

진단 X선 절차에 의한 피검자의 유효선량 선량평가

이재기

한양대학교 원자력공학과 교수

1. 서론

100여년 전인 1895년 뢰트겐에 의해 발견된 X선은 의료계에서 볼 때 인체를 절개하지 않고 병소를 투시할 수 있는 획기적인 수단이었다. 따라서 X선 발견 발표 수개월이 지나지 않아 이를 의료에 이용하는 사례들이 급증하였으며, 그 추세는 기술의 발전과 함께 지금까지 이어져 오고 있다. 따라서 X선은 항생제와 함께 인류의 보건을 위해 신이 부여한 선물이라고까지 불릴 정도이며, 분명히 현대의학의 중심에 서 있다. 일본에서 원폭 피해자가 발생한 이후부터 일반 대중이 방사선을 위험한 것으로 인식하는 경향이 심화되고 있으나 의료에서 X선의 사용은 컴퓨터와 영상 기술의 발전과 함께 더욱 그 진가를 발휘하고 있다. 특히 선진 사회일수록 의료기관을 이용하는 빈도가 높아지고 이에 따른 의료방사선 피폭도 높아진다. 결과적으로 현재 인류의 인공방사선 피폭의 80% 이상을 의료방사선이 차지하는데 촬영 회수에서 압도적으로 많은 진단방사선이 그 대부분을 차지한다.

의료상 피폭도 엄연한 방사선 피폭이므로 방사선 방호의 대상이 된다. 즉, 인체에 방사선을 사용함으로써 인한 이득이 손해에 비해 우월하고 다른 대안이 마땅하지 않아 정당화될 수 있어야 하며, 계획된 진료의 목적을 달성하는 범위에서 환자의 방사선 피폭을 최소화해야 한다. 그러나 의료상 피폭은 직접 생명을 위협하는 질병을 진료하기 위해 사용하는 것이므로 개인 선량을 일일이 측정하거나 선량한도를 적용하지는 않는다. 그렇더라도 의료목적의 방사선 피폭의 정도와 이로 인한 리스크의 증가가 얼마나 될 것인가를 이해하는 것은 국민보건의 관점에서 필요하다.

이 글은 과학기술부의 원자력 중장기연구개발사

업의 지원으로 한양대학교 방사선안전연구실이 수행하고 있는 "국민 방사선 위험도 평가" 과제의 일부로서 진단X선 절차로 인한 환자의 선량을 평가하는 방법론과 그 결과의 일부를 소개하는 것이다.

2. 진단X선 절차에서 환자의 선량평가

전통적으로 X선을 인체에 사용할 때에는 일종의 품질관리 형태로 X선빔에 노출되는 신체 부위의 입사면에서 조사선량을 또는 흡수선량률에 대해 기준을 두고 관리한다. 그런데 낮은 수준의 방사선 피폭으로 인한 위험의 지표로는 유효선량을 사용한다. 유효선량은 피폭하는 인체 조직의 조직 등가선량에 그 조직의 암 위험을 반영한 조직가중치를 가중하여 합산한 양이다. 즉, 유효선량을 산출하기 위해서는 각 조직의 등가선량에 대한 정보가 있어야 하는데 이 조직 등가선량은 단순한 입사면에서의 흡수선량과는 상당한 차이가 있고 위치별로 값이 다르다. 그렇다고 실제 인체 또는 인체와 유사한 물체 내에 방사선량을 측정할 수 있는 선량계를 넣고 방사선을 노출시켜 실측하는 것은 불가하거나 비현실적이다. 따라서 조직의 구체적 등가선량과 이를 종합한 유효선량을 평가하기 위해서는 인체에 준하는 인형 모의피폭체를 이용한 정밀한 계산수법으로 인체 내 방사선량의 분포를 산출하는 해석적 방법이 사용된다. 계산에는 주로 몬테칼로 방사선 수송기법을 쓰는 데 범용 몬테칼로 코드인 MCNP²⁾가 널리 이용된다.

모의피폭체

여러종류의 해석기하학적 체적을 조합하여 실제 인체의 형상을 근사적으로 모사한 인형 모의피폭체

의 원형은 1969년에 MIRD(Medical Internal Radiation Dose) 위원회가 핵의학 목적으로 방사성핵종을 체내에 투여할 경우 각 조직이나 장기가 받게 될 선량을 평가하기 위해 수립한 MIRD 성인 남성 모의피폭체이다. 이후 이 MIRD 모의피폭체는 일부 수정과 보완을 거쳐 오늘에 이르고 있으며 같은 방법으로 체격조건이 다른 성인 여성 모의피폭체, 그리고 미성년 연령군에 대한 MIRD형 모의피폭체 그룹이 개발되어 이용되고 있다. 그림1은 이러한 MIRD형 모의피폭체군의 일부를 보여준다. MIRD형 모의피폭체 내에는 방사선 안전 관점에서 중요한 여러 장기들의 형상이 근사적으로 모사되어 포함되어 있으며 조성은 뼈, 연조직 그리고 폐조직의 세 종류로 대별된다. 폐조직은 연조직이지만 밀도가 일반 연조직에 비해 크게 낮다.

그림2는 진단X선 촬영에서 팔뚝의 방해를 받지 않기 위해 팔을 드는 경우를 고려하기 위해 방사선 안전연구실에서 변형한 모의피폭체를 원형 MIRD 모의피폭체와 비교하여 보였다. 그림은 연조직을 제외하고 도시한 것으로서 뼈와 폐가 보인다.

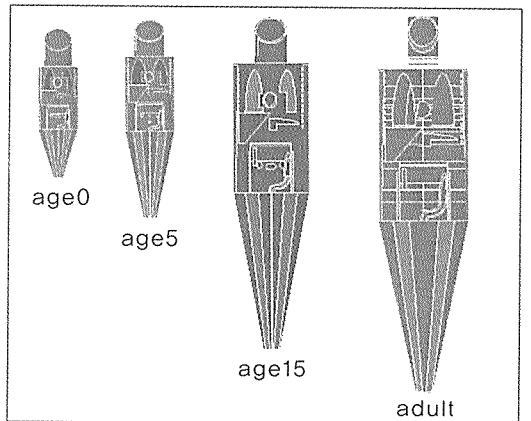


그림 1. 해석기하학적으로 모사한 인형 모의피폭체.

1) phantom을 말하며 외래어 표기로 "팬텀"으로 적기도 하나 의미의 전달이 불충분하므로 "모의피폭체"가 적절한 용어로 생각한다.
2) 미국 로스알라모스 연구소에서 개발, 보급된 전산 코드이며 이 연구에서는 MCNP4B PC 버전이 사용되었다.

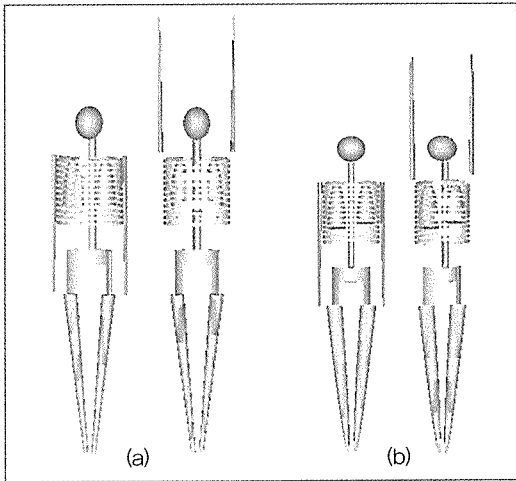


그림 2. (a)남성과 (b)여성 모의피폭체의 뼈 골격과 측면방향의 촬영을 위한 모의피폭체의 변형.

X선 스펙트럼

방사선량을 평가하기 위해서는 방사선 방출원인 X선관에서 나오는 X선의 에너지 분포와 강도를 알아야 한다. X는 발생장치의 필라멘트로 가열된 음극에서 튀어나오는 전자가 관전압에 의해 가속되어 양극의 표적과 반응할 때 발생한다. 표적물질의 원자핵 주변 전기장에 의해 전자의 감속될 때 다양한 에너지의 X선이 방출되는데 이를 제동복사선이라 하며 연속 스펙트럼을 가진다. 제동복사선에 추가하여 일부 특정한 에너지를 가진 특성 X선이 원자의 궤도

전자 천이로부터 발생한다. 이 연구에서 X선의 스펙트럼과 강도는 의학물리공학연구소(IPEM: Institute of Physics and Engineering in Medicine)에서 편집한 SPEC78 프로그램(Catalogue of Diagnostic X-Ray Spectra and other Data)을 이용하였다. SPEC78 프로그램은 관전압 30~150kVp, 텅스텐 표적각 6~22°를 가지는 중경도 스펙트럼과 관전압 25~32kVp, 몰리브덴 표적각 9~23°를 가지는 연질 스펙트럼에 대해 0.5keV 간격의 에너지별로 75cm 거리에서 단위 mAs 당 단위 면적 당 광자 수를 제공함으로써 사용자가 선택하여 스펙트럼을 출력할 수 있다.

X선 중 낮은 에너지 부분은 진단 목적을 달성하기 위한 영상의 정보원으로서 기능을 못할 뿐 아니라 환자의 피부선량만을 불필요하게 높이는 역할을 하므로 적절한 필터를 이용하여 이 영역의 X선은 제거하는 것이 보통이다. 실용 X선 촬영장비는 알루미늄, 혹은 알루미늄과 구리를 섞어서 만든 복합 필터를 사용하고 있다. SPEC78 프로그램에서는 필터로 사용하는 물질을 비롯하여 공기 및 인체 조직 등과 같은 32개의 물질에 대해 감쇠계수를 내장하고 있어 스펙트럼을 생성할 때 사용자가 필터의 종류와 두께를 선택하면 이를 반영한 스펙트럼이 출력된다. 그림3은 텅스텐 표적의 X선관에 25mm 알루미늄 필

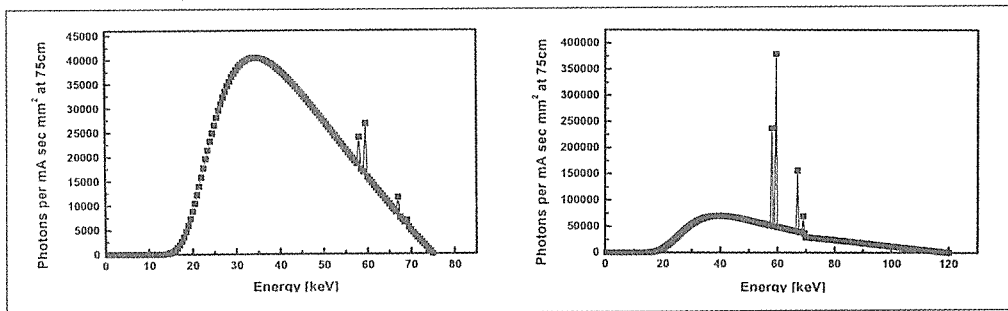


그림 3. SPEC78 프로그램을 이용하여 생성한 X선 스펙트럼. 텅스텐 표적과 2.5mm 알루미늄 필터를 가진 관전압 (a)90kVp와 (b)120kVp의 경우임.

터를 추가한 경우 SPEC78이 제공하는 스펙트럼을 도시한 것이다.

진단X선 촬영조건

진단X선 촬영을 흉부, 복부, 두부와 척추로 분류하고, 한양대학병원에서 사용하고 있는 일반 목적의 발생장치인 Optimus (텅스텐 표적, 각도 13°, 2.5mm Al 필터)를 기본으로 하여 실제 환자 촬영에 사용하는 전압, 전류, 노출시간과 인체와의 거리에 관한 정보를 입수하였다. 병원에서 실제로 조사한 촬영조건은 두부촬영이라 할지라도 시행되는 각 촬영마다 보고자 하는 부위가 상당히 다양하여 여러 촬영조건을 입수하게 되었다. 그래서, 두부촬영 중에서 가장 전형적인 절차를 방사선사에게 그룹핑하는 작업을 의뢰하여 촬영조건을 결정하였다. 흉부, 복부 및 척추촬영도 마찬가지로 방법으로 촬영조건을

획득하였다.

몬테칼로 모사

촬영에서 환자에게 입사되는 X선빔은 점 선원으로 콜리메이터를 지나면서 촬영 부위에만 광자가 입사하는 사각뿔 형태의 빔으로 모사 되었고, 그림4는 모의피폭체의 흉부와 복부가 진단X선에 노출되는 모사상황을 보인 것이다. MCNP 평가에 수반되는 고유의 통계적인 오차를 감소시키기 위해서 5 백만 개의 입자를 투사하여 거동을 추적하였다. 이 때 촬영 부위에만 빔이 입사하는 진단X선 촬영조건의 특성 때문에 일차 빔이 입사하지 않은 부분에 위치하는 장기는 입자 수를 증가시켜도 불확실성을 충분히 줄이기는 어렵다. 그러나 그 경우는 해당 조직의 등가선량 값이 작기 때문에 0.1 이상의 상대오차를 가지는 장기의 선량은 0으로 간주하여도 무방하다.

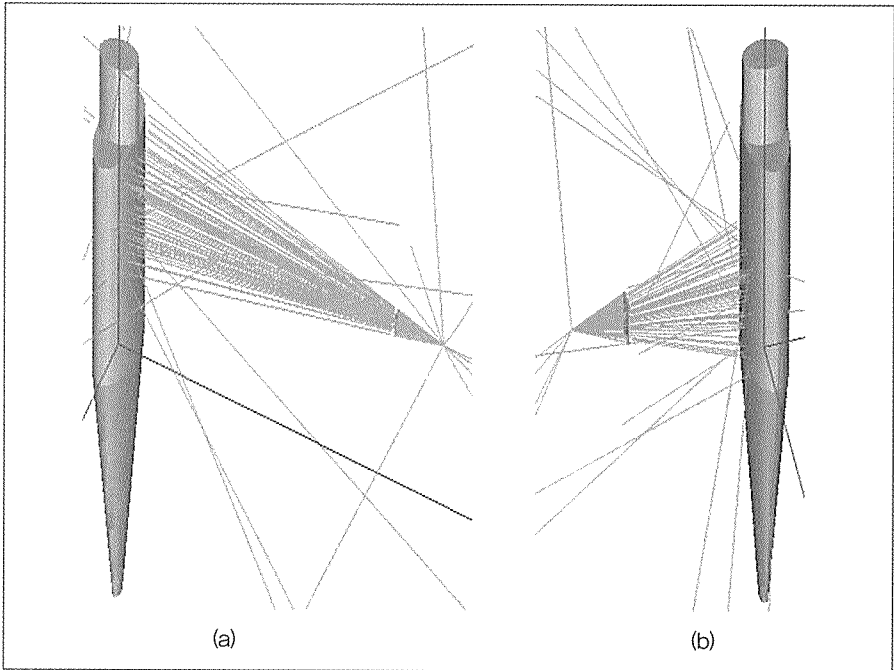


그림 4. 남성 모의피폭체에 (a)흉부 PA와 (b)복부 AP 촬영 시 진단X선의 모사 및 광자의 트랙.

유효선량 계산

유효선량을 산출하기 위해서 등가선량을 알아야 하는 장기 중에서 유방과 자궁은 여성에게만 존재하는 장기로서 이들 조직에 대한 가중치는 각각 10%와 1%로 한다. 남성에 대한 계산에서는 유방이나 자궁 등가선량 자체가 산출되지 않으므로 자연히 기여가 없다.

모의피복체에서 모사 되지 않는 근육, 뼈 표면과 적색골수의 장기선량 계산 역시 연구자들의 이슈가 되고 있다. 우리 연구에서는 근육에 대한 선량평가는 몸통에서 장기들을 제외한 영역과 다리에서 뼈를 제외한 영역을 근육으로 정의하고 관련된 영역에 대하여 계산을 수행하였다. 뼈 표면은 모델링 자체가 매우 복잡하고, 설사 모델링을 통해 계산을 수행하더라도 극히 작은 체적으로 인해 선량평가가 어렵다. 그래서, 모의피복체에서 8개의 뼈로 구성된 선량을 각 뼈의 부피를 보정하여 뼈 표면의 선량으로 평가하였다. 방사선에 민감한 적색골수는 인체에서 불균일한 분포를 이루지만 본 연구에서 이용한 모의피복체는 뼈와 골수가 균일하게 혼합되어 있는 모델을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

선량계산 벤치마킹

본 연구의 선량계산 방법론의 검증을 위하여 흉부 PA와 복부 AP³⁾의 두 촬영을 선택하여 시범적으로 계산을 수행한 후 영국 방사선방호원(NRPB)에서 평가한 결과와 비교하였다. 두 진단행위의 조건은 표1과 같으며, 그림5에 결과를 도시하였는데 두 값들이 잘 일치하고 있음을 보여 주고 있다. 흉부 PA 촬영 시 부신, 폐, 비장의 순서로 장기선량이 높았으며, 복부 AP의 경우에는 방광, 대장, 위 등이 높은 선량을 받은 것으로 나타났다.

표 1. 흉부 PA와 복부 AP 촬영 조건.

	흉부 PA	복부 AP
관전압 [kVp]	90	90
표적 각도 [°]	17	17
필터 [mm]	2.5 Al	2.5 Al
빔 중심 좌표	(0,0,52)	(0,0,20)
빔 너비 [cm]	32	30
빔 높이 [cm]	40	40
FSD* [cm]	160	75

* Focus to Surface Distance(X선초점으로부터 신체표면까지 거리)

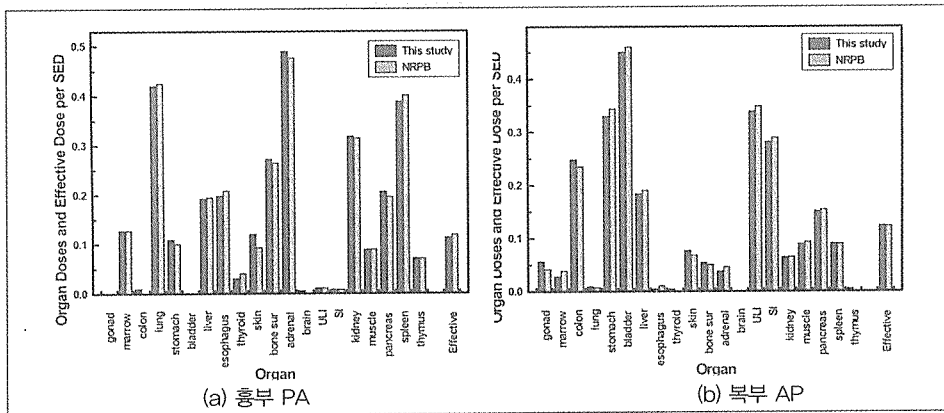


그림 5. 남성 모의피복체에서 SED(Surface Entrance Dose)에 대한 장기의 등가선량과 유효선량.

진단X선 절차별 유효선량

흉부, 복부, 두부와 척추로 분류한 진단촬영을 AP, PA, LLAT와 RLAT방향별로 장기의 등가선량 계산을 수행하였다. 그림6은 촬영 방향별로 분류하여 장기의 등가선량을 나타낸 것으로, 0.01mSv 이상의 선량을 가진 장기의 경우에만 표시하였다. 대부분의 진단절차 중에서 조직가중치가 별도로 주어진 개별장기가 그렇지 않은 기타장기보다 등가선량이 높게 평가된 점은 상당히 흥미롭다 할 수 있다. 진단X선 중심의 z축 좌표가 52cm(흉곽), 54cm(경추)로 비슷한 절차에서, 폐의 장기선량이 흉부 AP에서 0.005mSv, 흉부 PA에서 0.0023mSv, 흉추 AP에서 0.092mSv로 큰 차이가 발견되었다. 이는 광자의 개수에 선형적 영향 관계를 가지고 있는 mAs(관전류와 피폭시간을 곱한 값)가 12.5, 2와 20으로 다르며, 점 선원에서 환자의 피부까지의 거리(FSD)가 68, 120, 75cm로 다른 값을 가지기 때문이다. 인체 구조

에서 좌우 대칭이 아닌 장기의 경우에는 좌측 입사와 우측 입사 촬영 시에 상이한 결과를 초래하였다. 예를 들면, 인체의 오른쪽에 위치하는 간은 우측 입사 시에 좌측 입사 시보다 훨씬 더 큰 값을 가지고, 그 반대로 왼쪽에 위치하는 위의 경우는 그 반대의 경향을 가진다.

그림 7은 진단행위 촬영조건 중 관전압(kVp), mAs와 FSD(cm)를 나타내고, 1회 촬영에서 환자가 받는 유효선량을 보여주고 있다. 상대적으로 높은 유효선량을 야기하는 촬영은 복부나 골반과 요추로 0.15mSv에서 0.45mSv범위의 값을 가지고 있다. 흔히 검진에서 행하는 흉부 PA 절차의 1회 촬영 시 받는 유효선량 0.03mSv로서 일반 자료에서 나타나는 값보다 상당히 작다. 이는 일반 자료가 유효선량이 아니라 입사면 선량을 반영하고 있는 데서 비롯한다.

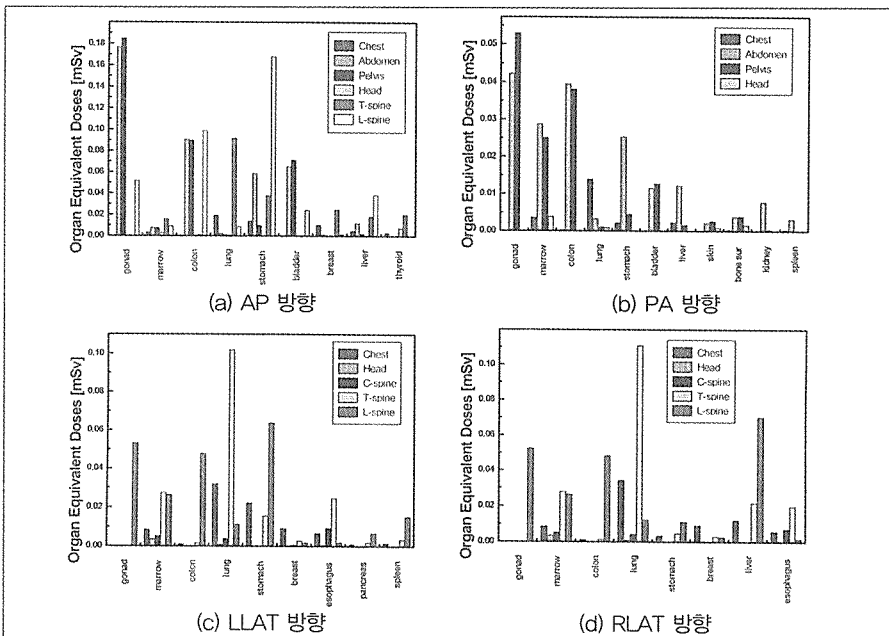


그림 6. 전형적인 진단X선 촬영에 의한 장기의 등가선량. (a)전방입사, (b)후방입사, (c)좌측입사, (d)우측입사. 각 촬영에서 등가선량이 0.01mSv 이상인 장기들의 경우만 표시하였음.

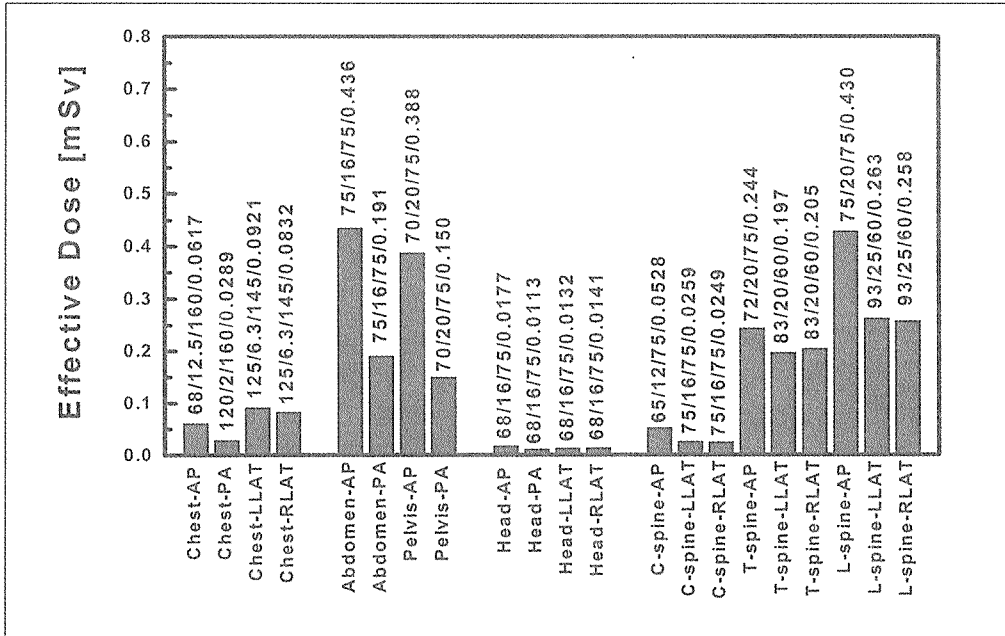


그림 7. 전형적인 진단X선 1회 촬영이 야기하는 유효선량. 각 막대 위 숫자는 촬영조건과 유효선량으로서 관전압[kVp]/mAs/FSD[cm]/유효선량[mSv]의 순서임.

4. 맺는말

본 연구를 통하여 진단 X선에 의한 환자의 조직 등가선량과 유효선량을 직접 평가하는 계산체계가 수립되었으며, 이를 이용하여 여기서는 제시하지 않은 다양한 환경 혹은 다른 조건에서의 선량도 평가할 수 있게 되었다. 여기서는 특정 기기를 사용한 촬영절차에 대해서만 예시하였지만 여러 병원에서 사용 중인 진단 X선 촬영조건에 대한 조사와 샘플링, 그리고 그 각각에 대한 선량평가를 통해 우리 국민의 평균적 진단 X선 피폭량을 종합할 수 있다. 또, 그림1에서 보인 미성년 그룹의 모의피폭체를 사용하면 아동에 대한 진단 X선의 선량평가 역시 가능하다. 더 나아가 이렇게 완성한 모의피폭체의 장기들을 표현하는 수식에 배수인자를 도입하여 모의피폭

체의 축소 및 확대를 가능하도록 발전시키면 환자 개개인의 신체조건에 근사한 선량평가가 가능하며 이는 진료절차에서 선량계획에도 활용될 수 있다.

이러한 계산체계는 일반적인 진단 X선 이외에 최근 집단선량에의 기여도가 크게 증가하고 있는 CT 촬영 환자의 선량평가에도 응용될 수 있다. 피폭시간이 긴 플루로스코피와 중재방사선 절차에 대해서도 응용할 수 있다. 이 경우에는 환자의 의료상 피폭 뿐 아니라 근접하여 있는 의료진의 직업상 피폭도 관심의 대상인데 이 역시 인형 모의피폭체와 몬테칼로 모사를 통해 평가할 수 있다. 한편으로 방사선안전연구실은 임산부에게 진단 X선 촬영이 불가피할 때 태아의 선량을 평가하기 위한 임부 모의피폭체도 개발하였다. 