

BaF₂ 검출기의 시간과 에너지 특성연구

주관식·박일진·김종호·남기용·백승화*

= Abstract =

A Study on the Energy and Time Characteristics of BaF₂ Scintillation Detector

K.S. Joo, I.J. Park, J.H. Kim, K.Y. Nam and S.H. Beack*

The scintillation detector having BaF₂ crystal with 3.6cm dia×2.0 cm thick was provided. The energy and timing characteristics were measured and compared with NaI(Tl) scintillation detectors, which widely used in nuclear medicine. In order to measure the energy spectrum, the radioactive sources used were ²²Na, ⁵⁴Mn, ⁵⁷Co, ¹³⁷Cs and the source to detector distance was 7cm. For the timing characteristic, NaI(Tl)(1"×1")-BaF₂ and NaI(Tl)(3"×3")-BaF₂ timing coincidence systems were prepared and the used source was ²²Na emitting 511keV annihilation photons. For the 511keV gamma-ray emitted from ²²Na, It was revealed that the timing response of the BaF₂ detector was faster than NaI(Tl)(1"×1") and NaI(Tl)(3"×3") detectors used in this experimental investigation. The energy characteristics of the BaF₂ detector had a good values for about 500keV energy range.

Key words : ① BaF₂ detector ② NaI(Tl) detector ③ 에너지 분해능 (energy resolution)
④ 에너지 효율(full energy peak efficiency) ⑤ 반응시간(time response)

서 론

핵 의학에서 사용되고 있는 SPECT(Single Photon Emission Computer Tomography)나 PET(Positron Emission Tomography)등의 단층촬영장치는 환자의 몸에 방사선 물질을 주입시켜 영상을 획득하는 장치이다 [1-4]. 따라서 반감기가 짧은 물질을 사용하기 때문에 빠른 시간내에 원하는 정보를 정확히 얻는 것이 주된 관심이 된다. 즉 측정시간을 줄이기 위하여 높은 검출효율을 가지며 측정 오차를 줄이기 위하여 좋은 분해능을 가진 센서를 사용하여야 한다.

현재 핵의학에서 사용되고 있는 방사능 검출센서는 NaI(Tl)과 BGO 섬광체를 주로 사용하고 있으나 NaI(Tl)은 조해성과 분해능이 문제점으로 제기 되고 있으며,

BGO 섬광체는 가격이 높은 단점을 가지고 있다. 따라서 적절한 성능과 가격의 섬광체를 개발하고 이들의 검출특성을 조사하여 센서로 적용하기위한 연구가 필요하다. GSO(Ce), CsI(Tl), ZnS, BaF₂ 등 여러 섬광체들에 대한 연구가 많이 수행되고 있으나[5-8] 기존의 센서와 좀더 정확한 비교가 필요하다. 이들 중 BaF₂ 섬광체는 밀도가 4.89g/cm³ 이고, 섬광빛의 붕괴시간이 0.6 ns 로 매우 빠르므로 NaI(Tl)과 비교하여 더 높은 효율이 기대되며, 빠른 반응시간으로 인하여 양전자 소멸(Positron Annihilation) 실험에서 많이 사용되고 있는 물질이다. 따라서 위와 같은 특성으로 인하여 여러 응용분야에서 관심의 대상이 되고 있다.

본 연구에서는 3.6cm×2.0cm 크기의 BaF₂ 섬광체로 검출기를 제작하여 핵의학에서 가장 널리 사용되고 있는

명지대학교 물리학과
Department of Physics, Myong-Ji Univ.

명지대학교 제어계측공학과

Department of Control and Instrumentation Engineering, Myong-Ji Univ.

본 연구는 1997년도 명지대학교 교내연구비로 수행되었음.

통신저자 : 주관식, (449-728) 경기도 용인시 남동산 38의 2 물리학과, Tel. (0335)30-6167, Fax. (0335)35-9533,
e-mail : ksjo@wh.myongji.ac.kr

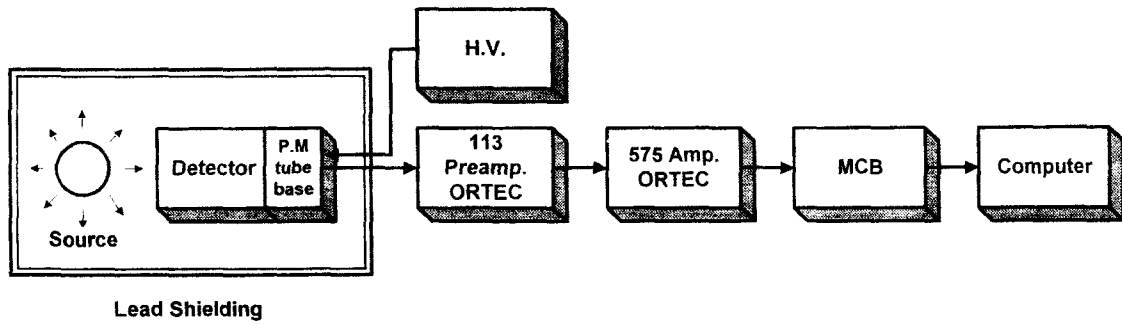


그림 1. BaF₂ 검출기와 NaI(Tl) 검출기의 에너지 측정장치
Fig. 1. Block Diagram of Energy Detection System

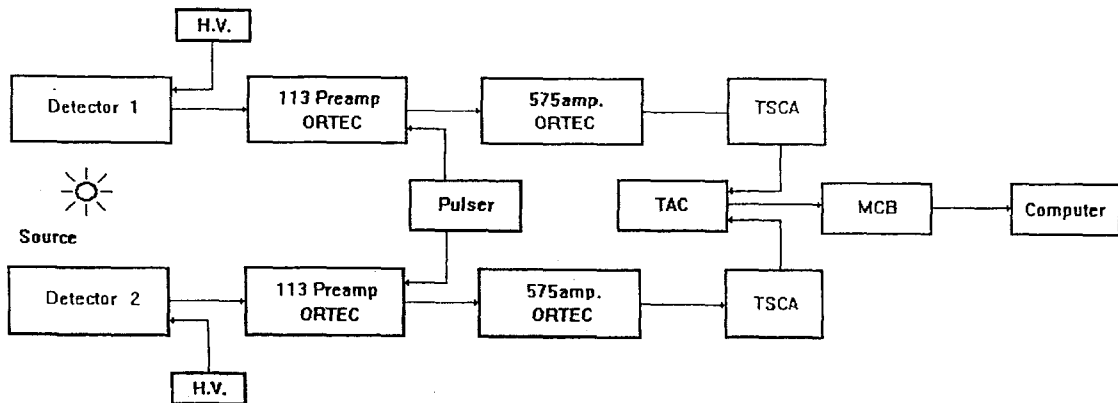


그림 2. 동시시간 측정장치
Fig. 2. Block Diagram of Slow Coincidence System

NaI(Tl) 검출기와 방사선 검출특성을 비교하여 보았다. 검출효율과 에너지 분해능을 측정하기 위하여 ²²Na, ⁵⁴Mn, ⁵⁷Co, ¹³⁷Cs의 감마선 방출선원을 사용하여 에너지 측정장치를 구성하였으며, 반응시간 측정을 위하여 NaI(Tl) 검출기와 동시시간 측정장치를 구성하였다. 이 실험결과를 토대로 BaF₂ 섬광체의 의료상 응용에 있어서 그 적합성에 관하여 논의 하였다.

실험 방법

1. 에너지 측정

3.6cm × 2.0cm(지름 × 두께)의 크기를 가진 원통형 BaF₂ 섬광체를 RCA 6655A 모드의 광증배관(Photomultiplier tube)과 접착(optical coupling) 시켰다. PM tube base 로는 ORTEC 사의 276 모드를 사용하였다. 에너지 특성을 측정하기 위하여 276 PM tube base의 preamp output에서 신호를 받았다. NaI(Tl) 검출기는 HARSHAW 사의 상용의 검출기를 사용하였다. 각 검출기의 실험장치는 다음과 같다.

각각의 검출기에서 나온 전기적 신호는 전치 증폭기와 주 증폭기를 통과하면서 펄스 성형과 증폭의 과정을 거치게 된다. 스펙트럼을 측정하기 위하여 MCB(Multichannel Buffer)채널을 4096으로 선택하였으며, 선원과 검출기의 거리는 동시합성효과를[9] 무시할수 있도록 7cm로 일정하게 유지 하였다.

2. 동시시간 측정[11]

감마선이 같은 시간에 동시에 검출기에 도달하였을 때, 검출신호로 판독되기까지의 시간을 반응시간이라 한다. 본 실험에서는 각각의 검출기의 반응시간을 알아보기 위하여 다음과 같은 동시시간 측정장치를 구성하였다. 실험은 NaI(Tl)(3"×3")-BaF₂, NaI(Tl)(1"×1")-BaF₂, NaI(Tl)(1"×1")-NaI(Tl)(3"×3")의 세 가지 시스템에 대하여 수행되었다. 사용 선원은 양전자 소멸에 의해 거의 180° 방향으로 511keV 의 감마선을 방출하는 ²²Na를 사용하였다. 511keV 이외의 감마선의 의한 펄스를 제거하기 위하여 TSCA(Timing Single Channel Analyzer)창으로 구간을 잡아주었다. 각각의 TSCA 출력펄스는 TAC

표 1. 효율결정에 사용된 선원의 붕괴자료.[10]

Table 1. Decay data of the nuclides used in efficiency calculation

Nuclide	Half Life	Energy(keV)	Emission Probability(%)
⁵⁷ Co	271 day	122.06	85.60 ¹
		136.47	10.58
²² Na	2.6 year	1274.54	99.94
⁵⁴ Mn	313 day	834.84	99.98
¹³⁷ Cs	30.2 year	661.66	85.10

(Time to Amplitude Converter)의 시동, 정지 단자로 입력되는데 각각의 시스템에 대하여 TAC 의 시동단자로 들어가는 검출기는 다음과 같다. NaI(Tl)(3"×3")-BaF₂ 측정장치와 NaI(Tl)(1"×1")-BaF₂ 측정장치에서는 BaF₂가 시동단자로 입력되었으며, NaI(Tl)(1"×1")-NaI(Tl)(3"×3") 측정장치에서는 NaI(Tl)(3"×3")를 시동단자로 입력시켜 측정하였다.

실험 결과

1. 에너지 분해능

²²Na(511keV, 1274keV), ⁵⁴Mn(834.84keV), ¹³⁷Cs(661.66keV)의 γ 선 방출선원의 에너지 스펙트럼 측정을 하였다. 에너지 보정 곡선을 통하여 채널 내 에너지 비를 얻었으며 이것을 토대로 에너지 분해능을 구하였다.

2. 검출효율

검출효율은 다음의 식에 의해 결정되었다[9].

$$\epsilon(E) = \frac{n(E)}{AP\gamma}$$

- ε(E) : γ 선 에너지 E에서 검출기의 검출효율
- n(E) : 에너지 스펙트럼 봉우리 면적(peak net area)
- A : 측정선원의 방사능
- P γ : γ 선 방출확률

여기서 피크의 봉우리 면적 n(E)는 합산 방법에 의하여 면적을 산출할 수 있었다[9].

3. 반응시간

일반적으로 시간특성을 논할경우 같은 검출기 쌍으로 동시시간 측정장치를 구성하여 시간분해능을 구하는 것을 의미한다. 시간 분해능이란 측정장치 전반에 걸친 타이밍의 불확정성의 치수이다. 그러나 본 실험장치로는 정확한 시간 분해능을 확인 할수 없었으며, 상용의 NaI(Tl)검출기와 비교하여 제작된 BaF₂ 검출기의 시간오차가 더 클 것이라 예상되며, PM Tube특성에 따른 오차도 예상되었

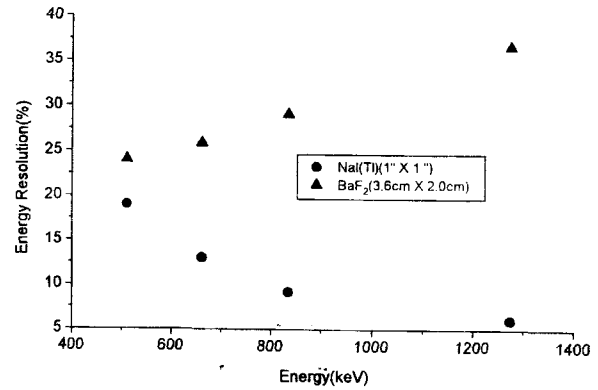


그림 3. BaF₂ 검출기와 NaI(Tl)(1"×1")검출기의 에너지 분해능

Fig. 3. The energy resolution values for BaF₂ and NaI(Tl) detector

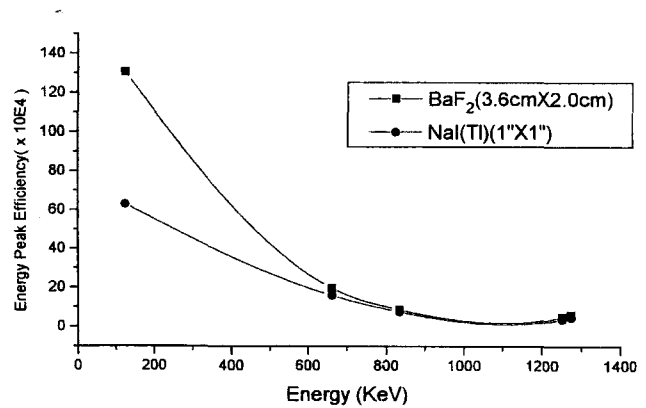


그림 4. BaF₂ 검출기와 NaI(Tl)(1"×1")검출기의 효율

Fig. 4. Photopeak Efficiency Values for BaF₂ and NaI(Tl) detector

다. 이것은 그림7.(b) 의 시간 분해능을 그림5.(b)와 그림6.(b) 와 비교하여 확인할수 있었다.

본 실험에서는 서로 다른 검출기를 사용하여 동시시간 측정장치를 구성하였으며, 시스템 내의 두 검출기에 대한 반응시간을 측정하였다. 반응시간이란 감마선이 같은 시간에 동시에 검출기에 도달하였을 때, 검출신호로 판독되기까지의 시간을 말하며 섬광빛의 감쇠시간에 기인하는

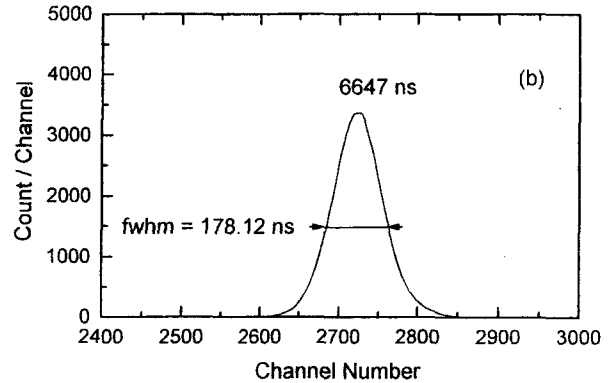
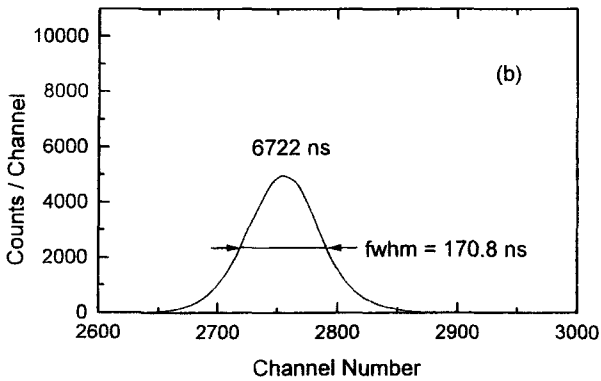
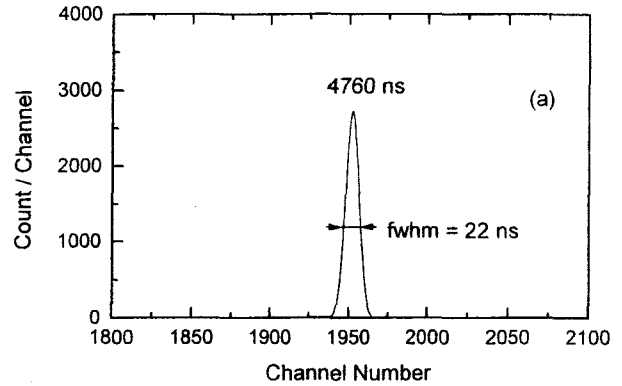
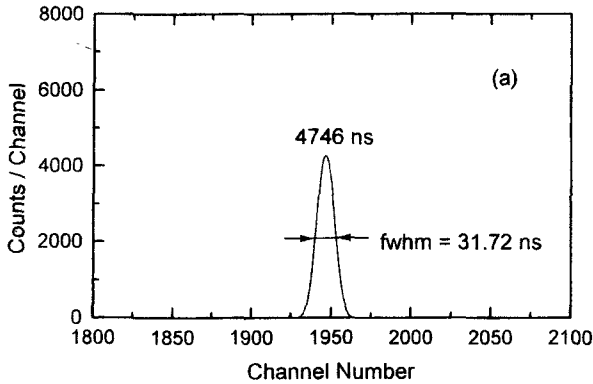


그림 5. NaI(Tl)(3"×3") - BaF₂ 동시시간 스펙트럼(TAC : 10000ns, MCA : 4096 chn)

(a)기본시스템, (b)검출기를 포함한 시스템

Fig. 5. Time Spectra Obtained with NaI(Tl)(3"×3") - BaF₂ Coincidence Sys. (TAC : 10000ns, MCA : 4096 chn)

(a)excluded detectors. (b)included detectors

그림 6. NaI(Tl)(1"×1") - BaF₂ 동시시간 스펙트럼(TAC : 10000ns, MCA : 4096 chn)

(a)기본시스템, (b)검출기를 포함한 시스템

Fig. 6. Time Spectra Obtained with NaI(Tl)(1"×1") BaF₂ Coincidence Sys.(TAC : 10000ns, MCA : 4096 chn)

(a)excluded detectors. (b)included detectors

시간특성을 말한다. 두 검출기의 반응시간차는 TAC (Time to Amplitude Converter)의 특성에 의하여 구할 수 있다. TAC은 정지와 시동단자에 들어오는 신호의 시간차를 펄스높이, 즉 MCB의 채널로 나타내는 장치이다 [11]. 따라서 검출기를 포함하지 않은 기본시스템에서 얻은 스펙트럼의 피크 중앙값을 측정 한 후, 모든 조건을 동일하게 하여 검출기를 포함한 스펙트럼의 피크 중앙값을 구한다. 이때 검출기의 반응시간차는 두 스펙트럼의 피크 중앙값의 차이가 된다.

결 론

측정된 검출효율을 살펴보면 BaF₂(3.6cm×2.0cm)의 검출효율이 NaI(Tl)(1"×1")보다 더 크게 나타났다. 그러나 기하학적 효율인 G를 고려한다면

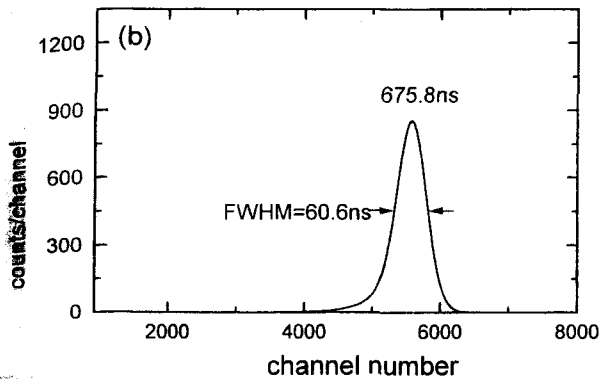
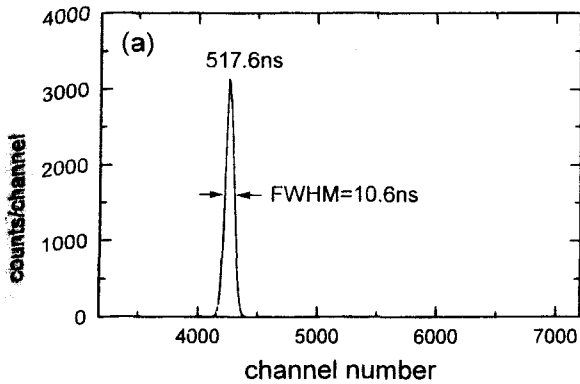
$$G = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d^2}{\sqrt{d^2 + R^2}} \right)$$

d : 검출기-선원 거리(7cm)

R : 검출기의 반경(NaI(Tl):1.2cm, BaF₂:1.8cm)

600keV이하의 에너지 영역에서는 NaI(Tl)(1"×1")보다 더 좋은 값을 나타내며, 600 keV ~ 1300 keV 구간에서는 두 검출기의 효율값이 거의 같음을 알 수 있다.

분해능을 비교해 본 결과 전체적으로 NaI(Tl)(1"×1") 검출기가 더 좋은 값을 나타내고 있다. 그러나 각각의 검출기에 대하여 분석해 보면 NaI(Tl)(1"×1")는 500 keV~1300 keV 구간사이에서 에너지가 증가할수록 분해능이 점점 좋아지고 있으며, BaF₂는 500 keV 근처에서 가장 좋은 분해능을 보인다. 모든 검출기는 에너지에 대한 분해능과 효율값이 차이를 나타내는데 두가지 특성을 분석하여 검출기의 적정 에너지 영역을 판별할 수 있다. 위의 실험 결과로부터 NaI(Tl)검출기는 약 600KeV 이상의 에너지에 대하여 좋은 특성을 나타냄을 알 수 있으며, BaF₂ 검출기는 600keV 이하의 에너지 영역에서



7. NaI(Tl)(1"×1") - NaI(Tl)(3"×3") 동시시간 스펙트럼
 TAC : 1000ns, MCA : 8192chn
 (a) 배분시스템, (b) 검출기를 포함한 시스템
 7. Time Spectra Obtained with NaI(Tl)(1"×1") - NaI(Tl)(3"×3") Coincidence Sys. (TAC : 1000ns, MCA : 8192chn)
 (a)excluded detectors. (b)included detectors

결과 분해능이 비교적 좋은 값을 가진다.
 시간 특성을 살펴보면 ²²Na의 511keV γ 선에 대한 반응 시간이 BaF₂, NaI(Tl)(1"×1"), NaI(Tl)(3"×3") 순으로 나타남을 알 수 있다. BaF₂ 검출기의 반응시간은 NaI(Tl)(1"×1") 검출기보다 1.887 μ s 정도 빠르게 나타났으며, NaI(Tl)(3"×3")보다 1.976 μ s 빠르다는 것을 알 수 있다.
 NaI(Tl) 검출기와 비교하여 실험결과를 살펴보면, BaF₂ 검출기는 양전자 방출선원을 사용하는 응용분야에 있어서 소멸광자에 대하여 매우 빠른 반응을 보이며, 광

수율이 NaI(Tl)과 비교하여 20% 정도이기 때문에 에너지 분해능은 떨어지나 저에너지 감마선에 대한 효율이 높은 것을 알 수 있다. 특히 BaF₂ 검출기는 조해성을 가진 NaI(Tl) 검출기와 비교하여 볼 때 더욱 안정적이고, 511keV 영역에서 가장 좋은 검출특성을 가지고 있어서 높은 검출효율과 빠른 반응시간으로 단시간내에 많은 양의 정보를 얻어야 하는 감마카메라, PET 등 의료영상장치의 센서로 적용하여 좋은 결과를 기대할 수 있으리라 생각한다. 그러나 영상장치에 있어서 가장 중요한 특성인 위치 분해능에 대한 고찰, 그리고 적용될 감마선에 대한 최적의 선풍체크기, 시간 분해능 등 여러가지 요인에 대하여 보다 구체적인 평가가 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. James A. Sorenson and Michael E. Phelps, *Physics in Nuclear Medicine* (Grune & Stratton), Chap. 20. 1987
2. T. F. Buldinger, S. E. Derenzo and R. H. Huesman, *Instrumentation, for Positron Emission Tomography Annals of Neurology*, 1984
3. C. F. G Delaney and E. C. Finch, *Radiation Detectors* (Clarendon Press), p.272, 1992
4. G. F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement* (John Wiley & Sons), p.117, 1988
5. E. Costa, E. Massaro, and L.Piro, *Nucl. Instrum. Meth. Phys. A*243, p.572, 1986
6. O. Hausser et al., *Nucl. Instrum. Meth.*, vol. 213, p.301, 1983
7. A. Breskin, et al. *IEEE Trans. Nucl.Sci.*, vol. NSS14, no 1, p.455, 1994
8. M. Globus, et al. *IEEE Trans. Nucl.Sci.*, vol. 33, no 1, p.364, 1986
9. T.S.Park, W.J.Jeon, and K.S.Joo, *New Phys.*, vol. 32, p.644, 1992
10. F.Lagoutine, N. Cousol and J.Legrand, *Table de Radionuclides*, (LHRI, Scalay) 1984.
11. William R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments* (Springer-Verlag Berlin Heideberg), p.149, 1987

= 국문초록 =

3.6cm×2.0cm (지름 × 두께) 크기의 BaF₂ 섬광체로 검출기를 제작하여 감마 카메라등 의료용 진단 장치에서 센서로 사용되고 있는 NaI(Tl)검출기와 방사선 검출특성을 비교하여 보았다. 측정에 사용된 선원은 ²²Na, ⁵⁴Mn, ⁵⁷Co, ¹³⁷Cs의 γ 선 방출선원으로 검출기와 선원간의 거리를 7cm로 유지하였다. 시간특성을 분석하기 위하여 511keV의 양전자 방출선원을 사용하여 NaI(Tl)(1"×1")-BaF₂, NaI(Tl)(3"×3")-BaF₂ 동시시간 측정장치를 구성하였다. 실험결과, 반응시간은 BaF₂, NaI(Tl)(1"×1"), NaI(Tl)(3"×3")순으로 BaF₂가 가장 빠르게 나타났으며, BaF₂ 검출기의 효율은 500keV에서 가장 높게 측정되었다.