

영상처리기술에 의한 사용후핵연료 집합체의 제원 측정

Dimensional Measurement of Spent Fuel Assemblies Using Image Processing Technique

구대서*[†], 박성원*

Dae-Seo Koo*[†] and Seong-Won Park*

초 록 수중에서 사용후 핵연료 제원측정 시험의 효율성을 높이고 측정오차를 줄이기 위하여 수중 영상측정방법을 개발하였다. 이 시스템의 모의 핵연료봉 직경 및 길이 측정치는 실제값 기준으로 할 때, 각각 $-0.24 \pm 0.03\text{mm}$, $0.34 \pm 0.06\text{mm}$ 이고 측정 최대오차는 각각 -0.3mm 및 0.4mm 이내였다. 실제 사용후핵연료에 대한 수중 제원측정결과 고리원자력 2호기에서 2주기 동안 연소한 핵연료 집합체 J44의 핵연료봉 직경은 설계치 기준으로 할 때 핵연료봉 상·하단부 직경은 2.0%, 중앙부의 직경은 3.0% 정도 감소하였으나 핵연료봉의 길이는 0.4% 정도 신장하였다. 고리원자력 1호기에서 3주기 동안 연소한 핵연료 집합체 F02의 핵연료봉의 직경 및 길이는 핵연료 집합체 J44의 결과와 비슷한 경향을 나타내었다.

주요용어: 핵연료 집합체, 핵연료봉, 영상처리, 제원측정, 측정오차

Abstract A pool image processing measurement method has been developed to improve the examination efficiency and to minimize the errors of dimensional measurements of spent fuel assemblies in pool. Diameter and length measurements of mock-up fuel rods using the image processing system are $-0.24 \pm 0.03\text{mm}$, $0.34 \pm 0.06\text{mm}$ on the basis of the true value and their maximum errors are within -0.3 and 0.4mm , respectively. According to the result of dimensional measurement of spent fuels in pool, the upper and lower part diameter and mid part diameter of fuel rods of the J44 fuel assembly irradiated for 2 cycles in the Kori-2 nuclear reactor were decreased by about 2.0 and 3.0% in comparison with design values, respectively. The length of fuel rods was elongated by about 0.4%. The change behavior of diameter and length of fuel rods of the F02 fuel assembly irradiated for 3 cycles in the Kori-1 nuclear reactor showed a trend similar to the results of J44.

Keywords: fuel assembly, fuel rod, image processing, dimension measurement, measurement error

1. 서 론

원자로의 핵연료는 중성자 선속, 원자로 선출력, 원자로 온도 및 압력등 원자로 운전 조건에 의해 팽창(swelling) 및 고밀화(densification)를 거치면서 핵연료봉 제원변형이 발생한다[1-4]. 사용후 핵연료의 변형과 건전성을 검사하

기 위하여 이제까지 수중에서 내 방사선 카메라를 수동으로 움직여 핵연료 집합체의 외관을 관찰하고 핵연료봉 표면결함을 검사하고 수중 카메라의 핵연료봉 영상의 경계면과 경계면간의 엔코드 값을 읽어 핵연료 집합체의 제원을 측정하였다. 이 방법에 의하여 검사를 수행하면 시간과 인력이 많이 소요되고 핵연료봉 제원설계치 기준으로 할

때, 최대 측정오차 10%의 측정한계를 지닌다. 또한 현장 장비는 최대 측정오차 5%의 성능이 요구되므로 이를 개선하기 위하여 영상처리에 의한 방법을 적용하여 오고 있다[5-7].

본 연구에서는 사용후 핵연료의 제원측정 시험의 효율을 향상시키기 위하여 자동 이진화 영상처리 알고리즘, 영상경계면 개선 알고리즘, 영상처리 측정 알고리즘 등을 개발하여 현장에 영상처리측정 시스템을 구축하고 이 시스템의 성능시험을 수행하였다. 수동의 interactive 다이얼로그에 의하여 임의로 이진화 임계치를 결정하지 않고 프로그램에 의하여 이진화 임계치를 결정하였고, 이진화 영상의 손실을 줄일 수 있었다. 얻은 이진화 영상에 smooth filter를 통과시키고 픽셀의 opening 및 closing을 반복 수행하여 영상 경계면을 개선하였다. 개선된 이진화 영상에서 ROI 영상의 경계 추출(edge detection)를 수행하여 수평 및 수직영상의 픽셀수를 구하고 표준자에 대한 수평 및 수직성분 캘리브레이션 값을 이용하여 연료봉의 치수를 측정하였다. 고리 원자력 1호기에서 3주기 연소하고, 고리 원자력 2호기에서 2주기 연소한 사용후 핵연료집합체 핵연료봉의 제원을 측정하고 비교하였다.

2. 실험 및 측정

2.1. 영상측정 시스템

Fig. 1은 사용후 핵연료집합체 외관 및 영상제원 측정 장치를 나타낸 것이다. 영상처리시스템은 위치 제어부, 영상 처리부로 구성되는데 위치 제어부는 MEI(motion engineering incorporation)회사의 위치 제어보드에 의하여 카메라를 X, Y, Z축으로 각각 1,500mm/min, 120mm/min 및 4,980mm/min 속도로 제어 하고, 영상 처리부는 R93 25mm 렌즈 카메라, FGAX 2250 halogen light, Matrox 영상보드를 사용하여 사용후 핵연료집합체의 제원 변형률을 측정하게 된다.

2.2. 모의 핵연료 집합체 제작

개발한 영상처리 측정시스템을 이용하여 핵연료봉 제원의 측정오차를 측정하기 위하여 Fig. 2와 같은 모의 핵연료 집합체를 제작하였다. 이 핵연료 집합체의 제원은 가로 214mm, 세로 214mm, 높이 570mm이고 연료봉의 재질은 스테인레스강이며 집합체의 하판, 상판 및 가운데

2개 지지관은 듀랄루민으로 제작하여 수증에서 사용할 수 있도록 하였다. 집합체 한 면은 직경 10.72mm인 연료봉을 사용하여 고리 원자력 1호기 핵연료 집합체의 14열 3행으로 제작하고 대응하는 집합체 면은 직경 9.50mm인 연료봉을 사용하여 울진 원자력 1~2호기 핵연료 집합체의 17열 3행으로 제작하였다.

2.3. 이진화 영상처리 알고리즘

Fig. 3은 이진화 영상처리 절차를 나타낸 것이다. 먼저 핵연료봉 영상을 입력하고 측정하고자 하는 위치에 ROI(region of interest)를 설정하고 ROI의 히스토그램을 구한다. 히스토그램의 x축은 그레이 레벨이고 y축은 픽셀 수를 나타낸다. ROI 영상의 히스토그램에 존재하는 영상 잡음을 평활화 필터를 사용하여 제거하고 두 그레이 레벨 피크 사이의 움푹 꺼진 가장 낮은 점의 임계치를 수동의 interactive 다이얼로그에 의하여 임의로 결정하지 않고 프로그램에 의하여 이진화 임계치를 결정하였다. 이와 같이 물체(백색)와 배경(흑색)을 분리하는 이진화 임계치를 프로그램에 의하여 자동적으로 결정하면 수동의 임의로 이진화 임계치를 결정하는 경우보다 이진화 영상의 손실을 줄일 수 있다.



Fig. 1 Visual/dimensional image processing measurement system of spent fuel assembly

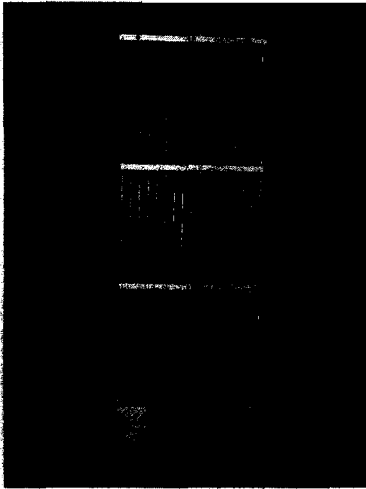


Fig. 2 Mockup fuel assembly

2.5. 영상처리 측정 알고리즘

Fig. 5는 영상처리 측정 알고리즘을 나타낸 것이다. 영상 경계면이 개선된 이진화 영상을 라벨링하고 ROI를 재설정한다. 재설정된 ROI 영상의 경계 추출(edge detection)를 수행하여 첫째 경계와 둘째 경계를 찾아 수평 및 수직영상의 픽셀수를 구한다. 구한 픽셀수에 표준자에 대한 수평 및 수직성분 캘리브레이션 값을 이용하여 프로그램의 연산에 의하여 연료봉의 치수를 측정하였다.

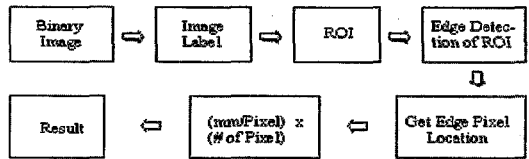


Fig. 5 Algorithm of image processing measurement

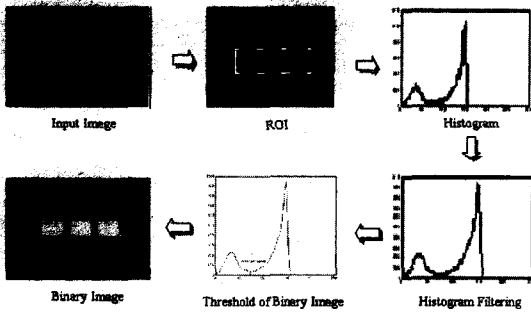


Fig. 3 Algorithm of binary image processing

2.6. 측정방법

한국원자력연구소 조사후시험시설의 9403 시험/해체폴의 집합체 회전판에 설치된 사용후 핵연료 집합체면과 나란하게 설치된 표준자(Ø5mm 관통원)와 카메라간의 영상 캘리브레이션을 수행하고 사용후 핵연료 집합체 체원을 측정하였다.

본 실험에서 수평영상 캘리브레이션은 $CX = 0.116\text{mm/pixel}$, 수직영상 캘리브레이션은 $CY = 0.093\text{mm/pixel}$, 연속조절 할 수 있는 조명등의 수중 조명세기는 900watt, 수동초점 및 수동 iris 로 작동하는 카메라의 초점거리는 22cm이고 조리개는 50% 였다. Fig. 5의 영상처리 측정 알고리즘 절차에 따라 핵연료봉 직경과 길이를 측정하였다. 측정대상 핵연료는 고리원자력 2호기에서 2주기 연소한 J44 집합체와 고리원자력 1호기에서 3주기 연소한 F02 핵연료 집합체였으며, 집합체를 90° 씩 회전시켜 제1면~제4면 핵연료봉의 직경과 길이를 측정하고 설계치를 기준으로 제원 변형률을 비교하였다.

2.4. 영상경계면 개선 알고리즘

Fig. 4는 영상경계면 개선 알고리즘을 나타낸 것이다. 이진화된 영상의 경계(edge)부분의 들쭉날쭉한 것을 smooth filter를 통과시켜 경계부분을 blurring 시킨 후 영상 이진화를 수행하고 픽셀의 opening 및 closing을 반복 수행하여 영상경계면을 개선하였다.

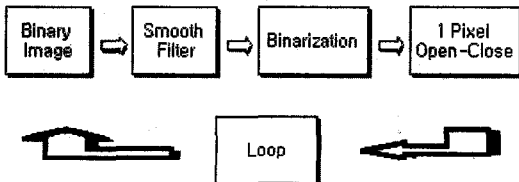


Fig. 4 Algorithm of image edge enhancement

3. 결과 및 고찰

Fig. 6은 개발한 영상처리 제원 측정시스템에 의하여 모의 핵연료 집합체 핵연료봉 직경을 측정한 결과를 측정오차에 대해 나타낸 것이다. 모의 핵연료봉의 직경 실

제값 기준으로 할 때 모의 핵연료봉 직경의 측정치는 $-0.24 \pm 0.03\text{mm}$ 이고 측정 최대오차는 -0.3mm 이내였다. Fig. 7은 모의 핵연료 집합체 핵연료봉 길이를 측정된 결과를 측정오차에 대해 나타낸 것이다. 모의 핵연료봉의 길이 실제값 기준으로 할 때 모의 핵연료봉 길이 측정치는 $0.34 \pm 0.06\text{mm}$ 이고 측정 최대오차는 0.4mm 이내였다. 개발한 시스템의 측정 최대오차는 5%이내였고, 측정시간이 기존방법에 의한 측정시간의 1/3으로 단축되어 기존 시스템보다 시험의 효율이 향상되었다.

Fig. 8은 고리원자력 2호기에서 2주기 동안 연소한 핵연료 집합체 J44-4면의 핵연료봉 직경변화율을 측정된 것을 나타낸 것이다. 핵연료봉 직경의 설계치 기준으로 할 때 핵연료봉 하단부 직경은 1.7~1.8%, 상단부 직경은 1.9~2.0% 정도 감소하고, 중앙부의 직경은 2.8~2.9% 정도 감소하였다. 이는 노내에서 핵연료봉 중앙부가 상·하단부보다 원자 핵분열이 활발하여 더 많이 연소된 것에 기인한 것으로 생각된다. Fig. 9는 핵연료 집합체 J44의 핵연료봉 길이신장률을 측정된 것을 나타낸 것이다. 핵연료 집합체 제1~제4면의 길이는 0.4% 정도 신장하였다.

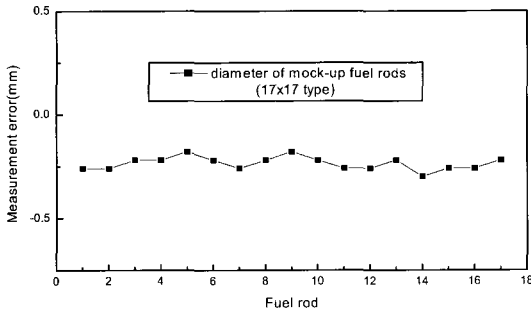


Fig. 6 Diameter of mockup fuel rods of image processing system

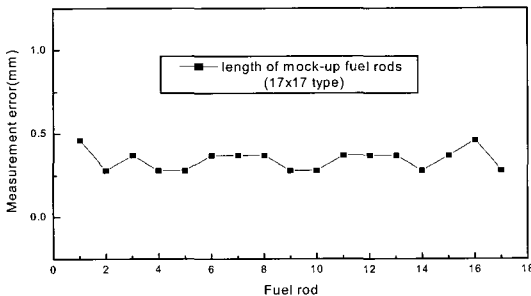


Fig. 7 Length of mockup fuel rods of image processing system

Fig. 10은 고리원자력 1호기에서 3주기 동안 연소한 핵연료 집합체 F02-제4면의 핵연료봉 직경변화율을 측정된 것을 나타낸 것이다. 핵연료봉 직경의 설계치 기준으로 할 때 핵연료봉 하단부 직경은 1.8~2.2%, 상단부의 직경은 2.0~2.1% 정도 감소하고, 중앙부의 직경은 2.9~3.1% 정도 감소하였다. Fig. 11은 핵연료 집합체 F02의 핵연료봉 길이신장률을 측정된 것을 나타낸 것이다. 핵연료 집합체 제1면의 핵연료봉 길이는 0.5%, 제2~제4면의 길이는 0.4% 정도 신장하였다.

따라서 고리원자력 발전소 1호기에서 3주기 동안 연소한 핵연료 집합체 F02 핵연료봉의 직경 및 길이는 핵연료 집합체 J44의 결과와 비슷한 경향을 나타내었다.

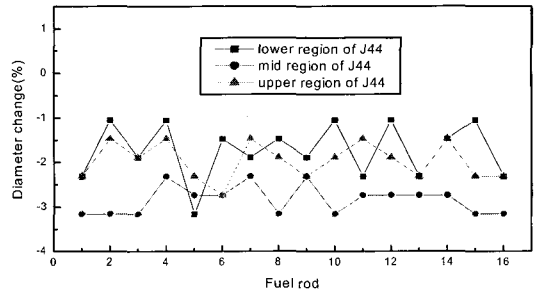


Fig. 8 Diameter of fuel rods of J44 fuel assembly

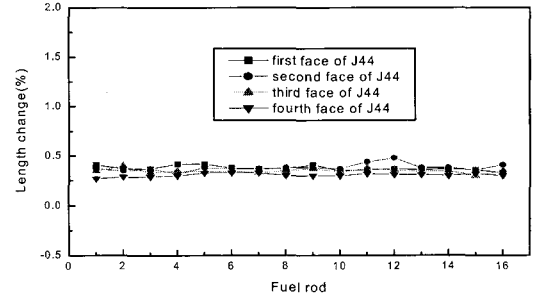


Fig. 9 Length of fuel rods of J44 fuel assembly

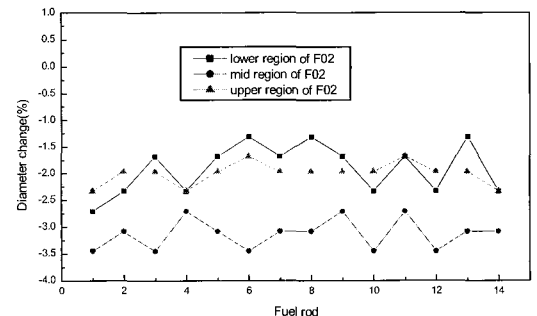


Fig. 10 Diameter of fuel rods of F02 fuel assembly

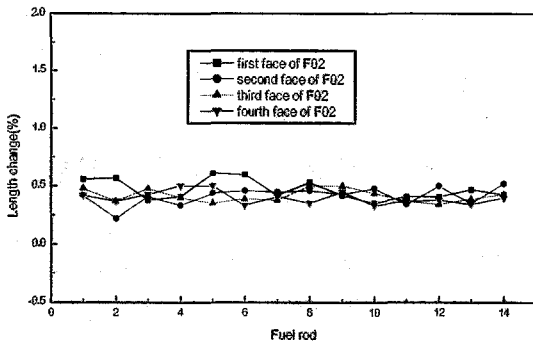


Fig. 11 Length of fuel rods of F02 fuel assembly

4. 결 론

영상처리 측정시스템을 개발하여 이 시스템에 대한 성능시험을 수행하고 고리 원자력 발전소에서 연소한 사용 후 핵연료 집합체의 재원을 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 영상처리 재원 측정시스템을 개발하고 이 시스템에 대한 모의 핵연료봉의 직경 및 길이 측정치는 설계값 기준으로 할 때, 각각 $-0.24 \pm 0.03 \text{mm}$, $0.34 \pm 0.06 \text{mm}$ 이고 측정 최대오차는 각각 -0.3mm 및 0.4mm 이내였다. 개발한 시스템의 측정 최대오차는 5% 이내였고, 측정시간이 기존방법의 측정시간의 1/3으로 단축되어 기존 시스템보다 시험의 효율이 향상되었다.
2. 고리원자력 발전소 2호기에서 2주기 동안 연소한 핵연료 집합체 J44-제4면 핵연료봉의 상·하단부 직경 및 중앙부 직경은 설계치 기준으로 할 때 각각 2.0% 및 3.0% 정도 감소하였다. 이는 노내에서 핵연료봉 중앙부가 상·하단부 보다 원자 핵분열이 활발하여 더 많이 연소된 것에 기인한 것으로 생각된다. 핵연료 집합체의 핵연료봉 길이는 약 0.4% 신장하였다.
3. 고리원자력 발전소 1호기에서 3주기 동안 연소한 핵연료 집합체 F02 핵연료봉의 직경 및 길이 측정결과는 핵연료 집합체 J44의 결과와 비슷한 경향을 나타내었다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] M. C. J. Carson, "Densification in mixed oxide fuel during fast reactor irradiation", Nucl. Tech. Vol. 42, pp. 335-339, (1974)
- [2] M. Uchida, et al., "Densification of uranium dioxide fuel pellets(I)", JAERI-M6904, pp. 1-7, (1977)
- [3] W. Chubb, et al., "The influence of fuel microstructure on in-pile densification", Nucl. Tech. Vol. 26, pp. 496-493, (1975)
- [4] W. K. Pratt, "Digital image processing", pp. 305-349, 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, pp. 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)