

## 자기장에 의한 깊이선량율(PDD) 변화에 관한 연구 : 10 MV 광자선에 대한 몬테칼로 계산

원광대학병원 방사선종양학과\*, 전북대학교 임상의학연구소†, 동아대학병원 방사선종양학과‡, 단국대학병원 방사선종양학과§, 충남대학병원 방사선종양학과||, 영남대학병원 방사선종양학과||, 군산대학교 물리학과#, 한국원자력연구원 방사선종양학과\*\*

정동혁\*·# · 김진기† · 김정기‡ · 신고철§ · 김기환|| · 김성규|| · 김진영# · 오영기\*\* · 지영훈\*\*

본 연구에서는 몬테칼로 계산을 이용하여 외부 가로 자기장에 의한 깊이선량율(PDD)의 변화를 고찰하였다. 몬테칼로 계산은 자기장에서 전자의 편향을 고려하도록 수정한 EGS4 몬테칼로 코드를 사용하였다. 자기장에서 깊이선량율의 변화를 기술하기 위하여, 선량증가(DI; dose improvement)와 선량감소(DR; dose reduction)를 정의하였다. 10 MV 광자선에 대하여 1-5 T 자기장 범위에서 계산한 결과, 자기장의 세기에 따라 DI와 DR은 거의 선형으로 각각 증가, 감소하였다. 자기장 3 T의 경우에 조사면 10 × 10 cm<sup>2</sup>와 자기장 인가깊이 5-10 cm에서 DI는 1.56 (56% 증가), DR은 0.68 (32% 감소)로 나타났다. 깊이선량율 변화의 원리는 로렌츠 법칙과 전자평형 개념으로부터 설명하였으며, 이러한 특성을 이용하여 방사선치료의 최적화를 달성할 수 있음을 제안하였다.

**중심단어** : 자기장, 깊이선량율(PDD), EGS4

### 서 론

최근 관심이 증대되고 있는 자기장에 의한 선량분포의 변환 기술은 기존의 선형가속기를 그대로 이용하면서 자기장 발생 장치의 부착만으로 하전입자선과 유사한 형태의 선량분포를 유도할 수 있기 때문에 새로운 방사선치료 기술로서 연구 가치가 높으며 전망이 매우 밝다고 할 수 있다.<sup>1,3)</sup>

Bostick<sup>4)</sup>은 자기장을 이용하여 전자선의 흡수선량을 Bragg Peak와 유사한 형태로 집중시킬 수 있으며, 이러한 원리가 종양치료에 응용될 수 있음을 발표하였다. 그 후 Weinhou 등<sup>5)</sup>은 몬테칼로 계산을 이용하여 최적화 선량분포를 얻기 위한 자기장 장치의 조건들을 결정하였다. Bielajew<sup>6)</sup>는 몬테칼로 계산을 이용하여 세로방향 자기장에서 반응영의 급격한 감소를 고찰하였는데, 그 후 여러 연구자들에 의하여 자기장을 이용한 방사선치료의 장점들이 보고되어졌다. 최근 들어 Litzenberg 등<sup>7)</sup>은 약 3 T의 초전도 자

기장 발생장치를 이용하여 마이크로트론(MM50, Scanditronix, Sweden)에서 발생된 전자선과 광자선의 선량분포를 변화시키는 실험에 성공하였다. 이것은 지금까지의 연구들에 대한 가능성의 확인과 함께 이러한 분야의 기술개발이 가속화될 수 있음을 암시하는 중요한 실험으로 평가할 수 있다.

이러한 배경과 함께 본 연구에서는 광자선에 대하여 빔축과 수직으로 인가되는 가로 자기장(transverse magnetic field)에서 깊이선량율(PDD)의 변화를 몬테칼로 계산을 이용하여 고찰하고자 한다. 본 연구의 결과들은 자기장 영향 하에서 선량변화를 이해하는데 도움이 될 수 있으며, 추후 실험을 병행한 연구의 수행시 참고자료로서 활용될 수 있다. 다음의 재료 및 방법에서는 외부 자기장에 의한 깊이선량율의 변화를 몬테칼로 계산하는 방법에 대하여 기술하였으며, 결과 및 결론에서는 계산결과에 대한 토의와 함께 추후연구에 대하여 논의하였다.

### 재료 및 방법

본 연구에서 깊이선량율의 계산을 위하여 사용한 몬테칼로 계산코드는 자체 개발한 자기장 계산 알고리즘<sup>8)</sup>이 이식된 EGS4 (electron gamma shower version 4) 코드<sup>9)</sup>이다. EGS4 주요부는 사용자코드(user code)에 의하여 제어되는데, Fig. 1에 본 연구에서 작성한 사용자코드의 기하구조를

이 논문은 2003년 10월 4일 접수하여, 2003년 11월 14일 채택됨. 본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 중·장기 사업 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

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

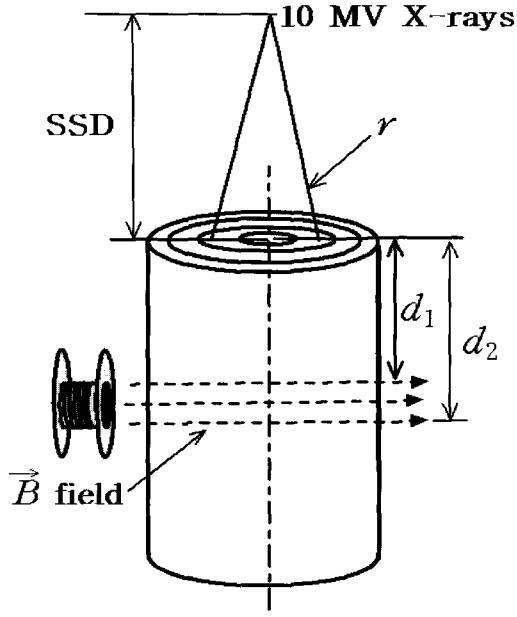


Fig. 1. The geometry of the photon beam and the magnetic field for Monte Carlo calculation.

나타내었다. 이 그림에서 보여지는 바와 같이 깊이선량율의 계산은 원통형 물팬텀에 대하여 수행하였는데, 팬텀의 전체 크기는 직경 30 cm, 높이 30 cm이다. 또한 빔축에 위치한 흡수선량 검출영역들의 직경은 1.0 cm, 두께는 0.25 cm이었다. 선원은 Mohan 등<sup>10)</sup>이 발표한 10 MV X-선 스펙트럼을 이용하였다. 이 때 자기장( $\vec{B}$  field)은 그림과 같이 빔축과 수직으로  $d_1$ 과  $d_2$  깊이 사이에 균일하게 인가되는 것으로 가정하였다. 본 연구에서  $d_1$ 과  $d_2$ 는 각각 5 cm와 10 cm이다.

몬테칼로 계산은 팬텀 빔에 대한 궤적계산으로부터  $5 \times 5$ ,  $10 \times 10$ ,  $15 \times 15$  cm<sup>2</sup> 조사면에 대한 선량계산으로 확장하였으며, 광자이력은 궤적계산에서 500개 그리고 선량계산에서  $5 \times 5$ ,  $10 \times 10$ ,  $15 \times 15$  cm<sup>2</sup> 조사면에 대하여 각각 5백만, 2천만, 4천5백만개를 처리하도록 하였다. 이때 조사면에 따라 광자이력(photon histories; total number of incident photons)을 다르게 취한 것은 각 조사면에 대하여 동일한 입사 선속(incident fluence)을 가지도록 하기 위해서이다. 사용 컴퓨터는 개인용 컴퓨터(Pentium CPU 1.2 GHz, Intel, US)이며, 이 컴퓨터는 초당 약 3,000개의 광자이력을 처리하는 것으로 조사되었다.

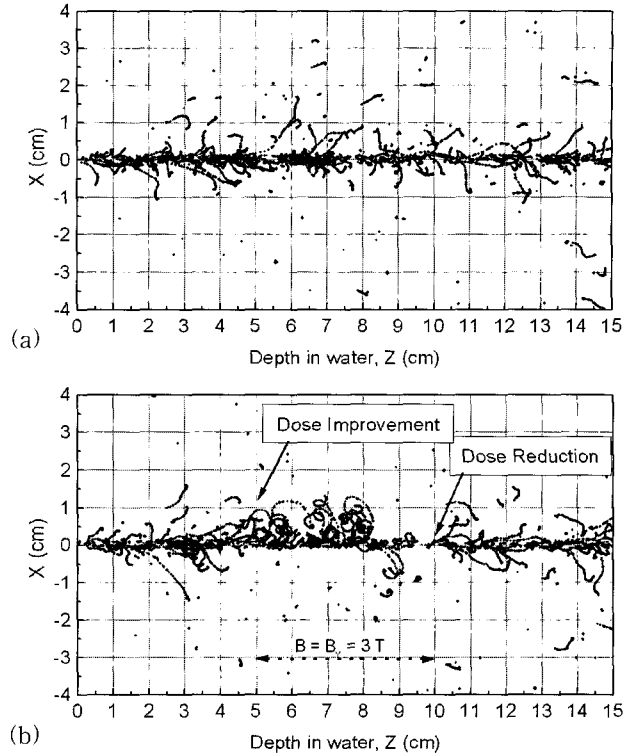


Fig. 2. Tracks of secondary electron emerging from the 10 MV photons without (a) and with (b) transverse magnetic field of 3 T.

## 결 과

### 1. 선량변화 해석

Fig. 2는 팬텀에 입사하는 500개의 광자들(10 MV 광자선 스펙트럼에서 표본추출됨)에 대한 팬텀속 이차전자 또는 델타선(delta rays)들의 국소 궤적을 나타내는 그림이다. 이 그림은 몬테칼로 계산코드에서 이차전자만을 선별하여 좌표를 표시하도록 수정하고 계산한 결과를 Z-X 평면으로 투영한 그림이다. 이 그림에서 (a)는 자기장이 없을 때 전자의 궤적을 나타내며 (b)는 3 T 자기장에 대한 전자의 궤적을 나타낸다. 이 때 자기장의 인가 영역은 5-10 cm 범위이며, 자기장의 방향은 +Y 방향으로서 지면으로부터 밖으로 나오는 형태이다. +Z 방향으로 속도  $\vec{v} = v\hat{k}$ 로 운동하는 전자는, 자기장  $\vec{B} = B\hat{j}$ 에 의하여 로렌츠 힘(Lorentz force)  $\vec{F}_L = q\vec{v} \times \vec{B}$ 을 받는데,  $\hat{k} \times \hat{j} = -\hat{i}$  그리고 전하  $q = -e$ 이므로, 힘의 방향은 +X이다. 따라서 전자는 +X 방향으로 편향되며, 이 힘은 경로에 수직한 방향으로 연속적으로 작용

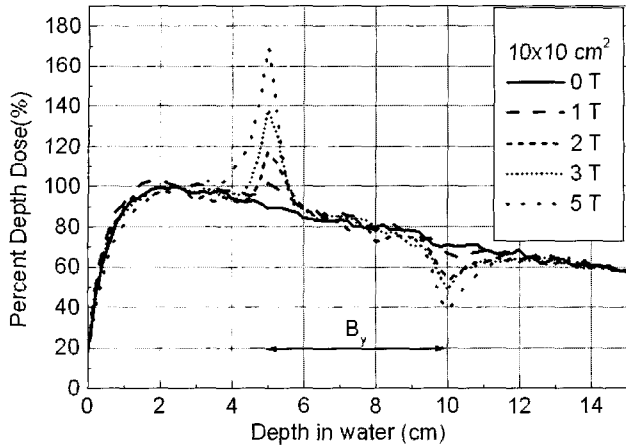


Fig. 3. PDD curves for a 10 MV X-ray at  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  field size in the presence of transverse magnetic fields applied at the depth region of 5-10 cm.

하므로 전자는 반시계 방향으로 원운동한다. 여기서  $\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$  는 단위벡터이다. 그림 (b)에서 자기장 영역인 5-10 cm 깊이에서 전자의 궤적이 위쪽(+X 방향)으로 이동하면서 원을 그리는 형태가 되는 것을 알 수 있다. 이 그림으로부터 자기장 영역에서의 선량변화를 설명하면 다음과 같다.

자기장 영역 5-10 cm에 대하여, 5 cm 깊이의 경우에 5 cm 이전 깊이에서 발생한 전자들과 5 cm 이상 깊이에서 발생하여 다시 5 cm 깊이 쪽으로 편향된 전자들이 모두 흡수 선량에 기여하므로 선량의 증가(Dose Improvement)가 발생한다. 또한 전자의 편향은 자기장 영역 내에서만 발생하며 통계적 관점에서 이들의 편향확률이 대등하다고 가정하면 5 cm와 10 cm 깊이 사이에서는 전자평형 상태가 되어 자기장에 의한 선량의 변화가 나타나지 않는다. 그러나 자기장의 종단부인 10 cm 깊이의 경우에 편향을 받은 전자들이 앞쪽 깊이로 편향되며, 이 후 깊이에서는 자기장이 작용하지 않으므로 전자는 본래의 경로를 취한다. 따라서 10 cm 깊이에서는 전자평형이 고갈되는 상태가 되어 선량의 감소(Dose Reduction)가 나타난다. (b) 그림에서의 Dose Improvement와 Dose Reduction의 의미는 이와 같은 해석으로부터 표현되었다.

2. 깊이 선량을 변화

궤적계산 결과를 통한 해석으로부터 조사면  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 에 대한 깊이선량의 변화를 예상할 수 있는데, 다양한 자기장의 세기에 대한 결과를 Fig. 3에 나타냈다. 이 그림에서 예상과 같이 5 cm 영역에서는 흡수선량의 급격한 국소적 증가가 발생하며 또한 10 cm 영역에서는 흡수선량의 급격한 국

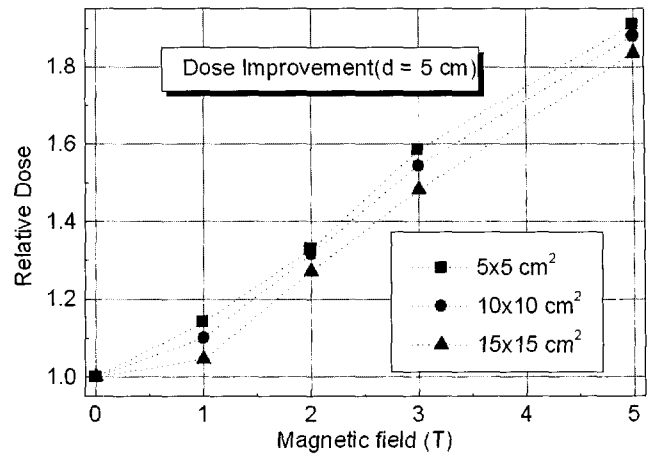


Fig. 4. Dose improvement (DI) as a function of transverse magnetic fields at the depth of 5 cm in water for the various field sizes.

소적 감소가 발생하는 것을 알 수 있다.

본 논문에서는 이러한 성질들을 조사면 및 깊이에 따라 조사하기 위하여 다음과 같은 두 물리량,  $DI$ (dose improvement)와  $DR$ (dose reduction)를 정의하였다. 이 정의는 Wadi-Ramahi 등<sup>2)</sup>이 세로자기장의 효과를 연구한 논문에서 도입한 개념과 유사하다.

$$DI(B, d_1) = \frac{PDD(B, d_1)}{PDD(0, d_1)} \dots\dots\dots (1)$$

$$DR(B, d_2) = \frac{PDD(B, d_2)}{PDD(0, d_2)} \dots\dots\dots (2)$$

이 식들에서 알 수 있듯이  $DI$ 와  $DR$ 은 모두 자기장과 깊이의 함수이다. 그러나 깊이의 경우에  $DI$ 에서는 자기장 상단 깊이에 대하여 정의하며  $DR$ 에서는 자기장 종단 깊이에 대하여 정의하는 점에서 서로 다르다.  $DI$ 는 자기장 상단깊이( $d_1$ )의 증가된 선량과 자기장이 없을 때의 선량의 비이며,  $DR$ 는 자기장 종단깊이( $d_2$ )의 감소된 선량과 자기장이 없을 때의 선량의 비와 같다.

Fig. 3에서 자기장 3 T의 경우에  $DI$ 는 1.56 그리고  $DR$ 은 0.68을 얻을 수 있는데, 이것은 자기장 3 T를 5-10 cm에 인가할 때 5 cm 깊이에서 56%의 선량증가가 발생하며, 10 cm 깊이에서 32% (1-0.68)의 선량감소가 나타남을 의미한다. 이 그림에 나타난 바와 같이  $DI$ 는 자기장의 세기에 따라 각각 증가하며  $DR$ 은 감소하는 것을 예상할 수 있다.

한편,  $DI$ 와  $DR$ 은 조사면의 크기에 따라 차이를 보일 수 있다. 따라서 본 연구에서는 조사면  $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 와  $15 \times 15 \text{ cm}^2$ 에 대하여 동일한 방법으로 깊이선량의 계산을 수행하였으

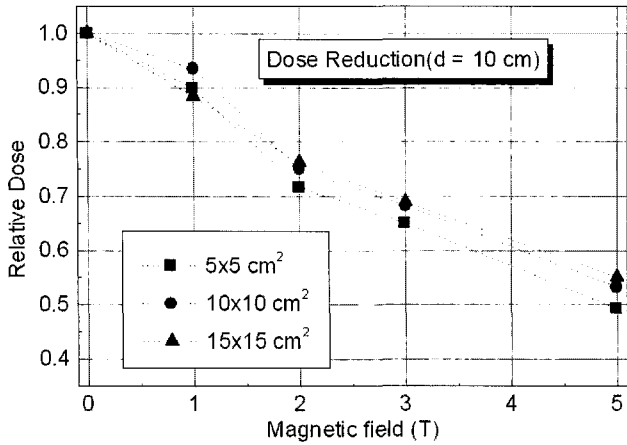


Fig. 5. Dose reduction (DR) as a function of transverse magnetic fields at the depth of 10 cm in water for the various field sizes.

며, 그 결과들을 10×10 cm<sup>2</sup>의 결과와 함께 Fig. 4와 5에 나타내었다. 두 결과에서 알 수 있듯이 조사면의 크기에 따라 *DI*는 약간 감소하며, *DR*은 1 T를 제외하고 대체로 증가하는 경향을 보이는 것을 알 수 있다(1 T의 경우는 계산의 통계적 오차로 인한 것으로 보임). 이 현상에 대하여 상세한 분석은 어려운데 그 이유는 한 점에서 흡수선량의 변화가 조사면과 자기장에 동시에 의존할 수 있기 때문이다. 본 논문에서는 일반적 개념들을 도입하여 다음과 같이 *DI*와 *DR*이 조사면 의존성을 해석하였다.

먼저 일정한 자기장 하에서 조사면에 따라 *d*<sub>1</sub>에서 일정한 크기(깊이선량율 상에서 높이,  $\delta P_1$ )의 선량증가가 나타나며, *d*<sub>2</sub>에서도 일정한 크기( $\delta P_2$ )의 선량감소가 난다고 가정하면, ①식과 ②식은 다음과 같이 쓸 수 있다(논의의 단순화를 위하여 수식에서 조사면  $\gamma$ 에 대한 의존성만을 고려함).

$$DI(r) = \frac{PDD(r) + \delta P_1}{PDD(r)} = 1 + \frac{\delta P_1}{PDD(r)} \dots\dots\dots (3)$$

$$DR(r) = \frac{PDD(r) - \delta P_2}{PDD(r)} = 1 - \frac{\delta P_2}{PDD(r)} \dots\dots\dots (4)$$

따라서 일반적으로 자기장이 없을 때 조사면의 증가에 따라 깊이선량율이 증가되기 때문에, *DI*는 조사면의 증가에 따라 감소하며, *DR*은 증가하는 것으로 단순히 해석할 수 있다. 그렇지만  $\delta P_1$ 과  $\delta P_2$ 가 조사면에 따라 일정하지는 아직 분명하지 않다. 이를 위하여 일정한 자기장에 대하여 다음을 고려하자. 먼저 각 인자에 조사면 의존성을 부여하고, 이들을 절대선량으로 분해하면(깊이선량율의 차원이므로), 각각 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta P_1(r) = \frac{\delta D(r)_{d_1}}{D_m(r)}, \quad \delta P_2(r) = \frac{\delta D(r)_{d_2}}{D_m(r)} \dots\dots\dots (5)$$

여기서  $D_m(r)$ 은 조사면  $\gamma$ 에서 최대선량깊이의 절대선량이며,  $\delta D(r)_{d_1}$ 는 깊이 *d*<sub>1</sub>에서 자기장에 의한 선량의 증가분, 그리고  $\delta D(r)_{d_2}$ 는 깊이 *d*<sub>2</sub>에서 자기장에 의한 선량의 감소분이다. 먼저  $D_m(r)$ 은 조사면 산란인자와 관련 있으며 이 인자는 조사면의 크기에 따라 증가하므로, 만약  $\delta D(r)_{d_1}$ 과  $\delta D(r)_{d_2}$ 가 일정하다고 가정하면, 조사면의 증가에 따라  $\delta P_1(r)$ 과  $\delta P_2(r)$ 이 감소하므로 앞의 결과와 같이 *DI*는 감소 *DR*은 증가를 보일 것이다. 나머지 두 인자  $\delta D(r)_{d_1}$ 과  $\delta D(r)_{d_2}$ 의 조사면 의존성을 논의하면 다음과 같다.

앞에서 언급하였듯이 이 두 인자는 동일한 자기장 조건일 때 깊이 *d*<sub>1</sub>과 *d*<sub>2</sub>에서 조사면에 대한 흡수선량의 변화량이다. 이것은 해당 깊이에서 자기장에 의한 전자의 편향 형태 또는 운동 형태와 관련된다고 할 수 있다. 일반적으로 자기장 하에서 흡수선량의 변화에 기여하는 전자들은 높은 에너지 전자들인데, 그 이유는 낮은 에너지 전자들은 비정(range)이 짧기 때문에 편향을 받더라도 그 지점에서 바로 흡수되며, 높은 에너지 전자들은 편향을 받으면서 보다 먼 거리까지 진행할 수 있기 때문이다. 자기장이 없을 때 물속 임의의 깊이에서 조사면에 따라 변화하는 것은 광자분포이며, 일반적으로 넓은 조사면에서 산란광자의 증가가 나타나며 결과적으로 저에너지 이차전자의 발생의 증가로 인하여 흡수선량이 증가된다. 이러한 해석에 의하면, 만약 자기장 하에서도 동일한 광자분포를 가진다고 가정하면, 조사면의 증가에 따른 저에너지 산란전자의 증가는 자기장에 의한 효과를 보다 감소시킬 것이다. 따라서  $\delta D(r)_{d_1}$ 과  $\delta D(r)_{d_2}$ 는 조사면의 크기에 따라 감소하며, 이는  $\delta P_1(r)$ 과  $\delta P_2(r)$ 의 감소를 유도하고, 결과적으로 Fig. 4, 5의 결과와 같은 *DI*의 증가 *DR*의 감소를 유도한다고 할 수 있다. 보다 정확한 분석을 위해서는 조사면 의존성을 포함하여 자기장 인자깊이에 따른 *DI*와 *DR*의 변화에 관한 실험을 병행한 많은 연구가 요구된다고 할 수 있다.

**결 론**

자기장에 의한 선량분포의 변화를 임상에 응용을 위해서는 실험을 병행한 선량분포의 평가와 함께 정확한 선량계산을 위한 기반 연구가 이루어져야 한다. 그렇지만 실험적 연구가 어렵고 또한 평가해야할 자료가 방대하기 때문에 현재 선량분포의 기본적인 변화들 외에 알려진 자료는 매우 적다.

따라서 본 연구에서는 몬테칼로 계산을 이용하여 10 MV X-선에 대한 깊이선량율의 변화만을 자기장의 세기 및 조사면 크기에 대해서만 조사하였다. 본 연구의 결과로부터 나타난 자기장에 의한 깊이선량율의 급격한 증가와 감소특성은 하전입자선의 특성과 유사하며 이로부터 자기장을 이용함으로써 보다 효과적인 방사선치료의 최적화를 달성할 수 있을 것으로 분석된다.

마지막으로 본 논문에서는 자기장 영역에서의 선량변화에 대하여 자기장 세기 및 조사면의 함수로 조사하였으며, 일반적 개념들로부터 결과들의 경향을 해석하였다. 그렇지만 보다 실용적인 정보의 획득을 위한 정량적 해석은 충분히 다루지 못하였으며, 방대한 계산의 어려움으로 인하여 다른 깊이들에 대한 선량변화 또한 다루지 못하였다. 따라서 추후 실험을 병행한 연구를 통하여 보다 많은 자료를 획득하고 보다 객관적인 방법으로 결과를 분석해야 할 것으로 생각한다.

### 참 고 문 헌

1. Nardi E: Electron beam therapy with transverse magnetic fields. *Med Phys* 26:967-968 (1999)
2. Wadi-Ramahi SJ, Naqvi SA, Chu JCH: 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* 28:1711-1712 (2001)
3. 오영기, 정동혁, 신교철 등: 세로 자기장에서 6 MeV 전자선의 선량분포에 관한 몬테칼로 계산. *의학물리* 13:195-201 (2002)
4. Bostick WH: Possible techniques in Direct-Electron-Beam tumor therapy. *Phy Rev* 27:564-565 (1949)
5. 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)
6. Bielajew F: The effect of strong longitudinal magnetic fields on dose deposition from electron and photon beams. *Med Phys* 20:1171-1179 (1993)
7. 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:N105-115 (2001)
8. 정동혁, 오영기, 신교철 등: 자기장이 인가된 물펜탐속의 전자선 선량분포 계산을 위한 EGS4 제어코드의 개발과 응용. *의학물리* 14:1-7 (2003)
9. SLAC Report-265: The EGS4 code system. Stanford Linear Accelerator Center (1985)
10. Mohan R, Chui C, Lidofsky L: Energy and angular distributions of photons from medical linear accelerators. *Med Phys* 12:592-597 (1985)

## Study on Variation of Depth Dose Curves by the Strong Magnetic Fields : Monte Carlo Calculation for 10 MV X-rays

Dong Hyeok Jeong<sup>\*,#</sup>, Jhin Kee Kim<sup>†</sup>, Jeung Kee Kim<sup>†</sup>, Kyo Chul Shin<sup>§</sup>,  
Ki Hwan Kim<sup>||</sup>, Sung Kyu Kim<sup>¶</sup>, Jin Young Kim<sup>#</sup>, Young Kee Oh<sup>\*\*</sup>, and Young Hun Ji<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Department of Radiation Oncology, Wonkwang University Hospital,

<sup>†</sup>Research Institute of Clinical Medicine, Chonbuk National University,

<sup>‡</sup>Department of Radiation Oncology, Dong-A University Hospital,

<sup>§</sup>Department of Radiation Oncology, Dankook University Hospital,

<sup>||</sup>Department of Radiation Oncology, Chungnam National University Hospital,

<sup>¶</sup>Department of Radiation Oncology, Yeungnam University Hospital,

<sup>#</sup>Department of Physics, Kunsan Nat. university

<sup>\*\*</sup>Department of Radiation Oncology, Korea Institute of Radiological and Medical Sciences,

We examined the variation of percent depth dose (PDD) curves for 10 MV X-rays in the presence of magnetic fields. The EGS4 Monte Carlo code was applied and modified to take account of the effect of electron deflection under magnetic field was used. We defined and tested DI (dose improvement) and DR (dose reduction) to describe variation of PDD curves under various magnetic fields. For a magnetic field of 3 T applied at the depth region of 5-10 cm and field size of  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ , the DI is 1.56 (56% improvement) and DR is 0.68 (32% reduction). We explained the results from the Lorentz law and the concept of electron equilibrium. We suggested that the dose optimization in radiotherapy can be achieved from using the characteristics of dose distributions under magnetic fields.

**Key Words :** Magnetic field, Depth dose, Monte Carlo