

방사성폐기물 처분장 감시를 위한 다발형 광섬유 센서 및 Tapered 섬광체  
방사선 센서에 관한 연구

A Study on the Bundle-type Scintillating Fiber and Tapered  
Scintillator Radiation Sensors for Monitoring of Radioactive Wastes  
Disposal Sites

김계홍, 박재우  
제주대학교 방사능이용연구소

요 약

플라스틱 광섬유섬광체(PSF)를 여러 가닥의 다발로 묶은 방사선센서를 제작하여  $^{137}\text{Cs}$  감마선원에 적용하여 가닥수에 따른 방사선 계측 특성을 분석하였다. 이를 통하여 센서부위와 전송용 광섬유간의 집광을 용이하게 하는 끝이 가늘어지는 광섬유(Tapered fiber)의 필요성을 발견하였다. Tapered 광섬유의 성능을 예측하기 위하여 polystyrene을 기반으로 미량의 dPOPOP와 PPO 또는 dPBD를 첨가한 Tapered 플라스틱 섬광체를 제작하였으며,  $^{137}\text{Cs}$  선원 1. 1.5, 3, 5  $\mu\text{Ci}$ 에 적용하여 출력과고 및 방사능과 총계수치 사이의 비례관계를 분석하였다. 본 연구를 통하여 플라스틱 광섬유섬광체를 Tapered 형태로 제작하는 경우  $\mu\text{Ci}$  수준의 감마선장에서 방사선 계측기로 개발될 수 있음을 확인하였다.

Abstract

Several types of gamma-ray sensors were constructed by packing different numbers of fibers into aluminum tubes, and tested to detect the  $^{137}\text{Cs}$  gamma ray. It has been found from this investigation that tapered fibers can be more efficient to collect the lights produced inside the sensor and transfer them into the transmitting fiber. In order to predict the functioning of the tapered fiber, tapered plastic scintillators, composed of polystyrene with minute amount of dPOPOP and PPO or dPBD, were fabricated and tested for the detection of gamma rays from 1.0 1.5 3.0 5.0  $\mu\text{Ci}$   $^{137}\text{Cs}$  sources, and the pulse height spectrum and the relationship between the radioactivity and the total counts are analyzed. It has been found from this study that the tapered scintillating optical fiber, if manufactured, can be practically applied to the development of gamma-ray sensors which can be deployed in  $\mu\text{Ci}$ -level radiation fields

1. 서 론

광섬유는 그 특성을 살려 현재 여러 가지 측정 센서로 이용되고 있으며, 원자력 분야에서도 다양

한 목적의 센서 개발에 대한 연구가 진행되고 있다.[1,2,3] 방사선 측정 측면에서 이러한 연구는 최근의 광학기술과 접목되어 다양한 방법으로 진보하고 있다. 광섬유를 활용한 방사선계측방법은 센서부분을 매우 소형화 할 수 있어서 연료봉 집합체 사이처럼 기존의 방사선 계측기로는 삽입이 곤란한 협소한 장소의 측정을 가능하게 할 수 있으며, 센서부위에 전원공급이 불필요한 장점을 활용하여 토양이나 수중에 직접 적용이 가능하다. Berthold[4]는 이러한 센서가 방사성폐기물 처분장의 주변의 지하 여러 군데에 설치하여 방사성 핵종의 누출을 감시하는 계통에 활용될 수 있음을 제시하고 있다.

본 연구에서는 이러한 방사선 센서의 가능성을 분석하기 위하여 BICRON BCF-12 1mm 광섬유를 다발형태로 묶은 센서를 제작하여  $^{137}\text{Cs}$  감마선원에 대해서 시험하였다. 센서에 사용된 광섬유가닥수에 따라 측정되는 출력파고 스펙트럼을 분석하였으며 선원의 방사능과 총계수치간의 비례관계를 분석하였다. 이를 통하여 직경이 굵은 센서부위에서 생성된 섬광을 직경이 가는 전송용 광섬유로 효과적으로 집광하기 위해서는 끝이 가늘어지는 광섬유섬광체(tapered scintillating fiber)가 필요함을 발견하였다. 현재 국내에서는 본 연구의 목적에 맞는 굵기의 tapered 광섬유를 제조하는 곳을 찾을 수 없었기 때문에 플라스틱 광섬유 재료인 polystyrene에 발광성분으로 미량의 dPOPOP와 PPO 또는 dPBD를 첨가한 Tapered 플라스틱 섬광체를 끝이 가늘어지는 형태로 제작하였다. 이 섬광체를  $^{137}\text{Cs}$  감마선원에 적용하여 출력되는 펄스 파고 스펙트럼을 분석하였고 선원의 방사능과 총계수치간의 비례관계를 분석하였다. 센서로부터 발생하는 광신호는 전송용 광섬유를 통해 Photomultiplier Tube(PMT)로 전송되고, 이것을 다중파고분석기(Multichannel Analyzer)로 채널별 계수치로 출력하였다. 이를 통하여 tapered fiber를 제조하여, 사용하는 경우 방사선 계측기로의 활용 가능성을 분석하였다.

## 2. 센서부위의 제작

플라스틱 광섬유는 외가닥은 감마선과의 반응확률이 낮기 때문에 플라스틱광섬유섬광체인 BCF-12 1mm를 Fig.1(a)와 같이 알루미늄 튜브에 3, 7, 13, 18, 25가닥의 다발형태로 매워 넣어서 센서로 제작하였다. 센서의 한쪽 끝에는 박막의 알루미늄을 이용하여 외부광을 차단하고 내부에서 발생된 광신호를 반사하여 누설을 최소화 하였다.

Tapered 플라스틱 섬광체의 모형은 Fig.1(b)와 같으며 문헌[5]에 주어진 처방과 같이 모체인 styrene 단량체 용액에 미량의 용질을 첨가하여 열중합법으로 제작하였고 PMMA (Polymethylmethacrylate)로 코팅하여 피복하였다. 제1용질로 bPBD(2-4-T-Butylphenyl) 또는 PPO(2,5-diphenyloxazde)를 0.1%(mol/ℓ) 첨가하였고, 제2용질로는 dPOPOP (dimethyl POPOP)를 각각 0.01, 0.02, 0.03, 0.04%농도로 다르게 첨가하였다. Styrene 단량체에 개시제로 AIBN (Azobisisobutyronitrile, 아조비스이소부틸로니트릴)을 넣고 가열하면 개시제인 AIBN이 열분해하여 자유 라디칼을 생성시키고 생성된 자유 라디칼이 Styrene의 이중결합을 공격하여 중합이 일어나 polystyrene이 형성된다. 중합과정은 발열과정이므로 중합시 온도를 급격히 올리면 용매와 용질이 끓기 시작하여 기포가 발생하면서 고체화되기 때문에 교반기에서 90℃까지 서서히 온도를 상승 시킨 후 중합온도를 유지하도록 하였다. 이 상태가 4시간이 되면 제법 점성이 생기는데 이 점성이 있는 모노머를 형틀에 주입해 오븐에서 중합과정을 거친다. 중합온도는 오븐에서 50℃, 80시간 동안 유지하였고 상온에서 열처리하여 냉각하였다.

Tapered 섬광체의 피복은 코어로 사용된 재료보다 굴절율이 낮은 PMMA(Polymethyl methacrylate)를 사용 하였다. PMMA 폴리머를 만들기 위한 중합반응에도 개시제(Initiator)로 AIBN을 사용하였다. 기초 경화단계는 완전한 액체상태의 MMA 모노머를 100℃까지 온도를 올리

면서 서서히 교반 하여 준 뒤 다시 소량의 MMA를 주입하여 모노머가 끓는 것을 막고 80℃정도 까지 유지한다. 다시 온도를 90~95℃를 유지하면서 점도를 유지 한다. 이 과정을 반복하여 제법 점도가 있는 액체 상태를 유지하여준 뒤 60℃까지 온도를 내려주어야 한다. 이렇게 만들어진 점도가 있는 액체에 Tapered 플라스틱섬광체를 담가 클래드를 코팅한다. 이것을 오븐에서 40℃로 6시간 동안 건조시켜 경화시켰다.

섬광체에서 발생된 신호를 전송용 광섬유에 효율적으로 전송하기 위하여 한쪽 끝에는 400 nm 파장에서 반사율이 90%이상인 거울을 부착하였으며 외부는 알루미늄 호일로 감쌌다.

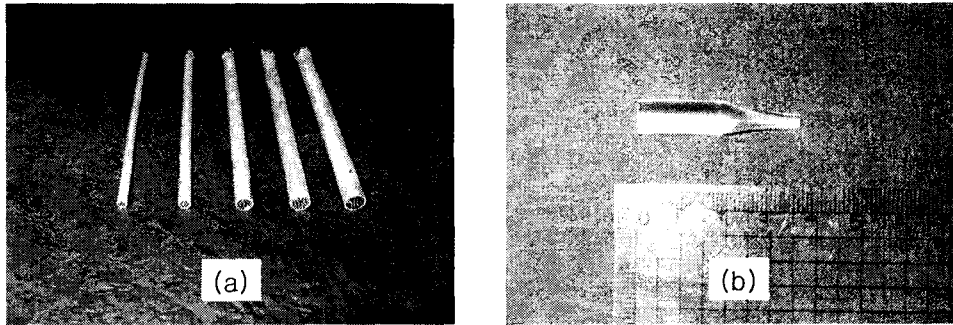


Fig. 1 Picture of (a)Multi-strand scintillating fiber sensor and (b) Tapered scintillator

### 3. 실험장치 구성 및 실험방법

섬광체 센서에서 생성된 섬광을 측정하기 위하여 사용된 실험장치의 구성은 Fig. 2와 같다. 실험 장치는 크게 센서 부분, 전송용 광섬유, PMT 및 다중과고분석장치(MCA)로 구성되어있다.

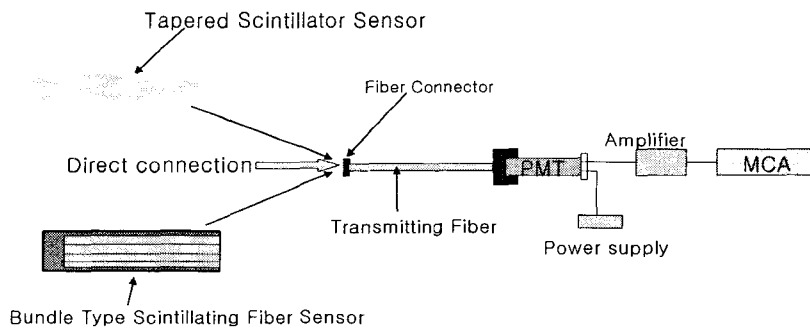


Fig. 2 Experimental setup for the test of the optical sensors

전송용 광섬유는 BICRON사의 BCF-12 model과 자체 제작한 Tapered 광섬유섬광체의 방출 파장의 범위가 350~600nm이기 때문에 이 파장 범위에서 전송손실이 적은 플라스틱광섬유를 선정 하였다. 본 실험에 사용된 플라스틱 광섬유는 Edmund Optics사(Dia. 3mm)의 제품으로 재질은 core 용으로 PMMA( $n_1 = 1.492$ )가 사용되며 cladding 재질로는 불소계 폴리머(fluorine polymer,  $n=1.402$ )가 사용되었다.

센서부위로부터 발생된 광신호를 광신호를 측정·분석하기 위해서는 광전자증배관(Photomultiplier Tube 이하 PMT)을 사용하여 전기적신호로 변환한다. 섬광체의 발광파장이 350~600nm를 가지므로 PMT의 Photocathode 역시 이 에너지 영역에서 입사된 빛을 전자 방출로

전환하는 효율이 우수한 것을 선정하여야 한다. Bialkali 재질로 된 Photocathode의 경우 약 400nm 파장에서 최대의 효율을 가지므로, 이 재질로 된 창이 크기가 8mm인 Hamamatsu Model H3164-10과 H5784를 Head-on type으로 선정 하였다. PMT와 전송용 광섬유의 접속부위는 연결을 용이하게 하고 외부 광에 의한 신호의 교란을 줄이기 위하여 FC-type의 접속단자(connector)와 어댑터(adapter)를 이용하여 제작하였다.

PMT에서 발생하는 신호가 미약하여 전치증폭기와 주 증폭기를 모두 사용하는데 전치증폭기(Preamplifier)는 1차 신호를 증폭하고, 출력된 전하펄스를 전압펄스로 전환하며, 증폭율의 변화를 가변적으로 조절 가능한 C7319(Hamamatsu)것으로 선정하였다. 주 증폭기는(Canberra Amnplifier Model:2012) 제품을 이용하였으며, HV Power supply는 PMT에 안정적인 전원공급 및 전치증폭기에 동시에 전원을 공급할 수 있는 C3830(Hamamatsu)을 선정하였다. 신호 분석을 위한 MCA(Multi Channel Analyzer)는 Ortec trump-8k-32 + Maestero32로 PC에 On board형으로 장착하여 사용할 수 있는 제품을 선정하여 시스템을 구성하였다.

방사선원은  $^{137}\text{Cs}$ 용액을 각각 1.0, 1.5, 3.0, 5.0  $\mu\text{Ci}$ 가 되게 정량하여 유리 시험관에 봉입한 것으로 시험관의 하부끝이 센서부의 측면과 접촉하도록 배치하였으며, 주위의 배경방사능의 영향을 최소화하기 위하여 납벽들을 사용하여 센서부위를 차폐하였다. 각 경우 계측시간은 300초로 하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

Fig. 3은 광섬유 다발 센서의 광섬유 가닥수에 따른  $^{137}\text{Cs}$  3 $\mu\text{Ci}$ 에 대한 펄스파고 스펙트럼을 나타낸 것이다. 가닥수가 증가 할수록 계수치가 증가해 계측 효율이 증가함을 알 수 있다. 그러나 Fig. 4는 모든 채널의 계수치를 합한 총계수치로서 계수치 증가율이 가닥수가 증가함 따라 완만해 짐을 보여준다. 이것은 가닥수 증가에 따라 센서부의 직경이 전송용 광섬유의 직경보다 커지게 되어 일부의 광은 전송용 광섬유에 입사되지 못함을 말해준다.

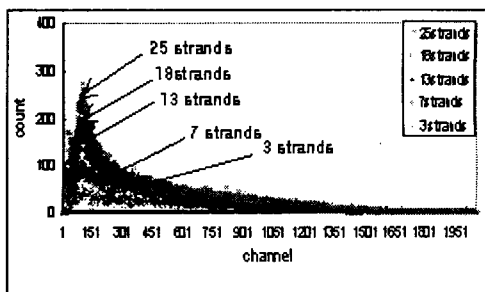


Fig. 3 Pulse-height spectrum measured for the 3 $\mu\text{Ci}$   $^{137}\text{Cs}$  source with the sensors having different number of fibers

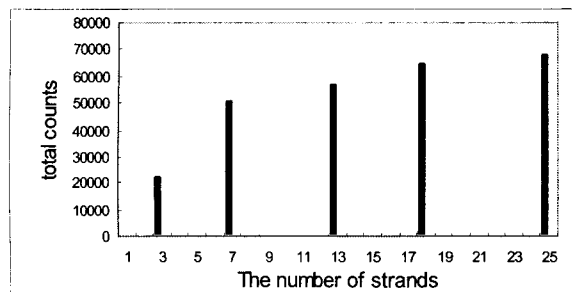


Fig. 4 The total counts measured with sensors having the different number of strands.

Fig. 5는 PPO 0.1%와 dPOPOP 0.02%를 첨가해 제작한 Tapered 섬광체의  $^{137}\text{Cs}$  1, 1.5, 3, 5  $\mu\text{Ci}$ 에 대한 펄스파고 스펙트럼을 보여주고 있다. 방사능의 증가에 따라 스펙트럼의 형태는 변하지 않으나 높이가 증가함을 알 수 있다. Fig. 6은 dPOPOP의 농도를 0.01, 0.02, 0.03, 0.04%(mol/l) 다르게 첨가한 4가지 센서에 대해서 방사능과 총계수치와의 관계를 나타내고 있다. 모든 센서에 대해서 방사능의 증가에 따라 총계수치가 대체적으로 선형적으로 증가함을 볼 수 있다. dPOPOP의 농도가 0.02%일 때 가장 큰 계수치를 나타내고 있으나 4종류 센서의 dPOPOP 농도에 따른 감도를 비교

하는 데는 한계가 있었다. 각각의 센서마다 섬광체의 균질도, 전송용 광섬유와의 결합 상태, 접속부의 polishing 상태, 섬광체의 크기 등에서 편차가 있었기 때문에 농도에 따른 계수치 비교에는 어려움이 있었다. 그러나 전반적으로 감마선에 대해서 상당한 감도를 가지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 bPBD 0.1%와 dPOPOP 0.02%를 첨가해 제작한 센서의  $^{137}\text{Cs}$  1, 1.5, 3, 5  $\mu\text{Ci}$ 에 대한 펄스파고 스펙트럼이고, Fig. 8은 dPOPOP의 농도가 0.01, 0.02, 0.04, 0.06%(mol/l)인 센서의 방사능에 따른 선형성을 보여주고 있다. 제 1용질로 dPBD를 첨가한 경우가 PPO보다 약간 감도가 높게 나타났으나 이 경우 역시 위에서 언급한 불확실 등으로 직접적인 비교는 곤란하였다.

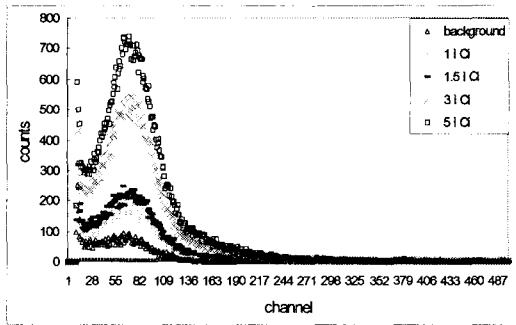


Fig. 5 Pulse-height spectrum measured with the tapered scintillator sensor. PPO and dPOPOP concentrations are 0.1%, 0.02%(mol/l), respectively.

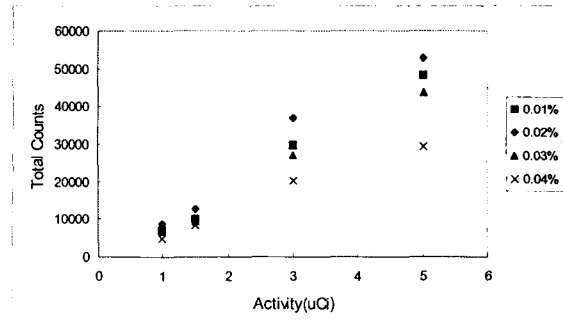


Fig. 6 Proportionality of the total count versus the source activity measured with the sensors having different concentrations of dPOPOP.

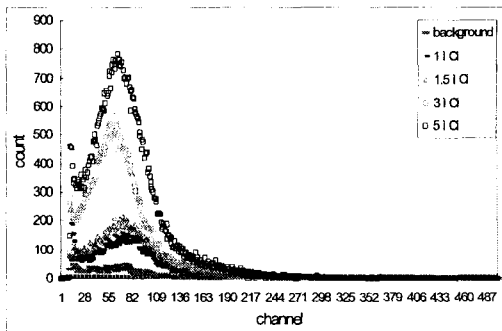


Fig. 7 Pulse-height spectrum measured with the tapered scintillator sensor. bPBD and dPOPOP concentrations are 0.1%, 0.02%(mol/l), respectively.

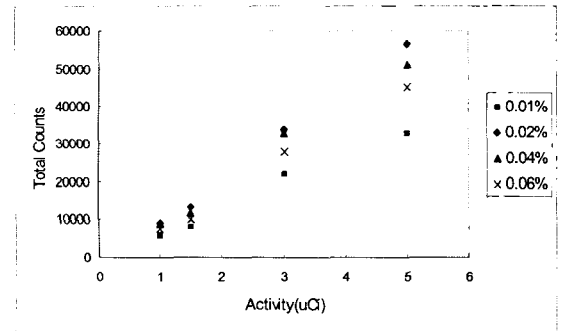


Fig. 8 Proportionality of the total count versus the source activity measured with the sensors having different concentrations of dPOPOP.

## 5. 결론

방사성폐기물 처분장 주변의 지하에 매설하여 방사능 누설 감시를 위하여 활용될 수 있는 센서 후보로서 플라스틱 섬광체 광섬유를 다발형태로 묶은 센서와 한쪽 끝이 가늘어 지는 플라스틱 섬광체(tapered scintillator) 센서를 제작하여  $^{137}\text{Cs}$  감마선에 대해서 시험하였다. 광섬유다발 센서는 여러 가닥의 플라스틱 섬광체 광섬유를 알루미늄 튜브에 봉입하여 제작하였고, tapered scintillator

는 문헌에 제시된 플라스틱 섬광체광섬유의 성분배합을 열중합하여 제작하였다. 광섬유 다발 센서의 경우 센서부위에서 생성된 광을 직경이 작은 전송용 광섬유로 효율적으로 집광/전송하는 데 한계가 있었으나 대체로 좋은 감도를 가지고 있음을 발견하였다. 이러한 집광상의 문제점을 극복하는 방안으로 tapered fiber의 사용 가능성을 확인하기 위하여 tapered scintillator를 사용하여 실험한 결과 충분한 감도가 있음을 확인하였다. 본 연구결과를 통하여 tapered 플라스틱 섬광체광섬유를 활용한다면 분포형 방사선 감시시스템의 개발이 충분히 가능함을 확인 할 수 있었다.

감사의 글 : 이 연구는 과학재단 지정 방사선 안전신기술연구센터의 지원에 의해 수행되었음

## 참 고 문 헌

- [1] R. Van Geen, "Optical Fibere Sensing and Systems in Nuclear Enviroments" Proceeding of SPIE, Vol 2425, 1994.
- [2] 敦 木村, 光技術を用した原子力計測の研究, 學位論文, 東京大學, 2001.
- [3] Francis T. S. Yu and Shizhuo Yin, Fiber Optic Sensors, Marcel Dekker, 2002
- [4] John W. Berthold, "Overview of Prototype Fiber Optic Sensors for Future Application in Nuclear Environments", Proceeding of SPIE, Vol 2425, pp. 74-83, 1994.
- [5] Margarida Mizue Hamada et al., Radiation damage studies on the optical and mechanical properties of plastic scintillators, Nucl. Instr. and Meth. A, 422, 1999