

부정형 전자선 조사면의 심부선량과 출력비의 계산

고려대학교의료원 안암병원 방사선종양학과

이병구 · 이상록 · 권영호

- 1. 목적 :** 작고 불규칙한 모양의 전자선 조사면에서 선원의 출력에 영향을 미치는 요인은 선형가속기의 collimation system, insert block diameter, energy 등이다. 때문에 이러한 조사면의 선량계산으로 LBR을 이용할 수 있는데 LBR(lateral build-up ratio)이란 동일한 incident fluence와 profile에 대해 circular field와 broad field의 선량비로서 나타낼 수 있다. 얻어진 LBR data는 elementary pencil beam 모형을 근거해 깊이와 에너지에 따른 함수(f)로 표현할 수 있다. 여기에서 얻어진 수식을 기초로 해서 만들어진 factor값이 작고 부정형의 전자선 조사면의 선량계산 유용성을 알아보려고 한다.
- 2. 재료 및 방법:** 심부선량은 water phantom에서 ion chamber로 측정하였다. Cerobend와 electron applicator 에 따른 incident fluence의 변화를 알아보기 위해 Chamber를 0.5mm깊이에 놓고 측정하였다. 그리고 에너지와 electron applicator 크기에 따라 insert block diameter를 2-15cm로 변화시키며 심부선량을 측정하였고 이 값을 0.5mm 깊이에서 normalization 하였다. 이렇게 normalization 한 그래프로부터 LBR과 함수 f 를 얻어냈다.
- 3. 결과 :** 0.5mm 깊이에서 normalization한 심부선량-그래프로부터 LBR data와 그로부터 얻어낸 f 함수 값을 기초로 하여 elementary pencil beam 모형의 깊이에 따른 선량변화의 수식을 얻어낼 수 있었다.
- 4. 결론 :** 부정형 전자선 조사면에 대해 MU당 심부선량은 작은 circular field에서 측정된 LBR값, reference applicator 와 insert block diameter 에 따른 Incident fluence factor 그리고 reference broad field에서의 심부선량 등 세 가지 data로 부터 계산할 수 있다. 이 방법을 이용하면 어떤 모양의 전자선 조사면에 대해서도 심부선량의 계산에 유용하다고 할 수 있다.

1. 서론

선형가속기의 발전과 더불어 다양한 에너지를 가진 전자선의 임상적용은 점차 증가하고 있다. 무게가 가볍고 음전하를 띤 전자선은 물질내에서의 다중산란(multiple scattering)으로 인해 에너지에 따른 최대비정 깊이까지 선량을 주고 그 이후의 깊이에서는 급격히 선량이 감소하여 정상조직의 장해를 최대로 줄일 수 있는 장점이 있다.^[1] 그러나 다중산란으로 인해 조사면의 선량율에 영향을 미치는 요인은 상당히 많다. 그 요인으로는 조사면의 형태 및 크기, 전자선 에너지, 조준기(collimator)의 design과 개방정도, electron cone의 design, 조사면을 보정해 주는 차폐체의 밀도와 두께등을 꼽을 수 있다.^[2]

임상에서 흔히 접하는 부정형 조사면(irregular field)의 정의는 조사면이 정방형(square), 장방형(rectangular)이 아니거나 조사면의 중심부에 beam의 중심축이 일치되지 않는 것을 말한다^[2]. 조사면의 형태 및 크기에 따른 주요 효과는 측정점간의 거리에 따라 뚜렷해지며 조사면의 끝단(edge)이 측면 산란전자의 비정보다 짧게 되면 매질의 산란에 의한 깊이의 추가적인 산란증가는 없다. 조사면이 측면 산란 평형(lateral scatter equilibrium)에 필요한 크기 이하로 작게 되면 선량율은 급속하게 감소한다. 그러나 조사면의 크기가 증가함에 따라 심부선량율은 처음에 증가하지만 측면 산란 평형에 도달하는 일정 조사면의 크기가 넘으면 거의 일정한 값을 보인다. 또한 소조사면의 경우 최대 흡수지점(dmax)는 표면쪽으로 이동되는 양상을 보인다.^[2] 때문에 임상에서 소조사면은 깊이선량분포(depth dose distribution)를 출력 교정(output calibration)에 추가하여 개별적으로 측정하여 사용되고 있다.

본 논문에서는 부정형 조사면 중에서 원형의 소조사면을 이용하여 LBR (lateral buildup ratio)값을 구하고 그 함수(σ)를 이용하여 깊이에 따른 측면산란의 정도를 유추하고 위에 열거한 요인들이 실제 심부선량과 출력비의 계산에 끼치는 영향에 대해 평가해 본다.

2. 재료 및 방법

- Varian Clinac 1800 (electron beam - 12, 16MeV)
- Electron cone (6×6cm², 15×15cm²)
- Insert block
(diameter - 2.5Ø, 3Ø, 3.5Ø, 4Ø, 5Ø, 8Ø cm)
- Water phantom
- Multidata dosimetry system
- Ionization chamber (PTW Freiburg 0.3cc)

명목전자선 에너지 12MeV와 16MeV의 심부선량곡선을 open(non-insert block), 2.5Ø, 3Ø, 3.5Ø, 4Ø, 5Ø, 8Øm의 insert block을 만들어 각각 측정후 표면으로 normalization하였다. LBR값은 이 심부선량곡선을 이용하여 원형의 소조사면에 대한 같은 지점의 넓은 정방형 조사면(broad field)의 선량비로 나타낼 수 있다.^[1] 그 식은 다음과 같다.

$$LBR = \frac{D(R, Z, E)}{D(R\infty, Z, E)} \frac{\Phi_i(R\infty, E)}{\Phi_i(R, E)} \dots\dots\dots (1)$$

- D : 선량(dose)
- Φ_i : 입사유량 (incident fluence)
- R∞ : 측면산란평형이 이루어질 수 있는 넓은 정방형 조사면
- R : insert block의 반경
- Z : 깊이
- E : 명목전자선 에너지

LBR data에서 추출할 수 있는 함수(σ)는 다음과 같다.

$$\sigma(z) = \frac{R}{\sqrt{\ln[1-LBR(R, Z)]}} \dots\dots\dots (1)$$

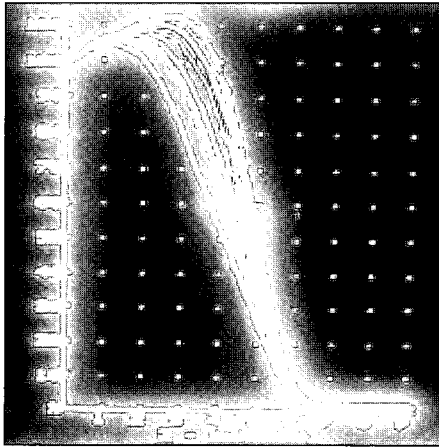
insert factor는 표면에서 insert block이 있을 때와 없을 때의 비로 구하였다. 서론에서 열거한 여러 요인 중 차폐물질과 두께에 의한 선원 출력영향은 동일한 물질과 두

계를 사용하므로 의미를 부여할 수 없고 taping 방법이나 그 내용, 즉 어떤 재질의 천으로 어떻게 하는냐 인데 그 결과 차이가 미미하므로 무시하기로 하였다.

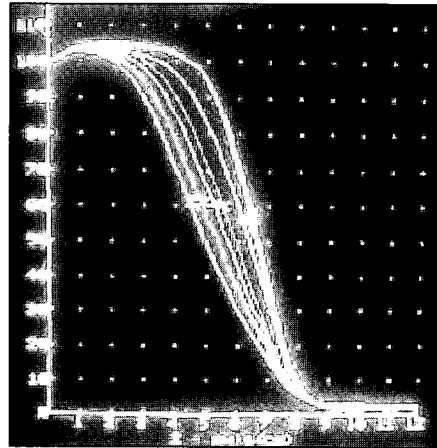
3. 결과

그림 1과 2는 12MeV와 16MeV 전자선의 open과 2.5 \emptyset , 3 \emptyset , 3.5 \emptyset , 4 \emptyset , 5 \emptyset , 8 \emptyset m의 insert block을 삽입했을 때

의 심부선량곡선을 표면으로 normalization한 결과이다. 이는 insert block의 크기 또는 electron cone size, 그리고 cone의 삽입에 따라 자동으로 조절되는 X-ray jaw setting에 의한 입사유량(incident fluence)의 변화를 동일한 입사유량일 때의 심부선량으로 표현한 것이다. 이때 insert block의 크기에 상관없이 표면에서 수mm(2-5mm) 깊이까지는 일치하는 값을 보이고 있다. 이는 LBR값의 변화가 없음을 의미한다.



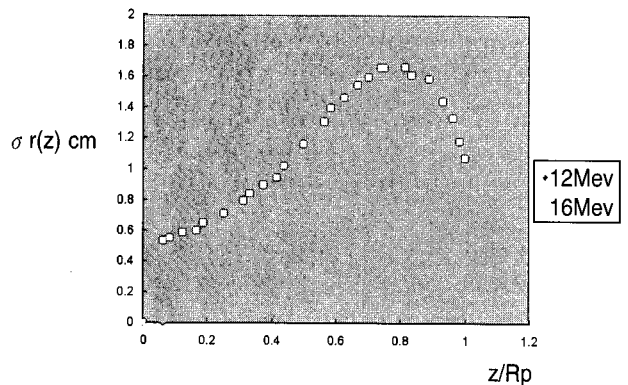
<그림 1>



<그림 2>

(1)식에 의해 동일한 입사유량일 때, insert block을 삽입했을 때의 심부선량과 broad field의 심부선량 비로 LBR 값을 얻을 수 있었다. 그리고 (2)식에 의해 σ 함수값을 구하여 그림 3에서와 같이 x축에 Z/RP값 즉, 측정깊이를 실용비정깊이로 나눈값으로 표현하였다. 그림 3은 2.5 \emptyset insert block data에서 추출한 σ 값이다.

이때 σ 값은 깊이가 깊어짐에 따라 점점 증가하는 양상을 보이다 Z/RP가 0.75에서 0.85 사이에서 최대값을 보인 후 감소하는 모습을 보인다. 이는 입사에너지에 따른 영향으로 보인다.^[11]



<그림 3>

Gaussian 분포를 하는 pencil beam model의 LBR data에서 추출한 σ 값은 field size에 독립된 값을 보인다.⁶⁹ 그러나 실제 측정결과 insert block의 크기에 따라 약간의 차이를 보이는데 이는 data 측정 시 산란선의 가감, 또는 field size에 따른 pencil beam의 initial angular spread의 변화로 추측된다.⁶⁹ 하지만 이러한 변화는 2.5 \emptyset insert block에서 추출한 σ 값이 치료비정(therapeutic range)에서 $\pm 3\%$ 정도의 차이를 보여 큰 영향을 미친다고 할 수는 없겠다. 또한, 참고문헌에 의하면 field diameter가 2cm 미만이거나 특히 3cm 이상 일 때는 저에너지의 경우 측면 산란평형이 일어나므로 σ 값의 일관성을 보장할 수 없다고 한다.^{66,67} σ 값이 실용비정의 2/3 정도 깊이에서 최대가 되는 것은 Abou Mandour등에⁶⁷ 의해 정리된 값과 비교하면 약 3%의 차이를 보여 매우 근사한 값이다. Abou Mandour와 Khan등에 의해 정리된 공식은⁶⁷⁽¹¹⁾ (3)과 같다.

$$\sigma \text{ (max)} = C \sqrt{E_p \cdot o} \text{ (3)}$$

E_p : 명목 에너지

C : 0.44cm MeV^{-0.5} (constant bt Abou Mandour)

σ 값이 Z/RP의 0.75 - 0.85 사이에서 최대값을 보이는데 이 값이는 pencil beam의 maximum spread에 도달하는 깊이라고 할 수 있다.⁶⁷⁽¹¹⁾

X-ray jaw (collimator system)는 그 곳에서 발생하는 산란선의 변동을 최소화 할 수 있게 electron cone size에 따라 자동적으로 setting되므로 조사면 크기에 따른 출력 변화는 합리적으로 작게 유지되게 설계되어 있다.

insert block의 크기변화에 기인한 입사유량의 변화값은 water phantom의 표면에서 insert block이 있을 때와 open 상태에서의 비로 측정하였으며⁶⁶⁽¹⁰⁾ 그 값은 Table 1.과 같다.⁶⁶⁽¹⁰⁾

Table 1. Insert factor (15×15cm² cone)

Energy (MeV)	Insert block diameter (cm)					
	2.5	3	3.5	4	5	8
12	0.97	0.97	0.98	0.99	1.00	1.00
16	0.98	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00

4. 결론

전자선 치료시 조사면의 선량율에 영향을 미치는 요인으로는 조사면의 형태 및 크기, 전자선 에너지, 조준기(collimator)의 design과 개방정도, electron cone의 design, 조사면을 보정해 주는 차폐체의 밀도와 두께등을 꼽을 수 있다. 이중 선형가속기측 인자로는 전자선 에너지, 조준기, electron cone 등이며 이는 insert factor값을 측정하여 제조회사가 출력선량의 변화가 합리적으로 적게 유지되도록 설계하였음을 알 수 있다.

환자측 인자로는 조사면의 형태 및 크기로 볼 수 있다. 조사면의 형태중 부정형조사면(irregular field)의 정의는 조사면이 정방형(square), 장방형(rectangular)이 아니거나 조사면의 중심부에 beam의 중심축이 일치되지 않는 것

을 말한다. 그 중 원형의 작은 조사면(측면산란평형이 일어나지 않는)에서 LBR값을 측정하고, σ 함수 값을 추출하여 치료 유효비정에서의 측면산란크기를 알 수 있었으며 그 값을 매개변수로 한 공식을 유도할 수 있었다.

12MeV와 16MeV 전자선의 open과 2.5 \emptyset , 3 \emptyset , 3.5 \emptyset , 4 \emptyset , 5 \emptyset , 8 \emptyset cm의 insert block을 삽입했을 때의 심부선량곡선을 표면으로 normalization한 결과 insert block의 크기에 상관없이 표면에서 수mm(2-5mm) 깊이 까지는 일치하는 값을 보였다.

(1)식에 의해 동일한 입사유량일 때, insert block을 삽입했을 때의 심부선량과 broad field의 심부선량 비로 LBR 값을 얻을 수 있었다. 그리고 (2)식에 의해 σ 함수값을 구한 결과 σ 값은 깊이가 깊어짐에 따라 점점 증가하는 양상을 보이다 Z/RP가 0.75에서 0.85 사이에서 최대값을 보

인 후 감소하는 모습을 보인다. 이는 입사에너지에 따른 영향으로 보인다. σ 값이 Z/RP의 0.75 - 0.85 사이에서 최대값을 보이는데 이 값이는 pencil beam의 maximum spread에 도달하는 깊이라고 할 수 있다.

Abou Mandour와 Khan등에 의해 정리된 공식 (3)에 의해 σ (max)값을 구한 결과 실험 값과 큰 차이가 없음을 확인 하였다.

insert block의 크기변화에 기인한 입사유량의 변화값은 water phantom의 표면에서 insert block이 있을 때와 open 상태의 비로 측정하였으며 그 값은 예상하였던 대로 조사면이 3.5-4.0 이상으로 커짐에 따라 동일한 측정치를 보였다.

결론적으로 전자선 치료에 있어서 치료유효비정의 심부 선량비로 출력선량을 보정하여 선량계산을 하는 것이 일반적인 방법인데 실제 치료유효비정에서의 조사면의 측면산란으로 인한 조사면의 변화요인도 출력선량보정의 한 요인으로 적용하는 것이 좀더 정확한 처방선량의 전달에 기여 할 수 있지 않을까 하는 조심스런 의견이다. 끝으로 이 data는 각 선형가속기의 X - ray jaw setting과 electron cone의 구조 등에 의해 입사유량의 변화가 예상 되므로 각 치료기기 마다 거기에 맞게 측정된 값을 이용 하여야 할 것이다.

reference

1. S. C. Klevenhagen Physics of Electron Beam Therapy.
2. Khan. F. M: The Physics of Radiation Therapy (second edition)
3. Brahme A, Lax I and Andreo P 1981 Electron beam dose planning using discrete Gaussian beams, mathematical background Acta Radiol. Oncol. 20 147-58
4. Ebert M A and Hoban P W 1995 A model for electron beam applicator scatter Med. Phys. 22 1419-29
5. Hogstrom K R, Mills M D and Almond P R 1981 Electron beam dose calculations Phys. Med. Biol. 26 445-59
6. Bruinvis I A D, Amstel A v, Elevelt A J and Van der Laarse R 1983 Dose calculation for arbitrarily shaped electron fields Acta Radiol. (Suppl. 364) 73-9
7. Abou Mandour M, Nusslin F and Harder D 1983 Characteristic functions of point monodirectional electrons Acta Radiol.-(Suppl. 364) 43-8
8. ICRU 1984 Radiation dosimetry: electron beams with energy between 1 and 50 MeV ICRU Report 35 (Bethesda, MD: ICRU)
9. jette D 1983 The application of multiple scattering theory to therapeutic electron dosimetry Med. Phys. 10 141-6
10. McParland B J 1989 A method of calculating the output factors of arbitrarily shaped electron fields Med. Phys. 16 88-93
11. Khan. F. M, Higgins, Gerbi B J, Deibel F C 1998 Calculation of depth dose and dose per monitor unit for irregularly shaped electron fields Phys. Med. Biol. 43 2741-2754

Calculation of depth dose for irregularly shaped electron fields

Byoung Koo Lee. Sang Rok Lee. Young Ho Kwon

Department of Radiation Oncology, Korea University Medical Center

The main cause factor for effective the output, especially in small & irregular shaped field of electron beam therapy, are collimation system, insert block diameter and energy. In the absorption deose of treatment fields, we should consider the lateral build-up ratio (LBR), which the ratio of dose at a point at depth for a given circular field to the dose at the same point for a 'broad-field', for the same incident fluence and profile. The LBR data for a small circular field are used to extract radial spread of the pencil beam, σ , as a function of depth and energy. It's based on elementary pencil beam. We consider availability of the factor, σ , in the small & irregular fields electron beam treatment.