



工學博士 學位論文

핵연료 집합체 결함 검사 시스템 제작에 관한 연구

A Study on Fabrication of Defect Inspection System for Nuclear Fuel Assembly



2014年 2月

韓國海洋大學校 大學院

컴퓨터工學科

元 羅 卿

本 論文을 元羅卿의 工學博士 學位論文으로 認准함.



2013년 12월 24일

한 국 해 양 대 학 교 대 학 원

- i -

Collection

목 차

List of Tables	•••••• v
List of Figures	····· vi
Abbreviations	····· vii
Abstract	······ix

제 1	장 서	론·		L
1.1	연구	배경		
1.2	연구	목적		3
1.3	연구	방법		ŀ
			MARIUME W.	

제 2 장 기존 핵연료 집합체 검사 방법	5
2.1 가압경수로 핵연료 개요 및 검사 기술	5
2.2 초음파를 이용한 검사	10
2.2.1 초음파 검사 원리	
2.2.2 초음파 검사 시스템 동작	14
2.3 와전류 탐상검사	17
2.3.1 와전류 탐상검사 원리	17
2.3.2 와전류 탐상검사 탐촉자	
2.3.3 원전 증기발생기 와전류 탐상 검사	
2.4 영상처리를 이용한 변형 검사	
2.4.1 스페이서 그리드 변형 검사	
2.4.2 핵 연료봉의 변형 검사	
2.4.3 사용후 핵연료 집합체 단면 검사	
2.5 기존 검사 방법의 비교 분석	

제 3	장 핵연료 집학	화체 검사 시:	스템의 H/W	제작	35
3.1	핵연료 집합체	검사 시스템	제작		36
3.2	전체 시스템의	구성과 동작	••••••		37



3.3	영상 모듈	43
3.4	카메라 제어 모듈	48
3.5	무선 전송 모듈	51

제 4 장 핵연료 집합체 검사 시스템의 구현
4.1 사용자 인터페이스 구성 및 동작
4.1.1 사용자 인터페이스 구성
4.1.2 사용자 인터페이스 동작
4.2 핵연료 집합체 결함 검출
4.2.1 피복관의 크러드 및 변형 검출63
4.2.2 스페이서 그리드 검사
4.2.3 핵 연료봉 캡 소실 검사
A BITIME III.

제 5 자 시허 민 부서	
	12
5.1 핵연료 검사 시스템 제작 결과	
5.2 핵연료 집합체 검사 시스템 검출 결과	
5.3 제작 시스템 분석	
계 6 자 겨 로 1945	
제 0 경 실 끈 해 양 대	90
참고문헌	



List of Tables

Table	2.1	An analysis of fuel assembly inspection methods	33
Table	3.1	The specification of cameras	42
Table	3.2	The specification of a PC	42
Table	3.3	The specification of a line laser	50
Table	4.1	The performance of auto-mode	58
Table	5.1	The comparison with FPS and camera movement	73
Table	5.2	The general item	73
Table	5.3	The test conditions	74
Table	5.4	The spectrum analyzer setup	74
Table	5.5	The spectrum analyzer setup of spurious power measurements	76





List of Figures

Fig.	2.1 The structure of PWR7
Fig.	2.2 The structure of the fuel rod
Fig.	2.3 An example of visual inspection camera9
Fig.	2.4 An example of ECT
Fig.	2.5 The cladding and pellets
Fig.	2.6 The ultrasonic pulse propagation
Fig.	2.7 The echo envelope of the fuel rod13
Fig.	2.8 The nuclear fuel inspection system using ultrasonic wave $\cdots\cdots\cdots 16$
Fig.	2.9 The structure of the ultrasonic probe16
Fig.	2.10 The ECT of the block diagram
Fig.	2.11 An example of a spacer grid (1)23
Fig.	2.12 An example of a spacer grid (2)23
Fig.	2.13 The flowchart of the image processing
Fig.	2.14 The configuration of micro displacement measurement of a fuel rod $\cdots 25$
Fig.	2.15 The algorithm for the image processing28
Fig.	3.1 The 4-face fuel inspection system of Ahlberg Electronics
Fig.	3.2 The block diagram of the fuel assembly inspection system
Fig.	3.3 The inspection system of the fuel assembly40
Fig.	3.4 The miniature of the fuel assembly40
Fig.	3.5 The fuel assembly inspection system
Fig.	3.6 The flow chart of the crud detection
Fig.	3.7 The inside block diagram of the CMOS sensor
Fig.	3.8 The data processing of realtime video image
Fig.	3.9 The data processing of recorded video image
Fig.	3.10 The camera housing (1)
Fig.	3.11 The camera housing (2) 49
Fig.	3.12 The fuel rod using line laser
Fig.	3.13 The structure of the zigbee remote control network53
Fig.	3.14 The block diagram of cameras & zigbee transmitters



Fig. 3.15 The block diagram of PC & USB zigbee modem receivers 54
Fig. 3.16 The mimic board and the rack monitor
Fig. 3.17 The front of the mimic board55
Fig. 4.1 The structure of user interface modules
Fig. 4.2 The main of the user interface
Fig. 4.3 The analytical screen of user interface
Fig. 4.4 The flow chart of the crud detection algorithm
Fig. 4.5 The foreign material of fuel rods
Fig. 4.6 The flowchart of the spacer grid detection algorithm
Fig. 4.7 The fracture of a spacer grid
Fig. 4.8 The flowchart of the cap detection algorithm70
Fig. 4.9 The analysis standard of a fuel rod cap71
Fig. 5.1 The fabricated zigbee wireless module75
Fig. 5.2 The power measurements at 2405MHz, 2440MHz, 2480MHz75
Fig. 5.3 The spurious power measurement of 2nd hamornic at 2405MHz77
Fig. 5.4 The spurious power measurement of 2nd hamornic at 2440MHz77
Fig. 5.5 The spurious power measurement of 2nd hamornic at 2480MHz 78
Fig. 5.6 The result of data transmission measurement (1)78
Fig. 5.7 The result of data transmission measurement (2)79
Fig. 5.8 The result of the crud detection (black tape)80
Fig. 5.9 The result of the crud detection (cotton)
Fig. 5.10 The result of the crud detection (string)82
Fig. 5.11 The result of the spacer grid fracture (1)83
Fig. 5.12 The result of the spacer grid fracture (2)84
Fig. 5.13 The result of fuel rod cap loss (1)
Fig. 5.14 The result of fuel rod cap loss (2)
Fig. 5.15 The result of fuel rod deformation (1)
Fig. 5.16 The result of fuel rod deformation (2)
Fig. 5.17 The result of fuel rod deformation (3)
Fig. 5.18 The result of fuel rod deformation (4)



Abbreviations

EPRI	:	Electric Power Research Institute
PWR	:	Pressurized Water Reactor
PHWR	:	Pressurized Heavy Water Reactor
ECT	:	Eddy Current Inspection Method
UT	:	Ultrasonic Flaw Detecting Test
PVDF	:	Polyvinylidene Fluoride
VT	:	Visual Test
PIEF	:	Post Irradiation Examination Facility
IAEA	:	International Atomic Energy Agencies
MCU	:	Master Control Unit
IPS	:	Image Signal Processor
VCS	:	Video Capture System
NTSC	:	National Television System Committee
PAL	:	Phase Alternate Line
SDI	:	Serial Digital Interface
CCIR	:	International Radio Consultative Committee
S/N	:	Signal to Noise Ratio
SDI	:	Serial Digital Interface
JPEG	:	Joint Photographic Coding Experts Group
MPEG	:	Moving Picture Experts Group
PWM	:	Pulse Width Modulation
ROI	:	Region of Interest
M2M	:	Machine to Machine
IoT	:	Internet of thing
MAC	:	Medium Access Control



APS	:	Application Support Sublayer
ISM	:	Industrial Scientific Medical
QVGA	:	Quarter Video Graphic Array
FPS	:	Frame Per Second
VGA	:	Video Graphics Array
UI	:	User Interface





핵연료 집합체 결함 검사 시스템 제작에 관한 연구 A Study on Fabrication of Defect Inspection System

for Nuclear Fuel Assembly

La-Kyoung, Weon

Department of Computer Engineering Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

The nuclear fuel assembly for nuclear power generators is tested regularly as a requirement in nuclear material safeguards of International Atomic Energy Agencies. In addition, the test is one of the most important maintenance processes to prevent accidents such as radiation leakage.

This study examines how to detect and analyze the debris on the surface and sagging and torsion of nuclear fuel assembly through video image. Higher accuracy and higher efficiency methods are pursued by outline detection, compared to other researches on nuclear radiation leakage detection. A miniature system was built for this experiment in the half size of the actual fuel rod. It is made as 17×17 in the center, and we set up 4 cameras around the rod. All of the cameras are enclosed in each housing and each camera is remote controled to move vertically using motor drives. Four cameras move up and down simultaneously to video record the surface of the nuclear fuel. The video is analyzed to find out the contour and coordinates of the defects on the rods are calculated through detection algorithm. The coordinates are shown on the monitoring screen. The images are viewed in 2D and 3D, and its coordinate data of the defects can be



identified. By the aid of wireless module on the experiment system, it can be managed remotely by transmitting data wirelessly. Although the experiment system is not as good as those of professional manufacturers', it enables research experiments in all kinds environments of examinations with or without the nuclear fuel rod, and the video images can be recorded, detected and analyzed.

For more effective inspection on fuel rod foreign substances, a parallel processing method was used for the color-image foreign substance detection algorithm and black-and-white-image foreign substance detection algorithm.

The color-image foreign substance detection algorithm utilizes the fact that the light of a line laser is scattered or focused when the fuel rod has foreign substances or is damaged.

The black-and-white-image foreign substance detection algorithm was used to raise probability of foreign substance detection. In order to detect foreign substances through black-and-white images, pre-processing was first conducted by applying the technique combining DoG edge detection and threshold processing. The foreign substance detection parallel processing algorithm helps draw more reliable results by comparing and analyzing the color-image foreign substance detection algorithm and the black-and-white-image foreign substance detection algorithm.

As a result of applying the parallel processing algorithm to the result obtained from the color-image foreign substance detection algorithm and the black-and-white-image foreign substance detection algorithm, as high as 85% foreign substance detection ability could be gained.

With the results above, this study suggested a basic image processing algorithm for inspecting domestic nuclear fuel, and researches on algorithms with higher reliability need to be conducted in the future.



제1장서론

1.1 연구 배경

일본 동해안에서 발생한 쓰나미로 인한 일본의 후쿠시마 지역의 원자력 발전소 사고로 인하여 국내 원전의 핵연료 안전성 및 관리 능력 확보에 대한 우려가 높아지고 있다. 이는 원자력 발전이 국내 전력량의 절대적인 비율을 감당하고 있기 때문이다. 향후 원자력의 사용에 따른 사회적 동의 가 필요한 시점에도 불구하고, 지속적인 원자력 사용에 따른 안전관리 기 술의 확보가 요구되고 있는 실정이다[1].

미국 EPRI(Electric Power Research institute) 연구 결과에 의하면[2], 원 자력 발전소에서 핵연료 누설이 일어날 경우 발전량 손실, 출력감소, 냉각 재 정화, 계획예방정비 기간 연장, 손상 분석 검사, 손상 핵 연료봉 교체, 방사선 피폭을 비롯한 사회적 신임도 저하 등 발생 1회당 약 500만 달러 의 손실이 발생할 수 있다고 보고하고 있다. 핵연료에 대한 검사 기술의 확보는 매우 시급하고 중요한 사안이다. 핵연료를 수출 또는 공급할 경우 검사 기술을 보유하고 있지 않으면 핵연료 수출에 큰 제약 사항이 되고, 검사를 다른 기관에 의뢰하게 되면 주요한 연료 성능 및 정보가 유출될 가능성이 있기 때문이다[2]-[6].

원전연료에 사용되는 우라늄은 우라늄 235로 천연 우라늄으로부터 농축 하여 얻어진다. 자연에 존재하는 우라늄은 흙과 같은 불순물이 포함되어 천연 우라늄의 경우 우라늄 235의 비율이 약 0.7% 밖에 없고 나머지는 우라늄 238로 이루어져 있다. 우라늄을 원전 연료로 사용하기 위해서는 농축이라는 과정이 필요하다. 우라늄의 농도를 핵폭탄으로 사용하기 위해 서는 94% 정도의 고농축이 필요하지만, 원자력발전에 이용하기 위해서는 2~5%의 농축도를 가지면 가능하다[7]. 농축과정에서 만들어진 농축 우라 늄을 분필 모양으로 만들어서 고온처리를 하게 되면 원전 핵연료의 소자,



펠렛(pellet)이 된다. 이 펠렛을 지르코늄(zirconium)으로 만들어진 가느다 란 튜브에 수백 개를 집어넣어 핵 연료봉을 만들고, 또 이렇게 만들어진 핵 연료봉 여러 개를 다발로 묶어 사용하는데 이러한 핵 연료봉 다발을 핵연료 집합체라고 한다. 보통 원자로 내에서 이러한 핵 연료봉 다발은 121개가 수직으로 장진되는데, 핵 연료봉을 고정시키는 장치가 별도로 없 고 핵 연료봉의 중간에 위치한 스페이서 그리드(spacer grid)에 붙어 있는 작은 판스프링으로 가볍게 잡아주는 마찰력으로 핵 연료봉을 공중에 띄워 놓게 된다. 스페이서 그리드는 하나의 핵 연료봉에 일곱 개 정도가 있는 데 판스프링의 힘이 약하면 핵 연료봉이 아래로 흘러내려 가게 되고 판스 프링의 힘이 너무 강해도 핵 연료봉의 피복을 손상시킬 우려가 있다. 또 한 자칫하면 핵 연료봉 사이를 고속으로 흐르는 냉각재의 열수력학적 힘 에 의해 진동이 발생하면 핵 연료봉 피복의 깨짐, 이물질 부착, 자체 비틀 림, 스페이서 그리드 손상, 연료 캡 소실 등으로 인하여 방사성입자가 흘 러나와 냉각재를 오염시키게 되며 원자로를 정지해야 하는 최악의 경우가 발생하게 된다. 핵연료 집합체는 원자로 내에서 핵분열을 하면서 열을 내 게 되는데 장기간 사용하게 되면 핵 연료봉이 늘어나기도 하여 핵연료 집 합체에 변형이 일어나게 된다. 따라서 원자력발전에 있어 핵연료 집합체 에 대한 검사는 정기적으로 이루어지고 있으며, 방사능 유출 등에 대비한 매우 중요한 원전 보수 업무 중의 하나이다[8].

본 논문에서는 핵연료 집합체의 사용 중 표면에 부착되는 이물질, 핵연 료 집합체의 처짐 및 비틀림 등의 상태를 영상을 통하여 검사하는 시스템 제작에 관하여 연구한다. 핵 연료봉의 표면의 컬러 영상과 흑백 영상을 분석하여 이물질을 검출함으로써 보다 효율적이고 정확한 방법을 도출한 다. 각 산업분야에서 영상 인식 처리 기술의 적용 사례들을 보면 기본적 인 디지털 영상 처리 이론을 바탕으로 해당 산업이 요구하는 특성에 맞게 연구 개발되고 최적화되어가는 실정이며, 의료 영상, 보안, 증강현실, 반도 체, 방송 편집 등을 중심으로 다양하게 응용되고 연구 결과들이 지속적으 로 발표되고 있다[9]-[11].



1.2 연구 목적

원자로에 장전된 핵연료 집합체는 원자로 내에서 고온, 고압의 경수의 순환 과정에 견디면서 약 3년 정도의 핵분열을 일으키게 되며, 주기적인 검사를 통해 핵연료 집합체의 재장전 여부를 결정하게 된다. 주기적인 검 사는 통상 원자로내의 모든 핵연료 집합체를 제한된 시간 내에 빠르게 진 행되어야 한다[1]. 이러한 핵연료 검사로서 1차 검사는 외관 검사로 영상 을 통한 육안 검사가 시행되고 있다. 육안 검사는 숙련되고 경험 많은 검 사자에 의하여 건전성 평가가 이루어지고 있으며 이상이 의심스러울 때 2 차적으로 초음파에 의한 방법을 시행하며, 마지막 단계는 수리를 위하여 핵연료 집합체를 분해하여 와전류 탐상법 등에 의하여 개별 연료봉을 검 사하게 된다[12].

본 논문에서는 국내 원전 환경에 맞는 핵연료 집합체 검사 시스템을 제 안하고자 한다. 핵연료 집합체의 4면의 표면 상태를 영상처리 기법을 통 해 분석하고 이를 무선으로 전송하여 검사 시간을 단축하며, 숙련된 검사 자가 없더라도 단시간 내 검사가 진행될 수 있도록 한다. 또한 모든 검사 조건을 무선을 전송하여 기록함으로써 핵연료 집합체 검사 시 일어나는 모든 상황을 기록하며 관리가 가능하도록 한다.

핵연료 집합체 외관 검사는 원전 연료 검사환경 자체가 고준위의 방사 능 분포를 갖는 위치에서 감마선 피폭이 예상되므로 이를 방지하기 위하 여 원격에서 이루어지는 관계로 기술의 적용이 쉽지 않고, 또 새로운 기 술의 개발이 이루어진다고 하더라고 고정밀의 정확도를 가지는 기술이 필 요하며, 적용 또한 비용이 수반되므로 검사방법의 변경은 쉽지 않다. 그럼 에도 불구하고 원자력의 선진국들은 새로운 검사방법을 연구하고 신기술 을 연구하며 적용하고 있는 실정이다.



1.3 연구 방법

핵연료 집합체의 검사에 관한 연구는 검사지역이 갖는 한계성으로 인하 여 거의 모든 연구자가 모형 시스템을 만들어 연구를 진행하게 된다.

본 논문에서는 실제의 원전연료봉 높이의 절반 정도의 같은 모양의 모 형(miniature) 시스템을 제작하기로 한다. 모형 핵 연료봉은 17×17으로 하 고 중앙에 위치시키며, 핵 연료봉 주위를 돌아가며 4면에 카메라를 설치 한다. 4대의 카메라는 카메라 하우징 내부에 들어있으며 원격에서 모터 드라이브를 통해 동시에 4대의 카메라의 상승, 하강 동작을 할 수 있도록 한다. 4대의 카메라는 동시에 상승하고, 하강하면서 핵연료 표면을 동영상 으로 촬영하게 된다. 촬영된 동영상은 영상처리 기법에 의하여 이상 유무 를 검출하고 좌표 데이터를 생성하여 2D 그래픽을 만들게 되고, 그것을 기반으로 3D 그래픽으로 만들어 진다. 또한 모든 데이터는 무선으로 해당 서버로 즉시 전송되도록 하여 데이터를 관리하게 된다. 이 같은 검사방식 은 검사 시 입회자가 자칫 놓치기 쉬운 데이터 관리에 효율적일 뿐만 아 니라 측정환경에 대한 데이터도 관리가 용이해진다.

검사 시스템은 핵 연료봉이 탈착된 상태에서 검사할 때의 모든 상황을 고려하여 연구 실험이 가능하도록 하며, 동영상을 획득하고 검출하여 분 석 할 수 있도록 제작한다. 획득된 동영상은 영상처리 기법을 기반으로 분석되고, 검출 알고리즘을 통하여 핵 연료봉의 손상 부분의 좌표를 검출 하게 된다. 검출된 좌표를 통하여 전용 UI(User Interface)에서 분석이 가 능하도록 표현된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장 기존의 핵연료 검사 방법에 대하여 정리한다. 3장은 제안한 핵연료 집합체 검사 시스템의 하드웨어 제작에 관하여 기술한다. 4장에서 제안한 핵연료 집합체 검사 시스템 구현에 대 하여 기술하며, 5장의 실험 및 결과는 영상처리 결과와 무선전송 모듈 특 성 실험 결과를 설명하고, 6장에서 이에 대한 결론으로 정리한다.



제 2 장 기존 핵연료 집합체 검사 방법

2.1 가압경수로 핵연료 개요 및 검사 기술

(1) 핵연료 개요

원자로를 구성하는 가장 중요한 요소의 하나가 핵연료인데, 핵연료는 핵분열성 물질인 우라늄을 피복관으로 피복한 구성품으로 원소핵에 중성 자가 흡수되면 핵분열이 일어나면서 에너지 방출이 일어나게 된다. 핵분 열이 일어날 때마다 평균 2.5개의 중성자가 방출되며 이 중성자는 확산되 는 동안 점차 감속되어 우라늄 235의 원자핵과 반응하여 제2의 핵분열을 일으키게 된다. 이와 같은 핵분열의 연쇄반응을 인위적으로 제어하면서 지속시키게 하는 장치가 원자로(nuclear reactor)이다.

그러므로 원자로를 가동하는데 가장 필요한 요소가 바로 이러한 핵연료 이며, 원자로는 사용목적에 따라 동력로, 연구로, 전환로 등으로 분류되고, 이들 각각의 목적에 따라 원자로 구조가 결정된다. 일반적으로 동력로의 핵연료는 천연 우라늄광을 채광, 제련 및 정련과정을 거친 이산화우라늄 (UO₂)을 핵원료 물질로 사용한다. 이렇게 만들어진 UO₂는 천연우라늄을 연료로 하는 중수로형 원자로의 핵연료 소재로 직접 사용되고, 경수로형 원자로에는 6불화 우라늄(UF₆)로 전환하여 농축공정을 거처 재변환된 UO₂가 사용되고 있다.

원자로는 냉각 방식에 따라 크게 세 가지로 구분되는데, 가스 냉각로, 수냉각로 및 액체금속 냉각로로 구분된다. 오늘날 가장 많이 쓰이는 동력 로로는 수냉각 방식으로 경수로 및 중수로가 있다.

핵연료는 원자로 노심설계에서 주어진 핵연료의 사용조건을 기초로 하 여 핵연료의 열설계 및 기계설계를 포함한 구조설계를 통하여 각 원자로 형태에 따라 각각의 핵연료 설계시방이 작성되는데, 이는 UO₂ 소결체, 핵 연료 피복관, 연료봉, 핵연료 조립체와 같이 크게 네 가지 부분으로 구분



할 수 있다.

현재 국내에서 사용되는 핵연료의 주종을 이루는 가압경수로(PWR : Pressurized Water Reactor) 핵연료는 14×14, 16×16 및 17×17형이 있으며, 이 중에서 17×17형의 구조는 연료봉 264개, 제어봉 안내관 24개, 노심 계 장용 계측관 1개인 총 289개로 구성되어 있다. 경수로형 핵 연료봉의 직 경은 9.53/9.66mm이며 길이는 4m이다.

Fig. 2.1은 가압경수로 전체 구조를 나타낸다. 원자로 속에 핵연료를 넣 어 핵분열을 일으키면 300℃, 150기압에 달하는 고온, 고압의 물이 생긴 다. 이 물은 급수를 데우면서 280℃, 55기압으로 내려가며 다시 원자로 속 으로 들어가 가열된 원자로를 식히는 동시에 핵연료가 발생시키는 열에 의하여 다시 뜨거워지는 열교환 과정을 되풀이한다. 뜨거워진 급수는 수 증기로 변해 터빈을 돌리고, 그 다음에는 바닷물과 열교환 과정을 거쳐 냉각되면 다시 증기발생기로 돌아가 수증기가 되어 터빈을 돌리는 과정을 반복하게 된다. 물을 엄청난 압력으로 걸어주면 100℃에서도 물은 끓지 않는다. 원자로의 냉각수로서 300℃의 물이 존재하는 이유이다. 가압경수 로는 보통의 물에 100배 이상의 압력을 가하여 끓지 않도록 만드는 원전 을 가압경수로 원전이라고 한다. 가압중수로(PHWR : Pressurized Heavy Water Reactor)의 경우는 냉각제와 감속제로서 보통의 수소보다 두 배가 무거운 중수소와 산소가 결합한 중수를 사용하는 원전을 말하고 있다. Fig. 2.2는 각 연료봉 위치의 이름을 나타내고 있다.

(2) 핵연료 검사 기술

핵연료 운용기술에는 핵연료 설계 기술, 핵설계 기술, 열수력 설계 기 술, 안전해석 기술, 핵연료 제조 기술, 핵연료 검사 및 수리 기술이 있다. 핵연료 검사 및 수리 기술에는 핵연료 손상 유무 평가 기술, 핵연료 성능 자료 측정 기술, 핵연료 수리 기술이 있다.





Fig. 2.2 The structure of the fuel rod



핵연료 검사 및 수리 기술이 중요한 이유는 핵연료 이용률을 증가시켜 핵연료 교체의 주기성에 따른 비용절감과 운영비를 절감하기 위한 경제성 을 위해서이다. 핵연료 이용률을 증가시키기 위해서 핵연료의 검사 능력 을 향상시켜 효율성을 증가시키며, 이를 위하여 모든 핵연료의 검사 결과 에 대한 성능별 데이터베이스가 필요하다. 검사 및 수리 기술의 향상은 결국 사용 후 핵연료의 수량을 감소시켜 핵연료 재사용의 효율성을 증가 시키게 된다.

기존의 핵연료 집합체 검사 방법으로는 육안 검사 기술, 방사성 물질 누설검사, 초음파 검사, 와전류 검사가 시행되고 있다.

핵연료 집합체에 대한 검사는 일차적으로 육안 검사로 시행되며 대상은 핵연료 피복관 검사, 연료봉과 연료봉 사이 갭 상태검사, 연료봉 길이 처 짐 검사, 연료봉 직경 휨 또는 찌그러짐 검사, 연료봉 입출력, 지지격자 상태 검사, 지지격자 스프링력, 집합체 길이에 대한 검사로 이루어진다.

육안 검사 방법으로는 고배율의 카메라를 이용하여 연료봉 및 집합체 부품 표면을 검사하여 손상 핵연료의 손상원인을 규명하게 된다. 이물질 에 의한 손상, 연료봉과 스페이서 그리드 간의 마모 등을 검사하는 것이 다. 육안 검사를 위한 카메라 장비의 예를 Fig. 2.3에서 나타내고 있다.

와전류 탐상에 의한 검사(ECT : Eddy Current Inspection Method)는 전자유도법칙을 이용한 교류 전류로부터 유도되는 와전류의 임피던스 변 화를 측정하는 것으로 연료봉 피복관 표면에 크러드(crud) 등이 존재하는 경우 표면에 흐르는 와전류의 상태를 측정함으로써 크러드 및 산화층의 두께를 측정하게 된다. 와전류 탐상 장비의 예를 Fig. 2.4에서 보여주고 있다.





Fig. 2.3 An example of visual inspection camera (excerpted from [15])



Fig. 2.4 An example of ECT (excerpted from [15])



2.2 초음파를 이용한 검사

원자력산업에서 핵연료 무결성을 평가하기 위한 일반적인 검사는 각 원 자로의 가동 주기 종료시점에 핵연료 집합체를 조사하는 것이다[16]-[18].

이 검사는 핵연료 집합체로부터 방사능 누출을 탐지하는 목적으로 진행 된다. 핵연료 집합체에 대한 개별 핵분열 생성물의 방사능 유출 경향을 분석하고 물리적 원리를 기반으로 하는 정교한 모델을 사용해서 핵연료 집합체의 파손을 평가하기 위한 수많은 방법들이 개발되어 왔다[19]-[24].

초음파에 의한 핵연료 집합체 검사는 산업계에서는 비파괴 검사로 잘 알려져 있는데, 파손된 핵연료 집합체의 연료봉 위치를 탐지하는 것을 목 적으로 한다. 초음파 검사는 핵연료 집합체의 연료봉 내부에 물이 존재하 는지 여부를 검사하여 손상된 연료봉의 위치를 식별한다[25][26].

본 절에서는 Thome 등[27]에 의하여 제안된 중심주파수 25MHz의 초음 파를 이용한 핵연료 집합체 검사 시스템을 소개한다. 초음파에 의한 검사 시스템은 초음파 펄스 에코 시스템(Ultrasonic Pulse-Echo System)이라고 도 하는데 가압경수로 코어에서 누출되는 연료봉의 손상을 식별하기 위해 서 설계하고 개발되었다. 이 시스템은 핵연료 집합체의 각 연료봉에 대해 서 자동으로 초음파 데이터를 수집해서 분류한다. 이 시스템은 기계 제어 시스템, 특수목적 변환기, 데이터 수집 시스템, 그리고 신호처리 시스템 등으로 구성되어 있다[28][29].

초음파 검사는 와전류 탐상법과는 달리 핵연료 집합체를 분해하지 않고 검사하게 되는데, 핵연료 집합체를 분해하여 검사하는 경우에는 분해로 인한 연료봉의 손상 가능성이 커지게 된다.

이 방법은 매우 안전하고 정확하며 신뢰할 수 있는 것으로 입증되어 있으며, 정확성과 신뢰도 범위가 80%에서 90%에 이르는 가장 일반적인 PWR검사 방법이다[18][25].



2.2.1 초음파 검사 원리

초음파 탐상법(UT : Ultrasonic Flaw Detecting Test)은 핵연료 집합체 사이를 초음파를 발사하여 반사되는 주파수의 변화를 이용해 내부의 결함 을 검출하는 원리를 사용하고 있다. 원자력 발전소에서 연료봉의 피복관 부위의 결함 검사를 위하여 필수적인 사항이다.

통상적으로 핵연료 집합체는 물에 침전되는 17×17 행렬의 지르칼로이 (zircaloy) 봉으로 이루어져 있다. 원자로가 정상적으로 가동을 하는 동안 클래드(cladding)와 연료 펠렛 사이의 간격에는 압축된 헬륨과 핵분열 가 스를 포함하고 있다. 핵 연료봉이 파손되면, 물이 갭으로 침투한다. 클래 드와 펠렛을 Fig. 2.5에 나타낸다.

초음파 펄스 에코 시스템은 갭 내부의 물을 탐지하는 방법을 기초로 하 고 있다. 가스와 고주파수 초음파로 채워진 갭 중앙으로 전송되는 파를 상당히 감쇠시키는데, 두께가 밀리미터밖에 되지 않는다 하더라도, 초음파 가 전파된다고 말할 수 있을 만큼 충분한 것이다. 초음파 트랜스에 의해 서 방출되는 UT펄스는 튜브 벽을 따라 방사상으로 전파된다.







지르칼로이 튜브(zircaloy tube) 두께는 0.62mm로 튜브 내벽과 연료 요 소 사이의 간격을 포함하고 있다. 입사펄스(incident pulse)는 Pi가 외벽으 로부터 입사되면 바로 외벽에서 반사되는 P_{ro} 와 P_{r1} 에서 P_{r4} 까지 펄스 에코우로 다중 반사하게 된다. 초음파 확산을 Fig. 2.6에서 나타내었다.

에코 펄스가 평면파 방법(plane wave approach)이라는 점을 고려하면, 에코 펄스는 튜브벽 전반에서 다중으로 반사되기 때문에, 식 (2.1)에서부 터 식 (2.4)와 같이 표현할 수 있다.

$$P_{r1} = T_1 \cdot T_2 \cdot \Gamma_1 \cdot P_i \tag{2.1}$$

$$P_{r2} = T_1 \cdot T_2 \cdot \Gamma_1 \cdot \Gamma_2 \cdot \Gamma_1 \cdot P_i \tag{2.2}$$

- $P_{r3} = T_1 \cdot T_2 \cdot \Gamma_1 \cdot \Gamma_2 \cdot \Gamma_1 \cdot \Gamma_2 \cdot \Gamma_1 \cdot P_i$ (2.3)
- $P_{r4} = T_1 \cdot T_2 \cdot \Gamma_1 \cdot \Gamma_2 \cdot \Gamma_1 \cdot \Gamma_2 \cdot \Gamma_1 \cdot \Gamma_2 \cdot P_i$ (2.4)

여기에서, T_1, T_2 는 지르칼로이 튜브 갭에서 갭에 이르는 초음파 투과계 수이자, 전송계수이며, Γ_1 은 튜브 내벽과 갭 사이 경계 면에서 반사된 초 음파 반사계수이고 Γ_2 는 튜브 내벽과 물 사이의 경계 면에서 반사계수이 다. 식 (2.1)에서 식 (2.4)로부터 다음의 식 (2.5)에서부터 식 (2.7)과 같이 표현할 수 있다.

 $P_{r2} = \Gamma_1 \cdot \Gamma_2 \cdot P_{r1} \tag{2.5}$

$$P_{r3} = (\Gamma_1 \cdot \Gamma_2)^2 \cdot P_{r1} \tag{2.6}$$

$$P_{r4} = (\Gamma_1 \cdot \Gamma_2)^3 \cdot P_{r1} \tag{2.7}$$

초음파 펄스 에코 기술은 지르칼로이 튜브 벽과 갭의 내용물 사이의 서 로 다른 음향 임피던스 부정합을 기반으로 한다. 연료봉의 전형적인 에코 엔벨로프(envelope)를 Fig. 2.7에서 보여주고 있다. R1~R4는 연료봉 내벽 의 펄스 반향에서 나온다. Fig. 2.7 (a)와 (b)에서 나오는 에코의 크기는 각 각 갭 내부의 공기 또는 물과의 관계를 나타내고 있다.







Fig. 2.7 The echo envelope of the fuel rod (excerpted from [27])



2.2.2 초음파 검사 시스템 동작

초음파 시스템은 내부 10m 수심과, 감마 및 배타 방사선뿐만 아니라 60℃ 온도에서 작동하도록 설계된다. 이것은 사용 후 핵연료 집합체의 저장 수 조를 고려한 것이다. 초음파 시스템의 동작은 또한 특별히 설계된 자동적 으로 위치를 제어하는 금속 팔에 탐사침을 부착하여 검사를 수행한다. 탐 사침은 핵 연료봉 사이의 통로를 따라 스캔하므로 탐사 침의 속도는 신호 품질에 중요한 파라미터가 된다. 스캐닝 속도가 높으면 연료봉의 표면과 탐사 침의 전면 사이에 오류를 발생시켜서, 전반적인 에코 신호 품질을 떨어뜨리게 되고, 반대로 속도가 낮으면 스캐닝 시간을 증가시켜서 불필 요하게 시스템을 작동하는 결과가 발생한다. 초음파를 이용한 핵연료 검 사 실험 시스템 예를 Fig. 2.8에서 나타내었다.

초음파 탐침기는 핵연료의 통로를 따라 위치 이동을 하면서 1kHz의 펄 스 반복 주파수를 가진 펄스를 지속적으로 송신하며 각 연료봉에 대한 에 코 신호를 만들게 된다. 표준 PWR에서 주변 연료봉 사이는 약 3mm이다. 이 구조는 초음파 탐침에 약간의 제약이 있는데, 그것은 압전소자 (piezoelectric element), 탐침기 크기, 초점 맞추기, 연료봉의 외벽과 내벽 사이에서 반사되는 에코신호 사이의 데드 존 및 깊이 해상도(depth resolution)등의 선정과 같은 것들이다. 탐침기를 연료봉 주변 사이에 위 치시키기 위해서, 전체 탐침기 두께는 2.5mm를 초과하면 안된다. 적절한 깊이 해상도는, 초음파 펄스 길이가 0.5µs보다 짧아야 한다. 탐침기 전면 이 연료봉에 매우 가깝게 위치하기 때문에, 데드 존은 1mm를 초과해서는 안 된다.

이러한 요건들을 준수하기 위해서, 압전소자는 매우 얇아야 하며, 짧은 펄스를 방출하기 위해서 품질이 낮은 기계 및 전기적 인자들을 필연적으 로 수반하는 광역 스펙트럼을 가진 고주파에서 작동되어야 한다. 탐침기 전면에는 음향 정합 층을 삽입하기 위한 공간이 부족하기 때문에, 압전소 자는 탐침기 전면과 접촉하는 매체에 가까운 음향 임피던스를 가지고 있



도록 임피던스 정합이 이루어지도록 해야 한다.

Thome 등[27]에 의하여 제안된 초음파 펄스 에코 시스템은 이러한 요 건들을 충족시키기 위해서, 25µm 두께의 PVDF(polyvinylidene fluoride) 압전 폴리머 필름과 금 전극(gold electrodes)으로 탐침기를 만들었다[31]. 탐침기 중심 주파수는 25MHz이며, 광역 스펙트럼을 가지고 있다.

탐침기 구조의 도면을 Fig. 2.9에서 나타내는데, 두 개의 평면으로 하나 는 수직면을 보여주는 것이고, 다른 하나는 연료봉 축을 따라 보여주고 있다. 이것은 또한 활성 PVDF 압전막과 방지층(backing layer), 그리고 하 우징을 보여주고 있다.

탐침기는 또한 리프 스프링과 쌍을 이루는 방법으로 유동할 수 있는 금 속 팔에 부착하도록 설계되었는데, 이것은 탐지기가 전면으로 이동할 때, 항상 연료봉 벽과 접촉하도록 되어 있다. 탐침기의 외형 및 치수, 리프 스 프링과 금속 팔 모두 연료 집합체의 연료봉 사이를 이동하는 동안 탐침기 를 조절하는 조건을 제공하는데, 이것은 자동 측위시스템을 이용한다.

초음파 펄스 에코 시스템은 펄스 에코 신호 해석을 위하여 인공신경망 을 기반으로 분류방법을 개발하고 있는데, 모든 신호의 신호대비 잡음수 준과 상관없이 모든 신호를 다룰 수 있는 장점이 있다. 탐지된 신호를 연 료봉 식별성능으로 변환시켰을 때, 허위경보 가능성은 2%인 반면에, 파손 된 연료봉을 정확하게 식별하는 가능성은 93%에 이르렀다고 보고하고 있 다[32].





Fig. 2.8 The nuclear fuel inspection system using ultrasonic wave (excerpted from [30])



Fig. 2.9 The structure of the ultrasonic probe (excerpted from [27])



2.3 와전류 탐상검사

2.3.1 와전류 탐상검사 원리

와전류 탐상검사는 대상 시험체에 와전류를 유도하여 이 전류와 시험체 의 재질 사이 상호 작용을 관찰하여 시험체의 상태를 분석하는 비파괴검 사 기술로서 검사시 시험체에 접촉되지 않고 고속으로 검사가 가능하기 때문에 원자력 발전소와 같은 방사선 피폭 등이 예상되는 비파괴검사에 널리 적용되고 있다.

와전류 탐상법의 원리는 전자기코일에 의해 와전류가 시험 탐촉자 내에 발생하고 동시에 탐촉자 전기 임피던스 변화를 측정함으로써 이 와전류 변화를 관찰하게 되고, 이를 분석하여 시험체의 상태를 평가하게 된다.

와전류 탐상검사 장치는 기본적으로 교류 발진기, 발진기에 연결된 코 일 탐촉자, 코일을 가로질러 발생하는 전압변화를 측정할 수 있는 전압계 등으로 구성된다.

교류 발진기는 1kHz~2MHz 주파수 대역에서 시간에 따라 변하는 전 류를 발생시킬 수 있어야 하며, 탐촉자 코일은 적절한 형태로 감겨진 절 연 구리선으로 되어있다. 원하는 검사결과를 얻기 위해 선의 직경, 권선수 와 코일의 치수가 결정되어야 한다. 와전류 탐촉자는 검사형태에 따라 단 일 시험코일, 별도의 수신 코일을 가진 여자코일, 홀 효과 감지코일을 가 진 여자코일 등이 있다. 전압계는 시험체의 전기적 상태, 전도특성 변화 또는 코일과 시험체 사이의 상대적 위치변화에 따라 코일 양단에 발생하 는 전압 변화를 측정한다.

교류 발진기를 코일에 접근 시킬 때 유도되는 전압은 패러데이 법칙에 따르면 식 (2.8)으로 나타낼 수 있다.

$$V_s = -N_p \frac{d\Psi_p}{dt} \tag{2.8}$$

여기서 V_s 는 코일에 유도되는 전압이고, Ψ_s 는 교류발진기에 의해 발생



- 18 -

식 (2.14)에서 코일의 임피던스는 코일 주위의 자속의 함수로 나타내지 고 자속은 시험 도체 내에 유도된 와전류의 지배를 받는다. 와전류 탐상

(2.15)로 표현된다. *Z*∝Ψ_E

 $V = ZI_n$

Collection

(2.13)과 같이 표현할 수 있다. $\Psi_s \propto -I_s$ (2.12) $\Psi_E = \Psi_p - \Psi_s$ (2.13)

여기서 Ψ_E 는 시험도체가 존재할 경우 코일 주위의 평형 자속이다. 와

전류의 흐름에 따라 저항이 감소하게 되고 자속도 감소하게 된다. 이것은

탐촉자의 임피던스 감소로 나타나게 되어 식 (2.14)의 관계가 성립되고 식

여기에서 Z_g는 시험 도체의 임피던스로서 전류의 흐름을 방해하는 성 분이며, I_g는 시험 도체에 흐르는 전류로 와전류라고 한다. 와전류 I_g는 렌츠 법칙에 따라 1차 자장에 반하는 자장을 발생시키므로 식 (2.12), 식

도체의 임피던스와의 관계는 식 (2.11)로 나타낼 수 있다. $I_{e} = V_{e}/Z_{e}$ (2.11)

식 (2.10)의 전압 V_s를 검사하고자 하는 시험 도체에 접근시키면 시험

여기서 Ψ_o 는 전류 I_o 에 해당하는 자속이다. 식 (2.9)을 식 (2.8)에 대입 하여 V_s 를 구하면 식 (2.10)이 된다.

 $V_s = -N_n \omega \Psi_o \cos \omega t$

하는 총자속이다. 코일의 전류는 시간에 따른 사인 함수로 나타낼 수 있 으므로 총 자속은 식 (2.9)와 같이 표현할 수 있다.

$$\Psi_p = \Psi_o \sin \omega t \tag{2.9}$$

(2.14)

(2.10)

(2.15)

법은 이와 같이 코일의 전압에 의하여 시험 도체에서 발생하는 와전류가 총 자속을 감소시키게 되고 총 자속이 감소하면 코일 임피던스 변화와 전 압강하를 유발하게 되어 시험도체의 상태를 측정할 수 있다.

와전류 탐상검사는 와전류에 의해서 코일의 임피던스가 변화하게 되고 코일의 양단전압의 변화를 이용하여 시험 도체의 결함을 측정하게 되는데 실제로 대부분의 검사에서 탐촉자가 결함을 통과할 때 탐촉자 임피던스는 보통 1%이하로 미소하게 변하므로 측정하기가 매우 곤란하다. 이 미소변 화를 측정하기 위하여 여러 가지 방법을 이용하게 되는데 그 중에서도 임 피던스 브릿지 방법이 많이 이용되고 있다.

와전류 탐상법 블록 다이어그램을 Fig. 2.10에 나타낸다. 여기에서 오실 레이터에서 발생하는 발진 주파수를 통하여 시험 코일에 전압을 발생시키 게 된다. Z₁과 Z₂ 시험 코일은 임피던스가 같지 않기 때문에 양단간의 전 압차를 없애기 위해 평형(balancing)회로를 사용하며, 대부분의 탐상기는 교류 브리지(AC bridge) 회로를 사용하고 있다.



Fig. 2.10 The ECT of the block diagram



지금 평형상태에서 시험 도체의 결함에 의하여 작은 불평형신호가 생성 되면 이 신호는 증폭되고 분석을 용이하게 하기 위하여 AC신호의 진폭과 위상 특성을 지닌 DC신호로 바꾸게 된다. Fig. 2.10에서 Z_1 과 Z_2 는 브릿 지 회로를 구성하는 테스트 코일과 기준 코일의 임피던스이다. Z_1 과 Z_2 가 평행을 이룬 상태에서 탐침자에 의하여 시험 도체에 이상이 발견되면 브릿지 회로의 평행상태가 깨어지므로 불평행 성분을 검출하게 된다.

2.3.2 와전류 탐상검사 탐촉자

(1) 원형 코일 보빈 탐촉자

튜브 타입이나 원주형 시험체 검사를 위하여 원형 코일을 사용하여 직 경 약 50mm까지의 튜브 또는 봉의 결함 검사가 가능하다. 이 보다 더 큰 직경을 가진 시험체에서는 결함체적은 일정하게 유지되고 있는 반면 시험체 검사 체적은 증가하기 때문에 결함의 감도는 감소한다. 이때 더 높은 감도를 얻기 위해서는 표면 탐촉자를 사용하여야 한다. 시험체의 형 태는 선재, 봉 또는 튜브, 원형, 사각, 직사각형, 또는 육각형 등이 가능하 고, 가능한한 길이가 긴 형태의 코일을 사용한다. 외삽코일은 1회 통과로 시험체 원주방향 전체에 대해 완전한 신호를 수집할 수 있고 100%검사 가 가능하기 때문에 검사 속도가 빠르고 효율적이다. 결함의 검출도는 와 전류 흐름이 방해되는 정도에 따라 크게 좌우된다. 따라서 가장 좋은 탐 촉자는 시험체의 검사 관심부위에 가장 높은 와전류밀도를 유도할 수 있 어야 하고 전류방향은 결함에 수직해야 한다. 검사를 계획할 때는 검사대 상 결함의 종류, 균열이 예상된다면 균열의 방향성(길이 방향에 수직 또 는 평행), 검사 도체의 자성(강, 상, 반자성체 등)을 고려해야 한다.

(2) 표면 탐촉자(Surface Probe)

표면 탐촉자를 사용한 와전류 탐상 검사 시 보통 검사자가 제어할 수 있는 변수들은 시험 주파수, 탐촉자 크기 및 형태 등과 같은 것들이다. 이들 변수는 표피효과, 결함 크기, 탐촉자 크기에 따라 결정한다. 바람직



하지 않은 시험변수를 최소화하고 이에 대처하기 위한 시험조건을 다루 기 위해서는 임피던스 그래프를 완전하게 이해하는 것이 필요하다.

검사 착수전 검사 계획 시 첫 번째로 고려해야 할 중요한 사항은 검사 대상 결함의 종류이다. 만약 균열일 경우 결함크기, 결함의 방향성, 결함 의 허용치, 재질의 물성(자성체 혹은 비자성체), 다른 시험변수가 시험에 미칠 영향, 이와 같은 것들은 탐촉자 크기, 시험 주파수 등을 적절하게 선정하기 위해 반드시 필요하다.

와전류 탐상검사 탐촉자의 역할은 크게 2가지로 나누어진다. 즉, 대상 시험체에 와전류를 유도하고 결함에 의해 왜곡된 와전류의 흐름을 감지 하는 것이다. 결함과 시험체의 다른 변수들에 대한 감도는 탐촉자 설계에 따라 달라지고 와전류 흐름의 방향과 코일의 자장을 제어하고 적절한 코 일크기를 선택하여 이루어진다. 바람직하지 않은 재질 변화와 탐촉자-시 험체간 결합도(coupling)의 영향은 다중 코일을 사용하여 감소시킬 수가 있다. 표면 탐촉자는 표면, 평면 또는 굴곡, 결함 또는 재질 특성 검사에 사용된다.

2.3.3 원전 증기발생기 와전류 탐상 검사

(1) 단일 주파수 검사방법

일반적인 원자력발전소의 가동전 및 가동중 검사에 사용해온 방법으로 전열관의 건전성 여부를 검사하기 위하여 검사부위 특성, 검출결함 특성 을 고려하여 미리 주파수를 선정하여 단일 주파수로 검사하는 방법이다. 예를 들면 400kHz에 의한 전열관내외경 균열검사, 부식 검사가 있으며, 7kHz을 이용한 전열관 지지판 검사 및 튜브 시트(tubesheet)내 결함검사 가 있고, 100kHz에 의한 곡률 반경이 작은 전열관에 사용되는 방법이 있 다.

(2) 다중 주파수 검사방법

예상 결함의 특성을 고려하여 4가지 이상의 주파수를 선정하여 동시에



검사 대상에 주입시켜 응답특성을 분석하는 방법으로서 복잡한 구조 또는 탐촉자 진동 등 결함 신호해석에 영향을 미치는 요소가 있을 때라도 신뢰 성 있는 검사가 가능하다. 또한 한 번의 검사로 여러 가지 필요한 데이터 를 얻을 수 있고 검사에 필요한 시간 및 방사선 피폭을 줄일 수 있는 장 점이 있다.

와전류 탐상법은 전자유도 현상을 이용한 간접적 검사방법으로 비접촉 특성으로 인한 자동화, 신속한 검사 및 악조건하에서도 검사가 가능한 장 점을 가지고 있으나 검출하고자 하는 특성 이외의 인자에 의하여 신호 방 해가 심하며, 결함의 종류 및 형상의 판별이 어려운 단점을 가지고 있다.

2.4 영상처리를 이용한 변형 검사

2.4.1 스페이서 그리드 변형 검사

핵연료 집합체를 잡아주는 스페이서 그리드의 변형검사 방법으로 영상 처리를 이용한 방법은 2007년 Cho 등[33]에 의하여 제안되었다. 본 제안 의 실험 영상은 스웨덴의 Ahlberg 사의 4면 검사 장치에 의해 수행된 경 수로형 핵연료 집합체의 검사 동영상을 이용하여 스페이서 그리드의 변형 검출을 위한 영상 알고리즘을 제시하였다. 스페이서 그리드의 파열을 검 출하기 위해 영상 관심영역을 스페이서 그리드의 일정 간격의 홈으로 설 정하고 특징점으로 추출한다. 가우시안 스무딩 처리를 통해 스페클을 제 거하고 수중조명에 의한 영향을 최소화하기 위해 이진화 처리하여 스페이 서 그리드의 홈 영역을 강건하게 추출한다.

스페이서 그리드의 균열과 이물질을 Fig. 2.11과 Fig. 2.12에서 보여주고 있다. 이 방법은 블롭 분석(blob analysis)을 이용하는데, 스페이서 그리드 의 홈 영역 추출을 위해 블롭들의 크기를 비교하고, 크기 필터를 이용하 여 잡음영역을 제거한다. 블롭 영역들의 면적의 평균 값을 구하고, 각 블 롭의 면적을 평균 면적과 비교하여 허용 편차 내에 수렴하는 블롭만 취함 으로써 스페이서 그리드의 홈을 추출할 수 있게 된다. 스페이서 그리드에



위치한 홈들은 일정한 크기와 위치를 가지므로 그리드 파열이 일어나는 경우 각 블롭 간의 규칙성이 깨어짐을 이용하여 이상상태를 검출할 수 있 게 된다. 본 알고리즘의 순서도를 Fig. 2.13에 나타내었다.



Fig. 2.11 An example of a spacer grid (1) (excerpted from [13])



Fig. 2.12 An example of a spacer grid (2) (excerpted from [13])





Fig. 2.13 The flowchart of the image processing (excerpted from [33])

2.4.2 핵 연료봉의 변형 검사 / 이 🗸

영상처리를 이용하여 핵 연료봉의 변형 검사에 관한 방법은 2010년 Cho와 Choi[34]에 의하여 제안되었다. 이 연구는 중성자 조사 후 외관검 사에 발견되는 핵 연료봉의 표면에 필연적으로 발생하는 크러드, 산화피 막, 연료봉의 휨, 뒤틀림으로 연료봉의 변형, 연료봉의 성장 또는 수축, 특 히 연료봉과 스페이서 그리드 사이에서 발생하기 쉬운 프렛팅 마모 (fretting wear) 등을 관찰하고 측정하는 방법을 제안하고 있다. 핵연료 집 합체 외관 검사는 원자로에 재장전 가능한지의 여부를 판단하는 건전성 평가로 원자력 발전소의 안전 운영에 직결되는 사항이며 높은 정밀도의 외관 검사가 요구된다. 본 연구에서는 반도체 레이저와 고분해능 CCD& CMOS 영상센서를 사용하여 핵 연료봉의 변형 검사기준인 150µm 보다 3


배 이상 개선된 50μm 이하의 정밀도를 달성하였다. 핵 연료봉의 미세변위 측정을 위하여 실험시스템이 제안되었다. 시스템을 Fig. 2.14에 나타내었 다. Fig. 2.14에서 VT(visual test) 시스템은 고분해능 CCD & CMOS 영상 센서로 광축(optical axis)을 이루고 있다. 반도체 레이저 다이오드에서 방 출되는 빔(beam)은 VT 시스템의 광축과 θ를 이루며 조사하면 VT에는 포물선 형태로 디스플레이 된다.



Fig. 2.14 The configuration of micro displacement measurement of a fuel rod (excerpted from [34])



이때 연료봉이 VT 시스템의 광축을 따라 Δx 만큼 변위가 발생한다고 가정하면, VT시스템 모니터의 레이저 상은 그림처럼 수직방향으로 Δy 정 도 움직이는 결과가 되므로 다음 식 (2.16)이 성립한다.

$$\tan\theta = \frac{\Delta y}{\Delta x} \tag{2.16}$$

즉, 주어진 θ에 대해서 Δy를 측정하면 Δx를 구할 수 있게 된다. 식 (2.16)로부터 Δx를 고정밀도로 측정하기 위해서는 선형 레이저빔 입사각 θ이 매우 중요한 변수가 된다. 레이저 빔 입사각이 45°이면 Δy 측정값이 연료봉 변위 Δx로 치환된다.

$\Delta y = \Delta x$, if $\theta = \pi/4$

식 (2.17)의 관계를 갖기 위해서는 Fig. 2.14로부터 반도체 레이저 다이 오드는 VT 시스템과 연료봉사이의 관측거리에 *d*에 해당하는 높이로 VT 시스템의 광축에 수직으로 위치하여야 한다. 이때 반도체 레이저 다이오 드와 연료봉 표면의 조사지점 사이의 거리 *d*는 다음 식 (2.18)과 같다.

(2.17)

$l = \sqrt{[d^2 + (\alpha d)^2]} \quad \alpha = \tan\theta \tag{2.18}$

레이저빔의 입사각이 클수록 변위의 측정 정밀도는 1/α로 개선된다. 그럼에도 불구하고 반도체 레이저 다이오드의 설치 위치를 높이는 것은 한계가 있다. 영상센서의 광축을 기준으로 45°로 레이저 빔을 연료봉 표 면에 투사하면 연료봉 수평방향의 변위가 영상센서에서는 수직방향의 변 위로 관측된다. 핵 연료봉의 감마선 피폭에 관하여도 실험기간 CCD & CMOS 영상센서 및 반도체 레이저는 문제가 없는 것으로 판명되었다.

연료봉의 크러드를 조사하기 위하여 마이크로 스테이지를 이용하여 전 후 방향으로 0.1mm 단위로 실험 시편을 미세 이동하면서 측정을 하였다. 선형 빔을 방출하는 반도체 레이저는 650nm 파장에서 20mW의 출력을 갖는 Class IIIb 레이저 다이오드를 사용하였다. 45°레이저를 이용한 연료봉 검 사의 특징으로는 레이저 다이오드와 연료봉 조사지점사이의 거리는 2.8~



4.2m에 해당하므로 레이저 선형 빔의 두께를 균일하게 유지시켜주는 광 학계가 부가적으로 필요하고 레이저 출력이 고출력 특성을 가져야 한다. 중성자 조사 후 핵 연료봉의 표면에 형성된 크러드는 검은색을 띄고 있으 므로 레이저 빔의 반사율을 감쇄시키기 때문이다. 여기에서는 레이저 빔 위치의 특징점으로 상단의 포물선을 취하였다. 레이저 빔 영역의 전체 윤 곽선에 대해 타원을 구하고 타원 축의 임계값(threshold)이하의 값들은 제 거한다. 상단의 포물선 영역만 남게 되며 이를 타원으로 재차 모델링하고 타원의 장축과 단축의 기울기를 구한다. 포물선의 변곡점과 모델링한 타 원의 장축과 단축이 교차하는 지점을 특징점으로 하여 레이저의 위치를 찾게 되면 기준점, 즉 핵 연료봉의 전후 변위가 기준점으로부터 얼마나 벗어났는지를 계산할 수 있게 된다. 기준점으로 부터 벗어난 픽셀 수를 구한 후 이를 분해능을 통해 mm로 변환시켜준 다음 연료봉의 변위를 구 하는 것이다.

2.4.3 사용후 핵연료 집합체 단면 검사

2007년 Jang 등[35]에 의해 제시된 연구는 사용후 핵연료 집합체의 특징 을 추출하기 위한 알고리즘을 제안하고 있다. 이 연구는 사용후 핵연료 집합체 이미지 영상에서 핵 연료봉 영상을 추출할 수 있는 영상처리 기법 과 RGB 색상 데이터를 추출하여 가시화하는 방안에 대해 제안하였다. 전 체적인 알고리즘의 순서도를 Fig. 2.15에 나타내었다.

사용 후 핵연료 집합체가 저장된 수조에서 노출된 상부 영역을 먼저 Matlab서 제공하는 강도 변환(intensity transformation) 함수를 이용하여 명도 값을 밝은 쪽으로 전환한다. 강도 변환(Intensity transformation) 한 결과 영상으로부터 히스토그램을 제시하고 히스토그램 평활화(histogram equalization)를 한다. 평활화를 통하여 낮은 명암대비를 가지는 영상을 높은 명암대비를 가지는 영상으로 전환할 수 있다. 이후 모폴로지 기법 (morphology method)를 이용하여 그레이 영상의 침식 및 팽창 연산을 수행한다. 이 침식연산을 통해 관심대상인 핵 연료봉 단면을 추출할 수



있다. 또한 RGB 색상정보를 추출하여 개별적인 핵 연료봉에 대한 색상 피크를 측정하고, 핵 연료봉 경계선 검출을 통해 핵연료 크기 및 형상을 파악할 수 있으며, 색상정보를 이용한 윤곽(contour) 그래프가 경계선 검 출의 다른 방안이 될 수 있음을 보여주고 있다. 기존에 많이 사용되는 소 벨 연산자를 이용한 경계선 검출과 RGB 정보에서 녹색 성분 데이터만을 추출하여 윤곽 그래프를 작성한다. 소벨 필터를 이용하여 경계선을 검출 한 결과 핵 연료봉의 경계선 검출이 잘되는 것을 알 수 있었으며, 특이한 사항은 핵 연료봉 형상이 도넛 모양으로 나타났는데, 이는 실제 핵 연료 봉 끝단 단면에 굴곡이 있다는 것을 의미하고 장착된 핵 연료봉 진위여부 를 판단할 수 있는 중요한 정보라고 할 수 있다.



Fig. 2.15 The algorithm for the image processing (excerpted from [35])



2.5 기존 검사 방법의 비교 분석

(1) 카메라 영상에 의한 육안 검사

육안 검사는 사람의 눈으로 결함의 유무나 연료봉 표면의 변형 등을 검 출하는 방법이다. 이는 많은 검사기기가 필요하지 않기 때문에 간단히 수 행할 수 있는 장점이 있는 반면, 충분한 지식과 기량을 가진 검사자의 수 행이 필요하다. 육안 검사는 현재 핵연료 집합체 일차적인 검사에 가장 많이 사용되는 방법으로 고배율 카메라에 의한 획득된 영상을 중심으로 이루어지며 제한된 시간 내에 검사 업무를 수행되므로 검사자의 숙련도에 따라 정확성이 좌우된다.

검사자는 영상을 통하여 육안으로 연료봉의 집합체 부품과 표면을 검사 하고 손상 핵 연료봉의 손상원인을 규명하게 된다. 손상의 종류로는 이물 질에 의한 손상, 연료봉 지지격자, 스페이서 그리드간의 마모 등을 판독하 는데 검사상의 한계를 가지고 있다. 이를테면 연료봉과 연료봉 사이의 틈 의 변화, 비틀림, 휨, 연료봉 직경 변화에 대하여 아주 세심한 관찰이 요 구된다.

본 논문에서는 고배율로 획득된 영상을 중심으로 검출 알고리즘을 통하 여 분석 가능한 핵연료 집합체 검사 실험 시스템을 제작하여 육안으로 식 별이 불가능한 부분에 대하여 판독이 가능하도록 구현하여, 육안 검사의 시간을 단축시키고, 좀 더 정확한 검사 신뢰도를 올리고자 한다.

(2) 와전류 탐상 검사

교류가 흐르는 코일을 전도체에 가까이 하면 코일 주위에 발생된 자계 가 도체에 작용하게 되어 도체를 관통하는 자속의 방향은 시간적으로 변 하게 된다. 이때 도체에는 도체를 관통하는 자속의 변화를 방해하려는 기 전력이 생긴다.도체는 이 기전력에 의해 교류성분의 와전류를 만들게 되 는데 와전류의 크기와 분포는 인가한 교류전압의 주파수, 도체의 전도도 와 투자율, 시험체의 크기와 형상, 코일의 형상과 크기, 전류, 도체와의 거



리, 균열 등의 결함에 의해 변한다. 따라서 시험체에 흐르는 와전류의 변 화를 검출함으로서 시험체에 존재하는 결함의 유무, 재질 등의 시험하는 방법을 비파괴검사의 하나로 와전류 탐상검사라 한다. 도체에 흐르는 와 전류는 표피효과로 인하여 도체의 표면층에 집중하여 흐르며 내부로 들어 갈수록 급격히 감쇠한다. 감쇠의 정도는 주파수, 시험체의 전도도, 투자율 이 클수록 현저히 커진다. 전자유도에 의한 와전류 탐상검사는 주로 표층 부 결함 검출법으로서 관, 봉, 선 등의 제조시의 탐상검사와 보수 검사시 탐상검사에 적용되고 있다. 열교환기 튜브의 보수검사, 항공기 부품의 보 수검사 등에서 다른 검사법의 적용이 곤란한 부위까지 탐상할 수 있어 편 리하게 이용된다. 이러한 와전류탐상검사의 특징은 비접촉시험이며, 시험 속도가 빠르고, 관의 내외면 표층부 결함 검출에 적당하며, 측정값이 전기 적 출력으로 얻어지므로 결함 크기를 추정할 수 있고, 특히 고온 시험체 의 탐상에 적합한 것으로 알려져 있다. 현재 원자로의 증기발생기 세관검 사에도 사용되고 있다. 와전류 탐상검사에 의한 핵연료 집합체 검사는 검 사의 정확성이 매우 높음에도 불구하고 핵연료 집합체를 분해하여 이루어 지므로, 핵연료 집합체의 표면 검사에는 적합하지 않다.

(3) 초음파를 이용한 검사

2.2절에서 제안된 초음파 펄스 에코 시스템(ultrasonic pulse-echo system)의 표준모형은 가압경수로 코어에서 누출되는 연료봉의 손상을 식 별하기 위해서 설계하고 개발되었다. 이 시스템은 핵연료 집합체의 각 연 료봉에 대해서 자동으로 초음파 데이터를 수집해서 분류하며, 최종 신호 처리 및 분류까지 몇 가지의 소프트웨어와 특정 하드웨어가 필요한데, 제 어 시스템, 변환기, 데이터 수집 시스템, 그리고 신호조정 등과 같은 몇 가지 독립파트로 이루어져 있다.

초음파 탐침은 핵 연료봉 사이를 통과하면서 초음파에서 발생하는 에코 를 측정하는데, 핵 연료봉의 손상으로 연료봉 내부에 발생하는 물의 존재 여부를 측정함으로써 가압경수로에서 파손된 핵연료 집합체의 이상 연료



봉의 위치를 탐지하는 것이다. 이 기술은 안전하고 정확하며 신뢰할 수 있는 것으로 입증되어 있다. 이것은 정확성과 신뢰도 범위는 80%에서 90%에 이르는 가장 일반적인 가압경수로 핵연료 집합체 검사이다. 그럼 에도 불구하고 연료봉 표면에 두꺼운 산소가 존재하는 것이 초음파 신호 를 약하게 만들어서, 성능을 손상시키고 해석의 오류를 발생시키며, 과소 평가와 과대평가가 발생한다. 초음파 펄스 에코 시스템은 일차적으로 육 안 검사에 의하여 이상이 발견된 핵연료 집합체의 이차 정밀검사로 이용 된다.

(4) 영상처리에 의한 변형검사

스페이서 그리드 변형 검사는 2007년 Cho 등[33]에 의하여 제안되었는 데 이것은 영상처리를 이용하여 스페이서 그리드에 대한 손상여부를 판독 하는 방법이다. 실험에 사용된 영상은 스웨덴의 알버그 사의 4면 검사장 치에 의해 수행된 경수로형 핵연료 집합체의 검사 동영상을 이용하였다. 스페이서 그리드 변형 검사는 스페이서 그리드에 위치한 홈들이 일정한 크기와 위치를 가지므로 파열이 일어나는 경우 각 블롭 간의 규칙성이 깨 어짐을 이용하여 이상상태를 검출하는 것이다. 스페이서 그리드의 홈을 영상 특징점으로 활용하여 적응적 이진화처리와 블롭 분석을 통하여 이상 상태를 검출한다. 스페이서 그리드 홈을 특징점으로 하는 변형검사 방법 은 제안자의 지적대로 크레인에 의해 하강되는 핵연료 집합체의 미세한 흔들림에 따라 영상 처리 관심영역이 크게 변동한다. 완전한 자동화를 위 해서는 핵연료 집합체의 미소 변위를 보상하여 영상처리 관심영역을 강건 하게 설정하는 알고리즘이 보강되어야 한다.

핵 연료봉의 변형 검사에서 레이저와 영상처리를 이용한 핵 연료봉의 변형 검사에 관한 방법은 2010년 Cho와 Choi[34]에 의하여 제안되었다. 이 방법은 반도체 라인 레이저와 고분해능 CCD & CMOS 영상 센서를 이용한 방법으로 핵 연료봉과 이를 관측하는 영상 센서의 광축을 수직으 로 구성하고 영상 센서의 광축을 기준으로 45°이상의 각도로 레이저 빔을



연료봉 표면에 조사하면 연료봉의 수평 방향 변위가 영상 센서에서는 수 직 방향 변위로 관측되는 원리를 이용한다. 크러드가 형성된 연료봉 시편 을 0.1mm씩 이동하면서 고해상도 영상센서를 사용하여 실험한 결과 연료 봉의 변형 검사기준인 150µm 보다 3배 이상 개선된 50µm 이하의 검사 정 밀도를 보고하고 있다. 아울러 반도체 레이저 다이오드는 재료 및 물리구 조의 특성상 고선량의 감마선 피폭에도 강건하므로 검사 대상인 핵 연료 봉에 근접하여 설치하여 연료봉의 변위를 고정밀도로 측정할 수 있을 것 으로 기대하고 있다.

이 방법은 현재 모노 카메라에 의한 연료봉 육안 검사에서는 연료봉의 요철, 덴트(dent) 등의 미세 변위를 검출하기 위해서 검사자의 숙련도에 크게 좌우 되는 것과는 다르게 크게 향상된 방법으로 특히 연료봉의 휨 변형 검사에 큰 효과가 있을 것으로 생각되나, 검사 대상이 피복관 표면 의 크러드 부착과 변형에 국한되고 스페이서 그리드 손상과 연료봉 캡의 소실 및 쳐짐에 관하여는 다른 방법의 연구가 필요하며, 핵연료 집합체에 대한 크레인에 의해 하강되는 미세한 진동에 대비한 안정도 높은 설비 구 축 역시 관건이라 할 수 있다.

사용후 핵연료 집합체 단면 검사에 대하여는 2007년 Jang 등[35]에 의해 사용 후 핵연료 집합체의 특징을 추출하기 위한 알고리즘을 제안하고 있 으며, 이 연구는 사용후 핵연료 집합체의 상부 단면 이미지를 영상처리 기법과 RGB 색상 데이터를 추출하여 가시화하는 방안에 대해 제안하고 있다.

현재 한국 원자력 연구소 조사후시험시설(PIEF : Post Irradiation Examination Facility)내에는 국내 원자력발전소에서 추출된 사용후 핵연 료 집합체들이 깊이 10m의 수조 내에 저장되어 있다. 사용후 핵연료 집 합체는 원자로에서 추출된 이후에도 핵분열 생성물 때문에 오랜 기간 동 안 강력한 방사선과 열을 낸다. 수조 내에서 핵연료 집합체의 이동 및 핵 연료봉에 대한 변화를 확인하기 위해서 현재 숙련 검사자가 망원경을 통



하여 육안 관찰하는 방법이 사용되고 있다. 제안하는 방법은 사용후 핵연 료 집합체의 효율적인 관리와 안전을 위하여 집합체의 디지털 이미지를 이용하여 핵연료 집합체 상부의 단면에 대하여 핵 연료봉의 특징을 추출 할 수 있는 영상처리기법에 관한 연구이다. 이 방법은 핵연료 집합체 상 부 단면에 대한 검사에만 한정되어있다. 기존의 검사 방법에 대한 특징을 정리하여 Table 2.1에 나타내었다.

검사 방법	원 리	방 법	특 징	문제점
압력차에 의한 연료누설검사 (IMS)	실제 사용하는 방법, 압력차 이용	핵연료를 크레인을 들어 올려 압력차에 의한 핵분열 생성물 조사	높은 정확도	대량 연료봉 파손시 비효율
와전류 탐상검사	전자유도법 칙 이용	연료봉을 교류전원에 접근시켜 도체의 표면 특성 측정	정확성, 고온 특성	장애요소로 인한 결함, 형상판별곤란. 집합체 분해 필요
초음파 에코 시스템	초음파 에코현상 이용	초음파 탐침을 연료봉사이로 이동시키며 에코 측정, 수분 측정	연료봉 분해 불필요, 정확도	연료봉 표면의 산소에 의한 초음파 감소효과로 오류 발생
스페이스 그리드 변형검사	이진화 및 블록 분석	스페이서 그리드의 홈의 배열 규칙성 이용, 블롭분석	높은 정확도	핵연료 집합체 크레인에 의한 진동 대책 미흡
반도체 레이저에 의한 핵 연료봉 변형검사	45도 각도의 반도체레이 저와 영상센서 사용	연료봉과 레이저 45도 각도 시 수평변위와 수직변위가 동일함 이용	높은 정확도	상 하단 캡 소실 및 처짐, 스페이서 그리드 손상 검출 방법 미흡
사용후 핵연료 집합체 검사	핵연료 저장수조상 단 영상 처리	저장 수조 상단에서 디지털 카메라로 영상 획득 후 영상처리	사용 후 핵연료 집합체 검사 제안	상부 단면 검사에만 국한

Table 2.1 An analysis of fuel assembly inspection methods



(5) 제안한 검사 시스템

현재 원자력 발전소에서 사용되고 있는 핵연료 집합체 검사의 첫 단계 로는 육안 검사이다. 육안 검사는 고배율 카메라로 핵연료 집합체의 외관 영상을 획득하여 숙련된 검사자가 영상을 보고 이상을 판독하여 수행하게 되는데, 육안 검사의 내용으로는 핵연료 피복관 검사, 연료봉과 연료봉 사 이의 상태 검사, 연료봉 길이 처짐 검사, 연료봉 직경 휨 또는 찌그러짐 검사, 연료봉 인출력, 지지격자 상태 검사, 지지격자 스프링력, 집합체 길 이에 대한 검사로 이루어진다.

첫 단계의 육안 검사에서 의심스러운 핵연료 집합체를 골라내고 두 번 째 단계로서 초음파 검사를 통하여 보다 정밀한 검사를 수행하며, 세 번 째 단계로는 핵연료 집합체를 분해하고 와전류 탐상 검사에 의하여 손상 부위를 측정하여 수리를 하게 된다.

육안 검사는 숙련되고 경험이 많은 전문가에 의하여 시행되는데, 한 개 의 원자로에 장전된 약 200여 개의 핵연료 집합체를 3일 정도의 시간 내 에 검사를 완료해야하는 매우 어려운 작업이다.

본 논문에서 제작한 핵연료 검사 시스템은 첫 단계의 육안 검사를 보다 효율적으로 수행할 수 있는 방법이다. 이 시스템은 보다 저비용으로 구축 하여 숙련된 검사자가 없이도 빠른 시간 내에 검사를 완료할 수 있으며, 또한 검사 시 발생하는 데이터를 무선으로 전송하여 관리함으로써 검사의 효율성을 높일 수 있다.



제 3 장 핵연료 집합체 검사 시스템의 H/W 제작

핵연료 집합체가 원자로에 장착되어 사용하게 되면 일정 기간 운용주기 로 안정성을 위한 정기적인 유지보수를 시행한다. 정기 점검기간에는 핵 연료 집합체를 인출하여 검사한다[38]. 핵연료 집합체의 변형 측정은 원자 로에 재장전 가능여부를 가늠하는 건전성 평가로 원자로의 안전에 직결되 는 문제이다.

현재 사용되고 있는 방법으로는 먼저 수중 카메라를 이용하여 외관상 손상여부, 연료봉의 부분휨, 조사성장, 부식 및 수소화 현상, 지지격자 건 전성, 핵연료 집합체 변형 등을 육안으로 확인하고 손상징후가 있는 경우 에는 추가로 정밀 검사(초음파 검사)를 수행하여 손상 연료봉을 제거함으 로써 핵연료의 건전성을 확보하고 있다. 국내의 검사부위에 대한 비파괴 검사는 초음파, 와전류, 영상처리 등의 방법으로 원자력안전위원회고시 제 2012-10호(원자로 16, 원자로시설의 가동중 검사에 관한 규정 고시)로 규 정하고 있다.

사용후 핵연료 집합체는 고준위 폐기물로 분류되지만 재활용이 가능한 에너지원으로 전 세계적으로 누적량이 증가함에 따라 검사 및 관리는 IAEA(International Atomic Energy Agencies)의 핵물질보장조치 임무 중 중요한 사항으로 간주되는 실정이다[39].

스웨덴의 Ahlberg Electronics사에서 개발한 비전 시스템을 Fig. 3.1에 나타낸다. 이것은 4면 연료 검사 시스템(Four-faced Fuel Inspection System)이라 부른다. 본 시스템은 핵연료 집합체 4면에 일정 간격을 두고 카메라를 설치하여 검사가 시작되면 핵연료 집합체를 따라 상승, 하강하 면서 핵연료 집합체의 4면의 표면 상태를 검사한다[13]. ④는 핵연료 집합 체를 나타내며, ⑧는 카메라, ⓒ는 조명을 나타낸다. 동작은 핵연료 집합 체를 중심으로 4대의 카메라를 장착한 사각를 형태의 장치가 상하로 이동



하면서 핵연료 집합체의 표면을 영상으로 촬영하고, 손상여부를 영상처리 를 통하여 집합체의 이상 유무를 검출한다[36][37].

3.1 핵연료 집합체 검사 시스템 제작

핵연료 집합체에 대한 보다 효율적인 실험을 위하여 시스템을 제작하였 다. 제작하는 시스템은 기본적으로 스웨덴 알버그사와 같이 4면에 카메라 를 설치하고 동작하지만, 크기나 규모면에서 좀 더 작은 모형으로 제작하 며 구동방법과 검출 데이터 처리 방법은 자체적인 연구를 통하여 해결하 였다. 또한 데이터의 효율적인 분석을 위해 무선 전송 모듈을 도입하여 데이터 분석 및 처리의 효율성을 제고한다.



Fig. 3.1 The 4-face fuel inspection system of Ahlberg Eletronics 현재 원자력 발전소에서 사용되고 있는 방법의 첫 단계로는 육안 검사



로 고배율 카메라로 핵연료 집합체의 외관 영상을 획득하여 검사를 수행 한다. 첫 단계의 외관검사에서 의심스러운 핵연료 집합체를 골라내고 두 번째 단계로서 초음파 검사를 통하여 보다 정밀한 검사를 수행하며, 세 번째 단계로는 핵연료 집합체를 분해하고 와전류 탐상 검사에 의하여 손 상부위를 측정하여 수리를 하게 된다. 육안 검사는 숙련되고 경험이 많은 원전기술자에 의하여 핵연료 집합체에 대한 이상 유무를 검사하게 되는데 한 개의 원자로에 장전된 약 200여 개의 핵연료 집합체를 3일 정도의 시 간 내에 검사를 완료해야하는 어려운 작업이다.

본 논문에서 제작한 핵연료 검사 시스템은 첫 단계 외관검사를 가장 저 비용으로 구축하여 숙련된 검사자의 입회 없이도 빠른 시간 내에 검사를 완료할 수 있도록 제안되었으며, 검사를 수행하면서 일어나는 모든 데이 터를 무선으로 전송하여 기록관리가 가능하여, 검사의 효율성을 높일 수 있다.

3.2 전체 시스템의 구성과 동작

본 논문에서 제안하는 핵연료 집합체 검사 시스템의 블록 다이어그램을 Fig. 3.2에 나타내었다. 시스템 구성은 핵연료 집합체 모형을 중심으로 하 는 높이 2m의 검사 시스템 및 각종 모니터와 미믹 보드(mimic board)가 설치된 랙(rack) 마운트의 두 가지 시스템으로 구별된다. 검사 시스템은 기계적인 요소를 제어하는 랙 마운트 부분과 카메라 콘트롤, 원격관제부 분으로 나눌 수 있다. 랙 마운트에 장착된 미믹 보드는 비전 시스템의 모 터의 상하 좌우를 제어하고 있으며, 카메라 콘트롤러와 같은 기능이 있다. 비디오 캡쳐 시스템에서는 입력된 영상을 4채널로 디스플레이 하도록 하 며, 획득한 영상 데이터를 모니터링 사용자 인터페이스로 전달한다. 카메 라 콘트롤부는 카메라 하우징 내부에서 카메라 줌(zoom)제어, 조명 제어 및 각종 전원을 제어한다. 통합관제센터는 미믹 보드에 내장된 지그비 무 선모듈에 의하여 데이터가 전송되어 관제센터의 코디네이터를 거쳐 데이



터가 입력되고 관리된다. 검사 현장에서의 모든 검사 조건은 지그비 전용 으로 개발된 MCU(Master Control Unit)에 의해 처리되고 통합관제센터로 전송하게 된다.



Fig. 3.2 The block diagram of the fuel assembly inspection system



핵연료 집합체 모형을 중심으로 4면에서 동영상을 획득할 수 있는 카메 라와 조명이 탑재된 모습을 Fig. 3.3에서 보여주고 있다. 기본적인 외관은 Fig. 3.1에 제시된 알버그 사 제품의 동작을 참조하여 제작되었으나, 카메 라 상하좌우 동작은 모터 드라이버를 사용하여 구현하였다. Fig. 3.3의 ① 은 2m 높이의 핵연료 집합체 모형으로 원자력발전소의 원자로 내에 사용 되는 실제 핵연료봉의 높이는 4m 정도이나, 본 시스템에서는 2m 높이로 제작되었다. Fig. 3.3의 ②는 카메라 하우징 내부에 있는 카메라이다. 카메 라 하우징 ③의 내부에는 카메라 콘트롤 보드와 카메라 수직 및 수평 이 동을 위한 모터 드라이버 콘트롤 보드가 들어있다.

본 논문에서 제안한 검사 시스템의 실사를 Fig. 3.4와 Fig. 3.5에서 나타 내었다. 핵연료 집합체 검사 시스템은 평상시 외부 빛의 노출로부터 안전 한 영상 검출을 위하여 Fig. 3.4에 보여주듯이 두꺼운 천으로 시스템 전체 를 덮어 측정시 외부의 빛의 산란을 방지하기 위한 암실 역할을 하도록 제작되었다. 검사를 위한 사전 영상 검출로서 피측정 시스템의 상단에 부 착되어있는 고유번호를 영상을 통하여 인식하게 된다. 모든 영상 인식은 동서남북 네 방향에 설치된 카메라가 수직으로 최상단에서 최하단으로 이 동하면서 피측정 시스템의 겉 표면에 붙어 있는 크러드, 표면의 손상, 전 체 집합체의 비틀림 등을 카메라에 의하여 동영상으로 획득하고 분석하고 전송한다. 각각의 카메라는 네 방향에서 동시에 영상을 인식하고 이 인식 데이터는 카메라 케이블을 통하여 입력된 영상 데이터로 PC 기반의 사용 자 인터페이스로 전달되게 되는데, 이 데이터는 2차원 그래픽으로 표현되 며, 각 면의 2차원 데이터를 가지고 다시 3차원 그래픽으로 표현되어 이 상 상태를 관찰할 수 있게 된다. 카메라로부터 입력된 신호는 4채널 영상 캡처 보드(VCS : Video Capture System)으로 보내져 분석된다. VCS는 이 밖에도 시스템 동작을 위한 줌 제어, 조명 제어와 카메라의 상하 및 좌 우 이동 제어를 위한 데이터들이 RS-485로 연결된다. 최적의 영상 획득을 위하여 카메라의 포커스 조정 기능, 아이리스 조정 기능, 녹화 시작, 정지 조정 기능, 밝기 조정 , 조명 제어가 가능하다.





Fig. 3.3 The inspection system of the fuel assembly



Fig. 3.4 The miniature of the fuel assembly





Fig. 3.5 The fuel assembly inspection system



Table 3.1은 카메라 요구사항이며, Table 3.2는 제작한 영상 시스템이 설 치된 PC의 사양이다.

Table 3.1 The specification of cameras

- Image Sensor : HD Color
- + Y/S(S-Video) Video out : Y/1 Vp-p, 75 $\Omega,$ C/0.3 Vp-p, 75 $\Omega,$ unbalanced
- Sigal to noise ratio : 50dB 이상
- Minimum illumination : 10 lux, f-1.8(Y/0.75 Vp-p)
- Focal Length : 5-50mm(without close-up lens)
- Minimum object-to-lens distance : 40mm
- Maximum relative aperture : f-1.6
- Zoom ratio : x10 optical, x10 digital (x100 with digital zoom)

Table 3.2 The specification of a PC

17인치 LED모니터 (HD급 영상)
CPU : Intel Core(TM) 17-2670 QM이상 성능
Ram : 16G Ram 이상 성능
HDD : 1 TB 이상 성능
Graphic Card : Radeon 6970(2G) 이상 성능
USB 2.0 및 USB 3.0 슬롯
DVD 멀티 드라이브 (읽기, 쓰기 가능)
영상편집 보드 내장
카메라 / 조명제어 콘트롤러 (택 내장)
106 키보드 및 레이저 마우스
운영체제 : Window 7(64bit)





3.3 영상 모듈

영상 검출은 피측정 시스템인 핵연료봉의 이상 유무를 판별하는 영상 검출 방법을 말하며 카메라로부터 주어진 영상 데이터를 실시간 기준으로 분석하고 처리하거나, 녹화된 영상을 통하여도 동일한 작업을 가능하게 하는 것을 말한다. 핵연료봉의 이상 유무의 판단 기준은 핵연료 집합체 표면에서의 휨, 터짐, 처짐 및 스페이서 그리드 깨짐, 그리고 겉 표면에 붙어 있는 크러드의 위치를 판별하는 것을 목적으로 한다. Fig. 3.6은 크 러드 검출에 대한 전체적인 흐름도이다.

비디오 캡쳐 보드로 들어온 영상은 프레임 그레버에 의해서 영상이 추 출되어, 영상은 MPEG(Moving Picture Experts Group) 코덱으로 압축되 고, 영상에서 연료번호를 검출한다. 또한 검출 결과를 엑셀 포맷으로 저장 한다. 획득된 영상은 크러드 검출, 스페이서 그리드 검사, 캡 소실 검사 등으로 구분지어 검출된다. 검출 결과는 사용자 인터페이스에 2D, 3D 그 래픽으로 표현된다.

모든 영상 처리의 기준은 PC기반의 제어 프로그램에서 분석 가능한 RGB 이미지를 캡쳐하여 처리한다. 카메라에서 직접 받은 데이터 처리는 카메라에 장착되어 있는 CCD(Charge Coupled Device) 또는 CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) 센서 형태의 촬상 소자를 사용하여 피사체의 이미지를 캡쳐하고 이를 ISP(Image Signal Processor) 에 의해 분석 가능한 디지털 또는 아날로그 형태의 데이터로 변환한다. 카메라의 실제 촬상 센서 소자의 크기는 656×492 보다 클수록 보다 선명 한 영상을 얻을 수 있다. 출력 포맷은 센서가 출력할 수 있는 포맷으로 표준 포맷, NTSC/PAL(National Television System Committee/Phase Alternate Line), CCIR656 (International Radio Consultative Committee) 등이 있다. 특별히 NTSC식 영상을 기준으로 한 이유는 현재 원전에서 사 용되는 외관 검사가 아날로그 방식으로 진행되기 때문이다.





Fig. 3.6 The flow chart of the crud detection



CMOS센서의 내부 블록 다이어그램을 Fig. 3.7에 나타내었다. 영상검출 로 인한 변환된 데이터는 규격에 따라 SDI (Serial Digital Interface), 병렬 케이블(parallel data cable), S-video 등의 형태로 전송할 수 있다. 이 경 우 대부분의 데이터는 압축되지 않은 원시 데이터(raw data) 상태로 전송 되며 1 프레임의 이미지 데이터 양은 상당히 크다. S-video 등의 아날로 그 방식의 데이터로 보내는 경우에는 그 크기의 제한은 최대 720×480으 로 제한된다. 전송된 데이터는 PC에서 분석 가능하도록 비디오 영상 캡 쳐 보드로 전달되고, 이는 전송된 규격에 의한 프로토콜로 들어온 데이터 를 PC 제어 프로그램에서 분석 가능한 형태의 이미지로 재조립한다.

한편 카메라로부터 실시간으로 얻어진 영상이 아닌, 녹화된 영상은 압 축된 방식에 따라 JPEG, MPEG, H.264 등으로 디코딩 되어 원래의 원시 데이터로 변환되고 이후 PC 프로그램에 의한 공통 처리 과정을 수행한 다.





Fig. 3.7 The inside block diagram of a CMOS sensor



카메라 영상과 녹화 영상의 분석 처리 차이점을 살펴보면, 카메라에서 직접 수신하여 처리되는 디지털 영상은 화질의 열화가 없어 가장 원본 이 미지에 맞게 분석이 되므로 최상의 결과 값을 얻을 수 있지만, 같은 조건 으로 카메라에서 직접 영상을 받은 아날로그 데이터는 S-Video 케이블과 커넥터 등을 거치면서 다소간의 데이터 열화를 발생 시키게 된다. 이러한 열화는 분석 결과에 적지 않은 영향을 끼칠 수 있다. 만일 녹화된 동영상 을 분석하는 경우에는 동영상 압축 알고리즘에 의한 소프트웨어 열화로 인해 더 좋지 않은 결과를 초래 할 수도 있다. 동영상 녹화 시 압축률을 낮추면 그 만큼 보상은 되겠지만, 이러한 방법은 압축률에 따라 분석 프 로그램 구동 시 분석 결과에 많은 차이를 발생 시킬 소지가 있다.

영상 획득 프로그램은 크게 두 가지로 나뉘는데, 첫째는 기본적인 영상 처리를 위한 멀티미디어 데이터 처리 기술과 둘째는 획득한 영상을 분석 하는 자체 프로그램이다. 본 논문에 사용된 Direct X는 마이크로소프트 사에서 제공하는 멀티미디어 데이터 처리 기술을 제공하는 플랫폼으로 카 메라로부터 들어온 영상 또는 녹화된 동영상을 디코딩하여 처리하는 일련 의 전 과정에 적용되는 기술이다.

카메라를 통해 들어오는 영상 데이터를 처리하는 과정을 Fig. 3.8에서 보여준다. Fig. 3.8의 (a)는 카메라에서 들어오는 영상 비디오 데이터를 캡 쳐하는 필터이며, (b)는 캡쳐 필터에서 들어오는 이미지를 분석하는 필터 로서 모든 영상 분석을 처리하는 핵심 루틴이다. (c)는 영상 처리 후 이미 지 저장과 4면 표시를 위해 같은 영상을 복사하고 분할해주는 필터이다. (d)는 동영상을 MPEG4로 압축하는 인코딩 필터이며, (e)는 카메라 영상 을 모니터에 표시해주는 필터, (f)는 압축된 동영상을 파일로 저장하는 필 터이다. 녹화된 동영상 분석을 위한 필터 연결도를 Fig. 3.9에서 나타내었 다. (a)는 녹화된 동영상의 읽는 필터이고, (b)는 압축된 동영상을 원본 이 미지로 복원하는 디코딩 필터, (c)는 영상 분석을 처리하는 핵심 필터, (e) 는 영상을 모니터에 표시해주는 필터이다.





Fig. 3.9 The data processing of recorded video image



3.4 카메라 제어 모듈

(1) 카메라 콘트롤러

핵연료 집합체 4면에 위치한 카메라가 탑재된 하우징(housing)은 모터 컨트롤러에 의하여 상하수직운동을 하게 된다. 모터 드라이버(motor driver)는 AC 스테핑 드라이버 MD5-HF14를 사용하여 구성하였고, 모듈 보드(module board)와는 포토 커플러(Photo Coupler)를 사용하여 절연하 였다. 카메라가 동작하는 환경을 고려하여 전원부 필터를 사용하여 노이 즈를 방지하였으며, 마이콤은 노이즈에 강한 PIC16F883을 사용하였다. 리 미터를 이용하여 상하 최종점을 설정하였고, Dip SW를 이용하여 각 모터 의 ID를 부여하였다. 조명 제어는 펄스 폭 제어 (PWM : Pulse Width Modulation)을 이용하여 16단계로 조정하였다.

카메라 하우징을 Fig. 3.10과 Fig. 3.11에서 보여주었다. 모터 콘트롤러에 는 검사용 비전 소프트웨어가 포함된 하드웨어를 설치하고, 영상편집보드 및 카메라/조명 제어 콘트롤러를 내장하였다. 사용 컴퓨터는 산업용 데스 크탑을 선정하여 제작하고, 하드웨어의 성능은 고성능 프로그램의 기동, 3 차원 모델링 변환 및 동영상 재생 등을 고려하되, 핵연료 1개의 동영상의 분석 처리의 시간은 최대 10분 이내로 설계하였다.

카메라 및 조명 콘트롤러는 랙에 내장되는 구조로 제작하고, 카메라의 조정은 포커스 및 아이리스, 녹화 시작/정지 및 카메라의 상하 이동을 조 정할 수 있도록 하며, 조명의 제어는 밝기를 휠 방식으로 제어가 가능하 도록 설계하였다.





Fig. 3.10 The camera housing (1)



Fig. 3.11 The camera housing (2)



(2) 라인 레이저

라인 레이저는 영상검출의 정확도를 올리기 위하여 사용되었다. 영상 검출 시 컬러 영상 분석에 사용되며, 이는 라인 레이저의 적색 포인트가 검출 영역의 지정 및 검출 위치에서의 RGB 분포 분석에 우수한 검출을 하는 역할을 수행한다. 라인 레이저에 의한 ROI(Region of interest)를 Fig. 3.12에 나타내었다.

라인 레이저는 도트(Dot)형태의 평행광 또는 집광된 빔을 실린더 렌즈 (cylinder lens) 또는 원통 렌즈(cylindrical lens)라는 렌즈계를 통해 라인 (line)으로 만들어 주는데, 사용자가 원하는 길이는 10, 15, 30, 45, 60, 90, 120° 같은 각도의 길이로 방사 되는 레이저이다. 라인 레이저 길이 구하 는 공식은 식 (3.1)로 알려져 있다.

 $L = 2D \times tan \frac{q}{2}$

(3.1)

(L : 라인길이, D : 거리, q : 각도)

Table 3.3에서 라인 레이저 각도와 거리 특성의 예를 나타내었다.

기호	각도	라인 길이(1m 거리에서)			
		일반 길이(mm)	45° 기울였을 때(mm)		
1D	15°	250	500		
3D	30°	500	1200		
4D	45°	830	2000		
6D	60°	1160	3500		
9D	90°	2000	5000		
12D	120°	3400	8000		

Table	3.3	The	specification	of	а	line	laser
rabic	0.0	IIIC	specification	01	а	mic	laser





Fig. 3.12 The fuel rod using line laser

3.5 무선 전송 모듈

핵연료 집합체에 대한 정기 검사는 단시간 내에 원자력 발전소의 발전 가동을 정지하고 시행되는데, 짧은 시간 내에 검사를 수행해야 한다. 이는 원자력발전에 따른 전력공급의 피해를 최소화하기 위해서이다. 또한 검사 에 따른 모든 측정환경은 원자력안전위원회고시에 따라 필히 숙련된 검사 자가 입회하여야 하며 이상 유무를 기록하고 보존하여야 한다.

그러나 한정된 인원으로 모든 검사 데이터의 수집과 기록 관리는 매우 제한적일 수밖에 없으므로 이에 대한 보완이 필요하다. 측정 데이터와 같 은 검사의 기록은 물론 측정 시 각종 부대설비의 측정 조건 또한 매우 중 요한 데이터이므로 이러한 공학적 안전설비의 작동상태까지도 일괄해서 데이터를 기록 보관하기 위해서는 무선에 의한 데이터 전송이 필요하며 본 논문에서는 지그비(Zigbee)를 이용한 무선 전송 모듈을 도입하였다. 무 선 전송 모듈은 핵연료 집합체 외관 검사에 따른 영상 데이터를 무선으로 전송하여 영상 데이터 분석의 효율성을 제고하는데 있다. 영상 데이터와 함께 검사 시 모든 상태를 측정 조건을 감지하고 데이터화 하여 무선으로 전송한다. 무선 전송의 도입은 핵연료 집합체 검사 방법의 개선에서 향후 사물지능통신(M2M : Machine to Machine or IoT : Internet of thing)으 로 가기 위한 시도이다.



(1) 지그비(Zigbee) 무선 전송

지그비는 IEEE 802.15.4 표준을 기반으로 만든 저전력 저가격의 근거리 무선통신의 국제 표준이다. IEEE 802.15.4 표준의 물리계층과 매체접근제 어(MAC : Medium Access Control) 계층 위에 그 상위계층으로 네트워 크 계층, 응용지원(APS : Application Support Sublayer) 계층과 보안 및 응용 규격화하였다. 지그비의 물리계층은 간단한 구조이며 매체접근제어 계층은 전력소비를 최소화할 수 있도록 연구되었다. 무엇보다도 지그비는 원격제어, 원격 모니터링에 적합하고 각종 자동화에 활발하게 이용되고 있다[52]-[54].

IEEE 802.15.4 표준 스펙의 ISM(Industrial, Scientific, Medical) 대역은 868~870MHz은 1개 채널로 유럽의 무허가 영역이며, 902~928MHz의 10개 채널은 915MHz 미국 무허가 영역 (1번 ~ 10번 채널)이며, 2.400~2.4835GHz 16개 채널은 전 세계 무허가 영역 (11번 ~26번 채널)이다. 무선 전송 속도는 868~870MHz의 경우 20Kbps, 902~928MHz은 40Kbps, 2.400~2.4835GHz는 250Kbps이다. 송출 출력 및 전송 거리는 1mW (0dBm)에서 실내 30m, 실외 100m 전송을 기본으로 하지만 지그비 모듈 제조업체마다 전송 거리는 다르다. 코디네이터는 라우터/앤드디바이스와 통신을 하며, 라우터, 코디네이터 앤드 디바이스 또는 노드 디바이스와 데이터를 전송하게 된다.

지그비 네트워크가 시스템에 연결된 구조를 Fig. 3.13에서 보여준다. 검 사 시스템과 미믹 보드와 연동되면서 현장에서 사용자 인터페이스와도 데 이터 처리가 가능하며, 미믹 보드로부터 각종 데이터를 지그비 무선 모듈 을 통하여 전송하고 통합 관제 센터에서 동일한 사용자 인터페이스로 모 든 상황을 관찰하며 데이터를 분석할 수 있음을 보여준다.

(2) 지그비 무선 전송 모듈 제작

멀티미디어 정보의 송수신이 가능하도록 MPEG4 CODEC을 이용하여 최대 QVGA (Quarter Video Graphic Array)급 해상도를 지원하도록 하였



으며, 최대 30 FPS(Frame Per Second)의 영상 데이터 고속 전송이 가능 하도록 하였다. 30만 화소의 VGA(Video Graphics Array)급 CMOS 센서 를 사용하였으며, 3.5인치 TFT LCD 지원(320×240)하도록 하였다. RF IC 는 IEEE 802.15.4 호환 및 최대 2Mbps의 고속 전송을 지원한다. 현재 사 용 중인 핵연료 집합체 카메라 영상과 동일하게 NTSC TV 출력을 지원하 였으며, H/W 기능을 통해 최대 640×480 해상도를 지원하도록 제작하였 다. 카메라와 지그비 송신부 블록 다이어그램을 Fig. 3.14에 나타내고, PC 와 USB(universal serial bus) 지그비 모뎀 수신부 블록 다이어그램을 Fig. 3.15에 나타낸다.



Fig. 3.13 The structure of the zigbee remote control network





Fig. 3.14 The block diagram of cameras & zigbee transmitters



Fig. 3.15 The block diagram of PC & USB zigbee modem receivers



(3) 미믹 보드(mimic board)

핵연료 집합체 검사 시스템의 미믹 보드를 Fig. 3.16과 Fig. 3.17에 나타 낸다. 미믹 보드와 PC내의 UI(User Interface)는 연동되면서 원격에서 핵 연료봉 검사를 수행한다. 핵연료 집합체 외관 검사가 시작되면 카메라는 모두 네 방면에서 영상 촬영을 시작한다. 자동인 경우는 이미 최적화된 값을 따라 조명, 모터 드라이버 등 모든 기능이 자동 조절이 이루어진다. 또한 지그비 모듈을 탑재하여 원격으로 데이터를 전송한다.



Fig. 3.16 The mimic board and the rack monitor



Fig. 3.17 The front of the mimic board



제 4 장 핵연료 집합체 검사 시스템의 구현

4.1 사용자 인터페이스 구성 및 동작

핵연료 집합체의 표면 검사는 규칙적으로 배열된 원통형 핵 연료봉의 표면에 대한 검사이다. 본 장에서는 3장에서 구현한 실험 시스템으로부터 얻어진 영상을 중심으로 핵연료 집합체의 결함을 검출하고 표현하는 핵연 료 집합체 검사 시스템의 운용 소프트웨어를 구현한다. 본 시스템은 실제 상황에서 크레인에 의하여 핵연료 집합체를 들어 올릴 때 진동이 존재하 는 점을 고려하고, 카메라 영상 획득 역시 NTSC 아날로그 영상을 중심으 로 연구되었다. 획득된 핵연료 집합체 영상에서 결함을 검출하는 부분과 이를 좌표화하여 모니터에 그래픽으로 표시하는 사용자 인터페이스로 나 뉜다. 이를 통해 결함 부분의 좌표와 이상 상태를 판단할 수 있다. 또한 무선으로 모든 데이터를 전송하므로 원격에서 검사가 가능하며 녹화된 영 상 분석이 가능하다. 또한 결함 부분 데이터를 엑셀 데이터로 데이터베이 스화하여, 추후에 핵연료 집합체 검사 및 관리를 이용하게 된다.

4.1.1 사용자 인터페이스 구성이

사용자 인터페이스는 실시간으로 얻어지는 동영상 분석 및 녹화된 영상 도 분석이 가능하도록 설계되었다. 분석되어 얻어진 연료봉에 관한 데이 터는 엑셀 파일로 저장되고, 실시간 영상도 하드디스크에 저장되어 분석 후에도 데이터 관리를 가능하게 한다. 실시간으로 얻어지는 영상은 사용 자 인터페이스에서 자동모드로 실행되고, 녹화되었거나 따로 저장되어있 는 동영상을 분석할 시에는 수동모드로 진행된다. 실시간으로 얻어진 카 메라 영상은 비디오 캡쳐 시스템을 거처 PC에 저장되고 사용자 인터페이 스를 통해 화면에 표시된다. 디스플레이는 2개로 나눠져서 한쪽은 메인 사용자 인터페이스가 나타나고, 다른 하나는 핵연료 집합체의 4면 영상이 동시에 나타난다.



사용자 인터페이스의 모듈 구조를 Fig. 4.1에 나타낸다. 사용자 인터페 이스의 모듈은 크게 SampleGrabber와 MainGUI, 2D_Display, 3D_Display, Detection_Result로 나눠진다. SampleGrabber는 4면의 영상 을 추출하여 MainGUI와 4면 영상으로 보내고, MainGUI가 구동되면서 지도상에서 원전을 선택하고, 연료 번호를 입력한다.

Camera Control은 카메라의 상승 하강과 4면의 카메라 선택, 카메라의 줌 조정을 위해 구현된 모듈이며, Light Control은 조명제어, DVD Setting은 분석할 영상을 녹화하거나, 녹화된 영상을 불러오는 역할을 한 다.

2D_Display에서는 검출된 부분의 좌표값을 가지고 2D그래픽으로 표현 하고, 결함이 검출된 부분의 위치 좌표를 엑셀 데이터 창에 남긴다.

또한 연료봉 각 면의 동영상 데이터를 저장하고, 각 면의 2D 데이터 수 집 및 분석하며 최종적으로 엑셀 데이터로 작성되어 저장된다.

3D_Display에서는 2D그래픽으로 표현된 4면의 상태를 3D 그래픽으로 모델링 하여 표현한다. 카메라가 최하단으로 이동한 후 수집 분석된 2D 데이터로 3D 모델링을 분석한다. 모델링 완료 후 3D, 2D, 엑셀 데이터를 표현하고 동시에 동영상 녹화 화면, 엑셀 데이터, 3D 그래픽 파일을 지정 된 폴더에 자동으로 저장한다.

4.1.2 사용자 인터페이스 동작

검사 모드는 자동 검사와 수동 검사 두 가지 모드를 지원하는데, 자동 검사는 실시간으로 핵연료 집합체의 영상을 획득하여 분석하는 방법이다. 수동 검사는 검사자가 현장에서 미믹 보드의 개별 기능을 이용하여 카메 라 위치, 줌, 조명 등을 설정하고 검사하는 방법이다. 또한 이미 저장되어 있는 동영상을 분석할 때에는 수동 검사 모드로 진행한다. Table 4.1은 자 동모드 설정 시 동작되는 기능을 설명하고 있다.



구 분	기 능	동 작		
	상하 이동 모터	상하 이동 모터를 기동하여 카메라 하우징 최상단 위치로 이동		
카메라	Zoom - IN / OUT	최대 줌 아웃 상태로 이동 후 전체 연료봉 풀샷 위 치로 다시 줌 인 동작 수행		
	최적 상태 확인	각 모터 및 카메라, 조명 줌 등 기능 검사 준비 상태 확인 후 상하 이동 모터 동작하여 카메라 하 우징 하단으로 이동		
비디오	카메라 영상 분석	카메라 비디오 데이터 분석 시작		
	연료봉 고유번호 인식	연료봉의 고유 번호 인식		
	연료봉 크러드 검출	연료봉의 휨, 찌그러짐, 크러드 검출		
	연료봉 2D 데이터 추출	연료봉 각 면의 2D 데이터 수집 및 분석 엑셀 데이터 작성		
	동영상 추출	연료봉 각 면의 동영상 추출 및 데이터 저장		
변환 프로그램	3D 모델링 분석	상하 이동 모터로 카메라 하우징 최하단으로 이 동, 수집 분석 된 2D 데이터로 3D 모델링 분석		
	3D 모델링 저장	3D 모델링 완료 후 제어 화면에 3D, 2D 엑셀 데 이터 도시와 동시에 동영상 녹화 화면, 엑셀 데이터, 3D IGS 파일을 지정된 폴더에 자동 저장		
	초기 화면으로 전환	자동 검사 완료 후 제어판 초기 화면으로 전환 모든 기본 기능 활성화		

Table 4.1 The performance of auto-mode





Fig. 4.1 The structure of user interface modules



Fig. 4.2는 사용자 인터페이스의 메인화면이다. 메인 화면에서는 카메라 의 위치 선택, 카메라 상하 좌우, 카메라 줌 제어, 조명 제어가 가능하다. 검사가 시작되면 메인 화면은 비활성화 되어, 획득한 영상을 표현하는 화 면으로 넘어가게 되고, 검사 완료시 다시 활성화 된다. 비상시에 정지 할 수 있는 비상 정지 버튼과 검사 후에 다른 핵연료로 넘어갈 수 있도록 차 기 핵연료 번호를 등록할 수 있고, 검사하는 동영상은 하드 디스크에 저 장된다. 자동 모드 검사가 시작되면 카메라는 연료봉 상단으로 이동하여 최초로 연료번호를 확인하고, 문자인식을 통하여 핵연료의 고유번호를 영 상 보관하게 된다. 카메라는 하강하면서 핵 연료봉의 이상 유무를 확인하 고 윤곽선의 위치를 파악하여, 좌표화하여 변위량을 기록하며 2D그래픽으 로 표현한다. 이때 핵연료 집합체의 4면을 동시에 검출하며 기록한다. 영 상 분석은 입력 영상이 데이터화하여 저장매체로 전송되어 최초 처리 시 에 별도의 변환 없이도 MPEG파일 형태로 사용된다.

핵연료 집합체를 카메라가 촬영하면서 획득한 영상을 표현하는 모니터 링 화면을 Fig. 4.3에 나타낸다. Fig. 4.3 (a)는 카메라가 수직으로 이동하 면서 촬영하는 상태를 나타내는 부분이, Fig. 4.3 (c)는 이상 지점의 좌표 데이터이다. 좌표데이터는 1차적으로 Fig. 4.3 (a)에서 2D화면으로 출력하 며, 이어서 Fig. 4.3 (b)의 3D화면으로 출력된다. 2D화면과 3D화면에서 연 료봉의 변형 상태를 확인할 수 있으며, 3D화면의 경우는 마우스로 드래그 하여 좌우 또는 상하를 조절하면 핵연료 집합체의 입체적인 형태를 확인 할 수 있다. Fig. 4.3 (b)의 3D 출력에서는 붉은 점들로 표면의 이상점을 표현하며, Fig. 4.3 (c)에서 검사가 진행되는 동안 이상이 있는 지점을 좌 표데이터로 보여준다. Fig. 4.3 (a)의 2D화면에서도 이상 지점의 변형을 나타내고, 3D 화면에서도 이를 확인할 수 있다. Fig. 4.3 (a)의 좌측 상단 은 카메라 네 방향 중의 하나를 선택하는 화면이고, (a)의 하단에서는 검 출된 이상 부위의 전체 개수와 선택한 화면에서의 개수를 확인할 수 있 다.




Fig. 4.2 The main of the user interface



(a) 2D 화면(b) 3D 화면(C) 좌표데이터Fig. 4.3 The analytical screen of the user interface



4.2 핵연료 집합체 결함 검출

핵연료 집합체는 핵 연료봉 및 연료봉 다발을 잡아주는 역할을 하는 스 페이서 그리드와 연료봉 상단 캡과 하단 캡으로 구성되어있다. 핵연료 집 합체가 원자로에 장전되어 핵분열을 일으키게 되면 사용으로 인한 변형이 이 모든 부분에서 일어날 수 있는데, 이상 상태를 검출하기 위해서는 각 각의 변형 종류에 따라 검출 방법이 적용되어야 한다. 변형 종류는 주로 연료봉 피복관 표면에 형성되는 크러드, 연료봉의 뒤틀림, 연료봉의 늘어 남, 스페이서 그리드와 연료봉 사이의 마모 등이 있다[34].

현재 핵연료 검사를 위한 영상획득은 아날로그 방식에 의존하고 있다. 영상획득 기술을 쉽게 변경하지 못하는 이유는 고준위 방사선 방출에 대 한 적절한 대책 마련이 필요하고, 국내법으로 정한 핵연료 검사 시스템 방법에 관한 법령 변환이 필요하기 때문이다. 본 논문에서는 핵연료 검사 시스템의 효율성을 높이기 위하여 컬러와 흑백 영상 두 가지를 병렬로 분 석하였다.

컬러 영상 검출을 위하여 본 논문에서는 라인레이저를 사용하였다. 라 인레이저를 중심으로 영상 분석을 위한 ROI를 설정하였고, 핵 연료봉에 이물질이 있거나 손상이 된 경우에 라인 레이저의 빛은 산란하거나 집중 또는 분산되는 점에 착안하였다. 적색 포인트는 명암의 임계의 최적값을 설정하여 그 영역만 분석에 사용하였으며, 분석할 때의 기준은 적색 포인 트의 픽셀 수가 아니라 설정한 영역의 길이와 폭의 평균으로 기준을 정하 였다.

흑백 영상 검출을 위해서는 핵 연료봉의 윤곽선을 검출하여 분석에 이 용하였다. 여러 가지 미분 연산자들을 이용하여 조합해본 결과 핵 연료봉 의 윤곽선 검출에는 두 개의 연산자를 조합하는 방법으로 최적의 방법을 도출하였다[39]-[51].



4.2.1 피복관의 크러드 및 변형 검출

핵 연료봉 표면의 크러드는 불순물이 부착된 경우를 말한다. 크러드를 검출하기 위한 알고리즘 순서도는 Fig. 4.4와 같다.

획득된 영상은 컬러와 흑백으로 나누어 처리한다. 컬러 영상은 R>180, G<100, B>60 조건에서 좌표상 ROI의 중심점을 결정하고, 적색 포인트의 클러스터를 찾아 레이블링한다. 포인트 클러스터의 크기 비교에서 가장 큰 클러스터로부터 설정된 일정거리 이하의 크기이거나, 큰 클러스터로부 터 일정거리 이상 떨어져있으면 잡음으로 처리한다. 다음으로 크러드가 존재하지 않는 정상 화면의 중심점과 측정화면의 중심점과의 거리가 일정 거리이상 차이가 나면 에러로 확정되며, 크러드로 처리하게 되고, 변위 역 시 일정 거리 이내이면 클러스터의 폭과 높이를 정상 값과 비교하여 에러 로 확정하여 크러드로 판별하게 된다.

한편 그레이 영상은 두 개가 시그마 값, σ₁=0.95, σ₂=3.65 값으로 DoG처리 후 임계값 처리한 후에 컬러에서 정의한 ROI를 반영하여 흑백 영상에서 연료봉 윤곽선을 검출하게 된다. ROI 영역 내에서 윤곽선의 연 속성을 판단하기 위하여 수직부분의 불연속 구간이 ROI 길이와 비교하여 설정된 길이 이상인 경우는 에러로 확정하여 크러드로 판단하고, 설정 값 이내인 경우는 정상 값 처리되어 수평크기를 정상 값의 평균과 비교하여 에러를 산정하는데 설정 값 이내는 정상 처리하고 이상 값인 경우에는 이 물질로 판단한다. 컬러 및 흑백 영상의 검사 값이 정상인 경우는 측정값 을 저장하여 정상 값에 반영한다.

크러드 검출의 예를 Fig. 4.5에 나타낸다. Fig. 4.5에서 컬러 영상 검출 알고리즘을 이용하여 살펴보면, 연료봉에 반사되는 적색 포인트의 평균 높이와 폭은 6.5인데, 이물질이 있을 경우에는 늘어나는 반사로 인하여 높 이는 11, 폭은 18로 커지고, 이때의 중심 좌표 변화는 (143, 321.7)에서 (151, 322.7)로 변하는 것을 알 수 있다.





Fig. 4.4 The flow chart of the crud detection algorithm





Fig. 4.5 The foreign material of fuel rods



4.2.2 스페이서 그리드 검사

스페이서 그리드는 핵 연료봉 다발을 스프링 형태로 잡아주는 역할을 하며 스페이서 그리드의 악력이 약해지는 경우 핵 연료봉 다발이 하강하 는 등의 연료 집합체의 배열에 영향을 주게 된다. 각각의 핵 연료봉이 원 통형인데 비해 스페이서 그리드 부분은 평면으로 되어 있다. 스페이서 그 리드의 변형을 검출하는 순서도를 Fig. 4.6에서 나타낸다. Fig. 4.6에서 흑 백 영상에서 ROI 아래 검은 픽셀 클러스터가 설정 값 이상 존재하면 스 페이서 그리드로 인식하여 흑백 영상 검출 알고리즘은 동작하지 않게 되 고 컬러 영상 검출 알고리즘이 사용된다.

적색 포인트 클러스터의 레이블링과 잡음처리까지의 동작은 크러드 검 출 알고리즘과 같이 동작되며, 다음으로 적색 포인트 수평부분의 불연속 을 조사하게 된다. 클러스터 수평의 불연속 부분이 ROI크기와 비교하여 설정값 이상 차이가 나면 에러로 확정하고 스페이서 그리드 손상으로 처 리한다. 차이값이 설정값 이내이면, 이번에는 클러스터 높이를 비교하여 정상 값 이상이면 스페이서 그리드 손상으로 처리한다.

예를 들어, Fig. 4.7는 파손된 스페이서 그리드를 나타내는데, 이 경우 스페이서 그리드의 적색 포인트의 평균 높이는 5.1픽셀이다. 파손된 부분 에 적색 포인트의 높이가 17픽셀이고, 폭의 불연속이 9픽셀로 불연속 구 간이 ROI 폭의 20%이상이 되어 손상이라 판단한다.





Fig. 4.6 The flowchart of the spacer grid detection algorithm





Fig. 4.7 The fracture of a spacer grid



4.2.3 핵 연료봉 캡 소실 검사

각각의 핵 연료봉은 상부와 하부에 연료캡을 가지고 연료캡이 소실되는 경우 방사능 유출로 인한 냉각재가 오염되는 최악의 사태가 발생할 수 있 다.

연료봉 캡 검출 알고리즘의 순서도를 Fig. 4.8에서 나타낸다. 흑백 영상 검출 처리에서 스페이서 그리드의 수가 5개가 넘어서게 되면 캡 소실 검 출 알고리즘이 동작하게 된다. 흑백 화면에서 캡의 소실 및 처짐 발생 유 무는 명암의 경도에 의하여 확연히 구분이 가능하므로 연료봉 처짐 및 소 실을 검출할 수 있다.

핵 연료봉 하단부를 최적값으로 흑백 처리한 후의 영상을 Fig. 4.9에 나 타낸다. 핵 연료봉의 종단과 캡이 연결되는 부분은 Fig. 4.9 (b)의 구분선 부분을 시작점으로 캡 소실여부를 분석하게 된다. 캡 소실이 없는 정상 상태에서는 일정한 패턴이 나타나게 된다. 이러한 패턴은 명도의 변화가 있다하더라도 패턴의 일정성은 유지되므로 판독을 용이하게 한다.







Fig. 4.8 The flowchart of the cap detection algorithm







제 5 장 실험 및 분석

5.1 핵연료 검사 시스템 제작 결과

(1) 영상 분석 시간

초당 저장하는 프레임의 수를 말하는 일반적인 FPS(Frame Per Second) 는 1초당 몇 장의 비율로 동영상을 저장할 수 있는지를 의미한다. FPS는 PC 및 저장 장치의 성능에 따라 가변적으로 설정할 수 있는데, 1~30 FPS 까지 임의의 설정이 가능하며, Full HD급인 경우에는 60 FPS도 지원할 수 있다.

카메라 이동 속도에 따른 영상 분석의 해상도를 알아보기 위하여 연료 봉 높이를 2000mm(2m) 또는 4000mm(4m) 로 설정하고 최대 카메라 스 캔 이동 속도는 초당 40mm(4cm) 또는 80mm(8cm)인 경우 2000mm를 40mm/sec의 속도로 30 FPS 기준으로 분석하는 경우 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

연료봉이 2,000mm인 경우 초당 40mm로 스캔하게 되면 총 스캔 분석 시간은 50초가 되고 초당 30FPS인 경우 총 스캔 영상수는 1,500매가 된 다. 또 각 스캔 영상의 분석 거리 분해능은 40mm/30 FPS = 1.333mm당 1장의 영상 이미지 스캔 가능하다. Table 5.1에서 연료봉 2,000mm, 4,000mm에서 이동속도와 FPS를 달리하며 나타내었다. 스캔 영상 분석 시 중요 변수는 이동 속도에 따른 장당 분석할 수 있는 분해능이다. 카메라 이동속도가 느린 만큼 같은 비율로 FPS를 낮추면 빠른 속도로 이동하는 영상과 동일한 효과가 있다.



. 총거리	2000mm	2000mm	2000mm	4000mm	4000mm	4000mm
· 제동속도 FPS	40mm/sec	80mm/sec	40mm/sec	40mm/sec	80mm/sec	40mm/sec
내용	30FPS	30FPS	15FPS	30FPS	30FPS	15FPS
스캔 분석시간	50초	25초	50초	100초	50초	100초
스캔 영상수	1500장	750장	750장	3000장	1500장	1500장
분석거리 분해능	1.333mm	2.666mm	2.666mm	1.333mm	2.666mm	2.666mm

Table 5.1 The comparison with FPS and camera movement

(2) 지그비 무선 모듈 실험 결과

제작된 Zigbee 무선 모듈을 Fig. 5.1에서 나타낸다. Table 5.2 과 Table 5.3은 RF 출력을 측정하기 위한 조건이다. 제작된 모듈에 RF 출력을 측정 해보았다. 측정에서 RF Cable 삽입손실은 2440Mhz에서 2.7dBm, 4000MHz에서는 2.8dBm이다. 스펙트럼 아날라이저 설정상태는 Table 5.4 와 같다.

Table 5.2 The general item

Items	Specifications	Remarks
Communication Form	Half Duplex	-
Carrier Frequency Range	2405~2480MHz	-
Channel Spacing	5MHz	-
Number of Channel	16CH(11th~26th)	-
RF In/Output Impedance	50Ω / 50Ω	Transmit / Receive



Table 5.3 The test conditions

Items	Remarks
Standard Test Condition	IEEE 802.15.4, ZigBee specification
Power Supply Voltage	DC 9.0V Input.
Module Mode	ZigBee: RF test mode(RF Evaluation Firmware)

Table 5.4 Spectrum Analyzer Setup

Items	Value/Request	
Ref. Level	30dBm	
Center freq.	2405MHz, 2440MHz, 2480MHz	
SPAN	1945 100MHz	
RBW/VBW	Auto(1MHz)	
Sweep time	Auto(4ms)	
Sweep Mode	Continue	
Marker	해당 채널에서 Max Peak	
Marker table	On	

DUT(Device Under Test)의 측정조건은 최대출력, 무변조반송파, 전체대 역에 대하여 최저, 중간, 최대주파수이다. 2405MHz, 2440MHz, 2480MHz 에서 측정결과를 Fig. 5.2로 나타낸다.





Fig. 5.1 The fabricated zigbee wireless module



Fig. 5.2 The power measurement at 2405MHz, 2440MHz, 2480MHz



지그비 모듈에 불요파 시험 측정을 해보았다. 측정에서 RF Cable 삽입 손실은 2440 Mhz에서 2.7dBm, 4000 MHz에서는 2.8dBm이다. DUT는 출 력측정 조건과 동일하며, 측정결과를 Fig. 5.3, Fig. 5.4, Fig. 5.5로 나타낸 다. 스펙트럼 아날라이저 설정상태는 Table 5.5와 같다.

Items	Value _/ Request	
Start Freq.	30MHz	
Stop Freq.	6.7GHz	
RBW	Auto(3MKHz)	
VBW	Auto(3MHz)	
Detector mode	Max Peak at spurious frequency	
Trace	Max hold	
Sweep time	Auto(16.7ms)	
소인횟수	1945 10회 이상	
Mark table	On	

Table 5.5 Spectrum Analyzer Setup of Spurious power measurement





Fig. 5.3 The spurious power measurement

2nd Hamornic at 2405MHz



Fig. 5.4 The spurious power measurement 2nd Hamornic at 2440MHz





Fig. 5.5 The spurious power measurement





Fig. 5.6 The result of data transmission measurement (1)





Fig. 5.7 The result of data transmission measurement (2)



5.2 핵연료 집합체 검사 시스템 검출 결과

(1) 피복관 표면 크러드 검출 결과

Fig. 5.8은 모의 이물질 검은 테이프의 검출 특성을 나타내고 있다. 영 상에서 확연히 구분됨을 알 수 있다. 검은 테이프로 인해 적색의 반사가 일어나지 않아 연료봉의 적색 포인트의 폭과 길이가 0으로 변하였다. 중 심 좌표 역시 (446, 320)에서 (0, 0)으로 변하였다.



 $\begin{array}{l} \textit{if black tape,} \\ \begin{bmatrix} H_{avg} = 5.7 \\ W_{avg} = 8.2 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} H_{grid} = 0 \\ W_{grid} = 0 \end{bmatrix} \\ P_{nomal}(446, 320) \rightarrow P_{crud}(0, 0) \end{array}$

Fig. 5.8 The result of the crud detection (black tape)



Fig. 5.9는 핵연료 집합체 표면의 모의 이물질 섬유 조각 검출 특성을 나타낸다. 라인레이저의 반사에 의하여 칼라 및 흑백 모두 양호한 검출 특성을 나타내었다. 적색 포인트의 분산으로 인하여 정상일 때의 높이 5, 폭 9에서 높이18, 폭 15로 변하였고, 중심 좌표도 (97, 319)에서 (106, 320) 으로 변한 것을 확인할 수 있었다.





Fig. 5.9 The result of the crud detection (cotton)



Fig. 5.10은 핵연료 집합체 이물질 가는 실과 같은 모의 이물질을 검출 하는 모습을 보여준다. 칼라 영상 및 흑백 영상 모두 양호하게 검출되었 다. 적색 포인트의 변화를 살펴보면 반사되는 적색 포인트의 평균 높이와 폭은 6.5인데, 이물질이 있을 경우에는 늘어나는 반사로 인하여 높이는 11, 폭은 18로 변하였고, 중심 좌표는(143, 321.7)에서 (151, 322.7)로 변하 는 것을 확인할 수 있다.



$$\begin{split} & \textit{if string,} \\ \begin{bmatrix} H_{avg} = 6.5 \\ W_{avg} = 6.5 \end{bmatrix} & \rightarrow \begin{bmatrix} H_{crud} = 11 \\ W_{crud} = 18 \end{bmatrix} \\ P_{nomal}(143, 321.7) & \rightarrow P_{crud}(151, 322.7) \end{split}$$

Fig. 5.10 The result of the crud detection (string)



(2) 스페이서 그리드 손상 검출 결과

Fig. 5.11는 스페이서 그리드 중앙부분이 손상된 상태를 검출하고 있다. 칼라 영상에서 적색 포인트의 난반사로 인해 검출 특성이 우수하게 나타 났다.

Fig. 5.12는 스페이서 그리드 종단 부분이 손상된 상태를 검출하고 있 다. 라인레이저의 적색 포인트의 난반사로 인해 칼라 영상에서 우수한 검 출 특성을 나타내었고, 흑백영상에서도 손상 부분이 잘 나타나고 있다. 적 색 포인트의 변화 역시 높이 5, 폭 26에서 높이 1.2, 폭 1로 반사 정도가 줄어든 것을 확인할 수 있었다.



Fig. 5.11 The result of the spacer grid fracture (1)



(3) 캡 소실 및 처짐 검출 결과

Fig. 5.13은 핵연료 집합체 캡 소실 상태 검출 특성을 나타낸다. 흑백 검출 영상에서 연료봉 에지를 검출함으로 양호한 특성을 가진다. Fig. 5.14는 핵연료 집합체 하단의 한 연료봉이 처짐이 발생한 상태를 나타낸 다. 캡이 소실되어 연료봉의 처짐이 발생하였다. 흑백 검출 영상에서 캡의 소실 여부를 검출할 수 있었다.





Fig. 5.13 The result of fuel rod cap loss (1)





Fig. 5.14 The result of fuel rod cap loss (2)

(4) 핵연료 집합체 변형 상태 검출 실험 결과

Fig. 5.15는 핵연료 집합체의 모서리 부분이 휙 상태를 나타내는 것으로 스페이서 그리드 스프링의 힘이 약화되었을 때 나타낼 수 있는 현상이다. 연료봉의 폭 변화는 컬러 영상에서 확인할 수 있었으며, 흑백 영상에서도 검출 가능하였다. Fig. 5.16은 핵연료 집합체의 찌그러짐 검출 상태를 측 정하는 모습이다. 컬러 영상에서는 적색 포인트의 반사가 증가하였고, 흑 백 영상에서는 연료봉의 윤곽선의 연속성이 끊어져 검출이 가능함을 확인 하였다.

Fig. 5.17은 핵연료 집합체의 중앙부분이 함몰된 상태를 검출하는 모습 이다. 라인 레이저의 적색 포인트의 반사 부분이 컬러 영상에서 확인되어 양호하게 검출되었다.

Fig. 5.18은 핵연료 집합체의 중앙부분이 찌그러짐과 함몰이 동시에 일 어난 상태를 검출하는 모습이다. 적색 포인트의 반사로 컬러영상에서 확 인 가능하였고, 흑백 영상에서는 윤곽선의 불연속을 확인하여 검출이 가 능함을 알 수 있었다.





Fig. 5.16 The result of fuel rod deformation (2)





Fig. 5.18 The result of fuel rod deformation (4)



5.3 제작 시스템 분석

(1) 검사 시스템의 하드웨어 성능 분석

핵연료 집합체의 정기검사에서 연료봉 외관검사를 위한 검사 시스템을 설계하고 제작하였다. 제작 시스템의 목적은 외관 검사를 통하여 사용 중 발생한 연료봉 표면의 크러드, 스페이서 그리드 손상, 연료봉 상하부 캡의 소실과 처짐, 연료봉의 처짐 및 비틀림 등을 영상 처리를 통하여 검출하 기 위함이다.

제작 시스템은 약 2m 높이로 모형 핵연료 집합체를 중앙에 위치시키고 사각 형태의 주위로 네 방향에 카메라와 라인 레이저를 설치하였다. 카메 라는 상승과 하강하며 동시에 핵연료 집합체 외관을 각각 촬영하고, 라인 레이저의 난반사를 이용하여 검출의 정확성을 높였다.

카메라 및 조명제어는 PC기반의 사용자 인터페이스에서 조작할 수 있 으며, 수동과 자동 제어가 가능하도록 하고 결함 부위의 의심스러운 부분 을 녹화하고 저장할 수 있도록 하였다. 검사에 따르는 데이터들은 유선 및 무선 전송에 의하여 PC에 저장된다. 저장 데이터들은 필요에 따라 화 면을 재구성할 수 있도록 하였고, 검사 조건에 따른 변수를 저장할 수 있 도록 하였다. 이러한 동작은 검사자가 검사에 집중할 수 있게 하여 결함 검출 시간을 줄일 수 있는 장점이 있다.

모든 데이터는 자동으로 전송되어 저장할 수 있으므로 육안 검사에서 놓치기 쉬운 여러 가지 검사 조건들을 정밀하게 분석하는 것이 가능하다. 결함 검출 부분에 대하여 2D 및 3D로 구현하여 사용자 인터페이스에서 확인이 용이하도록 하였다. 전반적으로 알버그 사의 제품 또는 웨스팅하 우스 사의 제품과 비교하여 저가격, 다기능의 편의성을 실현하였다.

(2) 검사 시스템의 검출 기법 성능 분석

핵연료 집합체에서 연료봉의 윤곽선을 검출하기 위해 기존 에지 처리 기법 중에서도 1차 미분 연산자와 2차 연산자를 이용한 윤곽선 처리기법



에 주목하여, 적용해본 결과 DoG 윤곽선 처리 경우 연료봉 구분은 비교 적 잘되는 편이나, 잡음이 존재하여 화면이 흐려져 실제 윤곽선의 구분이 잘 안 되는 경향이 있음을 알 수 있었고, 이를 다시 임계값을 적용하여 회미한 경계선 부분을 이진화하여 강조함으로써 판독이 가능한 연료봉 경 계를 얻을 수 있었다.

보다 효율성이 높은 연료봉 이물질 검사를 위하여 컬러 영상과 흑백 영 상을 병렬로 처리하여 사용하기로 하였다. 컬러 영상은 연료봉에 이물질 이 있거나 손상이 된 경우에 라인 레이저의 적색 포인트가 급격하게 줄어 들거나, 늘어나거나, 분산되는 경우로 제한하여 분석하였다. 흑백 영상은 연료봉의 윤곽선에 집중하여 연료봉 변형과 이물질의 검출에 적용하였다.

컬러 영상과 흑백 영상을 병렬로 처리하여 분석함으로써 보다 신뢰성 있는 결과를 도출하였다. 컬러 영상의 적색 레이저 포인트 인식만으로는 찾아내기 어려운 상태도 검출할 수 있고, 흑백 영상에서도 마찬가지로 연 료봉의 평균 두께만을 이용해서는 검출할 수 없는 상태까지도 처리가 가 능함을 알 수 있었다.



제 6 장 결 론

가압경수로의 경우 핵연료 집합체는 일정기간을 주기로 정기적인 점검 을 실시하게 되는데 이때 핵연료 집합체에 대하여 외관검사를 실시하게 된다. 이렇게 사용 중이거나, 사용 후 핵연료 집합체에 대한 외관검사는 핵연료 집합체의 방사능 누출을 미연에 방지하면서 핵연료 사용의 효율성 증가를 위해 IAEA의 핵물질보장조치에서 중요한 임무이다.

핵연료 집합체 외관검사를 위한 여러 가지 방법들이 제안되고 있다. 현 재 사용되는 방법으로는 NTSC 아날로그 카메라에 영상을 통하여 숙련된 검사자의 육안에 의한 검사가 이루어지고 있으며 이상이 의심스러운 핵연 료 집합체가 발견되면 2차적으로 초음파 검사를 시행하고 최종적으로 핵 연료 집합체를 분해하여 와전류 탐상 검사를 통하여 핵 연료봉을 수리하 거나 재장전 여부를 결정한다.

본 논문에서는 숙련된 검사자가 아니더라도 빠른 시간 내에 핵연료 집 합체 검사를 위한 방법과 시스템을 제안하였다. 먼저 핵연료 검사 시스템 을 제작하고 핵연료의 피복관의 표면 검사를 위한 검사 방법에 관하여 연 구하였다. 실험 시스템은 핵연료 높이 1/2 정도로 약 2m 높이로 구현하 였으며 모형 핵연료 집합체를 중앙에 위치시켜 핵연료봉의 주위로 네 방 향에 카메라를 설치하였다. 카메라가 핵연료 집합체를 따라 수직으로 상 승하고 강하하면서 핵연료의 표면의 동영상을 획득하고 검출하여 분석할 수 있도록 하였다. 검사 시스템은 영상 획득을 위한 여러 가지 전기전자 적인 요소를 포함하여 제작되었다. 특별히 검사 결과 데이터의 무선 전송 을 통하여 고준위 방사능 지역에서의 장비의 피폭시간을 되도록 줄이기 위하여 획득된 데이터 처리를 무선으로 전송하여 자동 저장되도록 하였 다.

핵연료 집합체의 오랜 사용으로 인한 변형이나 이물질을 검출하기 위해



본 논문에서는 컬러와 흑백 영상을 동시에 분석함으로써 검출 신뢰도를 높이고자 하였다. 컬러 영상에서는 특별히 라인 레이저를 사용하였는데, 핵 연료봉에 이물질이 있거나 손상이 된 경우에 라인 레이저의 빛이 산란 하거나 집중하는 점에 착안하였다. 흑백 영상에서는 연료봉의 윤곽선을 이용하여, 연료봉의 폭 변화와 불연속성 여부를 판독하였는데, 기존의 윤 곽선 검출 기법 중 DoG와 임계값을 결합 처리한 방법을 적용하였다. 컬러와 흑백 영상을 동시에 분석함으로써 검출의 정확도와 신뢰도를 향상할 수 있음을 확인하였다. 제작된 검사 시스템은 검사 시간을 줄일 수 있도록 각종 데이터 처리를 자동화하도록 착안하였다. 선순위의 검사가 먼저 이루어지도록 하고 후순위의 데이터는 시스템에서 처리 할 수 있도록 모든 데이터는 무선으로 전송하여 서버로 저장한다. 무선 전송 솔루션은 근 거리 통신에 적합한 지그비 방식을 이용하였으며, 검사 시스템에 적용 가 능한 MCU를 개발하였으며, 송신출력 특성 및 불요파 특성 측정을 통하 여 우수한 전송 특성을 확인하였다.

시스템의 전체적인 운용을 위한 운용 소프트웨어 및 사용자 인터페이스 와 연동하여 시험하였으며 연료봉 표면의 이상 유무 좌표데이터를 2D 그 래픽으로 표현하고, 다시 3D로 변환하여 사용자 인터페이스에서 나타나도 록 구현하였다. 3D 그래픽의 경우 이상 지점에 대한 표현에 80% 이상의 성공률을 보이고 있음을 확인하였다.

검사 시스템을 통하여 전체 핵연료 집합체가 갖는 요소별 특징점을 분 석하였으며, 연료봉 피복관 표면뿐만 아니라 스페이서 그리드와 연료봉 캡의 소실 및 처짐에 대하여 부분 처리가 아닌 일괄처리를 통하여 숙련된 검사자 입회없이도 단시간 내 검사업무를 수행할 수 있도록 하였으며, 검 출 정확률은 85%~95%의 성능을 가지고 있음을 확인하였다.

향후 연구로는 획득된 영상에 대한 전처리 및 후처리의 고속화에 대한 연구가 필요하며, 무선 전송된 영상 데이터의 실시간 2D 및 3D 변환시간 단축에 대한 연구가 필요하다고 생각된다.



참고문헌

[1] 이종호, 2012. *시크릿 방사능*, 과학사랑.

- [2] Kumar B. K., et al., 2006. Vision systems for inspection of nuclear fuel components. *Proceeding National Seminar on Non-Destructive Evaluation*.
- [3] Visual and Optical Testing. ASNT Hand book of NDT, Volume 8.
- [4] Timothy S. N., et al., 1995. Survey of Automated Visual Inspection. *Computer vision and image understanding*, 61(2), pp.231-262.
- [5] Valli K., 1998. Basics of Image processing. *DAE-BRNS Workshop on Applications of Image processing in plant Sciences and Agriculture.*
- [6] Chin R. T. and Harlow C. A., 1982. Automated Visual Inspection : A Survey. *IEEE Transaction On Pattern Analysis And Machine Intelligence*, PAMI-4(6).
- [7] 김석훈 등, 2008. 소*듐냉각고속로 핵연료교환 및 ISI 단순화개념 연구,* 한국원자력연구원, KAERI, Technical Report-3662.
- [8] 과학기술부, 2006. 중수로 핵심 안전현안 해결기술 특허동향, 과학기술
 부 원자력중장기계획사업, 2006년도 연구기획시 특허동향조사.
- [9] Prince J. L. and Links J. M., 2006. *Medical Imaging, Signals, and System,* Prentice Hall, Upper Saddle River, NI.
- [10] Bezdek J. C, et al., 2005. Fuzzy Models and Algorithms for Pattern Recognition and Image Processing, Springer, New York.
- [11] Davies E. R., 2005. Machine Vision : Theory, Algorithms, Practicalities, Morgan Kaufmann, San Francisco, CA.



- [12] 과학기술부, 2006. 경수로 혼합핵연료 고유기술 특허동향, 과학기술부
 원자력중장기계획-사업, 2006년도 연구기획시 특허동향조사.
- [13] Four-Face Fuel Inspection System, http://www.ahlberg-electronics.com
- [14] Four-faced Fuel Inspection Cavity System, http://www.westinghousenuclear.com
- [15] 김규태, 2011. 핵연료 기술, 동국대학교 에너지환경대학 제10회 가속 기 여름학교
- [16] File P., 1990. Field experience with failed-fuel detection-PWRs, *Trans. Amer. Nucl. Soc.*, 61, pp.48.
- [17] Kreider S. D. and Schneider A., 1990. The detection of failed fuel in LWRs – A historical review, *Transactions of the American Nuclear Society.*, 61(47), pp.46-47.
- [18] International Atomic Energy Agency, 2010. Review of fuel failures in water cooled reactors, Nuclear Energy Series, NF-T-2.1, pp.53.
- [19] International Atomic Energy Agency, 1992. Fuel Failure in Normal Operation of Water Reactors: Experience, Mechanisms and Management, Proceedings of a Technical Committee Meeting held in Dimitrovgrad, Russian Federation, IAEA, Technical Document-709, vol.46, pp.70-95.
- [20] Stora G. P. and Chenebault P., 1981. Defect fuel rod evaluation in EDFPWR reactors, *in Proceeding. ANS-ENS Top.* Meeting Reactor Safety Aspects of Fuel Behaviour, Sun Valley, ID, vol.1, pp.119.
- [21] Genin J. B., et al., 2002. DIADEME: A computer code to assess in operation defective fuel characteristics and primary circuit contamination, *in Proceeding. International Conference. Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems*, Avignon, France, FNES.



- [22] Tigeras A., et al., 2004. MERLIN: Modelling fuel defects at EDF power plants, in Proceeding International Conference, Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems, San Francisco, CA, EPRI.
- [23] Tigeras A., et al., 2004. Improvement of fuel failure assessment based on radio chemical parameters (MERLIN code) taking in account the thermal mechanical fuel rod calculations (CYRANO3 code), in Proceeding International Conference. Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems, San Francisco, CA.
- [24] Parrat D., et al., 2003. Failed Rod Diagnosis and Primary Circuit Contamination Level Determination, *IAEA-TECDOC-1345, IAEA*, Vienna, Austria.
- [25] Attar M., 1990. State-of-the art ultrasonic detection of failed fuel, *Transactions of the American Nuclear Society.*, vol. 61, pp.47-48.
- [26] Antolovic A. and Kurincic B., 2008. NPP Krsko experiences with spent fuel assembly inspection methods, *in Proceeding International Conference*, Nuclear Energy for New Europe, Portoroz, Slovenia, pp.1011.1 - 1011.11.
- [27] Thomé Z. D., et al., 2011. A System for Nuclear Fuel Inspection Based on Ultrasonic Pulse-Echo Technique. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 58(5), pp.2452-2458.
- [28] Seixas J. M., et al., 2000. Neural identification of failed fuel rods in nuclear reactors, *in Proceeding. IEEE International Symposium.* Circuits and Systems, Geneva, Switzerland, pp.I-160 - I-163.
- [29] Thomé Z. D., et al., 2000. Ultrasonic system for fuel assembly inspection in pressurized water reactors, *in Proceeding. IEEE Ultrasonics Symposium*, San Juan, Puerto Rico, pp.1-5.



- [30] 가압경수로 핵연료 검사장비, 초음파 검사 장비. KNT 한국원자력기 술(주)
- [31] Machado J. C., et al., 2000. An ultrasonic probe for NDT inspection of fuel assembly used in nuclear power plant reactors, presented at the 15th World Conference Non-Destructive Testing, Rome, Italy.
- [32] Thomé Z. D., et al., 2011. A System for Nuclear Fuel Inspection Based on Ultrasonic Pulse-Echo Technique. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 58(5), pp.2452-2458.
- [33] 조재완 등, 2007. 영상처리를 이용한 조사 후 핵연료 집합체의 결함 검출. *대한전기학회 학술대회 논문집*, pp.425-426.
- [34] 조재완, 최영수, 2010. 영상처리를 이용한 핵연료봉의 변형 검사. 전 자공학회논문지, 47-SP(1), pp.91-96.
- [35] 장지운 등, 2007. 사용후 핵연료 집합체 영상에서 핵연료봉 영상 추 출방법과 색상정보의 가시화에 관한 연구. 비파괴검사학회지, 27(5), pp.432-441.
- [36] 남문호 등, 2012. 다음 연료봉 자동 디지털 방사선 검사 방법 타당성 분석. *대한전기학회 제43회 하계학술대회*, pp.1253-1254.
- [37] Park Seung-kyu, et al., 2013. Next Visualization of Internal Defects In Plate-Type Nuclear Fuel By Using Non contact Optical Interferometry. *Nuclear Engineering and Technology*, 45(3), pp.361-366.
- [38] 한국원자력연구원, 2005, 사용후 연료 노내 조사성능 검사요건 및 해 석 방법에 관한 연구, 한국원자력연구원, KAERI/CR-219/2004.
- [39] Lindsey CS., et al., 1999. Nuclear fuel assembly assessment project and image categorization, *Ninth Workshop on Virtual*



Intelligence/Bynamic Neural Networks, Vol. 3728, pp. 491-499.

- [40] Rafael C. G. and Richard E. W., 2010. *Digital Image Processing*, PEARSON.
- [41] 김우생, 2009. 영상처리 및 패턴인식 배움터, 생능출판사.
- [42] Yu Y. and Chang C., 2006. A new edge detection approach based on image context analysis. *Elsevier Journal of Image and Vision Computing*, 24(10), pp.1090 - 1102.
- [43] Sharifi M., Fathy M., and Mahmoudi M. T., 2002. A Classified and Comparative Study of Edge Detection Algorithms, *International Conference on. IEEE*, pp.117-120.
- [44] Deng C., Ma W., and Yin Y., 2011. An edge detection approach of image fusion based on improved Sobel operator. *Image and Signal Processing (CISP)*, 3, pp.1189-1193.
- [45] BAI J. J. and HONG C. Y., 2009. Edge detect based on Sobel. Computer Knowledge and Technology, 5(21), pp.5847-5849.
- [46] Marr D. and Hildreth E., 1980, Theory of Edge Detection, Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences, B207, pp.187-217.
- [47] Clark J. J., 1989. Authenticating Edges Produced by Zero-Crossing Algorithms, *IEEE Transaction. Pattern Analysis. Machine Intelligence*, 12(8), pp.830-831.
- [48] Gunn S. R., 1999. On the Discrete Representation of the Laplacian of Gaussian, *Pattern Recognition.*, 32(8), pp.1463-1472.
- [49] Canny J., 1989, A Computational Approach for Edge Detection. IEEE Transactions Pattern Analysis. Machine Intelligence, 8(6),


pp.679-698.

- [50] Zhang Y. and Rockett P. I., 2006, The Bayesian Operating Point of the Canny Edge Detector. *IEEE Transactions Image Processing.*, 15(11), pp. 3409-3416.
- [51] Oskoei M. A. and Hu H., 2010. A survey on edge detection methods, *Technical Report CES*, 506, pp.5-16.
- [52] IEEE Std 802.15.4 TM-2003 Part 15.4 : Wireless Medium Access Control and Physical Layer Specification for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), IEEE Standard, http://www.ieee.org.
- [53] IEEE 802.15 WPAN Task Group 4, http://ieee802.org/15/pub/TG4.html.
- [54] Zigbee TM Alliance, http://www.zigbee.org.





감사의 글

때로는 학문적 방황과 갈등도 있었고, 너무 무접게만 느껴지는 걸음 때 문에 지치기도 하였습니다. 먼저 걸어가신 선배님들의 큰 그림 앞에서 나 의 작은 그림은 너무나 더디게 진행되고 있었습니다. 그리고 이제 그 작 은 그림에 마침표를 찍으려고 합니다. 먼저 오늘의 나로 나 되게 하신 그 분께 감사와 영광을 드립니다.

이 논문이 완성되기까지 저에게 도움 주신 분들께 감사드립니다. 부족 한 제 논문을 끝까지 지도해주신 류길수 교수님께 깊이 감사드립니다. 또 한 바쁘신 와중에도 심사를 맡아주신 김재훈 교수님, 조석제 교수님, 이서 정 교수님, 하창승 교수님께도 감사드립니다. 그리고 학부때부터 지금까지 가르침을 주신 박휴찬 교수님, 신옥근 교수님, 손주영 교수님, 이장세 교 수님께도 감사드립니다.

그리고 여러모로 살펴봐주시고 조언을 주신 전파공학과 조형래 교수님 과 전기공학과 서동환 교수님께도 감사의 말을 전하고 싶습니다.

여름을 뜨겁게 달구며 프로젝트 하면서 고생하신 민원식 사장님, 팀원 들 정말 더운 여름에 현장에서 수고 많으셨습니다. 진심으로 감사드립니 다. 그리고 강관중 사장님, 강충남 이사님께도 감사의 말을 전합니다.

지금은 자주 만나지는 못하지만, 컴퓨터 공학과 대학원 선후배님들에게 도 감사와 응원의 말을 전하고 싶습니다. 또한 조교실의 김경언 조교님과 강군호 조교님, 가끔 제가 가서 귀찮게 해드렸는데 언제나 한결같이 도와 주셔서 고마웠습니다.

마지막으로 기도로 응원해준 저희 가족들.

지쳐 힘들 때마다 격려로 이끌어주신 나의 멘토 아버지, 기도로 응원해 주신 어머니, 동생 라진이. 그리고 힘든 가운데에도 내색하지 않고 도와준 나의 남편, 나의 딸 지우에게도 고마움과 사랑한다는 말을 전하고 싶습니 다.

저는 다시 조금 더 큰 그림을 그리고 싶습니다. 지금의 열매에 자만하 지 않고 새로운 여정을 시작하려고 합니다. 감사합니다.

