

Measurement of Dose outside a 6 MV Field Edge Using Optically Stimulated Luminescent Nano Dot Dosimeters

Jongeon Kim*, Wontae Kim*

Department of Radiological Science, Kaya University*

광자극형광나노닷선량계를 사용한 6 MV 조사야 가장자리 바깥 선량 측정

김종연*, 김원태*

가야대학교 방사선학과*

Abstract

The purpose of this study is(was) to investigate the shielding ratio of 1 mmPb and the off axis ratio outside the field edge at depth of 1 cm from a phantom surface for 6 MV photon beam. A dose of 180 cGy was delivered to a depth of 10 cm for a 10×10 cm² and 15×15 cm² field in the SAD technique. The off axis ratio was calculated by measuring the dose of optically stimulated luminescent nanoDot dosimeters(OSLNdS) positioned at 2, 4 and 6 cm from the field edge, and the center axis of field. And the shielding ratio of 1 mmPb was calculated by measuring the dose of OSLNdS positioned at 2, 4 and 6 cm from the field edge.. As a result, for a 10×10 cm² and 15×15 cm² field, the off axis ratios were acquired 0.008-0.023 and 0.011-0.028, respectively. Also the shielding ratios of 1 mmPb were acquired 0.868-0.888 and 0.807-0.842, respectively. These results provide data to protect organs at risk outside the radiation treatment field.

Key Words : Optically stimulated luminescent nanoDot dosimeter, Energy response factor, Off axis ratio

요약

이 연구의 목적은 6 MV 광자 빔에 대하여 팬텀 표면으로부터 1 cm 깊이에서 조사야 가장자리 바깥 축외선량비와 1 mmPb의 차폐비를 조사하는 데 있다. 180 cGy의 선량은 SAD기법에서 10×10 cm²와 15×15 cm² 조사야에 대하여 깊이 10 cm에 전달되었다. 축외선량비는 조사야의 중심축과 가장자리로부터 2, 4, 6 cm에 위치한 광자극형광나노닷선량계(OSLNd)들의 선량을 측정하여 계산하였다. 그리고 1 mmPb의 차폐비는 조사야 가장자리로부터 2, 4, 6 cm에 위치한 OSLNd들의 선량을 측정하여 산출하였다. 결과로서, 10×10 cm²와 15×15 cm² 조사야에 대하여, 축외선량비들은 0.008-0.023과 0.011-0.028을 각각 얻었다. 또한 1 mmPb의 차폐비들은 0.868-0.888과 0.807-0.842을 각각 얻었다. 이 결과들은 방사선치료 조사야 바깥에 위치한 위험장기들을 보호하기 위한 자료를 제공한다.

중심단어 : 광자극형광나노닷선량계, 에너지반응인자, 축외선량비

I. INTRODUCTION

광자극형광나노닷선량계(optically stimulated luminescent nanoDot dosimeter, OSLnD)는 에너지의존성 때문에 다양한 스펙트럼의 평균에너지에 대하여 불균일한 에너지 반응을 나타낸다^{[1]-[9]}. (near) 방사선 치료에 사용되는 선형가속기의 조사야 내에서 선량계 교정 위치와 조사야 가장자리 바깥 위치에서 광자 스펙트럼들은 차이가 있다^{[6]-[9]}. 그러므로 OSLnD를 사용한 조사야 가장자리 바깥 위치에서 선량 측정은 에너지의존성에 대한 보정으로 정확한 측정을 하여야 한다.

방사선치료 시 조사야 가장자리 바깥에 위치하고 있는 위험장기는 체내선량계측(in-vivo dosimetry) 및 미리 팬텀에서 선량 측정으로 허용선량 이하가 되도록 치료계획을 세워야 한다. 이러한 위험장기의 치료계획에 적용할 수 있는 자료의 필요성이 요구된다. 따라서 이 연구는 6 MV 조사야 가장자리 바깥 위치에서 선량 측정, 축외선량비(OAR, off axis ratio), 그리고 1 mmPb 차폐비를 측정으로부터 구하는 데 목적이 있다.

6 MV 광자 빔에 대한 에너지반응인자의 정의는 6 MV 광자의 물흡수선량에 대한 OSLnD(6 MV)의 광 출력 분의 주어진 빔 품질(Q)의 물흡수선량에 대한 OSLnD(Q)의 광 출력의 비이다^[2].

본 연구는 SAD기법으로 물등가고체팬텀의 깊이를 10 cm로 맞춘 후 팬텀 표면으로부터 1 cm 깊이에 OSLnD를 조사야 중심과 조사야 가장자리로부터 바깥 지정된 지점들에 배치하고, 6 MV 광자 빔으로 180 cGy를 조사한다. 그 다음 판독기로부터 각 지점의 선량계의 선량은 측정된다. 측정된 선량으로부터 축외선량비를 산출한다. 또한 축외선량비의 측정 조건과 동일한 기하학에서 조사야 가장자리로부터 바깥 지정된 지점들에 배치된 선량계들을 1 mmPb 납판을 차폐한 후 동일한 선량을 조사하여 선량은 측정된다. 1 mmPb 차폐비는 조사야 가장자리로부터 바깥 지정된 지점들에서 납 차폐를 안 했을 때 선량에 대한 납 차폐를 했을 때 선량의 비로서 산출하여 정량적으로 분석하고자 한다.

II. MATERIAL AND METHOD

실험에는 Varian 21iX 선형가속기(Varian Medical System, Milpitas, CA, USA), 물등가고체팬텀(RW3, Scanditronix wellhofer, Germany), 모눈종이, 납판(20 cm × 20 cm × 0.1 cm), 그리고 볼루스(30 cm × 30 cm × 0.5 cm)를 사용하였다. 선량은 InLight OSLnD(Landauer, Inc., Glenwood, IL, USA)와 InLight MicroStar reader(Landauer, Inc., Glenwood, IL, USA)를 사용하여 측정하였다. 그 판독기(reader)의 교정 선량 범위는 6 MV 광자 빔에 대하여 0~1300 cGy이다^[10].

1. 조사야 가장자리 바깥 에너지반응인자

조사야 가장자리 바깥 영역에서 평균에너지는 조사야 내에서 평균에너지보다 아주 많이 낮다. 그러므로 조사야 가장자리 바깥 영역의 선량 측정 시 OSLnD의 에너지의존성에 대한 에너지반응인자의 보정이 요구된다^{[6]-[9]}. 에드워즈 등(Edwards et al.)은 6 MV 광자 빔의 조사야 10×10 cm²와 15×15 cm²에 대해서 깊이 0.1 cm에서 조사야 가장자리로부터 거리의 함수로서 평균 에너지를 발표하였고, 이 값들은 Table 1에서 보여준다^[7]. 조사야 가장자리로부터 거리에 대한 평균에너지는 Table 1 자료를 사용하여 Origin Pro 7.5 프로그램의 다항식 맞춤(polynomial fit)으로 산출하였다. 모비트 등(Mobit et al.)은 광자 빔들에서 Al₂O₃의 에너지반응인자를 ⁶⁰Co 감마선 빔으로 규격화하여 발표하였고, 이 값들은 Table 2에서 보여준다^[8]. Table 2 자료는 6 MV 빔으로 다시 규격화하여 에너지반응인자를 구하였다.

조사야 가장자리 바깥 에너지반응인자는 조사야 가장자리로부터 2, 4, 6 cm 거리의 함수로서 평균에너지에 대한 에너지반응인자를 Origin Pro 7.5 프로그램으로 960점(point) 내삽(interpolation)하여 얻었다.

Table 1. The variation at 0.1 cm depth of the mean energy at 1, 2, 5 and 10 cm from the edge of a 10×10 cm² and 15×15 cm² field.

Distance from the field edge (cm)	Mean energy (MeV)	
	10×10 cm ²	15×15 cm ²
Center axis	1.67	1.61
1	0.30	0.26
2	0.33	0.28
5	0.43	0.33
10	0.67	0.47

Table 2. Energy response factor of Al₂O₃ in photon beams

Energy	Mean energy (keV)	Energy response factor
60-Co gamma rays	1250	1
50 kV	29	3.219
100 kV X rays	60	2.861
150 kV X rays	105	1.607
250 kV X rays	170	1.449
6 MV X rays	2020	0.99

2. 조사야 가장자리 바깥 축외선량비(OAR)

조사야 중심축 및 가장자리 바깥 선량을 측정하기 위한 선량계의 기하학적 배치는 Fig. 1에서 보여주는 바와 같이, 두께 19 cm의 물등가고체팬텀위에 모눈종이를 깔고, SSD 91 cm로 맞추었다. 그 모눈종이 위에 선량계들을 조사야 중심축, 조사야 가장자리로부터 2, 4, 6 cm 바깥지점에 각각 3개의 선량계를 나란히 배치하였다. 그 다음에 두께 0.5 cm 볼루스(bolus)를 덮고, 그 위에 두께 0.5 cm 팬텀 평판(slab)을 놓았다. 이 때 SSD는 90 cm로서 선량계는 표면으로부터 1 cm 깊이에 위치한다.

선량은 SAD기법으로 조사야 10×10 cm²와 15×15 cm²에 대해서 깊이 10 cm에 180 cGy를 조사한 후 노출된 각 지점의 선량계를 판독기로 측정하였다. 조사야 가장자리 바깥 선량 측정값은 판독기로부터 측정된 선량값에 에너지 반응 보정인자를 곱하여 산출하였다. 그리고 선량 평균값은 각 지점에서 3개 선량계의 측정

값을 평균하여 산출하였다. 산출된 선량 평균값으로부터 축외선량비는 조사야 중심축의 선량 평균값에 대한 조사야 바깥지점의 선량 평균값의 비로서 구하였다.



Fig. 1. Photographs of phantom setup used for measuring the off axis ratio. (a) OSLnDs positioned at 2, 4 and 6 cm from the field edge and center axis a radiation field, (b) a solid water slab of 0.5 cm thickness and a bolus of 0.5 cm thickness positioned over the OSLnDs, respectively.

3. 조사야 가장자리 바깥 1 mmPb 차폐비

조사야 가장자리 바깥 1 mmPb 차폐 시 선량을 측정하기 위한 선량계의 기하학적 배치는 Fig. 2에서 보여 준다. Fig. 1과 같이 조사야 가장자리로부터 2, 4, 6 cm 바깥지점에 각각 3개의 선량계를 나란히 배치하고, 그 위에 0.5 cm 볼루스와 0.5 cm 팬텀 평판을 순차적으로 덮고, 그 다음에 1 mmPb 납판을 놓았다.

선량은 SAD기법으로 조사야 10×10 cm²와 15×15 cm²에 대해서 깊이 10 cm에 180 cGy를 조사한 후 노출된 각 지점의 선량계를 판독기로 측정하였다. 선량 측정값은 판독기로부터 측정된 선량값에 에너지 반응 보정인자를 곱하여 산출하였다. 선량 평균값은 각 지점에서 3개 선량계의 측정값을 평균하여 산출하였다. 조사야 가장자리 바깥 1 mmPb 차폐비는 각 지점에서 납 차폐를 안 했을 때 선량 평균값에 대한 납 차폐를 했을 때 선량 평균값의 비로서 구하였다.



Fig. 2. A photograph of phantom setup used for measuring the shielding ratio of 1 mmPb.

III. RESULT

조사야 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 가장자리로부터 2, 4, 6 cm 거리에 대한 평균에너지는 Fig. 3의 다항식으로부터 구하였다. 또한 조사야 $15 \times 15 \text{ cm}^2$ 가장자리로부터 2, 4, 6 cm 거리에 대한 평균에너지는 Fig. 3의 다항식으로부터 산출하여 얻었다. Table 2 자료로부터 6 MV 빔으로 다시 규격화하여 얻어진 에너지반응인자는 Table 3의 결과로 나타났다.

조사야 가장자리로부터 거리의 함수로서 평균에너지에 대한 에너지반응인자는 Table 3의 자료를 사용하여 Fig. 4와 같이 내삽하여 얻었다. 얻어진 결과들은 Table 4에서 보여준다. 여기서 조사야 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 에 대하여 조사야 가장자리로부터 2, 4, 6 cm 거리에서 평균에너지는 0.33~0.472 MeV, 그리고 에너지반응인자는 1.337~1.397 범위로 얻었다. 또한 조사야 $15 \times 15 \text{ cm}^2$ 에 대하여 조사야 가장자리로부터 2, 4, 6 cm 거리에서 평균에너지는 0.28~0.355 MeV, 그리고 에너지반응인자는 1.386~1.418 범위로 얻었다.

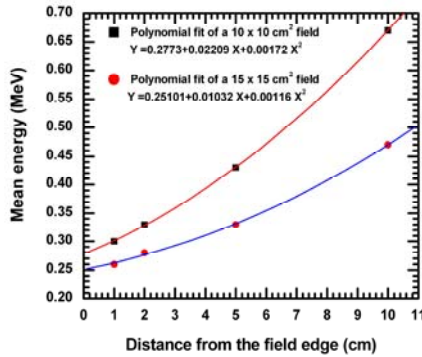


Fig. 3. Mean energy versus distance from the field edge for a $10 \times 10 \text{ cm}^2$ and $15 \times 15 \text{ cm}^2$ field.

Table 3. Energy response factor of Al_2O_3 normalized to 6 MV X-rays from the data of table 2

Energy	Mean energy (keV)	Energy response factor
60-Co gamma rays	1250	1.01
50 kV	29	3.252
100 kV X rays	60	2.89
150 kV X rays	105	1.623
250 kV X rays	170	1.464
6 MV X rays	2020	1

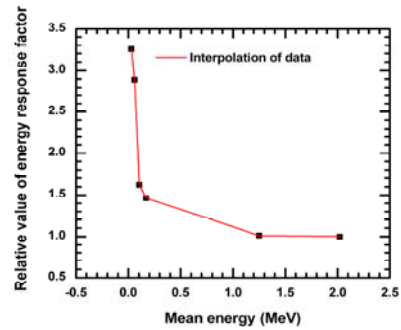


Fig. 4. Interpolation of the energy response factor of Al_2O_3 normalized to 6 MV X-rays.

Table 4. The variation at 0.1 cm depth of the mean energy at 2, 4 and 6 cm from the edge of a $10 \times 10 \text{ cm}^2$ and $15 \times 15 \text{ cm}^2$ field

Distance from the field edge (cm)	$10 \times 10 \text{ cm}^2$		$15 \times 15 \text{ cm}^2$	
	Mean energy (MeV)	Energy response factor	Mean energy (MeV)	Energy response factor
2	0.33	1.397	0.28	1.418
4	0.393	1.37	0.311	1.405
6	0.472	1.337	0.355	1.386

측정되어진 조사야 가장자리 바깥 축외선량비는 Table 5에서 보여준다. 여기서 조사야 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 에 대하여 조사야 가장자리로부터 2, 4, 6 cm 거리에서 축외선량비는 0.008~0.023 범위로 얻었다. 그리고 조사야 $15 \times 15 \text{ cm}^2$ 에 대하여 조사야 가장자리로부터 2, 4, 6 cm 거리에서 축외선량비는 0.011~0.028 범위를 나타냈다.

얻어진 조사야 가장자리 바깥 1 mmPb 차폐비는 Table 6에서 보여준다. 여기서 조사야 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 에 대해

여 조사야 가장자리로부터 2, 4, 6 cm 거리에서 차폐비는 0.868~0.888 범위로 측정되었다. 그리고 조사야 15×15 cm²에 대하여 조사야 가장자리로부터 2, 4, 6 cm 거리에서 차폐비는 0.807~0.842 범위로 나타내었다.

Table 5. Measured mean value and OAR at 2, 4 and 6 cm from the edge of a 10×10 cm² and 15×15 cm² field

Distance from the field edge (cm)	10×10 cm ²		15×15 cm ²	
	Mean value ± SD (cGy)	OAR	Mean value ± SD(cGy)	OAR
Center axis	265.377±3.8		261.433±2.558	
2	6.233±0.289	0.023	7.4±0.265	0.028
4	3.533±0.115	0.013	4.5±0.1	0.017
6	2.1±0.2	0.008	2.933±0.231	0.011

Table 6. Measured mean value and the shielding ratio of 1 mmPb at 2, 4 and 6 cm from the edge of a 10×10 cm² and 15×15 cm² field

Distance from the field edge (cm)	10×10 cm ²		15×15 cm ²	
	Mean value ±SD (cGy)	Shielding ratio of 1 mmPb	Mean value ±SD (cGy)	Shielding ratio of 1 mmPb
2	5.533±0.41	0.888	6.233±0.14	0.842
	6		5	
4	3.067±0.15	0.868	3.633±0.28	0.807
	3		9	
6	1.833±0.20	0.873	2.467±0.15	0.841
	8		3	

IV. DISCUSSION AND CONCLUSION

에드워즈 등(Edwards et al.)에 의해 발표된 6 MV 광자 빔의 평균에너지는 팬텀 표면으로부터 0.1 cm 깊이에서 구하였다^[7]. 그러나 모비트 등(Mobit et al.)에 의한 광자 빔의 평균에너지는 조사야 10×10 cm²에서 kV 광자 빔에 대하여 2 cm 깊이에서, 그리고 MV 광자 빔에 대하여 5 cm 깊이에서 산출하였다^[9]. 에드워즈 등과 모비트 등(Mobit et al.)에 의해 보고된 평균에너지는 조사야 10×10 cm²에서 측정 깊이의 차이로 인하여 에드워즈 등의 평균에너지가 조금 더 낮다. 이 차이는 산출된 에너지반응인자의 오차에 거의 영향을 미치지

않는다. 조사야 가장자리로부터 거리의 함수로서 얻어진 평균에너지는 거리 증가와 함께 증가한다. 이 현상은 팬텀 속에서 단일(single) 또는 다중 콤프톤산란(multiple compton scattering)을 겪는 광자들에 기인한다^[6].

평균에너지에 대한 에너지반응인자는 평균에너지가 작을수록 증가한다. 이 근거는 평균에너지가 작을수록 Al₂O₃의 유효원자번호(Zeff : 11.28) 3승에 대략적으로 비례하여 광전효과의 상호작용 확률을 더 높이기 때문에 높은 평균에너지보다 낮은 평균에너지에서 과대반응(over-response)을 나타낸다^[6]. 실험에 사용된 10×10 cm²와 15×15 cm²의 조사야 가장자리로부터 2, 4, 6 cm 거리에서 평균에너지에 대한 에너지반응인자는 약 1.4이다.

조사야 가장자리 바깥 축외선량비는 같은 깊이에서 조사야의 중심축 선량에 대한 조사야 가장자리 바깥 관심의 축외점 선량의 비이다. 이 비는 조사야 가장자리 바깥 선량을 계산하는 데 사용된다. 즉 중심축 선량을 알고 있을 때, 조사야 가장자리 바깥 선량은 중심축 선량과 축외선량비의 곱으로 산출된다. 임상에서는 치료계획시스템으로부터 중심축 선량을 구한 후 조사야 가장자리 바깥에 위치한 위험장기, 인공심장박동기 및 삽입형 제세동기의 선량을 계산하는 데 축외선량비를 사용할 수 있을 것이다.

인공심장박동기 및 삽입형 제세동기를 이식한 환자들의 방사선치료 시 조사야 가장자리 바깥에 위치한 인공심장박동기 및 삽입형 제세동기는 허용선량 이상을 받으면 방사선손상으로 기능부전을 일으킨다. 이 기능부전을 예방하기 위한 인공심장박동기와 삽입형 제세동기의 대략적인 허용선량은 각각 200~500 cGy와 100 cGy이다^[11]. 치료계획에서 인공심장박동기 및 삽입형 제세동기가 받는 선량이 허용선량 이하가 되도록 납 차폐를 사용한다. 이 때 실험에서 구한 1 mmPb 차폐비를 사용한다. 즉 허용선량은 납 두께에 대응하는 납 차폐비에 앞에서 언급한 조사야 가장자리 바깥 선량의 곱으로 계산하여 예상할 수 있을 것이다.

실험으로부터 얻어진 조사야 바깥 축외선량비는 조사야 10×10 cm²와 15×15 cm²에서 조사야 가장자리로부터 거리가 증가할수록 감소하였다. 그리고 조사야 바

각 1 mmPb 차폐비는 조사야 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 와 $15 \times 15 \text{ cm}^2$ 에서 조사야 가장자리로부터 2 cm보다 4 cm에서 감소하였고, 다시 6 cm에서 증가하는 양상을 나타내었다.

결론적으로, 실험으로부터 구한 조사야 가장자리로부터 거리의 함수로서 평균에너지, 에너지반응인자, 축외선량비, 그리고 1 mmPb 차폐비는 조사야 바깥 위험장기의 체내선량계측뿐만 아니라 인공심장박동기 및 삽입형 체세동기를 방사선 손상으로부터 예방하는데 유용한 자료로 사용될 수 있을 것으로 사료된다 [11],[12].

Acknowledgement

This work was supported by Kaya University's research fund in 2014(Kaya 2014-001).

Reference

- [1] J.E. Kim, I.C. Im and H.Y. Lee, "Correction factor for the energy dependence of an optically stimulated luminescence dosimeter in diagnostic radiography", *Journal of Korean Society of Radiology*, Vol. 5, No. 5, pp. 261-265, 2011.
- [2] C.S. Reft, "The energy dependence and dose response of a commercial optically stimulated luminescent detector for kilovoltage photon, megavoltage photon, and electron, proton, and carbon beams", *Med. Phys.*, Vol. 36, No. 5, pp. 1690-1699, 2009.
- [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] P.H.G. Rosado, M.S. Nogueira, P.L. Squair and P.M.C Oliveira, "Determination of the mean energy for attenuated and unattenuated IEC diagnostic X-ray beams", *International Nuclear Atlantic Conference*, Santos, 2007.
- [5] P.H.G. Rosado, M.S. Nogueira, F. genezini and E.C. Vilela, "Measurement of conversion coefficients between free in air kerma and personal dose equivalent for diagnostic X-ray beams", *Radiation Measurements*, Vol. 43, pp. 968-971, 2008.
- [6] Z. Knezevic, L. Stolarczyk, I. Bessieres, J.M. Bordy, S. Miljanic and P. Olko, "Photon dosimetry methods outside the target volume in radiation therapy: Optically stimulated luminescence (OSL), thermoluminescence (TL) and radiophotoluminescence (RPL) dosimetry", *Radiation Measurements*, Vol. 57, pp. 9-18, 2013.
- [7] C.R. Edwards and P. J. Mountford, "Near surface photon energy spectra outside a 6 MV field edge", *Phys. Med. Biol.*, Vol. 49, P.293-301, 2004.
- [8] E.O. Agyingi, P.N. Mobit and D.A. Sandison, "Energy response of an aluminum oxide detector in kilovoltage and Megavoltage photon beams: an EGSnrc monte carlo simulation study", *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 118, No. 1, pp. 28-31, 2005.
- [9] P. Mobit, "Comparison of the ebergy-response factor of LiF and Al_2O_3 in radiotherapy beams", *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 119, No. 1-4, pp. 497-499, 2006.
- [10] J.E. Kim, S.H. Kim and H.Y. Lee, "Calibration of Optically Stimulated Luminescent nanoDot Dosimeter for 6 MV Photon Beam" *Journal of Korean Society of Radiology*, Vol. 7, No. 1, pp.93-98, 2013.
- [11] M.F. Chan, Y. Song, L.T. Dauer, J.d. Li, D. Huang and C. Burman, "Estimating dose to implantable cardioverter-defibrillator outside the treatment fields using a skin QED diode, optically stimulated luminescent dosimeters, and LiF thermoluminescent dosimeters", *Medical Dosimetry*, Vol. 37, No. 98, pp. 334-338, 2012.
- [12] A.N. Solan, M.J. Solan, G. Benbarz and M.B. Goodkin, "Treatment of patients with cardiac pacemakers and implantable cardioverter defibrillators during radiotherapy", *Phys. Med. Biol.*, Vol. 59, No 3, pp. 897-904, 2004.