

## Development of Monte Carlo Simulation Code for the Dose Calculation of the Stereotactic Radiosurgery

Jeongku Kang\*, Dong Joon Lee†

\*Department of Radiation Oncology, Presbyterian Medical Center, Jeonju,

†Department of Neurosurgery, School of Medicine, Inje University, Goyang, Korea

The Geant4 based Monte Carlo code for the application of stereotactic radiosurgery was developed. The probability density function and cumulative density function to determine the incident photon energy were calculated from pre-calculated energy spectrum for the linac by multiplying the weighting factors corresponding to the energy bins. The messenger class to transfer the various MLC fields generated by the planning system was used. The rotation matrix of rotateX and rotateY were used for simulating gantry and table rotation respectively. We construct accelerator world and phantom world in the main world coordinate to rotate accelerator and phantom world independently. We used dicomHandler class object to convert from the dicom binary file to the text file which contains the matrix number, pixel size, pixel's HU, bit size, padding value and high bits order. We reconstruct this class object to work fine. We also reconstruct the PrimaryGeneratorAction class to speed up the calculation time. because of the huge calculation time we discard search process of the ThitsMap and used direct access method from the first to the last element to produce the result files.

**Key Words:** Monte Carlo, Dicom, Stereotactic Radiosurgery, Geant4

### 서 론

정위적 방사선 수술(Stereotactic radiosurgery, SRS)은 작은 크기인 뇌병변의 위치를 정확히 선정한 다음 작은 조사면으로 뇌병변 표적에 많은 선량이 도달되도록 하여 1회 또는 5회 이내의 조사로 수술효과를 이루는 치료법이다.<sup>1-3)</sup> 또한 이러한 치료법을 뇌 이외의 부위에 적용할 경우에는 SBRT (Stereotactic body radiotherapy)라고 부른다. 이들 치료법은 일반적인 치료법에 비해 한 번에 조사하는 선량이 크기 때문에 위치와 선량에 높은 정확도가 요구되고 있다.

방사선수술이 성공적으로 이루어지기 위해서는 먼저 CT 영상에 정확한 병변의 위치와 치명적인 장기의 위치를 설정해 주어야 한다. 이 과정에서 MRI (Magnetic Resonance Imaging) 영상과 중첩된 퓨전(fusion) 영상을 사용함으로써 보다 효과적으로 치료 영역을 정의할 수 있다. 다음에는 각

회전에 따른 선량을 최적화하는 알고리즘과 이들의 선량을 3차원으로 구현하는 소프트웨어가 마련되어야 한다. 또한 방사선수술의 성패를 가장 좌우할 수 있는 환자의 고정 장치로는 뇌정위 프레임(stereotactic frame) 또는 플라스틱 마스크가 이용된다.<sup>4,5)</sup> 최근에는 컴퓨터 영상기술의 발달로 플라스틱 마스크를 사용하여도 전용 고정기구를 사용하는 것과 차이가 없을 정도로 정확도가 향상되고 있다. 마지막으로 시술 전 계산된 선량분포가 계산된 대로 조사되는지 정도관리의 과정이 필수적이다. 선량의 확인은 대부분 측정기에 의한 기준점선량 측정과 MatriXX (IBA, Germany)나 MapCheck (SunNuclear, USA) 같은 배열형 검출기를 이용하여 실행하고 있다.

본 연구에서는 최근 방사선 치료 분야에서 활용이 급격하게 증가하고 있는 몬테카를로 방식에 의한 선량 계산을 방사선수술에 적용하여 소조사면 선량 측정의 어려움을 극복하고 현재 다양한 방식으로 수행 하고 있는 품질관리의 표준을 마련하고자 하였다. 본 연구에서는 C/C++ 코드로 되어있는 Geant4를 기반으로 뇌정위 방사선수술을 구현하였다. Geant4의 배포판에는 방사선 치료분야의 응용 프로그램 예도 함께 포함되어 있으나 실제로 이용하기에는 여러 가지 제약이 많아 그동안 활용이 저조한 편이었다. 이에

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012-0004887, BAERI).

이 논문은 2012년 12월 5일 접수하여 2012년 12월 7일 채택되었음.  
책임저자 : 이동준, (411-706) 경기도 고양시 일산 서구 대화동 2240 인제대학교 일산백병원 신경외과

Tel: 031)910-7730, Fax: 031)915-0885

E-mail: djlee@paik.ac.kr

본 연구에서 개발한 응용 코드는 Geant4를 이용한 의학적인 연구의 표준으로 다양한 분야에 이용되리라 생각한다.<sup>6,9)</sup>

## 재료 및 방법

### 1. 방사선 치료기의 모델링

일반적으로 방사선수술에 사용되는 장비는 Novalis (Brainlab, Germany) 등의 전용 장비와 방사선치료에 사용되는 Linac에 micro MLC를 장착하여 사용하는 2가지 경우가 있다. 또한 수술용 콘을 장착하는 경우도 있다. 따라서 이들 장비에 대해 모두 모델링하기에는 경우의 수가 많아 실제 구현에 어려움이 있다. 따라서 일반 Linac을 표준으로 삼아 모델링한 후 각각의 장비에 맞추어 MLC를 이용한 조사면을 구현하도록 하였다.

Linac에서 방사선을 발생시켜 치료부위에 조사시키는 전통적인 방식의 계산은 많은 시간이 소요된다. 몬테카를로 계산에 일반적으로 사용하는 variance reduction 방식을 적용해도 마찬가지이다. 따라서 몬테카를로 방식을 사용하는 최근의 상용 프로그램은 사전에 Linac에서 발생하는 스펙트럼을 구한 다음 이 스펙트럼 자료에 대해 수학적으로 피팅을 해 구한 다항식을 스펙트럼의 선원으로 사용하고 있다. 이렇게 함으로써 계산시간을 획기적으로 줄일 수 있다. 상용 프로그램에서는 이러한 방식을 virtual MC 방식이라 부르기도 한다. 본 연구에서도 이 방식을 따라 사전에 Linac에 대해 시뮬레이션을 행한 후 구한 스펙트럼을 사용 하였다. 다만 스펙트럼을 다항식으로 변환하는 대신 스펙트럼 자료에서 각 에너지별로 확률밀도를 구한 다음 이에 대한 누적 확률밀도로 바꾸어 시뮬레이션에 사용 하였다. 이번

에 개발한 코드의 Linac 부분에서는 이 확률에 따르는 photon generator가 만들어 진다.

MLC의 모델링은 각 장비별로 다양하기 때문에 가장 일반적인 방식으로 구현한 다음 추후에 다시 개선하기로 하였다. 방사선은 MLC의 형태대로 평행하게 조사하는 방식을 취하였다. 실제의 치료기에서는 방사상으로 조사가 되지만 환자의 표면으로 평행하게 조사되도록 하였다. 이 부분은 향후 좀 더 개선해야 할 점이라고 생각한다. 평행한 방사선을 피부표면에 조사하게 함으로써 실제보다 primary 빔의 영향이 크게 나타난다. Linac을 시뮬레이션 할 때 콜리메타 밑에서 스펙트럼을 구하지만 이 자료를 가지고 물 팬텀에 조사하면 깊이선량율(Percentage depth dose, PDD)에서 상당한 차이가 나게 된다. 이러한 이유 때문에 평행조사를 할 때는 산란선 효과를 반영하기 위하여 각 스펙트럼별 가중치를 구하여 기존 스펙트럼을 수정해야 한다. 가중치를 적용한 스펙트럼을 사용해서 물 팬텀에 조사 했을 때 10×10 cm 조사면에서 측정된 PDD와 일치 하도록 하였다. 실제 계산으로 구한 스펙트럼과 가중치를 곱하여 구한 스펙트럼을 Fig. 1에 보였으며 Fig. 2에는 가중치를 적용한 스펙트럼을 이용해 계산한 PDD와 측정으로 구한 PDD를 보였었다. Fig. 1의 그래프에서 계열1의 그래프는 Linac의 시뮬레이션을 통해 구한 스펙트럼이며 아래의 그래프들은 가중치를 적용하여 PDD와 일치시키는 과정의 스펙트럼을 보였었다. 계열4의 그래프가 본 연구에서 사용한 스펙트럼이며 실제로 고에너지 영역의 비율이 많이 감소되어 상대적으로 낮은 에너지가 보강되어 산란선의 효과를 얻을 수 있었다. 이들 계산에 사용된 입자수는 각각 2×10<sup>8</sup>개씩 입력 하였다.

갠트리 회전에 의한 치료 아크(arc)의 구현은 Geant4의

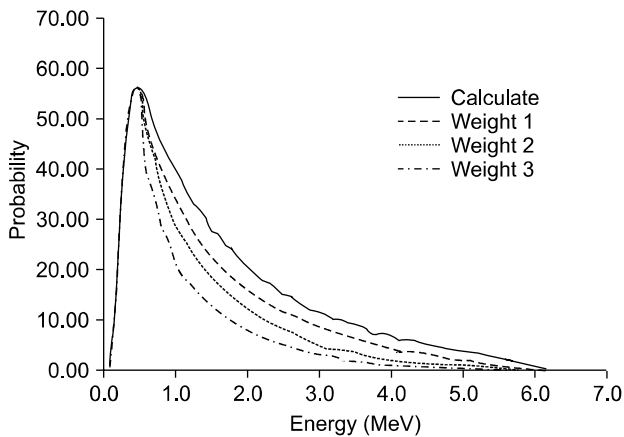


Fig. 1. Calculated energy spectra (series 2, 3, and 4) by multiplying initial spectrum pre-calculated for a linac (series 1).

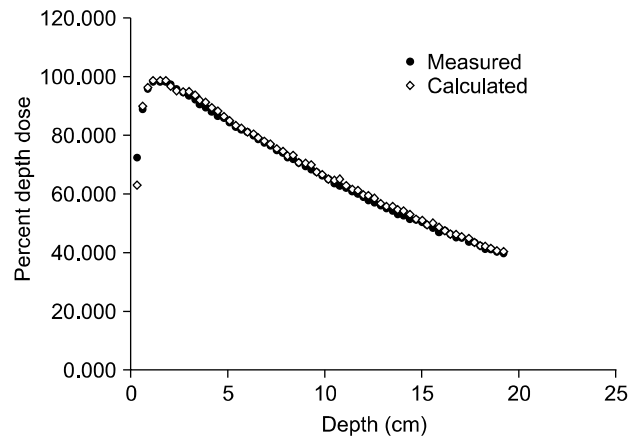


Fig. 2. Percentage depth dose measured and calculated with weighting factors.

배포판에 포함된 예제의 medical linac에서 사용된 메신저 방식의 회전을 사용 하였다. 다만 방사선 치료에서 사용하는 좌표와 Geant4에서 사용하는 좌표는 y와 z가 바뀌어 있음을 염두에 두어야 한다. 이를 해결하기 위해 Linac를 y축으로 회전시킨 다음 필요한 아크만큼 회전조사 하였다. Linac의 회전은 x축, y축 로테이션 매트릭스를 이용 하였으며 월드좌표 안에 가속기월드를 구성하여 이 가속기 월드를 회전 하도록 하였다. 가속기월드내의 각 부분의 좌표는 인버스 매트릭스를 이용하여 구할 수 있다. 각 아크별로 조사되는 방사선의 히스토리수는 MU와 상관관계가 없기 때문에 MU의 비율에 비례한 광자수를 메신저를 통해 조사 하도록 하였다.

## 2. CT 데이터를 이용한 환자의 모델링

몬테카를로 시뮬레이션에 CT 자료를 이용하려는 시도는 오래전부터 있어왔다. 다양한 코드에서 CT를 사용하고 있지만 Geant4에서는 이의 사용이 활성화 되지 못하고 있다. Geant4에서는 DicomHandler라는 파일을 사용 dicom 파일에서 매트릭스의 크기, 슬라이스 정보, 픽셀 크기, 픽셀의 HU 값 등을 읽어 들인다. 또한 읽어 들인 정보 중 CT의 각 픽셀 값은 밀도로 변환한 다음 이 밀도에 해당하는 물질로 할당하여 시뮬레이션에 사용할 텍스트 파일을 만든다. 픽셀의 HU값에서 밀도로 변환하기 위해서는 변환표가 필요한데 이 교정곡선을 구하기 위해 Catphan 503 (The Phantom Laboratory) 팬텀을 사용하였다. Genat4 배포판의 예제에서 제공된 파일은 이 변환이 제대로 실행되지 못했다. 이에 본 연구에서는 Geant4에서 CT의 활용에 장애가 되던 몇가지 문제점을 해결 하였다. 우선 국내의 각 병원에는 GE, Philips, Simense의 3가지 CT가 설치되어 있다. 이들 각 CT에서 만들어진 dicom 자료를 이용하기 위해서는 dicomHandler에서 데이터 버퍼의 크기를 키워야 한다. 그리고 가장 큰 문제는 아스키코드를 읽어 hexa 코드로 바꾸어 내는 루틴이 제대로 작동하지 못해 픽셀 데이터를 읽어내지 못한 문제를 모두 해결 하였다. 또한 CT에서는 데이터의 16비트 중 12비트를 사용하는 경우와 16비트를 모두 사용하는 경우가 있으며 CT의 FOV를 설정에 따라 패딩값을 추가하여 규격화하는 경우가 있어 이들에 대한 처리를 완벽하게 하지 않으면 제대로 변환이 이루어지지 않거나 잘못된 밀도로 변환된다. 시간의 절약을 위해 가로, 세로 2개씩 또는 4개씩의 픽셀을 합하여 하나의 복셀 값으로 변환 하였다.

이렇게 변환한 파일을 환자를 모델링하는데 이용하였다. 변환 파일의 복셀 크기와 숫자에 해당하는 복셀을 만들고

이 복셀에 CT의 밀도와 물질을 할당한 다음 방사선을 조사하여 상호작용에 따른 흡수선량을 계산한다. 복셀에 할당하는 물질은 밀도별로 10개로 나누어진 ICRU report 46을 인용한 예제 파일을 그대로 따랐다. 실제 인체내 물질에 대한 변환 문제는 많은 어려움을 가지고 있다. 여러 가지 다른 구성 성분일지라도 같은 픽셀값 혹은 밀도값을 갖게 되기 때문이다. 이점은 향후 좀 더 연구를 해야 할 부분이라 생각한다.

환자의 모델링은 월드좌표 내에 팬텀월드를 구성하여 그 안에 구성 하였다. 테이블의 회전은 기존에 있던 갠트리의 회전방식을 그대로 이용하였다. 테이블의 회전은 갠트리와는 달리 y축 하나만을 기준으로 회전하기 때문에 y축 로테이션 매트릭스 하나만을 사용하였다.

## 결 과

방사선 측정에 사용하는 1D 스캐닝용 팬텀을 CT 스캔하여 스펙트럼의 가중치를 구하는 계산에 사용 하였다. 계산한 결과와 측정된 PDD를 비교하여 스펙트럼의 가중치를 구하고 이를 적용하여 실제 계산에 사용할 스펙트럼의 누적 확률밀도를 구하였다. 이 확률밀도를 PrimaryGeneratorAction 클래스의 생성자에서 배열에 입력하여 사용하였다. 이들 스펙트럼은 각자가 사용하는 장비별로 특화되기 때문에 향후에는 상용프로그램처럼 다항식으로 변환하여 사용하는 방식으로 개선이 필요하다고 생각한다.

계산이 끝난 후 자료처리에 여러 가지 시도를 하였다. 실제로 계산의 결과는 엄청난 수의 3차원 배열에 각 지점의 선량이 저장되어있다. 이들 자료를 좌표별로 또는 복셀별로 테이블을 만들어내는 과정에서 검색시간이 많이 소요됨을 발견하였다. 가장 최선의 방법으로 THitsMap에 저장된 엄청난 자료를 CT의 슬라이스에 해당하는 구간별로 나누어 직접 저장하도록 하였다. 이렇게 함으로써 EndOfRunAction에서 실행되는 시간이 현저히 줄어들게 되었다.

방사선 수술을 구현하기 위해서 선형가속기와 환자치료대의 회전을 구현해야 한다. 이를 위해 월드좌표 안에 다시 가속기월드와 팬텀월드를 배치한 후 이들을 회전하도록 하였다. 이렇게 함으로서 각각의 회전을 서로 독립적으로 손쉽게 구현할 수 있었다.

Geant4에서는 실제 시뮬레이션을 실행 하면서 화면에 표시할 수 있는 기능이 있어 응용프로그램의 개발시 상당히 편리하다. 본 연구에서도 코드개발 후 의도한대로 정확하게 동작하는지를 화면에 표시함으로써 검증 하였다. Fig. 3

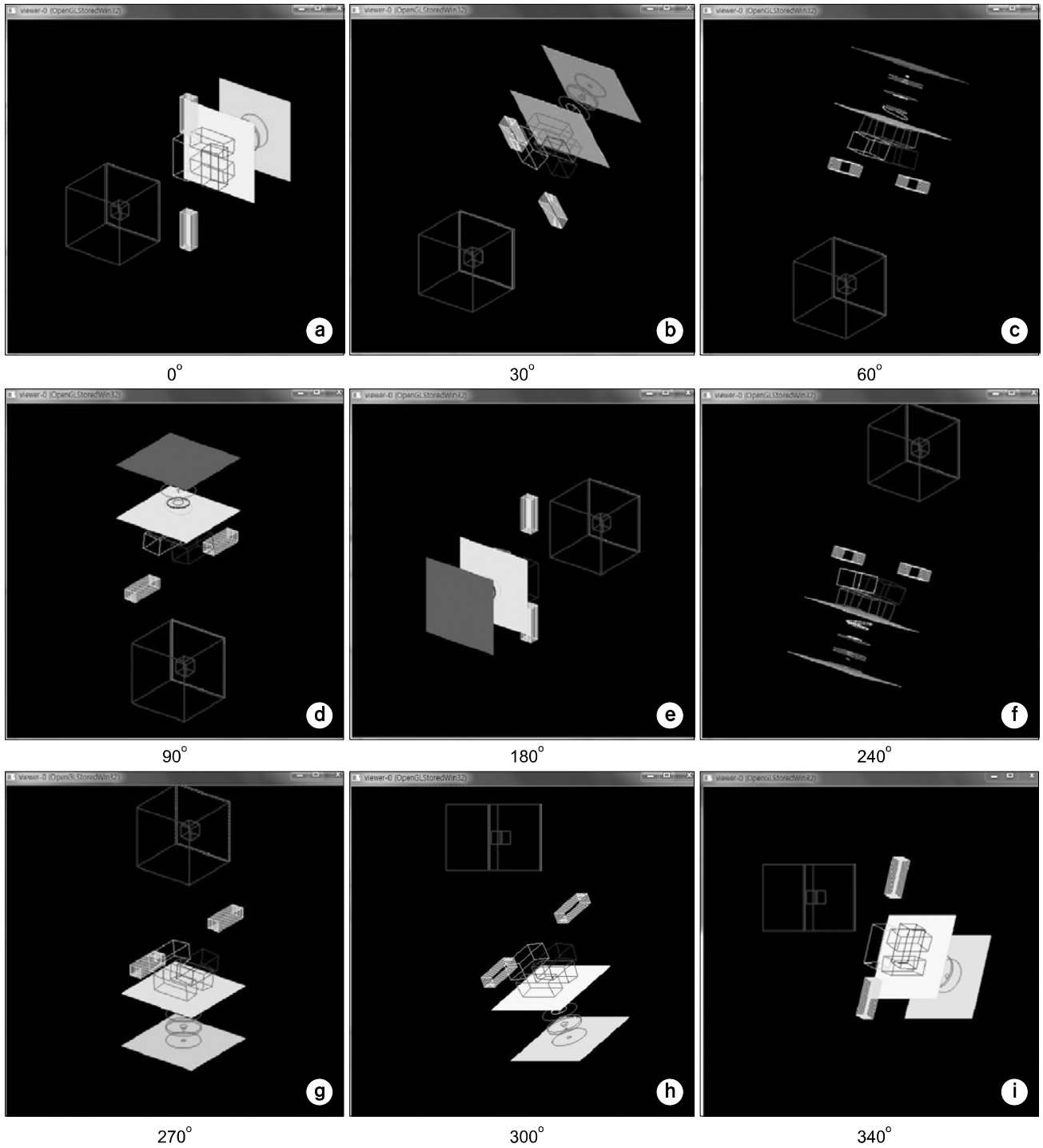


Fig. 3. Geant4 modeling of the gantry position for nine angles (a~i).

에 각 각도별로 갠트리의 회전을 보였다. 이때 사용한 패턴은 정육면체의 물패턴을 사용 하였다. 또한 Fig. 4에는 실제 환자의 CT를 이용하여 갠트리를 회전하며 실행한 모습

을 보였다. 이들을 확인함으로써 이번에 개발한 코드가 정상적으로 동작함을 알 수 있었다. Table 1에는 환자의 CT를 변환하여 만들어지는 파일 그리고 계산 결과로 만들어

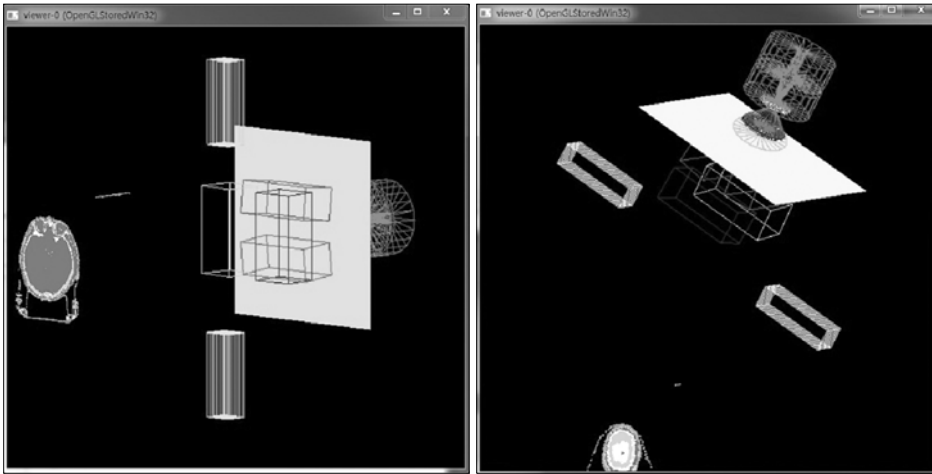


Fig. 4. Geant4 based stereotactic radiosurgery demonstrated in this study.

Table 1. Generated data files from initial dicom files.

Dicom	Conversion file	output
1.dcm	1.g4dcm	dicom1.out
2.dcm	2.g4dcm	dicom2.out
3.dcm	3.g4dcm	dicom3.out
4.dcm	4.g4dcm	dicom4.out
5.dcm	5.g4dcm	dicom5.out
.	.	.
.	.	.
72.dcm	72.g4dcm	dicom72.out
73.dcm	73.g4dcm	dicom73.out
74.dcm	74.g4dcm	dicom74.out
75.dcm	75.g4dcm	dicom75.out

### 고찰 및 결론

본 연구에서는 선량계산의 정확성으로 사용이 증가하고 있는 몬테카를로 방법을 방사선수술에 적용할 수 있도록 응용프로그램을 Geant4를 사용하여 개발하였다. 이를 위해 본 병원에서 사용하고 있는 장비의 특성에 맞는 스펙트럼을 구하기 위한 선행 실험을 수행하였다. 스펙트럼의 가중치 확률을 구하기 위해 사용된 입자 수는 각각  $2 \times 10^8$  개를 입력 하였다. 물 팬텀에서 조사면 크기  $10 \times 10$  cm에서 측정 한 선형가속기의 PDD와 스펙트럼 자료를 이용하여 계산한 PDD가 1% 미만의 차이를 보일 때 까지 가중치 곡선을 구하는 순환계산을 실행하였다.

방사선수술을 구현하기 위해 선형가속기의 갠트리의 회전은 회전 매트릭스 rotateX와 rotateY를 정의하였으며 회전 각도는 메신저를 통하여 전달하는 방식을 사용하였다. 환자 테이블의 회전은 rotateY 하나만 정의하여 구현하였다. 실제 환자치료 시 여러 개의 아크와 세그먼트를 이용하기 때문에 이들을 하나의 매크로 파일로 작성하여 실행하도록 하였다.

최근에는 대부분의 코드에서 CT를 이용한 모델링 기법을 사용하고 있으나 Geant4에서 제공된 예제는 불완전하여 정확한 변환이 이루어지지 않았다. 변환 자체에서부터 실행이 되지 않거나 픽셀값의 부정확한 밀도 변환이 이루어지고 있었다. 이에 본 연구에서는 dicom 파일을 바이너리 상태에서 분석을 하여 새로운 파일로 다시 작성 하였다. 이렇게 함으로서 Geant4를 이용하는 모든 연구자들이 CT 파일에서 직접 환자의 모델링을 할 수가 있다.

지는 파일간의 관계를 표로 나타내었다.

실제 환자의 치료계획 시스템에서 각각의 아크에 대한 필드자료를 메신저로 입력 하도록 구현을 하였으나 이번 연구에서는 아쉽지만 시간이 촉박한 관계로 제외 하였다. 향후 이 부분에 대한 연구를 계속 진행할 계획이다. 이 부분이 진행되면 측정값과 계산값 그리고 치료계획 시스템의 계산 결과들을 서로 비교할 수 있을 것이다.

최근의 컴퓨터의 CPU는 코어의 수가 4개에서 6개까지 증가하였다. 따라서 컴퓨터 한 대에서 최대 8개의 프로세스를 실행할 수가 있게 되었다. 이렇게 실행할 경우에는 난수 시작값(Random number seed)을 각각 다르게 설정함으로써 멀티프로세싱의 효과를 얻을 수 있었다. 이 경우 많은 수의 입자를 실행시키는데도 실행 시간은 획기적으로 줄일 수 있었다.

방사선수술에 특화된 응용프로그램으로 개발된 코드지만 MLC에 세그먼트 입력을 편리하게 입력할 수 있는 방법을 적용하면 세기조절방사선치료의 계산에도 사용될 수 있다. 이번에 개발된 응용프로그램은 방사선치료의 여러 분야 특히 특수치료 분야에서 다양하게 이용될 수 있으리라 생각한다.

## 참 고 문 헌

1. Leksell L: Stereotactic radiosurgery. J Neurol Psychiatr 46:797-803 (1983)
2. Steiner L, Leksell L: Stereotactic radiosurgery for cerebral arteriovenous malformations: Report of a case. Acta Chir Scand 138:459 (1972)
3. Backlund EO, Rahn T, Sarby B: Treatment of pinealomas by stereotactic radiation surgery. Acta Radiol Ther Phys Biol (Stockh.) 13:368-376 (1974)
4. Minniti G, Scaringi C, Clarke E, Valerani M, Osti M, Enrici RM: Frameless Linac-based stereotactic radiosurgery (SRS) for brain metastases: analysis of patient repositioning using a mask fixation system and clinical outcomes. Radiat Oncol 6:158 (2011)
5. Ramakrishna N, Rosca F, Friesen S, Tezcanli E, Zygmanski P, Hacker F: A clinical comparison of patient setup and intra-fraction motion using frame-based radiosurgery versus a frameless image-guided radiosurgery system for intracranial lesions. Radiother Oncol 95:109-115 (2010)
6. Agostinelli S, Allison J, Amoko K, et al: GEANT4—a simulation toolkit. Nucl Instrum Meth Phys Res A 506:250-303 (2003)
7. Pia MG: The Geant4 Toolkit: simulation capabilities and application results. Nuclear Physics B (Proc. Suppl) 125:60-68 (2003)
8. Agostinelli S, Allison J, Amoko K, et al: Geant4 developments and applications. IEEE Trans Nucl Sci 53:270-278 (2006)
9. Kimura A, Tanaka S, Aso T, et al: DICOM Interface and Visualization Tool for Geant4-based Dose Calculation. 2005 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record 2:981-984 (2005)

## 뇌 정위 방사선수술의 선량 계산을 위한 몬테카를로 시뮬레이션 코드 개발

\*전주 예수병원 방사선종양학과, †인제대학교 의과대학 신경외과학교실

강정구\* · 이동준†

뇌정위 방사선수술의 선량계산을 위해 Geant4 기반의 응용 프로그램을 개발 하였다. 선형가속기에서 발생하는 방사선의 스펙트럼을 입력하기 위하여 사전에 실행하여 구한 스펙트럼에 각 에너지별로 구한 가중치를 곱하여 확률밀도를 구하였다. 이를 누적밀도로 변환하여 입력하도록 하였다. 메신저 클래스를 이용하여 다양한 형태의 MLC 조사면을 설정할 수 있도록 하였다. 갠트리와 테이블의 회전을 모사하기 위하여 rotateX와 rotateY라는 회전행렬을 사용하였다. 월드좌표 속에서 갠트리와 테이블을 정의하여 각각 회전을 구현하였다. 실제 환자의 자료는 CT의 dicom 파일에서 픽셀 크기, 매트릭스 크기 등의 정보와 픽셀의 HU를 밀도로 변환한 파일을 생성한 다음 이 파일을 이용 환자의 모델링에 이용 하였다. 환자의 모델링은 팬텀월드 안에 픽셀의 크기에 해당하는 복셀을 정의하고 이 복셀에 픽셀의 밀도와 이 밀도에 해당하는 물질을 할당해주었다.

중심단어: 몬테카를로, Dicom, 방사선수술, Geant4