

고 선량을 감마선 조사에 따른 렌즈의 열화

논문
58-7-28

A CCD Camera Lens Degradation Caused by High Dose-Rate Gamma Irradiation

조재완[†] · 이준구^{*} · 허섭^{*} · 구인수^{*} · 홍석봉^{*}

(Jai-Wan Cho · Joon-Koo Lee · Seop Hur · In-Soo Koo · Seok-Boong Hong)

Abstract - Assumed that an IPTV camera system is to be used as an ad-hoc sensor for the surveillance and diagnostics of safety-critical equipments installed in the in-containment building of the nuclear power plant, a major problem is the presence of high dose-rate gamma irradiation fields inside the one. In order to uses an IPTV camera in such intense gamma radiation environment of the in-containment building, the radiation-weakened devices including a CCD imaging sensor, FPGA, ASIC and microprocessors are to be properly shielded from high dose-rate gamma radiation using the high-density material, lead or tungsten. But the passive elements such as mirror, lens and window, which are placed in the optical path of the CCD imaging sensor, are exposed to a high dose-rate gamma ray source directly. So, the gamma-ray irradiation characteristics of the passive elements, is needed to test. A CCD camera lens, made of glass material, have been gamma irradiated at the dose rate of 4.2 kGy/h during an hour up to a total dose of 4 kGy. The radiation induced color-center in the glass lens is observed. The degradation performance of the gamma irradiated lens is explained using an color component analysis.

Key Words : IPTV, CCD Imaging Sensor, Gamma Ray, Color Center, Radiation, Color Component Analysis

1. 서 론

IT 기술의 발전에 의해 비전센서와 영상처리기능이 융합된 구조의 스마트 비전시스템이 산업현장에서는 유지보수, 공정제어관리 효율화를 위해 널리 활용되고 있다. 사람이 체감하는 외부 정보인지에 대한 시각의존도가 가장 높기 때문에 원자력 발전소의 주요 기기 및 설비 감시진단에 스마트 비전 기술을 적용하는 시도가 되고 있다. 현재는 영상기술이 BOP, 원자력 발전소 주변 경계 감시 분야 응용에 국한되고 있다. 초고속 광대역 통신기술, IPTV 기술의 발전으로 비전 센서와 영상정보처리 기능이 융합된 스마트 비전 기술이 격납건물 내부의 안전계통 주요 기기의 진단, 감시에 적용될 시대가 도래할 것으로 예측된다.

본 논문에서는 격납건물 내부의 안전계통 기기 주변에 감시, 진단용 스마트 비전기능을 갖춘 IPTV 카메라가 설치된다고 가정한다. 격납건물 내부는 Category A 등급으로 분류되며 격납건물 내부에 설치되는 주요 기기는 IEEE Std. 323-1974에서 정의하는 극한환경 요건에서 생존할 수 있는 내환경성이 요구된다. 이는 IPTV 카메라가 설계기준사고 요건의 고 선량을 감마선 폭발환경에서 생존성이 보증되어야 하는 것이다.

원자력발전소 격납건물 내부에 감시, 진단용 IPTV 카메라가 설치된다고 가정할 때, 감마선에 취약한 IPTV 카메라의 핵심 부품인 CCD 센서를 비롯하여 카메라 구동회로를 구성하는 FPGA, ASIC, 마이크로프로세서 등이 납, 텅스텐 등의 비중이 높은 물질에 의해 차폐되어야 한다. 즉, 잠망경 원리와 같이 관측창, 비반사 거울을 이용하여 빛의 경로를 끊어줌으로써 감마선이 직접적으로 센서 및 주변 전자소자에 영향을 미치는 것을 차단한다. 그러나 관측 창, 비반사 거울은 감마선에 직접 노출되므로 이에 대한 성능평가는 필요하다. IPTV 카메라의 관측 창에 해당하는 렌즈에 설계기준사고 요건에 해당하는 4kGy/h 정도의 고 선량을 감마선을 한 시간여 조사하였다. 렌즈에 칼라 센터 형성과 같은 열화가 관측되었으며 칼라 성분 분석을 이용하여 렌즈의 열화 특성을 분석하였다.

2. 원천 극한 환경 요건

스마트 비전기능을 갖춘 IPTV 카메라 시스템이 격납구조 내부의 극한환경에 적용되기 위해서는 설계기준사고 요건의 온도, 습도 및 감마선 폭발환경에서 센서의 강건성이 입증되어야 한다. 감마선 요건만을 고려하기 위해 스마트 비전 시스템은 일정한 두께의 납에 의해 차폐된다고 가정한다. 이를 그림 1에 나타낸다. 원천 격납구조 내부의 중앙에 원자로 압력용기가 위치하고 있다. 원자로에 장전된 핵연료 집합체를 연소할 때에 발생한 증기열을 이용하여 터빈을 돌려 전기를 생산하는 공정의 핵심에 원자로 냉각재 계통 (RCS,

[†] 교신저자, 정회원 : 한국원자력연구원 책임연구원

E-mail : jwcho@kaeri.re.kr

* 정회원 : 한국원자력연구원

접수일자 : 2009년 1월 6일

최종완료 : 2009년 5월 8일

reactor coolant system) 이 있다. 원자력 발전소가 정상 가동 중인 경우의 RCS 계통 주변의 감마선 선량 율은 0.5~2 Gy/h 로 낮다. 이를 표 1에 나타낸다[1]. 표 2는 전자소자의 제조 공정에 따른 누적 방사선 피폭 선량(TID, total integrated dose) 기준의 방사선 민감도 특성을 나타낸다[2].

표 2에서 내방사화 CMOS 공정으로 제작된 전자소자의 경우 TID 기준으로 10kGy 의 내방사화 특성을 갖기 때문에 고방사선 구역에 적용이 가능하지만 매우 고가이고 수요가 적기 때문에 주문 제작이외에는 거의 생산되지 않고 있다. 경제성 측면에서 상용(COTS, commercial-off-the-shelf) 소자를 활용하고자 하는 경향이 세계적인 추세이므로 본 논문에서도 상용 제조공정의 전자소자 적용을 고려한다. 일반적으로 1MeV 의 에너지 준위를 갖는 감마선 세기를 1/10로 줄이기 위해서는 27.9mm 두께의 납 차폐체가 필요하다[3].

표 1 원자력 발전소 격납건물 내부의 방사선 준위

Table 1 Radiation levels of in-containment building of nuclear power plant

Location	Gamma Dose Rate [Gy/h]
Reactor Vessel (Primary Shield Annulus)	100 ^(a)
RCS Loop (General area)	0.5
RCS Loop (Piping Area)	2
Outside RCS Loop	$5 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-3}$
Operating Deck	$5 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-4}$
[a] Calculated values	

표 2 공정에 따른 전자소자의 내방사선 특성

Table 2 Radiation hardness of electronic devices by fabrication process

공정	내방사선 특성 (TID, Gy)
NMOS	5 ~ 100
CMOS/Bulk	10 ~ 1K
CMOS/Bulk (내방사화)	20 ~ 10K
CMOS/SOS	10 ~ 1K
TTL, 저전력	1K ~ 100K
Schottky TTL, 저전력	1K ~ 100K
Advanced Schottky TTL, 저전력	200 ~ 10K
I ² L	200 ~ 10K
ECL	$\geq 50K$
Bipolar, BI-FET(Linear)	60 ~ 100K

RLAT(radiation lot acceptance test) 를 통해 TID 기준으로 1kGy 의 내방사선 특성을 갖는 CMOS 공정으로 제조된 ASIC, FPGA, 마이크로프로세서 등에 의해 IPTV 카메라 시스템이 설계/제작된다고 가정하면 표 2의 RCS 계통의 배관 설비 영역의 이상 상태를 감시하기 위한 IPTV 카메라

시스템은 500시간 정도 정상 동작됨을 알 수 있다. 그럼 1과 같은 구조로 IPTV 카메라를 약 56mm 두께의 납으로 차폐하면 원자력 발전소의 정상 가동조건에서는 약 50,000 시간(5년 8개월) 의 운용 가능 주기를 추정할 수 있다. NUREG-0588, IEEE Std 323-1974 등의 표준에서 정의하는 품질 보증 요건에 의하면 원전 격납건물 내부에 설치되는 Class 1E 센서, 기기는 5-40년의 품질보증 운용주기 동안 고장이 발생해서는 안된다[4]. 원자력 발전소에서 중대사고가 발생하지 않는다고 가정하면 감마선 차폐체에 둘러 쌓인 IPTV 카메라는 최소한 5 년의 운용 주기를 달성할 수 있다. 그러나 원자력 발전소의 격납건물 내부에 설치되는 기기 및 센서는 IEEE에서 정의하는 Class 1E 기기 요건을 만족함과 동시에 설계기준사고(DBA-design basis accident) 요건에서의 생존성이 검증되어야 한다. 격납건물 내부에 설치되는 온도, 압력, 레벨(수위) 트랜스미터 등의 설계기준사고시의 감마선 선량을 요건은 4kGy/h ~ 20kGy/h 분포를 보인다[5][6][7]. 본 논문에서는 스마트 비전 기능을 갖춘 IPTV 카메라 시스템이 RTD 센서 설치위치의 RCS 계통의 배관을 감시한다고 가정한다. 이와 같은 경우의 RTD 센서 설치위치의 DBA 요건의 감마선 선량율은 4kGy/h 이다.

그림 1의 차폐 카메라 구조에서 설계기준사고 요건의 고선량을 감마선에 직접 노출되는 부위는 비반사 거울(anti-reflection mirror) 과 투과창(window) 이다. 따라서, IPTV 카메라의 판측 성능에 영향을 끼치는 요인은 투과창과 비반사 거울의 고선량을 감마선 피폭에 따른 열화 특성이다. 투과 창도 CCD 카메라 렌즈와 같은 물질이므로 본 논문에서는 CCD 카메라 렌즈 (Avenir 50mm/f1.3) 에 대해 고선량을 감마선 조사 실험을 수행하였다.

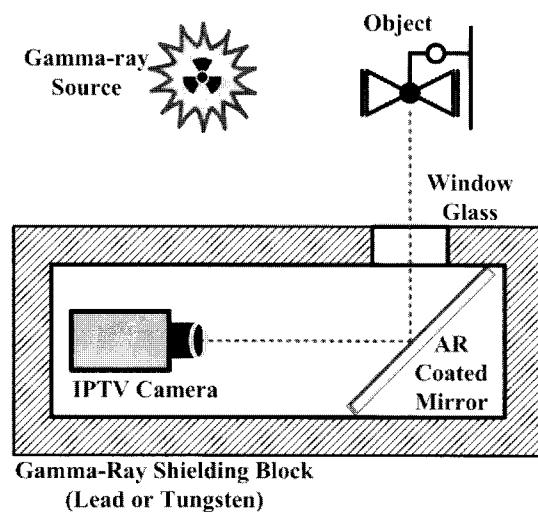


그림 1 차폐 카메라의 구조

Fig. 1 Architecture of radiation-shielded camera

그림 2에 고 선량을 감마선 조사 실험 구성도를 나타낸다. 고 선량을 감마선 조사 선원은 Co-60 방사성 동위 원소이고 1m×1m 크기의 면 선원이다. 그리고 Co-60 동위원소의 에너지 준위는 1.17/1.3MeV 이다. 감마선 선량 율은 RTD 센서의 설계기준사고 피폭 요건인 4kGy/h 로 설정하였다. 그림 3은 실험에 사용한 고선량 감마선 조사 선원의

거리에 따른 선량을 분포를 나타내고 있다. 원자로 냉각재 온도를 계측하는 RTD 센서의 설계기준사고시의 감마선 피폭 선량율이 4kGy/h 임을 감안하면 Co-60 감마선 조사 선원과 DUT (device under test) 사이의 거리는 65.7cm 정도로 추정되었다. 그럼 2에서 고 선량을 조사에 따른 렌즈의 특성을 온라인으로 관측하기 위해 CCD 카메라 본체를 8.4mm 두께의 납으로 차폐를 하였다. 일반적으로 8.4mm 두께의 납은 고에너지 (1.17/1.3MeV) 준위를 갖는 감마선을 1/100로 차폐한다. 실험에 사용한 CCD 칼라 카메라는 Hitachi KP-D591U-S1 모델이다.

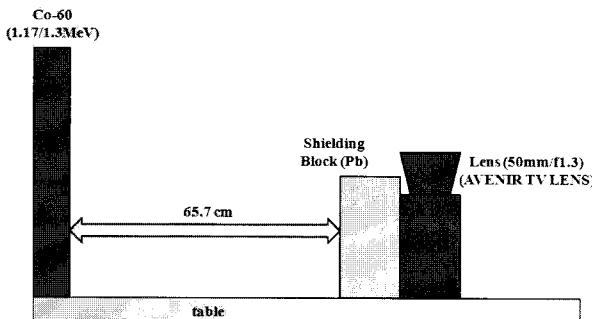


그림 2 감마선 조사 실험 구성도

Fig. 2 Experimental set-up for high dose-rate gamma irradiation

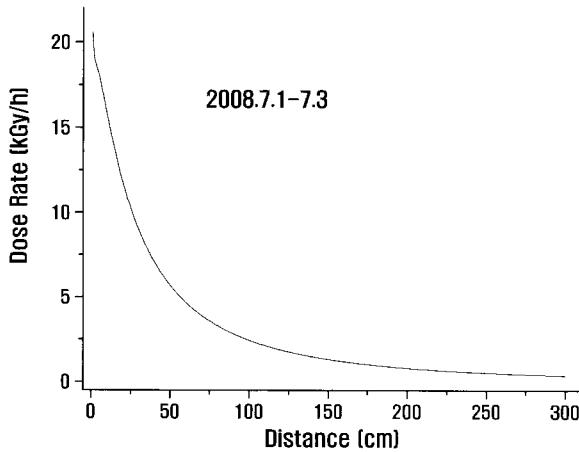


그림 3 거리에 따른 감마선 선량을 분포

Fig. 3 Gamma ray dose-rate versus distance

그림 4는 고 선량을 감마선 조사에 따른 렌즈의 열화 특성을 보이고 있다. 그림 4에서 좌측 렌즈는 감마선 조사전의 모습이고 우측 그림은 감마선 조사 후의 모습이다. 그럼에서 Browning effect에 의해 일상 유리로 제조된 렌즈의 경우 갈색으로 착색되어 있음을 알 수 있다.

3 렌즈의 열화 특성 분석

그림 5는 렌즈의 열화 특성 평가를 위한 실험장치 구성도이다. 그림 2의 고선량을 감마선 조사실험 구성도에 사용한 것과 동일한 CCD 칼라 카메라, 렌즈를 이용하여 특성 평가

를 수행하였다. Hitachi KP-D591U-S1 칼라 CCD 카메라 모듈에 고선량을 감마선 조사 렌즈를 장착하여 조리개를 순차적으로 변화시켜 가면서 칼라 영상패턴의 변화정도를 관측하였다. 고 선량을 감마선 조사에 의한 렌즈의 열화 특성을 비교 분석하기 위해 실험에 사용한 것과 동일한 정상적인 렌즈를 CCD 칼라 카메라 모듈에 장착하여 조리개를 순차적으로 변화시켜가면서 영상의 특성을 관측하였다. 그럼 6은 f5.6에서 관측한 영상패턴이다. 육안으로 관측할 때에 감마선 조사 렌즈로 관측한 영상이 정상 렌즈에 비해 약간 어둡게 표현됨을 알 수 있다.

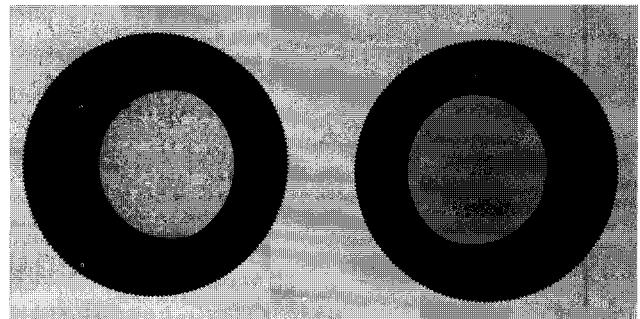


그림 4 Browning 효과에 의한 렌즈착색

Fig. 4 Color center generated by brown effect.

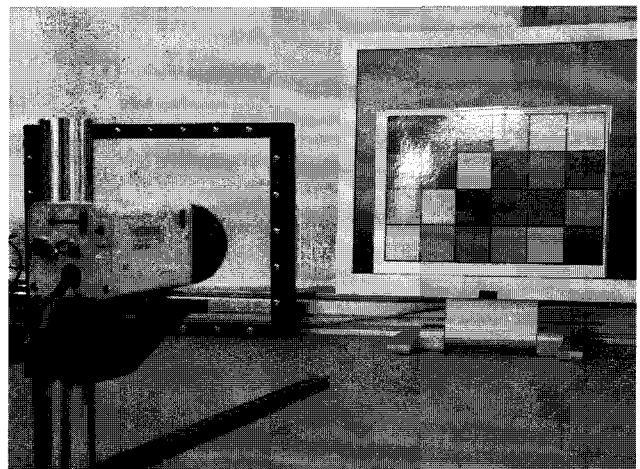


그림 5 렌즈 특성 평가 실험 구성도

Fig. 5 Experimental setup for lens characteristics evaluation

그림 7, 8, 9, 는 관측된 칼라 영상을 RGB 성분으로 분리하여 각각의 RGB 성분에 대한 energy (밝기의 총량) 값을 비교한 것이다.

$$\text{Energy} = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n P_{rgb}^2(i, j) \quad (1)$$

그림 7, 8, 9에서 실선으로 표현된 것은 정상 렌즈의 조리개 변화에 따른 에너지 값이며 점선으로 표현된 것은 고선량을 감마선 조사 렌즈의 조리개 변화에 따른 에너지 값이다.

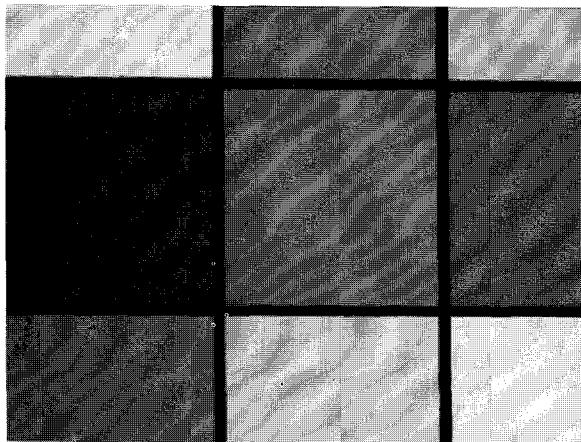


그림 6(a) 정상 렌즈(f5.6) 관측 영상

Fig. 6(a) Observation image using the normal lens

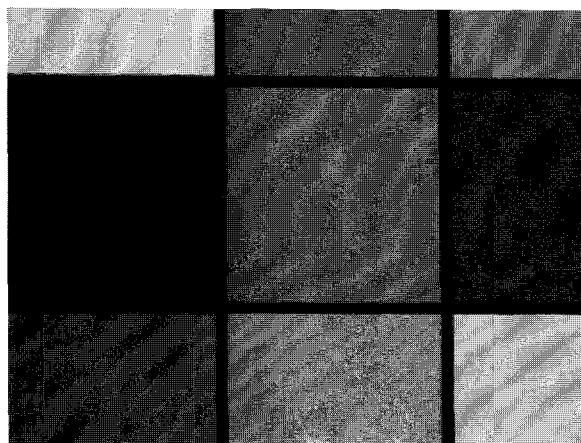


그림 6(b) 감마선 조사 렌즈(f5.6) 관측 영상

Fig. 6(b) Observation image using the gamma-irradiated lens

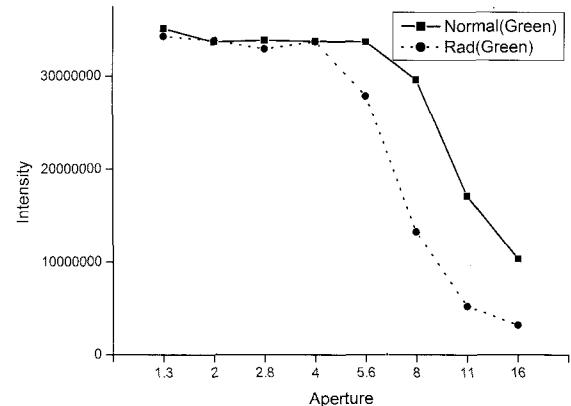


그림 8 Green 성분의 energy 비교

Fig. 8 Intensity variation of green component

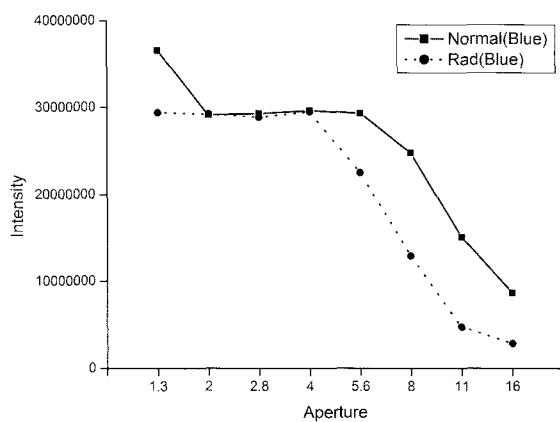


그림 9 Blue 성분의 energy 비교

Fig. 9 Intensity variation of blue component

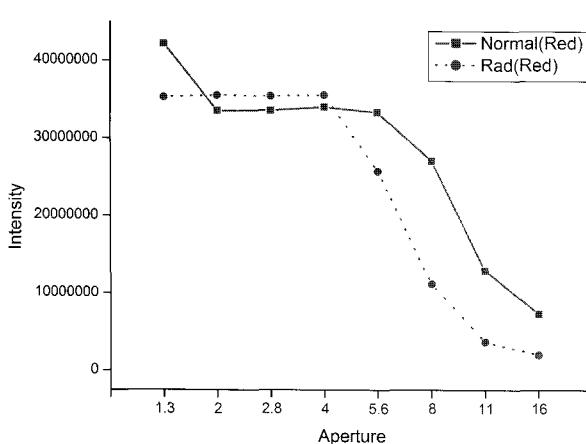


그림 7 Red 성분의 energy 비교

Fig. 7 Intensity variation of red component

그림 7, 8, 9로 부터 browning effect에 의한 렌즈의 칙색 현상이 green 파장 보다는 red, blue 파장에 영향을 크게 끼침을 알 수 있다. 그림 6~9로 부터 고 선량을 감마선 조사 렌즈는 정상 렌즈에 비해 렌즈의 밝기가 1/2로 어두워진 것을 알 수 있다. 이는 고 선량을 감마선 조사 렌즈의 열화된 관측성능을 보상하기 위해서는 주변조명을 2배로 밝게 해야 함을 의미한다. RGB 영상을 HSV 영상으로 변환하여 조리개 값 변화에 따른 HSV 영상의 변화를 그림 10, 11에 나타내었다[7]. RGB 패턴의 영상을 HSV(Hue, Saturation, Value 또는 Intensity) 기법으로 변환하여 정상 렌즈와 감마선 조사 렌즈의 특성을 비교하였다. 그림 10은 조리개를 f1.3에서 f4.0 까지 변화시켰을 때의 정상렌즈와 감마선 조사렌즈로 관측한 영상의 HSV 변환 특성을 나타내고 있다. 그림 11은 조리개를 f5.6에서 f16.0 까지 변화시켰을 때의 정상렌즈와 감마선 조사렌즈로 관측한 영상의 HSV 변환 특성을 나타내고 있다. 그림 11의 상단 그림으로부터 정상렌즈의 경우 조리개의 광량이 f11로 줄어들 경우 정상적인 칼라 색상의 관측이 불가능함을 나타내고 있다. 감마선 조사렌즈의 경우 조리개의 광량이 f8로 줄어들 경우 정상적인 칼라 색상의 관측이 불가능함을 나타내고 있다. 그

림 10, 11로 부터 감마선 조사 렌즈의 경우 정상렌즈보다 칼라 색상 표현 능력이 떨어지고 있음을 알 수 있다. 위의 특성 결과로부터 고 선량을 감마선 조사에 의해 형성된 착색 현상(browning effect)으로 렌즈의 밝음 정도를 나타내는 지표가 50mm/f1.3에서 50mm/f2.0으로 열화된 것으로 추정할 수 있다.

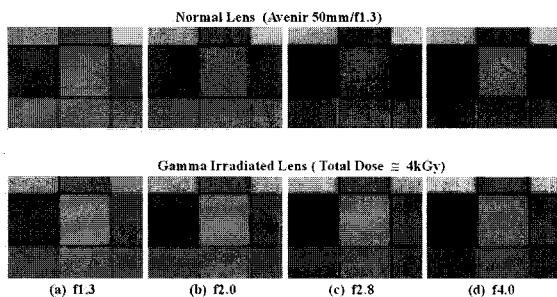


그림 10 조리개변화에 따른 HSV 영상 (f1.3 ~ f4.0)

Fig. 10 HSV images by the aperture variation

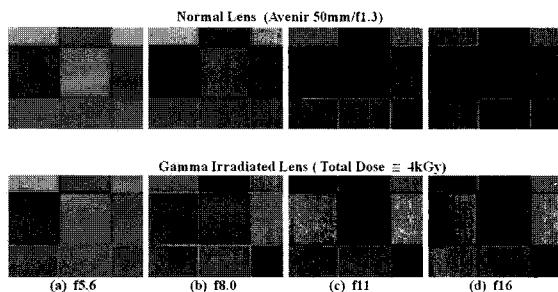


그림 11 조리개변화에 따른 HSV 영상 (f5.6 ~ f16.0)

Fig. 11 HSV images by the aperture variation

3. 결 론

본 원자력발전소 격납건물 내부에 감시, 진단용 IPTV 카메라가 설치된다고 가정할 때, 감마선에 취약한 IPTV 카메라의 핵심 부품인 CCD 센서를 비롯하여 카메라 구동회로를 구성하는 FPGA, ASIC, 마이크로프로세서 등이 납, 텅스텐 등의 물질에 의해 차폐된다. 잠망경 원리와 같이 관측창, 비반사 거울을 이용하여 빛의 경로를 격어줌으로써 감마선이 직접적으로 센서 및 주변 구동회로로 구성 전자소자에 영향을 미치는 것을 차단한다. 그러나 관측 창, 비반사거울은 감마선에 직접 노출되므로 이에 대한 성능평가는 필요하다. 원자력 발전소 설계기준과 요건의 고 선량을 감마선 피폭 환경에서 차폐 구조 IPTV 카메라의 관측성능이 보증되는지 확인하기 위하여 관측창과 같은 물질인 유리 성분의 렌즈에 4.2kGy/h 정도의 고선량을 감마선을 한 시간여 조사하였다. 렌즈에 칼라센터 형성과 같은 열화가 관측되었으며, 렌즈의 열화 특성을 분석하기 위해 칼라 영상의 RGB 특성을 분리하여 각각의 RGB 성분에 대해 에너지 특성을 비교하였다. 고선량을 감마선 조사에 따른 렌즈의 착색으로 에너지 특성 변화가 정상렌즈의 f5.6에 비해 2 배 밝은 조리개 값인 f4.0

이후에서 급격히 나타남을 확인하였다. 또한 Browning effect에 의한 렌즈의 착색 현상이 Green 파장 보다는 Red, Blue 파장에 영향을 크게 끼침을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] J.Sejvar, "Normal Operating Radiation Levels In Pressurized Water Reactor Plants", Nuclear Technology, Vol.36, p48-55, Nov.1977
- [2] "Comparison of Radiation Susceptibility for Microcircuits of Different Technologies", MIL-HDBK-978-B
- [3] John V. Draper, Reid L. Kress and Barry L. Burks, "Remote Maintenance Design Guide for Compact Processing Units ", ORNL /TM-2000/124, 2000
- [4] R.H. Jabs and D.E. Rygg, "Extending Qualified Life of Class 1E Equipment", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 4, No. 2, June 1989, 211-215
- [5] Weed Instrument, "DTN 2010 Pressure Transmitter", Product Data Sheet
- [6] Rosemount, "1152 Alphaline® Nuclear Pressure Transmitter", Product Data Sheet, 00813 - 0100 - 4235 Rev BA, 2007
- [7] Weed Instrument, "N4000R-99 Series RTD Temperature Transmitter Nuclear Qualified", Product Data Sheet
- [8] C. Choi, Y.K. Choi and C.C. Park, "The Color Retrieval System with Color Component Analysis", International Workshop on Image Systems and Techniques, pp 35-39, 2004A. Ghosh, S. Devadas, K. Keutzer and J. White, "Estimation of Average Switching Activity in Combinational and Sequential Circuits," ACM/IEE Design Automation Conf., pp. 253-259, 1992.

저 자 소 개



조재완 (曹在完)

1960년 12월 22일생. 1982년 경북대 전자 공학과 졸업. 1984년 경북대 전자공학과 석사 1987년 ~ 현재 한국원자력연구원 원자력 산업기술개발본부 책임 연구원

Tel : 042-868-8828

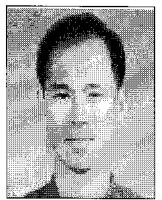
Fax : 042-868-2082

E-mail : jwcho@kaeri.re.kr



이 준 구 (李俊求)

충남대학교 전기공학 석사졸업. 현재는 한국원자력 연구원에서 일체형 원자로 (SMART) I&C 시스템 설계과제에 참여하고 있으며 주 관심분야는 MMIS 시스템 개발임.



허 섭 (許燮)

서강대학교 물리학 석사. 현재 한국원자력 연구원에서 한국형 디지털 원전제어계통 국산화 과제에 참여하고 있으며, 주 관심분야는 원전 안전계통 및 계측시스템 개발임.



구 인 수 (具仁守)

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.



홍 석 봉 (洪錫鵬)

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