

가우시안 근사를 이용한 6 MeV 전자선의 에너지분포에 관한 연구

원광보건대학 방사선과 · 전북대학교 물리학과*
이정옥 · 김승곤*

-Abstract-

Study on Energy Distribution of the 6 MeV Electron Beam using Gaussian Approximation

Jeong Ok Lee · Seung Kon Kim*

Department of Radiotechnology, Wonkwang Health Science College
Department of Physics, Chonbuk national University*

A Gaussian distribution was parametrized for the initial distribution of the electron beam emitted from a 6MeV medical linear accelerator. A percent depth dose was measured in a water phantom and the corresponding Monte Carlo calculations were performed starting from a Gaussian distribution for a range of standard deviations, $\sigma=0.1\langle E \rangle$, $0.15\langle E \rangle$, $0.2\langle E \rangle$, $0.25\langle E \rangle$, and $0.3\langle E \rangle$ with $\langle E \rangle$ being the mean value for the incident beam energy. When measurement and calculation were compared, the calculation with the Gaussian distribution for $\sigma=0.25\langle E \rangle$ turned out to agree best with the measurement. The results from the present work can be utilized as input energy data in planning an electron beam therapy with a Monte Carlo calculation.

Key words : electron beam, energy distribution, Monte Carlo calculation

I. 서 론

전자선은 물질속에서 에너지에 의존하는 비정(range)이 있어, 일정한 깊이 이상으로 투과할 수 없기 때문에 피부암, 유방암 등과 같은 표재성 종양의 치료에 이용된다. 전자선치료에 적합한 전자의 에너지범위는 4~20 MeV이며, 이 범위를 가지는 전자선의 발생장치로서 일반적으로 의료용 선형가속기가 이용된다^{1,2)}. 선형가속기에서 방출되는 전자선의 에너지를 결정하는 것은 측정 및 방사선치료의 연구를 위해서 중요한 요소이지만, 빔의 강도와 에너지가 높아 이를 정확하게 측정하는 것은 매우 어려워 에너지에 의존하는 깊이선량율(percent depth dose)을 측정하여 팬텀표면에서 전자들의 평균에너지와 최빈에너지를 결정하는 방법이 연구되었다^{3~5)}.

본 연구에서는 명목상의 에너지가 6MeV인 선형가속기에서 방출되는 전자들의 에너지가 6MeV를 중심으로 분

포된 가우시안 분포로서 가정하고, 몬테칼로 계산을 이용하여 깊이선량율을 계산하여 측정값과 비교하였다. 6MeV 전자의 단일에너지에 대한 몬테칼로 계산결과는 이미 문헌을 통하여 발표된 바 있으나⁶⁾, 이 연구에서 계산된 깊이선량율은 최대선량깊이를 중심으로 표면영역과 깊은 영역에서 측정값과 많은 차이를 보였다. 이는 몬테칼로 계산에서 전자선의 초기 에너지분포를 적절하게 감안하지 않고 단일에너지로 가정하였기 때문으로, 측정값과의 일치를 위해서는 입사에너지분포의 결정이 선행되어야 할 과제이다.

본 연구의 목적은 가우시안 분포와 몬테칼로 계산을 이용하여 6MeV 선형가속기에서 방출되는 전자선의 에너지분포를 근사적으로 결정하는 것이며, 이 결과는 전자선의 측정 및 결과의 해석에 많은 정보가 될 뿐 아니라, 최근 중요하게 부각되는 몬테칼로 계산의 임상적 응용에 입사 전자의 에너지에 관한 자료로서 이용될 수 있을 것이다.

다음의 재료 및 방법에서는 6MeV 전자선의 측정 및

* 이 논문은 1999학년도 원광보건대학 교내 연구비 지원에 의해 수행하였음.

몬테칼로 계산에 가우시안분포를 적용하는 과정에 대하여 논의하고, 결과 및 결론에서는 전자선의 측정결과와 표준편차의 함수로 구해진 몬테칼로 계산결과를 제시하고, 이 두 가지 결과를 비교 분석하였다.

II. 재료 및 방법

1. 측정

전자선에 대한 깊이선량율의 측정은 검출부의 직경이 0.2cm인 소형이면서, 취급이 용이한 반도체검출기(P-type silicon, Scanditronix co.)를 이용하였다. 물팬텀은 검출기를 3차원적으로 이동시키기 위한 장치가 부착되어 있으며, 용적은 $50 \times 50 \times 50 \text{ cm}^3$ 이다. 그리고 검출기의 조작 및 측정값의 기록장치는 컴퓨터로 제어되는 RFA-300(Scanditronix co., Sweden)을 이용하였다. 본 연구에서 측정조건은 선원과 팬텀표면간의 거리는 100 cm이며, 조사면의 크기는 전자선조사용 콘(cone)을 부착한 상태에서 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 이다. 깊이선량율의 측정은, 전자선이 조사되는 상태에서 검출기를 깊이방향으로 이동시키면서 측정값을 RFA300을 통하여 컴퓨터에 기록하는 방법으로 하였으며, 측정범위는 6 MeV 전자선의 물속에서의 실비정(practical range)이 3~4cm인 것을 고려하여 표면에서부터 5cm 깊이까지로 정하였다.

2. 몬테칼로 계산

본 연구에 이용된 6MeV 의료용 선형가속기(ML6M, Mitsubishi co. Japan)는 정상파형(standing wave type)의 가속방식을 채택하고 있으며, 전자의 가속을 위한 마이크로파의 공급은 마그네트론(magnetron)에 의한다. 고진공인 가속관안에서 가속이 완료된 전자선은 270도 휨

자석(bending magnet)에 의하여 경로가 휘고, 티타늄(titanium)으로 제작된 가속기창(window)을 통하여 공기중으로 방출된다. 방출된 초기의 전자들은 좁은 에너지의 폭을 가지고 있어, 거의 단일에너지로 간주할 수 있지만, 선형가속기 외부로 방출될 때에는 산란막, 필터 및 콜리메이터 등의 기하구조와 상호작용하는 과정에서 생성 및 산란된 전자들이 기여함으로써, 초기보다 넓은 에너지의 폭을 가지게 된다. 본 연구에서는 이를 통계적인 관점에서 다음과 같이 에너지의 평균값을 중심으로 일정한 대칭을 이루는 가우시안(Gaussian) 분포로 가정하였다⁷⁾

$$f(E)dE = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(E-\langle E \rangle)^2}{2\sigma^2}} dE \quad (1)$$

여기서 $f(E)dE$ 는 전자가 에너지 E와 E+dE사이를 가질 확률이며, σ^2 은 분산, $\langle E \rangle$ 는 평균에너지로서 6MeV를 취하였다. 본 연구에서는 $f(E)$ 를 입사전자의 에너지분포로서 취하고, $\sigma=0.1\langle E \rangle$, $0.15\langle E \rangle$, $0.2\langle E \rangle$, $0.25\langle E \rangle$, $0.3\langle E \rangle$ 에 대하여 각각 몬테칼로 계산으로 깊이선량율을 계산하였다. Fig. 1은 본 몬테칼로 계산에서 입사전자의 에너지분포로서 취한 각각의 σ 에 대한 가우시안분포들이다.

몬테칼로 계산에 이용된 코드는 EGS4(electron gamma shower version 4)^{8,9)}이며, 자료의 입출력을 담당하는 사용자코드(user code)는 xyzdos.mortran이다. 여기서 xyzdos.mortran은 EGS4와 함께 제공되는 사용자코드로서, 물질의 표면에 수직으로 입사하는 단일에너지로 구성된 평행한 광자 또는 전자선에 대하여 그 물질에 흡수된 에너지를 계산하는 기능이 있다. 본 연구에서는 계산의 목적에 맞도록, 에너지분포를 입력할 수 있는 기능과 빔의 확산(beam divergence)을 고려한 기하구조를 입력할 수 있는 기능을 사용자코드에 추가하였다. Fig. 2는 깊이선량율의 몬테칼로 계산을 위한 기하구조 모형이다. 여기서 (1)식으로 주어지는 에너지분포로부터 입사전자의 에너지를

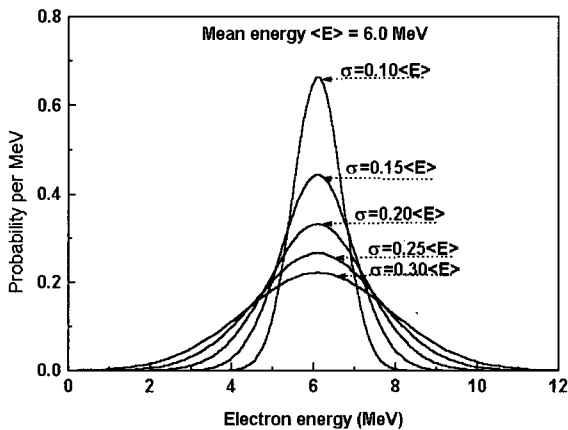


Fig. 1. Gaussian distributions as a function of standard deviation assumed for incident electron beam energy spread of a 6MeV linear accelerator. $\langle E \rangle$ denotes the mean energy of the distributions.

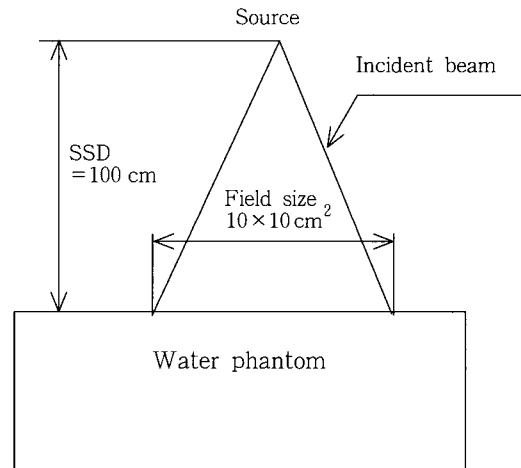


Fig. 2. Geometrical modeling of the incident electron beam and water phantom used in Monte Carlo calculations.

표본추출하는 과정에 대하여 간략하게 요약하면 다음과 같다.

a) $f(E)$ 는 $\int_0^{\infty} f(E)dE = 1$ 을 만족하는 확률밀도함수이며, 누적확률함수는 다음과 같다.

$$F(E) = \int_0^E f(E')dE' \quad (2)$$

b) 누적확률함수 $F(E)$ 로부터 입사전자의 에너지 E_i 를 표본추출하게 되는데, 0에서 1사이에서 균일한 분포를 이루는 난수 ξ 를 취하여, $F(E) = \xi$ 로 놓아 다음과 같이 E_i 를 결정한다.

$$E_i = F^{-1}(\xi) \quad (3)$$

과정은 사용자코드의 내부에서 수행되는데, 본 연구에서는 계산시간을 단축하기 위하여, 0~12 MeV사이를 80개의 에너지구간으로 나누고, 각 에너지구간에 대한 $f(E)$ 와 $F(E)$ 를 사전에 계산해 놓고, 입사전자의 에너지를 결정할 때 (3)식만을 이용하여 계산하도록 하였다. 다음은 이렇게 에너지가 결정된 입사전자에 대하여 몬테칼로 계산이 수행되는 과정에 대하여 기술한다.

물팬텀에 입사한 전자는 물속의 원자들과의 상호작용으로 에너지를 잃는데, 몬테칼로 계산에서 이 과정은 연속적 에너지손실(continuous energy loss)과 불연속적 에너지손실(discrete energy loss)로 나누어서 다룬다¹⁰⁾. 여기서 전자의 연속적 에너지손실은 입사전자가 물속의 전자들과 다수의 약한 충돌로 서서히 에너지를 잃는 과정인데, 이 과정에서 전자가 잃는 에너지는 그 지점에서 물에 흡수된 것으로 간주한다. 따라서 물이 단위질량 당 흡수한 에너지, 즉 흡수선량은 이 값으로부터 결정하는데, 계산된 흡수선량을 깊이에 대하여 규격화함으로써 본 연구에서 관심을 가지는 깊이선량율을 구할 수 있다. 한편, 전자의 불연속적 에너지손실은 입사전자가 물속의 전자, 핵들과 강한 충돌로 인하여 높은 에너지를 상실하고 이차입자가 발생하는 과정인데, 이 과정은 전자(텔타선)를 생성하는 Möller산란이나 광자를 생성하는 제동복사(bremsstrahlung)와 같은 상호작용의 발생을 의미한다. 이 과정에서 발생된 새로운 입자들은 입사입자와 동등하게 수송의 규칙이 적용되며, 만약 수송중인 입자의 에너지가 사전에 정한 하한값 이하가 되거나, 관심지역을 이탈하면 강제로 수송을 종료한다.

본 연구에서는 이와 같은 방법으로 300만개의 입사전자에 대하여 계산을 수행하여 물팬텀에 대한 심부선량율을 구하였다. 여기서 몬테칼로 계산에 사용된 초기의 변수들을 제시하면, 입자의 하한 에너지는 전자에 대하여 $ECUT = 0.611\text{MeV}$, 광자에 대하여 $PCUT = 0.01\text{MeV}$, 그리고 전자의 수송단위인 스텝(step)은 에너지가 3% 줄어드는 거리로 정하였다.

본 연구의 몬테칼로 계산에 이용된 컴퓨터는 워크스테

이션(HP-715/100, Hewlett Packard co., U.S.)이다. 몬테칼로 계산코드의 실행은, 다수의 매크로(macros)로 구성된 원시코드인 모트란(mortran)언어를 포트란(fortran)언어로 변환하는 과정과 포트란언어를 실행파일로 변환하는 과정으로 진행되며, 각 과정에서 사용된 컴파일러(compiler)는 mortran3와 fortran77이다.

III. 결 과

Fig. 3은 6MeV 단일에너지를 포함하여, $\sigma = 0.1\langle E \rangle$, $0.2\langle E \rangle$, $0.3\langle E \rangle$ 를 가지는 가우시안 분포를 입사전자의 에너지분포로 정하고, 몬테칼로 계산으로 구한 깊이선량율의 계산결과들이다. 이 그림에서 입사전자에 대한 에너지의 분산이 증가할수록 물팬텀의 표면영역과 깊은 영역에서 깊이선량율이 증가됨을 알 수 있는데, 이것은 평균에너지를 중심으로 낮은 에너지와 높은 에너지의 전자들의 기여가 증가하여, 이들이 물팬텀의 표면영역과 깊은 영역에서 각각 흡수되기 때문이다. 단일에너지의 전자의 경우에는 일정깊이에서 깊이선량율의 값이 급격하게 감소하는데, 이것은 단일에너지의 전자들은 물속에서 에너지의 손실이 거의 일정하여 대부분 동일한 깊이에서 흡수되기 때문이다. 이와 같이 계산된 결과들을 측정값과 비교함으로써 측정값에 대한 선형가속기의 에너지분포를 근사적으로 예측할 수 있는데, 이를 수행한 결과, 깊이선량율의 측정값과 가장 잘 일치하는 몬테칼로 계산결과는 $\sigma = 0.25\langle E \rangle$ 인 가우시안 분포로 나타났으며, 그 결과를 Fig. 4에 제시하였다. 이 그림에서 나타난 두 결과들은 깊이 $d = 0$ 에서 약 2.8 cm 깊이까지 서로 잘 일치하였으며, 깊이 $d = 0, d = 1.0, d = 2.0, d = 3.0$ cm에 대하여 측정값과의 차이는 각각 -1.7%, 1.3%, -3.5%, -12%로 나타났다. $d = 3\text{cm}$ 인 깊은 영역에서 계산값이 측정값보다 높게 나타난 이유는 가우시안의 표준편차를 $\sigma = 0.25\langle E \rangle$ 로

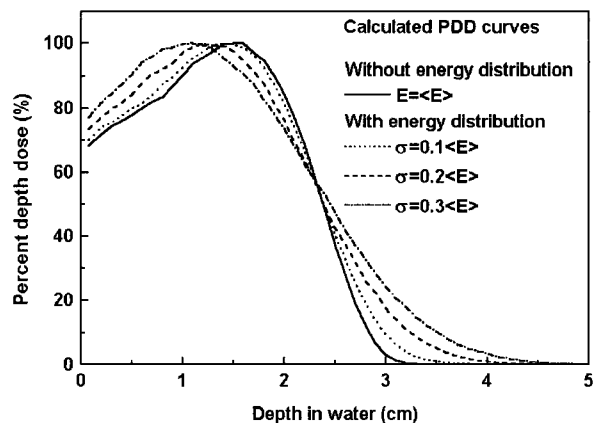


Fig. 3. Percent depth dose curves calculated by Monte Carlo methods with and without energy distributions for a 6MeV electron beam.

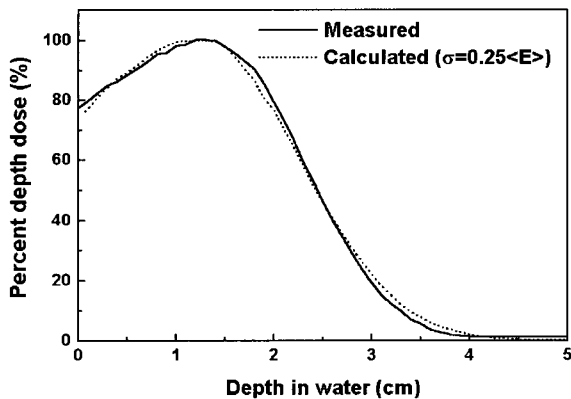


Fig. 4. Percent depth dose curves measured and calculated using a Gaussian distribution with a standard deviation of $0.25\langle E \rangle$.

취하는 경우에, Fig. 1에 제시된 분포의 형태에서 알 수 있듯이 8 MeV 이상의 고 에너지 전자들이 이러한 깊이 이상 침투하여 에너지 손실에 상당히 기여하기 때문이다. 따라서 보다 정확한 결과를 얻기 위해서, 가우시안분포로부터 표본 추출되는 입사전자의 최대에너지를 강제로 제한하는 방법으로 이 점을 보완할 수 있지만, 이 방법은 가우시안분포가 비대칭으로 왜곡되는 결과를 초래함으로써 본 연구의 초기가정에 어긋나며 또 물리적으로 별 의미를 가지지 못한다.

IV. 결 론

본 연구에서 초기에 에너지의 평균값을 6MeV로 선정한 배경을 제시하면 다음과 같다. 물펜텀에 입사하는 전자선의 에너지결정에 대한 Sorcini등³⁾의 연구에 의하면, 깊이선량율로부터 구한 전자선의 실비정이 R_p 일 때 표면에서의 최빈에너지는 $E_p = 0.22 + 1.98 R_p + 0.0025 R_p^2$ 인데, 깊이선량율이 50%인 깊이가 R_{50} 일 때 평균에너지는 $\bar{E} = 2.33 R_{50}$ 의 관계가 있다. 본 연구에서 측정된 깊이선량율로부터 이들을 구하면 $E_p = 6.6 \text{ MeV}$, $\bar{E} = 5.6 \text{ MeV}$ 를 얻을 수 있으며, 이 값들을 가우시안분포의 평균에너지로 취할 수 있다. 그러나 두 값에 대한 심부선량율을 각각 계산해 보면, 두 결과 모두 측정값과 많은 차이가 있음을 알 수 있는데, 그 이유는 실제의 에너지분포가 가우시안분포와 정확하게 일치하지 않기 때문이다. 본 연구에서 이를 수행한 결과, 깊이선량율의 최대선량지점만을 비교하면, E_p 의 경우에 다소 높게 평가되어 있으며, \bar{E} 의 경우는 너무 낮게 평가되어 있음을 발견할 수 있었다⁶⁾. 그러나 단일에너지 6 MeV에 대하여 깊이선량율을 몬테칼로 계산으로 구하고 측정값과 비교한 참고문헌 6에서, 최대선량지점은 측정값과 잘 일치하였으나, 그 이외의 깊이에서는 계산값이 측정값보다 낮게 평가되어 있음을 발견할 수 있다. 따

라서 6 MeV를 기준으로 적절한 에너지의 분산을 취함으로써 측정값과의 일치를 기대할 수 있다는 가정에 도달하게 되었으며, 이로부터 본 연구의 결과를 얻을 수 있었다.

본 연구의 결과로부터 결론을 제시하면, 6 MeV 선형가속기(ML 6M)에서 방출되는 전자선의 에너지분포를 근사적으로 가우시안분포로서 취했을 때, 이 선형가속기에서 방출되어 팬텀표면으로 입사하는 전자들의 에너지가 6 MeV를 중심으로, $\sigma = 25\% \langle E \rangle$ 정도 분산되어 있는 것으로 나타났다. 본 연구에서 수행한 방법은 매우 단순하여 다른 에너지 및 여러 형태의 선형가속기에 대해서도 쉽게 적용할 수 있을 것으로 생각되며, 구해진 에너지분포는 전자선을 이용하는 모든 연구에서, 에너지에 대한 참고자료로서 활용될 수 있을 것이다. 특히, 몬테칼로 계산의 전자선치료계획에 응용을 위해서는 이용되는 선원에 대한 에너지분포가 주어져야 하지만, 알려진 자료가 거의 없고 에너지분포가 가속기의 구조에 따라 다르기 때문에 본 연구에서 취한 방법은 이 분야의 연구에 많은 참고가 될 것이다.

참 고 문 헌

1. Klevenhagen S. C. : Physics of Electron Beam Therapy, Adam Hilger, England, 67, 1985.
2. Khan F. M. : The Physics of Radiation Therapy 2nd ed., Williams & Wilkins, Baltimore, 14, 1994.
3. Sorcini, B. B, Brahme A : An accurate energy-range relationship for high-energy electron beams in arbitrary materials, Phys. Med. Biol. 39, 795, 1994.
4. AAPM Task Group 21 : A protocol for the determination of absorbed dose from high-energy photon and electron beams. Med. Phys., 10, 741, 1983.
5. AAPM Task Group 25 : Clinical electron-beam dosimetry. Med. Phys., 18, 73, 1991.
6. 이성아, 이정옥, 문성록, et. al : 6 MeV 전자선의 측정과 모의계산에 대한 연구. J. Kor. Soc. Ther. Radiol., 13, 285, 1995.
7. Reif, F : Fundamentals of statistical and thermal physics, Mc-GRAW-HILL, U.S. 17, 1965.
8. SLAC Report 265 : The EGS4 Code System, Stanford Linear Accelerator Center 1985.
9. Rogers D. W. O., Faddegon B.A., Ding G.X. : BEAM : A Monte Carlo code to simulate radiotherapy treatment units. Med. Phys., 22, 503, 1995.
10. Jenkins T.M., Rindi A. : Monte Carlo Transport of Electrons and Photons, Plenum, New York 323, 1988.