

Calculation Formula for Effective Photon Energy in kV X-ray Beam of Mammography

Young-On Park¹, Sang-Hun Lee², Jong-Eon Kim^{2,*}

¹Department of Radiology, Miraero women's Hospital

²Department of Radiological Science, Kaya University

Received: August 11, 2023. Revised: August 30, 2023. Accepted: August 31, 2023.

ABSTRACT

The purpose of this study is to find a formula that can easily calculate the effective photon energy in the X-ray beam of mammography. The tube voltage measured for each set tube voltage was obtained using the X2 MAM Sensor. The mass attenuation coefficient for aluminum of the aluminum filter was obtained from the half value layer measurement from each measured tube voltage X-ray beam. The mass attenuation coefficient of aluminum obtained from each measured tube voltage X-ray beam was corresponded to the mass attenuation coefficient of aluminum for each photon energy obtained from NIST. The photon energy corresponding to the matching mass attenuation coefficient was determined as the effective photon energy. The formula for calculating the determined effective photon energy was obtained by polynomial matching of the effective photon energy for each tube voltage in the Origin pro 2019b statistical program as $y = 28.98968 - 1.91738x + 0.07786x^2 - 0.000946717x^3$. Here, x is the measuring tube voltage and y is the effective photon energy. The calculation formula of the effective photon energy of the mammography X-ray beam obtained in this study is considered to be very useful in obtaining the interaction coefficient between the X-ray beam and a certain substance in clinical practice.

Keywords: Tube voltage, Half value layer, Mass attenuation coefficient, Effective photon energy

I. INTRODUCTION

유방촬영장치(Mammography unit)로부터 발생하는 X선 빔은 다에너지 X선 빔(Polyenergetic X-ray beam)^[1-3]이다. 이 X선 빔은 서로 다른 에너지를 가진 X선들로 구성된 빔을 의미한다. 이 현상은 X선관의 양극과 전자의 상호작용에서 제동X선이 발생되기 때문에 일어난다. 그리고 단일에너지 X선 빔(Monoenergetic X-ray beam)^[1]은 같은 에너지를 갖는 X선들로 구성된 빔을 의미한다.

다에너지 X선 빔의 유효광자에너지(유효에너지)^[4]는 질량감쇠계수가 같은 단일에너지 X선 빔의 단일에너지이다. 유방촬영에 사용하는 다에너지 X선 빔의 에너지는 일반적으로 임상에서 유효광

자에너지의 개념으로 사용된다. 다에너지 X선 빔과 물질과의 상호작용으로 측정되는 감쇠계수와 흡수계수는 유효광자에너지의 함수로써 얻어진다. 환자의 피폭선량을 줄이기 위한 차폐체의 제작 시에 사용하는 다에너지 X선 빔의 차폐체 두께는 유효광자에너지에 대하여 계산된다.

앞에서 언급한 바와 같이, 유효광자에너지는 아주 중요하게 임상에서 사용된다. 그렇지만 유방촬영장치로부터 발생하는 다에너지 X선 빔에 대한 유효광자에너지의 자료가 거의 없는 실정이다. 그러므로 유효광자에너지^[10]에 대한 연구의 필요성이 대두되었다. 이 연구의 목적은 유방촬영의 X선 빔에서 유효광자에너지를 쉽게 계산할 수 있는 계산식을 구하는데 있다.

* Corresponding Author: Jong-Eon Kim E-mail: kjepk@kaya.ac.kr

Tel: +82-55-330-1184

본 연구는 각각의 측정관전압 X-선 빔으로부터 구하여진 알루미늄의 질량감쇠계수는 미국국립표준기술연구소(NIST: National Institute of Standards and Technology)로부터 얻어진 광자에너지별 알루미늄의 질량감쇠계수에 대응시켰다. 일치하는 질량감쇠계수에 대응하는 광자에너지는 유효광자에너지로 결정하였다. 결정된 유효광자에너지의 계산식은 통계프로그램에서 각각의 측정관전압에 대한 유효광자에너지를 다항식으로 정합(fit)하여 얻었다.

II. MATERIAL AND METHODS

실험에 사용한 유방촬영장치(Alpha ST, General electrichealthcare, Hungary, 2010)는 몰리브덴(Mo) 표적(Target)과 몰리브덴(Mo) 여과체(Filter)로 조합되어 있는 장치이다. 반가층을 측정하기 위하여 알루미늄 여과체(Aluminum half value layer attenuator set, Gammex, USA)와 공기커마를 측정할 수 있는 X2 MAM Sensor(Dose measurements, X2, Raysafe)를 사용하였다. X2 MAM Sensor의 교정성적서에 기재된 교정결과는 다음과 같다. 설정관전압 23 ~ 35 kVp 범위에서 공기커마는 측정값의 표준편차는 $\pm 1.1\%$ 이하이고, 측정불확도는 2.3% 이하이다. 그리고 설정관전압 23 ~ 35 kVp 범위에서 측정관전압은 정확도가 -0.2% 이하이며, 측정값의 표준편차는 $\pm 0.2\%$ 이하이고, 측정불확도는 0.8% 이하이다.

1. 반가층 측정

Fig. 1에서 보여주는 바와 같이, X2 MAM Sensor는 표적으로부터 거리 57 cm, 카세트 홀더의 전면에서 흉벽 앞 4 cm 위치에 배치하였다. 압박대는 표적으로부터 40 cm 거리에 배치하였다. X-선 빔의 조사면적은 압박대 윗면에 두께 1 mm를 갖는 4개의 납판을 조준기(Collimator)로 사용하여 $2 \times 2 \text{ cm}^2$ 로 설정하였다. 알루미늄 여과체는 압박대 윗면의 납판 위에 위치시켜 사용하였다.

먼저 설정관전압(Set tube voltage)에 대한 측정관전압(Measured tube voltage)은 관전류량을 40 mAs로 고정하고, 각각의 설정관전압 20, 24, 28, 32, 35 kVp에서 X-선 빔을 3번 조사하여 측정되어진 측정값의 평균값으로 얻었다.

공기커마의 측정은 각각의 측정관전압에서 관전류량을 40 mAs로 고정하고, 알루미늄 여과체의 두께 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8 mm에서 각각 10번 X-선 빔을 조사하여 측정되어진 측정값의 평균값으로 얻었다. 그리고 각각의 측정관전압에서 측정되어진 공기커마들은 알루미늄 여과체의 두께 0 mm에서 측정된 공기커마에 대한 상대적인 비로써 투과강도비(transmitted intensity ratio)로 산출하였다.

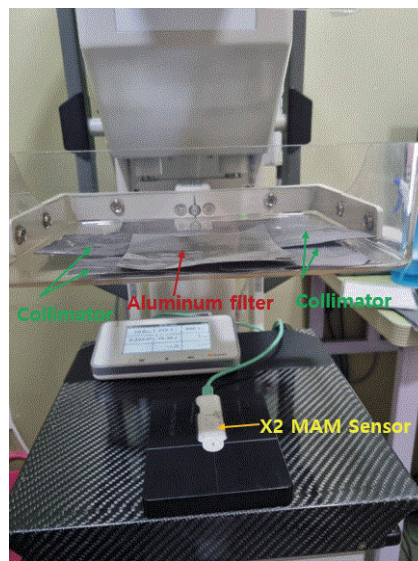


Fig. 1. Experimental setup of X2 MAM Sensor, collimator aluminum filter.

반가층(HVL: Half Value Layer)^[11-13]은 Origin pro 2019b 통계프로그램에서 알루미늄 여과체의 두께에 대한 산출된 투과강도비를 ExpDec2 함수로 정합하여 구하였다.

2. 유효광자에너지 계산식

반가층 측정으로부터 각각의 측정관전압 X-선 빔에서 선감쇠계수는 Eq. (1)을 사용하여 계산하였다. 그리고 각각의 측정관전압 X-선 빔에서 질량감쇠계수는 Eq. (1)에서 계산된 선감쇠계수에 알루미늄의 밀도 2.7 g/cm^3 를 나누어 산출하였다.

$$\mu = \frac{0.693}{HVL} \quad (\text{cm}^{-1}) \quad (1)$$

실험으로부터 산출된 질량감쇠계수에 대응하는 광자에너지(단일광자에너지)가 유효광자에너지이다. 이 유효광자 에너지를 구하기 위한 절차는 다음과 같다. NIST의 웹 사이트에 들어가서 services & resources, data에서 physical reference data, X-ray and gamma-ray data, XCOM: photon cross sections database, contents의 database search form에서 element를 체크한 다음 submit information 클릭, atomic number or symbol 입력한 후 submit information 클릭 등의 순서로 검색하여 광자에너지 10 ~ 20 keV 범위의 질량감쇠계수 자료를 얻었다. 얻어진 질량감쇠계수는 Origin pro 2019b 통계프로그램을 사용하여 광자 에너지 0.1 keV 간격으로 linear 내삽하였다. 내삽하여 얻어진 광자에너지별 질량감쇠계수에 실험으로부터 산출된 측정관전압 X-선 빔의 질량감쇠계수를 대응시켜, 일치하는 질량감쇠계수의 광자 에너지를 유효광자에너지로 결정하였다.

각각의 측정관전압 X-선 빔에서 결정된 유효광자 에너지와 측정관전압을 다항식으로 정합하여, 측정관전압의 함수로써 유효광자에너지의 계산식을 구하였다.

III. RESULT

1. 반가중 측정

설정관전압 20, 24, 28, 32, 35 kVp에서 측정되어진 측정관전압의 평균값과 표준편차는 Table 1에서 보여준다.

Table 1. Tube voltage measured against the set tube voltage

| Set tube voltage (kVp) | Measured tube voltage (kVp) |
|------------------------|-----------------------------|
| | Average value \pm SD |
| 20 | 19.8 \pm 0 |
| 24 | 24.3 \pm 0 |
| 28 | 28.7 \pm 0 |
| 32 | 33.0 \pm 0 |
| 35 | 36.0 \pm 0 |

그리고 각각의 측정관전압 X-선 빔에서 알루미늄 여과체의 두께의 함수로써 측정된 공기커마의 평균값과 표준편차, 투과강도비 그리고 변동계수는

Table 2, 3, 4, 5, 6에 나타내었다. 여기서 측정된 공기커마들의 변동계수(CV: Coefficient of Variation)는 0.65 이하로 나타났다.

Table 2. Mean value, standard deviation, coefficient of variation, transmission intensity ratio of the air kerma measured as a function of thickness of aluminum filter in a 19.8 kVp x-ray beam

| Thickness (mm) | Mean value \pm SD (mGy) | Relative intensity ratio | Coefficient of variation |
|----------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 0 | 1.19 \pm 0.0007 | 1.00 | 0.060 |
| 0.1 | 0.87 \pm 0.0013 | 0.73 | 0.144 |
| 0.2 | 0.65 \pm 0.0011 | 0.55 | 0.168 |
| 0.3 | 0.50 \pm 0.0012 | 0.42 | 0.243 |
| 0.4 | 0.38 \pm 0.0001 | 0.32 | 0.037 |
| 0.5 | 0.30 \pm 0.0011 | 0.25 | 0.362 |
| 0.6 | 0.24 \pm 0.0008 | 0.20 | 0.336 |
| 0.8 | 0.16 \pm 0.0008 | 0.13 | 0.520 |

Table 3. Mean value, standard deviation, coefficient of variation, transmission intensity ratio of the air kerma measured as a function of thickness of aluminum filter in a 24.3 kVp x-ray beam

| Thickness (mm) | Mean value \pm SD (mGy) | Transmitted intensity ratio | Coefficient of variation |
|----------------|---------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| 0 | 2.54 \pm 0.0072 | 1.00 | 0.282 |
| 0.1 | 1.95 \pm 0.0007 | 0.77 | 0.036 |
| 0.2 | 1.55 \pm 0.0043 | 0.61 | 0.280 |
| 0.3 | 1.26 \pm 0.0004 | 0.50 | 0.033 |
| 0.4 | 1.02 \pm 0.0021 | 0.40 | 0.200 |
| 0.5 | 0.84 \pm 0.0007 | 0.33 | 0.086 |
| 0.6 | 0.70 \pm 0.0004 | 0.28 | 0.059 |
| 0.8 | 0.50 \pm 0.0021 | 0.20 | 0.415 |

Table 4. Mean value, standard deviation, coefficient of variation, transmission intensity ratio of the air kerma measured as a function of thickness of aluminum filter in a 28.7 kVp x-ray beam

| Thickness (mm) | Mean value \pm SD (mGy) | Transmitted intensity ratio | Coefficient of variation |
|----------------|---------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| 0 | 4.37 \pm 0.0034 | 1.00 | 0.077 |
| 0.1 | 3.50 \pm 0.0068 | 0.80 | 0.194 |
| 0.2 | 2.86 \pm 0.0048 | 0.65 | 0.169 |
| 0.3 | 2.39 \pm 0.0074 | 0.55 | 0.311 |
| 0.4 | 1.99 \pm 0.0021 | 0.46 | 0.107 |
| 0.5 | 1.67 \pm 0.0011 | 0.38 | 0.065 |
| 0.6 | 1.42 \pm 0.0023 | 0.32 | 0.161 |
| 0.8 | 1.04 \pm 0.0008 | 0.24 | 0.079 |

Table 5. Mean value, standard deviation, coefficient of variation, transmission intensity ratio of the air kerma measured as a function of thickness of aluminum filter in a 33 kVp x-ray beam

| Thickness (mm) | Mean value ± SD (mGy) | Transmitted intensity ratio | Coefficient of variation |
|----------------|-----------------------|-----------------------------|--------------------------|
| 0 | 6.53 ± 0.0152 | 1.00 | 0.233 |
| 0.1 | 5.34 ± 0.0107 | 0.82 | 0.201 |
| 0.2 | 4.48 ± 0.0009 | 0.69 | 0.019 |
| 0.3 | 3.77 ± 0.0131 | 0.58 | 0.346 |
| 0.4 | 3.19 ± 0.0157 | 0.49 | 0.177 |
| 0.5 | 2.72 ± 0.0009 | 0.42 | 0.032 |
| 0.6 | 2.33 ± 0.0009 | 0.36 | 0.037 |
| 0.8 | 1.74 ± 0.0004 | 0.27 | 0.025 |

Table 6. Mean value, standard deviation, coefficient of variation, transmission intensity ratio of the air kerma measured as a function of thickness of aluminum filter in a 36 kVp x-ray beam

| Thickness (mm) | Mean value ± SD (mGy) | Transmitted intensity ratio | Coefficient of variation |
|----------------|-----------------------|-----------------------------|--------------------------|
| 0 | 8.44 ± 0.0017 | 1.00 | 0.021 |
| 0.1 | 6.98 ± 0.0096 | 0.83 | 0.137 |
| 0.2 | 5.86 ± 0.0044 | 0.69 | 0.074 |
| 0.3 | 4.97 ± 0.0026 | 0.59 | 0.053 |
| 0.4 | 4.25 ± 0.0090 | 0.50 | 0.020 |
| 0.5 | 3.62 ± 0.0043 | 0.43 | 0.120 |
| 0.6 | 3.12 ± 0.0174 | 0.37 | 0.237 |
| 0.8 | 2.37 ± 0.0017 | 0.28 | 0.074 |

Table 2, 3, 4, 5, 그리고 6에 나타난 자료에서, 투과강도비에 대한 알루미늄 여과체의 두께는 Fig. 2와 같이 Originpro 2019b 프로그램으로 ExpDec2 함수로 정합하여 Eq. (2)와 같은 수식들을 얻었다.

$$y = A_1 e^{-x/t_1} + A_2 e^{-x/t_2} + y_0 \quad (2)$$

여기서 측정관전압별 Eq. (2)에 대응되는 매개변수들은 Table 7에서 보여준다.

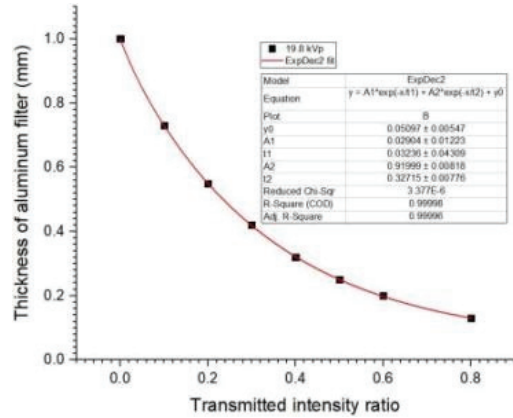


Fig. 2. ExpDec2 function fit of aluminum filter thickness to transmitted intensity ratio in 19.8 kVp X-ray beam.

Table 7. Parameters corresponding to Equation (2) for each measured tube voltage

| | 19.8 kVp | 24.3 kVp | 28.7 kVp | 33 kVp | 36 kVp |
|-------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| y_0 | -0.17601 | -0.2661 | -0.19557 | -0.29986 | -0.29167 |
| A_1 | 0.9181 | 1.17577 | 142.09455 | 1.3776 | 1.41319 |
| t_1 | 0.09087 | 0.13884 | 0.03118 | 0.11056 | 0.10922 |
| A_2 | 0.94123 | 1.03501 | 1.52478 | 1.52003 | 1.57538 |
| t_2 | 0.59585 | 0.73392 | 0.4865 | 0.61525 | 0.59334 |

얻어진 측정관전압별 ExpDec2 함수의 수식에서, x 에 투과강도비 0.5를 대입하므로써 y 의 값으로 반가층을 구하였다. 구어진 측정관전압별 반가층들은 Table 8에서 보여준다.

Table 8. Half-value layer for each measured tube voltage

| Measured tube voltage (kVp) | HVL (mm) |
|-----------------------------|----------|
| 19.8 | 0.234 |
| 24.3 | 0.289 |
| 28.7 | 0.349 |
| 33 | 0.389 |
| 36 | 0.401 |

2. 유효광자에너지 계산식

반가층 측정으로부터 각각의 측정관전압 X-선 빔에서 선감쇠계수는 Eq. (1)로 산출하였다. 질량감쇠계수는 선감쇠계수에 알루미늄의 밀도로 나누어 구하였다. 실험으로부터 얻어진 각각의 측정관전압 X-선 빔에 대한 선감쇠계수와 질량감쇠계수는

Table 9에서 보여준다.

Table 9. Linear attenuation coefficient(μ) and mass attenuation coefficient(μ/ρ) for each measured tube voltage X-ray beam obtained from the experiment

| Measured tube voltage (kVp) | μ (cm ⁻¹) | μ/ρ (cm ² /g) |
|-----------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| 19.8 | 29.615 | 10.969 |
| 24.3 | 23.897 | 8.851 |
| 28.7 | 19.856 | 7.354 |
| 33 | 17.815 | 6.598 |
| 36 | 17.282 | 6.401 |

NIST 웹사이트 검색에서 얻어진 광자에너지 10 ~ 20 keV 범위의 알루미늄 질량감쇠계수는 Table 10에서 보여준다. Table 10의 자료는 Origin pro 2019b에서 광자에너지 0.1 keV 간격으로 linear 내삽하였다. 내삽으로 얻어진 자료는 Table 11에 나타내었다. 이 내삽된 자료의 질량감쇠계수들에 실험으로부터 각각의 측정관전압 X-선 빔에서 얻어진 질량감쇠계수를 대응시켜, 일치하는 질량감쇠계수에 대응하는 광자에너지가 유효광자에너지로 결정되었다. 각각의 측정관전압 X-선 빔에서 결정된 유효광자에너지는 Table 12에서 보여준다.

각각의 측정관전압 X-선 빔에서 결정된 유효광자에너지의 계산식은 Origin pro 2019b에서 측정관전압들에 대한 유효광자에너지들의 다항식을 Fig. 3과 같이 정합하여 Eq. (3)으로 얻었다.

$$y = 28.98968 - 1.91738x + 0.07786x^2 - 0.000946717x^3 \quad (3)$$

여기서 y 는 유효광자에너지(keV)이고, 28.98968은 절편이며, x 는 측정관전압(kVp)이다.

Table 10. Mass attenuation coefficients(μ/ρ) of aluminum for photon energies obtained from the NIST website

| Photon energy (keV) | μ/ρ (cm ² /g) |
|---------------------|---------------------------------|
| 10 | 26.210 |
| 15 | 7.955 |
| 20 | 3.442 |

Table 11. Mass attenuation coefficients(μ/ρ) of aluminum for interpolated photon energies

| Photon energy (keV) | μ/ρ (cm ² /g) | Photon energy (keV) | μ/ρ (cm ² /g) | Photon energy (keV) | μ/ρ (cm ² /g) |
|---------------------|---------------------------------|---------------------|---------------------------------|---------------------|---------------------------------|
| 10.0 | 26.210 | 13.4 | 13.797 | 16.8 | 6.330 |
| 10.1 | 25.845 | 13.5 | 13.432 | 16.9 | 6.240 |
| 10.2 | 25.480 | 13.6 | 13.066 | 17.0 | 6.150 |
| 10.3 | 25.115 | 13.7 | 12.701 | 17.1 | 6.060 |
| 10.4 | 24.750 | 13.8 | 12.336 | 17.2 | 5.969 |
| 10.5 | 24.385 | 13.9 | 11.971 | 17.3 | 5.879 |
| 10.6 | 24.019 | 14.0 | 11.606 | 17.4 | 5.789 |
| 10.7 | 23.654 | 14.1 | 11.241 | 17.5 | 5.699 |
| 10.8 | 23.289 | 14.2 | 10.876 | 17.6 | 5.608 |
| 10.9 | 22.924 | 14.3 | 10.511 | 17.7 | 5.518 |
| 11.0 | 22.559 | 14.4 | 10.146 | 17.8 | 5.428 |
| 11.1 | 22.194 | 14.5 | 9.781 | 17.9 | 5.337 |
| 11.2 | 21.829 | 14.6 | 9.415 | 18.0 | 5.247 |
| 11.3 | 21.464 | 14.7 | 9.050 | 18.1 | 5.157 |
| 11.4 | 21.099 | 14.8 | 8.685 | 18.2 | 5.067 |
| 11.5 | 20.734 | 14.9 | 8.320 | 18.3 | 4.976 |
| 11.6 | 20.368 | 15.0 | 7.955 | 18.4 | 4.886 |
| 11.7 | 20.003 | 15.1 | 7.590 | 18.5 | 4.796 |
| 11.8 | 19.638 | 15.2 | 7.225 | 18.6 | 4.706 |
| 11.9 | 19.273 | 15.3 | 6.860 | 18.7 | 4.615 |
| 12.0 | 18.908 | 15.4 | 6.495 | 18.8 | 4.525 |
| 12.1 | 18.543 | 15.5 | 6.130 | 18.9 | 4.435 |
| 12.2 | 18.178 | 15.6 | 5.765 | 19.0 | 4.345 |
| 12.3 | 17.813 | 15.7 | 5.400 | 19.1 | 4.254 |
| 12.4 | 17.448 | 15.8 | 5.035 | 19.2 | 4.164 |
| 12.5 | 17.083 | 15.9 | 4.670 | 19.3 | 4.074 |
| 12.6 | 16.717 | 16.0 | 4.305 | 19.4 | 3.984 |
| 12.7 | 16.352 | 16.1 | 3.940 | 19.5 | 3.893 |
| 12.8 | 15.987 | 16.2 | 3.575 | 19.6 | 3.803 |
| 12.9 | 15.622 | 16.3 | 3.210 | 19.7 | 3.713 |
| 13.0 | 15.257 | 16.4 | 2.845 | 19.8 | 3.623 |
| 13.1 | 14.892 | 16.5 | 2.480 | 19.9 | 3.532 |
| 13.2 | 14.527 | 16.6 | 2.115 | 20.0 | 3.442 |
| 13.3 | 14.162 | 16.7 | 1.750 | | |

Table 12. Effective photon energies determined from measured kVp X-ray beams

| Measured tube voltage (kVp) | Effective photon energy (keV) |
|-----------------------------|-------------------------------|
| 19.8 | 14.2 |
| 24.3 | 14.8 |
| 28.7 | 15.7 |
| 33 | 16.5 |
| 36 | 16.7 |

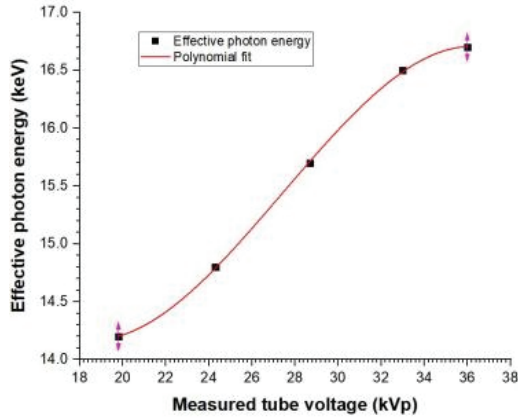


Fig. 3. Polynomial fit of effective photon energies to measured tube voltages.

IV. DISCUSSION

반가층 측정 시 X-선 빔의 조사면적은 표적으로부터 X2 MAM Sensor가 위치된 거리 57 cm에서 $2 \times 2 \text{ cm}^2$ 가 형성되도록 설정하였다. 이 조사면적은 1차 빔(Primary beam)으로써 산란선의 영향을 받지 않도록 하였다^[14].

반가층 측정은 투과강도비에 대한 알루미늄 여과체의 두께를 ExpDec2 함수로 정합하여 얻어진 수식에 투과강도비 0.5 를 대입하여 산출하였다. 측정된 반가층을 채택할 수 있는 허용범위는 IAEA 출간물 No. 17(IAEA human health series No. 17)에서 Eq. (4)으로 주었다^[15].

$$kV/100 + 0.03 \leq HVL \leq kV/100 + C \quad (4)$$

여기서 kV 는 측정관전압, HVL 는 측정된 반가층(mm), C 는 표적/필터 조합에 대한 상수로써 Mo/Mo는 0.12, Mo/Rh는 0.19, Rh/Rh는 0.22이다.

실험으로부터 각각의 측정관전압 X-선 빔에서 측정된 반가층은 Table 13에서 보여주는 바와 같이, Eq. (4)의 허용범위 이내에 들어가기 때문에 반가층으로 채택하였다. 실험으로부터 얻어진 각각의 측정관전압 X-선 빔에서 유효광자에너지의 계산식의 정확도는 상대오차(%)로써 0.1% 이내로 얻었다.

여기서 상대오차는 결정된 유효광자에너지에서 Eq. (3)로 계산된 참값을 뺀 다음 참값을 나눈 후에 100을 곱하여 구하였다. 그리고 각각의 측정관전압 X-선 빔에서 관전압의 파고치(Peak value)에 대응하는 광자의 최대에너지(peak energy)^[16]에 대한 유효광자에너지의 백분율은 관전압이 클수록 감소하는 양상으로 46% ~ 72%로 얻었다.

Table 13. Acceptable tolerance range of the measured half-layer based on Eq. (4) in each measured tube voltage X-ray beam

| Measured tube voltage (kVp) | Permissible range for HVL(mm) selection |
|-----------------------------|-----------------------------------------|
| 19.8 | $0.228 \leq HVL=0.234 \leq 0.318$ |
| 24.3 | $0.273 \leq HVL=0.289 \leq 0.363$ |
| 28.7 | $0.317 \leq HVL=0.349 \leq 0.407$ |
| 33 | $0.360 \leq HVL=0.389 \leq 0.450$ |
| 36 | $0.390 \leq HVL=0.401 \leq 0.480$ |

Eq. (3)으로 계산되는 다에너지 X-선 빔의 유효광자에너지는 어떤 물질과의 상호작용으로 측정될 수 있는 감쇠계수와 흡수계수를 보고서, 문헌, NIST 웹사이트에서 쉽게 찾는데 사용할 수 있다.

V. CONCLUSION

X2 MAM Sensor를 사용하여 각각의 설정관전압에 대하여 측정관전압을 얻었다. 알루미늄 여과체의 알루미늄에 대한 질량감쇠계수는 각각의 측정관전압 X-선 빔에서 반가층 측정으로부터 산출하였다. 산출된 알루미늄의 질량감쇠계수는 NIST로부터 얻어진 광자에너지별 알루미늄의 질량감쇠계수에 대응시켰다. 일치하는 질량감쇠계수에 대응하는 광자에너지가 유효광자에너지로 결정되었다.

결정된 유효광자에너지의 계산식은 Origin pro 2019b 통계프로그램에서 각각의 측정관전압에 대한 유효광자에너지를 다항식으로 정합하여 얻었다.

결론적으로, 이 연구에서 얻어진 다에너지 X-선 빔의 유효광자에너지의 계산식은 임상에서 어떤 물질의 상호작용 계수를 구하는데 아주 유용하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

Acknowledgement

이 논문은 2022년 2월에 발행된 가야대학교 박영온의 석사학위 논문^[17]에서 일부 내용을 발췌하여 작성하였다.

Reference

- [1] J. M. Boone, J. A. Seibert, "A Comparison of Mono- and Poly-energetic X-ray Beam Performance for Radiographic and Fluoroscopic Imaging", *Medical Physics*, Vol. 21, No. 12, pp. 1853-1863, 1994. <https://doi.org/10.1118/1.597185>
- [2] D. G. Morgenthaler, R. A. Brooks, A. J. Talbert, "Noise Factor of a Polyenergetic X-ray Beam in Computed Tomography", *Physics in Medicine & Biology*, Vol. 25, No. 2, pp. 251-259, 1980. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/25/2/005>
- [3] K. Ramakrishna, K. Muralidhar, P. Munshi, "Beam-Hardening in Simulated X-ray Tomography", *NDT & E International*, Vol. 39, No. 6, pp. 449-457, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2006.01.006>
- [4] F. M. KHAN, *The Physics of Radiation Therapy*, 3rd Ed., Wolters Wluwer Co., New York, pp. 97-102, 2003.
- [5] S. C. Chen, W. L. Jong, A. Z. Harun, "Evaluation of X-ray Beam Quality Based on Measurements and Estimations Using SpekCalc and Ipem 78 models", *Malaysian Journal of Medical Sciences*, Vol. 19, No. 3, pp. 22-28, 2012.
- [6] J. E. Kim, S. h. Lee, "Determination of the Effective Energy of X-Ray Beam Using Optically Stimulated Luminescent nanoDot Dosimeters", *Journal of Korean Society of Radiology*, Vol. 9, No. 6, pp. 375-379, 2015. <http://doi.org/10.7742/jksr.2015.9.6.375>
- [7] M. G. Petrushanskii, E. A. Kornev, "On Determination of the Effective Energy of a Mixed X-ray Beam", *Biomedical Engineering*, Vol. 40, pp. 102-105, 2006. <https://doi.org/10.1007/s10527-006-0054-2>
- [8] H. Kato, N. Hayashi, S. Suzuki, S. Ando, M. Miyamoto, N. Wakasugi, S. Suzuki, "Problems of the Effective Energy Used as a Quality Expression of Diagnostic X-ray", *Journal of the Japanese Society of Radiological Technology*, Vol. 67, No. 10, pp. 1320-1326, 2011. <https://doi.org/10.6009/jjrt.67.1320>
- [9] J. E. Kim, "Determination of Effective Energy of CT X-ray Beams", *Journal of the Korean Society of Radiology*, Vol. 13, No. 4, pp. 517-522, 2019. <https://doi.org/10.7742/jksr.2019.13.4.517>
- [10] E. d. L. Corrêa, V. Vivolo, M. d. P. A. Potiens, "Determination of the Effective Energy in X-rays Standard Beams, Mammography Level", from URL; <https://www.ipen.br/biblioteca/2011/eventos/17459.pdf>
- [11] T. Nakamura, S. Suzuki, K. Kato, S. Niroshani, T. Negishi, R. Irie, "Half-value Layer Measurement Method for Routine Management of Digital Breast Tomosynthesis Equipped Breast Radiography Systems", *Sensors and Materials*, Vol. 34, No. 11, pp. 3949-3957, 2022. <https://doi.org/10.18494/SAM4096>
- [12] H. Yagi, R. Kitamura, R. Saruwatari, N. Doi, E. Yamane, "Measurement of half-value Layer in Mammograph", *Journal of the Japanese Society of Radiological Technology*, Vol. 59, No. 6, pp. 729-736, 2003. <https://doi.org/10.6009/jjrt.kj00003174155>
- [13] L. K. Wagner, B. R. Archer, F. Cerra, "On the measurement of half-value layer in film-screen mammography", *Medical Physics*, Vol. 17, No. 6, pp. 989-997, 1990. <https://doi.org/10.1118/1.596444>
- [14] 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. <https://doi.org/10.1118/1.1374247>
- [15] IAEA Human Health Series No. 17, "Quality Assurance Programme for Digital Mammography", International Atomic Energy Agency, Vienna, 2011.
- [16] P. Sprawls, *Radiation Penetration*, The Physical Principles of Medical Imaging, from URL; <http://www.sprawls.org/ppmi2/RADPEN/#X-RAY%20BEAM%20QUALITY>
- [17] Y. O. Park, Derivation of Energy Fluence of Air Kerma Output from Mammography Equipment, Major in Radiological Science Graduate School of Public Health, Kaya University, pp. 7-30, 2022.

유방촬영의 kV X-선 빔에서 유효광자에너지에 대한 계산식

박영은¹, 이상훈², 김종연^{2*}

¹미래로병원 영상의학과

²가야대학교 방사선학과

요 약

이 연구의 목적은 유방촬영의 X-선 빔에서 유효광자에너지를 쉽게 계산할 수 있는 계산식을 구하는 데 있다. X2 MAM Sensor를 사용하여 각각의 설정관전압에 대하여 측정관전압을 얻었다. 알루미늄 여과체의 알루미늄에 대한 질량감쇠계수는 각각의 측정관전압 X-선 빔에서 반가층 측정으로부터 구하였다. 각각의 측정관전압 X-선 빔으로부터 구하여진 알루미늄의 질량감쇠계수는 NIST로부터 얻어진 광자에너지별 알루미늄의 질량감쇠계수에 대응시켰다. 일치하는 질량감쇠계수에 대응하는 광자에너지가 유효광자에너지로 결정되었다. 결정된 유효광자에너지의 계산식은 Origin pro 2019b 통계프로그램에서 각각의 측정관전압에 대한 유효광자에너지를 다항식으로 정합하여 $y=28.98968-1.91738x+0.07786x^2-0.000946717x^3$ 으로 얻었다. 여기서 x는 측정관전압이고, y는 유효광자에너지이다. 이 연구에서 얻어진 유방촬영 X-선 빔의 유효광자에너지의 계산식은 임상에서 X-선 빔과 어떤 물질과의 상호작용 계수를 구하는데 아주 유용하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

중심단어: 관전압, 반가층, 질량감쇠계수, 유효광자에너지

연구자 정보 이력

| | 성명 | 소속 | 직위 |
|--------|-----|-------------|------|
| (제1저자) | 박영은 | 미래로병원 영상의학과 | 방사선사 |
| (공동저자) | 이상훈 | 가야대학교 방사선학과 | 교수 |
| (교신저자) | 김종연 | 가야대학교 방사선학과 | 부교수 |