

비편평화여과기 방사선 빔을 위한 분석적 빔 소스 모델 개발

조 웅¹·Kayla N. Kielar²·Ed Mok²·박 정훈¹·정 원균¹·서 태석¹

¹가톨릭 대학교 의공학교실,

²Department of Radiation Oncology, Stanford University, Stanford, CA

E-mail: tarotblue@gmail.com

중심어 : 비편평화여과기 빔, 치료계획 시스템, 빔 소스모델

서론

최근 편평화 여과기(flattening filter)를 사용하지 않는 신행 방사선 치료용 선형가속기가 방사선 치료 분야에 도입되고 있다. 이는 선량 전달률을 에너지에 따라 2~4배 까지 증가시키고, 갠트리 헤드의 산란선량을 감소시키며, MLC와 collimator로부터 발생하는 누수 선량(leakage dose)도 감소시키는 장점을 보이고 있다. 비(非)편평화여과기 빔의 경우 빔 중심부 선량이 매우 높고 주변부로 갈수록 선량이 감소하는 콘 형태의 선량 분포를 보이는 특징을 보이며, 정확한 선량 분포 형태는 치료기기, 빔 에너지에 따라 달라질 수 있다. 이에 따라 방사선 치료계획 시스템(treatment planning system) 또한 비 편평화여과기 빔에 의한 방사선량 분포를 정확히 모사할 수 있는 기술이 요구되고 있다. 치료계획 시스템은 실측 방사선 분포 데이터를 기반으로 각 선량 분포 특성을 빠르게 재현하는 분석적 모델들을 사용하고 있는데, 특히 빔 소스 모델은 평면상의 선량 분포를 모사하는데 가장 중요한 기술이라 할 수 있다.

본 연구에서는 치료계획 시스템으로의 이식을 목적으로, 비편평화 여과기 빔에 적합한 분석적 빔 소스 모델을 개발하였으며, 고속 최적화 알고리즘을 개발하여 장비 및 에너지에 따라 달라지는 방사선량 분포를 자동으로 모사할 수 있는 기술을 개발하였다.

재료 및 방법

1. 다중 빔 소스 모델 개발

치료 대상의 임의의 한 지점에 도달하는 광자선

플루언스의 양을 계산하기 위한 빔소스 모델로서 우선 3중 소스 모델을 기본 형태로 활용하였다¹. 3중 소스 모델은 선형가속기로부터 나오는 플루언스를 크게 3가지로 구분한다. 첫 번째는 텅스텐 타겟 자체에서 나오는 주방사선(primary radiation)을 의미하며, 점소스(point source) 형태를 가진다. 두 번째는 갠트리 헤드 내의 주 collimator로부터 나오는 산란 방사선원이며, 디스크 형태의 소스 분포를 가진다. 세 번째는 갠트리 내부의 빔 경로 상에 존재하는 텅스텐 타겟, 모니터링 챔버, mirror 등을 거치면서 발생하는 산란 방사선원이며, 분포는 중심에서 멀어질수록 지수함수로 감소하는 형태를 가진다. 여기에 추가적으로 편평화 여과기가 없는 선형가속기에서의 콘 형태의 방사선 분포를 모사하기 위하여 첫 번째 소스원에 Off axis ratio 인자를 적용하였다. 임의의 한 지점에 도달하는 플루언스의 양을 계산하는 수식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} Fluence(x_b, y_b, z_b) = & \int C_p \cdot dA_{src1} \times F_{ISW_src1} \times R(r) \\ & + \int C_{sp} \cdot dA_{src2} \times F_{ISW_src2} \\ & + \int \frac{A_0}{r} \exp(-k \cdot r) \cdot dA_{src3} \times F_{ISW_src3} \end{aligned}$$

여기서 R(r)이 Off axis ratio이며, C_p, C_{sp}, A₀ 는 각 소스의 상대적인 세기를 의미하며, F_{ISW}는 빔 확산(divergence)에 따른 선량 감소를 고려하는 인자이다.

2. 측정 데이터 기반의 빔 소스 모델 인자 최적화

실제 치료 빔의 방사선량 분포와 정확히 일치하는 선량 분포를 만들어 내기 위하여 앞서 기술한 모델의 각 인자들은 실측 데이터를 기반으로 최적의 값이 결정되어야 한다. 우선 각 소스의 상대적인 크기 변수들은 조사야(field size) 크기에 따른 산란 선량 출력인

자 (head scatter output factor)의 계산 값과 실측 값을 이용하여 line search 최적화 알고리즘을 통하여 결정 하였으며, 다음으로 중심축으로부터 거리에 따른 Off axis ratio 값들은 40x40 조사야 크기에서의 방사선량측면도 분포 (dose profile)의 계산 값과 실측 값을 이용하여 같은 최적화 알고리즘으로 결정하였다.

결과 및 고찰

최적화 과정을 통하여 결정된 비 편평화여과기 빔에서의 플루언스의 off axis ratio 인자는 빔 에너지에 따라 Fig. 1과 같이 나타났다.

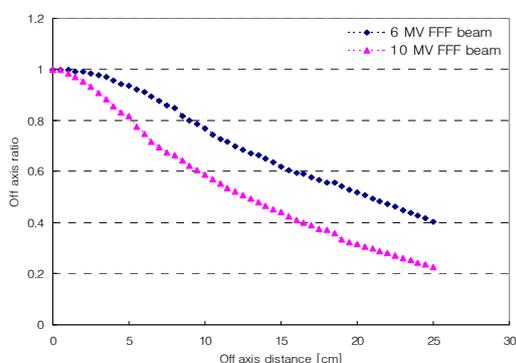


Fig 1. Determined off axis ratio of photon fluence for FFF beam

최적화 된 각 모델 인자들을 이용하여 조사야 크기에 따라 모사된 방사선량측면도 분포 결과는 Fig. 2, Fig. 3과 같이 계산값 및 실측값이 서로 잘 일치하였다.

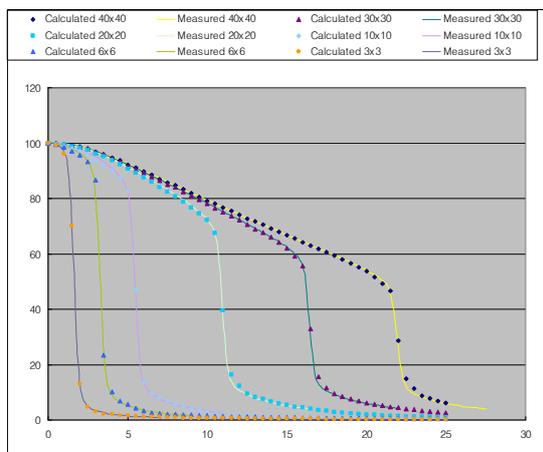


Fig 2. Comparison between measured and calculated dose profile at 10 cm depth for a 6 MV FFF beam on Varian TrueBeam

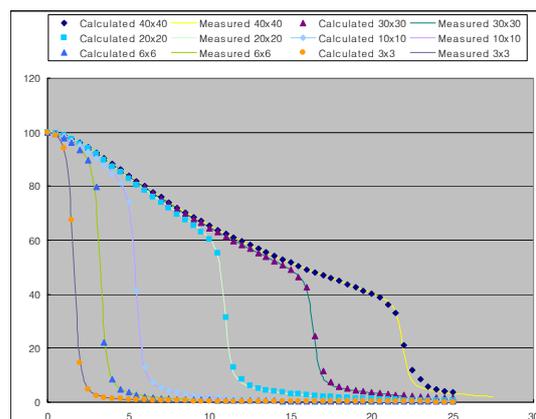


Fig 3. Comparison between measured and calculated dose profile at 10 cm depth for a 6 MV FFF beam on Varian TrueBeam

결론

개발된 비 편평화여과기 빔을 위한 소스 모델링 방법은 실제 측정치와 계산 결과 간에 만족스러운 일치도를 보여주고 있었다. 연구에서 개발된 빔 소스 모델과 최적화 방법은 실제 치료계획 시스템에 그대로 이식이 가능한 실용적인 기술이다. 차후 각 치료기기 회사들이 경쟁적으로 비 편평화여과기 선형가속기들의 개발 및 상품화에 박차를 가하는 추세를 볼 때, 본 연구에서 개발된 기술은 이러한 첨단 선형가속기를 소화해 낼 수 있는 전용 치료계획 시스템의 핵심 기술로서 응용될 수 있으며, 타 방사선 치료계획 시스템에서도 본 기술의 활용이 가능하다. 연구 결과의 빔 소스 모델 기술은 IMRT 및 IGRT기술에서의 선량계산에서도 근간이 되기 때문에 국내 방사선 치료계획 시스템 관련 기술의 다양한 분야에 실질적인 응용이 가능할 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. Y. Yang, L. Xing, A. L. Boyer, Y. Song and Y. Hu, "A three-source model for the calculation of head scatter factors," Med. Phys. 29,2024-2033(2002).