

방사선 치료시 생식선 차폐체 성능 평가를 위한 MOSFET 선량 측정

김휘영*, 최윤석*, 박소연*, 박양균*, 예성준^{†,‡}

*서울대학교 의과대학 방사선응용생명 협동과정

[†]서울대학교 의과대학 방사선종양학교실

[‡]서울대학교 대학원 융합과학기술대학원 지능형융합시스템학과

2011년 2월 11일 접수 / 2011년 3월 11일 1차수정 / 2011년 3월 23일 2차수정 / 2011년 3월 24일 채택

방사선 치료를 받는 환자의 생식선에 대한 피폭 선량을 최소화하기 위한 차폐체의 성능을 MOSFET 측정을 통해 평가하고자 서울대학교 병원 방사선 종양학과에서 4명의 남자 직장암 환자를 대상으로 2009 년 이후로 시행한 생식선 차폐체 선량 측정 결과를 이용하였다. 환자 치료는 Varian 21EX 선형가속기 (LINAC) 에서 방출되는 6 MV 와 15 MV 의 Xray 를 이용하였다. 선형가속기의 조준기 (collimator) 등에 의한 산란선 (scattered ray) 뿐만 아니라 방사선조사영역 (radiation field) 내의 치료부위로부터 산란되어 전달되는 산란선을 최소로 하기 위하여 3면이 모두 차폐될 수 있도록 차폐체는 상자 모양으로 제작되었다. 차폐체는 납으로 만든 7.5 cm × 9.5 cm × 5.5 cm 크기의 상자와 9 cm × 9.5 cm × 1 cm 크기의 덮개로 이루어져 있다. 차폐체의 성능 평가를 위한 선량 측정은 MOSFET 을 이용하였다. 생식선 차폐체를 이용한 경우 차폐체 안쪽의 피폭 선량이 바깥쪽에 비해 평균적으로 23.07% 로 감소하였다. 차폐체 안쪽에 전달된 선량은 평균 0.01 Gy (표준편차 0.004 Gy) 로 측정되었다. 차폐체의 성능은 환자들 별로 적게는 18.76% 부터 많게는 38.20% 까지 차이를 보였으나 전달된 절대적 선량은 무정자증 (aspermia) 의 가능성이 있는 0.35 Gy 와, 불임을 초래할 수 있는 2.0 Gy 의 기준치 이하로서, 차폐체의 효과는 충분한 것으로 확인할 수 있다. MOSFET 측정 결과, 생식선 차폐체를 이용하여 환자 생식선에 피폭되는 선량을 효과적으로 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 기존의 연구에서 TLD 를 이용한 측정과 비교하여 MOSFET 을 이용하였을 때 보다 실시간으로 정확하게 차폐체에 의한 생식선의 선량 감소 효과를 평가할 수 있음을 확인하였다.

중심어: 생식선 차폐, MOSFET 측정, 생체내 측정

1. 서론

현대의 방사선 치료 기술은 암 세포에는 집중적으로 방사선을 조사하는 반면에 정상 세포에는 최소한의 선량을 조사하는 것을 목표로 급속히 발전하고 있다. 3차원 정위적 방사선 치료(3D Conformal RadioTherapy, 3D CRT), 세기 변조 방사선 치료(Intensity Modulated RadioTherapy, IMRT) 등은 기계적으로 정밀한 방사선 치료가 가능하도록 개발된 최신 기술이다.

IMRT 등과 같은 최신 기술로써 정밀한 방사선 치료가 가능하지만, 선형가속기의 조준기(collimator) 등에 의한 산란선(scattered ray) 뿐만 아니라 방사선조사영역(radiation field) 내의 치료부위로부터 산란되어 전달되는 산란선 등의 의해 방사선조사영역에 포함되지 않더라도

손상위험장기(Organ at risk, OAR) 에 대한 피폭 선량이 증가할 수 있어 추가적인 차폐가 필요한 경우가 있다[1].

국제 기구인 NCRP 와 ICRP 는 생식선에 대한 유효선량등가(effective dose equivalent) 를 계산하기 위한 가중인자(weighting factor, w_T) 를 0.25 와 0.08 로 각기 권장하고 있다[2, 3]. 이는 같은 피폭 선량에 대해서 생식선이 갖는 위험 계수(risk coefficient) 가 다른 OAR 들에 비해 작지 않다는 것을 의미한다. 생식선의 생식 세포는 방사선에 매우 민감하여 남자의 경우 0.35 Gy 에서 무정자증(aspermia) 의 가능성이 있고, 2.0 Gy 이상일 경우 불임을 초래할 수 있다[4, 5].

서울대학교 병원 방사선종양학과는 생식선의 피폭 선량을 줄이기 위해 생식선 차폐체를 실제 임상에 적용해왔다. 기존의 차폐체 성능 평가를 위한 선량 측정은 열형광

책임저자 : 예성준, sye@snu.ac.kr
서울시 종로구 연건동 서울대학교 병원

선량계 (TLD) 를 이용하였으나 온도나 빛 조건의 영향을 받기 쉽고, 선량 관독(readout) 에 긴 시간이 소요되는 단점이 있다[6, 7]. 따라서 교정(calibration) 과정이 간단하며, 선량 관독이 간단하고 빠른 MOSFET 을 이용하여 차폐체에 의한 생식선의 선량 감소 효과를 측정하였다[8].

본 연구에서는, 생식선 차폐체의 성능을 MOSFET을 이용한 선량 측정을 통해 평가하였고, 기존의 TLD 를 이용한 측정 결과와 비교하여 생체내 선량측정(in-vivo dosimetry) 에 MOSFET 장비가 임상적으로 활용될 가치가 높음을 확인하였다.

2. 재료 및 방법

서울대학교 병원 방사선종양학과에서 2009년부터 2011년 1월까지 치료한 성인 남자 직장암 환자 4명에 대해 생식선의 선량을 측정하였다. 환자 치료를 위해 Varian 21EX (Varian Medical Systems, CA, USA) 선형가속기(LINAC) 에서 방출되는 6 MV 와 15 MV 의 Xray 를

이용하였다.

선형가속기의 조준기(collimator) 등에 의한 산란선(scattered ray) 뿐만 아니라 방사선조사영역(radiation field) 내의 치료부위로부터 산란되어 전달되는 산란선을 최소로 하기 위하여 3면이 모두 차폐될 수 있도록 차폐체는 상자 모양으로 제작되었다[6]. 차폐체는 납으로 만든 7.5 cm × 9.5 cm × 5.5 cm 크기의 상자(각 면은 1 cm 두께) 와 9 cm × 9.5 cm × 1 cm 크기의 덮개로 이루어져 있다(Fig 1).

차폐체의 성능 평가를 위한 선량 측정은 mobile MOSFET Dose Verification System (TNRD-70-W, Best Medical Canada Ltd., Ottawa, Canada) 을 이용하였다. 센서에 걸어드는 바이어스(bias) 는 높은(high) 상태로 하여 미량의 선량에서도 민감하게 반응하도록 하였다. MOSFET 장비의 교정은 기본 제공되는 형판(template) 과 물등가고체모형(solid water phantom) 을 이용하였다. 0.01 ~ 0.2 Gy 범위로 선량을 변화시켜 가며 조사해 MOSFET 장비의 측정값의 변화를 관찰하고 이들의 관계를 평균평방근(root mean square) 값을 이용해 선형회귀(linear regression) 하여 교정 값을 구하였다.



Fig. 1. Gonad shielding from scattered photon with lead shielding material. The shielding material consists of case with 3 layers and a cover (left). The cover is placed on the case in order to protect gonad (right).

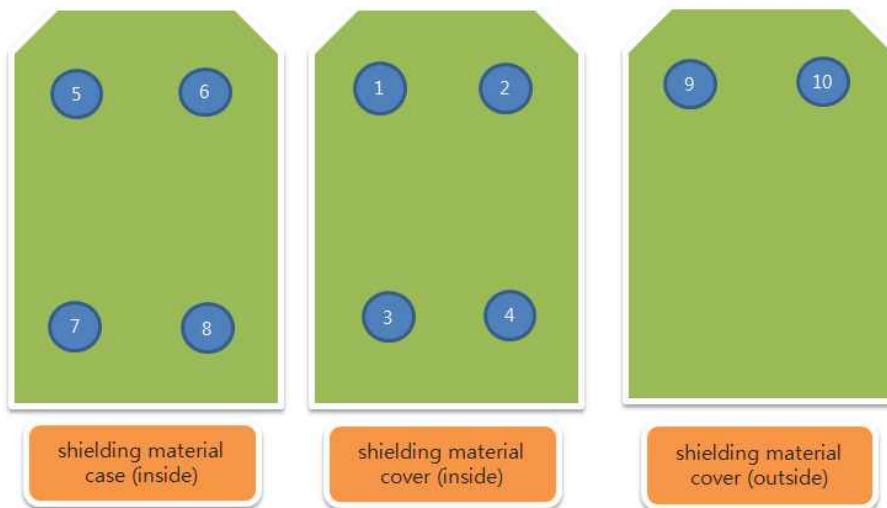


Fig. 2. MOSFET sensors are located on selected points of shielding material. Number 9 and 10 sensors are located outside of shielding material to

measure reference dose.

Table 1. Effect of Fractionated X-ray Irradiation to Gonads. Over 0.35 Gy dose caused aspermia and 2.0 Gy caused permanent aspermia[3].

Gonad dose (Gy)	Number and age of patients	Effect
0.16-0.29	5 22-51	Temporary oligospermia
0.35	2 22 and 24	Temporary aspermia from 4 to 12 months
0.4-0.48	7 26-40	Temporary aspermia 5 months post irradiation. Full recovery by 48 months
0.5-1.6	25 21-56	Temporary aspermia from 3 to 17 months post irradiation with recovery beginning at 8 to 38 months
2.0-3.0	5 21-30	Permanent aspermia. Recovery began after 12 to 14 years in 2 patients

생식선의 측정을 위해 각 MOSFET 센서(sensor) 들을 차폐체의 정해진 부분에 부착하여 측정하였다. 각 센서의 위치는 차폐 효과를 확인하기 위해 차폐체 안쪽과 바깥쪽으로 구분하여 정하였다(Fig 2). 본 MOSFET 장비는 PC에 블루투스(Bluetooth) 를 이용해 무선 연결하여 선량판독이 가능하였다. 선량 판독에는 mobile MOSFET Dose Verification System 에 기본 제공되는 프로그램을 사용하였다.

차폐체 바깥쪽의 선량 측정 결과를 참조 값(reference) 으로 하여 차폐체 안쪽의 선량이 감소되는 정도를 다음 식과 같이 계산하였다.

$$Shielding\ Ratio = \frac{average\ dose\ on\ inside}{average\ dose\ on\ outside\ (reference)} \times 100(\%) \quad (1)$$

차폐체 성능 평가를 위해 측정된 선량이 선행 연구된

결과에 의한 기준치[3, 6] (Table 1) 를 넘지 않는지를 확인하였다. 또한 기존의 TLD 를 이용한 생식선 선량 측정 결과를 이용해 MOSFET 장비를 이용한 측정이 생체내 선량측정에 유효한지를 확인하였다.

3. 결과 및 논의

생식선 차폐체에 대한 MOSFET 측정 결과는 Table 2 와 Fig 3 에 정리하였다. 생식선 차폐체를 이용한 경우 차폐체 안쪽의 피폭 선량이 바깥쪽에 비해 평균적으로 23.07% 로 감소하였다. 6 MV 광자선 (photon beam) 에 대한 납 차폐체의 반가층(Half Value Layer, HVL) 두께가 축 이탈점(off-axis point) 에서 6.5 mm 이므로[9] 23.07% 로 감소하는 데에는 대략 10 mm 정도의 납 차폐체가 필요함을 알 수 있다. 이로써 MOSFET 의 선량 측정 결과가 정확함을 확인할 수 있다.

Table 2. MOSFET Measurement of Gonadal Doses. Each site refers where the MOSFET sensor attached indicated in FIG 2. (Unit: Gy)

Site	Patients				
	A	B	C	D	
Inside	1	0.02	0.01	0.01	0.01
	2	0.00	0.02	0.01	0.00
	3	0.00	0.00	0.00	0.00
	4	0.01	0.00	0.01	0.00
	5	0.05	0.03	0.03	0.03
	6	0.06	0.01	0.03	0.05
	7	0.01	0.01	0.01	0.03
	8	0.02	0.02	0.01	0.00
Average	0.02	0.01	0.01	0.01	
Outside	9	0.10	0.07	0.06	0.04
	10	0.09	0.07	0.07	0.04
	Average	0.10	0.07	0.07	0.04
Shielding Ratio (%)	22.87	19.01	18.76	38.20	

Notes: $Shielding Ratio = \frac{average\ dose\ on\ inside}{average\ dose\ on\ outside} \times 100(\%)$

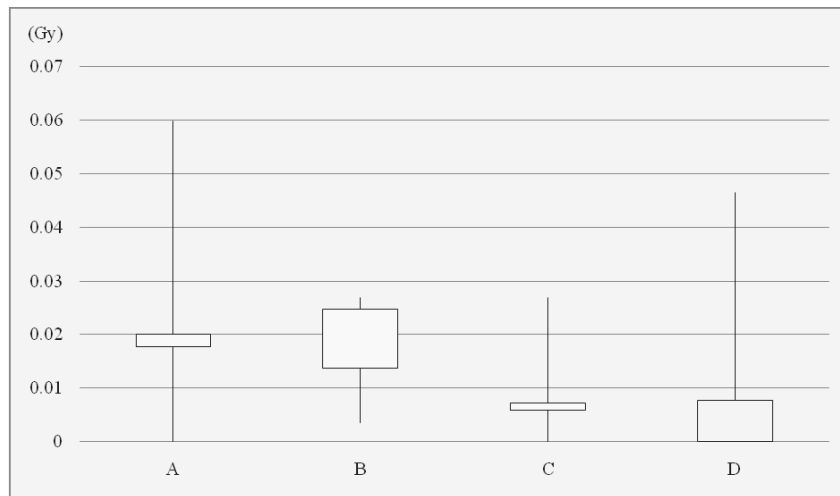


FIG. 3. Result of MOSFET dosimetry of gonad shielding material. The results are displayed for each patient. The length of the lines in the graph corresponds with the range of the measured dose. The size of the block is related to the mean value of the standard deviation of the measured dose and the position of the block is related to the mean value of the measured dose.

차폐체 안쪽에 전달된 선량은 평균 0.01 Gy (표준편차 0.004 Gy) 로 측정되었다. 이는 선행 연구에 의해 밝혀진 무정자증(aspermia) 의 가능성이 있는 0.35 Gy 와, 불임을 초래할 수 있는 2.0 Gy 의 기준치들을 넘지 않는 수준의 선량이다. NCRP 의 보고서 91번에 의하면, 의료 등의 목적으로 방사선 피폭을 동반한 행위에 대해 합리적이고 달성 가능한 수준에서 그 선량을 제한하도록 하고 있다 [2]. 환자들 별로 식 (1) 에 의해 계산된 Shielding Ratio 는 적게는 18.76% 부터 많게는 38.20% 까지 차이를 보였으나 전달된 절대적 선량은 기준치 이하로서, 차폐체의 효과는 충분한 것으로 확인할 수 있다.

차폐체 내의 선량 측정 지점들 중 5, 6 번 지점의 피폭 선량이 다른 지점에 비해 다소 높은 것은 차폐체 구성상 산란선이 바로 입사될 수 있는 여지가 큰 지점이기 때문인 것으로 판단된다. 또한 5, 6 번 지점에 환자의 생식선이 실제로 위치하지는 않게 되므로 환자의 생식선 보호에

도 문제가 없을 것으로 판단된다.

기존의 TLD 를 이용하여 생식선의 선량을 측정된 결과는, 차폐체 안쪽에 전달된 선량이 평균 0.02 Gy, 차폐체 바깥쪽에 전달된 선량은 평균 0.04 Gy 로 확인되었다. Shielding Ratio 는 56.25% 로 MOSFET 측정 결과로 구해진 Shielding Ratio 와는 차이를 보였다. 이는 기존의 TLD 가 주로 전신방사선조사(total body irradiation, TBI) 의 생체내 측정에 이용된 것으로, 100 cGy 이상의 높은 선량에 대해 교정 되어 낮은 선량에 대해 교정이 정확하지 않은 것으로 판단된다.

본 연구로써 방사선 치료시 생식선 차폐체가 환자의 생식선에 피폭되는 선량을 효과적으로 줄여줄 수 있음을 확인하였다. 또한 MOSFET 을 이용하여 기존의 TLD 를 이용한 선량 측정보다 더 간단하면서도 정확하게 선량을 평가할 수 있었다. 따라서 MOSFET 이 방사선 치료시 환자의 생체내 선량측정에 임상적으로 활용될 가치가 높음

을 확인하였다.

4. 결론

MOSFET 측정 결과, 생식선 차폐체를 이용하여 환자 생식선에 피폭되는 선량을 효과적으로 줄일 수 있음을 확인하였다. 기존의 TLD를 이용한 측정과 비교하여 MOSFET 을 이용하였을 때 보다 실시간으로 정확하게 선량을 평가할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

1. Giessen PH. Calculation and measurement of the dose at points outside the primary beam for photon energies of 6, 10, and 23 MV. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 1994 Dec;30(5):1239-1246.
2. National Council on Radiation Protection and Measurements. NCRP report : Recommendations on limits for exposure to ionizing radiation. Bethesda, MD; The Council. 1987.
3. International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103 : The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Pergamon Press, 2007;37(2-4):1-332.
4. Ash PJND. Non-stochastic effects of ionising radiations on gonads. *J. Soc. Radiol. Prot.* 1998 June;6(2):55-62.
5. Hall EJ, Giaccia AJ. *Radiobiology for the radiologist.* 6th ed. Philadelphia; Lippincott Williams & Wilkins, 2006.
6. Fraass BA. Peripheral dose to the testes: the design and clinical use of a practical and effective gonadal shield, *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 1985 Mar;11(3):609-615.
7. Essers M, Mijnheer BJ. In vivo dosimetry during external photon beam radiotherapy. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 1999 Jan;43(2):245-259.
8. Ramani R, Russell S, O'Brien P. Clinical dosimetry using MOSFETs, *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 1997 Mar;37(4):959-964.
9. Choo SS, Seo CO, Kim GE. Shielding for Critical Organs and Radiation Exposure Dose Distribution in Patients with High Energy Radiotherapy. *J. Korea Asso. Radiat. Prot.* 2002;27(1):1-10.

MOSFET Dosimetry for Evaluation of Gonad Shielding during Radiotherapy

Hwiyoung Kim*, Yunseok Choi*, So-Yeon Park*, Yang-Kyun Park*, and Sung-Joon Ye^{†,‡}

*Department of Radiation Applied Life Science, Seoul National University College of Medicine, Seoul, Korea

†Department of Radiation Oncology, Seoul National University College of Medicine, Seoul, Korea

‡Department of Intelligent Convergence Systems, Seoul National University, Seoul, Korea

Abstract - In order to confirm feasibility of MOSFET modality in use of in-vivo dosimetry, evaluation of gonad shielding in order to minimize gonadal dose of patients undergoing radiotherapy by using MOSFET modality was performed. Gonadal dose of patients undergoing radiotherapy for rectal cancer in the department of radiation oncology of Seoul National University Hospital since 2009 was measured. 6 MV and 15 MV photon beams emitted from Varian 21EX LINAC were used for radiotherapy. In order to minimize exposed dose caused by the scattered ray not only from collimator of LINAC but also from treatment region inside radiation field, we used box-shaped lead shielding material. The shielding material was made of the lead block and consists of 7.5 cm × 9.5 cm × 5.5 cm sized case and 9 cm × 9.5 cm × 1 cm sized cover. Dosimetry for evaluation of gonad shielding was done with MOSFET modality. By protecting with gonad shielding material, average gonadal dose of patients was decreased by 23.07% compared with reference dose outside of the shielding material. Average delivered gonadal dose inside the shielding material was 0.01 Gy. By the result of MOSFET dosimetry, we verified that gonadal dose was decreased by using gonad shielding material. In compare with TLD dosimetry, we could measure the exposed dose easily and precisely with MOSFET modality.

Keywords : Gonad shielding, MOSFET dosimetry, In-vivo dosimetry