

鉛필터의 투과선량을 이용한 15 MV X선의 에너지스펙트럼 결정과 조직선량 비교

계명대학교 의과대학 *의공학교실, †방사선종양학교실

최 태 진* · 김 진 희[†] · 김 옥 배[†]

최근의 방사선 치료선량 계획시스템은 대체로 커널빔을 컨볼루션하여 조직선량을 구하고 있다. 본 연구에서는 광자선 빔에 따른 심부선량과 임의의 깊이에서 프로파일 선량을 구하기 위하여 반복적 수치해석을 통해 투과 필터에 의한 감쇠 선량으로부터 에너지스펙트럼을 구성하였다. 실험은 15 MV X선(Oncor, Siemens사)과 이온선량계 0.125 cc (PTW T31010)을 이용하여 납필터를 투과한 선량을 측정하여 이루어졌다. 15 MV X선의 에너지스펙트럼은 0.25 MeV 간격으로 납필터 0.51 cm에서 8.04 cm의 감쇠선량으로 실험치와 비교하여 구하였다. 실험 연산에서 15 MV X선의 최대유량은 3.75 MeV에서 나타났으며, 평균에너지는 4.639 MeV를 보였으며, 투과선량은 평균 0.6%의 오차인 반면에 최대오차는 납두께 5 cm에서 2.5%를 보였다. 조직선량은 에너지에 크게 의존하므로, 평탄형 필터의 중심과 Tangent 0.075와 0.125인 가장자리의 에너지를 구하였으며, 각각 4.211 MeV와 3.906 MeV로 나타났다. 심부선량과 프로파일 선량은 상업화로 공급되고 있는 선량계획시스템에 중심 선속과 가장자리의 각 에너지스펙트럼을 적용하여 구하여 실측선량률과 비교하였다. 생성된 심부선량 곡선은 조사면 6×6 cm²에서 30×30 cm²까지 실측치와 비교한 결과 1% 이내의 거의 일치하는 값을 얻었으며, 프로파일 곡선은 10×10 cm²에서 1% 이내의 오차를 보였으나, 30×30 cm²와 같이 큰 조사면의 얇은 깊이에서는 2%의 오차를 보였다. 따라서 투과선량을 연산으로 구한 에너지 스펙트럼이 조직선량을 평가하는 데 상당히 적은 오차범위 내에서 정량적이고 정성적으로 얻을 수 있음을 알 수 있다.

중심단어: 투과선량, 에너지 스펙트럼, 커널 빔 컨볼루션, 심부선량, 프로파일 선량

서 론

체내 장기에 도달되는 방사선의 흡수선량은 입사 방사선의 입사 유량(Flux)과 에너지에 따른 물질의 에너지흡수로 결정된다. 조직 내 선량평가는 깊이에 따라 방사선 경화효과에 의해 다르게 나타나게 되며, 췌기필터를 사용하는 경우 동일한 깊이의 심부선량률은 개방조사면의 것에 비해 높게 나타나므로 보정이 필요하다.¹⁾ 최근 방사선치료계획용 선량연산은 조직을 통과한 커널빔을 컨볼루션하여 입체적 선량분포를 얻는 연산을 많이 사용하고 있다. 커널빔과 조직층에 도달하는 광자선 빔은 에너지에 따라 영향을 받게 되므로 정확한 선량을 얻기 위해서는 선형가속기에서 방출되는 광자선의 에너지 스펙트럼을 구하는 것이 중요하다.

광자선의 에너지스펙트럼을 구하는 방법에는 기발표된 자료를 사용하거나 직접 구하는 방법이 있으며 연산으로 구한 선량값이 실험치와 오차범위 내에서 일치시키려는 연구가 활발하다.^{2,3)} 개방조사면의 크기가 증가할수록 심부선량률은 증가를 보이므로 연산된 심부선량률도 당연히 증가하여야 한다.⁴⁾

임상 의료에 사용되는 높은 에너지의 방사선에 대한 에너지스펙트럼의 결정은 사용할 방사선의 차폐뿐만 아니라 조직층의 통과에 따른 선속경화 및 인체 비균질성밀도에 의한 선량변화를 얻는 데에도 적용될 수 있으므로 중요한 평가 작업이다. 광자선의 에너지분석은 다체널분석기와 흡수체의 방사선 감쇠를 이용한 수치해석과 EGS4 시뮬레이션이 있다.

Baird⁵⁾와 Archer 등⁶⁾은 100 keV 이하의 낮은 에너지 X선을 이용하여 연속X선에서 필터를 투과한 선량의 감쇠 모양이 에너지 스펙트럼에 의존하게 됨을 발표하였으며, 여러 층의 필터를 통과한 선량감쇠를 라플라스변환을 시행하여 광자선의 에너지스펙트럼을 유도할 수 있음을 밝힌 바

이 논문은 2008년 1월 28일 접수하여 2008년 3월 5일 채택되었음.
 책임저자 : 최태진, (700-712) 대구광역시 중구 동산동 194
 계명대학교 의과대학 의공학교실
 Tel: 053)250-7666, Fax: 053)250-7667
 E-mail: tjchoi@dsmc.or.kr

있다.⁷⁻⁹⁾

본 연구에서는 선형가속기의 15 MV 광자선의 스펙트럼이 원뿔모양의 평탄형필터를 통과하면서 입자의 에너지 변화를 예상하고, 납필터를 투과한 선량의 변화로 조사된 광자선의 에너지스펙트럼을 중심선속과 Off-Axis에서 각각 구하였다.

한편 기존 치료선량계획시스템에 사용하고 있는 커널빔은 입자의 에너지에 따라 결정되므로 실험에서 구한 에너지분포를 적용하여 6×6 cm²에서 30×30 cm²까지 중심선속과 측방의 심부선량을 구한 결과를 발표하고 투과선량에 의한 에너지스펙트럼의 유효성을 발표하고자 한다.

대상 및 방법

1. 커널빔 콘볼루션

균질한 조직 내에서 선원으로부터 거리 r 점의 흡수선량 D(r)은 광자선의 커널 빔으로부터 거리 r'에서 방출된 축적된 에너지의 콘볼루션 식으로 주어진다.

$$D(r) = \int T(r') A(r-r') d^3r' \quad (1)$$

여기서 벡터 A(r-r')은 일차광자선과 상호작용한 지점에서 단위볼륨당 축적된 에너지를 나타내는 커널을 콘볼루션한 것이며, T(r')은 단위질량당 방출된 총에너지(Total energy released per unit mass, TERMA)의 3차원분포를 나타낸다.¹⁰⁾

TERMA는 조직층과의 상호작용에 의해 감소되므로 플루언스는 다음과 같이 주어지며,

$$T(r') = \mu/\rho \psi(r') \quad (2)$$

μ/ρ 는 질량감쇠계수를, ψ 는 일차에너지플루언스분포(primary energy fluence distribution)를 의미한다.

선형가속기에서 방출되는 광자선은 연속스펙트럼을 갖고 있으므로, r 점에서 선량 D(r, MV)는

$$D(r, MV) = \int \frac{\mu}{\rho}(h\nu) \int \frac{d\psi(r', h\nu)}{dh\nu} A(r-r', MV) d^3r' dh\nu \quad (3)$$

으로 주어진다. 여기서 $\frac{d\psi(r', h\nu)}{dh\nu}$ 는 일차상호작용점 r'에서 에너지플루언스 스펙트럼을 나타낸다.

조직 내 임의의 위치에 도달되는 선량을 구할 때 선형가속기에서 방출되는 광자선 속의 스펙트럼을 정확히 얻는 것이 매우 중요함을 알 수 있다.

2. 광자선 에너지결정

연속스펙트럼의 광자선을 이용하여 얻게 되는 총에너지 플루언스와 $\Psi(E)$ 는 임의의 단면을 통과하는 단위구간의 광자선 에너지 플루언스 $\Psi(Ei)$ 의 합으로

$$\Psi(E) = \sum_i \Psi(Ei) \quad (4)$$

식 4와 같이 나타난다. 선형가속기의 광자선은 연속스펙트럼 특성을 갖고 있으므로 투과량으로 부터 스펙트럼분포를 구할 수 있다.¹¹⁾

선형가속기의 광자선 선속(Beam) 내 전리형 검출기의 조사선량(S)은 임의의 단면을 통과하는 광자의 에너지플루언스 $\psi(E)$ 와 각입자의 물질에 대한 질량에너지흡수($\frac{\mu_{en}}{\rho}$)로 나타낼 수 있으므로

$$S = \Psi(E) \frac{\mu_{en}}{\rho}(E) \quad (5)$$

와 같이 된다. 이 조사선량(S)은 실험적으로 광자선의 에너지 E의 단위 플루언스에 의해 발생하는 선량계의 에너지반응함수R(E)로부터 전 에너지구간의 전리량을 적분한 라스변환을 통해 얻을 수 있으므로

$$S = \int_0^{E_{max}} \Psi(E) R(E) dE \quad (6)$$

과 같이 된다.

선속 내 흡수체 두께(x)가 있으면 무흡수체일 때 플루언스의 에너지 스펙트럼으로부터 투과한 선량은 다음과 같이

$$\Psi(X) = \Psi(0) e^{-\mu x} \quad (7)$$

나타나게 되므로 조사선량 S는 흡수체두께 x의 함수가 된다. 이에 식7을 식6에 대입하여

$$S(x) = \int_0^{E_{max}} \psi(E) R(E) e^{-\mu(E)x} dE \quad (8)$$

와 같이 전 에너지구간 내 투과된 선량을 얻을 수 있다. 여

기서 $m(E)$ 는 광자선에너지 E 에 대한 흡수체의 선흡수계수이다. 흡수체 두께 x 를 투과한 상대적 선량비 $T(x)$ 는

$$T(x) = S(x)/S(0) \quad (9)$$

와 같이 흡수체가 없는 선량률 $S(0)$ 에 대한 흡수체를 투과한 선량 $S(x)$ 의 비로 나타낸다.

연속X선인 경우 투과선량비는

$$T(x) = \int_0^{E_{max}} F(E) e^{-\mu(E)x} dE \quad (10)$$

과 같이 둘 수 있다. 단, 검출기에 도달된 감쇠되지 않은 선속의 총 조사선량 $F(E)$ 는

$$F(E) = \psi_E(0) R(E)/S(0) \quad (11)$$

로 둔다. 여기서 $\psi_E(0)$ 는 에너지 구간 내 흡수체가 없을 때의 총 입자수이다.

상기 식에서 흡수체에 의한 감쇠선량은 분할조사선량분포를 전 에너지 영역에 대한 조사선량으로 적분하고, 두께 변화에 따른 선량비를 필터두께에 의한 선량과 비교하여 근사적으로 에너지 스펙트럼을 결정하게 됨을 보여준다. 총 조사선량 $F(E)$ 는 광자선의 에너지 스펙트럼 특성인 최대에너지의 1/3 에너지 구간을 최대입자수로 설정한 후, 최대에너지까지 적분하여 에너지 유량을 구하였다.

필터를 투과한 선량은 에너지 플루언스와 물질의 흡수계수로 결정되므로, 반복적 수치해석을 통해 투과선량에 가장 근접한 에너지플루언스분포를 취하였다.

조사면 내 선량분포는 중심선속의 심부선량률과 방사선의 에너지 함수와 Spread 함수로 구하며, 차폐면의 선량은 가우스분포식을 이용하여 최적화한다.

3. 투과선량 실험

선형가속기의 광자선은 선형가속기(Oncor, Siemens)의 에너지 15 MV X선을 이용하였다.

작은 조사면의 선량측정에서 이온함의 전자평형두께 3.0 g/cm^2 을 얻기 위해 원주형 직경 6.7 cm의 미니 water phantom을 제작하여 공기 중 Build-up 두께로 사용하였다.

광자선 선속은 산란선의 영향을 줄이기 위하여 Build-up 물질을 포함할 수 있도록 최소화하여 선원-검출기 거리 100 cm에서 6×6 cm^2 로 하였고, 필터의 재질은 밀도 11.3

g/cm^3 인 납을 이용했으며, 두께는 0.51 cm에서 8.04 cm까지 투과선량을 측정하였다.

필터의 위치는 선원에서 56 cm 위치에서 필터를 적층하였으며, 전리함의 중앙에서 필터간 최단거리는 44 cm이다.

전리함은 0.125 cc (PTW사) Famer형 전리함과 pico 암페어를 측정할 수 있는 전위계(모델명: UNIDOS)를 사용하였다.

평탄필터의 정점을 이탈하는 선속에 대한 스펙트럼변화를 구하기 위하여 전리함의 위치를 중심선속에서 7.5 cm (Tangent 0.075)와 12.5 cm (Tangent 0.125) 떨어진 위치 OAD (Off-Axis Distance)에 Fig. 1과 같이 설치하여 납 투과선량을 측정하였다.

조사면 내 얇은 깊이의 선량분포는 필터의 모양과 콜리메이터에서 생성된 산란선의 영향을 실측에서 구한 프로파일 함수를 콘벌루션에 적용하기 위하여 각 조사면의 프로파일곡선을 깊이별 입력으로 생성시켰다.

심부선량과 깊이별 선량프로파일은 물펜텀(50×70×50 cm^3)을 이용하여 깊이 40 cm까지 실측하였다. 수치분석으로 구한 에너지스펙트럼을 상업화된 치료선량계획용 프로그램(XiO Ver.4.3, CMS사)에 적용하여 식 (3)의 커널법 콘벌루션에 의한 심부선량률과 실측에 의한 값을 비교하였다.

본 실험에서 선택한 조사면은 임상에서 많이 사용되는 조사면 6×6, 10×10, 20×20과 30×30 cm^2 을 택하여 조사면 심부선량률과 선량프로파일곡선을 각각 비교하였다.

결 과

연속스펙트럼 광자선의 투과선량은 흡수체의 두께를 통과한 전 에너지구간의 광자플루언스로 나타낼 수 있다. 흡수체(X)를 통과한 상대 투과선량비 T 는 식 10을 이용하여 초기에너지에서 최대에너지의 1/3 에너지구간을 최대조사선량으로 설정하고 Prismoidal 정리를 이용한 심슨 적분형으로 바꾸어 다음과 같이 얻었다.

$$T(X) = 1/3 \sum_{E_i=0}^{E_{max}} a F(E) e^{-\mu(E)x} \quad (12)$$

이 되며 에너지 구간은 0.25 MeV이고, 선흡수계수(μ)는 필터 재질의 에너지함수로 주어졌다.¹²⁾

적분계수 a 는 에너지구간에 따라 다음과 같다. 즉 초기 구간과 최종구간은 $a=1$, 짝수구간은 $a=4$, 홀수구간은 $a=2$

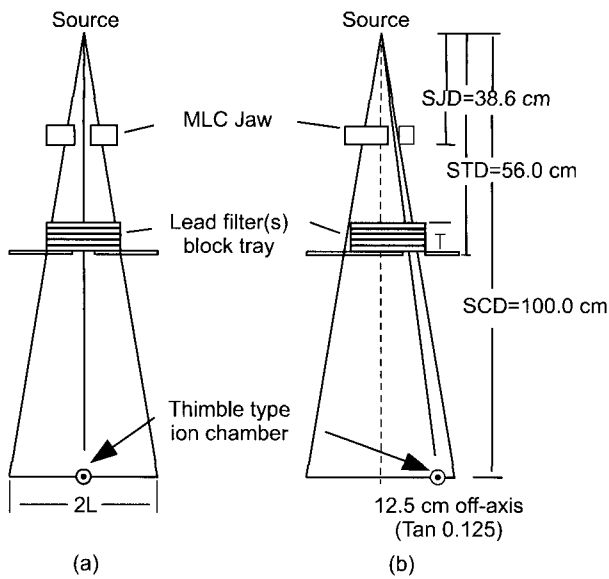


Fig. 1. Showing the schematic set-up diagram for transmitted dose of lead filters in central axis (a) and off-axis dose at 12.5 cm (b).

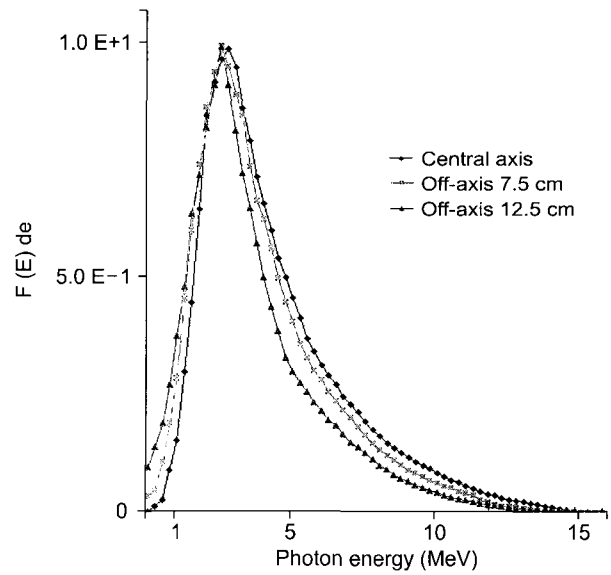


Fig. 2. Energy spectra were fitted from the transmitted dose of 15 MV X rays on central axis (black diamond), tangent 0.075 (pink square) and Tangent 0.125 (green triangular). Here $F(E) dE$ represents the relative energy fluence of energy interval dE .

Table 1. Comparison the transmission rate of calculations to that of the measurements using the lead filter in 15 MV photon beams.

Lead thickness (g/cm ²)	Transmission %		
	Measurement (%)	Calculation (%)	Discrepancy (%)
0	100.0	100.0	0.0
1.02	59.60	59.90	0.5
2.03	35.70	36.10	1.1
3.05	21.90	21.80	-0.5
5.00	8.10	8.30	2.5
8.04	1.81	1.80	-0.6

Table 2. Comparison the transmission rate of calculations to that of the measurements of 7.5 cm off-axis using the lead filter in 15 MV photon beams.

Lead thickness (g/cm ²)	Transmission %		
	Measurement (%)	Calculation (%)	Discrepancy (%)
0	100.0	100.0	0.0
1.03	58.7	59.2	0.9
2.04	35.1	35.5	1.1
3.07	21.2	21.2	0.0
5.01	7.9	8.1	2.5
7.05	2.8	2.9	3.6

이다.

선형가속기의 15MVX 선의 스펙트럼은 납 투과체를 투과한 실험선량률을 근거로 수치적 반복법을 사용하여 Table 1과 같이 1% 이내의 오차로 근접한 투과선량을 얻을 수 있었다.

중심선속과 변두리 선속의 각 연속스펙트럼을 구한 결과 Fig. 2와 같으며, 중심선속의 평균에너지는 4.634 MeV, Tangent 0.075에서는 4.211 MeV, Tangent 0.125에서는 3.906 MeV를 각각 얻었다.

Table 1과 같이 분석된 스펙트럼을 이용한 15MV X선의

투과선량률은 측정치에 대해 평균오차 $0.60 \pm 1.14\%$ 를 보였으며 납필터 8.04 cm에서 -0.6%로 최저오차, 5 cm 두께에서 2.5%로 최대오차를 보였다.

Tangent 0.075 (Table 2)와 0.125 (Table 3)인 변두리 선속에서 투과선량의 평균오차는 각각 $1.62 \pm 1.27\%$, $1.44 \pm 1.53\%$ 를 보였고, 변두리 선속의 스펙트럼에서 투과선량 값이 중심선속에 비해 오차가 약간 높게 나타났다.

저자들이 구한 에너지 분포가 다소 낮은 경우로 보이나 투과선량비가 낮은 곳에서는 적은 차이에서도 오차가 크게

Table 3. Comparison the transmission rate of calculations to that of the measurements of 12.5 cm off-axis using the lead filter in 15 MV photon beams.

Lead thickness (g/cm ²)	Transmission %		
	Measurement (%)	Calculation (%)	Discrepancy (%)
0	100.0	100.0	0.0
1.03	58.0	58.4	0.7
2.05	34.5	34.7	0.6
3.09	20.7	20.6	-0.5
5.04	7.5	7.7	2.7
7.09	2.7	2.8	3.7

나타남으로 실험으로 구한 스펙트럼이 비교적 높은 신뢰성을 가지고 있음을 알 수 있다.

임상에 이용되는 방사선의 선량계획은 펜텀 내 조사된 방사선 중심선속의 심부선량률은 식 3과 같이 임의의 입자수를 정하여 임의의 총 입자수에 대해 규격화하여 구하였다. 조사면 내 선량은 중심선속에서 떨어진 거리에 따른 측방선량률(Lateral fluence distribution)로 주어졌다. 조사면의 경계 바깥의 선량기울기는 콜리메터의 투과와 산란선에 의한 프로파일 곡선을 나타내는 Clarkson 투과계수(δ) 0.02를 적용하였으며, 조사면의 가장자리의 선량기울기를 나타내

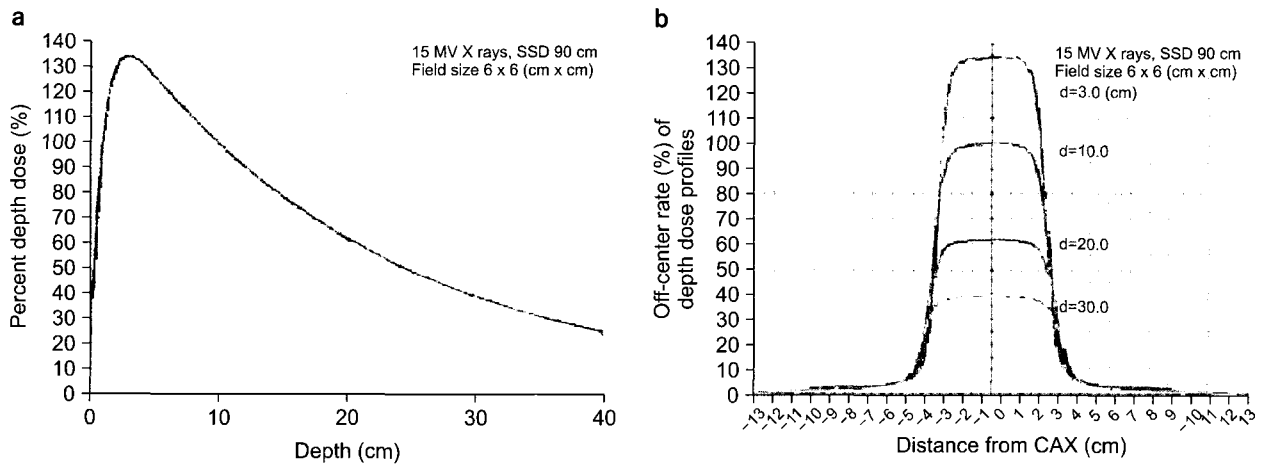


Fig. 3. Computed percent depth dose curve (a) and depth dose profiles (b) curves are colored in figure for 6×6 cm² of 15 MV X rays showed very closed to those of measurements (black). The field size was defined at SAD 100 cm and aligned for SSD 90 cm. The profiles are obtained from 3, 10, 20, and 30 cm of depth.

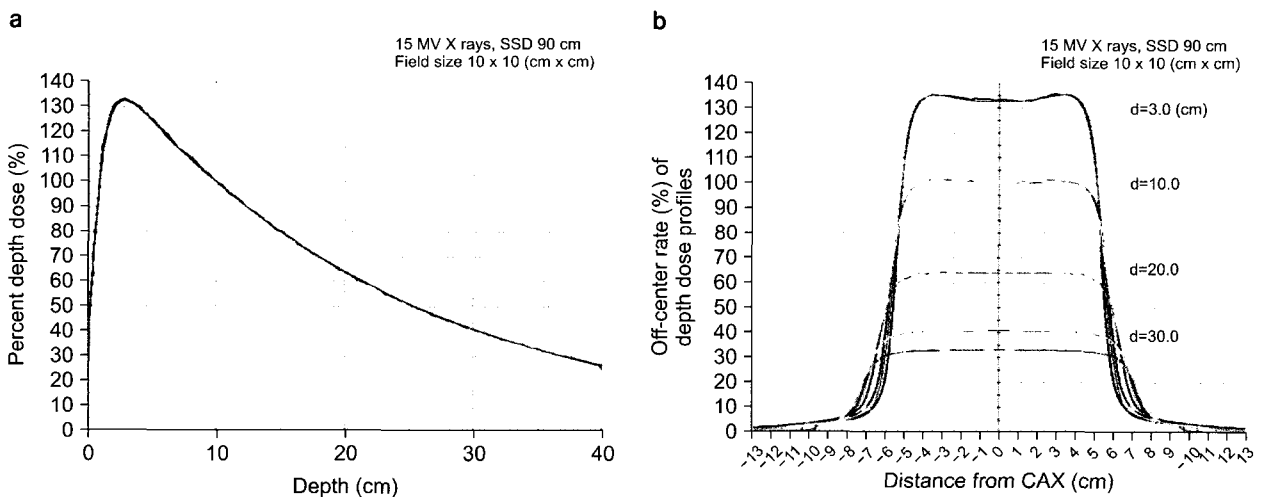


Fig. 4. Computed percent depth dose curve (a) and depth dose profiles (b) curves are colored in figure for 10×10 cm² of 15 MV X rays showed very closed to those of measurements (black). The field size was defined at SAD 100 cm and aligned for SSD 90 cm. The profiles are obtained from 3, 10, 20, 30 and 35 cm of depth.

는 Gaussian 계수(σ)는 0.39를 취하여 선량프로파일을 최적화하였다.¹³⁾

조사면크기에 따른 선량분포는 임상에서 많이 사용되는 조사면으로 6×6 cm²과 10×10, 20×20, 30×30 cm²을 선택하여 심부선량곡선과 선량프로파일 곡선을 얻었다(Fig. 3~6). Fig. 3에서 흑색실선은 수조펜트를 이용한 실측 심부선량곡선(a)과 선량프로파일곡선(b)을 나타내며, 색상을 띤 선은 에너지스펙트럼에 해당되는 커널빔을 콘볼루션하고 프로파일곡선을 함수화한 측방선량율과 Gaussian 함수를

이용한 조직선량이다.

심부선량률은 작은 조사면 6×6 cm²에서 최대조사면 30×30 cm²까지 실험한 진 조사면에서 계산치와 실측치가 매우 잘 일치하였으며, Table 4와 같이 심부선량은 10×10에서 최소오차 -0.58%와 최대오차 0.39%를 보였으며, 30×30에서는 -0.34%와 1.51%의 오차를 보였다.

계산상 물의 깊이 40 cm에서는 후방산란의 기여가 없으므로 약 2% 이하의 오차를 보였다.

조사면의 선량분포를 알 수 있는 프로파일 곡선(Fig. 3~

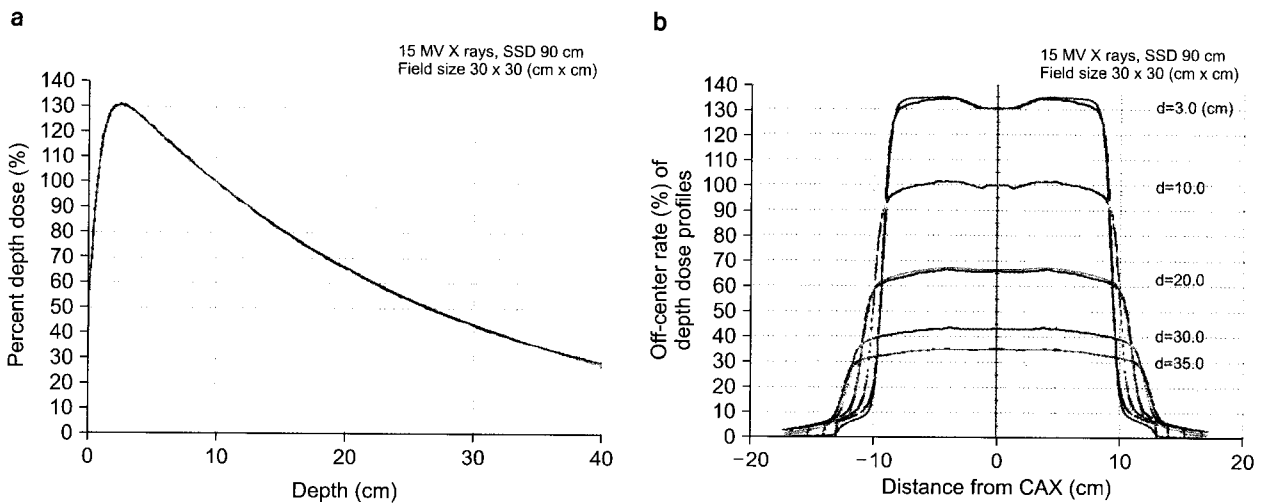


Fig. 5. Computed percent depth dose curve (a) and depth dose profiles (b) curves are colored in figure for 20×20 cm² of 15 MV X rays showed very closed to those of measurements (black). The field size was defined at SAD 100 cm and aligned for SSD 90 cm. The profiles are obtained from 3, 10, 20, 30 and 35 cm of depth.

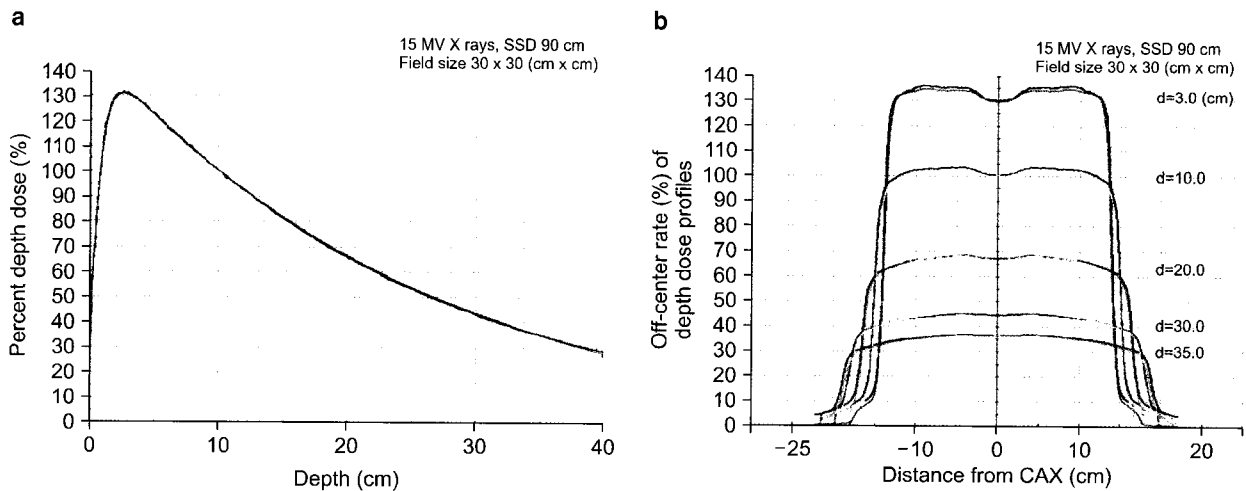


Fig. 6. Computed percent depth dose curve (a) and depth dose profiles (b) curves are colored in figure for 30×30 cm² of 15 MV X rays showed very closed to those of measurements (black). The field size was defined at SAD 100 cm and aligned for SSD 90 cm. The profiles are obtained from 3, 10, 20, 30 and 35 cm of depth.

Table 4. Comparison the Percent depth dose of measured to that of convolution method.

Field size (cm)		10×10			30×30		
d (cm)	%	Measured (M)	Convolution (C)	(C-M)/Mx 100	Measured (M)	Convolution (C)	(C-M)/Mx 100
3		133.10	132.33	-0.58	129.80	129.36	-0.34
5		125.18	124.76	-0.34	121.53	121.30	-0.19
10		100.00	100.00	0.00	100.00	100.00	0.00
15		80.17	80.10	-0.09	81.87	82.24	0.45
20		63.81	63.97	0.25	67.01	67.42	0.61
25		50.90	51.10	0.39	54.74	55.17	0.79
30		40.78	40.90	0.29	44.45	45.12	1.51
35		32.81	32.63	-0.55	36.14	36.15	0.03

Table 5. Compare the error percent of lateral dose distributions to that of measurement of 15 MVX. OADR represents the off-axis distance ratio.

Field size (cm)		6×6			10×10			20×20			30×30		
d (cm)	OADR	0.5 L	0.75 L	0.9 L	0.5 L	0.75 L	0.9 L	0.5 L	0.75 L	0.9 L	0.5 L	0.75 L	0.9 L
3		0.40	2.50	2.34	0.32	0.13	1.45	0.44	1.53	0.16	-0.82	-0.73	-0.97
10		0.13	1.42	2.98	0.19	0.18	1.46	1.13	1.85	0.86	-0.83	-1.39	-1.59
20		1.36	0.64	2.82	0.13	0.23	0.82	1.42	1.82	0.55	0.04	-0.93	-1.33
30		0.81	0.73	0.94	0.13	0.33	1.19	1.34	1.47	0.48	0.83	-0.43	-0.92

6)은 비교적 작은 조사면의 깊이 3 cm, 10 cm, 20 cm, 30 cm에서 모두 1% 미만으로 일치했으나, 조사면 20×20 cm 이상에서는 중심선에서 떨어진 조사면 경계 주위에서 최대 2% 이내의 오차를 보였다.

조사면의 중심에서 변까지 거리를 깊이별 L로 하고, 0.5 L, 0.75 L, 0.9 L의 위치에서 각 깊이별 프로파일곡선을 비교한 결과 Table 5와 같이 0.5 L에서는 전 조사면에서 평균 오차 0.645%를 나타내었고, 0.75 L은 20×20 조사면에서 1.08%의 오차를 보였다.

조사면의 가장자리에 해당되는 0.9 L에서는 평균 1.20%를 보였고, 작은 조사면에서는 최대 2.27%의 오차를 보였다. 이에 비해 큰 조사면에서는 오히려 낮은 오차를 나타내어 전 조사면의 실측선량과 콘벌루션에 의해 구한 값이 허용하는 3% 이내의 오차범위로 잘 일치하는 결과를 얻었다.

고 찰

선형가속기의 고에너지 X선에 대한 조직의 선량은 조사된 방사선에너지의 심부선량률과 Off-axis distance에 의한 선량감쇠를 구하거나 몬테칼로 시뮬레이션을 통해 입자 커널을 만들고 커널범이 조직을 통과하면서 주어진 에너지의 량을 콘볼루션법으로 구하는 방법이 많이 발표되고 있다.^{13,14)}

본 연구에 사용된 치료선량계획장치는 조직층에 도달되는 방사선에너지의 커널범을 콘벌루션 적분으로 심부선량과 조사면 내 도달되는 선량을 얻으므로 에너지스펙트럼을 구하는 일이 중요함을 알 수 있었다.¹⁵⁾

흡수체를 통과한 연속스펙트럼의 광자는 흡수계수가 구간의 에너지별로 다른 흡수를 나타내므로 납필터를 통과한 감쇠선량과 에너지별 광자플루언스는 라플라스역변환관계에 있게 된다. 따라서 여러층의 필터두께를 통과한 선량감

쇠비로 에너지별 분할조사선량을 구할 수 있음을 확인하였다.¹⁶⁾

저자들은 본 연구에서 15 MV X선의 투과선량에 대한 에너지스펙트럼을 이용해 얻은 투과선량률은 0.5 cm부터 8.04 cm 두께까지 모두 실험오차 범위 내에서 측정선량과 매우 일치함을 보였으나 5 cm 두께의 선량에서 다소 높은 2.5% 불일치를 보였으나 선량률이 비교적 낮은 구간을 고려하면 계산된 선량률이 상당히 정확한 스펙트럼에 근거한 것임을 알 수 있었다.

본 실험의 15 MV X선의 에너지구간은 0.25 MeV에서 시작하여 16 MeV까지 0.25 MeV씩 분할입자속 F(E)으로 택했으며, 15 MeV 이상에서는 명목상 입자수로 설정하였다.

선형가속기의 빔관에서 나온 전자선속이 타겟에 충돌하여 변환된 광자선속이 원뿔모양의 평탄형필터를 통과하는 위치에 따라 에너지 변환을 생각할 수 있으므로 중심선속과 변두리의 에너지를 분석할 필요가 있다.¹⁷⁾

본 실험에서 투과선량률은 선원-검출기 거리가 100 cm 일 때의 중심선속과 중심-이탈거리 7.5 cm (Tangent 0.075)와 12.5 cm (Tangent 0.125)의 각 위치에서 에너지스펙트럼을 반복적인 수치해석으로 구하였으며, 에너지 변환을 수치적으로 나타내게 되어 조사면 가장자리의 선량변화가 에너지와 투과깊이 변화에 있음을 알 수 있다.

선량률 결정에 중요한 에너지스펙트럼을 통해 실측 심부선량률과 측방선량률을 비교한 것은 조사면내 선량률이 주로 입자플루언스의 변화에 의한 것을 감안하여 커널빔의 콘벌루션에 실험적 에너지 스펙트럼을 구하여 상업화된 XiO 치료선량계획전산에 입력하고 작은 조사면 6×6 cm에서 큰 30×30 cm까지 심부선량을 비교한 결과 중심선속 및 깊이별 측방 선량분포가 실험치에 비해 평균 1% 이내로 거의 일치하는 선량률을 보였다. 작은 조사면의 프로파일 곡선은 3 cm, 10 cm, 20 cm, 30 cm 깊이에서 모두 실험과 일치하는 선량분포를 보인 반면 임상에 많이 쓰이는 30×30 cm 조사면의 선량분포에서는 중심에서 떨어질수록 최대 2% 이내의 불일치를 보였다. 이것은 평탄형필터의 기하학적 구조에 의한 선량변환과 콜리메터에 의한 산란선의 증가와 조직층의 산란선 기여도에 의한 오차로 생각된다.

특히 조사면의 얇은 깊이의 선량분포에서 필터의 모양과 콜리메터의 영향이 높음을 알 수 있다. 따라서 실험에서 깊이 10 cm의 깊이에서는 매우 평탄한 조직선량을 보이므로 필터와 콜리메터 산란선의 영향이 현저히 적게 나타남을 알 수 있다. 이는 향후 필터와 콜리메터 산란선의 영향범위에 대해서 연구가 더 이루어질 필요가 있음을 암시

하고 있다.

그러나 전 조사면의 선량오차가 허용 범위 내에 들어있음을 알 수 있어 저자들이 분석한 필터 투과선량에 의한 에너지 스펙트럼은 평탄형필터를 통과한 선형가속기의 에너지플루언스비를 구하는 데 매우 유용함을 확신하게 된다.

특히 중심선속을 벗어난 위치에서 에너지스펙트럼을 분석함으로써 상업화된 전산치료계획선량을 독립적으로 검증할 수 있는 한 방법이 될 수 있으며, 선속 내 임의의 재질의 필터를 통과한 선질의 조직선량을 구하는 데도 유용한 방법이 될 것으로 생각된다.

결 론

방사선 치료용 선형가속기의 15 MV 광자선은 가속관내 고속전자가 Bending magnet를 통과하면서 지정된 에너지케도를 따라 270도 회전한 다음 타겟에 충돌되어 형성된 연속스펙트럼이 평탄형 필터를 통과한 에너지플루언스비를 실험적 반복분석법으로 Fitting하여 구한 결과 중심선속의 평균에너지는 4.639 MeV, Tangent 0.075의 조사면측방에서는 4.211 MeV, 0.125에서는 3.906 Me를 보여 측방으로 갈수록 평균에너지가 낮아짐을 알 수 있다.

중심선속의 스펙트럼에서는 에너지플루언스의 비가 가장 높은 에너지는 3.75MeV로 나타났다. 투과계수에 의한 에너지스펙트럼을 이용한 심부선량률은 6×6 (cm²)의 작은 조사면에서 30×30 (cm²)의 큰 조사면까지 실측한 심부선량률과 거의 일치하는 값을 보였고, 선량프로파일곡선에서는 평균 1.2%의 오차범위를 보여 실측선량과 상당히 일치함을 알 수 있으며, 커널빔의 콘벌루션 방법을 이용한 조직내 선량평가에 에너지결정이 중요함을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. Sontag MR, Cunningham JR: The Equivalent Tissue-Air Ratio Method for making absorbed dose calculations in a heterogeneous medium. *Radiology* 129:787-794 (1978)
2. Mohan R, Chui C: Differential pencil beam dose computation model for photons. *Med Phys* 13:64-73 (1986)
3. Mackie TR, Bielajew AF: Generation of photon energy deposition kernels using the EGS Monte Carlo code. *Phys Med Biol* 33:1-20 (1988)
4. Jordan TJ: Central axis depth dose data for use in radiotherapy. *BJR Suppl* 25:62-83 (1996)
5. Baird LC: X-ray spectra vs attenuation data. A theoretical

- analysis. Med Phys 8:319-323 (1981)
6. Archer BR, Wagner LK: A Laplace transform pair model for spectral reconstruction. Med Phys 9:844-847 (1982)
 7. Archer BR, Wagner LK: Determination of diagnostic x-ray spectra with characteristic radiation using attenuation analysis. Med Phys 15:637-641 (1988)
 8. Huang PH, Chen TS, Kase KR: Reconstruction of diagnostic x-ray spectra by numerical analysis of transmission data. Med Phys 13:707-710 (1986)
 9. 최태진, 김옥배, 서수지: 투과선량의 수치해석에 의한 전산화단층영상장치 X선의 에너지분포 결정. 의학물리 8:35-43 (1997)
 10. Sharpe MB, Battista JJ: Dose calculations using convolution and superposition principles: the orientation of dose spread kernels in divergent x-ray beams. Med Phys 20:1685-1694 (1993)
 11. Francois P, Cataia A, Scouarnec C: Simulation of X-ray spectral reconstruction from transmission data by direct resolution of numeric system AF=T. Med Phys 20:1695-1703 (1993)
 12. NSRDS-NBS29: Photon Cross Sections, Attenuation Coefficients, and Energy Absorption Coefficients from 10 KeV to 100 GeV. NBS (1969)
 13. Papanikolaou N, Mackie TR, Meger-Wells C: M Gehring: Investigation of the convolution method for polyenergetic spectra. Med Phys 20:1327-1336 (1993)
 14. Bortfeld T, Schlegel W, Rhein B: Decomposition of pencil beam kernels for fast dose calculations in three-dimensional treatment planning. Med Phys 20:311-318 (1993)
 15. XiO: XiO beam modeling guide. ver.4.2.0. P/N98916, CMS, INC.
 16. Boone JM, Seibert JA: An accurate method for computer-generating tungsten anode x-ray spectra from 30 to 140 KV. Med Phys 24:1661-1670 (1997)
 17. Ahnesjo A: Analytic modeling of photon scatter from flattening filters in photon therapy beams. Med Phys 21:1227-1235 (1994)

Compare the Clinical Tissue Dose Distributions to the Derived from the Energy Spectrum of 15 MV X Rays Linear Accelerator by Using the Transmitted Dose of Lead Filter

Tae-Jin Choi*, Jin-Hee Kim[†], Ok-Bae Kim[†]

Department of *Bio-Physics Medical Engineering and [†]Radiation Oncology, Keimyung University School of Medicine, Daegu, Korea

Recent radiotherapy dose planning system (RTPS) generally adapted the kernel beam using the convolution method for computation of tissue dose. To get a depth and profile dose in a given depth concerned a given photon beam, the energy spectrum was reconstructed from the attenuation dose of transmission of filter through iterative numerical analysis. The experiments were performed with 15 MV X rays (Oncor, Siemens) and ionization chamber (0.125 cc, PTW) for measurements of filter transmitted dose. The energy spectrum of 15 MV X-rays was determined from attenuated dose of lead filter transmission from 0.51 cm to 8.04 cm with energy interval 0.25 MeV. In the results, the peak flux revealed at 3.75 MeV and mean energy of 15 MV X rays was 4.639 MeV in this experiments. The results of transmitted dose of lead filter showed within 0.6% in average but maximum 2.5% discrepancy in a 5 cm thickness of lead filter. Since the tissue dose is highly depend on the its energy, the lateral dose are delivered from the lateral spread of energy fluence through flattening filter shape as tangent 0.075 and 0.125 which showed 4.211 MeV and 3.906 MeV. In this experiments, analyzed the energy spectrum has applied to obtain the percent depth dose of RTPS (XiO, Version 4.3.1, CMS). The generated percent depth dose from 6×6 cm² of field to 30×30 cm² showed very close to that of experimental measurement within 1% discrepancy in average. The computed dose profile were within 1% discrepancy to measurement in field size 10×10 cm, however, the large field sizes were obtained within 2% uncertainty. The resulting algorithm produced x-ray spectrum that match both quality and quantity with small discrepancy in this experiments.

Key Words: Attenuation, Energy spectrum, Kernel beam convolution, Percent depth dose