

모델기반 광자선량 계산방식을 사용하는 전산화치료계획장치의 모델변수 결정에 있어 몬테카를로 모사법에 의해 유도된 방사선 물리량의 직접 적용 가능성에 대한 연구

한림대학교 의과대학, 한림대학교 성심병원 방사선종양학과

강세권 · 조병철 · 박희철 · 배훈식

모델 기반으로 광자선 선량을 계산하는 전산화치료계획장치를 취역검사(commissioning)하기 위해서는 많은 파라미터들을 조절해가면서 측정된 심부선량 및 가로방향선량분포 등을 맞추어야 한다. 우리는 몬테카를로 전산모사를 이용하여 Pinnacle³ 시스템의 취역검사에 필요한 광자선의 에너지 스펙트럼, 오염 전자(contaminant electron), 축외선질연화(off-axis softening) 및 입자 유량 증가 등을 기술하는 파라미터들을 구하였다. 몬테카를로 계산을 통해 실험으로는 측정이 쉽지 않은 이러한 양들의 변화량을 알 수 있었으나 축외선질연화 및 입자 유량 증가 변수의 경우에는 Pinnacle³ 시스템을 이용한 계산과 측정값에 불일치를 보였다. 전산화치료계획장치의 취역검사에 몬테카를로 방식으로부터 얻은 파라미터 값을 그대로 이용하는 문제는 추가 연구가 필요하다.

중심단어: 전산화치료계획장치, 취역검사, 몬테카를로 전산모사, convolution/superposition

서 론

3차원 전산화치료계획장치 (Radiotherapy treatment planning system: RTPS)에서의 광자선 선량계산은 convolution/superposition 알고리즘을 이용하고 있는데, 이 알고리즘은 선량 계산에 필요한 커널을 몬테카를로(Monte Carlo: MC)방법의 계산으로부터 구해서 단위 질량당 전체 에너지 부여량(Total Energy Released per unit MA: TERMA)과의 convolution을 통해 선량을 계산한다.^{1,2)} Pinnacle³ (Philips Radiation Oncology Systems, 미국) 시스템과 같은 모델기반의 치료계획장치를 취역검사(commissioning)하기 위해서는 1차 광자선의 에너지 스펙트럼, 선형가속기의 헤드 산란성분, 오염 전자량(contaminant electrons) 등 여러 물리적인 변수들에 적절한 수치를 넣어주어, 치료계획장치에 의해 계산된 심부선량 및 가로방향 선량분포가 측정된 자료와 오차범위 내에서 일치하도록 해야 한다.³⁾

이러한 변수 값들은 각각 나름대로의 물리적인 의미를 가지고 있지만, 이러한 양들을 직접 측정하기는 어려워, 비록 많은 반복 시행을 통해 측정값을 가장 잘 재현하는 파라미터 값들을 정할 수 있다해도, 사용자로서는 정해진 변수 값들이 물리적으로 적정한지 판단하기가 쉽지 않다. 반면에 몬테카를로 전산모사(simulation)를 이용하면 선형가속기의 헤드를 지나 팬텀에 선량을 부여하기까지의 광자선을 세밀하게 모델링할 수 있으므로 모델기반의 치료계획장치에 필요한 여러 물리적인 인자들의 적정 값들을 결정하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

이 연구에서는 3차원 방사선 치료계획장치의 하나인 Pinnacle³ 시스템의 취역검사를 위한 변수들의 적정 값을 결정하는 데 있어서 몬테카를로 전산모사를 이용하는 방법의 가능성을 확인해 보고자 하였다.

방 법

광자선 에너지가 6 MV 및 10 MV인 Primus 선형가속기 (Siemens, 미국)의 민조사면(open beam) 상태에 대해 Pinnacle³ 전산화치료계획장치를 취역검사하였다. 각각의 에너지에 대하여 물팬텀(PW, 독일)에서 PTW 0.125cc 이온 선량계를 이용하여 심부선량(percentage depth dose: PDD)과 가로선량분포(transverse profile)를 측정하였다. 측정된 심부

본 연구는 '원자력 연구개발 중장기 사업(M2-0242-01-0002)'의 지원 하에 이루어졌음.

이 논문은 2004년 4월 8일 접수하여 2004년 5월 18일 채택되었음.

책임저자: 조병철, (431-070) 경기도 동안구 평촌동 896

한림대학교 성심병원 방사선종양학과

Tel: 031)380-3911, Fax: 031)380-3913

E-mail: bychul@hallym.or.kr

선량분포에서 선량증가(build-up)영역의 경우에는 정확한 측정치를 이용하기 위하여 평행평판형 전리함의 한 종류인 Attix model 449 전리함(RMI, 미국)을 이용하여 고체물팬텀(Nuclear Associates, 미국)의 표면에서 최대선량깊이(d_{max})를 지난 3.1 cm까지 2 mm 간격으로 측정하고, 3.1 cm에서의 값을 물팬텀에서 측정한 기존의 심부선량값과 동일하게 맞추어 대체하였다.

몬테카를로 전산모사를 위해 BEAM/DOSXYZ를 이용하여 선형가속기의 헤드부를 모델링하였다.⁴⁾ 선형가속기의 타겟에 입사하는 전자선의 반경 방향 세기 분포는 가우시안 함수로 하였으며, 전자선의 직경은 $30 \times 30 \text{ cm}^2$ 조사면 크기에 대해 d_{max} 깊이에서 가로선량분포를 최적으로 모사할 수 있도록 선택하였다. 이를 이용하여 심부선량 및 가로선량분포를 계산하였는데, 몬테카를로 모사에 의한 선형가속기 모델링의 정확도는 계산된 심부선량 및 가로선량분포와 측정 자료를 비교하여 평가하였다.

결과 및 논의

6 MV 및 10 MV의 광자선에 대하여 몬테카를로 전산모사를 이용하여 계산한 심부선량분포는 $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 에서 $30 \times 30 \text{ cm}^2$ 까지의 모든 조사면 크기에서 최대선량깊이 d_{max} 이후 깊이에서는 1% 이내에서 측정값과 일치하였으며, 선량증가영역의 경우에는 2% 이내에서 일치하였다. 몬테카를로 전산모사로 얻은 가로선량분포는 1% 이내에서 측정과 일치하였고, 반음영(penumbra) 영역에서의 오차는 1 mm 이내이었다. 측정값과 몬테카를로 전산모사 결과 사이의 이러한 차이는 선량 계산의 최대 오차가 2% 이내이고, 고선량 경사면 영역(high-dose gradient region)에서는 2 mm 이내이어야 한다는 ICRU⁵⁾의 권고를 충족시키는 것이어서, 선형가속기에 대한 몬테카를로 모델링은 전산화치료계획장치를 취역검사하기 위한 준비로서 충분한 것으로 판단되었다.

1. 에너지 스펙트럼(Energy spectrum)

Pinnacle³ 시스템의 취역검사를 위해서는 제일 먼저 방사선 치료에 이용하는 선형가속기의 일차 광자선(primary photon beam)의 에너지 스펙트럼을 입력시켜야 하는데, 이러한 스펙트럼을 직접 측정하는 것은 쉽지 않다. 몬테카를로 전산모사는 이러한 점에서 매우 유용해서 전산모사를 통해 SSD=100 cm의 물팬텀 표면에서 Primus 선형가속기의 6 MV 및 10 MV에 대한 1차 광자 스펙트럼을 구하였다.

Pinnacle³ 시스템에서 이용되는 스펙트럼은 에너지 간격

이 일정하지 않은 커널에 기반을 두고 있다. 이렇게 에너지 구간 폭(bin)이 일정하지 않아서 혼란을 야기하기도 하였는데, 취역검사를 위해 넣어주어야 하는 에너지 스펙트럼이 단위 에너지당 광자수인지 아니면 각각의 에너지 구간 폭 내에서의 광자수인지 하는 것이다.⁶⁾ 만약 입력해 주어야 하는 스펙트럼이 에너지 구간 폭 내에서의 광자수 형태라면, 몬테카를로 전산모사로 얻게되는 스펙트럼은 단위 에너지당 광자수를 결과로 주기 때문에 이 스펙트럼 결과를 에너지 구간 폭 내에서의 값으로 환산하여 입력하여야 한다. 이 문제에 대해 Pinnacle³ 시스템 제작사의 자료에 의하면, 필요한 에너지 스펙트럼은 다음과 같다.⁷⁾ 에너지 스펙트럼에서의 구간별 에너지를 $E_1, E_2, \dots, E_{n-1}, E_n, E_{n+1}, \dots, E_{max-1}, E_{max}$ 라고 할 때, 에너지 구간 폭은 각각 $(E_2-E_1), (E_3-E_1)/2, \dots, (E_{n+1}-E_{n-1})/2, \dots, (E_{max}-E_{max-1})$ 으로 설정되고 해당 구간의 광자수는 단위 에너지당 일차 광자수를 이용한다. Pinnacle³은 여러 물리량들의 계산 시 에너지 구간 폭이 다른 것을 내부적으로 고려해서, 예를 들어 평균 에너지의 경우 $\bar{E} = \sum \phi_i E_i \Delta E_i$ 으로 계산한다. 여기서 ϕ_i 는 단위 에너지당 일차 광자수, ΔE_i 는 에너지 E_i 에서의 구간 폭이다. 평균에너지에 대한 이러한 계산 방식은 Pinnacle³시스템의 축외선질연화(off-axis softening) 옵션 창에서 사용자가 직접 확인해 볼 수 있다.

Fig. 1은 Siemens Primus 선형가속기에 대해 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 의 조사면 크기에서 몬테카를로 전산모사를 수행하여 얻은 6 MV 및 10 MV 에너지의 스펙트럼으로, 일차 광자선에 대한 스펙트럼을 얻기 위하여 광자선의 중심축에서 반경 2

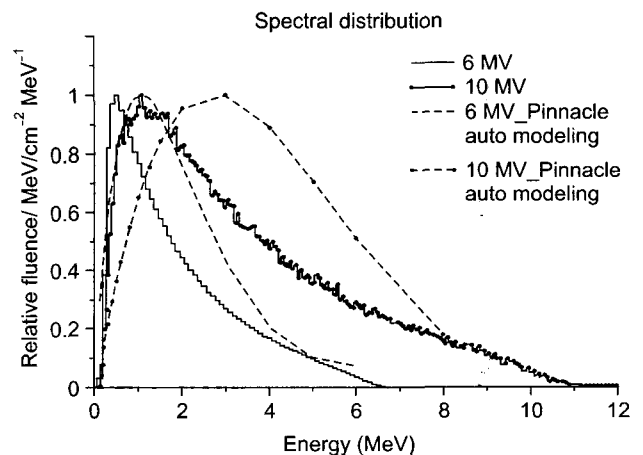


Fig. 1. Primary energy spectra from the linac head derived from the MC simulation and auto modeling of Pinnacle³ for 6 and 10 MV.

cm 이내의 영역에 대해서만 얻은 것이다. 심부선량 측정곡선과의 비교를 통해 Pinnacle³ 시스템에서 auto 모델링으로 얻은 에너지 스펙트럼도 같이 나타내었으며, 비교를 위해 최대값은 1로 규격화하였다.

몬테카를로 전산모사로부터 얻은 스펙트럼과 Pinnacle³ 시스템에 의한 결과는 상당한 차이를 보이는데, 이것은 팬텀에서 깊이방향에 따른 선량 계산 커널의 경화(hardening) 현상을 Pinnacle³ 시스템에서는 고려하지 않기 때문으로 판단된다.⁸⁾ 광자에 의한 선량은 TERMA $T(E, r)$ 와 광자 선량 커널 $K(E, r)$ 의 convolution으로 계산된다. 몬테카를로 전산모사는 실질적으로 TERMA와 커널의 경화를 모두 고려하는 것으로 볼 수 있는 반면, Pinnacle³ 시스템은 TERMA의 경화만 고려한다. 그러나, 서로 다른 두 에너지 스펙트럼으로부터 얻은 심부선량곡선은 약 1% 내에서 일치하는데, 이것은 심부선량이 1차 광자의 에너지 스펙트럼에 비교적 민감하지 않기 때문으로 보인다.

2. 오염전자(Electron contamination parameters)

Pinnacle³ 시스템에서 오염전자 항목은 측정된 심부선량과 계산값 사이에 보이는 선량증가(build-up) 영역에서의 차이를 없애기 위해 만들어진 것으로, 오염전자 항목을 이용하여 광자선에 의한 선량에 차이에 해당하는 선량을 더해 주는 방식이다.

몬테카를로 전산모사는 오염전자만에 의한 심부선량을 별도로 구할 수 있어서 오염전자에 의해 선량이 전달될 수

있는 최대 깊이를 포함하여 그 선량값들을 알 수 있다. Pinnacle³ 시스템은 오염전자에 의한 선량을 모델링하는 데 있어서 오염전자만에 의한 최대 선량 깊이까지는 대체로 선형으로 변화하며, 그 이후 깊이에서부터는 다음과 같은 변형된 지수함수 형태를 갖는 것으로 간주한다.^{4,6,9)}

$$F(d) = \frac{ECD_{10 \times 10}}{SF} \frac{e^{-Kd} - e^{-Kd_m}}{1 - e^{-Kd_m}} \quad (1)$$

여기서 파라미터들은 각각

- $ECD_{10 \times 10}$ = $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 조사면 크기에서 오염전자에 의한 표면 선량
- SF = 표면 근처에서의 선형구간을 나타내기 위한 스케일 인자
- K = 깊이에 따른 계수
- d_m = 오염전자의 최대 도달 깊이

이다. 일차광자선 및 오염전자선에 의한 심부선량을 몬테카를로 전산모사를 통해 구한 다음, 위의 식 (1)에 맞추어 필요한 파라미터 값들을 구하였다. 한 예로서 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 조사면 크기에서 10 MV 에너지의 깊이에 따른 오염전자에 의한 선량이 Fig. 2에 있다.

한편, 팬텀 표면에서 조사면 크기에 대하여 오염전자에 의한 선량 기여를 보정하기 위하여 Pinnacle³ 시스템이 이

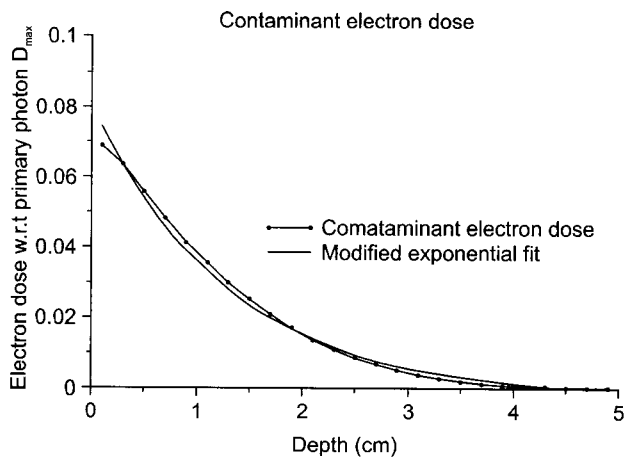


Fig. 2. MC calculated contaminant electron dose for 10 MV with a $10 \times 10 \text{ cm}^2$ field size. A modified exponential function is used for the fit of the electron depth dose. The linear part of the near surface is negligible in our cases.

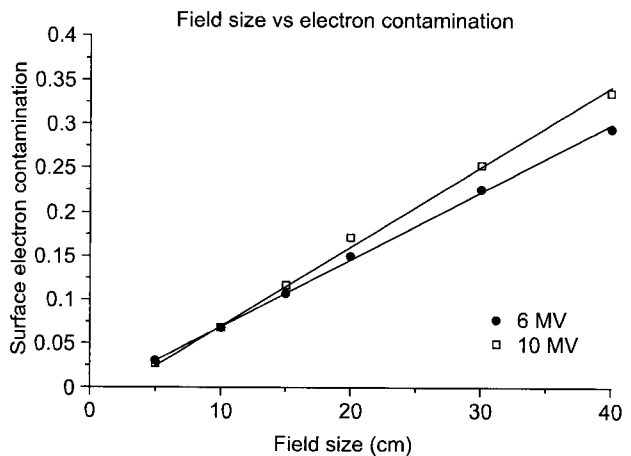


Fig. 3. The surface electron contaminations vs. field size for 6 and 10 MV. The contamination increases linearly with the field sizes.

용하는 관계식은 다음과 같다.

$$F_{FS}(fs) = ECD_{10 \times 10} + C_1 \cdot (fs - 10) + C_2(e^{-C_3 \cdot 10} - e^{-C_3 \cdot fs}) \quad (2)$$

여기서 fs 는 조사면 크기, C_1 , C_2 및 C_3 는 측정값과 맞추어 얻어야 하는 파라미터이다. 몬테카를로 전산모사를 이용하여 6 MV 및 10 MV에서 일차광자선 및 오염전자에 의한 심부선량을 얻고 그로부터 팬텀 표면에서의 오염전자에 의한 선량의 비율을 나타낸 것이 Fig. 3이다. 이 그래프는 광자선에 의한 최대선량을 기준으로 표면에서의 오염전자에 의한 선량을 나타낸 것으로, 6 MV의 경우, $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 이하에서는 3% 이하이고, $40 \times 40 \text{ cm}^2$ 에서는 30% 수준으로 증가하였다. 10 MV의 경우에는 $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 에서 3%, $40 \times 40 \text{ cm}^2$ 에서 34%이었다. 두 에너지 모두 오염전자에 의한 표면선량과 조사면 크기 사이에는 선형관계가 성립하였다(상관계수 0.999 이상).

몬테카를로 전산모사로부터 얻은 이러한 변수값들을 이용하여 Pinnacle³ 시스템에서 계산한 심부선량분포는 측정된 선량분포와 2% 이내에서 일치하였다. Bedford 등⁶⁾은 몬테카를로 전산모사로부터 얻은 오염전자 변수값을 이용하여 Pinnacle³ 시스템에서 얻은 심부선량분포가 측정된 분포와 큰 차이가 있었다고 보고하였다. 이는 그들의 측정 방식에 한 원인이 있는 것으로 판단된다. 그들은 에너지가 보정된(energy-compensated) 유형의 광자선 다이오드 선량계를 이용하여 심부선량분포를 측정하였는데, 이러한 형태의 다이오드는 산란전자에 의한 성분을 차단하고 광자선에 의한 선량만을 검출하는 목적에 이용된다. 본 연구에서 선량증가 영역의 심부선량분포를 측정하는 데 이용한 Attix 전리함은 산란 전자가 포함된 6 MV 광자선의 선량증가 영역에서 1% 이내의 선량 측정 정확도를 보인다.¹⁰⁾

3. 축외선질연화(Off-axis softening parameter)

평탄화 필터는 세로 단면이 삼각형 꼴인 관계로 필터의 중심에서 가장자리로 감에 따라 필터의 두께가 얇다. 따라서 이 필터를 지날 때 중심축에서 축외로 감에 따라 저에너지 부의 광자수가 고에너지 부의 광자수에 비해 상대적으로 증가하는 소위 축외선질연화(off-axis softening) 효과를 보인다. 이 효과를 기술하기 위하여 Pinnacle³ 시스템은 다음과 같은 식을 이용하여 각각의 축외(off-axis) 위치에서의 스펙트럼 비중을 감소시킨다.

$$W'_i = W_i \times \left(1 + \left(\frac{E_i}{E_{\max}} \right) \right)^{-S\theta} \quad (3)$$

여기서 W_i 는 광자선의 중심축(central axis)에서 에너지가 E_i 인 에너지 구간 폭(bin)의 스펙트럼 비중, θ 는 스펙트럼을 결정하고자 하는 축외 위치에서의 광자선과 중심축사이의 각도이고, S 는 축외선질연화 변수로서 사용자가 결정해 주어야 하는 값이다. 축외 거리가 증가함에 따라, 즉 θ 가 증가함에 따라 각각의 위치에서의 에너지 스펙트럼의 비중은 감소되는데, 고에너지 빔으로 갈수록 비중의 감소가 커져서, 결과적으로 축외로 감에 따라 저에너지의 비중이 상대적으로 증가하도록 되어있다. 위 식에서 축외선질연화 효과는 변수 S 에 따라 증가한다.

몬테카를로 전산모사를 통해 필요한 S 값을 결정하기 위하여 팬텀 표면인 SSD=100 cm 위치에서 일차광자선의 에너지 스펙트럼을 구하였다. 기본 아이디어는 중심축과 특정 축외 거리(즉 θ)에서의 스펙트럼을 몬테카를로 전산모사로부터 구한 다음, 중심축의 스펙트럼에 식 (3)을 적용하여 θ 에서 구한 스펙트럼을 잘 맞출 수 있도록 S 를 정하는 것이다. Fig. 4는 축외 거리가 2.5~3.5 cm 구간(3 cm로 표기)과 13.5~14.5 cm 구간(14 cm로 표기)에서 전산모사 및 식 (3)으로 얻은 스펙트럼을 나타낸 것인데, 비교를 위해 최대값을 규격화하였다. 변수 S 는 $S=25$ 로서 Pinnacle³ 시스템에서 최대 선택할 수 있는 값, 즉 축외선질연화 효과를 최대로 한 것이다. 축외 거리 3 cm의 스펙트럼의 경우, 선

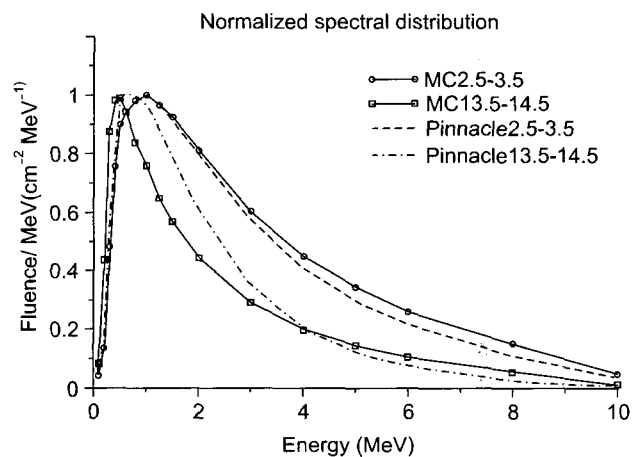


Fig. 4. Normalized spectral distributions for 10 MV the MC simulation and Eq. (3) for two off-axis distances of 3.0 and 14.0 cm from the central axis with a 1.0 cm width. The S parameter in Eq. (3) is set to 25 to magnify the softening effect.

질연화 효과가 크지 않아서 계산된 스펙트럼과 전산모사로 얻은 스펙트럼이 대체로 일치하고 있다. 그러나 14 cm의 경우, Pinnacle³ 시스템의 방식인 식 (3)을 이용한 스펙트럼은 전산모사에 의한 실제 스펙트럼에 비해 1~3 MV에서는 크고 ~0.5 MV 이하에서는 작아서, 중간 에너지 이하에서의 선질연화에 대해 식 (3)이 적절치 않음을 알 수 있다. Pinnacle³ 시스템의 축외선질연화 기술이 적절하지 않다는 것은 축외 거리에 따른 평균에너지의 변화를 통해서도 알 수 있다. 몬테카를로 전산모사에 의하면 평균에너지는 축외거리를 따라 거의 선형으로 감소한다. Pinnacle³ 시스템 역시 평균에너지의 감소를 나타내나 축외 거리에 따라 그래프를 그려보면 아래로 볼록한 패턴을 보인다. 한 위치에서의 평균에너지는 스펙트럼에서 에너지에 따른 입자 비중(weight)과 그에 해당하는 각각의 에너지를 곱해서 합한 양이므로 전산모사와 Pinnacle³ 시스템의 이러한 차이는 축외 거리에 따른 스펙트럼 분포의 변화량이 다르다는 것을 의미한다.

선량증가 영역은 저에너지 광자선에 의해 큰 영향을 받으므로, 중간에너지 이하의 광자 스펙트럼에 대해 Pinnacle³ 시스템의 축외선질연화 효과 기술이 미흡하다는 것은 축외 거리가 크고 얇은 깊이에서의 가로방향 선량분포 계산에 영향을 미칠 수 있을 것으로 보인다. 축외 거리에 따른 스펙트럼의 변화를 좀 더 정확히 기술하기 위해서는 식 (3)을 개선할 필요가 있다고 판단된다.

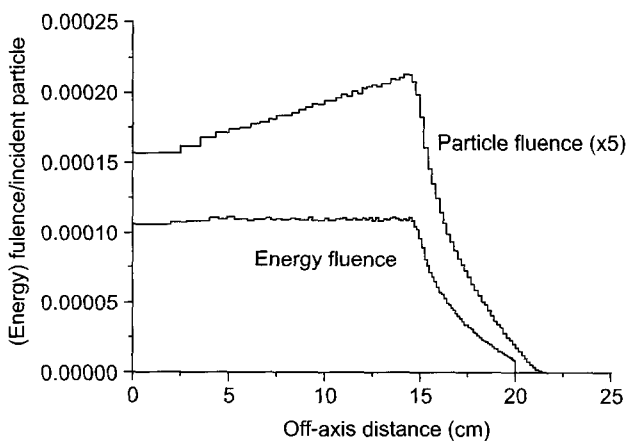


Fig. 5. Energy and particle fluencies obtained from the MC for 10 MV with field a size of 30×30 cm². The particle fluence (×5) shows a steep increase, while the energy fluency remains almost constant along the off-axis distance.

4. Cone 반경과 입자유량증가(Cone radius and fluence increase/cm parameters)

Pinnacle³ 시스템에서 ‘cone 반경’ 변수는 축외(off-axis) 방향으로의 반경을 정하는 것으로, 이 반경 내에서는 입자 유량에 변화가 있고 그 이후는 일정한 값을 유지하도록 한다. ‘cone 반경’과 ‘입자 유량 증가’는 빔을 가로지르는 방향을 따라 초기 입사하는 유량을 모델링해주기 위한 것이다.

‘유량증가/cm’ 변수의 값은 팬텀 표면 위치에서 가로방향에 대해 몬테카를로 전산모사를 통해 계산한 입자 유량에서 선형으로 증가하는 부위의 기울기로부터 구한다. Fig. 5는 조사면 크기 30×30 cm²에서 10 MV에 대해 얻은 입자 유량을 나타낸 것으로 비교를 위해 에너지 유량도 함께 보였다. 입자유량은 축외 거리에 따라 급격히 증가하는 반면, 에너지 유량은 거의 일정한 패턴이다. 몬테카를로 전산모사로부터 얻은 입자유량의 증가 값을 Pinnacle³ 시스템에 적용하면, 가로방향 선량분포는 축외 거리에 따라 급격히 증가해서 가로방향 선량분포를 기술하지 못하게 되는데, 이러한 현상은 이미 보고된 바가 있다.⁶⁾ 이러한 현상의 원인 중 한 가지는 앞에서 언급한 바와 같이 Pinnacle³ 시스템에서 낮은 에너지 및 중간 에너지 영역에 대한 축외선질연화(off-axis softening) 과정이 적절하게 기술되지 못하기 때문으로 추측된다. 낮은 에너지 대에 대해서는 축외선질연화의 정도가 불충분하게 기술되고 중간 에너지 대에 대해서는 과도하게 기술됨으로써, 축외 거리를 따라 어느 한 평균 에너지 값을 기술하는 데 있어서 입자 유량이 실제보다 적은 양으로 나타나기 때문이다. 다른 원인으로는 선량 계산을 위한 커널의 연화(softening)가 Pinnacle³ 시스템에 반영되어 있지 않다는 것을 들 수 있으며, 마지막으로 Pinnacle³ 시스템에서의 ‘입자 유량의 증가’ 변수가 실제 유량의 증가 외에 다른 효과까지 포함하고 있을 수 있는 가능성이 있다. 입자 유량의 축외 거리에 따른 증가는 더 논의가 필요하다.

5. 평탄화 필터 산란 변수(Flattening filter scatter source parameters)

외부 조사면(out of field)을 모델링하기 위해 Pinnacle³ 시스템에는 2개의 변수가 있는데, 하나는 유효원천크기(effective source size)이고, 다른 하나는 평탄화 필터 산란 변수로서 이들을 각각 조정해서 가로선량분포(cross profile)의 반응영 부위와 그 바깥 꼬리부(tails)를 맞추도록 되어있다. 몬테카를로 전산모사에서 입사 전자선의 반치폭(FWHM)을

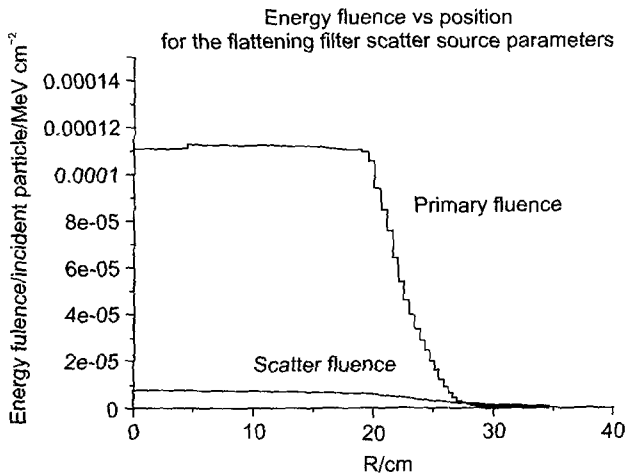


Fig. 6. Primary and scatter photon fluencies obtained from the MC for 10 MV with a field size of $60 \times 60 \text{ cm}^2$.

조절하여 측정된 가로선량분포를 잘 맞추도록 하였으며, 이 때의 반치폭을 유효선원크기 인자로 사용하였다.

평탄화 필터는 산란 광자선의 선원으로 생각할 수 있는데, Pinnacle³ 시스템은 이 필터로부터 산란되는 광자의 가로방향 분포를 가우시안 곡선으로 기술한다. 몬테카를로 전산모사로부터 팬텀 표면에서 축외(off-axis) 위치에 따른 산란 광자선의 에너지 유량을 구하고, 이를 가우시안 함수로 맞추어 반치폭을 얻은 다음, 이를 비례관계를 이용하여 선형가속기의 평탄화 필터위치에서의 폭으로 환산한 값을 산란 광자선의 폭으로 이용하였다. 또한 중심축 위치에서 1차 광자선의 에너지 유량을 기준으로 산란 광자선의 상대 값을 구하여, 이를 취역검사에 필요한 산란광자선의 상대 높이로 정하였다(Fig. 6). 이렇게 구한 값들은 10 MV에서 높이가 0.07, 폭이 2.4이었고, 6 MV에 대해서는 각각 0.05와 2.4이었다. 이 값들을 이용하여 Pinnacle³ 시스템에서 계산한 가로방향 선량분포는 두 에너지에서 모두 측정과 1% 이내에서 일치하였다.

결 론

Pinnacle³ 시스템과 같은 모델 기반의 선량계산 시스템에 이용되는 커널은 몬테카를로 계산을 통해서 구하고 있으므로, 전산화치료계획장치의 취역검사에 있어서 필요한 양들을 몬테카를로 방법으로 선형가속기를 모델링하여 얻을 수 있지 않을까 생각하였다. 이 논문에서는 Siemens Primus 선형가속기의 빔 특성을 몬테카를로 전산모사로 모델링하고

이로부터 민조사면(open beam)에서 Pinnacle³ 시스템을 취역검사를 위해 필요한 파라미터 값들을 얻어보았다. 몬테카를로 전산모사를 통해서 에너지 스펙트럼과 오염 전자선에 의한 선량비율 등 측정이 쉽지 않은 여러 양들을 알 수 있었으며, 이것은 전산화치료계획장치를 취역검사를 하는 과정에서 사용자가 여러 값들을 결정하는 데 지침으로 사용될 수 있다. 그러나, 축외 거리에 따른 선질연화 변수와 유량 증가 변수는 몬테카를로 계산으로부터 얻은 값들이 취역검사에 적당치 않았는데, 이것은 Pinnacle³ 시스템에 선량 계산의 커널 경화(hardening)가 채택되어있지 않고, 또한 구현된 축외선질연화가 적절치 않기 때문으로 판단된다. 이러한 점을 고려하면, 몬테카를로 전산모사를 통해서 얻은 파라미터 값들을 상용의 치료계획 장치의 취역검사에 바로 사용하기 위해서는 치료계획 장치의 선량계산 방식 및 그 작동에 대한 정확한 이해가 선행되어야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Mackie TR, Scrimger JW, Battista JJ: A convolution method of calculating dose for 15-MV x-rays. *Med Phys* 12: 188-196 (1985)
2. Papanikolaou N, Mackie TR, Meger-Wells C, Gehring M, Reckwerdt P: Investigation of the convolution method for polyenergetic spectra. *Med Phys* 20: 1327-1336 (1993)
3. Philips Radiation Oncology Systems, PINNACLE³ Physics Guide, P/N 9201-5067A-ENG Rev. A (Version 6.2b) May 2001
4. Rogers DWO, Faddegon BA, Ding GX, Ma CM, We J, Mackie TR: BEAM: a Monte Carlo code to simulate radiotherapy treatment units. *Med Phys* 22:503-524 (1995)
5. ICRU Report 24: Determination of absorbed dose in a patient by beams of X or gamma rays in radiotherapy procedures. International Commission on Radiation Units and Measurements, Washington, DC (1976)
6. Bedford JL, Childs PJ, Hansen VN, Mosleh-Shirazi MA, Verhaegen F, Warrington AP: Commissioning and quality assurance of the Pinnacle3 radiotherapy treatment planning system for external beam photons. *Br J Radiol* 76: 163-176 (2003)
7. Private communication with Dr. Todd R. McNutt, Philips Radiation Oncology Systems, WI
8. Liu HH, Mackie TR, McCullough EC: Correcting kernel tilting and hardening in convolution/superposition dose calculations for clinical divergent and polychromatic photon beams. *Med Phys* 24:1729-1741 (1997)
9. Starkschall G, Steadham RE, Popple RA, Ahmad S, Rosen II: Beam-commissioning methodology for a three-dimensional convolution/superposition photon dose algorithm. *J Appl Clin Med Phys* 1:8-27 (2000)
10. Gerbi BJ: The response characteristics of a newly designed plane-parallel ionization chamber in high-energy photon and electron beams. *Med Phys* 20:1411-1415 (1993)

The Feasibility Study on the Direct Use of the MC-derived Physical Quantities to Determine the Model Parameters of RTPS with -Model-Based Photon Dose Calculation Algorithm

Sei-kwon Kang, Byung-chul Cho, Hee-chul Park, and Hoonsik Bae

Department of Radiation Oncology, Hallym University College of Medicine

The commissioning of a model-based treatment planning system requires many parameters to fit the measured depth doses and transverse profiles. For the commissioning of the Pinnacle³ system, through the Monte Carlo (MC) simulation, the necessary parameters, including the photon spectrum, contaminant electrons, off-axis softening and fluency of photons, were observed. Through the simulation the parameters contained valuable information, but the calculated results of the Pinnacle³ using the MC-derived parameters showed discrepancies with those measured for the off-axis softening and the fluency of photons. Even though the MC calculation produces reasonable values for the commissioning, the thorough physical basis of the Pinnacle³'s commissioning process is needed in order to directly use the MC derived parameters.

Key Words: RTP commissioning, Monte Carlo, Convolution/superposition algorithm