

Effect of Improving Accuracy for Effective Atomic number (EAN) and Relative Electron Density (RED) extracted with Polynomial-based Calibration in Dual-energy CT

Daehong Kim¹, Il-Hoon Cho², Mi-jo Lee^{3,*}

¹Department of Radiological Science, Eulji University

²Department of Biomedical Laboratory Science, Eulji University

³Department of Radiation Oncology, Eulji University College of Medicine

Received: October 12, 2023. Revised: November 20, 2023. Accepted: December 31, 2023.

ABSTRACT

The purpose of this study was to improve the accuracy of effective atomic number (EAN) and relative electron density (RED) using a polynomial-based calibration method using dual-energy CT images. A phantom composed of 11 tissue-equivalent materials was acquired with dual-energy CT to obtain low- and high-energy images. Using the acquired dual-energy images, the ratio of attenuation of low- and high-energy images for EAN was calibrated based on Stoichiometric, Quadratic, Cubic, Quartic polynomials. EAN and RED were extracted using each calibration method. As a result of the experiment, the average error of EAN using Cubic polynomial-based calibration was minimum. Even in the RED image extracted using EAN, the error of the Cubic polynomial-based RED was minimum. Cubic polynomial-based calibration contributes to improving the accuracy of EAN and RED, and would like to contribute to accurate diagnosis of lesions in CT examinations or quantification of various materials in the human body.

Keywords: Dual-energy Computed Tomography (DECT), Effective atomic number (EAN), Relative electron density (RED)

I. INTRODUCTION

전산화단층촬영장치(Computed Tomography, CT)는 인체 감약 정보를 획득하고 이를 3차원 영상으로 재구성하여 인체의 해부학적 구조를 정확하게 나타낸다. 특히, 이중 에너지 CT는 서로 다른 두 에너지를 이용하여 감약 정보가 다른 두 영상을 획득하고, 영상 처리를 통해 물질의 대조도 증강, 물질의 정량화 등에 기여하고 있다^[1,2]. 이중 에너지 CT 기반 유효원자번호 (Effective atomic number, EAN) 및 상대전자밀도 (Relative electron density, RED) 추출은 방사선 치료 분야의 선량계측 측면에서 널리 사용되고 있는 방법이다^[3].

방사선치료계획 시 선량분포는 CT 영상을 이용하여 확인하며, CT 영상의 RED 정보를 이용하여 선량분포가 표기된다. 기존 하나의 관전압을 이용한 CT 영상은 각 물질의 CT number에 대한 RED 값을 교정하여 사용하며, 비슷한 CT number를 가진 물질의 경우 물질 구별의 어려움이 존재한다. 이를 해결하고자 이중 에너지 CT를 이용하여 물질의 EAN 대비 RED 값을 산출하여 치료계획 프로그램에 사용한다. 따라서, EAN과 RED 추출의 정확도 향상은 방사선 치료의 선량계측 측면에서 매우 중요하다.

기존 연구 결과는 이중 에너지 CT 기반 EAN과 RED의 정확도를 향상시키기 위해 여러 노력을 보여주었다. Bazalova et al.의 연구에 따르면^[4], 조직

* Corresponding Author: Mi-Jo Lee

E-mail: minsk7144@eulji.ac.kr

Tel: +82-42-611-3546

등가 물질에 대한 선형 감쇠 계수의 매개변수화를 기반으로 하여 EAN과 RED를 추출하였고, EAN과 RED의 평균 오차는 각각 2.8%와 1.8%를 획득하였다. 하지만, EAN의 가장 큰 오차는 CB3 resin에서 12%를 보였다.

Zhu et al.에 의한 연구에서는 Stoichiometric calibration에 기반하여 EAN과 RED의 결과를 보고하였다. 이 연구에서 인체 등가 물질에 대한 EAN과 RED의 최대 오차는 각각 10.7%, -3.21%를 보였다^[5].

광자계수기반 CT를 이용한 EAN과 RED의 정확도 개선에 대한 연구도 수행되었다. Son et al.의 연구는 광자계수기반 CT를 사용하여 이중 에너지 분별을 통해 EAN과 RED의 오차를 줄일 수 있다고 보고 하였다^[6]. 또한, EAN에 대한 저에너지와 고에너지 감쇠 비율의 calibration은 Stoichiometric 방법을 사용하였다. 그 결과, 인체 등가 물질의 EAN과 RED의 오차는 모두 4% 이내에 존재했다.

이중 에너지 CT를 이용한 인체 등가 물질의 EAN과 RED의 정확도를 높이기 위한 여러 노력이 있었다. 대부분의 연구는 EAN을 추출하기 위한 calibration 방법으로 Stoichiometric 방식을 사용한다. 하드웨어적으로는 광자계수 검출기 기반 CT를 사용하는데, 임상적인 적용은 아직 미미하다. 그리고, 다양한 노력에도 불구하고 일부 물질은 오차가 증가하는 단점이 존재하기 때문에 이를 해결하기 위한 새로운 접근 방법이 필요하다.

따라서, 본 연구의 목적은 이중 에너지 CT 영상을 이용하여 다항식 기반 calibration 방법을 통해 EAN과 RED의 정확도를 향상시키는 것이고, 그 결과를 기존 Stoichiometric 기반 calibration 방법과 비교하고 평가하는 것이다. 실험에서 CT 영상은 임상에서 사용되는 에너지 적분형 검출기를 사용하였다.

II. MATERIAL AND METHODS

1. 영상 획득

영상 획득을 위해 조직등가팬텀 (Model 467, Gammex RMI, Middleton, WI, USA)을 사용하였다. 팬텀은 11개의 조직 등가 물질로 구성되어 있으며, 세부사항은 Table 1에 기술되어 있다. 팬텀에 포함

된 인체 등가 물질들의 EAN은 Landry et al.의 연구^[7]에서 사용된 값을 참고하였고, RED는 제조사에서 제공된 값을 사용하였다.

Table 1. Specification of tissue-equivalent phantom.

No.	Material	EAN	RED
1	LN-450 Lung	7.53	0.463
2	AP6 Adipose	6.21	0.926
3	BR-12 Breast	6.93	0.960
4	CT Solid Water	7.74	0.987
5	BRN-SR2 Brain	6.09	1.049
6	LV1 Liver	7.74	1.074
7	IB Inner Bone	10.42	1.082
8	B200 Bone Mineral	10.42	1.099
9	CB2-30% CaCO ₃	10.90	1.279
10	CB2-50% CaCO ₃	12.54	1.469
11	SB3 Cortical Bone	13.64	1.694

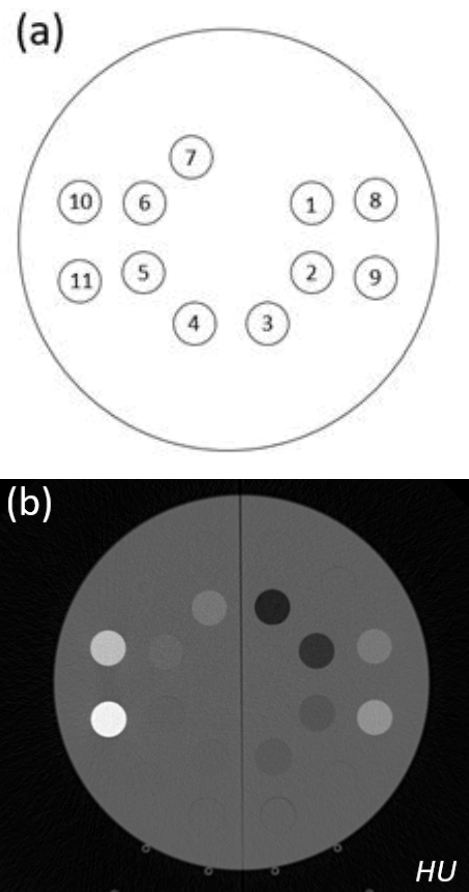


Fig. 1. (a) A tissue-equivalent phantom with 11 materials, (b) CT image at low-energy (80 kV) and pixel value of the image is HU.

Fig. 1-(a)는 조직등가팬텀의 모식도를 보여주고 있다. Table 1에 작성된 조직 등가 물질의 번호와 물질이 Fig. 1-(a)처럼 배열되어 있다. 이 팬텀을 CT (SOMATOM Definition Edge, Siemens, Erlangen, Germany)를 이용하여 이중 에너지로 촬영하였다. 이중 에너지는 저에너지와 고에너지에서 각각 80 kV와 140 kV의 관전압을 사용하였다. 슬라이스 두께는 5 mm 였다^[8]. Fig. 1-(b)는 80 kV 관전압으로 촬영하여 재구성된 영상이며, 영상의 픽셀값은 Hounsfield unit (HU)로 나타내었다.

2. EAN과 RED 추출

저에너지와 고에너지 CT 영상을 이용하여 EAN 영상을 추출하였다. EAN 추출은 다양한 물질의 EAN에 대한 저에너지와 고에너지의 감약 비율을 calibration하여 수행된다. 본 연구에서는 EAN의 정확도 향상을 위해, 다항식 기반의 calibration 모델을 제시하였다. 2, 3, 4차 다항식 기반의 calibration 모델을 적용하여 EAN을 추출하였고, 그 결과를 Stoichiometric calibration 방법과 비교하였다. 다항식 기반의 calibration은 Eq. (1)과 같다.

$$\frac{HU_L + 1,000}{HU_H + 1,000} = \sum_{n=0}^i a_n (Z_{eff})^n \quad (1)$$

여기서 HU_L 과 HU_H 는 각각 저에너지와 고에너지에서 다양한 물질의 HU 값이다. n 은 다항식의 차수이며, a_n 은 calibration에 의해 획득된 상수이다. Z_{eff} 는 어떤 물질의 EAN이다. Stoichiometric calibration에 의한 식은 Zhu et al.의 연구^[5]에서 보고된 식을 사용하였다.

또한, 각 다항식 및 Stoichiometric calibration 기반으로 추출된 EAN 영상을 이용하여 RED 영상을 생성하였다. RED 영상은 아래 Eq. (2)를 이용하여 획득할 수 있다^[5].

$$\left(\frac{HU}{1,000} + 1 \right) / \rho_e = \left(\frac{1 + Z_{eff}^{1.86} k_1(E) + Z_{eff}^{3.62} k_2(E)}{1 + Z_w^{1.86} k_1(E) + Z_w^{3.62} k_2(E)} \right) \quad (2)$$

여기서 HU 는 저에너지 또는 고에너지 영상의 HU 값이다. ρ_e 는 RED이며, Z_{eff} 와 Z_w 는 각각 어떤

물질의 EAN과 물의 EAN이다. $k_1(E)$ 와 $k_2(E)$ 는 Eq. (2)를 저에너지 혹은 고에너지에서 calibration하여 획득한 상수이다.

III. RESULT

1. Effective Atomic Number

Fig. 2는 EAN의 이론값과 실험값을 비교한 그래프이다. Stoichiometric, 2차, 3차, 4차 다항식의 R^2 는 각각 0.9993, 0.9987, 0.9994, 0.9995였다. 추가적으로, Stoichiometric, 2차, 3차, 4차 다항식의 평균제곱근오차 (Root mean square error, RMSE)는 각각 0.0030, 0.0039, 0.0028, 0.0029였다.

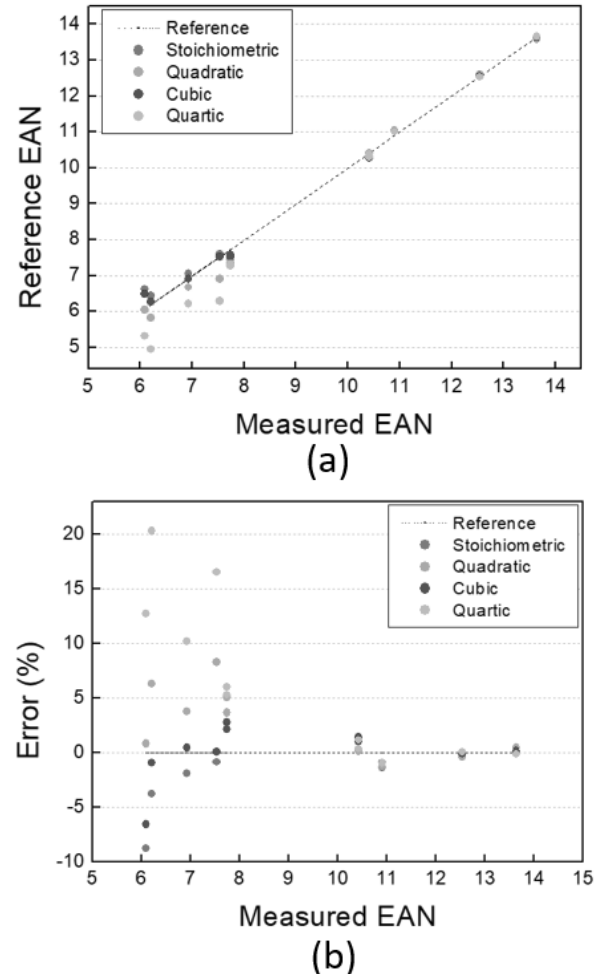


Fig. 2. (a) Relationship between the reference EAN and measured EAN, (b) Error(%) of EAN extracted with Stoichiometric, Quadratic, Cubic, and Quartic polynomials, respectively.

Fig. 2 (a)의 가로축은 Stoichiometric, 2차, 3차, 4차 다항식을 이용하여 획득한 EAN의 측정값이고, 세로축은 이론값이다. 점선(검은색)에 일치할수록 EAN의 이론값과 실험값이 일치하는 것을 의미한다. 11개의 인체 등가 물질에 대하여 3차 다항식 기반 calibration 방법이 다른 방법들에 비해 이론값에 가장 가까운 것을 보여주고 있다. 각 물질에 대한 EAN의 오차는 Fig. 2 (b)에 나타내었다. 모든 물질에 대한 평균 오차는 Stoichiometric, 2차, 3차, 4차 다항식에서 각각 -0.87%, 2.55%, -0.05%, 6.51%를 나타내었다. 3차 다항식에서 평균 오차가 가장 적게 나타났으며, 오차가 가장 큰 물질은 BRN-SR2 Brain으로 -6.57%로 나타났다. 오차가 가장 작은 물질은 LN-450 Lung, CB2-50% CaCO₃로 각각 0.09%, -0.09%의 오차를 보였다. Stoichiometric 기반으로 획득된 EAN에서 가장 높은 오차는 BRN-SR2 Brain으로 -8.77%로 나타났다. 오차가 가장 작은 물질은 SB3 Cortical Bone으로 오차는 0.13%였다.

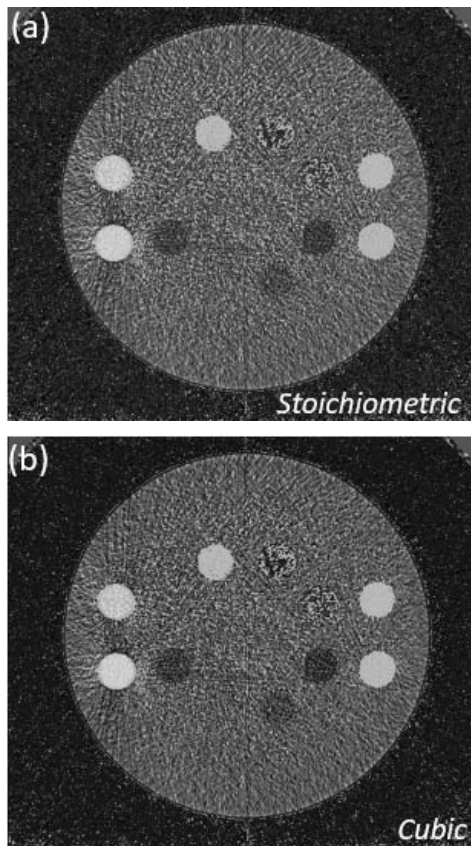


Fig. 3. EAN images extracted from (a) Stoichiometric and (b) Cubic polynomials calibration, respectively.

Fig. 3 (a)와 (b)는 각각 Stoichiometric과 3차 다항식 기반으로 추출된 EAN 영상이다. Stoichiometric 기반 CT Solid Water와 LV1 Liver의 EAN은 각각 7.58과 7.53으로 측정되었다. 3차 다항식 기반 두 물질의 EAN은 각각 7.52와 7.57로 측정되었다. 두 물질은 팬텀의 백그라운드 물질과 유사한 EAN으로 인해 Fig.에서 잘 구별되지 않았다.

2. Relative Electron Density

Fig. 4는 RED의 이론값과 실험값을 비교한 그래프이다.

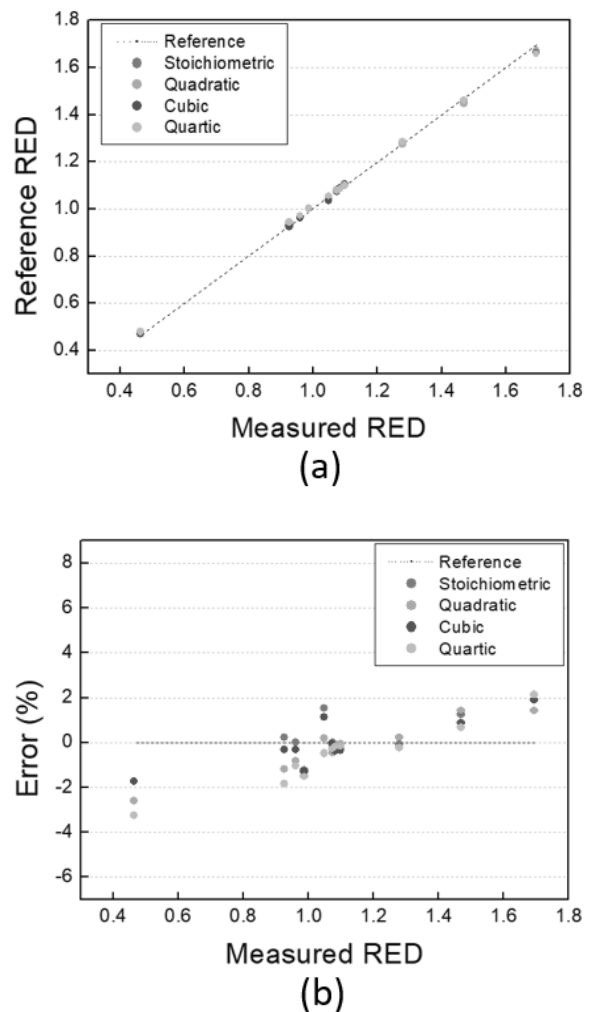


Fig. 4. (a) Relationship between the reference RED and measured RED, (b) Error(%) of RED generated from EAN extracted with Stoichiometric, Quadratic, Cubic, and Quartic polynomials, respectively.

Fig. 4-(a)의 가로축은 Stoichiometric, 2차, 3차, 4차 다항식을 이용하여 획득한 EAN을 이용하여 획득된 RED의 측정값이며, 세로축은 이론값이다. 점선(검은색)에 일치할수록 RED의 이론값과 실험값이 일치하는 것을 의미한다. 11개의 인체 등가 물질에 대하여 모든 calibration 방법들이 이론값에 가까운 것을 보여주고 있다. 각 물질에 대한 RED의 오차는 Fig. 4 (b)에 나타내었다. 모든 물질에 대한 평균 오차는 Stoichiometric, 2차, 3차, 4차 다항식에서 각각 0.11%, -0.32%, -0.07%, -0.56%를 나타내었다. 3차 다항식에서 평균 오차가 가장 적게 나타났으며, 오차가 가장 큰 물질은 SB3 Cortical Bone으로 1.89%로 나타났다. 오차가 가장 작은 물질은 LV1 Liver로 -0.09%의 오차를 보였다. Stoichiometric 기반으로 획득된 RED에서 가장 높은 오차는 SB3 Cortical Bone으로 1.89%로 나타났다. 오차가 가장 작은 물질은 LV1 Liver로 오차는 0.00%였다.

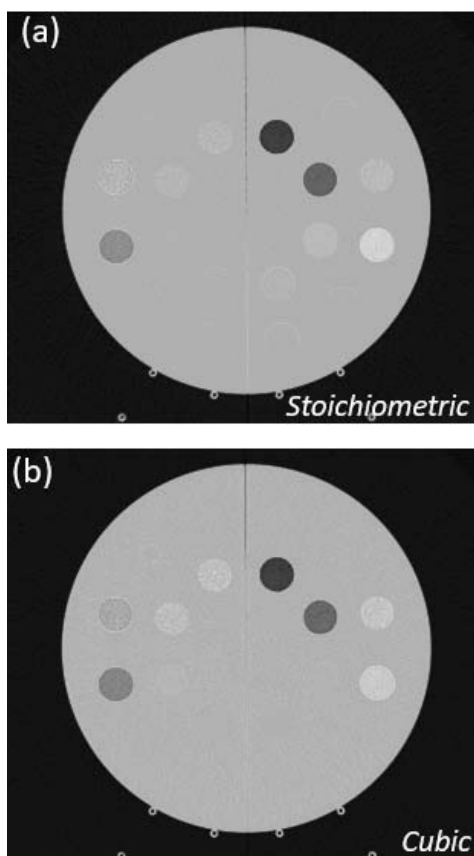


Fig. 5. RED images generated from EAN extracted with (a) Stoichiometric and (b) Cubic polynomials calibration, respectively.

Fig. 5 - (a)와 (b)는 각각 Stoichiometric과 3차 다항식 기반으로 추출된 EAN으로 생성된 RED이다. Stoichiometric 기반 CT Solid Water의 RED는 0.999로 측정되었다. 3차 다항식 기반 CT Solid Water의 RED는 와 1.000으로 측정되었다. 두 물질은 팬텀의 백그라운드 물질과 유사한 RED로 인해 그림에서 잘 구별되지 않았다.

IV. DISCUSSION

본 연구는 이중 에너지 CT를 이용한 EAN 및 RED 추출 시 다항식 기반 calibration 방법을 이용한 정확도 개선 효과를 확인하는 것이다. 또한, 그 결과를 Stoichiometric 기반으로 획득한 EAN과 RED 결과와 비교하였다. 인체 등가 물질의 EAN에 대한 기존 연구에서 EAN의 범위는 약 6에서 15였다. 본 연구에서 EAN의 범위는 BRN-SR2 Brain (6.09)에서 SB3 Cortical Bone (13.64)까지로 인체 내에 존재하는 물질의 범위 안에 포함된다. 연구 결과에 따르면 3차 다항식 기반으로 calibration 했을 때, 11개 물질에 대한 EAN과 RED의 정확도가 증가하였다. 또한, 3차 다항식 기반 EAN의 결과에서 BRN-SR2 Brain를 제외하고 EAN의 이론값 대비 실험값 오차는 모두 3% 미만이었다.

Goodsitt et al.의 연구에 따르면^[9], Brain 물질의 EAN의 실험값은 이론값 대비 15%의 오차를 보였다. 본 연구에서 3차 다항식 기반 EAN 중 BRN-SR2 Brain의 오차가 -6.57%로 가장 컸으며, Stoichiometric 기반 BRN-SR2 Brain의 EAN은 -8.77%의 오차를 보였다. 이 결과는 저에너지 (80 kV)에 의해 밀도가 높은 SB3 Cortical Bone에서 선속경화 및 노이즈가 BRN-SR2 Brain 부분에 영향을 준 것으로 사료된다.

RED 결과에서, 3차 다항식 기반 calibration에 의한 11개 물질의 RED는 이론값 대비 평균 -0.07%의 오차를 보였고, Stoichiometric 기반 방식은 0.11%였다. RED 개선 측면에서도 3차 다항식 기반 방식이 기존 Stoichiometric에 비해 평균 오차가 약간 적은 것을 확인하였고, 두 방식은 11개의 물질에 대해 RED 오차가 모두 2% 미만의 결과를 보였다. RED 오차가 가장 높은 인체 등가 물질은 3차 다항식과

Stoichiometric 방식에서 SB3 Cortical Bone에 대해 모두 1.89%의 오차를 보였다.

EAN과 RED 정확도 향상에 대한 Son et al.의 연구에 따르면, 광자계수기반 CT를 이용한 Stoichiometric 기반 EAN과 RED의 정확도는 모두 4% 미만 범위에 있었다^[6]. 이는 광자계수기반 CT가 다색 방사선 스펙트럼의 정보를 단색 방사선에 가깝게 만들기 때문에 물질의 감약 계수 정보가 에너지 적분형 검출기 보다 정확한 정보를 주기 때문이다. 하지만, 기존 에너지 적분형 검출기 기반 EAN과 RED 추출 연구에서 보고된 내용에 따르면, EAN과 RED는 물질에 따라 최대 15%, 6.7%의 오차를 보였다^[3]. 본 연구는 에너지 적분형 검출기 기반 CT를 이용하였고, BRN-SR2 Brain의 EAN을 제외하고 기존 연구 결과보다 우수한 정확도를 보였다.

본 연구에서, EAN에 대한 저에너지와 고에너지의 비율의 calibration을 다항식의 차수에 의존한 회귀를 사용하였고, 그 결과 3차 다항식의 정확도가 가장 높았다. 3차와 4차 다항식의 R^2 는 각각 0.9994, 0.9995로 4차 다항식이 높았다. 하지만 RMSE는 3차와 4차 다항식에서 각각 0.0028, 0.0029이다. 이 결과는 4차 다항식이 3차 다항식에 비해 과적합 문제가 있는 것으로 생각할 수 있다.

본 연구는 이중 에너지 CT 기반 EAN 추출 시 calibration의 정확도 향상을 위한 3차 다항식 방법을 제시하였다. 오차가 높은 특정 물질의 오차를 줄이는데 다양한 보간법이 사용될 수 있고, 향후 연구에서는 다양한 인체 등가 물질의 정확도를 향상시킬 수 있는 보간법 개발이 필요할 것이며, 이를 통해 물질 분별의 정확성 향상 및 정량화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

V. CONCLUSION

3차 다항식 기반 calibration은 EAN과 RED의 정확성 향상에 기여하며, 이를 통해 CT 검사에서 병변의 정확한 진단 또는 인체의 다양한 물질의 정량화에 기여할 것으로 사료된다.

Reference

- [1] M. W. Goo, J. M. Goo, "Dual-Energy CT: New Horizon in Medical Imaging", *Korean Journal of Radiology*, Vol. 18, No. 4, pp. 555-569, 2017. <https://doi.org/10.3348/kjr.2017.18.4.555>
- [2] S. Leng, L. Yu, J. G. Fletcher, C. H. McCollough, "Maximizing Iodine Contrast-to-Noise Ratios in Abdominal CT Imaging through Use of Energy Domain Noise Reduction and Virtual Monoenergetic Dual-Energy CT", *Radiology*, Vol. 276, No. 2, pp. 562-570, 2015. <http://dx.doi.org/10.1148/radiol.2015140857>
- [3] L. I. Garcia, J. F. Azorin, J. F. Almansa, "A new method to measure electron density and effective atomic number using dual-energy CT images", *Physics in Medicine & Biology*, Vol. 61, No. 1, pp. 265-279, 2016. <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/61/1/265>
- [4] M. Bazalova, J. F. Carrier, L. Beaulieu, F. Verhaegen, "Dual-energy CT-based material extraction for tissue segmentation in Monte Carlo dose calculations", *Physics in Medicine & Biology*, Vol. 53, No. 9, pp. 2439-2456, 2008. <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/53/9/015>
- [5] J. Zhu and S. N. Penfold, "Dosimetric comparison of stopping power calibration with dual-energy CT and single-energy CT in proton therapy treatment planning", *Medical Physics*, Vol. 43, No. 6, pp. 2845-2854, 2016. <http://dx.doi.org/10.1118/1.4948683>
- [6] K. Son, D. Kim, S. Lee, "Improving the Accuracy of the Effective Atomic Number (EAN) and Relative Electron Density (RED) with Stoichiometric Calibration on PCD-CT Images", *Sensors (Basel)*, Vol. 22, No. 23, 2022. <http://dx.doi.org/10.3390/s22239220>
- [7] G. Landry, J. Seco, M. Gaudreault, F. Verhaegen, "Deriving effective atomic numbers from DECT based on a parameterization of the ratio of high and low linear attenuation coefficients", *Physics in Medicine & Biology*, Vol. 58, No. 19, pp. 6851-6866, 2013. <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/58/19/6851>
- [8] R. Caivano, A. Fiorentino, P. Pedicini, G. Califano, V. Fusco, "The impact of computed tomography slice

thickness on the assessment of stereotactic, 3D conformal and intensity-modulated radiotherapy of brain tumors", *Clinical and Translational Oncology*, Vol. 16, No. 5, pp. 503-508, 2014.

<http://dx.doi.org/10.1007/s12094-013-1111-4>

- [9] M. M. Goodsitt, E. G. Christodoulou, S. C. Larson, "Accuracies of the synthesized monochromatic CT numbers and effective atomic numbers obtained with a rapid kVp switching dual energy CT scanner", *Medical Physics*, Vol. 38, No. 4, pp. 2222-2232, 2011. <http://dx.doi.org/10.1118/1.3567509>