

Determination of the Equivalent Energy of a 6 MV X-ray Beam

Jong-Eon Kim,¹ Byung-Do Park^{2,*}

¹Department of Radiological Science, Kaya University

²Department of Radiation Oncology, Samsung Changwon Hospital, Sungkyunkwan University School of Medicine

Received: November 09, 2016. Revised: December 20, 2016. Accepted: December 31, 2016

ABSTRACT

The purpose of this study is to determine the equivalent energy of a 6MV X-ray beam in the experiment. The half-value layer (HVL) of lead for the 6 MV X-ray beam was measured using an ionization chamber. The linear attenuation coefficients were calculated with HVL. And, the mass attenuation coefficient was obtained by dividing the linear attenuation coefficient by the density of lead. The equivalent energy of mass attenuation coefficient was determined using the photon energy versus mass attenuation coefficient data of lead given by National Institute of Standards and Technology (NIST). In conclusion, the equivalent energy of the 6 MV X-ray beam was determined to be 1.61 MeV. This equivalent energy was determined to be about 30% lower than reported by Ref. The reason is presumed to be due to the presence of an air cavity between the lead attenuators.

Keywords: Half value layer, Mass attenuation coefficient, Equivalent energy. Ionization chamber.

I. INTRODUCTION

선형가속기로부터 발생된 에너지가 다른 X-선 빔들에 대하여 선량계(광자극형광선량계(OSLD), 열형광선량계(TLD) 등)는 에너지 의존성이 있어서 반응을 다르게 한다. 이 에너지 의존성을 보정하기 위하여 보정인자가 사용된다.^[1,2] 그 보정인자는 다중에너지 X-선 빔(polyenergetic X-ray beam)의 품질(quality)인 등가에너지[equivalent (or effective) energy]에 대하여 기술된다.^[1] 그러므로 선량계를 사용하는 이용자는 다중에너지 빔인 MV X-선 빔(mega voltage X-ray beam)들에 대한 등가에너지를 실험적으로 구하여 한다.^[3,4] 그리고 선량 측정 시 실제 측정값은 측정된 선량에 이미 보고된 자료 또는 실험으로부터 얻은 에너지 의존성 보정인자로 보정을 행하여 얻어야 한다. MV X-선 빔들에 사용하는 감쇠기 물질의 반가층은 교정된 전리함(ionization chamber)을 사용하여 조사선량 측정으로부터 산출할 수 있다.^[3,5] 이 산출된 반가층으로부터 MV X-선 빔들의 품질인 등가에너지는 결정될 수 있다. 따라서 이 연구

의 목적은 전리함, 납 반가층 감쇠기 세트(lead half value layer attenuator set) 및 감쇠기 지지대로서 자체 제작한 음영반(shadow tray)을 사용하여 6 MV X-선 빔에 대한 등가에너지 결정이다.

MV X-선 빔의 품질을 묘사하기 위한 이상적인 방법은 X-선 빔의 스펙트럼 분포에서 피크 에너지(peak energy)로 지정하는 것이다. 이런 빔 품질(beam quality, 선질)의 완전한 지정은 대부분 임상 상황에서 필요하지 않는다. X-선의 생물학적 효과는 빔의 품질에 아주 민감하지 않기 때문에, 방사선치료에서는 빔의 상세한 에너지 스펙트럼 보다 오히려 빔의 투과력에 관심을 둔다. 그러므로 더 간단한 빔 품질의 지정은 주로 반가층(HVL; Half Value Layer)을 사용한다. 그리고 X-선 빔의 투과력(penetrating ability)은 X-선 빔의 품질로서 보통 기술된다. 방사선학에 사용되는 X-선 빔들은 항상 다중에너지 빔으로서 등가에너지에 의해 X-선 빔의 품질을 표현하는 것이 편리하다. X-선 빔의 등가에너지는 문제의 방사선과 같이 같은 비율에서 감쇠되는 단일에너지 빔(monoenergetic beam)의 광자들의 에너지

*Corresponding Author: Byung-Do Park

E-mail: Byungdo.Park@gmail.com

Tel: +82-55-233-5668

이다. 그리고 등가에너지는 주어진 빔과 같이 같은 선감쇠계수 또는 질량감쇠계수를 가지는 단일에너지 광자들의 에너지를 찾아서 결정할 수 있다.^[3]

본 연구는 6 MV X-선 빔으로부터 납 감쇠기의 반가층 측정 후, 측정되어진 반가층으로부터 선감쇠계수로 구한다. 선감쇠계수에 납의 밀도로 나누어 질량감쇠계수를 산출한다. 산출되어진 질량감쇠계수와 미국표준기술연구소(National Institute of Standards and Technology, NIST)의 납의 단일 광자에너지들에 대한 질량감쇠계수의 자료를 사용하여 등가에너지를 구하고자 한다.

II. MATERIAL AND METHODS

Varian 21iX 선형가속기(Varian Medical System, Milpitas, CA, USA)와 파머형 전리함(FC65-G, IBA Dosimetry, Belgian)은 선형가속기의 출력을 교정하기 위하여 사용하였으며, 지두형 전리함(CC13, IBA Dosimetry, Belgian)과 빌드업 캡, 음영반, 그리고 납 감쇠기 세트는 반가층을 측정하기 위해 사용하였다. 납 감쇠기 세트는 치수가 6×7×0.2 cm인 납판 20개로 구성하였다. 선형가속기로부터 6 MV X-선 빔의 출력은 SSD 치료기법의 교정 기준조건으로 SSD(source to surface distance) 100 cm, 조사야 10×10 cm², 최대선량 깊이 1.4 cm 지점에 대하여 1 MU가 1 cGy가 되도록 교정하여 본 실험에 사용하였다. 반가층 측정 시 납 감쇠기의 지지대로서 사용된 음영반은 Fig. 1에서 보여주며, 일상적으로 방사선치료 시에 사용하는 음영반으로서 중심부에 5×5 cm²의 구멍을 내어 X-선 빔 조사 시 감쇠가 일어나지 않도록 자체 제작을 하였다.

1. 반가층 측정

전리함을 사용해서 측정되어지는 조사선량(exposure)은 측정 전하량에 비례하므로 전하량 측정으로부터 반가층을 구할 수 있다. 전하량 측정을 위한 실험적 배치는 Fig. 2에서 보여준다. 하전입자평형 조건하에서 전하량을 측정하기 위하여 빌드업 캡을 씌운 지두형 전리함을 사용하였다. 이 전리함의 중심은 SAD(source to axis distance) 100 cm에 위치하고, 이 거리에서 조사야는 3×3 cm²로 설정하였다. 자체 제작한 음영반은 선원으로부터 65 cm에 위치한 부속품 장착대(accessory mo-

unt)에 삽입하였고, 이 음영반 위에 납 감쇠기를 놓았다. 전하량(nC)은 선형가속기로부터 측정점에 103 cGy 조사 하에 0, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2, 2.4, 2.8, 3.2, 3.6, 4 cm Pb에 대하여 각 3번 측정 후 평균값을 구하여 납 감쇠기의 유무에 따른 상대비로 반가층을 계산하였다.



Fig. 1. Shadow tray used in the experiment.



Fig. 2. The experimental setup for half value layer measurement.

2. 등가에너지 결정

등가에너지를 결정하기 위하여, 먼저 구해진 납 감쇠기의 반가층을 사용하여 Eq. (1)로부터 선감쇠계수(μ)를 얻었다.

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

선감쇠계수에 알루미늄 밀도(ρ)를 나누어 질량감쇠계수(μ/ρ)를 구하였다.^[6] 등가에너지는 NIST에서 제공하는 광자에너지 대 질량감쇠계수 자료를 사용하여 구하여진 질량감쇠계수를 대응시켜 결정을 하였다.^[7]

III. RESULT

반가층 측정 실험으로부터 각각의 납 감쇠기 두께에 대하여 측정된 전하량 평균값과 표준편차, 상대적인 강도 비를 Table 1에서 보여준다. 이 도표에서 전하량 측정의 변동계수(CV)는 0.007이하로 나타났다.

Table 1에서 나타낸 상대적인 강도 비에 대한 납 감쇠기의 두께는 Fig. 3과 같이 Origin 8.0 프로그램의 지수감쇠함수 설정(ExpDec2 fit)을 사용하여 다음의 Eq. (2)를 얻었다.

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

Lead attenuator(cmPb)	Mean value±SD (nC)	Relative intensity ratio
0	3.991±0.004	1
0.4	3.146±0.006	0.79
0.8	2.519±0.003	0.631
1.2	2.025±0.002	0.508
1.6	1.651±0.004	0.415
2	1.350±0.002	0.339
2.4	1.109±0.005	0.278
2.8	0.916±0.001	0.23
3.2	0.744±0.001	0.187
3.6	0.611±0.004	0.153
4	0.503±0.002	0.126

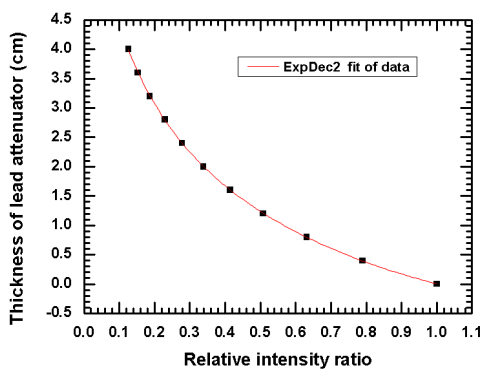


Fig. 3. Attenuation in lead of X-rays produced at a 6 MV X-ray beam.

$$y = 2.9328e^{-x/0.10956} + 4.91305e^{-x/0.59547} - 0.9132 \quad (2)$$

Eq. (2)로부터 반가층은 1.293 cmPb로 산출되었다.

이 산출된 반가층은 Eq. (1)에 대입하여 Eq. (3)과 같이 선감쇠계수를 얻었다.

$$\mu = \frac{0.693}{HVL} = \frac{0.693}{1.239 \text{ cm}} = 0.559/\text{cm} \quad (3)$$

그리고 질량감쇠계수는 식(3)에서 얻은 선감쇠계수에 납의 밀도로 나누어 Eq. (4)식와 같이 산출하였다.

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{0.559/\text{cm}}{11.34 \text{ g/cm}^3} = 0.0493 \text{ cm}^2/\text{g} \quad (4)$$

등가에너지를 구하기 위하여 사용한 것으로서, NIST에서 제공하는 광자에너지 대 납 질량감쇠계수 자료는 Table 2에서 일부를 보여준다.

Table 2. X-ray mass attenuation coefficients of lead for photon energies

Photon energy (MeV)	Mass attenuation coefficient (cm ² /g)
1.00	0.0710
1.25	0.0588
1.50	0.0522
2.00	0.0461
3.00	0.0423
4.00	0.0420

이 자료에서 납 질량감쇠계수에 대한 광자에너지의 관계식은 Fig. 4와 같이 Origin 8.0 프로그램에서 ExpDec2 fit하여 Eq. (5)를 구하였다.

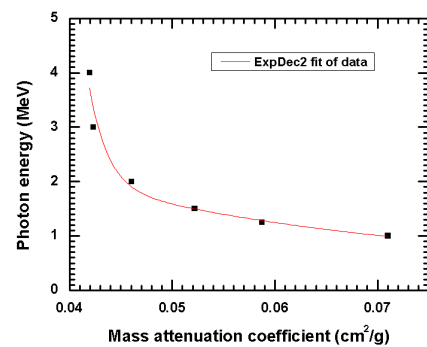


Fig. 4. Photon energy versus the mass attenuation coefficient of lead for equivalent energy determination based on NIST data.

$$y = 577.207e^{-x/0.00173} + 5.83239e^{-x/0.03148} + 0.38097 \quad (5)$$

Eq. (4)에서 구한 납 질량감쇠계수를 Eq. (5)에 대입 하므로서 등가에너지는 1.61 MeV로 결정되었다.

IV. DISCUSSION

MV X-선 빔의 선량계측에서 조직사이에 존재하는 공기 공동(air cavity)의 가장 중요한 효과는 공동의 표 면에서 전자평형의 부분 손실이다. 공동의 존재 시 공 동의 앞과 뒤에 있는 조직에서 실제 선량은 기대되는 선량보다 약간 적게 측정된다.^[9] 실험으로부터 얻어진 6 MV x선 빔의 등가에너지는 1.61 MeV로서 Reft^[1]가 보고한 등가에너지 2.4 MeV보다 약 30% 낮게 결정되 었다. 이 이유는 실험에 사용된 납 감쇠기의 평판(slab) 의 면이 고르지 않아 평판과 평판 사이에 공기층 형성 하였고, 이 공기층의 영향에 의해 반가층이 적게 측정 되어 등가에너지가 적게 결정된 것으로 추정된다.

반가층 측정 시 조사야는 SAD 100 cm에서 3×3 cm² 로 설정하여 좁은 빔(narrow beam)으로서 산란선의 영 향을 받지 않도록 하였다.^[8] 또한 전리함은 반가층 감 쇠기로부터 적어도 50 cm 떨어진 지점에 놓아야 하지 만 선형가속기의 기하학적 구조적인 제한으로 인하여 감쇠기로부터 35 cm에 지점에 배치를 하였다. 그리고 자체 제작한 음영반은 납 감쇠기 평판을 지지하면서 음영반 차체에서 X-선 빔의 감쇠 작용이 일어나지 않 도록 구멍을 뚫어 디자인하였다.

6 MV X-선 빔의 등가에너지는 실험으로 측정된 납 의 질량감쇠계수를 NIST에서 제공하는 납의 질량감쇠 계수 자료로부터 얻어진 식(5)에 대입하여 결정하였다. 이 NIST 자료는 Hubbell과 Seltzer 등에 의한 현재 광 자 상호작용 데이터베이스이다.^[7]

열형광선량계와 광자극형광선량계는 임상에서 체내 선량계측(in-vivo dosimetry)에 많이 사용되고 있는 대 표적인 선량계이다. 이 선량계들은 반응에 있어서 에너 지에 의존하는 특성을 가진다. 선량 측정 시 에너지 의 존성 보정인자로 보정하여야 한다.^[10-12] 이때 보정인자 는 X-선 빔의 등가에너지에 대하여 기술된다. 따라서 등가에너지는 실험적으로 또는 시뮬레이션으로 결정하 여 선량측정에 사용되어야 할 것으로 사료된다.

V. CONCLUSION

실험으로부터 얻어진 6 MV X-선 빔의 등가에너지 는 1.61 MeV로서 Reft^[1]가 보고한 등가에너지 2.4 MeV 보다 약 30% 낮게 결정되었다. 이유는 실험에 사용된 납 감쇠기 평판(slab)의 면이 고르지 않아 평판과 평판 사이에 공기층 형성하였고, 이 공기층의 영향에 의해 반가층이 적게 측정되어 등가에너지가 적게 결정된 것 으로 추정된다.

향후 낮게 결정된 등가에너지의 원인을 더욱 면밀히 분석하기 위하여, 납 감쇠기 평판의 두께는 각 두께별 로 하나의 평판을 사용하여 실험하여야 될 것으로 생 각된다.

Acknowledgement

본 연구는 가야대학교 교내연구비의 지원에 의해 수 행되었다.

Reference

- [1] C. S. Reft, "The energy dependence and dose respon se of a commercial optically stimulated luminescent detector for kilovoltage photon, megavoltage photon, and electron, proton, and carbon beams", *Medical Ph ysics*, Vol. 36, No. 5, pp. 1690-1699, 2009.
- [2] J. E. Kim, I. C. Im, H. Y. Lee, "Correction factor f or the energy dependence of a optically stimulated l uminescence dosimeter in diagnostic radiography", *Jo urnal of Korean Society of Radiology*, Vol. 5, No. 5, pp. 261-265, 2011.
- [3] F. M. KHAN, *The Physics of Radiation Therapy*, 3r d Ed., Wolters Wluwer Co., New York, pp. 97-102, 2003.
- [4] S. C. Chen, W. L. Jong, A. Z. Harun, "Evaluation o f x-ray beam quality based on measurements and est imations using SpekCalc and Ipem78 models", *The Malaysian Journal of Medical Sciences*, Vol. 19, No. 3, pp. 22-28, 2012.
- [5] National Institute of Standards and Technology, "NIS T measurement services: calibration of x-ray and ga mma-ray measuring instruments", *NIST Special Publi cation 250-58*, pp. 1-96, 2001.

-
- [6] J. H. Hubbell, "Photon mass attenuation and energy-absorption coefficients from 1 keV to 20 MeV", *The International Journal of Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 33, pp. 1269-1290, 1982.
- [7] <http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/ElemTab/z13.html>.
- [8] 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", *Medical Physics*, Vol. 28, No. 6, pp. 869-875, 2001.
- [9] F. M. KHAN, *The Physics of Radiation Therapy*, 3rd Ed., Wolters Wluwer Co., New York, pp. 258-259, 2003.
- [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.
- [11] E. Carinoua, A. Boziaria, P. Askounisa, A. Mikulisb, V. Kamenopouloua, "Energy dependence of TLD 100 and MCP-N detectors", *Radiation Measurements*, Vol. 43, pp. 599-602, 2008.
- [12] W. E. Muhogora, W. N. Ngoye, U. S. Lema, D. M walongo, "Energy response of LiF:Mg,Ti dosimeters to ISO 4037 and typical diagnostic x-ray beams in Tanzania", *Journal of Radiological Protection*, Vol. 22, pp. 175-184, 2002.

6 MV X-선 빔의 등가에너지 결정

김종언,¹ 박병도^{2,*}

¹가야대학교 방사선학과

²성균관대학교 의과대학 삼성창원병원 방사선종양학과

요 약

본 연구의 목적은 실험으로 6 MV X-선 빔의 등가에너지를 결정하는 데 있다. 6 MV X-선 빔에 대한 납의 반가층은 전리함을 사용하여 측정하였다. 선감쇠계수는 측정된 반가층을 사용하여 계산하였다. 그리고 질량감쇠계수는 납의 밀도로 선감쇠계수를 나누어 얻었다. 얻어진 질량감쇠계수의 등가에너지는 미국표준기술연구소에서 주어진 납의 광자에너지 대 질량감쇠계수 자료를 사용하여 결정하였다. 그 결과로서, 6 MV X-선 빔에 대한 등가에너지는 1.61 MeV로 결정되었다. 이 등가에너지는 Ref1가 보고한 것 보다 약 30% 낮게 결정되었다. 그 원인은 납 감쇠기 사이의 공기공동의 존재에 기인한 것으로 추정된다.

중심단어: 반가층, 질량감쇠계수, 등가에너지, 전리함