

GEANT4 Medical Linac2 예제를 이용한 6 MV 선형가속기 광자선속의 기초특성과 연구방법

*영남대학교 이과대학 물리학과, †전주예수병원 방사선종양학과, ‡영남대학교 의과대학 방사선종양학교실

김병용* · 김형동* · 김성진* · 오세안* · 강정구† · 김성규‡

본 연구에서는 GEANT4 toolkit을 이용하여 의료용 선형가속기에 대한 몬테칼로(Monte Carlo) 전산모사를 하였다. Medical Linac2 예제를 수정해서 사용하였다. 에너지스펙트럼, 최빈에너지, 평균에너지를 EGS4 결과와 비교 하였고 선속의 중심에서부터 반경에 따른 단위면적당 광자수, 단위면적당 에너지, 평균에너지를 분석하였다. 그 결과 EGS4 결과와 큰 차이를 보이지 않기 때문에 Medical Linac2 예제의 선속특성에 관한 전산모사에 큰 문제점은 없는 것으로 판단된다. 같은 헤드구조에서도 Physics List의 모델에 따라서는 결과에 차이가 발생하므로 연구 환경에 알맞은 Physics List 모델을 선택하는 것이 중요하다고 판단된다. 본 연구는 처음 몬테칼로 전산모사를 접하는 사용자가 선속특성에 대한 전산모사를 수행하고 6 MV 광자선속의 특성을 분석하는 과정에 많은 도움이 될 것으로 사료된다.

중심단어: Geant4, 몬테칼로, 광자선, 스펙트럼

서 론

방사선종양학에서 몬테칼로(Monte Carlo) 전산모사는 정확한 선량계산 도구로서 폭넓게 이용되고 있다.¹⁻³⁾ 치료용 선형가속기에 대한 몬테칼로 전산모사는 주로 EGS4와 MCNP 등의 코드를 사용하여 이루어져 왔다.^{4,5)} GEANT4 toolkit은 유럽입자물리연구소(European Organization for Nuclear Research, CERN)에서 개발하였으며 C++언어로 만들어진 코드이다. GEANT4는 Windows, Linux, Unix의 운영체제에서 호환이 가능하고 별도의 소프트웨어를 연계하는 인터페이스 기능이 GEANT4 프로그램 내에 구성되어 있어 사용자 친화력이 우수하다.⁶⁾ 또한 GEANT4 toolkit에는 의료용 선형가속기의 예제가 교육용으로 포함되어 있어 몬테칼로 전산모사의 학습에 많은 도움이 되고 있다. 이러한 이유로 최근 GEANT4의 사용자가 급속히 증가하고 있다.

일반적으로 의료용 선형가속기에 대한 몬테칼로 전산모사는 크게 두 단계로 실행하고 있다. 첫 번째는 선형가속기

의 선속 특성에 대한 전산모사이다. 가속된 전자부터 표적 이후 선형가속기의 구조에 대한 여러 가지 상황을 코드에 반영하여 선속의 에너지 스펙트럼을 검출하게 된다. 두 번째 단계는 첫 번째 단계에서 얻어진 선속자료를 이용하여 인체의 CT (computed tomography)영상 또는 팬텀에 입사시켜 흡수선량, 깊이선량율(percent depth dose), 측방선량 분포(profile) 등 사용자의 목적에 맞는 자료를 얻기 위한 계산한다. 이렇게 두 단계로 나눠서 계산을 하면 첫 번째 단계에서 선속의 에너지 스펙트럼을 얻은 후 선속의 에너지 스펙트럼에 영향을 줄 수 있는 헤드구조 등의 변화가 없을 경우 두 번째 단계의 계산을 바로 시행할 수 있어서 몬테칼로 전산모사의 계산시간을 단축하고 컴퓨터의 계산 부담을 줄일 수 있다.

본 연구는 이러한 몬테칼로 전산모사의 첫 번째 단계로 Medical Linac2 예제를 수정하여 코드를 작성하고 6 MV 광자선 에너지 스펙트럼을 계산하였다. 이렇게 계산된 6 MV 광자선속의 에너지 스펙트럼을 EGS4 코드의 결과와 비교하고 반경에 따른 여러 가지 물리적인 특성을 분석하였다.

이 논문은 2011년 5월 16일 접수하여 2011년 6월 27일 채택되었음.

책임저자 : 김성규, (705-717) 대구시 남구 대명동 317-1

영남대학교 의과대학 방사선종양학교실

Tel: 053)620-3373, Fax: 053)624-3599

E-mail: skkim3@ynu.ac.kr

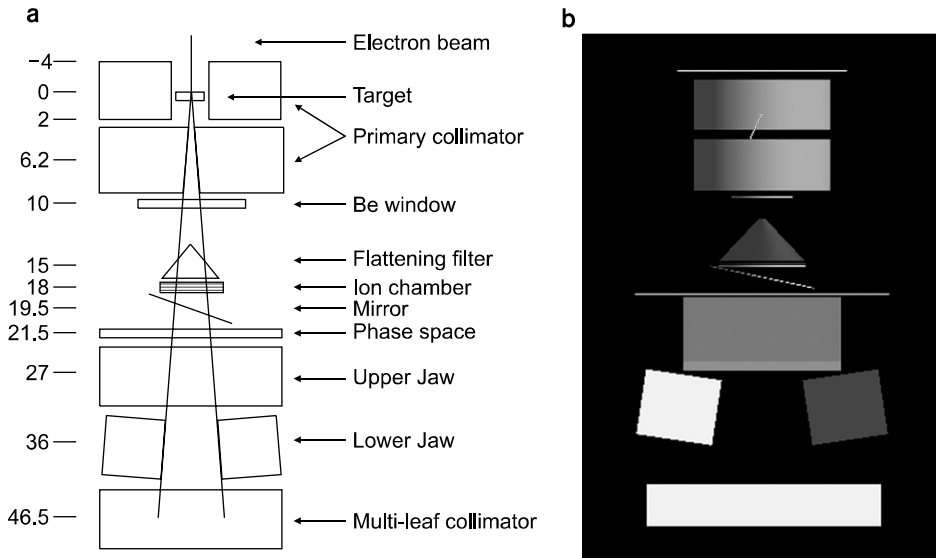


Fig. 1. (a) Illustration of the gantry head and the component modules used in the GEANT4 simulations. (b) Geometry of the linear accelerator head as shown by GEANT4.

Table 1. Components of the medical Linac2 head structure.

	Shape	Size (x,y) or radius (cm)	Height (cm)	Material
Target	Upper Box	1.2×1.2	0.15748	Copper
	Lower Box	1.2×1.2	0.0889	Tungsten
Primary collimator	Upper Cylindricality	8	6	Tungsten
	Lower Cylindricality	8	6.4	Tungsten
Flattening filter	Circular truncated cone	5	5	Copper

재료 및 방법

1. GEANT4 운용 환경과 헤드구조

본 연구에서는 GEANT4 (9.3.p02 버전)을 WINDOW 운영 체제에서 실행하였으며 상용 컴파일러 MS Visual Studio 2008을 사용하였다. 물리적인 계산을 위해 CLHEP (A Class Library for High Energy Physics, 2.0.4.6 버전)를 사용하였다. Physics List는 Medical Linac2에서 지원하는 3가지

모델(Standard opt3, Penelope, Livermore)을 사용하여 각각 계산하였다.⁷⁾

몬테카를로 전산모사에서 선형가속기 헤드의 구조를 보다 실제에 가깝도록 모델 할수록 결과의 정확성은 높아진다. 그렇지만 제조사별로 다양하고 복잡한 기하학적 구조를 상세히 적용하는 것은 한계가 있으므로 Medical Linac2 예제를 이용하여 Fig. 1과 같이 나타내었다. Table 1은 표적, 일

차콜리메이터, 평탄화필터의 간략한 제원을 나타내었다. 표적은 텅스텐과 구리로 이루어져 있으며 텅스텐으로 구성된 원통형 구조의 일차콜리메이터 내부에 위치해 있다. 다음으로 베릴륨창과 구리로 구성된 평탄화필터가 위치한다. 이온함과 거울은 각각 KAPTON과 MYLAR 재질로 구성되어 있으며 이차콜리메이터와 다엽콜리메이터를 차례로 구성하였다. 헤드구조를 이루고 있는 구성요소들의 물질구조는 Medical Linac2 예제의 기본 값을 사용하였다. 선속의 자료를 획득하는 Phase Space는 프로그램상의 장치이며 물리적인 구조를 갖지는 않는다.

2. 데이터의 수집과 분석

Björk 등⁸⁾에 의하면 초기 에너지 분포가 가우시안 분포이고 FWHM (Full Width at Half Maximum)이 최빈에너지 (most probable energy)의 10%보다 작을 때는 선량분포에 영향이 적다고 하였다. 따라서 입사전자의 에너지 분포는 Medical Linac2 예제의 기본 값을 사용하였으며 표준편차는 0.127 MeV, 평균에너지는 6 MeV, 반경 0.5 mm이다. 3가지의 Physics List 모델(Livermore, Standard, Penelope)마다 Phase Space에서 1×10^6 입자를 획득하였다. Phase Space에서 획득한 입자들은 광자, 전자, 양전자로 구성되어 있으며 전자와 양전자의 자료는 제거하였다. Phase Space를 통해 획득된 데이터에는 입자의 종류, 위치, 운동방향, 에너지 등의 정보가 포함되어 있어 다양한 분석이 가능하다.

Sheikh-Baghri^{9,10)}의 결과와 에너지 스펙트럼, 평균에너지, 최빈에너지를 비교하였다. Sheikh-Baghri은 Varian Clinac

Table 2. Calculated total photon number for Physics List model.

	Number of photon	
	r ≤ 50 mm	r ≤ 22.5 mm
Livermore	656042	198119
Standard	652425	195507
Penelope	655482	197170

r: radius from the centre of the beam in phase space.

Table 3. Comparison mean energy of 6 MV energy spectra at 21.5 cm from target of medical Linac2 and Sheikh-Bagheri's^{9,10} results.

	Medical Linac2			Varian clinac	Elekta	Siemens
	Livermore	Standard	Penelope	HE	SL25	KD
Mean energy (MeV)	1.71	1.66	1.97	1.8	2.02	1.94

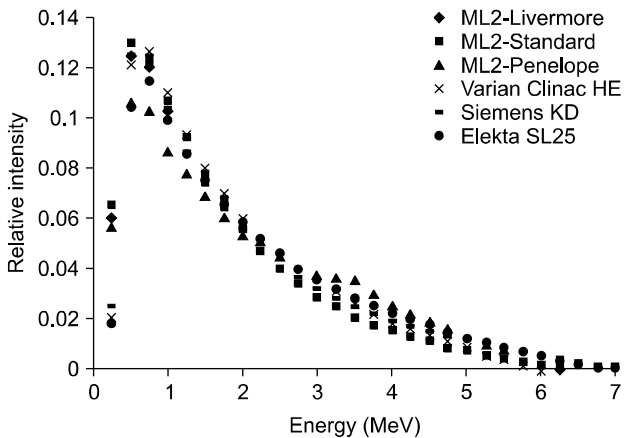


Fig. 2. Comparison 6 MV energy spectra from Medical Linac2 and Sheikh-Bagheri's^{9,10} results.

High-Energy, Elekta SL25, Siemens KD 모델의 6 MV 에너지 스펙트럼을 EGS4 코드로 구현하여 계산하였다. 본 연구에서 사용한 헤드의 구조는 Sheikh-Baghri가 사용한 3가지 제조사별 모델의 헤드구조와 다르다. 그래서 EGS4와 Geant4 코드 사이의 차이를 알아볼 수는 없지만 결과의 비교에서 큰 차이가 나지 않는다면 Medical Linac2 예제의 선속특성에 대한 전산모사 실행과정에는 심각한 오류는 없다고 판단할 수 있을 것이다. Sheikh-Baghri의 방법과 같이 선속의 중심축으로부터 반경 2.25 cm 이내의 광자데이터를 이용하여 0.25 MeV 간격으로 에너지 스펙트럼을 계산하였다. 비교를 위하여 에너지스펙트럼에서 모든 구간의 합이 1이 되도록 각각의 에너지스펙트럼을 규격화 하였다.

선속의 중심축으로부터 반경에 따른 특성을 분석하기 위하여 선속중심으로부터 반경 50 mm까지 1 mm간격으로 데이터를 분석하였고 단위면적당 광자수, 단위면적당 에너지, 평균에너지를 알아보았다. Table 2는 에너지스펙트럼과 선속의 중심축으로부터 반경에 따른 물리적 특성을 알아보기 위해 사용된 광자의 수를 나타낸 것이다.

3. 통계적 불확정성의 계산과 분석의 과정

통계적 불확정성(statistical uncertainty)은 몬테칼로 전산 모사에 많이 사용되고 있는 식(1)을 이용하여 추정하였다.¹¹⁻¹³⁾

$$s = \sqrt{\frac{\langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2}{N-1}} \quad (1)$$

여기서 N 은 반복수행의 횟수이며 $N=10$ 을 적용하였다. 즉, 총 데이터를 순차적으로 10등분하여 계산에 적용하였고 독립성을 갖추었다. $\langle X^2 \rangle$ 과 $\langle X \rangle^2$ 은 N 개의 계산 결과에 대한 제곱평균과 평균이며 상대적 불확정도(relative uncertainty)는 식(2)로 계산하였다.

$$s_r = \frac{s}{\langle X \rangle} \times 100 [\%] \quad (2)$$

에너지스펙트럼과 선속의 반경에 따른 물리적 특성들을 분석하는 단계로 크게 3가지의 과정을 거쳤다. 첫째, 통계적 불확정도 계산을 위하여 원본 데이터를 순차적으로 10등분 하였다. 둘째, 10개의 데이터 각각에서 전자와 양전자의 데이터를 제거하고 선속의 중심으로부터 거리에 따라 50 mm와 22.5 mm 이내의 데이터만 추출하였다. 셋째, 22.5 mm 이내의 데이터로 에너지 스펙트럼을 분석하고 50 mm 이내의 데이터로 반경에 따른 물리적 특성들을 각각 분석하였다. 모든 분석의 과정은 Microsoft Excel 프로그램을 이용하여 이루어졌다.

결 과

Fig. 2는 Sheikh-Bagheri^{9,10)} 결과와 에너지 스펙트럼을 비교한 것이다. Sheikh-Bagheri 결과와 비교하였을 때 Medical Linac2 3가지 Physics List 모델의 에너지 스펙트럼은 0.25 MeV 구간을 제외한 대부분의 구간에서 큰 차이를 보이지 않았다. Medical Linac2와 Siemens KD 모델의 최빈구간은 0.5 MeV였으며 Varian Clinac HE와 Elekta SL25 모델의 최

빈구간은 0.75 MeV이다. Table 3의 각 모델별 평균 에너지 계산 결과에서는 약 1.7 MeV에서 2 MeV 사이의 평균에너지가 나타났다. Fig. 3은 Medical Linac2의 통계적 불확정성

을 계산한 결과이다. 5 MeV 이상에서 3% 이상의 불확정성을 보였다. Table 4는 Fig. 2에 나타난 Medical Linac2 예제의 3가지 Physics List 모델의 에너지스펙트럼 결과이다.

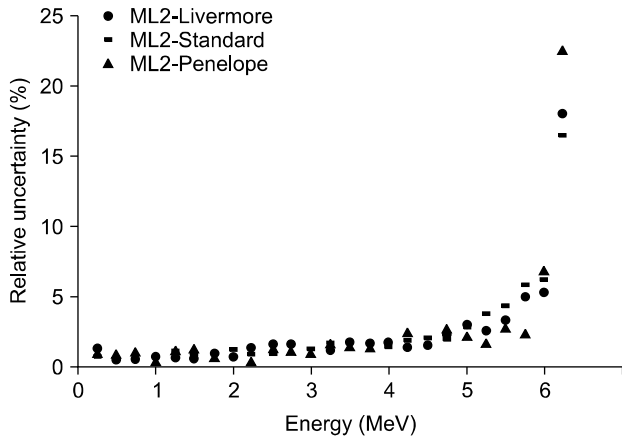


Fig. 3. Statistical uncertainty¹¹⁻¹³⁾ (relative) of the calculated results using Medical Linac2.

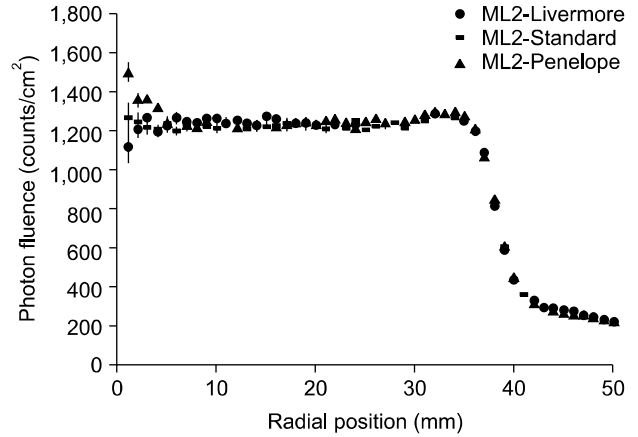


Fig. 4. Photon fluence as a function of the radial position at 21.5 cm from target.

Table 4. 6MV photon spectra from Medical Linac2, for the radial bin $0 \leq r \leq 2.25$ cm, as shown in Fig. 2. The bins are 250 keV wide, and the spectra data are tabulated with the energy at the end of each bin.

Energy (MeV)	Livermore		Standard		Penelope	
	Number of photon	Normalize	Number of photon	Normalize	Number of photon	Normalize
0.25	1134.9	6.02E-02	1281.7	6.56E-02	1133.5	5.75E-02
0.50	2346.8	1.24E-01	2530.4	1.29E-01	2088.6	1.06E-01
0.75	2283.2	1.21E-01	2421.3	1.24E-01	2032.8	1.03E-01
1.00	1957.3	1.04E-01	2099.2	1.07E-01	1712.4	8.68E-02
1.25	1733.6	9.20E-02	1808.4	9.25E-02	1539.2	7.81E-02
1.50	1475.0	7.82E-02	1527.2	7.81E-02	1369.2	6.94E-02
1.75	1270.5	6.74E-02	1314.0	6.72E-02	1207.9	6.13E-02
2.00	1087.9	5.77E-02	1091.1	5.58E-02	1058.6	5.37E-02
2.25	921.7	4.89E-02	905.5	4.63E-02	946.9	4.80E-02
2.50	775.1	4.11E-02	786.5	4.02E-02	871.2	4.42E-02
2.75	669.3	3.55E-02	658.8	3.37E-02	780.1	3.96E-02
3.00	566.2	3.00E-02	565.6	2.89E-02	731.7	3.71E-02
3.25	483.4	2.56E-02	493.0	2.52E-02	712.0	3.61E-02
3.50	420.1	2.23E-02	401.9	2.06E-02	687.3	3.49E-02
3.75	358.0	1.90E-02	341.9	1.75E-02	577.8	2.93E-02
4.00	304.6	1.62E-02	292.8	1.50E-02	498.7	2.53E-02
4.25	253.7	1.35E-02	241.2	1.23E-02	431.8	2.19E-02
4.50	221.2	1.17E-02	211.6	1.08E-02	359.0	1.82E-02
4.75	178.0	9.44E-03	167.5	8.57E-03	307.2	1.56E-02
5.00	143.6	7.62E-03	141.3	7.23E-03	240.8	1.22E-02
5.25	112.7	5.98E-03	110.3	5.64E-03	190.9	9.68E-03
5.50	79.2	4.20E-03	80.4	4.11E-03	133.8	6.79E-03
5.75	52.7	2.80E-03	54.9	2.81E-03	74.7	3.79E-03
6.00	23.0	1.22E-03	20.8	1.06E-03	27.3	1.38E-03
6.25	2.0	1.06E-04	3.4	1.74E-04	3.5	1.78E-04

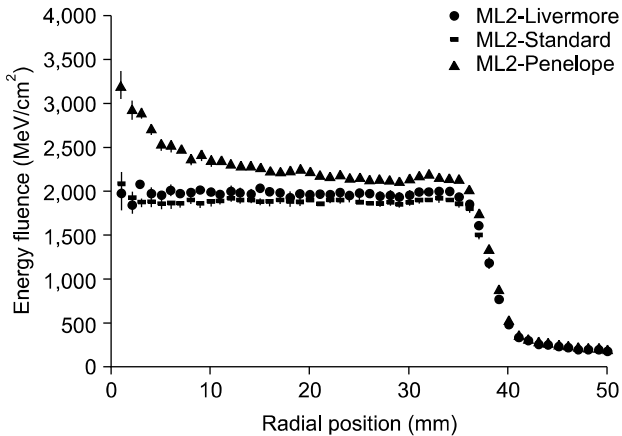


Fig. 5. Photon energy fluence as a function of the radial position at 21.5 cm from target.

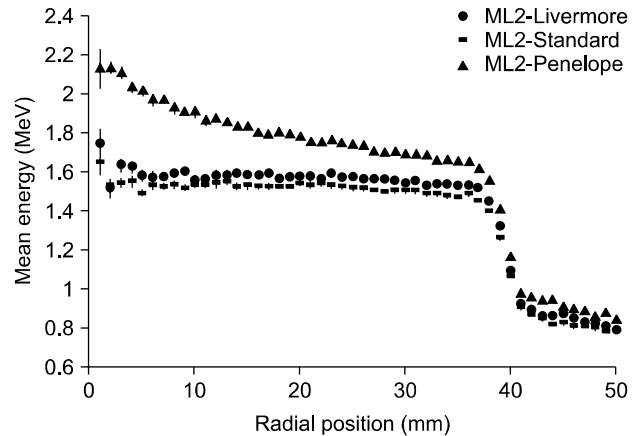


Fig. 6. Photon mean energy as a function of the radial position at 21.5 cm from target.

Fig. 4는 선속 중심축으로부터 1 mm 간격의 반경에 따른 단위면적당 광자수를 나타내고 있다. 약 36 mm의 반경까지 일정한 값을 보인 후 반경 36 mm 이후 급격히 줄어들었다. 본 연구에 사용된 헤드구조에서는 일차 콜리메이터에 의해 형성되는 방사각이 약 9.5°이며 표적으로부터 21.5 cm 거리에 Phase Space가 위치해 있다. 즉 기하학적으로 Phase Space의 위치에서는 반경 36 mm에서 선속의 경계가 형성되므로 단위면적당 광자수의 감소는 타당하다. Fig. 5는 반경에 따른 단위면적당 에너지를 나타내며 단위면적당 입사된 에너지의 총합을 뜻한다. 반경 36 mm까지 Livermore와 Standard 모델은 거의 일정한 값을 보였으며 Penelope 모델은 전반적으로 높은 단위면적당 에너지를 보이고 반경이 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. Fig. 6의 반경에 따른 평균에너지에서는 Standard 모델에서 가장 낮은 평균에너지 분포를 나타냈으며 Penelope 모델이 가장 높은 평균에너지를 보였다. 또 선속의 중심에 대한 주변부의 평균에너지의 감소는 Livermore와 Standard 모델은 약 0.1 MeV Penelope 모델은 약 0.4 MeV 감소하였다. GEANT4를 이용해 Elekta Precise Linac을 구현한 Greillot 등¹²⁾의 결과에 의하면 선속의 중심에 대하여 반경 36 mm의 평균에너지 감소는 약 0.25 MeV이다. Greillot의 결과와 비교하면 조금의 차이를 보이고 있다. 반경에 따른 단위면적당 광자수, 단위면적당 에너지, 평균에너지는 반경 5 mm 이후부터 2% 미만의 상대적 불확정도를 보였다.

고찰 및 결론

Medical Linac2 예제의 헤드구조는 상용의 장비들과 비교했을 때 많은 차이점이 있다. 특히 평탄화필터의 경우 단순한 원뿔대 형태로 이루어져 있으며 적절한 선속의 변화를 위해 섬세하게 설계되지 않았다. 그 결과 에너지스펙트럼과 반경에 따른 평균에너지의 변화에서 실제 장비를 구현한 기존의 결과들과 약간의 차이를 보인다. 그렇지만 에너지스펙트럼과 반경에 따른 물리적 특성의 결과를 종합했을 때 큰 차이를 보이지 않으므로 Medical Linac2 예제의 선속 특성에 대한 전산모사 과정에 심각한 오류는 없는 것으로 판단된다. Physics List 모델에 따라서는 에너지스펙트럼과 선속의 반경에 따른 특성에 차이가 발생하므로 각자의 연구 환경에 적당한 Physics List 모델 선택을 위해 신중을 기해야 할 것이다. Medical Linac2 예제는 연구 활동에 직접적으로 이용될 수는 없지만 몬테칼로 전산모사를 처음 접하는 사용자가 Geant4 코드 학습의 과정에 많은 도움이 될 뿐만 아니라 각자의 연구 환경을 구현하는 과정에서 테스트 코드로 활용하여 참고하기에 유용하다고 판단된다. 또한 본 연구의 결과는 선속 특성에 대한 전산모사를 수행하고 6 MV 광자선속의 특성을 분석하는 과정에 많은 도움이 될 것으로 사료된다.

앞으로 통계적 불확정도를 감소시키기 위해 1×10^7 이상의 히스토리를 계산하고 물 팬텀에서 흡수선량 계산을 통해 깊이선량을(percent depth dose)과 측방선량분포(profile) 등을 비교, 분석할 계획이다. 또한 Medical Linac2 예제의

헤드구조를 실존 장비의 헤드구조로 변형하여 물 팬텀에서 측정된 흡수선량과 계산한 흡수선량을 비교하여 스펙트럼의 타당성을 입증할 계획이다.

참 고 문 헌

1. Rebecca M. Howell, Stephen F. Kry, Eric Burgett, David Followill, Nolan E. Hertel: Effects of tertiary MLC configuration on secondary neutron spectra from 18 MV x-ray beams for the varian 21EX linear accelerator. *Med Phys* 36:4039-4046 (2009)
2. 강세권, 정광호, 주라형 등: 제작된 선량 검증용 IMRT 팬텀의 몬테칼로 시뮬레이션: 예비적 연구. *의학물리* 18:126-133 (2007)
3. Kim HK, Han SJ, Kim JL, Kim BH, Chang SY, Lee JK: Monte Carlo simulation of the photon beam characteristics from medical linear accelerators. *Radiation Protection Dosimetry* 119:510-513 (2006)
4. Nettelbeck H, Takacs GJ, Rosenfeld AB: Effect of transverse magnetic fields on dose distribution and RBE of photon beams: comparing PENELOPE and EGS4 Monte Carlo codes. *Phys Med Biol* 53:5123-5137 (2008)
5. Bruce AF, Makoto AJ, Joesph P, et al: Benchmarking of Monte Carlo simulation of bremsstrahlung from thick targets at radiotherapy energies. *Med Phys* 35:4308-4317 (2008)
6. 강상구, 한동현, 김종일: GEANT4를 이용한 ^{99m}Tc Generator 안정성 시뮬레이션. *의학물리* 19:11-18 (2008)
7. Barbara Caccia, Claudio Andenna, Giuseppe Antonio Pablo Cirrone: MedLinac2: a GEANT4 based software package for radiotherapy. *Ann Ist Super Sanita* 46:173-177 (2010)
8. Björk P, Knöös T, Nilsson P: Influence of initial electron beam characteristics on monte carlo calculated absorbed dose distributions for linear accelerator electron beams. *Phys Med Biol* 21:4019-4041 (2002)
9. Daryoush SB, Rogers DWO: Monte Carlo calculation of nine megavoltage photon beam spectra using the BEAM code. *Med Phys* 29:391-402 (2002)
10. Daryoush SB, Rogers DWO, Carl KR, et al: Comparison of measured and Monte Carlo calculated dose distributions from the NRC linac. *Med Phys* 27:2256-2266 (2000)
11. AAPM TG-105: Issues associated with clinical implementation of Monte Carlo-based photon and electron external beam treatment planning. *Med Phys* 34:4818-4853 (2007)
12. Greillot L, Frisson T, Maneval D, Zahra N, Badel JN, Sarrut D: Simulation of a 6 MV Elekta Precise Linac photon beam using GATE/GEANT4. *Phys Med Biol* 56:903-918 (2011)
13. 정동혁, 김진기, 신교철 등: EGS5 기반 사용자코드의 작성과 초기 계산결과. *의학물리* 17:123-129 (2006)

Study on the 6 MV Photon Beam Characteristics and Analysis Method from Medical Linear Accelerators Using Geant4 Medical Linac2 Example

Byung Yong Kim*, Hyung Dong Kim*, Sung Jin Kim*, Se An Oh*, Jung Gu Kang[†], Sung Kyu Kim[‡]

*Department of Physics, College of Science, Yeungnam University, Gyongsan, [†]Department of Radiation Oncology, Presbyterian Medical Center, Jeonju, [‡]Department of Therapeutic Radiology & Oncology, College of Medicine, Yeungnam University, Daegu, Korea

In this study, Geant4 based Monte Carlo simulations were carried out for medical linear accelerator. Modified Medical Linac2 toolkit was used for calculation. The energy spectrum, most probable energy and the photon mean energy compared with the published results using the EGS4 code. The results well agreed with published results. The calculated results of photon fluence, energy fluence and mean energy according to the radius from the centre of the beam were analyzed. Monte Carlo simulation using Medical Linac2 code is considered to be useful for analysis of medical linear accelerator. Because the calculated results varies depending on Physics List model for same head structure. It is important to choose the right model for research purpose. Monte Carlo simulation using GEANT4 Medical Linac2 is a valuable for any novice to adopt this code to the study related to 6 MV photon fluence from medical linear accelerator.

Key Words: Geant4, Monte Carlo, Photon, Spectrum