

몬테카를로 방법을 이용한 중재방사선시술자에 대한 선량평가

임영기

가천대학교 방사선학과

2014년 10월 7일 접수 / 2014년 11월 28일 1차 수정 / 2014년 12월 8일 2차 수정 / 2014년 12월 10일 채택

중재방사선을 이용한 의료적 시술이나 진단은 꾸준히 증가하고 있다. 특히 환자에 근접하여 이루어지는 중재방사선시술의 특성상 시술자에 대한 직무피폭의 관리 및 감시가 중요하다. 개인선량계를 통해 측정되는 방사선 방호 실용량인 심부선량은 중재방사선시술의 경우 균질한 방사선장에 의해 전신에 고르게 노출되는 경우가 아니므로 유효선량을 항상 대표할 수는 없다. 따라서 본 연구에서는 C-arm을 이용한 대표적인 중재방사선시술에 대해 수학적 모의피폭체와 몬테카를로 방법을 이용한 계산과 개인선량계를 이용한 실측을 통해 개인선량당량과 장기별 선량을 평가하고자 하였다. 주요 장기별 선량평가 결과는 개인선량계로 측정된 선량 값보다 낮았으나, 갑상선과 같은 장기는 전신 연조직 선량보다 상당히 높은 것으로 평가되었다. 중재방사선시술자에 대한 적절한 방사선방호를 위해 납치마의 착용과 같은 전신방호와 더불어 갑상선 방호와 같은 추가적인 방호조치가 고려되어야 할 것이다.

중심어: 중재방사선시술, 직무피폭, 전산모사, 방사선방호

1. 서론

중재방사선(interventional radiology)은 방사선의 도움을 받아 의료절차를 수행하여 최소 침습을 달성하는 기술로서 진단방사선의 일부로 볼 수 있다. 중재방사선 기술은 1960년대 후반부터 적용되어 왔는데 최근에는 높은 해상도의 영상안내를 통한 고난도 중재방사선 시술이 빠르게 증가하고 있으며 일부 국가에서는 중재방사선 시술 빈도의 연간 증가율이 10~20% 범위에 있다. 방사선을 이용하는 의료분야 중에서도 특히 중재방사선 시술은 시술자가 방사선장에 근접 노출되기 때문에 높은 선량을 피폭 받을 수 있으며, 이로 인해 백내장이나 손의 방사선 상해 사례도 보고되고 있다[1]. 따라서 시술자는 방호를 위해 납치마, 갑상선보호대와 같은 물리적 방호 도구를 착용해야 하며 개인선량계도 필수적으로 착용해야 한다.

개인 피폭관리와 제한을 위한 개인감시는 방사선 작업종사자가 착용하는 개인선량계를 사용하여 수행되며, 그 중심 측정량은 실용량인 개인선량당량 Hp(10)이다 [2]. 실용량은 유효선량당량을 부당하게 과소평가하지 않으면서 용이하게 측정 가능한 양으로서 국제방사선단위 측정위원회(International Commission on Radiation Units and measurement, ICRU)가 정의한 양이다. 일반적으로 방사선작업종사자는 몸통의 대표적 위치에 하나

의 개인선량계를 패용하고 그 관독치인 HP(10)으로 유효선량을 같음하나 이는 대체로 균질한 방사선장에서 전신을 고르게 피폭한다는 가정 하에 합당하다.

그러나 중재방사선 시술자의 경우 선원에 근접하여 노출되므로 방사선장이 대체로 비 균질할 뿐만 아니라 환자로 인한 방사선의 산란 및 개인선량계의 착용위치 등을 고려할 때 단순히 개인선량계의 관독 값으로 유효선량을 충분히 반영한다고 판단하기 어려운 부분이 있다 [3].

따라서 본 연구에서는 널리 이용되고 있는 대표적인 중재방사선 시술에 대하여 몬테카를로 방법을 적용한 방사선수송코드를 통해 중재방사선 시술자에 대한 개인선량당량과 장기별 선량을 비교, 평가하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 대상작업 및 피폭환경

중재방사선 시술의 범위는 다양하나 본 연구에서는 일반적으로 가장 널리 사용되고 있는 C-arm을 대상으로 하였으며, C-arm을 이용한 시술에는 경막외 차단술, 추간관절차단술, 천장관절차단술 등이 대표적이다. 실제 선량과 가장 근접한 평가를 위해서는 피폭을 유발하는 각각의 작업별 방사선발생장치 및 주변인들과 매 작업 시 작업 자세에 대한 세부정보가 요구되지만 일반적인 상황을 가정하여 평가하였다. Table 1과 같이 각각의

교신저자 : 임영기, yklim@gachon.ac.kr
인천 연구구 학박피로 191

Table 1. Radiation Exposure Time for Major Interventional Radiology Using C-arm.

검사명	검사내용	검사시간
Epidural block (경막외 차단술)	- 연하곤란(삼킴장애) 검사 - 진단. 조영제로 밥, 죽, 물 등 음식물 형태의 점성도를 만들어 구강에서 위로 전달되는 경로의 이상을 투시영상을 통해 평가	5~10분
Facet jint block (추간관절차단술)	- 척추 신경근의 염증 부종 예방, 통증 완화를 목적으로 경막외강에 주사 - 주사바늘의 침투 경로 및 약물 주입 전 정확한 위치에 도달했는지 X-ray 영상을 통해 조영제 주입으로 확인	10~20분
S-I joint block (천장관절차단술)	- 척추 관절부위에 nerve(branch)에 주사 - 주사바늘의 침투 경로 및 약물 주입 전 정확한 위치에 도달했는지 X-ray 영상을 통해 조영제 주입으로 확인	5~10분

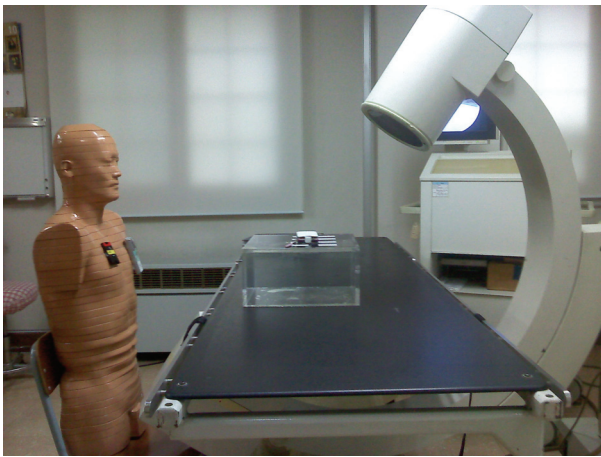


Fig. 1. Dose measurement using real human phantom with TLDs in a typical working condition of interventional radiology using C-arm.

시술에 소요되는 시간은 최대 20분정도이지만 실제로 방사선에 노출되는 시간을 고려하여 조사시간은 5분으로 설정하였다.

본 연구에서 대상으로 한 C-arm 장비는 Siemens 사의 SIREMOBIL 2000으로서 주당 최대동작부하는 50 mA · min · week⁻¹, 조사조건은 관전압 및 전류가 최대 80kVp, 4.2mA이나 실제 시술에서는 고정된 값이 아닌 환자의 상태나 임상 프로토콜에 따라 달라지므로 관상동맥의 혈관조영영상식 시술에서 사용되는 X선 스펙트럼 정보[4] 및 시술자의 면담을 통해 대표적으로 사용되는 65 kVp, 2.0 mA를 조사조건으로 가정하였다. 또한 저에너지 제동복사선을 제거하기 위한 필터로는 2.5 mm의 알루미늄을 사용하였다.

방사선량평가에 있어 선량은 선원과 피폭체와의 거리의 제곱에 반비례하는 관계가 있으므로 작업자의 예상위치 및 자세는 중요한 요소가 된다. 중재적 방사선시술은 시술자가 촬영영상을 보면서 직접 약물을 주사하는 등 실제로 방사선조사의 대상이 되는 환자에 근접하여 이루어지므로 보수적인 평가를 위해 시술자가 시술테이블에 최대한 접근하는 경우에 대한 평가를 추가하였다.

2.2 선량실측

실제 시술환경과 같은 상황을 구성하여 모의피폭

체와 개인선량계를 이용한 실측을 수행하였다. 조사환경은 앞서 기술한 일반적인 촬영조건에 대하여 수행하였으며 환자의 대용체로 30 cm × 30 cm × 15 cm의 PMMA water slab phantom[5]에 물을 채워 사용하였다. 작업자의 대한 모의피폭체로는 표준한국인 실물 모의피폭체[6]를 사용하였다. 개인선량계는 X선 표준선장으로 교정된 열형광선량계(thermo-luminescence dosimeter, TLD), Harshaw-8814를 모의피폭체의 가슴에 부착하여 시술시간인 5분 동안 노출시켰다(Fig. 1). 모의 피폭체는 상반신형태가 일반적이며 이는 주요 장기가 상반신에 위치하기 때문이다. 사용된 피폭체 역시 다리부분이 없기 때문에 높이 조절을 위해 의자를 이용하였다.

2.3 선량계산

선량계산을 위해서는 일반적인 방사선수송코드를 이용한 피폭환경의 구성과 Monte Carlo 방법으로 하나하나의 방사선에 대한 무작위사상을 통해 이에 대한 평균값으로부터 대상의 흡수선량을 산출하게 된다. 방사선량 실측은 방사선실용량만을 측정할 수 있는데, 이는 실제 피폭체가 받는 값보다 넓고 평행한 방사선장에서는 보수적으로 약간 높은 값을 갖는다. 즉, 인체를 대표하는 인체 등가 피폭체를 이용하여 조직등가 선량계를 이용하여 측정되며 인체를 구성하는 각각의 장기의 선량이 아닌 전신선량을 대체하는 값으로 사용된다. 그러나 특정장기의 선량이나 이로 인한 확률론적 영향을 평가하기 위한 유효선량의 산정목적으로는 주어진 방사선장에 대하여 몸을 구성하는 하나하나의 장기가 받는 선량을 계속해야 하며 이를 위해서는 인체 등가의 선량계를 신체 내 주요 장기에 위치시키고 측정해야 하는 데 현재의 측정시스템으로 이를 측정하기란 사실상 불가능하다.

따라서 이에 대한 대안으로 주요 장기를 포함하는 인체 등가의 피폭체를 수학적으로 구성하여 방사선에 의한 각각의 장기가 받는 선량을 몬테카를로 모사방법을 통해 산출하는 방법이 사용된다. 최근에는 voxel 형태의 피폭체가 도입되어 정밀한 선량계산이 가능해졌으나 계산속도와 피폭체의 변형이 어려운 단점이 있다. 편의상 일반적으로 널리 사용되는 모델은 MIRD (medical internal radiation dose, MIRD)에서 1969년에 Snyder에 의해 개발된 MIRD-V 피폭체를 근간으로 하는 stylized 피폭체[7]

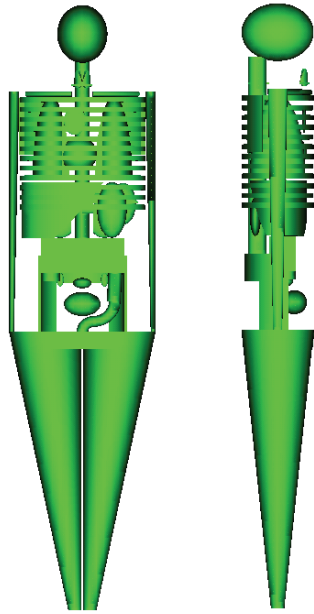


Fig. 2. Front and right lateral view of modified MIRD-V mathematical phantom.

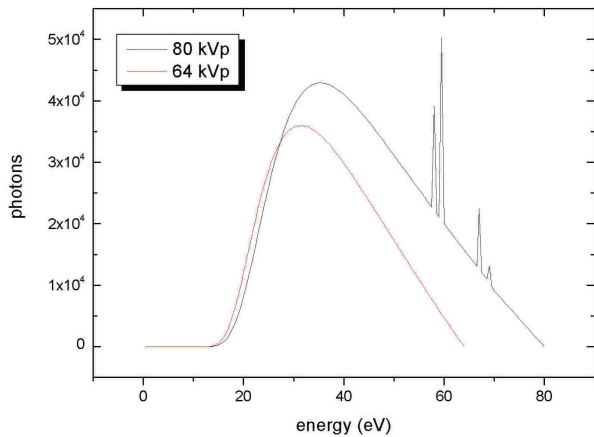


Fig. 3. X-ray source spectrum of C-arm produced by Spec 78.

이때 본 연구에서는 이 피폭체에 ORNL (Oak Ridge National Laboratory)에서 Cristy 등에 의해 개발된 연령별 피폭체[8] 중 성인남성의 주요장기 정보를 추가하여 평가하였다. Fig. 2에 피부와 두부 및 가슴의 연조직부분을 제외한 피폭체를 구성하여 도시하였다.

방사선수송코드는 MCNP 계산코드 (Monte Carlo N-Particle, MCNP)를 사용하였다. MCNP는 Boolean 대수법을 이용하여 3차원의 해석기하학적 구조를 구현하고 이를 특정 물질로 채움으로써 광자, 전자, 중성자의 수송해석이 가능한 대표적인 Monte Carlo 계산 코드이다. 본 선량재구성에서는 MCNPX 2.6.9[9]을 사용하였다.

X선 스펙트럼은 Institute of Physics and Engineering in Medicine (IPEM)에서 개발한 "Catalogue of Diagnostic X-ray Spectra and Other Data(Report 78)"에서 제공하는 데이터를 이용하였다[10]. SPEC 78 프로그램은 이 데이터를 이용하여 30~150 kVp 구간의 관전압

과 6~22°를 가지는 텅스텐 표적의 스펙트럼을 0.5 keV 간격의 에너지별로 75 cm 거리에서 단위 mAs 당 단위 면적당 광자수를 제공한다. 또한 공기 및 인체 조직 등과 같은 32개의 물질에 대해 감쇠계수 역시 0.5 keV 간격으로 내장하고 있어 필터의 효과를 스펙트럼에 고려할 수 있다. SPEC78에서 생성된 스펙트럼은 MCNPX의 입력문에 연속적인 에너지를 가진 선원을 표시하는 카드인 si/sp를 사용하여 선원향으로 모사하였으며 75 cm 거리에서의 공기 커마 값 산출결과 5% 미만의 큰 차이를 보이지 않았다.

Fig. 3에서는 생성된 스펙트럼을 도시하였는데 알루미늄 필터에 의해 저에너지 영역은 대부분 제거됨을 확인할 수 있으며 스펙트럼에서 peak로 나타나는 부분은 특성 X선의 발생에 따른 것으로 원자의 K 또는 L 각의 빈 공간에 전자가 채워지는 현상으로 나타나게 된다. 평균 에너지는 각각 약 37 keV, 52 keV로 평가되었다. C-arm의 일반적인 촬영조건에서는 최대 사용조건보다 저에너지 영역으로 스펙트럼이 많이 치우친 것을 확인할 수 있으며 이는 최대사용조건으로 사용할 경우 좀 더 보수적으로 선량을 평가할 수 있다는 것을 보여준다.

선량계산은 우선 실제 측정과 동일한 상황을 입력하여 MCNP의 흡수선량 산출 f6 tally를 이용하였으며 상대 오차를 5% 미만으로 줄이기 위해 107개 이상의 사상을 발생시켜 평가하였다. 시술자의 다양한 위치에 대한 평가를 수행하기 위해 우선 실측환경과 동일하도록 앉은 자세를 기준으로 평가하였다. 이 때에는 가슴위치에 추가적으로 TLD chip을 모사하여 실측결과와 일치하도록 피폭환경을 모델링하고 전산모사시 단일 사상의 TLD chip에 대한 선량환산인자를 산출하여 적용하였다. 이후 시술자 대응 피폭체의 위치를 조정하여 선 자세의 일반적인 작업위치와 최대선량을 받도록 가급적 조사 테이블에 가까이 위치하는 경우를 가정하여 평가하였다(Fig. 4).

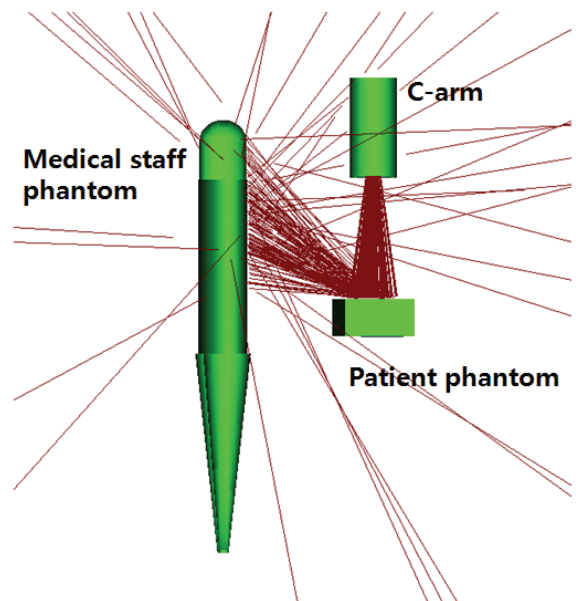


Fig. 4. Schematic view of radiation transport in an interventional radiology procedure by Monte Carlo simulations.

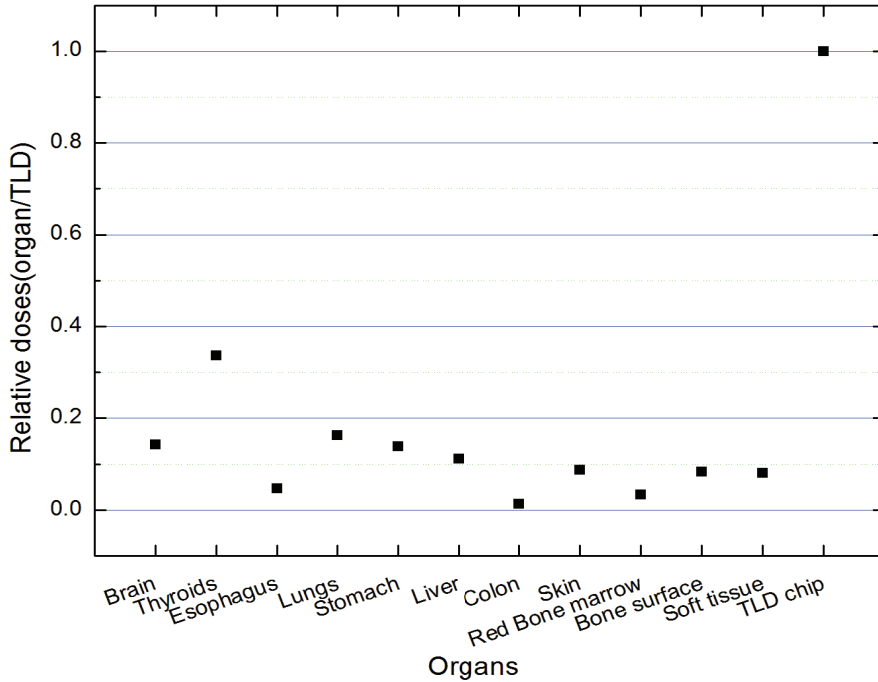


Fig. 5. Relative organ doses calculated by Monte Carlo simulations for standing position of a staff phantom.

3. 결과 및 논의

Table 2에 실측을 통한 선량 및 전산모사를 통해 얻은 선량계산 결과를 제시하였다. 기준점인 앉은 자세의 경우 실측값보다 전신(연조직)선량 계산 값이 적게 나오는데 이는 실측 시에는 개인선량계의 위치가 가슴이므로 전신이 동일한 조건에서 피폭되었을 경우를 가정하지만 선량계산에서는 산란체에서 저 에너지 광자가 투과하지 못하고 주로 위 방향으로 산란되어 신체의 일부에만 선량을 주기 때문에 전신을 모두 고려할 경우 오히려 선량평가의 대상영역이 확대되는 데에서 기인한다. 그러나 갑상선의 경우는 위치 상 산란선에 의해 피폭될 확률이 크기 때문에 실제 전신 측정값보다 높은 값을 보인다. Fig. 5에는 일반적인 작업위치인 선 자세에 대해 모사된 TLD-chip과 상대적인 주요장기의 선량을 표시하였다. TLD 착용에 따른 개인선량은 전신(연조직) 선량보다 약 10배 높은 값을 나타내는 데, 이는 단일 선량계를 착용하였을 때에 대한 유효선량 보정인자를 제시하는 일부 연구의 결과와도 비교적 잘 일치한다.[11,12]

선량평가 결과 단순히 개인선량계를 이용한 실측 방법으로는 본 피폭상황과 같이 방사선의 조사영역이 전신에 넓게 분포하지 않을 경우 실측값을 그대로 적용하는 데에는 한계가 있음을 보여준다. 일반적인 작업자세인 선 자세에서는 전신 선량이 더 증가하는 데 이것은 피폭영역이 앉은 자세보다 더 넓어지기 때문이며 갑상선의 경우는 오히려 산란선 영역에서 멀리 떨어지므로 선량이 낮게 나타난다.

Table 2. Results of Dose Assessment for the Staff of Interventional Radiology by Monte Carlo Calculations.

작업자의 위치	구분	선량
기준점	전신(실측)	0.07 mSv
	전신	0.01 mSv
	갑상선	0.15 mSv
선자세 (일반적인 작업위치)	전신	0.03 mSv
	갑상선	0.13 mSv
최대한 접근 (최대선량)	전신	0.07 mSv
	갑상선	0.19 mSv

4. 결론

일반적으로 널리 활용되고 있는 중재적 방사선시술에 대하여 실측 및 몬테카를로 전산모사 방법을 통해 시술자에 대한 주요 장기별 선량을 평가하였다. 시술자의 가슴부위에 패용하는 개인선량계에 의한 선량은 연조직을 비롯한 주요장기의 선량보다 상당히 높은 것으로 평가되었다. 또한 갑상선 선량은 상대적으로 전신 연조직을 비롯한 다른 주요장기보다 상대적으로 높은 것으로 평가되었으며 이에 대해 추가적인 관리나 방호조치가 필요할 것으로 보인다.

본 연구는 전신피폭체를 이용한 개인선량당량 및 주요 장기의 선량평가에 초점을 맞추어 수행하였으나 실제로 일차범에 노출되는 시술자의 손에 대한 선량평가에 관한 연구가 추가적으로 필요하다고 판단된다. 또한 중재적 방사선시술의 증가에 따라 시술자에 대한 방사선방호 조치는 더욱 강화되어야 할 필요가 있다.

참고문헌

1. International Commission on Radiological Protection. Avoidance of radiation injuries from medical interventional procedures. ICRP Publication 85. Oxford; Pergamon Press, 2000.
2. Internal Commission on Radiation Units and Measurements. Radiation quantities and units. ICRU Report 33, 1980.
3. Faulkner K, Marshall NW. The relationship of effective dose to personnel and monitor reading for simulated fluoroscopic irradiation conditions. Health Physics, 1993;64(5):502-508.
4. Stern SH, Rosenstein M, Renaud L, et al. Handbook of selected tissue doses for fluoroscopic and cineangiographic examination of the coronary arteries. HHS Publication FDA 1995:95-8288.
5. International Commission on Radiological Protection. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. ICRP Publication 74. Oxford; Pergamon Press, 1996.
6. Kim JI, Lee BI, Lim YK, et al. Physical phantom of typical Korean male for radiation protection purpose. Radiation Protection Dosimetry, 2006; 118(1):131-136.
7. Snyder WS, Ford MR, Warner GG, et al. Estimates of specific absorbed dose fraction for photon sources uniformly distributed in various organs of a heterogeneous phantom. Society of Nuclear Medicine MIRD pamphlet No. 5, revised, 1978.
8. Cristy M. Mathematical phantoms for use in reassessment of radiation dose to Japanese atomic bomb survivors. Oak Ridge National Laboratory ORNL/TM-9487, 1985.
9. Pelowitz DB. MCNPX user's manual version 2.6.0. Los Alamos National Laboratory LA-CP-07-1473, 2008.
10. Cranley K, Gilmore BJ, Fogarty WA, et al. Catalogue of diagnostic x-ray spectra and other data. The Institute of Physics and Engineering in Medicine Report No. 78, 1997.
11. Padovani R, Foti C, Malisan MR. Staff dosimetry protocols in interventional radiology. Radiation Protection Dosimetry, 2001;94:193-196.
12. McEwan AC. Assessment of Occupational Exposure in New Zealand from Personal Monitoring Records. Radiation Protection in Australasia, 2000;17:60-66.

Assessment of Occupational Dose to the Staff of Interventional Radiology Using Monte Carlo Simulations

Young-khi Lim
Gachon University

Abstract - Medical operations and diagnosis using interventional radiology techniques have been increased. The management and monitoring of occupational radiation exposure to the staff of interventional radiology become important, specially because they stand in close proximity to the patient. The operational radiation protection quantity, Hp(10) which can be obtained from personal dosimeter do not always represent the effective dose to the staff. So, in this study, to estimate the critical organ doses to the staff of interventional radiology, Monte Carlo calculations with mathematical human phantom and dose measurements with personal dosimeters were carried out for the major interventional radiology procedures using C-arm. Results showed that the values of Hp(10) measured by personal dosimeters were higher than critical organ doses which were calculated. And the calculated dose to thyroids was much higher than those of other critical organ doses. For the proper radiation protection of the medical staff of interventional radiology, additional radiation protection for thyroids as well as for whole body shielding like wearing a lead apron should be considered.

Keywords : Interventional radiology, Occupational exposure, Monte Carlo calculation, Radiation protection