

<원저>

진단용 다엽콜리메이터 개발을 위한 몬테칼로 시뮬레이션 연구

- Monte Carlo Simulation for Development of Diagnostic Multileaf Collimator -

1)한국원자력연구원 방사선기기부, 2)과학기술연합대학원대학교

한수철¹⁾, 박승우^{1,2)}

— 국문초록 —

진단방사선 검사 시 환자선량을 감소하기 위한 목적으로 진단용 다엽콜리메이터를 제작하고자 하며, 제작 전 사전연구로서 진단용 다엽콜리메이터에 사용되는 차폐물질 및 차폐효율에 대한 몬테칼로 시뮬레이션을 수행하였다. 몬테칼로 시뮬레이션 코드(MCNPX, LANL, USA)를 이용하여 진단방사선 기기(ReX-650R, Listem, Korea)을 모델링하기 위하여, SRS-78 프로그램을 이용하여 관전압(80, 100, 120 kVp)에 따라 에너지 스펙트럼을 획득하였다. 진단용 다엽콜리메이터의 제작을 위하여 사용된 재료는 SKD-11(탄소 : 1.6%, 규소 : 0.4%, 망간 : 0.6%, 크롬 : 5%, 몰리브덴 : 1%, 바니듐 : 0.3%, 밀도: 7.87 g/cm³)이며 이를 진단방사선 기기에 진단용 다엽콜리메이터(10 × 0.5 × 0.5 cm³, 좌우 20개씩) 형태로 전산 모사하였다. 진단용 다엽콜리메이터의 차폐효율을 확인하기 위하여 MCNPX 코드의 tally6을 이용하여 에너지별로 차폐효율을 계산하였다. 에너지에 따른 차폐효율은 80 kVp 일 때, 98.3% 차폐되었으며, 100 kVp는 95.7%, 마지막으로 120 kVp는 93.6%가 차폐되는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구결과를 기반으로 MLC형태 및, 누설선량에 대한 연구를 진행하여 진단방사선 기기에서 사용 가능한 진단용 다엽콜리메이터 개발에 필요한 정보를 제공할 수 있을 것이라 사료된다.

중심 단어: 진단용 다엽콜리메이터, 몬테칼로 시뮬레이션, 선량 감소

I. 서 론

진단방사선 검사에서 환자의 불필요한 선량을 감소시키기 위한 많은 연구들이 진행되어 왔다. 진단방사선 검사에서 선량 감소를 위한 연구들은 크게 몇 가지 볼 수 있다. 예를 들어 환자에게 직접적으로 들어가는 선량을 감소시키기 위하여 원자번호가 높은 납(Pb), 비스무스(Bi)와 같은 차폐물질을 진단에 영향을 미치지 않는 범위에서 환자의 중요부위에 차폐하여 환자의 피폭선량을 감소시킬 수 있으며^{1)~7)}, 미국의학물리학회(AAPM)⁸⁾, 국제원자력기구(IAEA)⁹⁾에서는 환자의 피폭선량을 감소하기 위한 지표로 진단참조준위를 권고 하고 있다. 또한 환자선량의 감소시키기 위하

여 선택적 콜리메이터를 방사선 입사 구에 부착하여 환자의 중요부위로 들어가는 선량을 차폐하는 연구도 진행되었다¹⁰⁾.

이와 같이 진단방사선 검사에서 선량 감소에 관한 연구를 위하여 다양한 평가방법을 사용하였다. 예를 들어 인체모형팬텀을 대상으로 치과방사선검사에서 Prins⁷⁾은 열형광선량계를 이용하여 납에 의한 선량 감소의 효과를 확인하였으며, Hopper³⁾ 및 McInughlin⁴⁾은 CT 검사에서 환자를 대상으로 열형광선량계를 이용하여 비스무스에 의한 선량 감소의 유용성을 평가하였다.

이와 다르게 Lee¹¹⁾는 몬테칼로 시뮬레이션 코드와 열형광선량계를 이용하여 치과방사선검사에서 선택적 콜리메이

터에 의한 선량 감소의 유용성을 평가하였다. 몬테칼로 시뮬레이션은 측정소자 및 측정시스템을 직접적으로 이용하지 않고도 장기선량을 측정 및 평가할 수 있는 장점을 가지고 있으며, 선량 감소를 위하여 차폐체를 제작할 경우, 직접 제작하지 않고도 연구를 진행할 수 있는 장점을 가지고 있다.

본 연구는 환자의 불필요한 선량을 감소시킬 수 있는 진단용 다엽콜리메이터 개발에 앞선 선행연구로 범용적으로 사용되고 있는 몬테칼로 시뮬레이션 코드를 이용하여 진단용 다엽콜리메이터의 차폐효율을 에너지에 따라 평가하였다.

II. 연구 재료 및 방법

진단방사선 검사 시 환자선량 감소를 위한 진단용 다엽콜리메이터(Multileaf Collimator; MLC) 개발을 위하여, LANL (Los Alamos National Lab.)에서 개발한 범용의 방사선 수송 전산해석 코드인 MCNPX(Monte carlo N-Particle Code Extended, Ver.2.6.0, USA)를 이용하여 몬테칼로 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션 계산은 광자를 적용하였고, 입력 자료로 number of particle history, nps = 1.0×10^9 로 하였다. 사용된 컴퓨터는 CPU (intel(R) Core(TM) i7-6700, 3.4 GHz)를 사용하였으며, 메모리는 16 GB 이다.

진단용 다엽콜리메이터 모델링에 앞서 진단방사선 기기를 모델링하였으며, 장비의 특성은 다음 Table 1과 같다.

Table 1 Specification of diagnostic radiography unit for this study

Unit model	Rex-650R (Listem, Korea)
Tube model	LTN-50 (Toshiba, Japan)
Max voltage	150 kV
Inherent filter	0.9 mmAl
Target angle	12 degree
Target	Rhenium-Tungsten-faced Molybdenum

진단방사선 기기를 모델링하기 위하여 SRS-78 프로그램을 이용하여 모델의 대상이 되는 기기의 튜브정보를 입력하여 관전압에 따라 에너지 스펙트럼을 획득하였으며, 획득된

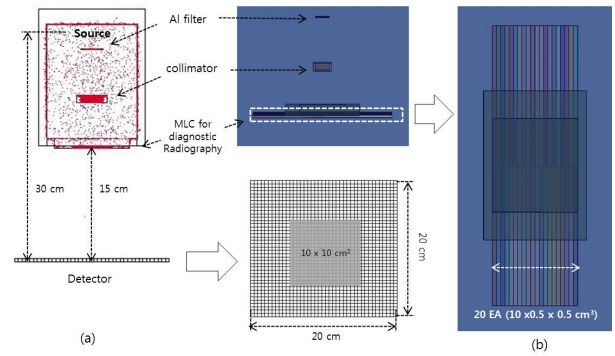


Fig. 1 Modeling of (a) diagnostic radiography unit and (b) Multileaf collimator for diagnostic radiography in MCNPX visual Editor (Ver. X-22S)

에너지 스펙트럼을 몬테칼로 시뮬레이션 코드에 삽입하여 진단방사선 기기의 소스를 모델링하였다.

본 연구는 진단용 다엽콜리메이터를 제작하기 위하여, 우수한 기계 가공성을 가지고 있으면서 차폐모형을 만들기 위하여 잦은 움직임이 발생하더라도 높은 내마모성을 가지는 SKD-11합금 공구강을 선택하여 만들 예정이며, SKD-11합금 공구강은 일반 철과 밀도가 유사한 7.87g/cm^3 이고, 첨가된 성분 함유량은 다음과 같다(탄소 : 1.6%, 규소 : 0.4%, 망간 : 0.6%, 크롬 : 5%, 몰리브덴 : 1%, 바나듐 : 0.3%).

진단용 다엽콜리메이터의 기하학적 구조는 총 40개의 엽으로 좌우 20개씩 위치시켰으며, $10 \times 0.5 \times 0.5 \text{ cm}^3$ (길이×폭×높이)이다. Fig. 1은 모델링된 진단용 다엽콜리메이터의 차폐효율을 평가하기 위한 시뮬레이션 환경을 보여주고 있다. 진단방사선 기기를 모델링하기 위하여 SRS-78 프로그램으로 획득한 에너지 스펙트럼을 삽입하였으며, 고유여과 필터를 표현하였다. 그리고 1차 콜리메이터 및 입사 구 앞에 진단용 다엽콜리메이터를 부착하여 모델링하였다.

진단용 다엽콜리메이터의 에너지별 차폐 효율을 확인하기 위하여 진단용 다엽콜리메이터를 부착한 부위를 기준으로 15 cm 떨어진 위치에 $20 \times 20 \text{ cm}^2$ 의 디텍터를 구현하였으며, 조사면 사이즈가 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 이 되도록 콜리메이터를 설정한 후 Tally card를 이용하여 디텍터의 X축 방향을 따라서 프로파일을 계산하였으며, 진단용 다엽콜리메이터의 유무에 따라 식(1)을 이용하여 차폐 효율을 계산하였다.

$$\text{Shielding rate (\%)} = \left[1 - \frac{\text{Dose}_{\text{with MLC}}}{\text{Dose}_{\text{Open}}} \right] \times 100 \quad \text{식 (1)}$$

· $\text{Dose}_{\text{with MLC}}$: MLC 부착 후 디텍터의 중심축의 X축 방향에서 측정된 빔 프로파일의 평균값

· Dose_{open}: MLC 부착 없이 디텍터의 중심축의 X축 방향에서 측정된 빔 프로파일의 평균값.

III. 결 과

Fig. 2은 SRS-78 프로그램을 이용하여 관전압 별로 획득한 에너지스펙트럼을 보여주고 있다. 본 결과를 MCNPX 코드에 삽입하여 모델의 대상이 되는 진단방사선 기기를 구현하였다.

Fig. 3는 진단용 다엽콜리메이터를 부착하지 않고 진단용 발생장치의 콜리메이터를 10 × 10 cm²으로 설정한 후 몬테칼로 시뮬레이션 한 결과를 보여주고 있으며, 각각의 관전압에 따라 디텍터의 조사면에 검출되는 선량의 분포도로 보여주고 있다.

Fig. 3d는 각 조사면의 중심축에서 x축 방향으로 획득한 프로 파일을 비교한 그림이며, Fig. 3d에서 확인할 수 있듯이 에너지가 높을수록 조사면의 선량이 높을 것을 확인할 수 있었다.

반면에 Fig. 4은 앞의 실험과 모든 동일한 조건에서 진단용 다엽콜리메이터를 모두 닫은 상태로 부착한 후 계산한 선량분포도를 보여주고 있으며, Fig. 4d는 각 에너지의 조사면에서 중심축에서 x축 방향으로 획득한 프로 파일을 관전압에 따라 비교한 것을 보여주고 있다.

진단용 다엽콜리메이터의 에너지에 따른 차폐효율은 진단용 다엽콜리메이터가 부착되지 않고 조사하여 획득한 Fig. 3d를 기준으로 진단용 다엽콜리메이터를 부착하였을 때 획득한 Fig. 4d의 값을 식 (1)에 따라 계산하였으며 결과는 Table 2에서 확인할 수 있다.

Fig. 5는 진단방사선 기기 및 다엽콜리메이터를 MCNPX visual Editor에서 3D로 구현한 그림과 본 연구결과를 기반으로 진단용 다엽콜리메이터를 Solidworks 프로그램을 이용하여 공학적으로 설계한 그림을 보여주고 있다.

IV. 고 찰

진단방사선 검사 시 환자의 불필요한 선량을 감소하기 위하여 납과 비스무스와 같은 차폐 물질 등을 진단에 영향을 주지 않는 범위 내에서 주요장기를 차폐하였으며, 차폐에 대한 선량 감소를 확인하기 위하여 열형광선량계 및 유리선량계 그리고 필름 등을 사용하였다¹⁾⁻⁷⁾.

예를 들어 Hopper³⁾ 및 McLanughlin⁴⁾은 CT검사에서 비

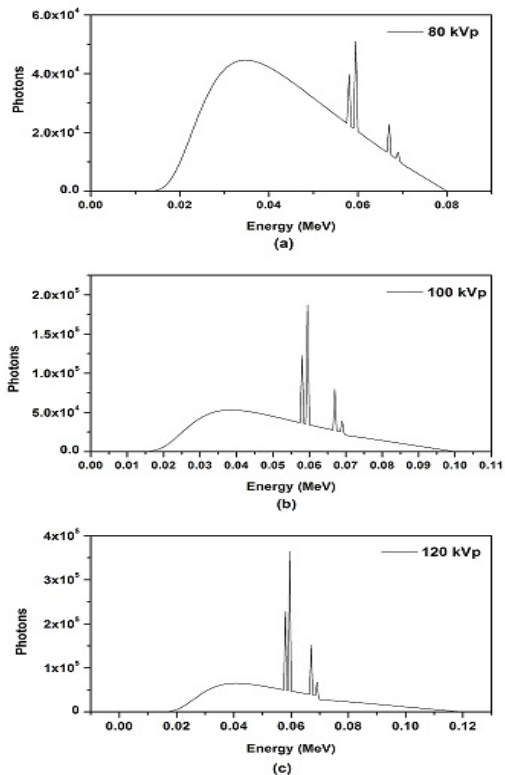


Fig. 2 Energy spectrum depending on tube voltage (a) 80 kVp, (b) 100 kVp, (c) 120 kVp

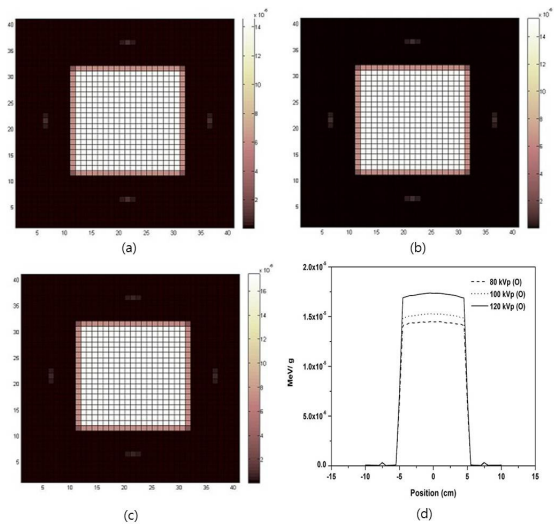


Fig. 3 Dose distribution and beam profile in detector with tally6 depending on tube voltage (a) 80 kVp, (b) 100 kVp, (c) 120 kVp (d) Beam profile without Multileaf collimator (Open field)

스무스 차폐체를 이용하여 환자 눈의 선량을 50%이상 감소하는 효과를 확인하였다. 그리고 중재적 방사선 시술에서 Shott⁵⁾는 납을 이용하여 갑상선의 선량을 48% 까지 감소시켰으며, Han은 비스무스 차폐체를 이용하여 눈과 갑상선의

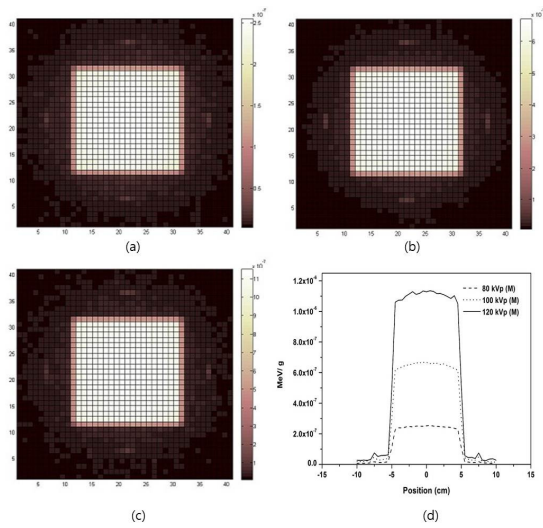


Fig. 4 Dose distribution and beam profile in detector with tally depending on tube voltage (a) 80 kVp, (b) 100 kVp, (c) 120 kVp (d) Beam profile with Multileaf collimator (MLC field)

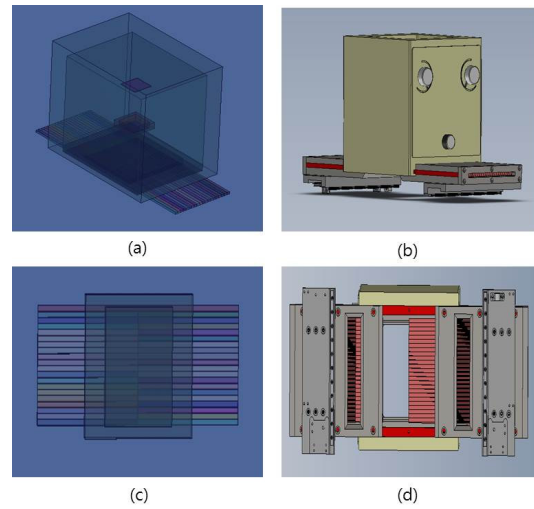


Fig. 5 3D view of diagnostic radiography unit and Multileaf collimator in MCNPX (a),(c) and Solidworks (b),(d)

Table 2 The shielding rate of diagnostic multileaf collimator depending on energy (Mev/g)

	80 kVp	100 kVp	120 kVp
Open field	1.44×10^{-5}	1.51×10^{-5}	1.72×10^{-5}
MLC field	2.44×10^{-7}	6.48×10^{-7}	1.10×10^{-6}
Shielding rate(%)	98.3	95.7	93.6

선량을 각각 20, 64%의 감소시키는 연구를 진행하였다.

본 연구는 환자에게 직접적으로 차폐체를 부착하여 환자의 불필요한 선량을 감소시키는 기존의 연구와는 다르게 방사선치료시스템에서 정상조직을 보호하기 위하여 사용되고 있는 다엽 콜리메이터를 착안하여 진단용 다엽콜리메이터를 개발하여 진단방사선의 불필요한 선량을 감소시키고자하였으며, 이를 위한 사전연구로써 범용적으로 사용되고 있는 몬테칼로 시뮬레이션 코드를 이용하여 연구를 수행하였다.

본 연구는 몬테칼로 시뮬레이션을 이용하여 여러 가지 차폐재료 및 두께에 대한 내용을 전산모사하기 보다는 사전 차폐후보 재료를 선정된 후 선전된 차폐 후보 재료에 대하여 검증하는 시뮬레이션을 수행하는 제한성을 가지고 있으며, Lee¹¹⁾의 연구처럼 가상의 인체 팬텀을 몬테칼로 시뮬레이션 코드에 삽입하여 실제 진단용 다엽콜리메이터로 인한 장기선량의 감소를 비교하지 않았다

하지만 진단용 다엽콜리메이터의 제작을 위한 기계적 가공 및 잦은 움직임에 대하여 높은 내마모성 고려하여 우선적으로 선정된 후보물질의 차폐 유효성에 대한 평가연구

와 이 연구 결과를 기반으로 한 공학적 설계까지 연구를 진행하였다.

본 연구 결과에서 확인할 수 있듯이 관전압에 따라 약 94%에서 98%의 차폐효율이 있음을 확인하였고, 본 연구결과를 기반으로 임상에서 검사되고 있는 진단방사선검사를 몬테칼로 시뮬레이션 코드를 전산모사와 직접적인 측정방법을 통하여 비교분석하는 연구를 진행할 예정이다.

V. 결 론

본 연구는 진단 방사선 검사에서 선량 감소를 위한 진단용 다엽콜리메이터의 개발의 선행적 연구로서 몬테칼로 시뮬레이션을 이용하여 개발에 사용되는 재질에 대하여 에너지에 따라 평가하였다. 제작하고자하는 재질로 충분히 선량을 감소시킬 수 있을 것이라 사료되며, 본 연구결과를 통하여 진단용 다엽콜리메이터를 개발연구에 선행적 연구 결과로 충분히 활용될 수 있을 것이라 사료된다.

Acknowledgement

본 연구는 보건복지부의 재원으로 한국보건산업진흥원의 보건의료기술연구개발사업 지원에 의하여 이루어진 것임 (과제고유번호 : HI16C0699)

REFERENCES

- Short C. P, Fannin N. F, Malone L, Thornton J, Brennan P, and Lee M. J: Thyroid dose during neuro-interventional procedure: dose lead shielding reduce the dose ? *Cardiovascular Interv. Radiol.* 30, 922-927, 2007
- Sandborg M, Rossitti S, and Perrersson H: Local skin and eye lens equivalent doses in interventional neuro-radiology. *Eur. Radiol.* 20, 725-733, 2010
- Hopper K. D, Neuman J. D, King S. H. and Kunselman A. R: Radioprotection to the eye during CT scanning. *SJNR Am J Neuroradiol.* 22, 1194-1198, 2001
- McLanghlim D. J. and Moongy R. B: Dose reduction to radiosensitive tissues in CT: do commercially available shields meet the user' needs ? *Clinical Radiology.* 59, 446-450, 2004
- Shortt C. P, Malone L, Thornton J, Brennan P and Lee M. J: Radiation protection to the eyes and thyroids during diagnostic cerebral angiography: a phantom study. *J Med Imaging Radiat. Oncol.*, 52, 365-369, 2008
- Su chul Han and Soon Chan Kwon: Radiation dose and reduction to the critical organ with bismuth shielding during endovascular coil embolisation for cerebral aneurysms. *Radiat. Prot. Dosimetry.* 156, 364-371, 2013
- Prins R, Dauer L. T, Colosi D. C, Quinn B, Kleiman N, Bohle G, Holohan B, Al-Najjar Fernandez T, Bonvento M et al: Significant reduction in dental cone beam computed tomography(CBCT) eye dose through the use of leaded glasses. *Oral Surg Oral MEd Oral Pathol Oral Radiol Ended.* 112, 502-507, 2011
- Gray J. E, Archer B, Butler P. F, Hobbs, B. B, Mettler F. A, Pizzutiello R. J et al: Reference values for diagnostic radiology: application and impact. *Radiology.* 235, 354-358, 2005
- IAEA, Radiological protection for medical exposure to ionizing radiation. IAEA Safe Standards Series, Safety Guide No RS-G-1.5. International Atomic Energy Agency, 2002
- Gijbels F, Sanderink G, Wyatt J. and Van Dam J: Radiation doses of collimated vs non-collimated cephalometric exposure. *Dentomaxillofac. Radiol.*, 32, 128-133, 2003
- Boram Lee, Gwisoon shin, Sunjung Kang et al: Dose evaluation of selective collimation effect in cephalography by measurement and Monte Carlo simulation. *Radiat. Prot. Dosimetry.* 148, 58-64, 2011

•Abstract

Monte Carlo Simulation for Development of Diagnostic Multileaf Collimator

Su-Chul Han¹⁾·Seungwoo Park^{1,2)}

¹⁾*Division of Medical Radiation Equipment, Korea Institute of Radiological and Medical Sciences*

²⁾*Radiological & Medico-Oncological Sciences, University of Sciences and Technology*

The diagnostic multileaf collimator(MLC) was designed for patient dose reduction in diagnostic radiography. We used monte carlo simulation code (MCNPX, LANL, USA) to evaluate efficiency of shielding material for making diagnostic MLC as preliminary study. The diagnostic radiography unit was designed using SRS-78 program according to tube voltage (80,100,120 kVp) and acquired energy spectrums. The shielding material was SKD11 alloy tool steel that is composed of 1.6% carbon(C), 0.4% silicon(Si), 0.6% manganese (Mn), 5% chromium (Cr), 1% molybdenum(Mo) and vanadium(V). The density of it was 7.89 g/cm³. Using tally card 6, we calculated the shielding efficiency of MLC according to tube voltage. The results was that 98.3% (80 kVp), 95.7 % (100 kVp), 93.6% (120 kVp). We certified efficiency of diagnostic MLC fabricated from SKD11 alloy steel by monte carlo simulation. Based on the results, we designed the diagnostic MLC and will develop the diagnostic MLC for reduction of patient dose in diagnostic radiography.

Key Words : Diagnostic multileaf collimator, Monte carlo simulation, Dose reduction, Diagnostic radiography