

고휘도 Power LED 의 고선량 감마선 조사 특성

(A High Dose-rate Gamma Irradiation of the High Brightness Power LED)

조재완* · 최영수* · 신중철**

(Jai-Wan Cho · Young-Soo Choi · Jung-Cheol Shin)

* 한국 원자력 연구원, **한전 원전 연료(주)

Abstract

A Radioactive constraint of the nuclear fuel assembly irradiated by neutron during normal operation cycle of the nuclear power plant is typically on the order of about 3 kGy/h. In order to inspect nuclear fuel assembly using a VT (vision technology) system, the light such as halogen lamp is used. As the halogen lamp has lower color temperature than the sun light, the objects under halogen lamp illumination are seemed to be tinted with red. In this paper, high brightness LED is considered to be used as the light source of VT system. The high brightness LED, which is a key light source of the VT system, have been gamma irradiated at the dose rate of 4 kGy/h during two hours up to a total dose of 8 kGy. The radiation induced color-center in the LED housing cap made of plastics materials is observed.

1. 서 론

원자력 발전소는 18 개월의 상업 운전이 종료되면 약 1개월의 예방정비기간(overhaul) 에 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. 중성자 조사된 핵연료 집합체 (이하 조사 후 핵연료봉으로 기술)는 3 kGy/h 정도의 고 선량율의 감마선을 방출한다[1]. 또한 원자력발전소 예방 정비기간중에 작업 종사자에게 허용되는 방사선 선량율이 약 50uGy/h 이다 [2]. 한편 1MeV 의 에너지 준위를 갖는 감마선 선원의 투과율을 1/10로 감소시키는데 필요한 냉각수(water) 의 두께는 66.04cm 이다. 이로부터 길이 4m 에 해당하는 조사후 핵연료봉의 상부 헤드 구조물이 조사후 핵연료봉의 운반수로(canal) 에 사람이 위치하는 바닥면으로부터 수심 5m 이내로 인양되어서는 안됨을 알 수 있다. 수심 5 m 이내로 인양되면 작업종사자의 허용 피폭선량이 초과되기 때문이다.

일반적으로 조사 후 핵연료 봉의 VT 검사는 수심 10m 깊이에서 수행된다. 내방사선 특성이 우수한 CCTV 카메라 시스템을 사용하여 VT 검사를 수행하기 때문에 수중 조명의 역할이 중요함을 알

수 있다.

백열 전구는 계속 켜져 있으면 필라멘트로부터 텅스텐이 증발하여 구 형태의 전구 내벽(유리)에 증착되어 전구 내벽이 점점 어두워지는 흑화현상이 발생한다. 흑화현상이 진행됨에 따라 전구의 밝기가 감소하며 계속되는 텅스텐 증발로 인하여 필라멘트가 가늘어져 전구의 수명이 단축된다. 이를 방지하기 위해 불활성 가스인 할로겐 원소 화학물질을 미세한 광 봉입한 것이 할로겐 전구이다. 전구에 봉입된 할로겐 원소에 의해 필라멘트에서 증발된 텅스텐이 할로겐과 화합물을 생성한다. 전구의 내벽 온도가 250~300℃일 때에 화합물은 전구 내벽에 증착되지 않고 분해되어 텅스텐은 필라멘트에 재 증착된다. 그러므로 백열전구에 비해 수명이 길고 방사선에 강하다. 따라서, 조사후 핵연료봉의 VT 검사의 조명으로 할로겐 전구가 사용된다. 할로겐 전구는 색온도가 3,000°K 정도로 낮기 때문에 붉은색에 가까운 광색을 나타낸다. 따라서 조사후 핵연료봉의 VT 관측 영상이 실제보다 붉게 나타난다[3].

LED 기술의 발전에 의해 6,500°K 이상의 색온도를 갖는 고휘도 순백색 LED 가 출시되고 있다 [4]. 이는 평균 태양광 색온도 4,874°K 보다 높으므로 자연광에 가깝다. 따라서 색온도가 높은 고휘도 백색 LED 를 조명으로 사용하여 조사후 핵연료봉을 VT 검사할 경우 관측 영상은 자연광 아래서 관측한 영상과 거의 동일한 관측 영상을 얻을 수 있으므로 조사 후 핵연료봉 표면의 얼룩, 산화 상태 등을 실제와 동일하게 추적할 수 있다. 또한 LED 는 소형/경량이므로 배열 형태로 구성할 수 있다. 배열(array) 구조의 LED 조명들의 발광

위치를 적절히 변경하여 관측할 수 있기 때문에 고정된 조명의 광속(flux) 하에 함몰되어 관측이 불가능한 결함 등을 용이하게 관측할 수 있다.

고선량 감마선을 방출하는 조사후 핵연료봉을 육안 검사하기 위한 VT 검사 시스템의 조명광원으로 고휘도 백색 LED를 활용하기 위해서는 고선량을 감마선 영향에서의 생존성 검증이 필요하다.

본 논문에서는 고휘도 백색 LED에 대해 고선량을 감마선 조사 실험을 수행하였으며 이들의 열화 특성을 기술한다. LED 광원에 대해 4kGy/h의 선량율로 2시간 동안 감마선 조사를 하였다. 다이오드의 중요한 특성인 순방향 전압 특성과 유리 또는 플라스틱 재료로 구성된 LED하우징의 색상 변화를 관측하였다.

2. 고선량 감마선 조사 실험

2.1. 온라인 특성 평가

온라인 특성 평가 실험에 사용한 LED는 W724C0 모델로 색온도는 6,300°K이고 순방향 바이어스 전압 V_F 는 3.3V이다. LED 광원의 밝기를 조도계(Lx-102)로 측정한다. 조도계는 밝기에 비례하는 전압을 mV 단위로 출력한다. 이를테면 조도계의 값이 800lx이면 80mV를 출력한다. 조도계의 mV 출력 전압을 15m 길이의 동축 케이블로 전송하여 데이터 기록장치(data logger)에 연결한다. Data logger 값을 PC로 읽어서 온라인 저장한다. 이를 그림 1에 나타낸다. LED 구동에 필요한 스위칭 전원장치(12V/10A), 조도계는 LED가 받는 4kGy/h 정도의 고선량을 감마선 조사에 파손될 수 있기 때문에 의해 15cm 두께의 납으로 차폐를 하였다.

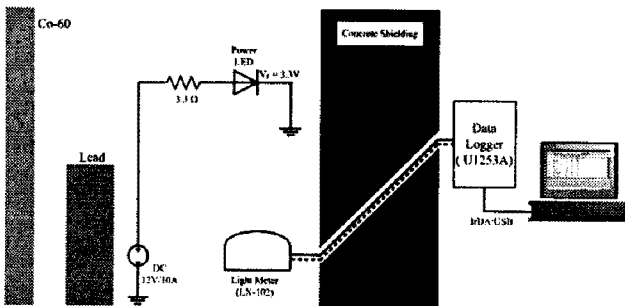


그림 1. 온라인 특성평가 구성도

Fig.1. Experimental configuration of on-line luminescence measurement of a high brightness LED device

그림 2는 W724C0 LED의 구동 전류 파형이고, 그림 3은 2.6A 구동 전류에서의 조도를 Lx-102로 측정된 값을 나타낸다. 그림 3에서 조도가 30초에 걸쳐 급격히 떨어지는 이유는 LED의 최적 밝기 조건인 p/n 접합 온도 T_j 를 일정하게 상온(25°C)으로 유지할 수 없기 때문이다. 그림 3의 측정 파형은 실험실 환경에서 측정된 값이다. 실험실 내부의 형광등 불빛이 일정 부분 offset으로 작용하였다. 형광등의 on/off에 따라 조도계의

offset은 200lx(0.02mV)이었다.

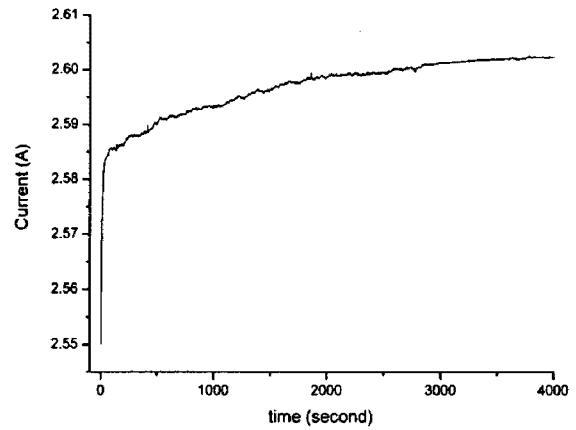


그림 2. LED 구동 전류

Fig.2. Waveform of LED drive current

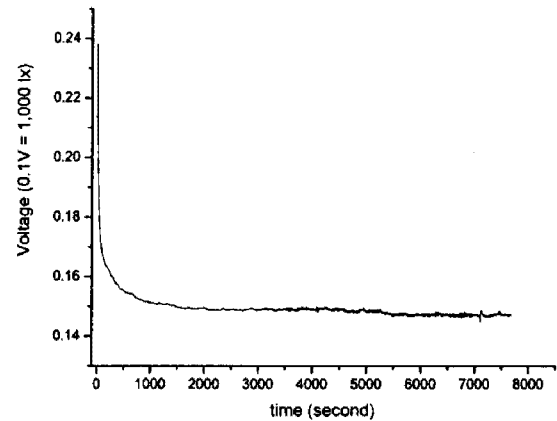


그림 3. 실험실 환경에서의 고 휘도 Power LED의 밝기

Fig.3. Brightness of high power LED (W724C0) at Lab condition.

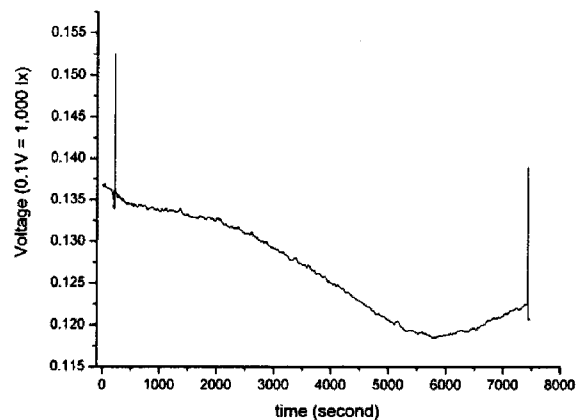


그림 4. 고선량을 감마선 조사하의 고휘도 LED의 밝기

Fig.4. Brightness of high power LED at the high dose-rate gamma irradiation.

그림 4는 고선량을 (4kGy/h) 감마선 조사에 따른 고휘도 power LED의 밝기 특성을 나타내고 있다. 그림 3에 비해 초기 밝기가 낮은 것은 p/n 접합 온도 T_j 를 일정하게 상온(25°C)으로 유지하는 것이 공학적인 측면

에서 비현실적이기 때문에 정상적인 구동조건에서의 밝기를 기준으로 하였다. 그림 1의 실험구성에서 Co-60 감마선 선원이 수조에서 상승하여 조사 지점에 정위치할 때까지는 조도계/전원 장치에는 감마선 차폐가 이루어지지 않는다. 감마선도 가시광선 보다 파장이 짧은 빛이다. 그림 5에 나타낸 1m² 크기의 감마선 면선원이 차폐벽이 없는 상승/하강 경로를 통과할 때에 조도계에 영향을 미치므로 그림 4 좌우측의 peak 파형으로 나타남을 알 수 있다.

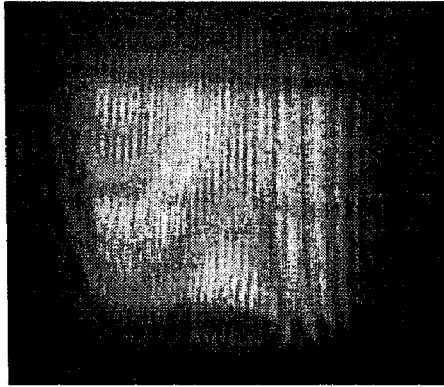


그림 5 고선량 감마선 선원(Co-60)
Fig.5. Gamma-ray source (Co-60)

2.2. 오프라인 특성 평가

고휘도 power LED 는 구동 전류가 0.35~1.4A 로 크다. 이에 비해 고휘도 LED 는 구동전류가 30~40mA 로 낮기 때문에 고휘도 power LED 구동회로에서 요구되는 열처리를 고려할 필요가 없다. 전광판과 같은 $m \times n$ 배열구조로 설계하면 VT 검사에 필요한 조도를 확보할 수 있다. LED 소자 자체는 GaAs 계열의 III-V 족 원소에 기반하고 p/n 접합 구조이므로 방사선에 강하다. 그러나 LED에서 발생한 빛을 집광 및 지향시키는 하우징이 유리 또는 플라스틱으로 구성된다. 이에 대한 고선량 감마선 조사에 따른 하우징의 착색 (browning effect) 효과를 평가할 필요가 있다. 본 논문에서는 1~10k mcd 밝기를 갖는 고휘도 LED, 마이크로 할로겐 램프, 700 lm 의 밝기를 갖는 고휘도 power LED 들을 4kGy/h 선량율로 2시간 조사하였다. LED 전구 표면의 착색을 관측하였으며, 또한 LED 의 순방향 전압을 비교하였다. 고 휘도 LED 의 경우 순방향 전압은 감마선 조사전과 조사후에 차이가 없었다. 일반적으로 마이크로 할로겐램프는 필라멘트 열을 흡수하기 위해 전구는 quartz 로 제작된다. 고휘도 power LED의 전구는 발광시의 내부 열을 흡수하기 위해 실리콘 resin 으로 제작된다. 따라서 전구 표면이 착색이 되어 투명도가 떨어지면 전구 내부의 열이 외부로 방출되지 못하고 내부로 흡수되므로 전구의 수명이 단축된다. 그림 6, 7 은 직경이 각각 3, 5mm 인 고휘도 백색 LED 의 전구 특성을 나타낸다. 감마선 조사전과 후의 고휘도 백색 LED의 문턱전압 (V_T) 은 2.59V 로 변동이 없었다. 감마선 조사후 고휘도 백색 LED의 투명 플

라스틱 전구의 색상이 갈색으로 변화하였다.

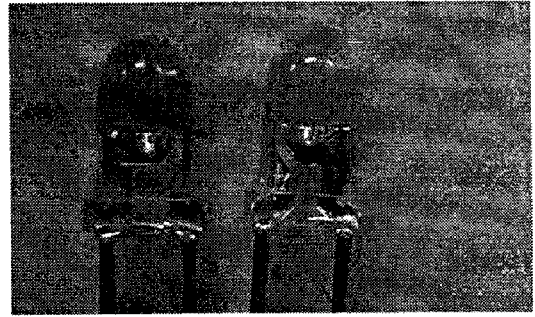


그림 6. 3mm 직경의 고휘도 백색 LED 전구의 착색
(좌측: 감마선 조사 후, 우측: 감마선 조사 전)

Fig.6. LED bulb darkened by high gamma irradiation (left: irradiated after 2 hours, right: before)

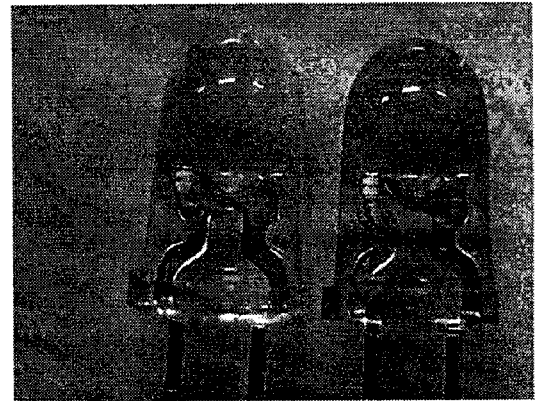


그림 7. 5mm 직경의 고휘도 백색 LED 전구의 착색
(좌측: 감마선 조사 전, 우측: 감마선 조사 후)

Fig.7. LED bulb darkened by high gamma irradiation (left: before, right: gamma irradiated after 2 hours)



그림 8. 6mm 직경의 마이크로 할로겐 전구의 착색
(좌측: 감마선 조사 후, 우측: 감마선 조사 전)

Fig.7. Micro halogen bulb darkened by high gamma irradiation (left: before, right: gamma irradiated after 2 hours)

그림 8은 고휘도 백색 LED 에 비해 조도가 1,000배

이상 밝은 마이크로 할로겐 램프 전구의 고선량 감마선 조사 특성을 나타내고 있다. 마이크로 할로겐 전구는 내열 특성이 우수한 quartz 재질로 이루어진다. 그림 6, 7에 비해 전구의 착색이 미약하다. 고선량 감마선 조사 후에 마이크로 할로겐 램프 전구의 착색이 램프의 수명에 영향이 미치는지를 평가하기 위하여 실험실에서 150 시간 (6일) 연속 동작실험을 수행하였으나 조도의 변화는 없었다. 그림 9, 10 은 고휘도 power LED 의 전구 특성이다. 고휘도 power LED 는 전구가 실리콘 resin 으로 제조되어 있다. 그림 6, 7, 8과 같이 감마선을 4 kGy/h 선량율로 2시간 조사하였으나 실리콘 레진의 색상 변화를 육안으로는 확인할 수 없었다.

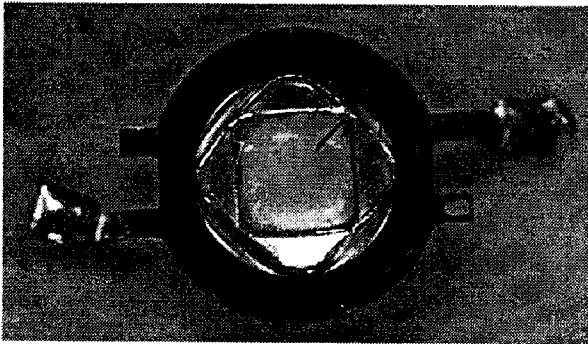


그림 9. 감마선 조사후의 고휘도 power LED (X42180, 8mm)
Fig.9.High Power LED bulb after high gamma irradiation (X42180, 700mA max.)

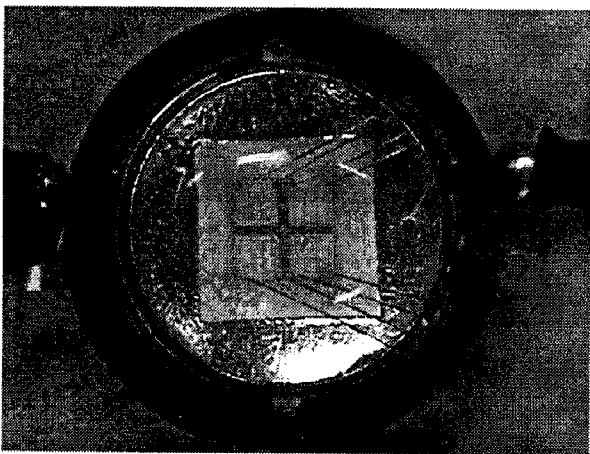


그림 10. 감마선 조사후의 고휘도 power LED (W724C0, 12mm)
Fig.9.High Power LED bulb after high gamma irradiation (W724C0, 2.8A max.)

그림 6~10 으로부터 고 선량율의 감마선을 방출하는 조사후 핵연료 봉의 VT 검사에서 조명광원으로 고휘도 power LED 를 사용할 수 있음을 알 수 있다. 실리콘 resin 으로 제조된 전구가 고선량 감마선에 착색현상을 보이지 않으며 그림 4의 온라인 실험 결과로부터 조도도 1,200 lx 로 CCD 카메라의 최저 관측 조도를 훨씬 상회하기 때문에 자연광하의 관측 영상을 얻을 수 있다. 따라서 할로겐 조명에 비해 조사 후 핵연료봉의 VT 검사의 신뢰성을 개선할 수 있다.

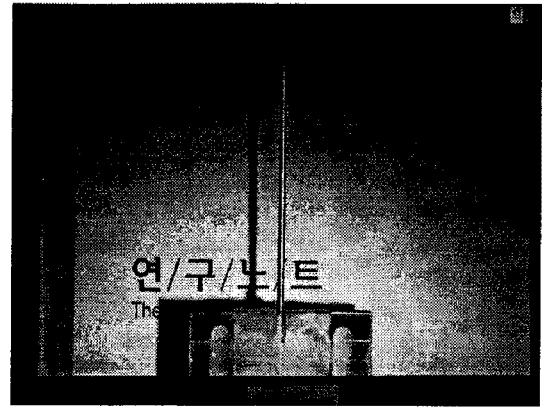


그림 11 할로겐 램프 조명의 관측영상
Fig.11.An observation image under halogen lamp

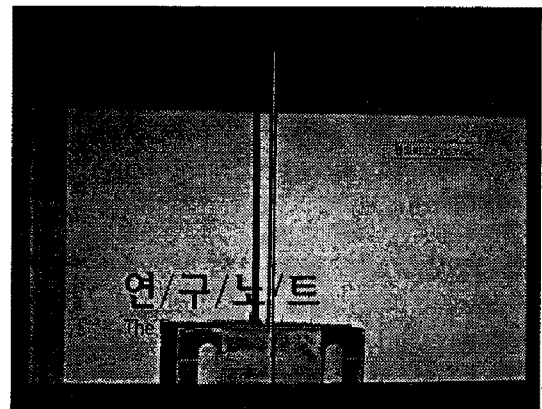


그림 12 고휘도 power LED 조명의 관측영상
Fig.11.An observation image under high power LED light

그림 11, 12 는 조사후 핵연료봉의 VT 검사 거리 (약 400mm)에서 할로겐 램프 및 고휘도 power LED 조명에서의 HD 급 CMOS 카메라 (FCB-H10) 의 관측영상을 나타낸다. 그림 11, 12는 관측 대상인 연구노트 색상은 실험실의 형광등 조명아래서의 색상과는 차이를 보인다. 앞으로 실내 조명이 형광등에서 고휘도 LED 로 변경되는 추세에 있으므로 조사후 핵연료봉의 VT 검사 조명도 고휘도 power LED 광원으로 변경하는 것이 조사 전/후의 핵연료 집합체에 대한 VT 검사의 일관성있는 관측 영상 DB 구축측면에서 유리할 것이라 생각된다. 원자로 장전 전의 핵 연료봉의 VT 검사와 원자로 장전 후 1주기 또는 2, 3주기 가동 후의 중성자 조사된 핵연료봉의 VT 검사시 동일한 색온도를 갖는 조명으로 관측하면 연료봉 표면의 얼룩, 산화 상태 등을 체계적으로 추적할 수 있다.

3. 결 론

중성자 조사 후 핵연료 집합체의 고 선량 율 감마선 피폭 환경에서 VT 검사 시스템의 조명 광원의 성능을 검증하기 위하여 조명광원들에 대해 4kGy/h의 고 선량

을 감마선을 조사하였다. 플라스틱 재질의 하우징으로 구성된 고휘도 백색 LED 는 8kGy(TID)에서 칼라센터가 관측되었다. 마이크로 할로겐 램프의 quartz 전구는 미세한 착색(browning effect) 이 관측되었으며, 실리콘 레진으로 구성된 고휘도 power LED (X42180, W724C0) 의 전구는 육안으로는 칼라 센터 형성과 같은 결함이 관측되지 않았다. 앞으로 실내 조명이 형광등에서 고휘도 LED 로 변경되는 추세에 있으므로 조사후 핵연료봉의 VT 검사 조명도 고휘도 power LED 광원으로 변경하는 것이 조사 전/후의 핵연료 집합체에 대한 VT 검사의 일관성있는 관측 영상 획득에서 유리할 것이라 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] "신고리 1&2, 신월성 1&2 Fuel Inspection System Purchase Specification", KHP Spec. No 9-159-N227
- [2] J. Sejvar, "Normal Operating Radiation Levels in Pressurized Water Reactor Plants", Nuclear Technology, Vol. 36, pp.48-55, 1977
- [3] 조재원, "칼라드리아 압력관의 급수배관 지지대의 육안검사를 위한 협소구역 관측기술", KAERI/TR-1433/99, Technical Report, 1999
- [4] W724C0 Data Sheet, Seoul Semiconductor