

논문 2000-9-5-03

플라스틱 섬광체의 제작과  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -선에 의한 방사선 손상

김성환\*, 남승희\*, 천중규\*, 김 완\*, 강희동\*, 김도성\*\*, 이우교\*\*\*, 도시홍\*\*\*\*

Fabrication and  $^{60}\text{Co}$  Gamma Induced Damage of Plastic ScintillatorsSung-Hwan Kim\*, Seung-Hee Nam\*, Jong-Kyu Cheon\*, Wan Kim\*,  
Hee-Dong Kang\*, Do-Sung Kim\*\*, Woo-Gyo Lee\*\*\*, Sih-Hong Doh\*\*\*\*

## 요 약

광출력이 크고, 방사선 손상이 작은 플라스틱 섬광체를 제작하기 위하여 제1용질 p-terphenyl과 제2용질 popop의 조성비에 따른  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -선에 대한 손상과 상대적 광출력을 조사하였다.  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -선에 의한 손상은 주로 제2용질의 농도에 의존하였다. 발광스펙트럼의 파장범위는 400~450 nm이고, 중심파장은 415 nm이었다.  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -선의 조사량이  $1 \times 10^4$  Gy까지는 방사선 손상에 의한 광투광율과 광출력 등이 변하지 않았다.

## Abstract

The optimum composition ratios of primary solute(p-terphenyl) and secondary solute(popop) have been investigated in order to fabricate plastic scintillator with higher light output and less radiation damage. The radiation damage induced by  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -irradiation depends on mainly the concentration of secondary solute. The spectral range of the luminescence was 400~450 nm, its peak emission appeared at 415 nm. The transmittance and the light output were not changed by radiation damage up to  $1 \times 10^4$  Gy irradiation with  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -rays.

## 1. 서 론

플라스틱 섬광체는 원자번호가 작기 때문에 저지 X선이 발생되지 않아  $\beta$ 선 계측에 적합하며<sup>[1,2]</sup> 형광광쇠시간이 수 ns이므로 ns영역의 핵 혹은 양성자의 수명 측정 등 원자력에 대한 여러 가지 정보를 얻는 데 사용된다.<sup>[3,8]</sup> 그리고 섬광체의 크기와 모양을 자유로이 만들 수 있고, 제작이 용이하며, 가격이 저렴하므로 액

면계, 밀도계 등 여러 가지 nucleonic gauge, 의료용장비, 고강도·고선량 방사선이용분야<sup>[9,11]</sup> 등에 활용되고 있다. 고에너지 물리학 실험에서 배경방사능(radiation background)은 플라스틱 섬광체와 열량계의 파장 변이 재에 방사선 손상을 일으켜 섬광효율을 저하시키므로, 고에너지·고선량 방사선장에서 플라스틱 섬광체의 방사선 손상에 대한 연구가 많이 발표되고 있다<sup>[12,16]</sup>.

본 논문에서는 styrene 용매에, 제1용질 p-terphenyl, 제2용질 popop를 첨가하여 열중합법으로 플라스틱 섬광체를 제작하였다. 그리고, 플라스틱 섬광체의 광 및 섬광특성과 방사선손상이 용질의 조성비에 따라 변하므로 제1용질과 제2용질의 첨가량에 따른 상대적 광출력과  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -선에 의한 손상을 측정하여 최적제작 조건을 확립하였다. 그리고 제작된 플라스틱 섬광체의

\* 경북대학교 물리학과 (Dept. of Physics, Kyung-pook National University)

\*\* 대구대학교 물리학과 (Dept. of Physics, Taegu University)

\*\*\* 한국원자력연구소 (Korea Atomic Energy Research Institute)

\*\*\*\* 부경대학교 물리학과 (Dept. of Physics, Boo-Kyung national University)

&lt;접수일자 : 2000년 8월 10일&gt;

흡수곡선, 발광스펙트럼 및  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -선량에 따른 방사선손상을 조사하기 위하여 광투과율과 파고스펙트럼의 변화를 측정하였다.

## II. 실험

### 1. 플라스틱 섬광체의 제작

본 연구에서는 styrene 단량체(monomer)를 용매로, p-terphenyl을 제1용질로, popop(1, 4-di-[2-(5-phenyloxazoly)]-benzene)를 제2용질로 사용하여 질소분위기에서 열중합방법으로 플라스틱 섬광체를 제작하였다. 제1용질은 입사방사선의 에너지를 흡수하여 발광하지만 발광파장이 짧으므로 용매질 중에서 흡수되기 쉽다. 그러므로 이 광에너지를 흡수하여 장파장의 형광을 발생시켜 광전자증배관의 스펙트럼 감도와 정합시키기 위하여 제2용질을 첨가하였다.

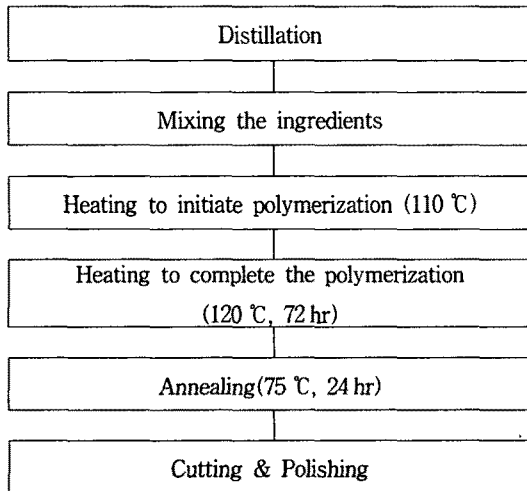


그림 1. 플라스틱 섬광체의 제작과정.

Fig. 1. Preparation procedure of plastic scintillator.

그림 1은 플라스틱 섬광체의 제작과정을 나타낸다. 모체인 styrene 단량체에 제1용질과 제2용질을 정량하여 혼합하고, 완전히 녹은 후 질소 분위기에서 열중합하였다. 중합과정은 발열과정이므로 중합시 온도를 급격히 올리면 용매와 용질이 끓기 시작하여 기포가 발생하면서 고체화되기 때문에 110 °C에서 온도가 안정될 때까지 서서히 상승시킨 후 중합온도를 유지하도록 하였다. 중합온도는 120 °C, 중합시간은 72시간으로 하였다. 그리고 중합 후 온도를 급격히 냉각 시키면 중합된 플라스틱 섬광체에 응력이 발생하여 섬광체 특성에 나

쁜 영향을 미치므로, 이 영향을 줄이기 위하여 플라스틱 섬광체를 75 °C에서 24시간 동안 열처리하였다. 제작한 플라스틱 섬광체는 적당한 크기로 자른 후 표면을 사포 1500, 2000 mesh 및  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (1  $\mu\text{m}$  와 0.05  $\mu\text{m}$ ) 분말을 사용하여 연마하였다. 그림 2는 본 연구에서 제작한 직경 2.5 cm, 높이 1 cm의 원통형 플라스틱 섬광체이다.

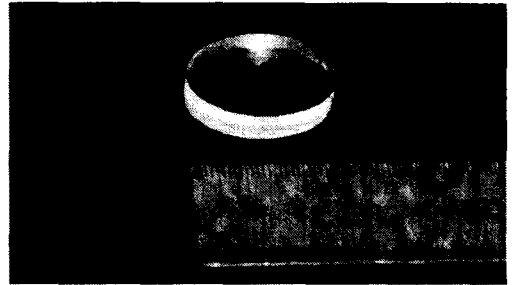


그림 2. 제작한 플라스틱 섬광체 (지름: 2.5 cm, 높이: 1.0 cm).

Fig. 2. Photograph of the prepared plastic scintillator (dia. : 2.5 cm, height : 1.0 cm).

### 2. 용질의 최적 조성비와 방사선 손상

그림 3은 styrene에 제2용질인 popop를 0.01 wt% 첨가한 후 제1용질인 p-terphenyl을 0.1~3.0 wt%까지 변화 시키면서 제작한 플라스틱 섬광체의 상대적 광출력을 나타낸다. 제1용질의 농도에 따른 상대적 광출력은 제1용질의 농도가 높을수록 증가하다가 1.5 wt%에서 최대가 된 후 감소하는 경향을 나타내었다.

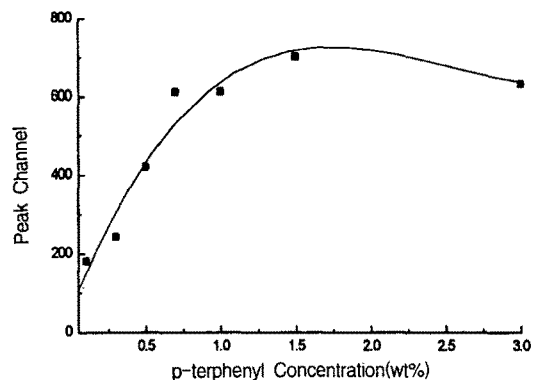


그림 3. p-terphenyl 농도에 따른 상대 광출력.

Fig. 3. Relative light output as a function of p-terphenyl concentration.

그리고, 제1용질인 p-terphenyl의 농도를 변화시키면서 제작한 플라스틱 섬광체에  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -선을  $1 \times 10^5$  Gy 조사하였을 때 제1용질의 농도에 따른 플라스틱 섬광체의 흡수곡선은 그림 4에 나타내었다. 흡수단 파장은 제1용질의 농도에 관계없이 모두 395 nm이었으며,  $\gamma$ -선 조사에 의해 약 400~540 nm 사이에 방사선 유도 색중심 흡수띠가 생성되었다. 그리고, 이 흡수띠는 제1용질을 2.0 wt% 첨가하였을 때 최소이었다. 그러나 그림 4에서 알 수 있는 바와 같이 방사선 유도 색중심 흡수띠는 제1용질의 농도에 따라 따라서 본 연구에서는 제1용질인 p-terphenyl의 첨가량을 상대적 광출력이 최대가 되고,  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -선에 의한 손상이 비교적 적은 1.5 wt%로 정하였다.

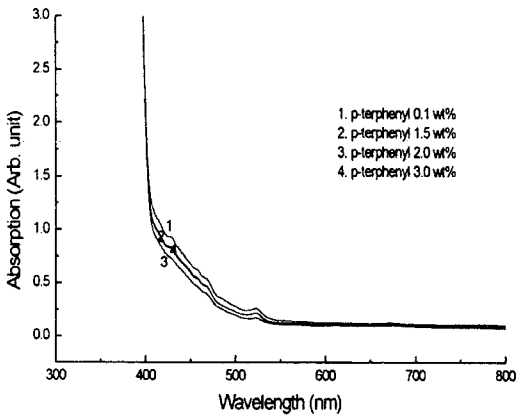


그림 4. p-terphenyl 농도변화에 대한 흡수곡선.  
Fig. 4. Absorption spectra as a function of p-terphenyl concentration.

그림 5는 styrene에 제1용질인 p-terphenyl을 1.5 wt%로 고정하고, 제2용질인 popop를 0.01~0.06 wt% 첨가하여 제작한 플라스틱 섬광체의 상대적 광출력을 나타낸다. 그림 5에서 알 수 있는 바와 같이 상대적 광출력은 제2용질을 0.01 wt% 첨가하였을 때 최대이었고, 제2용질의 농도가 증가할수록 감소하였다. 그리고 제2용질의 첨가하지 않았을 경우에는 발광스펙트럼의 피크 파장이 375 nm이므로 광전자증배관의 입사창에서의 흡수로 인해 상대적 광출력은 감소하였다. 또한 제2용질의 첨가량을 변화시켜 제작한 플라스틱 섬광체에  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -선을  $1 \times 10^5$  Gy 조사한 후 측정된 흡수곡선은 그림 6에 나타내었다. 제2용질의 농도가 높을수록 흡수단 파장은 장파장 쪽으로 이동하였으며, 0.01, 0.02,

0.03, 0.04, 0.05 및 0.06 wt% 일 때 흡수단 파장은 각각 395, 398, 400, 401, 402 및 403 nm 이었다. 그리고  $\gamma$ -선 조사에 의한 방사선 유도 색중심 흡수띠가 400~520 nm 사이에서 생성되었으며 이 흡수띠는 제2용질의 농도가 높을수록 커졌다. 따라서, 본 연구에서 제2용질인 popop의 첨가량을 상대적 광출력이 크고,  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -선에 의한 손상이 적은 0.01 wt%로 정하였다.

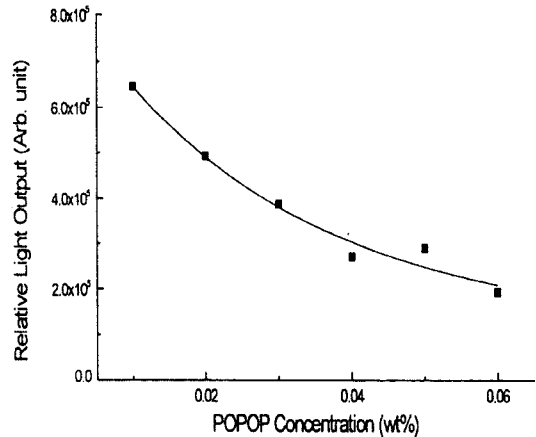


그림 5. popop 농도에 따른 상대광출력.  
Fig. 5. Relative light output as a function of popop concentration.

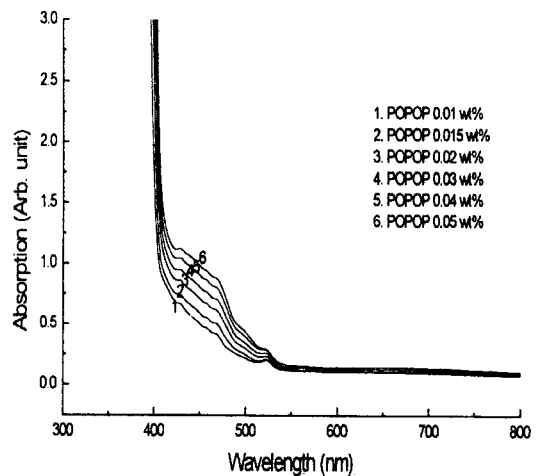


그림 6. popop 농도에 따른 흡수곡선.  
Fig. 6. Absorption spectra as a function of popop concentration.

III. 실험결과 및 논의

1. 발광 스펙트럼

그림 7은 styrene에 제1용질을 1.5 wt%, 제2용질을 0.01 wt% 첨가하여 제작한 플라스틱 섬광체를 흡수단 파장 395 nm로 여기시켰을 때의 발광스펙트럼을 나타낸다. 발광 스펙트럼은 spectrometer (JOBIN YVON-SPEX, HR 320, ISA)를 사용하여 측정하였고, 발광 스펙트럼의 파장범위는 400~450 nm이었으며, 중심파장은 415 nm이었다.

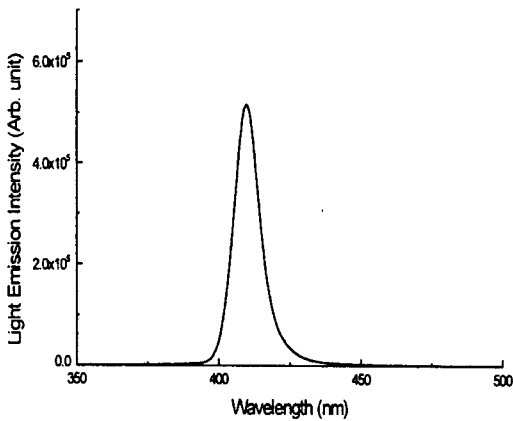


그림 7. 제작한 플라스틱 섬광체의 발광 스펙트럼.  
Fig. 7. Luminescence spectrum of prepared plastic scintillator.

2. 방사선 손상

그림 8은 제작한 플라스틱 섬광체에 <sup>60</sup>Co  $\gamma$ -선을 조사하기 전과 1x10<sup>4</sup>, 3x10<sup>4</sup>, 6x10<sup>4</sup>, 8x10<sup>4</sup> 및 1x10<sup>5</sup> Gy 조사한 후의 흡수곡선이다. 흡수곡선은 UV spectrophotometer(CARY 5G, Varian)를 사용하여 측정하였다. 그리고 흡수곡선은 공기를 기준으로 하여 측정하였으며, 측정시 시편의 표면에서 일어나는 반사와 산란에 의한 손실에 대해서는 보정하지 않았다. 그림 8에서 보는 바와 같이 방사선 유도 색중심 흡수띠는 약 400~520 nm 사이에서 생성되었으며,  $\gamma$ -선의 조사선량의 증가에 따라 커졌다. 또한 흡수단 파장은  $\gamma$ -선의 조사선량에 따라 장파장 쪽으로 이동하였으며, <sup>60</sup>Co  $\gamma$ -선을 조사하기 전의 흡수단 파장은 395 nm 이었고, 1x10<sup>4</sup>, 3x10<sup>4</sup>, 6x10<sup>4</sup>, 8x10<sup>4</sup> 및 1x10<sup>5</sup> Gy 조사하였을

때 흡수단 파장은 각각 396, 397, 398 및 400 nm 이었다.

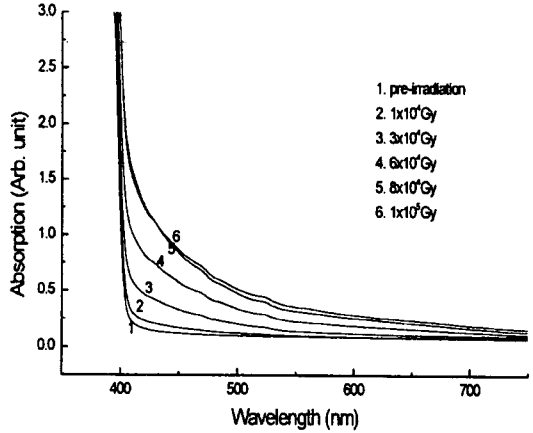


그림 8. <sup>60</sup>Co  $\gamma$ -선을 조사하기 전과 후의 흡수곡선.  
Fig. 8. Absorption curves before and after the irradiation with <sup>60</sup>Co  $\gamma$ -ray.

그림 9는 415 nm에서 <sup>60</sup>Co  $\gamma$ -선 조사선량의 증가에 대한 광투과율의 변화를 나타낸다. 1x10<sup>4</sup> Gy 이상부터  $\gamma$ -선에 의한 손상이 나타나기 시작하였으며, 플라스틱 섬광체는 연한 갈색으로 착색되었다. 그리고, 1x10<sup>5</sup> Gy 조사하였을 때의 광투과율은 방사선을 조사하기 전의 약 5% 정도이었다.

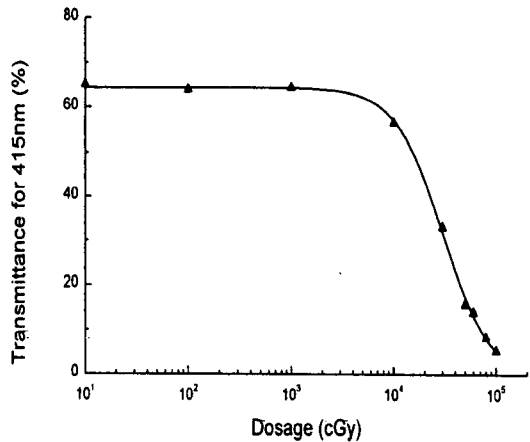


그림 9. 방사선량에 따른 광투과율.  
Fig. 9. Transmittance as a function of gamma dosage.

그림 10은 제작한 플라스틱 섬광체에  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -선을 조사하기 전과  $3 \times 10^4$  및  $1 \times 10^5$  Gy 조사한 후의  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{22}\text{Na}$ , 및  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -선에 대한 파고스펙트럼이다. 파고스펙트럼은 광전자증배관(R269, Hamamatsu Co), 고전압 전원(3106D, Canberra), 증폭기(452, Ortec), 다중과고분석기(ND-NSIC 50-1327-01, Nuclear Data) 및 파고 분석 소프트웨어(Accuspec Ver. 3.0, Canberra)를 사용하여 측정하였다.

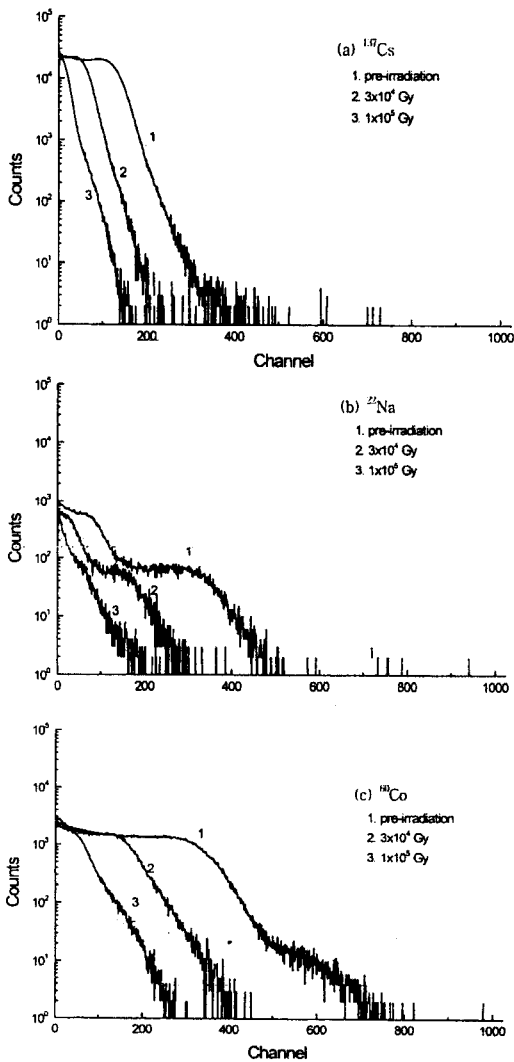


그림 10.  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -선으로 조사하기 전과 후의 파고 스펙트럼.

Fig. 10. Pulse height spectra before and after the irradiation with  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -rays.

그림 9에서 보는 바와 같이 조사선량이 증가할수록 광출력이 저하되었다. 이것은 조사선량의 증가에 의해 플라스틱 섬광체 내에 생성된 방사선 유도 색중심 흡수띠의 증가로 인하여 광투과율이 감소하는 것에 기인된다고 생각된다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 styrene 단량체에 제1용질로 p-terphenyl, 제2용질로 popop를 첨가하여 질소분위기에서 열중합 방법으로 플라스틱 섬광체를 제작하였다. 광출력이 크고, 방사선 손상이 작은 플라스틱 섬광체를 제작하기 위한 제1용질과 제2용질의 첨가량은 각각 1.5 wt%와 0.01 wt%이었다.

제작한 플라스틱 섬광체의 발광스펙트럼 파장 범위는 400~450 nm 이었으며, 중심파장은 415 nm 이었다.  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -선을 조사하기 전의 흡수단 파장은 395 nm 이었으며, 흡수단 파장은  $\gamma$ -선의 조사량이 증가함에 따라 장파장 쪽으로 이동하였다.  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -선에 의한 손상의 크기는 제1용질보다 제2용질의 양에 의존하였다.  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -선에 의한 방사선 유도 색중심 흡수띠는  $1 \times 10^4$  Gy부터 나타나고, 플라스틱 섬광체는 연한 갈색으로 착색되었다. 그리고 섬광체의 광투과율과 광출력이 저하되었다. 이 실험 결과를 토대로 하여 중성자에 대한 방사선 손상을 함께 연구한다면 방사선 정도 (radiation hardness)가 매우 큰 플라스틱 섬광체를 제작할 수 있는 가능성이 엿보인다.

#### 감사의 글

본 연구는 1999년도 과학기술부에서 시행한 원자력 중장기사업의 연구비지원에 의해 수행된 연구결과의 일부분입니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] F. K. Wahn et. al., "A Plastic Scintillation Detector for Beta-Ray Spectrum Measurements.", Nucl. Instr. Meth., 101, pp. 342~352, 1972.
- [2] T. Maekawa et. al., "Thin Beta-ray Detectors using Plastic Scintillator Combined

- with Wavelength-shifting Fibers for Surface Contamination Monitoring.", *J. Nucl. Sci. and Tech.*, Vol. 35, No. 12, pp. 886-894, 1998.
- [3] J. L. Basile, "Progress in Plastic Scintillators", *Proceedings of the Univ. of New Mexico Conf. on Organic Scintillation Detectors TID7612*, pp. 161~176, 1960.
- [4] W. L. Buck, R. K. Swank, "Efficient Plastic Scintillators", *Nucleonics*, Vol. 11, No. 11, pp. 48~52, 1953.
- [5] H. Kakehi, et al., "A Plastic Well Scintillation Detector for Assaying Large Volume Samples Containing Gamma Emitter", *Radioisotopes*, Vol. 13, No. 4, 275, 1964.
- [6] B. Gottschalk, "Large Scintillation Counter with Good Energy Resolution", *Rev. Scient. Inst.*, Vol. 40, No. 1, 22, 1969.
- [7] G. B. Forbes, "A  $4\pi$  Plastic Scintillation Detector", *Int. J. of Appl. Rad. and Isotopes*, Vol. 19, pp. 535~540, 1968.
- [8] S. S. Dasgupta and D. Sen, "Time dispersion in large plastic scintillation neutron detector", *IEEE Trans. on Nucl. Science*, Vol. 40, No.5, pp. 1329~1332, 1993.
- [9] P. E. Fehlau, "Integrated Neutron/Gamma-Ray Portal Monitors for Nuclear Safeguards.", *IEEE Trans. Nucl. on Science*, Vol. 41, No. 4, 922~926, 1994.
- [10] M. R. Arnfield et. al., "Radiation-Induced Light in Optical Fibers and Plastic Scintillators: Application to Brachytherapy Dosimetry.", *IEEE Trans. on Nucl. Science.*, Vol. 43, No. 3, pp. 2077~2084, 1996.
- [11] M. Globus and B. Grinyov, "Operation Characteristics of Ionizing Radiation Detectors Based on Inorganic and Plastic Scintillators for Nuclear Physics and Medical Instrumentation.", *IEEE Trans. on Nucl. Science.*, Vol. 43, No. 3, pp. 1287~1294, 1996.
- [12] A. D. Bross and A. Pla-Dalmau, "Radiation Damage of Plastic Scintillator.", *IEEE Trans. on Nucl. Science.*, Vol. 39, No. 5, pp. 1199~1204, 1992.
- [13] G. Bu $\beta$ , et. al., "Radiation Damage by Neutron to Plastic Scintillators.", *IEEE Trans. on Nucl. Science.*, Vol. 42, No. 4, pp. 315~319, 1995.
- [14] B. Bicken et. al., "Recovery and Permanent Radiation Damage of Plastic Scintillators at Different Dose Rate.", *IEEE Trans. on Nucl. Science.*, Vol. 38, No. 2, pp. 188~193, 1991.
- [15] M. Bowen et. al., "A New Radiation Resistant Plastic Scintillator.", *IEEE Trans. on Nucl. Science*, Vol. 36, No. 1, pp. 562~566, 1989.
- [16] C. Zorn et. al., "Progress in The Design of a Radiation Hard Plastic Scintillator.", *IEEE Trans. on Nucl. Science.* Vol. 38, No. 2, pp. 194~199, 1991.

著 者 紹 介

김 성 환

『센서학회지 제1권 제1호』 논문 92-07, p.59 참조  
 현재 대구보건대학 방사선과 조교수

강 회 동

『센서학회지 제1권 제1호』 논문 92-07, p.59 참조  
 현재 경북대학교 자연과학대학 물리학과 교수



남 승 희

1973년 9월 15일생  
 1999년 경북대학교 물리학과 졸업 (이  
 학사) 1999년 3월~현재 경북대학  
 교 대학원 물리학과 석사과정

김 도 성

『센서학회지 제1권 제1호』 논문 92-07, p.59 참조  
 현재 대구대학교 사범대학 물리학과 교수

이 우 교

『센서학회지 제7권 제4호』 논문 98-7-4-02, p18 참조  
 현재 한국 원자력 연구소 Post-Doc



천 종 규

1974년 11월 24일생  
 2000년 경산대학교 물리학과 졸업  
 (이학사)  
 2000년 3월~현재 경북대학교 대  
 학원 물리학과 석사과정

도 시 홍

『센서학회지 제2권 제2호』 논문 93-2-2-01, p3 참조  
 현재 부경대학교 자연과학대학 물리학과 교수

김 완

『센서학회지 제7권 제3호』 논문 98-7-3-05, p.179 참조  
 현재 경북대학교 방사선과학연구소 연구원