

논문 2010-47SP-1-11

영상처리를 이용한 핵연료봉의 변형 검사

(Inspection of the Nuclear Fuel Rod Deformation using an Image Processing)

조 재 완*, 최 영 수*

(JaiWan Cho and YoungSoo Choi)

요 약

본 논문에서는 핵연료봉의 변형에 대한 고정도 검사방법을 제안한다. 핵 연료봉과 이를 관측하는 영상 센서의 광축을 수직으로 구성한다. 영상 센서의 광축을 기준으로 45도 또는 그보다 높은 각도로 레이저 라인빔을 연료봉 표면에 조사하면 연료봉의 수평 방향 변위가 영상 센서에서는 수직 방향 변위로 관측된다. 핵 연료봉 표면에 일정 각도로 입사된 레이저 라인빔이 영상 센서면에서는 일정 두께를 갖는 포물선 형태로 관측되게 된다. 센서 화면에 나타나는 일정 두께의 포물선을 영상처리하여 타원으로 모델링하고 타원의 장축과 단축의 기울기를 구한다. 포물선의 변곡점과 모델링한 타원의 장축과 단축이 교차하는 지점을 특징점으로 추출한다. 이와 같은 영상처리 알고리즘을 이용하여 핵 연료봉의 수평방향 변위에 따른 특징점 좌표의 수직 방향 편차를 계산한다. 크러드가 형성된 핵연료봉 시편에 대해 고해상도 영상센서를 사용하여 실험한 결과 증성자 조사후 핵연료봉의 변형 검사기준인 150 μm 보다 3배 이상 개선된 50 μm 이하의 검사 정밀도를 달성하였다.

Abstract

In this paper, a deformation measurement technology of the nuclear fuel rod is proposed. The deformation measurement system include high definition CCD or CMOS image sensor, lens, semiconductor laser line beam marker, and optical & mechanical accessories. The basic idea of the deformation measurement is to illuminate the outer surface of the fuel rod with collimated laser line beam at an angle of 45 degrees or higher. The relative motion of the fuel rod in the horizontal direction causes the illuminated laser line beam to move vertically along the surface of the fuel rod. The resulting change of laser line beam position in the surface of the fuel rod is imaged as the parabolic beam in the high definition CCD or CMOS image sensor. From the parabolic beam pattern, the ellipse model is extracted. And the slope of the long and the short axis of the ellipse model is found. The crossing point between the saddle point of the parabolic beam and the long & short axis of the ellipse model is taken as the feature of the deformed fuel rod. The vertical offset between feature points before and after fuel rod deformation is calculated. From the experimental results, 50 μm inspection resolution is acquired using the proposed method, which is three times enhanced than the conventional criterion (150 μm) of the guide for the inspection of the nuclear fuel rod.

Keywords : nuclear fuel rod, deformation, laser, line, inspection, high definition image sensor

I. 서 론

원자로 가동 중에 증성자 조사에 의해 핵연료봉은 길이가 늘어나는 조사 성장을 하게 된다. 원자로에서

연소되고 나온 핵연료봉의 전반적인 변형 정도를 검사하기 위해서 제일 먼저 수행되는 시험이 외관검사이다. 외관 검사에서 핵연료봉의 표면에 형성되는 크러드(crud), 산화 피막, 연료봉의 휨/뒤틀림으로 인한 연료봉의 변형, 연료봉의 성장 또는 수축, 특히 연료봉과 스페이서 그리드 사이에서 발생하기 쉬운 fretting wear 마모 정도 등이 중점적으로 관찰된다^[1]. 경수로형 핵연

* 정회원, 한국원자력연구원 원자력융합기술개발부
(Div. Nuclear Convergence Korea Atomic Energy Research Institute)
접수일자: 2009년7월12일, 수정완료일: 2009년12월28일

료봉의 직경은 9.53/9.66mm 이며 길이는 4m 이다^[2]. 중성자 조사 성장에 의한 핵연료봉의 변형을 정밀 측정하여 원자로에 재장전 가능한지의 여부를 판단하는 건전성 평가는 원자력 발전소의 안전 운영에 직결되므로 이를 위한 정밀도 높은 외관 검사가 요구된다. 본 논문에서는 핵연료봉의 고정도 변형검사를 위한 검사 시스템 및 영상처리알고리즘을 제안한다. 검사 시스템은 선형 빔을 방출하는 반도체 레이저 모듈, 고 분해능 CCD & CMOS 영상 센서, 영상 획득/처리를 위한 PC, 크러드 핵연료봉 시편을 미세 이동시키는 마이크로 스테이지로 구성된다. 적색 파장대의 선형 레이저 빔을 일정 각도로 핵연료봉에 조사시키면 CCD 센서에는 포물선으로 상이 맺힌다. 핵연료봉이 수평방향으로 미세하게 위치가 변화하면 CCD 센서 화면에 맺힌 포물선형태의 레이저 빔 영상의 위치는 상하로 변화한다. 레이저 선형빔의 입사각이 45도 이상이면 수평방향의 변위가 수직 방향으로 1:1 대응 또는 그 이상의 변위로 변환된다. 따라서 해상도 CCD & CMOS 영상 센서를 이용하여 레이저 상의 위치를 측정하면 핵연료봉의 변형을 고정도로 검사할 수 있다. 선형 레이저 빔이 조사된 핵연료봉의 영상을 캡처하여 PC에 저장하고 이를 분석할 수 있는 영상처리 알고리즘을 개발하였다. 영상 처리 알고리즘을 이용하여 선형 레이저빔의 입사각에 따른 핵연료봉의 전후 변위와 레이저 상의 상하 변위간의 관계식을 도출하였다. 핵연료봉의 표면에 크러드를 형성시킨 검사 시편에 대해 미세변형 측정실험을 하였으며 검사 정밀도를 계산하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 핵 연료봉 외관 검사 시스템, 분해능 계산 및 영상처리 알고리즘을 II장에서 기술하고 III 장에서 실험을 통해 제안한 검사 시스템의 성능을 평가하고 IV장에서 결론을 맺는다.

II. 핵 연료봉의 외관 검사

1. 검사 시스템

그림 1에 핵연료봉의 미세변위 측정 구성도를 나타내고 있다. 그림 1에서 VT(visual test) 시스템은 고분해능 CCD & CMOS 영상 센서이다. 반도체 레이저 다이오드에서 방출되는 선형빔을 VT 시스템의 광축을 기준으로 일정 각도 θ 로 연료봉 표면에 조사하면 VT 시스템의 모니터에는 연료봉 표면에 맺힌 선형 빔이 포물선 형태로 디스플레이 된다. 이때 연료봉이 VT 시

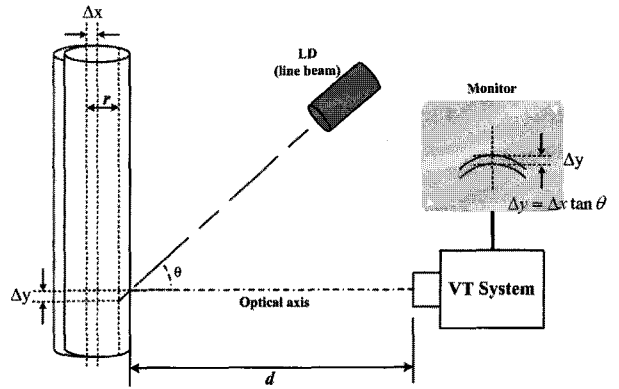


그림 1. 핵 연료봉의 미세변위 측정 구성도
Fig. 1. Configuration of micro displacement measurement of the fuel rod.

템의 광축을 따라 Δx 만큼 변위가 발생한다고 가정한다. VT 시스템의 모니터에는 레이저 상이 수직방향으로 Δy 정도 움직이게 된다. 연료봉의 전후 변위가 Δx 일 때 이에 따른 레이저 상의 상하 변위를 Δy 라고 하면 레이저 입사각 θ 와의 관계는

$$\tan\theta = \frac{\Delta y}{\Delta x} \tag{1}$$

로 나타낼 수 있다. 즉, 주어진 θ 에 대해서 Δy 를 측정하면 Δx 를 구할 수 있게 된다. 식(1)로부터 Δx 를 고정도로 측정하기 위해서는 선형 레이저빔 입사각 θ 가 매우 중요한 변수임을 알 수 있다. 레이저 빔의 입사각이 45° 일때 Δy 측정값이 연료봉 변위 Δx 로 치환된다.

$$\Delta y = \Delta x, \text{ if } \theta = \pi/4 \tag{2}$$

식(2)의 관계를 갖기 위해서는 그림 1로부터 반도체 레이저 다이오드는 VT 시스템과 연료봉사이의 관측거리 d 에 해당하는 높이로 VT 시스템의 광축에 수직으로 위치하여야 한다. 이때 반도체 레이저 다이오드와 연료봉 표면의 조사지점사이의 거리 l 는 다음과 같다.

$$l = \sqrt{(d^2 + (ad)^2)}, \alpha = \tan\theta \tag{3}$$

레이저빔의 입사각이 클수록 변위의 측정 정밀도는 $1/\alpha$ 로 개선된다. 그러나 반도체 레이저 다이오드의 설치위치가 높지므로 실용적이지 않다. 원자로에서 한 주기 이상 연소된 핵연료봉에서는 대략 3kGy/h 이상의 고 선량을 감마선을 방출한다^[3~4]. CCD & CMOS 영상 센서는 100Gy/h 이상의 고 선량을 감마선 피폭 환경에서는 사용할 수 없다^[5]. 일반적으로 1MeV의 에너지 준위를 갖

는 감마선의 세기를 1/10로 감소시키는데 필요한 냉각수(water)의 두께는 66.04cm 이다^[6]. 따라서 냉각수의 우수한 감마선 차폐 특성을 고려하여 고분해능 CCD & CMOS 영상 센서를 이용하여 연료봉을 정밀 관측할 경우 연료봉 표면으로부터 2~3 m 거리에서 수중 검사로 수행된다. 반도체 레이저를 VT 시스템의 y 축상에 위치할 경우 레이저다이오드와 연료봉 조사지점사이의 거리는 2.8~4.2 m에 해당하므로 레이저 선형빔의 두께를 균일하게 유지시켜주는 광학계가 부가적으로 필요하고 레이저 출력이 고출력 특성을 가져야 한다. 중성자 조사후 핵연료봉의 표면에 형성된 크러드는 검은색을 띄고 있으므로 레이저 빔의 반사율을 감소시키기 때문이다. 본 논문에서는 반도체 레이저 다이오드를 VT 시스템의 y 축상에 위치시키지 않고 연료봉과 근접한 거리에 위치시킨다. 반도체 레이저 다이오드의 재료특성에 주목하여 상기와 같은 가정을 하였다. CCD & CMOS 영상 센서는 IV 족 원소인 실리콘 공정으로 제조된다. LED 를 포함한 반도체 레이저 다이오드는 GaAs 등의 III-V 족 원소로 제조된다. 실리콘에 비해 GaAs 등의 III-V 족 화합물의 에너지 갭이 높기 때문에 감마선에 강한 특성을 가진다^[7~8]. LED 와 광학계 구성 재료에 대한 고선량을 감마선 조사 실험 결과로부터 반도체 레이저 다이오드 및 선형빔을 방출하는 광학계도 고선량율의 감마선 피폭환경에서 충분한 생존성이 있음을 추론할 수 있다. 원자로에 장전된 200 여개의 중성자 조사후 핵연료 집합체를 3일 이내에 전수 검사하여야 한다. 핵연료봉에서 방사하는 감마선 선량율을 보수적으로 계산할 경우 3kGy/h 로 추산한다. 그러면 레이저 다이오드는 누적 피폭선량(TID-total irradiation dose) 기준으로 216 kGy 정도의 감마선에 피폭된다. 반도체 레이저 다이오드와 물리적 구조가 같은 LED 및 초고휘도 power LED 에 대해 4kGy/h의 고선량율로 2~72시간 온라인 및 오프라인 감마선 조사실험을 수행하고 동작 특성을 평가한 결과 LED 및 초고휘도 power LED는 정상적으로 동작하였으며 밝기도 변화가 없었으며 전광(구동전류-발광세기) 특성도 선형성을 유지하였다^[9~10].

2. 영상 센서 분해능 계산

선형 레이저 빔 추출에 앞서 영상센서의 분해능을 알아보기 위해 연료봉 시편 옆에 눈금자를 두고 이를 촬영하여 분해능을 계산하였다. 그림 2에 9.66mm 직경의 크러드 연료봉 시편과 눈금자의 관측 영상을 나타내고

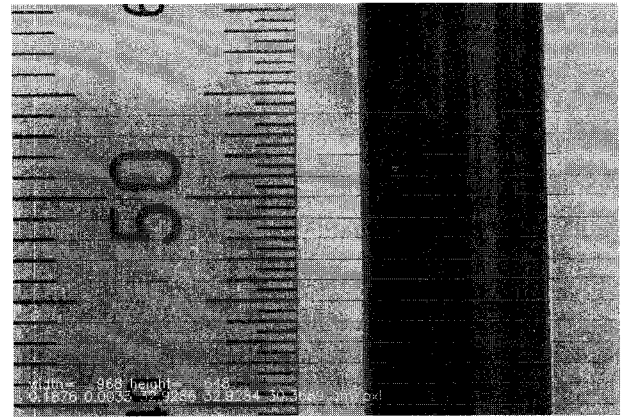


그림 2. 연료봉 시편 관측 영상

Fig. 2. Observation image of fuel rod with crud.

있다.

그림 2의 눈금을 바탕으로 영상 센서의 분해능을 측정하기 위해 눈금자의 선분을 구하고 선분의 기울기와 절편을 추출하였다. 각각의 선분들로부터 기울기 평균과 절편의 평균을 계산한다. 실제 눈금자 치수를 평균 절편값으로 나누어 주면 한 픽셀이 나타내는 분해능을 구할 수 있다. 그림 2의 픽셀 분해능은 $30.37\mu\text{m}/\text{pixel}$ 이다. 이는 레이저 빔이 y 축으로 1 픽셀 움직였을 경우 연료봉의 Δx 변위는 약 $30.37\mu\text{m}$ 임을 나타낸다.

3. 레이저 선형 빔의 위치 추출

관측 영상에서 선형 레이저빔의 위치를 검출한다. 본 논문에서는 선형 레이저 빔 조사전/후의 두 영상을 이용하여 차영상 기법으로 선형빔 영역을 추출하였다. 이를 그림 3에 나타내었다. 그림 3의 상단 그림은 레이저 빔 조사전의 영상이고 중간 그림은 레이저 빔 조사후의 영상이다. 조사 전후의 차영상을 구하여 2진화 처리를 하면 그림 3의 하단과 같이 레이저 빔 영역만 추출된다. 그림 3의 하단 그림에서 연료봉 표면에 일정 각도로 입사된 레이저 라인빔이 영상 센서면에서는 일정 두께를 갖는 포물선 형태로 관측 된다. 이는 레이저 라인빔이 일정 두께를 갖고 있고 발산하므로 연료봉 표면에 맺히는 거리가 다르기 때문이다. 본 논문에서는 레이저 빔 위치의 특징점으로 상단의 포물선을 취하였다. 이를 그림 4에 나타낸다. 그림 4에서 레이저 빔 영역의 전체 윤곽선에 대해 타원을 구하고 타원의 y 축의 threshold 이하의 값들은 제거한다. 상단의 포물선 영역만 남게 되며 이를 타원으로 재차 모델링하고 타원의 장축과 단축의 기울기를 구한다. 포물선의 변곡점과 모델링한 타

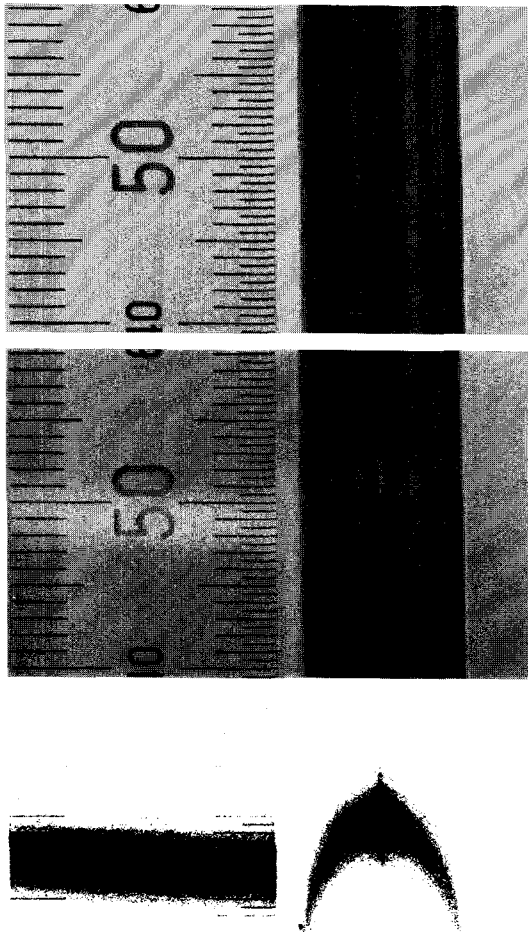


그림 3. 레이저 선형빔 영역 추출
 Fig. 3. Line beam area extraction using image subtraction method (after and before laser beam illumination).

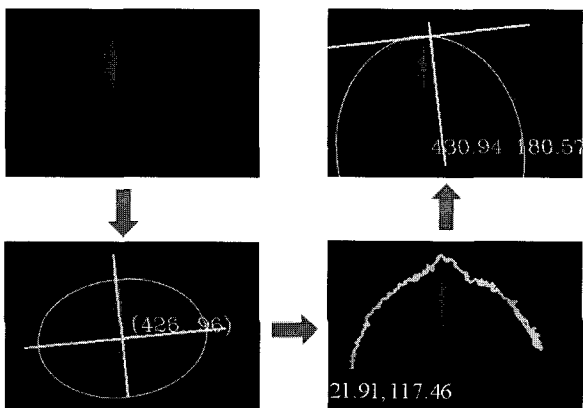


그림 4. 레이저 선형 빔 위치 추정
 Fig. 4. Estimation of laser line beam position illuminated at the fuel rod.

원의 장축과 단축이 교차하는 지점을 특징점으로 취하였다. 레이저의 위치를 찾게 되면 기준점, 즉 핵연료봉의 전후 변위가 0일 경우로부터 얼마나 벗어났는지를 계산할 수 있게 된다. 기준점으로부터 벗어난 pixel 수를 구한 후 이를 분해능을 통해 mm로 변환시켜준 다음 마지막으로 (1)식을 이용해 연료봉의 변위를 구한다.

III. 실험 및 고찰

1. 실험

그림 5에 나타난 것처럼 크러드 형성된 연료봉을 마이크로 스테이지를 이용하여 전후 방향으로 0.1mm 단위로 미세 이동시켰다. 선형 빔을 방출하는 반도체레이저는 650 nm 파장에서 20mW의 출력을 갖는 Class IIIb 레이저다이오드이다. 레이저 라인빔 영상을 획득하는 CCD & CMOS 영상 센서는 디지털 카메라에 사용되는 1/1.8" 크기의 대면적 센서를 사용하였다. CCD 카메라 렌즈는 F-마운트의 필름(35×24mm) 카메라용 렌즈를 사용하였다. CCD & CMOS 센서면의 유효 영역이 대구경의 F-마운트 필름 렌즈의 광축 중심부근에 위치하도록 하여 관측 영상의 왜곡이 발생하지 않도록 하였다.

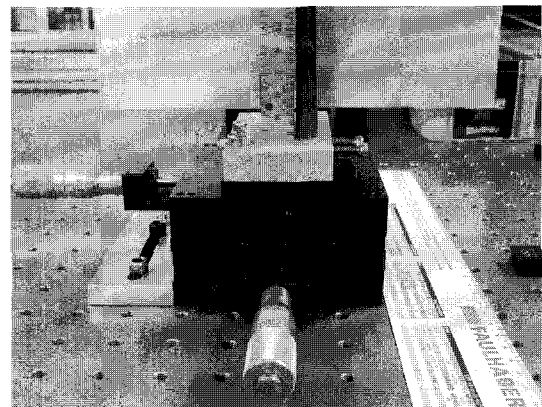


그림 5. 연료봉의 미세이동 실험장치
 Fig. 5. Experimental setup for micro-movement of fuel rod.

2. 각도에 따른 분해능의 변화

레이저 입사각 θ 에 따라 같은 변위 Δx 에 대해서 Δy 는 커지게 된다. Δy 가 클수록 분해능이 좋아지며 오차도 줄어든다. 본 논문에서는 주어진 거리(440mm)에서 45°, 60°, 70°, 80°의 네 가지 각도들에 대해 분해능과 오차율을 분석하였다. 각각의 레이저 입사각도에 대해 전후 변위를 주면서 레이저 상의 pixel 변화를 통

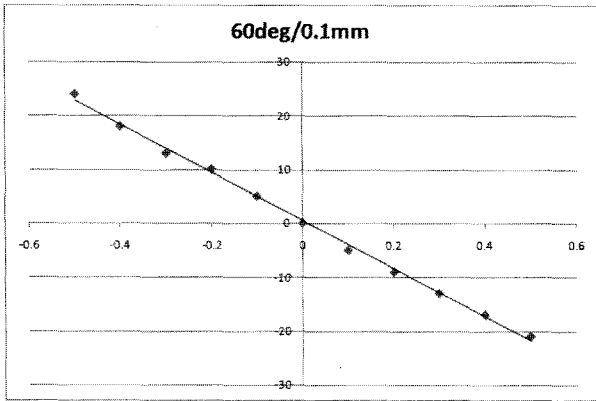


그림 6. 연료봉의 전후변위에 따른 레이저 빔의 위치
Fig. 6. Laser beam positions according to the back and forth fuel rod displacement of the fuel rod.

표 1. 레이저 선형빔 입사각도에 따른 분해능
Table 1. Displacement resolution of the fuel rod due to the incident angle of the laser line beam.

레이저 빔 입사각	45°	60°	70°	80°
전후 변위 (분해능)	0.2mm	0.1mm	0.1mm	0.05mm
평균 pixel	5.82	4.68	6.38	7.18
표준 편차	0.64	0.76	0.84	1.59

계적으로 분석하여 이들의 평균과 표준편차를 구함으로써 분해능을 구하였다. 타원 모델링에 의한 중심점 추출은 레이저 빔 패턴의 윤곽선 형태에 따라 변동이 심하다. 측정 결과 이진화 처리를 위한 문턱치 변동에 따라 추출된 타원모델의 중심점 위치도 변동하였다. 측정 오차를 최소화하기 위해 다수의 문턱치를 이용하여 타원 모델들을 다수 추출하고 이들 타원 모델들의 중심점들을 평균하여 레이저 빔의 변위를 구하였다. 그림 6은 레이저 입사각이 60°일 때 연료봉의 전후 변위에 따른 레이저 상의 pixel 변화를 분석한 그래프이다. 그림에서 x 축은 연료봉의 전후 변위(mm) 를 나타내고 y 축은 레이저 상의 픽셀위치를 나타낸다.

표 1로부터 변위 검출이 가능한 레이저 입사각의 상한선이 80도 정도라는 것을 알 수 있었다. (1) 식과 그림 2에서 구한 픽셀 분해능의 관계를 바탕으로 레이저 상의 위치와 핵연료봉의 전후 변위간의 관계를 도출해 본다. 관측 영상에서 레이저 위치가 기준점 보다 α 픽셀 벗어나 있는 경우 실제 레이저의 상하 변위는

$$\frac{\alpha \text{ pixel}}{30.3689 \text{ pixel/mm}} = \frac{\alpha}{30.3689} \text{ mm} \quad (4)$$

이다. (1)식에 대입하면

$$\Delta x = \frac{\Delta y}{\tan \theta} = \frac{\alpha}{30.3689 \times \tan \theta} (\text{mm}) \quad (5)$$

(5) 식을 바탕으로 레이저 빔의 입사각 θ 가 80° 일 때 42.38 μm 크기의 전후 변위 까지 검출해낼 수 있다.

레이저 빔의 입사 각도에 따른 평균 픽셀과 표준 편차를 볼 때 45° 일 경우에는 0.2mm 정도의 변위를 검출할 수 있지만 80° 일 때는 50 μm 이하의 미세 변위도 검출할 수 있음을 알 수 있다. 이러한 검출 정밀도는 CCD & CMOS 영상센서의 픽셀 크기가 빛의 파장영역인 0.4~0.7 μm 크기의 2~3 배로 더욱더 적어지면 더욱더 향상될 것으로 추정 된다.

IV. 결론

본 논문에서는 핵연료봉의 변형을 고정밀도로 검사할 수 있는 방법을 제안하였다. 직선 형태의 선형빔을 방출하는 반도체레이저와 고분해능 CCD & CMOS 영상 센서를 이용한다. 핵 연료봉과 이를 관측하는 영상 센서의 광축을 수직으로 구성하고 영상 센서의 광축을 기준으로 45° 이상의 각도로 레이저 빔을 연료봉 표면에 조사하면 연료봉의 수평 방향 변위가 영상 센서에서는 수직 방향 변위로 관측된다. 센서 화면에 나타나는 일정 두께의 레이저 빔 패턴의 위치를 추출한다. 크러드가 형성된 핵연료봉 시편에 대해 고해상도 영상센서를 사용하여 실험한 결과 중성자 조사 후 핵연료봉의 변형 검사기준인 150 μm 보다 3배 이상 개선된 50 μm 이하의 검사 정밀도를 달성하였다. 현재 모노 카메라에 의한 조사후 연료봉의 육안검사에서는 연료봉의 요철, dent 등의 미세 변위를 검출하기 위해서는 검사자의 숙련도에 크게 좌우된다. 반도체 레이저 다이오드는 재료 및 물리구조의 특성상 고선량의 감마선 피폭에도 강건하므로 검사 대상인 고선량의 감마선을 방출하는 중성자 조사 후 핵 연료봉에 근접하여 설치할 수 있으므로 본 논문에서 제안한 방법을 적용할 경우 연료봉의 변위를 고정밀도로 측정할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] 전용범, "사용 후 연료 노내 조사성능 검사요건 및 해석 방법에 관한 연구", KAERI/CR-219/2004, 한국 원자력 연구원, 2005.
- [2] 노성기, "조사 핵연료의 수중 비파괴 시험 기술", KAERI/AR-204/83, 한국 원자력 연구원, 1983.
- [3] J.Sejvar, "Normal Operating Radiation Levels In Pressurized Water Reactor Plants", Nuclear Technology, vol. 36, pp. 48-55, Nov. 1977.
- [4] (주) KHNP, "Fuel Inspection System Specification 9-159 -N227", 2007.
- [5] "Comparison of Radiation Susceptibility for Microcircuits of Different Technologies", MIL-HDBK-978-B
- [6] John V. Draper, Reid L. Kress, and Barry L. Burks, "Remote Maintenance Design Guide for Compact Processing Units", ORNL/TM-2000/124, 2000.
- [7] Ethan L. Blansett, "Radiation Hardened Optoelectronic Components for Space -Based Applications", SAND2003-4288, 2003215
- [8] K. Gill and V. Arbet-Engels, "Radiation Damage Studies of Optoelectronic Components for the CMS Tracker Optical Links", Presented at RADECS 97 conference, Cannes, Sept. 1997.
- [9] J. W. Cho, Y. S. Choi, and J. C. Shin, "A Color Correction of Camera Lens Degraded by High Dose-Rate Gamma Irradiation", 한국정밀공학회 2009년도 춘계학술대회논문집
- [10] J. W. Cho, Y. S. Choi, and J. C. Shin, "A High Dose-rate Gamma Irradiation of the High Brightness Power LED", 한국 조명 전기 설비학회 2009년도 춘계학술대회 논문집

저자 소개



조재완(정회원)
1982년 경북대학교 전자공학과
학사
1984년 경북대학교 전자공학과
석사
1987년~한국원자력연구원
원자력융합기술개발부

<주관심분야 : 통신, 신호처리>



최영수(정회원)
1991년 경북대학교 전자공학과
학사
1994년 경북대학교 전자공학과
석사
1995년~한국원자력연구원
원자력융합기술개발부

<주관심분야 : 통신, 신호처리>