J. Korea Asso. Radiat. Prot.
Vol. 28 No. 3 : 199~206 (2003)

■ 論 文 ■

Modification of Trunk Thickness of MIRD phantom Based on the Comparison of Organ Doses with Voxel Phantom

Choonsik Lee* · **Sanghyun Park** · **Jaiki Lee**
Dept. of Nucelar Engineering, Hanyang University
*Innovative Technology Center for Radiation Safety

체적소팬텀과의 장기선량 비교를 통한 MIRD팬텀 몸통두께 수정

이춘식* · **박상현** · **이재기**
한양대학교 원자력공학과, *방사선안전신기술연구센터

(2003년 6월 16일 접수, 2003년 8월 27일 채택)

Abstract - Because the MIRD phantom, the representative mathematical phantom was developed for the calculation of internal radiation dose, and simulated by the simplified mathematical equations for rapid computation, the appropriateness of application to external dose calculation and the closeness to real human body should be justified. This study was intended to modify the MIRD phantom according to the comparison of the organ absorbed doses in the two phantoms exposed to monoenergetic broad parallel photon beams of the energy between 0.05 MeV and 10 MeV. The organ absorbed doses of the MIRD phantom and the Zubal voxel phantom were calculated for AP and PA geometries by MCNP4C, general-purpose Monte Carlo code. The MIRD phantom received higher doses than the Zubal phantom for both AP and PA geometries. Effective dose in PA geometry for 0.05 MeV photon beams showed the difference up to 50%. Anatomical axial views of the two phantoms revealed the thinner trunk thickness of the MIRD phantom than that of the Zubal phantom. To find out the optimal thickness of trunk, the difference of effective doses for 0.5 MeV photon beams for various trunk thickness of the MIRD phantom from 20 cm to 36 cm were compared. The optimal thunk thickness, 24 cm and 28 cm for AP and PA geometries, respectively, showed the minimum difference of effective doses between the two phantoms. The trunk model of the MIRD phantom was modified and the organ doses were recalculated using the modified MIRD phantom. The differences of effective dose for AP and PA geometries reduced to 7.3% and the overestimation of organ doses decreased, too. Because MIRD-type phantoms are easier to be adopted in Monte Carlo calculations and to standardize, the modifications of the MIRD phantom allow us to hold the advantage of MIRD-type phantoms over a voxel phantom and alleviate the anatomical difference and consequent disagreement in dose calculation.

Key words : MIRD phantom, Zubal voxel phantom, organ dose, modification

요약 - 대표적인 수학적 팬텀인 MIRD팬텀은 개발 당시 컴퓨터 계산시간을 단축하기 위해 단순화된 수학방정식으로 표현되었으며 본래 내부피폭 선량계산에 이용하기 위해 제작되었으므로 실제 인체구조에 근접하는 정도와 외부피폭 선량계산 용도로서의 적합성 여부를 평가할 필요가 있다. 본 연구에서는 인체의 단층촬영영상을 이용하여 제작된 Zubal체적소팬텀과 MIRD팬텀이 가장 일반적인 피폭모드인 AP 및 PA모드 감마선장에 노출될 때 장기선량 계산결과 및 단층영상을 비교하여 선량차이의 주요 원인이 되는 MIRD팬텀의 몸통두께를 수정하였다. AP와 PA방향으로 입사하는 0.05 MeV에서 10 MeV의 에너지 범위를 가진 넓고 평행한 단일 에너지 감마선장에 대해 MIRD팬텀과 Zubal팬텀의 장기선량을 MCNP4C를 이용하여 계산 및 비교한 결과 저에너지 영역에서 AP와 PA방향 모두 MIRD팬텀이 Zubal팬텀보다 높은 선량을 받았으며 유효선량의 경우 특히 PA방향, 0.05 MeV 광자빔에 대해서 50%에 가까운 선량차이를 보였다. 몸통부분 단층영상을 비교한 결과 Zubal팬텀에 비해서 MIRD팬텀의 몸통 두께가 얇아서 나타나는 결과임을 확인하게 되었고 MIRD몸통두께의 최적값을 찾아내기 위해 20 cm에서 32 cm까지 변화시켜가며 원전 작업환경에서 가장 많이 받게되는 0.5 MeV 감마선에 대한 유효선량을 계산하여 비교하였다. AP방향에서는 24 cm, PA방향에서는 28 cm일 때 최소의 선량차이를 보이는 것으로 나타났고 이에 따라 몸통모델을 수정하였다. 수정된 MIRD팬텀을 이용하여 장기선량을 재계산하여 Zubal팬텀의 선량과 비교한 결과 특히 PA방향에서 큰 과대평가를 보였던 장기들의 선량차이가 현저하게 줄었고 유효선량의 경우 0.05 MeV 광자빔에 대해 AP, PA방향 각각 -0.5%와 7.3%의 낮은 선량차이를 보였다. Zubal팬텀에 의해 계산된 선량환산인자는 ICRP74에서 제공하는 값과 큰 차이를 보이고 있으며 수정된 MIRD팬텀은 Zubal팬텀의 값에 준하는 결과를 보였다. 본 연구에서 수정된 MIRD팬텀은 기존에 사용되던 선량환산계수의 수정에 사용될 수 있으며 수학적팬텀의 장점을 살리면서 실제 인체에 근접한 선량계산을 수행할 수 있다.

중심어 : MIRD팬텀, Zubal체적소팬텀, 장기선량, 수정

서 론

국제방사선방호위원회(ICRP)가 권고하는 방사선방호량인 유효선량[1] 평가를 위해서는 방사선에 대한 장기별 선량분포에 대한 정보가 필요하며 이를 위해 수학적인형팬텀을 이용한 몬테칼로 계산방법이 사용되어 왔다. 대표적 수학적인형팬텀인 MIRD팬텀[2]은 대수방정식을 이용하여 인체 외형 및 내부 장기의 모양을 단순화하여 표현한 것으로 ICRP23 표준인[3]에 근거하여 제작되었으며 많은 연구자들이 이를 이용하여 다양한 방사선방호 선량계산을 수행하였다. 하지만 MIRD팬텀은 본래 내부피폭 선량계산용으로 개발되었으며 개발 당시 컴퓨터 계산속도의 한계로 인해 단순화된 대수방정식을 사용하였으므로 인체의 모양에 얼마나 근접하는지 여부와 외부피폭 선량계산에 그대로 이용될 수 있는지에 대한 평가가 필요하였지만 적절한 비교 방법이 없었다. 최근 약 20여년간 컴퓨터기술과 인체 단층영상 획득기술의 눈부신 발전에 힘입어 인체를 작은 미소체적소의 집합체로 표현하는 체적소팬텀이 개발되었고 이를 이용하여 계산된 장기선량들을 통해 기존의 MIRD팬텀에 대한 평가가 가능해졌다.

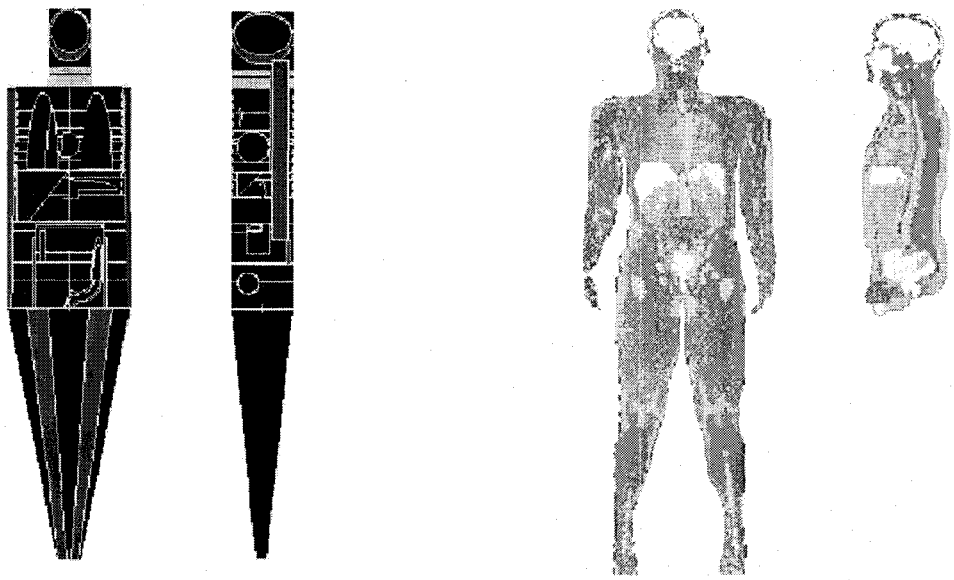
D.G. Jones[4]는 NORMAN이라는 체적소팬텀을 이용한 감마선 외부피폭 선량계산결과를 수학적팬텀인 ADAM 및 EVA의 선량계산값과 비교하여 그 차이를 분석하였으며 그 이후에도 여러 연구자들이 수학적팬텀과 체적소팬텀의 선량을 비교하여 차이를 분석하여 수학적팬텀 수정의 필요성을 제시하였다[5,6,7,8,9]. 그러나 이러한 연구자들은 선량차이 분석 및 수정의 필요성을 제시하는데 그쳤고 실제로 MIRD팬텀을 수정하여 선량차이를 줄이는 시도는 하지 않았다. 체적소팬텀이 실제 인체에 가깝다는 장점을 가지고 있지만 기존의 MIRD형 팬텀에 비해 몬테칼로코드로 팬텀을 구성하기가 까다롭고 특정인의 단층이미지를 이용하므로 표준팬텀을 만들기 어렵다는 약점을 가지고 있으므로 두 팬텀간의 선량차이를 분석하고 이를 기초로 MIRD형팬텀에서 실제 인체와 많은 차이를 보이는 부분을 수정하는 것은 의미있는 연구가 될 것이다. 본 연구의 목적은 MIRD팬텀과 Zubal체적소팬텀[10]을 가장 일반적인 피폭모드인 antero-posterior(AP)와 postero-anterior(PA)방향에서 입사하는 0.05 MeV에서 10 MeV 에너지를 가진 넓고 평행한 광자빔에 조사시킬 때의 장기선량 차이를 분석하고 MIRD팬텀

에서 주요한 차이의 원인이 되는 부분을 수정하는 것이다.

재료 및 방법

수학적팬텀

연구에 사용된 수학적인형팬텀은 MIRD팬텀으로서 키 174 cm, 몸무게 70 kg의 1969년 초기버전[2]이다. 비교대상으로 사용된 체적소팬텀은 Zubal 등에 의해 CT이미지를 기초로 제작된 Zubal팬텀이며 키 178cm, 몸무게 70.3 kg의 남성팬텀으로서 MIRD팬텀과 체형이 유사하다. Zubal팬텀이 남성팬텀이므로 비교를 위해 양성팬텀인 MIRD팬텀에서 여성장기를 제거하여 남성 MIRD팬텀을 구성하였다. Zubal팬텀은 192×96×498개의 체적소의 3차원 행렬로 구성되어 있으며 단위체적소의 크기는 3.6 mm×3.6 mm×3.6 mm이다.



(a) MIRD phantom (b) Zubal phantom

Fig. 1. Cross-sectional images of (a) MIRD phantom and (b) Zubal phantom cut by XZ plane(left) and YZ plane(right).

Table1. Comparison of organ masses of the MIRD phantom and Zubal phantom.

Organs	Weight (g)		Organs	Weight (g)	
	MIRD	Zubal		MIRD	Zubal
Gonads	35.6	69.0	Bone	10183.0	9659.8
Colon	692.1	853.1	Adrenals	15.7	2.9
Lung	1013.4	872.9	Brain	1470.0	907.4
Stomach	402.1	239.5	ULI	416.3	853.1
Bladder	508.9	146.8	SI	1696.0	1233.9
Liver	1833.0	1365.9	Kidney	288.0	355.4
Esophagus	40.2	30.0	Pancreas	61.1	37.0
Thyroid	19.9	4.9	Spleen	175.9	259.8
Skin	2593.0	6125.1			

100개 이상의 장기 및 조직이 분할되어 있으며 각 체적소는 해당되는 장기의 고유번호를 가진다. 그림1은 두 팬텀의 y=0평면과 x=0평면 단층이미지를 보여준다. 두 팬텀 모두 연조직, 폐, 뼈 3가지 조직에 대해 1.0, 0.3, 1.5 gcm^{-3}의 밀도를 각각 적용했으며 두 팬텀의 장기질량을 표1에 정리했다. 갑상선, 부신, 피부 등에서 큰 차이를 보이지만 장기흡수선량을 계산할 경우 장기질량차의 영향은 적은 것으로 보고되고 있으므로[11] 본 연구의 결과에는 영향을 주지 않는다고 판단하였다.

몬테칼로 계산체계

일반목적의 MCNP4C코드는 몬테칼로 계산기법을 사용하는 대표적인 방사선수송코드로서 광자 및 중성자를 수송할 수 있으며 4B버전부터는 전자까지도 수송할 수 있게 되었다[12]. MCNP4C코드 내에는 체적소몬테칼로 계산을 위한 루틴이 없으므로 반복구조 알고리즘(repeated structure algorithm)을 응용하여 물체를 단위 체적소로 구성된 3차원 행렬로 표현한 뒤 각 체적소에 서로 다른 물질 및 밀도를 부여하여 방사선수송을 수행할 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 0.05 MeV에서 10 MeV 범위를 가지고 AP와 PA방향으로 입사하는 넓고 평행한 감마선장에 대해 장기흡수선량을 *F6 tally*를 이용하여 계산하였고 Window2000으로 운영되는 2.4GHz, RAM 512MB가 장착된 개인용컴퓨터를 사용하였으며 상대오차 1% 이내의 결과를 얻기 위해 MIRD팬텀의 경우 500,000개, Zubal팬텀의 경우 1,000,000개~2,000,000개의 히스토리를 각각 사용하였다[12].

결과 및 논의

장기선량비교

MIRD팬텀과 Zubal팬텀을 이용하여 AP방향과 PA방향에서 입사하는 0.05, 0.1, 0.4, 0.8, 2, 8, 10 MeV의 넓고 평행한 감마선장에 대해서 ICRP60[1]에서 제시하는 기타장기 이외의 주요장기 11개 중에서 적색골수를 제외한 10개 장기에 대해서 선량계산을 수행하였다. 적색골수의 경우 Zubal팬텀에서는 직접 묘사되어 있어 선량계산이 가능하지만 MIRD팬텀의 경우 묘사가 불가능하여 일반적으로 골격 내의 적색골수 분율을 가중하여 선량계산을 하므로 그 계산방법이 상이하여 비교대상에서 제외시켰다.

그림2는 두 팬텀의 에너지별 장기선량값 차이를 보여주고 있다. AP방향의 경우 10개 주요장기 중 4개 장기가 0.05 MeV에서 40% 이상의 차이를 보이며, PA방향 역시 4개 장기가 40% 이상의 선량차이를 보였다. 유효선량을 계산한 결과 0.05 MeV에 대해 AP방향은 11.7%, PA방향은 49.5%의 선량차이를 보였고 MIRD팬텀이 더 높은 선량을 받았다. 이러한 선량차이의 원인을 고찰하기 위해 각 팬텀의 폐 중심 높이에서의 XY평면 단층이미지를 얻어 비교해보았다(그림3). 그림에서 볼 수 있듯이 두 팬텀의 Y축방향 몸통 두께가 현저하게 차이가 나며 몸통에 의한 차폐효과로 인

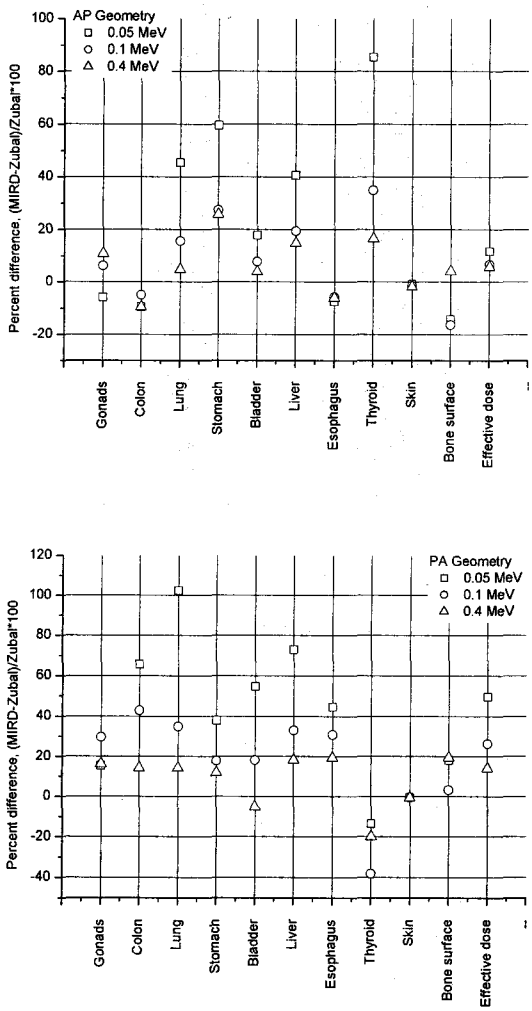


Fig. 2. Comparison of organ absorbed doses and effective doses for the MIRD phantom and the Zubal voxel phantom with monoenergetic photons of energies of 0.05, 0.1 and 0.04 MeV for AP (top) and PA (bottom) geometries.

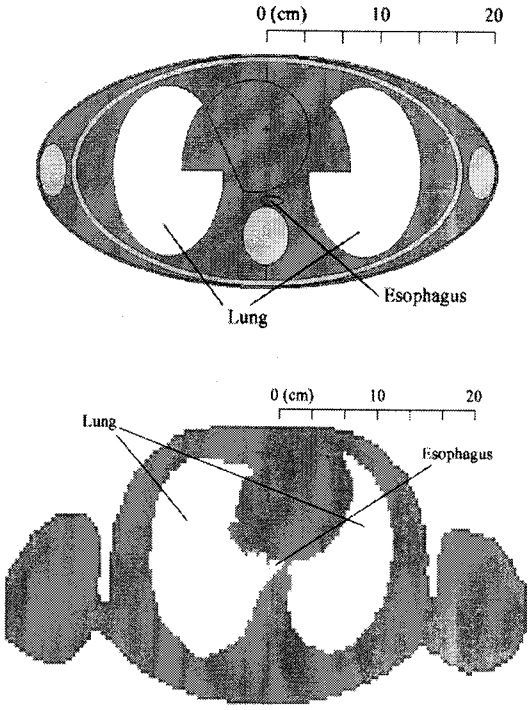


Fig. 3. Axial slices through center of lungs of the MIRD phantom (top) and the Zubal phantom (bottom).

해 Zubal팬텀의 경우 MIRD팬텀에 비해 낮은 선량을 받음을 알 수 있다. 이와 같은 분석은 타 연구자에 의해서도 이미 제기된 결과이다. Zankl 등[13]은 MIRD형 성인팬텀과 다양한 체적소팬텀을 이용하여 외부피폭 상황에서 선량차이를 비교하였고 MIRD팬텀의 몸통 앞뒤 두께가 너무 얇아 체적소팬텀보다 높은 선량을 받는 것을 지적하였다.

MIRD팬텀 몸통수정

실제 인체에 기초한 Zubal팬텀에 비해 얇은 MIRD팬텀의 몸통두께를 수정하기 위해 본래 20 cm ($-10\,cm \le y \le 10\,cm$) 두께의 타원통으로 모사되어 있는 몸통 두께를 20 cm에서 36 cm까지 변화시켜가며 Zubal팬텀과의 유효선량차이를 살펴보았다. 입사되는 감마선의 에너지가 커질수록 두 팬텀간의 유효선량차이는 줄어들겠지만, 고에너지에서는 유효선량 자체가 커지므로 적은 선량차이도 무시할 수 없다. 따라서 수정될 팬텀의 적용분야를 원전 방사선작업자에게 국한시키고 원전 작업장에서 가장 빈번하게 받을 수 있는 감마선 에너지를 설정했다. 원전방사선장에 대한 이재기 등[14]의 연구보고서에 의하면 평균 감마에너지 값의 분포는 가동정지중일 때 원전의 격납용기 내에서 440~780 keV, 가동 중일 때 원전의 보조건물 내에서 280~760 keV로 나타났으므로 0.5 MeV를 대푯값으로 선정하였다. 0.5 MeV 감마선이 AP 및 PA방향으로 입사할 때 몸통 두께별로 유효선량을 계산한 뒤 Zubal팬텀에 의한 계산값과 비교하여 선량차이를 표2에 정리했다.

AP와 PA방향 감마선에 대해서 각각 두께 12 cm와 14 cm에서 0.7%와 0.8%의 최소 유효선량차이를 보임을 알 수 있다. 본래 단축 반지름 10 cm, 장축 반지름 20 cm의 타원 실린더로 모사되었던 MIRD팬텀 몸통을 다음과 같이 수정했고 그림4는 수정된 몸통의 단층영상을 보여준다.

Table 2. Percent differences of effective doses per unit air kerma, *E/Ka(Sv/Gy)* for 0.5 MeV photon beams in AP and PA geometries with various thickness of trunk.

Thickness of trunk (cm)	AP direction		PA direction	
	Effective dose(Sv/Gy)	Difference(%)*	Effective dose(Sv/Gy)	Difference(%)
11	2.324×10^{-12}	3.2	1.862×10^{-12}	10.3
12	2.267×10^{-12}	0.7	1.811×10^{-12}	7.2
13	2.212×10^{-12}	-1.8	1.754×10^{-12}	3.8
14	2.154×10^{-12}	-4.4	1.702×10^{-12}	0.8
15	2.094×10^{-12}	-7	1.649×10^{-12}	-2.4
16	2.035×10^{-12}	-9.7	1.594×10^{-12}	-5.6

* $(MIRD-Zubal)/Zubal\times100$

수정된 몸통 모델(앞쪽);

$$(\frac{x}{20})^2+(\frac{y}{12})^2\leq 1, 0\leq z\leq 70, y\leq 0$$

수정된 몸통 모델(뒤쪽);

$$(\frac{x}{20})^2+(\frac{y}{14})^2\leq 1, 0\leq z\leq 70, y\geq 0$$

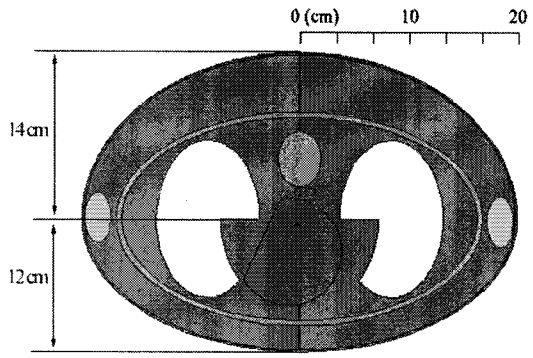


Fig. 4. Axial slice of the modified MIRD phantom, in which trunk thickness is modified.

MIRD팬텀의 몸통을 수정한 이후 Zubal팬텀과의 선량차이를 에너지별로 다시 비교하여 그림5에 나타내었다. AP방향 0.05 MeV에 대해 갑상선만 40%를 넘어서고 있으며 PA방향에서는 모든 장기가 40% 안으로 선량차이가 줄어들었다. 또한 유효선량 계산 결과 0.05 MeV에 대해 AP방향은 -0.5%, PA방향은 7.3%로 수정 이전의 11.7%, 49.5%에 비해 현저하게 선량차이가 줄어들었다.

MIRD팬텀의 몸통 수정 이후 계산된 선량환산인자가 ICRP74에서 제공하는 값과 어떤 차이를 보이는지 고찰하기 위해 ICRP74에서 제공하는 AP 및 PA방향에서 입사하는 광자빔에 대한 선량환산인자와 비교하였다. 그 중 특히 PA방향에서 큰 선량차이를 보였던 폐와 간에 대한 선량환산인자를 수정 전후의 MIRD팬텀, ICRP74 및 Zubal팬텀에 대해 0.05 MeV 광자빔에서 계산하여 그림6에 나타내었다. ICRP74에서 제시하는 값은 표준인에 기반을 둔 MIRD팬텀으로 계산된 값이므로 MIRD팬텀에 의한 계산값과 거의 유사하다. 하지만 그 값이 실제 인체에 기초한 Zubal팬텀의 값과는 차이를 보이며 본 연구에서 수정한 MIRD팬텀은 Zubal팬텀의 계산값에 근접한다.

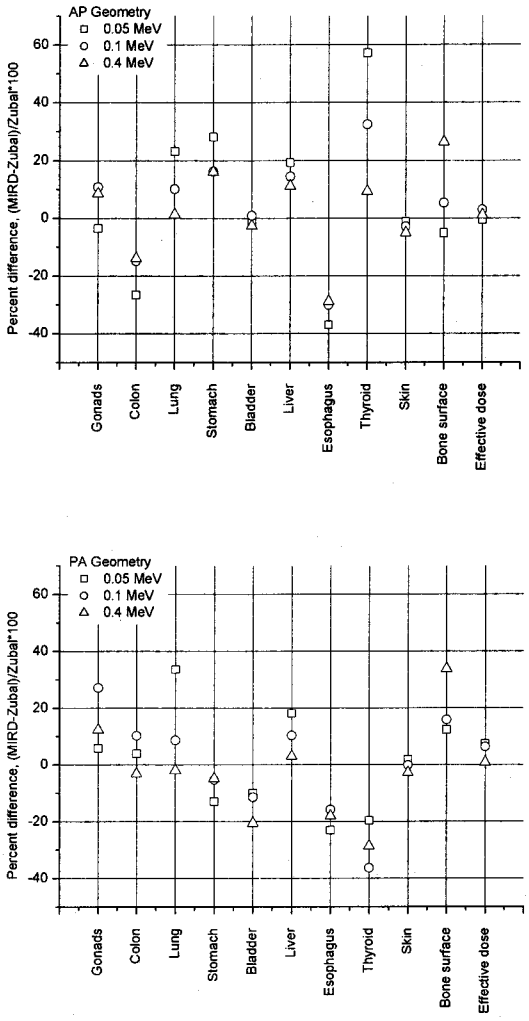


Fig. 5. Comparison of organ absorbed doses and effective doses recalculated by the modified MIRD phantom and the Zubal voxel phantom for AP (top) and PA (bottom) geometries.

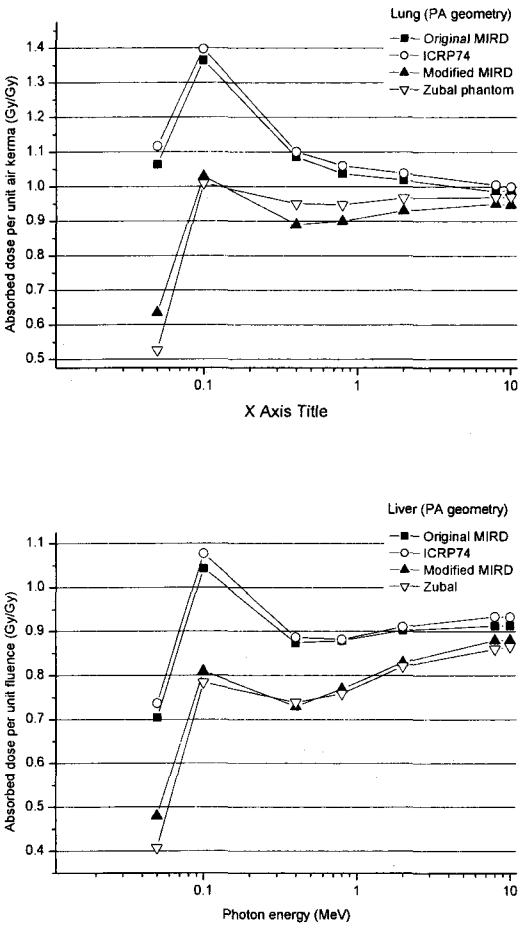


Fig. 6. Comparison of absorbed doses per unit fluence ($GyGy^{-1}$) calculated by original MIRD, modified MIRD and Zubal phantoms with those of ICRP74 for lung (top) and liver (bottom) in PA irradiation geometry.

결 론

대표적인 수학적 팬텀인 MIRD팬텀의 실제 인체구조에 근접하는 정도와 외부피폭 선량계산에서의 적합성 여부를 평가하기 위해 인체의 단층촬영영상을 이용하여 제작된 Zubal체적소팬텀과의 장기선량값과 단층영상을 비교하여 선량차이의 주요 원인이 되는 MIRD팬텀의 몸통두께를 앞쪽 12 cm, 뒤쪽 14 cm로 수정하였다. 수정 전 PA 방향 0.05 MeV 광자빔에 대한 유효선량 차이가 49.5%까지 생겼으나 수정 이후 7.3%까지 줄었으며 장기선량의 경우도 MIRD팬텀이 과대평가 성향을 보였으나 수정 이후 선량차이가 현저하게 줄었다. 표준인에 근거한 ICRP74의 선량환산인자는 Zubal팬텀에 의해 계산된 값과 AP, PA방향에서 큰 차이를 보이고 있으며 수정된 MIRD팬텀은 Zubal팬텀의 값에 준하는 결과를 보였다. Zubal팬텀은 새로 정의된 ICRP의 표준인[15]을 모사하는 체적소팬텀 연구[16]에 기초자료로 사용된바 있으므로 이를 근거로 MIRD팬텀을 수정한 본 연구의 접근방법의 타당성을 보여준다.

체적소팬텀의 경우 인체 단층영상자료를 이용하므로 실제 인체에 가까운 선량계산이 가능하다는 장점이 있으나 방정식만 주어지면 모사할 수 있는 MIRD팬텀에 비해 그 모델링과정이 복잡하고 완성된 팬텀자료가 공개되지 않는다면 타 연구자들이 용이하게 사용할 수 없다는 단점이 있다. 또한 체적소팬텀은 특정인의 단층자료를 이용하므로 표준인자료에 준하는 표준팬텀을 제작하기 어렵고 계산된 선량환산인자 역시 일반적인 목적에 적용하기 어렵다는 약점을 안고 있다. 따라서 MIRD팬텀의 장점을 최대한 살리면서 실제 인체와 큰 차이를 보이는 부분을 수정한 팬텀 개발은 방사선방호계산 분야에서 의미있는 연구가 될 것이다. 본 연구에서는 AP, PA방향 조사를 통해 몸통두께만을 수정했으나 이후 LAT, ROT 및 ISO 등의 방향 조사를 통해 체적소팬텀과 선량차이를 확인하고 그 원인을 분석하여 계속적인 수정작업이 필요할 것이다.

감사말씀

본 연구는 과학기술부 원자력중장기연구개발사업의 지원과 방사선안전신기술연구센터(iTRS)의 일부 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. International Commission on Radiological Protection, *1990 Recommendation of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 60, Pergamon Press (1990).
2. W.S. Snyder, M.R. Ford, G.G. Warner, and H.L. Fisher, "Estimates of absorbed fractions for monoenergetic photon sources uniformly distributed in various organs of a heterogeneous phantom", MIRD Pamphlet No 5, *J. Nucl. Med.* 10(Suppl. 3) (1969).
3. International Commission of Radiological

Protection, *"Report of the Task Group on Reference Man"*, ICRP Publication 23, Pergamon Press (1975).
4. D.G. Jones, "A realistic anthropomorphic phantom for calculating organ doses arising from external photon irradiation", *Radiat. Prot. Dosim.* 72(1), 21-29 (1997).
5. T.C. Chao, A. Bozkurt, and X.G. Xu, "Conversion coefficients based on the VIP-MAN anatomical model and EGS4-VLSI code for external monoenergetic photons from 10 keV to 10MeV", *Health Phys.* 81(2), 163-183 (2001).
6. K. Saito, A. Wittmann, S. Koga, Y. Ida, T. Kamei, J. Funabiki, and M. Zankl, "Construction of a computed tomographic phantom for a Japanese male adult and dose calculation system", *Radiat. Environ. Biophys.* 40, 69-76 (2001).
7. M. Zankl and A. Wittmann, "The adult male voxel model "Golem" segmented from whole-body CT patient data", *Radiat. Environ. Biophys.*, 40, 153-162 (2001).
8. M. Zankl, U. Fill, N. Petoussi-Henss, and D. Regulla, "Organ dose conversion coefficients for external Photon irradiation of male and female voxel models", *Phys. Med. Biol.*, 47, 2367-2385 (2002).
9. R.J. Staton, F.D. Pazik, J.C. Nipper, J.L. Williams, and W.E. Bolch, "A comparison of newborn stylized and tomographic models for dose assessment in paediatric radiology", *Phys. Med. Biol.*, 48, 805-820 (2003).
10. I.G. Zubal, C.R. Harrell, E.O. Smith, Z. Rattner, G. Gindi, and P.B. Hoffer, "Computerized three-dimensional segmented human anatomy", *Med. Phys.*, 21, 299-302 (1994).
11. T.J. Smith, A.W. Phipps, N. Petoussi-Henâ, and M. Zankl, "Impact on internal doses of photon SAFs derived with the GSF adult male voxel phantom", *Health Phys.* 80(5), 477-485 (2001).
12. J.F. Briesmeister, "MCNP - A General Monte Carlo Code N-Particle Transport Code, Version 4C", LA-13709-M (2000).
13. M. Zankl, U. Fill, N. Petoussi-Henss, and D. Regulla, "Organ dose conversion coefficients for external photon irradiation of male and female voxel models", *Phys. Med. Biol.* 47, 2367-2385 (2002).
14. 이재기, 김종경, 정운관, 장재권, 김현기, 한치영, *비균질 감마 방사선장에 대한 유효선량 평가법의 연구*, 과제번호97-중-8/중간보고서, 한양대학교 (1998).
15. International Commission on Radiological Protection,*Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection: The Skeleton*, ICRP Publication 89, Pergamon Press (2003).
16. R. Kramer, J.W. Vieira, H.J. Khoury, F.R.A. Lima, and D. Fuelle, "All about MAX: a male adult voxel phantom for Monte Carlo calculations in radiation protection dosimetry", *Phys. Med. Biol.*, 48, 1239-1262 (2003).