

A Theoretical Calculation for Angular Dependence of X-ray Beams on Extremity Phantom

Jong-Soo Kim, Suk-Chul Yoon, Jang-Lyul Kim and Kwang-Pyo Kim*
Korea Atomic Energy Research Institute, *Kyung Hee University

말단팬텀에서 X-선 빔의 방향의존성에 관한 이론적 계산

김종수 · 윤석철 · 김장렬 · 김광표*

한국원자력연구소, *경희대학교

Abstract - The ANSI N13.32 recommends that a study of the angular response of a dosimeter be carried out once, although no pass/fail criterion is given for angular response. Gamma dose equivalent conversion and angular dependence factors were calculated by using MCNP code for the case of ANSI N13.32 extremity phantoms (finger and arm) at the depth of $7\text{mg}/\text{cm}^2$. Those extremity dosimeters were assumed to be irradiated from both monoenergetic photons and ISO X-ray narrow beams. These calculated gamma dose equivalent conversion and angular dependence factors were compared to B. Grosswendt's result calculated by using X-ray beams. The result showed that the dose equivalent conversion factors of this study agreed well with that of B. Grosswendt for all energies within 2% except 7% in the case of the low energies. In the case of angular dependence factors comparison, they agreed within 3%. It was shown that angular dependence factors of the finger phantom decreased as the horizontal angle of the phantom increased for the ISO X-ray beams less than 60keV. For the higher energy X-ray beams range they decreased slightly around 40 degree, but then increased from this energy to 90 degree.

Key words : Angular dependence factor, Extremity phantom, ANSI N13.32 performance test, Dose equivalent conversion factor.

요약 - ANSI N13.32에서는 선량계의 방향에 따른 반응도가 성능시험의 합격판정의 범주는 아니지만 이에 관한 연구를 요구하고 있다. 본 연구에서는 ANSI N13.32의 말단팬텀 즉, 손가락과 손목팬텀내의 $7\text{mg}/\text{cm}^2$ 깊이에서 MCNP 코드를 사용하여 단일에너지를 가진 광자 및 ISO narrow X-선 빔에 대하여 선량당량환산인자와 방향의존성인자를 도출하였다. X-선 빔에 대하여는 이들 데이터를 B. Grosswendt의 연구 결과와 비교하였다. 그 결과 선량당량환산인자는 낮은 에너지 영역에서 최대 7%를 그리고 다른 에너지 영역에서는 2% 이내였으며, 방향의존성인자는 최대 3% 정도로 잘 일치하였다. 또한 60keV 이하의 낮은 에너지 영역에서 발생된 방향의존성인자는 손가락 팬텀의 경우에 주축을 따라 수평회전각이 증가할수록 감소하지만 그 에너지 영역 이상에서 90°까지는 증가하고 있음을 알 수 있었다.

중심단어 : 방향의존성인자, 말단팬텀, ANSI N13.32 성능시험, 선량당량환산인자.

서 론

국제방사선단위·도량 위원회(International Commission Radiation Units and Measurement, ICRU)[1]에서는 개인모니터링을 위한 실용량으로서 개인선량당량[H_p(d)]을 인체의 특정한 깊이 에 대한 연조직(Soft tissue)에서의 선량당량으로서 권고하고 있다. 전신선량계에 대한 ICRU의 4 가지 인체조직 성분으로 이루어진 반경 15cm의 ICRU 구 팬텀 또는 정면 30cm×30cm, 두께 15cm slab 팬텀은 손목 또는 손가락에 비하여 상대적으로 크기 때문에 말단선량계에 적용하는 데는 적당하지 않다. 따라서 ANSI N13.32[3]에서는 인체말단부를 모사한 정원(Right circular)의 원통형 팬텀으로 손목팬텀(Arm/leg phantom)과 손가락팬텀(Finger phantom) 두 가지 종류[2]를 제시하고 있다. 또한 ANSI N13.32는 선량계의 특성 조사를 위하여 말단팬텀에서 사용하는 말단선량계의 방향의존성을 성능시험에 포함하고 있다.

한편 선량계에서의 측정량은 조사선량 또는 흡수선량을 나타내므로 이 양을 개인모니터링을 위한 실용량으로 전환하기 위해서 공기커마와 ICRU 연조직에 대한 조직커마와의 비를 정함으로써 직접 선량당량을 결정할 수 있다. 그러나 ANSI(American National Standard Institute)가 제안한 손목팬텀과 손가락팬텀에서 단일에너지의 광자뿐만 아니라 X-선 빔에 대해서 방향의존성에 대한 자료가 없는 상황이다.

따라서 이번 연구에서는 MCNP(Monte Carlo N-Particle) 4A[4]코드를 활용하여 ANSI에서 제안한 손목팬텀과 손가락팬텀에 단일에너지의 광자를 조사시켜 이론적인 선량당량환산인자에 대한 방향의존성인자를 계산하였다. 아울러 ISO(International Organization of Standardization)의 narrow X-선 빔[5]에 의해 조사된 말단팬텀에서의 선량당량환산인자와 이에 대한 방향의존성인자를 도출하였다.

이론적 근거

단일에너지의 광자에 의해 조사된 말단팬텀의 7mg/cm² 깊이에서 공기커마와 선량당량과의 비

로서 선량당량환산인자[6]를 이미 결정하였다. 따라서 이 결과로부터 단일에너지 광자에 의한 선량당량환산인자의 방향의존성을 우선 계산하였으며 아울러 ISO narrow X-선 빔에 의한 선량당량환산인자를 도출하였다. 궁극적으로 ISO narrow X-선 빔에 조사된 손가락과 손목 팬텀의 7 mg/cm² 깊이에서 선량당량환산인자[7]에 대한 방향의존성인자 계산을 수행하였다.

본 연구의 X-선 빔에 대한 선량당량환산인자를 계산하기 위하여 적용된 최종 식은 다음과 같다.

$$\frac{H_p(\bar{E}, d, a)}{K_a} = \frac{\int \frac{H_p(E, d, \alpha)}{K_a} \cdot \left(\frac{d\phi}{dE}\right)^{ISO} dE}{\int \left(\frac{d\phi}{dE}\right)^{ISO} dE} \tag{1}$$

여기서, $\left(\frac{d\phi}{dE}\right)^{ISO}$: ISO X-선 빔의 스펙트럼

$\frac{H_p(E, d, \alpha)}{K_a}$: 단일에너지 광자에 의한 방향의존성 선량당량환산인자

$\frac{H_p(\bar{E}, d, \alpha)}{K_a}$: ISO X-선 빔의 스펙트럼에 의한 방향의존성 선량당량환산인자이다.

식 (1)에서 손목팬텀과 손가락팬텀의 관심 있는 체적 내에서만 인체조직등가물질인 ICRU 연조직으로 모사함으로써 ICRU에서 권고하는 피부선량당량을 대변할 수 있도록 고려하였으며 여기에 나타난 모든 선량당량환산인자는 공기커마[8]에 대한 팬텀내의 7mg/cm² 깊이에서 조직커마의 비로서 계산하였다.

선량당량환산인자가 회전각 α의 함수로서 결정되면 방향의존성인자[9]를 결정하기 위한 식은 다음과 같다.

$$R(\bar{E}, d, \alpha) = \frac{h(\bar{E}, d, \alpha)}{h(\bar{E}, d, 0^\circ)} \tag{2}$$

여기서, $R(\bar{E}, d, \alpha)$: 방향의존성인자

$h(\bar{E}, d, \alpha)$: 깊이 d, 각 α에서 선량당량환산인자

$h(\bar{E}, d, 0^\circ)$: 깊이 d , 각 0° 에서 선량
당량환산인자이다.

식 (2)의 방향의존성인자는 팬텀의 주축을 따라
각 α 만큼 수평으로 회전시킨 팬텀내의 $7\text{mg}/\text{cm}^2$
깊이에서 선량당량환산인자의 변화를 나타낸다.

전산수행방법

본 연구에서 손목팬텀은 뼈등가물질로 사용된
알루미늄과 PMMA(Poly Methyl Meth Acrylate)로
구성되었으며 손가락팬텀은 PMMA로 구성된 것
으로 모사하였다. PMMA의 구성원소는 C 62%,
O 32%, H 8% 이고 밀도(g/cm^3)는 1.19이며, 알
루미늄은 Al 100% 이고 밀도(g/cm^3)는 2.7 이다.
선량당량환산인자를 결정하기 위한 조사조건으
로서 팬텀의 주위는 진공상태이며, 평행하고 광

범위한 면선원이며, 광자 또는 X-선 빔이 팬텀의
주축을 따라 수직으로 입사한다고 가정하였다.
팬텀의 형태 및 계산 수행을 위한 기하학적 형
태를 그림 1에 나타내었다. 그리고 ISO narrow
스펙트럼 데이터를 실제 계산에 적용하기 위하여
스펙트럼의 단일에너지 광자에 의한 선량당량환
산인자를 스펙트럼 가중치로 계산하였다. 여기서
ISO narrow 스펙트럼의 모든 합은 1 이다. MCNP
4A 전산코드는 단일에너지의 광자에 의해 조사된
팬텀의 $7\text{mg}/\text{cm}^2$ 깊이에서 선량당량환산인자와
방향의존성인자를 결정하는데 사용하였으며 여
기에는 F6(Energy deposition) Card를 적용하였다.
또한 이차전자의 수송을 고려하지 않는 커마근
사법을 사용하였다.

X-선 빔에 의해 조사된 말단팬텀에서 방향의
존성인자를 결정하기 위하여 선량당량환산인자를
구할 때와 동일한 조사조건으로서 가정하였다.

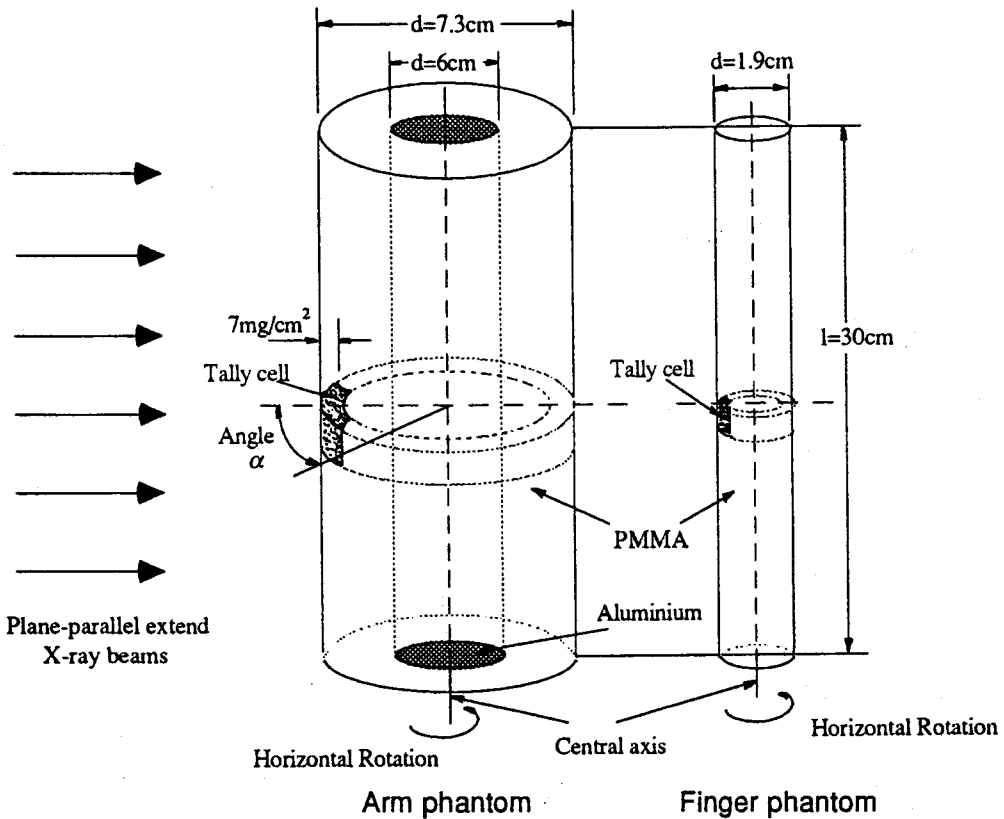


Fig. 1. Geometrical arrangement of irradiation condition for computational calculation on ANSI extremity phantom.

또한 그림 1에서와 같이 팬텀의 주축을 중심으로 각 α 만큼 수평으로 회전시켰으며 수평회전각 α 의 함수로서 제시된 값들은 $\alpha_{\min} = \alpha - \frac{\Delta\alpha}{2}$ 와 $\alpha_{\max} = \alpha + \frac{\Delta\alpha}{2}$ 사이의 평균값을 의미한다.

결과 및 고찰

손목과 손가락팬텀의 $7\text{mg}/\text{cm}^2$ 깊이에서 단일 에너지의 광자에 대한 선량당량환산인자 및 수평회전각 α 의 함수로서 선량당량환산인자의 방향의존성인자를 표 1과 표 2에 각각 제시하였다. 여기서 본 계산의 결과는 ANSI N13.32에서 제시한 말단팬텀에 의한 것으로서 손가락팬텀은 Grosswendt[9]와 같은 팬텀구성물질인 PMMA 재질로

한 것이다. 한편 손목팬텀은 팬텀구성물질로서 Grosswendt가 PMMA 재질만 고려한 반면 본 계산에서는 PMMA 재질과 뼈등가물질로서 알루미늄 재질을 함께 고려하였다. 본 연구의 단일에너지 광자에 의한 손가락팬텀과 손목팬텀에서 팬텀의 주축에 따른 수평회전각 α 의 함수로서 선량당량 환산인자의 방향의존성인자를 그림 2와 그림 3에 각각 나타내었다. 그림 2와 3에서 보는 것처럼 방향의존성인자의 이러한 분포는 광자가 관심있는 체적내로 도달하는데 필요한 회전각에 의존하는 관통길이(Penetration length)[10]와 에너지에 의존하는 관통능력도에 따른 것이다. 먼저 그림 2와 같은 손가락팬텀의 경우, 낮은 에너지 영역에서 관통능력은 작지만 각이 커짐에 따라 관통길이가 증가함으로써 방향의존성인자는 급격히

Table 1. Angular dependence factors of gamma dose equivalent conversion factors for horizontal angle(α) between 0° and 120° in the finger.

E(keV)	Angle(degree)	0	10	20	30	40	50	60	90	120
15	B. Grosswendt	1.000	0.996	0.993	0.996	0.994	0.991	0.980	0.880	0.336
	This report	0.96	1.006	1.002	1.005	0.990	0.988	0.981	0.911	0.350
30	B. Grosswendt	1.092	1.000	0.991	0.992	0.994	0.978	0.982	0.948	0.746
	This report	1.01	1.018	1.003	1.005	0.990	0.988	0.971	0.980	0.758
50	B. Grosswendt	1.144	1.004	1.003	0.996	0.999	0.990	0.995	0.966	0.818
	This report	1.10	1.009	0.987	1.002	0.978	0.988	0.975	0.984	0.813
80	B. Grosswendt	1.183	0.999	1.001	1.002	0.997	0.999	0.993	0.992	0.857
	This report	1.16	1.021	1.001	1.012	0.998	0.992	0.996	1.008	0.862
100	B. Grosswendt	1.188	0.997	0.995	0.992	0.992	1.001	0.997	0.988	0.862
	This report	1.19	1.003	0.996	1.000	0.989	0.994	0.999	1.000	0.869
150	B. Grosswendt	1.170	0.998	0.997	1.006	1.000	1.004	1.006	0.999	0.895
	This report	1.17	1.002	1.002	1.009	0.994	1.011	1.005	1.018	0.894
300	B. Grosswendt	1.141	0.998	0.998	0.998	1.004	1.002	1.005	1.003	0.924
	This report	1.14	1.008	1.001	1.009	0.993	1.012	1.011	1.026	0.931
500	B. Grosswendt	1.125	0.999	0.997	0.997	1.000	1.004	1.004	1.012	0.941
	This report	1.12	1.013	1.002	1.008	0.997	1.007	1.012	1.032	0.952
700	B. Grosswendt	1.114	1.001	1.001	1.003	1.005	1.005	1.009	1.014	0.958
	This report	1.118	1.012	1.005	1.006	0.998	1.011	1.013	1.030	0.958
1000	B. Grosswendt	1.112	0.999	0.999	1.000	1.001	1.001	1.004	1.006	0.963
	This report	1.115	1.009	1.002	1.003	0.992	1.008	1.011	1.024	0.964
1250	B. Grosswendt	1.108	1.003	1.001	1.001	1.002	1.005	1.005	1.008	0.967
	This report	1.112	1.011	1.001	1.006	0.994	1.009	1.013	1.026	0.969

Table 2. Angular dependence factors of gamma dose equivalent conversion factors for horizontal angle(α) between 0° and 120° in the arm.

E(keV)	Angle(degree)	0	10	20	30	40	50	60	90	120
15	B. Grosswendt	1.003	1.001	0.999	1.001	1.004	0.992	0.983	0.766	0.016
	This report	0.96	1.025	1.027	1.039	1.011	1.038	1.021	0.846	0.015
30	B. Grosswendt	1.245	0.997	0.999	0.990	0.992	0.982	0.973	0.889	0.357
	This report	1.04	1.007	1.042	1.047	1.031	1.047	1.028	0.927	0.314
50	B. Grosswendt	1.437	1.003	0.999	0.993	0.989	0.976	0.972	0.945	0.511
	This report	1.22	0.998	1.008	1.007	0.990	0.984	0.974	0.956	0.422
80	B. Grosswendt	1.433	1.002	0.999	0.993	0.994	0.991	0.991	0.951	0.575
	This report	1.34	1.020	1.022	1.029	1.021	1.030	1.017	0.965	0.523
100	B. Grosswendt	1.398	0.996	0.999	0.995	0.995	0.993	0.994	0.972	0.598
	This report	1.35	1.033	1.038	1.041	1.035	1.043	1.045	0.997	0.574
150	B. Grosswendt	1.319	0.995	0.995	1.001	0.999	1.010	1.006	1.001	0.649
	This report	1.32	1.040	1.042	1.052	1.042	1.057	1.057	1.048	0.652
300	B. Grosswendt	1.214	1.003	1.007	1.006	1.007	1.015	1.026	1.032	0.734
	This report	1.24	1.027	1.038	1.045	1.043	1.064	1.072	1.090	0.762
500	B. Grosswendt	1.17	1.000	1.000	1.004	1.004	1.009	1.022	1.036	0.789
	This report	1.19	1.021	1.031	1.036	1.037	1.059	1.067	1.078	0.816
700	B. Grosswendt	1.149	1.002	1.004	1.002	1.009	1.012	1.019	1.035	0.822
	This report	1.165	1.021	1.034	1.045	1.034	1.056	1.057	1.071	0.862
1000	B. Grosswendt	1.136	0.999	1.001	0.999	1.006	1.006	1.010	1.029	0.850
	This report	1.15	1.016	1.027	1.038	1.040	1.050	1.052	1.080	0.896
1250	B. Grosswendt	1.125	1.000	1.001	1.004	1.007	1.009	1.014	1.032	0.866
	This report	1.14	1.019	1.030	1.041	1.047	1.054	1.056	1.078	0.908

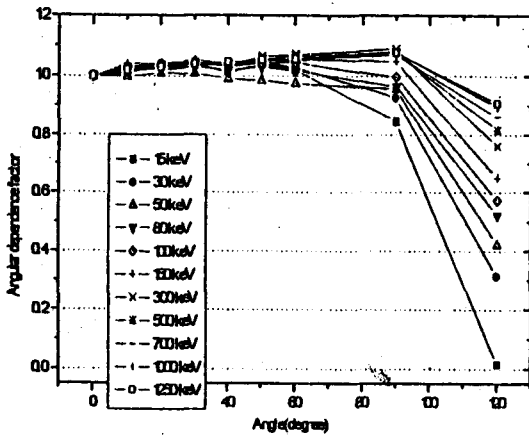


Fig. 2. Angular dependence for monoenergetic photon in the finger phantom.

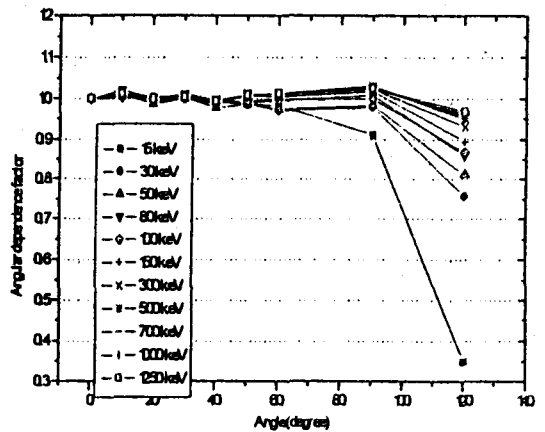


Fig. 3. Angular dependence for monoenergetic photon in the finger phantom.

Table 3. Angular dependence factors for ISO narrow beams as dose equivalent conversion factors, horizontal angle(α) and average energy (\bar{E}) in the finger phantom.

E(keV)	Angle(degree)	선량환산인자	10	20	30	40	50	60	90	120
ISO 33	B. Grosswendt	1.096	1.000	0.996	0.992	0.992	0.981	0.984	0.948	0.754
	This report	1.022	1.016	0.999	1.004	0.988	0.988	0.972	0.980	0.761
ISO 48	B. Grosswendt	1.135	1.001	0.997	0.995	0.996	0.989	0.987	0.961	0.806
	This report	1.084	1.011	0.991	1.003	0.981	0.988	0.976	0.985	0.806
ISO 65	B. Grosswendt	1.168	1.000	0.997	0.997	0.993	0.993	0.989	0.977	0.836
	This report	1.131	1.015	0.994	1.007	0.989	0.990	0.986	0.997	0.839
ISO 83	B. Grosswendt	1.183	1.000	0.998	0.996	0.997	0.995	0.993	0.988	0.852
	This report	1.165	1.015	0.998	1.008	0.994	0.992	0.995	1.004	0.861
ISO 100	B. Grosswendt	1.185	0.998	0.996	0.995	0.995	0.999	0.997	0.990	0.863
	This report	1.180	1.006	0.997	1.003	0.991	0.995	0.999	1.003	0.869
ISO 118	B. Grosswendt	1.180	0.999	0.995	0.999	0.997	1.001	1.001	0.994	0.877
	This report	1.175	1.004	0.999	1.004	0.991	1.001	1.001	1.008	0.878
ISO 161	B. Grosswendt	1.166	1.000	0.998	1.004	0.998	1.002	1.004	1.002	0.899
	This report	1.163	1.003	1.002	1.009	0.994	1.010	1.005	1.019	0.897
ISO 205	B. Grosswendt	1.155	1.002	1.000	1.000	0.996	1.001	1.001	1.005	0.908
	This report	1.151	1.004	1.002	1.009	0.994	1.011	1.007	1.025	0.909
ISO 248	B. Grosswendt	1.148	1.000	0.999	0.998	0.999	1.001	1.002	1.004	0.915
	This report	1.145	1.006	1.001	1.009	0.993	1.012	1.009	1.026	0.919

감소한다. 그러나 높은 에너지 영역에서는 관통 능력이 크고 각에 따른 관통정도는 미미하다. 또한 그림 3에 보여진 것처럼 손목팬텀의 경우는 다르다. 낮은 에너지 영역에서는 손가락팬텀의 경우와 거의 같은 경향을 나타내지만 높은 에너지 영역에서는 각이 증가한다 할지라도 방향의존성 인자는 급격한 감소를 나타낸다. 이것은 손목팬텀의 직경이 손가락팬텀의 직경보다 크므로 더 큰 관통길이를 가지므로써 야기된 것이다. 그리고 본 계산에서 고려한 모든 에너지영역의 90°보다 작은 각에 대해서 그러한 증가 형태를 보이는 것은 전방향(Forward direction)로 산란되거나 또는 측면(Laterally)으로 산란되는 광자가 선량에 많이 기여했기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 현상은 손가락팬텀보다 손목팬텀에서 더욱 두드러진다.

X-선 빔으로 조사시킨 손목팬텀과 손가락팬텀의 7mg/cm² 깊이에서의 선량당량환산인자를 ISO narrow 빔에 적용하였을 때, 본 계산결과를 표

3과 표 4에 평균에너지의 함수로서 각각 제시하였으며 본 연구의 결과를 Grosswendt의 결과[10]와 비교하였다. 물론 손목과 손가락팬텀의 재질은 단일에너지의 광자의 경우와 동일하다. 본 연구에서 계산결과와 통계적 불확실성은 3%미만이다. 실질적인 면에서 이러한 통계적 불확실성은 조사조건에 거의 의존하며, 특히 낮은 에너지에 상응하는 큰 광자 분율을 포함하는 X-선 빔인 경우 공기에서의 산란을 고려해야 한다. 또한 부가되는 불확실성으로서 본 계산에 사용된 X-선 빔의 반가층, 평균에너지와 같은 X-선의 특성(Quality)이 다른 X-선 빔인 경우에 야기될 수 있으므로 플루언스 스펙트럼의 분석이 중요하다.

단일에너지의 광자와 X-선 빔과 같은 방사선 특성에 의존하는 선량당량환산인자의 영향을 보기 위하여, 단일에너지 광자에 대한 선량당량환산인자와 ISO narrow X-선 빔에 대해서 플루언스에 대한 평균에너지의 함수로서 선량당량환산인자를 비교하였다. 여기서 손목팬텀에 비해서

Table 4. Angular dependence factors for ISO narrow beams as dose equivalent conversion factors, horizontal angle(α) and average energy (\bar{E}) in the arm phantom.

E(keV)	Angle(degree)	선량환산인자	10	20	30	40	50	60	90	120
ISO 33	B. Grosswendt	1.261	0.999	1.000	0.994	0.991	0.984	0.975	0.890	0.377
	This report	1.064	1.006	1.034	1.038	1.022	1.034	1.017	0.931	0.330
ISO 48	B. Grosswendt	1.400	1.000	1.001	0.994	0.990	0.982	0.974	0.907	0.492
	This report	1.188	1.001	1.014	1.015	0.999	0.997	0.986	0.952	0.410
ISO 65	B. Grosswendt	1.450	1.001	1.003	0.994	0.989	0.990	0.982	0.934	0.550
	This report	1.282	1.009	1.015	1.018	1.006	1.008	0.997	0.961	0.475
ISO 83	B. Grosswendt	1.427	0.998	0.999	0.996	0.989	0.992	0.992	0.958	0.579
	This report	1.334	1.022	1.025	1.031	1.023	1.031	1.022	0.974	0.531
ISO 100	B. Grosswendt	1.394	0.998	0.998	0.996	0.995	0.996	0.996	0.974	0.600
	This report	1.343	1.031	1.035	1.039	1.032	1.042	1.041	0.996	0.572
ISO 118	B. Grosswendt	1.361	0.999	0.998	0.996	1.001	1.003	1.001	0.988	0.620
	This report	1.334	1.035	1.039	1.045	1.037	1.048	1.048	1.015	0.602
ISO 161	B. Grosswendt	1.301	0.996	0.999	1.003	1.001	1.010	1.009	1.008	0.662
	This report	1.299	1.024	1.041	1.051	1.042	1.057	1.058	1.051	0.661
ISO 205	B. Grosswendt	1.262	0.999	1.005	1.006	1.004	1.011	1.016	1.022	0.691
	This report	1.263	1.034	1.041	1.049	1.042	1.059	1.063	1.065	0.696
ISO 248	B. Grosswendt	1.236	1.001	1.007	1.007	1.006	1.013	1.022	1.029	0.713
	This report	1.249	1.031	1.039	1.047	1.043	1.062	1.067	1.077	0.727

손가락팬텀이 선량당량환산인자에 대한 산란기여도가 훨씬 적음을 알 수 있으며 선량당량환산인자의 최대치가 손가락팬텀에서 더 작다. 이것은 손가락팬텀이 상대적으로 크기가 작기 때문이다. 또한 ISO narrow X-선 빔과 단일에너지의 광자에 대한 선량당량환산인자가 낮은 에너지영역에서 최대 6%, 다른 에너지 영역에서 4%미만의 차이는 플루언스 스펙트럼이 다른데서 야기된다. 특히 매우 낮은 에너지영역에서는 ICRU 연조직이 PMMA보다 광전흡수가 탁월하므로 ICRU 연조직에는 7mg/cm²의 깊이까지 도달하는 광자의 수가 상대적으로 적다. 이것은 두 물질의 질량감쇄계수를 비교함으로써 알 수 있으며 낮은 에너지영역에서의 더 큰 차이를 야기한다고 판단된다. 또한 매우 유사한 평균에너지를 가진 경우일지라도 X-선 빔과 단일에너지 광자의 방사선 특성(radiation quality)이 다른 스펙트럼 분포에 기인한다고 판단된다.

따라서 방사선 특성을 나타내는 것으로서 광

자플루언스에 대한 평균에너지 대신 공기커마에 대한 평균에너지를 사용하면 이러한 차이는 감소할 것으로 사료된다.

그림 4와 5는 ISO narrow X-선 빔에 의해 조사된 손목과 손가락팬텀의 7mg/cm² 깊이에서 평균에너지의 함수로서 선량당량환산인자를 본 계산의 결과와 Grosswendt의 결과를 비교하여 각각 나타낸 것이다. 손가락팬텀에 대해서만 Grosswendt의 결과와 비교하였을 때 플루언스에 의한 평균에너지가 낮은 에너지영역에서 최대 7%의 차이를 보이며 다른 모든 에너지 영역에서 2%내에서 잘 일치함을 알 수 있었다. 여기서 손목팬텀의 경우, 본 계산의 결과와 Grosswendt의 데이터와는 서로 독립적인 것이다. 이것은 서로 다른 팬텀재질 때문이며 본 계산의 손목팬텀에 대한 계산 결과는 모두 이것에 해당된다.

표 3과 4는 X-선 빔에 의해 조사된 손목과 손가락팬텀의 7mg/cm² 깊이에서 선량당량환산인자에 대한 방향의존성인자를 ISO narrow 스펙트럼

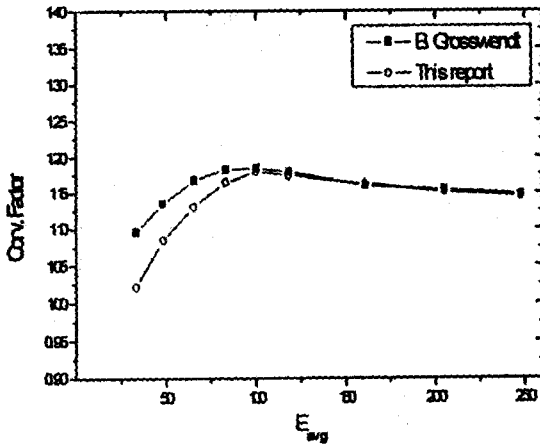


Fig. 4. Dose equivalent conversion factor for ISO narrow X-ray beams in the finger phantom as average energy of fluence.

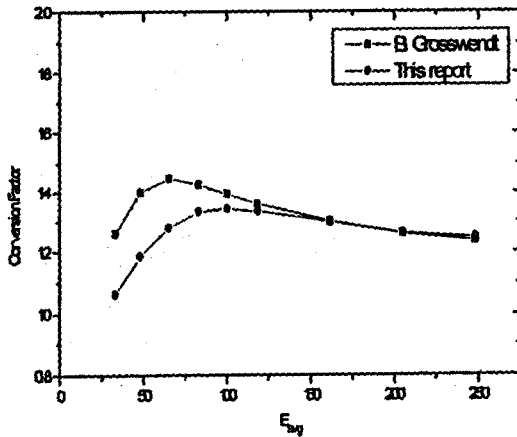


Fig. 5. Dose equivalent conversion factor for ISO narrow X-ray beams in the arm phantom as average energy of fluence.

에 적용하였을 때, 평균에너지의 함수로서 각각 제시하고 있다. 또한 그림 6와 7은 X-선 빔에 의해 조사된 손목과 손가락팬텀의 7mg/cm² 깊이에서 수평회전각 α 의 함수로서 플루언스에 의한 평균 에너지에 따른 방향의존성인자를 ISO narrow 스펙트럼에 적용하였을 때 그 경향을 보여주고 있다. 그림 6과 7에서 보여진 대로 생성전압이 낮은 X-선 빔인 경우 수평회전각이 증가함에 따라 방향의존성인자가 크게 감소하며, 한편 생성전압이 높은 X-선 빔인 경우 방향의존성인자가 처음에는 근소하게 감소하지만 90°까지는 증가하고 있음

을 알 수 있다. 이러한 경향은 팬텀의 7mg/cm² 깊이에서 수평회전각 α 인 지점에 도달하는 일차 광자(Primary photon)보다 팬텀내에서 광자의 산란거동에 더 지배를 받기 때문이다.

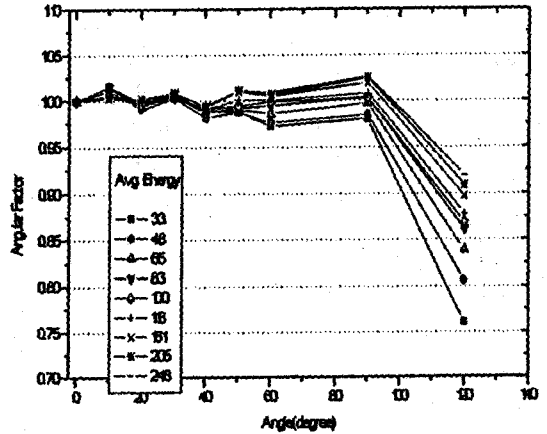


Fig. 6. Horizontal angular dependence(α) for ISO narrow X-ray beams in the arm phantom.

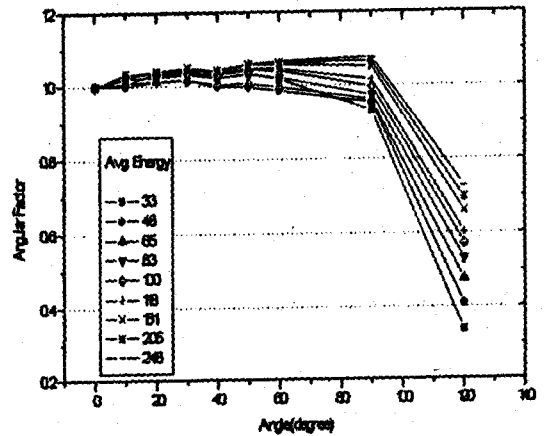


Fig. 7. Horizontal angular dependence(α) for ISO narrow X-ray beams in the finger phantom.

본 연구의 손가락팬텀에 대한 선량당량환산인자에 대한 방향의존성인자 계산 결과를 Grosswendt의 방향의존성인자[11]와 비교하였을 때 최대 3%정도의 차이를 보였다. 이것은 Grosswendt는 팬텀물질을 PMMA 재질로만 고려한 반면 본 계산에서는 팬텀물질은 동일하게 PMMA 재질로 구성하였지만 팬텀내의 7mg/cm² 깊이에서 관상 있는 체적을 ICRU 연조직으로 다르게 모사했기

때문인 것으로 사료된다.

결 론

ANSI N13.32에서 제시한 손목팬텀과 손가락팬텀의 $7\text{mg}/\text{cm}^2$ 깊이에서 단일에너지의 광자에 대한 방향의존성인자를 계산하였으며 또한 ISO narrow 스펙트럼 데이터를 이용하여 X-선 빔에 조사된 손가락팬텀에 대해서 선량당량환산인자와 방향의존성인자를 각각 제시하였다. 본 연구의 계산 결과를 B. Grosswendt의 결과와 X-선 빔에 대해서만 비교하였을 때 선량당량환산인자는 낮은 에너지 영역에서 최대 7%를 그리고 다른 에너지 영역에서는 2%이내에서 일치하였다. 한편 방향의존성인자는 손가락팬텀에 대해서만 비교하였을 때 최대 3%정도의 차이를 보였다. 따라서 본 연구에서 도출된 선량당량환산인자 및 방향의존성인자의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

따라서 말단선량평가지 본 연구에서 제시한 결과는 ANSI N13.32의 손목팬텀과 손가락팬텀에서 직접 정의되는 선량당량값으로 개인말단선량계를 교정할 경우 단일에너지의 함수로서 광자뿐 만 아니라 플루언스에 대한 평균에너지의 함수로서 X-선 빔에 대한 방향의존성인자로 사용할 수 있다.

향후 교정과 적용선량계의 중요성 때문에, 방향의존성에 대한 선량당량환산인자는 ISO에 의해 X-선 기준 방사선으로서 권고된 the narrow spectrum series 뿐 만 아니라 the low air kerma rate spectrum series, the wide spectrum series, 그리고 the high air kerma rate spectrum series에 대해서도 정확한 계산이 요구된다.

참고문헌

1. International Commission on Radiation Units and Measurements, "Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry", ICRU Report 51, Washington, D.C.(1993).
2. P.L. Roberson, F.N. Eicher, W.D. Reece, "Determination of Photon Conversion Factors Relating Exposure and Dose for Several Extremity Phantom Designs," Pacific Northwest Laboratory, Washington D.C.(1986).
3. American National Standards Institute, "American National Standard for the Performance Testing of Extremity Dosimeters," ANSI N13.32 Draft, New York, N.Y.(1995).
4. J. Briesmeister, "MCNP4A, Monte Carlo N-Particle Transport Code Version 4A", LA-12625-M, Los Alamos National Laboratory(1993).
5. International Organization for Standardization, "X and Reference Radiation for Calibrating and Determining the Energy Response of Dosimeters and Dose-rate-meters", ISO/DIS 4037 (1976).
6. 김광표, 이원근, 김종수, 윤여창, 윤석철, "말단선량계의 광자선량환산인자 결정을 위한 이론적 계산 연구," X-선 발견 100주년 기념 학술대회, 7월, 웨라톤 워커힐 호텔, 서울(1995).
7. B. Grosswendt, "Coefficients for the Conversion of Air Collision Kerma to Dose Equivalent for the Calibration of Individual Dosimeters in X-ray Fields," *Radiat. Prot. Dosim.*, **40**(3), p. 169-184(1992).
8. J.H. Hubbel, "Photon Mass Attenuation and Energy-Absorption Coefficient from 1keV to 20MeV", *Int. Appl. Rad. Isot.*, **33**, p. 1269-1290 (1982).
9. B. Grosswendt, "Angular Dependence Factors and Air Kerma to Dose Equivalent Conversion Coefficients for Cylindrical Phantoms Irradiated by Plane-parallel Extended Monoenergetic Photon Beams", *Radiat. Prot. Dosim.*, **59**(3), p. 165-179 (1995).
10. B. Grosswendt, "Angular Dependence Factors and Air Kerma to Dose Equivalent Conversion Coefficients for 1.9cm Rod and 7.3cm Pillar Phantoms Irradiated by Extended Monodirectional X-ray Beams", *Radiat. Prot. Dosim.*, **59**(3), p. 181-193(1995).