

Assessment of Spatial Dose Distribution in the Diagnostic Imaging Laboratory by Monte Carlo Simulation

Yun-Hyeong Cho, Bo Sun Kang*

Department of Radiological Science, Konyang University, Daejeon 35365, Korea

Received: September 19, 2017. Revised: November 23, 2017. Accepted: November 30, 2017

ABSTRACT

In this study, the calculation of the effective spatial dose distribution of the diagnostic imaging laboratory of K university was performed by the Monte Carlo simulation. The radiation generator has a maximum tube voltage of 150 kVp and a maximum current of 700 mA. Using the results, we compared the spatial effective dose distributions of diagnostic imaging laboratory when the shielding door was closed and opened. In conclusion, it was found that the effective dose in the operating room of the diagnostic imaging laboratory does not exceed the annual dose limit (6 mSv/y) of the student (occasional visitor) even when the door is opened. However, since the effective dose when the door is open is about 16 times higher in front of the lead glass window and about 3,000 times higher in front of the doorway than the case when the door is closed, closing the shielding door at the time of the practical exercising reduces unnecessary radiation exposure by great extent.

Keywords: Monte Carlo simulation, X-ray Generator, Dose Distribution, Dose limit

I. INTRODUCTION

방사선학과의 진료영상 촬영 실습실과 같은 방사선 발생장치 사용시설은 원자력안전법규에 따라 사용시설 경계에서의 공간선량이 원자력안전법규에 명시된 선량한도를 초과하지 않도록 차폐시설을 설치한 후, 원자력안전기술원에서 시설검사를 실시하여 누설선량이 선량한도를 초과하지 않는 것이 확인된 이후에 사용허가를 취득할 수 있다. 따라서 모든 발생장치 사용시설, 특히, 방사선학과의 진료영상 촬영 실습실은 원자력안전법에 의한 방사선 발생장치 사용 허가시설이다. 하지만, 대부분 방사선학과의 진료영상 촬영 실습실은 원자력법상 수시출입자 기준이 수립된 2016년 이전에 일반인과 방사선 작업종사자 선량한도 기준에 의해 차폐 설계되고 건설된 시설들이므로 수시출입자의 선량한도 기준을 적용할 경우 사용시설 내 출입가능 공간에 대한 확인을 위해 사용시설 내부 공간 방사선량의 분포에 대한

정확한 평가가 필요하다.

진료영상 촬영 실습실은 크게 방사선 조사실과 방사선 발생장치 제어실로 나누어져 있다. 방사선 조사실은 방사선 발생장치와 방사선 영상장치 및 인체모형 positioning을 위한 조사테이블 등이 설치되어 있는 공간을 말하며, 방사선 발생장치 제어실은 관전압과 관전류 및 조사시간 등 촬영조건에 관련된 모든 인자를 포함하여 방사선 발생장치를 조작하는 컴퓨터 및 모니터가 설치되어 있으며 실습수업을 수강하는 학생들이 실습준비를 위해 대기하고 있는 공간을 말한다. 발생장치 제어실에 설치된 발생장치 제어용 컴퓨터와 모니터 그리고 빔 조사 스위치 등은 대부분 조사실 내부를 관찰할 수 있는 납유리로 제작된 시창구 앞에 설치된 테이블 위에 배치되어 있다. 따라서, 방사선 조사 중에 팬텀의 위치유지나 내부상황 관찰 등을 납유리를 통해 확인하면서 촬영을 진행할 수 있다. 그러므로 실습에 참여하는 학생은 테이블 크기에 의해 조사

* Corresponding Author: Bo Sun Kang

E-mail: bskang@konyang.ac.kr

Tel: +82-42-600-8441

실 경계 즉, 차폐벽 또는 납유리의 표면으로부터 대략 20 ~ 30 cm 정도 떨어진 곳에서 실습을 진행한다. 그러므로 사용시설의 실제 설계기준은 방사선 발생장치의 성능이 최대일 때로 가정하여 납유리로부터 30 cm 거리에서의 선량이 작업종사자 선량한도 20 mSv/y, 수시출입자 선량한도 6 mSv/y, 또는 일반인 선량한도 1 mSv/y를 넘지 않도록 차폐재가 설치되어야 한다.^[1] 선량한도의 적용은 발생장치 제어실에 출입하는 출입자의 신분이 무엇인지에 따라 결정된다. 예를 들어 작업종사자와 수시출입자가 출입해야한다면 발생장치 제어실의 공간방사선선량은 수시출입자 선량한도인 6 mSv/y를 초과하지 않도록 차폐시설이 설계 및 시공되어야 한다.

이에 본 연구에서는 방사선 발생장치 용량을 최대로 설정하고, 문이 닫혀 방사선 사용시설로부터 완전히 차폐가 되었을 때의 선량 분포와 문이 열려 있을 때의 선량 분포를 몬테카를로 코드 중 하나인 MCNPX 2.7 (Monte Carlo N-Particle eXtended 2.7)로 비교하였다. MCNPX는 중성자, 광자, 전자와 관련된 입자반응을 모사하는 프로그램으로 방사선 방어 및 선량 계산, 차폐, 가속기 표적 설계 등에서 대표적으로 이용되는 몬테카를로 코드이다.^[2]

II. MATERIAL AND METHODS

K대학교 진료영상 촬영 실습실을 대상으로 몬테카를로 전산해석을 위한 실습실 구조를 모델링하였다. K대학교 진료영상 촬영 실습실의 실제 높이는 300 cm, 방사선 조사실은 910 × 400 × 300 cm³ 이고, 발생장치 제어실은 910 × 600 × 300 cm³이다. 일반인 구역과의 경계면 벽두께는 10 cm의 콘크리트로 되어 있고, 방사선 사용시설 사면 벽은 5 cm의 판넬 사이에 0.2 cm의 납으로 구성되어있다. 방사선 조사실과 발생장치 제어실을 구분하는 경계면에는 시창구로 사용되는 두께 1 cm의 납유리가 있으며, 시창구를 제외한 나머지 차폐벽과 차폐문에는 두께 0.2 cm의 납판이 설치되어 있다. Fig. 1은 실제 설계를 반영하여 MCNPX 2.7로 geometry를 모델링한 것이다. Fig. 1의 (a)는 차폐문이 닫혀있을 때 사용시설 내부의 공간유효선량 분포를 계산하기 위해 사용된 geometry를 나타낸 것이고 (b)는 차폐문이 열려있을 때 사용시

설 내부의 공간유효선량 분포를 계산하기 위해 사용된 geometry를 나타낸 것이다.

K대학교 진료영상 촬영 실습실에 설치된 방사선 발생장치(APOLLON, GEMSS Co. Ltd, Korea)는 최대성능이 150 kV, 700 mA로 일반촬영 용도이다. 따라서선원향을 정의할 때 텅스텐 표적에 입사하는 전자의 최대에너지 150 keV, tally multiplication factor $700 \times 10^3[A]/1.6 \times 10^{-19}[C/e]$ 으로 설정했으며, 선원 위치(텅스텐 표적과 전자의 충돌위치)는 조사테이블 중심의 높이에서 100 cm 떨어진 높이로 설정하였다. 조사야의 크기는 10 × 10 cm²가 될 수 있도록 콜리메이터를 지정하였고, 고유여과를 고려하여 0.08 cm 두께의 Be 필터를 삽입하였으며 X선관 내부의 텅스텐 타겟 각도는 20°로 설정하였고, X선관 내부는 진공으로 설정하였다.^[3]

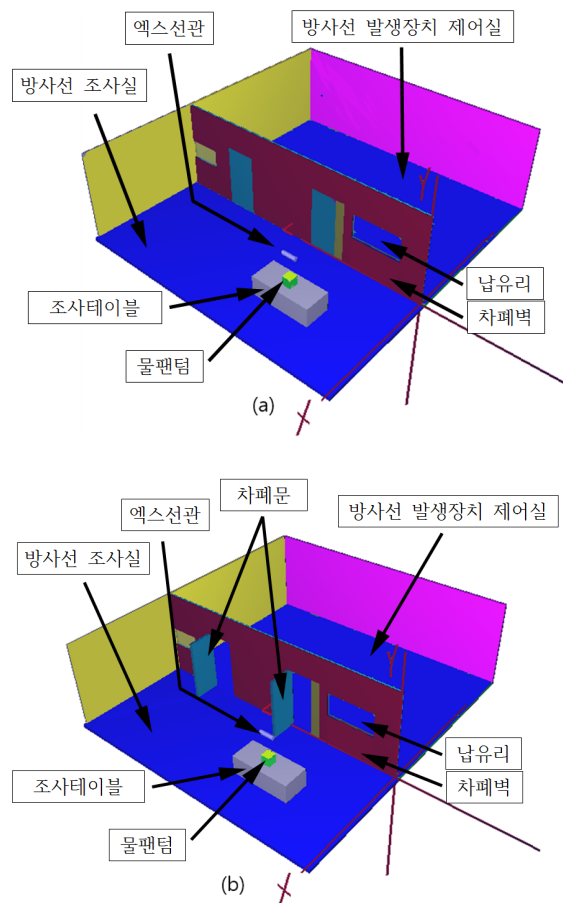


Fig. 1. Geometry modeling of the X-ray using laboratory for Monte Carlo simulation: (a)with closed shielding doors, (b)with open shielding doors.

계산시간의 절약과 효율적인 coding을 위해서 2-step 방법을 이용하였다. 먼저 1st-step에서는 전자 빔으로 생성되는 광자의 개수를 F4 tally를 이용하여 광자의 에너지 스펙트럼을 계산하고 최대 관전류 값을 고려하여 X 선관에서 방출되는 광자의 fluence를 계산하였다. 2nd-step에서는 1st-step에서 계산된 결과를 선원항으로 입력하여 조사실과 제어실에서의 광자에너지 공간 분포를 구하였다.^[5] 계산된 광자에너지 공간 분포로부터 공간 유효선량 분포를 구하기 위해서 ICRP 116 photon isotropic conversion function에 제시된 선량환산인자를 이용하였다.^[6] 1차 계산결과 얻어진 관전압 150 kV, 관전류 700 mA일 때 타겟에서 방출되는 X선 스펙트럼을 Fig. 2에 나타내었다.

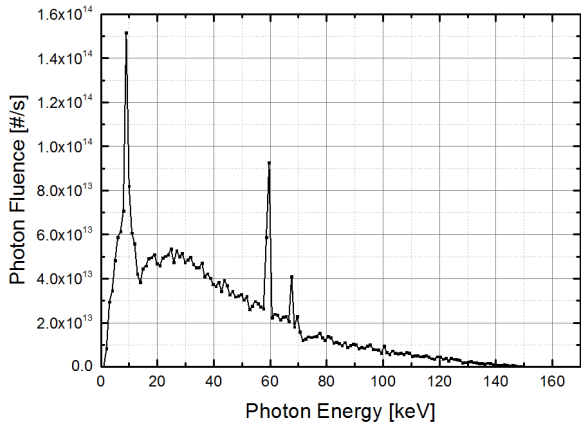
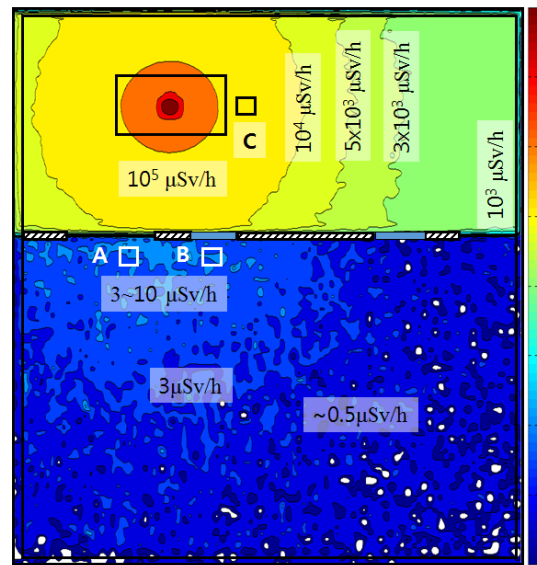


Fig. 2. Photon spectrum calculated by MCNPX simulation with tube voltage 150kVp and tube current 700mA. The spectrum was used as the source term in the input file for 2nd calculation to get the spatial dose distribution.

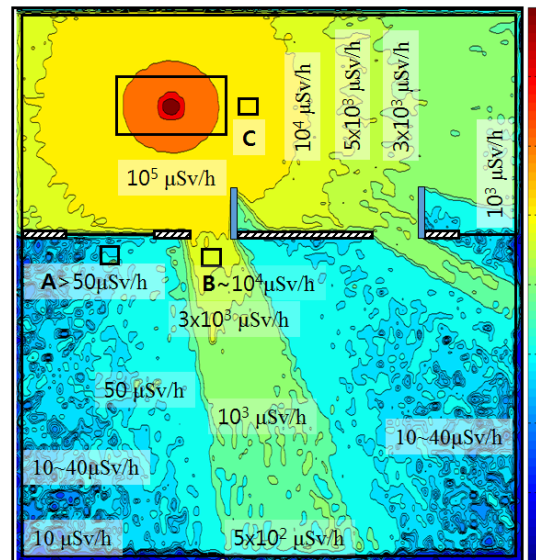
3차원 공간선량 분포 외에 특정 지점 3곳에서의 선량을 따로 확인할 수 있도록 선량측정 팬텀(디텍터) 3개를 모델링하였다. 첫 번째는 테이블 위에 위치한 $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ 크기의 물 팬텀이고, 두 번째는 테이블 모서리에서 30 cm 거리 떨어진 곳에 설치된 $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ 크기의 공기 팬텀이며, 마지막으로 세 번째는 납유리 표면에서 30 cm 거리 떨어진 발생장치 제어 위치에 설치된 $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ 크기의 공기 팬텀이다.^[4] 3개의 팬텀 선량 및 공간선량 분포는 Fig. 2의 photon fluence를 Fig. 1에 나타낸 geometry에 대하여 F4 tally [#/cm²]와 TMESH tally type 1 [#/cm²]을 이용하여 각각 계산하였다.

III. RESULTS

MCNPX 2.7로 계산한 K대학교 진료영상 촬영 실습실에서의 공간선량 분포를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3의 (a)는 차폐문이 닫혀 있을 때의 방사선 조사실과 방사선 발생장치 제어실에서의 공간 유효선량 분포이며, (b)는 차폐문이 열려 있을 때의 방사선 조사실과 발생장치 제어실에서의 공간 유효선량 분포이다.



(a)



(b)

Fig. 3. Effective dose distribution of the X-ray using laboratory.(a)when shielding doors are closed, (b)when shielding doors are opened.

조사실 내부에서는 조사야 중심으로부터 동심원 모양의 등선량률 분포를 보이며 최고선량 $10^7 \mu\text{Sv/hr}$ 에서 최저 $10^3 \mu\text{Sv/hr}$ 의 매우 높은 유효선량률이 거리의 역제곱법칙에 일치하게 조사실 공간 내부에 분포되어 있음을 확인할 수 있다. 차폐문의 개폐상태에 관계없이 조사실 내부의 선량률 분포는 일정한 반면 방사선 발생장치 제어실 내부의 공간선량률 분포는 큰 차이를 보인다.

차폐문이 닫힌 상태에서는 납유리 근처에서 약 $3\sim 10 \mu\text{Sv/hr}$ 의 다소 높은 선량률을 보이지만 방사선 발생장치 제어실 대부분은 $3 \mu\text{Sv/hr}$ 이하의 균일한 공간 선량률을 나타냄을 알 수 있었다. 반면, 차폐문이 열려있을 때 방사선 발생장치 조사실 내부의 공간 유효선량률은 매우 높고 불균일하게 나타남을 확인할 수 있었다. 특히 차폐문의 개방된 부분을 따라 $10^4\sim 5\times 10^2 \mu\text{Sv/hr}$ 의 높은 공간 유효선량률을 보이며 나머지 대부분의 공간에서도 $10\sim 40 \mu\text{Sv/hr}$ 정도의 높은 공간 유효선량률을 나타냄을 알 수 있었다.

Fig. 3에 나타낸 공간 유효선량률 지도에서 제어실 내부의 주요 관심위치인 Control panel 위치, 차폐도어 앞 및 조사실 내부의 조사테이블 측면과 조사테이블 위에 위치한 물팬텀에서의 유효선량률 값을 Table 1에 나타내었다. 이 계산결과는 X선이 연속조사되는 경우의 유효선량률($\mu\text{Sv/hr}$) 값이다.

Table 1. Calculation results of effective dose rate ($\mu\text{Sv/hr}$) at interested locations inside in the laboratory.

	Closed	Opened
A (Control panel)	4.17	6.97×10^1
B (Shielding door)	5.00	1.48×10^4
C (Table side)	3.26×10^4	3.27×10^4
Water phantom	5.31×10^6	5.31×10^6

IV. DISCUSSION

Table 1에 나타낸 관심위치에서의 유효선량률은 연속조사에 의한 MCNPX 전산해석의 계산결과이므로 관심위치에서의 실제 유효선량률 계산을 위해서는 실제 실습조건을 고려해서 환산해야 한다. 즉, 연간 2학기, 학기당 15주, 주당 평균 실습시간을 3시간, 실습시간 중 평균 촬영회수를 10 회/hr, 그리고 촬영

당 평균 X선 조사시간을 0.3 초/회로 가정하면 연간 X선 조사시간은 $7.5\times 10^2 \text{ h/y}$ 가 된다. 이 조사시간을 고려하여 실제 유효선량을 계산하면 Table 2와 같다.

Table 2. Annual cumulated effective dose (mSv/y) at interested locations inside of the laboratory.

	Closed	Opened	Dose limit
A (Control panel)	0.32×10^{-3}	5.23×10^{-3}	6
B (Shielding door)	0.38×10^{-3}	1.11	6
C (Table side)	2.45	2.45	
Water phantom	3.98×10^2	3.98×10^2	

진단영상용 방사선 발생장치의 경우 대부분 조사시간이 1초보다 매우 짧아서 연간 조사시간을 고려해서 연간 유효선량을 고려하면 차폐문의 개폐 결과에 관계없이 방사선 발생장치 제어실 내부에서의 공간유효선량률이 수시출입자 연간선량한도인 6 mSv/y를 초과하지 않는다. 심지어 방사선 조사실 내부에 위치한 조사테이블 근처에서도 수시출입자 연간선량한도인 6 mSv/y를 초과하지 않음을 확인할 수 있다. 하지만, 조사테이블 공간은 거의 대부분 7.5 mSv/y를 초과하므로 수시출입자 선량한도를 초과하였다. 따라서 실습교육에 참여하는 수시출입자(실습생)는 X선 조사 중에는 조사실 내부에 머물지 않도록 주의해야 하며 X선 조사 전에 조사실 내부를 확인하는 절차를 준수해야 할 것으로 판단된다. 한편, 물 팬텀에서 계산된 선량을 한번 shot(0.3초 조사)했을 때의 선량으로 계산하면 0.443 mSv가 되는데, 이 선량은 흉부 촬영 권고 선량인 0.02 mSv 보다 높았다.^[7,8] 환자위치에서 물 팬텀에 대한 계산결과가 흉부촬영 권고 선량보다 크게 계산된 이유는 본 실험에서 사용된 빔 조사조건이 일반적인 흉부촬영에서 사용되는 $72 \text{ kVp} \times 100 \text{ mAs}$ 보다 훨씬 큰 최대용량인 $150 \text{ kVp} \times 700 \text{ mAs}$ 를 사용했기 때문이다.

$$H_E(V_1, I_1) = \frac{H_E(V_0, I_0)}{(I_1/I_0) \times (V_1/V_0)^2}$$

$$H_E = \frac{0.443 \text{ mSv}}{(700 \text{ mA}/100 \text{ mA}) \times (150 \text{ kVp}/72 \text{ kVp})^2}$$

$$= 0.0158 \text{ mSv}$$

물팬텀은 X선관 바로 아래에 있고 산란선의 영향이 크지 않으며, X선 강도는 관전압의 제곱과 관전류에 비례하므로 관전압과 관전류로 보정하면 위 식과 같이 계산되어 흉부촬영 권고선량을 초과하지 않는다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 MCNPX를 이용한 전산해석 결과가 과장되지 않았음을 확인할 수 있다.

V. CONCLUSION

본 연구에서는 K대학교 방사선학과 진료영상 촬영 실습실의 공간 유효선량을 분포를 몬테카를로 전산해석법을 이용하여 평가하였다. 사용 중인 방사선 발생장치의 최대 용량인 관전압 150 kVp, 관전류 700 mA를 사용 조건으로 가정하여 차폐문이 닫혀있을 때와 열려있을 때의 실습실 공간 유효선량을 분포를 비교하였다.

차폐문이 열린 경우에도 방사선발생장치 제어실의 유효선량은 수시출입자의 연간선량한도를 초과하지 않는다는 것을 알 수 있었다. 하지만 차폐문이 열려있을 때의 유효선량이 차폐문이 닫힌 경우에 비해 납유리 앞에서는 약 16배, 차폐문 앞에서는 약 3,000배 더 높기 때문에 실습 중에 차폐문을 닫는 것이 불필요한 방사선피폭을 크게 줄이는 효과적인 방법임을 알 수 있다. 또한, 조사실 내부 선량분포는 상당히 높으므로 팬텀을 사용하지 않고 학생을 대상으로 조사할 경우 높은 유효선량에 피폭되어 방사선장해 유발의 가능성이 매우 높아 질 수 있음을 확인하였다. 따라서 진료영상 촬영실습 시에 인체대상 방사선조사는 절대 금해야 할 것이다.

향후 본 연구 결과를 실험적으로 검증하기 위하여 survey meter를 이용하여 관심위치 등에 대해 직접 선량률을 측정하여 MCNPX 2.7로 계산된 선량률 결과와 비교하는 추가적인 교차실험을 진행할 것이다.

Reference

- [1] J. VALENTIN, *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, Elsevier science Publishing Co., pp. 89-91, 2007.
- [2] Dennis B. Pelowitz, *MCNPX™ USER'S MANUAL, Version 2.7.0*, pp. 11-13, 2011.

- [3] Andrew M. Hernandez, John M. Boone, "Tungsten a node spectral model using interpolating cubic splines : Unfiltered x-ray spectra from 20 kV to 640 kV", *Medical Physics*, Vol. 41, No. 4, 2014.
- [4] Virginia L. Maniquis, *Monte Carlo Dose Verification of an X-ray Beam in a Virtual Water™ Phantom*, Georgia Institute of Technology, pp. 13-16, 2006.
- [5] M. Baptista, P. Teles, G. Cardoso, P. Vaz, "Assessment of the dose distribution inside a cardiac lab using TLD measurements and Monte Carlo simulations", *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 104, pp. 163-169, 2014.
- [6] N. Petoussi-Hens, W.E. Bolch, K.F. Eckerman, A. Endo, N. Hertel, J. Hunt, M. Pelliccioni, H. Schlattl, M. Zankl, *Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures*, Elsevier Science Publishing Co., pp. 117-126, 2010.
- [7] M.H. Kang, J.M. Cho, B.J. Jung, S.C. Noh, S.S. Kang, I.H. Choi, H.J. Jung, J.K. Park, "A Study for Dose Difference of Anode and Cathode by the Size of Radiation Field in Normal Chest X-ray Examination", *The Korean Society of Radiology*, Vol. 8, No. 1, pp. 113-115, 2014.
- [8] Fred A. Mettler, Walter Huda, Terry T. Yoshizumi, Mahadevappa Mahesh, "Effective Doses in Radiology and Diagnostic Nuclear Medicine: A Catalog", *Radiology*, Vol. 248, No. 1, July 2008.

몬테카를로 전산해석에 의한 X선 실습실의 공간선량분포 평가

조윤희, 강보선*

건양대학교 방사선학과

요 약

본 연구에서는 몬테카를로 전산해석법으로 K대학교 진료영상 촬영 실습실의 방사선 조사실과 발생장치 제어실 내부 공간 유효선량률 분포 계산을 수행하였다. 방사선 발생장치는 최대 관전압 150 kVp에 최대 관전류 700 mA이다. 전산해석 결과를 이용하여 차폐문이 닫힌 경우와 열린 경우의 진료영상 촬영 실습실의 공간선량 분포를 비교 평가하였다. 결과적으로, 차폐문이 열린 경우에도 방사선 발생장치 제어실의 유효선량률은 학생(수시출입자)의 연간 유효선량률 한도(6 mSv/y)를 초과하지 않는다는 것을 알 수 있었다. 하지만, 차폐문이 열려있을 때의 유효선량률이 차폐문이 닫힌 경우에 비해 납유리 앞에서는 약 16배, 차폐문 앞에서는 약 3,000배 더 높기 때문에 실습 중에 차폐문을 닫는 것이 불필요한 방사선 피폭을 크게 줄인다는 것을 알 수 있었다.

중심단어: 몬테카를로 전산해석, 방사선 발생장치, 공간선량률 분포, 선량한도