

# Verification of Dose Evaluation of Human Phantom using Geant4 Code

Eun-Sung Jang,<sup>1</sup> Ji-Hoon Choi<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Radiation Oncology Kosin University Gospel Hospital

<sup>2</sup>Department of Radiation Oncology Kosin University Gospel Hospital

Received: July 22, 2020. Revised: October 20, 2020. Accepted: October 31, 2020

## ABSTRACT

Geant4 is compatible with the Windows operating system in C++ language use, enabling interface functions that link DICOM or software. It was simulated to address the basic structure of the simulation using Geant4/Gate code and to specifically verify the density composition and lung cancer process in the human phantom. It was visualized using the Gate Graphic System, i.e. OpenGL, Ray Tracer: Ray Tracing by Geant4 Tracing, and using Geant4/Gate code, lung cancer is modeled in the human phantom area in 3D, 4D to verify the simulation progress. Therefore, as a large number of new functions are added to the Gate Code, it is easy to implement accurate human structure and moving organs.

Keywords: Geant4/Gate, Human Phantom, DICOM, Volume rendering technique.

## 1. INTRODUCTION

컴퓨터 하드웨어와 소프트웨어 기술의 발전과 함께 방사선 응용분야의 몬테카를로 방법이 다양한 EGS4, GEANT4, MCNP 등을 통해 방사선과 물질과의 상호작용과정 및 선량측정, 분포 등을 통계적인 방법으로 계산하는데 사용되고 있다.<sup>[1]</sup> 몬테카를로 시뮬레이션은 원래 방사선 종양학분야에서 물리적 과정 및 기하학적 구조들을 계산 및 분석하여 선량측정, 분포 예측을 명확하게 알려주는 방법 중의 하나로 알려져 왔다. Geant4는 C++ 언어로 개발된 코드로 입자와 물질간의 상호작용에 몬테카를로가 가능하며 2004년 처음 방사선 종양학분야의 소프트웨어 개발을 위하여 적용되어 왔다.<sup>[2-5]</sup> 또한, Geant4는 인터넷 다운로드 즉, 프로그램 및 open 소스가 가능해 10.2부터 소프트웨어 속도 (CPU, RAM)가 매우 빨라서 windows 운영체제와 호환이 가능하며, DICOM이나 소프트웨어를 연계하는 인터페이스 기능이 가능해졌다.<sup>[6-7]</sup> 또한 방사선 종양분야에서 Geant4의 사용이 증가하는 추세이

다. 기하학적 고형물에 의해 인체 장기를 나타내는 팬텀은 치료나 진단에서 선량 계획과 같은 의학 용도에 널리 사용된다.<sup>[4,6,9-10]</sup> 따라서, 개인 또는 특정 장기에 의해 수신되는 전리방사선의 선량의 평가는 인체를 대표하는 수학적모델을 통한 입자 이동의 수치 시뮬레이션으로 얻을 수 있다. Geant4 code에 의해 기술된 물리학은 그러한 에너지에 대해 광범위하게 검증되었지만, 방사선 방호 목적을 위해서는 에너지가 몇 keV의 일때 설명의 유효성을 보여주는 것일 여전히 필요하다.<sup>[14-15]</sup>

또한, 인체 팬텀에 대한 장기 선량의 몬테카를로 계산은 Zankl 등이 발표했으며, 실험 결과의 검증에 사용되었다.<sup>[8]</sup> 본 연구에서는 Geant4 시뮬레이션을 통해 저 keV부터 고 keV까지 다양하게 에너지를 선택하여 인간 팬텀중 일부분을 선택하여 광자병렬 평면 필드에서 조사했을 때 그 장기에 대한 방사선량을 구하고 Zankl의 승인된 방법에 의해 얻은 결과에 대해 결과를 비교 검증하고자 한다.

\* Corresponding Author: Choi Ji Hoon

E-mail: 1stdr@naver.com

Tel: 051-990-6394

## II. MATERIAL AND METHODS

### 1. Geant4 의 물리적 단계

#### 1.1 Geant4 Kernel

Geant4는 17개의 카탈로그로 구성되어 있다.<sup>[8]</sup> Fig. 1은 카탈로그를 구조적 면에서 기본적인 구조를 제공하는 kernel 영역 및 물리프로세스 관리 영역과 기타 인터페이스 영역으로 나눌 수 있다.<sup>[5,6]</sup> 기능적 면에서 Geant4 kernel은 run, event, track, step, hit, trajectory를 처리하고 있다.

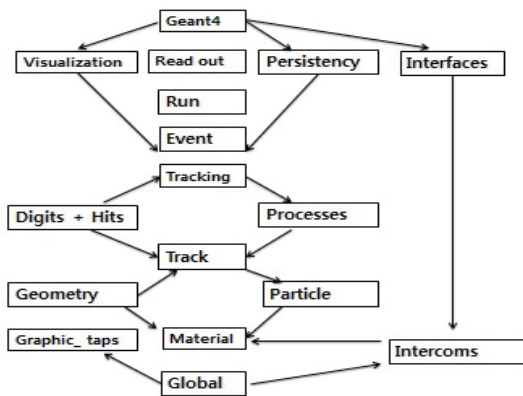


Fig. 1. Basic Structure of the Geant4 Simulation.

각각의 기능 중에서 run은 초기화와 결과에 대한 설정. 하나의 event는 입자의 생성과 물질과의 상호작용 후 최종적으로 검출되기까지의 과정. Track은 한 입자의 진행 순간의 정보를 제공한다. step은 하나의 event를 쪼갠 단계의 에너지 손실과 시간에 대한 정보, volume 정보와 같은 경계과정의 정보. Trajectory는 track들의 위치 정보를 시각화를 통해 모든 궤적을 표현. Hit는 검출기의 민감 영역에 track이 통과할 때 남기는 입자들의 정보를 분석하여 결과를 얻는 것이다.

따라서 Geant4 kernel은 복합적 구조의 시뮬레이션이 가능하다.

#### 1.2 Monte Carlo Methods for Radiation Transport

몬테카를로 방법은 무작위 과정의 문제를 해결하는데 사용될 수 있다. 예를 들어, 분석 선량 계산

알고리즘과 대조적으로, 몬테카를로 기반 선량 계산 알고리즘은 매체의 에너지 침적을 초래하는 입자의 물리적 상호작용을 직접 시뮬레이션 하여 잠재적으로 매우 정확한 선량 계산 방법을 제공한다.<sup>[7]</sup> 방사선 운송의 몬테카를로 시뮬레이션에 대한 기본 과정은 Fig. 2에 설명하였다.

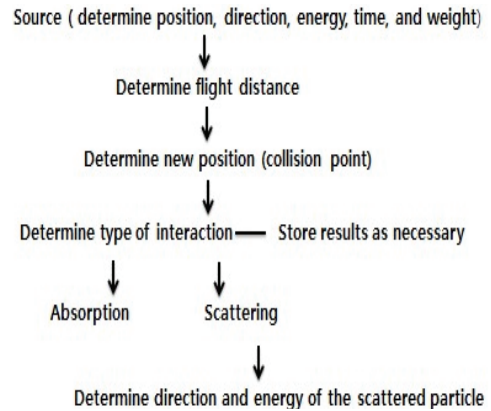


Fig. 2. Outline of Monte Carlo simulation of photon transport.

또한 몬테카를로 선량 계산 알고리즘이 광자와 전자 빔의 치료계획 및 치료기의 치료 빔 입자의 생성을 시뮬레이션하기 위해 개발되었다.<sup>[7-9]</sup>

#### 1.3 Geant4 Phantom Package

Geant4에서 DICOM 인터페이스를 사용하여 DICOM 파일부터 인체 팬텀 모델링 가능하다. 또한 Geant4에서 그래픽 드라이브로 OpenGL, DAWN, VRML있다. Geant4 시뮬레이션을 위해 Medical 예제를 응용하여 Table 1에 인간모형 팬텀 중 여성 모델을 시뮬레이션 하였다.

#### 1.4 Geant4 Human Phantom directory

인간 팬텀 구축 프로세스는 Builder 설계 패턴을 통해 처리됨. G4Base PhantomBuilder 기본 클래스는 팬텀 조립을 위한 인터페이스를 정의하고 모든 공용 가상 멤버 기능의 인간모형 구현을 제공한다.<sup>[10-12]</sup>

Table 1. G4 Human Phantom Material Process

```

# Initialize New Phantom : AdultMixFemale. mac

# Choose model: ORNLFemale, ORNLMale, MIRD,
MIX,MIRDHead, ORNLHead

/phantom/setPhantomModel MIX/phantom/setPhantomSex Female

# Insert Body Part and their Sensitivity

# The energy deposit is calculated in the organs declared sensitive

/bodypart/addBodyPart Head yes

/bodypart/addBodyPart Trunk yes

/bodypart/addBodyPart LeftLeg yes

/bodypart/addBodyPart Rightleg yes

# Skeleton System

/bodypart/addBodyPart LeftLegBone yes

/bodypart/addBodyPart RightLegBone yes

/bodypart/addBodyPart LeftArmBone yes

/bodypart/addBodyPart RightArmBone yes

.....

# Organs

/bodypart/addBodyPart LeftBreast yes

/bodypart/addBodyPart RightBreast yes

/bodypart/addBodyPart LeftLung yes

/bodypart/addBodyPart RightLung yes

/bodypart/addBodyPart Brain yes

/bodypart/addBodyPart Heart no

.....

# Genitalia

/bodypart/addBodyPart LeftOvary yes

/bodypart/addBodyPart RightOvary yes

/bodypart/addBodyPart Uterus yes

# Construct your Phantom

/phantom/buildNewPhantom

/run/initialize

#
    
```

Table 2. Types of material corresponding of density range

Density Range(g/cm) <sup>2</sup>	Material
0 ~0.207	Air
0.207 ~ 0.481	/Lung( inhale)
0.481~ 0.919	Lung( exhale)
0.919 ~ 0.979	Adipose tissue
0.979 ~ 1.004	Breast
1.004 ~1.043	Water
1.109~1.113	Liver
1.496~1.654	ense Bone

## 2. Geant4 DICOM Interface

몬테카를로 시뮬레이션에 CT 이미지자료 이용은 오래전부터 있어왔다.<sup>[13,14]</sup> DICOM은 CT나 MRI, PET-CT와 같은 영상장치로부터 데이터 획득, 처리 및 저장하기 위한 환자의 image 및 정보를 Fig. 3에 포함하고 있다.

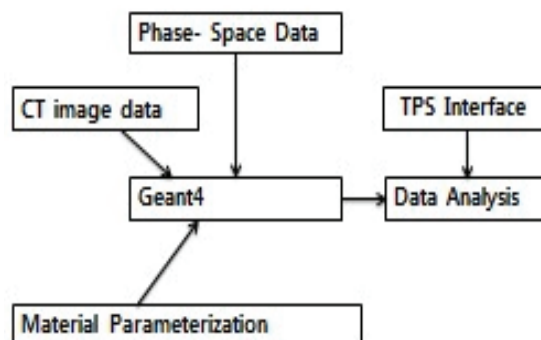


Fig. 3. In the organization of the developed GEANT4 dose calculation system.

시뮬레이션을 위한 인체팬텀영상의 geometry는 Geant4에서 geometry model로 변환해야 하는데, Geant4의 data와 DICOM 파일의 geometry data가 맞지않기 때문에 선형 보간법을 이용한다.<sup>[14,-16]</sup> 이는 DICOM 픽셀의 8개의 neighbor grid point의 Hounsfield 값들을 Geant4 geometry data의 Hounsfield 값으로 보간하는 방법이다. Geant4에서 제공하는 Dicomhandler라는conversion파일은 Table2에 DICOM 파일의 픽셀 값을 밀도로 변환시킨 후 다시 material type으로 변환하는 역할을 한다.<sup>[14]</sup>

또한 Gate에서는 DicomHandler라는 파일을 사용하여 dicom 파일에서 매트릭스의 크기, 픽셀크기, 픽셀의 HU값 등을 읽어 실행하여 나타내었다.

### 3. Anthropomorphic Phantom of Run

ICRP가 채택한 선량 계산에 대한 방사선 방호 표준 값으로 모든 장기를 설명하기 위해 인체를 시뮬레이션하는 MIRD-5형의 인체 모형 팬텀을 사용하여 계산하였다.

빔은 인체팬텀의 각 실행마다  $10 \times 10^6$  광자가

2.8 GHz의 팬티엄 프로세스에 생성되었으며, RAM 4G, SSD 128G 메모리 LINUX OS를 실행하였다. 병렬 평면 필드 방향에서 Geant4 code로 Zankl에서 제시한 에너지로 조사하였다. 또한 획득한 선량계산치와 기준값의 비율을 Table 3에 비교하였다.

Table 3. Ratio of equivalent organ doses calculated by Geant4 and by Zankl et al.

Organs	50 keV	100 keV	200 keV	300 keV	500 keV	1000 keV
Skeleton	0.97	0.97	1.00	1.00	0.99	0.98
Lungs	0.67	0.85	0.97	0.98	0.99	1.03
Stomach	0.86	0.92	0.96	0.99	0.97	1.01
Kidney	0.98	0.97	0.94	0.97	0.98	0.99
Bladder	0.95	0.94	0.99	0.97	0.98	0.91
Brain	1.06	0.97	0.99	0.98	0.98	1.00
Spleen	0.97	0.93	0.96	0.99	1.00	1.04
Pancreas	0.98	0.95	1.02	1.03	1.07	1.04

### III. RESULTS

Table 1에서 Geant4 설치 구조 중 OpenGL로 3D 시각화뿐만 아니라 발생입자들의 생성한 것들을 AdultMix Female.cc로 실행하여 여성 팬텀 및 두부 모사 실행한 결과를 Fig4에 나타내었다.

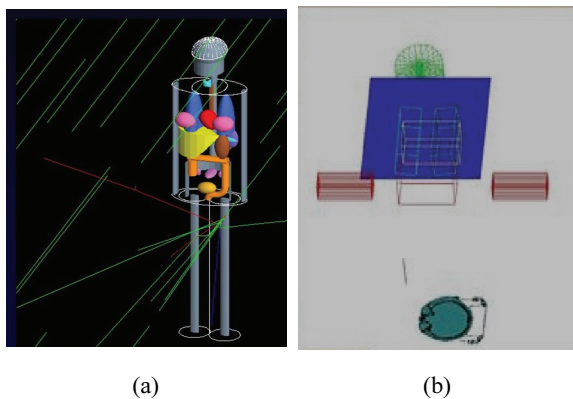


Fig. 4. (a) Geant 4 Anthropomorphic Female Phantoms run, (b) Geant 4 Anthropomorphic Head Phantoms run.

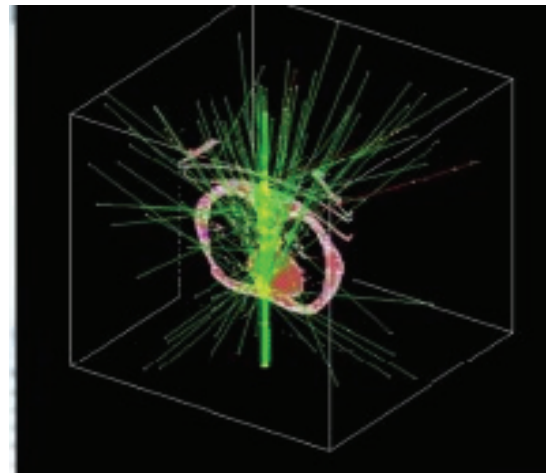


Fig. 5. Geant4\_9\_6 examples extended medical DICOM.

따라서, Table 3, 5에 제시된 구성 물질과의 상호 작용을 계산하기 때문에 ICRU Report 46 인용 결과 즉, 밀도별로 10개로 나누면 실제 선량계산 및 조사가 가능하며, Geant4 인체팬텀과 DICOM 인터페이스를 통합하는 것이 가능함을 확인하였다.

또한, Table 2에 사용된 기준 에너지의 경우 Geant4에 의해 계산되고 기준값에 인용된 동등한 장기 선량의 비율을 보여준다. 장기 등가선량의 계산은 기준치에서 제시한 값과 4% 이내에서 일치함을 Fig 6에서 확인하였다.

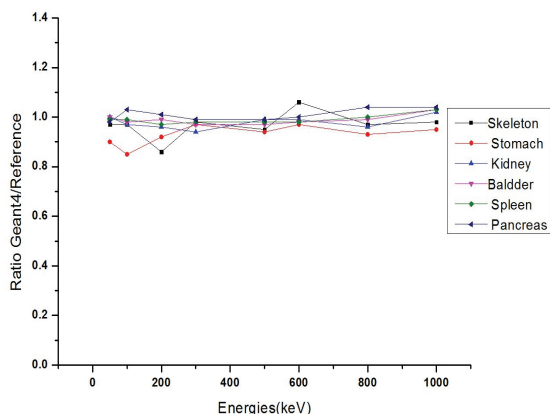


Fig. 6 Ratio of Geant4 organ equivalent doses to reference as a function of energy, for six organs.

#### IV. DISCUSSION & CONCLUSION

Geant4 시각화 설정(openGL, DAWN, VRML)은 CAD와 연동되어 있어 입자의 생성과 동시에 실시간으로 시각해주기 때문에 시뮬레이션 과정을 쉽게 이해 할 수 있다. Geant4.10.2 version부터는 CPU 및 사양의 고성능으로 인해 계산처리 속도가 아주 빨라졌다.

따라서 DICOM 인터페이스를 사용하여 DICOM 파일로부터 인체 팬텀 모델링<sup>[17]</sup>가능함을 확인하였다. Geant4로 대부분 시뮬레이션을 많이 하는데 반해, Gate의 연동으로 인해 술자가 인체 부위를 쉽게 묘사할 수 있다. 따라서, Geant4/Gate를 연동해서 사용하면 움직이는 장기까지도 묘사 할 수 있는 장점이 있다.

하지만 실제 인체내 물질에 대한 변환 문제는 많은 어려움을 가지고 있다. 반면에 인체 내 구성 성분이 다르더라도 같은 밀도 및 픽셀 값들을 갖기 때문인데, 이러한 장점은 앞으로 CERN에서 연구원들이 계속 연구를 해야 할 부분이라 사료된다.<sup>[18]</sup>

또한, 몬테카를로 코드를 사용하여 장기 선량을 평가하는 것의 중요성은 시뮬레이션 다양한 묘사 및 특성에 의해 중성자, 양성자, 파운 등과 같은 빔의 여러 가지 유형의 입자와 Geant4와 같은 높은 에너지에도 적합하다는 것을 확인하였다.

#### Reference

- [1] L. Maigne, Y. Perrot, D. R. Schaart, D. Donnarieix, V. Breton, "Comparison of GATE/GEANT4 with EGSnrc and MCNP for electron dose calculations at energies between 15 keV and 20 MeV," *Physics in Medicine and Biology*, Vol. 56, No. 3, pp. 811-838, 2011. <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/56/3/017>
- [2] S. Agostinelli, J. Allison, et. al., "Geant4-a simulation toolkit," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 506, No. 3, pp. 250-303, 2003. [http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8)
- [3] E. Poon, F. Verhaegen, "Accuracy of the photon and electron physics in GEANT4 for radiotherapy applications," *Medical Physics*, Vol. 32, No. 6, pp. 1696-1711, 2005. <http://dx.doi.org/10.1118/1.1895796>
- [4] Kramer, R., Zankl, M., Williams, G. and Drexler, G. The Calculation of dose from External Photon Exposures Using Reference human Phantoms and Monte Carlo Methods-Part I: The male (Adam) and Female (Eva) Adult Mathematical Phantoms. Institute für Strahlenschutz, GSF-Bericht S-885 1982.
- [5] L. G. Bouchet, W. E. Bolch, D. A. Weber, H. L. Atkins, J. W. Poston, "MIRD Pamphlet No 15: Radionuclide S Values in a Revised Dosimetric Model of the Adult Head and Brain", *Journal of Nuclear Medicine*, Vol. 40, No. 3, pp. 62S-101S 1999
- [6] D. Sarrut, M. Bardiès, et. al., "A review of the use and potential of the GATE Monte Carlo simulation code for radiation therapy and dosimetry applications," *Medical Physics*, Vol. 41, No. 6, pp. 064301, 2014. <http://dx.doi.org/10.1118/1.4871617>
- [7] T. E. Booth, LAUR-98-47-55, Adaptively learning an importance function using transport constrained Monte Carlo. Technical Report, Los Alamos National Laboratory, 1998.

- [8] K. F. Eckerman, M. Zankl, W. E. Bolch, "Voxel-based models representing the male and female ICRP reference adult - the skeleton Radiat," *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 127, No. 1-4, pp. 174-186, 2007.  
<http://dx.doi.org/10.1093/rpd/ncm269>
- [9] Tiezhi Zhang, Nigel P. Orton, Wolfgang A. Tomé, "On the automated definition of mobile target volumes from 4D-CT images for stereotactic body radiotherapy," *Medical Physics*, Vol. 32, No. 11, pp. 3493-3502. 2005. <https://doi.org/10.1118/1.2106448>
- [10] Zankl, M., Petoussi-Hen b , N., Drexler, G., Saito, K., The Calculation of Dose from External Photon Exposures Using Reference Human Phantoms and Monte Carlo Methods - Part VII: Organ Doses due to Parallel and Environmental Exposure Geometries. Institute für Strahlenschutz, GSF-Bericht 8/97 March/1997
- [11] Sophie Chiavassa, Manuel Bardiès, Françoise Guiraud-Vitoux, Damien Bruel, Jean-Rene Jourdain, Didier Franck, Isabelle Aubineau-Lanièce, "OEDIPE: A Personalized Dosimetric Tool Associating Voxel-Based Models with MCNPX," *Cancer Biotherapy and Radiopharmaceuticals*, Vol. 20, No. 3, pp. 325-332, 2005.  
<http://dx.doi.org/10.1089/cbr.2005.20.325>
- [12] W. Schneider, T. Bortfeld, W. Schlegel, "Correlation between CT numbers and tissue parameters needed for Monte Carlo simulations of clinical dose distributions," *Physics in Medicine and Biology*, Vol. 45, No. 2, pp. 459-537, 2000.  
<http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/45/2/314>
- [13] Lukkana Apipunyasopon, Somyot Srisatit, Nakorn Phaisangittisakul, "An investigation of the depth dose in the buildup region, and surface dose for a 6 MV therapeutic photon beam: Monte Carlo simulation and measurements," *Journal of Radiation Research*, Vol. 54, No. 2, pp. 374-456, 2013.  
<http://dx.doi.org/10.1093/jrr/rrs097>
- [14] ICRU 1992 Phantoms and Computational Models in Therapy, Diagnosis and Protection (ICRU Report vol 48) (Bethesda, MD: ICRU)
- [15] ICRP 2002 Basic Anatomical and Physiological Data for use in Radiological Protection Reference Values (ICRP Publication vol 89) (Oxford: Pergamon)
- [16] W. S. Snyder, H. L. Fisher, M. R. Ford, G. G. Warner, "Estimates of Absorbed Fractions For Monoenergetic Photon Sources Uniformly Distributed in Various Organs of a Heterogeneous Phantom", *Journal of Nuclear Medicine*, Vol. 3, pp. 7-52, 1969.
- [17] M. K. Fix, P. J. Keall, K. Dawson, J. V. Siebers, "Monte Carlo source model for photon beam radiotherapy: photon source characteristics", *Medical Physics*, Vol. 31, No. 11, pp. 3106-3121, 2004.
- [18] <http://public.web.cern.ch/Public/Welcome.html>, accessed on June, 17, 2007.
- [19] L. Apipunyasopon, S. Srisatit, and N. Phaisangittisakul, "An investigation of the depth dose in the buildup region, and surface dose for a 6 MV therapeutic photon beam: Monte Carlo simulation and measurements", *Journal of Radiation Research*, Vol. 54, No. 2, pp. 374-382, 2013.



## Geant4 코드를 사용한 인체팬텀 선량평가 검증

장은성,<sup>1</sup> 최지훈<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>고신대학교복음병원 방사선종양학과

<sup>2</sup>고신대학교복음병원 방사선종양학과

### 요 약

Geant4는 C++ 언어사용에서 windows 운영체제와 호환이 가능해져, DICOM이나 소프트웨어를 연계하는 인터페이스 기능이 가능해졌다. 기하학적 고형물에 의해 인체 장기를 나타내는 팬텀은 치료나 진단에서 선량 계획과 같은 의학 용도에 널리 사용된다 방사선 방호 목적을 위해서는 에너지가 몇 keV의 일때 설명의 유효성을 보여주는 것일 여전히 필요하다. 본 연구에서는 Geant4 시뮬레이션을 통해 저 keV부터 고 keV까지 다양하게 에너지를 선택하여 인간 팬텀중 일부분을 선택하여 광자 병렬 평면 필드에서 조사했을 때 그 장기에 대한 방사선량을 구하고 Zankl의 승인된 방법에 의해 얻은 결과에 대해 결과를 비교 검증하고자 한다. 몬테카를로 코드를 사용하여 장기 선량을 평가하는 것의 중요성은 시뮬레이션의 다양한 묘사 및 특성에 의해 중성자, 양성자, 파운 등과 같은 빔의 여러 가지 유형의 입자와 GeV와 같은 높은 에너지에도 적합하다는 것을 확인하였다.

중심단어: Geant4/Gate, 인체팬텀, DICOM, 선형보간법

### 연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	장은성	고신대학교복음병원 방사선종양학과	주임/연구원
(교신저자)	최지훈	고신대학교복음병원 방사선종양학과	교수