

세로 자기장에서 6 MeV 전자선의 선량분포에 관한 몬테칼로 계산

영남대학교 의료공학연구소, 원광대학교병원 치료방사선과*
 단국대학교병원 치료방사선과[†], 충남대학교병원 치료방사선과[‡],
 동아대학교병원 치료방사선과[§], 전북대학교병원 치료방사선과^{||},
 전북대학교 의과대학 의공학교실[¶], 원광보건대학 방사선과^{**},
 영남대학교 의과대학 방사선종양학교실^{††}

오영기 · 정동혁* · 신교철[†] · 김기환[‡] · 김정기[§]
 김진기^{||} · 김부길[¶] · 이정옥^{**} · 문성록* · 김성규^{††}

측방 산란이 상대적으로 많은 6 MeV 전자선에 대하여 세로 자기장에서 반응영의 변화를 몬테칼로 계산을 이용하여 연구하였다. 전자의 물질과의 상호작용 계산에서 외부 자기장의 효과를 반영하기 위하여 자기장에서 전자의 방향변화에 관한 알고리즘을 개발하여 EGS4 시스템에 삽입하였다. 완성된 코드를 이용하여 점선원 기하구조를 설정하고 SSD 100 cm에서 직경 5 cm인 전자선에 대하여 0-3 T의 세로 자기장이 걸려있는 팬텀속 1.5 cm, 2.0 cm, 2.4 cm 깊이에서의 빔 프로파일을 계산하였다. 자기장의 세기에 따른 반응영의 감소를 나타내기 위해 같은 깊이에서의 기존 반응영의 폭과 자기장에 의한 반응영 폭의 감소 비로 반응영 감소율(PRR)을 정의하였다. 계산결과 팬텀속 1.5 cm, 2.0 cm, 2.4 cm 깊이에 대하여 자기장의 세기가 2 T인 경우에 PRR은 각각 27%, 36%, 36%로 나타났으며, 3 T인 경우에는 각각 46%, 50%, 50%로 나타났다. 0.5 T와 1 T에서는 자기장의 효과가 매우 미약하였다. 이 결과는 6 MeV 전자선의 경우에 2 T 이상의 자기장을 세로방향으로 인가하는 경우에 측방산란된 전자들이 자기장에 의하여 편향되면서 반응영의 폭이 크게 줄어드는 것으로 해석할 수 있다. 결론적으로 전자선치료에서 세로 자기장을 병행하는 경우에 조사면 가장자리의 선량감소가 보상됨으로써 치료효과의 증대를 기대할 수 있다.

중심단어 : 몬테칼로 계산, 반응영, 자기장, 전자선

서 론

전자선에 의한 방사선치료에 있어서 종종 조사 영역 이외의 정상조직에도 많은 선량이 전달되는데, 특히 광자선과의 병행 치료시 조사면의 경계면 부근에서 고선량점을 유발하는 등의 문제가 발생하기도 한다. 이는 전자선의 측방산란에 의한 것으로 이를 줄이기 위한 많은 방법들이 연구되고 있다. 그 중 한 방법으로서, 전자선의 빔 방향으로 자기장을 인가하게되면 전자들의 측방향 속도성분에 자기장에 의한 로렌츠 힘(Lorentz force)이 작용하게되어, 운동 에너지를 변화시키기 않으면서 전자들의 방향을 바

꿀 수 있다. 즉, 전자들의 측방향의 궤도를 왜곡시켜 조사 영역안으로 휘어 들어오게 할 수 있고 따라서 빔 영역 바깥으로 빠져나가는 전자들을 제어할 수 있다는 것이다. 이 방법은 1950년 Bostick¹⁾이 처음으로 주장한 이래 전자선의 반응영 감소를 목적으로 자기장을 이용한 몬테칼로 계산 및 실험이 계속 되고 있다. Nath²⁾는 3 T 정도의 세로 자기장(longitudinal magnetic field)을 이용하면 표면선량의 감소와 반응영의 크기를 줄일 수 있다고 발표하였고, Weinhou 등³⁾은 1 T-4 T의 자기장에 대한 몬테칼로 계산을 통해 이러한 효과를 재차 확인하였다. 최근에는 Bielajew⁴⁾가 3 T-20 T의 자기장에 대한 EGS4 몬테칼로 계산을 통해 전자선의 반응영 영역의 감소를 보여 주었다.

본 연구에서는 전자선의 측방산란 효과를 빔축에 평행한 자기장을 이용하여 어느 정도 제어할 수 있는지를 몬테칼로 방법을 이용하여 고찰하였다. 앞서 언급된 연구들에서는 대부분 20 MeV 이상의 고에너지 전자선에 대해

이 논문은 2002년 10월 11일 접수하여, 2002년 10월 25일 채택됨.
 본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 중·장기 사업 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

책임저자: 오영기, 대구광역시 남구 대명 5동
 영남대학교 의료공학연구소

Tel : 053)620-4539, E-mail : kissforsci@hanmail.net

여 자기장의 효과를 관찰하기 위하여 강한 자기장이 인가되는 경우를 논의하였는데, 그 이유는 고에너지 전자들이 대부분 전방산란을 하기 때문에 자기장의 효과를 명확하게 관찰하기 위해서는 강한 자기장이 요구되기 때문이다. 그러나 본 연구에서는 약한 자기장에서도 그 효과가 쉽게 관측될 수 있고, 실제 임상에서 사용될 때 측방산란이 많아서 문제가 되고 있는 6 MeV 전자선을 대상으로 하였다. 재료 및 방법에서 자기장에 의한 전자수송의 방향변화를 수식화하여 몬테칼로 코드 내에 이식하는 과정과 계산을 위한 기하학적 구조 등을 간단히 설명하고, 결과에서는 몬테칼로 계산에서 인가한 자기장의 세기의 변화에 따른 전자선의 선량분포 및 반응영 변화를 도출하였다. 마지막으로 결론에서는 본 논문을 요약하고 이러한 현상의 응용에 대하여 논의하였다.

재료 및 방법

1. 세로 자기장에서 전자의 운동

자기장 \vec{B} 가 인가된 영역에 속도 \vec{v} 를 가지고 입사하는 전자는 자기장에 의하여 편향되는데, 이 과정에 대한 운동방정식은 MKS 계에서 다음과 같이 주어진다.

$$\vec{F}_m = e\vec{v} \times \vec{B} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 \vec{F}_m 은 자기장에서 전자가 받는 힘을 의미하는 로렌츠 힘(Lorentz force)이며, e 는 전자의 전하이다. 이 식으로부터 \vec{F}_m 의 크기는 $evB\sin\phi$ 인데, 이 때 ϕ 는 전자의 방향과 자기장의 방향 사이의 각이다. 여기서 전자의 운동에너지는 속력 v 의 함수로 주어지므로 전자가 받는 힘의 크기는 전자의 운동에너지와 자기장의 세기 및 진행방향에 의존함을 알 수 있다. 본 연구는 이러한 일반적인 전자기적 현상들에 기초하며 이를 본 연구의 목적에 적절히 적용하기 위하여 먼저 다음과 같은 상황을 다루어 본다. 팬텀에 수직으로 전자선이 조사되며 외부로부터 넓고 평행한 자기장이 전자선과 동일한 방향으로 인가되는 경우를 고려하자. 이 때 자기장의 방향을 z 축으로 정하며 이것을 세로 자기장으로 정의한다. 따라서 자기장 벡터는 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{B} = B\hat{k} \dots\dots\dots (2)$$

따라서 이것을 (1)식의 우변에 대입하고 좌변에 운동의 법칙 $\vec{F}_m = m\vec{d}v/dt$ 을 적용하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{q}{m} \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ v_x & v_y & v_z \\ 0 & 0 & B \end{vmatrix} \dots\dots\dots (3)$$

이식의 우변을 계산하고, 계산의 편의를 위하여 속도의 성분들을 원통형 좌표계를 이용하여 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dv_x}{dt} &= -\omega v_\perp \sin\omega t \hat{i} \\ \frac{dv_y}{dt} &= -\omega v_\perp \cos\omega t \hat{j} \dots\dots\dots (4) \\ \frac{dv_z}{dt} &= 0 \end{aligned}$$

여기서 \hat{i} , \hat{j} , \hat{k} 는 x , y , z 축과 평행한 단위벡터이다. 이 식에서 ω 는 원궤도를 운동하는 전자의 각속도로서 $\omega = eB/m$ 이며, v_\perp 는 속도의 자기장과 수직인 성분의 크기이다. 이러한 논의에 대한 도식적 묘사는 Fig. 1과 같다. 이 그림에서 \vec{v}_\perp , \vec{v}_\perp 는 전자 속도의 수직성분인데, 자기장에서 편향되기 전과 후의 속도를 나타낸다. 또한 $\Delta\theta$ 는 편향각인데, 이것은 $\Delta\theta = \omega\Delta t$ 로 주어지며 미소 시간 Δt 동안의 전자 속도벡터의 방향변화를 나타낸다. (4)식으로부터 알 수 있는 중요한 사실은 세로 자기장에서 전자의 방향변화는 자기장과 수직인 성분에 의존하며 수평성분에는 무관하다는 것이다. 따라서 팬텀속 임의의 위치에서 세로 자기장에 나란한 방향으로 운동하는 전자들은 아무런 힘을 받지 않으며 그렇지 않은 전자들은

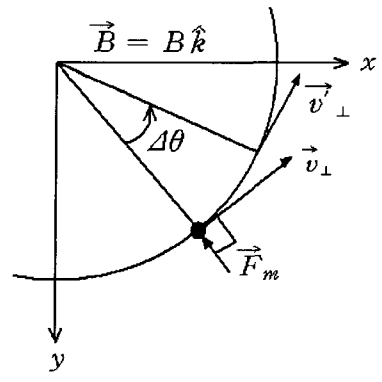


Fig. 1. The analysis of motion for an electron in a longitudinal magnetic field.

편향을 받는데, 이때 자기장과 수직으로 진행하는 전자들은 최대의 힘을 받는다.

지금까지의 논의는 세로 자기장이 인가된 자유공간에서 전자의 운동을 기술하기 위한 것이며, 이것은 경로에 따라 에너지손실 및 다중산란이 존재하는 팬텀에 대하여 적용할 수는 없다. 이와 관련하여 Bielajew⁴⁾에 의하면 자기장이 가해진 물질 속을 진행하는 전자가 받는 힘은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\vec{F} = \vec{F}_{ret} + \vec{F}_{ms} + \vec{F}_m \dots\dots\dots (5)$$

여기서 \vec{F}_{ret} 는 전자의 비탄성 충돌에 의한 감속(retarding)을 일으키는 힘으로서 에너지손실과 관련 있으며, \vec{F}_{ms} 는 전자의 연속적인 탄성 충돌에 의한 방향변화를 일으키는 힘으로서 다중산란(multiple scattering)과 관련된 힘이다. 마지막으로 \vec{F}_m 은 (1)식으로 주어지는 자기장에서 전자의 방향변화를 일으키는 힘이다. 따라서 자기장이 인가된 물질속을 진행하는 전자의 속도는 (5)식과 운동방정식을 이용하여 다음과 같이 시간에 대한 적분으로서 나타낼 수 있다.

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \frac{1}{m} \int_0^t (\vec{F}_{ret} + \vec{F}_{ms} + \vec{F}_m) dt \dots\dots\dots (6)$$

그러나 전자의 물질과의 복잡한 상호작용에 추가적인 자기장에 의한 효과가 결합된 (6)식은 단순한 방법으로 계산되지 않으므로, 몬테칼로 계산을 통하여 통계적 해를 구하는 것이 가장 적절하다고 할 수 있다. 또한 이 방법은 전자의 물질과의 상호작용에 대한 정확한 이론들이 대부분 알려져 있으며 이를 이용한 몬테칼로 계산코드들이 이미 사용되고 있기 때문에 편리하게 이용할 수 있다. 따

라서 EGS4와 같은 일반적인 전자선의 몬테칼로 계산 코드에 자기장에 의한 전자의 방향변화를 고려할 수 있는 항들을 삽입함으로써 팬텀의 외부에서 가해지는 세로 자기장에 의한 효과를 고려할 수 있다. 이를 위하여 먼저 (4)식을 적분하여 시간의 함수로서 속도의 3차원적 성분들을 계산하고, 이로부터 자기장에서 전자의 에너지와 자기장의 세기의 함수로서 전자의 방향변화를 구하였으며, 이것을 다시 EGS4와 호환되는 형태로 코드를 작성하여 전자선 처리부분에 삽입하였다. Fig. 2에 자기장의 계산 항목이 삽입된 EGS4 전자선 서브루틴의 흐름을 간략하게 나타내었다.

2. 계산의 기하학적 구조

본 연구의 몬테칼로 계산에서는 Fig. 3에서 볼 수 있는 것과 같이 점선원으로부터 방사되는 6 MeV의 단일 에너지 전자선을 SSD 100 cm에서 5 cm의 직경을 갖도록 하여 원통형 물팬텀의 중심으로 입사시켰다.

이때 빔과 평행한 방향으로 자기장의 세기를 B=0 T, 0.5 T, 1 T, 2 T, 3 T로 변화시키면서 각각 천만번의 반복수행을 통하여 통계적 평균치를 계산하도록 하였다. 그리고 이러한 조건에서 단일에너지 6 MeV 전자선에 대한 깊이선량율(percentage depth dose)과 최대선량깊이인 1.5 cm와 90% 선량깊이인 2.0 cm, 50% 선량깊이인 2.4

Electron Transport in EGS4

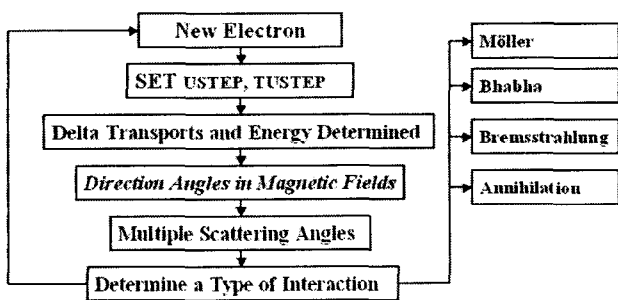


Fig. 2. The electron subroutine modified to account for external magnetic fields in EGS4 code system.

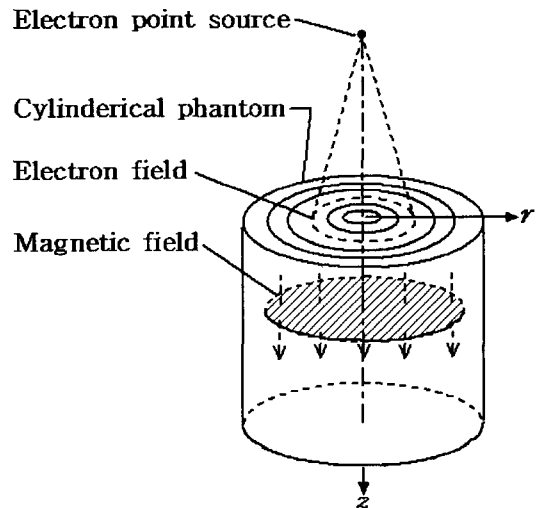


Fig. 3. Geometrical configuration used in Monte Carlo calculation. Where γ and z are the geometrical axes based on cylindrical coordinate system assumed in this calculation.

cm에서의 빔 프로파일(beam profile)을 계산하였다. 이 계산에서 중단에너지(cutoff energy)는 전자와 광자에 대하여 각각 50 keV와 10 keV로 지정하였다. 이 때 통계 처리는 백만번의 반복계산을 10회 수행하여 각 계산결과로부터 평균값과 표준오차를 구하는 방법으로 수행하였다.

결과 및 토의

몬테칼로 계산 결과는 앞서 언급한 방법으로 통계처리되었으며 결과는 모두 평균값에 대하여 정리되었다. 이 때 평균값에 대한 표준오차(standard error)는 일반적으로 계산량 및 기하구조의 정밀성에 의존하여 변화하는데,⁶⁾ 본 연구에서 수행한 천만번의 반복계산 및 Fig. 3과 같은 기하구조에 대한 결과들은 모두 표준오차 $\pm 1\%$ 이내를 나타내었다.

Fig. 4는 팬텀속 세로 자기장에 대한 몬테칼로 계산의 결과로부터 정리된 6 MeV 전자선의 깊이선량률이다.

이 그림에서 보여지는 바와 같이 자기장이 3 T인 경우에도 자기장이 없는 경우와 비교해 큰 차이를 보이지 않고 있어, 다른 연구결과들²⁻⁴⁾에서 보고된 결과와는 달리 선량증가 현상은 나타나지 않았다. 이것은 다른 연구들에서는 SSD가 100 cm 보다 작거나 큰 조사면을 설정하여 중심에서 측면으로 산란하는 전자선의 수를 증가시키고, 여기에 세로 자기장을 인가함으로써 중심 쪽으로 편향되는 전자들에 의한 선량증가가 나타나도록 하였기 때문이다. 본 연구에서는 전자선의 반음영 변화에 초점을 맞추

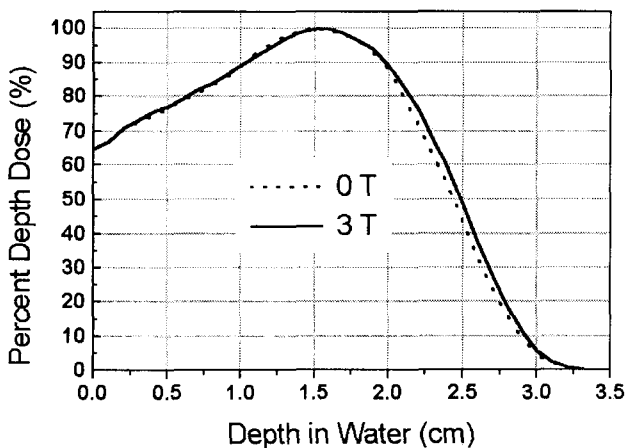


Fig. 4. Percent depth dose curves of 6 MeV electron beam. dashed line : without magnetic field, solid : with magnetic field of 3 T.

었기 때문에 실제 임상에서 사용하고 있는 상황과 유사하게 SSD를 100 cm으로 두고 방사선 조사면을 직경 5 cm으로 하였다. 따라서 조사면의 중심에서 전자선의 측방산란이 상대적으로 적어 자기장에 의해 중심방향으로 수렴되는 전자가 많지 않으므로 심부선량곡선에서의 선량증가 현상이 두드러지게 나타나지 않은 것으로 해석할 수 있다. 따라서 SSD를 줄이고 넓은 조사면을 이용하는 경우에는

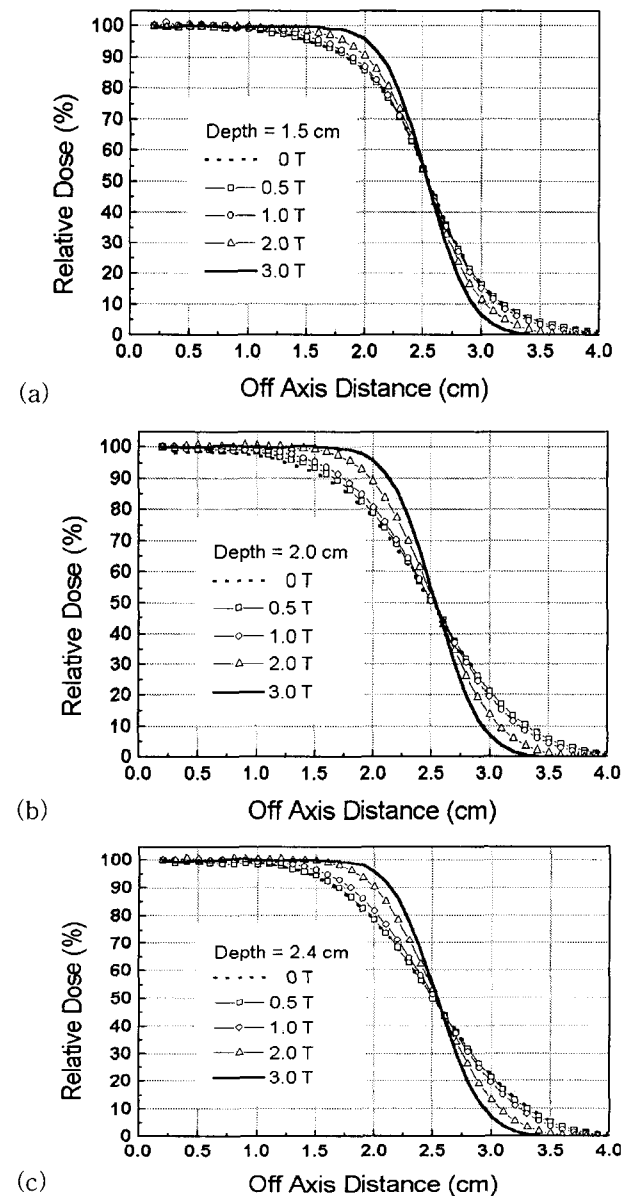


Fig. 5. 6 MeV electron beam profiles at 1.5 cm (a), 2.0 cm (b), and 2.4 cm (c) depths with 0 T-3 T magnetic fields. From these results we found that the more magnetic field increases the more penumbra sharpens.

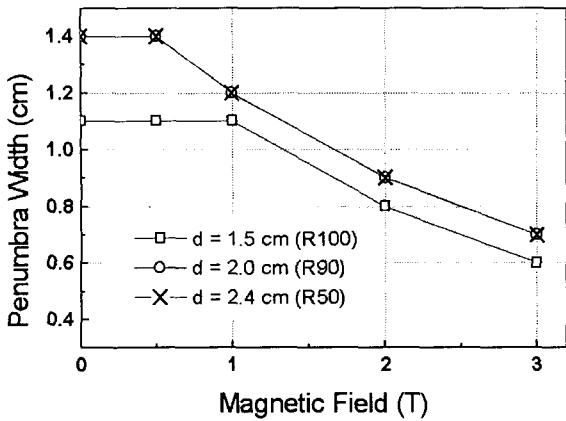


Fig. 6. Penumbra widths at the depths of 1.5 cm, 2.0 cm and 2.4 cm with magnetic fields of 0-3 T.

깊이선량율에서 선량증가현상이 보다 쉽게 관측할 수 있을 것으로 생각된다. 이 현상은 또한 3 T 이상의 강한 자기장을 사용함으로써 관찰할 수 있지만 실용적인 측면에서 이것은 타당하지 않다.

Fig. 5는 6 MeV 전자선의 최대선량 깊이인 1.5 cm, 90% 선량깊이인 2.0 cm 및 50% 선량깊이인 2.4 cm에서의 빔 프로파일의 계산결과이다. 이 그림에서 0.5 T와 1.0 T의 자기장에서는 선량분포에 있어서 별다른 차이를 보이고 있지 않으나 2.0 T와 3.0 T에서는 조사면의 경계에서 급격한 경사를 이루고 반응영 영역이 좁아짐을 알 수 있다. 이 현상은 또한 깊이에 따라 보다 명확한데, 이것은 1.5 cm 깊이보다 2.0 cm와 2.4 cm 깊이에서는 낮은 에너지의 전자가 상대적으로 많아지며 측방산란이 증가하기 때문이다. 따라서 자기장의 인가에 의하여 측방산란하는 전자들이 조사면 내로 휘어 들어오게 되어 반응영 영역이 크게 감소하게된다는 사실을 확인할 수 있다. 이러한 반응영 영역의 변화를 Fig. 6에 나타나있다. 1.5 cm 깊이에서 자기장이 없을 때의 반응영 폭이 1.1 cm 이었으나 자기장이 2 T일 때는 0.8 cm, 3 T에서는 0.6 cm으로 줄어들며, 2.0, 2.4 cm 깊이에서는 자기장이 없을 때 둘 다 1.4 cm의 반응영 폭이 1 T에서 1.2 cm, 2 T에서 0.9 cm, 3 T에서 0.7 cm으로 줄어들고 있음을 알 수 있다. 이 때 2.0 cm와 2.4 cm 깊이에서 자기장의 변화에 대한 반응영의 폭이 서로 동일한 것은 두 깊이에서 전자들의 측방산란의 형태가 거의 유사함을 의미하며 반응영의 관점에서 그 차이가 0.1 cm 차수 이하임을 의미한다. 따라서 이 차이를 구분하기 위해서는 기하구조 계산의 정밀도

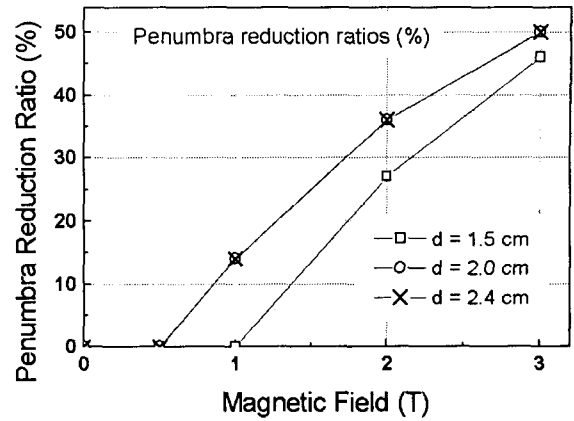


Fig. 7. Penumbra reduction ratios (PRR) at depths of 1.5 cm, 2.0 cm, and 2.4 cm with magnetic fields of 0 T-3 T.

를 현재의 0.1 cm 보다 작게 설정해야 하지만 이러한 0.1 cm 이하의 작은 거리변화를 구별하기 위한 계산은 계산 시간과 오차의 증가를 유발할 수 있으므로 실용적이지 못하다.

본 연구에서는 이러한 반응영의 변화를 정량적으로 나타내기 위하여 다음과 같이 임의의 깊이에서 자기장이 없을 때의 반응영의 폭에 대한 자기장 B에서의 반응영의 폭의 줄어든 정도를 %로 나타내는 반응영 감소율(Penumbra Reduction Ratio : PRR)을 정의하였다.

$$PRR = \frac{W_0 - W_B}{W_0} \times 100\% \dots\dots\dots (7)$$

Fig. 7에서 자기장의 세기에 따른 PRR의 변화를 나타내고 있다. 1.5 cm 깊이에서의 PRR은 자기장의 세기 2 T에서 27%와 3 T에서 46%로 나타났으며, 2.0 cm와 2.4 cm 깊이에서의 PRR은 둘 다 자기장의 세기 2 T에서 36% 그리고 3 T에서 50%로 계산되어졌다. 결과로부터 자기장의 증가에 따라 PRR이 증가됨을 명확하게 알 수 있다.

결 론

본 몬테칼로 계산의 결과로부터 세로 자기장을 이용함으로써 전자선의 측방산란을 줄이게 되고 따라서 반응영의 폭이 감소하게 된다는 사실을 확인하였다. 6 MeV 전자선의 경우 3 T-5 T 정도의 자기장으로 50-60%의 반응영 폭 감소를 유도할 수 있음을 예상할 수 있어 전자선을 이용한 방사선치료에 크게 기여할 수 있을 것으로 기

대된다. 이 결과는 몬테칼로 계산을 이용한 이론적 연구로서 이를 입증할 실험적 연구가 뒤따라야 할 것이다. 한편 본 연구에서는 0 T, 0.5 T, 1 T, 2 T 및 3 T의 자기장에서만 계산하였기 때문에 PRR 증가에 대한 정확한 추이를 밝히기에는 데이터가 다소 부족한 점이 있다. 그러나 주어진 결과들로부터 유추한다면 PRR은 자기장의 세기가 증가하더라도 50-60% 정도에서 포화를 보일 것으로 예상된다. 따라서 반응영 폭을 효과적으로 감소시키기 위해서는 3 T-5 T 정도의 세기를 가진 자기장을 인가해야 될 것으로 보인다. 이 때 인가 자기장의 세기는 전자선 에너지에 따라 결정되어야 하며 보다 정확한 판단을 위해서는 다른 에너지에 대해서도 연구를 수행해야 할 것이다. 마지막으로 이러한 치료용 방사선에 대한 자기장에 관한 연구들은 보다 넓은 응용을 가지는데, 이중 대표적인 것은 전자선에 수직인 방향으로의 자기장을 인가하면 강한 국소적 선량증가를 유도할 수 있다는 것이다. 또한 체내의 폐와 같은 전자결핍이 일어날 수 있는 경우에도 자기장에 의하여 선량보상을 유도할 수도 있다. 따라서 본 연구는 제시된 연구들로 확장되어야 타당하며 지속적인 연

구를 통하여 자기장을 병행한 방사선치료의 기반을 마련해야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. Bostick WH: Possible techniques in direct-electron-beam tumor therapy. *Phys Rev* 77:564-565 (1950)
2. Nath R: Physical and biological aspects of magnetic enhancement of high-energy electron dose distributions. *Proceedings of the Symposium on Electron Dosimetry and Arc Therapy*. 1981, Madison, Wisconsin
3. Weinhaus MS, Nath R, Schulz RJ: Enhancement of electron beam dose distributions by longitudinal magnetic fields: Monte Carlo simulations and magnet system optimization. *Med Phys* 12(5):598-603 (1985)
4. Bielajew AF: The effect of strong longitudinal magnetic fields on dose deposition from electron and photon beams. *Med Phys* 20(4):1171-1179 (1993)
5. Jackson JD: *Classical Electrodynamics*. 3th ed. Johnsons & Willy, New York, (1998)
6. Nelson WR, Rogers DWO, Hirayama H: SLAC Report 265: *The EGS4 Code System*. (1985)

Monte Carlo Calculation of the Dose Profiles for a 6 MeV Electron Beam with Longitudinal Magnetic Fields

Young Kee Oh, Dong Hyeok Jeong*, Kyo Chul Shin[†],
 Ki Hwan Kim[‡], Jeung Kee Kim[§], Jhin Kee Kim^{||}, Bu Gil Kim[¶],
 Jeong Ok Lee^{**}, Sun Rock Moon* and Sung Kyu Kim^{††}

Department of BioMed. Eng., Yeungnam Univ., Daegu, Korea

**Department of Rad. Onc., Wonkwang Univ. Hospital, Iksan, Korea*

†Department of Therapeutic Radiology, Dankook Univ. Hospital, Cheonan, Korea

‡Department of Therapeutic Radiology, Chungnam Nat. Univ. Hospital, Teajeon Korea

§Department of Rad. Onc., Dong-A Univ. Hospital, Pusan, Korea

||Department of Rad. Onc., Chonbuk Nat. Univ. Hospital, Jeonju, Korea

¶Department of BioMed. Eng., Chonbuk Nat. Univ., Jeonju, Korea

***Department of Radiotec., Wonkwang Health Science College, Iksan, Korea*

††Department of Rad. Onc., Yeungnam University Hospital, Daegu, Korea

Several investigators have presented the effects of external magnetic fields on the dose distributions for clinical electron and photon beams. We focus the low energy electron beam with more lateral scatter. In this study we calculated the beam profiles for an clinical electron beam of 6 MeV with longitudinal magnetic fields of 0.5 T-3.0 T using a Monte Carlo code. The principle of dose enhancements in the penumbra region is to deflect the laterally scattered electrons from its initial direction by the skewness of the laterally scattered electrons along the direction of magnetic field lines due to Lorentz force under longitudinal magnetic field. To discuss the dose enhancement effect on the penumbra area from the calculated results, we introduced the simple term of penumbra reduction ratio (PRR), which is defined as the percentage difference between the penumbra with and without magnetic field at the same depth. We found that the average PRR are 33%, and 49% over the depths of 1.5 cm, 2.0 cm, and 2.4 cm for the magnetic fields of 2.0 T and 3.0 T respectively. For the case of 0.5 T and 1.0 T the effects of magnetic field were not observed significantly. In order to obtain the dose enhancement effects by the external magnetic field, we think that its strength should be more than 2 T approximately. We expect that the PRR would be saturated to 50-60% with magnetic fields of 3 T-5 T. As a result of these calculations we found that the penumbra widths can be reduced with increased magnetic fields. This penumbra reduction is explained as a result of electron lateral spread outside the geometrical edges of the beam in a longitudinal magnetic field. This means that the electron therapy benefits from the external magnetic fields.

Key words : Monte Carlo calculation, Penumbra, Magnetic field, Electron beam