

A Dual Radiation Monitoring System For Robot Working in High Radiation Field

李南昊[†] · 曹在完^{*} · 金承鎬^{**}
 (Nam-Ho Lee · Jai-Wan Cho · Seung-Ho Kim)

Abstract - The effect of high irradiation on inspection systems in a nuclear power plant can be severe, especially to electronic components such as control boards. The effect may lead to a critical malfunction or trouble to a underwater robot for inspection and maintenance of nuclear reactor. However, if information on the total accumulated dose on the sensitive parts of the robot is available, a prediction of robot's behavior in radiation environments becomes possible. To know how much radiation the robot has encountered, a dosimeter to measure the total accumulated dose is necessary. This paper describes the development effort of a dual radiation monitoring system using a SiC diode as a dose-rate meter and a p-type power MOSFET as a dose meter. This attempt using two sensors which detect same radiation improves reliability and stability at high intensity radiation detection in nuclear facilities. It uses the concept of diversity and redundancy.

Key Words : Nuclear, Radiation, Detector, SiC, MOSFET

1. 서 론

원자로나 우주와 같은 극한 환경에서 작업하는 로봇에는 일반 작업자용과는 다른 별도의 방사선 측정기가 요구된다. 최근 널리 사용되는 실리콘(Si)형 반도체 선량계는 온도와 방사선에 민감하여 고온과 고준위 방사선 환경에서 안정적으로 사용하기 쉽지 않다. 이에 반해 실리콘 카바이드(SiC)는 넓은 밴드갭(Band-gap)으로 인해 실리콘형에 비해 높은 온도의 영향과 고방사선에 대한 손상이 적다는 장점을 지니고 있다. 이러한 장점으로 인해 S. Metzger 등[1]은 SiC 다이오드를 원자로의 고준위 방사선을 측정하기 위한 센서로의 활용을 시도하였다. 입사 방사선에 의해 생성된 펄스의 증폭에 기인한 출력 DC 전류를 방사선의 측정 변수로 응용한 것이다. 이 정전류 방식은 전류 생성에 충분한 펄스가 발생되는 높은 방사선장에 대해서 유용하지만 낮은 준위의 방사선장 측정에는 어려움이 있다.

본 연구에서는 원자로 내부 검사용 수중로봇의 방사선 측정을 위해 상용 SiC 다이오드를 센서로 활용하여 펄스 계수 방식으로 측정기를 구현하였다. 이 방식은 보다 낮은 범위의 방사선까지 넓은 범위의 방사선 측정이 가능한 장점이 있다. 이 측정기에는 SiC 다이오드와 함께 pMOSFET를 방사선 측정 센서로 동시에 사용하였다. 이는 예기치 않은 전력 손실이 발생할 경우 pMOSFET은 피폭 방사선의 누적량을 기억

하는 특징이 있고 동일 방사선 측정 시 서로 다른 측정 원리의 센서를 동시에 적용함으로써 방사선 계측에서 신뢰도를 향상시키기 위함이다[2]. SiC 펄스형 센서와 MOSFET의 복합 센서로 구성된 방사선 측정기는 소형 경량으로 구현이 용이하여 원자로 검사용 수중로봇(그림 1)의 좁은 공간에 장착이 가능하였다.

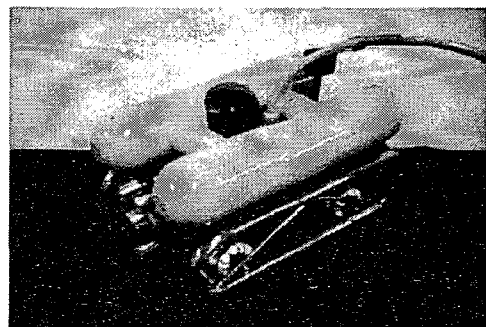


그림 1. 원자로 검사용 수중로봇
 Fig. 1 Underwater robot for reactor inspection

2. 방사선 감지기 구성

2.1 방사선 검출기

검출기로 사용된 두 종류의 반도체 소자 중 SiC 소자는 HAMAMATSU사에서 제작한 JEC1 포토 다이오드로 1[mm²]의 감응면적을 가지고 있으며, pMOSFET은 HITACHI사 J182를 채용하였다.

다이오드의 p-n 접합부에 방사선이 조사되면 공핍영역에서 전자-정공(electron-hole pair, EHP)이 발생되고 전계의

[†] 교신저자, 正 會 員 : 韓國原子力研究所 先任研究員 工博
 E-mail : nhlee@kaeri.re.kr

^{*} 正 會 員 : 韓國原子力研究所 責任研究員 工博

^{**} 學生會員 : 韓國原子力研究所 責任研究員 工博

接受日子 : 2005年 5月 26日

最終完了 : 2005年 7月 18日

방향에 따라 이동된 전하가 전류펄스를 형성하게 되는데 이때의 다이오드 출력전류는 다음과 같이 표현된다.

$$I_O = I_L - I_S \left(\exp \frac{eV_D}{kT} - 1 \right) \quad (1)$$

여기서 I_S 는 역포화 전류, e 는 전자전하, V_D 는 다이오드 양단전압, k 는 볼츠만 상수, T 는 절대온도이다.

pMOSFET가 이온화 방사선에 노출되면 산화층 내에 정공이 축적되고 이로 인해 문턱전압(V_T)이 변화되는데 이 변화량과 피폭 방사선량의 다음과 같은 선형적 관계식을 이용하여 방사선량을 측정하게 된다[3].

$$\Delta V_T = \frac{-1}{C_{OX}} \int_0^x \Delta p_{OX}(x) \frac{x}{t} dx \quad (2)$$

여기서, C_{OX} 는 산화층의 정전용량, Δp_{OX} 는 산화층 전하 밀도의 변화, t 는 산화층의 두께, x 는 게이트 상단부로 부터의 측정거리이다.

2.2 계통 구성

SiC 및 pMOSFET 방사선 센서로부터 피폭 방사선량을 실시간 추출하고 신호처리 및 데이터베이스를 생성하는 전체 탐지기의 구성은 그림 2와 같다.

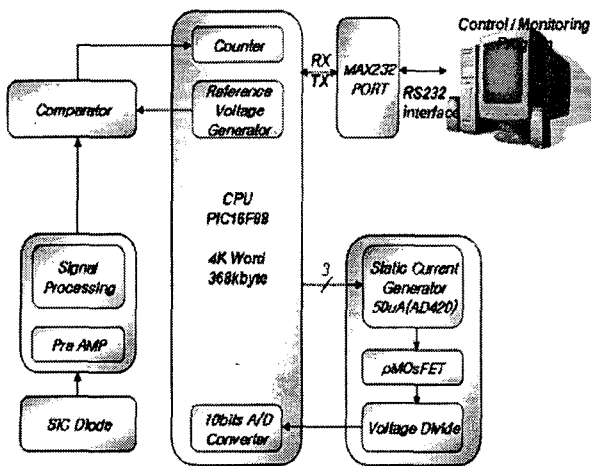


그림 2. 복합 선량계 구성도
Fig. 2 Configuration of a dual radiation monitoring system

SiC 다이오드에 인가된 18V 역바이어스에 의한 소자 내부 공핍영역에서 방사선 작용에 의해 생성된 전하는 전하 민감형 증폭기를 거쳐 전류 펄스로 만들어지고 그 개수가 계수(Count) 된다. pMOSFET 산화층에 축적된 전하량을 읽어내기 위해 50uA의 정전류를 소스단자에 인가하고 이에 대한

출력전압을 읽어내게 된다. 두 센서의 출력값은 원격의 제어 및 모니터링 PC에서 시간별로 그래프화되고 데이터베이스로 저장된다. 그림 3은 센서부분과 신호처리 부분의 회로도를 보여주고 있다.

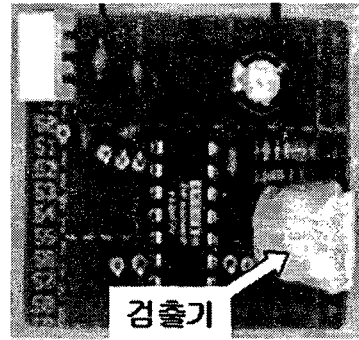


그림 3. 방사선 탐지센서 및 측정회로 모듈
Fig. 3 Radiation detector and circuit module for measuring

그림 4는 PIC16F88에 내장된 탐지기 내부 작동 프로그램의 흐름도를 나타낸다. 프로그램은 Timer1 인터럽트와 Com 인터럽트 신호로 시작되고 두 센서로부터 측정 및 변환된 방사선량 값에서 기준치 이상의 오차가 발생할 경우 이상발생을 알려주는 경보신호를 발생시키게 된다.

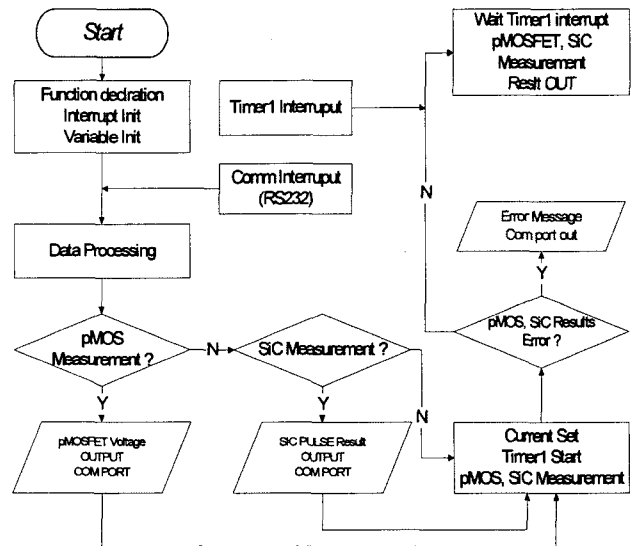


그림 4. 탐지기부 신호처리 기능도
Fig. 4 Flowchart of the operating program

그림 5는 디스플레이 화면을 캡처한 것이다. 각 센서로부터의 전압 출력값과 이 값들에 해당하는 방사선량률(Dose rate)과 방사선량(Dose)을 나타내도록 구성하였고, SiC 다이오드로 부터의 방사선량률 적분 값과 pMOSFET에서 측정된 방사선량에서 오차가 나타나면 경보신호가 켜지도록 설계하였다.

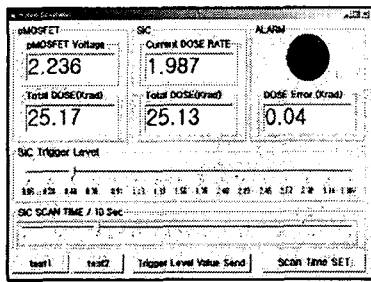


그림 5. 제어/모니터링 윈도우
Fig. 5 Window for control and monitoring

3. 성능시험 및 결과

3.1 방사선 조사시험

한국원자력연구소 코발트(Co-60) 감마 방사선 조사시설에서 이루어진 실험은 SiC의 경우 공기 흡수선량률에 따라 소자의 위치를 이동시키면서 그 때 생성된 전류펄스의 개수를 원격에서 실시간으로 계수하는 절차로 진행되었으며, 방사선 조사값은 원자력발전소 원자로 지역의 실제 방사선 예상치를 기준으로 설정된 양이다. pMOSFET은 SiC 다이오드와 동일한 시설에서 유사한 절차로 진행하였고 측정변수는 MOS의 V_T 값이다.

3.2 시험결과 및 분석

SiC 다이오드에 대한 실험결과를 조사 선률별 펄스수의 그래프로 그림 6에 도시하였다. 선형화된 직선으로 보아 조사선률에 대한 소자 출력 펄스수의 관계는 선형적으로 비례함을 알 수 있고 측정 가능한 방사선률의 범위가 0.18Gy/h로부터 200Gy/h에 이르는 넓은 범위를 확인할 수 있다. 선형화 함수는 다음과 같다.

$$C_P = 39.1 \times D_R + 29.5 \text{ (counts/10s)} \quad (3)$$

여기서 C_P 는 SiC의 펄스 수, D_R 은 공기 흡수선량률(Gy/h)을 나타낸다.

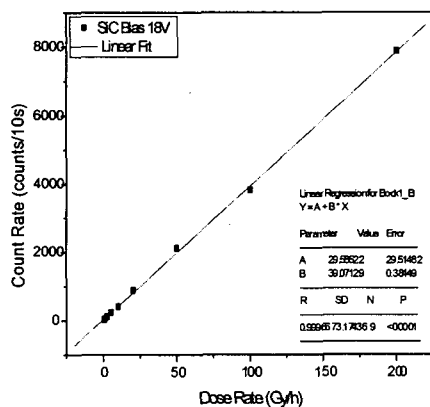


그림 6. 조사 방사선률별 SiC 다이오드 출력 펄스 수
Fig. 6 The number of output pulses from SiC diode to the dose rate

그림 7은 pMOSFET에 대한 방사선 실험 결과로서 조사선량에 대한 소자의 V_T 값의 변화를 보여주고 있다. 이 값들을 선형화한 직선은 다음 함수로 표시된다.

$$V_T = 2.85 \times D_T + 1.51 \quad (4)$$

여기서 V_T 는 MOSFET의 pMOSFET의 V_T , D_T 는 조사 방사선량이다.

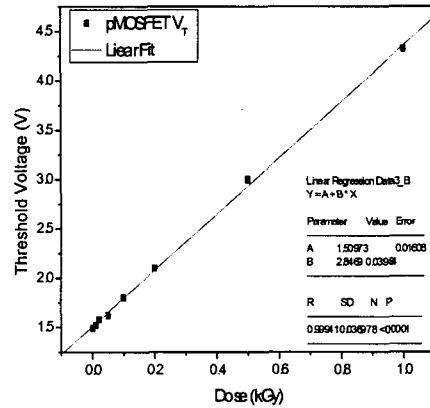


그림 7. 조사 방사선량에 대한 pMOSFET V_T 변화량
Fig. 7 The V_T shifts of pMOSFET to the dose rate

4. 결론

본 논문에서는 원자로 내부 검사용 로봇에 적용 가능한 고준위 방사선 측정용 방사선 센서와 측정기 구현에 관하여 논하였다. 고준위 방사선 측정을 위해 SiC 다이오드와 pMOSFET 센서를 각각 펄스형과 정전류 방식으로 채택하고 감마 방사선장에서 방사선 시험을 통해 특성을 분석하였다. 그 결과 두 센서는 각각 순간 방사선량률과 방사선량을 만족스럽게 지시하였고, 이 실험 결과를 바탕으로 수중 로봇에 부착 가능한 소형 경량의 형태로 복합 측정기를 설계 하였다. 구현된 복합 방사선 측정기는 고준위 방사선 측정에서 신뢰도와 안전성이 향상된 것으로 평가된다.

참고 문헌

- [1] S. Metzger, Silicon carbide radiation detector for harsh environments Nuclear Science, IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 49, pp. 1351~1355, 2002.
- [2] Andrew Holmes-Siedle, Leonard Adams, J. Stephen Leffler, and Steven R. Lindgren, The RADFET System for Real-Time Dosimeter in Nuclear Facility, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1983.
- [3] Andrew Holmes-Siedle, The Space-Charge Dosimeter, Nuclear Instruments & Methods, vol.121, pp.169~179, 1974.