

MOSFET 선량계를 이용한 *In-vivo* 선량의 확인

강대규^{*,**} · 이광만^{**,***†}

In-vivo dose verification using MOSFET dosimeter

Dae-Gyu Kang^{*,**} and Kwang-Man Lee^{**,***†}

Abstract

In-vivo dosimetry is an essential tool of quality assurance programs in radiotherapy. The most commonly used techniques to verify dose are thermoluminescence dosimeter (TLD) and diode detectors. Metal oxide semiconductor field-effect transistor (MOSFET) has been recently proposed for using in radiation therapy with many advantages. The reproducibility, linearity, isotropy, and dose rate dependence of the MOSFET dosimeter were studied and its availability was verified. Consequently the results can be used to improve therapeutic planning procedure and minimize treatment errors in radiotherapy.

Key Words : MOSFET sensor, *in-vivo* dosimetry, dose verification, radiotherapy

1. 서 론

치료를 목적으로 사용하는 방사선은 일반적으로 사용되어지는 진단용 방사선에 비하여 에너지가 매우 크기 때문에 사용 및 관리에 있어서 많은 주의가 요구된다. 이에, 실제 치료에 있어서는 처방선량(prescription dose)의 적절한 결정이 필요하고, 더불어 실제로 환자에 흡수되는 선량을 정확하게 측정하는 과정이 필요하다.

선량의 확인은 오래전부터 여러 가지 측정 장비를 사용하여 이루어져 왔는데, TLD(thermo-luminescence dosimeter)와 다이오드(diode) 선량계^[1]가 가장 대표적으로 사용되어져 왔다. 최근 MOSFET(metal oxide semiconductor field-effect transistor) 선량계는 기존의 선량계들에 비해 크기가 작고 실시간 판독이 가능하며 사용이 매우 용이하다는 장점을 가지고 방사선 치료뿐만 아니라 방사선 진단 등 여러 분야에서 선량검증을

위해 점차 사용이 증가되고 있다^[2,4]. 그러나 이를 이용한 선량확인 방법과 검증 절차가 요구되고 있어, 본 연구에서는 방사선 치료분야에서 요구되어지는 MOSFET 선량계의 특성을 분석하고 실제 팬텀(phantom)에 적용하여 선량확인 유효성을 확인하였다. 이를 통해 치료계획의 수립과 치료시에 발생할 수 있는 오차를 최소화시킴으로서 보다 정확한 치료를 가능하게 할 수 있을 것이다.

2. 실험

2.1. MOSFET 선량계 시스템

본 연구에서 사용하는 MOSFET 선량계 시스템 (Thomson and Nielson Electronic, Ltd., Canada)의 센서부분은 심부선량 측정용의 표준형(TN-502RD)과 이보다 3배정도의 감도를 가지고 진단영역과 표면선량 및 산란선을 측정하는 고감도형(TN-1002RD)으로 구분되어져 있고, 센서에 바이어스를 공급하는 바이어스 공급기(TN-RD-22)와 측정된 선량을 읽는 Reader(TN-RD-10)로 구성되어 있다. 바이어스 공급기는 동시에 5개의 MOSFET 센서를 부착할 수 있고, Reader는 측정이 끝난 MOSFET 센서와 연결된 바이어스 공급기를 연결하여 전압(mV), 흡수선량(cGy) 및 조사선량(R)의 단위를 적용하여 표시 할 수 있다.

*가톨릭대학교 성빈센트병원 방사선종양학과 (Dept. of Radiation Oncology, St. Vincent's Hospital, The Catholic University of Korea)

**제주대학교 대학원 의공학과 (Dept. of Biomedical Engineering, Graduate School, Cheju National University)

***제주대학교 전기전자공학부 (Faculty of Electrical and Electronic Engineering, Cheju National University)

†Corresponding author: kmlee@cheju.ac.kr

(Received : January 26, 2006, Accepted : February 10, 2006)

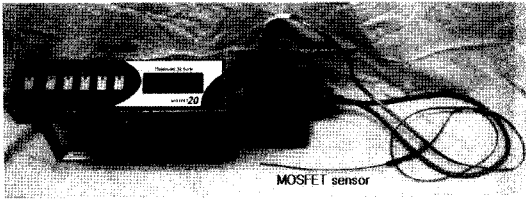


그림 1. MOSFET 선량계 시스템의 사진
Fig. 1. Photograph of MOSFET dosimeter system.

그림 1은 MOSFET 선량계 시스템의 실제 사진이다. MOSFET 센서는 1 mm^2 면적과 0.25 mm 두께의 실리콘 칩으로 구성되어 있다.

본 연구에서 사용한 p-채널 MOSFET 센서의 기본 동작원리는 폴리 실리콘 게이트에 큰 음전압을 걸었을 때 실리콘 기판으로부터 Si/SiO₂ 계면으로 끌려온 정공에 의한 소스와 드레인 사이에 전류의 흐름에 의하여 MOSFET가 동작한다. 이때 MOSFET가 동작하기 시작하는 게이트 전압을 문턱전압(V_T ; threshold voltage)이라 한다. 실제 선량의 측정에는 검출부위(SiO₂)에 조사된 방사선에 의해 전자-정공쌍이 생성되고 생성된 정공들은 전장에 의해 Si/SiO₂ 계면으로 이동하여 최종적으로 정공중 일부가 계면에 영구적으로 고정된다. 이 결과 조사된 방사선량에 비례하는 MOSFET 센서의 문턱전압의 변화(ΔV_T)가 생기고 이 변화량을 측정함으로써 조사량의 실시간 측정이 이루어진다^{2,5}.

2.2. 측정환경

본 연구에서 MOSFET 선량계의 특성을 측정하기 위한 기준조건은 방사선 치료 장비의 기본적인 빔 데이터를 측정했을 때와 동일한 조건으로 그림 2와 같이 방사선 소스와 표면간 거리(SSD, source surface distance)가 100 cm 이고, 조사면적(field size)은 $10 \times 10\text{ cm}^2$

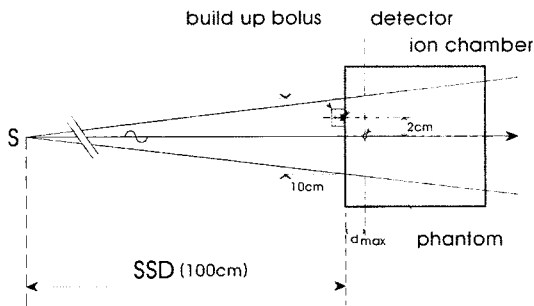


그림 2. 측정환경 구성도, (S; source, SSD; source-surface distance)
Fig. 2. Schematic diagram of experimental setup.

이다. 이러한 조건에서 인체등가 팬텀(phantom)에 대하여 에너지의 최대지점에 이온 전리함(ion chamber)을 위치시키고 그 표면에 전자평형을 위한 인체등가 bolus($3 \times 3 \times 1.5\text{ cm}^3$)를 적용하여 MOSFET 센서를 장착하였다.

2.3. 특성분석

선량의 확인은 각 선량계마다 조금씩 다른 교정계수(CF; calibration factor)를 가진다. 이의 측정은 중요하며 방사선 치료기의 정확한 선량을 이온 전리함을 통해 확인하고 이에 대한 MOSFET 선량계의 지시 값을 3회 측정하여 평균을 구하고 이를 각 선량계 reader에 입력해 놓는다. 선량계로서 고려되어야 할 중요특성은 선량계 지시 값의 재현성, 선형성, 선량률 의존성 및 등방성 등이 있다^{6,7}. 이에, 본 연구에서는 기준조건에서의 이온 전리함 지시 값을 기준으로 식(1)에 의해 MOSFET 센서마다 교정계수를 적용하여 특성을 분석하였다.

$$CF = \frac{\text{MOSFET reading (mV)}}{\text{Known Radiation Value (Gy)}} \quad (1)$$

선량계 지시 값의 재현성은 5개의 서로 다른 선량계에 동일한 선량을 조사하여 지시 값의 변화를 관찰하였다. 선형성은 6 MV, 15 MV의 광자(photon)선과 6 MeV, 9 MeV, 12 MeV, 15 MeV, 18 MeV의 전자(electron)선에 대하여 각각 선형성을 측정하였다. 선량률 의존성은 선량률을 변화시키면서 그에 따른 지시 값의 변화를 측정하였다. 등방성은 방사선 치료기의 회전중심 축에 MOSFET 센서를 전자평형용 build up cap을 적용하여 공기 중에 위치시키고 치료가 0° 일 때의 지시 값에 대해 30° 간격으로 회전시키면서 조사하여 MOSFET 센서에 입사되는 방향에 따른 지시 값의 변화를 측정하였다. 모든 측정치는 3회 이상 측정된 값의 평균치를 적용하였다.

2.4. 흡수선량의 확인

일반적으로 방사선 치료에서의 선량 확인은 중심선량(midline dose)의 확인을 말한다. 물론 중심선량의 확인을 직접 원하는 위치에서 할 수 있다면 가장 확실하겠지만 실제로 인체내부에 선량계를 위치시킬 수 없기 때문에 입사선량(entrance dose)과 출구선량(exit dose)의 측정을 통하여 중심선량을 유도하여 확인한다^{18,9}. 이에, 본 연구에서는 기준조건에서 실제로 측정된 깊이 선량 비(PDD; percent depth dose)와 입사선량과 출구선량의 비를 이용하여 중심 부분의 PDD로 환산하여

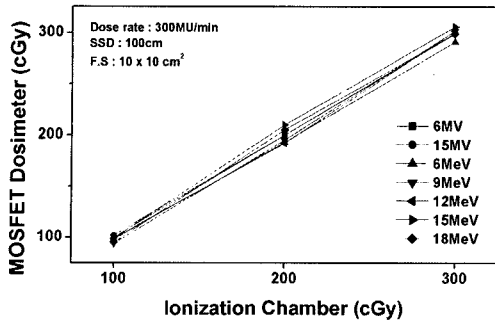


그림 3. MOSFET 선량계의 선형성
Fig. 3. Linearity of the MOSFET dosimeter.

추정하는 방식을 택하였다. MOSFET 선량계의 선량학인의 유효성을 위하여 여러 가지 두께의 팬텀에 대하여 측정을 실행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. MOSFET 선량계 특성분석

MOSFET 센서의 재현성은 5개의 MOSFET 센서에서 최대 표준편차 1.2% 이내의 우수한 재현성을 보였다. 선형성은 그림 3에서와 같은 결과로서 이온 전리함 지시 값에 대하여 최대편차는 광자선의 경우 $\pm 1\%$ 이내, 전자선의 경우 $\pm 3\%$ 이내의 우수한 선형성을 보였다.

선량률 의존성은 임상에서 주로 사용 되는 분당 200~500 MU에 대하여 측정하였다. 선량률에 대한 의존성은 그림 4에서와 같이 기준 선량률 300 MU/min에 대하여 최대편차 $\pm 2\%$ 이내의 범위에서 안정된 값을 보였다.

등방성은 그림 5와 같이 치료기(갠츄리)의 0°를 기준으로 180°까지의 회전각도에 대하여 최대편차 $\pm 2\%$ 이내의 오차를 가지고 고른 등방성을 나타냈다.

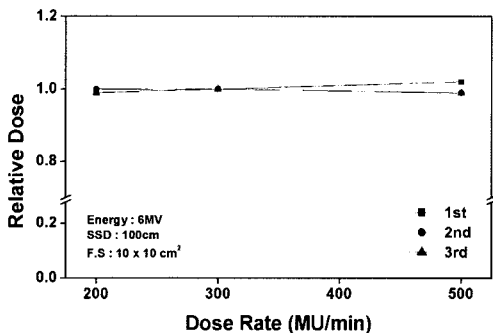


그림 4. MOSFET 선량계의 선량률 의존성
Fig. 4. Dose rate dependence of the MOSFET dosimeter.

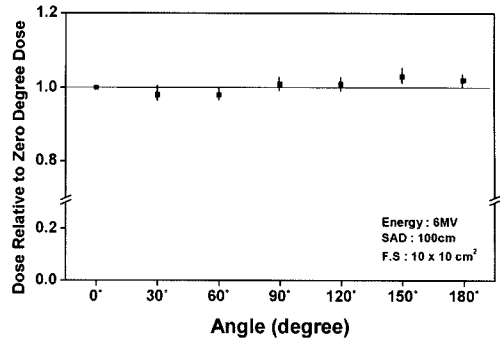


그림 5. MOSFET 선량계의 등방성
Fig. 5. Isotropy of the MOSFET dosimeter.

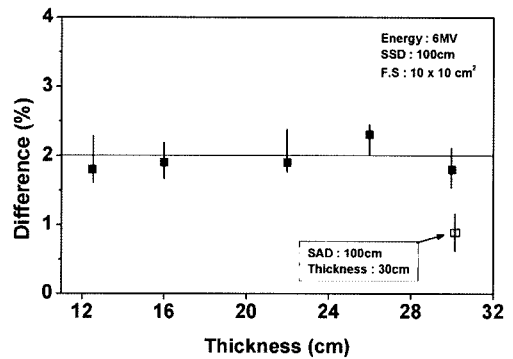


그림 6. 여러 팬텀 깊이에 대한 MOSFET 선량계의 유효성 평가
Fig. 6. Verification of the difference between IC and MOSFET as a function of phantom depth.

실제 치료 장비를 이용하여 실시한 본 연구의 실험 결과는 일반적으로 요구되는 중요한 선량계로서의 특성에 있어 기존의 여러 선량 측정 장비들의 특성^[6,9-11]보다 우수한 결과를 보였다.

3.2. 흡수선량의 확인

그림 6은 기준조건에서 여러 두께(깊이)의 팬텀에 대해 MOSFET 선량계를 통해 얻은 입사선량과 출구 선량을 적용하여 얻은 중심선량과 실제 중심 부분에 위치시킨 이온 전리함 값과의 차이를 나타내고 있으며, 모든 두께에 대하여 2% 이내의 오차를 보이며 그 유효성을 확인 할 수 있었다. 그림 6에서 SAD는 팬텀의 중앙이 소스 중심축간 거리(SAD, source axis distance)가 100cm에 있을 때로, 일반적인 치료 위치와 동일한 조건이며, 실제 치료가 대부분 SAD조건에서 이루어지기 때문에 SAD조건에서의 적은 오차는 양호한 결과라 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 MOSFET 선량계의 선량계로서 요구되는 특성과 선량 확인의 유효성을 측정 하였다. 측정 결과, 기존의 측정 장비보다 우수한 특성과 2% 이내의 선량확인 유효성을 확인할 수 있었다. 특히, 우수한 재현성으로 인한 측정값의 높은 정확도와 우수한 등방성은 최근 치료 장비와 치료기술의 발달로 인해 치료부위에 대하여 여러 방향으로 많은 조사가 이루어지기 때문에 큰 장점이라고 할 수 있다. 따라서 실제 적용을 통하여 보다 정확한 치료계획의 수립과 치료시에 발생할 수 있는 오차를 보완함으로써 정확한 치료를 가능하게 할 수 있을 것이다. 향후 본 연구의 결과를 바탕으로 작은 MOSFET 센서로 측정 가능한 국소면적에서의 선량측정과 피부표면에서의 선량분포 및 고감도 선량계에 의한 치료범위 밖의 산란선량에 대한 연구와 환자의 치료를 위한 전신조사(total body irradiation)에 대한 연구도 진행할 것이다.

참고 문헌

- [1] 이동훈, 권장우, 홍승홍, "치료 방사선 Portal Image를 위한 다이오드 방사선 센서의 특성에 관한 연구", *센서학회지*, 제5권, 제5호, pp. 11-20, 1996.
- [2] 조성구, 김찬영, "고감도 MOSFET 선량계 방사선학적 특성 연구", *의학물리*, 제15권, 제4호, pp. 215-219, 2004.
- [3] S. Paolo and P. Francescon, "Calibration of a MOSFET detection system for 6-MV *in vivo* dosimetry", *Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys.*, vol. 40, no. 4, pp. 987-993, 1998.
- [4] 한상현, 지용권, 권오상, 민흥기, 이응혁, "γ선 실시간 검출을 위한 P채널 Power MOSFET 방사선 선량 시스템 개발", *센서학회지*, 제9권, 제3호, pp. 61-71, 2000.
- [5] R. Ramaseshan, R. Stephen, and O. Peter, "Clinical dosimetry using MOSFETs", *Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys.*, vol. 37, no. 4, pp. 959-964, 1997.
- [6] S. M. Sali, S. Keith, and M. Gwen, "Evaluation of the VERIDOSE *in vivo* dosimetry system", *Medical Dosimetry*, vol. 27, no. 1, pp. 29-36, 2002.
- [7] T. Takako, S. noriyuki, O. Yasunori, T. Katuyoshi, K. Syuuji, A. Yuuichi, S. Akiyo, and K. Satoru, "Dosimetry with phantom for total body irradiation (TBI)", *Japanese Journal of Radiological Technology*, vol. 58, no. 4, pp. 511-516, 2002.
- [8] E. Marion and J. M. Ben, "In vivo dosimetry during external photon beam radiotherapy", *Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys.*, vol. 43, no. 2, pp. 245-259, 1999.
- [9] C. J. Millwater, A. S. Macleod, and D. I. Thwaites, "In vivo semiconductor dosimetry as part of routine quality assurance", *The British Journal of Radiology*, vol. 71, pp. 661-668, 1998.
- [10] J. M. Robert and B. P. Matthew, "Characterization of the response of commercial diode detectors used for *in vivo* dosimetry", *Medical Dosimetry*, vol. 22, no. 1, pp. 31-37, 1997.
- [11] F. Sanches-Doblado, J. A. Terron, B. Sanches-Nieto, R. Arrans, L. Errazquin, D. Biggs, C. Lee, L. Nunez, A. Delgado, and J. L. Muniz, "Verification of an on line *in vivo* semiconductor dosimetry system for TBI with two TLD procedures", *Radiotherapy and Oncology*, vol. 34, pp. 73-77, 1995.



강 대 구

- 1998년 경기대학교 물리학과 졸업(이학사)
- 2006년 제주대학교 대학원 의공학과 졸업(공학석사)
- 2002년 성모병원 방사선 종양학과 의학 물리 연구원
- 2003년 한라병원 방사선 종양학과 의학 물리사
- 2004년~현재 성빈센트병원 방사선 종양학과 의학물리학자
- 주관심분야 : 의학물리학, 방사선종양학



이 광 만

- 1978년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사)
- 1987년 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)
- 1987년~현재 제주대학교 전기전자공학부 교수
- 1991~1993년 케이스 웨스턴 리저브대학 객원교수
- 1997~1998년 오사카대학 연구교수
- 2000~2001년 노쓰캐롤라이나 주립대학 객원교수
- 주관심분야 : 반도체소자, 반도체센서, RFID/USN