

## Feasibility Study of the microDiamond Detector for Measurement of Small Field Photon Beam

Chang Yeol Lee\*, Woo Chul Kim\*, Hun Jeong Kim\*, Young Hoon Ji<sup>†</sup>,  
Kum Bae Kim<sup>†</sup>, Sang Hoon Lee<sup>†</sup>, Chul Kee Min<sup>§</sup>, Gwang Hwan Jo<sup>§</sup>,  
Dong Oh Shin<sup>||</sup>, Seong Hoon Kim<sup>||</sup>, Hyun Do Huh\*

\*Department of Radiation Oncology, College of Medicine, Inha University, Incheon,

<sup>†</sup>Research Institute of Radiological and Medical Sciences, Korea Institute of Radiological and Medical Sciences, Seoul, <sup>‡</sup>Department of Radiation Oncology, College of Medicine, Kwandong University, Gangneung,

<sup>§</sup>Department of Radiation Oncology, College of Medicine, Soonchunhyang University, Cheonan,

<sup>||</sup>Department of Radiation Oncology, College of Medicine, Kyunghee University, Seoul,

<sup>¶</sup>Department of Radiation Oncology, College of Medicine, Hanyang University, Seoul, Korea

The dosimetry of very small fields is challenging for several reasons including a lack of lateral electronic equilibrium, large dose gradients, and the size of detector in respect to the field size. The objective of this work was to evaluate the suitability of a new commercial synthetic diamond detector, namely, the PTW 60019 microDiamond, for the small field dosimetry in cyberknife photon beams of 6 different collimator size (from 5 mm to 30 mm). Measurements included dose linearity, dose rate dependence, output factors (OF), percentage depth doses (PDD) and off center ratio (OCR). The results were compared to those of pinpoint ionization chamber, diamond detector, microLion liquid ionization chamber and diode detector. The dose linearity results for the microDiamond detector showed good linearly proportional to dose. The microDiamond detector showed little dose rate dependency throughout the range of 100~600 MU/min, while microLion liquid ionization chamber showed a significant discrepancy of approximately 5.8%. The OF measured with microDiamond detector agreed within 3.8% with those measured with diode. PDD curves measured with silicon diode and diamond detector agreed well for all the field sizes. In particular, slightly sharper penumbras are obtained by the microDiamond detector, indicating a good spatial resolution. The results obtained confirm that the new PTW 60019 microDiamond detector is suitable candidate for application in small radiation fields dosimetry.

**Key Words:** microDiamond detector, Small field, Dosimetry

### 서 론

최근 방사선치료분야에서는 세기조절방사선치료(Intensity Modulated Radiation Therapy, IMRT), 체적변조회전방사선치료(Volumetric Modulated Arc Therapy, VMAT), 정위방사선수술(Stereotactic Radiosurgery, SRS) 등 다양한 방법의 방사선치

료기법들이 시행되고 있다. 이러한 치료기법들은 환자의 병소에는 충분한 방사선량을 조사하여 치료효과를 높이며 동시에 정상조직에 대한 조사량을 극소화하여 최대한 보호하는데 그 목적이 있다.<sup>1)</sup> 따라서 복잡하고 정교해진 치료기법들에 대한 검증으로 방사선 선량의 정확한 측정은 매우 중요하다. 특히 국제방사선단위측정위원회(International Commission on Radiation Units and Measurements, ICRU)에서 표적 선량에 대한 흡수선량 결정의 정확도는  $\pm 5\%$  혹은 그 이하를 권고하고 있어 선량측정 단계에서 측정의 정확도는  $\pm 2.5\%$  이내 이어야한다.<sup>2)</sup>

통상적으로  $3 \times 3 \text{ cm}^2$  이하의 소조사면을 이용하는 방사선 치료기법들은 소조사면내의 급격한 선량 변화, 측면 전자비평형, 광자와 전자들의 스펙트럼 변화, 그리고 조사면 크기에 대한 검출기의 기하학적 크기 영향으로 정확한 선량

This research was supported by a grant (14172MFDS404) from Ministry of Food and Drug Safety in 2014.

Received 11 November 2014, Revised 26 November 2014, Accepted 28 November 21014

**Correspondence:** Hyun Do Huh (hyundohuh@gmail.com)

Tel: 82-32-890-3073, Fax: 82-32-890-3082

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

의 평가가 어렵다.<sup>3-5)</sup> Rice 등<sup>6)</sup>은 다양한 유효체적의 이온전리함, 다이오드, 그리고 열 형광 선량계를 이용하여 소조사면에 대한 출력선량계수를 비교한 결과 유효체적이 큰 검출기일수록 출력선량계수가 낮게 측정된다고 보고하였고, 조사면 가장자리 부근에서 급격한 선량 변화와 완전한 전자평형이 유지되지 않기 때문에 소조사면의 빔 자료를 측정하는데 있어서 검출기의 크기는 측정 조사면보다 작은 검출기 사용을 권고 하고 있다. 또한 Laub 등<sup>7)</sup>은 IMRT에 사용된 소조사면 선량측정에서 다양한 검출기의 부피에 대한 영향을 평가하였다. 절대선량 측정결과에서 부피가 0.6 cc인 이온전리함에서 최대 6% 이상의 차이가 발생한 반면, 부피가 0.015 cc인 이온전리함은 2% 이내에서 치료계획시스템의 계산값과 잘 일치하였음을 보고하였다.

소조사면에 대한 깊이선량백분율, 측방선량분포, 선량출력계수와 같은 선량특성을 결정하기 위해서 유효체적이 작은 이온 전리함이나 다이오드 검출기, 열형광선량계 또는 필름 등을 사용하여 측정되고 있으며, 소조사면 선량측정에 적합한 선량계에 관한 연구의 결과들이 보고되고 있다.<sup>8-10)</sup> Francescon 등<sup>11)</sup>은 소조사면 선량측정용으로 적합하지 않은 검출기로 출력선량계수를 측정한 결과 30% 의 큰 차이를 나타내어 방사선 사고로 이어질 수 있음을 발표한바 있다. 또한 소조사면에서의 보정 계수의 필요성에 대해서 보고되고 있다.<sup>12,13)</sup> 따라서 소조사면에 대한 선량의 정확한 측정은 방사선 치료의 기본이 되는 매우 중요한 요소이며, 방사선의 종류, 에너지, 조사 범위에 따른 정확한 측정이 요구된다. 또한 치료계획시스템에서 신뢰할만한 선량계산분포를 얻기 위해서는 반드시 소조사면에 대한 정확한 빔 자료 획득이 필요하다.

고에너지 광자선의 소조사면에 대한 선량을 측정하는데 이상적인 검출기는 취급이 용이하고 재현성이 우수할 뿐만 아니라 방사선에 민감하고 높은 공간 분해능을 가지며, 방향 의존성과 에너지 의존성이 적으며, 인체 조직과 등가인 성질 등을 포함한 것이라고 할 수 있다. 미국의학물리학회(American Association of Physicists in Medicine, AAPM)에서는 소조사면의 선량측정을 위해서는 에너지, 선량, 그리고 선량률 의존성이 적고 부피가 작은 검출기를 사용할 것을 권고하고 있다.<sup>14)</sup> 이에 본 연구에서는 정위적방사선수술에 사용되는 사이버나이프를 이용하여 소조사면 선량측정용으로 새롭게 출시되어 상업적으로 이용되고 있는 마이크로다이아몬드(PTW 60019 microDiamond) 검출기의 유용성을 평가하기 위해 선량선형성, 선량률의존성, 출력선량계수, 깊이선량백분율 및 측방선량비 등의 특성을 파악하고자 한다.

## 재료 및 방법

### 1. 사이버나이프 시스템

사이버나이프는 6축의 자유도(관절)를 갖는 로봇팔(Kuka, Augsburg, Germany)에 장착되어 있는 명목상 에너지 6 MV X-선이 방출되는 선형가속기와 6차원적 공간좌표에 의한 종양위치추적이 가능한 위치인식시스템(target locating system, TLS)으로 구성되어 있으며, 0.4~0.7 mm 이내의 기하학적 정확도를 갖는 정위방사선수술 치료 장비이다. 사이버나이프의 조준기는 직경 5~60 mm으로 총 12개로 구성되어 있으며, 조사면 중심에서 반경 80 cm의 구면상에서 약 100개의 조사점(node)을 사용하여 최대 1200개의 빔을 만들어 환자의 병변의 모양과 크기 등에 따라 치료 계획이 최적화되어 결정된다.

### 2. PTW 60019 microDiamond

마이크로다이아몬드 검출기(Fig. 1)는 측정 용적이 0.004 mm<sup>3</sup>으로 대단히 작고, 민감 면적은 3.8 mm<sup>2</sup>이며 플레이트의 두께는 1  $\mu$ m이다. 다이아몬드 플레이트는 용기의 원형 전면으로부터 1 mm 밑에 위치에 있고, 검출기의 최적의 동작을 위해서 검출기에 인가된 바이어스 전압은 0 V로 해야 하며, 검출기의 선량 감도를 열적 평형 및 안정화시키기 위해서 측정에 앞서 5 Gy의 선량을 검출기에 조사해야 한다. 마이크로다이아몬드 검출기는 측정용적이 작을 뿐만 아니라 인체 조직과 등가인 물질로 이루어져 있어 고에너지 광자선의 소조사면에 대한 선량측정에 이상적인 검출기라 할 수 있다. 소조사면에 대한 선량측정 비교 및 분석을 위



Fig. 1. Photo of the PTW 60019 microDiamond detector.

해서 0.015 cc 부피의 이온전리함(PTW 31014 PinPoint chamber), 다이아몬드 검출기(PTW 60003 diamond), 액체이온함(PTW 31018 microLion), 그리고 다이오드 검출기(PTW 60008 diode)를 사용하였다. 본 연구에 사용된 5개의 검출기에 대한 특성을 Table 1에 나타내었다. 측정 팬텀은 가로×세로×높이가 각각  $33.4 \times 33.6 \times 42.3 \text{ cm}^3$ 인 PTW MP3-XS 물 팬텀을 사용하였으며, 전하량은 PTW UNIDOSE 전위계로 측정하였다.

### 3. 선량측정인자

각 검출기의 선량 특성을 평가하기 위해서 선량선형성(Dose linearity), 선량률의존성(Dose rate dependence), 선량출력계수(Output Factor, OF), 선량백분율(Percentage Depth Dose, PDD), 그리고 축바깥선량비(Off Center Ratio, OCR)를 측정하였다(Fig. 2). 사이버나이프 선량률의 가변적인 특성 때문에 선량선형성과 선량률의존성의 측정은 선형 가속기(Clinac iX,

Varian) 6 MV를 이용하였다. 선량선형성, 선량률의존성, 출력선량계수의 측정은 각각 3회 반복 실시하였으며, 평균값을 사용하여 비교 및 분석하였다.

1) **선량선형성(Dose linearity)**: 선량 증가에 따른 검출기의 반응성을 측정하였다. 선원과 물팬텀 표면 간의 거리 100 cm, 조사면의 크기  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ , 깊이 5 cm에서 측정하였으며, 선량률 300 MU/min로 고정시키고 10, 30, 50, 100, 200, 400, 600 MU를 조사하였다. 5 cm 깊이의 PDD 값을 사용하여 측정된 전하량 값을 선량 값으로 변환하였으며, 선형적 합함수(Linear fit function)를 사용하여 선량선형성을 평가하였다.

2) **선량률의존성(Dose rate dependency)**: 선량선형성을 평가하기 위한 동일한 실험적 조건을 사용하여 선량률 증가에 따른 검출기의 반응성을 측정하였다. 100, 200, 300, 400, 500, 600 MU/min 선량률을 사용하였고 300 MU/min

Table 1. Characteristics of each detectors under investigation in this study.

| Model                  | Sensitive volume* |                   |                           |                          |                            |
|------------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|
|                        | Material          | Zeff <sup>†</sup> | Volume (mm <sup>3</sup> ) | Thickness or length (mm) | Package material           |
| PTW 31014 PinPoint     | Air               | 7.64              | 15                        | 5                        | PMMA + graphite            |
| PTW 60003 Diamond      | Carbon            | 6                 | 1~6                       | 0.1~0.4                  | Polystyrene                |
| PTW 31018 microLion    | Dielectric liquid |                   | 1.7                       | 0.35                     | Polystyrene + graphite     |
| PTW 60019 microDiamond | Carbon            | 6                 | 0.004                     | 0.001                    | RW+epoxy resin+Al 99.5+air |
| PTW 60008 Diode        | Silicon           | 14                | 0.0025                    | 0.0025                   | RW3+epoxy resin+metal      |

\*Models are listed in descending order of sensitive volume. <sup>†</sup>Zeff of water = 7.42.

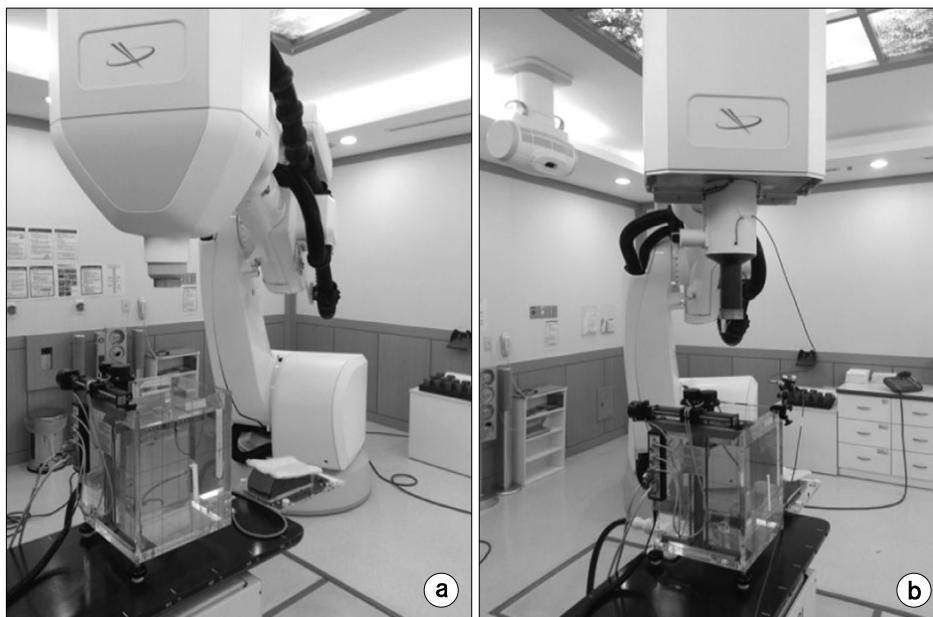


Fig. 2. Photographs depicting the experimental setup of cyberknife and water phantom. The source-detector distance of 80 cm at  $1.5 \text{ g/cm}^2$ , 5 cm  $\text{g/cm}^2$  depth for measurement of (a) OF and (b) OCR, respectively. The measurement of dosimetric parameters with (b) PDD was scanned at SSD = 80 cm, from water surface to 25 cm depth.

선량률로 규격화(Normalization)하였다.

3) 출력선량계수(Output Factor, OF): 출력선량계수의 측정은 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 60 mm, 총 12개의 조준기에 대하여 수행되었다. 소조사면에서는 방사선 중심축에서 측방향으로 선량분포가 급격히 감소하기 때문에 선량출력계수 측정 시 검출기의 위치가 매우 중요하다. 따라서 본 실험에서는 40 mm 조사면에서 각각의 검출기에 대하여 종단선과 횡단선 빔 스캔하여 정확한 방사선 중심축을 찾은 후 측정을 시작하였다. 선원과 검출기 간의 거리 80 cm, 최대선량 깊이 1.5 cm에서 측정하였으며, 60 mm 조사면에 대한 출력선량으로 규격화하여 각 조사면에 대한 출력선량계수를 구하였다.

4) 깊이선량백분율(Percentage Depth Dose, PDD): 깊이선량백분율의 측정은 5, 7.5, 10, 15, 20, 30 mm, 총 6개의 조준기에 대하여 수행되었다. 선원과 물팬텀 표면 간의 거리 80 cm, 표면에서 깊이 25 cm까지 측정하였으며, PinPoint 이온전리함을 제외한 다른 검출기들은 방사선 중심축과 평행하게 위치시켜 측정하였다. 검출기들의 깊이선량백분율을 서로 비교하기 위해 깊이 20 cm 깊이선량백분율과 깊이 10 cm 깊이선량백분율의 비( $PDD_{20}/PDD_{10}$  ratio) 값을 사용하였다.

5) 축바깥선량비(Off Center Ratio, OCR): 축바깥선량비의 측정은 5, 7.5, 10, 15, 20, 30 mm, 총 6개의 조준기에 대하여 수행되었다. 선원과 검출기 간의 거리 80 cm, 깊이 5 cm에서 횡단면 방향으로 스캔하여 측정하였다. 모든 축바깥선량 분포는 방사선 선원 중심축을 최대지점으로 하여 규격화하였고, 검출기의 부피에 의한 선량 특성을 평가하기 위하

여 반응영역은 20%~80% 영역으로 정의하여 측정값을 비교 및 평가하였다.

## 결과 및 고찰

위에서 언급한 실험 방법을 통하여 소조사면에 대한 각 검출기의 선량측정인자 결과 값을 얻었다.

### 1. 선형가속기의 선량선형성(Dose linearity)

Fig. 3의 결과와 같이 MU가 증가할수록 모든 검출기의 반응성이 증가됨을 알 수 있으며, 선형적합함수 결과 모든 검출기에서 선량선형성을 보였다. 검출기 간의 반응성의 차이는 1% 이내로 일치하였다.

### 2. 선형가속기의 선량률의존성(Dose rate dependency)

모든 검출기에서 선량률 300 MU/min을 기준으로 선량률이 감소할수록 반응민감도가 증가하였고 선량률이 증가할수록 반응민감도가 감소하는 경향을 보였다(Fig. 4). 선량률의존성이 가장 크게 나타난 검출기는 액체이온함으로 100 MU/min과 600 MU/min에 대해서 5.8%의 반응민감도 차이를 보였다. 이는 microLion 액체이온함의 특성연구에서 제시한 5%와 유사한 결과 값이다.<sup>15)</sup> 반면에 마이크로다이아몬드 검출기와 다이오드 검출기는 1% 이내의 반응민감도 차이를 보였으며, 5개의 검출기 가운데 선량률의존성이 가장 작았다. 기존 통상적인 3차원 방사선치료 및 세기변조 방사선치료기법은 하나의 선량률을 사용하므로, 선량률보

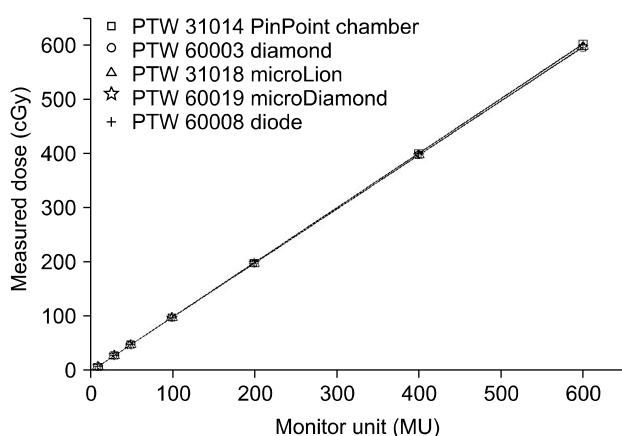


Fig. 3. The comparison of dose linearity for each detectors response were measured from 10 to 600 MU in  $10 \times 10$  cm<sup>2</sup> field with respect to the dose rate of 300 MU/min. Linear fit is plotted with solid line.

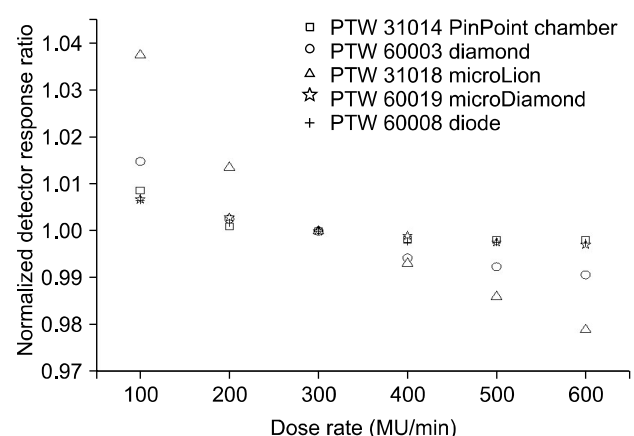


Fig. 4. The comparison of dose rate dependence for each detectors response were measured from 100 to 600 MU/min in  $10 \times 10$  cm<sup>2</sup> field at delivered dose 100 MU. Detector response at dose rate 300 MU/min was normalized to 1.

정인자(Dose rate correction factor)를 적용하여 각 선량률에 대한 선량 평가를 정확히 할 수 있다. 하지만 다양한 선량률로 치료의 최적화를 이루는 체적변조희전방사선치료기법의 선량 분석에서 액체이온함의 선량률 변화에 따른 보정이 어려울 것으로 판단된다. 만약 선량률을 보정하지 않고 선량 평가에 사용하게 되면, 최대 5.8%의 차이를 보일 수 있다. 한편 선량률 의존성이 있는 것으로 알려진 다이아몬드 검출기<sup>16,17)</sup>는 2.4%의 반응민감도 차이를 보였으며, 마이크로다이아몬드 검출기와 결과 값과 차이를 보였다. 다이오드 검출기의 선량률 의존성에 관한 연구에서 보고하는 바는 p-type 다이오드 검출기보다 n-type 다이오드 검출기가 선량률 의존성이 크며, p-type 다이오드 검출기는 선량률에 관계없이 반응민감도가 일정함을 보고하고 있다.<sup>18)</sup> 본 실험에서 사용한 다이오드는 p-type 검출기로서 선량률에 따라 거의 일정한 반응민감도를 나타내었다.

### 3. 출력선량계수(Output Factor, OF)

Fig. 5는 5 mm에서 60 mm까지 범위의 12개의 조사면에 대하여 마이크로다이아몬드 검출기의 출력선량계수와 다양한 검출기들의 출력선량계수를 보여준다. PinPoint 이온전리함을 제외하고 조사면의 크기가 20 mm 이상에서 다른 검출기들의 상대적인 출력선량계수의 차이는 1.0% 이내로 일치하였다. 하지만 15 mm 이하의 조사면에 대해서는 조사면이 작아질수록 출력선량계수 값이 검출기의 종류에 따라 큰 차이를 나타내었다. 특히 5 mm 조사면에 대해서는 다이오드 검출기와 PinPoint 이온전리함의 출력선량계수의 차이는 26%로 가장 큰 차이를 나타내었으며, 반면에 다이

오드 검출기와 마이크로다이아몬드 검출기의 출력선량계수의 차이는 3.8%로 가장 작은 차이를 나타내었다. 또한 유효체적의 크기가 증가할수록 출력선량계수의 값이 작아지는 경향을 보였다. PinPoint 이온전리함의 출력선량계수 값이 가장 작았는데, 이는 상대적으로 큰 유효체적의 영향과 구성 물질이 조직 등가 물질이 아닌 공기 공동으로 이루어져 있어서 빔 중심축에서 측면 전자 비평형이 커짐에 따른 것으로 사료된다. 20 mm 이하의 조사면에 대한 다이오드 검출기의 출력선량계수의 값이 다른 검출기와 비교할 때 모두 높게 측정되었다. 이는 다이오드 검출기가 고밀도( $2.329 \text{ g/cm}^3$ )이며, 높은 원자번호( $Z=14$ )의 매질로 이루어져 있어서 균질매질에서 플루언스의 요동으로 인해 소조사면에서 선량이 과대평가되기 때문이다.<sup>19)</sup> Haryanto 등<sup>20)</sup>도 다이오드 검출기로 측정한 출력선량계수가 20 mm 이하의 조사면에서 다른 검출기의 측정값과 몬테칼로 계산값보다 큰 것으로 보고하고 있다. Bassinet 등<sup>8)</sup>은 다양한 검출기를 사용하여 사이버나이프의 소조사면에 대한 출력선량계수의 값을 측정하였는데, 검출기의 출력선량계수의 측정값이 본 연구의 측정값보다 높게 보고하였으며, 특히 5 mm 조사면에서 PinPoint 이온전리함과 다이아몬드 검출기의 출력선량계수 측정값은 본 연구에서 측정된 값과 각각 16%, 8%의 큰 차이를 보였다. 소조사면에서의 출력선량계수의 정확한 측정은 치료계획시스템의 선량계산에 미치는 영향이 크므로 측정시 주의가 필요하다. 몇몇 연구자들은 30 mm 이하 조사면에서 검출기 위치 차이에 따라 5%에서 최대 10%의 차이를 발생함을 보고하고 있다.<sup>21,22)</sup>

### 4. 깊이선량백분율(Percentage Depth Dose, PDD)

6개의 조사면에 대한 각 검출기로 측정된 깊이선량백분율은 Fig. 6과 같다. 5 mm 조사면에서는 마이크로다이아몬드 검출기와 다이오드 검출기의 깊이선량백분율이 거의 일치하는 반면 다른 검출기와의 최대선량 깊이 이후부터 값의 차이가 점점 커지는 경향을 나타내었다. 7.5 mm 조사면 이상에서는 최대선량깊이 이후로 액체이온함의 깊이선량백분율이 다른 검출기의 값보다 크게 측정되는 경향을 보였다. Fig. 7은 6개의 조사면에 대한 각 검출기의 10 cm와 20 cm 깊이에서의 깊이선량백분율의 비를 평가한 결과를 보여준다. 5 mm 조사면에서 깊이선량백분율의 비가 가장 큰 차이를 보인 검출기는 다이오드 검출기와 PinPoint 이온전리함으로 약 4.5%의 차이가 나타났으며, 7.5 mm 이상의 조사면에서는 다이오드 검출기와 액체이온함이 약 2.5%~3%로 가장 큰 차이가 나타났다. 통상적으로 다이오드 검출기

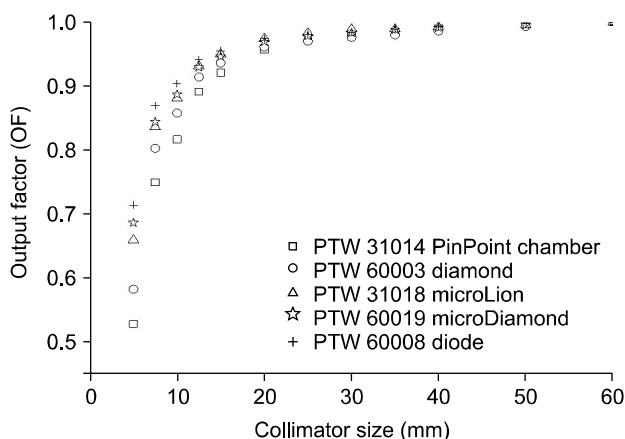
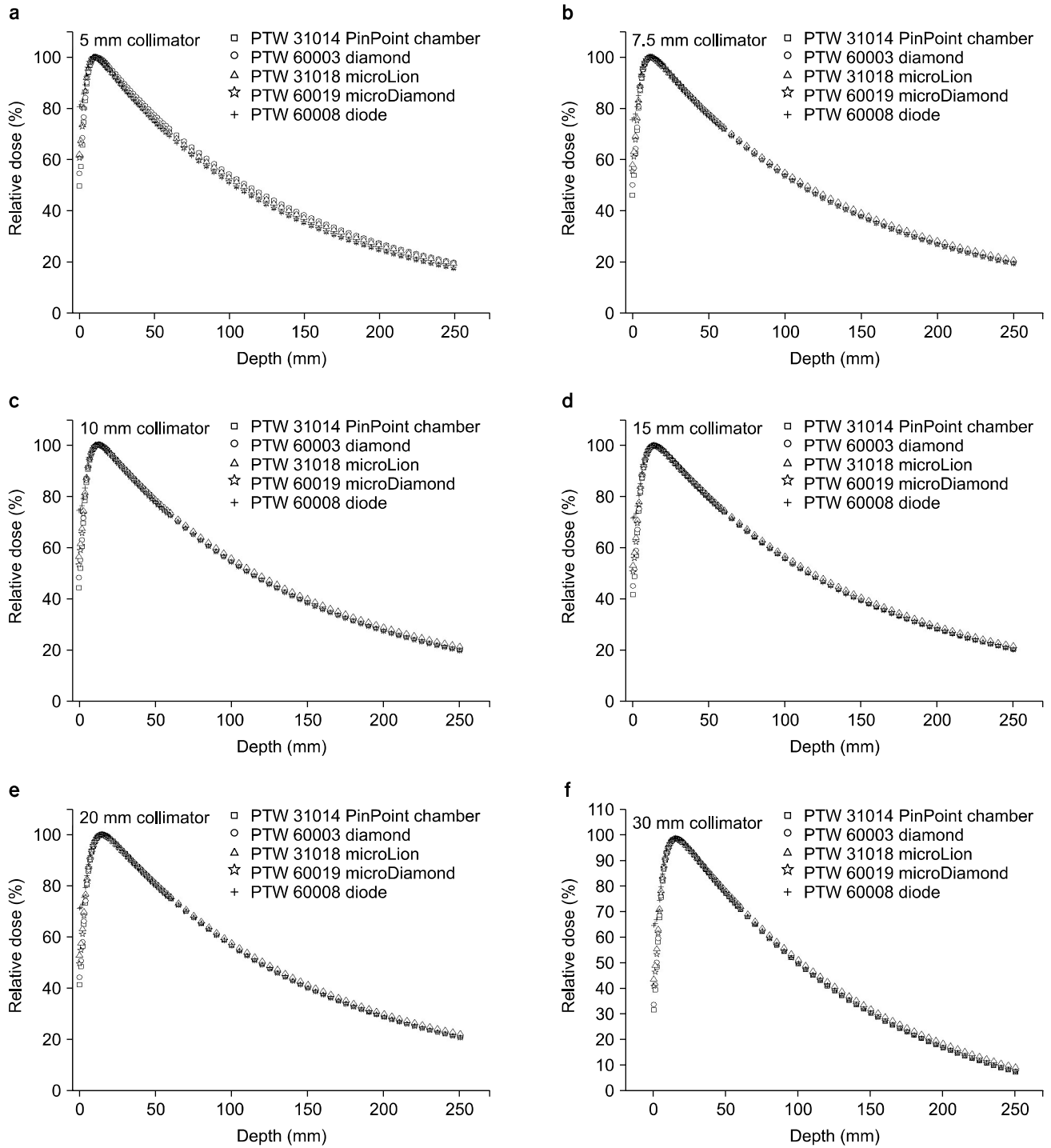


Fig. 5. The comparison of output factors for each detectors were measured in diameter from  $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$  to  $6 \times 6 \text{ cm}^2$  with CyberKnife system.



**Fig. 6.** Depth-dose curves as measured with the each detectors at (a) 5 mm, (b) 7.5 mm, (c) 10 mm, (d) 15 mm, (e) 20 mm, and (f) 30 mm collimator, respectively. All depth-dose curves are taken from water surface to 25 cm depth at SSD 100 cm.

는 큰 조사면에서 깊이가 증가할수록 깊이선량백분율을 과대평가하는데 이는 깊이가 증가할수록 저 에너지 산란 광자선이 증가하고 실리콘과의 광전효과가 지배적이기 때문

이다. 그러나  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  이하의 조사면에서는 유효체적이 작은 다이오드 검출기는 깊이선량백분율의 과대평가를 최소화 할 수 있다.<sup>23)</sup>

### 5. 축바깥선량비(Off Center Ratio, OCR)

Fig. 8은 6개의 조사면에 대한 각 검출기의 축바깥선량비와 이를 통해 분석된 80%~20% 영역의 반응영 측정값을 보여주며, 이를 통해서 소조사면에 대한 축바깥선량 분포의 반응영 크기를 검출기별로 비교함으로써 검출기들간의 공간분해능을 비교할 수 있다. 모든 검출기에서 조사면의 크기가 증가할수록 반응영의 크기가 증가하는 경향을 보였으며, 검

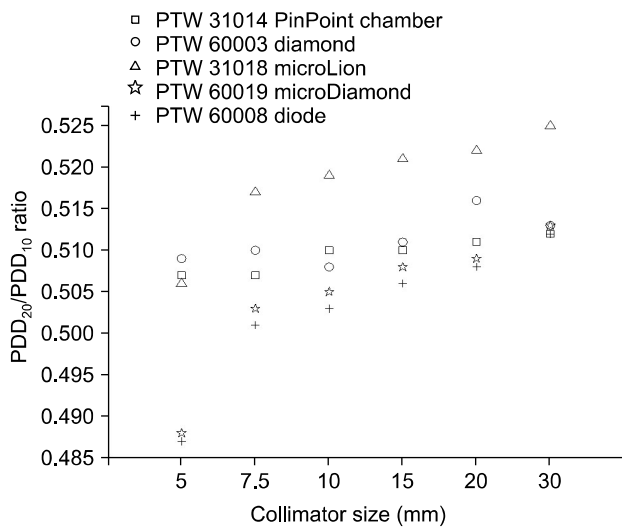
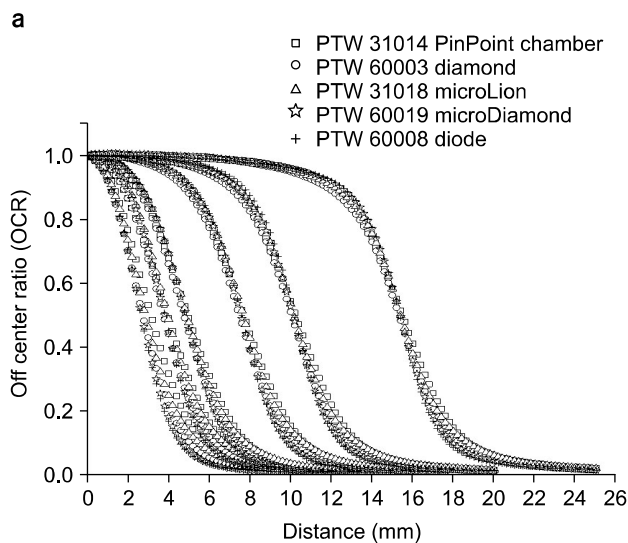


Fig. 7.  $PDD_{20}/PDD_{10}$  ratio values derived from depth-dose curves.



출기의 유효체적이 증가할수록 반응영 또한 증가하는 경향이 나타났다. 마이크로다이아몬드 검출기인 경우 유효체적이 가장 작은 다이오드 검출기와 비교하여 모든 조사면에서 축바깥선량비가 약 2% 이내의 차이를 보였으며, 반응영은 8.8% 이내로 일치하였다. 반면에 상대적으로 유효체적이 큰 Pinpoint 이온전리함은 다이오드 검출기와 비교하여 반응영이 35%로 큰 차이를 나타내었다. 최근에 발표된 linac 기반의 4, 7.5, 10, 30 mm 소조사면에 대한 마이크로다이아몬드의 반응영의 측정값은 각각 1.7, 2.0, 2.3, 2.7 mm으로 본 연구의 측정값과 16%~29%의 큰 차이를 보였으나, 조사면의 크기 증가에 따른 반응영의 측정값의 변화는 3.5%~7% 이내의 차이를 보였다.<sup>24)</sup> 이를 통해 치료 장비에 따라 마이크로다이아몬드의 반응영 측정값의 차이를 확인할 수 있었다. 마이크로다이아몬드와 다이오드 검출기는 유효체적이 작으므로 반응영이 작게 평가되었으며, 다른 검출기들보다도 공간분해능이 높은 것으로 생각된다. 또한 소조사면 대한 선량 측정시 보다 정확한 결과 값을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

### 결론

본 연구에서는 사이버나이프를 이용하여 소조사면에 대한 마이크로다이아몬드 검출기의 유용성을 평가하기 위해서 선량선형성, 선량률의존성, 출력선량계수, 깊이선량백분율 및 축바깥선량비를 측정하였고, 다른 검출기와 이온함의 측정 결과와 비교 및 평가를 하였다. 그 결과 마이크로다이

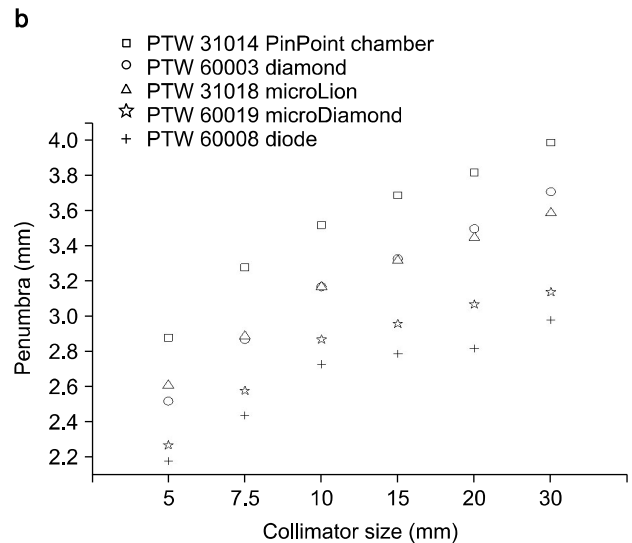


Fig. 8. (a) The lateral dose profiles measured with the each detectors at 6 collimator size, respectively. All profiles are taken at 5 cm depth water at 80 cm SAD. (b) 80%~20% penumbra values derived from the lateral beam profiles.

아몬드 검출기는 선량선형성이 우수하며, 선량률의존성이 적게 나타났다. 또한 사이버나이프 소조사면 측정용으로 상업적으로 권고되고 있는 다이오드 검출기와의 선량측정인자 측정값과 유사한 경향을 보였다. 하지만 다이오드 검출기의 조직비등가물질로 인한 높은 값의 선량출력계수가 측정되는데 비해 마이크로다이아몬드 검출기는 조직등가물질에 가까워 다이오드 검출기보다 정확한 출력선량계수 값을 얻을 수 있을 것으로 생각되며, 작은 유효체적으로 광자선 소조사면 선량측정 검출기로서 매우 유용한 것으로 판단된다. 차후 소조사면에 대한 마이크로다이아몬드 검출기의 정확한 유용성 평가를 위해서 몬테카를로 전산모사 방법을 병행한 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

## References

1. Wiggensraad RG, Petoukhova AL, Versluis L, et al: Stereotactic Radiotherapy of Intracranial Tumors: A Comparison of Intensity-Modulated Radiotherapy and Dynamic Conformal Arc. *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics* 74(4):1018-1026 (2009)
2. International Commission on Radiation Units and Measurements, Determination of absorbed dose in a patient irradiated by beams of X or Gamma rays in Radiotherapy procedure. ICRU Report No. 24 (1976)
3. R. Alfonso, P. Andreo, R. Capote, et al: A new formalism for reference dosimetry of small and nonstandard fields. *Med Phys* 35(11):5179-5186 (2008)
4. I. J. Das, G. X. Ding, A. Ahnesjö: Small fields: Nonequilibrium radiation dosimetry. *Med Phys* 35(1):206-215 (2007)
5. C. McKerracher, D. I. Thwaites: Assessment of new small-field detectors against standard-field detectors for practical stereotactic beam data acquisition. *Phys Med Biol* 44(9):2143-2160 (1999)
6. Rice RK, Hansen JL, Svensson GK, et al: Measurements of Dose Distributions in Small Beams of 6 MV X-Rays. *Physics in Medicine and Biology* 32(9):1087-1099 (1987)
7. Laub WU, Wong T: The Volume Effect of Detectors in the Dosimetry of Small Fields used in IMRT. *The International Journal of Medical Physics Research and Practice* 30(3):341-347 (2003)
8. C. Bassinet, C. Huet, S. Derreumaux, et al: Small fields output factors measurements and correction factors determination for several detectors for a CyberKnifeR and linear accelerators equipped with microMLC and circular cones. *Med Phys* 40(7):071725 (13pp.) (2013)
9. C. McKerracher, D. I. Thwaites: Head scatter ratios for small MV photon fields. Part II: The effects of source size and detector. *Radiother Oncol* 85(2):286-291 (2007)
10. P. H. Charles, G. Cranmer-Sargison, D. I. Thwaites et al: A practical and theoretical definition of very small field size for radiotherapy output factor measurements. *Med Phys* 41(4):041707 (8pp.) (2014)
11. P. Francescon, S. Cora, C. Cavedon: Total scatter factors of small beams: A multidetector and Monte Carlo study. *Med Phys* 35(2):504-513 (2008)
12. H. Benmakhlouf, J. Sempau, P. Andreo: Output correction factors for nine small field detectors in 6MV radiation therapy photon beams: APENELOPE Monte Carlo study. *Med Phys* 41(4):041711 (12pp.) (2014)
13. P. Francescon, W. Kilby, N. Satariano: Monte Carlo simulated correction factors for output factor measurement with the CyberKnife system—Results for new detectors and correction factor dependence on measurement distance and detector orientation. *Phys Med Biol* 59(6):N11-17 (2014)
14. Das IJ, Cheng CW, Watts RJ, et al: Accelerator Beam Data Commissioning Equipment and Procedures: Report of the TG-106 of the Therapy Physics Committee of the AAPM. *The International Journal of Medical Physics Research and Practice* 35(9):4186-4215 (2008)
15. Sang Hyoun Choi, Hyun Do Huh, Seong Hoon Kim, et al: A Study of Characteristics of MicroLion Liquid Ionization Chamber for 6 MV Photon Beam, *Progress in Medical Physics* 22(4):216-223 (2011)
16. S. N. Rustgi, D. M. D. Frye: Dosimetric characterization of radiosurgical beams with a diamond detector. *Med Phys* 22:2117-2121 (1995)
17. P. W. Hoban, M. Heydarian, W. A. Beckham, et al: Dose rate dependence of a PTW diamond detector in the dosimetry of a 6 MV photon beam. *Phys Med Biol* 39:1219-1229 (1994)
18. G. Rikner: Silicon diode as detectors in relative dosimetry of photon, electron, and proton radiation fields. Ph.D. Thesis Uppsala University Sweden (1983)
19. Sauer OA, Wilbert J: Measurement of output factors for small photon beams. *Med Phys* 4:1983-1988 (2007)
20. Haryanto F, Fippel M, Laub W, et al: Investigation of Photon Beam Output Factors for Conformal Radiation Therapy—Monte Carlo Simulations and Measurements. *Physics in Medicine and Biology* 47:N133-N143 (2002)
21. Das IJ, Ding GX, Ahnesjö A: Small Fields: Nonequilibrium Radiation Dosimetry. *The International Journal of Medical Physics Research and Practice* 35(1):206-215 (2008)
22. Francescon P, Cora S, Cavedon C: Total Scatter Factors of Small Beams: A Multidetector and Monte Carlo Study. *The International Journal of Medical Physics Research and Practice* 35(2):504-513 (2008)
23. Kim JK, Wen N, Jin JY, et al: Clinical Commission and Use of the Novalis Tx Linear Accelerator for SRS and SBRT. *Journal of Applied Clinical Medical Physics* 13(3):124-151 (2012)
24. Johnny E Morales, Scott B. Crowe, Robin Hill, et al: Dosimetry of cone defined stereotactic radiosurgery fields with a commercial synthetic diamond detector. *Med Phys* 41(11):111702 (2014)



## 광자선 소조사면 선량측정을 위한 microDiamond 검출기의 유용성 고찰

\*인하대학교 의과대학 방사선종양학교실, †한국원자력의학원 방사선의학연구소,  
‡관동대학교 의과대학 방사선종양학교실, §순천향대학교 의과대학 방사선종양학교실,  
||경희대학교 의과대학 방사선종양학교실, ¶한양대학교 의과대학 방사선종양학교실

이창열\* · 김우철\* · 김현정\* · 지영훈† · 김금배† · 이상훈‡  
민철기§ · 조광환§ · 신동오|| · 김성훈¶ · 허현도\*

소조사면을 이용하는 방사선치료기법들은 소조사면내의 측면 전자 비평형, 급격한 선량 변화, 그리고 조사면 크기에 대한 검출기의 기하학적 크기 영향으로 정확한 선량의 평가가 어렵다. 본 연구의 목적은 사이버나이프의 6개의 조사면(5 mm~30 mm)에 대해서 소조사면 선량측정용으로 새롭게 출시되어 상업적으로 이용되고 있는 마이크로다이아몬드(PTW 60019 microDiamond) 검출기의 유용성을 평가하고자 한다. 이를 위해 선량선형성, 선량률의존성, 출력선량계수, 깊이선량분포 및 촉박각선량비 등의 선량측정인자를 측정하였고, 0.015 cc 부피의 이온전리함(PTW 31014 PinPoint chamber), 다이아몬드 검출기(PTW 60003 diamond), 액체이온함(PTW 31018 microLion), 그리고 다이오드 검출기(PTW 60008 diode)의 측정 결과와 비교 및 평가를 하였다. 그 결과 마이크로다이아몬드 검출기는 선량선형성이 우수하며, 선량률의존성이 적게 나타났다. 또한 사이버나이프 소조사면 측정용으로 상업적으로 권고되고 있는 다이오드 검출기와의 선량측정인자 측정값 3.8%의 차이를 보였다. 또한 깊이선량분포도 다이오드 검출기의 결과와 유사한 결과를 얻었다. 마이크로다이아몬드 검출기는 유효체적이 작으므로 반응영이 작게 평가되었으며, 다른 검출기들보다도 공간분해능이 높은 것으로 생각된다. 연구 결과 마이크로다이아몬드 검출기는 조직등가물질로 이루어져 있으며, 작은 유효체적으로 광자선 소조사면 선량측정 검출기로서 매우 유용한 것으로 판단된다.

**중심단어:** microDiamond 검출기, 소조사면, 선량측정