

Development of an Organic Scintillator Sensor for Radiation Dosimetry using Transparent Epoxy Resin and Optical Fiber

투명 에폭시와 광섬유를 이용한 방사선량 측정용 유기섬광체 센서 개발

Chan-Hee Park¹⁾, Bum-Kyoung Seo, Dong-Gyu Lee and Kune-Woo Lee
Korea Atomic Energy Research Institute, 1045 Daedeokdaero, Youseong-gu, Daejeon

박찬희¹⁾, 서범경, 이동규, 이근우
한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 덕진대로 1045

(Received September 12, 2009 / Revised November 4, 2009 / Approved March 09, 2009)

Abstract

Remote detecting system for a radiation contamination using a plastic scintillator and an optical fiber was developed. Using a commercially available silica optical fiber and a plastic scintillator, we tested then for a real possibility as a remote monitoring detector. Also, a plastic scintillator was developed by itself, and evaluated as a radiation sensor. The plastic scintillator was made of epoxy resin, a hardener and an organic scintillation material. The mixture rate of the epoxy resin, hardener and organic scintillator was fixed by using their emission spectrum, transmittance, intensity etc. In this study, in order to decrease the light loss of an incomplete connection between an optical fiber and a scintillator, the optical fiber was inserted into the scintillator during the fabrication process. The sensor used a plastic optical fiber and was estimated for its detection efficiency by an optic fiber's geometric factor.

Key words : Remote measurement, Plastic scintillator, Epoxy resin, Optical fiber, Radiation sensor.

요 약

방사선량 측정을 위하여 섬광체와 광섬유를 이용한 원격 측정용 센서를 개발하였다. 유리 광섬유와 상용화된 플라스틱섬광체로 원거리 측정 가능성을 시험하였고, 에폭시 수지로 자체 개발한 섬광검출소재로 방사선 측정센서로서의 성능을 평가하였다. 에폭시 수지와 유기섬광물질의 배합별 물질 특성을 측정하여 최적의 조건을 도출하였다. 광섬유와 섬광체를 연결할 때, 불완전한 접속으로 인한 광 손실을 줄이기 위하여 섬광검출소재 제조 과정 중 소재내로 광섬유를 삽입하여 일체형으로 센서를 제조하였다. 일체형 센서는 유리광섬유의 단점을 보완하여 플라스틱 광섬유를 적용하였으며, 방사선 반응 체적별 검출효율을 평가하기 위하여 검출소재 밑단으로부터 일정 거리의 광섬유를 배치하여 측정하였다. 개발한 방사선 검출용 센서는 오염도 원거리 측정뿐만 아니라 측정센서로서의 적용도 가능할 것으로 예상된다.

중심단어 : 원격측정, 플라스틱 섬광체, 에폭시 수지, 광섬유, 방사선 센서

1) Corresponding Author. E-mail : teras45@hanmail.net

I. 서론

현재 과학 기술은 다양한 분야의 기술적 융합을 통하여 발전하고 있다. 방사선 계측기 개발 분야에서도 이러한 기술적 융합을 통하여 새로운 계측 시스템의 개발이 진행되고 있다. 최근에는 미래의 통신 수단으로서 가장 기대되는 것 중의 하나인 광섬유를 이용하여 원자력분야에 적용하고자 하는 시도가 많이 이루어지고 있다[1].

방사선량을 측정하기 위해서 국내·외에서 다양한 검출소재 및 측정기술을 개발하고 있으며[2, 3], 최근에는 섬광체와 광전자 증배관(photomultiplier tube)을 긴 광섬유에 적용하여 원거리 측정이 가능한 방사선 계측기를 개발하고자 하는 연구가 수행된 바 있다[4]. 광섬유를 활용한 방사선 계측방법은 센서부분을 매우 소형화할 수 있어서 연료봉집합체 사이와 같이 기존의 방사선 계측기로는 삽입이 곤란한 협소한 곳의 측정을 가능하게 할 수 있으며, 광섬유의 광전도성과 비교적 저렴한 장점을 활용하여 원자력발전소, 가속기, 방사성폐기물 처분장 등에 센서를 분산, 배치하여 여러 곳의 방사능을 한 곳에서 집중하여 감시하는데 유용하게 적용할 수 있다. 이미 광섬유는 방사선 계측방법으로 원자력분야에서 널리 활용되고 있다. 광섬유는 신호를 전달하는 통신용 섬유, 물체를 관찰하기 위한 이미지 섬유, 각종 센서용 광섬유 등의 형태로 원자력분야에서 다양하게 사용되고 있다[5-6]. 특히 열중성자의 선속을 실시간으로 측정하기 위하여 붕소가 함유된 플라스틱 섬광체와 신호전송용 광섬유를 결합하여 새로운 열중성자 선속 모니터를 개발하였다[7].

본 연구에서도 상용화되어 있는 전송용 광섬유를 이용하여 방사능 오염도 측정 검출기를 보다 안전하고, 간편하게 측정하기 위한 원격 측정기술을 개발하였다. 기존의 섬광체와 광전자 증배관을 부착시킨 형태를 보완하여 광섬유를 활용함으로써 광전자증배관과 섬광체를 분리시킨 형태로 검출기를 구성하였다. 검출 시스템에 성능 평가를 위해 플라스틱섬광체와 ZnS(Ag) 무기섬광체를 사용하였고, 원격측정을 위한 광섬유는 코어가 실리카로 구성된 다중모드 광섬유를 사용하였다. 광섬유의 직경이 각각 1200, 1500 μm 이고 길이가 각각 2, 5m인 광섬유를 이용하여 신호를 전송하였다. 또한 액체 형태의 표준 에폭시 수지에 유기섬광체를 혼합하여 제조한 섬광검출 센서를 제조하였으며, 유기섬광체와 에폭시수지와 배합비에 따른 특성을 평가하여 방사선 검출용 센서로서 가장 적합한 조건을 도출하였다. 자체 제조한 섬광검출 센서는 플라스틱 광섬유를 이용하여 신호 전송이 가능한 일체형으로 제조하여 신호 전송 특성을 평가하였다.

II. 재료와 방법

가. 오염도 측정용 센서 제작

섬광체 재료로 쓰인 에폭시 수지(YD-128, 국도화학)는 비스페놀(bisphenol-A)과 에피클로로히드린(epichlorohydrin)을 알카리 존재 하에서 반응시킨 비교적 저분자량으로 상온에서 액상 상태이다. 에폭시 수지는 점착력과 화학적 내구성, 열에 대한 저항성이 우수한 장점으로 여러 분야에서 응용되고 있다. Table 1에서 이들의 특성을 나타내고 있다.

본 연구에서는 YD-128에 에폭시 수지의 점도 감소 및 가소성을 부여하는 반응성 희석제인 PG-207(국도화학)과 도료 및 일반 물딩용으로 쓰이는 경화촉진제 D-230(국도화학)을 일정 비율로 섞고, 유기섬광체를 혼합하여 제조하였다. YD-128에 PG-207P, D-230을 table 2와 같이 네 가지 조건으로 제조 시 고형화에 걸리는 시간이 짧고, 경도가 우수한 조건을 기준으로 하여 제조조건을 결정하였다. 또한 경화촉진제(D-230)의 함량(10-20g)에 따른 에폭시 수지의 특성평가를 토대로 세 화합물의 최종 배합 조건을 도출하였고, 방사선 측정이 가능한 유기섬광체를 첨가하였는데, 제1용질로는 2,5-diphenyloxazole(PPO)를 그리고 파장변환체(wave-shifter)인 제2용질로는 1,4-bis[5-phenyl-2-oxazol]benzene(POPOP)를 사용하였다. 제조된 섬광검출소재의 투명도, 경도, 경화 속도, 지지체와의 분리 용이 등을 평가하여 유기섬광체의 함량을 결정하였는데, 각각 PPO는 0.1~2.0wt% 그리고 POPOP 0.01~0.1wt%로 함량을 변화하면서 제조하였다.

Fig. 1은 유기섬광물질을 이용하여 섬광검출소재를 제조하는 과정이다. D-230에 PPO, POPOP를 녹이기 위하여 진탕항온수조(shaking Bath)를 이용하여 180rpm에서 10분간 돌린 후, YD-128을 첨가하고 혼합 하여 24시간 보관하였다. Fig. 1(a)는 상용화된 플라스틱 섬광체 BC-408과 성능을 비

Table 1. Chemical Properties of the Epoxy Resin.

	Properties	
	YD-128	PG-207P
EEW(g/eq)	184-190	300-330
Viscosity(cps at 25°C)	11,500-13,500	40-100
Specific gravity(20°C)	1.17	1.07
Color(g)	0.5max.	1.0max.

Table 2. The Mixing Ratio of Epoxy Resin.

The Mixing Ratio (unit:g)			
YD-128	PG-207P	D-230	Hardness
50	0	15	Good
45	5	14	·
42.5	7.5	13.5	·
40	10	13	Bad

교, 평가하기 위하여 에폭시 섬광검출소재를 같은 크기로 제작하는 과정이고, fig. 1(b)는 에폭시 섬광물질 제조 시 혼합물이 고형화되기 전에 플라스틱 광섬유를 삽입하여 일체형으로 제작하였다. 신호 전송이 가능한 센서를 제조하기 위하여 에폭시 소재의 검출소재 내의 광섬유 삽입하여 제조하였다. 광섬유의 중심을 잡아주기 위해 4mm의 소형 pipe를 이용하여 고정시켰고, 외부 빛이 전송용 광섬유로 입사되는 것을 방지하기 위하여 열수축튜브를 이용하여 차광하였다. 고형화된 검출소재와 광섬유간의 신호전송량을 측정하기 위하여 에폭시 검출소재 밀단으로부터 10, 20, 30 mm씩 차이를 두고 광섬유를 고정시켜 제조하였다.

나. 원격검출장치 구성

① 전송용 광섬유

본 연구에서는 우선 광섬유를 이용한 원격전송의 가능성을 확인하기 위해 유리 광섬유를 활용하였다. 본 실험에 사용된 유리광섬유(BFH-37, Thorlabs)는 코어가 실리카, 클래딩은 폴리머로 구성되어있고, 섬광체와 광전자증배관의 연결을 효과적이고 용이하게 하는 patch cable로 되어있다. 유리광섬유의 직경은 1200, 1500 μ m이고, 길이는 2, 5m를 사용하였다.

직접 제조한 에폭시 섬광검출소재와 광섬유를 일체형으로 제작하기 위해 사용한 광섬유는 플라스틱 광섬유이다. 이는 유리광섬유보다 광학적인 특성과 가공성이 우수하고, 단면적 대비 코어의 비율이 매우 커서 빛 전달 효율이 매우 높은 장점을 가지고 있다. 본 연구에 사용된 직경 3mm의 플라스틱 광섬

유(NT02, Edmund optics)는 고순도 아크릴 레진(PMMA : polymethyl- methacrylate)으로 된 코어와 특수 불소 폴리머(F-PMMA : florine polymethyl methacrylate)로 만들어진 클래딩으로 구성되어있다. Table 3은 각 실험에 사용된 전송용 광섬유의 특성을 나타낸 것이다.


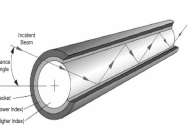
② 광 측정 장치의 구성 및 측정방법

에폭시 섬광검출소재와 광섬유를 통한 원격 검출 시스템의 성능평가를 위해 사용된 방사선 검출용 플라스틱 섬광체는 발광파장이 최대 425nm를 가진 Bicron사의 BC-408을 사용하였다. BC-408의 주성분은 폴리비닐톨루엔(polyvinyltoluene)으로 밀도는 1.302g/cc⁻¹이고 굴절률(refractive index)은 1.58이다. 플라스틱 섬광체는 직경과 두께가 각각 26, 25mm이며, 광섬유의 광접속부와 섬광체 사이에 공기층을 제거하여 광전송 손실을 줄이고, 광 전송효율을 최대로 높이기 위하여 섬광체 shield를 제작하였다. 광섬유와 섬광체 shield의 연결을 용이하게 하기위해 광통신용으로 널리 쓰이고 있는 SMA 접속단자와 어댑터를 사용하였다.

첫 번째로 유리광섬유를 활용한 방사능 오염도 원격 검출 성능을 평가하였다. 알파선 검출을 위해 ZnS(Ag) 무기섬광체를 사용하였다. 알파선 검출용 ZnS(Ag) 무기 섬광체는 ELGEN Technology의 EJ-440을 사용하였다. EJ-440은 polyester 플라스틱 필름 위에 ZnS(Ag)을 얇게 코팅한 제품으로써 최대 발광파장은 450nm이고, 밀도는 10mg/cm²이다.

본 연구에서는 fig. 2와 같이 ZnS(Ag) 무기섬광체를 BC-408

Table 3. Physical Properties of the Transmitting Optical Fiber.

	Silica	Plastic
		
Core	Pure silica	PMMA
Clad	Hard polymer	Fluorine-PMMA
Numerical Aperture	0.37±0.02	0.50
Operating Temperature	-40°C to +150°C	-55°C to +70°C
Minimum Radius of Bend	100× clad radius	25× outer diameter

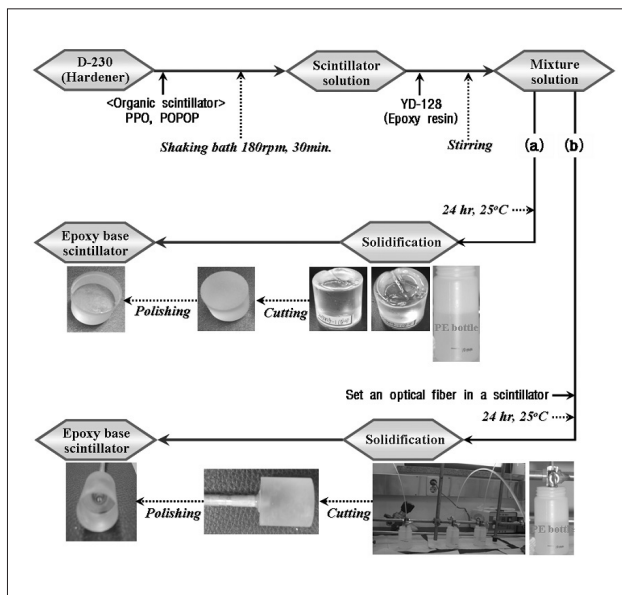


Fig. 1. Preparation procedure of the organic scintillator based on epoxy. (a) plastic scintillator, (b) unification of optic fiber and epoxy scintillator.

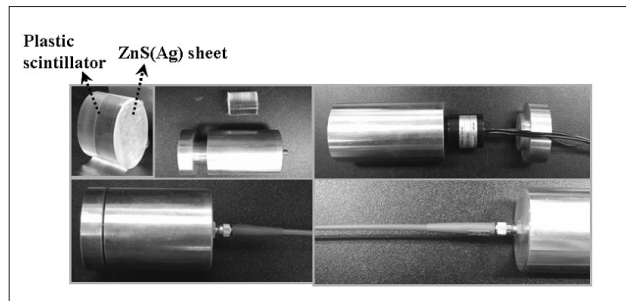


Fig. 2. Experimental components for the measurement.

의 직경 26mm와 같게 하고, 접촉면사이에 공기층을 없애기 위하여 광 그리스(optical grease)를 이용하여 부착시켰다. 광섬유의 직경을 1200, 1500 μ m, 길이 2, 5m로 변화시키며 광섬유의 기하학적 조건에 따른 원격 검출 성능을 평가, 비교하였다.

제조된 섬광체와 BC-408은 광 그리스를 활용하여 PMT전면에 바로 부착하여 ^{137}Cs 감마선원에 적용하여 출력되는 펄스 파고 스펙트럼을 분석하였다. 또한, 앞서 실험한 유리광섬유를 활용한 원격측정 실험도 수행하였다.

본 연구에 사용된 광전자증배관은 섬광체의 발광 파장과 정합하는 광응극 응답파장의 특성을 갖는 것을 선정했는데, 측정에 사용된 광전자증배관은 HAMAMATSU사의 head-on type으로써 300-650nm 응답파장을 가지는 H5211A 모델을 이용하였다. 섬광체와 마찬가지로 광전자증배관과 광섬유 접속부의 연결을 용이하게 하기 위해 광전자증배관 케이스를 따로 제작하였고, 광손실을 최대한 줄이기 위해 SMA connector를 사용하여 연결하였다. Fig. 3은 본 실험의 구성도를 나타낸다. 광섬유의 끝단과 함께 고형화된 검출소재로부터 발생된 광신호는 광섬유를 통하여 광전자증배관으로 전송하였다.

III. 결과 및 논의

본 연구에서는 방사능오염도의 원격측정을 위한 가능성을 시험하였는데, 상용화된 플라스틱 섬광체와 유리광섬유를 사용하여 기초 측정을 시행하였다. 유리광섬유는 투과도가 높고 열적환경성이 뛰어나 장거리 통신용으로 이미 널리 사용하고 있기 때문에 오염도 원격 측정 실험을 수행하는데 적합한 것으로 분석했다. 이후 직접 제조한 섬광체 특성 평가에서는 유리광섬유의 물질이 가지는 저굴곡성으로 인해 깨지기 쉽고 고가인 단점을 보완하여 코어 직경이 넓고 비교적 가격이 저렴하며 굴곡성이 큰 플라스틱 광섬유로 측정하였다.

Fig. 4(a)와 (c)는 유리광섬유 직경에 따른 플라스틱 섬광체(BC-408)의 알파, 베타선에 대한 펄스 파고 스펙트럼이다. 직경을 1200 μ m에서 1500 μ m로 변화시켰을 때, 파고 스펙

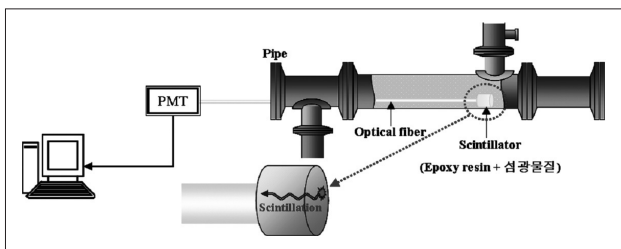


Fig. 3. Experimental setup for remote detection of radiation contamination.

트럼의 모양은 거의 비슷하나 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 선원의 대해서는 약 10%, ^{241}Am 선원에 대해서는 약 65% 검출효율이 증가함을 보였다. Fig. 4(b)와 (d)는 유리광섬유 길이에 따른 플라스틱 섬광체(BC-408)의 알파, 베타선에 대한 펄스 파고 스펙트럼이다. 길이를 2m에서 5m로 변화시켰을 때, 파고 스펙트럼의 모양은 거의 동일하고 각각의 방사성 용액의 대한 총계수치도 별 차이를 나타내지 않았다. 측정결과 광섬유 직경에 변화는 뚜렷하게 나타났으나, 길이에 대해서는 변화가 없는 걸로 보아 거리에 따른 감쇠가 거의 일어나지 않았다.

본 연구에서는 에폭시를 이용한 센서를 제조하였는데, 이미 상용화되어있는 플라스틱 섬광체와 성능 비교 및 평가함으로써 섬광체로써의 활용 가능성을 시험하고, 유기섬광체의 함량에 따른 특성평가를 실시하여 최적의 조건을 도출하였다.

Fig. 5는 에폭시를 이용하여 제조된 플라스틱 섬광체와 상용화된 플라스틱 섬광체 BC-408의 검출 성능을 비교하고, 유리광섬유를 이용한 측정 분석을 나타낸 것이다. Fig.

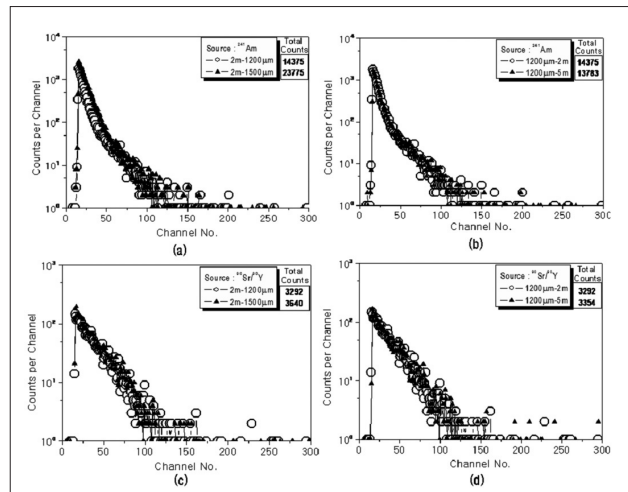


Fig. 4. Pulse height spectrum of silica optical fiber's (a) and (c) diameter. (b) and (d) length.

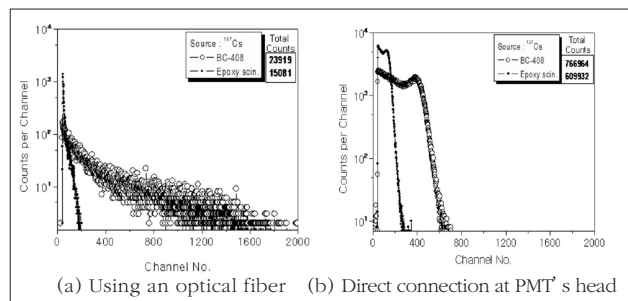


Fig. 5. Comparison between plastic scintillator(BC-408) and epoxy based scintillator.

5(a)는 두 종류의 섬광체와 PMT 사이를 유리광섬유로 연결하여 측정된 것이고, Fig. 5(b)는 두 종류의 섬광체를 PMT 전면부에 부착하여 측정된 그래프이다. BC-408의 총계수치가 에폭시 섬광체보다 약 26~60% 검출효율이 우수했고, PMT에 부착되어 바로 전송된 광신호는 유리광섬유를 통해 전송된 신호보다 검출효율이 월등히 높았다.

방사선 측정센서로서 최적의 조건을 도출하기 위해서 유기섬광체 함량에 따른 에폭시 소재 섬광검출 센서의 투과도와 발광스펙트럼을 측정하였다. 제 1용질인 PPO의 함량을 0.1~2.0wt%로 변화시키며 특성평가를 하고, 투과도와 발광스펙트럼이 모두 우수한 0.3wt%의 조건을 기준으로 제 2용질인 POPOP의 조건도 도출하였다. POPOP의 함량은 0.01~0.1wt% 범위로 특성평가를 하였으며, 마찬가지로 투과도와 발광스펙트럼이 우수한 함량(0.03wt%)으로 에폭시 섬광체의 유기섬광체 함량을 최종 결정하였다.

직접 제조한 에폭시 섬광체에 광섬유를 연결하여 원격측정시험을 수행하였는데, 이 전에 언급했듯이 현재 사용되는 광섬유는 유리로 만든 광섬유가 뛰어난 광학 특성, 환경안정성, 내열성 때문에 많이 사용되고 있으나, 깨지기 쉽고, 형상 가공이 어렵다. 이 문제를 해결하기 위하여 전송용 광섬유로 플라스틱 광섬유를 적용하였다. 플라스틱 광섬유는 유리 광섬유보다 전송 손실이 크고, 내열성 등이 뒤떨어지는 단점이 있으나, 저가이며 유연성이 우수하고, 코어 직경이 크며, 그리고 개구수가 크기 때문에 적용하였다. 제조된 섬광검출소재와 광섬유는 일반적인 FC connector를 이용하여 결합되었는데, 이 방법에서 검출소재와 광섬유사이의 접합면에서의 광 손실 및 접촉 불량 등으로 인한 문제점이 노출되었다.

본 연구에서는 에폭시를 이용하여 섬광검출 센서를 제조하는 과정에서 고형화되기 전에 플라스틱 광섬유를 검출소재 내에 삽입하여 FC connector와 섬광체의 접속 손실을 줄이도록 제작되었다. 광섬유는 에폭시 검출소재 밑단으로부터 각각 10, 20, 30mm로 제작되었는데, fig. 6은 각 거리에 따른 방사선 검출특성을 나타내고 있다. 검출소재 밑단으로부터 광섬유와의 거리가 멀어질수록 검출 효율은 더 높게 측정되었다. 이는 방사선이 검출소재로 흡수된 후, polishing된 광섬유밑단을 통해 전송되는 과정에서 방사선과 검출소재내의 반응하는 체적이 넓어질수록 검출 효율이 더 높게 측정된 것으로 분석한다. 즉, 35mm의 길이를 가진 에폭시 검출소재의 밑단으로부터 10, 20, 30 mm의 거리로 위치된 광섬유의 반응단면적과 총계수치와의 관계를 살펴보면, 광섬유가 밑단에서 거리가 멀어질수록 반응체적이

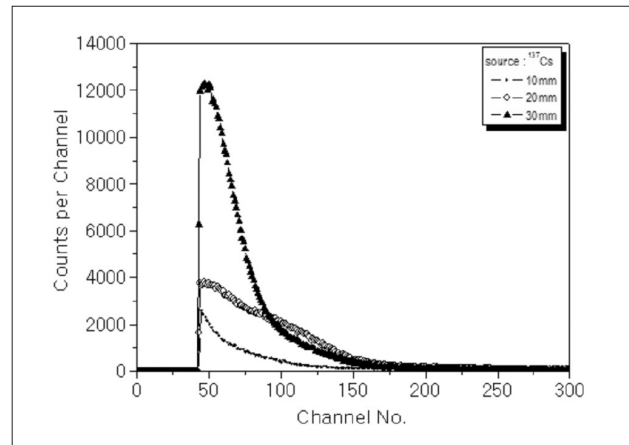


Fig. 6. Pulse height spectrum of optic fiber's embedding change.

넓어져 검출효율이 약 5배 높게 측정되었다.

IV. 결론

본 연구에서는 방사능오염도 원격측정을 위해 광섬유를 활용하여 기초 측정을 시행하였고, 자체 제작된 검출소재의 적용가능성을 평가하였다. 방사선 측정시스템과 섬광체 사이에 광섬유를 연결하여 검출 특성을 평가하였는데, 이러한 원격시스템은 검출 범위나 지역에 제한 없이 협소하거나 고방사능 영역 등에 적용할 수 있는 가능성을 보여주었다. 에폭시 수지와 유기섬광물질을 조합한 섬광검출소재는 물질에 대한 기초적인 특성평가와 방사선 센서로서 검출 능력을 평가하였고, 상용화된 섬광체와 비교 측정을 하였다. 상용화된 섬광체와의 검출효율은 다소 차이가 있고, 광섬유 사용에서 발생하는 구부림 손실, 접속부의 불완전한 표면거칠기 등에 의한 결점을 보완한다면 원자력시설의 원거리 측정용 검출기 개발이 가능할 것이다.

참고문헌

- [1] R. Van Green, "Optical Fiber Sensing and Systems in Nuclear Environments" Proceeding of SPIE, Vol 2425, Mol, Belgium, 1994.
- [2] 서범경, 정연희, 김계홍, 이근우, 정종현, 한명진, "얇은 필름 형태의 베타선 측정용 플라스틱 섬광검출기 제조", Analytical Science & Technology 18(6), (2005).
- [3] 서범경, 우주희, 김계홍, 이근우, 이동규, 정종현, "알파 및 베타선 동시 측정용 ZnS(Ag)/플라스틱 이중섬광체 검출센서 개발", Analytical Science & Technology

21(2), (2008).

- [4] K.Sakasai and M.Katagiri, "In-situ Ex-core Monitoring using Optical Fibers with Scintillators", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 50(4), August (2003).
- [5] Francis T. S. Yu and Shizhuo Yin, "Fiber Optic Sensors", Marcel Dekker, 2002.
- [6] S. Yamamoto, Y. Yoshida, T. Iida, "Development of an Underground Radon Detector Using on Optical Fiber". *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 50(4), pp. 987-990 (2003).
- [7] M. Ishikawa, K. Ono, Y. Sakurai, H. Unesaki, A. Uritani, G. Bengua, T. Kobayashi, K. Tanaka, and, T. Kosako, "Development of Real-time Thermal Neutron Monitor using Boron-loaded Plastic Scintillator with Optical Fiber for Boron Neutron Capture Therapy", *Applied Radiation and Isotopes*, 61, pp. 775-779 (2004).