

단일에너지 깊이선량을 자료에 의한 치료용 전자선의 에너지분포 계산

*원광보건대학 방사선과, †원광대학병원 방사선종양학과

이정옥* · 정동혁†

본 연구에서는 깊이선량의 측정값과 단일에너지 계산값들로부터 치료용 전자선에 대한 에너지분포를 계산하였다. 최소제곱법에 기초한 수치연산을 이용하여 측정과 환산 깊이선량의 차이가 최소가 되는 에너지분포를 결정하였다. 본 방법은 임상에 이용되는 명목에너지 6, 9, 12, 그리고 15 MeV 전자선에 대하여 적용되었다. 본 연구에서는 측정값과의 비교를 위하여 결정된 에너지분포를 입력자료로 이용한 깊이선량의 몬테칼로 계산을 수행하였다. 계산된 깊이선량을 측정값과 비교할 때, 모든 전자선에 대하여 표면에서 R_{90} 깊이까지 측정값과 $\pm 3\%$ 미만, 비정 근처까지 $\pm 4\%$ 미만의 상대오차를 보였다. 본 연구는 입사 전자선의 에너지분포를 결정하기 위한 실용적 방법으로 응용될 수 있다.

중심단어: 에너지분포, 전자선, 몬테칼로

서 론

전자선치료를 위한 인체내 선량분포 계산은 물에서의 측정자료에 기초한 전통적 계산방식에서 보다 진보된 몬테칼로 기반 선량계산 방식으로 점차 대체되고 있다.¹⁻³⁾ 몬테칼로 계산에서 중요한 것은 입사선원에 대한 물리적 자료들인데, 여기에는 조사면에 대한 에너지분포, 각분포, 그리고 플루언스의 분포 등이 있다. 에너지분포의 경우에 몬테칼로 계산의 결과에 큰 영향을 미칠 수 있는 중요한 입력자료로서 간주되지만, 이에 대한 적절한 측정이 어렵고 또한 이러한 물리량들이 가속기 head의 구조물질과 기하구조에 의존하기 때문에 임의의 선형가속기 기종에 대한 만족할 만한 에너지분포의 결정은 쉽지 않다.^{4,5)} 전자선의 경우에 이러한 어려움으로 인하여 종래에는 명목에너지만을 취하거나⁶⁾ 또는 가우시안 분포를 취하여⁷⁾ 계산을 수행하기도 하였지만, 깊이선량의 경우에 일부 깊이에서 근사적으로 일치할 뿐 대부분의 깊이에서 측정값과 차이를 보이는 것으로 나타났다.

최근에 개발된 EGS4 기반 BEAMnrc^{8,9)}에서는 선형가속기 head의 전체 기하구조에 대한 몬테칼로 계산을 통하여 궁

극적인 선원의 자료들을 획득하도록 되어 있지만, 먼저 선형가속기 head의 구조물질과 기하구조에 대한 정확한 정보가 주어져야 하며, 전자선의 경우에 가속기 창으로부터 방출되는 초기 에너지의 결정이 다소 경험적이어서,^{9,10)} 만족할 만한 결과를 얻기 위해서는 많은 시간과 노력이 요구된다. 따라서 몬테칼로 기반 치료계획의 실용화를 위해서는 실용적인 에너지 분포의 결정에 관한 연구들이 요구된다고 할 수 있다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 실용적인 접근법으로서 단일에너지의 깊이선량률 자료와 수치해석을 이용하여 전자선의 에너지분포를 계산하였다. 이 방법은 Kovar 등¹¹⁾(1983)이 연구하였는데, 이들은 치료용 베타트론에서 방출되는 4 MeV와 8 MeV에 대하여 단일 에너지 자료의 최소제곱법에 의한 자료의 조합을 통하여 측정 깊이선량률과 일치하는 에너지분포를 계산하였다. 당시 이들의 연구는 몬테칼로 기반의 선량계산과는 다소 무관하고, 또한 몬테칼로 계산으로 재확인되지도 않았다. 그렇지만 몬테칼로 계산에 관심이 증가되는 최근의 추세와 함께 에너지분포의 실용적인 결정을 위하여 이들의 연구를 도입하고 평가하는 것도 중요한 의미를 가진다고 할 수 있다.

본 연구에서는 선형가속기(Siemens co., Germany)에서 발생하는 6, 9, 12, 15 MeV 전자선에 대하여 에너지분포를 결정하였다. 본 연구에서는 몬테칼로 계산으로 직접 구한 단일에너지 깊이선량률을 사용하였으며, 계산된 에너지분포의 확인은 결정된 에너지분포를 적용한 몬테칼로 계산결과와 측정값의 비교를 통하여 수행되었다. 본 연구는 몬테칼로 기반 선량계산 체계의 도입 시 입사 전자선의 에너지분포를 결정하기 위한 실용적 방법으로 활용할 수 있다.

본 연구는 2003학년도 원광보건대학 교내연구비 지원에 의해 수행되었음.

이 논문은 2004년 2월 28일 접수하여 2004년 3월 6일 채택되었음.

책임저자 : 이정옥, (570-711) 전북 익산시 산용동 344-2

원광보건대학 방사선과

Tel: 063)840-1232, Fax: 063)840-1239

E-mail: jolee@wkhc.ac.kr

다음의 재료 및 방법에서는 본 연구에서 도입한 수치해석 방법과 몬테칼로 계산에 에너지분포를 입력하는 방법에 대하여 기술하였다. 결과에서는 먼저 전자의 명목상의 에너지만으로 계산한 결과가 측정값과 차이를 보이는 것을 보이고, 본 방법의 적용에 사용된 자료들을 그래프로 나타내었다. 그리고 결정된 에너지분포를 제시함과 함께 이를 입사선원으로 이용한 몬테칼로 계산결과와 측정값을 서로 비교하고 결론을 제시하였다.

재료 및 방법

1. 에너지분포 결정의 수치해석

물에 입사하는 에너지 E 와 $E+dE$ 사이를 가지는 전자 1개에 대한 물 속 깊이 d 에서 흡수선량을 $D_{E,d}^1$ 으로 정의한다면, 입사선속이 ϕ_E 인 경우에 총흡수선량은 $\phi_E D_{E,d}^1$ 이다. 여기서 $D_{E,d}^1$ 은 입사전자의 단위 에너지당 흡수선량으로서 Gy/MeV의 단위를 가지며, 물 속 깊이와 입사전자의 에너지의 함수이다. 이 정의로부터 다양한 성분의 에너지 및 선속을 가지는 입사전자들에 대해서 전체 흡수선량을 표현하면 다음과 같다.⁸⁾

$$D_d = \int_0^{E_{max}} \phi_E D_{E,d}^1 dE \quad (1)$$

여기서 D_d 는 물 속 깊이 d 에서의 흡수선량이며 단위는 Gy/cm²이다. 그리고 E_{max} 는 입사전자의 에너지분포에서 최대에너지이다.

물에 입사하는 임의의 전자선에 대하여 개별 에너지와 선속을 각각 구별할 수 없으므로 측정 가능한 양은 단지 깊이에서의 전체 흡수선량 D_d 이다. 만약, 측정값이 주어지고, 단일에너지에 대하여 $D_{E,d}^1$ 가 주어진다면 수치적 반복법을 적용하여 (1)식을 만족하는 ϕ_E 를 근사적으로 결정할 수 있는데, 본 절에는 이러한 가정에 대한 기본적 방법을 기술한다.

본 연구에서는 몬테칼로 계산으로부터 결정된 단일에너지 전자에 대한 흡수선량 자료를 기초로 하였는데, 이를 위하여 먼저 (1)식의 적분을 합으로 표현하면 다음과 같다.

$$D_k = \sum_{i=1}^n \phi_i D_{ik}^1 \quad (2)$$

여기서 D_k 는 표면에서 최대깊이까지 불연속적으로 구분된 깊이구간($k=1,2,\dots,k_{max}$)에서 임의의 k 에 대한 환산 흡수선량(reduced dose)이며, ϕ_i 는 최소에너지에서 최대에너지

까지 불연속적으로 구분된 에너지구간($i=1,2,3,\dots,n$)에서 임의의 i 에 대한 전자의 입사선속이다. 또한 D_{ik}^1 은 깊이 k 에서 에너지 i 인 입사전자 1개에 의한 흡수선량과 같다. 만약 k 번째 깊이에 대한 흡수선량의 측정값이 D_k^m 으로 주어지고, 에너지분포에 대한 임의의 초기값 ϕ_i 가 주어지면, 모든 k 에 대하여 다음을 계산할 수 있다.

$$\chi^2 = \sum_{k=1}^{k_{max}} [D_k^m - D_k(\phi_i)]^2 \quad (3)$$

이 계산의 목적은 ϕ_i 를 $\phi_i + \delta\phi_i$ 로 치환하는 반복과정을 통하여 χ^2 이 최소가 되는 ϕ_i 의 집합을 찾는 데 있다. 여기서 ϕ_i 의 조건은 양수이어야 하며 $\delta\phi_i$ 는 음수 또는 양수가 될 수 있다. 또한 결정된 임의의 $D_k(\phi_i)$ 에 대한 상대오차를 다음과 같이 계산할 수 있는데,

$$SE = \frac{\sqrt{\chi^2/k_{max}}}{\langle D \rangle} \quad (4)$$

여기서 $\langle D \rangle = (\sum_k D_k^m)/k_{max}$ 은 모든 k 에 대하여 계산된 흡수선량의 평균값이다. 만약 상대오차가 기준값 이상이면 (3)식의 계산은 다시 반복되는데 이 때 $\delta\phi_i$ 는 $\delta\phi_i/l$ 로 치환된다. 여기서 l 은 (3)식의 계산이 반복되는 횟수이며, $\delta\phi_i$ 를 l 로 나누는 것은 정밀도를 높이기 위해서이다. 본 연구에서는 l 을 증가시키면서 $SE \leq 0.3\%$ 에 도달할 때까지 (3)의 계산을 반복하도록 하였다. 본 연구에서 모든 수치계산은 자체 작성한 포트란(LF95, Lahey co.) 프로그램으로 수행하였다.

지금까지 본 연구의 수치연산 방법에 대하여 알아보았는데, 이 방법의 사용에 있어서 오류를 피하기 위하여 고려할 사항은 다음과 같다.

(a) D_{ik}^1 은 모든 i 에 임의의 수를 곱하거나 나눌 수 있지만, 개별 i 에 대하여 일반화하지 않아야 한다.

(b) $\delta\phi_i$ 는 초기값은 임의의 수를 취할 수 있으나 너무 작은 경우에 계산시간이 증가된다. $\delta\phi_i$ 의 적절한 값은 D_k^m 와 $D_k(\phi_i)$ 의 차수로부터 결정할 수 있는데, 본 계산에서는 (a)의 절차를 통하여 서로 비슷한 차수가 되도록 하고 $\delta\phi_i = 0.001$ 을 사용하였다.

2. 몬테칼로 계산

본 연구에서 깊이선량률의 계산에 사용한 몬테칼로 계산 코드는 EGS4 (electron gamma shower version 4) 코드¹²⁾이다. 이 코드를 이용하여 원통형 물팬텀 및 점선원(point source)

기하구조에서 선원과 거리 100 cm, 조사면 10×10 cm²에 대하여 1부터 18 MeV까지 1 MeV 간격으로 깊이선량률을 계산하였다. 이 때 깊이선량률의 깊이 간격은 0.1 cm이었다. 깊이선량률 계산결과는 (2)식의 D_{ik} 자료 및 ϕ_i 의 계산을 위한 자료로서 사용하였는데, 보다 세분된 에너지 간격을 가지기 위하여 선형대상을 통하여 0.25 MeV 간격을 가지도록 자료를 확장하였다.

명목에너지가 6, 9, 12, 15 MeV인 치료용 전자선에 대하여 본 연구방법을 적용하여 에너지분포를 결정하였다. 최종 결정된 에너지분포의 평가는 이를 입사선원으로 사용하여 몬테칼로 계산을 수행하고 결과를 측정값과 비교하는 방법을 사용하였다. 따라서 두 번째 몬테칼로 계산에서는 앞의 방법으로 결정된 ϕ_i 를 입사선원으로 사용하는데, 이 과정은 매 계산 시작시 주어진 ϕ_i 분포로부터 에너지를 표본추출하고 최종적인 흡수선량의 분포로부터 깊이선량률을 구하는 절차로 진행된다. 이를 위하여 먼저 다음과 같이 b_i 를 규격화한다.

$$b_i = \frac{\phi_i}{\sum_j \phi_j} \quad (5)$$

여기서 b_i 는 $\sum_j b_j = 1$ 을 만족하는 에너지 E_i 에 대한 규격화된 확률밀도함수(probability density function)이다. 다음은 0과 1 사이를 가지는 임의의 난수 ξ 를 취하여 다음 조건을 만족하는 j 를 구한다.

$$\sum_{i=1}^j b_i < \xi \leq \sum_{i=1}^{j+1} b_i \quad (6)$$

선택된 j 로부터 결정된 에너지는 E_j 이며, 많은 수의 표본 추출에 대하여 결정된 E_j 의 분포는 b_j 의 분포를 따를 것이다. 이 계산에서는 4종류의 전자선 에너지에 대하여 결정된 에너지분포를 입사선원으로 이용하여 천만번의 전자이력(electron history)을 계산하고 이로부터 깊이선량률을 구하였다. 모든 몬테칼로 계산들에서 에너지 하한값(cutoff energy)은 전자와 광자에 대하여 각각 ECUT=0.561 MeV, PCUT=0.05 MeV이었다. 다음 결과에서는 단일에너지만으로 계산한 결과들과 본 연구에 사용된 자료들을 보이고, 최종 결정된 에너지분포와 이를 이용한 몬테칼로 계산결과를 제시하였다.

결 과

Fig. 1은 명목에너지 6, 9, 12, 15 MeV 전자선에 대한 깊

이선량률의 측정값과 동일한 단일에너지에 대하여 몬테칼로 방법으로 계산한 결과를 보여준다. 이 그림에 나타난 바와 같이 단일에너지에 대한 몬테칼로 계산의 결과들은 이정옥 등^{6,7)}이 논의한 바와 같이 최대 선량지점만이 근사적으로 일치할 뿐 전후 깊이에서 측정값과 많은 차이를 보인다. 이는 서론에서 예상한 바와 같다.

Fig. 2는 본 방법의 적용을 위하여 1에서 18 MeV까지 1 MeV 간격으로 몬테칼로 방법에 의하여 계산된 단일에너지 입사전자에 대한 깊이선량률들이다. 따라서 이 그림에서

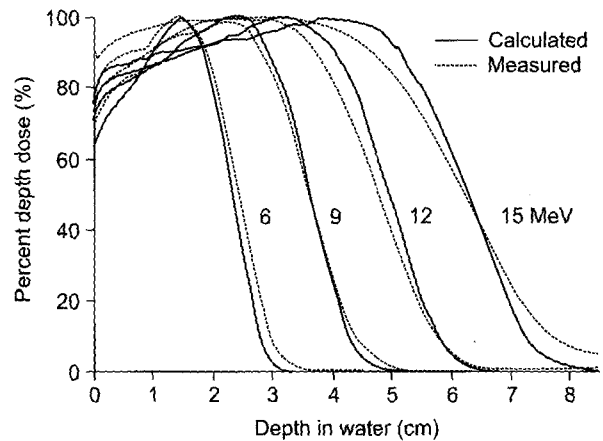


Fig. 1. Comparison of calculated and measured depth dose curves for nominal energies of 6, 9, 12, and 15 MeV electron beams. The calculations are performed by Monte Carlo for mono energetic electron beams corresponding to nominal energies.

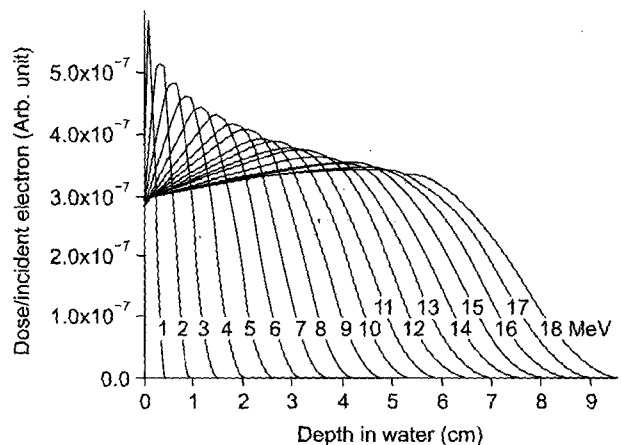


Fig. 2. Mono energetic depth dose data prepared for numerical iterations based on the least square method to determine energy distributions for incident electron beams.

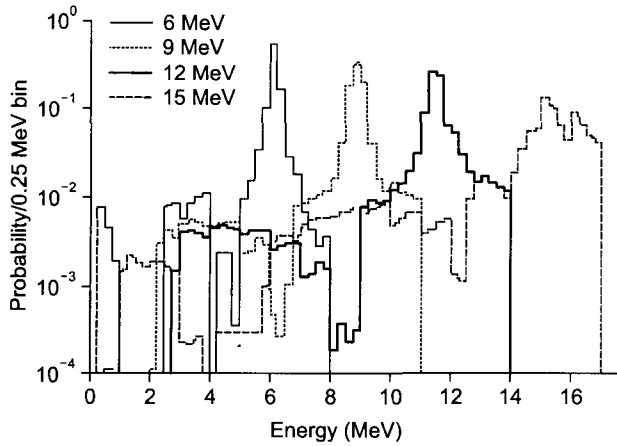


Fig. 3. Determined energy distributions for the clinical electron beams of nominal energies of 6, 9, 12, and 15 MeV by numerical iterations based on least square methods.

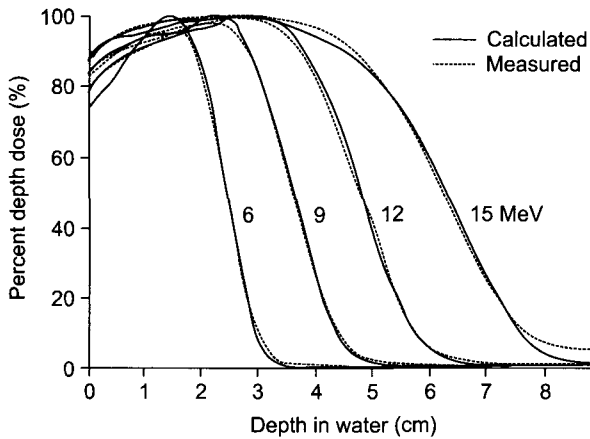


Fig. 4. Comparison of calculated and measured depth dose curves. The calculations are performed using determined energy distributions in this work.

임의의 한 에너지에 대한 값들은 입사전자 에너지당의 흡수선량으로 간주할 수 있다. 이 자료들은 (2)식의 D_{ik}^* 에 대응되며, 또한 (3)식을 기반으로 하는 수치적 반복계산에 기본자료로서 사용된다.

Fig. 3은 본 방법에 의하여 결정된 전자선의 에너지분포를 보여준다. 수치계산의 종료조건은 $SE \leq 0.3\%$ 인데, 이 결과들은 6, 9, 12, 15 MeV 전자선에 대하여 각각 $SE = 0.28\%, 0.20\%, 0.20\%, 0.34\%$ 로 평가되었으며, 이 값에 이르는 반복횟수(l , 재료 및 방법 참조)는 각 에너지에 대하여 10회 이내였다. 표준오차가 0.34% 이상인 15 MeV의 경우에 l 을 10 이상으로 증가시켜도 이 값에서 큰 변화를 보

Table 1. Percent Errors (PE) of calculated results in comparison with measured data.

Depth (cm)	6 MeV PE (%)	9 MeV PE (%)	12 MeV PE (%)	15 MeV PE (%)
0.5	+0.1	+1.1	+1.4	-0.1
1.0	+0.4	+0.3	+1.8	-1.6
1.5	+0.8	-1.1	+0.1	-1.1
2.0	+3.4	-1.0	-0.9	+0.2
2.5	-1.5	+1.3	-0.5	+0.1
3.0	-24.6	+2.8	+0.5	-0.8
3.5		+3.4	+2.3	-2.0
4.0		+0.2	+3.5	-2.0
4.5		-17.2	+3.3	-2.6
5.0			+0.5	-1.7
5.5			-4.3	+0.7
6.0			-9.1	+3.1
6.5				+3.2
7.0				+1.3
7.5				-13.7

지 않았다.

Fig. 4는 앞에서 결정된 에너지분포(Fig. 3)를 식(5)~(6)의 과정을 통하여 입사선원으로 취하여 몬테칼로 계산한 결과들이며, 측정값과 함께 나타내었다. 이 그림에서 보여지듯이 4종류의 전자선 명목 에너지에 대하여 Fig. 1의 결과보다 계산값이 측정값과 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 이 결과에 대하여 각 명목에너지(E_n)의 근사적 비정, 즉 $E_n/2$ (cm)까지 0.5 cm 깊이 간격으로 오차를 계산하여 Table 1에 수록하였다. 이 표에서, $PE(\%) = 100(C - M)/M$ 로서 임의의 깊이에서 측정값(M)에 대한 계산값(C)의 상대오차이다. 이 표에서 알 수 있듯이 본 연구에서 계산한 에너지분포를 이용하여 계산한 결과가 전자선 비정($R_p \sim E_n/2$) 근처까지 $\pm 4\%$ 이내로 일치함을 알 수 있으며, 치료유효범위인 $PDD=80\%$ 깊이($R_{80} \sim E_n/3$) 범위에 대한 오차는 $\pm 3\%$ 이내로 나타났다. 비정(R_p) 이상의 깊이에서의 오차들은 깊이선량률 3% 이하로서 큰 의미를 가지지 않는다.

결론

본 연구에서는 전자선 에너지분포 결정을 위한 실용적인 방법의 하나로서 단일에너지 자료에 기반한 수치해석으로부터 치료용 전자선에 대한 에너지분포를 결정하였다. 결정된 에너지분포를 몬테칼로 계산에 반영하여 깊이선량률을 계산한 결과 모든 대상에너지에 대하여 표면에서 R_p 근처까지 측정값과 $\pm 4\%$ 이내, R_{80} 까지 $\pm 3\%$ 이내로 일치하

는 것으로 나타났다.

본 연구 결과들은 수치적 조합에 의한 결과로서 물리적 해석이 취약한 점은 있으나, 임상에서 에너지분포의 직접 측정이 어렵고 또한 장비 형태에 따라 에너지분포가 다르게 나타나는 것을 고려하면 본 방법은 보다 실용적일 수 있다.^{8-10,13} 따라서 본 연구의 방법과 결과는 전자선 몬테칼로 선량계산 또는 전자선 측정(dosimetry)에 관한 연구에 활용될 수 있다.

본 연구에서는 가속기 head에 대한 BEAMnrc¹⁰ 몬테칼로 계산의 결과와 비교하지 못하였는데, 이는 추후 수행할 예정이다. 그리고 본 연구에서 깊이선량율의 계산과 측정의 비교만으로 결정된 에너지분포를 평가하였는데, 추후 빔측면도에 대한 비교와 비균질영역에 대한 선량분포 비교를 통하여 결정된 에너지분포의 정확성을 재확인 하고자 한다.^{14,15} 아울러 지속적 연구를 통하여 본 방법을 수학적 측면에서 더욱 개선하고 자료들을 데이터베이스화하여 임상에서 쉽게 응용할 수 있도록 추진할 예정이다.

참 고 문 헌

1. Lee MC, Deng J, Li J, Jiang SB, Ma CM: Monte Carlo based planning for modulated electron beam radiotherapy. *Phys Med Biol* 46:2177-2199 (2001)
2. Altschuler MD, Bloch P, Buhle EL, Ayyalasomayajula S: 3D dose calculations for electrons and photon beams. *Phys Med Biol* 37:391-411 (1992)
3. Ma CM, Li JS, Pawlicki T, et al: A Monte Carlo dose calculation tool for radiotherapy treatment planning. *Phys Med Biol* 47:1671-1689 (2002)
4. Zaini MR, Thomadsen BR, Pearson DW, Paliwal BR: Measuring electron fluence of clinical accelerators. *Rad Mea* 27:511-521 (1997)
5. Udale M: A Monte Carlo investigations of surface doses for broad electron beams. *Phys Med Biol* 33:939-953 (1988)
6. 이정옥: 몬테칼로 계산에 의한 전자선속의 흡수선량에 관한 연구. 전북대학교(박사학위논문); (1996)
7. 이정옥, 김승곤: 가우시안 근사를 이용한 6 MeV 전자선의 에너지분포에 관한 연구. *대한방사선기술학회지* 22:54-58 (1999)
8. Lim SY, Chu TC, Lim JP: Monte Carlo simulation of a clinical linear accelerator. *App Rad Iso* 55:759-765 (2001)
9. Rogers DWO, Faddegon BA, Ding GX, Ma C-M, Wei J: BEAM: A Monte Carlo code to simulate radiotherapy treatment units. *Med Phys* 22:503-524 (1995)
10. Ding GX, Rogers DWO: Energy spectra, angular spread and dose distributions of electron beams from various linear accelerators used in radiotherapy. *National Research Council of Canada PIRS* 439:8-9 (1995)
11. Kavar I, Novotny J, Kovar Z, Jirousek P, Vavra S: Calculation of energy spectra for the therapeutic electron beams from depth-dose curves. *Phys Med Biol* 28:1441-1446 (1982)
12. SLAC Report-265: The EGS4 Code System, Stanford Linear Accelerator Center; (1985)
13. Ma CM, Jiang SB: Monte Carlo modelling of electron beams from medical accelerators. *Phys Med Biol* 44:R157-R189 (1999)
14. Doucet R, Olivares M, DeBlois F, Podgorsak EB, Kawrakow I, Seuntjens J: Comparison of measured Monte Carlo calculated dose distributions in inhomogeneous phantoms in clinical electron beams. *Phys Med Biol* 48: 2339-2354 (2003)
15. Faddegon B, Balogh J, Mackenzic R, Scora D: Clinical considerations of Monte Carlo for electron radiotherapy treatment planning. *Rad Phys & Chem* 53:217-227 (1998)

The Calculation of Energy Distributions for Clinical Electron Beams from Mono Energetic Depth dose Data

Jeong Ok Lee^{*}, and Dong Hyeok Jeong[†]

^{*}Department of Radiotechnology, Wonkwang Health Science College,

[†]Department of Radiation Oncology, Wonkwang University Hospital

The energy distributions for clinically used electron beams from measured and calculated mono energetic depth dose values were calculated. The energy distributions having the minimum difference between the measured and reduced values of depth dose are determined by iterations based on least square method. The nominal energies of 6, 9, 12, 15 MeV clinical electron beams were examined. The Monte Carlo depth dose calculations with determined energy distributions were performed to evaluate those distributions. In a comparison of the calculated and measured depth dose data, the standard errors are estimated within $\pm 3\%$ from surface to R_{80} depth and within $\pm 4\%$ from the surface to near the range for all electron beams. This can be practically applied to determine the energy distributions for clinically used electron beams.

Key Words: Energy distribution, Electron beam, Monte Carlo