

# Derivation of Photon Energy Fluence and Mass Energy Absorption Coefficient for 1 Gy Absorbed Dose of Water in Brachytherapy using Ir<sup>192</sup> Source

Jong-Eon Kim<sup>1,\*</sup>, Il-Hoon Ahn<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Radiological Science, Kaya University

<sup>2</sup>Department of Gem Design Engineering, Kaya University Graduate School

Received: January 18, 2022. Revised: February 25, 2022. Accepted: February 28, 2022.

## ABSTRACT

The purpose of this study is to derive photon energy fluence and mass energy absorption coefficient for 1 Gy of absorbed dose of water in brachytherapy using an Ir<sup>192</sup> source. From the radiotherapy physics written by Khan, the half-value of lead for the gamma ray beam of the Ir<sup>192</sup> source was obtained. The linear attenuation coefficient and the mass attenuation coefficient were calculated from the obtained half-value layer of lead. By matching the calculated lead mass attenuation coefficient with the NIST mass attenuation coefficient data, the photon energy of the matching mass attenuation coefficient was determined as the effective energy. By matching the determined effective energy with the photon energy of the NIST data on the mass energy absorption coefficient of water, the mass energy absorption coefficient of water was obtained as 0.03273 cm<sup>2</sup>/g(32.73 cm<sup>2</sup>/kg). The photon energy fluence was calculated as 0.03055 J/cm<sup>2</sup> by dividing the obtained mass energy absorption coefficient (32.73 cm<sup>2</sup>/kg) by the absorbed dose of water 1 Gy.

Keywords: Effective energy, Mass attenuation coefficient, Mass energy absorption coefficient, Absorbed dose.

## I. INTRODUCTION

방사선종양학과에서 근접치료 시 사용하는 Ir<sup>192</sup> 선원은 다중에너지 감마선 선속(polyenergetic gamma ray beam)을 방출한다<sup>[1]</sup>. 이 선원을 사용하는 근접치료에서 처방선량으로 사용하는 선량은 물 흡수선량이다<sup>[2]</sup>. 물 흡수선량은 광자에너지플루언스( $\Psi$ )와 질량에너지흡수계수( $\mu_{en}/\rho$ )의 구성성분으로 구성되고, 광자에너지플루언스( $\Psi$ )와 질량에너지흡수계수( $\mu_{en}/\rho$ )의 곱으로 산출된다<sup>[1]</sup>. 그러나 물 흡수선량의 구성성분인 광자에너지플루언스( $\Psi$ )와 질량에너지흡수계수( $\mu_{en}/\rho$ )를 아는 것은 아주 어렵고, 논문으로 보고된 자료가 거의 없는 실정이다. 따라서 Ir<sup>192</sup> 선원을 사용한 근접치료에서 물 흡수선량

에 대한 광자에너지플루언스와 질량에너지흡수계수를 유도하는 방법을 연구할 필요성이 제기된다.

이 연구는 Khan<sup>[1]</sup>이 저술한 방사선치료물리학으로부터 Ir<sup>192</sup> 선원의 감마선 선속에 대한 납의 반가층을 얻고, 얻어진 반가층으로부터 질량감쇠계수를 산출하고, 산출된 질량감쇠계수를 미국표준기술연구소(national institute of standards and technology, NIST)의 납의 질량감쇠계수 자료에 대응시켜, 일치하는 질량감쇠계수의 광자 에너지를 유효에너지로 결정한다. NIST의 물의 질량에너지흡수계수 자료에 결정된 유효 에너지를 대응시켜 물의 질량에너지흡수계수를 얻는다. 얻어진 물의 질량에너지흡수계수를 물 흡수선량 1 Gy에 나누어 광자에너지플루언스를 유도하는데 이 연구의 목적이 있다.

\* Corresponding Author: Jong Eon Kim E-mail: kjepek@kaya.ac.kr Tel: +82-55-330-1184  
Address: Kaya University, #208, Samgye-ro, Gimhae-Si, Gyeongsangnam-do, 50830, Republic of Korea

광자에너지플루언스(photon energy fluence)는 구 단면적(da)으로 들어가는 모든 광자의 에너지 합(dEfl)의 몫(J/cm<sup>2</sup>)이다<sup>[1]</sup>. 반가층(half value layer, HVL)은 공기커마율(air kerma rate)이 원래 값의 절반으로 감소되는 정도까지 방사선 선속을 감소시키는 특정 재료의 두께이다<sup>[1,3-6]</sup>. 유효에너지(effective energy)는 같은 반가층을 갖는 단일에너지 광자선속(monoenergetic photon beam)의 에너지이다<sup>[1,6-9]</sup>. 선감쇠계수( $\mu$ )는 광자 하나가 단위경로길이를 지나면서 상호작용할 확률(cm<sup>-1</sup>)이다<sup>[1]</sup>. 질량감쇠계수( $\mu/\rho$ )는 선감쇠계수를 밀도로 나누어서 얻는 계수(cm<sup>2</sup>/g)이다. 질량에너지흡수계수( $\mu_{en}/\rho$ )는 물질에 에너지가 전달되어 연이어 물질에 흡수된 광자에너지의 비율(cm<sup>2</sup>/g)이다<sup>[1]</sup>.

본 연구는 Khan이 저술한 방사선치료물리학으로부터 Ir<sup>192</sup> 선원의 감마선 선속에 대한 납의 반가층을 얻었다. 얻어진 납의 반가층으로부터 선감쇠계수와 질량감쇠계수를 산출하였다. 산출된 납의 질량감쇠계수를 NIST의 납의 질량감쇠계수 자료에 대응시켜 일치하는 질량감쇠계수의 광자에너지를 유효에너지로 결정하였다. NIST의 물의 질량에너지흡수계수 자료에 결정된 유효에너지를 대응시켜 물의 질량에너지흡수계수를 얻었다. 얻어진 물의 질량에너지흡수계수를 물 흡수선량 1 Gy에 나누어 광자에너지플루언스를 산출하였다.

## II. MATERIAL AND METHODS

### 1. 반가층으로부터 질량감쇠계수 산출

Khan이 저술한 방사선치료물리학으로부터 Ir<sup>192</sup> 선원의 감마선 선속에 대한 납의 반가층(half value layer, HVL)으로 2.5 mm<sup>[1,10]</sup>를 얻었다. 선감쇠계수(linear attenuation coefficient,  $\mu$ )는 Eq. (1)과 같이 ln2에 반가층을 나누어 산출하였다.

$$\mu = \frac{\ln 2}{HVL} \quad (cm^{-1}) \quad (1)$$

질량감쇠계수(mass attenuation coefficient,  $\mu/\rho$ )는 Eq. (2)과 같이 산출된 선감쇠계수에 납의 밀도

(11.36 g/cm<sup>3</sup>)를 나누어 산출하였다.

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu_m}{\rho} \quad (cm^2/g) \quad (2)$$

여기서  $\mu_m$ 은 어떤 물질의 선감쇠계수이다.

### 2. Ir<sup>192</sup> 선속의 감마선 선속에 대한 유효에너지 결정

단일에너지 광자선속에 대한 납의 질량감쇠계수<sup>[11]</sup>는 NIST의 웹 사이트에 들어가서 다음과 같은 순서로, 즉 services & resources 메뉴에서 data의 physical reference data 클릭, X-ray and gamma-ray data 클릭, X-ray and gamma-ray data에서 X-ray attenuation and absorption for materials of dosimetric interest 클릭, table of contents의 X-ray mass attenuation coefficients에서 table 3. [data] elemental media.클릭, lead 클릭하여 광자에너지 300~400 keV 범위의 자료를 얻었다<sup>[12]</sup>.

얻어진 질량감쇠계수는 Origin pro 2019b 통계프로그램을 사용하여, 300~400 keV 범위에서 광자에너지 1 keV 간격으로 cubic Spline 내삽하여 자료를 다시 정리하였다. 이 자료에 산출된 질량감쇠계수를 대응시켜, 일치하는 질량감쇠계수에 해당하는 광자에너지를 Ir<sup>192</sup> 감마선 선속에 대한 유효에너지로 결정하였다.

### 3. 물의 질량에너지흡수계수

단일에너지 광자선속에 대한 물의 질량에너지흡수계수(mass energy absorption coefficient,  $\mu_{en}/\rho$ )<sup>[11]</sup>는 NIST의 웹 사이트에 들어가서 다음과 같은 순서로, 즉 services & resources 메뉴에서 data의 physical reference data 클릭, X-ray and gamma-ray data 클릭, X-ray and gamma-ray data에서 X-ray attenuation and absorption for materials of dosimetric interest 클릭, table of contents의 X-ray mass attenuation coefficients에서 table 4. [data] compounds and mixtures 클릭, water, liquid 클릭하여 광자에너지 300~400 keV 범위의 자료를 얻었다<sup>[13]</sup>.

얻어진 질량흡수계수는 Origin pro 2019b 통계프로그램을 사용하여, 300~400 keV 범위에서 광자에

너지 1 keV 간격으로 cubic Spline 내삽하여 얻은 자료를 최종적인 물의 질량에너지흡수계수 자료로 사용하였다.

#### 4. 물 흡수선량의 광자에너지플루언스 유도

물 흡수선량은 아래의 Eq. (3)로 기술된다.

$$D = \Psi \times \frac{\mu_{en}}{\rho} \quad (3)$$

여기서  $D$ 는 물의 흡수선량,  $\Psi$ 는 광자에너지플루언스이며,  $\mu_{en}/\rho$ 은 물의 질량에너지흡수계수이다. 광자에너지플루언스는 Eq. (3)으로부터 Eq. (4)로 유도하여 산출하였다.

$$\Psi = \frac{D}{\frac{\mu_{en}}{\rho}} \quad (4)$$

### III. RESULT

#### 1. 반가층으로부터 질량감쇠계수 산출

Eq. (1)과 Eq. (2)로부터 산출된 납의 선감쇠계수와 질량감쇠계수는 Table 1에서 보여준다.

Table 1. Linear attenuation coefficient and mass attenuation coefficient of lead for Ir<sup>192</sup> source

Source	Linear attenuation coefficient (cm <sup>-1</sup> )	Mass attenuation coefficient (cm <sup>2</sup> /g)
Ir <sup>192</sup>	2.772	0.2440

#### 2. Ir<sup>192</sup> 감마선 선속에 대한 유효에너지 결정

NIST로부터 납의 질량감쇠계수의 자료는 광자에너지 300~400 keV 범위의 자료를 얻었으며, 이 자료는 Table 2에서 보여준다.

Table 2. Mass attenuation coefficients of lead in the range of 300-400 keV of photon energy

Photon energy range	Mass attenuation coefficient (cm <sup>2</sup> /g)
300-400 keV	0.4031-0.2323

광자에너지 300~400 keV 범위에서 내삽하여 얻은 납의 질량감쇠계수 자료 중 일부는 Table 3에서 보여준다.

Table 3. Mass attenuation coefficients of lead in the photon energy range of 390 to 400 keV

Photon energy (keV)	Mass attenuation coefficient (cm <sup>2</sup> /g)
390	0.2496
391	0.2478
392	0.2461
393	0.2444
394	0.2427
395	0.2409
396	0.2392
397	0.2375
398	0.2358
399	0.2340
400	0.2323

산출된 납의 질량감쇠계수 Table 3의 질량감쇠계수에 대응시켜, 근사적으로 일치되는 질량감쇠계수의 광자에너지 393 keV를 유효에너지로 결정하였다.

#### 3. 물의 질량에너지흡수계수

NIST로부터 물의 질량에너지흡수계수의 자료는 광자에너지 300~400 keV 범위의 자료를 얻었으며, 이 자료는 Table 4에서 보여준다.

Table 4. Mass energy absorption coefficients of water in the range of 300-400 keV of photon energy

Photon energy range	Mass energy absorption coefficient (cm <sup>2</sup> /g)
300-400 keV	0.03192-0.03279

광자에너지 300~400 keV 범위에서 내삽하여 얻은 물의 질량에너지흡수계수 자료 중 일부는 Table 5에서 보여준다. 결정된 유효에너지를 Table 5의 광자에너지에 대응시켜, 일치하는 광자에너지의 물의 질량에너지흡수계수 0.03273 cm<sup>2</sup>/g를 얻었다. 이 물의 질량에너지흡수계수는 다시 cm<sup>2</sup>/kg의 단위로 환산하여 32.73 cm<sup>2</sup>/kg으로 얻었다.

Table 5. Mass energy absorption coefficient of water in the photon energy range of 390 to 400 keV

Photon energy (keV)	Mass energy absorption coefficient (cm <sup>2</sup> /g)
390	0.03270
391	0.03271
392	0.03272
393	0.03273
394	0.03274
395	0.03275
396	0.03275
397	0.03276
398	0.03277
399	0.03278
400	0.03279

#### 4. 물 흡수선량의 광자에너지플루언스 산출

Ir<sup>192</sup> 선원의 감마선 선속에 대하여 결정된 유효 에너지에서, 물 흡수선량 1 Gy의 광자에너지플루언스( $\Psi$ )의 계산식은 Eq. (4)로부터 Eq. (5)로 유도되었다. Eq. (5)에 물의 질량에너지흡수계수 0.03273 cm<sup>2</sup>/g을 대입함으로써 광자에너지플루언스는 0.03055 J/cm<sup>2</sup>으로 산출하였다.

$$\Psi \left( \frac{J}{cm^2} \right) = \frac{Gy \left( \frac{J}{kg} \right)}{\frac{\mu_{en}}{\rho} \left( \frac{cm^2}{g} \right)} = \frac{Gy \left( \frac{J}{kg} \right)}{\frac{\mu_{en}}{\rho} \left( \frac{cm^2}{g \times \frac{kg}{1000g}} \right)} \quad (5)$$

$$= \frac{Gy \left( \frac{J}{kg} \right)}{\frac{\mu_{en}}{\rho} \left( \frac{cm^2}{0.001kg} \right)}$$

#### IV. DISCUSSION

다중에너지 광자선속에서 반가층은 여과된 광자선속의 품질로 표현된다. 다중에너지 광자선속의 유효에너지는 같은 반가층을 가지는 단일에너지 광자선속의 광자에너지를 말한다. 즉 물질에서 감쇠 비율이 같은 단일에너지 광자선속의 광자에너지이다. 따라서 다중에너지 광자선속의 유효에너지는 물질에서 질량감쇠계수가 같은 단일에너지 광자선속의 광자에너지로 표현할 수 있다. 그러나 다

중에너지 광자선속의 유효에너지는 에너지스펙트럼의 평균에너지와 다른 에너지이다. Ir<sup>192</sup> 선원에서 방출되는 감마선 선속의 에너지는 0.136 MeV로부터 1.06 MeV까지 분포하며, 평균에너지는 0.38 MeV(380 keV)이다.<sup>[1]</sup> 이 연구로부터 결정된 유효에너지는 평균에너지보다 13 KeV 더 높게 결정되었다.

NIST나 문헌에서 주어지는 질량감쇠계수나 질량에너지흡수계수의 자료는 다중에너지 광자선속의 자료가 아니라, 단일에너지 광자선속의 자료로써 단일에너지 광자선속에 대한 질량감쇠계수나 질량에너지흡수계수이다. 다중에너지 광자선속을 사용하는 사용자가 이 자료들을 사용하기 위해서는 먼저 유효에너지를 결정하여야 한다. 유효에너지를 결정한 후, 사용자는 NIST나 문헌에서 주어지는 질량감쇠계수나 질량에너지흡수계수를 사용 목적에 맞게 사용하여 한다.

이 연구에서 Ir<sup>192</sup> 선원에 대한 반가층을 실험으로 측정하지 않고, 문헌에 기재된 표준 자료를 사용한 이유는 부정확한 실험에서 오는 오차를 줄이고, 정확한 유효에너지를 결정하기 위해서 사용하였다.

본 연구는 이전 논문으로 보고된 적이 없는 Ir<sup>192</sup> 선원을 이용한 근접치료에서 물 흡수선량 1 Gy의 구성성분인 광자에너지 플루언스와 질량에너지흡수계수를 유도하는 방법 및 산출된 결과를 제시하였다. 임상에서 방사선치료계획시스템을 이용한 방사선치료계획의 결과로 물 흡수선량이 표시될 때, 치료계획사(medical dosimetrist)는 산출된 질량에너지흡수계수에 얼마의 광자에너지 플루언스가 기여되었는지 알 수 있을 것이다. 따라서 이 연구는 임상뿐만 아니라 교육에서 흡수선량의 구성성분을 산출하고 이해하는데 도움을 줄 것으로 사료된다.

#### V. CONCLUSION

이 연구는 Khan이 저술한 방사선치료물리학으로부터 Ir<sup>192</sup> 선원의 감마선 선속에 대한 납의 반가층을 얻었다. 얻어진 납의 반가층으로부터 선감쇠계수와 질량감쇠계수를 산출하였다. 산출된 납의 질량감쇠계수를 NIST의 납의 질량감쇠계수 자료에 대응시켜 일치하는 질량감쇠계수의 광자에너지를

유효에너지를 결정하였다. 결정된 유효에너지를 NIST의 물의 질량에너지흡수계수 자료의 광자에너지에 대응시켜, 물의 질량에너지흡수계수는  $0.03273 \text{ cm}^2/\text{g}$ ( $32.73 \text{ cm}^2/\text{kg}$ )으로 얻었다. 얻어진 물의 질량에너지흡수계수를 물 흡수선량 1 Gy에 나누어 광자에너지플루언스는  $0.03055 \text{ J}/\text{cm}^2$ 으로 산출하였다.

결론적으로, 이 연구는 흡수선량을 구성하는 성분인 광자에너지플루언스와 질량에너지흡수계수를 유도하는 방법을 제시한다.

### Reference

- [1] F. M. KHAN, The Physics of Radiation Therapy, 3rd Ed., Wolters Wluwer Co., New York, pp. 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. 59~377, 2003.
- [2] J. E. Kim, "Quality Assurance on Dose Distribution of Ir-192 Line Source", Journal of Radiological Science and Technology, Vol. 30, No. 1, pp. 33-38, 2007.
- [3] 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.
- [4] A. Akkaş, "Determination of the Tenth and Half Value Layer Thickness of Concretes with Different Densities", Acta Physica Polonica A, Vol. 129, No. 4, pp. 770-772, 2016.  
<http://dx.doi.org/10.12693/APhysPolA.129.770>
- [5] 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>
- [6] International Standard ISO 4037-1, *X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function for photon energy-Part 1: Radiation characteristics and production methods*, 1st Ed., ISO, pp. 1-4, 1996.
- [7] 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.  
<http://dx.doi.org/10.7742/jksr.2019.13.4.517>
- [8] J. E. Kim, S. h. Lee, "Determination of the Effective Energy of an X-ray Beam Using Optically Stimulated Luminescent nanoDot Dosimeters", Journal of Korean Society of Radiology, Vol. 9, No. 6, pp. 375-379, 2015.  
<http://dx.doi.org/10.7742/jksr.2015.9.6.375>
- [9] M. R. Millner, W. H. Payne, R. G. Waggener, W. D. McDavid, M. J. Dennis, V. J. Sank, "Determination of Effective Energies in CT Calibration", Medical Physics, Vol. 5, No. 6, pp. 543-545, 1978. <https://doi.org/10.1118/1.594488>
- [10] J. Burger, "Radioactive sources in brachytherapy", Radiology and Oncology, Vol. 37, No. 2, pp. 127-131, 2003.
- [11] 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, No. 11, pp. 1269-1290, 1982.  
[https://doi.org/10.1016/0020-708X\(82\)90248-4](https://doi.org/10.1016/0020-708X(82)90248-4)
- [12] <https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/ElemTab/z82.html>
- [13] <https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/ComTab/water.html>

# Ir<sup>192</sup> 선원을 이용한 근접치료에서 물 흡수선량 1 Gy에 대한 광자에너지 플루언스와 질량에너지흡수계수 유도

김종언<sup>1,\*</sup>, 안일훈<sup>2</sup>

<sup>1</sup>가야대학교 방사선학과

<sup>2</sup>가야대학교 대학원 보석디자인공학과

## 요 약

이 연구의 목적은 Ir<sup>192</sup> 선원을 이용한 근접치료에서 물 흡수선량 1 Gy에 대한 광자 에너지플루언스와 질량에너지흡수계수를 유도하는데 있다. Khan이 저술한 방사선치료물리학으로부터 Ir<sup>192</sup> 선원의 감마선 선속에 대한 납의 반가층을 얻었다. 얻어진 납의 반가층으로부터 선감쇠계수와 질량감쇠계수를 산출하였다. 산출된 납의 질량감쇠계수를 NIST의 납의 질량감쇠계수 자료에 대응시켜 일치하는 질량감쇠계수의 광자에너지를 유효에너지로 결정하였다. 결정된 유효에너지를 NIST의 물의 질량에너지흡수계수 자료의 광자에너지에 대응시켜서, 물의 질량에너지흡수계수는 0.03273 cm<sup>2</sup>/g(32.73 cm<sup>2</sup>/kg)으로 얻었다. 얻어진 물의 질량에너지흡수계수(32.73 cm<sup>2</sup>/kg)를 물 흡수선량 1 Gy에 나누어 광자에너지플루언스는 0.03055 J/cm<sup>2</sup>으로 산출하였다.

중심단어: Ir<sup>192</sup> 선원, 유효에너지, 반가층, 질량감쇠계수, 질량에너지흡수계수, 흡수선량.

## 연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자) (교신저자)	김종언	가야대학교 방사선학과	부교수
(공동저자)	안일훈	가야대학교 대학원 보석디자인공학과	교수