

영상처리를 이용한 조사후 핵연료 집합체의 결함검출

조재완*, 최영수*, 정경민*, 신중철**, 정승호*
 *한국원자력연구원 원자력 로봇LAB
 **한전 원자력 연료(주) 핵연료 서비스팀

A Defect Detection of Irradiated Nuclear Fuel Assembly using Image Processing Technology

Jai Wan Cho*, Young Soo Choi*, Kyung Min Jeong*, Jung Cheol Shin**, and Seung Ho Jung*
 *Nuclear Robotics Lab, Korea Atomic Energy Research Institute
 **Nuclear Fuel Service Team, Korea Nuclear Fuel Co., Ltd.

Abstract 본 논문에서는 4 m 길이의 핵연료 집합체를 지지하는 스페이스 그리드 외관의 이상 상태를 자동으로 검출하기 위한 영상처리 알고리즘에 대해 기술한다. 원자로 가동 중에는 중성자 조사와 고온 고압 냉각수의 열 유동에 의한 물리적 작용으로 정방 격자구조로 되어 있는 연료봉이 늘어나거나 휘어져 연료봉 틈새 간격이 좁아지고 냉각수의 원활한 유동이 방해될 받게 됨에 따라 연료봉을 지지하는 스페이스 그리드의 변형이 초래될 수 있다. 스페이스 그리드 간격의 변화를 자동으로 추출하는 영상처리 알고리즘을 개발하여 스페이스 그리드의 이상 상태를 자동으로 인식할 수 있게 하였다. 실험 영상으로는 스웨덴 Ahlberg 사의 4면 검사장치에 의해 수행된 경수로형 핵연료 집합체의 검사 동영상을 이용하였다.

1. 서 론

원자력 발전소는 12개월에서 18개월에 이르는 운용 주기를 갖는다. 운용 주기가 끝나면 1 개월여에 걸쳐 원전 시설의 안전성 검증을 위해 정기 점검(overhaul)을 수행한다. 정기 점검기간에 원자로로부터 핵연료 집합체를 인출하여 외관 검사를 수행한다[1]. 원자로 가동 중에 중성자 조사에 의해 핵연료 집합체는 길이가 늘어나는 조사 성장을 하게 된다. 원자로에서 연소 되고 나온 핵연료 집합체나 핵연료봉의 전반적인 변형 정도를 검사하기 위해서 제일 먼저 수행되는 시험이 외관 검사이다. 외관 검사를 통하여 중성자 조사에 의한 핵연료 집합체의 변형 상태를 살펴봄으로써 기계적 건전성을 판정하며 측정 자료는 연소 전후의 특성을 분석하기 위한 기초자료로 활용된다. 외관 검사 시에 핵연료봉과 스페이스 그리드(spacer grid) 표면에 형성되는 크러드(crud)와 산화피막 형성상태 및 그 유형, 연료봉의 휨/뒤틀림으로 인한 연료봉 간격 변화, 연료봉 성장 또는 수축 현상 등이 중점적으로 관찰된다. 특히 핵연료봉과 스페이스 그리드 사이에서 발생하기 쉬운 fretting wear에 의한 마모 정도를 육안 검사한다. 경수로형 핵연료 집합체는 직경이 9.5mm 이고 길이가 4,000mm 에 이르는 핵연료 피복관이 일정한 간격을 두고 17x17 규모의 정방형 격자구조로 배치되어 있으며 이의 전체 크기는 214x214x4,000 [mm]이고 무게가 650kg에 이르는 대형 구조물이다[2]. 핵연료 집합체의 중성자 조사 성장에 의한 변형을 정밀 측정하여 원자로에 재장전 가능한지의 여부를 판단하는 건전성 평가 작업은 원자로의 안전성에 직접되는 문제이기 때문에 핵심적으로 요구되는 사항이다. 이와 동시에 원자력 발전소 가동률 향상을 위해서 운용 주기별로 실시되는 정기점검 기간이 단축되는 경향을 보이고 있다. 정기점검 기간 단축에 따른 가동률 향상과 원자력 발전소 주요 기기 및 구조물의 고 신뢰도 건전성 평가를 동시에 달성하기 위해서는 검사 장비의 고속, 고 분해능 측정과 자동화 기법이 요구 되고 있다. 검사 구역이 방사선 관리 구역 내에 위치하는 방사선 피폭 환경이므로 검사자의 방사선 피폭을 감소시키기 위해서도 신속한 검사가 요구된다. 따라서 조사 후 핵연료 집합체의 외관 검사를 보다 빨리 수행하기 위해서 정방형 구조의 핵연료 집합체의 각 면을 4 대의 수중 TV 카메라로 동시에 촬영하여 한 화면에 디스플레이하여 육안 검사하는 4면 검사가 일반화 되고 있다[3][4]. 4 면의 관측 영상을 동시에 육안 검사하여 이상 유무를 판정해야 하므로 검사 경험이 풍부한 숙련 검사자가 요구된다. 숙련 검사자라 하더라도 장시간에 걸쳐 집중력을 유지할 수 없기 때문에 고 신뢰성을 갖는 일관된 검사 결과를 얻기는 용이하지 않다. 조사 후 핵연료 집합체 외관의 변형 상태를 고속으로 검출하고 고 신뢰성으로 검사하기 위해 영상처리기술을 이용한 자동화 기법이 연구되고 있다[5].

본 논문에서는 4 m 길이의 핵연료 집합체를 지지하는 스페이스 그리드 외관의 이상 상태를 자동으로 검출하기 위한 영상처리 알고리즘에 대해 기술한다. 원자로 가동 중에는 중성자 조사와 고온 고압 냉각수의 열 유동에 의한 물리적 작용으로 정방 격자구조로 되어 있는 연료봉이 늘어나거나 휘어져 연료봉 틈새 간격이 좁아지고 냉각수의 원활한 유동이 방해될 받게 됨에 따라 연료봉을 지지하는 스페이스 그리드의 변형이 초래될 수 있다. 스페이스 그리드 간격의 변화를 자동으로 추출하는 영상처리 알고리즘을 개발하여 스페이스 그리드의 이상 상태를 자동으로 인식할 수 있게 하였다. 실험 영상으로는 스웨덴 Ahlberg 사의 4면 검사장치에 의해 수행된 경수로형 핵연료 집합체의 검사 동영상을 이용하였다.

2. 조사후 핵연료 집합체의 외관 검사

그림 1에 4면 검사 장치를 이용한 조사후 핵연료 집합체의 검사 구성도를 나타내고 있다.

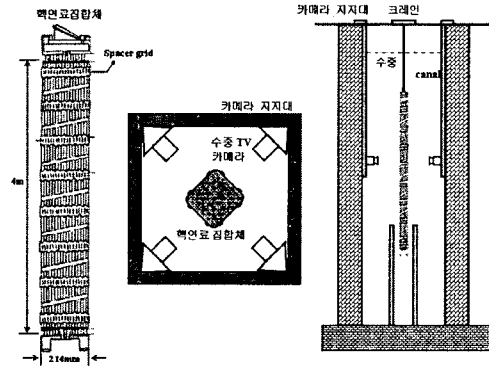


그림 1. 조사후 핵연료 집합체의 4면 검사

정방형 구조의 핵연료 집합체의 각 면을 관측하는 4 대의 수중 TV 카메라를 장착한 4면 검사 장치를 핵연료 집합체 운반 수로(canal) 에 설치한다. 원자로에서 인출한 핵연료 집합체를 크레인으로 운반하여 4면 검사장치의 중앙으로 하강시킨다. 하강하는 핵연료 집합체의 각 면을 4 대의 수중 TV 카메라로 촬영하여 CRT 모니터에 디스플레이하며 이를 육안 검사한다. Alberg 사의 4면 검사 장치는 Sony 의 상용 CCD Block Camera 를 납으로 차폐하여 사용하고 있다[4]. CCD 카메라는 순차(progressive) 주사방식의 FCB-PV480 모델이다[5]. 그림 2, 3, 4 에 4면 검사 장치로 촬영한 핵연료 집합체의 관측화면을 나타낸다.

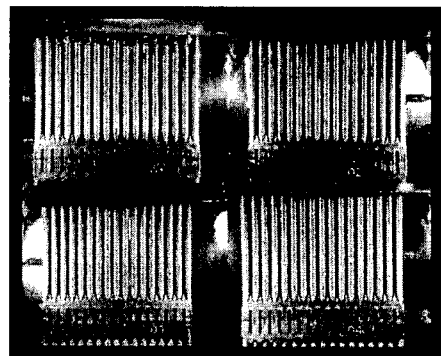


그림 2. 조사 후 핵연료 집합체의 4면 관측화면

그림 2는 연료봉 및 스페이스 그리드가 건전한 상태를 나타내고 있으며 그림 3은 핵연료 집합체 1면의 스페이스 그리드에 결함이 있음을 나타내고 있다. 1면의 스페이스 그리드 결함화면을 확대한 것이 그림 4이다. 그림 4의 관측화면에서 보이는 백색 반점(speckle) 들은 연소된 핵연료에서 방출되는 감마선에 의한 잡음이다. 원자로에서 한 주기 이상 연소된 핵연료에서는 대략 300kRad/h 이상의 고 선량률로 감마선을 방출한다[6][7]. CCD 카메라 시스템은 10kRad/h 이상의 고 선량률 환경에서는 감마선에 의한 백색 잡음 때문에 관측이 불가능하다[8]. 물이 우수한 감마선 차폐체이므로 고 감마선 선량률의 조사후 핵연료 집합체 검사는 수중에서 수행된다[8].

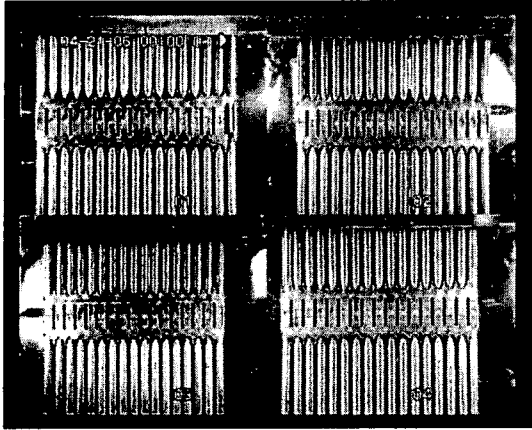


그림 3. 스페이스 그리드의 파열 관측화면 (1면)

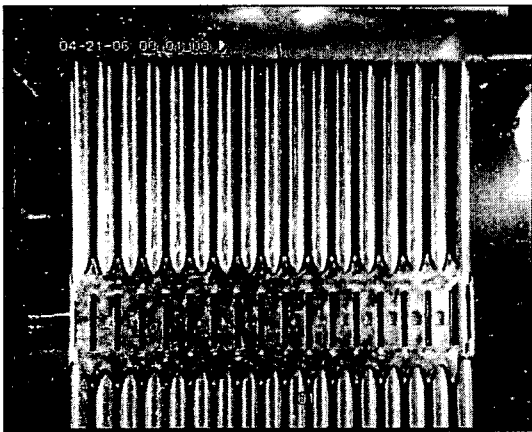


그림 4. 스페이스 그리드 파열관측 확대 화면 (1면)

경수로형 원자력발전소의 수로(canal)의 폭이 1.5~1.8 m 이다. 4면 검사 장치의 지지 구조물에 장착되는 카메라 시스템의 크기 등을 고려할 때 핵연료 집합체 면과 수중 카메라 사이의 거리는 300~600mm 로 추정된다. 이와 같은 정도의 물 두께로는 완벽하게 감마선을 차폐할 수 없고 CCD 카메라 시스템을 보호할 수 없기 때문에 비좁은 공간에 높은 납이나 텅스텐 물질로 CCD 카메라 시스템을 차폐하여 검사한다[4].

스페이스 그리드의 파열과 같은 결함을 자동으로 검출하기 위해 관심영역(region-of-interest) 을 설정한다. 그림 4를 보면 연료봉을 냉각시키는 용도로 냉각수의 원활한 흐름을 돕기 위해 스페이스 그리드에는 일정한 간격으로 홈이 파져 있다. 본 논문에서는 스페이스 그리드에 일정한 크기와 간격으로 위치한 홈(groove)을 특징 점으로 추출한다. 가우시안 스무딩 처리를 통해 스페클을 제거한다. 수중 조영에 의한 영향을 가능한 한 제거하기 위해 적응적 이진화(adaptive threshold) 처리를 통해 스페이스 그리드의 홈 영역을 강건하게 추출한다. 블롭 분석(blob analysis) 처리를 통해 각 blob 영역의 특성을 구한다. 스페이스 그리드의 홈 영역을 추출하기 위해 블롭들의 크기를 비교한다. 크기 필터(sizing filter)를 이용하여 잡음 영역을 제거한다. 블롭 영역들의 면적의 평균 값을 구한다. 각 블롭의 면적을 평균 면적과 비교하여 허용 편차내에 수렴하는 블롭만 취함으로써 스페이스 그리드의 홈을 추출할 수 있었다. 건전한 핵연료 집합체의 경우 각 면에서 관측되는 스페이스 그리드에 위치한 홈들은 일정한 크기, 간격 등의 규칙성을 갖고 있다. 스페이스 그리드 파열과 같은 결함이 존재할 경우 각 블롭(스페이스 그리드 홈) 간의 규칙성은 깨어진다. 이와 같은 규칙성을 이용하여 스페이스 그리드의 이상상태를 자동으로 검출할 수 있음을 확인하였다. 본 논문에서는 스페이스 그리드 홈의 면적, 무게 중심 좌표, 이웃하는 홈 사이의 간격 등을 규칙성 정보로 활용하였다. 그림 5에는 스페이스 그리드 이상상태를 자동으로 추출하기 위한 영상처리 알고리즘의 순서도(flowchart) 를 나타내고 있으며 그림 6에는 처리 결과를 나타내었다. 그림 6에서 맨 우측의 스페이스 그리드가 파열된 위치의 블롭 특성(면적)이 좌측의 나머지 블롭들의 면적과 크기에서 명확히 차별이 됨을 알 수 있다. 그림 5의 순서도에서 스페이스 그리드 홈을 추출하기 위해 블롭 면적의 평균값에 가감해지는 오프셋의 크기의 설정에 따라 블롭의 개수가 17 개로 추출될 수 있다. 규칙성 비교에서 건전한 경우의 16 개보다 1개가 더 추출되므로 이상상태가 용이하게 검출될 수 있다.

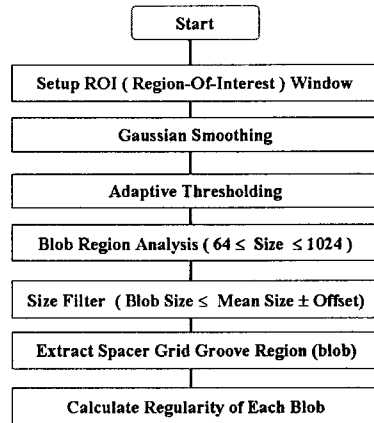


그림 5. 영상처리 알고리즘의 순서도

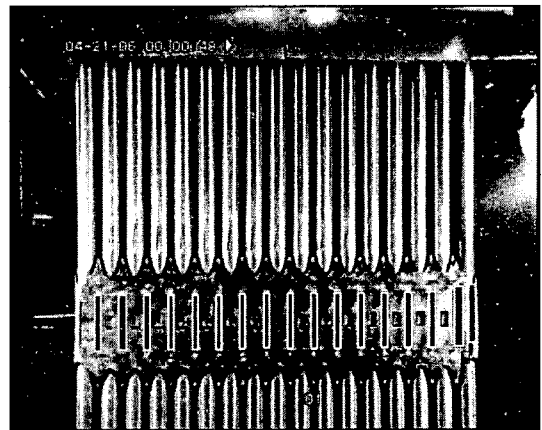


그림 6. 스페이스 그리드 홈(blob) 추출

3. 결 론

본 논문에서는 4 m 길이의 핵연료 집합체를 지지하는 스페이스 그리드 외관의 이상 상태를 자동으로 검출하기 위한 영상처리 알고리즘에 대해 기술하였다. 일정한 크기를 가지면서 일정한 간격으로 배치되어 있는 스페이스 그리드의 홈을 영상 특징 점으로 활용하였다. 특징 점들을 추출하기 위해 적응적 이진화 처리를 통해 조영에 의한 영향을 최소로 억제할 수 있었으며 블롭 분석 처리를 통해 각각의 스페이스 그리드 홈을 강건하게 추출할 수 있었다. 각각의 스페이스 그리드 홈의 규칙성 정보를 비교하여 스페이스 그리드의 이상상태를 검출하였다. 크레인에 의해 하강되는 핵연료 집합체의 미세한 흔들림에 따라 영상 처리 관심영역은 크게 변동한다. 완전한 자동화를 위해서는 핵연료 집합체의 미소 변위를 보상하여 영상처리 관심영역을 강건하게 설정하는 알고리즘이 보장되어야 한다.

[참 고 문 헌]

- [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] (주) 도시바, "조사 연료 집합체 검사장치", 일본 특허 JP2000-19288, 2000
- [4] Ahlberg, "Device for the Inspection of the Fuel Assembly", 국제 특허. WO 2005/027141 A1, 2004
- [5] (주) Global Nuclear Fuel Japan, "연료 집합체의 검사 장치 및 검사 방법", 일본 특허 JP2006- 343284, 2006
- [6] (주) Sony, "Color Camera Module (FCB-PV480) Technical Manual", <http://www.sony.co.jp/>
- [7] (주) KHNP, "Fuel Inspection System Specification 9-159 -N227", 2007
- [8] 정승호, "원자력 내방사선 로봇 개발", KAERI/RR-2751/2006, 2007