

## Calibration of Optically Stimulated Luminescent nanoDot Dosimeter for 6 MV Photon Beam

Jongeon Kim<sup>\*</sup>, Seonghu Kim<sup>\*\*</sup>, Hyoyeong Lee<sup>\*\*\*</sup>

*Department of Radiological Science, Kaya University<sup>\*</sup>,*

*Department of Radiology, Gyeongsang National University Hospital<sup>\*\*</sup>,*

*Department of Nuclear Medicine, Pusan National University Yangsan Hospital<sup>\*\*\*</sup>*

## 6 MV 광자 빔에 대한 광자극형광나노닷선량계의 교정

김종연<sup>\*</sup>, 김성후<sup>\*\*</sup>, 이효영<sup>\*\*\*</sup>

가야대학교 방사선학과<sup>\*</sup>, 경상대학교병원 영상의학과<sup>\*\*</sup>, 부산대학교병원 핵의학과<sup>\*\*\*</sup>

### Abstract

The purpose of this study is to investigate the calibration of an optically stimulated luminescent nanoDot dosimeter(OSL<sub>nD</sub>) to 6 MV photon beam. Dose ranges of the calibration of linear and non-linear from the analysis of dose response of the OSL<sub>nD</sub> were decided. To evaluate the accuracy of calibration equation and the calibration, the sets of the calibration and quality control dosimeter were used to make. The calibrations were performed by the linear and the non-linear in the dose range of 0~300 cGy and 20~1300 cGy, respectively. The errors of the calibration were acquired less than 0.1% respectively from the measurement of the quality control dosimeters for the calibration of linear and the non-linear. This study provides the calibration equation of the OSL<sub>nD</sub> to the 6 MV photon beam.

Key Words : Optically stimulated luminescent nanoDot dosimeter, Dose response, Calibration

### 요약

이 연구의 목적은 6 MV 광자 빔에 대한 광자극형광나노닷선량계(OSL<sub>nD</sub>)의 교정을 조사하는 데 있다. OSL<sub>nD</sub>의 선량반응 분석으로부터 선형 및 비선형 교정의 선량범위들은 결정을 하였다. 교정 및 교정식의 정확성을 평가하기 위하여 교정 및 품질관리선량계의 세트들은 만들어서 사용하였다. 교정들은 각각 0~300 cGy 및 20~1300 cGy 선량범위에서 선형 및 비선형적으로 수행하였다. 교정의 오차들은 선형 및 비선형 교정에 대하여 품질관리선량계들의 측정으로부터 각각 0.1% 이하로 얻었다. 이 연구는 6 MV 광자 빔에 대한 OSL<sub>nD</sub>의 교정식을 제공한다.

중심단어: 광자극형광나노닷선량계, 선량반응, 교정

## I. 서론

광자극형광나노닷선량계(optically stimulated luminescent nanoDot dosimeter, OSLnD)는 방사선치료에 있어서 전신조사법(total body irradiation)과 이웃하는 조사야 사이의 접합 부위에 대하여 체내선량측정(in vivo dosimetry)을 행하는 데 사용할 수 있다<sup>[1]</sup>. 제조사는 판독기의 교정을 위하여 kV 광자 빔에 대하여 교정선량계(calibration dosimeter) 및 품질관리선량계(quality control dosimeter)의 세트(set)를 사용자에게 제공한다. 그러나 MV 광자 빔에 대하여 교정 및 품질관리선량계 세트를 사용자에게 제공하지 않고 있는 실정이다. 따라서 MV 광자 빔을 이용하는 사용자는 직접 교정 및 품질관리선량계 세트를 만들어서 판독기를 교정하여야 하는 문제점이 제기된다.

MV 광자 빔에 대한 광자극형광나노닷선량계의 교정은 기존 논문에서 상세하게 발표된 적이 없었다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 이 연구는 6 MV 광자 빔에 대하여 교정 및 품질관리선량계 세트를 만들어서 판독기 교정을 수행하고 그 결과로부터 교정인자 및 교정식을 제공하는 데 목적이 있다.

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C로 만든 광자극형광나노닷선량계는 방사선 유도 형광을 유발하기 위하여 광을 이용한다. 알고 있는 선량의 전리방사선에 노출된 물질은 판독기(MicroStar reader)의 광발광다이오드(light emitting diode, LED)로부터 적당한 파장 및 강도의 광으로 자극된다. 이 자극 과정 동안 선량계로부터 방출된 형광은 자극 시간의 함수로서 광전자증배관(photomultiplier tube)의 계수치(count)로 측정되어진다<sup>[2]</sup>. 측정된 계수치 대 선량으로 판독기시스템의 교정은 행할 수 있다. 이미 발표된 논문들에서 OSLnD의 선량반응은 300 cGy 이하에서 선형반응(linear response) 및 300 cGy 이상에서 초선형반응(supra linear behavior)을 나타내었다고 보고하였다<sup>[1,2]</sup>. 그리고 OSLnD 및 광자극형광나노닷선량계(optically stimulated luminescent Dot dosimeter, OSLDD)의 붕괴신호(decay signal)는 방사선 조사 후 10분 뒤에 안정한 신호를 나타냈다고 발표하였다<sup>[1,3,4]</sup>.

본 연구는 6 MV 광자 빔에 대하여 OSLnD의 선량 반응곡선을 측정으로 얻은 다음 특성분석으로 선량의

교정범위를 정한다. 그 후 각 교정범위에 대한 교정으로 교정인자 및 교정식을 구하여 유용한 자료로 제공하고자 한다.

## II. 대상 및 방법

InLight OSLnD(Landauer, Inc., Glenwood, IL, USA)와 InLight MicroStar reader(Landauer, Inc., Glenwood, IL, USA)는 이 연구에 사용하였다. OSLnD의 치수는 0.8×0.8×0.2 cm이다. Varian 21iX 선형가속기(Varian Medical System, Milpitas, CA, USA)의 6 MV 출력선량은 IAEA TRS398 프로토콜에 의하여 선량률 400 MU/min, SSD(Source to surface distance) 100 cm, 조사야 10×10 cm<sup>2</sup>, 최대선량 깊이 1.5 cm에 1 cGy/MU로 되도록 선량을 교정하였다. 여기서 교정한 선량의 오차는 0.01%이다. 흡수선량 측정은 전리함(Model FC96-G, Scanditronix wellhofer, Germany)과 물팬텀(Model WP34, Scanditronix wellhofer, Germany)을 사용하여 수행하였다.

OSLnD의 선량반응을 측정하기 위하여 물등가고체팬텀(RW3, Scanditronix wellhofer, Germany)을 사용하였다. 이 팬텀은 평판(slab)들로 구성된다. 평판 사이에 OSLnD를 배치할 때 공기 간격(air gap)이 측정에서 문제가 된다. 이 문제를 해결하기 위하여 1 cm 두께의 평판의 위면에 1개의 OSLnD를 삽입 하였을 때 위면의 표면과 접하도록 평판 중앙에 흡은 제작되었다. 측정에서 물등가고체팬텀의 구성은 OSLnD의 표면으로부터 위, 아래의 두께가 각각 1.5 cm, 10 cm가 되도록 하였다.[Fig 1].

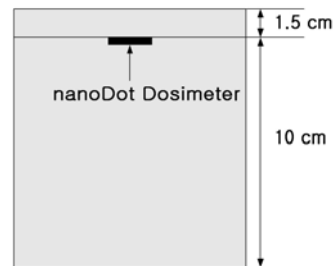


Fig 1. Geometry of an OSLnD in water equivalent solid phantom slabs.

OSLnD의 선량반응은 선형가속기의 출력 선량률 400MU/min에서 SSD 100 cm, 조사야 10×10 cm<sup>2</sup>, 최대선

량 깊이 1.5 cm 위치에 있는 OSLnD에 1, 5, 10, 15, 17, 18, 20, 50, 100, 200, 300, 500, 800, 1000 그리고 1300 cGy를 조사하여 측정하였다. 각 선량에 3개의 OSLnD를 1set로 구성하여 개개의 OSLnD에 같은 선량을 조사하였다. 얻어진 OSLnD의 선량반응곡선의 분석으로부터 판독기의 교정을 위한 측정들은 선량반응과 같은 기하학적 조사조건을 사용하여 측정하였다. 교정을 위한 측정은 선형 교정과 비선형 교정으로 나누어 측정을 하였다. 교정선량계 및 품질관리선량계는 각 선량에 대하여 3개의 선량계가 1세트가 되도록 구성을 하였다. 선형 교정은 저선량(low dose)과 고선량(high dose) 범위로 나누어서 교정을 수행한다. 교정선량계 세트들은저선량 범위에서 0, 1 그리고 5 cGy, 고선량 범위에서 0, 50, 150 그리고 300 cGy 각각 전달하여 만들었다. 또한 품질관리선량계 세트들도 2 그리고 200 cGy를 각각 전달하여 만들었다. 비선형 교정에서 교정선량계 세트들은 20, 100, 300, 500, 800, 1000 그리고 1300 cGy, 품질관리선량계 세트는 600 cGy를 각각 전달하여 만들었다. 선형 및 비선형 교정을 위해 만들어진 교정선량계들은 판독기시스템의 교정을 위하여 사용된다. 품질관리선량계는 교정 후 교정곡선(교정식)의 정확성을 평가하기 위하여 사용된다.

선형교정(linear calibration)은 300 cGy 이하의 선량 범위에 대하여 교정을 행할 수 있다. 공선량계(blank dosimeter)의 평균 계수치( $BAvg$ )는 식(1)[5]을 사용하여 구하며 단위는 Counts이다.

$$BAvg = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^L \left( \frac{1}{N \times S_j} \sum_{i=1}^N C_i \right) \dots\dots\dots (1)$$

여기서  $L$ 는 공선량계의 수(number of blank dosimeters)로서 방사선에 조사되지 않은 선량계 수이다.  $N$ 는 선량계당 판독위치의 수(number of read positions per dosimeter)로서 선량계당 반복 측정 수이다.  $S_j$ 는  $j$ 번째 선량계의 감도(sensitivity of dosimeter  $j$ )이다.  $C_i$ 는 창 위치에 대한 계수치(counts for window position)로서 판독 위치에서 계수치이다.

선형 교정인자( $CF$ )는 식(2)<sup>[5]</sup>를 사용하여 구하며 단위는 counts/cGy이다.

$$CF = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \frac{1}{E_j} \left( \frac{1}{N \times S_j} \sum_{i=1}^N C_i - BAvG \right) \dots\dots\dots (2)$$

여기서  $M$ 는 조사된 선량계의 수(number of exposed dosimeters),  $N$ 는 선량계당 판독위치의 수,  $S_j$ 는  $j$ 번째 선량계의 감도,  $C_i$ 는 창 위치에 대한 계수치 그리고  $E_j$ 는  $j$ 번째 선량계에 대한 조사선량(exposure for dosimeter  $j$ )으로서 흡수선량(cGy)이다.

선형 교정식은 식(3)<sup>[5]</sup>과 같다.

$$D = \frac{PMT \text{ Counts}}{CF \cdot S \cdot SAF} \dots\dots\dots (3)$$

여기서  $D$ 는 흡수선량,  $S$ 는 선량계의 감도(sensitivity) 그리고  $SAF$ 는 감도조절인자(sensitivity adjustment factor)로서 1이다.

비선형 교정(non-linear calibration)은 10 cGy 이상의 선량 범위에 대하여 교정을 행할 수 있다. 교정식은 2차 다항식(second-order polynomial)을 교정자료(calibration data)에 맞추는(fit) 것으로서 식(4)<sup>[5]</sup>와 같다.

$$D = a(Counts)^2 + b(Counts) + c \dots\dots\dots (4)$$

여기서  $D$ 는 흡수선량(cGy),  $Counts$ 는 선량계의 감도로 조절된 계수치이다.  $a$ (cGy/Counts<sup>2</sup>),  $b$ (cGy/Counts) 그리고  $c$ (cGy)는 계수(coefficient)이다.

### III. 결과

OSLnD의 선량반응 측정에서 한 개의 OSLnD 계수치는 한 번 판독으로 얻었다. 판독(read-out)은 선량계에 흡수선량을 조사한 후 10분 뒤에 하였다. 측정되어진 각 선량에 대한 계수치는 1set의 평균치이다. 측정되어진 OSLnD의 선량반응은 [Fig 2, 3]에서 보여준다. [Fig 2]에서 측정된 계수치는 1 cGy에서 17 cGy로 선형적으로 증가한 후 18 cGy로 급격하게 감소하였다. 그 후 다시 선량의 함수로서 계수치는 선형적으로 증가하였다. [Fig 3]은 18 cGy에서 1300 cGy의 선량범위에서 선량반응을 보여주어 있다. 여기서 18 cGy에서 300 cGy의 선량범위에서 계수치는 선량의 함수로서 선형적(linear)으로 증가하였다. 그리고 300 cGy에서 1300

cGy의 선량범위에서 계수치는 선량의 함수로서 초선형(supralinear)적으로 증가하였다. 이 결과들로부터 선형 교정과 비선형 교정의 선량범위들이 결정이 되었다. 즉, 교정의 선량범위는 선형 교정에서 0~300 cGy, 비선형교정에서 20~1300 cGy로 각각 결정을 하였다.

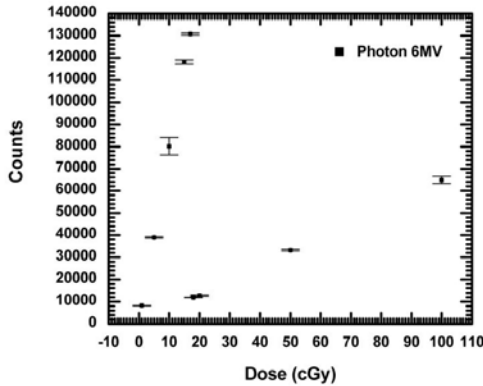


Fig 2. OSLnD response vs absorbed dose

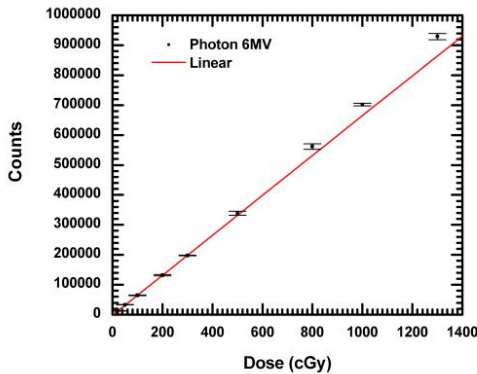


Fig 3. OSLnD response vs absorbed dose

선형교정을 위한 측정에서 계수치의 평균, 표준편차 그리고 변동계수는 [Table 1]과 같다. [Table 1]의 교정 자료를 사용하여 교정을 수행한 결과로부터 교정 식들을 얻었다.

Table 1. Data of linear calibration

선량(cGy)	측정값(Counts)		
	평균	표준편차	변동계수
0	156.852	9.115	0.58
1	8199.359	136.643	0.017
5	38483.496	968.986	0.025
50	31420.953	324.545	0.01
150	96203.313	2538.016	0.026
300	197920.875	1149.575	0.006

얻어진 저선량 범위(0~17 cGy)에서 교정식은 식(5)와 같다.

$$D = \frac{PMT\ Counts}{7854.186 \cdot S \cdot SAF} \dots\dots\dots (5)$$

얻어진 고선량 범위(18~300 cGy)에서 교정식은 식(6)과 같다.

$$D = \frac{PMT\ Counts}{643.8738 \cdot S \cdot SAF} \dots\dots\dots (6)$$

비선형교정을 위한 측정에서 계수치의 평균, 표준편차 그리고 변동계수는 [Table 2]와 같다. [Table 2]의 교정자료를 사용하여 교정을 수행한 결과로부터 교정 식을 얻었다. 얻어진 비선형 교정식은 식(7)과 같다.

Table 2. Data of non-linear calibration

선량(cGy)	측정값(Counts)		
	평균	표준편차	변동계수
20	12605.767	45.334	0.004
100	64994.563	1502.271	0.023
300	197779.422	614.691	0.003
500	333588.656	3872.133	0.012
800	562962.188	3547.001	0.006
1000	707610.313	3716.220	0.005
1300	925287.063	9680.774	0.01

$$D = -9.290337E-11 (Counts)^2 + 0.00147886 (Counts) + 5.987531$$

..... (7)

#### IV. 고찰

OSLnD의 선량반응 및 교정을 위해 측정된 측정값들은 판독기의 판독으로 얻어진 계수치에 선량계의

감도를 나누어 얻어진 값이다. OSLnD의 선량반응곡선에서 17 cGy와 18 cGy 사이에서 계수치가 급격하게 감소하는 데 이 지점을 교차점(cross-over point)라 한다. 그 지점은 판독기를 선형 교정해서 측정을 행할 때 LED로부터 방출된 빛이 광전자증배관 계수치의 포화(saturation)가 일어나지 않도록 하기 위하여 자동적으로 자극의 수준(stimulation level)을 변경하는 지점에 해당된다. 이 변화는 약 12 cGy에서 일어난다고 보고를 하였다[6]. 그러나 본 연구의 측정으로부터 18 cGy에서 판독기가 자극 수준을 변경시키는 것을 알 수 있었다. 또한 300 cGy 이하의 선량범위에서 계수치는 선량의 함수로서 선형적(linear)으로 증가하였다. 그리고 300 cGy이상의 선량범위에서 계수치는 선량의 함수로서 초선형(supralinear)적으로 증가하였다. 이것들은 기존 논문에서 보고된 결과와 잘 일치하였다<sup>[1]-[3],[7]-[10]</sup>.

선형 교정에서 교정 자료를 사용하여 판독기의 교정으로부터 얻어진 교정인자(CF)는 식(1)과 식(2)를 사용하여 손으로 계산된 교정인자와 정확하게 일치하는 것으로 검증을 하였다. 판독기 교정의 정확성을 평가하기 위하여 품질관리선량계를 사용하여 평가한 결과 0.1% 이하의 오차를 얻었다.

비선형교정에서 교정 자료를 사용하여 판독기의 교정으로부터 얻어진 교정식은 OrigiPro 7.5 통계 프로그램을 사용하여 polynomial fit로부터 얻은 교정식과 정확하게 일치하였다[Fig 4]. 판독기 교정의 정확성을 평가하기 위하여 품질관리선량계를 사용하여 평가한 결과 0.1% 이하의 오차를 얻었다.

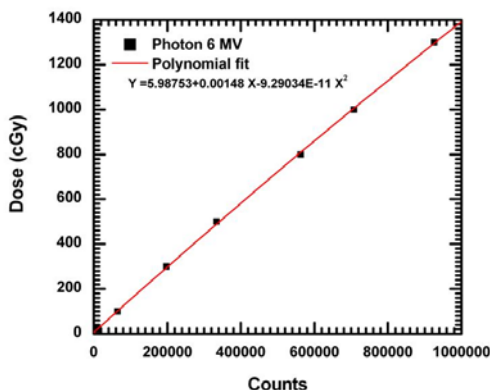


Fig 4. Polynomial fit for non-linear calibration

판독기는 0.5 MeV 이상의 고에너지 광자 빔에 대하여 0.005~1500 cGy의 선량범위에서 선량을 측정하기 위하여 교정을 행할 수 있다. 본 연구는 0.005~1300 cGy의 선량범위에 대하여 교정을 하였다. 이 선량범위는 IMRT QA 및 전신조사 치료에서 체내선량측정에 충분히 사용할 수 있는 범위이다. Jursinic은 6~8 MV 광자 및 6~20 MeV 전자 빔들의 에너지 범위에서 선량계의 감도변화는 2%이하라고 보고를 하였다[3]. 본 실험으로부터 얻어진 교정식은 앞에서 언급된 광자 및 전자 빔들의 에너지에 적용하여 사용할 수 있다. 그리고 얻어진 교정인자 및 교정식은 임상에서 판독기의 교정없이 계수치만 읽어서 선량을 계산하는 데 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

## V. 결론

OSLnD의 선량반응 분석으로부터 선형 및 비선형 교정의 선량범위들은 결정을 하였다. 교정 및 교정식의 정확성을 평가하기 위하여 교정 및 품질관리선량계의 세트들은 만들어서 사용하였다. 교정들은 각각 0~300 cGy 및 20~1300 cGy 선량범위에서 선형 및 비선형적으로 수행하였다. 교정의 오차들은 선형 및 비선형 교정에 대하여 품질관리선량계들의 측정으로부터 각각 0.1% 이하로 얻었다

따라서, 이 연구로부터 얻어진 교정인자 및 교정식은 임상에서 IMRT QA 및 체내선량측정에 유용하게 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

## 감사의글

이 논문은 2012년도 가야대학교 학술연구비 지원으로 수행되었음.

## 참고문헌

- [1] D.W. Kim, W.K. Chung, D.O. Shin, M.G. Yoon and U.J. Hwang, "Dose response of commercially available optically stimulated luminescent detector, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C for megavoltage photons and electrons", Radiation Protection Dosimetry, pp.1-8, 2011.
- [2] P.A. Jursinic, "Changes in optically stimulated luminescent dosimeter(OSLD) dosimetric characteristics with accumulated dose", Med. Phys, Vol. 27, No. 1, pp.132-140, 2010.

- [3] P.A. Jursinic, "Characterization of optically stimulated luminescent dosimeters, OSLDs, for clinical dosimetric measurements" , Med. Phys, Vol. 34, No. 12, pp.4594-4604, 2007.
- [4] M.S. Akselrod, A.C. Lucas, J.C. Polf and S.W. McKeever, "Optically stimulated luminescence of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C" , Radiat. Meas, Vol. 29, pp.391-399, 1998.
- [5] microStar user manual, Landauer Inc., 2009.
- [6] Frequently asked questions about landauer's optically stimulated luminescence(OSL) detectors, Landauer Inc
- [7] A. Viamonte, L.A.R. Darosa, L.A. Buckley, A. Cherpak and J.E. Cygler, "Radiotherapy dosimetry using a commercial OSL system" , Med. Phys, Vol. 35, No. 4, pp.1261-1266, 2008.
- [8] V. Schembri and B.J.M. Heijmen, "Optically stimulated luminescence(OSL) of carbon-doped aluminum oxide ( Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C) for film dosimetry in radiotherapy" , Med. Phys, Vol. 34, No. 6, pp.2113-2118, 2007.
- [9] M.S. Yukihara, V.H. Whitley, S.W.S. McKeever, A.E. Akselrod and M.S. Akselrod, "Effects of high-dose irradiation on the optically stimulated luminescence of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C" , Radiat. Meas, Vol. 38, pp.317-330, 2004.
- [10] E.G.Yukihara, G. Mardirossian, M. Mirzasadeghi, S. Guduru and S. Ahmad, Evaluation of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C optically stimulated luminescence(OSL) dosimeters for passive dosimetry of high-energy photon and electron beams in radiotherapy, Med. Phys, Vol. 35, No. 1, pp.260-269, 2008.