

말단팬텀에서 X-선 빔의 방향의존성에 관한 이론적 계산

김광표 · 윤석철 · 윤여창 · 김종수 · 홍중숙

한국원자력연구소

- 요약 -

ANSI N13.32는 손목팬텀과 손가락팬텀에서 말단선량계의 특성조사를 위하여 방향의존성인자를 선량계의 성능평가에 적용하도록 권고하고 있다. 본 연구에서는 말단선량의 정확한 선량평가를 위하여 ANSI N13.32에 제안된 팬텀과 동일하게 모사하고 그 팬텀내의 $7\text{mg}/\text{cm}^2$ 깊이에서 단일에너지를 가진 광자의 선량당량환산인자 및 방향의존성인자를 MCNP 전산코드를 사용함으로써 계산하였다. 또한 본 연구의 최종목적인 ISO Narrow X-선 빔에 의해 조사된 손가락팬텀에서 선량당량환산인자 및 방향의존성인자를 도출하였다. 전산 수행한 결과 낮은 전압에서 발생된 X-선 빔인 경우, 팬텀의 주축을 따라 수평회전각이 증가할수록 방향의존성인자가 크게 감소하며, 한편 높은 전압에서 생성된 X-선 빔인 경우, 수평회전각이 증가할수록 방향의존성인자가 처음에는 근소하게 감소하지만 90° 까지는 증가하고 있음을 알 수 있었다.

1. 서론

국제방사선단위·도량 위원회(International Commission Radiation Units and measurement, ICRU)⁽¹⁾에서는 개인모니터링을 위한 실용량으로서 개인선량당량[$H_p(d)$]을 인체의 특정한 깊이에서 연조직(Soft tissue)에서의 선량당량으로서 권고하고 있다. 전신선량계에 대한 ICRU의 4가지 인체조직 성분으로 이루어진 반경 15cm의 ICRU 구 팬텀 또는 정면 $30\text{cm} \times 30\text{cm}$, 두께 15cm slab 팬텀은 손목 또는 손가락에 비하여 상대적으로 크기 때문에 말단선량계에 적용하는 데는 적당하지 않다. 따라서 인체말단부를 모사한 정원의 원통형 팬텀을 도입⁽²⁾하게 되었으며 ANSI N13.32⁽³⁾에서는 손목팬텀(Arm/leg phantom)과 손가락팬텀(Finger phantom) 두 가지 종류를 제시하고 있다. 또한 ANSI N13.32는 선량계의 특성조사를 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 선량당량환산인자에 대한 방향의존성인자를 도출하였다.

2. 이론적 근거

단일에너지의 광자에 의해 조사된 말단팬텀에서 공기커마와 선량당량과의 비로서 선량당량환산인자⁽⁶⁾를 이미 결정하였으므로 ISO의 Narrow X-선 빔에 의해 조사된 말단팬텀에 대해서도 선량당량환산인자⁽⁷⁾를 도출할 수 있으며 또한 단일에너지의 광자에 대한 선량당량환산인자의 방향의존성인자를 계산함으로써 ISO의 Narrow X-선 빔에 적용함으로써 X-선 빔에 조사된 손가락팬텀내의 7mg/cm² 깊이에서 선량당량환산인자에 대한 방향의존성인자를 결정할 수 있다.

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

$$\left[\frac{H_p(\bar{E}, d)}{K_a} \right] = \frac{\int H_p(E, d)/K_a \cdot \phi(E) \cdot E \cdot \left(\frac{\mu_{tr}(E)}{\rho} \right)_{air} dE}{\int \phi(E) \cdot E \cdot \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho} \right)_{air} dE} \dots \dots \dots (1)$$

여기서, $H_p(E, d)/K_a$: 깊이, d에서의 단일광자에너지에 대한 선량당량환산인자

$\phi(E)$: 일차광자의 플루언스

E: 팬텀에 입사하는 단일광자에너지

K_a : 공기커마(air kerma)⁽⁸⁾

$\left(\frac{\mu_{tr}(E)}{\rho} \right)_{air}$: 공기의 질량에너지전이계수⁽⁹⁾

$\left[\frac{H_p(\bar{E}, d)}{K_a} \right]$: 깊이, d에서의 스펙트럼가중(Spectrum-weighted) 선량당량환산인자이다.

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

선량당량환산인자가 회전각 α 의 함수로서 결정되면 방향의존성인자⁽¹⁰⁾를 결정하기 위한 식은 다음과 같다.

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

여기서 $R(\bar{E}, d, \alpha)$: 방향성의존성인자

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

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

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

3. 전산수행방법

본 연구에서 손목팬텀은 뼈등가물질과 PMMA(PolyMethylMethAcrylate)로 구성되었으며 손가락팬텀은 PMMA로 구성된 것으로 모사하였다. 선량당량환산인자를 결정하기 위한 조사조건으로서 팬텀의 주위는 진공상태이며, 평행하고 광범위한 면선원으로서, 광자 또는 X-선 빔이 팬텀의 주축을 따라 수직으로 입사한다고 가정하였다. 팬텀의 형태 및 계산 수행을 위한 기하학적 형태를 그림 1에 나타내었다. 그리고 ISO Narrow 스펙트럼데이터를 실제 계산에 적용하기 위하여 플루언스에 의해 평균한 에너지의 함수로서 선량당량환산인자를 계산하였다. MCNP 4A 전산코드는 단일에너지의 광자에 의해 조사된 팬텀의 $7\text{mg}/\text{cm}^2$ 깊이에서 선량당량환산인자와 방향의존성인자를 결정하는데 사용하였으며 F6(Energy deposition) Card가 적용되었다.

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

4. 결과 및 고찰

ISO Narrow X-선 빔으로 조사시킨 손가락팬텀의 $7\text{mg}/\text{cm}^2$ 깊이에서 선량당량환산인자를 평균에너지의 함수로서 표 3에 제시하였으며 본 연구의 결과를 Grosswendt의 결과⁽¹¹⁾와 비교하였다. 본 연구에서 계산결과의 통계적 불확실성은 1%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 불확실성으로 본 계산에 사용된 X-선 빔의 반가층, 평균에너지와 같은 X-선 질(Quality)이 다른 X-선 빔인 경우에 야기될 수 있으므로 플루언스 스펙트럼의 분석이 중요하다.

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

트럼이 다른데서 야기된다. 특히 매우 낮은 에너지영역에서는 ICRU연조직이 PMMA보다 광전흡수가 탁월하므로 ICRU연조직에는 $7\text{mg}/\text{cm}^2$ 의 깊이까지 도달하는 광자의 수가 상대적으로 적다. 이것은 낮은 에너지 영역에서의 더 큰 차이를 야기한다고 판단된다.

그림 2는 ISO Narrow X-선 빔에 의해 조사된 손가락팬텀의 $7\text{mg}/\text{cm}^2$ 깊이에서 선량당량환산인자를 본 계산의 결과와 Grosswendt의 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 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.

표 3은 ISO Narrow X-선 빔에 의해 조사된 손가락팬텀의 $7\text{mg}/\text{cm}^2$ 깊이에서 선량당량환산인자에 대한 방향의존성인자 평균에너지의 함수로서 제시하고 있다. 또한 그림 3은 ISO Narrow X-선 빔에 의해 조사된 손가락팬텀의 $7\text{mg}/\text{cm}^2$ 깊이에서 수평회전각 α 의 함수로서 방향의존성인자를 플루언스에 의한 평균에너지에 따라 경향을 보여주고 있다. 그림 3에서 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 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 팬텀의 $7\text{mg}/\text{cm}^2$ 깊이에서 수평회전각 α 인 지점에 도달하는 일차광자(Primary photon)보다 팬텀내에서 광자의 산란거동에 더 지배를 받기 때문이다. 본 연구의 방향의존성인자 계산 결과를 Grosswendt의 방향의존성인자⁽¹¹⁾와 비교하였을 때 최대 3%정도의 차이를 보였다. 이것은 Grosswendt는 팬텀물질은 PMMA로만 고려한 반면 본 계산은 팬텀물질은 동일하게 PMMA로 구성하였지만 팬텀내의 $7\text{mg}/\text{cm}^2$ 깊이에서 관상있는 체적을 ICRU연조직으로 다르게 모사했기 때문인 것으로 사료된다.

5. 결론

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 일치하였으며 한편 방향의존성인자는 최대 3%정도의 차이를 보여 본 연구의 이론적 계산 방법에 대해 신뢰성을 확인할 수 있었다.

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

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 기념학술대회, 7월, 쉐라톤 워커히 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. E. Storm and H.I. Israel, "Photon Cross Section from 1keV to 100MeV for Element Z=1 to Z=100," LA-3753, Los Alamos Scientific Laboratory(1968).
10. 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).
11. 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).

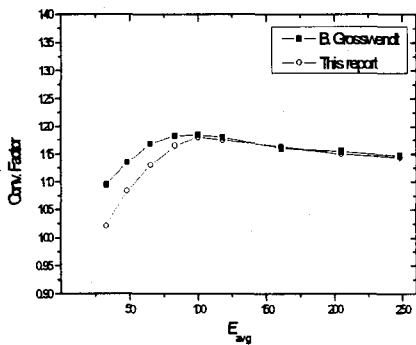


그림 2. 손가락팬텀에서 플루언스에 의한 평균 에너지의 함수로서 ISO의 Narrow X-선 빔에 대한 선량당 량환산인자.

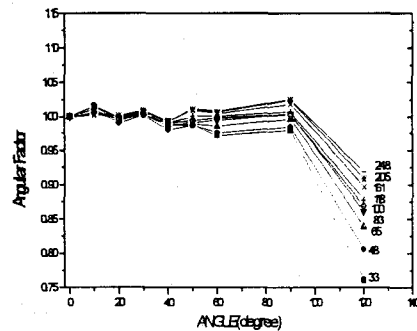


그림 3. 손가락팬텀에서 회전각 α 의 함수로서 ISO Narrow X-선 빔에 대한 방향 의존성인자.

1) 손목팬텀

2) 손가락팬텀

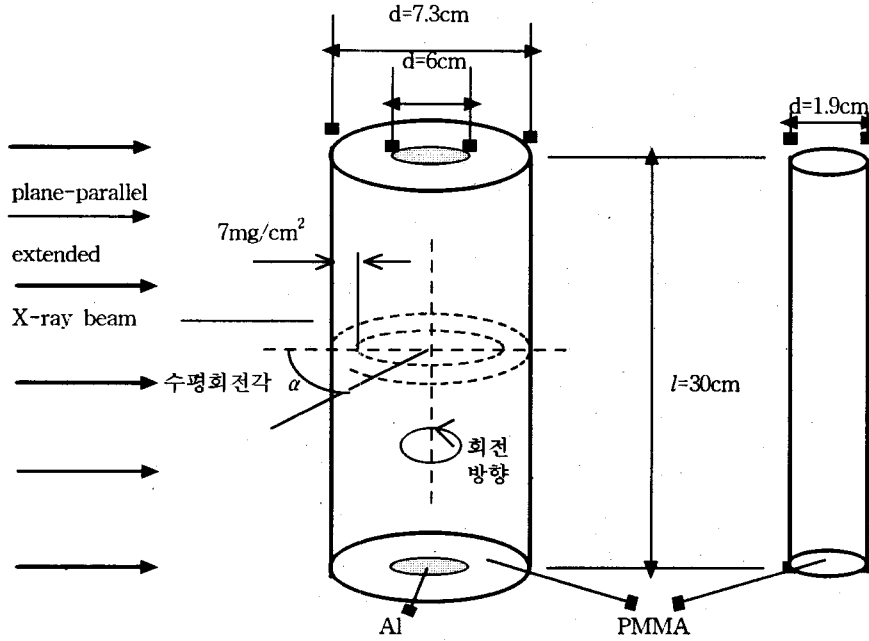


그림 1. 팬텀 형태와 전산수행에 위한 조사조건의 기하학적 형태.

\bar{E} (keV)	Angle(degree)	선량 환산 인자	10	20	30	40	50	60	90	120
			ISO 33	B. Grosswendt	1.096	1.000	0.996	0.992	0.992	0.982
	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
ISO100	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
ISO118	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
ISO161	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
ISO205	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
ISO248	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

<표 3> 손가락팬텀에서 Narrow 스펙트럼의 X-선 빔에 대한 선량당량환산인자 및 회전각 α 와 평균 에너지 \bar{E} 의 함수로서 방향의존성인자.