

Construction of MIRD-type Korean Adult Male Phantom and Calculation of Dose Conversion Coefficients for Photon

Sanghyun Park · Choonsik Lee* and Jaiki Lee

Hanyang University, *Innovative Technology Center for Radiation Safety

한국 성인남성 MIRD형 모의피폭체 제작 및 광자 외부피폭 선량환산인자 산출

박상현 · 이춘식* · 이재기

한양대학교 원자력공학과, 방사선안전 신기술 연구센터*

(2003년 8월 18일 접수, 2004년 5월 21일 채택)

Abstract - MIRD-type Korean adult male phantom, "KMIRD" was constructed to calculate Korean-specific dosimetric quantities for radiation protection consideration. The external shape of KMIRD was based on national physical standard data of Korean. KMIRD has thicker trunk than MIRD5 and arm models divided from trunk. The height and weight of the KMIRD are 171 cm and 63.8 kg. ICRP23 data were referred to constitute organs and tissues of KMIRD. However nine organs were constructed based on Korean reference data provided by Radiation Health Research Institute. In the present study, the MCNPX2.3 Monte Carlo transport code was combined with KMIRD to calculate dose conversion coefficients for photon in the energy range from 0.05 to 10 MeV. The simulated irradiation geometries are broad parallel photon beams in AP, PA, LLAT and RLAT direction. Absorbed dose conversion coefficients were compared with data calculated with MIRD5, MIRD-type phantom based on ICRP23 reference man. In some organs, the discrepancies between two phantoms amount up to nearly 30%. The effective doses conversion coefficients of KMIRD are lower than those of MIRD5. The dose discrepancies between two MIRD-type phantoms are because of physical differences between Korean and Western, also geometric differences between two phantoms. KMIRD should be revised using the full set of Korean reference data of all organs. The developed MIRD-type Korean adult male phantom can be applied to dose assessment of internal exposure.

Key words : radiation protection, Monte Carlo transport, MIRD-type phantom, dose conversion coefficient

요약 - 한국인 고유의 방사선 방호량을 산출하기 위한 목적으로 MIRD형 한국 성인남성 모의피폭체 'KMIRD'를 제작하였다. 모의피폭체의 외형은 국민표준체위조사에서 제공하는 데이터를 사용하여 제작하였다. 제작된 KMIRD는 MIRD5보다 몸통 두께가 더 두껍고, 팔이 첨가되었다. 보건연구원에서 제공하는 9개 장기의 한국표준 자료와 ICRP23의 자료를 사용하여 모의피폭체의 내부 장기를 모사하였다. KMIRD의 신장은 171 cm, 체중은 63.8 kg이다. 제작된 KMIRD와 몬테칼로 입자 수송 코드인 MCNPX2.3을 이용하여 0.05와 10 MeV 사이의 7개 에너지 영역에 대해서 광자의 선량환산인자를 산출하였다. 피폭 환경은 AP, PA, LLAT, RLAT 4가지 방향에서 입사하는 평행하고 넓은 광자 방사선장으로 모사하였다. ICRP23 표준인 자료를 기초로 제작된 MIRD5 모의피폭체를 사용하여, 비교 계산을 수행하였다. 장기별 흡수선량환산계수를 비교한 결과 30% 이상의 차이를 보이는 장기도 있었다. 유효선량 환산계수를 비교한 결과, 모든 입사 방향에서 KMIRD가 MIRD5보다 낮은 값을 보였다. 한국인과 서구인간의 체격적인 차이와, 모의피

폭체간의 기하학적 구조의 차이가 선량 편차의 주요 원인이다. 모든 장기에 대한 한국 표준자료를 확보하여 개선된 한국인 MIRD형 모의피폭체를 제작해야한다. KMIRD를 사용하여 내부피폭 선량평가를 수행할 수 있다.

중심어 : 방사선 방호, 몬테칼로 입자 수송, MIRD형 모의피폭체, 선량환산인자

서 론

방사선에 피폭된 인체의 위해도를 평가하기 위해 정의된 등가선량(equivalent dose) 및 유효선량(effective dose)은 인체의 해부학적인 복잡성과 인체 조직의 불균일성으로 인해 실측이 불가능하다. 국제 방사선 방호 위원회(ICRP; International Commission on Radiological Protection)는 실측이 가능한 플루언스(flucence), 커마(kerma)등의 값으로부터, 등가선량 및 유효선량을 구하기 위해 선량환산인자(Dose Conversion Coefficient)를 제시하였다[1]. 선량환산인자를 산출하기 위해서는 수학적 모의피폭체(Mathematical phantom) 혹은 MIRD형 모의피폭체(MIRD-type phantom)라 불리는 인형 모의피폭체(Anthropomorphic phantom)와 몬테칼로(Monte Carlo) 기법이 사용된다. MIRD형 모의피폭체는 원뿔, 평면, 타원체, 원통과 같은 2차 대수방정식을 이용하여 인체의 외형과 내부 장기 및 조직을 표현한다.

Snyder등은 MIRD5라 불리는 MIRD형 성인 남성 모의피폭체를 최초로 제작하였고, Cristy, Eckerman등의 연구자들은 신생아부터 성인에 이르는 연령별 모의피폭체를 개발하여, 선량 계산에 사용해왔다[2, 3]. 기존의 MIRD형 모의피폭체들은 ICRP23[4]에서 제시하고 있는 북미와 서유럽인의 표준인 자료를 근거로 제작되었다. 국민소득이 증가하고 영양상태가 개선됨에 따라 대한민국 국민의 체형과 체위가 서구인에 근접하는 경향이 있지만 아직은 서구인과 약간의 차이가 있다. 본 연구에서는, 대한민국 국민을 모델로 한 모의피폭체를 구성하여 방호량을 산출하여 서구인을 기준으로 한 결과와 비교, 평가하고자 하였다. 이를 위하여, MIRD형 한국 성인남성 모의피폭체 KMIRD를 제작하였고, 감마선에 의한 외부피폭 선량환산인자를 산출하였다. 또한 계산된 결과를, MIRD5를 사용하여 산출한 결과와 비교 평가하였다.

재료 및 방법

MIRD형 모의피폭체

MIRD형 한국 성인남성 모의피폭체 KMIRD의 외형은 한국기술표준원에서 1997년 시행한 국민 표준체위조사의 자료를 참조하여 제작하였다[5]. 제작된 KMIRD의 외형은 신장 171 cm, 몸통의 넓이와 두께는 각각 32.6 cm, 22 cm 이다. KMIRD의 내부 장기 중, 9개는 방사선보건연구원에서 제공하는 한국 표준 장기부피자료와 일치하도록 제작하였다. 이 데이터는 대한민국 성인 남녀 중 신장 및 체중이 평균값에 해당하는 건강한 자원자들의 자기공명영상 이미지(MR image)를 분석하여 산출한 것이다[6]. 표1에 방사선 보건연구원에서 제공한 자료를 사용하여 제작된 9개의 장기에 대하여 KMIRD와, MIRD5의 장기 질량을 비교하여 나타내었다. KMIRD를 구성하는 나머지 장기들은 서구 표준인 자료인 ICRP23 보고서에서 제공하는 자료를 참조하여 제작하였고, MIRD5는 ICRP23의 자료를 기초로 제작되었기 때문에, 나머지 장기들의 질량은 서로 동일하다.

MIRD형 모의피폭체는 각각의 장기가 서로 겹치지 않도록 제작한다. 그 이유는 컴퓨터를 이용한 몬테칼로 계산을 수행할 때, 겹치는 부분이 있으면 컴퓨터가 오류로 인식하여 계산을 멈추기 때문이다. 그런데 신장 174.5 cm, 체중 70 kg으로 상대적으로 한국인보다 체격이 큰 ICRP23의 표준인 자료를 KMIRD에 적용할 경우, 장기가 겹치는 오류가 발생할 가능성이 높다. 실제로 KMIRD 제작 과정에서, 골격계와 폐의 경우는 인체에서 차지하는 부피가 크기 때문에 다른 내부 장기들과 겹치는 오류가 발생하였다. ICRP23의 표준인 자료를 기초로 제작된 MIRD형 모의피폭체의 다리뼈와 척추의 길이를 축소하여 KMIRD의 골격계에 적용하였다. KMIRD의 폐는 몸통의 넓이와 폭, 그리고 폐 안에 위치하는 심장의 크기를 고려하여 제작하였다. KMIRD의 폐와 뼈의 질량은 각각 886.2 g, 8212 g 이며, MIRD5의 폐와 뼈는 각각 999 g, 10091 g의 질량을 갖는다.

KMIRD는 기존의 MIRD형 모의피폭체와 동일하게 연조직, 폐 그리고 뼈 혼합물의 세 가지 물질로 구성되어 있으며, 밀도는 각각 $1.04 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, $0.296 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, $1.4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 이다. MIRD형 모의피폭체는 골격내의 골수를 모사할 수 없기 때문에, 뼈

와 골수를 뼈 혼합물로 모사한다. 또한 뼈와 폐를 제외한 모든 인체 장기 및 조직, 근육과 피부는 모두 연조직으로 모사하였다. 이와 같은 과정을 거쳐 제작된 KMIRD의 체중은 63.8 kg이다. 그림 1은 KMIRD의 외형과 골격계를 나타낸다.

Table 1. Comparison of organ or tissue masses between KMIRD and MIRD5 [g].

Organs	KMIRD	MIRD5
Bladder	233.8	509
Heart	647.3	603
Kidneys	325	288
Liver	1466.4	1833
Pancreas	56.5	61
Spleen	203.8	176
Stomach	402.6	402
Testes	31.2	38
Thyroid	19.7	19.9

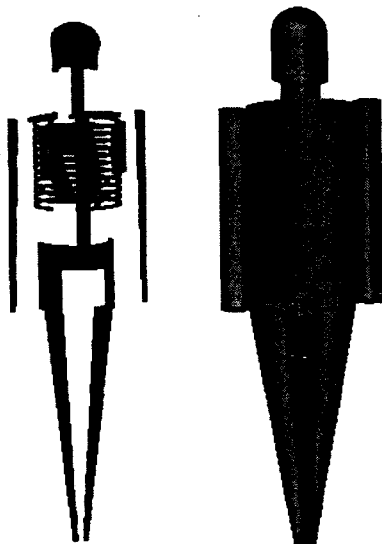


Fig. 1. Skeleton and external shape of KMIRD(rendered by Sabrina[7]).

몬테칼로 계산

선량 평가를 위해 넓고 평행한 표준 광자 방사 선장을 모사하였고, 0.05, 0.1, 0.4, 0.8, 2, 8, 10 MeV의 에너지 영역에 대해서 계산을 수행하였다 [8]. 각 에너지에 대하여 AP(Anterior-posterior), PA(Posterior-anterior), LLAT(Left-lateral), RLAT(Right-lateral) 방향에서 조사하는 환경을 모사하였고, 외부피폭에 의한 선량환산인자를 장기별로

산출하였다.

선량을 평가하기 위해서 일반목적 몬테칼로 코드인 MCNPX2.3을 사용하였다[9]. 선량 평가자로는 광자와 전자에 의해 축적되는 에너지를 모두 계산하는 *F6 tally를 사용하였다. 광자에 의해 발생하는 2차 전자들에 대해서는 커마 근사를 적용하여 몬테칼로 계산의 복잡성을 해결하였다[1]. 커마 근사는 2차 입자 평형(secondary particle equilibrium)이 유지될 때 적용가능하다. 몸통 내에 존재하는 폐, 뼈, 연조직 각각에 대한 광자의 반응단면적의 변화는 크지 않기 때문에 모의피폭체 몸통 내부의 모든 지점에서 2차 입자 평형이 유지되며, 따라서 커마 근사를 적용할 수 있다. 그러나 피부와 같은 표면 조직에 대해서는 1 MeV 이하의 에너지에 대해서만 커마근사를 적용할 수 있다[10]. 본 연구에서는 1 MeV 이상의 에너지에서 계산한 피부의 선량도 제시하였다. 통계적 오차를 3% 이내로 낮추기 위해서 5×10^6 개의 히스토리를 사용하였다. 1.7GHz Pentium 4 CPU와 1024MB RAM을 탑재한 퍼스널 컴퓨터를 이용하여 계산하였고, 2분 이내의 계산 시간이 소요되었다. MIRD5 모의피폭체를 동일한 피폭환경에서 조사되도록 모사하여 선량 계산을 수행하였고, KMIRD를 이용하여 계산된 값들과 비교하였다. KMIRD와 MIRD5는 성인남성 모델이기 때문에, 자궁 및 난소와 같이 여성 고유의 장기는 포함하지 않으며, 가슴 역시 남성의 경우 부피가 작기 때문에 모사하지 않았다. 따라서 본 연구에서 계산한 유효선량은 ICRP60[11]에서 제시한 자궁과 난소 그리고 가슴의 선량을 포함한 유효선량과는 차이가 있다[12].

결과 및 논의

그림 2와 3은 KMIRD와 MIRD5를 이용하여 계산한 주요 장기의 외부피폭 선량환산인자를 비교하여 나타내었다. 전반적으로 KMIRD가 MIRD5보다 낮은 값을 보이고 있다. 광자가 후방에서 입사할 때, 갑상선의 선량이 큰 차이를 보이고 있다. 이는 후방에서 입사하는 방사선에 대하여, KMIRD의 갑상선 위치가 MIRD5보다 2배 이상 얇기 때문이다. 그림 4에 갑상선의 위치를 비교하여 나타내었다. 방광은 전후방향에서 입사하는 광자에 대하여 KMIRD와 MIRD5가 비슷한 값을 갖지만, 측 방향에서 입사할 때, KMIRD가 더 높은 선량을 받는다. 측 방향 조사시, 방광의 위치

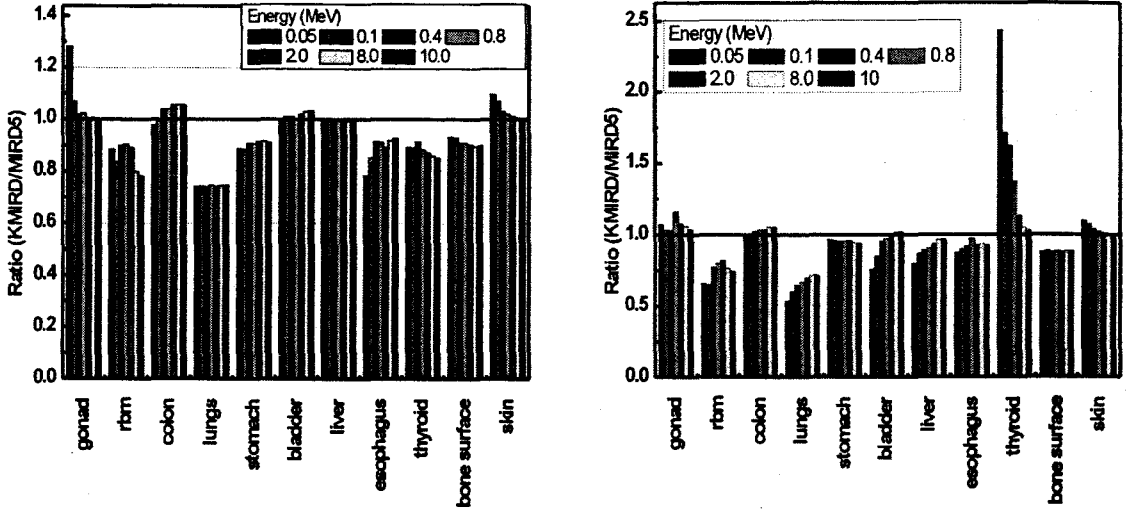


Fig. 2. Conversion coefficient ratio KMIRD/MIRD5 for AP(left) and PA(right) direction.

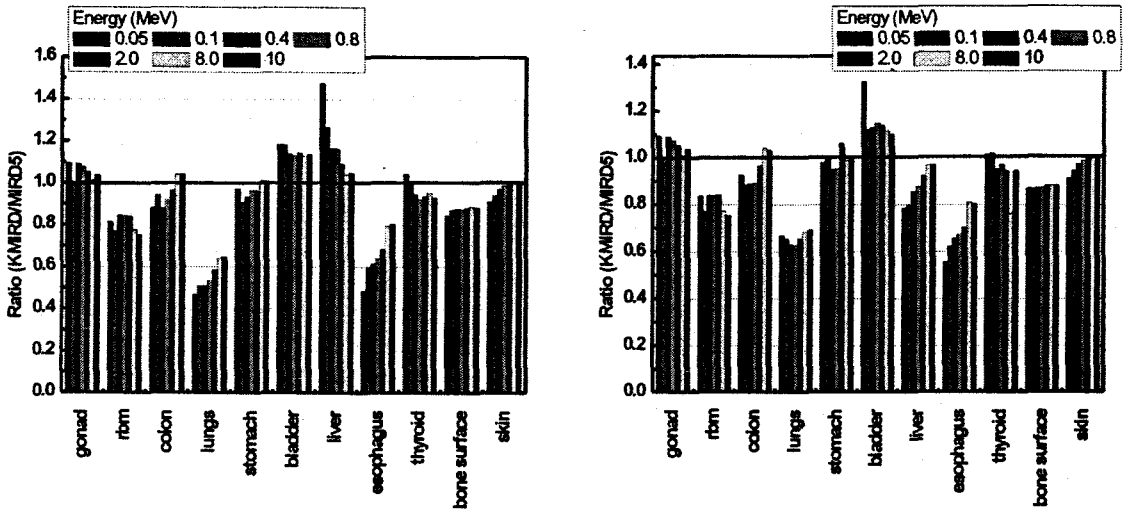


Fig. 3. Conversion coefficient ratio KMIRD/MIRD5 for LLAT(right) RLAT(left) direction.

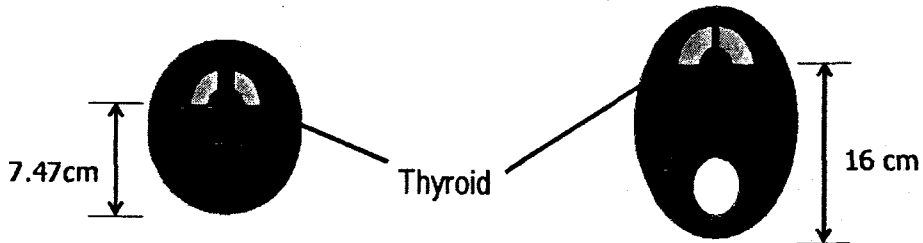


Fig. 4. Sectional image of thyroid (left: KMIRD, right: MIRD5).

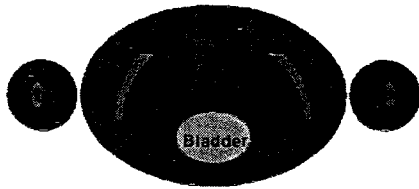


Fig. 5. Sectional image of bladder.

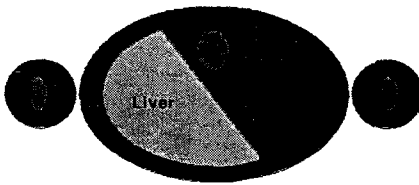


Fig. 6. Sectional image of liver.

가 팔의 차폐 범위를 벗어나기 때문에, MIRD5에 비해서 몸통에 의한 자체 차폐효과가 감소된다는 것을 알 수 있다. 간은 우측에서 입사하는 광자에 대해서만 KMIRD가 높은 선량을 받는 것으로 나타나는데, 이는 간의 위치가 우측에 치우쳐 있으며, 간의 부피가 커서 팔의 차폐 범위를 벗어나는 영역이 넓기 때문이다. 그림 5와 6은 KMIRD의 방광과 간의 단면을 보여준다. KMIRD의 폐는

MIRD5에 비해서 모든 방향에서 30% 가량 적은 값을 보인다. 전술한 바와 같이, KMIRD의 폐를 모사할 때, 몬테칼로 계산의 오류를 피하기 위하여 부피를 축소하였고, MIRD5의 폐보다 330 cm³ 작다. 계산 결과에서 보여주는 폐 선량의 차이는 제작과정에 의해서 발생한 것이다. 따라서 향후 한국 표준데이터를 확보하여 개선할 필요가 있다.

그림 7에 KMIRD와 MIRD5를 사용하여 산출한 유효선량 환산인자를 비교하여 나타내었다. KMIRD가 MIRD5보다 낮은 유효선량을 받은 것을 알 수 있다. KMIRD는 서구인에 비해 체구가

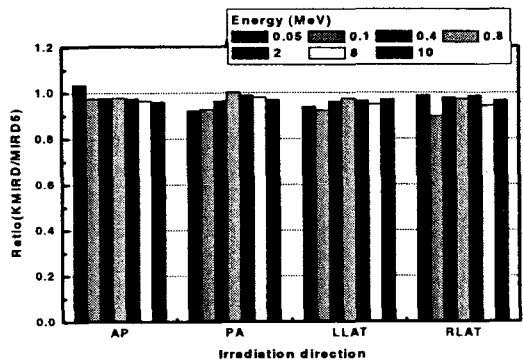


Fig. 7. Comparison of effective doses between KMIRD and MIRD5.

Table 2. Absorbed dose per unit air kerma free-in-air, D_T/K_a , in AP direction ($Gy \cdot Gy^{-1}$).

Organ	Energy(MeV)							
	0.05	0.1	0.4	0.8	2	8	10	
Testes	1.7777	1.8535	1.3492	1.2446	1.1691	1.0934	1.0907	
RBM*	0.3314	0.6298	0.7644	0.7850	0.8192	0.8067	0.8021	
Colon	0.9168	1.3219	1.0046	0.9593	0.9592	0.9415	0.9441	
Lungs	0.9549	1.2399	1.0170	1.0017	1.0080	0.9963	1.0015	
Stomach	1.1706	1.4630	1.0906	1.0182	0.9958	0.9637	0.9628	
Bladder	1.2360	1.5670	1.1301	1.0340	1.0273	0.9930	0.9925	
Liver	1.0402	1.3602	1.0313	0.9756	0.9661	0.9550	0.9581	
Esophagus	0.4043	0.7959	0.7366	0.7440	0.7942	0.8502	0.8544	
Thyroid	1.4454	1.5605	1.2146	1.1038	1.0246	0.9506	0.9501	
Bone surface	1.9565	1.6931	0.8769	0.8511	0.8715	0.9268	0.9451	
Skin	0.9576	1.1233	0.9906	0.9780	0.9912	0.9829	0.9859	
Effective dose**	1.0277	1.2696	0.9982	0.9508	0.9373	0.9114	0.9118	

RBM* : Red bone marrow

** The unit of effective dose per unit air kerma free-in-air, E/K_a : $Sv \cdot Gy^{-1}$

작은 한국인을 대표하는 모델이지만, 몸통 두께와 첨가된 팔로 인하여 외부에서 입사하는 광자에 대한 차폐 효과는 오히려 증가하였다. 그러나 일부 장기에서는 KMIRD가 MIRD5보다 높은 선량을 받은 경우도 있어 두 모의피폭체간의 유효선량의 차이는 10%를 벗어나지 않는다.

표 2부터 5에 KMIRD를 이용하여 산출한 주요 장기의 외부피폭 흡수선량환산인자와 유효선량환산인자를 AP, PA, LLAT, RLAT의 방향에 대해서 나타내었다.

결 론

MIRD형 한국 성인남성 모의피폭체 KMIRD를

제작하고, 광자에 의한 외부피폭 선량환산인자를 산출하였다. 보건연구원에서 제공하는 9개 장기의 한국표준 자료와 ICRP23의 자료를 사용하여 모의피폭체의 내부 장기를 구성하고, 국민표준체위 조사에서 제공하는 자료를 바탕으로 외형을 제작하였다. 산출한 선량환산인자를 MIRD5를 이용하여 계산한 결과와 비교하였고, 장기별 선량편차의 원인을 분석하였다. 한국인과 서양인의 체격 차이와, 모의피폭체간의 기하학적 차이가 선량편차의 주요 원인이다. 모든 장기에 대한 한국 표준자료를 확보하여 한국인 MIRD형 모의피폭체를 개선해야한다. 향후 KMIRD를 이용하여 AF 및 SAF 산출하여 내부피폭에 의한 선량을 평가하고, 해외 자료와 비교 분석하는 연구를 수행할 수 있을 것으로 예상된다.

Table 3. Absorbed dose per unit air kerma free-in-air, $D_T/K_{a,}$ in PA direction ($Gy \cdot Gy^{-1}$).

Organ	Energy(MeV)						
	0.05	0.1	0.4	0.8	2	8	10
Testes	0.3491	0.7197	0.7420	0.8683	0.9180	0.9760	0.9711
RBM	0.4208	0.7736	0.8637	0.8575	0.8689	0.8347	0.8281
Colon	0.5087	0.9414	0.8086	0.8123	0.8503	0.8843	0.8874
Lungs	0.9642	1.2905	1.0681	1.0342	1.0277	1.0085	1.0121
Stomach	0.4575	0.7907	0.7145	0.7486	0.8318	0.8595	0.8642
Bladder	0.2936	0.6364	0.6300	0.6715	0.7626	0.8336	0.8357
Liver	0.5644	0.9117	0.7768	0.7932	0.8392	0.8794	0.8828
Esophagus	0.4928	1.0196	0.8577	0.8433	0.8829	0.8942	0.8982
Thyroid	0.4116	0.6592	0.7421	0.8324	0.8311	0.8733	0.8635
Bone surface	2.5033	2.0455	0.9867	0.9287	0.9245	0.9597	0.9767
Skin	0.9526	1.1234	0.9955	0.9822	0.9927	0.9833	0.9866
Effective dose	0.5071	0.8420	0.7734	0.8036	0.8384	0.8603	0.8602

Table 4. Absorbed dose per unit air kerma free-in-air, $D_T/K_{a,}$ in LLAT direction ($Gy \cdot Gy^{-1}$).

Organ	Energy(MeV)						
	0.05	0.1	0.4	0.8	2	8	10
Testes	0.2510	0.4610	0.5978	0.7136	0.7867	0.8698	0.8727
RBM	0.2301	0.4467	0.5750	0.6173	0.6953	0.7321	0.7307
Colon	0.2230	0.4564	0.4172	0.4892	0.6073	0.7502	0.7658
Lungs	0.3113	0.5131	0.4974	0.5560	0.6736	0.7948	0.8066
Stomach	0.6216	0.8622	0.7368	0.7717	0.8286	0.8980	0.9022
Bladder	0.2816	0.5163	0.5389	0.6276	0.7223	0.8505	0.8633
Liver	0.1032	0.2309	0.2997	0.3853	0.5290	0.6963	0.7085
Esophagus	0.1930	0.4465	0.4683	0.5687	0.6289	0.7644	0.7876
Thyroid	1.0823	1.3321	1.2246	1.1723	1.1767	1.1274	1.1287
Bone surface	1.3623	1.1672	0.6544	0.6683	0.7398	0.8403	0.8602
Skin	0.6548	0.8109	0.8076	0.8391	0.8927	0.9255	0.9308
Effective dose	0.3355	0.5387	0.5543	0.6165	0.6964	0.7822	0.7894

Table 5. Absorbed dose per unit air kerma free-in-air, D_T/K_a , in RLAT direction ($Gy \cdot Gy^{-1}$).

Organ	Energy(MeV)						
	0.05	0.1	0.4	0.8	2	8	10
Testes	0.3008	0.4101	0.6219	0.7156	0.8272	0.8604	0.8738
RBM	0.2352	0.4508	0.5758	0.6153	0.6922	0.7309	0.7300
Colon	0.2271	0.4035	0.4020	0.4552	0.5861	0.7352	0.7453
Lungs	0.3661	0.5579	0.5361	0.5901	0.7043	0.8155	0.8267
Stomach	0.0591	0.1776	0.2444	0.3213	0.4941	0.6692	0.6789
Bladder	0.2921	0.4948	0.5374	0.6200	0.7451	0.8374	0.8577
Liver	0.5348	0.8011	0.7035	0.7370	0.8157	0.8891	0.8931
Esophagus	0.2026	0.4448	0.4860	0.5443	0.6569	0.7789	0.7925
Thyroid	1.0808	1.3025	1.1766	1.1667	1.1633	1.1168	1.1136
Bone surface	1.3966	1.1693	0.6560	0.6665	0.7366	0.8390	0.8595
Skin	0.6556	0.8129	0.8076	0.8398	0.8938	0.9253	0.9309
Effective dose	0.3062	0.4684	0.5192	0.5760	0.6792	0.7615	0.7700

감사의 글

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

참고문헌

1. International Commission on Radiological Protection, *1996 Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation*, ICRP Publication 74, Pergamon Press (1996)
2. W.S. Snyder, M.R. Ford, G.G. Warner, "Estimates of absorbed fractions for monoenergetic photon sources uniformly distributed in various organs of a heterogeneous phantom", Medical Internal Radiation Dose Committee(MIRD) Pamphlet No. 5. *J. Nucl. Med.* 10 (Suppl.3)(1969)
3. M Cristy, KF Eckerman, Specific absorbed fractions of energy at various age from internal photon sources I, Methods. Report No. ORNL/TM-8381/VI, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn. (1987)
4. International Commission on Radiological Protection, "Report of the Task Group on

Reference man", ICRP Publication 23, Pergamon Press(1975)

5. <http://www.ats.go.kr/kor-docs/stdbody/stdbody.htm>
6. Jin Lee, Yeun Ju Lee, Young-khi Lim, Eun Sil Kim, Eung Jo Kim, Jae Ki Lee, "Study on Structure of Target Organs in Radiation Protection" 2001년 방사선방어학회 추계학술 발표회 논문집, 120-122, 2001. 11.1-2, 경주 교육문화회관(2001)
7. K. A. Van Riper, SABRINA User's Guide, LA-UR-93-3696, LANL(1993)
8. Choonsik Lee, Sanghyun Park, Jaiki Lee, "Modification of Trunk Thickness of MIRDo phantom Based on the Comparison of Organ Doses with Voxel Phantom", *J. Korea Asso. Radiat. Prot.*, 28, 199-206 (2003)
9. Laurie S. Waters, Editor, "MCNPX user's manual, version 2.3.0," Los Alamos National Laboratory, LA-UR-02-2607(2000)
10. U Fill, M Zankl, N Petoussi-Henss, M Siebert and D Regulla, "Adult female voxel models of different stature and photon conversion coefficients for radiation protection", *Health Phys.*, 86, 253-272(2004)
11. International Commission on Radiological Protection, *1990 Recommendations of the*

- International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 60, Pergamon Press(1990)
12. 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)