

Phoswich Detector for Simultaneous Measuring Alpha/beta Particles

알파/베타선 동시측정용 phoswich 검출기

Gye Hong Kim, Chan Hee Park, Kune Woo Lee, Chong Hun Jung
and Bum Kyoung Seo

Korea Atomic Energy Research Institute, Daedeokdaero 1045, Yuseong-gu, Daejeon

ghkim@kaeri.re.kr

김계홍, 박찬희, 이근우, 정종현, 서범경

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045

(Received July 25, 2007 / Revised March 26, 2008 / Approved April 4, 2008)

Abstract

The new type phoswich detector consisting of the ZnS(Ag) and plastic scintillator for alpha/beta-ray simultaneous counting was developed for monitoring radiological contamination inside pipes. The detection performance was estimated using the PSD (pulse shape discrimination) method as a function of distance between the scintillator and radioactive source. The attenuation of particles traveling through a thin film for preventing the detector from being contaminated was experimentally estimated. It is concluded from our investigation that the phoswich detector developed can provide a sufficient alpha/beta-ray discrimination. The application of a thin film for preventing the detector from being contaminated was proven to be feasible.

Key words : Radiological contamination level inside pipe, Phoswich detector, Pulse shape discrimination, Scintillator

요약

배관 내부의 방사성 오염도를 측정하기 위한 ZnS(Ag)/플라스틱섬광체 조합의 알파/베타선 동시측정용 phoswich 검출기를 개발 하였다. 알파/베타선 동시측정용 phoswich 검출기의 오염 위치에 따른 검출 성능을 PSD (Pulse shape discrimination) 방법을 이용하여 평가하였다. 또한, 검출기를 방사성 오염물질로부터 보호하기 위한 오염방지용 필름에 대한 방사선 감쇄 정도를 실험적으로 평가하였다. PSD 방법으로 알파/베타선 분리 정도를 측정한 결과 충분히 알파와 베타

선이 분리되었으며 오염방지용 필름의 적용 가능성을 확인하였다.

중심단어 : 배관 내부 방사능 오염도, phoswich 검출기, PSD, 섬광체

I. 서론

원자력연구시설 및 방사능 물질 취급 시설은 방사능 물질에 의해 오염되거나 방사화 되어있기 때문에 시설을 해체하기 전에 방사선학적인 오염 특성이 평가되어야 한다. 그러나 배관과 같이 협소한 공간에서 내부 표면에서 방출되는 하전입자 방사선을 측정하는데 많은 어려움이 있다. 이러한 제약성으로 인하여 원자력 시설에 맞는 방사능 측정 장비의 개발이 필요하며 작업자의 안전성 확보를 위하여 원격조작 및 작업 시간 단축을 위하여 측정 장비의 자동화 및 원격장치 개발에 그 초점을 맞추고 있다[1, 2]. 미국은 ANL CP-5 연구로의 해체 프로젝트에서 배관 내부의 방사성 오염도를 측정하기 위하여 Pipe Explorer™를 개발하여 실증시험을 수행하였으며 일본의 JAERI에서는 JPDR의 해체 시 발생되는 배관의 내부 방사성 오염도를 측정하기 위하여 MISE(Measuring Device for Inner Surfaces of Embedded Piping)라는 장비를 개발하여 베타선과 감마선을 동시에 측정할 수 있도록 제작하였다. MISE는 검출기에서 베타선과 감마선의 투과도 차이를 이용하여 방사선을 구분하여 측정할 수 있도록 장비를 설계하였다. 그러나 Pipe Explorer™은 알파와 베타선을 동시에 측정할 수 없는 번거로움이 있으며 MISE는 알파선을 측정할 수 없고 검출시스템이 배관 내부의 오염 물질에 의한 오염 가능성을 가지고 있다.

본 연구에서는 배관 내부의 방사선학적인 오염 특성을 평가하기 위하여 배관 내부로 검출기를 직접 삽입하여 알파/베타선을 동시에 측정할 수 있고, 내부의 오염물질에 의한 측정 장비의 오염을 방지할 수 있는 ZnS(Ag)/플라스틱섬광체 조합의 알파/베타선 동시측정용 검출기 검출시스템을 구성하여 방사능 검출 성능을 평가하였다. 대부분 기존 phoswich 검출기는 각각의 섬광체가 직접 접촉해 있는 샌드위치 형태

지만 배관 내부 표면에서 방출되는 비정이 짧은 하전 입자, 특히 알파선의 방사선의 검출 효율을 향상시키기 위하여 각각의 섬광체가 분리된 검출기를 고안하였다. 알파/베타선 신호 분리 정도와 검출기와 오염 위치 사이의 거리에 따른 검출 성능을 물론 오염방지용 필름에 의한 방사선 감쇠 정도를 파형분별(PSD : Pulse Shape Discrimination) 방법을 이용하여 실험적으로 평가하였다. 그리고 베타선 검출 성능 실험 결과를 입증하기 위하여 Monte Carlo 전산 코드인 MCNP 4C를 이용하여 배관 내부의 베타선 검출 특성을 모사하였다.

II. 재료와 방법

Phoswich 검출기는 여러 형태의 방사선을 동시에 검출하기 위해 하나의 광전자증배관에 2개 이상의 다른 섬광체가 부착된 검출 시스템이며 섬광체 각각은 특정 형태의 방사선에만 반응하도록 선정되며 방사선 형태의 분리는 형광 사이 파형 차이에 기초하여 이루어진다.

검출기는 알파 검출을 위한 ZnS(Ag) 무기섬광체와 베타 검출용으로 플라스틱 섬광체로 구성하였다. 플라스틱섬광체와 ZnS(Ag) 섬광체 선정은 PSD 방법의 적용을 가능하게 하기 위하여 섬광 천이 시간 차이에 기초하였다. ZnS(Ag) 섬광체는 가장 오래된 무기섬광체 중의 하나이며 이것은 CsI와 거의 같은 정도의 매우 높은 섬광효율을 가지고 있지만 다결정 분말로써만 이용할 수 있기 때문에 알파입자나 그 외의 중이온 검출용으로 사용되는 박막에 한정된다. ZnS(Ag) 무기섬광체 밀도가 25 mg/cm² 이상이 되면 섬광체에서 방출되는 섬광에 대하여 불투명하기 때문에[3] 알파선 검출이 불가능하기 때문에 알파선 저지 및 섬광에 대한 투명성을 고려하여 시트 형태의 ZnS(Ag) 섬광체를 선정하였다. ZnS(Ag) 무기섬광체

는 0.25mm의 폴리에스터 필름에 3.25mg/cm² 밀도로 ZnS(Ag) 섬광체가 도포되었으며 섬광 천이 시간이 200nsec인 ELJEN Technology의 EJ-440을 사용하였다. 0.5MeV 베타입자의 경우 1.032 g/cm³인 폴리에스터 필름에서 비정이 1mm 이상이기 때문에 0.25mm 폴리에스터 필름에서 베타입자가 거의 손실 없이 통과하기 충분하며 3.25mg/cm³의 ZnS(Ag) 밀도는 비정이 아주 짧은 알파선 입자를 충분히 저지시킬 수 있는 두께다. 검출기 제작에 사용된 베타선 검출용 플라스틱 섬광체는 Bicron 사의 BC-408이며 섬광 천이 시간이 2.1nsec로 ZnS(Ag) 섬광체의 200nsec보다 아주 짧아 파형분리를 가능하게 해준다. 섬광체 주성분은 polyvinyltoluene이며 최대 발광 파장은 적용된 PMT의 응답파장인 300~650nm에 감도가 맞는 425 nm이다.

알파선과 베타선이 공존하는 혼합방사선장에서 알파선과 베타선을 판별하기 위하여 파형 분리 신호 처리 시스템을 이용하였다. 일반적으로 PMT에는 전자를 가속/증배시키는 dynode 전극과 마지막에 전하를 수집하는 anode 전극이 있다. Anode 신호를 시간 신호로 하고, dynode 신호를 에너지 신호로 하여 알파선과 베타선의 파형 판별을 시도하였다. 일정한 진폭에 이르는 시간이 베타(감마)선이 알파선보다 빨리 도달하기 때문에 anode와 dynode 사이의 신호 사이 시간 차이를 측정하여 파형을 판별한다. 파형판별 정도를 나타내는 방법에는 여러 가지가 있으나, 본 연구에서는 가장 일반적으로 사용되는 FOM (figure of merit)값을 사용하여 파형판별정도를 평가하였다. 이때 FOM 값의 정의 식은 다음과 같다.

$$FOM = \frac{P_\alpha - P_\beta}{\alpha FWHM + \beta FWHM}$$

위 식에서 분자는 알파선과 베타(감마)선 피크 사이 간격을 나타내고 분모는 알파선과 베타선 파형 스펙트럼 반치폭의 합을 나타낸다.

시트 형태의 ZnS(Ag) 무기섬광체는 배관 내부 표면의 알파선 방사능 오염도 측정에 적용하기 위하여 높이 30mm, 직경 40mm인 원통형으로 제작하여 Fig. 1의 검출기 이송시스템에 부착하였다. 플라스틱

섬광체는 PMT와 같은 직경 26mm, 두께 4.17mm로 가공/연마하였으며 플라스틱 섬광체와 PMT 윈도우 사이 공기층을 제거하여 광전송 손실을 줄이기 위하여 광 그리스(optical grease)를 이용하였다. 일반적인 혼합 방사선장에는 알파 또는 베타선뿐만 아니라 감마선도 같이 방출하기 때문에 일반적으로 베타선 검출용 플라스틱 섬광체는 감마선의 검출 영향을 제거하기 위해 섬광체 두께를 약 0.25mm 전후로 제작하지만 비교적 에너지가 큰 베타선에도 검출 효율을 높이기 위해 4.17mm로 제작하였으며 이 경우 구성된 PSD 검출시스템에서 ¹³⁷Cs의 감마선 검출 효율은 ⁹⁰Sr/⁹⁰Y의 베타선 검출 효율의 약 10⁻⁷ 정도이며 섬광체 두께가 12mm인 경우에도 방사선원 붕괴 당 계수율이 0.18%로 아주 미미함을 이전 연구에서 확인하였다[4].

검출기 이송용 장비는 검출기 특성 평가 결과와 배관 내부에서 크기 등을 고려하여 설계하였다. 알파/베타선 측정용 Phoswich 검출기는 배관 내부에서의 적용 시험을 통하여 원통형 ZnS(Ag) 섬광체 중심과 플라스틱 섬광체의 거리가 2cm 정도일 때, 최대 검출 효율을 보인다는 것을 확인하였으며, 그 결과를 설계에 반영하였다[5]. 또한, 이송시스템 앞부분에 CCD 카메라와 조명장치를 부착하여 외부 LCD 모니터에서 배관 내부의 상황을 영상으로 확인할 수 있도록 제작하였다. 검출 시스템을 배관 내부로 이송하기 위하여 소형 모터를 장착하였으며 배관 내부에서 장비를 지지하기 위하여 3축의 바퀴를 이용하여 지지할 수 있도록 제작하였으며, 전후 이송은 모터를 이용하여 외부에서 직접 제어할 수 있게 하였다. 배관 내부에서 오염도 측정위치를 확인하기 위한 시스템은 지지용 바퀴 회전수를 진행거리로 변환하여 표시할 수 있도록 제작하였으며, 측정결과는 감시부의 LCD 모



Fig. 1. The Photograph of a Phoswich Detector System Manufactured for Simultaneous Alpha/beta Particles Counting inside Pipes.

니터 상에 표시하게 하였다.

Phoswich 검출기가 방사능 물질로 오염된 배관 내부를 이동할 경우 검출기가 배관 내부 표면의 방사능 물질에 의해 오염될 수 있는데 오염 물질로부터 검출 시스템을 보호하기 위한 수단이 필요하다. 검출 시스템을 오염물질로부터 보호하기 위하여 얇은 필름으로 원통형 ZnS(Ag) 무기섬광체가 위치한 프레임 외부를 감싸 필름의 적용가능성을 평가하였다. 알파선과 같은 하전입자 방사선은 공기 중이나 물질 중에서 비정기 상당히 작으므로 검출기 보호용 필름을 적용할 경우 검출기에 도달하는 알파입자 수에 상당한 영향을 미칠 수 있다. 흡수체 두께가 얇을 때에는 알파입자는 흡수체를 투과할 때에 에너지를 잃을 뿐이며 검출기에 도달한 알파입자의 총 수는 일정하게 유지된다. 흡수체 두께를 증가하면 흡수체 내에서 정지한 알파입자 수는 점점 증대되고 검출된 빔의 강도는 급속히 저하되어 영이 된다. Phoswich 검출기의 오염방지용 필름은 Aluminized mylar 필름과 HDPE (high-density polyethylene) 필름 2종에 대하여 필름 두께에 따른 알파/베타선 검출 계수치를 측정하였다. 측정에 이용된 알파 및 베타선원은 ^{241}Am 과 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 을 이용하였으며 600sec 동안 측정하였다.

운영전압과 LLD의 최적화는 최적 계수 조건을 위한 요건이 되는데 공급전압 그리고 LLD는 그 변화에 대한 감도 변화가 최소가 되는 플래토우라 불리우는 구역에서 선택되어야 한다. 운영 전압은 플래토우 길이의 1/3 또는 플래토우 전압의 하위 끝에서 75~100V 높은 것 중에서 작은 값에서 선택되어야 하며 플래토우 영역의 기울기는 100V 당 5~10%가 넘지 않아야 한다[6, 7, 8]. 그래서 운영 전압은 플래토우 영역에서 1/3 되는 지점에서 선택하였다[9].

알파/베타선 동시측정용 phoswich 검출기의 배관 내부 방사능 오염 위치에 따른 검출 성능을 평가하였으며 플라스틱 섬광체 입사창을 기준으로 -2.0 ~ 7.0cm 까지 0.5cm 간격으로 평가하였다.

그리고 실험 결과를 입증하기 위하여 Monte Carlo 전산 코드인 MCNP 4C를 이용하여 배관 내부 베타선에 대하여 오염 위치에 따른 검출 효율을 계산하

여 측정값과 비교하였다. 플라스틱 섬광체의 주성분은 PVT로 밀도는 $1.302\text{g}/\text{cm}^3$ 이며 수소와 산소 원소의 분율(H:C)은 1.104 이며 계산 결과는 검출기 설계에 많이 이용되는 F8 tally(pulse height tally)를 이용하였다. 계산 과정에서 생길 수 있는 오차는 1% 이하가 되도록 히스토리를 1,000,000으로 정하였으며 채널폭은 1.1×10^{-2} MeV로 정하여 input으로 입력하였다.

III. 결과와 논의

배관 내부로 검출기를 직접 삽입하여 알파/베타선을 직접 측정할 수 있는 phoswich 검출시스템을 개발 하였다. 디스크 형태의 베타선 검출용 플라스틱 섬광체는 PMT 입사창에 직접 부착하고 알파선 검출용 ZnS(Ag) 무기섬광체는 원통형으로 제작하여 배관내부 표면과 근접할 수 있도록 하였다. 그리고 원통형 ZnS(Ag) 섬광체가 플라스틱 섬광체와 최적 거리에 위치 할 수 있도록 이송시스템과 검출기를 제작하여 phoswich 검출시스템을 구성하였다. 제작된 ZnS(Ag)/플라스틱 섬광체 조합의 알파/베타선 동시측정용 phoswich 검출기를 오염위치에 따른 검출 성능과 오염방지용 필름에 의한 방사선 감쇠 정도를 PSD 방법을 이용하여 실험적으로 평가하였다.

과형판별의 정도를 나타내는 방법에는 여러 가지가 있으나, 본 연구에서는 가장 일반적으로 사용되는 FOM (figure of merit) 값을 사용하여 과형판별정도를 평가하였다. 현실적으로 PSD 시스템에서 각기 다른 방사선 형태의 완전분리가 불가능 하지만 FOM 값이 1.5 이상이 되면 과형의 분리가 완전히 된 것으로 간주한다[10]. Phoswich 검출시스템의 과형 분포 스펙트럼을 측정하여 FOM을 평가하였으며 Fig. 2에 선원이 1.5cm 위치에 오염됐을 때 과형 분포 스펙트럼을 나타냈고 Table 1에 각각의 경우에 대하여 FOM을 나타냈다. -1.0cm 이 전과 5.5cm 이후의 경우에는 알파선 검출 효율이 낮아 FOM로 알파/베타선 분리 정도를 표현할 수 없었으나 이 외에 FOM 값은 약 3.5에서 4.0 사이의 값을 나타냈으며 대부분

Table 1. Figure of Merit Obtained with ZnS(Ag)/plastic Phoswich Detector for ²⁴¹Am and ⁹⁰Sr/⁹⁰Y

	FWHM		FOM		FWHM		FOM
	beta	alpha			beta	alpha	
-2.0	32.37	-	-	3.0	19.45	75.12	3.99
-1.5	36.40	-	-	3.5	19.73	77.36	3.88
-1.0	35.19	-	-	4.0	19.63	77.22	3.88
-0.5	37.01	67.99	3.50	4.5	19.76	80.20	3.76
0	31.33	62.41	3.97	5.0	24.77	79.60	3.54
0.5	29.19	65.43	3.97	5.5	24.29	-	-
1.0	26.56	67.82	4.01	6.0	23.95	-	-
1.5	23.04	68.41	4.13	6.5	26.11	-	-
2.0	21.79	71.55	4.08	7.0	19.33	-	-
2.5	19.46	73.47	4.07				

FOM 값이 신호가 완전히 분리되었다고 보는 1.5 이상으로 양호한 알파/베타선 신호 분리도를 보여주고 있다.

방사선원 오염 위치에 따른 알파선 검출 계수치를 Fig. 3에 나타냈는데 플라스틱 섬광체 입사창과 2.5cm 거리에 있을 때 (Fig. 1에서 동축선상 거의 ZnS(Ag)섬광체의 중심에 위치했을 경우) 가장 큰 계수치를 나타냈으며, 계수치가 원통형 ZnS(Ag) 섬광체를 중심으로 거리에 따른 정규분포를 나타냄을 볼 수 있다. 이 검출 시스템의 경우 알파선은 플라스틱 섬광체 입사창을 기준으로 -2cm에서 7cm까지 검출되었으며 그 평균 계수치는 13.78cps이다. 베타선의 경우에는 Fig. 4에서 플라스틱 섬광체 입사창에서 0 ~ 2cm 사이의 위치에 있을 때 가장 큰 검출 신호를 나타냈으며 MCNP 계산 결과와 거의 유사한 결과를 보여주고 있다. 그러나 베타선 방출 오염 물질이 플라스틱 섬광체 입사창 후방에 위치했을 경우에도 베타선이 검출되는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 ⁹⁰Sr/⁹⁰Y에서 방출되는 베타선의 비정이 검출시스템 프레임 두께보다 길기 때문에 검출기 후방에 오염됐을 때도 베타선이 검출됨을 확인하였다.

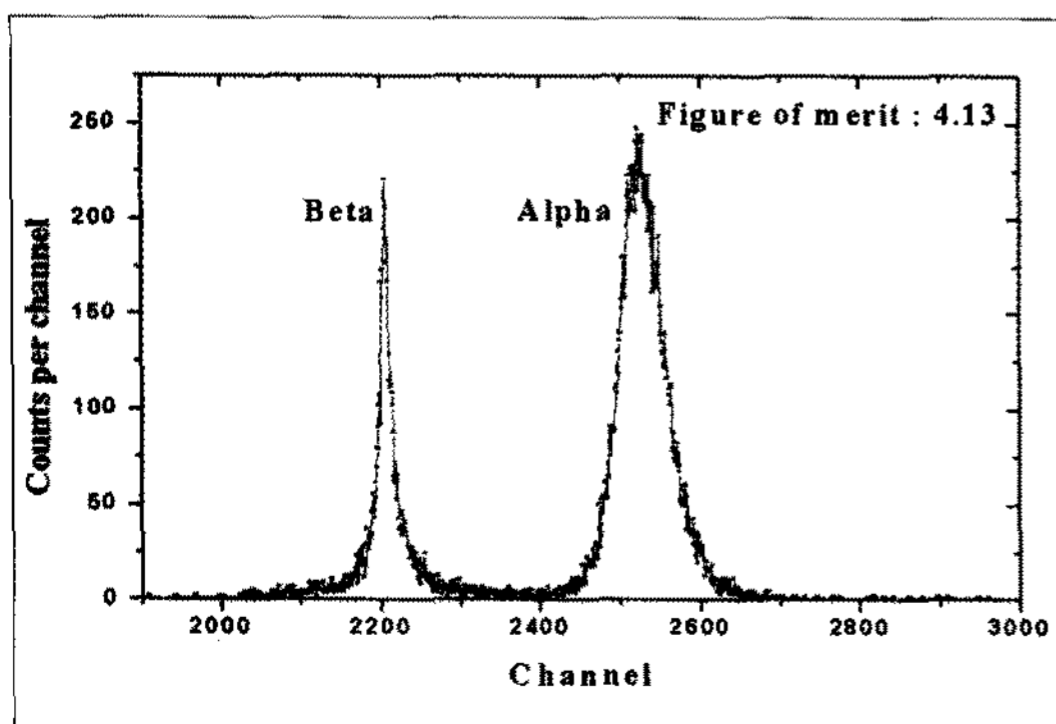


Fig. 2. Separation of Alpha and Beta Particles Using PSD Methods with ZnS(Ag)/plastic Phoswich Detector.

타선이 검출되는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 ⁹⁰Sr/⁹⁰Y에서 방출되는 베타선의 비정이 검출시스템 프레임 두께보다 길기 때문에 검출기 후방에 오염됐을 때도 베타선이 검출됨을 확인하였다.

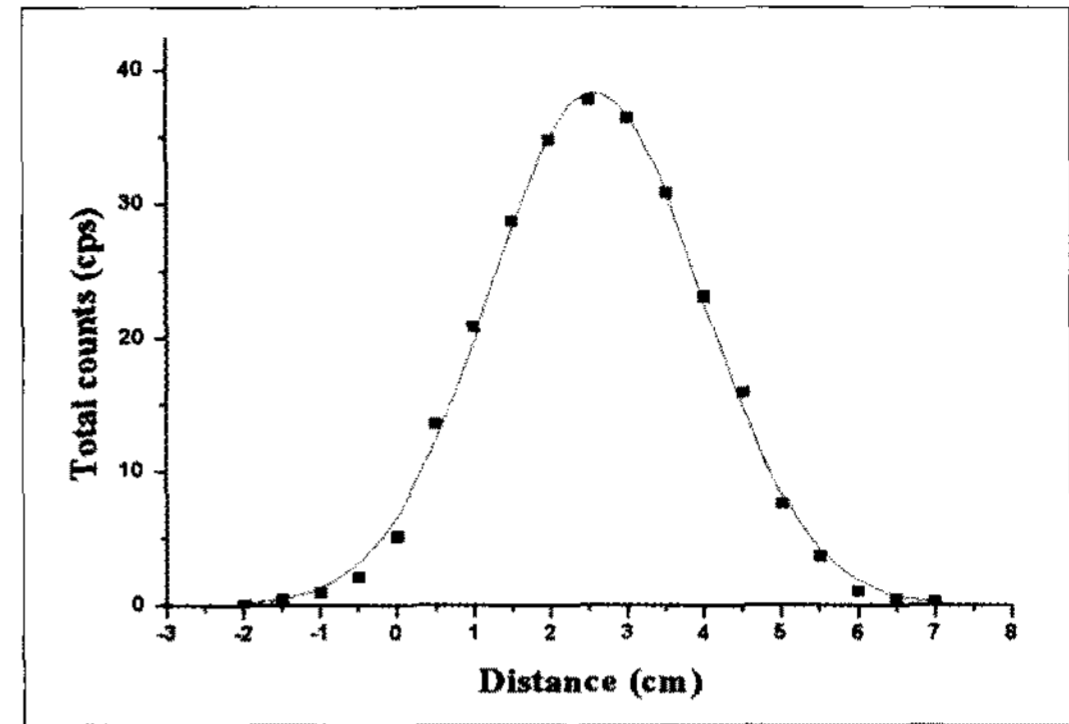


Fig. 3. Alpha-ray Total Counts Obtained with the Phoswich Detector as a Function of Distance from Plastic Scintillator Entrance Window to a Spot Contaminated by Radioactive Materials.

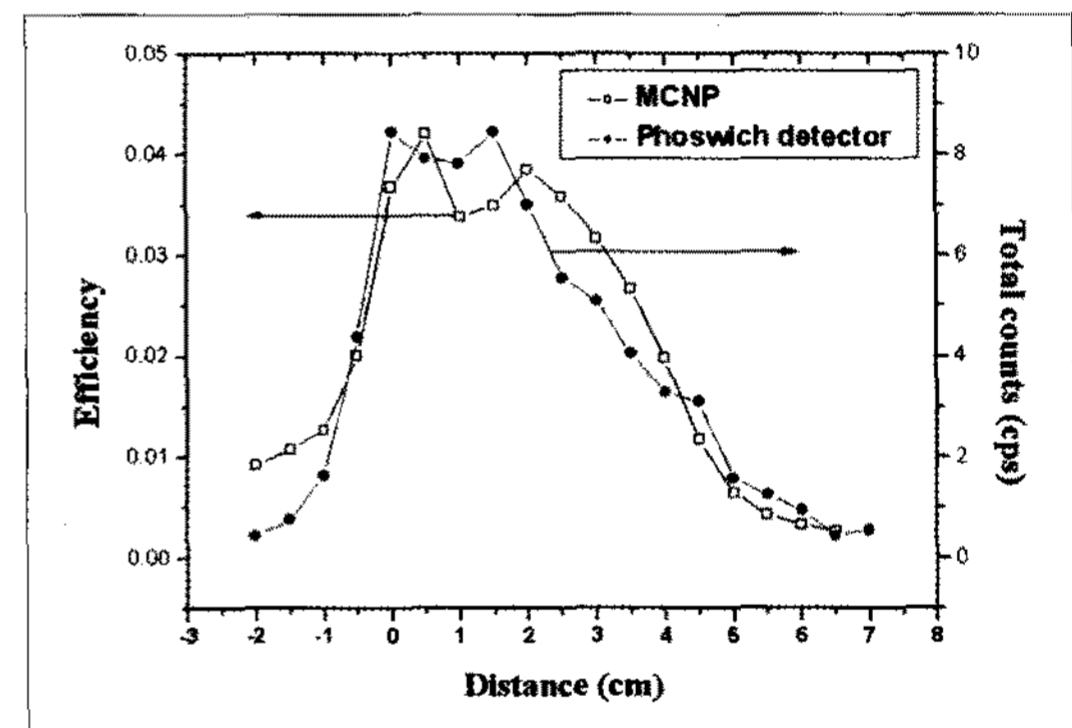


Fig. 4. Beta-ray Total Counts Obtained with the Phoswich Detector and Efficiency as a Function of Distance from Plastic Scintillator Entrance Window to a Spot Contaminated by Radioactive Materials.

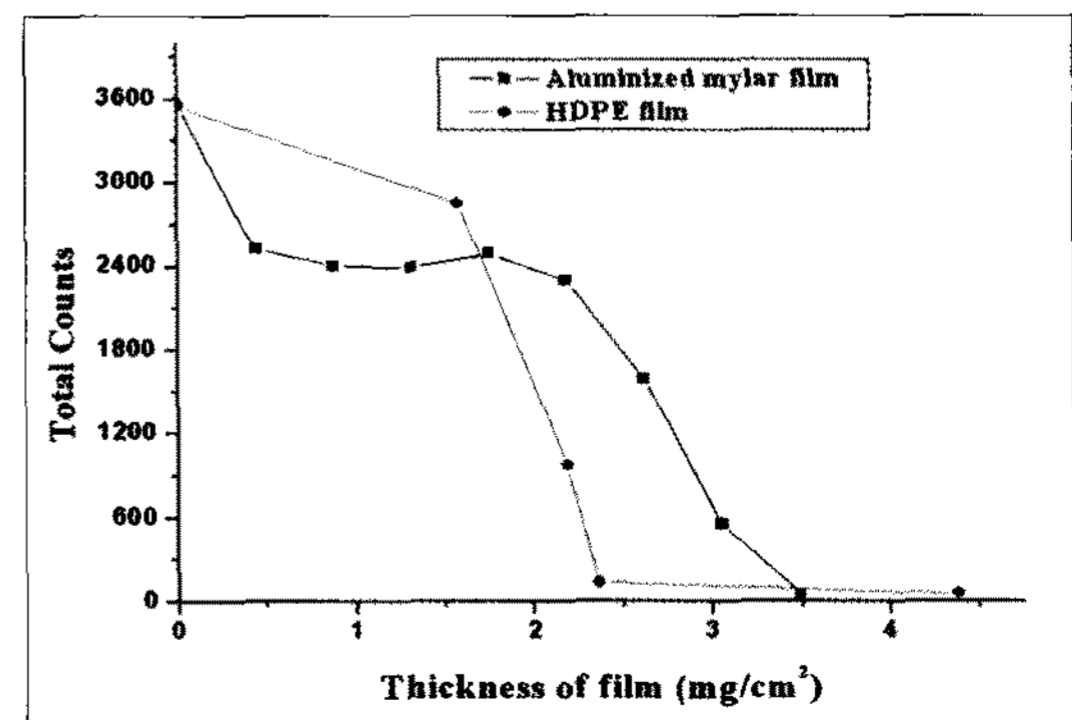


Fig. 5. Alpha-ray Total Counts as a Function of Thickness of a Thin Film for Preventing the Detector from Being Contaminated

Fig. 5는 검출기를 보호하기 위한 오염방지용 필름에 의한 알파선 측정신호의 감쇠를 나타낸 것이다. 얇은 두께의 물질에 대해서는 모든 입자가 투과하지만 비정거리에 가까워질수록 투과입자 수가 감소하게 되는데[3] 측정 결과에서 이런 현상을 확인할 수 있었다. HDPE 필름의 경우 1.5mg/cm² 까지 알파선 신호 검출에 많은 영향을 안 미침을 볼 수 있었으며 aluminized mylar 필름의 경우에는 2.0mg/cm² 까지 도 알파선 검출에 충분함을 확인하였다. 그리고 베타선의 경우는 적용된 필름의 두께에 대하여 베타선 감쇠에 거의 영향을 미치지 않았다.

IV. 결 론

배관 내부 방사성 오염도를 측정하기 위한 ZnS(Ag)/플라스틱 섬광체 조합의 알파/베타선 동시측정용 phoswich 검출기를 개발 하였다. 알파/베타선 동시측정용 phoswich 검출기를 오염위치에 따른 검출 성능과 오염방지용 필름에 의한 방사선 감쇠 정도를 PSD 방법을 이용하여 실험적으로 평가하였다. PSD 방법으로 방사선을 측정 한 결과 기존의 오름 시간 분별 방법을 이용한 검출 시스템이 가진 성능 이상으로 충분히 알파와 베타선이 분리되었다. 제작된 검출기에 대해 거리에 따른 검출 효율을 확인하였고 검출기를 오염물질로부터 보호하기 위한 필름의 적용이 가능함을 확인하였다. 배관 내부 방사성 오염도를 측정하기 위한 ZnS(Ag)/플라스틱 섬광체 조합의 알파/베타선 동시측정용 phoswich 검출기를 개발 하였다. 알파/베타선 동시측정용 phoswich 검출기를 오염 위치에 따른 검출 성능과 오염방지용 필름에 의한 방사선 감쇠 정도를 PSD 방법을 이용하여 실험적으로 평가하였다. PSD 방법으로 방사선을 측정 한 결과 기존의 오름 시간 분별 방법을 이용한 검출 시스템이 가진 성능 이상으로 충분히 알파와 베타선이 분리되었다. 제작된 검출기에 대해 거리에 따른 검출 효율을 확인하였고 검출기를 오염물질로부터 보호하기 위한 필름의 적용이 가능함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력중장기연구개발사업 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] U.S. Department of Energy. Pipe Explorer™ Surveying System, INNOVATIVE TECHNOLOGY Summary Report, DOE/EM-0440(1999).
- [2] U.S. Department of Energy. Pipe Crawler? Internal Piping Characterization System, INNOVATIVE TECHNOLOGY Summary Report, DOE/EM-0355(1998).
- [3] Glenn F. Knoll, "Radiation Detection and Measurement," John Wiley & Sons, New York(1999).
- [4] G.H. Kim, W.Z. Oh, K.W. Lee and B.K. Seo, "Fabrication and estimation of the plastic for measuring the contamination of beta-ray level of the kind of duct waste," J. of the Korean Rad. Was. Soci, 3(3), pp. 159-165(2005).
- [5] G.H. Kim, C.H. Park, C.H. Jung, K.W. Lee and B.K. Seo, "Development of the ZnS(Ag)/BC-408 phoswich detector for monitoring radioactive contamination inside pipes," J. Korea Asso. Radiat. Prot, 31(3), pp. 123-128(2006)
- [6] R.T. Overman, H.M. Clark, Radioisotope Techniques, McGraw-Hill, New York, 1960.
- [7] G.D. Chase, J.L. Rabinowitz, Principles of Radioisotope Methodology, Burgess Publishing Company, Minneapolis. 1967.
- [8] ASTM (American Society for Testing and Materials), Standard Test Methods for Detector Calibration and Analysis of Radionuclides, ASTM E181-98, pp. 16,

2003.

- [9] G.H. Kim, B.K. Seo, Z.H. Woo, Y.H. Jung, W.Z. Oh and K.W. Lee, "Determination of the Optimum Counting Condition of a ZnS(Ag) Scintillation Detector for Contamination Monitoring," Trans. of the Korea Nuclear Society Autumn Meeting, vol. 1, Busan(2005).
- [10] R. A. Winyad, J. E. Lutkin and G. W. McBeth "PULSE SHAPE DISCRIMINATION IN INORGANIC AND ORGANIC SCINTILLATORS. I," Nucl. Instr. Meth., 95, pp. 141(1971).