

영상처리법에 의한 사용후 핵연료 집합체 제원변형률 측정

**The Dimensional Change Rate Measurement of Spent Fuel Assemblies  
using Image Processing Method**

구대서, 박성원, 김은가, 민덕기, 김길수

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

**요 약**

원자로 핵연료 집합체의 제원변형률을 측정하기 위하여 개발한 영상측정 시스템의 성능 시험을 수행하였다. 본 시스템의 핵연료봉 직경 및 길이 측정 정확도는 실제값 기준으로 각각 0.3mm, 0.5mm 이내였다. 고리원자력 2호기에서 2주기 동안 연소한 핵연료 집합체 J44의 핵연료봉 직경은 설계치 기준으로 핵연료봉 하단·상단부의 직경은 1.7~2.0%, 중앙부의 직경은 3.0% 정도 감소 하였는데 이는 노내에서 핵연료봉 중앙부의 연소도가 상·하단부 연소도보다 더 큰 것에 기인하는 것으로 생각된다. 핵연료 집합체 J44의 제1~4면의 핵연료봉 길이는 약 0.4% 정도 신장하였다. 고리원자력 1호기에서 3주기 동안 연소한 핵연료 집합체 F02의 핵연료봉 직경은 설계치 기준으로 핵연료봉 하단·상단부의 직경은 1.9~2.0%, 중앙부는 3.1% 정도 감소하였고 핵연료봉 길이는 제1면의 핵연료봉 길이는 약 0.5%, 제2~4면의 길이는 약 0.4% 정도 신장하였다.

**Abstract**

The verification test of image processing measuring system which is developed was carried out to measure the dimensional change rate of reactor fuel assemblies. The measuring accuracies of diameter, length of fuel rods using this system are within 0.3mm, 0.5mm by comparing measurement values with standard ones, respectively. The diameters of fuel assembly J44 which is burned for 2 cycles at Kori-2 reactor are diminished with 1.7~2.0% at lower, upper region, with 3.0% at mid region of fuel rods by comparing measurement values with design ones, which is probably due to the higher burnup of mid region than that of lower, upper region of fuel rods. The length elongation of first face to fourth face fuel rods in J44 is about 0.4%. The diameters of

fuel assembly F02 which is burned for 3 cycles at Kori-1 reactor are diminished with 1.9~2.0% at lower, upper region, with 3.1% at mid region of fuel rods by comparing measurement values with design ones. The length elongation of first face fuel rods in F02 is about 0.5% and that of second face to fourth face fuel rods is about 0.4%.

## 1. 서론

원자로의 핵연료는 중성자 선속, 원자로 선출력, 원자로 온도 및 압력등 원자로 운전 조건에 의해 swelling 및 densification 을 거치면서 핵연료봉 제원변형이 발생한다[1~3]. 사용후 핵연료의 변형과 건전성을 검사하기 위하여 이제까지 수중에서 내방사선 카메라를 수동으로 움직여 핵연료 집합체의 외관을 관찰하고 핵연료봉 표면결함을 검사하였다. 이 방법에 의하여 검사를 수행하면 시간과 인력이 많이 소요되는 단점이 있기 때문에 이를 개선하기 위하여 영상처리에 의한 방법을 적용하였다[4~7].

본 연구에서 위치제어보드, R93 25 mm 렌즈 카메라, FGAX 2250 halogen light, Matrox 영상보드를 구성하여 카메라 위치를 X, Y, Z 축 방향으로 각각 25 mm/sec, 2 mm/sec 및 83 mm/sec 속도로 제어하고 사용후 핵연료집합체 제원 변형률을 측정할 수 있는 영상측정 시스템을 개발하였다. 이 시스템의 성능시험을 수행하고 고리원자력 2호기, 1호기에서 각각 2주기 3주기 연소한 핵연료 집합체의 제원변형률을 측정하고 분석하였다.

## 2. 실험장치 및 측정방법

### 2.1. 영상측정 시스템

그림 1의 영상처리시스템은 위치제어부, 카메라 영상 처리부로 구성되는데 위치 제어부는 MEI (motion engineering incorporation)회사의 위치 제어보드로 X, Y, Z축 모터 및 X, Y, Z축 드라이브를 구동시켜 camera를 X, Y, Z축으로 25 mm/sec, 2 mm/sec 및 83 mm/sec 속도로 제어 되도록 하였으며, 카메라 영상처리부는 R93 25 mm 렌즈 카메라, FGAX 2250 halogen light, Matrox 영상보드를 사용하여 사용후 핵연료집합체 제원 변형률을 측정하고 핵연료 집합체의 외관검사를 수행할 수 있도록 하였다.

### 2.2. 모의 핵연료집합체 제작

제작한 영상처리시스템 성능시험용 모의 핵연료 집합체의 제원은 가로 214mm, 세로 214mm, 높이 570mm이고 연료봉의 재질은 스텐레스 스틸로 하고 핵연료 집합체의 하판, 상판 및 가운데 2개 지지판은 듀랄루민으로 제작하여 수중에서 사용할 수 있도록 하였다. 집합체 한 면은 고리 1호기 14×14 면의 3열로 제작하고 대응하는 집합체 면은 울진 1~2호기 17×17 면의 3열로 제작하였다.

### 2.3. 측정방법

9403 시험/해체품의 집합체 회전판에 설치된 사용후 핵연료 집합체면과 나란하게 설치된 표준자( $\varnothing$  5mm 관통원)에서 영상 수평성분 캘리브레이션(CX)과 수직 성분 캘리브레이션(CY)을 수행한다. 본 실험은  $CX = 0.116\text{mm/pixel}$ ,  $CY = 0.093\text{mm/pixel}$  인 조건에서 핵연료봉의 측정위치에 ROI를 설정하고 핵연료봉 1개씩 제원을 측정하였다. 측정할 때 light intensity, 카메라의 조리개 및 초점을 영상측정조건에 적절하도록 조절하였다. 측정대상 핵연료 집합체는 고리원자력 2호기에서 2주기 연소한 J44집합체와 고리원자력 1호기에서 3주기 연소한 F02집합체에 대하여 직경과 길이를 측정하여 설계치를 기준으로 제원 변형률을 분석하였다.

### 3. 측정결과 및 논의

그림 2는 개발한 영상처리 제원 측정시스템에 의하여 모의 핵연료 집합체 핵연료봉의 직경을 측정된 것을 나타낸 것이다. 핵연료봉 직경 실제값 기준으로 본 시스템의 모의 핵연료봉 직경 측정 정확도는 0.3mm 이내였다. 그림 3은 개발한 영상처리 제원 측정시스템에 의하여 모의 핵연료 집합체 핵연료봉의 길이를 측정된 것을 나타낸 것이다. 핵연료봉 길이 실제값 기준으로 본 시스템의 모의 핵연료봉 길이 측정 정확도는 0.5mm 이내였다.

그림 4는 고리원자력 발전소 2호기에서 2주기 동안 연소한 핵연료 집합체 J44의 핵연료봉 직경을 측정된 것을 나타낸 것이다. 설계치 기준으로 핵연료봉 하단·상단부의 직경은 1.7~2.0% 정도 감소한 반면 중앙부의 직경은 3.0% 정도 감소하였다. 이는 노내에서 핵연료봉 중앙부가 상·하단부보다 원자 핵분열이 활발하여 더 많이 연소된 것에 기인하는 것으로 생각된다. 그림 5는 고리원자력 발전소 2호기에서 2주기 동안 연소한 핵연료 집합체 J44의 핵연료봉 길이를 측정된 것을 나타낸 것이다. 설계치 기준으로 핵연료 집합체 제1~4면의 길이는 약 0.4% 정도 신장하였다.

그림 6은 고리원자력 발전소 1호기에서 3주기 동안 연소한 핵연료 집합체 F02의 핵연료봉 직경을 측정된 것을 나타낸 것이다. 설계치 기준으로 핵연료봉 하단·상단부의 직경은 1.9~2.0% 정도 감소한 반면 중앙부의 직경은 3.1% 정도 감소하였다. 이는 노내에서 핵연료봉 중앙부가 상·하단부보다 원자 핵분열이 활발하여 더 많이 연소된 것에 기인하는 것으로 생각된다. 그림 7은 고리원자력 발전소 1호기에서 3주기 동안 연소한 핵연료 집합체 F02의 핵연료봉 길이를 측정된 것을 나타낸 것이다. 설계치 기준으로 핵연료 집합체 제1면의 핵연료봉 길이는 0.5%, 제2~4면의 길이는 약 0.4% 정도 신장하였다.

### 4. 결론

1. 본 영상처리 제원 측정시스템의 모의 핵연료봉 직경 및 길이 측정 정확도는 실제값 기준으로 각각 0.3mm, 0.5mm 이내였다.
2. 고리원자력 2호기에서 2주기 동안 연소한 핵연료 집합체 J44의 핵연료봉 직경은 설계치 기준으로 핵연료봉 하단·상단부의 직경은 1.7~2.0%, 중앙부의 직경은 3.0% 정도 감소하였는데 이는 노내에서 핵연료봉 중앙부가 상·하단부보다 연소가 더 많이 된 것에 기인하는 것으로 생각된다. 핵연료 집합체 제1~4면의 핵연료봉 길이는 약 0.4% 정도 신장하였다.
3. 고리원자력 1호기에서 3주기 동안 연소한 핵연료 집합체 F02의 핵연료봉 직경은 설계치 기준으로 핵연료봉 하단·상단부는 1.9~2.0%, 중앙부는 3.1% 정도 감소하였는데 이는 노내에서 핵연료봉 중앙부의 연소도가 상·하단부 연소도보다 더 큰 것에 기인하는 것으로 생각 된다. 핵연료 집합체 F02의 제1면의 핵연료봉 길이는 0.5%, 제2~4면의 길이는 약 0.4% 정도 신장하였다.

## 감사의 글

본 연구가 과학기술부의 원자력사업의 일환으로 수행되었음

## 참고문헌

- [1] M. C. J. Carson, "Densification in Mixed Oxide Fuel during Fast Reactor Irradiation," Nucl. Tech. V. 42, p. 335(1974).
- [2] M. Uchida, et al., "Densification of Uranium Dioxide Fuel Pellets(I)," JAERI-M 6904, pp. 1-7(1977).
- [3] W. Chubb, et al., "The Influence of Fuel Microstructure on In-Pile Densification," Nucl. Tech. V. 26, pp. 496-493(1975).
- [4] W. K. Pratt, "Digital Image Processing," pp. 305-318, pp. 345-349, John Wiley & Sons, Inc., California(1978).
- [5] H. C. Andrews and B. R. Hunt, "Digital Image Restoration," pp. 113-118, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey(1977).
- [6] A. Rosenfeld and M. Thurston, "Edge and Curve Detection for Visual Scene Analysis," IEEE Transactions, Vol. C-20, No. 5, 562-563(1971).
- [7] D. J. Bryant and D. W. Bouldin, "Evaluation of Edge Operators using Relative and Absolute Grading," pp. 138-140, IEEE, Tennessee(1979).



그림 1. 사용후 핵연료집합체 제원 영상처리 측정시스템.

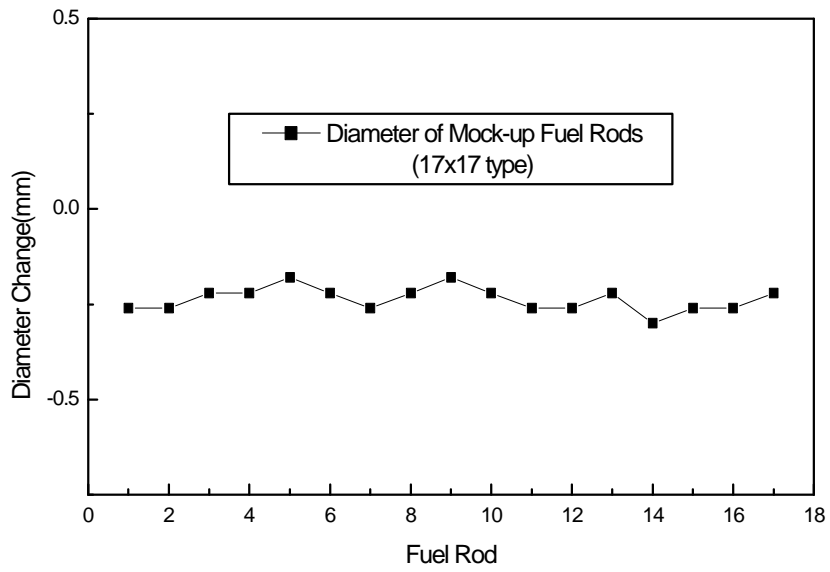


그림 2. 모의 핵연료봉의 직경측정 정확도.

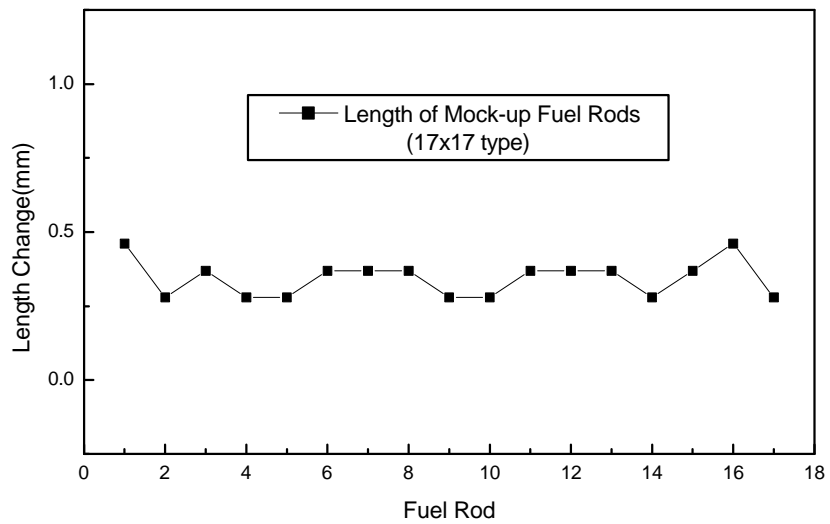


그림 3. 모의 핵연료봉의 길이측정 정확도.

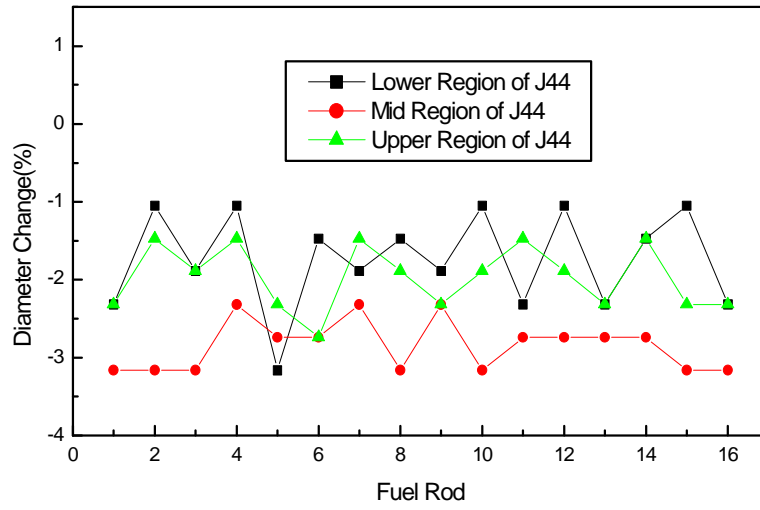


그림 4. 사용후 핵연료 집합체 J44 핵연료봉의 직경변형률.

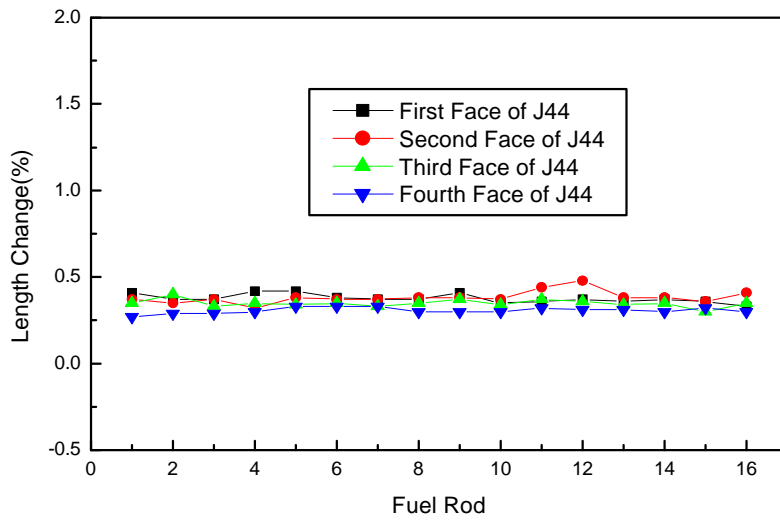


그림 5. 사용후 핵연료 집합체 J44 핵연료봉의 길이변형률.

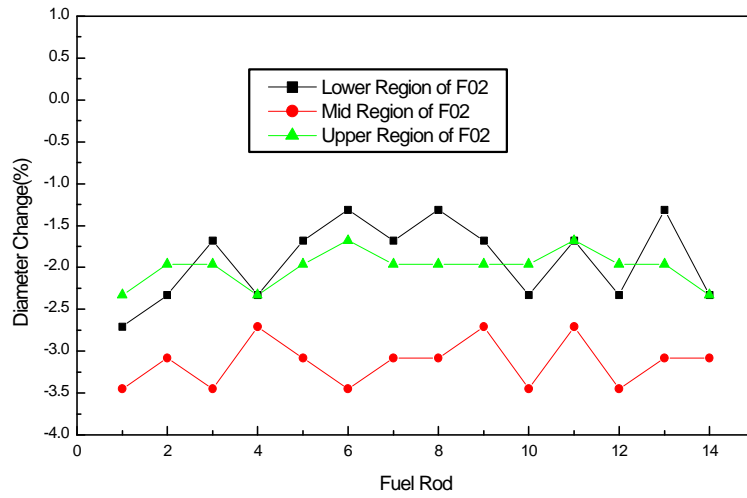


그림 6. 사용후 핵연료 집합체 F02 핵연료봉의 직경변형률.

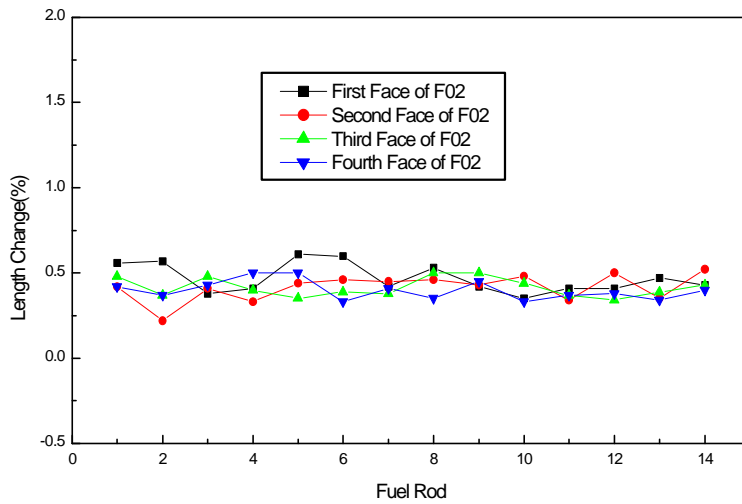


그림 7. 사용후 핵연료 집합체 F02 핵연료봉의 길이변형률.