



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

GaP Photodiode와 산화물  
섬광체를 이용한 원격측정  
방사선량계 특성 분석

濟州大學校 大學院

에너지 工學科

金在京

2011年 2月

# GaP Photodiode와 산화물 섬광체를 이용한 원격측정 방사선량계 특성 분석

指導教授 朴 在 雨

金 在 京

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2010年 12月

金在京의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 金 信 (印)

委 員 朴 在 雨 (印)

委 員 鄭 鈺 津 (印)

濟州大學校 大學院

2010年 12月

# Characteristics analysis of remote measurement used GaP photodiode and inorganic scintillator

Jae-Kyoung Kim

(Supervised by professor Jae-Woo Park)

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

2010. 12.

This thesis has been examined and approved.

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

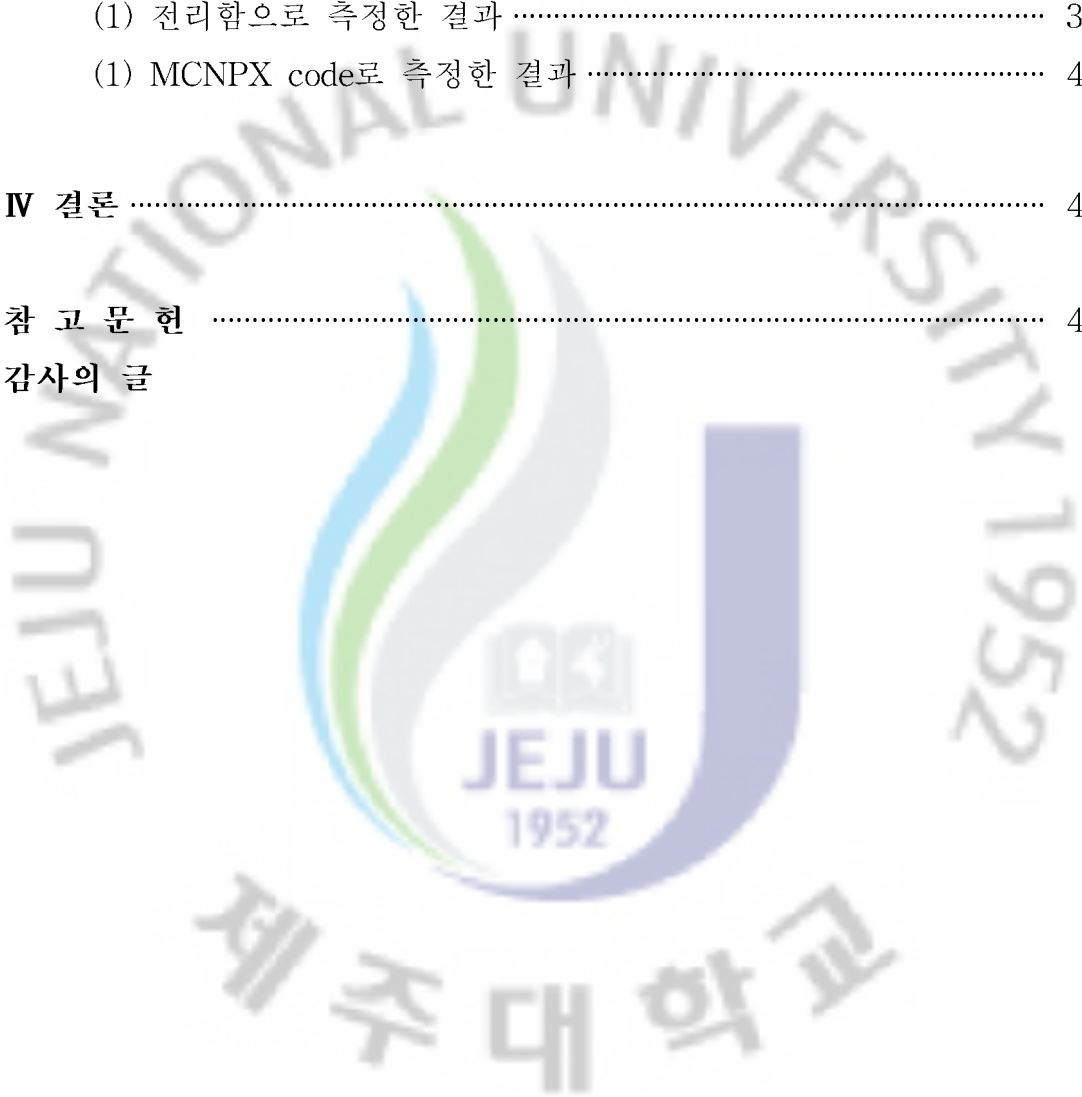
.....  
Date

Department of Nuclear & Energy Engineering  
GRADUATE SCHOOL  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

# 목 차

LIST OF FIGURES .....	iii
LIST OF TABLES .....	vi
SUMMARY .....	vii
I. 서 론 .....	1
1. 연구의 필요성 .....	1
2. 국내외의 연구동향 .....	2
(1) 유기섬광체와 광섬유를 결합한 방사선 센서 .....	2
(2) 무기섬광체와 광섬유를 결합한 방사선 센서 .....	6
II. 선량계 모형 구성 및 제작 .....	9
1. 섬광체 sensor, 섬광체 case, 플라스틱 광섬유, Photodiode의 구성 9	
(1) 섬광체 sensor의 구성 .....	9
(2) 섬광체 case의 구성 .....	11
(3) 플라스틱 광섬유의 구성 .....	13
(4) Photodiode의 구성 .....	14
2. 선량계 모형 평가 실험방법 .....	15
(1) 실험방법 .....	16
(2) 전리함 측정방법 .....	17
(3) MCNPX code 계산 .....	18

III 결과 및 고찰 .....	20
1. 전리함으로 측정된 결과의 선형성 비교 .....	20
2. 변환상수 비교 .....	28
3. 정규화 분포 비교 .....	37
(1) 전리함으로 측정된 결과 .....	37
(1) MCNPX code로 측정된 결과 .....	42
IV 결론 .....	47
참 고 문 헌 .....	49
감사의 글	



## LIST OF FIGURES

Fig. 1. The fiber-optic radiation sensor using the organic scintillator and plastic optical fiber .....	3
Fig. 2. Schematic diagram of SOF(Scintillator with Optical Fiber) detector system .....	4
Fig. 3. Diagram of the plastic scintillation detector system and longitudinal cross-section of (a) the proximal end of the fiber light guide and (b) the polystyrene probe containing the scintillator .....	5
Fig. 4. A schematic diagram and a scaled photograph of the proximal end of the Scintillator-Fiberoptic-PMT detector system .....	6
Fig. 5. Composition of sensor tip to detect beta rays .....	7
Fig. 6. The inorganic scintillator use radiation sensor of (a) film-type (b) powder-type .....	8
Fig. 7. Schematic of the fiber-optic dosimeter system .....	9
Fig. 8. Process of sensor manufacture .....	11
Fig. 9. Sensor case production combining optic fiber and scintillator .....	12
Fig. 10. Plastic optical fiber (PGR-FB3000) .....	13
Fig. 11. GaP photodiode (Thorlabs, Inc.) .....	14
Fig. 12. Picture and schematic of 5400Ci <sup>60</sup> Co irradiation chamber .....	16
Fig. 13. Measurement of dosimeter using GaP photodiode in irradiation chamber .....	17
Fig. 14. Ionization chamber (PTW Freiburg) and Electrometer (Cardinal Health Co. model 35040) .....	18
Fig. 15. Simulation depending on the MCNPX code .....	19
Fig. 16. Linearity of the BGO scintillator and Al case .....	22
Fig. 17. Linearity of the BGO scintillator and PE case .....	23

Fig. 18. Linearity of the CWO scintillator and Al case .....	24
Fig. 19. Linearity of the CWO scintillator and PE case .....	25
Fig. 20. Linearity of the LYSO scintillator and Al case .....	26
Fig. 21. Linearity of the LYSO scintillator and PE case .....	27
Fig. 22. Deviation of scintillator BGO(Al case) for ionization chamber dose rate .....	30
Fig. 23. Deviation of scintillator BGO(PE case) for ionization chamber dose rate .....	31
Fig. 24. Deviation of scintillator CWO(Al case) for ionization chamber dose rate .....	32
Fig. 25. Deviation of scintillator CWO(PE case) for ionization chamber dose rate .....	33
Fig. 26. Deviation of scintillator LYSO(Al case) for ionization chamber dose rate .....	34
Fig. 27. Deviation of scintillator LYSO(PE case) for ionization chamber dose rate .....	35
Fig. 28. Deviation of scintillators for ionization chamber dose rate .....	36
Fig. 29. Normalized distribution of measured BGO(Al case) current and ionization chamber .....	39
Fig. 30. Normalized distribution of measured BGO(PE case) current and ionization chamber .....	39
Fig. 31. Normalized distribution of measured CWO(Al case) current and ionization chamber .....	40
Fig. 32. Normalized distribution of measured CWO(PE case) current and ionization chamber .....	40
Fig. 33. Normalized distribution of measured LYSO(Al case) current and ionization chamber .....	41
Fig. 34. Normalized distribution of measured LYSO(PE case) current and ionization chamber .....	41



Fig. 35. Normalized distribution of absorption energy from measured BGO(AI case) and calculated MCNPX code ..... 44

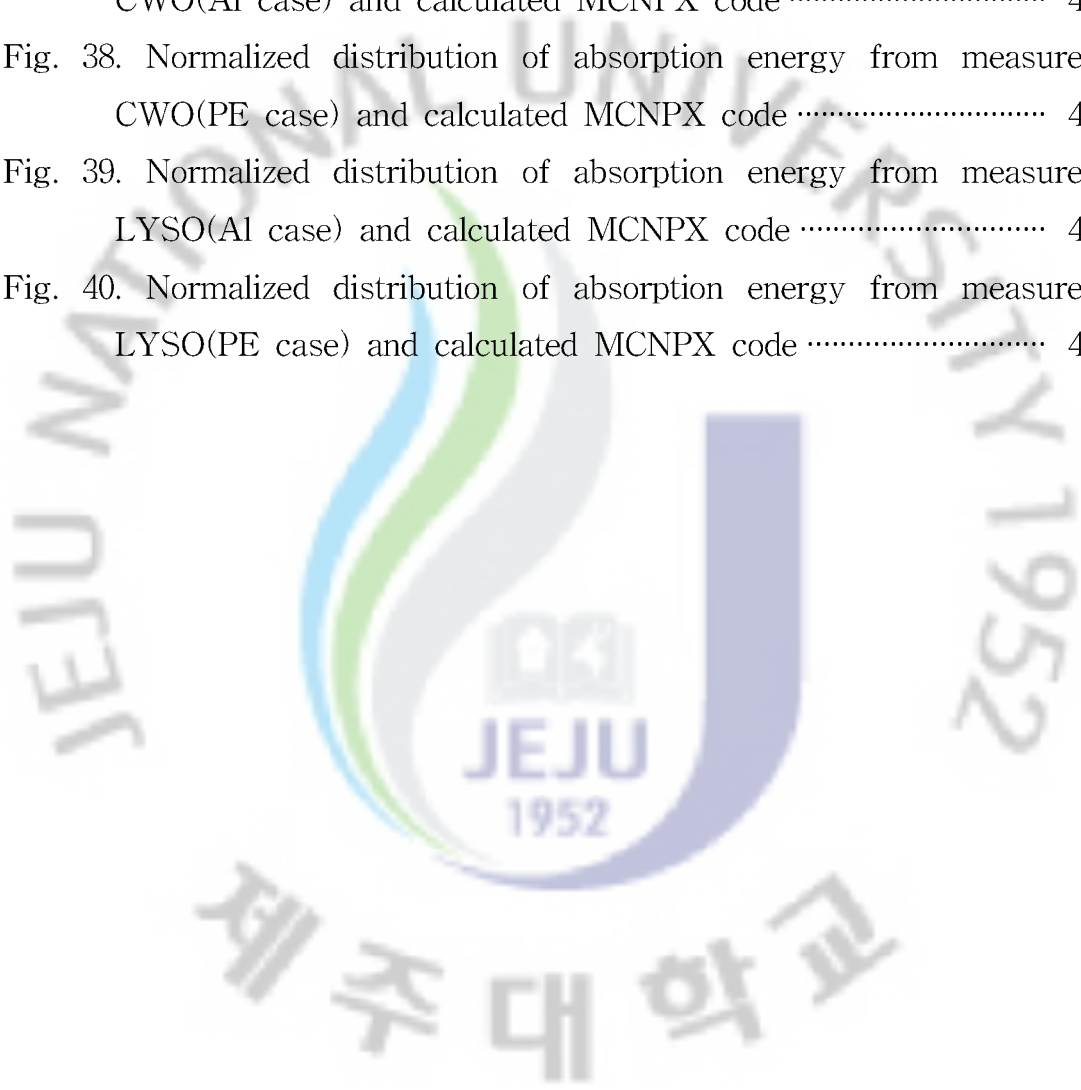
Fig. 36. Normalized distribution of absorption energy from measured BGO(PE case) and calculated MCNPX code ..... 44

Fig. 37. Normalized distribution of absorption energy from measured CWO(AI case) and calculated MCNPX code ..... 45

Fig. 38. Normalized distribution of absorption energy from measured CWO(PE case) and calculated MCNPX code ..... 45

Fig. 39. Normalized distribution of absorption energy from measured LYSO(AI case) and calculated MCNPX code ..... 46

Fig. 40. Normalized distribution of absorption energy from measured LYSO(PE case) and calculated MCNPX code ..... 46



## LIST OF TABLES

Table 1. Characteristics of scintillators .....	10
Table 2. Characteristics of plastic optical fiber (PGR-FB3000) .....	13
Table 3. Measurement result of BGO scintillator and Al case .....	22
Table 4. Measurement result of BGO scintillator and PE case .....	23
Table 5. Measurement result of CWO scintillator and Al case .....	24
Table 6. Measurement result of CWO scintillator and PE case .....	25
Table 7. Measurement result of LYSO scintillator and Al case .....	26
Table 8. Measurement result of LYSO scintillator and PE case .....	27
Table 9. Deviation of scintillator BGO(Al case) for ionization chamber dose rate .....	30
Table 10. Deviation of scintillator BGO(PE case) for ionization chamber dose rate .....	31
Table 11. Deviation of scintillator CWO(Al case) for ionization chamber dose rate .....	32
Table 12. Deviation of scintillator CWO(PE case) for ionization chamber dose rate .....	33
Table 13. Deviation of scintillator LYSO(Al case) for ionization chamber dose rate .....	34
Table 14. Deviation of scintillator LYSO(PE case) for ionization chamber dose rate .....	35

## SUMMARY

As applications of radiation in industrial and medical fields expand, high-tech radiation sensor production and measurement methods are developing. For example, ionization chamber, which is the most commonly used in the measurement of radiation absorbed dose, can be measurable in real time, yet it has problems such as low spatial resolution or complex correction process, caused by the volume and component materials of the detector. Also, Metal Oxide Field Effect Semiconductor Transistor (MOSFET), which is used in medical fields, has fine spatial resolution with small sensor part and measure dose at many points at the same time. However, it is uneconomical to measure in the high dose rate fields since it is depletable and has a limited life. Alanine chemical dosimeter shows an exact dose and low deviation; it has a disadvantage of decoding dose rate and the form of energy only with an expensive decoder since it cannot distinguish them directly. Therefore, the development of a new dosimeter to measure radiation in real time has been required. In order to compensate the weak points, the dosimeter, combining optic-fiber and scintillator, has a high spatial resolution since it makes the volume of scintillator in sensor part small. In addition, dose measurement is exact and easy, as measuring the amount of scintillation in proportion to dose. Also, it is not affected by electromagnetic wave and can measure dose in real time by using optic fiber, which is optical transfer medium. In this study, dosimeter has been created, combining oxide scintillator and plastic optical fiber and connecting GaP photodiode. After finding Calculated results, from MCNPX code and current changes of the photodiode which is measured by distance between sensors, changes of

normalized distribution with dose rate of ionization chamber, which is measured at the same point, and transmutation constant which is converted by linearity, resulting from current and dose rate, the researchers analyzed the possibility of dosimeter by comparing dose rate. Several types of scintillators such as BGO( $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ), CWO( $\text{CdWO}_4$ ), and LYSO( $\text{Lu}_5\text{Y}_2\text{SiO}_5$ ) were used in the sensor part of the dosimeter. Also,  $^{60}\text{Co}$  source of 5400Ci, obtained from the radiation room of applied radiological science research institute in Jeju National University, was used. The error between dose rate of transmutation constant and that of ionization chamber was 0.4~50% in BGO scintillator, which was not almost right; the error in CWO and LYSO was within 8% in high dose field with a few errors in whole part. The results of normalized distribution in BGO scintillator showed high deviation with different aspects of change as measured at the point which distance between dose and sensor is 20cm. The results of normalized distribution in CWO and LYSO scintillators were similar to ionization chamber and aspect of normal distribution change of MCNPX code.

# I 서론

## 1. 연구의 필요성

방사선의 의료, 산업적 응용분야가 확대됨에 따라 검출 및 계측을 가능하게 하는 첨단 방사선 센서 제작 및 계측법들이 발전하고 있다. 일반적으로 방사선 흡수선량 측정에 가장 많이 사용되고 있는 이온 전리함의 경우 실시간 측정이 가능하나 계측기의 부피 및 구성 재질로 인한 낮은 공간 분해능, 복잡한 보정과정 등의 문제점을 가지고 있다. 그리고 국내에서의 생산이 불가능하여 외국에서 들여오고 있어 고장 발생 시 외국의 제작회사에 보내 수리해야 하기 때문에 많은 시간이 소요된다. 또한 의료 분야에서 사용되는 MOSFET(Metal Oxide Field Effect semiconductor Transistor) 선량계는 센서부분이 작아 공간분해능이 좋고 많은 지점의 선량을 동시에 측정가능하다. 그러나 선량계의 유효 수명이 있어 소모성이기 때문에 고선량장에서의 측정에서는 비경제적이다. Alanine 화학선량계는 온도와 습도에 대해 민감하지 않으며, 측정된 선량이 정확하고 낮은 편차( $\pm 2\%$ )를 보인다. 그러나 선량율과 에너지형태를 직접적으로 구분할 수가 없어 고가의 판독 장치로 판독을 해야 한다. 그렇기에 조사되는 방사선을 실시간으로 측정하기 위한 새로운 선량계의 개발이 절실히 요구되고 있다.

이러한 단점들을 보완하기 위해 섬광체를 이용한 광섬유 방사선량계에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 광섬유와 섬광체를 조합한 방사선량계의 센서부는 부피를 작게 할 수 있기 때문에 높은 공간분해능을 가지며, 선량에 비례하여 발생하는 섬광량을 계측함으로써 선량측정이 정확하고 용이하다. 또한 광 전달 매체인 광섬유를 사용함으로써 전자기파의 영향을 받지 않고 실시간으로 선량 측정이 가능하다. 그러나 광섬유의 단점인 일정 에너지 이상의 하전입자와 광섬유와의 직접적인 작용으로 발생하는 체렌코프 빛은 가시광선 영역에서 섬광체의 섬광빛과 유사한 파장을 방출하여 섬광빛 계측에 방해요소로 작용하게 되기 때문에 dummy 광섬유를 사용한 감법을 이용하여 제거하는 방법을 사용하고 있다.

이 연구에서는 산화물 섬광체와 플라스틱 광섬유를 결합하고 GaP photodiode를

연결한 방사선량계 모델을 제작하고 선량계로서의 가능성을 분석하였다. 방사선량계 센서부는 BGO 섬광체, CWO 섬광체, LYSO 섬광체를 사용하였으며, 약 5400Ci  $^{60}\text{Co}$  감마선원과 센서간의 거리에 따라 측정된 GaP photodiode 전류 변화와 MCNP code로 계산된 결과와 비교 분석하여 선량계 모델 가능성을 모색하였다. 그리고 선량계 모델로 측정한 GaP photodiode 전류와 같은 지점에 전리함을 같이 측정하여 선량율을 비교 분석하였다. GaP photodiode 전류와 선량율과의 비교는 선원과 센서간 거리에 따른 정규화 분포 변화, 선형성, 그리고 선형성에 의해 변환된 변환상수를 구하고 방사선량계로의 가능성을 분석하였다.

이 연구를 수행한 장소는 제주대학교 연구 시설 중 하나인 방사선응용과학연구소에서 2004년 2월 19일 10,807Ci  $^{60}\text{Co}$  선원을 가지고 있는 방사선 조사실에서 실험을 하였다. 이 연구를 수행한 기간은 2009년 10월 ~ 2010년 2월로 선원의 방사능은 대략 5400Ci이다.

## 2. 국내외 연구동향

섬광체와 광섬유를 활용한 방사선량계 개발은 여러 형태로 이루어지고 있다. 섬광체와 광섬유를 결합한 방법과 광섬유섬광체를 사용한 방법이 있다. 섬광체와 광섬유를 결합한 방법에는 무기섬광체와 유기섬광체를 사용하는 방법으로 또 나뉜다. 섬광체와 광섬유를 결합하는 경우 섬광체가 센서 역할을 하고 광섬유는 섬광체에서 발생한 광을 전달하는 기능을 하고, 광섬유섬광체를 사용하는 경우 광섬유가 방사선과 반응하여 섬광을 발생함과 동시에 광을 전달하는 기능을 한다. 이 연구에서는 섬광체와 광섬유를 결합한 방법을 사용하였다. 이 연구와 같이 섬광체와 광섬유를 결합한 센서 연구들을 다음과 같이 나누어 기술하였다.

### (1) 유기섬광체와 광섬유를 결합한 방사선 센서

고 에너지 광자선 계측용 2차원 광섬유 방사선 센서의 제작 및 특성분석(장경원 외 5명, 2007)에서는 섬광체에서 발생된 광신호를 25개의 포토다이오드로 이루어진 포토다이오드(S1336-18BK, Hamamatsu) 어레이로 측정하는 시스템을 제

작하였다. Fig. 1과 같이 섬광체는 지름이 1mm, 길이가 10mm인 원통형태의 유기섬광체(BCF-20, Bicron)를 사용하였으며 유기 섬광체와 플라스틱 광섬유를 광학 접착제(DP100-Plus, 3M)를 사용하여 결합하고, 섬광체에서 발생되어 외부로 손실되는 빛을 최소화하기 위해 액체상태의 반사체( $\text{TiO}_2$ )로 섬광체 주위를 도포하였다. 또한 섬광체에서 발생하는 섬광빛은 미세하기 때문에 포토다이오드 어레이의 각 단마다 별도로 증폭기를 제작하여 포토다이오드에서 발생하는 전기신호를 증폭하였다. 광자선 선원으로는 의료용 선형가속기(Clinac 2100CD, Varian)에서 발생하는  $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ ,  $10\text{cm} \times 10\text{cm}$  조사야의 6, 15MV 에너지를 가지는 광자선을 사용하였다.

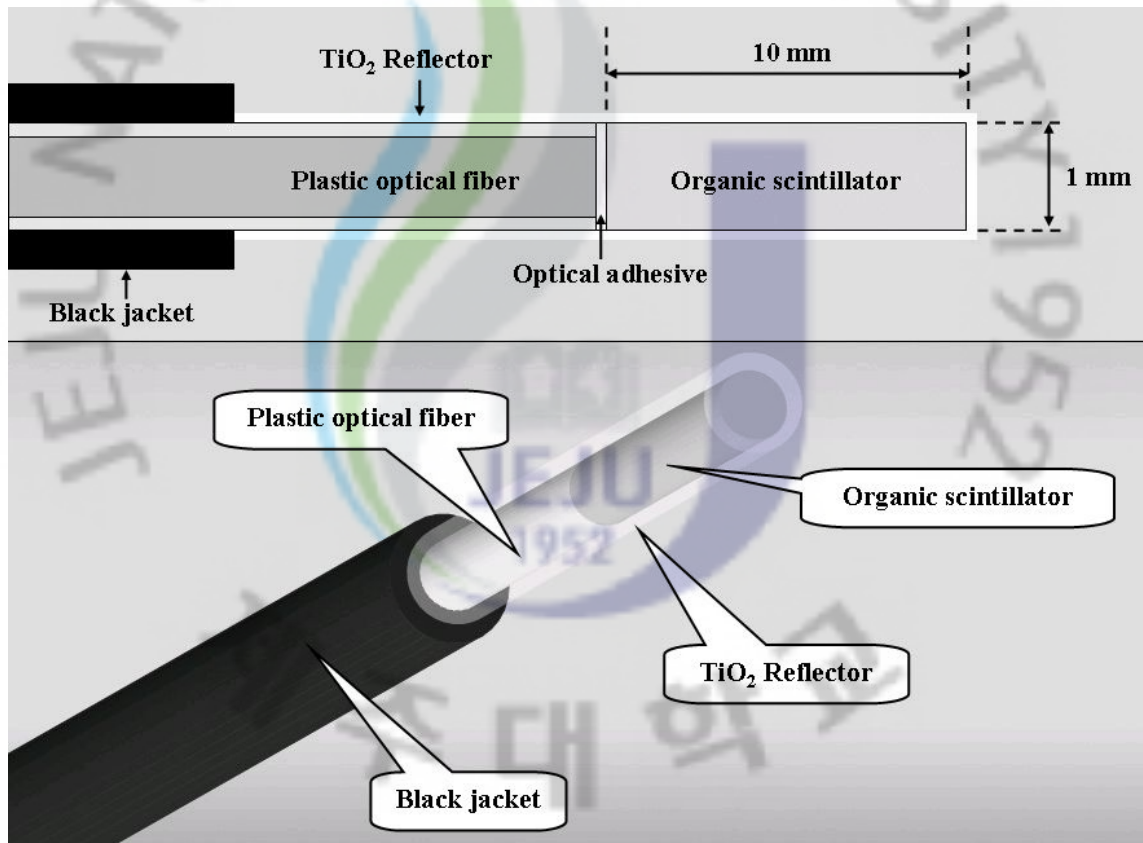


Fig. 1 The fiber-optic radiation sensor using the organic scintillator and plastic optical fiber.

그리고 붕소중성자포획치료(Boron Neutron Capture Therapy, BNCT) 조사를 위한 광섬유-섬광체의 중성자 측정기 개발(Masayori Ishikawa 외 8명, 2005)에서는 BNCT 방사 분야에서 폭넓은 범위의 열중성자의 실시간 측정과 동시 측정의 문제를 해결하기 위해 Fig. 2와 같이 소형 플라스틱 섬광체(BC490, Bicron Ltd.)와 플라스틱 광섬유(Mitsubishi Rayon MH4001, 1mm diameter optical fiber with 2.2mm diameter polyethylene shielding)과 PMT(H7155), 프리앰프, 판별기와 카운터로 구성되는 계측기를 개발하였다. 이는 플라스틱 광섬유 끝단에 플라스틱 섬광체가 연결되어 그 위에 LiF 파우더를 씌우고, 섬광체로부터 나오는 광신호는 광섬유를 통해 30ns TTL 펄스로 변환되고, 펄스 개수는 USB를 통해 컴퓨터로 보내진다. 이 연구에서는 JAERI(Japan Atomic Energy Research Institute)의 JRR-4 Medical 방사 설비를 이용하여 수행되었다.

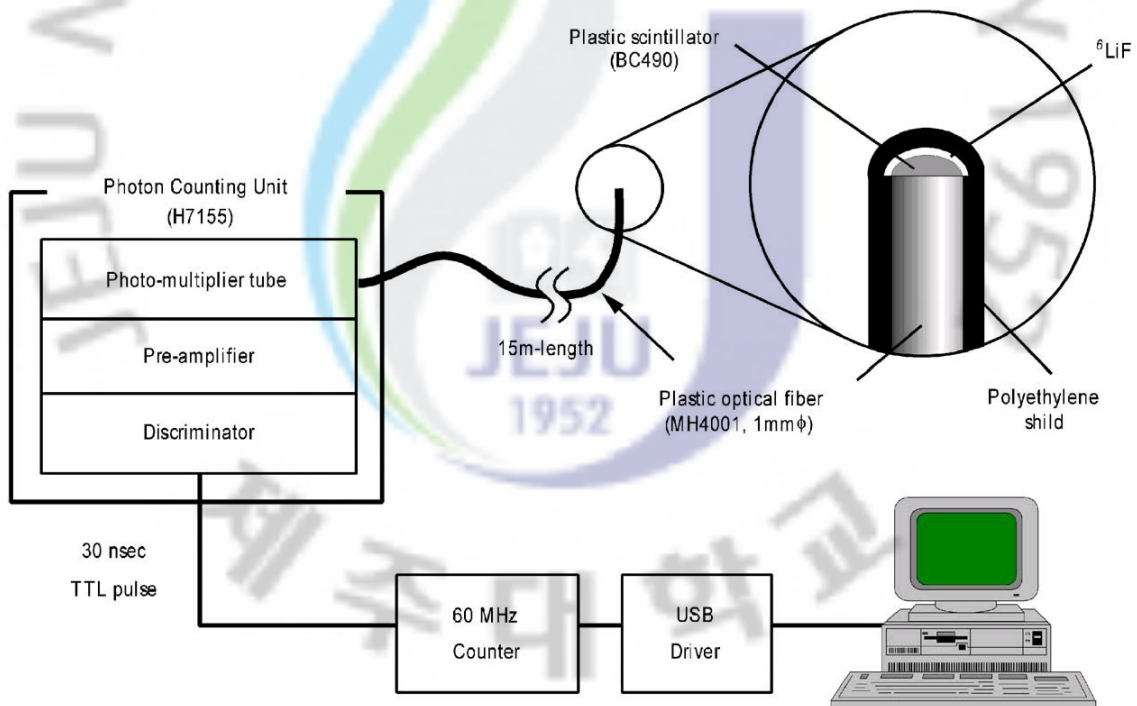


Fig. 2 Schematic diagram of SOF(Scintillator with Optical Fiber) detector system



플라스틱 섬광 선량 측정과 방사선치료에서의 응용(A.S.Beddar, 2007)에서는 Fig. 3과 같이 플라스틱 섬광체(BC-400, Bicron Corporation, Newbury, OH, USA, 1mm diameter and 4mm length)와 pure 실리카(SiO<sub>2</sub>) 광섬유를 결합하고 PMT(Hamamatsu R1635, Hamamatsu Corp., Bridgewater, NJ, USA)를 연결한 센서를 구성하였으며, Fig. 4과 같이 광섬유에서 발생하는 체렌코프 빛을 감범하기 위해 하나의 광섬유를 추가하였다(A.S.Beddar 외 3명 2001). 섬광체는 빛 차단을 위해 탄소로 코팅하고, 알루미늄 반사체로 광 수집 능력을 향상시켰다. 이 섬광체 검출기의 특성은 재현성, 에너지 독립성, 물 증가, 선량의 선형성의 장점이 있다. 그리고 이온화 챔버, 방사선 필름과 실리콘 다이오드를 포함하여 가장 좋은 공간분해능을 가진다. 이 실험에서는 의학용 선형가속기에서 제공하는 6MV photon beam을 선원으로 하여 PTW 이온화 챔버와 Si 다이오드와 섬광체 검출기를 비교하는 실험을 하였다.

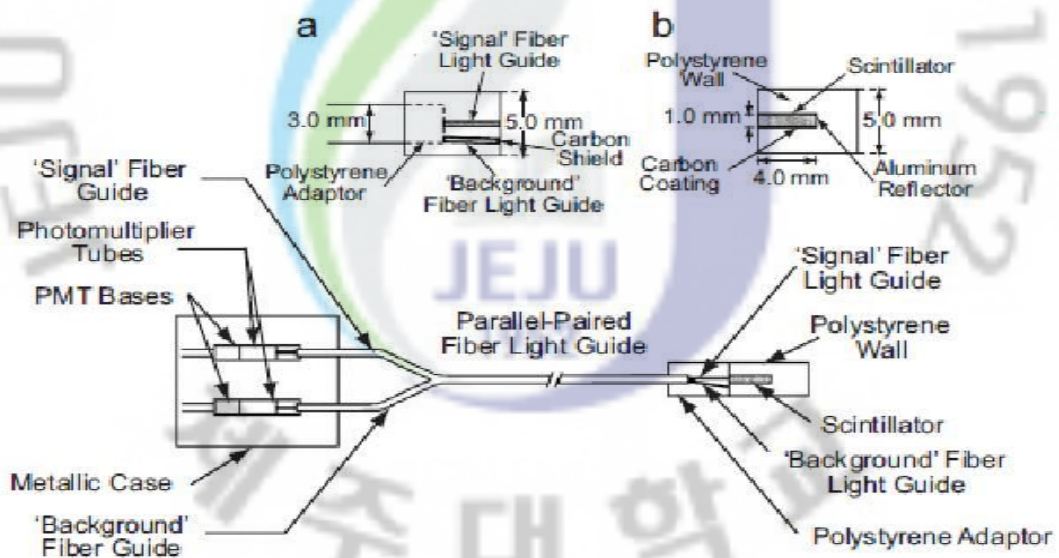


Fig. 3 Diagram of the plastic scintillation detector system and longitudinal cross-section of (a) the proximal end of the fiber light guide and (b) the polystyrene probe containing the scintillator

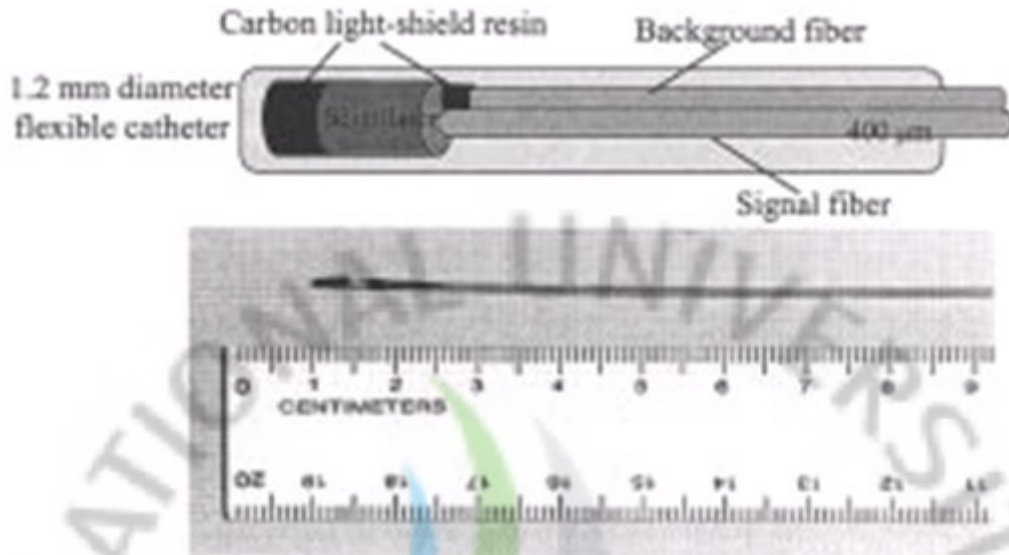


Fig. 4 A schematic diagram and a scaled photograph of the proximal end of the Scintillator-Fiberoptic-PMT detector system.

(2) 무기섬광체와 광섬유를 결합한 방사선 센서

삼중수소 검출용 광섬유 방사선 센서의 제작 및 특성분석(장경원 외 7명, 2009)에서는 광섬유 번들, 무기섬광체, PMT로 구성된 광섬유 방사선 센서를 제작하였다. 삼중수소 검출용 광섬유 방사선 센서를 제작하기 위해 40개의 직경 1mm 광섬유를 번들 형태로 제작하여 섬광량을 측정하였다. Fig. 5와 같이 광섬유의 끝단에 광학용 에폭시와 각각의 무기섬광체를 부피비 1:1 비율로 혼합하여 0.1mm의 두께로 제작하여 결합하였다. 사용된 무기 섬광체로는  $Gd_2O_2S:Tb$ ,  $Y_3Al_5O_{12}:Ce$ ,  $CsI:Tl$ 이 사용되었다. 그리고 삼중수소에서 발생하는 베타선의 에너지가 미약한 것을 감안하여 보호층 없이 센서팁(10mm diameter)을 제작하였다. 이는 제작한 센서로 삼중수소 선원으로부터 거리에 따른 섬광량을 측정하고 선원의 방사능에 세기에 따른 섬광량을 측정하여 표면 방사능 모니터의 결과와 비교, 분석하였다.

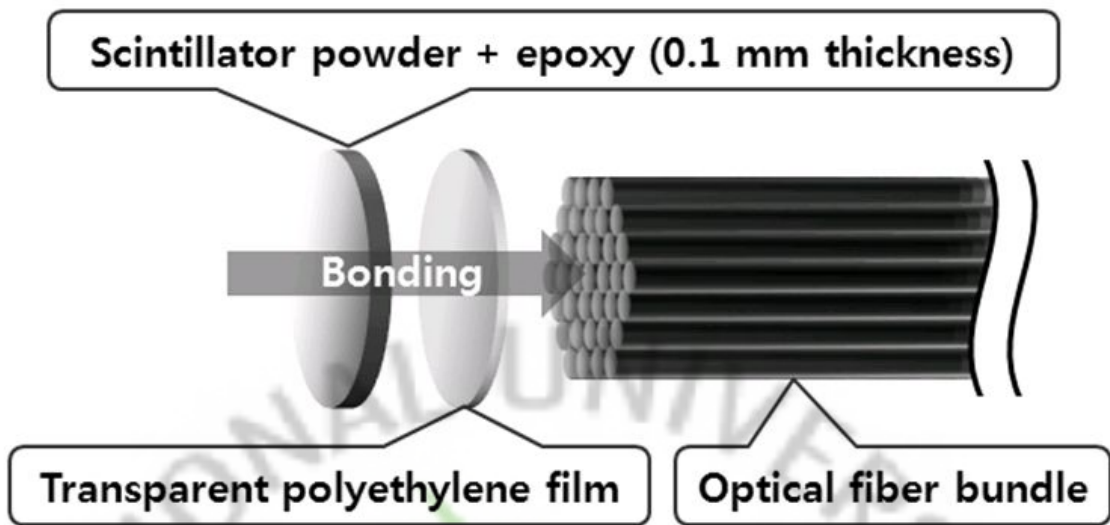


Fig. 5 Composition of sensor tip to detect beta rays.

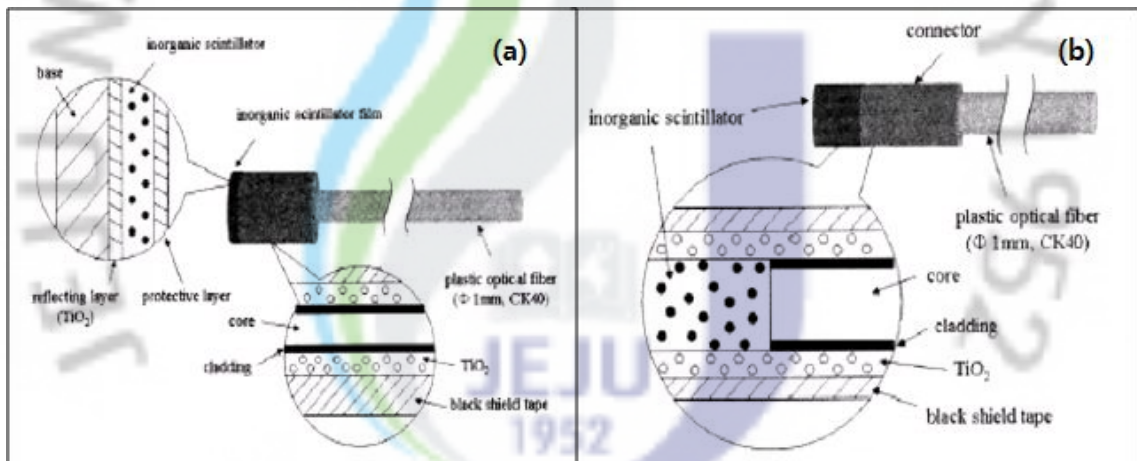


Fig. 6 Radiation sensor with (a) film type and (b) powder types using inorganic scintillator

그리고 무기 섬광체를 이용한 플라스틱 광섬유 방사선 센서부 제작 및 특성평가(황영복 외 4명, 2005)에서는 필름형태와 분말형태의 무기섬광체로 광섬유 방사선센서를 제작하였다. 필름형태는 지지층, 반사층, 무기섬광체, 보호층의 다층 구조로 이루어져 있으며 지지체는 PET(Polyethylene terephthalate), 반사층은 TiO<sub>2</sub>를 사용하였다. 섬광빛의 계측 효율을 높이기 위해 Bicon사의 반사테이프,

BC-642를 원통 형태의 플라스틱 커넥터에 균등한 두께로 도포하였으며 black shield 테이프를 사용하여 엑스선에 의해 발생된 섬광빛에 대한 외부 가시광의 간섭을 최소화하였다. 분말형태는 중심부에 원형의 구멍이 뚫린 원통형태의 PMMA (Poly-Metal Methacrylate) 커넥터를 사용하였고 필름형태와 마찬가지로 TiO<sub>2</sub> 반사체와 black shield 테이프를 사용하였다. 개략도는 Fig. 6에서 보여진다. 이 연구에서는 무기섬광체와 플라스틱 광섬유를 이용하여 제작한 방사선 센서의 성능을 평가하기 위해서 엑스선 발생 장치와 일반적으로 비과과 검사장비에서 사용하는 Ir-192를 선원으로 사용하였다. 실험 결과 엑스선과 감마선에 대해 민감한 센서물질을 결정할 수 있는 결과를 얻었다.



## II 선량계 모형 구성 및 제작

이 연구의 선량계 모형 구성은 Fig. 7이며, 구성 장치는 크게 방사선을 감지하는 센서부인 섬광체와 방사선이 섬광체에 입사하여 발생하는 광을 전달하는 광섬유, 그리고 GaP photodiode로 구성되어진다.

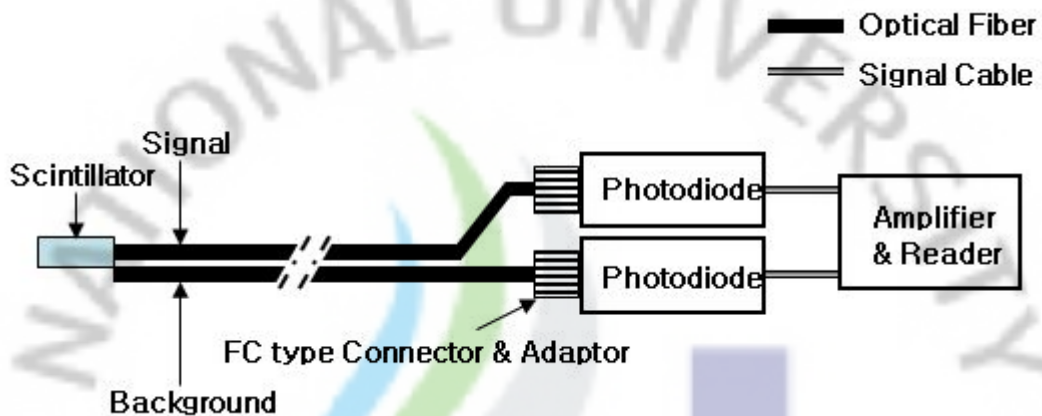


Fig. 7 Schematic of the fiber-optic dosimeter system

### 1. 섬광체 sensor, 섬광체 case, 플라스틱 광섬유, Photodiode의 구성

#### (1) 섬광체 sensor의 구성

제작한 센서 모형의 센서부를 구성하는 물질 중의 섬광체 센서부는 BGO( $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ), CWO( $\text{CdWO}_4$ ), LYSO( $\text{Lu}_5\text{Y}_2\text{SiO}_5$ ) 3가지의 무기섬광체를 사용하였고 크기는 지름 5mm, 길이 10mm로 모든 섬광체가 동일한 크기의 원통형이다.

BGO 섬광체는 Institute for Single Crystals(ISC)에서 구입하였다. BGO 섬광체는 원자번호(83)와 밀도( $7.13\text{g}/\text{cm}^3$ )가 다른 섬광체에 비해 매우 커서 감마선의 검출효율이 우수하다. 그러나 발광량[NaI(Tl)의 10~20%]이 좋지 않아 에너지분해능이 떨어지는 단점이 있다. 그러나 불순물이 필요 없고 조해성이 없어

Housing 등이 필요 없으며 신호 출력의 지연이 없기 때문에 신속하게 감응해야 하는 X선 CT 등에 사용되고 있으며 현재 핵의학 분야에서 사용되고 있는 PET 검출기로 활용되고 있다.

CWO 섬광체는 Institute for Single Crystals(ISC)에서 구입하였다. CWO는 1950년대부터 섬광체로 잘 알려져 있었지만 본격적으로 섬광체의 특성 연구를 시작한지는 1990년대이다. CWO의 발광량은 NaI(Tl)의 30~40%이고 최대방출파장은 가시광선 영역인 470nm이다. 밀도와 실효원자번호가 높아서 감마선 측정에 매우 좋다. 그러나 1.1 $\mu$ s(40%)와 14.5 $\mu$ s(60%)의 두 개가 혼합되어 나타나는 붕괴 시간이 상대적으로 느리다는 게 단점이다.

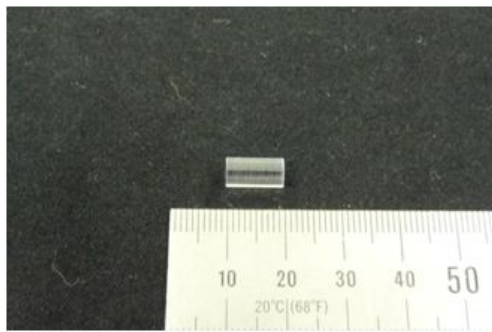
LYSO 섬광체는 Omega Piezo Technologies, Inc.,에서 구입하였다. 밀도는 7.3g/cm<sup>3</sup>이며 발광량은 NaI(Tl)의 75%이고 최대방출파장은 가시광선 영역인 428nm이고 굴절율은 1.82이다. 방사선 내성은 10<sup>4</sup>Gy 이상으로 CWO와 BGO 섬광체 등 다른 섬광체보다 우수하나 가격이 상대적으로 비싸다는 단점이 있다.

각 섬광체는 섬광체 안에서 발생된 광의 손실을 막기 위해 반사체(Teflon tape)로 감싸고 외부의 광을 차단하기 위해 제작한 csae의 connector 부분에 삽입하였다.

Table 1에서는 이 연구에서 사용한 각 섬광체의 특징들을 비교하였고 Fig. 8에서는 센서 제작 과정을 설명하였다.

**Table 1 Characteristics of scintillators**

무기섬광체	BGO(Bi <sub>4</sub> Ge <sub>3</sub> O <sub>12</sub> )	CWO(CdWO <sub>4</sub> )	LYSO(Lu <sub>5</sub> Y <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub> )
밀도(g/cm <sup>3</sup> )	7.13	7.9	7.3
최대파장(nm)	480	470	428
발광량 (% of NaI:Tl)	10~20	30~40	75
굴절율	2.15	2.3	1.82
방사선 내성	10 <sup>2~3</sup>	10 <sup>2</sup>	>10 <sup>4</sup>



➤  $\Phi 5\text{mm} \times 10\text{mm}$ 의 섬광체를 알루미늄 파우더로 연마함



➤ 섬광체를 테플론 테이프(Teflon tape)로 광섬유와 접촉하는 면을 제외하고 감쌈



➤ 섬광체를 케이스의 connector 부분에 삽입하고, 케이스의 adapter 부분에 광섬유를 연결  
 ➤ Connector 부분과 adapter 부분을 연결  
 ➤ Adapter 부분의 나사를 조임

Fig. 8 Process of sensor manufacture

## (2) 섬광체 case의 구성

방사선량계 센서 모형은 소형 섬광체를 광섬유의 한쪽 끝에 집합하여 여기서 발생한 광을 광섬유를 통해서 GaP photodiode로 전송하여 판독하는 원리이다. 여기서 섬광체와 광섬유의 연결은 플라스틱 재질과 알루미늄 재질 2가지로 센서 케이스를 제작하여 결합하였다. 이 센서 케이스는 암수 나사식으로 조여서 섬광체와 광섬유를 압착 접촉시키는 방법으로 connector와 adapter 2가지 부분으로

나뉜다. Connector 부분은 섬광체가 삽입되는 부분이고 adapter 부분은 광섬유와 연결하는 부분이다. Adapter 부분에 양 방향으로 나사홈 구멍이 있어서 그 구멍으로 플라스틱 나사를 조여서 광섬유와 케이스를 연결하는 동시에 고정될 수 있도록 하였다. Connector의 외경은 7.5mm이고 내경은 5.5mm이며 길이는 11mm, 두께는 1mm이다. 그리고 adapter의 외경은 9.5mm이며 내경은 광섬유와 연결하는 방향으로 3.5mm이고 반대편의 내경은 7.5mm이다. 이렇게 하여 섬광체와 광섬유의 접촉의 일관성을 유지하고 섬광체를 쉽게 교체 할 수 있게 하였다. Fig. 9에 센서 케이스 개략도를 나타내었다.

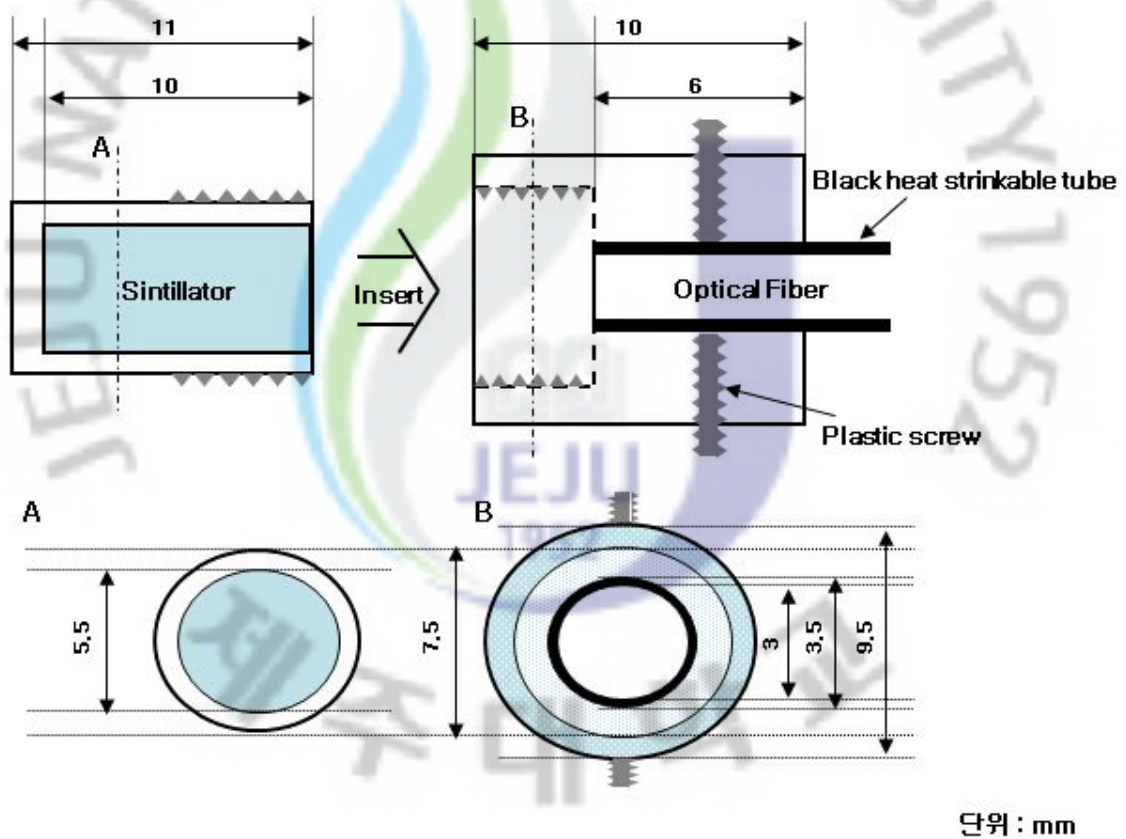


Fig. 9 Sensor case production combining optic fiber and scintillator



### (3) 플라스틱 광섬유의 구성

플라스틱 광섬유는 Toray Industries에서 제조한 직경 3 mm(PGR-FB3000) 광섬유를 10m 길이로 잘라서 사용하였다. 광섬유 core의 굴절률은 1.49, cladding의 굴절률은 1.41이고, 광전송 손실은 400~600nm 빛에 파장에 대해 0.2db/m 이하이다. 소재는 범용수지인 PMMA(Polymethyl Methacrylate)를 원재료로 하여 SI(Step Index)형으로 만들어진 전자재료용 소재이다. 그리고 이 광섬유는 외부에서 들어오는 광을 차단하기 위해서 검은색 열 수축튜브로 피복하였다. 이 광섬유의 선단과 후단의 면은 polishing film를 이용하여 연마하였는데 polishing film은 입자 크기 5 $\mu$ m→3 $\mu$ m→1 $\mu$ m 순서로 3과정을 걸쳐서 연마하였고 최종적으로는 0.05  $\mu$ m 입자 크기의 알루미나 파우더로 연마하였다. 그리고 광섬유의 연마되는 면을 평평하게 하기 위해서 자체적으로 polishing pad를 제작하여 연마하였다. Fig. 10과 Table 2에서 플라스틱 광섬유의 사진과 특징을 나타내었다.



Fig. 10 Plastic optical fiber (PGR-FB3000)

Table 2 Characteristics of plastic optical fiber (PGR-FB3000)

Parameter		Performance
Core	Material	Polymethyl Methacrylate (PMMA)
	Reflective index	1.49
Cladding	Material	Fluorinated Polymer
	Reflective index	1.41
Refractive index profile		Step index
Angle of incidence		60°
Temperature range of use		-55~70℃

#### (4) Photodiode의 구성

Photodiode는 Thorlabs, Inc.,에서 구입한 current-type에 제품명이 SM05PD7A이다. 이것은 스펙트럼 응답파장이 150-550nm 을 가지며 5V전압에 대하여 fall time이 140ns, rise time이 1ns이며, 유효면적이 4.8mm<sup>2</sup>인 Schottky 우물형 GaP-Photodiode이다. 이 Photodiode의 크기는 직경 약 1.3cm이며 높이는 1.4cm로 소형으로 제작되어 이동성이 좋으며 공간적 제약이 덜하다. 그리고 온도에 변화에 따른 오차는 존재하지만 그 오차는 1% 미만으로 매우 낮다. 그리고 광섬유와 photodiode를 결합하기 위해서, 광섬유의 끝에 FC형 connector를 부착하였고 photodiode에는 FC형 adapter를 부착하여 서로 연결하였다. 광섬유의 후단과 GaP photodiode 광 입사면 사이의 간격을 최대한 가까이 하여 집광되는 비율을 높게 하기 위해 광섬유의 끝을 FC형 connector 밖으로 5mm 도출시켰다. 출력되는 전류를 증폭하고 표시하는 장치로는 Thorlabs, Inc., 에서 구입한 PDA200C 제품으로 증폭기와 일체형 제품이다. 또한 측정 전류 영역은 10pA~10mA이고 ±10V 사이의 전압을 photodiode에 공급 할 수 있으며, 여기에 사용된 photodiode에는 +5V 전압을 공급한다. Fig. 11에서는 광섬유와 GaP photodiode의 연결 방법을 보여준다.



Fig. 11 GaP photodiode (Thorlabs, Inc.,)

## 2. 선량계 모형 평가 실험방법

이 연구의 실험장치의 구성은 Fig. 7에 나타냈으며, 크게 섬광체 센서부분, 신호 전송용 광섬유, 전류형 GaP photodiode로 구성된다. 센서 부분은 BGO( $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ), CWO( $\text{CdWO}_4$ ), LYSO( $\text{Lu}_5\text{Y}_2\text{SiO}_5$ ) 3가지의 무기섬광체를 사용하였고 크기는 지름 5mm, 길이 10mm로 모든 섬광체가 동일한 크기의 원통형이다. 각 섬광체는 섬광체 안에서 발생된 광의 손실을 막기 위해 반사체(Teflon tape)로 감싸고 외부의 광을 차단하기 위해 제작한 case의 connector 부분에 삽입하였다. 직경 3mm 크기의 플라스틱 광섬유는 10m 길이로 자르고, 섬광체와 GaP photodiode에 접합하는 양 끝 단면은 polishing film과 알루미늄 파우더로 연마하였다. 그리고 광섬유 끝 단면을 case의 adapter에 연결하여 섬광체가 들어있는 connector 부분과 결합하고, 다른 끝 단면은 FC형 connector로 연결하여 전류형 GaP photodiode에 연결하였다. 연결된 GaP photodiode는 출력되는 전류를 증폭하고 표시하는 장치인 PDA200C로 연결된다.

이 연구에서의 방사선량계 모형을 실험한 장소는 제주대학교 연구 시설 중에 하나인 방사선응용과학연구소에서 2004년 2월 19일 기준으로  $10,807\text{Ci } ^{60}\text{Co}$  방사선 조사실에서 실험을 하였다. 이 실험을 한 기간은 2009년 10월 ~ 2010년 2월로 선원의 방사능은 약 5400Ci이다. 방사선량계의 적합성을 알아보기 위해, 선원과 센서간의 거리에 따라 GaP photodiode의 전류를 측정하고 MCNP(Monte carlo N-Particle) code로 계산하여 센서부인 섬광체의 흡수 에너지를 구하였다. 측정된 GaP photodiode 전류와 MCNP code로 계산된 섬광체의 흡수 에너지를 선원과 센서간 거리에 따른 정규화 분포 변화를 비교분석하였다. 그리고 섬광체 센서로 측정한 photodiode 전류와 같은 지점에서 전리함을 동시에 측정하여 측정한 선량율과 비교하였다. GaP photodiode 전류와 선량율과의 비교는 선원과 센서간 거리에 따른 정규화 분포 변화, 선형성, 그리고 선형성에 의해 변환된 변환상수를 구하고 방사선량계의 가능성을 분석하였다.

(1) 실험방법

제주대학교 방사선응용연구소의 조사시설의  $^{60}\text{Co}$  선원으로부터 20, 25, 30, 35, 40, 60, 80, 100, 120, 150, 200cm의 거리에서 1분간 3회 반복 측정하여 평균 전류 (nA)를 구하였다. 일반적으로 제주대학교 조사 시설에서 연구의 목적으로 생물체에 방사선조사를 하는 높이와 방향을 선택하였는데, 측정 높이는 조사대 지면에서 35cm 높이이고 조사방향은 C방향(Fig. 12)으로 하였다. 그리고 방사선과의 직접적인 작용으로 섬광체가 아닌 광섬유에서 자체적으로 발생하는 체렌코프가 발생하게 되는데, 체렌코프 빛을 제거하기 위해 섬광체가 없는 10m 길이의 광섬유를 별도 제작하고 측정지점마다 측정하여 감하였고, 섬광체 안에서 발생하는 실제 photodiode의 전류를 계산하였다. Fig. 13에서는 조사실에서 실험한 사진을 나타내고 있다.

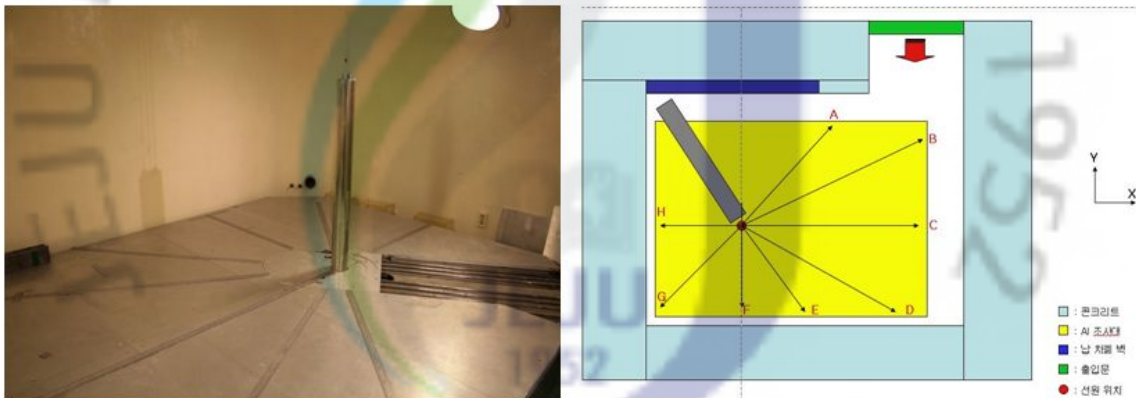


Fig. 12 Picture and schematic of 5400Ci  $^{60}\text{Co}$  irradiation chamber

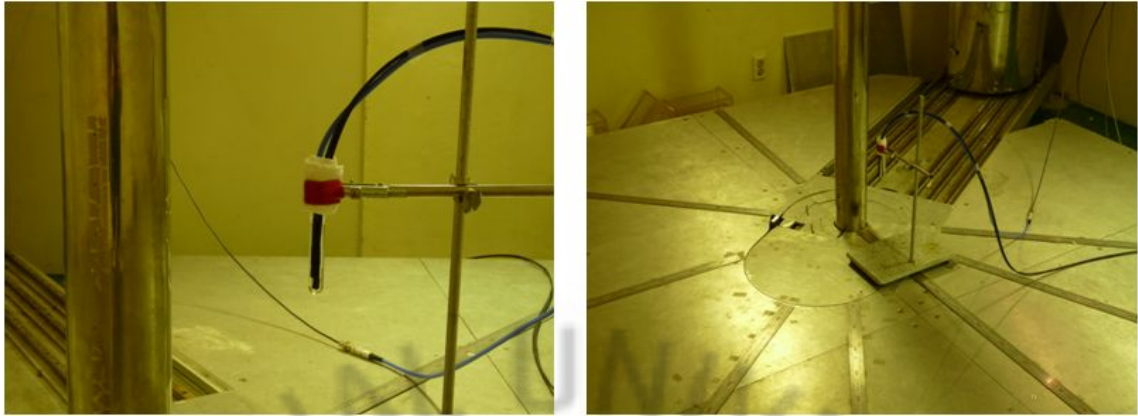


Fig. 13 Measurement of dosimeter using GaP photodiode in irradiation chamber

## (2) 전리함 측정방법

이 연구에서는 Farmer-type의 전리함으로 PTW Freiburg사가 제작한 전리체적이 0.6cc 인 자유공기 전리함을 사용하였다. 이 골무형 자유공기 전리함은 공기 등가물질을 전리함의 벽으로 사용함으로써 부피가 작아져 공간 분해능이 향상되었으며,  $^{60}\text{Co}$  선원의 선량 측정시에는 전자평형을 유지하기 위하여 전리함 벽두께를 보상하는 PMMA buildup cap을 사용한다. 그리고 전리함 내부로 공기가 자유롭게 드나들 수 있기 때문에 온도와 압력에 대한 보정이 필요하다. 전리함의 ion transit time은 180ms이고 99.5% 이온 수집 효율의 선량이 2.8Gy/s이다. 전리함에서 측정된 전하량은 전위계(Electrometer, Cardinal Health Co. model 35040)에서 확인할 수 있다. 측정지점은  $^{60}\text{Co}$  선원으로부터 20, 25, 30, 35, 40, 60, 80, 100, 120, 150, 200cm의 지점에서 측정하였다. 각 측정지점으로부터 1분간 3회 반복 측정 후 평균 전하량(nC)의 값을 얻고 방사선 에너지에 대한 보정 상수와 측정온도, 압력변화에 대한 공기밀도 보정계수를 곱하여 Air Kerma로 변환하였다. Fig. 14에서는 전리함의 센서 부분과 전위계를 나타내었다.



Fig. 14 Ionization chamber (PTW Freiburg) and Electrometer (Cardinal Health Co. model 35040)

### (3) MCNPX code 계산

몬테카를로법은 난수를 발생하여 확률적 방법으로 물리적, 수학적 시스템의 문제를 해결하는 방법이다. 원자로에서의 중성자 확산 계산, 원자로 차폐해석에 대한 문제들을 풀기 위하여 2차 세계 대전 중 Manhattan Project로부터 부각되기 시작하여, 종전 후 몬테카를로법이 여러 공학 분야에 적용되었고 Manhattan Project 동안 몬테카를로법을 연구한 미국의 Los Alamos 연구소에서 1977년에 MCNP를 처음으로 공개하였다. MCNP(Monte-Carlo N-Particle)는 범용목적, 연속에너지, 일반적 형태, 시간의존, 중성자-광자-전자를 동시에 다룰 수 있고 기하학적 구조가 복잡한 방사선 조사실이나 원자로 물리, 방사선 차폐 등에 적용할 수 있는 몬테카를로 시스템이다. 본 연구에서 사용한 MCNPX는 MCNP의 extend 하였다는 뜻으로 적용할 수 있는 입자수의 확장(34 particles), 연속에너지 확장, 여러 가지 Tally Card 계산 옵션 등이 확장 되었고, LANL에서 개발된 LA150 라이브러리를 사용하고 있다.

이 연구에서는 제주대학교 방사선응용과학연구소 조사실 설계도의 도면으로 MCNP code의 기하학적 구조를 설계하였다. 그 후 구성하고 있는 물질의 물성치를 입력하고  $^{60}\text{Co}$  방사선원의 에너지를 설정하였다. MCNP code에서는 섬광체 부피를 하나의 셀로 잡고 F6 tally를 사용하여 단위 질량당 흡수에너지(MeV/g)

를 계산하였다. 이 단위 질량당 흡수에너지는 각각의 섬광체의 질량을 곱해주어 에너지 단위로 변환하였다. 그리고 MCNP code의 결과값의 상대오차 값이 5% 이하가 되면 일반적으로 계산 결과가 정확성이 있는 것으로 판단한다. 여기서 신뢰도는 확실한 물리적 값과 비교한 결과가 아닌 오로지 MCNP code 자체 계산값의 정밀도에만 관련된다. 즉, MCNP code 계산값의 신뢰도를 높이기 위한 방법 중 하나로는 MCNP code 내의 History를 증가시키는 방법이 있다. 이러한 오차 범위를 만족시키기 위하여 History(N개, nps)를  $1 \times 10^7 \sim 5 \times 10^8$ 까지 변경하면서 4% 미만의 상대오차 값을 유지하였다. Fig. 15에서는 조사실의 MCNP code simulation Fig.을 나타내었다.

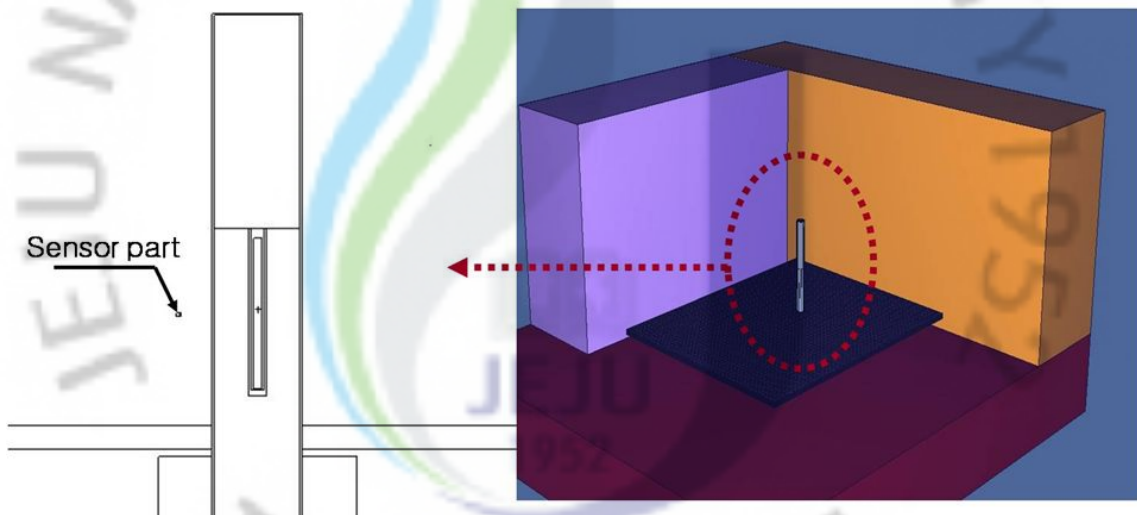


Fig. 15 Simulation depending on the MCNPX code

### III 결과 및 고찰

#### 1. 전리함으로 측정된 결과의 선형성 비교

이 연구에서는 3개의 섬광체 센서와 센서 부분의 플라스틱과 알루미늄 2개의 케이스로 측정된 GaP photodiode 전류와 전리함으로 측정된 선량율을 비교 분석하였다. GaP photodiode 전류와 선량율과의 비교는 선원과 각 센서의 거리별에 따른 전류와 선량율과의 선형성으로 방사선량계로의 가능성을 알아보았다.

Fig. 16에서는 BGO 섬광체에 Al case를 씌워 측정된 전류와 전리함으로 측정된 선량율과의 관계를 나타낸 그래프이고, Table 3은 측정된 전류의 결과값이다. 측정된 GaP photodiode 전류는 비교적 선형적으로 비례하지 않았고, 저선량 부분에서는 비슷한 전류 값이 나왔다.

Fig. 17에서는 BGO 섬광체에 PE case를 씌워 측정된 전류와 전리함으로 측정된 선량율과의 관계를 나타낸 그래프이고, Table 4는 측정된 전류의 결과값이다. 측정된 GaP photodiode 전류는 비교적 선형적으로 비례하지 않았고, 저선량 부분에서는 비슷한 전류 값이 나왔다.

Fig. 18에서는 CWO 섬광체에 Al case를 씌워 측정된 전류와 전리함으로 측정된 선량율과의 관계를 나타낸 그래프이고, Table 5는 측정된 전류의 결과값이다. 측정된 GaP photodiode 전류는 비교적 선형적으로 비례하지 않았다.

Fig. 19에서는 CWO 섬광체에 PE case를 씌워 측정된 전류와 전리함으로 측정된 선량율과의 관계를 나타낸 그래프이고, Table 6은 측정된 전류의 결과값이다. 측정된 GaP photodiode 전류는 선형적으로 일치하는 현상을 보였다.

Fig. 20에서는 LYSO 섬광체에 Al case를 씌워 측정된 전류와 전리함으로 측정된 선량율과의 관계를 나타낸 그래프이고, Table 7은 측정된 전류의 결과값이다. 측정된 GaP photodiode 전류는 선형적으로 일치하는 현상을 보였다.

Fig. 21에서는 LYSO 섬광체에 PE case를 씌워 측정된 전류와 전리함으로 측정된 선량율과의 관계를 나타낸 그래프이고, Table 8은 측정된 전류의 결과값이다. 측정된 GaP photodiode 전류는 선형적으로 거의 일치하는 현상을 보였다.



전반적으로, 섬광체 센서들로 측정된 전류와 전리함 선량율과의 관계에서 선량율이 커질수록 섬광체 센서들로 측정된 GaP photodiode 전류도 커졌으며, 측정된 전류는 LYSO 센서일 때 가장 높게 나타났으며 CWO 센서, BGO 센서 순으로 낮게 나타났다. 그리고 polyethylene case보다 aluminum case가 더 높게 측정되었다.

그리고 선형성으로 보았을 때 LYSO 섬광체와 CWO 섬광체 일 때 비교적 잘 일치하였지만 BGO 섬광체일 때 상당한 차이를 보였다. BGO 섬광체의 측정 전류는 다른 섬광체의 측정 전류보다 미약했고, 거리에 따라 측정된 전류 변화도 미비해서 구별할 수 없었다. 이는 BGO 섬광체가 다른 섬광체에 비해 발광량이 적기 때문일 것으로 여겨진다.



Table 3 Measurement result of BGO scintillator and Al case

BGO(Al)							
Distance (cm)	Measurement number of times						Net average (nA)
	1st(nA)		2nd(nA)		3rd(nA)		
	Sensor	Dummy	Sensor	Dummy	Sensor	Dummy	
20	0.58	0.14	0.58	0.14	0.57	0.14	0.44
25	0.43	0.12	0.44	0.12	0.43	0.12	0.31
30	0.33	0.11	0.33	0.11	0.32	0.11	0.22
35	0.26	0.10	0.26	0.10	0.26	0.10	0.16
40	0.22	0.10	0.22	0.10	0.22	0.10	0.12
60	0.13	0.08	0.13	0.08	0.13	0.08	0.05
80	0.09	0.05	0.09	0.05	0.09	0.05	0.04
100	0.07	0.03	0.07	0.03	0.07	0.03	0.04
120	0.05	0.02	0.05	0.02	0.05	0.02	0.03
150	0.04	0.01	0.04	0.01	0.04	0.01	0.03
200	0.03	0.01	0.03	0.01	0.03	0.01	0.02

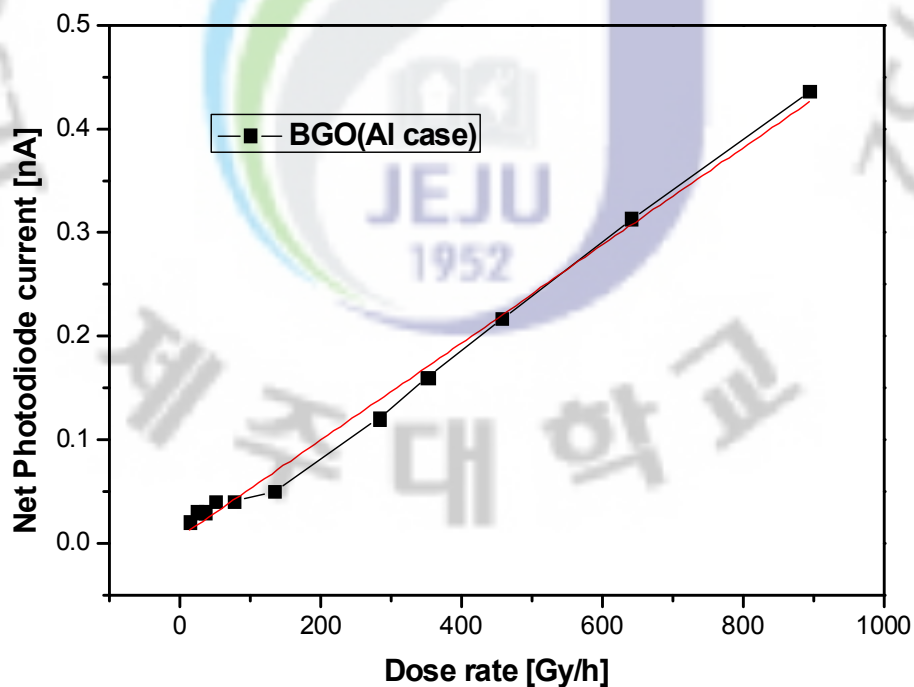


Fig. 16 Linearity of the BGO scintillator and Al case

Table 4 Measurement result of BGO scintillator and PE case

BGO(PE)							
Distance (cm)	Measurement number of times						Net average (nA)
	1st(nA)		2nd(nA)		3rd(nA)		
	Sensor	Dummy	Sensor	Dummy	Sensor	Dummy	
20	0.53	0.14	0.53	0.14	0.53	0.14	0.39
25	0.38	0.12	0.39	0.12	0.38	0.12	0.26
30	0.29	0.11	0.29	0.11	0.28	0.11	0.18
35	0.24	0.10	0.23	0.10	0.23	0.10	0.13
40	0.19	0.10	0.19	0.10	0.19	0.10	0.09
60	0.12	0.08	0.12	0.08	0.12	0.08	0.04
80	0.08	0.05	0.08	0.05	0.08	0.05	0.03
100	0.06	0.03	0.06	0.03	0.06	0.03	0.03
120	0.04	0.02	0.04	0.02	0.04	0.02	0.02
150	0.03	0.01	0.03	0.01	0.03	0.01	0.02
200	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01

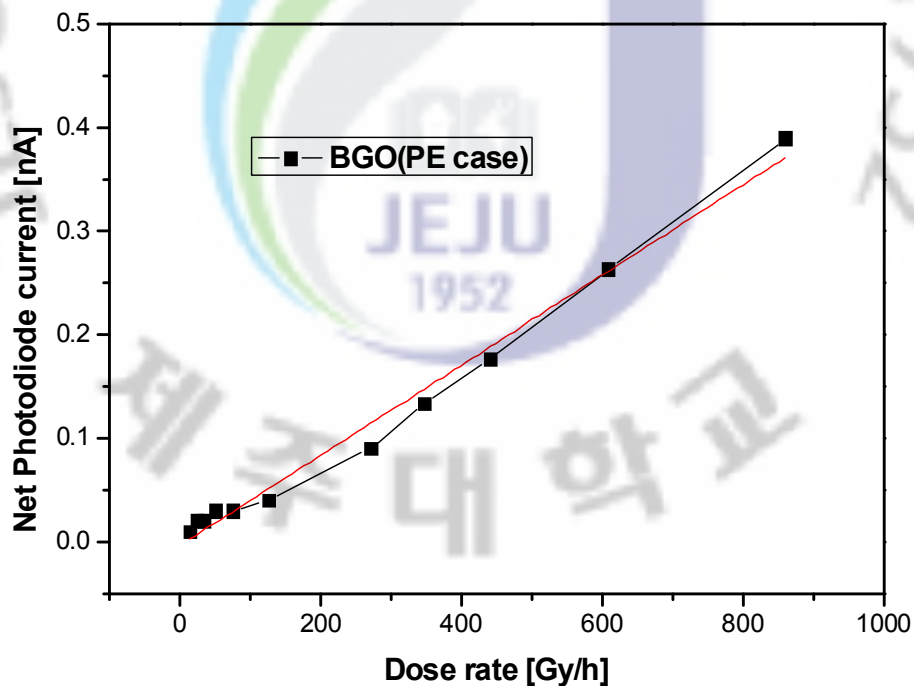


Fig. 17 Linearity of the BGO scintillator and PE case

Table 5 Measurement result of CWO scintillator and Al case

CWO(Al)							
Distance (cm)	Measurement number of times						Net average (nA)
	1st(nA)		2nd(nA)		3rd(nA)		
	Sensor	Dummy	Sensor	Dummy	Sensor	Dummy	
20	4.83	0.14	4.52	0.14	4.32	0.14	4.41
25	2.95	0.12	2.88	0.12	2.88	0.12	2.77
30	2.15	0.11	2.13	0.11	2.12	0.11	2.03
35	1.63	0.10	1.64	0.10	1.63	0.10	1.54
40	1.31	0.10	1.31	0.10	1.31	0.10	1.23
60	0.66	0.08	0.66	0.08	0.65	0.08	0.60
80	0.40	0.05	0.40	0.05	0.39	0.05	0.35
100	0.27	0.03	0.26	0.03	0.26	0.03	0.22
120	0.19	0.02	0.19	0.02	0.19	0.02	0.16
150	0.13	0.01	0.13	0.01	0.13	0.01	0.11
200	0.08	0.01	0.08	0.01	0.08	0.01	0.06

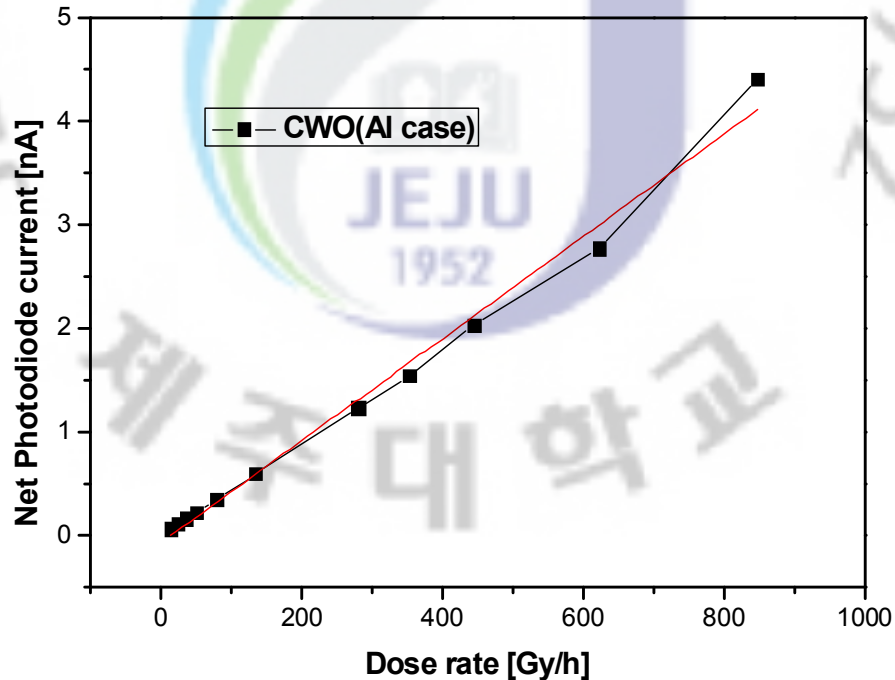


Fig. 18 Linearity of the CWO scintillator and Al case

Table 6 Measurement result of CWO scintillator and PE case

Distance (cm)	CWO(PE)						Net average (nA)
	Measurement number of times						
	1st(nA)		2nd(nA)		3rd(nA)		
	Sensor	Dummy	Sensor	Dummy	Sensor	Dummy	
20	2.80	0.14	2.83	0.14	2.76	0.14	2.66
25	2.05	0.12	2.04	0.12	2.06	0.12	1.93
30	1.56	0.11	1.52	0.11	1.51	0.11	1.42
35	1.23	0.10	1.20	0.10	1.21	0.10	1.11
40	0.97	0.10	0.97	0.10	0.98	0.10	0.87
60	0.52	0.08	0.52	0.08	0.52	0.08	0.44
80	0.32	0.05	0.33	0.05	0.33	0.05	0.28
100	0.21	0.03	0.22	0.03	0.22	0.03	0.19
120	0.16	0.02	0.16	0.02	0.16	0.02	0.14
150	0.11	0.01	0.11	0.01	0.11	0.01	0.10
200	0.07	0.01	0.07	0.01	0.07	0.01	0.06

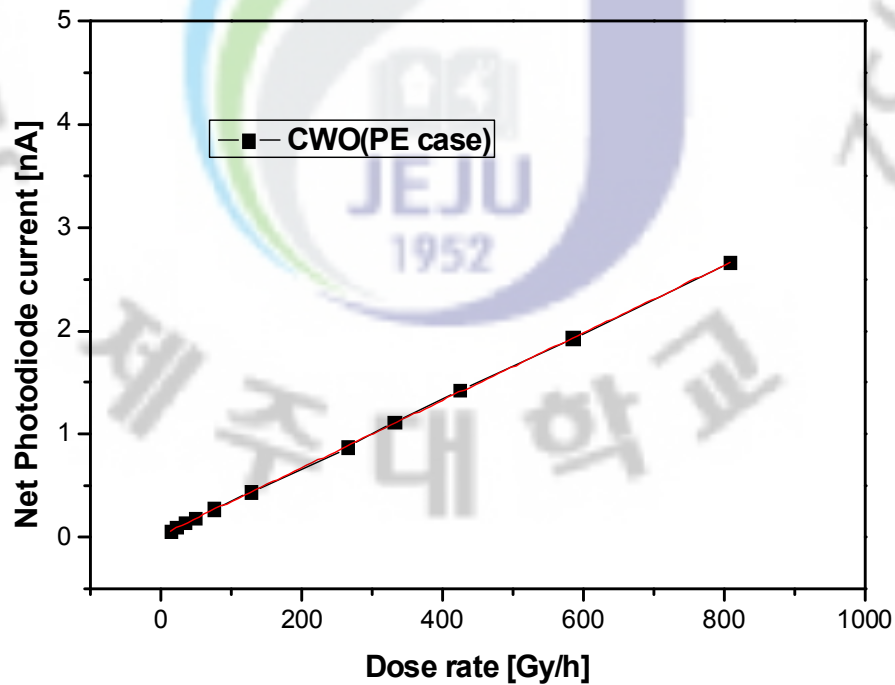


Fig. 19 Linearity of the CWO scintillator and PE case

Table 7 Measurement result of LYSO scintillator and Al case

LYSO(Al)							
Distance (cm)	Measurement number of times						Net average (nA)
	1st(nA)		2nd(nA)		3rd(nA)		
	Sensor	Dummy	Sensor	Dummy	Sensor	Dummy	
20	10.33	0.14	10.34	0.14	10.17	0.14	10.14
25	7.58	0.12	7.53	0.12	7.53	0.12	7.43
30	5.43	0.11	5.40	0.11	5.42	0.11	5.31
35	4.33	0.10	4.30	0.10	4.31	0.10	4.21
40	3.46	0.10	3.43	0.10	3.48	0.10	3.36
60	1.75	0.08	1.76	0.08	1.71	0.08	1.66
80	1.06	0.05	1.06	0.05	1.05	0.05	1.01
100	0.72	0.03	0.71	0.03	0.71	0.03	0.68
120	0.52	0.02	0.52	0.02	0.52	0.02	0.50
150	0.36	0.01	0.36	0.01	0.36	0.01	0.35
200	0.22	0.01	0.22	0.01	0.22	0.01	0.21

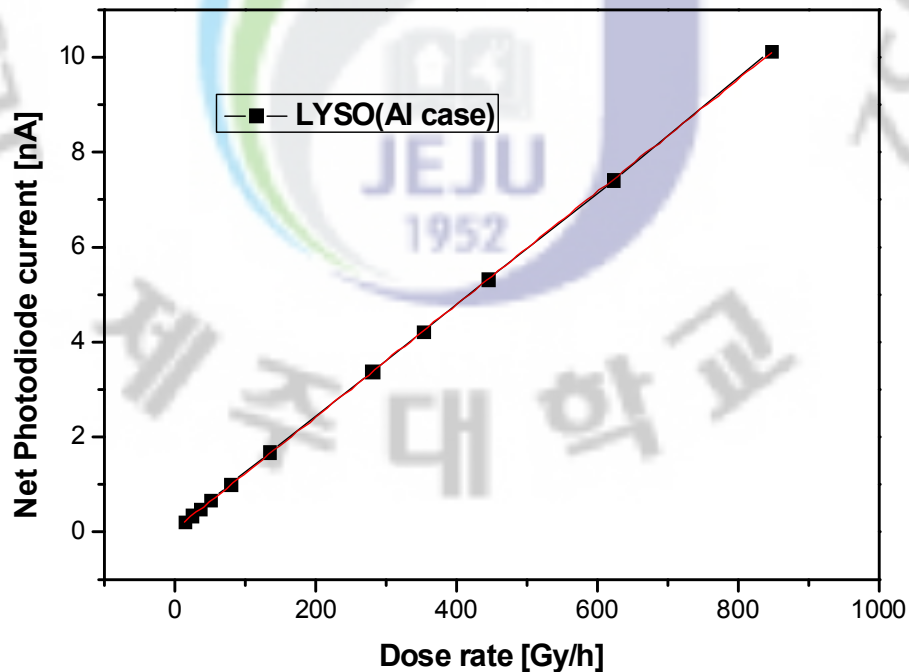


Fig. 20 Linearity of the LYSO scintillator and Al case

Table 8 Measurement result of LYSO scintillator and PE case

LYSO(PE)							
Distance (cm)	Measurement number of times						Net average (nA)
	1st(nA)		2nd(nA)		3rd(nA)		
	Sensor	Dummy	Sensor	Dummy	Sensor	Dummy	
20	6.11	0.14	5.93	0.14	5.89	0.14	5.84
25	4.21	0.12	4.06	0.12	4.07	0.12	3.99
30	3.03	0.11	2.92	0.11	2.94	0.11	2.85
35	2.25	0.10	2.26	0.10	2.26	0.10	2.16
40	1.78	0.10	1.77	0.10	1.75	0.10	1.67
60	0.89	0.08	0.89	0.08	0.88	0.08	0.81
80	0.54	0.05	0.54	0.05	0.53	0.05	0.49
100	0.37	0.03	0.37	0.03	0.37	0.03	0.34
120	0.27	0.02	0.26	0.02	0.26	0.02	0.24
150	0.18	0.01	0.18	0.01	0.18	0.01	0.17
200	0.11	0.01	0.11	0.01	0.11	0.01	0.10

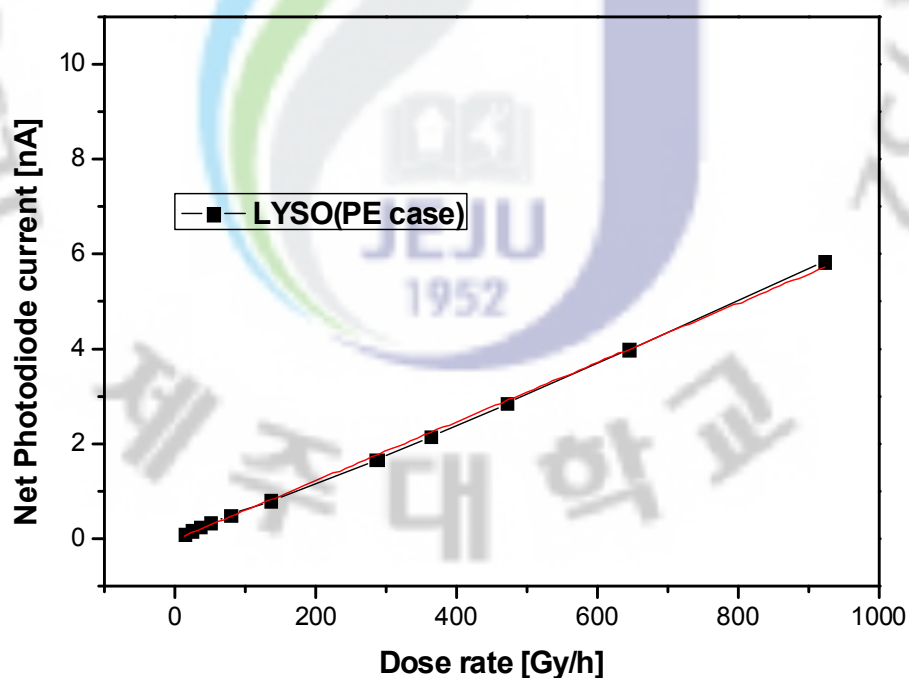


Fig. 21 Linearity of the LYSO scintillator and PE case

## 2. 변환상수 비교

이 연구에서는 3개의 섬광체 센서와 센서 부분의 플라스틱과 알루미늄 2개의 케이스로 측정된 GaP photodiode 전류와 전리함으로 측정된 선량을 비교 분석하였다. GaP photodiode 전류와 선량율과의 비교는 선원과 각 센서의 거리별에 따른 정규화 분포와 전류와 선량율과의 선형성으로 방사선량계로의 가능성을 알아보았다. GaP photodiode 전류와 선량율과의 변환상수는 전류와 선량율과의 선형성으로 변환상수를 구하였다. Origin 프로그램에서 전류와 선량율과의 선형성에서 기울기의 방정식을 구하고, 섬광체의 흡수선량을 구하기 위해 기울기 방정식의 역수를 취해 변환상수를 구하고, 각 지점에서의 변환상수 값과 전리함의 선량율과의 오차를 구하였다.

Fig. 22에서는 전리함으로 측정된 선량을 기준으로 하여 BGO 섬광체에 Al case를 씌운 센서의 GaP photodiode 전류-선량율 변환 상수 편차를 나타내고 있고, Table 9는 변환 상수와 변환 상수에 의한 선량율, 그리고 편차를 나타내고 있다. 이는 전리함 선량율의 선형성과 비례하지 않아 변환 상수에 의한 선량율에서도 큰 편차를 보였다. 측정지점마다의 편차는 2~54%로 나타나고 있다.

Fig. 23에서는 전리함으로 측정된 선량을 기준으로 하여 BGO 섬광체에 PE case를 씌운 센서의 GaP photodiode 전류-선량율 변환 상수 편차를 나타내고 있고, Table 10은 변환 상수와 변환 상수에 의한 선량율, 그리고 편차를 나타내고 있다. 이는 전리함 선량율의 선형성과 비례하지 않아 변환 상수에 의한 선량율에서도 큰 편차를 보였다. 측정지점마다의 편차는 0.5~56%로 나타나고 있다.

Fig. 24에서는 전리함으로 측정된 선량을 기준으로 하여 CWO 섬광체에 Al case를 씌운 센서의 GaP photodiode 전류-선량율 변환 상수 편차를 나타내고 있고, Table 11은 변환 상수와 변환 상수에 의한 선량율, 그리고 편차를 나타내고 있다. 이는 고선량장에서는 변환 상수에 의한 선량율과의 편차가 8% 이하를 보이고 있지만, 저선량장으로 갈수록 편차가 더욱 커지는 현상을 보였다.

Fig. 25에서는 전리함으로 측정된 선량을 기준으로 하여 CWO 섬광체에 PE case를 씌운 센서의 GaP photodiode 전류-선량율 변환 상수 편차를 나타내고 있고, Table 12는 변환 상수와 변환 상수에 의한 선량율, 그리고 편차를 나타내고



있다. 이는 변환 상수에 의한 선량율과의 편차가 200cm 지점을 제외하고는 4% 미만의 편차를 보였다.

Fig. 26에서는 전리함으로 측정된 선량율을 기준으로 하여 LYSO 섬광체에 Al case를 씌운 센서의 GaP photodiode 전류-선량율 변환 상수 편차를 나타내고 있고, Table 13은 변환 상수와 변환 상수에 의한 선량율, 그리고 편차를 나타내고 있다. 이는 전리함의 선량율과 변환 상수에 의한 선량율이 거의 일치 하였으며 편차는 7% 미만으로 나타났다.

Fig. 27에서는 전리함으로 측정된 선량율을 기준으로 하여 LYSO 섬광체에 PE case를 씌운 센서의 GaP photodiode 전류-선량율 변환 상수 편차를 나타내고 있고, Table 14는 변환 상수와 변환 상수에 의한 선량율, 그리고 편차를 나타내고 있다. 이는 전리함의 선량율과 변환 상수에 의한 선량율의 편차가 0.2~30%로 나타났다.

Table 9 Deviation of scintillator BGO(AI case) for ionization chamber dose rate

BGO(AI)				
Distance (cm)	Net value (nA)	Conversion function(Gy/h) K=2126.02I-11.82	Dose rate (Gy/h)	Deviation (%)
20	0.44	916.54	895.55	2.29
25	0.31	654.33	641.85	1.91
30	0.22	448.82	457.62	-1.96
35	0.16	328.34	352.42	-7.33
40	0.12	243.30	282.92	-16.28
60	0.05	94.48	134.28	-42.13
80	0.04	73.22	77.60	-5.98
100	0.04	73.22	50.55	30.96
120	0.03	51.96	36.40	29.94
150	0.03	51.96	23.71	54.36
200	0.02	30.70	13.90	54.73

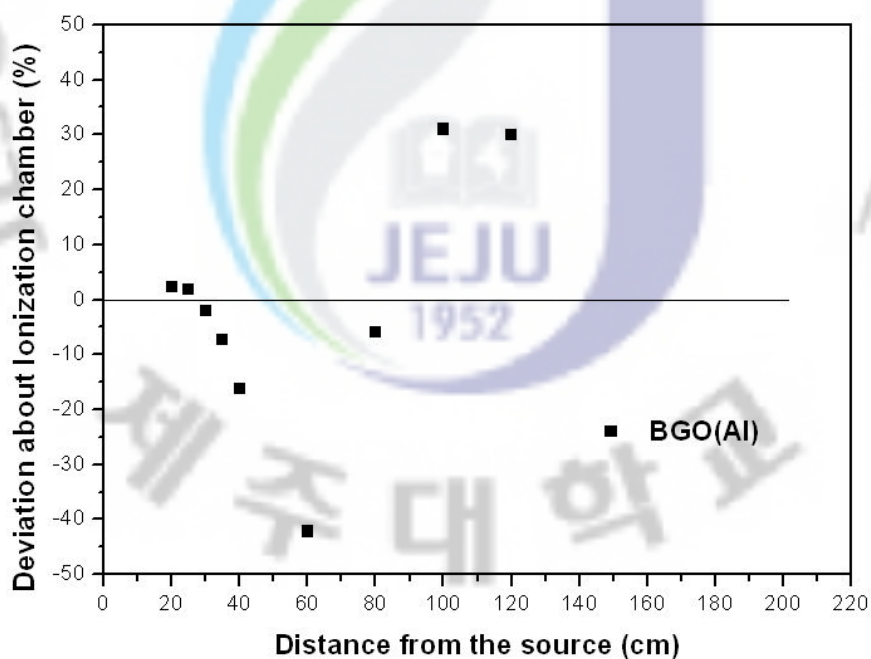


그림 22 Deviation of scintillator BGO(AI case) for ionization chamber dose rate

Table 10 Deviation of scintillator BGO(PE case) for ionization chamber dose rate

BGO(PE)				
Distance (cm)	Net value (nA)	Conversion function(Gy/h) $K=2294.07I+8.28$	Dose rate (Gy/h)	Deviation (%)
20	0.39	902.97	860.14	4.74
25	0.26	612.39	609.22	0.52
30	0.18	413.57	440.76	-6.57
35	0.13	314.16	347.35	-10.57
40	0.09	214.75	270.60	-26.01
60	0.04	100.04	126.19	-26.13
80	0.03	77.10	74.81	2.98
100	0.03	77.10	50.09	35.04
120	0.02	54.16	35.35	34.73
150	0.02	54.16	23.47	56.67
200	0.01	31.22	13.70	56.12

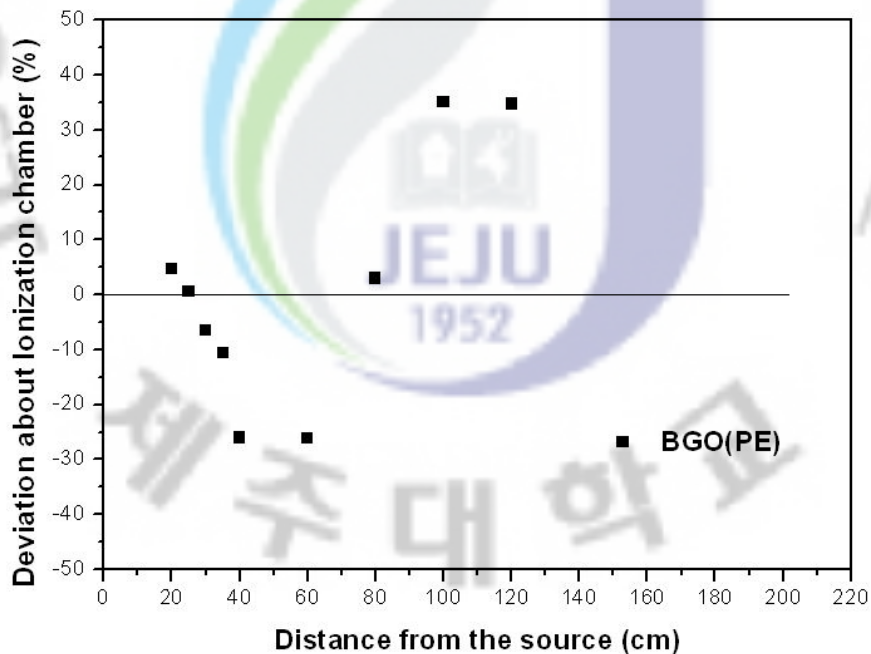


그림 23 Deviation of scintillator BGO(PE case) for ionization chamber dose rate

Table 11 Deviation of scintillator CWO(AI case) for ionization chamber dose rate

CWO(AI)				
Distance (cm)	Net value (nA)	Conversion function(Gy/h) K=202.43I+14.73	Dose rate (Gy/h)	Deviation (%)
20	4.42	906.76	847.09	6.58
25	2.78	576.13	623.50	-8.22
30	2.02	426.33	444.53	-4.27
35	1.53	327.14	352.80	-7.84
40	1.21	263.71	280.72	-6.45
60	0.58	135.50	135.35	0.11
80	0.35	84.90	78.96	6.99
100	0.23	59.93	51.59	13.91
120	0.17	47.11	36.61	22.28
150	0.12	36.99	24.28	34.36
200	0.07	26.87	14.28	46.85

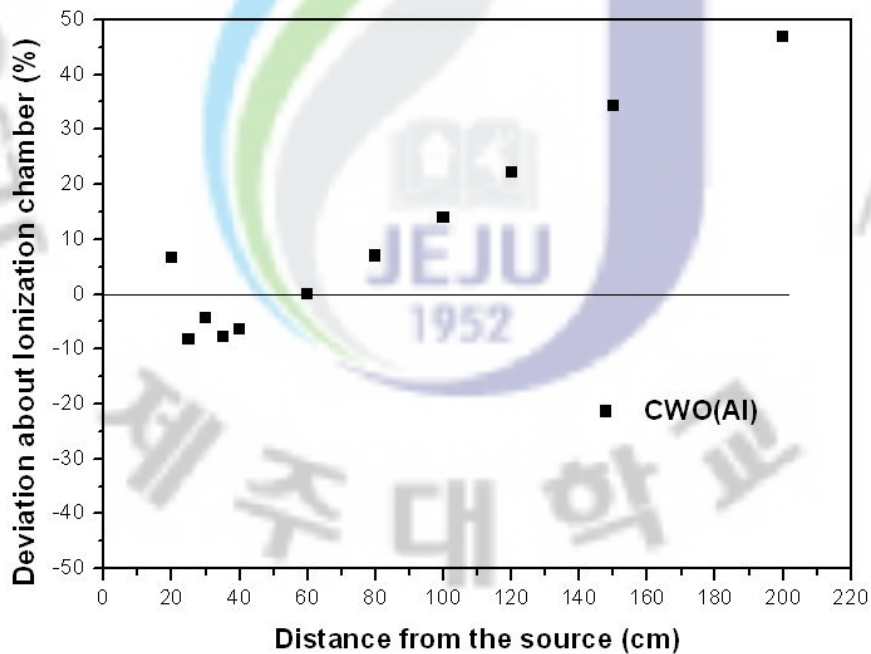


그림 24 Deviation of scintillator CWO(AI case) for ionization chamber dose rate

Table 12 Deviation of scintillator CWO(PE case) for ionization chamber dose rate

CWO(PE)				
Distance (cm)	Net value (nA)	Conversion function(Gy/h) K=306.75I-7.33	Dose rate (Gy/h)	Deviation (%)
20	2.66	807.60	808.68	-0.13
25	1.93	584.70	585.14	-0.08
30	1.42	428.26	425.02	0.76
35	1.11	334.18	331.99	0.66
40	0.87	260.56	264.95	-1.66
60	0.44	127.64	128.05	-0.32
80	0.28	77.54	74.91	3.51
100	0.19	49.93	49.49	0.90
120	0.14	35.62	35.34	0.77
150	0.10	23.35	23.32	0.11
200	0.06	11.08	13.64	-18.78

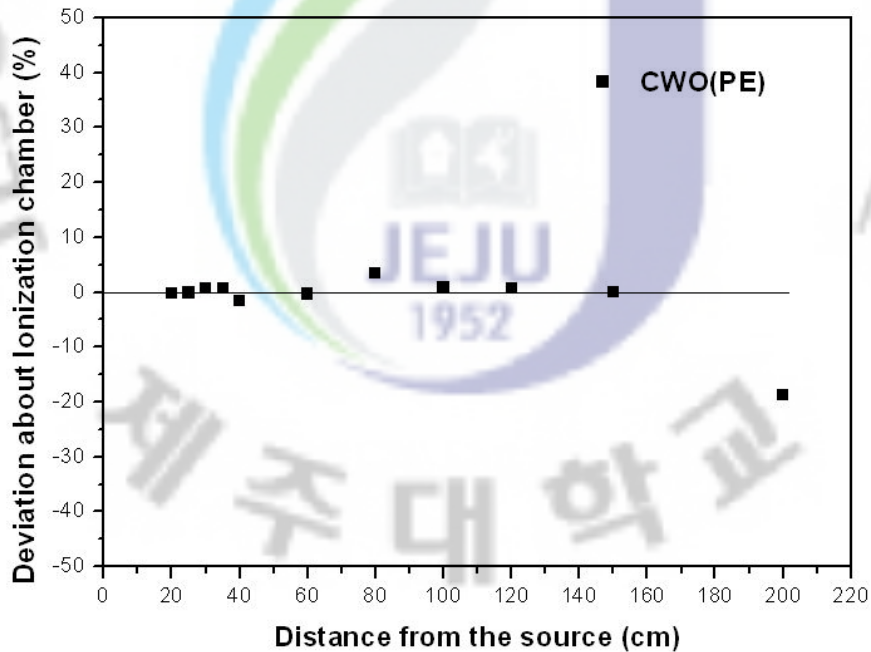


그림 25 Deviation of scintillator CWO(PE case) for ionization chamber dose rate

Table 13 Deviation of scintillator LYSO(Al case) for ionization chamber dose rate

LYSO(Al)				
Distance (cm)	Net value (nA)	Conversion function(Gy/h) K=84.32I-4.42	Dose rate (Gy/h)	Deviation (%)
20	10.14	850.55	847.09	0.41
25	7.43	621.77	623.50	-0.23
30	5.31	443.02	444.53	-0.27
35	4.21	350.83	352.80	-0.63
40	3.36	278.60	280.72	-0.65
60	1.66	135.54	135.35	0.15
80	1.01	80.46	78.96	2.25
100	0.68	53.19	51.59	2.57
120	0.50	37.74	36.61	3.08
150	0.35	25.09	24.28	3.34
200	0.21	13.28	14.28	-6.95

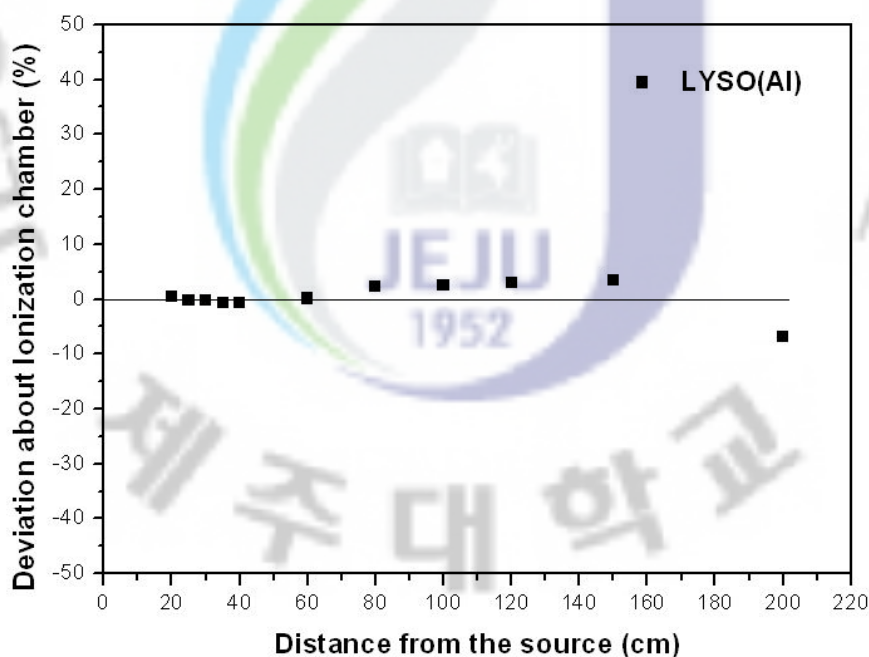


그림 26 Deviation of scintillator LYSO(Al case) for ionization chamber dose rate

Table 14 Deviation of scintillator LYSO(PE case) for ionization chamber dose rate

LYSO(PE)				
Distance (cm)	Net value (nA)	Conversion function(Gy/h) K=160.26I+3.96	Dose rate (Gy/h)	Deviation (%)
20	5.84	939.34	923.14	1.72
25	3.99	643.93	645.31	-0.21
30	2.85	461.24	471.96	-2.32
35	2.16	349.59	364.17	-4.17
40	1.67	271.06	286.81	-5.81
60	0.81	133.24	136.89	-2.74
80	0.49	81.95	79.21	3.35
100	0.34	58.45	51.54	11.81
120	0.24	42.96	36.39	15.28
150	0.17	31.20	24.04	22.97
200	0.10	19.99	13.90	30.47

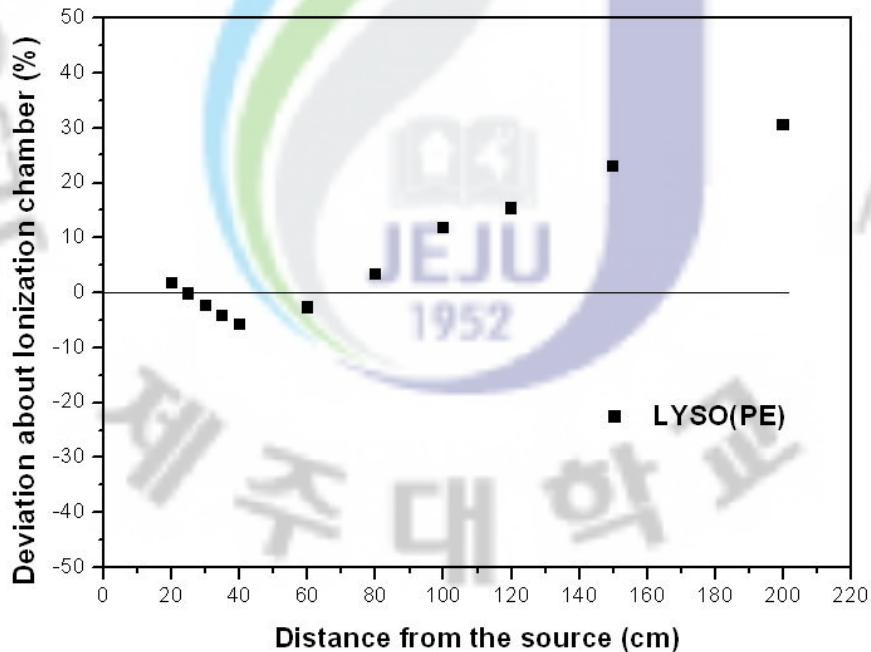


그림 27 Deviation of scintillator LYSO(PE case) for ionization chamber dose rate

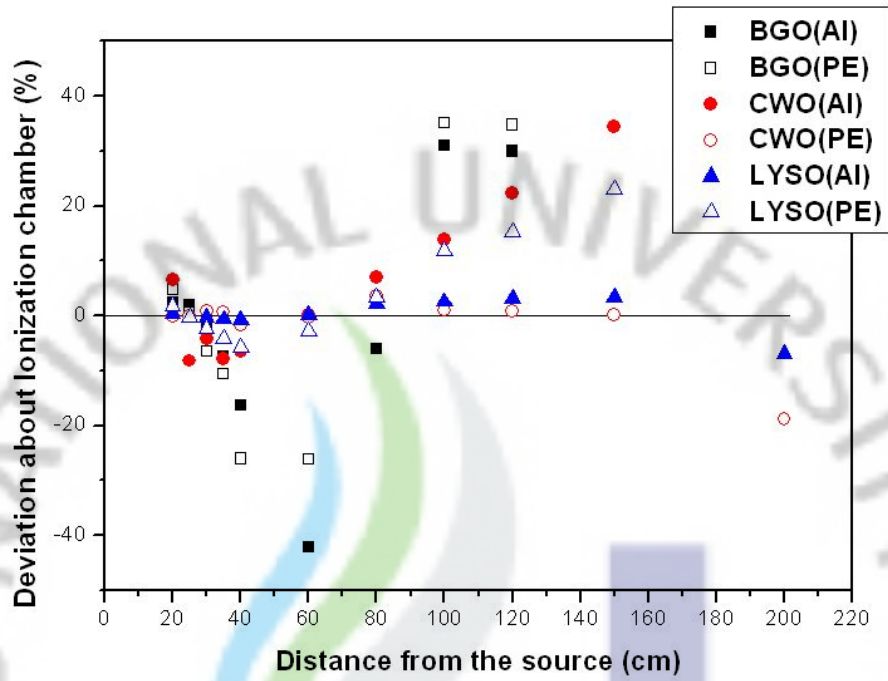


그림 28 Deviation of scintillators for ionization chamber dose rate



### 3. 정규화 분포 비교

#### (1) 전리함으로 측정된 결과

이 연구에서 조합한 센서 모형의 방사선량계로서의 가능성을 알아보기 위해 선원과 섬광체의 거리별에 따라 GaP photodiode의 전류를 측정하고 전리함으로 같은 거리의 선량율을 측정하였다. 측정된 GaP photodiode 전류와 전리함으로 측정된 선량율을 거리에 따른 정규화(normalize) 분포 변화를 비교분석하여 방사선량계로서의 가능성을 알아보았다. 정규화 분포는 각 지점마다 측정되고 계산된 결과를 선원과 센서간 거리가 20cm인 지점에서 측정되고 계산되어진 값으로 나누어 산출하였다.

Fig. 29에서는 BGO 섬광체에 Al case를 씌워 측정된 결과와 전리함으로 측정된 선량율을 선원과 센서의 거리별 정규화 분포로 나타내었다. 센서로 측정된 결과와 전리함으로 측정된 결과의 정규화 분포는 변화 양상에서도 큰 차이를 보였다. 측정지점마다 정규화 분포의 편차는 0.1~66%로 나타나고 있다.

Fig. 30에서는 BGO 섬광체에 PE case를 씌워 측정된 결과와 전리함으로 측정된 선량율을 선원과 센서의 거리별 정규화 분포로 나타내었다. 센서로 측정된 결과와 전리함으로 측정된 결과의 정규화 분포는 변화 양상에서도 큰 차이를 보였다. 측정지점마다 정규화 분포의 편차는 5~46%로 나타나고 있다.

Fig. 31에서는 CWO 섬광체에 Al case를 씌워 측정된 결과와 전리함으로 측정된 선량율을 선원과 센서의 거리별 정규화 분포로 나타내었다. 센서로 측정된 결과와 전리함으로 측정된 결과의 정규화 분포는 비슷한 양상으로 변하지만 같은 지점에서 측정된 결과에서는 차이를 보였다. 측정지점마다 정규화 분포의 편차는 5~18%로 나타나고 있다.

Fig. 32에서는 CWO 섬광체에 PE case를 씌워 측정된 결과와 전리함으로 측정된 선량율을 선원과 센서의 거리별 정규화 분포로 나타내었다. 센서로 측정된 결과와 전리함으로 측정된 결과의 정규화 분포는 비슷한 양상으로 변하지만 선원에서 거리가 멀어질수록 측정된 결과에서는 차이를 보였다. 측정지점마다 정규화 분포의 편차는 0.3~25%로 나타나고 있다.

Fig. 33에서는 LYSO 섬광체에 AI case를 띄워 측정된 결과와 전리함으로 측정된 선량율을 선원과 센서의 거리별 정규화 분포로 나타내었다. 센서로 측정된 결과와 전리함으로 측정된 결과의 정규화 분포는 비슷한 양상으로 변하지만 같은 지점에서 측정된 결과에서는 차이를 보였다. 측정지점마다 정규화 분포의 편차는 0.1~18%로 나타나고 있다.

Fig. 34에서는 LYSO 섬광체에 PE case를 띄워 측정된 결과와 전리함으로 측정된 선량율을 선원과 센서의 거리별 정규화 분포로 나타내었다. 센서로 측정된 결과와 전리함으로 측정된 결과의 정규화 분포는 비슷한 양상으로 변하지만 같은 지점에서 측정된 결과에서는 차이를 보였다. 측정지점마다 정규화 분포의 편차는 2~12%로 나타나고 있다.



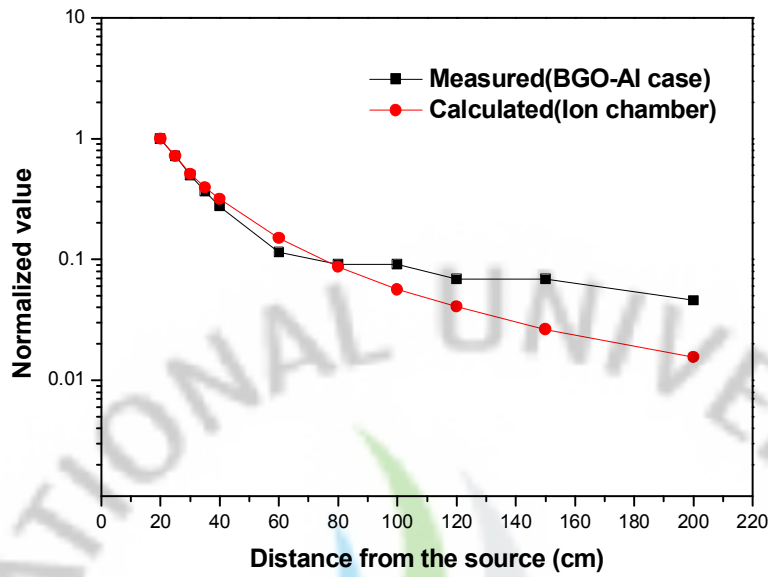


그림 29 Normalized distribution of measured BGO(Al case) current and ionization chamber

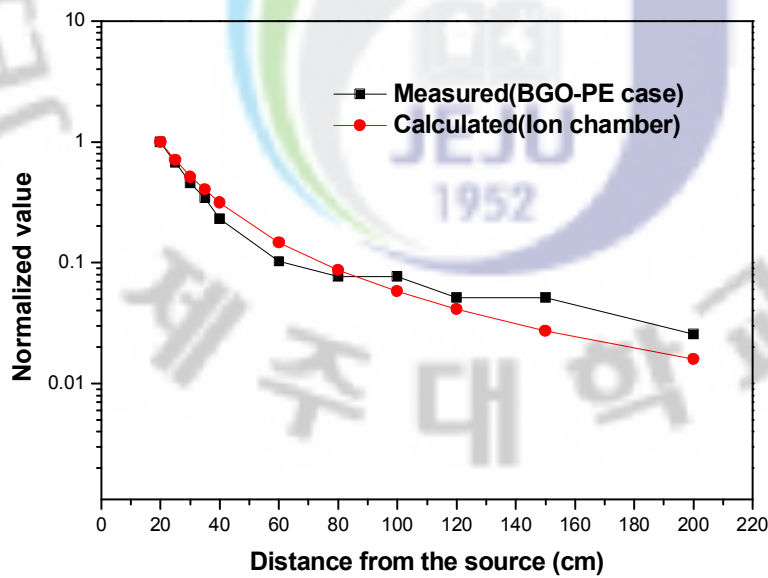


그림 30 Normalized distribution of measured BGO(PE case) current and ionization chamber

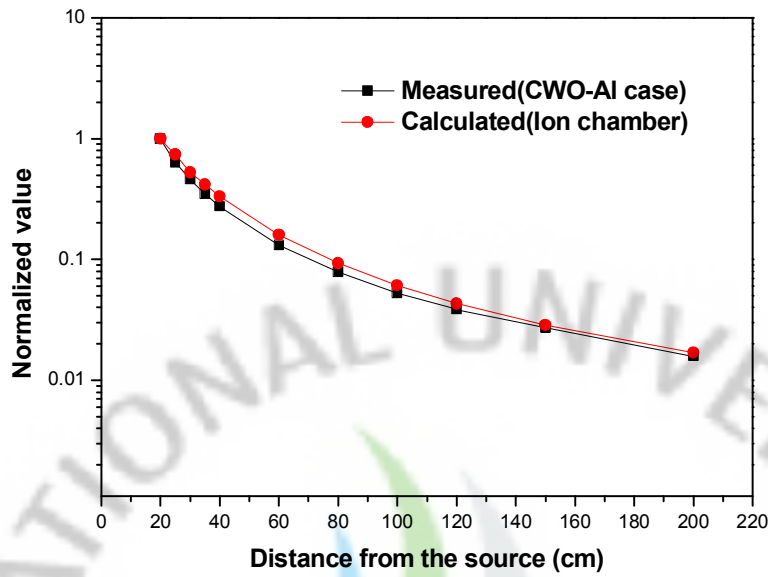


Fig. 31 Normalized distribution of measured CWO(AI case) current and ionization chamber

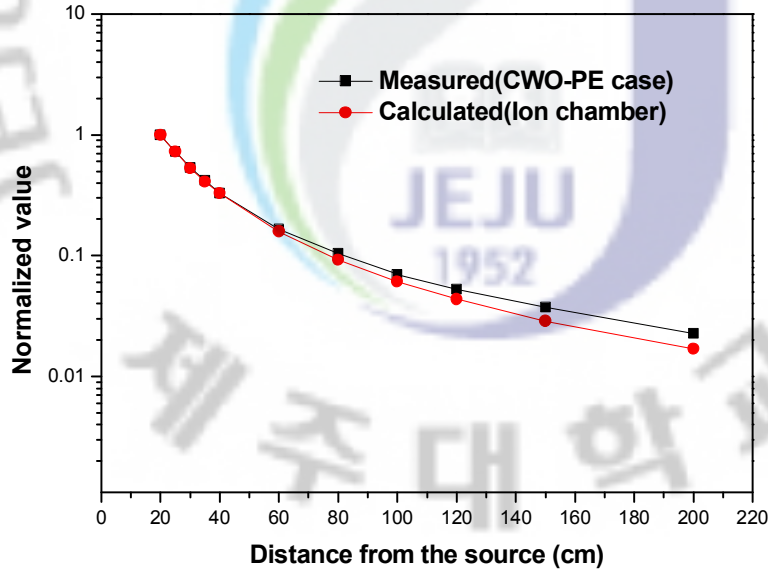


Fig. 32 Normalized distribution of measured CWO(PE case) current and ionization chamber

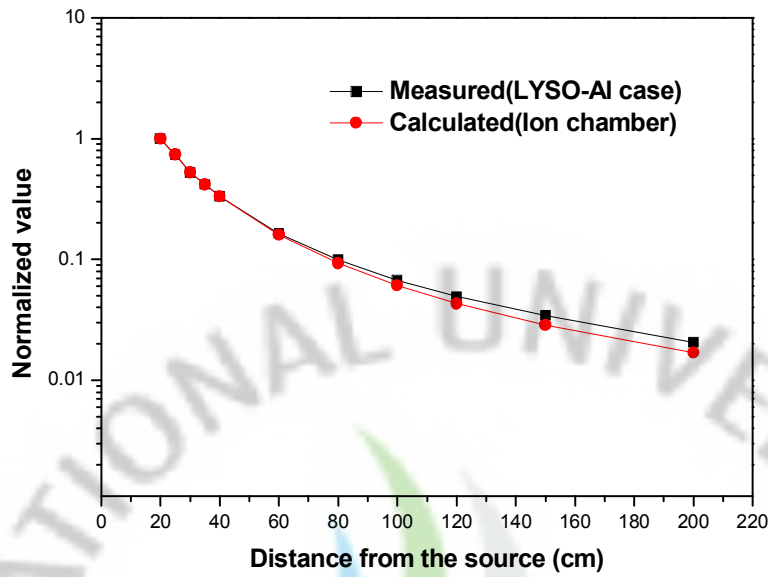


Fig. 33 Normalized distribution of measured LYSO(Al case) current and ionization chamber

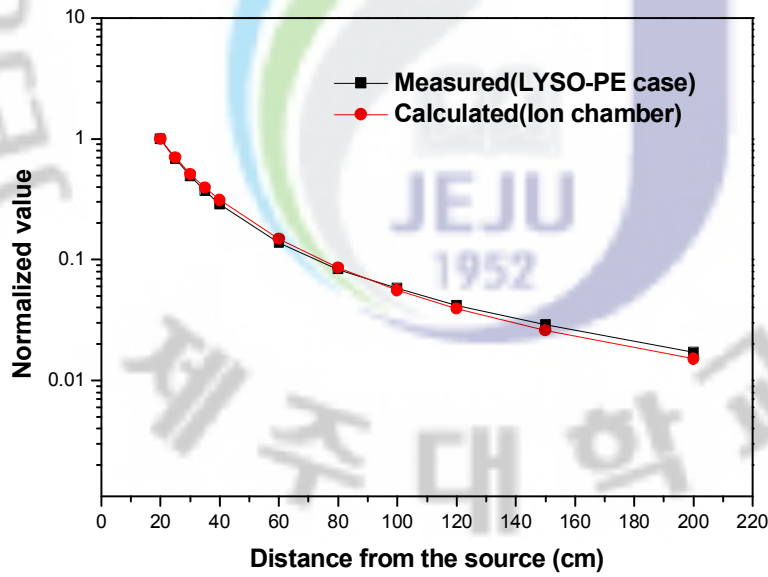


Fig. 34 Normalized distribution of measured LYSO(PE case) current and ionization chamber

## (2) MCNPX code로 계산한 결과

이 연구에서 조합한 센서 모형의 방사선량계로서의 가능성을 알아보기 위해 선원과 섬광체의 거리별에 따라 GaP photodiode의 전류를 측정하고 MCNP(Monte Carlo N-Particle) code로 계산하여 섬광체의 흡수 에너지를 구하였다. 측정된 GaP photodiode 전류와 MCNP code로 계산된 흡수 에너지를 거리에 따른 정규화 분포 변화를 비교분석하여 방사선량계로서의 가능성을 알아보았다. 정규화 분포는 각 지점마다 측정되고 계산된 결과를 선원과 센서간 거리가 20cm인 지점에서 측정되고 계산되어진 값으로 나누어 산출하였다.

Fig. 35에서는 BGO 섬광체에 Al case를 띄워 측정된 결과와 MCNP code로 계산된 결과를 선원과 센서의 거리별 정규화 분포로 나타내었다. 측정된 결과와 계산된 결과의 정규화 분포는 변화 양상에서도 큰 차이를 보였다. 측정지점마다 정규화 분포 값의 편차는 4~49%로 나타나고 있다.

Fig. 36에서는 BGO 섬광체에 PE case를 띄워 측정된 결과와 MCNP code로 계산된 결과를 선원과 센서의 거리별 정규화 분포로 나타내었다. 측정된 결과와 계산된 결과의 정규화 분포는 변화 양상에서도 큰 차이를 보였다. 측정지점마다 정규화 분포 값의 편차는 2~49%로 나타나고 있다.

Fig. 37에서는 CWO 섬광체에 Al case를 띄워 측정된 결과와 MCNP code로 계산된 결과를 선원과 센서의 거리별 정규화 분포로 나타내었다. 측정된 결과와 계산된 결과의 정규화 분포는 거리에 따라 비슷한 양상으로 변하지만 같은 지점에서 측정된 결과와 계산된 결과의 정규화 분포 값이 상당한 차이를 보였다. 측정지점마다 정규화 분포 값의 편차는 14~31%로 나타나고 있다.

Fig. 38에서는 CWO 섬광체에 PE case를 띄워 측정된 결과와 MCNP code로 계산된 결과를 선원과 센서의 거리별 정규화 분포로 나타내었다. 측정된 결과와 계산된 결과의 정규화 분포는 거리에 따라 비슷한 양상으로 나타났다. 측정지점마다 정규화 분포 값의 편차는 0.2~9%로 나타나고 있다.

Fig. 39에서는 LYSO 섬광체에 Al case를 띄워 측정된 결과와 MCNP code로 계산된 결과를 선원과 센서의 거리별 정규화 분포로 나타내었다. 측정된 결과와 계산된 결과의 정규화 분포는 거리에 따라 비슷한 양상으로 나타났지만, 선량이

가장 적은 200cm의 지점에서 약간의 차이를 보였다. 측정지점마다 정규화 분포 값의 편차는 2~13%로 나타나고 있다.

Fig. 40에서는 LYSO 섬광체에 PE case를 씌워 측정된 결과와 MCNP code로 계산된 결과를 선원과 센서의 거리별 정규화 분포로 나타내었다. 측정된 결과와 계산된 결과의 정규화 분포는 거리에 따라 비슷한 양상으로 변하지만 같은 지점에서 측정된 결과와 계산된 결과의 정규화 분포 값에서 차이를 보였다. 측정지점마다 정규화 분포 값의 편차는 9~29%로 나타나고 있다.



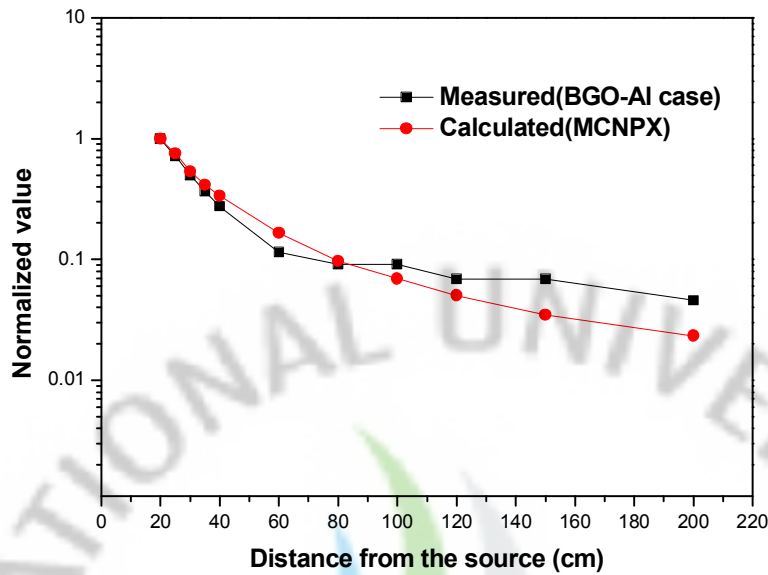


Fig. 35 Normalized distribution of absorption energy from measured BGO(Al case) and calculated MCNPX code

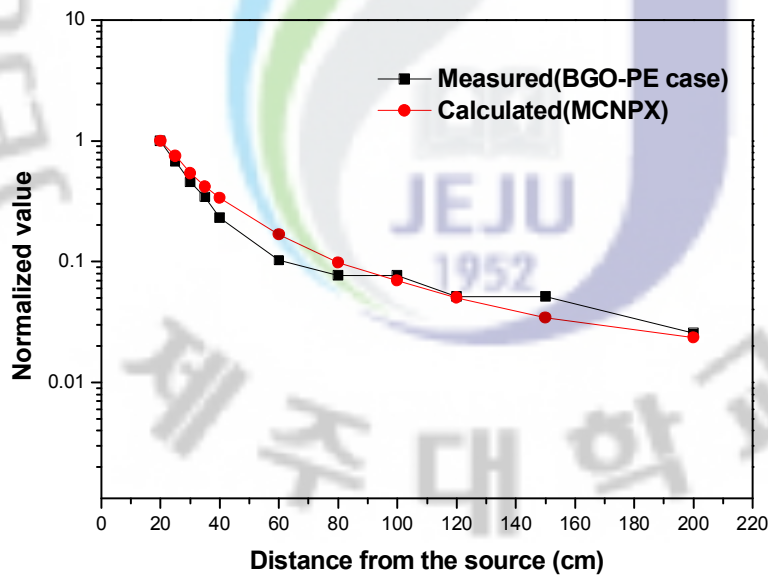


Fig. 36 Normalized distribution of absorption energy from measured BGO(PE case) and calculated MCNPX code



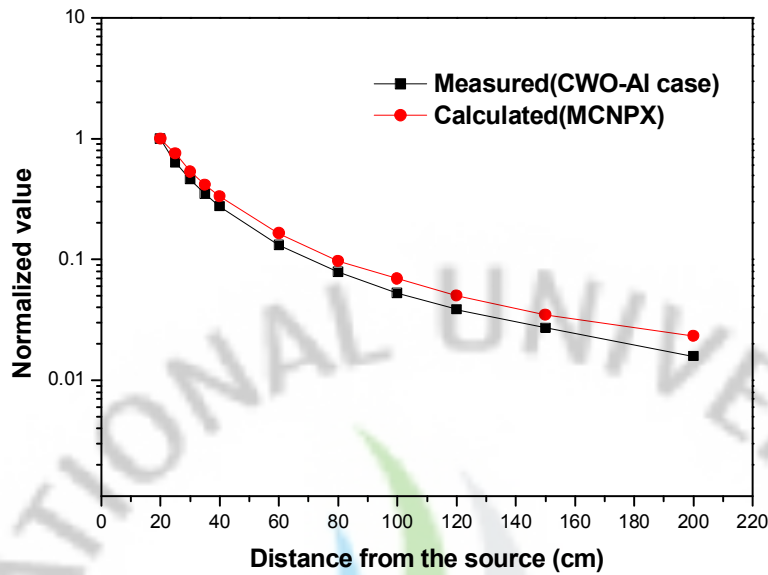


Fig. 37 Normalized distribution of absorption energy from measured CWO(AI case) and calculated MCNPX code

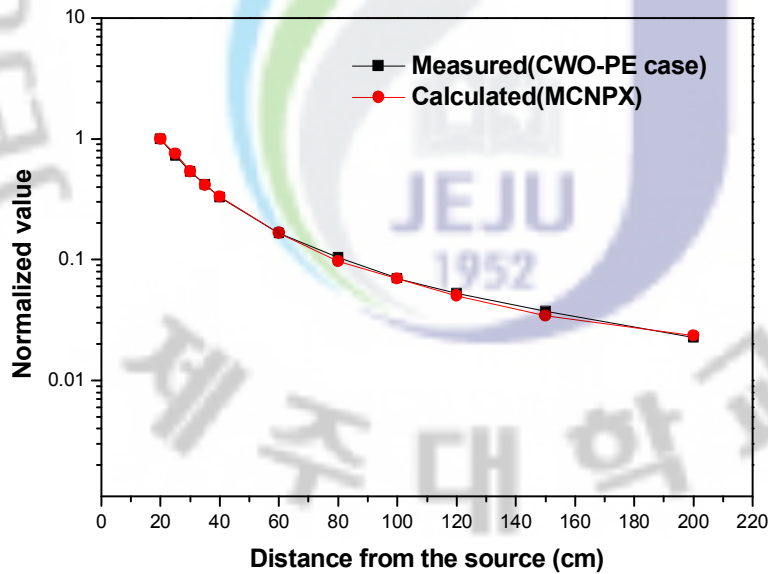


Fig. 38 Normalized distribution of absorption energy from measured CWO(PE case) and calculated MCNPX code

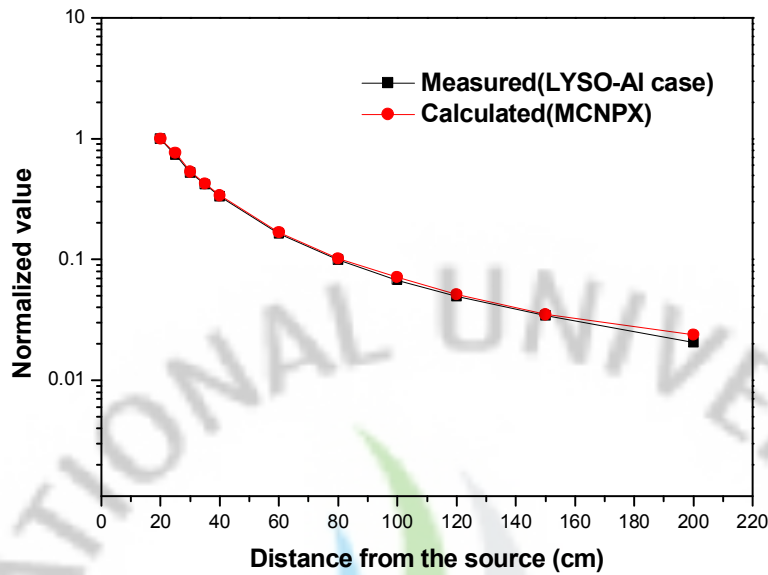


Fig. 39 Normalized distribution of absorption energy from measured LYSO(AI case) and calculated MCNPX code

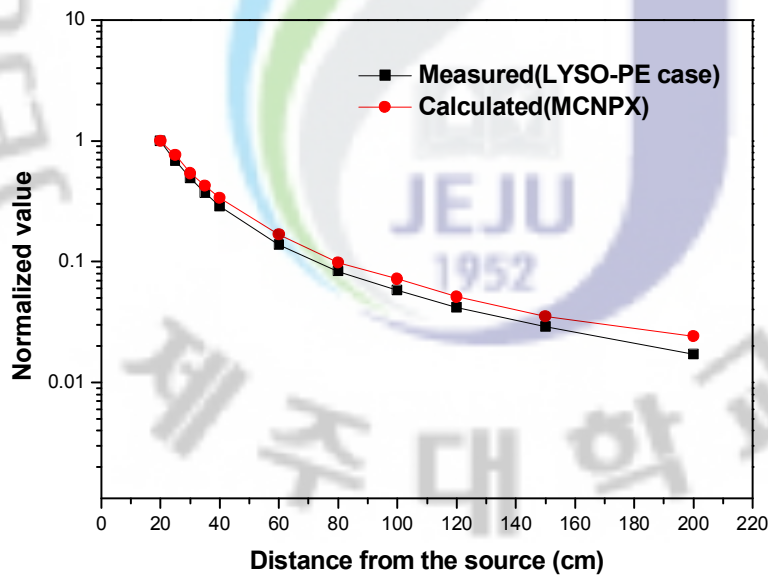


Fig. 40 Normalized distribution of absorption energy from measured LYSO(PE case) and calculated MCNPX code

## IV 결론

이 연구에서는 조사되는 고준위방사선을 실시간으로 측정하기 위한 새로운 선량계의 개발을 목적으로 산화물 섬광체와 플라스틱 광섬유를 결합하고 GaP photodiode를 연결한 방사선량계 모델을 제작하고 선량계로의 가능성을 분석하였다.

방사선을 감지하는 센서부분인 섬광체와 직접적인 노출을 막아주는 케이스, 그리고 섬광체에서 발생하는 광을 전달하는 플라스틱 광섬유와 광을 전류로 변환하는 GaP photodiode를 연결한 방사선량계 모델을 구성하였다. 이 연구에서 구성한 방사선량계 모델은 제주대학교 방사선응용과학연구소의  $5400\text{Ci } ^{60}\text{Co}$  감마선원과 센서에서의 거리에 따른 전류변화를 측정하고 전리함에서 측정된 선량율에 대해 각 섬광체의 선형성을 분석하였다. 그리고 GaP photodiode 전류 값을 방사선량율로 변환할 수 있는 GaP photodiode 전류-선량율 변환 상수를 구하고 분석하였으며, 선원과 센서 간의 거리에 따른 전리함과 MCNP code의 정규화 분포를 구함으로써 방사선량계로의 가능성을 분석하였다.

이 연구에서 섬광체의 측정 전류와 전리함의 선량율의 관계에서 선량율이 커질수록 방사선량계 모델로 측정한 GaP photodiode 전류도 선형적으로 비례하여 커지지만, BGO 섬광체일 때 선형적으로 일치하지 않는 결과를 얻었다. 이는 다른 섬광체에 비해 발광량이 적기 때문일 것으로 여겨진다.

그리고 GaP photodiode 전류와 선량율과의 변환상수는 전류와 선량율과의 선형성으로 변환상수를 구하였다. Origin 프로그램에서 전류와 선량율과의 선형성에서 기울기의 방정식을 구하고, 섬광체의 흡수선량을 구하기 위해 기울기 방정식의 역수를 취해 변환상수를 구하고, 각 지점에서의 변환상수 값과 전리함의 선량율과의 오차를 구하였다. BGO 섬광체는 1~56%의 오차로 전리함의 선량율과 큰 차이를 보였으며, CWO 섬광체와 LYSO 섬광체는 비교적 선형적으로 전리함의 선량율과의 큰 차이는 없었지만 CWO 섬광체는 Al case를 사용하였을 때와 LYSO 섬광체는 PE case를 사용하였을 때 저선량장 부분에서 차이를 보였다.

또한 측정된 GaP photodiode 전류와 전리함으로 측정한 선량율과 MCNP code

로 계산된 흡수 에너지를 거리에 따른 정규화(normalize) 분포 변화를 비교분석하여 방사선량계로서의 가능성을 알아보았다. 정규화 분포는 각 지점마다 측정되고 계산된 결과를 선원과 센서간 거리가 20cm인 지점에서 측정되고 계산되어진 값으로 나누어 산출하였다. 각각의 섬광체 센서들과 전리함 선량율의 결과를 선원과 센서 간의 거리에 따른 정규화 분포 결과를 보면 CWO 섬광체와 LYSO 섬광체의 정규화 분포 편차 값은 25% 이내로 나타났으며, 비교적 선원과 센서 간 거리에 따른 정규화 분포 변화 양상은 비슷하였다. 그러나 BGO 섬광체의 정규화 분포 편차 값은 전체적으로 66% 이내로 상당한 차이를 보였으며, 정규화 분포 변화 양상도 비슷하지 않았다. 각각의 섬광체 센서들과 MCNP code의 결과를 선원과 센서 간의 거리에 따른 정규화 분포 결과를 보면 BGO 섬광체는 전리함의 정규화 분포와 마찬가지로 변화 양상이 비슷하지 않았으며 그 편차 값은 전체적으로 49% 이내로 큰 차이를 보였다. CWO 섬광체와 LYSO 섬광체는 비교적 선원과 센서 간 거리에 따른 정규화 분포 변화 양상은 비슷하였으며, 그 편차 값은 31% 이내로 나타났다.

이 연구에서는 산화물 섬광체와 플라스틱 광섬유를 결합하고 GaP photodiode를 연결한 방사선량계 모델을 제작하고 선량계로서의 가능성을 분석하였으며, case의 종류에 상관없이 대체적으로 CWO와 LYSO 섬광체를 사용한 선량계 모델이 기준선량계와 MCNPX 시뮬레이션값과 모든 지점에서 유사한 양상을 확인하였으며, 고선량장 영역에서 사용하기에 CWO(PE case) 섬광체와 LYSO(Al case) 섬광체에서 기준선량계와의 직선성과 MCNPX 시뮬레이션값과의 normalize 분포의 오차가 용인가능한 수준이며 선량계로서의 가능성을 확인하였다.

## V 참고문헌

A. S. Beddar, "Plastic scintillation dosimetry and its application to radiotherapy", Radiation Measurements 41, pp. 124~133, 2007

A. S. Beddar, T. J. Kinsella, A. Ikhlef, and C. H. Sibata, "A Miniature Scintillator-Fiberoptic-PMT Detector System for the Dosimetry of Small Fields in Stereotactic Radiosurgery", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 48, No. 3, pp. 924~928, 2001

A. S. Beddar, T. R. Mackie, and F. H. Attix, "Water-equivalent plastic scintillation detectors for high energy beam dosimetry: II Properties and measurements", Phys. Med. Biol., Vol 37, pp. 1901~1913, 1992

A. S. Beddar, "Water equivalent plastic scintillation detectors in radiation therapy", Radiation Protection Dosimetry, 2006

B. S. Lee, Y. M. Hwang, H. S. Cho, S. Kim, and S. Cho, "Fabrication of fiber-optic radiation sensor tips with inorganic scintillator for remote sensing of X or  $\gamma$ -ray", Institute of Electrical and Electronics Engineers, Vol. 2, pp. 865~868, 2004

Masayori Ishikawa, Hiroaki Kumada, Kazuyoshi Yamamoto, Junichi Kaneko, Gerard Bengua, Hironobu Unesaki, Yoshinori Sakurai, Kenichi Tanaka, Toshiso Kosako, "Development of a wide-range paired scintillator with optical fiber neutron for BNCT irradiation field study", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 551, pp. 448~457, 2005

Pelowitz, Denise B. "MCNPX<sup>TM</sup>-USER'S MANUAL version 2.5.0", 2005

장경원, 조동현, 신상훈, 김형식, 이정환, 이봉수, 김신, 조효성, "고 에너지 광자선 계측용 2차원 광섬유 방사선 센서의 제작 및 특성분석", Hankook Kwanghak Hoeji, Vol. 18, No. 4, pp. 241~245, 2007

조동현, 장경원, 유욱재, 서정기, 허지연, 이봉수, 조영호, "광섬유 방사선량계를 이용한 선량보강 영역에서의 심부선량 백분율과 피부 선량을 측정", Korean Journal of Optics and Photonics, Vol. 21, No. 1, pp. 16~20, 2010

장경원, 이봉수, 조동현, 김형식, 이정환, 이정환, 김신, 조효성, "광학 필터를 이용한 광섬유 방사선 센서의 체렌코프 빛 제거", Hankook Kwanghak Hoeji, Vol. 17, No. 4, pp. 312~316, 2006

황영복, 조동현, 이봉수, 조효성, 김신, "무기 섬광체를 이용한 플라스틱 광섬유 방사선 센서부 제작 및 특성평가", J. of the Korean Sensors Society, Vol. 14, No. 4, pp. 244~249, 2005

장경원, 조동현, 유욱재, 이봉수, 문주현, 박병기, 조영호, 김신, "삼중수소 검출용 광섬유 방사선 센서의 제작 및 특성분석", Korean Journal of Optics and Photonics, Vol. 20, No. 4, pp. 201~206, 2009

김용호, "MCNPX 코드를 이용한 감마선 조사실의 방사선량 분포 계산", 제주대학교 석사논문, 2008

서민우, "섬광체와 광섬유를 조합한 방사선량계 모델 특성 분석", 제주대학교 석사논문, 2009

## 감사의 글

4년간의 학부생활과 2년간의 대학원 생활을 이제 마무리 짓는 때가 되었습니다. 이러한 생활 속에 그동안 격려해주시고 저에게 많은 격려와 도움을 주신 분들께 감사의 말을 전하려고 합니다.

먼저 부족한 점이 많은 저에게 학문적 지도와 함께 세심한 배려와 조언을 아끼지 않으시며 용기를 북돋아 주시고 바른 길로 인도해주시고 가능성을 제시해주신 박재우 교수님께 진심어린 감사를 드립니다. 그리고 바쁜 와중 논문 심사와 조언해주신 김신 교수님과 정범진 교수님께 감사를 드립니다. 또한 학부생활 당시 열정적인 지도와 관심을 가져주신 에너지공학과 이윤준 교수님, 이현주 교수님, 천원기 교수님, 김남진 교수님께도 감사드립니다.

이 연구를 하면서 많은 관심과 도움을 주셨던 방사선응용과학연구소의 송성준 박사님, 홍경애 선생님과 환경방사능측정소의 강태우 선배님께도 감사드립니다. 그리고 이 연구를 하면서 많은 조언을 주었던 용호형과 민우형에게도 감사의 인사를 드립니다. 바쁜 업무와 대학원 생활 과정에서도 후배들을 항상 신경써주신 준호형과 지훈형, 그리고 제가 나아질 수 있도록 많은 질타를 해주신 봉진이형과 박형훈 조교 선생님, 그리고 실험실 생활을 잘 해나갈수 있도록 도움을 준 김우용 조교 선생님과 대학원 선배님과 후배들에게도 감사의 인사를 드립니다. 그리고 곁에서 항상 같이 웃고, 울면서 생활하였던 실험실 후배 태형, 원직, 경필, 은영이와 재성이, 항상 힘들 때마다 위로가 되준 우리의 family 한승, 오주, 민석, 상중, 영호, 철규와 대학 신입생 때부터 항상 같이 다니던 기철이와 승정이, 그리고 언제나 내 옆에서 힘을 준 여진이와 영림이에게 고맙다는 말을 전하며 그동안 저에게 깊은 관심과 힘이 되준 모든 분들께 감사드립니다.

마지막으로 28년 동안 부족한 저에게 항상 곁에서 큰 힘이 되어주시고 제 의견을 존중해주시고, 물심양면 아끼지 않으신 부모님께 마지막으로 감사의 마음을 담아 이 논문을 바치겠습니다. 부모님 사랑합니다.