

영상처리기술에 의한 핵연료봉의 제원 측정 Dimension Measurement of Nuclear Fuel Rods Using an Image Processing Technology

구대서*, 민덕기*, 유길성*, 신희성*, 홍권표*

D. S. Koo*, D. K. Min*, G. S. You*, H. S. Shin* and K. P. Hong*

초 록 영상처리 방법에 의한 핵연료봉의 제원을 측정하기 위하여 영상처리 소프트웨어를 개발하고 핵연료봉의 직경을 측정하였다. 카메라와 시험체간의 거리, 카메라 위치, 조명세기 및 조명종류와 같은 요소가 핵연료봉 제원 측정에 영향을 미침을 확인하였다. 영상처리 방법에 의한 핵연료봉 직경의 백분율 측정 상대오차는 4.88%이고 백분율 측정 표준편차는 $\pm 3.34\%$ 였다. 한편 영상처리 방법이 아닌 기존 방법에 의한 백분율 측정 상대오차는 12.77%이고 백분율 측정 표준편차는 $\pm 9.72\%$ 였으며, 영상처리 방법에 의한 직경 측정 정확도가 기존 방법에 의한 결과보다 약 3배 정도 향상되었다.

Abstract An image processing technology was developed to measure the dimension of nuclear fuel rods and the diameter of nuclear fuel rods was measured by this method. It was confirmed that parameters such as camera-to-specimen distance, camera location, light intensity and light characteristic would affect dimension measurement of nuclear fuel rods. The percent relative error and percent standard deviation of measuring the diameter of nuclear fuel rods using image processing method were 4.88%, $\pm 3.34\%$ while the percent relative error and percent standard deviation using conventional method were 12.7%, $\pm 9.72\%$, respectively. The accuracy of diameter measurement of nuclear fuel rods using image processing method was about 3 times as high as that using conventional method.

1. 서 론

원자로의 핵연료는 중성자 선속, 원자로 선출력, 원자로 온도 및 압력 등 원자로 운전 조건에 따라 핵연료의 이산화 우라늄이 핵반응을 통해서 많은 핵분열 에너지를 발생하게 되고 이 핵연료는 swelling 및 densification 같은 과정을 거치면서 핵연료봉 제원변화가 발생한다. 이 제원 변화를 정확하게 측정하면 원자로 핵연료의 거동 및 핵연료의 건전성을 평가할 수 있다.

원자로에서 연소한 핵연료봉은 방사선이 나오는 방사성 물질이기 때문에 수중이나 핫셀에 저장하여 방사선을 차폐하면서 원격조정기로 시험체를 움직여 실험을 수행함으로써 일반시편에 대한 실험을 수행하는 것 보다 많은 제약을 받고 있다. 원자력 선진국에서는 영상처리

기술에 의한 핵연료봉 제원을 측정하고 그 결과를 분석하고 있는 추세이며 이웃 일본에서는 비디오 녹화 및 영상 분석 방법으로 핵연료봉의 제원을 측정하고 있다. 국내에서는 원자력 연구시설의 제한 및 사용후 핵연료에 대한 현장실험의 제약성 때문에 이 방법의 적용이 미진한 상태여서 외국의 외관검사 장비를 구입하여 사용후 핵연료의 변형 및 건전성을 검사하고 있는 실정이다. 앞으로 이와 같은 원자로 핵연료 검사기술의 적용이 점차 증대될 것으로 전망된다.

본 실험실에서는 이제까지 핵연료 집합체를 수중에서 저장하고 모터를 구동시켜 수중용 내방사선 카메라를 움직여 시험체의 영상을 모니터에 나타내어 그 영상에 대한 수평 및 수직성분을 엔코더 값으로 측정하여 핵연료봉의 제원을 측정하였다. 이 방법으로 실험을 수행하

면 실험결과를 얻고 분석하는데 시간과 인력이 많이 소요되고 측정 정확도가 떨어지는 단점이 있기 때문에 이러한 점을 개선하기 위하여 영상처리기술이 요구된다 [1-4].

본 연구에서 먼저 카메라로 핵연료봉의 영상을 캡춰하여 개인용 컴퓨터에 입력시키고 그 영상을 측정하고 분석할 수 있는 소프트웨어를 개발하였다. 이 소프트웨어를 사용하여 제작한 표준 핵연료봉의 직경을 측정하여 기존방법에 의한 결과와 비교하였고 영상처리 시스템의 기하학적 인자 및 조명조건 등에 따른 핵연료봉의 직경을 측정하고 그 결과를 분석하였다.

2. 실험방법

2.1. 표준시험체 제작

영상처리 방법에 의하여 핵연료봉의 제원을 측정하기 위한 표준시험체를 Fig. 1과 같이 제작하였다. 수중에서 사용할 수 있도록 표준시험체 재질은 스테인레스를 사용하여 가로, 세로, 높이를 각각 190, 190, 485mm로 하였다. 표준시험체의 핵연료봉 직경은 10.72mm로 하였으며 표준시험체의 상판 및 하판의 가로, 세로, 높이는 각각 196, 196, 15mm로 하였다. 냉각수의 순

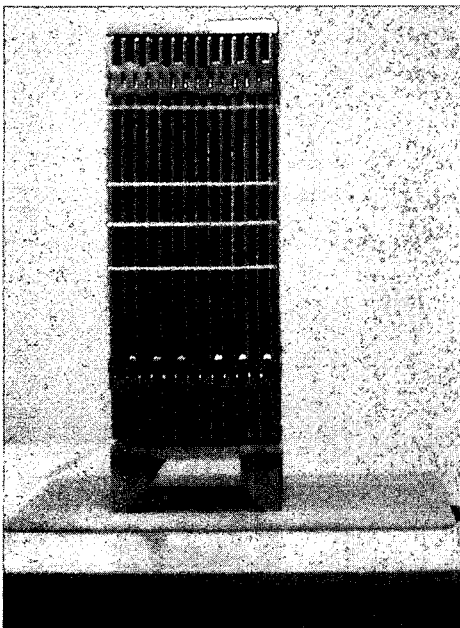


Fig. 1 The manufactured mock-up of fuel assembly

환 및 핵연료봉의 진동에 따른 핵연료봉의 변형을 줄이기 위하여 표준시험체의 상부 및 하부에 핵연료봉 지지격자를 설치하였으며 그 길이 및 폭을 각각 190, 35mm로 하였다. 표준시험체의 4개의 받침대의 두께는 모두 5mm로 하고 그 받침대의 가로, 세로 및 높이는 각각 20, 20, 65mm로 제작하였다.

2.2. 영상처리 프로그램 제작

영상처리 방법에 의하여 사용후 핵연료봉의 제원을 측정하기 위하여 Fig. 2와 같은 영상처리 소프트웨어 개발 순서도와 Table 1과 같은 영상처리 카드 및 카메라

Table 1 The hardware specification of image processing

| 카메라 |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> * Panasonic wvBP 310 * F 1.4에서 최소 0.08 Lux의 감도 * 수평 해상도 570 Lines * 신호대 잡음비 46dB |
| 영상처리카드 |
| <ul style="list-style-type: none"> * Matrox 사 Genesis Frame Grabber * TMS320C80 DSP 칩(Texas Instrument 사) * 그래픽 가속기 NOA(Matrox's Neighborhood Operations Accelerator) * SDRAM 메모리 16Mb * 8Mb Display Ram * Genesis Native Driver (프로그램) * 해상도 1600 × 1200, 85Hz * 140MHz Sampling Rate |

를 사용하여 영상처리 프로그램을 제작하였다. 모의 핵연료 집합체에 대한 카메라의 입력영상을 스크린에 출력시키고 영상화일로 그 영상을 입·출력되도록 하였으며, 입력영상의 파라미터를 조정하였다. 표준자(직경 2mm 흑색원)의 영상을 캡춰하여 카메라와 시험체 거리에 따른 영상처리보정을 수행할 수 있는 수평·수직 가늠자 보정루틴을 제작하였다. 영상의 각 gray level이 몇 개의 pixel로 분포되었는가를 그래프로 나타낸 histogram과 영상의 명암 및 contrast 정도 등을 histogram으로 판단하여 gray level을 균등하게 조절하여 나타낸 histogram equalization으로 영상 degradation을 분석하게 된다. 입력영상에 대한 histogram equalization, histogram에서 이진화 임계치를 결정하여 이진화 영상을 얻게 된다. 좋은 영상처리를 수행하기 위하여 histogram equalization를 작성하여 영상을 개선하고 이진화 영상의 임계치를 결정할 수 있는 histogram을 구하였으며[5], 영상을 여러

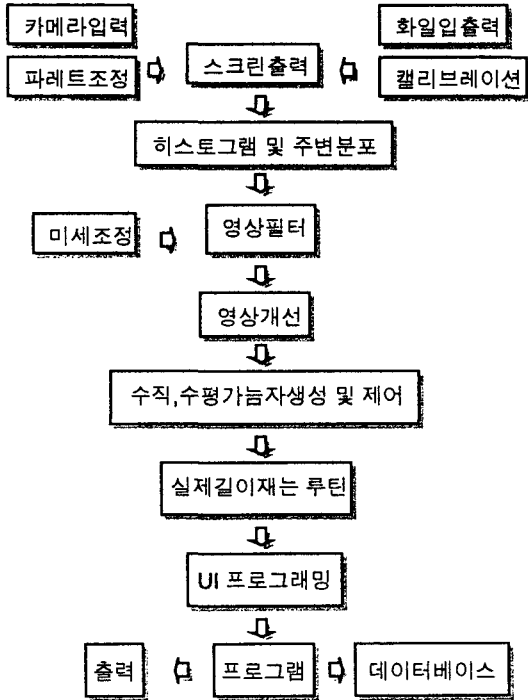


Fig. 2 The program chart of image processing

번 받을 때 임의의 픽셀이 같은 값을 갖지 않는 gaussian 잡음, impulse 및 shot에 의한 salt-and-pepper 잡음, 카메라내의 먼지, 나쁜 카메라, 불균형한 조명에 의한 예견 잡음(systematic noise) 그리고 카메라 위치, 렌즈 굴곡, 카메라와 영상처리 카드의 확대비에 의한 왜곡 (dislocation) 등과 같은 영상잡음을 제거하기 위하여 smoothing filtering, sharpening filtering, edge detection, median filtering 등의 영상필터를 제작하였다(6). 실제길이를 측정하는 루틴을 제작하고 전체 프로그램 흐름을 제어할 수 있도록 하여 사용후 핵연료봉의 제원을 측정할 수 있는 영상처리 소프트웨어를 완성하였다.

2.3. 영상처리 소프트웨어 성능시험

개발한 영상처리 소프트웨어는 Fig. 3과 같이 구성하였으며, Fig. 4와 같은 실험절차로 영상처리 소프트웨어의 성능시험을 수행하였다. 먼저 카메라로 표준시험체의 영상을 입력하고 그 영상의 잡음을 제거하고 영상을 개선하여 히스토그램을 거쳐 이진화 영상 임계치

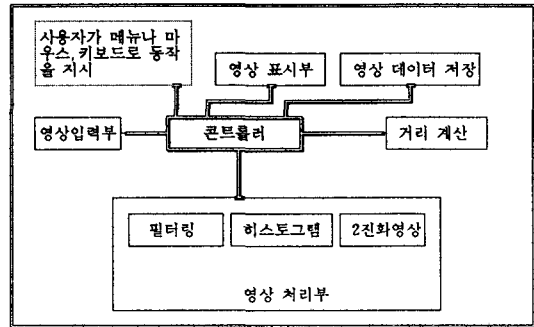


Fig. 3 Software schematic of image processing

를 결정하여 이진화 영상처리 한다. 이때 카메라와 시험체간의 거리, 시험체에 대한 카메라 위치, 카메라 특성, 조명종류 및 조명세기 등이 이진화 영상 처리에 큰 영향을 미치기 때문에 이와 같은 하드웨어가 영상처리 소프트웨어와 잘 결합하는 것이 필요하다. 영상을 이진화 처리후 표준자 (직경 2mm 흑색원)의 영상처리보정을 수행하여 그 표준자에 대한 이진화 영상의 수평영상 pixel(image element) 개수, 수직영상 pixel 개수에서 수평 및 수직영상 pixel 1개의 길이가 각각 계산된다. 계산된 각각 pixel 1개의 길이와 핵연료봉에 대한 이진화 영상의 수평 및 수직영상 pixel 개수에서 핵연료봉의 직경과 길이가 측정된다. 이 과정들은 프로그램에서 수행된다.

본 실험은 시험체에 대한 카메라의 위치, 시험체에 대한 조명세기, 조명종류 및 카메라와 시험체간의 거리를 300~600mm로 변화시키며 핵연료봉의 직경 측정 실험을 수행하고 그 결과를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 5는 시험체와 카메라 거리에 따른 실제체에 대한 핵연료봉 직경 측정 변동을 나타낸 것인데 B는 시험체와 카메라간의 거리가 300mm인 경우이고 C, D, E가 각각 400, 500, 600mm인 경우인데 이 결과는 시험체와 카메라간의 거리가 가장 짧은 것을 기준하여 핵연료봉 1부터 5까지 영상처리를 수행한 것이다. 한편 F는 기존방법에 의하여 핵연료봉 직경 측정 변동을 나타낸 것이다. 시험체와 카메라의 거리가 400, 500mm인 경우의 핵연료봉 직경 측정 변동이 300, 600mm인 경우의 결과보다 핵연료봉 직경 실제체에 근접한 분포를 나타내었다. 따라서 핵연료봉과 카메라간의 거리에

따라 핵연료봉 직경 측정치가 변동하였으며 영상처리 방법에 의한 직경 측정 변동이 기존방법에 의한 핵연료

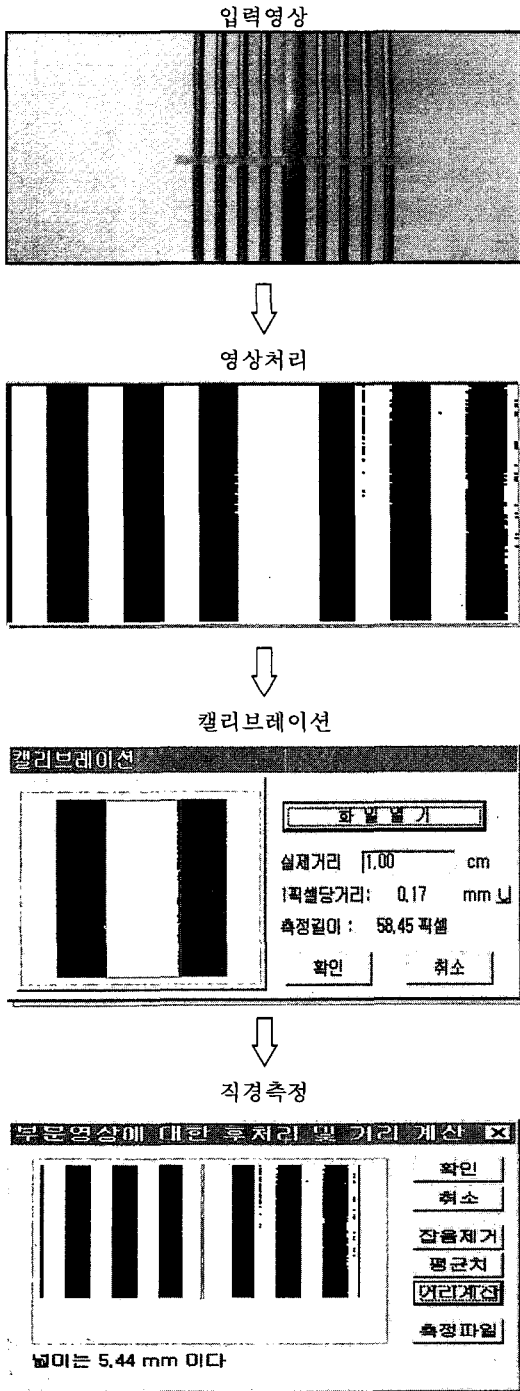


Fig. 4 Diameter measurement process using image processing method

봉 직경 측정 변동보다 작은 경향을 나타내었다.

Fig. 6은 시험체와 카메라간의 거리를 500mm로 고정하고 시험체에 대한 카메라 위치에 따른 핵연료봉 직경 측정 변동을 나타낸 것이고 B는 카메라를 시험체 중앙에 위치한 것으로서 핵연료봉 1~11까지 영상처리한 것이고 C와 D는 각각 좌측 및 우측에 위치한 것으로서 핵연료봉 1~8 및 핵연료봉 4~11을 영상처리한 것을 나타낸 것이다. C는 시험체 좌측의 핵연료봉 직경 측정 변동이 핵연료봉 직경 실제치에 근접하는 분포를 보였으며, D는 시험체 우측의 핵연료봉 직경 측정 변동이 핵연료봉 직경 실제치에 근접하는 경향을 나타내었다. 카메라가 시험체 중앙에 위치한 B의 제 11핵연료봉 직경 측정 변동이 기존방법에 의한 결과보다 큰 것은 이 핵연료봉의 위치가 카메라 정면에서 벗어나고 균일한 조

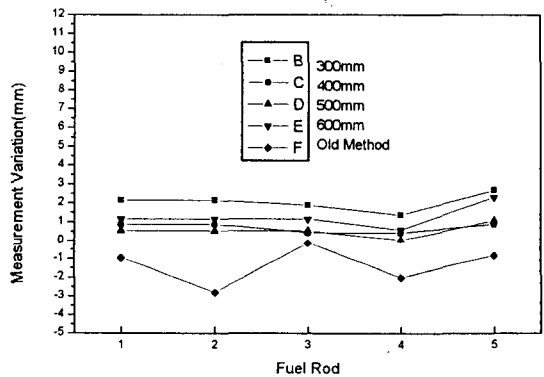


Fig. 5 The comparison of diameter measurement using image processing method with that using conventional method

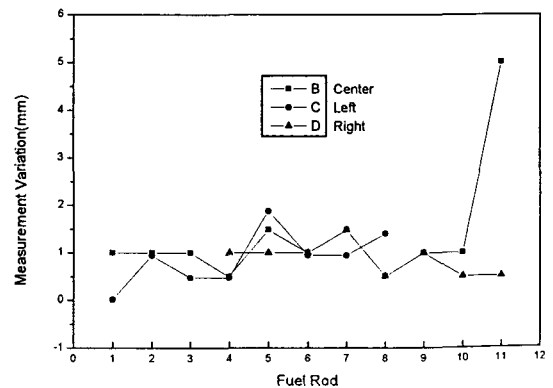


Fig. 6 The diameter measurement of specimen versus camera position

명을 받지 못한 점으로 생각된다. 따라서 시험체에 대한 카메라 위치가 핵연료봉 직경 측정에 큰 영향을 일으킴을 알 수 있다.

Fig. 7은 핵연료봉 1~12 영상처리를 수행하여 조명 세기에 따른 핵연료봉 직경 측정 변동을 나타낸 것이다. B는 시험체 전체에 대하여 조명세기를 일정하게 한 경우이고, C는 시험체 좌측의 핵연료봉에 대하여 조명의 세기를 증가한 경우이고, D는 시험체 우측의 핵연료봉 조명의 세기를 증가한 경우이다. E와 F는 각각 시험체 정면의 위쪽 및 아래쪽의 조명세기를 증가한 경우이다. C 경우의 좌측 핵연료봉 직경 측정 변동이 우측 핵연료봉 직경 측정 변동보다 핵연료봉 직경 실제치에 근접하는 분포를 나타내었으며, D 경우의 우측 핵연료봉 직경 측정 변동이 좌측 핵연료봉 직경 측정 변동보다 핵연료봉 직경 실제치에 근접하는 분포를 나타내었다. 이때 좌측에 위치하는 핵연료봉 제 1, 제 2 및 제 3봉의 직경 측정 변동이 기존 방법에 의한 결과보다 큰 것은 카메라 위치에 기인된다고 생각된다. 시험체의 상하 핵연료봉 조명 세기를 증가한 E 및 F의 경우는 시험체 좌우 핵연료봉 조명세기를 증가한 C 및 D 만큼 핵연료봉 직경 측정에 큰 영향을 나타내지 않았다. 이 상에서 살펴볼 때 카메라 정면에 위치하는 핵연료봉의 개수를 많이 선택하여 영상처리 하는 것보다 적게 선택하여 영상처리하는 것이 핵연료봉 직경 측정 변동을 줄일 수 있다고 판단된다.

Fig. 8은 핵연료봉 1~14 영상처리를 수행하여 조명 종류에 따른 핵연료봉 직경 측정 변동을 나타낸 것이다. B는 형광조명을 사용한 결과이고 C는 백열조명을 사용한 결과를 나타낸 것인데 제 1핵연료봉 직경 측정

변동이 기존 방법에 의한 결과보다 큰 것은 백열조명이 균일하게 제공되지 못하고 영상처리 영역을 넓게 선택한 것에 기인된다고 추정된다. 따라서 핵연료봉에 균일한 조명을 제공하고 영상처리 영역을 넓게 선택하여 하는 것보다 좁게 선택하는 것이 영상처리 측정 변동을 줄일수 있을 것으로 판단된다. 형광조명에 의한 핵연료봉 직경 측정 변동은 백열조명에 의한 결과보다 핵연료봉 직경 실제치에 근접하는 경향을 나타내었으며 영상처리 방법에 의한 핵연료봉의 직경측정은 조명의 종류에 영향을 받음을 알 수 있다.

4. 결 론

- 1) 사용후 핵연료 집합체의 재원 측정을 위하여 영상처리 소프트웨어를 개발하였고 영상처리 방법에 의하여 제작한 모의 표준 핵연료봉의 직경을 측정하였다.
- 2) 영상처리기술에 의한 핵연료봉 직경 측정변동은 카메라와 시험체간의 거리, 시험체에 대한 카메라 위치, 조명세기 및 조명종류에 큰 영향을 받음을 확인하였다.
- 3) 영상처리기술에 의한 핵연료봉 직경측정에 대한 백분을 측정 상대오차 및 백분을 측정 표준편차는 영상처리 방법이 아닌 기존방법에 의한 백분을 측정 상대오차 그리고 백분을 측정 표준편차보다 각각 약 3배 정도 향상되었다.

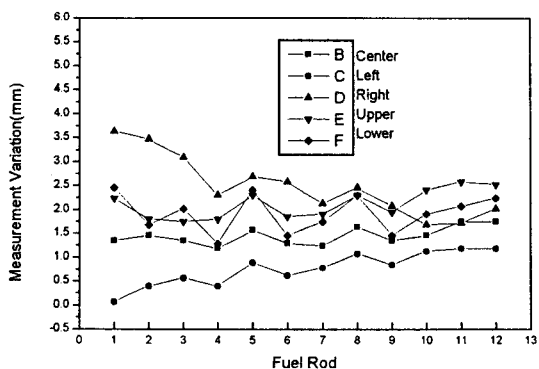


Fig. 7 The diameter measurement of specimen versus light intensity

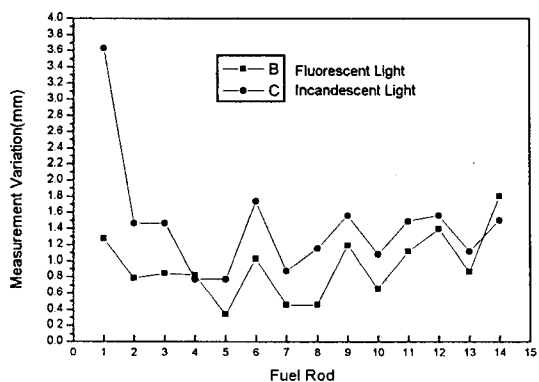


Fig. 8 The diameter measurement of specimen versus light characteristic

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] W. K. Pratt, "Digital image processing", pp. 305-318, pp. 345-349, John Wiley & Sons, Inc., California, (1978)
- [2] H. C. Andrews and B. R. Hunt, "Digital image restoration", pp. 113-118, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, (1977)
- [3] A. Rosenfeld and M. Thurston, "Edge and curve detection for visual Scene analysis", IEEE Transactions, Vol. C-20, No. 5, pp. 562-563, (1971)
- [4] D. J. Bryant and D. W. Bouldin, "Evaluation of edge operators using relative and absolute grading", pp. 138-140, IEEE, Tennessee, (1979)
- [5] R. C. Gonzalez and P. Wintz, "Digital image processing", Second Edition, pp. 146-158, Addison-Wesley Publishing Company, (1987)
- [6] G. A. Baxes, "Digital image processing", pp. 32-37, 129-172, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey 07632, (1984)