

## 선량보강(Build-up) 영역에서의 광자선 깊이선량을 측정 위한 검출기의 특성 비교

한림대학교 의과대학 방사선종양학교실

강세권 · 조병철 · 박석원 · 오도훈 · 박희철 · 김수산 · 배훈식

표면 선량을 포함한 선량보강(build-up) 영역에 대한 깊이선량률(percentage depth dose)을 측정하는 데 있어서 적절한 측정방법을 결정하기 위해 6 MV 광자선에 대해 Attix와 Markus 평행평판형 이온함, 원통형이온함, 그리고 다이오드 검출기를 사용하여 측정, 비교하였다. Attix 이온함에 의한 측정을 기준으로 할 때, Markus 이온함의 측정은 민조사면(open field)에서 2% 내로 일치하였으나, 오염전자가 포함된 광자선의 경우에는 최대 3.9%의 차이를 보였다. 원통형 이온함과 다이오드 선량계의 경우에는 이들 검출기가 물 팬텀에 완전히 잠긴 이후부터는 오염전자가 포함된 광자선에 대해서도 각각 1.5% 혹은 1.0% 내의 정확도를 보였다. 따라서 민조사면에서 표면선량을 포함한 깊이선량률을 정확히 측정하기 위해서는 평행평판형 이온함이 추천되나, 표면에서의 정확한 선량에 특별한 관심을 두는 경우가 아니면, 원통형 이온함이나 다이오드 선량계를 이용하여 선량보강영역의 깊이선량률을 측정하는 것은 양호한 결과를 준다고 할 수 있다.

**중심단어:** 선량보강(Build-up), 전자오염, 이온함, 다이오드 선량계

### 서 론

방사선 치료를 위한 처음의 중요 작업은 깊이선량률(percentage depth dose; PDD), 가로방향선량곡선(transverse dose profile) 및 출력인자(output factor) 등 선량 분포를 정확히 측정하는 것이다. 거의 모든 측정에는 이온함이 이용되며, 깊이선량률 역시 이온함으로의 측정이 추천되고 있으나, 선량보강(build-up)영역은 선량변화율이 클 뿐 아니라 오염전자의 기여까지 있어서 정확한 측정이 쉽지 않다.

깊이선량률에서의 선량보강영역은 선량변화가 급격한 지역으로 외삽형 이온함(extrapolation chamber)을 이용하는 것이 이상적이다. 외삽형 이온함은 각각의 위치에 대해 전극 간격을 좁혀가며 측정한 다음, 이를 외삽하여 그 위치에서의 선량을 정확히 측정하는 것으로서 주로 표면 선량을 측정하는 데 이용되나, 한 위치에서의 선량을 측정하는데 너무 많은 시간과 노력이 든다는 단점이 있어서 폭넓게 이용되지는 못하고 있다. 한편, Markus 이온함과 같은 일반

평행평판형 이온함을 이용하는 경우에는 이온함의 측면 벽에 의한 산란선에 대해 보정을 해야 한다.<sup>1-3)</sup> 여기에서의 유효측정점은 평행평판형 이온함의 전면 입사창의 안쪽 면 위치에 해당한다. 좀 더 간편하게는 원통형 이온함을 사용하는 것이며, 흔히 이 측정값으로 전산화치료계획장치의 취역검사(commissioning)를 수행하는데, 측정 체적이 커서 위치에 따른 급격한 선량 변화를 제대로 측정하지 못하는 단점이 있다.

한편, 다이오드 선량계는 유효측정점이 선량계 표면에서 0.5 mm 내로 매우 작아 측정체적 또한 작아서 선량변화율이 큰 영역에 적합하다. 그러나 다이오드 선량계의 측정값은 예를 들면, 입사빔과 다이오드 검출기 사이의 방향 및 선형가속기의 선량률에 영향을 받으며,<sup>4)</sup> 또한 지속적인 방사선 조사에 의해 반도체의 성능이 저하되어 그 감도가 변하는 문제가 있을 수 있어서 항상 기준 이온함과의 비교를 권장하고 있다.<sup>5)</sup>

여기에서는 선량보강영역에서의 여러 선량계의 특성을 비교하고 Attix 이온함에 의한 측정을 기준으로 각 선량계의 유용성을 평가해 보고자 한다.

### 재료 및 방법

5×5 cm<sup>2</sup>, 10×10 cm<sup>2</sup> 및 20×20 cm<sup>2</sup>의 조사면에서, Primus 선형가속기(Siemens, 미국)의 6 MV 광자선을 이용하여

본 연구는 원자력 연구개발 중장기 사업(M2-0242-01-0002)의 지원 하에 이루어졌음.

이 논문은 2005년 3월 9일 접수하여 2005년 6월 9일 채택되었음.

책임저자 : 조병철, (431-070) 경기도 동안구 평촌동 896

한림대학교 성심병원 방사선종양학과

Tel: 031)380-3911, Fax: 031)380-3913

E-mail: bychul@hallym.or.kr

깊이선량률을 측정하였다. 0.125 cc 원통형 이온함(PTW23323, PTW, 독일) 및 p형 실리콘 다이오드 선량계(PFD, Scanditronix, 스웨덴)는 물 팬텀에서, 평행평판형인 Markus 이온함(PTW23343, PTW, 독일) 및 Attix 이온함(model 449, RMI, 미국)은 고체 팬텀(Solid Water, Nuclear Associates, 미국)을 이용하여 측정하였다.

PTW23323 원통형 이온함의 경우, 내반경은 3.0 mm 이어서, 유효측정점을 고려하기 위해 이온함의 중심점을 1.8 mm 이동하여 측정하였으며,<sup>6)</sup> Scanditronix p-Si 다이오드 선량계는, 전극을 싸고 있는 에폭시 수지에 전극을 기준으로 아래쪽  $2\pi$  라디안의 입체각에 대해 텅스텐 파우더를 섞어 넣은 광자선용이다.<sup>7)</sup>

평행평판형 이온함의 측면 벽은 내부 공기에 비해 상대적으로 매우 큰 밀도를 갖기 때문에 측면 벽에서 산란된 일부 전자들이 수집 전하에 기여하여 실제 동일 지점의 물에서의 흡수선량에 비해 과대평가를 하게 되므로 적절한 보정이 필요하다. 보정의 정도는 측정영역과 측면 벽 사이에 보호영역(guard ring)이 얼마나 충분한가에 의해 결정된다.<sup>1)</sup> 본 연구에서 사용한 Markus 이온함은 보호영역이 충분하지 못한 대표적인 평행평판형 이온함으로 알려져 있고, 따라서 깊이선량률 측정은 Rawlinson 등<sup>1)</sup>의 방식을 이용하여 평행평판형 이온함의 측면에서 발생하는 산란전자선에 대해 보정하였다.

$$\text{즉 } P(d) = \dot{P}(d) - \xi(0) e^{-4d/d_{\max}}$$

여기서  $P$ 는 보정된 실제 깊이선량률(%),  $\dot{P}$ 은 측정된 깊이선량률(%),  $d$ 는 표면으로부터의 깊이이다.  $\xi(0) = c(E) (s/w) \rho^{0.8}$ 는 보정인자로서,  $\rho$ 는 측벽 재료의 밀도,  $s$ 는 전극 간격,  $w$ 는 측면 벽의 직경으로 Markus의 경우,  $s/w \sim 1/3$ 이며, 6 MV에 대해  $d_{\max} = 1.5$  cm, 에너지  $E$ 의 함수인 매개변수  $c(E)$ 는  $c(E) = 27\%$ 를 이용하였다. Attix 이온함의 경우에는  $s/w \sim 1/40$ 이므로 측정된 깊이선량률에 보정해 주어야 하는 양이 최대 0.5% 수준이어서 산란선의 보정을 별도로 해주지는 않았으며, 두 이온함 모두 극성에 의한 효과는 보정하였다.

또한, 광자선에 포함된 오염 전자선의 정도에 따른 선량계들의 반응을 비교하기 위하여, 1.0 cm 두께의 PMMA재질로 제작된 빔 스포일러(beam spoiler)를 물 팬텀 표면으로부터 위쪽으로 6 cm 위치(Spoiler-To-Surface-Distance; 이하 STSD로 표기함)에 두어 오염 전자선이 포함된 광자선을 만든 다음, 앞에서 사용한 0.125 cc 원통형 이온함, Scanditronix 다이오드 선량계, Markus 이온함 및 Attix 이온함을 이용하여 깊

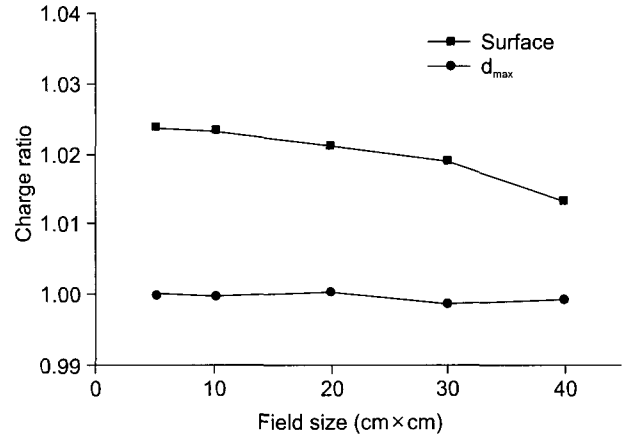


Fig. 1. Polarity effects of the Markus chamber for 6 MV photon beam at the phantom surface and the  $d_{\max}$  as a function of field sizes. The charge ratio is the ionization measurements of negative bias voltages relative to those of positive bias voltages.

이선량률을 다시 측정하였다.

또한 BEAM을 이용한 몬테칼로 시뮬레이션을 수행하여 오염전자선의 선량기여도 평가 및 Attix 이온함의 측정값에 대한 기준으로 삼았다.<sup>8,9)</sup>

모든 측정값 및 시뮬레이션 결과는 오염전자선에 의한 선량 변화를 알아보기 쉽도록, 최대선량점 깊이가 아닌 3.1 cm에서 1로 규격화하였다.<sup>10)</sup>

## 결과 및 논의

통상적으로 평행평판형 이온함은 입사 빔에 수직하게 두고 사용하며, 이 경우 이온함 내에 형성되는 전기장은 광자선의 진행 방향과 나란하다. 여기에 입사창 쪽의 전극에 음전압을 가하면, 대부분 광자선의 진행 방향을 따라 형성되는 2차 전자는 부가 에너지를 얻게 되고, 입사창 쪽에 양전압을 가하는 경우보다 좀 더 많은 이온화를 만들며, 이로 인해 극성에 따른 수집 전하에 차이가 있게 된다.<sup>5)</sup> 따라서 평행평판형 이온함의 경우에는 가해진 전압의 극성 효과를 보정해야 한다. 원통형 이온함은 이러한 효과가 상대적으로 미미하다.

Fig. 1은 팬텀 표면과 최대선량깊이에서, Markus 이온함의 인가전압의 극성을 바꾸어 얻은 측정 전하량의 비를 조사면의 함수로 나타낸 것이다. 이 극성효과는 조사면이 작을수록, 그리고 표면으로 갈수록 두드러져서,  $5 \times 5$  cm<sup>2</sup> 경우 표면에서 약 2.4% 정도이다. Attix 이온함에 대해 동일한 측정을 한 결과, 극성효과는 더 커서,  $5 \times 5$  cm<sup>2</sup>의 조사

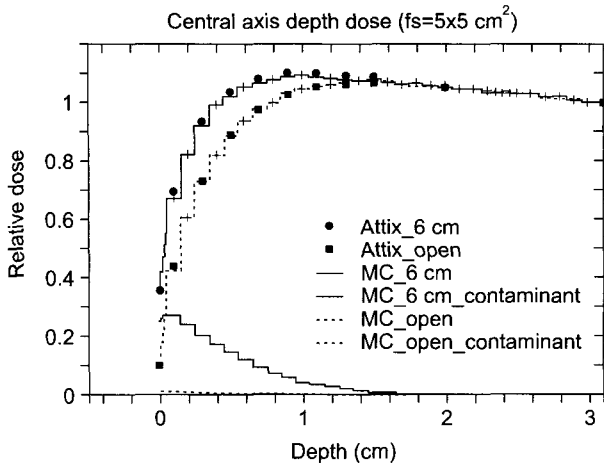


Fig. 2. Comparisons of relative depth doses in the build-up region between measurements with the Attix chamber and the Monte Carlo (MC) simulations for 6 MV photon beam (field size of  $5 \times 5 \text{ cm}^2$ ). The two lines at the bottom of the figure are for contaminant electrons with a spoiler (STSD=6 cm) and without a spoiler (open field). The measurements are normalized at 3.1 cm depth (see text for explanation). In the legend, 6 cm stands for the case of beam spoiler with STSD=6 cm and open stands for open beam.

면 경우, 표면에서 9%에 달하였다. Attix 이온함의 큰 극성 효과는 주의해야 할 문제여서 인가전압의 극성을 바꾸어 측정 후, 그 평균값을 이용하는 것이 바람직하다. 그러나 표면 선량이 상대적으로 작아서, 최대선량  $D_{max}$ 를 기준으로 하면 극성효과는 실질적으로 1% 수준이고, 따라서 이 정도의 오차를 감안하고 양전압으로 측정된 값만을 이용하는 것도 고려해 볼 만하다.<sup>11)</sup> 우리는 Markus 및 Attix 이온함에 대하여  $\pm 300 \text{ V}$ 를 가하여 전하를 측정하는 다음 평균하였다.

Fig. 2는 조사면  $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 에서, 빔 스포일러와 팬텀 표면까지의 거리(STSD)가 6 cm인 경우 및 빔 스포일러가 없는 경우에 대하여 Attix 이온함을 이용한 깊이선량률 측정과 몬테칼로 시뮬레이션을 비교한 것이다. 참고로 아래쪽의 감소해 가는 두 선은 오염전자에 의한 깊이선량률 기여를 몬테칼로 시뮬레이션을 통해 얻은 것으로, 6 MV 광자선이 빔 스포일러를 지나며 만든 오염전자는 표면으로부터 대략 2 cm 깊이까지 선량에 기여하고 있다. 따라서 비교를 위해 모든 측정을  $d=3.1 \text{ cm}$  깊이에서 1로 규격화하는 것은 무리가 없음을 알 수 있다. 3.1 cm에서의 규격화는 측정된 자료의 제한 때문에 택한 것으로 특별한 의미는 없다. 오염전자가 표면 선량에 기여하는 비율은 STSD가 작을수록, 조사면이 클수록 커진다.<sup>10)</sup> 6 MV 광자선 및 STSD=6 cm의 spoiler에 대하여 몬테칼로 시뮬레이션을 이용하여 계산한

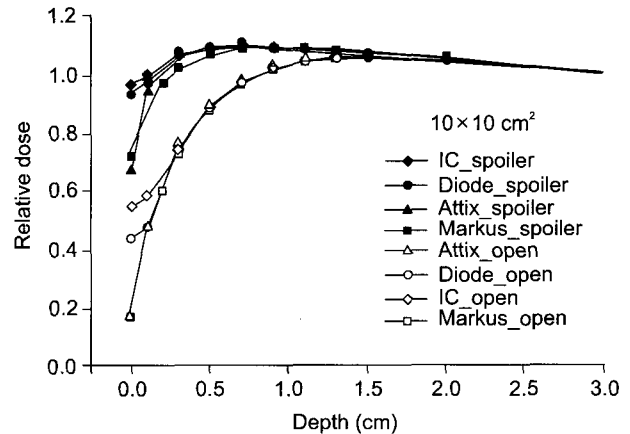


Fig. 3. Measured relative depth doses for field size of  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  with a spoiler (STSD=6 cm) and without a spoiler (open field). IC\_spoiler (or open) is using an ion chamber of PTW 0.125 cc. The normalization of measurements is the same as Fig. 2.

깊이선량률은,  $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 에서  $20 \times 20 \text{ cm}^2$ 까지의 모든 조사면 크기에서 최대선량  $D_{max}$ 를 기준으로,  $d_{max}$  이후 깊이에서는 1% 이내에서, 선량보강영역의 경우에는 2% 이내에서 Attix 이온함의 측정치와 일치하였다. 이후 논의에서는 Attix 이온함에 의한 측정을 기준으로 하도록 한다.

Fig. 3은 조사면  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 에서 STSD=6 cm으로 빔스포일러를 장착하여 오염전자가 많이 포함되게 한 경우와 민조사면(open field)에 대해, 여러 검출기를 이용하여 얻은 깊이선량률을 나타낸 것이다. Markus 이온함의 경우에는 민조사면 및 빔 스포일러의 경우 모두에 대해, Rawlinson 방식을 따라 평행평판형 이온함의 측면 벽에 의한 과응답을 보정하였다. 민조사면의 경우, Markus 이온함의 측정은 전 구간에서 Attix 이온함의 측정과 2% 내에서 일치한다. 그러나 빔스포일러를 이용한 오염전자가 다량 포함된 경우에는 사정이 달라서 표면에서 5%의 오차를 보이고 있다. 이것은 Rawlinson 방식의 보정이 오염전자가 없는 순수 광자선을 이용했기 때문으로, 전자가 포함된 광자선에 대해서는 효과적이지 못함을 알 수 있다.<sup>1)</sup> 민조사면에 대해 원통형 이온함을 이용한 경우, 표면의 두 측정값을 제외하면 측정된 3 mm 지점부터는 1.9% 내에서 Attix 측정과 일치하며, 빔 스포일러를 이용한 경우에도 그 정확도는 1.5%를 유지한다. 표면 부근의 측정에서 발생하는 이러한 문제는 원통형 이온함인 물 팬텀 내에 완전히 잠기지 못해서 발생한다. 측정에 이용된 원통형 이온함의 외반경이 3.5 mm이고, 유효측정점 이동을 위해 1.8 mm를 이동시켰으므로, 표면으로부터 1.7 mm 이후 깊이에서야 비로소 원통형 이온함은 물에 완전히 잠기게

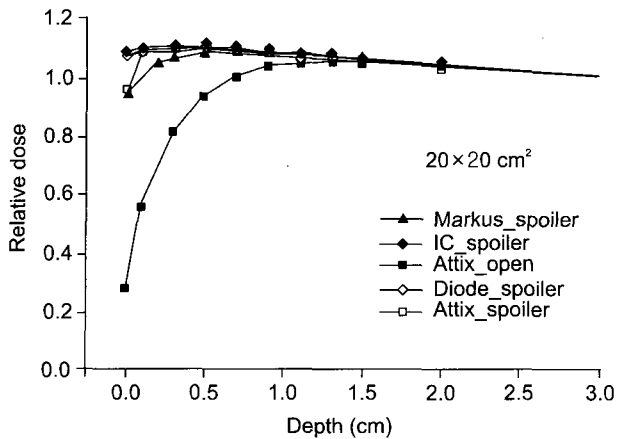


Fig. 4. Measured relative depth doses for field size of  $20 \times 20 \text{ cm}^2$  with a spoiler (STSD=6 cm). The case of the Attix chamber without a spoiler (Attix\_open) is also shown for comparison. The normalization of measurements is the same as Fig. 2.

된다. 이러한 현상은 다이오드 선량계의 경우에도 그대로 적용된다. 민조사면의 경우, 다이오드 선량계의 측정은 표면에서의 측정만을 제외하고 1 mm 깊이부터 1.0% 내로 일치하며, 빔 스포일러가 이용된 경우 역시 1.3% 내를 유지한다. 다이오드 선량계의 유효측정점이 0.6 mm이므로, 이 역시 물에 잠긴 이후부터는 빔 스포일러에 의한 오염전자 유무에 관계없이 적절한 측정값을 주는 것을 알 수 있다.

Fig. 3에서 언급한 사항은 STSD=6 cm의 빔 스포일러에 조사면이  $20 \times 20 \text{ cm}^2$ 로 커져서 오염전자의 양이 많아진 Fig. 4에서 더욱 두드러진다. Markus 이온함의 측정은 선량보강영역에서 Attix 이온함의 측정과 3.9%의 차이를 보이고 있고, 원통형 이온함에 의한 측정은 1.5% 내, 다이오드 선량계는 1.0% 내를 유지한다. 물론 이 경우에도 물에 완전히 잠기지 않은 측정치는 제외한 것이다. Markus 이온함은 전극 간격이 작아서, 선량의 기울기가 급한 선량보강영역의 대표적인 측정도구로 알려져 있다. 그러나 방수기능이 있다 해도, 물 팬텀을 이용하는 경우 이온함의 표면에 남아있는 물로 인해 오차가 발생해서, 표면선량을 측정하기 위해서는 고체팬텀을 이용하는 것이 적절하다. 또한, 이 실험에서 이용한 PTW사의 Type 23343 Markus 이온함과 같이 측면 벽의 직경에 대한 전극 간격의 비가  $s/w \sim 1/3$  수준인 경우에는 측면 벽에 의한 산란선을 보정해 주어야 하며, 이 보정 역시 오염전자가 포함된 광자선에 대해서는 적용이 안 된다. 따라서 오염전자의 유무에 관계없이 평행판형 이온함을 이용하고자 할 때에는  $w/s$  값이 최소 25 이상 되어, 측면 벽에 의한 산란기여가 작은 전리함을 선택

할 필요가 있다.<sup>11)</sup> Markus 이온함의 이러한 번거로운 점을 고려할 때, 표면 선량에 특별히 관심을 두는 경우가 아니라면, 원통형 이온함이나 다이오드 선량계를 이용하여 선량보강영역의 깊이선량률을 측정하는 것은 훌륭한 대안으로 보인다. 또한, 물에 완전히 잠기기 전에 측정된 데이터에 문제가 있으므로, Wellhofer사의 CC01 (외반경 1.5 mm) 과 같은 미소 체적의 원통형 이온함을 이용하면 이번 실험에 이용한 PTW23323 이온함(외반경 3.5 mm) 에 비해 표면에 더욱 근접한 지점의 선량값을 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 다이오드 선량계는 정위방사선 수술과 같은 작은 조사면이나 선량기울기가 큰 조사면경계의 측정 등에 유용하며, 전자선 측정의 경우, 전하량이 아닌, 선량을 직접 결과로 주는 이점이 있다.<sup>12)</sup> 다이오드 선량계는 200 cGy를 1,000회 조사하는 동안 약 25%의 감도저하가 보고되어 있어서,<sup>13)</sup> 절대선량 측정에는 적합하지 않은 것으로 받아들여지고 있지만, 깊이선량률은 깊이에 따른 선량의 비율을 구하는 것이므로, 다이오드 선량계를 이용하여 깊이선량률을 얻는 것도 유용한 방법이다.

## 결론

6 MV 광자선에 대하여 여러 검출기를 이용하여 선량보강영역의 깊이선량률을 측정, 비교하였다. Markus 이온함을 이용한 측정은 오염전자가 없는 민조사면에 대해서는 이온함의 측면 벽에 의한 과응답을 적절히 보정해 줄 수 있었으나, 오염전자가 있는 경우에는 보정인자의 실험적 보고가 없는 관계로 선량보강영역의 깊이선량률 측정에 적절치 못하였다. 반면에, 원통형 이온함 및 다이오드 선량계는 검출기 전체가 물에 잠긴 깊이부터는 선량보강영역을 잘 재현하였다. 원통형 이온함 및 다이오드 선량계는 특히 오염전자가 포함된 경우, Markus 이온함에 비해 전반적으로 양호한 특성을 보였다. 따라서 민조사면이나 오염전자가 많이 포함된 경우 모두의 선량보강선량(build-up dose)을 측정하는데 있어서, 특별히 표면 및 표면 근처에서의 정확한 선량을 측정하고자 하는 것이 아닌 경우에는 원통형 이온함이나 다이오드 선량계를 이용하면, 번거로운 보정을 수행하고서도 만족스럽지 않은 Markus 이온함 이상의 정확도를 보임을 알 수 있었다.

## 참고 문헌

1. Rawlinson J, Arlen D, Newcombe D: Design of parallel

- plate ionization chambers for build-up measurements in megavoltage photon beams. *Med Phys* 19:641-648 (1992)
2. **Gerbi B, Khan F**: Measurement of dose in the build-up region using fixed separation plane parallel ionization chambers. *Med Phys* 17:17-26 (1990)
  3. **Velkley D, Manson D, Purdy J, Oliver G**: Build up region of megavoltage photon radiation sources. *Med Phys* 2:14-19 (1975)
  4. **VanDam J, Leunens G, Dutreix A**: Correlation between temperature and dose-rate dependence of semiconductor response-influence of accumulated dose. *Radiother Oncol* 19:345-351 (1990)
  5. **Metcalfe P, Kron T, Hoban P**: The Physics of radiotherapy: X-Rays from Linear Accelerators. Medical Physics Publishing, Madison, Wisconsin (1997)
  6. **IAEA Technical Report 277**: Absorbed dose determination in photon and electron beams. An International Code of Practice. Vienna, Austria, International Atomic Energy Agency (1987)
  7. **Rikner G, Grusell E**: Selective shielding of a p-Si detector for quality independence. *Acta Radiol Oncology* 24:65-69 (1985)
  8. **Rogers DWO, Faddegon BA, Ding GX, Ma CM, We J, Mackie TR**: BEAM: a Monte Carlo code to simulate radiotherapy treatment units. *Med Phys* 22:503-524 (1995)
  9. **강세권, 조병철, 박희철, 배훈식**: 모델기반 광자선량 계산방식을 사용하는 전산화치료계획장치의 모델변수 결정에 있어 몬테카를로 모사법에 의해 유도된 방사선 물리량의 직접 적용 가능성에 대한 연구. *의학물리* 15:77-83 (2004)
  10. **McKenna MG, Chen XG, Altschuler MD, Bloch P**: Calculation of the dose in the build-up region for high energy photon beam. Treatment planning when beam spoilers are employed. *Radiother Oncol* 34:63-68 (1995)
  11. **Butson MJ, Yu PKN, Cheung T**: Polarity effect on surface dose measurement for an attix parallel plate ionisation chamber. *Aust Phys Eng Sci Med* 26:85-87 (2003)
  12. **John LH**: Acceptance tests and commissioning measurements. Podgorsak, EB: Review of Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria (2003)
  13. **Rikner G, Grusell E**: Effects of radiation damage on p-type silicon detectors. *Phys Med Biol* 11:1261-1267 (1983)

## Characteristics of Detectors for Measurements of Photon Depth Doses in Build-Up Region

Sei-Kwon Kang, Byung Chul Cho, Suk Won Park, Do Hoon Oh,  
Hee Chul Park, Su Ssan Kim, Hoonsik Bae

Department of Radiation Oncology, College of Medicine, Hallym University

To determine the appropriate method out of various available methods to measure build-up doses, the measurements and comparisons of depth doses of build-up region including the surface dose were executed using the Attix parallel-plate ionization chamber, the Markus chamber, a cylindrical ionization chamber, and a diode detector. Based on the measurements using the Attix chamber, discrepancies of the Markus chamber were within 2% for the open field and increased up to 3.9% in the case of photon beam containing the contaminant electrons. The measurements of an cylindrical ionization chamber and a diode detector accord with those of the Attix chamber within 1.5% and 1.0% after those detectors were completely immersed in the water phantom. The results suggest that the parallel-plate chamber is the best choice to measure depth doses in the build-up region containing the surface, however, using cylindrical ionization chamber or diode detector would be a reasonable choice if no special care is necessary for the exact surface dose.

**Key Words** : Build-up, Electron contamination, Ionization chamber, Diode detector