

반도체 센서를 이용한 핵연료교환기 피폭방사선량 모니터링

Radiation Monitoring on a Fuel Handling Machine with Semiconductor Sensors

이 남 호*, 김 승 호, 김 양 모
(Nam-Ho Lee, Seung-Ho Kim, and Yang-Mo Kim)

Abstract : The radiation dosage of nuclear fuel handling machine of PHWR type NPP during normal operation is measured using semiconductor detectors. In order to predict and mitigate the damage of main components in fuel handling machine, caused by high irradiation, the radiation dosage exerted to the components by neutron and gamma ray is measured independently during one time of the fuel exchange, which is used for estimating the radiation dosage for one year. This result can guarantee the safety and economical efficiency for determining the replacement time of the high cost main components in fuel handling machine.

Keywords : semiconductor, radiation, nuclear, neutron, fuel handling machine, gamma-ray

I. 서론

최근 원자력발전소의 증가와 더불어 비파괴감사용 산업 시설 및 의료용 방사선 장비의 활용이 빈번함에 따라 방사선 노출 가능성이 증대되고 있다. 일반적으로 환자 검사 및 치료에 이용되는 저준위 방사선과는 달리 비파괴 검사 및 원자로의 핵연료로부터 방출되는 고준위 방사선은 전자 회로나 카메라 등으로부터 기계 구성장치나 물질에도 영향을 미쳐 고장이나 오동작을 유발할 수 있다. 따라서 안전성이 특히 강조되고 있는 원전에서는 이러한 방사선의 피폭을 엄격히 규제하고 있다.

월성원자력발전소는 중수로(PHWR)형으로 한 주기 동안 핵연료의 교체없이 운전되는 경수로형과는 달리 일정 시간 간격으로 일정량의 핵연료 교체가 지속적으로 이루어지므로 원자로 주변의 주요기기는 가동 중 높은 준위의 방사선에 상시 피폭된다. 이에 따라 원전의 안전성 향상을 위해 가동 기간 동안 원자로 주변 기기에서 누적 피폭되는 방사선량에 대한 측정의 필요성이 대두되었지만, 가동 중의 원자로 주변은 작업자의 접근이 엄격히 통제되는 고준위 방사선 구역이므로 그동안 국내에서는 이 지역에 대한 방사선 측정이 이루어진 사례가 전무하다. 이와 관련하여 최근 캐나다에서는 중수형 원전의 원자로 주변 기기에 대하여 원전 수명기간(40년) 동안 피폭되는 누적 방사선량을 측정하기 위한 실험이 시도되었다. Gary Mackay[1] 등에 의해 수행된 이 실험에는 다수의 반도체 센서를 투입하여 한 주기 운전중 원자로 주변기기에서 피폭되는 감마 방사선량을 실측하고 원전 수명기간 동안의 누적 피폭방사선량을 제시

함으로써 원자로 주변에 위치한 주요기기가 실제 고준위의 방사선에 노출되고 있어 고장의 위험이 존재한다는 사실을 입증하였고, 원자로로부터 원거리로 재배치할 것을 권고하고 있다. 그러나 이 논문에서 나타나지 않은 핵연료교환기(Fuel Handling Machine)는 원전 가동기간 동안 지속적으로 핵연료교환 작업을 수행하는 장치로써 원자로에서 방출되는 핵연료방사선과 수거된 사용후 핵연료로부터 발생하는 고준위 방사선에 직접 노출되고 있고, 핵연료 교환기 구성 장치 가운데 케이블 루프는 방사선에 가장 취약하여 이 부분에서 고장이 발생할 경우 원전 안전에 심각한 영향을 미치는 냉각재 누출사고(LOCA)로 이어질 수 있다. 또한 원자로에서 방출되는 중성자는 물질에 직접 손상을 주는 주요한 방사선원이므로 감마선과 더불어 중성자 선량의 측정 또한 중요하다.

방사선 센서의 선정은 측정하고자 하는 방사선원과 세기, 에너지, 그리고 측정 지역의 환경과 측정하고자하는 목적에 맞게 이루어져야 한다. 원자로 지역은 가동중 방사선 측정을 위해 작업자의 직접 접근이 불가능하고 고온 다습한 지역이며, 현장에서 방사선 측정이 가능해야하는 조건을 고려할 때 일반적으로 널리 이용되는 TLD나 GM 튜브 등의 방사선 선량계의 사용은 적합하지 않다. 여러 가지 방사선 측정용 센서 가운데 자체 기억 기능을 가지고 있는 반도체형 방사선 센서는 소형으로 핵연료 교환기의 협소 위치에 부착할 수 있고, 방수 기능의 구현이 용이하며, 현장에서 피폭 방사선량을 직접 확인할 수 있다는 장점을 지니고 있다. 특히 반도체 센서 가운데 원자로에서 방출되는 감마선은 MOSFET(p-type Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)을 이용할 수 있고, 속중성자는 PIN 다이오드에 의해 측정될 수 있다. 이들 반도체 소자를 방사선량 측정 현장에 적용하기 위해서는 원자로에서 방출되는 방사선의 세기와 에너지에 적합한 특성의 소자를 선정하고, 유사 방사선장에서 반도체 소자의 방사선 특성을 캘리브레이션한 후

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2003. 6. 9., 채택확정 : 2003. 11. 12.

이남호, 김승호 : 한국원자력연구소 원자력로봇팀
(nhlee@kaeri.re.kr/RobotKim@kaeri.re.kr)

김양모 : 충남대학교 전기공학과(ymkim@ee.cnu.ac.kr)

※ 본 연구는 국방부 민군겸용기술사업의 일환으로 수행되었음.

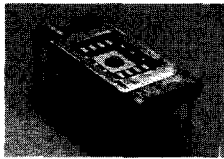


그림 1. 감마/X선 측정용 MOSFET.
Fig. 1. MOSFET, Gamma/X-ray detector.

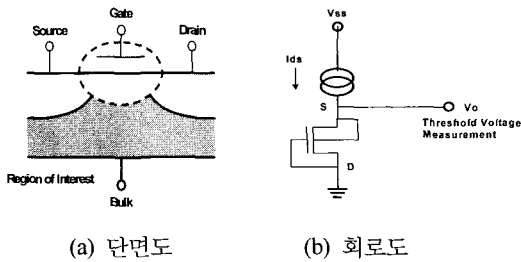


그림 2. pMOSFET의.
Fig. 2. of pMOSFET.

적용이 가능하다.

본 논문에서는 가동 중 중수형 원자로 핵연료 교환기에서 피폭되는 방사선량을 측정하였다. 일회의 핵연료교환기 교체작업 시 피폭 감마선과 중성자 선량을 측정하여 가동중 핵연료 교환기에서 피폭되는 연간 누적선량을 제시하였다. 이를 위해 고준위 선량 측정에 적합한 반도체형 방사선 센서 및 실시간 선량 모듈을 제작하였다. 본 실험 결과는 핵연료 교환기의 안전하고 경제적인 부품교체 시기 결정에 있어 중요한 자료로 활용될 것이다.

II. 반도체를 이용한 방사선(감마/X선 및 속중성자) 측정

원자로와 사용후 핵연료에서 방출되는 감마선의 주 에너지는 코발트(⁶⁰Co)에서 방출되는 감마선과 거의 일치하고, 핵분열시 방출되는 속중성자는 칼리포늄(Cf-252)에서의 중성자 에너지와 유사하다고 알려져 있다.

1. 감마/X선량 측정용 MOSFET 센서

1) MOS 소자의 특성

감마/X 방사선량의 측정에는 이온화 방사선 측정용으로 공인된 아일랜드 NMRC사의 400nm MOSFET을 이용하였으며, 고감도 특성 적용을 위해 5V의 게이트 바이어스를 적용하였다.^[2] 그림 1과 같은 형태의 반도체 소자는 실리콘 다이(Die) 셀로부터 외부 측정단자 두 줄로 배열시킨 세라믹 패키지로 구성되어 있다.

2) MOSFET을 이용한 이온화 방사선 측정원리

그림 2(a)와 같은 형태의 MOSFET은 스위칭 및 증폭용으로 사용되는 반도체 소자의 일종으로 소자 내 산화물층(SiO₂)으로 절연된 게이트의 인가전압에 의해 제어되는데 게이트 전압이 문턱전압(V_T) 이상이면 작동(On)하고, 그 이하이면 정지(Off)하게 된다. 이 V_T 값은 MOSFET을 방사선 센서로서 활용하기 위한 주요변수로서, 방사선에 조사될 경우 V_T 값의 변위 현상이 나타나는데 이 변위값을 이용하여 방사선량을 측정할 수 있다.

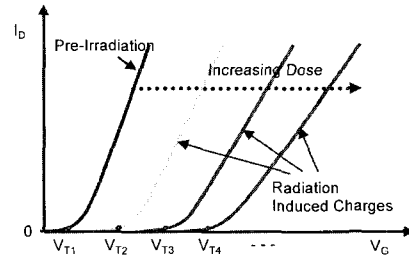


그림 3. 방사선 피폭에 따른 pMOSFET의 출력 특성변화.
Fig. 3. Output Characteristics of pMOSFET as irradiation.

문턱전압 값을 구하는 여러 가지 방법 가운데 소형의 전자회로로 구현이 유리한 정전류 인가식은 실험을 통해 결정된 낮은 고정 드레인 전류값(I_d)을 인가하고 이때의 게이트 전압을 추출하는 것으로서, 인가되는 드레인 전류의 관계식은 아래 (1)과 같이 표현된다(그림 2(b)).

$$I_d = \mu_n \frac{W}{L} C_{ox} [(V_g - V_T) V_d - 0.5 V_d^2] \quad (1)$$

여기서 I_d 는 드레인 전류, μ_n 은 전자의 이동도, W 는 채널의 두께, L 은 채널의 길이, C_{ox} 는 산화층의 두께, V_g 는 게이트 전압, V_T 는 문턱전압, 그리고 V_d 는 드레인 바이어스 전압이다.

pMOSFET이 방사선에 노출되면 소자의 게이트 산화물층(Oxide Layer, SiO₂) 내부에서 전자-정공쌍 (Electron-Hole Pair)이 형성된다. 전자는 빠르게 게이트 쪽으로 이동하여 게이트 전극에 수집되며, 반면 정공은 산화물층 내부의 산화물(Oxide)과 결합하여 반영구적인 양이온을 형성하게 된다. 이러한 정공 트랩(Hole Trap)과 계면 트랩(Interface Trap)들은 pMOSFET에서 양의 전계로 작용하기 때문에 이 소자를 작동시키기 위해서 새로 형성된 전계만큼 추가적 전압을 인가하여야 한다. 즉, 방사선 피폭량이 증가할수록 소자에는 높은 게이트 전압을 걸어주어야 소자를 작동시킬 수가 있기 때문에, 이 문턱전압(V_T)이 피폭 이온화 방사선량을 측정하는 변수가 된다. 그림 3은 이러한 이온화 방사선 피폭 량에 따른 pMOSFET의 V_T 변화량을 도시한 그림이다. 방사선 노출 이전의 pMOSFET의 출력특성은 제일 왼쪽 곡선이며 방사선에 노출되어 피폭 방사선량이 증가할수록 출력특성(V_G-I_b)에서의 곡선들은 오른쪽으로 이동하게 된다.

MOSFET형 방사선 센서는 사용분야 및 용도에 따라 방사선 대한 민감도와 사용가능 총 선량 범위가 고려되어야 한다[3,4]. pMOSFET의 이온화 방사선에 대한 특성은 방사선의 에너지 및 게이트 산화층의 두께에 따라 다르며 일반적으로 산화층이 두꺼울수록 감마선에 대한 반응이 민감하게 나타난다.

3) 누적 흡수선량에 대한 소자의 특성함수

원자로에서 방사되는 감마/X선의 대부분을 차지하는 성분은 코발트(Co-60)로 알려져 있다. 따라서 원자로 전면부에서의 감마/X 방사선량 측정을 위해 MOSFET 소자의 Co-60 방사선장에 대한 교정함수가 필요하다. 그림 4는 NMRC 400nm RADFET에 대해 제작사에서 제공한 Co-60

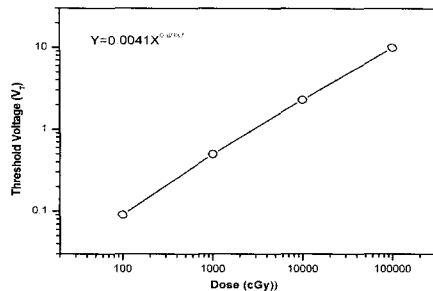


그림 4. pMOSFET의 감마선(Co-60)장 교정함수.

Fig. 4. Calibration function of pMOSFET at Gamma-ray (Co-60) field.

방사선장으로부터 추출한 교정함수를 도시한 것이며, 감마선 감도는 약 0.5mV/rad, 최소 선량 준위는 40rad임을 확인하고 있다.

고감도의 측정을 위해서는 pMOSFET의 게이트에 5V의 전압을 인가하여 사용할 수 있지만 핵연료교환기에서의 고준위 감마선 측정을 위해서는 무전압 인가상태에서 사용하는 것이 적합하다. 따라서 무전원 인가상태의 감마선량과 pMOSFET의 문턱전압과 관계함수는 (2)와 같다.

$$\Delta V_{GT} = 0.0041 \times G D^{0.6987} \quad (2)$$

여기서, ΔV_{GT} 는 pMOSFET의 문턱전압 변화량, $G D$ 는 센서에서 피폭된 감마선 누적선량이다. pMOSFET 센서로 임의의 현장에서 방사선을 측정할 경우, 측정된 pMOSFET의 문턱전압(V_{GT})값을 (2)에 대입하면 센서에 누적 피폭된 감마선의 선량을 직접 추출할 수 있다.

2. 속중성자 측정용 PIN 다이오드

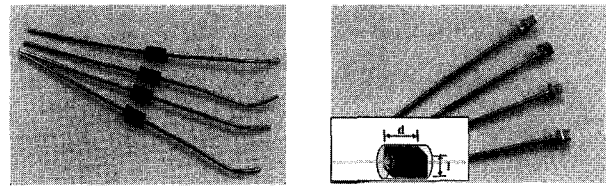
1) 속중성자 탐지용 고감도 PIN 다이오드 소자 개발

속중성자 선량 측정에는 한국원자력연구소 원자력로봇랩에서 자체 개발한 PIN 다이오드를 사용하였다[5]. 중성자 폭탄 폭발 실시간 탐지용 반도체 소자로 개발하게 된 고선량 중성자 탐지용 PIN 다이오드는 미국에서 군용으로 개발된 적이 있을 뿐 아직 국내에서는 개발된 적이 없다. 속중성자에 대한 감도를 향상시키기 위해 소자의 구조를 가변하는 반복 제작실험과 감도 시뮬레이션을 거쳐 최종 제작된 개별 PIN 다이오드 소자의 외부 형태는 다음 그림 5(a)와 같다. 3,000Ω n의 고저항 p형 실리콘 웨이퍼로부터 제작된 PIN 다이오드의 내부 셀은 그림 5(b)와 같이 1.2mm x 1.0mm x 1.0mm의 정육면체 구조로 이루어져 있다.

개발된 소자는 한국전자부품연구원에 의뢰한 전기적 특성평가시험에서 신뢰도를 인정받은 바 있고, 국제공인기관인 미국 표준연구원(NIST)에서의 캘리포늄(Cf-252) 중성자 선원 교정시험에서 속중성자에 대한 선형적인 특성과 더불어 선량계로 사용 가능한 고감도의 교정함수 시험 결과서를 확보하였다.

2) PIN 다이오드를 이용한 중성자 탐지원리

속중성자에 노출된 실리콘 PIN 다이오드는 내부에서 변위손상(Displacement damage) 현상이 발생한다. 즉, 중성자는 실리콘의 격자구조에 손상을 일으켜 실리콘 원자를 그 원래



(a) 외형

(b) 내부구조

그림 5. 제작된 PIN다이오드의.

Fig. 5. of the fabricated PIN diode.

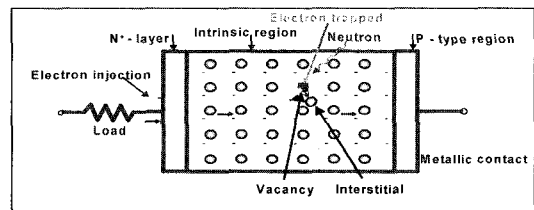


그림 6. PIN 다이오드에 대한 속중성자의 피폭 영향.

Fig. 6. Fast neutron effect on PIN diode.

격자 위치로부터 이탈시킨다. 이 과정에서 실리콘 격자 내부에 공간(Vacancy)과 격자 사이에 낀(Interstitial) 등의 작은 결함영역들이 생성된다(그림 6).

이 결함들은 다이오드 외부 전계에 의해 이동되는 내부 전하들의 재결합 중심으로 작용하게 되고, 이로 인해 실리콘 PIN 다이오드 내부 주입 전하의 수명이 감소하여 내부 저항이 증가하게 된다. 소자 저항성분의 증가는 정전류에서 소자전압의 증가로, 그리고 정전압에서는 소자를 관통하는 전류량이 감소하는 전기적 특성변화로 나타난다. 이 관계를 수식에서 살펴보면, 우선 중성자 조사량의 증가에 따른 전하 수명감소 관계는 (3)으로 표현된다[6,7].

$$\frac{1}{\tau_f} - \frac{1}{\tau_0} = \frac{\varphi}{K_f} \quad (3)$$

여기서, τ_f 는 중성자 조사 후 수명, τ_0 는 과잉 캐리어 초기 수명, K_f 는 소자의 공핍 영역에서의 효율적인 수명 손상 상수, φ 는 누적 속중성자 플럭스이다. 또한, 주입 전하 농도의 분포는 다음 확산거리의 함수이고, PIN 다이오드 외부전압은 다음의 (4), (5)와 같은 비례관계로 표현된다.

$$L = \sqrt{D \tau} \quad (4)$$

$$V_D \propto \left(\frac{W}{L}\right)^2 \quad (5)$$

여기서, L 은 전하 평균확산거리, D 는 전하 확산상수, τ 는 전하수명, W 는 공핍영역 두께, V_D 는 인가전압이다. 위 (3)에서 중성자 플루언스는 소자의 전하 수명에 반비례하고, 다이오드 인가전압 V_D 는 (4)와 (5)의 관계로부터 캐리어의 수명에 반비례하므로, V_D 는 중성자 플루언스에 비례하게 됨을 확인할 수 있다. 이와 같은 중성자 피폭에 의해 다이오드 내부에서 발생하는 현상은 소자의 전기적 출력 특성에도 변화를 가져오게 되며, 이 현상이 그림 7에 나타나 있다.

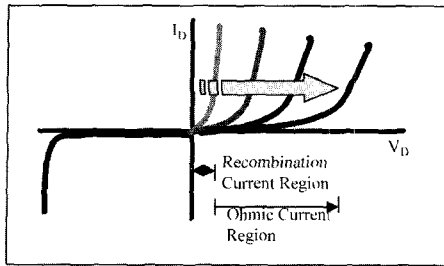


그림 7. 중성자 피폭에 의한 다이오드 출력특성 변화 현상.
Fig. 7. Transit of PIN diode output characteristics by neutron irradiation.

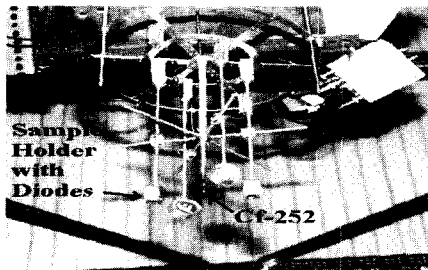


그림 8. Cf-252 선원(중심)과 시험용 PIN 다이오드.
Fig. 8. Cf-252 source(center) and PIN diode samples.

이것은 다이오드에서의 중성자 피폭 누적량이 증가함에 따라 전류-전압(I-V) 특성 곡선이 점차 오른쪽으로 이동하는 것을 보여주고 있다. 따라서 다이오드를 속중성자 탐지소자로 사용할 경우 일정 전류를 인가한 상태에서 소자의 출력 전압 값을 측정하거나, 역으로 일정 전압을 인가한 상태에서 다이오드 양단을 흐르는 전류 양을 추출하게 되면 그때의 피폭 중성자 선량을 알 수 있다.

3) 속중성자 에너지 및 감도교정

단일 에너지를 가지는 감마/X 선과는 달리 중성자의 에너지는 넓은 범위에 걸쳐 존재한다. 중성자는 그 에너지에 따라 물질과 반응하는 과정 및 결과가 복잡하여 하나의 감지기를 사용하여 전 영역의 중성자 선량을 측정하는 것은 쉬운 일이 아니다. 따라서 측정하고자 하는 중성자의 에너지를 확인한 후 동일한 에너지의 중성자장에서 교정된 감지기를 사용하여 선량을 측정하는 것이 일반적으로 행해지는 중성자 선량 측정법이다. 원자로에서 방출되는 중성자는 주로 핵분열에 의해 발생하는 것으로써 이때의 중성자는 캘리포늄(Cf-252)의 선장에서와 유사한 에너지 특성을 보이므로, Cf-252 국제표준선원을 보유한 미국 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서 감도 교정(Calibration) 시험 절차를 수행하였다. NIST의 Cf-252 중성자 조사시설은 Cf-252 감쇠로부터 자발 핵분열 중성자를 공급한다. 시험에 사용된 네 개의 PIN 다이오드 샘플은 얇은 알루미늄 디스크 위에 얹혀져 알루미늄 테이프로 정해진 조사위치에 고정되었다. 중성자 조사는 이틀간 모두 여섯 번에 걸쳐 수행되었으며 열화현상을 방지하기 위해 조사가 끝나자마자 즉시 측정이 이루어졌다. 시험 수행 시 Cf-252 선원의 중성자 방사능은 $2.435 \times 10^9/cm^2/s$ 이었고

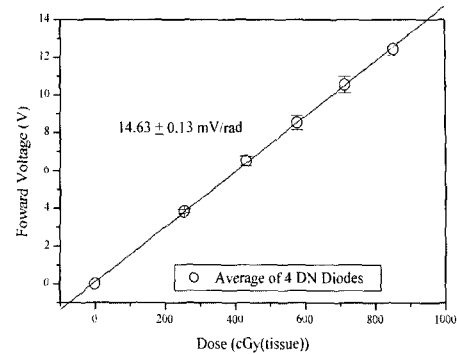
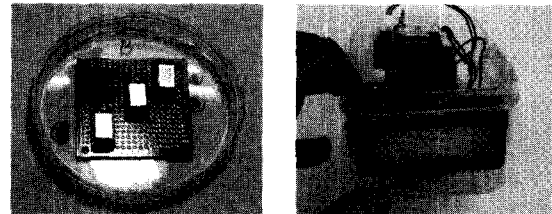


그림 9. PIN 다이오드의 NIST Cf-252 조사시험 결과.
Fig. 9. Irradiation test result of PIN diodes at NIST Cf-252.



(a) 반도체 센서모듈 (b) 선량계 모듈

그림 10. 방사선량 측정용.

Fig. 10. For radiation dose measuring.

PIN 다이오드가 설치된 시험장치가 그림 8에 나타나있다. 선원의 중심으로부터 각 센서까지의 평균거리는 4.34cm이며, 이 지점에서의 방사선 조사당 선량율은 115rad/h이다.

그림 9는 여섯 단계에 걸쳐 진행된 NIST Cf-252 분열 중성자에 대한 PIN 다이오드 특성변화 시험의 결과를 보여주고 있는 것으로서 제작된 PIN 다이오드가 중성자 누적 조사 선량에 대해 선형적인 변화 특성을 나타냄을 확인할 수 있고, 이때의 감도는 $14.63 \pm 0.13mV/rad$ 이다.

3. 센서모듈 및 선량계 장치 제작

좁고 다습한 원자로 구역에서의 사용을 위해 그림 10(a)와 같은 형태의 방사선량 측정용 센서모듈을 두 세트 제작하였다.

각 모듈에는 중성자와 감마선 측정용 PIN 다이오드 및 pMOSFET을 각각 네 개와 세 개씩 설치하였으며 방사선 차폐를 최소화 하기위해 얇은 재질의 케이스를 사용하여 방수 처리 하였다. 정확한 피폭 방사선량의 정보를 추출하기 위해 방사선 조사시험 직 후 현장에서의 반도체 센서에 대한 방사선량 측정이 필요하다. 이를 위해 PIN 다이오드와 pMOSFET에서 대한 실시간 선량값 추출이 가능한 전자적 선량계 모듈을 그림 10(b)와 같이 제작하였다. PIC16F873으로 구현된 전자적 선량 모듈은 PIN 다이오드와 pMOSFET의 소스(Source) 단자에 각각 10mA와 10μ의 디지털 정전류 펄스값이 인가되도록 설계하였고, 인가 전류에 대한 전압의 변화량을 LCD 화면에 디스플레이 하도록 고안되었으며, 장시간 사용을 위해 12V의 소형 고용량 배터리를 바닥에 고정된 형태로 습기가 많은 현장에서 안전하고 간편하게 사용할 수 있도록 플라스틱 케이스에 밀봉하여 제작하였다.

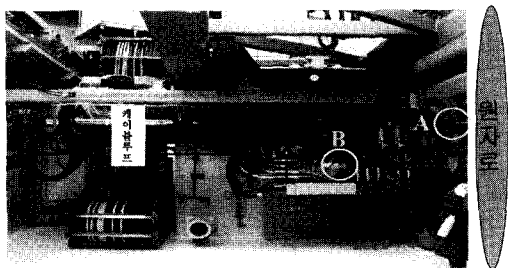


그림 11. 핵연료교환기에 설치된 두개의 센서모듈(A, B).
Fig. 11. Two radiation sensor modules installed in FHM(A, B).

III. 현장 적용 시험

1. 시험환경 및 절차

그림 11은 핵연료교환기의 전체 모습으로서 오른쪽 전면에 위치한 원자로의 한 연료봉(A 지점)으로부터 핵연료를 교환하고 수거한 핵연료를 매거진(B 지점)에 담아내어 처리하는 과정을 원전 운전기간 동안 계속 반복 수행하게 되며, 작업과정에 필수적인 중수와 오일, 그리고 전력을 공급하는 케이블 루프는 왼쪽에 위치해 있다.

핵연료 교환기에서의 피폭 방사선은 주로 핵분열에 의해 원자로 전면부로부터 방출되는 방사선과 매거진(Magazine)으로 수거된 사용후 핵연료에서 방출되는 방사선에 기인한다. 그러므로 두 방사선원으로부터 방출되는 방사선량을 측정 한 후 선원으로부터의 거리 및 핵연료교환기의 기하학적 구조를 고려하면 핵연료교환기와 케이블 루프에서 피폭되는 방사선의 양을 알 수 있다. 제작된 두 개의 방사선 측정 센서모듈을 두 방사선원의 방향으로 제일 가까운 위치에 부착하기 위해 그림에서 표시된 바와 같이 센서 모듈 A는 교환기 헤드의 스나우트(Snout) 상부에 설치하여 원자로 전면부에서 방출되는 핵분열 방사선을 감지하도록 하고, 센서 모듈 B는 매거진 내에 임시 저장된 사용 후 핵연료로부터의 방사선을 측정할 수 있도록 매거진의 외부에 부착하였다.

센서 모듈이 부착된 핵연료 교환기는 일 회 작업 동안 원자로 연료관 내 총 12 다발의 핵연료 중 8 다발의 핵연료를 교체한다. 이 작업은 연간 약 625회 반복 수행된다. 설치된 센서는 일 회의 핵연료 교체 작업을 수행하는 동안 원자로 전면부로부터 방출되는 핵분열 방사선과 수거한 사용후 핵연료로부터의 고준위 방사선에 피폭된다. 작업 완료 후 다시 보수실로 이동한 후 다음 작업을 준비하게 되며 이때 부착한 센서 모듈을 수거한 후 제작된 전자적 선량계 모듈을 이용하여 개별 센서의 특성변화를 추출함으로써 일 회 작업 시 피폭되는 누적 방사선량을 측정하게 된다.

2. 시험 결과 및 분석

일 회 핵연료 작업 수행 후 수거된 두 개의 센서 모듈 A, B에 대해 선량계 모듈을 사용하여 현장에서 측정된 소자의 특성변화는 표 1과 2에 기록되어 있다.

선량계 모듈에서 추출된 출력 변화량, 즉 인가 정전류에 대한 PIN 다이오드의 출력전압 변화값과 pMOSFET의 소스에 인가된 정전류에 대한 V_T 의 변화량을 교정함수에 적용하면 이들 센서의 특성 변화량에 대응하는 방사선 피폭량

표 1. 센서모듈 A의 측정결과.

Table 1. Measured results of sensor module A.

	$V_{T(Avg)}(V)$	$V_{T(Avg)}(V)$	$\Delta V_{T(Avg)}(V)$
PIN 다이오드	4.68	5.09	0.41
pMOSFET	2.49	7.94	5.45

표 2. 센서모듈 B의 측정결과.

Table 2. Measured results of sensor module B.

	$V_{T(Avg)}(V)$	$V_{T(Avg)}(V)$	$\Delta V_{T(Avg)}(V)$
PIN 다이오드	4.75	6.17	1.42
pMOSFET	2.44	17.15	14.71

표 3. 핵연료 교환기상 두 지점에서의 감마선 피폭선량.

Table 3. Gamma-ray dosage at the two spots of FHM.

센서 설치 지점	A	B
pMOSFET의 $\Delta V_T (V)$	5.45	14.71
피폭 감마선량(krad)/1회	29.55	122.40
피폭 감마선량(Mrad)/1년	18.47	76.50

표 4. 핵연료 교환기상 두 지점에서의 속중성자 피폭선량.

Table 4. Fast neutron dosage at the two spots of FHM.

센서 설치 지점	A	B
PIN 다이오드의 $\Delta V(V)$	0.41	1.42
피폭 속중성자량(rad)/1회	28.02	97.06
피폭 속중성자(krad)/1년	17.51	60.66

을 구할 수 있게 된다.

1) 감마선 피폭선량

pMOSFET에 대한 코발트(Co-60) 선원의 방사선량과 문턱 전압의 변화량(ΔV_T) 관계 함수식에 센서모듈의 출력 변화량을 대입하면 감마선의 누적선량은 표 3에서처럼 각각 29.55krad, 122.40krad로 계산된다.

구해진 감마선 선량은 핵연료 교환기 한번의 작업주기 동안 피폭된 감마선량이고, 이러한 작업은 연간 625번 반복하게 되므로 일년간 피폭되는 총 감마선량은 각각 18.47Mrad와 76.50Mrad로 추정된다.

2) 속중성자 피폭선량

선량계 모듈에서 추출한 PIN 다이오드의 출력전압은 0.41V와 1.42V이므로 속중성자 교정함수에 적용하면 피폭된 속중성자의 선량은 28.20rad와 97.06rad임을 알 수 있다(표 4). 또한 이 값을 연간 피폭 중성자선량으로 환산하면 각각 17.51krad와 60.66krad로 계산된다.

일반적인 전자부품은 100krad 이상에서 오동작 등으로 인해 사용이 어려워지며, CCD 카메라 등은 10krad 이상 피폭되면 화질이 열화되어 관측에 어려움이 발생된다. 수십 메가 rad의 방사선량은 기계 장치의 금속 재질을 파괴시키기에는 미약하지만 핵연료케이블의 피복재에 손상을 줄 수 있는 양이다. 방사선에 의해 손상된 피복재는 경화되고 부서져 중수의 누출사고나 전기 합선 등 중대사고로 이어질 수 있으므로 원전 안전에 치명적인 결과를 초래하는 원인이 될 수 있다. 본 실험 결과 추출된 연간 피폭방사선량에 대하여 원

자로 전면부의 공간 및 기구적 구조와 방사선의 감쇠, 그리고 핵연료교환기 각 부분의 물질 특성 및 내방사선 설계 기준치를 고려한다면 현장에서 요구되는 핵연료교환기 케이블 루프의 안전성이 유지되는 경제적 교체시기에 대한 중요한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

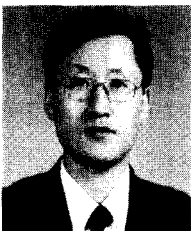
IV. 결론

본 연구에서는 중수로 원전 핵연료 교환기의 케이블 루프에서 운전중 피폭되는 방사선량을 측정하기 위한 국내 첫 시도로서, 자체 개발한 소형의 반도체 센서 모듈을 사용하였다. 또한 물질을 파괴시키는 중성자장과 이온화를 주로 하며 일부 파괴효과가 있는 감마/X-선이 혼합된 방사선 환경에서 이들 방사선을 구별하여 측정할 첫 시도이기도 하다. 케이블 루프에서의 조사 방사선량을 측정하기 위해 핵연료 교환기 헤드의 두 곳에 센서 모듈을 부착하여 일회용 핵연료 교체 작업 동안 피폭되는 감마/X선과 속중성자를 오프라인 방법으로 측정하였다. 실험값들의 분석결과 핵연료 교환기 헤드의 두 곳에서 연간 누적 피폭 감마/X선량은 각각 18.47 Mrad와 76.50 Mrad, 연간 중성자 피폭선량은 17.51 krad와 60.668 krad로 측정되었다. 수십 Mrad의 감마/X선은 금속 재질을 파괴시키기에는 미약하지만 케이블 피복재의 재질에 따라 이를 경화시켜 부스러지게 할 수 있는 큰 양이다. 현장에 제공된 본 실험결과는 운전중 원자로 지역의 첫 실측 방사선 정보로써 중요하게 사용될 수 있고, 특히 핵연료교환기 케이블루프의 안전성이 유지되는 경제적 교체시기에 대한 중요한 자료로 활용될 수 있을 것이다. 본 실험은 캐나다 원전에서도 현장적용을 권고받고 있는 연구[1]로써, 가동중 고방사선에 상시 노출되는 중수형 원전의 원자로 주변 기기들의 안전성 향상을 위해 원자로 전 지역

에 대한 방사선 준위 모니터링 연구가 시급히 수행되어야 한다고 판단된다.

참고문헌

- [1] G. Mackay, I. Thomson, C. R. Himing, and M. Zeya: "Gamma-ray Dose Mapping in Operational CANDU Reactor Containment Areas using MOS Dosimeters," ASTM publication, pp. 441-446, 1994.
- [2] P. N. Cooper: *Introduction to Nuclear Radiation Detector*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 84 ~ 96, 1986.
- [3] A. Holmes-Siedle, L. Adams, J. Stephen Leffler, and Steven R. Lindgren: "The RADFET System for Real-Time Dosimeter in Nuclear Facility," IEEE Trans. Nucl. Sci., 1983.
- [4] A. Holmes-Siedle: "The Space-Charge Dosimeter," Nuclear. Instruments. & Methods, vol. 121, pp. 169~179, 1974.
- [5] N. H. Lee et al, "Development of Fast Neutron Detector and its Characteristics", KIEE Annual Summer Cong., 2003.
- [6] M. McPherson, T. Sloan, B. K. Jones, "Suppression of Irradiation Effect in Gold-Doped Silicon Detectors", J. Phys. D: Appl. Phys. 30, pp. 3028~3035, 1997.
- [7] J. M. Swartz and M. O. Thurston, "Analysis of the Effect of Fast-Neutron Bombardment on the Current-Voltage Characteristic of a Conductivity-Modulated P-I-N Diode," J. Appl. Phys. 37 no. 2, pp. 745~755, 1966.



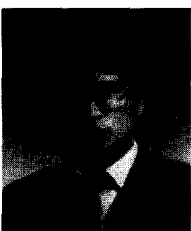
이 남 호

1963년 4월 28일생. 1990년 경북대학교 전자공학과 졸업. 동대학원 석사(1993). 1992년~현재 한국원자력 연구소 원자력로봇랩. 연구원. 관심분야는 센서 신호 및 영상처리



김 승 호

1953년 6월 15일생. 1975년 연세대학교 기계공학과 졸업. 동대학원 박사(1988). 1980년~현재 한국원자력연구소 원자력로봇랩 랩장. 관심분야는 로봇 및 시스템 제어



김 양 모

1950년 3월 29일생. 1973년 서울대 전자공학과 졸업. 동경대 대학원 박사(1983). 1979년~현재 충남대 전기공학과 교수. 관심분야는 전자신호처리 및 전기철도