

반도체 센서를 이용한 핵연료교환기 피폭 방사선량 모니터링

Radiation Monitoring on Fuel Handling Machine with
Semiconductor Sensor

*이남호, *김승호, *이용덕, **김양모
*한국원자력연구소, **충남대학교
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

자체 개발한 소형의 반도체 센서를 사용하여 중수로 원전 핵연료 교환기에서 가동 중 피폭 방사선량을 측정하였다. 고 방사선 피폭에 의한 핵연료 교환기 주요 부품의 손상을 예측하기 위해 핵연료 교환 작업 일회 수행과정에 피폭되는 중성자와 감마선량을 독립적으로 측정하고, 연간 피폭 방사선량을 계산하였다. 본 실험의 결과는 원전 안전성과 직결되어 있는 중수로 핵연료 교환기 주요 부품의 교체 시기 등을 결정할 수 있는 근거 데이터를 제공하였다.

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.

1. 서 론

월성원자력발전소는 중수로(PHWR)형으로 한 주기 동안 핵연료의 교체없이 운전되는 경수로형과는 달리 일정 시간 간격으로 일정량의 핵연료 교체가 지속적으로 이루어진다. 핵연료 교체 작업을 수행하는 핵연료 교환기(Fuel Machine)는 그림 1과 같이 칼란드리아(Calendria) 차폐벽(Shielding Door) 외부의 보수실에서 대기하고 있다가 핵연료 교체 작업 시 칼란드리아 전면부로 진입하여 새 핵연료의 장전 및 핵연료의 수거 임무를 동시에 수행한다. 칼란드리아 전면부 양쪽에 설치된 두 대의 핵연료 교환기가 새 핵연료 장전과 동시에 반대편으로 추출된 사용후 핵연료 다발을 매거진(Magazine)에 수거한 다음 보수실로 재이동하여 사용 후 핵연료를 연료 방출구로 방출함으로써 한주기의 핵연료 교체과정이 마무리하게 되며, 이 과정은 한 주기 운전 중 반복된다. 핵연료 교환기는 핵연료를 담아서 운반하는 핵연료 교환기 헤드(Fueling Machine Head)와 케이블 루프(Catenary Loop), 그리고 케이블 공급 장치(Catenary Trolley)로 이루어지고, 이 가운데 케이블 루프를 구성하는 총 34개의 라인은 각각 전기 공급(10 라인), 오일 공급(12 라인), 그리고 중수를 공급(12 라인)하는 역할을 한다.

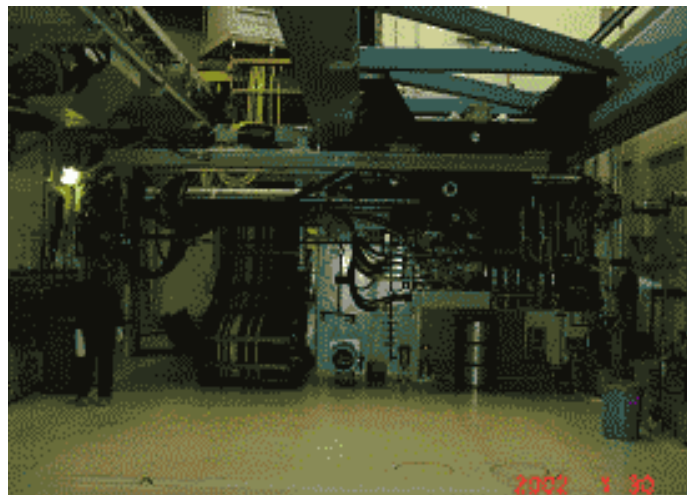


그림 1. 핵연료 교환기 및 케이블 루프의 정면사진 (작업 대기중)

핵연료 교환기는 칼란드리아에 근접하여 핵연료 교체작업을 수행할 뿐만 아니라 사용 후 핵연료를 직접 취급하므로 피폭 방사선 준위가 높을 것이라고 예상되며, 핵연료 교환기 가운데 케이블 루프가 방사선에 가장 취약한 것으로 평가되고 있어 제조사인 AECL에서는 일정 기간 사용 후 핵연료 케이블 루프를 교체를 강권하고 있다. 이는 고준위 방사선 피폭으로 인해 케이블 루프에 손상이 발생할 경우 중수의 누출 등 원전의 안전에 심각한 영향을 미칠 수 있기 때문이다. 그러나 안전에 대한 지나친 우려로 인해 방사선에 의한 케이블루프에서의 손상 발생 훨씬 이전에 불필요한 교체를 반복하게 된다면 경제적으로 큰 손실이 아닐 수 없을 뿐만 아니라 고가의 외산 수입품이라는 점을 감안한다면 최대 허용 방사선 설계 기준치까지 충분히 활용한 다음 교체하는 방안을 모색하는

것이 바람직하다.

가동중 핵연료 교환기에서의 피폭 방사선량을 알 수 있다면 이 값과 핵연료 교환기 케이블 루프관련 부품의 내방사선 설계 기준치를 비교하여 최적의 교체시기를 결정할 수 있어, 원전의 안전성을 유지하면서 동시에 경제적 효과를 극대화시킬 수 있다. 그러나 핵연료 교환기에 대한 방사선 누적 피폭량에 대한 실측 자료의 입수가 불가능할 뿐만 아니라 작업환경의 고준위 방사선으로 인하여 실측을 위한 접근 또한 용이하지 않다.

본 논문에서는 가동중인 중수형 원전의 칼란드리아 지역의 핵연료 교환기 케이블 루프에서의 피폭 방사선량을 측정하였다. 가동중 원자로 전면에 접근하여 방사선량을 측정하는 것은 불가능하므로, 원전 가동 중에 핵연료 교환 작업을 반복하여 수행하는 핵연료 교환기에 방사선 측정용 센서를 부착하여 일회 작업 시 피폭되는 방사선량을 측정 후 연간 작업회수를 곱하는 방법을 통하여 핵연료 교환기에서 피폭되는 연간 총 방사선량을 구하였다. 핵연료교환기의 피폭 방사선량 측정을 위해 고준위 선량 측정에 적합한 반도체형 방사선 센서 및 실시간 선량 모듈을 제작하였고, 피폭 중성자와 감마선량을 분리하여 추출하였다.

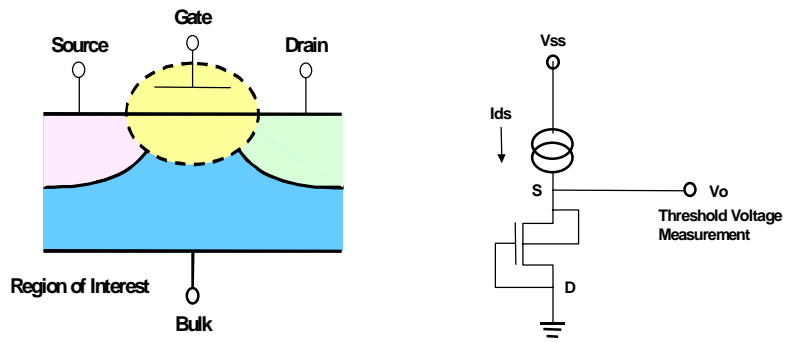
2. 반도체형 방사선 측정 센서

가. 반도체를 이용한 방사선 측정

고온 다습한 중수로 원자로 지역과 핵연료 교환기의 부착에 적합한 방사선 센서로 밀봉 방수 처리와 소형의 센서 모듈 제작에 장점을 지닌 반도체형을 채택하였다^[1]. 속중성자의 측정에는 제작한 PIN 다이오드 소자를 사용하였고 감마선 측정을 위해 NMRC사의 pMOSFET(p-type Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)을 준비하였다. 이 두 종류의 소자는 피폭 방사선량을 자체에서 기억하는 특성을 가지고 있어 외부 회로의 추가없이 센서만으로 방사선량의 측정이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 각각의 소자에 대해 미국 NIST에서의 시험을 거쳐 추출한 캘리브레이션 함수와 NMRC사에서 제공된 감마선 특성 감도함수를 적용하여 선량을 계산하였다. 각각의 소자의 방사선에 대한 특성 및 측정 원리는 다음과 같다.

1) MOSFET에서의 이온화 방사선 측정

그림 1(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 방사선 센서를 구현하였다.



(a) pMOSFET의 단면도 (b) pMOSFET의 회로도
 그림 1. pMOSFET의 구조 및 회로도

여러 가지 문턱전압 값을 구하는 방법 가운데 소형의 전자회로로 구현이 유리한 정전류 인가식은 실험을 통해 결정된 낮은 고정 드레인 전류값(I_d)을 인가하고 이때의 게이트 전압을 추출하는 것으로서, 이때의 드레인 전류의 관계식은 아래 식 1과 같이 표현된다(그림 1(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, 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, SiO_2) 내부에서 전자-양공쌍 (Electron-Hole Pair)이 형성된다. 전자는 빠르게 게이트 쪽으로 이동하여 게이트 전극에 수집되며, 반면 양공은 산화물층 내부의 산화물(Oxide)과 결합하여 반영구적인 양이온을 형성하게 된다. 이러한 정공 트랩(Hole Trap)과 계면트랩(Interface Trap)들은 pMOSFET에서 양의 전계로 작용하기 때문에 이 소자를 작동시키기 위해서 새로 형성된 전계 만큼 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 2는 이러한 이온화 방사선 피폭량에 따른 pMOSFET의 V_T 변화량을 도시한 그림이다. 방사선 노출 이전의 pMOSFET의 출력특성은 제일 왼쪽 곡선이며 방사선에 노출되어 피폭 방사선량이 증가할수록 출력특성 ($V_G - I_D$)에서의 곡선들은 오른쪽으로 이동하게 된다.

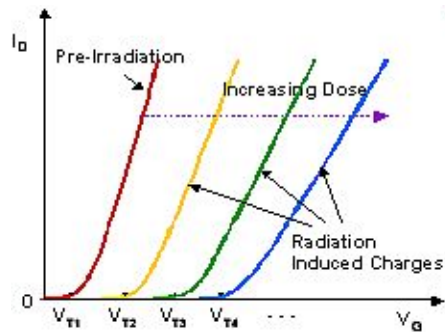


그림 2. 방사선 피폭에 따른 pMOSFET의 출력 특성변화

MOSFET형 방사선 센서는 사용분야 및 용도에 따라 방사선 대한 민감도와 사용가능 총 선량 범위가 고려되어야 한다.^{[2][3]} pMOSFET의 이온화 방사선에 대한 특성은 방사선의 에너지 및 게이트 산화층의 두께에 따라 다르며 일반적으로 산화층이 두꺼울수록 감마선에 대한 반응이 민감하게 나타난다.

2) PIN 다이오드를 이용한 속중성자 탐지

속중성자에 노출된 실리콘 PIN 다이오드는 내부에서 변위손상(displacement damage) 현상이 발생한다. 즉, 중성자는 실리콘의 격자구조에 손상을 일으켜 실리콘 원자를 그 원래 격자 위치로부터 이탈시킨다. 이 과정에서 실리콘 격자 내부에 공간(vacancy)과 격자 사이에 낀(interstitial) 등의 작은 결함영역들이 생성된다.(그림 3)

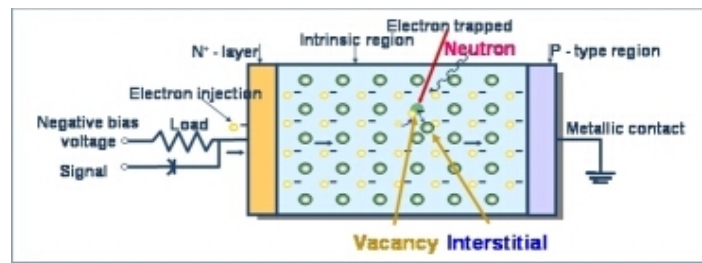


그림 3. PIN 다이오드에 대한 속중성자의 피폭 영향

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. 소자의 저항성분의 증가는 정전류에서 소자전압의 증가로, 그리고 정전압에서는 소자를 관통하는 전류량이 감소하는 전기적 특성변화 현상으로 나타난다. 이 관계를 수식에서 살펴보면, 우선 중성자 조사량의 증가에 따른 전하 수명감소 관계는 식 (1)로 표현된다^{[4][5]}.

$$\frac{1}{\tau_f} - \frac{1}{\tau_0} = \frac{\varphi}{K_T} \quad (2)$$

여기서, τ_f 는 중성자 조사 후 수명, τ_0 는 과잉 캐리어 초기 수명, K_T 는 소자의 베이스 영역에서의 효율적인 수명 손상 상수, φ 는 누적 속중성자 플럭스이다.

또한, 주입 전하 농도의 분포는 다음의 베이스 폭과 확산길이의 함수이고, PIN 다이오드 외부전압은 식 (3)과 같은 비례관계로 표현된다.

$$L = \sqrt{D \tau} \quad (3)$$

$$V_D \propto \left(\frac{W}{L}\right)^2 \quad (4)$$

여기서, L은 전하 평균확산거리, D는 전하 확산상수, τ 는 전하수명, W는 베이스 폭, V는 인가전압이다.

위 식 (2)에서 중성자 플루언스는 소자의 전하 수명에 반비례하고, 다이오드 인가전압 V_D 는 식 (2)의 캐리어 수명에 반비례하므로, V_D 는 중성자 플루언스에 비례하게 됨을 확인할 수 있다. 이와 같은 중성자 피폭에 의해 다이오드 내부에서 발생하는 현상은 소자의 전기적 출력 특성에서도 변화를 가져오게 되며. 이 현상이 그림 4에 나타나 있다. 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 출력전압 값을 측정하거나, 역으로 일정 전압을 인가한 상태에서 다이오드 양단을 흐르는 전류 양을 추출하게 되면 그때의 피폭 중성자 선량을 알 수 있다^[6].

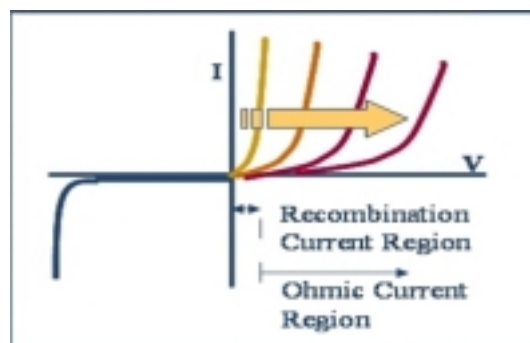


그림 4. 중성자 피폭에 의한 다이오드 출력특성 변화 현상

나. 반도체 소자의 방사선 캘리브레이션 함수

1) 감마선 캘리브레이션

감마선 측정용 400nm Implanted RADFET(NMRC)에 제작사로부터 제공된 감마선 (Co-60)에 대한 소자의 방사선 특성 및 캘리브레이션 함수 그림 5와 같다.

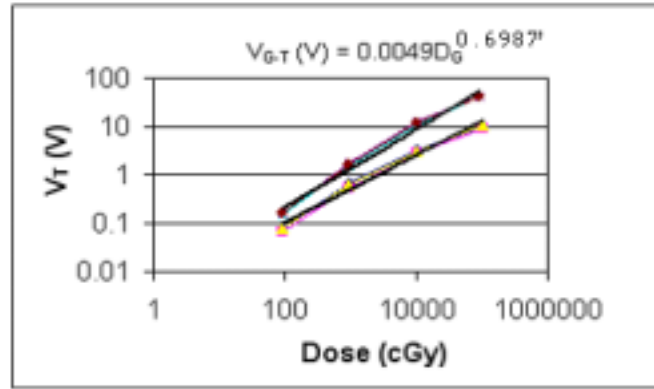


그림 5. pMOSFET의 감마선(Co-60)장 캘리브레이션 실험 곡선

고감도의 측정을 위해서는 pMOSFET의 게이트에 5V의 전압을 인가하여 사용할 수 있지만 핵연료교환기에서의 고준위 감마선 측정을 위해서는 무 전압 인가상태에서 사용하는 것이 적합하다. 무전원 인가상태의 감마선량과 pMOSFET의 문턱전압과 관계함수는 식 5와 같다.

$$\Delta V_{G-T} = 0.0049 \times G D^{0.6987} \quad (5)$$

여기서, ΔV_{G-T} 는 pMOSFET의 문턱전압 변화량, $G D$ 는 센서에서 피폭된 감마선 누적선량이다. pMOSFET 센서로 임의의 현장에서 방사선을 측정할 경우, 측정된 pMOSFET의 문턱전압(V_{G-T})값을 식 5에 대입하면 센서에 누적 피폭된 감마선의 선량을 직접 추출할 수 있다.

2) 속중성자 캘리브레이션 실험

속중성자 측정용 PIN 다이오드는 고준위 속중성자 선량을 측정하기 위해 두께 1.2mm, 저항도 $3,000 \Omega \cdot \text{cm}$ 의 고순도 웨이퍼로부터 단면 한변의 길이가 1mm인 PIN 다이오드 개별소자를 직접 반도체 공정과정을 거쳐 제작하여 적용하였다. 일반적으로 원자로 핵분열에서 방출되는 중성자의 에너지는 Cf-252의 에너지장에서와 유사한 에너지 특성을 보이므로 Cf-252 국가표준선원을 보유한 미국 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서 캘리브레이션 과정을 수행하였다.

NIST의 캘리포늄(Cf) 중성자 조사시설은 자발 핵분열 중성자를 Cf-252 감쇠로부터 공급한다. 시험에 사용된 네 개의 PIN 다이오드는 얇은 알루미늄 디스크 위에 얹혀져 알

루미늄 테이프로 정해진 위치에 고정되었다. 중성자 조사는 이틀에 걸쳐 각각의 여섯 번에 걸쳐 수행되었다. 열화현상을 방지하기 위해 조사가 끝나자마자 즉시 측정이 이루어졌다. 시험 수행 시 Cf-252 선원의 중성자 방사능은 2.435×10^9 /cm²/s이다. 조사시험을 위해 설치된 PIN 다이오드의 구성이 그림 6에 나타나있다. 선원의 중심으로부터 각 센서까지의 평균거리는 4.34cm이며, 이 지점에서의 방사선 조사당 선량율은 115 rad/h이다. 여섯 번의 독립적인 방사선 조사는 다음 표와 같이 이루어졌다.

표 1. NIST Cf-252 방사선 조사절차

조사 시작시간	조사 종료시간	조사 시간 (시간)	피폭 선량 (rad)	누적 피폭선량 (rad)
1st Day				
10:36:15	12:49:20	2.218	255	255
13:31:15	15:04:10	1.549	178	433
15:29:04	16:45:55	1.281	147	580
2nd Day				
09:36:50	10:47:58	1.186	136	716
11:22:53	12:35:34	1.211	139	855
13:10:10	14:41:16	1.518	175	1,030

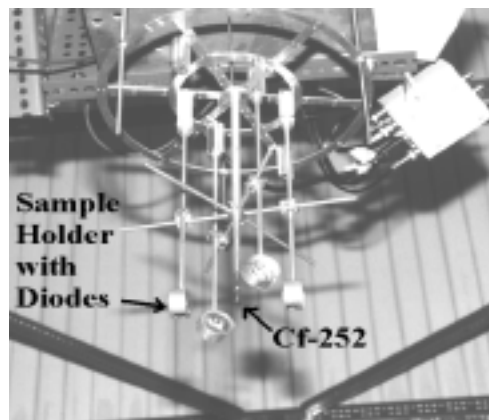


그림 6. Cf-252 분열 중성자 선원(중심)을 마주하고 있는 네 개의 캔에 설치된 시험용 PIN 다이오드 (미, NIST)

그림 7은 표 1의 절차에 따라 진행된 NIST Cf-252 분열 중성자에 대한 PIN 다이오드 특성변화 시험의 결과를 보여주고 있다. 환경에서 선량계 다이오드 센서의 방사선 성능을 보여주고 있다. 실험 결과에서 PIN 다이오드 센서는 중성자 선량에 대해 선형적인

변화 특성을 나타냄을 확인할 수 있고, 감도는 14.63 ± 0.13 mV/rad이다.

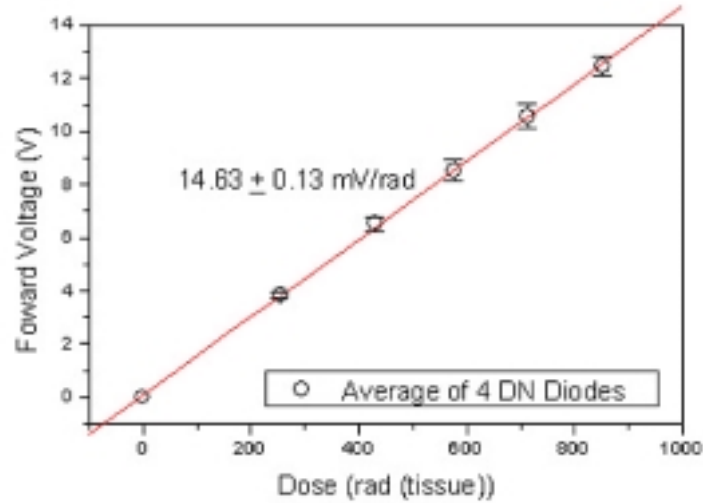


그림 7. PIN 다이오드의 NIST 핵분열 중성자 조사시험 결과 및 감도수식

다. 센서 및 실시간 방사선량 측정 모듈 제작

그림 8과 같은 핵연료 교환기 부착용 방사선량 측정모듈을 동일한 형태로 두 세트 제작하였다. 각 모듈에는 중성자와 감마선 측정용 PIN 다이오드와 pMOSFET을 각각 네 개와 세 개씩 설치하였으며 방사선 차폐를 최소화 하기위해 얇은 재질의 케이스를 사용하여 방수 처리 하였다.



그림 8. 제작된 핵연료 교환기 방사선량 측정용 반도체 센서모듈(A, B)

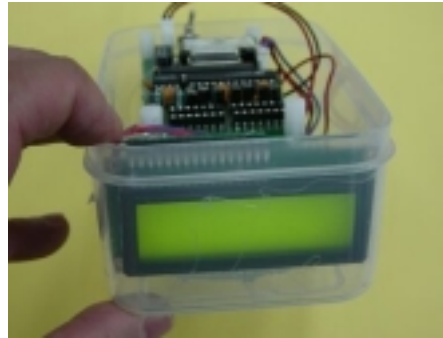


그림 9. 방사선량 측정용 선량계 모듈

정확한 피폭 방사선량의 정보를 추출하기 위해 방사선 조사시험 직 후 현장에서의 반도체 센서에 대한 방사선량 측정이 필요하며 PIN 다이오드와 pMOSFET에서 대한 실시간 선량값 추출이 가능한 전자적 선량계 모듈을 그림 9와 같이 제작하였다. PIC16F873

으로 구현된 전자적 선량 모듈은 PIN 다이오드와 pMOSFET의 소스 단자(Source)에 각각 10mA와 10 μ A의 디지털 정전류 펄스값이 인가되도록 설계하였고, 인가 전류에 대한 전압의 변화량을 LCD 화면에 디스플레이하도록 고안되었으며 장시간 사용을 위해 12V의 소형 고용량 배터리를 바닥에 고정된 형태로 습기가 많은 현장에서 안전하고 간편하게 사용할 수 있도록 플라스틱 케이스에 밀봉하여 제작하였다.

3. 월성 원전 핵연료 교환기에서의 피폭방사선량 측정

가. 피폭 방사선량 측정 방법 및 절차

핵연료 교환기 케이블 루프에서 누적 피폭되는 방사선량은 주로 핵분열에 의해 칼라드리아 전면부로부터 방출되는 방사선과 매거진으로 수거된 사용후 핵연료에서 방출된 방사선에 기인한다. 따라서 제작된 두개의 센서 모듈을 사용하여 두 방향으로부터의 방출되는 방사선량을 측정하면 궁극적인 케이블 루프에서의 누적 방사선 피폭량을 예측할 수 있으므로, 그림 10과 같이 핵연료 교환기 헤드에 두개의 센서 모듈을 설치함에 있어서 두 방향으로부터의 방사선을 감지하는데 적합한 위치를 고려하였다. 표 1에 나타난 바와 같이 센서 모듈 A는 교환기 헤드의 스나우트(snout) 상부에 설치되어 칼라드리아 전면부에서 방출되는 핵분열 방사선을 감지하고, 센서 모듈 B는 매거진 내에 임시 저장된 사용후 핵연료로부터의 방사선을 측정할 수 있도록 매거진 외부에 부착하였다. 그림 11은 전체 핵연료 교환기에서의 센서의 상대적인 설치 위치를 보여주고 있다.

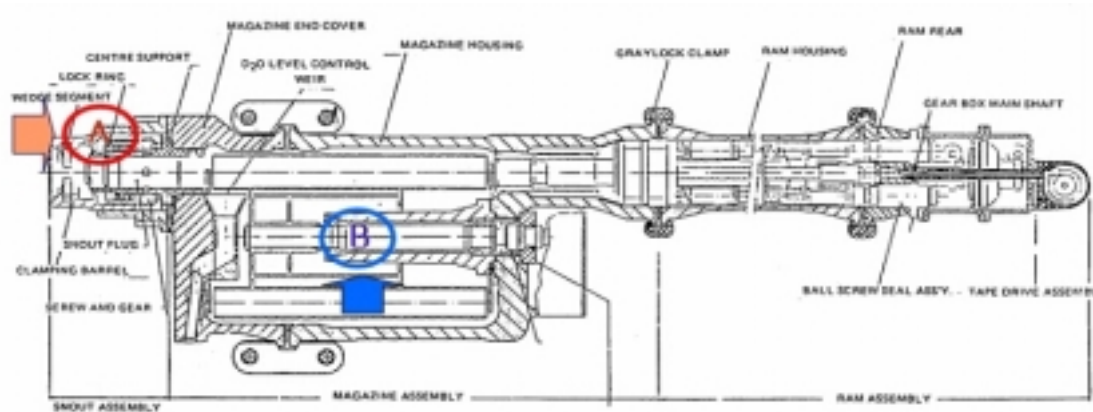


그림 10. 핵연료 교환기 헤드와 센서모듈의 설치위치

표 1. 핵연료 케이블 루프의 방사선 측정센서

센서 설치위치	스나우트 상부	매거진 하우징 외부
목적	핵연료 교체중 원자로로부터 조사되는 선량 측정	연료 교체중 매거진내에 임시 저장된 사용후 핵연료로부터의 조사선량 측정
측정 방향	원자로	매거진
거리	약 1m (원자로 전면부터)	약 0.1m(매거진부터) 약 2.5m(원자로 전면부터)



그림 11. 핵연료 교환기에 설치된 두개의 방사선 측정 센서 모듈 (A, B)

센서 모듈이 부착된 핵연료 교환기는 표 2와 같은 절차로 일 회(回)의 핵연료 교체 작업을 수행하게 되며, 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 회 의 핵연료 교체 작업을 수행하는 동안 칼란드리아 전면부로부터 방출되는 핵분열 방사선 과 수거한 사용후 핵연료로부터의 고준위의 방사선에 피폭된다. 작업 완료 후 다시 보수 실로 이동한 후 다음 작업을 준비하게 되며 이때 부착한 센서 모듈을 수거하여 제작된 전자적 선량계 모듈을 이용하여 개별 센서의 특성변화를 추출함으로써 일 회 작업 시 피 폭되는 누적 방사선량을 측정하게 된다.

표 2. 핵연료 교환기 한주기 작업과 방사선 피폭량 측정 기간

순서	시간	내용
1	15:40	측정센서 설치
2	16:09	핵연료 교환기 이동(보수실 -> 원자로정면)
3	16:17	이동완료
4	16:42	원자로내 핵연료 1차 이동(핵연료교환 전방 1.7 m)
5	16:56	원자로내 연료이동 완료(8다발) -> 핵연료교환기
6	17:26	핵연료교환기 이동(원자로정면 -> 보수실)
7	17:34	이동완료
8	17:47	사용후 핵연료 방출 시작
9	18:00	사용후 핵연료 방출 완료
10	18:40	측정센서 수거

나. 결과 및 분석

일회 핵연료 작업 수행 후 수거된 두 개의 센서 모듈 A, B에 대해 선량계 모듈을 사용하여 현장에서 측정된 소자의 특성변화는 표 3과 4에 기록되어 있다.

표 3. 센서모듈 A의 측정결과

	$V_{T0(Avg.)}(V)$	$V_{T1(Avg.)}(V)$	$\Delta V_{T(Avg.)}(V)$
PIN 다이오드	4.68	5.09	0.41
pMOSFET	2.49	7.94	5.45

표 4. 센서모듈 B의 측정결과

	$V_{T0(Avg.)}(V)$	$V_{T1(Avg.)}(V)$	$\Delta V_{T(Avg.)}(V)$
PIN 다이오드	4.75	6.17	1.42
pMOSFET	2.44	17.15	14.71

선량계 모듈에서 추출된 출력변화량, 즉 인가 정전류에 대한 PIN 다이오드의 출력 전압의 변화값과 pMOSFET의 소스에 인가된 정전류에 대한 V_T 의 변화량을 캘리브레이션 결과로써 도출한 함수를 적용하면 이들 센서의 특성 변화량에 대응한 방사선 피폭량을 구할 수 있게 된다.

1) 감마선 피폭선량

식 5에 나타난 pMOSFET의 코발트($Co-60$) 선원의 방사선량에 대한 문턱전압의 변화량(ΔV_T)에 대한 관계 함수식에 측정된 센서모듈의 출력 변화량을 대입하면 감마선의 누적선량은 표 5에서처럼 각각 29.55 krad, 122.40 krad로 계산된다.

표 5. 핵연료 교환기상의 두 지점에서의 감마선 피폭선량

센서 설치 지점	스나우트 상부	매거진 하우스 외부
pMOSFET의 ΔV_T (V)	5.45	14.71
피폭 감마선량 (krad)/1회	29.55	122.40
피폭 감마선량 (Mrad)/1년	18.47	76.50

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

Mrad와 76.50 Mrad로 예상된다.

2) 속중성자 피폭선량

선량계 모듈에서 추출한 PIN 다이오드의 출력전압은 0.46V와 0.3V이므로 위에서 다음 속중성자 캘리브레이션 함수에 구한 감도를 적용하면 피폭된 속중성자의 선량은 28.20 rad와 97.06 rad임을 알 수 있다(표 6). 또한 이 값을 연간 피폭 중성자선량으로 환산하면 각각 17.51 krad와 60.66 krad 로 계산된다.

표 6. 핵연료 교환기상의 두 지점에서의 속중성자 피폭선량

센서 설치 지점	스나우트 상부	매거진 하우징 후면
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

본 실험 결과 추출된 연간 피폭방사선량에 대하여 칼란드리아 전면부의 공간 및 기구적 구조와 방사선의 감쇠, 그리고 핵연료교환기 각 부분의 물질 특성 및 내방사선 설계 기준치를 고려한다면 현장에서 요구되는 핵연료교환기 케이블루프의 안전성이 유지되는 경제적 교체시기에 대한 중요한 자료로 활용할 수 있을 것이다.

4. 결론 및 향후계획

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 측정한 첫 시도이기도 하다. 케이블 루프에서의 조사 방사선량을 측정하기 위해 핵연료 교환기 헤드의 두 곳에 센서 모듈을 부착하여 일회 핵연료 교체 작업 동안 피폭되는 감마/X선과 속중성자를 오프라인 방법으로 측정하였다.

실험값들의 분석결과 핵연료 교환기 헤드의 두 곳에서의 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. 본 실험은 캐나다 원전에서도 현장적용을 권고받고 있는 연구^[7]로써, 가동중 고방사선에 상시 노출되는 중수형 원전의 원자로 주변 기기들의 안전성 향상을 위해 원자로 전 지역에 대한 방사선 준위 모니터링 연구가 시급히 수행되어야 한다고 판단된다.

후 기

본 연구는 국방부 민군겸용기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] P. N. Cooper: *Introduction to Nuclear Radiation Detector*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 84~96, 1986.
- [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.
- [4] 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.
- [5] John M. Swartz and Marlin 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.
- [6] M. Valdinoci, et al. "Analysis of Conductivity Degradation in Gold/Platinum-Doped Silicon," Trans. On Electron Devices, Vol. 43, No. 12, pp. 2269-2275, 1996.
- [7] G. Mackay, I. Thomson, C. R. Hirning, and M. Zeya: "*Gamma-ray Dose Mapping in Operational CANDU Reactor Containment Areas using MOS Dosimeters*," ASTM publication, pp. 441-446, 1994.