

마이크로 할로겐램프의 고선량 감마선 조사 High Dose-Rate Gamma-ray Irradiation of Micro Halogen Lamp

*조재완¹, 최영수, #신중철²

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

¹ 한국원자력연구원 원자력융합기술부, ²한전 원전연료(주)

Key words : Micro Halogen Lamp, High Dose-Rate Gamma Irradiation, Color Center, Darkening Effect

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 발생될 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]. 일반적으로 수심 10m 깊이에서 수행되므로 조명의 역할이 중요하다. VT 검사에 사용되는 조명은 직경이 크므로 CCTV 관측 카메라에 좌/우에 할로겐램프를 두 대 배치하거나 또는 하나의 할로겐 광원을 사용한다. 따라서 할로겐램프의 광속(flux) 과 VT 검사 대상인 핵연료집합체의 결함위치가 CCTV 관측카메라의 동일 광축에 위치하면 결함을 발견할 수 없다. 이를 보완하기 위해 빛을 산란시키는 diffuser 를 램프 전면에 부착하여 사용한다. 그러나 광원의 광속과 핵연료집합체 결함이 동일 광축에 위치하면 diffuser 를 사용하더라도 결함을 발견하기가 용이하지 않다. 이에 대한 해결방안으로 본 논문에서는 VT 검사용 CCTV 카메라시스템의 광원으로 직경이 7mm 내외인 마이크로 할로겐램프를 여러개 사용하는 것을 검토한다. 직경이 적은 소형광원들을 공간적으로 적절히 배치한다. CCTV 카메라 시스템의 최적 관측주도에 맞게 공간적으로 배치된 광원들에서 일부만 ON 시켜 관측한다. 동일 관측위치에 대해 ON 조명들을 OFF 시키고, OFF 조명들을 ON 시켜 관측함으로써 광원의 광속에 의한 관측사각을 방지할 수 있다. 고선량 감마선을 방출하는 핵연료 집합체를 육안 검사하기 위한 VT 검사 시스템의 조명광원으로 마이크로 할로겐 램프를 활용하기 위해서는 고선량을 감마선 영향에서의 생존성 검증이 필요하다.

본 논문에서는 마이크로 할로겐 램프에 대해 고 선량을 감마선 조사 실험을 수행하였으며 이들의 열화 특성을 기술한다. 마이크로 할로겐 램프에 대해 4kGy/h 의 선량율로 2시간 및 72 시간 동안 감마선 조사를 하였다. 할로겐램프 전구의 고선량 감마선 조사에 따른 칼라센터 생성여부를 관측하였으며 감마선 조사후의 동작 특성을 평가하였다.

2. 고선량 감마선 조사 실험

고선량 감마선 조사 실험에 사용한 마이크로 할로겐 램프는 HLG-SE6-580 모델로 직경이 6.2mm 이며 12W 의 밝기를 갖는다. 실험 구성도를 그림 1에 나타낸다. 실험은 두가지 방법으로 수행되었다. 2시간 조사실험은 온라인으로 수행하였다. 전원을 공급한 상태에서 마이크로 할로겐램프의 고선량 감마선 조사에 따른 생존성을 평가하였다. 온라인 평가에 필요한 마이크로 할로겐 램프의 전원장치(12V/10A) 는 4kGy/h 정도의 고선량을 감마선

조사에 파손될 수 있기 때문에 의해 15cm 두께의 납으로 차폐를 하였다.



Fig. 1. Experimental setup for high dose-rate gamma irradiation of micro halogen lamp.

3. 특성 평가

고선량 감마선 조사에 따른 마이크로 할로겐 램프의 특성평가는 2가지 방법으로 하였다. 온라인 특성평가에서는 4kGy/h 선량율로 2시간 조사후에 마이크로 할로겐램프의 동작여부를 확인하였다. 누적 조사선량(TID - total irradiation dose) 으로 8kGy 조사후에는 전구의 밝기 변화는 없었다. 흑화현상(darkening-effect) 에 의한 수명단축요인을 평가하기 위하여 램프 전구의 칼라센터 생성여부를 관측하였다. 이를 그림 2에 나타낸다.



Fig. 2. Lamp bulb degradation by color center after high dose rate gamma irradiation.

(left: before, right: after 8kGy irradiation)

그림 2에서 왼쪽 램프는 감마선 조사전의 모습이고 오른쪽 램프는 4kGy/h 선량율로 2시간 조사한 후의 모습이다. Quartz 로 제조되는 전구에 갈색의 착색(color center) 이 형성되었음을 알 수 있다. 그림 3은 4kGy/h 선량율로 72시간 조사한 후의 모습이다. 그림 2와 비교하여 착색현상은 크게 진행되지 않았다.

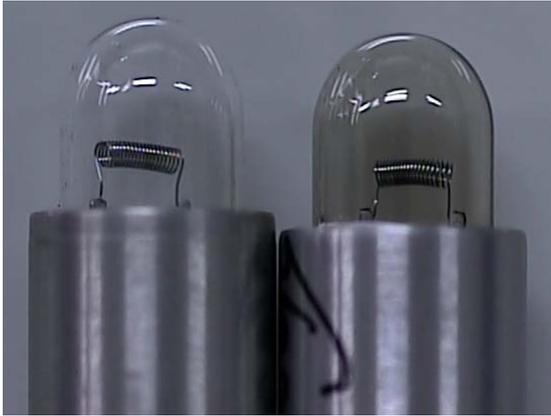


Fig. 3. Lamp bulb degradation after high dose rate gamma irradiation. (left: before, right: after 288kGy)

72 시간 조사(TID 288kGy) 후 램프전구의 착색효과는 2시간 조사(TID 8kGy)에 비해 큰 차이가 없으나 전선 피복재가 바스라져서 램프 발광시에 전선의 단락에 의한 과전류로 전원장치를 포함한 주변기에 손상을 줄 수 있음을 확인하였다. 이를 그림 4에 나타낸다. 그림 4에서 상단그림은 288kGy 조사후에 전선 피복재가 손상되어 벗겨진 모습을 나타내고 하단 그림은 8kGy 조사후의 전선 피복재 모습을 보이고 있다. 따라서 핵연료 집합체의 VT 검사장치 설계제작시에 고선량 피폭에 의한 전선 피복재의 취약성을 보완할 수 있는 정교한 계장 설비가 요구된다.

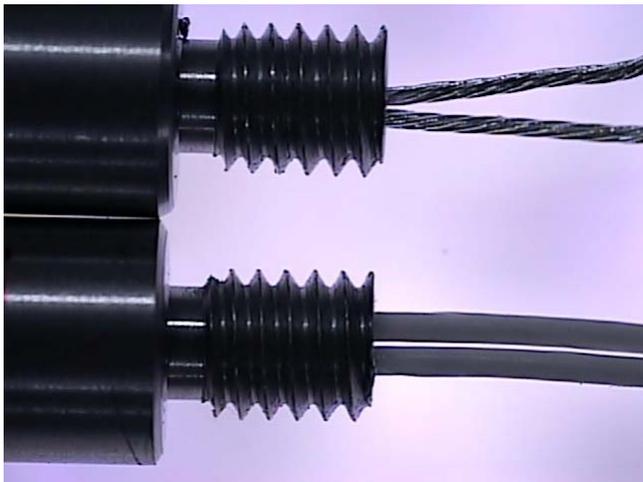


Fig. 4. Cable sheath degradation after high dose rate gamma irradiation. (top: after 288kGy, bottom: after 8kGy)

마이크로 할로겐램프에 대한 고선량 감마선 조사후의 특성 평가를 위해 조사된 램프(TID 8kGy) 와 감마선 조사되지 않은 램프 2개를 병렬로 연결하여 조도를 측정하였다. 일반적으로 할로겐 램프는 AC 전원 구동이다. 핵연료 집합체 VT 검사용의 CCTV 카메라 시스템이 고속/고해상도 디지털 기반으로 기술 발전이 되고 있기 때문에 전원 주파수(60Hz) 에 동기를 맞춘 AC 전원 조명으로는 120Hz 이상의 고속 영상획득에 부응할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 마이크로 할로겐 램프의 DC 조명 특성을 측정하였다. DC 전원 공급으로 할로겐램프를 발광시키면 필라멘트로부터 텅스텐이 증발하여 램프전구의 내벽(quartz)에 증착되어 전구 내벽이 점점 어두워지는 흑화현상이 발생된다. 흑화현상이 진행됨에 따라 전구의 밝기는 계속 감소하며 전구 내부의 열이 흡수되므로 텅스텐 증발이 가속화 된다. 따라서 필라멘트가 점점 가늘어져 전구의 수명이 단축된다.

그림 5는 감마선 조사된 램프(TID 8kGy) 와 감마선 조사되지 않은 램프 2개를 병렬로 연결하여 조도를 11일 동안 연속적으로 측정한 결과를 나타내고 있다. DC 전원에 의한 연속 동작시 11일 경과 후에 2개의 할로겐 램프가 모두 흑화현상으로 수명을

다하였다.

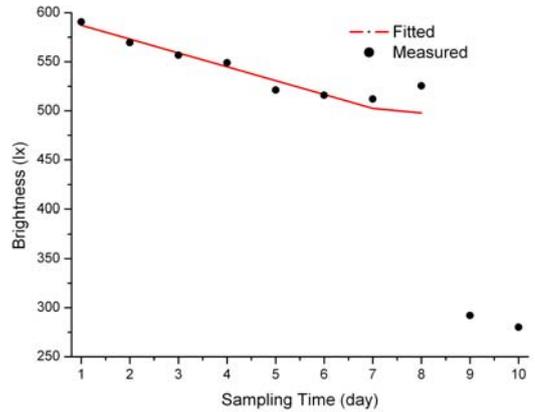


Fig. 5. Halogen lamp brightness as time.

2 개의 램프중에서 감마선 조사되지 않은 램프가 9일경에 흑화현상으로 수명이 종료되었으며 감마선 조사된 램프는 10일경에 램프의 수명이 다하였다. 하나의 예제로 단순 비교는 어렵지만 TID 8kGy/h 고선량 피폭에서는 램프의 특성이 열화되지 않음을 알 수 있다. 그림 6은 흑화현상에 의해 필라멘트가 증발하여 램프의 수명이 종료된 예를 보이고 있다.

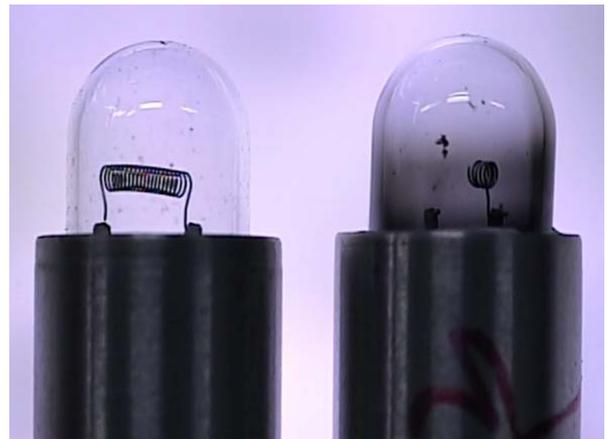


Fig. 6. Halogen lamp degradation by darkening effect (left: not irradiated, right: 8kGy irradiated)

4. 결론

중성자 조사 후 핵연료 집합체의 고 선량 을 감마선 피폭 환경에서 VT 검사 시스템의 조명 광원의 성능을 검증하기 위하여 마이크로 할로겐램프에 대해 4kGy/h의 고 선량을 감마선을 2시간 및 72시간 각각 조사하였다. 누적조사 선량기준으로 8kGy, 288kGy 의 고선량 감마선 조사시 Quartz 재질로 제조된 램프 전구에서 칼라센터가 관측되었다. 288kGy 의 고선량 조사에서는 램프의 전선 피복재가 손상되어 전원 단락에 의한 주변 시스템의 파손을 야기할 수 있음이 확인되었다. 200여개 이상의 핵연료 집합체의 VT 검사시 고선량 감마선에 의한 누적 피폭선량이 200 kGy 이상이므로 VT 검사장치 설계 제작시에 전선 피복재의 취약성을 보완할 수 있는 정교한 계장설비가 고려되어야 한다.

참고문헌

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