

적외선 열영상을 이용한 가시광 통신모듈의 고선량 감마선조사에 따른 열화 분석

Analysis of Visible Light Communication Module Degraded by High Dose-Rate Gamma Irradiation using Thermal Infrared Image

조재완*, 홍석봉, 구인수
(Jai-Wan Cho¹, Seok-Boong Hong¹, and In-Soo Koo¹)

¹Korea Atomic Energy Research Institute

Abstract: In this paper, the degradation evaluation method of VLC (Visible Light Communication) wireless module after high dose rate gamma-ray irradiation using the thermal infrared camera is proposed. First, the heating characteristics of the active devices embedded in the VLC wireless module during the condition of normal operation is monitored by thermal infrared camera. By the image processing technique, the trends of the intensity of the heat emitted by the active devices are calculated and stored. The feature of the blob area including the area of the active devices in the thermal infrared image is extracted and stored. The feature used in this paper is the mean value of the gray levels in the blob area. The same VLC module has been gamma irradiated at the dose rate of about 4.0 kGy/h during 72 hours up to a total dose of 288 kGy. And then, the heating characteristics of the active devices embedded in the VLC wireless module after high dose gamma ray irradiation is observed by thermal infrared camera. The high dose gamma-ray induced degradation of the active devices embedded in the VLC module was evaluated by comparing the mean value of the blob area to the one of the same blob area of the VLC module before the gamma ray irradiation.

Keywords: visible light communication, thermal infrared image, high dose-rate gamma ray, degradation

I. 서론

전자기파를 전송매체로 이용하는 무선통신기술은 원자로 건물내부에 위치한 주요 계통, 구조물 및 기기(SSC: System Structure and Components) 등에 전자기파, 고주파 간섭을 야기할 수 있으므로 신중한 접근이 요구되며, 엄격한 안전성 평가가 요구된다[1]. 원자로 건물내부의 센서통신망 적용을 위해서는 무선기기에 대한 전계강도, 지향성, 주파수 대역 등에 대한 기술 기준 등이 마련되어야 하며, 내환경 시험, 신뢰성 검증 및 안전성 평가 등이 선행되어야 한다. 이와 같은 제반 절차에 따른 인허가 과정 등이 미국 원자력 규제위원회(NRC: Nuclear Regulatory Commission) 또는 NRC 인준기관 등에 의해 독립적으로 수행되어야 하며, 원자력 안전성 기준을 충족하는 경우에 한해서 규제지침서 또는 표준문서로 발행된다. 현재는 무선기기 사용에 관한 규제지침 또는 표준문서 등이 마련되지 않았기 때문에, 상업운전 중인 원전을 포함하여 건설중인 원전에도 원자로 건물 내부의 센서통신망 체계로 무선통신이 도입되지 않고 있다. 이와 같은 안전성 평가, 신뢰성 검증 및 표준문서 발행에 상당한 기간이 소요되기 때문에, 개념설계 단계에 있는 차세대 원전의 센서 통신망 체계에서 무선통신기술이 유력하게 검토되고 있다[2,3]. 한편, 후쿠시마 원전사고의 사례에서 볼 수 있듯이, 유선(케이블) 체계로 구축되어 있는 원전 센서통신망체계가 대지진의 충격에 의해 붕괴되어 원자로 안전계통의 주요 변수들이 제공

되지 않았다. 노심손상-수소폭발로 이어지는 중요 시간대에서 적절한 초동 대처가 이루어지지 않아 대규모 방사능 물질의 대기 방출을 가져온 원자력 중대사고를 방지 및 완화할 수 없었다[4]. 대지진에 의해 원전 센서 통신망체계가 붕괴된 것은 여러 복합적 요인이 작용한 것으로 보이지만, 원자로 안전계통의 센서에서 주체어실까지 연결되는 유선전송체계도 주요 원인중의 하나라고 추정된다. 따라서, 유선에 의존하는 원전센서 통신망 체계의 신뢰성을 개선하기 위해서는 무선통신기술에 의한 다양성 수단을 확보하여 원전 센서통신망의 건전성을 보완하여야 할 것으로 생각된다.

가시광 광파를 전송매체로 이용하는 가시광 무선 통신기술은 원자로 건물내에 위치한 SSC 등에 전자기파 간섭을 야기하지 않는다. 가시광 발광소자인 LED의 기본 재료는 III-V 족 원소에 기반한 반도체 재료를 이용하므로 IV족 원소인 Si 물질에 비해 에너지 밴드갭이 높으므로 방사선에 강한 것으로 보고되고 있다[5]. 현재 건설중인 상용 발전소의 설계 수명은 60년이며, 이를 고려하여 원자로 건물내부의 고선량 감마선 환경에서 60년 동안 피폭되는 누적피폭선량 기준의 감마선을 LED에 조사하여 생존성 평가 시험을 수행한 결과 LED의 성능열화는 관측되지 않았다[6]. LED 소자의 고속 변조특성은 고속, 대용량의 정보 전송을 가능하게 한다. 또한 가시광 광파는 전자기파 무선에 비해 파장이 짧기 때문에 직진성(LOS: Line-of-Sight)이 우수하므로 전송 선로 구축이 용이하다. LED가 갖고 있는 고속 변조, 고휘도 발광과 내방사선 특성 등을 이용한 가시광 무선 통신기술도 원자로 건물내부의 센서 통신망에 적용될 수 있을 것으로 판단된다. 이를 위해서는 가시광 무선 통신기술의 내환경(고선량 감마선) 성

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2011. 3. 17., 수정: 2011. 7. 14., 채택확정: 2011. 10. 24.

조재완, 홍석봉, 구인수: 한국원자력연구원

(jwcho@kaeri.re.kr/boong@nanum.kaeri.re.kr/iskoo@kaeri.re.kr)

능평가가 요구된다. 내환경 성능평가에는 온도, 습도, 전자기파 및 감마선 영향 평가 등이 있다. 감마선 영향 평가는 설계기준사고 요건의 고선량을 감마선 피폭 평가와 원전설계 수명을 고려한 누적피폭선량 평가가 있다.

본 논문에서는 고선량 감마선 조사된 가시광 통신 모듈의 성능 열화 평가에 대해 기술한다. 가시광 통신 모듈은 고휘도 LED 들을 50개 이용하여 3개의 동심원 배열형태로 설계 제작하였다. 원자로 발전소의 원자로건물내에 위치한 생물학적 방사선 차폐벽(bio-shields) 들간의 거리가 3.5m~10m 이므로[7], 이들 간의 통신링크가 가시광 무선 전송링크로 구성되기 위해서는 3.5m LOS(line-of-sight) 통신 거리를 고려할 경우 40개 이상의 고휘도 LED 들이 소요되는 것으로 계산되었다 [8]. 일반적으로 전자소자(능동소자 및 수동소자)에 전류가 흐르면 소자가 갖고 있는 내부 고유저항에 의해 열이 발생한다. 이러한 열은 소자를 보호하고 있는 패키지(플라스틱)를 통해 외부로 방출된다. 플라스틱 패키지는 방사율이 거의 1.0에 가까우므로 적외선 열영상카메라로 관측할 경우에는 전자 소자에서 발생하는 열 변화를 측정할 수 있다. 적외선 열영상 카메라는 원격 비파괴 방법으로 주요 구조물의 이상상태를 점검하는데 유용한 수단이다. 온도 계측기능을 이용하여 정상상태와 비정상상태의 온도차이를 이용하여 고장여부를 판단한다. 본 논문에서는 적외선 열영상 카메라를 이용하여 각 전자소자의 고선량 감마선 피폭에 따른 열화를 평가하는 방법을 제안한다. 정상 동작환경(normal operation environment)에서 가시광 통신 모듈의 특성을 적외선 열영상 카메라로 관측한다. 관측된 적외선 열영상을 영상처리하여 가시광 통신 모듈에 내장된 능동소자의 발열을 시간 경과에 따른 프로파일분포 곡선으로 추출하고 저장한다. 영상처리 기법을 적용하여 통신 모듈에 내장된 능동소자들을 Blob 영역으로 설정한다. Blob 영역들의 특징점(무게중심, Contour (윤곽선), 평균, 최대/최소 값 등) 들을 추출하여 저장한다. 동일한 가시광 통신모듈에 대해 설계기준사고 요건의 고선량을 감마선을 원전설계수명에 해당하는 누적피폭선량기준에 도달할 때까지 조사한다. 고선량 감마선 조사후의 가시광 통신모듈에 대해 정상 동작환경에서 평가되었던 동일한 Blob 영역들에 대해 동일한 영상처리 알고리즘을 적용하여 특징점을 추출하여 비교함으로써 능동소자의 열화를 평가할 수 있다. 본 논문에서는 특징점으로 평균값을 이용하여 가시광 통신 모듈에 내장된 능동소자의 열화를 평가하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서 실험 및 평가에 사용한 가시광 통신모듈의 설계에 대해 기술하고, III 장에서는 적외선 열영상 카메라를 이용한 성능열화를 비교 측정하고, 그 결과를 IV 장에서 기술하고, V 장에서 결론을 맺는다.

II. 가시광 통신 모듈 설계 제작

가시광 무선통신을 원자로건물 내부의 센서통신망으로 구축하기 위해서는 생물학적 방사선 차폐벽을 활용하여야 한다. 원자로건물 내부의 생물학적 방사선 차폐벽(bio-shields)들 사이의 최소 LOS (Line-of-Sight) 직선 거리는 3.5m이고, 최대 직선거리는 10m 정도이다. 그림 1에 원자로 건물내의 방사선 차폐벽을 포함한 주요 구조물 등의 위치를 나타내고 있다.

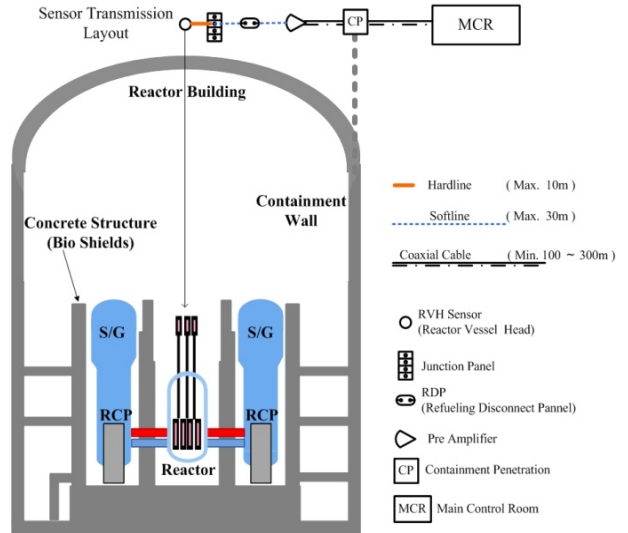


그림 1. 원자로건물 내부의 방사선 차폐벽 구성도.
Fig. 1. Bio-shields layout in the containment of reactor building.

원자로 건물 내의 유선 케이블에 의한 센서 전송체계는 그림 1의 상부에 표시한 것과 같이 개념적으로 표현할 수 있다. 원자로 용기 상부의 아날로그 센서신호는 내방사선 특성이 우수한 하드라인, 케이블의 유연성이 뛰어난 소프트라인, 동축 케이블 등에 의한 점대점(point-to-point) 실배선 연결을 통해 주 제어실 (또는 전기 기기실)에 위치한 원격 다중화 모듈(RMU: Remote Multiplexing Unit)까지 전송된다. 센서와 RMU 사이의 신호전송케이블이 최소 100m 이상 요구되는 것은 방사선(감마선, 중성자) 차폐벽 등의 구조물을 우회하여 연결되기 때문이다.

RMU는 센서신호를 A/D 변환하고 센서의 종류(온도, 레벨, 압력, 유량 등), 측정위치, 시간, 측정 값, 목적지 등을 데이터 패킷으로 가공하여 통신망을 통해 주 제어실에 위치한 안전 계측계통에 전송한다. 그림 1에서, 원자로(reactor)와 증기발생기(S/G: Steam Generator) 사이에 연결된 원자로냉각재 배관에 설치되는 RTD 온도센서의 값을 인근의 생물학적 방사선 차폐벽까지 가시광 무선데이터로 전송하기 위해서는 최소 3.5 m 이상의 LOS 공간 광전송거리가 요구된다. 본 논문에서는 원자로냉각재 배관에 설치된 RTD 온도센서의 값을 인근의 생물학적 방사선 차폐벽까지 RS-232C 인터페이스로 전송한다고 가정하고, RS-232C 신호를 직접 광변조하는 방식의 RS-2323C 가시광 무선전송 링크를 설계 제작하였다. 그림 2는 가시광 송신회로의 구성도를 나타내고 있고, 그림 3은 제작된 PCB 도면을 나타내고 있다. 제작된 RS-232C 가시광 송신 모듈은 고선량 감마선 조사후의 특성을 평가하기 위해 제조 공정에 따른 부품을 배치하였다. 그림 3에서 동심원 형태로 배열된 고휘도 LED 50개(2×25)를 20mA로 구동하기 위해서는 0.5A 이상의 구동전류가 요구된다. 이러한 구동전류를 최대 256kbps의 전송율로 스위칭하기 위해 N채널 MOSFET 구조의 고속 전력스위칭 소자를 사용하였다. RS-232C 인터페이스 신호를 TTL 레벨의 신호로 변환하는 RS-232C 드라이버 소자는 CMOS 공정의 MAX232를 사용하였으며, 변환된 TTL 신호의 버퍼로 CMOS/TTL 논리소자를 배치하였으며 CMOS/

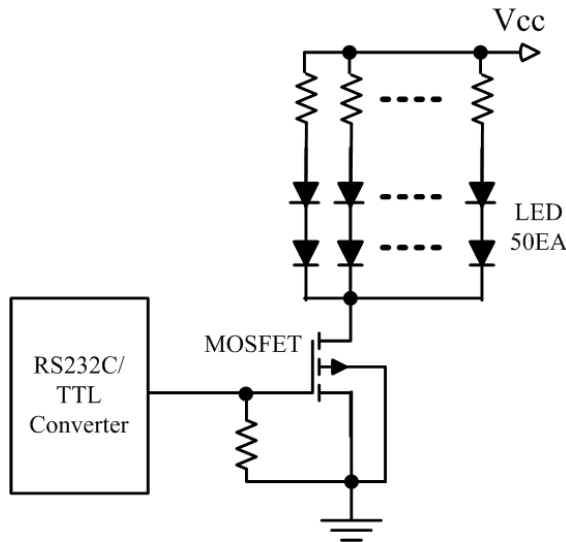


그림 2. RS-232C 가시광 송신회로의 구성도.
Fig. 2. The VLC transmission circuit diagram of RS-232C interface.

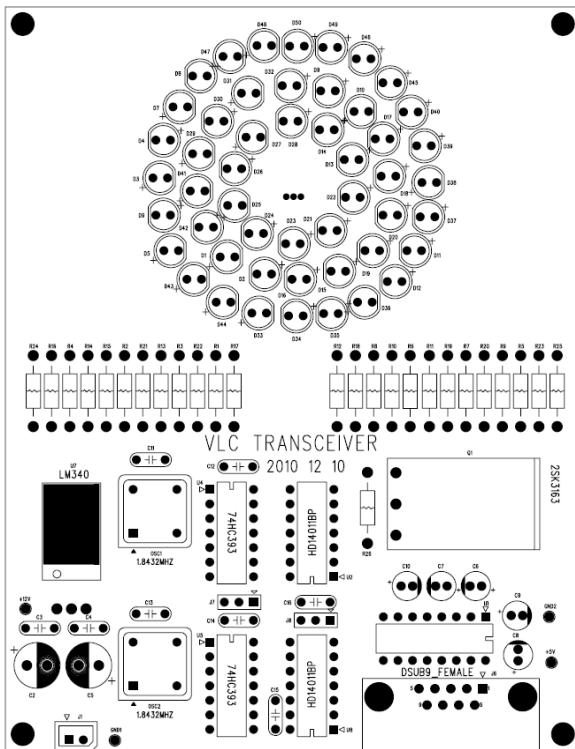


그림 3. RS-232C 가시광 송신회로의 PCB 도면.
Fig. 3. The PCB pattern of RS-232C VLC transmission circuit.

TTL 소자에 전원을 공급하는 Power Regulator 소자는 바이폴라 공정의 소자를 배치하였다. 수동소자로는 세라믹 계열의 커패시터와 전해 콘덴서를 능동소자 주변에 배치하였다.

III. 적외선 열영상 카메라에 의한 가시광 송신모듈의 열화성능 관측

원자력 발전소의 원자로 내부에 설치되는 기기 및 센서는 IEEE Std. 323(2003)에서 정의하는 Class 1E 기기 요건을 만족함과 동시에 설계기준사고(DBA-design basis accident) 요건에

서의 생존성이 검증되어야 한다. 원자로 건물 내부에 설치되는 RTD 온도 센서의 설계기준사고시의 감마선 선량을 요건은 4kGy/h 이다[9]. 본 논문에서는 가시광 통신 모듈에 대해 RTD 센서의 DBA 요건에 해당되는 4 kGy/h의 선량율로 72 시간 조사하였다. Class 1E 기기의 보증 수명이 10 년임을 감안하면 원자로냉각재배관의 온도를 감시하는 RTD 센서의 누적 피폭선량(TID: Total Irradiation Dose) 은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$TID_{RTD} = RTD_{dose\ rate} \times Operation_{hours}$$

$$TID_{RTD} = 2 \left[\frac{Gy}{h} \right] \times 10[yr] \times 365 \left[\frac{d}{yr} \right] \times 24 \left[\frac{h}{d} \right] = 175.2kGy \quad (1)$$

바이폴라 트랜지스터의 경우, 저 선량율에 노출되었을 때 고선량율 피폭의 경우보다 소자의 손상이 큰 것으로 보고되고 있다. 이를 저선량율 감도(ELDRS: Enhanced Low Dose Rate Sensitivity)로 정의하고 있으며, 우주항공산업의 주요기에 적용되고 있다. 일반적으로 우주의 방사선 환경은 지상에 위치한 원자력시설보다 낮기 때문에 위성, 우주 탐사선 등에 탑재되는 바이폴라, BiCMOS 구조의 소자에 대해서는 ELDRS 평가가 적용된다. 우주항공산업에 적용되는 고선량율 피폭기준은 1 Gy/sec(3.6 kGy/h)이고, 저선량율은 50 uGy/sec ~ 0.1 Gy/sec(0.36 kGy/h) 이다. 원자력 발전소는 누적피폭선량(TID: Total Irradiation Dose) 기준이 적용된다. 원자로 건물 내부를 3개의 환경 범주(category) A1, A2, B로 구분하고, 환경 범주에 따른 설계기준사고의 TID 요건은 각각 330 kGy/182 days, 20.45 kGy/182 days, 20 kGy/182 days로 정의된다[10]. 일반적으로 설계기준사고에 대한 원자로 건물내부의 온도/압력 추이를 보면 사고 발생후 10 ~ 1,000 sec 기간 동안 온도와 압력이 급격히 증가하다가 약 12일 정도(1,000,000 sec)에 걸쳐 서서히 감소하며 그 이후로는 6개월 여동안 일정한 상태를 유지한다.

실제 후쿠시마 원전사고에서 측정된 원자로 격납 건물내의 대기 방사선 데이터의 추이를 보면 3월 중순의 방사선 감지기 CAMS (Containment Atmospheric Monitoring System) 수치는 약 200 Sv/h (Gy/h)의 정점에서 서서히 감소하여 5개월 여 지난 8월 초순에는 20 Sv/h를 보이고 있다. 이를 누적피폭선량기준으로 계산하면 108 kGy 정도이다[11]. 본 논문에서는 감마선 선량을 측정에 대한 불확실성을 고려하여 50% 이상의 여유도를 두어 288 kGy로 조사하였다. 위의 수식에서 RCS 주변의 감마선 선량율은 최대한 보수적으로 선정하였다. 그림 4에 감마선 조사 전후의 가시광 송신모듈의 특성을 나타낸다. 그림 4에서 LED 전구는 고선량 감마선 조사이후에 갈색으로 착색이 되어 있으나 전광 특성은 차이가 없었다. CMOS 공정의 RS-232C 통신 드라이버(MAX232) 소자와 CMOS 논리 소자(4011)는 기능이 상실되었다. 그리고 MOSFET 소자도 스위칭 기능이 상실되었다. CMOS/TTL 소자에 전원을 공급하는 Power Regulator (7805) 소자는 고선량 감마선 조사 후에도 정상 동작함을 확인하였다. 정상 보드에 고선량 감마선 조사후의 능동소자를 교체하는 방식으로 실험을 통해 동작을 확인하였다. 수동소자인 전해콘덴서도 고선량 감마선 조사후에는 전원의 ripple을 평활하는 기능이 열화

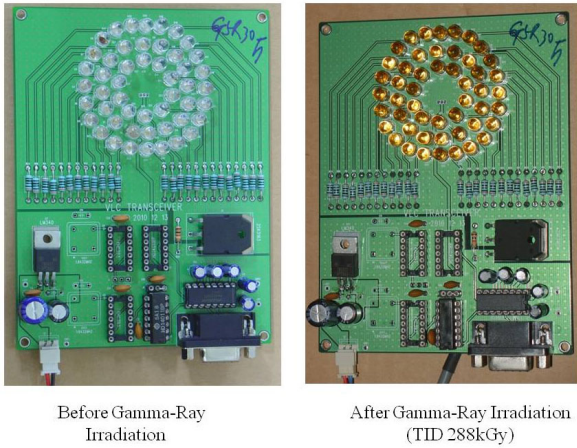


그림 4. 고선량 감마선 조사전후의 RS-232C 가시광 송신모듈.
Fig. 4. RS-232C VLC TX module before and after high dose-rate gamma irradiation.

되었음을 확인하였다. 그림 4 우측의 고선량 감마선 조사된 보드에 정상동작의 CMOS 소자(4011, MAX232)들을 교체하여 논리동작 여부를 점검하였다. 세라믹 콘덴서가 장착된 4011 소자에는 NAND 기능이 정상적으로 동작하였으나 MAX232는 RS-232C 인터페이스 신호를 TTL 신호로 변환하지 못하였다. 이는 MAX232의 기능을 위한 전해콘덴서의 전원 평활기능이 열화된 것으로 판단된다. 그림 4에 나타난 보드를 소자 장탈착이 가능한 평가보드로 제작하여 전해 콘덴서의 성능 열화를 추후 검증하고자 한다.

IV. 실험 및 결과

고선량 감마선 피폭에 따른 가시광 송신모듈에 내장된 능동소자의 열화를 평가하기 위해 적외선 열영상카메라를 이용한다. 그림 5, 6에 실험 구성도와 실험 장면을 나타낸다. 그림 5에서 전류계를 이용하여 가시광 송신모듈이 소비하는 전체 전류를 측정한다. 가시광 송신모듈에 소비되는 전력은 12V/0.54A 로 측정되었으며, 고선량(288 kGy TID) 감마선 조사후에는 가시광 송신모듈의 소비전력이 12V/0.47A로 감소하였다. 파형 발생기는 RS-232C 인터페이스 신호의 데이터 전송율에 따라 LED 광원 모듈을 ON/OFF 제어한다. 고선량 감마선 조사후에 가시광 송신모듈에 내장된 CMOS 계열의 논리소자(MAX232, 4011) 등의 동작특성을 확인하기 위해 파형발생기를 사용한다. RS232C Driver (MAX232) 소자의 경우 주변에 극성을 갖는 콘덴서(수동 소자)가 연결된다. 고선량 감마선 조사후 이들 수동소자의 열화를 확인하기 위해 파형 발생기를 이용한다. 고선량 감마선 조사에 의해 파손된 MAX232 소자를 제거하고 신규의 MAX232 소자를 삽입하여 파형의 동작특성을 확인함으로써 수동소자(극성을 갖는 전해 콘덴서)의 성능열화를 간접적으로 확인할 수 있다.

그림 5, 6에서 실험에 사용한 적외선 열영상카메라는 중적외선(3~5 μ m) 파장대의 스펙트럼 특성을 갖고 있다. 적외선 열영상 카메라는 2개의 출력신호를 갖고 있다. NTSC 신호는 모니터에 연결하여 시편 관측영상의 조점을 조절하는데 사용하고, RS-170 신호는 영상처리시스템에 연결하여 가시광 송신모듈의 열화 특성을 관측하였다. 감마선 조사전의 가시

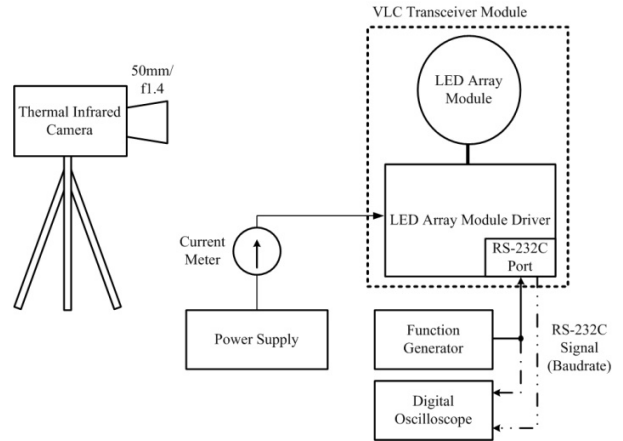


그림 5. 가시광 송신모듈의 열화관측을 위한 실험구성도.
Fig. 5. Experimental layout for the degradation measurement of the VLC TX modules.

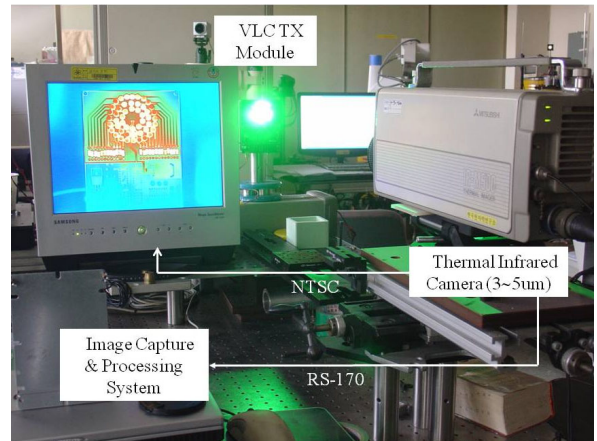


그림 6. 적외선 열영상 카메라를 이용한 가시광 송신모듈의 열화관측실험.
Fig. 6. The degradation measurement of the VLC TX modules using thermal infrared camera.

광 송신모듈을 대상으로 4개의 능동소자 (MOSFET, 7805, 4011, MAX232) 영역을 blob 으로 설정하고 각 blob의 발열 특성을 시간 경과에 따른 평균 밝기 값으로 저장한다. 고선량 감마선 조사후의 동일한 가시광 송신모듈을 대상으로 전원 공급후 시간 경과에 따른 4개 능동소자의 동일한 blob 영역의 평균 밝기를 구하고 이를 감마선 조사전의 특성과 비교하였다. 고선량 감마선 조사에 따른 가시광 송신모듈의 성능 열화를 평가하기 위해 먼저 정상동작환경(normal operation environment)에서 가시광 통신 모듈의 특성을 적외선 열영상 카메라로 관측하고 통신 모듈에 내장된 능동소자의 발열을 시간 경과에 따른 프로파일 분포 곡선으로 추출하고 DB로 저장하였다. 본 논문에서 정상 동작환경은 고준위 감마선 조사시설에 투입되기 전에 실험실 환경에서의 동작환경으로 정의한다. 가시광 송신 모듈에 탑재된 능동 소자들을 blob 영역으로 설정한다. 가시광 송신모듈에 전원을 공급하면 blob 영역으로 설정된 능동 소자의 표면으로 열이 방출되며 이를 적외선 열영상 카메라로 관측하면 발열특성이 그레이레벨(밝기) 값으로 나타난다. 본 논문에서는 각 blob 영역들의 평균

밝기를 특징점으로 추출하였다. 적외선 열영상 카메라를 중심으로 감마선 조사전의 가시광 송신모듈의 위치와 감마선 조사후의 가시광 송신 모듈 시편의 위치가 미세하게 다를 수 있기 때문에 평균값으로 선정하였다. 능동소자의 전체 영역을 포함하도록 blob 영역을 설정하고 감마선 조사전과 조사후의 각 blob 영역의 면적은 동일하게 하였다. 그러나 감마선 조사전과 조사후의 시편위치의 편차를 고려하면, 각 blob 영역의 시작점 좌표는 1~2 픽셀 오차가 발생할 수 있다. 시작점 위치편차에 대한 오차를 줄이기 위해 성능 열화의 특징점 비교 대상으로 blob 영역의 평균 값을 취하였다. 실험은 2 과장대의 시편에 대해 수행하였다. 일반적으로 고휘도 LED 들 중에서 가장 밝은 녹색(green) 과장대의 가시광 송신모듈과 실내 조명용으로 활용도가 높은 백색 과장대의 LED 모듈을 대상으로 열화 성능을 평가하였다. 그림 7은 적외선 열영상 카메라로 관측한 RS-232C 가시광 송신모듈을 나타낸다. 그림 7에서 좌측의 blob (Power Regulator)를 시작으로 시계 방향으로 MOSFET (2SK3163), RS232C Driver (MAX232) 및 CMOS 로직 (4011) 소자의 blob 영역 설정을 각각 나타낸다. 그림 7의 우측 상단에 문자가 나타나는 것은 고선량 감마선 조사후에 시편 우측에 검은색 매직 잉크로 감마선 조사선량을 표기한 것이 적외선 열영상 카메라에 관측된 것이다. 검은 색의 매직 잉크는 방사율이 1.0에 가까운 값이므로 적외선 열영상 카메라라는 검은색 매직 잉크 표면을 통해 방사되는 PCB 보드의 열을 대부분 감지할 수 있다. 그림 7의 좌측 blob 영역인 Power Regulator (7805) 소자의 경우 heat sink 기능을 하는 Gnd 단자가 방사율이 매우 낮은 금속면으로 되어 있기 때문에 적외선 열영상 카메라는 플라스틱 패키지의 금속면에서 방사되는 열을 감지하지 못하고 있음을 나타낸다.

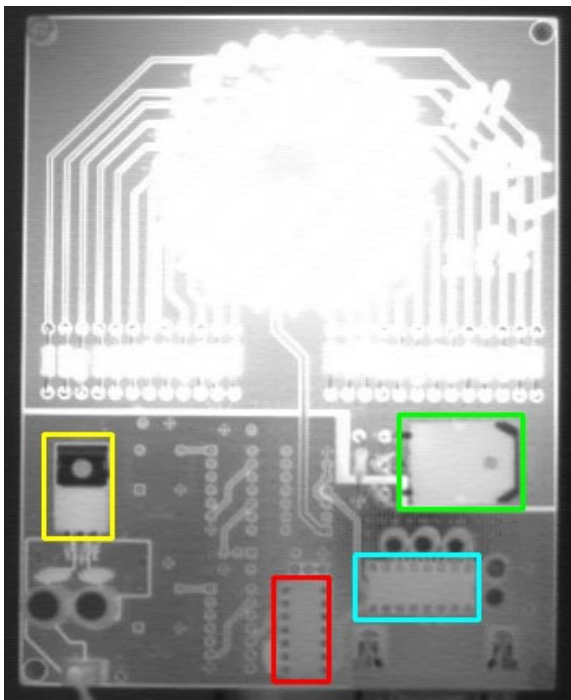


그림 7. 능동소자의 blob 영역 설정.
 Fig. 7. The blob area setup of the active devices in the thermal infrared image of the VLC TX module.

그림 8은 가시광 송신 모듈에 내장된 능동소자들의 시간 경과에 따른 발열 특성을 적외선 열영상 카메라로 관측하고 이를 영상처리하여 구한 평균값기 분포를 나타내고 있다. 그림 8에서 X 축은 적외선 열영상 카메라의 관측영상 프레임 수를 나타낸다. Y 축은 각 능동소자의 blob 영역의 휘도(gray level) 성분의 평균값을 나타낸다. 그림 8은 영상획득 및 처리 속도가 23frames/sec 로 계산되었으며 가시광 송신 모듈에 전원이 공급된 후 약 35,000 frames (25 min) 동안의 관측결과를 나타낸다. 가시광 송신모듈에 전원이 공급된 후 약 3분 경과 하였을 때에 Power Regulator, MOSFET 소자의 온도가 급격히 상승하여 saturation되고 있음을 보이고 있다. 약 10,000 frames (7.23 min) 경과후에 RS-232C 통신 소자의 표면 온도가 상승하고, CMOS 로직(4011)은 25,000 frames (18.11 min.) 경과후에 4011 소자의 온도가 상승하고 있음을 나타내고 있다.

그림 9, 10은 고선량 감마선 조사된 가시광 송신 모듈 능동

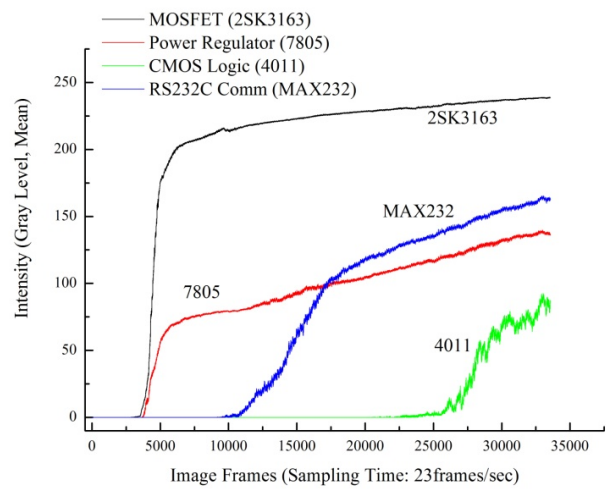


그림 8. 능동소자 blob 영역의 온도 분포 (고선량 감마선 조사전).

Fig. 8. The temperature profiles of the blob areas of the active devices (before high dose-rate gamma irradiation).

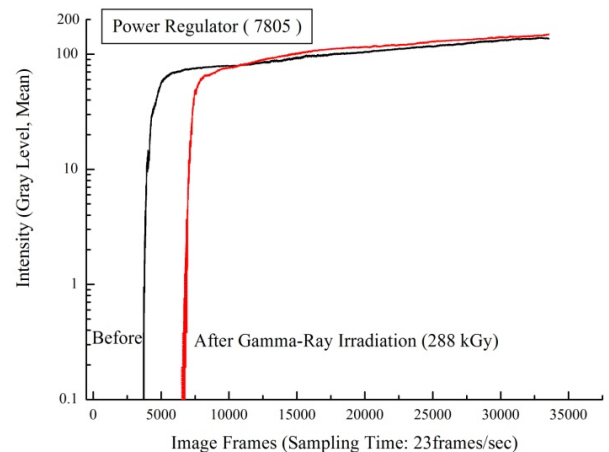


그림 9. 고선량 감마선 조사 전후의 power regulator 소자의 온도 분포.

Fig. 9. The temperature profile of power regulator device before and after high dose-rate gamma irradiation.

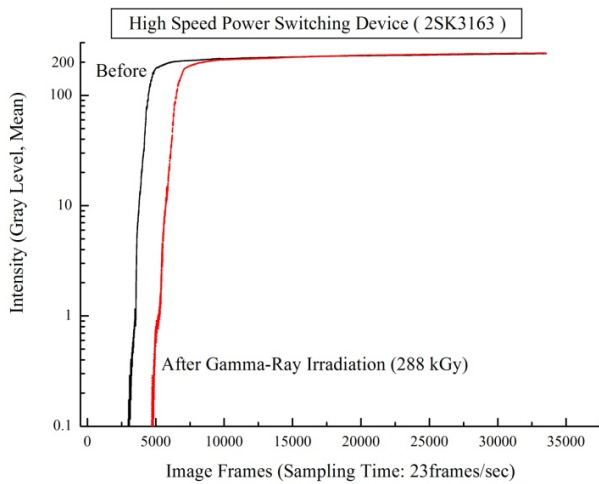


그림 10. 고선량 감마선 조사 전후의 고속 전력 스위칭 소자의 온도 특성.

Fig. 10. The temperature profile of high-speed power switching device before and after high dose-rate gamma irradiation.

소자들의 동작 특성을 적외선 열영상 카메라로 관측하고 이를 그림 8의 감마선 조사전의 열 특성과 비교한 결과를 나타내고 있다. 그림 9, 10에서 X 축은 관측 열영상의 처리 시간을 나타내며, 영상 frame 처리속도는 43.5 ms로 계산되었다. Y 축은 추출한 각 blob 영역의 밝기 성분을 평균한 값이다. 이때 적외선 열영상 카메라의 이득과 threshold level은 고선량 감마선 조사전과 동일한 조건에서 관측하였으며, 측정 환경의 복사열이 관측 시편에 영향을 미치는 것을 최소화 하기 위해 동일한 시간대(AM 8:00 전후)에서 측정하였다. 그림 9에서 감마선 조사전의 경우 3,760 frames 시간대부터 소자의 표면온도가 급격히 상승하는데 비해 고선량 감마선 조사후에는 Power Regulator (7805)의 동작 특성이 6,740 frames 시간대에서 소자 표면의 열이 급격히 상승하고 있다. 이를 시간으로 표시하면 2 분여 지연되어 소자의 열 특성이 나타나고 있다. 그림 10은 고속 전력스위칭 소자인 2SK3163의 고선량 감마선 조사 전후에 따른 소자표면의 열 특성을 나타내고 있다. 그림 10에서 감마선 조사전의 경우 3,138 frames 시간대에서 소자의 표면온도가 급격히 상승한다. 이에 비해 고선량 감마선 조사후의 경우 4,773 frames 시간대에서 소자표면의 열이 급격히 상승한다. 이를 시간으로 표시하면 약 71초 정도의 지연에 해당한다.

적외선 열영상 카메라를 이용하여 가시광 송신모듈에 사용된 2개 능동 소자 (7805, 2SK3163) 표면의 열특성을 측정된 결과 다음과 같은 사실을 확인할 수 있었다. 4 kGy/h의 고선량을 감마선으로 72시간 조사, 누적피폭선량 기준으로 288 kGy의 감마선 피폭후에도 생존한 2개 능동 소자 (7805, 2SK3163)는 감마선 조사 전에 비해, 소자표면의 발열 특성이 각각 129 sec, 71 sec 정도 지연되었다. 이는 소자 자체에 의한 원인인지, 아니면 주변 회로와의 상관 관계에 의한 것인지는 향후 규명하고자 한다. 적외선 열영상 카메라를 이용하여 고선량 감마선 조사에 따른 가시광 송신모듈의 주요 능동소자 표면의 발열 특성을 관측함으로써 원격 비파괴 방법으로 소자의 열화를 분석할 수 있음을 확인하였다. 적외선 열영상

카메라는 소형 경량이고 고속의 frame rate를 갖는 기술개발 추세를 보이고 있으므로 감마선 면선원에 의한 차폐가 용이하므로 온라인 분석도 가능할 것으로 판단된다. 가시광 무선 통신 모듈의 경우 loopback 시험과 온라인 감마선 조사시험을 병행할 경우, 감마선의 누적피폭에 따른 가시광 무선통신 모듈의 BER (Bit Error Rate) 저하 시점에 영향을 미치는 소자의 열 특성 규명도 가능할 것으로 판단된다. 그리고 IT 기반의 ASIC, FPGA, DSP 소자 등의 온라인 분석평가에도 적용할 수 있다. 정상환경과 고선량 감마선 피폭환경에서의 소자의 발열 특성을 적외선 열영상 카메라로 비교 관측함으로써 IT 기반의 가시광 송신모듈의 기능상실 시점을 정량적으로 판단할 수 있으며, 이를 토대로 원자로 건물내에 적용되는 기기 구조물 등의 Class 1E 기기요건을 충족하기 위한 차폐구조 또는 내방사화 설계분석 평가에도 활용될 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 적외선 열영상 카메라를 이용하여 가시광 송신모듈의 고선량 감마선 피폭에 따른 열화를 분석하는 방법을 제안하였다. 정상 동작환경에서 가시광 통신 모듈에 내장된 전자 소자들의 특성을 적외선 열영상 카메라로 관측하였다. 가시광 송신모듈에 내장된 전자소자들은 소자가 갖는 고유저항에 의해 전원이 공급되면 열이 발생하며, 이를 적외선 열영상 카메라로 관측하면 핫 스팟(hot spot)으로 나타난다. 핫 스팟으로 나타나는 전자소자들의 영역을 Blob 영역으로 설정한다. Blob 영역들에 대해 영상처리기법을 적용하여 Blob 영역에 대한 밝기(발열)의 세기정보를 추출하고 평균값들을 추출하여 저장한다. 그리고 동일한 가시광 송신모듈에 대해 설계기준사고 요건의 고선량 감마선을 조사하였다. 고선량 감마선 조사후의 가시광 송신모듈에 대해 정상 동작환경에서 평가되었던 동일한 Blob 영역들에 대해 동일한 영상 처리 알고리즘을 적용하여 특징점을 추출하여 비교함으로써 가시광 송신모듈에 내장된 전자 소자들의 열화를 분석할 수 있었다. 소형 경량의 휴대형 냉각식 적외선 열영상 카메라가 개발되어 시장에 출시되고 있다. 이는 면 선원인 고선량 감마선 선원에 대한 차폐체 설계/제작이 용이하게 됨을 의미한다. 따라서 이를 이용하면 정상환경과 고선량 감마선 피폭환경에서의 소자의 발열 특성을 적외선 열영상 카메라로 비교 관측함으로써 IT 기반의 가시광 송신모듈의 기능상실 시점을 정량적으로 판단할 수 있으며, 이를 토대로 원자로 건물내에 적용되는 기기 구조물 등의 Class 1E 기기요건을 충족하기 위한 차폐구조 또는 내방사화 설계분석평가에도 활용될 수 있다.

참고문헌

- [1] IEEE Std. 323, "Standard for qualifying class 1E equipment for nuclear power generating stations," 2003.
- [2] K. Korsah, R. Wetherington, R. Wood, L. F. Miller, K. Zhao, and A. Paul, "Emerging technologies in instrumentation and controls - An Update," NUREG/CR-6888, 2006.
- [3] B. J. Kaldenbach, "Assessment of wireless technologies and their application at nuclear facilities," NUREG/CR-6882, 2006.
- [4] Nuclear Emergency Response Headquarters, "Report of Japanese government to the IAEA ministerial conference on nuclear safety -The accident at TEPCO's fukushima nuclear

- power stations-," Government of Japan, Jun. 2011.
- [5] Japan Machinery Federation, "Inspection report on nitride compound semiconductor materials for the preparation of the interface technology strategy map," (in Japanese), 2006.
- [6] J. W. Cho, "VLC Data Transmission characteristics of high luminance LED irradiated by high dose-rate gamma-ray," *2009 IEK Fall Conference (in Korean)*, pp. 190-191, 2009.
- [7] J. E. Burns, "Design specification for NSSS integrity monitoring system for YGN 3&4 NPP," 10487-IC-DS-740, Rev.01, Combustion Engineering Inc., 1990.
- [8] J. W. Cho, S. B. Hong, and I. S. Koo, "Analysis of high luminance LED beam degradation for visible light communication," NPIC&HMIT 2010, Las Vegas, Nevada, Nov. 2010.
- [9] Weed Instrument, "N4000R-99 Series RTD Temperature Transmitter Nuclear Qualified," Product Data Sheet.
- [10] Combustion Engineering, "Qualification of Class 1E Electrical Equipment," 1985.
- [11] <http://www.gengikyo.jp/report/tohokutaiheiyoujishin.html>.



조재완

1984년 경북대학교 전자공학과 석사. 1987년~현재 한국원자력연구원 원자력융합기술개발부 책임연구원. 관심분야는 로봇 비전, 적외선 영상 신호처리.



홍석봉

성균관대학교 전자공학 박사. 현재는 한국원자력 연구원에서 IT 기반 통신망 기술개발과제를 책임지고 있으며 주 관심분야는 미래형 원전 통신망의 국제 표준 프로토콜 개발임.



구인수

충남대학교 전자공학 박사. 현재는 한국원자력 연구원에서 일체형 원자로 (SMART) I&C 시스템, 연구용 원자로 I&C 시스템 설계에 참여하고 있으며 주 관심분야는 원전 통신망 국제표준화 설계임.