

## 실리콘 핀 포토다이오드를 이용한 능동형 방사선 피폭 전자선량계의 구현

### Implementation of Electronic Personal Dosimeter Using Silicon PIN Photodiode

이 윤 근, 백 광 렬, 권 석 근  
(Un-Kun Yi, Kwang Ryul Baek, and Seok Geon Kwon)

**Abstract** : A personal portable type electronic dosimeter using silicon PIN photodiode and small GM tube is recently attracting much attention due to its advantages such as an immediate indication function of dose and dose rate, alerting function, and efficient management of radiation exposure history and dose data. We designed and manufactured a semiconductor radiation detector aimed to directly measure X-ray and  $\gamma$ -ray irradiated in silicon PIN photodiode, without using high-priced scintillation materials. Using this semiconductor radiation detector, we developed an active electronic dosimeter, which measures the exposure dose using pulse counting method. In this case, it has a shortcoming of over-evaluating the dose that shows the difference between the dose measured with electronic dosimeter and the dose exposed to the human body in a low energy area. We proposed an energy compensation filter and developed a dose conversion algorithm to make both doses indicated on the detector and exposed to the human body proportional to each other, thus enabling a high-precision dose measurement. In order to prove its reliability in conducting personal dose measurement, crucial for protecting against radiation, the implemented electronic dosimeter was evaluated to successfully meet the IEC's criteria, as the KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute) conducted test on dose indication accuracy, and linearity, energy and angular dependences.

**Keywords** : silicon PIN photodiode, preamplifier, semiconductor radiation detector, dose rate, electronic personal dosimeter (EPD)

#### I. 서론

원자력을 이용하는 발전소의 운영에 있어서 가장 큰 문제점은 방사능 누출에 의한 방사선의 피해를 들 수 있다. 방사선은 사람의 눈에 보이지 않을 뿐 더러 그 피해는 바로 나타나지 않으면서 인간에게 치명적인 피해를 입힌다. 따라서 방사선구역 종사자들 개개인의 피폭량이나 오염여부 등을 측정 및 관리하여 효과적으로 방사선에 의한 피해를 미연에 방지하거나 최소화하기 위한 장비의 필요성이 커지고 있다[1-3].

현재, 방사선 시설에 종사하는 종사원들 개개인의 외부 피폭 방사선량을 측정 및 관리하기 위한 장비로는 열형광 선량계와 필름배지와 같은 수동형 선량계가 사용되고 있다. 그러나, 이들 선량계는 일정기간 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.

최근에는 집적회로와 반도체 기술의 급속한 발달로 인하여 수동형 선량계의 상기한 단점을 보완할 수 있는 능동형 선량계에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이는 즉각

적인 선량 및 선량률 표시기능, 경보기능, 피폭이력 및 선량자료 관리의 효율성 등의 고유한 장점으로 인하여 영국, 독일 등과 같은 일부 유럽국가에서는 EPD2를 공식 선량계로 채택한 바 있다. 특히, 사회 전반적으로 안전문화에 대한 국민의식이 향상되고 국제방사선방호위원회(ICRP)의 권고에 따라 능동적이며, 적극적인 방사선 관리가 강조되므로 피폭통계의 즉각적인 효율적 분석이 가능한 능동형 선량계는 미래의 주된 선량계로서 기존의 열형광 선량계나 필름배지를 대체할 가능성이 높아지고 있다[4-5].

그러나, 휴대형 전자선량계의 설계 및 제작은 방사선 계측, 전자회로 설계, 프로그래밍, 소재, 원자력 현장적용 등의 기초기술이 복합적으로 어우러져 있어 현재 몇몇의 선진국에서만 이루어지고 있으며, 또한 관련 전자회로도 방사선 측정기술이 탑재된 고집적 커스텀 칩(custom chip)이 사용되고 있기 때문에 구현에 많은 어려움을 가지고 있다. 우리나라에서는 전자선량계에 대한 연구가 일부 이루어지고 있으나 아직은 미비한 실정이며, 특히 전자선량계의 개발은 방사선 검출기의 제작 및 이의 신호처리, 그리고 선량 환산 알고리즘의 개발이 선행되어야 한다[5-6].

그림 1은 개인 피폭 선량을 효율적으로 측정하여 개인 피폭량의 데이터 베이스를 유지·관리하기 위한 방사선 피폭 선량 관리시스템의 전체 구성을 나타낸 것이다. 그림에서 나타낸 것과 같이 이는 개인 피폭 선량을 측정하기 위한 전자선량계 외에 전자선량계의 보관 및 배터리 충전을 목적으로 하는 배터리 차저(battery charger), 그리고 전자선

논문접수 : 2002. 8. 20., 채택확정 : 2003. 2. 19.

이윤근 : 부산경상대학 디지털에니메이션과(yiuk@bsgs.ac.kr)

백광렬 : 부산대학교 전자전기정보컴퓨터공학부(krbaek@pusan.ac.kr)

권석근 : 울산대학교 전기전자정보시스템공학부(selfking@chollian.net)

※ 본 연구는 부산대학교 기성회 재원 학술연구조성비에 의한 연구입니다.

량계에서 취득된 개인 피폭 선량데이터를 호스트 컴퓨터로 전송하거나 입출구 제어 등을 담당하기 위한 리더(reader)로 구성이 되며, 이들 구성 중에서 본 논문의 범위는 전자선량계의 구현으로 한정을 한다.

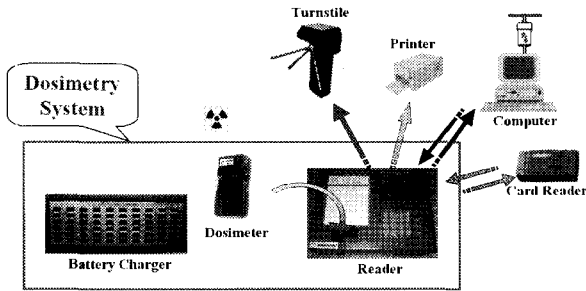


그림 1. 방사선 피폭 선량 관리시스템.  
Fig. 1. A dosimetry system.

본 논문에서는 고정도의 방사선 측정이 가능한 능동형 전자선량계를 구현하기 위하여 방사선과 실리콘 핀 포토다이오드(Silicon PIN photodiode)의 상호작용으로 생성된 수 [nA]의 전류펄스를 측정하기 위한 전치증폭기(preamplifier)와 성형증폭기(shaping amplifier)가 포함된 반도체 방사선 검출기를 설계하였다. 특히, 제작된 반도체 방사선 검출기는 신틸레이션(scintillation) 물질 없이 직접적으로 실리콘 핀 포토다이오드에 조사되는 X-선과  $\gamma$ -선의 검출이 가능하다. 이러한 구성은 에너지 보상필터(energy compensation filter)를 사용하여 여러 입사에너지에 대한 검출기 반응을 일정하게 유지하도록 만들고, 입사방사선을 계수하여 이를 흡수선량으로 전환하기 위함이다. 물론, 신틸레이션 물질을 이용하여 입사된 방사선의 에너지 스펙트럼과 에너지별 선량환산인자를 이용하는 방법은 정확도에 있어서 펄스 계수형 보다는 상당히 뛰어나지만, 입사방사선에 대한 에너지 스펙트럼을 얻기 위해 MCA가 필수적으로 요구되므로 개인 선량계에 이를 탑재하기란 쉽지 않다.

본 논문에서는 신틸레이션 물질 없이 설계·제작된 반도체 방사선 검출기를 이용하여 펄스 계수형 방식으로 피폭 선량을 측정한다. 이 경우, 저에너지 영역에서 인체 조직에 비해 선량을 과대 평가하는 단점이 있으나 본 논문에서는 검출기의 선량과 조직의 선량이 비례하도록 에너지 보상필터를 사용하여 고정도의 전자선량계를 구현하였다[7]. 그리고, 전자선량계의 PCB 실장시 반도체 방사선 검출기에 유입되는 전자장의 차폐를 위한 차폐제에 대한 검토를 수행하였다.

구현된 전자선량계는 방사선 방호의 핵심인 개인선량측정에 충분한 신뢰도를 제공하는지를 평가하기 위하여 선량 지시의 정확성, 방사선량률 의존성, 에너지 의존성 및 방향 의존성에 대한 전반적인 성능시험을 수행하였다. 시험결과, 개인 선량계에 대한 평가기준인 IEC 규격 [8]을 만족하는 성공적인 결과를 얻었다.

**II. 실리콘 핀 포토다이오드를 이용한 방사선 검출**

최근 실리콘 핀 포토다이오드의 성능은 수광 면적의 증가와 응답파장 대역이 넓어지는 등 많은 개선을 하였다. 일반적으로 X-선과  $\gamma$ -선 에너지에 대한 실리콘 핀 포토다이오드의 검출효율은 10keV보다 높은 에너지의 X-선과  $\gamma$ -선에 대해서는 그림 2에 나타난 실리콘 핀 포토다이오드의 에너지와 효율에 대한 그래프에서와 같이 광전효과(photoelectric effect)가 급속히 저하된다. 그러나, 효율은 떨어지지만 콤프톤 산란(compton scattering) 때문에 직접적으로 방사선 검출이 가능하다[9-10]. 이러한 점을 고려해 볼 때,  $\gamma$ -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[9].

본 논문에서는 수광 면적이 2.7mm이며, 공핍층이 300 $\mu$ m로 넓은 Hamamatsu사의 실리콘 핀 포토다이오드 S2506을 사용하였다.

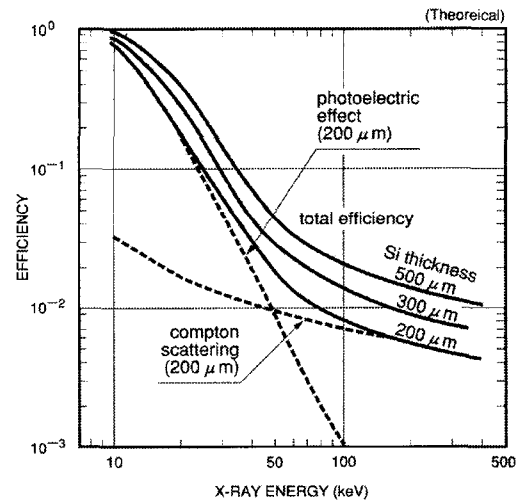


그림 2. 실리콘 검출기의 검출효율.  
Fig. 2. Detection efficiency of Si detectors.

**III. 방사선 피폭 전자선량계의 구현**

**1. 반도체 방사선 검출기**

실리콘 핀 포토다이오드를 이용한 방사선 검출기에서 방사선과 반도체 물질과의 상호작용으로 생성되는 수 [nA] 정도의 전류펄스를 측정하기 위해서는 검출기의 특성에 적합한 전치증폭기 및 성형증폭기의 설계가 필수적으로 요구된다. 이를 위하여 본 논문에서는 방사선 검출소자인 실리콘 핀 포토다이오드와 이의 신호변환을 위한 전하 증폭형 전치증폭기와 성형증폭기를 그림 3과 같이 구성하였다[6]. 그리고, 표 1은 본 논문에서 구현된 반도체 방사선 검출기의 설계사양을 나타낸다.

실리콘 핀 포토다이오드에 방사선이 조사되면 수십 나노초(nanoseconds)의 펄스 폭을 갖는 미약한 전하 펄스(weak

charge pulse)가 발생하게 된다. 이 신호는 고 임피던스 신호이므로 입력 임피던스가 높은 전하 증폭형 증폭기(charge sensitive amplifier)를 구성하여 미소한 전하펄스를 적분하여 이를 전압펄스로 변환, 증폭시킨 후 저 임피던스 회로로 신호를 출력한다. 이때 본 논문에서 사용된 전하증폭기의 OP 앰프는 입력 임피던스가  $10^{13}\Omega$ 으로 매우 높은 Analog Devices사의 FET 입력형의 OP 앰프인 AD820이다. 그리고, 성형증폭기는 과형 정형용의 미분, 적분 회로를 포함하고 있으며, 펄스의 높이 측정에 적합한 가우시안 형태의 펄스를 만들어 낸다. 이때 과형 정형의 시정수는 S/N비 즉, 에너지 분해능과 밀접한 관계가 있다[6][11]. 성형증폭기에서 사용된 OP 앰프는 범용의 OP 앰프를 사용하였다.

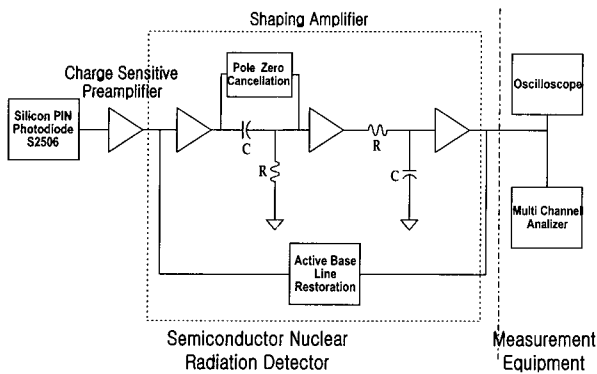


그림 3. 반도체 방사선 검출기의 구성.  
Fig. 3. Structure of semiconductor nuclear radiation detector.

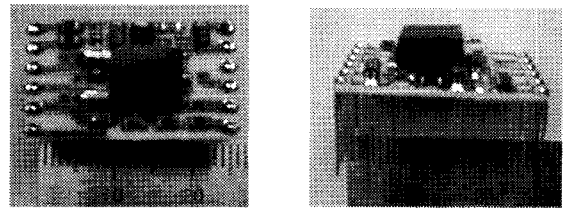
표 1. 구현된 검출기의 설계사양.

Table 1. Specification of semiconductor nuclear radiation detector.

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

성형증폭기의 극 제로 상쇄기(pole zero canceler) 및 베이스 라인 복원기(base line restorer)는 실제 측정되는 펄스 값을 정확히 얻기 위한 보상회로이다. 일반적으로 전하증폭기의 출력신호는 지수적으로 비교적 서서히 감쇠하는 펄스이며, 이 시정수는 수  $\mu$ s 정도로 조절되어 있다. 이와 같은 펄스를 성형증폭기 중의 시정수가 짧은 미분회로에 가하면 언더슈트가 발생할 뿐만 아니라 이 언더슈트에서 베이스 라인으로 복구하는 시간은 입력과형의 느린 시정수에 따르기 때문에 조건이 좋지 않다. 이를 보완하기 위하여 본 논문에서는 저항으로 구성된 극 제로 상쇄기를 이용하여 펄스의 높이를 정확하게 측정할 수 있도록 하였으며, 이는 CR 미분 후에 출력펄스가 베이스 라인 보다 아래로 내려가는 것을 막아주는 역할을 한다. 만약 극 제로 상쇄기가 없으면 후속 펄스의 펄스 높이가 낮게 측정될 수 있다. 그리

고, RC에 의해 전압결합을 포함하는 회로에서 단일 극성의 펄스를 취급하면 계수율에 따라 베이스 라인이 변동한다. 그러므로 본 논문에서는 다이오드와 증폭기로 구성된 베이스 라인 복원기를 이용하여 베이스 라인을 클램프(clamp)시켜서 능동적으로 기준전압에 복원되게 하였다. 그림 4는 본 논문에서 제작된 반도체 방사선 검출기의 외형을 나타낸다. 그림에서 나타낸 것과 같이 이는 하이브리드 형으로 제작되었다.



(a) 전면 (b) 측면

그림 4. 반도체 방사선 검출기.  
Fig. 4. Semiconductor nuclear radiation detector.

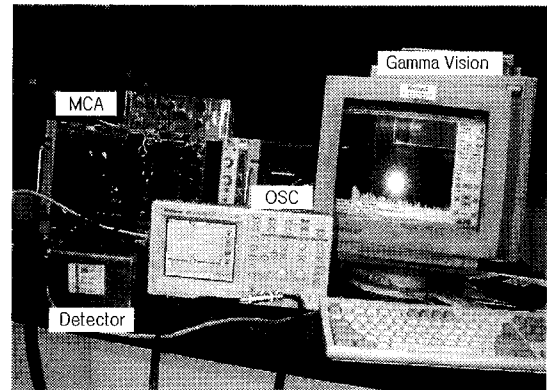


그림 5. 실험장치의 구성.  
Fig. 5. Structure of the experimental equipments.

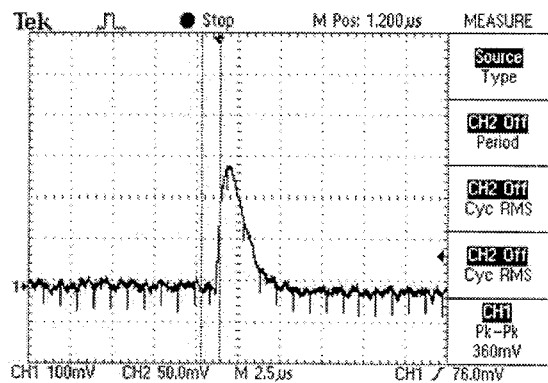


그림 6. Cs-137에 조사된 방사선 검출기의 출력 파형.  
Fig. 6. Pulse output of  $\gamma$ -ray(Cs-137) by the semiconductor nuclear radiation detector.

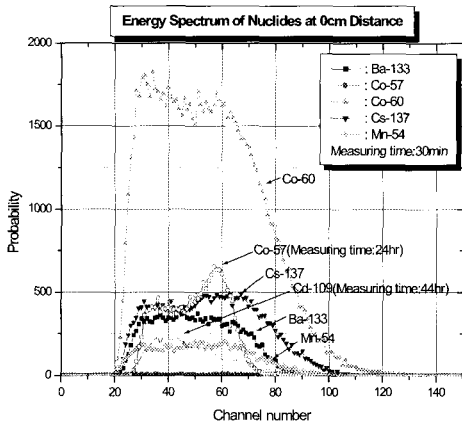


그림 7. 제작된 방사선 검출기의 에너지 스펙트럼.

Fig. 7. Energy spectrum of  $\gamma$ -ray by the semiconductor nuclear radiation detector.

실리콘 핀 포토다이오드를 이용하여 제작된 반도체 방사선 검출기의 검출특성을 실험하기 위하여 그림 5에 나타난 것과 같이 실험장치를 구성하여 방사선 조사실험을 수행하였다. 그림 6은 제작된 반도체 방사선 검출기에  $\gamma$ -선 Cs-137(662keV)을 조사했을 때 얻어진 검출기의 출력 파형을 나타내며, 출력 파형이 매우 양호함을 알 수 있다. 그리고, 그림 7은 여러 종류의 에너지를 가진  $\gamma$ -선에 조사시켜 생성된 에너지 스펙트럼을 나타낸 것이다. 그림 7에서 x축의 channel number는 에너지의 크기를 나타낸다. 실험시에 인가된 반도체 방사선 검출기의 바이어스 전압은 본 시스템이 향후 개인 휴대형으로 제작되어 배터리로 동작되어야 함으로 3.6V를 인가하였다. 측정 소요시간은 30분이며, 이들 중 Co-57, Cd-109는 방출 감마 에너지가 너무 낮으므로 30분 동안 측정할 경우 측정되는 양이 너무 작아 Co-57은 24시간 동안, Cd-109는 44시간 동안 측정하였다. 측정결과는 그림에서 나타난 것과 같이 고에너지 영역에서 입사 감마선의 에너지에 따라 측정되는 양도 많게 나타남을 알 수 있다. 그러나, 전체 계수 중 저에너지 영역에서 계수되는 양이 차지하는 비율이 상당하므로 결코 무시할 수 없으며, 총 계수를 이용한 환산인자 도출시 세심한 주의가 필요함을 알 수 있다.

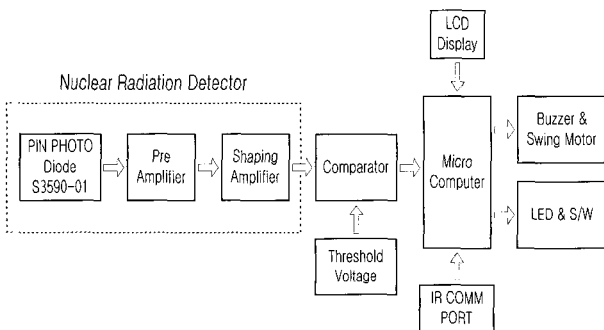
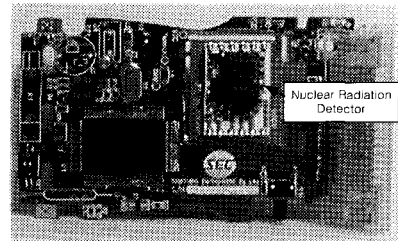
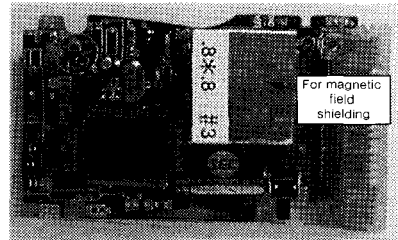


그림 8. 구현된 전자선량계의 구성.

Fig. 8. Structure of electronic personal dosimeter.

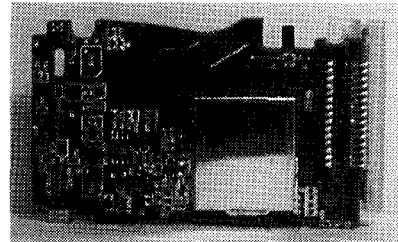


Nuclear Radiation Detector



For magnetic field shielding

a) 전면



b) 후면

그림 9. 구현된 전자선량계.

Fig. 9. Implemented electronic personal dosimeter.

2. 방사선 피폭 전자선량계의 구현

제작된 반도체 방사선 검출기를 이용한 전자선량계의 개략적인 구성은 그림 8에 나타난 것과 같이 실리콘 핀 포토다이오드에서 검출된 방사선은 전치 및 성형 증폭기를 거쳐 마이크로 컴퓨터의 선량 환산알고리즘을 통하여 선량값으로 LCD에 표시된다. 구현된 전자선량계는 그림 9에 나타내었다. 전자선량계의 구현시 제작된 방사선 검출기를 PCB에 실장하기 위해서는 전자장(magnetic field)의 차폐가 필수적으로 요구된다. 따라서 본 논문에서는 전자장을 차단하기 위한 차폐제에 대하여 검토하였다. 그림 10은 여러 에너지의 방사선이 0.35mm Al과 1mm Ni판을 각각 통과한 후에 감쇄하지 않고 살아남을 비율을 나타낸 것이다. 그림 11은 그림 10에서 저에너지 영역의 영향을 자세히 나타낸 것이다.

그림 10과 11에 나타난 그래프를 살펴보면 0.35mm Al판의 경우 입사에너지가 20keV이면 입사한 양의 약 48%정도가 통과하지만 입사에너지가 30keV이면 약 90%정도가 통과한다. 따라서 외부 자장이나 빛의 차폐를 위해 사용하는 0.35mm Al판은 아주 낮은 에너지의 방사선만 감쇄시키고, 높은 에너지에는 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 따라서 이러한 실험결과를 토대로 본 논문에서는 전자장의 차단을 위해 0.35mm Al판을 사용하였으며, 이의 실장에는 그림 9에 나타낸다.

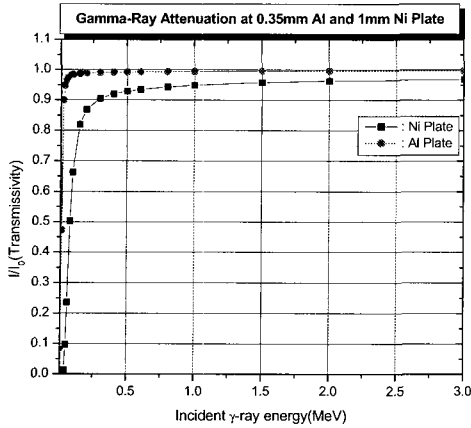


그림 10. 방사선이 0.35mm Al과 1mm Ni판을 각각 통과한 후에 감쇄되지 않고 살아남을 비율.

Fig. 10. Gamma ray attenuation at 0.35mm Al and 1mm Ni Plate.

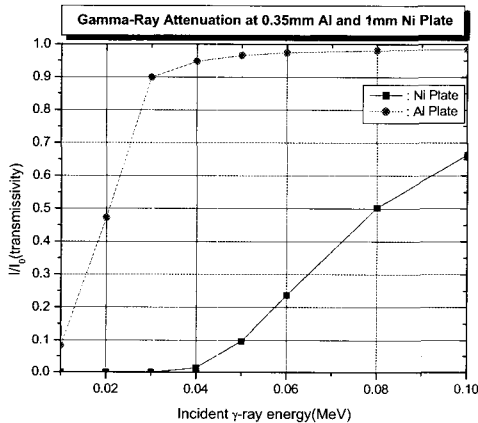


그림 11. 그림 10의 저에너지 영역.

Fig. 11. Region of low energy at Fig. 10.

3. 방사선량 환산알고리즘

저가의 실리콘 핀 포토다이오드를 실제 방사선 검출 센서로써 사용하기 위해서는 포토다이오드의 흡수선량과 인체 조직의 흡수선량이 일치하지 않는다는 문제점을 해결하여야 한다. 즉, 실리콘 핀 포토다이오드는 방사선 센서로써 사용하기에 응답속도가 빠르고, 분해능이 우수하다는 등의 여러 장점이 있으나 실리콘 핀 포토다이오드를 펄스 계수형 방식으로 피폭선량을 측정하기 위해서는 저에너지 영역에서 인체 조직에 비해 선량을 과대 평가하는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 본 논문에서는 방사선 검출 센서에 도달되는 방사선을 감쇄시키고, 포토다이오드의 반응도를 일정하게 유지하여 검출기의 선량과 조직의 선량이 비례하도록 에너지 보상필터를 사용하였다. 이에 대한 내용은 참고문헌 [7]에 자세히 소개되어 있다. 참고문헌 [7]에 따라 사용된 에너지 보상필터는 0.8mm 두께의 구리에 주석을 도금한 필터를 사용하였다.

방사선량 환산알고리즘을 구하기 위하여 한국원자력연구소에서 제작된 전자선량계를 PMMA 팬텀에 부착하고, 방사선 Cs-137(선량률 : 0.01~20R/h)을 조사하여 초당 계수율(cps, count per second)을 측정하였다. 이때의 선량당량 환산인자는 1.21[Sv/Gy]이다. 실험결과는 표 2와 그림 12에 환산인자 적용전의 데이터로 나타냈으며, 그림에서 나타낸 것과 같이 계수율과 선량의 비 즉, 반응도 [cnts/μSv]는 선량률이 10~1,000[mR/h]인 범위에서는 거의 선형성을 나타내며, 3,000[mR/h] 이상에서는 반응도가 점점 낮아짐을 알 수 있다. 이 그래프에서 선형성을 갖는 부분의 반응도 평균을 모든 선량률에 대한 환산인자로 적용하기 위해서는 선량률이 3,000[mR/h] 보다 높아질 때 즉, 반응도가 낮아지는 영역은 초당 계수율을 보정해 주어야 한다.

표 2의 환산인자 적용전 데이터에서 선형성을 갖는 영역에 대한 반응도의 평균을 취한 결과, 방사선량 환산인자는 135[cnts/μSv]이었으며, 이 환산인자를 (1)에 적용하여 선량률에 대한 초당 계수율  $N$ 을 구하였다. 그 결과는 표 2와 그림 12에 환산인자 적용후의 데이터로 나타내었다. 그리고, (2)는 환산인자 적용전의 반응도  $\xi$ 를 계산하기 위한 식이다.

$$N [cps] = C [cnts/\mu Sv] \times X [mR/h] \times \{0.878 \times 1.21 \times 0.01\} \quad (1)$$

$$[mSv/mR] \times \frac{1}{3,600} [h/s] \times 1,000 [\mu Sv/mSv]$$

$$= C [cnts/\mu Sv] \times X [mR/h] \times \frac{10.6238}{3,600} [\mu Sv \cdot h/mR \cdot s]$$

$$\xi [cnts/\mu Sv] = \frac{N [cps]}{\left\{ [mR/h] \times \frac{10.6238}{3,600} [\mu Sv \cdot h/mR \cdot s] \right\}} \quad (2)$$

여기에서  $C$ 는 환산인자 135를 나타내며,  $X$ 는 선량률,  $N$ 은 초당 계수율을 나타낸다.

그림 12에서 선량률이 선형성을 갖지 않는 3,000 [mR/h] 이상의 영역에 대한 초당 계수율 보정을 위하여본 논문에서는 곡선의 적합성(curve fitting)을 이용한 직선근사화를 통하여 환산인자 적용 데이터로 변환하여 초당 계수율을 보정하였다.

최종 구현된 선량 환산알고리즘은 시험 데이터 중 5개의 데이터를 추출하여 이 값을 곡선의 적합성을 이용하여 3차식으로 근사화하였으며, 이는 다음 (3)과 같다.

$$X [mR/h] = (7.096 \times 10^{-8} \times N^3) + (-2.01 \times 10^{-3} \times N^2) + (3.05 \times N) - 326.6 \quad (3)$$

여기에서  $X$ 는 선량률을 나타내며,  $N$ 은 초당 계수율을 나타낸다. (3)을 프로그램 처리가 용이하도록 변환하면 다음의 (4), (5)와 같다. 환산인자 추출실험을 통해 얻은 실험데이터를 (4)와 (5)에 적용하면 그림 12에서 환산인자 적용후의 그래프와 같은 직선성을 갖는 선형적인 데이터를 얻을 수 있다.

$$X [mR/h] = \frac{N}{1,000} \left\{ \frac{N}{1,000} \left( \frac{7}{100} \times N - 200 \right) + 3,000 \right\} - 300 \quad (4)$$

$$M [cps] = 0.4X \quad (5)$$

표 2. 환산인자 추출실험 및 환산인자 적용결과.

Table 2. Extracting conversion coefficient and its application.

mR/h	환산인자 적용 전		환산인자 적용 후	
	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

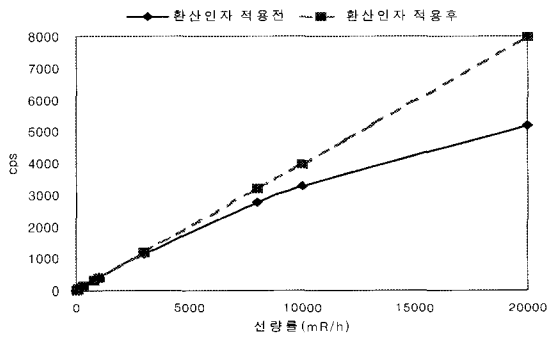


그림 12. 환산인자 추출실험 및 환산인자 적용결과.  
Fig. 12. Extracting conversion coefficient and its application.

IV. 성능시험 및 결과고찰

구현된 전자선량계가 방사선 방호의 핵심인 개인선량측정에 충분한 신뢰도를 제공하는지를 평가하기 위하여 한국 원자력연구소에서 그림 13에 나타난 환경하에서 ISO4037-3 (감마/엑스선)의 개인 선량계 반응도 시험방법에 준하여 기준선량을 조사하고 그 반응도를 결정하기 위한 시험을 수

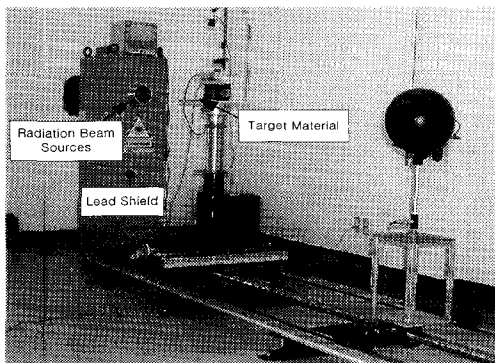


그림 13. 성능시험 환경.  
Fig. 13. Environment of performance test.

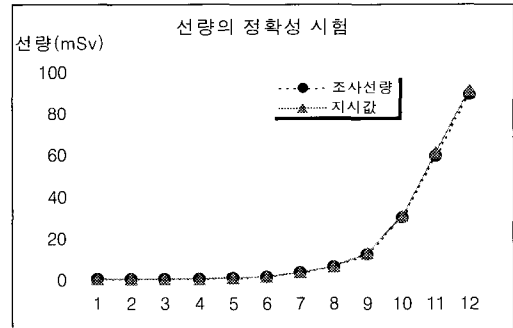


그림 14. 조사선량에 대한 지시값의 정확성 시험결과.  
Fig. 14. Dose measurements of the accuracy test.

행하였다. 시험종류는 선량지시의 정확성, 방사선량률 의존성, 에너지 의존성 및 방향 의존성에 대한 전반적인 성능시험을 수행하였으며, 시험결과는 개인 선량계에 대한 평가의 기준인 IEC 규격[8]을 만족하는 성공적인 결과를 얻었다.

1. 선량지시의 정확성

조사선량 0.031 ~ 88.562[mSv]를 제작된 전자선량계에 조사하여 선량지시의 정확성을 시험하였으며, 이의 결과는 그림 14에 나타난다. 그림에서 나타난 것과 같이 조사선량과 선량계의 지시값은 거의 일치함을 알 수 있다. 선량지시의 정확성을 평가하기 위해 조사선량에 대한 보정된 지시값의 비율을 계산하고, 이의 표준편차를 평균 비율로 나눈 값 즉, COV(coefficient of variation)를 계산한 결과 2.3%로 ANSI의 기준을 충분히 만족하였다.

2. 방사선량률 의존성

방사선량률 의존성을 평가하기 위하여 10~20,000 [mR/h]의 표준 방사선장에서 방사선량률을 변화시키면서 계수율을 측정하여 반응도 [cnts/μSv]를 얻어 이를 그림 15에 나타내었다. 평가의 기준은 1Sv/h에 이르는 선량률에서 상대고유오차(relative intrinsic error)가 ±2%이내이어야 한다. 사용한 방사선장의 제한으로 1Sv/h까지 평가하지는 못하였으나, 제한된 영역의 측정결과는 상대고유오차가 ±9.6%로 평가기준에 적합하였다.

3. 에너지 의존성

에너지 의존성을 평가하기 위한 기준은 20keV~1.5MeV

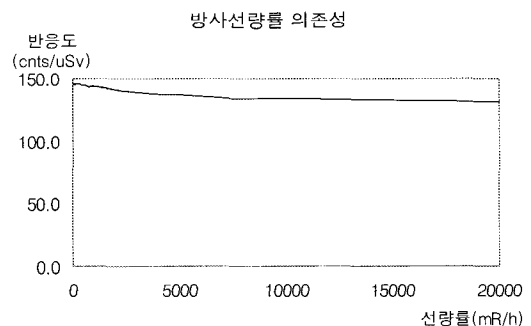


그림 15. 방사선량률의 변화에 대한 반응결과.  
Fig. 15. Dose rate linearity.

의 에너지 범위에서 Cs-137에 대한 상대반응이  $\pm 30\%$ 이내이어야 한다. 본 논문에서는 평균에너지를 48.2~250.2keV로 변화시키면서 선량을 측정하여 반응도를 구하였으며, 이 결과를 그림 16에 나타내었다. 비록 방사선장의 제한으로 전 영역에서의 시험은 수행하지 못하였지만, 수행된 영역에서의 결과는 그림에서 나타낸 것과 같이 상당히 양호함을 알 수 있다.

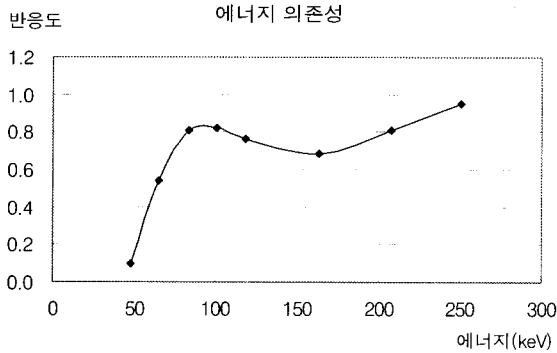


그림 16. 에너지에 대한 반응결과.  
Fig. 16. Energy response.

4. 방향 의존성

방향 의존성에 대한 평가의 기준은 0°에서 측정된 값에 대해 -60°~+60°에서 측정값의 비가  $\pm 20\%$  이내이어야 한다. 본 논문에서는 단일에너지 방사선장에서 15°간격으로 -90°~+90°까지 입사 방향을 변화시키면서 반응도를 측정하였으며, 그림 17은 이의 결과를 나타낸다. 이때, 입사방향의 우측이 (-), 좌측이 (+)이다. 그림 17은 각 입사각의 변화로부터 얻어진 측정치를 0°에서의 측정치에 대한 상대값으로 계산하여 나타낸 것이다. 실험결과, 전 구간에서 0.89~0.99의 상대감도를 나타내어 평가기준에 적합하였다.

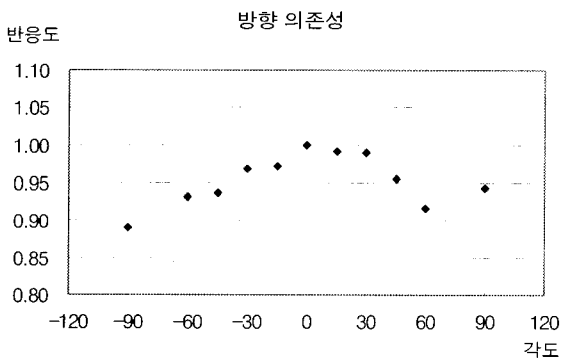


그림 17. 입사각에 대한 반응결과.  
Fig. 17. Angular response.

V. 결론

본 논문에서는 고가의 신틸레이션 물질을 사용하지 않고 직접적으로 실리콘 핀 포토다이오드에 조사된 X-선 및  $\gamma$ -선을 측정할 수 있는 반도체 방사선 검출기를 설계하고 제작하였다. 또한, 이를 이용한 능동형 전자선량계를 구현하

였다. 구현된 전자선량계는 펄스 계수형 방식으로 피폭선량을 측정한다. 이 경우, 저에너지 영역에서 인체 조직에 비해 선량을 과대 평가하는 단점이 있으나 본 논문에서는 검출기의 선량과 조직의 선량이 비례하도록 에너지 보상필터를 사용하여 고정도의 선량측정이 가능하도록 선량 환산알고리즘을 개발하였다.

구현된 전자선량계는 방사선 방호의 핵심인 개인선량측정에 충분한 신뢰도를 제공하는지를 평가하기 위하여 원자력연구소에서 이루어진 선량지시의 정확성, 방사선량률 의존성, 에너지 의존성 및 방향 의존성에 대한 성능시험에서 IEC의 평가기준에 만족하는 성공적인 결과를 나타내었다. 이러한 결과는 개인 선량계 뿐만아니라 기타의 방사선 측정시스템에 직접적인 적용이 가능하다.

향후, 전자선량계의 소형화 및 저소비전력의 실현을 위하여 하이브리드 형태로 설계된 반도체 방사선 검출기의 신호처리부를 ASIC화하고, 또한 다수의 실리콘 핀 포토다이오드에 흡수체의 종류 및 크기를 달리한 방사선 검출기의 제작 및 선량 환산알고리즘의 개발에 대한 연구가 필요하며, 이의 적용은 정밀도가 높은 피폭 선량계의 구현을 가능하게 하여 주선량계의 대체로 이어지리라 판단된다.

참고문헌

- [1] S. Izumi, H. Kitaguchi, S. Mitani, and H. Kikuchi, "A computerized personal dosimeter with an IC card," *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*, vol. 36, pp. 1150-1153, 1989.
- [2] N. Horiuchi, T. Sato, and E. Kobayashi, "A high-sensitivity neutron dosimeter using the coherent demodulation technique," *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*, vol. 42, no. 6, pp. 2203-2208, 1995.
- [3] U. K. Yi, M. H. Lee, C. J. Lee, J. Y. Hong, and S. S. Jin, "The development of a portal monitor with the electronic dosimetry system," *Proc. of Int'l Symposium on Radiation Safety Management*, pp. 44-51, 2001.
- [4] International Commission on Radiological Protection, *1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 60, Pergamon Press, 1990.
- [5] M. Slapa and M. Traczyk, "A new concept of dosimeter with silicon photodiodes," *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*, vol. 43, no. 3, pp. 1855-1859, 1996.
- [6] 이운근, 김중선, 손창호, 백광렬, "실리콘 포토 다이오드를 이용한 방사선 검출기 개발에 관한 연구," 1999년도 대한전기학회 추계학술대회 논문집, vol. B, pp. 754-756, 1999.
- [7] 박성우, 조규성, 김봉환, 위상봉, 이운근, 임훈, "Si PIN Photodiode를 이용한 개인선량계의 에너지 보상 필터의 설계," 대한방사선방어학회 2000 추계 학술대회 논문집, pp. 340-344, 2000.
- [8] International Electrotechnical Commission, "Direct reading personal dose equivalent and/or dose equivalent rate dosimeters for the measurement of personal dose equivalent  $H_p(10)$  and  $H_p(0.07)$  for X,

*gamma and beta radiations,*" IEC 61526 First Edition, 1998.

[9] Hamamatsu Photonics K. K., Solid State Division, *Si photodiodes and charge sensitive amplifiers for scintillation counting and high energy physics*, Catalog #KOTH0002E05, Jun, 1997.

[10] 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.

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



**이운근**

1969년 3월 12일생. 1991년 울산대학교 전기공학과 졸업. 동대학원 석사(1993). 부산대학교 전자공학과 박사(2002). 1992년~1998년 동환산업(주) 연구소 주임연구원. 1999년~2003년 삼창기업(주) 제어기술연구소 선임연구원. 2003

년~현재 부산경상대학교 디지털애니메이션과 전임강사. 관심 분야는 신호처리, 컴퓨터비전, 지능제어, 지능형 자동차, 자율주행시스템.

**백광렬**

제어·자동화·시스템공학 논문지 제 5 권 제 1 호 참조.

**권석근**

제어·자동화·시스템공학 논문지 제 5 권 제 3 호 참조.