

## 소동물 Iodine-125 SPECT 개발을 위한 컴퓨터 시뮬레이션

성균관대학교 의과대학 생명의공학과, 삼성서울병원 핵의학과

정진호, 최 용, 송태용, 정용현, 정명환, 홍기조, 민병준, 최연성, 이경한, 김병태

### A Computer Simulation for Small Animal Iodine-125 SPECT Development

Jin Ho Jung, Yong Choi, Ph.D., Yong Hyun Chung, M.S., Tae Yong Song, M.S., Myung Hwan Jeong, Key Jo Hong, Byung Jun Min, Yearn Seong Choe, Ph.D., Kyung-Han Lee, M.D. and Byung-Tae Kim, M.D.

*Department of Biomedical Engineering, Sungkyunkwan University School of Medicine and Department of Nuclear Medicine, Samsung Medical Center, Seoul, Korea*

#### Abstract

**Purpose:** Since I-125 emits low energy (27-35 keV) radiation, thinner crystal and collimator could be employed and, hence, it is favorable to obtain high quality images. The purpose of this study was to derive the optimized parameters of I-125 SPECT using a new simulation tool, GATE (Geant4 Application for Tomographic Emission). **Materials and Methods:** To validate the simulation method, gamma camera developed by Weisenberger et al. was modeled. NaI(Tl) plate crystal was used and its thickness was determined by calculating detection efficiency. Spatial resolution and sensitivity curves were estimated by changing variable parameters for parallel-hole and pinhole collimator. Performances of I-125 SPECT equipped with the optimal collimator were also estimated. **Results:** In the validation study, simulations were found to agree well with experimental measurements in spatial resolution (4%) and sensitivity (3%). In order to acquire 98% gamma ray detection efficiency, NaI(Tl) thickness was determined to be 1 mm. Hole diameter (mm), length (mm) and shape were chosen to be 0.2:5: square and 0.5:10: hexagonal for high resolution (HR) and general purpose (GP) parallel-hole collimator, respectively. Hole diameter, channel height and acceptance angle of pinhole (PH) collimator were determined to be 0.25 mm, 0.1 mm and 90 degree. The spatial resolutions of reconstructed image of the I-125 SPECT employing HR:GP:PH were 1.2:1.7:0.8 mm. The sensitivities of HR:GP:PH were 39.7:71.9:5.5 cps/MBq. **Conclusion:** The optimal crystal and collimator parameters for I-125 imaging were derived by simulation using GATE. The results indicate that excellent resolution and sensitivity imaging is feasible using I-125 SPECT.

**Key Words:** I-125, SPECT, collimator, simulation

Received December. 11, 2003; accepted January. 24, 2004

Corresponding author: Yong Choi, Ph.D.

Department of Nuclear Medicine, Samsung Medical Center, Sungkyunkwan University School of Medicine, 50 Ilwon-dong, Kangnam-ku, Seoul, 135-710 Korea

Tel: 02-3410-2624 Fax: 02-3410-2639 E-mail: y7choi@samsung.co.kr

\* 본 연구는 과학기술부 원자력연구개발사업과 보건복지부 보건의료기술진흥사업(02-PJ3-PG6-EV06-0002)의 지원에 의하여 이루어진 것임

## 서 론

I-125는 항원, 항체 등 여러 리간드의 표지에 사용하며, 분자생물학 연구를 포함한 핵의학 분야에서 널리 이용하고 있는 방사성동위원소이다<sup>1)</sup>. I-125는 27~32 keV 엑스선과 35 keV 감마선 방출, 반감기 60.14일, 납에서의 반가층 0.02 mm, 공기 중 반가층 68 m 등의 물리적 특성을 가지고 있다.

I-125 단일광자방출전산화단층촬영(Single Photon Emission Computed Tomography, SPECT)은 일반적인 140 keV 감마선 검출 SPECT에 비해 여러 장점을 가진다. I-125는 저에너지 감마선을 방출하기 때문에 감마선 검출에 필요한 섬광결정의 두께를 일반 SPECT에 사용하는 섬광결정보다 얇게 할 수 있다. 섬광결정 두께가 얇을수록 섬광결정내에서 발생하는 방사선 산란이나 빛 퍼짐이 적어지기 때문에 내인성공간분해능이 향상된다. I-125를 선원으로 사용할 경우 바늘구멍조준기 구멍 가장자리에서 일어날 수 있는 감마선 투과가 영상 질 저하에 미치는 영향이 적어지며, 평행구멍조준기 격벽 두께를 일반 SPECT 조준기 보다 얇게 만들 수 있기 때문에 상대적으로 높은 공간분해능과 민감도를 지닌 조준기를 제작 사용할 수 있다. 또한 I-125는 핵의학에서 사용하는 다른 방사성동위원소에 비해 긴 반감기를 가지기 때문에 동일 동물에서 장기간에 걸친 유전자 발현을 연구하기에 유용하다.

현재 이러한 여러 장점을 갖는 I-125 영상용 SPECT 개발 연구를 여러 대학과 연구기관들이 진행하고 있다<sup>2-4)</sup>. Beekman 등<sup>5)</sup>은 NaI(Tl) 섬광결정과 바늘구멍조준기를 사용해서 0.2 mm 분해능을 갖는 감마카메라를 개발했으며, Weisenberger 등<sup>6)</sup>은 CsI(Na) 섬광결정과 고분해능 평행구멍조준기를 사용해서 1.5 mm 분해능을 갖는 감마카메라를 개발했다. 그러나 이들 논문에서는 섬광결정의 종류 또는 두께 선택 및 조준기 파라미터 결정 과정에 대한 구체적 언급이 없어서 이들이 최적 파라미터인지에 대한 판단근거가 부족하다.

이 연구의 목적은 최적의 I-125 영상용 SPECT

시스템 파라미터를 몬테카를로 시뮬레이션으로 도출하는 것이다. 연구 목적을 달성하기 위해 GATE (Geant4 Application for Tomographic Emission)를 사용하여 I-125 SPECT에 적합한 평행구멍조준기와 바늘구멍조준기의 파라미터를 결정하고, 결정된 파라미터를 기반으로 모사한 검출기의 성능평가를 수행하였다.

## 대상 및 방법

### 1. GATE 코드

GATE는 PET과 SPECT를 포함한 다양한 핵의학 영상기기 설계 및 성능예측을 목적으로 개발한 Geant4 기반의 시뮬레이션 코드이다<sup>7)</sup>. GATE는 쉽게 사용할 수 있도록 설계되어, 원형 PET 또는 다중헤드 SPECT와 같은 복잡한 구조의 검출기나 조준기, 선원, 팬텀 등을 간단하고 정확하게 모사할 수 있다. GATE를 사용하여 검출기 시스템의 기하학적 형태를 설계한 후, 선원의 방사능 붕괴나 검출기에 방사선이 입사하는 과정에서 발생할 수 있는 광전효과나 컴프턴 산란과 같은 물리적 현상을 시뮬레이션할 수 있다. 또한 검출기를 회전시키면서 각도별 영상정보를 획득하는 시뮬레이션도 할 수 있다. 시뮬레이션 결과 검출기에서 반응이 일어난 시간, 위치 및 그 때의 에너지 정보를 예측할 수 있으며, 획득한 데이터를 사용하여 영상 재구성을 위한 여현곡선을 만들 수 있고, 산란분획을 얻을 수 있다.

### 2. GATE를 이용한 시뮬레이션 신뢰성 검증

GATE 코드에 대한 신뢰성을 검증하기 위하여 Weisenberger 등<sup>6)</sup>이 보고한 감마카메라 시스템의 성능과 시뮬레이션을 통해 계산한 성능을 비교, 분석하였다. 이들이 개발한 감마카메라 시스템은 CsI(Na) 섬광결정과 평행구멍조준기 및 R3292-02 위치민감형 광전자증배관(Position Sensitive Photomultiplier Tube, PSPMT)으로 구성되어 있다. 섬광결정은 픽셀 크기 1 mm × 1 mm × 3 mm, 지름 110 mm인 배열형 CsI(Na)이며, 각 픽셀은 0.2 mm 두께 반사물질로 분리되어 있다. 이 시스템

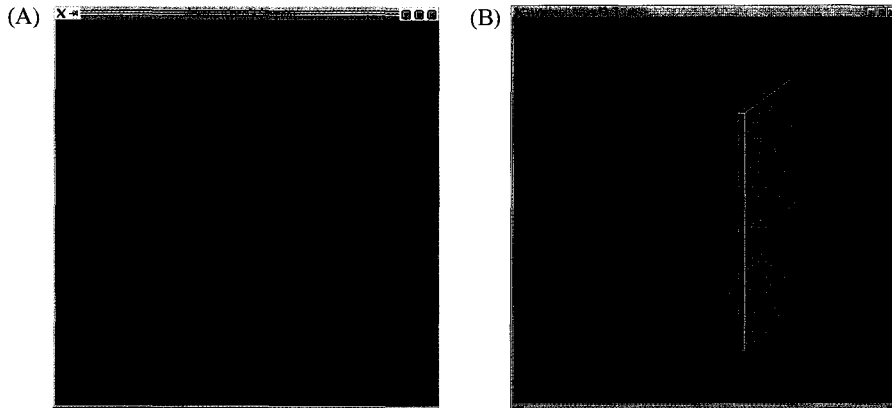


Fig 1. A 5 mm length Parallel-hole collimator which has 0.2 mm × 0.2 mm square shape hole and 0.05 mm septa thickness is shown (A). Geometry of gamma camera system simulated with GATE. Line source and gamma camera coupled to parallel hole collimator are shown (B).

탐에 사용한 평행구멍조준기 구멍크기는 0.2 mm × 0.2 mm × 5 mm이며, 격벽두께는 0.05 mm이다(Fig 1A). 조준기 전체 지름은 125 mm이며, 재질은 구리-녹주석(~1.9% 녹주석) 합금이다. 시뮬레이션에 사용한 선원은 비교 실험 환경과 유사한 내경 0.8 mm, 길이 8 cm인 튜브에 채운 2.4 MBq I-125로 하였고, 이 선 선원을 조준기 2 mm 앞에 위치시키고 평면영상을 획득하였다(Fig 1B). 그리고 이 영상에 대한 공간분해능과 민감도를 측정하였다. 모든 시뮬레이션에서 빛의 이동 및 PMT의 영향은 고려하지 않았다.

### 3. 섬광결정 두께 결정

내인성분해능은 사용하는 섬광결정의 섬광빛 출력이 많을수록, 섬광결정 두께가 얇을수록 향상한다. I-125 SPECT기기에 사용할 섬광결정으로 섬광빛 출력이 많은 NaI(Tl)을 선택하였으며, 형태는 평판형으로 하였다. 평판형 섬광결정 두께를 결정하기 위해서 I-125에서 방출하는 방사선의 에너지 가중평균치와 이 에너지에 대한 선형감쇠계수, 섬광결정 두께에 따른 검출율을 계산하였다<sup>8)</sup>.

### 4. 조준기 설계

I-125 선원 영상화에 적합한 조준기 파라미터를 결정하기 위해 GATE 시뮬레이션을 실행하였다.

사용한 선원의 방사능은 15 MBq이고, 직경은 0.1 mm로 설정하였다. 평행구멍조준기 시뮬레이션 시 점선원은 조준기 파라미터 변화에 상관없이 조준기에서 15 mm 떨어진 지점에 위치시켰다. 바늘구멍조준기 시뮬레이션 시에는 허용각도에 따라 원하는 시야(Field of View, FOV)를 충족시키기 위한 회전반경(Radius of Rotation, ROR)이 달라지기 때문에 점선원 위치를 허용각도에 따라 달리하였다. 평행구멍조준기 재질은 구리-녹주석(~1.9% 녹주석) 합금이고, 바늘구멍조준기 재질은 텅스텐으로 하였다(Fig 2). 조준기 파라미터 변화가 공간분해능과 민감도에 미치는 영향을 분석하기 위해 90 mm × 90 mm × 1 mm 크기 평판형 NaI(Tl)을 조준기에 결합시켜 한 각도에서의 평면영상 획득 시뮬레이션을 실행하였다.

#### 1) 평행구멍조준기

평행구멍조준기의 구멍모양, 구멍크기, 구멍길이, 격벽두께는 영상 질을 결정하는 중요한 파라미터이다<sup>9,10)</sup>. 조준기 구멍 크기와 길이가 공간분해능과 민감도에 미치는 영향을 고찰하기 위해 조준기 구멍모양은 사각으로 고정시키고, 격벽두께는 0.05 mm로 고정시킨 후 구멍크기를 직경 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 mm로 변화시키고, 각각의 구멍크기에 대해 5, 7.5, 10, 12.5, 15 mm로 구멍길이를

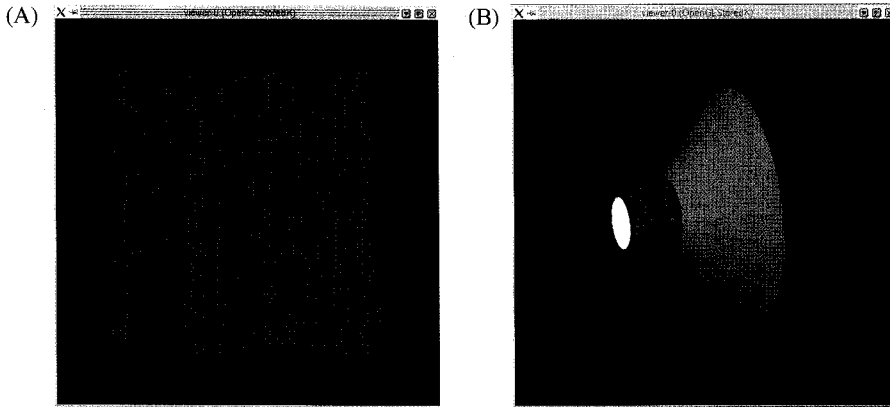


Fig 2. Geometries of Parallel-hole collimator (A) and pinhole collimator (B) simulated by GATE.

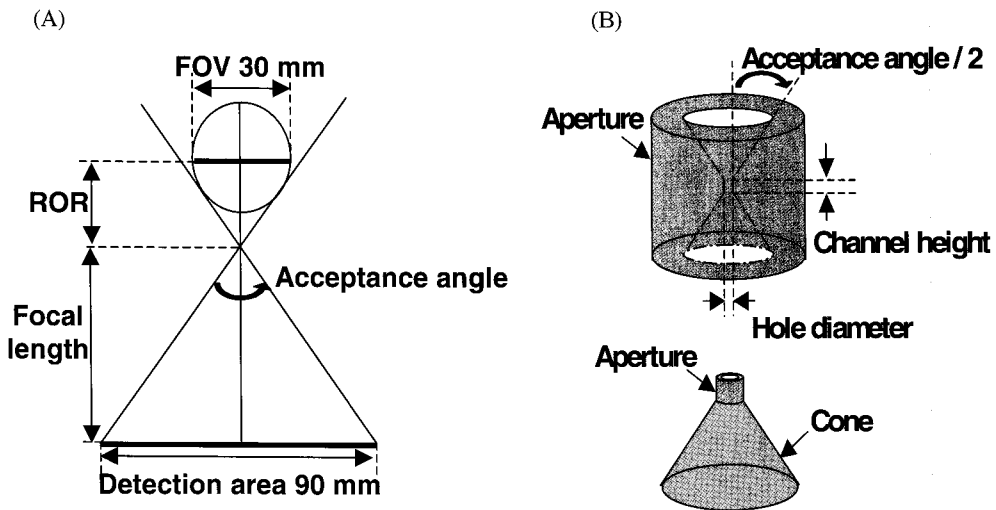


Fig 3. Imaging geometry of a pinhole collimator (A) and schematic diagram of pinhole collimator aperture (B).

변화시키면서 평면영상 획득 시뮬레이션을 실행하였다. 다음으로 구멍모양이 공간분해능과 민감도에 미치는 영향을 고찰하기 위해 사각구멍조준기와 동일한 파라미터를 가진 육각구멍조준기의 평면영상 획득 시뮬레이션을 실행하였다.

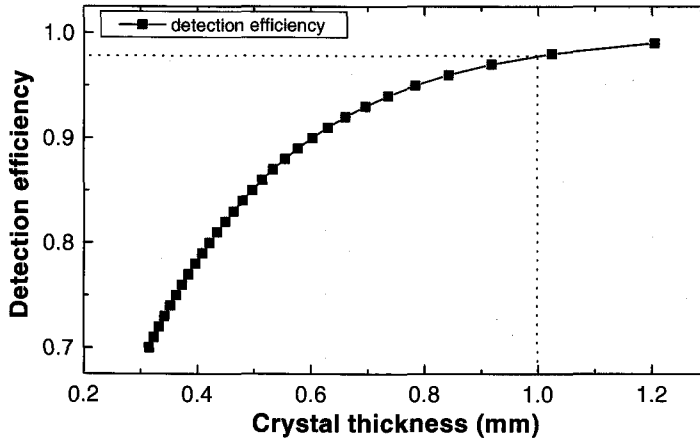
### 2) 바늘구멍조준기

바늘구멍조준기의 구멍지름, 채널높이, 허용각도, 초점거리와 회전반경의 비로 구해지는 확대율은 영상 질을 결정하는 중요한 파라미터이다. 방사선의 입사 허용각도를 제한하기 위해 허용각도에 따른 확대율을 계산하였다. 30 mm FOV와 90

mm PSPMT 검출면(R3292-02 PSPMT의 유효시야)은 고정시킨 후, 확대율이 최소 2인 지점에서 허용각도 최대값을 정하였다(Fig 3A). 허용각도와 바늘구멍지름이 공간분해능과 민감도에 미치는 영향을 고찰하기 위해 허용각도를 60, 70, 80, 90도로 변화시키고, 각각의 허용각도에 대해 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 mm로 구멍지름을 변화시키면서 평면영상 획득 시뮬레이션을 하였다. 그리고 채널높이가 공간분해능과 민감도에 미치는 영향을 알아보기 위해서 허용각도가 90도이며, 구멍지름이 1 mm인 바늘구멍조준기를 모사한 뒤, 채널높이를 0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 mm로 변화시키면서 평면

**Table 1.** Comparison of Measured and Simulated Spatial Resolutions and Sensitivities

	Spatial resolution	Sensitivity
Measured	1.76 mm	30.63 cps/MBq
Simulation	1.69 mm	31.58 cps/MBq
% Difference	4.0%	3.1%



**Fig 4.** Detection efficiency as a function of NaI(Tl) crystal thickness when irradiated with 28 keV gamma ray.

영상 획득 시뮬레이션을 실행하였다(Fig 3B).

**5. 검출기 성능평가 시뮬레이션**

검출기 성능을 평가하기 위해 NaI(Tl) 섬광결정에 평행구멍조준기와 바늘구멍조준기를 결합한 SPECT 시스템을 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션에 사용한 I-125 선원의 방사능은 2.4 MBq이며, 지름은 0.1 mm로 하였다. 선원의 위치는 평행구멍조준기가 결합된 SPECT의 경우 조준기 표면에서 회전축 중심으로 22 mm 떨어진 지점이고, 바늘구멍조준기가 결합된 SPECT의 경우 바늘구멍에서 회전축 중심으로 22 mm 떨어진 지점이다. 선원을 FOV 중심 및 중심에서 10 mm 떨어진 곳에 위치시킨 후 검출기를 3도 간격으로 360도 회전시키면서 각도별 투사영상을 획득하였다. 그리고 획득한 투사영상을 사용해 영상을 재구성한 후 공간분해능과 민감도를 계산하였다. 평행구멍조준기를 사용한 SPECT 단층영상은 2차원 여과후역투사(Filtered Backprojection, FBP)방법으로 재

구성하였고, 바늘구멍조준기를 사용한 SPECT 단층영상은 3차원 FBP방법을 사용해서 재구성하였다. FBP방법으로 영상을 재구성할 때 사용한 Hann 필터의 차단 주파수는 평행구멍조준기 SPECT에서는 0.3 cycle/pixel 이었고, 바늘구멍조준기 SPECT에서는 0.5 cycle/pixel 이었다.

**결 과**

**1. GATE를 이용한 시뮬레이션 신뢰성 검증**

Weisenberger 등이 개발한 감마카메라 시스템 성능 측정값과 시뮬레이션으로 계산한 성능을 비교한 결과(Table 1), 보고된 측정값과 시뮬레이션으로 계산한 공간분해능과 민감도가 유사함을 확인하였다. 각각의 경우 오차율은 4.0%와 3.1%였다.

**2. 섬광결정 두께 결정**

I-125 선원이 방출하는 방사선의 에너지 가중평

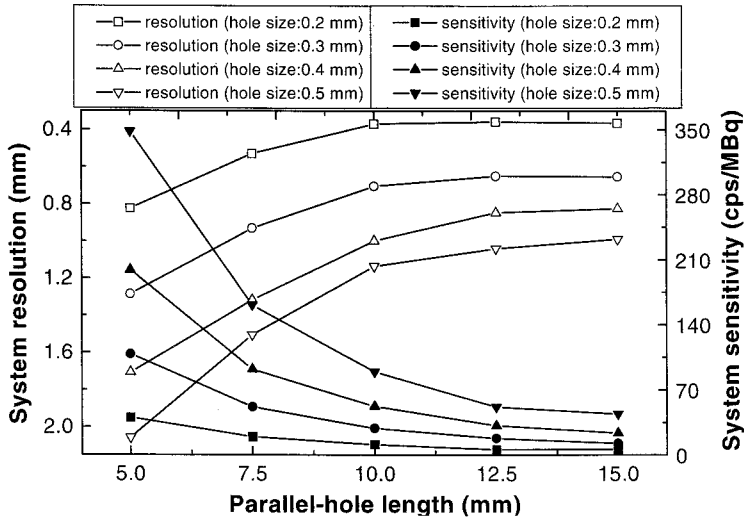


Fig 5. Spatial resolution and sensitivity as a function of hole length for various hole sizes.

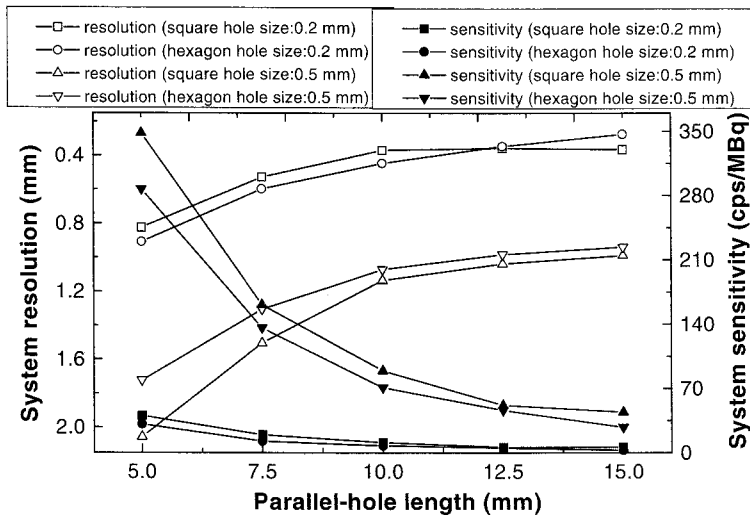


Fig 6. Spatial resolution and sensitivity as a function of hole length for various hole shapes.

균치는 28 keV이며, 이 에너지에 대한 NaI(Tl)의 선형감쇠계수는  $38.2 \text{ cm}^{-1}$ 이다. 28 keV 감마선이 NaI(Tl)에 입사할 때 두께에 따른 감마선 검출율을 계산하여(Fig 4), 98% 검출율을 보이는 1 mm로 섬광결정의 두께를 결정하였다.

### 3. 조준기 설계

#### 1) 평행구멍조준기

구멍모양이 사각형인 평행구멍조준기의 구멍 크기와 길이에 따른 공간분해능과 민감도 측정 결과를 Fig 5와 6에 나타내었다. 동일 구멍길이를 가지면 구멍 크기가 커질수록 공간분해능은 저하

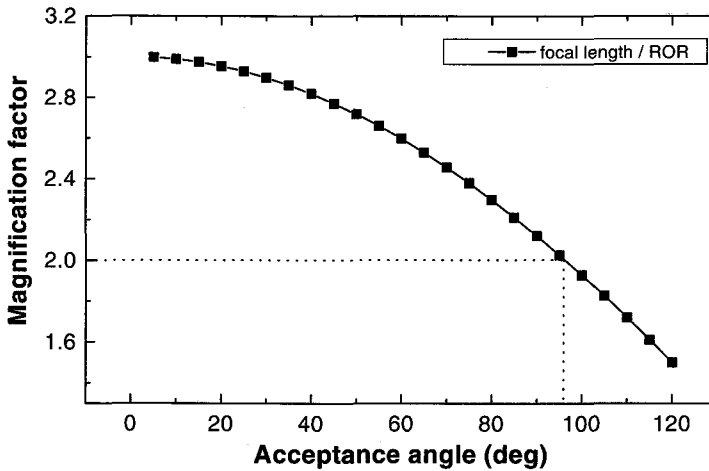


Fig 7. Magnification factor as a function of acceptance angle of pinhole collimator.

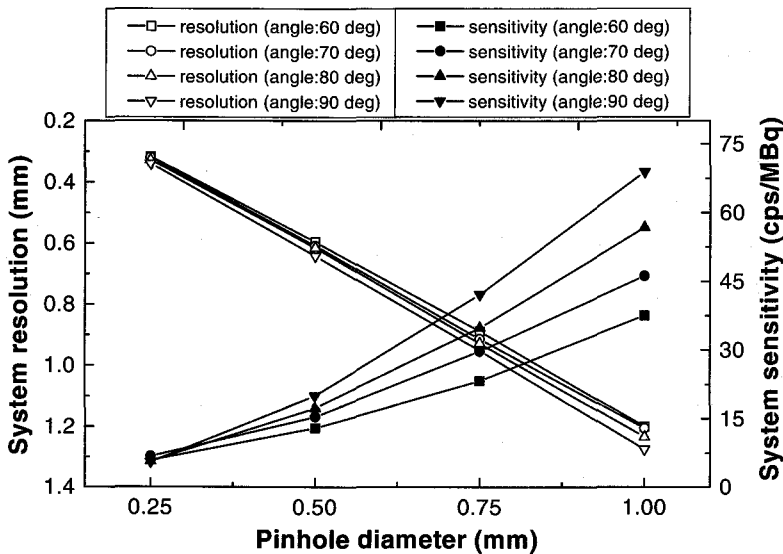


Fig 8. Spatial resolution and sensitivity as a function of hole diameter for various acceptance angles.

되나 민감도는 향상되었으며, 동일 구멍크기를 가지면 구멍길이가 길어질수록 공간분해능은 향상되나 민감도는 저하되었다.

구멍모양이 영상 질에 미치는 영향은 구멍 크기가 0.2 mm이고, 길이가 5 mm일 때는 사각구멍이 육각구멍보다 공간분해능은 8.9%, 민감도는 28.7% 우수하였다. 구멍크기가 0.5 mm이고, 길이가 10 mm일 때는 공간분해능은 육각구멍이 6.1% 우수하였으며, 민감도는 사각구멍이 25.9% 우수

하였다. 시뮬레이션 결과 고분해능 조준기로 구멍 크기가 0.2 mm이고 길이가 5 mm인 사각구멍조준기를 선택하였고, 범용 조준기로 구멍크기가 0.5 mm이고, 길이가 10 mm인 육각구멍조준기를 선택하였다.

## 2) 바늘구멍조준기

바늘구멍조준기 확대율이 최소 2가 되는 지점의 최대 입사 허용각도는 96도였다(Fig 7). 허용각

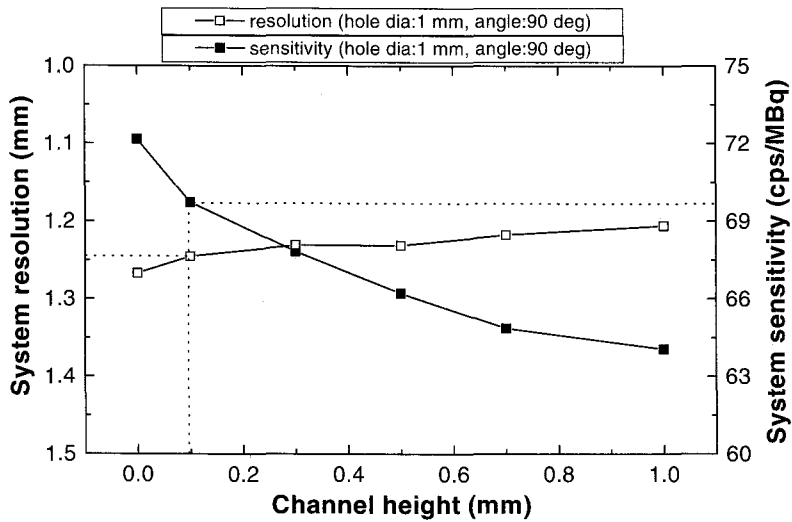


Fig 9. Spatial resolution and sensitivity as a function of channel height. Pinhole diameter and acceptance angle were fixed to 1 mm and 90 degree, respectively.

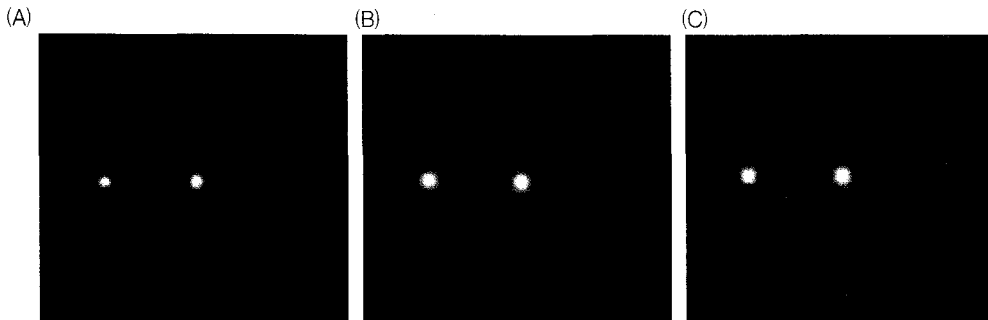


Fig 10. Reconstructed images of point source placed at the FOV center and 10 mm off-center obtained with I-125 SPECT coupled to high resolution parallel-hole collimator (A), general purpose parallel-hole collimator (B) and pinhole collimator (C).

도와 구멍지름이 커질수록 공간분해능은 저하되나 민감도는 향상되었으며(Fig 8), 채널높이가 증가하면 민감도는 저하되나, 공간분해능은 유사하였다(Fig 9). 시뮬레이션 결과 바늘구멍조준기로 구멍크기가 0.25 mm이고 채널높이가 0.1 mm이며 허용각도가 90도인 조준기를 선택하였다.

#### 4. 검출기 성능평가 시뮬레이션

GATE 시뮬레이션을 사용하여 고분해능 평행구멍조준기, 범용 평행구멍조준기, 바늘구멍조준기와 NaI(Tl) 섬광결정을 결합한 SPECT 시스템을

모사한 후 SPECT 영상을 획득하고, FBP방법으로 영상을 재구성한 후 시스템 성능을 평가하였다(Figure 10). 회전축 중심에 위치한 점선원에 대해 고분해능 평행구멍조준기, 범용 평행구멍조준기, 바늘구멍조준기를 결합한 SPECT의 공간분해능은 1.2 mm, 1.7 mm, 0.8 mm였다. 민감도는 각각의 경우 39.7 cps/MBq, 71.9 cps/MBq, 5.5 cps/MBq이었다(Table 2). 선원이 FOV 중심에서 10 mm 떨어진 지점에 위치할 경우, 공간분해능과 민감도는 선원이 중심에 있을 때 결과와 유사하였다.



**Table 2.** Spatial Resolution and Sensitivity of Reconstructed Images Obtained with Various Collimators and with the Source at FOV Center and at 10 mm Off-center

Collimator type	Spatial resolution (mm)			Sensitivity (cps/MBq)		
	High resolution	General purpose	Pinhole	High resolution	General purpose	Pinhole
FOV center	1.2	1.7	0.8	39.7	71.9	5.5
10 mm off-center	1.2	1.7	0.7	39.2	70.3	5.2

## 고 찰

이 연구의 목적은 저에너지 방사선 방출 선원인 I-125를 사용해서 고분해능, 고민감도 성능을 가지는 SPECT 시스템 파라미터를 몬테카를로 시뮬레이션으로 도출하는 것이다. 파라미터를 결정하기 위해 Geant4 기반의 시뮬레이션 코드인 GATE를 사용하였다. 사용자가 쉽게 사용할 수 있는 장점을 지닌 이 코드에 대해서 여러 대학과 연구소들은 코드에 대한 검증과 발생한 오류에 대한 수정을 지속적으로 실시하고 있다<sup>11)</sup>. 이 연구에서도 GATE 코드에 대한 신뢰성을 검증하기 위해, 보고된 측정값과 시뮬레이션으로 계산한 공간분해능과 민감도를 비교하였다. 공간분해능에서는 4.0%, 민감도에서는 3.1%의 오차율을 보임으로서 GATE 코드에 대한 신뢰성을 확보할 수 있었다. 공간분해능과 민감도를 비교했을 때 시뮬레이션이 실험보다 우수한 성능을 보였는데 이는 시뮬레이션에서 섬광빛의 이동, PMT의 비균일성, 실험환경에서 발생할 수 있는 전기적 잡음, 데이터 획득 소프트웨어의 문제점 등을 고려하지 않았기 때문이다.

일반 SPECT에 사용하는 NaI(Tl) 두께는 일반적으로 6 mm와 9.5 mm이며, 이 때 140 keV 감마선에 대한 검출율은 75%와 89%이다. 반면 28 keV 감마선 검출 시에는 NaI(Tl) 두께가 1 mm만 되어도 98% 검출율을 보인다. 일반적으로 검출기에 배열형 섬광결정을 사용함으로써 고분해능 영상을 얻을 수 있다. 그러나 이 연구에서는 지름이 90 mm 이면서, 픽셀이 최소 1 mm × 1 mm × 1 mm인 배열형 NaI(Tl)은 현재의 기술력으로는 제

작이 불가능한 것으로 조사되었기 때문에 배열형 섬광결정을 고려대상에서 제외하였다. 현재 제작 가능한 배열형 섬광결정의 최소 픽셀 크기는 1.5 mm × 1.5 mm × 2 mm 혹은 2 mm × 2 mm × 1 mm였다. 이러한 섬광결정은 1 mm 두께의 평판형 섬광결정에 비해 고분해능 섬광결정으로서의 장점을 가지지 못한다. 2 mm로 두께가 두꺼워지면 방사선 산란이나, 빛 퍼짐 정도가 커져 내인성 분해능이 나빠질 것이고, 2 mm로 픽셀 표면적이 커지면 공간분해능이 2 mm 이상으로 제한될 것이다.

우리 실험실에서는 평판형 섬광결정의 유용성을 검증하는 실험을 수행하여 보고한 바 있다<sup>12)</sup>. Wojcik등이 배열형 섬광결정용으로 개발한 저항전하분배회로와 지도화 알고리즘, 에너지 보정 등<sup>13)</sup>을 평판형 섬광결정에 적용하여 평판형과 배열형 섬광결정의 성능을 평가한 결과, 영상보정 방법을 평판형 섬광결정에 적용할 경우 고분해능과 고민감도를 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다. 최종적으로 결정된 I-125 SPECT의 섬광결정은 두께가 1 mm이며, 지름이 90 mm인 평판형 NaI(Tl)이었다.

조준기 파라미터를 결정하기 위해 고려해야 할 변수는 다양하다. 평행구멍조준기의 경우 구멍모양, 구멍크기, 구멍길이, 격벽두께가 있고, 바늘구멍조준기의 경우 바늘구멍지름과 채널높이, 허용각도, 확대율이 있다. 이러한 변수는 사용목적 또는 검출하려는 방사선 에너지에 따라 정해진다. 이 연구에서는 고분해능 또는 범용이라는 사용목적에 따라 조준기 파라미터를 결정하였다. 평행구멍조준기 파라미터 결정 시뮬레이션 시 격벽두께는 격벽이 얇을수록 민감도가 향상하기 때문에

구리-녹주석 합금으로 만들 수 있는 격벽의 최소 두께인 0.05 mm로 고정하였다. 이 두께는 일반 감마카메라에 사용하는 고민감도 조준기의 격벽 두께(0.25 mm)와 유사한 감마선 차폐효과를 가지는 파라미터이다. 바늘구멍조준기 파라미터 평가 시뮬레이션 결과 조준기 공간분해능은 확대율이나 허용각도보다 구멍 크기에 영향을 더 많이 받는 것을 확인할 수 있었다. 시뮬레이션으로 도출한 최적의 파라미터를 사용해 모사한 조준기의 성능은 고분해능 평행구멍조준기의 경우 공간분해능은 0.8 mm, 민감도는 40.0 cps/MBq이었고, 범용 평행구멍조준기의 경우 공간분해능은 1.1 mm, 민감도는 71.1 cps/MBq이었으며, 초고분해능 바늘구멍조준기의 경우 공간분해능은 0.3 mm, 민감도는 5.5 cps/MBq이었다.

SPECT 영상획득 시뮬레이션으로 측정된 선원 위치별 재구성영상의 공간분해능과 민감도는 유사하여 I-125 SPECT 시스템이 FOV내에서 균일한 성능을 가짐을 확인할 수 있었다. 재구성 영상 공간분해능이 평면영상으로 획득한 공간분해능에 비해 상대적으로 높은 수치를 보이는데, 이는 단층영상 재구성시 투사와 역투사 과정에서 생기는 잡음의 영향이다.

마우스나 랫의 심장 또는 뇌 등 소동물 연구에 유용성이 높은 고분해능 영상을 획득하기 위해서는 1 mm 정도의 공간분해능이 필요하다. 종래의 검출기는 1 mm 정도 공간분해능을 획득하기 위해 민감도가 현저히 나쁜 바늘구멍조준기를 사용하였다. 그러나 시뮬레이션 결과 I-125 SPECT는 평행구멍조준기를 사용해서 1 mm 정도 공간분해능을 획득함과 동시에 고민감도를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

현재 시뮬레이션으로 도출한 파라미터를 사용해 I-125 SPECT 시스템을 구축하기 위해 섬광결정과 조준기를 제작중이며, 시스템 구축 후에는 I-125를 이용한 소동물 핵의학 영상 획득에 이용할 계획이다.

## 요 약

**목적:** I-125는 저에너지(27-35 keV) 방사선을 방출하기 때문에 두께가 얇은 섬광결정과 조준기를 사용할 수 있어 고분해능, 고민감도 영상획득에 유리한 물리적 특성을 가지고 있다. 이 연구의 목적은 새로운 시뮬레이션 도구인 GATE (Geant4 Application for Tomographic Emission)를 사용하여 최적의 I-125 SPECT 시스템 파라미터를 도출하는 것이다. **대상 및 방법:** 시뮬레이션 방법의 신뢰성을 검증하기 위해, Weisenberger 등이 개발한 감마카메라 시스템을 모사하였다. 섬광체로 평판형 NaI(Tl)을 사용하였으며, 두께는 검출효율을 계산해서 결정하였다. 평행구멍조준기와 바늘구멍조준기의 여러 파라미터가 공간분해능과 민감도에 미치는 영향을 평가하였다. 그리고 최적화된 조준기를 결합한 I-125 SPECT의 성능을 평가하였다.

**결과:** 시뮬레이션에 대한 신뢰성 검증연구 결과, 측정과 시뮬레이션에서 공간분해능(4%)과 민감도(3%)가 유사함을 확인하였다. NaI(Tl) 두께는 I-125 감마선을 98% 검출할 수 있도록 1 mm로 결정하였다. 시뮬레이션 결과 고분해능 평행구멍조준기로 구멍크기가 0.2 mm이고 길이가 5 mm인 사각구멍조준기를 선택하였고, 범용 평행구멍조준기로 구멍크기가 0.5 mm이고, 길이가 10 mm인 육각구멍조준기를 선택하였다. 바늘구멍조준기는 구멍지름이 0.25 mm이고 채널높이가 0.1 mm이며, 허용각도가 90도인 조준기를 선택하였다. 최적화된 고분해능 평행구멍조준기, 범용 평행구멍조준기, 바늘구멍조준기를 결합한 I-125 SPECT의 재구성 영상 공간분해능은 각각 1.2 mm, 1.7 mm, 0.8 mm였으며, 민감도는 39.7 cps/MBq, 71.9 cps/MBq, 5.5 cps/MBq이었다. **결론:** GATE 시뮬레이션으로 I-125 영상에 적합한 섬광결정 파라미터 및 조준기 파라미터를 도출하였다. 이 연구결과를 I-125 SPECT로 탁월한 고분해능, 고민감도 영상을 얻을 수 있음을 보여준다.

### 참고문헌

- 1) Koh CS, Nuclear Medicine. 3rd ed. Seoul: Korea Medical Book Publisher ; 1997. p. 47-50.
- 2) Weisenberger AG, Bradley EL, Majewski S, Saha MS. Development of a Novel Radiation Imaging Detector System for In Vivo Gene Imaging in Small Animal Study. *IEEE Trans Nucl Sci* 1998;45:1743-9.
- 3) Weisenberger AG, Wojcik R, Bradley EL, Brewer P, Majewski S, Qian J, et al. SPECT-CT System for Small Animal Imaging. *IEEE Trans Nucl Sci* 2003;50:74-9.
- 4) McElroy DP, MacDonald LR, Beekman FJ, Wang Y, Patt BE, Iwanczyk JS, et al. Performance Evaluation of A-SPECT: A High Resolution Desktop Pinhole SPECT System for Imaging Small Animals. *IEEE Trans Nucl Sci* 2002;49:2139-47.
- 5) Beekman FJ, McElroy DP, Berger F, Gambhir SS, Hoffman EJ, Dherry SR. Towards In VIVO Nuclear Microscopy: Iodine-125 Imaging in Mice Using Micro-Pinholes. *Eur J Nucl Med* 2002; 29:933-8.
- 6) Weisenberger AG, Kross B, Majewski S, Wojcik R, Bradley EL, Saha MS. Design Features and Performance of a CsI(Na) Array Based Gamma Camera for Small Animal Gene Research. *IEEE Trans Nucl Sci* 1998;45:3053-8.
- 7) <http://lphe.epfl.ch/~PET/research/gate/OpenGATE/>
- 8) Knoll GF. *Radiation Detection and Measurement*. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc.; 1999. p. 53-5.
- 9) Sorenson JA, Phelps ME. *Physics in Nuclear Medicine*. 2nd ed. Philadelphia: W.B. Saunders; 1987. p. 331-45.
- 10) Bong JK, Kim HJ, Lee JD, Kwon SI. Computer Simulation for Effects of Scintillator and Parallel Hole Collimator on Gamma Probe Imaging. *Journal of Korea Society of Medical Biological Engineering*. 1998;19:563-70.
- 11) Staelens S, Strul D, Santin G, Vandenberghe S, Koole M, D'Asseler Y, et al. Monte Carlo Simulations of a Scintillation Camera Using GATE: Validation and Application Modelling. *Phys Med Biol* 2003;48:3021-42.
- 12) Jeong MH, Choi Y, Chung YH, Song TY, Jung MH, Hong KJ, et al. Position Mapping, Energy Calibration, and Flood Correction Improve the Performances of Small Gamma Camera Using Position Sensitive PMT. *Conference Record of the 2003 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference*
- 13) Wojcik R, Majewski S, Kross B, Steinbach D, Weisenberger AG. High Spatial Resolution Gamma Imaging Detector Based on a 5" Diameter R3292 Hamamatsu PSPMT. *IEEE Trans Nucl Sci* 1998;45:487-91.