

실리콘 핀 포토다이오드를 이용한 전자 선량계의 설계 및 구현

†이운근\*, 권석근\*, 김중선\*, 손창호\*  
\*삼창기업(주) 제어기술연구소

A Study on the Development of Electronic Personal Dosimeter with Silicon PIN Photodiode

†Un-Kun Yi\*, Seok-Geon Kwon\*, Jung-Seon Kim\*, and Chang-Ho Sohn\*  
\*Samchang Enterprise Co., Ltd.

**Abstract** - Recently, electronic personal dosimeters based upon silicon PIN photodiode or miniature GM tube were developed and have attracted a lot of attention because of the advantages of their nature such as indication of dose rate and the cumulative dose, and facilitation of record keeping.

In this paper, we have developed a high-sensitivity electronic personal dosimeter with silicon PIN photodiode. The electronic personal dosimeter is constructed with silicon PIN photodiode, preamplifier, and shaping amplifier. To show the effectiveness of electronic personal dosimeter, we conducted nuclear radiation experiments using  $\gamma$ -ray Ba-133, Cs-137, and Co-60. The electronic personal dosimeter have a good linearity on  $\gamma$ -ray energy and activity.

측정기술이 탑재된 고집적 커스텀 칩(custom chip)이 사용되고 있기 때문에 제품가격이 매우 높은 실정이다. 우리 나라에서는 전자 선량계에 대한 연구가 일부 이루어지고 있으나 미비한 실정이다. 특히 전자 선량계는 방사선 검출기의 신호처리 및 선량 환산알고리즘의 개발이 매우 중요하다[8, 11].

본 논문에서는 선량계의 고유기능을 유지하면서 다양한 서비스를 부가할 수 있는 실리콘 핀 포토다이오드(Si PIN photodiode)를 사용한 반도체형 방사선 검출기 설계 및 선량 환산알고리즘 개발 등 주요 기술이 포함되며, 이는 사용하기 편리하고 정밀측정이 가능한 전자 선량계를 구현하는데 있다. 특히, 논문에서 제작된 반도체형 방사선 검출기는 신틸레이션 물질 없이 직접적으로 실리콘 핀 포토다이오드에 조사되는 X-선과  $\gamma$ -선을 검출가능하도록 구현되었으며, 구현된 전자 선량계는 방사선 조사시험 등의 여러 가지 성능시험을 통하여 유용성을 입증하였다.

1. 서 론

방사선을 이용하는 것은 인체에 유해한 영향보다 방사선의 이용을 통해 얻는 이익이 크기 때문일 것이다. 하지만 안전이라는 관점에서 보면 비록 미량의 방사선일지라도 인체에 유해한 것으로 간주될 수 있다. 따라서 방사선을 사용할 때는 방사선이 인체에 미치는 영향의 원인이 되는 방사선 피폭선량을 가능한 최소화하여야 한다.

방사선 시설에 종사하는 종사자의 외부피폭 방사선량을 측정하는 장비로 열형광 선량계와 필름배지와 같은 수동형 선량계가 사용되고 있다. 그러나 이들 선량계는 일정 기간 동안 방사선에 노출된 후 선량을 확인하기 위해서는 번거로운 판독과정이 필요한 단점이 있다. 그래서 작업자의 방사선 피폭관리를 효율적으로 하기 위해 보조의 포켓 선량계와 같은 직독식 선량계를 병행하여 사용하고 있다.

최근, 집적회로와 반도체 기술의 급속한 발달로 인하여 수동형 선량계의 상기한 단점을 보완할 수 있는 능동형 선량계에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이는 즉각적인 선량 및 선량률 표시, 경보기능, 피폭이력, 선량자료 관리의 효율성 등의 고유한 장점으로 인해 영국, 독일 등과 같은 일부 유럽국가에서는 EPD2(electronic personal dosimeter 2)를 공식 선량계로 채택한 바 있다. 특히 사회 전반적으로 안전문화에 대한 국민의식이 향상되고, 국제방사선방호위원회(ICRP)의 권고에 따라 능동적이고 적극적인 방사선 관리가 강조되므로 피폭통계의 즉시적이고, 효율적 분석이 가능한 능동형 선량계는 미래의 주된 선량계로서 기존의 열형광 선량계나 필름배지를 대체할 가능성이 높아지고 있다.[2, 7]

그러나, 휴대형 전자 선량계의 설계 및 제작은 방사선 측정 등 고도의 기술이 요구되므로 현재 몇몇의 선진국에서만 제작되고 있으며, 또한 관련 전자회로도 방사선

2. 실리콘 핀 포토다이오드를 이용한 방사선 검출

일반적으로 X-선과  $\gamma$ -선 에너지에 대한 실리콘 핀 포토다이오드의 검출효율은 10keV보다 높은 에너지의 X-선과  $\gamma$ -선에 대해서는 그림 1에 나타난 실리콘 핀 포토다이오드의 에너지와 효율에 대한 그래프에서와 같이 광전효과(photoelectric effect)가 급속히 저하된다. 그러나 효율은 떨어지지만 콤프톤 산란(compton scattering) 때문에 감마선 검출이 가능하다.[5, 6]

따라서,  $\gamma$ -선과 같이 높은 에너지의 포톤(photon)은 대부분이 실리콘 핀 포토다이오드를 그냥 통과하므로 공핍층이 넓고, 또한 일반 환경에 존재하는  $\gamma$ -선원의 선량이 적다는 점에서 센서는 효율이 좋고, 저 잡음의 제품이 요구된다.[6]

본 논문에서는 수평 면적이 2.7mm<sup>2</sup>으로 크고, 공핍층이 500 $\mu$ m로 넓은 HAMAMATSU사의 실리콘 핀 포토다이오드 S2506을 사용하였다.

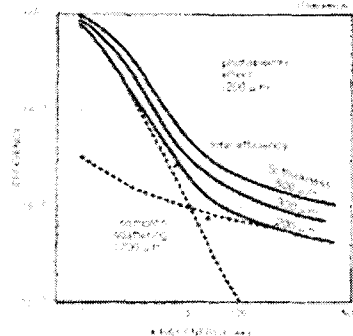


그림 1. 실리콘 검출기의 검출효율

### 3. 전자 선량계의 구현

#### 3.1 반도체형 방사선 검출기

반도체 방사선 검출기는 방사선 검출소자인 실리콘 편 포토다이오드와 이의 신호변환을 위한 전치증폭기와 성형증폭기로 구성된다. 그림 2는 제작된 반도체 방사선 검출기의 구성을 나타낸다. [1, 3, 4, 10]

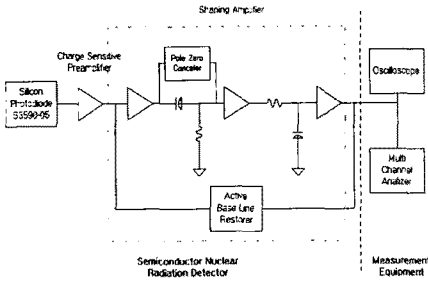


그림 2. 반도체 방사선 검출기의 구성

실리콘 편 포토다이오드에 방사선이 조사되면 전하 펄스가 발생되고, 이 신호는 전하 증폭형 증폭기(charge sensitive amplifier)로 적분되어 전압 펄스로 변형된다. 그리고, 성형증폭기는 파형 정형용의 미분, 적분 회로를 포함하고 있으며, 펄스의 높이 측정에 적합한 가우시안 형태의 펄스를 만들어 낸다. 이때 파형 정형의 시정수는 S/N비 즉, 에너지 분해능과 밀접한 관계가 있다. [9]

성형증폭기의 극 제로 상쇄기(pole zero canceler) 및 베이스 라인 복원기(base line restorer)는 펄스의 높이를 정확하게 측정할 수 있도록 하기 위한 것이다. 극 제로 상쇄기는 CR 미분 후에 출력펄스가 기준선(base line) 보다 아래로 내려가는 것을 막아주는 역할을 한다. 만약 극 제로 상쇄기가 없으면 후속 펄스의 펄스 높이가 낮게 측정될 수 있다. 베이스 라인 복원기는 노이즈 등의 원인으로 직류레벨이 변동될 경우 이를 능동적으로 기준전압에 복원된다.

표 1은 제작된 반도체 방사선 검출기의 전하 증폭형 전치증폭기의 특성을 나타내며, 그림 3은 이의 외형을 나타낸다.

표 1. 반도체 방사선 검출기의 특징

Feedback Capacitance Cf(pF)	Feedback Resistance Rf(MΩ)	Charge Gain (V/coulomb)
2	50	0.5



(a) 전면 (b) 측면

그림 3. 반도체형 방사선 검출기

그림 4는 제작된 반도체 방사선 검출기에  $\gamma$ -선 Cs-137(662keV)을 조사했을 때 얻어진 검출기의 출력 파형이며, 매우 양호함을 알 수 있다.

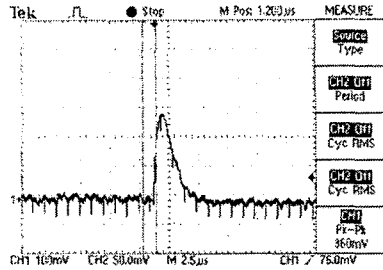
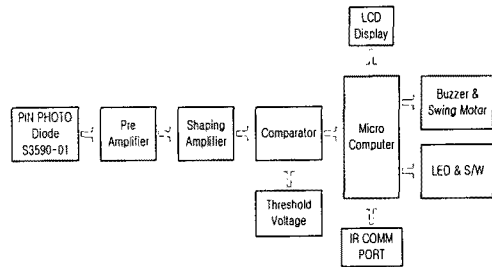


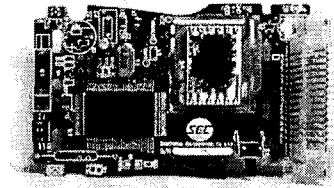
그림 4. Cs-137에 조사된 방사선 검출기의 출력

#### 3.2 전자 선량계의 구현

반도체형 방사선 검출기를 사용한 전자 선량계의 개략적인 다이어그램은 그림 5(a)에 나타낸 것과 같이 실리콘 편 포토다이오드에서 검출된 방사선은 전치 및 성형 증폭기를 거쳐 마이크로 컴퓨터의 환산 알고리즘을 통하여 선량으로 LCD에 표시된다. 구현된 전자선량계는 그림 5(b)에 나타낸다.



(a) 전자 선량계의 블록 다이어그램



(b) 구현된 전자 선량계의 전면

그림 5. 구현된 전자 선량계

#### 3.2 방사선량 환산알고리즘

정확한 방사선량을 얻기 위해 제작된 전자 선량계를 팬텀에 부착하고, Cs-137(선량률 : 0.01~20R/h)을 조사하여 초당 카운트 값(count per second, cps)을 구하였다. 이는 표 2와 그림 6에 나타냈으며, 그림 6에서 보듯이 반응도[counts/ $\mu$ Sv]는 선량률이 10~1000 [mR/h]인 범위에서는 거의 선형성을 보이며, 3000 [mR/h] 이상에서는 반응도가 점점 작아짐을 알 수 있다. 선형성을 갖는 부분의 반응도 평균을 모든 선량률에 대한 환산인자로 적용하기 위해서는 선량률이 3000 [mR/h]보다 커질 때 즉, 반응도가 작아지는 부분은 초당 카운트 값을 보정해 주어야 한다.

선형성을 갖는 부분의 반응도 평균을 구한 결과, 환산 인자는 135[counts/ $\mu$ Sv]이며, 이 환산인자를 식(2)에 적용하여 선량률에 대한 cps를 구하였다. 그 결과는 표 2에 나타내었다.

$$[\text{counts}/\mu\text{Sv}] = \frac{\text{cps}[\text{counts/s}]}{\left\{ [\text{mR}/\text{h}] \times \frac{10.6238}{3600} [\mu\text{Sv} \cdot \text{h}/\text{mR} \cdot \text{s}] \right\}} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{cps} &= [\text{counts}/\mu\text{Sv}] \times [\text{mR}/\text{h}] \times \{0.878 \times 1.21 \times 0.01\} [\text{mSv}/\text{mR}] \\ &\quad \times \frac{1}{3600} [\text{h}/\text{s}] \times 1000 [\mu\text{Sv}/\text{mSv}] \\ &= [\text{counts}/\mu\text{Sv}] \times [\text{mR}/\text{h}] \times \frac{10.6238}{3600} [\mu\text{Sv} \cdot \text{h}/\text{mR} \cdot \text{s}] \end{aligned} \quad (2)$$

그림 6을 살펴보면 선량률이 2000[mR/h]까지는 선형성을 보이므로 cps의 보정이 필요 없으며, 2000[mR/h] 이상은 보정이 필요함을 알 수 있다. 논문에서는 곡선의 적합성을 이용하여 3차 식으로 근사하여 환산인자 적용 데이터(직선 데이터)로 변환해 cps를 보정하였다.

환산알고리즘을 구하기 위하여 시험 데이터 중 5개의 데이터를 추출하였다. 이 값을 곡선의 적합성을 이용하여 3차 식으로 만들어진 환산알고리즘은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} X &= (7.096 \times 10^{-8} \times Y^3) + (-2.01 \times 10^{-3} \times Y^2) \\ &\quad + (3.05 \times Y) + (-326.6) \end{aligned} \quad (3)$$

위 식은 프로그램 처리가 용이하도록 다음의 식으로 변환된다.

$$X (\text{mR}/\text{h}) = \frac{Y}{1000} \left\{ \frac{Y}{1000} \left( \frac{7}{100} \times Y - 200 \right) + 3000 \right\} - 300 \quad (4)$$

$$Y (\text{cps}) = \frac{4}{10} \times X \quad (5)$$

환산인자 추출시험을 통해 얻은 데이터를 식(4)와 (5)에 적용하면 그림 6과 같은 직선성을 갖는 데이터를 얻을 수 있다.

표 2. 선량률에 따른 시험 결과 및 환산인자 적용 결과

mR/h	시험 결과		환산인자 적용	
	cps	counts/μSv	cps	counts/μSv
10	3.96	134.1	3.98	135
100	39.39	133.5	39.84	135
300	117.75	133	119.52	135
800	322.73	136.7	318.71	135
1000	405.00	137.2	398.39	135
3000	1134.41	128.1	1195.18	135
8000	2749.30	116.5	3187.14	135
10000	3269.00	110.8	3983.93	135
20000	5187.00	87.9	7967.85	135

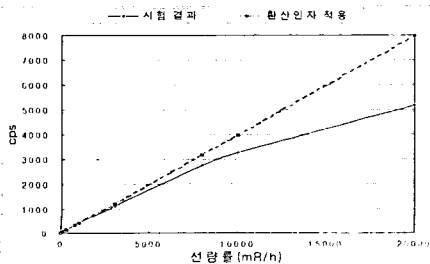


그림 6. 환산인자 추출시험 및 환산인자 적용 결과

## 4. 성능시험 및 결과고찰

구현된 전자 선량계에 대해 한국원자력연구소에서 그림 7에 나타난 환경에서 방사선량률 의존성, 에너지 의존성 및 방향 의존성에 대한 성능시험을 수행하였으며, 다음과 같이 성공적인 결과를 얻었다.

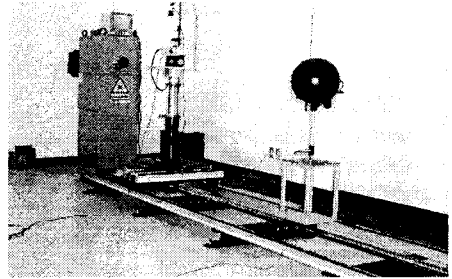


그림 7. 성능시험 환경

### 4.1 방사선량률 의존성

방사선량률 의존성을 평가하기 위하여 10~20,000 [mR/h]의 표준 방사선장에서 방사선량률을 변화시키면서 카운트 값을 측정하여 반응도(cnts/μSv)를 얻어 이를 그림 8에 나타낸다.

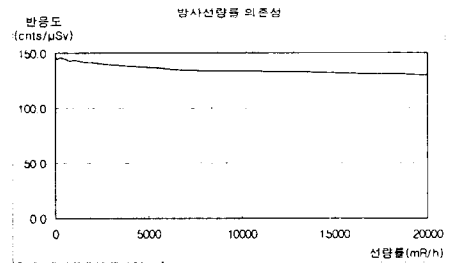


그림 8. 방사선량률에 따른 반응도

### 4.2 에너지 의존성

에너지 의존성을 평가하기 위하여 평균에너지를 48.2~250.2keV로 변화시키면서 선량을 측정하여 반응도를 얻고, 이 결과를 그림 9에 나타낸다.

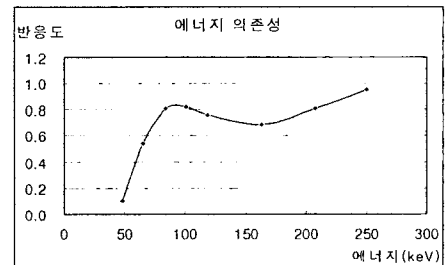


그림 9. 에너지에 따른 반응도

### 4.3 방향 의존성

단일에너지 방사선장에서 15° 간격으로 -90° ~90° 까지 입사 방향을 변화시키면서 반응도를 측정하였으며, 그림 10은 이의 결과를 나타낸다. 이때, 입사방향의 우측이 (-), 좌측이 (+)이다.

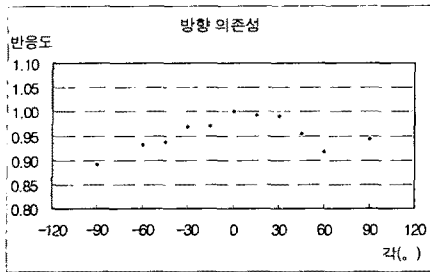


그림 10. 입사방향에 따른 반응도

## 5. 결 론

방사선 관련 장비는 방사선 계측, 전자회로 설계, 프로그래밍, 소재, 원자력 현장적용 등의 기초기술이 복합적으로 어우러져 있어 현재 몇몇 선진국에서만 제작 보급되고 있는 실정이며, 전량수입에 의존하고 있다. 이러한 현실에서 본 논문에서는 고가의 신틸레이션 물질 없이 직접적으로 실리콘 핀 포토다이오드에 조사된 X-선 및  $\gamma$ -선을 측정할 수 있는 반도체 방사선 검출기를 설계 및 제작하였다.

또한 방사선 구역 종사자의 과피폭 방지를 위해 경보 기능 등의 다양한 기능을 갖춘 전자 선량계를 개발하였으며, 이때 사용된 방사선량 환산알고리즘은 원자력연구소에서 행해진 방사선량률 의존성, 에너지 의존성 및 방향 의존성에 대한 성능시험에서 만족할 만한 성과를 나타내었다.

향후, 다수의 실리콘 핀 포토다이오드에 흡수체의 종류 및 크기를 달리한 반도체 방사선 검출기의 제작 및 선량 환산알고리즘의 개발에 대한 연구가 필요하며, 이의 적용은 정밀도가 높은 피폭 선량계의 구현이 가능하리라 판단된다.

## (참 고 문 헌)

[1] E. Beuville, K. Borer, E. Chesi, E.H.M. Heijne, P. Jarron, B. Lisowski, and S. Singh, "Amplex, a low-noise, low-power analog CMOS signal processor for multielement silicon particle detectors," *Nucl. Instr Meth.*, Vol. A288, pp. 157~167, 1990.

[2] S. Izumi, H. Kitaguchi, S. Mitani and H. Kikuchi, "A computerized personal dosimeter with an IC card," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Vol. 36, pp. 1150~1153, 1989.

[3] P.O'Connor, et al., "CMOS preamplifier with high linearity and ultra low noise for X-ray spectroscopy," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Vol. 44, pp. 318~325, 1997.

[4] V. Radeka, "Low noise techniques in detectors," *Ann. Rev. Nucl. & Part. Sci.* Vol. 38, pp. 217~277, 1988.

[5] M. Traczyk and M. Slapa, "Commercially manufactured photodiodes in detection of low-energy X-ray and  $\gamma$ -ray radiation," *Nukleonika*, Vol. 40, pp. 51~60, 1995.

[6] Hamamatsu Photonics K.K., Solid State Division, "Si photodiodes and charge sensitive amplifiers for scintillation

counting and high energy physics," Catalog #KOTH0002E05, Jun, 1997

[7] N. Horiuchi, T. Sato, E. Kobayashi, "A high-sensitivity neutron dosimeter using the coherent demodulation technique," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Vol. 42, pp. 2203~2208, 1995.

[8] U. Kilgus, R. Kotthaus, and E. Lange, "Prospects of CsI(Tl)-photodiode detectors for low-level spectroscopy," *Nucl. Instr Meth.*, Vol. A927, pp. 425~440, 1990.

[9] G. F. Knoll, "Radiation Detection and Measurement," John Wiley and Sons, ISBN: 0-471-49545-X, 1979.

[10] 이운근, 김중선, 손창호, 백광렬, "실리콘 포토다이오드를 이용한 방사선 검출기 개발에 관한 연구," 1999년도 대한전기학회 추계학술대회 논문집, B권, pp.754~756, 1999.

[11] 권석근, 이운근, 임훈, 김중선, 손창호, 이철준, "개인 피폭선량 측정시스템 개발," 2000년도 대한전기학회 추계학술대회 논문집, B권, pp.724~726, 2000.