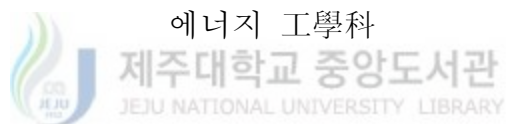


碩士學位論文

광섬유를 이용한 방사선계측에 관한 연구

濟州大學校 大學院



洪 尙 範

2002年 12月


광섬유를 이용한 방사선계측에 관한 연구

指導教授 朴 在 雨

洪 尙 範

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2002年 12月

 제주대학교 중앙도서관
洪尙範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

2002年 12月

A Study on Radiation Detection by Using
Optical Fibers

Sang-Bum Hong

(supervised by Professor Jae-Woo Park)

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

DEPARTMENT OF NUCLEAR AND ENERGY
ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

2002. 12

목 차

LIST OF FIGURES	iii
LIST OF TABLES	vii
SUMMARY	viii
I. 서 론	1
II. 이론적 배경	3
1. 섬광체의 원리 및 특성	3
1) 섬광계수기의 원리	3
2) 섬광체의 종류 및 특성	6
3) 감마선 스펙트럼 분석	9
2. 광섬유	11
1) 광섬유의 구조 및 신호전송원리	11
2) 광섬유의 손실	13
3. 국내외의 연구동향	15
1) 광섬유 자체를 센서로 활용한 중성자 및 감마선 측정	15
2) 광섬유의 선단에 소형 섬광체를 접합한 센서	18
3) 섬광체와 FOB를 조합한 센서	20
4) Laser 광원과 광섬유를 활용한 센서	21

III. 실험장치 및 실험방법	23
1. 광섬유의 굽힘손실 측정	23
1) 실험장치의 구성 및 방법	23
2. 광섬유섬광체를 이용한 방사선계측	25
1) 센서부분의 구성 및 계측방법	26
2) 신호전송을 위한 광섬유종류 및 특성	35
3) 신호처리 장치 및 구성	37
4) 방사선원의 구성 및 배치	39
IV. 실험결과 및 고찰	40
1. 광섬유 굽힘손실 측정 및 분석	40
2. 광섬유를 이용한 방사선계측 및 검출신호분석	45
1) 유리광섬유섬광체에 대한 실험결과	45
2) 플라스틱광섬유섬광체에 대한 실험결과	49
3) 소형 CsI(Tl)에 대한 실험결과	47
VI. 결 론	61
참 고 문 헌	63

LIST OF FIGURES

Fig. 1	Scintillation process in inorganic crystals in terms of band structure	5
Fig. 2	Scintillation spectrum for single photon energy	10
Fig. 3	Typical optical fiber construction	11
Fig. 4	Types of optical fibers	13
Fig. 5	Causes of loss in optical fibers	14
Fig. 6	Prototype of the storage-container monitor	16
Fig. 7	Pulse height spectra for the storage-container monitor under neutron, gamma and mixed excitation	16
Fig. 8	Structure of Wolsong soil and schematic diagram for remote monitoring	17
Fig. 9	Schematic of cross-section of Strontium-90 sensor	18
Fig.10	Emission spectrum of gamma ray measured with Cr-doped Al_2O_3 scintillators around the reactor core	19
Fig.11	Scintillator-painted optical fiber system and fiber driving unit	20
Fig.12	Principal of radiation detection by coupling of scintillator with fluorescent optical fiber	21
Fig.13	Measurement system with optical stimulated luminescence materials	22
Fig.14	Detecting instruments for optical fiber bending loss	24
Fig.15	Detecting system for optical fiber bending loss	24
Fig.16	Experimental setup for testing the optical fiber sensor	26
Fig.17	Emission spectrum for glass scintillating fiber (GS20 1mm)	27
Fig.18	Two type of sensors by using glass scintillating fibers (Dia 1mm, 0.5mm)	28

Fig.19	Connect sensors with optical fibers by using the FC-type optical connector and adapter	28
Fig.20	Emission spectrum for plastic scintillating fiber (BCF-12)	30
Fig.21	Two types of sensors with single-strand plastic scintillating fibers (Dia 0.5mm, 1mm)	31
Fig.22	a) Four type of sensors with multi-strand plastic scintillator fibers, b) Coupling of multi fiber sensors using a mirror and lens	32
Fig.23	Gamma ray excited emission spectra of grown CsI(Tl) crystals and BICRON CsI(Tl) crystals	34
Fig.24	Coupling of CsI(Tl) sensor with transmitting fibers using a mirror and lens	34
Fig.25	a) Attenuation spectrum of plastic optical fibers. (Edmund Optics Inc.), b) Attenuation spectrum of glass optical fiber (Oxford Industrial Electronics TM)	36
Fig.26	PMT case used to fix transmitting fiber on the window of PMT	38
Fig.27	Experimental setup for radiation detection	38
Fig.28	Experimental setup using lead bricks	39
Fig.29	Emission spectrum of LED at 2.25V	41
Fig.30	Bending loss of plastic scintillating fiber (Dia. 1mm)	42
Fig.31	Bending loss of silica optical fiber (Dia. 1mm)	42
Fig.32	Bending loss of plastic optical fiber (Dia. 2mm)	43
Fig.33	Bending loss of plastic optical fiber (Dia. 1mm)	43
Fig.34	Transmitting attenuation of optical fiber types at 2.25V	44
Fig.35	Pulse height spectrum of measured with single-stand 1mm sensor for the gamma ray source	46
Fig.36	Experimental results of glass scintillating fibers	47

Fig.37	Pulse height spectrum measured with the single-stand 1mm sensor for the sealed standard gamma sources	48
Fig.38	Linear fitting results of glass scintillating fiber	48
Fig.39	a) Pulse-height spectrum measured with the single-strand 0.5mm sensor for the gamma ray and beta ray source. b) Pulse-height spectrum measured with the single-strand 1mm sensor for the gamma ray and beta ray source	51
Fig.40	Pulse-height spectrum measured with four type of the multi-strand sensors for the gamma ray and beta ray source ·	52
Fig.41	Pulse-height spectrum measured with the multi-strand 1mm sensor(A1) for coupling of a mirror and lens	54
Fig.42	Pulse-height spectrum measured with four type of the multi-strand sensors which used a mirror and lens for the gamma ray and beta ray source	53
Fig.43	Experimental Result to find focusing length	54
Fig.44	Pulse height spectrum measured with the multi-stand 1mm sensor for the sealed standard gamma sources	55
Fig.45	Linear fitting results of multi-stand 1mm plastic scintillating fiber sensor (sensor B1)	55
Fig.46	Pulse height spectrum measured with the multi-stand 0.5mm sensor for the sealed standard gamma sources	56
Fig.47	Linear fitting results of multi-stand 0.5mm plastic scintillating fiber sensor (sensor B3)	56
Fig.48	Pulse-height spectrum measured with CsI(Tl) sensor for the gamma ray and beta ray source	58
Fig.49	Pulse-height spectrum measured with CsI(Tl) sensor for coupling of a mirror and lens	58

Fig.50 Pulse-height spectrum measured with CsI(Tl) sensor for
2mm optical fiber 59

Fig.51 Pulse height spectrum measured with the CsI(Tl) sensor for
the sealed standard gamma sources 59

Fig.52 Linear fitting results of CsI(Tl) sensor 60



LIST OF TABLES

<Table-1> Properties of common inorganic scintillators	7
<Table-2> Specifications for spectrometer	25
<Table-3> Physical properties of lithium glass scintillating fibers	27
<Table-4> Properties of the plastic scintillating fiber (BCF-12)	30
<Table-5> Physical properties of lens (KODAK Lens)	32
<Table-6> Physical properties of the optical fibers	36



Summary

Optical fiber have been investigated for their potential use as sensor material in various nuclear applications. Several new methods of radiation measurement are being developed using recent optical techniques. Comprehensive overviews of their potential use in nuclear environments can be found in measuring temperature, pressure, void fraction and corrosion in nuclear systems. Optical fibers doped with scintillating components in the core have drawn special interests as potential use for radiation detection. As a radiation detector, a scintillating optical fiber can function for dual purpose: scintillator and light transmitter. When a radiation interacts with the core material, scintillation occurs and the resultant light is transmitted through the fiber to an optoelectronic devices such as a photomultiplier tube. Optical fiber sensors have proven to present several advantages as compared to other conventional sensors. They can be processed very small size and 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 trouble in harsh environments such as underground and underwater. Optical fiber sensor cost relatively cheap to make them more suitable for a multi-point distribution radiation monitoring which can be applied in such as nuclear reactors, accelerators, fusion study facilities. Much effort has been exerted on applying scintillating optical fibers to develop radiation detectors.

This study has been conducted to investigate feasibility of using scintillating optical fibers and inorganic scintillator[CsI(Tl)] for detection of gamma rays emitted ^{137}Cs and ^{60}Co and beta rays from ^{90}Sr . The sensors are constructed of single-stand or multi-stand fibers of 1mm and 0.5mm diameter. The glass scintillating fibers used contains cerium-activated lithium-silicate material in Levy Hill Lab model GS20, GS30 and the plastic scintillating fiber used are commercially available Bicon

model BCF-12. We used a mirror and lens to improve the efficiency of the sensor with collecting multi-stand plastic scintillating fibers and light transmitting fibers were tested its bending loss of their types.

In this paper, we report the pulse-height spectra obtained by using these sensors, and analyze them in the aspect of their usability for radiation detectors. Our investigation suggests that the glass scintillating fibers can be used to develop gamma ray detectors which will function in high and low gamma ray flux environments. Use of the sensor for the beta ray detection was not satisfactory. Multi-strand plastic scintillating fiber sensors work satisfactorily for the weak gamma sources, but did produce somewhat promising results for beta ray sources. The inorganic scintillator[CsI(Tl)] works satisfactorily both gamma ray sources and beta ray sources.



1. 서 론

현재 광섬유는 그 특성을 이용하여 여러 가지 측정 센서로 이용되고 있으며, 원자력 분야에서 다양한 형태의 센서의 적용에 대한 연구가 진행되어 오고 있다.[R. Ven Geen 1994] 이러한 연구는 광학기술과 접목되어 새로운 방법으로 진보하고 있다. 그 예로는 온도, 압력, 진동, 부식 등 많은 부분에 적용되고 있다. 광섬유를 활용한 방사선계측방법은 광섬유의 유연성, 경량·세경, 센서부위의 전원공급의 불필요 등의 장점을 활용하여 기존의 방사선계측법의 적용이 곤란한 곳의 방사선 측정을 할 수 있다는 점에서 시도되었다. 환경방사능 측정 면에서는 수중이나 토양 등의 방사능을 시료 채취 없이 직접 실시간 감시(Monitoring)하는 시스템 개발이 가능할 뿐만 아니라 원자력발전소, 가속기 및 핵융합연구 등에서도 유용하게 적용할 수 있다.

광섬유를 활용한 방사선계측방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째는 광섬유 자체를 방사선센서로 활용하는 방법이고, 둘째는 섬광체(Scintillator)와 광섬유를 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 끝에 부피가 큰 섬광체를 결합하여 여기서 발생한 광을 전송하는 매체로 활용하는 방법으로 환경방사능과 같이 저준위 방사선장에 활용될 수 있다. 근래에 와서 밀도가 높고 흡습성이 없는 새로운 소재가 많이 개발되고 있으므로 이들을 광섬유와 조합한다면 좋은 방사선계측 수단이 될 수 있다. 이러한 광섬유와 광섬유섬광체(Scintillating optical fiber)를 이용한 방사선계측기를 개발하는데 많은 연구가 시행되고 있다. 특히 미국, 일본 등에서는 방사선 계측수단으로 그 가능성이 인정되어 이미 연구가 활발히 진행중이다.[T. Kakura 1998]

본 연구에서는 광섬유섬광체와 무기섬광체인(Inorganic scintillator) CsI(Tl)를 소형으로 제작하여 $^{137}\text{Cs}(1\text{mCi}, 1\mu\text{Ci})$ 의 감마선원과 $^{90}\text{Sr}(1\mu\text{Ci})$ 의 베타선원에 적용하여 방사선계측 가능성에 대하여 조사하였다. 센서는 0.5mm, 1mm의 광섬유섬광체를 이용하여 외가닥과 여러 가닥의 다발형(Multi-stand)으로 센서를 제작하였다. 유리광섬유섬광체

(Glass scintillating fiber)는 영국의 Levy Hill Lab사의 GS20, GS30을 이용하였고, 플라스틱광섬유섬광체(Plastic scintillating fiber)의 경우 미국 Bicron사의 BCF-12를 이용하였다. 센서에서 발생된 광의 집광효율을 향상시키기 위하여 다발형센서의 양단에 렌즈와 거울을 이용하여 효율향상을 추구하였고, 신호전송용 광섬유의 경우 플라스틱과 실리카(Silica)계열의 제품을 이용하여 방사선계측에 적용하였을 뿐만 아니라 광섬유의 굽힘(Bending) 손실에 대하여 실험하였다.

광섬유섬광체와 소형의 무기섬광체인 CsI(Tl)의 발광 신호분포(Pulse-height spectrum)를 비교 분석하여 방사선계측에 활용가능성에 대한 조사를 통하여 유리광섬유섬광체의 경우에는 고준위 및 저준위 방사선장에 적용이 가능하며, 플라스틱섬광체의 경우 감마선원에 대해서는 신호분포가 양호하나, 베타선원에 대해서는 검출신호가 낮다. 하지만 적용가능성은 충분히 남겨두고 있다. 무기섬광체인 CsI(Tl)인 경우 감마선원 및 베타선원에 대해서도 만족할 만한 결과를 얻었다. 그리고 ^{137}Cs (1 μCi , 3 μCi , 5 μCi)의 감마선원에 대한 선량과 검출신호의 선형성 비교를 통하여 미지선원(^{137}Cs , 1.5 μCi)에 대한 응답신호를 비교 분석하였다.

본 논문의 연구를 통해서 환경방사능 수준의 저준위 방사성액체폐기물에 직접 적용이 가능한 광섬유섬광체를 활용한 방사선 계측기 개발에 적용될 수 있을 것이다.

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 1998]

본 논문에서는 이러한 두 가지 방법에 대하여 각각의 계측시스템을 구성하여 실험하였다. 이러한 적용을 위하여 섬광체의 발광원리 및 특성, 광섬유섬광체(Scintillating optical fiber)의 특성 및 광섬유의 신호전송원리를 통하여 체계적인 이론과 국내외의 연구현황에 대하여 살펴봄으로써 효율적인 방사선 계측시스템을 제작할 수 있도록 다음과 같이 자세히 기술하였다.



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

1. 섬광체(Scintillator)의 원리 및 특성

1) 섬광계수기의 원리

광학적으로 투명한 어떤 종류의 결정에 하전입자 및 감마선 등이 방사선이 입사하면 결정내의 원자가 여기 또는 전리된다. 그러나 약 $10^{-14} \sim 10^{-12}$ sec 후에 안정상태로 돌아가면서 여분의 에너지를 빛으로 방출하게 된다. 이러한 현상을 섬광(Scintillation)이라 하며, 섬광을 내는 물질을 섬광체(Scintillator)라 부른다. 섬광체의 광 Output의 크기와 방출광의 파장은 섬광체의 중요한 두 가지 성질이다. 광 출력은 광전자증배관(PMT: Photomultiplier Tube)의 Input에서 생성된 전자 등의 수에 영향을 주고, 따라서 이것은 계수계통의 Output에서 생성되는 파고에 영향을 준다. 파장에 대한 정보는 섬광체에

대한 최적의 광전자증배관을 선택하기 위해서 필요하다.

섬광체에서 발생한 미약한 빛은 광전자증배관이나 광다이오드(Photodiode)를 사용하여 전기적 신호로 변환된 후 이를 증폭하여 방사선흡수에너지 또는 방사선 입자수에 비례하는 전기펄스를 얻을 수 있다. 따라서 이 전기펄스의 파고를 분석하면 입사방사선의 에너지분석이 가능하므로 방사선 검출기로 이용할 수 있다. 이러한 검출기를 섬광검출기(Scintillation detector)라 한다.[정운혁 1994]

본 논문에 사용된 섬광체는 CsI(Tl)으로 무기섬광체(Inorganic scintillator)이다. 무기섬광체의 여기-발광 과정은 여기상태와 기저상태 사이의 전이에 기인된다. 무기섬광체는 두 가지 종류, 즉 진성(순수)결정체와 외인성(활성체첨가)결정체가 있다.

진성결정체(Intrinsic crystal)의 발광메커니즘은 Fig. 1 a)과 같이 일반적인 고체의 에너지 띠구조(Energy band structure)로 나타낼 수 있다. 입사방사선은 원자를 이온화시키거나 혹은 가전자대에 있는 전자를 여기시킨다. 이온화는 이온결합으로부터 전자를 유리(遊離)시키고, 전자들은 전도대로 올려 이온쌍(Ion-pair)을 형성시킨다. 여기는 약하게 결합된 전자-정공쌍 즉 엑시톤(Exciton)을 형성한다. 엑시톤의 전자에너지 상태는 전도대 바로 아래에 있다. 전자들은 결정내에서 이동(Drift)하고, 그리고 양(+이온)에 쉽게 포획된다. 광자는 전자가 전도대로 떨어지는 전자-정공 재결합과정에서 방출된다.

외인성결정(Extrinsic crystal)은 진성결정에 Tl, Na 및 Ce와 같은 원소를 활성체(Activator)로 첨가한 것이다. 비록 입사 방사선이 주 결정의 이온쌍 혹은 엑시톤을 형성하더라도, 이것은 대부분 격자에서 열로 소비하면서 비방사적으로 기저상태로 되돌아간다. 발광은 대부분 활성체에 기인된다.

Fig. 1 b)는 외인성결정의 에너지 띠구조이다. 활성체의 에너지 준위는 금지대내에 있으며, 활성체의 기저상태는 금지대의 중간보다 낮은 곳에 있고, 금지대의 중간보다 높은 곳에 활성체의 첫 번째 여기준위가 있다. 광자는 전자가 여기에너지 준위에서 기저상태로 떨어질 때 방출된다. 이 천이에너지가 금지대의 에너지보다 훨씬 작기 때문에 결정은 결정이 방출하는 빛에 대해 투명하다.

몇 가지 알칼리 헤라이드와 알칼리 토금속들은 UV(BaF₂, CsI, NaI) 혹은 VUV(KF, KMgF₃, KCaF₃등) 빛을 방출한다. 이러한 섬광은 UV여기로서는 관찰되지 않으므로, Self-trapped 여기에 대한 방사붕괴의 향으로 설명할 수 없다. 그러나 Cross

Luminescence의 향으로는 설명할 수 있다. Cross Luminescence는 이온화 방사선에 의해 생긴 양이온띠(Core cation band)내 깊은 곳에 있는 정공들과 가전자대 음이온띠 (Valence anion band)내 전자들과의 재결합에 기인하여 일어날 수 있다. Fig. 1 c)의 결정이 방출된 빛에 대해 투명하기 위해서는 가전자대와 Core band 사이의 에너지가 가전자대와 전도대 사이의 에너지갭(Energy gap) 보다 작아야 한다. [도시홍외 1998]

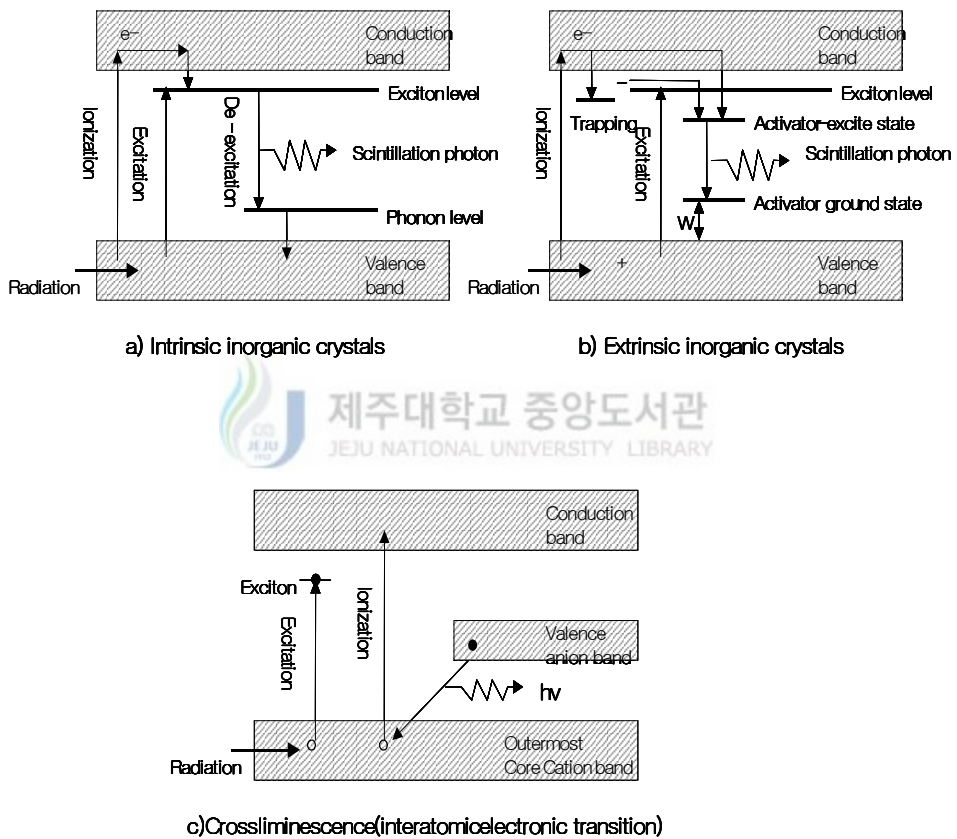


Fig. 1 Scintillation process in inorganic crystals in terms of band structure.

2) 섬광체(Scintillator)의 종류 및 특성

현재 많은 종류의 섬광체(Scintillator)가 사용되고 있으며, 일반적으로 무기섬광체(Inorganic scintillator)와 유기섬광체(Organic scintillator) 크게 2가지로 구분된다. 무기섬광체는 NaI(Tl), CsI(Tl), Li(Eu), ZnS(Ag) 등이 있고, 주로 X선, 감마선, 중성자 및 알파선 측정에 이용된다. 감마선을 측정할 경우 섬광체에 입사한 감마선에 의한 광전효과와 광효율은 원자번호의 5승에 비례하기 때문에 원자번호가 큰 것이 요구된다. Table 1은 상업적으로 유용하며, 일반적으로 사용되는 무기섬광체의 특성을 나타낸다.

본 논문에 사용된 CsI(Tl)은 NaI(Tl)보다 더 높은 밀도($4.51 \times 10^3 \text{kg/m}^3$)와 원자번호를 가진다. 따라서 감마선의 검출효율도 높다. CsI(Tl)의 광전환효율은 실온에서 NaI(Tl)의 약 45% 정도이다. 액체질소온도(77K)에서 순수한 CsI(Pure)는 실온에서 NaI(Tl)과 같은 광 출력을 가진다. CsI(Tl)의 방출 스펙트럼은 420~600nm이다. CsI는 흡습성이 없고, NaI보다 더 유연성이 크다. 따라서 이것은 강한 충격, 진동, 온도변화에 강하여, 인공위성실험에 적합하다.

Li(Eu)는 농축시킨 ${}^6\text{Li}$ 을 이용한 경우 ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ 반응에 의해서 열중성자에 대한 검출효율이 높다. ZnS(Ag)는 가장 오래된 무기섬광체 중의 하나이다. 이것은 매우 높은 형광효율을 가지고 있지만, 다결정의 분말로만 사용하기 때문에 다결정층에서 불투명함 때문에 투명도가 나빠서 25mg/cm^2 이상의 두께는 사용할 수 없다. 그러한 단점 때문에 두께가 얇은 박막으로 제작되어 비정(Range)이 짧은 알파선 측정에 이용되고 있다.

베타선용 섬광체로는 원자번호가 낮은 것이 좋다. 이것은 원자번호가 높으면 베타선의 후방산란이 두드러져서 입사한 베타입자가 자기의 전에너지를 잃어버리기 전에 다시 달아날 확률이 커지기 때문이다. 이와 같은 이유로 베타선의 측정에는 유기섬광체를 사용한다. 그 외의 무기섬광체는 $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO), BaF_2 , $\text{CaF}_2(\text{Eu})$, $\text{CaI}(\text{Eu})$, CsF 등이 있다.

유기섬광체에는 유기결정체, 플라스틱섬광체 및 액체섬광체 등이 있다. 유기 결정체로는 안트라센(Anthracene), 스틸벤(Stiblene) 등이 있으며, 플라스틱섬광체에는 유기섬광체를 용매로 녹인 후 이것을 고분자화 시켜 고용체로 만든 것이다. 그러나 플라스틱섬광체는 유기섬광체의 용기를 필요로 하지 않는 이점이 있다. 플라스틱섬광체는 가는 줄

로부터 얇은 막에 이르기까지 어떤 크기나 형태로 만들 수 있으며, 물, 공기 및 많은 화학약품 등에 불활성이기 때문에 방사성시료와 직접 접촉해서 사용할 수 있는 장점이 있다. 플라스틱섬광체에 많이 이용되는 용매는 Polystyrene과 Polyvinyltoluene며, 만족스러운 용질은 p-terphenyl과 POPPO이다. 플라스틱섬광체의 밀도는 약 10^3kg/m^3 이고, 광출력은 안트라센보다 낮다. 붕괴시간은 짧고, 방출 스펙트럼의 최대강도에 대응하는 파장은 350~450nm이다. 일반적으로 사용되는 플라스틱섬광체의 상품명은 Pilot B, Pilot Y, NE102 및 NE110이다. 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. [정운혁 외 1994]

Table 1 Properties of common inorganic scintillators.

	Specific Gravity	Wavelength of Max. emission	Refractive Index	Decay Time(μs)	Abs. Light Yield in Photons/MeV
Alkali Halides					
NaI(Tl)	3.67	415	1.85	0.23	38000
CsI(Tl)	4.51	540	1.80	0.68(64%), 3.34(36%)	65000
CsI(Na)	4.51	420	1.84	0.46, 4.18	39000
LiI(Eu)	4.08	470	1.96	1.4	11000
Other Slow Inorganic					
BGO	7.13	480	2.15	0.30	8200
ZnS(Ag)	4.09	450	2.36	0.2	-
Glass Scintillator					
Ce activated Li glass	2.64	400	1.59	0.05 to 0.1	3500
For comparison, a typical organic(plastic)scintillator					
NE102A	1.03	423	1.58	0.002	10000

Cerium을 활성화체로 갖는 유리섬광체(Glass scintillator)의 섬광현상 원리는, 감마선 검출물질로 널리 쓰이는 NaI(Tl) 등의 무기섬광체가 갖는 섬광 발생원리와 매우 유사하다. ^6Li 를 함유하는 유리섬광체를 중성자검출기로 사용하는 원리는 다음과 같다.



핵반응에 의해서 4.78MeV의 에너지가 방출되는데, 이중 알파입자인 ${}^4\text{He}$ 핵이 2.05MeV를 가지며 이보다 질량이 작아 운동에너지가 더 큰 ${}^3\text{H}$ 핵이 2.07MeV를 갖는다. 생성된 입자는 양성자(Proton)나 전자에 비하여 중하전입자이므로 유리섬광체내에서 갖는 비정(Range)이 아주 짧으며 대부분의 에너지는 직경이 아주 작은 섬유 형태의 물체 내에서 흡수된다. 이 반응에 대한 반응단면적을 중성자 검출용으로 널리 사용되는 ${}^3\text{He}$ 및 ${}^{10}\text{B}$ 과 함께 낮은 에너지 영역에서는 다른 핵반응 물질보다도 반응단면적이 1/10 정도로 떨어짐을 알 수 있다. Table 1에서 유리섬광체의 비중(Specific gravity)이 2.64로 다른 섬광체 물질의 경우보다도 훨씬 낮고 동시에 원자번호가 낮은 물질로 구성되어 있기 때문에 동일한 체적의 다른 광자(Photon)검출기보다 검출효율이 떨어진다. 따라서, 선원의 세기가 약한 경우에 감마선 검출용 물질로써의 활용도가 높지 않다. 빛 발생률은 NaI(Tl)의 4~6%에 해당된다. 유리섬광체의 경우 고속전자 에너지를 빛으로 전환할 때 갖는 절대검출효율은 약 1~2%로 알려져 있으며 유리 성분 중에서 Li의 농도에 반비례하는 것으로 알려져 있다. 하전입자에 대한 섬광체 반응은 비선형적(Nonlinear)이며 동일한 에너지를 내는 전자에 의한 섬광체의 세기보다도 항상 훨씬 낮다. 예로서 1MeV의 양성자, 중양자(Deuteron) 그리고 알파입자에 의한 섬광효율은 같은 에너지를 내는 전자에 의한 검출효율 값보다 각각 2.1, 2.8, 그리고 9.5 분의 1밖에 되지 않는다. 감마선에 대하여 알파입자나 삼중수소핵(Triton)이 내는 단위에너지(MeV)당 빛 발생률은 약 20~30% 정도인 것으로 알려져 있다. 하전입자의 경우 입사 방사선의 단위 에너지에 대한 유리섬광체의 빛 발생률은 낮으며, 예로서 4.78MeV의 하전입자에 의한 빛발생률은 1.2MeV 감마선에 의한 것과 비슷하다.

유리섬광체는 형태와 크기를 쉽게 변형할 수 있고, 심각한 주변 여건에 대해서도 잘 지탱이 되는 등의 많은 이점을 가지고 있기 때문에 일반적으로 활용도가 높은 섬광체는 부식성 화학물질이 있거나 고온에서는 사용하기 힘들지만 유리섬광체는 사용이 가능하다. 유리섬광체는 흡습성이 없으며, 열적충격이나 기계적충격에 대하여 잘 견디는 장점을 가지고 있다.

유리섬광체에서의 조성비를 달리하여 제작이 가능하고 아울러 Li의 동위원소비를 달리하여 제작하는 경우 중성자 검출목적으로 하는 경우나, 중성자 Background하에서 감

마선 등을 검출해야 하는 경우 등에 모두 적용이 가능한 특징을 갖고 있다. 유리섬광체의 제조는 일반적인 유리제조 공정과 유사하기 때문에 앞에서 언급한 섬유형태뿐만 아니라 일반적인 실린더형, 판형 또는 그 이외의 여러 가지 형태로 제작이 가능하다.[G F. Knoll 2000]

3) 감마선 스펙트럼분석

섬광검출기의 감마선 스펙트럼의 안정적인 모양에 대해서는, 감마선과 섬광체의 상호작용으로 생긴 고속전자의 에너지 스펙트럼으로 설명된다. 뿐만 아니라 에너지에서 광으로, 광에서 전기신호로 변환되는 과정에서 변동이 비선형성의 영향을 받아 펄스파고 분포 즉, 감마선 스펙트럼을 얻을 수 있다. 따라서 본래의 선스펙트럼인 전에너지 흡수 피크가 되지만, 감마선 에너지 및 양에 관한 정보가 명확하기 때문에 스펙트럼 해석은 주로 전에너지피크(광전피크)에 대해서 한다.

Fig. 2는 섬광검출기로 측정된 대표적인 감마선 스펙트럼이다. 감마선 스펙트럼은 검출기 매질과 감마선과 물질과의 상호작용과 검출기 주변물질과의 상호작용에 의한 복잡한 형태로 이루어진다. 먼저 입사 방사선의 Compton 효과에 의해서 Compton 전자의 에너지는 산란각에 따라 최저 0에서 최고 $E_{e_{max}} = \frac{hw}{(1+2hw/m_0c^2)}$ 에 걸쳐서 연속적으로

분포한다.

이 2차 전자는 검출기 내에서 흡수되지만, 산란 감마선은 대부분 검출기 밖으로 달아나고 얻어진 파고 분포의 Compton 전자의 스펙트럼은 Compton 연속대로 나타나고, $E_{e_{max}}$ 에 해당하는 영역을 Compton edge라 한다. Compton 연속분포는 단일 에너지의 감마선이 입사하더라도 스펙트럼은 연속분포가 되기 때문에 입사 감마선의 에너지 정보를 해석하는 데에는 불리하다.

Fig. 2는 에너지 스펙트럼 오른쪽에 분명하게 나타난 최고 펄스피크는 1회의 광전효과 또는 다중과정에 의한 광자의 에너지 흡수에 의해서 나타나는 것으로서 이것을 광전피크(Photopeak)라고 한다. 특히 광전피크는 저에너지 영역에서 반응확률이 높고, 입사 감마선 에너지에 비례하며, 감마선의 에너지 분석에 실질적으로 이용된다. 그리고

감마선이 검출기 이외의 장소에서 Compton 효과를 일으킨 경우에 산란 감마선이 섬광체로 되돌아옴으로서 후방산란피크가 생성된다.[도시홍외 1998]

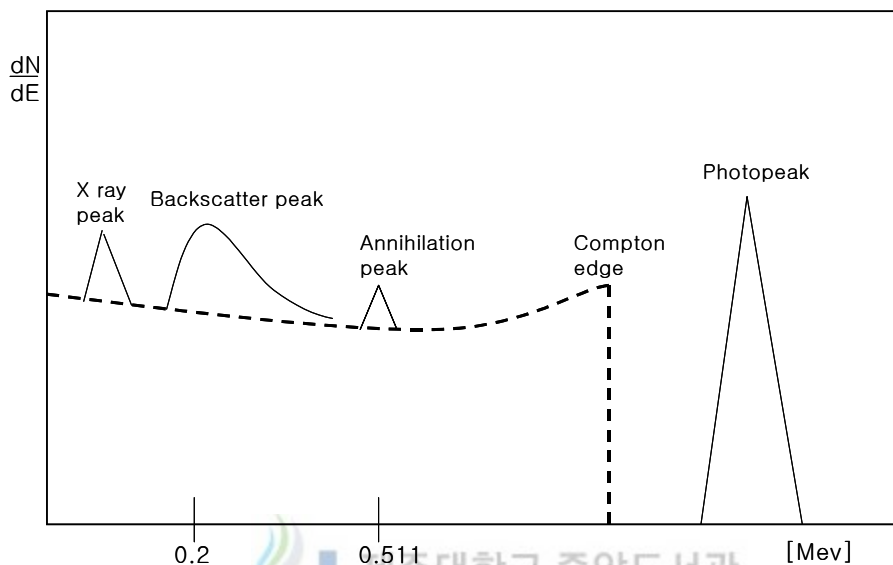


Fig. 2 Scintillation spectrum for single photon energy.

본 논문에 사용된 약 1mm이하인 광섬유섬광체(Scintillating optical fiber)는 작은 체적, 낮은 밀도 등으로 인하여 Fig. 2와 같이 섬광체내에서 전체 에너지가 흡수되는 "Full energy peak"가 스펙트럼 상에 나타날 확률은 희박하다. 직경이 0.1~2mm인 광섬유섬광체의 경우, 입사 감마선과 물질과의 상호작용으로 생긴 감마선 에너지의 일부만 검출신호로 기여하게 되고 나머지는 검출기 밖으로 빠져나가게 되므로 광섬유섬광체를 이용하여 입사 감마선의 에너지에 대한 정보를 얻을 수 없다. 즉, 이것을 이용하여 감마선 분광분석(Gamma-ray spectroscopy)을 수행할 수는 없다. 따라서, 특정 핵물질 또는 사용후핵연료의 검증 또는 감지용으로는 적절하지만 핵물질 자체에 대한 계량관리 목적으로 사용될 수 없다.

직경이 약 2mm이하인 광섬유섬광체를 각각 또는 여러 가닥으로 묶어서 중성자 또는 감마선, 또는 감마선 및 중성자 검출기로 폭 넓게 활용할 수 있다. 섬광체는 제작 및

취급이 용이한 물질이므로 측정대상의 핵물질의 기하학적 구조에 적합하게 제작할 수 있으며 보호용 피복재로 밀봉하여 수중이나 밀집된 곳의 작은 공간에 삽입하여 사용할 수 있다. 섬광체에 직접 전자장치를 부착할 필요가 없기 때문에 전자장치에 대한 방사선피폭을 고려하지 않아도 되므로 고방사선장에 적용할 수 있으며 장비의 유지, 보수가 거의 필요하지 않으므로 비용이 절감될 수 있다, [이영길 외 1998]

2. 광섬유

1) 광섬유의 구조 및 신호전송원리

광섬유 구조는 Fig. 3과 같이 심(Core)과 반사막(Cladding)으로 구성되어 있으며 그 위에 여러 겹의 재료를 입혀 광섬유의 강도를 높이고 보호벽으로 이용한다.

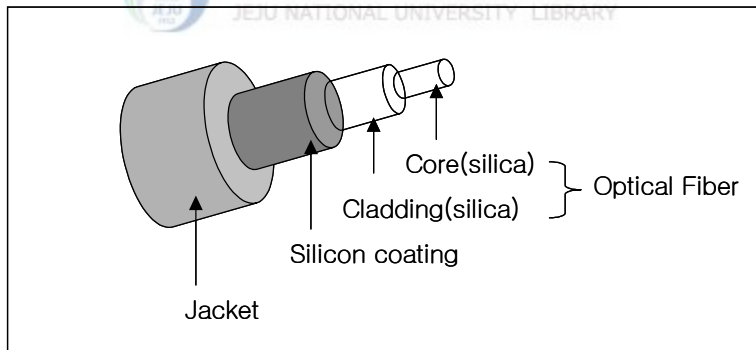


Fig. 3 Typical optical fiber construction.

Core의 역할은 빛을 통과시키는 것이며, Cladding의 역할은 빛이 Core와 경계면에서 전반사를 하도록 고안되어 있다. 이때의 조건은 Core의 굴절률이 Cladding의 굴절률보다 반드시 커야하며 대체로 굴절률의 차이는 약 0.1정도 되는 것이 바람직하다.[D. Marcuse 1973]

빛이 광섬유를 통과할 때는 Fig. 4와 같이 전진형태로 진행하며, 광섬유의 구조에 따

라 Graded-index와 Step-index로 나눌 수 있다. Graded-index는 굴절률이 Core의 중심부에서 광섬유의 표면으로 나오면서 점점 작아지며 Step-index는 Core의 굴절률이 일정하고, Cladding의 굴절률은 Core의 것보다 작아서 임계각 이상으로 빛이 경계면에 닿으면 전반사하도록 설계되어 있다. Graded-index 는 Step-index에 비해 만들기는 어려우나 중심부로 지나가는 빛은 높은 굴절률 즉 물질의 높은 밀도 때문에 중심에서 멀어진 쪽으로 지나가는 빛보다 속도가 늦으며 따라서 대부분의 빛이 통과한 거리에 관계없이 같은 시간에 같은 장소에 도달하게 된다. 반면에 Step-index형에서는 광섬유로 들어간 빛의 입사각이 큰 경우는 작은 경우보다 빛이 더 많은 횟수로 반사를 하게 되고, 따라서 통과한 거리도 일정한 시간 후에는 같은 시간에 입사한 빛들간에 전진한 거리와 달라지고 결과적으로 빛의 강도가 낮아지는 효과를 나타내게 된다.

광섬유의 출력광 에너지에 큰 영향을 주는 또 다른 인자는 광 모드(Mode)이다. 광 모드에는 다중모드(Multi-mode)와 단일모드(Single-mode)가 있는데 차이점은 Fig. 4에서와 같이 Input pulse에 비해 Output pulse의 폭이 단일모드는 별로 변하지 않는 대신에 다중모드의 경우에는 커진다. 특히 광섬유가 Step-index형일 때 다중모드 광선이 통과하면 광에너지는 Graded-index형에 비해서 쉽게 작아진다.

대용량의 통신을 전달하기 위한 광섬유내의 광에너지의 크기에 영향을 주는 것 중에 하나가 개수수(NA: Numerical Aperture)이다. NA는 광섬유 Core를 통해 빛이 유도되어 갈 수 있는 가장 큰 입사각의 Sine을 말한다. 즉 어떤 광섬유가 얼마나 많은 양의 빛을 Core속으로 입사시킬 수 있는가를 말한다. NA는 Core와 Cladding의 굴절률 함수로서 아래와 같이 나타낸다.

$$NA = \sin(\theta) = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}$$

여기서 θ 는 광의 입사각, n_1 과 n_2 는 각각 Core와 Cladding의 굴절률이다. [김정엽 1984]

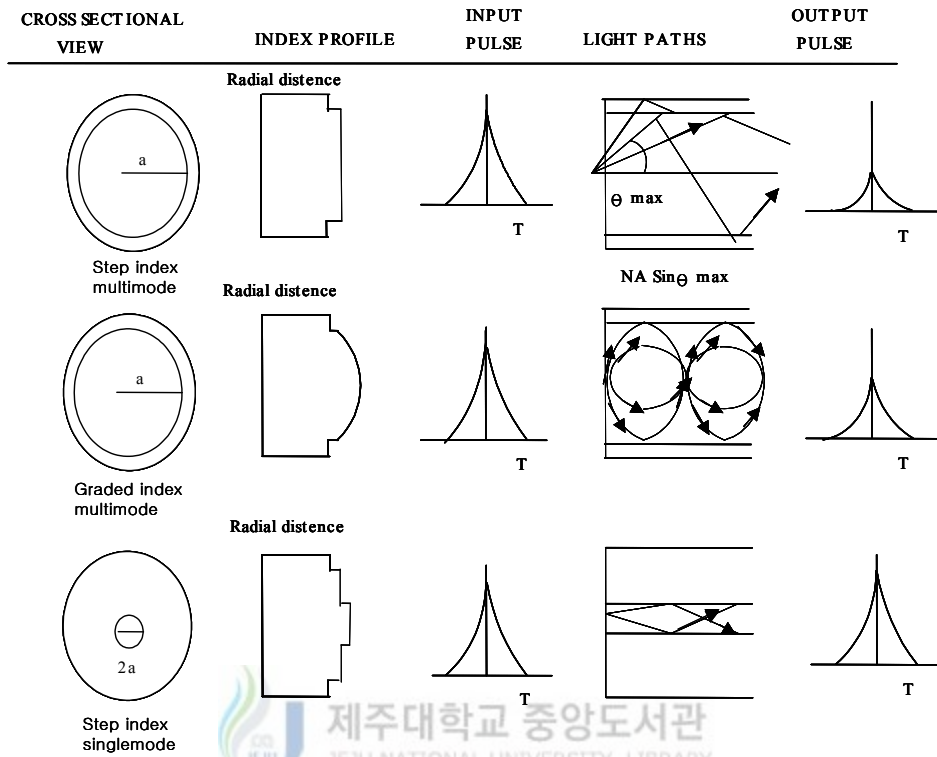


Fig. 4 Types of optical fibers.

2) 광섬유의 손실

광섬유에 빛을 입사시킨 후 종단에 방출되는 빛의 세기를 측정하여 보면 입사할 때의 빛의 세기보다 약해져 있다. 즉, 빛의 세기가 감소 되었다는 것을 알 수 있는데 여기서 감쇠량은 길이에 따라 손실의 크기가 달라지는데 일반적으로 1[km]당의 손실률로 나타낸다.

광손실은 입사 광전력과 출사단 광전력의 비를 측정하는데 데시벨(dB)로 표시하는데 광섬유에 입사하는 빛의 전력을 P_1 이라고 하고 1[km] 전달된 후의 빛의 전력을 P_2 라고 하면

$$L = -10 \log \frac{P_2}{P_1} [dB/km]$$

에 의하여 손실이 정의된다. 즉 손실이 0.5[dB/km]인 광섬유에 100[mW]의 빛을 입사시킨 후 1[km]거리에 전달되어 나오는 빛의 전력량은 약 89[mW]가 된다.

Fig. 5 a)에서와 같이 Core와 Cladding의 요철부분에 전송하는 빛이 다른 전파모드로 변환하는가 하면 방사모드로 되어 손실을 가져온다. 이러한 원인은 제조 과정에서 생기는 수가 있고 외력이나 불균일한 측압에 의해서 마이크로밴딩(Micro banding) 손실을 가져오게 된다.

Fig. 5 b)는 θ 가 임계각을 초과하면 Core와 Cladding의 경계면에서 굴절하여 Cladding으로 투과되어 방사모드가 생기는데 방사모드가 생기면 코어내의 에너지가 소실되어 방사손실을 가져온다.

Fig. 5 c)는 Core내의 분자에 의하여 빛이 산란하므로 산란손실을 가져오고 Fig. 5 d)는 Core내에서 빛이 전파할 때 불순물에 의하여 생기는 흡수손실이다.

Fig. 5 e)는 광섬유를 융착접속할 때 접속불량으로 인하여 모드변환이 발생하는데 이때 생기는 손실을 접속손실이라고 하며 Fig. 5 f)는 접속단자(Connector)를 결합할 때 발생하는 반사손실이다.[손병태 외 1998]

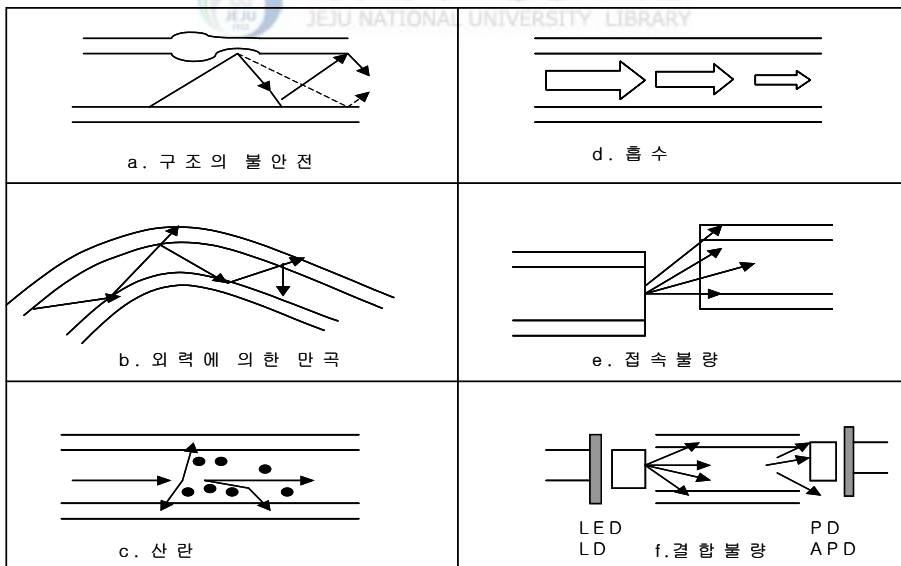


Fig. 5 Causes of loss in optical fibers.

3. 국내외의 연구동향

광섬유를 활용한 방사선 계측기 개발은 다양한 형태로 이루어지고 있으나 사용되는 광섬유의 기능측면에서 (1) 광섬유 자체를 센서로 활용하는 방법, (2) 광섬유선단에 소형 섬광체를 접합하는 방법, (3) 섬광체와 파장변환 광섬유를 조합하는 방법, (4) Laser 광원과 광섬유를 조합하는 방법으로 구분할 수 있다. 광섬유 자체를 센서로 활용하는 경우는 광섬유가 섬광체로 작용하여 방사선과 반응하여 섬광을 발생함과 동시에 광을 전달하는 기능을 수행한다. 광섬유 선단에 소형 섬광체를 접합하는 경우는 섬광체가 센서 역할을 하고 광섬유는 섬광체에서 발생한 광을 전달하는 기능을 수행한다. 섬광체와 파장변환 광섬유를 조합하는 방법은 감마선 계측효율을 높이기 위하여 부피가 큰 섬광체를 센서로 활용하고 여기서 발생한 광의 전송손실을 감소시키기 위하여 형광형 광섬유에서 긴 파장의 광으로 변환한다. Laser 광원과 광섬유를 조합하는 방법은 광자극형광방출 물질(OSL)에 광섬유를 통하여 Laser광을 조사하고 방출되는 광을 측정한다.



1) 광섬유 자체를 센서로 활용한 중성자 및 감마선 측정

(1) 미국 Pacific Northwest National Laboratory(PNNL)

핵물질(U 및 Pu) 보장조치(Safeguard) 장비 개발과 관련하여 중성자를 측정하기 위한 Ce-doped, ⁶Li-silicate glass optical fiber 센서를 개발하였으며 이를 통하여 중성자와 감마선이 혼합된 방사선장에서 감마선의 신호를 배제하여 중성자를 측정하는 연구를 수행하였다. Fig. 6은 PNNL에서 광섬유를 리본형태로 집합하여 핵물질용기 주위에 배치한 센서의 모양이다. 광섬유섬광집합체(Scintillating optical fiber bundle) 양단은 PMT로 직접 연결하였다. Fig. 7은 광섬유 센서로 중성자와 감마선을 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 ²³⁹PuBe($\sim 8 \cdot 10^4$ n/s) 또는 ⁶⁰Co($\sim 3 \cdot 10^4$ n/s) 또는 두 종류

의 선원을 함께 놓고 측정하였다.[K. H. Albel et al. 1994]

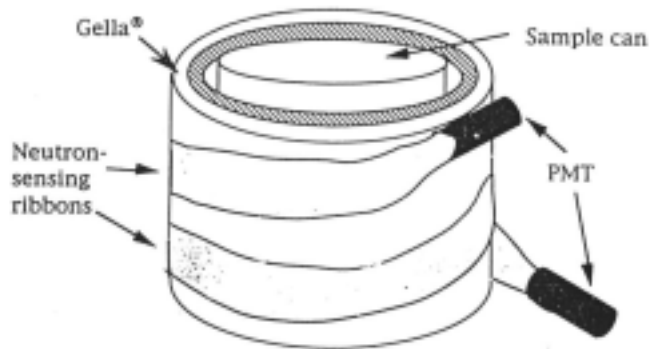


Fig. 6 Prototype of the storage-container monitor.

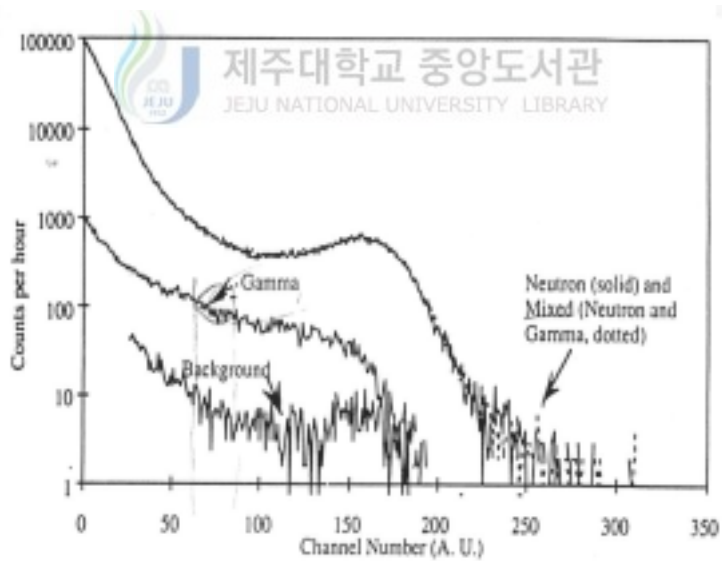


Fig. 7 Pulse height spectra for the storage-container monitor under neutron, gamma and mixed excitation.

(2) 한국 원자력연구소(KAERI)의 원자력통제기술센터(TCNC)

CANDU 핵연료의 원격감시계통(RMS) 개발을 위해서 광섬유를 고준위 방사성물질에 적용하기 위하여 내방사선 특성을 조사하였고, 핵물질 보장조치 기술개발과 관련하여 PNNL에서 연구한 내용을 조사·분석 및 PNNL에서 개발한 광섬유를 사용하여 고준위 중성자 및 감마선장에서 각 방사선의 계측 가능성에 대한 기초연구를 수행하였다. Fig. 8은 사용후 CANDU 핵연료 저장시설의 원격감시계통(RMS)구축을 위한 개념도이다.[Jong-Soo Kim et al. 1999]

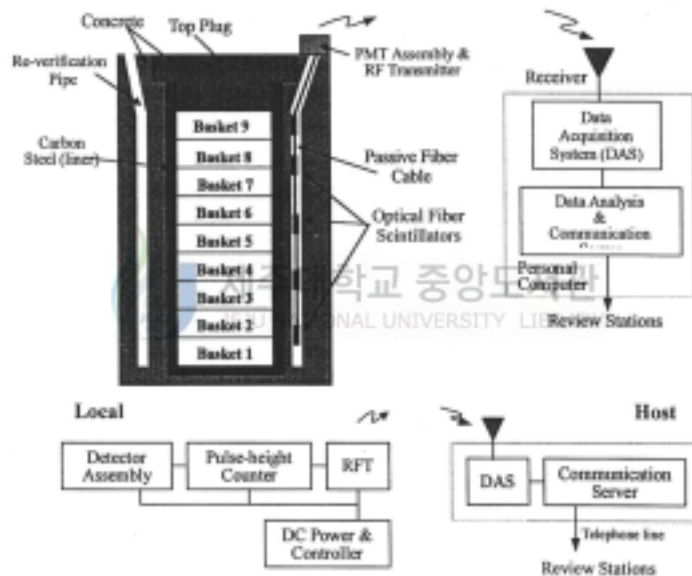


Fig. 8 Structure of Wolsong soil and schematic diagram for remote monitoring.

(3) 미국 BetaScint Inc.

토양내에 존재하는 ^{90}Sr , ^{238}U 핵종의 농도를 측정하기 위하여 다층의 광섬유섬광체를 조합하여 사용하는 형태의 센서를 개발하였다. 센서는 흡수체를 사이에 두고 상부 1층 하부 3층으로 되어 있으며 토양에 센서를 얹어서 직접 측정이 가능하다.(Fig. 9) ^{90}Sr , ^{238}U 에서 발생하는 고에너지 베타선은 하부의 세 층에서 반응하여 형광신호를 발생시키고, 우주선(Cosmic ray)은 모든 층에서 반응하고, 저에너지 베타선은 맨 아래층에서 반응하며 감마선은 거의 반응을 하지 않기 때문에 각 층의 신호를 적절히 선별하면 다른 방사능을 배제한 ^{90}Sr , ^{238}U 만의 방사능을 측정할 수 있다.[A. J. Schilk et al. 1994]

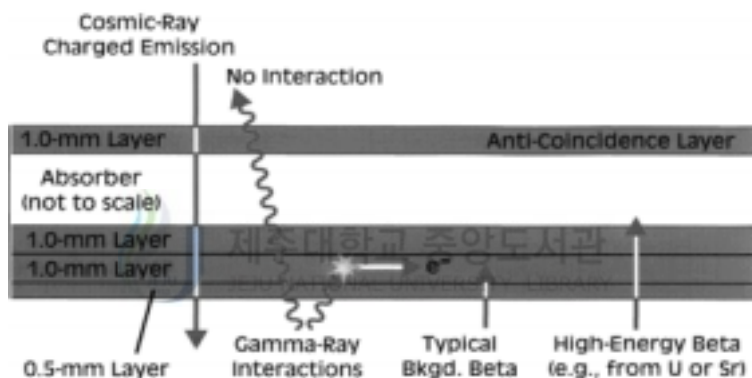


Fig. 9 Schematic of cross-section of Strontium-90 sensor.

2) 광섬유의 선단에 소형 섬광체를 접합한 센서

(1) 일본 원자력연구소(JAERI)

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

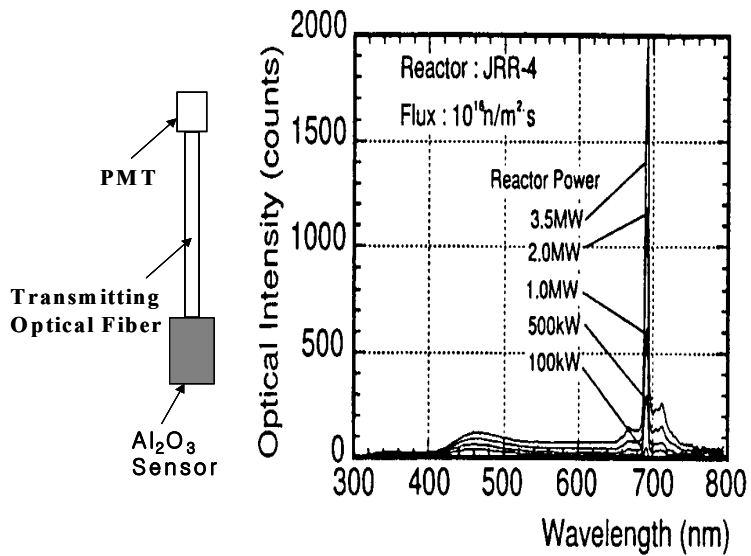


Fig. 10 Emission spectrum of gamma ray measured with Cr-doped Al_2O_3 scintillators around the reactor core.

(2) 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, 감마선 등 대상방사선을 선택해서 측정하는 것이 가능하며, 소형이고 유연하다는 장점을 이용하여 원자로 및 방사선 시설에 있어서 협소부위에 중성자 및 감마선 계측이 용이하다. Fig. 11은 이 계측시스템을 나타내었다. 광섬유의 구동은 컴퓨터 프로그램에 의해 구동속도를 자유로이 선택할 수 있으며 시간차 구동이 가능하다. 이 방법을 이용하여 원자로 임계집합체내의 열중성자속 분포를 측정하였다.[C. Mori 1994]

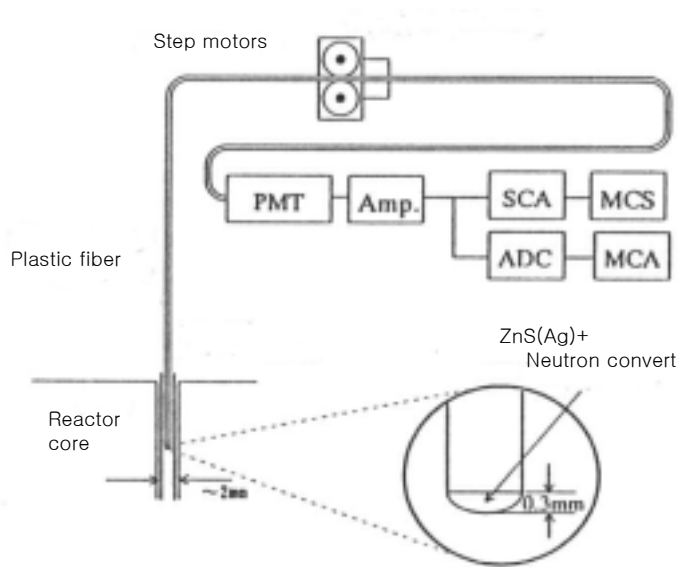


Fig. 11 Scintillator-painted optical fiber system and fiber driving unit.



3) Scintillator와 Fluorescent Optical Fiber(FOB)를 조합한 센서

(1) 일본 동북전력사

Light Transmitting Radiation Monitor(LITTRA)라는 섬광체(Scintillator)와 형광성 광섬유(Fluorescent optical fiber)를 조합하여 감마선 측정효율을 향상시키고 빛의 파장을 장파장으로 변환하여 먼 거리까지 전송하는 개념의 광전송형 방사선검출기를 개발 중이다. LITTRA는 섬광체에서 발생하는 약 400nm 정도의 광을 광섬유의 전송손실 없는 파장영역으로 변환하기 위해서 섬광체 내부에 파장변환용 형광성광섬유를 조합한 구조로 되어 있다. 이 형광성광섬유는 파장변환기능 이외에 광섬유 주변으로부터 빛을 흡수하고 광섬유 Core부에 첨가(Doping) 되어있는 형광체의 여기·발광에 의한 집광기능도 가지고 있다. 이러한 검출부 기본구조로부터 직경8mm×길이100mm의 NaI(Tl) 섬광체를 사용한 LITTRA를 개발했다.(Fig. 12) 섬광체의 형광(410nm)은 형광성광섬유에 입사·흡수되어 광섬유내의 형광체를 여기시켜 발광(520nm)이 생기고, Core와

Cladding의 경계면에서 반사를 반복하면서 광섬유 끝점으로 광신호가 송출된다. 이 섬광체 중심에 1mm의 구멍을 뚫고 그 개공부에 직경(1mm)×길이(100mm)의 형광성광섬유가 들어있다. 형광성광섬유의 끝은 전송용 광섬유를 연결하는 광 접속단자(Connector)를 이용하였다. 섬광체 주위는 테프론(Teflon) 등의 반사재에 덮여져 검출부 전체를 알루미늄 재료로 차광하고 있다. LITTRA는 소형, 경량으로 검출부에 전기적인 에너지를 필요하지 않는 특징을 가지고 있기 때문에 수중이나 자장 혹은 온도가 높은 환경에서도 적용할 수 있다. LITTRA은 섬광체의 종류와 구조를 바꾸는 것으로 알파선, 베타선, 감마선, 중성자선의 분리 측정이 가능하다.[M. Tatsuyuki 1994]

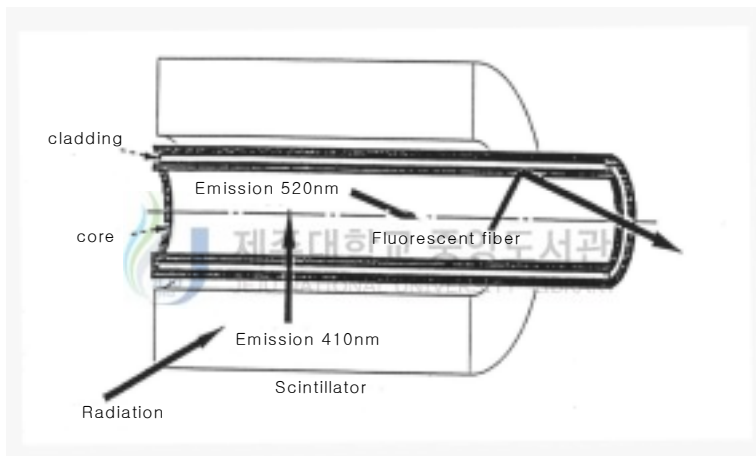


Fig. 12 Principal of radiation detection by coupling of scintillator with fluorescent optical fiber.

4) Laser 광원과 광섬유를 활용한 센서

(1) Optical Stimulated Luminescence(OSL) 발광체와 광섬유를 조합한 센서

OSL 발광체는 방사선을 흡수하면 1차 여기가 일어나고 여기에 장파장의 레이저광을 조사하면 기저상태로 천이할 때에 단파장의 OSL이 발광한다. OSL의 발광량은 조사된 방사선량에 비례하고 OSL발광체로부터 조사된 방사선량을 측정할 수 있게 된다. 이

장치의 구성을 Fig. 13에 나타냈다. 센서는 석영계 광섬유 선단에 OSL 형광체를 차광해서 만든다. 레이저 광원에는 파장 635nm의 반도체 레이저(정격출력 20mW)를 사용하는 레이저(Laser)광을 콜리메이터(Collimator)로 집광해서 광섬유 앞에서부터 조사한다. 형광체가 방출하는 OSL은 같은 광섬유를 통해서 광(파장: 350-450nm)을 전파시키고 광전자증배관(PMT)를 이용하여 수광하고 파고분석기(PHA)와 시간분석기(MCS)로 측정한다. OSL형광체로는 주로 BaFBr:Eu가 이용된다.[H. Kitaguchi and I. Shigeru 1994]

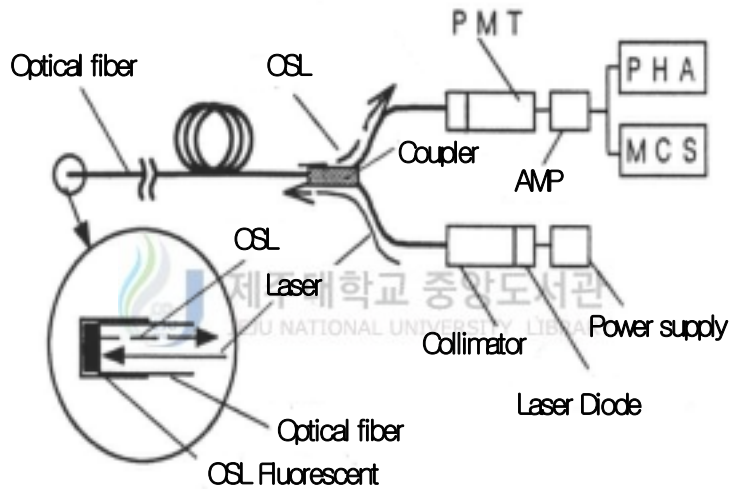


Fig. 13 Measurement system with optical stimulated luminescence materials.

Ⅲ. 실험장치 및 실험방법

1. 광섬유 굽힘(Bending) 손실 측정

광섬유를 활용한 방사선계측 실험에 앞서 광섬유의 굽힘(Bending) 손실을 측정하였다. 앞에서 살펴보았듯이 미국의 PNL에서 핵물질 감지(Monitoring)하기 위한 실험장치 (Fig. 6)에서 보듯이 핵물질이 들어있는 용기 주변을 광섬유섬광체를 이용하여 여러 겹으로 둘러져 있는 것을 알 수 있다. 또한 전송용광섬유를 이용하는 경우 광섬유의 제조할 때에 결정되는 고유한 손실 즉, 흡수손실, 산란손실, 구조의 불완전에 의한 손실은 실제 계측시스템에 적용할 때 개선할 수 없으나, 외력이나 굴곡에 의한 굽힘 손실의 정도를 측정하여 실제 시스템에 적용할 때 기본 자료로 활용하고자 한다.

1) 실험장치의 구성 및 방법

광섬유의 굽힘 손실을 측정하기 위한 광섬유는 센서용으로 사용되는 플라스틱광섬유섬광체(BCF-12)와 신호전송용으로 사용된 플라스틱광섬유 및 실리카(Silica) 재질의 광섬유를 사용하였다. 플라스틱광섬유섬광체의 경우 구입 당시 1.5m의 길이로 제작되었기 때문에 1m길이에 대하여 적용하였으며, 신호전송용 광섬유인 경우에는 2m 길이로 동일하게 적용하였다.

위에서 언급된 광섬유에 대해서는 광섬유방사선계측의 센서부분에서 자세히 설명하도록 하겠다.

광원으로는 광섬유섬광체에서 발생하는 광원과 비슷한 파장대를 가지고 있는 Blue Emitting 발광다이오드(LED: Light Emitteting Diode)를 이용하였으며 광섬유와 연결이 용이하도록 Fig. 14와 같이 제작하였으며, 발광다이오드(LED)에 안정적인 전원공급

을 위하여 HEWLETT PACKARD사의 6624A model을 적용하였다. 계측장비는 Spectrometer를 PC에 연결하여 사용하였다. Spectrometer는 K-MAC사의 광섬유식 초소형 SpectraView 2000 model을 적용하였다. 제품에 대한 사양은 Table 2에 나타내었다.

광섬유 굽힘 손실을 측정하기 위해서 길이 1m인 플라스틱광섬유섬광체의 경우 곡률반경(Radius of curvature)을 각각 ∞ (No bending), 31.8, 15.9, 10.6, 5.3cm에 대하여 원형의 판을 제작하였다. 전송용광섬유는 동일한 길이 2mm로 제작된 광섬유 중에 실리카(Silica) 재질의 광섬유는 유연성이 떨어져 파손의 우려가 있어서 곡률반경을 각각 ∞ (No bending), 63.7, 31.8, 15.9cm에 대해서만 실험하였으며 플라스틱 재질의 광섬유의 경우 직경이 1mm인 경우 곡률반경을 각각 ∞ (No bending), 63.7, 31.8, 15.9, 8, 6.4cm에 대해서 실험하였고, 직경이 2mm인 플라스틱 재질의 광섬유의 경우에는 실리카 재질의 광섬유 보다 유연성이 우수하나 곡률반경이 6.4cm의 경우 파손의 우려가 있어 ∞ (No bending), 63.7, 31.8, 15.9, 8cm까지만 실험을 수행하였다.

실제 적용 예는 Fig. 14와 같고, 계측시스템은 Fig. 15와 같다.

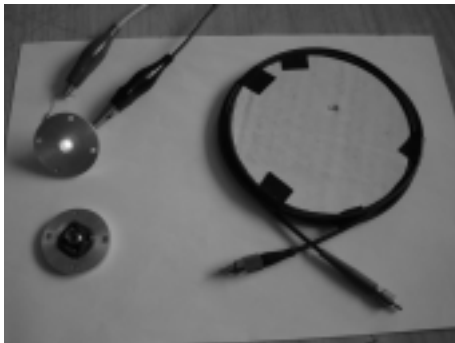
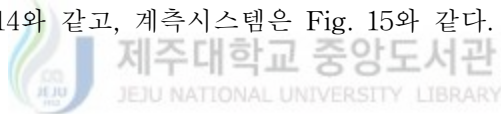


Fig. 14 Detecting instruments for optical fiber bending loss.



Fig. 15 Detecting system for optical fiber bending loss.

Table 2 Specifications for spectrometer.

Detector	2048-element linear silicon CCD array
CCD elements	2048 element @(12.5 μ m \times 200 μ m per element)
Well depth(@600nm)	160,000 photons
Sensitivity(estimated)	86 photons/count
Effective range	185~1100nm
Integration time	3msec to 60sec
Grating	600 lines/mm
Slit	standard: 25 μ m(slits height is 1000 μ m)
Resolution	~0.3nm - 10nm FWHM
Stray light	<0.05% at 600nm
Fiber optic connector	SMA 905
Size	119 \times 100 \times 42mm



2. 광섬유섬광체를 이용한 방사선계측

본 연구의 실험장치의 구성은 Fig. 16과 같고, 적용된 실험장치는 크게 센서부분, 신호 전송용을 위한 광섬유 및 계측장치로 구성되어있다.

센서부분은 유리광섬유섬광체(Glass scintillating fiber), 플라스틱광섬유섬광체(Plastic scintillating fiber) 및 무기섬광체인 CsI(Tl)을 이용하여 다양한 형태로 제작하였다. 신호 전송용을 위한 광섬유는 플라스틱과 실리카(Silica) 재질로된 광섬유를 이용하였다. 센서부분의 두 종류의 광섬유섬광체(Scintillating optical fiber)의 발광특성을 분석하여 각각에 최적화된 계측시스템을 구성하였다.

각각의 실험재료 및 장치에 대해서는 살펴보면 다음과 같다.

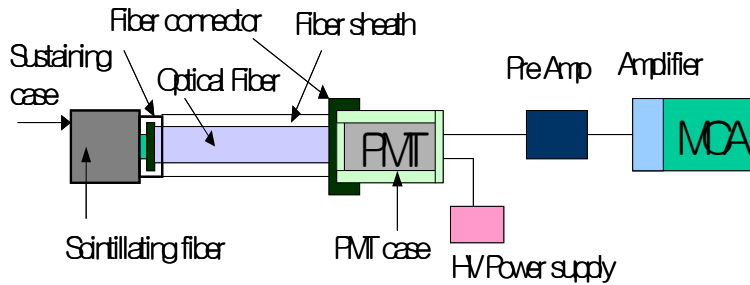


Fig. 16 Experimental setup for testing the optical fiber sensor.

1) 센서부분의 구성 및 측정방법

(1) 유리광섬유섬광체(Glass scintillating fiber)를 이용한 센서

${}^6\text{Li}$ 는 중성자와 반응하여 알파선을 방출하며 이 알파선은 섬광체에 작용하여 가시광선 영역의 빛을 방출하게 된다. 이런 특성으로 인하여 ${}^6\text{Li}$ 를 첨가한 유리섬광체(Glass scintillator)는 1950년대 말에 중성자검출용으로 개발되어 현재까지 이용되고 있다. 유리섬광체 재료를 이용하여 섬유(Fiber) 형태로 제작한 것이 유리광섬유섬광체(Glass scintillating fiber)이다. 유리섬광체의 주성분은 SiO_2 , Li_2O , Al_2O_3 , MgO , Ce_2O_3 등의 혼합물로 구성되어 있으며 밀도를 높이기 위하여 가끔 BaO 를 첨가하기도 한다. 고체에서 알파선은 비정기 매우 짧기 때문에 약 $100\mu\text{m}$ 정도의 가는 유리광섬유섬광체를 활용하는 경우에도 중성자 측정이 가능하다. 감마선인 경우 가는 유리광섬유섬광체로는 반응 확률이 극히 낮기 때문에 방사능 준위가 아주 높은 경우를 제외하고는 측정이 곤란하다. 최근에는 직경 1mm 정도의 굵은 광섬유섬광체가 상품화되었기 때문에 이것을 외가닥으로 사용하거나 다발로 사용하여 감마선과 베타선 센서를 제작하는 것이 가능하다. Table 3는 ${}^6\text{Li}$ 의 농축도를 달리한 유리광섬유섬광체의 물리적 특성 및 검출 특성을 나타내었다.[이영길 외 1998]

본 실험에서는 영국의 Levy Hill Lab사의 제품을 구입하여 실험하였다. Li의 농축도를 달리하는 3가지 제품(GS10 - natural, GS20 - Enriched(95% ${}^6\text{Li}$), GS30 - Depleted(99.99% ${}^6\text{Li}$))중에서 GS20(Dia. 1mm), GS30(Dia. 0.5mm) 두 종류의 제품을

구입하였다. GS20에 대한 발광스펙트럼(Emission spectrum) 분포는 Fig. 17에 나타내었다.

Table 3 Physical properties of Lithium glass scintillating fibers.

	GS1/2/3	GS10/20/30	KG/1/2/3	GSF1
Density(g/ml)	2.66	2.5	2.42	2.42
Reflective Index n4047	1.60	1.55	1.57	1.58
Wavelength of Maximum Emission(nm)	395	450	395	395
Relative light pulse height per unit	100(1)(2)	85(2)	60(2)	80
Light output relative to Anthracene	22-34%	20-30%	20%	-
Decay Time(ns)	50-70	50-70	50-70	50-70
Resolution on the thermal neutron peak obtained with moderated Po/Be neutrons	13-22(GS2)	13-22%(GS20)	20-30(KG2)	-

- (1) Pulse height of GS1 is 15% that of sodium iodide
- (2) Determined by thickness, increasing with decreasing thickness down to ~2mm

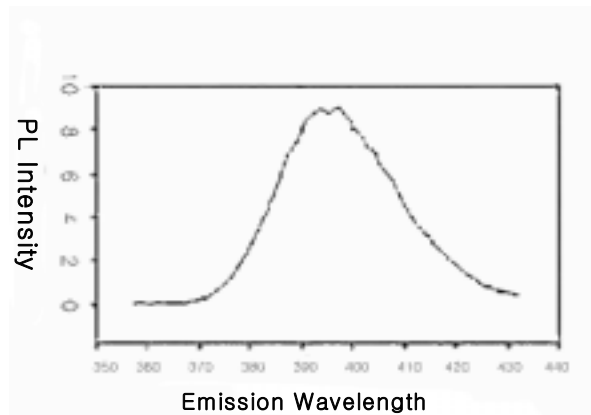


Fig. 17 Emission spectrum for glass scintillating fiber. (GS20 1mm)

센서를 제작하기 위하여 위의 제품 중에 두 종류의 유리광섬유섬광체를 이용하여 Fig. 18과 같이 센서를 제작하였다. GS20의 경우에는 외가닥으로 제작하였고, GS30의 경우 직경이 0.5mm이므로 감마선과의 반응확률을 높이기 위하여 Fig. 18과 같이 3가닥을 이용하여 다발 형태의 센서를 제작하여 감마선과 베타선에 대해서 실험을 수행하였다.

제작된 센서를 실제 실험에 적용하기 위하여 기존에 광통신 등에 널리 상품화 되어있는 접속단자(Connector)는 “ST type”, “FT type” ”SMA”등이 있다. 본 실험에서는 접속이 용이하고 전송효율이 우수한 “FT type”과 ”SMA type”을 선정하였다. 접속단자의 내경은 2.5mm로 Ferrule 중앙에 관통되어 있는 구멍을 통해 연결된다. 광섬유와 센서 부위는 외부광의 차단을 위하여 Adapter를 사용하였다. FC-type의 접속단자와 어댑터(Adapter)를 이용하여 Fig. 19와 같이 제작하였다.



Fig. 18 Two type of sensors by using glass scintillating fibers.(Dia 1mm, 0.5mm)



Fig. 19 Connect sensors with optical fibers by using the FC-type optical connector and adapter.

(2) 플라스틱광섬유섬광체(Plastic scintillating fiber)를 이용한 센서

플라스틱섬광체(Plastic scintillator)는 쉽게 원통형, 막대형, 판형 등으로 제작이 용이하다. 가장 흔한 형태로는 수 퍼센트(%)의 무기발광체(Inorganic flour)을 포함한 Polystyrene(Refractive index $n=1.58$)의 Core에 기초를 두고 만들어진다. 일반적인 Cladding 물질은 Polymethylmethacrylate(PMMA)(Refractive index $n=1.49$) 또는 형광물질을 도포한 Polymethacrylate($n=1.42$)을 사용한다. 일반적인 플라스틱광섬유섬광체의 전형적인 직경은 0.1~수mm 까지이다.

직경이 더 작은 플라스틱광섬유섬광체의 경우에 플라스틱섬광체 광석의 기질(Matrix)에서 실제의 섬광원인이 되는 유기 발광체 분자에서 일어나는 에너지 전달이 억제되기 때문에 관찰되는 빛의 양에서 감소가 일어난다.

대표적인 플라스틱 신틸레이터에서 방출 스펙트럼은 일반적으로 청색(Blue)영역에서 피크가 나타나고 붕괴시간(Decay time)은 2~4ns정도이다.

많은 플라스틱광섬유섬광체는 고체 격자에 유기 발광체가 분포된 두 성분의 용액 형태로 제작된다. 작은 크기에서 최고의 발광량을 얻기 위해 수 퍼센트의 비교적 높은 발광체 농도가 일반적으로 사용된다. 다른 플라스틱광섬유섬광체는 추가성분으로 제공된 파장 변환물질을 포함해 세 가지 성분으로 구성된다. 전형적으로 다른 유기 분자와 같이 파장 변환물질은 1차 섬광 형광을 흡수하고 다시 그것을 더 긴 파장으로 방출하는 기능을 가지고 있다. 이 스펙트럼의 변화는 빛이 광섬유의 길이에 따라 전송될 때 발생하는 자기 흡수의 양을 줄일 수 있다.

플라스틱광섬유섬광체는 때때로 다양하게 적용하기 위하여 리본(Ribbon) 또는 다발(Bundle)형태로 제작되기도 한다.[G. F. Knoll 2000]

본 논문에 사용된 플라스틱광섬유섬광체는 BICRON사의 BCF-12 model로 직경이 0.5mm, 1mm 두 종류를 이용하였다. Table 4은 구입한 BCF-12에 대한 특징이고, Fig. 20은 BCF-12에 대한 발광 스펙트럼이다.

센서를 제작하기 위하여 플라스틱광섬유섬광체인 BCF-12(0.5mm, 1mm)를 각각 1가닥을 이용하여 2종류의 센서를 Fig. 21과 같이 스테인레스(Stainless) 재질의 Case를 이용하여 제작하였다.

Table 4 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			0.49	
Numerical aperture			0.58	
Trapping efficiency round fibers			3.44% minimum	
Operating Temperature			-20°C ~ +50°C	

(1) For Minimum Ionization Particle(MIP), corrected for PMT sensitivity

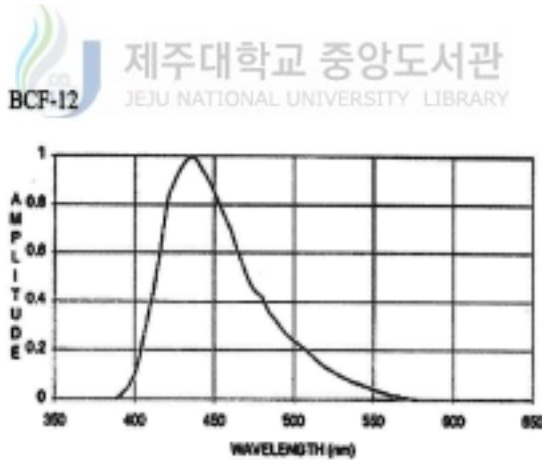


Fig. 20 Emission spectrum for Plastic scintillating fiber. (BCF-12)

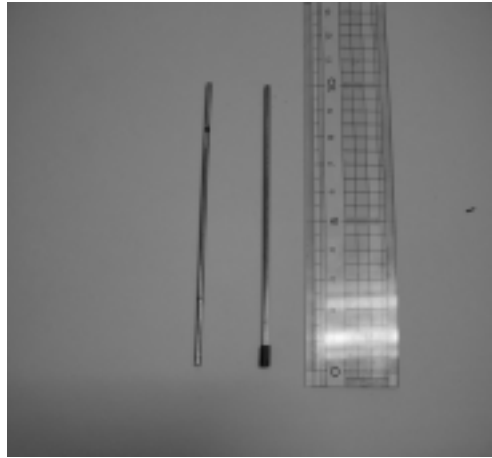


Fig. 21 Two types of sensors with single-strand plastic scintillating fibers.
(Dia. 0.5mm, 1mm)



감마선과의 반응확률을 높이기 위하여 Fig. 22 a)과 같이 25가닥(1mm), 100가닥(0.5mm)의 플라스틱광섬유섬광체를 다발형태로 알루미늄과 플라스틱 재질의 Case를 이용하여 4종류의 센서를 제작하였고, 센서에서 발생된 신호를 광섬유에 효율적으로 전송하기 위하여 Fig. 22 b)와 같이 센서의 한쪽 끝에는 400nm 파장에서 반사율이 90% 이상인 거울(Mirror)을 붙이고, 반대쪽 끝에는 렌즈(Lens)를 이용하여 제작하였다. 제작된 센서를 이용하여 감마선과 베타선에 대해서 실험을 수행하였다.

거울의 경우 99%이상의 반사율을 갖는 제품을 사용 시 센서의 성능을 30%정도 향상시킬 수 있다.[D. Albers et al. 1996]

렌즈는 THORLAB 사의 F230SMA-A type으로 사용된 렌즈의 특성은 Table 5에 나타내었으며, 초점거리(f)는 4.5mm로 SMA type 광접속단자와 연결하여 사용하기 용이하도록 제작되어 있다.

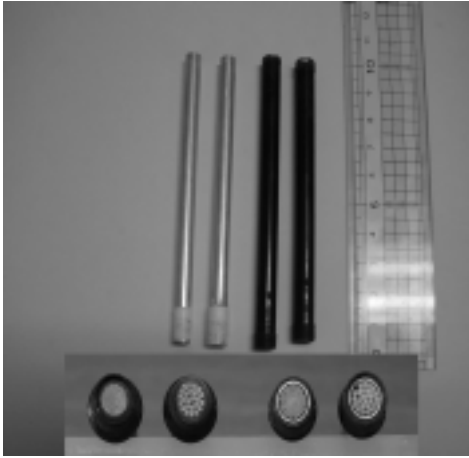


Fig. 22 a) Four type of sensors with multi-strand plastic scintillator fibers.



b) Coupling of multi fiber sensors using a mirror and lens.

Table 5 Physical properties of lens. (KODAK Lens)

Item #	f (mm)	NA	Clear aperture (mm)	Outer diameter	Center thickness (mm)	Equivalent Microscope objective magnification	Housing diameter
A438TM	4.50	0.55	5.12	6.33	2.71	35×	9.24

각각의 센서의 모형을 살펴보면 다음과 같다. 알루미늄 Case로 제작된 두 종류의 센서는 길이가 100mm이고, 직경이 7mm이다. 그리고, 플라스틱 Case로 제작된 두 종류의 센서는 길이가 100mm이고, 직경이 8mm이다. 각각의 센서는 신호전송용 광섬유와 결합이 용이하도록 광접속단자를 이용하였으며, 센서의 한쪽 끝에는 박막의 알루미늄을 이용하여 외부광의 차단을 막고 광섬유의 접촉을 통한 손상으로부터 보호하도록 제작하였다.

다발형태로 제작된 센서는 종류별로 8가지이며, 각각의 센서에 대해서 분류하면 다음과 같다.

- ▶ **sensor A1** - 알루미늄 Case, 1mm 25가닥.
- ▶ **sensor A2** - 알루미늄 Case, 0.5mm 100가닥.
- ▶ **sensor A3** - 플라스틱 Case, 1mm 25가닥.
- ▶ **sensor A4** - 플라스틱 Case, 0.5mm 100가닥.

- ▶ **sensor B1** - 알루미늄 Case, 1mm 25가닥으로 렌즈와 거울이용.
- ▶ **sensor B2** - 알루미늄 Case, 0.5mm 100가닥으로 렌즈와 거울이용.
- ▶ **sensor B3** - 플라스틱 Case, 1mm 25가닥으로 렌즈와 거울이용.
- ▶ **sensor B4** - 플라스틱 Case, 0.5mm 100가닥으로 렌즈와 거울이용.

앞으로 센서를 구분할 경우 위의 용어를 사용할 것이다.

(3) 섬광체(Scintillator)를 이용한 센서

본 논문에 사용된 섬광체(Scintillator)는 육성한 CsI에 0.1mole %의 Tl을 첨가한 CsI(Tl)을 이용하여 소형의 센서를 제작하였다.

무기섬광체(Inorganic scintillator)인 CsI(Tl)는 밀도와 실효원자번호가 크기 때문에 감마선에 대하여 효율이 높고, NaI(Tl)에 비하여 부드럽기 때문에 충격이나 진동이 심한 조건하에서도 사용할 수 있다. CsI(Tl)의 발광스펙트럼은 420~600nm의 파장을 가지며, Fig. 23에서 보듯이 0.1mole %의 Tl을 첨가하여 ^{137}Cs 의 감마선원에 대한 발광스펙트럼 분포가 최대가 됨을 알 수 있다.[도시홍 외 1988]

0.1mole %의 Tl을 첨가한 CsI(Tl)을 이용한 센서는 소형으로 직경이 8mm이고, 길이가 25mm로 0.3mm이하의 알루미늄 Case를 이용하였다. Fig. 24와 같이 플라스틱광섬유섬광체를 이용한 센서 제작에 사용된 것과 동일한 렌즈와 거울을 이용하여 제작하였다.

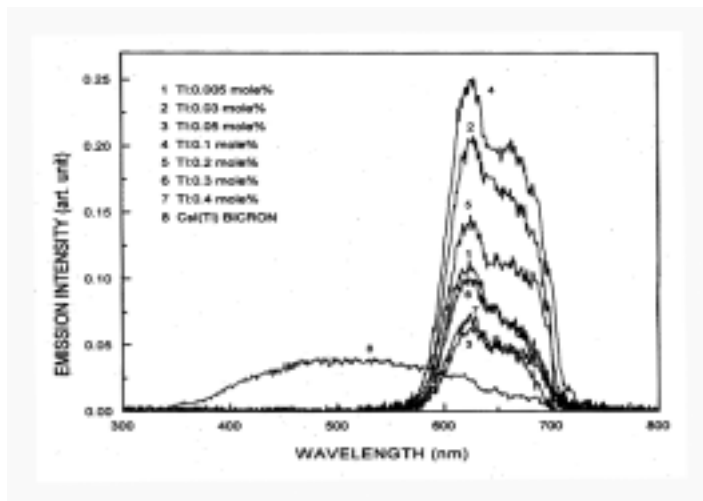


Fig. 23 Gamma ray excited emission spectra of grown CsI(Tl) crystals and BICRON CsI(Tl) crystals.



Fig. 24 Coupling of CsI(Tl) sensor with transmitting fibers using a mirror and lens.

2) 신호전송을 위한 광섬유종류 및 특성

위에서 살펴본 바와 같이 본 실험에 사용된 센서는 재질에 따라 3가지이며 이들의 방출되는 파장의 범위는 390~700nm이다. 따라서 이 파장에서 전송손실이 적은 전송용 광섬유로 플라스틱형(Plastic)과 실리카(Silica) 광섬유를 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.[정과 김 2000]

본 실험에 사용된 플라스틱 광섬유는 Edmuond Optics사(Dia. 2mm)의 제품으로 재질은 Core 용으로 폴리스테렌(polysterene, $n_1=1.492$)이 사용되며 Cladding 재질로는 PMMA (polymethylmethacrylate, $n_2=1.402$)이 사용되었으며 EASK사의 CK-40(Dia. 1mm)의 재질은 위의 Edmuond Optics사의 제품과 동일하다.

현재 많이 이용되는 실리카(Silica)계열의 광섬유는 플라스틱 광섬유에 비하여 전송손실이 적다는 큰 장점과 더불어 높은 온도(1000℃)에서도 변형이 잘 되지 않고, 열팽창 계수가 작기 때문에 갑작스런 온도 변화에도 깨지지 않는 특성을 갖고 있다. 또한 가시광선 영역에서부터 적외선 영역까지 빛에 투명하여 여러 파장영역에 적용이 가능하다. 본 실험에 사용된 실리카 재질의 광섬유는 Oxford Electronics사의 제품 중에서 HPSUV1000P(Dia. 1mm)를 이용하였으며, Core용 재질로 High purity synthetic silica($n_1=1.48$)이 사용되고 있으며 Cladding 재질은 Doped silica($n_2=1.46$)로 되어 있다.

각각의 제품에 대한 특징은 Table. 6에 정리하였으며, Edmuond Optics사의 플라스틱 광섬유와 Oxford Electronics사의 실리카 재질의 HPSUV1000P의 파장에 따른 감쇠 특성은 Fig. 25 a)와 b)에 나타내었다.

Table 6 Physical properties of the optical fibers.

Type	Plastic Optical Fiber		Glass Optical Fiber
Trademark	EASK	Edmund Optics	Oxford Electronics
Product code	CK	02549	HPSUV1000P
Reflective Index-Core	1.492	1.492	1.48
Reflective Index-Cladding	1.402	1.402	1.46
Numerical Aperture	0.51	0.51±0.03	0.22±0.02
Temperature range(°C)	-55~70	-55~70	-40~70
Attenuation (typical)	200 dB/m	190 dB/m	20 dB/m

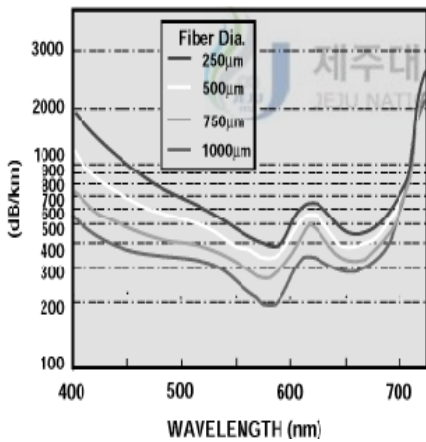
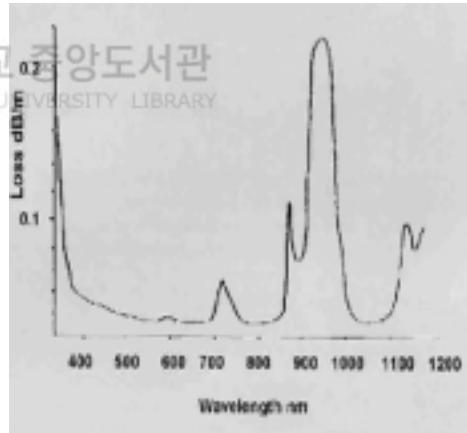


Fig. 25 a) Attenuation spectrum of plastic optical fibers. (Edmund Optics Inc.)



b) Attenuation spectrum of glass optical fiber. (Oxford Industrial ElectronicsTM.)

3) 신호처리 장치 및 구성

광섬유섬광체로부터 발생된 신호를 광섬유를 통하여 전송된 빛 신호를 측정·분석하기 위해서는 광전자증배관(Photomultiplier Tube 이하 PMT) 등을 사용하여 전기적 신호로 변환하여야 한다. 광섬유섬광체 및 CsI(Tl)의 발광파장이 370~700nm를 가지므로 PMT의 Photocathode 역시 이 에너지 영역에서 입사된 빛을 전자 방출로 전환하는 효율이 우수한 것을 선정하였다. 그리고, Bialkali 재질로 된 Photocathode의 경우 약 400 nm 파장에서 최대의 효율을 가지므로, 이 재질로 된 PMT를 선정하면 최대의 효율을 얻을 수 있다.

광섬유섬광체의 경우 밀도 및 원자번호가 낮고 국부적인 결정이 비균질 형태로 되어 있기 때문에 일반적인 무기섬광체인 NaI(Tl)보다도 낮은 검출효율 및 신호의 크기를 가진다. Bialkali PMT를 사용하는 경우라도 감마선에 의한 광섬유섬광체 신호 크기는 NaI(Tl)의 신호크기의 10% 수준이다. 따라서 광섬유섬광체의 경우 출력되는 빛의 세기를 측정 가능한 전기적 신호로 변환해 주기 위해서는 PMT의 증배율이 높아야 한다.

본 연구에 이용된 PMT는 소형으로 창의 크기가 각각 8 mm(Hamamatsu model: R1635)와 10mm(Hamamatsu model: R647)으로 Head-on type으로 선정하였으며 Magnetic shield가 함께 조립(Assembly)되어 있으며 증배율은 각각 1.1×10^6 , 1.0×10^6 으로 비슷하나 반응속도가 0.8ns, 2.5ns로 R1635가 훨씬 우수하다. 그러나, 본 실험의 경우에는 입사 방사선의 세기가 낮고 섬광체를 통해 발생된 광 신호를 광섬유를 이용하여 전송하기 때문에 단면적인 큰 R647을 사용하였다.

실험을 위해서 PMT는 플라스틱 Case와, 광섬유와 연결을 용이하게 하고, 외부 광에 의한 신호의 외극현상을 줄이기 위하여 Fig. 26와 같이 FC-type의 접속단자(Connector)와 어댑터(Adapter)를 이용하여 제작하였다.

PMT에서 발생되는 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 PMT에 안정적인 전원공급 및 선형

증폭기에 동시에 전원을 공급할 수 있는 것을 선정하였고 신호 분석을 위한 MCA(Multi Channel Analyzer)는 Ortec trump-8k-32 + Maestro32로 PC에 On board형으로 장착하여 사용할 수 있는 제품을 선정하여 시스템을 구성하였다. 구성된 시스템은 Fig. 27에 나타내었다.



Fig. 26 PMT case used to fix transmitting fiber on the window of PMT.



Fig. 27 Experimental setup for radiation detection.

4) 방사선원의 구성 및 배치

방사선원은 각각의 센서에 접촉하도록 배치하였으며, 외부광에 의한 영향을 줄이기 위하여 검정색 비닐을 이용하였다. 사용된 방사선원은 디스크형의 밀봉선원인 $^{137}\text{Cs}(1\mu\text{Ci})$ [감마선원]과 $^{90}\text{Sr}(\mu\text{Ci})$ [베타선원]을 이용하였다. 각각의 밀봉선원은 구입한지 수년이 지났기 때문에 현재의 방사능은 선원표면에 기재되어있는 양보다 훨씬 적을 것으로 예상된다. 유리광섬유섬광체의 경우 $^{137}\text{Cs}(1\text{mCi})$ [감마선원]에 대한 실험을 추가적으로 수행하였다. 그리고 표준밀봉선원인 $^{137}\text{Cs}(50\mu\text{Ci})$ 를 $1\mu\text{Ci}$, $3\mu\text{Ci}$, $5\mu\text{Ci}$ 로 정확히 분배하여 각각의 센서에 적용하여 실험하였으며, 미지선원에 대한 정확도를 확인하기 $1.5\mu\text{Ci}$ 를 추가적으로 분배하여 실험하였다. 주위의 배경방사능의 영향을 최소화하기 위하여 Fig. 28과 같이 납차폐벽을 이용하여 실험장치를 구성하였으며, 측정시간은 300Sec로 하였다.

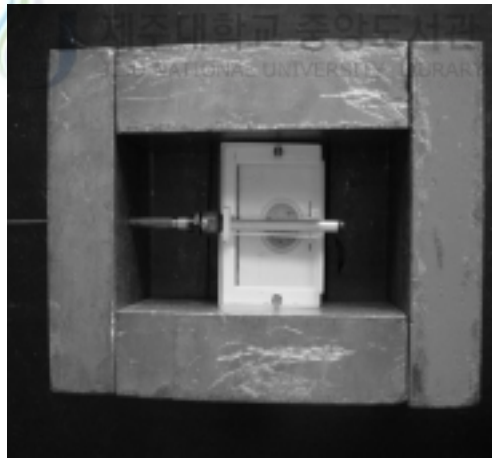


Fig. 28 Experimental setup using lead bricks.

IV. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 먼저 광섬유의 굽힘(Bending)손실에 대해서 실험을 수행하였고, 그 결과를 바탕으로 광섬유섬광체에 대해서 제작된 각각의 센서에 대해서 밀봉방사선원을 이용하여 방사선계측의 가능성을 시험하였다. 이를 바탕으로 3종류의 표준밀봉선원에 대하여 검출신호의 선형성을 확인하였을 뿐만 아니라 미지선원에 대한 검출신호를 판별하여 계측오차를 판별하였다.

1. 광섬유 굽힘손실(Bending loss) 측정



Fig. 29에 측정된 결과를 바탕으로 그 피크값을 이용하여 전압 측, 발광량과 곡률반경에 따른 굽힘손실을 측정한 결과 센서로 이용된 플라스틱광섬유섬광체의 경우 곡률반경에 따라 굽힘손실이 다른 광섬유에 비해 매우 크다는 것을 알 수 있었다. 그리고 직경이 1mm인 실리카(Silica) 재질의 광섬유와 플라스틱 재질의 광섬유는 굽힘손실이 크지 않았으며, 직경이 2mm인 플라스틱 재질의 광섬유의 경우에는 굽힘손실이 거의 발생하지 않았다.

실제 광섬유섬광체에서 발생하는 광량은 매우 적다. 그래서 본 실험에 사용되어진 Spectrometer를 이용하여 계측할 수 있는 최저 광량 즉, 2.25V를 입력하고, 광섬유를 구부러짐 없이 계측한 결과를 Fig. 34에 나타내었다. 실리카 재질의 광섬유가 동일한 광량에 대한 검출감도가 가장 우수하고, 직경이 2mm, 1mm의 플라스틱 재질의 광섬유, 플라스틱광섬유섬광체 순서로 나타났다.

위의 결과를 바탕으로 신호전송용으로 이용된 3종류의 광섬유의 경우에는 굽힘에 의한 감쇠는 크지 않아 신호전송용으로 사용해도 무방하지만, 플라스틱광섬유섬광체는 신

호전송용으로 이용하는 것은 바람직하지 못하며, 실제 광섬유섬광체의 신호전송을 위한 광섬유는 직경이 1mm인 실리카 재질의 광섬유와 직경이 2mm인 플라스틱 재질의 광섬유를 이용하였다.

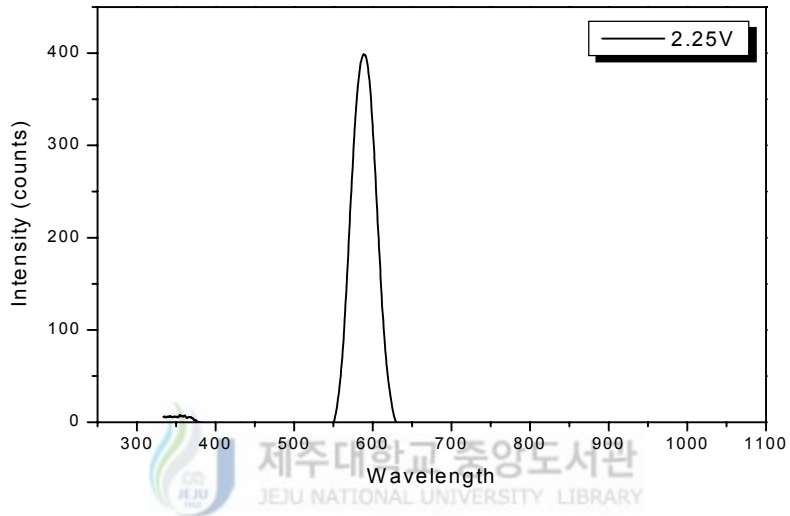


Fig. 29 Emission spectrum of LED at 2.25V.

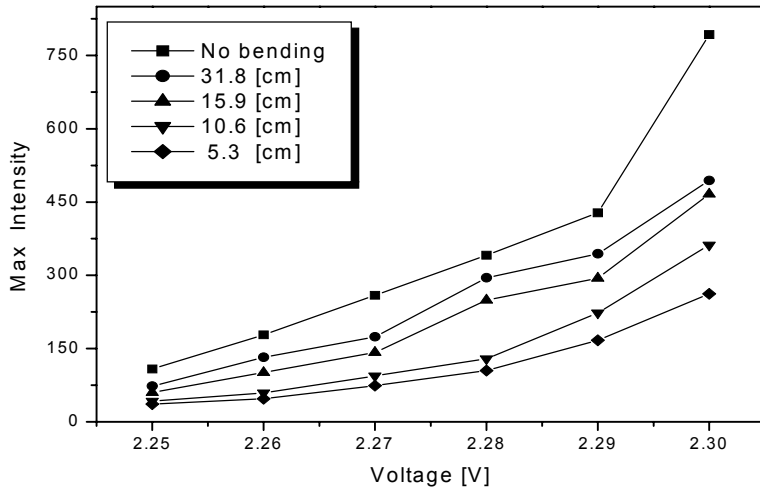


Fig. 30 Bending loss of plastic scintillating fiber. (Dia. 1mm)

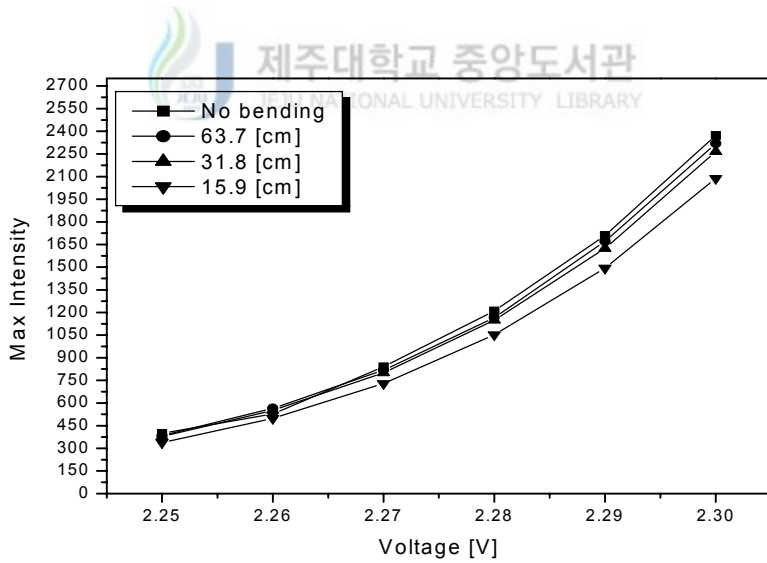


Fig. 31 Bending loss of silica optical fiber. (Dia. 1mm)

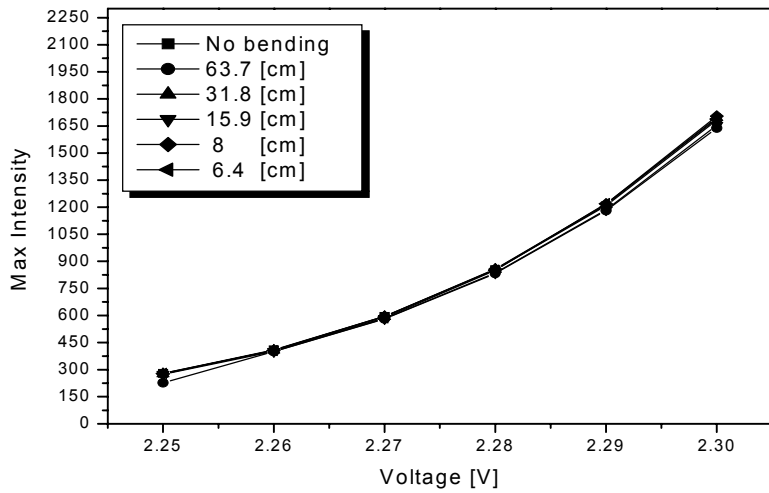


Fig. 32 Bending loss of plastic optical fiber. (Dia. 2mm)

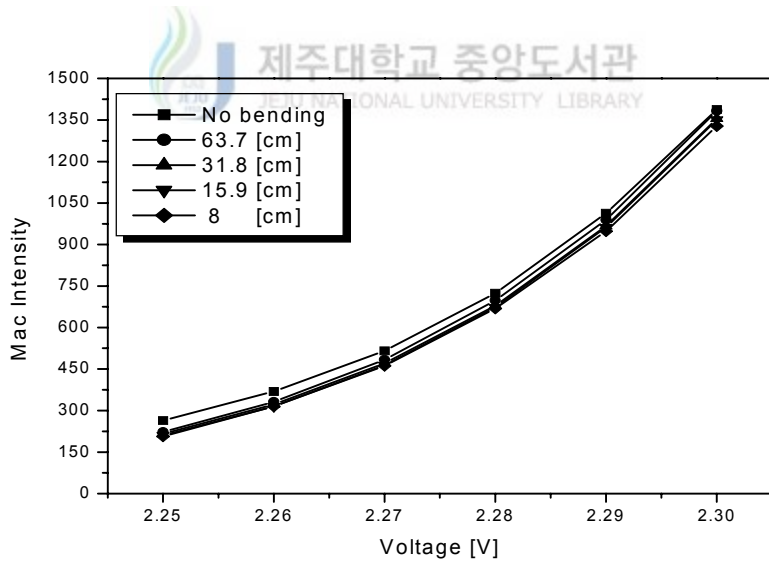


Fig. 33 Bending loss of plastic optical fiber. (Dia. 1mm)

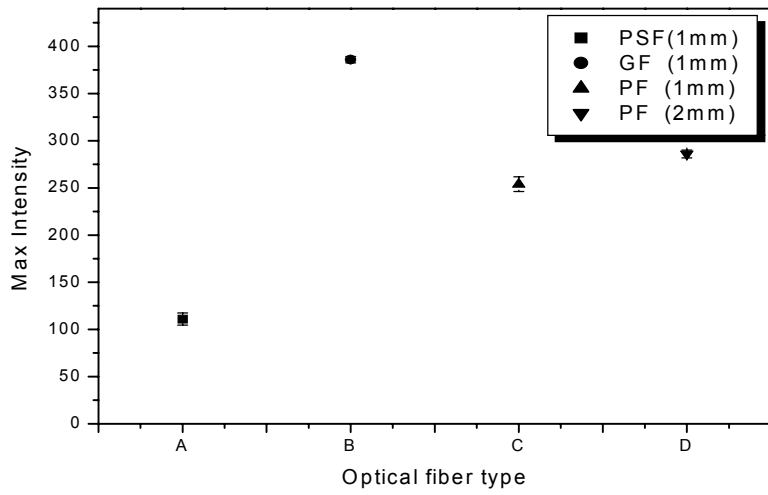


Fig. 34 Transmitting attenuation of optical fiber types at 2.25V.

2. 광섬유를 이용한 방사선계측 및 검출신호분석

1) 유리광섬유섬광체에 대한 실험결과

유리광섬유섬광체는 Fig. 35와 같이 $^{137}\text{Cs}(0.1\text{mCi})$ 에 대해서는 배경방사능과 검출신호의 충분한 계수치의 차이를 보였으나, 밀봉선원인 $^{137}\text{Cs}(1\mu\text{Ci})$, $^{90}\text{Sr}(1\mu\text{Ci})$ 에 대해서 직경이 1mm인 실리카 재질의 광섬유 및 직경이 2mm인 플라스틱 재질의 전송용 광섬유를 적용한 경우 낮은 계수치를 보였다. 또한 직경이 0.5mm인 3가닥의 유리광섬유섬광체로 구성된 센서에 대해서도 여전히 낮은 계수치를 보였다. 직경이 1mm인 유리광섬유섬광체에서 발생한 신호의 선형성을 판독하기 위해 표준밀봉선원인 ^{137}Cs 1 μCi , 3 μCi , 5 μCi 에 대하여 각각 10회의 실험을 수행하였고, 검출신호에 대한 적분값을 이용하여 1차 함수로 근사한 결과는 아래와 같다.(Fig. 38)

$$Y = A + Bx$$

	Data	Error
A	1131.17	237.73
B	1370.6	69.60

미지선원이라고 생각한 $^{137}\text{Cs}(1.5\mu\text{Ci})$ 에 대해 10회 계측에 대해 위의 결과 식에 대입하여 계산한 결과 1.24 μCi 로 17.3%의 오차가 발생하였다.

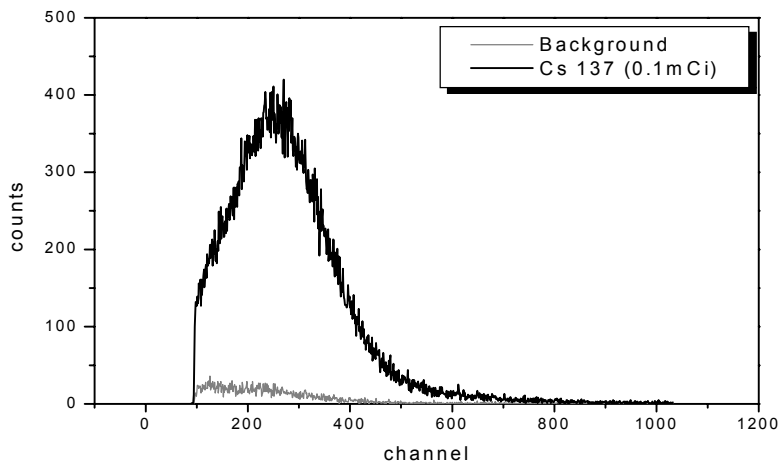


Fig. 35 Pulse height spectrum of measured with single-stand 1mm sensor for the gamma ray source.



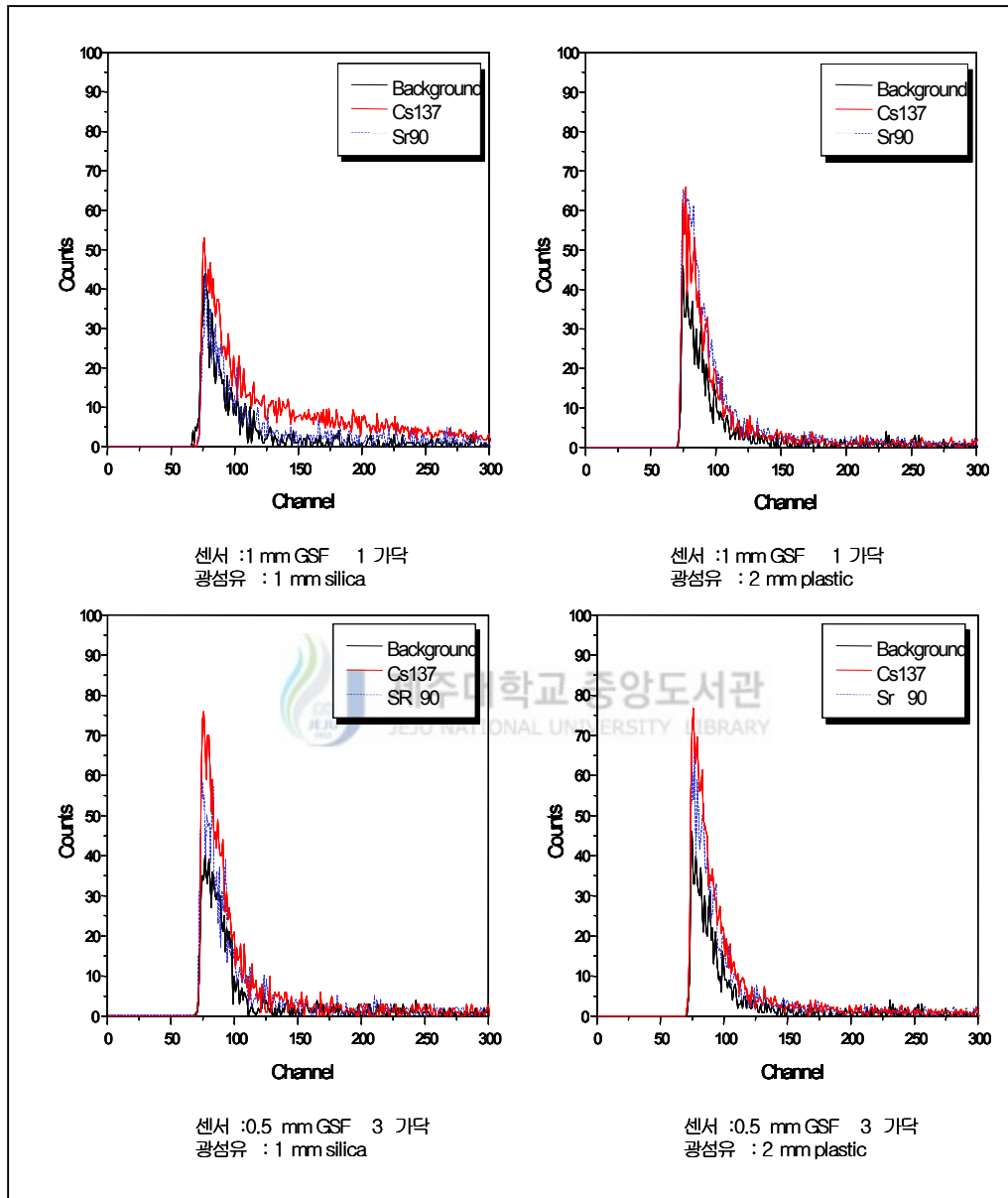


Fig. 36 Experimental results of glass scintillating fibers.

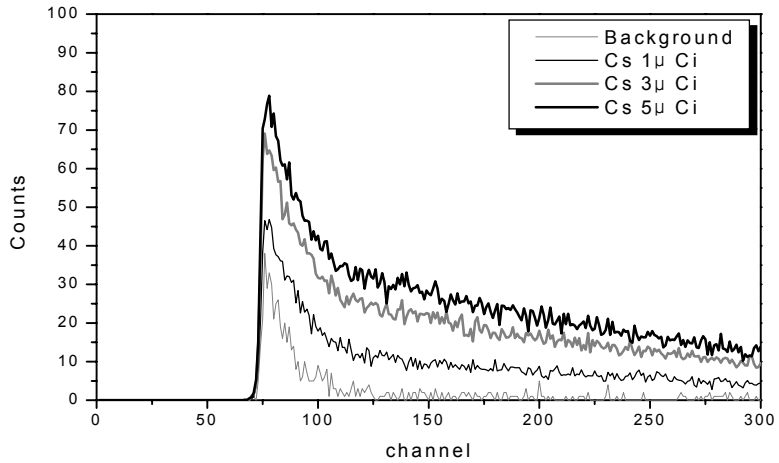


Fig. 37 Pulse height spectrum measured with the single-stand 1mm sensor for the sealed standard gamma sources.

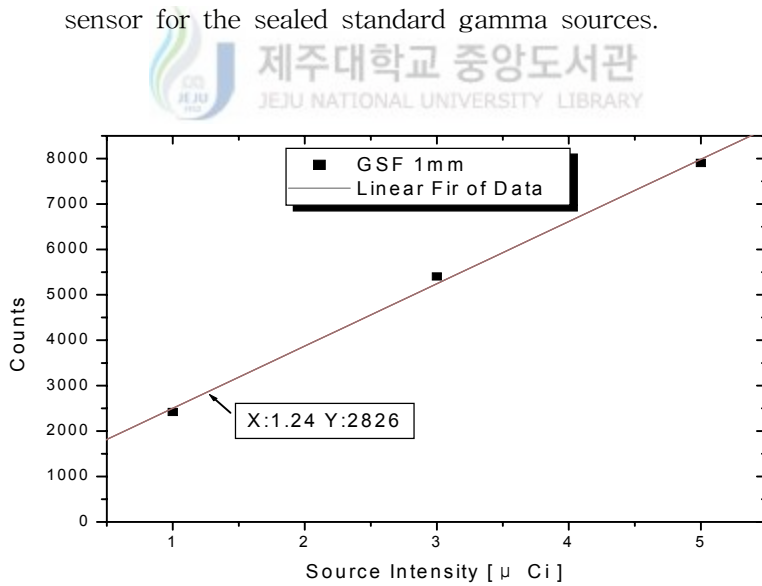


Fig. 38 Linear fitting results of glass scintillating fiber.

2) 플라스틱광섬유섬광체에 대한 실험결과

직경이 0.5mm, 1mm로 제작된 외가닥의 플라스틱광섬유섬광체에 대한 실험결과는 Fig. 39 a), b)에 나타내었다. 실험결과에서 보듯이 1mm센서인 경우 반응면적이 0.5mm보다 커서 감마선, 베타선이 1mm인 경우 더 많은 에너지 전이를 일으키는 것으로 분석된다. 그러나 위의 두 종류의 센서에서 발생된 신호는 매우 낮아 배경방사능과의 구분이 어렵다. 그래서 4종류의 다발형의 센서에 실리카(Silica) 재질의 1mm 전송용 광섬유를 사용한 경우 감마선원¹³⁷Cs(1μCi)과 베타선원⁹⁰Sr(μCi)에 대한 스펙트럼 분포 Fig. 40과 같이 나타내었다. 다발형의 센서는 외가닥의 센서보다 충분한 계수치의 차이를 나타내었으나 발생된 신호의 양이 여전히 낮다.

광섬유섬광체에서 발생된 광의 집광효율을 향상시키기 위한 방안으로 다발형(Multi-stand)센서의 한쪽 끝에 반사율이 90%이상이 되는 거울을 부착시키고, 다른 쪽면에는 렌즈를 이용하여 플라스틱광섬유섬광체에서 발생하는 광의 집광효율을 향상시키도록 하였으며, 신호전송용 광섬유는 Edmuond Optics사(Dia .2mm)를 이용하였고, 센서는 Fig. 40에서 가장 높은 검출특성을 보인 알루미늄 Case에 플라스틱광섬유섬광체 1mm로 25개의 다발형센서(sensor B1)이용하여 각각의 신호분포에 대하여 Fig 41과 같이 나타내었다.

다발형센서 중에 알루미늄 Case의 1mm 플라스틱광섬유로 제작된 센서와 신호전송용으로 2mm 광섬유를 사용한 경우 계수치가 약 4배 향상되었으며, 거울을 이용한 경우 약 5%, 렌즈와 거울을 모두 이용한 경우 약 35%의 향상을 가져왔다.(적분값 이용)

전송용광섬유를 실리카 재질의 1mm 광섬유에서 플라스틱 재질의 2mm 광섬유로 전환한 경우 렌즈에 의한 Focusing 문제인지를 확인하기 위하여 센서와 신호전송용 광섬유를 각각 0.1, 0.2, 0.3mm 거리를 두고 측정된 결과는 Fig. 43과 같다. 결과에서 알 수 있듯이 렌즈에 의한 Focusing은 잘 맞추어진 것으로 분석된다.


그 이유는 실험에 적용된 렌즈의 경우 입사광이 평행하게 적용될 경우에 대해서 제작되었는데, 다발형의 플라스틱광섬유섬광체에서 발생하는 광은 평행하게 렌즈에 입사되지 않는 것으로 분석된다.

Fig. 42과 같이 2mm의 전송용광섬유, 렌즈, 거울을 이용하여 제작된 센서(sensor B

type)는 초기의 센서(sensor A type)보다 훨씬 향상된 신호분포를 보여주고 있다. 감마선원에 대해서 알루미늄 Case로 제작된 센서의 경우 1mm(sensor B1), 0.5mm(sensor B2)가닥의 신호는 비슷한 양상을 보이고 있고, 플라스틱 Case로 제작된 센서의 경우 1mm(sensor B3), 0.5mm(sensor B4) 다소 낮은 결과치를 보이는 것은 플라스틱 Case가 알루미늄 Case에 비하여 2배정도 두껍기 때문에 감마선의 감쇠에 의한 영향이라고 분석된다. 베타선원의 경우 감마선원에 비하여 신호의 변화가 크지 않는 것을 알 수 있다. 이것은 베타선의 경우 하전입자의 형태로 비정(Range)이 감마선에 비하여 매우 짧기 때문에 센서의 Case에서 대부분의 베타선 에너지가 흡수되는 것으로 분석된다.

위의 결과를 바탕으로 sensor B1, sensor B3에 대해서 검출신호의 선형성을 판독하기 위해 표준밀봉선원인 ^{137}Cs 1 μCi , 3 μCi , 5 μCi 에 대하여 각각 10회의 실험을 수행하였고, 실험 결과에 대한 검출신호의 적분값을 이용하여 1차 함수로 근사한 결과는 아래와 같다.

sensor B1의 경우는 아래와 같다.(Fig. 44~Fig. 45)



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

$$Y = A + Bx$$

	Data	Error
A	3234.13	135.28
B	6476	39.61

미지선원이라고 생각한 ^{137}Cs (1.5 μCi)에 대해 10회 계측에 대해 위의 결과 식에 대입하여 계산한 결과 1.36 μCi 로 9.3%의 오차가 발생하였다.

sensor B3의 경우는 아래와 같다.(Fig. 46~Fig. 47)

$$Y = A + Bx$$

	Data	Error
A	2756.36	836.78
B	4954.33	244.29

미지선원이라고 생각한 ^{137}Cs (1.5 μCi)에 대해 10회 계측에 대해 위의 결과 식에 대입하여 계산한 결과 1.42 μCi 로 3.11%의 오차가 발생하였다.

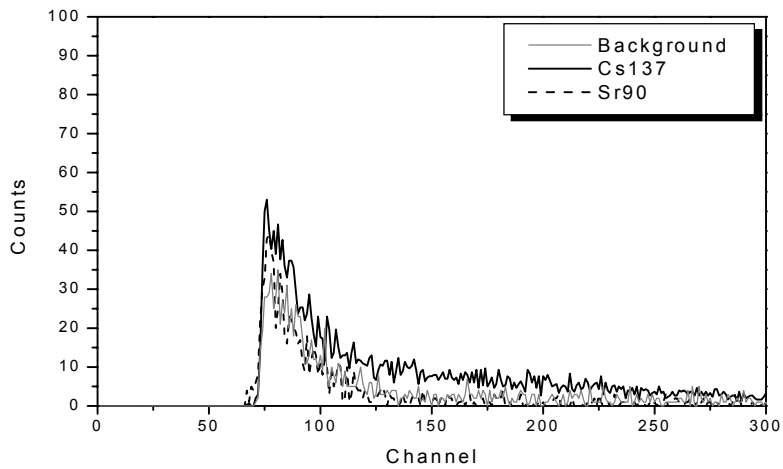


Fig. 39 a) Pulse-height spectrum measured with the single-strand 0.5mm sensor for the gamma ray and beta ray source.

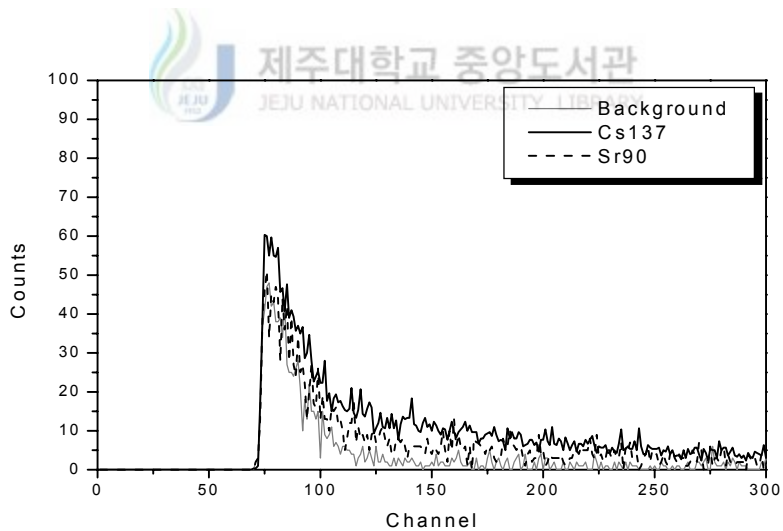


Fig. b) Pulse-height spectrum measured with the single-strand 1mm sensor for the gamma ray and beta ray source.

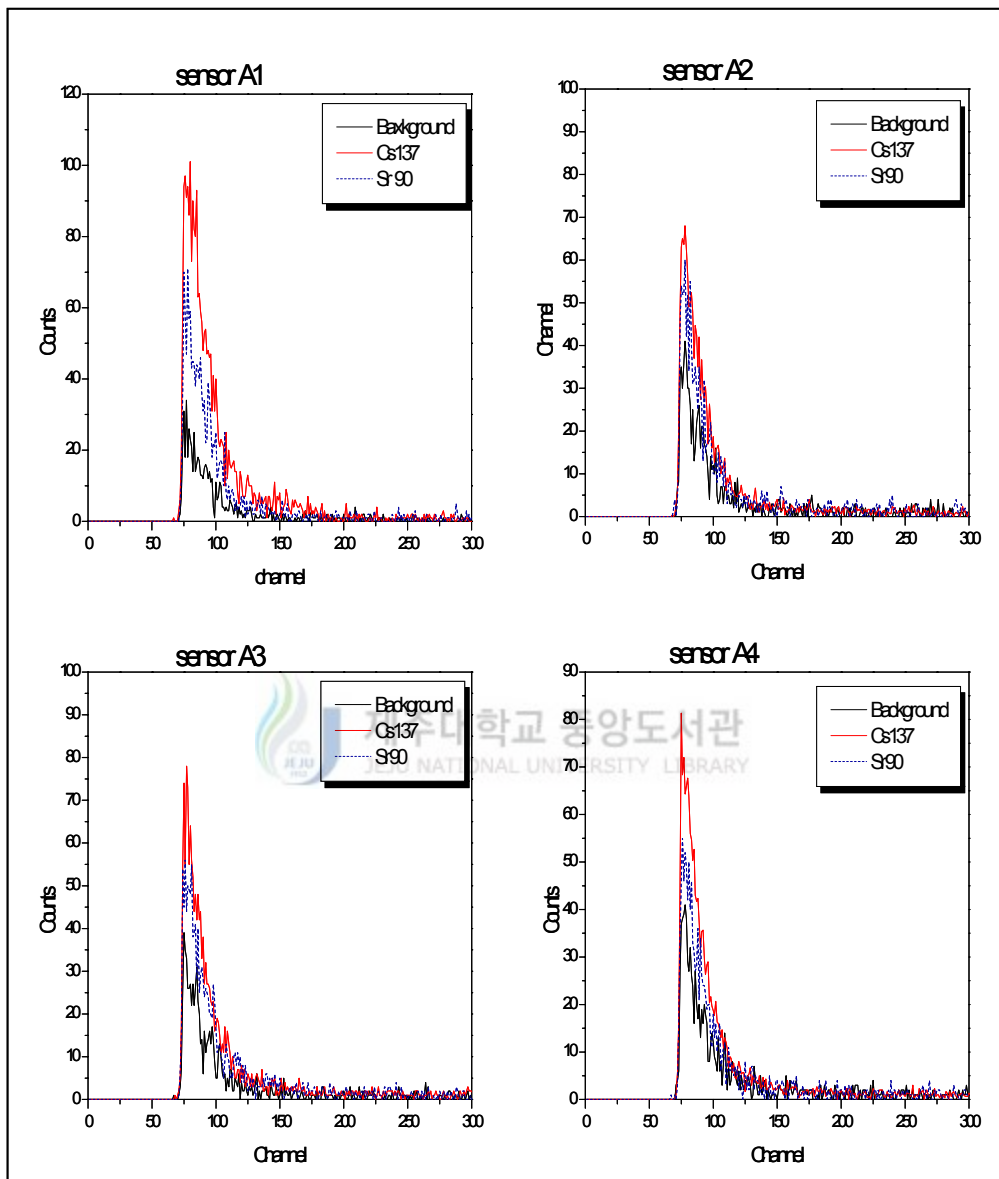


Fig. 40 Pulse-height spectrum measured with four type of the multi-strand sensors for the gamma ray and beta ray source.

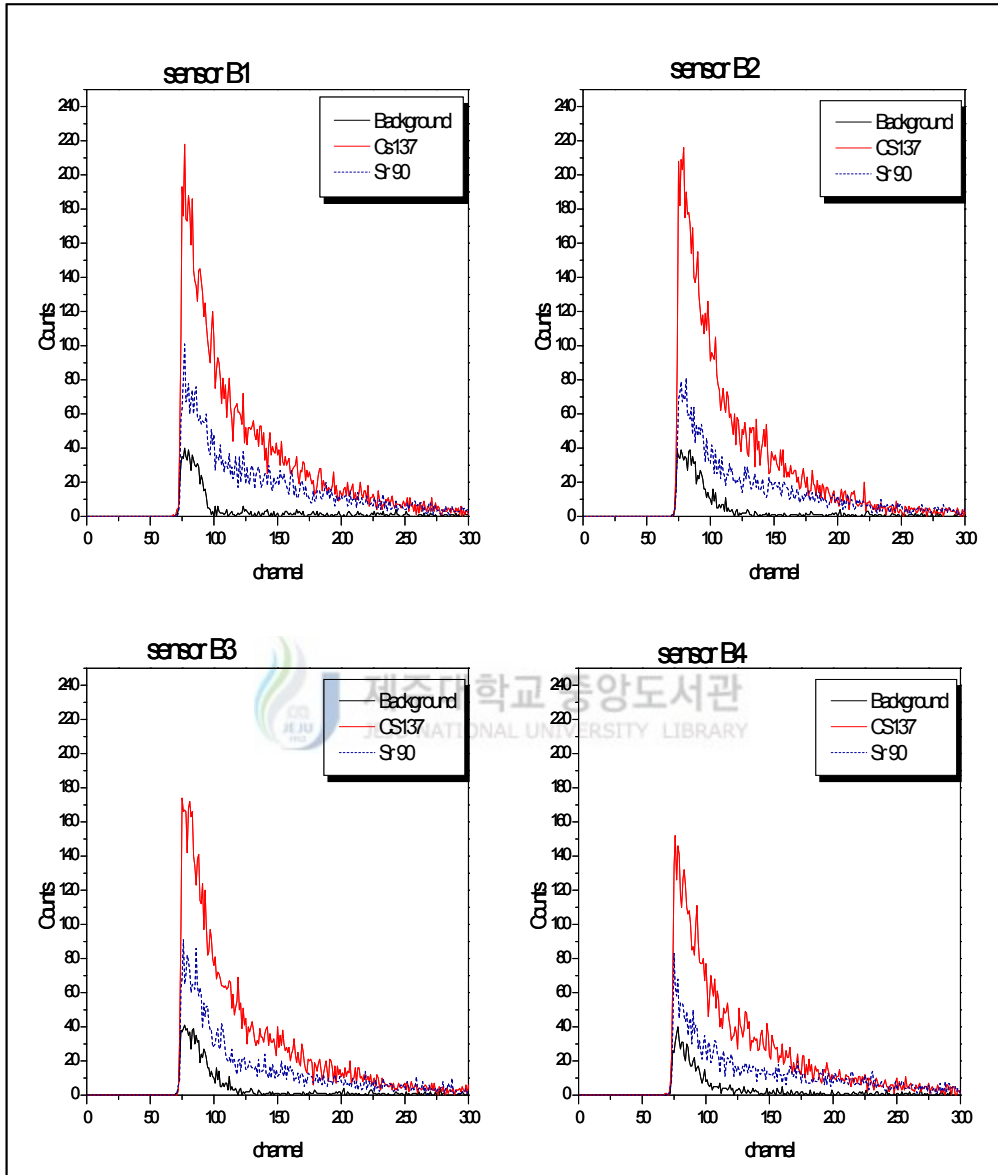


Fig. 42 Pulse-height spectrum measured with four type of the multi-strand sensors which used a mirror and lens for the gamma ray and beta ray source.

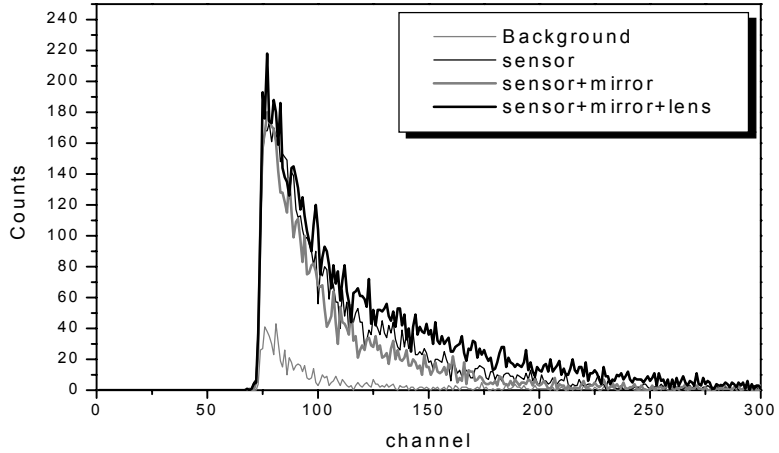


Fig. 41 Pulse-height spectrum measured with the multi-strand 1mm sensor(A1) for coupling of a mirror and lens.

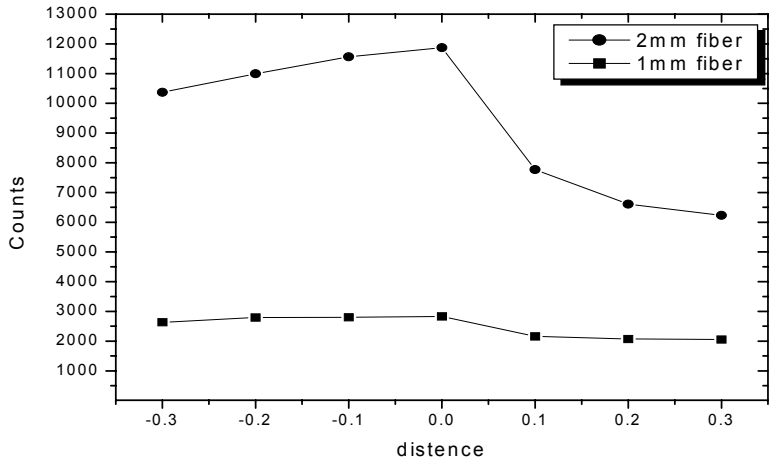
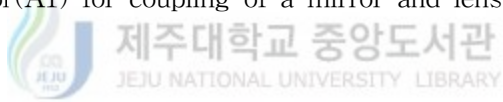


Fig. 43 Experimental result to find focusing length.

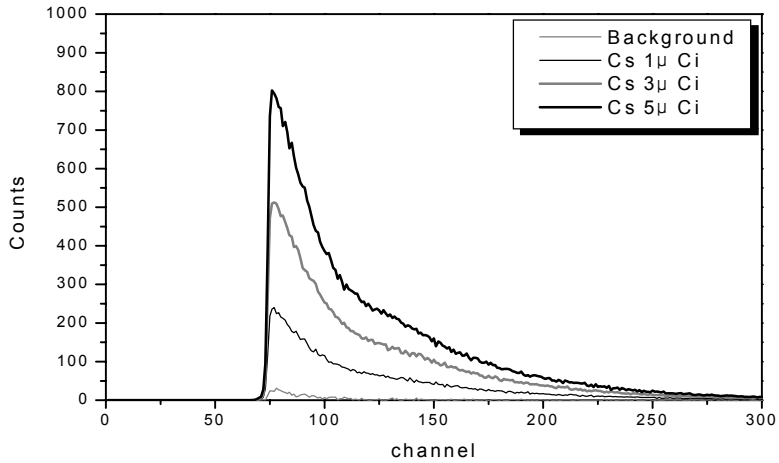


Fig. 44 Pulse height spectrum measured with the multi-stand 1mm sensor for the sealed standard gamma sources.

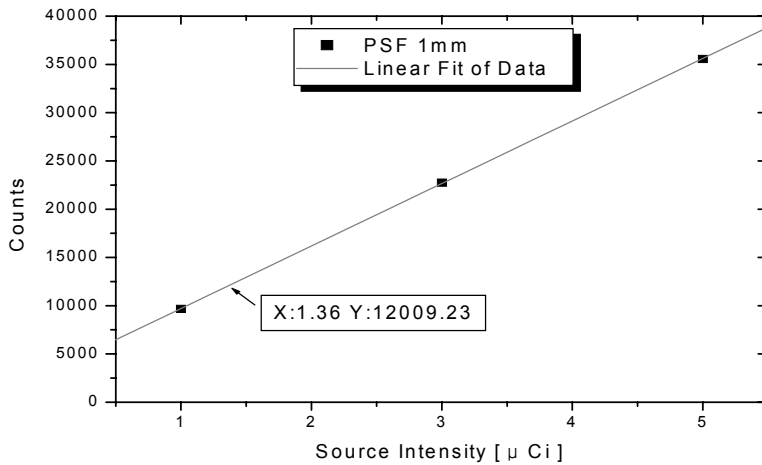


Fig. 45 Linear fitting results of multi-stand 1mm plastic scintillating fiber sensor. (**sensor B1**)

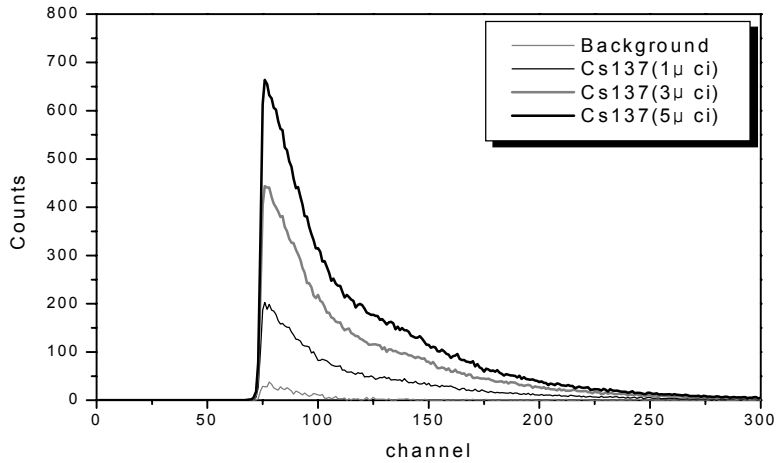


Fig. 46 Pulse height spectrum measured with the multi-stand 0.5mm sensor for the sealed standard gamma sources.

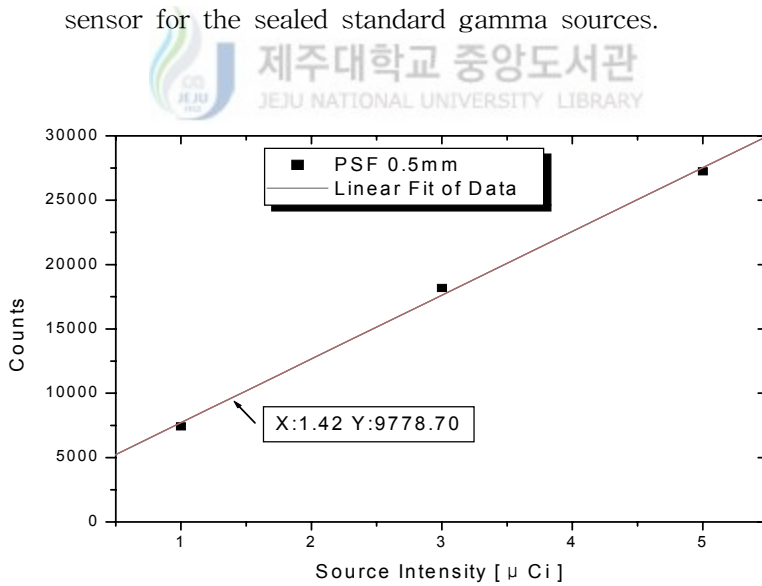


Fig. 47 Linear fitting results of multi-stand 0.5mm plastic scintillating fiber sensor. (**sensor B3**)

3. 소형 CsI(Tl)에 대한 실험결과

소형의 CsI(Tl)의 경우에는 광섬유섬광체를 이용하였을 때보다 충분한 계수치의 차이를 보여주고 있다.(Fig. 48)

본 실험에서도 위의 경우와 마찬가지로 섬광체인 CsI(Tl)에서 발생된 신호를 광섬유를 통해서 효율적으로 전송하기 위하여 렌즈와 거울을 이하였다. Fig. 49에서와 같이 거울을 이용한 약 31%, 거울과 렌즈를 모두 이용한 경우 33%의 계수치를 향상시킬 수 있었다.(적분값 이용)

다발형의 플라스틱광섬유섬광체와 비교하여 CsI(Tl)은 결정(Crystal)의 크기가 크기 때문에 거울을 이용한 경우 큰 비율로 검출신호의 계수치가 향상되었으나, 렌즈사용에 대한 계수치는 상대적으로 낮다. 그 이유는 플라스틱광섬유섬광체의 경우와 마찬가지로 CsI(Tl)에서 생성되는 광이 렌즈에 입사할 때 평행하게 입사하지 않기 때문으로 분석된다.

전송용광섬유를 실리카(Silica) 재질의 1mm 광섬유에서 플라스틱 재질의 2mm 광섬유로 전환한 경우 4배 이상의 계수치의 증가를 보였다.(Fig. 50)

위의 결과를 바탕으로 소형의 CsI(Tl)에 대해서 검출신호의 선형성을 판독하기 위해 표준밑봉선원인 ^{137}Cs 1 μCi , 3 μCi , 5 μCi 에 대하여 각각 10회의 실험을 수행하였고, 실험 결과에 대한 검출신호의 적분값을 이용하여 1차 함수로 근사한 결과는 아래와 같다.(Fig. 51~Fig. 52)

$$Y = A + Bx$$

	Data	Error
A	23137.84	2154.14
B	56597.7	630.67

미지선원이라고 생각한 ^{137}Cs (1.5 μCi)에 대해 10회 계측에 대해 위의 결과 식에 대입하여 계산한 결과 1.25 μCi 로 20%의 오차가 발생하였다.

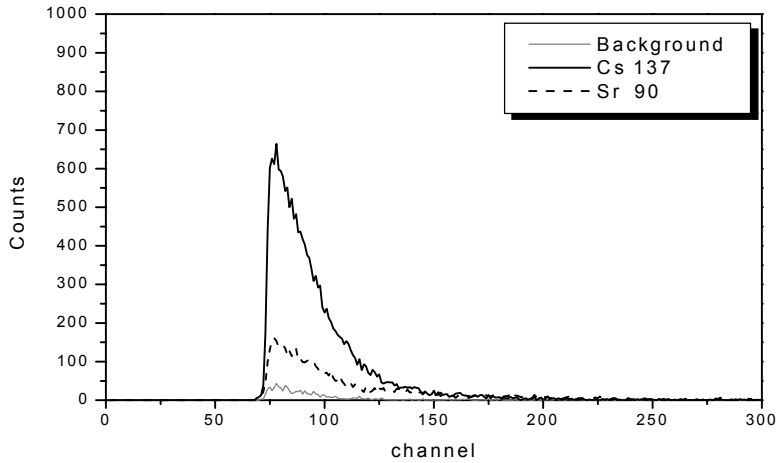


Fig. 48 Pulse-height spectrum measured with CsI(Tl) sensor for the gamma ray and beta ray source.

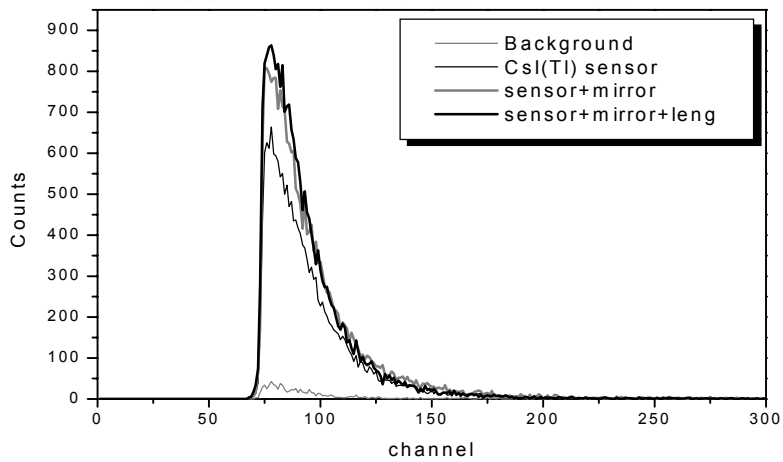


Fig. 49 Pulse-height spectrum measured with CsI(Tl) sensor for coupling of a mirror and lens.

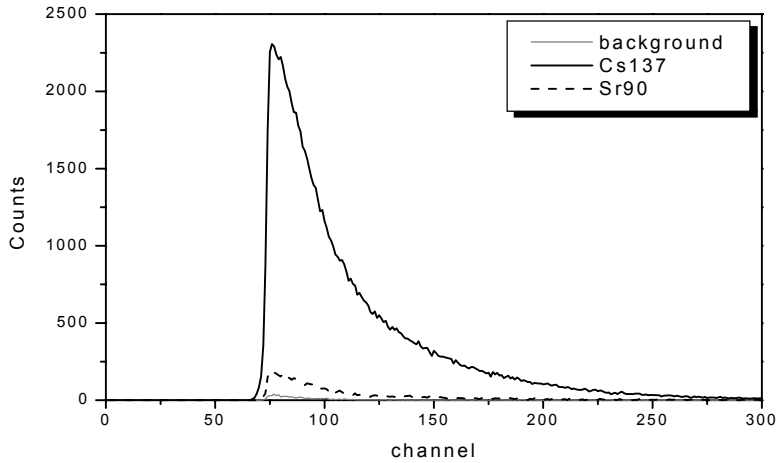


Fig. 50 Pulse-height spectrum measured with CsI(Tl) sensor for 2mm optical fiber.

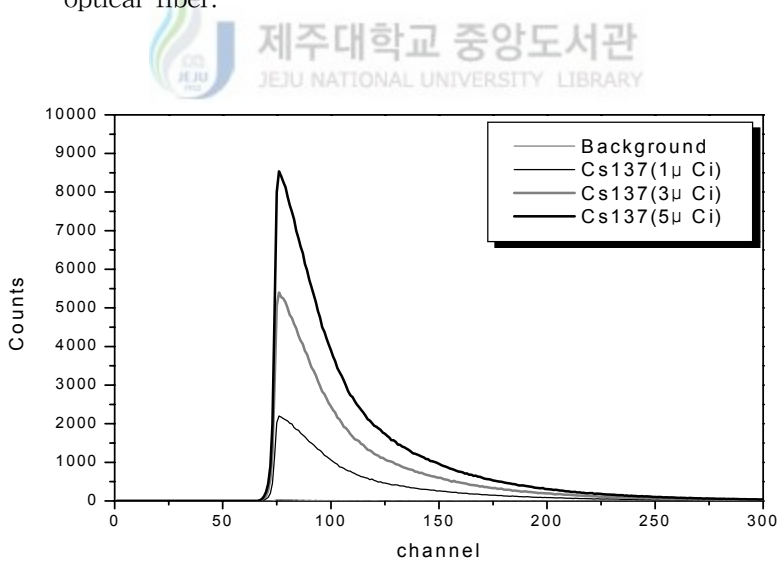


Fig. 51 Pulse height spectrum measured with the CsI(Tl) sensor for the sealed standard gamma sources.

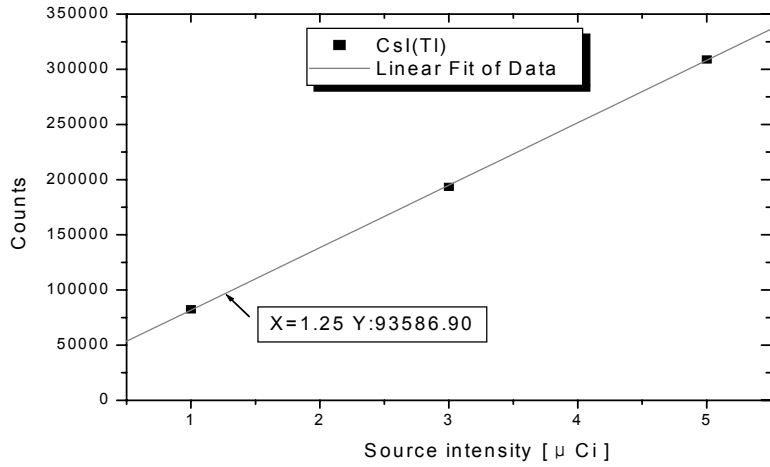


Fig. 52 Linear fitting results of CsI(Tl) sensor.



V. 결 론

본 연구에서는 토양 또는 수중에 투입하여 방사능을 직접 측정할 수 있는 소형 방사능 검출기를 개발하기 위하여 광섬유섬광체와 CsI(Tl) 단결정 섬광체를 소재로 하는 방사선검출센서를 제작하였다. 센서로 사용된 광섬유는 Ce이 첨가된 Li 유리섬광체 또는 플라스틱섬광체를 Core 성분으로 하는 것이고, 센서의 형태는 광섬유를 외가닥 또는 다발형태로 결합하여 광신호 전송용 광섬유와 연결하였다. 제작된 여러 형태의 센서를 활용하여 감마선과 베타선의 측정 가능성을 조사하였고, 측정된 계수치를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

▷ 광섬유섬광체는 가공 및 취급이 용이하고, 다른 섬광체(Scintillator)보다 화학적 및 기계적 성질이 우수하여 측정여건에 맞는 다양한 형태와 크기의 센서로 제작이 용이하다. 반면 광섬유섬광체의 낮은 밀도 및 원자번호로 인하여 검출효율이 낮으므로 선원의 세기가 약한 경우에는 충분한 신호를 얻을 수 없었으나, 다발형으로 제작하거나 기존의 섬광체와 조합하는 경우 이 문제를 개선할 수 있었다.

▷ 광섬유섬광체에서 발생한 광을 적은 손실로 전송할 수 있는 신호전송용 광섬유를 선택하기 위하여 직경 1mm 및 2mm의 플라스틱 광섬유와 직경이 1mm의 실리카(Silica) 광섬유를 대상으로 검출신호를 조사한 결과 플라스틱광섬유섬광체를 이용한 경우에 비해 플라스틱 광섬유 직경 1mm의 경우 2.3배 및 직경 2mm의 경우 2.6배, 실리카 광섬유는 3.5배의 증가를 보였다. 그리고 플라스틱광섬유섬광체는 위의 세 가지 광섬유에 비해 굽힘(Bending)손실이 크다. 이상의 결과를 바탕으로 플라스틱광섬유섬광체는 신호전송용으로는 부적당하다는 결론을 얻었다.

▷ 직경이 1mm 유리광섬유섬광체를 외가닥으로 사용한 센서를 ^{137}Cs 선원에 적용한 결과 1 μCi 의 방사능에서는 계수치가 낮았으나 100 μCi 의 방사능에서는 충분한

계수치를 보였다.

▷ 직경이 0.5mm, 1mm인 플라스틱광섬유섬광체를 외가닥으로 이용한 센서를 $^{137}\text{Cs}(1\mu\text{Ci})$, $^{90}\text{Sr}(1\mu\text{Ci})$ 에 적용한 경우 검출신호의 계수치가 배경방사능과 큰 차이는 없었으나, 다발형으로 제작된 센서는 충분한 계수치의 차이를 보여주었다.

▷ CsI(Tl) 섬광체와 렌즈 및 거울을 조합한 센서의 경우 $^{137}\text{Cs}(1\mu\text{Ci})$ 선원에 대해서 충분한 계수치를 보였다.

▷ 아래의 4가지 센서에 대한 방사선원의 방사능과 계수치의 비례관계를 평가하기 위해 ^{137}Cs 선원 1 μCi , 3 μCi , 5 μCi 에 적용하여 조사한 결과 선형성의 상관계수 (Correlation coefficient: r)가 외가닥의 유리광섬유섬광체 센서는 0.99871, 다발형의 플라스틱광섬유섬광체 (**sensor B1, sensor B3**)는 0.99878, 0.99998이고, CsI(Tl)섬광체 센서는 0.99994를 나타내었다.

위의 결과를 바탕으로 미지선원(1.5 μCi)에 대해 각각의 센서로 측정된 계수치와 선원의 방사능을 비교하여 살펴보면 17.3%, 9.3%, 3.1%, 20%의 오차가 발생하였다.

본 연구를 종합하면 현재 제작된 센서의 정확성은 다소 떨어지지만 광섬유 연결방법, 누광 차단방법 등을 개선하면 광섬유를 활용한 소형센서 개발이 충분히 가능한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- R. Van Geen, "Optical Fibere Sensing and Systems in Nuclear Enviroments"
Proceeding of SPIE, Vol 2425, Mol, Belgium, 1994.
- 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. 219~263
- D. Marcuse, "Principles of Optical Fiber Measurement", Academic Press, 1981
- K. H. Abel et al., "Scintillating Glass Fiber Neutron Sensors: III. Photon
Economy in Scintillating Fibers", Pacific Northwest Laboratory, Richland, USA.
1994.
- Jong-Soo Kim et al., "Application of Optical Fiber-Scintillator for
Unattended Monitoring in Spent Fuel Storage Silo", Technology Center for
Nuclear Control, Korea. 1999.
- A.J. Schilk et al., "Real-time, in Situ Detection of ^{90}Sr and ^{238}U in Soils via
Scintillating-Fiber-Sensor Technology", Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res. A353,
1994.

Chizuo Mori, "Distribution of Radiation Intensity with Optical Fiber at Narrow Space", J. of Nucl. Sci. and Tech., vol.31, no.3, Japan. 1994. pp. 248-249

Hitachi Kitaguchi, Izumi Shigeru, "Fundamental Study of Nuclear Radiation Monitor Using Phosphor of Optically Stimulated Luminescence(OSL) with Optical Fiber", Japan Atomic Energy Research Institute, Japan. 1994.

D. Albers, "Studies on scintillating fiber response", Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res. 1996, pp. 388~396

정운혁, "방사성 동위원소 및 방사선의 취급기술", 청문각, 1997, pp. 166~176

도시홍 등, "CsI 단결정 섬광체의 성장과 방사선손상", 과학기술부, 1998, pp. 17~83

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

이영길 등, "광섬유섬광체를 이용한 핵물질 보장조치 기술", 한국원자력연구소, 1998, pp.3~64

김정엽, "광섬유", 한국섬유형공학회지, 1984

정원채, 김종헌, "광전자공학", MRC미래컴, 2000, pp. 173~215

손병태 등, "광통신공학", 광문각, 1998, pp. 13~98

감사의 글

이제 작은 결실을 맺게 되었습니다. 아직 부족한 점이 많지만 2년이라는 기간 동안 이 작은 결실을 위해 열심히 노력했기에 나름대로 보람과 자부심을 찾고 싶습니다. 그리고 이 논문을 통해서 앞으로 어떠한 일이든 도전의 기틀을 마련할 수 있다는 것에 더 큰 의미를 두고 싶습니다.

본 논문을 완성하는데 많은 분들의 도움이 있었기에 가능했던 것 같습니다.

세심한 배려와 관심으로 지도해주신 박재우 교수님께 존경과 감사를 드립니다. 물심양면으로 지도해주신 이윤준 교수님, 이헌주 교수님, 천원기 교수님, 김신 교수님, 정범진 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

본 논문을 완성하는데 많은 도움과 조언을 주신 원자력연구소 김종수 박사님께 감사드립니다. 바쁜 중에도 언제나 옆에서 많은 도움을 주신 경진 선배님 멀리서 항상 관심을 주신 현식, 재광, 성택, 영동, 상훈 선배님 그리고 현조, 보안에게 감사드립니다. 대학원 시절을 같이 보내며 큰 힘이 되어준 준호형, 지훈, 정선에게도 고마운 마음을 전합니다. 어려울 때마다 묵묵히 뒤따라준 계홍, 승진, 희철에게도 고마운 마음을 전합니다. 많은 도움을 주신 현종관, 박숙희 선생님께도 감사드립니다. 사소한 부탁도 내 일처럼 도움을 주신 한라병원 지남준 선생님, 방사능이용연구소 송성준 선생님께도 감사드립니다. 어려울 때 항상 버팀목이 되어준 4·2회 친구들과 고교동기모임 친구들에게 감사의 말을 전합니다.

언제나 변함없이 저를 믿고 학업에 전념할 수 있도록 도와주신 부모님과 형님께 미안한 마음을 감출 수가 없습니다. 이 한 권의 논문으로 전부 보답할 수는 없지만 이 작은 결실을 바탕으로 그 큰 은혜에 보답하도록 노력하겠습니다.

끝으로 저에게 도움과 격려를 주신 모든 분들에게 감사의 마음으로 본 논문을 드립니다.