

광자선에 의한 민조사면 경계영역의 선량분포

전북대학교병원 치료방사선과

*전북대학교 의과대학 치료방선과학교실

전주시 덕진구 금암동 634-18

김진기, 김정수*, 권형철*

방사선조사면의 가장자리는 반응영역으로 선량변화가 급격한 부분이다. 이러한 부분은 메가볼트 광자선 영역의 조사면에서 선원크기, 콜리메이터, 차폐블럭, 보조기구 그리고 내부산란선에 의한 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 기준조사면 경계 영역의 선량특성을 확인하고 선형적인 이론적 관계식으로 비교하여 치료시스템 조사면의 특성을 알고자 하였다. 조사면 경계영역의 주변선량분포를 깊이와 중심축으로부터 거리의 함수로서 구성하여 6MV 광자선에 의한 민조사면 경계영역의 주변선량분포를 측정하고 이를 선형적인 함수분포와 비교하였다. 3차원 물 팬텀으로 조사면 가장자리 영역의 주변선량분포를 측정하고 이를 선형적인 함수값과 비교하여 측정치와 근접한 함수방법을 알아보았다.

반도체 검출기와 전리함으로 최대선량점, 5 cm, 10 cm 깊이의 위치에서 측정값의 비를 이용하고, 유효 가장자리 영역은 80-20 % 를 선택하여 거리의 함수로 분석하였다. 깊이가 증가함에 따라 경계영역의 선량폭이 증가하였다. 주변선량분포에서 검출기의 특성에 따라서 측정값과 함수값에 작은 차이가 있었다. 민조사면 경계영역 선량 분포함수를 비교하였다.

중심단어 : 민조사면 경계영역, 경계면 선량분포함수, 선량측정

서 론

방사선 조사면의 경계영역 선량은 조사면 가장자리에서 받은 방사선량으로 조사면 밖의 민감한 조직이 한계선량에 가까운 선량을 받지 않지만, 경계면 선량에 대한 자세한 선량 분포와 양에 대한 정확한 예측은 조사면 경계영역에서 이차적 예후와 방사선량 사이의 상관 관계를 고찰하는 연구에 필요하다 하겠다.^{1,2)} 방사선 치료의 영향은 주변정상조직의 방사선 피폭을 줄이고 종양에만 집중적으로 방사선을 조사할 수 있도록 치료계획을 통하여 종양크기와 모양에 맞는 조사면에 대한 최적의 방법을 구하는 것과 정확한 조사선량의 분포에 따라 크게 좌우된다. 그리고 치료 조사면의 형태를 정하는 것은 중요장기의 방어뿐만 아니라 정상 조직에 불필요한 방사선 피폭을 줄이는데 절대적으로 필요한 것이다.¹⁻⁵⁾ 이를 위하여 부가적인 차폐체를 이용하거나 다엽 콜리메이터를 사용하지만 여전히 조사면 경계영역의

선량분포에 대한 문제점을 가지고 있다. 다엽 콜리메이터는 자동제어 시스템을 이용하여 방사선 치료 조사면과 유사한 조사면을 만들 수 있지만 이는 계단식 형태의 경계면으로 인하여 기존 모델의 경우 선량분포에 보정이 요구되고 있다^{6,7)}. 이에 저자들은 선형가속기에 이용되는 정사면 기준조사면의 깊이에 따른 경계면 선량분포의 특성을 비교하고, 방사선 조사면 경계의 선량분포에 영향을 주는 인자로 기기구조의 기하학적성분, 팬텀체적에 의한 산란성분, 그리고 측정형태의 구조적 산란성분등을 고려하여 선량 분포도 및 측정 자료를 통하여 기존 경계면 선량분포 함수모델과 비교, 분석하고 나아가 주변선량분포 함수모델을 보완하고자 하였다. 또한 경계면 선량의 계산방법의 개발에 필요한 선량의 계산과 측정값들은 조사면의 방사선 차폐에 대한 평가에 활용 될 수 있어 본 연구에서는 임상에 이용되는 6MV 광자선의 민조사면 경계영역의 선량분포를 알아보고, 측정값과 분포함수의 계산 결과를 비교하였다.

재료 및 방법

1. 실험방법

의료용 선형가속기 Mevatron 6700(Siemens, 독일)을 이용한 6 MV 광자선에서 정사면 민조사면의 깊이에 따른 경계면 선량분포를 균일한 조직 조건에서 3차원 물팬텀, RK 전리함 그리고 p-Si 반도체 검출기(Scanditronix, 스웨덴)로 구성된 RFA-7 선량계측시스템(Scanditronix, 스웨덴)과 PR-06C 전리함으로 구성된 기준선량계측시스템(Capintec, 미국)을 이용하여 측정하고, 선량분포에 영향을 주는 인자로 선형가속기 구조의 기하학적성분, 팬텀체적에 의한 산란성분, 측정형태의 구조적 산란성분을 고려하여 측정된 자료에 의하여 기존 경계면 선량분포 모델과 비교한다. 실험방법을 요약하면 다음과 같다.

- 1) SSD 100 cm, 10x10 cm² 조건의 1.5 cm, 5 cm 그리고 10 cm 깊이에서 중심축선에 대칭형태로 전 조사면에 대한 등선량분포도를 얻는다.
- 2) SSD 100 cm, 10x10 cm² 조건의 1.5 cm, 5 cm 그리고 10 cm 깊이에서 중심축선에 비대칭형태로 반조사면에 대한 등선량분포도를 얻는다.
- 3) 측정된 등선량분포를 가지고 경계면의 선량분포 함수와 비교한다.
- 4) 검출기별 측정자료를 통하여 경계면 선량분포에 대한 영향인자를 분석한다.
- 5) 경계면 선량분포에 대한 분석은 조사면의 크기에 따라, 유효반응영을 20 - 80 % 등선량분포곡선을 연결한 직선의 거리로 정하여 비교한다.

2. 검출기의 특성

선량분포 측정에 있어서 반도체 검출기는 계측용적이 선량계측에 많이 사용되고 있는 공기전리함의 용적에 비해 매우 소형으로 공간분해능이 우수하며 방사선 감도가 공기전리함에 비해 높은 것으로 알려져 고에너지 광자선 및 전자선의 선량계측에 많이 이용되고 있다. 자료에 의하면 실리콘 반도체 검출기에 영향을 주는 변수들이 많이 있음을 알 수 있다. 특히 반도체 검출기에 의한 비교적 저에너지 광자선의 심부선량곡선에서 깊은 지점의 선량이 과대

평가 되었으며, 큰 조사면에서 왜곡이 나타남을 보고한 바 있다. p-Si 반도체검출기는 방사선이 조사되면 전자-정공쌍이 다이오드내에 생성되고, 공핍층내 생성된 많은 수의 이동전하로 인해 전류신호를 얻게 된다. 또한 하전입자에 의한 손상을 입게 되므로 전자-정공쌍의 생성 및 전하캐리어의 감소로 감도가 저하된다. 따라서 반도체검출기는 검출기의 구조와 모양에 따라 선량 특성이 다르게 나타날 수 있다⁸⁻¹⁰.

본 연구의 경계면 선량분포의 측정은 공간분해능이 높아야 하기 때문에 전술한 반도체 검출기의 특성을 고려하여 이에 적합한 p-Si형 반도체 검출기(Scanditronix, 스웨덴)와 RK 소형 전리함(Scanditronix, 스웨덴)을 가지고 측정의 재현성을 얻고자 하였다. 연구에 이용된 검출기는 검출 유효면적의 크기가 지름이 0.25 cm, 두께가 0.06 mm 인 p-Si 반도체검출기와 공기 체적이 0.12 cm³ 이고 지름이 4 mm 인 전리함 등을 이용하였다.

3. 조사경계면 선량분포의 함수

선량분포가 급격히 감소하는 조사면 경계영역의 선량분포함수는 Fig.1.에서 보는바와 같이 일반적인 함수꼴을 적용하기에는 α_1 , α_2 부분에서 다른 양상을 보이기 때문에 몇가지 변형된 함수모델이 제시되고 있다. 조사면 경계영역의 주된 산란선 영향 때문에 제시된 함수모델의 변수를 조사면 조건에 따라 확인하여야 한다. 여기에서 제시된 변형 함수모델을 가지고 즉 Johns 등¹⁰이 제시한 이차지수함수 모델과

Relative Dose (%)

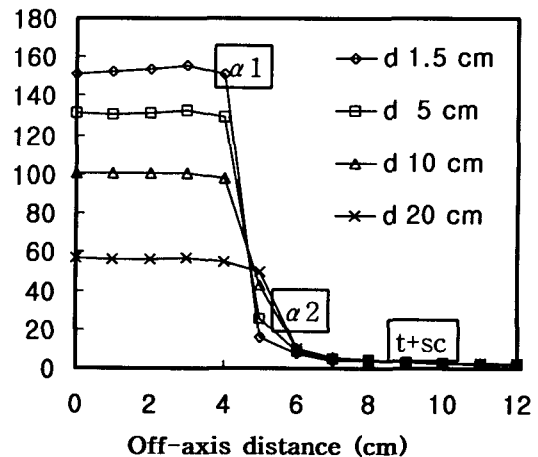


Fig. 1. Shape of measured beam profile for 6 MV photon beam in field size 10x10 cm²

Target 사용법에 제시된 Cosine 함수모델 그리고 Korn 등¹¹⁾이 제시한 square root 함수모델을 비교하여 측정된 실험 조건에 부합하는 함수모델과 함수내 실용변수를 확인하였다. 비교를 위해 선택한 함수모델 3가지는 다음과 같은 관계식으로 표현된다.

$$D_{pen}(d_{ref}, x) = 1 - \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{\alpha_1}{p}\right) \left(\left(\frac{W_d}{2}\right) - |x|\right) \quad \text{①}$$

여기서 $|x| \leq \frac{W_d}{2}$ 이다.

$$D_{pen}(d_{ref}, x) = (t + s_c) \left(\frac{1}{2} - (t + s_c)\right) \exp\left(-\frac{\alpha_2}{p}\right) \times \left(|x| - \left(\frac{W_d}{2}\right)\right) \quad \text{②}$$

여기서 $|x| \geq \frac{W_d}{2}$ 이다. 함수에서 각각의 변수는 다음과 같다. α_1 : upper profile curve shape, α_2 : lower profile curve shape, p : 경계영역의 폭인자, x : off-axis 거리, $W_d/2$: d_{ref} 깊이에서 빔에너지 반폭치, t : 콜리메이터 투과인자, s' : 선원의 크기이다.

둘째, Target 사용법에 제시된 Cosine 함수모델은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$D_{pen}(d_{ref}, x) = \frac{\cos\left(\frac{d_{pen}}{s'} \times 180\right) + 1}{2} \times (1 - (t + s_c)) + (t + s_c) \quad \text{--- ③}$$

여기에서 $s' = \left(\frac{f_c}{f + d_{ref}}\right) \times p'$ 이다.

셋째, Korn 등¹¹⁾이 제시한 square root 함수모델은 다음과 같은 식으로 요약된다.

$$D_{pen}(s) = \frac{1 - (t + s_c)}{2} \times \left(1 - \sqrt{\frac{s}{s^2 + n}}\right) + (t + s_c) \quad \text{--- ④}$$

여기서 f_c 는 선원과 콜리메이터의 거리이고 d_{pen} 는 조사면 경계영역의 거리, t 는 차폐체의 투과인자, p' 는 d_{ref} 에서 측정된 80%-20% 경계영역의 폭, p'' 는 $2.4 \times p'$ 이고, s 는 조사면 가장자리부터의 거리로 s 는 $x - W_d/2$ 와 같다. $1 - (t - s_c)$ 는 기준위치에서 경계영역의 최대 높이, n 은 제시된 경험적 인자로 6MV 경우 d_{max} 에서 n 은 4.5로 p' 은 $1.5\sqrt{n}$ 의 관계가 있다.

측정된 자료로부터 함수모델별로 기준함수와의 추

적함수 비교를 통해서 변수를 찾고 이로부터 실험조건에 타당한 함수모델을 RFA-7 측정모델로부터 분석하였다.

결과 및 토의

경계면 선량의 측정값 및 분포 함수에 의한 결과는 표.에서 보는 바와 같이 민조사면의 깊이와 검출기에 따른 경계면 선량분포는 고정된 조사면에서 깊이가 증가함에 따라 경계면 선량폭이 증가한다.

측정된 자료로부터 지수함수모델의 추적함수의 계수로부터 Fig.1에서 보이는 α_1 , α_2 해당계수와 변곡 기울기에 해당하는 대각거리 P 그리고 투과인자 t , 산란인자 s_c 의 비교 값을 Table 1.에 나타내었다. John 등이 제시한 함수모델 인자값과 2% 이내로 일치하였다. Table 2에서 경계영역의 대칭 및 비대칭 조사면에 대한 폭의 결과를 측정값의 비교에서 Biggs 등이 제시한 내용과 일치함을 알 수 있었다. 반도체 검출기 및 전리함을 이용한 비대칭 조사면의 비교값을 Table 3.에 나타내었다. 검출기에 따른 분해능의 차이가 있었다. Table 4.에서 함수모델별 경계영역 결과와 측정값의 비교를 나타내었다. 측정값은 이차지수함수모델과 가장 잘 일치하였다. 선택한 함수모델별의 비교에서 변곡부위에 따른 차이가 크지는 않았지만 일반적인 역자승함수에 따른 감소와 차이가 있었다.

전체 경계면 선량의 분포는 선원과의 거리, 조사면 크기에 따라 영향 인자에 차이가 있었다. 대칭적인 조사면 사용에서 방사선 확산방향으로 반응영의 차이가 거의 나타나지 않았다.

보고된 논의에 따르면 조사야의 크기, 깊이, 거리에 따른 경계면 선량분포는 조사면이 커질수록 경계면 선량폭이 증가하고 기하학적 계산부분 보다 측정치의 차이가 증가하며, 깊이가 증가함에 따라 경계면 선량폭이 증가한다^{12,13)}. 본 연구에서도 위의 보고와 유사한 결과를 보였다. 전체 경계면 선량의 분포는 선원과의 거리, 깊이, 조사면 크기에 따라 영향 인자에 차이가 있다.

비대칭적 경계면선량 분포의 논의는 다양한 경계면 선량분포 자료들에서 부분적인 계산방법에 대한 논의가 나타나 있지만 이러한 자료에서는 단일 기준

Table 1. Suitable exponential forming function parameters that fit half field profile data collected with a shielded diode. 6MV x-rays, 10x10 cm² FS, SSD 100 cm (Johns etc. 1983)¹⁰⁾.

Profile depth (cm)	$\alpha 1$	$\alpha 2$	p(mm)		t+sc(%)
			Johns	CNH*	
1.5	3.1	3.3	6.0	6.2	5.4
5	3.5	3.5	7.0	6.9	7.5
10	3.8	3.9	8.2	8.0	11.0

* p-Si diode detector

Table 2. A comparison of 80%-20% p' widths for symmetric and asymmetric fields using the diode at different depths for 6MV x-rays. SSD 100 cm (Biggs etc. 1991)⁷⁾

Profile depth (cm)	Symmetric 10x10 cm ² 80%-20% width p'(mm)		Asymmetric 10x10 cm ² 80%-20% width p'(mm)	
	Biggs	CNH	Biggs	CNH*
1.5	3.4	3.5	6.0	6.2
5	3.5	3.7	7.0	6.9
10	3.8	4.2	8.2	8.0

* p-Si diode detector & half block

Table 3. A comparison of 80%-20% p' widths for asymmetric field using the diode and RK detector at 100 cm SSD (Metcalfe etc. 1993)⁸⁾.

Measurement	Asymmetric 10x10 cm ² 80%-20% width p'(mm)	
	Metcalfe	CNH
Shielded diode (Scanditronics)	3.6	3.8
Calculated point	3.4	3.4
Ionization Chamber RK	5.0	5.2

Table 4. Exponential, cosine, and square root forming function fits to 6MV profile data at 1.5 cm depth.

Forming function	Distance from the field edge (mm)										
	-10	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	10
Exponential	101	101	100	97	90	63	24	11	7	4	4
cosine	101	101	101	101	82	52	19	5	5	5	4
Square root	100	100	99	96	90	63	23	11	7	5	4
Measured data	101	101	100	98	90	63	23	11	8	7	6

조사면에 따르는 것과 경계면의 몇몇 계산점등에 한정된 경우였다. 또한 측정치의 대부분은 개별적인 성분들보다 전체적인 경계면 선량분포자료였다. 일부 연구에서는 경계면선량 성분들이 깊이, 빔축에 대한 방향각, 조직의 균일성에 서로 다른 의존성을 보이고 있는 것을 나타내고 있다. 이러한 논의에서 전체 경계면선량에 포함되는 일반적인 요인은 첫째 콜리메이터 구조로부터의 산란(기계적 성분), 둘째 팬텀체적으로부터 산란(팬텀성분), 셋째 조사실 벽-바닥-천장으로부터의 산란, 넷째 광중성자 임계에너지 이상의 X-선 빔의 경우 가속기나 체내에서 발생된 중성자 등이었다³⁻⁵⁾.

경계면 선량분포에 이용된 반도체검출기는 검출용적의 크기가 적지만 고감도를 나타내므로 방사선 계측에 많이 이용되고 있다. 또한 선량평가에 있어서 반도체 캡슐의 두께와 크기 및 모양에 따라 방사선 감도가 매우 다르므로 표준선량계로써는 이용되지 못하나 상대선량 측정에는 유리한 점이 많다. 공기전리함은 벽물질의 특성과 용적 및 공기이온화 에너지등이 잘 알려져 있어 기준선량계로 이용되고 있으나 2차전자의 전자평형을 전제로 한 선량평가이므로 조사경계면에 대한 출력선량계측에 오차를 수반하게 된다. 하지만 반도체검출기는 공기전리함을 충분히 포함할 수 있는 방사선 영역에서 보정계수를 구하면 공기전리함으로 측정이 어려운 방사선 영역에 이용될 수 있다. 그러나 반도체검출기는 선량율의존성, 방향의존성, 온도특성 등이 크게 나타나 등방성 유지가 필요한 산란선 평가에는 검출기의 선택에 유의해

야 하며, 검출기의 방향에 따라 측정선량이 달라지게 되므로 재 측정시 검출기의 위치가 일치되어야 한다⁸⁻¹⁰⁾.

Rinser 등⁹⁾ 은 실리콘반도체검출기를 이용한 저에너지 광자선의 심부선량이 실리콘의 광전효과에 의해 과대 평가되고 있고, p-형 반도체검출기의 선량감도가 에너지가 높을 수록 감도가 높은 결과를 갖는다고 하였다. 이에 준한다면 경계면 선량분포함수의 비교에서 Table 4.에서 보는바와 같이 지수함수형 경계면 선량분포함수가 보다 적절하다 하겠다. 조사면 가장자리에서 밖으로 측정시 10 cm 이내에서 $\pm 3\%$ 정도로 팬텀산란량이 최대영향을 나타냈다. 표에서 알 수 있듯이 조사면의 크기에 따라 안쪽과 경계영역에서 2% 이하의 오차를 보이지만 치료영역크기 밖에서는 3% 정도 선량이 과소 평가되는 것으로 나타났다 이는 콜리메이터에 의한 감쇄정도가 과도하게 계산되거나 혹은 경계면밖으로 산란선의 기여량이 적게 고려되고 있는 것으로 판단된다. 따라서 경계면선량분포를 정확하게 모델링하는 일반화된 함수모델은 그 필요성에서 의의가 크다 하겠다.

최근 들어 다양한 선량계산모델이 개발되어 컴퓨터 치료계획시스템에 사용되고 있으나 아직까지 컴퓨터치료계획시스템의 선량계산의 정확도에 대한 기준조건 및 정도관리에 관련된 보고는 많지 않다. 다만 ICRU 보고서 24¹⁴⁾ 인용에 따르면 환자의 방사선 치료에 발생하는 총 오차범위를 5% 이내로 하는 것을 목표로 하고 있으며 치료기의 선량교정에 따른

불확정도의 범위가 2% 임을 감안할 때 컴퓨터 치료 계획시스템의 허용 오차범위는 2-5%로 볼 수 있다. 그러나 이러한 조건은 선량변화가 급격한 영역에서는 만족되기 어려운 점이 있어 Van Dyk 등¹⁵⁾은 치료영역크기 안쪽의 선량변화가 작은 영역, 치료영역 크기 밖의 선량변화가 작은 영역 (최대선량의 7%이하 영역), 그리고 선량변화가 30%/cm 이상인 영역으로 세분하여 선량 계산치의 허용오차를 제안하고 있다. 논고에서처럼 함수모델을 이용한 경계면선량 분포의 검증은 차후 치료계획등의 오차 분석에도 이용할 수 있으리라 사료된다.

결 론

측정비교에서 조사면이 커질수록, 깊이가 증가할수록 경계면 선량폭이 증가하였다. 따라서 조사면의 기하학적 성분의 영향이 가장 크며, 측정별 선량오차는 검출기의 특성에 따른 선량오차가 큰 경향을 추론할 수 있었다.

경계면 선량분포를 모델링하는 선형적인 함수를 비교에서 이차지수함수에 의한 근사값이 측정된 경계면 선량분포값과 가장 잘 일치하였다.

경계면 선량의 측정값과 지수함수에 의한 근사값이 방사선 조사경계면의 차폐에 대한 평가에 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Boyer AL, Ochransky G, Nyerick CE.: Clinical dosimetry for implementation of a collimator. Med. Phys. 19:1255-1261 (1992)
2. Kallman p, Agren A, Brahme A.: Tumor and normal tissue responses to fractionated non uniform dose delivery. Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.; 62:249-262 (1992)
3. B. A. Fraass, J.van de Geijn.: Peripheral dose from megavoltage beams. Med. Phys. 10:809-818 (1983)
4. P. Francois, C. Beurtheret, A. Dutreix.: Calculation of the dose delivered to organ outside the radiation beams. Med. Phys.

- 15:879-883 (1988)
5. Van der Giessen, P.H.: Calculation and measurement of the dose at points outside the primary beam for photon energys of 6, 10, and 23 MV. Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys. 30:1239-1246 (1994)
6. Galvin JM, Smith AR, Moeller RD.: Evaluation of multileaf collimator design for photon beam. Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys. 23:789-801 (1992)
7. Biggs P. Capalucci J., Russell M.: Comparison of the penumbra between focused and non-divergent blocks-implications for multi-leaf collimators.:Med. Phys. 18:753-758 (1991)
8. Metcalfe P., Korn T., Elliot A.: 6MV Asymmetric beam penumbra. Med. Phys. 20:1439-1445 (1993)
9. G Rinser, E Grusell.: General specifications for silicon semiconductors for use in radiation dosimetry. Phys. Med. Biol. 32:1109-1117 (1987)
10. Johns H.E, Cunningham J.R.: *The physics of Radiology*, fourth edition, Charles C. Thomas, Springfield, Illinois. (1983)
11. Korn T., Elliot A. Metcalfe P.: Penumbra measurements in a 6 MV x-ray beam by means of TLD extrapolation. Med. Phys. 20:703-711 (1993)
12. B. J. McParland, H. I. Fair.: A method of calculating peripheral dose distribution of photon beams bellow 10 MV. Med. Phys. 19(2):283-293 (1992)
13. Khan FM.: *The physics of radiation therapy*. 2nd ed., Williams & Wilkns, Baltimore (1994), pp 200-239
14. ICRU Report 24.: *Determination of absorbed dose in a patient irradiated by beams of x or gamma rays in radiotherapy procedures*. Washington, D.C : International Commission on Radiation Units and Measurements (1976)
15. Van Dyk J, Barnett RB, Cygler JE.: Commissioning and quality assurance of treatment planning computers. Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys. 26:261-273 (1993)

Peripheral Dose Distributions of Clinical Photon Beams

Jhin Kee Kim, Jung Soo Kim*, Hyoung Cheol Kwon*

Department of Therapeutic Radiology & Oncology

Chonbuk National University Hospital

**Medical School, Chonbuk National University*

Chonju, 561-712, Korea

The region, near the edge of a radiation beam, where the dose changes rapidly according to the distance from the beam axis is known as the penumbra. There is a sharp dose gradient zone even in megavoltage photon beams due to source size, collimator, lead alloy block, other accessories, and internal scatter ray.

We investigate dosimetric characteristics on penumbra regions of a standard collimator and compare to those of theoretical model for the optimal use of the system in radiotherapy. Peripheral dose distribution of 6 MV photon beams represents penumbral forming function as the depth. Also we have discussed that the peripheral dose distribution of clinical photon beams, differences between calculation dose use of empirical penumbral forming function and measurements in penumbral region. Predictions by empirical penumbral forming functions are compared with measurements in 3-dimensional water phantom and it is shown that the method is capable of reproducing the measured peripheral dose values usually to within the statistical uncertainties of the data.

The semiconductor detector and ion chamber were positioned at a d_{max} depth, 5cm depth, 10 cm depth, and its specific ratio was determined using a scanning data. The effective penumbra, the distance from 80% to 20% isodose lines were analyzed as a function of the distance. The extent of penumbra will also expand with depth increase. Difference of measurement value and model functions value according to character of the detector show small error in dose distribution of the peripheral dose.

Key word : peripheral dose distribution, penumbral forming functions, radiation dosimetry