Journal of Radiation Industry 12(2) : 131~138(2018)

몬테카를로 시뮬레이션을 통한 micro-CT의 차폐 물질 및 위치 최적화 연구

김기윤[1] · 김명수[1] · 김민환[1] · 이은중[1] · 조규성[1,*]

[1]한국과학기술원 원자력 및 양자공학과

Study of Shielding Material and Position Optimization of Micro-CT by Monte-carlo Simulation

Giyoon Kim[1], Myungsoo Kim[1], Minhwan Kim[1], Eunjung Lee[1] and Gyuseong Cho[1,*]

[1]*Department of Nuclear & Quantum Engineering, KAIST, Daejeon, Republic of Korea*

Abstract - Shielding radiation devices is a very important factor in securing the safety of users. In general, the best method of shielding radiation is to make the shielding material thick enough to minimize the amount of radiation leakage. However, since the shielding materials are very heavy, it would be necessary to consider the mass of the total system with a sufficient shielding structure for mobile systems. In this study, we investigate different materials for shielding of mobile micro-CT and evaluate the shielding performance with respect to the shielding position and the total weight of the system. The purpose of the shielding materials optimization is to compare the shielding ability with respect to the weight of the shielding material and to select the material that is sufficiently light while maximizing the shielding effect. The shield location measurement is based on the amount of leakage radiation when the shield is installed inside and outside of the micro-CT system housing. The materials used in this study are lead and tungsten with thicknesses ranging from 1 mm to 5 mm. Tungsten showed the same shielding performance at half of the lead thickness with the density less than twice the density of lead, making the tungsten shielding much lighter. In case of the shielding position, the inner shielding of the housing showed a higher shielding performance when compared to that of the outer housing.

Key words : Micro-CT shielding, MCNP simulation, Shielding calculation, Dose calculation, Portable micro-CT

서 론

엑스선 영상장치는 영상획득 시간이 빠르며, 다른 영상장치에 비하여 사용하기 쉬우므로 의료 분야와 산업 분야에서 매우 빈번하게 사용되고 있다. 비교적 낮은 에너지의 방사선을 사용하며, 엑스선 조사시간이 짧으므로 1회 촬영 시 방사선량은 흉부 엑스레이 기준 0.03 mSv 정도로 낮다(Wall and Hart 1997). 그러나, 산업 분야와 같이 엑스선 영상장치를 장시간 사용하면, 누적 선량이 매우 높아지게 된다. 따라서 엑스선 영상장치를 안전하게 장시간 사용하려면, 엑스선 차폐가 필수적이다.

차폐는 사용 분야에 따라 다르게 설계가 이루어진다. 일반 의료용 엑스선 방과 CT 방의 경우 다수의 차폐벽을 이용한다. 또한, 추가로 보호 장비로서 치마, 장갑 그리고 고글

* Corresponding author: Gyuseong Cho, Tel. +82-42-350-3821, Fax. +82-42-350-5861, E-mail. gscho@kaist.ac.kr

과 같이 신체에 착용하는 차폐 옷을 착용하고 촬영을 한다 (McCaffrey *et al*. 2007). 산업용 엑스선 시스템 혹은 보안 검색대용 엑스선 시스템은 자체 하우징을 차폐하여, 내부에 피사체만 들어가고 사용자는 하우징 밖에서 엑스선 조사가 가능하도록 구성되어 진다. 현재까지는 차폐벽 혹은 기타 차폐 방법에 사용된 차폐체는 납이다. 납 이외에 여러 물질의 광자 투과율 평가 결과를 보면 텅스텐과 금과 같이 밀도가 높은 물질이 1% 정도의 투과율을 보였으며, 납의 경우 6% 정도였다. 그럼에도 불구하고 납이 쓰이는 이유는 경제적으로 적합하며, 가공성이 매우 뛰어나기 때문이다(김과 심 2017).

납에서 발생하는 여러 문제점을 보완하기 위해 대체 물질 연구가 활발하게 이루어졌다. 그러나 앞선 연구들의 결과를 보면, 여전히 납을 주로 사용한 차폐체의 효율에 미치지는 못하고 있다. 바륨, 텅스텐, 고무 등, 여러 물질을 조합한 1.6 mm의 두께를 갖는 차폐체는 50~150 kVp 에너지 영역에서 납의 두께 0.03 mm~0.3 mm와 비슷한 차폐 수준을 나타내었다 (Kim *et al*. 2012). 80 kVp의 엑스선에서 여러 혼합 물질들은 0.5 mm의 납과 같은 투과율을 갖기 위하여 최소 0.55 mm 이상의 두께가 필요한 것을 확인하였다(McCaffrey *et al*. 2007).

본 연구에서는 Fig. 1에 나타나 있는 micro-CT의 차폐 최적화를 위한 연구를 진행하였다. Fig. 1의 micro-CT는 움직일 수 있는 이동형 CT 시스템이다. 따라서 사용자 및 주변 보호를 위한 차폐가 필수적이며, 움직임이 쉽도록 전체 시스템의 무게가 적당히 낮도록 설계가 되어야 한다. 차폐 최적화를 위하여 실제 사용이 가능한 물질 중 차폐성능이 뛰어난 납과 텅스텐을 사용하였을 경우 투과 방사선이 기준치 이하로 내려가는 두께를 계산하였다. 또한, 이때 각각의 차폐체로 인하여 증가하는 질량을 비교하여, 납과 텅스텐 중 사용 가능한 차폐체를 선정하였다. 마지막으로 차폐체의 위치에 대한 차폐능력을 비교하기 위하여, 하우징 속 차폐와 하우징 겉 차폐 두 경우에 대한 차폐능력을 비교하였다. 최적화 계산은 Monte-Carlo 시뮬레이션을 이용하였다.

Fig. 1. Micro-CT 3D rendering.

재료 및 방법

Fig. 1의 micro-CT는 겉면이 모두 철 재질로 이루어져 있으며, 두께는 5 mm이다. 따라서 이와 똑같은 크기로 MCNP 상에서 구현한 형태가 Fig. 2이다. 실체와 같이 순수 철 5 mm의 두께로 모사하였으며, 각각의 면의 길이는 2D 도면에 명시되어 있는 길이와 같이 모사하였다. Micro-CT 내부에 있는 검출기와 스테이지와 같은 기구 부는 제거한 상태로 MCNP 상에 모사하였는데, 이는 여러 기구 부로 인하여 일어나는 감쇄를 최소화하고, 검증을 보수적으로 진행하기 위함이다.

본 연구에서 모사된 엑스선 튜브는 EXG8 모델로 최대 120 kVp의 관 전압과 최대 10 mA의 관 전류를 갖는 튜브이다. 최대 출력은 1.2 kW이다. 필터는 2.8 mm의 알루미늄으로 이루어져 있다. 시뮬레이션 상에서 해당 튜브를 모사하기 위하여 SRS-78 프로그램을 사용하였으며(Paydar *et al*. 2012), 관 전압의 경우 150 kVp로 증가시켜서 엑스선 스펙트럼을 구하였고, 2.8 mm의 알루미늄 필터를 적용하여 얻었다. SRS-78 프로그램으로 얻은 엑스선 스펙트럼은 Fig. 3에

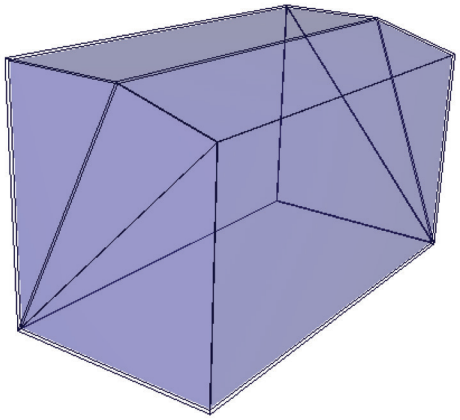

Fig. 2. Micro-CT housing designed for simulation.

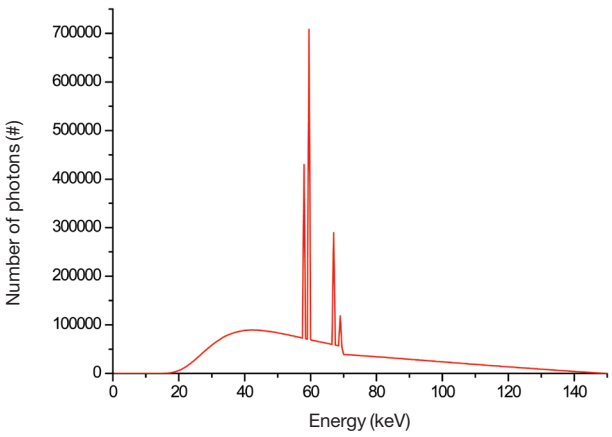

Fig. 3. X-ray spectrum obtained with the SRS-78 program.

나타나 있다. 관 전류는 MCNP 내부에서 10 mA를 mAs로 환산하였으며, 조사시간은 실제 튜브의 펄스 조사시간인 30 s를 적용하여 300 mAs의 가중치를 곱해주었다.

Fig. 2의 하우징 내부에서 엑스선 선원의 위치는 튜브 벽면으로부터 15 cm 떨어진 곳에 있다. 이는 실제 튜브가 micro-CT 내부에 설치되는 위치와 같으며, 높이는 micro-CT의 중심과 같다. Micro-CT와 선원 항의 구조는 Fig. 4에 나타나 있다. 이때, 엑스선 빔의 콘 각도는 60°로써 실제 튜브와 같은 콘 빔 각도로 모사하였다.

앞서 모사한 micro-CT는 총 7면체이다. 좌측면과 우측면과 앞면, 뒷면 그리고 바닥 부분은 하나의 면으로 되어있으나, 천장 부분이 2개의 면(top01, top02)으로 이루어져 있으며, top02 부분이 각도가 있으며, 납유리로 이루어지는 부분

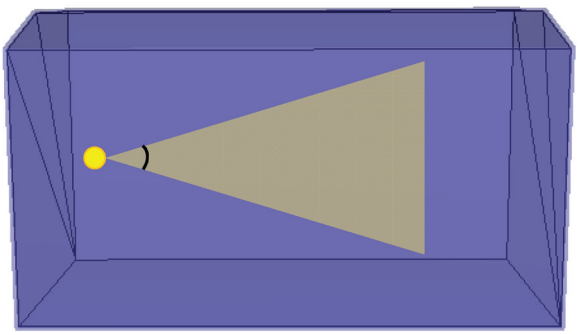

Fig. 4. Direction of X-ray generation in simulation.

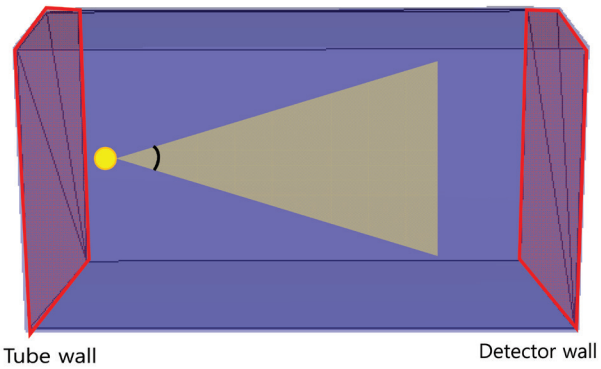

Fig. 5. Position of X-ray tube side and detector side.

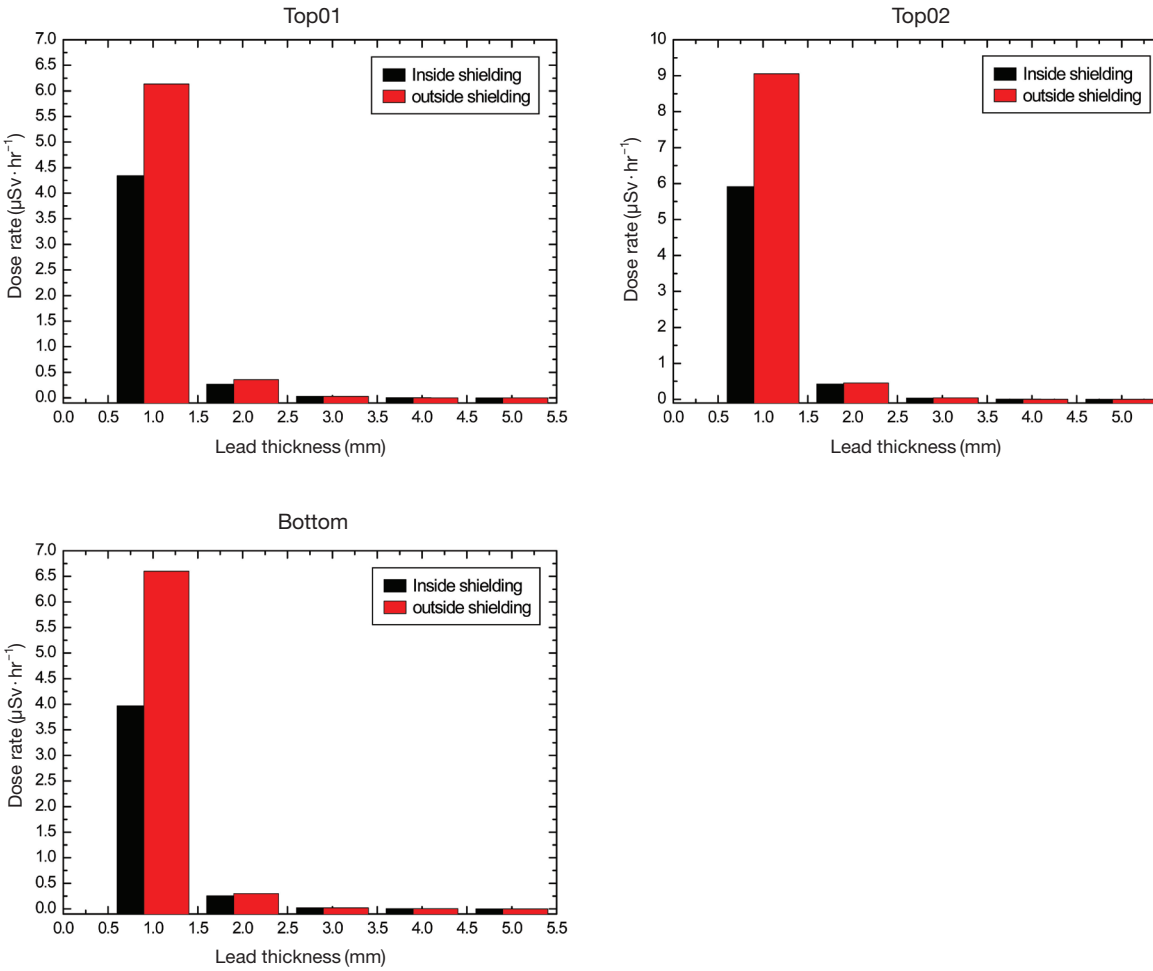

Fig. 6. Dose rate due to internal and external lead shielding.

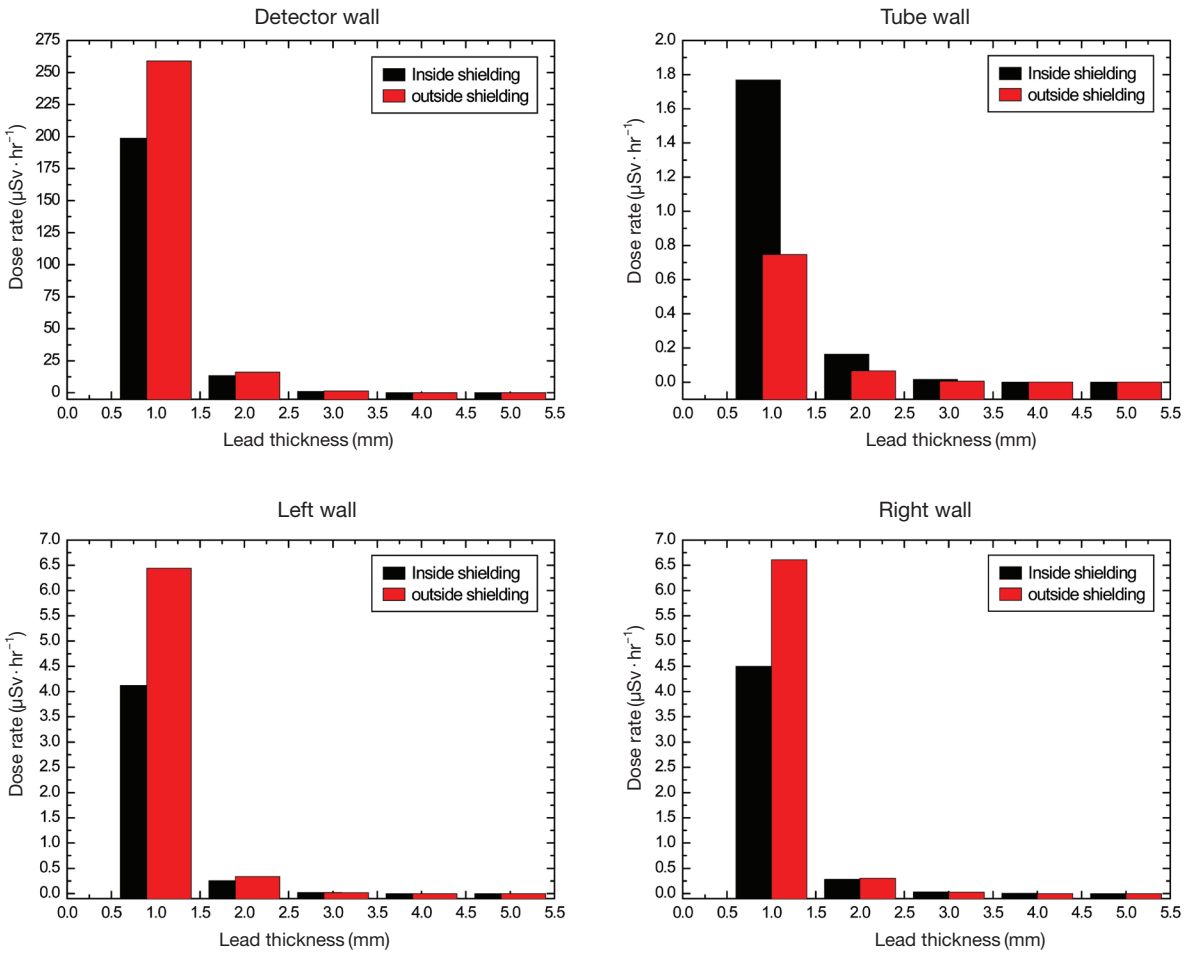

Fig. 7. Dose rate due to internal and external lead shielding.

Table 1. Dose rate according to lead thickness in internal shielding

Thickness (mm)	Lead-Inside shielding (μSv · hr^{-1})						
	Top01	Top02	Bottom	Detector wall	Tube wall	Left wall	Right wall
1	4.340	5.918	3.971	198.643	1.769	4.121	4.498
2	0.264	0.424	0.255	13.297	0.163	0.253	0.283
3	0.030	0.034	0.022	1.129	0.015	0.021	0.031
4	0.004	0.003	0.003	0.096	0.000	0.002	0.003
5	0.000	0.002	0.000	0.006	0.000	0.001	0.000

Table 2. For lead shielding, the dose on the micro-CT housing surface for a year

Thickness (mm)	Lead-Inside shielding (mSv)						
	Top01	Top02	Bottom	Detector wall	Tube wall	Left wall	Right wall
1	9.028	12.309	8.259	413.177	3.680	8.573	9.355
2	0.549	0.882	0.530	27.658	0.338	0.525	0.588
3	0.062	0.070	0.045	2.348	0.032	0.045	0.064
4	0.009	0.007	0.007	0.199	0.000	0.003	0.006
5	0.000	0.003	0.000	0.013	0.000	0.002	0.000

이다. 앞면과 뒷면은 Fig. 5와 같이 엑스선 튜브 쪽 면과 검출기 쪽 면이다.

차폐체는 각각의 철 하우징 면의 안쪽에 두었을 때와 바깥에 두었을 때, 2가지 경우로 나누어 구성하였다. 또한, 차

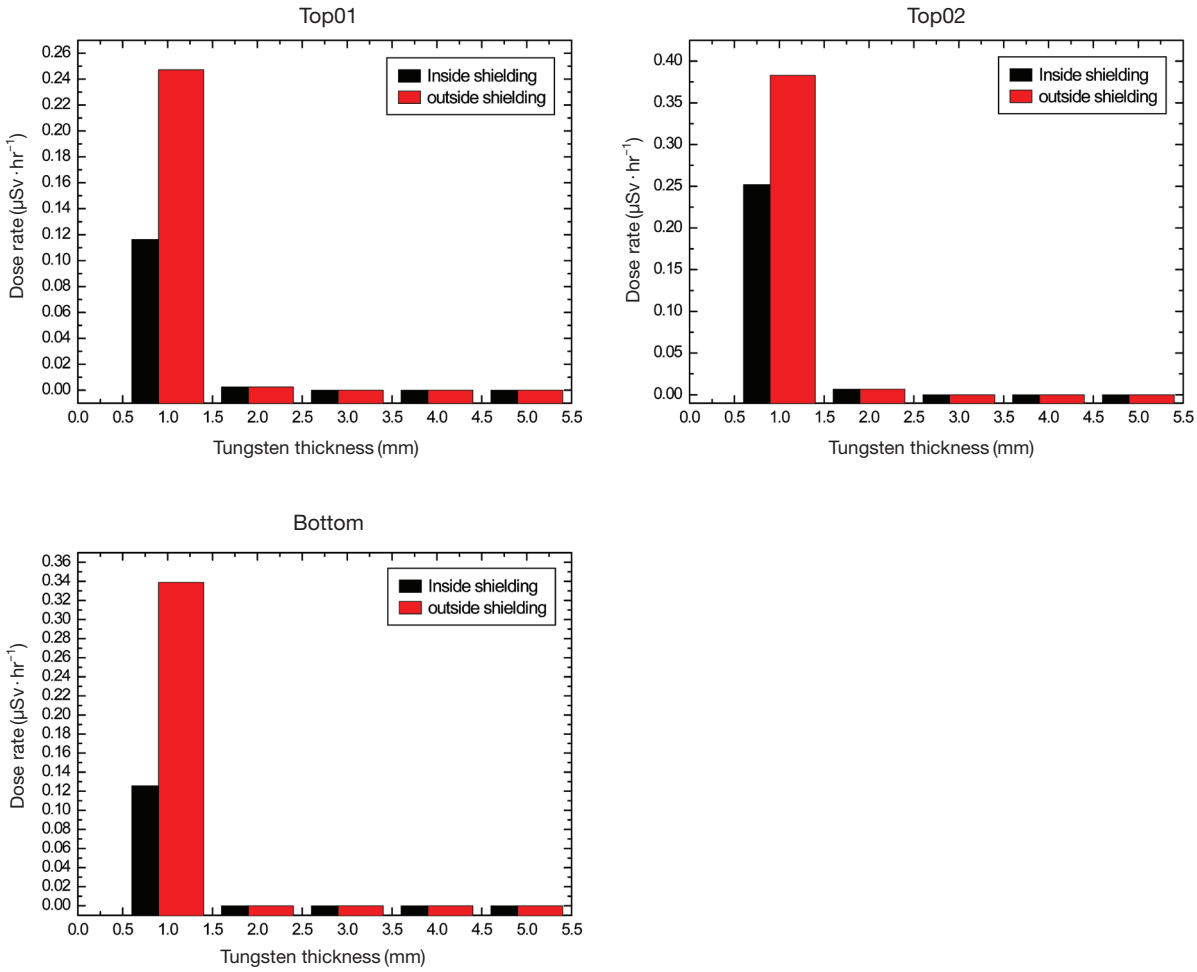

Fig. 8. Dose rate due to internal and external tungsten shielding.

폐체로는 납과 텅스텐 두 가지 물질을 비교하였다. 각각의 차폐체는 두께 1 mm부터 5 mm까지 1 mm 간격으로 증가시키며 표면 선량을 계산하였다.

결과 및 고찰

본 연구의 차폐 기준은 micro-CT를 하루 8시간씩, 주 5일, 52주간 사용했을 때, 법령에서 지정하는 기준 선량 이하로 측정이 되며, 비교적 부피가 낮아 전체 시스템의 질량이 가벼운 차폐 조건을 찾는 것이다.

1. 납 차폐 결과

1.1 차폐체 위치에 따른 선량율

납을 micro-CT 내부에 위치시키고 측정하였을 때와 하우징 외부에 위치시키고 측정하였을 때의 결과는 Fig. 6과 Fig. 7에 나타나 있다. 전체적으로 내부에 납으로 차폐한 경우에서 더 낮은 선량율을 보이는 것을 알 수 있다. 각각의 선량율은 Table 1에 나타나 있다. 내부 차폐의 경우 엑스선 튜브 쪽 벽의 경우 직접적으로 엑스선이 도달하지 않기 때문에 1 mm의 납 조건에서 1.8 μSv·hr^{-1} 정도의 선량율을 보이고 있다. 반면에 직접적으로 도달하진 않지만 포톤이 이동하는 경로의 주변에 있는 벽들은 1 mm의 납 조건에서 4 μSv·hr^{-1}에서 6 μSv·hr^{-1} 정도의 선량율을 보이고 있다. 엑스선 튜브가 바라보는 방향의 검출기 쪽 벽은 대략 200 μSv·hr^{-1} 정도로 다른 부분보다 50배 가량 높은 선량율을 보인다. 검출기 쪽 벽의 선량율이 다른 부분의 선량율과 같아지는 납의 두께는 대략 3 mm 정도이다. Micro-CT 외부 차폐의 경우 내부 차폐보다 대략 최소 25%에서 최대 50% 정도 높은 선량율을 나타내었다. 단, 튜브 쪽 벽의 경우 반대로 외부 차폐의 선량율이 더 낮은 것을 확인할 수 있다.

1.2 1년간 선량 계산

1년간 선량을 계산하는 기준은 1주일에 40시간씩 52주를 가동했을 때를 기준으로 설정하였다. 이는 1년간 2080시간으로 계산하였으며, 결과는 Tabel 2에 나타나 있다. 검출기 쪽 벽면을 제외한 나머지 면에 대한 결과를 보면 1 mm의

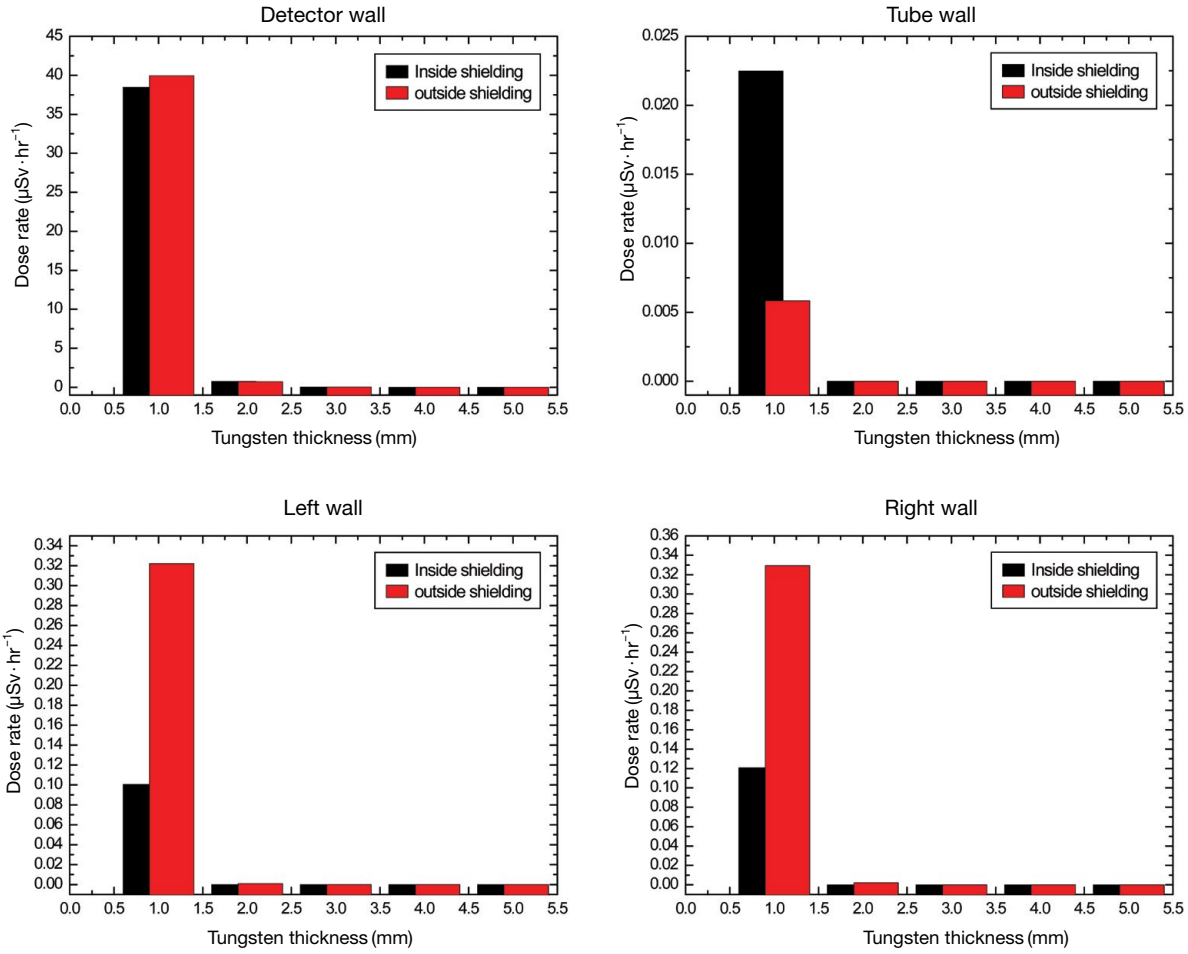

Fig. 9. Dose rate due to internal and external tungsten shielding.

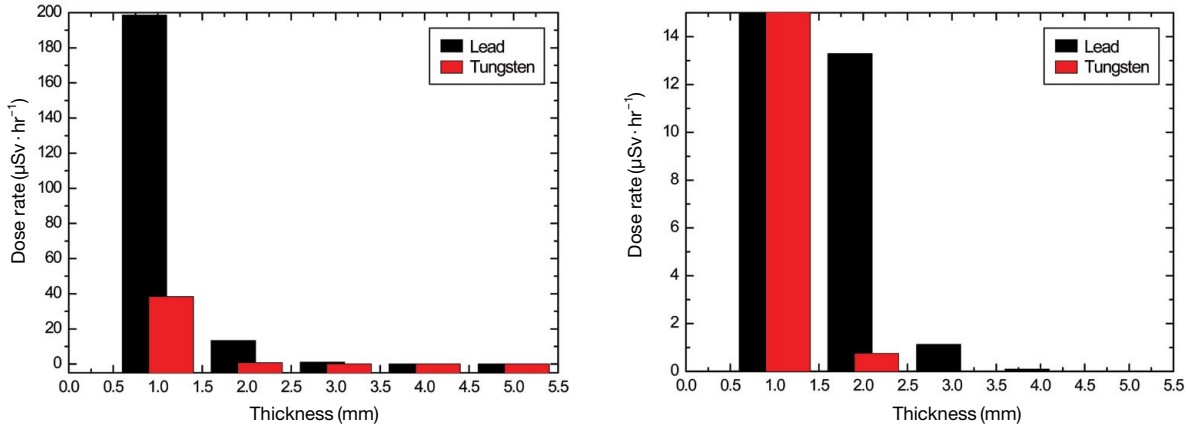

Fig. 10. Comparison of dose rate of lead shielding and tungsten shielding on detector wall.

납 조건에서 최소 8 mSv에서 최대 12 mSv의 선량이 측정되며 해당 값은 년간 기준선량인 20 mSv의 절반 정도 수준인 것을 알 수 있다. 단, 검출기 쪽 벽의 경우 3 mm의 납 조건에서 기준 선량 이하의 값이 측정되었다.

2. 텅스텐 차폐 결과

2.1 차폐체 위치에 따른 선량율

텅스텐을 micro-CT 내부에 위치시키고 측정하였을 때와 하우징 외부에 위치시키고 측정하였을 때의 결과는 Fig. 8

Table 3. Dose rate according to tungsten thickness in internal shielding

Thickness (mm)	Tungsten-Inside shielding ($\mu Sv \cdot hr^{-1}$)						
	Top01	Top02	Bottom	Detector wall	Tube wall	Left wall	Right wall
1	0.116	0.252	0.126	38.451	0.022	0.100	0.121
2	0.002	0.007	0.000	0.753	0.000	0.000	0.000
3	0.000	0.000	0.000	0.013	0.000	0.000	0.000
4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Table 4. For tungsten shielding, the dose on the micro-CT housing surface for a year

Thickness (mm)	Tungsten-Inside shielding (mSv)						
	Top01	Top02	Bottom	Detector wall	Tube wall	Left wall	Right wall
1	0.242	0.524	0.261	79.977	0.047	0.209	0.251
2	0.005	0.014	0.000	1.566	0.000	0.000	0.000
3	0.000	0.000	0.000	0.027	0.000	0.000	0.000
4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Table 5. For tungsten shielding, dose of micro-CT surface for one year (0.5, 1.5 mm of tungsten)

Thickness (mm)	Tungsten-Inside shielding ($\mu Sv \cdot hr^{-1}$)						
	Top01	Top02	Bottom	Detector wall	Tube wall	Left wall	Right wall
0.5	3.847	6.194	3.352	358.063	0.330	3.579	3.569
1.5	0.008	0.020	0.010	5.097	0.000	0.008	0.011
Thickness (mm)	Tungsten-Inside shielding (mSv)						
	Top01	Top02	Bottom	Detector wall	Tube wall	Left wall	Right wall
0.5	8.001	12.883	6.972	744.771	0.686	7.444	7.424
1.5	0.016	0.042	0.020	10.603	0.000	0.016	0.023

과 Fig. 9에 나타나 있다. 텅스텐도 내부와 외부 차폐의 차이는 납 차폐와 비슷한 경향을 보인다. 단, 검출기 쪽의 선량율은 납과 다르게 내부와 외부에서 매우 비슷한 값을 나타내고 있다. 각 벽에 대한 선량율은 Table 3에 나타나 있으며, 전체적으로 1 mm의 텅스텐 차폐는 최소 0.1 $\mu Sv \cdot hr^{-1}$에서 0.24 $\mu Sv \cdot hr^{-1}$의 선량율을 나타내고 있다. 텅스텐의 차폐능력을 납과 비교하였을 때, 1 mm의 텅스텐이 2 mm의 납과 같은 차폐능력을 갖는 것을 볼 수 있다.

2.2 1년간 선량 계산

텅스텐 차폐의 1년간 선량은 납과 같게 2080시간을 기준으로 계산하였다. 결과는 Table 4에 나타나 있다. 검출기 쪽 벽을 제외한 나머지 차폐벽에서 1 mm의 텅스텐 차폐 시, 연간 1 mSv를 넘지 않는 차폐능력을 보인다. 검출기 벽의 경우는 2 mm의 텅스텐 차폐에서 연간 기준 선량 이하의 값을 나타내는 것을 볼 수 있다.

3. 검출기 벽면 차폐능력 비교

본 연구에서 가장 선량율이 높은 부분은 엑스선이 직접 도달하는 검출기 쪽 벽면이다. Fig. 10에서 볼 수 있듯이, 납 차폐의 경우 3 mm 두께가 기준 선량 이하를 나타냈으며, 텅스텐의 경우 2 mm에서 기준 선량 이하의 값을 알 수 있다. 그러나 검출기 벽면 2 mm의 텅스텐에서 나타내는 선량은 기준 선량에 비하여 15배 가량 낮고, 다른 벽면 1 mm의 텅스텐의 선량 값은 20배 이상 낮기 때문에 실제 제작 가능한 텅스텐 두께에서 가장 낮은 두께인 0.5 mm와 1.5 mm를 추가적으로 계산하였다. 결과는 Table 5에 나타나 있다. 엑스선이 직접 도달하는 검출기 벽의 경우 1.5 mm의 텅스텐에서 연간 기준 선량 이하의 값을 나타내고 있으며, 나머지 벽은 0.5 mm의 텅스텐 차폐에서 연간 기준 선량 이하의 값을 나타내는 것을 볼 수 있다.

4. 차폐체의 질량 비교

검출기 쪽 벽면의 가로는 556 mm이고 세로는 640 mm이다. 이때 납 3 mm의 부피는 1,067,520 mm^3이고 밀도는 11.34 $g \cdot cm^{-3}$로 납 차폐체의 질량은 12.1 kg 정도이다. 나머지 벽의 경우 납 1 mm에서 충분한 차폐가 가능하다. Micro-

CT의 길이가 1,110 mm이고, 따라서 나머지 6개의 벽의 총 부피는 3,010,960 mm^3이다. 따라서 나머지 벽의 전체 질량은 34.1 kg 정도로 납 차폐체의 전체 질량은 46.2 kg이다. 텅스텐 차폐의 경우 검출기 쪽 벽면의 부피는 텅스텐 두께가 납에 비해 절반 정도이기 때문에 533,760 mm^3이고 텅스텐의 밀도는 19.25 $g \cdot cm^{-3}$이기 때문에 전체 질량은 10.275 kg 정도이다. 나머지 6개 벽의 총 부피는 1,505,480 mm^3이다. 따라서 질량은 28.98 kg으로 텅스텐 차폐체의 전체 질량은 39.26 kg이다. 차폐능력은 거의 비슷한 수준이지만 질량에서 텅스텐 차폐가 7 kg 가량 낮기 때문에 이동형 micro-CT의 차폐체로는 텅스텐이 더욱 합리적인 것을 알 수 있다.

결 론

방사선은 눈에 보이지 않기 때문에 사용 시, 사용자의 안전을 위하여 차폐는 필수적이며, 충분한 차폐가 요구된다. 단순하게 차폐체의 두께를 매우 두껍게 만드는 것이 차폐에는 좋지만, 본 연구와 같이 이동이 가능해야 하는 방사선 기기의 경우 차폐체를 무한정 두껍게 설계하는 것은 불가능하다. 따라서 질량 대비 차폐 효율이 높은 물질을 사용하며, 연간 기준 선량을 넘지 않도록 설계하여, 안전하면서 사용하기 편리한 설계가 필수적이다. 본 연구에서 이동에 용이한 물질의 선정 기준은 전체 차폐체의 질량을 기준으로 하였으며, 안전에 대한 기준은 국가 법령에서 지정한 연간 선량 기준치를 일반적인 근무시간 동안 구동하였을 때의 총 선량으로 정하였다. 이때, 효과적인 차폐가 가능한 납과 텅스텐 중 질량 대비 차폐능력이 높은 물질은 텅스텐이었다. 텅스텐은 납에 비하여 절반의 두께에서 같은 차폐능력을 보였으며, 텅스텐의 밀도가 납의 밀도에 비하여 두 배를 넘지 않기 때문에 텅스텐 차폐의 총 질량이 더 낮은 것을 볼 수 있다.

본 연구에서 차폐체의 위치에 따른 차폐능력을 비교하기 위하여, micro-CT 하우징의 내부와 외부 차폐를 비교하였다. 납과 텅스텐 모두에서 내부에 차폐체를 설치하는 것이 더 좋은 차폐능력을 보였다. 차폐체에 막히지 않고 통과한 엑스선 포톤들이 물질 내부에서 반응을 통해 에너지가 감소한 상태로 차폐체를 빠져나오고, 에너지가 감소한 포톤들은 하우징 물질인 철에서 다시 차폐가 일어나 막히면서 더 좋은 차폐 능력을 보인 것이라고 사료된다. 반면에 하우징을 먼저 통과하게 되면, 철에서 고에너지 부분의 포톤의 감쇄비율이 낮기 때문에 높은 에너지의 포톤들은 철과 반응하지 않고 지나간다. 이러한 포톤들이 차폐체에 막히지 않고 통과하면서 에너지가 감쇄하더라도, 차폐체가 전체 시스템에 마지막 물질이기 때문에 포톤들은 공기 중으로 진행하기 때문에 차폐 능력이 떨어진다고 사료된다. 이는 감마선 차폐와 비슷한 경향을 보이는데, 감마선 차폐 시에도 차폐체를 통과하면서 발생하는 2차 방사선을 막기 위하여 일반적으로 차폐체를 시설 내부에 설치하게 된다.

결론적으로 엑스선 차폐는 하우징 내부에 하는 것이 차폐 효율적인 부분에서 더 좋으며, 시스템을 이동시키면서 발생하는 충격에도 내부에 차폐하는 것이 안정적이다. 또한, 외부 도색과 같은 기타 편의 사항 디자인 부분에서도 내부 차폐가 더 용이하다. 차폐 물질의 경우 납보다 가벼운 설계가 가능한 텅스텐을 사용하는 것이 안정성과 이동성 두 가지 모두에서 이득인 것을 확인할 수 있다.

사 사

This work was supported by the Nuclear Research & Development Program of the Korea Science and Engineering Foundation (KOSEF) grant funded by the Korean government (MSIP) (grant code : 2015M2A2A4A03045310).

참 고 문 헌

김기정, 심재구. 2017. 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 차폐체 원소 평가. *방사선기술과학* **40**:269-274.

Kim SC, Dong KR and Chung WK. 2012. Medical radiation shielding effect by composition of barium compounds. *Ann. Nucl. Energy* **47**:1-5.

McCaffrey JP, Shen H, Downton B and Mainegra-Hing E. 2007. Radiation attenuation by lead and nonlead materials used in radiation shielding garments. *Med. Phys.* **34**(2): 530-537.

Paydar R, Takavar A, Kardan MR, Babakhani A, Deevband MR and Saber S. 2012. Patient effective dose evaluation for chest X-ray examination in three digital radiography centers. *Iran. J. Radiat. Res.* **10**(3-4):139-143.

Wall BF and Hart D. 1997. Revised radiation doses for typical X-ray examinations. Report on a recent review of doses to patients from medical X-ray examinations in the UK by NRPB. *Brit. J. Radiol.* **70**(833):437-439.

Received: 5 March 2018
Revised: 14 April 2018
Revision accepted: 4 June 2018