

碩士學位論文

플라스틱 섬광광섬유를 활용한
저에너지 베타선 측정



濟州大學校 大學院

에너지 工學科

朴 贊 姬

2005年 12月

플라스틱 섬광광섬유를 활용한 저에너지 베타선 측정

指導教授 朴 在 雨

朴 贊 姬

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



朴贊姬의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 鄭 釩 津

委 員 朴 在 雨

委 員 劉 榮 勳



濟州大學校 大學院

2005年 12月

Detection of Beta-rays by using Plastic Scintillating Fibers

Chan-Hee Park

(Supervised by professor Jae-Woo Park)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement
for the degree of Master of Science

2005. 12.

This thesis has been examined and approved.



세주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

.....
Thesis director, Jae-Woo Park, Prof. of Nuclear and Energy Engineering
.....
.....
.....

.....
Date

Department of Nuclear & Energy Engineering
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

LIST OF FIGURES	iii
LIST OF TABLES	vi
SUMMARY	vii
I. 서 론	1
II. 이론적 배경	3
1. 섬광광검유투의 특성	3
1) 섬광광검유투의 구조 및 종류	3
2) 섬광광검유투의 신호발생 및 전송	6
2. 섬광계측원리	8
1) PMT	8
2) MCA	14
3. 섬광광검유투를 활용한 방사선 계측 방법	16
1) 플라스틱 섬광광검유투를 활용한 X-ray imaging	16
2) Time-of-Flight(TOF)기술과 PSF를 활용한 중성자 방사선 분포 센서	17
3) 광검유투를 활용한 실시간 트리튬 모니터링	18
4) ELSA(Electron Stretcher Accelerator)의 Crystra Barrel 실험장치에 사용되는 섬광광검유투 검출기	20

III. 실험장치 및 실험방법	21
1. 센서모형	21
1) Non-coincidence 회로 측정용 원통형 센서 제작	22
2) Coincidence 회로 측정용 센서 제작	24
2. 신호전송용 광섬유의 특징	25
3. 신호처리 장치 및 구성	27
1) Non-coincidence 회로	27
2) Coincidence 회로	29
3. 방사선원 ^3H , ^{14}C 용액 측정 방법	31
IV. 실험결과 및 고찰	32
1. 원통형 센서에 대한 non-coincidence 회로 측정 실험	32
2. Coincidence 회로 측정용 센서에 대한 실험	43
V. 결 론	48
참 고 문 헌	50



LIST OF FIGURES

Fig. 1.	Structure of the optical fiber	4
Fig. 2.	Transmission principal of the optical fiber	6
Fig. 3.	Basic configuration of a PM tube	10
Fig. 4.	The spectral sensitivity of a number of photocathode materials of interest in PM tube	10
Fig. 5.	Basic elements of a PM tube	12
Fig. 6.	Spectral sensitivity of the anode in the PM tube(H5784)	13
Fig. 7.	Functional block diagram of a typical MCA	14
Fig. 8.	Block diagram of a linear ramp(Wilkinson type) ADC	15
Fig. 9.	Irradiation position using an intensified camera	16
Fig. 10.	Imaging system using a fiber array, showing a pattern of trace detection	17
Fig. 11.	Schematic view of the long range radiation distribution monitor ..	17
Fig. 12.	Measuring system for TOF method	18
Fig. 13.	Measurement system for the ^3H concentration in the tritiated oil ·	19
Fig. 14.	Fiber optic probe assembly for measuring the ^3H concentration in the tritiated oil	19
Fig. 15.	(a) Inner-detector before its installation into the Crystal Barrel. (b) Outer layer of the inner-detector before all fibres were fixed on the support tube	20
Fig. 16.	Emission spectrum for Plastic scintillating fiber (BCF-12)	22
Fig. 17.	Fiber bundle sensors for non-coincidence circuit measurement	23
Fig. 18.	Vertical cross section of the scintillating fiber sensor for non-coincidence circuit measurement	23
Fig. 19.	Fiber bundle sensor for coincidence circuit measurement	24

Fig. 20.	The upper view of the coincidence measurement sensor	24
Fig. 21.	Vertical cross section of the scintillating fiber sensor for coincidence circuit measurement	25
Fig. 22.	Attention spectrum of the transmitting fiber(Edmund Optics Inc.)	26
Fig. 23.	Experimental setup for the non-coincidence measurement	28
Fig. 24.	PMT adapter used to couple the transmitting fiber with the window of PMT	28
Fig. 25.	Experimental components for the measurement	29
Fig. 26.	The aluminum case used for preventing the external light from entering the sensor	29
Fig. 27.	Experimental setup for coincidence circuit measurement	30
Fig. 28.	The pipette for pouring radioactive solution into the sensors	31
Fig. 29.	The pulse height spectra measured with the open type sensor for the ^3H sources (1mm diameter fibers)	33
Fig. 30.	The pulse height spectra measured with the open type sensor for the ^{14}C sources (1mm diameter fibers)	34
Fig. 31.	The total number of counts vs radioactivity concentration measured with the open type sensor with and without reflector on the open end	35
Fig. 32.	The pulse height spectra measured with the closed type sensor for the ^3H sources (0.5mm diameter fibers)	37
Fig. 33.	The pulse height spectra measured with the open type sensor for the ^3H sources (0.5mm diameter fibers)	37
Fig. 34.	The pulse height spectra measured with the closed type sensor for the ^{14}C sources (0.5mm diameter fibers)	38
Fig. 35.	The pulse height spectra measured with the open type sensor for the ^{14}C sources (0.5mm diameter fibers)	38

Fig. 36. The net total count with respect to the radioactivity concentration of ^3H sources (0.5mm diameter fibers)	40
Fig. 37. The net total count with respect to the radioactivity concentration of ^{14}C sources (0.5mm diameter fibers)	40
Fig. 38. The pulse height spectra measured for ^{14}C in $\mu\text{Ci/ml}$ concentrations with the closed type sensor. (0.5mm diameter fibers)	41
Fig. 39. The net total count with respect to the radioactivity concentration of ^{14}C in $\mu\text{Ci/ml}$ (0.5mm diameter fibers)	41
Fig. 40. The net total count measured for ^3H with the open type sensors constructed with fibers of different diameters	42
Fig. 41. The net total count measured for ^{14}C with the open type sensors constructed with fibers of different diameters	42
Fig. 42. The pulse height spectra measured using the coincidence circuit for the ^3H sources (1mm diameter fibers)	44
Fig. 43. The pulse height spectra measured using the coincidence circuit for the ^{14}C sources (1mm diameter fibers)	44
Fig. 44. The pulse height spectra measured with the sensor by using coincidence circuit for the ^3H sources (0.5mm diameter fibers) ...	45
Fig. 45. The pulse height spectra measured with the sensor by using coincidence circuit for the ^{14}C sources (0.5mm diameter fibers) ...	45
Fig. 46. The total count measured for ^3H with the sensor by using coincidence circuit constructed with fibers of different diameters ·	46
Fig. 47. The total count measured for ^{14}C with the sensor by using coincidence circuit constructed with fibers of different diameters ·	46
Fig. 48. Comparison of the cross sectional areas using fibers of different diameters	47

LIST OF TABLES

Table 1. Specification of a PM tube (H5784)	13
Table 2. Properties of the plastic scintillating fiber (BCF-12)	21
Table 3. Physical properties of the optical fibers	26



SUMMARY

Optical fibers have been used as sensing materials in various nuclear applications. Optical fiber sensors have proven to present several advantages as compared with other conventional sensors. They can be prepared in very small sizes and they are light enough to be easily put into very narrow channels such as between nuclear fuel rods. No electrical power is needed to the sensor part so they are less susceptible to troubles in harsh environments such as underground and underwater.

Optical fiber sensors cost relatively cheap to make, so that they are more suitable for multi-point radiation monitoring such as in nuclear power plants, accelerators, fusion study facilities. If one develops radiation sensors using scintillating optical fibers, that can directly measure the concentration of ^3H or ^{14}C in radioactive liquid, they can be useful tools to substitute the current liquid scintillation counters. They can be also used to measure the radioactivity of liquid radioactive wastes by dipping into the liquid wastes.

Recently, several new scintillating materials of high density and low hygroscopicity have been found, and they can be transformed into good radiation-detection tools when they are combined with optical fibers.

In this study, we have used commercially available plastic scintillating fibers of Bicon model BCF-12 (0.5mm, 1mm in diameter) to detect beta rays emitted from ^3H , ^{14}C .

Several types of radiation sensors were constructed : each was constructed with thirty strands of the fibers being packed an aluminum tube. The optical signals generated inside the fiber bundle were converted into electrical pluses by a photomultiplier tube(PMT). The pulses were counted either through a

non-coincidence circuit or a coincidence circuit.

Two types of sensors were constructed for the non-coincidence counting. 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) is the one for which the fibers are bent so that both ends are coupled with a light-transmitting fiber leading to a PMT. For the fiber of 1mm diameter, only open type sensor was constructed due to the difficulty of bending. ^3H or ^{14}C solution was poured into the sensor and a direct contact was made between the solution and the fibers.

For the coincidence circuit counting, each end of the sensor was connected with a transmission fiber which is connected to a PMT. The electrical pulse signals are fed into the coincidence circuit from which the output signals are supplied to an MCA system.

The radioactive concentration of the solution is commonly 0.05, 0.1 and 0.2 mCi/ml for the ^3H and ^{14}C solutions. For the ^{14}C solution, the sensors were also tested for the radioactive concentration of 1, 3 and 5 $\mu\text{Ci/ml}$. For the sensors considered, we measured the pulse height spectra using an MCA, and investigated the proportionality between the total number of counts and the radioactivity of the radiation sources.

We have found that the two types (the open and closed types with 0.5mm fibers) of fiber sensors show sufficient sensitivities for radioactive concentrations of 0.05, 0.1, 0.2 mCi/ml ^3H and ^{14}C . They also show measurable sensitivities for the ^{14}C solution of μCi order. Fairly good proportionalities are found between the total number of counts and the radioactive concentration of the sources.

In case of coincidence circuit, has shown good linearities between the radioactivity concentration and the total number of counts for the sensor as long as the non-coincidence is within the measurable limits. But, noise that it

was occur at a low channel for non-coincidence measurement remarkably decreased.

Both of the method, it is also found that the sensors are about 11-40 times more sensitive to beta rays from ^{14}C than from ^3H , and the sensor constructed with 0.5mm fibers has higher sensitivities than the sensor constructed with 1mm fibers.



I. 서 론

광섬유는 그 특성을 살려 현재 여러 가지 측정 센서로 이용되고 있으며, 원자력 분야에서도 다양한 목적의 센서의 대한 연구가 진행되고 있다[R. Van Green, 1994]. 광섬유는 그 고유의 유연성, 경량·세경, 센서부위의 전원공급의 불필요성 등과 같은 장점으로 미국, 일본 등지에서 방사선 계측수단으로 그 가능성이 인정된 바 있다[敦 木村 2001, Francis T. S. Yu 등 2002].

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 원자력발전소, 가속기, 방사성폐기물 처분장 등에 센서를 분산, 배치하여 여러 곳의 방사능을 한 곳에서 집중하여 감시하는데 유용하게 적용할 수 있다.

광섬유를 활용한 방사선계측방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째는 광섬유에 섬광을 일으키는 성분을 첨가하여 방사선과 반응하여 섬광을 발생시키는 방법이고, 둘째는 광섬유 끝에 부피가 큰 섬광체를 결합하여 섬광을 발생시키는 방법이다.

전자의 경우로써 광섬유를 다발로 묶어서 감마선을 측정하는 센서로 개발할 수 있는 가능성을 나타내는 연구가 수행되었다[김계홍 등 2004]. 한편 플라스틱 섬광광섬유(Plastic scintillating fiber)를 활용하여 오일의 ^3H 농도를 측정하는 기초적인 연구가 수행된 바 있다[D. R. Krause 등 2001].

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. 후자의 경우, 현재 섬광체는 밀도가 높고 흡습성이 없는 새로운 소재가 많이 개발되고 있고

이들을 광섬유와 조합한다면 좋은 방사선 계측수단이 될 수 있다.

특히 플라스틱 섬광광섬유의 경우, 일반 광섬유와 비교하여 측면과 끝단에서 모두 빛을 받아들이고 방출하는 장점으로 방사선계측 분야에서 유용하게 사용되고 있다.

본 연구에서는 직경이 0.5mm, 1mm인 Bicron사의 플라스틱 섬광광섬유(Plastic scintillating fiber) BCF-12를 다발형태로 묶어서 알루미늄용기에 삽입한 형태의 방사선 센서를 제작하였으며 이를 활용하여 ^3H 및 ^{14}C 용액의 방사능을 측정할 결과를 제시하였다. 센서는 광섬유의 한쪽 끝이 열려서 섬광광섬유에서 발생한 광의 일부가 이탈하는 열린 형태와 광섬유를 구부려서 양쪽 끝에서 집광할 수 있는 닫힌 형태 두 가지를 제작하였다. 또한 광섬유의 양쪽 끝에서 동시에 받은 신호만 계측할 수 있는 센서를 제작하였다. 시험 대상으로 삼은 용액의 방사능 농도는 ^3H , ^{14}C 공통적으로 0.05, 0.1, 0.2 mCi/ml이다.

^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. 비교적 에너지가 높은 ^{14}C 에 대해서는 1, 3, 5 $\mu\text{Ci/ml}$ 농도로 희석시켜 추가로 실험하였다.



직경 1mm인 센서에 대해서는 단면적이 넓은 특성을 살려 Bicron사의 반사체를 이용하여 광섬유의 끝 즉, 열린 부분에 얇게 입혀서 더 높은 검출 효율을 기대하였다.

신호전송용 광섬유의 경우 플라스틱형 제품을 이용하여 방사선 계측에 적용하였다. 센서로부터 발생하는 광 신호는 광섬유를 따라 이동하며 광전자증배관(PMT : Photo-Multiplier Tube)에서 전압신호로 변환되고 이 신호가 다시 증폭기에서 증폭된 후 다중과고분석기로 채널별 계수치로 출력하였다.

II. 이론적 배경

1. 섬광광섬유의 특성

1) 섬광광섬유의 구조 및 종류

광섬유는 빛을 전송하는 내부의 코어와 코어에서 빛의 전반사가 이루어지도록 굴절률을 달리한 클래딩으로 구성된다. 빛의 전반사와 관련하여 클래딩의 굴절률은 코어의 굴절률에 비해 1%정도 낮으며 굴절률이 1.47인 코어와 1.46인 클래딩이 일반적으로 사용이 된다. 광섬유는 크게 코어(core)라고 부르는 중앙의 원통형 물질, 이를 원통형으로 에워싸고 있는 클래딩(cladding)과 이들을 뒤덮고 있는 재킷(jacket)으로 구성된다. 코어는 광파를 전달하고, 클래딩은 광파를 코어 내로 유지시키며 코어에 강도를 제공한다. 재킷은 광섬유를 수분과 부식으로 부터 보호한다. Fig. 1은 플라스틱 광섬유의 기본구조를 나타내고 있다[정원채 등 2000].

클래딩과 코어는 유리나 플라스틱으로 만들어진다. 즉, 이 두 물질을 이용해 플라스틱 코어/클래딩, 유리 코어/플라스틱 클래딩, 유리의 코어/클래딩과 같은 세 가지 형태의 광섬유가 얻어진다. 플라스틱이 이용되는 경우, 코어는 보통 폴리스티렌(polystyrene)이나 폴리메틸 메타크릴레이트(polymethyl methacrylate)가, 클래딩은 실리콘이나 테프론(teflon)이 사용된다. 유리는 일반적으로 모래를 구성하는 실리카(silica)이다. 이 실리카는 지구 표면의 26%를 차지한다. 반면 구리는 단지 0.01% 정도 뿐이다. 광섬유에 있어 실리카는 매우 순수하지만, 붕소(B), 게르마늄(Ge), 인(P) 등의 아주 미량의 불순물(dopants)이 광섬유의 굴절 계수를 변화시키기 위해 첨가된다. 붕소 산화물(boron oxide)은 클래딩으로 이용되는 붕소 규산염 유리(borosilicate glass)를 형성하기 위해 실리카에 첨가된다.

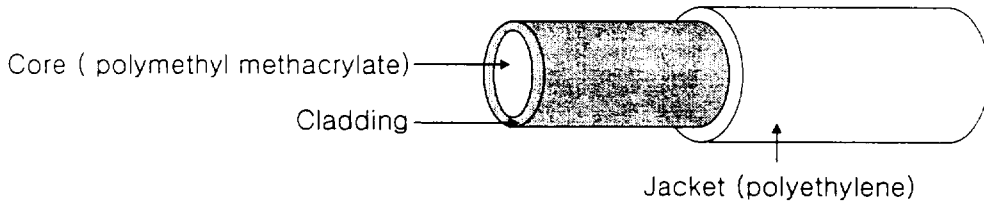


Fig. 1. Structure of the optical fiber

광섬유는 일반적으로 매질의 종류나 코어의 굴절률 및 전파되는 빛의 모드에 의해 분류된다. 사용 매질에 따라 현재 가장 많이 사용되고 있는 제품으로는 코어와 클래딩을 석영계 유리나 실리카 유리로 제조한 유리섬유, 코어는 유리로 클래딩은 플라스틱으로 제조한 PCF(Plastic-Clad Silica Fiber)섬유 그리고 코어와 클래딩을 플라스틱으로 제조한 플라스틱 광섬유로 분류된다.

(1) 석영계 광섬유

석영계 광섬유는 SIMMF, GIMMF 그리고 단일모드 광섬유가 제품화되어 있으며 코어의 굴절률 분포, 코어지름, 코어와 클래딩의 굴절률 차이가 다르다. 각 광섬유는 코어내에 있어서 광의 전반사 모양이 다르고 특성면에서는 전송대역에 큰 차이가 있다.

(2) 다성분 광섬유

다성분 광섬유는 SiO_2 에 Na_2O , B_2O_3 , K_2O 등의 산화물을 도핑한 유리섬유로 기존의 석영계 광섬유에 비해 낮은 비용으로 저손실, 광대역을 실현할 수 있어 근래에 들어 활발한 연구가 진행되어 기존의 의료용 광섬유 스킵프등의 용도에서 광통신으로의 응용이 급속히 진행되고 있다.

일반적으로 B_2O_3 광섬유는 장파장대에서 높은 전송손실을 나타내기 때문에 현재 거의 이용되지 않고 있다. 현재 SiO_2 의 굴절률을 증가시키기 위하여 Al_2O_3 를 도핑하는 방법이 연구되고 있으나 희귀원소이기 때문에 상용화가 이루어지지 않고 있다. 이외에 soda-lime-silicate나 sodium borosilicate 다성분 광섬유는 기

존 광섬유 처리기술을 이용할 수 있다는 측면에서 많은 연구가 이루어져 왔지만, 성능면에서 떨어진다.

(3) 플라스틱 클래딩 광섬유

플라스틱 클래딩 광섬유는 석영계 유리로 된 코어에 플라스틱 클래딩을 입힌 광섬유로써 코어와 클래딩의 굴절률 차이가 크다. 특히 플라스틱 클래딩 광섬유는 지름이 크고, 개구수가 높고 손실특성이 우수하여 광데이터 링크로 실용화되고 있다. 기존의 클래딩재로써 실리콘 수지가 사용되어 왔는데, 경도가 높은 불화성 아크릴레이트 수지를 사용한 플라스틱 클래딩 광섬유가 개발되고 있다. 이 플라스틱 클래딩 광섬유는 현장 조립형 광커넥터의 광섬유 고정방법으로서 주목받고 있는 압착방식에의 적용방식이 높고 나아가 전송손실의 저온 특성도 개선되고 있다. 특히, 플라스틱 광섬유와 함께 플라스틱 클래딩 광섬유는 대역폭-중계거리가 적절한 광통신 시스템에의 응용이 급속히 전개되고 있다. 현재 상용화되고 있는 플라스틱 클래딩 광섬유는 코어 직경이 110과 200 μm 로 크며, 개구수도 0.608로 높은 편이다. 특히, 850nm의 입사과장에 대한 감쇠율이 6dB/km로 광통신에의 응용이 충분하다. 플라스틱 클래딩 광섬유는 전송손실이 5-7dB/km, 전송대역-중계거리가 5~10MHz-km가 실용화되고 있으며, 1km 이하의 단거리 데이터 링크나 화상전송에 적용되고 있다.

(4) 플라스틱 광섬유

플라스틱 광섬유는 유연성, 코어직경, 개구수 등에서 뛰어난 단거리 응용분야에서 저가의 이점으로 기존의 석영계 광섬유를 급속히 대체해 나가고 있다.

플라스틱 광섬유는 고순도 아크릴(PMMA : Polymethyl methacrylate)으로 된 Core와 특수 불소 폴리머(F-PMMA: Fluorine Polymethyl methyl methacrylate)로 만들어진 얇은 Clad층으로 구성되어 있다. Clad의 굴절율이 Core보다 낮으므로 광섬유의 한쪽 끝단으로부터 들어온 빛은 Core와 Clad의 접속 면에서 전반사(Total-Reflection)를 일으켜 Core를 통하여 다른 광섬유 끝단으로 나간다. Core의 굴절율은 1.495, Clad의 굴절율은 1.402이다. 수광각도는 광섬유가 끝단에서

빛을 수용할 수 있는 각도인데, 플라스틱 광섬유의 수광각도는 0.5, 즉 60° (Light acceptance : 2θ)이다.

플라스틱 광섬유의 장점중의 하나는 광섬유 당 면적대비 Core의 비율이 매우 크다는 것이다. 예를 들면, 1mm Out-dia규격의 광섬유 Core dia는 0.98mm, Clad dia는 0.02mm이므로 광섬유 단면적 대비 Core의 비율은 98%이다. 이는 플라스틱 광섬유의 빛 전달 효율이 매우 높다는 것을 보여준다.

2) 섬광광섬유의 신호발생 및 전송

Fig. 2는 광섬유 내에서 빛의 진행방향을 도식화 한 것이다. 코어로 주입된 빛은 임계각보다 큰 각도로 클래딩 접속면으로 입사되면, 입사각과 같은 각도로 반사하여 전파하게 된다. 만약 입사각이 임계각보다 작은 경우 클래딩 접속면에서의 빛은 급속히 감쇠하게 된다. 또한 빛이 대기에서 광섬유로 입사되는 경우 굴절하게 되며, 빛의 전파는 코어와 클래딩의 굴절률에 의해 결정된다. 이를 공식화한 것이 Snell의 법칙이다. 즉, 굴절률이 서로 다른 두 매질 간의 경계면에서 굴절률이 높은 매질에서 굴절률이 낮은 매질로 빛이 임의의 각으로 입사할 때 어느 임계각에 도달하게 되면 굴절현상이 없어지고 완전히 반사하게 된다. 이를 전반사라고 한다.

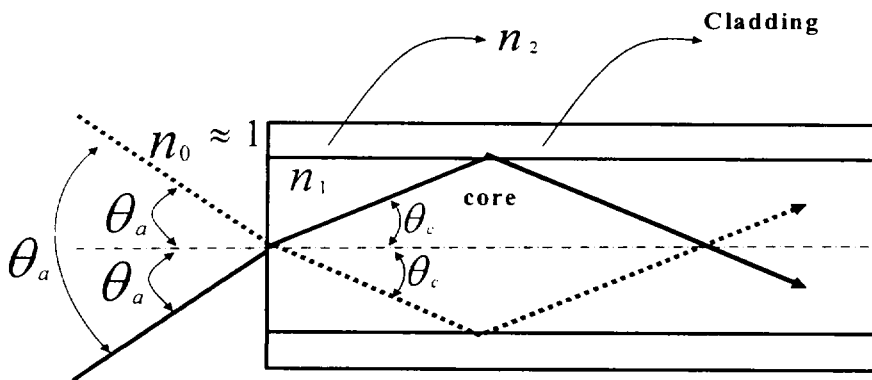


Fig. 2. Transmission principal of the optical fiber

광섬유에서의 빛의 전파특성은 광섬유의 크기, 광섬유의 구성매질, 광섬유로 주입되는 빛의 특성에 의해 일반적으로 좌우된다. 그리고, 광섬유의 분류는 위의 3가지 요소간의 관계에 의해 이루어진다. 사람 머리털의 직경이 일반적으로 100 μm 이므로 광섬유의 직경이 얼마나 작은지 알 수 있을 것이다. 일반적으로 광섬유는 직경으로 표현되며, 먼저 코어의 직경을 적는다. 즉, 50/125는 코어의 직경이 50 μm , 클래딩의 직경이 125 μm 인 광섬유를 나타낸다. 광섬유에서의 빛의 전파를 결정짓는 주요 요인으로는 개구수, 전송손실 그리고 분산 등이 있다.

(1) 개구수(NA: Numerical Aperture):

개구수는 광섬유로 입사되는 빛의 수광 가능 최대각을 표시하는 매개변수이다. 즉, 광섬유에 빛이 입사했을 때 광섬유 내에서 전반사가 가능한 입사각보다 작은 각으로 입사해야 빛이 광섬유의 다른 끝으로 진행한다. 전반사가 가능한 입사각보다 큰 각으로 입사한 빛은 광섬유 내에서 굴절되어 전달되지 않는다. 전반사가 가능한 최대 입사각의 값을 개구수라고 한다. 개구수는 코어의 굴절률이 n_1 , 클래딩의 굴절률이 n_2 일 때 아래와 같은 식으로 주어지며 보통 통신용 광섬유의 경우 단일모드가 0.316정도, 다중모드인 경우 0.447~0.548정도이다. 광섬유 내로 입사되는 빛의 입사각이 클수록 코어 내에 집속 되는 에너지의 양이 커지므로 개구수가 클수록 유리하다.

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

(2) 전송손실

광섬유로 전파되는 빛은 산란, 흡수 등 재료자체에 의한 에너지 손실과 OH이온 조적 불안정에 의하여 전송 손실을 지니게 된다. 특히, 구조적 불안정에 의한 손실은 거의 제조조건에 의해 결정되므로 제조시 주의하여야 한다. 현재의 통신용 광섬유의 전송손실은 거의 이론값에 접근한 상태이며, 단일모드 광섬유의 경우 1300nm파장에서 0.5dB/km, 1550nm에서 0.2dB/km 정도이다. 전송손실은 광섬유

의 입사면에 입사된 빛이 다른 출력면으로 진행하는 경우에 이 두 점 간의 광전력의 감소를 나타낸다.

(3) 분산

광펄스가 광섬유를 통해 전송될 때 각각의 광펄스는 폭이 증가되는 등 변형이 이루어지게 되어 펄스가 서로 겹치게 된다. 이런 현상은 수신기 단에서 검출된 신호의 에러를 증가시킴으로써 광섬유 전송로의 정보전송용량을 제한하게 되는 요소로 작용하며, 이를 분산이라고 한다. 일반적으로 분산을 전파모드의 변형과 색의 변형 두 가지가 발생하게 된다. 모드분산은 광섬유를 진행하는 전파모드에 따른 전송경로가 다르기 때문에 도착시간 차가 발생하여 신호 광 펄스가 벌어지는 현상을 말한다. 색분산은 광섬유 재료인 유리의 굴절률이 진행하는 빛의 파장에 따라 차이가 생김으로써 발생하는 분산으로 이로 인해 도착시간 차가 발생하여 신호 광 펄스가 벌어지는 현상을 말한다.

2. 섬광계측원리



방사선은 섬광체내의 원자나 분자를 들뜨게 하는데, 이 들뜬 에너지가 빛으로 방출되는 것을 섬광(scintillation)이라고 한다. 섬광은 할로젠화알칼리나 황화아연 등의 무기결정에서는 전도띠(conduction band)로 들뜨게 된 전자가 발광중심인 격자결함이나 불순물 원자에 포착되어 발광하는 것이며, 발광세기나 스펙트럼 및 감쇠시간은 발광중심의 종류나 농도 및 발광중심과 모체결정의 조합에 크게 좌우된다. 발광스펙트럼은 일반적으로 가시광선영역 및 자외선영역에 있으며 감쇠시간은 $10^{-9} \sim 10^{-3}$ s 정도가 된다.

방사선이 섬광체에 부딪치면, 많은 여기분자를 생성시키는데, 이 들뜬 분자는 바닥상태로 되돌아갈 때 섬광을 방출한다. 1개의 방사선에는 1개의 섬광이 대응한다. 발생한 섬광을 광전자증배관을 통해 전류펄스로 변환, 증폭시켜 그 계수치

에서 입사방사선의 수를 구한다. 또한 얻은 전류펄스의 파고는 입사방사선의 에너지에 비례하기 때문에 펄스파고로부터 입사방사선의 에너지를 분석할 수 있다. 섬광체는 방사선을 섬광으로 변환하는 작용을 하고, 광전자증배관은 광전효과를 이용하여 그 빛을 전류로 변환, 증폭시키는 작용을 한다[G.F.Knoll, 2000].

1) PMT(Photomultiplier Tube, 광전자 증배관)

PMT는 Photomultiplier Tube의 줄임말로써 광전자 증배관이라고 한다. PMT는 광전효과와 전자 증폭 원리는 이용하는 가장 감응도가 좋은 검출기로써, 광자 하나씩 셀 수 있을 정도로 민감한 검출기로 널리 사용된다.

(1) PMT의 원리

섬광물질에 방사선의 에너지가 흡수됨에 따라 방출되는 가시광선의 양은 극히 미약하므로 Fig. 3과 같이 광전자증배관(PMT)을 이용하여 출력신호를 증폭시킬 필요가 있다. 가시광선이 광음극과 반응하여 생성되는 광전자는 순차적으로 높은 전압이 인가된 다단계의 다이노드(dynode)를 거치는 과정에서 증배되어 최종적으로 양극에 포집되는 전자의 수는 초기 전자수보다 약 10^6 배로 증가하고 이에 해당하는 출력펄스가 형성된다.[고성진 등 1999]

광전자증배관은 미약한 빛을 광전자로 변화시키는 알칼리 금속을 함유한 광음극(photocathode)과 광전자의 수를 차례로 증폭시키기 위하여 배열한 다이오드 그리고 양극으로 구성된다. 양극은 광전자를 마지막으로 전류로서 끄집어내어 출력 펄스를 만들어내는 역할을 한다.

특히 이때 사용된 광음극의 물질 종류에 따라 파장에 따른 감도 특성이 달라지므로 측정하고자 하는 빛의 파장 영역에 따라서 광음극의 종류를 선택하여야 한다. Fig. 4는 광음극의 종류에 따른 파장 감도 특성을 보여준다. 광자 하나에 대하여 광전자가 얼마만큼 발생되는냐를 양자효율(quantum efficiency)이라고 한다[G. F. Knoll, 2000].

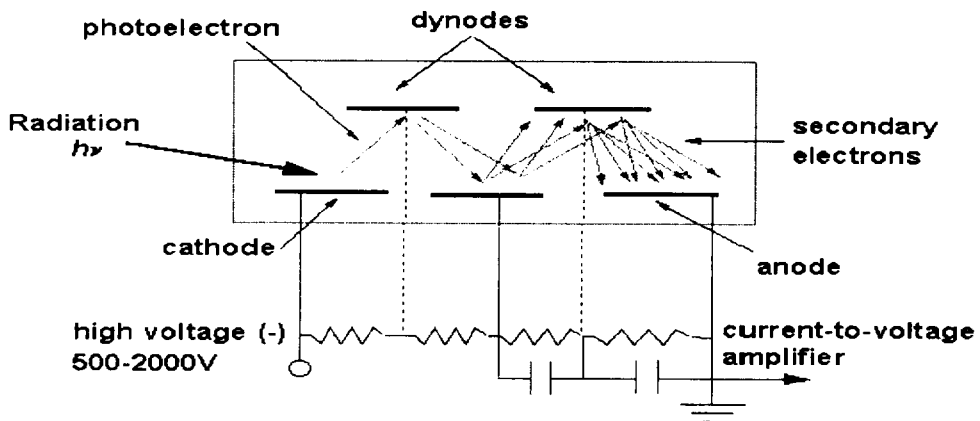


Fig. 3. Basic configuration of a PM tube

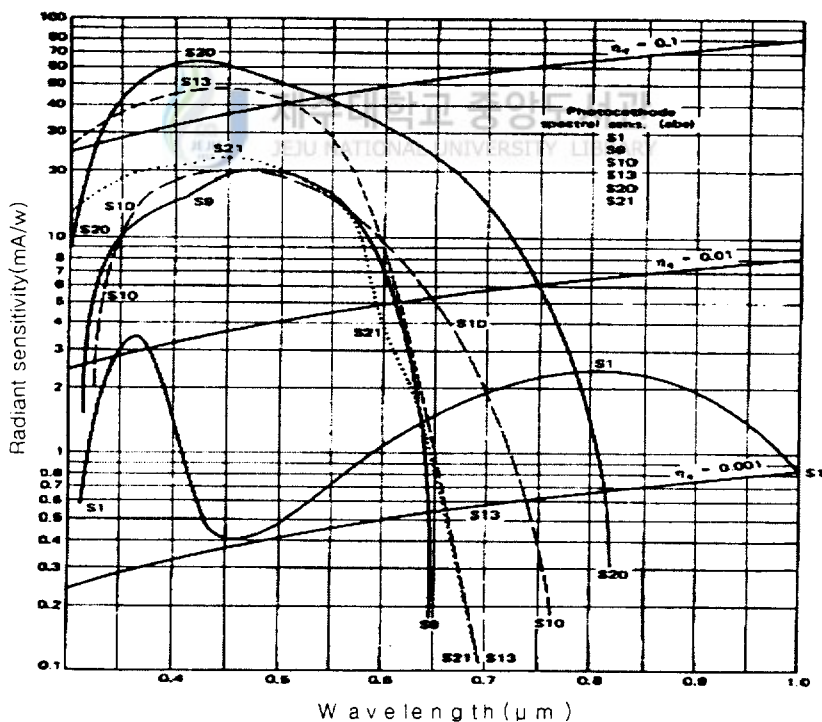


Fig. 4. The spectral sensitivity of a number of photocathode materials of interest in PM tube

따라서 광전자방출효율을 높이기 위하여 광전면에 Cs-Sb이나 Ag-Mn을 증착시키고 있다. 섬광체는 광전면에 밀착되어 있기 때문에 방사선에 의하여 생긴 신틸레이션의 대부분이 광전면에 부딪치지만 광전자 방출효율은 20~30%에 지나지 않는다. 금속면에 전자가 충돌하면 수 개의 전자가 금속면에서 튀어나온다. 이와 같은 현상을 2차전자 방출이라 하는데 2차전자의 방출률은 입사 전자의 에너지와 금속면의 재질에 따라 다르다. 따라서 2차전자 방출률을 높이기 위하여 다이노드의 전극면에도 Cs-Sb이나 Ag-Mn으로 증착하여 사용하고 있다. 광전자증배관에서는, 이와 같은 2차전자의 방출이 각 다이노드에서 차례로 일어나서, 전자는 다단계로 증배되기 때문에 전자의 총수는 기하급수적으로 증가한다.

(2) PMT의 구조

Fig. 5에 광전자증배관의 구조를 나타내었다. PMT는 수많은 다이노드가 배치되어 있고, 각 다이노드 사이에는 저항기에 의해서 100~200V로 분할된 전압이 걸려 있다. 다이노드에서 방출된 2차전자는 다이노드 사이의 전계에 의하여 가속되어, 100~200eV의 에너지를 얻은 후, 다시 다음 단의 다이노드로 향한다. 1단당의 증배율(2차전자 방출률)은, 걸어준 전압에도 관계되지만, 일반적으로 4~6이므로 10단의 다이노드가 있는 경우는 총 $4^{10} \sim 6^{10}$ 의 증배율을 나타낸다. 이 전체의 증배율 M을 10진수로 다시 나타내면 $10^5 \sim 10^7$ 에 도달하게 되며, 수mV~수 100mV의 펄스전압을 만들어낸다. 증배율은 전압을 올려주면 증대하지만, 너무 올리면 열전자의 잡음(noise)이 증가하여, 미약한 방사선은 검출할 수 없게 된다.

증배율은 걸어주는 전압에 의존한다. 전압이 변동하면 증배율은 크게 변동하고 그것에 따라서 출력펄스의 파고도 변동하기 때문에, 섬광검출기로서의 에너지분해능이 떨어진다. 실험에 의하면, 전압이 1%변동하면 증배율은 5~7%나 변동한다. PMT는 대략 1000~2000V의 고전압을 걸어주기 때문에, 전압 변동률이 작은 안정화 고압전원이 필요하다.

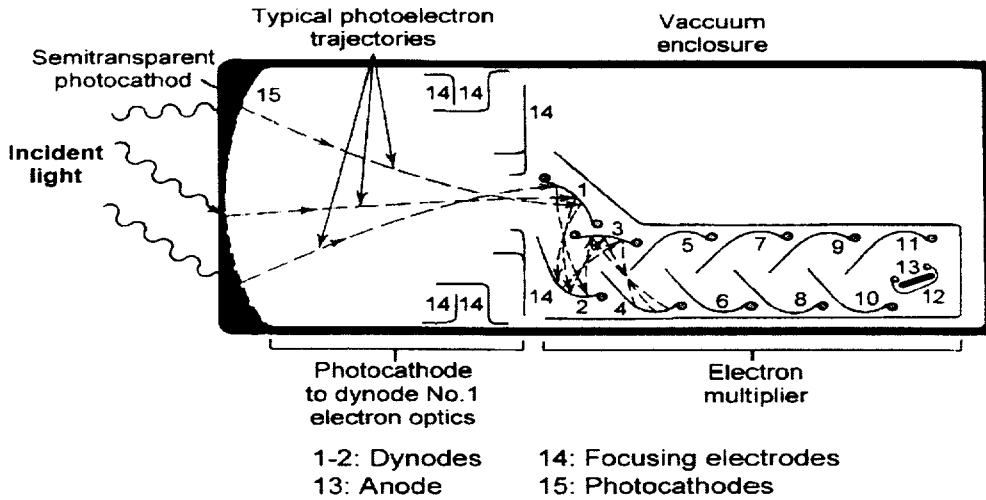


Fig. 5. Basic elements of a PM tube

본 연구에 사용된 PMT는 Hamamatsu사의 H5784로 저출력 소비 고전압 power supply와 저소음 증폭기를 가진 금속으로 포장된 광검출기이다. 광전자증배관에서 나오는 전기적인 신호는 비교적 쉬운 신호 처리를 할 수 있는 증폭기에 의해서 전압으로 변환된다. H5784는 증폭기가 광전자 증배관의 양극 가까이에 설치되어 있어 소음에 대해서는 높은 저항력을 가지고 있다.

Table 1은 구입한 H5784의 특성을 나타내고 있고, Fig. 6은 파장 감도 특성을 나타낸 그래프이다.

Table 1. Specification of a PM tube (H5784)

Input Voltage(V)		±11.5 to ±15.5	
Max. Input Voltage(V)		18	
Max. Input Current(mA)		+9/-1	
Max. Output Signal Voltage(V)		+10(load resistance 10kΩ)	
Max. Control Voltage(V)		+1.0(Input impedance 100kΩ)	
Recommended Control Voltage Adjustment Range(V)		+0.25 to +0.9	
Effective Area(mm)		φ8	
Peak Sensitivity Wavelength(nm)		20	
Cathode	Luminous Sensitivity(μA/lm)	Min.	40
		Typ.	70
	Radiant Sensitivity(mA/W)	62	
Anode	Luminous Sensitivity(μA/lm)	Min.	1.0×10^7
		Typ.	5.0×10^7
	Radiant Sensitivity(mA/W)	43	
Operating Ambient Temperature(°C)		+5 to +50	

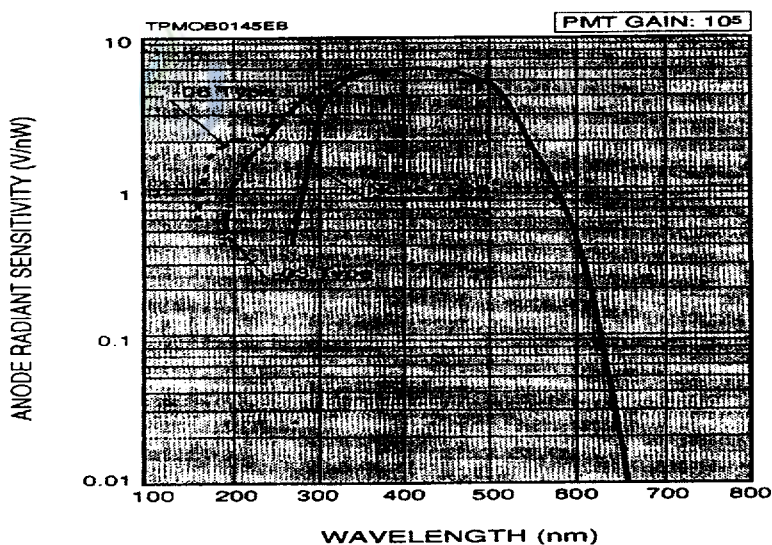


Fig. 6. Spectral sensitivity of the anode in the PM tube (H5784)

2) MCA(Multichannel Analyzer, 다중과고분석기)

MCA는 펄스진폭을 디지털 수로 변환하는 A/D 변환기(analog to digital converter)와 각 채널에 대한 디지털 수를 기록, 분석하는 분석기로 구성된다. Fig. 7은 가장 전형적인 MCA의 구성도를 보여주고 있다[G. F. Knoll, 2000].

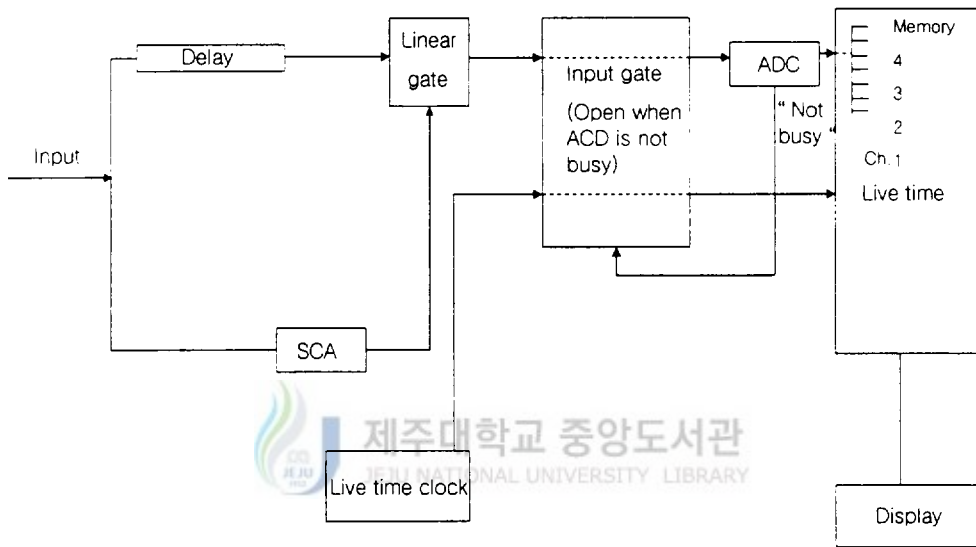


Fig. 7. Functional block diagram of a typical MCA

Fig. 8은 A/D 변환기로 주로 사용되는 Wilkinson-type의 변환기를 보여주고 있다. 이는 펄스의 첨두치에 해당하는 전압으로 충전된 캐패시터의 전하를 일정한 전류로 방전시킴으로써 펄스 높이에 비례하는 시간만큼 게이트를 열어 펄스 수를 통과시키면 펄스신호가 클럭신호로 A/D변환이 된다.

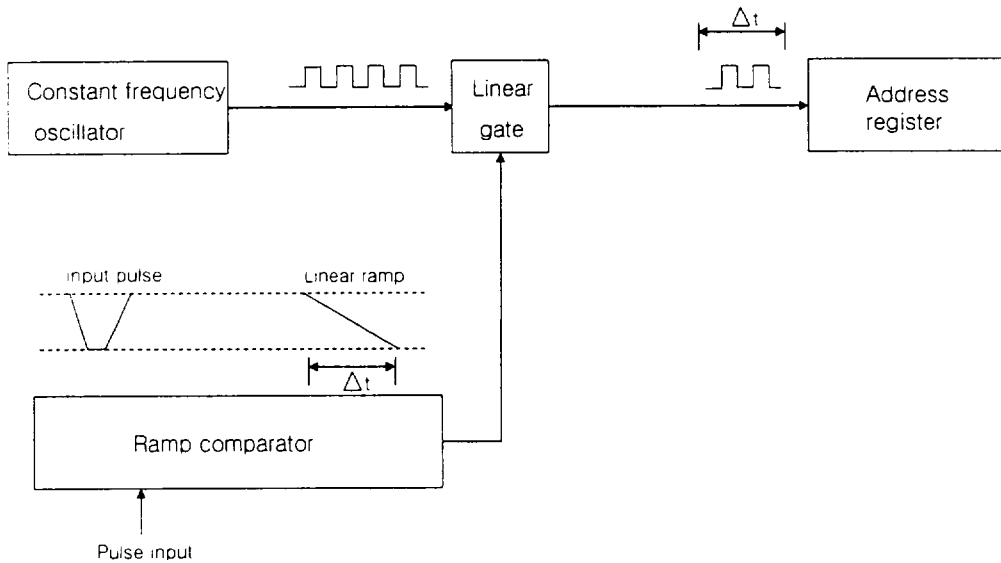


Fig. 8. Block diagram of a linear ramp(Wilkinson type) ADC

MCA의 주요 기능은 ADC에서 나온 데이터를 따라 해당 채널에 어떤 숫자를 더하는 작업을 사용자가 정해진 조건이 만족될 때까지 수행하는 것이다. 스펙트럼을 확대하거나 축소하여 보여주는 것이 또한 주요 기능이다.

그 외 기능들은 다음과 같다.

- 에너지 교정 : 에너지 교정을 하면 현재 위치의 채널에 따른 에너지를 표시할 수 있다.
- 피크 판별 : 스펙트럼 상의 피크들을 찾아 표시한다.
- 피크 면적 계산 : 피크만의 면적, 피크 위치의 총 면적 등을 계산한다.
- 스펙트럼간의 감산 : 스펙트럼끼리 감산하여 그 차이에 해당하는 스펙트럼을 얻는다. 이때, 두 스펙트럼의 Live time 차이에 따른 상수를 곱해 수행한다.
- 스펙트럼간의 비교 : 한 화면에 두 개의 스펙트럼을 동시에 표시하여 비교.

3. 섬광광섬유를 활용한 방사선 계측 방법

광섬유는 광통신분야에서 주로 이용되었는데, 최근에는 의료용, 산업용 특히, 방사선 센서로써 개발할 수 있는 많은 가능성을 보여주고 있다. 여기서는 섬광광섬유를 활용한 다양한 연구 방법들을 소개하겠다.

1) 플라스틱 섬광광섬유를 활용한 X-ray imaging

PSF(Plastic Scintillating Fiber) array를 이용하여 저에너지 방사선을 가진 X-ray의 image를 나타내는 연구이다. PSF를 사용하여 물리학에서 사용하는 가장 일반적인 기술은 입자 추적, 방사선 위치 추적, 열량 측정 등을 형상화하는 것이다. 이것은 일차원, 2차원방법으로 검출에 적용함으로써 이미지를 형상화한다.

Fig. 9는 명암도가 비교적 높은 카메라를 사용하여 방사선원의 위치를 추적하는 모식도이고, Fig. 10은 PSF array를 사용하여 추적자의 패턴을 보여주는 Imaging system이다[A. Ikhlef 등 2000].

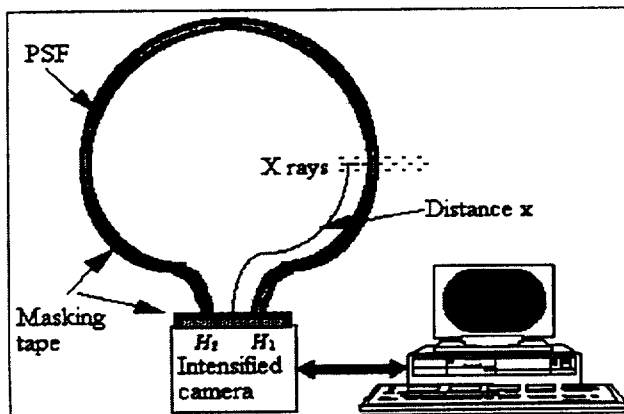


Fig. 9. Irradiation position using an intensified camera

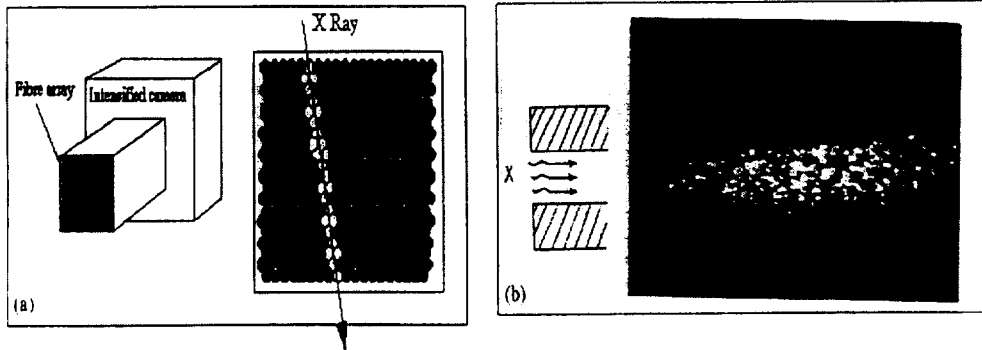


Fig. 10. Imaging system using a fiber array, showing a pattern of trace detection

2) Time-of-Flight(TOF)기술과 PSF를 활용한 중성자 방사선 분포 센서
 중성자 방사 분포를 감지하는 센서로서, 플라스틱 섬광 광섬유의 양끝을 두 개의 실리카 섬유로 연결해서 만든 원격 섬유 장치이다. 원격 섬유 장치의 기본 특성은 TOF방법을 이용하여 중성자의 발생위치를 감지하는 것이다.

Fig. 11은 각각의 PSF와 normal fiber가 조합되어 TOF 방법에 적용되는 것을 보여주는 개략도이고, Fig. 12는 TOF의 측정 구성도이다.

이 시스템에 의해 측정되는 중성자 분포는 일반적으로 사용되는 중성자 Sievert(Sv) 계수기를 이용하여 측정결과와 비교된다. 공간분해능은 Unfolding method에 의해 보정되고, 측정된 결과의 일치성을 보여준다 [E. Takada 등 1995].

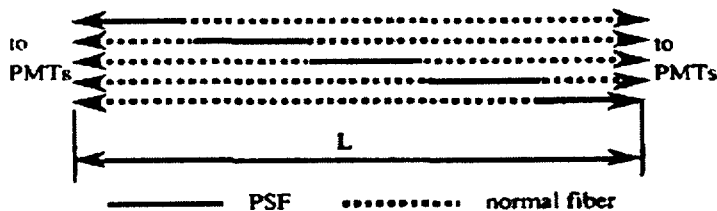


Fig. 11. Schematic view of the long range radiation distribution monitor

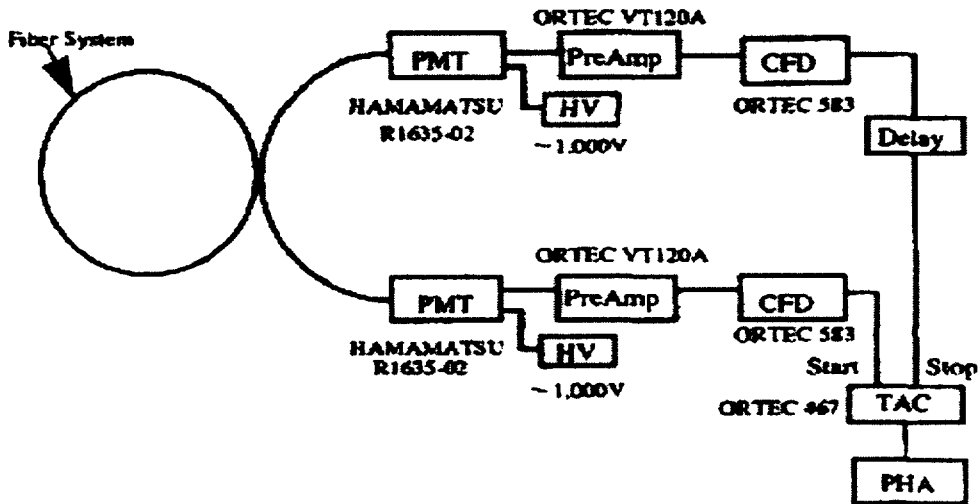


Fig. 12. Measuring system for TOF method

(3) 광섬유를 활용한 실시간 트리튬 모니터링

진공펌프는 글로우 박스나 fume hood에서 tritium gas를 다룰 때, 주의가 요구되고 작동 시에는 오일이 사용된다. 사용하는 동안에 오일은 ^3H 에 오염되어 오일 탄화수소에서 수소로 바뀐다. 이 연구는 많은 양의 오일과 ^3H 농도가 짙은 물을 제거하기 위해서 수행되었다. 현재 삼중수소화된 오일과 물을 평가하는 기준 방법은 먼저 샘플을 얻고, 액체섬광계수기와 열량측정법을 통해 얻는 것이다. 섬광계수기는 성능과 정밀도면에서 좋은 검출기이지만, 노동집약적이고 비싸다. 또한 샘플링과 분석 전환 시간이 길고, 높은 반응성의 오일과 물을 실험했을 때 부정확한 분석이 발생할 수 있다. 이 연구는 다발형태의 광섬유를 사용하여 오일의 ^3H 농도를 측정하는 방법이다.

Fig. 13은 데이터 측정을 위한 장치 구성도이고, Fig. 14는 실험에 사용된 다발로 메워진 광섬유이다[D. R. Krause 등 2001].

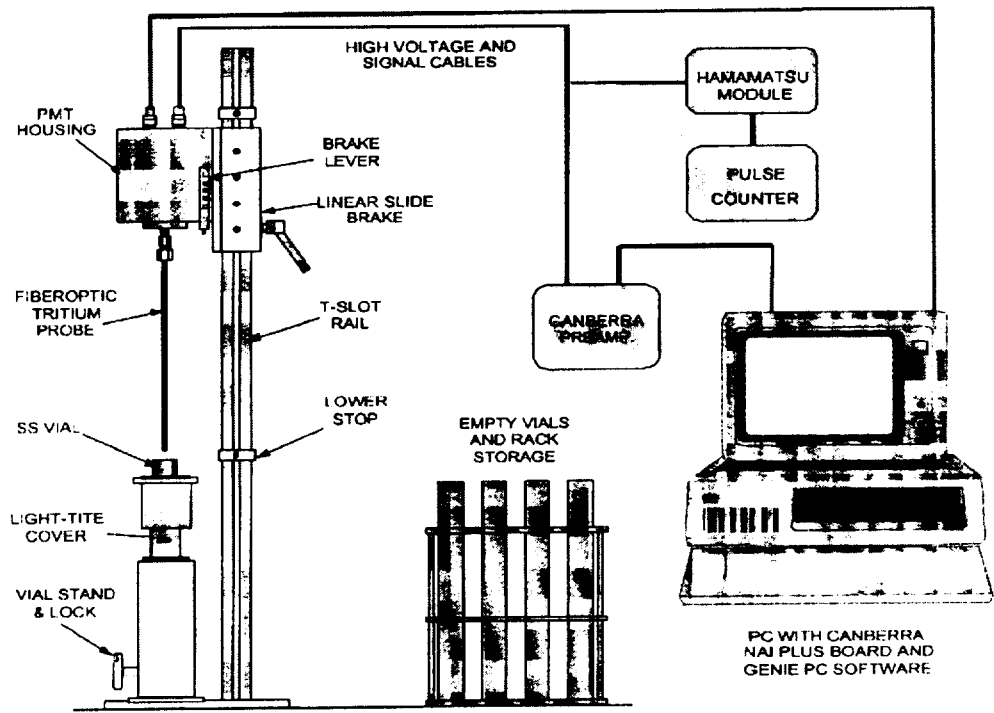


Fig. 13. Measuring system for the ^3H concentration in the tritiated oil



Fig. 14. Fiber optic probe assembly for measuring the ^3H concentration in the tritiated oil

4) ELSA(Electron Stretcher Accelerator)의 Crystal Barrel 실험장치에 사용되는 섬광광섬유 검출기

Crystal Barrel은 독일 본에 있는 ELSA(Electron Stretcher Accelerator)에 설치되어 있다. 전자빔은 3.2Gev까지 에너지를 낼 수 있다. 광자는 전자추적 시스템의 제동복사에 의해 발생하는데, 이 광자의 에너지는 확산된 전자의 에너지를 측정하면 알아낼 수 있다. 타겟은 Crystal Barrel calorimeter 안쪽에 놓여있고, 1380개의 CsI(Tl) crystal로 구성되어 있으며 광자 측정의 높은 효율을 보여준다. 이 타겟을 감싸고 있는 섬광광섬유 검출기는 하전입자의 존재를 확인하기 위해 개발되었다. 이 섬광광섬유 검출기는 inner-detector로 되어있다. Fig. 15(a)는 inner-detector를 보여주고 있는데 원기둥의 형태로 target cell을 덮고 있다. 513개의 섬광광섬유는 3개의 층으로 나열되어 있는데, 2개의 층은 나선형으로 굽어져 있다.

기하학적인 정확도와 강도를 얻기 위해, 광섬유는 지지tube에 고정되어있다. Fig. 15(b)는 inner-detector의 바깥 층의 사진이다. 이 층의 윗부분이 섬광광섬유로 구성되어 있다[G. suft 2005].

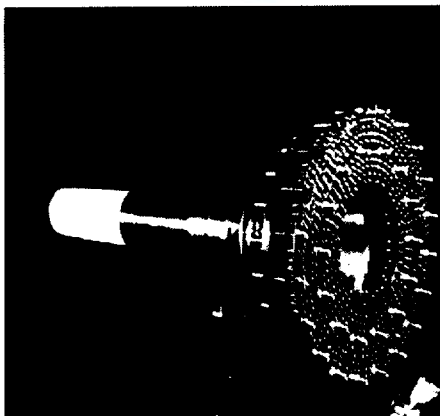
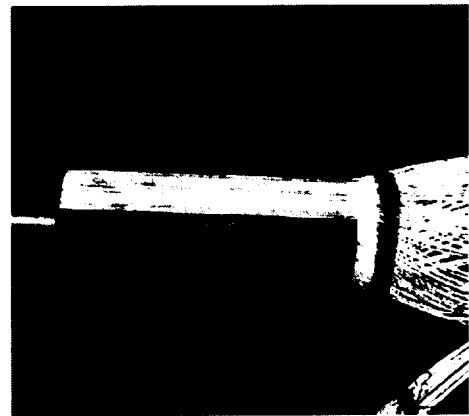


Fig.15 (a) Inner-detector before its installation into the Crystal Barrel



(b) Outer layer of the inner-detector before all fibres were fixed on the support tube

Ⅲ. 실험장치 및 실험방법

1. 센서모형

본 논문에 사용된 플라스틱 섬광광섬유는 BICRON사의 BCF-12 model로 직경이 0.5mm, 1mm 두 종류를 이용하였다. Table 2는 구입한 BCF-12에 대한 특징이고, Fig. 16은 BCF-12에 대한 발광 스펙트럼이다. 발광효율은 8000photns/Mev로서 높은 편이며 최대 발광 파장은 435nm로서 일반적인 PMT의 흡광 감도와 잘 일치한다[홍상범, 2002].

광섬유는 외가닥으로는 방사선과의 반응확률이 낮기 때문에 광섬유를 다발로 매운 형태의 센서모형을 제작하였다.

Table 2. Properties of the plastic scintillating fiber (BCF-12)

	Material	Number of Photons per Mev(1)	Wavelength of Maximum Emission(nm)	Decay Time(ns)
BCF-12	Plastic Scintillating Fiber	~8000	435 (390~570)	3.2
Scintillating core material			polystyrene	
Scintillating core reflective index			1.60	
Density			1.05 g/cm ³	
Cladding material			acrylic	
Cladding reflective index			1.49	
Numerical aperture			0.58	
Trapping efficiency round fibers			3.44% minimum	
Operating Temperature			-20℃ ~ +50℃	

BCF-12

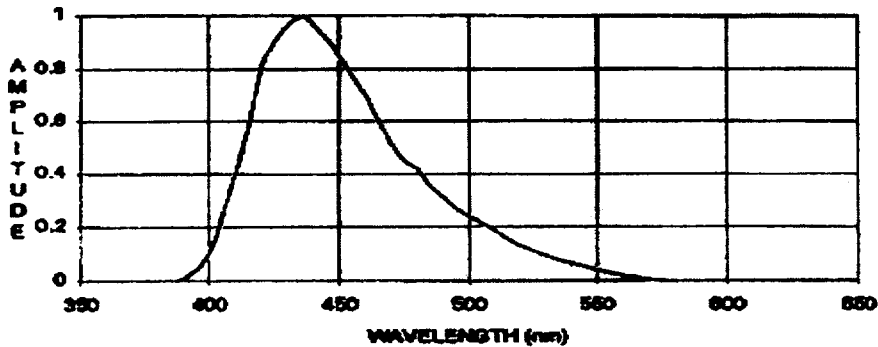


Fig. 16. Emission spectrum for plastic scintillating fiber (BCF-12)

1) Non-coincidence 회로 측정용 원통형 센서 제작

Non-coincidence 회로를 이용하여 측정한 센서는 직경 0.5mm, 1mm 플라스틱 섬광광섬유 BCF-12를 각각 직경이 4mm, 5mm인 알루미늄 튜브에 다발로 메어 넣은 형태로 제작되었다. 외부광을 차단하고 내부에서 발생된 광신호를 반사하여 누설을 최소화하기 위해 직경 17mm, 길이 105mm의 알루미늄 케이스를 이용하여 제작하였다.

Fig. 17은 0.5mm, 1mm의 광섬유 각각 30가닥, 14가닥(이하 1mm-sensor B1, 0.5mm-sensor B)을 한쪽 끝이 열린 다발형태(Open type)로 제작하였고, Fig. 18는 0.5mm 광섬유 15가닥(이하 sensor A)을 구부려서(Closed type) 닫힌 형태로 제작하였다. 각 센서에 대해서 간단하게 분류하면 다음과 같다.

- Sensor A : 0.5mm의 광섬유(4mm Aluminium tube) 15가닥, Closed type
- Sensor B : 0.5mm의 광섬유, 30가닥(4mm Aluminium tube), Open type
- Senspr B1 : 1mm의 광섬유, 14가닥(5mm Aluminium tube), Open type

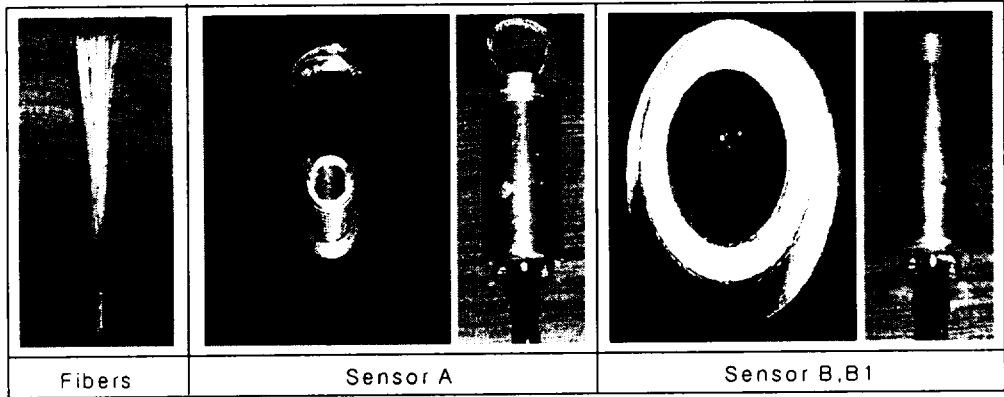


Fig. 17. Fiber bundle sensors for non-coincidence circuit measurement

특히, 0.5mm 광섬유의 두 센서가 전송용 광섬유와 접속하는 부분의 플라스틱 섬광광섬유의 가닥수는 30가닥으로 동일하다. Sensor B인 경우 광섬유의 한쪽 끝이 열려 있어서 섬광체에서 발생한 광의 일부가 수집되지 않고 이탈하지만 Sensor A의 경우 양쪽 끝이 모두 전송용 광섬유와 접속되기 때문에 발생한 광이 모두 수집된다고 볼 수 있다. Fig. 18은 제작한 센서의 단면도를 보여주고 있다.

센서부의 광섬유 다발 끝은 FC connector를 통하여 직경이 3mm인 전송용 광섬유와 접속된다.

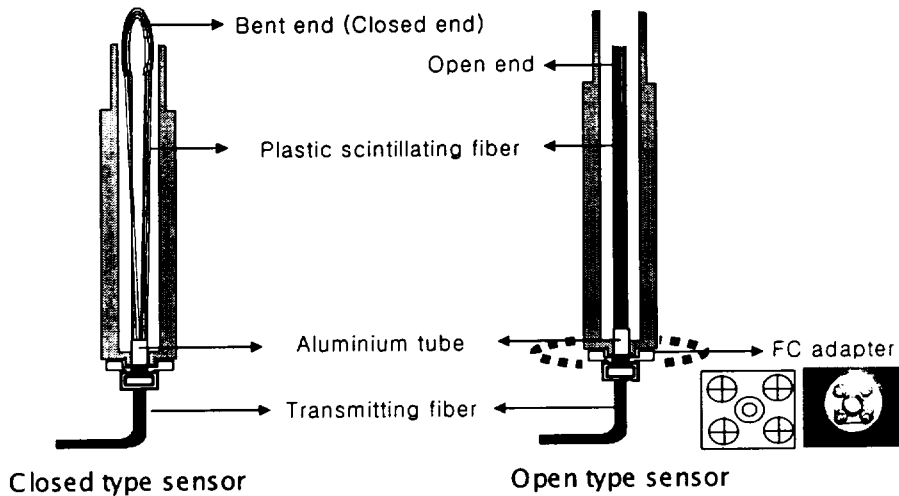


Fig. 18. Vertical cross section of the scintillating fiber sensor for non-coincidence circuit measurement

2) Coincidence 회로 측정용 센서 제작

Coincidence 회로를 이용하여 측정한 센서는 직경이 각각 0.5mm, 1mm인 플라스틱 섬광광섬유의 양쪽 끝단을 알루미늄 튜브로 메어 넣은 형태로 제작되었다.

Fig. 19와 같이 알루미늄으로 제작된 수축관형 Case의 가로, 세로, 높이는 각각 25, 25, 80mm이다. 외부로부터 유입되는 광을 최소한으로 줄이기 위해 Case의 뚜껑을 만들고, Fig. 20과 같이 Case의 윗면 6곳에 탭을 내어 볼트로 고정하였다.

Fig. 21은 제작한 센서의 단면도를 보여주고 있다. 센서부의 광섬유 다발 끝은 FC connector를 통하여 직경이 3mm인 전송용 광섬유와 접속된다.

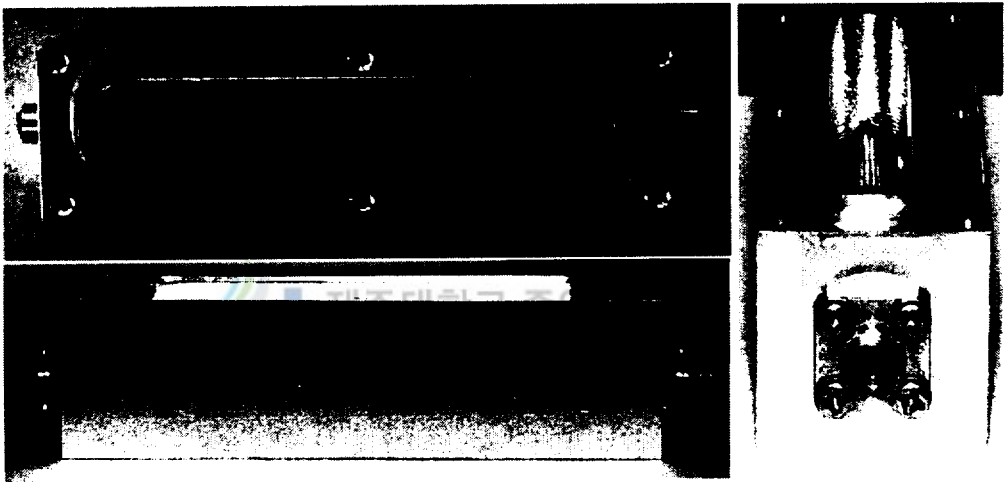


Fig. 19. Fiber bundle sensor for coincidence circuit measurement



Fig. 20. The upper view of the coincidence measurement sensor

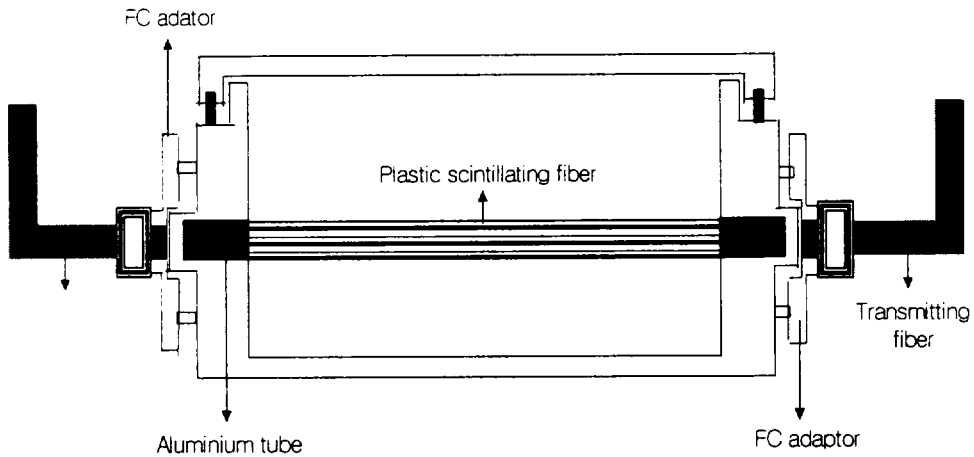


Fig. 21. Vertical cross section of the scintillating fiber sensor for coincidence circuit measurement

2. 신호전송용 광섬유의 특성



본 연구에 사용된 플라스틱 섬광광섬유의 방출 파장의 범위는 350~600nm이므로 전송용광섬유는 이 파장 범위에서 전송손실이 적은 플라스틱광섬유를 선정하였다. 플라스틱 광섬유는 유리광섬유와 비교하여 전송손실이 큰(약 1.5dB/m이상) 단점이 있으나 광섬유가 잘 부러지지 않고 취급이 용이하며, 가격이 저렴하며, 개구수(Numerical aperture)가 큰 장점을 가지고 있다.[정과 김, 2000]

본 실험에 사용된 전송용 플라스틱 광섬유는 Edmund Optics사(Dia. 3mm)의 제품으로 재질은 Core에 PMMA (Polymethylmethacrylate, $n=1.492$)가 사용되며, Cladding 재질로는 불소계 폴리머(Fluorine polymer, $n=1.402$)가 사용되었다. Table 3은 실험에 사용된 전송용 플라스틱 광섬유의 특성을 나타낸 것이고, Fig. 22는 직경에 따른 감쇠스펙트럼을 나타낸 것이다.

Table 3. Physical properties of the optical fibers

Core Refractive Index(n_1)	1.492
Clad Refractive Inde(n_2)	1.402
Numerical Aperture($n_1^2 - n_2^2$)	0.51 ± 0.33
Max Attenuation(dB/m)	0.19
Acceptance Angle($2\sin^{-1}[N.A.]$)	61°
Operating Temperature($^\circ\text{C}$)	-55°C to $+70^\circ\text{C}$
Minimum Radius of Bend	60

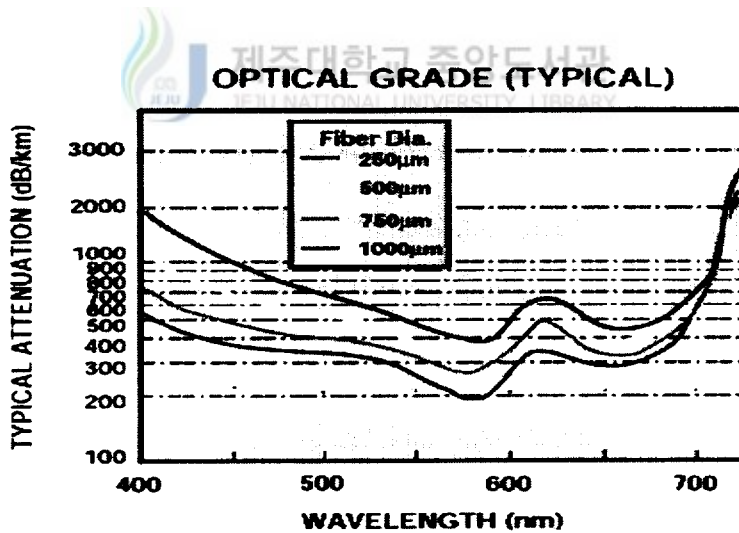


Fig. 22. Attention spectrum of the transmitting fiber
(Edmund Optics Inc.)

3. 신호처리 장치 및 구성

1) Non-coincidence 회로

광 측정 장치는 센서 부분, 전송용 광섬유, 광전자 증배관(PMT; Photomultiplier tube), 주 증폭기 및 다중파고분석기(MCA; Multi channel analyzer)로 구성하였다. Fig. 23은 Non-coincidence 회로 측정용 원통형 센서에 대한 실험 장치 구성도이다.

센서부위로부터 발생된 광 신호를 측정·분석하기 위해서는 광전자증배관을 사용하여 전기적 신호로 변환하여야 한다. 플라스틱 섬광광섬유의 발광파장이 370-700nm를 가지므로 PMT의 Photocathode 역시 이 에너지 영역에서 입사된 빛을 전자 방출로 전환하는 효율이 우수한 것을 선정하여야 한다. 본 연구에 이용된 PMT는 Fig. 24와 같이 소형으로 창의 크기가 8mm인 Hamamatsu Model H5784로 Head-on type이다. H5784는 300 - 650nm 범위의 파장이 측정가능하고, 420nm에서 피크치를 가진다. 본 연구에서 사용된 PMT의 특징은 섬광계측원리에서 언급되었다.

외부광의 유입을 차단하고 PMT, 알루미늄 센서 case와 전송용광섬유의 연결을 용이하게 하기위하여 광통신용으로 널리 쓰이고 있는 FC 접속단자와 어댑터를 사용하였다.

주 증폭기는 Canberra Amplifier model 2012를 이용하였으며, Power supply는 PMT에 안정적인 전원공급 및 전치증폭기에 동시에 전원을 공급할 수 있는 Hamamatsu 제품 C3830을 사용하였다. 신호 분석을 위한 MCA(Multi Channel Analyzer)는 Ortec trump-8k-32 + Maestro32로 board형태로 PC에 장착하여 사용할 수 있는 제품이다. 구성된 시스템은 Fig. 25에 나타내었다. 또한 외부로부터의 광을 차단하기 위하여 Fig. 26과 같은 직경 30mm, 길이 200mm의 알루미늄 케이스를 제작하여 그 속에 센서를 넣을 수 있도록 하였고 섬광광섬유의 접속부위와 연결될 수 있도록 밑 부분의 직경 4mm의 구멍을 만들어 전송용 광섬유가 통과할 수 있도록 제작하였다.

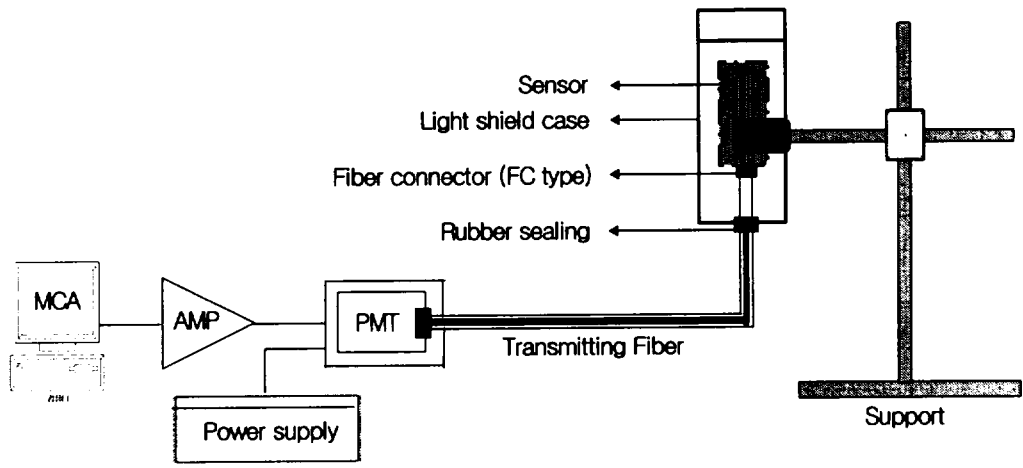


Fig. 23. Experimental setup for the non-coincidence measurement

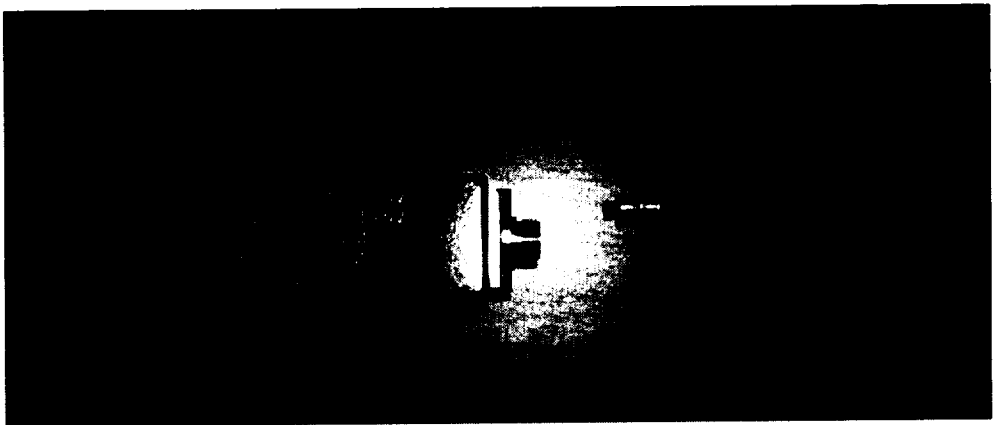


Fig. 24. PMT adapter used to couple the transmitting fiber with the window of PMT

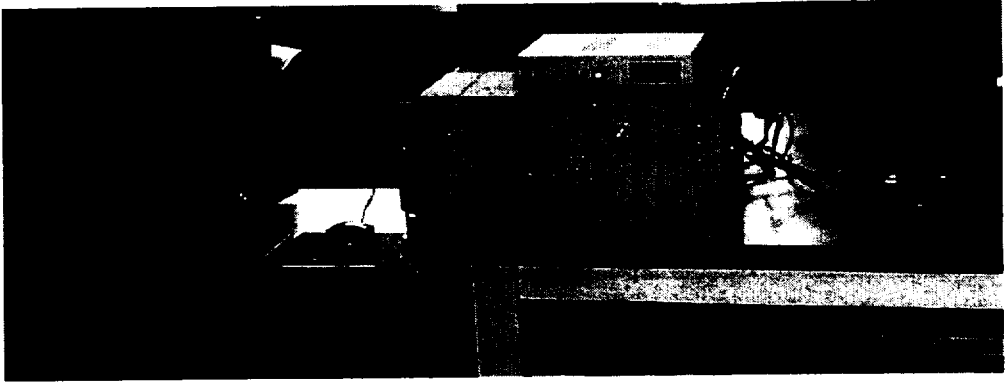


Fig. 25. Experimental components for the measurement

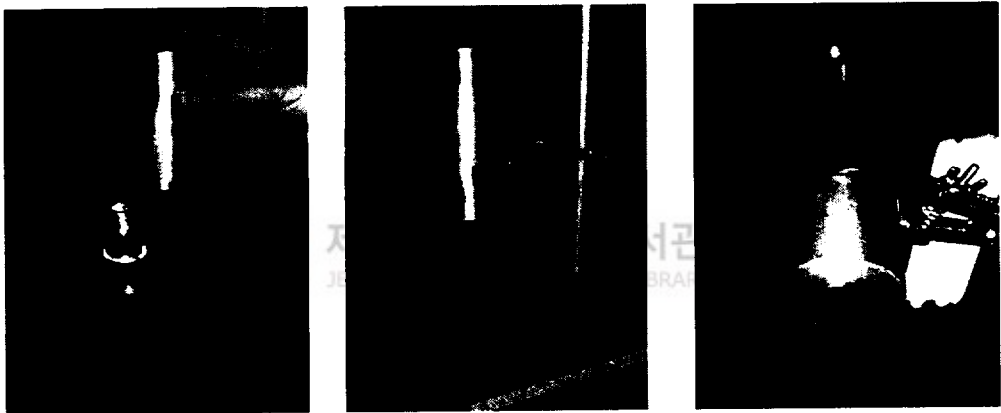


Fig. 26. The aluminum case used for preventing the external light from entering the sensor

2) Coincidence 회로

본 연구에서 사용되고 있는 광전자 증배관은 외부광이나 주위의 열에 의해 noise를 발생시킨다. 특히 이러한 noise pulse와 ^3H , ^{14}C 등의 붕괴에 기인한 섬광에 의해 발생한 진짜 pulse는 매우 비슷하고, real pulse를 구분하기가 매우 어렵다. 동시회로에서는 매우 짧은 시간동안 동시에 pulse를 측정 했을 때만 기록이 되게 된다[kim and Shin, 1997] 따라서, 두 개의 광전자 증배관을 사용하면 한쪽

한쪽에서 계측했을 때에 나타나는 noise를 줄일 수 있을 것으로 보인다.

Coincidence 회로의 광 측정 장치는 센서 부분, 전송용 광섬유, 광전자 증배관, 주 증폭기 각각 두 개, Coincidence module 및 다중과고분석기로 구성하였다. Coincidence module은 Canberra coincidence model 1446을 사용하였고, 그 외의 측정 장치는 앞서 non-coincidence에서 언급한 것과 동일하다.

Fig. 27은 Coincidence 회로 측정용 센서에 대한 실험 장치 구성도이다.

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.

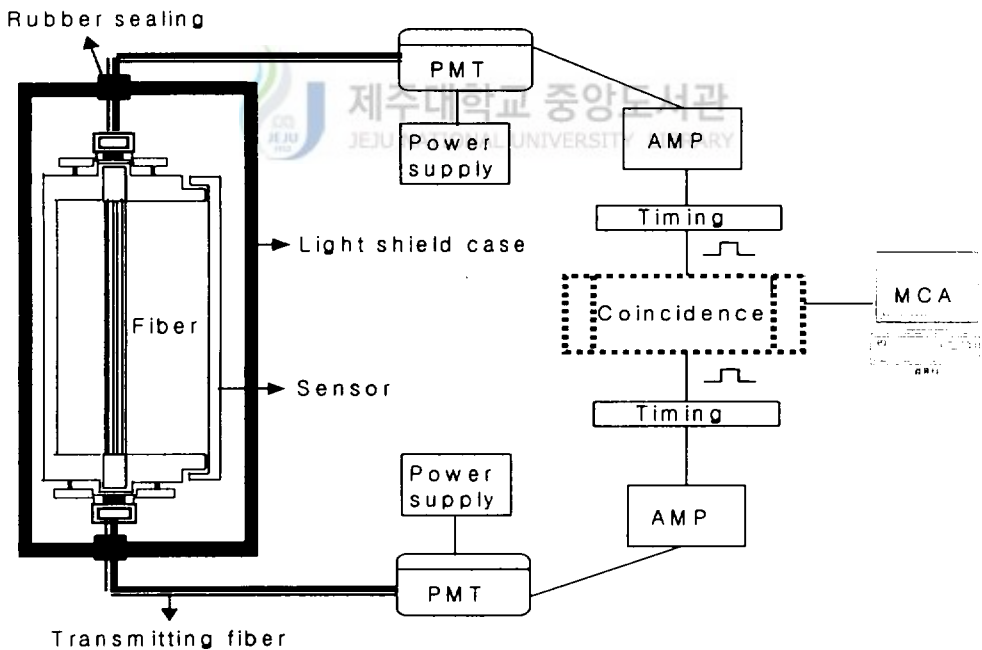


Fig. 27. Experimental setup for coincidence circuit measurement

4. 방사선원 ^3H , ^{14}C 용액 측정 방법

^3H 와 ^{14}C 는 극히 미량이 천연수에 포함되어, 지하수 유동조사나 원자력 시설의 누설 감시 등에 사용된다. 특히 환경수 중의 트리튬 농도는 매우 낮아 측정 시에는 10배 이상의 농축이 필요하게 된다. ^3H 와 ^{14}C 는 각각 0.018, 0.156MeV의 베타선을 방출한다.

본 연구에서 베타선 측정용 섬광광섬유 센서 개발을 목적으로 이용한 방사선원은 ^3H 과 ^{14}C 용액이다. Tritiated water 형태의 ^3H 과 NaHCO_3 용액상태의 ^{14}C 을 0.05, 0.1, 0.2mCi/ml의 농도로 희석하여 자동 피펫으로 각각의 센서 case에 9ml 씩 주입하여 5분간의 채널별 계수치와 총계수치를 측정하였다. 0.156MeV의 비교적 높은 에너지의 방사선을 방출하는 ^{14}C 용액에 대해서는 추가로 1, 3, 5 $\mu\text{Ci/ml}$ 의 농도를 희석시켜 실험하였다. 광섬유를 외가닥으로 비교했을 때, 상대적으로 단면적이 큰 1mm에 대해서 Bicron사의 BC-620 액상형 반사체를 사용하여 광섬유 끝, 즉 열린 부분에 얇게 입혀서 추가로 실험하였다.

용액을 센서부위에 효과적으로 주입하고, 주위 오염을 최소화하기 위하여 Fig. 28과 같이 10ml의 피펫에 실리콘 재질(직경 5mm, 길이 150mm)의 튜브를 연결하였다. 한 농도를 측정 한 후에는 센서 case를 물로 5번 이상 세척한 후 다른 농도를 측정하였다.가로 실험하였다.

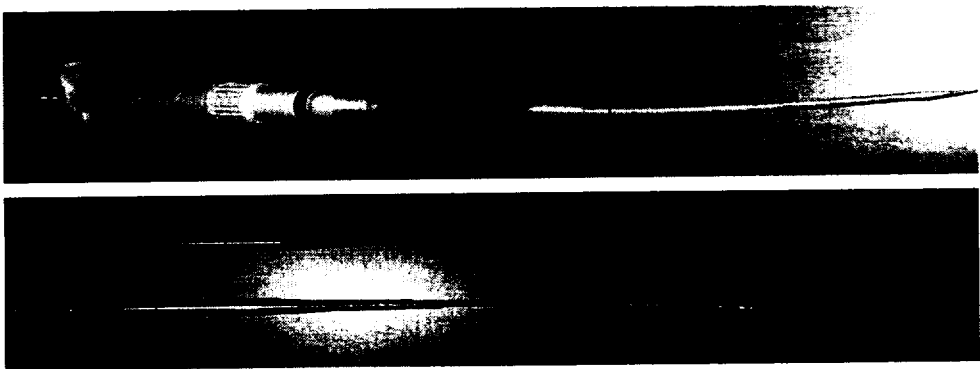


Fig. 28. The pipette for pouring radioactive solution into the sensors

VI. 실험결과 및 고찰

1. 원통형센서에 대한 non-coincidence 회로 측정 실험

직경이 1mm로 제작된 베타선 측정용 플라스틱 섬광광섬유 센서(Sensor B1)에 대해서 펄스높이분포(pulse height spectrum)를 측정한 결과는 Fig. 29와 Fig. 30에 나타내었다. 직접적용은 광섬유의 끝에 반사체를 칠하지 않은 경우이고 반사체 적용은 반사체를 칠한 경우이다. ^3H 와 ^{14}C 용액 모두에 대한 스펙트럼의 모양은 비슷하게 나타났다. Fig. 31은 두 용액의 방사능농도 변화에 따른 총계수치를 나타내고 있는데, 반사체를 입혀서 실험한 결과 ^3H 용액에 대해서는 약 27%, ^{14}C 용액에 대해서는 약 18%정도 검출 효율이 높게 측정되었다. 두 종류의 선원에 대해서 용액의 방사능과 총계수치간에는 거의 비례관계가 성립됨을 볼 수 있다. 완전한 비례성에서 약간의 편차가 발생한 것은 매번 측정할 때마다 센서부와 전송용 광섬유의 접속부에서의 광손실 편차, 센서부에 남아 있는 잔류 방사능의 편차에서 발생한 것으로 여겨진다. 각 선원에 대한 센서의 감도를 비교한 결과 0.0186Mev 베타선을 방출하는 ^3H 에 비하여 0.156Mev의 베타선을 방출하는 ^{14}C 이 상대적으로 11-30%의 높은 감도를 보였다.

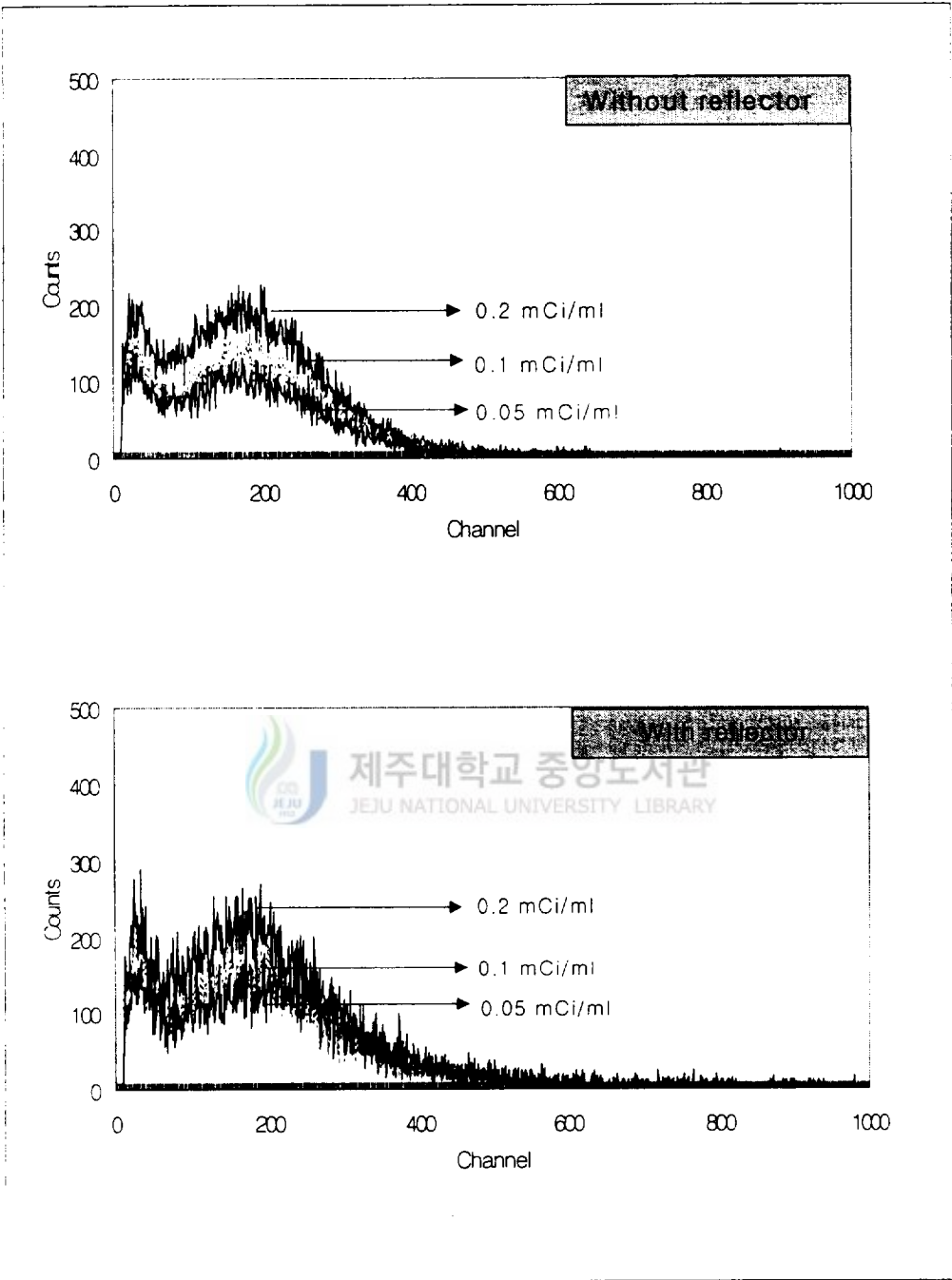


Fig. 29. The pulse height spectra measured with the open type sensor for the ^3H sources (1mm diameter fibers)

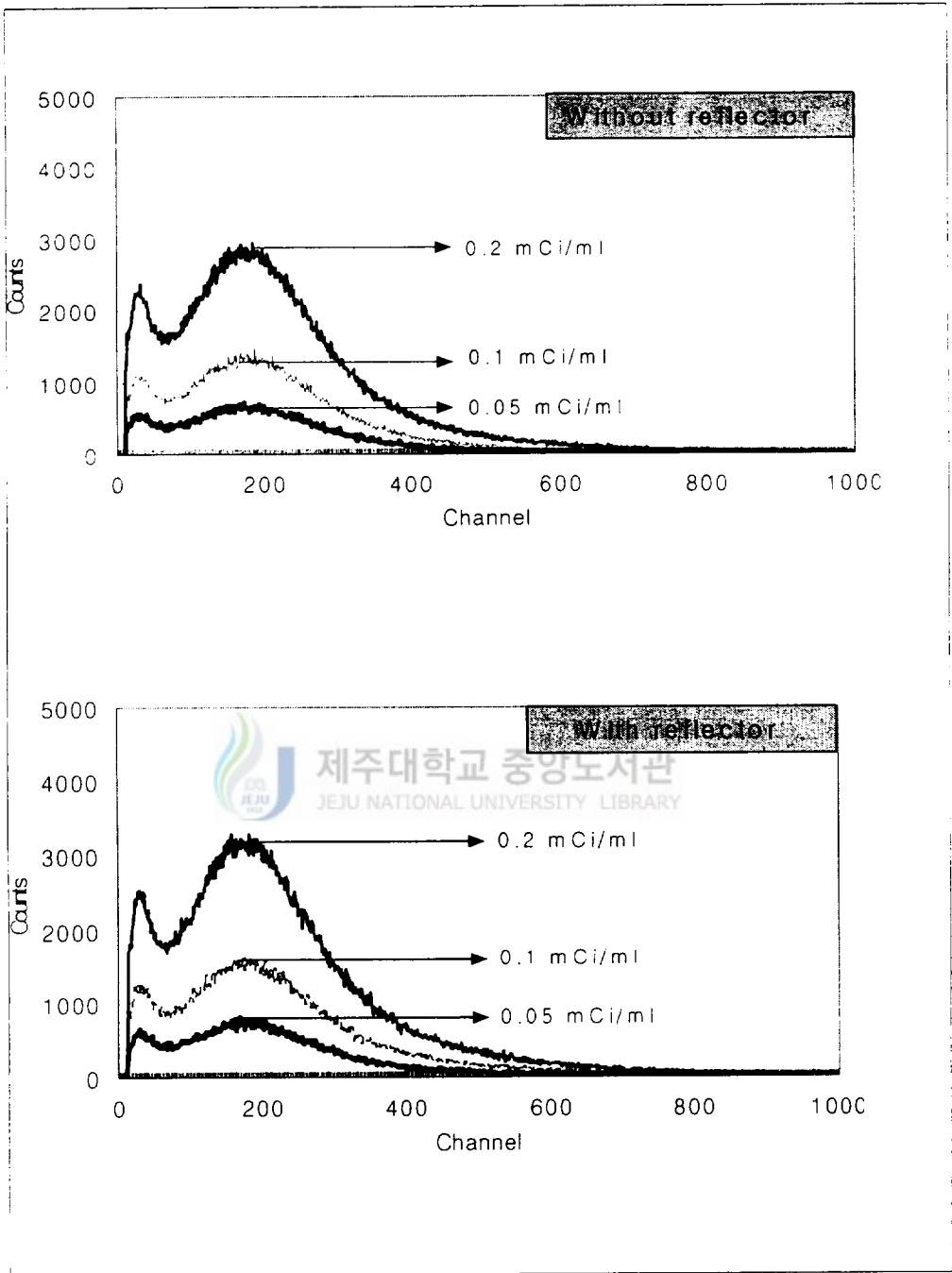


Fig. 30. The pulse height spectra measured with the open type sensor for the ^{14}C sources (1mm diameter fibers)

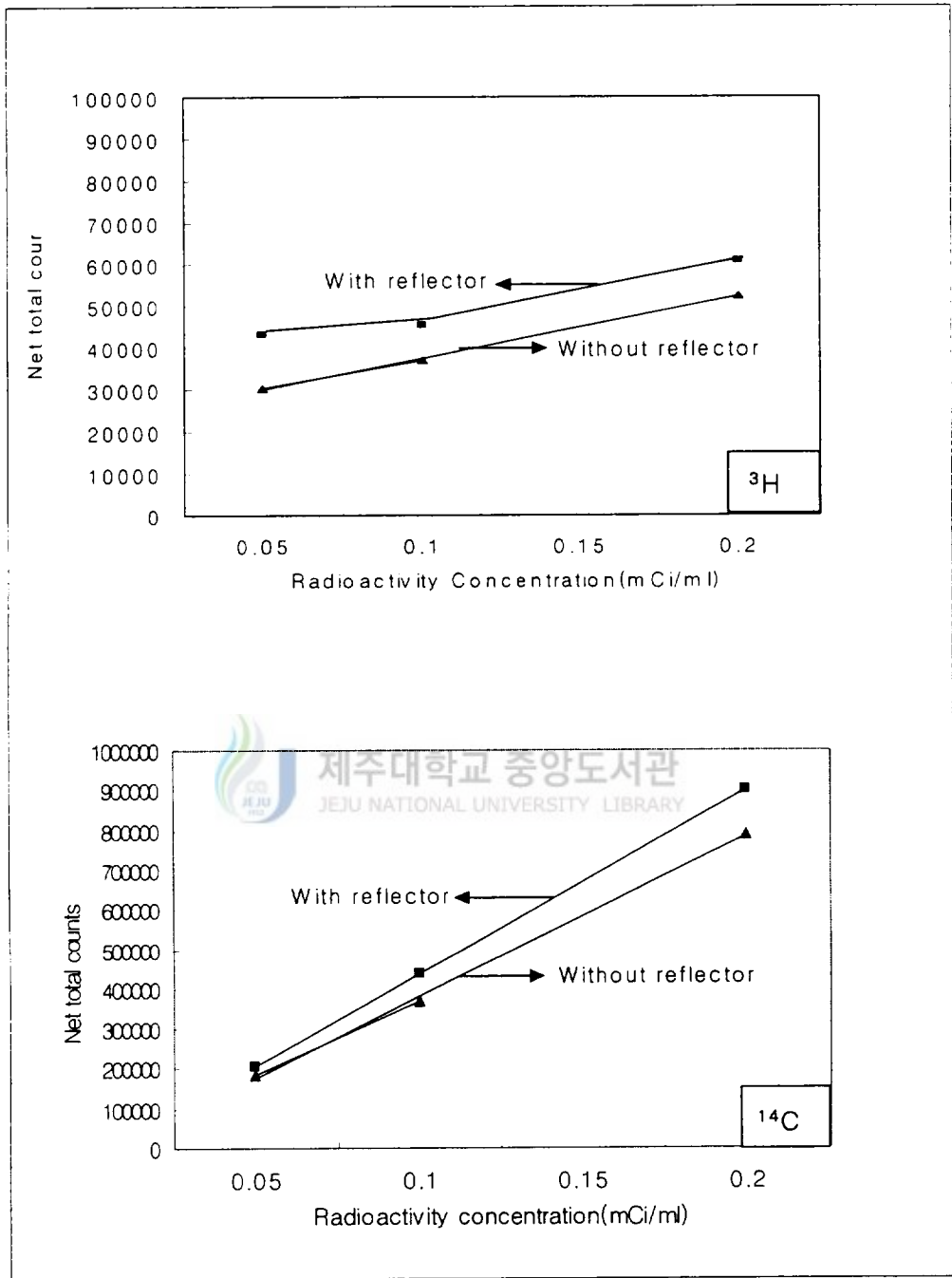


Fig. 31. The total number of counts vs radioactivity concentration measured with the open type sensor with and without reflector on the open end

Fig. 32와 Fig. 33은 0.05, 0.1, 0.2 mCi/ml 농도의 ^3H 용액에 대해서 직경 0.5mm 광섬유로 제작된 센서로 측정된 펄스높이분포이다. Fig. 32는 광섬유를 구부려서 양쪽 끝에서 집광할 수 있는 닫힌 형태(Sensor A)의 측정결과이고, Fig. 33은 광섬유의 한쪽 끝이 열려서 광의 일부가 이탈하는 열린 형태(Sensor B)의 측정결과이다.

두 가지 센서의 파고 스펙트럼의 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.

Fig. 34와 Fig. 35는 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 직경 1mm 플라스틱 섬광광섬유 센서와 마찬가지로 ^3H 경우 보다 ^{14}C 에 대해서 두 가지 센서 모두 35-40배의 높은 감도를 보였다. 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 비정기 길기 때문에 광섬유의 섬광체에 도달하여 반응하는 수가 많기 때문인 것으로 해석된다.

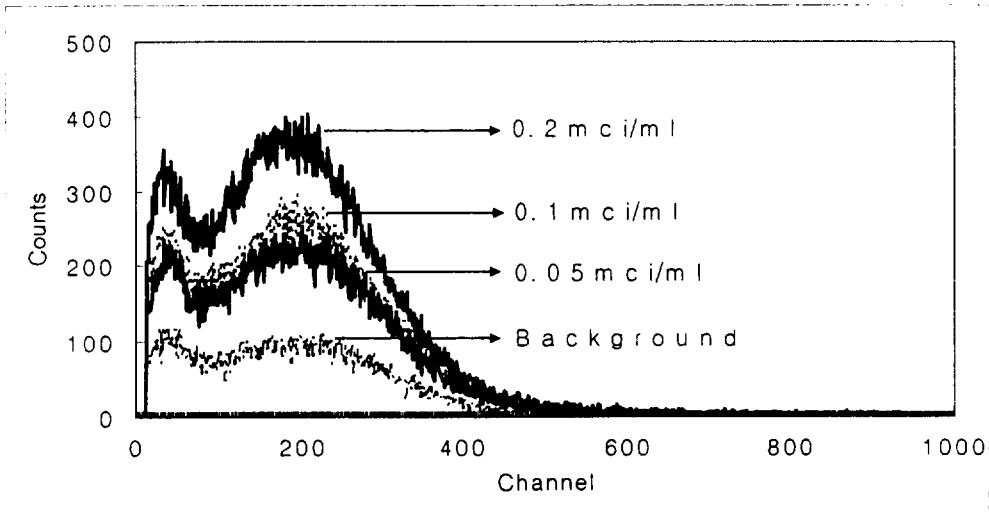


Fig.32. The pulse height spectra measured with the closed type sensor for the ^3H sources (0.5mm diameter fibers)

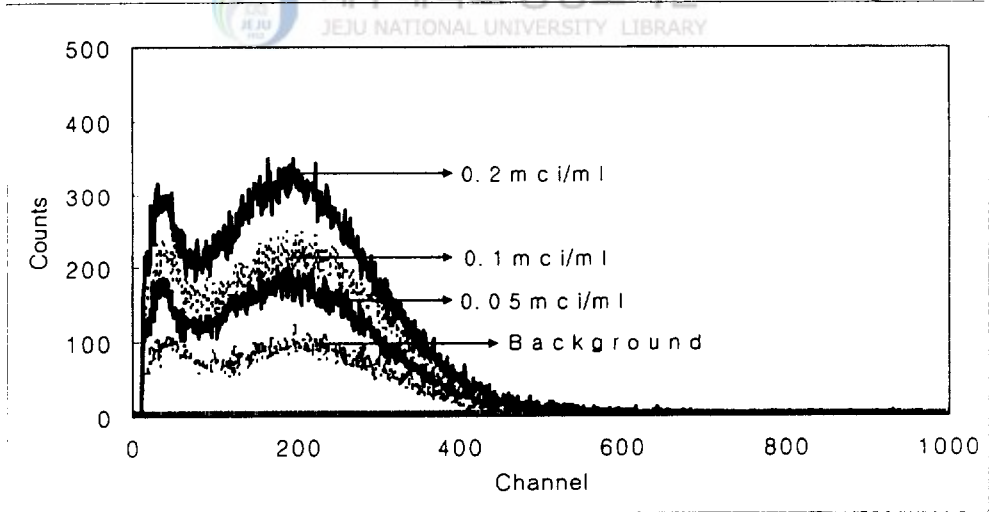


Fig. 33. The pulse height spectra measured with the open type sensor for the ^3H sources (0.5mm diameter fibers)

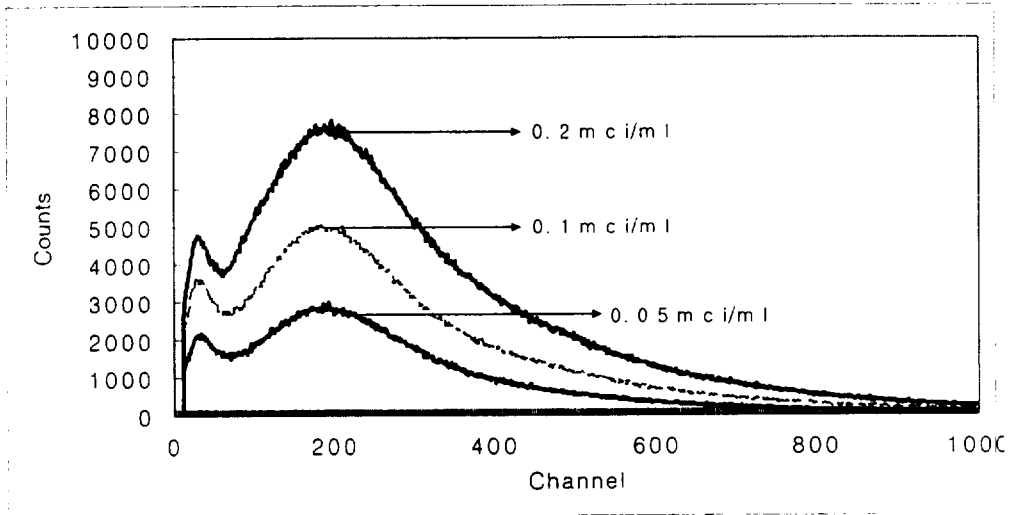


Fig. 34. The pulse height spectra measured with the closed type sensor for the ^{14}C sources (0.5mm diameter fibers)

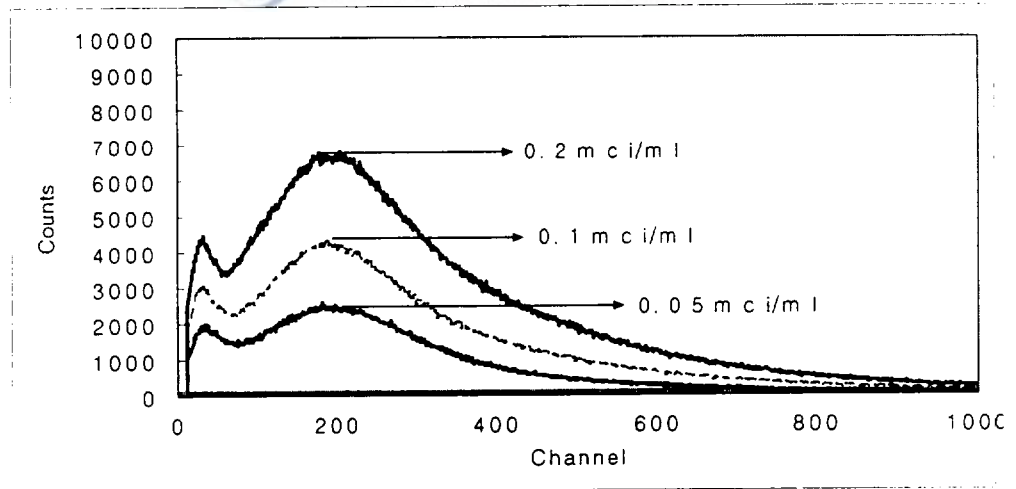


Fig. 35. The pulse height spectra measured with the open type sensor for the ^{14}C sources (0.5mm diameter fibers)

Fig. 36과 Fig. 37은 각 용액의 방사능 농도 변화에 따른 총계수치의 변화를 나타낸 그래프이다. 총계수치는 배경방사능 총계수치를 뺀 값이다. 선원의 방사능 농도와 총계수치 간에 완전한 비례관계는 성립하지 않으나 앞서 언급한 바와 같이 매번 측정할 때마다 접속부에서의 광손실의 편차, 센서에 잔류하는 방사능 등을 감안하면 상당히 좋은 결과로 여겨진다.

전반적으로 Sensor A가 Sensor B보다 높은 계수치를 보이고 있는데 이는 Sensor B인 경우 core부에서 생성된 일부의 광이 열려 있는 한쪽 끝으로 세어나가기 때문인 것으로 분석된다. 광 손실을 줄일 수 있도록 구부린 형태로 제작된 Sensor A는 ^3H 용액에 대해서는 약 20%정도 높은 감도를 보였으며, ^{14}C 용액에 대해서는 11-16%의 높은 감도를 보였다.

위 결과로써 ^{14}C 용액인 경우 측정된 총계수치의 크기에 근거하여 불 때 사용된 방사능 농도 즉, 0.05, 0.1, 0.2 mCi/ml보다 훨씬 낮은 μCi 범위에서의 적용가능성을 두고, 실험에 사용된 세 가지 센서 가운데 가장 검출효율이 높은 Sensor A(직경 0.5mm 섬광광섬유의 닫힌 형태)를 이용하여 실험해보았다.

Fig. 38은 Sensor A의 대해서 ^{14}C 용액 1, 3, 5 $\mu\text{Ci/ml}$ 의 농도로 측정된 펄스높이스펙트럼이고, Fig. 39는 농도에 따른 방사능의 총계수치를 나타낸 것이다. 스펙트럼의 모양은 앞의 경우와 유사하나 저에너지 채널에서 계수치가 상대적으로 현저히 높아지는 양상을 보이고 있는데 이에 원인에 대해서는 더 규명이 필요한 것으로 여겨진다. 낮은 방사능 농도로 인해 발생된 신호는 미약하나, 용액의 방사능 농도와 총계수치간에 비교적 양호한 선형적 관계가 유지됨을 관찰할 수 있다.

Fig. 40과 Fig. 41은 플라스틱 섬광광섬유 직경에 따른 방사능 농도와 총계수치간의 차이를 나타낸 것이다. 여기서 측정된 센서는 직경 0.5mm, 1mm 모두 열린 형태로 제작된 것을 이용하였는데, 두 용액에 대한 총계수치를 비교해 본 결과 직경 0.5mm의 플라스틱 섬광광섬유가 1mm보다 검출 효율이 훨씬 더 높음을 보였다.

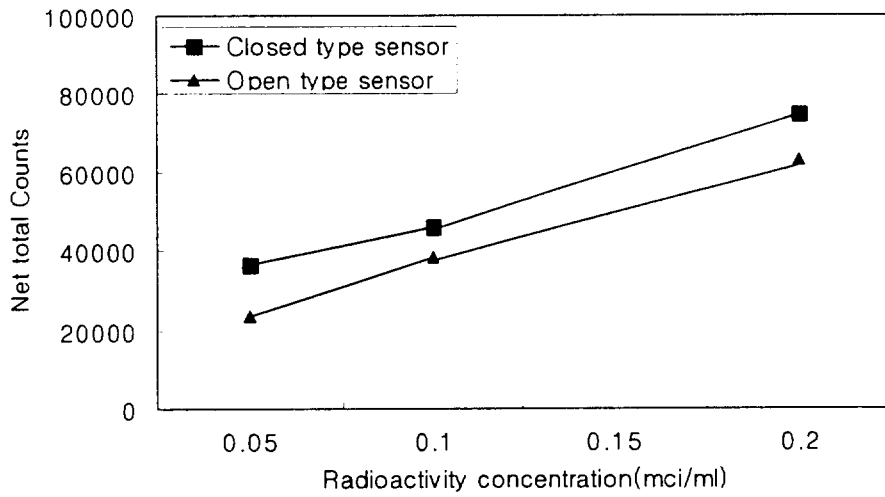


Fig. 36. The net total count with respect to the radioactivity concentration of ^3H sources (0.5mm diameter fibers)

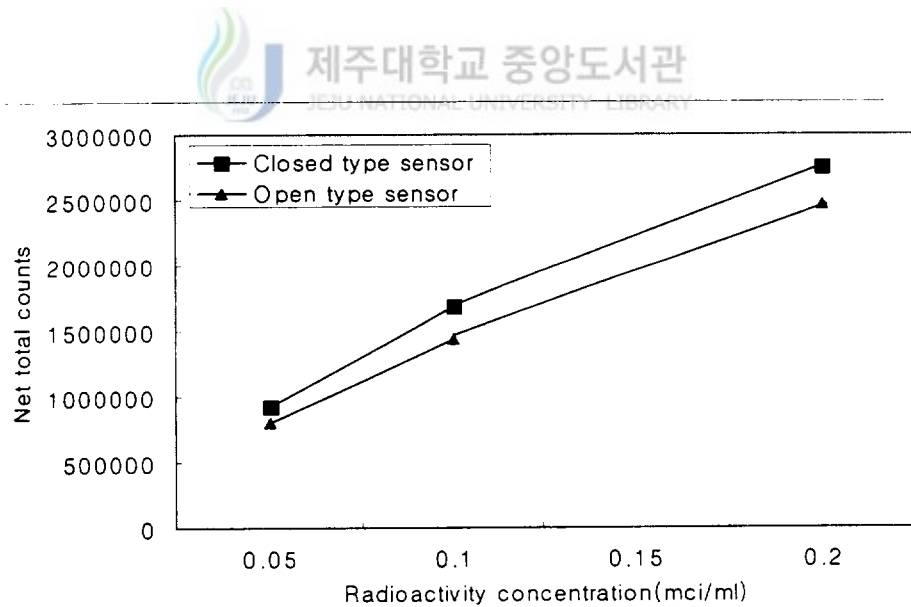


Fig. 37. The net total count with respect to the radioactivity concentration of ^{14}C sources (0.5mm diameter fibers)

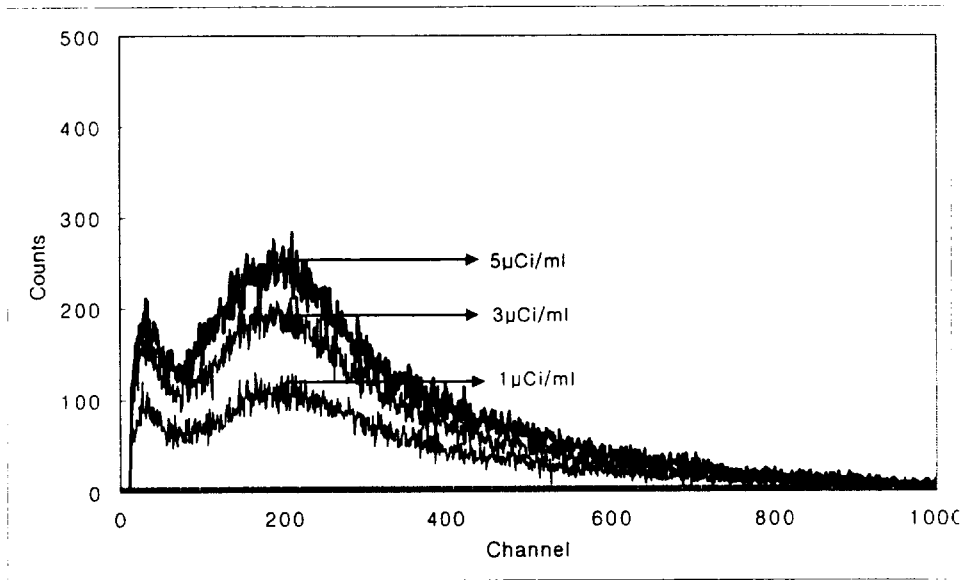


Fig. 38. The pulse height spectra measured for ^{14}C in $\mu\text{Ci/ml}$ concentrations with the closed type sensor. (0.5mm diameter fibers)

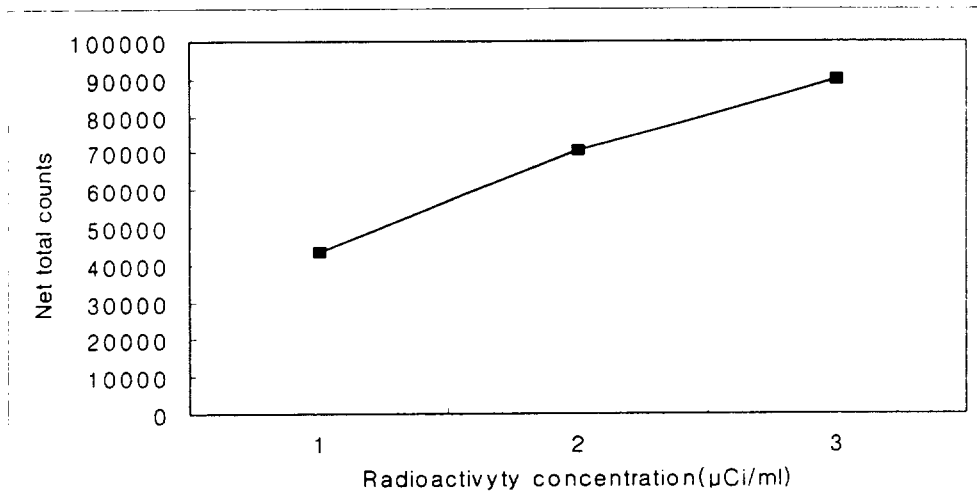
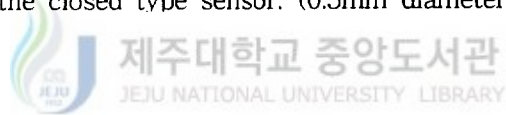


Fig. 39. The net total count with respect to the radioactivity concentration of ^{14}C in $\mu\text{Ci/ml}$ (0.5mm diameter fibers)

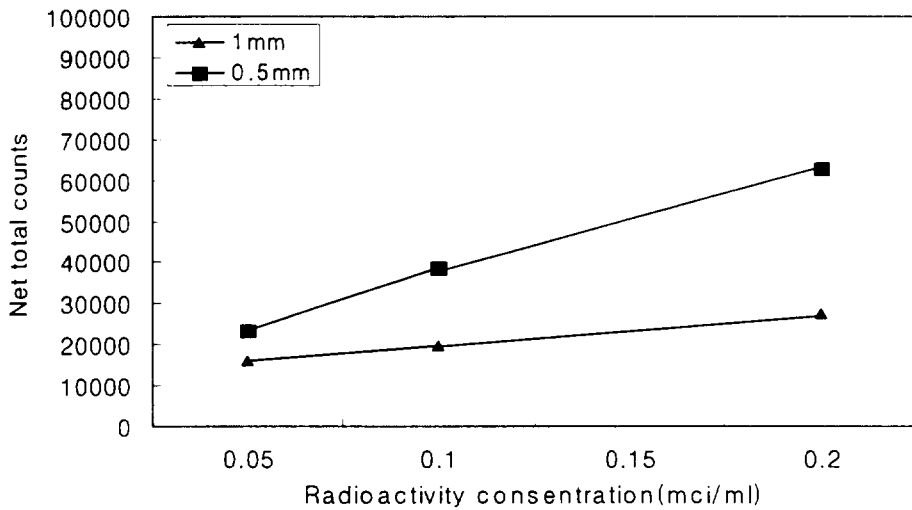


Fig. 40. The net total count measured for ^3H with the open type sensors constructed with fibers of different diameters

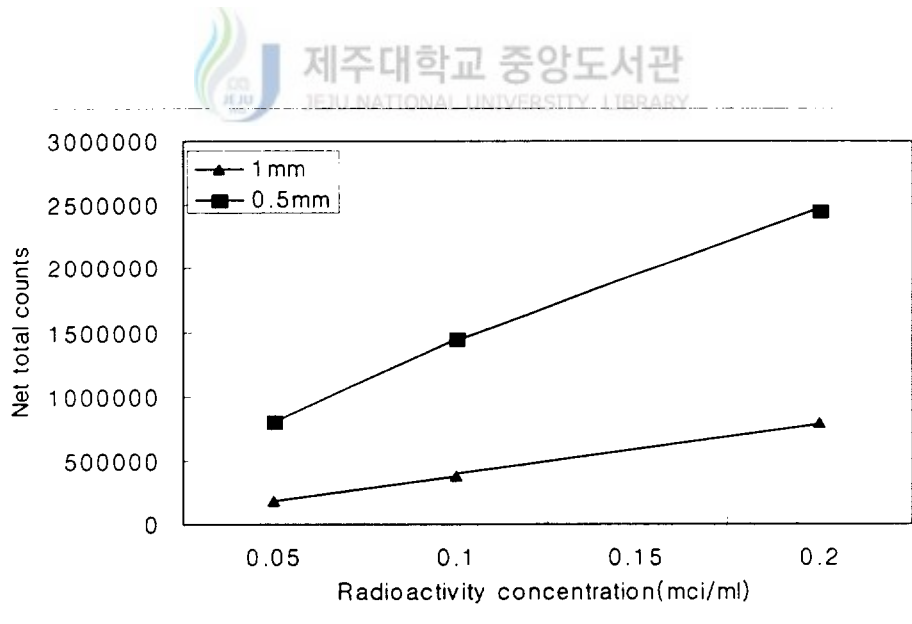


Fig. 41. The net total count measured for ^{14}C with the open type sensors constructed with fibers of different diameters

2. Coincidence 회로 측정용 센서에 대한 실험

직경이 각각 0.5, 1mm로 제작된 수축관형 센서에 대해서 펄스높이분포(pulse height spectrum)를 측정한 결과는 Fig. 42~Fig. 45에 나타내었다.

^3H 와 ^{14}C 용액 모두에 대한 스펙트럼의 모양은 비슷하게 나타났다.

원통형 센서의 파고 스펙트럼에서 나타난 저차벨에서의 왜곡현상은 조금 없어졌으나 광의 노출이나 전기적 잡음에 의한 noise는 완전히 없어지지 않은 것으로 분석된다.

Fig. 46와 Fig. 47는 직경에 따른 방사능 농도의 총계수치를 나타낸 것이다. 두 종류의 선원에 대해서 용액의 방사능과 총계수치간에는 거의 비례관계가 성립됨을 볼 수 있다.

각 선원에 대한 센서의 감도를 비교한 결과 0.0186Mev 베타선을 방출하는 ^3H 에 비하여 0.156Mev의 베타선을 방출하는 ^{14}C 이 상대적으로 높은 감도를 보였다.

또한, 원통형 센서의 결과와 마찬가지로 다발로 묶었을때 상대적으로 단면적이 넓은 0.5mm의 광섬유가 1mm보다 더 높은 검출 효율을 보였다.

이는 Fig. 48에서 보는 것과 같이 일정한 튜브에 상대적으로 많은 가닥을 메울 수 있는 0.5mm의 섬광광섬유가 용액과 접촉하는 단면적이 훨씬 크기 때문인 것으로 분석된다.

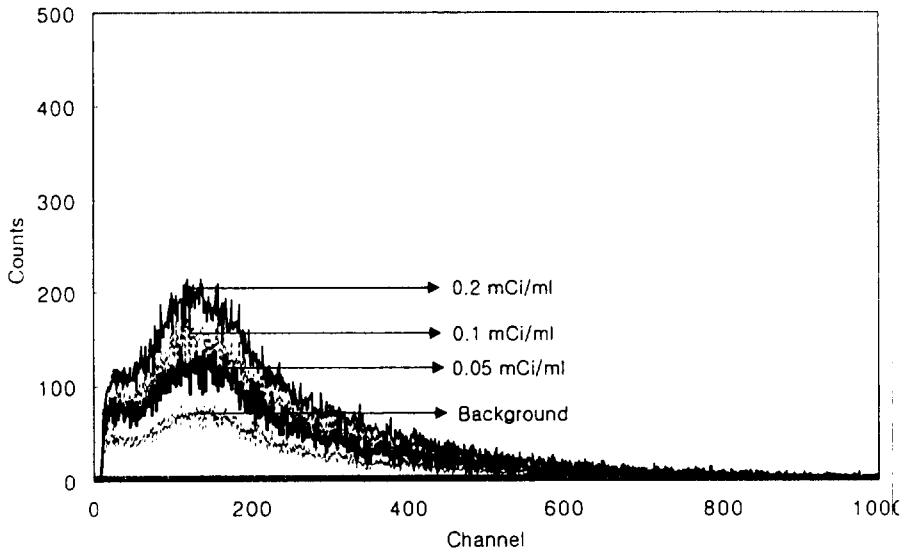


Fig. 42. The pulse height spectra measured using the coincidence circuit for the ^3H sources (1mm diameter fibers)

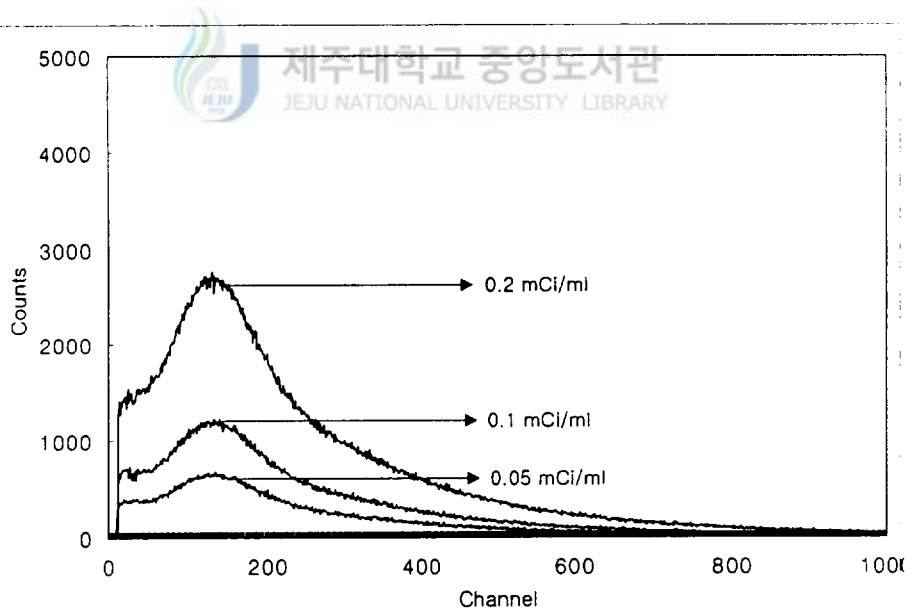


Fig. 43. The pulse height spectra measured using the coincidence circuit for the ^{14}C sources (1mm diameter fibers)

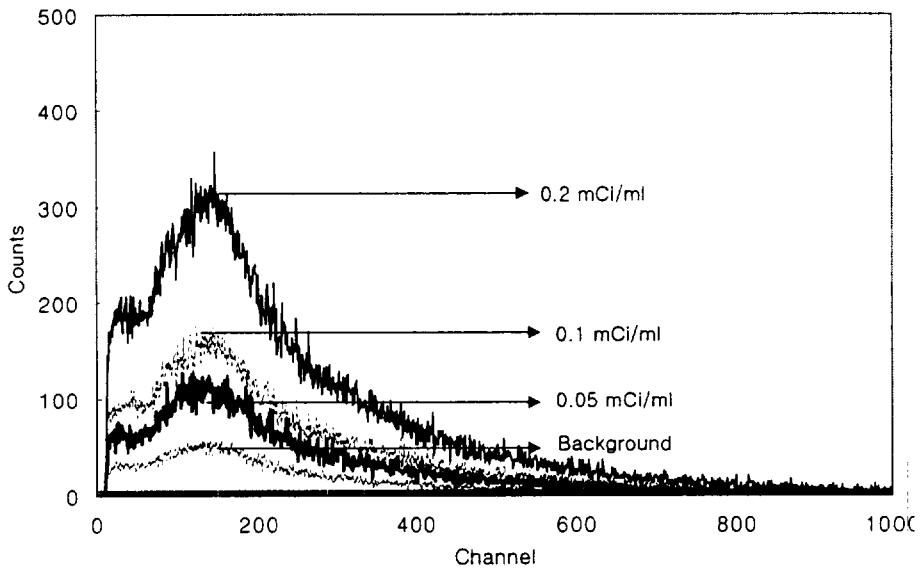


Fig. 44. The pulse height spectra measured with the sensor by using coincidence circuit for the ^3H sources (0.5mm diameter fibers)

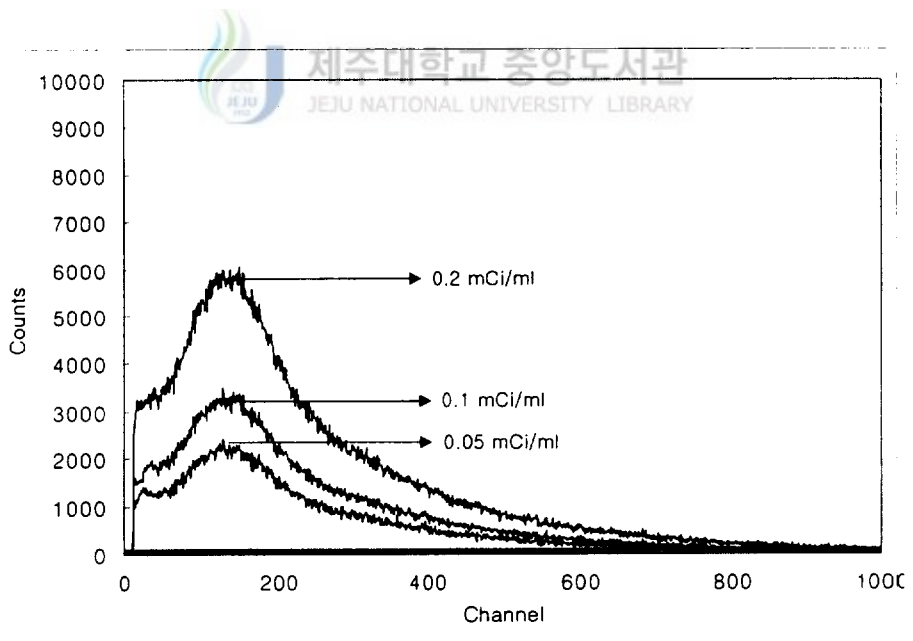


Fig. 45. The pulse height spectra measured with the sensor by using coincidence circuit for the ^{14}C sources (0.5mm diameter fibers)

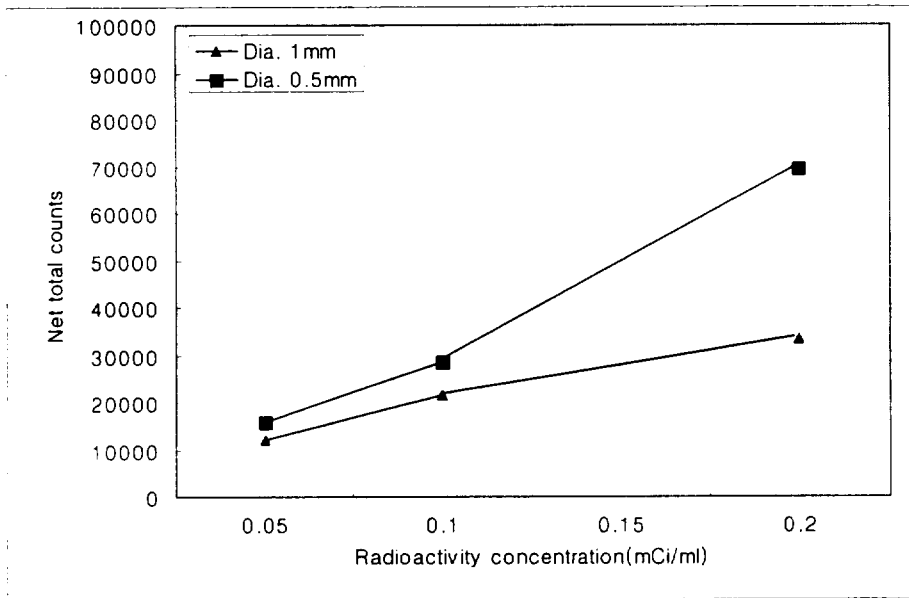


Fig. 46. The total count measured for ^3H with the sensor by using coincidence circuit constructed with fibers of different diameters

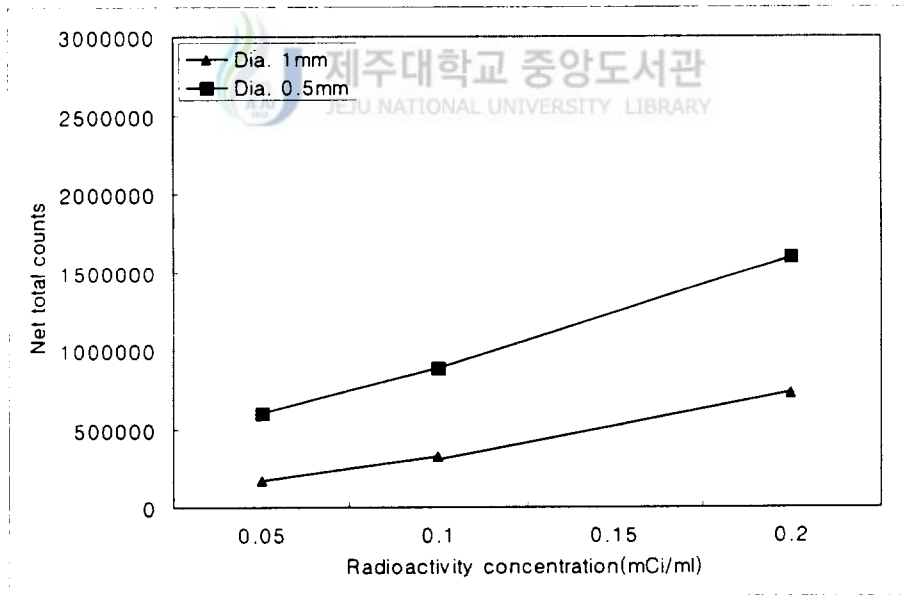


Fig. 47. The total count measured for ^{14}C with the sensor by using coincidence circuit constructed with fibers of different diameters

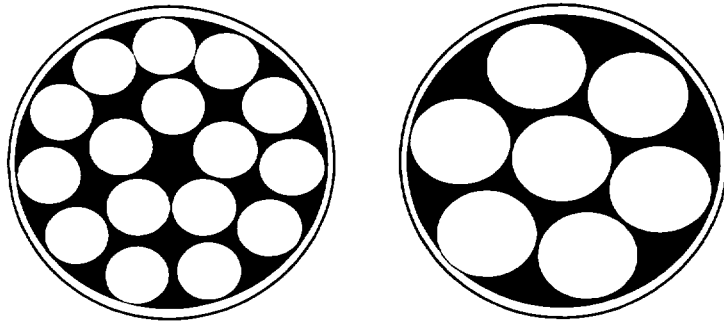


Fig. 48. Comparison of the cross sectional areas using fibers of different diameters

V. 결 론

본 연구에서는 광섬유와 방사성 용액을 직접 접촉함으로써 광섬유를 활용한 저에너지 베타선 측정용 센서 개발의 가능성을 시험하기 위하여 직경이 0.5, 1mm 인 플라스틱 섬광광섬유를 다발형태로 묶어서 알루미늄 관에 삽입한 센서를 제작하였으며 이것을 사용하여 ^3H , ^{14}C 용액의 방사능을 측정하는 실험을 수행하였다. 시험 대상으로 삼은 용액의 방사능 농도는 ^3H , ^{14}C 공통적으로 0.05, 0.1, 0.2 mCi/ml이고 ^{14}C 에 대해서는 1.0, 2.0, 3.0 $\mu\text{Ci/ml}$ 를 추가로 포함하였다.

센서는 non-coincidence 회로, coincidence 회로용으로 구분하여 제작하였다.

Non-coincidence 회로용 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 약간의 편차는 있었지만 매우 양호한 선형적인 결과를 보였다. 직경 0.5mm를 이용하여 닫힌 형태로 제작된 센서의 경우 열린 형태로 제작된 센서보다 ^3H 용액에 대해서는 약 20%정도 높은 감도를 보였으며, ^{14}C 용액에 대해서는 11-16%의 높은 감도를 보였다. 직경 1mm의 열린 형태로 제작된 센서의 경우, 열린 부위에 반사체를 입혀서 추가로 실험한 결과 ^3H 용액에 대해서는 약 27%, ^{14}C 용액에 대해서는 약 18%정도 검출 효율이 높게 측정되었다.

가장 검출효율이 높은 직경 0.5mm의 닫힌 형태에 대해서는 에너지가 높은 ^{14}C 의 μCi 측정을 하였는데, 충분한 감도를 보였다.

Coincidence 회로용 센서는 광섬유의 양쪽에 전송용광섬유를 연결할 수 있도록 제작되었다. Non-coincidence와 마찬가지로 용액의 방사능 농도와 센서의 총계수치 간에는 비교적 선형적인 결과를 보였다. 차이점은 non-coincidence에서 발생한 낮은 채널에서의 noise는 현저히 줄어드는 현상을 보였다.

각 선원에 대한 센서의 감도를 비교한 결과 0.0186Mev 베타선을 방출하는 ^3H 에 비하여 0.156Mev의 베타선을 방출하는 ^{14}C 에 대해서 세 가지 센서 모두 11-40배

의 높은 감도를 보였다. 광섬유의 직경에 따른 방사성 농도와 센서의 총계수치간에 차이를 보였는데 이는 용액과 반응하는 단면적의 크기에 따른 것으로 분석되었다.

광섬유를 이용한 베타선 측정용 센서 제작에서 센서 접속 부의 불완전한 Polishing상태, 전송용 광섬유간의 불균일한 결합, 집광상의 효율 등의 편차로 본 연구에서는 다소 편차가 발생하였지만 이러한 문제점을 해결한다면 방사성 용액에 직접 접촉하여 방사능 농도를 측정할 수 있는 검출기의 개발이 가능할 것이다.



참 고 문 헌

A. Ikhlef, M. Skowronek and A.S. Beddar, "X-ray imaging and detection using plastic scintillating fibers" Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 442, 2000, pp. 428~432

D. R. Krause, C. F. Draut, and J. F. Van Patten, "Real-time fiber optic tritium monitoring in fluids", WM'01 Conference, February 25-March 1, 2001, Tucson, Arizona.

E. Takada et al., "Neutron Radiation Distribution Sensor Using Flexible Plastic Scintillating Fiber Combined with the Time-of-Flight Technique", IEEE Transaction On Nuclear Science, Vol. 42, No.4, August 1995.

Francis T. S. Yu and Shizhuo Yin, "Fiber Optic Sensors", Marcel Dekker, 2002.

Jae Woo Park and Gye Hong Kim, "Detection of Gamma Rays Using Plastic Scintillating Fiber", J. Nucl. Sci. Tech. supplement 4, 2004.

G. Suft et al., "A scintillating fibre detector for the Crystal Barrel experiment at ELSA", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 538, 2005, pp. 416~424

Glenn. F. Knoll, "Radiation Detection and Measurement", John Wiley & Sons, Inc., 2000, 802 pp.

Kyung Hwa Kim and Seung Ai Shin, "Electron-Capture Effects in Activity Determination of ^{192}Ir by a 4π β - γ Coincidence Counting Method". Journal of the Korean Physical Society, Vol.30, June 1997, pp. 241~246

R. Van Green, "Optical Fibere Sensing and Systems in Nuclear Enviroments" Proceeding of SPIE, Vol 2425, Mol, Belgium, 1994.

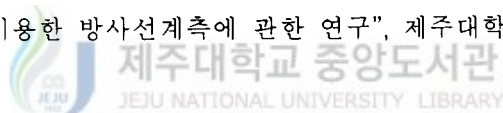
고성진 등, "방사선계측학", 청구문화사, 1999, pp. 341~370

김계홍, "Tapered 광섬유섬광체 센서 제작 및 특성 연구". 제주대학교 석사논문, 2004

정원채, 김종현, "광전자공학", MRC 미래컴, 2000, pp. 173~215

홍상범, "광섬유를 이용한 방사선계측에 관한 연구", 제주대학교 석사논문, 2002.

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.



감사의 글

지난 연구실 생활을 돌이켜 한 편의 논문으로 대신하기엔 많은 아쉬움이 남습니다. 연구실에서 보낸 2년이라는 생활은 제 인생에 있어서 많은 경험과 배움의 기회를 제공했던 소중한 시간이었다고 생각합니다. 이제 논문을 정리하면서 그동안 격려해주시고 도움을 베풀어주신 많은 분들께 감사의 인사를 드리고자 합니다.

무엇보다도 대학원 생활 내내 많은 도움과 관심을 베풀어주시고, 격려를 아끼지 않고 자상하게 논문을 지도해주신 박재우 교수님께 진심으로 감사드립니다. 또한 바쁘신 중에도 따뜻한 관심과 조언을 아끼지 않으신 물리학과 유영훈 교수님께도 정말 감사를 드립니다. 그리고 수업을 통해 많은 가르침을 주셨던 이윤준 교수님, 이현주 교수님, 천원기 교수님, 김 신 교수님, 정범진 교수님, 김남진 교수님께도 깊은 감사를 드립니다. 여러 가지로 부족한 후배의 부탁에도 성심성의껏 도움을 주셨던 연구실 선배님들이신 상범오빠, 계홍오빠, 정선언니, 현조언니에게도 감사의 말씀을 드립니다. 또한 어려운 일이 있을 때 묵묵하게 옆에서 도와준 용호, 석주, 범환, 재훈, 민우, 승보, 순철인 연구실 식구들에게도 고마움을 전합니다. 졸업하기까지 많은 관심과 도움을 주신 김지훈, 이승원 선생님께도 감사드립니다. 실험을 하는데 있어서 많은 조언과 관심을 아끼지 않으신 방사능응용과 학연구소의 송성준 선생님, 홍경애 선생님, 그리고 공과대학 부속공장에 고규현 선생님께도 감사의 뜻을 전하고 싶습니다.

에너지공학과에 들어와 항상 관심있게 후배를 챙겨주시고 좋은 추억을 많이 만들어주신 준호오빠, 영주언니, 형석오빠, 인혁오빠, 덕원오빠, 상범오빠와 많은 선배님들께 감사하다는 말씀을 드리고 싶습니다. 대학원에 같이 입학해서 힘든 일들을 함께 나누었던 두혁오빠, 상혁오빠, 유일한 동기인 성애에게도 앞길에 행운이 있길 기원하며 고맙다는 말을 하고 싶습니다.

처음 에너지공학과에 입학했을 때, 여학생이 6명밖에 없어서 당황했던 저에게 좋은 친구가 되어주고 사랑으로 감싸준 소연, 경희, 보나, 형진 그리고 99학번

동기들에게도 고마움을 전합니다. 어렸을 적부터 저의 즐거움과 괴로움을 함께 나눠준 영원한 친구인 미형, 혜진, 영희, 은정에게도 고맙단 말을 전하고 싶습니다. 때로는 힘들고 지친 학교생활에 안식처가 되어주고 용기를 주었던 서문성당 청년회의 선,후배님들에게도 감사의 뜻을 전하며, 항상 아버지, 어머니와 같은 마음으로 사랑을 주신 임문철 신부님, 박해극 선생님, 고성자 선생님께도 감사의 말씀을 드립니다.

마지막으로 항상 저의 모든 것을 묵묵히 성원하고 기다려주는 너무나 사랑하는 어머니와 동생 미영, 찬덕 그리고 부족한 딸을 너무나 아껴주시고 자랑스러워 하셨던 하늘에 계신 아버지께 이루 말할수 없이 감사드리며 이 논문을 바칩니다.

