

논문 2017-54-5-16

GATE 시뮬레이션 프로그램을 이용한 I-131의 영상 특성의 타당성에 관한 연구

(Validation Study for Image Performance of I-131 Using GATE Simulation Program)

백 철 하*, 김 대 호**, 이 용 구***, 이 영 진****

(Cheol-Ha Baek, Dae Ho Kim, Yong-Gu Lee, and Youngjin Lee[©])

요 약

본 연구의 목적은 GATE (Geant4 Application for Tomographic Emission) Simulation을 사용하여 치료용 방사성동위원소인 I-131의 감마카메라/SPECT 영상을 획득하여, 실제 기기의 실험결과와 그 특성을 비교 및 분석 하여 GATE simulation의 정확성을 획득하는 것이다. 더 나아가 GATE simulation을 이용한 치료용 방사성동위원소를 위한 감마카메라/SPECT 영상 정량화 기반기술 연구가 가능함을 입증하고자 한다. 본 연구에서 Simulation상에서 구성한 SPECT System은 Stream-R Forte version 1.2 (Philips Medical System, Best and Heerlen, Netherlands)의 설계변수를 참고로 하였다. 감마카메라/SPECT 시스템에서의 I-131 영상특성을 이해하기 위하여 실제 Forte 시스템을 이용하여 산란물질을 사용하였을 때와 사용하지 않았을 때 에너지 스펙트럼 및 선 선원에 대한 선 응답함수 (Line Spread Function, LSF)와 반치폭 (Full Width at Half Maximum, FWHM)을 측정하였다. 또한 실제 실험과의 비교를 위하여 GATE simulation에서 구성한 시스템에서도 동일한 실험 조건 및 변수에 대하여 에너지 스펙트럼 및 선 선원에 대한 LSF 및 FWHM을 측정하였다. 그 결과 산란물질을 사용하지 않았을 때의 에너지 스펙트럼의 경우 실제 실험과 Simulation 모두 364 keV의 위치에서 에너지 피크를 나타내어 동일한 경향의 결과를 보였다. FWHM은 실제 실험과 Simulation 모두에서 선원과 검출기간의 거리가 증가함에 따라 그 크기가 증가하는 경향을 보였으며 오차율은 3.8%로 나타났다. 산란물질을 사용하였을 때의 에너지 스펙트럼 역시 실제 실험과 Simulation 경우 모두에서 비슷한 경향을 나타내었다. 결론적으로, GATE simulation은 치료용 방사성 동위원소에 대해서도 실제 기기의 특성 및 방사성 동위원소의 특성을 모두 반영하고 있으며 이를 이용하여 감마카메라/SPECT에서의 치료용 방사성 동위원소의 정량화에 대한 다양한 연구가 가능 할 것이라고 사료된다.

Abstract

The purpose of this study was to validate for GATE (Geant4 Application for Tomographic Emission) simulation by comparing the results of GATE simulation and experiment in real SPECT system. Furthermore, we want to prove that it is possible that the quantitative research of gamma camera/SPECT imaging for therapeutic radio isotope by using GATE simulation. In this study, the SPECT system on simulation referred to the parameters of Stream-R Forte version 1.2 (Philips Medical System, Best and Heerlen, Netherlands). To understand the I-131 image of gamma camera/SPECT system, we acquired the energy spectrum and measured the full width at half maximum (FWHM) which comes from line spread function (LSF) with and without scatter material in real SPECT system. And to compare with experiment, we also measured the FWHM and acquired the energy spectrum without scatter material in GATE simulation. As a result, without scatter material, the energy peak was almost same location, which are located nearby 364 keV, and other spectrum factors are same tendency in both cases. The FWHM was increased by increasing the distance of source to detector, and the error rate was approximately 3.8%. When we used the line source with scatter material, energy spectrum also indicated similar tendency in both cases. As you confirmed earlier, GATE simulation included real instrument and radioisotope characters for therapeutic radioisotope. Therefore this result that it was possible that various quantitative study for therapeutic radioisotope imaging in gamma camera/SPECT using GATE simulation.

Keywords : Validation study, GATE simulation, Energy spectrum, I-131

* 정회원, 동서대학교 방사선학과 (Dept. of Radiological Science, Dongseo University)

** 학생회원, 한양대학교병원 방사선과 (Dept. of Radiology, Hanyang University Seoul Hospital)

*** 정회원, 한림성심대학교 방사선과 (Dept. of Radiological Science, Hallym Polytechnic University)

**** 정회원, 을지대학교 방사선학과 (Dept. of Radiological Science, Eulji University)

© Corresponding Author(E-mail : radiyoungj@gmail.com)

Received ; December 13, 2016 Revised ; January 23, 2017 Accepted ; April 3, 2017

I. 서론

최근 의료영상 분야는 진단 및 치료, 그리고 핵의학 분야에서 필수적인 요소로 자리 잡고 있다^[1]. 그 중 핵의학 분야의 CT라고 불리는 단일광자방출전산화단층촬영 (Single Photon Emission Computed Tomography, SPECT)은 1958년 Hal. O. Anger에 의해 섬광카메라가 탄생된 후, 1963년 D. E. Kuhl에 의해 방출 단층 촬영 장치의 개념이 소개되어 1976년 W. I. Keys에 의해 처음 개발되었다^[2-4]. SPECT는 오늘날 핵의학 분야에서 다양한 목적으로 사용되고 있으며 인체 내 기관의 기능을 검사할 수 있는 의약품에 영상을 얻을 수 있는 동위원소를 표지한 방사성의약품 을 이용한다. SPECT는 구조가 비교적 간단하고 방사성의약품의 구입이 용이한 장점이 있다. 그러나 SPECT 영상은 감쇠, 산란의 영향, 검출기의 응답곡선, 부분 용적 효과 및 격자 투과 등의 문제로 정량성이 저하되는 단점을 가지고 있어 이와 같은 이유로 보다 정확한 감마카메라/SPECT 영상을 얻기 위해서는 감쇠 보정, 산란 보정 등의 물리적 인자에 대한 정량화의 한계성을 정확히 이해하여 이에 대한 보정방법을 개발 할 필요성이 있다. 특히 핵의학 영상에서 가장 널리 쓰이고 있는 ^{99m}Tc 의 경우에 대해서는 많은 연구 결과들이 있지만, I-131에 대한 연구 결과는 많지 않아 그 필요성이 높은 실정이다.

본 연구에서는 감마카메라/SPECT 영상의 획득을 위하여 GATE simulation을 사용하였다. GATE simulation이란 Monte Carlo Method를 사용한 Simulation으로서 Monte Carlo Method란 Simulation 기술의 일종으로 구하고자 하는 수치의 확률적 분포를 실험의 통계로부터 구하는 방법이다^[5-6]. GATE simulation은 실제 기기와 같은 구조 (Geometry)를 컴퓨터상의 가상의 공간에서 설계가 가능하고 팬텀이나 선원 등의 특성 및 형태의 모사 역시 가능하다. GATE simulation은 실제 기기에서의 측정치와 같은 결과를 얻어낼 수 있으며 이와 같은 특징을 이용하여 PET이나 SPECT 등의 실제 기기를 설계하기 전에 미리 그 기기의 성능의 평가를 가능하게 한다.

I-131에 대한 GATE simulation 역시 여러 가지 물리적 요소들에 대한 정량적인 측정 및 특성 평가가 가능하다. 그러나 이러한 연구에 앞서서 I-131에 대한 Simulation의 충분한 검증이 요구될 것이라고 사료된다. 이에 본 연구에서는 GATE simulation을 사용하여 치료용 방사성동위원소인 I-131의 감마카메라/SPECT 영

상을 획득하고, 실제 기기의 실험결과와 그 특성을 비교·분석 하여 GATE simulation의 정확성을 입증하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 실제 시스템 Geometry

본 연구에서 사용된 Simulation상의 시스템 구성은 Stream-R Forte version 1.2 (Philips Medical System, Best and Heerlen, Netherlands)의 설계변수를 참고로 하였다. 다음은 Stream-R Forte version 1.2의 검출기와 조준기의 주요 설계 변수이다 (Table 1). 조준기는 고에너지 범용 (High Energy General Purpose) 조준기를 사용하였다.

표 1. Stream-R Forte version 1.2 system의 설계 변수 (검출기 및 조준기)

Table 1. Specification of Stream-R Forte version 1.2 system (Detector and Collimator).

Specifications			
Detector		Collimator	
Size (cm ²)	38 x 51	Hole (cm)	0.38
Number of head	2	Septal (cm)	0.17
Crystal thickness (inch)	3/8	Length (cm)	6

2. 표준 PMMA 몸통형 팬텀

선원의 방사능이 체외로 방출되는 과정에서 발생되는 감쇠와 산란현상에 대한 연구를 위하여 인체 등가물질을 사용한 표준 PMMA 몸통형 팬텀을 사용하였다. 실험에 사용된 팬텀은 직경 32 cm, 높이 10 cm의 5개의 구멍으로 구성된 Polymethylmethacrylate (PMMA)로 이루어진 원형 몸통형 팬텀이다 (그림 1). 팬텀의 5개의 구멍 가운데 중앙에 위치한 구멍에 선 선원을 주입하는 방법을 사용하였다.

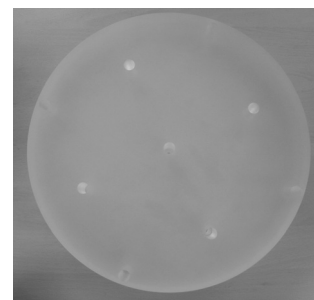


그림 1. 표준 PMMA 몸통형 팬텀 사진

Fig. 1. Photo of standard PMMB body phantom.

3. 실제 데이터 획득

실제의 기기를 이용한 실험에서 10 μ Ci의 I-131를 지름 0.2 mm, 길이 10 cm의 관에 주입하여 선 선원을 만들었다. 그 후 Stream-R Forte version 1.2 시스템을 사용하여 테이블에 선 선원을 위치시키고 선원과 검출기 사이의 거리가 23 cm일 때의 에너지 스펙트럼을 획득하였다. 그리고 실제의 기기와 동일한 설계변수로 GATE 공간에 시스템을 설계하여 Simulation 후 에너지 스펙트럼을 얻었다 (그림 2).

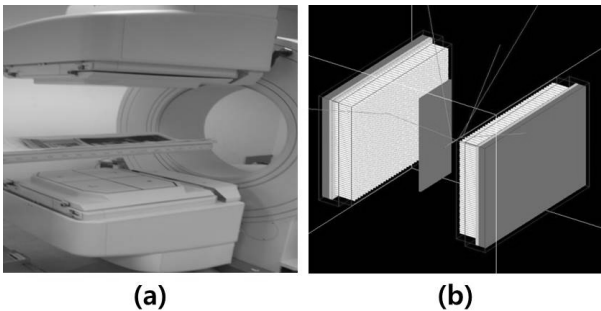


그림 2. 에너지 스펙트럼을 얻기 위한 I-131을 이용한 SPECT 시스템: (a) 실제 시스템과 (b) GATE 시뮬레이션
Fig. 2. SPECT system using I-131 for acquiring energy spectrum: (a) real system and (b) GATE simulation.

선원과 검출기간의 거리에 따른 영상의 질을 차이로 보기 위하여 실제의 기기 상에서 선원과 검출기간의 거리를 23 cm, 28 cm, 33 cm로 변경시켜 가면서 선 선원의 투영상에 대한 선 profile을 획득하였다. 또한 GATE simulation과의 비교 평가를 위하여 동일한 선원과 검출기사이의 거리에서 GATE simulation으로 투영상에 대한 선 profile을 획득하였다.

산란 매질을 사용하였을 때의 에너지 스펙트럼을 획득하기 위하여 동일한 시스템 및 선 선원을 사용하여 직경 32 cm, 높이 10 cm인 표준 PMMA 원형 몸통형 팬텀을 추가하여 실험을 진행하였다. 실제 기기를 이용한 실험에서 선원과 검출기사이의 거리를 23 cm로 설정하여 I-131의 에너지 스펙트럼을 획득한 뒤 동일한 조건으로 GATE 공간에 시스템을 구성하여 Simulation 한 뒤 에너지 스펙트럼을 획득하였다 (그림 3).

4. 데이터 분석

실제 기기에서 획득된 에너지 스펙트럼과 같은 설계 변수로 GATE 공간에 구성한 시스템에서 획득한 에너지 스펙트럼을 비교하고자 각 에너지 스펙트럼의 에너지 지별 계수율을 비교하였다. 실제 I-131이 방출하는 364

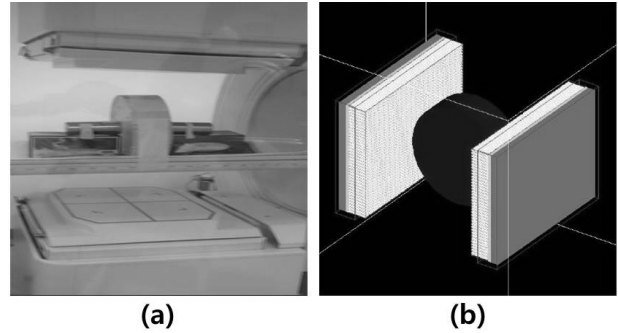


그림 3. 산란물질을 포함한 에너지 스펙트럼을 얻기 위한 I-131을 이용한 SPECT 시스템: (a) 실제 시스템과 (b) GATE 시뮬레이션
Fig. 3. SPECT system using I-131 for acquiring energy spectrum with scatter matter: (a) real system and (b) GATE simulation.

keV의 에너지 피크가 위에서 획득한 두 에너지 스펙트럼에서 모두 동일한 위치에서 나타나는지 확인하였다.

선원과 검출기간의 거리에 따른 영상의 질의 차이를 보기 위하여 실제의 기기와 GATE simulation에서 선원과 검출기간의 거리를 23 cm, 28 cm, 33 cm로 변경시켜 가면서 획득한 선 선원의 투영상에 대한 선 profile을 이용하여 각 영상에 대한 FWHM을 측정하였다.

FWHM은 핵의학 영상에서 공간분해능을 나타내기 위하여 빈번히 사용되는 지표로서 본 연구에서는 실제의 기기와 GATE simulation로부터 투영상을 획득하여 그 영상의 중심값의 데이터로 LSF를 얻은 후 FWHM을 측정하였다. 또한 실제의 기기와 GATE simulation의 시스템에 대한 FWHM값을 비교하여 일관성 있는 결과가 나오는지 확인하고 오차율을 계산하였다.

마지막으로 산란 매질인 표준 PMMA 원형 몸통형 팬텀을 사용하였을 때 획득된 에너지 스펙트럼 에너지 지별 계수율을 기준으로 비교·평가하였다.

III. 결 과

1. 에너지 스펙트럼

그림 4는 산란 매질이 없는 상태에서 획득한 I-131의 에너지 스펙트럼이다. 실제의 실험에서 획득한 결과와 GATE simulation에서 획득한 결과가 364 keV 위치의 에너지 피크를 나타내 동일한 결과를 보였다. 또한 180도 산란 후 검출기에 흡수되는 감마선에 의해 생기는 후방산란피크와 납으로 차폐한 조준기를 사용하여 감마선이 납 안에서 광전흡수를 일으키고 여기서 방출된 납의 특성 X-선 (75-90 keV)이 검출기에 흡수될 때 생기는 납 X-선 피크도 동일한 결과를 보였다.

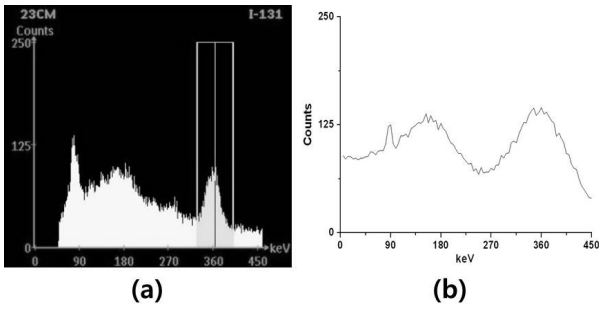


그림 4. 획득된 에너지 스펙트럼: (a) 실제 시스템과 (b) GATE 시뮬레이션

Fig. 4. Acquired energy spectrum: (a) real system and (b) GATE simulation.

2. 반치폭 (FWHM)

그림 5는 선원과 검출기간의 거리를 23 cm, 28 cm, 33 cm으로 증가시킬 때 실제 실험과 GATE simulation에서 획득한 선 선원의 profiles을 나타낸 것이다. 실제 기기와 GATE simulation에서 선원과 검출기간의 거리에 따른 FWHM과 오차율은 각각 다음과 같이 확인되었다. 실제 기기와 GATE simulation으로 측정된 FWHM 값의 오차율은 3.8%로 측정되었는데 이는 각각에 거리에 대한 오차율의 평균으로 계산하였다. 이러한 결과로 보아 Simulation에서 구성된 시스템의 영상의 특성은 실제 기기의 특성을 충분히 반영하였다고 확인할 수 있었다.

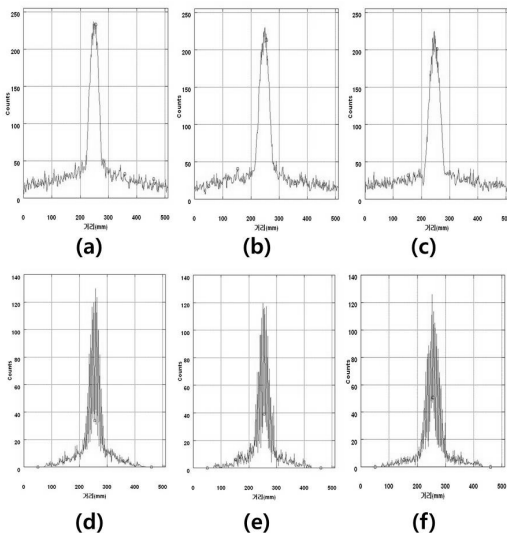


그림 5. 선원과 검출기 거리에 따른 획득한 profile: 실제 시스템에서의 (a) 23 cm, (b) 28 cm, (c) 33 cm, GATE 시뮬레이션에서의 (d) 23 cm, (e) 28 cm, (f) 33 cm.

Fig. 5. The acquired profiles by increasing the distance of source to detector: (a) 23 cm, (b) 28 cm, (c) 33 cm in real system, (d) 23 cm, (e) 28 cm, (f) 33 cm in GATE simulation.

3. 산란매질에 따른 에너지 스펙트럼

그림 6은 산란 매질을 사용하였을 때 각각 실제기기와 GATE simulation에서 획득한 에너지 스펙트럼이다.

팬텀을 사용하였을 때 실제 실험과 GATE simulation에서의 에너지 스펙트럼은 그 형태가 비슷한 경향을 나타내었다. 팬텀을 사용하였을 경우, 실제 실험과 GATE simulation 모두에서 산란선의 영향으로 인하여 364 keV에서 원하는 피크가 나타나지 않았다.

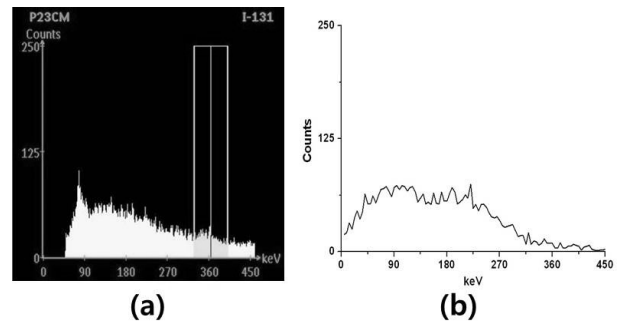


그림 6. 산란 매질을 사용하였을 때의 획득한 에너지 스펙트럼: (a) 실제 시스템과 (b) GATE 시뮬레이션

Fig. 6. Acquired the energy spectrum with scatter matter. (a) real system and (b) GATE simulation.

IV. 고찰 및 결론

현재의 동위원소를 이용한 핵의학 영상 분야의 연구는 대다수 ^{99m}Tc의 연구 및 평가에 집중되어 있으며, I-131에 대한 연구 결과는 많지 않아 I-131을 이용한 정확한 치료 및 진단을 위해서는 I-131에 대한 특성 평가 등의 연구가 매우 필요한 실정이다. 이에 본 연구에서는 GATE simulation을 사용하여 치료용 방사성동위원소인 I-131의 감마카메라/SPECT 영상을 획득하고, 실제 기기의 실험결과와 그 특성을 비교 및 분석 하여 GATE simulation의 정확성을 입증하고자 하였다.

Lee 등의 논문에 의하면 GATE simulation을 이용한 에너지 스펙트럼이 평가되었고, 선원과 검출기간의 거리가 증가함에 따라 공간분해능이 감소된다는 연구 결과가 보고된 바 있다^[4]. 본 연구에서도 산란물질을 사용하지 않았을 경우 FWHM 값은 실제의 실험과 GATE simulation 모두에서 선원과 검출기간의 거리의 증가에 따라 그 크기가 증가하는 경향을 보였으며, 오차율은 3.8%로 나타남을 확인할 수 있었다. 또한 산란물질의 유·무에 따른 I-131의 에너지 스펙트럼 역시 실제의 실험과 GATE simulation 모두에서 일관성 있는 경향을 나타냄을 확인할 수 있었다. 이는 GATE simulation

에서 구성된 시스템의 영상의 특성은 실제 기기의 특성을 충분히 반영하였다고 볼 수 있겠다. 즉 이것은 GATE simulation을 사용하여 치료용 방사성 동위원소인 I-131에 대한 여러 가지 물리적 요소들의 정량적인 측정 및 특성 평가가 가능하다는 것을 의미한다.

그러나 본 연구는 Stream-R Forte version 1.2 시스템에 한정되어 수행된 연구로서 추후 본 연구에서 사용된 시스템뿐만 아니라 다른 시스템의 추가적인 연구가 이루어진다면 치료용 방사성 동위원소에 대한 더욱 정확성이 입증된 연구가 가능할 것이다. 더 나아가 산란 물질에 따른 I-131의 에너지 스펙트럼은 산란물질이 없을 때와 비교하여 산란선의 영향에 의해 원하는 피크치를 나타내지 못하였다. 이에 보다 정확한 감마카메라/SPECT 영상을 얻기 위해서는 감쇠 보정, 산란 보정 등의 물리적 인자에 대한 정량화의 한계를 정확히 이해하여 이에 대한 보정 방법에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

REFERENCES

- [1] M. K. Kim, H. J. Kwak, J. H. Kim, W. H. Choi, Y. K. Ha, S. J. Lee, D. H. Kim, Y. G. Lee and Y. Lee, "Development of Image Reconstruction Algorithm for Chest Digital Tomosynthesis System (CDT) and Evaluation of Dose and Image Quality," Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers, vol. 53, pp. 1441-1445, 2016.
- [2] R. J. Jaszczak, R. E. Coleman and C. B. Lim, "SPECT: Single Photon Emission Computed Tomography," IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. NS-27, pp. 1137-1153, 1980.
- [3] D. E. Kuhl and R. Q. Edwards, "Large Separation Radioisotope Scanning," Radiology, vol. 80 pp. 653-662, 1963.
- [4] Y. Lee and H. J. Kim "Performance evaluation of a small CZT pixelated semiconductor gamma camera system with a newly designed stack-up parallel-hole collimator", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, vol. 794, pp. 54-61, 2015.
- [5] Y. Lee, A. C. Lee and H. Kim, "A Monte Carlo simulation study of an improved K-edge log-subtraction X-ray imaging using a photon counting CdTe detector," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, vol. 830, pp. 381-390, 2016.

- [6] S. Lee and Y. Lee, "Feasibility of gamma camera system with CdWO4 detector for quantitation of yttrium-90 bremsstrahlung imaging: Monte Carlo simulation study," OPTIK, vol. 127, pp. 11807-11815, 2016.

저 자 소 개



백 철 하(정회원)

2008년 연세대학교 방사선학과 학사 졸업.

2013년 연세대학교 방사선학과 박사 졸업.

<주관심분야: 의학영상, 의료공학, 영상처리, 신호처리>



김 대 호(학생회원)

2017년 을지대학교 방사선학과 박사 재학 중.

<주관심분야: 의학영상, 영상처리>

이 용 구(정회원)

대한전자공학회 논문지
51권 4호 (2014년) 참조



이 영 진(정회원)

2007년 연세대학교 방사선학과 학사 졸업.

2015년 연세대학교 방사선학과 박사 졸업.

<주관심분야: 의학영상, 의료공학, 영상처리, 신호처리>