

The Study on Design of Customized Radiation Protective Layer for Medical Radiation Dose Reduction

Sang-Sik Kang*, Kyo-Tae Kim**, Si-Cheol Noh*, Bong-Jae Jung*, Ji-Koon Park*

Dept. of Radiological Science, International University of Korea*, Dept. of Hybrid Medicine and Science, Inje University**

의료방사선 피폭선량 저감을 위한 맞춤형 차폐재 설계에 관한 연구

강상식*, 김교태**, 노시철*, 정봉재*, 박지균*

한국국제대학교 방사선학과*, 인제대학교 융합의과학**

Abstract

The fact is that in addition to an increase in social needs that must be managed systematically unnecessary exposure in the field of medical. Recent important that the shield has emerged. However, products that are now in practical use, are not subdivided as compared to various medical radiology. Therefore, in the present study, we tried to present with the help of Monte Carlo simulation the structure of the shielding material that has been optimized. Simulated estimation result, the energy of the mammography for (30 kVp) spectrum, check the shielding rate of 90% or more 30 μ mPb, at 2 mmAl case of shielding material of a single, at design time of 1 mmAl and 0.03 mmPb a double shield structure it is determined that more efficient. Also, check the blocking rate of 90% or more 340 μ mPb, at 30 mmAl energy captured general in (80 kVp) spectra, it is considered that a double shield structure, design 1 mmAl and 0.3 mmPb is useful. These results, be used as basic material for the development of commercialization customized products for dose reduction is expected.

Key Words : Monte Carlo Simulation, Double-shielded structure, Lead, Aluminium, Shielding rate

요 약

최근 의료 분야에서의 불필요한 피폭을 체계적으로 관리해야 한다는 사회적 요구 증가와 더불어 차폐의 중요성이 대두되고 있는 실정이다. 하지만 현재 상용화된 제품은 다양한 의료방사선 분야보다 세분되어 있지 않다. 이에 본 연구에서는 최적화된 차폐재의 구조를 몬테카를로 시뮬레이션을 활용하여 제시하고자 하였다. 모의 추정 결과, 유방촬영 에너지 (30 kVp) 스펙트럼에 대하여 단일 차폐재의 경우 30 μ mPb, 2 mmAl에서 90% 이상의 차폐율을 확인하였고, 이중차폐 구조에서는 0.03 mmPb와 1 mmAl의 설계 시 효율적인 것으로 판단되었다. 또한, 일반촬영 에너지(80 kVp) 스펙트럼에 대해서는 340 μ mPb, 30 mmAl에서 90% 이상의 차폐율을 확인하였으며, 이중차폐 구조에서는 0.3 mmPb와 1 mmAl의 설계가 유용할 것으로 사료된다. 이러한 결과는 향후 피폭저감을 위한 맞춤형 상용화 제품 개발에 대한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

중심단어 : 몬테카를로 시뮬레이션, 이중차폐 구조, 납, 알루미늄, 차폐율

I. INTRODUCTION

최근 의료 분야에서 수검자를 진료함에 활용되고 있는 방사선 관련 의료기기는 질병의 조기 진단 및 정확한 진단 그리고 치료에 대한 핵심적인 역할 수행을 위하여 발전하고 있으며 이용이 급격히 증가하고 있는 추세이다^[1-2]. 의료기기 발전과 더불어 다양한 의료방사선 분야에서는 의료 영상의 품질 향상과 피폭선량 저감을 위한 다양한 노력을 기울이고 있다^[3-5]. 또한, 영상의학과에서는 X-ray를 활용한 진단 영상 획득 시 수검자 및 방사선작업종사자에게 불필요한 피폭을 초래하는 산란방사선에 대한 관심이 대두되고 있다^[6-7].

산란방사선은 위해가 크지 않다는 이유로 연구가 미흡하였으나, 진단용 X-ray 장치가 2008년도에 대비하여 약 21.5%p 설치가 증가한 현 시점에서 진단용 X-ray 장치에 대한 체계적인 관리에 대한 사회적 요구의 증가되고 있다^[8-9]. 진단용 X-ray 장치 중 진단용 X-ray 발생기는 약 107.2%p으로 활용 빈도가 가장 크게 증가하였고, 유방촬영장치의 경우 약 20.8%p으로 두 번째로 크게 증가하였으며, 치과진단용 엑스선 발생장치가 약 12.2%p로 세 번째로 변화 폭이 큰 것으로 보고되었다^[9].

X-ray 활용 빈도의 증가는 직업피폭 및 환자피폭의 증가를 초래할 수 있으므로 차폐의 중요성이 높아지고 있다. 현재 많이 활용되는 차폐 물질은 가공성 및 차폐율이 우수한 납을 사용하고 있으나^[10], 상용화된 제품의 종류가 다양한 의료방사선 분야에 맞추어 세분되어 있지 않고 인식 또한 미흡한 실정이다.

이에 본 연구에서는 활용 빈도가 급증된 진단용 X-ray 및 유방촬영장치 분야의 차폐재로 이용되는 납 및 알루미늄과 X-ray 광자와의 상호작용을 모의 추정함으로써 최적화된 차폐재의 구조를 제시하고자 하였으며, 이는 향후 방사선작업종사자의 피폭저감을 위한 맞춤형 제품 개발에 대한 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

II. RESEACH METHOD

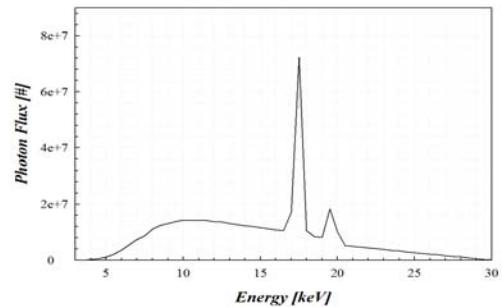
본 연구에서는 전 세계적으로 검증된 방사선 수송 모의 코드인 MCNP (Los Alamos National Laboratory, USA, Ver. X) 코드를 이용하였고, Data card는 Mode, Cell and Surface parameters, Source specification, Tally specification,

Material specification, Problem cutoffs로 구성하였다^[11].

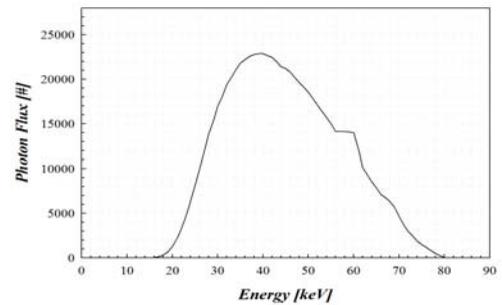
2.1 방사선 수송 모의 코드 설계

2.1.1 단일 차폐재의 모의 코드 설계

진단 영역의 X-ray 광자 중 입사한 광자가 물질과 상호작용하여 통과한 광자들의 에너지 스펙트럼을 얻기 위해 Mode P를 이용하여 X-ray 광자의 Transport를 정의하였다. 또한 Cell과 Surface parameter card에서는 광자에 대한 Important를 "1"로 하여 추적(tracking)을 지속하였으며, 차폐재 외부 빈 공간에서는 광자를 막기 위해 Important를 "0"으로 구현하였다.



(a) Mammography spectrum at 30 kVp



(b) General radiography spectrum at 80 kVp

Fig 1. X-ray Spectrum of Simulation.

본 연구에서 모의 추정에 이용된 ERG(Energy)는 진단 유방촬영용 X-ray 발생장치의 지지체(Target) 재질로 이용되는 몰리브덴(Mo)과 일반촬영용 X-ray 발생장치의 Target 재질로 이용되는 텅스텐(W)에서 발생하는 연속 X-ray 광자의 에너지 분포 데이터 중 유방촬영의 경우 30 kVp, 일반촬영의 경우 80 kVp에 대한 선원 정보(Source information; SI) 및 선원 확률(Source probability; SP)로 히스토그램을 정의하였다. 일반촬영용 X-ray는 맥동률 13%, 2.5 mmAl로 여과된 에너지 스펙트럼을 Source data로 이용하였다. Fig. 1은 모의 추

정에 이용하기 위하여 이용된 스펙트럼의 분포를 나타내었다. 소스 입자의 샘플링은 SUR(Surface)를 이용하여 직육면체 차폐재의 표면에서 X-ray 광자들을 정의하였다. Source particle type을 정의하는 PAR(Particle)는 광자에 해당하는 PAR 2를 이용하였다. 끝으로, Tally specification card는 결과의 표현법을 규정하는 코드로 본 연구에서는 중성자 및 광자 그리고 전자에 대한 표면 전류로 결과를 표현하여 주는 F1 Tally를 이용하여 X-ray의 한 표면에 입사하는 광자가 반대쪽 표면을 통과할 확률을 추정하였다. 50,000개의 Source particle들이 진단 영역의 연속 X-ray 스펙트럼과 같은 확률로 샘플링 하였다.

차폐재 종류는 일반적으로 방호용으로 이용되고 있는 납(Pb)과 부가필터로 이용되고 있는 알루미늄(Al)을 활용하였고, 밀도는 Pb의 경우 11.34 g/cm^3 , Al의 경우 2.7 g/cm^3 을 기준으로 구현하였다. 또한, 차폐재의 두께에 따른 차폐율을 조사하기 위하여 유방촬영용 에너지 스펙트럼에서 Pb의 경우 $30 \mu\text{m}$, Al의 경우 5 mm 까지 입력하였고, 일반촬영용 에너지 스펙트럼에서 Pb는 $500 \mu\text{m}$, Al은 50 mm 까지 모의 추정하였다. 이때 차폐재의 면적은 $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ 으로 고정하였다.

2.1.2 다층 차폐재의 모의 코드 설계

다층 차폐재의 구성 물질은 Pb와 Al을 활용하였고, 설계는 Pb의 특성 X-ray를 차폐하기 위하여 Pb 하단에 Al을 구현하였다. 차폐재의 면적은 $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ 으로 고정하였고, Pb의 두께는 차폐율 모의 추정 결과 90%로 나타나는 두께를 기준으로 입력하였고, Al의 경우 단일 차폐재에서의 90% 되는 두께까지 모의 추정하였다.

2.2 에너지 스펙트럼에 대한 차폐율 분석

본 연구에서는 모의 추정을 통해 임의의 x 에 대한 I 를 추정하여 ΔI 를 계산하여 결과를 비교하였다. 각 차폐재에 대해서 X-ray 광자가 상호작용한 흡수율을 다음의 수식과 같이 정의된다.

$$\Delta I = I_0 - I, \quad I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

단, I_0 는 입사 X-ray 강도, I 는 투과된 X-ray 강도, μ 는 선감약계수이고, x 는 차폐재의 두께이다.

이러한 연속 에너지를 가지는 광자의 흡수 확률을 에너지 별로 구분하여 적분함으로써 차폐율을 도출하였다.

III. RESULT AND DISCUSSION

3.1 에너지 영역에 따른 단일 차폐재의 차폐율 분석

3.1.1 유방촬영용 에너지 스펙트럼

유방촬영에서 이용되고 있는 에너지 스펙트럼에 대하여 차폐재 두께에 따라 모의 추정된 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

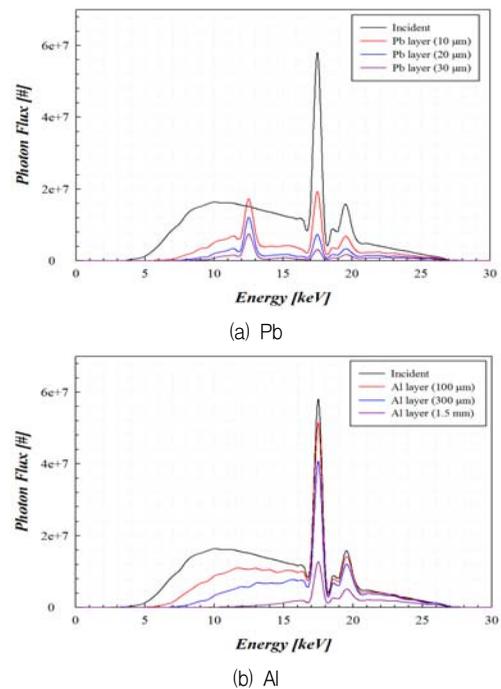


Fig. 2. Transmission probability as a function of photon energy at Mammography spectrum. (a) pb and (b) Al

모의 추정 결과, Fig. 2 (a)에서와 같이 Pb 차폐재는 전 에너지 영역에서 비슷한 차폐 효과를 보였으며, Pb와 광자와의 상호작용 결과로 12.5 keV에서 날카로운 특성 X-ray 광자가 생성되어 투과되는 것을 알 수 있었다. 반면, Fig. 2 (b)에서와 같이 Al 차폐재는 $300 \mu\text{m}$ 이하의 두께에서 17 keV 이하의 에너지 대역에서 상대적으로 높은 차폐 효과가 나타났다. 이와 같은 투과 스펙트럼을 적분하여 단일 차폐재에서의 차폐율을 도출하였고 이를 Fig. 3에 제시하였다.

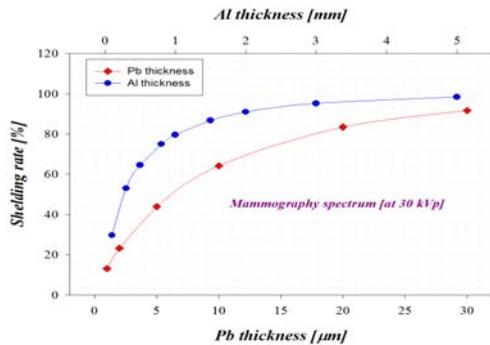


Fig. 3 shielding rate as a function of material thickness at Mammography spectrum.

Fig. 3에서와 같이 유방촬영 영역의 에너지에 대하여 Pb 30 μm , Al 2 mm에서 각 각 91.7%, 91%의 차폐율을 보였다. 또한, 차폐재의 두께증가에 따른 차폐율은 지수증가 경향을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

3.1.2 일반촬영 에너지 스펙트럼

Fig. 4는 일반촬영 에너지 영역의 X-ray 스펙트럼(80 kVp)에 대한 Pb와 Al 차폐재의 두께별 투과 스펙트럼을 보여준다.

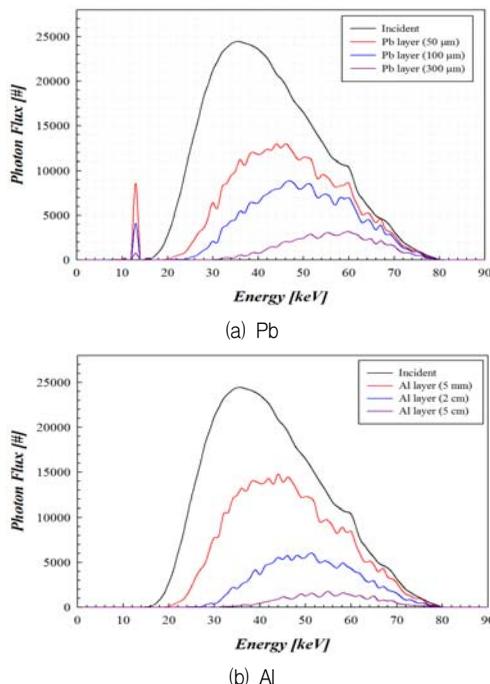


Fig. 4. Transmission probability as a function of photon energy at General radiography spectrum.

Fig. 4 (a)에서와 같이 일반촬영에 이용되는 연속 X-ray 에너지에 대해 Pb의 경우 50 μm 두께에서 고에너지에 비해 40 keV 이하에서 상대적으로 높은 차폐율을 나타냈으며, 300 μm 이상의 두께에서 고에너지에 대한 차폐 효과가 있는 것을 알 수 있었다. 또한 Pb 차폐재의 경우 광자와의 상호작용 결과로 12.5 keV에서 날카로운 특성 X-ray 광자가 생성되어 투과되는 것을 알 수 있었다. 반면, Fig. 4 (b)의 Al 차폐재의 경우 5 mm 두께에서 40 keV 이하의 에너지에 대해 높은 차폐율을 보였으며 2 cm 이상의 두께에서 전 에너지 영역에서 차폐효과가 나타나는 것을 알 수 있었다.

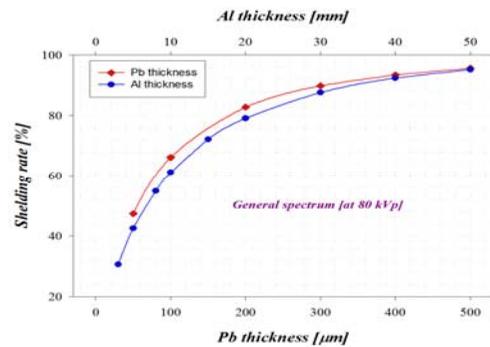


Fig. 5. shielding rate as a function of material thickness at General radiography spectrum.

Fig. 5는 일반촬영 에너지 대역에 대한 차폐재(Pb, Al) 두께별 차폐율 결과로 Pb 300 μm , Al 40 mm에서 각 각 89.8%, 92.4%의 차폐율을 보였으며, 포화되는 경향을 보였다.

3.2 에너지 영역에 따른 다층 차폐재의 차폐율 분석

다층 차폐재의 가능성을 제시하기 위하여 Pb의 경우 유방촬영 에너지 영역에서는 30 μm , 일반촬영 에너지 영역에서는 340 μm 으로 설정하였고, Al은 유방촬영 에너지 영역에서는 2 mm까지 모의 추정하였고, 일반촬영 에너지 영역에서는 30 mm까지 모의 추정하였다.

모의 추정 결과, Al을 이용한 다층 구조 형성 시 Pb 차폐재와 X-ray 광자의 상호작용으로 발생하는 특성 X-ray를 충분히 제거할 수 있는 것으로 나타났다. Fig. 6 (a)에서는 12.5 keV의 특성 X-ray가 0.5 mmAl에 의하여 약 89.8% 감소하는 것으로 나타났다, 1 mmAl로 설계하였을 경우 98.6% 감소되었으며, 2 mmAl의 경우 전부 제거가 가능한 것으로 평가되었다.

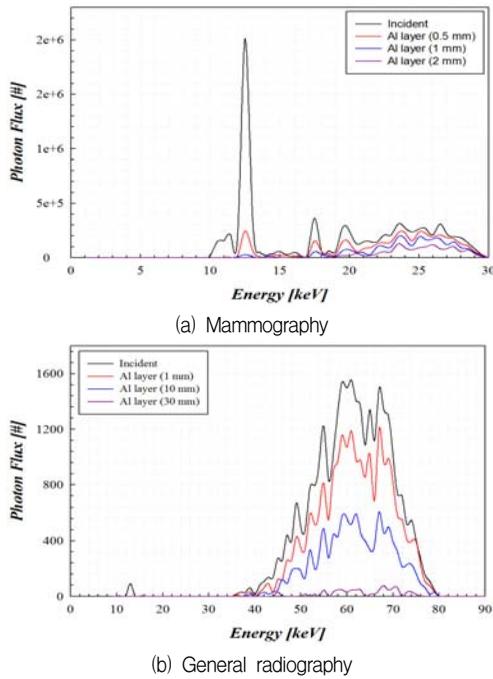


Fig. 6. Transmission probability spectrum as a function of material thickness.

그뿐만 아니라 일반촬영용 에너지 대역에서 설계된 1 mmAl의 구조를 활용 시 전부 제거 가능한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 향후 맞춤형 제품 개발의 가능성을 확인 할 수 있는 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

IV. CONCLUSION

최근 의료 분야에서 방사선 관련 의료기기의 이용이 급격히 증가하고 있으며 X-ray를 활용한 진단 영상 획득 시 불필요한 피폭을 초래하는 산란방사선에 대한 관심이 대두되고 있다. 또한, 방사선에 대한 체계적인 관리의 사회적 요구 증가와 더불어 차폐의 중요성이 높아지고 있다. 하지만 현재 상용화된 제품은 다양한 의료방사선 분야에 맞추어 세분되어 있지 않고 인식 또한 미흡한 실정이다. 이에 본 연구에서는 활용 빈도가 급증된 진단용 X-ray 및 유방촬영장치 분야의 차폐제로 이용되는 납 및 알루미늄과 X-ray 광자와의 상호작용을 모의 추정함으로써 최적화된 차폐제의 구조를 제시하고자 하였다.

본 연구에서 유방촬영 에너지(30 kVp) 스펙트럼에 대해 Pb의 경우 X-ray와의 상호작용 결과로 12.5 keV의 특성 X-ray가 발생하여 차폐제를 투과하였으며, 30 μ m의 두께에서 91.7%의 차

폐율을 가졌다. 반면, Al은 300 μ m 정도의 두께에서 17 keV 이하의 저에너지 영역에 대한 상대적인 높은 차폐 효과를 보였다. 이러한 결과를 바탕으로 피폭저감을 위한 이중 차폐의 구조를 설계하여 모의 추정된 결과 0.03 mmPb에 의해서 발생하는 12.5 keV 특성 X-ray를 1 mmAl의 알루미늄이 약 98.6%로 감소시키는 것으로 확인되었고, 2 mmAl의 경우 완전 차폐가 가능한 것으로 파악되었다. 그러므로 0.03 mmPb 및 1 mmAl 구조로 설계된 이중차폐 구조는 특성 X-ray의 영향을 모두 고려하여 효율적인 차폐가 가능할 것으로 판단된다. 또한, 일반촬영 에너지(80 kVp)의 경우도 12.5 keV의 특성 X-ray가 발생하였으며, Pb의 경우 두께 300 μ m에서 89.8%의 차폐율을 가졌으며, Al에 대해 5 mm 정도의 두께에서 20 keV 이하의 저에너지를 모두 흡수하였다. 이를 바탕으로 다층 차폐제의 구조를 설계하여 모의 추정된 결과 0.3 mmPb에 의해서 발생하는 12.5 keV 특성 X-ray를 1 mmAl의 알루미늄이 완전 차폐가 가능한 것으로 파악되었으므로 0.3 mmPb 및 1 mmAl 구조로 설계된 이중차폐 구조는 차폐제로 유용할 것으로 사료된다.

향후 연구에서는 본 연구에서 설계된 이중차폐 구조를 바탕으로 방사선장에서의 실제 차폐율을 확인함으로써 맞춤형 차폐제 개발 시 최적화된 두께를 선정할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 모의 추정 결과를 바탕으로 설계된 이중차폐 구조에 대한 유용성에 대한 검증을 통하여 차폐 설계 시 기초 자료로 활용 할 수 있을 것으로 사료된다.

Acknowledgement

This work was supported by International University of Korea's research fund in 2014.

Reference

- [1] Kyo-Tae Kim, Ye-Ji Heo, Jung-Wook Shin, et al, "A Study on the Improvement of Evaluation Methods and Standards for Simulation evaluation of Computed Tomography", The Korean Society of Radiology, Vol 7, No 5, pp. 339 - 345, 2013
- [2] Ye-Ji Heo, Kyo-Tae Kim, Si-Cheul Noh, et al, "A Base Study on the Constancy Quality Control Test and Clause of Diagnosis Radiation Equipment", The Korean Society of Radiology, Vol 8, No 3, pp. 105 - 110, 2014
- [3] IAEA Safety Series No.115 : "International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources", Vienna, 1996
- [4] ICRP Publication 103: Recommendations of the International

Commission on Radiological Protection, Oxford, 2007

- [5] "Patient Dose Reference Levels Guidelines of General Radiology", Korea Food & Drug Administration, Radiation safety management series, No. 30, 2012
- [6] Kyo-Tae Kim, Sang-Sik Kang, Si-Cheul Noh, et al, "Absorbed Spectrum Comparison of Lead and Tungsten in Continuous X-ray Energy using Monte Carlo Simulation", The Korean Society of Radiology, Vol 6, No 6, pp. 483 - 487, 2012
- [7] Pyong-Kon Cho, Joon-Hyup Lee, Yoon-Sik Kim, et al, "A Study on measurement of scatter ray of Computed Tomography", Korean Society of Radiological Science, Vol 26, No 3, pp. 37 - 42, 2003
- [8] Chan-Wook Kim, "A Study for Partial Dose to Evaluate the Exposure Dose of Major Organ in Mammography", The Graduate School International University of Korea, 2013
- [9] Hyung-Soo Kim, Seung-Youl Lee, Jung-Eun Lee, et al, "Study for the appropriate management of the diagnostic radiological devices", radiation safety division, 2013
- [10] Seon-Chil Kim, Kyo-Tae Kim, Ji-Koon Park, "Barkum compounds through Monte Carlo simulation compare the performance of medical radiation shielding analysis", The Korean Society of Radiology, Vol 7, No 6, pp. 403 - 408, 2013
- [11] Judith.F. Briesmeister, "MCNPTM A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. Ver. 4C", 2000.