

## &lt;원저&gt;

# GATE6를 이용한 Varian 21EX Clinac 선형가속기의 6 MV X-선 특성모사

## - Monte Carlo Simulation of a Varian 21EX Clinac 6 MV Photon Beam Characteristics Using GATE6 -

<sup>1)</sup>한국원자력연구원 핵비확산시스템연구부·<sup>2)</sup>방사선보건환경연구센터·<sup>3)</sup>동서대학교 방사선학과  
<sup>4)</sup>동서대학교 보건과학과·<sup>5)</sup>연세대학교 방사선학과

안수정<sup>1)</sup>·이창래<sup>5)</sup>·백철하<sup>2,3,4)</sup>

## — 국문초록 —

본 연구에서는 몬테칼로 전산모사 코드인 GATE6 (Geant4 Application for Tomographic Emission ver.6)를 사용하여 의료용 선형 가속기인 Varian사의 Clinac 21EX를 모사하고, 6 MV 광자선의 선량 특성을 평가하였다. 몬테칼로 방법은 방사선 치료시 환자 내의 선량분포를 계산하는 가장 정확한 방법으로 널리 이용되고 있다. 몬테칼로 기반의 코드를 이용하여 선형가속기의 조사 헤드부를 통과하는 입자의 흐름을 모사하는 것은 조사선량을 정량화 하는데 필요한 입자들의 에너지, 공간 분포와 같은 임상적인 빔의 특성을 결정하기 위한 실용적인 방법이다. 본 연구에서 모사한 선형가속기의 조사 헤드부는 빔 경로에 위치한 타겟, 일차 콜리메이터, 선속 평판 필터, 이온전리함, 이차 콜리메이터로 구성된다. 모사된 선형가속기를 이용하여 선원-표면간 거리 100 cm, 조사야 10×10 cm<sup>2</sup> 조건에서 물팬텀 내의 광자선 에너지 스펙트럼(energy spectrum), 심부선량백분율(percentage depth dose), 선량프로파일(dose profiles)을 측정하였으며, 이 결과값을 실험 측정값과 비교하여 정확성을 검증하였다. 본 연구에서는 모사를 통한 결과값과 실험값이 매우 일치함을 보였으며, 이를 통해 GATE6 전산모사 코드는 방사선치료에 사용되는 광자선을 모사하기에 효과적임을 입증하였다.

**중심 단어:** 방사선치료, GATE, 선형가속기, 심부선량백분율

## I. 서 론

의료용 선형가속기로부터 생성되는 4-25 MV 에너지의 X-선은 심부종양을 치료하는데 사용되는 일반적인 광자선이다<sup>(1-4)</sup>. 방사선 치료는 종양 조직에 최대 선량을 투여하고, 주위 정상조직은 보호함으로써 치료효율을 극대화시키는데 있으며, 방사선 치료성적을 향상시키기 위해서는 치료 계획, 분할조사계획과 더불어 다양한 선량 전달 기술에 따른 방사선 빔의 특성화가 근본적으로 요구된다. 이를 위해

서는 조사 헤드부로부터 생성되는 방사선의 전달과 환자에 입사되는 빔의 작용을 이해하는 것이 필수적이다<sup>(5)</sup>.

몬테칼로 시뮬레이션은 방사선 치료계획 수립과 선량계산에 있어 가장 정확한 방법을 제공한다. 최근의 방사선치료는 치료효율을 극대화하기 위해 세기변조치료(IMRT), 영상유도치료(IGRT) 등의 다양한 치료기술을 수행한다. 따라서 복잡한 선량 조사체계를 고려하면서 정확한 체내선량을 예측하기 위해서는 정확한 선량계산이 이루어져야 한다. 많은 연구기관에서 광자와 전자선을 이용한 방사선 치

This work was supported by Dongseo University, "Dongseo Cluster Project" Research Fund of 2016

Corresponding author: Cheol-Ha Baek, Dept. of Radiological Science, Dongseo University, Jurye-Ro 47, Sasang-gu, Buasn City, 47011, Korea / Tel: +82-51-320-2719 / E-mail: baekch@gdsu.dongseo.ac.kr

Received 20 September 2016; Revised 30 November 2016 ; Accepted 06 December 2016

료계획을 위해 몬테칼로 기법을 적용하는 연구를 수행하고 있다<sup>(6-9)</sup>.

시스템을 모사하기 위해서 GATE6 (Geant4 Application for Tomographic Emission version, 6.0)를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. GATE는 핵의학 영상기기 설계 및 성능예측을 목적으로 개발한 Geant4 기반의 시뮬레이션 코드이다. 최근에 배포된 GATE6는 방사선 치료 시뮬레이션 전용으로 제안된 새로운 도구로써<sup>(10)</sup> X-선 CT 및 방사선 치료 시스템을 모사 가능하도록 개발되었으며<sup>(11)</sup> EGS, MCNP, Geant4와 같은 범용성 시뮬레이션 도구로는 구현하기 복잡한 반복되는 구조의 타겟, 콜리메이터, 선속평탄 필터 등을 Geant4에 정의된 간단한 모형의 조합을 이용하여 정확하면서 비교적 쉽게 모사할 수 있다.

본 연구에서는 GATE6 시뮬레이터를 이용하여 Varian Clinac 21EX 선형가속기 조사헤드부를 모사하였으며, 6MV의 광자 스펙트럼을 측정하고 선형가속기로부터 발생한 광자선의 선량특성을 계산하였다. 그리고 실험값과의 비교를 통해 GATE 시뮬레이션으로부터 계산된 선량분포의 정확성을 입증하였다. 선형가속기의 타겟, 일차 콜리메이터, 이온함 그리고 이차 콜리메이터 각각의 위치와 구조, 구성물질과 같은 세부사항은 제조사의 사양을 참고하였다.

## II. 본 론

### 1. Reference data

측정은 선원에서 표면거리 100 cm에서 물팬텀(Blue phantom2, Scanditronix Wellhofer, Germany)을 사용하여 이루어졌다. 10 cm×10 cm의 조사야 크기 조사 조건에서 심부선량백분율(PDD)와 10 cm 깊이에서 선량 프로파일을 X, Y 방향으로 측정하였다. 측정에 사용된 검출기는 Scanditronix Wellhofer CC13 이온전리함이며 active volume은 0.13 cm<sup>3</sup>을 가진다. 분석용 소프트웨어는 OmniPro 6.0 (Scanditronix Wellhofer, Germany)을 사용하였다. 측정은 밀리미터(mm) 단위로 수행되었다.

### 2. Simulation

구체적인 도면을 기반으로 기하학적 구조를 모사하였으며, 시뮬레이션으로 모사한 선형 가속기의 구조는 Fig. 1과 같다. 선형가속기의 헤드부는 타겟, 일차 콜리메이터, 선속 평탄 필터, 이온함, 거울, 이차 콜리메이터(upper jaws and lower jaws), 그리고 물 팬텀으로 구성되었다.

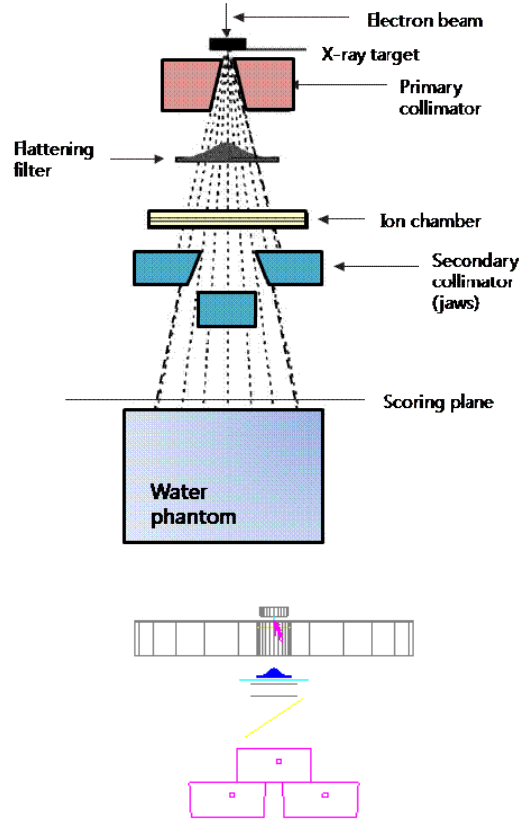


Fig. 1 Geometrical model of Varian Clinac 21EX simulated with GATE

타겟은 텅스텐으로 전자선이 통과하면서 제동복사에 의한 광자를 생성하는 역할을 하며, 이때 생성되는 열을 감소시키기 위해 텅스텐 아래에 구리가 부착되어있다. 1차 콜리메이터는 불필요한 광자를 차폐하기 위해 28° 각도의 원뿔로 개방되어 있으며, 선속 평탄 필터는 광자선속의 강도를 일정하게 하기 위해 사용된다. 본 연구에서 선량의 분포를 계산하기 위한 과정은 BEAM code에서 적용하는 방식과 유사하게<sup>(6)</sup> 두 가지 단계로 나뉘어서 수행되었다. 첫 번째 과정은 발생한 입자선이 이차 콜리메이터 위에 위치한 미리 정의된 저장단면에 전달되는 과정이다. 이 저장단면에 광자

선이 phase space file로 기록되며 이를 통해 광자의 에너지 스펙트럼을 측정할 수 있다. phase space file은 두 번째 계산단계에서의 입력정보(input)가 되며, 두 번째 계산단계에서는 phase space file로부터 방출되는 광자선이 50×50×30 cm<sup>3</sup>의 물 팬텀에 전달되는 과정이 수행된다. 물 팬텀은 복셀(voxel)단위로 나눌 수 있으며, 심부선량 백분율과 심부선량 프로파일은 5×5×5 mm<sup>3</sup> voxel에 기록되었다. 시뮬레이션에 적용한 조사야는 10×10 cm<sup>2</sup>이며, 5×10<sup>8</sup> 회 생성하여 계산하였다. 타겟에 입사하는 전자선은 평행한 원형 빔으로 모사하였다.

전자선의 에너지는 심부선량백분율과 선량프로파일이 실험값과 일치하도록 반복적인 계산을 통해 구할 수 있으며 평균값이 6.05 MeV이며 가우시안 분포를 갖도록 설정하였다. 이차 전자를 생성하기 위한 역치 범위(cut-off range)는 0.1 mm로 설정하였으며 Variance reduction 기법으로 photon splitting방법을 사용하였다. 리눅스 기반의 3.4 GHz Intel (Intel i7 processor)을 이용해 계산을 수행하였다.

### III. 결 과

#### 1. 광자에너지 스펙트럼(Photon Energy Spectrum)

Fig. 2는 100 cm SSD에서의 광자에너지 스펙트럼을 보여준다. 전자선을 1×10<sup>8</sup>회 발생시킨 결과이며, 시뮬레이션 결과, 광자선의 평균에너지는 약 1.99 MeV로 최대 에너지의 1/3의 값과 잘 일치하였다.

#### 2. 심부선량백분율(Percentage Depth Dose: PDD)

계산된 에너지 스펙트럼을 검증하기 위해서는 빔의 투과 특성을 살펴보면 된다. 중심축 선량분포를 특성화하는 방법으로 기준깊이(최대선량깊이)에 대해 임의의 깊이에서의 선량을 정규화 하여 나타낸 것을 심부선량백분율로 정의한다. Fig. 3은 10×10 cm<sup>2</sup> 조사야에서의 심부선량백분율 시뮬레이션 값과 실험값을 보여준다. 그래프는 중심축상의 최대선량을 1로 표준화하였다. 모든 깊이에서 계산된 선량의 상대 오차는 평균적으로 약 3%로 측정되었으며, 10 mm 깊이까지는 평균 오차보다 큰 반면, 그 이후 깊이에서는 1% 내외의 오차를 보였다.

#### 3. 선량프로파일 (Dose profiles)

Fig. 4는 10 cm 깊이에서 계산된 cross profile을 측정값

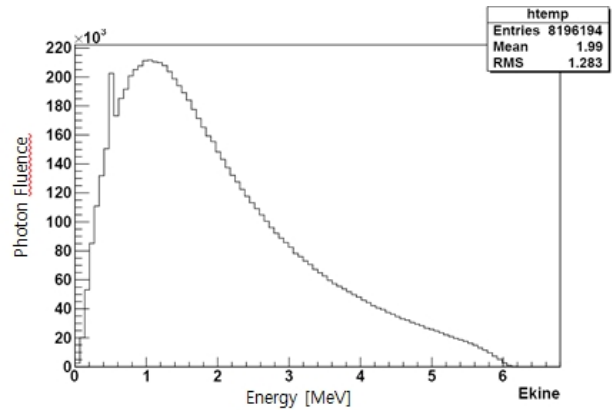


Fig. 2 Calculated photon energy spectra for Varian 21EX6MV beam

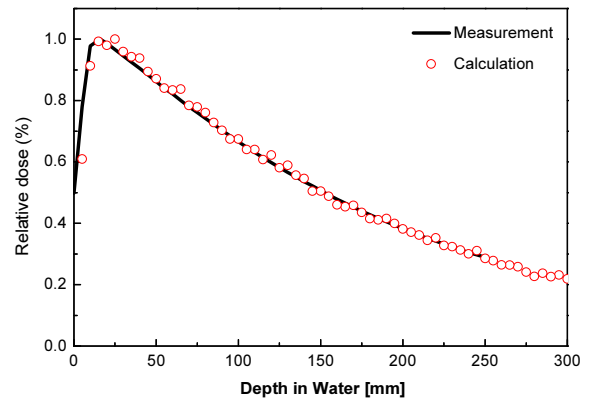


Fig. 3 Comparison of the calculated and measured depth dose curves

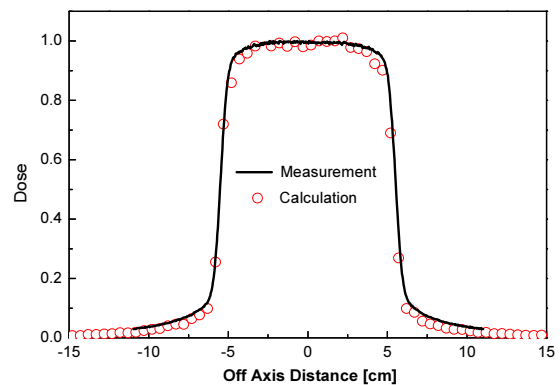


Fig. 4 Comparison of the calculated and measured cross profiles

과 비교하여 나타내었다. 그래프의 최대선량을 1로 표준화한 값이며, 중심의 10 cm 영역에서의 상대오차는 약 2% 미만으로 나타났다. 100-50% 선량레벨에서는 3% 이내로 일치함을 확인할 수 있었으며, 20-10% 선량레벨에서는 10% 이내에서 일치하였다.

#### IV. 결론 및 고찰

본 연구에서는 GATE6 코드를 사용하여 의료용 선형가속기인 Varian사의 Clinac 21EX를 모사하고, 6 MV 광자선의 선량 특성을 평가하였다. GATE 시뮬레이터의 방사선 치료 적용은 복잡한 구조를 매우 쉽고 정확하게 모사할 수 있는 장점을 지니고 있으나 방사선 치료분야에서의 활용이 미비하다.

본 연구는 GATE 시뮬레이션 코드를 선형가속기에 적용하여 GATE 시뮬레이션 코드의 치료계획 활용 가능성을 측정결과와의 비교를 통해 평가하였으며 그 결과 임상적으로 허용범위 안의 오차를 보임으로써 GATE 코드가 선형가속기로부터 발생하는 광자선을 모사하기에 적합한 시뮬레이터임을 확인하였다.

GATE의 간단한 macro file 구조는 GEANT4의 정교한 시뮬레이션을 컴퓨터 언어에 대한 깊은 지식이 없이도 가능하도록 하였다<sup>(13)</sup>. GATE의 version6에서 추가된 기능 중 에너지, 선량 및 확률적 불확실성을 기록할 수 있고 filter와 결합하여 variance reduction이 가능한 DoseActor tool을 선형가속기를 모사하는데 적용하였으며, DoseActor tool을 사용하여 신뢰성 있는 결과를 도출하였다. Phase space기능을 사용함으로써 electron beam부터 물 팬텀까지 한번에 시뮬레이션 하는 방법 보다 photon output rate이 9.7배 증가하였으며<sup>(13)</sup> 이를 잘 활용한다면 시뮬레이션 결과 획득 시간을 크게 줄일 수 있을 것이다. 본 연구의 오차를 줄이기 위해서는 정교한 photon splitting방법의 사용 및 측정 검출기의 크기에 따른 효과를 최소화 하고 검출기의 분해능을 향상시켜야 할 것이다.

본 연구의 결과는 GATE code의 적용분야를 확장시키고, 조직 내의 선량분포 연구 및 선량계산 시뮬레이션에 응용될 수 있을 것으로 판단된다. 다음 연구에서는 서로 다른 에너지의 경우와 함께 다엽 콜리메이터를 적용하여 정밀한 검증을 수행할 것이다.

#### REFERENCES

- Ahnesjo, A. and Aspradakis, M. M : Dose calculations for external photon beams in radiotherapy, *Physics in Medicine and Biology*, 44, R99-R115, 1999
- Verhaegen, F. and Seuntjens, J : Monte Carlo modeling of external radiotherapy photon beams, *Physics in Medicine and Biology*, 48, R107-R164, 2003
- Jenkins, T. M., Nelson, W. R., Rindi, A., Nahum, A. E. and Rogers, D. W. O : *Monte Carlo Transport of Electron and Photons* (New York: Plenum), 453-468, 1988 ISBN 0 306 43099 1.
- Seltzer, S. M : *Monte Carlo Transport of Electron and Photons* (New York: Plenum), 151-181, 1988 ISBN 0 306 43099 1.
- H. K. Kim, S. J. Han, J. L. Kim, et al : MONTE CARLO SIMULATION OF THE PHOTON BEAM CHARACTERISTICS FROM MEDICAL LINEAR ACCELERATORS, *Radiation Protection Dosimetry*, 119, 510-513, 2006
- Rogers, D. W. O., Faddegon, B. A., Ding, G. X., Ma, C. M., We, J. and Mackie, T. R : BEAM: A Monte Carlo Code to simulate radiotherapy treatment units, *Medical Physics*, 22(5), 503-524, 1995
- Sheikh-Bagheri, D. and Rogers, D. W. O : Monte Carlo calculation of nine megavoltage photon beam spectra using the BEAM Code, *Medical Physics*, 29(3), 391-402, 2002
- Han, K., Ballon, D., Chui, C. and Mohan, R : Monte Carlo simulation of a cobalt-60 beam, *Medical Physics*, 14(3), 414-419, 1987
- Lovelock, D. M. J., Chui, C. S. and Mohan, R : A Monte Carlo model of photon beams used in radiation therapy, *Medical Physics*, 22(9), 1387-1392, 1995
- L. Grevillot, T Frisson, D Maneval, N Zahra, J-N Badel and D Sarrut : Simulation of a 6MV Elekta Precise Linac Photon beam using GATE/GEANT4, *Physics in Medicine and Biology*, 56, 903-918, 2011
- Jan S, Benoit D, Carlier T, Cassol F, Descourt P, Frisson T, Grevillot L et al : GATE V6: a major enhancement of the GATE simulation platform enabling modeling of CT and radiotherapy, *Medical Physics*, 56(4), 881-901, 2011
- Mohan, R., Chui, C. and Lidofsky L : Energy and angular distribution of photons from medical linear accelerators, *Medical Physics*, 12(5), 592-597, 1985
- DeMarco, J. J., Solberg, T. D. and Smathers, J. B. A : CT-based Monte Carlo simulation tool for dosimetry planning and analysis, *Medical Physics*, 25(1), 1-11, 1988

•Abstract

## Monte Carlo Simulation of a Varian 21EX Clinac 6 MV Photon Beam Characteristics Using GATE6

Jung-Su An<sup>1)</sup>·Chang-Lae Lee<sup>5)</sup>·Cheol-Ha Baek<sup>2,3,4)</sup>

<sup>1)</sup>*Korea Atomic Energy Research Institute, Nonproliferation System Research Division*

<sup>2)</sup>*Center for Radiological Environment & Health Science*

<sup>3)</sup>*Department of Radiological Science, Dongseo University*

<sup>4)</sup>*Department of Health Science, Dongseo University*

<sup>5)</sup>*Department of Radiological Science, College of Health Science, Yonsei University*

Monte Carlo simulations are widely used as the most accurate technique for dose calculation in radiation therapy. In this paper, the GATE6(Geant4 Application for Tomographic Emission ver.6) code was employed to calculate the dosimetric performance of the photon beams from a linear accelerator(LINAC). The treatment head of a Varian 21EX Clinac was modeled including the major geometric structures within the beam path such as a target, a primary collimator, a flattening filter, a ion chamber, and jaws. The 6 MV photon spectra were characterized in a standard 10×10 cm<sup>2</sup> field at 100 cm source-to-surface distance(SSD) and subsequent dose estimations were made in a water phantom. The measurements of percentage depth dose and dose profiles were performed with 3D water phantom and the simulated data was compared to measured reference data. The simulated results agreed very well with the measured data. It has been found that the GATE6 code is an effective tool for dose optimization in radiotherapy applications.

---

**Key Words :** Radiation Therapy, GATE, Linear accelerator, PDD