

# A Simulation Study on Image Quality of Virtual Monochromatic Image using Dual-energy Method

Ki-Hong Son<sup>1</sup>, Soo-Yeul Lee<sup>1</sup>, Dae-Hong Kim<sup>2,\*</sup>, Myung-Ae Chung<sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup>Electronics and Telecommunications Research Institute

<sup>2</sup>Department of Radiological Science, Eulji University

<sup>3</sup>Department of Bigdata Medical Convergence Science, Eulji University

Received: October 11, 2022. Revised: October 24, 2022. Accepted: October 31, 2022.

## ABSTRACT

The purpose of this work was a simulation study to evaluate the virtual monochromatic (VM) image quality of blood vessels compared to the monochromatic image. Dual-energy images were obtained based on the linear attenuation coefficients of five materials at 50 keV and 80 keV at low- and high-energies, respectively. A weighting factor is required to synthesize the VM image, and the liver and bone were used as basis materials to obtain the weighting factor. VM images were synthesized at energies ranging from 30 keV to 100 keV. Image quality was evaluated by Contrast to noise ratio (CNR) and noise by setting calcium and contrast medium as signals and blood as background. According to the results, the energies with the maximum CNR were 50 keV and 60 keV for calcium and contrast medium, respectively. The energies showing the minimum noise were 70 keV, 70 keV, and 60 keV in calcium, iodine contrast medium, and blood, respectively. The VM image can contribute to the improvement of diagnostic performance in CT examination because it can implement an image at the optimal energy that minimize noise and maximize CNR.

Keywords: Dual-energy, Virtual monochromatic image, Simulation, Vessel

## I. INTRODUCTION

이중에너지 전산화단층영상장치 (Dual-energy Computed tomography, DECT)는 물질 특성 분석, 물질 분리, 영상 증강 등의 장점으로 인해 널리 이용되고 있다. 또한, DECT는 다색성 영상과 마찬가지로 일상적인 진단 영상으로 사용할 수 있도록 가상 단색성 (Virtual monochromatic, VM) 영상을 만들어 낼 수 있다<sup>[1,2]</sup>.

VM 영상을 생성하는 방법은 두 가지가 존재한다. 첫째, 이중에너지 투영상(projection image)을 획득하여 VM 영상을 합성하는 것이다. 이 방식은 선속 경화를 제거할 수 있는 장점이 있다<sup>[3]</sup>. 둘째, 재구성된 이중에너지 영상은 가중계수를 통해 선형

으로 합성하는 것이다<sup>[4]</sup>.

기존 연구는 다양한 VM 영상화 연구를 포함하고 있다. Ommen et al.의 연구는 비조영 두부 CT에서 재구성된 VM 영상의 화질을 평가하였다. 이 연구는 VM 영상의 최적 화질이 기존 CT에 비해 뇌 실질 영상 품질을 향상시킬 수 있었다<sup>[5]</sup>. 또한, Do et al.의 연구는 금속 인공물 감소에서 VM 영상의 최적 에너지에 대한 결과를 발표하였다. 이 결과에서 VM 영상은 CT 유도 생검 중 금속 인공물의 감소를 뚜렷하게 구현하였다<sup>[6]</sup>. Kang et al.은 환자 두께에 따른 VM 영상 화질 변화에 대해 연구하였다. 그 결과 VM 영상은 다색 영상보다 비만인 경우에도 향상된 영상 화질을 보여주었다<sup>[7]</sup>. Yu et al.의 연구는 동일한 선량에서 VM 영상과 다색성 영상

\* Corresponding Author 1: Dae-Hong Kim E-mail: goldcollar011@gmail.com Tel: +82-31-740-7494 Address: Eulji University, 553, Sanseong-daero, Sujeong-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea  
\* Corresponding Author 2: Myung-Ae Chung E-mail: machung@eulji.ac.kr Tel: +82-31-740-7223 Address: Eulji University, 553, Sanseong-daero, Sujeong-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea

의 화질 비교를 포함하였다. 연구 결과에 따르면, 최적의 VM 영상은 동일한 선량을 갖는 120 kV 영상보다 잡음(noise)이 우수하고 조영제의 대조도 대 잡음비 (Contrast to noise ratio, CNR)가 더 우수한 결과를 보였다<sup>[8]</sup>.

VM 영상에 대한 다양한 연구들이 진행되고 있으며, 최근에는 심장혈관처럼 혈관에 발생하는 석회화 검출에 관한 연구가 진행되고 있다<sup>[9]</sup>. 특히, 관상동맥 CT 혈관조영술을 통해 석회로 인해 혈관이 막힌 부위를 확인하고 향후 치료 방법을 결정할 수 있다. 하지만 혈관에 석회와 조영제가 섞여 있는 경우 정확한 검사결과를 얻지 못할 수 있다. 이를 해결하기 위해 본 연구는 혈액 안에 존재하는 석회와 조영제를 모사하고 이를 VM 영상화에 적용하는 것이다.

따라서, 본 연구의 목적은 혈관의 VM 영상 화질을 단색성 영상과 비교하여 평가한 시뮬레이션 연구이다.

## II. MATERIAL AND METHODS

### 1. 영상기반 가상단색성 영상화

영상기반 VM 영상은 저에너지와 고에너지에서 획득된 영상을 합성하여 얻을 수 있다. 재구성된 CT 영상의 값이 Hounsfield unit (HU)일 때, 에너지 E에서 VM 영상은 아래 Eq. (1)처럼 저에너지 및 고에너지 영상의 가중 평균으로 나타낼 수 있다<sup>[8]</sup>.

$$CT(E) = w(E) \cdot CT_L + [1 - w(E)] \cdot CT_H \quad (1)$$

여기서  $HU_L$ 과  $HU_H$ 는 각각 저에너지와 고에너지 영상의 HU값이다.  $w(E)$ 는 VM 영상을 만들기 위한 가중 계수로 아래 Eq. (2)와 같다.

$$w(E) = \frac{\mu_1(E) \cdot \mu_{2,H} - \mu_2(E) \cdot \mu_{1,H}}{\mu_{1,L} \cdot \mu_{2,H} - \mu_{1,H} \cdot \mu_{2,L}} \cdot \frac{\mu_{2,L}}{\mu_2(E)} \quad (2)$$

여기서  $\mu_1(E)$ ,  $\mu_2(E)$ 는 기저 물질인 간과 뼈의 특정 에너지에서의 선형감약계수이다.  $\mu_{1,L}$ ,  $\mu_{2,L}$ ,

는 저에너지에서 간과 뼈의 선형감약계수이고,  $\mu_{1,H}$ ,  $\mu_{2,H}$ 는 고에너지에서 간과 뼈의 선형감약계수이다. 본 연구에서 저에너지와 고에너지는 각각 50 keV, 80 keV이다. Table 1의 기저 물질인 간과 뼈의 30 keV부터 100 keV까지의 선형감약계수를 나타낸 표이다. 선형감약계수는 NIST 자료를 이용하였다<sup>[10]</sup>. Table 1의 선형감약계수를 이용하여 Eq. (2)의 가중계수를 획득하였다.

Table 1. Linear attenuation coefficients (LAC) for basis material liver and bone in the energies range of 30 to 100 keV

Energy (keV)	Basis materials	
	Liver (LAC) [ $\text{cm}^{-1}$ ]	Bone (LAC) [ $\text{cm}^{-1}$ ]
30	0.4081	2.5570
40	0.2886	1.2843
50	0.2404	0.8051
60	0.2178	0.6040
70	0.2047	0.5024
80	0.1951	0.4383
90	0.1869	0.3901
100	0.1795	0.3499

### 2. 영상 평가

Fig. 1은 인체를 묘사한 팬텀의 모습이다. 영상 평가는 CNR과 noise를 평가하였다. 그림 1에서 화살표가 가리키는 ①과 ②는 기저 물질인 간과 뼈를 각각 나타낸다. ③과 ④는 각각 칼슘과 조영제를 나타낸다. ⑤는 혈액을 나타낸다. 팬텀 물질의 정보는 Table 2에 기술하였다. Table 2의 HU 값은 NIST의 선형감약계수를 근거로 계산되었다. 또한, 영상에 분산 0.001의 랜덤 noise를 추가하였다.

CNR은 아래 Eq. (3)을 이용하여 구할 수 있다.

$$CNR = \frac{|S_s - S_b|}{\sqrt{SD_s^2 + SD_b^2}} \quad (3)$$

여기서  $S_s$ 와  $S_b$ 는 신호의 관심 영역의 평균값과 백그라운드의 관심 영역의 평균값이다.  $SD_s$ 와  $SD_b$ 는 신호의 관심 영역의 표준편차와 백그라운드의 관심 영역의 표준편차이다. 본 연구에서 CNR을 획득하기 위해 Fig. 1의 ③ 칼슘과 ④ 조영제를 신호

로 설정하였고, ⑤ 혈액을 백그라운드 물질로 설정하였다.

30 keV에서 100 keV까지의 noise도 측정되었다. noise는 백그라운드 물질인 Fig. 1의 ⑤ 혈액의 관심 영역의 표준편차로 설정하였다.

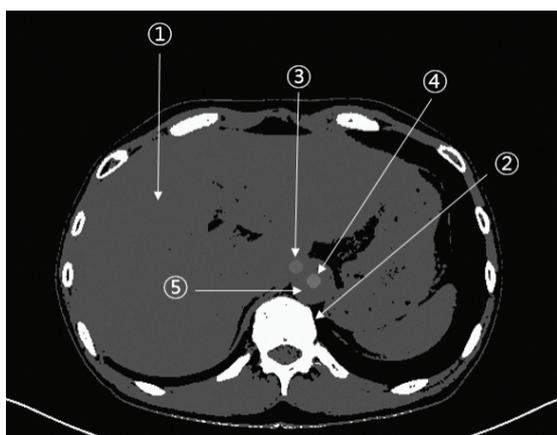


Fig. 1. Phantom images with liver bone, calcium, contrast medium, and blood information.

Table 2. HU values for low- and high-energies of phantom materials

No.	Material	HU values	
		50 keV (Low)	80 keV (High)
1	Liver	59.41	61.89
2	Bone	2589.51	1329.72
3	Calcium 100 mg/mL	348.61	99.62
4	Iodine 10 mg/mL	533.27	180.73
5	Blood	64.21	54.22

### III. RESULT

Fig. 2는 Eq. (1)과 (2)를 이용하여 획득한 VM 영상이다. VM 영상은 30 keV부터 100 keV까지 획득되었고, 칼슘, 조영제, 혈액 부분을 확대하여 나타내었다. Fig. 2 영상들의 window level과 window width는 각각 200과 2,000으로 설정하였다. 에너지 변화에 따른 칼슘, 조영제, 혈액의 영상 대조도 및 noise의 변화를 분석하였다.

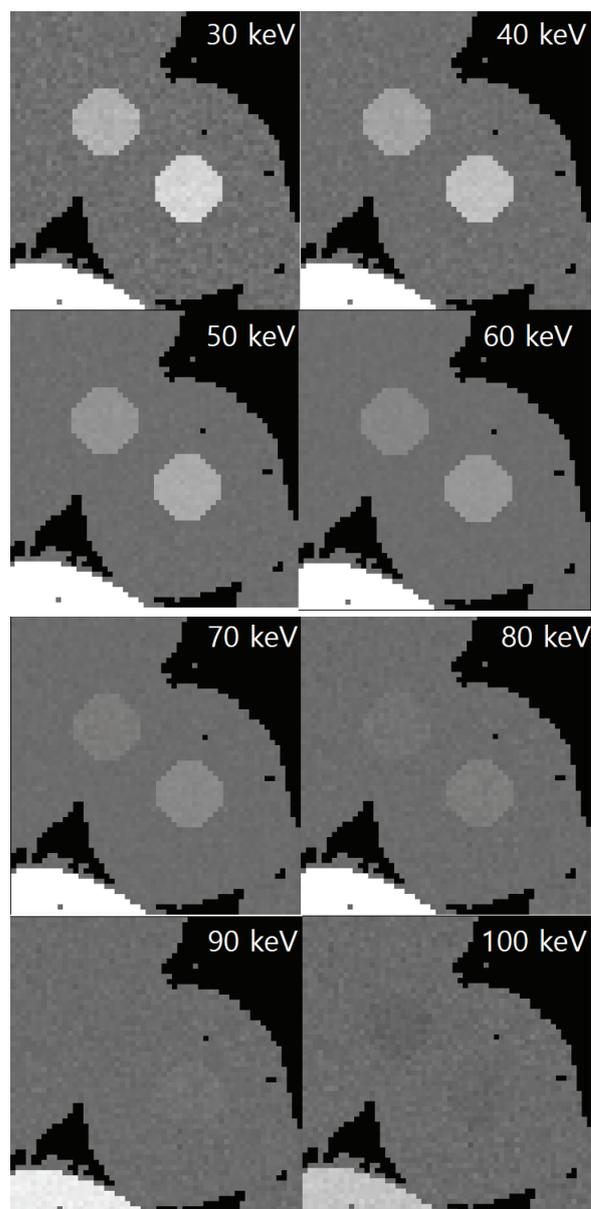


Fig. 2. Example of VM image from 30 keV to 100 keV generated by dual-energy.

Fig. 3은 Fig. 2의 각 에너지별 영상에서 획득된 CNR과 noise 값이다. Fig. 3-(a)는 칼슘과 요오드를 신호로 설정하고 백그라운드 물질을 혈액으로 설정했을 때의 CNR을 보여주고 있다. 칼슘의 CNR이 가장 높을 때 에너지는 50 keV이고 이때 CNR은 5.11이었다. 요오드 조영제에서 CNR이 가장 높을 때 에너지는 60 keV였고 CNR은 7.60이었다. 칼슘과 조영제의 CNR 값은 최대 CNR 값을 지나면서 감소하는 경향을 보였다.

Fig. 3-(b)은 칼슘, 요오드, 혈액의 noise 값을 보여주고 있다. 에너지에 따른 세 물질의 noise 변화는 비슷한 경향을 보인다. 에너지가 증가함에 따라 noise는 감소하다가 최저점을 지나 증가하는 형태를 보여주고 있다. 칼슘과 요오드의 noise는 70 keV에서 가장 낮은 값을 보이며 noise 값은 칼슘과 요오드 각각 26.69, 30.55를 보였다. 백그라운드인 혈액의 noise는 60 keV에서 가장 낮았으며 noise 값은 26.35였다.

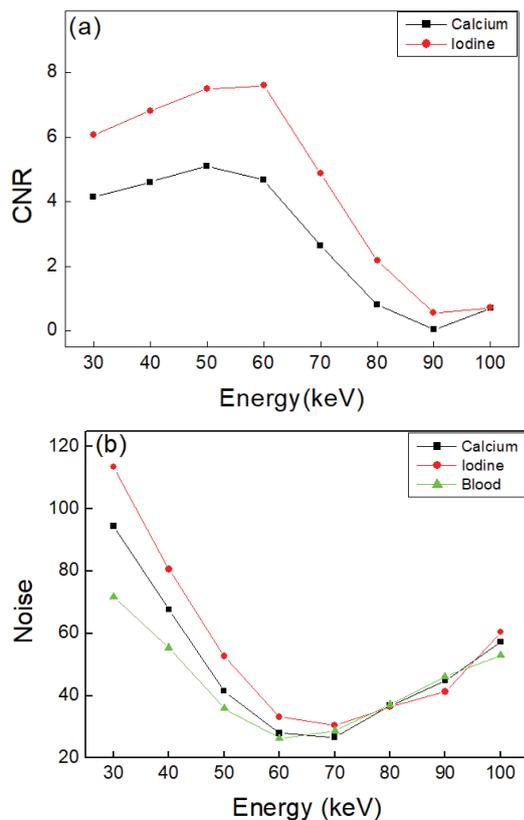


Fig. 3. (a) CNR and (b) noise in the 30 keV to 100 keV energy range.

#### IV. DISCUSSION

본 연구는 혈관에 존재하는 석회 병변과 조영제를 VM 영상을 이용하여 대조도 증강 및 noise 감소를 확인하는 것이었다. 혈관에 발생하는 석회는 조영제를 혈관에 주입했을 때 석회와 조영제가 잘 구별되지 않는 경우가 발생할 수 있다. 석회와 조영제를 영상 증강을 통해 구별한다면 석회에 대한 오진을 최소화할 수 있다.

VM 영상은 저에너지와 고에너지로 촬영된 두 영상을 합성하여 병변의 대조도는 증가시키면서 noise를 감소시키는 최적화 방법을 이용하여 영상 신호의 증강을 구현할 수 있는 기술이다. 연구 결과에 따르면, CNR을 최대로 증가시키는 VM 영상의 에너지는 칼슘은 50 keV, 요오드 조영제는 60 keV였다. noise가 최소가 되는 VM 영상의 에너지는 칼슘, 요오드 조영제, 혈액에서 각각 70 keV, 70 keV, 60 keV였다.

VM 영상에서 에너지가 낮을 때 noise가 증가하는 이유는 저에너지 영상에 noise가 많은데 여기에 가중계수 값이 곱해져 영상에 noise가 더 많이 반영되기 때문이다. 최적의 에너지에서는 가중계수 값이 낮아지므로 noise가 감소한다. 에너지가 증가하면 고에너지 영상에 곱해지는 가중계수 값이 높아 noise가 증가하였다. CNR도 noise가 반영되어 에너지에 따라 값이 변화하였다. 다만 90 keV에서 다시 증가하는 경향이 있는데 이는 고에너지인 80 keV 영상의 noise 레벨이 실제 장치에서 발생하는 noise의 경향을 정확히 반영하지 못한 것에 기인한 것으로 사료된다.

VM 영상의 에너지 범위는 30 keV에서 100 keV였다. 이 에너지 범위 내에서 에너지가 증가할 때 CNR이 증가하다가 최대지점을 지나 감소하는 형태를 보였다. 한편, noise는 에너지가 증가할 때 감소하다가 최저지점을 지나 증가하는 형태를 보였다. 이중에너지 영상에 사용된 저에너지와 고에너지는 각각 50 keV, 80 keV였다. Fig. 3(b)에 에너지에 따른 noise는 저에너지와 고에너지 두 영상을 합성했을 때 noise가 최소가 되는 범위가 있음을 보여주고 있다. 따라서, 단색 에너지 영상인 50 keV 또는 80 keV 영상을 대조군으로 가정했을 때, CNR과 noise가 최적화된 VM 영상의 화질이 더욱 우수하였다. 다만, 칼슘의 CNR은 50 keV의 영상이 VM 영상보다 우수한 결과를 보였다.

칼슘과 조영제의 영상 화질을 확인하기 위해 100 mg/mL 10 mg/mL의 밀도를 가지는 칼슘과 요오드를 사용하였다. 하지만, 인체는 다양한 농도의 칼슘과 조영제가 존재할 수 있다. 향후 연구는 다양한 농도의 칼슘과 조영제를 포함한 인체 등가 물질들

의 VM 영상 화질에 관한 연구를 수행할 예정이다. 또한, 기존 연구에서 수행된 VM 영상들이 에너지 축적방식의 검출기를 사용했다면<sup>[11]</sup>, 차후 연구는 광자계수방식의 검출기를 사용하여 VM 영상의 최적화에 대한 연구가 필요할 것이다.

## V. CONCLUSION

이중에너지 방식으로부터 합성된 VM 영상의 화질을 평가하였다. VM 영상은 noise를 최소화하고 CNR을 최대화하는 최적의 에너지에서의 영상을 구현할 수 있기 때문에 CT 검사에서 진단능 향상에 기여할 수 있다.

본 연구를 바탕으로 향후 연구는 다양한 물질과 광자계수검출기를 이용한 연구를 수행할 것이다.

## Acknowledgement

본 연구는 한국전자통신연구원의 지원을 받아 수행되었음. (22YR1900, 노인성 질환 고정밀 진단을 위한 디지털 바이옴시 핵심기술 개발)

## Reference

[1] S. R. Pomerantz, S. Kamalian, D. Zhang, R. Gupta, O. Rapalino, D. V. Sahani, M. H. Lev, "Virtual Monochromatic Reconstruction of Dual-Energy Unenhanced Head CT at 65–75 keV Maximizes Image Quality Compared with Conventional Polychromatic CT", *Radiology*, Vol. 266, No. 1, pp. 318-325, 2013. <https://doi.org/10.1148/radiol.12111604>

[2] P. H. Jeon, H. Chung, D. Kim, "Investigation of the Effect of kV Combinations on Image Quality for Virtual Monochromatic Imaging Using Dual-Energy CT: A Phantom Study", *Journal of Radiation Protection and Research*, Vol. 43, No. 1, pp. 1-9, 2018. <https://doi.org/10.1148/rg.304095175>

[3] L. A. Lehmann, R. E. Alvarez, A. Macovski, W. R. Brody, N. J. Pelc, S. J. Riederer, A. L. Hall, "Generalized image combinations in dual KVP digital radiography", *Medical Physics*, Vol. 8, No. 5, pp. 659-667, 1981. <http://dx.doi.org/10.1118/1.595025>

[4] L. Yu, A. N. Primak, X. Liu, C. H. McCollough, "Image quality optimization and evaluation of linearly

mixed images in dual-source, dual-energy CT", *Medical Physics*, Vol. 36, No. 3 pp. 1019-1024, 2009. <http://dx.doi.org/10.1118/1.3077921>

[5] F. Ommen, F. Kauw, E. Bennink, J. J. Heit, D. N. Wolman, J. W. Dankbaar, H. W.A.M. de Jong, M. Wintermark, "Image Quality of Virtual Monochromatic Reconstructions of Noncontrast CT on a Dual-Source CT Scanner in Adult Patients", *Academic Radiology*, Vol. 28, No. 10, pp. e323-e330, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2020.05.038>

[6] T. D. Do, J. Heim, C. Melzig, D. F. Vollherbst, H. U. Kauczor, S. Skornitzke, C. M. SommerZhu, "Virtual monochromatic spectral imaging versus linearly blended dual-energy and single-energy imaging during CT-guided biopsy needle positioning: Optimization of keV settings and impact on image quality", *Plos One*, Vol. 15, No. 2, pp. e0228578, 2020. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0228578>

[7] Y. J. Kang, J. M. Lee, S. M. Lee, H. K. Yang, R. H. Kim, J. G. Nam, A. Karnawat, J. K. Han, "Value of virtual monochromatic spectral image of dual-layer spectral detector CT with noise reduction algorithm for image quality improvement in obese simulated body phantom", *BMC Medical Imaging*, Vol. 19, No. 1, pp. 76, 2019. <https://doi.org/10.1186/s12880-019-0367-8>

[8] L. Yu, J. A. Christner, S. Leng, J. Wang, J. G. Fletcher, C. H. McCollough, "Virtual monochromatic imaging in dual-source dual-energy CT: radiation dose and image quality", *Medical Physics*, Vol. 38, No. 12, pp. 6371-6379, 2011. <http://dx.doi.org/10.1118/1.3658568>

[9] I. Vlahos, R. Chung, A. Nair, R. H. Morgan, "Dual-Energy CT: Vascular Applications", *American Journal of Roentgenology*, Vol. 199, No. 5, pp. S87-S97, 2012. <http://dx.doi.org/10.2214/AJR.12.9114>

[10] NIST Physical Reference Data, [online] Available: <https://www.nist.gov/pml/x-ray-and-gamma-ray-data>

[11] L. Yu, S. Leng, C. H. McCollough, "Dual-energy CT-based monochromatic imaging", *American Journal of Roentgenology*, Vol. 199, No. 5, pp. S9-S15, 2012. <https://doi.org/10.2214/ajr.12.9121>

# 이중에너지 방법을 이용한 가상 단색 영상의 화질 시뮬레이션 연구

손기홍<sup>1</sup>, 이수열<sup>1</sup>, 김대홍<sup>2,\*</sup>, 정명애<sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup>한국전자통신연구원

<sup>2</sup>을지대학교 방사선학과

<sup>3</sup>을지대학교 빅데이터융합학과

## 요약

본 연구의 목적은 혈관의 가상단색성 영상 화질을 단색성 영상과 비교하여 평가한 시뮬레이션 연구이다. 이중에너지 영상은 저에너지와 고에너지 각각 50 keV, 80 keV에서 다섯 가지 물질의 선형감약계수를 바탕으로 획득되었다. 가상단색성 영상을 합성하기 위해 가중계수가 필요하며, 가중계수를 획득하기 위해 간과 뼈를 기저 물질로 사용하였다. 가상단색성 영상은 30 keV에서 100 keV 범위의 에너지에서 합성되었다. 영상 평가는 칼슘과 조영제를 신호로, 혈액을 백그라운드로 설정하여 CNR과 noise로 평가되었다. 연구결과에 따르면, 최대 CNR을 가지는 에너지는 칼슘과 조영제에서 각각 50 keV, 60 keV였다. 최소 noise를 보이는 에너지는 칼슘, 요오드 조영제, 혈액에서 각각 70 keV, 70 keV, 60 keV였다. VM 영상은 noise를 최소화하고 CNR을 최대화하는 최적의 에너지에서의 영상을 구현할 수 있으므로 CT 검사에서 진단능 향상에 기여할 수 있다.

중심단어: 이중에너지, 가상단색성 영상, 시뮬레이션, 혈관

## 연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	손기홍	한국전자통신연구원	선임연구원
(공동저자)	이수열	한국전자통신연구원	책임연구원
(교신저자)	김대홍	을지대학교 방사선학과	교수
	정명애	을지대학교 빅데이터융합학과	교수