

전자선의 부정형조사야 선량계산에 있어서 필름선량측정법에 대한 고찰*

인하대병원 방사선종양학과

김완선 · 임현실 · 장인기 · 최홍식

I. 서 론

1. 연구의 필요성

전자선은 선속(beam)이 제한된 비정을 갖고 있어 체내에서 용적선량(integral dose)이 작고, 또한 선속의 정형(trimming) 및 차폐가 용이하여 방사선 치료에 널리 이용 되지만 심부에서 선량이 급격히 감소 되는 등, 체내의 선량분포는 광자선(X, γ 선)과 다른 특성을 가지고 있다.¹⁾

선속의 특성 중 조사야형태(field shape)에 따라 콜리메터나 팬텀으로부터 산란선이 증가되어 전자선의 출력(선량)과 선속중심축(central axis) 선량분포는 크게 달라지게 된다.²⁾

그러므로 전자선의 부정형조사야³⁾(irregular field) 선량계산은 이러한 선량분포의 변화를 고려해야 한다.

부정형조사야에 대한 선량계산시, 광자선은 'Sterling' 등에 의해 고안된 실용적 방법(rule of thumb method)⁴⁾을 이용하여 심부선량분율(%DD), 조직최대선량비(TMR), 후방산란계수(BSF) 등은 물론 선속의 출력계수(output factor)에 대한 지침(protocol)으로 널리 이용되고 있지만, 전자선에서는 이와같은 적절한 지침을 만들어 사용하는 것이 어려운 현실이다.

전자선은 'Hogstrom KR' 등에 의해 고안된

제곱근법(square root method)⁵⁾을 관행적으로 이용하는데, 이 공식은 정방형조사야³⁾(square field)에 대한 출력을 부정형 조사야 선량계산에 적용하는 것으로, 조사야 형태에 따라 선량계산의 오차가 커질 수 있다.

따라서 전자선의 부정형조사야는 오차를 최소화 할 수 있는 선량계산 방법을 적용하는 것이 중요하다고 할 수 있다.

2. 연구의 목적

본 실험은 전자선 치료에 이용되는 부정형 조사야 선량계산시, 측정과정이 단순하여 임상에서 쉽게 이용할 수 있는 필름 선량측정법의 유용성과 임상적용 방법을 제시하고자 하였으며, 다음과 같은 실험을 통하여 필름 선량측정법의 유용성을 분석 하였다.

- 1) 부정형조사야 형태에 따른 선량 변화를 비교하기 위해 전자선조사통³⁾(electron cone) 별로 다양한 형태의 부정형조사야를 임의로 선정하였다.
- 2) 부정형조사야 선량계산시, 측정방법에 따른 오차를 비교하기 위해 제곱근법(square root method), 전리함선량측정법(ion chamber dosimetry), 필름선량측정법(film dosimetry)으로 부정형조사야에 대한 출력계수를 계산하였

*본 논문은 대한방사선사협회 제33차 종합학술대회('98. 10. 24 서울중앙병원)에서 제5회 웨빙학술상을 수상한 논문임.

다.⁵⁻⁶⁾

3) 전리함 선량측정법에 비해 측정과정이 단순하여 현재 본원에서 편리하게 이용하고 있는 필름 선량측정법의 임상적용 방법을 제시 하였다.

II. 대상 및 방법

1. 실험장비 및 재료

선형가속기(Siemens Mevatron KD-2, 독일)에서 발생하는 전자선 에너지(6, 9, 12, 15 MeV)별로 전자선 조사통(10×10, 15×15, 20×20, 25×25 cm²)을 사용하여 각 전자선 조사통의 개 조사야³⁾(open field) 및 임의로 선정된 부정형 조사야 선량을 측정 하였다.

측정에는 전리함(PTW-Unidos electrometer)과 측정용 필름(X-omat V film, Kodak)을 이용하여 고체 팬텀(solid phantom RW3, dimension: 30×30 cm²)으로 선량의 변화를 측정 하였다.

10MeV 이하의 전자선은 표면선량³⁾(surface dose) 측정이 용이한 markus 전리함(PTW-plane parallel ion chamber 23343, volume : 0.055 cm³)을 이용하고, 10MeV 이상의 전자선에서는 farmer type 전리함(PTW-farmer type ion chamber 30001, volume : 0.6cm³)을 이용하였다.

또한, 전리함 선량측정법을 대신 할 수 있는 필름선량측정법의 정밀도를 확인하기 위해 광학계(densitometer, Konica PDA85)로 필름의 농도(optical density)를 측정하였다.

2. 실험방법

본 실험에서 전리함과 필름을 이용한 측정조건은 선원 팬텀간 거리를 100 cm으로 하고, 전자선 에너지별로 선속중심측 최대선량점³⁾(Dmax)에 필름 및 전리함을 각각 위치 시켰다(그림 1).

부정형 조사야 선량계산시 필름 선량측정법

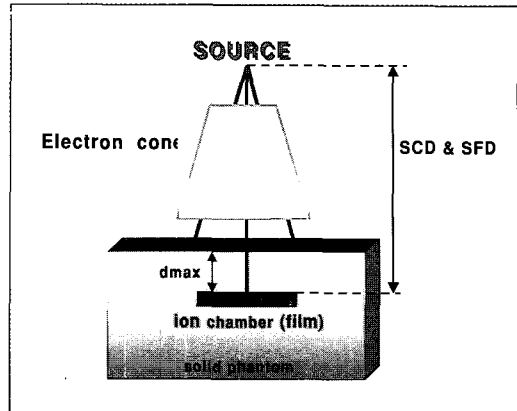


그림 1. 선량 측정을 위한 set-up 과정

- * SCD : 선원 전리함간 거리
- * SFD : 선원 필름간 거리
- * D_{max} : 최대선량점
- * SCD & SFD : SSD 100cm + dmax

의 유용성을 확인하기 위해 그림 2와 같이 전자선 조사통(electron cone)별로 부정형 조사야 차폐블록을 선정하여 다음과 같은 3가지 방법으로 출력계수를 계산하고, 측정방법에 따른 출력계수의 오차를 비교 하였다.

첫째, 관행적으로 이용되는 “제공근법 공식을 이용한 계산방법”은 실험대상으로 선정된 부정형 조사야(그림 2)에 대하여 표준 표(standard table)로 만들어진 데이터를 적용하는데, 즉 『장방형조사야에 대한 선량 계산은 등가정방형 조사야 데이터를 적용』 하였다(공식 1.)

<공식 1.> 제공근법의 출력계수 계산⁵⁾

$$D^{x,y} = [D^{x,x} \cdot D^{y,y}]^{1/2}$$

D^{x,y} : 장방형 조사야 선량 (D_{max} dose)

D^{x,x} : 등가 정방형 조사야 선량 (D_{max} dose)

D^{y,y} : 등가 정방형 조사야 선량 (D_{max} dose)

*장방형조사야(rectangular field), 등가정방형 조사야(equivalent square field)³⁾

위의 공식에서 D^{x,y}는 계산하고자 하는 장방

형 조사야 선량이며, 또한 $D^{X,X}$ 및 $D^{Y,Y}$ 는 표준 표로 만들어진 등가정방향 조사야 데이터로 이것을 곱한 후 제공근을 적용하여 제공근법 공식에 의한 출력계수를 계산하였다.

둘째, 정밀한 선량측정을 위해 이용되는 “전리함을 사용한 계산방법”은 실험대상으로 선정된 부정형 조사야(그림 2)에 대하여 전자선 에너지별로 100 cGy을 조사하여 전리함으로 선량을 측정하고, 또한 기준조사야⁸⁾(10×10cm cone, open field)에 대해서도 100 cGy을 조사하여 전리함으로 선량을 측정하여 부정형 조사야 및 기준 조사야 선량의 비율(ratio)로 출력 계수를 계산 하였다(공식 2).

〈공식 2.〉 전리함 선량측정법의 출력계수 계산⁶⁾

$$\text{출력계수} = \frac{\text{부정형 조사야의 선량(dmax dose)}}{\text{기준 조사야의 선량(dmax dose)}}$$

셋째, 본 저자가 가장 관심을 가지는 “필름을 이용한 계산방법”은 실험대상으로 선정된 부정형 조사야(그림 2)에 대하여 그림 3과 같이 전자선 에너지별로 100 cGy를 필름에 조사하고, 또한 기준 조사야⁸⁾(10×10cm cone open field)에 대해서도 100 cGy를 필름에 조사하여 부정형 조사야 및 기준 조사야 필름의 농도를 광학계로 측정해서 광학농도의 비율(ratio)로 출력계

수를 계산 하였다(공식 3).

〈공식 3.〉 필름 선량측정법의 출력계수 계산⁶⁾

$$\text{출력계수} = \frac{\text{부정형 조사야의 광학농도(optical density)}}{\text{기준 조사야의 광학농도(optical density)}}$$

위와 같은 ‘3가지 측정방법’으로 계산한 출력계수의 오차를 비교하기 위해 가장 정확한 측정법인 전리함 선량측정법을 기준으로 제공근법 공식과 필름 선량측정법의 출력계수 오차를 구하였다(공식 4~5).

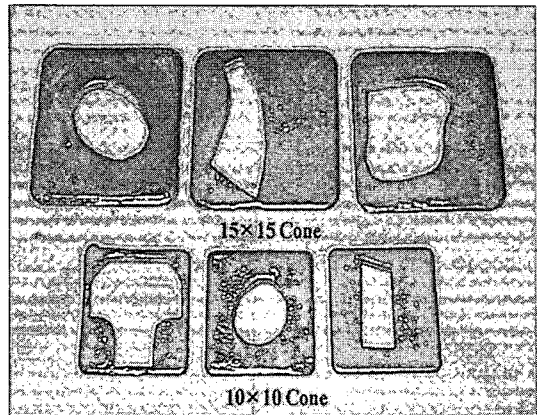


그림 2. 전자선 조사통(electron cone) 크기별 부정형 조사야 차폐블록

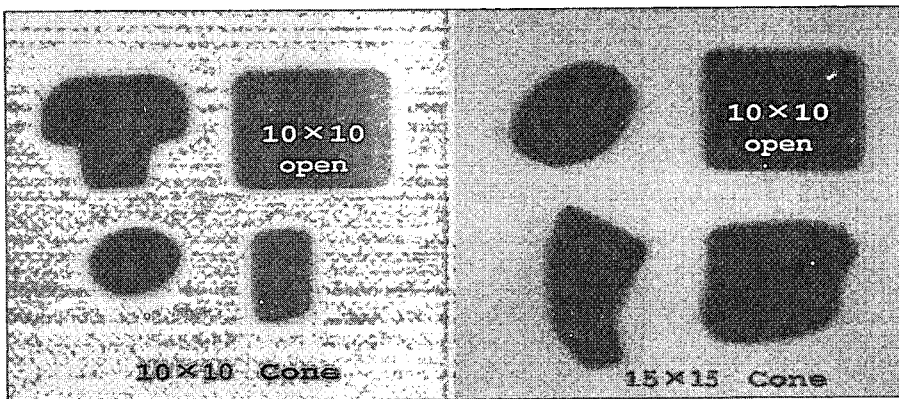


그림 3. 전자선 조사통(electron cone) 크기별 부정형 조사야 및 기준 조사야 촬영필름

<공식 4.> 제공근법의 출력계수 오차

$$\% \text{ Error} = \frac{\text{I.C. O}\cdot\text{F} - \text{SRM O}\cdot\text{F}}{\text{I.C. O}\cdot\text{F}} \times 100$$

SRM O·F : 제공근법의 출력계수

I.C O·F : 전리함 선량측정법의 출력계수

<공식 5.> 필름선량측정법의 출력계수 오차

$$\% \text{ Error} = \frac{\text{I.C. O}\cdot\text{F} - \text{Film O}\cdot\text{F}}{\text{I.C. O}\cdot\text{F}} \times 100$$

Film O·F : 필름선량측정법의 출력계수

I.C O·F : 전리함선량측정법의 출력계수

III. 결 과

표 1~2는 실험대상으로 선정된 부정형조사야(그림 2)에 대하여 3가지 측정방법(제공근법, 전리함 선량측정법, 필름 선량측정법)^{5~7)}으로 선량 변화와 출력계수의 오차를 비교한 결과이며, 또한 표 3은 측정방법에 따라 전자선 에너지별로 출력계수의 오차를 평균하여 비교한 것이다.

표 1에서 전리함 선량측정법을 기준으로 하여 관행적으로 공식을 이용하는 제공근법을 비교한 결과, 전자선 조사통(10×10, 15×15, 20×20, 25×25 cm²)별로 6 MeV는 각각 0.4, 3.4, 1.5, 0.4 %

의 오차를 나타냈고, 9 MeV 0.6, 3.7, 0.5, 3.5 %, 12 MeV 0.4, 2.2, 0.6, 3.6 %, 15 MeV 0.7, 1.3, 0.3, 3.1 %의 오차를 보였으며, 조사야 형태에 따라 3.0 % 이상의 오차가 있는 경우도 있었다.

표 2에서도 전리함 선량측정법을 기준으로 하여 필름 선량측정법을 비교한 결과, 전자선 조사통(10×10, 15×15, 20×20, 25×25 cm²)별로 6 MeV에서 각각 0.3, 0.4, 1.7, 1.4 %의 오차를 나타냈고, 9 MeV 0.4, 0.1, 0.3, 0.9 %, 12 MeV 1.2, 1.2, 0.4, 0.6 %, 15 MeV 0.5, 0.2, 0.3, 0.7 %의 오차를 보여 전체적으로 2.0 % 이내의 근소한 오차가 있는 것으로 나타났다.

또한, 표 3에서는 실험대상으로 선정된 부정형 조사야(그림 2)에 대하여 측정방법에 따라 전자선 에너지별로 출력계수의 오차를 평균하여 비교한 결과, 모든 전자선 에너지(6, 9, 12, 15 MeV)에서 가장 정확한 측정법인 전리함 선량측정법⁶⁾을 기준(1.0)으로 했을 때, 제공근법⁵⁾의 평균오차는 각각 1.4, 2.1, 1.7, 1.3 %의 비교적 많은 오차를 보인 반면, 필름 선량측정법⁷⁾에서는 각각 0.9, 0.4, 0.8, 0.4 %의 근소한 오차를 보여 제공근법에 비해 오차가 적을뿐 아니라 전리함 선량측정법의 정밀도에 근접한 출력계수를 얻을 수 있는 '필름선량측정법의 유용성'을 확인할 수 있었다.

표 1. 제공근법과 전리함 선량측정법의 출력계수 비교

Energy	6 MeV			9 MeV			12 MeV			15 MeV		
	SRM O·F	I.C O·F	% Error	SRM O·F	I.C O·F	% Error	SRM O·F	I.C O·F	% Error	SRM O·F	I.C O·F	% Error
Cone(1. F.)	0.995	0.999	0.40	0.990	0.996	0.60	0.994	0.990	0.40	0.998	0.991	0.70
10(9×8)	0.995	0.999	0.40	0.990	0.996	0.60	0.994	0.990	0.40	0.998	0.991	0.70
15(12×6)	0.981	1.016	3.40	0.955	0.992	3.70	0.969	0.989	2.20	0.980	0.993	1.30
20(17×11)	1.010	1.034	1.50	0.980	0.985	0.50	0.978	0.972	0.60	0.976	0.979	0.30
25(22×12)	1.011	1.015	0.40	0.972	0.972	3.50	1.001	0.966	3.60	1.004	0.974	3.10

*Cone : 전자선 조사통 크기

I.F : 부정형 조사야

SRM O·F : 제공근법의 출력계수

I.C.O·F : 전리함 선량측정법의 출력계수

$$\% \text{ Error} = \frac{\text{I.C. O}\cdot\text{F} - \text{Film O}\cdot\text{F}}{\text{I.C. O}\cdot\text{F}} \times 100$$

표 2. 필름 선량측정법과 전리함 선량측정법의 출력계수 비교

Energy	6 MeV			9 MeV			12 MeV			15 MeV		
	Film O·F	I. C O·F	% Error	Film O·F	I. C O·F	% Error	Film O·F	I. C O·F	% Error	Film O·F	I. C O·F	% Error
Cone(I. F.)												
10(9×8)	0.996	0.999	0.30	0.992	0.996	0.40	0.988	0.990	1.20	0.996	0.991	0.50
15(12×6)	1.012	1.016	0.40	0.991	0.992	0.10	0.987	0.989	1.20	0.991	0.993	0.20
20(17×11)	1.016	1.034	1.70	0.982	0.985	0.30	0.976	0.972	0.40	0.982	0.979	0.30
25(22×12)	1.001	1.015	1.40	0.981	0.972	0.90	0.972	0.966	0.60	0.967	0.974	0.70

*Film O·F : 필름 선량측정법의 출력계수

$$\% \text{ Error} = \frac{\text{I.C O·F} - \text{Film O·F}}{\text{I.C O·F}} \times 100$$

표 3. 측정방법에 따른 출력계수의 평균오차 비교

전자선 에너지 측정방법	6MeV	9MeV	12MeV	15MeV
제공근법	1.4	2.1	1.7	1.3
전리함 선량측정법	1.0	1.0	1.0	1.0
필름 선량측정법	0.9	0.4	0.8	0.4

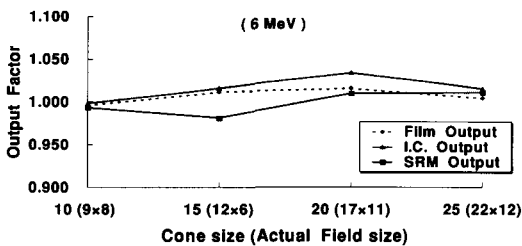


그림 4. 6 MeV 전자선의 출력계수 비교

- *Film output : 필름 선량측정법의 출력계수
- *I. C. output : 전리함 선량측정법의 출력계수
- *SRM output : 제공근법의 출력계수

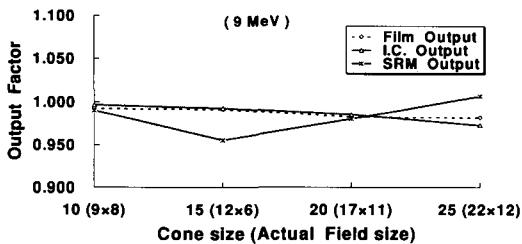


그림 5. 9 MeV 전자선의 출력계수 비교

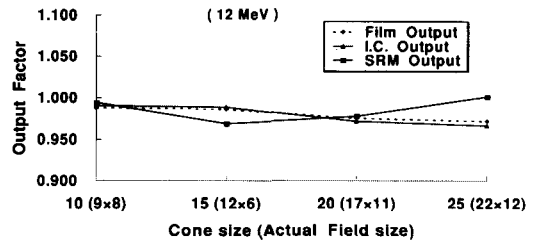


그림 6. 12 MeV 전자선의 출력계수 비교

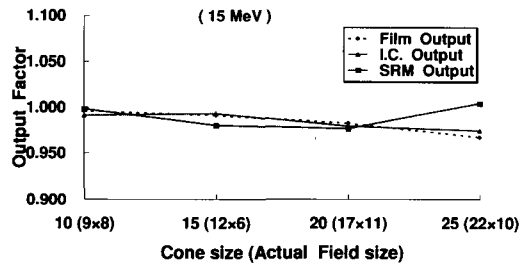


그림 7. 15 MeV 전자선의 출력계수 비교

그림 4~7의 그래프는 제공근법, 전리함 선량측정법, 필름선량측정법⁵⁻⁷⁾으로 구한 출력계수를 전자선 에너지별로 오차의 정도를 쉽게 비교하기 위한 그래프이다.

그래프를 살펴보면, 모든 전자선 에너지(6, 9, 12, 15 MeV)에서 제공근법의 출력계수는 비교적 높은 오차가 있는 것으로 나타났으며, 필름 선량측정법의 출력계수는 전리함 선량측정법의 정밀도에 근접한 낮은 오차를 보이고 있다.

IV. 고찰

1. 조사야 의존성(field size dependence)

표 1~2의 결과에서 보는 것처럼 조사야 크기가 증가하고 조사야 형태의 부정형(irregular)이 심할수록 출력계수가 증가되었는데, 그 원인으로 전자선 조사통 개 조사야는 산란선의 기여가 작지만, 부정형 조사야는 정상조직 보호를 위해 사용하는 차폐블록(shielding block)에서 발생되는 산란선이 심부선량³⁾(depth dose)에 기여하여 선량분포가 달라지는 것을 알 수 있었다.

따라서 전자선의 '조사야 의존성'을 고려하여 부정형 조사야 선량계산시 오차를 최소화 할 수 있는 선량계산 방법을 적용하는 것이 중요한 것으로 사료 되었다.

2. 측정방법에 따른 선량 변화

전리함 선량측정법의 출력계수를 기준으로 했을 때, 제품근법⁵⁾의 출력계수는 전반적으로 높은 오차(0.3~3.7%, 표 1)를 나타냈고 특히, 조사야의 부정형(irregular)이 심할수록 3% 이상의 많은 오차를 보여 부정형 조사야 선량계산에 제품근법 공식을 적용하는 것은 신중한 주의가 필요하다는 것을 알 수 있었다.

또한, 전리함 선량측정법⁶⁾은 가장 정확한 출력계수를 얻을 수 있었지만 측정을 위해 전기계(electrometer)를 설치해야 하므로 측정과정이 복잡했고 많은 시간과 노력을 필요로 하였다.

본 저자가 가장 관심을 갖는 필름 선량측정법⁷⁾의 출력계수는 전리함 선량측정법의 정밀도에 근접한 근소한 오차(0.1~1.7%, 표 2)를 보였으며 측정과정이 복잡한 전리함 선량측정법에 비해 짧은 시간에 간단한 방법으로 출력계수를 구할 수 있었다.

3. 필름 선량측정법의 유용성

필름의 농도를 선량계산에 이용하는 방법으

로 'Hunter & Driffield'에 의해 고안된 "sensito-metric curve"(또는, H-D 곡선 이라고도 함.)⁹⁾을 이용하는 방법도 있는데, 이 방법은 선량을 단계적으로 증가시켜 필름에 조사한 후, 각 필름의 광학농도를 선량으로 전환(conversion)하여 출력계수를 구하는 방법으로 측정과정이 단순하지 않다.

따라서 현재 본원에서 간단한 방법으로 쉽게 이용하는 "필름선량측정법"을 소개하면 다음과 같다.

『전자선치료에 이용되는 부정형조사야(그림 2) 및 기준 조사야(10×10cm cone open field)⁸⁾에 대하여 전자선 에너지별로 최대 선량점에 필름을 두고 각각 100 cGy를 조사한 후, 현상을 하여 부정형조사야 및 기준 조사야 필름의 농도를 광학계로 측정해서 광학농도 비율로 출력계수를 계산』한다(공식 3, 및 그림 3).

이와 같이 본원에서 이용하고 있는 필름선량측정법은 전리함 선량측정법에 비해 측정과정이 매우 단순하고 편리하여 임상에 쉽게 적용할 수 있으며, 또한, 모든 측정의 기준이 되는 전리함 선량측정법에서 『10×10cm cone open field는 에너지별 최대선량점에서 MU당 1 cGy가 되도록 기준 조사야로 이용』⁸⁾ 되고 있고, 본 저자가 소개하는 필름 선량측정법에서도 전자선 에너지별로 최대 선량점에서 측정 대상이 되는 부정형 조사야에 대하여 기준 조사야(10×10cm cone open field)를 이용하므로 측정방법 및 결과를 신뢰할 수 있었다.

V. 결 론

지금까지의 실험 결과를 분석하여 다음과 같이 필름 선량측정법의 유용성을 확인할 수 있었다.

첫째, 임상에서 관행적으로 이용되는 제품근법⁵⁾ 공식은 정도의 차이는 있지만 조사야 크기와 형태에 따라 3% 이상의 오차가 있으므로 부정형 조사야 선량계산에 이용시 신중한 주의가 있어야 할 것으로 사료된다.

둘째, 전자선의 부정형조사야 선량계산시, 가장 정확한 측정방법은 전리함을 이용한 선량 측정⁶⁾이지만 측정과정이 복잡하고, 많은 노력이 요구되어 이용성이 떨어졌다.

셋째, 필름선량측정법⁷⁾은 전리함 선량측정법과 같이 절대적인 측정방법은 아니지만, 출력계수의 정밀도는 '국제방사선단위위원회(ICRU)'에서 권장하는 『방사선 투여선량의 정확도는 $\pm 2\%$ 이하로 높여야 한다』¹⁰⁾는 범위 이내의 근소한 오차(0.1~1.7%, 표 2)이므로 그 동안 관행적으로 이용되던 제곱근법의 부정확성에 비해 정밀한 선량계산 결과를 얻을 수 있을뿐 아니라, 전리함 선량측정법의 복잡한 측정과정을 대신하여 임상에서 유용하게 이용 할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. Khan FM : Characteristics of clinical electron beams, The physics of radiation therapy, 1994 ; 2nd ed, : 361-366
2. Biggs PJ, Boyer AL, Doppke KP : Electron dosimetry of irregular fields on the Clinac-18, Int J Radiat Oncol Biol Phys, 1979 ; 5-433

3. 박찬일 : 방사선종양학 의학용어집, 대한치료방사선과학회 1997 ; 제 1권
4. Khan FM : Effect of field size & shape, The physics of radiation therapy , 1994 : 2nd ed, : 182-185
5. Hogstrom KR, Mills MD, Almond PR : Electron beam dose calculation, Phys Med Biol, 1981 ; 26-445
6. Khan FM : Output calibration, The physics of radiation therapy, 1994 ; 2nd ed, : 353-356
7. Dutreix J, Dutreix A. : Film dosimetry of high electrons, Ann NY Acad Sci, 1989 ; 33-161
8. Khan FM : Reference depth & Field size, The physics of radiation therapy, 1994 ; 2nd ed, : 353-354
9. Khan FM : Film dosimetry, The physics of radiation therapy, 1994 : 2nd ed, : 172-174
10. ICRU : Determination of absorbed dose in a patient irradiated by photon or electron beam in radiotherapy procedures, Report No.24. Washington, Dc : International Commission on Radiation Units & Measurements, 1976