

## GEANT4를 이용한 정위적 사이버나이프 선량분포의 계산과 측정에 관한 연구

\*가톨릭대학교 의과대학 의공학교실, †가톨릭대학교 생체의공학연구소,  
‡가톨릭대학교 여의도성모병원 방사선종양학과, §성균관대학교 자연과학부 물리학과,  
||서울우리들병원 사이버나이프 클리닉, ¶충해보건대학 방사선과, #신구대학 방사선과

이충일\*<sup>†</sup> · 신재원<sup>§</sup> · 신현주<sup>||</sup> · 정재용\*<sup>†</sup> · 김연래\*<sup>¶</sup> · 민정환\*<sup>#</sup> · 홍승우<sup>§</sup> · 정수미<sup>†</sup> · 정원균\*<sup>†</sup> · 서태석\*<sup>†</sup>

사이버나이프 치료에서 사용하는 소조사면은 전자평형의 부재와 급격한 선량 경사도(Steep dose gradients), 그리고 광자와 전자들의 스펙트럼 변화 요인으로 인하여 소조사면 광자선 선량 측정은 일반적인 치료의 측정보다 좀더 어렵고 복잡하다. 본 연구에서는 다이오드 검출기를 이용한 측정값과 GEANT4를 이용한 계산값을 비교하고 정확한 선량 전달을 위한 측정 선량의 검증 도구의 한 종류로 GEANT4의 유용성을 입증하고자 한다. 사이버나이프 몬테카를로 모델을 개발하는데 있어 두 단계로 진행하였다. 첫 번째 단계는 선형가속기 헤드(treatment head) 시뮬레이션과 이를 통한 광자 에너지 스펙트럼의 계산이었고, 두 번째 단계는 5, 10, 20, 30, 50, 60 mm의 여섯 개 원형 조사면에 대한 물팬텀속에서의 깊이선량율의 계산이었다. 그리고 출력인수(Relative output factors)에 대한 계산은 5 mm부터 60 mm까지 총 12가지 조사면에 대해 수행되었으며 그 결과를 다이오드 검출기를 이용한 측정값과 비교하였다. 가로선량분포(Profiles)의 경우 5, 10, 20, 30, 50, 60 mm의 6가지 조사면에 대해 계산이 이루어졌고 깊이는 1.5, 10, 20 cm의 세 가지 깊이에 대해 수행되었다. 깊이선량율의 계산값을 측정값과 비교한 결과 평균 2% 미만의 오차를 보여 임상에서 허용 가능한 결과를 얻었다. 조사면 출력인자의 경우에 조사면 직경 7.5 mm 이상에서 3% 이내의 오차를 보였으나 직경 5 mm 조사면에서는 6.9%로 높은 오차를 보였다. 가로선량분포에서 20 mm 이상의 조사면에서는 2% 미만의 오차를 보였고 그 이하의 조사면에서는 3.5% 미만의 오차를 보였다. 본 연구에서는 소조사면 사이버나이프 측정을 위한 선량분포 계산을 GEANT4 코드를 사용하여 다이오드 측정 결과와 비교하였다. 다이오드와의 측정 비교 결과 5 mm 조사면을 제외한 나머지 조사면들에 대해 오차 0.2~0.6% 내의 만족할만한 결과를 얻었다. 향후 소조사면에서 정확성을 가지는 Gafchromic 필름 등 다른 측정기와 비교를 통하여 그 정확성이 평가된다면 이 GEANT4의 선량분포 계산 방법은 소조사면을 이용하는 사이버나이프 방사선치료에서 정확한 선량 전달을 위한 측정 선량의 검증 도구의 한 종류로 사용할 수 있을 것으로 예상된다.

**중심단어:** 사이버나이프, 소조사면, GEANT4, 측면전자불평형

### 서 론

영상유도 무고정틀 정위적 방사선수술(Image-guided frameless stereotactic radiosurgery)은 Adler 등<sup>1)</sup>에 의해 1999년에 제안되었고 그 후에 사이버나이프 시스템(Cyberknife, Accuray Inc., Sunnyvale, CA)이 개발되었다. 사이버나이프 정위적

방사선 수술 및 치료는 1회 또는 소분할 치료에 의해 고선량을 치료하고자 하는 부위에 집중적으로 조사하기 때문에 높은 정확도를 요구한다. 방사선 수술에서는 1 mm 이내의 오차로 표적에 선량을 전달하는 것과 표적체적(Target volume)의 바깥쪽으로 급격한 선량 감소 영역에서 ±5%의 선량 정확도를 목표로 한다.<sup>2)</sup> 팬텀내 좁은 조사면 광자선의 흡수선량은 큰 조사면과 비교하여 상대적으로 조사면 반경과 깊이에 따라 더욱 급격하게 변화한다.<sup>3,4)</sup> 이것은 조사면 크기에 비해 검출기의 기하학적 크기가 상대적으로 크고 또한 이차전자의 최대 비정보보다 작은 면적의 조사면에서 측면 전자 불평형(Lateral electronic disequilibrium) 때문이다. 이와 같은 측면 전자 불평형과 급격한 선량 경사도, 그리고 광자와 전자들의 스펙트럼 변화 요인으로 인하여 소조사면

이 논문은 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. K20901000001-09E0100-00110, 2010-0017492). 이 논문은 2010년 3월 19일 접수하여 2010년 6월 3일 채택되었음.  
책임저자 : 서태석, (137-701) 서울시 서초구 반포동 505  
가톨릭대학교 의과대학 의공학교실  
Tel: 02)2258-7232, Fax: 02)2258-7506  
E-mail: suhsanta@catholic.ac.kr

광자선 선량 측정기는 기존의 일반적인 치료의 측정보다 좀 더 어렵다.

선량 반응에 대한 측정장비가 가져야 하는 조건은 안정성, 선형성, 재현성 뿐만 아니라 에너지와 선량률에 대하여 의존성이 적어야 한다. 또한 방사선수술용 소조사면 측정에 이용되는 검출기는 높은 공간 분해능(High spatial resolution)을 가져야 한다.

일반적인 방사선치료에 사용되는 표준 선량 측정용 전리함은 체적이 커서 광자선 소조사면 측정에 적합하지 않다. 검출면적이 3 mm 전리함은 사이버나이프 조사면의 크기가 12.5 mm 또는 그 이상일 때는 측정이 가능하지만 더 작은 조사면에서는 그 검출면적이 상대적으로 너무 크다.<sup>5)</sup> 조직 등가 물질이고 공간분해능이 좋아 소조사면 광자선 측정을 위해 고안된 다이아몬드 검출기는 선량률 의존성이 알려진 바 있다.<sup>6,7)</sup> 산화 금속막 반도체 전장효과 트랜지스터 검출기도 선량 반응의 선형성을 가지지만 에너지 의존성이 있고 수명에 한계가 있다. 게다가 10 mm 보다 작은 조사면에서 총산란율(Total scatter factor)을 과대 평가할 수 있다.<sup>8)</sup> New EBT 방사선크롬필름은(International Specialty Products, Wayne, NJ) 거의 조직등가이고 방사선 에너지 비의존성, 높은 공간분해능, 그리고 현상이 필요 없는 특성 때문에 세기변조방사선치료의 성능유지는 물론 소조사면을 이용하는 방사선수술 검출기로써 손색이 없다.<sup>9)</sup> 실리콘 다이오드 검출기는 검출체적의 크기가 매우 작기 때문에 정위적 방사선 수술 및 치료의 측정에 일반적으로 선택된다. 하지만 그 반응에 있어 에너지, 선량률, 그리고 방향 의존성이 있다. 실리콘이 조직에 비해 상대적으로 높은 원자번호를 가지고 있어 저에너지 광자선에 더 높은 감도를 보이고 게다가 선량률이 증가함에 따라 선량을 과대 평가한다.<sup>10,11)</sup> 그러나 같은 조건에서 상대적인 선량을 측정하는 경우에 그 영향이 작을 수 있다. 사이버나이프의 10 mm 이상의 조사면에서는 필름과 다이오드 검출기 그리고 전리함의 측정은 거의 일치 하지만 7.5 mm 이하 조사면에서는 공간분해능의 차이와 조직 비등가성으로 인해 검출기 간에 측정값의 차이가 있다.<sup>9)</sup>

하지만 몬테카를로 방법(Monte Carlo Method)은 통계적 계산법인데, 이것은 물질 중에서 광자와 전자의 물리적 과정을 시뮬레이션할 수 있다.<sup>12)</sup> 몬테카를로 코드인 GEANT4는 고에너지 입자 실험의 계산을 위해 유럽입자물리연구소(European Organization for Nuclear Research, CERN)에서 개발하였는데 최근 의학물리 분야에서 광범위하게 이용되고 있다. Perez-Calatayud (2004) 등은 근접치료에서 GEANT4와

분석계산(analytical calculation) 모델 사이의 선량분포가 일치하는 것을 보여 방사선 치료 분야의 이용에도 유용함을 보였고<sup>13)</sup> Carrier (2004) 등은 방사선 치료 영역에서 널리 이용되고 있는 다른 몬테카를로 코드와 일치함을 확인한바 있다.<sup>14)</sup>

현재 사이버나이프 시스템의 선량 계산에 직접적으로 필요한 정보인 깊이선량률(Percentage depth doses), 출력인수(Relative output factors), 가로선량분포(Profiles) 등의 측정에 다이오드 검출기 이용이 권고 되고 있는데, 본 연구에서는 다이오드 검출기를 이용한 측정값과 GEANT4를 이용한 계산값을 비교하고 정확한 선량 전달을 위한 측정 선량의 검증 도구의 한 종류로 GEANT4의 유용성을 입증하고자 한다.

## 재료 및 방법

### 1. GEANT4

GEANT4는 C++언어로 개발된 코드로 입자와 물질간의 상호작용에 대하여 미시적 현상의 전산모사가 가능하다. 그리고 고에너지 물리, 의학물리, 천체물리학 등 여러 영역에서 널리 이용되고 있으며 전자기와 강입자 상호작용을 연구에 응용할 수 있는 다양한 물리 모델을 가지고 있다.

GEANT4는 전자기 상호작용에 대하여 세 가지 형태의 모델, 즉 표준(Standard), 저에너지(Low energy), 페넬로프(Penelope) 모델들을 제공한다(<http://geant4.web.cern.ch/geant4/>). 본 연구에서는 표준모델을 사용하였다. 표준모델은 1 keV에서 100 TeV의 에너지 범위까지 적용 가능하며 레일리산란(Rayleigh scattering)을 제외한 모든 광자와 전자의 상호작용과 원자 이완(Atomic relaxations)을 포함한다. 이 모델은 단순한 운송 알고리즘을 사용하기 때문에 계산의 효율이 높은 것이 장점이다. 본 연구에서는 보다 정확한 시뮬레이션을 위해 물질 내에서 전자의 진행에 영향을 미치는 매개변수들 중 maximum step size와 range cut 값들을 모두 0.1 mm로 설정하였다. 현재 계산에 사용된 버전은 9.2.p01 버전이다.

### 2. 사이버나이프의 모형화

본 연구에서 수행한 사이버나이프에 대한 몬테카를로 계산은 두 단계로 구성된다. 첫 번째 단계는 선형가속기 헤드 구현과 제동복사 스펙트럼의 계산이다. 표적에서 생성된 광자선에 대해 표면선원거리(Source surface distance, SSD) 80 cm에 공기로 구성된 동심원 형태의 검출기를 설정하고

일차선과 산란선에 대해 에너지와 방향을 계산하였다. 콜리메이터의 산란 여부는 물 팬텀 표면에서부터 광자선이 입사되는 두번째 계산 과정에서 콜리메이터의 산란 효과를 고려하기 위함이다. 또한 5, 10, 30, 60 mm 조사면의 계산 결과, 모든 경우 동일한 광자선 에너지 분포를 얻을 수 있었다. 두 번째 단계는 첫 번째 단계에서 얻은 광자선의 스펙트럼을 이용해 5, 10, 20, 30, 50, 60 mm의 여섯 개 조사면과 물팬텀(50×50×50 cm<sup>3</sup>)을 모형화하여 축적되는 흡수선량을 계산 하였다. 본 연구에서는 모든 조사면에 대해 첫번째 단계에서 얻은 광자선 에너지분포를 동일하게 적용하였다.

본 연구에서 GEANT4를 이용하여 사이버나이프의 구조를 정확하게 구현한다는 것은 현실적으로 큰 어려움이 따른다. 이러한 단점을 보완하고 보다 신뢰성 있는 모형화를 위해 기존에 연구되었던 참고논문을 바탕으로 모형화를 시도하였다.<sup>15,16</sup> 빔 모형화의 각 구성요소들의 기하학적 구조와 물질의 정보를 Fig. 1과 같이 구현하였다. 표적 물질은 2 mm 두께와 직경을 갖는 원판모형의 텅스텐과 1.5 mm 두께와 2 mm 직경을 갖는 원판모형의 구리로 구성하였다. 일차콜리메이터(Primary collimator)는 납으로 구성 하였으며 16 mm 두께의 전자필터는 알루미늄으로 구성하였다. 이차콜리메이터(Remover collimator) 물질은 텅스텐으로 조

사면의 크기에 따라 안쪽 지름의 크기가 변하는 원뿔 형태로 구성되어 있다.

빔 모형화의 검증으로 입사 전자의 에너지가 6, 6.7 MeV 일때 표면선원거리 80 cm의 경우 60 mm 콜리메이터를 사용 하였을 때의 깊이선량율을 비교해 보았다. Araki<sup>15)</sup>의 연구에서 6.7 MeV의 평균 에너지를 가지고 3%의 반높이전폭(Full Width at Half Maximum, FWHM)을 가지는 가우시안 형태의 에너지분포를 가진 전자선이 표적과 충돌 후 물팬텀 표면에 입사하는 광자선의 평균 에너지는 약 1.71 MeV 정도였다. GEANT4 코드를 이용해 60 mm 조사면의 경우 선형 계산을 해 본 결과 평균 1.71 MeV로 Fig. 2에서 보는 바와 같이 Araki<sup>15)</sup>의 연구 결과와 일치함을 알 수 있었다. Fig. 3a는 전자의 입사 에너지가 6.7 MeV인 경우로 GEANT4 코드의 결과와 Araki<sup>15)</sup>의 측정결과가 1% 이내의 동일한 결과임을 보여주고 있다. 그러나 전자가 6.7 MeV의 에너지를 가질 때 사이버나이프의 깊이선량율을 계산 하였을 경우 본 연구에 이용된 사이버나이프 깊이선량율의 측정값과 약 3%의 차이가 발생하였다. 따라서 본 연구에서 전자선 에너지를 변화시켜 조사한 결과 깊이선량율 측정값과 잘 일치하는 에너지가 6 MeV임을 알 수 있었다. 전자선의 에너지가 6 MeV일 때 광자선의 평균에너지는 1.53 MeV가 되었

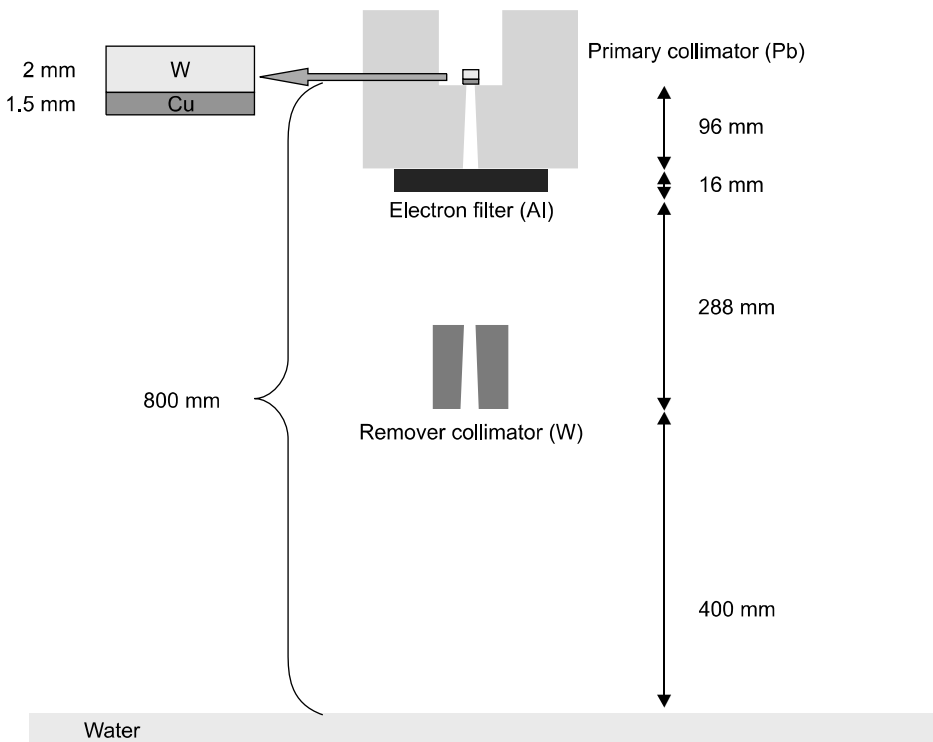


Fig. 1. Illustration of the treatment head and the component modules used in the GEANT4 simulations for the Cyberknife system (not to scale).

다. Fig. 3b는 전자의 입사에너지가 6 MeV인 경우로 본 연구에서 구현한 GEANT4결과와 Tokihiro 등<sup>16)</sup>의 측정결과 그리고 본 연구의 측정결과가 1% 이내의 오차로 동일한 결과를 나타내고 있다.

### 3. GEANT4 코드 계산

깊이선량을 계산의 경우 표면선원거리 80 cm에서 5, 10, 20, 30, 50, 60 mm의 6개 크기 조사면에서 빔 중심축에 대한 깊이선량을 계산하였다. 입사감마선의 개수를  $3 \times 10^8$ 로 세 번씩 서로 다른 무작위수(Random number)를 가지고 계산을 수행하였고 시뮬레이션간의 차이는 0.2% 이내로 수렴하는 결과를 얻었다.

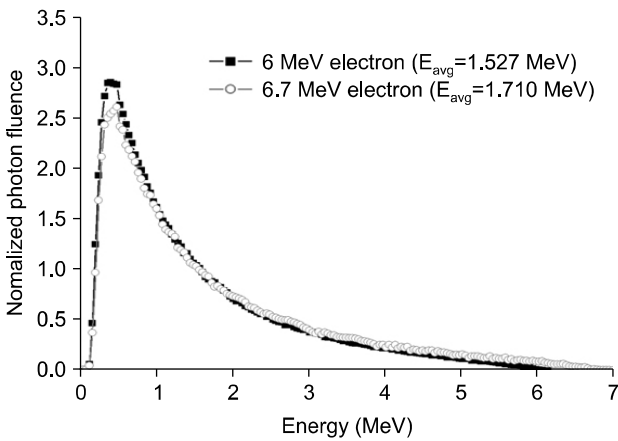


Fig. 2. Scored photon energy distribution at the phantom surface. The spectra were calculated with 60 mm collimator at 80 cm SSD. The spectra were normalized to the same integral fluence for both beams.

출력인수에 대한 계산은 5 mm부터 60 mm 조사면까지 총 12가지 조사면에 대해 축선원거리 80 cm, 최대선량 지점인 1.5 cm 깊이에서의 흡수선량을 계산하였고 다이오드 검출기를 이용한 측정값과 비교하였다. 계산 결과간의 차이는 0.2%로 수렴하는 결과를 얻었다.

가로선량분포의 경우 표면선원거리 80 cm에서 5, 10, 20, 30, 50, 60 mm의 6가지 조사면에 대해 계산이 이루어 졌고 깊이는 1.5, 10, 20 cm의 세 가지 깊이에 대해 수행되었다.

### 4. 다이오드 검출기 측정

다이오드 검출기(Type 60008, PTW-Freiburg, Germany)는 P형 실리콘 검출기를 사용하였는데 <sup>60</sup>Co부터 25 MV 에너지의 광자선까지 사용 가능하며  $1 \times 1 \text{ cm}^2$ 부터  $40 \times 40 \text{ cm}^2$  크기의 조사면까지 이용할 수 있다. 또한 다이오드 검출기의 검출부 면적은  $1 \text{ mm}^2$ 이고 두께는  $2.5 \mu\text{m}$ 로 아주 작은 크기이다. 높은 공간 분해능을 가지고 있어 정위적 방사선 수술 및 치료와 세기변조방사선치료의 선량 분석 사용에 적절하다. 또한 재현성과 안정성이 뛰어나며 사용하기 쉽고 바이어스(Bias)가 필요하지 않다. 다이오드 검출기를 이용하여 깊이선량을, 출력인수 그리고 가로선량분포 등을 측정하였다. 깊이선량을 측정은 표면선원거리 80 cm에서 5, 10, 20, 30, 50, 60 mm의 6개 크기의 조사면에 대한 중심축에서의 깊이선량을 측정하였다. 출력인수의 측정은 5 mm부터 60 mm 조사면까지 총 12가지 조사면에 대해 축선원거리 80 cm, 최대선량 지점인 1.5 cm 깊이에서 100 MU를 조사하여 측정하였다. 가로선량분포의 경우 표면선원거리 80 cm에서 5, 10, 20, 30, 50, 60 mm의 6가지 조사면

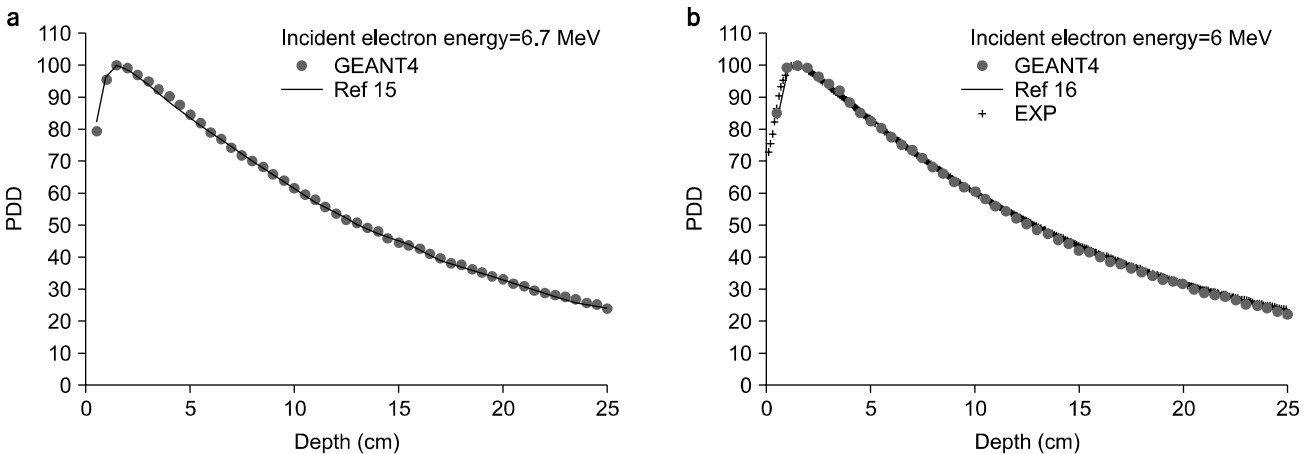
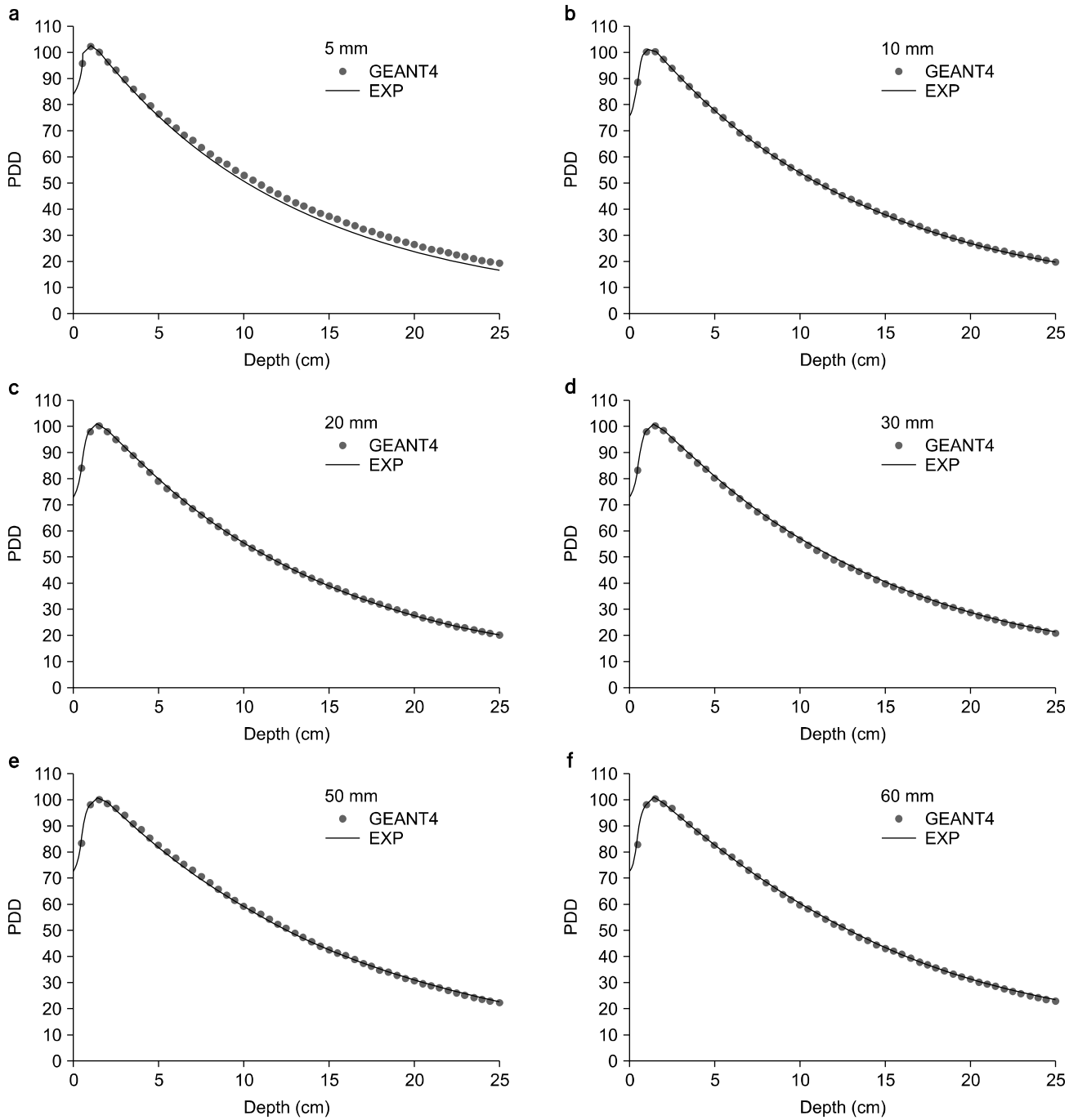


Fig. 3. Comparison between our results and references.<sup>15,16)</sup> with 6.7 MeV (a) 6 MeV, (b) electron beams. The PDD were calculated with 60 mm collimator at 80 cm SSD.



**Fig. 4.** The percentage depth dose along the central axis of Cyberknife beam in water. Results from GEANT4 (dots) and measurement (solid line) are compared in water at 80 cm SSD for field shaping cones of (a) 5 mm, (b) 10 mm, (c) 20 mm, (d) 30 mm, (e) 50 mm and (f) 60 mm diameter.

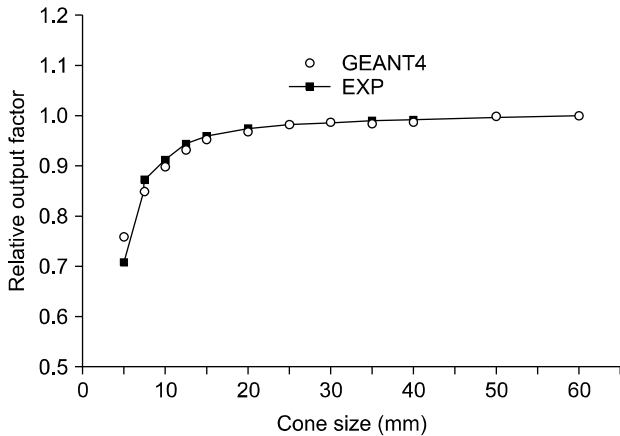


Fig. 5. Comparison of relative output factors measured with a diode detector and calculated at 1.5 cm depth in water for circular collimator sizes of 5 to 60 mm at 80 cm SAD.

에 대해 깊이 1.5, 10, 20 cm의 세 가지 깊이에서 측정하였다.

## 결 과

### 1. 깊이선량을 계산

Fig. 4는 표면선원거리(SSD) 80 cm에서 5, 10, 20, 30, 50, 60 mm의 조사면에 대한 중심축에서의 GEANT4 계산값과 다이오드 검출기(diode detector, PTW 60008)의 측정값을 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 5 mm 조사면을 제외하고 나머지 조사면들은 측정된 깊이선량율과 0.2~0.6%의 차이로 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다. 5 mm 조사면의 경우 약 평균 1.8%의 차이로 큰 조사면 보다 상대적으로 큰 차이를 보였지만 2% 미만의 결과로 임상에서 사용할 수 있는 범위의 오차를 보였다.

### 2. 출력인수 계산

축선원거리(SAD) 80 cm, 최대선량 깊이 1.5 cm에서 5 mm부터 60 mm까지 12개의 조사면에 대한 다이오드 검출기의 출력인수 측정값과 GEANT4의 출력인수 계산값의 결과는 Fig. 5와 같다. 출력인수의 경우 같은 광자선 세기에 대해 깊이 1.5 cm에서 각 조사면의 선량값들과 60 mm 조사면의 선량값의 비로 계산하였다.

20 mm 조사면부터 아주 작지만 오차가 발생하기 시작하여 조사면의 크기가 작아질수록 그 오차가 커지는 것을 볼 수 있다. Table 1은 각 조사면에 대한 다이오드 검출기의 측정값과 GEANT4의 계산값 그리고 두 값의 차이를 백분

Table 1. Relative output factor for 12 field sizes.

Field size (mm)	EXP	GEANT4	Difference (%)
5	0.709	0.758	6.91
7.5	0.871	0.849	2.53
10	0.912	0.898	1.54
12.5	0.943	0.931	1.27
15	0.959	0.952	0.73
20	0.974	0.968	0.62
25	0.981	0.982	0.1
30	0.985	0.987	0.2
35	0.988	0.983	0.51
40	0.991	0.988	0.3
50	0.996	0.998	0.2
60	1	1	-

율로 나타내었다. 15 mm 조사면 크기 이상에서는 1% 미만의 차이로 일치하는 것을 볼 수 있지만 12.5 mm 조사면은 1.27%, 10 mm 조사면은 1.54%, 7.5 mm 조사면은 2.53%로 조사면의 크기가 작아질수록 오차 정도가 점차 증가하는 것을 볼 수 있지만 임상적으로 허용범위 안의 오차이다. 하지만 유효한 치료를 위한 선량 전달(dose delivery)의 정확도가 5% 이내여야 하는데 사이버나이프 시스템의 가장 작은 조사면인 5 mm에서는 6.91%로 그 허용오차 범위를 초과하는 것을 볼 수 있다. 이것은 극도의 소조사면에서 측면 전자 불평형에 따른 결과이다.

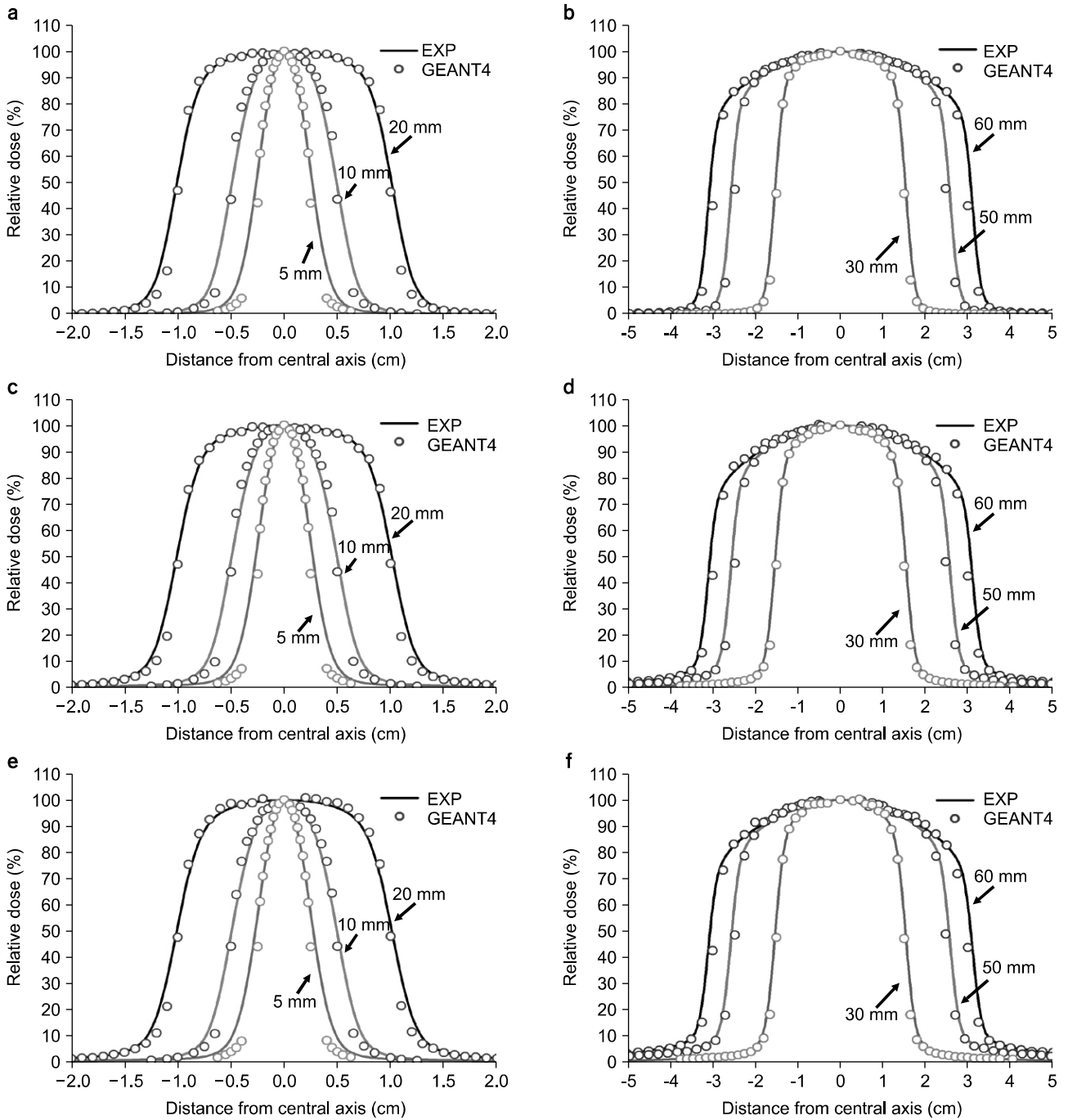
### 3. 가로선량분포 계산

Fig. 6은 표면선원거리(SSD) 80 cm, 물팬텀의 깊이 1.5, 10, 20 cm에서 5, 10, 20, 30, 50, 60 mm에 대한 측정값과 계산값을 비교한 것이다. a, b는 1.5 cm 깊이, c, d는 10 cm, e, f는 20 cm 깊이에서 가로선량분포를 비교한 것인데 그림에서 보는 바와 같이 20, 30, 50, 60 mm의 조사면 모두 실험결과와의 차이가 평균 오차율 1.5% 이내의 결과를 얻었고 전자불평형이 형성되지 않는 5 mm와 10 mm 조사면의 평균 오차율은 3.5%와 2.8%로 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

## 고 찰

### 1. 소조사면의 깊이선량을

조사면의 크기가 감소할수록 계산된 깊이선량율과 측정된 값 사이의 오차는 증가한다. 특히 5 mm 조사면의 경우 그 오차는 상당하다. 이것은 측면 전자 불평형의 정도가 증가함에 따른 결과이다. 그러한 조건하에서 비록 측정은 정



**Fig. 6.** Comparison of measured (solid line) and GEANT4 (dots) calculated dose profiles for 5, 10, 20, 30, 50 and 60 mm cone. The profiles are obtained at 1.5 cm (top line), 10 cm (middle line), 20 cm (bottom line) depth in water at 80 cm SSD.

확한 흡수선량을 측정할 수 없지만 몬테카를로 방법은 가능하다. 측정은 Spencer-Attix cavity theory를 적용하여 측정된 값으로부터 흡수 선량을 결정한다. 측정하는 위치에서 반드시 전자평형상태여야만 한다. 즉, 전자불평형 영역에

서의 측정값은 신뢰할 수 없다. 하지만 몬테카를로 방법은 그러한 영역에서도 정확한 선량을 계산할 수 있다. 그 이유는 단위질량당(unit mass) 흡수된 에너지를 직접적으로 계산하므로 전자평형은 필요하지 않다.

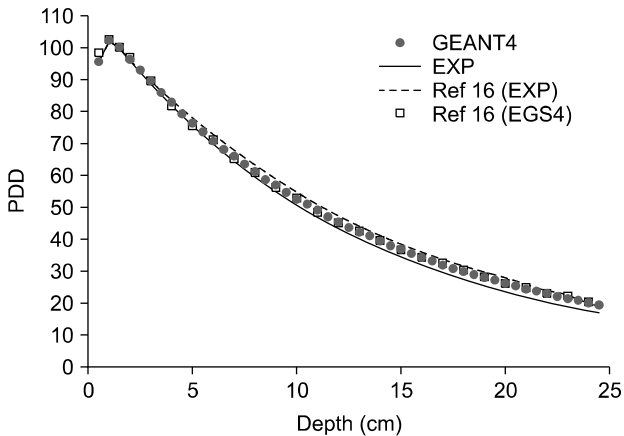


Fig. 7. Comparison between our study and referens.<sup>16)</sup> The PDD were calculated with 5 mm collimator at 80 cm SSD.

암 치료를 위한 방사선치료에서 유효한 치료를 위한 선량 전달(dose delivery)면에서 약 5% 이내의 정확도가 필요하다.<sup>17,18)</sup> 그렇지만 본 연구의 결과에서 5mm 조사면에서 측정 최대 오차는 5%이상으로서 임상에서 허용하는 범위를 초과하는 것으로 나타났다. 이 오차는 정확한 선량 전달면에서 허용될 수 없다. Fig. 7은 5 mm의 소조사면 경우 본 연구의 다이오드 검출기의 측정 및 GEANT4 코드를 이용한 계산과 Tokihiro 등<sup>16)</sup>의 연구에서 다이아몬드 검출기의 측정 및 EGS4 코드를 사용한 계산의 비교를 나타낸 그림이다. 이 경우 GEANT4와 EGS4 코드의 계산결과는 1% 미만의 오차로 동일한 결과를 얻었지만 두 실험의 결과는 서로 다른 양상을 보였다. Tokihiro 등<sup>16)</sup>의 연구에서 다이아몬드 검출기의 측정 결과가 3 cm 이후 몬테카를로 계산 값들 보다 높은 선량 값을 보였으며 실리콘 다이오드를 사용한 본 연구 결과는 10 cm 이후부터 몬테카를로 계산 값들 보다 측정된 선량값이 낮게 나타났다.

## 2. 모형화 검증

실험상황과 완벽히 동일한 모형을 구현하기는 현실적으로 불가능하다. 본 연구에서 사용된 모형화는 최소의 변수들(타겟 물질, 크기 및 사이버나이프의 구조 등)을 사용하고 기존 연구 논문들을 바탕으로 이루어 졌다. 예상할 수 있는 모형화의 오차로는 정확한 구조 묘사 및 사이버나이프 내부의 모든 산란 효과 고려의 부재를 생각할 수 있다. 이러한 점을 상세히 고려하지 않았지만 선량계산에서의 영향은 비교적 적었다. 5 mm의 가장 작은 조사면의 경우에 다른 조사면들 보다 계산과 측정의 차이가 높았는데 측정값의 불확정성으로 인한 결과로 생각된다.

## 결론

본 연구에서는 소조사면 사이버나이프 측정을 위한 선량 분포 계산을 GEANT4 코드를 사용하여 다이오드 측정 결과와 비교하였다. 다이오드와의 측정 비교 결과 5 mm 조사면을 제외한 나머지 조사면들에 대해 오차 0.2~0.6% 내의 만족할만한 결과를 얻었다. 향후 소조사면에서 정확성을 가지는 Gafchromic 필름 등 다른 측정기와 비교를 통하여 그 정확성이 평가된다면 이 GEANT4의 선량분포 계산 방법은 소조사면을 이용하는 사이버나이프 방사선치료에서 정확한 선량 전달을 위한 측정 선량의 검증 도구의 한 종류로 사용할 수 있을 것으로 예상된다.

## 참고 문헌

1. Adler JR, Murphy MJ, Chang SD, Hancock SL: Image-guided robotic radiosurgery. *Neurosurgery* 44:1299-1307 (1999)
2. Podgorsak E, Pike G, Pla M, Olivier A, Souhami L: Radiosurgery with photon beams: physical aspects and adequacy of linear accelerators. *Radiother Oncol* 17:349-358 (1990)
3. Biggs P, Ling C: Electrons as the cause of the observed dmax shift with field size in high energy photon beams. *Med Phys* 6:291-295 (1979)
4. Sixel K, Podgorsak E: Buildup region of high-energy x-ray beams in radiosurgery. *Med Phys* 20:761-764 (1993)
5. Task Group 42: Radiation Therapy Committee, American Association of Physicists in Medicine : Stereotactic Radiosurgery. AAPM Report No. 54, American Institute of Physics, Woodbury, NY (1995)
6. Rustgi SN, Frye DM: Dosimetric characterization of radiosurgical beams with a diamond detector. *Med Phys* 22:2117-2121 (1995)
7. Hoban PW, Heydarian M, Beckham WA, Beddoe AH: Dose rate dependence of a PTW diamond detector in the dosimetry of a 6 MV photon beam. *Phys Med Biol* 39:1219-1229 (1994)
8. Francescon P, Cora S, Cavedon C, Scalchi P, Reccanello S, Colombo F: Use of a new type radiochromic film, a new parallel-plate micro-chamber, MOSFETS, and TLD 800 microcubes in the dosimetry of small beams. *Med Phys* 25: 503-511 (1998)
9. Ellen EW, George MD: Evaluation of GAFCHROMIC<sup>®</sup> EBT film for CyberKnife<sup>®</sup> dosimetry. *Med Phys* 34:1967-1974 (2007)
10. Rice RK, Hansen JL, Svensson GK, Siddon RL: Measurement of dose distributions in small beams of 6 MV x rays. *Phys Med Biol* 32:1087-1099 (1987)
11. Beddar AS, Mason DJ, O'Brien PF: Absorbed dose perturbation caused by diodes for small field photon dosimetry. *Med*



- Phys 21:1075-1079 (1994)
12. DeMarco J, Chetty I, Solberg T: A Monte Carlo tutorial and the application for radiotherapy treatment planning. Med Dosim 27:43-50 (2002)
  13. Pérez-Calatayud J, Granero D, Ballester F, Puchades V, Casal E: Monte Carlo dosimetric characterization of the Cs-137 selectron/LDR source: evaluation of applicator attenuation and superposition approximation effects. Med Phys 31: 493-499 (2004)
  14. Carrier J, Archambault L, Beaulieu L: Validation of GEANT4, an object-oriented Monte Carlo toolkit, for simulations in medical physics. Med Phys 31:484-492 (2004)
  15. Araki F: Monte Carlo study of a Cyberknife stereotactic radio-surgery system. Med Phys 33:2955-2963 (2006)
  16. Tokihiro Y, Teruki T, Satoshi M, et al: Monte Carlo Calculation of Depth Doses for Small Field of Cyberknife. Radiat Med 20:305-310 (2002)
  17. ICRU Report 24: In Determination of Absorbed Dose in a Patient Irradiated by Beams of X or Gamma Rays in Radiotherapy Procedures. International Commission on Radiological Units and Measurements, Washington, DC (1976)
  18. ICRU Report 42: In Use of Computers in External Beam Radiotherapy Procedures with High Energy Photons and Electrons, International Commission on Radiological Units and Measurements, Washington, DC (1988)

## Monte Carlo Study Using GEANT4 of Cyberknife Stereotactic Radiosurgery System

Chung Il Lee\*<sup>†</sup>, Jae Won Shin<sup>§</sup>, Hun Joo Shin<sup>||</sup>, Jae Yong Jung\*<sup>†</sup>, Yon Lae Kim\*<sup>||</sup>,  
Jeong Hwan Min\*<sup>#</sup>, Seung Woo Hong<sup>§</sup>, Su-Mi Chung<sup>†</sup>, Won Gyun Jung\*<sup>†</sup>, Tae Suk Suh\*<sup>†</sup>

\*Department of Biomedical Engineering, School of Medicine, <sup>†</sup>Research Institute of Biomedical Engineering,  
<sup>†</sup>Department of Radiation Oncology, St. Mary's Hospital, The Catholic University of Korea,  
<sup>§</sup>Department of Physics, Sungkyunkwan University, <sup>||</sup>Seoul Wooridul Spine Hospital, Cyberknife Clinic, Seoul,  
<sup>||</sup>Department of Radiologic Technology, Choonhae College of Health Sciences, Ulsan,  
<sup>#</sup>Department of Radiologic Technology, Shingu University, Seongnam, Korea

Cyberknife with small field size is more difficult and complex for dosimetry compared with conventional radiotherapy due to electronic disequilibrium, steep dose gradients and spectrum change of photons and electrons. The purpose of this study demonstrate the usefulness of Geant4 as verification tool of measurement dose for delivering accurate dose by comparing measurement data using the diode detector with results by Geant4 simulation. The development of Monte Carlo Model for Cyberknife was done through the two-step process. In the first step, the treatment head was simulated and Bremsstrahlung spectrum was calculated. Secondly, percent depth dose (PDD) was calculated for six cones with different size, i.e., 5 mm, 10 mm, 20 mm, 30 mm, 50 mm and 60 mm in the model of water phantom. The relative output factor was calculated about 12 fields from 5 mm to 60 mm and then it compared with measurement data by the diode detector. The beam profiles and depth profiles were calculated about different six cones and about each depth of 1.5 cm, 10 cm and 20 cm, respectively. The results about PDD were shown the error the less than 2% which means acceptable in clinical setting. For comparison of relative output factors, the difference was less than 3% in the cones lager than 7.5 mm. However, there was the difference of 6.91% in the 5 mm cone. Although beam profiles were shown the difference less than 2% in the cones larger than 20 mm, there was the error less than 3.5% in the cones smaller than 20 mm. From results, we could demonstrate the usefulness of Geant4 as dose verification tool.

**Key Words:** Cyberknife, Small field, GEANT4, Electron disequilibrium