

碩士學位論文

섬광체와 광섬유를 조합한
방사선량계 모델 특성 분석



濟州大學校 大學院

에너지 工學科

徐旻佑

2008年 12月

섬광체와 광섬유를 조합한 방사선량계 모델 특성 분석

指導教授 朴 在 雨

徐 旻 佑

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2008年 12月

徐旻佑의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 金 信 (印)

委 員 金 洛 培 (印)

委 員 朴 在 雨 (印)

濟州大學校 大學院

2008年 12月

Characteristic Analysis of Dosimeter Model Constructed with Scintillator and Optical Fiber

Min-Woo Seo

(Supervised by professor Jae-Woo Park)

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

2008. 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

CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

LIST OF FIGURES	iii
LIST OF TABLES	vi
SUMMARY	vii
I. 서 론	1
II. 이론적 배경	3
1. 섬광체(Scintillator)의 종류 및 특성	3
2. 국내외의 연구동향	5
1) 고선량장에서 광섬유 검출기에 의한 방사선량 분포 측정	6
2) 고에너지 전자선 측정을 위한 광섬유 방사선 센서에서의 체렌코프 빛 측정 및 분석	7
3) 소형 BGO섬광체에서 발생한 섬광 수집	8
4) 정위적방사선수술에서 국소범위의 선량측정을 위한 소형 섬광체-광섬유 검출기	8
5) X-ray 또는 γ -ray의 원격 측정을 위한 무기섬광체와 광섬유를 조합한 방사선 센서 제작	9
6) 방사선진단에서 선량측정을 위한 LiF:W 섬광체 센서	10
7) 광섬유 섬광체를 이용한 방사선량계 개발	11
8) 협소지역의 방사선분포를 측정하기 위한 광섬유 센서	11

III. 실험장치 및 방법	13
1. 섬광체인 섬광체, 플라스틱 광섬유, PMT의 구성	13
1) 섬광체의 구성	13
2) 광전송용 플라스틱 광섬유의 제작 및 구성	15
3) PMT(Photomultiplier Tube)의 구성	16
2. 섬광체와 광섬유를 조합한 센서 모형의 구성 및 측정 방법	17
1) 섬광체와 광섬유를 조합한 센서 모형의 측정방법	18
2) MCNP(Monte carlo N-Particle) code 계산	19
3) 전리함(Ionization chamber)과 Alanine 화학 선량계의 측정 방법	21
IV. 실험결과 및 고찰	23
1. 섬광체 센서들로 측정된 결과와 MCNPX code로 계산된 결과 비교	23
2. 전리함과 Alanine 화학 선량계로 측정한 결과 비교	28
3. 섬광체 센서들과 전리함으로 측정한 정규화 분포 비교 분석	30
4. 섬광체 센서들과 Alanine 화학 선량계로 측정한 정규화 분포 비교 분석	34
5. 측정된 PMT 전류와 선량률과의 선형성 비교 분석	38
6. 섬광체 센서들의 PMT 전류-선량률 변환 상수 비교 분석	40
1) 전리함으로 측정한 선량을 기준으로 섬광체 센서들의 전류-선량률 변환상수	40
2) Alanine 화학선량계로 측정한 선량을 기준으로 섬광체 센서들의 전류-선량률 변환상수	46
V. 결 론	52
참 고 문 헌	54
감사의 글	57

LIST OF FIGURES

Fig. 1. Schematic diagram of radiation distribution measurement system using a conventional imaging sensor combined with a loss correction system with the OTDR technique	6
Fig. 2. Experimental setup of measurements and characterizations cerenkov light in fiber-optic radiation sensor irradiated by high energy electron beam	7
Fig. 3. Schematic diagram showing cross-section through proposed PET detector	8
Fig. 4. Schematic diagram and a scaled photograph of the proximal end of the Scintillator-Fiber-optic-PMT detector system	9
Fig. 5. Schematic diagram of film type fiber-optic sensor tip with inorganic scintillator	10
Fig. 6. Schematic diagram of dosimeter model using optical fiber scintillator	11
Fig. 7. Schematic diagram of scintillator-painted optical fiber system and fiber driving unit	12
Fig. 8. Schematic diagram of the fiber-optic system	13
Fig. 9. Process of sensor manufacture	14
Fig. 10. Picture of the Plastic Optical Fiber(POF, PGR-FB3000)	15
Fig. 11. Picture of Photomultiplier tube (H6780-04, Hamamatsu)	16
Fig. 12. Characteristics of Photomultiplier tube (H6780-04, Hamamatsu)	16
Fig. 13. Picture of the Data Acquisition Unit (C8908) and Experimental Setup	17
Fig. 14. Picture and Schematic of ^{60}Co irradiation chamber	19
Fig. 15. Arrangement of the fiber-optic dosimeter measuring the PMT	20

current in irradiation chamber.	19
Fig. 16. MCNPX geometry plots of the irradiation chamber	20
Fig. 17. Picture of ionization chamber(PTW Freiburg) and Electrometer (Cardinal Health Co. model 35040)	21
Fig. 18. Picture of reading of Alanine dosimeter and Dose-EPR signal graph	22
Fig. 19. Normalized distribution of the BGO sensor-measured PMT current and MCNPX-calculated deposited energy	25
Fig. 20. Normalized distribution of the GSO sensor-measured PMT current and MCNPX-calculated deposited energy	25
Fig. 21. Normalized distribution of the CWO sensor-measured PMT current and MCNPX-calculated deposited energy	26
Fig. 22. Normalized distribution of the BC-412 sensor-measured PMT current and MCNPX-calculated deposited energy	26
Fig. 23. Sensors-measured PMT current with source-to-sensor distance	27
Fig. 24. MCNPX-calculated deposited energy with source-to-sensor distance	27
Fig. 25. Normalized distribution of the BGO sensor-measured PMT current and IC-measured dose rate	32
Fig. 26. Normalized distribution of the GSO sensor-measured PMT current and IC-measured dose rate	32
Fig. 27. Normalized distribution of the CWO sensor-measured PMT current and IC-measured dose rate	33
Fig. 28. Normalized distribution of the BC-412 sensor-measured PMT current and IC-measured dose rate	33
Fig. 29. Normalized distribution of the BGO sensor-measured PMT current and Alanine dosimeter-measured dose rate	36
Fig. 30. Normalized distribution of the GSO sensor-measured PMT	

current and Alanine dosimeter-measured dose rate	36
Fig. 31. Normalized distribution of the CWO sensor-measured PMT current and Alanine dosimeter-measured dose rate	37
Fig. 32. Normalized distribution of the BC-412 sensor-measured PMT current and Alanine dosimeter-measured dose rate	37
Fig. 33. Linearity of the sensors-measured PMT current and IC-measured dose rate	39
Fig. 34. Linearity of the sensors-measured PMT current and Alanine dosimeter-measured dose rate	39
Fig. 35. Variation of the sensors-measured PMT current	40
Fig. 36. Estimated conversion factors for the BGO sensor to gain the absorbed dose rate from the measured PMT current (IC)	42
Fig. 37. Deviation of conversion factors for the BGO sensor based on ionization chamber-measured dose rate	42
Fig. 38. Estimated conversion factors for the GSO sensor to gain the absorbed dose rate from the measured PMT current (IC)	43
Fig. 39. Deviation of conversion factors for the GSO sensor based on ionization chamber-measured dose rate	43
Fig. 40. Estimated conversion factors for the CWO sensor to gain the absorbed dose rate from the measured PMT current (IC)	44
Fig. 41. Deviation of conversion factors for the CWO sensor based on ionization chamber-measured dose rate	44
Fig. 42. Estimated conversion factors for the BC-412 sensor to gain the absorbed dose rate from the measured PMT current (IC)	45
Fig. 43. Deviation of conversion factors for the BC-412 sensor based on ionization chamber-measured dose rate	45
Fig. 44. Estimated conversion factors for the BGO sensor to gain the absorbed dose rate from the measured PMT current (Alanine)	48

Fig. 45. Deviation of conversion factors for the BGO sensor based on Alanine dosimeter-measured dose rate	48
Fig. 46. Estimated conversion factors for the GSO sensor to gain the absorbed dose rate from the measured PMT current (Alanine)	49
Fig. 47. Deviation of conversion factors for the GSO sensor based on Alanine dosimeter-measured dose rate	49
Fig. 48. Estimated conversion factors for the CWO sensor to gain the absorbed dose rate from the measured PMT current (Alanine)	50
Fig. 49. Deviation of conversion factors for the BC-412 sensor based on Alanine dosimeter-measured dose rate	50
Fig. 50. Estimated conversion factors for the BC-412 sensor to gain the absorbed dose rate from the measured PMT current (Alanine)	51
Fig. 51. Deviation of conversion factors for the BC-412 sensor based on Alanine dosimeter-measured dose rate	51

LIST OF TABLES

Table 1. Characteristics of scintillators	4
Table 2. Characteristics of Plastic Optical fiber(PGR-FB3000)	15
Table 3. Ionization chamber-measured dose rate at source-to-sensor distance 20cm	28
Table 4. Alanine dosimeter-measured dose rate at source-to-sensor distance 5cm	29
Table 5. Comparison of doe rate measured by ionization chamber and Alaine dosimeter	30



SUMMARY

Ion chambers are often used to remotely monitor the real time radiation dose in a high level radiation field such as in a gamma irradiator. For medical purposes, MOSFET(Metal Oxide Effect Semiconductor Transistor) dosimeters are widely used. The ion chamber is generally known to be most accurate in measuring the gamma exposure dose. However, it is very vulnerable to the ambient conditions since its measurement depends on minute ionization currents generated in the chamber. Furthermore, it usually takes a long time to have a malfunction fixed since almost all of the ion chambers are imported and their malfunctions are in most cases handled by their manufacturers. The MOSFET dosimeter is very useful for simultaneously measuring radiation doses at multiple points, and has high spatial resolution since its sensing head is very small. However, it is impractical to use it in a high radiation field since its lifetime is exhausted very fast. As a means to overcome the drawbacks of the aforementioned dosimeters, a dosimeter type composed of a small piece of scintillator jointed an optical fiber can be a good option. Inorganic scintillators have high gamma sensitivities since they have high densities and are composed of high-atomic-number elements. The lights generated in the scintillator can be transmitted through a plastic or glass optical fiber to a remote place where they are measured by a photo sensor. This type of radiation dosimeter can have several additional merits such as flexibility in positioning, high spatial resolution and easiness in manufacturing in addition to the characteristics of remote and realtime measurement. A number of works has been carried out in relation to this subject. A. S. Beddar, proposed a miniature "scintillator-fiberoptic-PMT" detector system for the dosimeter of small fields in stereotactic radiosurgery. Nowotny, proposed a tissue equivalent dosimeter model base on LiF:W scintillator head and

plastic optical fiber to be applied in diagnostic radiology.

In this work, a fiber-optic dosimeter model composed of a small scintillator and current-type PMT has been studied. Four kinds of the small scintillator such as BGO($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$), GSO(Gd_2SiO_5), CWO(CdWO_4) and plastic scintillator (Saint Gobain, BC-412) were used as the sensor. The PMT currents measured with 4 kinds of scintillator were compared with the absorbed energy calculated by MCNP(Monte carlo N-particle) code as well as absorbed doses measured by ionization chamber and Alanine chemical sensor. The results obtained by 4 scintillators have shown similar dose distribution patterns obtained with the MCNP code. Compared to the result measured with the ionization chamber and Alanine chemical dosimeter, normalized dose rate distribution by BC-412 has shown less than 7% deviation for BC-412 scintillator, less than 17% deviation for the CWO and BGO scintillators, and less than 34% for the GSO. The conversion factors between PMT currents and the dose rate measured with the ionization chamber and Alanine dosimeter are calculated for each scintillator, and the results have shown less than 10% deviation from the average conversion factor. This suggests that the four scintillators can be used as the sensor of the dosimeter. The dose rate ranges measurable with in 5% deviation with the dosimeter model are 110~1189Gy/h for the GSO, 52~480Gy/h for BC-412, and 52~1189Gy/h for the BGO and CWO.



I. 서 론

현재 감마선 조사실 등의 고준위 방사선장에서 방사선량을 실시간 원격 측정하는 방법으로 ionization chamber가 주로 사용되고 있으며, 의료분야에서는 MOSFET 선량계가 자주 이용된다. Ionization chamber는 타 선량계에 비하여 정확성은 높으나 미세한 전류를 측정하는 장치여서 외부적 영향에 민감하고, 거의 전부 외국산 제품이어서 고장이 발생하는 경우 제작회사에 보내어 수리해야 하므로 많은 시간이 소요되는 문제가 있다. MOSFET(Metal Oxide Field Effect semiconductor Transistor) 선량계는 여러 지점의 선량을 동시에 측정하는데 편리하고, 센서부위가 매우 작아서 공간분해능이 뛰어나지만 센서의 유효수명이 정해져 있어서 고준위 방사선장에서 선량계로 사용하는 데에는 비경제적이다.

두 가지 선량계의 이러한 단점을 보완하기 위해서 섬광체와 플라스틱 광섬유를 결합한 선량계가 효과적인 대안이 될 수 있다. 무기섬광체는 원자번호가 높고 고밀도이어서 감마선에 대해 높은 감도를 가진다. 유기섬광체는 현재 사용되고 있는 센서들에 비해 인체와 가장 유사한 성질을 지니고 있으므로 보다 정확한 선량측정이 가능하다. 발생한 광은 플라스틱 또는 유리 광섬유를 통해 전달하여 측정하는 방사선 선량계를 구성할 수 있다. 이러한 섬광체와 광섬유를 조합한 선량계는 유연성, 우수한 공간분해능, 제작의 용이성 등 많은 장점을 가지고 있으며 섬광체와 광섬유를 이용한 방사선량계의 연구가 진행 중에 있다. 이러한 연구에는 인체 혈관 내 진단을 위한 플라스틱 섬광체와 실리카 광섬유를 조합한 소형 방사선량계 [Beddar 2001] 및 LiF:W 섬광체와 플라스틱 광섬유를 결합한 인체등가조직 방사선량계[Nowotny 2003], 고선량장에서 방사선 측정을 위한 광섬유 선량계[Eiji Takada 1999] 연구들이 수행되어졌다.

본 연구에서는 섬광체와 플라스틱 광섬유를 결합하고 전류형 PMT를 연결한 방사선량계 모델을 제작하고 선량계로서의 가능성을 분석하였다. 방사선을 감지하는 센서부인 섬광체는 BGO($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$)섬광체, GSO(Gd_2SiO_5)섬광체, CWO(CdWO_4)섬광체, BC-412 플라스틱 섬광체를 사용하였다. BGO 섬광체는

원자번호와 밀도가 높아서 감마선에 높은 대해 높은 검출감도를 가지며 GSO 섬광체는 높은 방사성 내성을 가지고 CWO 섬광체는 여타 섬광체보다 발광량이 많고 BC-412 플라스틱 섬광체는 수소와 탄소가 인체와 유사한 물질로 구성되어 인체에 대한 선량평가에 유용하다. 제작된 방사선량계 모델은 6000Ci ^{60}Co 감마선원과 센서간 거리에 따라 측정된 PMT 전류 변화와 MCNP(Monte-Carlo N-Particle)code로 계산된 결과와 비교 분석하여 선량계 모델 가능성을 모색하였다. 그리고 제작한 선량계 모델로 측정된 PMT 전류와 같은 지점에서 전리함(Ionization chamber)과 Alanine 화학선량계로 측정된 선량률과 비교 분석하였다. PMT 전류와 선량률과의 비교는 선원과 센서간 거리에 따른 정규화(normalized)분포 변화, PMT 전류와 선량률과의 선형성, PMT 전류 값을 방사선량률로 변환할 수 있는 전류-선량률 변환상수 구하고 방사선량계로서 개발가능성을 분석을 하였다.



II. 이론적 배경

1. 섬광체(Scintillator)의 종류 및 특성

현재 많은 종류의 섬광체(Scintillator)가 사용되고 있다. 유기섬광체(Organic scintillator)에는 유기 결정, 액체 섬광체와 플라스틱 섬광체가 있고, 무기섬광체(inorganic scintillator)는 무기결정, 가스 및 유리 섬광체 등이 있다. 본 연구에서 사용된 섬광체는 무기섬광체 중에서 BGO($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) 섬광체, GSO(Gd_2SiO_5) 섬광체, CWO(CdWO_4) 섬광체들이 있고, 유기섬광체 중에 플라스틱 섬광체인 Saint Gobain사의 BC-412를 사용하였으며, Table. 1에서 이들 섬광체의 밀도(density, g/cm^3), 붕괴시간(decay time, μs), light output 등을 요약하였다.

무기섬광체로는 할라이드 계열과 산화물 계열이 주로 개발되었는데 할라이드 계열은 대개 공기중의 수분을 흡수하여 녹는 흡습성(조해성)이 강하여 가공의 어려움이 있는 반면 산화물 계열은 공기 중에서 가공이 용이하다. 산화물계열 섬광체는 대체로 할라이드 계열보다 높은 원자번호를 갖는 원소로 이루어지기 때문에 소형으로 제작 가능하며 최근 의료영상기구의 섬광체로 널리 사용되고 있다.

BGO 섬광체는 원자번호(83)와 밀도($7.13\text{g}/\text{cm}^3$)가 다른 여타 검출기에 비해 매우 커서 감마선의 검출효율은 뛰어나다. 그러나 BGO 섬광체는 상대적으로 높은 굴절률(refractive index, 2.15)을 갖는데 낮은 굴절률을 갖는 섬광체들 보다 광수집효율이 떨어지고, 발광량(NaI(Tl)의 10%)이 좋지 않아 에너지 분해능이 떨어지는 단점이 있다. 그러나 불순물이 필요 없고 조해성이 없어 Housing 등이 필요 없으며 신호 출력의 지연이 없기 때문에 신속하게 감응해야 하는 엑스선 CT 등에 사용되고 있으며 현재 핵의학 분야에서 사용되고 있는 PET 검출기로 활용되고 있다.

GSO는 단결정섬광체로서 상당히 큰 결정을 만들 수 있으며 밀도와 실효원자번호가 커서 감마선 측정에 매우 좋다. 최대 발광량은 Ce를 0.5% 농도로 도

평한 섬광체에서 보이는데, NaI(Tl)의 20%이다. GSO 섬광체의 붕괴시간도 역시 Ce를 도핑한 양에 따라 달라지나 일반적으로 0.056 μ s(90%)와 0.4 μ s(10%)이 붕괴시간을 갖는다. 에너지 분해능은 662keV 감마선 일 때 약 9%로 나타난다. 특히 GSO는 뛰어난 방사선 내성을 가지고 있는데 10⁷Gy 감마선에 노출되어도 방사선 손상이 일어나지 않는다.[Glenn F. Knoll, 1999]

CWO(Cadmium Tungstate CdWO₄)는 1950년대부터 섬광체로 잘 알려져 있었지만 본격적으로 섬광체의 특성 연구를 시작하는지는 1990년대부터이다. CWO의 광출력은 NaI(Tl)의 40%이고 최대방출파장은 가시광선 영역인 470nm이다. 밀도와 실효원자번호가 높아서 감마선 측정에 매우 좋다. 그러나 1.1 μ s(40%)와 14.5 μ s(60%)의 두 개가 혼합되어 나타나는 붕괴시간이 상대적으로 느리다는 게 단점이다.

Table 1. Characteristics of scintillators

	BGO (Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂)	GSO (Gd ₂ SiO ₅)	CWO (CdWO ₄)	BC-412 (Polyvinyltoluene)
Density (g/cm ³)	7.13	6.71	7.9	1.032
Wavelength of Max. Emission (nm)	480	440	470	434
Refractive Index	2.15	1.85	2.3	1.58
Decay time (μ s)	0.3	0.056(90%) 0.4(10%)	1.1(40%), 14.5(60%)	0.0033
Light Output	10% of NaI	20% of NaI	40% of NaI	60 % of Anthracene
radiation hardness (rad)	10 ⁵⁻⁶	>10 ⁸	-	-

플라스틱 섬광체는 유기섬광물질을 용매로 녹인 후 이를 고분자화 시켜 중합 반응을 통해 제작된 것이다. 용매는 polystyrene 이나 polyvinyl toluene 등이 사용되며, 용질로서는 p-terphenyle+POPOP, p-terphenyle+tetraphenyl butadiene 등이 사용된다. 플라스틱 섬광물질이 용매와 용질의 발광현상은 액체 섬광물질과 동일하며 C, H, O, N이 주 구성성분이어서 광전효과의 발생확률이 극히 낮다. 용매는 polystyrene 이나 polyvinyl toluene 등이 사용되며, 용질로서는 p-terphenyle + POPOP, p-terphenyle + tetraphenyl butadiene 등이 사용된다. 따라서 감마선 핵종 분석에는 적합하지 않고 베타선 측정에 주로 사용된다. 플라스틱 섬광체는 가는 줄로부터 얇은 막에 이르기까지 어떤 크기나 형태로 만들 수 있으며, 물과 공기 및 많은 화학약품 등에 불활성이며, 따라서 방사성시료와 접촉해서 사용할 수 있다. 특히 체적이 큰 섬광체를 만들 수 있기 때문에 일부 국가에서는 전신방사능계측기로 사용되기도 한다. 얇은 플라스틱 섬광체 막은 중성자 비행시간 측정(time-of-flight)에 사용되고 있다. 또한 발광감쇄 시간이 짧은 장점으로 시간과 연관된 측정에 많이 이용되고 있으며 현재, 재활용고철 등에 같이 함유될 수 있는 무적선원 또는 NORM, TENORM 등을 감시하기 위해 국내 제철소 스크랩모니터(Scrap monitor)에 주로 이용되고 있고 향후 많은 분야에서의 사용이 예상된다.[고성진 등, 1999]

Saint Gobain사 BC-412 플라스틱 섬광체는 주로 고속중성자, 하전입자, 양성자 계측 등에 사용된다. H, C로 구성되었으며 그 구성비(H/C)는 1.1이며 용매로는 polyvinyl toluene이 쓰였다. 이 섬광체의 밀도와 굴절률은 1.032g/cm^3 와 1.58이며 발광량은 Anthracene의 발광량을 기준으로 하여 60%이다. 발광과장은 400~520nm로 최대발광과장은 434nm이다.

2. 국내외의 연구동향

섬광체와 광섬유를 활용한 방사선량계 개발은 다양한 형태로 이루어지고 있으며 이러한 개념의 연구에는 (1) 광섬유선단에 소형 섬광체를 접합하는 방법, (2) 섬광체 자체를 센서로 활용하는 방법, (3) 광섬유 자체를 센서로 활용하는

방법 등이 있다. 광섬유 선단에 소형 섬광체를 접합하는 경우는 섬광체가 센서 역할을 하고 광섬유는 섬광체에서 발생한 광을 전달하는 기능을 수행한다. 섬광체 자체를 센서로 활용하는 방법은 섬광체에서 발생한 광을 PMT, CCD 카메라 등과 같은 장치에 직접 연결한 방사선량계를 구성하는 것이다. 광섬유 자체를 센서로 활용하는 경우는 광섬유가 방사선과 반응하여 섬광을 발생함과 동시에 광을 전달하는 기능을 수행한다. 본 연구와 같이 광섬유 선단에 소형 섬광체를 접합한 센서 연구들을 다음과 같이 기술하였다.

1) 고선량장에서 광섬유 검출기에 의한 방사선량 분포 측정[Eiji Takada, 등, 1999]

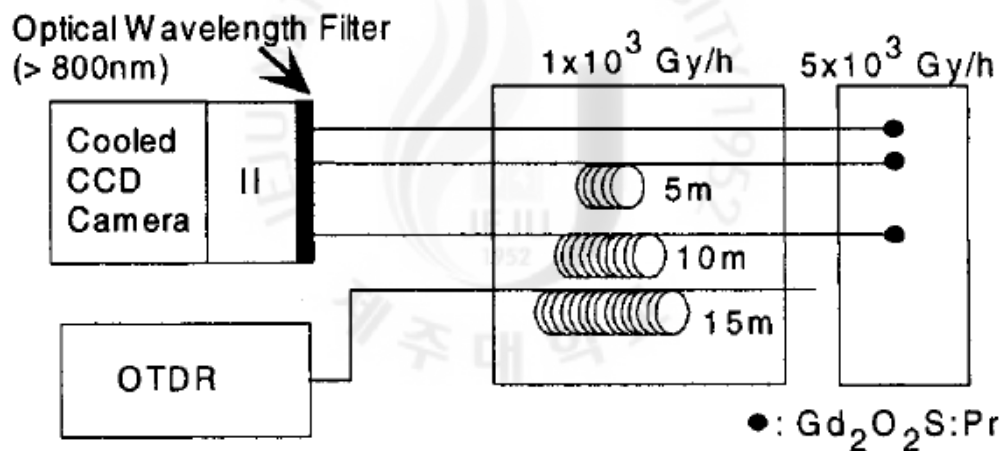


Fig. 1 Schematic diagram of radiation distribution measurement system using a conventional imaging sensor combined with a loss correction system with the OTDR technique.

Fig. 1와 같이 적외선 영역파장을 내는 섬광체를 광섬유 선단에 접합하고, 광섬유 다발들을 CCD 카메라에 연결하였으며 광섬유와 CCD 카메라 사이에는 800nm이상의 파장만 통과하는 필터를 부착한 방사선 검출기 모형을 제작하여 연구를 수행하였다. 섬광체와 광섬유 사이에서 발생하는 손실 분포를 측정하

기 위해 OTDR 기술을 사용하였다. OTDR(Optical Time Domain Reflectometry, 광시간 영역 반사측정법) 기술은 광섬유 통하여 광 펄스가 전송된 결과 생기는 산란과 반사에 의해 입력측으로 되돌아오는 광을 시간의 함수로 하여 광 강도 변화를 측정하는 방법이다.

2) 고에너지 전자선 측정을 위한 광섬유 방사선 센서에서의 체렌코프 빛 측정 및 분석 [장경원 등, 2006]

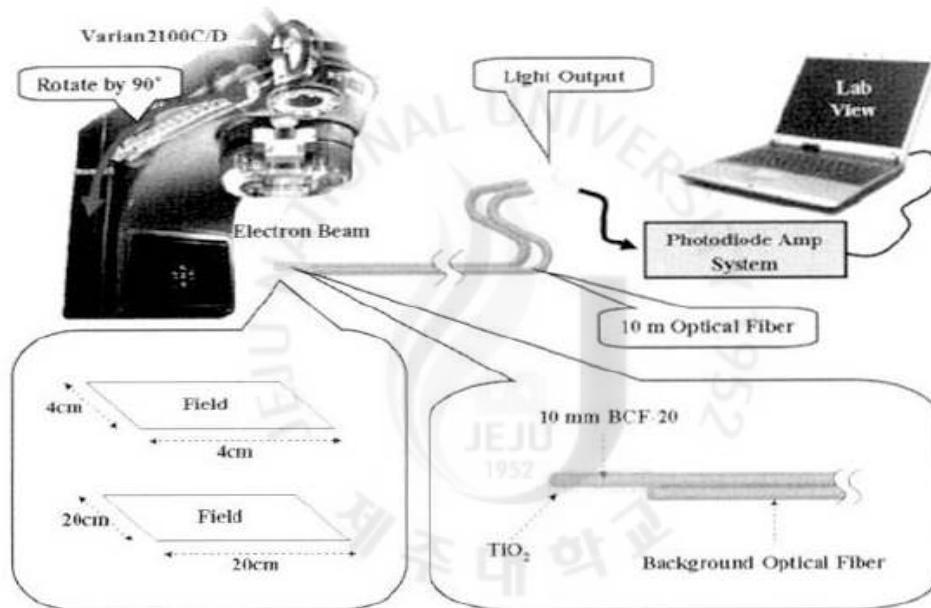


Fig. 2 Experimental setup of measurements and characterizations of cerenkov light in fiber-optic radiation sensor irradiated by high energy electron beam

유기섬광체(BCF-20) 센서부와 멀티모드 플라스틱 광섬유를 이용한 치료용 방사선의 선량측정 및 교정을 위한 광섬유 방사선 센서 연구를 진행하였다. Fig. 2와 같이 실험 장치를 구성하여 실험을 하였다. 그리고 고에너지 전자선 계측시 광섬유에서 발생하는 체렌코프 빛은 섬광체 자체 신호의 검출에 방해 요소로 존재하는데, 유기섬광체를 포함하는 광섬유 방사선 센서에서 발생하는

섬광량을 광섬유 자체에서 발생하는 체렌코프 빛의 양을 측정하여 감법으로 분리, 제거한 연구를 수행하였다 또한 체렌코프 빛과 전자선의 조사각도, 에너지, 조사 범위와의 관계를 연구하였다.

3) 소형 BGO섬광체에서 발생된 섬광 수집[Simon R. Cherry, 1995]

이는 작은 동물의 imaging(영상)을 위한 소형 BGO PET에 대한 연구에 대한 것이다. 소형 BGO 섬광체와 광섬유를 결합하고 multi-anode PM tube에 연결한 센서를 구성하였다. 소형 BGO의 크기와 광섬유의 길이에 따른 multi-anode PM tube에 수집되는 섬광량을 분석하였으며, 소형 BGO와 광섬유를 결합한 센서들을 64채널로 정렬하는 PET에 대한 연구를 진행하였다. 이러한 실험 구성은 Fig. 3에 나타내었다.

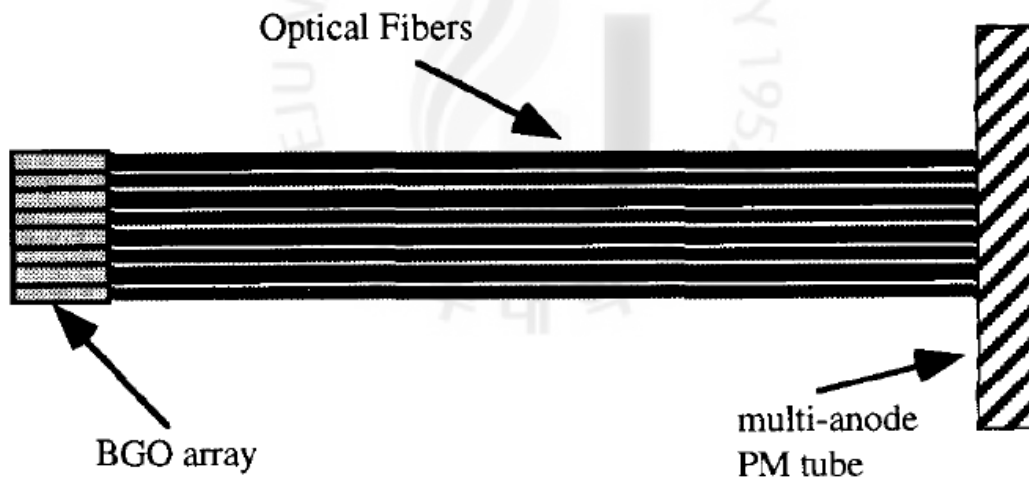


Fig. 3 Schematic diagram showing cross-section through proposed PET detector.

4) 정위적방사선수술에서 국소범위의 선량측정을 위한 소형섬광체-광섬유 검출기[A. S. Beddar, 2001]

정위적방사선수술을 위한 소형 플라스틱 섬광체(BC 400, 1mm diameter by

2mm long)와 pure 실리카 광섬유를 결합하고 head-on-type PMT를 연결한 센서를 구성하였다. 또한 광섬유에서 생겨나는 체렌코프 광을 제거하기 위해 별도로 광섬유센서를 구성하였는데 이와 같은 센서 구성은 Fig. 4에 나타내었다. 이 섬광체 센서의 특징들은 인체에 유사한 성질로 구성되어 있어 인체에 대한 선량평가가 정확하고, 공간분해능이 좋고, 실시간 원격측정이 가능하며, 에너지 독립성, 선량의 선형성 등의 장점을 가지고 있다. 정위적방사선수술에 쓰이는 PTW ionization chamber와 Si diode 선량계들과 비교하는 실험을 수행하였다.

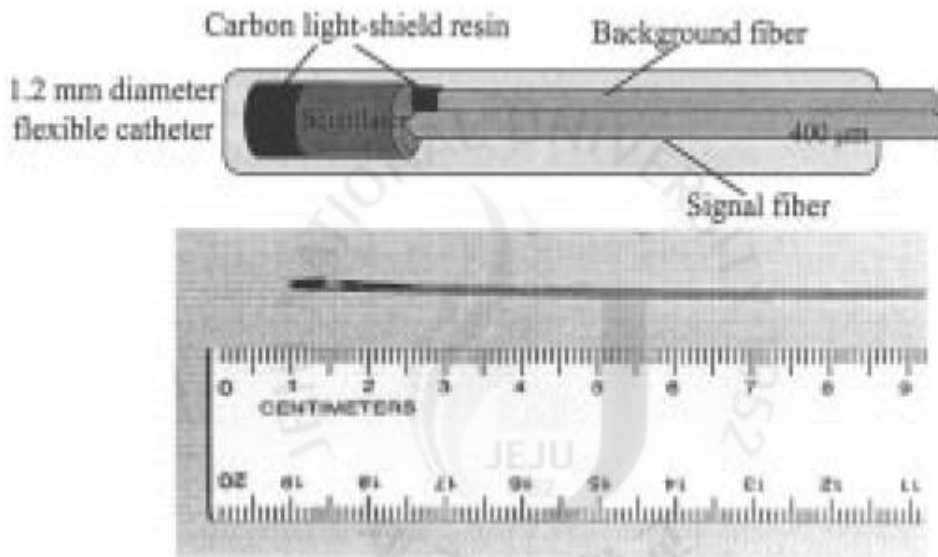


Fig. 4 Schematic diagram and a scaled photograph of the proximal end of the Scintillator-Fiberoptic-PMT detector system

5) X-ray 또는 γ -ray의 원격 측정을 위한 무기섬광체와 광섬유를 조합한 방사선 센서 제작[B. S. Lee, 2004]

이 연구에서는 film type와 powder type 두 형태의 섬광체 센서로 구성하였고 광섬유를 통해 전달되는 광을 optical detector와 power meter로 측정하는 시스템을 제작하였다. film type의 센서는 총 두께가 0.35mm이고 기본 물질로

는 polystyrene과 반사체로는 TiO_2 를 사용하였으며 여러 종류의 무기섬광체를 이용하여 실험하였다. power type의 센서는 무기섬광체의 평균입자 크기는 $2\sim 25\mu m$ 이며 밀도는 $4.5\sim 7.5g/cm^3$ 이다. 이와 같은 film type 센서 구성은 Fig. 5에 나타내었다. 방사선 선원으로는 X-ray 발생장치와 Ir-192을 사용하였다. 여러 종류에 film type의 센서들로 측정된 optical power를 비교하였고, 같은 film type의 센서에 광섬유의 길이를 2m와 11m로 서로 다르게 구성한 선량계 모델들을 실험하여 비교분석하였다.

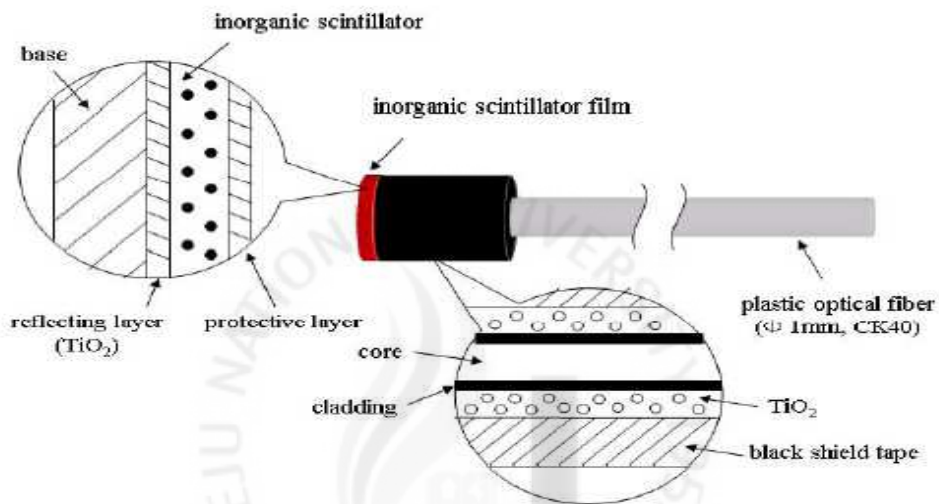


Fig. 5 Schematic diagram of film type fiber-optic sensor tip with inorganic scintillator

6) 방사선진단에서 선량측정을 위한 LiF:W 섬광체 센서[R Nowotny, 2004]

광섬유 선단과 LiF:W 섬광체 사이에 PMMA로 만든 light guided를 광학시멘트로 붙이고 광섬유 후단에는 PMT를 연결한 방사선 진단용 센서 모형을 제작하였다. LiF:W 섬광체는 방사선진단에서 선량측정을 위한 적합한 에너지 존성과 발광량을 가지는 물질이고, 흡습성이 없으며 밀도는 $2.64g/cm^3$ 이다. Toray industries에서 구입한 직경 3mm인 광섬유(PGR-FB3000)를 1.2m로 잘라서 사용하였다. 이 섬광체 센서는 X-ray에서 상업적으로 사용되는 tissu-equivalent 플라스틱 섬광체(BC 470)센서 보다 energy response의 변화

가 적었다. 선량률이 13.6Gy/min 일때 선형적 이였으나 높은 선량율일 때는 그렇지 못하였다.

7) 광섬유 섬광체를 이용한 방사선 선량계 개발[주관식, 2006]

이 연구에서 제작된 검출기와 시스템 구성도를 Fig. 6에 나타내었다. 제작된 검출기의 센서는 Bicron 사의 BCF-12 광섬유섬광체로 길이가 10cm이고 직경이 1mm이며 광섬유는 길이가 10m이고 직경이 1mm이다. 광섬유섬광체에서 발생하는 빛을 원거리로의 전송을 목적으로 하는 것이기 때문에 광섬유의 빛 손실에 줄이는데 주안점을 두고 연구를 수행하였으며, X선과 β 선에서 센서의 민감도 측정을 하였다. 또한 X선 발생장치에서 관전압 변화에 따른 광섬유 섬광에서의 특성 조사 실험을 수행하기 전에 MCNPX code를 이용한 시뮬레이션을 시행하였다.

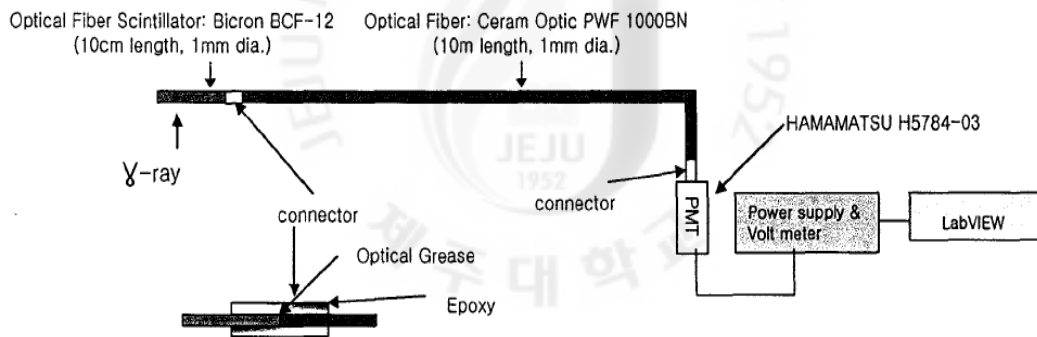


Fig. 6 Schematic diagram of dosimeter model using optical fiber scintillator

8) 협소지역의 방사선분포를 측정하기 위한 광섬유 센서[C. Mori, 1994]

LiOH를 도포한 ZnS(Ag) 센서를 플라스틱 광섬유에 접합하고 2~3mm의 협소지역에 투입하여 열중성자속분포를 측정하는 연구를 수행하였다. 이 방법은 중성자, 감마선을 측정하는 것이 가능하며, 소형이고 유연하다는 장점을 이용

하여 원자로 및 방사선 시설에 협소부위의 선량측정이 가능하다. 이 센서의 투입 깊이는 별도의 구동장치를 이용한다. 이 구동장치는 컴퓨터 프로그램에 의해 구동속도를 자유로이 선택할 수 있으며 시간차 구동도 가능하다. 그리고 원자로 입계집합체내의 열중성자 속 분포를 측정하였다. 이와 같은 센서 모형은 Fig. 7에 나타내었다.

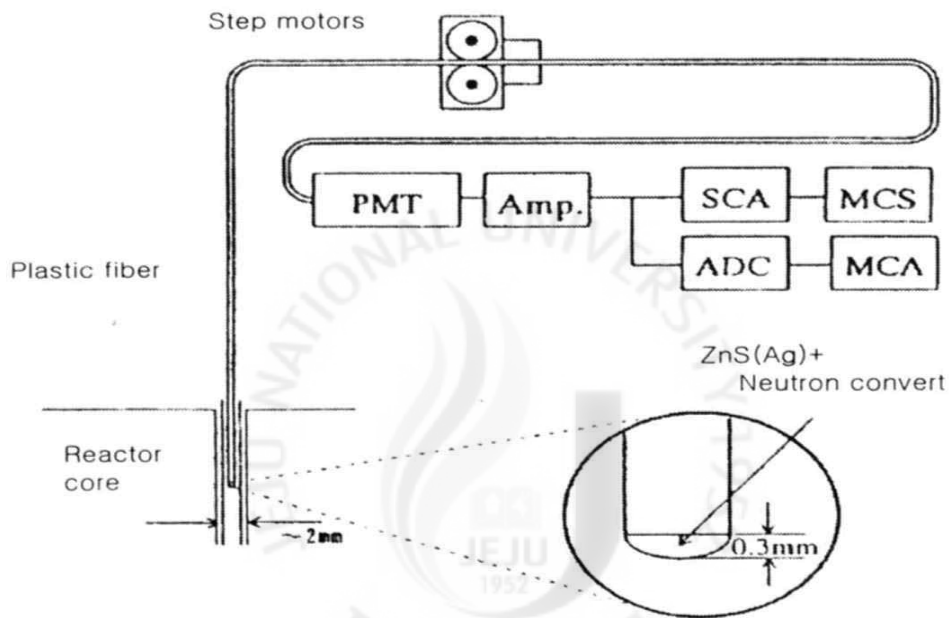


Fig. 7 Schematic diagram of scintillator-painted optical fiber system and fiber driving unit

III. 실험장치 및 방법

본 연구의 실험장치의 구성은 Fig. 8과 같고 적용된 실험 장치는 크게 방사선을 감지하는 센서부인 섬광체, 방사선이 섬광체에 입사하여 발생하는 광을 전달하는 전송용 광섬유와 PMT 등으로 구성되어 있다.

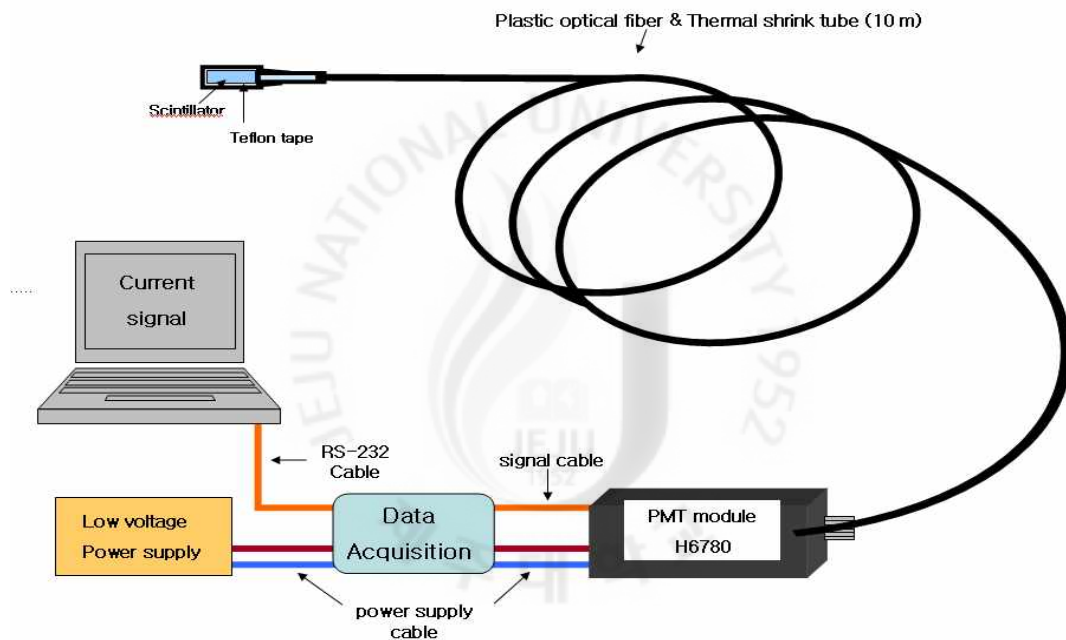


Fig. 8 Schematic of the fiber-optic dosimeter system

1. 센서부분인 섬광체, 플라스틱 광섬유, PMT의 구성

1) 센서부분의 구성

본 연구에서 사용된 섬광체는 BGO섬광체, GSO섬광체, CWO섬광체, BC-412 플라스틱 섬광체를 이용하였다. BGO와 BC-412 플라스틱 섬광체는

Saint- Gobain Crystals에서 각각 $10 \times 10 \times 10 \text{mm}^3$ 크기와 $100 \times 100 \times 20 \text{mm}^3$ 크기의 섬광체를 구입하였으며, GSO와 CWO섬광체는 Institute for Single Crystal(ISC)에서 $10 \times 10 \times 10 \text{mm}^3$ 크기의 섬광체를 구입하였다. BGO, GSO, CWO섬광체는 $4.9 \times 4.9 \times 10 \text{mm}^3$ 크기로 가공하고 BC-412 플라스틱 섬광체는 $5 \times 5 \times 20 \text{mm}^3$ 크기로 가공하여 센서부분을 제작하였다. 각 섬광체의 표면은 polishing film과 알루미나 파우더로 polishing하고 섬광체 안에서 발생된 광의 손실을 막기 위해 반사체(테프론 테이프)로 감쌌다. 그리고 외부적인 광을 차단하기 위해서 열수축튜브(Heat shrinkable Tube)로 2중으로 피복(cladding)하였다. 각 섬광체의 고유한 특성들은 Table. 1에 나타내었다. Fig. 9에서는 센서제작 과정들을 기술하였다.



Fig. 9 Process of sensor manufacture

2) 광전송용 플라스틱 광섬유의 제작 및 구성

플라스틱 광섬유는 Toray Industry에서 제조한, 직경 3mm(PGR-FB3000)의 광섬유를 10m 길이로 잘라서 사용하였다. 광섬유 Core의 굴절률은 1.49, Cladding의 굴절률은 1.41이고 광전송 손실은 400~600nm 빛의 파장에 대해 0.2db/m이하이다. 플라스틱 광섬유는 범용수지인 PMMA(Polymethyl Methacrylate)를 원재료로 하여 SI TYPE(Step Index) 으로 만들어진 전자재료용 소재로써 경량 대용량 NOISE등에 우수한 특성을 가지고 있다. 이 광섬유는 베어파이버(피복되지 않은 광섬유)여서 외부에서 들어오는 광을 차단하기 위해서 열수축튜브(Heat shrinkable Tube)로 2중으로 피복(cladding)하였다. Fig. 10와 Table. 2에서 플라스틱 광섬유 그림과 특성을 보여주고 있다.



Fig. 10 Picture of 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℃

3) PMT(Photomultiplier Tube)의 구성

PMT는 Hamamatsu사의 전치 증폭기와 일체로 제작된 전류형(Current type)을 구입하였다. 전류형인 H6780-04 photosensor modules는 photomultiplier tube와 high voltage power supply circuit로 구성되어있다. 특징으로는 low ripple noise와 fast setting time를 가지며 스펙트럼 응답 파장은 180~850nm이고 최고 민감한 파장은 400nm이다. PMT의 input voltage는 15V이며, PMT의 gain는 anode control voltage를 0.25~0.9V사이에 조정하면서 $10^2 \sim 10^6$ 사이에서 조절가능하다. 그리고 PMT Output current의 영역은 10pA~50mA이며, Operating temperature는 5~45°C사이에서 사용하여야 한다. Fig. 11와 Fig. 12에서 본 연구에서 사용한 PMT의 사진과 특성을 나타내었다.

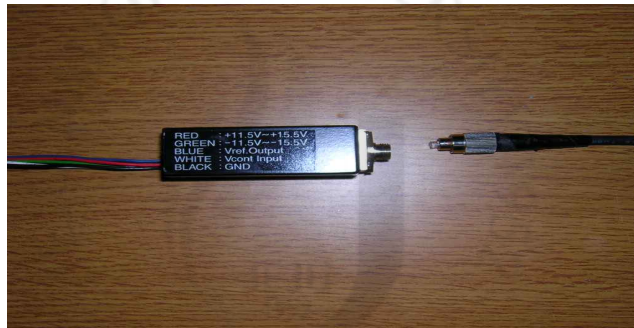


Fig. 11 Picture of Photomultiplier Tube (H6780-04, Hamamatsu)

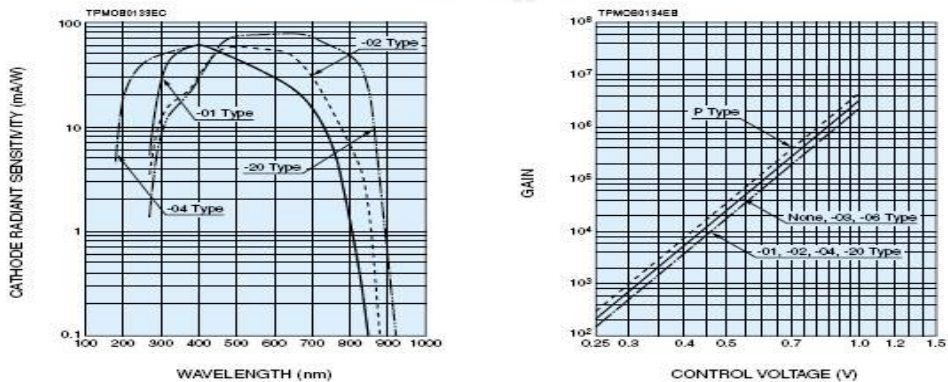


Fig. 12 Characteristics of Photomultiplier Tube(H6780-04, Hamamatsu)

2. 섬광체와 광섬유를 조합한 센서 모형의 구성 및 측정 방법

본 연구의 실험장치의 구성은 앞서 Fig. 8에 나타냈으며, 적용된 실험 장치는 크게 섬광체 센서부분, 신호 전송을 위한 광섬유, 전류형 PMT로 구성된다. 센서부분은 BGO($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$), GSO(Gd_2SiO_5), CWO(CdWO_4) 섬광체들을 각각 $4.9 \times 4.9 \times 10\text{mm}^3$ 으로 가공하고, BC-412 플라스틱 섬광체는 $4.9 \times 4.9 \times 20\text{mm}^3$ 으로 가공하여 사용하였다. 섬광체의 표면은 polishing film과 알루미나 파우더로 연마(polishing)하고 반사체인 테프론 테이프로 감쌌다. 직경 3mm 크기의 플라스틱 광섬유는 10m 길이로 잘라서 사용하였다. 섬광체와 PMT에 접합하는 양 끝 단면을 polishing film과 알루미나 파우더로 연마(polishing)하였다. 섬광체와 광섬유의 선단을 결합하고, 광섬유 끝단을 FC형 커넥터로 연결하여 전류형 H6780-04 PMT와 연결하였다. PMT에서 출력되는 전류 신호는 Hamamatsu사에 구입한 Data Acquisition Unit (C8908)에 수집되어 아날로그 전류 신호를 디지털 전류 신호로 변환하여 RS-232C cross cable을 통해 PC로 전달되어진다. Data Acquisition Unit(C8908) 실험 장치는 current signal output과 power supply input, control voltage input으로 구성되어 있으며, Integration time과 Dead time을 컴퓨터 화면상에서 조절이 가능하고 PMT의 control voltage(0.25~0.9V)도 조절이 가능하다. C8908 장치의 실행프로그램은 Window95,98에서 DOS prompt로 실행할 수 있다. Fig. 13에는 Data Acquisition Unit(C8908) 장치와 실험장치 구성을 나타내었다.

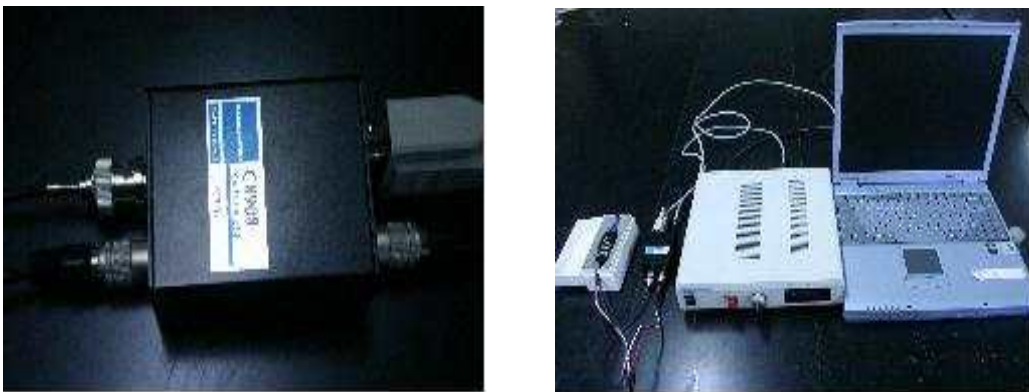


Fig. 13 Picture of Data Acquisition Unit (C8908) and Experimental setup

본 연구에서 제시한 센서모형을 가지고 실험을 수행한 장소는 제주대학교 연구 시설 중에 하나인 방사선응용과학연구소에서 2004년 2월 19일 기준으로 10.807Ci(399.9TBq) ^{60}CO 방사선 조사실에서 실험을 하였다. 파노라마식 급 조사 시설로서 조사선량률 범위가 0.4~5000 Gy/h이다. 본 실험을 수행했던 기간은 2008년 6~10월로 선원의 방사능은 대략 6000Ci이었다. 센서 모형의 방사선량계로서의 적합성을 알아보기 위해, 선원과 센서간 거리에 따라 PMT의 전류를 측정하고 MCNP(Monte carlo N-Particle)Code로 계산하여 센서부인 섬광체에 흡수한 에너지를 구하였다. 측정된 PMT의 전류와 MCNP code로 계산된 섬광체의 흡수 에너지를 선원과 센서간 거리에 따른 정규화(normalized)분포 변화를 비교분석하여 방사선량계로서의 가능성을 모색하였다. 그리고 섬광체 센서로 측정된 PMT 전류와 같은 지점에서 전리함(Ionization chamber)과 Alanine 화학선량계로 측정된 선량률과 비교 분석하였다. PMT 전류와 선량률과의 비교는 선원과 센서간 거리에 따른 정규화(normalized) 분포변화, PMT 전류와 선량률과의 선형성, PMT 전류 값을 방사선량률로 변환할 수 있는 전류-선량률 변환상수 구하여 방사선량계로서의 개발가능성을 분석하였다.

1) 섬광체와 광섬유를 조합한 센서 모형의 측정방법

조사시설의 ^{60}CO 선원과 센서간 거리를 20cm, 25cm, 30cm, 35cm, 40cm, 60cm, 80cm, 100cm, 120cm 지점에서 측정하였다. 현재, 일반적으로 제주대학교 조사 시설에서 연구의 목적으로 생물체에 방사선조사를 하는 높이와 방향을 선택하였는데, 측정 높이는 조사대 지면에서 35cm 높이이고 조사방향은 C방향(Fig. 14에 참조)으로 하였다. 조사하는 각 지점마다 1분간 측정한 결과를 평균하였다. 그리고 광섬유는 방사선과의 직접적인 작용으로 인해 센서부로 사용되는 섬광체가 아닌 광섬유 자체에서 체렌코프 빛(Cerenkov light)이 발생하게 되며, 발생된 체렌코프 빛은 광 계측장비(PMT)로 전달된다. 광섬유에서 불필요하게 발생하는 체렌코프 빛을 제거하기 위해 섬광체가 없는 10m 길이에 광섬유 센서를

별도 제작하고 측정지점마다 측정하여 감법 하였다. 그래서 섬광체 안에서 발생 되는 실제 PMT의 전류를 계산할 수 있었다. 또한 PMT의 control voltage는 0.3V로 하여 PMT의 gain를 10^3 으로 얻었다.

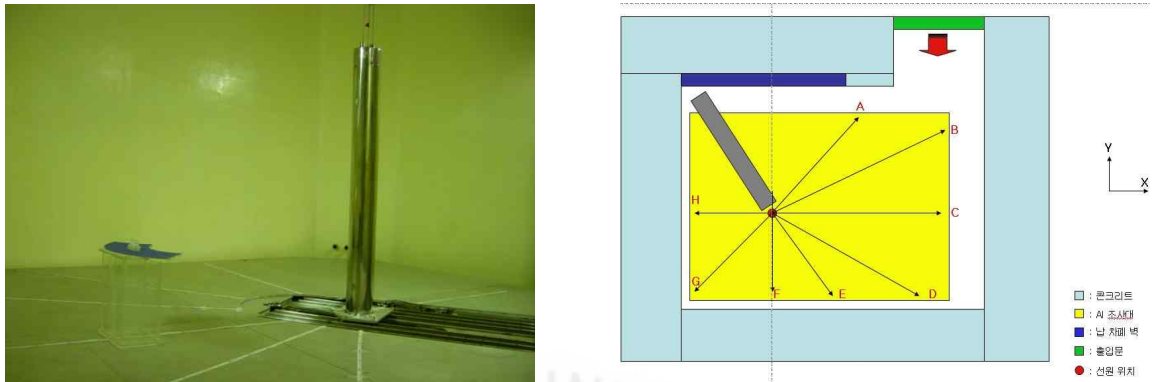


Fig. 14 Picture and schematic of 6000Ci ^{60}Co irradiation chamber.

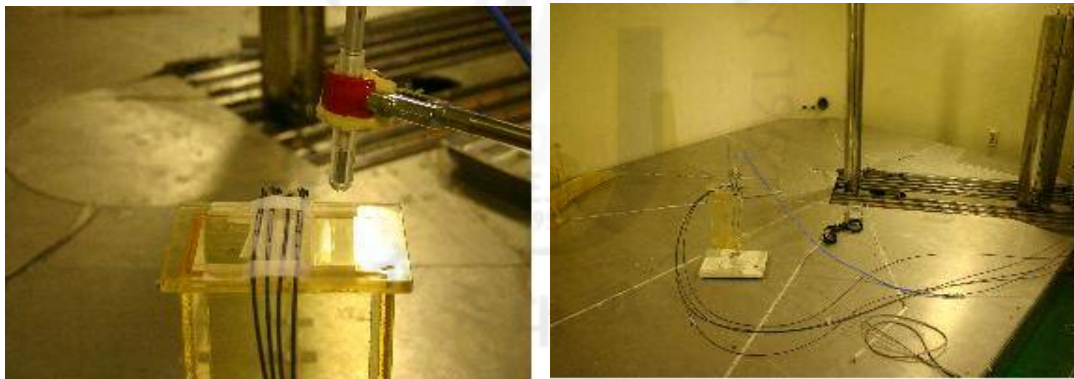


Fig. 15 Arrangement of the fiber-optic dosimeter measuring the PMT current in irradiation chamber.

2) MCNP(Monte carlo N-Particle) code 계산

몬테카를로법은 난수(Random Number)를 발생하여 확률적 방법으로 물리적, 수학적 문제를 해결하는 방법으로, 이러한 문제를 해결하기 위한 프로그램을 MCNP(Monte carlo N-Particle) code라고 한다. MCNP code는 중성자-광자-전자의 수송코드로 잘 알려져 있으며, 연속적인 에너지의 중성자-광자-전자를 동

시에 다룰 수 있고 기하학적 구조가 복잡한 원자로, 방사선 조사실, 인체 팬텀 등에 방사선 차폐 및 흡수에너지 등을 계산할 수 있다.

본 연구에서는 제주대학교 조사실의 설계를 바탕으로 하여 MCNP code의 기하학적인 구조를 설계하였다. 조사실에 기하학적인 구조를 설계한 뒤에, 구성하고 있는 물질의 물리적인 물성치를 입력하고 방사선원의 종류 및 에너지를 입력하였다. MCNPX 코드 계산의 경우에 섬광체 부피를 하나의 cell로 잡고서 F6 tally option(Energy deposition averaged over a cell)을 사용하여 그 cell 내에 단위 질량당 흡수에너지를(MeV/g)를 계산하였다. 단위 질량당 흡수에너지는 각각의 섬광체들에 총 질량을 곱해주어 에너지(MeV)단위로 변환하였다. 또한 MCNP code의 결과 값의 신뢰도는 상대오차 5% 미만일 때 정확성이 있는 것으로 판단한다. 하지만 여기서 말하는 신뢰도는 오로지 MCNP code 자체의 계산 값에 정확성에만 판단되는 기준이다. 이러한 상대 오차 범위를 만족하기 위해, history(N개, nps)를 $1 \times 10^7 \sim 2 \times 10^8$ 까지 높여가면서 5%미만으로 유지하였다. Fig. 16에서는 조사실의 MCNPX cord simulation 그림을 나타내었다.

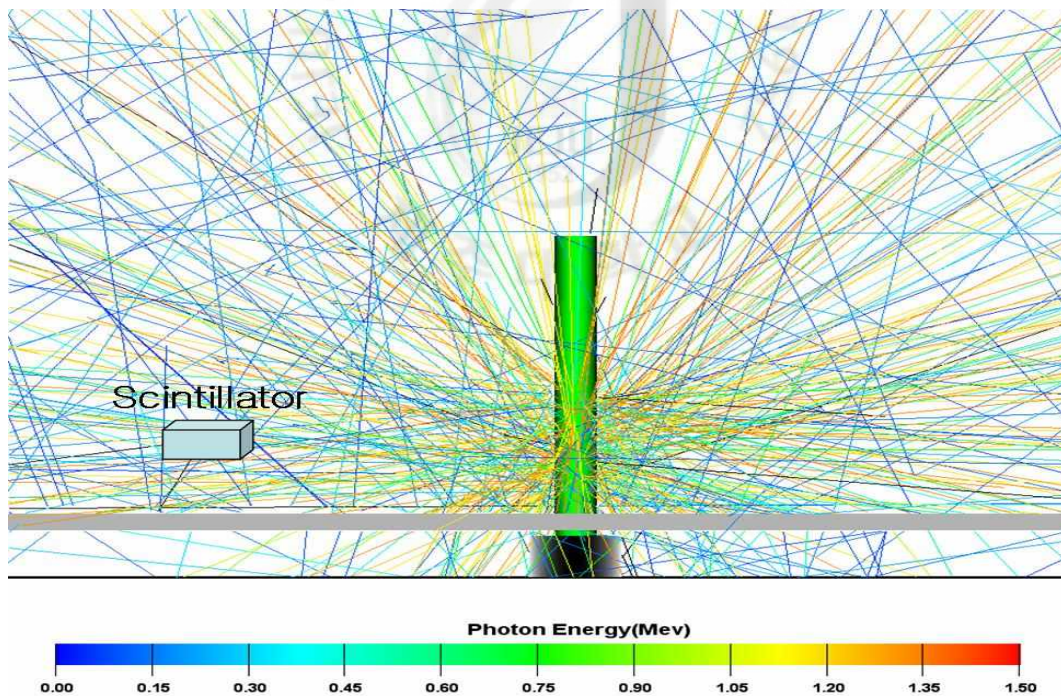


Fig. 16 MCNPX geometry plots of the irradiation chamber

3) 전리함(Ionization chamber)과 Alanine 화학 선량계의 측정 방법

본 연구에서 사용한 전리함은 Farmer-type으로 PTW Freiburg사가 제작한 전리체적이 0.6cc인 자유공기 전리함이다. 이 thimble type 전리함은 내부로 공기가 자유롭게 드나들 수 있기 때문에 온도 및 기압에 대한 보정이 필요하다. 전리함의 ion transit time은 180ms이고 99.5% 이온 수집 효율의 선량이 2.8Gy/s이다. 전리함에서 생성된 전하량의 측정은 전위계(Electrometer, Cardinal Health Co. model 35040)를 사용하였다. 측정 지점은 조사시설의 ^{60}Co 선원과 전리함의 센서체적중심간 거리를 20cm, 25cm, 30cm, 35cm, 40cm, 60cm, 80cm, 100cm, 120cm에서 측정하였다. 측정 높이는 조사대 지면에서 35cm 높이이고 조사방향은 C방향(Fig. 14에 참조)으로 하였다. 조사하는 각 지점마다 1분간 3회 반복 측정하고 평균값의 전하량(nC)을 구하였다. 평균값의 전하량은 방사선 에너지에 대한 보정 상수, 측정온도(T)와 압력(P)변화에 대한 공기밀도 보정계수 및 물 흡수선량 교정상수 등을 곱하여 물 흡수선량으로 변환하였다. 이는 Alanine 화학선량계가 방사선을 흡수하여 나타내는 선량이 물 흡수선량이기 때문에, 전리함을 물 흡수선량으로 하여 서로 비교하기 위함이다. Fig. 17에서는 전리함의 센서부분과 전위계를 나타내었다.



Fig. 17 Picture of Ionization chamber(PTW Freiburg) and Electrometer(Cardinal Health Co. model 35040)

본 연구에서 사용한 화학선량계는 Bruker Biospin사에서 제작한 알라닌 (Alanine) 화학선량계이다. 전리 방사선(Ionization radiation)은 물질에 다양한 형태들에서 자유라디칼(Free radical)을 생산하고 EPR spectrometer에 의해 정량적으로 검출되어진다. 아미노 산(Amino acid) L-Alanine는 전리 방사선에 의해서 매우 안정한 자유라디칼을 형성한다. 알라닌 자유 라디칼(Alanine free radical)는 선량에 의존하는 EPR signal를 산출한다. 그러나 이 선량계는 선량을, 에너지형태를 직접적으로 구분할 수 없다. 다만 총 누적선량만 측정하는데 이용되는데, 본 실험에서는 측정지점마다 총 누적선량을 500Gy이상으로 하였다. 그리고 이 선량계는 상대적으로 온도와 습도에 대해 민감하지 않으며, 측정된 선량이 매우 정확하고 낮은 편차($\pm 2\%$)를 보여준다. 현재 이 선량계 X-ray 조사실이나 전자 빔 조사실, 감마조사실에서 사용되어지고 있다.

Alanine 화학선량계로 측정한 지점은 선원과 센서간 거리를 20cm, 25cm, 30cm, 35cm, 40cm, 60cm, 80cm, 100cm, 120cm에서 측정하였다. 측정 높이는 조사대 지면에서 35cm 높이이고 조사방향은 C방향(Fig. 14에 참조)으로 하였다. 각 지점마다 총 누적선량을 500Gy이상으로 하였는데, 이는 Alanine 화학선량계의 선량 판독을 하는데 편리하고 정확성을 유지하기 위함이다. 그리고 Alanine 화학선량계의 선량 판독은 정읍방사선연구소에 의뢰하였다. Fig 18에서는 Alanine 화학선량계의 판독 사진과 EPR 신호 상관 그래프를 나타내었다.

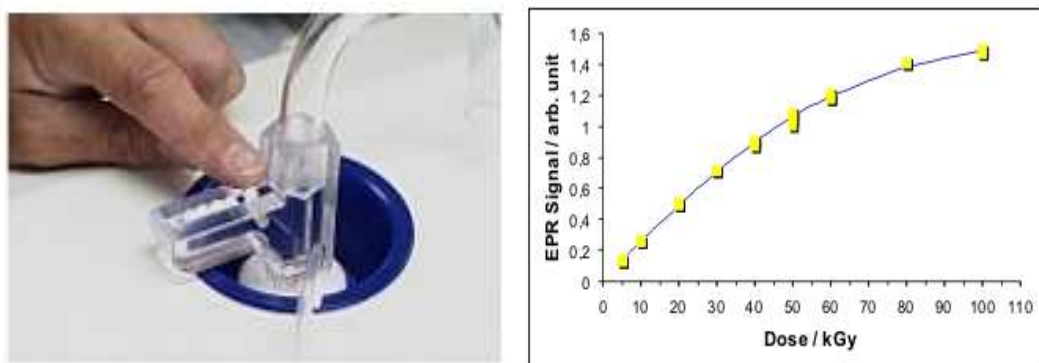


Fig. 18 Picture of reading of Alanine dosimeter and Dose-EPR signal graph

IV. 결과 및 고찰

1. 섬광체 센서들로 측정된 결과와 MCNPX code로 계산된 결과 비교

센서 모형의 방사선량계로서의 적합성을 알아보기 위해, 선원과 센서간 거리에 따라 PMT의 전류를 측정하고 MCNP(Monte carlo N-Particle) Code로 계산하여 센서부인 섬광체에 흡수한 에너지를 구하였다. 측정된 PMT의 전류와 MCNP code로 계산된 섬광체의 흡수 에너지를 선원과 센서간 거리에 따른 정규화(normalized)분포 변화를 비교분석하여 방사선량계로서의 가능성을 모색하였다. 정규화 분포(Normalized distribution) 값은 각 지점마다 측정되고 계산되어진 결과를 선원과 센서 간의 거리가 20cm인 지점에서 측정되고 계산되어진 결과로 나누어 산출하였다.

Fig. 19에서는 BGO sensor로 측정된 결과와 MCNPX code로 계산된 결과를 선원과 센서간 거리에 따른 정규화 분포로 나타내었다. 측정된 결과와 계산된 결과의 정규화 분포는 선원과 센서간 거리에 따라 비슷한 양상으로 변하지만 동지점에서 측정된 결과와 계산된 결과의 정규화 분포 값이 상당한 차이가 보인다. 측정지점마다의 정규화 분포 값에 편차는 12~34%로 나타나고 있다.

Fig. 20에서는 GSO sensor로 측정된 결과와 MCNPX code로 계산된 결과를 선원과 센서간 거리에 따른 정규화 분포로 나타내었다. 측정된 결과와 계산된 결과의 정규화 분포는 선원과 센서 간의 거리에 따라 비슷한 양상으로 변하지만 측정지점마다의 정규화 분포 값에 편차는 6~16%로 나타나고 있다.

Fig. 21에서는 CWO sensor로 측정된 결과와 MCNPX code로 계산된 결과를 선원과 센서간 거리에 따른 정규화 분포로 나타내었다. 측정된 결과와 계산된 결과의 정규화 분포는 선원과 센서간의 거리에 따라 비슷한 양상으로 변하지만 측정지점마다의 정규화 분포 값에 편차는 0.9~17%로 나타나고 있다.

Fig. 22에서는 BC-412 sensor로 측정된 결과와 MCNPX code로 계산된 결과를 선원과 센서간 거리에 따른 정규화 분포로 나타내었다. 측정된 결과와 계산된 결과의 정규화 분포는 선원과 센서 간의 거리에 따라 비슷한 양상으로 변하

지만 측정지점마다의 정규화 분포 값에 편차는 2~17%로 나타나고 있다.

본 연구에서 제시한 섬광체 센서들로 측정된 PMT 전류와 MCNPX code로 계산한 섬광체에 흡수한 에너지와의 비교에서 선원과 센서간 거리에 따른 정규화 분포 변화의 양상은 비슷하였다. 측정지점마다의 정규화 분포 값에 편차는 상당한 차이를 보였는데 이것은 선원과 센서간 거리 20cm일 때, 가장 높은 선량률에서 normalized한 것을 분석하는데 적합하지 않았다.

섬광체의 검출능력은 밀도와 원자번호가 높을수록 뛰어나지만 그에 비해 광수율은 섬광체의 고유특성으로 섬광체마다 그 능력이 다르다. 이는 섬광체 센서들로 측정된 PMT 전류는 방사선의 섬광체에 입사하여 발생하는 발광량과 비례하지만 MCNPX code로 계산된 흡수에너지는 검출능력에 비례한다. 따라서 MCNP code 계산은 섬광체 센서간 차이는 구별할 수 없었다. 이러한 섬광체의 검출능력과 광수율의 관계를 fig. 23와 24에서 나타내었다.

Fig. 23에서는 선원과 센서간 거리에 따라 센서들의 측정된 PMT 전류 값을 나타내었다. 선원과 센서 간의 거리가 20cm 일 때 측정된 전류는 CWO 센서 일 때 $2.4 \times 10^{-6} \text{A}$, GSO 센서 일 때 $1.7 \times 10^{-6} \text{A}$, BGO 센서 일 때 $6.5 \times 10^{-7} \text{A}$, BC-412 센서 일 때 $3.6 \times 10^{-7} \text{A}$ 로 측정되었다. 이는 Table. 1에서 섬광체들에 특성을 나타낸 것 중에 발광량(light Output)과 비례하는 것을 알 수 있다. CWO 센서로 측정된 PMT 전류가 가장 높게 나타났으며 GSO 센서, BGO 센서, BC-412 센서 순으로 PMT 전류가 작아지는 것을 알 수 있다.

Fig. 24에서는 선원과 센서간 거리에 따라 MCNPX code로 섬광체의 흡수 에너지를 계산한 값을 나타내었다. 선원과 센서간 거리가 20cm 일 때 계산된 결과는 BGO 센서 일 때 $8.9 \times 10^{-6} \text{MeV}$, CWO 센서 일 때 $8.7 \times 10^{-6} \text{MeV}$, GSO 센서 일 때 $7.2 \times 10^{-7} \text{MeV}$, BC-412 센서 일 때 $1.8 \times 10^{-7} \text{MeV}$ 로 계산되었다. BGO 센서로 계산된 결과가 가장 높게 나타났으며 CWO 센서, GSO 센서, BC-412 센서 순으로 계산된 결과가 작아지는 것을 알 수 있다. Table. 1에서 섬광체들에 특성을 나타낸 것 중에 밀도와 원자번호에 비례하는 것을 알 수 있다.

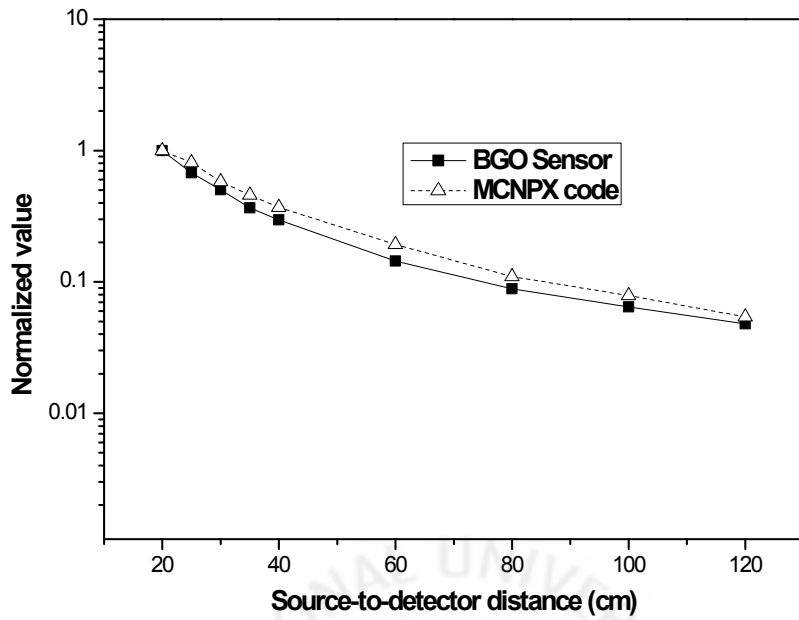


Fig. 19 Normalized distribution of the BGO sensor-measured PMT current and MCNPX-calculated deposited energy

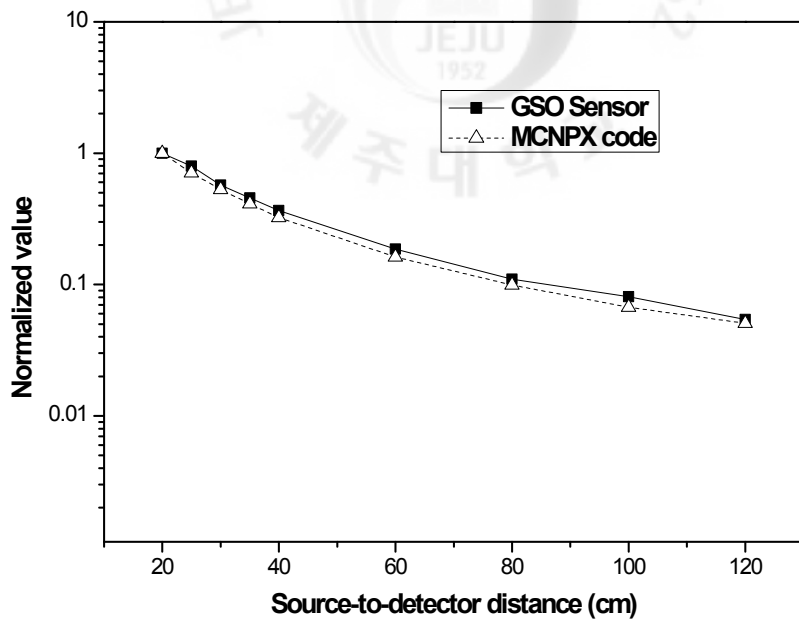


Fig. 20 Normalized distribution of the GSO sensor-measured PMT current and MCNPX-calculated deposited energy

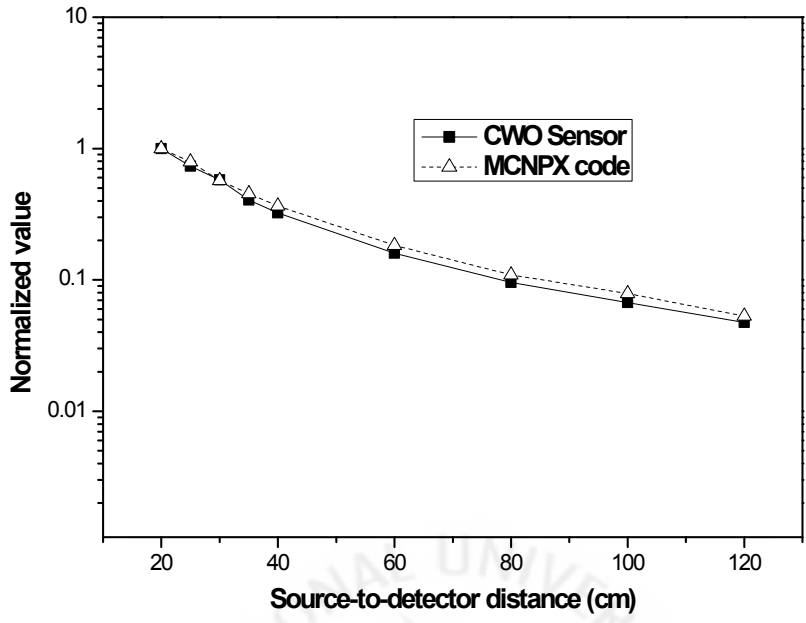


Fig. 21 Normalized distribution of the CWO sensor-measured PMT current and MCNPX-calculated deposited energy

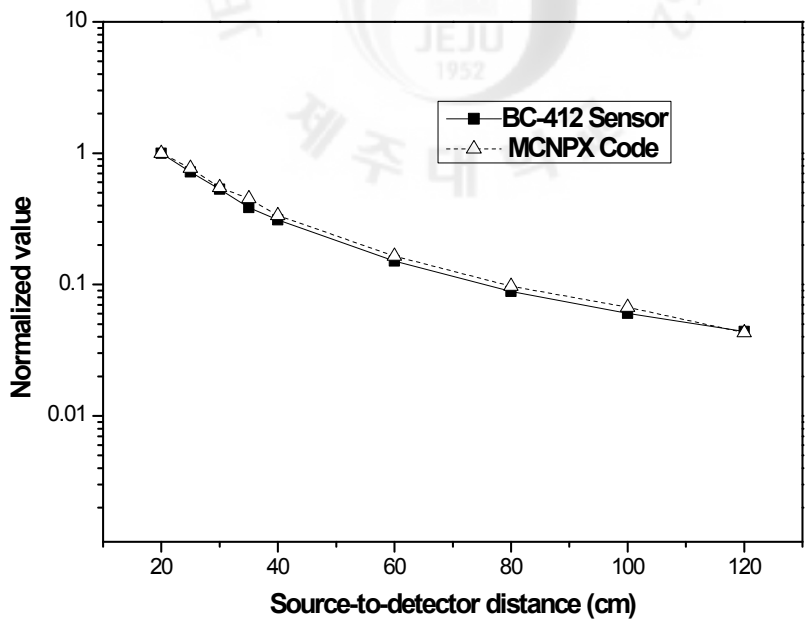


Fig. 22 Normalized distribution of the BC-412 sensor-measured PMT current and MCNPX-calculated deposited energy

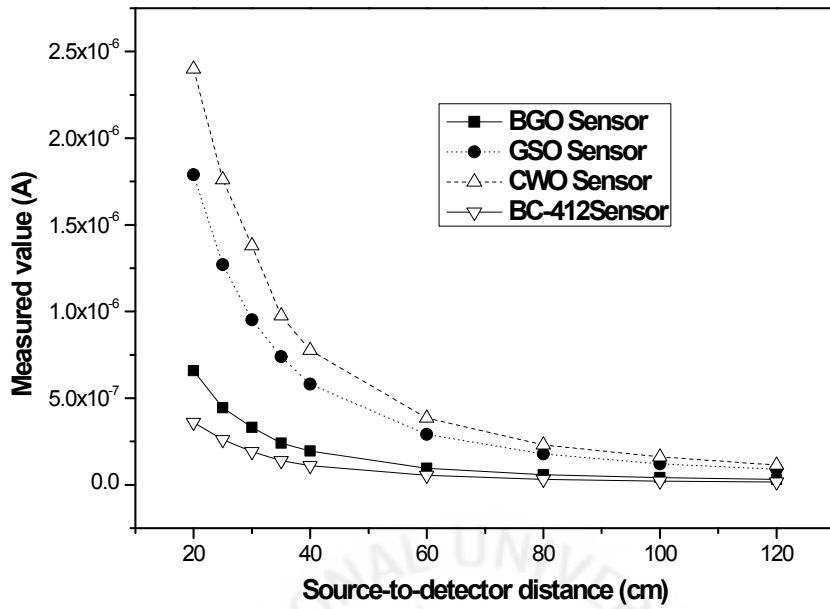


Fig. 23 Sensors-measured PMT current with source-to-sensor distance

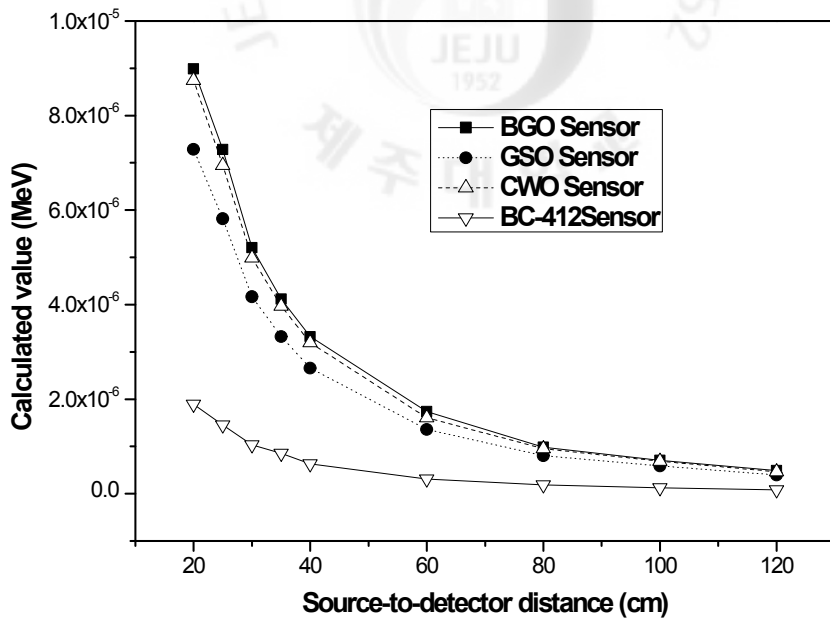


Fig. 24 MCNP-calculated deposited energy with source-to-sensor distance

본 연구에서 제시한 센서들로 측정된 결과를 MCNPX code로 계산된 결과를 비교 분석하여 방사선량계로서의 가능성을 모색하려 했지만, MCNPX code로 섬광체의 발광량(light output)과 붕괴시간(decay time) 등과 같은 고유특성까지는 모사하는데 한계가 있었다. 따라서 본 논문에서 제시한 섬광체 센서들과 현재 상용화하고 있고 감마선 조사시설에 자주 쓰이는 전리함과 화학선량계로 측정된 결과를 비교분석하여 선량계로서 개발가능성을 모색하려 한다.

2. 전리함과 Alaine 화학 선량계로 측정된 결과 비교

본 연구에서 제시한 센서들로 측정된 PMT 전류와 전리함(Ionization chamber)과 Alanine 화학선량계로 측정된 선량률과 비교 분석하기 위해서 같은 지점에서 측정하였다. 전리함과 Alanine 화학 선량계로 측정된 지점은 선원과 센서간 거리가 20cm, 25cm, 30cm, 35cm, 40cm, 60cm, 80cm, 100cm, 120cm에서 측정하였다.

Table. 3에서는 선원과 센서 간의 거리가 20cm인 지점에서 전리함으로 측정된 선량률을 나타내었다. 전리함으로 같은 지점에서 1분씩 3회 반복 측정하였는데 평균 선량률은 1141Gy/h이었다. 3회 측정된 선량률에서 가장 높은 선량률과 가장 낮은 선량률 사이에 편차는 0.77%로 낮게 나타났다.

Table 3. Ionization chamber-measured dose rate (distance 20cm)

Distance (cm)	Measurement			Average (Gy/h)	Maximum deviation (%)
	1st (Gy/h)	2st (Gy/h)	3st (Gy/h)		
20	1137	1139	1146	1141	0.77

Table. 4에서는 선원과 센서간 거리가 5cm인 지점에서 Alanine 화학 선량계로 측정된 선량률을 나타내었다. 전리함으로 같은 지점에서 25분씩 3회 반복 측정하였는데 평균 선량률은 4827Gy/h이었다. 3회 측정된 선량률에서 가장 높은 선

량률과 가장 낮은 선량률 사이에 편차는 7.14%로 나타났다.

Table 4. Alaine dosimeter-measured dose rate (distance 5cm)

Distance (cm)	Measurement			Average (Gy/h)	Maximum deviation (%)
	1st (Gy/h)	2st (Gy/h)	3st (Gy/h)		
5	4680	4760	5040	4827	7.14

선원과 센서간 거리를 5cm으로 하여 3회 측정 한 이유는 Alanine 선량계의 고유한 통계적인 변동을 알아봄으로써 선원의 방사능에 통계적 변동을 알아보고, 선원의 흔들림과 기울림에 대한 선원의 방사능에 통계적인 변동을 알아보기 위함이다. 현재 제주대학교 감마선 조사시설은 평상시에는 선원이 지하저장고에 있다가 방사선 조사할 때 지면에서 수직방향으로 용출하는 시스템이다. 선원이 지하 저장고에서 용출하면서 흔들림과 기울림 등이 있다. 따라서 Alanine 화학선량계로 측정 한 최대 편차는 선량계의 고유한 통계적인 특성과 선원의 흔들림과 기울림에 기인하는 것으로 판단된다. Alanine 화학선량계는 누적선량이 500Gy이상 일 때 판독하는데 편리하고 신뢰할 만한 값을 얻을 수 있는데, 본 연구에서는 선원과 센서 간의 거리를 멀어질수록 누적선량 500Gy를 만족하기 위해 조사시간도 늘어나서 3회 반복 측정하기가 어려웠다. 그래서 전리함으로 3회 반복 측정하여 평균한 선량률과 Alanine 선량계로 1회 반복 측정 한 선량률을 Table. 5에 나타는 것처럼 측정지점(선원과 센서간 거리)에 따라서 비교하였다.

선원과 센서간 거리가 20cm 일 때, 전리함으로 측정 한 평균 선량률은 1141Gy/h이며 Alanine 화학선량계로 측정 한 선량률은 1180Gy/h이고, 전리함으로 측정 한 선량률과 Alanine 화학선량계로 측정 한 선량률과의 편차는 3%이다. 같은 지점에서 전리함과 Alanine 화학 선량계로 측정 한 선량률의 편차는 1~10%로 나타났으며 선원과 센서간 거리가 120cm 일 때 가장 높은 편차인 10%가 보였다. 따라서 본 연구에서 제시한 섬광체 센서들로 측정 한 PMT 전류와

전리함과 Alanine 화학 선량계로 측정된 선량률과의 편차 이내로 보인다면 방사선량계로서 개발가능성을 모색할 수 있을 것이라 여겨진다..

Table. 5 Comparison of dose rate measured by ionization chamber and Alanine dosimeter

Distance (cm)	Ionization chamber (Gy/h)	Alanine dosimeter (Gy/h)	Deviation (%)
20	1141	1180	3
25	816	810	1
30	614	585	5
35	471	480	2
40	366	375	2
60	173	185	7
80	102	110	8
100	67	71	7
120	47	52	10

3. 섬광체 센서들과 전리함으로 측정된 정규화 분포 비교 분석

섬광체 센서들이 방사선량계로서의 적합성을 알아보기 위해, 선원과 센서간 거리에 따라 PMT의 전류를 측정하고 전리함으로 같은 지점을 측정된 선량률과의 정규화 분포 변화를 비교분석하였다. 정규화 분포(Normalized distribution)값은 각 지점마다 측정된 결과를 선원과 센서 간의 거리가 20cm인 지점에서 측정된 결과로 나누어 산출하였다.

Fig. 25에서는 BGO sensor로 측정된 결과와 전리함으로 측정된 결과를 선원과 센서 간 거리에 따른 정규화 분포로 나타내었다. 센서로 측정된 결과와 전리함으로 측정된 결과의 정규화 분포는 선원과 센서간 거리에 따라 비슷한 양상으로 변하고, 동지점에서 측정된 전류와 선량률과의 정규화 분포 값에 편차는 1~17%로 나타났다. 그리고 정규화 분포의 편차는 측정지점이 35cm, 120cm를

제외하면 10% 이내로 비교적 낮은 편차를 보였다.

Fig. 26에서는 GSO sensor로 측정된 결과와 전리함으로 측정된 결과를 선원과 센서간 거리에 따른 정규화 분포로 나타내었다. 센서로 측정된 결과와 전리함으로 측정된 결과의 정규화 분포는 선원과 센서간 거리에 따라 비슷한 양상으로 변하지만 동지점에서 측정된 전류와 선량률과의 정규화 분포 값에 편차는 6~34%로 전체적으로 상당한 차이를 보였다.

Fig. 27에서는 CWO sensor로 측정된 결과와 전리함으로 측정된 결과를 선원과 센서간 거리에 따른 정규화 분포로 나타내었다. 센서로 측정된 결과와 전리함으로 측정된 결과의 정규화 분포는 선원과 센서간 거리에 따라 비슷한 양상으로 변하고, 동지점에서 측정된 전류와 선량률과의 정규화 분포 값에 편차는 1~15%로 나타났다. 그리고 정규화 분포의 편차는 측정지점이 100cm, 120cm를 제외하면 7% 이내로 비교적 낮은 편차를 보였다.

Fig. 28에서는 BC-412 sensor로 측정된 결과와 전리함으로 측정된 결과를 선원과 센서간 거리에 따른 정규화 분포로 나타내었다. 센서로 측정된 결과와 전리함으로 측정된 결과의 정규화 분포는 선원과 센서간 거리에 따라 비슷한 양상으로 변하고, 동지점에서 측정된 전류와 선량률과의 정규화 분포 값에 편차는 1~7%로 전체적으로 낮은 편차를 보였다.

섬광체 센서들과 전리함으로 측정한 결과를 선원과 센서간 거리에 따라 정규화 분포 결과를 보면, BC-412 센서의 정규화 분포 편차 값은 7% 이내로 전체적으로 낮게 나타났다. CWO 센서와 BGO 센서의 정규화 분포 편차 값은 17% 이내로 비교적 낮게 나타났으며 측정지점 두 지점을 제외하면 10% 이내로 더 낮은 편차를 보였다. 그러나 GSO 센서 정규화 분포 편차 값이 전체적으로 34% 이내로 상당한 차이를 보였다.

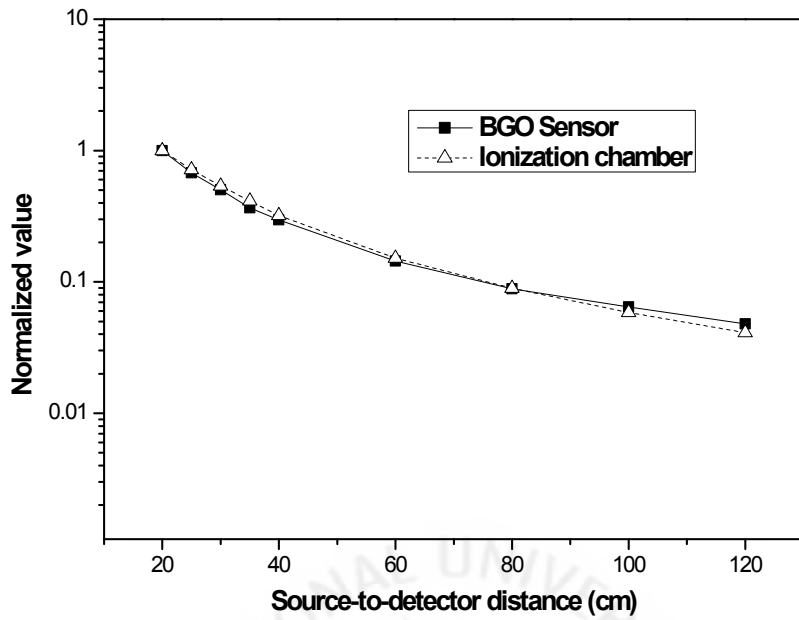


Fig. 25 Normalized distribution of the BGO sensor-measured PMT current and IC-measured dose rate

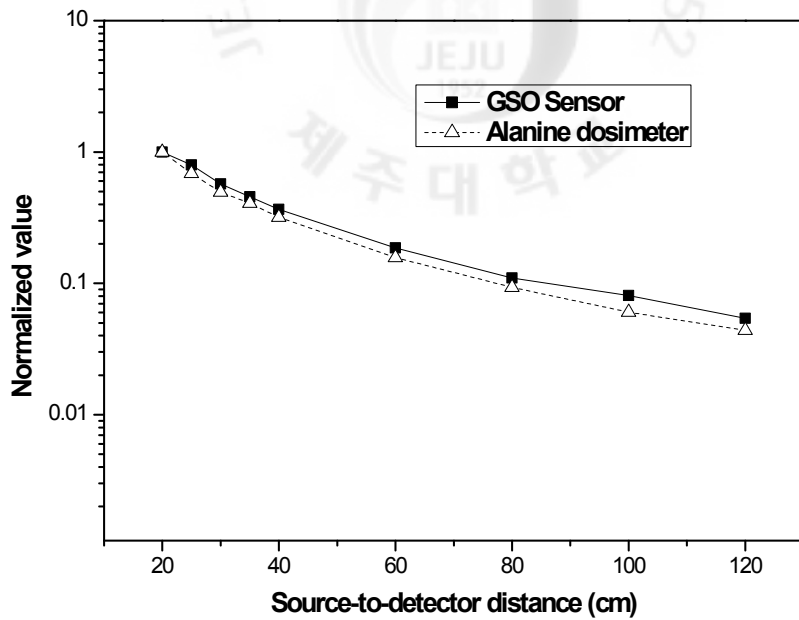


Fig. 26 Normalized distribution of the GSO sensor-measured PMT current and IC-measured dose rate

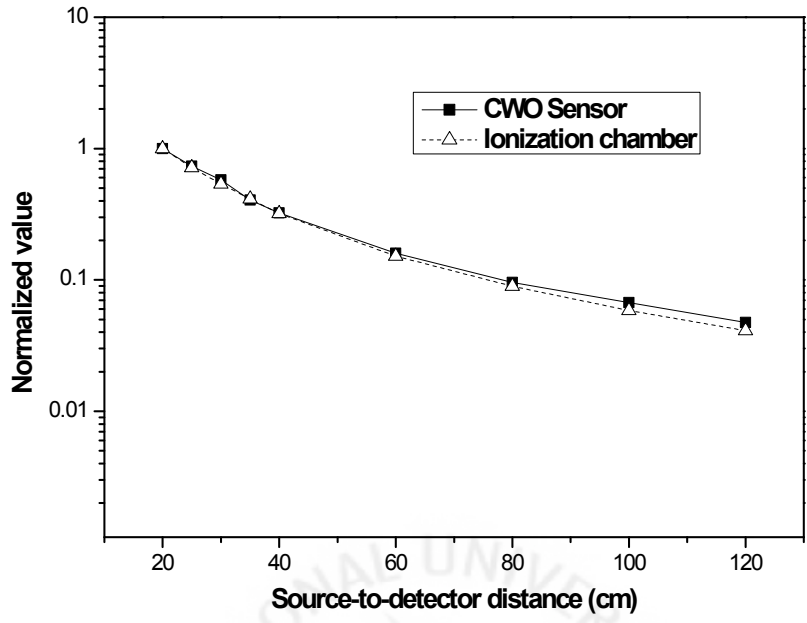


Fig. 27 Normalized distribution of the CWO sensor-measured PMT current and IC-measured dose rate

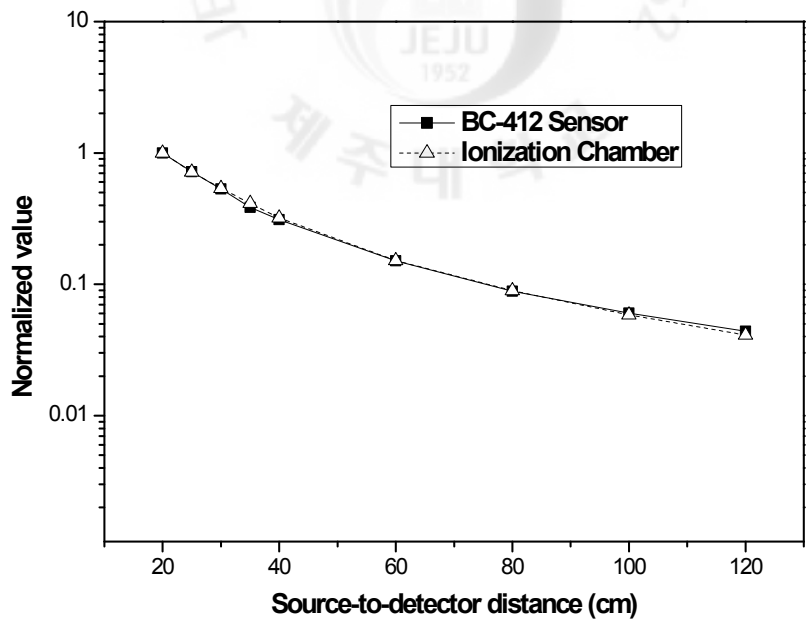


Fig. 28 Normalized distribution of the BC-412 sensor-measured PMT current and IC-measured dose rate

4. 섬광체 센서들과 Alanine 화학 선량계로 측정된 정규화 분포 비교 분석

선원과 센서간 거리에 따라 PMT의 전류를 측정하고 Alanine 화학 선량계로 같은 지점을 측정한 선량률과의 정규화 분포 변화를 비교분석하였다. 정규화 분포(Normalized distribution) 값은 각 지점마다 측정된 결과를 선원과 센서간 거리가 20cm인 지점에서 측정된 결과로 나누어 산출하였다.

Fig. 29에서는 BGO sensor로 측정된 결과와 Alanine 화학 선량계로 측정된 결과를 선원과 센서 간의 거리에 따른 정규화 분포로 나타내었다. 센서로 측정된 결과와 Alanine 화학 선량계로 측정된 결과의 정규화 분포는 선원과 센서 간의 거리에 따라 비슷한 양상으로 변하고, 동지점에서 측정된 전류와 선량률과의 정규화 분포 값에 편차는 전체적으로 2~10%로 비교적 낮게 나타났다.

Fig. 30에서는 GSO sensor로 측정된 결과와 Alanine 화학 선량계로 측정된 결과를 선원과 센서 간의 거리에 따른 정규화 분포로 나타내었다. 센서로 측정된 결과와 전리함으로 측정된 결과의 정규화 분포는 선원과 센서 간의 거리에 따라 비슷한 양상으로 변하지만, 측정된 전류와 선량률과의 정규화 분포 값에 편차는 6~34%로 전체적으로 상당한 차이를 보였다.

Fig. 31에서는 CWO sensor로 측정된 결과와 전리함으로 측정된 결과를 선원과 센서 간의 거리에 따른 정규화 분포로 나타내었다. 센서로 측정된 결과와 전리함으로 측정된 결과의 정규화 분포는 선원과 센서 간의 거리에 따라 비슷한 양상으로 변하고, 동지점에서 전류와 선량률과의 정규화 분포 값에 편차는 측정 지점이 30cm일 때 16%를 제외하면 10% 이내로 비교적 낮은 편차를 보였다.

Fig. 32에서는 BC-412 sensor로 측정된 결과와 전리함으로 측정된 결과를 선원과 센서 간의 거리에 따른 정규화 분포로 나타내었다. 센서로 측정된 결과와 전리함으로 측정된 결과의 정규화 분포는 선원과 센서 간의 거리에 따라 거의 일치하였으며, 동지점에서 측정된 전류와 선량률과의 정규화 분포 값에 편차는 6%이내로 전체적으로 낮은 편차를 보였다.

섬광체 센서들과 전리함으로 측정한 결과를 선원과 센서 간 거리에 따라 정규화 분포 결과를 보면, BC-412 센서의 정규화 분포 편차 값은 6% 이내로 전체

적으로 가장 낮게 나타났다. BGO 센서의 정규화 분포 편차 값은 10% 이내로 비교적 낮게 나타났으며 CWO 센서의 정규화 분포 편차 값은 16% 이내로 측정지점 한 곳만 제외하면 10% 이내로 더 낮은 편차를 보였다. 그러나 GSO 센서의 정규화 분포 편차 값이 34% 이내로 상당한 차이를 보였다. 이러한 결과는 전리함으로 비교한 것과 같은 비슷한 결과가 도출되었다.



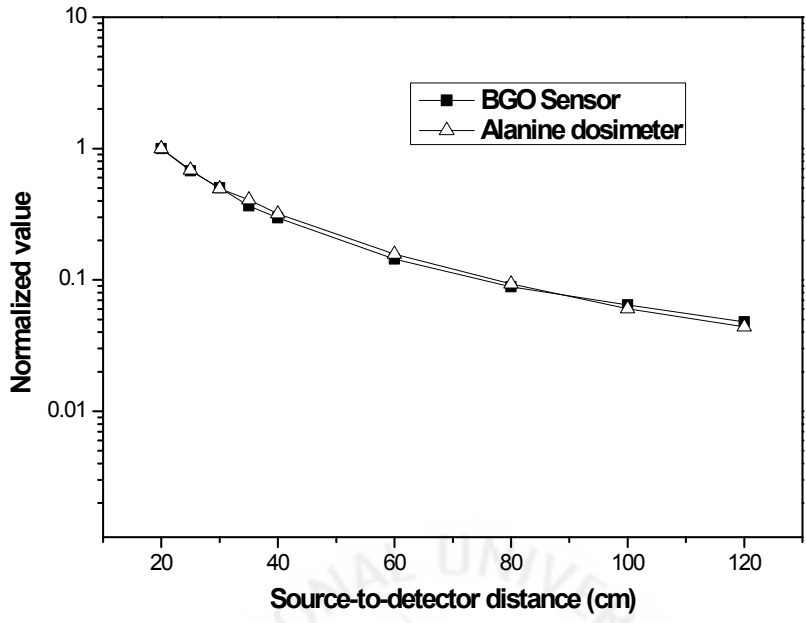


Fig. 29 Normalized distribution of the BGO sensor-measured PMT current and Alanine dosimeter-measured dose rate

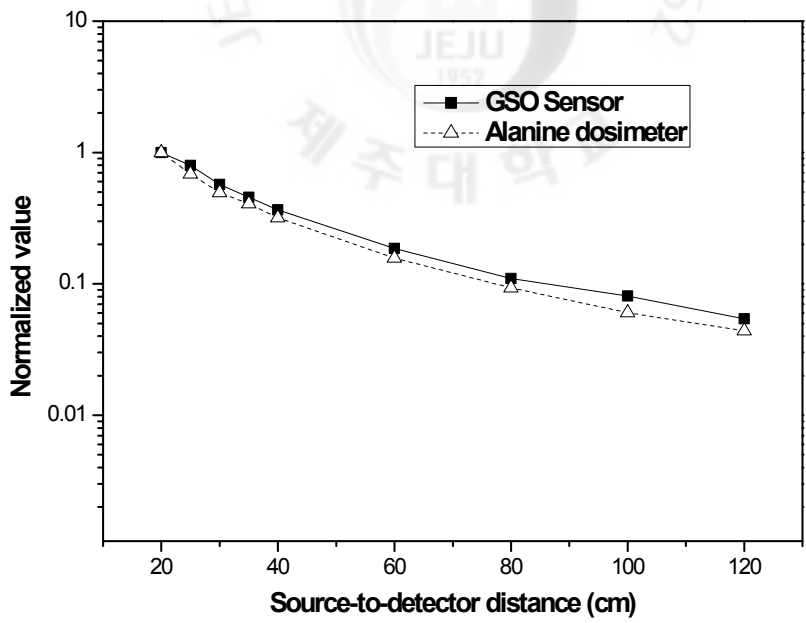


Fig. 30 Normalized distribution of the GSO sensor-measured PMT current and Alanine dosimeter-measured dose rate

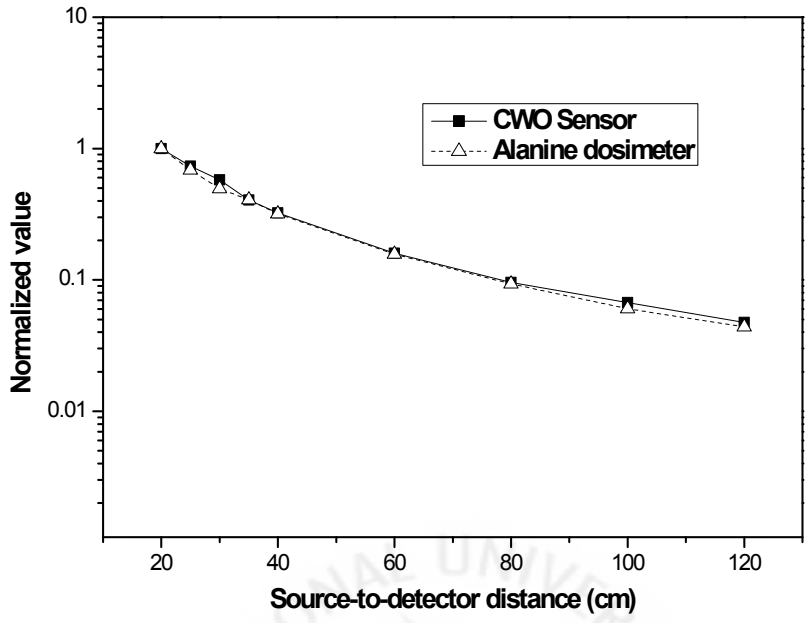


Fig. 31 Normalized distribution of the CWO sensor-measured PMT current and Alanine dosimeter-measured dose rate

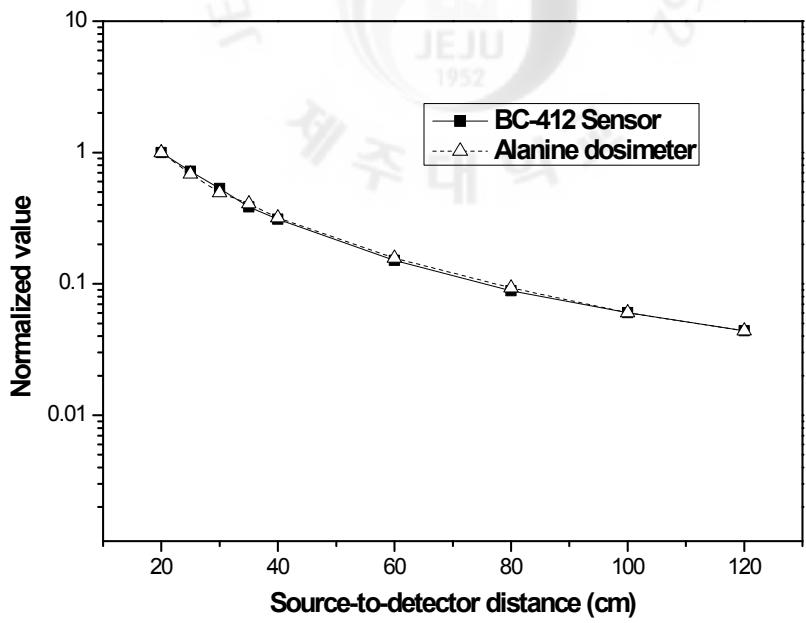


Fig. 32 Normalized distribution of the BC-412 sensor-measured PMT current and Alanine dosimeter-measured dose rate

5. 측정된 PMT 전류와 선량률과의 관계를 비교 분석

본 연구에서 제시한 섬광체 센서들로 측정된 전류와 전리함 및 Alanine 선량계로 측정된 선량률과 관계는 선형적으로 비례하여야한다. 이러한 이유로 섬광체 센서들로 측정된 전류와 선량률과의 관계를 비교분석하여 방사선량계로서의 가능성을 모색하려한다.

Fig. 33에서는 섬광체 센서들로 측정된 전류와 전리함으로 측정된 선량률과의 관계를 나타낸 그래프이다. 전반적으로, 선량률이 커질수록 섬광체 센서들로 측정된 PMT 전류도 선형적으로 비례하면서 커지는데 CWO 센서로 측정된 PMT 전류는 선량률 450~650Gy/h사이 일 때 선형적으로 비례하지 않는 부분이 있었다. 측정된 PMT 전류는 CWO 센서 일 때 가장 높게 나타났으며 GSO 센서, BGO 센서, BC-412 센서 순으로 낮게 나타났다. 이것은 Table. 1에서 나타낸 섬광체 특성 중에 광수율과 비례하였다.

Fig. 34에서는 섬광체 센서들로 측정된 전류와 Alanine 화학 선량계로 측정된 선량률과의 관계를 나타낸 그래프이다. 전반적으로, 선량률이 커질수록 섬광체 센서들로 측정된 PMT 전류도 선형적으로 비례하면서 커지는데 CWO 센서와 GSO센서로 측정된 PMT 전류는 선량률 450~600Gy/h사이 일 때 선형적으로 비례하지 않는 부분이 있었다. 측정된 PMT 전류는 CWO 센서 일 때 가장 높게 나타났으며 GSO 센서, BGO 센서, BC-412 센서 순으로 낮게 나타났다.

Fig. 35에서는 선원과 센서간 거리가 20cm 일 때, 섬광체 센서들로 측정된 PMT 전류를 50회 반복 측정하여 나타낸 것이다. CWO 센서로 측정된 전류는 $2.5 \times 10^{-6}A$ 로 일정하게 유지 되었고 BGO 센서로 측정된 전류는 $7.6 \times 10^{-7}A$ 로 일정하게 유지되었다. GSO 센서와 BC-412 센서로 측정된 전류는 각각 $1.8 \times 10^{-6}A$ 과 $3.8 \times 10^{-7}A$ 로 일정하게 유지되었다. 섬광체 센서들로 50회 반복측정을 하는데 걸리는 시간은 1분이다.

전반적으로, 섬광체 센서들로 측정된 전류와 선량과의 관계에서, 선량률의 커질수록 섬광체 센서들로 측정된 PMT 전류도 선형적으로 비례하면서 커지고 반복 측정된 PMT 전류도 측정시간이 거의 일정하였다.

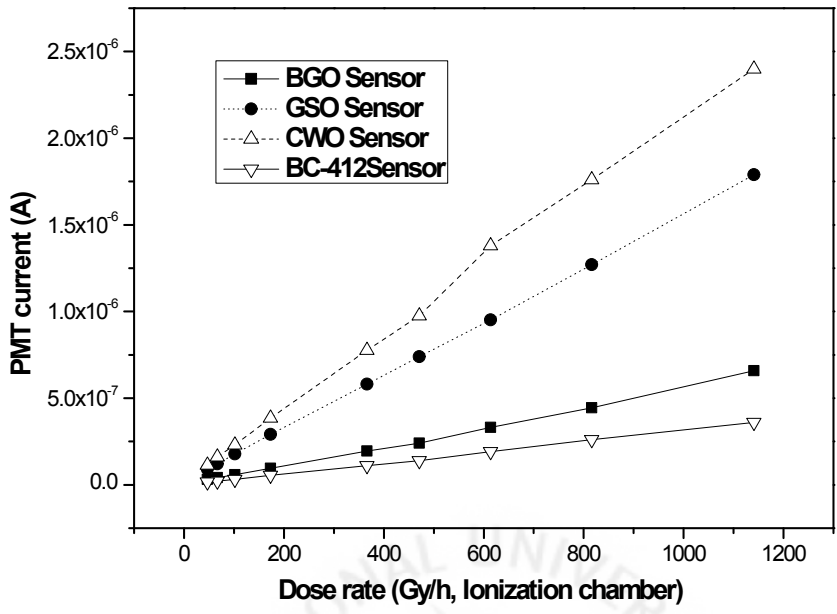


Fig. 33 Linearity of the sensors-measured PMT current and IC-measured dose rate

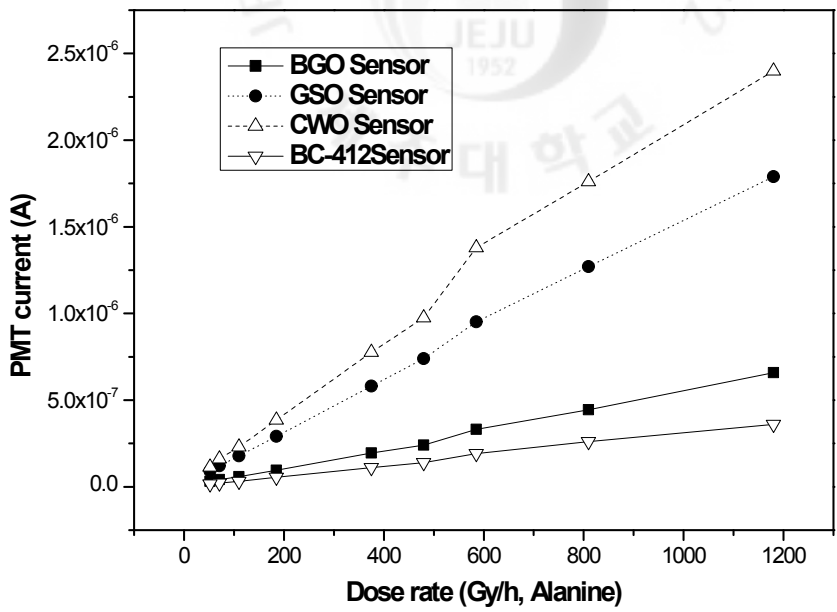


Fig. 33 Linearity of the sensors-measured PMT current and Alanine dosimeter-measured dose rate

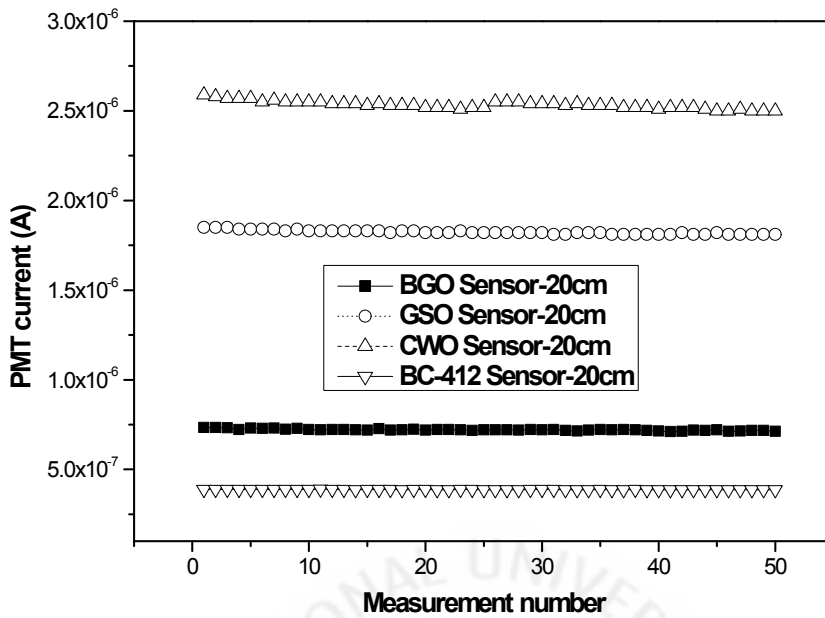


Fig. 35 Variation of the sensors-measured PMT current

6. 섬광체 센서들의 PMT 전류-선량률 변환 상수 비교 분석

1) 전리함으로 측정된 선량을 기준으로 섬광체 센서들의 전류-선량률 변환상수

본 연구에서 제시한 섬광체 센서로 측정된 PMT 전류와 같은 지점에서 전리함(Ionization chamber)과 Alanine 화학 선량계로 측정된 선량률과 비교 분석하였다. PMT 전류와 선량률과의 비교는 선원과 센서 간 거리에 따른 정규화(normalized) 분포 변화, 전류와 선량률과의 선형성, PMT 전류 값을 방사선량으로 변환할 수 있는 PMT 전류-선량률 변환상수 구하여 방사선량계로서의 개발가능성을 분석하였다. PMT 전류-선량률 변환 상수는 전리함으로 측정된 선량률에 같은 지점에서 섬광체 센서로 측정된 PMT 전류로 나누어 각 측정 지점마다의 변환상수를 구하였다. 각 측정지점마다 산출된 PMT 전류-선량률 변환 상수들을 평균한 변환상수를 구하였고, 평균한 변환 상수를 기준으로 하

여 각 지점마다의 편차를 구하였다.

Fig. 36와 37에서는 전리함으로 측정된 선량률을 기준으로 하여 BGO 센서의 PMT 전류-선량률 변환 상수와 편차를 나타내고 있다. BGO 센서의 변환상수는 선량률이 47Gy/h 일 때 $4.1 \times 10^5 \text{Gy/C}$ 로 가장 낮게 나타났으며, 선량률이 471Gy/h 일 때 $5.4 \times 10^5 \text{Gy/C}$ 로 가장 높게 나타났다. 그리고 각 측정지점마다의 변환상수를 평균한 상수는 $4.9 \times 10^5 \text{Gy/C}$ 이다. 편차는 15% 이내로 나타났으며 선량률이 580~1141Gy/h사이 일 때는 5% 이내로 비교적 낮은 편차를 보였고, 선량률이 47Gy/h 일 때 15%를 제외하고는 10% 이내로 나타났다.

Fig. 38와 39에서는 전리함으로 측정된 선량률을 기준으로 하여 GSO 센서의 PMT 전류-선량률 변환 상수와 편차를 나타내고 있다. GSO 센서의 변환상수는 선량률이 47Gy/h 일 때 $1.4 \times 10^5 \text{Gy/C}$ 로 가장 낮게 나타났으며, 선량률이 614Gy/h 일 때 $1.79 \times 10^5 \text{Gy/C}$ 로 가장 높게 나타났다. 그리고 각 측정지점마다의 변환상수를 평균한 상수는 $1.68 \times 10^5 \text{Gy/C}$ 이다. 편차는 14% 이내로 나타났으며, 선량률이 67~1189Gy/h 일 때는 8% 이내로 비교적 낮은 편차를 보였다.

Fig. 40와 41에서는 전리함으로 측정된 선량률을 기준으로 하여 CWO 센서의 PMT 전류-선량률 변환 상수와 편차를 나타내고 있다. CWO 센서의 변환상수는 선량률이 47Gy/h 일 때 $1.14 \times 10^5 \text{Gy/C}$ 로 가장 낮게 나타났으며, 선량률이 471Gy/h 일 때 $1.34 \times 10^5 \text{Gy/C}$ 로 가장 높게 나타났다. 그리고 각 측정지점마다의 변환상수를 평균한 상수는 $1.25 \times 10^5 \text{Gy/C}$ 이다. 편차는 8% 이내로 나타났다.

Fig. 42와 43에서는 전리함으로 측정된 선량률을 기준으로 하여 BC-412 센서의 PMT 전류-선량률 변환 상수와 편차를 나타내고 있다. BC-412 센서의 변환상수는 선량률이 47Gy/h 일 때 $8.5 \times 10^5 \text{Gy/C}$ 로 가장 낮게 나타났으며, 선량률이 471Gy/h 일 때 $9.4 \times 10^5 \text{Gy/C}$ 로 가장 높게 나타났다. 그리고 각 측정지점마다의 변환상수를 평균한 상수는 $8.8 \times 10^5 \text{Gy/C}$ 이다. 편차는 6% 이내로 비교적 낮게 나타났다.

섬광체 센서들로 측정된 PMT 전류를 선량률로 변환할 수 있는 상수를 구하고, 평균 변환 상수에 대한 편차를 구한바 몇 군데를 제외하면 전체적으로 10% 이내로 선량계로서 개발가능성을 모색할 수 있을 것이라 여겨진다.

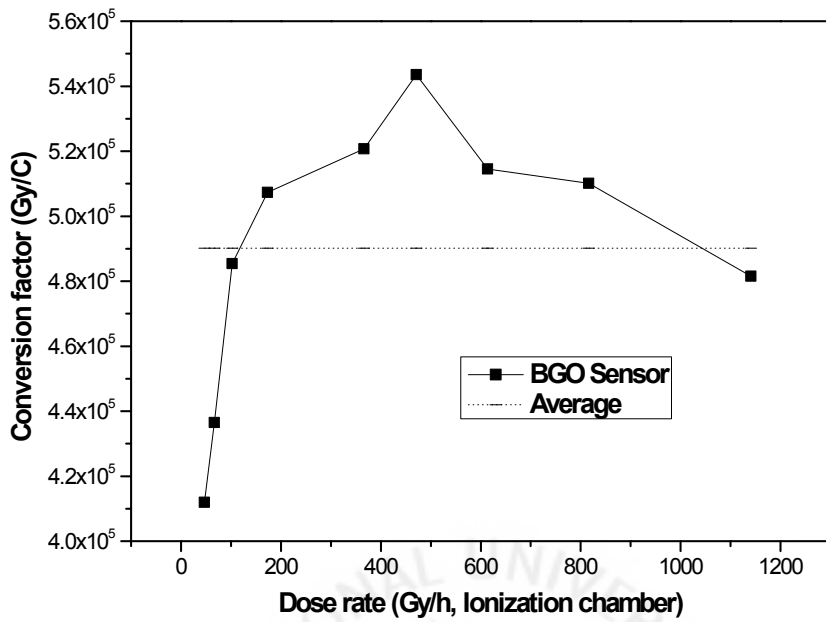


Fig. 36 Estimated conversion factors for the BGO sensor to gain the absorbed dose rate from the measured PMT current (IC)

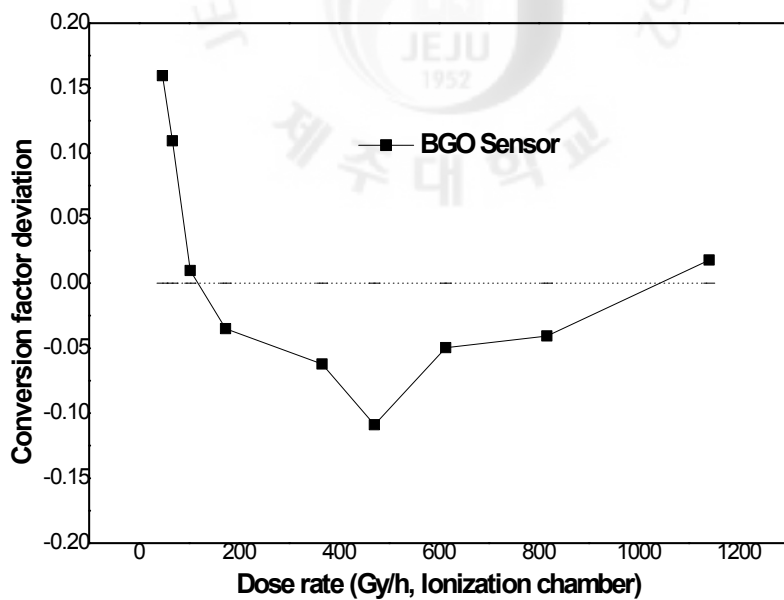


Fig. 37 Deviation of conversion factors for the BGO sensor based on the ionization chamber-measured dose rate

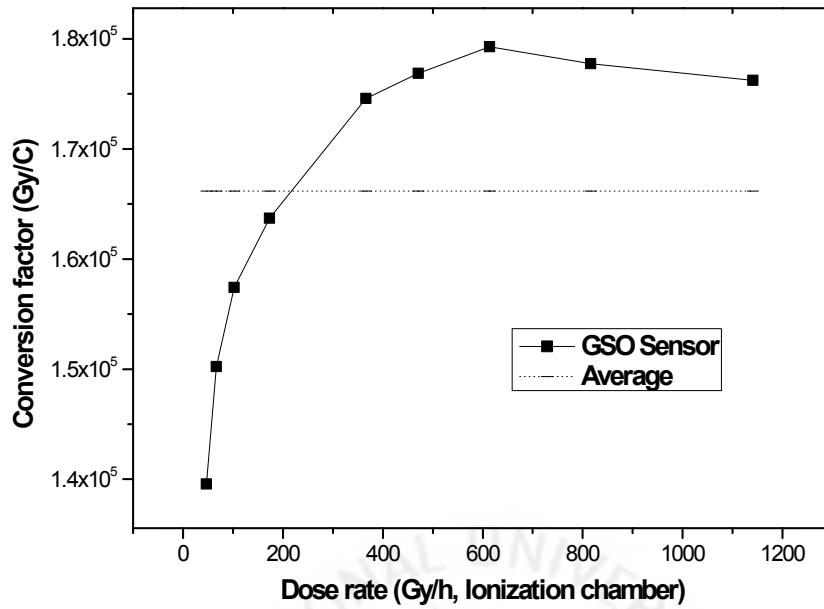


Fig. 38 Estimated conversion factors for the GSO sensor to gain the absorbed dose rate from the measured PMT current (IC)

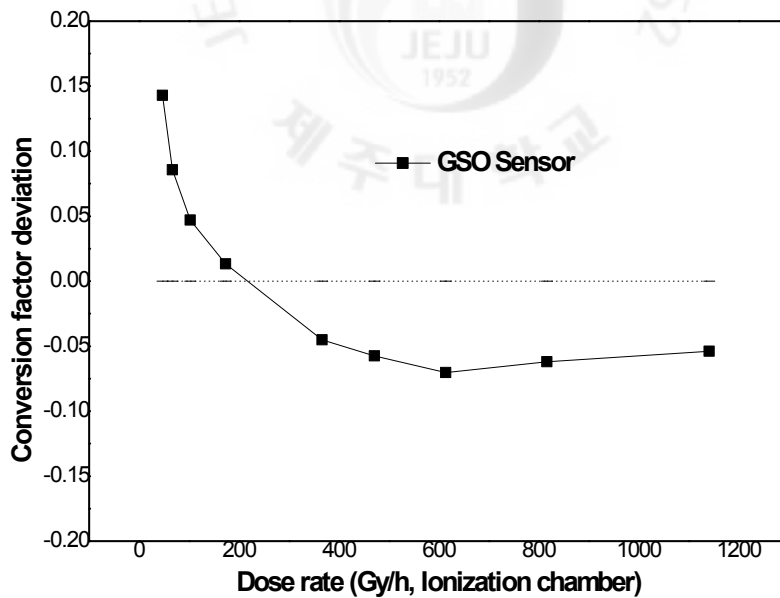


Fig. 39 Deviation of conversion factors for the GSO sensor based on the ionization chamber-measured dose rate

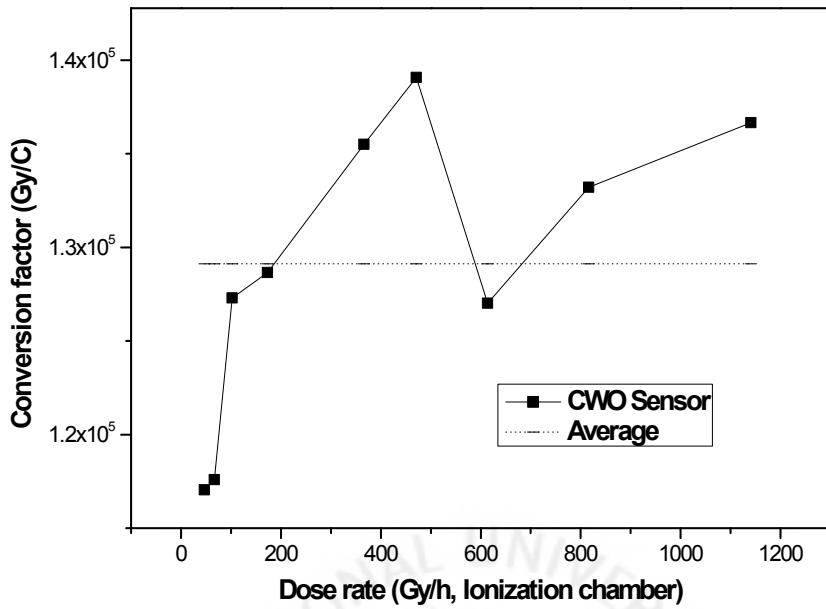


Fig. 40 Estimated conversion factors for the CWO sensor to gain the absorbed dose rate from the measured PMT current (IC)

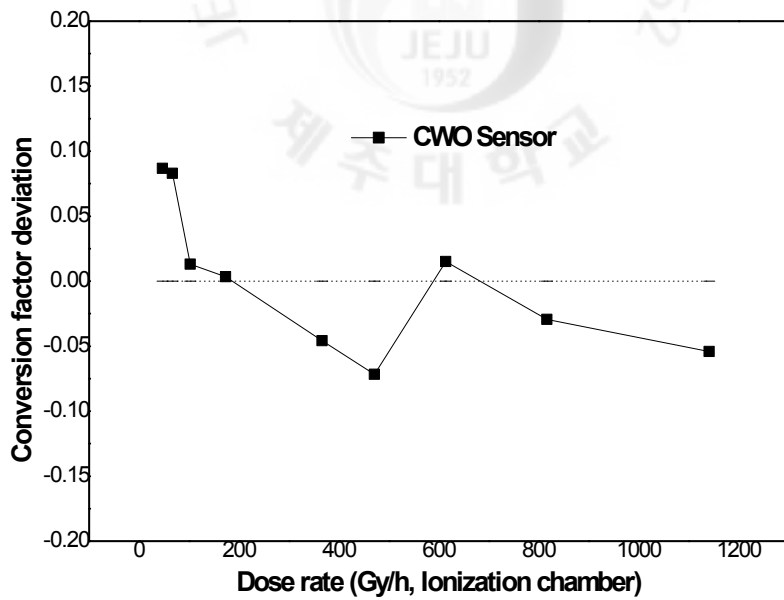


Fig. 41 Deviation of conversion factors for the CWO sensor based on the ionization chamber-measured dose rate

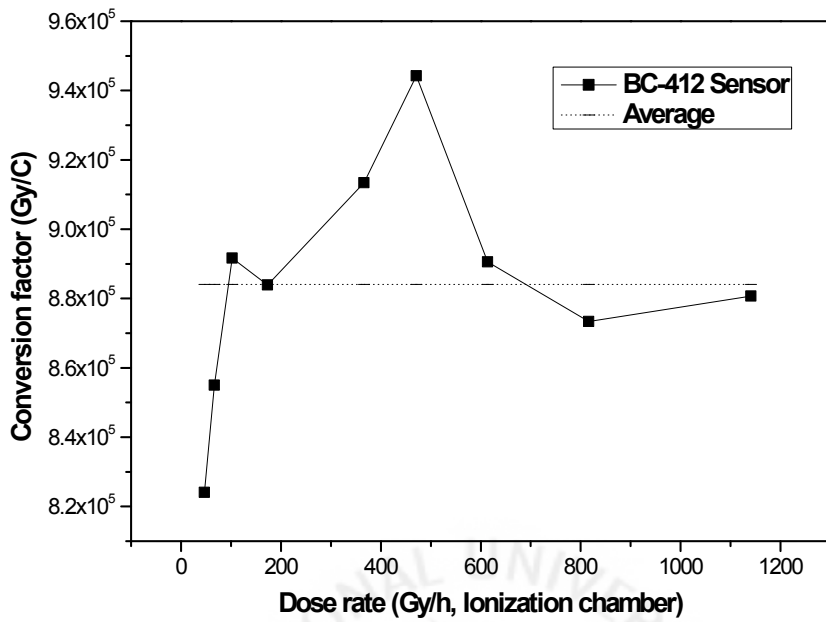


Fig. 42 Estimated conversion factors for the BC-412 sensor to gain the absorbed dose rate from the measured PMT current (IC)

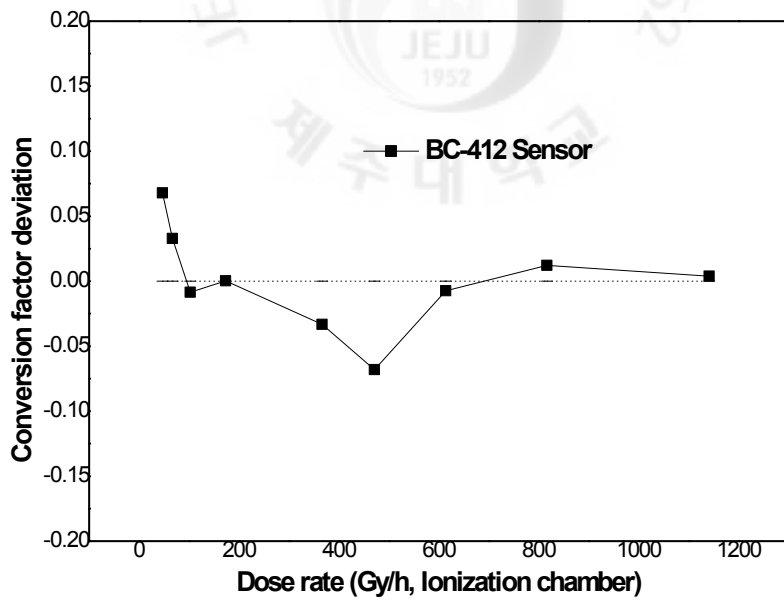


Fig. 43 Deviation of conversion factors for the BC-412 sensor based on the ionization chamber

2) Alanine 화학선량계로 측정된 선량을 기준으로 섬광체 센서들의 전류-선량을 변환상수

섬광체 센서로 측정된 PMT 전류를 선량률로 변환할 수 있는 PMT 전류-선량률 변환상수 구하여 방사선량계로서의 개발가능성을 분석하였다. PMT 전류-선량률 변환 상수는 Alanine 화학선량계로 측정된 선량률에 같은 지점에서 섬광체 센서로 측정된 PMT 전류로 나누어 각 측정 지점마다의 변환상수를 구하였다. 각 측정지점마다 산출된 PMT 전류-선량률 변환 상수들을 평균한 변환상수를 구하였고, 평균한 변환 상수를 기준으로 하여 각 지점마다의 편차를 구하였다.

Fig. 44와 45에서는 Alanine 화학선량계로 측정된 선량률을 기준으로 하여 BGO 센서의 PMT 전류-선량률 변환 상수와 편차를 나타내고 있다. BGO 센서의 변환상수는 선량률이 50Gy/h 일 때 $4.5 \times 10^5 \text{Gy/C}$ 로 가장 낮게 나타났으며, 선량률이 480Gy/h 일 때 $5.5 \times 10^5 \text{Gy/C}$ 로 가장 높게 나타났다. 그리고 각 측정지점마다의 변환상수를 평균한 상수는 $5.0 \times 10^5 \text{Gy/C}$ 이다. 편차는 10% 이내로 나타났으며 선량률이 580~1200Gy/h사이 일 때는 3% 이내로 비교적 낮은 편차를 보였다.

Fig. 46와 47에서는 Alanine 화학선량계로 측정된 선량률을 기준으로 하여 GSO 센서의 PMT 전류-선량률 변환 상수와 편차를 나타내고 있다. GSO 센서의 변환상수는 선량률이 52Gy/h 일 때 $1.5 \times 10^5 \text{Gy/C}$ 로 가장 낮게 나타났으며, 선량률이 1180Gy/h 일 때 $1.8 \times 10^5 \text{Gy/C}$ 로 가장 높게 나타났다. 그리고 각 측정지점마다의 변환상수를 평균한 상수는 $1.7 \times 10^5 \text{Gy/C}$ 이다. 편차는 8% 이내로 나타났으며, 선량률이 110~1189Gy/h 일 때는 5% 이내로 비교적 낮은 편차를 보였다.

Fig. 48와 49에서는 Alanine 화학선량계로 측정된 선량률을 기준으로 하여 CWO 센서의 PMT 전류-선량률 변환 상수와 편차를 나타내고 있다. CWO 센서의 변환상수는 선량률이 585Gy/h 일 때 $1.18 \times 10^5 \text{Gy/C}$ 로 가장 낮게 나타났으며, 선량률이 1180Gy/h 일 때 $1.37 \times 10^5 \text{Gy/C}$ 로 가장 높게 나타났다. 그리고 각

측정지점마다의 변환상수를 평균한 상수는 $1.3 \times 10^5 \text{Gy/C}$ 이다. 편차는 9% 이내로 나타났으며, 선량률이 585Gy/h 일 때를 제외하면 5% 이내로 비교적 낮은 편차를 보였다.

Fig. 50와 51에서는 Alanine 화학선량계로 측정한 선량률을 기준으로 하여 BC-412 센서의 PMT 전류-선량률 변환 상수와 편차를 나타내고 있다. BC-412 센서의 변환상수는 선량률이 585Gy/h 일 때 $8.5 \times 10^5 \text{Gy/C}$ 로 가장 낮게 나타났으며, 선량률이 480Gy/h 일 때 $9.6 \times 10^5 \text{Gy/C}$ 로 가장 높게 나타났다. 그리고 각 측정지점마다의 변환상수를 평균한 상수는 $9.2 \times 10^5 \text{Gy/C}$ 이다. 편차는 7% 이내로 나타났으며, 선량률이 52~480Gy/h 일 때 5% 이내로 비교적 낮은 편차를 보였다.

섬광체 센서들로 측정한 PMT 전류를 선량률로 변환할 수 있는 상수를 구하고, 평균 변환 상수에 대한 편차를 구한바 전체적으로 10% 이내로 선량계로서 개발가능성을 모색할 수 있었다. 또한 GSO 센서는 선량률이 110~1189Gy/h 일 때는 5% 이내로 비교적 낮은 편차를 보였으며, BC-412 센서는 선량률이 52~480Gy/h 일 때 5% 이내로 비교적 낮은 편차를 보였다. GSO 센서와 BC-412 센서의 두 타입에 센서를 이용하여 저선량률 영역에서 고선량률 영역까지 측정할 수 있는 시스템을 구축할 수 있을 것이라 여겨진다. 또한 BGO 센서와 CWO 센서도 전체적으로 낮은 편차를 보였지만 고선량률 영역에서는 더 낮은 편차로 보여 고선량률 영역에서 사용하기 적합한 센서로 여겨진다.

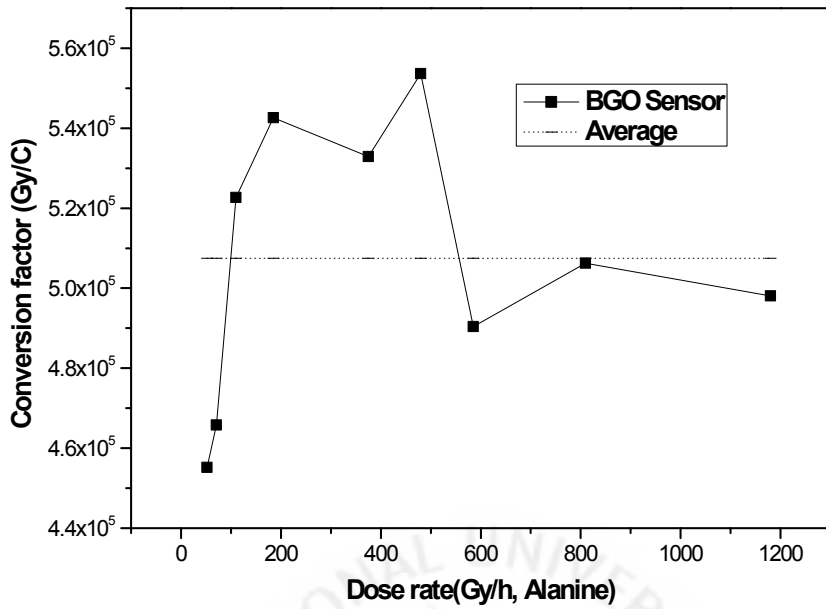


Fig. 44 Estimated conversion factors for the BGO sensor to gain the absorbed dose rate from the measured PMT current (Alanine)

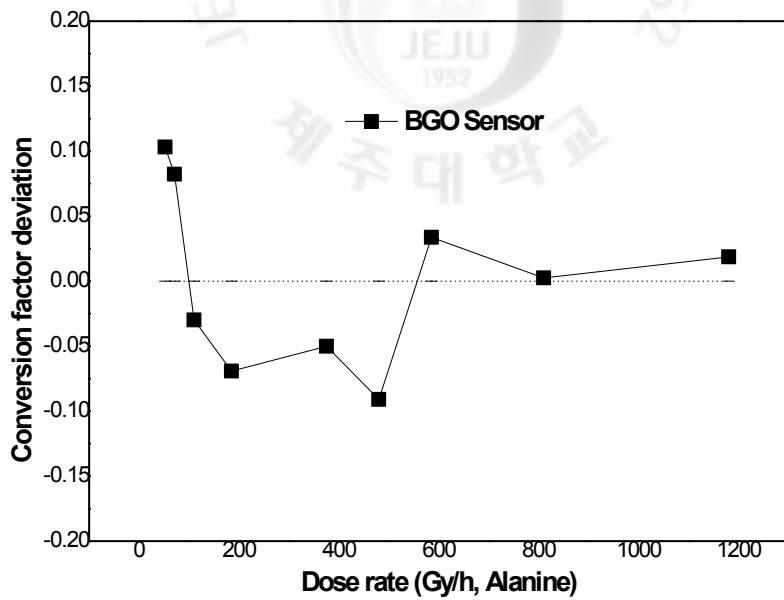


Fig. 45 Deviation of conversion factors for the BGO sensor based on the Alanine dosimeter-measured dose rate

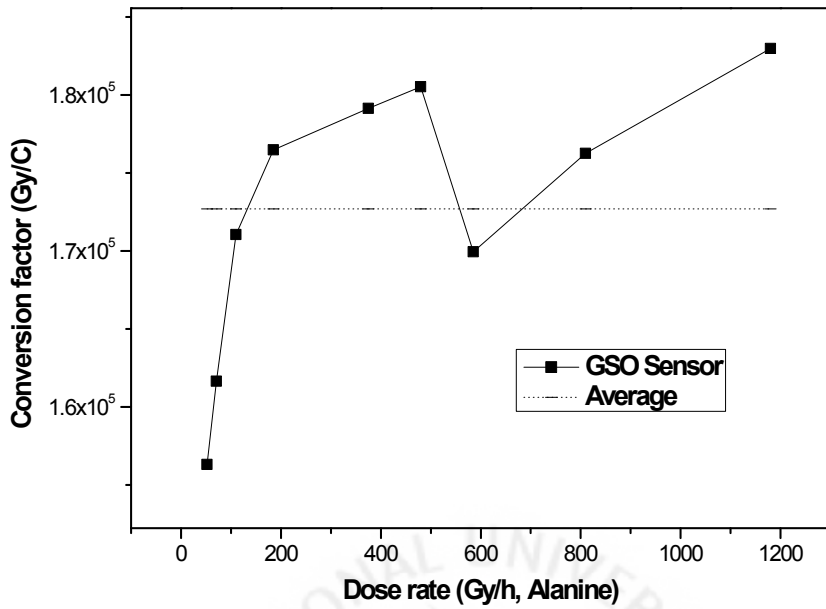


Fig. 46 Estimated conversion factors for the GSO sensor to gain the absorbed dose rate from the measured PMT current (Alanine)

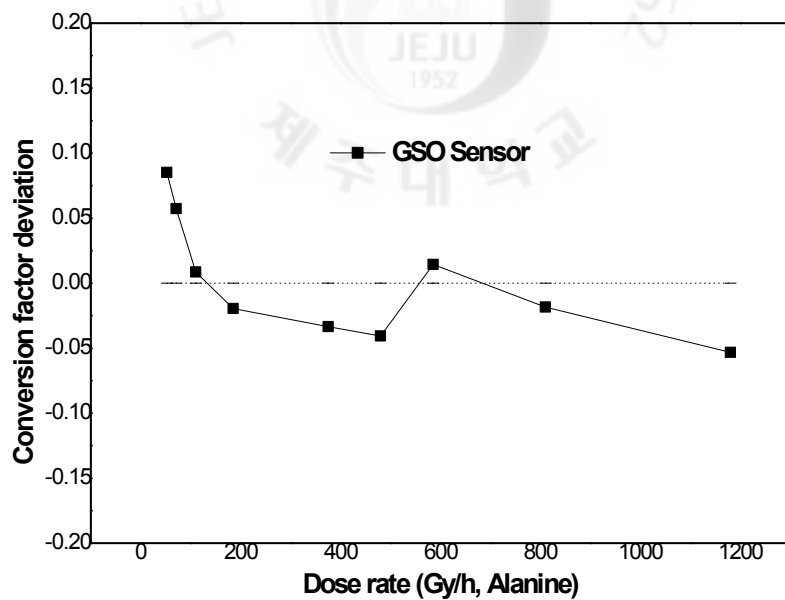


Fig. 47 Deviation of conversion factors for the GSO sensor based on the Alanine dosimeter-measured dose rate

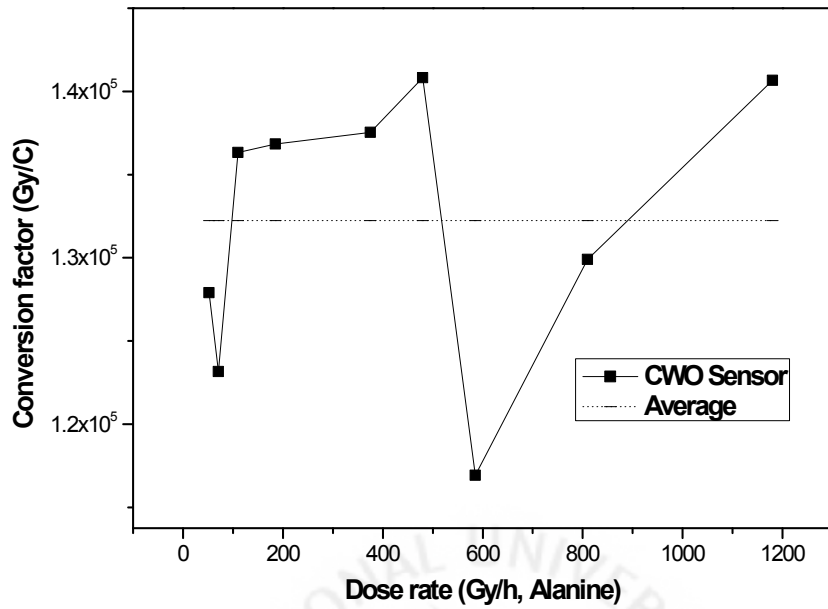


Fig. 48 Estimated conversion factors for the CWO sensor to gain the absorbed dose rate from the measured PMT current (Alanine)

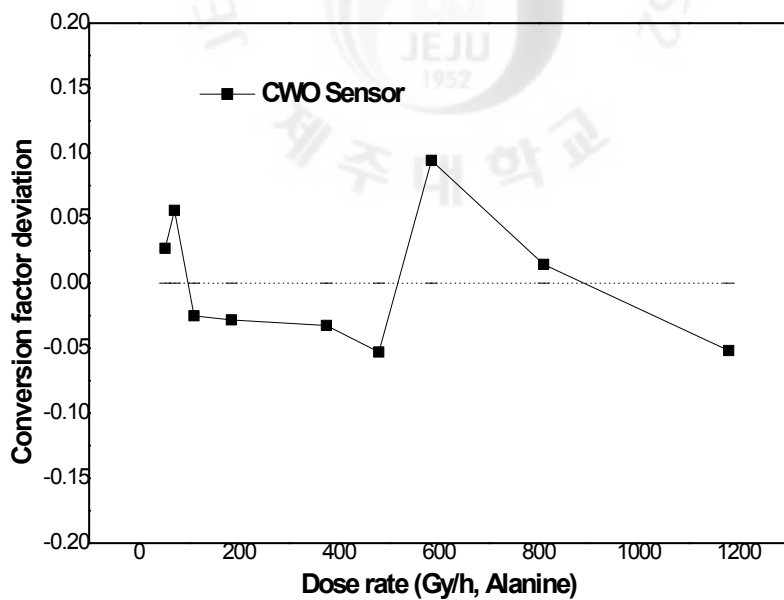


Fig. 49 Deviation of conversion factors for the CWO sensor based on the Alanine dosimeter-measured dose rate

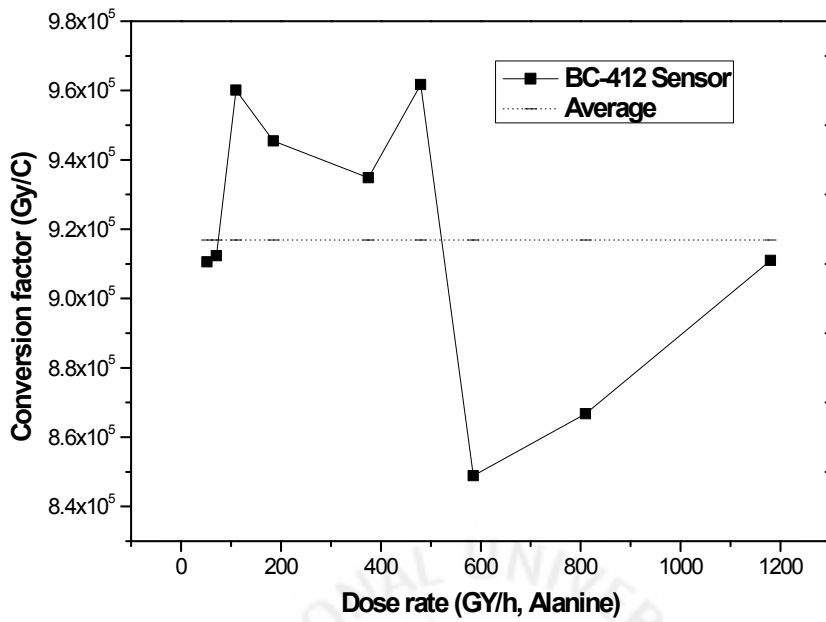


Fig. 50 Estimated conversion factors for the BC-412 sensor to gain the absorbed dose rate from the measured PMT current (Alanine)

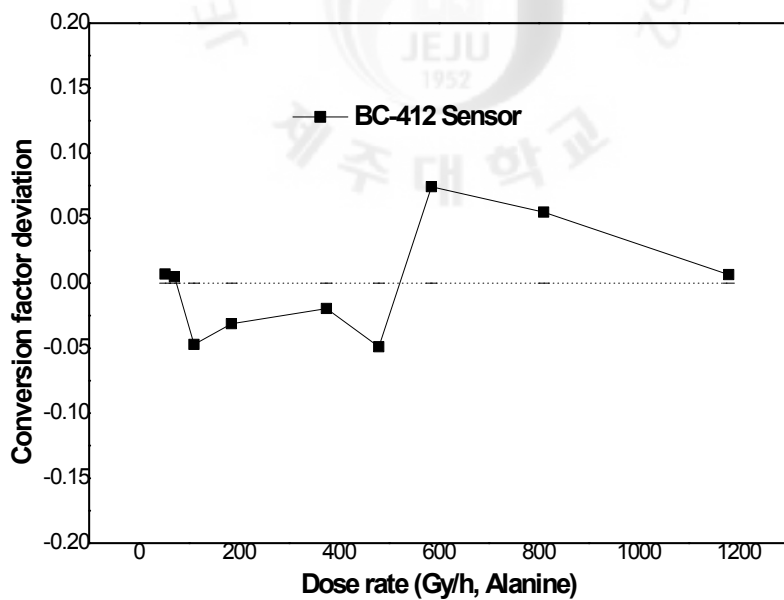


Fig. 51 Deviation of conversion factors for the BC-412 sensor based on the Alanine dosimeter-measured dose rate

V. 결 론

감마선 조사실 등의 고준위 방사선장에서 방사선량을 실시간 원격 측정을 하기 위해서 섬광체와 플라스틱 광섬유를 결합한 선량계 모델을 제작하고 선량계로서의 타당성을 알아보기 위한 특성 분석을 하였다.

방사선을 감지하는 센서부분인 섬광체와 섬광체에서 발생하는 광을 전달하는 플라스틱 광섬유를 결합하고 광섬유 통해 전달되는 광을 전류로 변환하는 광전자증배관을 연결한 방사선량계 모델을 구성하였다. 본 논문에서 제작된 방사선량계 모델은 6000Ci ^{60}Co 감마선원과 센서 간 거리에 따라 측정된 전류치 변화와 MCNP(Monte-Carlo N-Particle) code로 계산된 값과 비교 분석하였으며 섬광체 센서로 측정된 PMT 전류와 같은 지점에서 전리함(Ionization chamber)과 Alanine 화학 선량계로 측정된 선량률과 비교 분석하였다. PMT 전류와 선량 값의 비교는 선원과 센서 간의 거리에 따른 정규화(normalized)분포변화, 전류와 선량률과의 선형성, PMT 전류 값을 방사선량으로 변환할 수 있는 PMT 전류-선량률 변환상수를 구하여 방사선량계로서 타당성을 알아보기 위한 특성 분석을 하였다.

▶ 본 논문에서 제시한 센서들로 측정된 결과를 MCNPX code로 계산된 결과를 비교 분석하여 방사선량계로서의 가능성을 모색하려 했지만, MCNPX code로 섬광체의 광수율(light yield)과 붕괴시간(decay time) 등과 같은 고유 특성까지는 모사하는데 한계가 있었다. 그러나 선원과 센서 간 거리에 따른 정규화 분포 변화 양상은 비슷하였다.

▶ 섬광체 센서들과 전리함 및 Alanine 화학선량계로 측정한 결과를 선원과 센서 간 거리에 따라 정규화 분포 결과를 보면, BC-412 센서의 정규화 분포 편차 값은 7% 이내로 전체적으로 낮게 나타났다. CWO 센서와 BGO 센서의 정규화 분포 편차 값은 17% 이내로 나타났으며 측정지점 두 지점을 제외하면 10%

이내로 더 낮은 편차를 보였다. 그러나 GSO 센서 정규화 분포 편차 값이 전체적으로 34% 이내로 상당한 차이를 보였다.

▶ 전반적으로, 섬광체 센서들로 측정된 전류와 선량과의 관계에서, 선량률의 커질수록 섬광체 센서들로 측정된 PMT 전류도 선형적으로 비례하면서 커지고 반복 측정된 PMT 전류도 일정하였다.

▶ 섬광체 센서들로 측정한 PMT 전류를 선량률로 변환할 수 있는 상수를 구하고, 평균 변환 상수에 대한 편차를 구한바 전체적으로 10% 이내로 선량계로서 개발가능성을 모색할 수 있었다. 또한 GSO 센서는 선량률이 110~1189Gy/h 일 때는 5% 이내로 비교적 낮은 편차를 보였으며, BC-412 센서는 선량률이 52~480Gy/h 일 때 5% 이내로 비교적 낮은 편차를 보였다. GSO 센서와 BC-412 센서의 두 타입에 센서를 이용하여 저선량률 영역에서 고선량률 영역까지 측정할 수 있는 시스템을 구축할 수 있을 것이라 여겨진다. 또한 BGO 센서와 CWO 센서도 전체적으로 낮은 편차를 보였지만 고선량률 영역에서는 더 낮은 편차로 보여 고선량률 영역에서 사용하기 적합한 센서로 여겨진다.

본 연구에서 제시한 섬광체와 광섬유를 결합한 방사선량계 모델을 방사선량계로서의 타당성 분석을 하였는데 대체로 양호한 결과를 도출하였다. 그러나 이 밖에 방사선량계로서의 특성 분석이 요구되어지고, 섬광체 센서로 측정된 PMT 전류를 electrometer로 측정하는 장치와의 연결 및 PMT 전류 값을 컴퓨터 상에서 제어하는 시스템이 요구된다.

참 고 문 헌

A. S. Bedder, et al, "A Miniature Scintillator-Fiberoptic-PMT Detector System for the Dosimetry of small Fields in Stereotactic Radiosurgery", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 48, 2001

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-ray or γ -ray", Institute of Electrical and Electronics Engineers, Vol. 2, pp. 865-868, 2004

D. Nikolopoulos, "Evaluation of the GSO:Ce scintillator in the X-ray energy range from 40 to 140kV for possible application in medical X-ray imaging", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 560, pp. 577-583, 2006

Eiji Takada, et al, "Radiation Distribution Measurements with Optical Fibers in High Radiation Fields", Institute of Electrical and Electronics Engineers, Vol. 2, pp. 791-795, 1998

Glenn F. Knoll, "Radiation Detection and Measurement", John Wiley & Sons, Inc. pp. 219-350, 1999

H. Ishibashi, et al, "Scintillation performance of Large Ce-doped Gd_2SiO_5 (GSO) Single Crystal", Institute of Electrical and Electronics Engineers, Vol. 37, pp. 518-521, 1998

Manbu MIYATA, et al, "Development of TOF-PET using Cherenkov Radiation", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 43, pp. 339-343, 2006

O. Bordun, et al, "Luminescence of thin films of bismuth and lead complex oxide compounds", Radiation Measurements, Vol. 42, pp. 569-571, 2007

Pelowitz, Denise B. "MCNPXTM-USER'S MANUAL version 2.5.0", 2005

Peter Kozma, "Radiation resistance of heavy scintillators to low-energy gamma-rays", Radiation Physics and Chemistry, Vol. 71, pp. 705-707, 2004

S.E. Derenzo, et al, "Initial Characterization of a Position-Sensitive Photodiode/BGO Detector for PET", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 36, 1989

R Nowotny, "LiF:W as a scintillator for dosimetry in diagnostic Radiology", Phys. Med. Biol, Vol. 49, pp. 2599-2611, 2004

Simon R. Cherry, et al, "Collection of Scintillation light from Small BGO Crystals", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 42, 1995

Uritani, et al, "Reactor Dosimetry: Radiation Metrology and Assessment", pp. 769-774, 2001

Y. Eisen, et al, "CdWO₄ Scintillator as a compact gamma ray spectrometer for planetary lander missions", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 490, pp. 505-517, 2002

고성진 등, "방사선 계측학", 청구문화사, pp. 166-176, 1999

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

김성환 등, "플라스틱 섬광체의 제작과 ⁶⁰Co γ -선에 의한 방사선 손상" 센서학회지, Vol. 9, 2000

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

도시홍 등, “BGO 단결정의 육성과 방사선 손상”, The Korean Physical Society, Vol. 36, pp. 635-640, 1996

문성애, “Panorama식 ^{60}Co 감마선 조사시설내의 선량분포 평가”, 제주대학교 석사논문, 2005

박찬희, “플라스틱 섬광광섬유를 활용한 저에너지 베타선 측정”, 제주대학교 석사논문, 2005

손병태 등, “광통신공학”, 광문각, pp. 13-98, 2000

이영길 등, “광섬유섬광체를 이용한 핵물질 보장조치 기술”. 한국원자력연구소, pp. 3-64, 1998

장경원 등, “고에너지 전자선 측정을 위한 광섬유 방사선 센서에서의 체렌코프 빛 측정 및 분석”, J. of the Korean Sensors society, Vol. 15, pp. 186-191, 2006

정운혁, “방사선 동위 원소 및 방사선의 취급기술”, 청문각, pp. 166-176, 1997

정원채, 김종현, “광전자공학”, MRC미래컴, pp. 173-215, 1984

장경원 등, “고에너지 전자선 측정을 위한 광섬유 방사선 센서에서의 체렌코프 빛 측정 및 분석”, J. of the Korean Sensors society, Vol. 15, pp. 186-191, 2006

감사의 글

부족했던 저이기에 이 논문은 저한테는 새로움으로 느껴집니다. 이 새로움은 어느 때는 무서웠고 두렵기도 하였으나 그 뒤에는 격려와 사랑이 있었고 저에 대한 믿음이 생겼습니다. 이런 제 뒤에서 격려와 사랑 주신 분들께 감사의 말을 전하려고 합니다.

먼저 부족한 저에게 세심한 조언과 배려를 아끼지 않으시며 용기를 북돋아주신 박재우 교수님께 고개 숙여 깊은 감사드립니다. 그리고 바쁜 와중에도 논문에 대해 조언 해주시고 심사해 주신 김낙배 교수님과 김신 교수님께 감사를 드립니다. 또한 이윤준 교수님, 이현주 교수님, 천원기 교수님, 정범진 교수님, 김남진 교수님께도 학부때부터 지금까지 그간의 많은 가르침과 조언에 감사드립니다.

실험을 하면서 항상 많은 관심과 조언을 아끼지 않으셨던 방사선응용과학연구소의 송성준 박사님, 홍경애 선생님과 환경방사능측정소의 강태우 선배님께도 감사드립니다. 항상 곁에서 많은 조언과 격려를 해주신 대학원 선배님과 후배님께도 감사의 마음을 전합니다. 저를 믿어주는 친구들한테도 감사의 마음을 전합니다. 그 밖에도 저를 아껴주시고 사랑해주신 모든 분들께 감사의 마음을 전합니다.

마지막으로 저를 가장 사랑해주시는 “어머니”께 사랑을 전하려고 합니다. 제가 초등학교 이후로 오진보 여사님, 우리 어머니께 짧디 짧은 글, 편지라도 드려본 적이 없습니다. 죄송합니다. 어머니! 제가 아직도 어린가봅니다.

아직까지 어머니께 사랑한다는 말을 못해본 막둥이 민우지만, 문자를 못 보시는 어머니에게 사랑한다는 문자를 보내는 막둥이 민우입니다. 어머니한테 문자를 확인하는 방법은 말해주고 싶지만 막상 사랑한다는 문자를 확인할까봐 부끄러운 막둥이 민우입니다. 어머니! 저번 주에 그 문자는 지웠어요. 하지만 이렇게 글로 남길게요. 어머니가 안경을 안 써도 보일 만큼 크게 남길게요. **“사랑합니다. 어머니”**

항상 저를 믿어주신 어머니, 제가 그 마음을 다 헤아릴 수 없어서 안타깝고 제가 그 마음을 조금이나 알까 싶으면 헤아릴 수 있고 늘어나는 새치와 주름살에 아픕니다. 그런 어머니의 믿음에 보답해 드리지 못하지만 이 말은 전하고 싶습니다. “성공한 사람보다는 훌륭한 사람이 되겠습니다.” 그리고 나의 가족, 서민경 누님, 서민찬 형님, 서민수 형님, 서민국 형님, 매형, 형수님 우리 조카들 그리고 돌아가신 우리 아버지, 사랑합니다.