

## 단순화 이선원 모델을 이용한 전자선 선량을 계산 알고리즘에 관한 예비적 연구

울산대학교 의과대학 서울중앙병원 방사선종양학과  
한림대학교 성심병원 방사선종양학과\*

고영은, 이병용, 조병철\*, 안승도, 김종훈, 이상욱, 최은경

블록을 사용한 부정형 전자선 조사면에서의 선량율(relative output factor, ROF)을 계산하는 전자선 알고리즘을 개발하고, 측정값과 계산값을 비교하여 알고리즘을 평가하였다. 전자선의 선량은 산란판, 전자선 cone 등 모든 요소를 고려한 1차선 부분과 블럭에 의한 2차선의 합으로 표시할 수 있다고 가정하였으며, 1차선은 가우스 분포를, 2차선은 거리역제곱 법칙만을 따른다고 가정하였다. 2차선 블럭 산란에 의한 각 분포는 고려하지 않았다. 이런 방법으로 전자선의 ROF를 유효 SSD, 1차선 분포 표준편차, 2차선 발생률 등 3가지의 인자만을 이용하여 선량율을 계산할 수 있는 단순한 방식을 고안하였다. 6, 9, 12, 16, 20 MeV의 전자선을 사용하여 이 모델을 검증하였다. 측정은 항상 개방 조사면의 선량 최대지점 깊이에서 실시하였으며 다양한 정사각형 치료면 측정으로 3개의 인자를 구할 수 있었다. 직사각형 조사면과 부정형 조사면에 대하여 이 모델을 이용한 계산값과 측정값의 차이는 평균 1.0%이내였으며, 최대 2.1%를 넘지 않았다. 본 연구에서 개발한 알고리즘은 필요한 인자가 3개이면서 매 전자선 콘마다 5~6회 측정으로 구할 수 있어서 임상 적용에 편리하며, 계산 결과가 정확하여 특이 오차를 보이는 유형에 관한 보완 연구를 수행하면 임상에 사용할 수 있음을 보였다.

**중심단어** : 전자선, output factor, 알고리즘

### 서 론

전자선은 피부에 근접해 존재하거나 깊이가 얇은 곳에 존재하는 종양을 치료하는데 유리하며, 최근에는 전자선을 이용한 세기조절 방사선 치료에 관한 관심이 생기면서 방사선 치료에서 그 사용이 점차 늘어가고 있다<sup>1)</sup>. 그러나 전자선의 선량율(relative output factor, ROF)이 조사면의 크기(field size), 블럭의 형태(beam cutout), 전자선 에너지, 전자선 에너지에 따른 SSD(effective SSD)에 따라 크게 달라지므로 그 값을 예측하기 어려우므로 환자 치료시 각각의 환자들 선량율을 측정해야만 하는 어려움이 있다.<sup>2-16)</sup>

이런 불편함을 해결하기 위해 전자선의 선량율을 계산하는 많은 방법이 연구보고 되고있다. 대표적으로 Nair<sup>3)</sup>

등이 제시한 등가 조사면 평가 방법(equivalent square method), Mills<sup>4-6)</sup>, Shiu<sup>7)</sup> 등이 제시한 유효조사면 크기의 평가를 1차원적으로 고려하는 제곱근과 일차원 방법, Bruinvis<sup>8)</sup>, Choi<sup>9)</sup> 등이 제시한 분할 적분 방법, Ebert<sup>10)</sup>, McPaland<sup>11)</sup> 등이 제시한 콜리메이터 산란과 가우스 펜실 모델, Khan<sup>12)</sup> 등이 제시한 측면 전자축적 비율 방법 등이 있으며, 최근에는 Monte Carlo simulation<sup>13-14)</sup> 등을 사용하는 방법들이 제시되었다. 그러나 이런 방법들은 임상에 적용하기 어려운 문제점들을 갖고 있어서 실제 임상에 널리 쓰이고 있지는 않다. 즉, Nair 등의 방법은 조사면의 크기와 SSD에 의해서만 계산되는 함수이므로 작은 조사면에서는 오차가 커지고, Mills 등의 방법으로는 직사각형 형태는 어느 정도 예측하지만 부정형은 오차가 크고, Bruinvis, Choi 등의 방법은 선량율을 계산하기 위해 너무 많은 측정 인자를 요구하는 등의 문제가 있다. Monte Carlo Simulation 방법의 경우 사용이 어렵고, 계산에 긴 시간이 소요되는 등 실질적으로 이용하는데 기술적인 문제가 있어 실제 임상에 적용하는 데에 많은 어려움이 있다. 최근 발표된 Chen<sup>15)</sup> 등의 이선원 모델(two-source model)은 정확한 결과를 보여주고 있으나 분할 적분 방법

이 논문은 2002년 1월 9일 접수하여 2002년 2월 20일 채택되었음  
본 연구는 보건복지부 선도기술·의료공학 기술개발사업(HMP-98-G-1-016) 연구비 지원에 의해 수행되었음.

통신저자: 이병용, 서울시 송파구 풍납동 388-1  
서울중앙병원 방사선 종양학과  
Tel: 02)3040-4433

고영은 외 6인: 단순화 이선원 모델을 이용한 전자선 선량률 계산 알고리즘에 관한 예비적 연구

과 마찬가지로 인자를 결정하기 위해 많은 측정이 필요하여 실용성이 떨어지는 것으로 알려져 있다.

이 연구에서는 이선원 모델을 단순화하여 최소한의 측정으로 필요한 인자를 구할 수 있으며, 계산 결과를 신뢰할 수 있는 알고리즘을 개발하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 알고리즘

본 연구에서 고안한 단순화 이선원(STS, simplified two-source) 모델은 전자선이 측정 지점에 기여하는 선원이 산란판, 전자선 cone 등 모든 요소를 고려한 1차선과 블럭에 의한 2차선의 합으로 표시할 수 있다고 가정하였다. 1차선은 가우스 분포를 2차선은 거리역제곱 법칙만을 따르는 것으로 생각하였다(Fig. 1). 측정점에서 1차선에 의한 전자선 플루언스는 측정점과 선원과의 거리, 차폐 블럭의 크기 등을 고려하여 다음 식으로 표현할 수 있다.

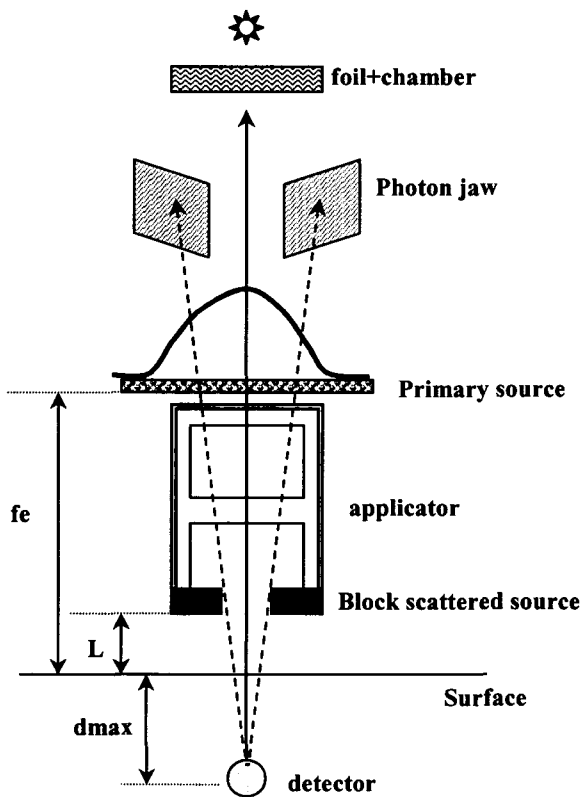


Fig. 1. Primary source component of the two-source model<sup>13)</sup>

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \int e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx \quad (1)$$

$$\text{단, } x = \frac{r(fe + d)}{L + d}$$

$fe$  : effective SSD

$d$  :  $d_{max}$

$L$  : applicator에서 surface까지의 거리

$\sigma$  : source의 거리

1차선 부분에서는 각 에너지별 유효 SSD를 고려하여 계산하였다. 알고리즘을 단순화하기 위해 선량 최대점까지는 저지능이 일정하다고 가정하였고, 따라서 1차선 부분에서의 선량은 1차선의 플루언스에 비례한다고 가정하였다.

2차선으로 인한 전자선 플루언스  $C_r$ 을 거리 역제곱 법칙에 따르는 것으로 하여 다음과 같이 표현하였다(Fig. 2)

$$C_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{2\pi r_i}{(L + d)^2 + r_i^2} \quad (2)$$

$r$  : 블럭의 중심에서 블럭 경계까지의 거리

이 식에서 전자선의 각분포는 무시하였다.

두 선원에 의한 측정 지점에서의 플루언스  $\phi$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\phi = f(x) + \delta C_r \quad (3)$$

단,  $\delta$  : 팬텀에 의한 산란을 고려, 차폐체에서 발생한 단위길이 당 이차선 발생율

실제 측정은 팬텀내에서 이루어지지만 측정점이 선량 최대점이므로 다음과 같은 근사식이 성립할 수 있다.

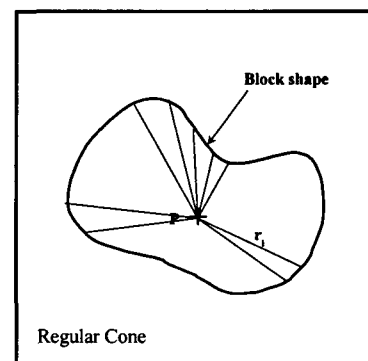


Fig. 2. Schematic representation of calculation method for block shaped-field

$$ROF = \frac{D_{block}}{D_R} \tag{4}$$

$$\doteq \frac{\Phi_{block}}{\Phi_R}$$

단,  $D_R, \Phi_R$ 은 개방 조사면의 팬텀내 선량율과 플루언스이며,  $D_{block}, \Phi_{block}$ 은 차폐면의 팬텀내 선량율과 플루언스이다.

**2. 실험방법**

선량을 계산에 필요한 선량율을 측정하기 위해 6, 9, 12, 16, 20MeV 전자선(Clinac 2100 C/D, Varian, 미국)을 이용하였고, 사용한 전자선 applicator는 선원에서 applicator 끝까지의 거리가 95 cm로 설계되어 SSD 100 cm로 측정 시 수면에서 5 cm 위에 위치하게 된다. 전자선의 조사면은 SSD 100 cm일 때 정사각형 형태의 1×1, 2×2, 4×4, 6×6, 8×8, 10×10 cm<sup>2</sup> 블럭을 이용하여 모델에 필요한 3개의 인자를 구하였다. 직사각형 형태의 1×10, 2×10, 4×10, 6×10, 8×10 cm<sup>2</sup> 블럭과 임상에 사용한 다양한 형태의 블럭을 제작하여 알고리즘 평가를 위한 비교실험에 사용하였다. 모든 선량율 측정은 SSD 100 cm로 고정하여 물팬텀내 선량최대지점에서 이루어졌다.

**Table 1.** Parameter used in the modified two-source model(10×10 applicator)

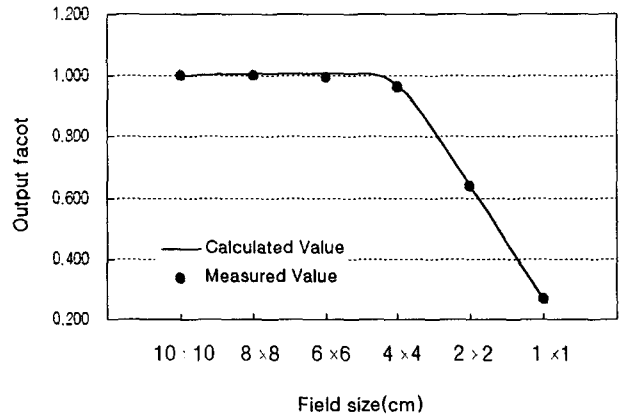
	<i>fe</i>	$\sigma$	$\delta$
6MeV	81.7	8.5	4.9
9MeV	86.8	10.1	30.8
12MeV	87.2	8.7	31.7
16MeV	88.2	6.8	2.7
20MeV	81.2	2.9	19.6

**Table 2.** Calculation vs. measurement of square field for 9MeV, 10×10 applicator

Square Field		
Field size	Calculation	Measurement
10×10	1.000	1.000
8×8	1.007	1.000
6×6	1.005	0.997
4×4	0.972	0.966
2×2	0.638	0.641
1×1	0.269	0.270

**결과 및 고찰**

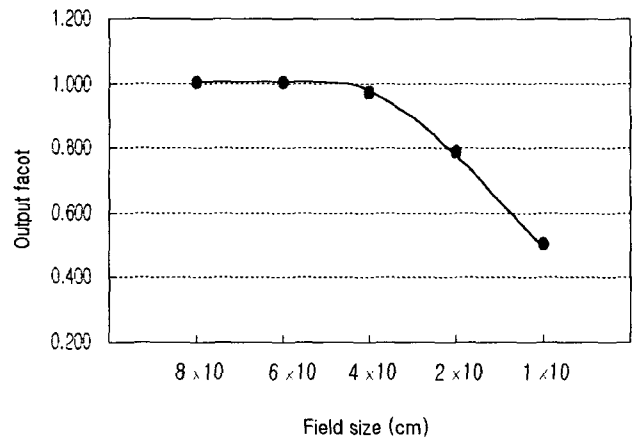
6개의 정사각형 치료면으로부터 (4)식에 필요한 3개의 인자를 구하였다. 측정값 6개에서 3개의 인자를 최소자승



**Fig. 3.** Calculation vs. measurement of square field for 9MeV, 10×10 applicator

**Table 3.** Calculation vs. measurement of square field for 9MeV, 10×10 applicator

Rectangular Field		
Field size	Calculation	Measurement
8×10	1.005	1.004
6×10	1.006	1.002
4×10	0.977	0.974
2×10	0.775	0.789
1×10	0.490	0.501



**Fig. 4.** Calculation vs. measurement of rectangular field for 9MeV, 10×10 applicator

고영은 외 6인 : 단순화 이선원 모델을 이용한 전자선 선량을 계산 알고리즘에 관한 예비적 연구

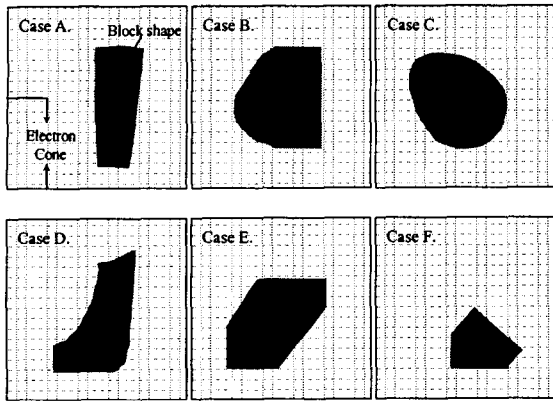


Fig. 5. Example of irregular shaped-field

Table 4. Irregular shaped-field(9MeV)

Case	Calculation	Measurement	Difference
A	0.940	0.961	-0.021
B	1.006	1.002	0.004
C	1.002	1.004	-0.002
D	0.988	0.975	0.013
E	0.994	0.993	0.001
F	0.801	0.793	0.008

범으로 추출한 결과를 Table 1에 표시하였다. Fig. 3과 Fig. 4, Table 2와 Table 3는 각각 정사각형 형태의 조사면과 직사각형 형태의 조사면에서 측정된 선량율과 같은 조사면에 대해 단순화 이선원 알고리즘에 의해 계산된 선량율을 비교한 결과다. 표에서 볼수 있듯이 측정값과 계산값의 차이는 1.0% 이내였다. 식 (1)~(4)에 나오는  $f_e$ ,  $\sigma$ ,  $\delta$  값은 Table 2의 측정값으로부터 구한 것으로 5~6번의 측정만으로 필요한 모든 인자를 구할 수 있음을 보여주고 있어 STS 모델의 우수성을 보여주고 있다.

실제 환자를 치료하는데 쓰인 부정형 전자선 조사면 (Fig. 5)을 사용하여 치료 전에 측정된 선량율과 알고리즘에 의해 계산된 선량율과의 차이는 1.0%이내 였으며, 최대 2.1%를 넘지 않았다(Table 4).

물팬텀 내에서 선량율은 블럭이 감소함에 따라 증가하다가 어느 크기(조사면  $4 \times 4 \text{ cm}^2$ )에 이르러 급격히 감소하는 경향을 나타내었다. 본 연구에서 개발한 알고리즘과의 결과는 조사면의 크기가  $4 \times 4 \text{ cm}^2$ 보다 크거나,  $2 \times 2 \text{ cm}^2$ 보다 작은 경우, 선량율 계산 결과는 잘 일치하는 경향을 보였으나,  $2 \times 2 \sim 4 \times 4 \text{ cm}^2$  사이의 조사면에서는 오차가 증가하는 경향을 보였다.

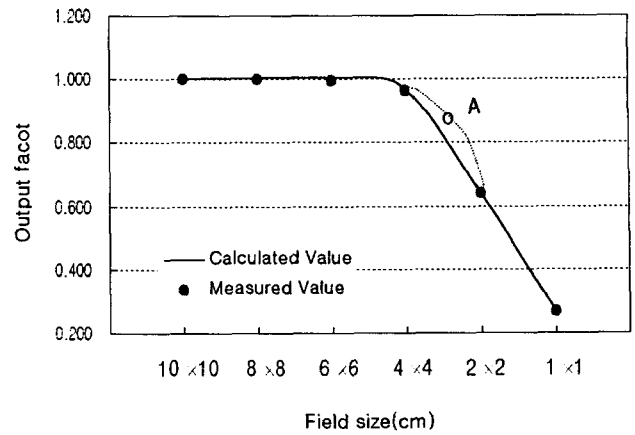


Fig. 6. Examples of  $3 \times 3 \text{ cm}^2$  field size

따라서 이 구간에 대해서도 측정값을 정확히 예측할 수 있는 방법의 보완이 필요함을 알 수 있다. 이는 조사면이  $4 \times 4 \text{ cm}^2$ 에서  $2 \times 2 \text{ cm}^2$ 로 변화해 갈 때 Fig. 6에서 실선으로 나타나는 것과 같이 본 연구의 모델에서 제시하는 모양과 달리 Fig. 6의 A경로를 따르도록 수정할 필요가 있음을 의미한다.

## 결 론

부정형 전자선 조사면을 사용하여 환자를 치료하는 경우 전자선의 선량율을 적은 수(3개)의 인자를 이용하여 전자선의 선량율을 계산할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 다양한 임상용 블럭 모양에 대해 측정된 선량율과 알고리즘에 의해 계산된 선량율을 비교한 결과 차이가 대부분 1.0% 이내이었고, 최대의 경우 2.1%를 넘지 않았다. 따라서 본 연구에서 개발한 알고리즘은 특이한 오차를 보이는 영역인,  $3 \times 3 \text{ cm}^2$  근처 조사면에 대한 추가 연구의 보완이 이루어진다면 적은 수의 인자로 쉽게 선량율을 구할 수 있고 결과가 정확하여 임상 적용이 가능하다.

## 참 고 문 헌

1. Ma C.M., Pawlicki T., Lee M.C., Jiang S.B., Li J.S., Deng J., Yi B., Mok E., Boyer A.L.: Energy- and intensity-modulated electron beams for radiotherapy. *Phys. Med. Biol.* 45(8): 2293-2311 (2000)
2. 조병철, 고영은, 오도훈, 배훈식: 2.5D 전자선 선량계산 알고리즘 개발. *의학물리학회지* 10(3): 133-140 (1999)
3. Nair R.P., Nair T.K.M., Wrede D.E.: Shaped field

- electron dosimetry for a Philips SL75/10 linear accelerator. *Med. Phys.* 10:356-360 (1983)
4. Mills M.D., Hogstrom K.R., Almond P.R.: Prediction of electron beam output factors. *Med. Phys.* 9:60-69 (1982)
  5. Mills M.D., Hogstrom K.R., Fielde R.S.: Determination of electron beam output for a 20 MeV linear accelerator. *Med. Phys.* 12(3):473-476 (1985)
  6. 이병용, 김정만, 김정화, 권경태, 이두현, 이강현, 최은경, 장혜숙: 차폐면적의 변화에 따르는 전자선 출력인자의 변화, *의학물리학회지* 1(1):61-68 (1990)
  7. Shiu A.S., Tung S.S., Nyerick G.: Comprehensive analysis of electron-beam central-axis dose for a radiotherapy linear accelerator. *Med. Phys.* 21:559-566 (1994)
  8. Bruinvis I.A.D., Mathol W.A.F.: Calculation of electron beam depth-dose curves and output factors for arbitrary field shapes. *Radiother. Oncol.* 11:395-404 (1988)
  9. Choi D.R., Wolters J., Mason D., Baillie A.: Modified sector-integration method for predicting the output factors of electron beams including extended source to surface distance. *Phys. Med. Biol.* 45(11):3367-3372 (2000)
  10. Ebert M.A., Hoban P.W.: A model for electron beam applicator scatter. *Med. Phys.* 16:88-93 (1995)
  11. McPaland B.J.: A Method of calculating the output-factors of arbitrarily shaped electron fields. *Med. Phys.* 22:1419-1429 (1989)
  12. Khan F.M., Higgins P.D., Gerbi B.J., Deibel F.C., Sethi A., Mihailidis D.N.: Calculation of depth dose and dose per monitor unit for irregularly shaped electron fields. *Phys. Med. Biol.* 43(10):2741-2754 (1998)
  13. Zhang G.G., Rogers D.W., Cygler J.E., Mackie T.R.: Monte Carlo investigation of electron beam output factors versus size of square cutout. *Med. Phys.* 26(5):743-50 (1999)
  14. Kapur A., Ma C.M., Mok E.C., Findley D.O. Boyer A.L.: Monte Carlo calculations of electron beam output factors for a medical linear accelerator. *Phys. Med. Biol.* 43(12): 3479-94 (1998)
  15. Chen J.Z., VanDyk J., Lewis C., Battista J.J.: A two-source model for electron beams: calculation of relative output factors. *Med. Phys.* 28(8):1735-45 (2001)
  16. Boyd R.A., Hogstrom K.R., Antolak J.A., Shiu A.S.: A measured data set for evaluating electron-beam dose algorithms. *Med. Phys.* 28(6):950-958 (2001)

## A Feasibility study on the Simplified Two Source Model for Relative Electron Output Factor of Irregular Block Shape

Young Eun Ko, Byong Yong Yi, Byung Chul Cho\*, Seung Do Ahn,  
Jong Hoon Kim, Sang Wook Lee, Eun Kyung Choi

*Dept. of Radiation Oncology, Asan Medical Center,  
College of Medicine University of Ulsan, Seoul, Korea*

*\*Dept. of Radiation Oncology, Hallym University Sacred Heart Hospital,  
Anayang, Korea*

A practical calculation algorithm which calculates the relative output factor(ROF) for irregular shaped electron field has been developed and evaluated the accuracy of the algorithm. The algorithm adapted two-source model, which assumes that the electron dose can be express as sum of the primary source component and the scattered component from the shielding block. Original two-source model has been modified in order to make the algorithm simpler and to reduce the number of parameters needed in the calculation, while the calculation error remains within clinical tolerance range. The primary source is assumed to have Gaussian distribution, while the scattered component follows the inverse square law. Depth and angular dependency of the primary and the scattered are ignored. ROF can be calculated with three parameters such as, the effective source distance, the variance of primary source, and the scattering power of the block. The coefficients are obtained from the square shaped-block measurements and the algorithm is confirmed from the rectangular or irregular shaped-fields used in the clinic. The results showed less than 1.0 % difference between the calculation and measurements for most cases. None of cases which have bigger than 2.1 % have been found. By improving the algorithm for the aperture region which shows the largest error, the algorithm could be practically used in the clinic, since one can acquire the full parameters with minimum measurements(5~6 measurements per cones) and generates accurate results within the clinically acceptable range.

**Keyword** : electron, output factor, algorithm