

A Low-Dose High-Resolution SPECT System with CdTe for Small-Animal Imaging Applications: A GATE Simulation Study

Su-Jin Park, A Ram Yu, Yeseul Kim, Young-Jin Lee, Hee-Joung Kim

Department of Radiological Science, College of Health Science,
Research Institute of Health Science, Yonsei University, Wonju, Korea

Dedicated single-photon emission computed tomography (SPECT) systems based on pixelated semiconductors are being developed for studying small animal models of human disease. To clarify the possibility of using a SPECT system with CdTe for a high resolution low-dose small animal imaging, we compared the quality of reconstructed images from pixelated CdTe detector to those from a small SPECT system with NaI(Tl). The CdTe detector was 44.8×44.8 mm and the pixels were 0.35×0.35×5 mm. The intrinsic resolution of the detector was 0.35 mm, which is equal to the pixel size. GATE simulations were performed to assess the image quality of both SPECT systems. The spatial resolutions and sensitivities for both systems were evaluated using a 10 MBq ^{99m}Tc point source. The quantitative comparison with different injected dose was performed using a voxelized MOBY phantom, and the absorbed doses for each organ were evaluated. The spatial resolution of the SPECT with NaI(Tl) was about 1.54 mm FWHM, while that of the SPECT with a CdTe detector was about 1.32 mm FWHM at 30 mm. The sensitivity of NaI(Tl) based SPECT was 83 cps/MBq, while that of the CdTe detector based SPECT was 116 cps/MBq at 30 mm. The image statistics were evaluated by calculating the CNR of the image from both systems. When the injected activity for the striatum in the mouse brain was 160 Bq/voxel, the CNR of CdTe based SPECT was 2.30 while that of NaI(Tl) based SPECT was 1.85. The CNR of SPECT with CdTe was overall higher than that of the NaI(Tl) based SPECT. In addition, the absorbed dose was higher from SPECT with CdTe than those from NaI(Tl) based SPECT to acquire the same quantitative values. Our simulation results indicated that the SPECT with CdTe detector showed overall high performance compared to the SPECT with NaI(Tl). Even though the validation study is needed, the SPECT system with CdTe detector appeared to be feasible for high resolution low-dose small animal imaging.

Key Words: SPECT (Single photon emission computed tomography), CdTe, High-Resolution, Low-Dose, Small-Animal imaging

서 론

최근 소동물 영상화에 대한 연구가 널리 이루어지고 있으며, 그 중 쥐는 인간과 유전적인 유사성을 지니므로 이러한 특성을 이용한 소동물 모델이 인간 질병 연구에 널리 응용되고 있다.¹⁾ 소형 단일광자단층촬영(SPECT, Single Photon Emission Computed Tomography) 시스템은 소동물

기능 영상화에 유용한 핵의학 장비이다. 소동물 영상화를 위한 SPECT 시스템이 오랜 기간 동안 발전되어 왔지만, 정량적인 측정에 있어서는 공간 분해능과 산란 방사선 등과 같은 여러 제한점을 지니고 있다. 기존의 SPECT는 감마선이 입사되면 콜리메이터를 지나 NaI(Tl) 섬광체에 흡수되고 이 신호가 PM tube를 지난 후 앵거 로직에 의해 입사한 감마선에 대한 정보를 수집하게 된다.^{2,3)} 따라서 이러한 신호 수집 방법에 의해 공간 분해능이 저하되며, 이에 따른 제한점을 극복하기 위해 카드뮴 텔루라이드(CdTe, Cadmium Telluride)와 카드뮴 아연 텔루라이드(CZT, Cadmium Zinc Telluride)와 같은 반도체 검출기를 제안할 수 있다. 이러한 반도체 검출기는 직접 변환에 의해 신호를 수집하며 NaI(Tl) 섬광결정 검출기보다 원자 번호와 밀도가 높기에 효율이 높을 뿐만 아니라 향상된 에너지 분해능을 제공할

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(사업명, No. NRF-2010-0018504). 이 논문은 2013년 7월 29일 접수하여 2013년 9월 7일 채택되었음.
책임저자 : 김희중, (220-710) 강원도 원주시 연세대길 1번지
연세대학교 보건과학대학 방사선학과
Tel: 033)760-2983, Fax: 033)760-2562
E-mail: hjk1@yonsei.ac.kr

수 있다. 게다가, 각각의 픽셀에서 신호를 수집하므로 검출기의 내인성 분해능을 픽셀 크기와 같은 크기로 향상시킬 수 있다.^{4,7)} 본 연구에서는 반도체 검출기인 CdTe로 SPECT를 구축하여 NaI(Tl) 섬광결정 검출기 기반의 SPECT와의 성능비교를 몬테카를로 기반의 GATE시뮬레이션 방법을 통해 수행하였다.

최근에 전임상 실험에서 소동물의 피폭 선량 문제에 대해 관심이 증대되고 있다. 따라서 소동물의 피폭 선량을 줄이는 동시에 영상의 질을 향상시킬 수 있는 것이 바람직한 방향이다. CdTe는 NaI(Tl) 검출기에 비해 높은 밀도로 인한 저지능 향상뿐만 아니라 원자 번호가 높아 광전효과 확률이 크다. 전임상용 실험에서 소동물의 흡수선량 측정 방법은 다양하며, 그 중 몬테카를로 시뮬레이션 방법은 에너지 분포와 물질의 비균일성(공기, 폐, 뼈, 지방)을 함께 고려하기 때문에 방사선의 흡수선량을 효과적으로 계산할 수 있다.⁸⁾ 몬테카를로 시뮬레이션 방법 중 하나인 GATE(Geant4 Application for Tomographic Emission)는 version. 6부터 DoseActor tool을 제공하고 있으며, 이 tool을 이용하여 흡수선량 분포를 계산할 수 있다. DoseActor는 GATE시뮬레이션이 이루어지는 동안 특정 부피 안에서 생성된 입자들의 수와 에너지 분포 정보를 수집하고 이를 추출할 수 있다.⁹⁾ 따라서, 본 연구의 두 번째 목적은 CdTe 검출기 기반의 SPECT시스템이 저선량을 위한 소동물 영상을 제공할 수 있는지를 선량 측면에서 평가해 보는 것이다.

재료 및 방법

1. 소동물용 단일광자단층촬영장치 및 GATE 시뮬레이션

1) 소동물용 단일광자단층촬영장치: 사용한 카드뮴 텔루라이드(CdTe) 검출기의 크기는 44.8×44.8 mm이며, 128×128 픽셀들로 구성되어 있다. 각각의 픽셀은 0.35×0.35 mm의 크기이며, 내인성 분해능은 픽셀 크기와 동일하다. CdTe검

출기는 140 keV의 에너지에서 5.5%의 에너지 분해능을 지니며, 구체적인 기하학적 구조는 AJAT사의 PID-350 (Fig. 1a)을 참고하여 설계하였다. CdTe의 밀도는 5.86 g/cm³이며, 검출기의 두께는 140 keV의 에너지에서 88%의 에너지 흡수 효율을 지니도록 최적화된 두께인 5 mm로 설정하였다.

NaI(Tl) 섬광결정 검출기는 기존의 상용화된 섬광결정 검출기를 참고하여 모델링하였다.¹⁰⁾ NaI(Tl) 섬광결정 검출기의 크기는 45×45 mm이며, 32×32개의 픽셀로 구성되어 있다. 각 크리스탈 픽셀의 크기는 1.2×1.2×5 mm이며, 픽셀의 피치는 1.4 mm이다. 내인성 분해능은 2.3 mm이며, 140 keV의 에너지에서 9%의 에너지 분해능을 지닌다. NaI(Tl) 섬광결정 검출기의 밀도는 3.67 g/cm³이며, 5 mm의 두께일 경우 이론적으로 140 keV에서 75%의 에너지 흡수 효율을 지닌다.

콜리메이터는 소동물용 평행다공형 콜리메이터를 사용하였으며, 납으로 제작되어 있다(Fig. 1b). 콜리메이터의 구멍은 정육각형 모양이며 구멍의 크기는 1.2 mm이다. 콜리메이터의 길이는 20 mm이고, 구멍 사이의 간격인 septum은 0.2 mm이다(Fig. 1c).

2) GATE 시뮬레이션: CdTe반도체 검출기로 구축된 SPECT와 NaI(Tl) 섬광결정 검출기 기반의 SPECT간의 성능평가를 하기 위하여 몬테카를로 시뮬레이션인 GATE를 이용하였다. GATE는 SPECT와 PET을 포함한 다양한 핵의학 영상기기 설계 및 성능예측을 목적으로 개발한 Geant4 기반의 몬테카를로 시뮬레이션 코드이다. GATE는 SPECT와 같은 복잡한 구조의 검출기와 콜리메이터, 선원, 팬텀 등을 간단하고 정확하게 모사할 수 있기에 여러 연구자들에 의해 널리 이용되고 있다. GATE를 사용하여 검출기의 시스템의 기하학적 형태를 설계한 후, 선원의 방사능 붕괴나 검출기에 방사선이 입사하는 과정에서 발생할 수 있는 광전효과나 콤프턴 산란과 같은 물리적 현상을 시뮬레이션 할 수 있으며, 영상 재구성을 위한 프로젝션 영상들을 획득할

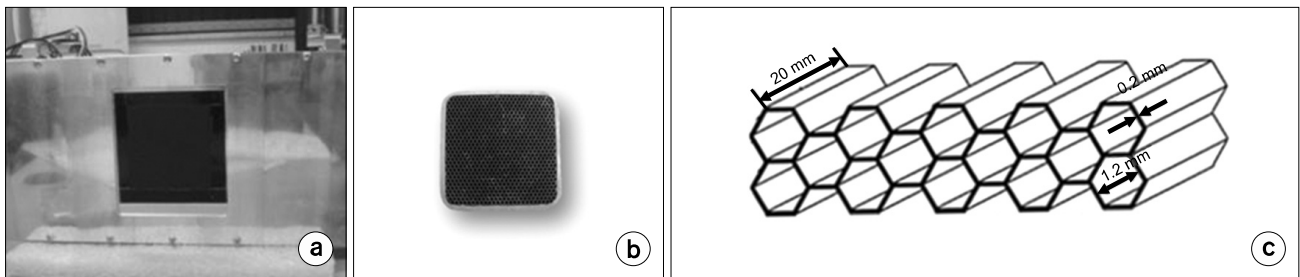


Fig. 1. CdTe 반도체 검출기(model PID-350, AJAT, Finland) (a), 소동물용 평행다공형 콜리메이터 (b), 평행다공형 콜리메이터의 구조 (c).

수 있다.¹¹⁻¹⁴⁾ 본 연구에서는 GATE version 6.1을 사용하여 140 keV의 단일 감마선이 4π 라디안 방향으로 방사되도록 묘사하였으며, 광자의 물리적인 현상들(광전 효과, 콤프턴 산란, 레일리 산란)을 묘사하였으며 감마선 변환은 고려하지 않았다. 가우시안 에너지 흐림을 모든 픽셀에 적용함으로써 두 종류의 검출기에 대한 에너지 분해능이 고려되었다. CdTe 검출기에 대한 에너지 분해능은 140 keV의 에너지에서 5.5%로, 그리고 NaI(Tl) 섬광결정 검출기는 9%의 에너지 분해능이 적용되었다. 또한, 우리는 ‘spatial blurrer’ 모듈을 사용하여 각 검출기의 내인성 분해능을 고려하였으며, CdTe의 내인성 분해능은 0.35 mm로, NaI(Tl) 섬광결정 검출기의 내인성 분해능은 2.3 mm로 설정하였다. 검출기 후면의 물질에서 발생한 산란선과 전기적 잡음은 고려되지 않았다. 3도 간격으로 360도를 회전하여 총 120개의 프로젝션 영상들을 획득하였으며 시뮬레이션 효율성을 증대시키기 위하여 SPECT head는 2개로 설정하고 총 60초간 프로젝션 영상을 획득하였다.

3) 영상재구성: 획득한 모든 프로젝션 영상은 Johns Hopkins 대학에서 제공한 재구성 프로그램을 사용하여 재구성 되었다. 이 프로그램은 OS-EM (Ordered Subsets Expectation Maximization) 반복적 재구성 알고리즘 기반으로, 재구성 과정에서 기하학적 반응 응답특성(GRF, Geometric Response Function)을 고려할 수 있다.¹⁵⁾ 이는 정확한 재구성 영상 획득을 위하여 콜리메이터의 기하학적 요소와 검출기의 내인성 분해능 및 픽셀 두께 및 사이즈 등이 보장된 것이다.

2. 시스템 특성 비교

10 MBq의 ^{99m}Tc 점 선원을 사용하여 공간 분해능과 민감도를 측정하였다. 공간 분해능과 민감도는 공기 중에서 점

선원으로부터 조준기를 10, 20, 30, 40, 50 mm 멀리 둔 거리에서 각각 측정하였다. 공간 분해능은 점 선원의 선 프로파일(line profile)을 그려 가우시안 fitting 후 최고치의 반이 되는 두 지점 간의 거리를 나타내는 반치폭(FWHM, Full Width at Half Maximum)을 구하여 결정하였다. 민감도는 검출된 반응을 점 선원의 방사선량으로 나누어 계산할 수 있다. 노이즈에 의한 영상 질 저하를 줄이기 위하여 에너지 허용 범위는 ±10%로 설정하였다. 추가적으로, Ultra-Micro Hot spot 팬텀(Data spectrum corporation, Hillsborough, NC)을 사용하여 공간 분해능을 재구성된 영상을 통하여 확인 하였으며, 대조도 값을 비교 하였다. 이때 사용한 Ultra-Micro Hot spot 팬텀은 실린더 형태의 hot-rod 팬텀(내경 28 mm, 높이 28 mm)으로 6개의 서로 다른 크기를 가지는 hot rod로 이루어져있다(Fig. 2a). 각각의 지름 크기는 2.4, 2.0, 1.7, 1.35, 1.0 mm 그리고 0.75 mm이며 각 rod의 높이는 9.9 mm로 동일하다. 모든 rod의 총 방사능량은 1.25 MBq이며 ^{99m}Tc의 동위원소로 채워져 있다. 이 팬텀을 GATE시뮬레이션에 적용하여 SPECT head를 3도 간격으로 360도 회전시켜 총 120개의 프로젝션 영상을 획득하였다. Fig. 2b는 Ultra-Micro Hot spot 팬텀의 횡단면을 나타내며, Fig. 2c는 Ultra-Micro Hot spot 팬텀의 GATE 시뮬레이션을 나타낸다.

Ultra-Micro Hot spot 팬텀의 재구성 영상을 정량적으로 평가 분석하기 위하여 다음 식을 이용하여 대조도를 구하였다(식(1)). 이 때, M_p 는 선 프로파일(line profile)에서 최대치(peak value)들의 평균값이며, M_v 는 최소치(valley value)들의 평균값이다.

$$\text{Contrast} = \frac{M_p - M_v}{M_p} \tag{1}$$

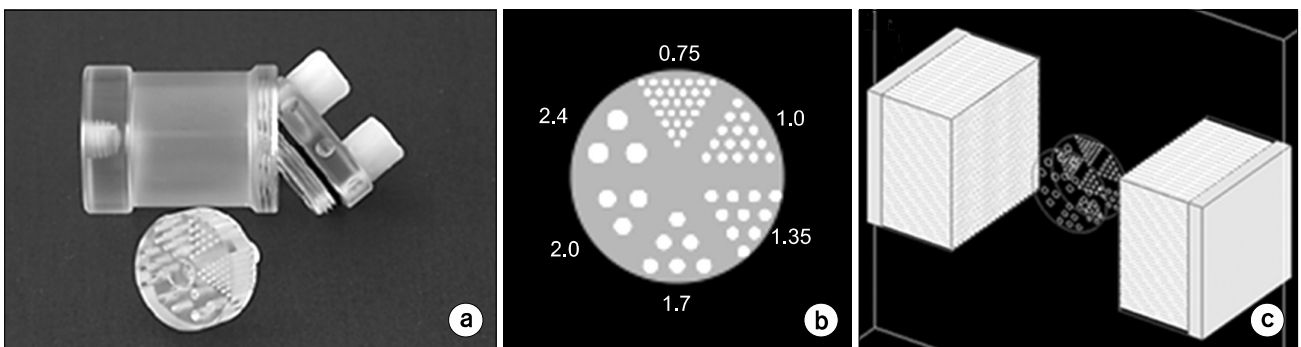


Fig. 2. Ultra-Micro Hot spot 팬텀 (a), 팬텀의 횡단면 (b), 팬텀의 시뮬레이션 (c).

3. Mouse brain SPECT 영상의 정량평가

두 시스템으로 획득한 복셀화된 mouse brain SPECT 영상에서의 정량적 비교 평가를 하기 위하여, mouse whole-body (MOBY) 팬텀을 GATE 시뮬레이션에 적용하였다.

1) **MOBY 팬텀**: MOBY 팬텀은 3차원적 실제 구조를 바탕으로 설계된 복셀화 팬텀으로 mouse의 장기와 상당히 유사하다. 또한, 호흡운동과 심박운동과 같은 움직임의 묘사가 수학적 연산을 통하여 실제와 같게 설계할 수 있으며, 방사선의 방출 및 감쇄 정보를 사용자 임의로 설정할 수 있으므로 시뮬레이션에 널리 적용 및 응용되고 있다.¹⁶⁻¹⁸⁾ MOBY 팬텀은 원래 256×256 픽셀들의 800 슬라이스로 구성되어있으며, 각 픽셀의 크기는 0.145 mm이다. Fig. 3a는

MOBY 팬텀을 나타낸다. MOBY 팬텀은 GATE 시뮬레이션에서 사용하기 위해서는 interfile 형태로 변화시켜 주어야 한다.

2) **Mouse brain SPECT 영상화**: 복셀화된 MOBY팬텀을 사용하여 두 시스템간의 mouse brain SPECT 영상 차이를 정량적 비교 분석하였다. 시뮬레이션의 효율성 증가를 위하여 MOBY 팬텀을 128×128의 400 슬라이스로 설정하여 팬텀을 생성하였다. 최근 Johns Hopkins 대학 연구진들은 MOBY팬텀의 뇌 구조를 37개로 세분화하여 실제와 매우 유사하도록 MOBY팬텀을 업그레이드 하였으며, 따라서 우리는 최신 버전의 MOBY팬텀을 획득하여 도파민 수용체 (dopamine transporters, DAT) 결합 연구에 필요한 mouse brain을 설계할 수 있었다. [^{99m}Tc] TRODAT-1을 이용한

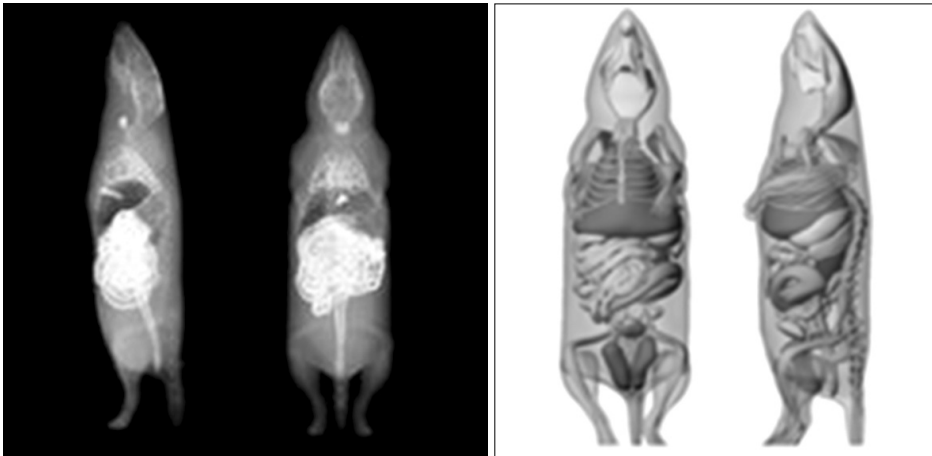


Fig. 3. MOBY 팬텀.

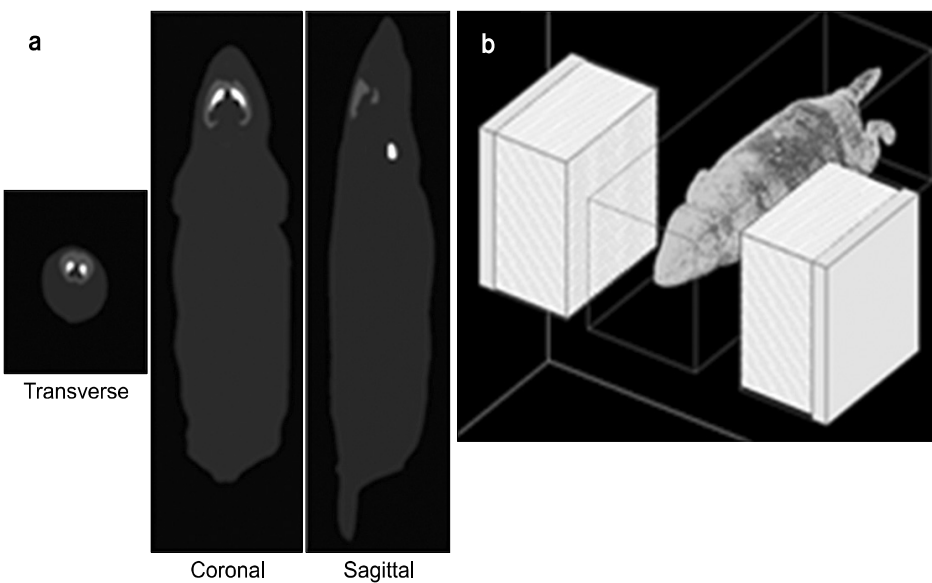


Fig. 4. MOBY brain 팬텀 (a), Mouse brain SPECT 획득을 위한 GATE 시뮬레이션 (b).

DAT 결합에 대한 실제 임상 연구결과¹⁹⁾를 바탕으로 방사선 동위원소의 상대적인 분포를 GATE 시뮬레이션에 적용하였다. 즉, striatum에는 160 Bq/voxel, thyroid는 20 Bq/voxel, 그리고 cerebral background에는 80 Bq/voxel, extra cerebral background는 20 Bq/voxel의 동위원소의 uptake 분포를 설정하였다. 시뮬레이션 효율성 증대를 위하여 2개의 SPECT head로 설계하고 360도를 3도 간격으로 총 120장의 프로젝션을 획득하도록 GATE 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 4a는 mouse brain을 모사한 MOBY 팬텀이며, Fig. 4b는 mouse brain SPECT 영상 획득을 위한 GATE 시뮬레이션 과정을 보여준다. Mouse brain SPECT의 재구성 영상 획득을 위해 Johns Hopkins 대학에서 제공한 OS-EM 알고리즘 기반의 재구성 프로그램을 사용하였다. 재구성 과정에서 콜리메이터와 검출기 간의 반응 응답 특성뿐만 아니라, MOBY 팬텀에 해당하는 attenuation map을 재구성 프로그램에서 선택하여 입력해줌으로써 감약에 대한 보상이 고려되었다.

Striatum 내의 도파민 결합의 정량적 평가를 위하여 mouse brain의 재구성 영상의 CNR을 계산하였다.¹⁷⁾ CNR은 target (striatum)과 background (cerebellum)에서 측정된 activity의 평균과 편차를 구하여 다음 식을 통하여 계산할 수 있다(식(2)).

$$CNR = \frac{T - B}{\sqrt{\sigma_T^2 + \sigma_B^2}} \quad (2)$$

위 값들은 의학 영상 분석 프로그램인 AMIDE (VA software Corporation, Fermont, CA)을 사용하여 보고자 하는 target인 striatum 주변에 Volume of Interest (VOI)를 설정하여 계산할 수 있다.

3) 흡수선량 비교: CdTe 검출기 기반의 SPECT 시스템이

저선량 소동물 영상화가 가능한지를 알아보기 위한 본 연구의 두 번째 목적을 달성하기 위하여 우리는 소동물의 흡수선량을 평가하였다. 먼저, 흡수선량이 달라짐에 따라서 두 SPECT시스템에서 정량적 수치가 어떻게 달라지는지를 확인하였다. 이러한 흡수선량 평가를 위하여, MOBY 팬텀을 이용한 GATE 시뮬레이션 중에 DoseActor tool을 활성화시켰으며, 이러한 DoseActor 기능을 통하여 MOBY팬텀의 흡수선량 지도를 생성할 수 있다. 이 흡수선량 지도는 시뮬레이션 도중 어느 특정 부피 안에 생성된 입자의 총 수와 그 에너지 분포 정보를 가지고 있다. 획득한 흡수선량 지도와 MOBY팬텀의 header 파일을 이용하여 MATLAB 프로그램을 통해 mouse brain의 관심 장기인 striatum만의 흡수선량을 계산하였다. Striatum의 주입 방사선량이 40, 80, 120, 160, 200, 그리고 240 Bq/voxel로 달라짐에 따른 흡수선량을 평가하였다. 이렇게 획득한 흡수선량에 따른 정량적 수치 값을 CNR로 평가하였다. 마지막으로 두 SPECT 시스템이 같은 수치의 CNR을 가지기 위한 흡수선량을 비교 분석하였으며, 이러한 흡수선량간의 차이 분석을 통해 저선량을 위한 CdTe검출기 기반의 SPECT 시스템의 가능성을 알아보았다. Fig. 5는 DoseActor tool을 사용한 MOBY 팬텀의 흡수선량을 계산 획득 과정을 보여주는 도식이다.

결 과

1. 시스템 특성 비교

Fig. 6은 CdTe기반의 SPECT와 NaI(Tl) 섬광결정 검출기 기반의 SPECT간의 공간 분해능 비교를 나타낸다. 여기서 FWHM은 재구성된 점 선원의 transverse, coronal, sagittal축으로 획득한 FWHM값들의 평균값이다. 선원과 콜리메이터 간의 거리에 따른 공간 분해능 분석을 위해 의학영상분석

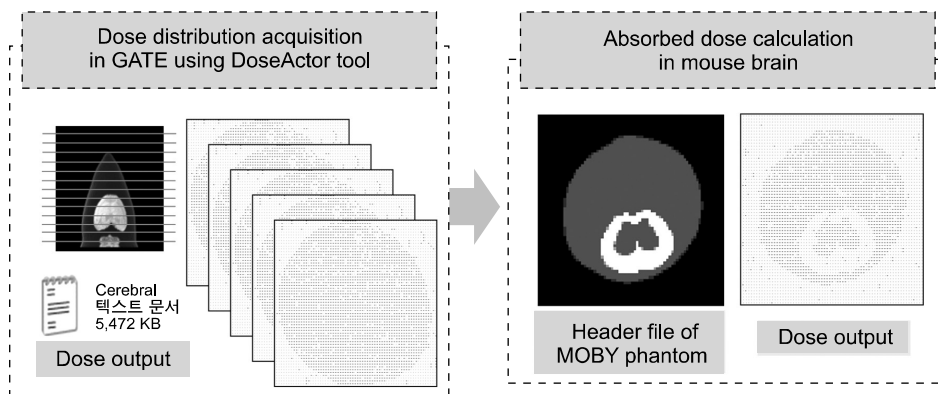


Fig. 5. DoseActor tool을 사용한 MOBY 팬텀의 흡수선량을 계산 획득 과정.

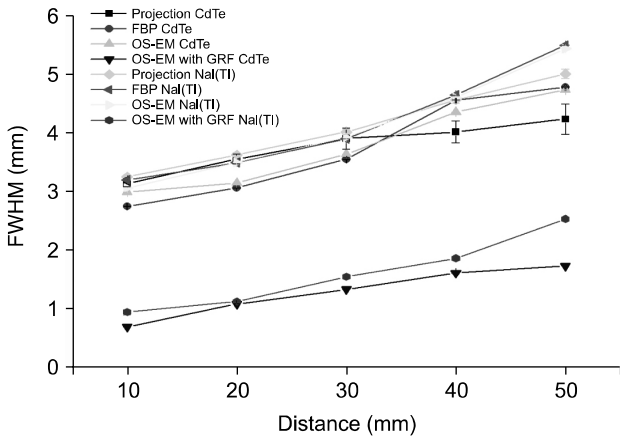


Fig. 6. 검출기 종류에 따른 두 SPECT 시스템의 공간 분해능 비교.

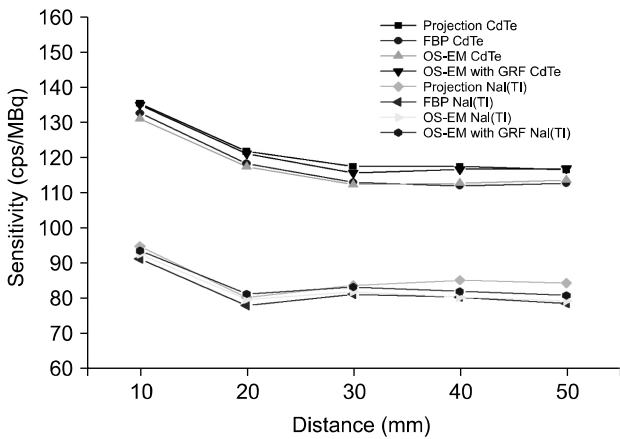


Fig. 7. 검출기 종류에 따른 두 SPECT 시스템의 민감도 비교.

프로그램인 AMIDE를 사용하였으며, 각 위치에서 재구성된 점 선원 영상에 대하여 프로파일을 그어 FWHM 및 표준 편차를 획득하였다. 그래프에서 표시된 GRF는 재구성 과정에서 콜리메이터와 검출기 간의 반응 응답 특성을 고려 여부를 의미한다. 선원과 콜리메이터 사이의 거리가 30 mm 일 때, NaI(Tl) 섬광결정 검출기 기반의 SPECT의 분해능은 1.54 mm였으며, CdTe검출기 기반의 SPECT시스템의 분해능은 1.32 mm로 더욱 향상된 값을 가지고 있었다. Fig. 7은 두 시스템의 민감도 비교를 나타내는 그래프이며, 선원과 콜리메이터 사이의 거리가 30 mm일 때 CdTe검출기 기반의 시스템에서는 116 cps/MBq, NaI(Tl) 섬광결정 검출기 기반의 시스템에서는 83 cps/MBq로 측정되었다.

Fig. 8은 두 시스템에서 획득된 Ultra-Micro Hot spot 팬텀의 재구성 영상을 보여준다. CdTe 기반의 SPECT의 경우 1.7 mm에서 2.4 mm크기 사이의 모든 rod가 재구성 영상에

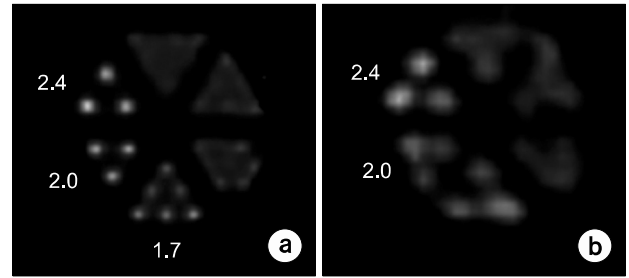


Fig. 8. CdTe-based SPECT (a), NaI(Tl)-based SPECT (b)에서 획득한 Ultra-Micro Hot spot 팬텀의 재구성 영상.

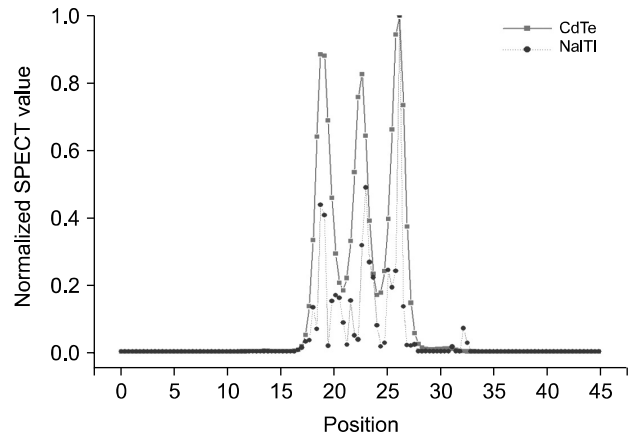


Fig. 9. Ultra-Micro Hot spot 팬텀의 재구성 영상의 프로파일.

서 구분이 가능한 반면, NaI(Tl) 섬광결정 검출기 기반의 SPECT는 2.0 mm크기의 rod는 구분할 수 있지만, rod간의 분리가 확연하게 구분되지 않았다. Fig. 9는 Ultra-Micro Hot spot팬텀의 재구성 영상에서 profile 획득하는 과정을 보여주며, profile을 통해 획득한 측정값을 통해 대조도를 계산할 수 있었다. CdTe기반의 SPECT는 0.86의 대조도를 나타냈으며 NaI(Tl) 섬광결정 검출기 기반의 SPECT의 경우 0.76로 대조도가 계산되었다.

2. Mouse brain SPECT 영상의 정량 평가

Fig. 10은 재구성된 mouse brain 영상을 나타내며, 영상에서 살펴볼 수 있듯이 CdTe 검출기로 구축된 SPECT에서 mouse의 striatum이 더욱 잘 구분되어 보임을 확인할 수 있었다. 두 시스템으로부터 획득한 mouse brain의 재구성 영상에서 CNR 계산을 통해 정량적 수치 값을 비교하였으며, CdTe 반도체검출기에서 획득한 CNR은 2.30인 반면, NaI(Tl) 섬광결정 검출기에서는 1.85를 나타내었다.

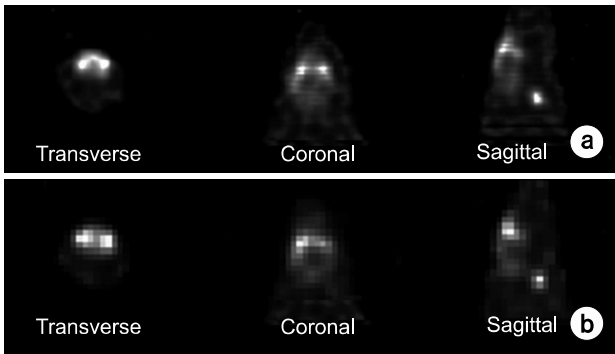


Fig. 10. CdTe-based SPECT (a), NaI(Tl)-based SPECT (b)의 Mouse brain 재구성 영상.

Table 1. 주입 방사선량에 따른 흡수선량 및 두 시스템에서의 CNR.

Injected activity (Bq/voxel)	Absorbed dose for striatum (mGy)	CNR of CdTe detector	CNR of NaI detector
40	1.29	1.76	1.42
80	2.45	1.98	1.66
120	3.75	2.04	1.79
160	5.04	2.30	1.85
200	6.57	2.59	2.00
240	7.47	2.63	2.03

3. Mouse brain SPECT 흡수선량 비교

주입 방사선량에 따른 striatum의 흡수선량 변화를 Table 1에 나타내었다. 또한, 두 시스템에서 각 흡수선량에 따른 CNR 변화를 Table 1에 함께 표현하였다.

주입 방사선량이 40 Bq/voxel씩 커질수록 striatum의 흡수선량 역시 증가하였으며, 두 시스템에서의 CNR도 함께 증가하였다.

Fig. 11은 흡수선량에 따른 두 시스템의 CNR 변화를 보여준다. 같은 흡수선량에서 CdTe검출기 기반의 SPECT 시스템이 NaI(Tl) 섬광결정 검출기 기반의 SPECT 시스템보다 CNR 값이 항상 큼을 확인할 수 있다.

동일한 정량적 수치를 가지기 위한 흡수선량 차이를 평가해보기 위하여 특정 지점의 CNR에서의 흡수선량을 그래프에서 확인하였다. 예를 들어, CNR값이 2일 경우 CdTe 검출기 기반의 SPECT에서는 striatum의 흡수선량은 2.8 mGy 정도였으며, NaI(Tl) 섬광결정 검출기 기반의 SPECT는 약 6.6 mGy였다. 이는 CdTe검출기 기반의 SPECT 시스템을 사용하였을 때 mouse striatum이 받게 되는 피폭 선량을 약 42% 감소시켜줄 것을 의미한다.

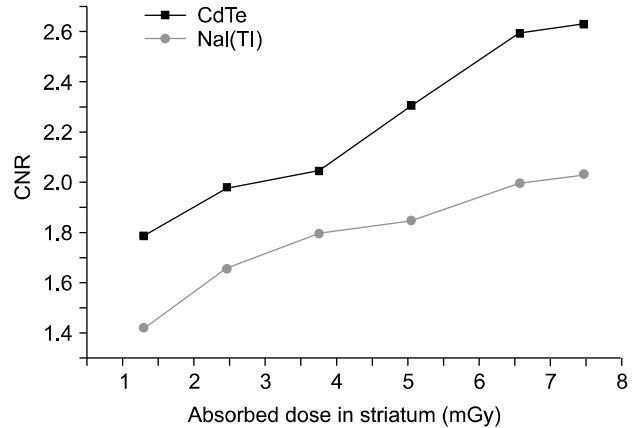


Fig. 11. Striatum의 흡수선량에 따른 두 SPECT 시스템의 CNR 비교.

고찰 및 결론

본 연구에서는 반도체 검출기 CdTe기반의 SPECT를 설계하고 이를 NaI(Tl) 섬광결정 검출기 기반의 SPECT와 비교 평가해보았다. CdTe 검출기 SPECT 시스템은 NaI(Tl) 섬광결정 검출기 SPECT시스템보다 향상된 분해능을 가지고 있었다. 이는 인간의 비해 세밀한 해부학적 구조를 가지는 소동물 영상화 연구에 CdTe검출기 기반의 SPECT시스템이 응용될 수 있음을 시사한다. 추가적으로, 섬광결정 검출기 대신 반도체 검출기를 사용하였을 경우 기대할 수 있는 분해능 향상은 평균적으로 24%였지만, 반복적 재구성 과정에서 콜리메이터와 검출기 간의 반응 응답 특성을 고려하였을 경우 약 2배 정도 향상되었다. 이는 검출기 종류뿐만 아니라 최적의 재구성 알고리즘 적용 역시 시스템의 분해능 성능 결정시에 중요한 요소가 됨을 의미한다. 추가적으로, 반복적 재구성 방법에서 반복횟수나 부분집합의 수와 같은 재구성 환경에 따른 공간 분해능이 변하는 영향을 최소화 하기 위해 여과후역투사(FBP, Filtered Backprojection)방법으로 재구성을 수행하였다. FBP방법을 사용할 때 사용한 Butterworth 필터의 차단 주파수는 0.5 cycle/pixel이었다. FBP 방법으로 재구성된 영상의 공간분해능은 선원과 콜리메이터 사이의 거리가 30 mm일 때, CdTe 검출기 기반의 SPECT에서는 3.55 mm FWHM로, NaI(Tl) 섬광결정 검출기 기반의 SPECT에서는 3.90 mm FWHM으로 나타났다.

NaI(Tl) 섬광결정 검출기 대신 CdTe검출기를 기반으로 SPECT를 구성하였을 경우 민감도 역시 향상된 성능을 보였으며 평균적으로 37% 향상됨을 보였다. 이러한 민감도 향상은 CdTe검출기의 특성에서 기인한 것으로, 기존의 검

출기들에 비해 밀도가 높아 저지능이 클 뿐만 아니라 원자 번호도 높기 때문에 광전효과가 일어날 확률이 높기 때문이다. 추가적으로, 반복적 재구성 과정에서 콜리메이터와 검출기 간의 반응 응답 특성을 고려를 통해 민감도 향상 정도는 평균 3.1%였으며 이는 재구성 방법에 따라 크게 영향을 받기 보다는 간접방식의 섬광결정 검출기 대신 직접 방식의 CdTe 검출기를 사용하였을 경우 민감도 향상을 기대할 수 있음을 의미한다.

Ultra-Micro Hot spot팬텀의 재구성 영상들간의 비교를 통해서도 CdTe 검출기가 NaI(Tl) 섬광결정 검출기 보다 더 작은 1.7 mm크기의 rod까지 구분됨을 확인하였다. 또한, 대조도 역시 13% 증가하였다.

MOBY 팬텀을 사용하여 획득한 mouse brain의 재구성 영상을 통해 CdTe반도체 검출기 기반의 SPECT가 mouse brain의 도파민 분포 영상을 보기 위한 충분한 분해능을 제공할 수 있음을 알 수 있었으며, NaI(Tl) 섬광결정 검출기 기반의 SPECT를 사용한 영상과 비교해볼 때 정량적 수치인 CNR 또한 향상됨을 Table 1을 통해 확인할 수 있었다. 추가적으로, CNR은 주입한 방사선량이 증가할수록 두 시스템에서 함께 증가하였으며, 동일한 CNR을 가지기 위한 두 시스템에서의 소동물 선량 평가를 통해 CdTe검출기 기반의 SPECT 사용시 소동물의 피폭선량을 약 42%로 감소시켜 줄 수 있음을 Fig. 11을 통해 확인하였다. 이와 같은 특징은 CdTe 검출기 기반의 SPECT시스템이 고해상도 저선량용 소동물 영상에 적합함을 증명한다. 실제 시스템과의 검증 및 전임상 실험을 통한 소동물의 흡수선량과 비교 등 추가 연구가 필요하지만, 본 연구 결과는 피폭 선량을 줄이는 동시에 영상의 질을 높일 수 있는 소동물용 SPECT 시스템 구축에 응용될 수 있음을 시사한다.

참 고 문 헌

1. Meikle SR, Kench P, Kassiou M, Banati RB: Small animal SPECT and its place in the matrix of molecular imaging technologies. *Phys Med Biol* 50(22):R45-R61 (2005)
2. Todd EP, Lasrs RF: SPECT detectors: the Anger Camera and beyond. *Phys Med Biol* 56(17):R145-R182 (2011)
3. Kim H, Furenlid LR, Crawford MJ, et al: SemiSPECT: a small-animal single-photon emission computed tomography (SPECT) imager based on eight cadmium zinc telluride (CZT) detector arrays. *Med Phys* 33(2):465-474 (2006)
4. Park S, Lee C, Cho H, Kim H: Ultra-high-resolution SPECT with CdTe for small-animal imaging applications: a monte carlo simulation study using a voxelized phantom. *JKPS* 60(7):1145-1149 (2012)
5. Kubo N, Songji A, Fujiki Y, et al: Evaluating performance of a pixel array semiconductor SPECT system for small animal imaging. *Ann Nucl Med* 19(7):633-639 (2005)
6. Ogawa K, Muraishi M: Simulation Study on an ultra-high resolution SPECT with CdTe detectors. *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*. 2006, San Diego, M10-50
7. Ogawa K, Ohmura N, Iida H, Kubo A: Development of an ultra-high resolution SPECT system with a CdTe semiconductor detector. *Ann Nucl Med* 23(8):763-770 (2009)
8. Richard T, Arion FC: Monte Carlo simulations of absorbed dose in a mouse phantom from 18-fluorine compounds. *Med Phys* 34(3):1026-1036 (2007)
9. Papadimitroulas P, Nikiforidis GC, Kagadis GC: A dose point kernel database using GATE Monte Carlo simulation toolkit for nuclear medicine applications: Comparison with other Monte Carlo codes. *Med Phys* 39(8):5238-5247 (2012)
10. Stolin AV, Williams MB, Kundu BK, et al: Characterization of imaging gamma detectors for use in small animal SPECT. *Proc. IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*. 2003, Portland, pp. 2085
11. Jan S, Benoit D, Becheba E, Carlier T, et al: GATE V6: a major enhancement of the GATE simulation platform enabling modeling of CT and radiotherapy. *Phys Med Biol* 56(4):881-901 (2011)
12. Jan S, Santin G, Strul D, et al: GATE: a simulation toolkit for PET and SPECT. *Phys Med Biol* 49(19):4543-4561 (2004)
13. Assie K, Gardin I, Vera P, Buvat I: Validation of the Monte Carlo simulator GATE for indium-111 imaging. *Phys Med Biol* 50(13):3113-3125 (2005)
14. Staelens S, Strul D, Santin G, et al: Monte Carlo simulations of a scintillation camera using GATE: validation and application modeling. *Phys Med Biol* 48(18):3021-3042 (2003)
15. Zaidi H: *Quantitative Analysis in Nuclear Medicine Imaging*. Switzerland, Springer, Geneva (2006), pp. 141-165
16. Paul W, Tsui BMW: MCAT to XCAT: the evolution of 4-D computerized phantoms for imaging research. *Proceedings of the IEEE*. 2009, Orland, pp. 1954-1968
17. Branco S, Jan S, Almeida P: Respiratory motion modeling in small animal PET using GATE. *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*. 2008, Dresden, M10-234
18. Paul W, Tsui BMW, Frey FC, Johnson JGA, Berr SS: Development of a 4-D digital mouse phantom for molecular imaging research. *Mol Imag Biol* 6(3):149-159 (2004)
19. Cao Z, Bal G, Accorsi R, Acton PD: Optimal number of pinholes in multi-pinhole SPECT for mouse brain imaging—a simulation study. *Phys Med Biol* 50(19):4609-4624 (2005)

GATE 시뮬레이션을 통한 고해상도 저선량용 소동물 영상화를 위한 CdTe 검출기 기반의 SPECT 기기 연구

연세대학교 보건과학대학 방사선학과, 연세대학교 보건과학연구소

박수진 · 유아람 · 김예슬 · 이영진 · 김희중

인간의 질병연구를 위한 소동물용 픽셀화 반도체 검출기 기반의 단일광자단층촬영(SPECT, single photon emission computed tomography)시스템 개발이 이루어지고 있다. 본 연구에서는 CdTe검출기 기반의 SPECT시스템의 고해상도 및 저선량 소동물 영상화 가능성을 알아보고자 NaI(Tl) 섬광결정 검출기로 구축된 SPECT 시스템과 비교 평가하였다. CdTe 검출기는 44.8×44.8 mm의 크기이며 0.35×0.35×5 mm크기의 픽셀로 구성되어 있다. 검출기의 내인성 분해능은 0.35 mm이며 이는 픽셀 크기와 동일하다. GATE 시뮬레이션 방법을 통하여 두 시스템간의 성능 평가를 수행하고 비교 분석하였다. 시스템의 공간 분해능과 민감도는 10 MBq의 ^{99m}Tc 점 선원을 사용하여 평가하였다. 복셀화된 MOBY (mouse whole-body) 팬텀을 사용하여 정량적 평가 및 흡수선량을 계산하였다. 점선원과 조준기 사이의 거리가 30 mm 일 때, NaI(Tl) 섬광결정 검출기 기반의 SPECT의 분해능은 1.54 mm, 민감도는 83 cps/MBq였으며, CdTe검출기 기반의 SPECT시스템의 분해능은 1.32 mm, 민감도는 116 cps/MBq로 더욱 향상된 공간 분해능과 민감도를 나타내었다. 두 시스템의 정량적 통계 분석은 CNR 계산을 통해 이루어졌으며, 주입 선량을 다양하게 설정하여 두 시스템에서의 CNR을 획득하였다. Mouse brain내 striatum의 주입선량이 160 Bq/voxel일 경우, CdTe검출기 기반의 SPECT에서 획득한 CNR은 2.30이었으며 섬광결정 검출기 SPECT에서 획득한 CNR은 1.85로 CdTe검출기 기반의 SPECT에서 더욱 큰 CNR을 지니고 있었다. 또한, CdTe기반의 SPECT를 사용할 경우 NaI(Tl) 섬광결정 검출기 기반의 SPECT 시스템을 사용하는 것보다 동일한 정량적 수치획득을 위한 소동물의 피폭선량을 감소시켜줄 수 있었다. 본 연구에서는 반도체 검출기 CdTe기반의 SPECT은 NaI(Tl) 섬광결정 검출기 SPECT 시스템보다 공간 분해능과 민감도 측면에서 높은 성능을 보였음을 증명하였다. 실제 시스템과의 검증 등의 추가 연구가 필요하지만, 본 연구 결과는 향후 피폭 선량을 줄이는 동시에 영상의 질을 높일 수 있는 소동물용 SPECT 시스템 구축에 응용될 수 있을 것이다.

중심단어: 단일 광자 단층촬영, CdTe, 고해상도, 저선량, 소동물 영상화