

## 동시회로를 이용한 $^3\text{H}$ , $^{14}\text{C}$ 방사선 측정에 관한 연구

박찬희 · 박재우

제주대학교 방사선응용과학연구소  
690-756 제주도 아라1동 1번지

### A Study on Radiation Detection of $^3\text{H}$ , $^{14}\text{C}$ by Using Coincidence Unit

Chan-Hee Park and Jae-Woo Park

Applied Radiological Science Research  
Institute, Cheju National University, Cheju  
690-756, Korea

#### Abstract

Optical fibers have been used as sensing materials for various measurements, and are currently being investigated for their potential use as sensor material in various nuclear applications. We have used commercially available plastic scintillating fibers of Bicon model BCF-12 (0.5mm, 1mm in diameter) to detect beta rays emitted from  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ . The radiation sensor was constructed with thirty strands of the fibers being packed and inserted in an aluminum tube. For the coincidence circuit counting, each end of the sensor was connected with a transmission fiber which is connected to a PMT.  $^3\text{H}$  or  $^{14}\text{C}$  solution was poured into the sensor and a direct contact was made between the solution and the fibers. The radioactive concentration of the solution is commonly 0.05, 0.1, 0.2 mCi/ml. It is found that sensor using by coincidence unit has

enough sensitivities to measure the given radioactive concentrations. It is found that the sensors are about 27-40 times more sensitive to beta rays from  $^{14}\text{C}$  than from  $^3\text{H}$ . The sensor constructed with fiber pieces of 0.5mm in diameter showed higher sensitivities than the sensor constructed with fiber pieces of 1mm in diameter.

Key words : Plastic scintillating fiber, Coincidence unit, detect beta rays,  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$

#### 서 론

현재 광섬유는 통신 분야에는 물론 그 특성을 이용하여 여러 가지 측정센서로 활용되고 있으며, 원자력분야에서도 그 가능성이 인정되어 활발한 연구가 이루어지고 있다[R. Van Geen 1994]. 광섬유를 활용한 방사선계측방법은 센서부분을 매우 소형화할 수 있어서 연료봉집합체 사이같이 기존의 방사선 계측기로는 삽입이 곤란한 협소한 곳의 측정을 가능하게 할 수 있으며, 광섬유의 광전도성과 비교적 저렴한 장점을 활용하여 원자력 발전소, 가속기, 방사성폐기물 처분장 등에 센서를 분산, 배치하여 여러 곳의 방사능을 한 곳에서 집중하여 감시하는데 유용하게 적용할 수 있다[敎木村 2001, Francis T. S. Yu et al. 2002]. 이미 플라스틱 섬광광섬유를 활용하여  $^3\text{H}$ 이나  $^{14}\text{C}$ 이 포함된 액체의 방사능을 측정할 수 있는 가능성을 보여준 기초적인 연구가 수행된 바 있다[박등 2004]. 본 연구에서는 직경이 0.5mm, 1mm인 Bicon사의 플라스틱 섬광광섬유 (Plastic scintillating fiber) BCF-12의 양쪽 끝단을 다발형태로 묶어서 알루미늄용기에 삽입한 수축관 형태의 방사선 센서를 제작하였으며 이를 활용하여  $^3\text{H}$  및  $^{14}\text{C}$  용액의 방사능을 측정한 결과를 제시한다. 실험방법은 coincidence module을 이용하여 양쪽에서 발생한 신호중 동시에 계측된 신호만 나타낼 수 있도록 구성하였다. 시험 대상으로 삼은 용액의 방사능 농도는  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$  공통적으로 0.05, 0.1, 0.2 mCi/ml이다.  $^3\text{H}$ 과  $^{14}\text{C}$ 은 각각 최대에너지가 0.018 Mev,

0.156 Mev인 베타선을 방출하며 이들 가운데 일부는 광섬유의 피복을 관통하여 내부의 섬광체와 반응할 수 있을 것이다. 섬광체와 반응하여 발생한 광은 광섬유를 따라 이동하며 이것을 모아서 광전자증배관으로 관독하면 용액의 방사능 농도에 관한 정보를 알 수 있다.

### 실험방법

#### 1. 센서 제작

Coincidence 회로를 이용하여 측정할 센서는 Bicon사의 BCF-12를 이용하여 직경이 각각 0.5mm, 1mm인 플라스틱 섬광광섬유의 양쪽 끝단을 알루미늄 튜브로 매어 넣은 형태로 제작되었다. Fig. 1과 같이 알루미늄으로 제작된 수족관형 Case의 가로, 세로, 높이는 각각 25, 25, 80mm이다. 외부로부터 유입되는 광을 최소한으로 줄이기 위해 Case의 뚜껑을 만들고, Case의 윗면 6곳에 땀을 내어 볼트로 고정하였다. Fig. 2는 제작한 센서의 단면도를 보여주고 있다. 센서부의 광섬유 다발 끝은 FC connector를 통하여 직경이 3mm인 전송용 광섬유와 접속된다.

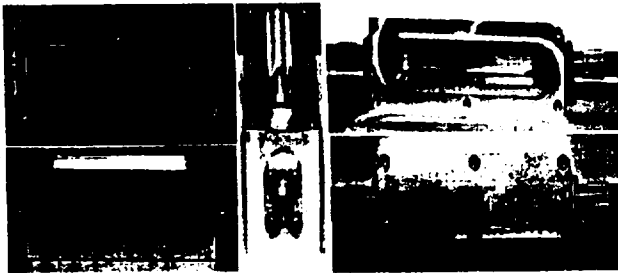


Fig. 1. Fiber bundle sensor for the use of coincidence circuit

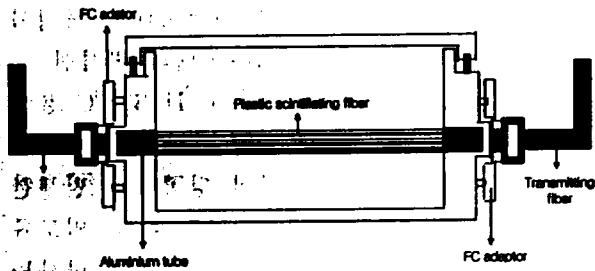


Fig. 2. Vertical cross section of the scintillating fiber sensor by using coincidence circuit

#### 2. 광 측정 장치의 구성

본 연구에서 사용되고 있는 광전자 증배관은 외부광이나 주위의 열에 의해 noise를 발생시킨다. 특히 이러한 noise pulse와  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$  등의 붕괴에 기인한 섬광에 의해 발생한 진짜 pulse는 매우 비슷하고, real pulse를 구분하기가 매우 어렵다. 동시회로에서는 매우 짧은 시간동안 동시에 pulse를 측정했을 때만 기록이 되게 된다[Kim and Shin 1997] 따라서, 두 개의 광전자 증배관을 사용하면 한쪽에서 계측했을 때에 나타나는 noise를 줄일 수 있을 것으로 보인다.

Coincidence 회로의 광 측정 장치는 센서 부분, 전송용 광섬유, 광전자 증배관 (PMT; Photomultiplier tube), 주 증폭기(Amplifier) 각각 두 개, Coincidence module 및 다중과도분석기(MCA; Multi channel analyzer)로 구성하였다.

Fig. 3은 Coincidence 회로 측정용 센서에 대한 실험 장치 구성도이다.

Bicon사의 BCF-12인 플라스틱 섬광광섬유의 방출 파장의 범위는 350~600nm이다. 따라서 전송용광섬유는 이 파장 범위에서 전송손실이 적은 플라스틱광섬유를 선정하였다. 본 실험에 사용된 전송용 플라스틱광섬유는 Edmund Optics사의 제품으로 재질은 Core에 PMMA (Polymethyl methacrylate,  $n=1.492$ )가 사용되며, Cladding재질로는 불소계 폴리머(Fluorine polymer,  $n=1.402$ )가 사용되었다.

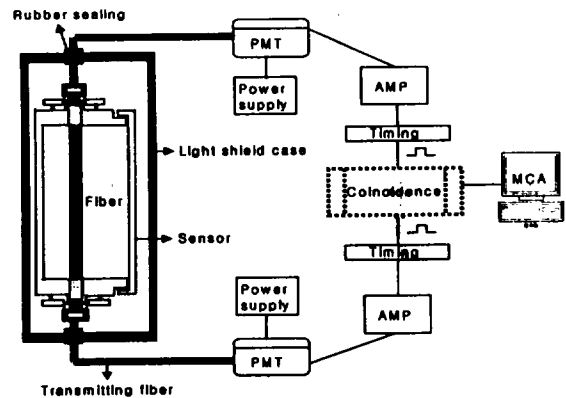


Fig. 3. Experimental setup for measuring the scintillation from the sensor by using coincidence circuit

센서부위로부터 발생된 광신호를 측정·분석하기 위해서는 광전자증배관(Photomultiplier Tube)을 사용하여 전기적 신호로 변환하여야 한다. 플라스틱 섬광광섬유의 발광파장이 350-600nm를 가지므로 PMT의 Photocathode 역시 이 에너지 영역에서 입사된 빛을 전자 방출로 전환하는 효율이 우수하고 창희 직경이 8mm인 Hamamatsu 제품 H5784를 선정하였다. 주 증폭기는 Canberra Amplifier model 2012를 이용하였으며, Power supply는 PMT에 안정적인 전원공급 및 전치증폭기에 동시에 전원을 공급할 수 있는 Hamamatsu 제품 C3830을 사용하였다. Coincedence module은 Canberra coincidence model 1446을 사용하였으며, 신호 분석을 위한 MCA (Multi Channel Analyzer)는 Ortec trump-8k-32 + Maestero32로 board형태로 PC에 장착하여 사용할 수 있는 제품이다. 또한 외부로부터의 광을 차단하기 위하여 직경 60mm, 길이 200mm의 알루미늄 케이스를 제작하여 그 속에 센서를 넣을 수 있도록 하였고 섬광광섬유의 접속부위와 연결될 수 있도록 양쪽 표면에 직경 4mm의 구멍을 만들어 전송용 광섬유가 통과할 수 있도록 제작하였다. 외부광의 유입을 차단하고 PMT, 알루미늄 센서와 전송용 광섬유의 연결을 용이하게 하기 위하여 광통신용으로 널리 쓰이고 있는 FC 접속단자와 어댑터를 사용하였다.

3. 실험방법

방사선원인  $^3\text{H}$ 과  $^{14}\text{C}$ 용액을 0.05, 0.1, 0.2 mCi/ml의 농도로 희석하여 자동 피펫으로 각각의 센서 case에 9ml씩 주입하여 5분간의 채널별 계수치와 총계수치를 측정하였다. 한 농도를 측정 한 후에는 센서 case를 물로 5번 이상 세척한 후 다른 농도를 측정하였다.

결과 및 고찰

Fig. 4는 직경이 1mm로 제작된 센서의  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$  용액 0.05, 0.1, 0.2 mCi/ml 농도에 따른 pulse height spectrum이다. 두 용액의 파고 스펙트럼의

모양은 거의 동일하다.

$^{14}\text{C}$ 용액의 경우 각 채널별 계수치는  $^3\text{H}$ 경우 보다 매우 높은 값을 보여주고 있음을 알 수 있다.  $^{14}\text{C}$  용액의 배경방사능 스펙트럼은 상대적으로 값이 매우 낮아 그래프에 나타나 있지 않다. 이것은  $^{14}\text{C}$ 에서 방출되는 베타선의 최대 에너지(0.156 Mev)가  $^3\text{H}$ 에서 방출되는 베타선의 최대에너지(0.018 Mev)보다 훨씬 커서 비정규성이 길기 때문에 광섬유의 섬광체에 도달하여 반응하는 수가 많기 때문인 것으로 분석된다.

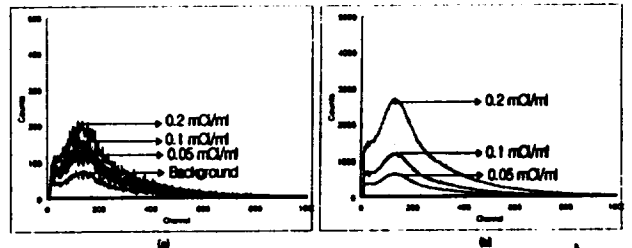


Fig. 4. Pulse-height spectrum measured with sensor of dia. 1mm for  $^3\text{H}$  (a) and  $^{14}\text{C}$  (b) solutions

Fig. 5는 직경 0.5 mm로 제작된 센서의  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$  용액에 따른 pulse height spectrum이다.

이 경우 역시 스펙트럼의 모양은 두 용액 간에 거의 동일하며 직경 1 mm로 제작된 광섬유센서 경우와도 거의 유사함을 알 수 있다. 하지만  $^3\text{H}$  용액의 0.2 mCi/ml 농도로 측정된 채널별 계수치 중 최대계수치에서 균일한 분포를 보이지 않고, 비정상적인 높은 계수치를 보이고 있다. 이의 원인에 대해서는 더 규명이 필요한 것으로 여겨진다.

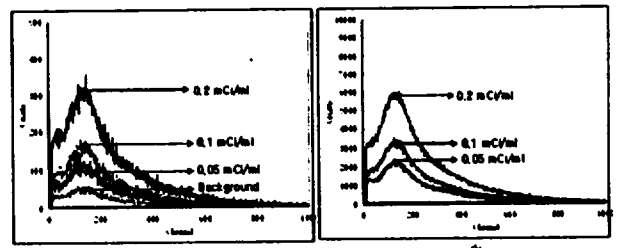


Fig. 5. Pulse-height spectrum measured with sensor of dia. 0.5mm for  $^3\text{H}$  (a) and  $^{14}\text{C}$  (b) solutions

앞서 2004년도에 방사능이용연구소 논문집에서 발표되었던 '플라스틱 섬광광섬유를 이용한  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$  방사선 측정에 관한 연구'의 원통형 센서의 파고 스펙트럼을 살펴보면 저차널에서의 방사능 계수치가 일정한 모양으로 나타남을 알 수 있다.

본 연구에 사용된 coincidence 회로용 센서의 측정 결과 앞서 연구된 원통형 센서의 저차널에서의 왜곡현상은 조금 없어졌음을 알 수 있다. 하지만 광의 노출이나 전기적 잡음에 의한 noise는 완전히 없어지지 않은 것으로 분석된다.

Fig. 6은 용액의 방사능 농도 변화에 따른 총계수치의 변화를 나타낸 그래프이다. 총계수치는 배경방사능 총계수치를 뺀 값이다. 두 종류의 선원에 대해서 용액의 방사능과 총계수치간에는 거의 비례관계가 성립됨을 볼 수 있다.

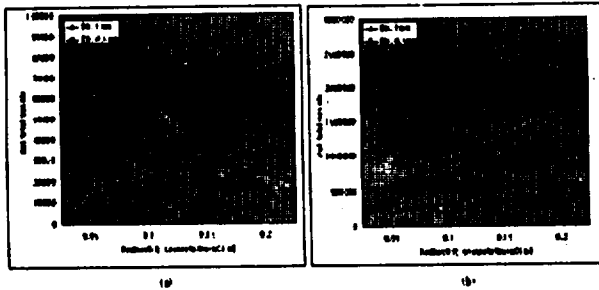


Fig. 6. Net total counts vs radioactivity concentration for  $^3\text{H}$  (a) and  $^{14}\text{C}$  (b) solutions

직경에 따른 방사능의 총계수치를 비교했을 때, 0.5 mm의 계수치가 1 mm보다 훨씬 더 높음을 알 수 있다. 이는 일정한 튜브에 광섬유를 다발로 매울 경우 상대적으로 많은 가닥을 묶을 수 있는 0.5 mm의 섬광광섬유가 용액과 접촉하는 단면적이 훨씬 크기 때문인 것으로 분석된다. 0.5 mm 센서의 경우  $^3\text{H}$  용액 0.2 mCi/ml인 총계수치가 비정상적으로 높음을 보이고 있는데, 이 또한 원인규명이 필요하다.

용액의 방사능 농도와 총계수치간에 완전한 비례관계는 관측 않았지만 비교적 양호한 선형적 관계가 유지됨을 관찰할 수 있다. 방사능 농도와 총계수치간에 완전한 비례관계가 성립되지 못한 이유 가운데는 센서부위와 전송용 광섬유와의 불

균일한 결합 상태, 접속부의 polishing 상태 등에 편차가 있었기 때문으로 분석된다.

## 결론

광섬유와 방사성 용액을 직접 접촉함으로써 광섬유를 활용한 저에너지 베타선 측정용 센서 개발의 가능성을 시험하기 위하여 직경이 1, 0.5 mm인 플라스틱 섬광광섬유를 다발형태로 묶어 coincidence 회로용 센서를 제작하였으며 이것을 사용하여  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$  용액의 방사능을 측정하는 실험을 수행하였다. 센서는 섬광광섬유의 양쪽 끝단을 알루미늄 튜브에 매어 넣고, 양쪽 모두 전송용 광섬유로 연결하여 방사능을 측정하는 형태를 제작하였다. 용액의 방사능 농도와 센서의 총계수치간에 어느 정도의 편차는 있었지만 비교적 양호한 선형적인 결과를 보였다. 시험 대상으로 삼은 용액의 방사능 농도는  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$  공통적으로 0.05, 0.1, 0.2 mCi/ml이다. 센서에서 발생한 광을 PMT로 수집하여 분석한 결과 각 선원용액에 대해서 두 가지 센서 모두 충분한 감도를 보였다.

$^{14}\text{C}$ 용액의 경우 최대 에너지가 0.018 MeV인  $^3\text{H}$ 보다 0.156 MeV로 훨씬 커서 각 차널별 계수치는  $^3\text{H}$ 경우 보다 매우 높은 값을 보여주었다. 직경에 따른 방사능의 총계수치를 비교했을 때, 0.5 mm의 계수치가 1 mm보다 훨씬 더 높음을 알 수 있다. 이는 일정한 튜브에 광섬유를 다발로 매울 경우 상대적으로 많은 가닥을 묶을 수 있는 0.5 mm의 섬광광섬유가 용액과 접촉하는 단면적이 훨씬 크기 때문인 것으로 분석된다. 본 연구에 사용된 coincidence 회로용 센서의 측정 결과 앞서 연구된 원통형 센서의 저차널에서의 왜곡현상은 조금 없어졌음을 알 수 있다. 하지만 광의 노출이나 전기적 잡음에 의한 noise는 완전히 없어지지 않은 것으로 분석된다.

## 감사의 글

이 논문은 한국과학재단 지질 방사선안전기술연구센터(ITRS)의 연구비 지원에 의해 수행된 결과입니다.

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

### 참고문헌

1. R. Van Green, "Optical Fibere Sensing and Systems in Nuclear Enviroments" Proceeding of SPIE, Vol 2425, Mol, Belgium, 1994.
2. 박찬희, 송성준, 박재우, "플라스틱 섬광광섬유를 이용한  $^3\text{H}$  및  $^{14}\text{C}$  방사선 측정에 관한 연구", 2004 방사선방어 및 방사성폐기물에 관한 추계 심포지움, 11.10-12, 2004, 제주
3. 教 木村, "光技術を用いた原子力計測の研究", 學位論文, 東京大學, 2001.
4. Francis T. S. Yu and Shizhuo Yin, "Fiber Optic Sensors", Marcel Dekker, 2002
5. Kyung Hwa Kim and Seung Ai Shin, "Electron-Capture Effects in Activity Determination of  $^{192}\text{Ir}$  by a  $4\pi$   $\beta$ - $\gamma$  Coincidence Counting Method". Journal of the Korean Physical Society, Vol.30, June 1997, pp. 241~246
6. Glenn. F. Knoll, "Radiation Detection and Measurement", John Wiley & Sons, Inc., 2000, 802 pp.