

# 방사선 검출기의 개발전망



강 희 동

경북대학교 물리학과 교수

## 1. 서 론

원자력시설이나 방사성동위원소 사용시설에서 작업자 및 작업환경의 안전을 위해 방사선계측기를 구비하도록 법으로 규정하고 있다. 여기서 측정대상이 되는 물리량은 주로 방사선의 종류 및 에너지, 방사선 선량, 방사능 등이다. 그러나 계측기에 이용되는 방사선 검출기는 측정하려는 물리량에 따라 검출특성이 매우 다르기 때문에 작업상황에 따라 적합한 방사선계측기를 선택하는 것은 매우 중요하다. 계측기의 올바른 사용을 위해서는 여러가지 계측기의 검출원리나 동작특성, 측정치의 신뢰도 및 안정성 등을 이해하여 목적에 부합하는 적절한 계측기를 선택할 수 있어야 한다.

일반적으로 방사선작업종사자는 작업시 휴대용 서베이미터와 피폭선량측정용 도시미터(선량계)를 주로 사용한다. 서베이미터에는 GM관, 비례계수관, 전리함, 신틸레이터 등의 방사선검출기들이 다양하게 이용되고 있는 집적선량을 측정하여 특정작업이나 작업기간에 대한 피폭상황의 파악을 목적으로 이용되는 개인피폭선량계에는 필름배지, TLD, GM관, 전리함 및 Si검출기 등이 주로 이용되고 있다. 이들 방사선검출기들은 이미 개발이 완료되어 상업화가 이루어져 있으며 전자기술 및 가공기술의 발달에 힘입어 사용에 편리하도록 소형화 및 지능화되고 있는 추세이다.

여기에서는 기존의 방사선검출기 외에 여러 연구기관이나 검출기제작회사에서 개발노력을 기울이고 있는 새로운 방사선검출기개발의 경향에 대해 간단히 소개하고자 한다.

## 2. 방사선검출기의 개발현황

방사선검출기는 방사선과 물질과의 상호작용에 따른 전리현상이나 발광현상 등을 이용하여 방사선의 존재와 종류, 에너지, 강도 등을 측정할 수 있는 센서소자이다. 방사선검출기는 측정대상이나 검출현상 및 검출물질의 상태에 따라 그 특성이 다르기 때문에 매우 다양하게 개발되어 왔다. 현재까지 개발되어 온 방사선검출기를 검출원리에 따라 살펴보면 표1과 같다.

방사선검출기는 그 이용분야가 확대됨에 따라 더욱 다양화 되어가고 있다. 검출기의 연구개발 방향은 기존의 검출기들이 가지고 있는 단점을 보완하기 위한 새로운 검출기의 개발과 이미 개발되어 사용중인 검출기를 이용하여 지능화 및 다기능화된 응용성 제고연구가 활발히 진행되고 있다. 새로운 검출기개발현황을 신틸레이션 검출기, 반도체검출기, 기체검출기 분야에서 진행되고 있는 현황을 살펴보기로 한다.

### (1) 신틸레이션검출기

신틸레이션검출기는 범용으로 널리 사용되

표 .1 검출원리에 따른 검출기와 그 특성

검출원리	검출기	세부분류	특징
이온화 (기체)	전리함	<ul style="list-style-type: none"> <li>직류형(적분형)전리함                             <ul style="list-style-type: none"> <li>자유공기전리함</li> <li>공동전리함</li> <li>공기등 가벽공동이온함</li> </ul> </li> </ul>	X, $\gamma$ 선 조사선량 절대측정 X, $\gamma$ 선 흡수선량 X, $\gamma$ 선 조사선량
		<ul style="list-style-type: none"> <li>펄스전리함</li> </ul>	
	비례계수관	<ul style="list-style-type: none"> <li>비례계수관 : X선용 : <math>4\pi</math></li> </ul>	X선 스펙트럼 측정 $\alpha$ , $\beta$ 방사능 절대측정
		<ul style="list-style-type: none"> <li>중성자용비례계수관                             <ul style="list-style-type: none"> <li>BF<sub>3</sub>계수관</li> <li><sup>3</sup>He계수관</li> </ul> </li> <li>반도양자계수관</li> <li>핵분열계수관</li> </ul>	열중성자의 계수 열중성자의 계수 및 고속중성자의 스펙트럼 고속중성자의 계수 및 스펙트럼(특수구조) 고속중성자의 계수
		<ul style="list-style-type: none"> <li>내부소멸형 : 유기다원자가스형</li> </ul>	$\alpha, \beta(\gamma)$ 선 계수, 단창형 등 여러가지 형상이 있음
		<ul style="list-style-type: none"> <li>할로젠가스형</li> <li>외부소멸형</li> </ul>	$\alpha, \beta(\gamma)$ 선 계수, 인가전압이 낮다. $\alpha, \beta(\gamma)$ 선 계수, 특수한 용도에 한정
스파크계수관	<ul style="list-style-type: none"> <li>스파크챔버</li> </ul>	특수	
이온화 (고체)	반도체검출기	<ul style="list-style-type: none"> <li>Si : p-n접합형 : 표면장벽형 : Li보상형</li> </ul>	$\alpha, \beta$ 중입자선 스펙트럼, 분해능 양호 $\alpha, \beta$ 중입자선 스펙트럼, 분해능 양호 X, 저에너지 $\gamma, \beta$ 선 스펙트럼,
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Ge : Li보상형 : 고순도형</li> </ul>	X, 저에너지 $\gamma, \beta$ 선 스펙트럼, 분해능 극히 양호, 상시 액체질소로 냉각 X, 저에너지 $\gamma, \beta$ 선 스펙트럼, 분해능 극히 양호, 사용시 액체질소로 냉각
형광	신틸레이션 계수관	<ul style="list-style-type: none"> <li>무기결정 : NaI(Tl) : Cs I (Tl) : ZnS(Ag)</li> </ul>	X, $\gamma$ 선 스펙트럼, $\gamma$ 선에 대한 계수효율이 크며, 대형의 검출기 가능. $\alpha$ 선 스펙트럼
		<ul style="list-style-type: none"> <li>유기결정 : 안트라센 : 스틸벤</li> </ul>	$\beta$ 선 스펙트럼, 고속응답 $\beta$ 선 스펙트럼, 고속응답
		<ul style="list-style-type: none"> <li>플라스틱형</li> </ul>	$\alpha$ , $\beta$ 선 스펙트럼 및 계수, 중성자의 계수(대형은 $\gamma$ 선 검출에도 사용)
		<ul style="list-style-type: none"> <li>액체형</li> </ul>	$\alpha$ , $\beta$ 선 스펙트럼 및 계수, 연 $\beta$ 선의 측정에 최적
기타	체렌코프계수관		고속하전입자의 검출
	TLD		개인피폭선량의 측정
	화학선량계		대선량의 측정
	사진필름		개인피폭선량의 측정
	형광유리선량계		개인피폭선량의 측정

고 있는 방사선검출기로서 신틸레이터와 광전증배관 또는 photodiode를 결합하여 사용하고 있으며, 검출기의 특성은 신틸레이터의 종류에 따라 결정이 된다. 기존의 신틸레이터는 무기단결정형 신틸레이터계열로서, NaI(Tl)을 필두로하여 CsI, CsI(Tl)등의 알칼리할라이드계와 CWO( $CdWO_4$ ), BGO( $Bi_4Ge_3O_{12}$ )등 다양한 종류의 신틸레이터가 개발 및 실용화되어 방사선의학, 핵물리학, 고에너지물리학 등의 발전에 크게 이바지하였다. 그러나 기존의 신틸레이터는 특수한 경우에 사용이 제한된다. 예를들면 고에너지의  $\gamma$ -선 측정용의 신틸레이터는 일반적으로 큰 신틸레이터를 사용하나, 형광의 발광파장에 대한 자체흡수율이 높아 사용상의 문제점이 제기된다. 따라서 신틸레이션검출기의 응용성을 높이기 위해서는 기존의 신틸레이터보다 발광강도가 크고, 고에너지  $\gamma$ -선의 흡수계수가 크며, 발광의 감쇄시간이 짧고, 내방사선성이 우수하여야 한다. 이러한 목적으로 개발단계에 있는 신틸레이터는 BSO( $Bi_4Si_3O_{12}$ ),  $CeF_3$ :YAIO( $YAlO_3$ :Ce),  $CdF_2$ , LSO( $Lu_2SiO_5$ :Ce)등이 있으며 이들의 특성은 표 2에서 보는 바와 같다.

여기서 가장 기대되는 신틸레이터는 LSO와 YAIO로서 LSO( $5 \times 5 \times 25mm^3$ )는 에너지분해능이 662keV의  $\gamma$ -선에 대하여 12.4%, YAIO( $4 \times 8 \times 25mm^3$ )는 6.7%까지 얻고 있는 것으로 보고되고 있다.

한편 종래의 신틸레이터는 광전증배관과 결합하여 사용하므로써 고전압전원이 소요되

고, 자장등에 의한 영향을 받는 등의 사용상의 문제점이 있어 소형의 PIN형의 photodiode를 결합하여 사용하는 경우가 늘어나고 있다. PIN형 photodiode의 경우 증폭작용이 없으므로 발광강도가 크고 발광파장이 긴 CsI(Tl), CdS(Te), ZnSe(Te)등과 같은 신틸레이터를 사용하게 된다. 여기서 CsI(Tl)은 피크파장이 550nm로 PIN형 photodiode의 감도파장영역 350~1100nm과 잘 일치되며 상대발광강도가 85정도로 크기 때문에 소형의 신틸레이션 검출기가 요구되는 분야에서 가장 많이 이용되고 있다.  $10 \times 10 \times 10mm^3$ 크기의 CsI(Tl)과  $10 \times 10mm^2$ 의 PIN을 결합한 경우 662keV의  $\gamma$ -선에 대하여 5.6%의 에너지분해능을 얻고 있어, 일반적인 상용의 NaI(Tl) 신틸레이션검출기의 분해능 8%에 비하여 우수함을 알 수 있다.

한편 반도체 제조기술의 향상에 힘입어 photodiode의 개발이 이루어져 반도체내에서 avalanche를 일으켜 수백배정도의 증폭작용을 하는 solid state PMT인 APD(Avalanche Photodiode)가 개발되었다. APD는 음극에 약 1500~2000V의 고압을 인가하여 접합영역에 강한 전기장을 형성하여 공간전하영역을 확장시킨다. P-측에 생성된 전자는 공핍층(depletion region)내로 이동되어 강한 전기장에 의해 가속되며 주위의 Si원자를 이온화시켜 이차전자가 발생되며 이차전자 또한 가속되어 주위 원자를 이온화시킴으로써 전자 사태를 일으키게 된다. 이로써 처음 생성된 미세한 신호는 증폭되어 높은 이득을 얻는다. 최근 직경

표 2. 개발 중인 무기단결정형 신틸레이터와 그 특성

	BSO( $Bi_4Si_3O_{12}$ )	$CeF_3$	YAIO( $YAlO_3$ :Ce)	$CdF_2$	LSO( $Lu_2SiO_5$ :Ce)
밀도(g/cm)	6.80	6.61	5.55	6.38	7.4
감쇄시정수(ns)	100	30	28	7	40
피크발광파장(nm)	480	375	347	520-580	420
상대발광강도	2	4-5	40	0.25	75
굴절률	2.06	1.68	1.94	1.55	1.82
용융점(°C)	1,030	1,443	1,850	1,090	~2,050
내방사선성(rad)	—	$10^6$	$10^6$	$10^7$	—
조해성	무	무	무	무	무

이 1" 크기의 APD가 상품화 되어있으며, 1" × 1" CsI(Tl)과 결합하여 662keV의  $\gamma$ 선에 대하여 6.9%의 에너지분해능을 얻고 있다. 특히 의료용 진단장비인 PET(positron emission tomography)에는 과거 BGO와 광선증배관을 배열하여 사용하던 방식을 BGO와 APD를 결합하여 사용함에 따라 공간분해능의 향상과 크기의 소형화를 이루었다. 앞으로 APD의 장점인 고속응답특성과 afterpulse가 없다는 점, 자장의 영향을 받지않는다는 점, 최대 80%에 달하는 양자효율 그리고 APD자체로서 연 X-선에 대해 효율이 높다는 특징을 고려할 때 APD의 응용범위가 넓을 것으로 기대되며, 신틸레이터와 결합하여 X선 CT 및 MRI등에도 응용연구가 기대된다. 그리고 위치검출을 목적으로 APD를 배열한 어레이 APD는 SSC의 Shower maximum검출기, BNL 등에서는 CT scanner로 이미 응용되었다.

현재 개발된 APD의 이득은 최대 1000배 정도로서  $10^7$ 정도 되는 광선증배관의 이득과는 차이가 있다. 따라서 APD를 이용하여 광선증배관정도의 이득을 얻기 위하여 photo-

cathode에서 발생한 광전자를 가속하여 APD에 입사시켜 이득을 거의  $10^6$ 까지 얻을 수 있는 VAPD(vacuum avalanche photodiode)가 개발되고 있다. 신틸레이터의 계속적인 개발과 그에 따른 PMT의 소형화가 어느정도 이루어져 있으나, PMT의 단점인 자장효과 및 좁은 dynamic range, 에프터펄스에 의한 S/N비의 저하, 낮은 양자효율, 크기 및 충격에 약한 점 등의 결점을 보완한 VAPD는 앞으로 PMT의 대체품으로서 미약광 검출이 요구되는 전반적인 연구에 응용될 것으로 보인다.

## (2) 반도체검출기

반도체검출기는 에너지분해능이 우수하여 정밀측정에 가장 광범위하게 이용되는 검출기로서 Si(Li), Ge(Li), HPGe-검출기가 주로 이용되고 있다. 요즘엔 결정성장기술의 발달로 NaI(Tl) 신틸레이션검출기와 대등한 검출효율을 가진 HPGe-검출기가 개발되어 사용되기도 한다. 그러나 이러한 반도체검출기는 상시 또는 사용시 액체질소로서 냉각을 해야하는 이용상의 많은 불편이 따른다. 이러

표 3. 반도체검출기의 물리적 특성

물 질	원자번호	Bandgap (eV)	전자-정공쌍 당에너지(eV)	밀 도 (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma$ 선에 대한 최상의분해능
Si(300K)	14	1.12	3.61	2.33	— { 420eV at 100KeV { 920eV at 661 KeV { 1300 eV at 1330 keV { 3500 eV at 122 keV { 8000 eV at 661 keV { 650 eV at 5.9keV { 2000eV at 122 keV
Ge(77K)	32	0.74	2.98	5.32	
CdTe(300K)	48-52	1.47	4.43	6.06	
HgI <sub>2</sub> (300K)	80-53	2.13	4.22	6.30	
GaAs	31, 33	1.42	—	5.35	
Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	83, 16	1.3	4.1	6.73	
PbI <sub>2</sub>	82, 53	2.6	—	6.16	
GaSe	31, 34	2.03	7.68	4.55	
AlSb	13, 51	1.62	6.3	4.26	
CdSe	48, 34	1.75	5.05	5.74	

한 단점을 보완할 수 있는 반도체검출기로서 CdTe와 HgI<sub>2</sub>가 개발되었다. 표 3에서 보는 바와 같이 CdTe는 Si이나 Ge에 비해 원자번호가 높아서 동일한 크기의 Ge-검출기에 비해 5배이상의 검출효율을 가진다. 또한 bandgap이 각각 1.47eV로 상온에서 동작되며 고압전원이 필요없는 장점이 있다. CdTe 검출기는 결정의 순도에 따라 counter급과 spectrometer급으로 나뉘어지며 그 크기는 최대 600mm<sup>3</sup>까지 상품화가 되었으며 planar diode형의 CdTe는 <sup>137</sup>Cs의 662keV의  $\gamma$ 선에 대해 3keV까지 에너지분해능을 얻고 있으며 현재의료용으로 많이 이용되고 있다. HgI<sub>2</sub> 검출기는 높은 원자번호를 가지고 bandgap이 2.1eV로 상온에서 동작하는 고분해능의 검출기로서는 적적인 검출이라 할 수 있다. 그러나 무결합 결정성장이 매우 까다로와 현재까지 10×10×1mm<sup>3</sup>크기까지 생산이 가능하여 수 keV에서 100keV 정도의 X-선 검출기로서 사용이 가능하다. 에너지분해능은 Fe-55(5.9keV)에 대해 600~1,500eV정도이다. CdTe, HgI<sub>2</sub> 외에도 Si과 Ge검출기를 대체하기 위하여, GaAs, Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, PbI<sub>2</sub>, GaSe, AlSb, CdSe등과 같은 화합물 반도체검출기 개발이 활발하게 진행되고 있으나 아직까지 연구단계에 머무르고 있는 실정이다. 특히 GaAs의 경우 상온동작이 가능하며 검출효율 또한 Ge과 거의 비슷하여 연구가 활발히 진행되었으나, 검출기용으로 사용할 수 있는 여건상 크기제한(1mm)과 비정상적인 leakage 및 잡음으로 인하여 큰 주목을 받지 못하고 있었으나 최근 반도체 제조기술과 고속 microelectronics기술의 발달로 Si과 Ge검출기의 대체검출기로서 또 다시 관심의 대상이 되고 있다.

한편 대면적 Si반도체 검출기인 표면장벽형검출기(SSD)가 개발되어 사용되고 있었으나 누설전류 등 사용상의 문제가 많아 이를 대체하기 위한 PIPS(passivated implanted planar silicon)형 검출기가 실용화되기 시작하였다. 현대 EG & G ORTEC 및 CANBERRA등의 검출기 제작회사에서는 최대 3000mm<sup>2</sup>크기의 검출기를 판매하고 있다. 이 검출기는  $\alpha$ 선

이나  $\beta$ 선등의 하전입자 측정용으로 사용되며 5.0-5.5MeV의  $\alpha$ 선에 대해 12keV전후의 에너지분해능을 보이고 있으며 제조기술의 발달로 그 성능은 약간 향상될 수 있으나 물리적인 한계가 있다. 따라서 최근에는 높은 원자번호(Z)를 갖는 금속과 Si반도체검출기를 조합하여 새로운 형태의 복합검출기의 개발을 위한 기초적인 연구들이 행해지고 있다. 이러한 검출기는 Si반도체검출기의 전면에 박막형태의 중금속(예를들면 Au)판을 놓은 형태로서  $\gamma$ -선이 중금속에 입사되었을 때 발생하는 X-선 및 2차전자를 Si반도체가 검출하도록 한 것으로 비교적 높은 에너지의  $\gamma$ -선에 대해서 높은 검출효율을 가진다. 이러한 검출기는 이미 1980년대 후반부터 X-선 측정에서 분해능을 높일 목적으로 Naruse와 Hatayama 등에 의해 연구가 진행되어 왔으며 1990년대에 들어와서는 Orvis등에 의해 400keV-2MeV 범위의  $\gamma$ -선영역까지 확대 연구가 보고되고 있으나 중금속에 의한 에너지흡수과정에서 피크시프트 및 에너지분해능의 저하문제가 아직 미해결 연구과제로 남아있어서 일용화 단계에는 못미치고 있는 실정이다. 앞으로  $\gamma$ 선에 대해서 검출효율 및 에너지분해능이 매우 낮은 Si반도체검출기의 단점을 보완하기 위한 연구가 계속되고 있다.

반도체검출기의 또다른 응용 형태인 반도체위치검출기는 Si 또는 Ge 반도체검출기를 2차원 matrix 구조 배열한 형태로 되어 있으며, 고에너지 하전입자의 위치검출을 위하여 1970년대에 부터 연구가 시작되었다. 이와 비슷한 형태로 microstrip 검출기, Si drift chamber등의 반도체위치검출기 등도 개발되어 이용되고 있다. 또한 최근에는 X선 검출기로서 수  $\mu$ m정도의 위치분해능을 얻을 수 있는 CCD(charge coupled device)의 개발로 천문학 등에서 우주선 탐재용의 X선위치 검출기로 사용되고 있다.

### (3) 기체검출기

일반적으로 서베이용 또는  $\alpha/\beta$ 입자의 검출기의 대부분은 기체검출기가 이용되고 있으

며 검출기 자체개발은 이미 완성단계라고 할 수 있다. 따라서 여기에 사용되는 새로운 기체검출기 개발에 관련된 연구는 많아 이루어지고있지 않는 실정이며 다만 비례계수관을 사용한 검출면적의 대형화나 전자산업의 발달에 따른 다양한 기능을 갖는 서베이미터 개발 등이 보고되고 있다. 그러나 근래에도 기체검출기 분야에서 활발하게 연구되고 있는 것은 PSD(position sensitive detector)이다. PSD는 x-선이나 중성자 또는 고에너지의 하전입자 검출용으로 대형의 가속기 등에 응용되고 있다. PSD를 이차원화하여 방사선영상을 검출할 수 있는 MWPC(Multi-Wire Proportional Chamber)는 PET(Positron Emission Tomography) 및 가속기 이용분야에서 응용되고 있다. 비슷한 구조를 지니며 위치검출을 위한 MSAC(Multi-Step Avalanche Chamber는 penning 효과에 의한 광매개를 이용한 위치검출기로서 높은 방사선장하에서 위치검출용으로 개발되었으나, Hamamatsu에서는 이를 위치검출용 광전증배관으로 응용하여 상품화하기도 하였다. 현재 국내에서도 MWPC를 의료용 X선 CT등에의 응용을 위하여 1차원 MWPC 및 그에 따른 고속신호처리를 위한 연구가 활발히 진행중에 있다.

### 3. 결 론

여러 방사선 관련 분야에서 요구되는 검출

기는 날로 다양해지고 있으며 이에 부합하는 특성과 기능을 가진 검출기에 대한 개발·연구가 진행되고 있어 모든 검출기의 종류와 특성을 간단하게 설명하는 것은 쉬운 일이 아니다. 상술한 검출기들 외에도 고에너지물리학 등에서는 주로 사용되는 calorimeter, glass scintillation 검출기 등 여러가지 검출기가 있으며, 또한 이들 검출기와 신호처리시스템을 결합한 다양한 형태의 검출기시스템이 개발되어 신호처리의 고속화와 검출효율의 향상을 위한 연구가 활발히 진행 중에 있다 현재 국내에서도 방사광의 이용에 따른 생물·유전공학 및 의학분야에서 방사선 영상을 얻기 위한 방사선영상검출기의 필요성이 점점 고조되고 있고 또한 몇몇 학교에서 방사선영상검출기의 개발·연구가 수행되고 있음을 감안할 때, 단순한 서베이용 또는 개인피폭용의 검출기와 더불어 여러가지 검출기를 잘 이해하여 올바른 검출시스템을 선택하는 것은 날로 증가해가는 동위원소이용시설과 원자력발전시설의 증가에 비추어 방사선작업자가 갖추어야할 기본적인 지식으로 생각된다.

따라서 상술한 검출기들 외의 다른 검출기들의 특성 및 검출원리 등에 대한 이해는 관련 문헌들을 참고하기 바라며, 본고가 방사선 관련작업에 있어 조금이나마 도움이 되었으면 한다.

