

강자기장이 인가된 물 속에서 고에너지 전자의 궤적 계산

*군산대학교 물리학과, †동아대학교 물리학과, ‡을지대학병원 방사선종양학과,

§단국대학병원 방사선종양학과, †충남대학병원 방사선종양학과,

¶전북대학교 임상의학연구소, *영남대학병원 방사선종양학과, **원자력의학원 방사선종양학과

정동혁* · 김정기† · 오영기‡ · 신교철§ · 김기환 · 김진기¶ · 김성규# · 노태익† · 김진영* · 지영훈**

본 연구에서는 수치해석을 이용하여 강자기장이 인가된 물펜텀 속에서 고에너지 전자의 경로를 근사적으로 계산하였다. 이를 위하여 자기장에서 전자의 방향변화에 관한 방정식을 세우고 오일러(Euler) 방법을 적용하여 전산코드로 구현하였다. 전산코드를 이용하여 입사전자와 수직 및 수평방향의 자기장이 인가된 물펜텀에 대하여 3, 5, 10, 15 MeV 전자의 궤적을 계산하였다. 본 결과는 전자의 다중산란이 고려되지 않아 실제 궤적과 차이가 있으나, 결과로부터 외부 자기장에 의한 물펜텀 속 선량분포의 변화를 설명할 수 있다.

중심단어: 전자궤적, 자기장

서 론

강자기장을 이용하여 물펜텀속 흡수선량 분포를 인위적으로 변화시키는 기술은 다양한 몬테칼로 계산들^{1,2)}과 최근 일부 실험들⁴⁾에 의하여 점차 현실화되고 있으며, 나아가서 미래형 방사선치료의 한 방법으로 인식되고 있다. 본 연구자들도 수년간 이에 관한 연구를 수행해 왔으며, 자체 작성한 몬테칼로 제어코드⁵⁾를 이용하여 세로자기장에서 전자선 빔측면도의 반응영 축소⁶⁾와 가로자기장에서 광자선 깊이선량율의 급격한 증가⁷⁾와 같은 기초적 특성들을 보인 바 있다. 이러한 특성들은 근본적으로 물 속을 진행하는 전자들이 자기장에 의하여 편향을 받아 궤적(trajjectory)의 변화를 일으키기 때문이다. 따라서 자기장의 영향으로 변화되는 선량분포의 특성들을 올바르게 해석하고 이해하기 위해서는 전자의 자기장에 의한 편향된 궤적을 고찰하는 것이

요구된다. 그렇지만 현재까지 이에 대한 연구들이 충분하지 못하였는데, 그 이유는 진공의 경우에 잘 정의된 로렌츠(Lorentz) 법칙⁸⁾을 적용하여 전자의 운동을 고찰할 수 있지만, 물질의 경우에 추가적으로 에너지손실과 다중산란을 결부시켜 해석해야 하기 때문이다. 이는 Bielajew⁹⁾가 자기장의 효과를 고려하는 몬테칼로 계산 알고리즘을 개발하는 과정에서 논의한 바와 같다.

전자궤적의 이론적 해석에 관심으로 보였던 Jette¹⁰⁾는 고전 전자기 이론과 저지능(stopping power) 및 다중산란 이론을 결합하여 물 속 자기장에서 전자의 경로를 해석적으로 유도하고자 하였다. 그는 전자의 저지능을 상수($dT/ds = -2\text{MeV/cm}$)로 취하고 로렌츠 방정식만을 적용하였음에도 방대한 적분들을 해결해야 했다. 그는 초보적 결과로서 몇 가지 자기장 세기에 대하여 물 속에서 10 MeV 전자의 궤적을 계산하여 제시한 바 있는데, 여기에 추가적으로 전자의 다중산란을 고려하기 위하여 Fermi-Eyges 이론을 근사화한 TSP (typical scattered particle) 개념¹⁰⁾을 이용하여 보완된 식들을 유도하였지만 이에 대한 결과는 충분히 보이지 않았다. Jette의 연구는 물질 속 자기장에서 전자의 궤적을 해석적으로 계산함으로써 몬테칼로 계산에 의하지 않고 선량분포를 예측하기 위한 시도로써 중요한 의미를 가진다고 할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 수학적 해석의 어려움을 극복하기 위하여 수치해석을 이용하여 자기장이 인가된 물에서 전자의 궤적을 계산하였다. 수치해석은 컴퓨터 프로그램

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 중·장기 사업 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

본 내용 중 알고리즘은 일본 ISORD-2 (2003. 7) 심포지움에 발표된 바 있으며(abstract No. P-6), 전자선 에너지를 확장하여 계산한 결과는 한국의학물리학회 학술대회(2003. 9)에 발표된 바 있음(abstract No. P-9).

이 논문은 2004년 6월 22일 접수하여 2004년 7월 19일 채택되었음.

책임저자: 정동혁, (570-711) 전북 익산시 신용동 344-2

원광대학병원 방사선종양학과

Tel.: 063)850-1526, Fax: 063)850-1528

E-mail: physics@wmc.wonkwang.ac.kr

을 이용한 반복적 수치연산을 통하여 미분방정식의 해를 구하는 일반적인 방법이다. 본 연구에서는 현재 에너지손실과 로렌츠 법칙만을 적용하여 전자궤도를 계산하였는데, 추후 다중산란과 이차전자의 발생을 고려할 예정이다. 여기서 후자의 고려는 부분적으로 몬테칼로 기법의 도입이 요구되어 현재 연구 중에 있다. 본 연구의 결과는 자기장에 의한 편향을 받으면서 에너지를 잃어 가는 전자의 경로를 근사적으로 묘사하고 있지만, 이로부터 물펄럼에 수직 및 수평방향으로 인가된 자기장에 의한 선량 분포의 특성을 쉽게 설명할 수 있다. 다음의 재료 및 방법에서는 물질 속 자기장에서 전자의 경로분석과 계산 알고리즘을 구현하는 과정에 대하여 논의를 하였으며, 결과 및 결론에서는 자기장의 함수로서 3, 5, 10, 15 MeV 전자에 대한 계산결과를 보이고 결론을 제시하였다.

재료 및 방법

1. 수식체계

물펄럼에 인가된 강한 자기장에 의한 전자의 궤적을 논의하기 위하여 먼저 진공에서 자기장의 영향을 받으며 운동하는 전자를 고려한다. 외부 자기장 \vec{B} 가 인가된 진공에서 속도 \vec{v} 로 운동하는 전자에 대한 로렌츠 공식은 다음과 같다.⁸⁾

$$\frac{d(m\vec{v})}{dt} = e\vec{v} \times \vec{B} \quad (1)$$

여기서 $e = -1.6 \times 10^{-19}$ C인 전자의 전하량이며, m 은 전자의 운동질량, 즉 $m = \gamma m_0$ 인데, 여기서 m_0 는 전자의 정지질량, $\gamma = 1/\sqrt{1-v^2/c^2}$, 그리고 v 와 c 는 전자의 속력과 광속이다. (1)식의 $d(m\vec{v})/dt$ 는 시간 dt 동안 운동량의 변화로서 $d(m\vec{v}) = m_0 \vec{v} d\gamma + m_0 \gamma d\vec{v}$ 인데, 진공에서 전자의 에너지의 변화는 없으므로 $d\gamma = 0$ ($v = \text{일정}$)이며, 곧 $d(m\vec{v}) = m_0 \gamma d\vec{v}$ 이다. 전자의 속도가 변화하지 않으므로 작은 이동거리 ds 에 대하여 $dt = ds/v$ 로 치환할 수 있으며, 이를 이용하여 전자의 단위 거리당 방향의 변화를 유도하면 다음과 같다.

$$\frac{d\hat{v}}{ds} = \frac{e}{m_0 v^2 \gamma} \vec{v} \times \vec{B} \quad (2)$$

여기서 $\hat{v} \equiv \vec{v}/v$ 로 정의되는 속도의 단위벡터이다. 총에너지 E_t 인 전자에 대하여 $\gamma = E_t/0.511$ 이며, $\vec{v} \times \vec{B}$ 의 크기는 $vB \sin \phi$ 이므로, 전자의 단위경로당 방향변화는 v 와

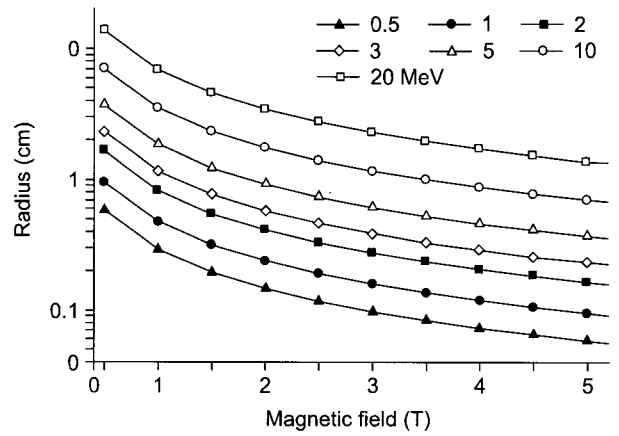


Fig. 1. Orbit radii of the clinical electrons as a function of transverse magnetic field.

E_t 에 반비례하며, B 와 $\sin \phi$ 에 비례함을 알 수 있다. 여기서 ϕ 는 \vec{v} 와 \vec{B} 사이의 각이다. $\vec{v} \times \vec{B}$ 의 방향은 언제나 v 와 B 에 수직으로 작용하므로 $\phi \neq 0$ 이면 전자는 원운동하며 이 때 궤도반경(cm)은 다음과 같음을 알 수 있다.

$$R = \frac{mv}{eB} \sin \phi \approx 0.334 \frac{E_{total}}{B} \sin \phi \quad (3)$$

여기서 E_{total} 은 전자의 운동에너지와 정지에너지의 합으로 정의되는 MeV 단위의 전자의 총에너지이며, B 는 Tesla 단위의 자기장이다. 이 식을 이용하여 다양한 에너지 전자들에 대하여 수직으로 인가되는($\phi = 90^\circ$) 자기장 세기의 함수로서 계산한 궤도반경은 Fig. 1과 같다.

물질 속에서 전자는 물질과의 상호작용에 의하여 에너지를 잃는데, 이때 단위 경로길이당의 에너지손실은 충돌과 제동복사의 기여에 대한 합으로서 총저지능(total stopping power), $S = dE/ds$ 으로 주어진다.¹¹⁾ 따라서 작은 이동거리 Δs 를 정의하고, 저지능을 이용하여 Δs 거리에 대한 에너지의 변화와 (2)식을 이용하여 전자의 방향변화를 고려함으로써 전자의 경로를 수치적으로 계산할 수 있다. 이러한 수치계산에서 계산의 정밀도는 Δs 의 크기에 반비례하는데, 이를 위하여 에너지변화와 방향변화가 모두 작은 값을 가지도록 Δs 를 결정해야 하는 것은 중요하다.⁹⁾

적절한 Δs 의 결정을 위하여 먼저 운동 중인 전자의 에너지와 방향의 변화율을 다음과 같이 정의하였다.

$$\delta_E \equiv \Delta E/E \quad (4)$$

$$\delta_V \equiv |\Delta \hat{v}|$$

δ_E 와 δ_V 은 매우 작은 ($\delta_E \ll 1, \delta_V \ll 1$)으로서 값계산의

초기에 결정하는 임의의 상수이다. 이로부터 에너지와 방향의 변화에 대한 Δs_E 와 Δs_V 가 각각 다음과 같이 유도되는데,

$$\begin{aligned} \Delta s_E &= \delta_E \frac{E}{|dE/ds|} \\ \Delta s_V &= \delta_V \frac{v}{|d\hat{v}/ds|} \end{aligned} \quad (5)$$

Δs 는 두 값 중 작은 값을 취하여 결정할 수 있다. 즉, $\Delta s = \min(\Delta s_E, \Delta s_V)$ 이다. 여기서 dE/ds 는 전자의 총저지능과 같으며, $|d\hat{v}/ds|$ 은 단위 경로길이당 단위벡터 변화의 크기와 같으며 (2)식으로 계산할 수 있다. 본 연구에서는 $\delta_E = \delta_V = 0.02$ 로 취하였는데, 이 값의 의미는 Δs 이동시 최대 2%의 에너지손실 또는 최대 2%의 방향변화를 가지도록 Δs 를 결정한다는 것과 같다.

한편, (2)식의 유도에서 속도가 일정한 것으로 간주하였는데, 결정된 Δs 에 따라 (2)식의 계산에서 오차를 유발할 수 있다. 그러나 본 연구에서 대상 전자 에너지들은 MeV 차수를 가지므로 물에 의한 에너지손실 과정에서 에너지(질량)의 변화만이 있을 뿐 약 0.511 MeV가 될 때까지 전자의 속도는 광속에 가까운 속도로 일정하게 유지되므로, $dt=ds/v$ 의 오차는 매우 작을 것이다. 또한 낮은 에너지 전자에 대한 방향변화의 계산에서 오차가 있을 수 있지만, 0.5 MeV 이하의 전자들의 물에서 CSDA (continuous slowing down approximation) 비정이 0.2 cm 이하이므로¹¹⁾ 이들의 고려는 중요하지 않다.

2. 계산구조

본 연구에서는 전자의 궤적을 계산하기 위하여 오일러 방법(Euler method)¹²⁾를 이용하여 수치계산을 수행하였다. 이 방법은 적분 구간을 매우 작게 나누어 각 구간에 대한 미분값을 차례로 계산하여 결과를 누적시켜 최종적으로 수치적 해를 구하는 방법이다. 이 방법을 본 목적에 적용하면, 계산구간을 전자의 초기에너지, E_1 와 최종에너지, E_n 으로 정의하고, 에너지 E_i 에 대하여 Δs_i 를 결정하고 방향을 고려하면서 Δs_i 를 점차 누적시켜 전자의 위치, $\vec{r}_i = (X, Y, Z)_i$ 를 추적하는 것이다. 즉, i 번째 계산에 대하여 먼저 (4), (5)식으로부터 Δs_i 를 결정하고 (2)식을 이용하여 $(d\hat{v}/ds)_i$ 를 계산한 후 방향변화를 $\Delta \hat{v}_i$ ($d\hat{v}/ds)_i \Delta s_i$ 와 같이 계산한다. 따라서 i 번째 계산에서 전자의 방향은 다음과 같다.

$$\hat{v}_i = \hat{v}_{i-1} + \Delta \hat{v}_i \quad (6)$$

또한 이로부터 결정되는 전자의 미소변위는 $\Delta \vec{r}_i = (\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)_i = \Delta s_i \hat{v}_i$ 이며, 전자의 위치는 다음과 같다.

$$(X, Y, Z)_i = (X, Y, Z)_{i-1} + (\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)_i, \quad (7)$$

이와 같이 i 번째 계산에 대한 방향과 변위가 결정되면 다음과 같이 에너지의 변화를 계산한다.

$$E_i = E_{i-1} - \Delta E_i \quad (8)$$

이 식에서 에너지의 감소 ΔE_i 는 저지능 S_i 로부터 $\Delta E_i = S_i \Delta s_i$ 이다. 이와 같은 방법으로 초기조건 즉, $i=0$ 에서 초기에너지, E_0 , 초기좌표, $(X, Y, Z)_0 = (0, 0, 0)$, 초기방향, $\vec{v}_0 = v_0 \hat{k}$ 을 가지는 전자에 대하여 에너지가 초기에 설정한 하한값에 도달할 때까지 $i=0, 1, 2, \dots, n$ 의 계산을 반복적으로 수행하여 각 i 에 대하여 좌표를 추적함으로써 전자의 궤적을 계산할 수 있다. 여기서 \hat{k} 는 Z축에 대한 단위벡터이다. 지금까지 본 연구에서 사용한 오일러 방법에 대하여 알아보았다. 본 연구에서는 이러한 계산구조에 대하여 Fig. 2와 같은 순서도를 작성하고 포트란(fortran)언어로 구현하여,¹³⁾ 물에 입사한 3, 5, 10, 15 MeV 전자에 대하여 그리고 수직($\vec{B} = B\hat{j}$, transverse magnetic field) 또는 평방향($\vec{B} = B\hat{k}$, longitudinal magnetic field)으로 인가되는 외부 자기장 1, 2, 3, 4, 5 T에 대하여 전자의 궤적

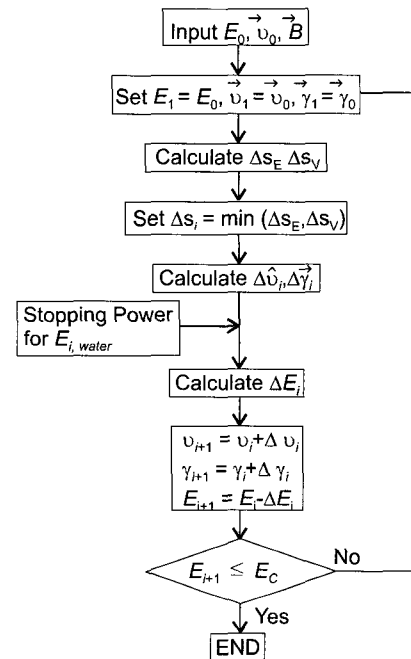


Fig. 2. Flow diagram for the numerical calculations in this study.

을 계산하였다. Fig. 2에서 E_c 는 종단에너지(terminal energy)인데, 본 계산에서는 $E_c=0.1$ MeV로 취하였다.

결 과

Fig. 3은 물에 입사하는 3, 5, 10, 15 MeV 전자에 대하여 입사방향($\vec{v} = v\hat{k}$)과 수직으로 인가된 자기장($\vec{B} = B\hat{y}$)에서 운동하는 전자의 궤적을 계산한 결과들이다. 전자속도와 자기장의 사이각은 $\phi=90^\circ$ 이므로 전자는 최대로 편향을 받는데, $(-)\vec{e}\vec{v} \times \vec{B}$ 및 $(-)\hat{k} \times \hat{y} = +\hat{i}$ 이므로, 전자는 X방향으로 편향을 받으면서 원운동의 형태를 취하며, 에너지와 자기장 세기의 함수로서 전자의 궤도 반경은 (3)식으로 주어진다. 또한 전자는 진행 중 물과의 상

호작용으로 에너지를 잃으므로 그림과 같이 회전반경은 점차 줄어드는 형태를 가진다. 전자의 회전반경은 에너지와 자기장의 세기에 반비례하므로 높은 에너지와 강한 자기장에서 전자는 수회 이상 회전하면서 정지하는 형태를 보인다.

이 결과들은 다중산란과 이차전자의 발생을 무시한 근사적 궤적이므로, 실제 전자의 궤적과 차이가 있으며 정확성의 검증은 어렵다. 본 연구에서는 해석적 방법으로 전자궤도를 연구했던 Jette의 계산 결과¹⁰⁾를 이용하여 본 계산의 결과를 평가하였는데, 세 종류의 자기장 조건에 대하여 본 방법을 사용하여 계산한 결과와 Jette의 계산결과를 Fig. 4에 함께 제시하였다. 이 그림에서 점들은 Jette가 발표한 논문¹⁰⁾의 그래프로부터 임의의 점들을 취하여 나타낸 값들인데, 두 값들에 대한 오차를 평가하지는 않

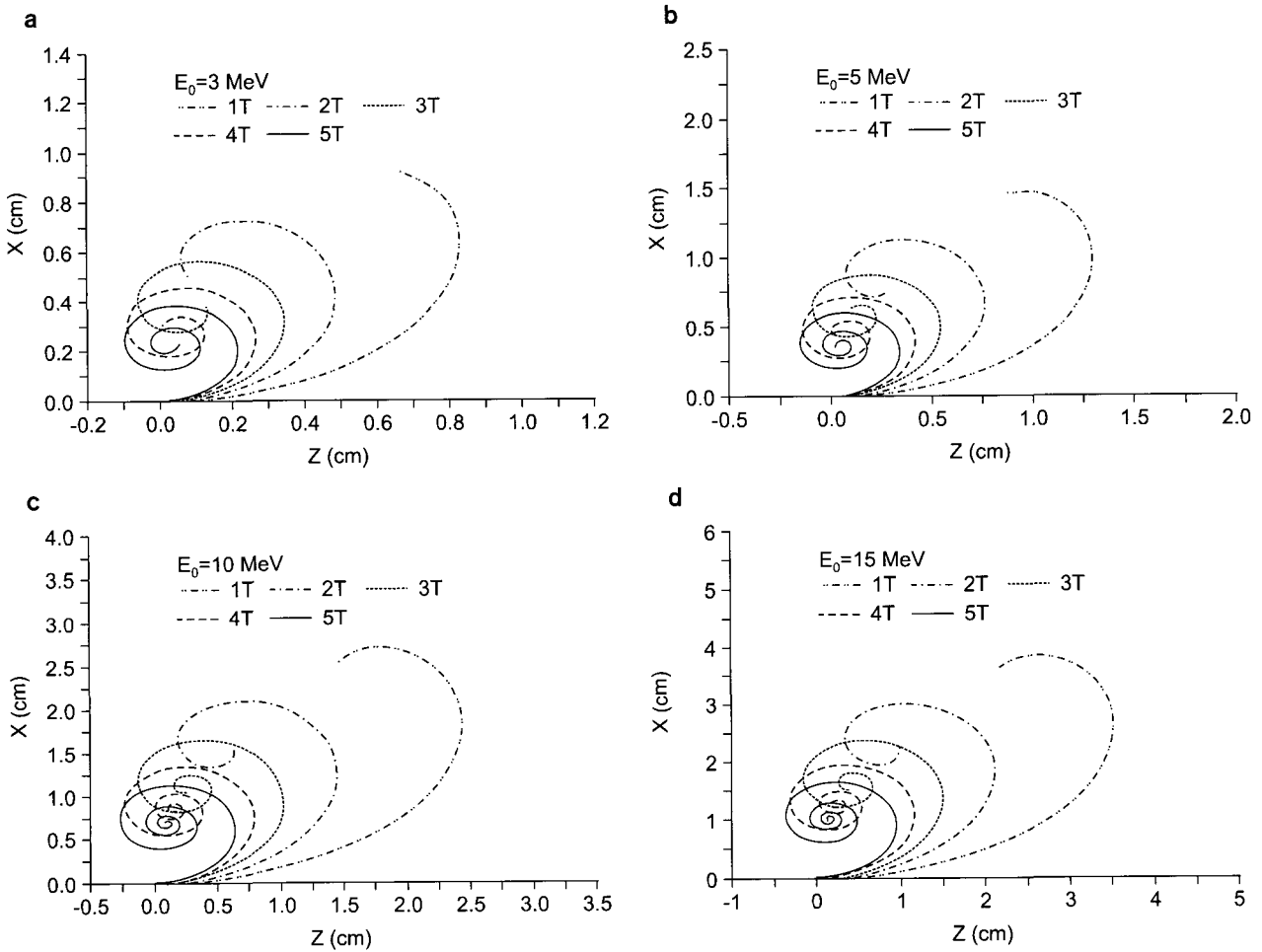


Fig. 3. Electron trajectories in water for 3 (a), 5 (b), 10 (c), and 15 (d) MeV electrons in the presence of -transverse magnetic fields of 1-5 T.

았지만(그래프로부터 수작업으로 읽은 값들이므로), 두 결과가 서로 잘 일치함을 알 수 있다. 서론에서 언급하였듯이 Jette는 전자의 저지능을 상수로 가정하고 계산하였지만, 본 계산에서는 각 에너지에 대한 정확한 저지능을 사용하였다. 따라서 물에서 전자의 저지능은 높은 에너지에서 거의 일정하게 유지되다가 약 0.5 MeV 이하에서 급격히 증가하는 경향을 보이므로,¹¹⁾ 전자의 총 도달거리는 Jette의 결과가 약간 길게 평가되어야 한다. 그러나 0.5

MeV 이하에서 전자의 비정은 매우 짧은 거리(1~2 mm)를 가지므로¹¹⁾ Fig. 4에 제시된 두 결과에서 이러한 차이는 거의 구분되지 않는다. 따라서 본 방법에 의한 계산결과와 Jette의 계산결과 사이에 큰 차이가 없으며 서로 잘 일치하는 것으로 잠정적 결론을 내린다.

본 연구의 수치연산에 의하여 계산한 결과들이 복잡한 공식들을 사용한 해석적 연구의 결과들과 잘 일치한다는 것은 중요하다. 그 이유는 현재는 고려되지 않은 다중산란과 이차전자 발생과 같은 추가적 전자 수송의 변수들을 고려하는 경우에 본 방법이 보다 용이할 수 있기 때문이다.

다음은 수평방향의 자기장 ($\vec{B} = B\hat{k}$)에 대한 전자 궤적의 계산결과를 논의한다. 수평방향 자기장에서 Z축과 평행하게 입사하는 초기의 전자는 편향을 받지 않으며 물과 상호작용하는데, 전자는 다중산란에 의하여 쉽게 측면 경로를 취하므로, 침투 깊이의 증가에 따라 전자는 속도 및 산란각의 함수로서 자기장에 의하여 편향을 받을 것이다. 이러한 현상들은 다중산란을 고려하지 않는 현재의 계산구조로는 계산할 수 없으며, 단지, 수평방향 자기장에서 입사전자에게 임의의 산란각을 부여함으로써 전자의 편향을 근사적으로 확인할 수 있는데, 수평방향 자기장에서 Z축과 45도 각도로 입사한 5 MeV 전자에 대하여 궤적의 계산결과를 Fig. 4에 보였다. 이때 전자의 방향

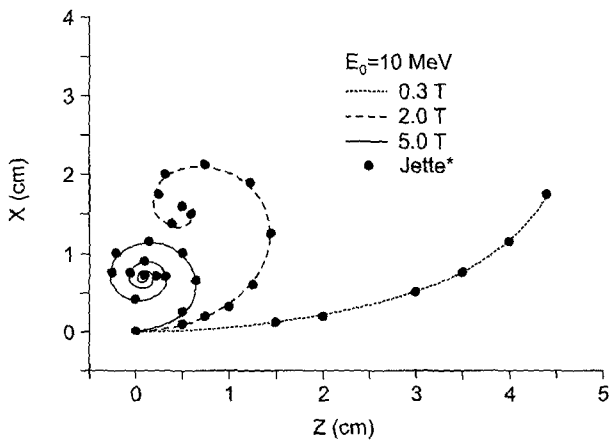


Fig. 4. Comparison of trajectories from this work and Jette's work. *The points were manually extracted from the graphs of ref. 10.

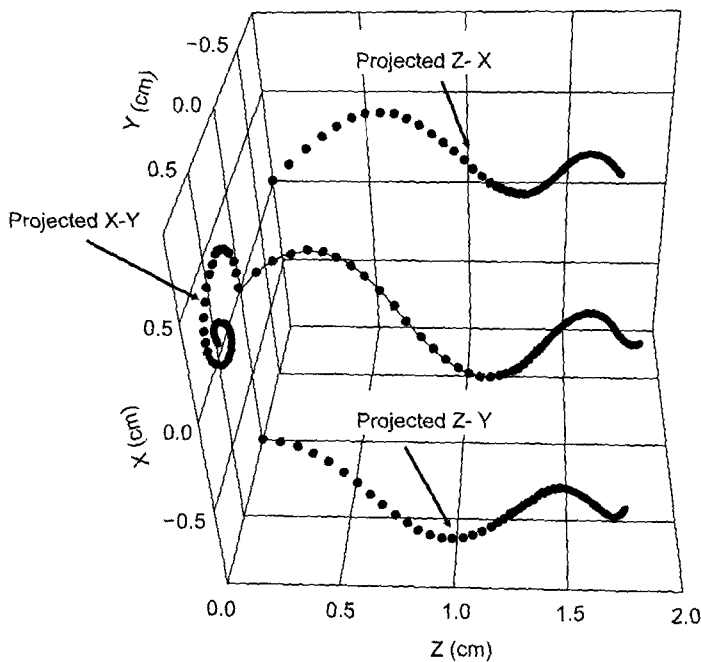


Fig. 5. Trajectories for 5 MeV electrons under longitudinal magnetic fields.

은 X축과 45도를 이루며 Y축에 대한 각(방위각)은 0도이다. 이 경우에 전자의 속도는 X와 Z성분의 합으로서, $\vec{v} = v\sin(\pi/4)\hat{i} + v\cos(\pi/4)\hat{k}$ 로 주어지며, 전자는 힘, $(-e)\vec{v} \times \vec{B}$ 를 받는데, 초기 입사전자는 속도의 X성분만이 기여하여, 힘의 방향은 $-\hat{i} \times \hat{k} = +\hat{j}$ 이므로, Y방향으로 편향을 받는다. 따라서 전자의 수송이 진행됨에 따라 속도의 X성분은 점차 감소하며 Y성분은 점차 증가하는데, 수학적으로 X방향의 속도는 코사인 함수 형태로 변화하고, Y방향의 속도는 사인 함수 형태로 변화한다. 전자의 변위는 속도의 시간에 대한 적분이므로 X방향의 변위는 사인함수, Y방향의 변위는 코사인함수 형태를 가진다. Fig. 4에 나타낸 Z-X와 Z-Y 평면에 대한 투영된 궤적을 통하여 이를 확인할 수 있다. 결과적으로 이러한 형태의 운동은 속도의 X성분의 연속적 회전으로 해석되므로, X-Y 평면에 투영된 전자의 궤도는 그림에서와 같이 원형이다. 또한 전자는 진행 중 에너지를 잃으므로 원궤도의 반경은 에너지에 반비례하여 감소한다. 본 연구에서는 이러한 형태의 운동이 다른 에너지 및 다른 입사각에서도 유사하게 나타남을 확인하였으며, 본 논문에서는 $\vec{B} = B\hat{k}$ 의 자기장 조건에 대한 다른 에너지에 대한 계산결과들의 제시를 생략하였다. 지금까지 물펄럼의 전자 입사방향에 수직과 수평으로 인가된 자기장에서 전자의 궤적의 근사적 계산결과를 제시하고 해석하였다.

결 론

본 연구의 목적은 물에 임의의 방향으로 인가된 자기장에 대하여 전자의 기본궤적을 수치해석을 이용하여 계산하는 것이었다. 이를 위하여 전자의 방향변화와 에너지 손실을 고려하여 수식을 체계화하고 이를 프로그램으로 구현하여 다양한 에너지 전자에 대하여 자기장 세기의 함수로 계산한 결과를 제시하였다. 그리고 가능한 범위에서 수직방향 자기장에 대한 몇 가지 계산결과들을 Jette¹⁰⁾의 해석적 계산의 결과와 비교하였는데 두 결과가 서로 잘 일치함을 알 수 있었다. 물론 본 논문에 제시된 다른 결과들에 대해서도 계산의 정확성을 평가해야 하지만 현재 충분한 자료가 없으므로 적절한 평가는 어렵다. 그렇지만 본 연구의 수식체계가 단순하고 정확한 에너지손실 자료를 이용하기 때문에 결과들은 신뢰할 수 있다고 생각한다. 이 계산의 결과들은 자기장에서 선량분포의 해석에 매우 유용하게 이용될 수 있는데, 예를 들어 Fig. 3의

결과로부터 수직 방향 자기장에서 깊이선량율이 급격히 증가하는 현상^{1,2,7)}을 설명할 수 있으며, Fig. 5의 결과로부터 수평방향 자기장에서 반응영역이 줄어드는 현상^{6,14)}을 설명할 수 있다. 아울러 Fig. 3의 결과에서 전자의 최종 수렴위치가 약간 벗어난 X방향에 위치하는 것을 관찰할 수 있으며, 이로부터 수직방향 자기장에서 등선량곡선의 이동(shift)을 예상할 수 있는데, 이 연구는 현재 진행 중에 있다. 이와 같이 임의의 방향으로 인가된 자기장에 대한 전자의 궤적을 계산함으로써 선량분포의 기본적인 변화 형태를 사전에 예측할 수 있다는 것은 중요하다. 더 나아가서 본 계산 방법은 다른 분야에도 응용될 수 있다. 물론 보다 실제에 가까운 전자궤적을 계산하기 위하여 후속 연구로서 다중산란의 고려와 이차전자의 궤적계산을 추가적으로 고려해야 할 것이다. 한편, 본 계산 알고리즘을 몬테칼로 계산코드에 이식하는 경우에 자기장 속에서 다양한 상호작용을 포함하여 전자 수송을 계산할 수 있으며, 이로부터 선량분포의 변화를 예측할 수 있다. 이 방법은 다양한 연구자들이 몬테칼로 계산에서 취하는 방법이지만,^{1-3,5,14)} 알고리즘이 충분히 공개되어 있지 않기 때문에 본 연구를 기반으로 독자적인 몬테칼로 계산기술을 확보하는 것도 매우 중요하다고 할 수 있다. 따라서 추후 연구는 이러한 분야에 대한 지속적 연구의 수행이라고 할 수 있으며, 아울러 실험을 병행한 연구들도 적극적으로 수행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. Nardi E, Barnea G: Electron beam therapy with transverse magnetic fields. *Med Phys* 26:967-973 (1993)
2. Lee, MC, Ma CM: Monte Carlo characterization of clinical electron beams in transverse magnetic field. *Phys Med Biol* 45:2947-2967 (2000)
3. 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)
4. Litzenberg DW, Fraass BA, McShan DL, et al: An apparatus for applying strong longitudinal magnetic fields to clinical photon and electron beams. *Phys Med Biol* 46: N105-N115 (2001)
5. 정동혁, 오영기, 신교철 등: 자기장이 인가된 물펄럼 속의 전자선 선량분포 계산을 위한 EGS4 제어코드의 개발과 응용. *의학물리* 14:1-7 (2003)
6. 오영기, 정동혁, 신교철 등: 세로 자기장에서 6 MeV 전자선의 선량분포에 관한 몬테칼로 계산. *의학물리* 13:195-201 (2002)

7. 정동혁, 김진기, 김정기 등: 강자기장에 의한 깊이선량율 (PDD) 변화에 관한 연구: 10 MV 광자선에 대한 몬테칼로 계산. 의학물리 14:234-239 (2003)
8. Jackson JD: CLASSICAL ELECTRODYNAMICS 3th ed., JOHN WILEY & SONS, New York(1998), pp. 237-283
9. Bielajew AF: Electron Transport in \vec{E} and \vec{B} Fields. Jenkins TM, Rindi A : Monte Carlo Transport of Electrons and Photons, Plenum Press, New York(1988), pp. 421-427
10. Jette D: Magnetic field with photon beams: Dose calculation using electron multiple-scattering theory. Med Phys 27: 1705-1716 (2000)
11. Attix FH: Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry. JOHN WILEY & SONS, New York(1986), pp. 165-166
12. 백태현, 정학기: 수치해석. 보문당, 서울(2002), pp. 190-196
13. Jeong DH, Oh YK, Kim JK, et al: A test code to calculate the trajectory of charged particles in a medium under external electric and magnetic fields. The second ITRS International Symposium on Radiation Safety and Detection Technology, ISORD-2, Abstract P-6:102-102 (2003)
14. Bielajew AF: The effects of strong longitudinal magnetic fields on dose deposition from electron and photon beams. Med Phys 20:1171-1179 (1993)

Calculation of Trajectory for High Energy Electrons in Water under Strong Magnetic Fields

Dong Hyeok Jeong*, Jeung Kee Kim[†], Young Kee Oh[‡], Kyo Chul Shin[§], Ki Hwan Kim^{||},
Jhin Kee Kim[¶], Sung Kyu Kim[#], Tae Ik Ro[†], Jin Young Kim*, and Young Hun Ji**

*Department of Physics, Kunsan National University, Gunsan, Korea, [†]Department of Physics, Dong-A University, Busan, Korea, [‡]Department of Radiation Oncology, Eulji University Hospital, Daejeon, Korea, [§]Department of Radiation Oncology, Dankook University Hospital, Chonan, Korea, ^{||}Department of Radiation Oncology, Chungnam National University Hospital, Daejeon, Korea, [¶]Research Institute of Clinical Medicine, Chonbuk National University, Jeonju, Korea, [#]Department of Radiation Oncology, Yeungnam University Hospital, Daegu, Korea, **Department of Radiation Oncology, Korea, Institute of Radiological and Medical Sciences, Seoul, Korea

The trajectories for high-energy electrons in water under magnetic fields were calculated approximately by numerical method. A differential equation for electrons under magnetic field was built and the calculation code was devised by Euler method. Using the code, the trajectories for electrons with energies of 3, 5, 10, and 15 MeV in water were calculated in the presence of magnetic fields parallel and perpendicular to the incident electrons. Since we considered only the energy loss and the directional change for primary electrons, there are errors in this calculation. However, based on the results we were able to explain the variation of dose distributions by the external magnetic fields in water.

Key Words: Electron trajectory, Magnetic field