

## 플라스틱광섬유섬광체를 이용한 방사선계측에 관한 연구

홍상범 · 김계홍 · 박재우

제주대학교 공과대학 에너지공학과  
690-756 제주시 아라1동 1번지

### A Study on Radiation Detection by Using Plastic Scintillating Fibers

Sang-Bum Hong, Gae-Hong Kim,  
Jae-Woo Park

Department of Nuclear and Energy Engineering  
Cheju National University, Jeju 690-756, Korea

#### ABSTRACT

We have used plastic scintillating fibers to detect gamma rays emitted from  $^{137}\text{Cs}$ , and beta rays from  $^{90}\text{Sr}$ . The sensors are constructed of single-strand or multi-strand fibers of 1mm and 0.5mm diameters. The plastic scintillating fibers used are in commercially available Bicon model BCF-12 fibers with the cladding made of PMMA (polymethyl methacrylate). We used a mirror and lens to improve the efficiency of the sensor with collecting multi-strand plastic scintillating fibers. In this paper, we report the pulse-height spectra obtained by using these sensors, and analyze them in the aspect of their usability for radiation detectors. Our investigation suggests that the plastic fiber sensor work satisfactorily for the gamma ray detection, but does not

\* 이 논문은 한국과학재단 지정 방사선안전기술연구센터 (iTRS)의 연구비 지원에 의해 수행된 결과임

\*\* This work was supported by the Korea Science and Engineering Foundation(KOSEF) through the Innovative Technology Center for Radiation Safety (iTRS), Seoul, Korea

work for the beta ray detection. In effect, We find the scintillating plastic fiber offers some feasibility as gamma ray sensor material.

**Key words** : glass scintillating fiber, plastic scintillating fiber, radiation detection

#### 1. 서 론

광섬유는 광통신분야 뿐만 아니라 계측센서로도 폭넓게 적용되고 있다. 최근의 광학기술과 접목하여 방사선분야에도 새로운 방사선계측방법이 개발되고 있다.

광섬유를 활용한 방사선계측방법은 광섬유의 유연성, 경량·세경, 센서부위의 전원공급의 불필요, 넓은 온도범위에 걸친 적용성, 화학적 환경에 대한 내구성 등의 장점을 충분히 이용할 수 있다.[Ven Geen 1994] 이와 같은 이유로 인하여 미국, 일본 등에서는 방사선 계측수단으로 그 가능성이 인정되어 이미 연구가 활발히 진행중이다. 미국의 경우 PNL(Pacific Northwest Laboratory)에서 핵물질 보장조치의 일환으로 유리광섬유섬광체를 이용한 연구가 수행되었고[Bill et al, 1993], 일본의 경우 섬광체 광섬유를 이용하여 많은 부분의 연구가 이루어지고 있으며, 특히 Bicon사의 플라스틱광섬유섬광체를 활용한 방사선계측에 관한 연구가 수행되고 있다[Maekawa 2001]

광섬유를 활용한 방사선계측방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 광섬유 자체를 방사선 센서로 활용하는 방안과 섬광체(scintillator)와 조합하여 발생한 광을 전송하는 매체로서 활용하는 방법이 있다. 전자의 경우는 섬광을 일으키는 성분을 첨가한 광섬유가 방사선과 반응하여 섬광을 발생시키고, 또 이것을 전송하는 매체로 활용하는 방법으로서 원자로 내부와 같이 주로 고준위 방사선장에서 중성자 측정에 활용이 가능하다. 후자는 광섬유와 부피가 큰 섬광체를 조합하는 방법으로 환경방사능 계측과 같이 저준위 방사선장에서  $\beta$ 선과  $\gamma$ 선을 측정하는 데 활용될 수 있다. 근래에 와서 밀도가 높고 흡수성이 없는 새로운 섬광체가 많이 개발되고 있으므로 이들을 광섬유와 조합한다면 좋은 방사선 계측수단이 될 수 있다.[이동 1998] 이러한 광섬유 소재를 이용하여 환경방사능 수준의 저준위 방사선장에서 사용될 수 있는 방사선 계측기의 개발이 본 연구가 추구하는 목표이다.

본 연구를 위해서는 미국 Bicon사의 플라스틱광섬유

섬광체(plastic scintillating fiber)를 구입하여 몇 가지 형태의 센서를 제작하였으며, 거울과 렌즈를 이용하여 광섬유 내에서 발생된 광의 계측효율을 증가시키고, 계측시스템을 구성에 필요한 각각의 장비를 구입하여 최적의 시스템을 구성하였고, 감마·베타선원의 기초적 측정실험을 통하여 각각의 신호를 분석하였고 이로부터 방사선 계측의 가능성을 확인하였다. 이러한 연구결과는 앞으로 보다 향상된 방사선계측기의 개발에 활용될 것이다.

## 2. 실험재료 및 방법

실험장치의 구성은 Fig. 1과 같이 구성하였다.

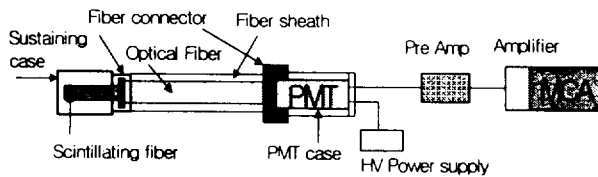


Fig. 1 Experimental setup for testing the optical fiber sensor

실험장치는 센서 부분, 전송용 광섬유, 광전자 증배관(PMT: Photomultiplier tube), 전치증폭기(pre-amplifier), 주증폭기(amplifier) 및 다중과도분석기(MCA: multi channel analyzer)로 구성하였다. 먼저 센서부분은 Fig. 2과 같이 플라스틱광섬유섬광체로 직경이 0.5mm, 1mm인 1가닥의 센서를 스테인레스(stainless) 케이스로 제작하였고, Fig.

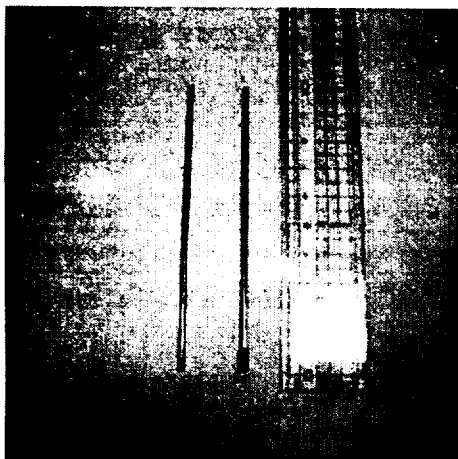


Fig. 2 Two type of sensors with single-strand plastic scintillator fiber.(dia 0.5mm, 1mm)

3와 같이 25가닥(Dia. 1mm)과 100가닥(Dia. 0.5mm)를 알루미늄(aluminum)과 플라스틱(plastic) 케이스를 이용하여 제작하였다.

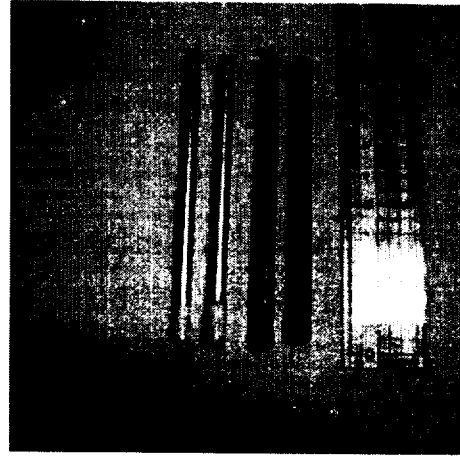


Fig. 3 Four type of sensors with Multi-strand plastic scintillator fibers.

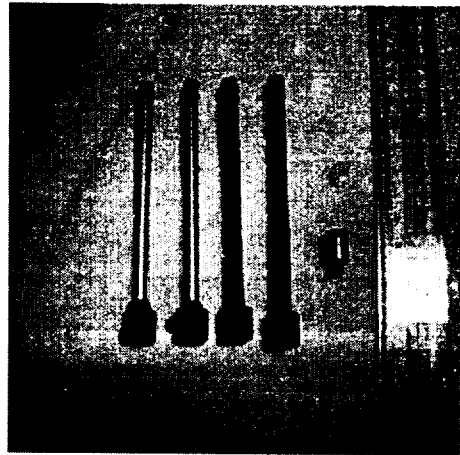


Fig. 4 Coupling of multi fiber sensors using a mirror and lens

센서의 한쪽 끝에는 400nm 파장영역에서 반사율이 90%이상인 거울을 붙이고, 반대쪽 끝에는 렌즈를 이용하여 센서에서 발생된 광의 집광효율을 향상시키도록 제작하였다. 거울의 경우 99%이상의 반사율을 갖는 제품을 사용시 센서의 성능을 30%정도 향상시킬 수 있다.[D. Albers 1996] 렌즈는 THORLAB 사의 F230SMA-A type으로 350~600nm 파장영역에서 사용되며, 초점거리(f)는 4.5mm로 SMA 광connector와 연결시 잘 맞도록 제작되어 있으며, 수광각도(Numerical Aperture)는 최대 0.55

인 렌즈를 사용하였다. 각각의 센서의 모형은 Fig.3과 Fig.4와 같다. 알루미늄 케이스로 제작된 두 종류의 센서는 길이가 100mm이고, 직경이 7mm이다. 그리고, 플라스틱 케이스로 제작된 두 종류의 센서는 길이가 100mm이고, 직경이 8mm이다. 각각의 센서는 신호전송용 광섬유와 결합이 용이하도록 광Connector를 이용하였으며, 센서의 한쪽 끝에는 박막의 알루미늄을 이용하여 외부광의 차단을 막고 광섬유의 접촉을 통한 손상으로부터 보호하도록 제작하였다.

센서는 종류별로 8가지를 제작하였으며, 각각의 센서에 대해서 분류하면 다음과 같다.

- ▶ sensor A1 - 알루미늄 케이스를 이용하여 1mm 플라스틱광섬유섬광체 25가닥 다발형.
- ▶ sensor A2 - 알루미늄 케이스를 이용하여 0.5mm 플라스틱광섬유섬광체 100가닥 다발형.
- ▶ sensor A3 - 플라스틱 케이스를 이용하여 1mm 플라스틱광섬유섬광체 25가닥 다발형.
- ▶ sensor A4 - 플라스틱 케이스를 이용하여 0.5mm 플라스틱광섬유섬광체 100가닥 다발형.
- ▶ sensor B1 - 알루미늄 케이스를 이용하여 1mm 플라스틱광섬유섬광체 25가닥 다발형으로 렌즈와 거울이용.
- ▶ sensor B2 - 알루미늄 케이스를 이용하여 0.5mm 플라스틱광섬유섬광체 100가닥 다발형으로 렌즈와 거울이용.
- ▶ sensor B3 - 플라스틱 케이스를 이용하여 1mm 플라스틱광섬유섬광체 25가닥 다발형으로 렌즈와 거울이용.
- ▶ sensor B3 - 플라스틱 케이스를 이용하여 0.5mm 플라스틱광섬유섬광체 100가닥 다발형으로 렌즈와 거울이용.

앞으로 센서의 구분시 위의 용어를 사용할 것이다.

기존의 신틸레이터 검출기는 섬광체내에서 방사선과의 상호작용으로 생긴 섬광을 짧은 광파이프를 통하거나 직접 광전자증배관(PMT)에 전달하여 사용하는 경우가 대

부분이지만, 광섬유섬광체를 이용한 검출기의 경우 이것을 전송용 광섬유와 연결하여 장거리 전송한다.

일반적인 광섬유는 가시광선영역의 파장 약 60~1600nm에서 최대 전송효율을 갖는 광섬유를 사용하고 있다.

Table. 1과 같이 본 실험에 사용된 플라스틱광섬유섬광체의 경우 방출되는 파장이 390~570nm이고, 최대방출 파장은 435nm이다. 따라서 이 파장에서 전송손실이 적은 전송용 광섬유로 플라스틱형과 실리카 광섬유를 선정하였다. 플라스틱광섬유는 유리광섬유와 비교하여 전송손실이 큰(약 1.5[dB/m]이상) 단점이 있으나 광섬유가 잘 부러지지 않고 취급이 용이하며, 가격이 저렴하며, 수광각도(Numerical Aperture)가 큰 장점을 가지고 있다.[정과 김 2000] 본 실험에 사용된 플라스틱 광섬유는 Edmuond Optics사(Dia. 2mm)로 재질은 코어용으로 폴리스티렌(polystyrene,  $n_1 = 1.492$ )이 사용되며 클래딩 재질로는 PMMA (polymethyl methacrylate,  $n_2 = 1.402$ )이 사용되고 있다. 또한, 많이 사용되는 실리카(silica)계열의 광섬유는 플라스틱 광섬유에 비하여 전송손실이 적다는 큰 장점과 더불어 높은 온도(1000℃)에서도 변형이 잘 되지 않고, 열팽창 계수가 작기 때문에 갑작스런 온도 변화에도 깨지지 않는 특성을 갖고 있다. 또한 가시광선 영역에서부터 적외선 영역까지 빛에 투명하여 여러 파장대에 적용이 가능하다. 본 실험에 사용된 Silica광섬유는 Oxford Electronics 사의 HPSUV1000P(Dia. 1mm)를 이용하였으며, 코어의 재질은 High Purity synthetic silica( $n_1 = 1.48$ )이 사용되고 있으며 클래딩 재질은 Doped silica( $n_2=1.46$ )로 되어 있다.

광섬유에서 발생한 빛을 광섬유와 연결하기 위해서 연결부위에서의 전송 손실을 최소화하기 위하여 광통신용으로 널리 상품화 되어있는 접속단자(connector)는 "ST type", "FT type" "SMA"등이 있다. 본 실험에서는 접속이 용이하고 전송효율이 우수한 "FT type"과 "SMA type"을 선정하였다. 접속단자의 내경은 2.5mm로 Ferrule 중앙에 관통되어 있는 구멍을 통해 연결된다. 광섬유와 센서부위는 외부광의 차단을 위하여 Adapter를 사용하였

Table 1. Physical Properties of The Plastic Scintillating Fiber.

	Material	Refractive Index	Wavelength of Maximum Emission(nm)	Operating Temp(℃)	Decay Time (ns)
BCF-12	Plastic Scintillating Fiber	1.60 1.40	435 (390~570)	-20~50	3.2

다.[이등 1999]

광섬유섬광체로부터 발생된 신호를 광섬유를 통하여 전송된 빛 신호를 측정·분석하기 위해서는 광증배관(PMT) 등을 사용하여 전기적신호로 변환하여야 한다. 플라스틱광섬유섬광체의 섬광 파장은 Table. 1과 같이 370~410nm 이고 최대 세기를 약 395nm에서 가지므로 PMT의 Photocathode 역시 이 에너지 영역에서 입사된 빛을 전자 방출로 전환하는 효율이 우수한 것으로 선정하였다. 그리고, Bialkali 재질로 된 Photocathode의 경우 약 400nm 파장에서 최대의 효율을 가지므로 플라스틱광섬유섬광체의 경우 이 재질로 된 PMT를 선정하면 최대의 효율을 얻을 수 있다.[Knoll, 1999]

본 연구에 이용된 PMT는 소형으로 창의 크기가 각각 8mm(Hamamatsu Model R1635)와 10mm(Hamamatsu Model R647)으로 Head-on type으로 선정하였으며 Magnetic shield가 함께 조립(assembly)되어 있으며 증배율은 각각  $1.1 \times 10^6$ ,  $1.0 \times 10^6$ 으로 비슷하나 반응속도가 0.8ns, 2.5ns로 R1635가 훨씬 우수하다. 따라서 고준위 방사성물질을 측정할 때, 신호처리의 불감시간을 고려하여야 할 경우에는 R1635를 사용하고, 입사 방사선의 세기가 낮고 집광해야 할 섬광체의 단면적인 큰 경우에는 R647을 사용할 것이다. PMT의 경우 외부광에 의한 신호의 외곽현상을 줄이기 위하여 플라스틱 케이스를 제작하여 외부광의 침입을 막고, 광접속단자(connector)와 연결을 용이하도록 하였다. 발생되는 신호가 미약하여 선형 증폭기와 주증폭기(Amplifier)를 모두 사용하는데 선형 증폭기는(Preamplifier Model:C7319 Hamamatsu) 검출기에서 발생된 1차 신호를 증폭하고, 출력된 전하펄스를 전압 펄스로 전환하며, 증폭율의 변화를 가변적으로 조절 가능한 것으로 선정하였다. 주증폭기는(Canberra Amplifier Model:2012) 제품을 이용하였으며, HV Power supply (Hamamatsu Model C3830)는 PMT에 안정적인 전원공급 및 선형증폭기에 동시에 전원을 공급할 수 있는 것을 선정하였고 신호 분석을 위한 MCA는 Ortec trump-8k-32 + Maestero32로 PC에 On board형으로 장착하여 사용할 수 있는 제품을 선정하여 시스템을 구성하였다.

방사선원은 센서에 접촉하도록 배치하였으며, 외부광에 의한 영향을 줄이기 위하여 검정색비닐을 이용하였다. 사용된 방사선원은 디스크형의 밀봉선원인  $^{137}\text{Cs}(1\mu\text{Ci})$ 의 감마선원과  $^{90}\text{Sr}(\mu\text{Ci})$ 의 베타선원을 이용하였다. 각각의 밀봉선원은 구입한지 수년이 지났기 때문에 현재의

방사능은 선원표면에 기재되어있는 양보다 훨씬 적을 것으로 예상된다. 배경방사능의 영향을 최소화하기 위하여 Fig. 5와 같이 납 차폐벽을 이용하여 실험장치를 구성하였으며, 계측시간은 300Sec로 하였다.

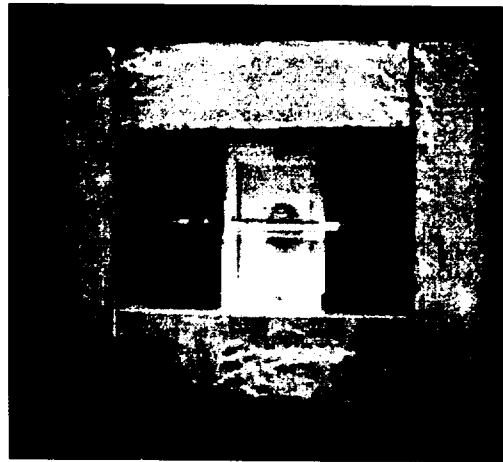


Fig. 5 Experimental setup using lead bricks

### 3. 결과 및 고찰

0.5mm, 1mm의 플라스틱광섬유섬광체를 이용하여 제작된 센서와 신호전송용으로 전송손실이 적은 HPSUV1000P (Dia. 1mm)사용하여 감마선원 $^{137}\text{Cs}(1\mu\text{Ci})$ 과 베타선원 $^{90}\text{Sr}(\mu\text{Ci})$ 에 대한 스펙트럼 분포는 Fig. 6, Fig. 7과 같다.

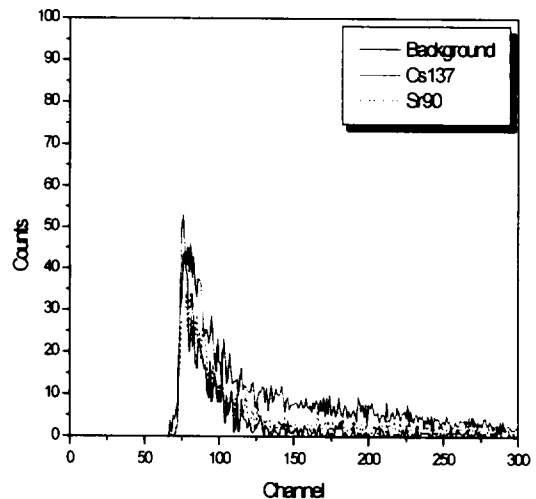


Fig. 6 Pulse-height spectrum measured with the single-strand 0.5mm sensor for the gamma ray and beta ray source

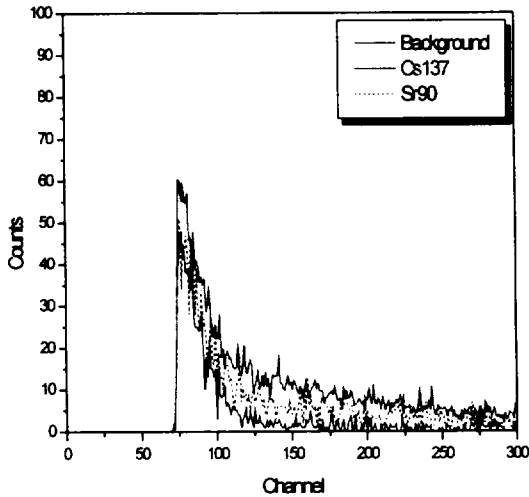


Fig. 7 Pulse-height spectrum measured with the single-strand 1mm sensor for the gamma ray and beta ray source

Fig.6, Fig. 7에서 보듯이 1mm센서인 경우 반응단면적이 0.5mm보다 커서 감마선 또는 베타선의 에너지가 1mm

센서에서 더 많은 에너지 전이(energy transfer)를 일으키는 것으로 분석된다. 그러나, 위의 두 종류의 센서에서 발생된 신호는 매우 낮아 백그라운드와의 구분이 어렵다. 그래서 Fig. 3과 같이 4종류의 다발형의 센서에 신호전송용 HPSUV1000P(Dia. 1mm) 광섬유를 사용하였다. 감마선원<sup>137</sup>Cs(1μCi)과 베타선원<sup>90</sup>Sr(μCi)에 대한 스펙트럼 분포 Fig.8과 같이 나타내었다.

다발형의 센서는 한가닥의 센서보다 나은 검출효율을 나타내었으나 발생된 신호의 양이 여전히 낮다.

광섬유섬광체에서 발생된 광의 집광효율을 향상시키기 위한 방안으로 다발형센서의 한쪽 끝에 반사율이 90% 이상이 되는 거울을 부착시키고, 다른 쪽 면에는 렌즈를 이용하여 플라스틱광섬유섬광체에서 발생하는 광의 집광효율을 향상시키도록 하였으며, 신호전송용 광섬유는 Edmuond Optics사(Dia. 2mm)를 이용하였고, 센서는 Fig. 8에서 가장 높은 검출효율을 보인 알루미늄 케이스에 플라스틱광섬유섬광체 1mm로 25가의 다발형센서(sensor A1)이용하여 각각의 신호분포에 대하여 Fig 9와 같이 나타내었다.

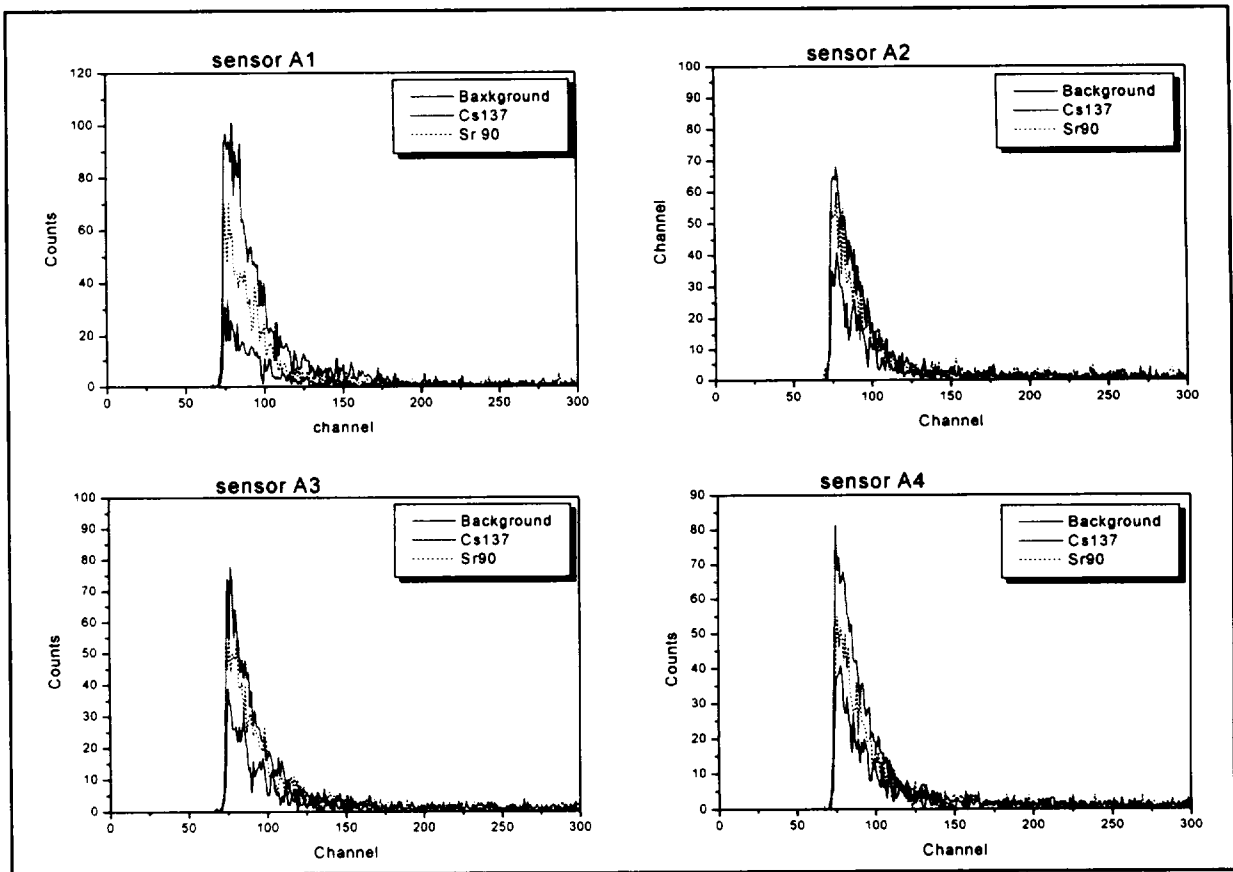


Fig. 8 Pulse-height spectrum measured with four type of the multi-strand sensors for the gamma ray and beta ray source

Fig. 9의 결과에서 1mm 광섬유에 비해서 2mm 광섬유를 이용할 경우 검출효율이 53%정도 향상된 결과를 보여주며, 거울을 이용하면 5%정도, 렌즈와 거울을 동시에 이용할 경우 35%정도의 검출효율이 향상되었다.

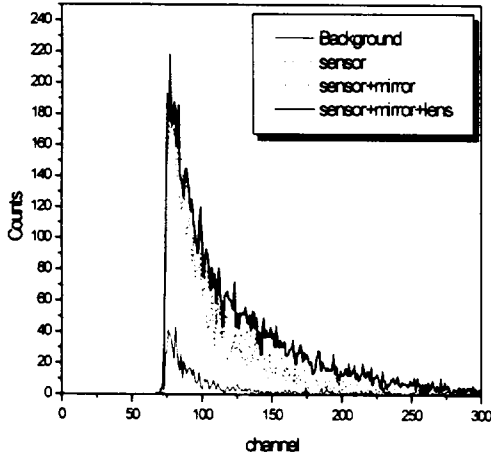


Fig. 9 Pulse-height spectrum measured with the multi-strand 1mm sensor(A1) for coupling of a mirror and lens.

다음으로 Fig. 3과 같이 위에서 언급한 4종류의 센서에 대하여 각각에 거울과 렌즈를 이용하여 감마선원과 베타선원에 대한 실험한 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

Fig. 10과 같이 2mm의 전송용광섬유, 렌즈, 거울을 이용하여 초기에 다발로 제작된 센서보다 훨씬 향상된 신호분포를 보여주고 있다. 감마선원에 대해서 알루미늄 케이스로 제작된 센서의 경우 1mm(sensor B1), 0.5mm (Sensor B2)가닥의 신호는 비슷한 양상을 보이고 있고, 플라스틱케이스로 제작된 센서의 경우 1mm(Sensor B3), 0.5mm(Sensor B4)대하여 다소 낮은 결과치를 보이는 것은 플라스틱 케이스가 알루미늄 케이스에 비하여 2배정도 두껍기 때문에 감마선의 감쇠에 의한 영향이라고 분석된다. 베타선원의 경우 감마선원에 비하여 신호의 변화가 크지 않는 것을 알 수 있다. 이것은 베타선의 경우 하전입자의 형태로 비정(Range)가 감마선에 비하여 매우 짧기 때문에 센서의 케이스에서 대부분의 베타선 에너지가 흡수되는 것으로 분석된다.

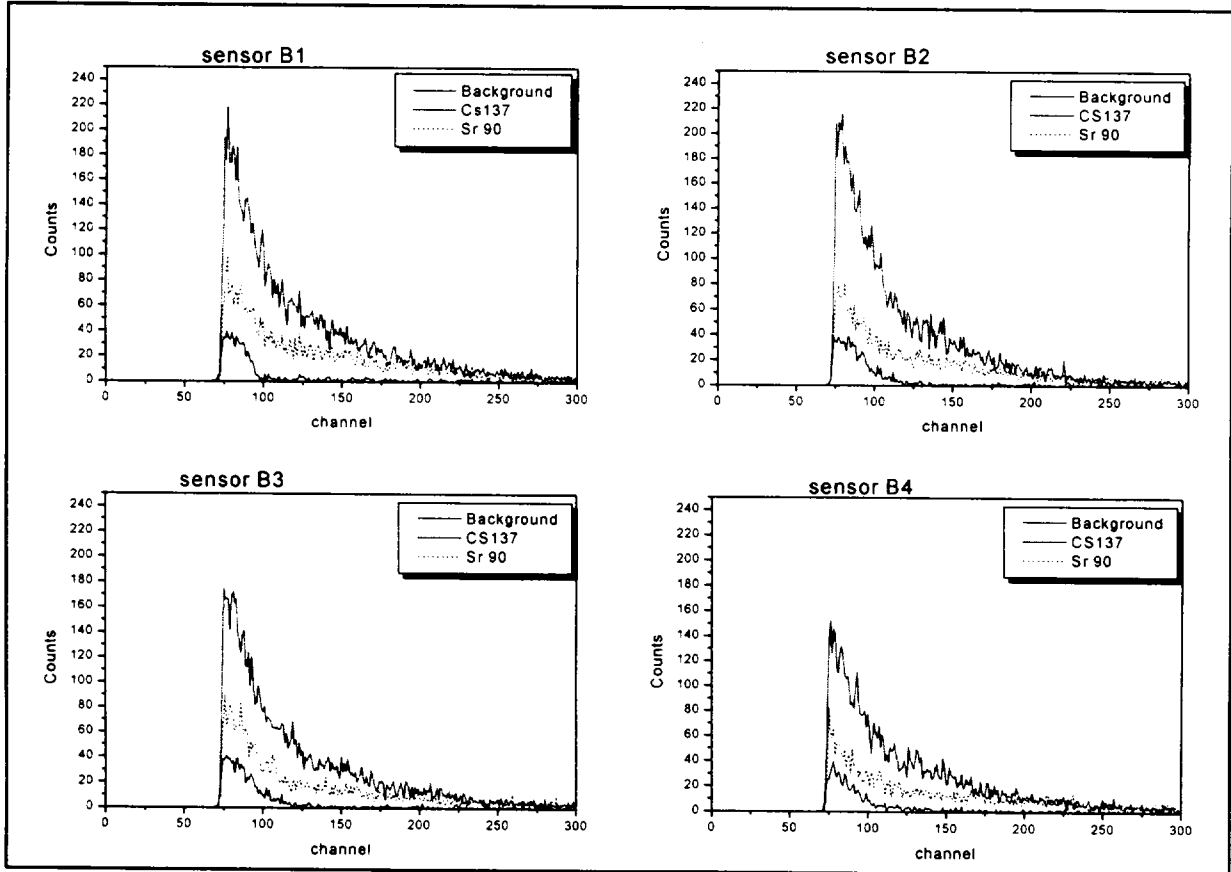


Fig. 10 Pulse-height spectrum measured with four type of the multi-strand sensors which used a mirror and lens for the gamma ray and beta ray source

4. 결 론

플라스틱광섬유섬광체를 이용하여 감마선과 베타선을 검출하기 위하여 한 가닥과 여러 가닥의 센서를 제작하였으며, 센서에서 발생된 광의 집광효율을 향상시키기 위하여 렌즈와 거울을 이용하였다. 방사선원으로는 감마선원인 <sup>137</sup>Cs과 베타선원인 <sup>90</sup>Sr을 각각 1μCi 이용하여 환경준위의 방사선계측의 가능성에 대하여 조사하였다.

본 실험을 통해서 살펴본 바와 같이 플라스틱광섬유섬광체를 이용하여 한가닥으로 센서를 제작한 경우 감마선원과 베타선원 모두에 대해서 낮은 검출효율을 보인 반면 다발형으로 제작하고, 발생된 광신호의 집광효율을 향상시키기 위하여 센서의 양단에 렌즈와 거울을 이용할 경우 2배 정도의 검출효율의 향상을 가져왔으며, 감마선원에 대한 검출효율은 만족할 만한 결과를 얻었으나 베타선원에 대해서는 여전히 낮은 검출효율을 보였다.

플라스틱광섬유섬광체와 광섬유를 조합하여 방사선계측기로서의 충분한 가능성을 보여주었으며 이러한 결과를 바탕으로 플라스틱광섬유섬광체와 신호전송용 광섬유를 결합하여 기존의 계측기로는 계측이 어려운 여러 분야에 걸쳐 폭넓게 적용할 수 있을 것이다.

참고문헌

Geen R. Van. 1994. Optical Fiber Sensing and Systems in Nuclear Enviroments, Proceeding of SPIE. Vol. 2425, Mol. Belgium.

Bliss M. 1993. Scintillating Galss Fiber Neutron Sensors: I. Production and Optical Characterization, PNL-SA-23095, Pacific Northwest Laboratory, Richland, Weshington, USA, Oct.

Maekawa T. 2001. Developement of An Optical Radiation Detector and Its Application to Radiation Monitoring in Nuclear Power Plants(Japanese Version). A Report Presentde to Toshiba Institute of Nuclear Technology.

이영길 외. 1996. 중성자검출법에 의한 핵물질보장조치 기술. KAERI/OT-295/96, 한국원자력연구소.

Albers D. et al. 1996. Study on Scintillating Fber Rspnse. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 371

정원재, 김종현. 2001. 광전자공학(Optoelectronic Engineering, 도서출판 미래컴.

Knoll Glenn F. 1999. Radiation Detection and Measurement. Third Edition. John Wiley and Sons, Inc.