

# 원자력 시설의 방사선 계측 및 감시 장치 개발

김 용 균

한국원자력연구소 미래원자력기술개발단  
계측제어·인간공학연구부 책임연구원



**원** 자자력은 국내 전력 생산의 40% 이상을 담당하고 있으며 미래에도 그 중요성이 크게 유지될 전망이다.

이러한 원자력 관련 시설에서 발생되고 다루어지는 방사성 물질을 보다 안전하게 취급 관리하기 위해서는 방사선을 정밀하게 계측할 수 있는 장치가 반드시 마련되어야 한다.

또한 방사성 물질과 방사선 계측에 관련된 이른바 방사선 기술(RT, Radiation Technology)은 비파괴 검사·두께 측정·물성 분석·신물

질 개발 등과 같은 산업 분야, 질병 진단·암 치료와 같은 의료 분야, 외계 은하 관측·물질의 근원 탐색 등과 같은 기초 과학 분야 등에 널리 적용되고 있다.

따라서 방사선 계측 장치는 보다 안전하게 방사성 물질을 취급하고자 할수록 보다 넓은 분야에서 방사성 물질이 이용될수록 더욱 발전된 형태로 연구 개발되어야 한다.

19세기 말에 방사선이 발견된 이래 세계적으로 방사선 계측기에 대한 연구는 원자력의 산업적 이용이 확대됨에 따라 꾸준히 발전되어 왔으며, 최근에는 방사선 계측기 기술과 반도체 공정 기술, 신소재 등이 어우러진 새로운 개념의 방사선 계측기가 개발되고 있다.

국내에서도 방사선 계측기에 대한 연구가 그간 진행되어 왔으나 개발된 기술이 실제 현장에서 쓰일 수 있을 정도의 성능까지 개발되지는 못하였다.

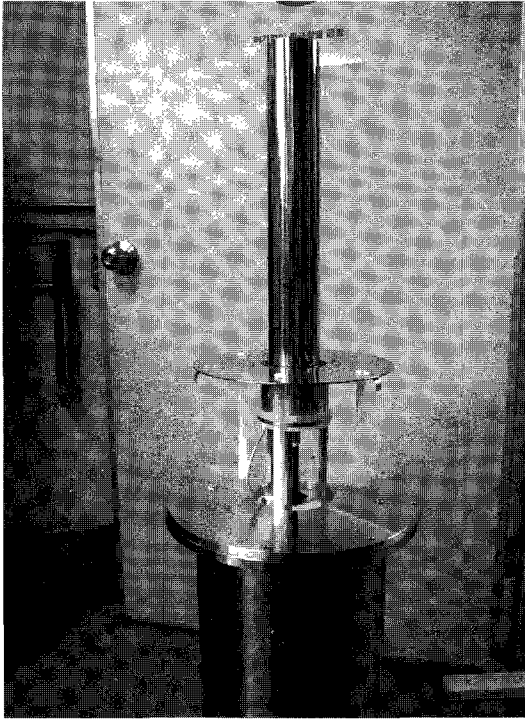
특히 방사선 계측기에서 가장 중요한 부분 중 하나라 할 수 있는 검

출기는 거의 연구가 이루어지지 못한 실정이다.

이는 방사선 검출기가 방사선과 물질의 반응, 반응에 의한 전기 신호의 발생, 발생 전기 신호의 포집 등과 관련된 재료 공학, 전기 전자, 핵물리 등 다양한 분야의 지식을 포괄적으로 필요로 하기 때문이며 국내 연구 기반이 취약하기 때문이다.

이러한 필요성에 따라 한국원자력연구소 계측제어·인간공학연구부에서는 과학기술부 원자력 중장기 사업 과제인 방사선 계측기 설계 및 제작 기술 개발과 한국원자력연구소 기관 고유 사업 과제인 전자기기 보수 및 제작 과제를 진행하여 방사선 계측기의 국산화와 이를 바탕으로 한 첨단 방사선 계측기 연구 기반 조성을 위하여 노력하여 왔다.

이러한 성과 중 하나로 이온 챔버와 섬광체 검출기를 기반으로 한 방사선 감시 장치의 핵심 기술 국산화에 성공함으로써 방사선 시설의 안전성과 신뢰성을 크게 향상시키게 될 것이다.



〈그림 1〉 제작된 이온 챔버

### 이온 챔버

이온 챔버는 입사 방사선이 물질과 반응하여 발생하는 양이온과 전자쌍을 수집하여 방사선량을 측정하는 검출기이다.

방사선은 이온 챔버 내부의 기체와 반응하게 되며, 이 때 발생된 전자와 양이온은 챔버 내에 형성된 전기장에 의하여 수집 전극으로 포집되게 된다.

이 때 챔버 내 전기장의 세기를 적합하게 조절하여 방사선에 의하여 발생된 전하가 수집 전극으로 이동하는 사이에 전하수가 증가하는

전하 증폭을 일으키지 않도록 한다.

이는 전하 증폭률은 인가하는 전압에 민감하게 반응하므로 장기간 이온 챔버를 사용할 경우 인가 전압의 변화에 따른 검출기의 안정성 저하를 피하기 위해서이다.

이온 챔버는 구조가 단순함에 비하여 방사선에 의한 미세한 전류를 장기간 안정적으로 측정할 수 있어야 하고 제작 과정에 많은 노하우가 필요하므로 그 동안 국내에서 개발이 되지 못하고 있었다.

이온 챔버 외벽 물질의 선택과 기하학적 구조는 이온 챔버 설계 기술에서 가장 중요한 요소 중 하나이

다.

이온 챔버를 둘러싼 외벽 물질은 방사선이 이온 챔버 검출 영역으로 입사한 경우 외벽의 영향을 최소화할 수 있는 물질이 선정되어야 하며 이를 최소화할 수 있는 기하학적 구조로 설계되어야 한다.

이를 위하여 방사선이 물질내를 투과할 경우 물질과의 반응을 시뮬레이션할 수 있는 EGSnrc와 MCNP4C 코드를 이용한 검출기 설계 체계를 마련하였다.

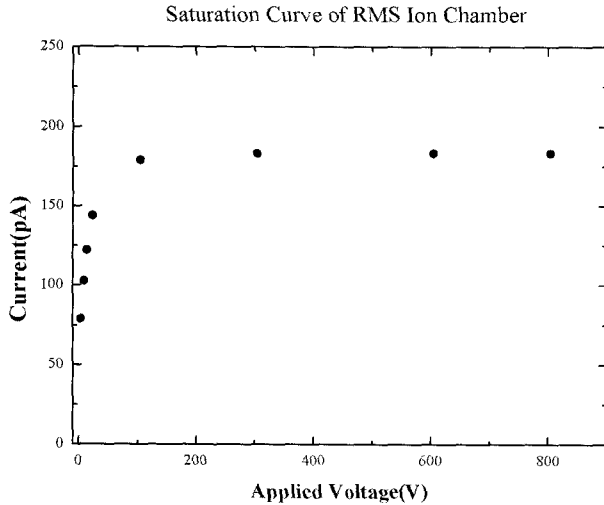
이온 챔버에서는 방사선에 의해 발생한 최초의 신호가 증폭 없이 수집되기 때문에 출력되는 전류의 크기는  $pA(10^{-12}A)$  수준으로 상당히 낮으므로, 입사 방사선이 없을 경우에 검출기에 측정되는 누설 전류가 크게 되면 신호를 읽을 수 없게 되므로 이를 최소화하여야 한다.

누설 전류를 줄이기 위하여 저항이 큰 물질을 전극 사이에 배치하고 제작시 각 구성 물질 표면의 이물질 을 최대한 제거하였다.

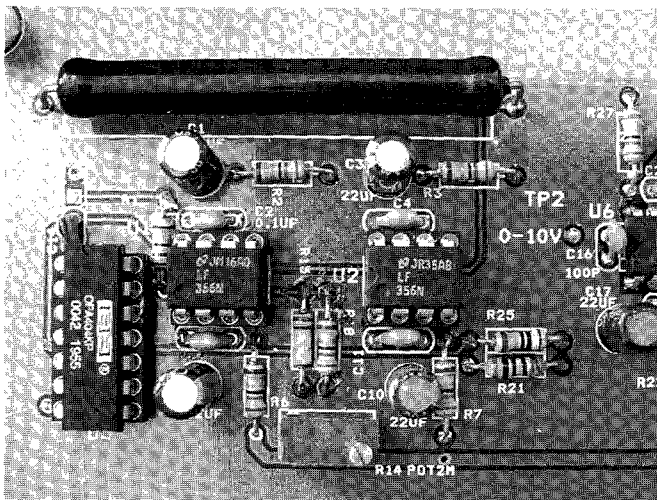
또한 guard 전극을 이온 챔버 내부에 설치하여 누설 전류를 최소화 하였다.

guard 전극에 의한 수집 영역 부피 감소의 영향을 최소화하기 위하여 guard 전극이 최대한 방사선 검출 영역에 위치하지 않도록 설계 하였다.

이온 챔버 내부에는 공기 이외의 건조 가스를 채워서 방사선에 의한



〈그림 2〉 제작된 RMS용 이온 챔버 포화 곡선



〈그림 3〉 이온 챔버용 전치 증폭기

신호를 크게 하거나 기체에 함유된 습도 등에 의한 오차를 최소화 한다. 이 경우 장기간 이용시 챔버 내 기체의 성분 변화를 최소화할 수 있는 밀봉 구조로 제작되었다.

이러한 고려를 바탕으로 설계

제작된 이온 챔버를 〈그림 1〉에 나타내었다.

외벽 및 수집 전극은 SUS 및 Polyethylene 두 종류로 제작하였으며 Polyethylene 내부에는 전도성 탄소를 코팅하였다.

고전압 인가와 신호 인출을 위하여 SHV와 BNC connector를 두었으며 이온 챔버 내부에 가스를 채우기 위하여 가스용 connector를 두었다.

제작된 이온 챔버의 방사선에 대한 반응 성능을 측정하기 위하여  $^{241}\text{Am}$  방사선원에서 발생하는 60keV 감마선을 이용하여 이온 챔버 외벽에 인가한 전압을 높여주면서 검출 신호의 변화를 측정하였다.

〈그림 2〉는 측정에 의하여 얻어진 이온 챔버 인가 전압에 따른 검출 전류의 변화이다.

방사선이 없는 경우 측정된 이온 챔버의 누설 전류는 50fA 정도였으며 10 $\mu\text{Ci}$ 의 미약한  $^{137}\text{Cs}$  방사선원에 대하여 200fA 정도의 신호를 얻을 수 있었다.

또한 장기간 방사선 반응성 평가 결과 이온 챔버의 성능이 1% 미만으로 안정적임을 확인할 수 있었다.

**이온 챔버용 전치 증폭기**

방사선 측정을 위한 검출기는 측정하려는 방사선의 종류와 측정을 통하여 얻고자 하는 정보에 의해 결정되며, 검출기에 따라 출력 신호도 다양하다.

특히 이온 챔버에서의 출력은 검출기에 흡수된 입사 방사선의 에너지에 선형적인 전류를 출력하는데, 출력은 수 pA에서 수십 pA의 미세

한 양의 전류이다.

그러므로 이를 직접 측정하기는 불가능하다. 특히 이온 챔버의 이온화는 연속적인 것이 아니라 챔버에 방사선이 입사되어 이온화가 될 때만 전류가 출력되므로 일반적인 계측기로는 측정이 불가능하다.

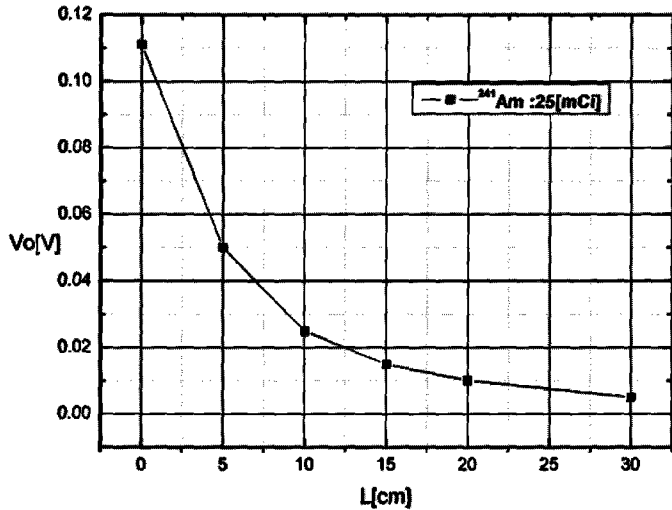
따라서 챔버의 미세한 전류 신호를 외부 잡음 신호와 구분하여 일반 계측기로 판독할 수 있도록 변환-증폭을 해야 하는 신호 처리 회로가 필요하다.

챔버의 출력을 검출하기 위하여 연산 증폭기는 입력 임피던스가 매우 높은 소자를 사용하였으며, 궤환 회로에 사용된 저항도 큰 이득을 얻기 위해 매우 큰 저항을 사용하였다.

이상적인 연산 증폭기에선 바이어스 전류가 거의 같지만 실제로 정확히 일치하지 않기 때문에 오프셋 전류  $I_{os}$ 가 발생한다.

이러한 전류는 이득이 크지 않은 증폭기에선 문제가 되지 않지만 이득이  $10^4$ 배가 되는 고이득 회로에선 심각한 문제가 된다. 이러한 오프셋 전류에 의한 오프셋 전압 드리프트를 줄이기 위해서  $\pm 15[V]$ 을 전위차계를 비반전 단자에 구성하였다(그림 3).

계산한 이론값과 실제 제작한 고이득 증폭기와의 오차 범위는 낮은 영역에선 최대 9[%], 높은 영역에선 1.5[%]의 오차를 나타내고 있다. 이 오차는 제품의 특성상 단순 비교



(그림 4) 이온 챔버와 방사선원의 거리에 따른 검출 신호 변화

하기는 무리가 있지만 이는 기존 상용화된 것들과 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

개발된 이온 챔버와 전치 증폭기를 이용하여  $^{241}\text{Am}$  방사선원과 이온 챔버 사이의 거리를 변화시키면서 방사선량에 따른 검출 신호를 변화를 (그림 4)에 표시하였다.

### 섬광형 검출기

베타선 측정을 위한 방사선 감시 장치용 검출기로 두께 1.5mm, 지름 40mm인 디스크 형태의 플라스틱 섬광체 검출기를 제작하였다(그림 5).

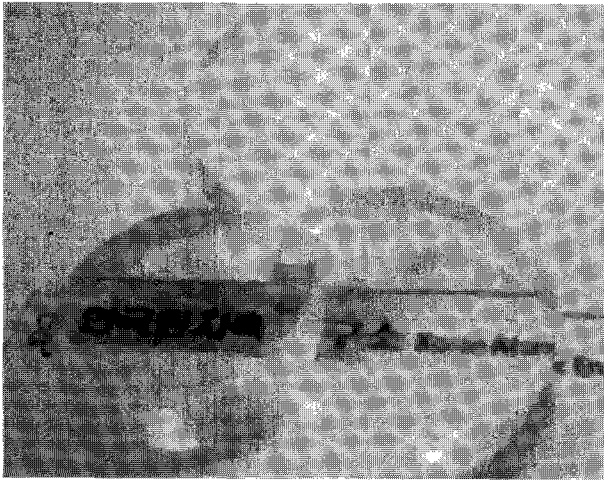
금속 mounting mold 내에 폴리에스테르 수지와 경화제를 부은 후 응고하여 시편을 제작하고 다이

아몬드 단결정 절단기를 이용하여 자르고 표면을 연마 후  $\text{Al}_2\text{O}_3$  powder를 이용하여 polishing 하였다.

하전 입자를 검출하는 검출기는 입사창이 아주 얇아야 하고 검출하고자 하는 입자 이외는 차단하여야 한다. 그리고 기본적으로 측정 신호의 잡음으로 작용하는 빛을 차단하여야 한다.

그러므로 본 beta 입자 플라스틱 검출기의 입사창은 beta 입자가 에너지 손실 없이 통과할 수 있는 mylar 필름(0.2mm)을 사용하였고 alpha 입자의 투과를 막기 위하여 알루미늄 호일을 사용하였다.

PMT와 플라스틱 섬광체 디스크가 접촉되는 부분에는 접촉이 잘되고 공기층을 없애기 위하여 실리콘



〈그림 5〉 플라스틱 섬광체 검출기

그리스를 사용하였다.

그리고 플라스틱 섬광체 디스크 위에는 외부로부터 빛·습기 등을 차단하기 위하여 mylar 필름을 사용하였고 그 위에 알루미늄 호일을 덮었다.

이를 한국원자력연구소 조사후 시설에 시험 설치한 결과 기존의 노후된 베타선 검출용 섬광형 검출기보다 검출 효율이 약 2배 이상 증가함을 확인할 수 있었다.

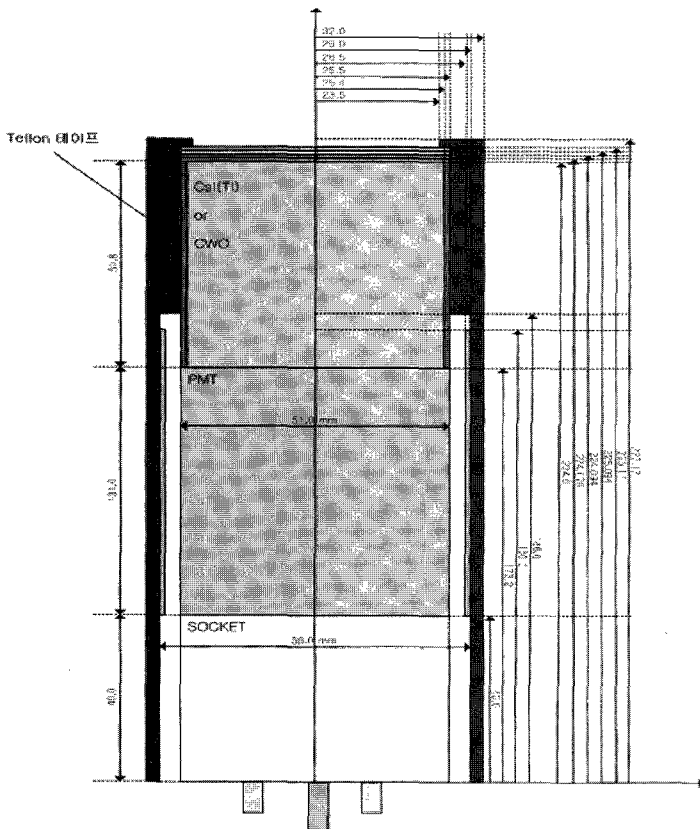
### 베타 감마 동시 계측기

앞에서 설명된 이온 챔버는 주로 감마선 측정을 위하여 사용되고 플라스틱 섬광체는 베타선 검출을 위해서 사용된다.

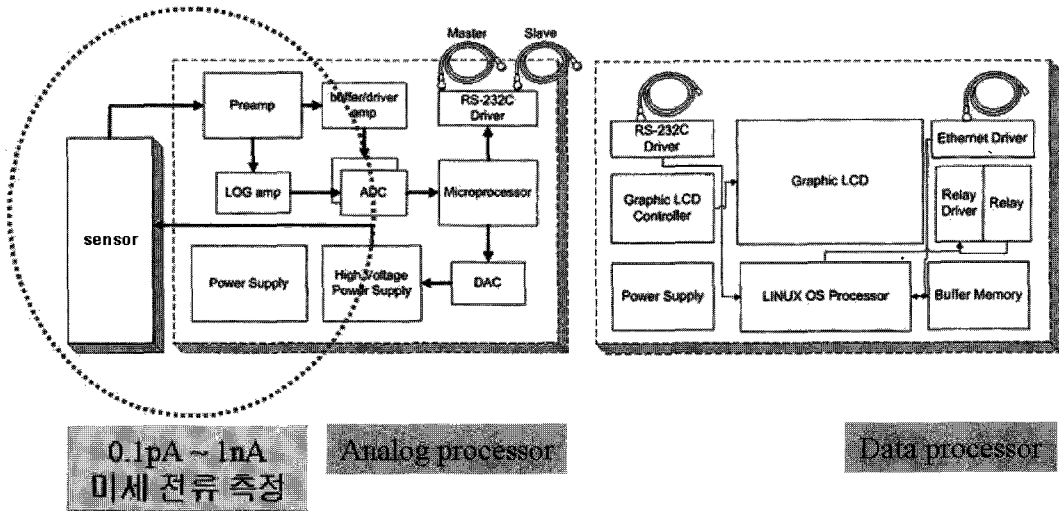
그러나 실제 측정이 이루어지는 환경하에서는 베타선과 감마선이 동시에 발생하는 경우가 많으며 이 경우 베타선과 감마선을 동시에 검출하면서 그 선량을 분리하여 측정할 수 있는 검출기가 요구된다.

이러한 검출기를 위하여 일반적으로 방사선 에너지 스펙트럼 측정을 위하여 연구되고 있는 PHOSWICH 검출기 개념을 방사선 감시 장치에 최초로 도입하였다.

베타선에 반응하는 플라스틱 섬광체와 감마선에 반응하는 CsI 섬광체를 PMT 앞에 연이어 두어서 베타선과 감마선을 함께 검출하게 하는 동시에 플라스틱 섬광체와



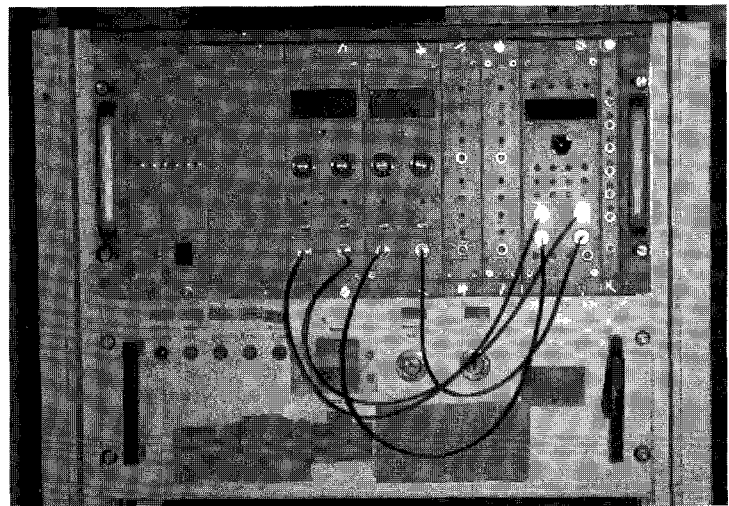
〈그림 6〉 베타-감마선 동시 계측기의 제원



〈그림 7〉 RMS 시스템 개념도

CsI 섬광체가 방사선과 반응할 경우 rising time이 다름을 이용하여 rising time을 측정할 수 있는 전자 회로를 설계하여 베타선과 감마선을 구분하도록 하였다. 입사하는 알파선 투과를 막기 위하여 17 $\mu$ m의 알루미늄 호일을 입사창에 두었다(그림 6).

제작된 동시 계측기와 설계한 전자 회로를 이용하여  $^{90}\text{Sr}$ (베타선)과  $^{137}\text{Cs}$ (감마선)에서 발생하는 방사선을 구분 측정하는 데 적용하였다.



〈그림 8〉 설치 운영중인 RMS의 일부

### 방사선 감시 장치

방사선 감시 장치(RMS, Radiation Monitoring System)는 방사선을 계측하는 검출기 센서와 그 신호를

처리하는 전자 회로, 데이터 처리 및 제어 시스템으로 이루어진다.

앞에서 설명한 바와 같이 방사선량 측정용 전리함, 알파, 베타선 계수용 섬광체 검출기, 감마선 측정용

섬광체 검출기, 베타, 감마 동시 측정 phoswich 검출기,  $^6\text{LiF}$ 를 이용한 중성자 측정용 전리함 등의 방사선 센서 제작 기술을 개발하고 0.1pA까지 미세 신호를 정밀하게

〈표 1〉 개발된 RMS와 외국 제품 간 비교

항목	기존 외국 제품	자체 개발품	비고
측정 범위	10nSv-10Sv/h	10nSv-10Sv/h	10 $\mu$ Ci-100mCi @Cs-137 (10 <sup>-13</sup> -10 <sup>-9</sup> A)
계측 정밀도	30~40% @ 0.1pA	10% @ 0.1pA	3배 이상 향상
기존 RMS와의 호환성	어려움	개발시 고려	현장 상황에 따른 최적화 가능
RMS 센서 유지 보수	모듈 교체	모듈 및 부품 교체	70~80% 이상 비용 절감
정비 및 사후 관리	고비용 장시간 소요	저비용 단시간 소요	24시간 감시 체제 유지 안전성 향상

처리하는 전자 회로가 개발됨으로써 핵심 기술 부분을 최초로 국산화한 방사선 계측기 및 감시 장치를 제작하였다.

〈그림 7〉은 RMS의 시스템 개념도이며, 여기에는 데이터 수집, 처리, 제어 시스템, Air Sampling Unit, 시스템 제어 프로그램이 포함되어 있다.

제작된 RMS는 이미 한국원자력연구소의 방사선 시설에 설치하여 장기간 안정적으로 운영되고 있다.

**맺음말**

본 기고에서는 핵심 기술의 국산화에 성공한 원자력 시설의 방사선 계측 및 감시 장치와 세부 기술인 센서 및 전자 회로에 대하여 소개하였다.

원자력 시설의 안전한 운용을 위해서는 주어진 시설에 적합한 방사

선 계측 장치의 설계 제작 설치가 요구되며 특히 계측 장치의 핵심이 되는 방사선 검출 센서의 제작이 필수적이다.

본 연구를 통하여 신호 처리를 위한 고효율 전지 증폭기를 자체 설계 개발하였을 뿐 아니라 이온 챔버·섬광형 검출기 등의 방사선 센서를 개발하였다.

또한 베타·감마선 감별을 위한 섬광형 검출기 구조를 방사선 감시 장치에 도입하고, 이를 바탕으로 시제품을 개발하였다.

개발된 방사선 감시 장치는 연간 1,000억원을 초과하는 방사선 계측기의 수입 대체에 의한 경제적 효과뿐 아니라 원자력/방사선 시설의 안전성에 대한 국민 신뢰도를 높이는 데 크게 기여할 것으로 예상된다.

〈표 1〉에서 보인 바와 같이 한국원자력연구소에서 개발된 제품은 기존의 외국산 제품보다 우수한 성

능을 가질 뿐 아니라, 기존의 시스템을 유지 보수하거나 교체할 때는 많은 비용을 절감할 수 있으며, 24시간 상시 감시 체제를 유지하기 위한 기술을 확보하게 되었다는 데 중요한 의의가 있다.

또한 RT의 활성화에 따라 방사선을 이용한 산업 분야가 날로 확대되고 있으므로 사용 목적에 적합한 방사선 검출기 제작 기술 확보의 필요성이 커지고 있다.

본 연구를 통하여 얻어진 검출기 제작 기술은 이러한 기술 수요에도 크게 부응할 것으로 기대된다.

특히 이온 챔버는 방사선 치료시 선량 감시 장치, 제철 시설의 두께 측정기, 원자력발전소의 중성자 모니터 검출기 등 다양한 분야에서 쓰이고 있으며 지금까지 연구를 통하여 확보된 기술을 바탕으로 다양한 응용 계측기 개발이 기대되고 있다.

본 연구 개발은 한양대학교 방사선안전신기술연구센터(소장:김종경), (주)유엘에스(대표:한건호)와 산·학·연 협력을 통하여 이루어진 것으로 이에 감사드립니다. ☎