

## 물질을 투과한 고에너지 전자선의 선량변화

연세대학교 의과대학 방사선과학교실

추 성 실 · 김 귀 언 · 박 창 윤

- Abstract -

### Studies on the Interaction of High Energy Electron with Various Matters

S.S. Chu, Ph. D., G.E. Kim M.D., C.Y. Park M.D.

*Dept. of Radiology and Nuclear Medicine, College of Medicine,  
Yonsei University*

Interaction between high energy electrons and matters had many complex reactions and the high energy electrons lost their energies with collision and scattering, therefore, electrons distribution in matters was shown as various situation by scattering, exciting and ionizing with moleculars.

We experimentally studies with 13 MeV Linear Accelerator and thermoluminescence dosimeter using aluminium and teflon, etc., and measured energy loss of electrons, electron range, electron scattering and dose distribution in matter.

We compared the results with theoretical formular, between 4-12MeV, the energy loss of electrons was decreased by 2MeV per 1g/cm<sup>2</sup> but under 1MeV it was rapidly decreased.

Electron range in matter reached to 0.5g/cm<sup>2</sup> per 1MeV of incident energy at 6-12MeV.

The dose distribution in matter was increased slightly to some depth by total distribution i.e., the combined intensity of primary and secondary radiant and it was rapidly decreased near the maximum range of electrons.

Energy loss of electrons and electron range measured by experiment were coincided with theoretical equations of L. Landau and Feather under 5 and 3% errors respectively.

The dose distribution of electrons in matter was similar to L.V. Spencer formular, however, we had found that it was quite different in accordance with the field size and that new formular of dose distribution was induced as empirical function contained experimental factors according to field size.

### I . 서 론

최근 선형 가속기에 의한 방사선 치료의 범위가 확대되고 있으며 가속기에서 발생되는 고에너지 전자선은 방  
본 논문은 1981년 교수연구비에 의해 이루어 졌음.

사선 치료에 일익을 담당하고 있으므로 이들이 조직에 주는 영향과 선량분포를 이론과 실험을 통하여 분석 평가하였다.

고에너지 전자선은 물질과 상호작용에서 주로 충돌에 의한 에너지 손실과 X-선의 발생으로 소멸되며 충돌에 의한 진로의 변화와 산란전자의 발생으로 전자선의 행로와 물질내 선량변화는 매우 복잡하다.

고에너지 전자선의 에너지 손실은 1913년 N. Bohr가 처음으로 고전 이론을 적용하여 유도하였으며 1930년에 H. A. Bethe가 상대론적 수정 공식을 유도하였다. 이들 이론은 모두 저지물질의 전자들이 정지상태에 있다는 가정이 필요하였다.

1944년 L. Landau는 전자속도에 따른 공식을 유도하였으며 1952년 A. O. Hanson은 고에너지에서 근사값을 갖는 최대 확률 에너지 손실공식을 유도하였다.

사용된 선형가속기는 3000 MHz의 진행형 마이크로파에 의하여 최대 에너지 13MeV로 가속시킬 수 있으며 발생된 전자선속은 사출구에서 1m 거리에  $10^{13}$  atom/cm<sup>2</sup> sec (100~300 rads/min)로 조종할 수 있는 Toshiba LMR-13형 가속기였다.

전자선의 실제 에너지 측정은 전자선 편각자에 의한 측정과 투과력에 의한 측정으로서 교정하였고 전자선 분포 측정은 소형 TLD를 phantom에 삽입하거나 film dosimetry로 가능하였다.

이상과 같이 고에너지 전자선의 이론적 특성과 실제 실험을 통한 실험치 사이의 상관관계를 검토하였으며 이들의 특성을 방사선 치료에 최대한 응용하므로써 전자선 치료의 향상을 기할 수 있었다.

## II. 이 론

### 1. 고에너지 전자선의 에너지 손실

일정한 에너지를 가진 입자가 어떤 물질을 통과할 때 그 입자가 가지고 있던 에너지가 감소된다.

전자의 에너지가 증가할 때 충돌에 의한 에너지 손실이 비교적 무시되므로 방사선에 의한 에너지 손실은 매우 중요한 역할을 한다.

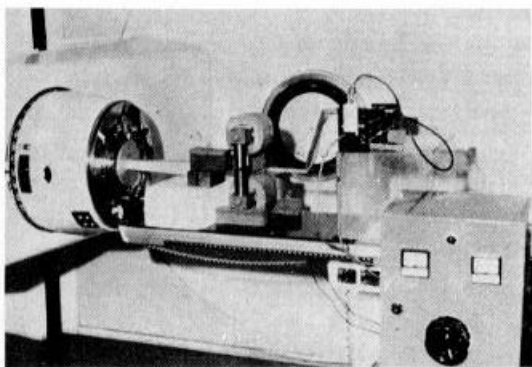


그림 1. 선형가속기와 전자선의 측정장치

그러나 전자선은 물질에 충돌함으로써 많은 산란선과 그 자체의 요동 (straggling)에 의해서 전자의 평균 에너지 손실보다 더 많은 에너지 손실이 야기된다.

L. Landau는 산란과 요동등에 의한 전체 에너지 손실을 다음과 같이 유도하였다.

$$\frac{dE}{dx} = \frac{2\pi N e^4}{m v^2} Z \left\{ \log \frac{m v^2 w_1}{I^2 (1-\beta^2)} - \beta^2 - k \right\} \text{ (MeV)} \quad \text{----- (1)}$$

여기서 사용된 양은 다음과 같다.

$$w_1 = 2\pi e^4 N Z x / m v^2$$

$$\beta = v / c$$

m = 전자의 정지질량 (g)

v = 전자의 속도 (cm/sec)

e = 전자의 전하량 (esu)

Z = 물질의 원자번호

N = 아보가드로 수

I = 저지물질의 평균 여기포텐셜 (eV)

한편 A. O. Hanson과 Goldwasser의 근사식은

$$\Delta E_p = W_1 \left\{ \log \left( \frac{x}{a} \right) - 1 - k \right\} \quad \text{----- (2)}$$

이고, L. Landau는  $k=0.37$ 로 결정했고, Bohr의 반경  $a = \hbar^2 / m c^2 = 5.29 \times 10^{-9}$  cm, x는 두께 (cm)이다.

이를 대입하여 간단히 하면 다음과 같다.

$$\Delta E_p = 0.153 \rho \frac{Z}{A} \left\{ \log x + 19.45 \right\} x \text{ (MeV)} \quad \text{----- (3)}$$

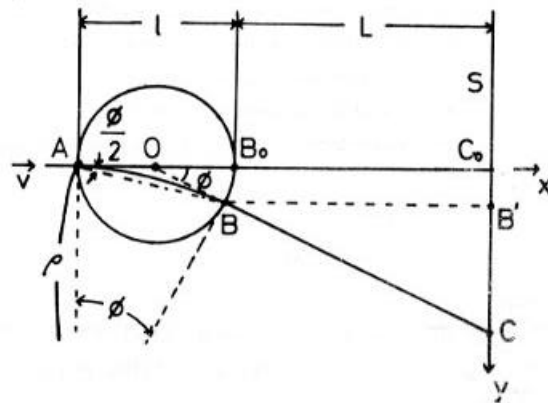


그림 2. 자장에서의 전자선 운동

여기서  $x$ 는 두께 (cm)이고,  $\rho$ 는 밀도 ( $g/cm^3$ )이며  $A$ 는 원자번호,  $Z$ 는 질량수이다.

한편 H. Heitler의 이론에 의하면 cm당 방사선에 의한 평균 에너지 손실은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{rad}} &= Nr_0^2 \frac{Z^2}{137} (E+mc^2) \\ &\quad \left\{ 4 \log \frac{2(E+mc^2)}{mc^2} - \frac{4}{3} \right\} \\ &= 3.44 \times 10^{-4} (E+mc^2) \frac{Z^2}{A} \rho \\ &\quad \left\{ 4 \log \frac{2(E+mc^2)}{mc^2} - \frac{4}{3} \right\} \\ &\quad (\text{MeV/cm}) \quad \text{----- (4)} \end{aligned}$$

또한 충돌에 의한 전자의 에너지 손실과 방사선에 의한 에너지 손실비는 다음과 같다.

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{rad}} / \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{coll}} = \frac{(E+mc^2)Z}{1600 mc^2} \text{----- (5)}$$

여기서 전자선 에너지가 50 MeV 이하이면 에너지 손실의 대부분은 충돌에 의해서 이루어진다.

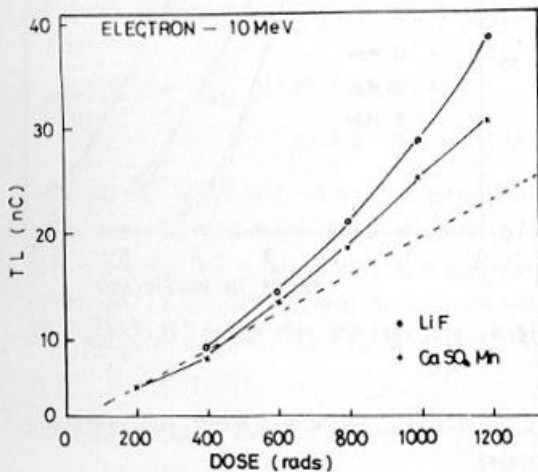


그림 3. 선량에 따른 TLD의 열형광 반응

## 2. 고에너지 전자선의 산란

전자는 질량이 큰 원자핵 주위의 전자장과 핵력에 의해서 산란되며 이때 입사전자는 원자를 여기 또는 전리시키면서 에너지의 손실을 가지게 된다.

단일 산란 (single scattering)에서의 E. Rutherford의 산란공식은 다음과 같다.

$$W(\theta) d\Omega = \frac{Z^2 r_0^2}{4 \sin^4(\theta/2)} \cdot \frac{1}{\epsilon^2 (1-\epsilon^2)^2} d\Omega \text{----- (6)}$$

$$r_0 = \frac{e^2}{mc^2} = 2.8 \times 10^{-13} \text{ cm (고전전자 반경)}$$

$$\epsilon = \frac{E+mc^2}{mc^2}$$

여기서  $W(\theta)$ 는 입체각  $d\Omega = 2\pi \sin\theta d\theta$ 에 산란하는 단면적 즉, 확률을 표시한다.

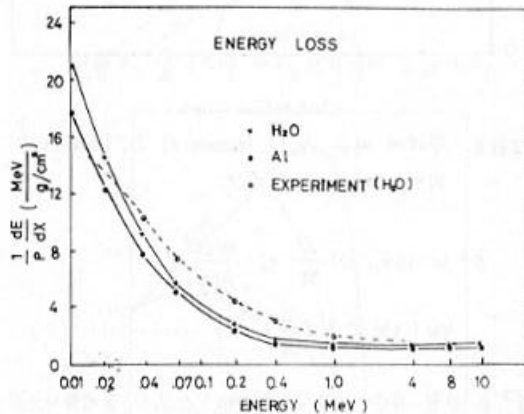


그림 4. 물과 알루미늄에 대한 전자선의 평균 에너지 손실

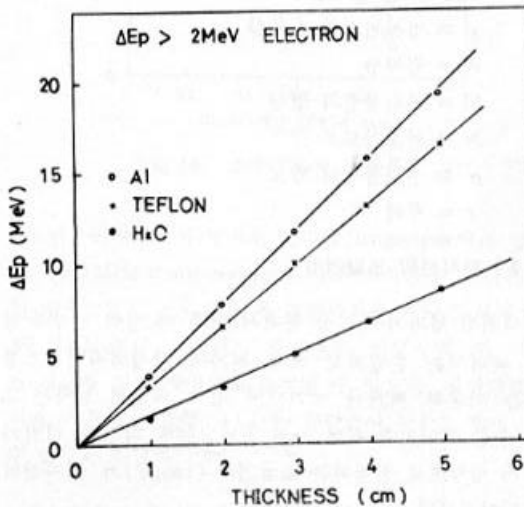


그림 5. 여러 물질의 주어진 두께에서의 에너지 손실

그러나 실제로 단일 산란의 측정은 곤란하여 다중 산란 (multiple scattering)을 생각하여야 하며 다중 산란에 대한 B. Rossi의 이론식은 다음과 같다.

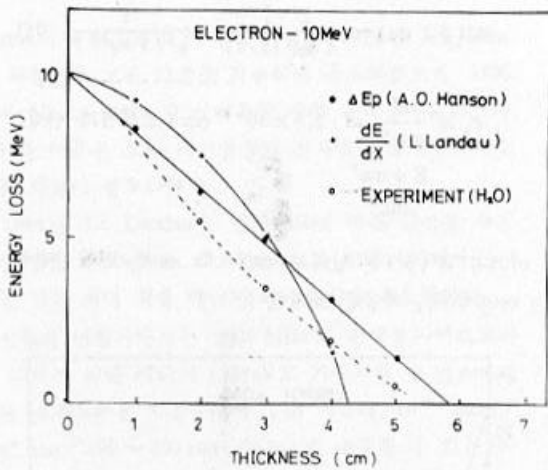


그림 6. 두께에 따른 A. O. Hanson 과 L. Landau 에 의한 에너지 손실 비교

$$\bar{\theta}^2 = 16\pi\rho\ell N \frac{Z^2}{M} r_0^2 \left(\frac{m_0c^2}{\beta pc}\right)^2$$

$$\log \left\{ 196 Z^{-1} \left(\frac{Z}{A}\right)^{1/6} \right\} \dots \dots \dots (7)$$

$\bar{\theta}^2$  은 평균 자승 산란각 (radian) 으로서 통계학적으로 평균 자승오차 ( $\sigma^2$ ) 에 해당한다.

- $m_0$  = 전자의 정지질량
- $r_0$  = 고전 전자반경
- $p$  = 입사전자의 운동량
- $A$  = 원자량
- $M$  = 산란물질의 질량
- $N$  = 아보가드로 수
- $\rho$  = 산란물질의 밀도
- $\ell$  = 두께

### 3. 전자선의 도달거리

대전된 입자가 매질을 통해서 더욱 더 멀리 갈수록 점점 에너지는 손실되고 표적 원자에 밀접해지면 그 경로는 이온화 되거나 여기되며 결국 대전된 입자는 그의 운동 에너지를 잃어 거의 정지되는데 대전된 입자가 입자 방향으로 진행되는 평균거리 (range) 가 전자선의 도달거리이다.

전자와 같은 가벼운 입자의 도달거리는 산란으로 인하여 경로가 지그재그 (zigzag) 이기 때문에 평균 경로길이 보다 짧아진다.

도달거리는 여러가지 요인에 따라 달라지는데 그중 대표적인 것은 에너지와의 관계이다.

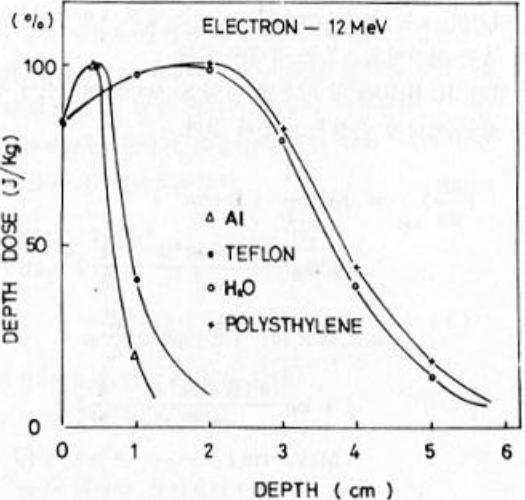


그림 7. 12 MeV에서 여러물질의 도달거리

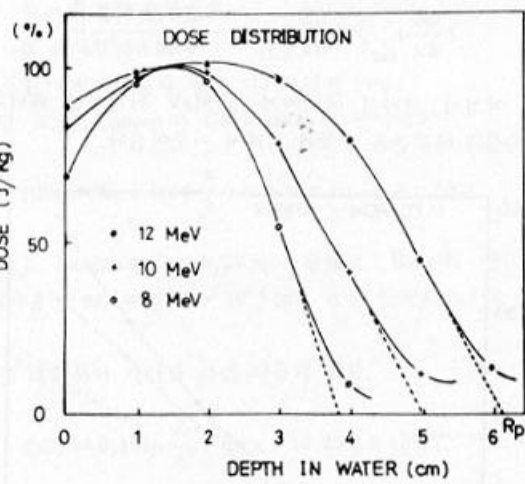


그림 8. 여러 에너지에 따른 물속에서의 전자선 도달거리

도달거리는 초기 에너지가 증가함에 따라 선형적으로 증가한다.

Marshall & Ward의 에너지와 도달거리와의 관계식은 다음과 같다.

$$R = 0.526 E - 0.094 \dots \dots \dots (8)$$

또한 Feather의 관계식은

$$R = 0.543 E - 0.160 \dots \dots \dots (9)$$

이다.  $R$ :  $cm^2/g$ ,  $E$ :  $MeV$   
여기서  $R$ 은 외삽 도달거리 (extrapolated range) 들의

미한다.

외삽 도달거리는 입사입자의 선속 (beam)에 의하여 생성된 최대 이온의 수가 그 폭이 넓게 분포되어 도달거리가 명확하게 결정되지 못하는데 이런 현상을 요동 (straggling)이라 부르며 이 요동현상은 도달거리의 정확한 측정을 어렵게 한다.

따라서 Bragg 곡선의 끝부분의 만곡점에 접선을 긋고 이 접선이 저리축과 만나는 점을 취하므로써 얻어지는 값을 말한다.

#### 4. 물체내에서의 전자선 선량분포

고에너지 전자선이 물체에 투입되면 충돌, 산란, 투과 및 흡수등으로 물체내의 선량분포는 매우 복잡하여 이들에 대한 수학적 기술은 H. W. Lewis 또는 Monte Carlo 등에 의한 연속 분할 근사식(moment method)에 의해 근사식으로 표시된다.

L. V. Spencer 등은 물체내에 분포되어 있는 전자의 강도(I) electron/cm<sup>2</sup>·sec<sup>2</sup>를 충돌과 산란에 의한 일차 선량분포 Ip(x)와 방사선의 산란선에 의한 이차 선량분포 Is(x)로 구분하였으며 증합 선량분포는 Ip(x)와 Is(x)를 합한 것으로서 수식은 다음과 같다.

$$I_p(x) = \left( \sum_{j=0}^{\infty} A_j x^j \right) \exp \left\{ -a^2 x (1-x)^{-1} \right\} \dots \dots (10)$$

여기서 x는 물체의 두께. A와 a<sup>2</sup>은 입사전자의 에너지에 따라 정해진 상수로서 전자선 에너지가 10 MeV 일때 전류분포인 경우는 a<sup>2</sup>=0.410, A<sub>0</sub>=1, A<sub>1</sub>=0.410, A<sub>2</sub>=0.494, A<sub>3</sub>=0.590, A<sub>4</sub>=0.135이며 전자선속분포인 경우는 a<sup>2</sup>=0.462, A<sub>0</sub>=1, A<sub>1</sub>=0.462, A<sub>2</sub>=0.569, A<sub>3</sub>=0.63이다.

$$\text{또 } I_s(x) = A_x^\alpha \exp \left\{ -a^2 x (1-x)^{-1} \right\} \dots \dots (11)$$

10 MeV 전자선에서 상수는 다음과 같다.

전류분포인 경우는 A=0.110, α=13/30, a<sup>2</sup>=0.64이며 전자 선속분포인 경우는 A=0.38, α=16/30, a<sup>2</sup>=0.54이다.

### III. 실험장치 및 방법

#### 1. 고에너지 전자선의 발생장치

그림 1에서와 같이 전자선의 분포측정을 위한 고에너지 전자선의 발생장치는 13 MeV 선형가속기를 사용하

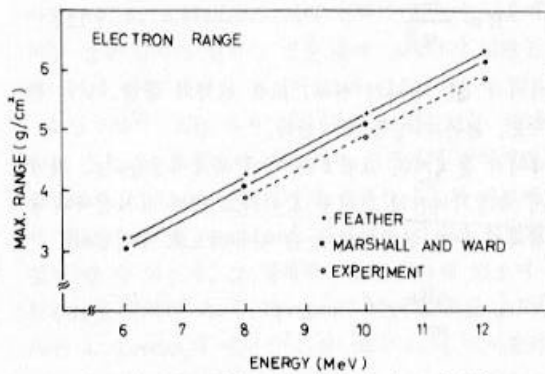


그림 9. 에너지에 따른 전자선의 도달거리

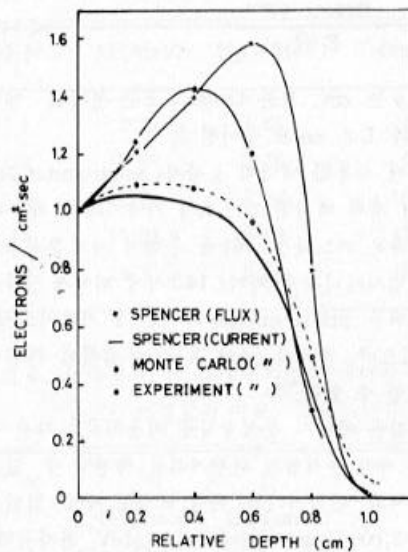


그림 10. 고에너지의 전류분포

였으며, 전자총에서 발사한 전자들 magnetron에서 발생된 3000 MHz의 microwave에 의해 가속관을 지나는데 동안 집속코일로 집속시킨 후 편향자석을 지나게 하여 8, 10, 12 MeV의 고에너지 전자선을 발생시켰으며 이것이 시료를 지나 측정기로 측정될 수 있도록 제작하였고 이때 시료에는 소형 TLD를 삽입하여 분포를 쉽게 알 수 있도록 하였다.

#### 2. 전자선 에너지 측정장치

전자선의 실제 에너지 측정은 자장에 의한 편향을 이용하는 방법이다.

즉 전하를 띤 입자가 자장내에서 움직일 때 로오렌츠의 힘에 의해서 서로 직각방향의 힘을 받게 되며 그 곡률반경 (R)은 다음 식으로 주어진다.

$$R = \frac{mv}{qB} \quad \text{----- (12)}$$

여기서  $q$ 는 전자의 전하,  $m$ 은 전자의 질량,  $v$ 는 전자속도,  $B$ 는 자장을 표시한다.

에너지 분석기는 그림 2와 같이 자극직경을  $\ell$ , 자극에서 측정기까지의 거리를  $L$ 이라고 하면 전자선속의 중심점에서 수직 편기거리  $y$ 는 다음식으로 주어진다.

$$y = \frac{qB\ell}{mv} \left( \frac{\ell}{2} + L \right) \quad \text{----- (13)}$$

실용단위로 환산하면

$$y = \frac{B\ell L \times 10^{-4}}{E^{1/2}} \quad \text{----- (14)}$$

여기서  $y$ 는 cm,  $B$ 는 Gauss,  $E$ 는 전자선 에너지 MeV,  $\ell$ 과  $L$ 은 cm로 주어진다.

본 실험에 사용한 에너지 분광계(spectrometer)는 본 실험실에서 세척 제작한 것으로서 가속기에서 가속된 전자선의 선속은 가느다란 slit를 통하여 자기분석장치에 들어가며 입사에너지에 따라(14)식에 의해서 전자선이 편기되고 이를 profil monitor와 X-Y 기록기로서 기록할 수 있으며 경우에 따라 X-ray 필름에 의해서도 측정 비교할 수 있다.

이상과 같은 에너지 분석장치를 이용하여 전자선 에너지에 따른 자기 분석함의 편향거리를 측정할 수 있으며 표준 에너지의 편향거리를 측정 교정할 수도 있었으며 그 결과 2,000 Gauss 자장내에서 8 MeV 전자선의 편

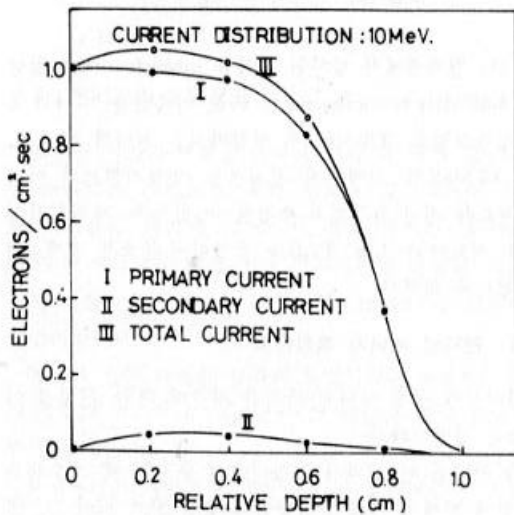


그림 11. 고에너지의 전자선속 분포

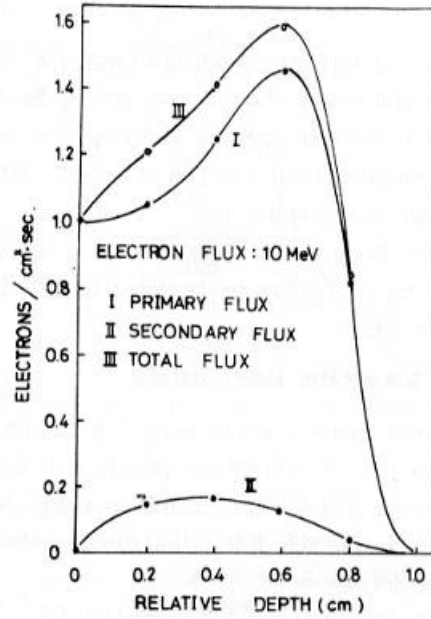


그림 12. 고에너지 전자선의 선량분포 비교

향거리는 21.1 cm이고 12 MeV는 18.2 cm로서 에너지가 적을수록 굽어지는 편향거리는 더 길어졌다.

에너지 분석장치에 의한 8, 10, 12 MeV 전자선의 스펙트럼은 에너지가 낮을수록 편기각과 에너지 분포폭도가 크다.

### 3. 전자선량 측정기구

실험에 사용한 조사물질은 물, 알루미늄, 폴리에틸렌, 폴리스틸렌, 테프론으로 표 1과 같다.

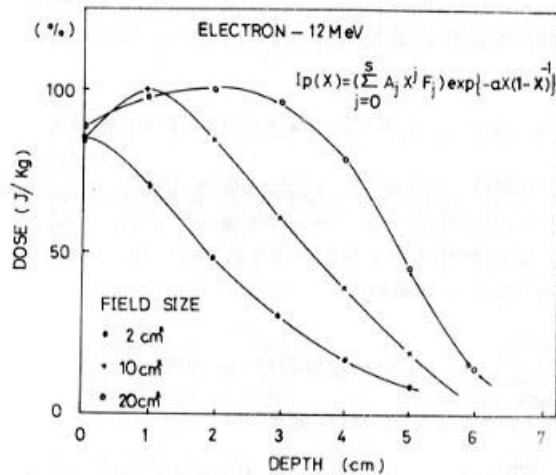


그림 13. 12 MeV에서 조사면에 따른 선량분포

표 1. 조사물질의 특성 비교

물 질	분자식	밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	Z	A	I (eV)
물	H <sub>2</sub> O	1	10	18	68
알루미늄	Al	2.7	13	27	150
폴리에틸렌	[CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> ] <sub>n</sub>	0.92~ 0.95	2.67	4.67	51.4
폴리스틸렌	[CH <sub>2</sub> -CH] <sub>n</sub>	1.04	3.00	5.4	60.4
테프론	[CF <sub>2</sub> -CF <sub>2</sub> ] <sub>n</sub>	2.24	8.00	16.67	120.4

여기서 고분자 물질인 폴리에틸렌, 폴리스틸렌, 테프론의 원자번호 (Z)와 질량수 (A)는 평균값이며 I는 평균 여기 포텐셜이다.

조사물질의 두께는 0.1 ~ 1 mm, 크기는 10×10cm의 정방형으로 절단하였으며 각각 사이에 4×4×1 mm 크기의 TLD등 작은 측정기를 삽입하여 물질내 어떤 지점에도 선량측정이 가능하도록 제작하였다.

TLD를 삽입하였을 경우 TL-response와 선량과의 관계는 그림 3과 같이 선량이 증가함에 따라 선형적이지 아니라는 사실을 알 수 있다.

#### IV. 실험결과 및 분석

##### 1. 전자선의 에너지 손실

평균 에너지 손실의 이론값은 10 MeV일때  $\beta = V/c = 0.999$ 로  $\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx}$  즉, 단위 길이당 손실되는 에너지량은 표 2와 같고, 그림 4에서 처럼 실험값과 비교해 보

표 2. 에너지 변화에 따른 단위 길이당 에너지 손실

에너지 (MeV)	$\beta = \frac{v}{c}$	이론 값		
		H <sub>2</sub> O (MeV)	Al (MeV)	H <sub>2</sub> O (MeV)
10	0.999	1.62	1.36	
8	0.998	0.58	1.48	1.79
4	0.995	1.52	1.46	1.8
1	0.96	1.48	1.40	2.0
0.4	0.85	1.80	1.74	3.0
0.2	0.70	2.66	2.40	4.5
0.1	0.55	4.32	3.80	6.0
0.07	0.50	5.24	4.58	7.5
0.04	0.40	8.20	7.22	10.4
0.02	0.30	14.74	12.6	15.6
0.01	0.25	21.28	18.10	

아도 10, 8, 4 MeV까지 거의 변화가 없으나 낮은에너지일 경우 갑자기 변하는 것을 볼때 고에너지 일때는 저에너지에 비해 에너지 손실이 크지 않음을 알 수 있다.

그림 5에서 보는 바와 같이 두께에 관련있는 에너지 손실  $\Delta Ep$ 는 표 3에서 처럼 거의 일정하게 변하지만 그림 6에서 L. Landau의 에너지 손실식  $\frac{dE}{dx}$ 와 비교해 볼때 3 g/cm<sup>2</sup>와 4 g/cm<sup>2</sup> 사이에서 갑자기 떨어지는 것을 알 수 있는데, 그 정확한 값은 표 4에 있으며 실험결과에 의하면 A. O. Hanson의 에너지 손실  $\Delta Ep$ 보다는 L. Landau의 에너지 손실  $dE/dx$ 에 더적합하다.

표 3. 여러 물질의 주어진 두께에서의 에너지 손실

두께 (cm)	Al (MeV)	H <sub>2</sub> O (MeV)	Teflon (MeV)
1	3.87	1.65	3.21
2	7.85	3.36	6.72
3	11.9	5.09	10.12
4	15.97	6.82	13.46
5	19.4	8.56	16.77

표 4. 물속에서 10 MeV 전자선의 에너지 손실을 이론값과 실험값의 비교

두께 (cm)	이론 값		실험 값 (MeV)
	A. O. Hanson $\Delta Ep$ (MeV)	L. Landau $\frac{dE}{dx}$ (MeV)	
1	1.65	0.81	2.1
2	3.36	2.49	4.5
3	5.09	5.05	6.5
4	6.82	8.56	8.2
5	8.56	12.93	9.5

##### 2. 전자선의 도달거리

12 MeV 전자선인 경우 길이에 따른 도달거리를 그림 7에서 보여주고 있는데, 알루미늄이나 테프론은 0.5 cm에서 최대의 분포를 나타내며 알루미늄은 1 cm에서 20%, 테프론은 2 cm에서 40%를 나타낸다.

또 물이나 폴리스틸렌은 6 cm의 두께일때 1/3인 2 cm에서 최고를 나타내며, 5 cm일때 거의 소실됨을 알

았다.

그러나 8, 10, 12 MeV인 고에너지에 따른 주어진 깊이에서의 물에 도달거리는 그림 8에서도 볼 수 있듯이 1.5 cm일때 최고이고 에너지가 클수록 분포도는 퍼져 있으며 서서히 손실되므로 도달거리가 긴 것을 알 수 있다.

에너지가 증가함에 따른 최대 도달거리를 Feather의 식과 Marshall & Ward의 식에서 비교해 볼 때 에너지가 클수록 도달거리는 선형적으로 증가함을 실험을 통해서 알게 되었다.

이 관계는 표 5와 그림 9에서 보여준다.

표 5. 에너지에 따른 최대 도달거리 (물)

에너지 (MeV)	Feather(cm)	Marshall & Ward(cm)	실험값 (cm)
6	2.78	3.065	.
8	3.86	4.117	3.67
10	4.94	5.169	4.7
12	6.02	6.221	5.8

### 3. 전자선의 선량분포

어떤 물질에 고에너지 전자선이 투과할 때 간단히 말해 다음과 같은 현상이 발생한다.

중합 x-선량분포 = 충돌 + 산란 + 방사선

충돌과 산란에 의한 일차 선량분포를  $I_p$ 라 하고 방사선의 산란선에 의한 이차 선량분포를  $I_s$ 라 하면 중합 선량분포는  $I_p + I_s$ 이다.

10 MeV일 때 L. V. Spencer의 전류분포와 전자선속 분포를 이론적으로 계산해 보면 표 6, 표 7과 같으며 그림 10과 그림 11에서 보는 바와 같이 어떤 두께까지는 일정한 값, 또는 일정하게 증가하는 값을 유지하다가 갑자기 떨어짐을 알 수 있다.

그러나 실험결과 L. V. Spencer의 전류 분포, 전자선속 분포 또는 컴퓨터를 이용한 Monte Carlo 분포를 실험치와 비교해 볼 때 모두 일정한 값을 갖지만 상대적인 두께 (relative depth)의 끝에서는 갑자기 떨어지며 그림 12와 같이 실험치에서도 일치함을 알았다.

전자선의 선량분포는 앞에서 표시한 것처럼 일차 선량분포와 이차 선량분포를 합한 중합 선량분포로도 알 수 있지만 조사면 (field size)이라는 인자를 공식에 삽

표 6. L. V. Spencer의 전류분포

두께 (cm)	일차 선 (Electrans/cm <sup>3</sup> · sec)	이차 선 (Electrans/cm <sup>3</sup> · sec)	중합선량 (Electrans/cm <sup>3</sup> · sec)
0	1	0	1
0.1	0.999	0.038	1.037
0.2	0.998	0.047	1.045
0.3	0.993	0.050	1.043
0.4	0.977	0.048	1.025
0.5	0.936	0.043	1.979
0.6	0.848	0.034	0.882
0.7	0.677	0.021	0.698
0.8	0.388	0.008	0.396
0.9	0.057	0.0003	0.0574
1.0	0	0	0

표 7. L. V. Spencer의 전자선속 분포

두께 (cm)	일차 선 (Electrans/cm <sup>3</sup> · sec)	이차 선 (Electrans/cm <sup>3</sup> · sec)	중합선량 (Electrans/cm <sup>3</sup> · sec)
0	1	0	1
0.1	1.005	0.106	1.116
0.2	1.041	0.143	1.174
0.3	1.123	0.161	1.284
0.4	1.123	0.165	1.415
0.5	1.387	0.155	1.542
0.6	1.457	0.131	1.588
0.7	1.319	0.091	1.410
0.8	0.808	0.040	0.848
0.9	0.105	0.003	0.108
1.0	0	0	0

입하므로써 그 분포를 더 정확히 알 수 있으며 조사면의 크기가 클수록 분포가 변화함을 그림 13에서 볼 수 있다.

## V. 결 론

물질 구성분자에 충돌된 고에너지 전자들은 전량이 최고 속도가 빠르기 때문에 많은 산란과 요동의 반복으



로 진보와 분포가 명확하지 않은 복잡한 상호작용을 하며 이를 위한 이론식은 L. Landau를 위시한 많은 학자들이 서로 상이한 방법으로 제시하여 왔다.

이와 같이 복잡한 물질과의 상호작용을 실험을 통하여 확인하기 위하여 13 MeV 선형가속기, 에너지분석장치, 정밀 열형광 측정기등 최신 정밀장치와 고순도 금속류, 고분자 화합물 및 조직등기물질을 사용하여 전자선의 에너지 손실, 도달거리, 물질내의 전자선 강도분포 및 산란선등을 측정하고 아래와 같이 이론과 비교 검토하였다.

1) 전자선 에너지 손실은 4~12 MeV에서  $1 \text{ g/cm}^2$ 당 2MeV씩 감소되었으며 1 MeV이하에서는 급격히 감소되었고 이 결과는 A. O. Hanson보다 L. Landau의 에너지 손실에 관한 이론식이 더욱 근사하며 평균  $\pm 5\%$  오차내에서 일치하였다.

2) 물질내에서 전자선 최대 도달거리는 입사 에너지 8~12 MeV에서 1MeV당  $0.5 \text{ g/cm}^2$ 의 깊이까지 도달하였으며 이것은 3MeV이상에서 Feather의 실험식과 Marshall & Ward의 식에 근사하였고 평균  $\pm 3\%$  오차내에서 일치하였다.

3) 물질내의 전자선 강도분포는 일차선과 산란선에 의한 중합선량으로서 일정 깊이까지 약간의 증가현상이 나타났고 전자선 최대 도달거리 부근에서 급격히 감소하였으며 이와 같은 분포는 L. V. Spencer의 전류밀도 분포식에 더 근사하며  $\pm 5\%$ 의 오차내에서 일치하였으나 조사면에 따라 상당한 분포차가 있기 때문에 조사면에 새로운 강도분포의 반실험식을 유도하였다.

4) 6~12 MeV 고에너지 전자선의 에너지손실, 도달거리, 강도분포는 물질의 구성성분에 거의 무관하고 다만 밀도에 비례하였다.

## REFERENCES

1. Fermi, E. : *Nuclear physics. The university of Chicago press, 1956.*
2. Bethe, H.A. : *Experimental Nuclear Physics. Jon Wiley and Son Inc., 1953.*
3. Heither, W. : *The Quantum Theory of Radiation. Oxford university press, New York, 1954.*
4. Kaplan, I. : *Nuclear physics. Addison Wesley, Massachusetts, 1954.*
5. Beattie, J.W., et al. : *Production and properties of high energy electron for therapy. Amer. J. Roeng. 88:235-237, 1962.*
6. Bradshaw, A.L., snf Maysent, A.M. : *Physical aspects of electron therapy using the 15 MeV Linear accelerator. Brit. J. Radiol. 37:219-231, 1964.*
7. Boag, J.W., Atti, F.H. and Roesch, W.C. : *Radiation dosimetry. 11-41. Academic press, New York, 1966.*
8. Chu, S.S. and Lee, D.H. : *Perturbation of dose distributions for air cavities in tissue by high energy electron, K. Rad Prot. Soc. 1:22-30, 1976.*
9. Haas, N.H., et al. : *Medical aspects of high energy electron beams. Am. J. Roentg. 72:259-259, 1954.*
10. Kessarar, N.D. : *Calculated absorbed dose for electrons. Radiation Res. 23:630-640, 1964.*
11. Laughlin, J.S. Ovadia, J and Beattie, J.W. : *Some physical aspects of electron beam therapy. Radiol. 60:165-168, 1953.*
12. Loevinger, R, et al. : *Radiation therapy with high energy electrons. Radiol. 77:909-927, 1961.*
13. Chu, S.S. and Lee, D.H. : *Studies on Dose distribution and treatment technique of high energy electron. J.K. Rad. prot. 3:6-22, 1978.*