J. Korean Asso. Radiat. Prot.
Vol. 21, No. 1 : (1996)

A Theoretical Calculation of Photon Dose Equivalent Conversion Factor For Extremity Dosimeter

Kwang-Pyo Kim, Won-Keun Lee*,
Jong-Su Kim, Yeo-Chang Yoon and Suk-Chul Yoon†
**Kyung Hee University*
†Korea Atomic Energy Research Institute
(Received 21 March 1996; Accepted 13 May 1996)

말단선량계의 광자선량당량환산인자에 대한 이론적 계산

김광표, 이원근*, 김종수, 윤여창, 윤석철†
*경희대학교
†한국원자력연구소

Abstract—In this study, the theoretical calculation of the air kerma-to-dose equivalent conversion factors was performed with a Monte Carlo N-Particle transport code for the two types of extremity phantom of the ANSI and the KAERI, respectively.

Considering the distribution of absorbed dose due to the interaction of homogeneous parallel broad beam of monoenergetic primary photons in the range between 15keV and 1.5 MeV, the air kerma-to-dose equivalent conversion factors based on the kerma approximation were calculated.

It is showed that all the theoretical conversion factors of the two types of the extremity phantom for the ANSI and the KAERI agree well with the experimental values of the ANSI N13.32 draft(1995) for each energy within 5.7%, maximum difference ratio, except for 13.6% difference ratio in the case for the energy of less than 40keV. It is due to uncertainties of experiment occurred in the low X-ray energy range and geometry considered in the MCNP code.

Key words : MCNP code, Extremity phantom, Air kerma-to-dose equivalent conversion factor, ANSI N13.32, Performance test, Uncertainties.

요약—중성자 및 전자 그리고 광자 수송코드인 MCNP 4A코드를 이용하여 ANSI N13.32에 제안된 말단팬텀과 한국원자력연구소 제작한 말단팬텀 각각에 대하여 감마선량당량환산인자를 커마근사법에 근거하여 계산하였다. 본 계산은 15keV~1.5 MeV 에너지영역에 대해 단일광자에너지 선원을 고려하였으며 이러한 단일광자에너지함수로서 계산한 공기커마에 대한 선량당량의 비로서 선량당량환산인자를 이론적으로 도출하였다.

본 연구에서 이론적 방법으로 도출한 ANSI와 KAERI의 말단팬텀 각각에 대한 광자선량당량환

산인자를 ANSI N13.32의 실험적 방법에 의해 제시된 값들과 비교한 결과 50 keV 이상의 단일 광자에너지영역에서는 실험적 방법에 의한 값들과 최대차이 5.7% 내에서 잘 일치함을 보였다. 그러나 40 keV 이하의 에너지영역에서는 본 연구의 계산 결과가 최대 13.6%까지 낮게 평가됨을 알 수 있었으며, 이러한 차이는 낮은 에너지영역에서 두드러지는 단일에너지의 생성과 관련된 실험의 불확실성과 MCNP코드에서 모사한 Geometry의 영향에 기인하는 것으로 사료된다.

중심단어 : MCNP 코드, 말단팬텀, 선량당량환산인자, ANSI N13.32, 성능평가, 불확실성

서 론

방사선작업 종사자의 방사선피폭으로부터의 안전성 확보는 개인선량계의 성능평가에 밀접히 관련된다. 미국의 경우 개인선량계의 성능평가, 선량계 교정, 상호비교, 평가, 인준에 이르기까지의 전 과정을 통해 개인선량측정의 정확성과 신뢰도를 개선하기 위하여 심혈을 기울인 결과 개인선량계의 균일한 선량평가를 위하여 성능평가지침을 공표 하였으나 이는 전신선량계에만 적용되고 있다[1].

그리고 전신선량당량의 제한치가 년간 5 rem인 반면 손에 대한 선량당량 제한치는 년간 50 rem으로 전자의 경우보다 10배나 높다[2]. 일상적으로 전신선량보다 큰 말단선량에 피폭되는 방사선작업종사자의 수는 상대적으로 적지만 이러한 인체 말단부에 대한 피폭선량의 잠재적 위험성은 전신선량에 비해 훨씬 높다. 그리고 미연방법에서는 방사선작업중 인체말단부위에 대한 제한치를 기존의 75 rem에서 50 rem으로 법적 근거를 강화하였다[3]. 이러한 일련의 과정으로 말단 선량평가의 필요성이 강력하게 대두됨에 따라 말단선량계의 성능평가(Performance test)가 요구되었으며, 미국에서는 말단선량계의 성능평가 지침으로서 American National Standard Institute(ANSI) N13.32 Draft를 제시하게 되었다[4]. 여기에는 기준팬텀, 선원, 에너지영역, 조사조건, 광자선량당량환산인자, 선량계의 방향의존성, 최소검출선량 등을 포함하고 있으며 개인선량계의 평가방법에 대한 정확성과 정밀도에 대한 성능 기준을 확립한 후 조만간 제정하여 발표될 예정이다.

또한 우리 나라의 경우 과학기술처에서 원자력법 시행령(1992)에 "개인 피폭선량 판독에 관한 기술 기준"을 고시하고 있으나 여기에도 말단선량계(Extremity dosimeter)의 성능평가 기준은 제외되어있다[5].

한편 국제방사선단위·도량위원회(ICRU)에서는 개인모니터링을 위한 실용량으로서 개인선량당량(Personal dose equivalent, $H_p(d)$)을 사용하도록 제안하였다[6]. 그러나 이 양은 인체조직에 대한 선량당량으로서 정의되고 있지만 인체는 물론 인체조직등가물질로 만든 팬텀을 사용할지라도 직접 측정하기에는 매우 곤란하다. 따라서 실제로 측정가능한 선량인 흡수선량 또는 조사선량으로부터 이러한 선량당량을 결정할 수 있다. 즉, 같은 에너지의 동일한 방사선에 대하여 한 지점에서의 측정량과 그 지점에서의 선량당량 사이에는 일정한 관계가 성립되며 이러한 경우 선량당량과 조사선량 또는 흡수선량과의 비는 선량당량환산인자가 된다. 그러므로 선량당량환산인자가 결정하면 선량당량을 정확히 구할 수 있다. 특히 광자의 경우 공기커마와 선량당량의 비가 선량당량환산인자가 된다.

따라서 본 연구에서는 ANSI N13.32의 말단표준팬텀내의 인체조직등가물질에서 단일광자에너지에 따른 흡수선량의 분포를 계산하여 선량당량을 결정하고 공기커마의 값을 이용함으로써 말단선량계의 광자에 대한 선량당량환산인자를 이론적인 방법에 의해 도출하고자 하며, 또한 현재 ANSI N13.32에 포함된 광자선량환산인자는 실험적 방법에 의해서 결정된 것이므로 본 연구의 이론적 방법에 의한 결과와 비교·분석하고자 한다.

말단팬텀

ANSI N13.32는 말단팬텀으로서 손목팬텀(Arm/

leg phantom)과 손가락팬텀(Finger phantom)을 제안하고 있다. 손목팬텀은 길이 300 mm, 직경 73 mm인 PMMA(PolyMethylMethAcrylate)의 재질을 가진 정원의 원통형(Right-circular cylindrical type)이며 특히 뼈등가물질로서 길이 300 mm, 직경 60 mm인 알루미늄으로 된 원통을 삽입한 형태의 것이다. 이러한 손목팬텀은 Lower arm 또는 Lower leg부분을 대표하는 것으로서 손목 또는 발목 선량계를 시험하기 위한 것이다. 한편 직경 73 mm는 손목, Mid-forearm, 팔꿈치, 발목의 각각에 대해 평균직경인 58, 82, 91, 78 mm를 비교하여 결정된 것이다. 이것은 10 mm의 표준편차를 포함하고 있다.

또한 손가락팬텀은 길이 300 mm, 직경 19 mm인 PMMA의 재질로만 형성된 정원의 원통형이며 손가락 부분을 대표하는 것으로서, Ring선량계를 시험하기 위한 것이다. 한편 직경 19 mm는 전형적인 Ring선량계의 설계에 용이하게 사용되는 장점에 기인한다.

ANSI N13.32의 손목팬텀과 손가락팬텀에 대하여 그 성분과 구성비를 표 1에 각각 나타내었으며, 한국원자력연구소(KAERI)에서 직접 제작한 말단팬텀(KAERI 팬텀으로 명명함)으로서, 손목팬텀과 손가락팬텀에 대해서 각각 그 성분을 표 2에 나타내었다[7, 8]. KAERI팬텀의 크기와 형태는 ANSI 말단팬텀과 동일하며 성분과 구성비에 대해서만 차이를 보인다.

표 1. ANSI 말단팬텀의 재질과 구성비.

	재 질		구성비(%)	밀도(g/cm³)
손목	조직등가물질	PMMA	H 8 C 60 O 32	1.19
	뼈 등 가 물 질	Al	Al 100	2.7
손가락	조직등가물질	PMMA	H 8 C 60 O 32	1.19

표 2. KAERI 말단팬텀의 재질과 구성비

팬텀	재 질		구성비(%)	밀도(g/cm³)
손목	조직등가물질	PMMA	H 11.6 B 5 C 61.2 O 22.2	0.93
	뼈 등 가 물 질	Al	Al 99.64 Si 0.25 Mn 0.06 Cu 0.005	2.7765
손가락	조직등가물질	PMMA	H 11.6 B 5 C 61.2 O 22.2	0.93

선량당량환산인자의 이론적 결정

본 연구에서 단일광자에너지의 공기커마에 대한 선량당량의 비로서 선량당량환산인자를 도출하기 위하여 사용된 최종 결과 식은 다음과 같다[9].

$$\frac{H_p(0.07)}{K_a} = \frac{C \cdot Q \int \phi_{ICRU\ tissue}(E, d) \cdot E \cdot \left(\frac{\mu_{tr}(E)}{\rho}\right)_{ICRU\ tissue}}{\phi(E) \cdot E \cdot \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho}\right)_{air}}$$

여기서, C : 단위환산인자 $\left[\frac{Sv}{(10^{12}) \cdot Joule/kg}\right]$

Q : 선질계수($Q \simeq 1$)

$H_p(d)$: 피부표면으로부터 깊이(d)에서의 선량당량

$\phi_{ICRU\ tissue}(E)$: 팬텀내의 ICRU 조직에 대한 플루언스

E : 팬텀에 입사하는 광자에너지

$\left(\frac{\mu_{tr}(E)}{\rho}\right)_{ICRU\ tissue}$: ICRU 조직의 질량에너지전이계수 [10]

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

K_a : 공기커마(air kerma)이다[11].

이 식에 의하면 ANSI N13.32 말단기준팬텀내의 관심있는 체적 내에서만 인체조직등가물질인 ICRU 연조직을 모사함으로써 ICRU에서 권고하는 피부선량당량을 대변하게 하였다.

그리고 본 계산에서는 모든 선량계가 동일한 후방산란을 하지않기 때문에 후방산란인자를 고려하지 않음으로써 새로운 ANSI N13.11에 부합하도록 하였다.

이론적인 감마선량당량환산인자의 결정을 위해 본 연구에서 사용된 MCNP(Monte Carlo N-Particle) 4A는 중성자, 광자, 전자 또는 coupled 중성자·광자·전자에 대한 수송을 계산하기 위한 다목적용 전산코드로서 난수를 토대로 통계적 검출에 의한 많은 확률적 사건에 대해서 개개의 입자를 모사 함으로써 필요한 결과를 얻을 수 있다[12].

그리고 복잡한 3차원의 형태를 임의적으로 묘사 가능할 뿐 만 아니라, 연속적인 에너지단면적을 사용하며 사용자가 정의하는 광범위한 물질과 선원이 허용되는 전산코드로서, 사용자가 정의한 면(Surface) 또는 부피(Volume)에서 플루언스 또는 커마를 직접 평가할 수 있다는 장점이 있다.

Monte Carlo N-Particle(MCNP) 4A전산코드를 말단팬텀에 입사하는 단위플루언스당 조직커마(Tissue kerma)를 계산하는데 사용하였다. 이것은 말단팬텀내의 0.07 mm 깊이에 해당된 관심있는 체적에서의 에너지흡수를 구함으로써 계산가능하다.

본 전산수행의 목적인 인체말단부 피폭선량 평가를 위한 말단팬텀내에서의 선량당량을 계산하기 위해 그림 1과 같은 조사조건을 적용하였다. 그리고 계산은 15 keV~1.5 MeV의 에너지 영역에 걸쳐 단일광자에너지를 17개 선택하여 커마근사법에 근거하여 수행하였다.

말단팬텀내에서 0.07 mm의 깊이는 PMMA 재질의 0.058 mm에 해당된다. 직경 36.5 mm의 원통의 표면으로부터 이 깊이에 해당된 관심있는 체적내에서 단위질량당 흡수된 에너지와 선원의 면적을 곱함으로써 단위플루언스당 선량당량을 계산하였다. 이를 위하여 MCNP코드의 F6 Tally Card를 사용하였다.

본 연구에서는 MCNP전산코드의 광자의 수송에 대한 계산모델중 detailed physics 모드를 선택함으로써 콤프턴효과에 기인한 Incoherent산란, 톰슨(Thomson)산란에 기인한 Coherent산란과 더불어 광전효과와 쌍생성을 각각 고려하였으며 전자의 결합효과는 물론 오제효과(Auger effect)까지 여기에 포함시켰다. 그러나 본 계산에서의 에너지영역에서는 제동복사는 무시하였다. 그리고 관심 있는 체적내로 입사하여 그 체적내에서 총에너지가 흡수되었을 경우, 에너지가 1 keV 이하로 감쇄되었을 경우, 그리고 산란에 의하여 그 체적을 벗어났을 경우에 한하여 실행을 종료하였다.

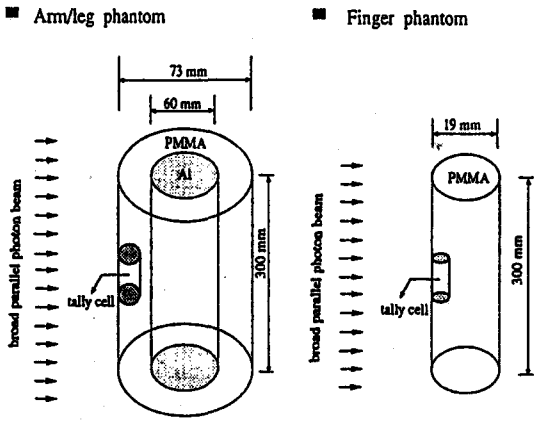

Fig. 1. The computational geometry and cell arrangement for the extremity phantom.

결과 및 고찰

말단팬텀내에서 단일광자에너지의 함수로서 피부선량분포는 그림 2와 3에 각각 나타냈으며, 이것은 ANSI와 KAERI의 손목과 손가락팬텀내의 0.07 mm 깊이에서 광자에너지에 따른 단위플루언스당 피부선량당량을 나타낸 것으로서 ANSI와 KAERI의 말단팬텀 재질에 따른 선량의 변화는 거의 없음을 알 수 있다.

본 연구의 목적인 선량당량환산인자에 대한 계산 결과로서, 표 3과 그림 4에는 ANSI 말단팬텀인 손목팬텀을 공기커마에 대한 선량당량의 비로서 ANSI의 실험적 방법에 의한 결과와 본 연구의 이론적 계산에 의한 결과를 서로 비교하여 나타

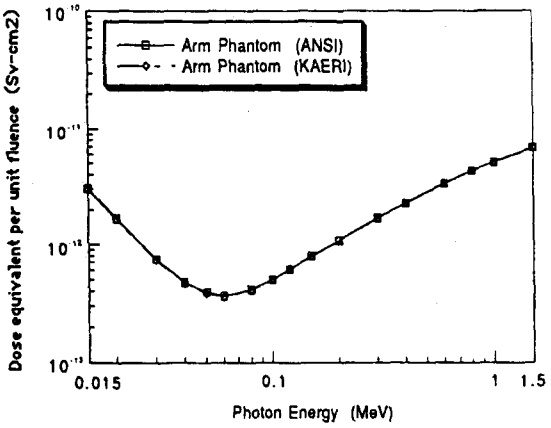

Fig. 2. 손목팬텀에서의 피부선량당량 분포

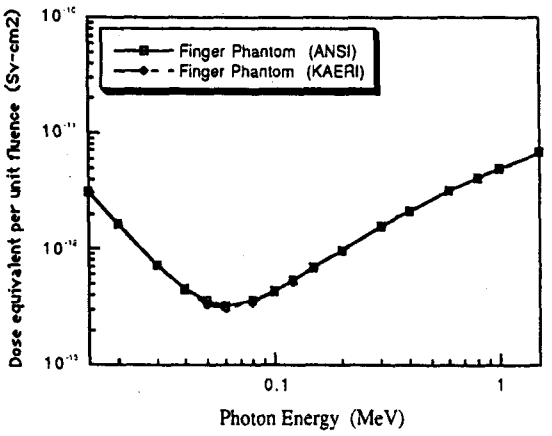

Fig. 3. 손가락팬텀의 대한 피부선량당량 분포

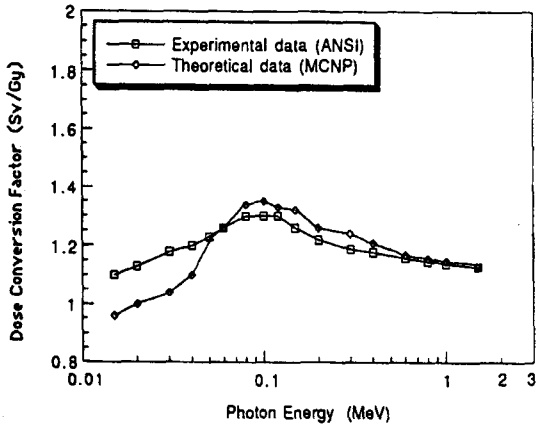

Fig. 4. The dose equivalent conversion factor for the arm phantom of the ANSI.

표 3. ANSI손목팬텀에서 단일광자에너지의 함수로서 선량당량환산인자 비교

Photon Energy keV	Conversion Factor Sv/Gy		
	ANSI N13.32 experimental data	MCNP theoretical data (This study)	Difference Ratio %
15	1.10	0.96(0.0183)	12.7
20	1.13	1.00(0.0204)	11.5
30	1.18	1.04(0.0204)	11.8
40	1.20	1.10(0.0181)	9.2
50	1.23	1.22(0.0251)	–
60	1.26	1.26(0.0263)	–
80	1.30	1.34(0.0237)	3.1
100	1.30	1.35(0.0236)	3.8
120	1.30	1.33(0.0247)	2.3
150	1.26	1.32(0.0235)	4.8
200	1.22	1.26(0.0274)	3.3
300	1.19	1.24(0.0169)	4.2
400	1.18	1.21(0.0188)	2.5
600	1.16	1.17(0.0175)	–
800	1.15	1.16(0.0203)	
1000	1.14	1.15(0.0194)	–
1500	1.13	1.13(0.0178)	–

( ) : 상대오차

– : 1% 미만의 상대적인 차이

$$\text{difference ratio} = \frac{\text{This study data}}{\text{ANSI experimental data}}$$

내었다. 또한 실험적 방법에 의한 값을 기준으로 하였을 때 이론적 계산에 의한 선량당량환산인자는 50 keV 이상의 에너지영역에서 최대 4.8% 높음을 알 수 있으며 단, 40 keV 이하의 단일에너지에 대해서는 최대 12.7%를 낮게 평가하였음을 알 수 있다.

표 4와 그림 5에는 ANSI 손가락팬텀의 경우, 공기커마에 대한 선량당량의 비를 나타내었으며 실험적 방법에 의한 값보다 이론적 계산에 의한 선량당량환산인자는 50 keV 이상의 에너지영역에서는 최대 3.5% 높은 경향을 나타내었다. 단, 40 keV이하의 단일에너지에 대해서는 최대 9.8% 낮게

표 4. ANSI손목팬텀에서 단일광자에너지의 함수로서 선량당량환산인자 비교

Photon Energy keV	Conversion Factor Sv/Gy		
	ANSI N13.32 experimental data	MCNP theoretical data (This study)	Difference Ratio %
15	1.05	0.96(0.0179)	8.6
20	1.08	0.98(0.0179)	9.2
30	1.12	1.01(0.0178)	9.8
40	1.13	1.04(0.0183)	7.9
50	1.13	1.10(0.0190)	2.7
60	1.14	1.12(0.0178)	1.8
80	1.14	1.16(0.0176)	1.8
100	1.15	1.19(0.0175)	3.5
120	1.15	1.17(0.0178)	1.7
150	1.15	1.17(0.0179)	1.7
200	1.14	1.15(0.0178)	–
300	1.13	1.14(0.0178)	–
400	1.13	1.12(0.0179)	–
600	1.12	1.12(0.0180)	–
800	1.12	1.117(0.0180)	–
1000	1.12	1.115(0.0180)	–
1500	1.12	1.110(0.0180)	–

( ) : 상대오차

– : 1% 미만의 상대적인 차이

$$\text{difference ratio} = \frac{\text{This study data}}{\text{ANSI experimental data}}$$

평가함으로써 손목팬텀과 동일한 경향을 나타내었다.

또한 그림 4와 5에서, 40 keV 이하의 에너지영역에서 선량당량환산인자를 비교할 때 실험적 방법에 의한 값보다 이론적 계산에 의한 값이 작은 것은 우선 실험적 방법에 의한 값이 50 keV 이상에서의 에너지반응함수보다 이 영역에서의 에너지반응함수가 더 크다는 사실, 즉 낮은 에너지 영역에서는 선량계의 에너지반응함수가 특히 크므로 보정한다할지라도 내포하고 있는 불확실성이 여전히 존재하며 이론적 계산시 전산수행과정에서의 관심있는 체적(Cell Volume)내의 Geometry

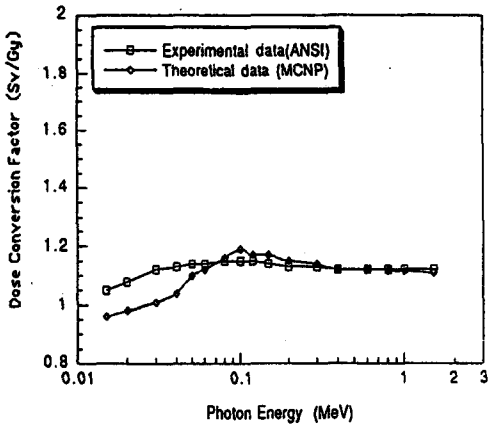

Fig. 5. The dose equivalent conversion factor for the finger phantom of the ANSI.

영향과 실험에서는 후방산란을 고려했기 때문인 것으로 사료된다. 그러나 낮은 에너지영역에서의 이러한 차이는 실험적 방법에 의해 야기된 불확실성 영역을 감안할 때 충분히 수용할 만하다.

80keV~150 keV의 에너지영역에서, 이론적 방법에 의한 선량당량환산인자가 상대적으로 더 크게 나타나는 것은 광자의 수송을 고려할 때 말단팬텀내의 관심있는 체적의 구성원을 실험에서 사용된 PMMA성분 대신 ICRU연조직으로 고려함에 따라 야기된 것으로 판단되며 이것은 ICRU에서 정의한 개인선량당량을 묘사하기 위함이다.

또한 150 keV 이상의 에너지영역에서는 PMMA와 ICRU연조직의 질량감쇄계수가 거의 같은 분포를 가지므로 관심있는 체적에서의 구성성분이 미치는 영향은 상대적으로 적다. 이러한 사실은 고려하고 있는 에너지 영역에서 높은 에너지로 갈수록 실험적 방법에 의한 값과 이론적 계산값이 서로 일치하는 결과로서 확인할 수 있다.

한편 KAERI 말단팬텀에 대해서는 이론적 선량당량환산인자를 ANSI 말단팬텀의 실험적 결과값과 비교하였다. KAERI손목팬텀은 50 keV 이상의 에너지영역에서 최대 5.7% 높은 결과 값을 보였으며 표 5와 그림 6에 나타내었다. 또한 KAERI 손가락팬텀에 대해서는 같은 에너지영역에서 최대 4.4% 높은 것으로 나타났으며 이것은 표 6과 그림 7로부터 각각 알 수 있다.

표 5. KAERI손목팬텀에서 단일광자에너지의 함수로서 선량당량환산인자 비교

Photon Energy keV	Conversion Factor Sv/Gy		
	ANSI N13.32 experimental data	MCNP theoretical data (This study)	Difference Ratio %
15	1.10	0.95(0.0175)	13.6
20	1.13	0.98(0.0178)	13.3
30	1.18	1.02(0.0181)	13.5
40	1.20	1.08(0.0183)	10
50	1.23	1.18(0.0206)	4.1
60	1.26	1.24(0.0192)	1.6
80	1.30	1.35(0.0212)	3.8
100	1.30	1.35(0.0175)	3.8
120	1.30	1.34(0.0166)	3.1
150	1.26	1.32(0.0165)	4.8
200	1.22	1.29(0.0166)	5.7
300	1.19	1.23(0.0169)	3.4
400	1.18	1.21(0.0188)	2.5
600	1.16	1.18(0.0175)	1.7
800	1.15	1.17(0.0203)	1.7
1000	1.14	1.15(0.0194)	–
1500	1.13	1.13(0.0178)	–

( ) : 상대오차

– : 1% 미만의 상대적인 차이

$$\text{difference ratio} = \frac{\text{This study data}}{\text{ANSI experimental data}}$$

표 6. KAERI손목팬텀에서 단일광자에너지의 함수로서 선량당량환산인자 비교

Photon Energy keV	Conversion Factor Sv/Gy		
	ANSI N13.32 experimental data	MCNP theoretical data (This study)	Difference Ratio %
15	1.05	0.97(0.0178)	7.6
20	1.08	0.99(0.0179)	8.3
30	1.12	1.00(0.0181)	10.7
40	1.13	1.04(0.0185)	8.0
50	1.13	1.08(0.0178)	4.4
60	1.14	1.10(0.0178)	3.5
80	1.14	1.14(0.0177)	–
100	1.15	1.17(0.0177)	1.7
120	1.15	1.15(0.0177)	–
150	1.15	1.17(0.0179)	1.7
200	1.14	1.15(0.0178)	–
300	1.13	1.14(0.0178)	–
400	1.13	1.13(0.0179)	–
600	1.12	1.12(0.0180)	–
800	1.12	1.12(0.0180)	–
1000	1.12	1.11(0.0180)	–
1500	1.12	1.11(0.0181)	–

( ) : 상대오차

– : 1%1 미만의 상대적인 차이

$$\text{difference ratio} = \frac{\text{This study data}}{\text{ANSI experimental data}}$$

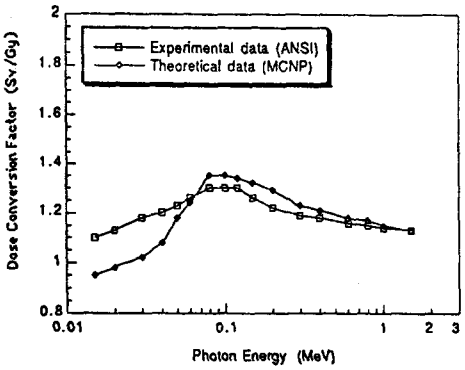

Fig 6. The dose equivalent conversion factor for the arm phantom of the KAERI.

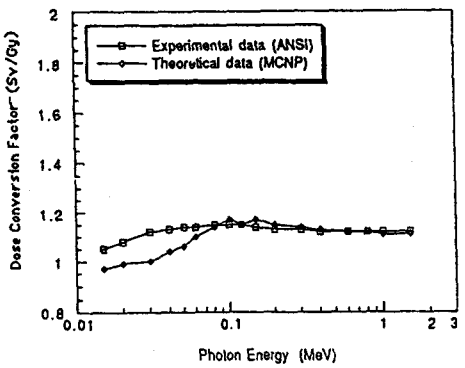

Fig. 7. The dose equivalent conversion factor for the finger phantom of the KAERI.

그림 4~그림 7에서 보는 바와 같이 ANSI 말단팬텀의 실험적 선량당량환산인자를 기준으로 하였을 때 KAERI말단팬텀의 이론적 방법에 의해 계산한 선량당량환산인자와 서로 비교한 결과로서 KAERI말단팬텀에서의 이러한 차이는 ANSI말단팬텀물질의 성분과 구성비에 기인하는 것으로 판단된다. 이것은 팬텀구성물질의 질량에너지흡수계수를 비교함으로써 알 수 있으며 매우 미미함을 알 수 있다.

결 론

ANSI N13.32에서 제시한 두 가지의 말단팬텀과 KAERI에서 제작한 말단팬텀에 대하여 공기커마에 대한 선량당량의 비로서 단일 광자에너지에 따른 선량당량환산인자를 이론적 방법에 의해 계산하였다.

ANSI N13.32의 손목팬텀은 실험적 방법에 의한 값과 이론적 계산에 의한 값을 비교한 결과 40keV 이하의 에너지영역에서 최대차이 12.7%를, 50 keV 이상의 에너지영역에서는 최대차이 4.8%를 나타내었다. 또한 ANSI N13.32의 손가락팬텀의 경우는 실험적 방법에 의한 값에 대해 이론적 계산에 의한 선량당량환산인자는 50 keV 이상의 에너지영역에서는 최대차이 3.5%를, 40 keV이하의 단일에너지영역에서는 최대차이 9.8%를 나타내었다.

KAERI팬텀의 경우, 위와 동일한 방법으로 비교하였을 때 손목팬텀은 50 keV 이상의 에너지영역에서 최대차이 5.7%를, 손가락팬텀은 같은 에너지영역에서 최대차이 4.4%를 나타내었다.

따라서 본 연구의 이론적 방법에 의한 계산 결과는 ANSI N13.32에 제시된 값들과 잘 일치하였을 뿐만 아니라 실험의 불확실성을 감안하였을 때 더 정확한 값이라 판단된다.

또한 말단팬텀에서 단일광자에너지의 함수로서 선량당량환산인자를 도출하였으므로 스펙트럼을 가진 X-선의 평균선량당량환산인자를 결정하는데 적용할 수 있으며 향후 말단팬텀내에서 중성자에 대한 선량환산인자를 도출하는 계산을 수행하여야 할 것이다.

참고문헌

1. U.S. Department of Energy, "Department of Energy Standard for the Personnel Dosimetry Systems," DOE/EH-0027, Washington, D.C.(1986).
2. International Commission on Radiological Protection, "General Principle of Monitoring for Radiological Protection," ICRP Publication 35, Pergamon Press, Oxford(1982).
3. United States Nuclear Regulatory Commission, "Standards for Protection against Radiation, 10 CFR20, USNRC(1988)
4. America National Standards Institute, "America National Standard for the Performance Testing of Extremity Dosimeters," ANSI N13.32 Draft, New York, N.Y.(1995).
5. 과학기술처, "개인방사선피폭선량평가에 의한 기술 기준," 과학기술처 고시 1992-15(11992)
6. International Commission on Radiation Units and Measurements, "Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry," ICRU Report 51, Washington, D.C.(1993).
7. 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)
8. 김광표, 이원근, 김종수, 윤여창, 윤석철, "말단선량계의 광자선량환산인자 결정을 위한 이론적 계산 연구," X-선 발견 100주년 기념학술대회, 7월, 쉐라톤 워커힐 호텔, 서울(1995)
9. 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)
10. 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).

11. J.H. Hubbel, "Photon Mass Attenuation and Energy-Absorption Coefficient from 1keV to 20MeV," Int. Appl. Rad. Isot., 33, p.1269－1290 (1982).

12. J. Briesmeister, "MCNP4A, Monte Carlo N-Particle Transport Code Version 4A," LA-12 625-M, Los Alamos National Laboratory(1993).