

## Comparative Studies on Absorbed Dose by Geant4-based Simulation Using DICOM File and Gafchromic EBT2 Film

Eun-Hui Mo\*, Sang-Ho Lee<sup>†</sup>, Sung-hwan Ahn<sup>‡</sup>, Chong-Yeal Kim<sup>‡</sup>

\*Department of Radiology, Wonkwang University Hospital, Iksan,

<sup>†</sup>Department of Radiological Science, Seonam University, Asan,

<sup>‡</sup>Department of Radiation Science & Technology, Chonbuk National University, Jeonju, Korea

Monte Carlo method has been known as the most accurate method for calculating absorbed dose in the human body, and an anthropomorphic phantom has been mainly used as a method of simulating internal organs for using such a calculation method. However, various efforts are made to extract data on several internal organs in the human body directly from CT DICOM files in recent Monte Carlo calculation using Geant4 code and to use by converting them into the geometry necessary for simulation. Such a function makes it possible to calculate the internal absorbed dose accurately while duplicating the actual human anatomical structure. Thus, this study calculated the absorbed dose in the human body by using Geant4 associating with DICOM files, and aimed to confirm the usefulness by compare the result with the measured dose using a Gafchromic EBT2 film. This study compared the dose calculated using simulation and the measured dose in beam central axis using the EBT2 film. The results showed that the range of difference was an average of 3.75% except for a build-up region, in which the dose rapidly changed from skin surface to the depth of maximum dose. In addition, this study made it easy to confirm the target absorbed dose by internal organ and organ through the output of the calculated value of dose by CT slice and the dose value of each voxel in each slice. Thus, the method that outputs dose value by slice and voxel through the use of CT DICOM, which is actual image data of human body, instead of the anthropomorphic phantom enables accurate dose calculations of various regions. Therefore, it is considered that it will be useful for dose calculation of radiotherapy planning system in the future. Moreover, it is applicable for currently-used several energy ranges in current use, so it is considered that it will be effectively used in order to check the radiation absorbed dose in the human body.

**Key Words:** Monte Carlo method, Geant4, Gafchromic EBT2 film, DICOM

### 서 론

의료분야에서 몬테카를로 방식을 이용한 시뮬레이션은 방사선 조사로 인한 인체 내부의 선량분포와 흡수선량을 계산할 수 있다. 특히 방사선 치료 영역에서 정확한 선량분포를 예측하여 치료계획을 세워야 하는 경우에 유용하게 쓰이는 통계적 계산법이다.<sup>1)</sup> 몬테카를로 기법을 이용한 시뮬레이터(simulator) 중 고 에너지 입자 실험을 위해 유럽입자물리연구소(European Organization for Nuclear Research, CERN)에서

개발된 Geant4는 물질 내에서 모든 입자의 물리적 과정을 시뮬레이션 할 수 있을 뿐만 아니라 복잡한 geometry을 묘사할 수 있고, 전자기장에서의 취급이 가능한 시뮬레이션 코드이다. 또한 객체지향언어인 C++를 프로그래밍 언어로 사용하여 기능성과 활용성, 적용의 다양성을 갖추고 있어 고 에너지와 핵물리실험, 천체물리, 의학물리, 방사선 방어와 우주과학 등 다양한 영역에서 활용되고 있다.<sup>2-4)</sup>

DICOM (Standard for Digital Imaging and Communication in Medicine)은 환자의 획득된 영상 데이터와 환자의 개인적인 정보 데이터를 처리하고 저장하는데 사용되는 데이터 형식이다. 이러한 DICOM 파일을 이용하면 필요한 데이터를 용이하게 획득할 수 있고 이미 존재하는 진단, 치료 시스템과도 쉽게 통합할 수 있다.<sup>5)</sup>

최근 Geant4 code는 DicomHandler라는 변환 파일을 사용함으로써 선량계를 이용하는 것과 같은 직접 측정 방법으

이 논문은 2012년 11월 12일 접수하여 2012년 12월 10일 채택되었음.

책임저자 : 모은희, (570-711) 전북 익산시 신용동 344-2

원광대학교병원 영상의학과

Tel: 063)859-1899, Fax: 063)851-4749

E-mail: mo0428@hanmail.net

로는 불가능하였던 인체 내부의 흡수선량을 해부학적 구조물들을 그대로 재현하면서 계산할 수 있게 하고 있다.<sup>6)</sup> 즉, DicomHandler 함수는 CT image data을 Geant4에서 사용할 수 있는 geometry로 변환하여 인체 내 흡수선량을 계산할 수 있도록 하는 기능을 한다.

방사선 치료 영역에서 환자에게 입사되는 방사선량을 측정하기 위한 선량계로 이온 전리함, 열형광 선량계(Thermoluminescent dosimeter, TLD), Gafchromic 필름, 반도체 디텍터 등이 이용된다. 이 중 필름을 이용한 Film dosimetry는 임상에서 2D 선량분포를 확인하는 QA (Quality assurance)에 사용이 편리하기 때문에 많이 사용되어진다. 최근 성능이 개선된 Gafchromic EBT2 필름으로 측정된 선량은 radiographic 필름의 단점인 화학적 현상 과정 없이 절대 선량에 가깝다고 제조사는 발표하고 있다.<sup>7)</sup> Gafchromic EBT2 필름은 조직등가 물질로 되어있고, 방사선 에너지 의존성이 적으며, 높은 공간 분해능과 현상이 필요 없다는 특성을 갖고 있기 때문에 IMRT의 QA와 소조사면을 이용하는 방사선수술에서 사용되어질 정도로 신뢰할 수 있는 선량측정을 할 수 있다.<sup>7-10)</sup>

본 연구에서는 인체 내부의 선량분포를 확인하기 위해서 CT에서 얻은 DICOM 파일과 Geant4 코드를 이용하였다. 또 시뮬레이션을 통해 얻은 선량 값을 실제 Gafchromic EBT2 필름을 이용하여 측정된 선량과 비교함으로써 환자의 의료영상 데이터인 DICOM 파일을 사용한 Geant4 simulation의 유용성을 확인해 보고자 하였다.

## 대상 및 방법

### 1. ART 팬텀 & CT data

Geant4 Geometry에서 인체 내부 구조를 표현하기 위해 ART (Alderson Radiation Therapy) 팬텀이 사용되었다. ART 팬텀은 두께가 25 mm인 34개의 슬라이스가 연결되어 인체의 Head, Lung, Pelvis를 형성한다. 조직 등가물질로 이루어진 ART 팬텀은 방사선 치료에서 선량측정을 위해 자주 사용되는 인체 모형 팬텀이다. 본 연구에서 simulation을 위한 인체 구조는 ART 팬텀의 lung 부위를 5 mm 간격으로 스캔하여 29개의 CT image를 획득하여 활용하였다. CT DICOM 파일에는 환자의 개인 정보와 장비 정보, 환자의 image 정보, 스캔정보 등이 저장되어 있고, 파일의 확장자는 “.dcm”를 갖는다. Image 스캔을 위한 CT 장비는 SIEMENS사의 Sensation Open 모델이다.

### 2. 시뮬레이션의 실행

본 연구는 Geant 4.9.5 버전이 사용되었다. 컴파일러는 Microsoft Visual Studio 2010 express가 사용되었고, 계산에 CLHEP 2.1.1.0을 함께 사용하였다. 시뮬레이션에 사용될 광자의 에너지 스펙트럼을 생성하기 위해 Varian 2100C LINAC을 모델링한 후 이온전리함 아래에 가상의 검출기를 위치시키고 6 MeV의 전자선에 의해 발생하는 에너지 스펙트럼을 얻은 다음 0.1 MeV 구간별로 확률분포를 구하였으며, 이때 히스토리는  $2 \times 10^8$ 회씩 8회 입사시켜 계산을 수행하였다. 이 확률분포를 다시 누적 확률분포로 변환하여 시뮬레이션의 스펙트럼 데이터로 사용하였다.<sup>1)</sup> 이 스펙트럼 데이터를 기본으로 설정한 후 물 팬텀에서 측정된 PDD와 일치시키기 위하여 각 에너지 구간별 Weighting factor를 구하고 이를 다시 스펙트럼에 적용하였다. 방사선 조사야는  $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 로 하고 입자 히스토리는  $1 \times 10^8$ 개를 설정한 후 고정된 6 MV의 광자 에너지 스펙트럼을 이용하여 시뮬레이션을 실행시켰다. 시뮬레이션 시행 후 얻어진 흡수선량은 이용이 편리하도록 각각의 CT 슬라이스 별로 출력되어지도록 하여 29개의 결과 파일을 형성하였다. 29개의 파일 중 선속의 중심 위치에 해당하는 파일에서 중심축의 깊이에 따른 선량 값을 읽어 최대 선량 값을 찾은 후 이를 기준으로 깊이에 따른 선량의 백분율을 계산하였다.

### 3. Dicom 파일의 변환

Binary로 code화 되어있는 CT의 DICOM data에는 환자의 인적사항과 장비에 대한 사항 그리고 환자의 image 정보를 포함하고 있다. 시뮬레이션을 위해 CT의 DICOM data는 Geant4에서 이용 가능한 형태의 geometry 모델로 변환하여야 하고, 이를 위해 DicomHandler라는 파일을 사용한다. DicomHandler는 DICOM 파일에서 matrix의 크기, 슬라이스 정보, 픽셀의 크기, 각 픽셀의 Hounsfield 정보를 읽어 Geant4 코드에서 사용 가능한 형태의 파일을 생성한다.

DICOM 파일에서 image의 픽셀 값은 CT의 Hounsfield number (HU)를 나타낸다. Geant4 변환 파일은 이러한 픽셀 값을 physical density로 변환한 후 여기에 다시 이 밀도 구간에 해당하는 material type을 설정한다. 픽셀 값의 밀도변환을 위한 CT의 픽셀 값과 이에 해당하는 밀도의 calibration curve를 구하기 위해 Catphan 503 (The Phantom Laboratory) 팬텀을 이용하였고, 밀도를 material type으로 설정하기 위해서는 인체의 물질 분류와 밀도에 관한 ICRU report 46에 근거하여 Data.dat 파일에 정의하여 사용하였다. 이처럼

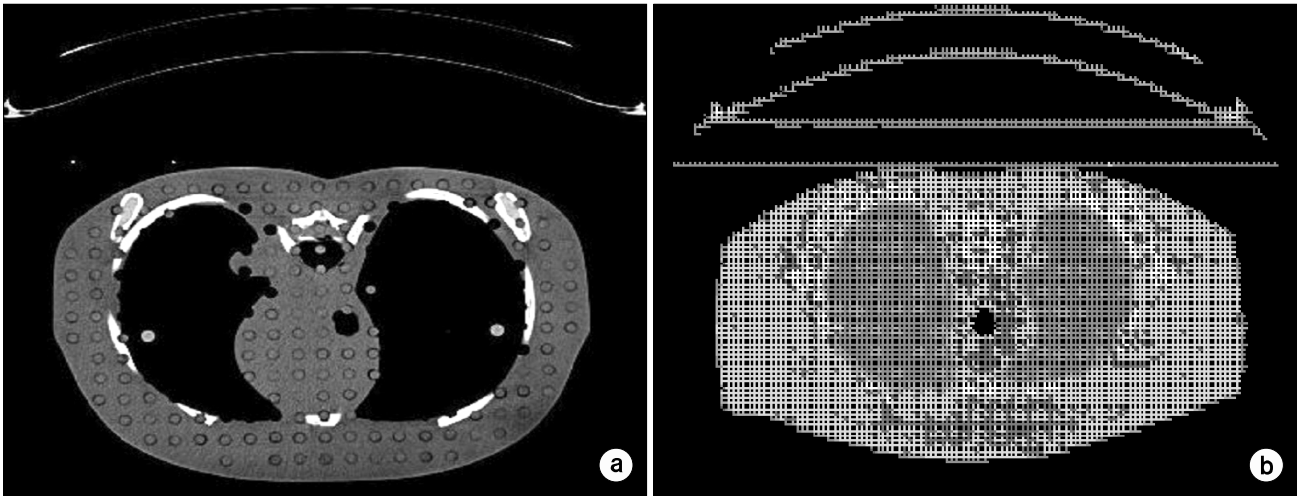


Fig. 1. DICOM image (a) and Converted Image into Geant4 geometry (b) of phantom.

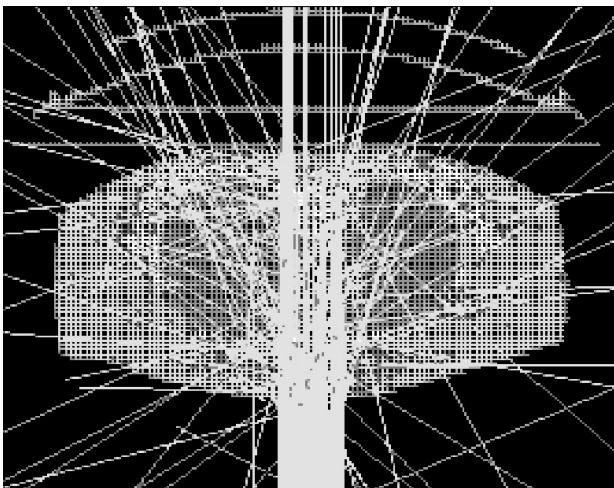


Fig. 2. Trajectory of radiation beam in Geant4 simulation.

DICOM 파일의 픽셀 크기에 해당하는 복셀을 만든 후 이 복셀에 해당 밀도와 material type를 설정하여 Geant4에서 사용되어질 수 있도록 재구성하여 사용하였다. Fig. 1은 ART 팬텀에서 lung의 DICOM image와 이를 DicomHandler 파일을 이용하여 복셀로 변환한 Geant4 geometry을 나타내었다.

Fig. 2는 변환 파일을 이용하여 생성된 Geant4 geometry에 광자선을 조사한 모습을 시각화한 것이다.

#### 4. Gafchromic EBT2 필름

본 연구에서 Film dosimetry에 사용된 필름은 가장 최근 개발된 Gafchromic EBT2 필름으로 이 제품은 기존의 EBT

필름에 비해 자외선이나 가시광선의 영향을 덜 받도록 설계된 것이다.

Gafchromic EBT2 필름은 인체의 선량을 측정하기에 앞서 Background 보정이 필요하고, 선량과 픽셀 값 사이의 response curve을 위한 calibration 작업이 필요하다. 먼저, 가로×세로가 5×5 cm<sup>2</sup>로 cutting된 calibration 필름을 고체팬텀 (plastic water, Nuclear Associate, Carle Place, NY) 사이에 한 장씩 위치시켰다. 방사선 조사야를 10×10 cm<sup>2</sup>로 하고 SSD는 100 cm가 되게 설정한 후 선량 0.1~1 Gy는 0.1 Gy 간격으로, 1~4 Gy는 0.5 Gy 간격으로 6 MV 광자를 조사하였고, 필름의 안정화를 위해 약 12시간 이상 보관 후 EPSON Expression 1680 Pro scanner (Japan, Epson Co.)를 이용하여 필름을 스캐닝 하였다. 스캐너에 의해 읽혀진 필름의 픽셀 값은 조사된 선량과 비교를 통해 선량-픽셀 값 response curve을 작성하였고, Background를 보정하기 위해 방사선이 조사되지 않은 필름을 스캔하여 스캐너의 광원과 flat-bed 사이의 산란효과를 보정하였다. 체내의 선량분포를 측정하기 위한 Gafchromic EBT2 필름은 5×25.4 cm로 cutting하여 중심 선속에 위치한 ART 팬텀의 횡단면에 삽입하고 시뮬레이션과 동일한 조건에서 6 MV 광자를 입사시켰다. 방사선이 조사된 선량측정용 필름은 필름 스캐너로 스캐닝하여 calibration 필름에 의해 생성된 response curve을 이용하여 선량 값으로 변환하였고 깊이에 따른 relative dose (%)을 계산하였다. Gafchromic EBT2 필름의 모든 분석은 FILM-QA software (version 2.2.0113, USA)를 사용하였고, 방사선 조사는 Varian사의 Clinac iX 선형가속기(LINAC)를 사용하였다.

**결과 및 고찰**

ART 팬텀의 lung을 5 mm 간격으로 스캔하여 29개의 DICOM 파일을 만들고, 이를 Geant4에서 사용 가능한 Geometry로 구성 한 후 조사야 5×5 cm<sup>2</sup>에 6 MV의 광자선을 입사시켜 방사선과 물질과의 상호작용을 시뮬레이션 함으로써 인체 내부에 흡수되는 선량을 계산하였다. 본 연구에서 사용한 SIEMENS사의 CT 장비에서 얻은 lung CT image에서 대략적인 픽셀 크기는 0.98×0.98 mm<sup>2</sup>이었고, row 와, column에서 각 4개 픽셀들이 합쳐져 하나의 복셀을 형성하도록 code화 하였다. 따라서 Geant4 geometry로 변환된 파일에서는 크기가 3.9×3.9×5.0 mm<sup>3</sup>인 복셀이 128×128개 형성되었다. 또한 이러한 크기의 복셀 각각에서의 흡수선량을 쉽게 이용하기 위해 본 연구에서는 계산된 선량이 29개의 슬라이스별로 각각 출력되도록 하였고(Table 1), 각 슬라이스에서 복셀의 x, y좌표를 정하여(Fig. 3) 좌표별로 선량 값이 출력되도록 하였다(Table 2).

**Table 1. File change with progression of simulation.**

Raw DICOM	Conversion file	Output
1.dcm	1.g4dcm	DICOM0.out
2.dcm	2.g4dcm	DICOM1.out
3.dcm	3.g4dcm	DICOM2.out
4.dcm	4.g4dcm	DICOM3.out
5.dcm	5.g4dcm	DICOM4.out
⋮	⋮	⋮
26.dcm	26.g4dcm	DICOM25.out
27.dcm	27.g4dcm	DICOM26.out
28.dcm	28.g4dcm	DICOM27.out
29.dcm	29.g4dcm	DICOM28.out

**Table 2. The calculated dose distribution table by voxel coordinate of the center slice data.**

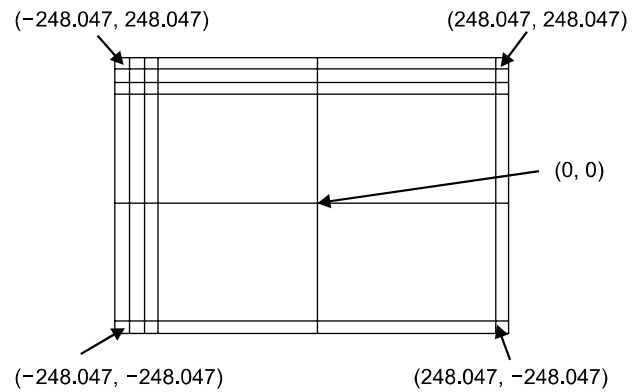
X (mm)	Y (mm)	Dose (Gy)
-17.5781	1.95313	1.81E-17
-13.6719	1.95313	1.85E-17
-9.76563	1.95313	1.87E-17
-5.85938	1.95313	1.90E-17
-1.95313	1.95313	1.88E-17
1.95313	1.95313	1.88E-17
5.85938	1.95313	1.87E-17
9.76563	1.95313	1.86E-17
13.6719	1.95313	1.86E-17
17.5781	1.95313	1.86E-17

이렇게 함으로서 손쉽게 각 좌표별 또는 인체 내부의 각 장기나 기관에서 원하는 지점의 선량을 확인할 수 있다.

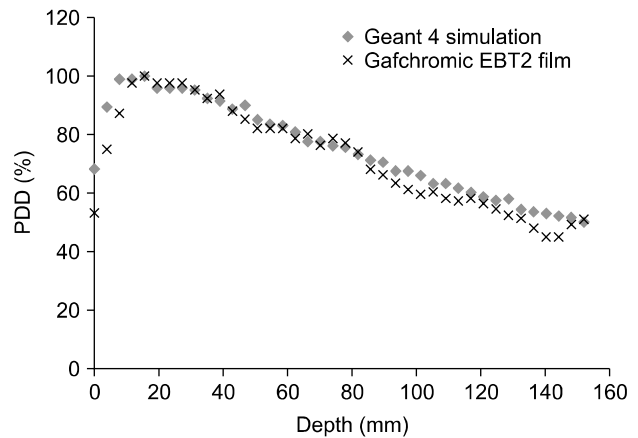
Fig. 4에 Geant4 시뮬레이션을 통해 계산된 흡수선량 중 선속의 중심축 슬라이스에서의 깊이에 따른 선량 백분율을 구한 것과 Gafchromic EBT2 필름에 의해 측정된 심부선량 백분율을 구한 그래프를 비교하여 나타내었다. 시뮬레이션에 의해 계산된 최대선량 깊이와 Gafchromic EBT2 필름을 이용하여 측정된 최대선량 깊이는 각각 15.6 mm, 15.4 mm로 두 결과가 상당히 정확하게 일치함을 볼 수 있다.

Fig. 5는 Geant4 시뮬레이션을 통해 계산된 심부선량백분율과 Gafchromic EBT2 필름을 이용하여 측정된 심부선량 백분율의 오차를 구하여 도시하였다. 심부선량백분율의 오차는 식(1)과 같이 정의할 수 있다.

$$Difference(\%) = D_{calculated}(\%) - D_{measured}(\%) \quad (1)$$



**Fig. 3. x, y coordinate of voxel in one slice.**



**Fig. 4. Comparison of calculated dose and measured dose by depth in phantom.**

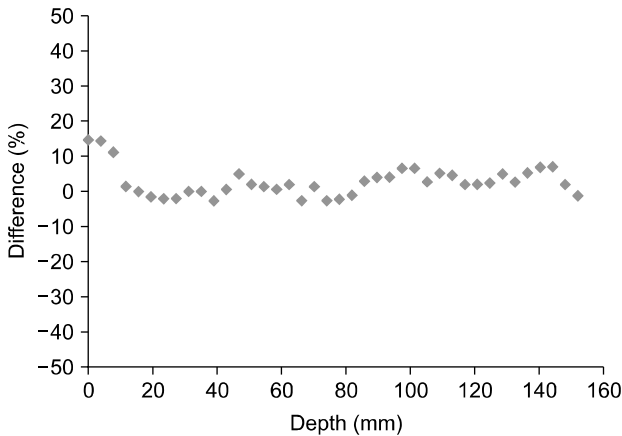


Fig. 5. Difference (%) between calculated dose and measured dose.

ICRU Report 24에서는 방사선 치료 시 방사선량 오차를  $\pm 5\%$  이내로 요구하고 있다. 본 연구에서는 심부선량백분율의 오차가 평균 3.75%를 보이고 있어 DICOM 파일을 이용한 Geant4 시뮬레이션이 인체 내부의 흡수선량을 측정함에 있어 유용한 계산 방식임을 보이는 있다. 그러나 측정과 계산의 심부선량백분율의 오차가 표면에서 최대선량 지점인 15.4 mm 깊이까지 그 차이가 매우 큰 것으로 나타났는데 이는 방사선 치료 에너지 영역인 고에너지 광자선의 사용 시 피부표면에서부터 최대선량 깊이까지는 선량이 급격하게 변화하는 build up 영역이기 때문인 것으로 보인다.<sup>11)</sup> Build up 영역에서는 작은 깊이의 변화에도 매우 급격한 선량 변화를 나타내므로 이 영역에서 흡수선량 분포를 정확하게 측정하는 것이 매우 어렵다. 또한 흡수선량을 측정하는 선량계의 형태와 선량측정방법에 따라 많은 차이를 보이는 것으로 보고되고 있다.<sup>12)</sup> 선량의 측정이 부정확한 build up 영역에서의 다소 큰 차이를 제외한 최대선량 깊이 이후에서 선량 오차의 평균은 3.75%로 Geant4 시뮬레이션에 의한 선량계산이 아직은 만족할 수 없지만 좀 더 개선하면 향후 인체 내 선량계산에 유용함을 확인 할 수 있다. 본 논문의 선량 오차의 결과는 장과 이<sup>13)</sup>의 보고에서 계산에 의한 선량 값이 EBT 필름을 이용한 측정 선량과 5% 이내의 오차를 보인다고 한 것보다 더 낮은 선량오차를 나타내는 것으로 조사되었다.

결론적으로 DICOM 파일과 Geant4를 이용한 시뮬레이션에 의한 인체 내 선량계산과 본 연구에서 사용한 선량의 복셀별, 좌표별 출력 방식은 향후 여러 치료에서 다양하게 이용될 수 있으리라 생각된다. 또한 치료영역 뿐만이 아니라 저에너지를 사용하는 진단영역의 선질에 대해서도 인

체 내 각 장기별, 기관별 정확한 선량평가를 위해 유용하게 사용되어질 것이라 생각된다.

## 결 론

현재까지는 인체 내 장기의 선량계산을 위해 인체모형팩터를 사용하면서 결정된 장기의 모양과 위치에 따라 선량계산을 해 왔던 것과 달리 본 연구에서는 실제 환자의 CT image data를 통해 개개인의 해부학적 구조를 재현하여 각 부위별 흡수선량을 계산하기 위해 DICOM 파일을 이용한 Geant4 시뮬레이션 code를 사용하였고 이를 Gafchromic EBT2 필름으로 측정된 선량과 비교를 통해 유용성을 확인하였다. DICOM 파일을 이용한 Geant4 선량계산과 본 연구에서 마련한 복셀별, 좌표별 선량 출력 방식은 정확한 선량계산뿐만 아니라 자료의 활용성을 증대시키고 또한 저에너지 영역에서의 목적 장기의 흡수선량 확인을 위해 유용한 선량계산 code로 활용되어 질 수 있을 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

1. 강상구, 안성환, 김종일: 몬테카를로 방법에 의한 6MV 선형가속기의 광자 흡수선량 분포 평가에 관한 연구. 방사선기술과학 34(1):43-49 (2011)
2. Agostinelli S, Allison J, Amoko K, et al: GEANT4-a simulation toolkit. NIMPPRA 506(3):250-303 (2003)
3. Pia MG: The Geant4 Toolkit: simulation capabilities and application results. NPB (Proc. Suppl) 125:60-68 (2003)
4. Agostinelli S, Allison J, Amoko K, et al: Geant4 developments and applications. TNS 53(1):270-278 (2006)
5. <http://medical.nema.org> DICOM Homepage
6. Kimura A, Tanaka S, Aso T, et al: DICOM interface and visualization tool for geant4-based dose calculation. Nuclear science symposium conference record, 2005. IEEE 2:981-984 (2005)
7. Devic S, Seuntjens J, Sham E, et al: Precise radiochromic film dosimetry using a flat-bed scanner. Med Phys 32:2245-2253 (2005)
8. Fuss M, Sturtewagen E, De Wagter C, Georg D: Dosimetric characterization of GafChromic EBT film and its implication on film dosimetry quality assurance. Phys Med Biol 21:4211-4225 (2007)
9. Fiandra C, Ricardi U, Ragona R, et al: Clinical use of EBT model Gafchromic film in radiotherapy. Med Phys 33:4314-4319 (2006)
10. Wilcox EE, Daskalov GM, Pavlonnis G 3rd, Shumway R, Kaplan B, VanRooy E: Dosimetric verification of intensity modulated radiation therapy of 172 patients treated for various disease sites: comparison of EBT film dosimetry, ion chamber

- measurements, and independent MU calculations. Med Dosim 33:303-309 (2008)
11. Khan FM: The Physics of Radiation Therapy. 2nd ed, Williams & Wilkins, Maryland, USA (1984), pp. 323-332.
12. Dong-Hyun Cho, Kyoung-Won Jang, Wook-Jae Yoo, et al: Measurement of Skin Dose and Percentage Depth Does in Build-up Region Using a Fiber-optic Dosimeter. KJOP 21(1): 16-20 (2010)
13. 장은성, 이철수: GafChromic EBT 필름을 이용한 뇌정위방사선 치료의 선량분석 가능성 평가. 대한방사선치료학회 19(1):27-33 (2007)

## DICOM 파일을 사용한 Geant4 시뮬레이션과 Gafchromic EBT2 필름에 의한 인체 내 흡수선량 비교 연구

\*원광대학교병원 영상의학과, †서남대학교 방사선학과, ‡전북대학교 방사선과학기술학과

모은희\* · 이상호† · 안성환‡ · 김종일‡

몬테카를로 방식은 지금까지 인체 내 흡수선량을 계산하는 가장 정확한 방법으로 알려져 왔고, 이러한 계산 방법을 이용하기 위한 인체 내부의 장기 묘사는 인체 모형 팬텀이 주로 사용되어 왔다. 그러나 최근 Geant4 코드를 사용한 몬테카를로 계산에서는 CT의 DICOM 파일에서 인체의 여러 장기에 대한 자료를 직접 추출하고 시뮬레이션에 필요한 geometry로 변환하여 사용하려는 다양한 노력이 시도되고 있다. 이와 같은 기능은 실제 인체의 해부학적 구조를 그대로 재현하면서 인체 내부의 흡수선량을 정확히 계산 할 수 있도록 한다. 따라서 본 연구에서는 DICOM 파일을 연동한 Geant4을 이용하여 인체 내 흡수선량을 계산하였고, 이를 Gafchromic EBT2 필름을 이용한 측정 선량과 비교함으로써 그 유용성을 확인하고자 하였다. 본 연구에서 시뮬레이션을 이용하여 계산한 선량과 EBT2 필름을 이용한 선속 중심축에서의 측정선량을 비교한 결과 피부표면에서부터 최대선량 깊이까지 선량이 급격하게 변화하는 build up 영역을 제외하고는 오차(difference) 범위가 평균 3.75% 임을 알 수 있었다. 또한 선량의 계산 값을 각 CT slice 별로 출력되도록 하였고, 또 각 slice에서도 복셀 하나하나의 선량 값이 출력되도록 하여 측정하고자 하는 장기별, 기관별 흡수선량을 쉽게 확인 할 수 있도록 하였다. 이처럼 인체 모형 팬텀이 아닌 실제 인체의 image data인 CT DICOM 파일을 이용한 선량계산을 각 slice, voxel 별로 선량 값을 출력하는 방식은 다양한 부위의 정확한 선량계산을 가능하게 하므로 향후 방사선 치료계획 시스템의 선량 계산에 유용할 것이라 생각한다. 또한 현재 사용 중인 여러 에너지 영역에도 적용이 가능하므로 인체 내 방사선의 흡수선량 확인을 위해 유용하게 활용되어질 수 있을 것으로 생각된다.

---

**중심단어:** 몬테카를로 방법, Geant4, Gafchromic EBT2 필름, DICOM