

플라스틱 섬광광섬유를 이용한 ^3H , ^{14}C 방사선 측정에 관한 연구

박찬희, 송성준, 박재우

제주대학교 방사선응용과학연구소
제주시 아라1동 1번지 690-756

A Study on Radiation Detection of ^3H , ^{14}C by Using Plastic Scintillating Fibers

Chan-Hee Park, Sung-June Song
and Jae-Woo Park

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

Abstract

Commercially available plastic scintillating fibers of Bicon model BCF-12 (0.5mm in diameter) have been used to detect beta rays emitted from ^3H , ^{14}C . The radiation sensor was constructed with thirty strands of the fibers being packed and inserted in an aluminum tube. Two kinds of sensors were made. The open type (sensor A) is a sensor for which one end of the fibers is open and the other end is coupled with a light-transmitting fiber. The closed type-sensor B(sensor B) is that for which the fibers are bent so that both ends are coupled with a light-transmitting fiber and a PMT. ^3H or ^{14}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 both types of sensors have enough sensitivities to measure the given radioactive concentrations. There were very little differences in the sensitivities between both types of the sensors. It is also found that both sensors are about 35-40 times more sensitive to beta rays from ^{14}C than from ^3H .

Key words : Plastic scintillating fiber, Radiation sensor, Beta rays, ^3H , ^{14}C

서 론

광섬유는 그 특성을 살려 현재 여러 가지 측정 센서로 이용되고 있으며, 원자력 분야에서도 다양한 목적의 센서의 대한 연구가 진행되고 있다¹⁾. 광섬유는 그 고유의 유연성, 경량·세경, 센서부의 전원공급의 불필요성 등과 같은 장점으로 미국, 일본 등지에서 방사선 계측수단으로 그 가능성이 인정된 바 있다^{2,3)}. 광섬유를 다발로 묶어서 감마선을 측정하는 센서로 개발할 수 있는 가능성은 문헌⁴⁾에 제시된 바 있다. 한편 플라스틱 섬광 광섬유(Plastic scintillating fiber)를 활용하여 오일의 ^3H 농도를 측정하는 기초적인 연구가 수행된 바 있다⁵⁾. 만일 광섬유를 활용하여 ^3H 이나 ^{14}C 이 포함된 액체의 방사능을 측정할 수 있는 방법이 개발된다면 기존의 액체섬광계수기(Liquid scintillating counter)를 대체할 수 있는 유용한 수단이 될 뿐 아니라 이러한 핵종으로 오염된 액체 폐기물에 직접 센서를 투입하여 방사능을 측정할 수 있는 길이 열릴 것이다. 본 연구에서는 직경이 0.5mm인 Bicon사의 플라스틱 섬광광섬유(Plastic scintillating fiber) BCF-12를 다발형태로 묶어서 알루미늄통기에 삽입한 형태의 방사선 센서를 제작하였으며 이를 활용하여 ^3H 및 ^{14}C 용액의 방사능을 측정된 결과를 제시한다. 센서는 광섬유의 한쪽 끝이 열려서 섬광광섬유에서 발생한 광의 일부가 이탈하

는 열린 형태와 광섬유를 구분러서 양쪽 끝에서 집광할 수 있는 닫힌 형태 두 가지를 제작하였다. 시험 대상으로 삼은 용액의 방사능 농도는 ^3H , ^{14}C 공통적으로 0.05, 0.1, 0.2 mCi/ml 이다. ^3H 과 ^{14}C 은 각각 최대에너지가 0.018MeV, 0.156MeV인 베타선을 방출하며 이들 가운데 일부는 광섬유의 피복을 관통하여 내부의 섬광체와 반응할 수 있을 것이다. 섬광체와 반응하여 발생한 광은 광섬유를 따라 이동하며 이것을 모아서 광전자증배관으로 관측하면 용액의 방사능 농도에 관한 정보를 알 수 있다.

재료 및 방법

1) 센서 제작

광섬유는 외가닥으로서는 방사선과의 반응확률이 낮기 때문에 직경 0.5mm 플라스틱 섬광광섬유 BCF 12를 Fig.1(a)과 같이 직경 4mm의 알루미늄 튜브에 다발형태로 배워 넣었다. 외부광을 차단하고 내부에서 발생된 광신호를 반사하여 누설을 최소화하기 위해 직경 17mm, 길이 105mm의 알루미늄(Aluminium) 케이스를 이용하여 제작하였다. Fig.1(b)는 0.5mm의 광섬유 30가닥(이하 sensor B)을 다발형태로 제작하였고, Fig.1(c)는 15가닥(이하 sensor A)을 구분러서 제작하였다. 두 센서가 전송용광섬유와 접속하는 부분의 플라스틱 섬광광섬유의 가닥수는 30가닥으로 동일하다. Sensor B인 경우 광섬유의 한쪽 끝이 열려 있어서 섬광체에서 발생한 광의 일부가 수집되지 않고 이

탈하지만 Sensor 양쪽 끝이 모두 전송용 광섬유와 접속되기 때문에 발생한 광이 모두 수집된다고 볼 수 있다. Fig. 2는 제작한 센서의 단면도를 보여주고 있다. 센서부의 광섬유 다발 끝은 FC connector를 통하여 직경이 3mm인 전송용 광섬유와 접속된다.

2) 광 측정 장치의 구성

광 측정 장치는 Fig. 3과 같이 센서 부분, 전송용 광섬유, 광전자 증배관(PMT : Photomultiplier tube), 주 증폭기(amplifier) 및 다중과고분석기(MCA : Multi channel analyzer)로 구성하였다. Bicon사의 BCF 12인 플라스틱광섬유섬광체의 방출 파장의 범위는 350~600nm이다. 따라서 전송용 광섬유는 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.

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 창의 직경이 8mm인 Hamamatsu 제품 H5784를 선정하였다. 주 증폭기는 Canberra Amplifier model 2012를 이용하였으며, Power supply는 PMT에 안정적인 전원공급 및 전지증폭

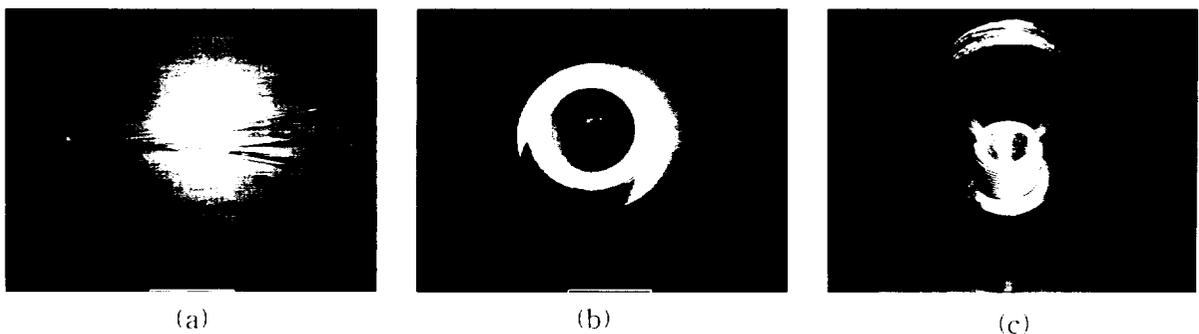


Fig. 1. Fiber bundle sensors

기에 동시에 전원을 공급할 수 있는 Hamamatsu 제품 C3830을 사용하였다. 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 30mm, 길이 200mm의 알루미늄 케이스를 제작하여 그 속에 센서를 넣을 수 있도록 하였고 섬광광섬유의 접속 부위와 연결될 수 있도록 밑 부분의 직경 4mm의 구멍을 만들어 전송용 광섬유가 통과할 수 있도록 제작하였다. 외부광의 유입을 차단하고 PMT, 알루미늄 센서와 전송용광섬유의 연결을 용이하게 하기 위하여 광통신용으로 널리 쓰이고 있는 FC 접속단자와 어댑터를 사용하였다.

3) 실험방법

방사선원인 ^3H 과 ^{14}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 0.05, 0.1, 0.2 mCi/ml ^3H 용액에 대해서 Sensor A와 Sensor B로 측정한 pulse height spectrum이다. 두 가지 Sensor의 파고 스펙트럼의

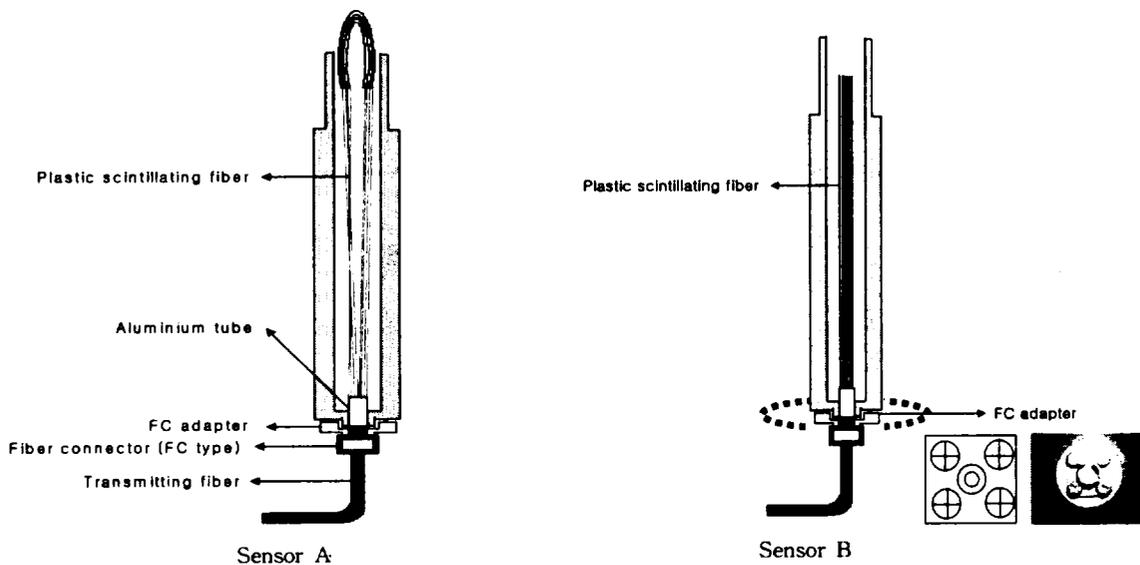


Fig. 2. Vertical cross section of the scintillating fiber sensor.

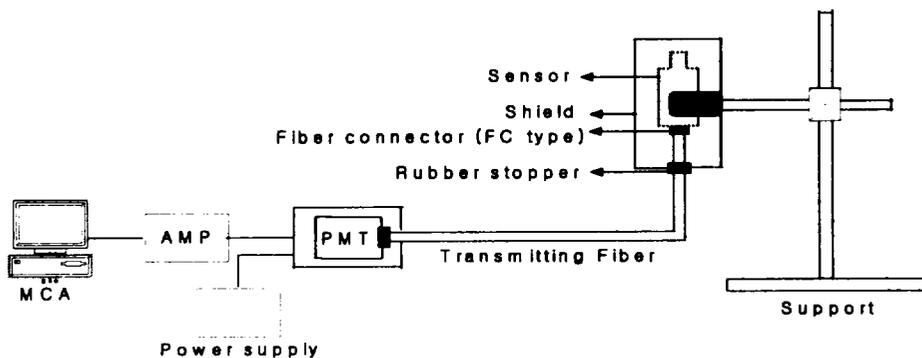


Fig. 3. Experimental setup for measuring the scintillation from the sensors.

모양은 거의 동일하나 최대 계수치에서 Sensor A의 값이 약간 높은 값을 보이고 있음을 알 수 있다. 한편 저에너지 채널에서 계수치가 높아지는 양상을 보이고 있는데 이러한 경향은 배경방사능 계수치에서도 나타나고 있다. 이것은 한 두 가닥의 광섬유에서 산발적으로 발생한 광이 수집된 결과로 해석된다. 여러 가닥의 광섬유에서 동시에 발생한 광을 수집한 경우에는 높은 pulse가 발생하여 높은 채널에서 계수되지만 한 두 가닥의 광섬유에서 산발적으로 발생한 광이 수집된 경우에는 pulse의 높이가 낮기 때문에 낮은 채널에서 계수된다.

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

Fig. 6은 용액의 방사능 농도 변화에 따른 총계수치의 변화를 나타낸 그래프이다. 총계수치는 배경방사능 총계수치를 뺀 값이다. 전반적으로 농도가 낮아질수록 계수효율이 감소하는 경향을 보이

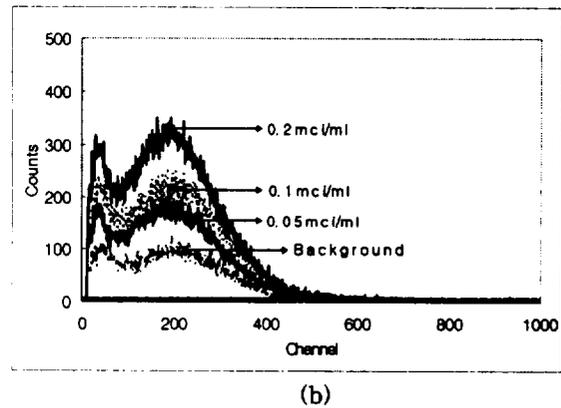
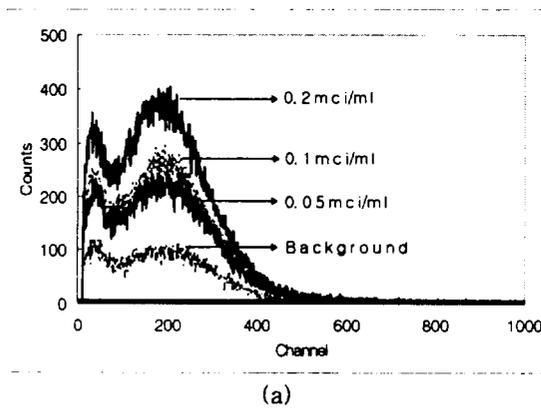


Fig. 4. Pulse-height spectrum measured for different concentration of ^3H solution with sensor A (a) and sensor B (b)

Fig. 5는 0.05, 0.1, 0.2 mCi/ml ^{14}C 용액에 대해서 Sensor A와 Sensor B로 측정된 pulse height spectrum이다. 이 경우 역시 스펙트럼의 모양은 두 센서간에 거의 동일하며 ^3H 경우와도 거의 유사함을 알 수 있다. 그러나 각 채널별 계수치는

고 있으나 Sensor A는 ^3H 용액의 0.05 mCi/ml 농도에서 비정상적으로 계수치가 높은 값을 보이고 있음을 알 수 있다. 이의 원인에 대해서는 더 규명이 필요한 것으로 여겨진다. 센서 A가 센서 B보다 발생된 높은 계수치를 보이고 있는데 이는

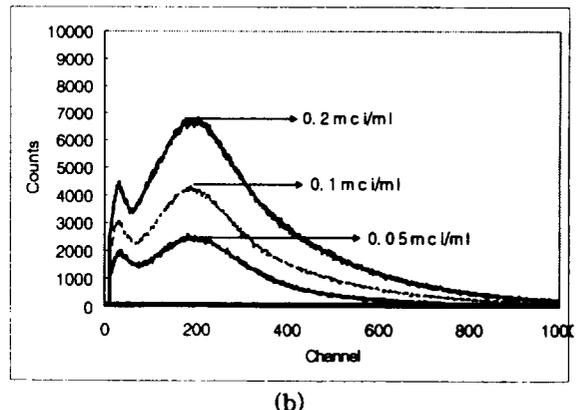
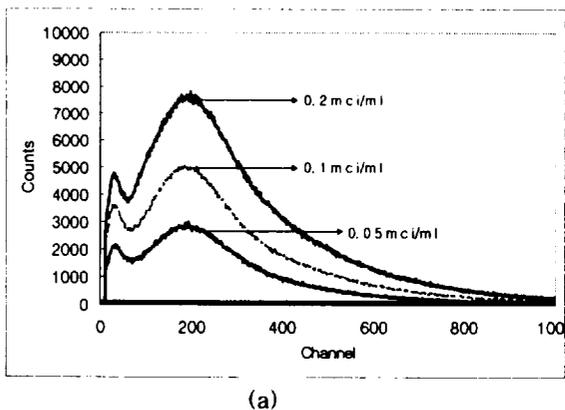
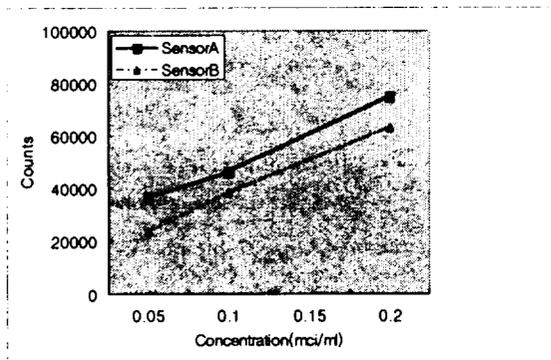


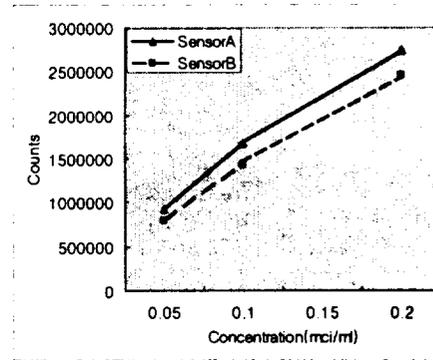
Fig. 5. Pulse-height spectrum measured for different concentration of ^{14}C solution with sensor A (a) and sensor B (b)

센서 B인 경우 열려 있는 한쪽 끝으로 광이 새어나가기 때문인 것으로 분석된다. 광 손실을 줄일 수 있도록 구부린 형태로 제작된 센서 A는 더 많은 신호가 측정되었다. 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 불균일한 결합 상태, 접속부의 polishing 상태 등에 편차가 있었기 때문으로 분석된다. ^{14}C 용액인 경우 측정된 총계수치의 크기에 근거하여 볼 때 본 연구에 사용된 방사능 농도보다 훨씬 낮은 μCi 범위에서도 사용 가능함을 알 수 있다.

호한 선형적인 결과를 보였다. 시험 대상으로 삼은 용액의 방사능 농도는 ^3H , ^{14}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. Sensor B의 경우 Sensor A보다 ^3H 용액에 대해서는 약 20%정도 높은 감도를 보였으며, ^{14}C 용액에 대해서는 11-16%의 높은 감도를 보였다. 각 선원에 대한 센서의 감도를 비교한 결과 0.0186Mev 베타선을 방출하는 ^3H 에 비하여 0.156Mev의 베타선을 방출하는 ^{14}C 에 대해서 두 가지 센서 모두 35-40배의 높은 감도를 보였다. ^{14}C 용액인 경우 본 연구에 사용된 방사능 농도보다 훨씬 낮은 μCi 범위에서도 적용 가능함을 알 수 있었다.



(a)



(b)

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

결론

광섬유와 방사성 용액을 직접 접촉함으로써 광섬유를 활용한 저에너지 베타선 측정용 센서 개발의 가능성을 시험하기 위하여 직경이 0.5mm인 플라스틱 섬광광섬유를 다발형태로 묶은 센서를 제작하였으며 이것을 사용하여 ^3H , ^{14}C 용액의 방사능을 측정하는 실험을 수행하였다. 센서는 광섬유의 한쪽 끝이 열려서 광의 일부가 이탈하는 열린 형태(Sensor B)와 광섬유를 구부려서 양쪽 끝에서 집광할 수 있는 닫힌 형태(Sensor A) 두 가지를 제작하였다. 용액의 방사능 농도와 센서의 총계수치 간에 어느 정도의 편차는 있었지만 비교적 양

감사의 글

※ 이 논문은 한국과학재단 지정 방사선안전신기술연구센터(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. 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. Jae Woo Park and Gye Hong Kim, "Detection of Gamma Rays Using Plastic Scintillating Fiber", J. Nucl. Sci. Tech. supplement 4, 2004.
5. D. R. Krause, C. F. Draut, and J. F. Van Patten, "Real-time fiver optic tritium monitoring in fluids", WM'01 Conference, February 25-March 1, 2001, Tucson, Arizona.