질보증활동이 수행된다면 알고리즘의 본질적 수정없이 선량평가가 가능할 것이다.
- (2) 선량평가 알고리즘의 X-선장에 대한 선량 환산인자가 TLD의 경우 대부분 ANSI N13.11(1983)의 값을 적용하고 있으므로 1995년도의 새로운 값으로 대처하여 선량평가를 실시하여야 한다.
- (3) Cs-137 및 Sr/Y-90의 경우는 선량평가에 문제점이 없다.

이상의 결론을 종합할 때 선량평가의 가장 중요한 사항인 정확한 교정과 품질보증활동이 유지된다면 기존의 선량평가 알고리즘으로 ISO 방사선장에 대한 선량평가가 가능한 것으로 나타났다.

참고문헌

1. ICRU, *Determination of Dose Equivalents from External Radiation Sources - Part 1*, ICRU Report 39, Bethesda, MD(1985).
2. ICRU, *Determination of Dose Equivalents from External Radiation Sources - Part 2*, ICRU Report 43, Bethesda, MD(1988).
3. ICRU, *Determination of Dose Equivalents from External Radiation Sources - Part 3*, ICRU Report 47, Bethesda, MD(1992).
4. 과학기술처, 개인선량계 관독에 관한 기술기준, 과학기술처 고시 제 96-6호(1996).
5. 과학기술처, 외부피폭선량 관독에 관한 품질보증계획서 작성기준, 과학기술처 고시 제 96-7호 (1996).
6. 과학기술처, 개인방사선피폭선량에 관한 기술기준, 과학기술처 고시 제 92-15호(1992).
7. 나성호등, 개인방사선 피폭선량관독 성능시험, 방사선방어학회지, 21(2), 131-138(1996).
8. ANSI, *American National Standard for Dosimetry - Personnel Dosimetry Performance - Criteria for Testing*, ANSI N13.11(1993).
9. International Organization for Standardization, *X-Ray and Gamma Reference Radiation for Calibrating Dosimeters and Dose Ratemeters and for Determining Their Response as a Function of Photon Energy*, ISO 4037 Part 1(1992).
10. B. Grosswendt, *Conversion Coefficients for Calibrating Individual Photon Dosimeters in Terms of Dose Equivalents Defined in an ICRU Tissue Cube and PMMA Slabs*, Radia. Prot. Dosim., Vol. 32, 219-231(1990).
11. C. G. Soares and P. R. Martin, *A Comprehensive Set of Conversion Coefficients for Photons*, Proceedings of the Harshaw User's Group Meeting, Las Vegas(1995)
12. ANSI, *American National Standard for Dosimetry - Personnel Dosimetry Performance - Criteria for Testing*, ANSI N13.11(1983).