

## 고 선량을 감마선 조사에 따른 칼라 영상의 왜곡

### A Color Correction of Camera Lens Degraded by High Dose-Rate Gamma Irradiation

\*조재완<sup>1</sup>, 최영수, #신중철<sup>2</sup>

\*J. W. Cho (jwcho@kaeri.re.kr), Y. S. Choi, #J. C. Shin

<sup>1</sup> 한국원자력연구원 원자력융합기술부, <sup>2</sup>한전 원전연료(주)

Key words : Color Correction, High Dose-Rate Gamma Irradiation, Color Center, Lens

#### 1. 서론

원자력 발전소는 18 개월의 상업 운전이 종료되면 약 1개월에 걸쳐 다음 주기의 상업 운전을 위해 주요 구조물, 설비, 기기의 건전성을 평가한다. 상업 운전 기간 동안 원자로에 장전되어 중성자 조사된 핵연료 집합체는 중성자 creep 에 의해 길이가 신장된다. 중성자 creep 에 의해 늘어나는 길이를 핵연료 집합체 구조물이 흡수하도록 설계/제작되고 있다. 확률적으로 극히 낮지만 제조 공정에서 발생할 수 있는 결함 가능성과 고속 고압의 냉각수 유동에 의해 이물질이 핵연료 집합체의 연료봉 사이에 삽입되거나 연료봉 표면에 충격을 주어 연료봉이 손상될 수 있다. 이를 검출하기 위하여 VT 기술에 의한 핵연료 집합체의 표면을 육안 검사하도록 규정되어 있다.

고선량 감마선원인 핵연료 집합체의 VT 검사는 수중에서 CCTV 카메라 시스템을 사용하여 수행된다[1]. CCTV 카메라 시스템의 핵심 부품인 CCD 센서를 비롯하여 카메라 구동회로를 구성하는 FPGA, ASIC, 마이크로프로세서 등이 납, 텅스텐 등의 비중이 높은 물질에 의해 차폐되어야 한다. 잠망경 원리와 같이 관측창, 비반사 거울을 이용하여 빛의 경로를 꺾어줌으로써 핵연료 집합체에서 방출되는 고선량 감마선이 직접 센서 및 주변 전자소자에 영향을 미치는 것을 차단한다. 관측 창, 비반사 거울은 고선량 감마선에 직접 노출되므로 이에 대한 성능평가는 필요하다. 렌즈에 4kGy/h 의 고 선량 을 감마선을 한, 두시간 각각 조사하였다. 렌즈에 칼라 센터가 형성되었다.

본 논문에서는 고선량 감마선 조사에 의해 열화된 렌즈로 관측한 칼라 영상의 보정에 대해 기술한다.

#### 2. 렌즈의 고선량 감마선 조사

그림 1의 차폐 카메라 구조에서 중성자 조사후 핵연료 집합체에서 방출되는 4kGy/h 이내의 고선량을 감마선에 직접 노출되는 부위는 비반사 거울(anti-reflection mirror) 과 렌즈이다. CCTV 카메라 시스템의 관측 성능에 영향을 끼치는 요인은 비반사 거울과 렌즈의 고선량을 감마선 피폭에 따른 열화 특성이다.

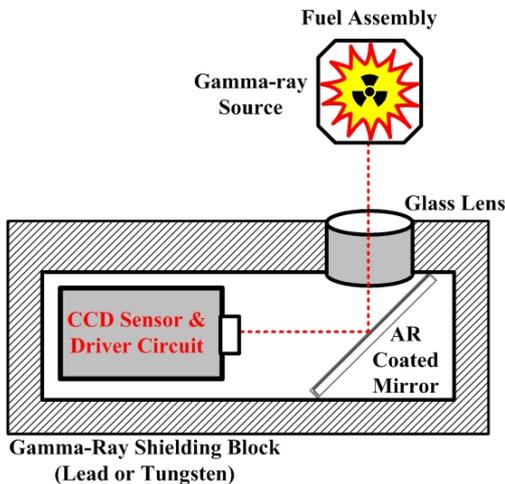


Fig. 1. CCTV camera architecture for VT inspection of neutron-irradiated nuclear fuel assembly

CCD 카메라 렌즈 (Avenir 50mm/f1.3) 에 대해 4kGy/h 의 고 선량을 감마선 조사 실험 결과를 그림 2에 나타낸다.

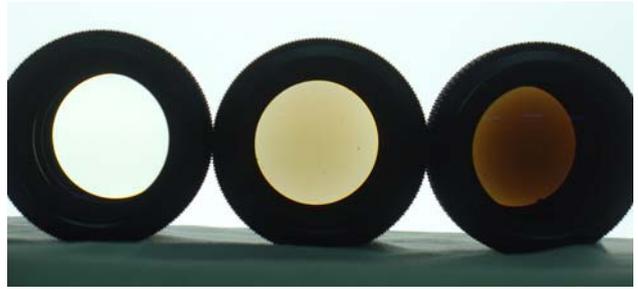


Fig. 2. Lens degradation by color center after high dose rate gamma irradiation. (left: before, center: after 4kGy, right: after 8kGy)

그림 2에 나타낸 바와 같이 CCD 카메라 렌즈는 몇 개의 렌즈 군으로 구성되기 때문에 누적 피폭선량이 클수록 렌즈의 착색은 더욱더 심화됨을 알 수 있다.

#### 3. 감마선 조사렌즈에 의한 영상의 칼라보정

고선량을 감마선 조사에 갈색의 칼라 센터가 형성된 렌즈로 촬영된 영상은 정상 렌즈로 촬영된 영상과 색상의 차이를 보인다. 칼라 영상의 픽셀을 RGB로 각각 8 비트씩 표현한다. RGB로 이루어진 각 픽셀은  $2^4 = 16,777,216$  가지의 컬러로 표현될 수 있다. 본 연구에서는 물체의 컬러 변화를 RGB 3 차원 벡터의 선형변환으로 간주하고 왜곡된 영상을 다시 원래의 영상으로 복원하고자 한다. 관측 물체의 컬러를  $C(r,g,b)$ 로 두면  $(r,g,b)$ 를 3 차원 벡터로 볼 수 있다. 감마선 조사 렌즈에 의해 관측 물체의 컬러가 왜곡된다는 것은 3차원 벡터로 표현할 수 있는 함수  $C$ 의 매개변수  $(r,g,b)$ 가 변환된다는 것을 의미한다. 따라서 감마선 조사렌즈에 의해 왜곡된 컬러  $C'(r',g',b')$ 를 선형방정식으로 고려할 수 있다.

$$C(r,g,b) = M \times C'(r',g',b') \quad (1)$$

이때  $M$  는  $C$ 를  $C'$ 로, 즉 벡터 $(r',g',b')$ 를 벡터  $(r,g,b)$ 로 변환시키는 변환매트릭스(transform matrix)로 볼 수 있다. 픽셀의 컬러는 3 차원 벡터로 표현할 수 있고, 감마선 조사 렌즈에 의해 왜곡된 칼라는 컬러 벡터의 변환으로 식 (2) 와 같이  $3 \times 3$  affine 변환매트릭스로 고려할 수 있다.

$$M = \begin{pmatrix} m_1 & m_2 & m_3 \\ m_4 & m_5 & m_6 \\ m_7 & m_8 & m_9 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Affine으로 고려하는 이유는  $(r,g,b)$ 로 표현되는 3차원 좌표계의 변화를 선형적으로 고려하였기 때문이다. Affine 변환매트릭스  $M$ 을 구하기 위하여 우리는 최소 3곳 이상의 영상점에 대하여  $(r,g,b)$  값을 알 수 있어야 한다. 그리고 동일한 점에 해당하는 왜곡된 컬러도 알 수 있어야 한다. 3곳의 컬러 값을  $C1, C2, C3$ 라 하고 왜곡된 컬러 값을  $C1', C2', C3'$ 라 하자. 매트릭스  $M$ 의 9개 미지값을 구하기 위하여 식 (3) 과 같이 선형방정식을 만들었다. 여기서  $(r1,g1,b1), (r2,g2,b2), (r3,g3,b3)$ 와  $(r'1,g'1,b'1), (r'2,g'2,b'2), (r'3,g'3,b'3)$ 는 각각 3곳의 원영상 컬러와 감마선 조사 렌즈에 의해 왜곡된 컬러의 색상 값이다. 식 (3) 은  $Ax=b$ 의 선형방

정식이므로 변환 매트릭스 M을 구하여 왜곡된 영상의 모든 픽셀의 컬러 값에 곱하여 보정된 영상을 구할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} r'_1 & g'_1 & b'_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r'_1 & g'_1 & b'_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r'_1 & g'_1 & b'_1 \\ r'_2 & g'_2 & b'_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r'_2 & g'_2 & b'_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r'_2 & g'_2 & b'_2 \\ r'_3 & g'_3 & b'_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r'_3 & g'_3 & b'_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r'_3 & g'_3 & b'_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \\ m_4 \\ m_5 \\ m_6 \\ m_7 \\ m_8 \\ m_9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_1 \\ g_1 \\ b_1 \\ r_2 \\ g_2 \\ b_2 \\ r_3 \\ g_3 \\ b_3 \end{pmatrix} \quad (3)$$

그림 3의 영상은 변환매트릭스를 구하기 위하여 미 공군에서 사용하는 색상 차트에 대한 관측 영상이다. 그림 4 감마선 조사렌즈에 의해 관측된 영상이다. 그림 3, 4의 관측 영상 획득시 사용한 렌즈의 조리개 값은 f5.6이다. 그림 3, 4 영상의 동일한 9개 지점의 좌표에 대하여 (r,g,b), (r',g', b) 값을 각각 측정하였다.



Fig. 3. Color chart image acquired by normal lens (f5.6).



Fig. 4. Color chart image acquired by gamma irradiated lens

그림 3, 4 영상의 9 영역에서 측정된 RGB 평균 값을 이용하여 변환매트릭스 M을 구하였다. 이를 식(4)에 나타낸다.

$$M = \begin{pmatrix} -0.26561 & -0.05356 & 1.61020 \\ -0.32036 & 1.17666 & 0.51040 \\ 0.99691 & -0.12976 & 0.44180 \end{pmatrix} \quad (4)$$

그림 5는 변환매트릭스를 이용하여 복원한 영상을 보여준다. 감마선 조사 렌즈에 의해 왜곡된 영상의 모든 픽셀의 (r',g',b)를 구한 다음 매트릭스 M을 곱하여 변환된 컬러 값으로 대체하였다. 그림 4의 영상에 비해 밝기가 개선되어 있음을 알 수 있다.

복원된 영상의 특성을 평가하기 위해 원 영상과 복원된 영상의 히스토그램의 상관을 비교하였다.

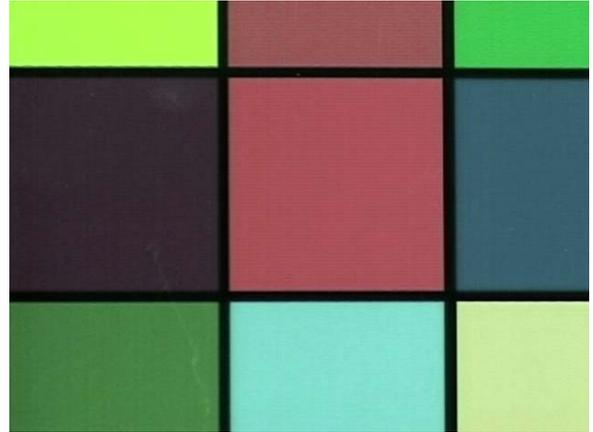


Fig. 5. Color chart image corrected by affine matrix.

$$d(H_1, H_2) = \frac{\sum_{i,j} [H_1(i,j) \cdot H_2(i,j)]}{\sqrt{[\sum_{i,j} H_1(i,j)^2 \cdot \sum_{i,j} H_2(i,j)^2]}} \quad (5)$$

영상의 RGB 성분을 분리하여 히스토그램을 구한다. 정상렌즈 관측 영상과 감마선 조사렌즈에 의한 관측 영상간의 히스토그램의 상관 특성을 계산하였다. 이를 정상렌즈 관측 영상과 복원 영상 사이의 히스토그램 상관 특성과 비교하였다. 감마선 조사렌즈 관측영상에 비해서는 상관계수가 높았으며 이를 통해 영상 복원이 어느 정도 달성되었음을 확인하였다. 영상 복원에 사용한 변환 매트릭스를 구하기 위해서 CCD 카메라가 영상을 획득하여 저장하는 주기와 실내조명인 형광등의 전원(60Hz) 주기가 일치하지 않아서 생기는 aliasing 효과에 의한 영상의 변화를 경감시키기 위해 100 개의 영상들을 평균화하였다.

#### 4. 결론

고선량을 감마선 선원인 중성자 조사 후 핵연료 집합체의 VT 검사를 위해서 고해상도 CCD 센서에 기반한 CCTV 카메라 시스템을 사용한다. 감마선에 취약한 CCTV 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 꺾어줌으로써 고선량 감마선이 직접 CCD 센서 및 구동회로 전자소자에 영향을 미치는 것을 차단한다. 관측창, 비반사 거울은 감마선에 노출되므로 이에 대한 성능평가는 필요하다. 차폐 구조 CCTV 카메라의 관측성능이 보증되는지 확인하기 위하여 유리 성분의 광학렌즈에 4kGy/h 정도의 고선량을 감마선을 한, 두시간 각각 조사하였다. 렌즈에 칼라센터 형성과 같은 열화가 관측되었으며 영상처리기법을 이용하여 열화 영상의 칼라를 보정하였다.

#### 참고문헌

1. 전용범, "사용후 연료 노내 조사성능 검사요건 및 해석방법에 관한 연구", KAERI/CR-219/2004, 2005