— J. Korean Soc Ther Radiol Oncol : Vol. 16, No. 2, June, 1998 —

선형가속기의 6 MV X-선에 대한 소형 조사면 측정과 몬테 카를로 시뮬레이션

원광대학교 의과대학 방사선종양학교실, 원광보건대학 방사선과*
전주예수병원 방사선종양학과†, 전북대학교 물리학과‡

정동혁 · 이정옥* · 강정구† · 김수곤† · 김승곤‡ · 문성록

Measurement and Monte Carlo Simulation of 6 MV X-rays for Small Radiation Fields

Dong Hyeok Jeong, B.S., Jeong Ok Lee, Ph.D.*, Jeong Ku Kang, Ph.D. †
Soo Kon Kim, M.D. †, Seung Kon Kim, Ph.D. ‡, and Sun Rock Moon, M.D.

Department of Radiation Oncology, Wonkwang University School of Medicine
**Department of Radiotechnology, Wonkwang Health Science College*
†Department of Radiation Oncology, Presbyterian Medical Center
‡Department of Physics, Chonbuk National University

Purpose : In order to obtain basic data for treatment plan in radiosurgery, we measured small fields of 6 MV X-rays and compared the measured data with our Monte Carlo simulations for the small fields.

Materials and Methods : The small fields of 1.0, 2.0 and 3.0 cm in diameter were used in this study. Percentage depth dose (PDD) and beam profiles of those fields were measured and calculated. A small semiconductor detector, water phantoms, and a remote control system were used for the measurement. Monte Carlo simulations were performed using the EGS4 code with the input data prepared for the energy distribution of 6 MV X-rays, beam divergence, circular fields and the geometry of the water phantoms.

Results : In the case of PDD values, the calculated values were lower than the measured values for all fields and depths, with the differences being 0.3 to 5.7% at the depths of 2.0 to 20.0 cm and 0.0 to 8.9% at the surface regions. As a result of the analysis of beam profiles for all field sizes at a depth of 10cm in water phantom, the measured 90% dose widths were in good agreement with the calculated values, however, the calculated penumbra radii were 0.1 cm shorter than measured values.

Conclusion : The measured PDDs and beam profiles agreement with the Monte Carlo calculations approximately. However, it is different when it comes to calculations in the area of phantom surface and penumbra because the Monte Carlo calculations were performed under the simplified geometries. Therefore, we have to study how to include the actual geometries and more precise data for the field area in Monte Carlo calculations. The Monte Carlo calculations will be used as a useful tool for the very complicated conditions in measurement and verification.

Key Words : Small field, Semiconductor detector, Monte Carlo simulation, EGS4

서 론

뇌정위 방사선수술에 이용하는 조사면은 직경 1.0-3.0 cm의 소형 원형 조사면으로서, 정확한 선량계산 및 치료계획을 위해서는 작은 조사면에 대한 선량분포를 구하여야 한다.

일반적으로 조사면에 대한 선량 분포는 이온 전리함을 이용한 직접적인 측정으로 얻을 수 있다. 그러나 조사면의 크기가 3.0 cm 이하인 작은 조사면의 경우, 통상적인 전리함 (0.3-0.6 ml)은 검출면의 크기가 조사면에 비하여 너무 커서, 조사면 영역의 정확한 선량분포를 얻기에는 적합하지 못하다. 최근 여러 기관에서 방사선 수술을 위한 소형 조사면 측정을 시행 하였으며, 측정에 사용한 검출기는 소형 전리함, 반도체검출기, 필름, TLD 등이다.[1-4] 본 연구에서는 소형 조사면에 대한 선량분포를 얻기 위하여 직접적인 측정과 함께, 동일 조사면에 대한 몬테칼로 계산을 수행 하였다. 측정을 위해서는 소형 조사면 측정에 가장 많이 이용되는 소형 반도체검출기를 이용하였으며, 몬테칼로 계산은 EGS4-code[5]를 이용하였다. 측정과 계산의 방법에 의하여 직경 1.0, 2.0, 3.0 cm 조사면에 대한 심부선량백분율 (PDD, Percentage Depth Dose)과 1.5, 5.0, 10.0, 15.0 cm 깊이에서의 빔측면도 (Beam profile)를 측정하였다. 본 논문의 결과에서는 서로 다른 방법으로 얻어진 자료들을 비교하였으며, 결론에서 측정값과의 차이를 논하고, 더욱 정확한 결과를 얻기 위한 몬테칼로 계산의 개선 방향을 제시하였다.

재료 및 방법

1. 소형 조사면 측정

측정을 위한 소형 조사면은 원통형 콜리메이터에 의하여 얻어지며, 조사면의 크기는 선원 과 팬텀 표면간 거리 (SSD) 100 cm에서 직경 1.0, 2.0, 3.0 cm이다. 상하 콜리메이터에 의하여 결정되는 1차 조사면은 5×5 cm^2로 설정하였다. 측정에 사용한 검출기는 반도체 검출기(p-type silicon, Ø=0.2mm, Scanditronix, Sweden)이며, 60×60×60 cm^3의 물팬텀속에서 3차원적으로 작동시키기 위하여, 측정 시스템(RFA-300 : Scanditronix, Sweden)과 컴퓨터(486DX2-50, MSDOS V6.2 based)를 이용하였다. 측정된 선량 자료는 컴퓨터에 2진자료 (binary data)로 저장되므로 제어 프로그램 (RFA300-Ver.4.4D)에 의하여 ASCII 파일로 변환한 후 수치를 처리하였다. 직경 3 cm 이하의 작은 조사면의 측정에는 빔축을 정확히 찾는 것이 중요하며[6], 이를 위해서 측정에 앞서 필름을 이용하여 광조사면과 빔조사면의 일치성을 확인한 후, 검출기를 광조사면의 중심에 일치시키는 방법으로 빔축을 결정하였다. 심부선량백분율은 치료 범위를 고려하여, 물팬텀의 표면에서 깊이 22 cm까지 측정하였다. 빔측면도는 최대 선량 깊이인 1.5 cm와 5.0, 10.0, 15.0 cm 의 깊이에서 측정하였으며, 몬테칼로 계산과의 비교는 10.0 cm 깊이에서의 측정값을 이용하였다. 각각의 측정값은 최대 선량 지점에서 100%로 규격화하여 몬테칼로 계산값과 비교하였다.

2. 몬테칼로 시뮬레이션

1) 몬테칼로 계산코드

몬테칼로 방법으로 소형 조사면의 선량분포를 계산하기 위한 계산 코드는, EGS4 (Electron Gamma Shower version-4) code system이다.[7] EGS4는 전자 및 광자의 물질과 상호작용을 몬테칼로 방법으로 계산하기 위한 프로그램이다. EGS4는 사용자가 작성하여 입력한 기하구조와 입사 선원에 대하여 계산을 수행하며, 결과의 출력은 사용 목적에 따라 사용자가 직접 작성하도록 되어있다. EGS4는 이러한 일련의 과정을 사용자가 복잡하지 않게 처리할 수 있도록 하기 위하여 모트란 (mortran) 이라는 구조체 언어로 작성 되어있다. 본 연구에서는 xyzdos.mortran으로 알려진 사용자 코드의 선원부와 에너지 입력부에 확산빔과 스펙

트럼을 입력할 수 있도록 매크로를 직접 작성하여, 워크스테이션 (HP-9000, Model 715/100)에서 컴파일하였다. 컴파일은 모트란과 포트란의 두 단계로 나누어 수행되며 각 컴파

일러는 모트란3 (mortran3)와 포트란77 (f77)이 사용되었다.

2) 선원의 형태와 X-선의 에너지

선형가속기의 타겟으로부터 발생한 제동복사선 (Bremsstrahlung radiation)은 입사전자의 에너지에 따른 각분포 (angular distribution)와 함께 공기중에서 선축과 평행하지 않은 경사진 경로를 진행한다.[8, 9] 본 연구에서 사용한 선원 (source)의 모델은 실제의 빔과 유사한 확산빔 (divergent beam)의 모형이다 (Fig. 1). 확산빔의 모형을 적용하는 과정과 에너지를 표본추출하는 과정은 다음과 같다.

a) 조사면의 크기는 가상의 선원으로부터 SFD (source to field distance) 거리에서 정의하며, 광자가 입사하는 지점을 빔축에 대하여 일정한 반경 R 이내로 제한하여 원형의 조사면을 형성하였다.

b) 조사면 범위내의 단위 면적당 입자 분포가 균일하도록 하기 위하여, 0.0-1.0 사이에 균일한 분포를 가지는 수, 즉 난수 (random number, ${}_1$, ${}_2$)를 이용하여 입사 지점의 좌표 X_i, Y_i, Z_i를 다음과 같이 표본 추출하였다.

$$
\left.\begin{array}{l} X_i = S_x + {}_1^{1/2} R\cos({}_2 2\pi) \\ Y_i = S_y + {}_1^{1/2} R\sin({}_2 2\pi) \\ Z_i = 0.0 \end{array}\right\} \quad (1)
$$

c) (1)식에서 S_x, S_y는 선원의 좌표이며, 선원의 Z좌표는 표면의 좌표가 0.0 cm 이므로 -SFD 지점에 위치한 것으로 가정한다. 평행빔과 확산빔의 다른 점은 입사면에서 입자의 방향에 있으며, 평행빔의 입자들은 입사면에 수직으로 입사하는 반면 확산빔의 각 입자들의 방향은 입사 지점과 선원간 거리에 의하여 결정 된다. (1) 식에서 결정한 X_i, Y_i, Z_i에 의하여 결정되는 입자의 방향코사인 u (cos α), v (cos β), w (cos γ)은 다음과 같다 (Fig. 1 참조).

$$u = (S_x - X_i)/D,\ v = (S_y - Y_i)/D,\ w = SFD/D \quad (2)$$

(2) 식에서 D=sqrt { rm(S_x −X_i)^2 +(S_y − Y_i)^2 +SFD^2} 이다.

d) 원형 조사면 안으로 입사하는 광자의 에너지를 에너지 스펙트럼 S(E)로부터 표본추출 하기 위하여, 단위 에너지 간격 (bin)당 분포확률 P(E)로서 일반화 한다.

rmP_i (E_i)= {S_i (E_i)} over {sum_i=1^max.bin S_i (E_i)} (3)

(3) 식에서 E_i는 i번째의 에너지이며, S_i는 에너지 E_i를 갖는 입자의 수이다.

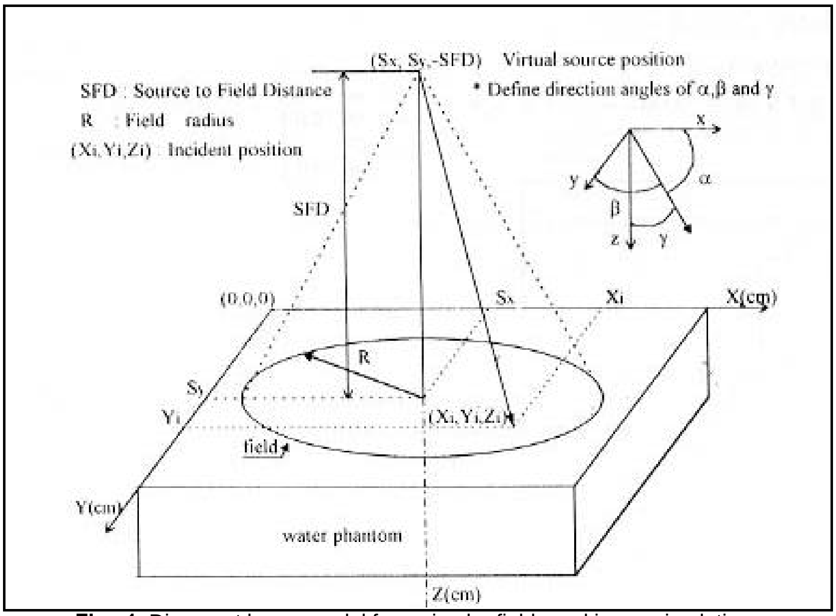

Fig. 1. Divergent beam model for a circular field used in our simulation.

e) 단위 에너지 간격당 확률 분포로부터 입사에너지를 결정하기 위하여 난수 ${}_3$를 취하여, 다음과 같은 조건을 만족하는 j를 구한다.

$$\sum_{i=j}^{i} P_i (E_i) \le {}_3 < \sum_{i=1}^{j+1} P_i (E_i) \quad (4)$$

f) 입력한 에너지자료는 불연속적인 반면 실제 X-선은 연속적인 분포를 가지기 때문에, 난수 ${}_4$를 취하여 다음과 같이 입사에너지 E_0를 결정한다.

$$E_0 = E_j + {}_4 (E_{j+1} - E_j) \quad (5)$$

본 계산에서 사용한 광자의 에너지 분포는 Mohan 등[10]의 연구로부터 얻어진 6 MV X-선의 에너지 분포이며, Fig. 2에 일정한 에너지 간격에 대한 방출확률(%)을 나타내었다. Fig. 2에서 0.75-1.25 MeV 사이를 가지는 광자들의 방출확률이 약 23%로서 가장 빈도가 높음을 알 수 있으며, 평균에너지는 2.01 MeV이다. 몬테칼로 계산에서 고려하지 않은 요소는 콜리메이터의 안쪽벽과 공기에 의해 산란된 전자 성분과 콜리메이터의 차폐 영역을 통과한 성분 그리고 조사면 중심영역에서의 빔경화 효과 (beam hardening effect)등이다. 또한 동일한 명목상의 에너지를 가진 가속기에서도 X-선의 에너지 분포는 가속기의 구조에 따라 다르게 되므로, 측정과의 정확한 비교를 위해서는 해당가속기의 에너지 분포를 입력하여야한다. 몬테칼로 계산의 정확도는 이러한 가능한 효과들을 모두 고려 함으로서 향상시킬 수 있으나, 본 계산에서는 기본적인 모델에 대한 계산을 수행한 후 측정과 결과를 비교하고, 추가적인 보정에 대하여 토의 하고자 한다.

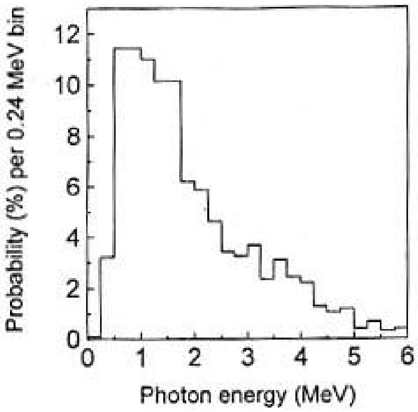

Fig. 2. 6 MV X-ray energy distribution (obtained by Mohan et. al) used in Monte Carlo calculation.

3) 입자의 몬테칼로 수송과 흡수선량의 계산

조사면

영역에 입사한 광자는 물팬텀속의 원자들과 상호작용하는 과정에서 에너지를 잃는다. 광자의 수송시 고려되는 물리적 요소는 광전효과, 콤튼산란, 쌍생성 그리고 레일리산란이다. 광자의 상호작용과정에서 생성된 전자 또는 양전자 (쌍생성에 의하여 발생)는 여기와 이온화 그리고 제동복사에 의하여 에너지를 잃는다. 전자의 수송시 진행방향의 변화는 다중산란 이론에 의하여 결정한다. 물질의 에너지 흡수는 진행하는 하전입자의 에너지 손실과 관계가 있으며, 관심영역의 흡수선량은 해당영역을 통

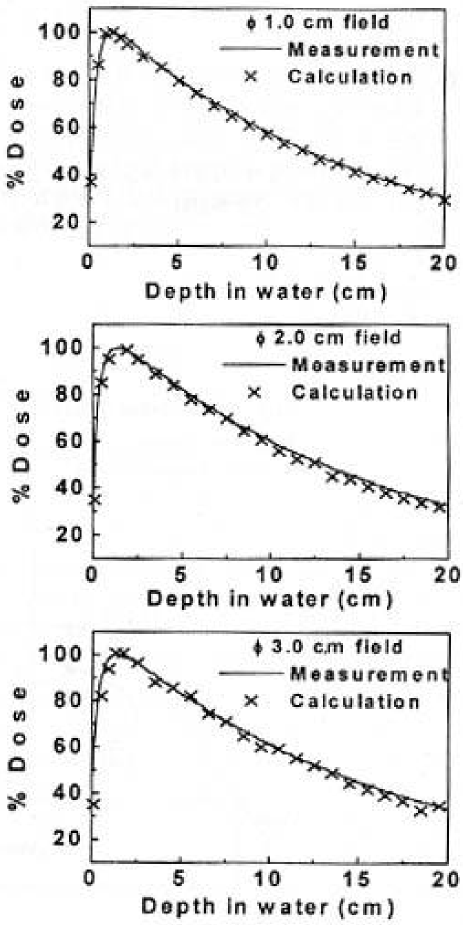

Fig. 3. Comparison of measured (semiconductor detector) and calculated (EGS4) PDD curves.

과하는 전자의 에너지 손실값의 합으로서 결정할 수 있다. 팬텀에 입사한 광자의 상호작용에 의하여 발생한 전자 (또는 양전자)가 i번째 영역을 임의의 간격(step)만큼 계속 진행하는 경우, 전자의 에너지 손실로 인하여 영역 안에 저장된 에너지의 합이 E_i (J)이고, 영역 i의 질량이 M_i (kg)이면, 1개의 광자에 대한 영역 i의 흡수선량은 D_i (Gy)= E_i/M_i로서 결정한다. 몬테칼로 계산결과는 입사 플루언스 (단위면적당 조사면에 입사하는 광자수)가 Ø (cm^{-2})일때, 단위 입사 플루언스당 흡수선량 D (Gy · cm^2)을 계산하여 출력하였다.

$$D_i \, (Gy \cdot cm^2) = \frac{1}{\phi \, (cm^{-2})} \cdot \frac{\sum_{allsteps} \Delta E(J)}{M_i \, (kg)} \quad (6)$$

결　　과

일반적으로 에너지가 일정할 때 조사면의 크기가 증가함에 따라 산란성분의 증가로 인하여 PDD 곡선은 증가하는 경향을 가진다. Fig. 3과 Table 1은 측정과 계산으로 얻어진 PDD이며, 작은 조사면에서도 조사면의 크기가 증가함에 따라 PDD값이 증가함을 알 수 있다.

몬테칼로 계산 결과는 조사면 1.0 cm에서 4×10^6, 2.0 cm와 3.0 cm에서는 각각 1.6×10^7, 3.6×10^7의 반복계산을 수행한 후 얻어졌다. PDD의 경우 1.0 cm 조사면의 계산값이 측정값과 잘 일치 하였으나, 깊이가 깊어짐에 따라 그리고 조사면의 크기가 증가함에 따라 계산값이 측정값에 비하여 낮게 평가되었다. 또한 깊이 0.0-1.0 cm의 표면 영역은 빔의 확산이 적은 영역이므로 계산된 PDD값의 차이가 적을 것으로 예상 되지만, 0.5 cm의 경우 조사면 2.0 cm에서 2.8%, 3.0 cm에서 8.9%로 나타났다. 측정값과 계산값이 가장 잘 일치하는 영역은 물팬텀속 깊이 2.0-16.0 cm 범위이며, 계산값의 차이는 0.3-4.8% 범위로서, 평균 2% 정도로 나타났다. 빔측면도는 10.0 cm 깊이 에서의 측정값에 대하여 중심부의 선량을 100%로서 규격화한 후 90%의 선량폭 그리고 평균 반

음영 영역 (physical penumbra)을 구하여 계산한 빔측면도와 비교하였다. 빔측면도의 경우 90% 선량폭은 직경 1.0과 3.0 cm 조사면에 대하여 측정값은 0.6, 1.5, 2.7 cm이며, 계산값은 0.6, 1.7, 2.7 cm로서, 직경

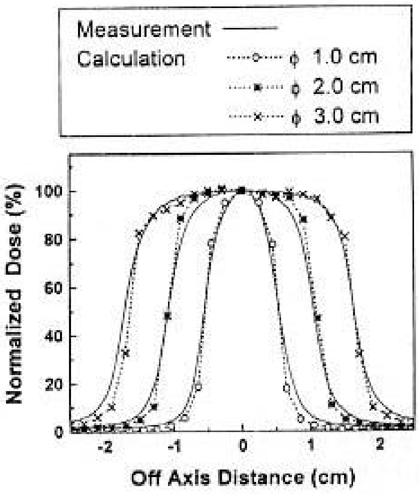

Fig. 4. Measured and calculated beam profiles normalized at the depth of 10 cm in the water phantom.

Table 1. Comparison of Measured and Calculated PDDs (Percentage Depth Dose) for Small Radiation Fields of 1.0, 2.0 and 3.0 cm in Diameter

Field size	ø1.0 cm		ø2.0 cm		ø3.0 cm	
Depth(cm)	Mea.	Cal./%Err.	Mea.	Cal./%Err.	Mea.	Cal./%Err.
0.5	86.3	86.3/ 0.0	87.5	85.0/-2.8	90.3	82.2/-8.9
1.0	99.0	99.2/ 0.2	96.2	96.4/ 0.2	99.3	96.7/-2.6
1.5	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
2.0	97.7	95.0/-2.3	98.5	96.7/-1.8	98.4	99.2/ 0.8
4.0	85.7	85.2/-0.6	87.8	86.1/-1.9	88.2	86.9/-1.5
6.0	75.4	74.3/-1.4	76.9	76.4/-0.7	78.8	79.0/-0.3
8.0	66.8	64.5/-3.4	67.4	66.4/-1.4	69.5	68.0/-2.2
10.0	58.4	57.1/-2.2	60.2	57.3/-4.8	61.4	60.7/-1.1
12.0	51.2	50.5/-1.3	53.0	51.9/-2.0	54.1	52.3/-3.3
14.0	45.2	44.9/-0.7	47.1	45.2/-4.0	48.2	47.6/-1.2
16.0	39.8	38.8/-2.5	41.2	39.0/-5.3	42.8	42.4/-0.9
18.0	35.2	34.3/-2.6	36.8	34.8/-5.4	38.1	36.2/-5.0
20.0	31.4	29.6/-5.7	33.0	31.9/-3.3	33.7	34.8/-3.3

Table. 2. Analysis of Measured and Calculated Beam Profiles Normalized at the Depth of 10 cm in the Water Phantom

Field size (cm)	ø1.0		ø2.0		ø3.0	
	Mea.	Cal.	Mea.	Cal.	Mea.	Cal.
90% Dose width(cm)	0.6	0.6	1.5	1.7	2.7	2.7
Mean penumbra width(cm)	0.4	0.3	0.5	0.4	0.6	0.5

1.0 cm와 3.0 cm 조사면의 경우 계산값은 측정값과 잘 일치하였다. 반음영은 모든 조사면에 대하여 몬테칼로 계산값이 측정값에 비하여 0.1 cm 작게 평가되었다.

고안 및 결론

방사선 수술의 치료계획에 사용할 기본자료를 얻기 위하여, 소형 조사면을 측정한 후 유사 모형에서의 몬테칼로 계산과 결과를 비교하였다. PDD의 경우 몬테칼로 계산값은 2.0-18.0 cm 사이의 치료 깊이 영역에서 평균 2% 이내로 잘 일치 하였으나, 모든 깊이에 대하여 계산된 PDD 값은 낮게 평가되었다. 이러한 이유는 실제 X-선의 에너지 분포와 계산에 사용한 에너지 분포와의 차이 때문으로 생각되며, 실제빔의 평균 에너지가 높음을 알 수 있다. 실제빔은 편평화 여과기 (flattening filter)를 통과한 후 빔경화 효과 (beam hardening effect)로 인하여 조사면 중심의 평균 에너지가 높아지는 특징이 있다.[11, 12] 특히 작은 조사면의 경우 조사면의 경계가 빔축과 매우 가깝기 때문에 평균 에너지가 높을 것이다. 따라서 몬테 칼로 계산에 실제빔의 에너지 분포를 입력 한다면 측정값과의 차이는 더욱 줄어들 것이다. 표면 영역의 경우 조사면이 증가할 수록 계산값이 측정값에 비하여 최대로 8.9% 낮게 나타났다. 이것은 실제빔의 경우 콜리메이터의 안쪽벽과 공기중에서 발생한 전자의 성분이 포함되어 있는 반면, 몬테칼로 계산은 전자성분을 고려하지 않았기 때문으로 생각된다. 이러한 산란 성분은 조사면의 크기가 클수록 많이 발생 하므로, 직경 3.0 cm 조사면에서 측정값과의 차이가 가장 많은 것으로 생각된다. 직경 1.0 cm의 작은 조사면의 경우에 0.5 cm 깊이의 계산한 PDD값이 측정값과 잘 일치 하는 것으로 보아, 직경 1.0 cm 조사면안의 산란된 전자의 성분은 매우 적음을 알 수 있다. 몬테칼로 계산에서 산란 전자선을 고려하는 방법은 몬테칼로 계산에 콜리메이터의 기하구조를 입력한 후 콜리메이터 상단에 X-선을 입사시키는 방법이 있으나, 기하구조의 입력에서부터 결과를 얻기 까지의 과정에는 매우 세심한 연구가 필요하다. 빔측면도의 경우 10.0 cm 깊이에서 90% 선량 폭은 직경 1.0 cm와 3.0 cm 조사면에서 측정과 계산은 일치 하였다. 직경 2.0 cm의 경우 몬테칼로 계산의 통계적 특성에 의한 오차라고 생각되며, 같은 조건에서 계산횟수를 증가시킴에 의하여 측정과 일치하는 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다. 반음영 영역의 경우 모든 조사면에 대하여 계산값이 약 0.1 cm 작게 나타났다 (Table 2). 반음영은 장치의 기하학적인 오차가 없을 경우 선원의 크기에 의한 기하학적 반음영 (geometric penumbra)과 콜리메이터를 투과한 빔에 의한 투과 반음영 (transmission penumbra), 그리고 팬텀속에서 조사면 밖을 향하여 진행하는 전자, 광자들에 의한 효과의 조합으로 나타난다. 기하학적 반음영은 선원의 크기 (s), 선원과 팬텀 표면간거리 (SSD), 관심점의 깊이 (d), 그리고 선원과 콜리메이터 종단의 거리 (SDD) 와 관계가 있으며, 깊이 d에서 기하학적 반음영 (P_d)은 다음과 같다.[13)]

$$P_d = \frac{s(SSD + d - SDD)}{SDD} \quad (7)$$

본 측정의 경우, 물팬텀속 깊이 10.0 cm에서 선원의 크기가 0.2-0.3 cm일 때 P_d=0.1-0.2 cm로 나타났으며, 측정값은 각 조사면에 대하여 0.4, 0.5, 0.6 cm이므로, 기하학적 반음영에 의한 효과 보다 투과 반음영과 팬텀내부의 산란선에 의한 기여가 클 것으로 보인다. 몬테칼로 계산에서는 팬텀내의 산란선은 고려하였지만, 콜리메이터의 투과는 고려하지 않았기 때문에, 반음영은 측정값에 비하여 작게 계산 된것으로 생각된다. 측정값과의 차이는 약 0.1 cm이며, 콜리메이터를 고려한 개선된 기하구조에서 몬테칼로 계산을 수행 한다면, 측정과 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있을 것이다. 결론적으로 6 MV X-선 소형 조사면에 대한 측정과 몬테칼로 계산에서, 측정값은 간단한 모형을 적용하여 계산한 몬테칼로 계산값과 근사적으로 일치하였으며, 정확한 기하구조와 실제빔의 분포를 구하여 계산 한다면, 측정과 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있을 것으로 확신한다. 정확한 기하구조와 실제빔의 분포는 같은 원리의 몬테칼로 계산에 의하여 얻을 수 있으며, 최근에 발표된 BEAM-code[14)]는 이러한 기능을 가지고 있다. 현재 유사

한 기능의 코드가 자체 기술에 의하여 개발 중에 있으며, 지속적인 연구에 의하여 실제빔과 가까운 분포를 구한다면, 본 연구 뿐만아니라 현재 측정과 검증에 어려움이 많은 MLC (Multi Leaf Collimator)의 조사면에 대한 선량분포, 인체 조직 사이의 선량 변화 연구 등에 효과적으로 응용할 수 있을 것이다. 또한 몬테칼로 계산은 3차원적으로 계산을 수행하므로, 몬테칼로 계산에 의한 3차원 치료계획에 대한 연구가 가능하게 될 것이다.

참 고 문 헌

1. **Tae Jin Choi, Ok Bae Kim, Young Hoon Kim et. al,** Dose Characteristics of Small Radiation Fields for 6MV X-ray of Linear Accelerator. J Kor Soc Ther Radio 1989; 7:287-291
2. **Sung Sil Chu, Chang Ok Suh, John J.K. Loh, et al,** Treatment Planning and Dosimetry of Small Radiation fields for Stereotactic Radiosurgery. J Kor Soc Ther Radio 1989; 7:101-112
3. **강위생, 하성환, 박찬일. 광자선 소조사면의 선량측정에 관한 연구. 의학물리** 1994; 5:57-67
4. **최동락, 안용찬, 이정일 등. 뇌정위적 방사선 수술을 위한 소조사면 측정. 의학물리** 1995; 6:59-62
5. **W.R. Nelson, H. Hirayma, D. W.O.** Rogers, The EGS4 code system. SLAC Report-265 1985:1-7
6. **KAPM, 방사선량의 표준측정법, 의학물리** 1991; 2: 50-51
7. **T.M. Jenkins, W.R. Nelson, A. Rindi, et. al,** Monte Carlo Transport of Electrons and Photons. New York, Plenum Press 1988; 287-317
8. **B.A. Faddegon, C.K Ross, D.W.O** Rogers, Angular distribution of bremsstrahlung from 15-MeV electrons incident on thick targets of Be, Al, and Pb. Med Phys 1991; 18:727-739
9. **A.F. Bielajaw, R. Mohan, C.S.** Chui, Improved bremsstrahlung photon angular sampling in the EGS4 code system, NRCC Report PIRS-0203, 1989:1-12
10. **R Mohan, C. Chui, L.** Lidofsky, Energy and angular distributions of photons from medical linear accelerators, Med. Phys 1985; 12:592-597
11. **P.C.Lee,** Monte Carlo simulations of the differential beam hardening effect of a flattening filter on a therapeutic x-ray beam. Med Phys 24 (9) 1997; 1485-1489
12. **J.K. Kim, J.H. Kim, B.K. Kim,** Energy Distribution of x-rays from Medical Linear Accelerator, KAPM, 2 (1); 1991:29-35
13. **F.M. Khan,** The Physics of Radiation Therapy. 2nd ed, Baltimore, Williams & Wilkins 1994: 64-66
14. **D.W.O. Rogers, B.A. Faddegon, G.X. Ding, et. al,** BEAM : A Monte Carlo code to simulate radiotherapy treatment units. Med Phys 1995; 503-524

= 국문 초록 =

선형가속기의 6 MV X-선에 대한 소형 조사면 측정과 몬테 카를로 시뮬레이션

원광대학교 의과대학 방사선종양학교실, 원광보건대학 방사선과*
전주예수병원 방사선종양학과†, 전북대학교 물리학과‡

정동혁 · 이정옥* · 강정구† · 김수곤† · 김승곤‡ · 문성록

목 적 : 방사선수술의 치료계획에 필요한 기본자료를 얻기 위하여, 6 MV X-선의 소형 조사면을 측정하고, 동일 조사면에 대한 몬테칼로 계산을 수행하여 그 결과를 측정한 자료와 비교하였다.
재료 및 방법 : 연구에 사용한 조사면은 SSD 100 cm에서 직경 1.0, 2.0, 그리고 3.0 cm인 원형의 소형 조사면이며, 각 조사면에 대한 심부선량백분율 (PDD)과 빔측면도 (Beam profile)를 구하였다. 측정에는 소형 반도체검출기, 물팬텀 그리고 원격조정 장치를 이용하였다. 몬테칼로 계산은 EGS4를 이용하여 수행하였으며, 계산에는 6 MV X-선의 에너지 분포와 확산빔 (divergent beam), 원형 조사면 그리고 물팬텀을 고려하였다.
결 과 : 심부선량백분율의 경우, 계산값은 측정값에 비하여 낮은 경향을 보였으며, 모든 조사면에 대하여 물팬텀속 깊이 2.0-20.0 cm에서 차이는 0.3-5.7%의 범위로 평가 되었고, 표면 영역에서는 0.0-8.9%로 나타났다. 물팬텀속 깊이 10.0 cm에서 90% 선량폭은 몬테칼로 계산과 잘 일치하였으나, 반음영의 계산값은 모든 조사면에 대하여 측정값보다 0.1 cm 작게 나타났다.
결 론 : 측정한 소형 조사면에 대한 심부선량백분율과 빔측면도는 몬테칼로 계산과 근사적으로 일치하였다. 팬텀 표면영역과 반음영 영역에서 측정값과 계산값의 차이가 많이 발생하였으며, 이러한 이유는 몬테칼로 계산 수행시 단순한 기하구조를 가정했기 때문이다. 따라서 실제의 기하구조와 조사면에 대한 보다 정확한 자료를 적용 할 수 있도록, 지속적인 연구를 해야 할 것이며, 몬테칼로 계산은 측정과 검증이 어려운 경우에 대하여 정확한 정보를 얻을 수 있는 유용한 도구로서 많이 이용 될 것이다.