

A Study of Dosimetric Characteristics of a Diamond Detector for Small Field Photon Beams

John .K. Loh*, Sung Y. Park*[†], Dong O. Shin[†], Soo I. Kwon[†]
Kil D. Lee[†], Woo C. Kim* and Young K. Cho*

*Department of Radiation Oncology, Inha University

[†]Department of Physics, Kyonggi University

광자선 소조사면에 대한 다이아몬드 검출기의 선량특성에 관한 연구

노준규* · 박성용*[†] · 신동오[†] · 권수일[†] · 이길동[†] · 김우철* · 조영갑*

*인하대학교 의과대학 방사선종양학교실

[†]경기대학교 이과대학 물리학과

(1999년 11월 29일 접수, 2000년 1월 20일 채택)

Abstract - It is difficult to determine dosimetric characteristics for small field photon beams since such small fields do not achieve complete lateral electronic equilibrium and have steep dose gradients. Dosimetric characteristics of small field 4, 6, and 10 MeV photon beams have been measured in water with a diamond detector and compared to measurements using small volume cylindrical and plane parallel ionization chambers. Percent depth dose (PDD) and beam profiles for 6 and 10 MeV photon beams were measured with diamond detector and cylindrical ion chamber for small fields ranging from 1x1 to 4x4 cm². Total scatter factors(S_{c,p}) for 4, 6, and 10 MeV photon beams were measured with diamond detector, cylindrical and plane parallel ion chambers for small fields ranging from 1x1 to 4x4 cm². The S_{c,p} factors obtained with three detectors for 4, 6, and 10 MeV photon beams agreed well ($\pm 1.2\%$) for field sizes greater than 2x2, 2.5x2.5, and 3x3 cm², respectively. For smaller field sizes, the cylindrical and plane parallel ionization chambers measure a smaller S_{c,p} factor, as a result of the steep dose gradients across their sensitive volumes. The PDD values obtained with diamond detector and cylindrical ionization chamber for 6 and 10 MeV photon beams agreed well ($\pm 1.5\%$) for field sizes greater than 4x4 cm². For smaller field sizes, diamond detector produced a depth-dose curve which had a significantly shallower falloff than that obtained from the measurements of relative depth-dose with a cylindrical ionization chamber. For the measurements of beam profiles, a distortion in terms of broadened penumbra was observed with a cylindrical ionization chamber since diamond detector exhibited higher spatial resolution. The diamond detector with small sensitive volume, near water equivalent, and high spatial resolution is suitable detector compared to ionization chambers for the measurements of small field photon beams.

Key Words : diamond detector, ion chamber, percent depth dose, profile, output factor

요약 - 고 에너지 광자선 소조사면에 대한 선량 특성은 조사면내의 급격한 선량 변화와 측면 전자 평형 상태하의 측정이 어려우므로 정확하게 파악하기 어렵다. 다이아몬드 검출기를 이용하여 광자선 에너지 4, 6, 그리고 10 MeV에 대한 소조사면의 선량특성을 측정하였고 그 값들을 작은 용적의 원통형과 평행 평판형 이온함의 선량특성과 비교하였다. 다이아몬드 검출기와 원통형 이온함을 이용하여 의료용 선형가속기에서 방출되는 광자선 에너지 6 MeV X-선, 10 MeV X-선에 대한 소조사면(1x1, 1.5x1.5, 2x2, 3x3, 4x4 cm²)에 대하여 심부선량분율, 측면 선량분포를 측정하였다. 또한 다이아몬드 검출기, 원통형

이온함 및 평행평판형 이온함을 이용하여 광자선 에너지 4 MeV X-선, 6 MeV X-선 및 10 MeV X-선으로 소조사면의 크기를 $1 \times 1 \text{ cm}^2$ 에서 0.5 cm^2 간격으로 $4 \times 4 \text{ cm}^2$ 까지 변화하면서 출력계수를 측정하였다. 세 가지 측정기에 대한 출력계수를 비교한 결과 광자선 에너지 4 MeV X-선은 조사면의 크기 $2 \times 2 \text{ cm}^2$, 6 MeV X-선은 $2.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$ 그리고 10 MeV X-선은 $3 \times 3 \text{ cm}^2$ 이상에서 출력계수가 $\pm 1.2\%$ 내외로 잘 일치하였으나 원통형과 평행평판형 이온함에 대한 출력계수는 조사면의 크기가 작아질수록 다이아몬드의 검출기와 비교하여 낮게 평가되었는데 이는 원통형과 평행평판형 이온함의 측면 전자평형상태가 이루어지지 않아 낮게 평가되었다. 광자선 에너지 6 MeV X-선과 10 MeV X-선에 대한 심부선량분율은 다이아몬드 검출기와 원통형 이온함이 조사면의 크기 $3 \times 3 \text{ cm}^2$ 까지 $\pm 1.5\%$ 내외로 잘 일치하였으나 조사면의 크기가 작고 깊이가 깊어짐에 따라 다이아몬드의 심부선량분율이 크게 평가되었다. 측면 선량분포는 원통형 이온함의 반응영역의 크기가 측정된 소조사면에 대하여 다이아몬드 검출기보다 크게 나타났다. 측면 선량분포는 다이아몬드 검출기가 상대적으로 이온함에 비해 민감 용적이 작고 높은 분해능을 가지므로 반응영역이 작은 것으로 사료된다. 따라서 고 에너지 광자선 소조사면에 대한 선량 측정시 검출기의 민감 용적이 작고 분해능이 우수하며 물과 등가인 다이아몬드 검출기는 이온함에 비해 상대적으로 우수한 것으로 생각된다.

중심어: 다이아몬드 검출기, 이온함, 심부선량분율, 측면 선량분포, 출력계수

서 론

최근 수년간에 걸쳐 방사선치료는 괄목할 만한 진보를 하였다. 이것은 컴퓨터단층영상장치(CT), 자기공명영상장치(MRI), 3차원 방사선치료계획장치, 컴퓨터단층 모의촬영장치, 그리고 다엽콜리메이터가 부착된 정교한 선형가속기에 의한 고 에너지 방사선을 이용할 수 있는 물리적인 진보뿐만 아니라 선량의 시간분할 및 선량효과관계에 관한 방사선종양학의 지식의 증대에 기인하고 있다. 이들 의학물리학과 방사선종양학의 발전에 힘입어 다양한 방법의 방사선 치료가 발전되면서 이에 대한 선량 특성이 중요시되고 있다. 방사선치료분야에서 방사선 투여 선량의 정확도는 방사선 치료의 성패와 직접적인 관계가 있으므로 국제방사선단위 측정위원회(ICRU)에서 표적선량에 대한 흡수선량 결정의 정확도는 $\pm 5\%$ 혹은 그 이하를 권고하고 있어 선량 측정 단계에서 측정의 정확도는 $\pm 2.5\%$ 이내이어야 한다[1]. 따라서 방사선 선량의 정확한 측정은 방사선 치료의 기본이 되는 매우 중요한 요소이며, 방사선의 종류, 에너지, 조사 범위에 따른 정확한 선량 측정이 요구되고 있다. 특히 뇌정위방사선수술에 사용하는 고 에너지 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 조직(tissue)과 등가인 성질 등을 포함한 것이라고 할 수 있다.

의료용 선형가속기에서 방출되는 광자선의 소조

사면에 대한 선량 특성을 결정하는데 있어 방사선 측정기로는 작은 용적을 가지는 이온함[2-4], 다이오드[3,4], 필름[2,4], 및 열 형광 선량계[2,3] 등을 사용하고 있다. 광자선 소조사면의 선량 특성을 연구하기 위해 이온함을 사용할 경우에는 민감 용적이 작아야 하고, 조사면내 측면으로의 전자평형 상태를 유지하도록 해야하는데 측정상의 어려움 때문에 $4 \times 4 \text{ cm}^2$ 조사면의 측정값으로부터 작은 조사면에 대한 값들을 외삽하고 있다. 필름의 사용은 필름의 에너지 의존성과 현상조건에 따라 측정값이 매우 다르므로 상당한 주위가 요구된다. 실리콘 다이오드 검출기는 높은 공간 분해능과 방사선에 민감하나 저 에너지 X-선 영역(100 keV 이하)에서 광전효과의 우세성으로 인하여 증가된 에너지 반응도를 보이며, 방향에 따른 변화를 나타낸다[5,6]. 열 형광선량계는 크기가 작고 인체 조직과 등가이며, 취급이 용이하나 열 형광선량계의 상대적으로 높은 불확실도, 선량 의존성 그리고 고 에너지의 변화에 따른 감도 변화를 보정해 주어야 한다.

따라서 본 연구에서는 다이아몬드 검출기[7-11]를 이용하여 방사선 종양학과에서 사용하는 에너지 범위 내에서 에너지 의존성과 방향성이 일정하고, 공간분해능이 우수할 뿐만 아니라 인체 조직($Z=7.4$)과 거의 등가($Z=6$)인 다이아몬드 검출기를 이용하여 고 에너지 광자선 소조사면에 대한 측면 선량분포, 심부선량분율 및 출력계수를 측정하고, 그 값들을 원통형과 평행평판형 이온함을 이용하여 얻은 값들과 비교 분석하고자 한다.

재료 및 방법

다이아몬드 검출기(PTW type 60003, 독일)는 측정 용적이 1.9 mm^3 으로 대단히 작고, 민감 면적은 7.3 mm^2 이며 플레이트의 두께는 0.26 mm 이다[7]. 그림 1에서와 같이 검출기는 원통형 플라스틱 용기 안에 들어있고 자연 상태의 다이아몬드 플레이트는 용기의 원형 전면으로부터 1 mm 밑에 위치하여 있다. 주어진 선량율에 대하여 전류는 100 V 전압에 대하여 비례하므로 최적의 동작을 위하여 다이아몬드 검출기에 인가된 바이어스 전압은 100 V 로 하였다. 다이아몬드 플레이트에 집적된 전하량은 전기계(PTW Unidos Electrometer, 독일)를 사용하여 측정하였고, 다이아몬드 검출기의 선량 감도를 열적 평형 및 안정화시키기 위하여 측정 전 10 Gy 의 선량을 검출기에 조사하였다.

고 에너지 광자선은 선형가속기(Siemens KD2, 독일)에서 발생하는 6 MeV , 10 MeV X-선을 사용하였고, 삼차원 전산화 물팬텀(PTW MP3S, 독일)에 다이아몬드 검출기와 125 mm^3 원통형 이온함(PTW type 31002, 독일)을 이용하여 심부선량백분율(percent depth dose)과 측면 선량분포 (beam profile)를 측정하였다. 선원 표면간 거리 (Source-Surface Distance)는 정격 치료거리인 100 cm 로 하였고, 조사면의 크기를 1×1 , 1.5×1.5 , 2×2 , 3×3 그리고 $4 \times 4 \text{ cm}^2$ 로 변화시키면서 각각 심부선량백분율을 측정하였다. 측면 선량분포는 6 MeV 에너지 X-선에서 최대선량 지점(d_{max})이 1.5 cm 깊이, 10 MeV 에너지 X-선에서는 2.5 cm 깊이에서 각각 측정하였다. 측정점의 위치는 원통형 이온함의 측정점이 이온함의 중심점에 오도록 하고 방사선원에 수직이 되도록 하였으며, 최근 발표된 국제원자력기구(IAEA) 표준측정법[12]의 권고에 따라 측정점의 위치를 기하학적 중심으로부터 $0.6r$ (r =이온함의 내반경)만큼 선원 쪽으로 변위된 점을 측정의 유효 중심으로 사용하였다. 다이아몬드 검출기는 다이아몬드 플레이트가 원통형 플라스틱 용기 전면으로부터 1 mm 밑의 지점에 위치하므로 이 지점을 유효 측정점으로 하여 측정을 하였다.

다이아몬드 검출기, 원통형 이온함 및 평행평판형 이온함(PTW Markus 23343, 55 mm^3 , 독일)을 이용하여 4 MeV (Siemens MD, 독일), 6 MeV 및 10 MeV 광자선 에너지 X-선에 대하여 조사면의 크기를 $1 \times 1 \text{ cm}^2$ 에서 0.5 cm^2 간격으로 증가시키면서 $4 \times 4 \text{ cm}^2$ 까지 물팬텀을 사용하여 조사면의 크기에 대한 출력계수(output factor, S_{cp})를 측정하

였다. 기준 조사면의 크기는 모든 광자선 에너지에 대하여 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 로 하였다. 선원 표면간 거리(SSD)는 정격 치료거리인 100 cm 로 하였고, 측정 깊이는 각 에너지별로 최대선량 지점에서 측정하였다. 평행평판형 이온함의 유효 측정점은 이온함의 중심점에 오도록 하고 선속 중심축에 수직이 되도록 하였으며, 이온함의 내전벽에 위치하도록 하여 측정하였다.

결과 및 논의

4, 6, 그리고 10 MeV 광자선 소조사면에 대하여 다이아몬드 검출기, 원통형 및 평행평판형 이온함의 출력계수(S_{cp}) 값들을 비교하였다(표 1). 모든 검출기들에 대하여 4 MeV 광자선은 조사면의 크기가 $2 \times 2 \text{ cm}^2$, 6 MeV 광자선은 $2.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$ 그리고 10 MeV 광자선은 $3 \times 3 \text{ cm}^2$ 보다 큰 조사면에서 출력계수가 1.2% 내외로 잘 일치하였으나 조사면의 크기가 작아짐에 따라 커다란 차이를 보였다. 조사면의 크기 $1 \times 1 \text{ cm}^2$ 에 대한 다이아몬드의 출력계수는 원통형 및 평행평판형 이온함의 출력계수와 비교하여 4 MeV 광자선의 경우 최대 10.9% 의 차이가 나타났으며 6 MeV 와 10 MeV 광자선은 각각 최대 14.6% , 18.1% 의 차이가 나타났다. 다이아몬드 검출기의 민감용적이 원통형 및 평행평판형 이온함의 민감용적 보다 작으므로 이 검출기로 측정된 출력계수의 값들이 참 값에 근접한 것으로 생각된다. 광자선 소조사면에 대하여 평행평판형과 원통형 이온함을 이용한 출력계수의 값들은 다이아몬드 검출기로 측정된 값들에 비하여 상대적으로 낮게 평가되었는데 이는 평행평판형과 원통형 이온함의 민감용적을 통과하여 나타난 급격한 선량 경사도에 기인한 것으로 사료된다. Rice등[2]은 민감용적이 다른 여러 종류의 이온함, 다이오드, 열 형광 선량계를 사용하여 소조사면에 대한 출력계수를 측정하였는데 민감용적이 큰 검출기일수록 선량이 낮게 평가되었다고 보고하였다.

고 에너지 광자선 6 , 10 MeV 의 심부선량백분율은 다이아몬드 검출기와 원통형 이온함을 사용하여 얻었고 조사면의 크기 $1.5 \times 1.5 \text{ cm}^2$ 와 $4 \times 4 \text{ cm}^2$ 에 대한 심부선량백분율 곡선을 그림 2, 3, 4 및 5에 나타냈으며 모든 곡선들은 최대선량지점에 규격화하였다. 조사면의 크기 $4 \times 4 \text{ cm}^2$ 에 대한 심부선량백분율 곡선은 다이아몬드 검출기와 원통형

이온함의 값들이 주어진 에너지별로 1.5 % 이내로 잘 일치함을 보여주고 있으나 조사면의 크기가 작은 $1.5 \times 1.5 \text{ cm}^2$ 에 대해서는 측정점의 깊이가 깊어짐에 따라 커다란 차이가 나타났다. 조사면의 크기 $1.5 \times 1.5 \text{ cm}^2$ 에 대한 6, 10 MeV 광자선의 심부선량백분율은 선량 측정점이 20 cm인 깊이에서 두 검출기간의 절대적인 차이가 각각 2.7 %와 2.0 %로 나타났고 측정점이 24 cm인 깊이에서는 각각 4.2 %와 3.8 %로 나타났다. Vatnitsky 등[10]은 측면으로의 전자평형이 충분히 이루어지는 큰 조사면($20 \times 20 \text{ cm}^2$)을 갖는 ^{60}Co 감마선에 대하여 심부선량백분율을 다이아몬드, 다이오드 검출기 및 원통형 이온함을 사용하여 측정하였으며, 상호비교한 결과 다이아몬드 검출기와 원통형 이온함의 심부선량백분율의 차이가 20 cm 깊이에서 1.4 %의 절대적인 차이가 나타났다고 보고하였다. 다이아몬드 검출기의 측정점은 다이아몬드 플레이트가 위치한 플라스틱 용기 전면으로부터 1 mm 지점으로 간단히 정할 수 있었으나 원통형 이온함의 경우 적당한 감도를 얻기 위해 유한한 크기의 원통형 공동을 갖기 때문에 이온함 공동내 플루언스 변화를 보정하기 위한 유효측정점을 정확하게 설정하는데 있어 오차와 고에너지 광자선에 대한 소조사면내 전자평형상태가 성립되지 않는 최대선량지점에서의 규격화로 인하여 측정점의 깊이가 깊어짐에 따라 심부선량백분율의 차이가 커지는 것으로 생각된다. 전자평형상태가 이루어지지 않은 선량증가(build up) 영역에서는 원통형 이온함의 기하학적 구조 및 유효 측정점 위치의 부정확도에 의하여 다이아몬드 검출기 보다 낮게 평가되었고 표면선량 및 선량증가 영역의 측정에 적합한 외삽형 이온함을 사용하여 비교 측정하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

고 에너지 광자선 6, 10 MeV의 측면선량분포는 다이아몬드 검출기와 원통형 이온함을 사용하여 얻었고 조사면의 크기 $1 \times 1 \text{ cm}^2$ 에 대한 측면선량분포를 그림 6과 7에 각각 나타냈다. 모든 측면선량분포는 방사선 선원 중심축을 최대지점으로 하여 규격화하였고 측면선량분포를 이용하여 각 에너지에 대한 다이아몬드 검출기와 원통형 이온함의 반음영(penumbra)의 크기(최대선량 레벨의 90 %와 10 % 되는 지점간의 거리)와 측면 선량이 최대선량 레벨의 50 %되는 지점간의 거리를 조사면의 크기로 결정하였다. 6 MeV 광자선에 대한 다이아몬드 검출기와 원통형 이온함의 반음영의 크기는 각각 0.46 cm와 0.52 cm로 계산되었고 조사면의 크기는 각각 1.02 cm와 1.09 cm로 나타났다. 10

MeV 광자선에 대한 다이아몬드 검출기와 원통형 이온함의 반음영의 크기는 각각 0.44 cm와 0.51 cm로 계산되었고 조사면의 크기는 각각 1.04 cm와 1.10 cm로 나타났다. 고 에너지 광자선 소조사면에 대한 측면선량분포의 반음영의 크기를 측정기별로 비교함으로써 검출기들간의 공간분해능을 비교할 수 있다. 작은 용적을 가진 검출기일수록 공간분해능이 우수한 것으로 기대가 되는데 본 연구에서 사용한 다이아몬드 검출기의 민감용적이 원통형 이온함 보다 작으므로 반음영의 크기가 작게 평가되었고 따라서 상대적으로 공간분해능이 높은 것으로 사료되며 작은 조사면에 대한 선량 측정시 보다 정확한 값들을 얻을 수 있다.

결론

고 에너지 광자선의 작은 조사면의 선량특성을 연구하기 위하여 다이아몬드 검출기를 사용하여 광자선 소조사면에 대한 출력계수(S_{cp}), 심부선량백분율곡선, 및 측면선량분포를 측정하였고 원통형과 평행평판형 이온함을 이용하여 측정된 값들과 비교 분석하였다. 조사면의 크기가 작아질수록 원통형과 평행평판형 이온함을 이용하여 측정된 출력계수 값들이 낮게 평가되었는데 이는 두 검출기들이 다이아몬드 검출기와 비교하여 상대적으로 민감용적이 크므로 고 에너지 광자선에 대한 소조사면의 측면으로의 전자평형이 이루어지지 않은 것으로 생각되며, 다이아몬드 검출기로 측정된 출력계수의 값들이 참 값에 근접한 것으로 사료된다. 심부선량백분율 곡선은 조사면의 크기가 $4 \times 4 \text{ cm}^2$ 에 대하여는 다이아몬드 검출기와 원통형 이온함이 잘 일치하였으나 $1.5 \times 1.5 \text{ cm}^2$ 에 대하여는 깊이가 깊어짐에 따라 커다란 차이를 나타냈다. 원통형 이온함의 경우 유효측정점을 정확하게 설정하는데 따른 오차와 고에너지 광자선에 대한 소조사면내 전자평형상태가 성립되지 않는 최대선량지점에서의 규격화로 인하여 측정점의 깊이가 깊어짐에 따라 심부선량백분율의 차이가 커지는 것으로 생각된다. 다이아몬드 검출기를 이용한 선량증가영역과 표면선량 측정은 평행평판형 혹은 외삽형 이온함을 사용하여 비교 측정하는 것이 바람직할 것으로 기대된다. 다이아몬드 검출기와 원통형 이온함의 공간분해능은 광자선 소조사면의 반음영의 크기를 측정하여 비교함으로써 평가하였는데 다이아몬드 검출기의 공간분해능이 높은 것으로 나타났다.

따라서 물과 거의 등가인 다이아몬드 검출기는 높은 공간 분해능이 요구되는 선량경사도가 심한 선량 측정, 전자평형상태 및 민감도가 요구되는 광자선 소조사면의 선량측정에 이온함에 비하여 우수한 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 1996년도 인하대학교 교내연구비를 지원 받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. International Commission on Radiation Units and Measurements, *Determination of absorbed dose in a patient irradiated by beams of X or Gamma rays in Radiotherapy procedures*, ICRU Report No. 24(1976)
2. R. K. Rice, J. L. Hansen, G. K. Swensson, and R. L. Siddon, "Measurements of dose distributions in small beams of 6 MeV x-rays," *Phys. Med. Biol.*, 32, 1087-1099(1987)
3. C. F. Serago, P. V. Houdek, G. H. Hartmann, D. S. Saini, M. E. Serago, and A. Kaydee, "Tissue maximum ratios (and other parameters) of small circular 4, 6, 10, 15 and 24 MeV x-ray beams for radiosurgery," *Phys. Med. Biol.*, 37, 1943-1956(1992)
4. S. S. Kubsad, T. R. Makie, M. A. Gehring, D. J. Misco, B. R. Paliwal, M. P. Mehta, and T. J. Kinsella, "Monte Carlo and convolution dosimetry for stereotactic radiosurgery," *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.*, 19, 1027-1035(1990)
5. G. Rikner and E. Grusell, "Selective shielding of a p-Si detector for quality independence," *Acta Radiol. Oncol.*, 24, 65-69(1985)
6. M. Ahmad, D. P. Fontenla, S. T. Chiu Taso, C. S. Chui, J. E. Reiff, L. L. Anderson, D. Y. C. Huang, and M. C. Schell, "Diode dosimetry of models 6711 and 6712 ¹²⁵I seeds in a water phantom," *Med. Phys.*, 19, 391-399(1992)
7. PTW-Freiburg, *Instruction manual for Diamond Detector Type 6003*(1996)
8. P. Metcalfe, T. Kron, and P. Hoban, *The Physics of Radiotherapy X-Rays from Linear Accelerators*, pp. 194-195, Medical Physics Publishing, Madison(1997)
9. R. J. Keddy, T. L. Nam, and R. C. Burns, "Synthetic diamonds as ionization chamber radiation detectors in biological environments," *Phys. Med. Biol.*, 32, 751-759(1987)
10. S. Vatnisky and H. Jarvinen, "Application of a natural diamond detector for the measurement of relative dose distributions in radiotherapy," *Phys. Med. Biol.*, 38, 173-184(1993)
11. M. Heydarian, P. W. Hoban, W. A. Beckham, I. M. Borchardt, and A. H. Beddoe, "Evaluation of a PTW diamond detector for electron beam measurements," *Phys. Med. Biol.*, 38, 1035-1042(1993)
12. International Atomic Energy Agency, *Absorbed Dose Determination in Photon and Electron Beams*, Technical Reports Series No.277(1997)

Table 1. Total scatter factors(Sc,p) for 4, 6, and 10 MeV small photon beams measured with diamond detector, plane-parallel, and cylindrical ionization chambers.

Field size (cm^2)	4 MeV Photon			6 MeV Photon			10 MeV Photon		
	Diamond	plane-parallel	cylin-drical	Diamond	plane-parallel	cylin-drical	Diamond	plane-parallel	cylin-drical
10.0x10.0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4.0x4.0	0.927	0.924	0.921	0.922	0.925	0.924	0.922	0.917	0.917
3.5x3.5	0.922	0.915	0.914	0.914	0.918	0.915	0.912	0.906	0.906
3.0x3.0	0.914	0.905	0.904	0.908	0.907	0.906	0.900	0.889	0.889
2.5x2.5	0.904	0.891	0.888	0.899	0.895	0.891	0.881	0.865	0.861
2.0x2.0	0.879	0.858	0.852	0.891	0.869	0.866	0.856	0.825	0.821
1.5x1.5	0.807	0.773	0.763	0.854	0.810	0.805	0.801	0.751	0.737
1.0x1.0	0.626	0.578	0.558	0.742	0.643	0.634	0.684	0.585	0.560

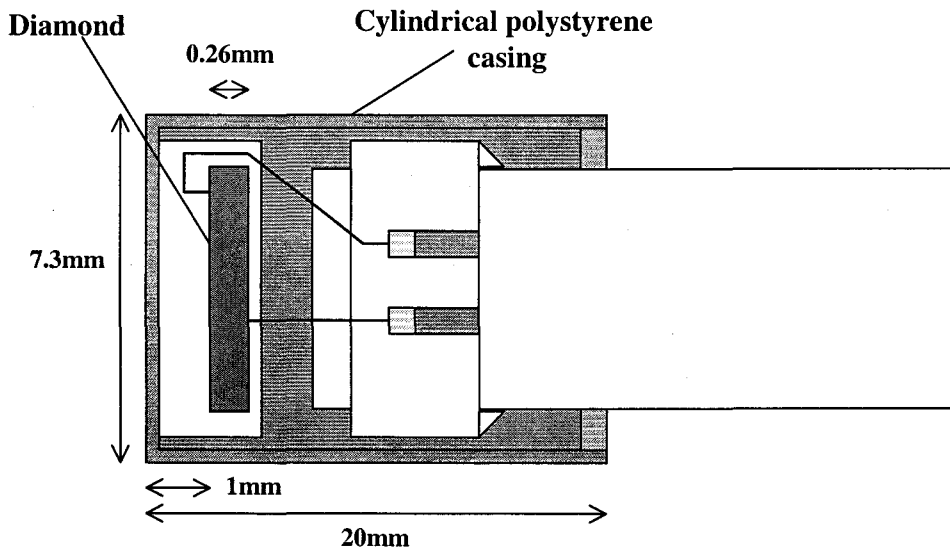


Fig. 1. Schematic drawing of the PTW diamond detector[7].

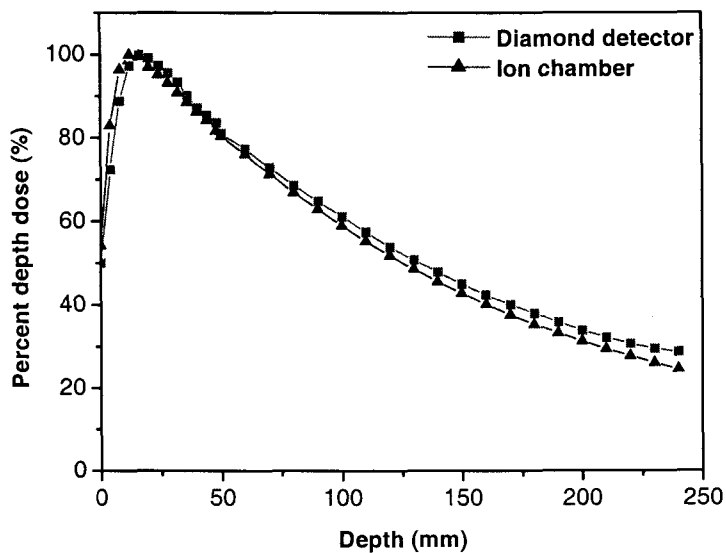


Fig. 2. Percent depth dose curves of $1.5 \times 1.5 \text{ cm}^2$ for 6 MeV photon beam.

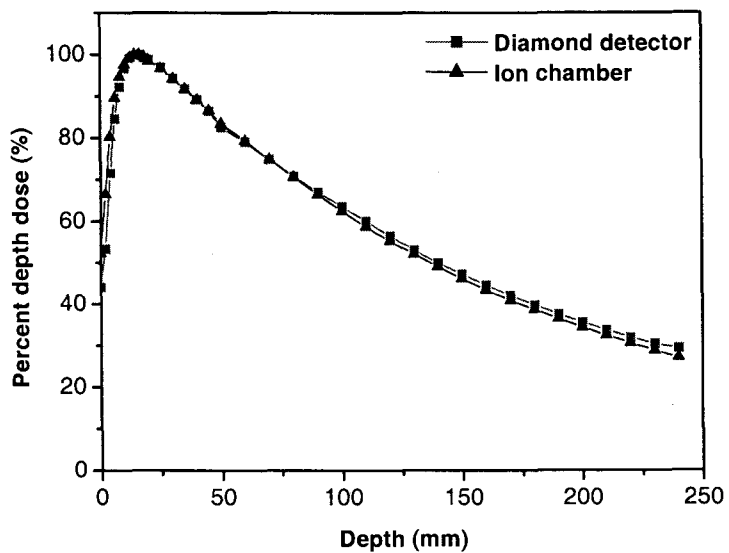


Fig. 3. Percent depth dose curves of $4.0 \times 4.0 \text{ cm}^2$ for 6 MeV photon beam.

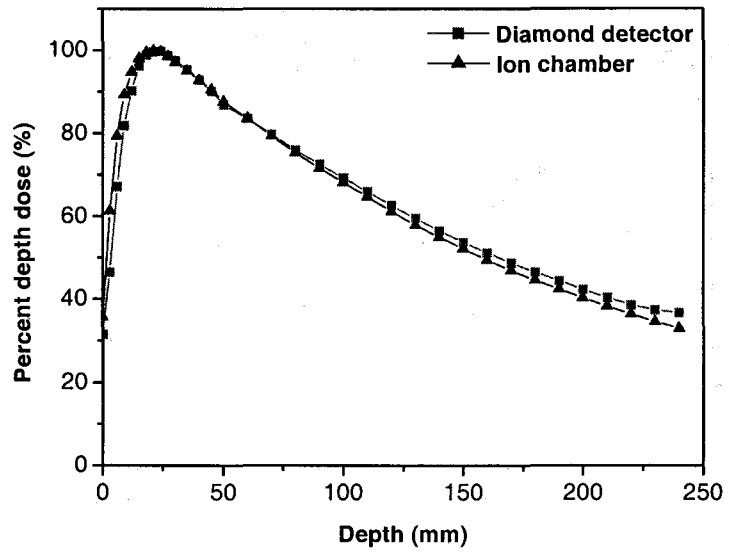


Fig. 4. Percent depth dose curves of $1.5 \times 1.5 \text{ cm}^2$ for 10 MeV photon beam.

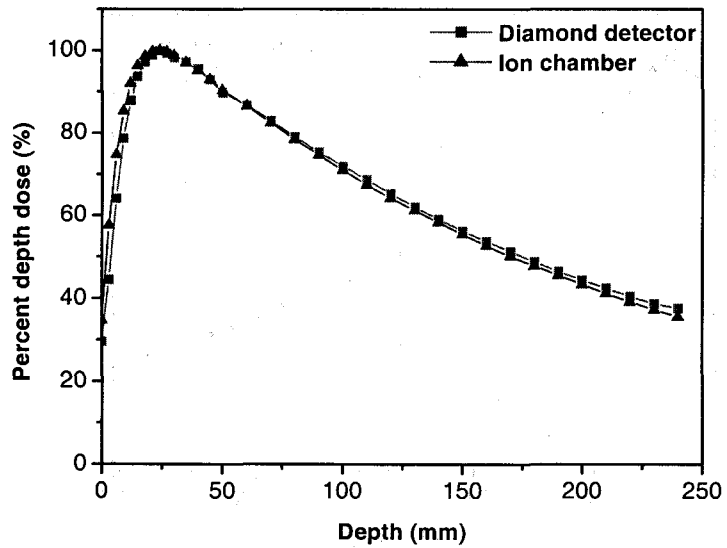


Fig. 5. Percent depth dose curves of $4.0 \times 4.0 \text{ cm}^2$ for 10 MeV photon beam.

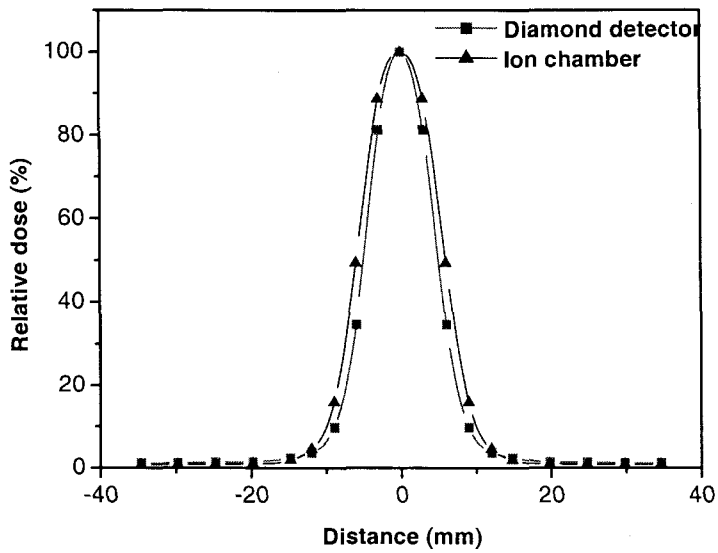


Fig. 6. Beam profiles of 1.0x1.0 cm² for 6 MeV photon beam.

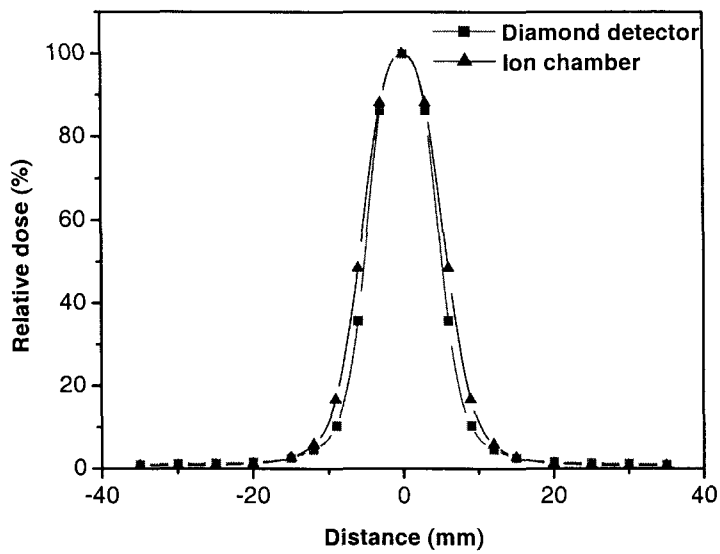


Fig. 7. Beam profiles of 1.0x1.0 cm² for 10 MeV photon beam.