

# Assessment of Effective Dose from Diagnostic X-ray Examinations of Adult

Woo-ran Kim · Choon-sik Lee · Jai-ki Lee

Department of Nuclear Engineering, Hanyang University

## 진단X선에 의한 성인의 진단행위별 유효선량평가

김우란 · 이춘식 · 이재기

한양대학교 원자력공학과

(2001년 12월 14일 접수, 2002년 9월 19일 채택)

**Abstract** - Methodology to evaluate the effective doses to adults undergoing various diagnostic x-ray examinations were established by Monte Carlo simulation of the x-ray examinations. Anthropomorphic mathematical phantoms, the MIRD5 male phantom and the ORNL female phantom, were used as the target body and x-ray spectra were produced by the x-ray spectrum generation code SPEC78. The computational procedure was validated by comparing the resulting doses to the results of NRPB studies for the same diagnostic procedures. The effective doses as well as the organ doses due to chest, abdomen, head and spine examinations were calculated for x-rays incident from AP, PA, LLAT and RLAT directions. For instance, the effective doses from the most common procedures, chest PA and abdomen AP, were 0.029 mSv and 0.44 mSv, respectively. The fact that the effective dose from PA chest x-ray is far lower than the traditional value of 0.3 mSv(or 30 mrem), which results partly from the advances of technology in diagnostic radiology and partly from the differences in the dose concept employed, emphasizes necessities of intensive assessment of the patient doses in wide ranges of medical exposures. The methodology and tools established in this study can easily be applied to dose assessments for other radiology procedures: dose from CT examinations, dose to the fetus due to examinations of pregnant women, dose from pediatric radiology.

**Key words:** diagnostic x-ray, effective dose, organ doses, Monte Carlo simulations, mathematical phantom

**요약** - 몬테칼로 모사를 통해 여러 가지 진단X선 검사를 받는 성인의 유효선량을 평가하는 방법체계를 구축하였다. 피사체 인형팬텀으로서 MIRD5 남성 팬텀과 ORNL 여성팬텀이 이용되었고 사용 X선 스펙트럼은 SPEC78 코드로 생산하였다. 같은 진단절차에 대해 NRPB 평가결과와 비교함으로써 계산체계를 검증하였다. 계산체계를 이용하여 흉곽, 복부, 두부 및 척추의 진단에서 AP, PA, LLAT 및 RLAT 방향으로 입사하는 X선에 대한 장기 등가선량과 유효선량을 평가하였으며, 가장 보편적인 흉곽 PA와 복부 AP의 경우 유효선량이 각각 0.029 mSv와 0.44 mSv로 나타났다. 흉곽 PA 1회 촬영 시 피폭하는 선량이 전통적 평가치인 0.3 mSv(또는 30 mrem)보다 매우 작게 나타나는 것은 진단방사선 기술의 발전뿐만 아니라 적용하는 선량개념의 차이에 기인하는 것으로서 여러 방사선 의료절차에 대한 집중적인 환자선량 평가의 필요성을 강조하는 것이다. 여기서 개발된 선량평가 체계는 CT 선량, 임부의 진단으로 인한 태아의 선량, 소아과 X선에 의한 선량 등 다른 방사선 의료절차에도 용이하게 응용될 수 있다.

**중심어:** 진단X선, 장기선량, 유효선량, 몬테칼로 모사, 수학적 인형팬텀

서론

재료 및 방법

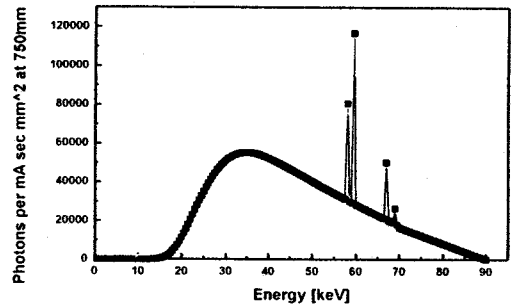
국제방사선방호위원회(ICRP)[1]는 방사선 방호 체계를 적용함에 직업상피폭, 공중의 피폭, 그리고, 의료상 피폭으로 구분하고, 직업상피폭과 공중의 피폭에 대해서 개인선량한도를 설정하여 피폭관리를 수행할 것을 권고하고 있지만, 의료상피폭은 행위가 정당화된다면 선량한도를 적용하는 것이 종종 환자의 이로움을 제한하는 요소로 작용할 가능성을 배제할 수 없으므로 부적절한 것으로 판단해 왔다. 이러한 이유로 진단 목적으로 사용되는 저선량의 진단X선 노출로 인한 리스크는 사실상 간과되어 온 것이 현실이다. 그러나 평균적 개인이 피폭하는 방사선의 큰 부분을 차지하는 것이 의료상 피폭이고 의료상 피폭도 방호 최적화의 대상이므로 점차 의료상 피폭에 대한 관심이 증대되고 있다. 특히 동일한 진단 목적을 달성하는 데에 의료 기관별 환자의 개인선량 분포의 편차가 크다는 사실이 보고됨에 따라 의료 방사선 절차에 대한 표준화도 추진되고 있다[2]. 사회가 선진화될수록 의료방사선 특히 진단방사선의 사용빈도가 증가하는 만큼 의료상 피폭에 대한 정량적인 평가 필요성도 증대되고 있다.

진단 X선에 의한 피폭은 광자의 외부피폭이지만 한정적 부위가 노출되는 좁은 빔이기 때문에 넓은 빔에 대한 일반적 선량환산계수를 적용할 수 없으며 각각의 진단 절차에 사용되는 프로토콜에 맞게 개별 선량계측이 필요하다. 특히 낮은 선량에서 리스크 평가의 지표인 유효선량을 평가하기 위해서는 빔에 노출되는 조직뿐만 아니라 산란선에 의한 인근 조직의 등가선량까지 평가되어야 한다.

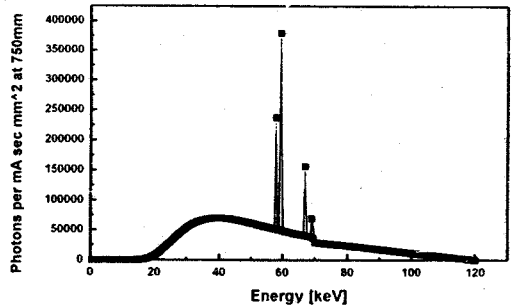
인체의 외형과 내부장기를 근사적으로 모사하는 MIRD형 인형 팬텀[3]과 3차원 공간엿 방사선 수송을 정밀하게 계산하는 몬테칼로 기법이 이러한 좁은 빔의 선량평가를 가능하게 만들었다. 영국 방사선방호원(NRPB)은 전형적인 진단X선 절차에 대해 환자의 장기 등가선량 및 유효선량을 평가하는 계수를 도출한 바 있다[4]. 그러나 구체적인 선량은 진단에 사용되는 X선 장치와 촬영절차에 따라 달라질 수 있으므로 진단X선에 의한 장기 등가선량 계측체계를 수립하는 것이 필요하다. 여기서는 NRPB 연구를 참조하여 우리나라에서 진단X선 촬영 시 환자 선량 평가체계를 구축하였으며 이를 이용하여 빈도가 높은 진단X선 절차에서 환자의 장기 등가선량 및 유효선량을 평가하였다.

X선 스펙트럼

촬영에서 환자의 신체에 입사되는 X선 선원항은 IPEM(Institute of Physics and Engineering in Medicine)에서 개발한 SPEC78[5] 코드로 산출하였다. SPEC78 프로그램은 30~150 kVp 구간의 관전압과 6~22 °를 가지는 텅스텐 표적의 스펙트럼을 0.5 keV 간격의 에너지별로 75cm 거리에서 단위면적 당, mAs 당 광자 수를 제공하며, 부가 필터의 감쇠효과를 고려하여 그림1에 예시한 것과 같은 스펙트럼을 생성한다. 표1은 SPEC78에서 제공되는 스펙트럼의 평균에너지와 75cm에서의 공기 커마 값을 MCNP 코드로 재계산한 값과 비교한 것으로서 두 결과가 잘 일치하고 있다.



(a) W target, 90 kVp, 17°, 2.5 mm Al total filtration



(b) W target, 120 kVp, 13°, 2.5 mm Al total filtration

Fig. 1. Sample x-ray spectra produced from SPEC78.

인형팬텀

방사선 방호 목적을 위한 유효선량을 산출하기 위해서는 인체 내 12개의 중요 장기와 10개의 기타 장기에 대한 선량분포를 알아야 하며 이를 위

Table 1. Mean energy and reference air kerma rate of the sample X-ray spectrum

Beam		SPEC78	MCNP4B	Error* [%]
90kVp, 17° 2.5mm Al	mean energy [keV]	45.9	45.6	0.65
	air kerma [ $\mu$ Gy/mAs at 75 cm]	$2.235 \times 10^2$	$2.308 \times 10^2$	-2.98
120kVp, 13° 2.5mm Al	mean energy [keV]	55.1	54.7	0.007
	air kerma [ $\mu$ Gy/mAs at 75 cm]	$3.160 \times 10^2$	$3.332 \times 10^2$	-5.44

\* (SPEC78-MCNP4B)/SPEC78 $\times$ 100

해서 실제 인체에 준하는 인형 팬텀이 필요하다. 본 연구에서는 Cristy[6]의 MIRd 성인 남성 팬텀과 Cristy와 Eckerman[7]의 성인 여성 팬텀을 각각 남성과 여성 성인 환자 기본 팬텀으로 사용하였다. 이 팬텀의 외형과 골격, 체내 장기는 간단한 대수 방정식을 이용하여 표현되며, 물질조성은 뼈, 연조직, 폐조직으로 성분과 밀도가 다른 세 가지로 이루어진다.

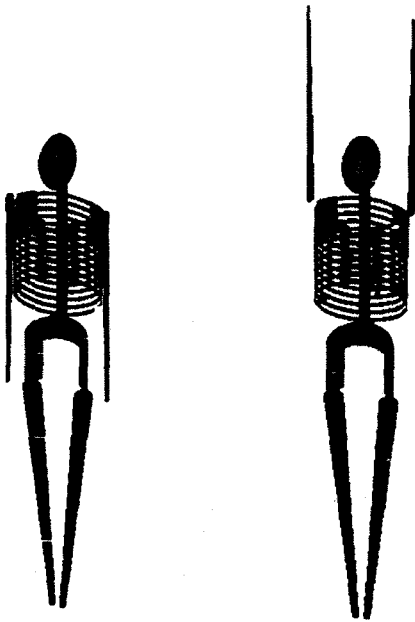


Fig. 2. A modified MIRd-type phantom(right) to be used in simulation of LAT exposures.

진단X선의 촬영에서 빔과 환자의 위치관계에 따라 AP(antero-posterior), PA(postero-anterior), LAT(lateral) 방향으로 나뉜다. 일반적인 피폭과

달리 LAT 방향에서의 X선 촬영은 방해가 되는 팔을 들도록 하고 있으므로 MIRd 팬텀에서 몸통 안에 고정되어 있는 팔을 분리하여 필요에 따라 위로 향하게 할 수 있도록 수정하였다. 그림2는 SABRINA[8]를 이용하여 얻은 수정된 인형팬텀의 골격을 보여준다.

#### 몬테칼로 계산

일반 목적 몬테칼로 입자수송 코드 MCNP4B[9]를 사용하였으며 광자 단면적 자료는 Hubble 등[10]의 데이터를 이용하였다. 진단X선은 점선원으로 콜리메타를 지나면서 촬영 부위에만 광자가 입사하는 사각뿔 형태의 빔으로 모사하였으며 통계적인 오차를 고려하여  $5 \times 10^7$ 개 규모의 입자 히스토리를 사용하였다. 장기들의 선량계산은 흡수선량 평가자(tally)인 \*F6 카드를 이용하였으며, 입사선량(surface entrance dose; SED) 계산은 팬텀 정면에 반지름 1cm 구를 두고 F4 카드와 DE/DF 카드를 사용하였다. 특정 부위에만 진단X선이 들어가는 선원의 특수성 때문에 계산결과와 상대오차가 0.1 이상인 장기들의 선량은 0으로 간주하였다.

#### 유효선량의 산출

성별 장기 차이로 인해 유방 및 자궁의 가중치를 일부 수정한 ICRP 74[11]에 따라 유효선량을 산출하였다. 한편, 인형 팬텀에서 모사되지 않아서 논란이 있는 장기인 근육, 뼈표면과 적색골수에 대한 선량은 다음과 같이 평가하였다. 근육의 선량은 몸통에서 장기들을 제외한 영역과 다리에서 뼈를 제외한 영역을 근육으로 정의하고 이 영역에 대하여 평가하였다. 뼈표면은 Drexler 등[12] 연구자들의 선량평가 방법처럼 뼈의 선량 값으로 대체하였다. 즉,

$$H_{bone\ surface} = \sum_i H_i \frac{V_i}{\sum_i V_i}$$

여기서  $V_i$ 는 부위  $i$ 의 뼈 체적이며  $H_i$ 는 부위  $i$ 의 뼈 등가선량이다.

방사선에 민감한 적색골수(RBM)는 불균일한 분포를 이루지만[13] 본 연구에서는 경질 뼈(cortical bone)와 골수가 균일하게 혼합되어 있는 모델이 사용되었다. 산출된 혼합 뼈(mixture bone) 선량 값은 경질 뼈와 적색골수에 흡수된 에너지의 합에 해당하므로 적색골수의 선량을 계산하기 위해서는 두 값의 분리가 필요하다. 인형 팬텀에서 모사하고 있는 8개 영역의 뼈에 대해 입사 광자가 에너지를 혼합 뼈에 전달할 확률과 적색골수에 전달할 확률의 비와 혼합 뼈와 적색골수의 질량비를 보정하여 합한 값으로 적색골수의 선량을 평가하였다.

$$H_{mixture} = \Phi_T T \left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{mixture} m_{mixture}$$

$$= H_{cortical} + H_{RBM}$$

$$\bar{H}_{RBM} = \sum_i H_{mixture,i} \frac{\left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{RBM,i}}{\left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{mixture,i}} \frac{m_{RBM,i}}{m_{mixture,i}}$$

여기서 첨자  $i$ 는 서로 다른 뼈 영역을 나타내며  $\Phi_T$ 는 에너지  $T$ 인 광자의 플루언스,  $\left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)$ 는 질량에너지흡수계수,  $m$ 은 질량이다.

**촬영조건**

시범적 계산의 촬영조건은 한양대학병원[14]에서 사용하는 프로토콜을 기본으로 진단행위별로 전압, 전류, 피폭시간, 피사체와의 거리(FSD), 양극의 각도 및 필터의 두께 등을 입수하였고, 빔 크기와 빔 중앙의 좌표는 NRPB-R262[4] 자료를 이용하였다. 그림3은 진단 부위별 촬영조건 중 (a)는  $y=0$  평면, (b)는  $x=0$  평면에서의 촬영 빔의 크기와 빔 중앙의 좌표를 남성 팬텀에 겹쳐 보여 주고 있다. 빔 크기는 인형 팬텀의 중앙면에서의 단면적이다.

**결과 및 토의**

**계산체계 벤치마킹**

선량 계산체계의 검증을 위하여 흉곽 PA와 복부 AP의 두 경우를 선택하여 예비계산을 수행한 후 NRPB-SR262[15]의 결과와 비교하였다. 두 진단 절차의 조건은 표2와 같으며, MCNP에서 X선 촬영을 모사하는 상황과 일부 광자의 자취를 그림4에 보이고 있다. 그림5는 본 연구에서 계산된

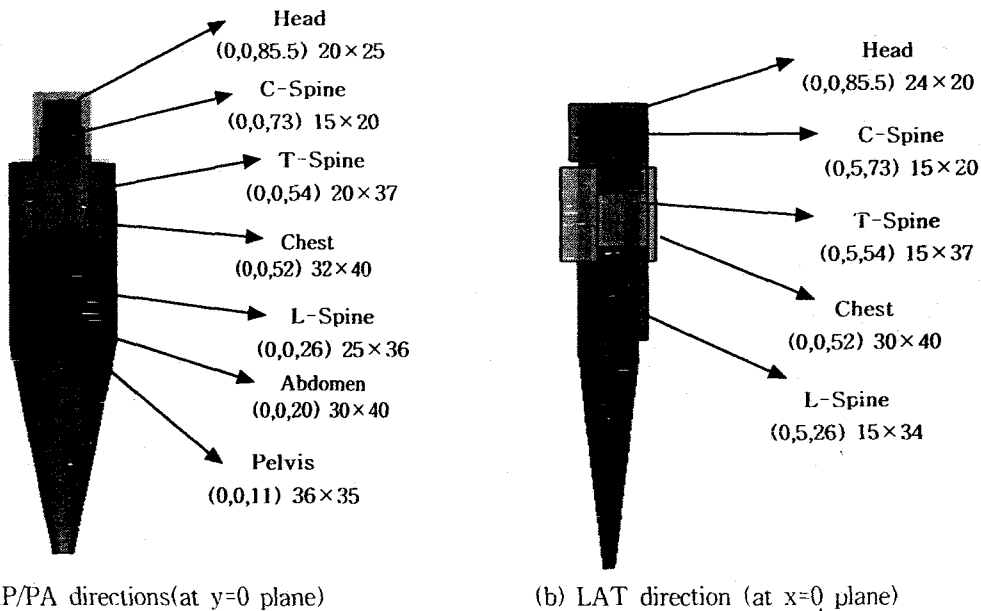


Fig. 3. Examination conditions (beam size, center ray, field at mid-plane) for various radiology procedures.

SED에 대한 장기 등가선량 및 유효선량의 상대 값이 NRPB의 결과와 일치하고 있음을 보여준다.

Table 1. Examination conditions of Chest-PA and Abdomen-AP

Parameters	Chest-PA	Abdomen-AP
Voltage [kVp]	90	90
Anode angle[degree]	17	17
Filtration[mm]	2.5 Al	2.5 Al
Beam center	(0, 0, 52)	(0, 0, 20)
Beam width[cm]	32	30
Beam height[cm]	40	40
FSD[cm]	160	75

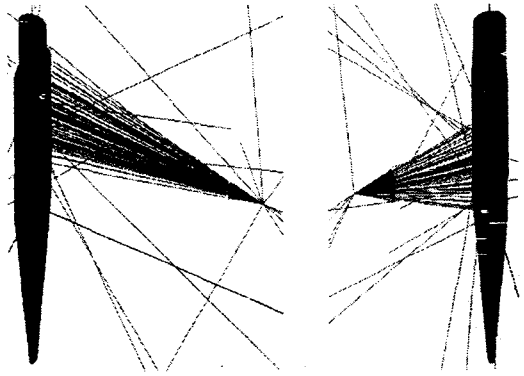
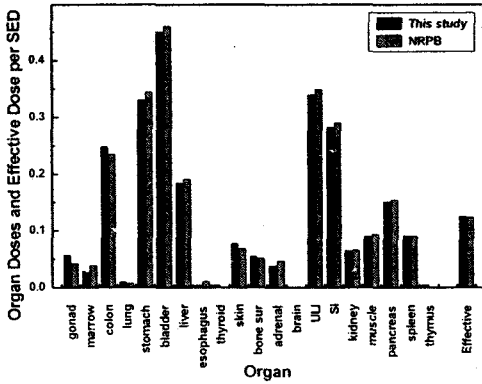
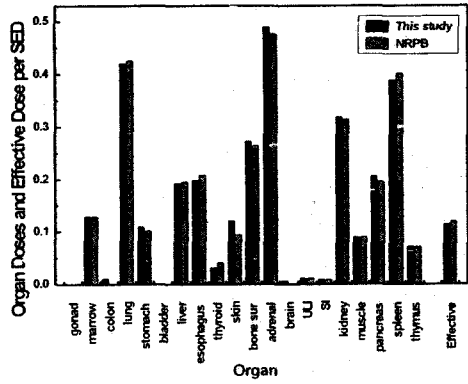


Fig. 4. Irradiation geometry of Chest-PA(left) and Abdomen-AP(right) in adult male. Part of the particle tracks are shown.



(a) Chest-PA study



(b) Abdomen-AP study

Fig. 5. Comparison of organ equivalent doses and the effective dose per SED in adult male.

**진단절차별 장기선량과 유효선량**

흉곽, 복부, 두부, 척추 부위의 진단X선 촬영에 대해 각 부위별로 AP, PA, LLAT, RLAT 방향 촬영에서의 성인 환자의 장기선량(등가선량에 조직가중치를 가중한 값. 즉, 유효선량 기여분)을 그림6~그림9에 나타내었다. 개인 선량 평가 목적으로는 남성과 여성을 구분하여 평가하는 것이 필요하지만 여기서는 남녀 공동 장기에 대해서는 남녀 평균 장기선량을, 여성만의 장기에 대해서는 여성 장기선량을 보였다. 당연히 빔 내에 위치하는 장기가 그렇지 않은 장기에 비해 높은 선량을 보인다. 일례로 생식선의 경우 복부나 골반부 AP 촬영에서는 약 0.18mSv의 장기선량을 받자

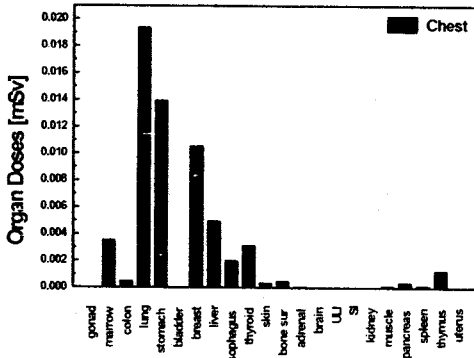
만, 흉곽, 두부, 경추부 촬영에서는 무시할 수준의 선량을 받는 것으로 나타난다. 한편, 복부 촬영과 같이 동일한 부위를 진단하는 경우에도 방향에 따라서 생식선의 선량이 0.18mSv(AP)와 0.042mSv(PA)로 4배 가량 다르게 평가되었는데, 이는 빔과 해당장기의 기하학적 배열의 차이에 기인한다. 그리고, 빔의 중심의 z축 좌표(cm 단위)가 52(흉곽), 54(흉추부)로 거의 비슷한 두 촬영에서 폐의 장기선량이 0.005mSv(흉곽-AP), 0.0023mSv(흉곽-PA)와 0.092mSv(흉추부-AP)로 차이를 보이는 것은 촬영조건 중 광자의 개수에 일차적 영향을 미치는 mAs가 12.5. 2와 20으로 다르기 때문이다[16]. 측면 방향에서의 장기선량 역시

비슷한 경향을 띠고 있다. 하지만, 인체에서 비대칭적으로 위치하는 장기들의 선량이 특히, 오른쪽에 위치하고 있는 간의 경우에 LLAT 촬영에서의 선량이 RLAT 촬영에서의 선량보다 월등히 높으며, 왼쪽으로 치우친 위는 LLAT 촬영에서 높은 선량을 보이고 있다.

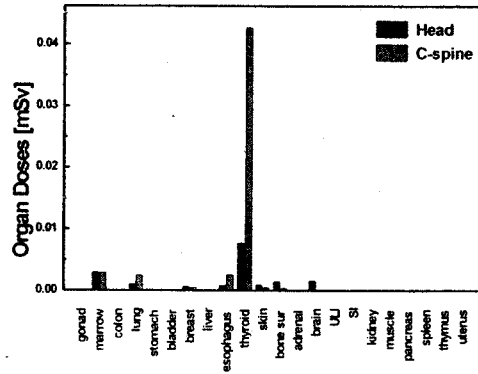
모든 방향에서의 촬영조건이 동일한 두부 촬영은 PA와 LAT 방향보다 AP 방향의 촬영에서 더 높은 유효선량을 보이지만 그 차이는 아주 작다. 중요 장기가 밀집한 부위의 촬영인 복부나 골반부 촬영에서는 AP 방향이 PA 방향보다 유효선량이 각각 2.3배와 2.6배로 나타난다. 흉곽 촬영에서는 유사한 경향이 보이지 않는 이유는 각 방향에서의 관전압과 mAs의 조건이 다르기 때문이다. 척추 촬영은 경추, 흉추, 요추로 구분하여 실시되고, 위치별로 선량 차이가 있다.

그림10은 각 진단절차의 촬영조건 중 관전압, mAs(관전압×피폭시간), FSD와 함께 1회 X선 촬영의 성인 남녀의 평균 유효선량을 보여주고 있다. 1회의 흉곽-PA 촬영으로 0.029 mSv의 유효선량을 받는 것으로 평가되었다. 척추 촬영은 AP에서 LLAT나 RLAT보다 더 높은 선량을 받는 것으로 평가되었는데, LLAT와 RLAT 촬영조건이 AP 촬영조건보다 관전압과 mAs 값은 크지만 입사빔과 중요 장기의 위치, 즉, 깊이의 영향이 더 크기 때문이다. 척추 촬영에서 가장 높은 유효선량은 0.24 mSv로 요추-AP 촬영이며, 가장 낮은 선량은 0.025 mSv로 경추-LAT 촬영으로 나타났다.

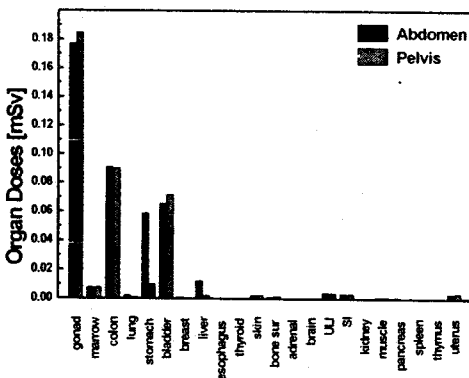
일반 대중에게 가장 빈번한 촬영은 흉곽-PA이다. 흔히 흉곽-PA 1회 촬영으로 피폭하는 선량은 약 0.3 mSv(30 mrem)으로 알려져 있지만, 본 연



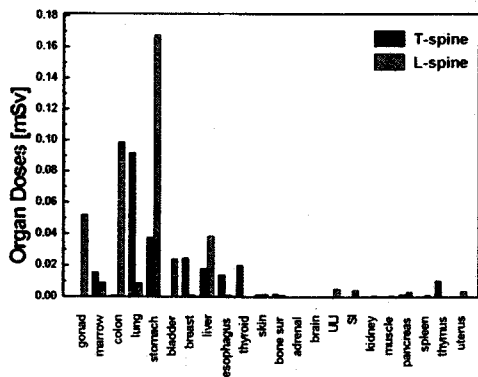
(a) Chest



(b) Head and C-spine



(c) Abdomen and Pelvis



(d) T-spine and L-spine

Fig. 6. Organ doses due to AP examinations.

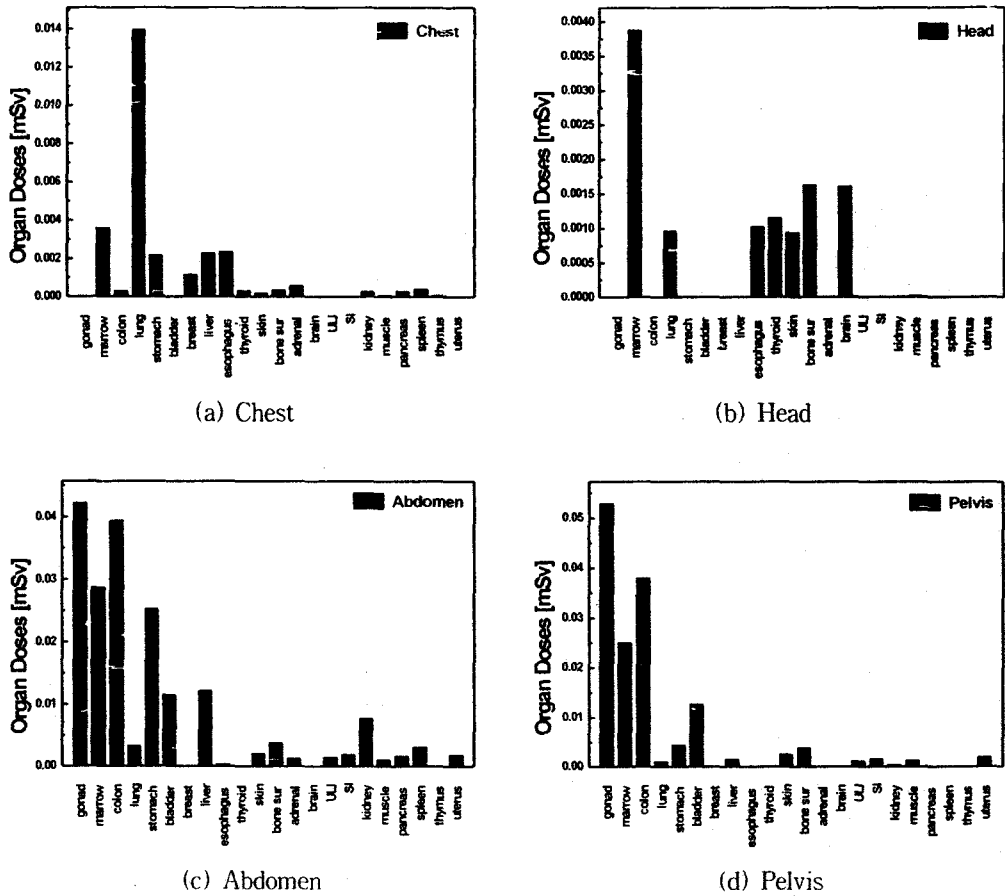


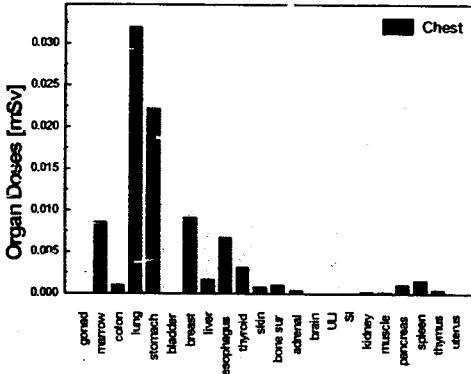
Fig. 7. Organ doses due to PA examinations.

구에서 평가한 유효선량은 그 1/10인 약 0.03mSv로 나타나고 있다. 이는 촬영장비 및 기술의 발전의 효과도 있지만 근본적으로는 평가하는 선량의 개념의 변화에 기인한다. 즉, 과거에는 유효선량 개념이 아니라 밤에 노출되는 흉부 조직의 등가선량에 해당하는 선량으로 표현했기 때문이다.

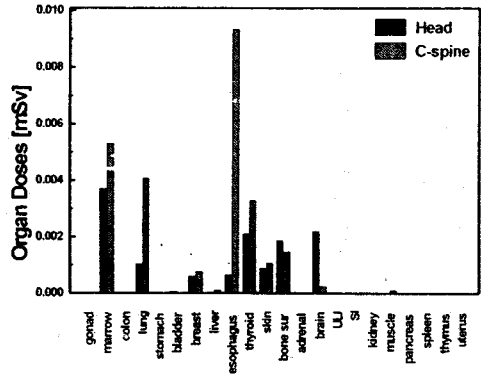
## 결론

MIRD형 인형팬텀과 몬테칼로 방사선 수송 기법을 이용하여 진단X선에 의한 환자의 장기선량과 유효선량 계산체계를 수립함으로써 다양한 의료방사선 절차로 인한 리스크 평가에 이용할 수

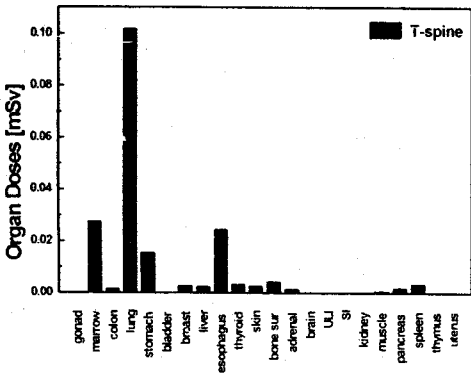
있게 되었다. 수립된 체계를 이용하여 대표적인 진단X선 절차에서 환자가 피폭하는 선량을 평가하였으며 적용된 선량의 개념이 다름으로 인해 전통적 명목선량 값이 유효선량과는 큰 차이가 있음이 확인되었다. 의료방사선이 평균적 개인이 피폭하는 최대의 인공 피폭원인을 고려하면[16] 의료 절차로 인한 국민의 방사선 리스크를 평가하기 위해서는 진단X선을 포함하여 핵의학 등 다양한 방사선 의료절차에서 환자가 받는 유효선량을 구체적으로 평가하는 것이 중요함이 분명해졌다. 또한 이러한 평가 수단이 마련됨으로써 본래의 진료 목적을 침해하지 않으면서 환자의 유효선량을 감축하도록 절차의 최적화를 도모함에 이용할 수 있다. 특히 단위 절차 당 환자의 선량이



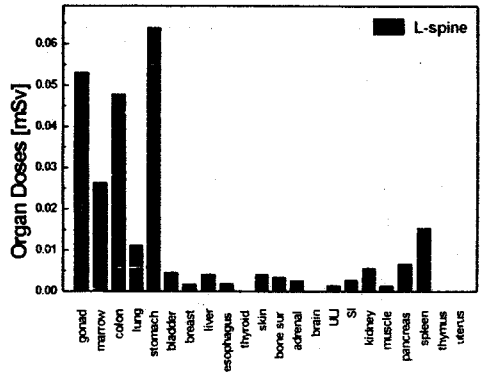
(a) Chest



(b) Head and C-spine



(c) T-spine



(d) L-spine

Fig. 8. Organ doses due to LLAT examinations.

큰 CT나 플루로스코피, 중재 방사선 분야에 대한 이러한 평가체계의 활용이 기대된다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부 원자력중장기연구개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

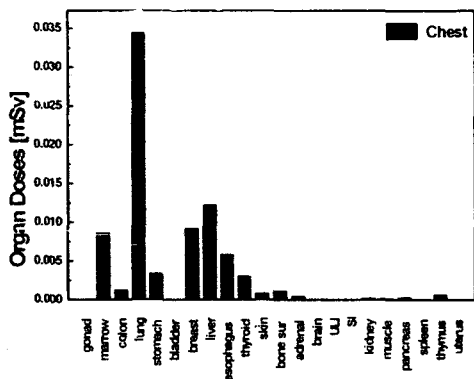
참고문헌

1. International Commission on Radiological Protection, 1990 *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 60, Pergamon

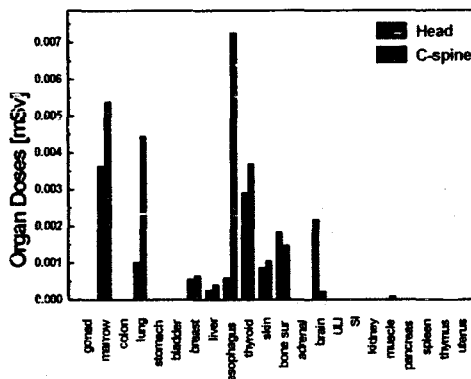
Press(1991).

2. P. Gron, "Methods used to Estimate the Collective Dose in Denmark from Diagnostic Radiology", *Proc. Symp., IRPA*, P-7-24 (2000).
3. W.S. Snyder, M.R. Ford and 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).
4. D. Hart, D.G. Jones and B.F. Wail,

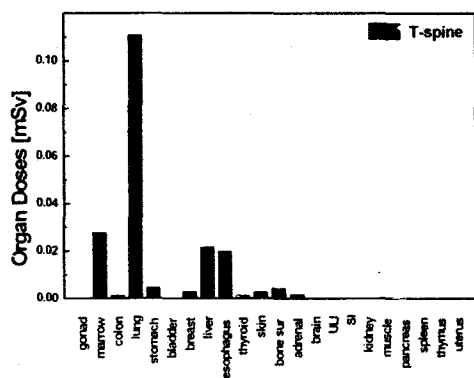




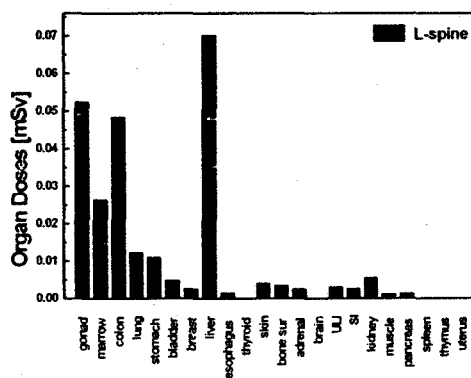
(a) Chest



(b) Head and C-spine



(c) T-spine



(d) L-spine

Fig. 9. Organ doses due to RLAT examinations.

*Estimation of Effective Dose in Diagnostic Radiology from Entrance Surface Dose and Dose-Area Product Measurements*, Report NRPB-R262, National Radiological Protection Board, Chilton, Didcot, UK(1994).

5. K. Cranley, B.J. Gilmore, G.W.A. Fogarty, and L. Desponds, *Catalogue of Diagnostic X-ray Spectra and Other Data*, Report No. 78, The Institute of Physics and Engineering in Medicine(1997).  
 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. M. Cristy and K.F. Eckerman, *Specific Absorbed Fraction of Energy at Various Ages from Internal Photon Sources, Part V: Fifteen-Year-Old Male and Adult Female*, Report ORNL/TM-8351/V5, Oak Ridge National Lab., Oak Ridge, Tennessee (1987).  
 8. K.A. Van Riper, *SABRINA User's Guide*, LA-UR-93-3696, LANL(1993).  
 9. LANL Group X-6, *MCNP-A General Monte Carlo Code N-Particle Transport Code Version 4B*, LA-12625-M(1997).  
 10. J.H. Hubbell, W.J. Veigele, E.A. Briggs,

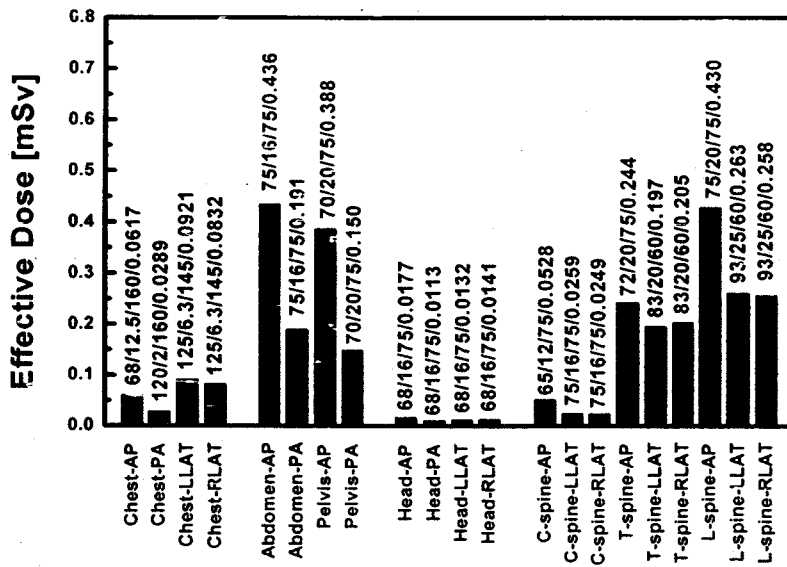


Fig. 10. Effective doses to adult patient resulting from various diagnostic X-ray examinations. Examination conditions are presented in terms of (voltage/mAs/FSD/effective dose).

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).

11. International Commission on Radiological Protection, *Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation*, ICRP Publication 74, Pergamon Press(1996).
12. G. Drexler, "Verlauf der Ionendosis an Grenzschichten, In Microdosimetry", *Proc. Symp. Microdosimetry*, Ispra, 13-15. EUR 3747 d-f-e, European Communities, Brussels (1968).
13. M. Cristy, "Active bone marrow distribution as a function of age in humans", *Phys. Med. Biol.*, Vol. 26, No. 3 389-400 (1981).
14. 한양대학교 병원 진단방사선과 개별 접촉.
15. D. Hart, D.G. Jones and B.F. Wall, *Normalised Organ Doses for Medical*

*X-ray Examinations Calculated Using Monte Carlo Techniques*, Report NRPB-SR262, National Radiological Protection Board, Chilton, Didcot, UK(1994).

16. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, *Sources and Effects of Ionizing Radiation*, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly with Scientific Annexes, Volume I.Sources, United Nations, New York(2000).