

Measurement of CT Numbers for Effective Atomic Number And Physical Density of Compound

Jong Eon Kim*

Department of Radiological Science, Kaya University

Received: February 16, 2021. Revised: April 21, 2021. Accepted: April 30, 2021.

ABSTRACT

In the AAPM CT performance phantom, there is little data on the CT number of the effective atomic number and physical density corresponding to each peg and water of the CT number calibration insert. Therefore, the necessity of documentation was raised. The purpose of this study is to calculate the effective atomic number for each peg and water of the CT number calibration insert in the AAPM CT performance phantom, and to measure the CT number for the calculated effective atomic number and physical density for comparative analysis. In order to obtain CT number data on the effective atomic number and physical density of each peg and water from the CT number calibration insert of the AAPM CT performance phantom, the effective atomic number for each peg and water was first calculated. Then, CT slices were obtained by scanning the CT number calibration with a CT scanner. CT numbers were measured for each peg and water in the central CT slice. As a result, the CT numbers for the effective atomic number showed a nonlinear pattern of repeating the increase and decrease as the effective atomic number increased. In addition, the CT numbers for physical density showed a nonlinear pattern of repeating the increase and decrease as the physical density increased.

Keywords: CT number, AAPM CT performance phantom, Effective atomic number, Physical density.

I. INTRODUCTION

AAPM CT 성능 팬텀^[1-4]의 CT수 교정 삽입부(CT number calibration insert part)에서 각 핀(peg)의 화합물에 대한 유효원자번호^[5]의 자료가 거의 없는 실정이다. 또한 유효원자번호 및 물리적 밀도에 대하여 측정된 CT수(CT number)^[6-11]의 자료도 거의 없다. 그리고 각 핀에 대한 물리적 밀도는 매뉴얼 및 기존 문헌에 기재되어 있다. 따라서 사용자는 유효원자번호에 대한 CT수 측정 시 유효원자번호를 산출하여 사용하여야 한다.

이 연구의 목적은 AAPM CT 성능 팬텀에서 CT수 교정 삽입부의 각 핀 및 물에 대하여 유효원자번호를 산출하고, 산출된 유효원자번호와 물리적 밀도에 대한 CT수를 측정하여 비교분석하는데 있다.

화합물(compound)에서 원자번호를 표기할 때 유효원자번호를 사용한다. 이 유효원자번호는 광자가 주어진 화합물과 같은 방식으로 상호작용하는 원소의 원자번호를 의미한다. 유효원자번호는 mayneord가 정의한 광전효과 상호작용 기반인 유효원자번호 계산식으로부터 산출된다^[5].

본 연구는 AAPM CT 성능 팬텀에서 CT수 교정 삽입부의 각 핀 및 물에 대하여 유효원자번호를 산출하였다. 그리고 CT스캐너로 CT수 교정 삽입부를 스캔한 후 중심 CT슬라이스에서 각 핀과 물에 대하여 CT수를 측정하였다. 결과로서 각 핀 및 물에 대하여 산출된 유효원자번호와 물리적 밀도에 대한 측정된 CT수를 비교분석하였다.

* Corresponding Author: Jong Eon Kim

E-mail: kjepek@kaya.ac.kr

Tel:+82-55-330-1184

II. MATERIAL AND METHODS

1. AAPM CT 성능 팬텀에서 CT수 교정 삽입부의 각 핀과 바탕 물질인 물에 대한 유효원자번호 산출

광전효과 상호작용 기반으로 화합물의 유효원자번호(Z_{eff})는 Eq. (1)로부터 산출된다^[5].

$$Z_{eff} = (a_1 Z_1^{2.94} + a_2 Z_2^{2.94} + a_3 Z_3^{2.94} + \dots + a_n Z_n^{2.94})^{1/2.94} \quad (1)$$

여기서 $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ 는 화합물의 단위 그램당 총 전자 수(총 전자 수/g)에 대한 각 원소의 단위 그램당 전자 수(전자 수/g)의 비이다. 화합물에서 $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ 의 비는 다음과 같은 순서로 유도된다. 먼저 하나의 화합물을 구성하는 각 원소에 대한 단위 그램당 전자 수를 Eq. (2)로 구한다.

$$\text{전자 수/g} = \frac{N_A Z}{A} \times f \quad (2)$$

여기서 N_A 는 아보가드로수($6.02 \times 10^{23}/\text{mol}$)이고, Z 는 원자번호, A 는 질량수이다. f 는 각 원소의 분율로서 Table 1에서 보여주는 바와 같이 미국표준기술연구소(National Institute of Standards and Technology(NIST))에서 제공하는 자료를 사용하였다. 이 자료는 아래의 순서대로 진행하면 얻을 수 있다. 먼저 NIST 홈페이지에 들어가서 XCOM: Photon Cross Sections Database를 검색한 후 Database Search Form을 클릭한 후 Compound선택한 다음 Submit information 클릭한다. 표시되는 Formula for compound의 양식에 화학식을 작성한 후 Submit information를 클릭하면 각 원소의 분율과 질량감쇠계수의 자료가 표시된다^[12]. Eq. (2)로부터 구하여진 각 원소에 대한 그램당 전자 수를 합하면 그램당 총 전자 수가 얻어진다. 이때 $a_1, a_2,$

a_3, \dots, a_n 의 비는 얻어진 그램당 총 전자 수에 한 각 원소의 그램당 전자 수의 비로서 계산된다. 계산된 각 원소의 $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ 와 원자번호(Z)를 Eq. (1)에 대입하여 각 핀과 물에 대한 유효원자번호를 산출하였다.

Table 1. Chemical formula, physical density and fraction of elements for each peg and water.

Peg	Chemical formula	Physical density(g/cm ³)	Element : Fraction by weight(f)
Polyethylene	C2H4	0.94	H : 0.143715 C : 0.856285
Polystyrene	C8H8	1.05	H : 0.077421 C : 0.922579
Water	H2O	1.00	H : 0.111898 O : 0.888102
Nylon	C6H11NO	1.15	H : 0.097980 C : 0.636853 N : 0.123779 O : 0.141388
Lexan	C16H14O	1.20	H : 0.063482 C : 0.864542 O : 0.071976
Plexiglass	C5H8O2	1.19	C : 0.599846 H : 0.080541 O : 0.319613

2. CT수 교정 삽입부의 CT 스캔

AAPM CT 성능 팬텀(AAPM CT Performance Phantom, Nuclear Associates 76-410, Fluke co.,USA)에서 CT수 교정 삽입부의 CT슬라이스를 얻기 위하여, 지멘스 사의 소마톰 센세이션 CT스캐너(Somatom sensation 16, Siemens co., Germany)를 사용하였다. CT스캐너에 관전류량 250 mAs, 10 mm 빔 콜리메이션과 50 cm의 스캔 시야(field of view)를 설정한 후, CT슬라이스들의 스캔 데이터는 관전압 80, 100 그리고 120 kVp에 대하여 5번의 single slice conventional scan을 실시하여 획득되었다. 획득된 CT슬라이스들의 스캔 데이터에 표준 재구성 연산식(standard reconstruction algorithm)을 적용하여, 재구성된 CT슬라이스들을 얻었다.

3. CT슬라이스에서 CT수 측정

관전압 80, 100 그리고 120 kVp에서 재구성된 CT슬라이스들은 CT스캐너 제어 컴퓨터로부터 다이콤 파일(.dcm)로 얻었다. 얻어진 다이콤 파일의

CT슬라이스들을 의료영상저장전송시스템 (INFINITT STARPACS, PiviewSTATM, Infinity co., Korea)으로 불러온 후, 중심 CT슬라이스에서 각 핀과 바탕 물질인 물에 관심영역(550 mm)을 설정하여 CT수의 평균값과 표준편차를 구하였다.

III. RESULT

AAPM CT 성능 팬텀에서 CT수 교정 삽입부의 각 핀과 물에 대하여, 유효원자번호는 Table 2에서 보여주는 바와 같이 산출되었다. 그리고 관전압 80, 100 그리고 120 kVp에서 각 핀과 물에 대하여 측정된 CT수의 평균값과 표준편차는 Table 3에서 보여준다.

Table 2. Effective atomic numbers(Z_{eff}) for each peg and water.

Peg	Effective atomic number(Z_{eff})
Polyethylene	5.44
Polystyrene	5.7
Water	7.42
Nylon	6.12
Lexan	5.94
Plexiglass	6.47

Table 3. CT numbers for each pin and water measured at 80, 100 and 120 kVp.

Peg	80 kVp	100 kVp	120 kVp
	CT number Mean Value±SD	CT number Mean Value±SD	CT number Mean Value±SD
Polyethylene	-129.21±0.21	-108.03±0.31	-95.22±0.06
Polystyrene	-63.53±0.25	-43.03±0.65	-30.93±0.02
Water	-3.73±0.23	-3.2±0.04	-2.96±0.05
Nylon	60.48±0.20	78.84±0.65	88.64±0.12
Lexan	72.91±0.13	90.12±0.24	99.12±0.11
Plexiglass	105.66±0.39	119.92±0.24	126.36±0.02

산출된 유효원자번호에 대한 측정된 CT수는 Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 유효원자번호가 증가할수록 CT수는 비선형적으로 증가와 감소를 반복하는 양상을 나타내었고, 그리고 관전압에 비례적으로 증가하였다. 그리고 물리적 밀도에 대한 측정된

CT수는 Fig. 2에서 보여주며, 물리적 밀도가 증가할수록 CT수는 증가와 감소를 반복하는 양상을 나타내었고, 그리고 관전압에 비례적으로 증가하였다.

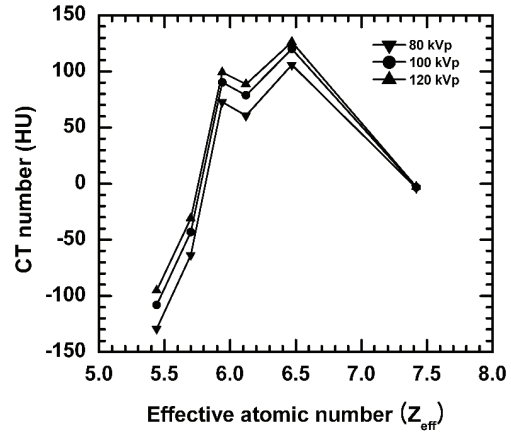


Fig. 1. Measured CT number for effective atomic number.

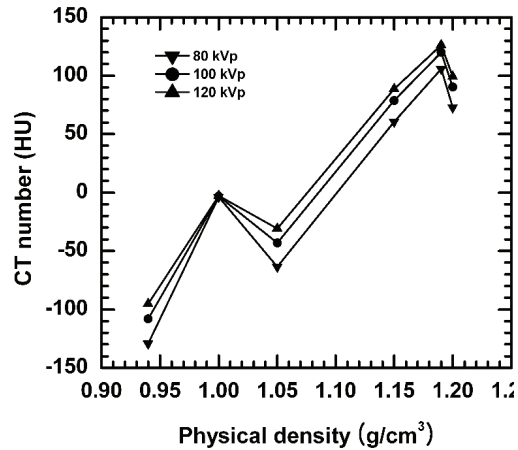


Fig. 2. Measured CT number for physical densit

IV. DISCUSSION

AAPM CT 성능 팬텀에서 CT수 교정 삽입부의 각 핀과 물에 대한 유효원자번호를 산출하기 위하여, NIST에서 제공하는 각 핀과 물의 화합물을 구성하는 각 원소의 분율을 Eq. (2)에 대입하여 각 원소의 그램당 전자 수를 구하였다. 구하여진 각 원소의 그램당 전자 수를 합하여 총 그램당 전자 수를 계산하였다. 계산된 총 그램당 전자 수 분의 각 원소의 그램당 전자 수를 나누어 a_1, a_2, a_3, \dots

a_n 의 비를 얻었다. 얻어진 각 원소의 $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ 의 비와 원자번호를 Eq. (1)에 대입하여 유효 원자번호를 산출하였다. 산출된 각 화합물의 유효 원자번호 중에서, 물의 유효원자번호는 기존의 문헌^[5]에 기재된 유효원자번호에 근사치로 얻었다. 따라서 산출된 유효원자번호들은 정확히 계산된 것으로 추정된다.

산출된 유효원자번호에 대한 CT수는 유효원자번호가 증가할수록 비선형적으로 증가와 감소를 반복하는 양상으로 측정되었다. 이것은 유효원자번호와 CT수는 비례하지 않음을 의미한다. 그리고 물리적 밀도에 대한 CT수도 물리적 밀도가 증가할수록 비선형적으로 증가와 감소를 반복하는 양상으로 측정되었다. 이것도 물리적 밀도와 CT수는 비례하지 않음을 의미한다.

유효원자번호 및 물리적 밀도에 대한 CT수는 관전압이 증가할수록 크게 측정되었다. 이것에 대한 이유는 다음과 같다. CT수는 하운스필드 단위(HU, hounsfield number)로 Eq. (3)과 같이 정의된다^[13].

$$HU = \left(\frac{\mu - \mu_w}{\mu_w} \right) \times 1000 \quad (3)$$

여기서 μ 는 어떤 물질의 선감쇠계수이고, μ_w 는 물의 선감쇠계수이다. 관전압이 높아지면 어떤 물질과 물의 선감약계수는 감소되지만 Eq. (3)에서 $\mu - \mu_w$ 의 차이가 커짐으로서 $\mu - \mu_w / \mu_w$ 의 값이 커지기 때문에 CT수가 증가하게 된다.

V. CONCLUSION

이 실험은 AAPM CT 성능 팬텀에서 CT수 교정 삽입부의 각 핀과 물에 대한 유효원자번호를 산출하였다. 그리고 AAPM CT 성능 팬텀에서 CT수 교정 삽입부를 CT스캐너로 스캔하여 CT슬라이스들을 획득한 후 중심 CT슬라이스에서 각 핀과 물에 대하여 CT수를 측정하였다.

결과로서, 산출된 유효원자번호에 대한 CT수는

유효원자번호가 증가할수록 비선형적으로 증가와 감소를 반복하는 양상을 나타내었다. 그리고 물리적 밀도에 대한 CT수도 물리적 밀도가 증가할수록 비선형적으로 증가와 감소를 반복하는 양상을 나타내었다.

이 연구는 기초연구로서 AAPM CT 성능 팬텀에서 CT수 교정 삽입부의 각 핀과 물에 대하여 산출된 유효원자번호 및 물리적 밀도에 대한 측정된 CT수의 자료를 제공한다.

Reference

- [1] Users Manual, "Nuclear Associates 76-410-4130 and 76-411 AAPM CT Performance Phantom", Fluke corporation. 2005.
- [2] M. R. Millner, W. H. Payne, R. G. Waggner, 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>
- [3] AAPM report No. 1, "Phantoms for performance evaluation and quality assurance of CT scanners", American Association of Physicists in Medicine, pp. 1-23, 1977.
- [4] AAPM report No. 39, "Specification and acceptance testing of computed tomography scanners", American Association of Physicists in Medicine, pp. 1-95, 1993.
- [5] F. M Khan, *The Physics of Radiation Therapy*, 3rd Ed., Wolters Kluwer Co., Philadelphia, pp. 82, 160, 2003.
- [6] R. J. Cropp, P. Seslija, D. Tso, Y. Thakur, "Scanner and kVp dependence of measured CT numbers in the ACR CT phantom", Journal of Applied Clinical Medical Physics, Vol. 14, No. 6, pp. 338-349, 2013. <http://dx.doi.org/10.1120/jacmp.v14i6.4417>
- [7] C. B. Saw, A. Loper, K. Komanduri, T. Combine, S. Huq, C. Scicutella, "Determination of CT-to-density conversion relationship for image-based treatment planning systems", Medical Dosimetry, Vol. 30, No. 3, pp. 145-148, 2005. <http://doi.org/10.1016/j.meddos.2005.05.001>
- [8] S. J. Thomas, "Relative electron density calibration

of CT scanners for radiotherapy treatment planning",
The British Journal of Radiology, Vol. 72, pp.
781-786, 1999.

<http://doi.org/10.1259/bjr.72.860.10624344>

- [9] P. F. Judy, "Comparison of equivalent photon energy calibration methods on computed tomography",
Medical Physics, Vol. 7, No. 6, pp. 685-691, 1980.

<http://doi.org/10.1118/1.594722>

- [10] W. Kilby, "Tolerance levels for quality assurance of electron density values generated from CT in radiotherapy treatment planning", Physics in Medicine & Biology, Vol. 47, pp. 1485-1492, 2002.

<http://doi.org/10.1088/0031-9155/47/9/304>

- [11] M. G. Baek, J. E. Kim, "The dependence of CT scanning parameters on CT number to physical density conversion for CT image based radiation treatment planning system", Journal of the Korean Society of Radiology, Vol. 11, No. 6, pp.501-508, 2017. <http://doi.org/10.7742/jksr.2017.11.6.501>

- [12] <https://www.physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>.

- [13] C. B. Saw, A. Loper, K. Komanduri, T. Combine, S. Huq, C. Scicutella, "Determination of CT-to-density conversion relationship for image-based treatment planning systems", Medical Dosimetry, Vol. 30, No. 3, pp. 145-148, 2005.

<http://doi.org/10.1016/j.meddos.2005.05.001>

화합물의 물리적 밀도와 유효원자번호에 대한 CT수 측정

김종언*

가야대학교 방사선학과

요 약

AAPM CT 성능 팬텀에서 CT수 교정 삽입부의 각 핀과 물에 대응하는 유효원자번호 및 물리적 밀도에 대한 CT수에 관한 자료가 거의 없다. 따라서 자료화의 필요성이 제기되었다. 이 연구의 목적은 AAPM CT 성능 팬텀에서 CT수 교정 삽입부의 각 핀 및 물에 대하여 유효원자번호를 산출하고, 산출된 유효원자번호 및 물리적 밀도에 대한 CT수를 측정하여 비교분석하는데 있다. AAPM CT 성능 팬텀의 CT수 교정 삽입부에서 각 핀과 물의 유효원자번호 및 물리적 밀도에 관한 CT수의 자료를 획득하기 위하여, 먼저 각 핀과 물에 대한 유효원자번호를 산출하였다. 그리고 CT스캐너로 CT수 교정 삽입부를 스캔하여 CT슬라이스들을 획득하였다. 중심 CT슬라이스에서 각 핀과 물에 대하여 CT수들을 측정하였다. 결과로서, 유효원자번호에 대한 CT수들은 유효원자번호가 증가할수록 비선형적으로 증가와 감소를 반복하는 양상을 나타내었다. 그리고 물리적 밀도에 대한 CT수들도 물리적 밀도가 증가할수록 비선형적으로 증가와 감소를 반복하는 양상을 나타내었다.

중심단어: CT수, AAPM CT 성능 팬텀, 유효원자번호, 물리적 밀도

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(단독저자)	김종언	가야대학교 방사선학과	부교수