

Determination of the Effective Energy of X-Ray Beam Using Optically Stimulated Luminescent nanoDot Dosimeters

Jongeon Kim*, Sanghun Lee*

Department of Radiological Science, Kaya University*

광자극형광나노닷선량계를 사용한 X선 빔의 유효에너지 결정

김종연*, 이상훈*

가야대학교 방사선학과*

Abstract

The purpose of this study is to determine the effective energy of a polyenergetic X-ray beam. The half value layer(HVL) of aluminum for 80 kVp X-ray beam was measured by using optically stimulated luminescent nanoDot dosimeters(OSL_nDs). The linear attenuation coefficient(μ) was calculated using the measured HVL. And the mass attenuation coefficient(μ/ρ) was obtained by dividing the linear attenuation coefficient by the density(ρ) of aluminum. The effective energy(E_{eff}) of the obtained mass attenuation coefficient was determined using data of the X-ray mass attenuation coefficients for photon energies of aluminum given by National Institute of Standards and Technology(NIST). As a result, the HVL value is 2.262 mmAl. The μ value is 3.06 cm^{-1} . The μ/ρ value is 1.114 cm^2/g . And the E_{eff} value was determined at 29.79 keV.

Key Words : Optically stimulated luminescent nanoDot dosimeter, Half value layer, Linear attenuation coefficient, Mass attenuation coefficient, Effective energy

요약

이 연구의 목적은 다중에너지 X선 빔의 유효에너지를 결정하는데 있다. 80 kVp X선 빔에 대한 알루미늄의 반가층은 광자극형광나노닷선량계들(OSL_nDs)을 사용하여 측정하였다. 선감쇠계수(μ)는 측정된 반가층을 사용하여 계산하였다. 그리고 질량감쇠계수(μ/ρ)는 알루미늄의 밀도로 선감쇠계수를 나누어 얻었다. 얻어진 질량감쇠계수의 유효에너지(E_{eff})는 미국표준기술연구소(NIST)에서 주어진 알루미늄의 광자에너지들에 대한 X선질량감쇠계수들의 자료를 사용하여 결정하였다. 결과로서, 반가층, 선감쇠계수 및 질량감쇠계수는 각각 2.262 mmAl, 3.06 cm^{-1} , 1.114 cm^2/g 이다. 그리고 유효에너지는 29.79 keV에서 결정되었다.

중심단어: 광자극형광나노닷선량계, 반가층, 선감쇠계수, 질량감쇠계수, 유효에너지

I. INTRODUCTION

진단X선장치(diagnostic X-ray equipment)에서 발생되는 X선 빔은 다중에너지 빔(polyenergetic beam)으로서 다중에너지 X선의 투과를 기술하기 위하여 유효에너지(effective energy)를 사용한다^[1]. 이 유효에너지는 선량계(dosimeter)의 교정 및 측정에서 에너지의존성을 보정하는 데 아주 중요한 매개변수(parameter)이다^[2]. 따라서 X선장치를 다루는 사용자는 X선관으로부터 발생하는 X선 빔의 유효에너지를 실험적으로 결정하여야 할 필요성이 제기된다.

유효에너지의 결정은 반가층 측정으로부터 유도된다. 반가층 측정은 교정된 전리함(ionization chamber)을 사용하여 측정하지만 전리함이 없는 관계로 인하여 이 실험에 광자극형광나노닷선량계들(stimulated luminescent nanoDot dosimeters(OSLNDs))을 사용한다. 이 연구의 목적은 OSLNDs 및 알루미늄 반가층 감쇠기 세트(Aluminum Half Value Layer Attenuator Set)를 사용하여 80 kVp에서 생성된 X선 빔으로부터 유효에너지를 구하는 데 있다.

유효에너지는 문제의 X선 스펙트럼과 같은 반가층을 가지는 단일에너지 X선 빔의 에너지로 정의된다. 제1 반가층(first half value layer, 1stHVL)의 정의는 감쇠되지 않은 빔 공기커마울(강도)의 이분의 일로 공기커마울을 감소시키는 빔 감쇠기로 부가된 특정물질의 두께이다. 이 반가층은 X선 선질(X-ray beam quality)을 기술하고 또한 유효에너지를 특징짓기 위해 사용된다. 제2반가층(second half value layer, 2ndHVL)은 사분의 일가층(quarter value layer, QVL)과 반가층 사이의 두께 차이이다. QVL은 감쇠되지 않은 빔 공기커마울의 사분의 일로 공기커마울을 감소시키는 빔 감쇠기로 부가된 특정물질의 두께로 정의된다. 균등도(homogeneity coefficient, HC)는 제2반가층에 대한 제1반가층의 비이다^[3].

본 연구는 80 kVp에서 생성된 X선 빔으로부터 반가층을 측정할 후, 측정된 반가층으로부터 선감쇠계수로 변환한 다음 알루미늄 반가층 감쇠기의 밀도로 나누어 질량감쇠계수를 구한다. 이 질량감쇠계수를 미국표준기술연구소(National Institute of Standards and Technology, NIST)의 자료에 대응시켜 유효에너지를 결정하고자 한다.

II. MATERIAL AND METHOD

실험에는 DigiRad Radiographic System(DigiRad-FP, Dual type, Sitec Medical Co., Ltd, South Korea), 반가층 감쇠기 세트(Half Value Layer Attenuator Set, 115A, Gammex, USA), 반가층 측정 지지대(HVL measuring stand), 폴리스티렌 고체팬텀(PS, CNMC Co., USA), 그리고 InLight OSLnD(Landauer, Inc., Glenwood, IL, USA)와 InLight MicroStar reader(Landauer, Inc., Glenwood, IL, USA)를 사용하였다.

DigiRad Radiographic System의 특성으로서 표적은 몰리브덴 표면에 레늄-텅스텐으로 처리된 중합금으로 되어 있다. 그리고 초점은 관전류 200 mA이하에서는 소초점(0.6 mm), 200 mA이상에서는 대초점(1.2 mm)으로 전환된다. X선관의 총여과는 75 kV에서 고유여과 0.9 mmAl와 부가여과 1.5 mmAl의 합으로서 2.4 mmAl이다. 그리고 발생기는 3상 6피크 정류방식을 사용된다.

반가층 측정 지지대는 자체 제작한 것으로서 Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 밀판의 치수가 30 cm×30 cm×2 cm이고, 밀판으로부터 높이는 76 cm이다.

폴리스티렌 고체팬텀 평판(치수: 30 cm×30 cm×1 cm, 밀도: 1.05 g/cm³)은 평판의 중앙에 홈을 파서 OSLnD를 삽입할 때 팬텀의 표면과 OSLnD의 표면이 일치하도록 제작하였으며 Fig. 1에서 보여준다.



Fig. 1. The experimental setup for half value layer measurement.

반가층 감쇠기 세트는 알루미늄 감쇠기(순도 99% 이상, 밀도 2.699 g/cm³)들로 구성되며, 면적이 10 cm×10 cm이고, 각각의 두께와 개수는 0.1 mm(3개), 0.2 mm(1개), 0.5 mm(2개), 1 mm(2개), 2 mm(1개)이다.

InLight MicroStar reader는 80 kVp 빔에 대하여 0~1000 mGy의 선량범위로 교정되어 있다^[4].

1. 반가층 측정

반가층 측정에 사용한 DigiRad Radiographic System에서, 설정된 관전압(80 kVp), 관전류(500 mA) 및 조사시간(0.1 s)에 대한 측정된 관전압, 관전류 및 조사시간의 백분율평균오차(Percent average error, PAE)는 각각 1.16%, 0.22%, 2%이다. 그리고 조사선량에 대한 변동계수(coefficient of variation, CV)는 0.01이다.

흡수선량 측정의 기하학적 배치로서 OSLnD는 표적(target)으로부터 거리 100 cm 지점의 수직된 평면의 중앙에 위치시켰고, 그리고 알루미늄 감쇠기는 표적으로부터 거리 40 cm 지점에 놓았다. 흡수선량(X선 빔 강도)은 표적으로부터 거리 100 cm 지점에서 조사야를 8×8 cm²로 설정하고, 80 kVp, 500 mA, 0.1 s의 조사조건 하에서 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5 mmAl에 대하여 각각 3번을 측정하였다. 측정되어진 흡수선량(mGy)은 평균값으로 얻었다. 알루미늄 필터를 사용하지 않았을 때 측정된 흡수선량에 대한 알루미늄 감쇠기를 사용했을 때 측정된 흡수선량의 상대적인 강도 비를 산출하여 반가층을 구하였다.

2. 유효에너지 결정

유효에너지를 결정하기 위하여, 먼저 구해진 알루미늄 감쇠기의 반가층(Half Value Layer, HVL)을 사용하여 식(1)로부터 선감쇠계수(μ)를 얻었다.

$$HVL = 0.693 / \mu \dots \dots \dots (1)$$

다음은 얻어진 선감쇠계수에 알루미늄 밀도(ρ)를 나누어 질량감쇠계수(μ/ρ)를 구하였다^[5]. 유효에너지는 NIST에서 제공하는 광자에너지 대 질량감쇠계수 자료를 사용하여 구하여진 질량감쇠계수를 대응시켜 결정을 하였다^[6].

III. RESULT

반가층을 구하기 위해 각각의 알루미늄 감쇠기 두께에 대하여 측정된 흡수선량 평균값과 표준편차, 상대적인 강도 비를 Table 1에서 보여준다. 이 도표에서 흡수선량 측정의 변동계수(CV)는 0.025이하로 나타났다.

Table 1. Relative intensity ratio at different thickness of aluminum attenuator

Aluminum attenuator(mmAl)	Mean value±SD (mGy)	Relative intensity ratio
0	4.181±0.044	1.000
0.5	3.559±0.041	0.851
1	2.987±0.067	0.714
1.5	2.471±0.007	0.591
2	2.233±0.011	0.534
2.5	2.001±0.007	0.479
3	1.761±0.003	0.421
3.5	1.511±0.016	0.361
4	1.442±0.011	0.345
4.5	1.257±0.025	0.301
5	1.096±0.019	0.262
5.5	1.003±0.025	0.240

Table 1에서 나타낸 상대적인 강도 비에 대한 알루미늄 감쇠기의 두께는 Fig. 2와 같이 Origin 8.0 프로그램으로 ExpDec2 fit하여 아래의 식(2)를 얻었다.

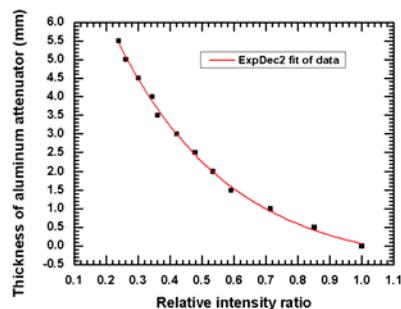


Fig. 2. Attenuation in aluminum of X-rays produced at 80 kVp.

ExpDec2 fit하여 얻은 식(5)에 대입하여 29.79 keV를 얻었다. 이 유효에너지는 허벨(hubbell) 발표한 자료에서 구한 유효에너지(30 keV)보다 0.21 keV 낮게 나타났다. 이 결과로부터 NIST 자료와 Hubbell 자료 중 어느 하나를 선택하여 사용할 수 있을 것으로 판단된다. Hubbell과 Seltzer 등에 의한 NIST 자료는 1982년에 발표된 Hubbell의 자료를 기반으로 현재 광자 상호작용 데이터베이스로 확장한 자료이다.

반가층은 HEW 규격에서 전리함(ionization chamber)을 사용하여 측정하였지만 이 연구에서 OSLnD를 사용하여 측정을 하였다. 그 결과 거의 같은 반가층의 두께를 얻었다. 따라서 반가층 측정 시 전리함의 대응으로 광자극형광나노달선량계를 사용해도 무방할 것으로 생각된다. 그리고 반가층 측정 시 표적으로부터 50 cm 거리에서 빔 직경은 4 cm 이하가 되도록 하여야 한다. 그 이유는 좁은 빔(narrow beam)으로서 산란선의 영향을 받지 않는 1차 빔(primary beam)으로 취급되기 때문이다. 그러므로 이 연구에서는 산란선의 영향을 받지 않는 조사야를 설정하였다. 그리고 선량계는 반가층 감쇠기로부터 적어도 50 cm 떨어진 지점에 놓아야 한다^[9].

전리함, 열형광선량계(TLD) 및 OSLnD들은 선량 측정에서 에너지에 따라 동일한 선량을 조사하여도 다르게 반응하는 데 이것을 에너지의존성이라 한다. 그러므로 교정에너지와 다른 에너지에서 선량 측정 시에는 에너지반응보정인자로 보정을 하여야 한다^[10]. 이때 유효에너지로 보정할 경우가 흔히 있다. 이 경우 사용자의 환경에서 실험으로 유효ener지를 결정하여 사용하여야 될 것이다.

V. CONCLUSION

80 kVp에서 생성된 X선 빔의 유효에너지는 측정된 반가층으로부터 구한 질량감쇠계수를 NIST에서 제공하는 질량감쇠계수에 대한 광자에너지에 대하여 ExpDec2 fit하여 얻은 식으로부터 29.79 keV를 얻었다.

이 연구는 다중에너지 X선 빔으로부터 유효에너지는 X선관의 총 여과, 고전압발생기의 종류 및 관전압에 의존하여 변화하므로 직접 반가층 측정으로부터 구하는 방법을 제시한다. 향후 전리함을 사용한 유효

에너지 결정에 대한 연구를 할 예정이다.

Reference

- [1] S.C. Chen, W.L. Jong, A.Z. Harun, "Evaluation of x-ray beam quality based on measurements and estimations using SpekCalc and Ipe78 models", *Malays. J. Med. Sci.*, Vol. 19, No. 3, pp. 22-28, 2012.
- [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] National Institute of Standards and Technology, "NIST measurement services: calibration of x-ray and gamma-ray measuring instruments", NIST Special Publication 250-58, pp. 1-96, 2001.
- [4] J.E. Kim, I.C. Im, H.Y. Lee, "Correction factor for the energy dependence of a optically stimulated luminescence dosimeter in diagnostic radiography", *Journal of Korean Society of Radiology*, Vol. 5, No. 5, pp. 261-265, 2011.
- [5] J.H. Hubbell, "Photon mass attenuation and energy-absorption coefficients from 1 keV to 20 MeV", *Int. J. Radiat. Isot.*, Vol. 33, pp. 1269-1290, 1982.
- [6] NIST: X-ray attenuation coefficients, Available in: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/ElemTab/z13.html>
- [7] U.S. Dept. of HEW, Publication(FDA) 80-8035, "Regulations for the administration and enforcement of the radiation control for health and safety act of 1968", 1980.
- [8] International Standard IEC 61267, "Medical diagnostic x-ray equipment radiation conditions for use in the determination of characteristics", IEC, 2005.
- [9] C.M.Ma. Chair, C.W. Coffey, L.A. DeWerd, C. Liu, R. Nath, S.M. Seltzer, J.P. Seuntjens, "AAPM protocol for 40-300 kV x-ray beam dosimetry in radiotherapy and radiobiology", *Med. Phys.* Vol. 28, No. 6, pp. 869-875, 2001.
- [10] P. Mobit, "Comparison of the energy-response factor of LiF and Al2O3 in radiotherapy beams", *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 119, No. 1-4, pp. 497-499, 2006.