

자기장이 인가된 물팬텀 속의 전자선 선량분포 계산을 위한 EGS4 제어코드의 개발과 응용

원광대학교병원 치료방사선과*, 영남대학교 의공학연구소†, 단국대학교병원 치료방사선과†, 전북대학교병원 치료방사선과‡, 충남대학교병원 치료방사선과‡, 동아대학교병원 치료방사선과‡, 영남대학교병원 치료방사선과#

정동혁* · 오영기† · 신교철† · 김진기‡ · 김기환‡ · 김정기‡ · 이강규* · 문성록* · 김성규#

본 연구에서는 팬텀에 인가된 강한 자기장에서 전자선에 대한 선량분포 계산을 위하여 EGS4 제어코드를 개발하였다. 이를 위하여 먼저 자기장에서 전자의 운동을 고찰하고 전자의 방향변화에 관한 수학적 결과를 EGS4 제어코드에 삽입하였다. 개발된 코드를 이용하여 6 MeV 전자선에 대하여 세로자기장 1-3 T가 인가된 물팬텀 속에서 팬슬빔 전자들의 경로를 계산하였고 0.6-1 T가 인가된 물팬텀 속에서 직경 1 cm의 조사면의 깊이선량율과 빔측면도를 계산하였다. 전자의 경로추적 계산결과 3 T의 자기장에서 전자들의 측면변위가 현저히 감소하는 것으로 나타났다. 직경 1 cm 전자선에 대한 깊이선량율은 비정근처에서 자기장의 세기에 따라 미소한 증가를 보였으며, 반응영은 1 T에서 약 0.15 cm 감소가 나타났다. 선량분포의 변화에 관한 계산결과들은 모두 이론적 해석이 가능하였으며 이로부터 본 계산코드의 신뢰성을 평가할 수 있었다.

중심단어 : EGS4, 몬테칼로 계산, 자기장

서 론

방사선치료에서 인체내 특정 영역에 방사선량을 집중시키기 위한 기술개발은 치료성적의 증대를 위한 가장 중요한 과제이며 이를 위한 다양한 방법들이 제안되고 시도되어왔다. 최근에 활발히 연구되고 있는 세기조절방사선치료(IMRT)나 양성자를 이용한 방사선치료는 모두 이러한 목적의 달성을 위한 치료기술이라고 평가할 수 있다. 이와 함께 최근 자기장에 의하여 방사선량의 분포를 변화시켜 이를 방사선치료에 응용하려는 방법들이 이론 분야를 중심으로 연구되고 있다.¹⁻⁴⁾ 이들의 연구방향은 크게 두가지로 정리되는데, 한가지는 팬텀속에 빔축과 평행한 자기장(세로 자기장)을 인가하여 조사면 가장자리의 선량감소를 보상하는 것이고,¹⁻³⁾ 다른 한가지는 빔축과 수직방향의 자기장(가로 자기장)을 인가하여 국소영역의 흡수선량을 급격하게 증가시키는 것이다.⁴⁾ 현재 이러한 분야의 연구는 직접적인 실험보다 이론적 연구가 주

류를 이룬다. Jette^{5, 6)}는 이론적 접근으로서 고에너지 전자의 자기장에서의 운동에 관한 식들을 에너지손실과 다중산란과 결부시켜 근사적으로 유도하였다. 그러나 이 식은 고에너지 전자에 대한 근사를 취하여 일차전자의 경로만을 대략적으로 예측할 수 있기 때문에 저에너지 전자들의 기여가 중첩된 실제 선량분포의 계산에는 적합하지 않다. 이론적 연구분야에서 보다 일반적인 방법은 몬테칼로 계산인데, 이것은 외부 자기장에서 전자의 운동을 고려하도록 코드를 설계하여 이를 몬테칼로 원시코드에 적절히 삽입하고, 연구 목적에 적합한 기하구조에 대하여 최종 계산결과를 구하는 방법이다.^{7, 8)} 이와 관련하여 Bielajew⁷⁾ 또는 Weinhaus 등⁸⁾의 논문을 참조할 수 있는데, 전자의 연구에서는 개발된 코드를 사용하여 20 MeV 전자선에 대하여 자기장 0-20 T에서 반응영의 감소를 중점적으로 다루었으며, 후자의 연구에서는 개발된 코드를 사용하여 특정한 형태의 선량분포를 달성하기 위한 자기장 장치의 주요 매개변수들을 결정하였다. 이러한 배경과 함께 본 연구에서는 세로 자기장이 인가된 물팬텀에 전자선이 입사할 때 자기장의 효과가 포함된 선량분포의 계산이 가능한 EGS4⁹⁾ 제어코드를 개발하고 계산결과 및 응용을 논의하였다. 본 연구의 주요 방법은 Bielajew⁷⁾ 또는 Weinhaus 등⁸⁾이 수행했던 방법과 유사하지만, 코드의 응용에 있어서 차이가 있다. 본 연구에서는 개발된 코드를 이용하여 먼저 1 T 및 3 T의 세로 자기장이 인가된 물팬텀에 전자선 팬슬빔

이 논문은 2003년 1월 17일 접수하여, 2003년 2월 21일 채택됨.
본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 중·장기 사업 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

책임저자: 정동혁, (570-711) 전북 익산시 신용동 344-2
원광대학병원 치료방사선과
Tel : 063)850-1526, Fax : 063)850-1528
E-mail : physics@wmc.wonkwang.ac.kr

이 입사할 때 펄속 전자들의 경로를 추적하여 자기장의 세기에 따른 전자들의 경로변화를 관찰하였다. 또한 펄속빔을 1 cm 조사면으로 확장하고 0.6-1.0 T 세로 자기장에 대하여 깊이선량율과 빔측면도를 계산하여 자기장의 세기에 따라 계산결과와의 차이를 분석하였다. 다음의 재료 및 방법에서는 자기장에서 전자의 운동을 방향변화의 측면에서 고찰하고 이를 몬테칼로 코드에 삽입하는 과정에 대한 주요사항들을 기술하였다. 다음의 결과에서는 자기장에서 전자선에 대한 계산결과를 도식으로 정리하고 이론적 배경으로부터 결과들을 해석하였으며, 마지막으로 결론에서는 본 논문을 요약하고 연구의 방향 및 계산코드의 응용에 대하여 논의하였다.

재료 및 방법

1. 펄속 자기장에서 전자의 상호작용

외부 자기장이 펄속 전체에 균일하게 가해질 때 펄속에 입사하는 고에너지 전자를 고려하자. 입사전자는 펄속 원자들과의 충돌 및 제동복사에 의하여 에너지를 잃으면서 다중산란에 의하여 경로변화를 당하는 한편 정지할 때까지 외부 자기장에 의하여 지속적으로 편향을 받을 것이다. 따라서 펄속 자기장 영역을 진행하는 전자가 받는 힘 \vec{F} 는 다음과 같이 두 힘벡터의 합으로 표현할 수 있다.⁷⁾

$$\vec{F} = \vec{F}_{Col} + \vec{F}_{Mag} \dots\dots\dots(1)$$

여기서 \vec{F}_{Col} 은 쿨롱힘(Coulomb force)이며 \vec{F}_{Mag} 는 외부에서 가해지는 자기장에 의하여 입사전자가 받는 힘이다. \vec{F}_{Col} 는 입사전자와 펄속 전자 및 원자와의 충돌과 제동복사 그리고 다중산란의 원인이 되는 힘으로서 이러한 미시적 상호작용들에 대한 이론적 결과들은 대부분 잘 알려져 있다. 또한 몬테칼로 방법을 적용하여 개별 상호작용들을 통계적으로 계산함으로써 실험결과와 잘 일치하는 거시적인 물리량들을 예측할 수 있다. 그러나 외부 자기장에 의하여 나타나는 새로운 힘 \vec{F}_{Mag} 에 의한 물리량의 변화는 \vec{F}_{Col} 과 결부된 몬테칼로 계산만으로는 예측할 수 없다. 따라서 입사전자에 대한 몬테칼로 계산체계에 \vec{F}_{Mag} 과 관련된 새로운 항을 삽입하여 입사전자의 방향변화만을 고려하고 이로부터 외부 자기장에 의한 물리량의 변화를 관찰할 수 있다. 다음은 \vec{F}_{Mag} 에 의한 전자의 방향변화를 고찰하는데 이 때 전자의 에너지 변화는 \vec{F}_{Col} 에서 다루어지므로 \vec{F}_{Mag} 에 의한 전자의 방향변화 계산시 전자의 에너지는 일정한 것으로 간주한다.

펄속 임의의 위치에서 전자의 속도가 \vec{v} 로 주어질 때

외부 자기장으로부터 전자가 받는 힘 \vec{F}_{Mag} 는 SI 단위계에서 다음과 같이 로렌츠 힘(Lorentz force)으로 표현된다.¹⁰⁾

$$\vec{F}_{Mag} = e\vec{v} \times \vec{B} \dots\dots\dots(2)$$

여기서 e 는 전자의 전하량이다. 이 식의 좌변에 운동방정식을 적용하고 우변의 벡터곱을 계산하면 가속도의 성분들은 직각 좌표계에서 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \frac{d^2x}{dt^2} &= \frac{e}{m} \left(\frac{dy}{dt} B_z - \frac{dz}{dt} B_y \right) \\ \frac{d^2y}{dt^2} &= \frac{e}{m} \left(\frac{dz}{dt} B_x - \frac{dx}{dt} B_z \right) \dots\dots\dots(3) \\ \frac{d^2z}{dt^2} &= \frac{e}{m} \left(\frac{dx}{dt} B_y - \frac{dy}{dt} B_x \right) \end{aligned}$$

여기서 m 은 전자의 질량이다. 이 방정식으로부터 자기장 속에서 전자의 운동을 전자의 에너지 및 자기장의 함수로 기술할 수 있다. 그러나 펄속을 진행하는 전자에 대하여 이 식의 적용은 쉽지 않은데, 그 이유는 펄속 전자의 경로에서 자기장의 방향 및 세기가 위치의 함수로 주어져야 하기 때문이다. 이를 위하여 본 논문에서는 단순한 접근으로서 다음과 같이 z 축에 평행한 자기장으로 정의되는 세로 자기장(longitudinal magnetic field)에 대해서만 기술하며, 이 때 자기장의 세기는 펄속 모든 영역에서 주어진 방향으로 일정한 것으로 가정한다.

$$\vec{B} = B\hat{k} \dots\dots\dots(4)$$

여기서 \hat{k} 는 z 축에 평행한 단위벡터이다. 만약 가로 자기장(transverse magnetic field)에서 전자의 운동을 기술하는 경우에는 자기장의 방향을 다음과 같이 정의할 수 있는데,

$$\vec{B} = B\hat{i} \text{ or } \vec{B} = B\hat{j} \dots\dots\dots(5)$$

이러한 서로 다른 자기장 방향에 대한 수학적 기술들은 좌표의 상호교환을 취하면 서로 동등한 형태로 표현되므로 본 논문에서는 다루지 않는다. 이 식에서 \hat{i} , \hat{j} 는 각각 x , y 축에 평행한 단위벡터이다.

(4)식으로 정의되는 세로 자기장을 (3)식에 대입하여 변위 x , y , z 에 대한 일반해를 구하고 여기에 다시 시간에 대하여 미분을 취하면 시간의 함수로서 전자의 속도는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v_x(t) &= R\omega \cos(\theta_0 + \omega t) \hat{i} \\ v_y(t) &= -R\omega \sin(\theta_0 + \omega t) \hat{j} \dots\dots\dots(6) \\ v_z(t) &= \text{constant} \end{aligned}$$

여기서 R 은 회전반경, ω 는 각속도, θ_0 는 전자의 초기 위치에 따라 결정되는 초기각도이다. 이 식으로 주어지는 전자의 운동은 $x-y$ 평면에서 반경 R , 속도 $R\omega$ 를 가지고 원운동하면서 $+z$ 방향으로 일정한 속도 v_z 로 진행되는 나선운동임을 알 수 있다. Fig. 1에 세로 자기장에 입사한 속도 \vec{v} 인 전자의 운동을 나타냈다.

이 그림에서 ϕ 는 입사전자의 방향과 자기장과의 각이며 v_{\perp} 와 v_{\parallel} 은 자기장에 대한 전자의 수직방향과 수평방향 속도의 크기이다. 이것을 (6)식과 결부시키면 v_{\perp} 와 v_{\parallel} 은 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v_{\perp} &= R\omega = v \sin \phi \\ v_{\parallel} &= v_z = v \cos \phi \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (6)$$

여기서 v 는 전자의 속력인데 전자의 에너지 변화는 무시하는 것으로 가정하였기 때문에 v 는 일정하다. 그리고 Fig. 1에 보여지는 바와 같이 주어진 전자의 입사방향과 나선운동에 대하여 ϕ 는 일정하므로 v_{\perp} 와 v_{\parallel} 은 초기에 결정되는 상수이다. 이것을 (6)식에 대입하면 자기장에서 방향변화를 R , ω , θ_0 와 같은 상수들과 함께 시간 t 만의 함수로 기술할 수 있으며, 또한 (6)식의 성분들을 몬테칼로 수송체계에서 사용되는 형태로 변환시킬 수 있다.

2. EGS4 제어코드

본 연구에서는 앞절에서 고찰한 주요 결과들을 전자의 EGS4 원시코드에 삽입하였으며, 또한 수송체계와 결합하여 자료의 입출력을 처리할 수 있는 EGS4 제어코드(또는 user

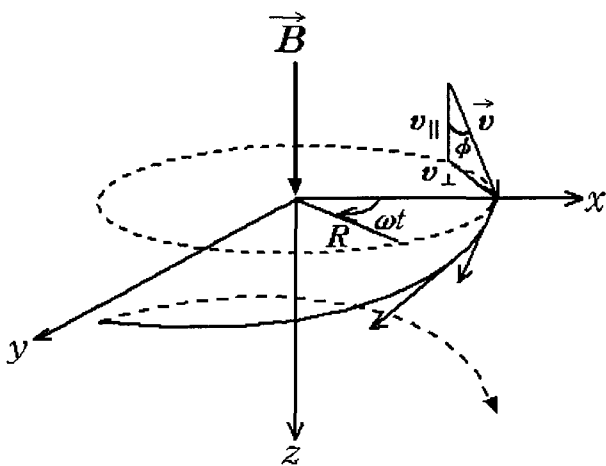


Fig. 1. The motion of the electron incident on the longitudinal magnetic field region.

code)를 작성하였다. 다음은 이러한 과정에서 중요하게 다루어지는 변수들에 대해서 기술한다.

EGS4에서 전자의 수송은 스텝(step)으로 정의되는 전자의 짧은 경로를 결정하고, 스텝을 이동하는 전자에 대하여 Bethe의 이론을 적용하여 에너지손실과 물질의 에너지흡수를 계산하며, 또한 Molière의 이론을 적용하여 다중산란각을 계산하는 일련의 과정으로 요약된다.⁹⁾ 이 때 하나의 전자에 대하여 다양한 매개변수들이 추적되는데, 본 연구에서 관심을 가지는 것은 수송체계에서 주어지는 전자의 위치와 진행 방향이다. EGS4에서는 초기에 팬텀의 기하구조를 수학적으로 정의하고 팬텀속에서의 입자의 수송을 처리하는데, 이 때 팬텀의 기하구조 속을 진행하는 전자의 미소변위 ΔX , ΔY , ΔZ 는 다음과 같이 계산한다.

$$\begin{aligned} \Delta X &= X - X_0 = U\Delta S \\ \Delta Y &= Y - Y_0 = V\Delta S \\ \Delta Z &= Z - Z_0 = W\Delta S \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (8)$$

여기서 X , Y , Z 및 X_0 , Y_0 , Z_0 는 전자의 나중 및 초기의 위치이며 ΔS 는 거리단위인 스텝이다. 또한 전자의 진행 방향을 나타내는 변수 U , V , W 는 다음과 같이 정의되는 방향코사인이다.

$$U = \cos \alpha, V = \cos \beta, W = \cos \gamma \dots\dots\dots (9)$$

여기서 α , β , γ 는 각각 입자의 속도벡터가 x , y , z 축과 이루는 각이며, 이들 방향코사인은 다음과 같이 속도벡터의 성분으로써 나타낼 수 있다.

$$\vec{v} = v(U\hat{i} + V\hat{j} + W\hat{k}) \dots\dots\dots (10)$$

따라서 본 연구에서는 자기장 속으로 입사한 전자에 대하여 초기조건으로서 $t = 0$ 을 취하고 (7)식과 (8)식을 (6)식에 대입하여 시간 t 후의 속도의 성분들을 계산하고 이로부터 새로운 방향코사인을 다음과 같이 결정하였다.

$$U = \frac{v_x(t)}{v}, V = \frac{v_y(t)}{v}, W = \frac{v_z(t)}{v} \dots\dots\dots (11)$$

이 때 (6)식의 계산에서 각속도 $\omega = eB/m$ 이다. 그러나 방향변화의 계산에서 중요한 변수인 t 는 임의로 결정되어야 하는데, 본 연구에서는 전자의 속력 v 와 미소변위 Δl 을 이용하여 $t = \Delta l/v$ 로 계산하였다. 여기서 Δl 은 스텝과 같은 전자의 실제 변위가 아니며 단지 방향변화만을 계산하기 위하여 도입된 가상변위이다. 본 연구에서는 EGS4의 전자 수송과정에서 결정되는 USTEP⁹⁾이라고 하는 직선스텝 길이를 Δl 로 놓고 계산하였다. 여기서 USTEP은 Molière의

다중산란 이론으로부터 결정되는 작은 직선거리인데 일반적으로 0.01 cm 크기 정도의 거리를 가진다. Weinhaus 등⁸⁾은 20 MeV 전자선 에너지와 1-4 T의 자기장에 대하여 최대 0.5 cm까지 스텝 길이(step length)를 취했을 때 오차는 무시할 정도라고 언급하였지만, 더 이상의 충분한 자료가 없으므로 Δl 의 적절한 결정방법에 대해서는 추가적인 연구가 요구된다.

본 연구에서는 이러한 과정을 통하여 얻어진 관련 매개변수들을 EGS4의 전자선의 처리부분, 즉 서브루틴 ELECTR에 삽입하였다. 또한 전자선 펜슬빔과 직경 1 cm 조사면에 대하여 물팬텀속에 균일하게 가해지는 세로 자기장에서의 경로변화 및 선량분포 변화를 계산하기 위한 제어코드를 개발하였다. 이 계산에서 전자선 에너지는 단일에너지 6 MeV로 취하였으며 자기장의 세기는 펜슬빔 계산에 대하여 1-3 T 그리고 조사면 계산에 대하여 0.6-1 T 범위로 취하였다.

결 과

Fig. 2는 자기장이 없는 일반적인 경우로서, 물팬텀에 수직으로 입사한 10개의 전자로 구성된 펜슬빔에 대하여 전자들의 경로를 추적하여 나타낸 그림이다.

이 그림에서 전자의 경로상에 보여지는 점들은 EGS4에서 전자의 에너지변화 및 상호작용을 계산하는 위치이다. 한편 이 그림에는 입사전자 뿐만 아니라 입사전자와 팬텀과의 상호작용 과정에서 발생한 이차전자들의 경로가 모두 나타나 있다. 따라서 경로로부터 이탈되어 독립적으로 나타난 점들은 제동복사로부터 발생된 광자에 의한 광전효과나 콤펄턴산란에서 발생한 이차전자들의 경로로 보여진다.

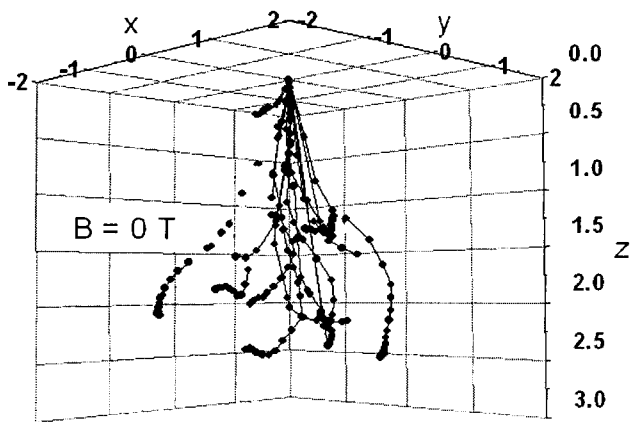


Fig. 2. The 10 histories of 6 MeV electrons transported through water phantom without magnetic field.

Fig. 3과 4는 z 축에 평행하게 가해지는 1 T와 3 T의 세로 자기장에 대하여 전자들의 경로를 나타낸 그림이다. 이때 나머지의 조건들은 Fig. 2의 경우와 동일하다. 이 두 그림의 분석에서 중요한 것은 전자의 측방향(x 또는 y 방향) 변위인데, 그 이유는 세로방향으로 진행하는 전자들은 자기장에 영향을 받지 않기 때문이다. 따라서 세로방향 도달거리로 정의되는 전자의 실비정(practical range)은 자기장과는 무관하다.

Fig. 3과 4에서 자기장 $B = 1$ T의 경우에 $B = 0$ 일 때와 측면변위의 차이가 거의 없으나 $B = 3$ T의 경우에는 전자의 측면변위가 매우 좁아지는 것을 알 수 있다. 단순히 관찰된 이 결과들은 우선 1 T의 세로 자기장은 전자의 측면변위 경로변화에 그다지 기여하지 못함을 의미한다. 이러한 결

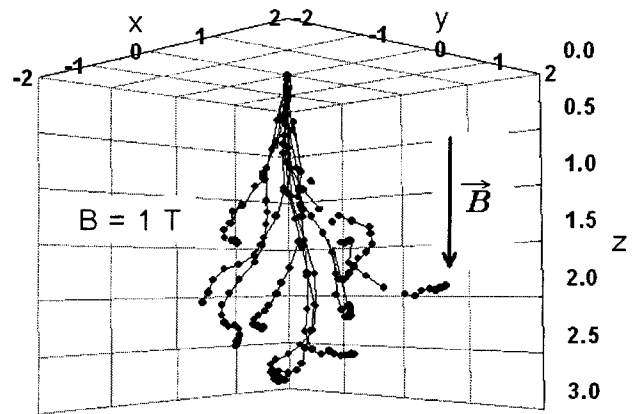


Fig. 3. The 10 histories of 6 MeV electrons transported through water phantom in the presence of longitudinal magnetic field of 1 T.

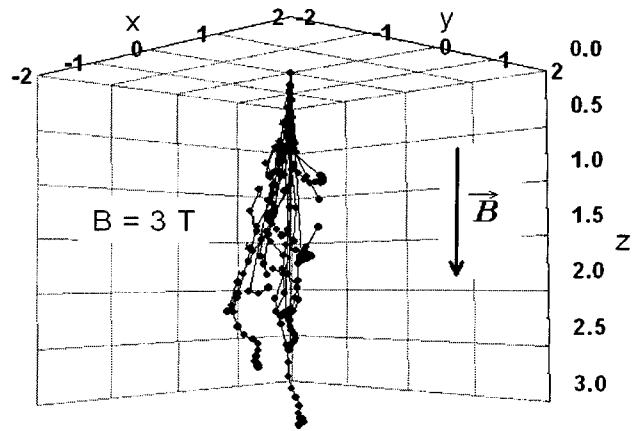


Fig. 4. The 10 histories of 6 MeV electrons transported through water phantom in the presence of longitudinal magnetic field of 3 T.

과들은 또한 팬텀에 3 T 정도의 강한 세로 자기장이 가해지는 경우에 전자선 조사면의 가장자리의 선량감소가 보상될 수 있다는 것을 의미하기도 한다. 그리고 자기장과 동일한 방향으로 진행되는 전자들은 자기장의 영향을 받지 않기 때문에 깊이선량율의 변화는 적을 것으로 보인다. 그러나 팬텀에 입사한 고에너지 전자들은 초기에는 거의 직선경로를 진행하지만 층돌 및 다중산란에 의하여 쉽게 측면경로를 취하기 때문에 일정 깊이 이상에서 자기장에 의한 깊이선량율의 변화도 예상할 수 있다. 이러한 현상은 Fig. 2-5와 같은 단순한 결과들로부터 설명되지 않으며 펜슬빔이 중첩된 형태인 전자선 조사면에 대한 몬테칼로 계산으로부터 관찰할 수 있다.

이를 위하여 본 연구에서는 개발한 EGS4 제어코드를 이용하여 SSD(source to surface distance) = 100 cm 기하구조에서 직경 1 cm 크기의 조사면 및 6 MeV 전자선에 대하여 몬테칼로 계산을 수행하여 깊이선량율과 빔측면도를 구하였다. 이 계산에서는 $B = 0.6, 0.8, 1.0$ T인 비교적 낮은 세기의 자기장에 대하여 수행하였는데, 이것은 앞의 논의에 대한 재확인과 함께 구현 가능한 낮은 세기의 자기장에 대하여 이론적인 계산결과를 구함으로써 추후 실험을 병행한 연구에서 참고하기 위해서이다.

Fig. 5는 이러한 세기의 자기장이 팬텀에 가해지는 경우에 대한 깊이선량율의 몬테칼로 계산결과인데, 자기장이 없는 경우에 최대선량깊이에서의 흡수선량을 100%로 일반화시켜 나타내었다. 이 그림에 나타난 바와 같이 깊이선량율의 변화

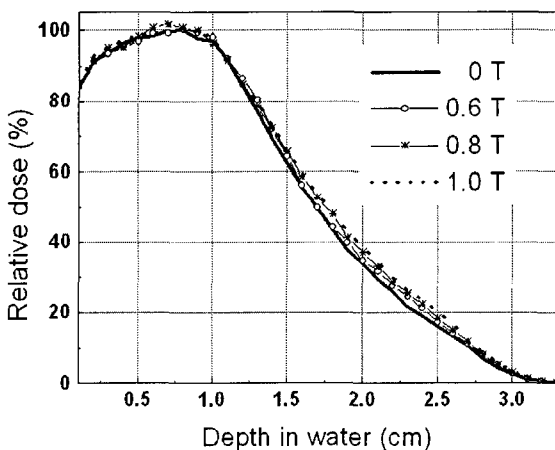


Fig. 5. The percentage depth dose curves as a function of longitudinal magnetic fields of 0, 0.6, 0.8, and 1.0 T for a 6 MeV electron beam with a field diameter of 1 cm on the phantom surface.

는 0-1 T 자기장 범위에서 큰 변화를 보이지 않으며, 또한 비정(range)은 자기장과 무관하게 일정함을 알 수 있다. 그러나 최대선량깊이 이후의 깊이에서 자기장의 증가에 따라 깊이선량율의 미소한 증가가 나타남을 알 수 있는데, 이것은 깊이에 따라 전자들의 측면변위가 증가할 때 조사면의 중심을 벗어나는 전자들이 자기장으로 인하여 다시 중심으로 이동하여 흡수되기 때문으로 해석할 수 있다. 이 때 자기장에 의한 깊이선량율의 증가는 Fig. 6으로부터 알 수 있다.

Fig. 6은 깊이 2 cm에서의 빔측면도인데 이 깊이는 Fig. 5에서 깊이선량율의 증가가 보다 명확하게 나타나는 깊이이다. 그리고 Fig. 6의 곡선들은 자기장이 없는 경우에 대하여 조사면 중심에서의 흡수선량을 100%로 일반화하여 나타낸 결과이다. 이 값들을 분석한 결과 깊이선량율은 자기장 0.6 T에서 약 7% 증가하며, 0.8 T에서는 약 16% 그리고 1.0 T에서는 약 17% 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 이러한

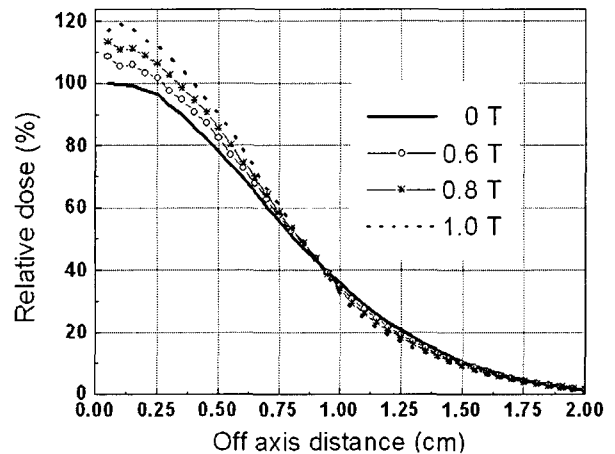


Fig. 6. The beam profile curves as a function of longitudinal magnetic fields of 0, 0.6, 0.8, and 1.0 T at a depth of 2.0 cm.

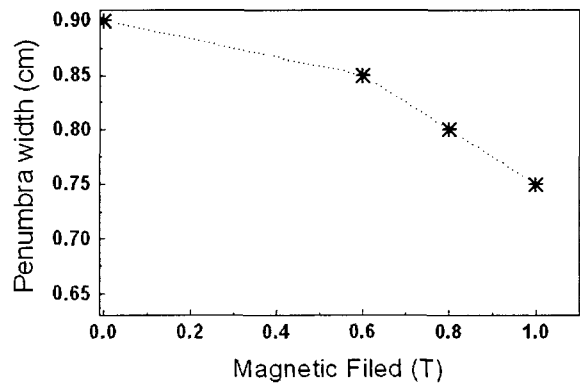


Fig. 7. Penumbra reduction as a function of longitudinal magnetic fields of 0, 0.6, 0.8, and 1.0 T at a depth of 2.0 cm.

세기의 자기장에서도 빔축면도의 변화가 있음을 의미한다.

Fig. 6의 결과들을 모두 중심축에 대하여 100%로 일반화하고 90%와 20%의 폭으로 정의되는 반응영을 구하여 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 $B = 0$ T에서 반응영이 0.9 cm 이었지만, 0.6 T에서 0.85 cm, 0.8 T에서 0.8 cm 그리고 1 T의 자기장에 대한 반응영은 0.75 cm로서 약 0.05 cm는 것으로 나타났다. 이러한 결과들 간격으로 줄어드는 1 T 이하의 자기장에서도 선량분포의 작은 변화들이 관측될 수 있음을 시사한다.

결 론

본 연구에서는 몬테칼로 방법을 이용하여 물팬텀에 인가되는 외부 자기장에 의한 전자선 선량분포의 변화를 고찰하였다. 이를 위하여 자기장에서의 전자의 방향변화를 고려할 수 있는 EGS4 제어코드를 개발하고 자기장에서 전자의 경로계산 및 시험계산을 수행하였다. 펜슬빔에 대한 계산을 통하여 1과 3 T의 강한 자기장에서 측방산란된 전자의 분포를 가시적으로 비교 관찰할 수 있었으며, 직경 1 cm 조사면에 대한 계산을 통하여 1 T 이하의 약한 자기장에서도 깊이선량율과 빔축면도에 미소한 변화가 나타나는 것을 확인하였다. 이러한 결과들은 실험을 병행한 연구로부터 검증되어야 하지만 이론적 배경으로부터 세로 자기장에서의 선량변화 특성을 충분히 설명할 수 있었다. 또한 본 연구에서 개발한 코드를 이용하여 방사선치료용 전자선 및 광자선 조사면에 대한 계산으로 확장하여 수행함으로써 세로 자기장에서 선량분포의 변화를 정량적으로 평가할 수 있다. 한편 문헌들¹⁻⁸⁾에서 제시된 가로 자기장에서 나타나는 급격한 선량증가 현상도 본 연구와 유사한 방법으로 계산을 수행함으로써 관찰할 수 있다. 따라서 이어지는 연구의 방향은 이러한 분야들이라고 할 수 있다. 결론적으로 본 연구는 최근 첨단 방사선치료를 위하여 관심이 증대되고 있는 자기장을 이용한 선량분포 변환기술의 기반마련에 기여할 것으로 예상되며, 또한 보다 진보된 결과를 얻기 위해서는 앞서 제시한 연구들을 지속적으로 수행해야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. Naqvi SA, Li XA, Ramahi SW, Chu JC, Ye SJ: Reducing loss in lateral charged-particle equilibrium due to air cavities present in x-ray irradiated media by using longitudinal magnetic fields. *Med Phys* 28:603-611 (2001)
2. Wadi-Ramahi SJ, Naqvi SA: Evaluating the effectiveness of a longitudinal magnetic field in reducing underdosing of the regions around upper respiratory cavities irradiated with photon beams-A Monte Carlo study. *Med Phys* 28:1711-1717 (2001)
3. 오영기, 정동혁, 신교철, 김기환, 김정기, 김진기, 김부길, 이정옥, 문성록, 김성규: 세로 자기장에서 6 MeV 전자선의 선량분포에 관한 몬테칼로 계산. *의학물리* 13:195-201 (2002)
4. Nardi E, Barnea G: Electron beam therapy with transverse magnetic fields. *Med Phys* 26:967-973 (1993)
5. Jette D: Magnetic field with photon beams: Dose calculation using electron multiple-scattering theory. *Med Phys* 27:1705-1716 (2000)
6. Jette D: Magnetic field with photon beams: Monte Carlo calculations for a model magnetic field. *Med Phys* 27:2756-2738 (2000)
7. Bielajew AF: The effects of strong longitudinal magnetic fields on dose deposition from electron and photon beams. *Med Phys* 20:1171-1179 (1993)
8. 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* 12:598-603 (1985)
9. SLAC Report-265: The EGS4 code system. Stanford Linear Accelerator Center (1985)
10. Jackson JD: CLASSICAL ELECTRODYNAMICS 3th ed., JOHN WILEY & SONS, New York, (1998) pp 237-283

Development of the EGS4 Control Code to Calculate the Dose Distributions in a Strong Magnetic Field

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

*Department of Radiology Oncology, Wonkwang University Hospital, Iksan, Korea

[†]Department of BioMed. Eng., Yeungnam University, Taegu, Korea

[‡]Department of Therapeutic Radiology, Dankook University Hospital, Cheonan, Korea

[§]Department of Radiology Oncology, Chonbuk National University Hospital, Jeonju, Korea

^{||}Department of Therapeutic Radiology, Chungnam National University Hospital, Teajeon Korea,

[¶]Department of Radiology Oncology, Dong-A University Hospital, Pusan, Korea

[#]Department of Radiology Oncology, Yeungnam University Hospital, Taegu, Korea

In this work we developed a EGS4 control code to calculate the dose distributions for high energy electron beams in water phantom applied longitudinal magnetic field. We reviewed the electron's motion in magnetic field and delivered equations for direction changes of the electron by the external magnetic field. The mathematical results are inserted into the EGS4 code system to account for the presence of external magnetic fields in phantom. The electron pencil beam paths of 6 MeV in water phantom are calculated for magnetic fields of 1-3 T and the dose distributions for a field of 1.0 cm in diameter are calculated for magnetic fields of 0.6-1 T using the code. From the results of path calculations we found that the lateral ranges of the electrons are reduced in the magnetic field of 3 T. For a field of 1 cm diameter and a magnetic field of 1 T, the small dose enhancement near the range of the electrons on the depth dose and the penumbra reduction of 0.15 cm on the beam profile are observed. We discussed and evaluated the results from the theoretical concepts.

Key words : EGS4, Monte Carlo calculation, Magnetic field