

'99 춘계학술발표회 논문집  
한국원자력학회

양전자방출단층촬영기용 BGO블록 검출기 성능평가와 동시계수 시스템

Performance Evaluation of BGO Block Detectors Used in Positron  
Emission Tomography and a Coincidence System

김종호, 최 용, 임기천, 이만영, 이상근, 이경한, 김상은, 최연성, 김병태

삼성서울병원  
서울특별시 강남구 일원동 50

#### 요 약

국내에 도입되어 운용중인 GE Advance 양전자방출촬영기에 사용되고 있는 BGO블록 검출기의 기본특성을 조사하였다. 이 검출기는 36개의 BGO 섬광결정이 하나의 블록으로 구성되어 두 개의 2채널 광전자증배관에 접합되어 있다. Tc-99m과 F-18 선원을 이용하여 섬광결정 지도영상과 내인성 에너지분해능, 그리고 동시계수 신호를 측정하였다. 에너지 분해능은 140 keV에 대하여 69% FWHM, 511 keV에 대하여 33% FWHM로 측정되었고 양호한 결정 지도영상과 동시계수 신호를 획득하였다. 검출기의 시간분해능은 측정중에 있으며 이를 이용한 고성능 소형 양전자방출단층촬영기 개발 가능성을 확인하였다.

#### Abstract

We investigated the basic performances of the BGO block detectors, which is used in the GE Advance positron emission tomography. The block detector is composed of 36 small BGO crystals coupled to two 2-channel photomultiplier tubes. In this study, we measured the crystal map and the intrinsic energy resolution of the detector. The coincidence signals between the detectors were also obtained using F-18. The intrinsic energy resolution of the block detector was 69% FWHM at 140 keV and 33% FWHM at 511 keV. High quality crystal map and the coincidence signals between the detectors were successfully obtained. The timing resolution of the detectors are being measured. The results of this study demonstrate the feasibility of developing high performance positron emission tomography.

## 1. 서 론

핵의학분야에서 사용되고 있는 양전자방출단층촬영기(positron emission tomography, PET)는 인체내에 주입한 방사성의약품에서 방출되는 양전자 소멸 감마선을 동시에 검출하여 생체내 생물학적 현상규명이나 난치성 뇌신경계 질환, 악성종양 등의 조기진단과 치료방법 결정, 예후 평가 등에 유용하게 이용되고 있는 첨단 의료영상 기기이다. 양전자방출단층촬영 영상은 인체내 혈류량, 기저대사율과 합성률뿐만 아니라 신경 수용체와 전달체 농도와 같은 생화학적 현상을 영상화한 기능영상을 제공하기 때문에 전산화단층촬영(computed tomography, CT)이나 자기공명영상(magnetic resonance imaging, MRI)에서 얻어지는 형태학적 영상과 구별된다.

양전자방출단층촬영기에서는 의료용 사이클로트론에서 생산한 방사성동위원소들을 양전자 방출체로 사용한다. 양전자 방출체인 핵종은  $\beta^+$ 붕괴 과정에서 양전자와 중성미자를 방출하며, 양전자는 전자의 반입자로서 주변 물질에 있는 전자와 쌍소멸 과정을 통해  $180^\circ$  방향으로 두 개의 소멸 감마선(511 keV)을 방출한다. 이러한 소멸 감마선을 동시계수 시스템에 의해 검출함으로써 양전자방출 핵종의 체내 분포를 영상형태로 제공하는 양전자방출단층촬영기는 섬광결정(scintillation crystal), 광전자증배관(photomultiplier tube), 동시계수 회로(coincidence circuit), 영상표현 시스템(image display system) 등으로 이루어져 있다<sup>1)</sup>.

현재 국내에는 총 3기의 양전자방출단층촬영기(삼성서울병원, 서울대학병원, 원자력병원)가 도입되어 운용 중에 있으며, 이를 이용한 임상진단과 연구활동이 크게 증가추세에 있다. 또한 국제적으로도 최근 고성능 첨단 양전자방출단층촬영기 개발에 대한 필요성과 관심이 높아지면서 경제적이며 영상분해능이 높은 소형화된 양전자방출단층촬영기 개발에 관한 연구가 활발하게 보고되고 있다<sup>2-4)</sup>.

이 연구는 궁극적으로 소형화된 고성능 양전자방출단층촬영기를 개발하는 것으로, 본 논문에서는 초기 연구단계로써 현재 삼성서울병원 핵의학과에 설치되어 사용중인 GE Advance<sup>TM</sup> PET (General Electric Medical Systems, Milwaukee, WI, USA) 스캐너로부터 분리된 BGO블록 검출기의 기초성능을 평가하고 두 개의 검출기를 이용한 동시계수 시스템을 구축하여 소형 양전자방출단층촬영기 개발 가능성을 고찰하고자 한다.

## I. 재료 및 방법

의료용 사이클로트론에서 생산되어 양전자방출단층촬영기에 사용되는 대표적인 양전자 방출체는 표 1에 나타낸 바와 같다. 본 연구에서는 이중에서 양전자방출단층촬영기에 가장 많이 사용되고 있는 F-18과 핵의학 분야에서 광범위하게 사용되고 있는 Tc-99m (반감기 6시간, 140 keV 감마선 에너지) 점선원을 측정에 이용하였다.

표 2에 현재 상용화된 양전자방출단층촬영기에 사용되고 있는 몇 가지 섬광결정의 물리적 특성을 나타내었다.

표 1. 양전자방출단층촬영기에 사용되는 양전자 방출체 핵종

Radionuclides	Half-life	Nuclear reaction	Compounds
$^{11}\text{C}$	20.3 min	$^{14}\text{N}(p, \alpha)^{11}\text{C}$	$^{11}\text{C}-\text{CO}_2$
$^{13}\text{N}$	10.0 min	$^{16}\text{O}(p, \alpha)^{13}\text{N}$	$^{13}\text{N}-\text{NO}_x$
$^{15}\text{O}$	2.1 min	$^{14}\text{N}(d, n)^{15}\text{O}$	$^{15}\text{O}-\text{O}_2$
$^{18}\text{F}$	109.0 min	$^{18}\text{O}(p, n)^{18}\text{F}$ $^{20}\text{Ne}(d, \alpha)^{18}\text{F}$	$^{18}\text{F}-\text{F}^-$

표 2. 양전자방출단층촬영기에 사용되는 섬광체의 물리적 특성

	Scintillator			
	NaI(Tl)	BGO	LSO	YSO
Decay time	230	300	40	70
Relative Light Output	100	15	75	120
Effective Z	51	74	66	34
$1/\mu$ at 140 keV (mm)	4.2	0.82	1.0	7.7
$1/\mu$ at 511 keV (mm)	30	11	12	26
Max Emission $\lambda$ (nm)	410	480	420	420

BGO(bismuth germanate oxide) 섬광결정은 유효 원자번호가 74이며 300 ns의 붕괴시간과 480 nm의 섬광파장을 가지고 있고 제작이 용이하여 511 keV 감마선을 검출하는데 가장 널리 사용되고 있다. 본 연구에 사용된 감마선 검출기는 이러한 BGO 섬광결정 36개(각  $4 \times 8 \times 30 \text{ mm}^3$  크기)가 하나의 블록으로 구성되어 두 개의 2채널 광전자증배관(Hamamatsu E2037, Shizuoka, Japan)에 접합되어 있다.

### 1. 검출기 기초성능 측정

검출기 기초성능을 측정하기 위하여 BGO블록 검출기와 몇 개의 NIM (nuclear instrument module)을 이용하여 그림 1과 같이 시스템을 구성하였다<sup>9-10)</sup>.

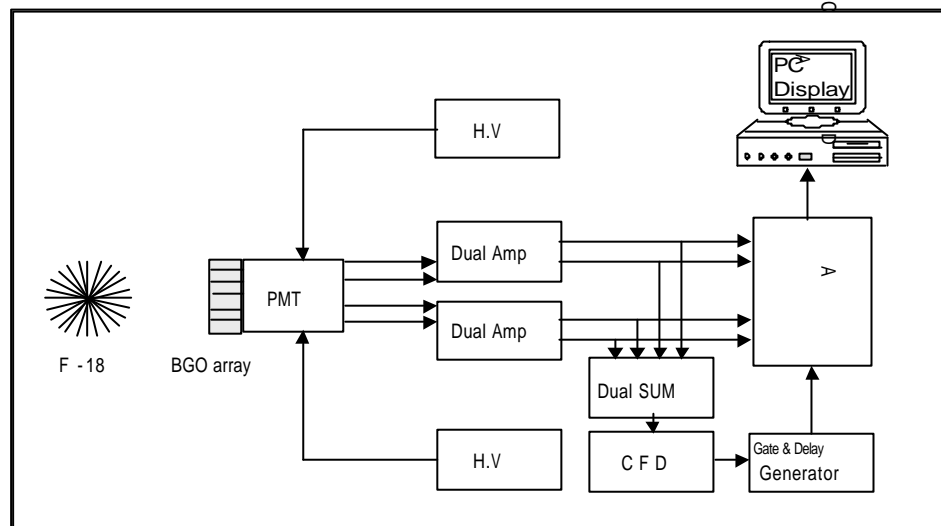


그림 1. 검출기 성능 측정을 위한 시스템 구성도

검출기의 BGO결정체내에 입사된  $\gamma$ -선은 섬광 빛으로 변환되어 광전자증배관의 음극(cathode)에 의해 검출된다. 본 연구에서 사용된 광전자증배관에 -1000 V의 작동전압을 공급하였으며, 음극에서 검출된 신호들은 광전자증배관내의 다층 다이노드(dynode)에 의해 증폭된 후, 양극(anode) 채널에 전달된다. 이 신호들을 전치증폭기(pre-amplifier)에 의해 1차 증폭시킨 후 주증폭기로 입력하였다.

주증폭기(amplifier)를 이용하여 신호파형을 정형( $1.5\mu\text{s}$  shaping time) 및 2차 증폭하였고, 이들을 아날로그-디지털 변환기(analog to digital converter)에 입력하였다. 또한 주증폭기에서 정형된 또다른 신호들을 가산(dual sum and invert) 증폭기 모듈과 일정분획식별기(constant fraction discriminator, CFD) 모듈, 그리고 게이트 지연신호 발생기(gate & delay generator) 모듈을 이용하여 아날로그-디지털 변환기에 사용될 트리거 신호를 생성하였다. 이 트리거 신호는 10 V의 진폭과  $1\mu\text{s}$ 의 펄스 폭을 가지며, 이 신호에 의해 각 모듈을 통과한 4개의 위치신호가 동시에 채널당 1.25 MSamples/sec의 속도로 아날로그-디지털 변환기에 의해 획득되고 디지털화 된다.

이렇게 만들어진 신호들은 아날로그-디지털 변환기에서 디지털화 되어 일반 개인용 컴퓨터의 메모리로 입력된다. 검출기 신호로부터 좌표결정은 앵거논리(Anger logic)를 적용하였고, 컴퓨터와의 디지털 입/출력 신호처리 제어를 위한 소프트웨어 인터페이스로써 Visual C++ 을 사용하여 영상을 획득·저장하고 간단한 분석이 가능한 영상표현 프로그램을 개발하였다.

감마선 검출기에 접합된 BGO 섬광결정 지도영상을 획득하기 위하여 두 개의 검출기에 대해 양전자 방출 선원인 F-18  $10\mu\text{Ci}$ 를 이용하여 300 초 동안 측정하였다. 또한 BGO 블록 검출기의 에너지분해능 특성을 비교하기 위해 저에너지 영역( $Tc-99m$ , 140 keV)과 고에너지 영역(F-18, 511 keV)에서 스펙트럼을 획득하였다.

## 2 동시계수 신호 측정

두 개의 BGO블록 검출기를 사용하여 양전자 소멸에 의해 발생한 감마선을 동시에 검출한 신호만을 계수하기 위해 그림 2에 나타난 것처럼 시스템을 디자인하여 구성하였다. 양전자 방출체인 F-18 점선원  $10\mu\text{Ci}$ 를 두 검출기 사이 중앙 위치(5 cm)에 놓고 각각의 검출기에서 출력된 신호를 증폭기를 이용하여 정형 및 증폭하였으며, 가산증폭기 모듈과 일정분획식별기 모듈을 사용하여 같은 조건에서 논리신호를 형성하였다. 양전자 소멸에 의해 동시에 양방향으로 방출된 소멸감마선을 검출한 신호만을 측정하기 위하여 고속 동시계수(Fast Coincidence) 모듈을 이용하였다. 두 검출기에서 출력된 신호와 동시계수 신호를 디지털 오실로스코프(Tektronix 540B- 500MHz, 2GS/s, Huntsville, Alabama, USA)를 이용하여 측정하였다.

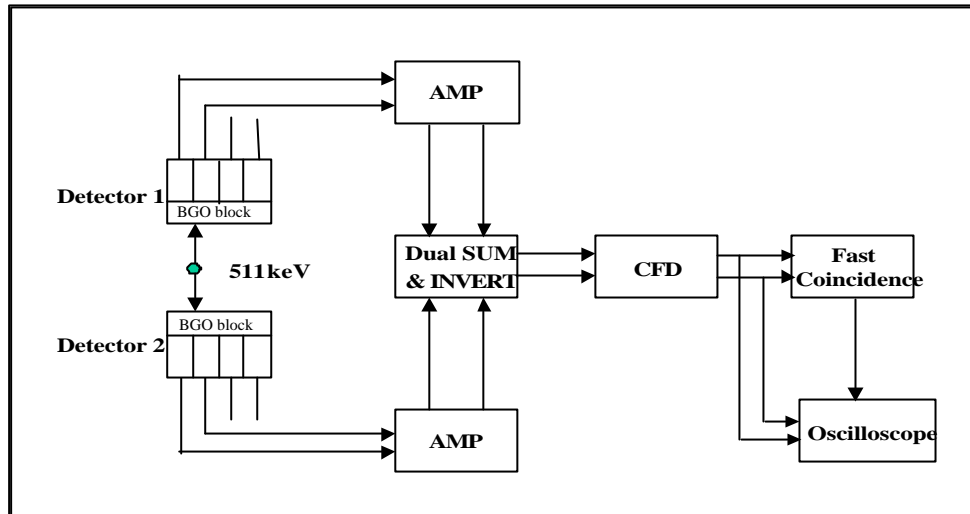


그림 2 동시계수 신호 측정을 위한 시스템 구성도

### III. 결 과

두 개의 BGO블록 검출기에 대한 섬광결정 지도영상 획득 결과를 그림 3에 나타내었다. 영상은  $256 \times 256$  화소크기로 나타내었으며, 총 36개의 섬광결정 배열영상을 양호한 상태로 획득하였다.

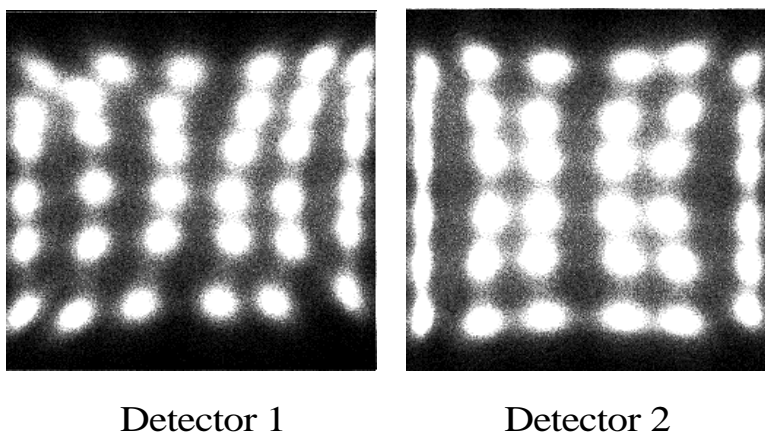


그림 3. BGO 섬광결정 지도영상

이 연구에서 사용된 BGO블록 검출기의 에너지 분해능은 Tc-99m의 감마선 붕괴에너지인 140 keV에 대하여 69% FWHM (full width at half maximum), F-18의 511 keV에 대하여 33% FWHM으로 측정되었다. 그림 4에 두 선원에 대한 에너지 스펙트럼 측정결과를 나타내었다.

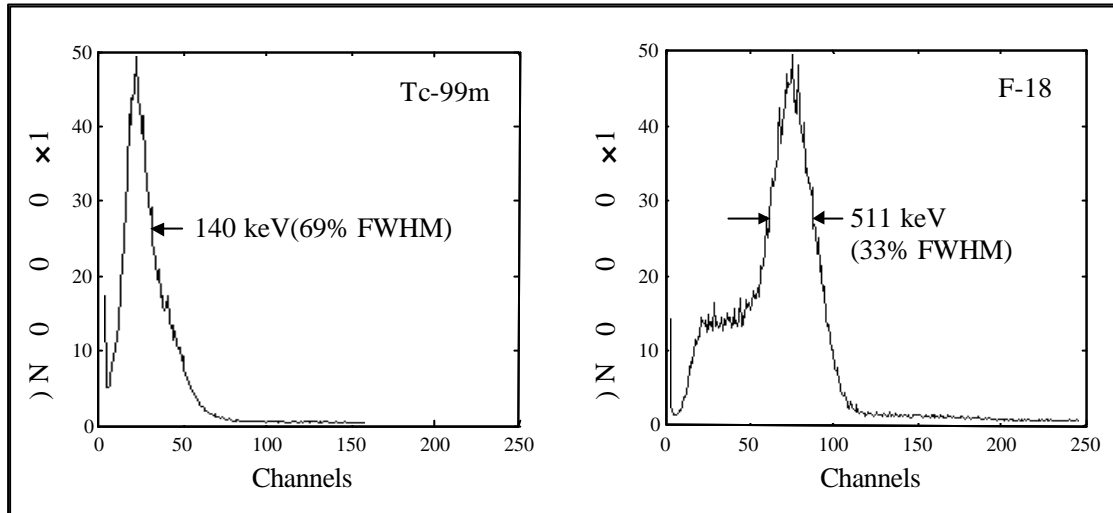


그림 4 BGO블록 검출기의 에너지분해능 측정결과

양전잡 소멸 감마선을 두 개의 BGO블록 검출기에서 동시에 계수된 신호 측정 결과를 두 검출기 신호와 함께 그림 5에 나타내었다.

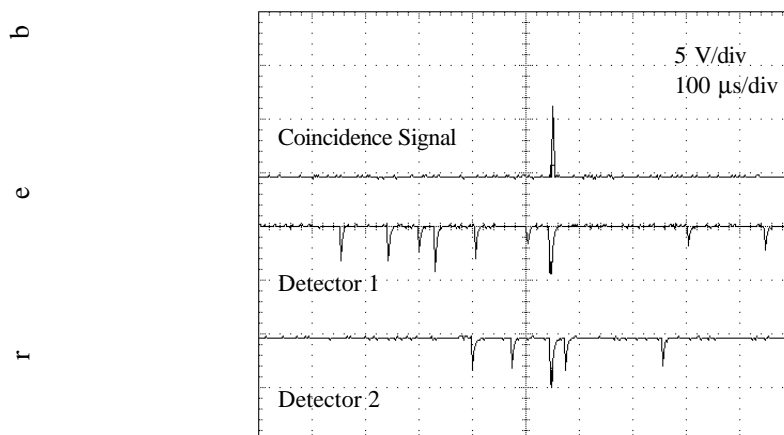


그림 5. 두 검출기의 동시계수 신호 측정결과

#### IV. 고찰 및 결론

이 연구에서는 고성능 소형 양전자방출단층촬영기 개발을 위해 현재 사용중인 상용 양전자방출단층촬영기로부터 분리된 두 개의 BGO블록 검출기의 기초성능을 측정하고 이를 이용한 동시계수 시스템을 구축하여 두 검출기간의 동시신호를 성공적으로 측정하였다.

두 개의 BGO블록 검출기의 섬광결정 지도영상을 획득한 결과, 공간왜곡 현상이 관찰되었으나 우수한 상태의 섬광결정 지도영상을 구현하였다. 이 공간왜곡 현상은 검출기에 사용된 두 개의 2채널 광전자증배관내에 있는 음극의 균일하지 못한 예민도와 비선형성(nonlinearity)이 주된 원인으로 보고되어 있다<sup>11)</sup>. 이 현상은 결국 영상의 장균일도(field uniformity)에 영향을 미치므로, 획득영상에 대한 보정 계수행렬을 구하여 실제 영상에 적용하는 방법으로 장균일도 및 비선형성을 보정하여 공간왜곡현상을 완화시킬 수 있을 것으로 판단된다<sup>12-13)</sup>.

핵의학분야에서 사용되는 동위원소의 감마선 에너지는 대개 50 ~ 600 keV의 에너지 영역이다. 이 연구에 사용된 감마선 검출기는 높은 유효 원자번호를 가지는 BGO 섬광결정을 채용하고 있어 저에너지 영역에서보다는 고에너지 영역에서 양호한 에너지 분해능을 나타내었다. 이 결과는 문헌자료(511 keV에 대하여 38% FWHM)<sup>14)</sup>에서 나타난 것과 비슷한 결과로 확인되었다. 핵의학 영상에서 좋지 못한 에너지 분해능은 검출기의 신호대 잡음 비(signal to noise ratio)를 감소시키고, 산란감마선에 의한 영향때문에 진단영상의 대조도가 저하되며 인체내 병변 검출에 대한 정확도를 떨어뜨리게 된다. 그러므로 이 연구에서 사용한 BGO블록 검출기가 낮은 에너지 영역에서보다는 높은 에너지 영역인 양전자 소멸 감마선을 검출하는데 적절함을 확인할 수 있었다.

현재 두 검출기간의 시간분해능 측정을 위한 시스템을 구축 중에 있으며, 이 연구에서 사용한 두 개의 BGO블록 검출기를 이용하여 양전자방출단층촬영 영상을 획득하기 위해 대상체를 중심으로 회전각도에 따른 감마선 방출 데이터를 획득하고, 개발된 영상표현 프로그램에 영상재구성 알고리즘을 적용하는 것을 계획중에 있다. 결론적으로 이 연구 성과는 앞으로 진행될 고성능 소형 양전자방출단층촬영기 개발에 중요한 핵심 기반기술을 제공할 것으로 기대된다.



## V. 참고문헌

1. 최 용, 이정림, "양전자방출단층촬영의 원리와 응용", 대한핵의학기술학회지, Vol 1(1), pp. 26-34, 1996
2. M. Dahlborn, L.R. MacDonald, L. Eriksson, M. Paulus, M. Andreaco, M.E. Casey and C. Moyers, "Performance of a YSO/LSO Detector Block for use in a PET/SPECT System", IEEE MIC Record, pp. 1049-1053, 1997
3. M. Watanabe, H. Okada, K. Shimizu, T. Omura, E. Yoshikawa, T. Kosugi, S. Mori and T. Yamashita, "A High Resolution Animal PET Scanner Using Compact PSPMT Detectors", IEEE MIC Record, pp. 1330-1334, 1997
4. M.E. Casey, L. Eriksson, M. Schmand, M.S. Andreaco, M. Dahlborn and R. Nutt, "Investigation of LSO Crystals for High Spatial Resolution Positron Emission Tomography", IEEE Trans on Nucl Sci., Vol 44, pp. 1029-1033, 1997
5. S. Weber, A. Terstegge, R. Engels, H. Herzog, R. Reinartz, P. Reinhart, F. Rongen, H.W. Muller and H. Halling, "The KFA TierPET: Performance Characteristics and Measurements", IEEE Trans on Nucl Sci., Vol 44, pp. 1117-1119, 1997
6. P. Stenstrom, A. Rillbert, M. Bergqvist, P. Habte and C. Bohm, "A New Scaleable Modular Data Acquisition System for SPECT (PET)", IEEE MIC Record, 1998
7. A. Del Guerra, G. Di Domenico, M. Scandola and G. Zavattini, "YAP-PET: a small animal Positron Emission Tomograph based on YAP:Ce finger crystals", IEEE MIC Record, 1998
8. A. Del Guerra, F. de Notaristefani, G. Di Domenico, M. Giganti, R. Pani, A. Piffanelli, A. Turra and G. Zavattini, "Use of a YAP:Ce Matrix Coupled to a Position-Sensitive Photomultiplier for High Resolution Positron Emission Tomography", IEEE Trans on Nucl Sci., Vol 43, pp. 1958-1962, 1996
9. 김종호, 최 용, 김준영, 임기천, 김상은, 최연성, 주관식, 김병태, "소형 감마카메라 제작에 사용되는 NaI(Tl)-광전자증배관 검출기의 민감도와 위치분해능 특성 연구를 위한 몬테카를로 시뮬레이션", 의학물리, Vol 8, No 2, pp. 67-76, 1997

10. 김종호, 최 용, 권홍성, 김희중, 김상은, 최연성, 이경한, 김문희, 주관식, 김병태, "NaI(Tl)섬광결정과 위치민감형 광전자증배관을 이용한 유방암 진단용 소형 감마카메라 개발", 대한핵의학회지, Vol 32, No 4, pp. 314-322, 1998
11. C.E. Ordonez, R.A. Mintzer, J.N. Aarsvold, N.J. Yasillo and K.L. Matthews, "Simulation of imaging with sodium iodide crystals and position-sensitive photomultiplier tubes", IEEE Trans on Nucl Sci., Vol 41, pp. 1510-1515, 1994
12. J.A. Sorenson and M.E. Phelps, *Physics in Nuclear Medicine*, 2nd ed, New York, Grune & Stratton, Inc., pp. 298-345, 1987
13. A.V. Wegst and B.R. Westerman, *The Scintillation Camera*, New York, The Society of Nuclear Medicine, pp. 47-59, 1988

본 연구는 1998년도 보건의료기술연구개발사업과 삼성전자 부설 삼성생명과학연구소 연구비의 보조로 이루어졌음.