

CCD형 내방사선 카메라의 월성 원자로구역 방사선 특성

The Radiation Characteristics of the CCD-type Radiation Hardened Camera

이남호, 최영수, 김승호
*한국원자력연구소
김양모
충남대학교

초 록

차폐방식의 CCD형 시작품 내방사선 카메라를 개발하고 원전 원자로 현장 적용연구를 진행 중이다. 개발된 카메라의 현장 성능평가 및 기능개선을 위해 원전 가동 중 카메라에서 피폭되는 실제 방사선량의 측정이 필요함에 따라, 두 종의 반도체 소자를 사용하여 중성자와 감마/X 선의 연간 피폭선량 정보를 분리하여 측정하고 한주기 운전중 카메라에서 피폭되는 방사선량을 도출하였다. 측정 결과를 통해 시작품 카메라의 성능 평가와 더불어 기능개선의 바람직한 방향을 제시하였다.

Abstract

A study on the development and field implementation of the prototype radiation-proof shielding CCD camera is currently undertaken. For the performance evaluation and improvement of the developed camera, it is necessarily required to measure the actual amount of radiation during the operation of an atomic power plant. Hence, two kinds of semiconductor are used to separately measure the yearly amount of radiation of the neutron and the gamma/X-ray. Moreover, the amount of radiation per one cycle of operation is calculated. Based on the measurement results, performance of the prototype camera is evaluated and guidelines for the improvement is also proposed.

1. 서 론

1895년 뢰트겐(Wilhelm Roentgen)에 의한 X선 발견 그리고 1896년 베크렐(Antonie H. Becquerel)과 1898년 마리 퀴리(Marie Curie)에 의한 방사능(Radio activity) 발견 이후로 원자력 분야는 괄목할 만한 성장을 이룩하였으며 원자로 기술, 핵의학, 핵공학, 보건물리 및 방사선 화학 등에서 방사선과 방사능의 응용 범위가 확장되어 왔다.^[1] 방사선 작업은 크게 증가하고 있고 이러한 방사선 관련 작업 환경은 작업자의 방사선 피폭으로 인해 접근이 제한되는 특수 작업환경으로 이들 시설에서의 각종 작업은 작업자의 방사선 피폭을 고려하여 원격관측 및 원격작업의 형태로 이루어진다. 이러한 무인, 원격작업은 주로 시각정보에 의존하게 되며 시각 정보원으로는 일반적으로 CCTV 시스템이 이용되고 있다.^[2] 그러나 일반 산업용 CCTV 장치에 사용되고 있는 카메라

는 방사선에 취약하여 특정량 이상의 방사선에 조사될 경우 열화되어 영상 관측이 불가능하게 된다. 따라서 고방사선 환경의 원격관측 및 감시를 위해서는 방사선에 열화되지 않고 깨끗한 영상을 관측할 수 있는 내방사선 카메라의 사용이 필수적이다. 현재 국내의 원전 등 방사선 관련 분야에서 사용되고 있는 내방사선 카메라는 전량 외국 제품에 의존하고 있으며 가격 또한 고가로 경제적으로 큰 부담이 되고 있다. 또한 내방사선 카메라에 대한 국내 기술이 취약하여 기존에 사용하고 있는 외국 제품의 유지 및 보수에 많은 어려움을 겪고 있는 상태이다. 이에 따라 한국원자력연구소 원자력로봇랩에서는 차폐방식의 CCD형 내방사선 카메라 설계 제작하였고, 개발된 시작품 카메라는 월성 원전 원자로 전면부 감시용으로 현장에 적용하여 시험 사용 중이다. 그러나 현장 설치된 카메라의 관측영상에서 방사선에 의한 원인으로 판단되는 상당한 준위의 백색잡음이 관측되고 있다.

개발된 프로토타입 카메라의 현장 성능평가 및 성능개선을 위해 원전 가동 중 카메라에서 피폭되는 실제 방사선량에 대한 정확한 정보가 중요하다. 그러나 카메라 설치 구역에서의 원전 가동 중 피폭 방사선량에 대한 정보가 전무하여 현장 적용실험을 통한 프로토타입 카메라의 성능 평가가 용이하지 않다. 따라서 내방사선 카메라의 설치 위치에서의 가동 중 온라인 방사선량 측정이 요구되었다. 고온 다습한 원자로 환경과 복잡한 장소에 설치가 가능한 방사선 측정 센서로는 반도체형을 선택하는 것이 유리하며, 반도체형 센서들 중에서 중성자와 감마선의 누적 피폭선량 측정에는 PIN 다이오드와 pMOSFET(p type Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)가 적합하다. 이 두 센서는 독립적으로 피폭선량을 누적할 수 있는 기능이 있어 원하는 측정 장소에 적용할 때 추가적인 기억회로 없이 센서만의 부착이 가능하다는 장점을 가지고 있기 때문이다.

본 논문에서는 반도체 센서를 사용하여 감시용 카메라에서 피폭되는 방사선량을 측정하고자 시도하였다. 두 종의 반도체 소자를 사용하여 중성자와 감마선의 연간 피폭선량 정보를 분리하여 측정함으로써 시험 개발된 내방사선 카메라의 현장 평가와 성능개선을 위한 실측 자료를 제공되었다.

2. CCD형 내방사선 카메라 개발

2.1 CCD 카메라의 내방사선화

카메라의 방사선 내구성 개선 방법으로 방사선에 강건한 소자들을 사용하여 카메라를 제작하거나 카메라에서 직접 피폭되는 방사선의 세기를 줄이는 방법이 일반적으로 이용되고 있다. 방사선의 영향은 거리, 시간, 부품의 특성에 따라 다르게 나타나게 되고 대부분의 경우 방사선 작업에서 거리, 시간은 변경할 수 없는 경우가 많으며 내구성을 개선시키기 위해 방사선에 대한 부품의 특성을 개선시키는 방법을 사용하게 된다. 따라서 기존의 내방사선 카메라는 방사선에 강한 부품을 카메라 헤드에 장착하고, 방사선에 약한 부품은 원격지의 제어기에 탑재하여 방사선 영향을 최소화시켰다. 이 방법은 소형, 경량으로 제작될 수 있는 장점을 가지고 있으나, 특수 부품의 경우 가격이 비싸고 구입이 용이하지 않아 제작 및 유지보수가 어려운 단점이 있다. 한편 차폐체를 이용한 방법은 상용 카메라를 차폐하여 방사선 내구성을 개선시키는데 크기 및 무게는 커지게 되나, 제작 및 유지보수가 쉽고 칼라 영상 구현이 용이하여 사용자의 선호도가 높을 뿐만 아니라 경제적인 측면에서도 장점이 있다.

2.2 차폐에 의한 CCD 내방사선 카메라 구현

2.2.1 방사선 차폐

방사선 차폐는 방사선이 어떤 물질을 통과하는 동안 그 물질의 구성원자와 반응하여 방사선의 세기가 감소되는 원리를 이용한다. 차폐체의 선형감쇠계수(μ)는 방사선 에너지의 함수로 주어지는 차폐물질의 고유한 상수로 μ 는 방사선이 물질 내에서 단위길이를 통과하는 동안 물질과 어떤 상호작용을 일으켜 에너지가 감소될 확률이다. 반가층은 방사선의 세기를 절반으로 줄이는 데 필요한 차폐두께를 말하며 방사선 세기의 지수 감소식으로부터 계산된다. 차폐 두께는 식 (1)과 같이 선형감쇠계수에 반비례하는데, 선형감쇠계수는 밀도의 함수로 나타나므로 물질의 밀도가 높을수록 차폐두께는 작아진다.

$$X_{1/n} = \frac{\ln(n)}{\mu} \quad (1)$$

따라서 밀도가 높은 텅스텐을 차폐체로 사용하면 기존의 사용이 많은 납 등에 비해 차폐 두께를 획기적으로 줄일 수 있어 카메라 전체의 크기를 감소시킬 수 있게 된다. 텅스텐 차폐 두께는 낮은 에너지의 감마선에 대해서는 차폐체의 두께가 얇아지며, 높은 에너지의 감마선에 대해서는 두꺼워진다. 4MeV의 감마선에서 선형감쇠계수가 가장 작아 차폐두께는 가장 두꺼워지나, 일반적으로 원자로에서 많이 방출되는 코발트(Co-60)의 에너지와 유사한 1~1.5MeV의 에너지를 고려하여 차폐 두께를 계산하는 것이 일반적이다.

2.2.2 CCD형 내방사선 카메라 설계 및 제작

카메라의 차폐는 방사선의 투과를 저지할 뿐만 아니라 영상 입력통로인 광 경로도 막아버리는 역할을 하게 된다. 방사선의 투과는 저지하고 광 경로를 확보하기 위해서는 그림 1과 같이 카메라 렌즈의 바로 앞에 카메라 영상센서의 중심축과 90도 되는 방향으로 광이 통과할 수 있는 공간을 만들어 놓는다. 그리고 45도 반사경 2개를 사용하여 광축 경로를 직각으로 두 번 꺾이게 만들어 카메라의 정면에서 오는 광을 받아들일 수 있게 만든다. 광은 반사경을 통해 광 경로가 바뀌어 렌즈를 통해 카메라 영상센서에 도달하게 되고, 방사선은 반사경을 투과함으로써 차폐체 내부에 있는 카메라에는 영향을 미치지 않게 된다.

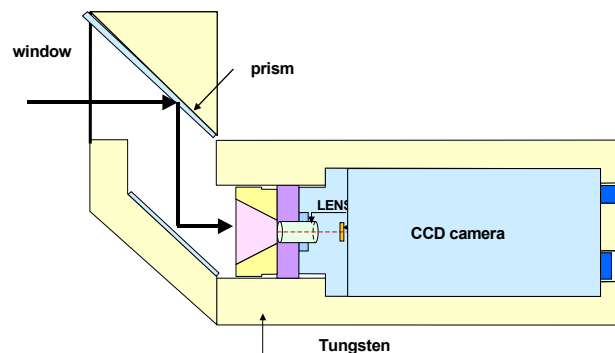


그림 1. 카메라 차폐 개념도

그림 2와 같이 방사선의 차폐와 빛의 반사 원리를 이용하여 CCD형 내방사선 카메라 시작용을 설계 제작하였다. 카메라 설계 요건은 중수형 원자로 적용을 목표로 하였으며, 원격에서 카메라의 조작성이 가능하도록 하였다. 일반 CCD 카메라의 영상관측 가능한 방사선 허용선량은 6krad 정도이지만 텅스텐과 함께 고안한 차폐 방식을 적용하면 18배 차폐 효과가 발생하여 108krad로 방사선 내구성이 향상될 것으로 예상된다. 개발된 차폐카메라의 특징적 사양은 표 1에 나타나 있다. 카메라를 포함하는 영상관측 시스템은 그림 3과 같이 카메라 헤드부와 원격 제어부로 구성되어 있으며, 카메라 헤드부는 CCD 카메라, 전동 줌렌즈, 그리고 차폐체 및 반사경으로 구성되어 방사선 환경에서 영상을 획득하게 되며, 제어부는 카메라의 제어 및 영상 출력 기능을 수행한다. 본 시스템은 3cm 두께의 텅스텐으로 차폐하여 1.5MeV의 감마 방사선에 대해 18배의 차폐효과를 지니도록 설계하였고, 차폐체의 크기는 30cm×10cm×15cm 이며, 무게는 24kg 이다. 8배줌 렌즈를 장착하여 10m 정도의 거리에서 수 cm 정도의 글자까지 관측할 수 있도록 하였다.



그림 2. 텅스텐 차폐를 이용한
시작용 내방사선카메라

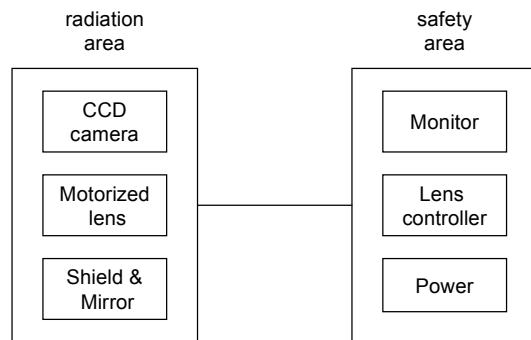


그림 3. 영상관측 시스템 구성도

표 1. 차폐 카메라 특징

구 분	특 징
크기	30cm×10cm×15cm
중량	24 kg
차폐체	텅스텐
영상관측 방법	이중 반사법
영상 출력	NTSC (칼라)
입력단자	전원(12V), 렌즈 제어선
출력단자	비디오(75Ω)
기능	줌, 초점 제어 가능

3. 반도체를 이용한 방사선(감마/X-선 및 속중성자) 측정

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

3.1 감마/X-선량 측정용 MOSFET 센서

3.1.1 MOSFET 소자의 특성

감마/X 방사선량의 측정에는 이온화 방사선 측정용으로 공인된 아일랜드 NMRC사의 400nm MOSFET을 이용하였으며, 고감도 특성 적용을 위해 5V의 게이트 바이어스를 적용하였다.^[3] 그림 4와 같은 형태의 반도체 소자는 실리콘 다이(Die) 셀로부터 외부 측정단자를 두 줄로 배열시킨 세라믹 패키지로 구성되어 있다.

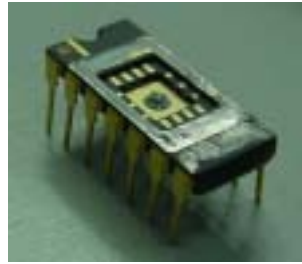


그림 4. 감마/X선 측정용 MOSFET

3.1.2 MOSFET을 이용한 이온화 방사선 측정원리

그림 5(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.

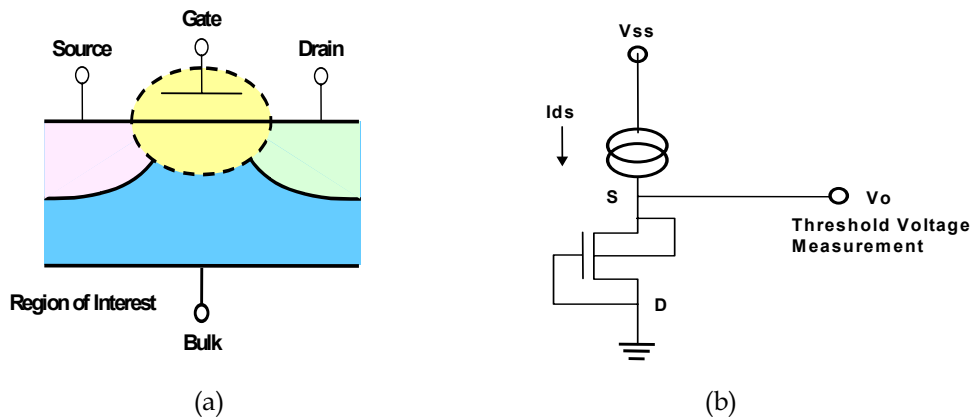


그림 5. pMOSFET의 (a)단면도, (b)회로도

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 (2)와 같이 표현된다(그림 5(b)).

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

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, 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 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 6은 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_D)에서의 곡선들은 오른쪽으로 이동하게 된다.

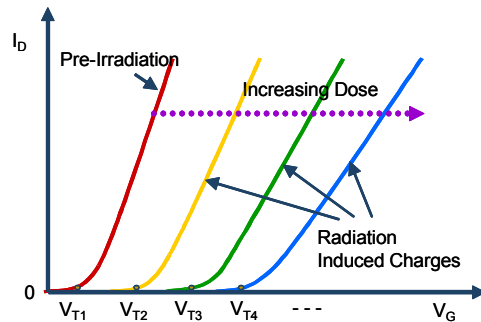


그림 6. 방사선 피폭에 따른 pMOSFET의 출력 특성변화

MOSFET형 방사선 센서는 사용분야 및 용도에 따라 방사선 대한 민감도와 사용가능 총 선량 범위가 고려되어야 한다.^{[4],[5]} pMOSFET의 이온화 방사선에 대한 특성은 방사선의 에너지 및 게이트 산화층의 두께에 따라 다르며 일반적으로 산화층이 두꺼울수록 감마선에 대한 반응이 민감하게 나타난다.

3.1.3 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 7은 NMRC 400nm RADFET에 대해 제작사에서 제공한 Co-60 방사선장에서 추출한 교정함수를 도시한 것이며, 감마선 감도는 약 0.5mV/rad, 최소 선량 준위는 40rad임을 확인하고 있다.

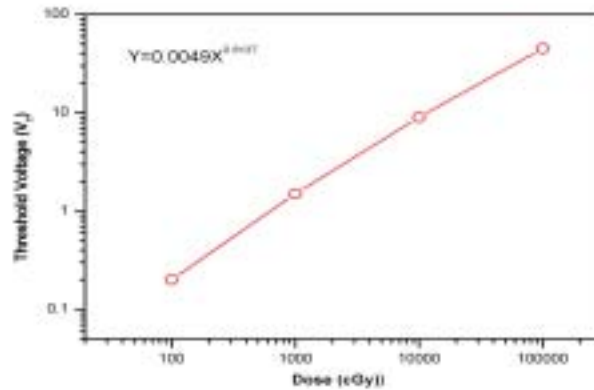


그림 7. pMOSFET의 감마선(Co-60)장 교정함수

고감도의 측정을 위해서 pMOSFET의 게이트에 5V의 전압을 인가하여 사용하였다. 이때의 감마선량과 pMOSFET의 문턱전압과 관계함수는 식 (3)과 같다.

$$\Delta V_{G-T} = 0.0049 \times cD^{0.8137} \quad (3)$$

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

3.2 속중성자 측정용 PIN 다이오드

3.2.1 속중성자 탐지용 고감도 PIN 다이오드 소자 개발

속중성자 선량 측정에는 한국원자력연구소 원자력로봇랩에서 자체 개발한 PIN 다이오드를 사용하였다.^[6] 중성자 폭탄 폭발 실시간 탐지용 반도체 소자로 개발하게된 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 아래 그림 8(a)와 같다.

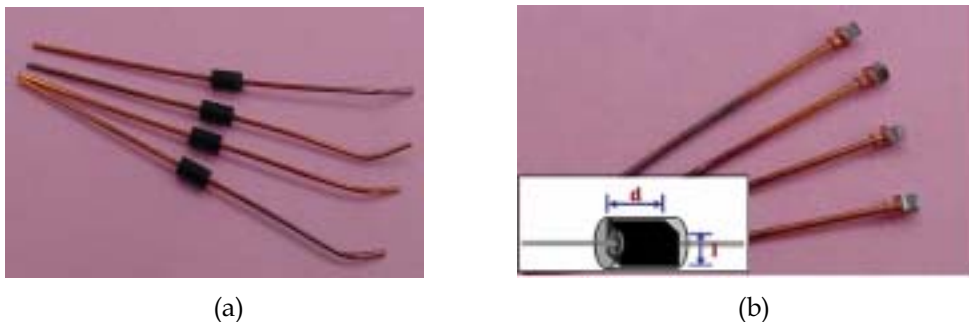


그림 8. 제작된 PIN다이오드 (a)외형, (b)내부구조

개발된 소자는 한국전자부품연구원에 의뢰한 전기적 특성평가지험에서 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.

3.2.2 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 격자 위치로부터 이탈시킨다. 이 과정에서 실리콘 격자 내부에 공간(vacancy)과 격자 사이에 낀(interstitial) 등의 작은 결함영역들이 생성된다.(그림 9)

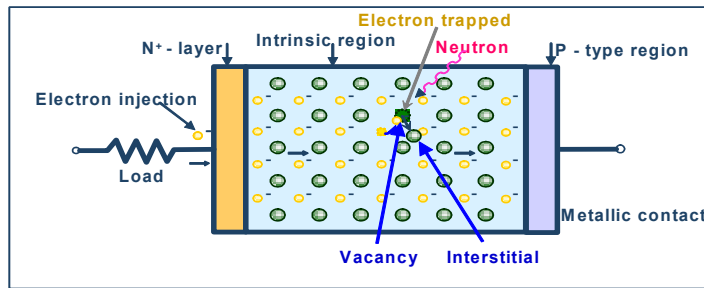


그림 9. PIN 다이오드에 대한 속중성자의 피폭 영향

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 (4)로 표현된다.^{[7],[8]}

$$\frac{1}{\tau_f} - \frac{1}{\tau_0} = \frac{\varphi}{K_r} \quad (4)$$

여기서, τ_f 는 중성자 조사 후 수명, τ_0 는 과잉 캐리어 초기 수명, K_r 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 (5), (6)과 같은 비례관계로 표현된다.

$$L = \sqrt{D\tau} \quad (5)$$

$$V_D \propto \left(\frac{W}{L}\right)^2 \quad (6)$$

여기서, L 은 전하 평균 확산거리, D 는 전하 확산상수, τ 는 전하수명, W 는 베이스 폭, V 는 인가전압이다. 위 식 (4)에서 중성자 플루언스는 소자의 전하 수명에 반비례하고, 다이오드 인가전압 V_D 는 식 (6)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 10에 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.^[9]

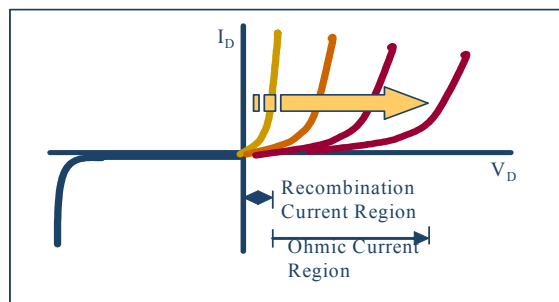


그림 10. 중성자 피폭에 의한 다이오드 출력특성 변화 현상

3.2.3 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 것으로서 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 이틀에 걸쳐 모두 여섯 번에 걸쳐 수행되었으며 열화현상을 방지하기 위해 조사가 끝나자마자 즉시 측정이 이루어졌다. 시험 수행 시 Cf-252 선원의 중성자 방사능은 $2.435 \times 10^9/\text{cm}^2/\text{s}$ 이었고 PIN 다이오드가 설치된 시험장치가 그림 11에 나타나 있다. 선원의 중심으로부터 각 센서까지의 평균거리는 4.34cm이며, 이 지점에서의 방사선 조사당 선량은 115rad/h이다.

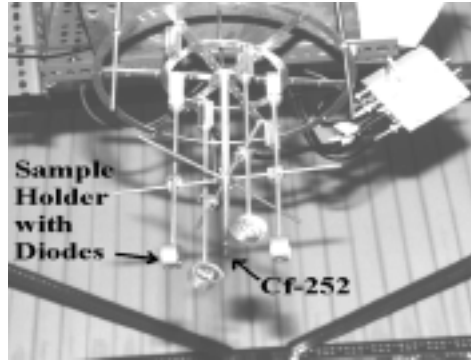


그림 11. Cf-252 선원(중심)과 시험용 PIN 다이오드

그림 12는 여섯 단계에 걸쳐 진행된 NIST Cf-252 분열 중성자에 대한 PIN 다이오드 특성변화 시험의 결과를 보여주고 있는 것으로서 제작된 PIN 다이오드가 중성자 누적 조사선량에 대해 선형적인 변화 특성을 나타냄을 확인할 수 있고, 이때의 감도는 $14.63 \pm 0.13 \text{ mV/rad}$ 이다.

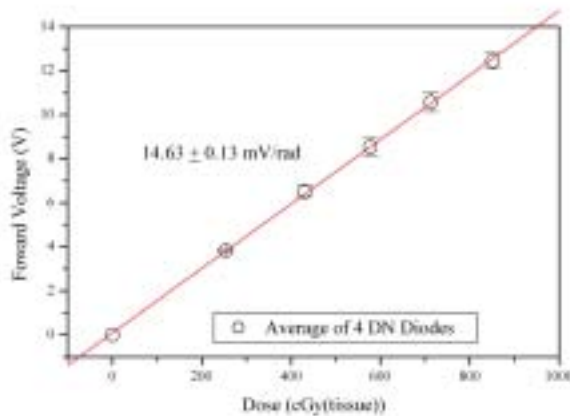


그림 12. PIN 다이오드의 NIST Cf-252 조사시험 결과

3.3 센서모듈 및 외부 측정단자

그림 13은 제작된 센서 모듈의 실물사진으로 pMOSFET와 PIN 다이오드, 그리고 9V 건전지로 구성되어 있다. 건전지의 전압은 감압되어 pMOSFET의 게이트(Gate)에 5V가 인가되고 있는데, 이는 pMOSFET의 감마선 감도를 증가시키기 위한 용도이다. 다수의 MOSFET과 PIN 다이오드를 적용함으로써 측정에서의 신뢰도를 향상시키기 위해 가용한 범위 내에서 3개의 MOSFET과 5개의 PIN 다이오드를 투입하였다. 원전 가동중 온라인 측정을 위해 접근이 가능한 안전 지역까지 소자의 각 단자를 연장한 측정단자를 방수 처리하여 제작하였다.



그림 13. 제작된 방사선 탐지용 센서모듈

제작된 센서 모듈을 그림 14(a)와 같이 원자로 전면부 감시 카메라용 기둥에 부착하고 센서 모듈로부터 방사선 준위가 낮은 안전한 지역으로 30미터(m)의 신호 케이블을 연장하여 그림 14(b)와 같이 측정단자를 설치함으로써 임의의 시간에 실시간 측정이 가능하도록 하였다.



(a)



(b)

그림 14. (a)내방사선 카메라 근처에 설치된 방사선 센서모듈, (b)원격지에 설치된 측정단

4. 가동중 원전 원자로 감시 카메라에서의 피폭 방사선량 측정

4.1 피폭 방사선량 측정 방법 및 절차

원전 보수(Overhaul) 기간에 중수형 원자로 감시용 카메라의 근접 위치에 방사선 센서 모듈을 부착하고 케이블로 연결된 측정단자를 가동중 접근이 가능한 곳에 설치한 다음, 원전 기동 약 2개월 후에 측정단자로부터 카메라용 방사선 센서의 특성변화를 온라인 측정하는 절차를 수행하였다. 표 2에는 센서의 설치일과 측정일, 그리고 이 기간 동안의 경과일 수를 나타내 주고 있다.

표 2. 내방사선 카메라 방사선 감지용 센서와 핵연료 교체 작업

설 치 일	2003-03-14
측 정 일	2003-06-17
원전 운전일수	95일

4.2 시험결과 및 분석

센서 설치 후 약 2개월이 지난 다음에 측정단에서 센서의 방사선 특성변화의 온라인 측정을

시도하였다. 감도를 향상시키기 위해 pMOSFET의 게이트에 인가한 배터리의 전압은 상당한 기간이 경과하였음에도 불구하고 계속 일정한 상태가 유지됨을 확인하였다. 표 3은 측정단자에서 온라인 측정된 각 소자의 특성변화 값으로서 10 μ A의 소스(source) 인가 정전류에 대한 pMOSFET 게이트 전압과 10mA 인가 정전류에 대한 PIN 다이오드 양단 전압 변화량이다.

표 3. 센서의 특성변화 측정결과

	$V_{T0(Avg)}(V)$	$V_{T1(Avg)}(V)$	$\Delta V_{T(Avg)}(V)$
pMOSFET	2.47	13.53	11.06
PIN 다이오드	4.75	8.04	3.29

각 센서에서 측정된 출력 전압의 변화량을 도출한 각각의 교정 함수에 적용하면 이들 센서의 특성 변화량에 대응한 방사선 피폭량을 구할 수 있게 된다.

3.2.1 감마선 피폭선량

pMOSFET의 코발트(Co-60) 선원의 방사선량에 대한 문턱전압의 변화량(ΔV_T)에 대한 관계 함수식에 측정된 센서모듈의 출력 변화량을 대입하면 감마선의 누적선량은 표 4에서 처럼 각각 13.224krad로 계산된다.

표 4. 원자로 감시용 카메라 지점의 감마선 피폭선량

pMOSFET의 ΔV_T (V)	11.56
피폭 감마선량(krad)/95일	13.224
피폭 감마선량(krad)/1년	50.81

구해진 감마선 선량은 원자로 95일 가동기간에 피폭된 방사선량에 해당하므로, 이 양을 연간 누적 피폭 방사선량으로 환산하면 약 50.81krad로 추정된다.

3.2.2 속중성자 피폭선량

측정된 PIN 다이오드의 출력전압 변화량은 3.29V이므로 Cf-252에 대한 교정 감도함수를 적용하면 속중성자의 누적 피폭선량은 224.71rad로 예상된다. 이 값을 연간 피폭 중성자선량으로 환산하면 863.36rad으로 예상된다.

표 5. 원자로 감시용 카메라 지점 속중성자 피폭선량

PIN 다이오드의 ΔV_T (V)	3.29
피폭 중성자선량(rad)/95일	224.71
피폭 중성자선량(rad)/1년	863.36

원자로 전면부 카메라 지역에서 측정된 연간 예상 감마선 누적 피폭량은 50.81krad로서 1.5년

의 중수형 원전 한주기 운전기간을 고려할 경우 76.2krad의 감마 방사선에 피폭되는 것으로 추정된다. 이 방사선량은 텅스텐과 함께 고안한 차폐 방식을 적용하여 108krad의 내방사선 설계치로 제작된 CCD형 시작품 내방사선 카메라에 거의 영향을 미칠 수 없는 수준이다. 그러므로 설치된 시작품 카메라의 영상에서 방사선 영향에 의해 나타나는 상당한 준위의 백색잡음의 원인은 낮은 방사선 차폐준위가 아님을 알 수 있다. 원자로 감시용 카메라는 높이 18미터에 달하는 대형의 원자로를 상시 관측하게 되므로 카메라의 차폐 구조방식에서 그 원인을 찾는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 즉 원자로에서 방출되는 방사선중 원자로 상단부로부터의 방사선이 제작된 카메라 광반사식 입구를 사선 방향으로 직진하여 직접 카메라에 도달하게 되고, 이로 인해 카메라 관측영상에 백색잡음을 발생시키게 될 가능성이 크다. 따라서 카메라를 원자로 전면부 반대 방향으로 위치시키고, 광 반사경을 이용하여 후위에 위치하는 원자로를 감시하도록 하는 차폐체의 구조개선 방법을 통하여 카메라의 직접 노출 문제를 해결하고자 연구 중이며 현재 관련 차폐구조의 설계를 마무리하였다.

5. 결론 및 향후계획

고가의 기존 내방사선 카메라를 대신하기 위해 제작된 CCD형 시작품 내방사선 카메라가 월성 원전 원자로 전면부 감시용으로 현장 적용 시험중에 있으며, 개발된 카메라의 현장 성능평가 및 기능개선을 위해 원전 가동 중 카메라에서 피폭되는 실제 방사선량 측정시험을 수행하였다. PIN 다이오드와 pMOSFET, 두 종의 반도체 소자를 사용하여 중성자와 감마선의 연간 피폭선량 정보를 분리하여 측정하고 한주기 운전중 카메라에서 피폭되는 방사선량을 도출하였다. 측정 결과 원자로 전면부 카메라 지역에서의 한주기 운전기간중 피폭되는 감마 방사선의 양은 76.2krad로 추정되었다. 실험 결과를 통해 시작품 카메라의 방사선 차폐준위는 충분함을 확인하였고, 현장 카메라에서 발생하는 방사선 영향을 방지하는 바람직한 방법으로 차폐체의 구조 개선책을 제시하였다.

참 고 문 헌

- [1] 황선태 편저, "방사선", 공업진흥청 정밀측정교제, 85-007, pp.6-13, 1985
- [2] 원송희 편저, "CCTV 시스템 설계의 기법", 도서출판 세화, 1996
- [3] P. N. Cooper: *Introduction to Nuclear Radiation Detector*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 84~96, 1986.
- [4] 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.
- [5] Andrew Holmes-Siedle: "*The Space-Charge Dosimeter*," Nuclear. Instruments. & Methods, vol. 121, pp. 169~179, 1974.
- [6] N. H. Lee et all, "*Development of Fast Neutron Detector and its Characteristics*", KIEE Annual Summer Cong., 2003.
- [7] 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.
- [8] 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.

- [9] 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.