

<원저>

몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 차폐체 원소 평가

- A Study on the Shielding Element Using Monte Carlo Simulation -

1)건국대학교병원 영상의학과·2)대구보건대학교 방사선과

김기정¹⁾·심재구²⁾

— 국문초록 —

본 연구에서는 기존의 납을 대체할 수 있는 의료방사선 차폐시트 적용을 위해 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 각각에 대한 원소별 차폐능을 모의 추정하였다. 원소들의 선정은 차폐성능이 큰 것으로 알려진 원자번호가 큰 원소와 금속원소를 중심으로 최근에는 다양한 복합재들이 차폐성능을 향상시킨다는 보고에 따라 경량화, 가공성, 활동성 등을 고려하여 21개 원소를 선정하였다. 몬테카를로 시뮬레이션 코드를 이용한 전산모사 투과도 실험으로 21개의 원소를 대상으로 시뮬레이션 하여 추정된 결과 납을 대체할 차폐물질로 적당한 원소의 투과율은 텅스텐(w) 98.82%, 가돌리늄(Gd) 92.96%, 주석(Sn) 86.87%, 인듐(In) 86.38%, 안티몬(Sb) 86.33%, 바륨(Ba) 78.51%로 평가되었으며, 각 원소별 차폐성능을 모의 추정된 결과 텅스텐과 금이 98.82%와 98.44%로 차폐율이 가장 높은 것으로 추정되었다. 경제성과 가공성을 고려할 때 위 원소를 화합한 물질로 차폐체를 만드는 것이 적절할 것으로 사료된다.

중심 단어: 몬테카를로 시뮬레이션, 차폐체, 원소, 차폐율, 투과율

I. 서 론

현대의학에 있어서 의료용 방사선은 인간의 질병 진단, 치료 및 연구에 활용되어 질병으로부터 인간의 건강을 보호하고 의학을 발전시키는데 중요한 역할을 해왔으며[1], 근래에는 방사선 의료장비가 인체의 생리학적, 병리학적 상태를 진단, 치료하는 가장 핵심적인 의료장비로 활용되고 있으며, 최첨단 방사선 의료장비들이 경쟁적으로 개발되고 있어 환자 진료에 그 이용이 더욱 확대될 전망이다[2].

그러나 의료목적으로 이용된 X선은 과도한 피폭으로 인하여 피부홍반 발생 등 인체의 상해효과가 보고되어 방사선 피폭의 제한과 방사선 방어를 위한 여러 지침이 나오고 있는 실정이다.

방사선을 이용한 의료 분야의 검사과정에서 불필요한 방

사선을 차폐하고자 하는 노력은 매우 중요하다. 방사선 피폭은 인위적 노력에 의해 선량을 감소시키는 것이 가능한 행위이며, 방사선 방어의 기본적인 목표는 방사선피폭으로부터 기재되는 이익을 고려하는 상황에서 피폭된 사람에게서는 결정적 영향이 나타나지 않도록 방지하고, 확률적 영향의 가능성을 수용할 만한 수준으로 낮추는데 있다[3]. 의료방사선의 차폐에 대한 연구는 환자와 종사자의 방사선 피폭과 직접적인 상관관계가 있어 많은 연구가 있었다. 방사선 차폐체로 사용되고 있는 대부분의 재료가 납(Pb)이다. 납이 방사선 차폐물로 많이 이용되는 가장 큰 이유는 경제적인 측면의 의료방사선 차폐능과 물질의 가공성이 우수하기 때문이다. 하지만, 납에 대한 유해성은 이미 많이 알려져 있으며, 중금속으로 분류되어 관리되고 있어 작업성 노출, 체내흡수 등 다양한 면에서 위험성을 내포하고 있다[4].

현재 의료기관에서 차폐물질로 가장 많이 사용되는 것도 납으로, 얇은 시트 형태로 만들어질 만큼 가공성이 좋지만, 최근 의료 환경에서 외면을 받고 있으며, 대체물질에 대한 연구도 지속되고 있다[5].

근무환경과 병원의 진단 검사 환경을 고려한다면 가벼우면서도 인체에 무해한 의료방사선 차폐 재료를 고려해야 할 것이며, 현재 의료 환경에서 사용되는 방사선 차폐체의 주 성분은 납이며, 이를 대체할 물질의 연구는 미비한 실정이다[6]. 인체에 무해한 차폐보호구를 제작하기 위해 많은 물질과 진단목적 외로 고가의 장비를 사용하는 것은 부담이 있으므로, 프로그램 가상 모델을 이용한 시뮬레이션 계산이 유용한 수단이 된다. 방사선과 물질의 상호작용을 알아보기 위한 방법으로 시뮬레이션 기법을 많이 사용하고 있다. 최근 컴퓨터를 이용한 여러 가지 방사선 수송 코드의 해석적 기법들 중에서 몬테카를로법(Monte-Carlo method)이 많이 사용되어 왔으며, 방사선 입자 수송에 적용하여 flux, fluence, energy spectra, energy deposition 등의 다양한 값들을 정확하게 예측할 수 있다[7].

이에 본 연구에서는 납을 대체할 수 있는 차폐물질을 찾기 위해 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 원소별 차폐율과 투과율을 비교분석하여 의료검사환경의 방사선 차폐체의 기초 자료를 제공하고자 한다.

II. 연구 방법

1. 몬테카를로 기법 프로그램 선정

몬테카를로 기법은 방사선과 물질의 상호작용을 시뮬레이션 하는데 정확한 결과를 주는 기법으로 알려져 있으며, 몬테카를로 기법을 모사한 프로그램과 코드의 종류도 다양하며, 현재도 개발되고 있는 중이다. 따라서 차폐평가를 위한 전산모사에 앞서 몬테카를로 기법을 적용한 프로그램을 선정할 필요성이 있다.

몬테카를로 기법을 적용한 프로그램은 EGS, GEANT, FLUKA, PENELOPE, MCNPX 등이 있다. 이 중 MCNPX 프로그램은 몬테카를로 기법을 적용한 방사선과 물질의 상호작용을 계산하는 대표적인 프로그램으로 실제와 매우 유사한 결과를 제공하는 프로그램으로 평가되며, 이를 이용한 피폭방사선량 및 방사선 차폐, 방사선 방호 등을 수행한 연구가 국내외적으로 많이 존재하고 있다[8].

본 연구에서 사용된 프로그램은 몬테카를로 시뮬레이션 프로그램으로 LANL(Los Alamos National Laboratory)에

서 개발된 MCNPX(Monte Carlo Neutron and Photon code version X) ver. 2.6을 사용하였다(Fig. 1).

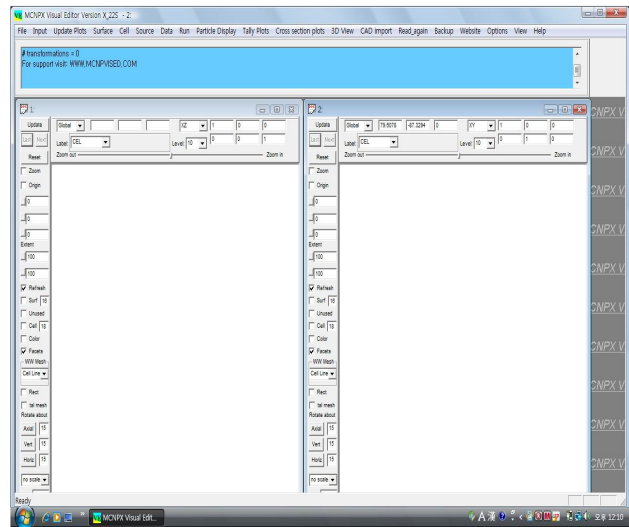


Fig. 1 MCNPX Program

2. 몬테카를로 계산코드를 이용한 전산모사

C cell card는 모양, 재질, 밀도를 정해주는 card로 카드 번호, 셀 번호/ 재질을 나타내는 물질의 번호/ 세 번째는 물질의 밀도를 적는데 밀도로 표시하는 경우 음수로 표기하고, 원자량을 정의하는 경우는 양수로 표기한다. 카드의 내부 혹은 외부 지정 내부 : 음수, 외부 : 양수/ 네 번째 카드는 카드의 내부 혹은 외부 지정하는 것으로 내부일 경우 음수, 외부일 경우 양수로 지정한다. 마지막은 추가적으로 입력하는 것인데 정밀도를 높이기 위한 분산감소를 위한 것이다.

이에 본 연구에서는 C cell card에 Housing, Second Collimator, First Collimator, Upper Filter(Al), Lower Filter(Cu), Ion Chamber 순으로 전산 모사하였다. 또 C surface card는 Geometry의 모양을 결정해 준다. 먼저 제일 앞의 숫자는 지정하고자 하는 카드의 번호이고, 두 번째는 Geometry의 모양을 결정하게 된다. 마지막 list는 Geometry의 크기를 결정하는데 필요한 값이다. C surface card에 차폐물질의 두께를 조절할 수 있게 전산 모사한다. 그리고 C data card를 모사한다. C data card는 Source인 선원을 정의하고, Tallies 결과를 기록하고, Materials 물질을 정의하는 등의 기능을 한다. C data card에서 made p를 이용하여 광자의 수송을 모사한다.

계산의 통계적 불확도(uncertainty)를 3% 이하로 줄이기 위해 반복실험 횟수는 1×10^8 번 모의 추정하였다(Fig. 2).

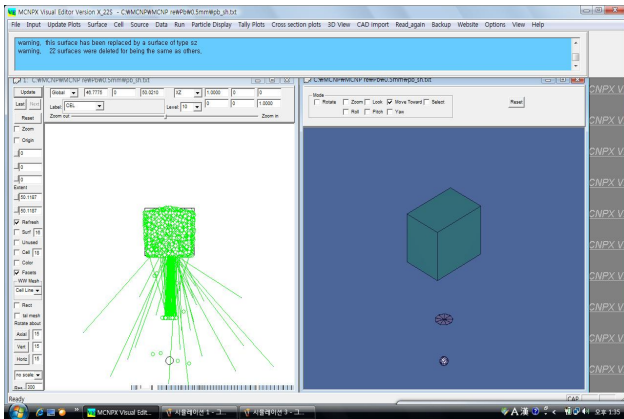


Fig. 2 Graphical illustration of MCNPX simulation

III. 결 과

1. MCNPX을 이용한 원소별 차폐율 평가

납(Pb)을 대체할 수 있는 친환경 차폐시트를 제작하는데 기초자료를 제공하기 위해 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 원소별 차폐율과 투과율을 추정한 결과 아래와 같이 도출되었다.

차폐율은 텅스텐(W)이 98.82%, 금(Au)이 98.44%, 납(Pb)이 93.92%, 가돌리늄(Gd)이 92.96%, 비스무트(Bi)가 92.35%, 은(Ag)이 89.95%, 주석(Sn)이 86.87%, 인듐(In)이 86.38%, 안티몬(Sb)이 86.33%, 요오드(I)가 82.80%, 바륨(Ba)이 78.51%, 구리(Cu)가 65.57%, 니켈(Ni)이 64.58%, 아연(Zn)이 63.20%, 코발트(Co)가 61.58%, 철(Fe)이 58.16%, 망간(Mn)이 55.13%, 크롬(Cr)이 51.87%, 티타늄(Ti)이 43.53%, 알루미늄(Al)이 34.04%, 붕소(B)가 16.78% 순으로 높았다.

2. MCNPX을 이용한 원소별 투과율 평가

투과율은 텅스텐(W)이 1.18%, 금(Au)이 1.56%, 납(Pb)이 6.28%, 가돌리늄(Gd)이 7.04%, 비스무트(Bi)가 7.65%, 은(Ag)이 10.05%, 주석(Sn)이 13.13%, 인듐(In)이 13.62%, 안티몬(Sb)이 13.67%, 요오드(I)가 17.20%, 바륨(Ba)이 21.49%, 구리(Cu)가 34.43%, 니켈(Ni)이 35.42%, 아연(Zn)이 36.80%, 코발트(Co)가 38.42%, 철(Fe)이 41.84%, 망간(Mn)이 44.87%, 크롬(Cr)이 48.13%, 티타늄(Ti)이 56.47%, 알루미늄(Al)이 65.96%, 붕소(B)가 83.22% 순으로 낮았다. 원소들의 선정은 차폐능이 큰 것으로 알려진 원자번호가 큰 원소와 금속원소를 중심으로 경량화, 가공성, 활동성 등을 고려하여 원소들을 선정하였다. 원소별 몬테카를로 시뮬레이션 결과 원자번호가 50번 이상에서 광자 흡수 확률이 증가하여 투과 광자가 적은 것으로 모의 추정되었으며, 70번 이상에서는 10%이하 광자 투과 확률로 차폐율이 90% 이상인 것으로 모의 추정되었다.

더불어 밀도가 10이상인 원소에서 투과 광자가 줄어들고, 차폐율이 증가하는 확률을 보여 밀도도 차폐성과 밀접한 관계가 있음을 추정할 수 있었다.

각 원소별 차폐성능을 모의 추정한 결과 텅스텐(W)과 금(Au)이 98.82%와 98.44%로 차폐율이 가장 높은 것으로 추정되었다.

납(Pb), 비스무트(Bi), 은(Ag), 주석(Sn), 안티몬(Sb), 요오드(I), 바륨(Ba) 순으로 차폐확률이 높은 것으로 추정되었다. 반면에 붕소(B)가 83.22% 투과율을 보여 가장 낮게 추정되었으며, 알루미늄(Al), 티타늄(Ti) 순으로 차폐확률이 낮게 추정되었다(Fig. 3), (Table 1).

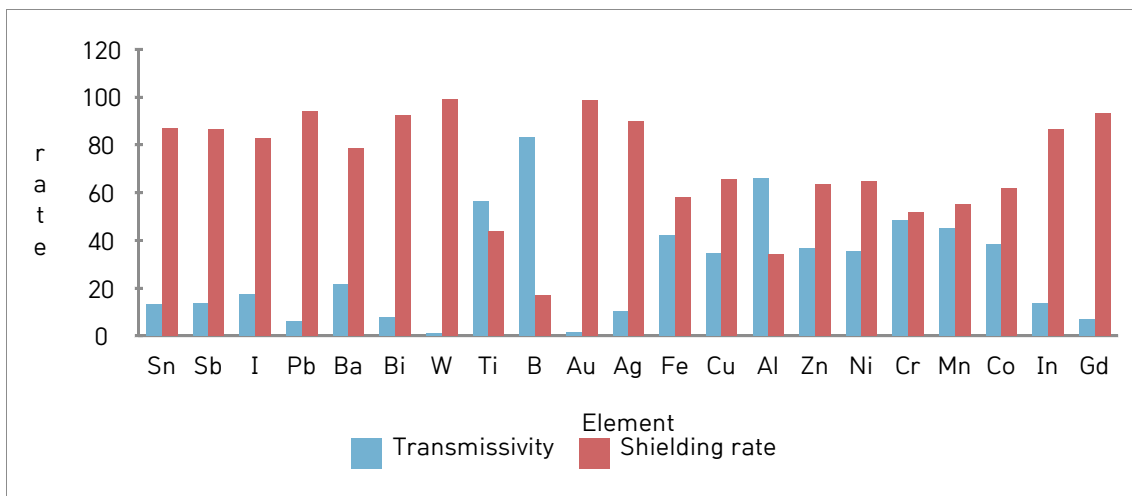


Fig. 3 Transmissivity and shielding rate

Table 1 Result of element category by using MCNPX

Element	Atomic number	Density (g/cm ³)	Cell 64 value	Transmissivity (%)	Shielding rate(%)
Sn	50	7.28	4.94260E-09	13.13	86.87
Sb	51	6.70	5.14446E-09	13.67	86.33
I	53	4.94	6.47386E-09	17.20	82.80
Pb	82	11.34	2.29005E-09	6.28	93.92
Ba	56	3.59	8.08811E-09	21.49	78.51
Bi	83	9.80	2.87899E-09	7.65	92.35
W	74	19.25	4.44148E-10	1.18	98.82
Ti	22	4.51	2.12488E-08	56.47	43.53
B	5	2.52	3.13126E-08	83.22	16.78
Au	79	19.30	5.87200E-10	1.56	98.44
Ag	47	10.49	3.78265E-09	10.05	89.95
Fe	26	7.87	1.57449E-08	41.84	58.16
Cu	29	8.94	1.29576E-08	34.43	65.57
Al	13	2.70	2.48176E-08	65.96	34.04
Zn	30	7.14	1.38496E-08	36.80	63.20
Ni	28	8.91	1.33282E-08	35.42	64.58
Cr	24	7.19	1.81099E-08	48.13	51.87
Mn	25	7.44	1.68851E-08	44.87	55.13
Co	27	8.90	1.44592E-08	38.42	61.58
In	49	7.31	5.12592E-09	13.62	86.38
Gd	64	7.95	2.65013E-09	7.04	92.96

IV. 고 찰

몬테카를로 시뮬레이션은 구하고자 하는 수치의 확률적 분포를 반복 가능한 실험 통계로 나타내는 방법을 말한다. 특히, 컴퓨터 및 기술의 비약적인 발전에 힘입어 이제 몬테카를로 기법은 방사선 수송 및 해석에 있어서 가장 보편적인 도구로 자리를 잡았다[9]. 몬테카를로 시뮬레이션 방법은 입자와 물질과의 상호작용을 직접 계산하여 결과를 나타내는 것으로 상대적으로 많은 계산시간이 필요하지만, 가장 정확한 선량계산도구로 평가받고 있으며, 특히 기하학적으로 불규칙한 비균질 물질을 포함하는 경우의 선량계산에 탁월하다[10].

의료방사선 사용영역 중 진단 영상의학 분야에서 사용되는 방사선 차폐는 대체로 0.25~1.0 mmPb이 사용되고, 이 중 0.5 mmPb는 가장 많이 사용되는 제품으로 납치마(apron)의 무게는 약 4.95kg이며, 차폐능은 50kVp에서 99.9%, 75kVp에서는 88%, 100kVp에서는 75% 정도 차폐되는 것으로 알려져 있다[11]. 또한, 황산바륨은 임상에서 X선 검사 시 조영제로 많이 사용되는 인체의 무해한 재료이

며, X선의 에너지 60keV 근처에서는 납에 비교하여 바륨쪽이 차폐효율이 크므로 유효한 방사선 차폐 재료로 알려져 있다[12]. 이는 본 연구에서 납과 바륨이 93.92%와 78.51%로 차폐율이 높은 것과 같았고, 경제성이 있고 낮은 에너지에서 차폐율이 좋은 바륨을 이용해 친환경 차폐체를 만들 수 있다는 김선철 등[13]의 결과를 뒷받침할 만하다. 본 연구의 시뮬레이션 결과 텅스텐(W)과 금(Au)이 98.82%와 98.44%로 가장 높은 모의 결과를 나타냈고, 납(Pb) 93.92%, 비스무스(Bi) 92.35%, 은(Ag) 89.95%, 주석(Sn) 86.87%, 안티몬(Sb) 86.33%, 요오드(I) 82.80%, 바륨(Ba) 78.51% 순으로 차폐효과가 높게 평가되었다. 김교태 등[14]의 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 납(Pb)과 텅스텐(W) 비교 연구에서 텅스텐이 납에 비해 흡수선량이 높아 차폐능이 크다는 결과와 일치하는 결과를 보였다.

V. 결 론

본 연구 결과를 바탕으로 몬테카를로 시뮬레이션 코드를

이용한 전산모사 투과도 실험으로 21개의 원소를 시뮬레이션 해 추정된 결과 납(Pb)을 대체할 차폐물질로 적당한 원소의 투과율은 텅스텐(w) 98.82%, 가돌리늄(Gd) 92.96%, 주석(Sn) 86.87%, 인듐(In) 86.38%, 안티몬(Sb) 86.33%, 바륨(Ba) 78.51%로 평가되었으며, 경제성과 가공성을 고려할 때 위 원소를 화합한 물질로 차폐체를 만드는 것이 적절할 것으로 사료된다.

REFERENCES

- Hyun-Chul Cho: Study on perception and behavior about radiation safety management and Measurement of radiation dose for workers who work in the angiography room, Graduate School of Public Health Korea University, 2004
- Akio, Sato: About the outline about the radiation pamphlet for the citizen, 4th The International Joint Conference of KTJ Radiological Technologists, 2001
- You-Hyun Kim, Jong-Hak Choi, Sung-Soo Kim, et al.: Patient exposure doses from medical x-ray examinations in Korea, Journal of radiological science and technology, 28, 2005
- Korea Industry Society Association: Safety Policy against lead poisoning, KISA, 05, 1995
- Judith F. Briesmeister: MCNPTM A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C, 2000
- Seon-chil Kim, Kyo-tae Kim, Ji-koon Park: Barium Compounds through Monte Carlo Simulations Compare the Performance of Medical Radiation Shielding Analysis, Journal of the Korean Society of Radiology, 7(6), 403-408, 2013
- M Sohrabpour, M Hassanzadeh, M Shahriari, et al.: Gamma irradiator dose mapping simulation using the MCNP code and benchmarking with dosimetry, Applied radiation and isotopes, 57(4), 537-542, 2002
- Calzada Elbio, Gruauer Florian, Schillinger Burkhard, et al.: Reusable shielding material for neutron and gamma-radiation, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, doi:10.1016/j.nima.2010.12.239, 2011
- Rogers D W O: Fifty years of Monte Carlo simulations for medical physics This paper is dedicated to W Ralph Nelson and to the memory of Martin J Berger, two men who have left indelible marks on the field of Monte Carlo simulation of electron-photon transport, Physics in medicine and biology, 51(13), R287, 2006
- Metcalfe Peter, Peter Hoban, Tomas Kron: The physics of radiotherapy X-rays from linear accelerators, Medical Physics Publishing, 1997
- Akkurt I, Basyigit C, Kilincarslan S, et al.: Radiation shielding of concretes containing different aggregates, Cement and Concrete Composites, 28(2), 153-157, 2006
- Friedman H. W., M. S. Singh: Radiation Transmission Measurements for Demron Fabric, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, Transparent polymers embedding nanoparticles for X-rays attenuation, 2003
- Seon-Chil Kim, Myeong-Hwan Park: Development of radiation shielding sheet with environmentally-friendly materials; II: Evaluation of barium, tourmaline, silicon polymers in the radiation shielding sheet, Journal of radiological science and technology, 34, 2011
- 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, Journal of the Korean Society of Radiology, 6(6), 483-487, 2012

•Abstract

A Study on the Shielding Element Using Monte Carlo Simulation

Ki-Jeong Kim¹⁾·Jae-Goo Shim²⁾

¹⁾*Department of Radiology, Konkuk University Medical Center*

²⁾*Department of Radiologic Technology, Daegu Health College*

In this research, we simulated the elementary star shielding ability using Monte Carlo simulation to apply medical radiation shielding sheet which can replace existing lead.

In the selection of elements, mainly elements and metal elements having a large atomic number, which are known to have high shielding performance, recently, various composite materials have improved shielding performance, so that weight reduction, processability, In consideration of activity etc., 21 elements were selected. The simulation tools were utilized Monte Carlo method.

As a result of simulating the shielding performance by each element, it was estimated that the shielding ratio is the highest at 98.82% and 98.44% for tungsten and gold.

Key Words : Monte Carlo Simulation, Shielding Material, Element, Shielding ratio, Transmissivity