

## 6 MeV 전자선 치료 시 차폐물질로서 알루미늄, 구리, 납

### Aluminum, Copper and Lead as Shielding Materials in 6 MeV Electron Therapy

이승훈\*, 차석용\*, 이선영\*\*

전북대학교 병원 방사선 중앙학과\*, 전북대학교 의학전문대학원 방사선중앙학 교실\*\*

Seung-Hoon Lee(20514@cuh.co.kr)\*, Seok-Yong Cha(chasy@cuh.co.kr)\*,  
Sun-Young Lee(sylee78@jbnu.ac.kr)\*\*

#### 요약

고 에너지 전자선 치료에 있어서 차폐물질은 종양조직 외 정상조직이나 주요장기를 보호하기 위해 사용된다. 하지만 이러한 물질에서 발생되어지는 산란선은 심부선량에 영향을 줄 수 있으며, 물질원자번호에 따라 다르게 나타난다. 이에 차폐물질로써 사용가능한 알루미늄, 구리, 납 등의 다양한 원자번호 물질을 전하 감약을 95% 되는 두께로 하여 측정과 MCNPX 모의계산으로 산란율을 비교분석하였다. 산란선 영향을 많이 받는 표면의 선량변화율은 최대 물질두께에서 +0.88%, 원자번호에서 +0.43%의 영향을 받으며, 전하 감약을 95% 되는 두께의 알루미늄, 구리, 납 물질은 측정에서 +19.70%, +15.20%, +12.40% 계산에서 +25.00%, +15.10%, +13.70%를 보였다. 이로 인해 산란율은 물질두께가 원자번호보다 많은 영향을 주며, 산란전자가 광자보다 많은 기여를 하고 있음을 알 수 있었다. 이에 임상에서의 적절한 차폐물질은 두께영향 산란선이 적게 방출되는 고 원자번호물질이 적당하다고 사료된다.

■ 중심어 : | 산란전자 | 차폐물질 | 두께 | 원자번호 | 모의계산 |

#### Abstract

During irradiation of lesions in cancer treatment with high energy electrons, normal tissue and critical organs are protected by the shielding material. Scattered radiation that generated the shielding materials affect the depth dose and atomic number. Therefore, we want to examine secondary particles and the scattered photons through calculation and its associated analysis, and compare the measurement for the aluminum, copper, and lead shielding substance of which thickness has 95% charge reduction. Dose change rate which effected scattering radiation was found to be +0.88% for material thickness, +0.43% for atomic number, and +19.70%, +15.20%, +12.40% for measurement, +25.00%, +15.10%, +13.70% for calculation on the aluminum, copper, and lead materials of which thickness has 95% charge reduction, respectively. As a result, we found that scattering rate was dependent on thickness than atomic number. In the dose increasing rate, scattered electrons are more important than scattered photon. For the above mentioned reasons, I think that high atomic number materials should be applied to reduce scattered radiation that generated with thickness effect.

■ keyword : | Scattered Electron | Shielding Material | Thickness | Atomic Number | Simulation |

## I. 서론

고 에너지 전자선은 1950년 처음 치료에 사용되어 1970년 선형가속기의 발달로 오늘날 외과적 수술 및 약물 요법과 함께 중요한 종양 치료방법이 되었다[1][2].

고 에너지 전자선의 특징은 표적-표면 간 거리 100 cm인 경우 최대비점이 6 MeV에서 4 cm, 20 MeV에서 10 cm로 일정 깊이 통과 후 급격한 선량 감소를 보인다. 이에 피부 및 구순암, 유방암의 흉벽조사, 임파절에 대한 부가선량조사, 그리고 두경부 종양 등 5 cm 깊이 이내의 표재성 종양을 치료하는데 사용된다[3].

이러한 고 에너지 전자선 치료는 종양조직의 정상조직이나 주요장기를 보호하기 위해 광자선 치료와 같은 조사야 및 차폐물질을 사용한다[4]. 그러나 고 에너지 전자선 차폐에는 광자선과 다소 차이가 있다. 먼저 조사야의 경우 광자선은 이차 콜리메이터 40×40 cm<sup>2</sup> 안에서 다양한 크기의 조사야를 만들 수 있는 반면 전자선에서는 6×6, 10×10, 15×15, 20×20 그리고 25×25 cm<sup>2</sup>의 고정된 조사야만을 사용하므로 크기에 제한적일 수밖에 없다. 다음으로 차폐물질을 보면 납 또는 저 용융합금물질로 재질은 같으나 사용두께에서 납사용 시 광자선은 7 cm, 전자선은 최대 1 cm로 그 두께가 다르다[5][6]. 이에 전자선 차폐물질은 본태성 떨림 증상으로 재현성이 떨어지는 환자나 유방 치료환자의 회전 전자선치료 방법 중 추가차폐물을 피부에 직접 올려야 하는 경우[7] 등의 피부 위에 올려 사용할 수 있다. 하지만 이와 같이 환자 피부와 차폐물간 이격거리가 없는 경우 산란전자 영향에 의한 차폐물 가장자리의 심부선량증가를 고려해 봐야 한다[8].

산란전자에 대한 연구는 몇몇 연구자들[6][9][10]에 의해 진행되어 왔다. 그 결과 산란전자 및 광자는 조사된 물질 원자번호 및 두께에 비례하여 발생된다고 보고된 바 있다. 이러한 연구는 치료부위 주변 정상조직 및 장기 보호에 초점을 둔 것으로 차폐 부위에 대한 차폐물 산란선의 영향을 연구하였다. 또한 기존의 연구는 저 원자번호 물질의 두께에 대한 환자의 불쾌감과 고 원자번호 물질의 독성으로 뚜렷한 평가를 보여주지는 않았다. 하지만 본 연구에서는 방사선 조사면의 차폐물

질 산란선에 의한 선량증가에 초점을 둔 것으로 Pohlit W 등[9]의 연구와 유사하며, 그들은 25 MeV 에너지에서 차폐물질 산란선에 의한 최대 선량값 27% 증가를 보고하였다. 이러한 영향을 주는 산란선은 물질의 원자번호에 영향을 받으며[5], 이에 저 원자번호 물질이 고 원자번호 물질보다 적은 양의 산란선을 방출시켜 조사면 심부선량 증가율이 다소 낮을 거라는 가정이 성립될 수 있다.

이에 본 연구는 6 MeV 에너지 안에서 전자선 차폐물질로 이용 가능한 저 원자번호 물질인 알루미늄(Z=13), 중간 물질인 구리(Z=29), 그리고 고 원자번호 물질인 납(Z=82)등[6]의 다양한 원자번호에 대한 전자 및 광자의 산란정도를 측정과 계산으로 비교 분석하여, 임상에서의 물질별 유용성 정도를 알아보려고 하였다.

## II. 실험 방법

### 1. 전리함을 이용한 차폐물질별 선량변화 측정

본 연구는 원자번호가 다른 물질에 대한 산란 정도를 알아보려고 각각의 차폐물질을 동일한 두께로 실험하였다. 이는 산란 전자 및 광자가 표적 물질의 원자번호 뿐만이 아닌 두께에도 영향을 받을 수 있기 때문이었다[4]. 실험은 6 MeV 에너지의 전자선속 중심선상에 평행평판형 전리함을 25×25 cm<sup>2</sup> 폴리스티렌 팬텀중심에 끼워 넣은 후 표적-표면 간 거리(Source surface distance: SSD) 100 cm, 조사야(Field size: FS) 10×10 cm<sup>2</sup>로 조정하였다. 차폐물질은 원자번호가 다른 알루미늄, 구리, 납판 각각을 팬텀 표면에 2.0 mm, 4.0 mm, 6.0 mm 두께별로 올려놓았다. 이때 측정 위치는 차폐물 가장자리 선상을 중심으로 선속 조사면으로 1.0 mm 이격 시켜 위치시켰다[그림 1]. 측정값은 Prasad SG 등[7]의 실험을 참조하여 100 cGy를 6회 조사 평균값으로 하였다.

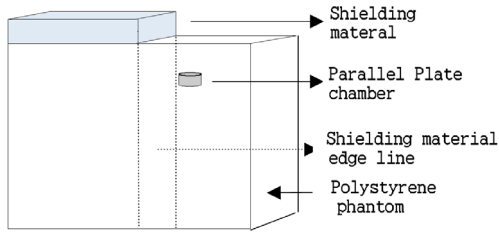


그림 1. 평행평판형 전리함을 이용한 실험 구성도

## 2. Gafchromic EBT2 필름교정 및 측정

이온전리함 선량평가는 한 지점을 측정하는 것으로 공간 분해능이 낮아 적은 산란 변화량을 알아보기에는 다소 어려움이 있다[11]. 이에 높은 공간 분해능과 낮은 분광학적 변화의 특징으로 선량변화량을 2차원적 곡선으로 나타낼 수 있는 Radiochromic 필름[12]중 하나인 Gafchromic EBT2 필름을 사용하였다.

Gafchromic EBT2 필름은 1 ~ 800 cGy 이하의 낮은 선량범위에서 사용 가능하여 기존의 Radiochromic 필름 보다 감도가 높고 에너지 의존성이 적어 광자 또는 고 에너지 전자선의 선량측정에 이용됐다[13][14]. 이에 산란전자에 의한 미세한 심부선량 증가율을 알아보기에 적합하므로 본 연구에서 선택하였다.

먼저 Gafchromic EBT2 필름의 선량-광학농도 선형성 보정을 위한 필름교정은 Sankar A등[15]의 연구방법을 참조 수정하여  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  작은 조각 14장과  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  큰 조각 1장으로 잘랐다.

$5 \times 5 \text{ cm}^2$  필름은 고 에너지 전자선 에너지가 25 MeV 인 경우 차폐물 경계에서의 심부선량증가율이 127% 인 점을 고려하여[9] 각각 10, 30, 50, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 200 MU를 조사하였다.  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  필름은 자연 방사선량(Natural background radiation dose)값을 알고자 하는 것으로 방사선을 조사하지 않았다. 방사선 조사 조건은 의료용 선형가속기에서 발생한 6 MeV 전자선을  $25 \times 25 \text{ cm}^2$  폴리스티렌 팬텀에 조사야  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ , 표적-표면 간 거리 100 cm 으로 하였으며 전자선 최대선량지점인 1.3 cm 깊이에 필름을 놓고 조사하였다.

다음으로 차폐물 사용에 따른 심부선량변화량을 알기 위해 Barouky JE등[16]의 연구방법을 수정하여 실험

하였다. 수정된 연구방법은  $25 \times 25 \text{ cm}^2$  폴리스티렌 팬텀을 수직으로 세운 후 알루미늄, 구리, 그리고 납 등의 가장자리를 중심선속에 위치시켜 심부선량 등선량 곡선을 측정하였다. Gafchromic EBT2 필름은 가로 20.3 cm, 세로 4 cm로 잘라 조사야 중심 선상 팬텀 표면에 필름 끝을 일치시켜 끼웠다. 측정 위치는 산란선의 영향을 많이 받는 표면에서부터 6 MeV 전자선 최대선량이 되는 깊이까지로 최대선량 80 ~ 90% 되는 구간과 90 ~ 100% 되는 구간 중 가장 큰 값을 보일 수 있는 0.6 cm, 1.3 cm 두 지점으로 하였다[17]. 각각의 물질은 팬텀 표면의 전하 감약율 95% 되는 두께로 팬텀 표면 상단에 조사야 횡축면 1/2면까지 올려놓았다. 조사조건은 표적-표면 간 거리 100 cm에서 기준조사야인  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 에 6 MeV 전자선을 이용하여 100 cGy 조사하였다.

조사되어진 모든 필름의 흑화도는 방사선 조사 후 안전한 조건이 되는 24시간 이후에[18][19] Epson Perfection V700 Photo Scanner로 분석하여 필름의 교정인자 및 등선량곡선을 구하였다.

## 3. MCNPX 모의계산

Gafchromic EBT2 필름의 최소 선량 측정 범위는 0.01 cGy로써 그 이하의 선량을 및 발생입자 분포율을 측정할 수 없는 단점이 있다. 하지만 몬테칼로 계산은 물질에서 발생되어지는 사건을 수학적으로 풀어나감으로 범위 제한이 없으며, 입자 형태의 분리 계산이 가능하여 측정으로 어려운 부분을 해결할 수 있어 방사선량 측정에 사용된다[20][21]. 본 계산에서는 LANL (Los Alamos National Laboratory)에서 광자-중성자-전자를 연계 수송해석 할 수 있는 2.5.0 버전의 MCNPX (Monte-Carlo N Particle eXtended) 코드[22]를 사용하였다. MCNPX는 포트란 프로그래머를 사용하여 광자, 전자, 중성자, 그리고 양자를 포함한 34개의 입자를 수송하는 계산이 가능하며, 윈도(Window) 운영체제로 개인용 컴퓨터에서도 실행이 가능한 특징이 있다[11][23]. 그렇지만 정확한 결과를 알기 위해서는 실제 물질과 같은 구조, 구성 및 계산 목적에 맞는 선원, 출력인자(tally)를 세부적으로 해야 하는 어려움이 있다. 이는 제조사의 정보 한계성에 따른 것으로 대부분의 연구자는

관심 분야에 따른 주요부분만 묘사하여 계산하였다 [21][24][25]. 이에 본 연구의 선형가속기 헤드 구성은 Zanini A등[26]의 기록을 참조하고 전자선 모드에 맞게 고려하여 1차 콜리메이터(Primary collimator), 산란막(Scattering foil), 2차 콜리메이터(Secondary collimator) 그리고 치료용 콘(Applicator)을 모델화 하였으며 [그림 2]과 같은 형태를 가진다. 구성 물질은 1차 콜리메이트와 2차 콜리메이트는 텅스텐, 산란막은 탄탈륨과 알루미늄 합성물질, 그리고 치료용 콘은 아연 및 저 용융 합금물질로 이루어져 있다.

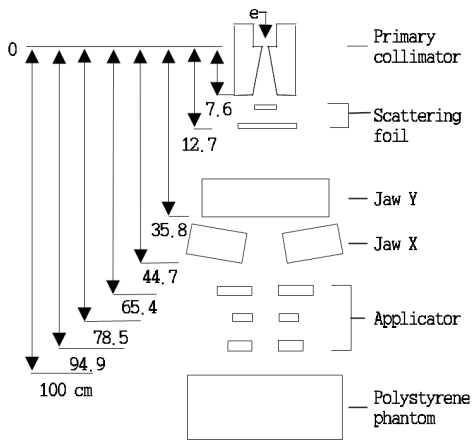


그림 2. 선형가속기 구성도

선형가속기의 제한된 구조 묘사에 대한 정확성을 확인하기 위해 몇몇 연구자들은 이온 전리함으로 측정하여 선형가속기 두부의 부분적 묘사에 따른 오차를 보정하여 계산하였다[25][27]. 이에 본 연구에서도 평행평판형 전리함으로 깊이선량률(Percentage Depth Dose: PDD)를 측정하여 비교하였다. 의료용 선형가속기에서 발생한 6 MeV 에너지 전자선을 표적-표면 간격 100 cm, 기준 조사야  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 의 조사 조건으로 두께 1 mm, 지름 20 mm 창을 가진 평행평판형 전리함(Exradin P11)을  $25 \times 25 \text{ cm}^2$  폴리스티렌(Polystyrene) 팬텀 표면에 고르게 하여 끼워 넣은 후 중심선속에 위치시켜 PDD를 측정하였다. 모의계산은 평행평판형 전리함(Exradin- P11)의 표면창-수집기 간격이 2.0 mm 인 점을 고려 MCNPX 코드로 묘사하고 출력 연산자

\*F6 tally와  $3 \times 10^6$ 개 히스토리로 계산하여 측정치와 비교하였다.

물질별 심부선량증가율은 전자 감약율 95% 되는 차폐물을 각각 구현한 후 조사야  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  범위 안에 횡측면 1/2까지 위치하도록 묘사 하였다. 계산에 사용된 이온 수집기는 지름 1 cm, 높이 0.5 cm 원기둥으로 폴리스티렌 팬텀과 같은 플라스틱으로 이루어져 있다. 이온 수집기 위치는 차폐물질 가장자리 종축선상을 중심으로 차폐물이 없는 바깥면 위치에서 표면으로부터 최대선량 90%되는 구간과 최대선량 90 %이상 최대 선량 100% 구간으로 하였다. 출력 연산자는 \*F6 tally로 측정 에너지(Energy deposition: ED)와 F4 tally로 광자속(Photon flux: PF), 전자 속(Electron flux: EF)를 계산하였다. 계산의 통계적 오차 3% 이하로 하기 위해 히스토리는  $1 \times 10^7$ 개를 사용하였다.

### III. 결과

#### 1. 차폐물질별 선량변화 결과

표면에서의 물질별 두께에 대한 측정결과는 다음과 같다. 알루미늄, 구리, 납판의 두께별 상대 이온량은 각각 2 mm에서 100.82%, 101.22%, 101.25%, 4 mm에서 101.19%, 101.31%, 101.70%, 6 mm에서 101.70%, 101.76%, 101.92%로 원자번호가 커질수록 두께가 두꺼워 질수록 모두 증가율을 보였다[그림 3].

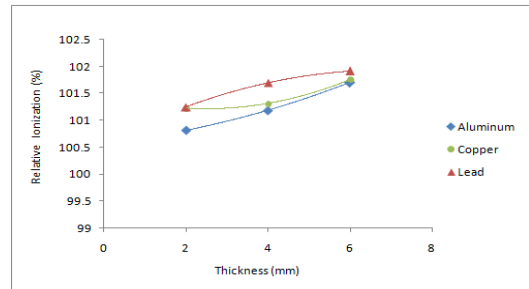


그림 3. 평행평판형 전리함을 이용한 물질 두께별 표면 상대 이온량

다음으로 최대선량깊이에서의 물질별 두께에 대한

측정결과는 다음과 같다. 알루미늄, 구리, 납판의 두께 별 상대 이온량은 각각 2 mm에서 100.23%, 99.78%, 99.72%, 4 mm에서 99.87%, 99.70%, 99.80%, 6 mm에서 99.78%, 99.80%, 99.83%로 두께 증가에 따른 선량변화율은 알루미늄의 경우 감소세를 보였으나 구리와 납은 4 mm를 중심으로 감소 후 증가세를 보였다. 동일 두께의 원자번호 차이에 따른 선량 변화율은 4 mm를 중심으로 두께가 증가함에 따라 고 원자번호에서 증가하였다[그림 4].

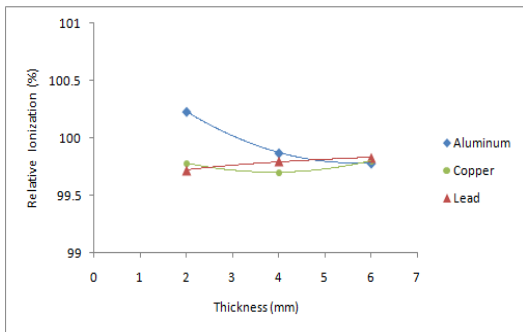


그림 4. 평행평판형 전리함을 이용한 물질 두께별 최대선량 깊이 상대 이온량

## 2. Gafchromic EBT2 등선량곡선 측정 결과

필름 흑화도는 필름고정 실험을 3차 방정식으로 피팅(Fitting)하여 선량-광학 농도 선형성을 입증하였다. 측정결과 필름의 흡수선량이 증가함에 따른 교정 인자가 비례하게 증가함을 확인할 수 있었다[그림 5]. 특히 본 연구의 관심 선량범위인 100 ~ 200 cGy에서 우수한 선형성을 보여 주었다.

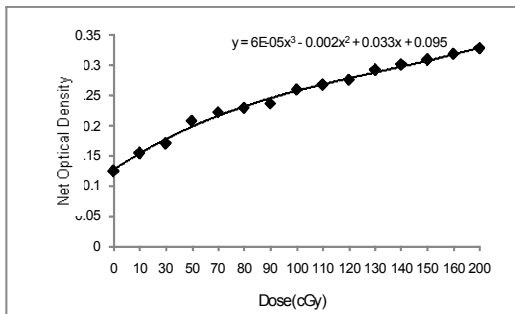


그림 5. Gafchromic EBT2의 선량-반응곡선

다음은 조사야  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  에서 차폐물질 가장자리 선상을 기준으로 조사면 방향에 따른 알루미늄, 구리, 납 물질별 선량변화율은 최대선량 90%되는 0.6 cm 구간에서 최대 +19.70%, +15.20%, +12.40%, 최대선량 100%되는 1.3 cm 구간에서 최대 +11.40%, +10.00%, +5.20%로 원자번호가 증가함에 따라 동일 지점의 선량 증가율이 작아짐을 볼 수 있었다[그림 6][그림 7].

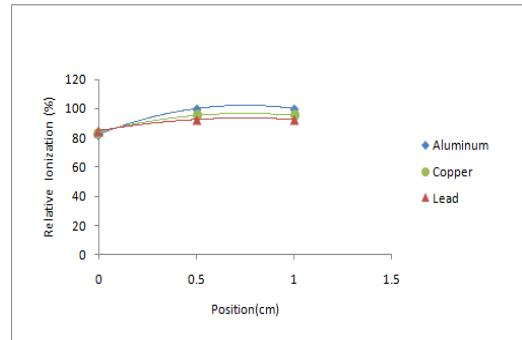


그림 6. Gafchromic EBT2 필름을 이용한 전하 감약을 95 % 두께의 물질별 표면 상대 이온량

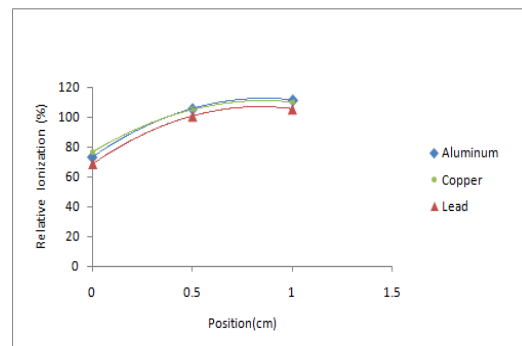


그림 7. Gafchromic EBT2 필름을 이용한 전하 감약을 95% 두께의 물질별 최대선량 깊이 상대 이온량

## 3. 전리함 측정과 MCNPX 모의계산 비교분석

먼저 몬테칼로 시뮬레이션의 선형가속기 두부 부분적 모사에 따른 오차를 보정하여 계산 값의 신뢰성을 평가 하기 위해 평행평판형 전리함의 PDD와 비교한 결과 6 mm 구간의 4.2%를 제외한 대부분이  $\pm 2\%$  이내를 보여 주고 있었다[그림 8].

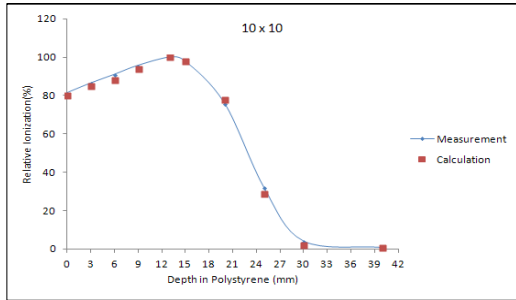


그림 8. 6 MeV 전자선의 측정과 계산의 PDD 비교

다음으로 몬테칼로 시뮬레이션을 이용하여 전하 감약률 95% 되는 차폐물질 가장자리 종축선상을 기준으로 선속 조사면 1.0 mm 이격 지점의 광자 속, 전자 속 그리고 축적 에너지를 계산한 값으로 크게 물질종류와 깊이에 따른 변화율로 나뉘 [Table 1]에 제시하였다.

먼저 표면 ~ 최대선량 90 % 구간에서 알루미늄, 구리, 그리고 납 물질 계산값은 광자 속 +23.80%, +22.00%, +22.60%, 전자 속 -98.80%, -98.96%, -98.97%, 축적에너지 +25.00%, +15.00%, +14.00%를 보였다. 본 결과에서 측정치와 유사한 선량증가율을 저 원자번호 물질이고 원자번호 물질보다 산란전자 및 광자 발생이 다소 많음을 보여 주었다. 다음으로 최대선량 90 % ~ 최대선량 구간의 계산 값을 보면 광자 속 +22.70%, +23.50%, +22.60%, 전자 속 -90.20%, -90.40%, -90.40%, 축적에너지 -1.00%, -3.80%, -3.70%를 보였다. 본 깊이에서는 측정치와 다소 상이하게 고 원자번호 물질에서 저 원자번호 물질보다 선량증가율이 높음을 보여주었다. 결과적으로 깊이가 커질수록 차폐물질에서 발생하여지는 산

란전자 및 광자의 영향보다는 측정되는 위치에서의 산란전자 및 광자 영향을 많이 받고 있음을 시사하였다.

#### IV. 고찰

본 연구는 차폐물질 원자번호와 산란전자 발생률의 연관성과 심부선량 변화율에 미치는 영향을 알아보고 물질별 유용성을 비교 분석하고자 하였다. Prasad SG 등[6]의 연구에 의하면 각각의 물질들은 그 고유의 성질 때문에 다양한 선량변화율을 보이고 있음을 발표했다. 이에 각 물질의 원자번호 및 두께에 대한 특성을 알아보고자 다양한 두께에서의 물질별 특성을 표면과 최대선량깊이에서 측정하였다.

표면에서는 원자번호와 물질 두께가 증가 할수록 높은 선량 증가율을 보여 기존 이론 및 연구와 동일한 결과를 보였다[4][8]. 더불어 최대선량깊이에서 두께가 얇은 경우 알루미늄이 납 보다 더 높은 선량 증가율을 보였으며, 제동복사의 영향을 받는 “domination point” 구간부터는 납이 알루미늄보다 높은 선량증가율을 보여 제동복사에 대한 영향력을 확인할 수 있었다. 하지만 이온 전리함의 결과에서는 Pohlit W 등[8]의 연구와 다소 다른 결과를 보였다. 즉 산란선의 영향을 받은 심부선량증가율이 100% 이상이 되지 않았으며, 이에 공간 분해능이 뛰어난 Gafchromic EBT2 film과 몬테칼로 전산모사 방법인 MCNPX 코드를 이용한 계산으로 심부선량 변화율을 세밀하게 확인하였다.

Gafchromic EBT2 film 측정과 몬테칼로 전산모사

표 1. 몬테칼로 시뮬레이션을 이용한 차폐물 가장자리 종축선상을 기준으로 선속 조사면 1.0mm 이격 지점의 계산 값

Shielding material of attenuation 95%	Depth (cm)	Photon flux (10 <sup>-4</sup> particles / cm <sup>2</sup> )	Electron flux (10 <sup>-4</sup> particles/cm <sup>2</sup> )	Energy deposition (10 <sup>-26</sup> Jers/g)
	of Maximum			
No block	Surface ~ 90%	2.0369300	2.0060000	4.4972000
	90% ~ 100%	2.2637600	2.2834600	5.7280400
Aluminum (th = 12.220000 mm)	Surface ~ 90%	2.5235400	0.0225593	5.6255900
	90% ~ 100%	2.7784400	0.2253080	5.6702500
Copper (th = 3.614100 mm)	Surface ~ 90%	2.4867200	0.0208126	5.1792800
	90% ~ 100%	2.7962500	0.2199380	5.5085100
Lead (th = 2.360089 mm)	Surface ~ 90%	2.4973000	0.0205421	5.1151800
	90% ~ 100%	2.7766600	0.2201250	5.5178500

방법인 MCNPX 코드계산에 사용된 장비의 신뢰성을 확인하고자 Gafchromic EBT2 film 선량-광학 농도의 선형성 입증과 이온 전리함 측정값에 따른 MCNPX 코드 계산 값의 깊이선량률(Percentage Depth Dose; PDD) 일치성을 확인 하였다. 그 결과 3차 함수 피팅에 따른 선형성과 Chow 등[28]와 Karlsson 등[29]이 제시한 깊이선량률  $\pm 2\%$  이하,  $R_{50}$ 과  $R_p$ 의  $\pm 1$  mm 이내 등으로 계산 신뢰성을 입증하였다.

전하 감약률 95% 되는 두께에 대한 Gafchromic EBT2 film을 이용한 알루미늄, 구리, 그리고 납의 심부 선량증가율은 차폐물이 없는 선속 조사면 위치에서 최대선량 90% 되는 0.6 cm, 최대 선량 100% 되는 1.3 cm 구간 모두 선량 증가를 보였으나 그 증가율은 저 원자번호 물질이 고 원자번호 물질보다 높았다.

전하 감약률 95% 되는 두께에 대한 MCNPX 코드를 이용한 계산을 보면 산란전자 및 광자 증가율은 표면 ~ 최대선량 90% 구간에서 고 원자번호 물질일수록 최대선량 90% ~ 최대선량 100% 구간에서 저 원자번호물질로 갈수록 감소하였으며, 축적에너지는 전자 플럭스에 비례하게 증가하였다.

본 연구결과 표면 ~ 최대선량 90% 구간의 Gafchromic EBT2 film 측정과 MCNPX 코드 계산에서 모든 물질이 선량 증가율을 보였으며, 저 원자번호 보다 고 원자번호 물질에서 선량증가가 다소 적게 나타났다. 즉 산란전자 및 광자 발생비율이 고 원자번호 물질보다 저 원자번호 물질에서 더 높음을 보여 주었다. 이는 기존 연구에서 보고된 원자번호와 산란계수 비례성[30], 제동복사 발생의 원자번호 제곱 비례성[31]과 다른 결과를 보여주었다. 하지만 그 원인은 다음의 물질 두께 변화에 대한 이차 전자 및 제동복사 발생[32] 및 표면 선량에 영향을 줄 수 있는 후방산란 연관성으로 설명될 수 있었다[33]. 즉 차폐물질이 물질별 전하 감약율 95%로 조정하려 함에 따라 저 원자번호 물질은 두꺼워지며 고 원자번호 물질은 상대적으로 얇아질 수밖에 없었다. 이에 두꺼운 저 원자번호 물질에서 많은 산란전자가 방출되어 높은 선량증가율을 보이고 있음을 실험을 통하여 알 수 있었으며, 연구결과에서 고 원자번호 물질보다 저 원자번호 물질에서 표면 선량 증가율이 높아짐을

확인할 수 있었다.

다음으로 최대선량 90% ~ 최대선량 100% 구간의 Gafchromic EBT2 film 측정과 MCNPX 코드 계산을 보면 표면 ~ 최대선량 90% 구간보다 더 높은 선량율로 기존연구의 깊이에 따른 산란선량증가와 유사한 결과를 보였다[34]. 하지만 MCNPX 코드 계산에서 전리함의 측정과 유사하게 차폐물질이 없는 경우보다 차폐물질이 있는 경우가 더 적은 선량율을 보였다. 이는 MCNPX 코드의 이온 수집기가 전리함과 유사하게 일부 구간만 측정된 결과로 이 구간에 대한 필름측정값을 비교한 결과 유사하였다. 즉 측정위치 및 형태에 따른 결과라 사료된다. MCNPX 코드를 이용하여 축적에너지 변화량을 분석한 결과를 보면 물질에서 많이 방출되는 광자 플럭스보다 가장 적게 방출되는 전자 플럭스에 비례적으로 감소함을 알 수 있었으며, 이에 선량변화요인이 Sathiyar 등[35]이 제시한 제동복사보다 산란전자에 있음을 확인하였다.

## VI. 결론

본 연구는 6 MeV 에너지에서 표면 위에 직접 차폐물을 놓았을 경우 알루미늄( $Z=13$ ), 구리( $Z=29$ ), 그리고 납( $Z=82$ ) 등의 다양한 원자번호 물질에 대한 차폐면과 조사면의 산란정도를 비교 분석하여 임상에서의 물질별 유용성 정도를 알아보고자 하였다. 이에 따른 연구결과로 조사면의 심부선량 증가율을 보면 동일 두께에서는 원자번호 증가에 따른 산란전자의 수는 증가하였으나, 전하 감약률 95% 두께에서는 저 원자번호 물질에서보다 많은 산란전자가 발생 되었다. 이러한 결과는 전하 감약률 95% 두께에 대한 물질별 차폐두께의 차이로 두께증가에 따른 산란선 증가의 영향을 받은 것을 알 수 있었다. 또한, 발생되어지는 입자의 산란영향 분석을 통해 에너지 변화가 광자보다 전자에 비례적으로 반응하는 것을 알 수 있었다. 즉 선량증가의 영향인자로 산란전자가 많은 기여를 하고 있음을 알 수 있었다. 이에 임상적인 면에서의 차폐물은 두께가 얇으며, 두께영향 산란선이 적게 방출되는 고 원자번호의 납 물질이 적당하

다고 사료된다. 또한, 차폐물질 사용에 따른 방사선 조사면 경계영역 선량분포 및 깊이에 따른 선량분포 측정에 세밀한 주의가 필요할 것으로 사료된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] R. J. Berry, "Therapeutic uses of X-rays," *Int J Radiat Biol*, Vol.15, pp.873-895, 1985.
- [2] H. S. Kaplan, "Historic milestones in radiobiology and radiation therapy," *Semin Oncol*, Vol.6, No.4, pp.479-489, 1979.
- [3] G. H. Fletcher, introduction. IN: Tapley N ed. *Clinical applications of the electron beam*, John Wiley & Sons, 1976.
- [4] F. M. Khan, *The physics of radiation therapy*, 4th ed, Lippincott Williams & Wilkins, pp.241-314, 2010.
- [5] S. C. Roy and G. A. Sandison, "Shielding for neutron scattered dose to the fetus in patients treated with 18 MV x-ray beam," *Med Phys*, Vol.27, pp.1800-1803, 2000.
- [6] S. G. Prasad, K. Parthasaradhi, W. D. Bloomer, W. H. Al-Najjar, J. McMahon, and O. Thomson, "Aluminum, copper, tin and lead as shielding materials in the treatment of cancer with high energy electrons," *Radi Phy Chem*, Vol.53, pp.361-366, 1998.
- [7] Xing and Aitang, "Dosimetric investigation of electron arc therapy delivered using siemens electron arc applicator with a trapezoidal aperture," *University of Canterbury*, pp.4-5, 2007.
- [8] W. Pohlit and K. H. Manegold, "Electron beam dose distribution in inhomogeneous media". In: S. Kramer, N. Suntharalingam, G. F. Zininger, eds. *High energy photons and electrons*, John Wiley & Sons, p.243, 1976.
- [9] T. E. Everhart, "Simple theory concerning the reflection of electrons from solids," *J. Appl Phys*, Vol.31, No.8, pp.1483-1490, 1960.
- [10] S. C. Klevenhagen, G. D. Lamdert, and A. Arbabi, "Backscattering in electron beam therapy for energies between 3 and 35MeV," *Phys Med Biol*, Vol.27, No.3, pp.363-373, 1982.
- [11] 이병용, 이상훈, 조병철, 김종훈, 최은경, 권수일, 장혜숙, "전리함 반응 함수의 직접 측정과 이를 이용한 방사선의 실제선량 분포측정", *대한방사선종양학회지*, 제15권, 제1호, pp.65-69, 1997.
- [12] R. A. Niroomand, C. R. Blackwell, B. M. Coursey, K. P. Gall, J. M. Galvin, W. L. McLaughlin, A. S. Meigooni, R. Nath, J. E. Rodgers, and C. G. Soares, "Radiochromic film dosimetry; Recommendations of AAPM Radiation Therapy Committee Task Group 55. American Association of Physicists in Medicine," *Med Phys*, Vol.25, No.11, pp.2093-2115, 1998.
- [13] ISP, "Gafchromic<sup>®</sup> EBT. Self-developing film for radiotherapy dosimetry," New Jersey USA, 2009.
- [14] C. Fiandra, R. Ragona, U. Ricardi, S. Anglesio, and F. R. Giglioli, "Absolute and relative dose measurements with Gafchromic EBT film for high energy electron beam with different doses per pulse," *Med Phys*, Vol.35, No.12, pp.5463-5470, 2008.
- [15] A. Sankar, K. M. Ayyangar, R. M. Nehru, P. G. Kurup, V. Murali, C. A. Enke, and J. Velmurugan, "Comparison of Kodak EDR2 and Gafchromic EBT film for intensity-modulated radiation therapy dose distribution verification," *Med Dosi*, Vol.31, No.4, pp.273-282, 2006.
- [16] J. E. Barouky, N. Fournier-Bidoz, A. Mazal, G. Fares, and J. C. Rosenwald, "Practical use of Gafchromic EBT film in electron beam for



- in-phantom dose distribution measurements and monitor units verification,” *Phys Med*, Vol.27, No.2, pp.81-88, 2011.
- [17] 이성아, 이정옥, 문성록, 원종진, 강정구, 김승곤, “6MeV 전자선의 측정과 모의계산에 대한 연구”, 대한치료방사선과학회지, 제13권, 제3호, pp.285-289, 1995.
- [18] T. Cheung, M. J. Butson, and P. K. Yu, “Post-irradiation colouration of Gafchromic EBT radiochromic film,” *Phys Med Biol*, Vol.50, No.20, pp.N281-285, 2005.
- [19] M. Martisikova, B. Ackermann, and O. Jakel, “Analysis of uncertainties in Gafchromic EBT dosimetry of photon beams,” *Phys Med Biol*, Vol.53, No.24, pp.7013-7027, 2008.
- [20] 김상태, “영·유아의 입사피부선량 측정을 위한 몬테칼로 시뮬레이션”, 한국콘텐츠학회논문지, 제12권, 제6호, pp.346-352, 2012
- [21] M. K. Fix, H. Keller, P. Rugesegger, and E. J. Born, “Simple beam models for Monte Carlo photon beam dose calculations in radiotherapy,” *Med Phys*, Vol.27, No.12, pp.2739-2747, 2000.
- [22] D. B. Pelowitz and L. S. Waters, Ed. “MCNPX<sup>TM</sup> user’s manual, version 2.6.0.” Los Alamos National Laboratory, LA-CP-07-1473, 2008.
- [23] R. Mohan, C. Chui, and L. Lidofsky, “Energy and angular distributions of photons from medical linear accelerators,” *Med Phys*, Vol.12, No.5, pp.592-597, 1985.
- [24] Y. H. Cho, “Monte-Carlo Estimate of photonuclear effects in radiation therapy using a high-energy photon beam,” *J. Korea Phy Soc*, Vol.57, No.6, pp.1509-1515, 2010.
- [25] 이정옥, 정동혁, “MCNPX를 이용한 선형가속기의 6 MeV 전자선에 대한 에너지 분포계산”, 의학물리, 제17권, 제4호, pp.224-231, 2006.
- [26] A. Zanini, E. Durisi, F. Fasolo, C. Ongaro, L. Visca, U. Nastasi, K. W. Burn, G. Scielzo, J. O. Adler, J. R. M. Annand, and G. Rosner, “Monte Carlo simulation of the photoneutron field in linac radiotherapy treatments with different collimation systems,” *Phys Med Biol*, Vol.49, No.4, pp.571-582, 2004.
- [27] F. Haryanto, M. Fippel, W. Laub, O. Dohm, and F. Nusslin, “Investigation of photon beam output factors for conformal radiation therapy—Monte Carlo simulations and measurements,” *Phys Med Bio*, Vol.47, No.11, pp.N133-N143, 2002.
- [28] J. C. Chow and A. M. Owangi, “Depth dependence of electron backscatter: An energy spectral and dosimetry study using monte carlo simulation,” *Med Phys*, Vol.36, No.2, pp.594-601, 2009.
- [29] M. G. Karlsson, M. Karlsson, and C. M. Ma, “Treatment head design for multileaf collimated high-energy electrons,” *Med Phys*, Vol.26, No.10, pp.2161-2167, 1999.
- [30] T. E. Everhart, “Simple theory concerning the reflection of electrons from solids,” *J. Appl Phys*, Vol.31, No.8, pp.1483-1490, 1960.
- [31] K. Yue, W. Luo, X. Dong, C. Wang, G. Wu, M. Jiang, and Y. Zha, “A new lead-free radiation shielding material for radiotherapy,” *Radiat Prot Dosimetry*, Vol.133, No.4, pp.256-260, 2009.
- [32] Y. S. Tsai and V. Whitis, “Thick Target Bremsstrahlung And Target Consideration For Secondary Particle Production By Electrons,” *Phys Rev*, Vol.149, pp.1248-1257, 1966.
- [33] M. A. Hunt, G. J. Kutcher, and A. Buffa, “Electron backscatter corrections for parallel-plate chambers,” *Med Phys*, Vol.15, No.1, pp.96-103, 1988.
- [34] A. Shih, J. Yater, C. Hor, and R. Abrams, “Secondary electron emission studies,” *Appl Surf Sci*, Vol.111, pp.251-258, 1997.

- [35] S. Sathiyar, M. Ravikumar, and S. S. Supe,  
“Measurement of backscattered dose at metallic  
interfaces using high energy electron beams,”  
Rep Pract Oncol Radiother, Vol.11, pp.117-121,  
2006.

저 자 소 개

이 승 훈(Seung-Hoon Lee)

정회원



- 2013년 8월 : 전북대학교 산업보  
건학(보건학석사)
- 2004년 5월 ~ 현재 : 전북대학  
교병원 방사선 종양학과

<관심분야> : 몬테칼로 시뮬레이션, 방사선량 평가

차 석 용(Seok-Yong Cha)

정회원



- 1999년 8월 : 전북대학교 산업보  
건학(보건학석사)
- 1987년 4월 ~ 현재 : 전북대학  
교병원 방사선 종양학과

<관심분야> : 몬테칼로 시뮬레이션, 방사선량 평가

이 선 영(Sun-Young Lee)

정회원



- 2008년 2월 : 전북대학교 의학석사
- 2013년 2월 : 전북대학교 의학박사
- 2004년 3월 ~ 현재 : 전북대학교  
병원 방사선 종양학과 임상조교수

<관심분야> : 몬테칼로 시뮬레이션, 방사선량 평가,  
근접치료