

논문 97-6-4-06

## 2차원 방사선준위 분포측정 시스템의 제작 및 특성 조사

김성환\*, 한상호\*, 김계령\*, 강희동\*, 최영수\*\*, 이용범\*\*, 이종민\*\*

## The Characteristics of Two-dimensional Radiation Monitoring System

S. H. Kim\*, S. H. Han\*, K. R. Kim\*, H. D. Kang\*, Y. S. Choi\*\*, Y. B. Lee\*\*, J. M. Lee\*\*

## 요 약

본 연구에서는 CsI(Tl) 섬광계수기를 이용하여 고방사선장에서 방사선준위분포를 측정할 수 있는 2차원 측정 시스템을 개발하였다. 콜리메이터의 내경이 8 mm일 때 최적의 위치분해능과 검출효율을 얻었으며 이때 위치분해능은 1 m 거리에서 10 cm 미만이었다. 그리고 시스템의 에너지 분해능은 Cs-137의 662 keV에 대하여 10 %, Co-60의 1.17 MeV에 대하여 7.6 %, 1.33 MeV에 대하여 5.8 %를 얻었다. 그리고 실제 방사선 선원에 대하여 그 분포를 측정할 수 있었다.

## Abstract

In this study, the radiation monitoring system using CsI(Tl) scintillation counter is developed for the measurement of radiation distribution in the field of high dose level. When the inner diameter of collimator is 8 mm, we have realized the optimum detecting efficiency and spatial resolution. At that time, the position resolution was 10 cm at 1 m from the system. And experimental results indicated that the energy resolution of the system were 10 % for 662 keV of Cs-137, 7.6 % for 1.17 MeV of Co-60, and 5.8 % for 1.33 MeV of Co-60. Also, we have shown that the real radiation distribution images may be obtained by our measurement system.

## 1. 서 론

원자력발전소 및 방사선 관련시설의 고준위 방사선장에서 방사선 준위분포 및 오염감사 등 각종 작업을 수행할 수 있는 로봇과 결합된 원격 무인 방사선 분포 측정시스템은 작업자의 방사선 피폭량 감소 및 안전성 향상을 위하여 필수적인 요소이다. 따라서 이에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다.<sup>1-6)</sup>

본 연구에서는 방사선 분포 영상 검출을 위한 기술의 개발과 특히 작업자의 안전성 향상을 목적으로 로봇 기술과 결합한 원격 무인 방사선준위 분포 측정용 감지 시스템을 개발하였다. CsI(Tl) 섬광체와 photodiode를 결합한 감지기 시스템을 구성하고 이에 따른 차폐체 및 콜리메이터의 최적화 기술을 개발하였다. 아울러 소형, 경량 및 저 소비전력형의 신호처리계를 설계, 제작하여 측정시스템을 구성하였고, 그 특성을 조사함으로써 고준위 방사선장에서 방사선 준위 분포 측정용 감지기로서의 실용 가능성을 조사하였다.

\* 경북대학교 물리학과 (Dept. of Physics Kyungpook National University)

\*\* 한국원자력연구소 (Korea Advanced Energy Research Institute)

<접수일자 : 1997년 2월 27일>

2. 본 론

본 측정시스템에서는 기체충진형 검출기에 비하여 검출효율이 우수하고 감마선 분광분석이 가능하며 로봇에 결합되어 이동하면서 측정하는 점을 고려하여 기계적인 진동에 강한 섬광계수기를 사용하였다. 검출기로는 eV-product Co.의 eV250-02를 사용하였으며, 10×10×20 mm 크기의 CsI(Tl) ( $\rho=4.52 \text{ g/cm}^3$ ) 섬광체와 광전변환소자로 Si pin photodiode와 hybrid preamplifier를 사용하여 검출기의 부피와 소비전력을 최소화하였다. 본 연구에서 사용된 검출기는 20 °C에서 Cs-137의 662 keV에 대하여 6 %미만의 에너지분해능을 나타낸다(표 1). 그리고 콜리메이터 및 차폐체의 최적화와 아울러 로봇 탐재를 위한 검출부의 소형·경량화를 위한 연구를 수행하였다. 방사선 센서와 컴퓨터의 접속을 시도하였고 저준위 방사선의 측정과 검출부의 중량을 상호 고려하여 차폐체를 최적화 하였다. 또 방사선 준위 분포의 원격측정을 위하여 Pan/Tilt, 데이터의 입출력 제어 등 모든 제어를 interface를 통하여 컴퓨터에서 조정할 수 있도록 설계·제작하였다.

방사선 영상 검출시스템은 그림 1과 같이 콜리메이터, 감지센서부, Pan/Tilt부, 방사선 영상 신호처리부, 제어용 interface부, 방사선의 에너지 스펙트럼을 측정하는 다중과고분석기(Multi Channel Analyzer) 및 컴퓨터와 구동 소프트웨어로 구성된다. 각 부분은 로봇 탐재를 고려하여 소형 및 경량화되어야 하며 최소한의 전력으로 작동되어야 한다. 이를 위하여 모든 신호처리 회로를 가능한 기존의 상용회로로 사용하지 않고 최소

Table 1. Specification of eV250-02 scintillation detector.

Scintillator	Energy Threshold	Size	Resolution T=20 °C	Photodiode Dimension	Package size
CsI(Tl)	45 keV	10×10×20 mm	< 6 %	10×10 mm	∅32×58 mm

한의 부품을 이용하여 설계 및 제작하였으며, background 제거를 위한 차폐기능을 부가하여 저준위 측정에 적합하도록 신호처리계를 구성하였다.

한편 위치분해능 및 검출효율을 결정하는 콜리메이터는 카메라에서의 렌즈와 같이 매우 중요한 역할을 한다. 콜리메이터의 직경 및 길이에 의하여 위치분해능과 검출효율이 결정되고 이들은 서로 상반되는 특성을 나타내므로 이 두 가지 특성을 적절히 고려하여 콜리메이터의 직경이나 길이 등을 결정하여야 한다. 따라서 필요에 따라 적절한 위치분해능과 검출효율을 선택할 수 있도록 ∅6, 8, 10 mm 내径의 콜리메이터를 제작하고 이를 교환하여 사용할 수 있게 하였다. 그림 2는 제작된 콜리메이터의 단면도이며 내경을 각각 6, 8, 10 mm로 제작하였다. 콜리메이터의 재질은 비교적 가공이 용이하고 차폐력이 뛰어나며 가격이 저렴한 납을 사용하였다.

본 연구에서 제작한 Pan/Tilt 시스템은 수평, 수직방향으로 회전하는 2개의 직류모터와 RF25 (Harmonic Driver System Co.) 직류 서보 액추에이터, 오픈 콜렉터방식의 엔코더 및 타코 제너레이터로 구성된다. 한편 제어기로는 HS450R을 사용하였다. 이것은 컴퓨터를 이용하여 액추에이터의 위치결정 및 제어, 속도제어를 할 수 있는 수치제어 타입의 제어장치이며 RS-232C

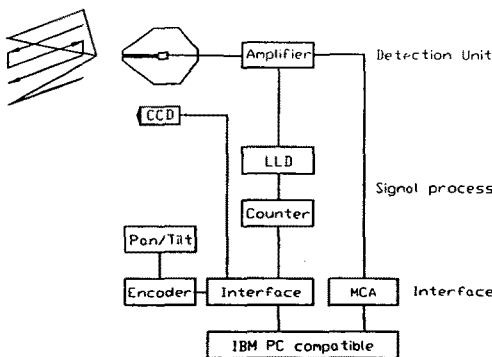


그림 1. 측정시스템의 개략도.  
Fig. 1. Block diagram of the system.

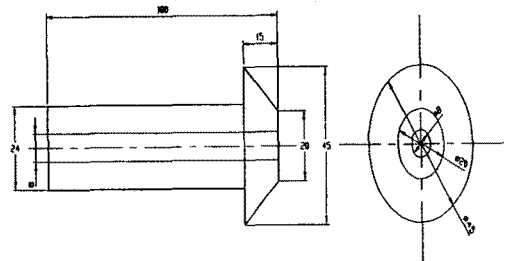


그림 2. 콜리메이터의 단면도.  
Fig. 2. Cross-sectional view of the collimator.

인터페이스, CPU, 펄스제너레이터, 편차 Counter 변환기, PWM 서보 앰프 등으로 구성되어 있다. 주 컴퓨터에서 ASCII 코드에 의한 데이터 통신으로 이동펄스량, 모터회전속도, 감속시간 등을 결정하여 위치제어 및 속도제어 등 각종 제어를 할 수 있다.

한편 검출기에 입사된 방사선은 그 에너지 정보를 전하량으로 발생하고 이것이 전치 증폭기를 통하여 펄스신호로 출력된다. 본 검출기 자체의 노이즈와 전치증폭기의 전기적 노이즈는  $\pm 2$  mV 정도였으며 신호의 크기는 Co-60 선원이 1.33 MeV의 감마선에 대하여 25 mV로 측정되었다. 그림 3은 전치증폭기의 출력신호를 LeCroy 9350AM 500 MHz Oscilloscope로 측정된 것이다. 신호의 모양은 5  $\mu$ s의 상승시간과 수백  $\mu$ s의 긴 하강시간을 갖는 전형적인 펄스형상을 나타내고 있다.

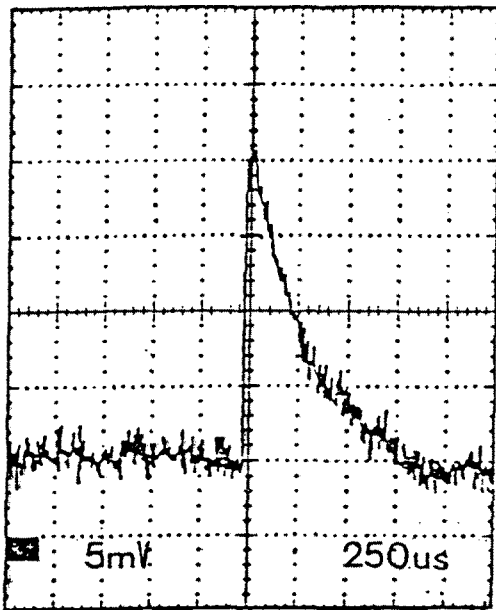


그림 3. 전치증폭기의 출력신호.  
Fig. 3. Output signal of preamplifier.

그런데 전치증폭기의 출력신호는 크기가 작고 신호의 상승시간이 수십 ns정도로 짧은 반면 하강 시간은 수백  $\mu$ s정도로 길기 때문에 신호의 pile-up 이 일어나 실제수치를 감소시키므로 정형증폭기에서의 입력신호 성형과 증폭은 필수적이다. 정형증폭기는 Pole-zero 제거부와 CR-RC 정형 및 active filter로 구성되어 있다 (그림 4). 앞단에 바이폴라 OP amp (OP 27)를 사용하

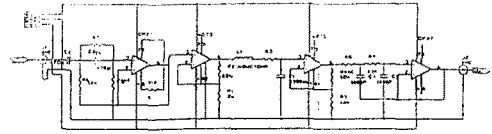


그림 4. 주증폭기의 회로도.  
Fig. 4. Circuit of shaping amplifier.

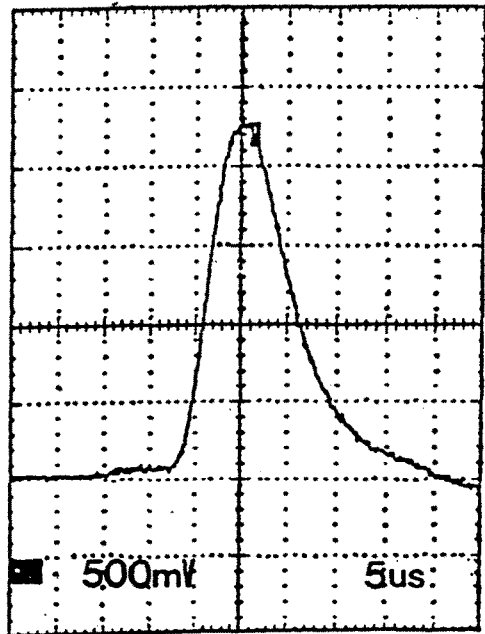


그림 5. 주증폭기의 출력신호.  
Fig. 5. Output signal of main amplifier.

여 2차 버터워스 하이패스필터를 구성하고 컷오프주파수는 30 kHz, 미분 필터에 의한 언더샷 제거를 위하여 pole-zero 제거부를 포함하여 제작하였다. 마지막 단에는 펄스성형과 필터를 위하여 2차 버터워스 로우패스 필터를 구성하였다. 한편 펄스증폭기로 AMPTEK사의 A275를 사용하였다. 이것은 저소비전력형의 Hybrid 미분연산증폭기이다. 이렇게 전치증폭기 신호를 선형적으로 증폭시키고 가우스성형한 최종 신호의 상승시간은 5  $\mu$ s, 하강시간은 10  $\mu$ s(그림 5)이었다.

주증폭기에서 정형 및 증폭된 출력신호는 잡음을 차단하고 논리신호로 변환하기 위하여 NE521 comparator를 사용한 discriminator에 입력된다. NE521은 내부에

comparator 2개와 NAND gate가 있어 window discriminator구성이 가능하다. 그런데 정형증폭기의 신호에는 검출기 자체의 통계적 오차나 회로상의 잡음으로 인해 지터링현상이 일어난다. 그 결과 comparator에서 bouncing 논리신호를 출력하여 잘못된 계수를 하게 된다. 이 현상을 없애기 위하여 NE521의 양출력단에 풀업을 하고 R-S latch를 구성하였다. 그리고 정형증폭기의 신호 크기에 무관하게 일정한 시간폭의 TTL신호를 출력하기 위하여 74LS123 (mono-stable multivibrator)으로 출력펄스폭을 1  $\mu$ s가 되게 하였다. 이렇게 논리화된 펄스의 개수를 헤아리기 위하여 그 뒤에 계수기를 연결하였다. 계수기는 신호처리를 최소화하기 위하여 8 bit counter인 74LS590을 두개 결합하여 최고 65540개까지 계수가 가능하도록 하였다. 그림 6은 본 연구에서 설계 및 제작한 discriminator의 회로도이다.

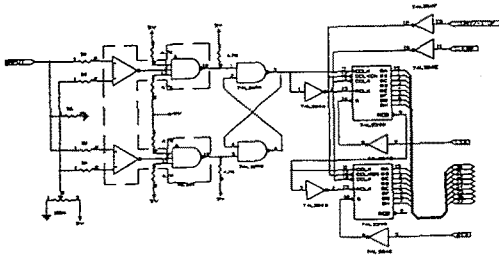


그림 6. Discriminator와 계수기 회로도.

Fig. 6. Circuit of low level discriminator and counter.

### 3. 결 과

그림 7은 제작된 측정시스템이다. 콜리메이터 및 차폐부, Pan/Tilt 부, 전원공급부, 모터구동부 등을 보여 준다. 콜리메이터, 차폐체, 검출기부 및 Pan/Tilt 부분이 로봇트에 탑재되어 방사선 지역으로 들어가게 되고 컴퓨터를 포함한 나머지 부분은 방사선으로부터 안전한 지역에서 검출기를 구동하게 된다.

그림 8의 (a)와 (b)는 각각 Cs-137 및 Co-60의 방사성 동위원소에 대하여 각각 측정시스템으로부터 1 m 거리에 두고 측정각도를 좌우 30°에 대하여 1° 간격으로 회전시키면서 각 픽셀에 대하여 측정시간을 1 초로 하였을 때 콜리메이터의 내경에 따른 측정값을 나타낸 것이다. 가로축은 scanning 각도이고 세로축은

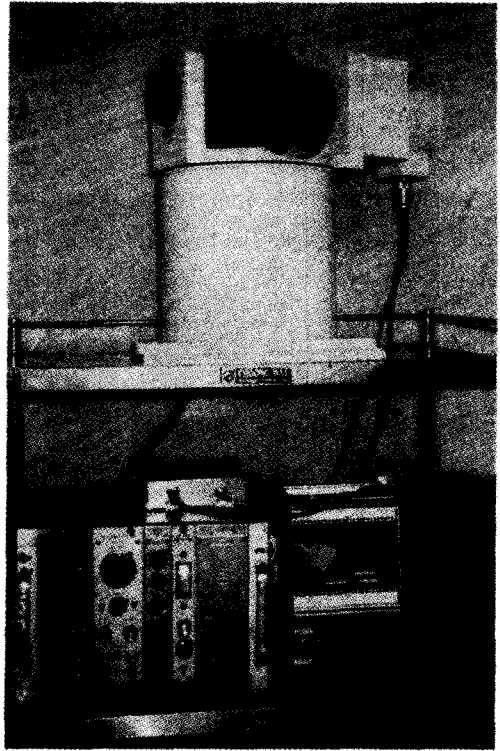
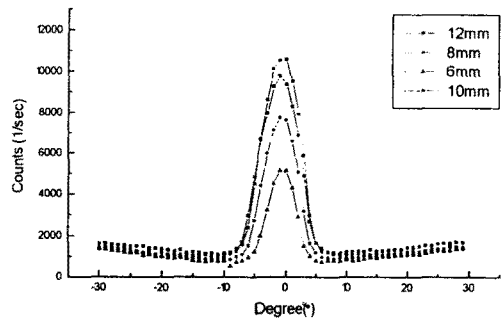


그림 7. 방사선준위 측정 시스템.

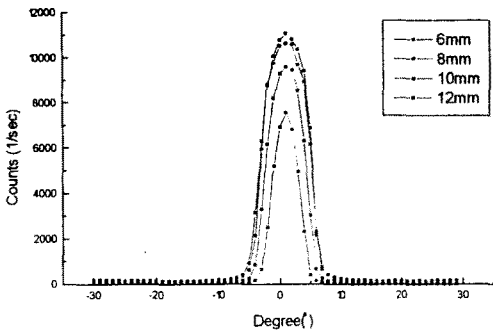
Fig. 7. The radiation level monitoring system.

이때의 측정수이다. 콜리메이터의 내경이 증가할수록 검출효율은 증가하여 측정수가 많아지나 위치분해능은 줄어들을 볼 수 있었다. 따라서 목적에 따른 적절한 콜리메이터를 선택하여 사용하여야 한다.

그림 9는 Co-60 및 Cs-137 선원에 대하여 콜리메이터의 내경과 위치분해능과의 관계를 나타낸 것으로 콜리메이터의 내경이 커짐에 따라 위치분해능이 나빠짐



(a) for Co-60



(b) for Cs-137

그림 8. 두 방사성 선원에 대한 각도에 따른 위치 분포도.

Fig. 8. The spectrum as a function of goniometer scanning degree.

을 보여준다. 그러나 섬광체의 단면적의 크기가  $10 \times 10$  mm이므로 내경 10 mm이상의 콜리메이터에 대해서는 위치분해능의 값이 포화됨을 알 수 있었다. 본 측정시스템의 설계시 위치분해능의 목표치는 이 1 m 거리에서 10 cm( $5.7^\circ$ )이므로 두 선원에 대하여 모두 8 mm의 콜리메이터를 사용하였을 때 각각  $5.4^\circ$ ,  $5.2^\circ$  로서 위치분해능과 검출효율을 동시에 만족하는 가장 적절한 값으로 결정하였다(표 2).

그림 10은 크기가 2 cm인 두 개의 Cs-137 선원 (1.757, 1.691 Ci)들을 1 m 거리에서 내경 8 mm 콜리

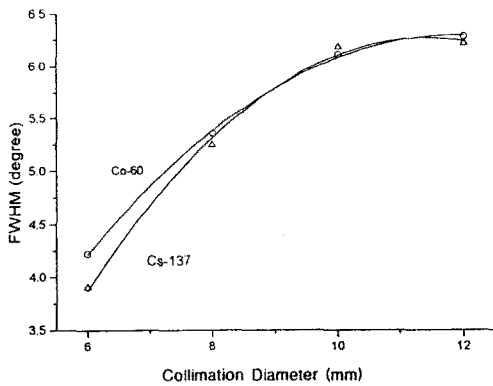


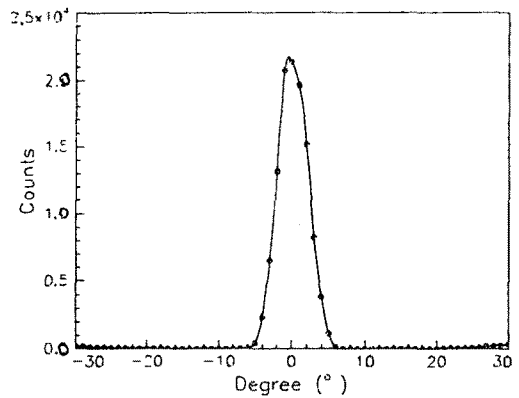
그림 9. 콜리메이터의 내경에 따른 두 선원에 대한 위치분해능.

Fig. 9. The position resolution of two radioisotopes as a function of collimation diameter.

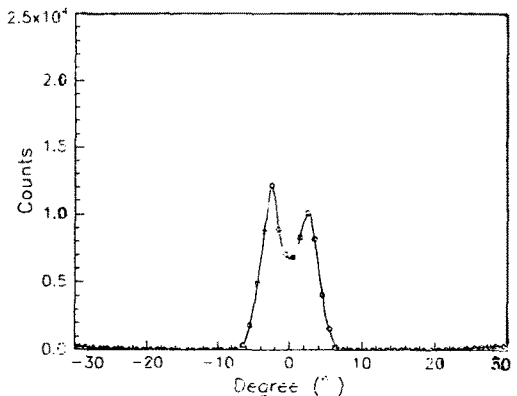
표 2. Collimator의 내경에 따른 위치분해능.

Collimation diameter(mm)	Spatial Resolution	
	for Co-60	for Cs-137
6	$4.20^\circ$	$3.90^\circ$
8	$5.35^\circ$	$5.24^\circ$
10	$6.10^\circ$	$6.17^\circ$
12	$6.27^\circ$	$6.20^\circ$

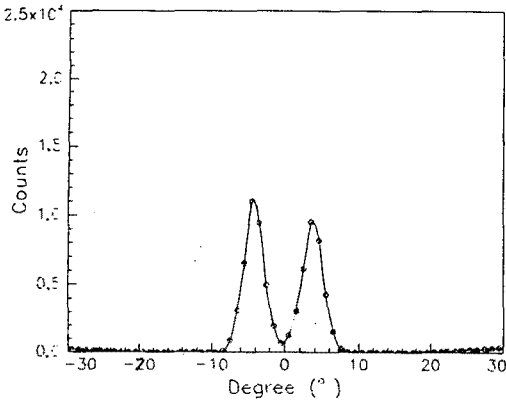
메이터를 사용하여 좌우  $30^\circ$  에 대하여 1 초간 측정 한 결과이다. 선원들의 거리를 5 cm부터 20 cm까지 5 cm 간격씩 이동하면서 위치 스펙트럼을 측정하였다. 내경 8 mm의 콜리메이터의 위치분해능이 약  $5.4^\circ$  이므로 10 cm 간격일 때부터 두 개의 선원을 구별하기 시작하였다. 본 측정시스템의 분해능의 목표가 1 m 거리에서 10 cm의 분해능을 얻는 것이므로 내경 8 mm의 콜리메이터가 적절함을 알 수 있다.



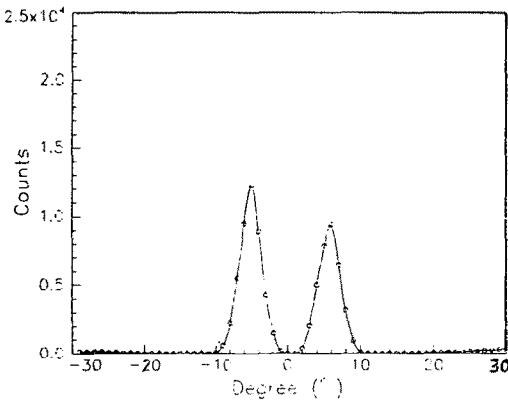
(a) distance = 5 cm



(b) distance = 10 cm



(c) distance = 15 cm



(d) distance = 20 cm

그림 10. 두 개의 Cs-137에 대한 공간위분해능.  
Fig. 10. Spatial resolution for two radioisotopes.

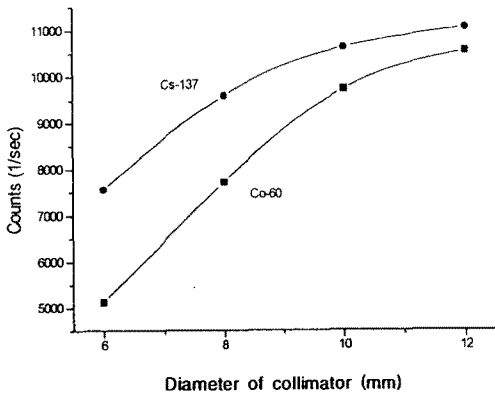


그림 11. 콜리메이터의 내경에 따른 검출효율.  
Fig. 11. The count rates as a function of collimation diameter.

그림 11은 Co-60 및 Cs-137 방사성 동위원소를 감지기로부터 1 m 위치에 두고 콜리메이터의 내경을 6 mm 에서 12 mm까지 변화시켰을 때 측정된 계수율에 관한 그림이다. 내경이 커질수록 계수율은 증가한다. 역시 섬광체의 크기보다 큰 콜리메이터에 대해서는 포화되는 경향을 보여준다. 또한 입사하는 방사선의 감마 에너지에 따라 계수율의 차이를 보이고 있다.

한편 방사선준위분포 뿐만 아니라 미지의 방사성 선원을 판정하고자 다중파고분석기(Multi Channel Analyzer, Nucleus INC. PCA II 8K)를 이용하여 입사 방사선의 에너지 스펙트럼을 측정하였다. 그림 12는 Co-60, Cs-137, Na-22, Ba-133 등 표준 감마선원들을 이용하여 에너지교정을 실시한 것이다. 다중파고분석기의 채널에 대응하는 감마선의 에너지를 교정함으로써 약 100 keV 이상의 방사선에 대하여 감마선 분광분석을 실시하여 미지의 핵종을 판정할 수 있었다.

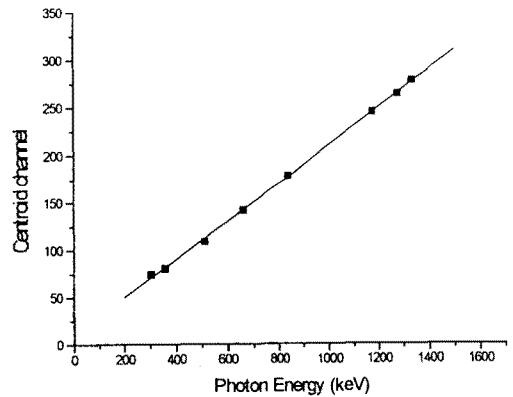


그림 12. 측정 시스템의 에너지 교정곡선.  
Fig. 12. Energy calibration curve of the system.

그림 13은 Co-60 방사선 선원에 대하여 본 측정시스템으로 측정한 pulse height 스펙트럼이다. Compton edge, Compton continuum, Backscattering Peak등이 잘 나타나고 있다. 한편 Co-60의 1.17 MeV와 1.33 MeV의 감마선에 대하여 각각 7.6 %, 5.8 %의 에너지 분해능을 나타낸다. Cs-137의 662 keV에 대하여 10 %의 에너지분해능을 나타내었다.

제작된 측정시스템을 이용하여 실제 방사선선원에 대하여 분포를 측정하였다. 그림 14의 (a)는 한 개의 Co-60과 두 개의 Cs-137을 검출기로부터 1 m 거리에

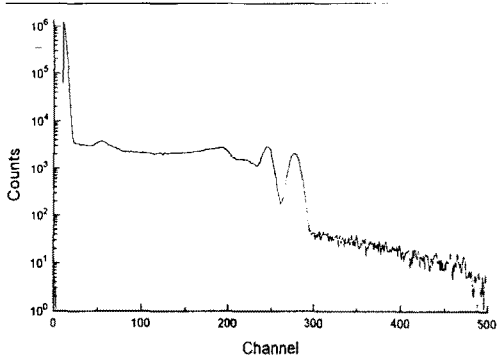
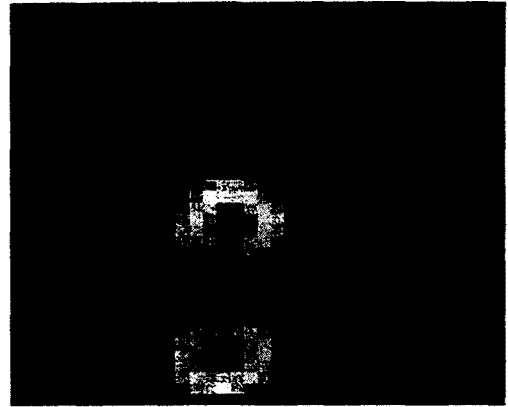


그림 13. Co-60의 에너지 스펙트럼.

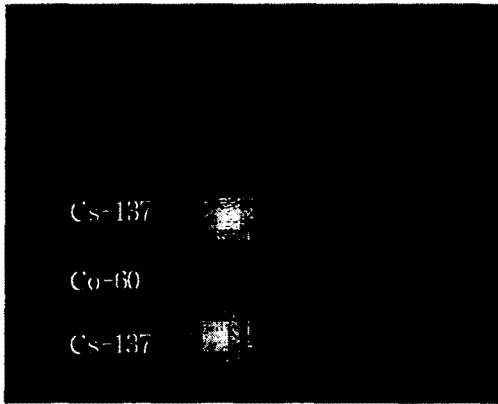
Fig. 13. Pulse height spectrum of Co-60 gamma-rays.



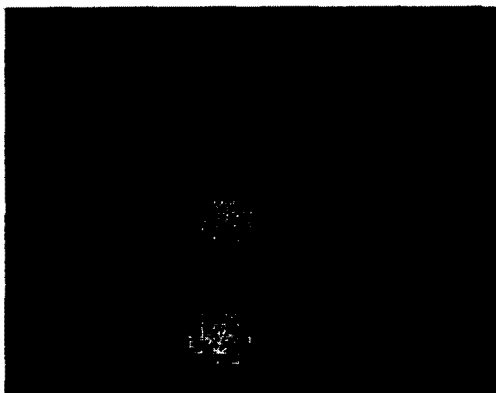
(c) after Kirsh operation

그림 14. 방사선 선원 분포도.

Fig. 14. Radiation level distribution data.



(a) row data



(b) after smoothing

10 cm 간격으로 두고 내경이 6mm인 콜리메이터로 가로 40°, 세로 40°에 대하여 1°씩 1 초간 측정된 분포도이다. 그림 14의 (b)는 여기에 median filter를 사용한 것이고 그림 14의 (c)는 Kirsh operator(표 3)를 사용하여 미분값을 취한 것이다. 방사선 선원 분포도에 미분을 함으로써 실제 선원의 정확한 위치를 판정할 수 있다.

표 3. Kirsh 연산자

M0	M1	M2	M3
5 5 5	5 5 -3	5 -3 -3	-3 -3 -3
-3 0 -3	5 0 -3	5 0 -3	5 0 -3
-3 -3 -3	-3 -3 -3	5 -3 -3	5 5 -3

M4	M5	M6	M7
-3 -3 -3	-3 -3 -3	-3 -3 5	-3 5 5
-3 0 -3	-3 0 5	-3 0 5	-3 0 5
5 5 5	-3 5 5	-3 -3 5	-3 -3 -3

#### 4. 결 론

본 연구에서는 CsI(Tl) 섬광체를 이용하여 2차원 방사선 준위분포를 측정할 수 있는 시스템을 제작하였다. 한편 콜리메이터에 의하여 위치분해능 및 검출효율이 결정되므로 이에 대한 최적조건을 조사하였다. 그 결과 내경이 8 mm인 콜리메이터의 경우 위치분해능이

약 5.4' 로서 개발목표로 설정된 방사선 선원으로부터 1 m 거리에서 10 cm의 위치분해능을 얻을 수 있었다. 그리고 주증폭기의 출력을 다중과교 분석기로 분석한 결과 Cs-137의 662 keV에 대하여 10 %, Co-60의 1.17 MeV, 1.33 MeV에 대하여 각각 7.6 %, 5.8 % 의 에너지 분해능을 얻었고, 미지의 방사선선원에 대하여 에너지 스펙트럼을 측정, 분석함으로써 방사선 분포 뿐만 아니라 미지 핵종을 판정할 수 있었다.

5. 참고문헌

[1] G. L. Palau and J. E. Tarpnian, ANS Trans. 55 (1987) 571.  
 [2] E. Christensen, T. Curry and J. Dowdey, "An Introduction to the physics of Diagnostic Radiography", Lea & Febueger, Philadelphia,

Pennsylvania, (1987).  
 [3] R. Gould and E. S. Kenney, Nucl. Tech. 89 (1990) 247.  
 [4] R. Glould, J. E. Tarpinian and E. S. Kenney, "An automated system for radiation field mapping", Nucl. Instr. and Meth. A299 (1990) 538.  
 [5] L. Tripp, R. Carlton, and G. Westrom, "The development of the integrated radiation mapper assistant.", Proceeding, 39th Conference on Remote Systems Tech., 1991.  
 [6] R. E. Carlton and L. R. Tripp, "Remote mapping of hot spots in nuclear power plants.", J. Machine Perception, Vol. 9, No.11, (1992).

著 者 紹 介

김성환

「센서학회지 제1권 제1호」 논문 92-07, p59 참조.  
 현재 대구보건전문대학 방사선과 전임강사.



한상효

1968년생. 1993년 경북대학교 물리학과 졸업(이학사). 1996년 동대학원 물리학과 졸업(이학석사). 현재 동대학원 박사과정 재학중. 주관심분야 : 방사선검출기.

강희동

「센서학회지 제1권 제1호」 논문 92-07, p59 참조.  
 현재 경북대학교 자연과학대학 물리학과 교수.



최영수

1966년 1월 14일생. 1991년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1994년 동대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 현재 한국원자력연구소(KAERI)연구원, 주관심분야 : 방사 선모니터링, Underwater Laser Imaging, 로봇비전



김계령

1965년생. 1988년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1991년 동대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 현재 동대학원 박사과정 재학중. 주관심분야 : 반도체, 플라즈마 진단 기술

이용범

「센서학회지 제5권 제5호」 논문 96-5-5-07, p62 참조  
 현재 한국원자력연구소(KAERI)연구원

이종민

「센서학회지 제5권 제5호」 논문 96-5-5-07, p62 참조  
 현재 한국원자력연구소(KAERI)연구원