

6 MeV 전자선의 물팬텀 속의 선량분포에 관한 모의계산

원광보건대학 방사선과 · 원광대학병원 치료방사선과*

이정옥 · 정동혁^{*} · 문성록^{*}

The Simulation on Dose Distributions of the 6 MeV Electron Beam in Water Phantom

Jeong Ok Lee · Dong Hyeok Jeong^{*} · Sun Rock Moon^{*}

Department of Radiotechnology, Wonkwang Health Science College

Department of Radiation Oncology, Wonkwang University, School of Medicine^{}*

This study was performed for the clinical applications applying the Monte Carlo methods. In this study we calculated the absorbed dose distributions for the 6 MeV electron beam in water phantom and compared the results with measured values. The energy data of electron beam used in Monte Carlo calculation is the energy distribution for 6 MeV electron beam which is assumed as a Gaussian form. We calculated percent depth doses and beam profiles for three field sizes of 10×10 , 15×15 , and $20 \times 20 \text{ cm}^2$ in water phantom using Monte Carlo methods and measured those data using a semiconductor detector and other devices. We found that the calculated percent depth doses and beam profiles agree with the measured values approximately. However, the calculated beam profiles at the edge of the fields were estimated to be lower than the measured values. The reason for that result is that we did not consider the angular distributions of the electrons in phantom surface and contamination of X-rays in our calculations. In conclusion, in order to apply the Monte Carlo methods to the clinical calculations we are to study the source models for electron beam of the linear accelerator beforehand.

I. 서 론

방사선 치료계획의 목적은 정상조직은 최대한 보호하면서 종양조직에는 치료선량이 정확하게 도달되도록 방사선원의 에너지와 조사면의 구성과 같은 물리적 조건을 결정하는 것이다. 전자선을 이용한 방사선치료의 경우에도 성공적인 방사선 치료계획을 위해서는 전자선이 조사된 인체내의 선량분포를 계산해야 한다. 현재 인체에 대한 선량분포를 계산하는 가장 일반적인 방법은 물과 같은 조직등가 물질을 이용하여 얻어진 선량분포를 인체에 그대로 적용하여 계산하는 것이다. 이와 같은 방법은 에너지가 명확하게 알려져 있지 않은 고에너지 전자선에 의해서 형성되는 인체내의 선량분포를 편리하게 예측할 수 있는 한가지 방법이 될 수는 있다. 그러나 실제의 방사선 치료계획에서 이러한 물팬텀에 대한 측정자료들을 인체에 그대로 적용하는 것은 여러 가지 문제들이 수반된다. 예를 들어 흉부조직과 폐조직의 경계면이나 굴곡이 심한

인체의 표면과 같은 곳에 대한 선량분포를 계산해야 하는 경우이다. 이러한 문제들에 대한 최적의 해결책으로서 몬테칼로 계산을 제시할 수 있다. 이 몬테칼로 계산기법은 임의의 기하구조에서 전자와 광자에 대한 거의 모든 미시적인 상호작용들을 낱알이 계산하여 임의의 관심영역에서 구하고자 하는 물리량들을 구하는 일종의 통계적 계산방법이다. 현재 전세계적으로 이 몬테칼로 계산기법을 방사선치료의 방사선량의 계산에 응용하고자하는 연구들^{1~3)}이 진행되고 있으며 최근의 컴퓨터 기술의 급속한 발달로 미루어 수년안에는 이 계산기법이 반드시 실용화 될 것으로 기대한다. 본 연구는 이러한 추세와 함께 이 새로운 계산방법의 임상적 응용에 기여하고자 수행되었으며, 본 논문에서는 고에너지 전자선이 조사되는 물팬텀 속에서의 선량분포의 몬테칼로 계산 결과를 측정값과 함께 제시하고자 한다. 본 연구에서는 선행된 연구로부터 구해진 6 MeV 전자선의 에너지 분포를 이용하여, 10×10 , 15×15 , $20 \times 20 \text{ cm}^2$ 의 3종류의 조사면에 대한 깊이선

* 이 논문은 2000년도 원광보건대학 교내 연구비 지원에 의해 수행하였음

량을(percent depth dose)과 빔측면도(beam profile)를 몬테칼로 방법에 의하여 계산하였으며, 또한 동일한 자료들을 실측으로 구하고 결과들을 상호 비교 분석하였다.

이어지는 본 논문의 순서는 다음과 같다. 재료 및 방법에서는 본 연구에서 수행한 전자선에 대한 몬테칼로 계산의 코드와 계산과정, 그리고 전자선의 측정에 대하여 설명하였고, 결과에서는 계산과 측정으로 구한 물팬텀 속의 선량분포를 상호 비교하였으며, 마지막으로 결론에서는 결과에 대한 분석 및 연구의 방향 등을 제시하였다.

II. 재료 및 방법

1. 몬테칼로 계산 코드

전자선에 대한 몬테칼로 계산은 전자와 광자에 대한 계산 코드인 EGS4(Electron Gamma Shower Version)^{4,5)}를 이용하였다. 이 코드는 SLAC(Stanford Linear Accelerator Center)에서 개발한 컴퓨터 프로그램으로서 고에너지 광자와 전자에 대한 상호작용을 연구하기 위한 몬테칼로 계산 코드이다. 이 코드는 구버전인 EGS3의 기능을 보완하여 1985년에 발표되었는데, 기능의 보완에서 대표적인 것은 광자와 전자의 수송에서 처리되는 에너지 범위에 대한 확장이다. EGS3에서는 저에너지 입자들에 대한 수송의 한계가 광자와 전자에 대하여 각각 0.1 MeV와 1 MeV이었으나 EGS4에서는 두 입자에 대하여 각각 1 keV와 10 keV까지로 확장되었다. 따라서 저에너지 입자의 수송이 보완된 EGS4는 개발초기부터 방사선치료의 분야에서 연구의 도구로서 많이 이용되어졌으며 현재에도 이 코드는 고에너지 방사선의 측정에서 수반되는 여러 가지 어려운 문제들의 해결에 중요한 수단이 되고 있다. EGS4는 세 가지의 주요 코드로 구성되는데, 이것은 사용자 코드(user code)와 표준 부함수(standard subroutines) 그리고 PEGS4 코드(pre-processor for EGS4 code)이며, 각각의 기능과 계산과정은 참고문헌 5에 상세히 기술되어 있다.

우리 연구에서 물팬텀속의 흡수선량의 분포를 구하기 위하여 이용한 사용자 코드는 xyzdos.mortran이다. 이 사용자 코드는 임의의 체적을 가지는 직육면체의 팬텀에 전자 또는 광자가 입사할 때 이 팬텀속에서 이들 입자들의 상호작용에 의하여 발생하는 팬텀 속의 각 영역에 저장되는 흡수선량을 계산하는 코드이다.

2. 전자선의 에너지

몬테칼로 계산의 성공적 수행에 있어서 가장 중요한 요구사항은 입사 방사선원의 에너지에 대한 자료를 준비하는 것이다. 그러나 현실적으로 무수히 많은 변수들에 의해서 결정되는 선형가속기의 전자빔에 대한 에너지 분

포를 정확하게 결정하는 것은 매우 어려운 실정이다. 따라서 선형가속기의 규격으로 인식되는 명목상의 가속전압 또는 에너지는 방출되는 입자의 에너지에 대한 근사적인 정보만을 제공하기 때문에 팬텀의 표면에 입사되는 전자들의 정확한 에너지로 간주할 수 없다. 경험적인 측면에서 이러한 단일 에너지의 전자선에 대한 흡수선량 분포의 몬테칼로 계산결과는 측정값과 다소 차이를 보인다⁶⁾.

본 연구에서 계산에 이용한 입사 에너지의 자료는 본 연구를 위해 선행된 6 MeV 전자선의 에너지 분포에 관한 연구결과⁴⁾로서, 이것은 선형가속기에서 방출되어 팬텀표면에 도달하는 전자선의 에너지가 평균값 $\langle E \rangle = 6$ MeV를 중심으로 $\sigma = 25\% \langle E \rangle$ 만큼 흩어져 있는 형태로 가정된 에너지 분포이다. 선행된 연구에서는 이 에너지 분포를 이용하여 6 MeV 전자선의 깊이선량을 계산한 결과 측정값과 잘 일치함을 보였다. 따라서 가우시안 형태의 에너지분포를 가지는 전자빔 속의 입사전자가 한 개가 에너지 E 와 $E + dE$ 를 가질 확률은 다음과 같다.

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

여기서 $\langle E \rangle$ 는 전자선의 에너지의 평균값으로서 6 MeV이며 σ 는 에너지분포의 표준편차인데 앞서 제시된 바와 같이 본 연구에서 취한 값은 평균에너지의 25%인 $\sigma = \pm 1.5$ MeV이다. 전자선에 대한 몬테칼로 계산은 이 식으로부터 단일에너지 E 를 가지는 전자 한개를 표본 추출하여 물팬텀 표면의 정의된 조사면 속으로 입사시키는 것으로부터 시작된다. 이 때 가우시안 분포의 특성에 의하여 표본 추출되는 최소 에너지는 영($E_{\min} = 0$)이지만 최대 에너지는 무한히 클 수 있다. 그러나 가우시안 분포의 약 95%의 면적에 해당하는 $\pm 2\sigma$ 의 범위의 에너지는 3 ~ 9 MeV로서 이 범위를 벗어나는 에너지의 값이 표본 추출될 확률은 5% 이하이다.

3. 몬테칼로 계산

입사전자의 에너지가 결정되면 이 전자는 물 팬텀의 표면에서부터 물과의 상호작용을 일으킨다. 몬테칼로 계산에서 입사전자에 대하여 고려되는 주요 상호작용은 입사전자와 물속의 전자들과의 충돌 그리고 원자핵들과의 충돌이다. 따라서 입사전자의 총 에너지손실은 이 두 과정의 합으로 주어지는데, 몬테칼로 계산에서는 이를 더욱 더욱 세분화시켜 연속과 불연속적인 에너지 손실로 나누어서 계산한다. 이것은 입사전자의 약한 충돌들로 인한 물질의 극소적인 에너지 흡수와 강한 충돌들로 인한 델타선이나 고에너지 광자와 같은 2차입자에 대한 수송을 서로 구분하여 처리하기 위해서이다. 따라서 몬테칼로 계산에서는 전자뿐 아니라 광자의 상호작용도 포함된다.

4. 흡수선량의 계산

방사선에 의한 물질의 에너지 흡수는 하전입자의 에너지 손실에 의하여 발생된다. 만약 전자나 광자가 무한대의 크기를 가진 물질에 입사되면 이들은 물질속에서 모두 에너지를 잃을 것이고 또 잃은 에너지는 모두 그 물질에 흡수된다. 그러나 이 계산에서 관심을 가지는 것은 팬텀 속 작은 체적소에 흡수된 에너지이다. 이러한 경우에 물질의 국소적인 영역에 흡수되는 에너지는 그 영역을 통과하는 하전입자의 연속적 에너지 손실로부터 계산할 수 있다. 이 때 물팬텀 속의 흡수선량이 기록되는 관심영역의 체적소와 하전입자의 하한에너지(cut-off energy)를 적절하게 결정하는 것이 필요하다. 만약 물질속 입자의 체적소 ΔV 에 흡수되는 에너지를 구하고자 하면 하전입자의 하한에너지는 ΔV 안에서 완전히 흡수될 정도의 값으로 선정해야 한다. 우리 연구에서는 물팬텀속의 선량계산을 위한 체적소의 크기를 $0.3 \times 0.3 \times 0.3 \text{ cm}^3$ 으로 정하였으며, 전자와 광자에 대한 하한 에너지는 각각 100 keV와 10 keV로 정하였다. 따라서 전자와 광자의 에너지가 각각 100 keV와 10 keV에 도달하면 그 위치에서 바로 흡수되는 것으로 간주하였다.

에너지 E 인 하전입자가 물팬텀 속의 임의의 체적소 ΔV 안에서 Δx 만큼 이동했을 때 그 체적소에 저장되는 에너지 ΔE 는 다음과 같다⁷⁾.

$$\Delta E = \left. \frac{dE}{dx} \right|_{\Delta} \cdot \Delta x \dots\dots\dots (2)$$

여기서 $\left. \frac{dE}{dx} \right|_{\Delta}$ 는 하한에너지 Δ 값 이하의 에너지 손실만을 고려하는 입사전자의 에너지의 함수로서 제한적 저지능(restricted stopping power)이다. 이 식으로부터 체적소 ΔV 에서 단위 질량당의 흡수된 에너지로 정의되는 흡수선량 D 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$D = \frac{\Delta E}{\rho \Delta V} \dots\dots\dots (3)$$

여기서 ρ 는 물의 밀도 즉, $\rho = 1.0 \text{ g/cm}^3$ 이다. 이와 같은 과정에 의하여 몬테칼로 계산이 진행되는데, 본 연구에서는 조사면 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 에서는 천만개의 입사전자에 대하여 계산하였고, 계산결과의 통계적 요동을 줄이기 위하여 조사면의 크기에 따라 전자수도 증가시켜 $15 \times 15 \text{ cm}^2$ 와 $20 \times 20 \text{ cm}^2$ 에서는 각각 삼천만개와 오천만개의 입사전자에 대하여 계산하였다.

5. 전자선의 측정

본 연구에서 사용한 6 MeV 전자선의 발생장치는 의료용 6 MV 선형가속기(모델 : ML6M, Mitsubishi co., Japan)

이며, 물 속의 흡수선량 분포의 측정에 이용된 검출기는 체적이 작고 감도가 좋은 반도체 검출기(Scanditronix co., Sweden)이다. 측정과정은 이 검출기를 3차원 이동장치를 내장한 $50 \times 50 \times 50 \text{ cm}^3$ 의 물팬텀 속에 위치시키고 RFA-300 (Scanditronix co.) 장치를 통하여 검출기를 원격조작 하였으며 측정값의 기록은 이 장치에 연결된 컴퓨터를 이용하였다. 깊이선량율의 측정에서는 6 MeV 전자선의 물에서의 실비정(practical range)이 4 cm 이내임을 감안하여 최대 측정깊이를 물팬텀의 표면으로부터 5 cm로 정하였으며, 빔측면도는 6 MeV 전자선의 최대선량 깊이인 1.4 cm에서 10×10 , 15×15 , 그리고 $20 \times 20 \text{ cm}^2$ 의 조사면에 대하여 측정하였다.

III. 결 과

Fig. 1은 몬테칼로 계산과 측정으로 얻어진 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 조사면에 대한 깊이선량율이다. 이 그림에서 보여지듯이 계산된 깊이선량율 곡선은 표면영역과 최대선량 영역 그리고 이보다 깊은 영역에서 측정값과 잘 일치함을 알 수 있다. 이것은 우리연구의 몬테칼로 계산에서 입사전자들의 에너지를 단일 에너지로 간주하지 않고 저에너지와 고에너지의 요소를 고려한 에너지 분포로부터 표본추출했기 때문이다. 일반적으로 저에너지 전자들은 표면영역의 선량에 대부분 기여하며 고에너지 전자들은 깊은 영역의 선량에 기여하기 때문에 만약 전자선의 에너지를 단일 에너지로 간주하고 몬테칼로 계산을 수행하면 그 결과는 이러한 이유로 인하여 표면영역과 깊은 영역에서 측정값과 차이를 보인다. 깊이선량율의 몬테칼로 계산은 이 그림에 나타낸 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 조사면 이외에도 15×15 와 $20 \times 20 \text{ cm}^2$ 에 대해서 수행되었는데 이 그림에 나타난 통계적 요동의 범위에서 측정값과 잘 일치함을 확인하였다. 그리고 Fig. 2는 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 의 전자선 조사면에 대한 빔측면도의 계산과 측정의 결과이다. 이 그림은 전자선

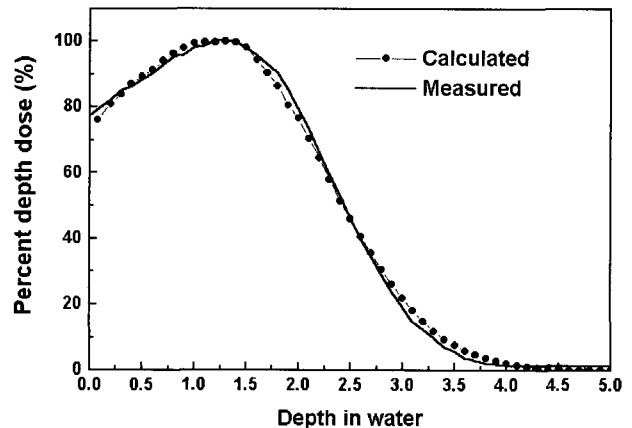


Fig. 1. Measured and calculated percent depth dose curves for a $10 \times 10 \text{ cm}^2$ field size.

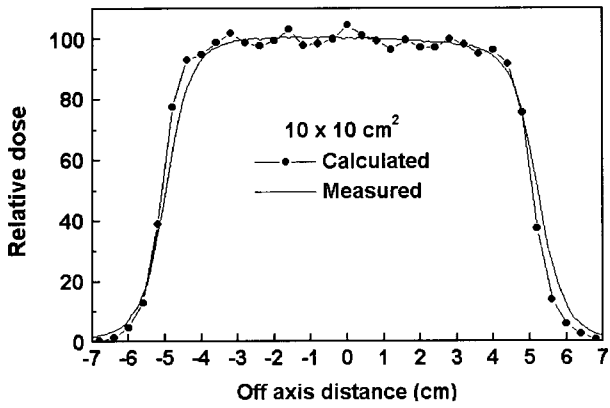


Fig. 2. Measured and calculated beam profiles for a $10 \times 10 \text{ cm}^2$ field size at the depth of dose maximum in a water phantom.

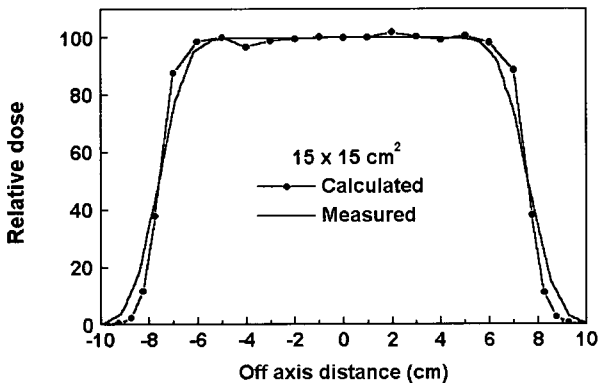


Fig. 3. Measured and calculated beam profiles for a $15 \times 15 \text{ cm}^2$ field size at the depth of dose maximum in a water phantom.

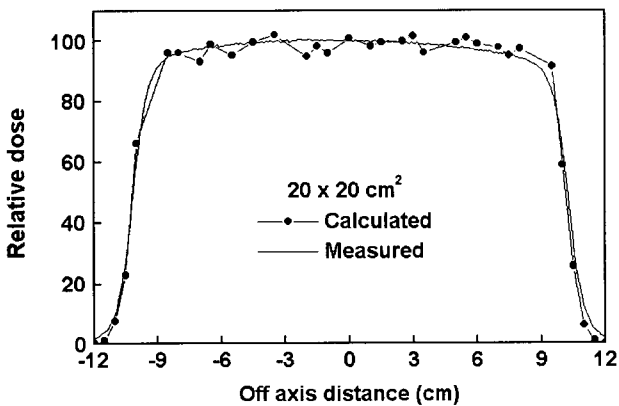


Fig. 4. Measured and calculated beam profiles for a $20 \times 20 \text{ cm}^2$ field size at the depth of dose maximum in a water phantom.

조사면의 중심영역에서의 흡수선량값을 100%로 일반화하고 축방향 거리의 함수로서 나타낸 그래프이다. 마찬가지로

Fig. 3과 Fig. 4는 각각 15×15 와 $20 \times 20 \text{ cm}^2$ 에 대한 빔측면도의 계산과 측정결과이다. 이들 빔측면도의 계산 결과는 통계적 요동이 다소 포함되어 있지만 측정값과 잘 일치함을 알 수 있다. 이 그림들에서 계산값이 측정값과 많은 차이를 보이는 영역은 조사면의 가장자리 영역이다. 이 영역에서의 빔측면도는 계산값의 경우에 급격한 감소를 보이는데 측정값은 완만한 감소를 보인다. 이러한 차이가 발생하는 이유중의 한가지는 팬텀표면에서 전자들의 각 분포와 관계가 있다. 선형가속기의 실제 전자선은 가속관의 출구로부터 가속기의 여러 가지 기하구조들과 상호작용하여 외부로 방출되므로 불펜텀의 표면에 입사하는 전자들은 제각기 난잡한 방향분포를 가질 것이다. 따라서 측방향으로 흩어지는 전자들의 기여로 인하여 실제 전자선 조사면의 가장자리 영역의 선량분포는 급격히 감소되지 않으며 측방향 거리에 따라 완만한 감소를 보인다. 그러나 몬테칼로 계산에서는 단순한 점선원의 모형을 적용하였기 때문에 조사면의 경계면에서 선량분포가 측정에 의한 값보다 급격한 감소를 보였던 것으로 해석된다. 다른 한가지의 원인으로서는 실제 전자선 조사면에는 가속기의 출구에서 방출된 전자들이 전자선용 콘에 충돌하여 발생된 X-선을 고려할 수 있다. 이 X-선은 대부분 전자선용 콘의 종단에 위치한 전자선 차폐체로부터 발생되므로 조사면의 가장자리로 입사할 가능성이 가장 크다. 따라서 실제 전자선 조사면의 경계면에서는 이 X-선의 기여로 인하여 흡수선량의 증가가 나타나게 된다. 결과적으로 이 두 가지의 영향을 모두 고려하지 않은 몬테칼로 계산결과가 빔의 경계면 영역에서 측정값과 차이를 보인 것으로 해석된다. 따라서 보다 정확한 계산결과를 얻기 위하여 앞으로 선원의 모형에 대한 많은 연구가 필요함을 보여준다. 한편, 이 결과에서 통계적 요동은 조사면의 크기가 증가할수록 더욱 커짐을 알 수 있는데, 이것은 조사면의 크기가 증가할수록 계산영역에 도달하는 전자의 수가 감소되어 통계적 요동이 증가한 것이다. 따라서 큰 조사면에 대한 계산에서는 계산에 이용되는 입사전자의 수를 더욱 증가시킴으로써 통계적 요동을 줄일 수 있다.

IV. 결 론

서론에서 제시한 바와 같이 본 연구는 몬테칼로 계산의 임상적 응용을 위한 시도이다. 본 논문의 결과에서 나타난 바와 같이 깊이선량률의 계산값은 측정값과 잘 일치하였으며, 빔측면도의 계산값은 통계적 오차를 포함하였지만 측정값과 근사적으로 일치하였다. 여기서 빔측면도의 몬테칼로 계산에서 통계적 오차가 발생하는 이유들을 제시하면 다음과 같다. 먼저 계산에 이용된 입사전자의 수, 즉 계산의 history와 관계가 있다. 통계법칙에 의하면 계산결과와 통계적 오차는 계산의 history의 제곱근에 반비례한다. 따라서 통계적 오차를 반으로 줄이려고 한다면 계산량은 4배로 증가시켜야 한다. 그러나 총 계산

시간은 history에 비례하여 증가하기 때문에 history의 결정은 일반적으로 경험적으로 정해진다. 그리고 팬텀내의 계산 영역의 체적도 통계적 오차와 관계가 있다. 선량계산의 체적요소를 크게 할수록 계산값의 통계적 오차는 줄어들게 된다. 이것은 작은 측정기보다 큰 측정기가 감도가 좋고 측정값의 재현성이 우수한 것과 같은 원리이다. 그러나 계산영역을 너무 크게 설정하면 계산값의 공간적 분해능이 감소되어 조사면의 가장자리 영역과 같이 선량이 급격하게 변화하는 위치에서의 선량평가를 정확하게 할 수 없는 단점이 있다. 따라서 계산의 통계적 오차를 줄이기 위해서는 계산의 history를 증가시키는 것만이 유일한 대안이라고 할 수 있다. 본 연구의 경우에 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 의 조사면에 대하여 천만개의 전자를 계산하였는데, 이 때 소요된 시간은 400 MHz 개인용 컴퓨터에서 약 6시간이었다. 이와 같은 계산시간은 현재로서는 임상적 응용에는 부적절하다는 것을 알 수 있다. 그러나 최근 컴퓨터의 발전 속도로 미루어 수년 안에는 이러한 계산을 수분 이내로 단축시킬 수 있을 것으로 기대할 수 있다. 이 외에도 몬테칼로 계산의 속도와 관련된 변수들은 더욱 많은데, 특히 계산코드의 구조와 계산의 기하학적 구조와 밀접한 관계가 있다. 즉 몬테칼로 계산코드의 알고리즘을 일부 변경함으로써 계산속도의 향상을 기대할 수 있으며 계산의 기하구조를 보다 단순화함으로써 계산시간을 단축시킬 수 있다. 그러나 이러한 방법들은 계산코드의 구조를 정확하게 분석함으로써 가능하지만 현재 이러한 부분에 대한 연구는 충분히 이루어지지 않고 있다고 생각한다.

본 연구의 결과에서 지적되는 다른 한가지는 빔측면도의 계산결과에서 빔의 가장자리 영역에서 측정값과의 불일치이다. 이것은 앞서 제시되었듯이 계산에 이용된 선원의 모델과 관계가 있다고 할 수 있다. 본 연구에서 취한 선원의 모델은 거리 역제곱법칙에 따라 입자의 강도와 입사각이 결정되는 점선원 모델로서 조사면 안에서의 입자수의 분포는 균일한 것으로 가정되었다. 그러나 실제 선형가속기의 전자선은 가속기의 창으로부터 산란박과 필터 그리고 전자선용 콘을 통과하는 과정에서 조사면 내부

의 입자분포가 균일하지 않을 수 있다. 또한 실제 전자선 조사면에는 오염된 X-선의 성분이 포함되어 있기 때문에 이들의 기여를 포함하지 않은 본 계산에서 측정값과의 차이가 발생한 것으로 해석된다.

결론적으로 본 연구에서 수행한 전자선의 선량분포의 계산은 몬테칼로 계산의 임상적 응용을 위한 기초 연구로서 충분한 가치가 있다고 생각된다. 본 연구와 관련하여 계속되는 연구로서 인체내 불균질 조직에 대한 몬테칼로 계산을 제시할 수 있는데, 본 연구의 수행에서 얻어진 경험들이 중요하게 작용할 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

1. 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).
2. Iwan Kawrakow, Matthias Fippel, and Klaus Friedrich, 3D electron dose calculation using a Voxel based Monte Carlo algorithm(VMC), Med. Phys., 23:445 (1996).
3. Paul J. Keall, Peter W. Hoban, Superposition dose calculation incorporating Monte Carlo generated electron track kernels, Med. Phys., 23:479(1996).
4. 이정옥, 김승근, 가우시안 근사를 이용한 6 MeV 전자선의 에너지분포에 관한 연구, 대한방사선 기술학회지, 22:54(1999).
5. SLAC Report 265 : The EGS4 Code System, Stanford Linear Accelerator Center, (1985).
6. 이성아, 이정옥, 문성록, et. al, 6 MeV 전자선의 측정과 모의계산에 대한연구, J. Kor. Soc. Ther. Radiol, 13:285(1995).
7. Jenkins T. M., Rindi A. : Monte Carlo Transport of Electrons and Photons, Plenum, New York, 323-325 (1988).