

뇌정위적 방사선수술 시 콜리메이터 크기 변화에 따른 검출기 의존성 평가

건국대학교병원 방사선종양학과, ¹춘해대학 방사선과

배용기 · 방동완 · 박병문 · 강민영 · 김연래¹

목 적: 뇌정위적 방사선수술시 이용되는 콜리메이터의 크기 변화에 따른 검출기 의존성을 평가하고자 한다.

대상 및 방법: 본 실험을 위해 6 MV 광자선(CL21EX, Varian, Palo Alto), 이온전리함(CC01, CC13, Wellhofer, Germany), 정위적 다이오드검출기(SFD, Wellhofer, Germany)를 사용하였다. 심부선량백분율(PDD)의 검출기 의존성을 평가하기 위해 Brain Lab사의 콜리메이터(ϕ 5, 10, 20, 30 mm)와 10×10 cm²에서 측정, 비교하였다. 선량측면도(dose profile)는 SAD 100 cm에서 콜리메이터(ϕ 10, 30 mm)와 10×10 cm²를 측정하여 반치폭(FWHM; full width half maximum)과 반음영(20~80%)을 비교하였다. 선량출력인자의 측정을 위해 선량최대깊이에서 콜리메이터(ϕ 5, 10, 20, 30 mm)의 출력을 측정하였으며, 정방형 조사면(10×10 cm²)의 출력 값을 기준으로 정규화 하였다.

결 과: 검출기에 따른 PDD의 영향을 평가하기 위해 PDD_{20,10} (PDD₂₀/PDD₁₀)을 비교하였다. 콜리메이터 ϕ 5 mm에서는 SFD 51.3%, CC01 50%, CC13 58%로 측정되었고, 다른 콜리메이터에서는 최대 1%의 측정값 차이를 보였다. 선량측면도 평가에서 FWHM은 0.1~0.4 mm의 차이를 보였다. 반음영은 ϕ 10 mm에서 SFD 3.2 mm, CC01 7.1 mm, CC13 9.4 mm로 측정되었고, ϕ 30 mm에서 SFD 4 mm, CC01 6.7 mm, CC13 12.4 mm로 측정되었다. 10×10 cm²에서는 SFD 6.6 mm, CC01 8.6 mm, CC13 12.2 mm로 측정되었다. 선량출력인자는 ϕ 20 mm 이상에서 검출기별 최대 2%의 차이를 보였다. ϕ 5 mm에서는 SFD 85%, CC01 61%, CC13 24%로 측정되었고, ϕ 10 mm에서는 SFD 94%, CC01 85%, CC13 71%로 측정되었다. 실험결과 PDD는 CC13이 조사면에 충분히 포함되지 않은 ϕ 5 mm에서 최대 16%의 차이를 보였고, 선량측면도의 FWHM은 검출기별 최대 0.4 mm의 차이를 보였다. 선량측면도의 반음영은 ϕ 30 mm에서 최대 8.4 mm 차이를 보였고, 출력선량인자는 ϕ 5 mm에서 최대 72%의 차이를 나타냈다.

결 론: 뇌정위적 방사선수술을 시행하는데 있어 정확한 선량을 측정할 수 있는 검출기를 선택하는 것은 무엇보다 중요하다. 따라서 본 실험에서는 측정을 통한 작은 원형조사면 선량계측에서 정위적 다이오드 검출기가 이온전리함에 비해 선량의 특성을 평가하는데 있어 유용함을 알 수 있었다.

핵심용어: 뇌 정위적 방사선 수술, 이온 전리함, 정위적 다이오드 검출기

서 론

뇌정위적 방사선수술은 선형가속기를 이용하여 치료목적 부위에 고선량을 조사하는 정교한 치료방법으로써 주로 뇌종양의 치료를 위해 널리 이용되고 있다. 선형가속기를 기반으로 하는 뇌정위적 방사선수술은 직경 3~40 mm 크기 이내의 전용 콜리메이터가 이용되며, 그에 따른 조사면 내의 정확한 선량분포와 선량계측은 치료를 위한 중요한 과정이다. 따라서 소조사면 콜리메이터의 선량특성을 정확하게 측정하기 위해 높은 공간분해능과 정확한 dose mapping, 반음영 영역에 대한 정확한 선량계측을 할 수 있는 적절한 검출

기의 선택이 필수적이다. 또한 이 검출기는 소조사면에서 선량계측의 오류를 나타낼 수 있는 측면 전자평형의 부족효과를 최소화 할 수 있어야 한다.

일반적으로 소조사면의 선량특성을 측정하기 위해서는 열형광선량계(TLD), 다이오드 검출기(diode detector), 이온전리함(ionization chamber), 다이아몬드 검출기(diamond detector), 필름 등이 사용되며, 각 검출기의 소조사면 선량계측에 있어 장점 및 단점은 여러 논문에서 논의 되었다.¹⁻³⁾

Bjarngard 등⁴⁾은 소조사면의 선량계측을 위해서는 조사면 직경의 절반 보다 작은 크기의 검출기 사용을 제안하였으며, Surendra 등⁵⁾과 Heydarian 등⁶⁾은 다이오드 검출기 및 이온전리함 보다 조직등가물질에 가까운(Z=6) 다이아몬드 검출기가 정확한 선량계측을 할 수 있다고 제안하였다. 하지만 다이아몬드 검출기는 선량률 의존성이 높고 검출기 비용이 매

이 논문은 2008년 4월 2일 접수하여 2008년 6월 25일 채택되었음.
책임저자 : 배용기, 건국대학교병원 방사선종양학과
Tel: 02)2030-5394, Fax: 02)2030-5383
E-mail: 22477486@naver.com

우 비싸다는 것이 단점으로 나타났다. 그리고 Dawson 등⁷⁾은 실험을 통하여 이온전리함으로 소조사면의 20~80%의 반응영역을 측정하기 위해서는 필름이나 다이오드 검출기와는 다르게 보정계수의 적용이 필요하다고 설명하고 있다.

따라서 본 실험에서는 여러 가지 검출기를 이용하여 뇌정위적 방사선수술 시 사용한 콜리메이터의 크기 변화에 따른 검출기 의존성을 평가하고자 하였다. 평가를 위한 검출기는 심부선량백분율(Percentage Depth Dose), 출력선량인자(Output factor), 선량측면도(Beam profile)를 측정하기 위하여 높은 공간분해능을 제공하기 위한 소조사면 전용 이온전리함(SDF)와 소조사면 전용 이온전리함(CC01), 표준 이온전리함(CC13) 등으로 측정하여 비교 평가 하였다.

대상 및 방법

본 실험은 선형가속기(CL21EX, Varian, Palo Alto, US)를 이용한 6 MV 광자선과 뇌정위적 방사선수술 장비(Brain Lab, Germany) 전용인 콜리메이터 직경 5, 10, 20, 30 mm을 사용하였다. 선량의 정량적인 값은 물 팬텀(Blue phantom,

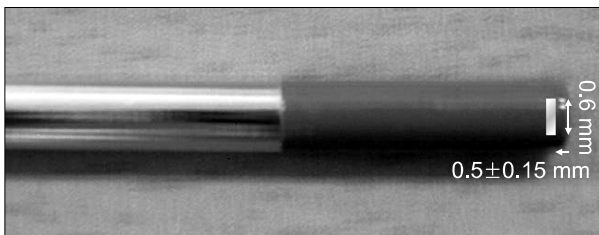


Fig. 1. Stereotactic diode detector. It has effective measurement point 0.5 ± 0.15 mm and diameter of active area 0.6 mm.

Wellhofer, Germany), 진류계(Dose1, Wellhofer, Germany), 정위적 다이오드 검출기(SFD, Wellhofer, Germany), 이온전리함(CC01, CC13, Wellhofer, Germany)을 이용하여 측정하였다. 정위적 다이오드 검출기는 p형 실리콘 검출기 칩을 사용하였고, 유효 측정점은 0.5 ± 0.15 mm, 칩 크기는 0.95/0.5 mm (side, thickness), active area는 원형, active area의 지름은 0.6 mm, active volume 두께는 0.06 mm이다(Fig. 1). 이온전리함의 Cavity volume은 CC01, CC13이 각각 0.01, 0.13 cm^3 , Cavity radius는 1, 3 mm이다.

1. 심부선량백분율(Percentage depth dose) 측정

심부선량백분율 측정은 선원-표면간 거리(SSD)를 100 cm으로 하고, 6 MV 광자선을 이용하였다. 10×10 cm^2 정방형 조사면과 뇌정위적 방사선수술 전용 콜리메이터 직경 5, 10, 20, 30 mm을 이용한 소조사면에서 정위적 다이오드 검출기, 이온전리함(CC01, CC13)을 사용하여 측정점 1.5, 5, 10, 20, 30 cm 깊이에서 측정값을 구하였다. 심부선량백분율은 각각의 검출기를 통해 측정된 값들의 선질을 비교하기 위한 방법인 심부선량백분율 값 10 cm 깊이와 20 cm 깊이에서의 선량비($\text{PDD}_{20}/\text{PDD}_{10}$)를 이용하였다. 측정은 3회 반복 측정하여 평균값을 구하였다(Fig. 2A).

2. 선량출력인자(Output factor) 측정

선량출력인자는 선원-표면간 거리를 100 cm으로 하고, 6 MV 광자선을 이용하였다. 각각의 검출기를 이용하여 6 MV 광자선의 최대선량 지점인 1.5 cm 깊이에서 측정값을 구하였다. 각 검출기에 대한 선량출력인자를 분석하기 위하여 측정값은 10×10 cm^2 정방형 조사면에 정규화(Normalize) 하였다(Fig. 2A).

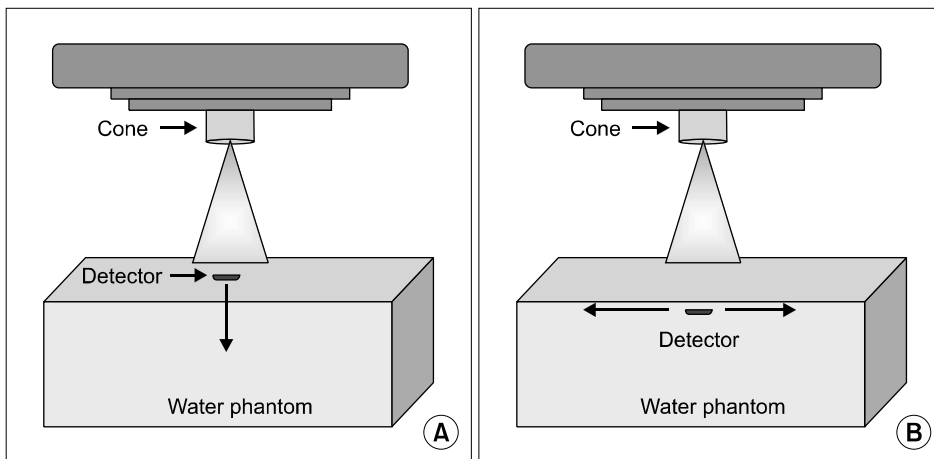


Fig. 2. (A) The schematic of PDD and output factor. (B) The schematic of beam profile.

3. 선량측면도(Beam profile) 측정

선량측면도는 선원-표면간 거리를 100 cm으로 하고, 6 MV 광자선을 이용하였다. 10×10 cm² 정방형 조사면과 뇌정위적 방사선수술 전용 콜리메이터 직경 10, 30 mm를 이용한 소조사면에서 각각의 검출기를 이용하여 측정값을 구하였다. 측정은 5 cm 깊이에서 검출기를 횡단면 방향으로 이동시키며 측정하였다. 검출기는 조사면 내에서 1 mm 간격으로 이동하였고, 반응영역 영역인 조사면 가장자리에서는 정확한 측정값을 얻기 위하여 0.5 mm 간격으로 이동하였다(Fig. 2B). 선량측면도는 측정된 값에서 공간분해능을 나타내는 지포인 반치폭(Full Width Half Maximum)을 얻어 각 검출기에 대한 공간분해능을 비교하였다. 각 검출기에서 반응영역(20~

80%)에 대한 검출능력을 비교하기 위하여 선량측면도 곡선에서 반응영역 크기를 측정하여 값을 비교하였다.

결 과

각 검출기의 심부선량백분을 영향을 평가하기 위한 심부선량백분을 측정에서는 10 cm 깊이와 20 cm 깊이에서의 선량비(PDD₂₀/PDD₁₀)를 비교한 결과, 직경 5 mm 콜리메이터에서 CC01 50%, CC13 58%, SFD 51.3% 로 측정되었고, SFD를 기준으로 평가했을 때 CC13은 13%의 과대평가를 나타냈다. 이것은 검출기 체적이 조사면에 충분히 포함되지 않았기 때문이다. 직경 5 mm 콜리메이터를 제외한 다른 직경의 콜리메이터 조사면에서는 검출기 별 차이가 최대 1% 만을 나타냈다(Table 1).

Table 1. PDD was measured at SSD 100 cm, 6 MV and field size 10×10 cm² from individual detectors in SRS collimator φ 5, 10, 20, 30 mm. PDD at 10, 20 cm was measured for a comparison of beam quality

	CC01	CC13	SFD
5 mm	0.5	0.58	0.5
10 mm	0.54	0.54	0.53
20 mm	0.54	0.54	0.53
30 mm	0.54	0.54	0.53
10×10 cm ²	0.58	0.58	0.58

Table 2. Output factor was measured with maximum depth at 1.5 cm. For analyzing output factor about individual detectors, the data normalized at field size 10×10 cm²

	CC01	CC13	SFD
5 mm	0.61	0.24	0.85
10 mm	0.85	0.71	0.94
20 mm	0.95	0.91	0.94
30 mm	0.974	0.96	0.97
10×10 cm ²	1	1	1

10×10 cm² 정방형 조사면에 정규화한 선량출력인자 측정에서는 그 값을 비교한 결과, 직경 5 mm 콜리메이터에서 CC01 61%, CC13 24%, SFD 85%를 나타냈고, 직경 10 mm 콜리메이터에서 CC01 85%, CC13 71%, SFD 94%를 나타냈다. 이는 SFD를 기준으로 평가했을 때 직경 5 mm 콜리메이터에서 CC01 28%, CC13 72%를 보였고, 직경 10 mm 콜리메이터에서 CC01 9.6%, CC13 25%의 과소평가를 나타냈다(Table 2).

선량측면도 측정에서는 반치폭(FWHM)을 측정한 결과, 직경 10 mm 콜리메이터에서 CC01 10.3 mm, CC13 10.2 mm, SFD 10 mm로 측정되었고, 검출기 별 최대 3%의 차이 만을 보였다. 직경 30 mm 콜리메이터에서는 세 검출기 모두 30.3 mm를 나타냈다(Table 3).

반응영역은 직경 10 mm 콜리메이터에서 CC01 7.1 mm, CC13 9.4 mm, SFD 3.2 mm로 측정되었고, 직경 30 mm 콜리메이터에서 CC01 6.7 mm, CC13 11.4 mm, SFD 4 mm로 측정되었다. 이것은 SFD를 기준으로 평가했을 때 직경 10 mm 콜리메이터에서 CC01 122%, CC13 194%를 보였고, 직경 30 mm 콜리메이터에서 CC01 68%, CC13 185%의 반응영역 크기 증가를 나타냈다(Table 3).

Table 3. Beam profile was measured at SSD 100 cm, 6 MV and field size 10×10 cm² from individual detectors in SRS collimator φ 10, 30 mm. The FWHM and the penumbra width (20~80%) were measured for a comparison of the spatial resolution and penumbra region in individual detectors (Unit: mm)

	CC01		CC13		SFD	
	FWHM	20~80%	FWHM	20~80%	FWHM	20~80%
10 mm	10.3	7.1	10.2	9.4	10	3.2
20 mm	30.3	6.7	30.3	11.4	30.3	4
10×10 cm ²	100.9	8.6	101.3	12.2	100.9	6.6

고안 및 결론

뇌정위적 방사선수술은 병변에 최대한 선량을 조사하고 병변 주위의 정상조직이나 장기는 최대한 보호하기 위하여 소조사면을 사용하고, 일회에 고선량의 방사선이 환자에게 조사되므로 치료에 대한 선량검증은 중요하다 할 수 있다. 따라서 선량검증을 위한 선량평가는 검출기를 사용하여 심부선량백분율 또는 조직최대선량비(Tissue Maximum Ratio), 선량측면도, 선량출력계수가 측정된다.⁸⁾ 하지만 소조사면의 직경이 일차전자의 최대비정 또는 최대선량 지점 보다 작을 경우 빔의 중심축 전자에너지 스펙트럼이 최대비정보다 가까운 거리에서의 전자에게는 기여 받지 못해 측면 전자평형 결여가 발생되어 정확한 선량검증이 어렵다.⁹⁾ 이러한 문제점 때문에 검출기 크기는 가능한 작아야 하고 고해상력을 가지고 있어야 한다.

Duggan 등³⁾은 실험을 통해 4 MV, 5 mm 직경 조사면에서 반치폭을 기준으로 하였을 때 선량측면도 차이가 1% 미만으로 나타나는 곳이 조사면의 30% 뿐이고 조사면 대부분이 반응영역이라고 하였다. 이에 정확한 선량계측을 위하여 보다 소형이고 고해상력의 검출기 사용을 권고하였다. 이와 유사한 결과로써 본 실험에서는 직경 10 mm 조사면에서 반응영역을 측정할 결과 CC01은 조사면의 71%, CC13은 94%, SFD는 32%가 반응영역으로 나타났다. 이것은 SFD가 소조사면에 이온전리함 보다 정확한 선량계측을 할 수 있다는 것을 나타낸다. 일반적으로 작은 조사면의 선량계측을 위하여 이온전리함, TLD, 고체상태 검출기, 필름 등이 이용되어 왔다. 하지만 필름은 현상과정을 통한 오류 및 에너지 의존성, 필름 고유의 문제점을 나타내었고, 열형광검출기는 작은 크기가 장점으로 나타났지만 선량재현성이 3% 미만인 것이 단점으로 지적되었다. 이온전리함의 경우 가파른 선량기울기 (steep dose gradient)와 측면 전자평형의 결여가 소조사면에서 나타날 수 있다는 것으로 나타났다.¹⁻³⁾

본 실험을 통한 측정에서는 소조사면의 선량계측에 있어 중요한 자 중 하나인 심부선량백분율의 경우 검출기가 조사면에 모두 포함이 되지 않을 때를 제외하고는 검출기별 차이가 1% 내외로 큰 차이를 보이지 않았다. 선량측면도의 반응

영 측정의 경우 Dawson 등⁷⁾은 이온전리함에 보정계수(측정된 반응영역-이온 전리함 지름 50%)를 적용시키면 다이오드 검출기와 비슷한 결과 값을 얻는다고 하였다. 하지만 본 실험결과에서 SFD는 10 mm 콜리메이터에서 3.2 mm로 보정계수를 적용한 CC01 6.1 mm, CC13 6.4 mm 보다 정확한 검출능력을 나타냈다. 또한 SFD는 반치폭과 선량출력인자 모두에서 다른 검출기와 비교하였을 때 측정값에서 우수한 검출능력을 보였다. 이것은 소조사면에서 선량계측의 오류를 범할 수 있는 요인들을 최소화 할 수 있는 조건이며, SFD가 이온전리함에 비하여 보다 정확한 선량계측을 할 수 있는 검출기라고 사료된다.

참고문헌

1. Mckerracher C, Thwaites DI: Assessment of new small-field detectors against standard-field detectors for practical stereotactic beam data acquisition. *Phys Med Biol* 1999;44: 2143-2160
2. Francescon P, Cora C, Cavedon, Scalchi S, Reccanello, Colombo: Use of a new type radiochromic film, a new parallel-plate micro-chamber, MOSFET and TLD 800 microcubes in the dosimetry of small beam. *Med Phys* 1998; 25:503-511
3. Duggan DM, Coffey CW: Small photon field dosimetry for stereotactic radiosurgery. *Med Dosim* 1998;23:153-159
4. Bjarngard BE, Tsai JS, Rice RK: Dose on the central axis of narrow 6 MV X-ray beam. *Med Phys* 1990;17:794-799
5. Surendra N, Rustgi, Douglas M. DFrye: Dosimetric characterization of radiosurgical beams with a diamond detector. *Med Phys* 1995;22:2117-2121
6. Heydarian M, Hoban PW, Beddoe AK: A comparison of dosimetry technique in stereotactic radiosurgery. *Phys Med Biol* 1996;41
7. Dawson DJ, Schroeder NJ, Hoya JD: Penumbra measurements in water for high-energy x-ray. *Med Phys* 1986;13: 101-104
8. Khan FM: The physics of radiation therapy. 3rd ed. Maryland: Williams & Wilkin, 2003;515-517
9. Andrew W, Zwicker RD, Kalend AM, Zheng Z: Comments on the dose measurement for a narrow beam in radiosurgery. *Med Phys* 1993;20:777-779

Abstract

Evaluation of Detector Dependency on Collimator in SRS: Compared Detectors; CC01, CC13, SFD

Yong Ki Bae, Dong Wan Bang, Byung Moon Park, Min Yeong Kang, Yeon Rye Kim¹

Department of Radiation Oncology, Kunkuk University Hospital, Seoul,

¹Department of Radiologic Technology, Choonhae College of Health Sciences, Ulsan, Korea

Purpose: To evaluate the detector dependency in the various collimator size for Stereotactic Radiosurgery (SRS).

Materials and Methods: This study was performed with 6 MV photon beam (Varian 21EX, Varian, US) and the measurement detectors are used by ion chamber CC01, CC13 (Wellhofer, Germany) and stereotactic diode detector (SFD, Wellhofer, Germany). SRS collimator size was used by \varnothing 5, 10, 20, 30 mm (Brain Lab, Germany). Percentage depth dose (PDD) was measured at SSD 100 cm and field size 10×10 cm from individual detectors. Output factor was measured by using same setup of PDD and with maximum dose depth. Data was normalized at field size 10×10 cm. Beam profile was measured at SSD 100 cm in SRS collimator \varnothing 10, 30 mm and field 10×10 cm and a comparison of FWHM (full width half maximum), penumbra width (20~80%).

Results: The CC13 detector was overestimated 16% than other detectors from the PDD in the 5 mm collimator. Output factors were underestimated CC01 28%, CC13 72% in the 5 mm collimator and CC01 9.6%, CC13 25% in the 10 mm collimator than the SFD. Maximum difference was 3% at the FWHM of the dose profile in the 10 mm collimator and difference of the 30 mm collimator was 0% at the FWHM. Penumbra width was increased CC01 122%, CC13 194% in the 10 mm collimator and CC01 68%, CC13 185% in the 30 mm collimator than the SFD.

Conclusion: It is very important for accurate dosimetry to select a detector in small field. The SFD was considered with the most accurate dosimeter for small collimator dosimetry in this study.

Key words: stereotactic radiosurgery (SRS), ion chamber, stereotactic diode detector (SFD)