

Calculation of Dose Conversion Coefficients in the Anthropomorphic MIRD Phantom in Broad Unidirectional Beams of Monoenergetic Photons

Jai-Kwon Chang, Jai-Ki Lee

Department of Nuclear Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791

MIRD 인형팬텀의 넓고 평행한 감마선빔에 대한 선량 환산계수 계산

장재권 · 이재기

한양대학교 원자력공학과

Abstract—The conversion coefficients of effective dose per unit air kerma and equivalent dose per unit fluence were calculated by MCNP4A code for antero-posterior(AP) and postero-anterior(PA) incidence of broad, unidirectional beams of photons into anthropomorphic MIRD phantom. Calculations have been performed for 20 monoenergetic photons of energy ranging from 0.03 to 10 MeV. The conversion coefficients showed a good agreement with the corresponding values given in the draft publication of joint task group of ICRP and ICRU within 10%. The deviations may arise from the differences of geometry in the MIRD phantom and the ADAM/EVE phantoms, and the differences in the codes and cross-section data used. Inclusion of a specific oesophagus model results in effective dose slightly different(5% at most) from the effective doses obtained by adopting the equivalent doses for the thymus or pancreas. Deletion of the ULI from the remainder organ appeared not to be significant for the cases of photon dosimetry covered in this study.

Key words : ICRP, Effective dose, Tissue weighting factor, Equivalent dose, MIRD Phantom, MCNP 4A, Conversion Coefficient

요약—MCNP4A 코드를 이용하여 MIRD 인형팬텀의 정면과 후방에서 입사하는 넓고 평행한 감마선빔에 대한 단위 공기커마당 유효선량 환산계수와 단위 플르언스당 장기의 등가선량을 계산하였다. 본 연구에서 고려한 감마선은 0.03–10 MeV 에너지 구간에서 20개의 단일에너지에 대해 수행되었다. 환산계수의 계산결과를 ICRP/ICRU의 연구결과 발표예정 출판물에 주어진 해당되는 값과 비교한 결과 편차 10% 이내에서 일치하고 있다. 결과의 차이가 발생한 이유는 MIRD 팬텀과 ADAM/EVE 팬텀의 기하학적 차이가 주원인이며 또한 계산에 사용된 전산코드와 단면적 차이 등으로 판단된다. 특정 식도 모델을 사용한 결과로부터 얻어진 유효선량과 흉선과 췌장에 대한 등가선량을 채택함으로써

언어지는 유효선량은 약간(최고 5%)의 차이를 보인다. 기타장기로부터 상부대장을 제외했을 때 본 연구에서 다루었던 감마선 선량학적 측면의 경우에는는 중요하지 않은 것으로 나타났다.

중심어 : 국제방사선방호위원회, 유효선량, 조직가중치, 등가선량, MIRD팬텀, MCNP4A, 환산계수

서 론

국제방사선방호위원회(ICRP)에서는 개인의 방사선 피폭으로 인한 확률론적 위험을 제한하기 위해 1978년 유효선량을 권고하였다. 방사선방호학적 측면에서 이온화방사선 피폭의 위험에 대한 평가는 중요하며 위원회에서 권고하고 있는 유효선량은 방사선에 의한 개인의 실질적인 위험을 개념적으로 잘 설명하고 있다. 그러나 유효선량을 평가하기 위해서는 인체내 각 장기의 선량분포를 알아야 하나 일상적인 방사선 작업 환경에서 각 장기의 등가선량을 직접 측정하는 것은 사실상 불가능하다.

다행히 핵의학분야에서 내부피폭을 평가할 목적으로 구성된 인체의 해석기하학적 모형인 MIRD 팬텀 [1] 및 발전된 방사선 수송계산 기법과 컴퓨터의 덕분에 방사선장에 피폭되는 인체 내부 각 조직이나 장기의 선량분포를 계산해 낼 수 있게 되었다.

이와 관련하여 특히 독일의 GSF 그룹[2]과 일본 JAERI 그룹이[3] 많은 계산을 수행하고 있다. 한편 방사선 영향에 대한 재평가의 결과로 인체내 각 조직의 방사선 피폭유발 암위험 데이터가 수정됨에 따라 ICRP 60[4]에서는 표 1에서 보는 것처럼 조직가중치가 ICRP 26[5]에서 사용한 값에 비해 상당한 차이를 내게 되었다. 특히 방사선에 민감한 것으로 평가되는 조직의 선정에서도 과거 6개의 중요조직과 5개의 기타 장기에서 12개 중요조직과 10개 기타 장기로 확대되었다.

이에 따라 유효선량에 대한 전면 재계산이 1990년을 전후하여 이루어져 왔다. 또 선정된 조직중에는 식도와 같이 MIRD에는 모델링되지 않은 조직도 포함되어 있어서 팬텀모델에도 수정이 필요하게 되었다. 나아가 성별과 연령에 따른 체격의 차이로 인한 등가선량 분포의 차이나 유효선량의 차이를 평가하기 위해 남녀의 팬텀을 구분하고 0, 1, 5, 10, 15세와 성인의 6개

연령그룹으로 구분하여 평가하는 노력이 진행되고 있다[6,9]. 그런데 체격자료나 해부학적 자료는 인종과 생활환경에 따라 차이가 있기도 하며 피폭되는 방사선장의 특성에 따라서도 체내 선량분포가 달라진다. 따라서 신체 조건의 차이나 특수한 피폭상황에서 피폭선량을 보다 정확히 평가하기 위해서는 우리 국민을 기준으로 한 인형팬텀이 필요하고 피폭상황을 변화시켜 계산할 수 있는 선량평가 체계가 수립되어야 한다.

Table 1. Tissue weighting factor.

Tissue	weighting factor, w_T	
	ICRP 60	ICRP 26
Gonads	0.2	0.25
Bone marrow(red)	0.12	0.12
Colon	0.12	—
Lung	0.12	0.12
Stomach	0.12	—
Bladder	0.05	—
Breast	0.05	0.15
Liver	0.05	—
Oesophagus	0.05	—
Thyroid	0.05	0.03
Skin	0.01	—
Bone surface	0.01	.03
Remainder*	0.05	0.30

* the remainder is composed of the following additional tissues and organs : adrenals, brain, upper large intestine, small intestine, kidney, muscle, pancreas, spleen, thymus and uterus. Lately, the upper large intestine was replaced by the extrathoracic region[7].

아직 표준한국인의 모델링이 되어있지 않으므로 기존의 MIRD 팬텀을 이용하여 이러한 계산 체계를

수립하는 것이 이 연구의 목적이다. 아울러 ICRP 69 [7]에서 상부대장이 기타장기의 고려대상에서 제외됨으로 인한 유효선량에 미치는 효과, 식도에 대한 모델링의 필요성 등을 본 연구에서 계산된 선량을 근거로 평가하였다. 등가선량과 유효선량 환산계수의 계산에는 일반 목적의 방사선수송계산 코드인 MCNP 4A[8]가 사용되었다.

인형팬텀 및 계산방법

MIRD 팬텀

MIRD 팬텀은 최초의 비균일 인형팬텀으로 1969년 핵의학분야의 내부피폭 선량계산을 목적으로 제작되었으나 외부피폭 선량의 계산에도 사용할 수 있도록 개선되었으며 1978년에는 인체를 좀더 근사적으로 나타내기 위해 팬텀내 몇몇 장기에 대한 수정이 이루어졌다. 표준성인을 나타내는 MIRD 팬텀은 간단한 대수 방정식을 이용하여 각 장기를 근사적으로 모사하는 기하학적 형태로 구성되어 있으며 각 장기들은 장기 구성성분과 밀도가 균일하게 분포하고 있는 것으로 가정하고 있다[1]. 팬텀에서 다른 구성성분과 밀도를 갖는 부분은 뼈(1.486g/cm^3), 폐(0.296g/cm^3), 연조직(0.987g/cm^3) 이다.

Table 2. Elemental composition of materials(in percent) used in MIRD phantoms.

Element	Lungs	Skeleton	Bulk	RBM*
H	10.21	7.04	10.47	10.43
C	10.01	22.79	23.02	43.09
N	2.8	3.87	2.34	3.34
O	75.96	48.56	63.21	43.09
Na	0.19	0.32	0.13	0.05
Mg	0	0.11	0.02	0
P	0.08	6.94	0.24	0
S	0.23	0.17	0.22	0
C	0.27	0.14	0.14	0
K	0.2	0.15	0.21	0
Ca	0.01	9.91	0	0
Fe	0.04	0	0	0

* Red Bone Marrows.

폐의 경우 지방질이 없고 내부에 공기를 포함하기 때문에 다른 조직에 비해 밀도가 낮다. 피부는 인체의 부위에 따라 두께의 차이가(인체내 등 부위의 두께는 전면의 2배) 있으나 MIRD 팬텀[1]에서는 전신에 대해 균등하게 0.2 cm의 두께를 고려하였다. 표2는 팬텀내 각 부위의 구성성분과 분율을 나타내고 있으며 0.005% 이하의 분율을 갖는 성분은 제외하였다.

표 3과 같이 적색골수는 뼈의 종류에 따라 분포와 함유량에 상당한 차이가 있음을 보여주고 있으며 동일한 뼈의 경우에도 위치에 따라 적색골수의 함유량에 차이가 있고 불균일한 분포를 하고 있기 때문에 적색골수의 선량계산은 어렵다. 따라서 본 연구는 계산의 단순성을 위해 적색골수는 뼈내 균일하게 분포하고 있음을 가정하였으며 적색골수의 성분은 표 2에서 보였다.

Table 3. Distribution of red bone marrows(in percent) used in MIRD phantoms.

Bone region	Red bone marrow
Skull	13.1
Vertebrae	28.4
Ribs	10.2
Scapulae	4.8
Both Arms	1.9
Both Clavicles	1.6
Both Legs	3.8
Pelvis	36.2

팬텀의 수정정보

현재 인체를 모사하기 위해 개발된 대부분의 수학적 인형팬텀들은 유효선량측정을 위해 ICRP에서 권고하고 있는 22개의 장기중 일부 장기들에 대한 모델링이 이루어지지 않고 있다. 여러 연구기관과 연구자에 의해 이들 장기에 대한 독자적인 모델들이 개발되고 있으나 약간씩의 차이가 있고 나름대로 수정의 여지가 남아있다[9]. MIRD 팬텀의 경우 뼈표면, 근육 그리고 식도에 대한 모델링이 이루어지지 않았다. 먼저 뼈 표면의 경우 매우 얇은($10\mu\text{m}$) 연조직으로 둘러싸여

있기 때문에 모델링이 복잡하고 계산이 용이하지 않기 때문에 대부분의 연구자들은 뼈의 평균선량 값을 대체하여 사용하고 있다[9]. 근육의 경우 Hollnagel 등 [10]은 근육을 몸통과 손, 다리의 3부분으로 모델링하고 있는 반면에 Zankl [11]과 Yamaguchi [3] 등은 몸통내에서 모델링이 이루어진 장기들을 제외한 전 영역의 평균선량값을 근육의 선량평가 모델로 제시하는 등 연구자에 따라 차이가 있다[9]. 본 연구는 모델링이 비교적 간단한 Zankl 과 Yamaguchi 등이 제시한 모델을 사용하여 근육의 선량을 평가하였다.

유효선량 계산에서 위에서와 같이 팬텀내 모델링이 이루어지지 않은 장기들에 대한 선량평가에서 사용된 방법과 가정 등으로 계산결과에 약간의 불확실성이 발생하겠지만 이들 장기의 가중치가 0.005로 작기 때문에 실제 유효선량 계산결과에서 발생하는 오차는 미미할 것이다.

식도의 경우에도 인형팬텀에 모델이 없기 때문에 많은 연구자들은 식도에 대한 근사적인 선량평가의 한 방법으로 식도에 근접하게 위치하고 있는 장기인 흉선(thymus)이나 췌장(pancreas)의 선량값을 대체하여 사용하고 있다[11,12]. 또한 ICRP 69에서도 식도에 대한 모델이 없을 경우 흉선의 선량값을 사용할 것을 권고하고 있다. 그러나 이러한 대체 장기에 의한 식도의 선량평가 방법에 대한 Zankl과 Drexler의 연구결과 근사적인 선량평가에는 사용이 가능하나 35 keV 이상 감마선에너지 경우 조사환경에 따라 과소평가와 과대평가가 이루어지고 있으며 저 에너지의 경우 적합하지 않는 결과를 보이고 있음을 발표하였다 [12]. 본 연구는 Zankl 등에 의해 개발된 모델을 사용하여 식도의 선량을 평가 하였다. 식도는 인체내 목에서부터 위의 맨 위쪽 부위에, 척추의 전방부에 위치하여 약간 왼쪽으로 치우친 해부학적 형태를 갖고 있으며 다음과 같이 타원형 실린더와 평면에 의해 표현된다[12].

$$\left(\frac{x-0.5}{1}\right)^2 + \left(\frac{y-2.5}{0.4}\right)^2 \leq 1$$

$$43 \leq z \leq 47$$

성인남성에 대한 식도의 체적과 질량은 각각 40.2cm³과 39.7g이다.

MCNP 코드 및 계산방법

로스알라모스연구소에서 개발한 MCNP 코드는 몬테칼로 방법을 사용하는 대표적 일반 목적의 방사선 수송 코드이다. 계산공간의 기하학적 구조를 설정함에 있어서 이 코드는 사용자가 면(surface)을 정의하고 면을 Boolean 대수방법으로 일정한 체적, 즉 cell을 정의할 수 있도록 하였다. 각 cell은 주어진 원자성분과 밀도를 지닌 물질로 채워지며 팬텀내 각 장기의 크기와 형태 등의 특성을 나타낼 수 있다. 본 연구에서 사용한 버전은 MCNP4A이며 감마선의 단면적 자료는 ENDF[13]의 데이터를 사용하였다. 본 연구 결과치의 시스템적 오차를 평가하기 위해 비교 대상으로 설정한 ICRP/ICRU 결과는 DLC-99/HUGO[14]의 데이터를 사용하여 도출된 값이다. MCNP 모사실험에서 발생하는 고유의 통계적인 오차와 계산시간을 고려하여 모사실험에서 수행된 이력(history)은 감마선 에너지에 따라 일백만에서 삼백만의 범위에서 실행하였다.

감마선 에너지와 조사환경

MIRD 팬텀은 그림1과 같은 좌표계에서 이상적 피폭환경인 정렬확장장내 넓은(반경 100cm) 평행감마선 빔에 AP(Antero-Posterior), PA(Postero-Anterior) 방향의 조사환경에 진공상태에 놓여 있다고 가정하였다. 넓고 평행한 감마선빔은 선원의 기하학적 구조를 이해하고 특성화가 용이하며 일상적인 작업 환경에서 쉽게 접하는 기하학적 형태이다. 또한 이러한 감마선빔은 기존의 연구자들이 발표한 연구 결과와 비교가 가능하며 선량계의 검교정과 성능평가를 위해 여러 표준연구기관에서 기준 방사선장으로 사용되고 있다.

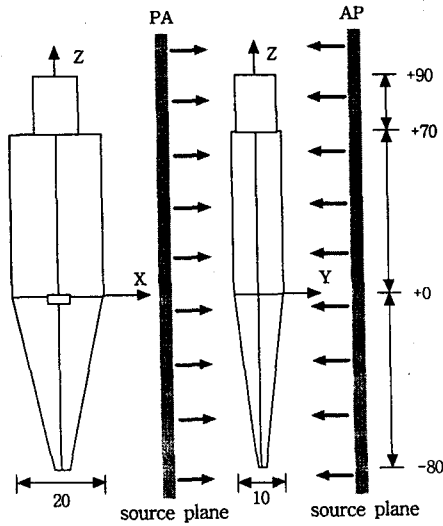


Fig. 1. Front and side view of the exposure geometry. The position of the MIRD phantom is shown with respect to the planar photon source.

결과 및 토의

평가선량

개인의 방사선 피폭에 따른 위험평가의 기본적인 척도로 권고된 유효선량은 기본적으로 조직이나 장기의 흡수선량으로부터 계산될 수 있으며, 각 장기의 흡수선량에 방사선질과 장기의 방사선에 대한 민감도를 나타내는 가중치의 곱에 대한 합으로 정의된다.

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T$$

여기서, 조직가중치 w_T 는 전신이 균일 피폭시 전체 확률론적 영향의 위험에 대한 각조직의 상대적인 비율로 ICRP60에서는 표1과 같이 12개 주요 개별 장기에 대한 가중치와 10개의 기타 장기에 대한 통합 가중치를 권고하고 있다. 표1의 값은 방사선의 확률적 위험을 대규모 인구 집단에 대해 평균한 값을 근거로 하고 있는 명목치이므로 특정 소집단에 대한 값은 달라질 수 있다[15]. 본 연구에서 사용된 MIRD 팬텀이 성인 남성을 나타내며 유방을 포함하고 있지

않기 때문에 조직가중치 합이 더 이상 1이 아니므로 혼동을 피하기 위해 남성유효선량(E_m)으로 부르기로 한다[16].

H_T 는 각 조직의 흡수선량에 형태와 에너지에 따른 에너지 부여(impart) 방식 차이를 고려한 방사선가중치가 곱해진 조직의 등가선량이다. 감마선에 대한 방사선가중치는 1이므로 장기의 흡수선량과 등가선량은 수치적으로 같다.

표 4와 5는 본 연구에서 계산한 MIRD 팬텀에 AP, PA 방향으로 입사하는 0.03-10 MeV 에너지구간내 20개 단일감마선 에너지에 대한 단위 플루언스당 각 장기의 등가선량 분포의 일부 에너지에 대한 계산결과를 보여주고 있다. 계산결과를 ICRP/ICRU 유효선량 환산계수[9]와 비교하면 저 에너지에서 일부 장기를 제외하고 상대오차 10% 이내에서 일치하고 있다. 비교 결과에서의 차이는 계산에서 사용한 팬텀의 차이가 주원인으로 생각되며 계산에 사용된 전산코드와 사용된 반응단면적 차이 등에 기인한 것으로 판단된다.

식도와 대체 장기를 이용한 유효선량 평가 비교

표 6은 Zankl이 개발한 식도에 대한 모델과 식도에 인접하게 위치하고 있는 장기인 흉선과 췌장 등의 대체 장기를 이용한 AP와 PA방향의 조사환경에 대한 공기커마의 유효선량 환산계수(E/K_a)의 계산결과이다. Zankl의 모델과 대체 장기를 이용한 유효선량 환산계수 계산결과를 비교하면 흉선의 경우 AP 방향에서는 약간의 과대평가를 PA방향에 대해서는 과소평가를 하고 있으며 췌장의 경우는 반대 경향을 보이고 있으나 실질적으로 비교결과에서 큰 차이는 발생하지 않았다. 이러한 이유는 식도에 대한 가중치가 0.05으로 유효선량 환산계수에 대한 기여가 작기 때문이다. 즉, 피폭 환경의 특성에 따라 인체내 이들 장기의 선량값의 분포에 많은 차이가 발생할 수 있다는 점을 고려할 때 좀더 신뢰성 있는 유효선량 평가를 위해서는 식도에 대한 모델의 개발이나 기존 선량평가 방법의 개선이 필요할 것으로 판단된다.

조직가중치 변화에 따른 유효선량 비교

Table 4. Organ doses per unit of fluence(Sv cm²) as a function of photon energy in AP geometry.
The relative errors are deviations from the ICRP/ICRU values.

Organ	Photon Energy(MeV)				
	0.1	0.4	0.8	2.0	8.0
Gonads	6.669E-13(2.7)	2.447E-12(0.7)	4.440E-12(0.2)	8.049E-12(4.8)	2.020E-11(1.1)
Marrow	3.095E-13(1.9)	1.489E-12(4.2)	3.025E-12(5.5)	6.648E-12(5.5)	1.761E-11(3.8)
Colon	5.482E-13(4.8)	2.090E-12(3.7)	3.794E-12(0.5)	7.594E-12(2.0)	1.980E-11(1.5)
Lung	5.012E-13(5.1)	2.056E-12(5.6)	3.880E-12(5.1)	7.708E-12(2.9)	2.007E-11(3.0)
Stomach	6.080E-13(0.2)	2.207E-12(1.5)	4.079E-12(0.8)	7.796E-12(0.6)	2.020E-11(0.4)
Bladder	5.973E-13(2.4)	2.177E-12(2.6)	3.910E-12(4.2)	7.658E-12(2.7)	1.952E-11(0.9)
Liver	5.086E-13(1.9)	1.978E-12(1.1)	3.665E-12(1.8)	7.351E-12(2.8)	1.940E-11(2.7)
Oesophagus	3.254E-13(4.8)	1.391E-12(9.1)	2.881E-12(6.0)	6.303E-12(3.0)	1.832E-11(1.8)
Thyroid	6.051E-13(3.6)	2.651E-12(1.1)	4.825E-12(0.9)	9.323E-12(3.8)	2.234E-11(9.8)
Skin	4.028E-13(0.4)	1.877E-12(1.4)	3.656E-12(1.8)	7.651E-12(2.9)	2.043E-11(3.7)
Bone surface	6.781E-13(4.5)	1.821E-12(7.8)	3.435E-12(7.5)	7.149E-12(7.3)	2.010E-11(6.9)
Remainder	3.904E-13(9.8)	1.640E-12(6.2)	3.166E-12(5.6)	6.662E-12(4.5)	1.791E-11(3.7)
Adrenals	2.105E-13 -	1.159E-12 -	2.470E-12 -	5.828E-12 -	1.655E-11 -
Brain	2.906E-13 -	1.467E-12 -	3.047E-12 -	6.704E-12 -	1.886E-11 -
ULI	2.523E-13 -	1.018E-12 -	1.894E-12 -	3.849E-12 -	1.018E-11 -
SI	5.092E-13 -	1.963E-12 -	3.682E-12 -	7.340E-12 -	1.925E-11 -
Kidney	2.326E-13 -	1.234E-12 -	2.602E-12 -	5.915E-12 -	1.724E-11 -
Muscle	4.579E-13 -	1.915E-12 -	3.670E-12 -	7.611E-12 -	2.024E-11 -
Pancrease	4.631E-13 -	1.856E-12 -	3.520E-12 -	7.386E-12 -	1.997E-11 -
Spleen	3.508E-13 -	1.519E-12 -	3.027E-12 -	6.533E-12 -	1.808E-11 -
Thymus	6.645E-13(3.6)	2.402E-12(1.1)	4.303E-12(0.7)	8.343E-12(3.8)	2.098E-11(9.9)
Uterus*	4.722E-13(7.1)	1.866E-12(0.2)	3.442E-12(1.2)	7.109E-12(1.3)	1.778E-11(0.3)

relative error(%)

* Geometry given by MIRD was used.

Table 5. Organ doses per unit of fluence(Sv cm^2) as a function of photon energy in PA geometry.
The relative errors are deviations from the ICRP/ICRU values.

Organ	Photon Energy(MeV)				
	0.1	0.4	0.8	2.0	8.0
Gonads	2.551E-13(15.1) ⁺	1.229E-12(7.8)	2.634E-12(7.0)	6.118E-12(2.6)	1.741E-11(1.0)
Marrow	4.908E-13(1.5)	1.905E-12(3.4)	3.806E-12(4.6)	7.700E-12(5.2)	1.911E-11(4.4)
Colon	3.483E-13(8.9)	1.558E-12(4.2)	3.035E-12(4.9)	6.528E-12(2.6)	1.817E-11(0.3)
Lung	5.147E-13(0.4)	2.099E-12(0.9)	3.953E-12(0.6)	7.807E-12(0.5)	2.022E-11(0.7)
Stomach	3.057E-13(1.9)	1.441E-12(2.7)	2.929E-12(3.0)	6.421E-12(2.8)	1.784E-11(1.5)
Bladder	2.775E-13(4.8)	1.337E-12(0.3)	2.770E-12(1.0)	6.069E-12(2.4)	1.665E-11(2.4)
Liver	3.897E-13(2.1)	1.644E-12(2.0)	3.191E-12(2.3)	6.753E-12(1.8)	1.833E-11(1.7)
Oesophagus	4.188E-13(0.4)	1.765E-12(1.4)	3.315E-12(0.2)	7.168E-12(3.0)	1.939E-11(4.2)
Thyroid	1.411E-13(28.1)	1.020E-12(8.4)	2.305E-12(8.0)	5.801E-12(0.9)	1.708E-11(2.6)
Skin	4.006E-13(1.8)	1.876E-12(1.9)	3.661E-12(2.2)	7.647E-12(2.8)	2.042E-11(2.9)
Bone surface	7.930E-13(5.2)	2.032E-12(8.8)	3.724E-12(8.3)	7.565E-12(7.7)	2.079E-11(7.0)
Remainder	4.250E-13(2.0)	1.727E-12(2.0)	3.272E-12(3.2)	6.771E-12(2.8)	1.816E-11(3.7)
Adrenals	6.611E-13 -	2.326E-12 -	4.137E-12 -	8.134E-12 -	2.019E-11 -
Brain	2.953E-13 -	1.467E-12 -	3.048E-12 -	6.712E-12 -	1.890E-11 -
ULI	2.194E-13 -	9.290E-12 -	1.797E-12 -	3.609E-12 -	9.970E-11 -
SI	3.960E-13 -	1.679E-12 -	3.252E-12 -	6.785E-12 -	1.836E-11 -
Kidney	6.470E-13 -	2.354E-12 -	4.239E-12 -	8.179E-12 -	2.055E-11 -
Muscle	4.475E-13 -	1.902E-12 -	3.650E-12 -	7.573E-12 -	2.021E-11 -
Pancrease	4.427E-13 -	1.797E-12 -	3.392E-12 -	7.028E-12 -	2.015E-11 -
Spleen	5.691E-13 -	2.143E-12 -	3.942E-12 -	7.649E-12 -	2.010E-11 -
Thymus	1.861E-13(3.4)	9.960E-12(6.1)	2.105E-12(6.7)	5.197E-12(6.6)	1.631E-11(3.5)
Uterus*	3.859E-13(1.0)	1.682E-12(3.7)	3.161E-12(0.1)	6.841E-12(5.0)	1.684E-11(2.3)

relative error(%)

* Geometry given by MIRD was used.

Table 6. Effect of different approaches in oesophagus dosimetry. The relative errors are deviations from the specific model.

Energy (MeV)	Effective dose conversion coefficient, E/Ka(Sv/Gy)					
	Irradiation mode					
	AP			PA		
	Specific model	Thymus	Pancrease	Specific model	Thymus	Pancrease
0.03	0.364	0.383(5.17) ⁺	0.354(2.58)	0.146	0.138(5.21)	0.143(1.99)
0.06	1.298	1.323(1.86)	1.288(0.79)	0.788	0.762(3.36)	0.792(0.50)
0.08	1.420	1.442(1.55)	1.413(0.48)	0.936	0.908(2.95)	0.939(0.40)
0.1	1.357	1.378(1.55)	1.351(0.45)	0.933	0.905(2.95)	0.940(0.77)
0.15	1.214	1.230(1.28)	1.209(0.46)	0.877	0.852(2.76)	0.881(0.52)
0.2	1.141	1.159(1.55)	1.136(0.45)	0.841	0.820(2.51)	0.846(0.61)
0.3	1.066	1.079(1.21)	1.063(0.30)	0.817	0.799(2.20)	0.821(0.55)
0.4	1.035	1.047(1.08)	1.032(0.31)	0.792	0.775(2.16)	0.797(0.51)
0.5	1.014	1.024(0.97)	1.011(0.27)	0.805	0.789(1.97)	0.809(0.47)
0.6	1.001	1.010(0.93)	0.997(0.31)	0.804	0.789(1.86)	0.808(0.50)
0.8	0.987	0.995(0.87)	0.985(0.20)	0.807	0.792(1.82)	0.810(0.34)
1	0.964	0.972(0.79)	0.964(0.09)	0.820	0.807(1.55)	0.823(0.34)
1.5	0.950	0.958(0.75)	0.949(0.12)	0.833	0.824(1.10)	0.836(0.28)
2	0.951	0.958(0.68)	0.951(0.02)	0.849	0.839(1.21)	0.851(0.21)
3	0.946	0.952(0.66)	0.946(0.06)	0.870	0.861(0.94)	0.873(0.35)
4	0.948	0.953(0.56)	0.949(0.09)	0.882	0.875(0.77)	0.885(0.40)
5	0.946	0.951(0.45)	0.948(0.16)	0.881	0.874(0.72)	0.878(0.29)
6	0.942	0.946(0.42)	0.943(0.15)	0.881	0.875(0.65)	0.885(0.41)
8	0.933	0.937(0.42)	0.934(0.15)	0.871	0.866(0.58)	0.876(0.52)
10	0.937	0.940(0.30)	0.938(0.06)	0.873	0.868(0.50)	0.876(0.43)

+ relative error(%)

Table 7. Effect of deletion of ULI from the remainder.

Energy (MeV)	Effective dose conversion coefficient, E/Ka(Sv/Gy)					
	Irradiation mode					
	AP			PA		
	with ULI	without ULI	relative difference	with ULI	without ULI	relative difference
0.03	0.364	0.365	(0.27) ⁺	0.146	0.147	(0.68)
0.06	1.298	1.301	(0.23)	0.788	0.792	(0.51)
0.08	1.420	1.422	(0.14)	0.936	0.939	(0.32)
0.1	1.357	1.360	(0.22)	0.933	0.936	(0.32)
0.15	1.214	1.217	(0.25)	0.877	0.880	(0.34)
0.2	1.141	1.143	(0.17)	0.841	0.844	(0.36)
0.3	1.066	1.069	(0.18)	0.817	0.820	(0.37)
0.4	1.035	1.038	(0.22)	0.792	0.795	(0.38)
0.5	1.014	1.012	(0.20)	0.805	0.808	(0.37)
0.6	1.001	1.003	(0.19)	0.804	0.807	(0.37)
0.8	0.987	0.989	(0.20)	0.807	0.810	(0.37)
1	0.964	0.967	(0.31)	0.820	0.823	(0.36)
1.5	0.950	0.953	(0.31)	0.833	0.836	(0.36)
2	0.951	0.954	(0.31)	0.849	0.852	(0.35)
3	0.946	0.949	(0.32)	0.870	0.872	(0.23)
4	0.948	0.951	(0.32)	0.882	0.885	(0.34)
5	0.946	0.949	(0.32)	0.881	0.884	(0.34)
6	0.942	0.945	(0.32)	0.881	0.884	(0.34)
8	0.933	0.936	(0.32)	0.871	0.874	(0.34)
10	0.937	0.940	(0.32)	0.873	0.876	(0.34)

+ relative error(%) = $\frac{(E/K_a)_w - (E/K_a)_{wo}}{(E/K_a)_{wo}} \times 100$, where $(E/K_a)_w$ and $(E/K_a)_{wo}$ are the conversion coefficients with ULI and without ULI, respectively.

표 7은 MIRD 팬텀을 이용하여 AP, PA방향의 조사환경에 대해 ICRP 60과 ICRP 69 조직가중값을 적용하여 계산한 공기커마의 유효선량 환산계수 계산결과와 비교를 나타내고 있다. 표5와 같이 AP, PA 방향의 균일한 외부피폭의 경우에는 조직가중치 변화에 따른 유효선량 환산계수 값에는 별 차이가 없음을 알 수 있다. 이러한 이유는 상부대장의 가중치가 0.005로 작기 때문에 가중치 가감에 따른 계산결과에 미치는 영향이 매우 작기 때문이다. 그러나 불균일 또는 국부 방사선 피폭의 경우 유효선량 계산 결과에 상당한 차이가 발생할 수 있으므로 가중값의 영향에 대한 좀더 많은 연구가 필요할 것으로 생각된다.

유효선량 환산계수

그림2와 3은 AP, PA 방향의 조사환경에 대해 ICRP 69의 조직가중치를 사용하여 본 연구에서 계산한 남성 유효선량 환산계수, 남성(ADAM)과 여성(EVE)팬텀 선량값의 산술적인 평균값으로부터 계산된 ICRP/ICRU 연구결과와 남성의 유효선량값에 ICRP/ICRU에서 계산된 유방의 선량을 단순히 더한 결과의 상호비교를 감마선에너지의 함수로 나타내고 있다. 그림2의 저 에너지 영역에서는 ICRP/ICRU 결과와 남성 유효선량 환산계수값이 유사하고 고에너지 영역에서는 ICRP/ICRU 결과와 남성유효선량에 유방의 선량값을 더한 결과가 비슷함을 보여주고 있다. 이와 같은 이유는 생식기관의 위치와 폐의 선량, 남성과 여성 몸통의 크기 차이로 설명될 수 있다. 가중치가 큰 생식기관을 살펴볼 때 남성의 생식기관이 여성 생식기관보다 전방부에 위치하고 있기 때문에 남성 생식기관이 받는 선량값이 감마선 투과력의 차이로 여성 생식기관 선량값보다 대체로 크다. 폐의 경우 유방에 의한 입사 감마선의 차폐로 인하여 남성 폐의 선량값이 여성 폐의 선량값보다 감마선의 에너지에 따라 차이가 있지만 대략 5~20% 정도 크기 때문이다[17].

또한 남성과 여성의 몸통 크기의 차이에 따른 인체의 차폐에 의해 전체적으로 남성 장기들의 선량값이 대체로 작다. 즉, 남성의 경우 유효선량 계산에 유방 선량을 포함하지 못하고 있으나 위의 3가지 이유에 따른 장기들의 상호 선량의 손실과 보상이 이루어졌기

때문에 AP 방향의 경우 여성과 남성의 유효선량값이 근사한 것으로 해석된다. 고에너지 영역은 저 에너지와는 달리 투과력이 상당히 높기 때문에 인체내 장기 위치와 인체의 크기 등에 의한 차폐효과 영향이 줄어들어 유방의 선량값을 포함하는 남성유효선량값이 ICRP/ICRU 결과와 좀더 비슷한 경향을 보여주고 있다. 그림 3의 저 에너지 영역에서는 남성의 유효선량값과 유방의 선량값이 더해진 결과보다 ICRP/ICRU 유효선량 결과가 큰 값을 보인다. 이러한 이유는 AP 방향과는 반대로 남성 팬텀의 몸체가 여성팬텀 경우보다 크기 때문에 입사 감마선에 대한 인체의 차폐효과가 증가하였기 때문이다. 고에너지의 영역은 AP 방향과 유사한 결과를 보여주고 있다.

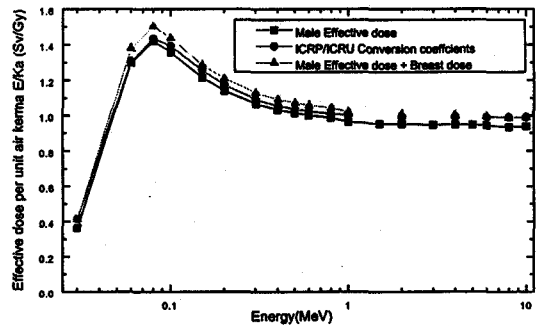


Fig. 2. Effective dose per unit air kerma in free air, E/Ka , in unit of Sv/Gy, for monoenergetic photon with energy up to 10MeV incident in AP on MIRD phantom.

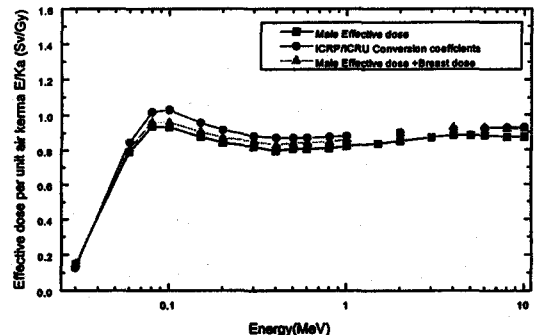


Fig. 3. Effective dose per unit air kerma in free air, E/Ka , in unit of Sv/Gy, for monoenergetic photon with energy up to 10MeV incident in AP on MIRD phantom.

그림 2와 3을 비교할 경우 조사조건에 따른 유효 선량 환산계수 값은 AP방향이 PA방향보다 크다. 이와 같은 이유는 유효선량에 기여하는 장기가 대부분 전방부에 위치하고 있기 때문이다. 그러나 감마선의 에너지가 증가할수록 인체내 투과력이 크기 때문에 이러한 차이가 줄어드는 경향을 알 수 있다. 그림 2와 3의 ICRP/ICRU 연구결과와의 비교를 통해 여성의 유효선량 환산계수 값이 AP와 PA방향에 대해 남성보다 큰 것을 추정할 수 있으며 유효선량 환산계수에 영향을 미치는 인자로는 감마선 에너지, 반응단면적, 인체의 크기, 유효선량에 기여하는 개별장기의 위치 및 가중치, 조사환경 등으로 해석할 수 있다.

결 론

MIRD 팬텀에 AP, PA방향으로 입사하는 0.03-10 MeV 에너지 구간내 20개 단일에너지 감마선에 대한 인체내 주요 장기의 등가선량과 공기커마에 대한 유효선량 환산계수를 몬테칼로 모의실험을 통해 계산하였다. 계산결과에서 발생하는 시스템적 에러를 평가하기 위해 ICRP/ICRU 결과와 비교한 결과 저 에너지 감마선에서 일부 장기를 제외하고 상대적 오차 10% 이내에서 일치하고 있다. 이와 같은 차이를 고려할 때 남성팬텀만을 이용한 AP, PA 방향 조사환경에 대한 유효선량 환산계수의 도출 가능성을 확인할 수 있다. MIRD 팬텀내 모델링이 이루어지지 않은 식도의 경우 가중치가 0.05로 작은 관계로 유효선량 환산계수의 값에는 Zankl이 개발한 식도모델과 대체장기를 이용한 결과에는 큰 차이가 없으나 이들 장기의 등가선량값의 차이를 고려할 때 좀더 정밀한 선량평가를 위해서는 식도에 대한 모델의 개발이나 기존 평가방법의 개선이 필요하다. 조직가중치 변화에 따른 유효선량 계산결과와의 차이는 균일 방사선장에서는 매우 작으나 불균일 방사선장에 대해서는 보다 많은 연구가 필요할 것으로 판단된다. 조사환경에 따른 유효선량 환산계수는 조직가중치가 주어진 장기가 보다 많이 위치하고 있는 AP 방향이 PA 방향보다 크고, 인체에 의한 방사선 차폐로 여성이 남성보다 큰 것을 추정할

수 있다.

본 연구에서 성인남성에 대한 계산만을 수행하였으므로 ICRP에서 정의하고 있는 유효선량 환산계수와의 직접 비교는 적절하지 못하지만 향후 표준 한국인에 적합한 연령별, 성별 팬텀이 마련될 경우 외부피폭의 유효선량 환산계수 산정을 위한 절차를 확립한 데에 의미가 크다. 앞으로 측방조사(LAT), 회전조사(ROT), 등방조사(ISO)와 같은 전형적 조사환경은 물론 실제에서 접할 가능성이 큰 불규칙한 방사선장 등 다양한 피폭 환경과 여성팬텀 소아 팬텀 등 상이한 체격조건인 팬텀에 대한 계산까지 확장되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. W. S. Snyder, M. R. Ford, G. G. Warner, "Estimates of Specific Absorbed Fraction for Photon Sources Uniformly Distributed in Various Organs of a Heterogeneous Phantom," Society of Nuclear Medicine, New York, MIRD Pamphlet No. 5. Revised(1978).
2. Kramer, R.; Zankl, M.; Williams, G.; Drexler, G., *The Calculation of Dose from External Photon Exposures Using Reference Human Phantoms and Monte Carlo Methods. Part I: The Male(Adam) and Female(Eve) Adult Mathematical Phantoms.* Neuherberg: Gesellschaft fur Strahlen- und Umweltforschung; GSF-Bericht S-885; (1982).
3. Yamaguchi, Y., *DEEP Code to Calculate Dose Equivalent in Human Phantom for External Photon Exposure by Monte Carlo Method.* Report No. JAERI-M 90-235(Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Ibaraki-Ken, Japan), (1991).
4. International Commission on Radiological Protection, "1990 Recommendation of the International Commission on Radiological Protection,"

- ICRP Publication 60, Pergamon Press, (1990).
5. International Commission on Radiological Protection, "Recommendation of the International Commission on Radiological Protection," ICRP Publication 26, Pergamon Press, (1977).
 6. M. Cristy, "Mathematical Phantoms for Use in Reassessment of Radiation Dose to Japanese Atomic-Bomb Survivors," Oak Ridge National Laboratory Report ORNL/TM-9487, (1985).
 7. International Commission on Radiological Protection, "Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 3 Ingestion Dose Coefficients," ICRP Publication 69, Pergamon Press, (1994).
 8. LANL Group X-6, MCNP-A General Monte Carlo Code N-Particle Transport Code Version 4A, LA-12625-M, (1993).
 9. A Draft Prepared by the Joint Task Group of the ICRP and the ICRU for discussion at a the Meeting of the Commissions in Remscheid-Lennep and Wurzburg, "Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection Against External Radiation," (1995).
 10. Hollnagel, R. A., "Conversion Functions of Effective Dose, E, and Effective Dose Equivalent, HE for Neutrons with Energies from Thermal to 20 Mev," *Radiat. Prot. Dosim.* Vol 54, pp 209-212, (1994).
 11. F. W. Schultz and J. Zoetelief, "Organ and Effective Doses in the Male Phantom Adam Exposed in AP Direction to Broad Unidirectional Beams Monoenergetic Electrons," *Health Phys.*, 70, 498-504 (1996).
 12. M. Zankl, N. Petoussi, and G. Drexler, "Effective Dose and Effective Dose Equivalent-The Impact of the New ICRP Definition for External Photon Irradiation," *Health Phys.*, 62(5), 395-399 (1992).
 13. J. H. Hubbell, W. J. Veigele, E. A. Briggs, R. T. Brown, D. T. Cromer and R. J. Howerton, "Atomic Form Factors, Incoherent Scattering Functions, and Photon Scattering Cross Sections," *J. Phys. Chem., Ref. Data* 4, 471 (1975).
 14. Roussin, R. W., Knight, J. R., Hubbell, J. H., Howerton, R., J., *Description of the DLC-99/HUGO Package of Photon Interaction Data in ENDF/B-V Format*, Report No. ORNL-RSIC-46(ENDF-335). (Radiation Shielding Information Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN). (1983).
 15. X. G. Xu and W. D. Reece, "Sex-Specific Weighting Factors for Effective Dose Equivalent Calculations," *Health Phys.*, 70, 81-86 (1996).
 16. C. Austerlitz, B. Kahn, G. G. Eichholz, M. Zankl and G. Drexler, "Calculation of the Effective Male Dose Equivalent Relative to the Personal Dose at Nine Locations with a Free-Arm Model," *Radiat. Prot. Dosim.* Vol 36, No.1 pp 13-21, (1991).
 17. M. Zankl and G. Drexler, "An Analysis of the Equivalent dose Calculation for the Remainder Tissues," *Health Phys.*, 69(3), 346-355 (1995).