

碩士學位論文

Tapered 광섬유섬광체 센서 제작 및 특성 연구



濟州大學校 大學院

에너지工學科

金 桂 弘

2003년 12월

Tapered 광섬유섬광체 센서 제작 및 특성 연구

指導教授 朴 在 雨

金 桂 弘

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



金 桂 弘의 工學碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 李 憲 周 印

委 員 朴 在 雨 印

委 員 金 信 印

濟州大學校 大學院

2003年 12月

Fabrication and a Study on the Tapered Scintillator Radiation Sensors

Gye-Hong Kim

(Supervised by Professor Jae-Woo Park)



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF NUCLEAR AND ENERGY ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

2003. 12.

목 차

LIST OF FIGURES	iii
LIST OF TABLES	vi
SUMMARY	vii
I. 서 론	1
II. 이론적 배경	3
1. 유기섬광체(Organic scintillator)의 원리 및 특성	3
1) 유기물 중의 섬광 메카니즘	3
2) 유기 섬광체의 종류 및 특성	4
2. 광섬유	5
1) 광섬유의 구조	6
2) 광섬유의 도파원리	7
3) POF의 종류	8
4) POF의 전송 손실	9
5) POF의 제조	13
3. 국내외의 연구동향	15
1) 한국 원자력연구소(KAERI)	15
2) 미국 Pacific Northwest National Laboratory(PNNL)	16
3) 일본 원자력연구소(JAERI)	17
4) 일본 나고야 대학	18

III. 실험장치 및 실험방법	20
1. 센서부분의 구성 및 계측 방법	20
1) 다발형 광섬유섬광체 센서 제작	22
2) Tapered 형태의 플라스틱광섬유섬광체 센서 제작	22
2. 신호전송을 위한 광섬유종류 및 특성	28
3. 신호처리 장치 및 구성	28
4. 방사선원의 구성 및 배치	30
IV. 실험결과 및 고찰	31
1. 다발형 광섬유 센서에 대한 실험	31
2. Tapered 섬광체 센서에 대한 실험	33
VI. 결 론	41
참 고 문 헌	42



LIST OF FIGURES

Fig. 1 Energy levels of an molecule.	4
Fig. 2 Structure of Optical Fibers.	6
Fig. 3 Characteristic of light on the interface.	8
Fig. 4 The track of light in the optical fibers.	8
Fig. 5 The absorption attenuation of PMMA.	11
Fig. 6 The manufacturing technique of POF : (a) Continuous extrusion, (b) Batch extrusion (c) Preform drawing.	14
Fig. 7 Detection system of radiation.	16
Fig. 8 The measured current versus the dose rate.	16
Fig. 9 Pulse height spectra for the storage-container monitor under neutron, gamma and mixed excitation.	17
Fig. 10 Emission spectrum of γ -ray measured with Cr-doped Al_2O_3 Scintillators around the reactor core.	18
Fig. 11 Scintillator-painted optical fiber system and fiber driving unit.	19
Fig. 12 Thermal neutron flux distribution in the core of KUCA.	19
Fig. 13 Experimental setup for the test of the optical sensors.	20
Fig. 14 Emission spectrum for Plastic scintillating fiber (BCF-12).	21
Fig. 15 Picture of Multi-strand scintillating fiber sensor.	22
Fig. 16 Emission spectrum of undoped polystyrene for an excitation at 252nm.	23
Fig. 17 Absorption of polystyrene measured in an undoped PS rod.	24
Fig. 18 Preparation procedure of plastic scintillator.	25
Fig. 19 The Photograph of the procedure for initiating polymerization on the stirrer.	25
Fig. 21 (a),(b) Free radical reaction process in PMMA.[김지훈 2002]	26
Fig. 22 The Photograph of Tapered plastic scintillator.	27
Fig. 24 PMT case used to fix transmitting fiber on the window of PMT. ...	29
Fig. 25 Arrangement of the source and the fiber sensor for detection.	30

Fig. 26 Experimental setup using lead bricks.	30
Fig. 27 Pulse-height spectrum measured with the sensors having the different number of strands for a $3\mu\text{Ci Cs-137}$ source. (a) is the case using the lens, and (b) is the case without using the lens. Measured time is five minutes for every case.	32
Fig. 28 The total counts measured with sensors having the different number of strands. 'unused' denotes the measurement using the lens. 'use' denotes the measurement without using the lens.	32
Fig. 29 Pulse-height spectra measured for a $3\mu\text{Ci Cs-137}$ source with sensors made of 20 strands of fibers with different tube.	33
Fig. 30 Pulse-height spectrum measured with the tapered scintillator sensor. PPO and dPOPOP concentrations are 0.1%, 0.01%(mol/ℓ), respectively.	34
Fig. 31 Pulse-height spectrum measured with the tapered scintillator sensor. PPO and dPOPOP concentrations are 0.1%, 0.02%(mol/ℓ), respectively.	35
Fig. 32 Pulse-height spectrum measured with the tapered scintillator sensor. PPO and dPOPOP concentrations are 0.1%, 0.03%(mol/ℓ), respectively.	35
Fig. 33 Pulse-height spectrum measured with the tapered scintillator sensor. PPO and dPOPOP concentrations are 0.1%, 0.04%(mol/ℓ), respectively.	36
Fig. 34 Proportionality of the total count versus the source activity measured with the sensors having different concentrations of dPOPOP.	36
Fig. 35 Total counts as a function of PPO concentration. dPOPOP concentration is 0.02%.	37
Fig. 36 Pulse-height spectrum measured with the tapered scintillator sensor. bPBD and dPOPOP concentrations are 0.1%, 0.01%(mol/ℓ), respectively.	37
Fig. 37 Pulse-height spectrum measured with the tapered scintillator sensor. bPBD and dPOPOP concentrations are 0.1%, 0.02%(mol/ℓ), respectively.	38
Fig. 38 Pulse-height spectrum measured with the tapered scintillator sensor.	

bPBD and dPOPOP concentrations are 0.1%, 0.04%(mol/ℓ), respectively.	38
Fig. 39 Pulse-height spectrum measured with the tapered scintillator sensor. bPBD and dPOPOP concentrations are 0.1%, 0.06%(mol/ℓ), respectively.	39
Fig. 40 Proportionality of the total count versus the source activity measured with the sensors having different concentrations of dPOPOP.	39
Fig. 41 Pulse-height spectrum measured with the tapered scintillator sensor. bPBD and dPOPOP concentrations are 0.1%, 0.02%(mol/ℓ), respectively.	40
Fig. 42 Pulse-height spectrum measured with the tapered scintillator sensor. bPBD and dPOPOP concentrations are 0.1%, 0.01%(mol/ℓ), respectively.	40



LIST OF TABLES

Table 1 Properties of The Plastic Scintillating Fiber(BCF-12).	21
Table 2 Properties of polymers used in the fabrication of scintillating fibers.	23
Table 3 Optical Properties of fluorescent molecules used in the elaboration of scintillating fibers.	23
Table 4 The specification of plastic optical fiber.	28



Summary

Optical fibers have been investigated for their uses as sensor materials in various nuclear applications. Comprehensive overviews of their potential usages in nuclear environments can be found in the literatures. Optical fibers with doped scintillating elements in the core have drawn special interests as nuclear radiation detectors. The two important functions of a scintillating optical fiber, as a radiation detector, are scintillator (light emitter) and light transmitter. When radiation interacts with the core material, scintillation occurs and resultant lights are transmitted through the fiber to an opto-electronic device such as a photomultiplier tube. Optical fiber sensors have several advantages as compared to other sensors of conventional material. Since they do not require electric power in the sensor part, they are less susceptible to trouble in harsh environments such as underground or underwater. At relatively low cost a multi-point distributed radiation monitoring system could be made using the fiber sensors. Furthermore, unlike the conventional scintillating counters they are not influenced by any magnetic field surrounding them.

This study has been conducted to investigate the feasibility of using scintillating optical fibers for the detection of gamma rays emitted by ^{137}Cs . Several types of gamma-ray sensors have been constructed by packing different numbers of fibers into aluminum tubes, and tested to detect the ^{137}Cs gamma ray. During the study it has been found that a tapered fibers might be more efficient to collect the lights produced inside the sensor and transfer them into the transmitting fiber. In order to investigate the effectiveness of the tapered fiber, tapered plastic scintillators, composed of polystyrene with minute amount of dPOPOP and PPO or bPBD, have been fabricated and tested for the detection of gamma rays from 1.0, 1.5, 3.0 and 5.0 μCi ^{137}Cs sources. The pulse hight spectra and the relationship between the radioactivity and the total counts were analyzed. It was concluded that the tapered scintillating optical fiber could be practically applied to the development of gamma-ray sensors which are suitable in μCi -level radiation measurements.

I. 서론

현재 국내 원자력 기술은 한국형 원자로 설계 및 건설기술의 국산화, 차세대를 이어갈 신형원자로에 대한 연구 등 전력산업분야에 있어서 괄목할만한 성과를 이루었으며, 방사선 및 방사선 동위원소를 이용한 인체진단 및 치료, 공산품의 품질관리, 농산물 개량, 보존기술 등 비발전 분야의 방사선 응용기술도 최근 들어 급속히 성장하고 있다.

그러나 원자력 기술의 바탕을 이루는 제반 기초 기술 분야는 비교적 미비한 상태이다. 원자력 기술의 초석이 되어 여러 분야에서 응용가능한 방사선 검출기의 제작기술은 국내 기술수준의 낙후로 인하여 산업체로의 기술이전이 미약하여 필요한 기기의 전량을 외국으로부터 수입하고 있는 실정이다. 특히 방사선 검출기기의 핵심이 되는 섬광체의 제조 기술은 거의 전무한 실정이다.

현재 광섬유는 그 특성을 살려 여러 가지 측정 센서로 이용되고 있으며, 원자력 분야에서도 다양한 목적의 센서 개발에 대한 연구가 진행되고 있다. [R. Van Geen 1994, 敦 木村 2001] 그 예로는 방사선, 온도, 압력, 진동, 부식 등을 감지하는 센서를 개발하는 것이다. 방사선 측정 측면에서 이러한 연구는 최근의 광학기술과 접목되어 다양한 방법으로 진보하고 있다. 광섬유를 활용한 방사선계측방법은 센서부분을 매우 소형화할 수 있어서 연료봉집합체 사이같이 기존의 방사선계측기로는 삽입이 곤란한 협소한 곳의 측정을 가능하게 할 수 있으며, 센서부위에 전원공급이 불필요한 장점을 활용하여 토양이나 수중에 직접 적용이 가능하다. 또한 광섬유의 광전도성과 비교적 비용이 저렴한 장점을 활용하여 원자력발전소, 가속기, 방사성폐기물 처분장 등에 센서를 분산 배치하여 여러 곳의 방사능을 한 곳에서 집중하여 감시하는데 유용하게 적용할 수 있다.

광섬유는 자체를 방사선 센서로 활용할 수 있을 뿐만 아니라 섬광체(Scintillator)와 조합하여 발생한 광을 전송하는 매체로서 활용할 수 있다. 전자의 경우는 광섬유에 섬광(Scintillation)을 일으키는 성분을 첨가하여 방사선과 반응하여 섬광을 발생하고 또 이것을 전송하는 매체로 활용하는 방법으로서 원자로 내부와 같이 주로 고준위 방사선장에 활용이 가능하다. 후자는 광섬유 끝부분에 큰 섬광체를 결합하여 여기서 발생한 광을 전송하는 매체로 활용하는 방법으로 환경방사능 계측과 같이 저준위 방사선장에 활용될 수 있다. 특히 미국, 일본 등에서는 방사선 계측수단으로 그 가능성이 인정되어 이미 연구가 활발히 진행 중이다.[T. Kakuta 1998]

본 연구에서는 이러한 방사선 센서의 가능성을 분석하기 위하여 BICRON BCF-12 직경 1mm 광섬유를 다발형태로 묶은 센서를 제작하여 ^{137}Cs 감마선원에 대해서 시험하였다. 센서에 사용된 광섬유 가닥수에 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}Cs 감마선원에 적용하여 출력되는 펄스 파고 스펙트럼을 분석하였고 선원의 방사능과 총계수치간의 비례관계를 분석하였다.



II. 이론적 배경

광섬유를 활용한 방사선계측방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 즉, 광섬유를 자체를 방사선 센서로 활용할 수 있을 뿐만 아니라 섬광체(Scintillator)와 조합하여 발생한 광을 전송하는 매체로서 활용할 수 있다. 전자의 경우는 광섬유에 섬광(scintillation)을 일으키는 성분을 첨가하여 방사선과 반응하여 섬광을 발생하고 또 이것을 전송하는 매체로 활용하는 방법과 광섬유 끝에 부피가 큰 섬광체를 결합하여 여기서 발생한 광을 전송하는 매체로 활용하는 방법이 있다.[M. Tatsuyuki 1994]

1. 유기섬광체(Organic scintillator)의 원리 및 특성

1) 유기물 중의 섬광 메커니즘

유기물 중의 형광과정은 단일 분자의 에너지 레벨 사이에서 전이에 의해서 생긴다. 따라서 이것은 분자들의 종류에 의해서 결정되기 때문에 그 물리적인 상태와는 무관한 것이다. 보기를 들면 안트라센(anthracene)은 고체의 다결정 상태에서 서나 또 증기로서 또는 다량성분으로 이루어진 용액의 일부분으로서도 형광이 관측된다. 실용적인 유기섬광체의 대부분은 π -전자 구조로써 알려져 있는 대칭적인 성질을 가진 어떤 종류의 유기분자에 기초를 두고 있다.[G F. Knoll 2000]

유기결정의 형광발생은 Fig. 1에서와 같이 분자의 에너지 전이에 의한다. 방사선에 의해서 안정상태에 있는 분자가 여기상태가 되어 그림의 A_0 에서 A_1 으로 올라간다. 분자는 격자진동이나 열의 형태로 에너지가 소비되어 B_1 으로 이동한다. B_1 레벨 역시 여기상태이며 안정상태인 B_0 로 되돌아가면서 $E_{B_1}-E_{B_0}$ 의 에너지를 가진 형광을 방출한다. 이 과정의 평균수명은 10^{-8} s 정도이다. 유기결정 신틸레이터 중에서 널리 사용되고 있는 것은 anthracene($C_{14}H_{10}$)과 trans-stilbene($C_{14}H_{12}$)이다. 이들 두 경우 모두 비교적 부스러지기 쉽고, 큰 것을 만들기 어려우며 형광의 붕괴시간이 매우 짧다. 형광의 붕괴시간이 짧다는 것은 분해시간이 짧다는 것으로 바람직한 특성이다. 또 신틸원자번호가 작기 때문에 γ 선 측정에는 부적당하고 β 선의 측정에 좋다. 특히 anthracene은 다른 유기 신틸레이터보다 높은 형광효율을 갖는다.

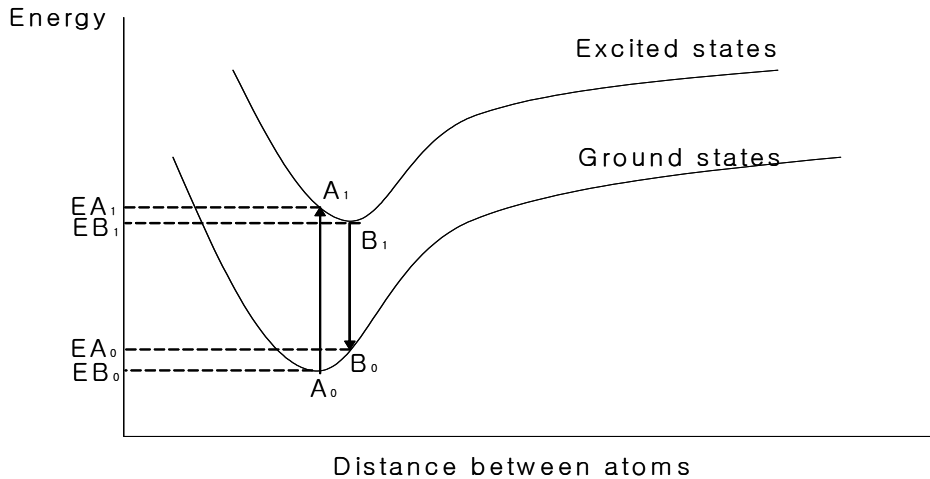


Fig. 1 Energy levels of a molecule.

2원 섬광체에서 입사방사선은 용매 내에 거의 모든 그의 에너지를 축적시키나 luminescence는 거의 전적으로 용질에 기인한다. 따라서 무기 섬광체의 경우에서와 같이 효율적인 에너지 전달이 인광체(phosphor) 덩어리로부터 소량 농도의 물질(무기섬광체에서는 활성제, 유기섬광체에서는 용질)로 이루어진다. 만일, 제2의 용질이 추가되면, 그것은 하나의 파장이동체(wavelength shifter)로서 작동한다. 즉 그것은 제1의 용질에 의해서 방출된 광의 파장을 증가시킨다. 따라서 방출된 복사선은 광전자 증배관의 음극 특성에 더욱 알맞게 된다.[정운혁, 1997]

2) 유기 섬광체의 종류 및 특성

유기섬광체들은 적당한 화합물질들을 결합시켜 만든다. 그들은 혼합체내에 들어 있는 화합물의 수에 따라서 1원, 2원, 3원 등으로 분류한다. 최고의 농도를 가진 물질을 용매, 다른 것들을 용질이라 부른다. 2원 섬광체는 하나의 용매와 하나의 용질로 구성되고, 3원 섬광체는 하나의 용매와 1차 용질, 2차 용질로 만들어진다. 유기섬광체에는 유기결정체, 플라스틱섬광체 및 액체섬광체 등이 있다.

유기 결정체로는 대표적으로 안트라센(anthracene), 스틸벤(stilbene) 등이 있다. anthracene은 $1.25 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 의 밀도를 가지며, 모든 유기섬광체 중에서 최고의 광전환효율을 가진다(NaI(Tl)의 약 1/3). 그리고 붕괴시간($\sim 30\text{ns}$)은 무기결정들보다 훨씬 짧다. anthracene은 상이한 형과 크기로 만들 수 있다. 스틸벤은

$1.15 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 의 밀도를 가지며, 붕괴시간이 짧다(4~8ns). 광전환 효율은 anthracene의 약 절반이다. 이것은 수 mm까지의 크기 무색의 단결정으로 만들 수 있다. 스틸벤 결정은 열과 기계적 충격에 민감하다.

플라스틱섬광체에는 유기섬광체를 용매로 녹인 후 이것을 고분자화 시켜 고용체로 만든 것이다. 그러나 플라스틱섬광체는 유기섬광체의 용기를 필요로 하지 않는 이점이 있다. 플라스틱섬광체는 가는 줄로부터 얇은 막에 이르기까지 어떤 크기나 형태로 만들 수 있으며, 물, 공기 및 많은 화학약품 등에 불활성이며, 따라서 방사성시료와 접촉해서 사용할 수 있다. 플라스틱섬광체에 많이 이용되는 용매는 polystyrene과 polyvinyltoluene이다. 만족스러운 용질은 p-terphenyl과 POPPO이다. 플라스틱섬광체의 밀도는 약 10^3Kg/m^3 이고, 광 출력은 anthracene보다 낮다. 붕괴시간은 짧고, 방출 스펙트럼의 최대강도에 대응하는 파장은 350 ~ 450nm이다. 일반적으로 사용되는 플라스틱섬광체의 상품명은 Pilot B, Pilot Y, NE 102 및 NE 110이다. 주석 및 납과 함께 사용된 플라스틱섬광체들은 5 ~ 100keV의 영역에서 X선 검출기로 사용된 적이 있으며, 얇은 플라스틱 섬광체막은 중성자 비행시간 측정(time-of-flight)에 유용한 검출기로서 판명되었다. 플라스틱 신틸레이터의 용매와 용질의 발광현상은 액체 신틸레이터와 동일하므로 β 선 계측에 사용할 수 있으며 다양한 형태로 제작이 용이하다. 특히 체적이 큰 신틸레이터를 만들 수 있기 때문에 전신 방사능계측기(Whole body counter)로서 이용된다.

액체섬광체는 효율을 올리기 위해서 큰 체적의 검출가 필요한 특징에 아주 유용하다. 예를 들면, 낮은 방사능의 β 방사체(^3H 및 ^{14}C 등)의 계수, 우주선의 검출 및 NE123섬광체를 사용한 MeV영역의 중성자 에너지 spectrum 측정 등이 있다. 액체섬광체는 다량(kℓ)으로 사용할 수 있고 사용하는 용기에 따라 어떠한 크기나 형태든지 원하는 대로 얻을 수 있기 때문에 이와 같은 측정에 아주 알맞다. [정운혁 1997, 고성진 등 1999]

2. 광섬유

광섬유는 인간의 머리카락 정도의 굵기에 수백 Tera Bit 급의 신호를 처리할 수 있고, 이러한 정보 처리의 속도는 일반적인 구리선의 약 수십만 배 이상의 처리 능력을 가지고 있다. 석영을 주 성분으로 하는 고 순도 유리는 그 자체의 뛰어난 광학 특성, 환경 안정성, 내열성 때문에 광섬유 및 유리는 깨지기 쉽고 형상 가공이 어려우며 일정 크기 이상의 형태를 가공함에 있어 생산성의 문제가

있기 때문에, 광학적으로 투명한 고분자 재료를 이용하여 기존 광학 유리 재료를 대체하고 있다. 이러한 응용에 있어서, 최근 세계적으로 가장 각광을 받고 있는 첨단 소재의 하나가 Plastic Optical Fiber(이하 POF)이다.

실질적으로 낮은 전송 손실 및 넓은 대역 특성을 갖는 GOF와 비교할 때 POF의 전송 특성은 매우 미흡하다. 그러나 POF의 장점으로서는 대구경 코어를 저가격으로 용이하게 얻을 수 있고, Numerical Aperture(이하 NA)가 높기 때문에, 광섬유 연결 시 접속 효율이 높으므로 고정밀도를 지닌 고가격의 광 Connector가 불필요하고, 또한 주위 부품과의 정밀 접속이 불필요하기 때문에 발광 소자에 저가의 Light Emitting Diode (이하 LED) 또는 Vertical Cavity Surface Emitting Laser (이하 VCSEL)를 사용할 수 있는 등 주변 부품의 저가화가 가능하다. 단면처리도 금속면 Hot-Plate를 사용하여 처리하는 등 기존의 GOF에서는 필수적인 고가의 단면 연마가 불필요하며, 외부 충격에도 안전하기 때문에 근거리 광통신망 설치에 필수적이며 많은 비용이 요구되는 절단, 연마, 접속, 포설 및 부품 등을 GOF와 비교하여 매우 저가로 처리할 수 있다.[C. Emslie 1988] 또한 전기 절연성이 뛰어나고 Electromagnetic Interference(이하 EMI)에 대한 영향을 받지 않아 잡음이 적고 오작동이 없어 안정도가 높은 센서의 용도로 사용이 가능하다.[R. E. Steele 1987]

1) 광섬유의 구조

광섬유는 Fig. 2와 같이 중앙에 빛을 도파시키는 코어(Core)가 있고, 그 주위를 클래드(Clad)가 둘러싸고 있는 2층 구조로 되어 있다. 빛이 코어 내를 전반사하면서 진행하도록 하기 위해 코어의 굴절률이 클래드의 굴절률보다 약간 큰 1.463 ~ 1.467 정도이며, 클래드의 굴절률은 1.45 ~ 1.46 정도이다. 따라서 빛을 코어와 클래드 경계면에 입사시킬 때 각도가 임계각보다 큰 각도로 입사된다면 광은 전반사되어 클래드 층으로 누설되지 않고 코어 내에 국한되어 멀리까지 전파되어 간다.

클래드의 주위를 둘러싸고 있는 코팅은 습기나 마모 등으로부터 광섬유를 보호하는 역할을 하는 동시에 광섬유의 취급을 손쉽게 한다. 코팅 부분에 사용되는 재료는 보통 유연하고 광 전력 손실이 큰 재료를 사용하며 단일 코팅형과 이중 코팅형이 있다.

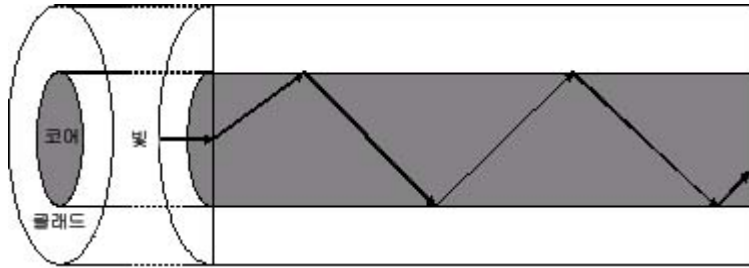


Fig. 2 Structure of Optical Fibers.

2) 광섬유의 도파원리

빛은 균일한 매질 중에서 직진하고, 서로 다른 매질의 경계면에서는 입사한 빛의 일부는 반사하며, 일부는 굴절하여 그대로 진행 한다. 빛의 반사에 대해서는 입사각 θ_i 와 반사각 θ_r 은 같고, 입사광선과 반사광선은 동일 평면 내에서 항상 반대 측에 있다. 굴절에는 입사각 θ_i 와 굴절각 θ_r 간에는 스넬의 법칙 [Snell's law]이 적용된다. 굴절률 n_1 의 매질로부터 θ_i 의 각도로 입사한 빛이 굴절률 n_2 의 매질로 θ_r 의 굴절각을 갖고 진행할 경우 입사각과 반사각 그리고 굴절률 n_1, n_2 간에는 다음과 같은 스넬의 법칙이 적용된다.

$$\frac{\sin\theta_i}{\sin\theta_r} = \frac{n_2}{n_1} .$$

입사하는 빛의 입사각이 임계각보다 더 큰 각도로 입사 되면 굴절 되는 빛은 없고, 입사된 모든 빛은 반사되는데 이러한 현상을 전반사 현상이라고 한다. 또한, 광통신에서는 레이저에서 나오는 빛을 광섬유 코어 내에 입사 시켜 코어 내를 따라 도파시켜야 하므로, Fig. 4와 같이 공기 중에서 광섬유 단면으로 향해 오는 광선이 광섬유 축과 이루는 각이 너무 크면 코어 안으로 굴절된 광선이 클래드와 코어의 경계면의 법선과 이루는 각 θ 가 임계각 θ_c 보다 작아져 경계면에서 굴절 현상이 발생 한다. 따라서 광전력은 코어와 클래드의 경계면에 부딪칠 때마다 점차 감소되어 장거리 전송이 불가능해 진다. 그러므로 장거리 전송 을 가능하게 하기 위해서는 θ 가 임계각보다 크게 해야 하는데, 이를 위해 각 θ_0 는 다음 식을 만족시켜 입사 시켜야 한다.

$$n_0 \sin\theta_0 < n_1 \sin(\pi/2 - \theta_c) = n_1 \cos\theta_c = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} .$$

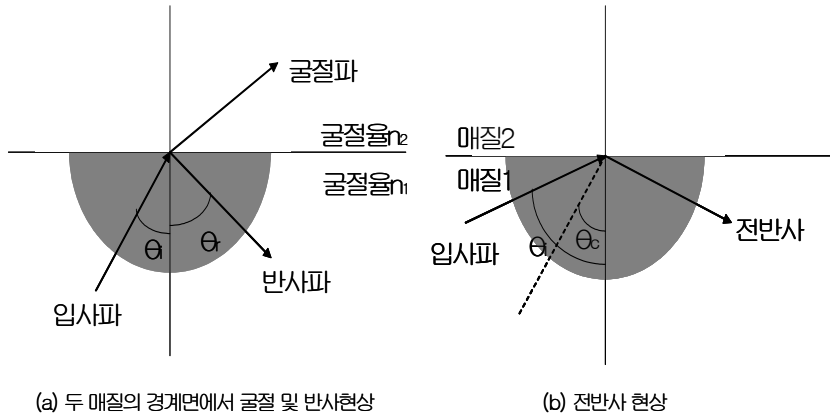


Fig. 3 Characteristic of light on the interface.

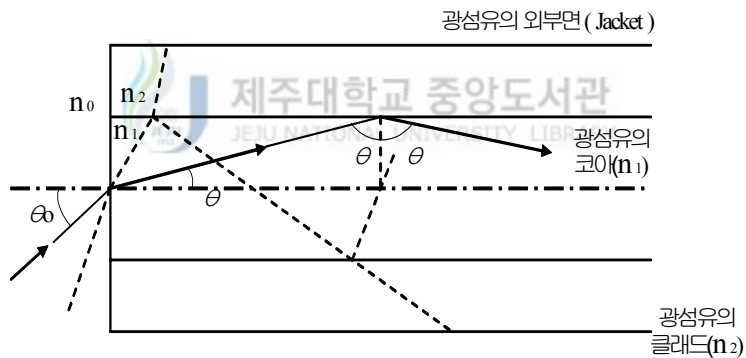


Fig. 4 The track of light in the optical fibers.

3) POF의 종류

광섬유를 통한 신호 전달은 기존의 구리선을 통한 전기 신호의 전달 개념을 광섬유를 통한 광신호의 전달 개념으로 전환한 것이다. 일반적으로 광섬유는 빛이 진행하는 코어와 진행하는 빛을 코어 내에 지속적으로 진행을 유도하는 클래드로 구성되며, 크게 나누어 단일모드형과 멀티모드형의 두 종류로 구분 된다. 단일모드 광섬유는 대부분 장거리 전송용으로 사용되는 GOF이며, 근거리 전송에 주로 이용되는 멀티모드 광섬유는 주로 50 μm 또는 62.5 μm 의 코어 직경을 갖는 GOF와 대부분의 POF가 해당된다. 현재까지 개발된 POF는 코어의 높은 굴절률

과 클래드의 낮은 굴절률의 굴절률 불연속 계면 상에서 빛이 전반사 하며 진행하는 SI-POF와, 코어의 굴절률이 중심축 에서 외부 방향으로 Gaussian 분포를 가지면서 낮아지는 중심축에 모든 입사광의 모드들이 교차하면서 진행하는 GI-POF의 두 종류가 있다. 두 종류 POF의 가장 큰 전송 특성으로는 굴절률 분포에 따른 모드 진행 거리 차이에 의한 모드 분산을 들 수 있다. SI-POF에서는 광섬유의 입사단을 동시에 출발하여 진행하는 빛의 각각의 모드들이 일정한 진행 거리 후에 진행 속도가 달라짐에 따라 출력단에서 검출된 각 모드가 넓게 분산, 중첩되어 결과적으로 정확한 정보의 검출이 어려워진다. 따라서 SI-POF의 경우는 저속, 저용량의 단거리 전송, 조명 및 Image Guide 등에 적합하며, 현재 시판되는 대부분의 POF는 PMMA를 사용한 SI형 멀티 모드 광섬유이다. GI-POF는 거리와 관계없이 일치하여 출력단에서 각 모드들의 신호가 분산이 없이 검출된다. 따라서 GI-POF는 전송 대역폭이 넓고 전송량이 큰 고속 전송에 적합하기 때문에 폭 넓은 응용이 기대되고 있다.

4) POF의 전송 손실

광섬유의 가장 중요한 특성 중의 하나는 전송손실 즉 감쇠 량이다. POF의 전송 손실의 요인은 일반적으로 광섬유를 구성하는 재료 자체의 손실과 광섬유의 제조 시에 발생하는 불순물이나 구조적인 결함에 의하여 생긴다. 불순물이나 구조의 결함에 의한 손실로는 주로 산란 손실이 해당하며, 정제 기술이나 인출 기술 등에 의하여 최소화 할 수 있으나 재료 자체에서 발생하는 흡수 손실은 POF의 고유 손실이라고 볼 수 있다. POF의 재료에 따른 전송 손실로는, 전자 천이 흡수 손실(Electronic Transition Absorption)과 적외 진동 흡수 손실(Carbon-hydrogen Vibration Absorption)로 크게 분류된다.[T. Kaino 1984] 일반적으로 고분자는 적외 영역에서 분자 구조 내의 진동에 의한 고유의 흡수 영역을 가지고 있고, 자외 영역에서는 전자 천이에 의한 고유의 흡수 영역을 가지고 있다.

POF의 고분자 구조에서 주된 전자 천이 흡수의 요인은, 일반적으로 Carbon-Oxygen 이중결합(이하 C=O)의 $n \rightarrow \pi^*$ 천이와 Carbon-Carbon 이중결합(이하 C=C)의 $\pi \rightarrow \pi^*$ 천이에 따른 흡수이다. PMMA의 경우 C=O 결합에 의한 전자 천이 흡수 손실은 500nm 이상의 파장대에서 1dB/km로 매우 낮고, PS의 경우 Benzene 고리의 Delocalization에 의하여 500nm의 파장대에서 100dB/km, 600nm의 파장대에서 7dB/km 정도의 전자 천이 흡수 손실을 나타낸다.

(1) 코어 폴리머 전송 손실

코어 폴리머로 인한 손실은 가장 기본적인 것인데, 이것은 흡수 손실과 산란 손실로 나눈다.

a. 흡수 손실

흡수 손실은 다시 코어 폴리머의 분자 구조에 기인하는 본질적인 것과, 외적 요인에 따른 부차적인 것으로 분류한다.

폴리머의 적외선 영역의 진동 흡수(원자간 결합의 진동공명)와 전자 천이에 따른 자외선 영역의 흡수의 두 가지가 있다. 일반적으로 폴리머는 적외선 영역에서 각종 분자 진동 흡수를 한다. 그 중에서 C-C, C-O, C=O의 결합기는 그 기준 진동이 장파장 측에 나타나기 때문에 가시 광역에는 거의 영향을 미치지 않는다. 그러나 대부분의 폴리머가 구성기로 갖는 C-H 결합은 그 기준 진동이 비교적 단파장 측에 있기 때문에 그 고조파 흡수는 근자외선 영역에서 가시 광역에 걸친 영역에 나타난다. 또 N-H결합 등이 존재하면 그 분자 진동 흡수의 영향이 가시 광역에 미친다. POF의 코어 폴리머는 기본적으로는 PMMA이다. Fig. 5에 PMMA의 분자 진동 흡수의 스펙트럼과 손실의 관계를 도시했는데, 근적외선 영역에서 가시광선 영역까지는 지방족 C-H결합의 적외 신축진동 V_0 의 고조파 nV_0 와 적외 변각진동 δ 와의 결합음 $nV_0+\delta$ 가 나타난다. 또 고조파의 흡수 강도는 그 차수가 커짐에 따라 저하하지만 7배음까지는 손실에 큰 영향을 미친다.

한편, 자외선 영역을 중심으로 전자 천이 흡수를 볼 수 있다. PMMA의 경우에 스텔기에 따른 $n \rightarrow \pi$ 천이, 혹은 일반적으로 분자량 조절제로 사용되는 RSH 화합물의 SH 결합에 의한 $n \rightarrow \pi$ 천이, 혹은 아조(azo)계 중합 개시제(-N=N-)의 $\pi \rightarrow \pi$ 천이 등을 들 수 있다. 이 전자 천이 흡수는 Urbach측에 따라 그 흡수 강도의 대수와 파장의 역수가 선형적 관계이기 때문에 자외선 영역을 중심으로 한 단파장 측에 영향이 강하게 나타나지만, 가시 광역에도 일부 그 영향이 미친다. 그 한계 영역은 폴리머의 종류에 따라 다르며, PMMA는 위 그림에서 보는 바와 같이, 500nm 이상의 영역에서는 그 영향을 사실상 무시할 수 있다. 그러나 PS는 555nm에서 22dB/km, 672nm에서 2dB/km 정도로 그 영향이 남아, PMMA보다 손실이 크다.

이와 같이, 폴리머에 의한 빛의 흡수는 적외선 영역에서의 분자 진동과 자외 영역에서의 전자천이에 의한 것인데, 가시 광역에 미치는 영향은 전자가 특히 크다. 따라서 C-H 적외 진동 흡수의 배음(倍音) 사이에 각각의 저 손실 창이 있으며, PMMA의 경우 최소 손실 피크는 567nm과 650nm의 가시광선 파장 영역이다.

외적 요인에 따른 흡수 손실에는 폴리머의 제조 혹은 섬유 부형과정에서 장치

부식 등으로 인하여 폴리머 속에 금속이 침투함으로써 발생하는 손실이 있을 수 있다.

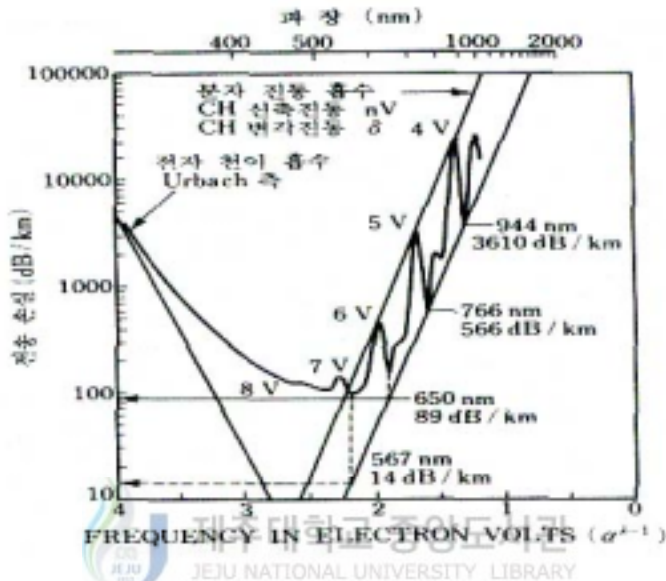


Fig. 5 The absorption attenuation of PMMA.

b. 산란 손실

플라스틱 광 파이버의 전송 손실은 흡수 손실에 기인하는 바가 z 다. 그러나 가시광선 영역에서의 손실은 산란 손실에 더욱 크게 의존한다. 따라서 산란으로 인한 손실을 어떻게 경감하느냐가 중영하다. 이 손실은 흡수 손실과 마찬가지로 본질적이 것과 외적 요인으로 인한 것으로 나눌 수 있다.

본질적인 산란 손실은 폴리머의 다 분자성에 기인하는 것으로, 그래프트 폴리머 등을 대표로 하는 폴리머 아로이 혹은 결정성 폴리머에서 현저하게 발견되는 손실이다. 게다가 그 손실은 파장의 4승에 역비례하기 때문에 가시 광역에 특히 영향을 미친다.

또 레일리 산란(Rayleigh scattering)으로 인한 손실은 단상 폴리머의 경우, 등방성 밀도 변동(fluctuation)에 따른 산란(V_s)과 이방성 밀도 변동에 따른 산란(H_v)의 합으로 표시된다. 여기서 폴리머의 등방성 밀도 변동은 무정형의 경우, 아래의 등방성 액체의 밀도 변동의 이론식으로 산출이 가능하다.

$$\tau_d^{iso}(cal) = \frac{8}{27} \pi^3 k \cdot T \cdot \beta \cdot \frac{\{(n^2 - 1)(n^2 + 1)\}^2}{\lambda^4},$$

여기서, k : 볼츠만 상수, β : 등은 압축률,
 T : 절대 온도, λ : 파장(진공중).

즉, PMMA와 PS의 레일리 산란은 등방성 밀도의 변동과 거의 일치한다. 즉, PMMA는 등방성물질이다. 그러나 PS는 등방성 밀도 변동보다 이방성 밀도 변동에 따른 손실이 크다. 그것은 PS가 분극률 이방성이 큰 벤젠 고리를 구성 성분으로 함유하고 있기 때문이다. 또 등방성 밀도 변동에 따른 산란은 각도 의존성을 나타내는 산란으로 나누어 기초적으로 해석되고 있다.

$$V_v = V_{v1} + V_{v2} .$$

여기서, V_v 는 입사광을 수직 편광시킨 빛을 폴리머에 쬐었을 때의 산란 광의 수직 성분의 세기를 나타낸다. 밀도 변동에 의한 산란체가 빛의 파장에 비행 충분히 작을 때는 V_v 는 산란광의 θ 에 의존하지 않지만, 산란체가 커지면 V_v 는 θ 에 의존한다, 따라서 산란체의 크기의 파라미터로 가늠할 수 있다.

예를 들어, PS의 경우, St 모노머를 0.2~0.3mm의 필터로 여과, 진공 증류, 직접 피상 중합하면 V_v 가 낮아질 뿐만 아니라 그 산란각의 의존성이 급격히 작아진다. 그 V_v 는 $1.4 \times 10^{-5} \text{cm}^{-1}$ 정도로, 거의 산란각에 의존하지 않는 관계로 산란체의 크기는 200Å 이하라고 보고되고 있다. 한편, PMMA의 V_v 에 대해서는 중합 조건과 관련하여 검토되고 있다.

빛을 산란하는 기본 인자는 말할 필요도 없이 폴리머가 갖는 분자 구조와 그 응집 상태이다. 그러나 PMMA계 광섬유의 경우, 그 보다도 더욱 중요시 되는 것은 외적요인에 의한 산란 손실이다. 그것은 어떻게 깨끗한 PMMA를 만드느냐 하는 점에 달려 있다. 그 엄밀도는 가장 크린성이 요구되는 광 디스크용 기반 재료인 PMMA, PC 보다도 한 계단 높은 레벨의 것이 필요한 것으로 미루어서도 이해할 수 있다. 따라서 우선 PMMA를 합성하는 제조법이 문제가 된다. PMMA의 경우, 그 공업적 제조법으로서는 현탁 중합방식과 피상 중합방식이 이용되고 있다. 피상 중합법의 PMMA가 현탁 중합법의 PMMA에 비해서 분명히 손실이 낮다. 이것은 피상 중합계는 현탁 중합법엔 볼 수 있는 중합 매체, 현탁 안정제 같은 중합 조제를 필요로 하지 않고, 게다가 고온에서의 중합 조건을 적절히 선택하면 중합 개시제의 양을 경감할 수 있기 때문이다. 이것은 깨끗한 PMMA의

제조 방법으로는 괴상 중합방식이 가장 적응성이 크다는 것을 의미한다.

중요시 되는 또 하나의 요인은 그 제조 방식과 함께 중합 원료 속의 먼지의 제거이다. 즉, 순수한 PMMA를 얻기 위해서는 중합 후에 불순물을 제거하기보다 낮은 점도의 원료 단계에서 불순물을 제거하는 것이 효과적이다. 일반적으로 MMA의 중합에서 원료로는 MMA의 모노머, 중합도 조절제로서의 메르카프탄(Mercaptan)류, 그리고 개시제 등을 들 수 있다. 이들 원료원을 다공질 중공사말을 사용하여 미량의 먼지 등을 제거한 후, MMA를 중합하면 매우 순수한 PMMA를 얻고, 전송 특성이 우수한 파이버가 형성된다. 또 외부로부터의 먼지 혼입 등을 완전히 방지하려면 중합 과정뿐만 아니라 방사에 이르는 전 프로세스를 크로즈할 필요가 있다.

(2) 구조 변형에 따른 손실-부형손실

외적 요인으로 인한 것에 구조 변형으로 인한 산란 손실이 있다. 이것은 주로 섬유 부형에서 유기되는 것으로, 경계면 변형, 코어 지름 변동 등, 섬유 형태에 의존하는 것과 연신으로 인한 분자 배향에 따르는 복굴절에 기인하는 것이 있다.

구조 변형 중에서 경계면 변형이나 코어 지름의 변동에 따른 손실을 경감하기 위해서는 폴리머의 유동성과 부형 조건의 적정화, 노즐의 최적 설계 등이 중요시된다.

또 벤딩에 따른 손실로는 코어 폴리머와 클래드계 폴리머의 상용성, 즉 접착성이 지배적 인자이고, 그러한 의미에서 클래드계 폴리머의 선택이 중요하다.

광 파이버에 사용되는 코어 폴리머는 PMMA, PS로 대표 되듯이 무정형 폴리머이다. 따라서 가느다란 섬유형태를 취하는 경우, 강도적으로 반드시 강한 것은 아니다. 그래서 일반적으로 연신함으로써 강인성을 부여하고 있다. 그러나 이 조작으로 분자 배향이 일어나고, 복굴절이 생기며, 그에 대응하여 산란 손실이 일어난다.

5) POF의 제조

POF의 제조는 광섬유 자체의 전송 손실과 직접적인 관계가 있다. POF의 제조 중에 나타날 수 있는 전송 손실로는 고분자 재료의 중합이나 정제 중에 예상되는 불순물의 유입이나 공정 미흡으로 인한 광섬유 구조의 변형 등에 인한 손실이다. 구조의 변형으로는 코어부와 클래드부의 동심도 변형과 코어와 클래드 경계면에 광간이 형성되는 점을 들 수 있다. 이러한 손실은 생산성에도 직접적인 영향을 미친다. 그러므로 POF의 제조 시에 전송 손실과 관련된 외부 요인을 차

단 할 수 있는 제조방법이 필요하다. 일반적으로 POF의 제조에는 연속 압출법(Continuous extrusion), 단위 압출법(Batch extrusion) 및 모재 인출법(Preform drawing; heat-drawing) 등이 있다. 앞의 두 방법은 단분자의 중합 또는 고분자 재료의 준비에서부터 광섬유의 제조까지 모든 공정이 밀폐된 연속적인 공점에 의해서 이루어지는데 반해서 마지막 방법은 미리 준비된 모재로부터 광섬유를 인출하는 방법이다.

연속 압출법은 Fig. 6 (a)에서와 같이 밀폐된 고열의 반응기 (1)속에 코어용의 단분자를 연속적으로 공급하면서 중합 반응을 지속적으로 행한다. 중합이 끝난 반응기속의 고분자와 미반응 단분자의 액체 혼합물은 밀폐된 관을 따라 연속적으로 공급하면서 중합 반응을 지속적으로 행한다. 중합이 끝난 반응기속의 고분자와 미반응 단분자의 액체 혼합물은 밀폐된 관을 따라 연속적 (2)으로 분리기로 전달되고 분리기에서는 저압 하에서 미반응 단분자를 증류 분리한 후 정제된 고분자를 압출단 (3)에서 압출한다. 동시에 추가의 압출기 (5)에서 클래드 재료를 압출하는 방법으로, 하나의 이중 구조의 nozzle (4)에서 코어부와 클래드부를 동시에 제조한다. 이 방법은 생산속도의 측면에서 큰 장점이 있으나 설비가 복잡하고 열에 의한 고분자 감성(減成)에 기인한 재료의 손실이 많은 단점이 있다. [Mitsubishi Rayon Co. 1974]

단위 압출법은 Fig. 6 (b)에서와 같이 밀폐된 시스템 속에서 단분자(1,2) 등의 반응물질을 직접 증류, 정제 하여 반응기(3)속으로 모은 후에 고분자 중합을 시키고 고온 액체 상태에서 증류하여 정제한 후 남은 순수한 코어용 고분자를 압출한다. 압출하는 방법은 연속 압출법과 비슷하다. 이 방법은 고순도의 고분자를 만들 수 있는 장점이 있으나 생산 속도가 느린 단점이 있다. [Nippon Telegraph & Telephone 1981]

모재 인출법은 Fig. 6 (c)일반 GOF 인출 시 사용하는 가장 보편적인 방법이다. 일반적으로 tube 내에 정제된 단분자를 채우고 그 상태로 중합시켜 고분자 모재를 형성한 후 인출 타워에서 수직으로 모재를 달아서 모재 하단부를 가열하여 take-up drum으로부터 회전에 의해 인출한다. 인출 중간 부위에서 클래드부를 코팅하거나 모재 제작용 tube 자체를 클래드로 사용할 수 있다. 이 방법은 여러 가지 특성의 POF, 특히 GI-POF를 제작할 수 있는 장점이 있다. [T. Ishigure et al. 1995]

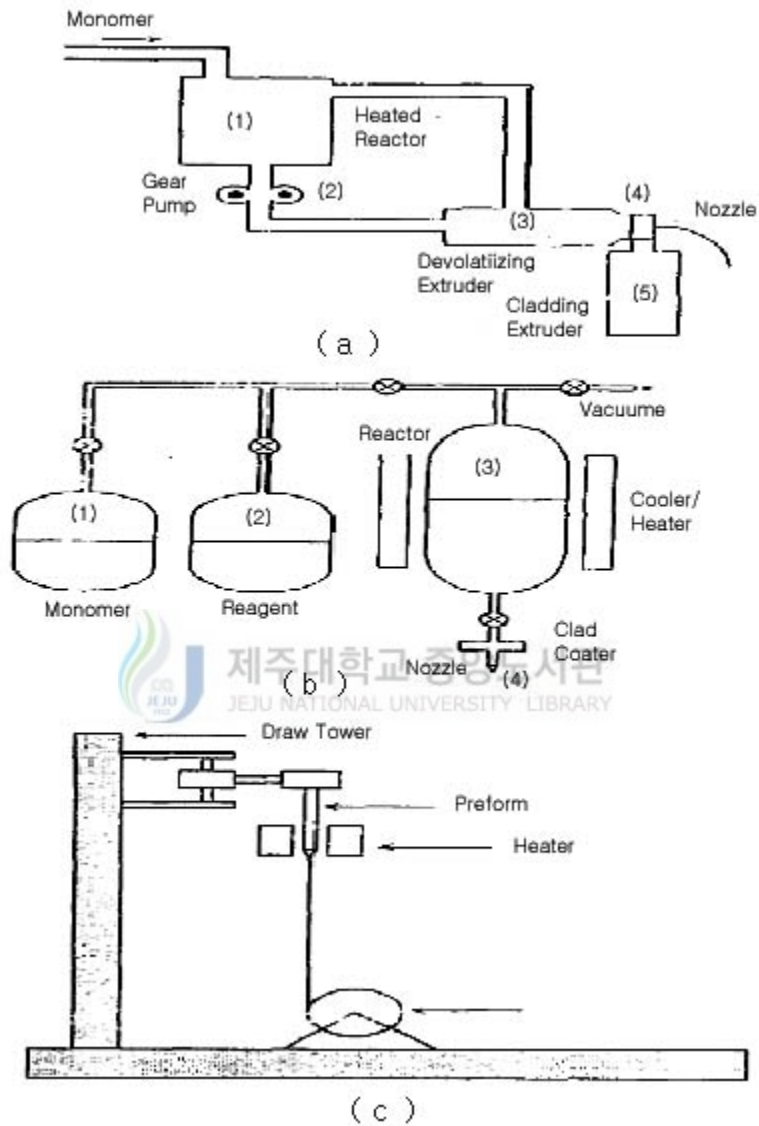


Fig. 6 The manufacturing technique of POE : (a) Continuous extrusion, (b) Batch extrusion (c) Preform drawing.

3. 국내외의 연구동향

1) 한국 원자력연구소(KAERI)

OFS(Optical Fiber Scintillator)를 이용한 원거리 및 고방사선 측정을 위해 subtraction 방법으로 Fig. 7과 같은 측정 장비를 개발하여 Fig. 8 과 같은 선량률에 따른 전류를 측정하였다. 빛의 전송매체로 PFC(Passive Fiber Cable)를 사용한 측정 장비는 특정지점의 방사선 정보를 알고자 할 때 방사선과 상호작용에 의해 PFC에서 발생하는 빛이 기여함으로써 전체 방사선량에 영향을 미치는 요소로 작용하게 된다. 따라서 subtraction방법에 의해서 PFC의 방사선 잡음을 제거하고 OFS에서 발생한 빛만 검출하기 위한 연구를 수행하였다.[김도현 외 2003]

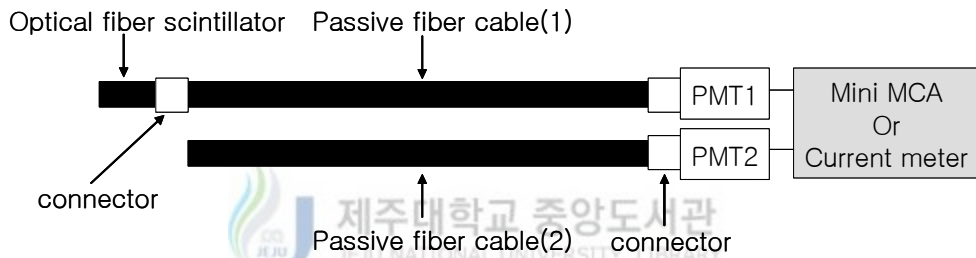


Fig. 7 Detection system of radiation.

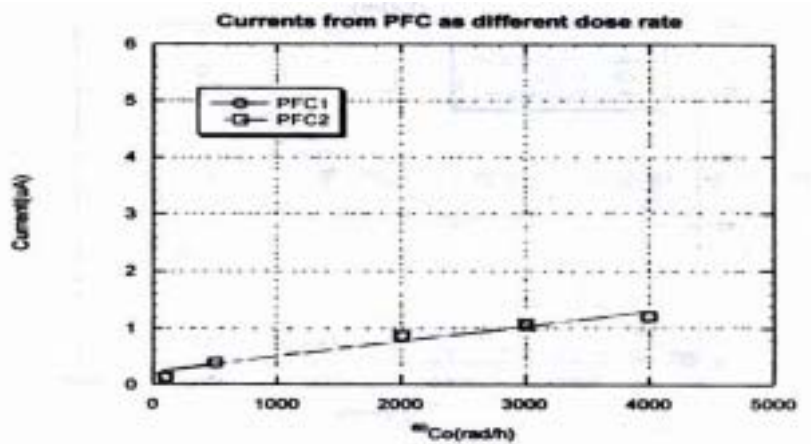


Fig. 8 The measured current versus the dose rate.

2) 미국 Pacific Northwest National Laboratory(PNNL)

핵물질(U 및 Pu) 보장조치(Safeguard) 장비 개발과 관련하여 중성자를 측정하기 위한 Ce-doped, ${}^6\text{Li}$ -silicate glass optical fiber 센서를 개발하였으며 이를 통하여 중성자와 감마선이 혼합된 방사선장에서 감마선의 신호를 배제하여 중성자를 측정하는 연구를 수행하였다. 광섬유섬광집합체(scintillating fiber bundle) 양단은 PMT로 직접 연결하였다. Fig. 9는 광섬유 센서로 중성자와 γ 선을 검출한 경우의 스펙트럼을 나타낸 것인데 높은 에너지영역(channel number 200이상)에는 중성자 신호만 분포하고 있어 감마선과 분리 측정이 가능함을 알 수 있다. 용기 내부에 중성자선원인 핵물질 ${}^{239}\text{PuBe}$ ($\sim 8 \cdot 10^4 \text{n/s}$) 또는 ${}^{60}\text{Co}$ ($\sim 3 \cdot 10^4 \text{n/s}$) 또는 두 종류의 선원을 함께 놓고 측정하였다.[K. H. Albel et al. 1994]

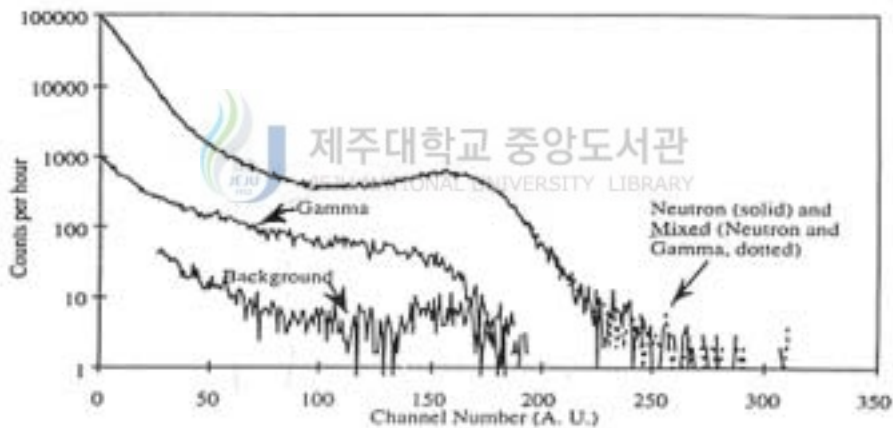


Fig. 9 Pulse height spectra for the storage-container monitor under neutron, gamma and mixed excitation.

3) 일본 원자력연구소(JAERI)

Cr-doped Al_2O_3 센서를 광섬유 선단에 접합하여 γ 선 가열에 의한 Al_2O_3 의 발광량을 측정하는 방법을 연구하였다.(Fig. 10) Al_2O_3 는 내열성과 내 방사선성이 모두 양호하고 순도 높은 Al_2O_3 과 Cr함유량의 조정으로 원자로 출력을 γ 선 레벨로 측정하였다. 중성자가 혼재하는 원자로의 노심 근방에서의 계측에도 좋은 결과를 Fig. 10에서 보여주고 있다.[T. Kakuta 1994]

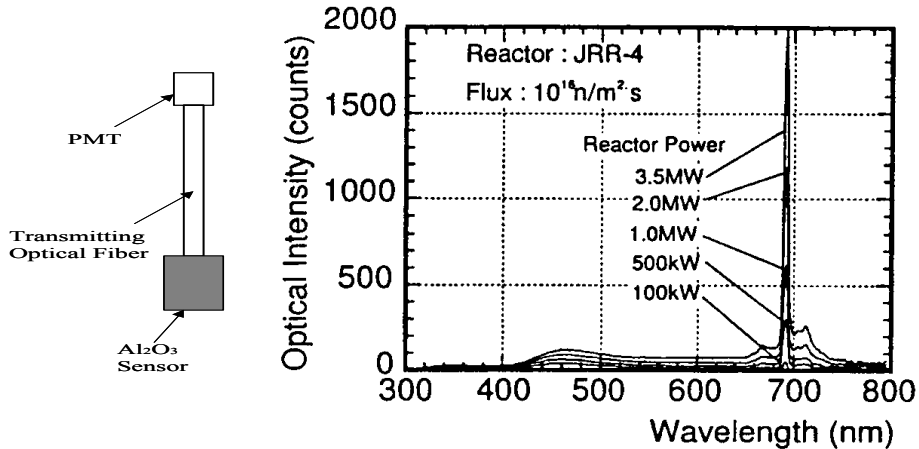


Fig. 10 Emission spectrum of γ -ray measured with Cr-doped Al_2O_3 Scintillators around the reactor core.

4) 일본 나고야 대학

LiOH를 도포한 ZnS(Ag) 센서를 접합한 1~2mm 길이 정도의 광섬유를 2~3mm 이하의 좁은 간격에 삽입하고 열중성자속(thermal neutron flux)분포를 측정하는 연구를 수행하였다. 이 방법은 중성자 감속에 의해 고속중성자, γ 선 등 대상방사선을 선택해서 측정하는 것이 가능하며, 소형이고 유연하다는 장점을 이용하여 원자로 및 방사선 시설에 있어서 협소부위에 중성자 및 γ 선 계측이 용이하다. Fig. 11은 이 계측시스템을 나타내었는데 광섬유의 구동은 컴퓨터 프로그램에 의해 구동속도를 자유로이 선택할 수 있으며 시간차 적인 구동이 가능하다. 이 방법을 이용하여 원자로 임계집합체내의 열중성자속 분포를 Fig. 12와 같이 측정하였다.[C. Mori 1999]

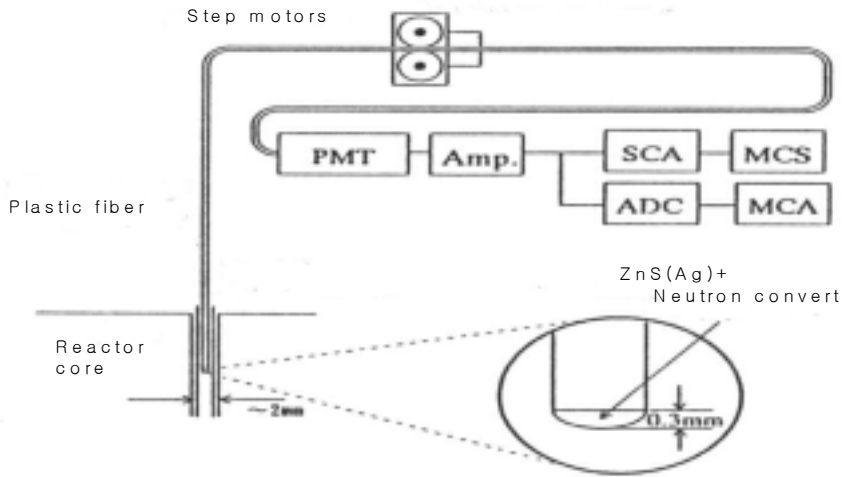


Fig. 11 Scintillator-painted optical fiber system and fiber driving unit.

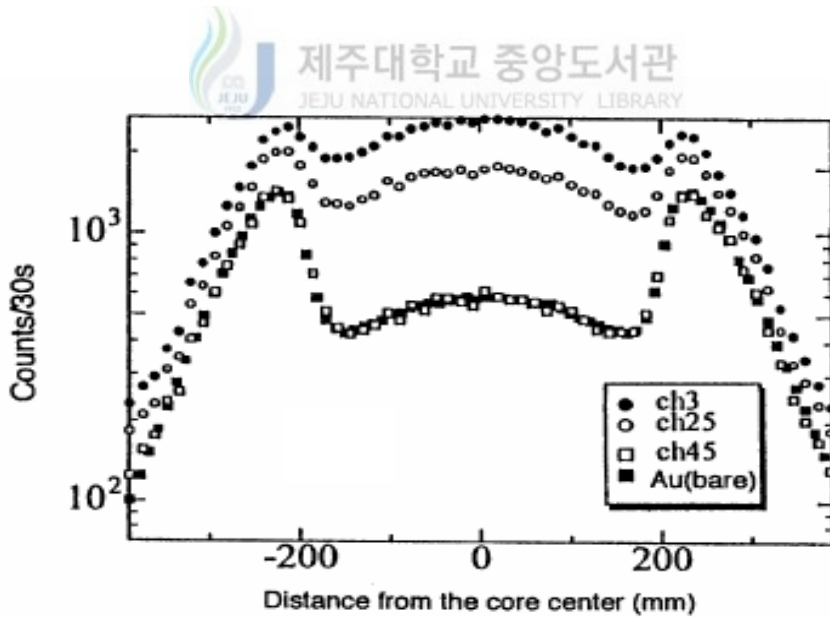


Fig. 12 Thermal neutron flux distribution in the core of KUCA.

III. 실험장치 및 실험방법

본 연구의 실험장치의 구성은 Fig. 13과 같고, 적용된 실험 장치는 크게 센서 부분, 전송용 광섬유 및 PMT 등의 계측장비로 구성되어 있다.

방사선 검출용 센서는 플라스틱광섬유섬광체(Plastic scintillating fiber)와 Tapered 섬광체를 이용하여 다양한 형태로 제작하였다. 신호 전송용을 위한 광섬유는 플라스틱 재질로 된 광섬유를 이용하였다.

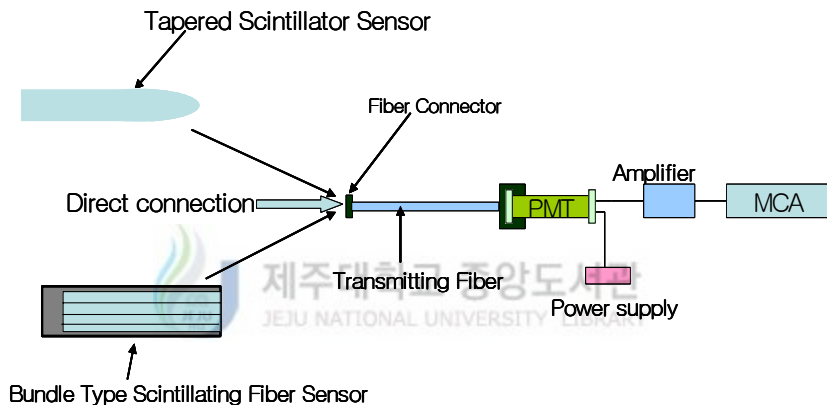


Fig. 13 Experimental setup for the test of the optical sensors.

1. 센서부분의 구성 및 계측 방법

플라스틱 섬광체(Plastic scintillator)는 쉽게 크기와 모양을 자유로이 만들 수 있고, 제작이 용이하며, 가격이 저렴하므로 액면계, 밀도계 등 의료용장비, 고강도·고선량 방사선이용분야 등에 활용되고 있다.

플라스틱 섬광체는 원자번호가 작기 때문에 저지 X선이 발생되지 않아 β 선 계측에 적합하며 형광감쇠시간이 수 ns이므로 ns영역의 핵 혹은 양성자의 수명 측정 등 원자력에 대한 여러 가지 정보를 얻는 데 사용된다.

플라스틱광섬유섬광체의 가장 흔한 형태로는 수 퍼센트(%)의 무기발광체(Inorganic flour)을 포함한 Polystyrene(PS, $n=1.58$)의 Core에 기초를 두고 만들어진다. 일반적인 Cladding 물질은 Polymethylmethacrylate(PMMA, $n=1.49$), 또는 형광물질을 도포한 Polymethacrylate($n=1.42$)를 사용하며, 전형적인 플라스틱

광섬유섬광체의 직경은 0.1~수mm 까지 이다.[홍상범 2002]

본 논문에 사용된 센서는 BICRON사의 BCF-12 model 1mm와 자체 제작한 Tapered 형태의 광섬유섬광체를 사용해 제작 하였다. Table 1과 Fig. 14는 BCF-12에 대한 특징과 발광 스펙트럼을 나타낸 것이다.

Table 1 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°C ~ +50°C	

BCF-12

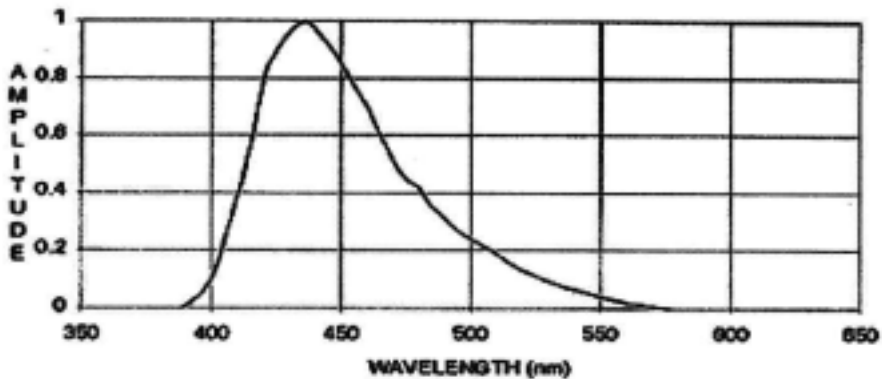


Fig. 14 Emission spectrum for Plastic scintillating fiber (BCF-12).

1) 다발형 광섬유섬광체 센서 제작

플라스틱은 감마선과의 반응확률이 낮기 때문에 외가닥으로는 계측효율을 높일 수 없고 가닥수 증가에 따른 신호 분석을 위해 플라스틱광섬유섬광체인 BCF-12 1mm를 Fig. 15와 같이 알루미늄 Case를 사용해 3, 7, 13, 18, 25가닥의 다발형으로 제작하였다.



Fig. 15 Picture of Multi-strand scintillating fiber sensor.

센서에서 발생된 신호를 직경이 센서보다 작은 3mm인 전송용 광섬유에 효율적으로 전송하기 위하여 센서와 전송용 광섬유 사이에 렌즈(lens)를 부착하여 제작하였으며, 렌즈사용 유무에 따른 γ 선에 대한 검출신호를 비교하였다. 센서의 한쪽 끝에는 박막의 알루미늄을 이용하여 외부광을 차단하고 내부에서 발생된 광신호의 누설을 최소화 하였다. 렌즈는 THORLAB 사의 F230SMA-A type으로 초점거리(f)는 4.5mm로 SMA 광connector와 연결하여 사용하기 용이하도록 제작 되어 있다.

또, 다발형 광섬유 센서의 Case 재질에 의한 계측 효율을 측정하기 위해 스텐레스, 알루미늄, 플라스틱을 이용해 0.8mm 두께로 Case를 가공해 20가닥의 다발형 광섬유섬광체 센서를 제작 하였다.

2) Tapered 형태의 플라스틱광섬유섬광체 센서 제작

센서에서 발생된 광신호를 비교적 직경이 작은 전송용광섬유에 효율적으로 전송하기 위한 방법으로 직경이 점점 작아지는 Tapered 형태의 플라스틱광섬유섬

광체를 제작하였다.

본 논문에서는 styrene 용매에 용질을 첨가하여 열중합법으로 플라스틱 섬광체를 제작하였고 PMMA로 클래드를 코팅하였다. Table 2에 Tapered 플라스틱광섬유섬광체에 사용된 폴리머의 특성을 나타내었고 Fig. 16에 core용으로 사용된 PS의 발광스펙트럼을 나타내었다.[Ph. Rebourgeard et al. 1999]

Table 2 Properties of polymers used in the fabrication of scintillating fibers.

물질	용도	Peak emission(nm)	Refractive index at 450nm
Polystyrene(PS)	Core	305	1.613
Polymethyl methacrylate(PMMA)	Cladding	weak	1.502

섬광체로는 2가지 용질이 첨가되는 3원 섬광체(ternary scintillator)를 제작하였다. 3원 섬광체는 styrene을 용매로 제1용질로 bPBD(2-4-T-Butylphenyl)와 PPO(2,5-diphenyloxazde) 두 종류를 사용하였고, 제2용질로는 dPOPOP(dimethyl POPOP)를 첨가하였다.

Table 3에서와 같이 3원 섬광체 제작을 위해 첨가되는 제1용질은 입사방사선의 에너지를 흡수하여 발광하지만 발광파장이 Fig. 16에서 보는바와 같이 짧기 때문에 용매질 중에서 흡수되기 쉽다.(Fig. 17) 그러므로 이 광 에너지를 흡수하여 장파장의 형광을 발생시켜 PS에 의한 흡수손실을 줄이고 광전자증배관의 스펙트럼 감도와 정합시키기 위하여 제2용질을 첨가하였다.

Table 3 Optical Properties of fluorescent molecules used in the elaboration of scintillating fibers.

Dopant	Molar mass	Peak absorption	Peak emission(nm)
bPBD	354.5	305	365
PPO	221.3	310	365
dPOPOP	392	370	430

용질의 농도는 제1용질을 PPO로 사용한 경우 섬광체 관련 연구[M. Mizue Hamada et al. 1999]에서 사용된 섬광체의 PPO 농도($\sim 10^{-1}\%$)의 레벨에 기준을 두고 PPO의 농도를 0.1%로 정하고 제2용질의 농도를 0.01~0.04%로 달리해 첨

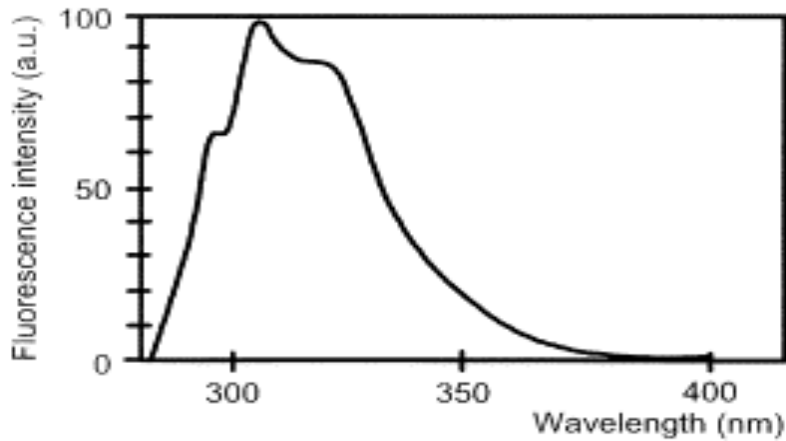


Fig. 16 Emission spectrum of undoped polystyrene for an excitation at 252nm.

가하였다. 또 PPO 농도가 발생 신호에 미치는 영향을 알아보기 위해 0.1~0.5%로 PPO의 농도를 변화하면서 첨가하였고 dPOPOP의 농도를 0.02%로 정하였다. bPBD를 제1용질로 사용한 경우 bPBD의 농도를 0.1%로 정하고 dPOPOP의 농도 0.01, 0.02, 0.04, 0.06%로 달리 하면서 첨가 하였다.

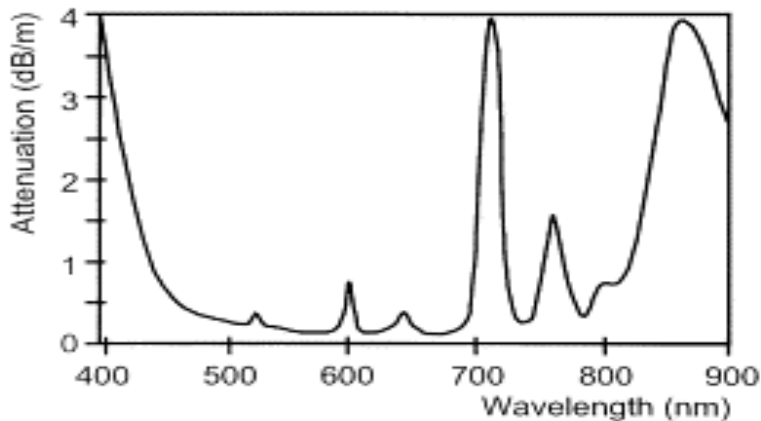


Fig. 17 Absorption of polystyrene measured in an undoped PS rod.

Fig. 18은 플라스틱섬광체의 제작 과정을 나타낸다. 모체인 styrene 단량체에 용질을 정량하여 혼합하고, 완전히 녹은 후 열중합 하였다. 스티렌 단량체에 개시

제로 AIBN(Azobisisobutyronitrile, 아조비스이소부틸로니트릴)을 넣고 가열하면 개시제인 AIBN이 열분해하여 자유 라디칼을 생성시키고 생성된 자유 라디칼이 스티렌의 이중결합을 공격하여 중합이 일어나도록 하기위해 혼합액에 소량의 AIBN을 첨가하였다.

중합과정은 발열과정이므로 중합 시 온도를 급격히 올리면 용매와 용질이 끓기 시작하여 기포가 발생하면서 고체화되기 때문에 Fig. 19에 보이는 교반기에서 90°C까지 서서히 온도를 상승 시킨 후 중합온도를 유지하도록 하였다. 이 상태가 2시간이 되면 제법 점성이 생기는데 이 점성이 있는 모노머를 유리 재질의 형틀에 주입해 Fig. 20에 보이는 오븐에서 중합과정을 거친다. 중합온도는 오븐에서 50°C, 80시간 동안 유지하였고 상온에서 열처리하여 냉각하였다.

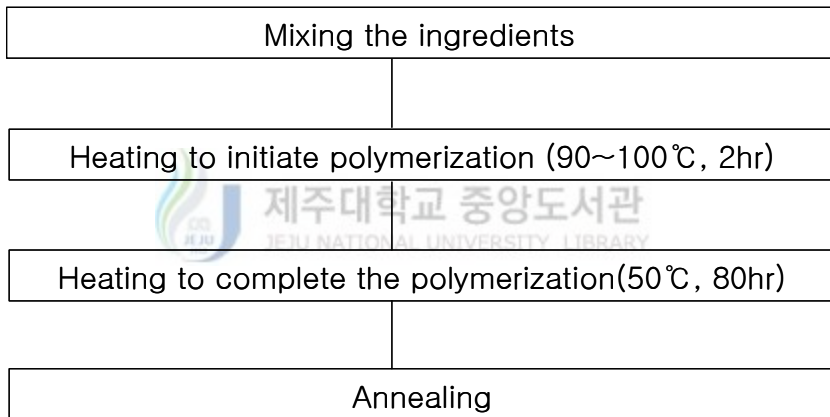


Fig. 18 Preparation procedure of plastic scintillator.

Tapered 광섬유섬광체 센서의 클래드는 일반 광섬유의 원리를 응용해 코어로 사용된 PS보다 굴절율이 낮은 PMMA(Polymethyl methacrylate)를 사용 하여 섬광체에서 발생한 광신호의 누설을 최소화 하였다. PMMA는 MMA의 모노머(Monomer)로부터 자유 라디칼 중합반응을 통하여 중합체가 된 것을 말한다. MMA는 액체 상태로 존재하는 무색의 모노머이다. 몰 당 분자량 M은 100.12g/mol이며 부피로 보면 1 liter = 0.94kg이다.

PMMA 폴리머가 만들어지는 중합반응의 전과정은 개시제(Initiator)라 하는 분자 물질로부터 시작된다. 자유 라디칼 중합반응에 사용되는 개시제는 여러 종류가 있지만 본 연구에서는 AIBN을 사용하였다. AIBN 개시제 온도 40°C 이상의 열을 가해주면 Isobutyronitrile 부분에 있는 탄소 공유 결합이 끊어지면서 질소



Fig. 19 The Photograph of the procedure for initiating polymerization on the stirrer.

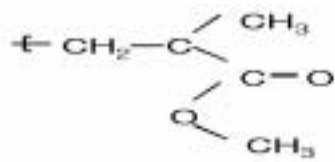


Fig. 20 The Photograph of the procedure for completing polymerization in the dry oven.

를 발생시키게 되는데 이때 개시제 AIBN은 두 조각의 라디칼로 변화한다. 이러한 AIBN의 라디칼들이 액체 상태의 MMA 모노머들과 만나면 중합반응을 일으켜 자유 라디칼중합반응(Free-Radical Polymerization)의 대부분은 부피가 있는 액상의 체적 상태에서 폴리머로 변화한다.

PMMA의 제작과정은 Fig. 21과 같이 Free Radical 반응 과정에서 열처리에 의해 진행된다. 기초 경화단계는 완전한 액체상태의 MMA 모노머를 100℃까지 온도를 올리면서 서서히 교반 하여 준 뒤 다시 소량의 MMA를 주입하여 모노머가 끓는 것을 막고 80℃정도까지 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 플라스틱 섬광체를 담가 클래드를 코팅한다. 이것을 급격히 냉각하면 클래드에 결합이 생길 수 있기 때문에 오븐에서 40℃로 6시간 동안 건조시켜 경화시킨다.

이렇게 완성된 Tapered 섬광체를 Polishing film을 이용해 양쪽 끝 부분을 연마하여 Fig. 22에 보이는 소형의 Tapered 플라스틱 섬광체를 제작하였다. 제작된 센서에 발생한 광 신호의 누설을 최소화하기 위해 센서 끝부분에 거울을 부착하였다.



(a) Methyl methacrylate

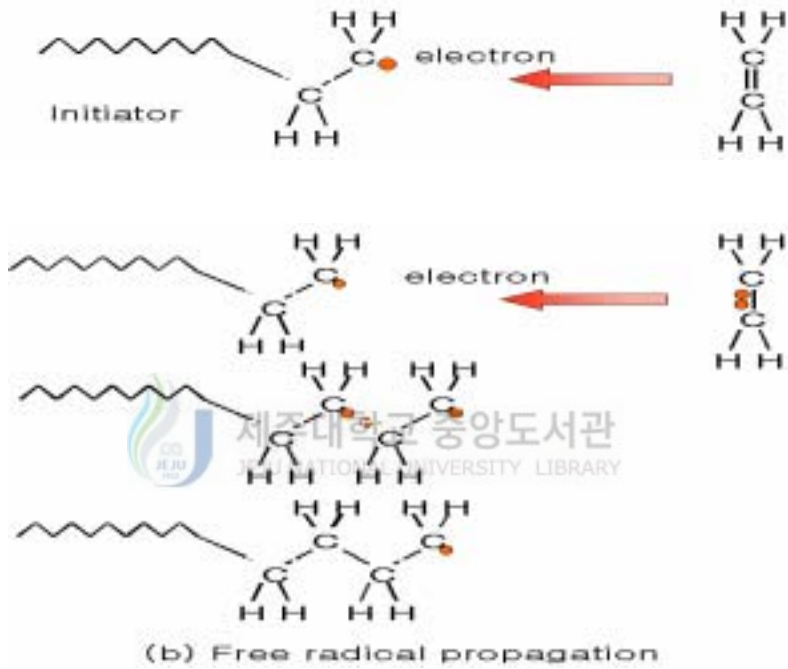


Fig. 21 (a),(b) Free radical reaction process in PMMA.[김지훈 2002]



Fig. 22 The Photograph of Tapered plastic scintillator.

2. 신호 전송을 위한 광섬유의 특성

BICRON사의 BCF-12 model과 자체 제작한 Tapered 광섬유섬광체의 방출 파장의 범위는 350~600nm이다. 따라서 전송용 광섬유는 이 파장 범위에서 전송손실이 적은 전송용 플라스틱광섬유를 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.[정원채 2000]

본 실험에 사용된 플라스틱 광섬유는 수광 단면적이 큰 Edmuond Optics사(Dia. 3mm)의 제품으로 재질은 core 용으로 PMMA($n_1 = 1.492$)이 사용되며 cladding 재질로는 불소계 폴리머(fluorine polymer, $n=1.402$)가 사용되었다. Table 4에 전송용 광섬유의 특성을 나타냈으며 Fig. 23 파장에 따른 감쇠 특성을 나타내었다.

Table 4 The specification of plastic optical fiber.

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(°C)	-55°C to +70°C
Minimum Radius of Bend	60

3. 신호처리 장치 및 구성

광섬유섬광체로부터 발생된 신호를 광섬유를 통하여 전송된 빛 신호를 측정·분석하기 위해서는 광전자증배관(Photomultiplier Tube 이하 PMT) 또는 포토다이오드(Photodiode, PD) 등을 사용하여 전기적신호로 변환하여야 한다. 광섬유섬광체의 발광파장이 350~600nm를 가지므로 광센서 역시 이 에너지 영역에서 입사된 빛을 전자 방출로 전환하는 효율이 우수한 것을 선정하여야 한다. 그래서 Bialkali 재질로 된 Photocathode의 경우 약 400 nm 파장에서 최대의 효율을 가지므로, 이 재질로 된 PMT를 선정하면 최대의 효율을 얻을 수 있다.

본 연구에 이용된 PMT는 소형으로 창의 크기가 8mm인 Hamamatsu Model

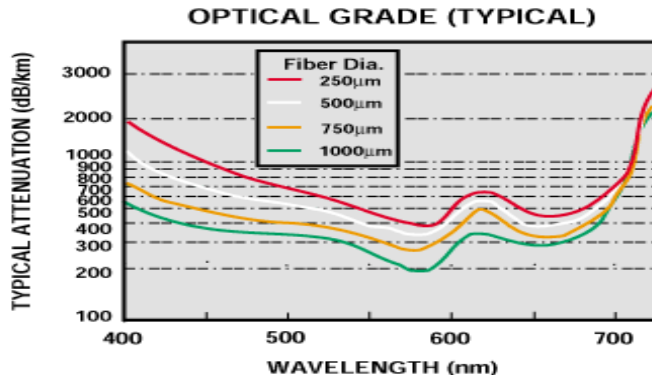


Fig. 23 Attenuation spectrum of plastic optical fibers. (Edmund Optics Inc.)

H3164-10와 H5784로 Head-on type으로 선정 하였다.

실험을 위해서 PMT는 플라스틱 Case와, 광섬유와 연결을 용이하게 하고, 외부 광에 의한 신호의 외곡현상을 줄이기 위하여 Fig. 24와 같이 FC-type의 접속단자(connector)와 어댑터(adapter)를 이용하여 제작하였다.

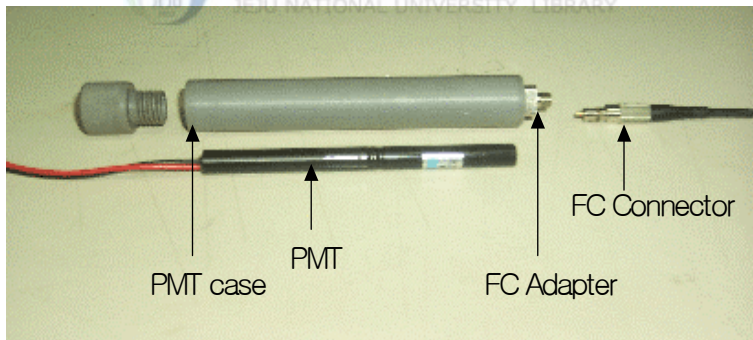


Fig. 24 PMT Case used to fix transmitting fiber on the window of PMT.

H3164-10을 사용하는 경우 PMT에서 발생하는 신호가 미약하여 선형증폭기와 주증폭기를 모두 사용하는데 선형증폭기는(Preamplifier Model:C7319 Hamamatsu) 검출기에서 1차 신호를 증폭하고, 출력된 전하펄스를 전압펄스로 전환하며, 증폭율의 변화를 가변적으로 조절 가능한 것으로 선정하였다. 주증폭기는(Canberra Amnplifier Model:2012) 제품을 이용하였으며, HV Power

supply(Hamamatsu Model C3830)는 PMT 에 안정적인 전원공급 및 전치증폭기에 동시에 전원을 공급할 수 있는 것을 선정하였고 신호 분석을 위한 다중과고분석기(Multi Channel Analyzer, MCA)는 Ortec trump-8k-32 + Maestero32 로 PC에 On board형으로 장착하여 사용할 수 있는 제품을 선정하여 시스템을 구성하였다.

4. 방사선원의 구성 및 배치

방사선원은 ^{137}Cs 용액을 각각 1.0, 1.5, 3.0, 5.0 μCi 가 되게 정량하여 유리 시험관에 봉입한 것으로 Fig. 25와 같이 시험관의 하부끝이 센서부의 측면과 접촉하도록 배치하였으며, 주위의 배경방사능의 영향을 최소화하기 위하여 Fig. 26과 같이 납벽들을 사용하여 센서부위를 차폐하였다.

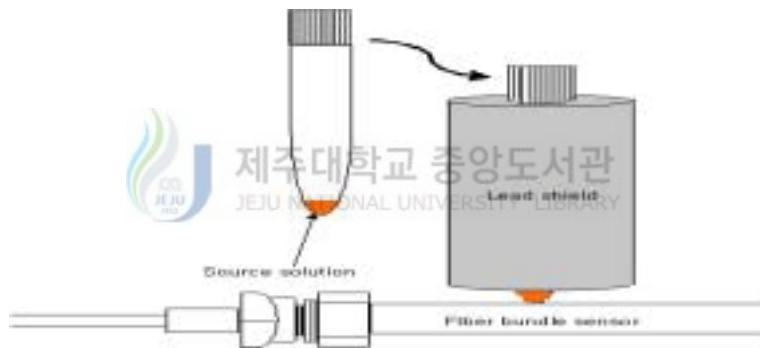


Fig. 25 Arrangement of the source and the fiber sensor for detection.

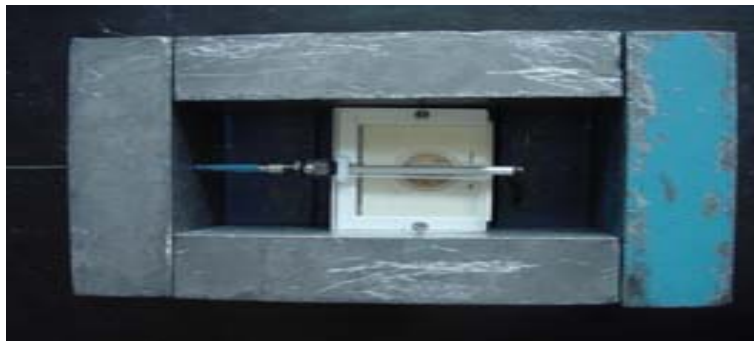


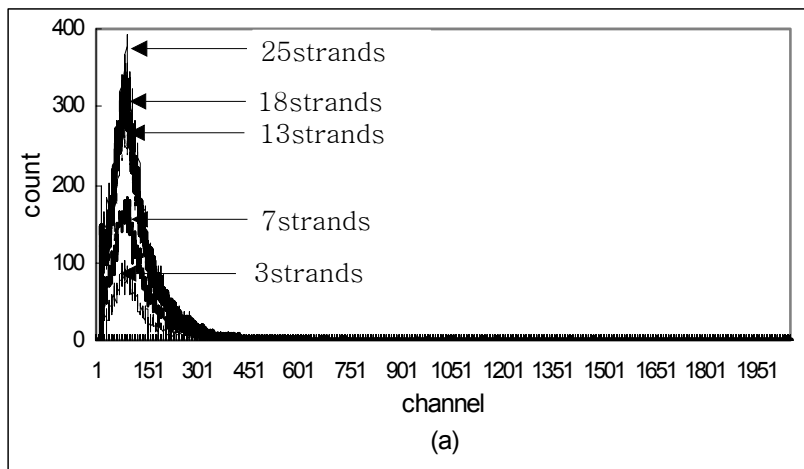
Fig. 26 Experimental setup using lead bricks.

IV. 실험결과 및 고찰

1. 다발형 광섬유 센서에 대한 실험

Fig. 26 (a), (b)는 본 실험에 사용된 전송용 광섬유에 대해 최적 가닥수를 찾기 위해 얻어진 광섬유 다발 센서의 광섬유 가닥수에 따른 ^{137}Cs 3 μCi 에 대한 펄스 파고 스펙트럼을 나타낸 것이다. 가닥수가 증가 할수록 계수치가 증가해 계측 효율이 증가함을 알 수 있다. 또 렌즈를 사용함으로써 채널수 75 근처에서 계수치가 높아졌으나 높은 채널의 계수치가 렌즈를 사용하지 않았을 때보다 줄어들었다는 것을 알 수 있다. Fig. 27에서 모든 센서의 경우에 총계수치가 렌즈를 사용하지 않았을 때 2배 정도 많음을 알 수 있다. 이것은 렌즈가 센서에서 발생된 광 신호가 전송용 광섬유로의 전달을 방해함을 알 수 있다. 또 모든 채널의 계수치를 합한 총계수치로서 계수치 증가율이 가닥수가 증가함 따라 완만해 짐을 보여 준다. 이것은 가닥수 증가에 따라 센서부의 직경이 전송용 광섬유의 직경보다 커지게 되어 일부의 광은 전송용 광섬유에 입사되지 못함을 말해준다.

Fig. 29는 다발형 광섬유 센서의 Case 재질에 의한 계측 효율을 측정하기 위해 스텐레스, 알루미늄, 플라스틱을 이용해 센서를 제작해 얻은 펄스파고 스펙트럼이다. 3가지 재질에 대해 알루미늄을 Case로 사용한 결과 가장 높은 계수치를 나타냈고, 스텐레스 경우에 가장 안 좋은 결과 값을 나타내었다.



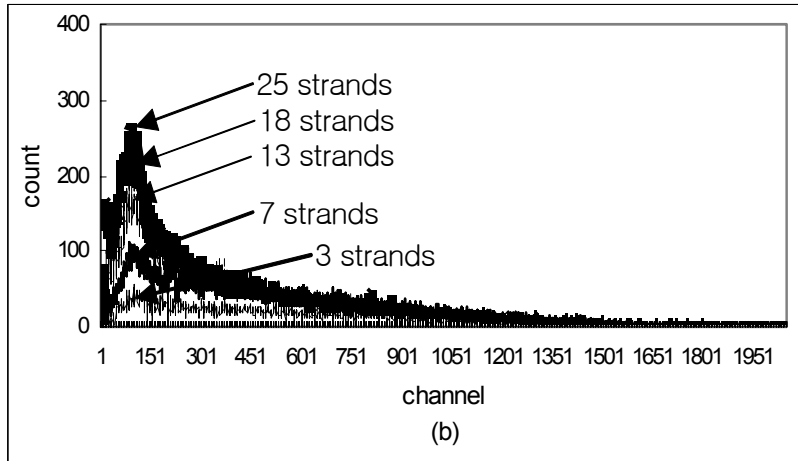


Fig. 27 Pulse-height spectrum measured with the sensors having the different number of strands for a $3\mu\text{Ci}$ Cs-137 source. (a) is the Case using the lens, and (b) is the Case without using the lens. Measured time is five minutes for every Case.

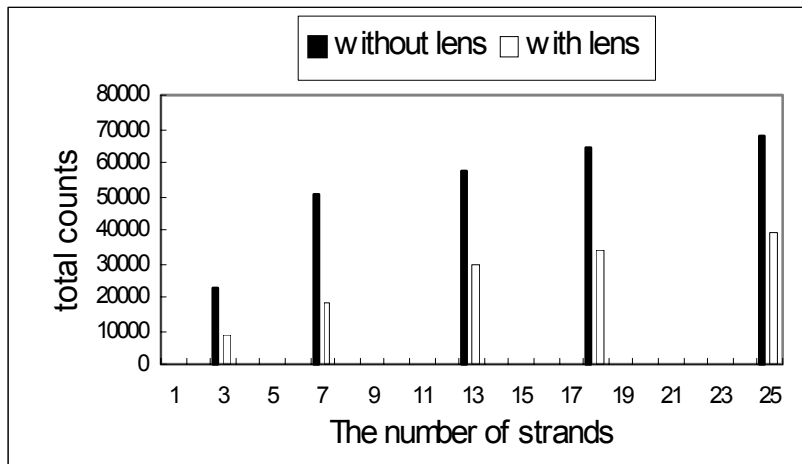


Fig. 28 The total counts measured with sensors having the different number of strands. 'unused' denotes the measurement using the lens. 'use' denotes the measurement without using the lens.

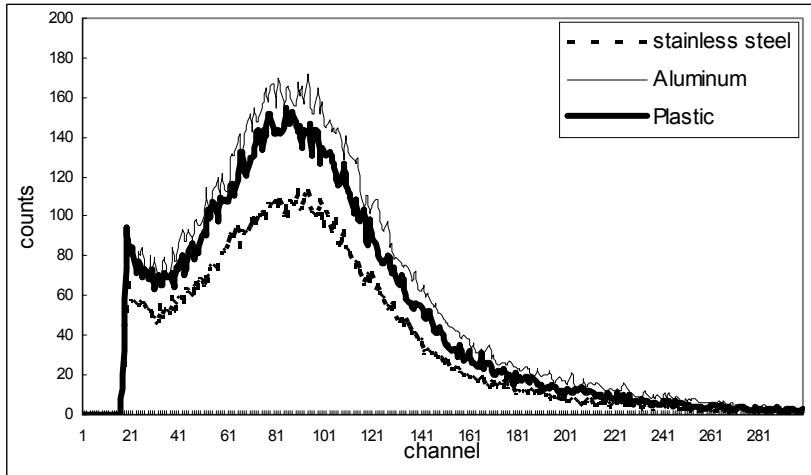


Fig. 29 Pulse-height spectra measured for a 3 μ Ci Cs-137 source with sensors made of 20 strands of fibers with different tube.

2. Tapered 섬광체 센서에 대한 실험

Fig. 30~33은 각각 PPO 0.1%와 dPOPOP의 농도를 0.01~0.04%를 첨가해 제작한 Tapered 섬광체의 ^{137}Cs 1, 1.5, 3, 5 μCi 에 대한 펄스파고 스펙트럼을 보여주고 있다. 각각의 센서에 대해 방사능의 증가에 따라 스펙트럼의 형태는 변하지 않으나 높이가 증가함을 알 수 있다. Fig. 34는 dPOPOP의 농도를 0.01, 0.02, 0.03, 0.04% 다르게 첨가한 4가지 센서에 대해서 방사능과 계수율과의 관계와 오차를 표현 하였다. 오차는 어떤 시료를 써서 t_t 분 동안 측정하여 얻은 계수치가 N_t 이고, background를 t_b 분 동안 측정하여 얻은 계수치를 N_b 라 했을때 다음 식을 이용해 표현 하였다.

$$\begin{aligned}
 n_s \pm \sigma_s &= \left(\frac{N_t}{t_t} \pm \frac{\sqrt{N_t}}{t_t} \right) - \left(\frac{N_b}{t_b} \pm \frac{\sqrt{N_b}}{t_b} \right) \\
 &= \left(\frac{N_t}{t_t} - \frac{N_b}{t_b} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{\sqrt{N_t}}{t_t} \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{N_b}}{t_b} \right)^2} \\
 &= (n_t - n_b) \pm \sqrt{\left(\frac{n_t}{t_t} \right) + \left(\frac{n_b}{t_b} \right)}.
 \end{aligned}$$

모든 센서에 대해서 방사능의 증가에 따라 총계수치가 대체적으로 선형적으로 증가함을 볼 수 있다. 그러나 dPOPOP의 농도가 0.02%일 때 가장 큰 계수치를 나타내고 있으나 4종류 센서의 dPOPOP 농도에 따른 감도를 비교하는 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. 35는 제2용질 dPOPOP를 0.02%의 농도로 제1용질 PPO를 0.1~0.05%로 변화 시키면서 제작한 Tapered 섬광체를 ^{137}Cs 5 μCi 에 적용했을 때 얻은 스펙트럼의 background값을 제외한 총계수치이다. 여기서 dPOPOP의 정해진 농도에 의한 것인지 확인할 수 없었으나 PPO의 농도 변화가 이 레벨에서는 신호에 큰 영향이 없는 것을 볼 수 있다.

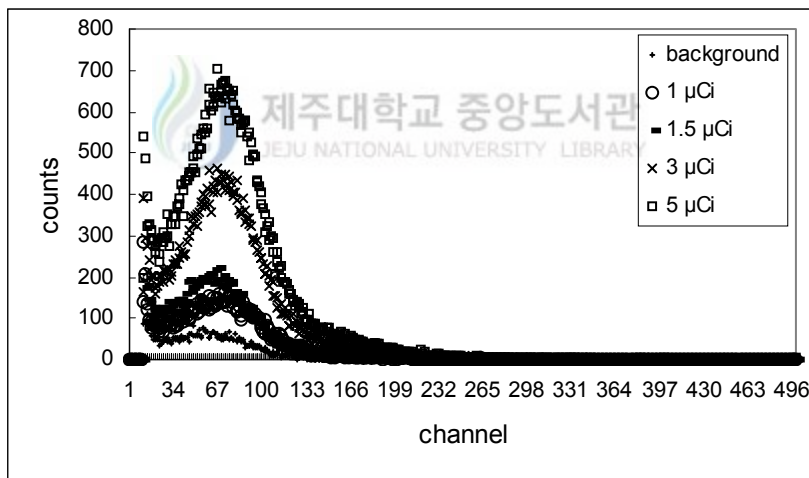


Fig. 30 Pulse-height spectrum measured with the tapered scintillator sensor. PPO and dPOPOP concentrations are 0.1%, 0.01%(mol/ℓ), respectively.

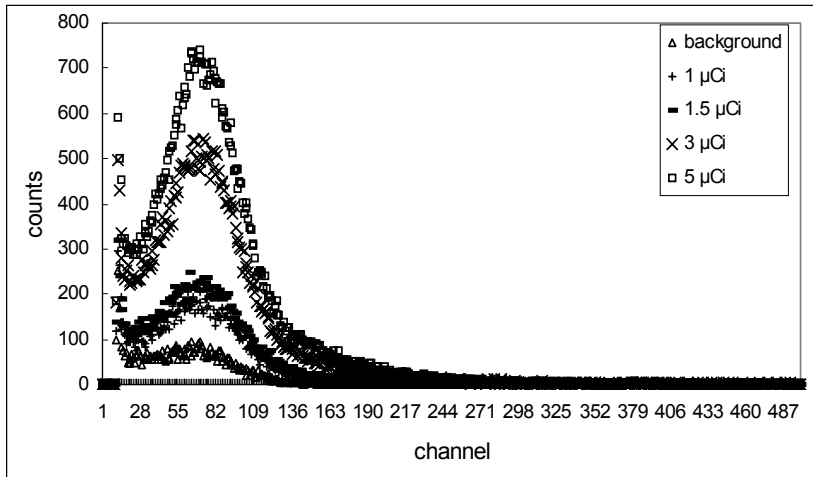


Fig. 31 Pulse-height spectrum measured with the tapered scintillator sensor. PPO and dPOPOP concentrations are 0.1%, 0.02%(mol/ℓ), respectively.

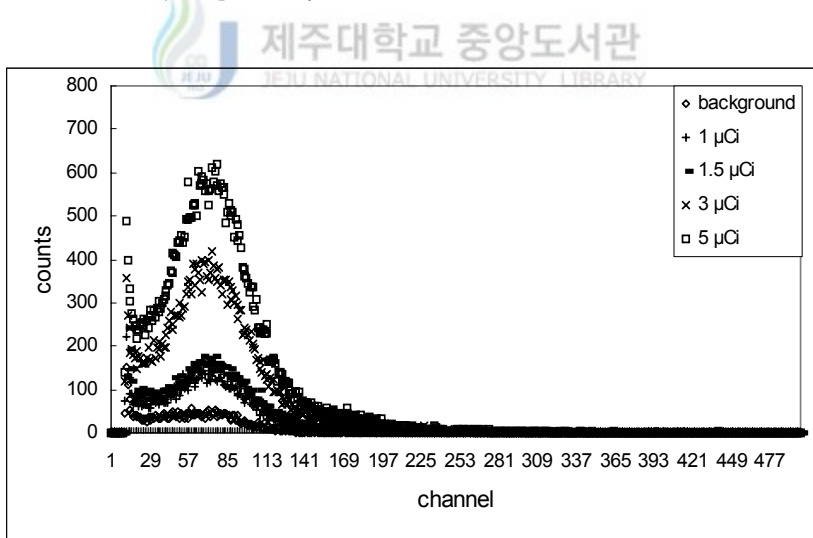


Fig. 32 Pulse-height spectrum measured with the tapered scintillator sensor. PPO and dPOPOP concentrations are 0.1%, 0.03%(mol/ℓ), respectively.

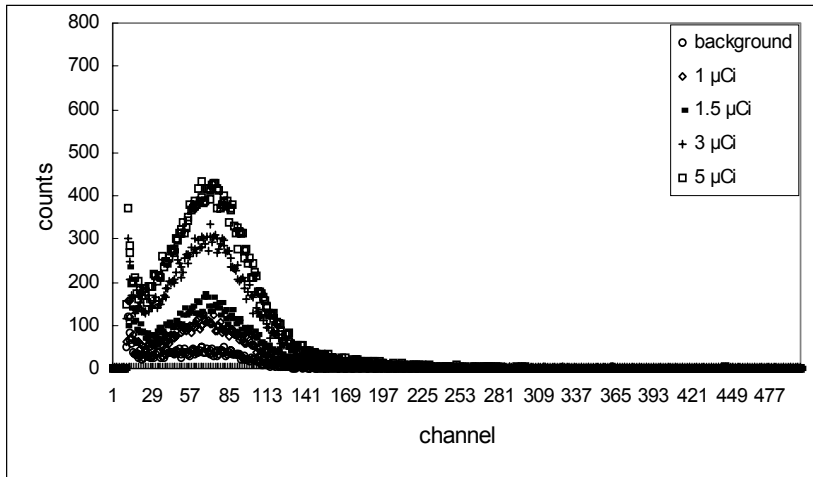


Fig. 33 Pulse-height spectrum measured with the tapered scintillator sensor. PPO and dPOPOP concentrations are 0.1%, 0.04%(mol/ℓ), respectively.

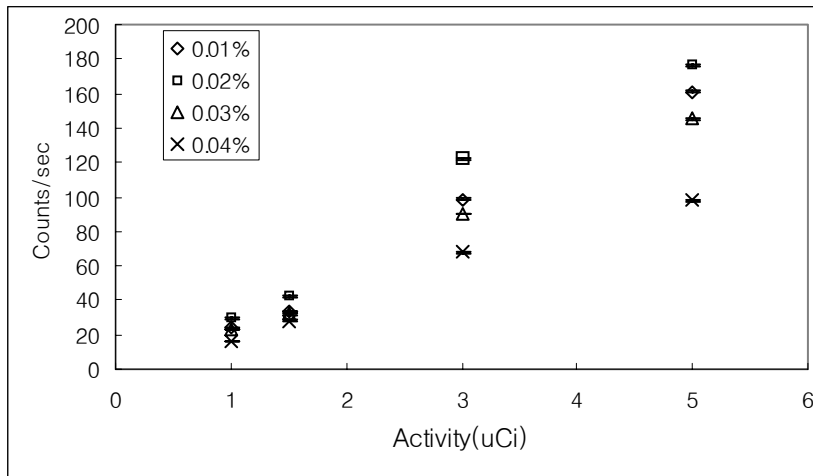


Fig. 34 Proportionality of the total count versus the source activity measured with the sensors having different concentrations of dPOPOP.

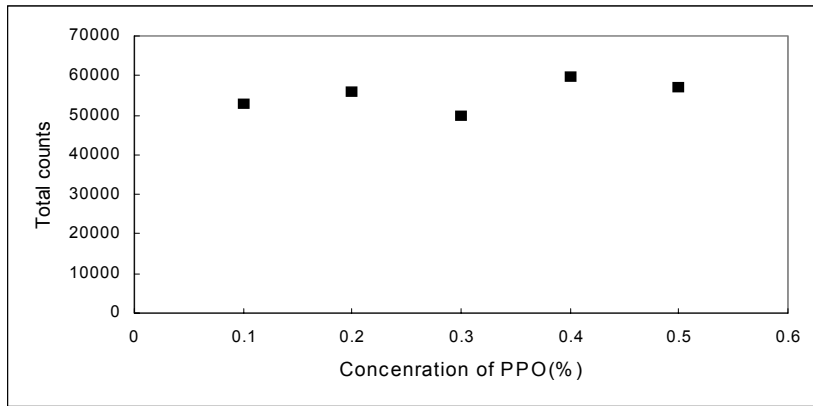


Fig. 35 Total counts as a function of PPO concentration. dPOPOP concentration is 0.02%.

Fig. 36~39은 bPBD 0.1%와 dPOPOP 0.01, 0.02, 0.04, 0.06%를 첨가해 제작한 센서의 ^{137}Cs 1, 1.5, 3, 5 μCi 에 대한 펄스파고 스펙트럼이고, Fig. 40는 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.

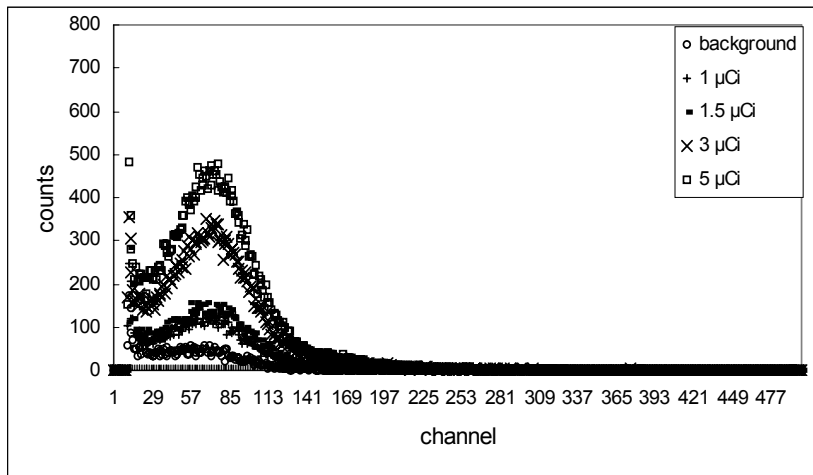


Fig. 36 Pulse-height spectrum measured with the tapered scintillator sensor. bPBD and dPOPOP concentrations are 0.1%, 0.01%(mol/l), respectively.

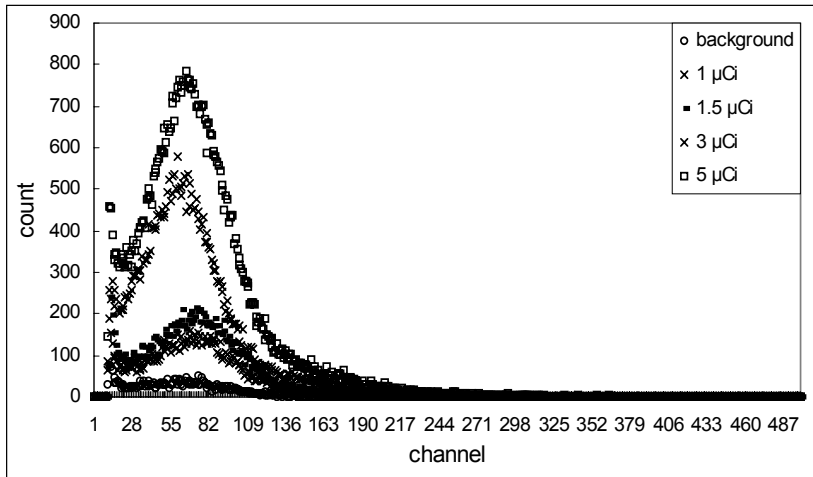


Fig. 37 Pulse-height spectrum measured with the tapered scintillator sensor. bPBD and dPOPOP concentrations are 0.1%, 0.02%(mol/ℓ), respectively.

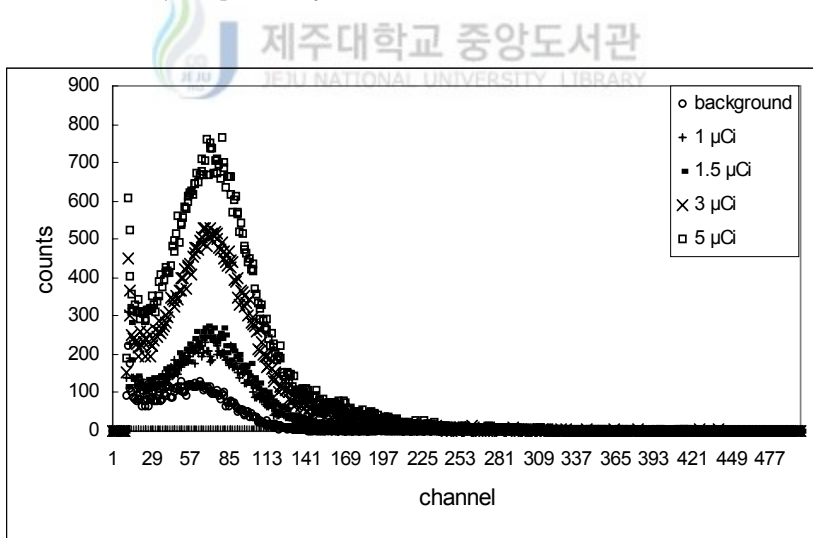


Fig. 38 Pulse-height spectrum measured with the tapered scintillator sensor. bPBD and dPOPOP concentrations are 0.1%, 0.04%(mol/ℓ), respectively.

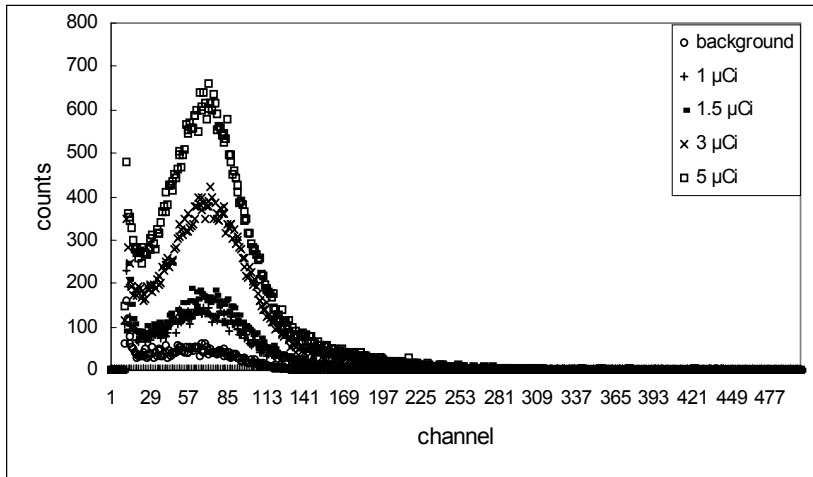


Fig. 39 Pulse-height spectrum measured with the tapered scintillator sensor. bPBD and dPOPOP concentrations are 0.1%, 0.06%(mol/ℓ), respectively.

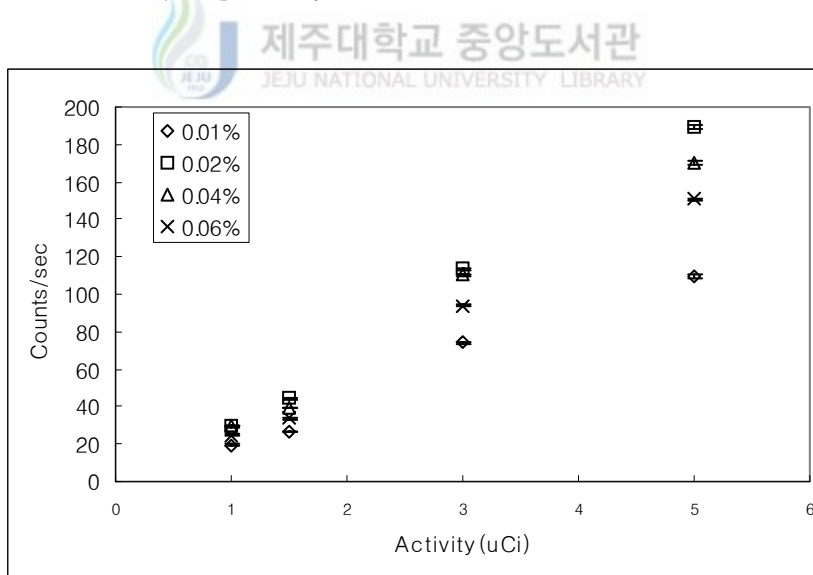


Fig. 40 Proportionality of the total count versus the source activity measured with the sensors having different concentrations of dPOPOP.

본 실험에 사용된 직경 3mm, 길이 1.5m 전송용 플라스틱 광섬유에 의한 손실을 알아보기 위해 제작된 Tapered 형태의 센서를 PMT에 직접 연결하여 펄스파고스펙트럼을 얻었다. Fig. 40 과 41은 제1용질로 bPBD 0.1%, 제2용질을 각각 0.02%를 첨가해 제작한 센서의 얻은 스펙트럼이다. 각 채널의 계수치를 합한 총 계수치는 전송용 광섬유를 사용한 경우 센서를 직접 PMT에 연결한 계수치의 30%이하를 가리켰다. 이 값은 Table 4에서 전송용 광섬유 자체의 손실(Max Attenuation)이 0.19dB/m임을 볼 때 센서와 전송용 광섬유의 결합 부분에서 광손실이 크다는 것을 알 수 있었다. 또 전송용 광섬유와 센서의 접합이 필요 없는 tapered scintillating fiber의 개발 필요성을 다시 한번 확인 하였다.

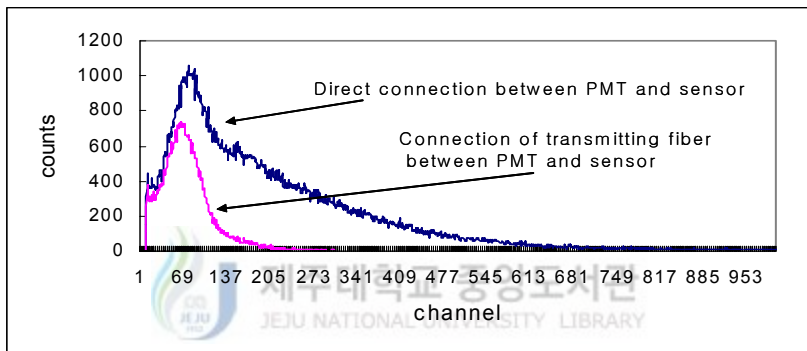


Fig. 41 Pulse-height spectrum measured with the tapered scintillator sensor. bPBD and dPOPOP concentrations are 0.1%, 0.02%(mol/ℓ), respectively.

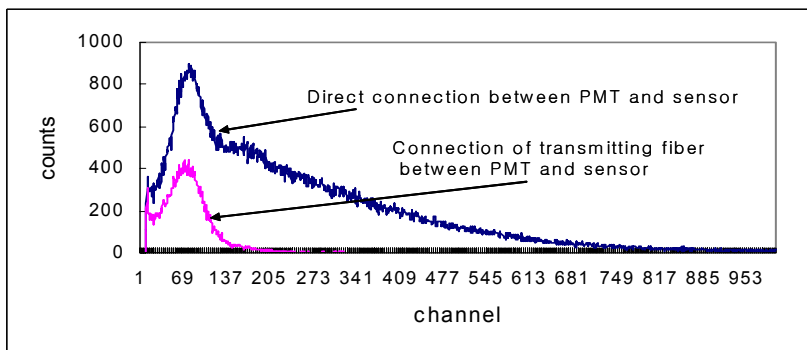


Fig. 42 Pulse-height spectrum measured with the tapered scintillator sensor. bPBD and dPOPOP concentrations are 0.1%, 0.01%(mol/ℓ), respectively.

V. 결 론

본 논문에서는 검출기로서 광섬유섬광체와 플라스틱 섬광검출기가 갖는 물리적 특성, 검출특성, 광섬유 섬광체를 통신용 광섬유기술에 접목하는 방법 및 국내외의 연구사례 등을 비교 분석한 자료를 바탕으로 방사선 검출센서를 제작하였다. 그리고, 제작된 센서에 대해서 방사선과 검출신호의 선형성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

원자력발전소, 가속기, 방사성폐기물 처분장 등에 센서를 분산배치하여 여러 곳의 방사능을 한 곳에서 집중하여 감시하는데 유용하게 적용이 가능한 방사선 센서 후보로서 플라스틱 섬광체 광섬유를 다발형태로 묶은 센서와 한쪽 끝이 가늘어 지는 플라스틱 섬광체(tapered scintillator) 센서를 제작하여 ^{137}Cs 감마선에 대해서 시험하였다. 광섬유 다발 센서는 여러 가닥의 플라스틱 섬광체 광섬유를 알루미늄 튜브에 봉입하여 제작하였고, tapered scintillator는 문헌에 제시된 플라스틱 섬광체의 성분배합을 열중합하여 제작하였다.

광섬유 다발 센서의 경우 대체로 좋은 감도를 가지고 있었으나 센서부위에서 생성된 광을 직경이 작은 전송용 광섬유로 효율적으로 집광/전송하는 데 한계가 있었으나 발견하였다. 그러나 이런 집광 및 센서와 전송용 광섬유의 연결 문제만 해결 한다면 방사선 센서로서 제 기능을 발휘할 것으로 보인다.

다발형 광섬유 섬광체의 집광상의 문제점을 극복하는 방안으로 센서와 전송용 광섬유가 일체형인 tapered fiber의 사용 가능성을 확인하기 위하여 tapered scintillator를 사용하여 실험한 결과 충분한 감도가 있음을 확인하였다.

또 본 연구결과를 통하여 tapered 플라스틱 섬광체광섬유를 활용한다면 분포형 방사선 감시계통의 개발이 충분히 가능함을 확인 할 수 있었다.

참 고 문 헌

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

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.

T. Kakuta, "Optical Fibers and Their Applications for Radiation
Measurements", JAERI-Conf 98-011 Japan Atomic Energy Research Institute,
Japan. 1994.

Maekawa Tatsuyuki, "Multi Point Radiation Monitor by Waveguide Scintillator
JAERI-Conf 95-002 Japan Atomic Energy Research Institute, Japan. 1994.

Glenn F. Knoll, "Radiation Detection and Measurement", John Wiley & Sons,
Inc. , 2000. pp.220~222.

정운혁, "방사성 동위원소 및 방사선의 취급기술", 청문각, 1997, pp. 173~176

고성진 등, "방사선계측학", 청구문화사, 1999, pp. 175~197

C. Emslie, J.Mat. Sci. 1988, 23, 2281.

R. E. Steele, H. J. Schmitt, Proc. SPIE. 1987, 840, 2

Mitsubishi Rayon Co., U. K. Patent 143,157, 1974

Nippon Telegraph & Telephone, U. K. Patent GB 2089352B, 1981

T. Ishigure et al., Electron. Letts, 1995, 31, 465.

김도현 외, "OFS를 이용한 원거리 방사선 측정", 방사선 방어학회, 2003 춘계

학술발표회, pp. 72~76.

K. H. Abel et al., "Scintillating Glass Fiber Neutron Sensors: III. Photon Economy in Scintillating Fibers", Pacific Northwest Laboratory, Richland, USA. 1994.

C. Mori, "Measurement of neutron and γ -ray intensity distributions with an optical fiber-scintillator detector", Nuclear instruments and methods in Physics Research A, 1999, pp.129-132

홍상범, "광섬유를 이용한 방사선계측에 관한 연구", 제주대학교 석사학위논문, 2002

Ph. Rebourgeard et al., "Fabrication and measurements of plastic scintillating fibers", Nuclear instruments and methods in Physics Research A, 1999, pp. 543~567



M. Mizue Hamada et al., "Radiation damage studies on the optical and mechanical properties of plastic scintillators", Nuclear instruments and methods in Physics Research A, 1999, pp.148~154.

김지훈, "LIF 플라즈마 진단을 위한 고체 색소레이저 제작 및 발진특성 연구", 제주대학교 석사학위논문, 2002

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

감사의 글

대학원 1학기의 생활이 어제 일 같은데 벌써 졸업을 하게 되어 지난 시간들이 소중한 그리움으로 저의 가슴속에 남습니다. 먼저 언제나 성실히 연구하는 자세로써 끊임없는 격려와 가르침을 부족한 저에서 배풀어 주신 박재우 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 그리고 학부 때부터 지금까지 많은 가르침을 주셨던 에너지공학과 모든 교수님들께도 이 자리를 빌어 감사를 드립니다.

지난 2년 동안 논문을 쓰는 동안 옆에서 신경써주신 지훈, 준호형, 형석이 그리고 멀리서 응원해 준 상범이형 진심으로 감사드립니다.

또 제가 졸업하기까지 과사무실에서 저를 졸업시키기 위해 무진 애를 쓴 숙희, 윤희에게도 짝한 고마움을 전합니다.

힘겨웠던 일들, 즐거웠던 일들을 모두 함께 나누며 언제나 곁에 있던 모든 선배들과 이 기쁨을 나누고 싶습니다.

같은 공대 B동에 있었기에 나의 활력소 역할을 해 주었던 익준, 경윤아 정말 고맙다.

오늘의 제가 있기까지 끝없는 격려와 사랑을 주시고 말없이 지켜봐 주신 저의 아버님 그리고 어머님께 감사의 마음과 함께 이 논문을 받칩니다.