

광유도발광선량계(Optically Stimulated Luminescent Dosimeter)의 선량 특성에 관한 고찰

서울아산병원 방사선종양학과

김정미 · 전수동 · 백금문 · 조영필 · 윤화룡 · 권경태

목 적: 방사선 치료의 선량평가를 위해 사용되는 Optically stimulated luminescent dosimeters (OSLD) 선량 특성을 분석하여, 선량 측정의 유용성을 알아보고자 한다.

대상 및 방법: NanoDot™와 Inlight™MicroStar Reader, Solid Water Phantom, 의료용 선형가속기 TRYLOGY®를 사용하였다. 측정 조건은 OSLD를 Solid Water Phantom의 D_{max} 깊이에 위치시킨 후 SSD는 100 cm, Field size는 10x10 cm²로 하고 300 MU/min으로 6 MV 광자선, 100 cGy의 방사선을 조사하였다. OSLD를 10분 마다 판독하면서 변화값을 측정하였고, OSLD에 선량을 50 cGy와 100 cGy씩 누적시켜 판독하였다. 또한 에너지 의존성은 6 MV, 15 MV, 4~20 MeV를 사용하였다. 선량률은 100 ~1,000 MU/min로 변화시키면서 측정하였다. 광자선 6 MV의 PDD의 변화를 측정하기 위해 OSLD와 전리함(Ionization chamber) (FC 65P-747)을 사용하였다.

결 과: 시간의 경과에 따른 OSLD의 재현성은 ±2.5%였다. OSLD의 선량에 대한 선형성(linearity)을 평가한 결과 300 cGy까지는 선형적으로 증가하였고, 300 cGy 이상에서는 초선형적(supralinearity)으로 증가하였다. 에너지 의존성은 ±2% 이내였고 선량을 의존성은 ±3% 이내였다. 6 MV 광자선에 대하여 OSLD로 측정된 PDD₁₀은 66.7%, PDD₂₀은 38.4%였고 전리함(Ionization chamber)으로 측정된 PDD₁₀은 66.6%, PDD₂₀은 38.3%였다.

결 론: OSLD의 특성을 분석한 결과 시간, 에너지, 선량률의 변화에 따른 차이는 ±3% 이내였으며 전리함(Ionization chamber)과 비교한 PDD는 0.3% 이내였다. 또한 300 cGy까지는 선량이 선형적으로 증가하였다. OSLD는 여러 번 반복 측정이 가능하였고 측정과 판독이 용이하여 선량계로서 유용성을 확인하였다.

핵심용어: 광유도발광선량계, 선량 특성

서 론

암의 방사선 치료는 CT, MRI, PET 등 첨단장비로 진단하고 정상조직을 최대한 보호하고 종양조직에 최대한의 선량을 주기 위한 목적으로 최적의 치료계획을 세워 치료를 하게 된다.¹⁾ 정확한 방사선 치료를 위해 해부학적 구조 또는 기하학적 치료 조사야를 확인하기 위하여 치료 조사야 확인 필름(L-gram), 전자조사문명상장치(Electronic Portal Imaging Device), 온보드 영상장치(On-Board Imager, OBI, Varian Medical Systems, USA) 등이 사용되고 있다. 또한 전산화 치료계획에 의해 얻은 방사선량이 치료 시 정확하게 종양에 전달되는지를 알기 위한 선량평가가 무엇보다 중요하다.²⁾

ICRP 60 권고에서는 선형무발단(linear non-threshold) 선

량 가설에 바탕을 둔 확률적 영향의 발생을 제한하기 위하여, 합리적으로 달성할 수 있는 한 충분히 낮게(as low as reasonably achievable, ALARA) 선량을 유지하는 것을 요구하고 있다.³⁾ ALARA 선량을 유지하기 위해서는 저선량 영역인 10⁻⁴~10⁻¹ mGy 선량영역에서 보다 정밀하고 정확한 선량평가를 필요로 하며 3차원 입체조형치료(3-Dimensional-conformal Radiation therapy, 3D-CRT), 세기변조방사선치료(Intensity Modulated Radiation Therapy, IMRT) 영상유도방사선치료(Image Guided Radiation Therapy, IGRT) 등 방사선 치료기술이 발전되면서 높은 공간적 해상도 및 높은 감도를 가진 선량계(Dosimeters)가 더욱 중요하게 되었다.^{1,2,4)}

선량측정을 위한 선량계로는 Ionization chambers, Thermoluminescence Dosimeter (TLDs), Diode, Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistors (MOSFETs) 등이 대중적으로 사용되고 있으며 TLD는 열(heating)과 열처리(annealing)의 복잡한 과정이 있고, 측정 즉시 선량값을 알 수 없는 단점이 있으며, Diode는 교정인수(calibration factor)가 온도에 의

이 논문은 2010년 6월 5일 접수하여 2010년 9월 2일 채택되었음.
책임저자 : 김정미, 서울아산병원 방사선종양학과
Tel: 02)3010-4419, Fax: 02)3010-6950
E-mail: kimchongmi@hanmail.net

존하고 방향에 균일하지 못하다. 또한 MOSFETs은 TLD와 Diode의 결점들을 보완했으나 수명이 한정되어 있다고 보고된 바 있다.⁵⁻⁸⁾

Optically Stimulated Luminescent Dosimeter (OSLD)는 방사선 방호에서 광범위하게 이용되어 왔고 최근에 방사선 치료에서 선량측정을 위해 사용되고 있다.⁹⁻¹²⁾ OSLD는 방사선 물질로 $Al_2O_3:C$ 를 이용하고 TLD와 매우 유사하다. 그러나 인공방사선 발광(Luminescence)을 일으키기 위해 열 대신에 빛을 이용한다.¹³⁾ 이온화 방사선이 조사 될 때, Light Emitting Diodes (LED)나 광(Laser)로부터 525 nm 파장의 빛으로 자극이 된다. 이 과정에서 방사선 계측기에서 470 nm의 발광 전체가 방사선 선량으로 측정된다.¹⁴⁻²¹⁾

본 논문에서는 OSLD의 선량(dosimetric)특성을 분석하여 선량 측정의 유용성을 알아보려고 한다.

대상 및 방법

OSL system은 Landaur에 의해 제조된 상업적인 InLight™ micro star reader (Fig. 1)이 사용되었다. Detector는 플라스틱 홀더에 싸여진 $Al_2O_3:C$ 로 구성되었다. Fig. 1은 플라스틱 홀더가 작은 $Al_2O_3:C$ dot를 포함하는 것을 보여주고 판독 동안에는 플라스틱 홀더는 더 큰 홀더 안에 위치하며 플라스틱 케이스는 빛이 통하지 않고 판독 동안에만 제거된다. InLight/OSL NanoDot™ dosimeters (Landauer, Inc., Glenwood, IL, USA)가 사용되었고(Fig. 2) 의료용 선형 가속기는 TRYLOGY® (VARIAN, USA)가 사용되었다(Fig. 3). Solid Water Phantom (Fig. 4)와 선량을 비교하기 위하여 FC 65P-747의 전리함(ionization chamber)을 사용하였다(Fig. 5). PDD를 제외한 모든 실험의 측정조건은 OSLD를 Solid Wa-



Fig. 1. InLight™ microStar reader.



Fig. 3. Linear accelerator (TRYLOGY®, VARIAN, USA).

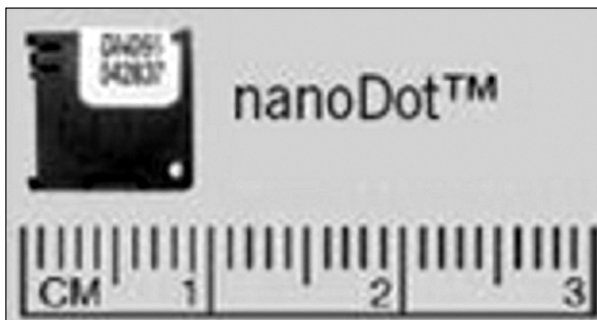


Fig. 2. InLight/OSL NanoDot™ dosimeters.

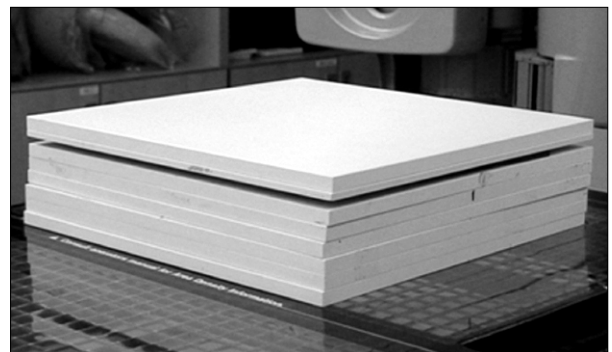


Fig. 4. Solid water phantom.

ter Phantom의 Dmax 깊이에 위치시켰다. 이 때 SSD는 100 cm, Field Size는 10×10 cm²로 하고 6 MV 광자선을 300 MU/min으로 100 cGy 조사하였다. 또한 OSLD가 방사선 조사 후 바로 판독을 하면 과도 신호가 발생해 대략 10분 경과 후부터 안정화 된다는 보고가 있어²²⁾ 모든 실험에서 방사선 조사 후 10분이 경과 한 후 판독을 하였다(Fig. 6).

첫 번째 실험은 시간의 경과에 따라 OSLD 판독값의 변화를 알아보기 위해 세 개의 OSLD를 10분씩 간격을 두고 100 분 동안 판독값을 측정하였다. 두 번째 실험은 세 개의 OSLD에 각각 선량을 50 cGy, 100 cGy, 200 cGy, 300 cGy, 400 cGy, 500 cGy로 누적시켜 가면서 판독값을 측정하였다. 세 번째 실험은 OSLD 에너지 의존성을 알아보기 위해 네 개의 OSLD에 각각 에너지를 6 MV, 15 MV, 4 MeV, 6 MeV, 9 MeV, 12 MeV, 16 MeV, 20 MeV에 대하여 조사 후 판독값을 측정하였다. 네 번째 실험은 OSLD 선량률 의존성을 알아보기 위해 네 개의 OSLD에 각각 선량률을 100 MU/min, 200 MU/min, 300 MU/min, 400 MU/min, 500 MU/min, 600

MU/min, 1,000 MU/min로 변화시켜 가면서 판독값을 측정하였다. 다섯 번째 실험은 네 개의 OSLD와 전리함(Ionization chamber)을 이용하여 6 MV 광자선에 대하여 D_{max}, 10 cm, 20 cm 깊이에서 측정하여 PDD를 비교하였다.

결 과

첫 번째 OSLD 시간의 경과에 따라 판독값의 변화를 측정 한 결과는 Table 1과 같다.

1번 OSLD는 최대값 27.56, 최소값 26.71, 2번 OSLD는 최대값 27.31, 최소값 26.02, 3번 OSLD는 최대값 27.07, 최소값 26.49로 측정되었다. 3개의 OSLD 측정값의 평균을 기준으로 세 개 모두 100분 동안의 OSLD 측정값은 ±2.5% 이내였다 (Fig. 7).

Table 1. OSLD measurements according to the lapse of time (unit: count)

Time (min)	OSL No. 1	OSL No. 2	OSL No. 3
10	27.37	26.75	26.91
20	27.47	26.02	26.51
30	27.56	26.83	27.07
40	27.17	26.75	26.83
50	27.38	26.17	26.91
60	27.20	26.63	26.63
70	27.40	27.31	26.95
80	27.06	26.57	26.82
90	26.71	26.70	27.06
100	26.82	26.93	26.49
AVG	27.21	26.67	26.82



Fig. 5. Ionization chamber (FC 65P-747, IBA®, Germany).

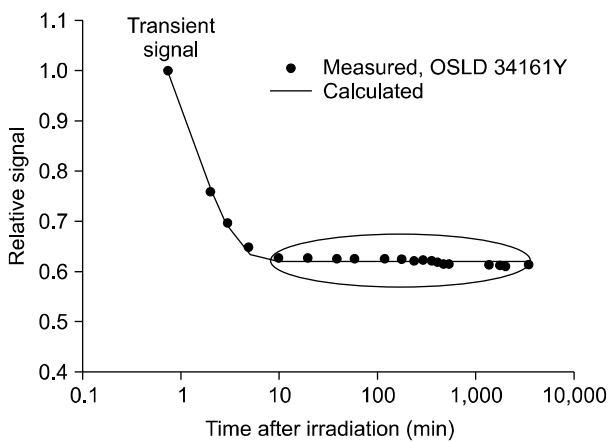


Fig. 6. Reading time after irradiation (Paul A. Jursinic et al Med Phys 2007;34:4594-4604).

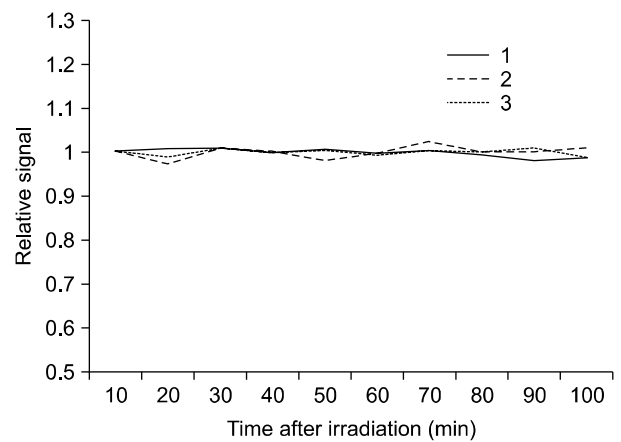


Fig. 7. Data for 3 OSLD during 100 minutes compared to the average rate.

두 번째 선량에 대한 의존성을 평가하기 위해 선량을 50~500 cGy로 누적시켜 측정한 값은 Table 2와 같다.

세 개의 OSLD 모두 300 cGy까지는 선형적으로 증가하는 양상을 보였으며, 300 cGy 이상에서는 초선형적으로 증가하는 양상을 보였다(Fig. 8).

세 번째 OSLD의 에너지에 대한 의존성을 평가한 결과 측

Table 2. Assessment of the dose dependency using dose accumulation (unit: count)

Accumulated dose (cGy)	OSL No. 1	OSL No. 2	OSL No. 3
50	13.37	13.03	13.52
100	26.90	26.03	27.36
150	40.49	39.92	41.24
200	56.54	54.91	55.68
250	71.55	69.30	70.93
300	83.96	82.77	86.26
400	116.90	115.18	116.57
500	145.42	144.05	146.02

Table 3. Result of the energy dependency (unit: count)

OSL No.	6 MV	15 MV	4 MeV	6 MeV	9 MeV	12 MeV	16 MeV	20 MeV
1	23.80	24.47	24.51	23.97	24.05	23.90	23.59	24.31
2	24.48	23.59	22.00	23.98	23.95	24.72	24.19	24.83
3	23.85	24.03	23.96	23.36	23.40	24.01	23.84	22.15
4	24.05	24.27	24.04	24.04	24.44	22.75	24.16	23.94
AVG	24.05	24.09	23.63	23.84	23.96	23.85	23.94	23.81
Normalizaton	1.000	1.002	0.983	0.991	0.996	0.992	0.996	0.990

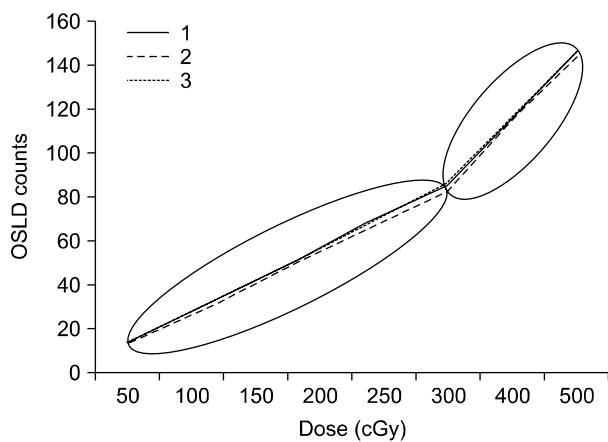


Fig. 8. OSLD measurements according to the lapse of accumulated dose.

정한 값은 Table 3과 같다.

6 MV를 측정한 네 개의 OSLD의 평균값은 24.05, 15 MV를 측정한 평균값은 24.09, 4 MeV를 측정한 평균값은 23.63, 6 MeV를 측정한 평균값은 23.84, 12 MeV를 측정한 평균값은 23.85, 16 MeV를 측정한 평균값은 23.94, 20 MeV를 측정한 평균값은 23.81로 측정되었다. 6 MV 에너지의 평균값을 1.0로 normalization시킨 후 에너지의 차이는 $\pm 2\%$ 이내였다 (Fig. 9).

네 번째 OSLD 선량률의 의존성을 측정한 결과는 Table 4와 같다.

100 MU/min을 측정한 네 개의 OSLD의 평균값은 24.76, 200 MU/min을 측정한 OSLD의 평균값은 24.61, 300 MU/min을 측정한 OSLD의 평균값은 24.22, 400 MU/min을 측정한 OSLD의 평균값은 24.83, 500 MU/min을 측정한 OSLD의 평균값은 24.71, 600 MU/min을 측정한 OSLD의 평균값은 24.30, 1,000 MU/min을 측정한 OSLD의 평균값은 24.94로 측정되었다. 400 MU/min을 측정한 OSLD의 평균값을 1.0로 normalization시킨 후 선량률의 차이는 $\pm 3\%$ 이내였다(Fig.

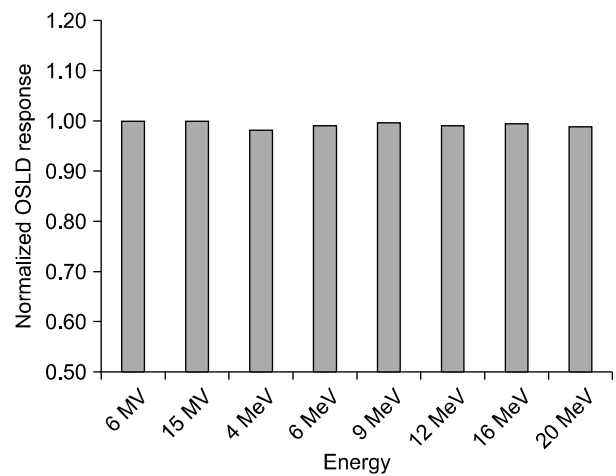


Fig. 9. Energy difference after the normalization of the photon beam of 6 MV to 1.0.

Table 4. Result of dose rate dependency (unit: count)

OSL No.	100	200	300	400	500	600	1000
1	25.38	24.16	24.09	25.40	24.30	24.18	24.92
2	24.54	25.51	24.22	24.37	24.96	24.48	24.91
3	24.72	24.39	24.19	24.90	25.09	24.15	25.08
4	24.38	24.39	24.40	24.65	24.50	24.39	24.85
AVG	24.76	24.61	24.22	24.83	24.71	24.30	24.94
Normalizaton	0.997	0.991	0.976	1.000	0.995	0.979	1.004

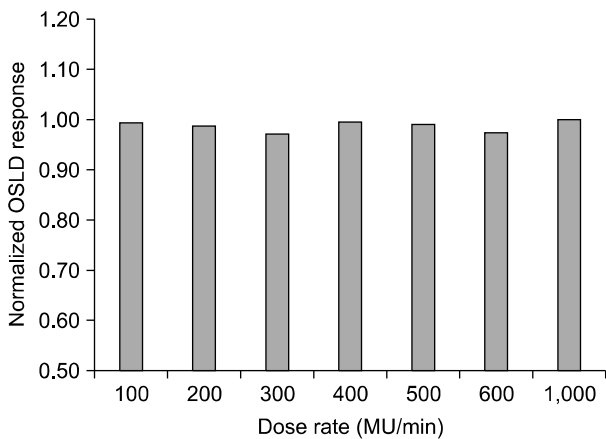


Fig. 10. Dose rate difference after the normalization of the dose rate of 400 MU/min to 1.0.

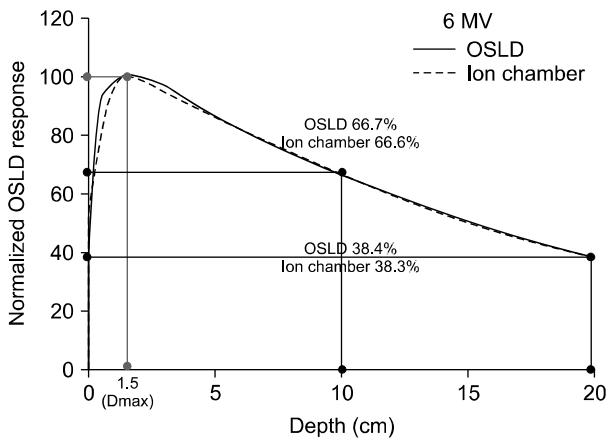


Fig. 11. PDD for the photon beam of 6 MV measured by OSLD and ionization chamber.

10).

다섯 번째 6 MV 광자선에 대하여 OSLD로 측정된 D_{max} 를 기준으로, 10 cm PDD는 66.7%, 전리함(Ionization chamber)으로 측정된 10 cm PDD는 66.6%였고 OSLD로 측정된 20

cm PDD는 38.4%, 전리함(Ionization chamber)으로 측정된 20 cm PDD는 38.3%로 측정되었다. 측정된 깊이 10 cm에서는 0.2%의 차이를 보였고 20 cm에서는 0.3%의 PDD 차이를 보였다(Fig. 11).

고안 및 결론

방사선 치료 시 치료 정확도에 대한 평가는 치료 성적을 좌우하는데 매우 중요한 요소이며 일반적으로 시행되고 있는 해부학적, 기하학적 오차 평가와 더불어 선량의 평가도 중요시 되고 있다. 본 연구에서 OSLD의 여러 가지 특성을 분석한 결과 시간에 경과에 따른 OSLD의 측정값은 $\pm 2.5\%$, 에너지의 의존성에 대한 OSLD의 측정값은 $\pm 2.0\%$, 선량률에 따른 OSLD의 측정값은 $\pm 3.0\%$ 이내의 차이를 보였고 300 cGy까지는 선량이 선형적으로 증가하는 양상을 보여 반복 측정이 가능함을 알 수 있었다. 또한 OSLD로 측정된 PDD값은 전리함(Ionization chamber)으로 측정된 PDD값과 10 cm에서는 0.2%의 차이를 보였고 20 cm에서는 0.3%의 차이를 보여 PDD를 잘 반영하였다. OSLD는 크기가 작고 측정과 관독이 용이하며 열(heating)과 열처리(annealing)의 복잡한 과정이 없기 때문에 관독시간은 1분 이내에 할 수 있다. 또한 사용 범위가 광범위하다. 이러한 장점으로 OSLD는 선량 측정에 유용하며 치료 과정에서 생기는 오차를 예방하여 방사선 치료의 정확도를 높일 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Van Dyk J: The Modern Technology of Radiation Oncology. A Compendium for Medical Physicist and Radiation Oncologists Medical Physics, Madison, WI, 1999.
2. Bruno S, Aris T: Clinical application of image-guided Radiotherapy, IGRT (on the Varian OBI platform). Cancer/Radiotherapy 2006;10:252-257
3. ICRP Publication 60. Radiation protection. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.

- Pergamon Press 1990; p:68
4. Bak J, Jeong K, Keum KC, Park SW: On-line image guided radiation therapy using Cone-Beam CT (CBCT). *J Korean Soc Ther Radiol Oncol* 2006;24:294-299
 5. Soubra M, Cygler J: Evaluation of a dual bias dual metal oxide silicon semiconductor field effect transistor detector as radiation dosimeter. *Med. Phys* 1994;21:567-572
 6. Essers M, Mijnheer BJ: In vivo dosimetry during external photon beam radiation therapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 1999;43:245-259
 7. Halvorsen PH: Dosimetric evaluation of a new design MOSFET in vivo dosimeter. *Med Phys* 2005;32:110-117
 8. Ferguson HM, Lambert GD, Harrison RM: Automated TLD system for tumor dose estimation from exit dose measurements in external beam radiotherapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 1997;38:899-905
 9. Gray JE, OSL: Dosimetry for the Twenty-First Century. First RCM on Development of Procedures for in-vivo Dosimetry in Radiotherapy (e2-rc-982.1) IAEA, Trieste, 2005.
 10. Yukihiro EG, et al.: High-precision dosimetry for radiotherapy using the optically stimulated luminescence technique and thin Al₂O₃:C dosimeters. *Phys Med Biol* 2005;50:5619-5628
 11. Aznar MC, et al.: Real-time optical-fibre luminescence dosimetry for radiotherapy: Physical characteristics and applications in photon beams. *Phys Med Biol* 2004;49:1655-1669
 12. Andersen CE, Marckmann CJ, Aznar MC: An algorithm for real-time dosimetry in intensity-modulated radiation therapy using the radioluminescence signal from Al₂O₃:C. *Radiat Prot Dosim* 2006;120:7-13
 13. McKeever SWS: Optically stimulated luminescence dosimetry. *Nucl Instrum Methods Phys Res B* 2001;184:29-54
 14. Justus BL, et al.: Optically and thermally stimulated luminescence characteristics of Cu⁺⁺-doped fused quartz. *Radiat Prot Dosim* 1999;81:5-10
 15. Justus BL, Merritt CD, Powlowich KJ: Optically and thermally stimulated luminescence dosimetry using doped fused quartz. *Radiat Prot Dosim* 1999;84:189-192
 16. Huston AL, et al.: Remote optical fibre dosimetry. *Nucl Instrum Methods Phys Res B* 2001;184:55-77
 17. Polf JC, et al.: A real time fibre optic dosimetry system using Al₂O₃ fibres. *Radiat Prot Dosim* 2002;100:301-304
 18. Ranchoux G, et al.: Fibre remote optoelectronic gamma dosimetry based on optically stimulated luminescence of Al₂O₃:C. *Radiat Prot Dosim* 2002;100:255-260
 19. McKeever SWS, Akselrod MS, Colyott LE, Agersnap-Larsen N, Polf JC, Whitley V: Characteristics of Al₂O₃ for use in thermally and optically stimulated dosimetry. *Radiat Prot Dosim* 1999;84:163-168
 20. Bøtter-Jensen L, McKeever SWS: Optically stimulated luminescence dosimetry using natural and synthetic materials. *Radiat Prot Dosim* 1996;65:273-280
 21. Markey BG, Colyott LE, McKeever SWS: Time-resolved optically stimulated luminescence from -Al₂O₃:C. *Radiat Meas* 1995;24:457-463
 22. Paul A. Jursinic, et al.: Optically stimulated luminescence dosimeters for clinical dosimetric measurements. *Med Phys* 2007;34:4594-4604

Abstract

Characteristic Evaluation of Optically Stimulated Luminescent Dosimeter (OSLD) for Dosimetry

Jeong Mi Kim, Su Dong Jeon, Geum Mun Back, Young Pil Jo, Hwa Ryong Yun, Kyung Tae Kwon

Department of Radiation Oncology, Asan Medical Center, Seoul, Korea

Purpose: The purpose of this study was to evaluate dosimetric characteristics of Optically stimulated luminescent dosimeters (OSLD) for dosimetry

Materials and Methods: InLight/OSL NanoDot™ dosimeters was used including InLight™MicroStar Reader, Solid Water Phantom, and Linear accelerator (TRYLOGY®) OSLDs were placed at a D_{max} in a solid water phantom and were irradiated with 100 cGy of 6 MV X-rays. Most irradiations were carried out using an SSD set up 100 cm, 10x10 cm² field and 300 MU/min. The time dependence were measured at 10 minute intervals. The dose dependence were measured from 50 cGy to 600 cGy. The energy dependence was measured for nominal photon beam energies of 6, 15 MV and electron beam energies of 4~20 MeV. The dose rate dependence were also measured for dose rates of 100~1,000 MU/min. Finally, the PDD was measured by OSLDs and Ion-chamber.

Results: The reproducibility of OSLD according to the Time flow was evaluated within $\pm 2.5\%$. The result of Linearity of OSLD, the dose was increased linearly up to about the 300 cGy and increased supralinearly above the 300 cGy. Energy and dose rate dependence of the response of OSL detectors were evaluated within $\pm 2\%$ and $\pm 3\%$. PDD₁₀ and PDD₂₀ which were measured by OSLD was 66.7%, 38.4% and PDD₁₀ and PDD₂₀ which were measured by Ion-chamber was 66.6%, 38.3%

Conclusion: As a result of analyzing characteration of OSLD, OSLD was evaluated within $\pm 3\%$ according to the change of the time, enregy and dose rate. The PDD₁₀ and PDD₂₀ are measured by OSLD and ion-chamber were evaluated within 0.3%. The OSL response is linear with a dose in the range 50~300 cGy. It was possible to repeat measurement many times and progress of the measurement of reading is easy. So the stability of the system and linear dose response relationship make it a good for dosimetry.

Key words: optically stimulated luminescent dosimeter, dosimetric characterization