

Development of Electronic Personal Dosimeter with Hybrid Preamplifier using Semiconductor Detector

B. J. Lee, B. H. Kim, S. Y. Chang, J. S. Kim and S. R. Rho*

Korea Atomic Energy Research Institute, *The university of Seoul

반도체 검출기를 이용한 Hybrid 전치증폭기형 전자식 개인선량계 개발

이봉재, 김봉환, 장시영, 김종수, 노승용*

한국원자력연구소, *서울시립대학교

(2001년12월 29일 접수, 2002년 3월 25일 채택)

Abstract - An electronic personal dosimeter(EPD) with hybrid type preamplifier adopting a semiconductor detector as a radiation detector has been developed, manufactured and test-evaluated. The radiation detection characteristics of this EPD has been performance-tested by using a reference photon radiation field. After several test-irradiations to a ¹³⁷Cs gamma radiation source the radiation detection sensitivity of this EPD appeared to be 3.8 cps/Gy · h⁻¹. The linearity of radiation response was kept within 8% of the dose equivalent ranges of 10 μSv ~ 4 Sv and the angular dependence was under less than 4% in angles of ±60°. It was confirmed that the energy response range was in 60 ~ 1,250 keV given in the ISO standard. This EPD satisfied the international criteria for the EPD in the mechanical and the environmental performance test for 9 test categories according to IEC 61526.

Key words : Semiconductor detector, Personal Dosimeter, Sensitivity, Performance test

요약 - 반도체 검출기를 이용하여 Hybrid 전치증폭기를 갖는 전자식 개인선량계를 설계 제작하고, 방사선 검출 반응특성과 기계적 및 주변 환경 요건에 따른 각종 성능을 평가하였다. ¹³⁷Cs 감마 방사선을 이용한 방사선 조사 시험결과 감도는 3.8 cps/Gy · h⁻¹이고, 10 μSv ~ 4 Sv 범위의 선량당량 조사시 선량계의 지시값은 오차 8%이하에서 선형성이 잘 유지되었다. 방향의존성은 ± 60°이내에서 4%이하이며, ISO 기준선장에 의한 에너지 반응영역은 60 ~ 1,250 keV로 나타났으며, IEC 61526에 의한 선량계의 성능검사시 9개 영역의 시험항목에 대한 국제기준을 만족하였다. **중심어** : 반도체검출기, 개인선량계, 감도, 성능검사

서 론

원자력 산업이나 방사선 취급 업무에 종사하는 개인의 방사선피폭선량을 측정하는 개인선량계는 합리적으로 달성가능한 범위에서 개인의 방사선 피폭을 최소로 유지하는데 필수적으로 사용되고 있다.

법정 개인선량계로 사용되는 TLD와 필름뱃지와 같은 수동형 선량계(passive dosimeter)는 선

량계의 패용기간동안 개인의 누적피폭 방사선량을 사후에 정확하게 측정할 수 있지만 개인피폭 방사선량에 대한 정보를 방사선작업 현장에서 제공하지는 못한다. 이러한 점을 보완하고, 방사선 작업 현장에서 효과적인 개인의 방사선 피폭관리를 위하여 포켓 도시메타나 포켓 알람메타와 같은 능동형 선량계(active dosimeter)가 보조선량계로 사용되어 왔으며 최근에는 전자기술의 발달과 함께 반도체를 이용한 능동형 전자식 개인선량계

및 판독시스템이 개발되어 사용되고 있다. 이 시스템은 즉각적인 선량 및 선량률 표시기능, 경고기능, 피폭이력의 제공 및 선량자료의 관리 효율성 등의 장점을 갖고 있어서 보조선량계로 국내의 원자력 관련 시설에서 널리 사용되고 있으나 고가임에도 불구하고 전량 외국에서 수입하여 사용하고 있는 실정이다.

한국원자력연구소의 본 연구팀은 원자력 중장기 성과이전 및 실용화 사업의 지원을 받아 그동안 본 연구팀내에 축적된 방사선 계측관련 기술과 국내의 발전된 전자공학 기술을 접목하여 전량 외국에서 수입되는 전자식 개인선량계 및 판독시스템의 개발 및 실용화 연구를 수행하였다[1].

본 연구에서 개발된 전자식 개인선량계는 소형 PIN형 반도체를 방사선검출기로 사용하고, 검출기의 신호를 처리하는 전자회로는 Hybrid형으로 설계 제작하므로써 방사선 반응에 대한 직선성과 정확성을 향상시켰으며 동시에 소형화 및 경량화하였다. 기능면에서도 필요시 사용자가 변수를 적절하게 설정함으로써 개인방사선 피폭감시를 위한 선량계 자체로서도 동작이 가능하도록 설계 제작하였다. 또한 국가공인 검사기관에서 국제기준인 IEC 61526에 따라 방사선학적 성능검사와 기계적 및 주변 환경에 따른 각종 성능시험을 수행하여 제작된 전자식 개인선량계의 성능을 입증하였다.

재료 및 방법

PIN형 반도체 검출기

전리방사선이 반도체를 통과하여 물질과의 상호작용으로 생성된 과잉 전자와 양공은 가전도대에서 전도대로 이동하게 된다. 실리콘 반도체의 경우 외부 광자의 에너지가 3.76 eV당 1개의 전자-양공 쌍을 생성하므로 수십에서 수천 keV의 에너지를 갖는 방사선 측정이 가능하게 된다[2].

PN형 반도체 검출기의 경우 직렬저항을 R_s , 부하저항을 R_L , 접합정전용량을 C_j 라고 하면, 그 응답속도는 $C_j(R_s+R_L)$ 에 의하여 제한받으므로 C_j 를 작게 할 필요가 있다. C_j 의 크기는 역방향 전압과 기관의 비저항 ρ 에 비례한다. C_j 를 줄이기 위해서 역전압을 증가시키면 암전류도 증가하게 되어 미약광의 검출이 어려워지므로 비저항을 크게 하는 것이 바람직하다. 비저항을 크게 하기 위해서 고유 반도체(intrinsic semiconductor)에 가까운 고저항의 기관을 사용한 것을 PIN형 반도체 검출기라 하고, 역방향 바이어스를 인가하면 그 전압이

대부분 고유 반도체에 걸리게 되며, 고유 반도체가 공핍영역 역할을 하게 되어 입사되는 광의 대부분은 여기에 흡수된다. 따라서 PIN형 반도체 검출기는 광도전효과를 이용한 소자라 할 수 있다.

PIN형 반도체 검출기에서의 방사선에 의한 반응은 빛에 의한 반응과 동일하게 나타난다. 그림 1은 PIN형 반도체 검출기에서의 방사선에 의한 전리효과 및 이를 수집하는 효과에 대해서 나타내고 있다[3]. 방사선과 빛의 차이는 빛은 대부분이 n층에서 반응을 일으키고 방사선은 투과력이 강해 공핍층 영역까지도 투과하여 반응을 일으킨다. 그림 1의 PIN형 반도체 검출기에 방사선이 입사되면 i층을 지나면서 전리작용을 일으킨다. 이 전리 작용에 의해 발생된 전자-양공쌍은 PIN형 반도체 검출기의 외부에서 인가된 전장(electric field)에 의해 전자(electron)는 n 영역으로, 양공(hole)은 p 영역으로 끌려가게 된다[4]. 이 과정에서 생성되는 전류를 계측하므로 방사선에 의한 전리작용을 감지할 수 있다.

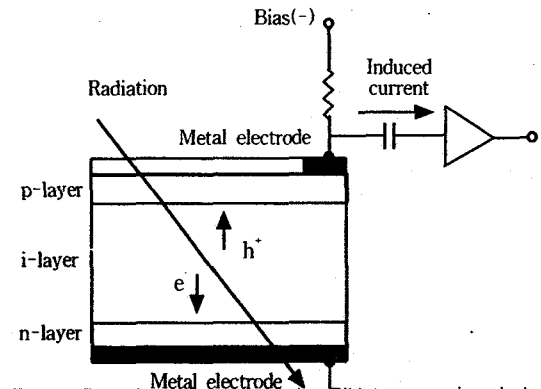


Fig. 1. Radiation response of the PIN type semiconductor detector.

전자회로의 구성

방사선 검출기로는 EURORAD사 모델 SI007인 PIN형 반도체 검출기를 사용하였으며, 선량계의 전자회로는 검출기의 신호를 처리하는 아날로그 부분과 신호를 계수하고 선량계를 동작시키는 디지털 부분으로 나누어 그림 2의 block diagram과 같이 설계 제작하였다. 그 구성은 감마 방사선에 의해 전기적 신호를 발생하는 PIN형 반도체 검출기, 검출기에서 출력되는 신호의 펄스 형성 및 신

호를 증폭하는 전치증폭기와 주증폭기로 구성되는 신호처리회로[5~8], 측정자료를 나타내는 LCD 표시장치, 사용자에게 경보를 주는 경보장치, 판독기와의 통신을 위한 적외선 통신장치, 직류전원장치, 선량계를 교정할 수 있고 독립적으로 동작하도록 변수를 설정하기 위한 Keypad, 선량계를 제어하는 마이크로프로세서 및 메모리 장치로 구성된다. PIN형 반도체 검출기의 신호를 처리하기 위한 신호처리회로는 방사선계측회로에서 사용되는 전하감도형(charge sensitive type)으로서 hybrid형 전치증폭기를 그림 3의 block diagram과 같이 설계 제작하였다.

설계하였으며, 선량계 제작에 사용된 마이크로프로세서는 8 kbits 프로그램 메모리, 8k x 8 bits의 Flash 프로그램 메모리와 512 x 4 bits의 데이터 메모리를 갖고 있으며, 128 segments LCD를 제어할 수 있는 삼성전자의 KS57C2308 chip을 사용하여 그림 4와 같이 구성하였다.

SEG0 ~ SEG23 단자는 LCD segment를 구동하기 위한 신호를 출력하며, Input/output port인 COM0 ~ COM3 단자는 LCD를 제어할 때 S0 ~ S12 단자의 데이터 버스에 데이터를 쓰거나 읽을 때 제어하는 역할을 한다.

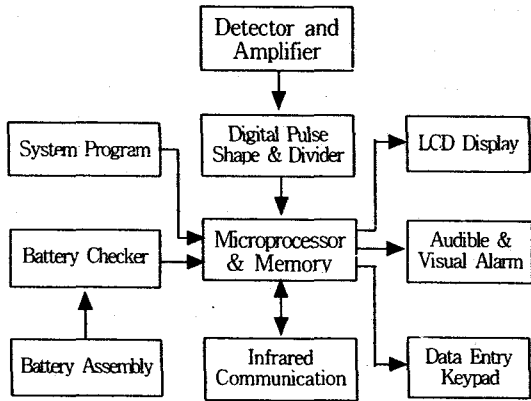


Fig. 2. Block diagram of the designed dosimeter.

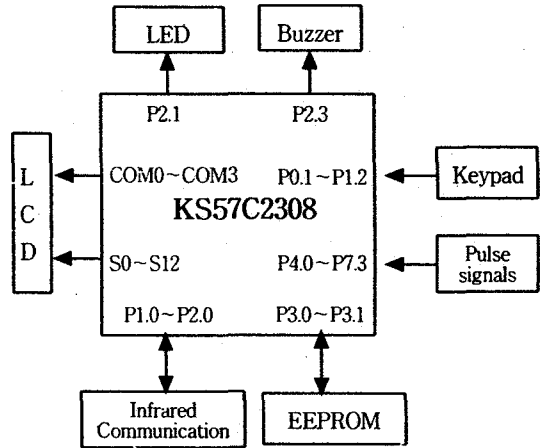


Fig. 4. Circuit diagram of the microprocessor.

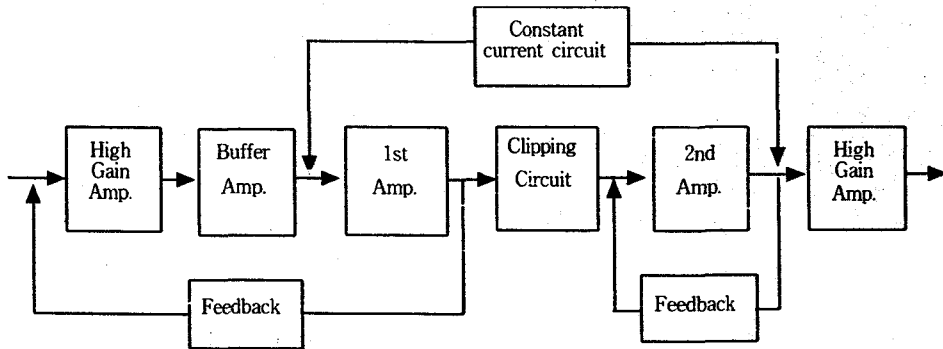


Fig. 3. Configuration of the signal processing circuit.

신호처리회로에서 출력되는 펄스 신호는 계수를 위하여 과형을 반전시키고 슈미트트리거 회로로 정형회로를 구성하였다. 정형회로에서 출력되는 디지털 신호의 계수율을 고려하여 12 bit 이진 카운터 두 개를 사용하여 16 bit 계수기를 구성하고 마이크로프로세서의 입력단에서 계수되도록

P2.3 단자에서 출력된 펄스는 트랜지스터를 통해 Buzzer를 Trigger한다. I/O 단자인 P4.0 ~ P7.3 에는 신호처리회로의 출력 펄스가 입력되는 17 bits로 구성된 계수기의 출력이 연결된다. P2.1 단자에는 경보를 표시하기 위한 적색의 LED를 연결하였으며, 판독기와의 IR통신을 위하여 P1.0단

자에는 IR 수신용 광트랜지스터와 P2.0 단자에는 IR 송신용 광다이오드를 연결하여 적외선 통신이 비동기식으로 이루어지도록 하였다.

사용자가 keypad를 이용하여 선량계의 독립적인 동작 기능할 수 있도록 하는 변수들을 설정할 수 있도록 P0.1 ~ P0.3단자와 P1.1 ~ P1.2단자에는 누름스위치를 연결하였으며, 설정된 변수의 저장을 위하여 전원의 공급이 중단되어도 변수들이 50년간 저장되어 있도록 P3.0과 P3.1단자에 1 kbits의 EEPROM를 연결하였다.

선량계의 외형

선량계의 Case는 플라스틱 ABS재질을 사용하여 제작하였으며, 선량계 전면의 LCD 표시창에는 사용자의 ID, 측정된 선량당량률, 피폭선량당량과 key로 입력되는 변수들이 표시되도록 하였으며, 배터리가 소모되면 배터리 표시가 나타나도록 하였다. 뒷면에는 판독기와와 데이터를 송수신을 위하여 적외선 통신 소자와 경보를 발생시키는 Buzzer를 배치하였으며, 사용자가 착용이 용이하도록 클립을 부착하였다. 전체 크기가 83 x 56 x 20 mm인 그림 5와 같은 선량계 외형을 제작하였으며, 전자회로가 내장된 선량계의 총 무게는 약 70g이다.



Fig. 5. Shape of the fabricated dosimeter.

성능시험

설계 제작된 전자선량계의 방사선 반응 특성 시험은 한국원자력연구소 기준 방사선조사시설에서 Cs-137 선원을 이용하여 조사선량률 5 mR/h ~ 25 R/h의 범위에서 17개의 선량률로 선량환산인자 결정실험을 수행하였다. 평균에너지 48 keV에서 250 keV에 이르는 총 8개의 ISO N-series 기준 엑스선장[9]을 사용하여 선량계의 에너지 반응특성을 확인하였다. 에너지 반응특성은 Cs-137 선원에 대한 상대 반응도로 결정되었으며, 이 때

의 선량당량률은 13 mSv/h ~ 103 mSv/h이었다.

방사선 조사는 개인선량계 성능시험을 위한 조사기준에 따라 이루어졌다. PMMA(Poly-Methyl Meta-Acrylate) 팬텀 위에 선량계를 부착하여 조사하였으며 선원으로부터 팬텀 표면까지의 조사거리는 감마선의 경우 선량을 조건에 따라 변화가 있지만 최소 조사거리는 1 m였으며, 엑스선의 경우 2 m로 고정하였다. 선량계에 부여된 기준 선량당량, Hp(10)은 ICRU 조직평균 팬텀에 대한 개인 선량당량 환산인자[10]를 적용하여 결정되었다. 가장 바람직한 개인 피폭선량 측정기는 그 재질이 인체 조직과 유사하게 모사되어야 한다[11]. 그러나 반도체를 검출기로 사용할 경우, 특히 Si의 경우 인체 조직에 비하여 약 2배가 넘는 원자번호와 밀도 ($Z=14$, $\rho=2.33 \text{ g/cm}^3$)를 갖고 있기 때문에 조직등가물질을 구현하기가 어렵다. 또한 밀도가 인체조직에 비하여 크기 때문에 100 keV 이하의 저에너지 감마선에 대하여 광전효과 반응확률이 크며, 이로 인하여 상대적으로 에너지 흡수가 고에너지의 경우보다 저에너지의 광자의 경우에서 크기 때문에 조직에 대한 흡수선량이 큰 차이가 난다. 따라서 대부분의 에너지 보상형 검출기의 경우와 마찬가지로 반도체 검출기도 이를 보상하기 위하여 일정 두께의 필터를 사용하여야 한다.

모의 계산된 결과[12]에 의하면 Si-PIN 반도체 검출기의 경우 2.9 mm 두께의 알루미늄이 에너지 보상용 필터로 적절한 것으로 나와 있으며, 본 연구에서는 적절한 에너지 보상용 필터를 결정하기 위하여 센서에 내장된 에너지보상필터를 고려하여 0.5 mm와 1 mm 알루미늄과 구리 판막 (mylar)을 이용한 세 종류의 필터를 반도체 검출기 위에 부착한 전자선량계를 제작하여 이들에 대한 조사실험을 수행하였다.

결과 및 검토

고선량률 조사조건에서의 계수 손실을 보상하기 위하여 측정자료의 계산 프로그램에 불감시간 (dead time)을 고려하였으며, 동시에 측정효율을 높이기 위하여 검출기의 감도(sensitivity)를 향상시키고, 전자회로의 시상수(time constant)를 조절하기 위하여 전치증폭기회로를 hybrid형으로 설계 제작하였다. 방사선에 의한 검출기의 전류 신호는 전치증폭기에서 펄스 형태로 변환되며, 고선량률에서 펄스의 중첩으로 인한 계수손실을 감소시키기 위하여 선량계의 최대 측정범위인 1 Sv/h

를 고려한 적절한 펄스의 상승시간과 하강시간은 각각 $5 \mu\text{sec}$ 와 $25 \mu\text{sec}$ 인 펄스이며, 전자회로의 잡음과 방사선에 의한 신호를 분리할 수 있는 펄스의 최소 높이는 500 mV 이상이 되는 펄스가 적절한 것으로 확인되었다.

Table 1. Dosimeter response with the variation of exposure rate.

조사선량률 (mR/h)	계수율 (cps)	Air kerma rate (mGy/h)	반응도(Sensitivity)	
			(cps/Gy/h)	(cps/ $\mu\text{Sv/h}$)
5	1.15	0.0439	2.6195	0.0216
8	2.2	0.07024	3.1321	0.0259
10	2.6	0.0878	2.9612	0.0245
20	6.5	0.1756	3.7015	0.0306
40	13.35	0.3512	3.8012	0.0314
80	27	0.7024	3.8439	0.0318
100	34.6	0.878	3.9407	0.0326
300	107.3	2.634	4.0736	0.0337
500	180.3	4.39	4.1070	0.0339
800	281	7.024	4.0005	0.0331
1000	362.5	8.78	4.1287	0.0341
3000	1061.6	26.34	4.0303	0.0333
5000	1741	43.90	3.9658	0.0328
8000	2754.5	70.24	3.9215	0.0324
10000	3389.4	87.80	3.8603	0.0319
20000	6182.6	175.60	3.5208	0.0281
25000	7308.2	219.50	3.3294	0.0275

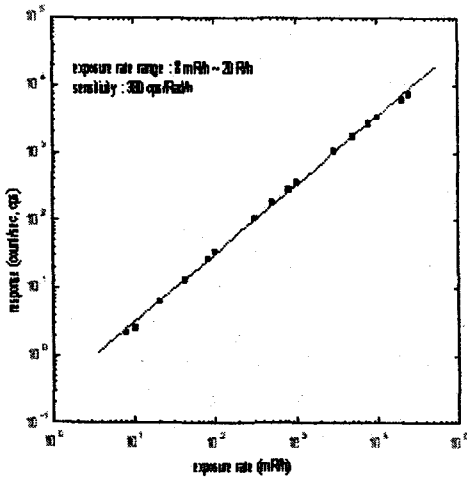


Fig. 6. Dosimeter response with the variation of exposure rate for determining the dose conversion factor of the fabricated dosimeter.

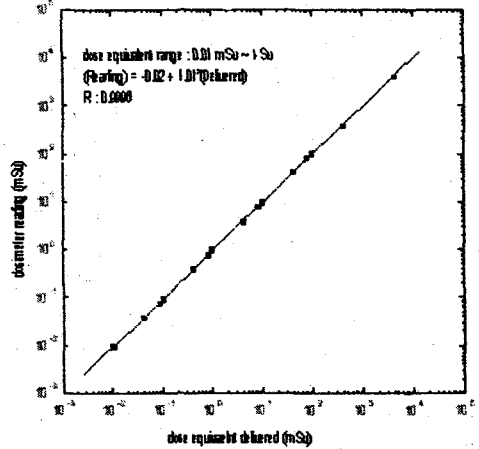


Fig. 7. Linearity and reproducibility of accumulated dose equivalent.

전술한 $5 \text{ mR/h} \sim 25 \text{ R/h}$ 조사선량률 범위내에서 결정된 선량계의 Cs-137 선원에 대한 반응도는 표 1과 그림 6 및 그림 7과 같다. 그림 6은 조사선량률과 계수율과의 관계를 보여주고 있으며, 그림 7은 부여된 선량당량에 대한 선형성을 보여주고 있다. 개인선량계의 성능시험기준[13]에 의하면 전 시험범위에 걸쳐 선량당량률의 경우 $\pm 20\%$, 선량당량의 경우 $\pm 15\%$ 를 초과하지 않도록 정하고 있다. 동 기준에 근거하여 본 연구에서 결정된 선량계의 감도는 $3.8 \text{ cps/Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 로 나타났다. 방사선의 연속 조사에 따른 선량계의 재현성과 선형성을 확인할 목적으로 조사선량률 300 mR/h 와 1000 mR/h 의 조건에서 선량당량 $10 \mu\text{Sv} \sim 4 \text{ Sv}$ 에 해당하는 선량을 조사하였다. 그림 7에서 알 수 있는 바와 같이 부여된 선량당량과 제작된 선량계의 지시값을 선형 회귀분석한 결과 조사선량당량 범위에서 오차 8% 이내로 선형성이 잘 유지되고 있음이 확인되었다.

선량계의 감도는 펄스의 수를 선량으로 환산하기 위한 중요한 선량환산인자로서 타사 제품에 비해 27% 향상된 것이며, 이는 검출기의 신호를 처리하는 전자회로의 성능이 최적으로 구성되어 있으며, 선량 환산프로그램에 고려된 불감시간이 정확하게 고려되어 있음이 입증되었다.

저에너지 감마선의 영역에서 제작된 선량계의 에너지 반응특성을 확인하기 위하여 검출기에 내장되어 있는 에너지 보상 필터를 고려하여 각각 다른 두께의 필터를 부착한 세 개의 선량계에 대

하여 ISO의 기준 엑스선장을 조사하여 0.662 MeV 감마선에 대한 상대 반응도를 결정하였다. 각 선량계에 대한 에너지 반응특성 자료를 그림 8에 도시하였으며, 이를 통하여 결정된 최적의 필터는 1.0 mm 두께의 알루미늄과 구리 판막을 사용하는 경우인 것으로 나타났으므로 센서 내부에 에너지 보상용 필터가 있는 것으로 확인되었다. 제작된 선량계의 에너지 반응특성(에너지 영역 : 48 keV ~ 1,250 keV)은 시험기준 허용한도가 $\pm 20\%$ 임을 고려할 때 시험기준을 만족하는 에너지 반응영역은 60 ~ 1,250 keV로 나타났다.

Cs-137 감마선원을 사용하여 선량계의 방향의 존성을 확인한 결과 그림 9와 같이 $\pm 60^\circ$ 이내에서 방사선 진행 방향의 수직면 0° 에서의 반응도에 대하여 4% 이하의 차이만을 기록했다.

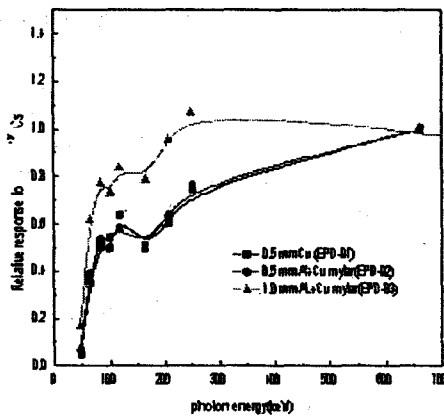


Fig. 8. Relative energy response of 3 kinds of dosimeter with different filtration to Cs-137.

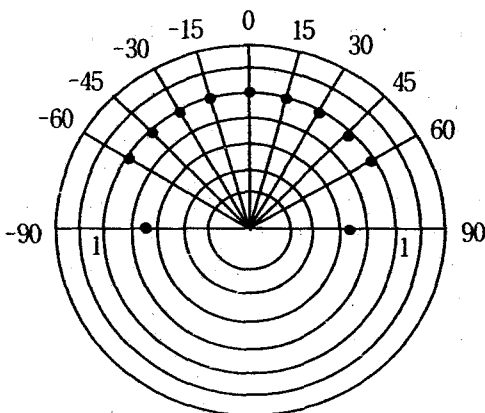


Fig. 9. Angular dependence of the fabricated dosimeter.

제작된 전자선량계의 기계적 성능검사와 주변 환경요건에 따른 성능검사는 산업기술시험원에 의뢰하여 국제 기준인 IEC 61526에서 제시하는 시험방법과 기준에 따라 수행되었다. 기계적 성능 검사에서는 3개 항목, 주변 환경요건에 따른 성능 검사에서는 6개 항목에 대하여 성능검사가 수행되었으며, 표 2와 같이 대부분의 시험항목이 국제 기준을 만족하고 있으나 한 차례의 시험에 의한 상대습도에서 기준치는 약간 상회하는 것으로 나타났다. 이는 한 차례의 시험에 의한 결과이며 선량계의 방사선 반응특성의 통계적 오차를 고려하고, 반복 시험을 수행한다면 국제기준에 만족될 것이다.

Table 2. Results of the EPD performance test with IEC 61526 criteria.

시험항목	국제기준		시험결과
	시험범위	기준한계	
낙하시험	1.5m	$\pm 10\%$	$\pm 1.75\%$
진동시험	2 g _n (10 ~ 30 Hz)	$\pm 15\%$	$\pm 1.96\%$
Microphony	10 cm	$< 1 \mu\text{Sv}$	$< 1 \mu\text{Sv}$
동작온도	$-10^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$	$\pm 20\%$	$\pm 17.75\%$
온도충격	$-10^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$	$\pm 15\%$	$\pm 13\%$
	$-20^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$	$\pm 50\%$	$\pm 45\%$
상대습도	40% ~ 90% (35°C)	$\pm 10\%$	$< \pm 10\%$
외부 전기장	100V/m @ 100 ~ 500 kHz	$\pm 10\%$	$< \pm 10\%$
	1V/m @ 500 MHz ~ 1 GHz	$\pm 10\%$	$< \pm 10\%$
외부 자기장	60 A/m @ 50 or 60 Hz	$\pm 10\%$	$< \pm 10\%$
정전기 방전	8 kV, 2 mJ	$\pm 10\%$	$< \pm 10\%$

결론

본 연구에서 설계 제작된 전자선량계는 PIN형 반도체 검출기를 사용하여 검출기의 출력신호를 증폭하기 위한 증폭기와 계수회로, 마이크로프로세서와 프로그램, LCD 표시장치, 통신 프로토콜로 구성되었다. 제작된 선량계에 대한 국제기준인 IEC 61520에 의한 방사선 반응 특성시험과 기계적 및 주변 환경조건에 따른 성능검사를 수행하였다.

선량계의 전자회로 설계에 있어서는 반응 감도와 잡음특성의 향상을 위하여 전치증폭기를 hybrid 형태로 제작하고, 고선량률에 따른 계수손실을 보상하기 위한 불감시간과 선량환산인자를 선량계

산 프로그램에 적용하였다. 한국원자력연구소에서는 방사선 반응특성 및 에너지 반응특성 시험을 수행하였으며, 기계적 성능시험과 주변환경 조건에 따른 성능시험은 산업기술시험원에 의뢰하여 수행하였다. 방사선 반응 특성 시험에서 제작된 선량계의 반응감도는 $3.8 \text{ cps/Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 이며, 누적 선량당량에 대한 선량계의 오차는 8% 이하이고, 에너지 반응 범위는 60 ~ 1,250 keV인 것으로 시험되었으며, 기계적 성능검사와 주변 환경 조건에 따른 성능시험에서도 국제기준을 만족하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 제작된 선량계는 상용화하여 원자력 관련 시설에서 전자식 개인선량계로서 활용될 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 주관하는 원자력실용화연구사업의 지원으로 수행하였습니다.

참고문헌

- 이봉재, 김봉환, 장시영, 김종수, "실리콘 PIN 다이오드 검출기를 이용한 전자선량계 개발" 방사선방어학회지, 25(4), 197-205(2000).
- W.B. Mann, Radioactivity Measurements Principles and Practice, Pergamon Press, pp. 85-88(1988).
- G. F. Knoll, Radiation Detection and Measurement, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York(1989).
- National council on radiation protection and measurements, "A handbook of radioactivity measurements procedures", NCRP report no. 58, P. 49(1978).
- Goulding, F. S. Pulse Shaping in Low-Noise Nuclear Amplifier, A Physical Approach to Noise Analysis, Nuclear Instruments and methods, 100, 493(1972).
- Kowalski, E. Nuclear Electronics, Springer Verlag, New York(1970).
- P.W. Nicholson, "Nuclear Electronics", Chap.5, John Wiley & Son, New York(1974).
- K.hodyr and S. Wysock, "Current Transients Induced by Fast Electrons and Bremsstrahlung in Polyethylene Films", Radiation Measurements, Vol. 26, No. 4, pp593-598(1996).
- ISO/FDIS 4037-3: X and Gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy- Paer3: Area and personal dosimeters.
- Grosswendt, B. Conersion coefficients for calibrating individual photon dosimeters in terms of dose equivalents defined in an ICRU tissue cube and PMMA slabs. Rad. Prot. Dosim., Vol. 32, No 4, pp219-231(1990).
- White, D.R., Martin, R.J., and Darlison, R. Epoxy resin based tissue substitutes. Br. J. Radiol., 50, pp814-821(1977).
- M. Jung et al., "Dose Response Simulations of A High Sensitivity Electronic Silicon Dosimeter", Radiat. Prot. Dosim., 51(3), pp. 157-167(1994).
- International Electrotechnical Commission, "Radiation Protection Instrumentation Measurement of Personal Dose Equivalents, Hp(10) and Hp(0.07) for X, Gamma and Beta Radiations Direction Reading Personal Dose Equivalent and/or Dose Equivalent Rate Dosimeters", IEC-61526 (1998)4. Fairstein, E., and J. Hahn, PartII, Nucleonics, 2319, 81(1965).