



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2020년 8월  
석사학위 논문

노내핵계측계통 검출기 안내관  
와전류탐상검사 평가에 관한 연구

조선대학교 대학원

원자력공학과

김 기 웅

# 노내핵계측계통 검출기 안내관 와전류탐상검사 평가에 관한 연구

A Study on the ECT Evaluation of DFMS Thimble Tubes

2020년 8월 28일

조선대학교 대학원

원자력공학과

김 기 응

# 노내핵계측계통 검출기 안내관 와전류탐상검사 평가에 관한 연구

지도교수      나   만   균

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2020년 5월

조선대학교 대학원

원자력공학과

김   기   웅

## 김기웅의 석사학위논문을 인준함

위원장    조선대학교 교 수    정운관 (인)

위 원    조선대학교 교 수    나만균 (인)

위 원    조선대학교 교 수    김진원 (인)

2020년 6월

조선대학교 대학원

## 목 차

ABSTRACT .....	vi
제 1 장 서 론 .....	1
제 2 장 노내핵계측계통 .....	2
제 1 절 개요 .....	2
1. 기능 .....	2
2. 구성 및 주요기기 .....	2
가. 제어반 .....	3
나. 검출기 .....	6
다. 검출기 구동설비 .....	6
라. 통로선택기 .....	11
마. 심블 .....	13
바. 보호관 .....	15
사. Seal Table .....	16
아. 격리밸브 .....	16
자. 제한스위치 집합체 .....	18
차. 밀봉유닛 .....	18
3. 와전류탐상시험(ECT) .....	20
가. 신호수집 .....	20
나. 심호평가 .....	22
다. 차기예상마모율 계산 .....	22
제 3 장 문제점 분석 및 개선 .....	23
제 1 절 차기예상마모율 .....	23
1. 차기예상마모율 산출 .....	23
가. 차기예상마모율 계산식 .....	23
나. 차기예상마모율 계산식 문제점 .....	24
2. 차기예상마모율 계산식 비교검토 .....	25
가. [KNP-89-707]계산식 검토 .....	25
나. [WCAP-12866]계산식 검토 .....	25
다. 계산식의 적용 .....	26
3. ECT 검사 오차 .....	26
가. [KNP-89-707]과 [WCAP-12866] 오차 적용 .....	26
나. 비교 결과 .....	26

4. 차기예상마모율에 따른 정비기준 .....	27
가. [KNP-89-707] 정비기준 .....	27
나. [WCAP-12866] 정비기준 .....	27
다. 비교 결과 .....	28
제 4 장 결 론 .....	29
【참고문헌】 .....	31

## 표 목 차

Table 1. 노내핵계측계통 설비구성 및 주요기능 .....	2
Table 2. 검출기 구동설비 주요 사양 .....	9
Table 3. 심블 설치 목록 .....	15
Table 4. 검사장비 및 소요자재 .....	20
Table 5. 차기예상마모율에 따른 검출기 안내관 조치방법 .....	22



## 그림 목차

Figure 1.	노내핵계측계통 설비 구성도 .....	3
Figure 2.	제어반 외관 .....	4
Figure 3.	노내핵계측계통 제어설비 구성도 .....	5
Figure 4.	검출기 구동설비 구성도 .....	6
Figure 5.	검출기 외관 .....	7
Figure 6.	이중색인 통로선택 메커니즘 .....	11
Figure 7.	내부통로선택기 .....	12
Figure 8.	외부통로선택기 .....	13
Figure 9.	노내핵계측 인코아심블 구성도 .....	14
Figure 10.	Seal Table(밀봉데이בל) .....	16
Figure 11.	격리밸브 .....	16
Figure 12.	In-Core Flux Thimble Tube Locations .....	17
Figure 13.	제한스위치 집합체 .....	18
Figure 14.	밀봉유닛 .....	19
Figure 15.	저압 및 고압 밀봉유닛 방식 .....	19
Figure 16.	ECT System of Flux Thimble Tubes .....	21

## ABSTRACT

### **A Study on the ECT Evaluation of DFMS Thimble Tubes**

Ki Woong Kim

Advisor : Prof. Man Gyun Na, Ph.D.

Department of Nuclear Engineering

Graduate School of Chosun University

In nuclear power plants, the digital flux mapping system (DFMS) measures the distribution of neutron flux inside the reactor. By inserting and withdrawing the fission chamber, a neutron flux detector, into 50 designated thimble tubes inside the reactor, the current of the charged detector can be measured. The distribution of neutron flux inside the reactor is used as calibration data for the core power distribution analysis, fuel combustion evaluation of each fuel assembly, thermal margin evaluation, and the neutron monitoring system.

However, thimble tube may be exposed directly to the installation or coolant flow inside the reactor, resulting in vibration-induced wear and changes in shape of the crack. Therefore, during each overhaul of a nuclear power plant, eddy current testing (ECT) is conducted to verify the integrity of the thimble tube.

The ECT evaluation can determine the current thimble tube wear level and the corresponding action method, and predict future wear rates.

There are two calculation methods for predicting wear rates of the thimble tube and the measures taken vary depending on which calculation method is applied.

In this thesis, more efficient calculation method using the two calculation methods was proposed for predicting the thimble tube wear and applied to Hanbit #1 nuclear power plant.

## 제 1 장 서론

한빛 1발전소 노내핵계측계통(DFMS: Digital Flux Mapping System)은 원자로 내부의 중성자속 분포를 측정하는 설비로 중성자속 검출기인 핵분열함(Fission Chamber)을 원자로 내부의 지정된 50개의 심블(Incore Thimble)로 삽입, 인출시키면 중성자속에 의해 전리되는 검출기의 전류를 측정할 수 있다. 이를 통해 노심 내의 중성자속 분포를 알 수 있으며 노심 출력 분포 상태 분석 및 각 연료 집합체의 연료 연소도 평가, 열적 여유도 평가와 노외핵계측계통의 교정 자료로도 활용된다.

그런데 심블은 원자로 내부의 설치물 또는 냉각재 유량에 직접 노출되어 진동에 의한 마모, 균열등의 형상 변화가 일어날 수 있다. 때문에 매주기 원자력발전소 계획 예방정비 시에는 ECT(와전류탐상검사)를 수행하여 건전성을 확인한다.

ECT 평가를 통하여 현재 심블의 마모정도와 그에 따른 조치방법을 판단하고 미래의 마모율을 예측할 수 있다.

하지만, 차기예상마모율의 계산식이 2가지 있고, 그 사용에 대한 방법이 명확하게 정립되지 않아 현장에서는 보수적인 계산식만 사용하고 있다. 이는 경우에 따라 추가적인 정비를 필요로 하여 작업자의 불필요한 피폭과 발전소 운영에 경제적인 손해를 야기할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 한빛 1발전소의 사례를 참고하여, 2가지 계산식에 대한 분석과 고찰을 통해 보다 합리적이고 효율적인 차기예상마모율 계산방법을 연구하였다.

또한 문제의 근본원인을 파악하여 정리하고 개선방안을 도출하였다.

## 제 2 장 노내핵계측계통

### 제 1절 개요

#### 1. 기능

원자력 발전소에서 노내핵계측계통(Digital Flux Mapping System)은 원자로 내부의 중성자속 분포를 측정하는 설비이다.

중성자속 검출기인 핵분열함(Fission Chamber)을 원자로 내부의 지정된 50개의 심블(Incore Thimble)로 삽입, 인출시키면 중성자속에 의해 전리되는 검출기의 전류를 측정할 수 있다. 이를 이용하여 노심 내의 중성자속 분포를 알 수 있으며 노심 출력 분포 상태 분석 및 각 연료 집합체의 연료 연소도 평가, 열적 여유도 평가와 노외핵계측계통의 교정 자료로도 활용된다.

#### 2. 구성 및 주요기기

노내 핵계측 계통은 주제어실에 설치되는 제어반, 보조건물에 설치되는 인버터 박스, 격납건물 내부에 설치되는 검출기 구동설비 및 기타 부속장치로 구성된다. 검출기 구동 설비는 검출기를 삽입, 인출하는 구동기, 원자로 내부의 50개 심블 중 해당 통로로 검출기를 이송하기 위한 통로선택기 및 기타 배관으로 구성된다. Table 1과 Figure 1은 노내핵계측계통의 설비구성 및 주요기능을 보여준다.

Table 1. 노내핵계측계통 설비구성 및 주요기능

No.	설 비 구 성	수 량	기 능
1	주제어실 제어반	2 SET	노내핵계측기 제어 및 노심출력분포 데이터 취득
2	검출 구동기	4 SET	검출기안내관 내부 검출기 삽입/인출
3	통로선택기	1 SET	50 EA의 검출기안내관 중 1 EA의 통로 선택
4	전원 공급반	1 SET	검출기 구동 모터 전원 공급 및 속도제어
5	Thimble (검출기안내관)	50 EA	검출기가 핵연료 다발 사이를 통과할 수 있는 통로
6	밀봉유닛	50 SET	원자로냉각재 압력 경계로 냉각재 누설 차단

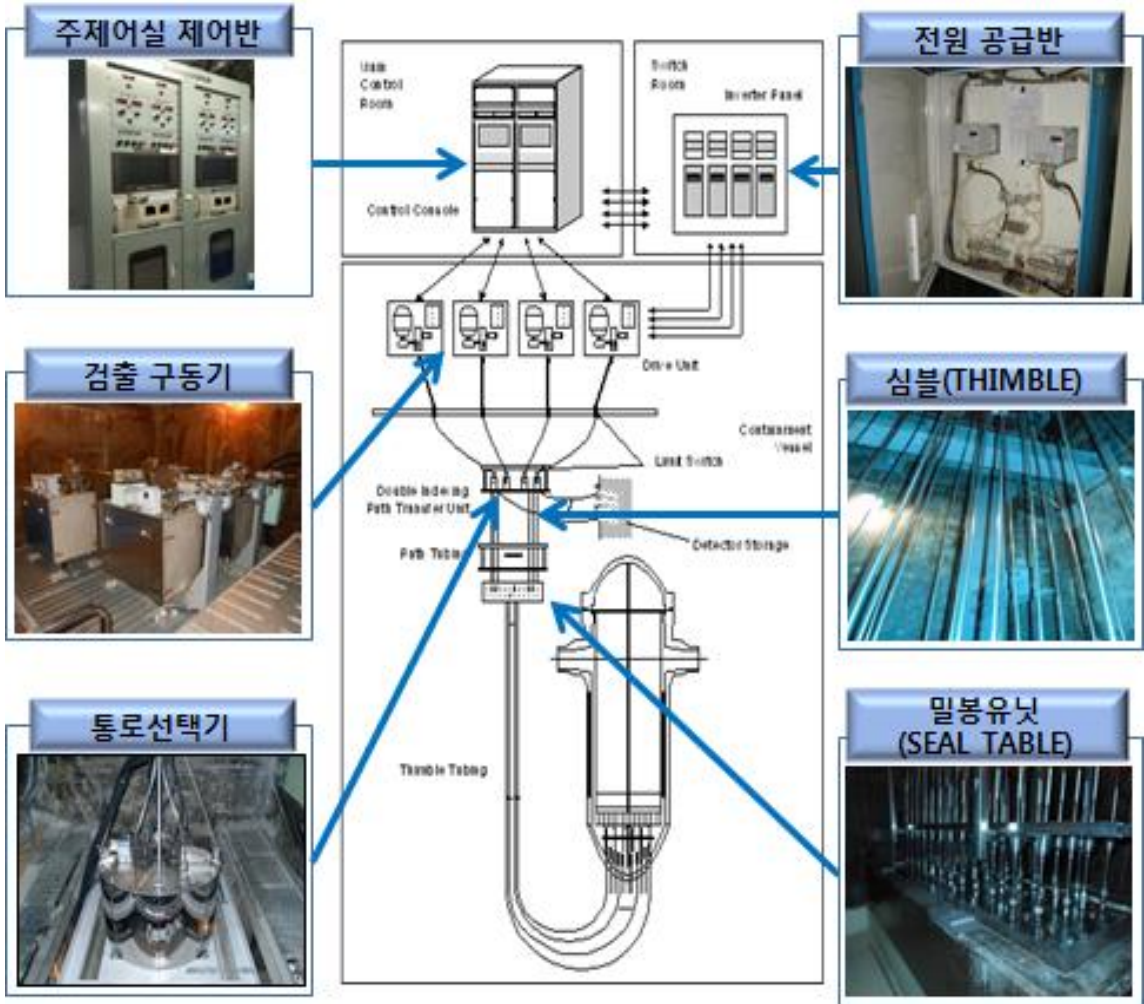


Figure 1. 노내핵계측계통 설비구성도

### 가. 제어반 (Control Console)

제어반은 중성자 검출기로부터 전송되는 정보취득과 검출기 구동설비를 포함한 각 장비들의 제어를 담당하며, 원자로 내부의 중성자속 분포를 측정하기 위하여 자동 및 반자동 또는 수동으로 조작된다. Figure 2에 보이듯이 제어반에는 운전원 스테이션과 PLC (Programmable Logic Controller), 수동조작반(Manual Drive Control Box) 4대, 검출기에 전원을 공급하는 검출기 전원공급기(Detector Power Supply) 4대와 현장음향반(Local Sound Box) 등이 설치되어 있고, 주제어실 아래에 위치한 스위치실(Switch Room)에는 구동 모터 제어용 인버터 패널이 설치되어 있다.



- (1) 전원 (Power Supply)
- (2) 검출기 전원공급기 (Detector Power Supply)
- (3) 수동조작반 (Manual Drive Control Box)
- (4) 운전상태정보표시기 (Touch Screen Display)
- (5) 현장음향반 (Local Sound Box)
- (6) 운전원 스테이션 (Operator Interface Station)
- (7) 주제어기 (PLC)

Figure 2. 제어반 외관

(1) 전원(Power Supply)

제어반과 격납건물 내부에 설치된 구동기, 통로선택기 등 기기들의 동작에 필요한 전원을 공급한다. 소내 전원과 연결된 주전원과 직류전원으로부터 각각 110VAC 전원 및 24VDC 전원이 공급된다.

(2) 검출기 전원 공급기(Detector Power Supply)

검출기 전원공급기는 검출기에 전원 전압을 인가 및 측정 전류에 따른 적정 측정 전류 범위를 선택하고, 측정 전류를 전압으로 변환하며 검출기 전원, 검출기 전류 등의 지시값을 PLC에 아날로그 신호로 전송하는 역할을 한다. 각 검출기마다 1대씩 총 4대가 설치되어 있다.

(3) 수동조작반(Manual Drive Control Box)

수동조작반은 PLC의 고장 상황을 대비하여 검출기가 원자로 내부에서 정지 및 손상되는 것을 방지하기 위하여 수동으로 인출할 수 있도록 비상수단을 제공한다. 각 구동기 마다 독립적으로 구성된다.

(4) 운전 상태 정보 표시기(Touch Screen Display)

운전원 스테이션 화면상에 제어기, 검출기 전원공급기, 구동기, 통로선택기 등 주요 기기의 상태, 검출기 구동 위치, 운전 상태, 경보 등을 표시하여 운전원에게 제공함으로써 종합적인 제어 및 감시가 가능하게 한다.

(5) 현장음향반(Local Sound Box)

현장음향반은 구동기 4대와 통로선택기에 설치되어 있는 5개의 가속도형 진동센서

로부터 신호를 받아 이들을 음향신호로 변환하고 스피커를 구동, 현장 음향을 제공하여 비정상 시 운전원의 신속한 대응을 지원하고 정비의 목적으로도 활용된다.

(6) 운전원 스테이션 (Operator Interface Station)

PLC와 컴퓨터통신(Ethernet)으로 정보를 교환하며, 노내 핵계측 설비의 제어기능, 진단기능, 보호기능, 및 경보기능 등을 구현하기 위한 프로그램이 내장되어 있다.

(7) 주제어기(PLC)

주제어기(Programmable Logic Controller)는 검출기, 구동기, 통로선택기 등으로부터 신호들을 입력 모듈로 전송받아 프로세서 모듈의 연산을 거친 후 검출기 전압제어, 구동기 모터 제어, 통로선택기 모터 제어 등 필요한 제어신호를 출력모듈을 통해 해당 기기로 전달한다.

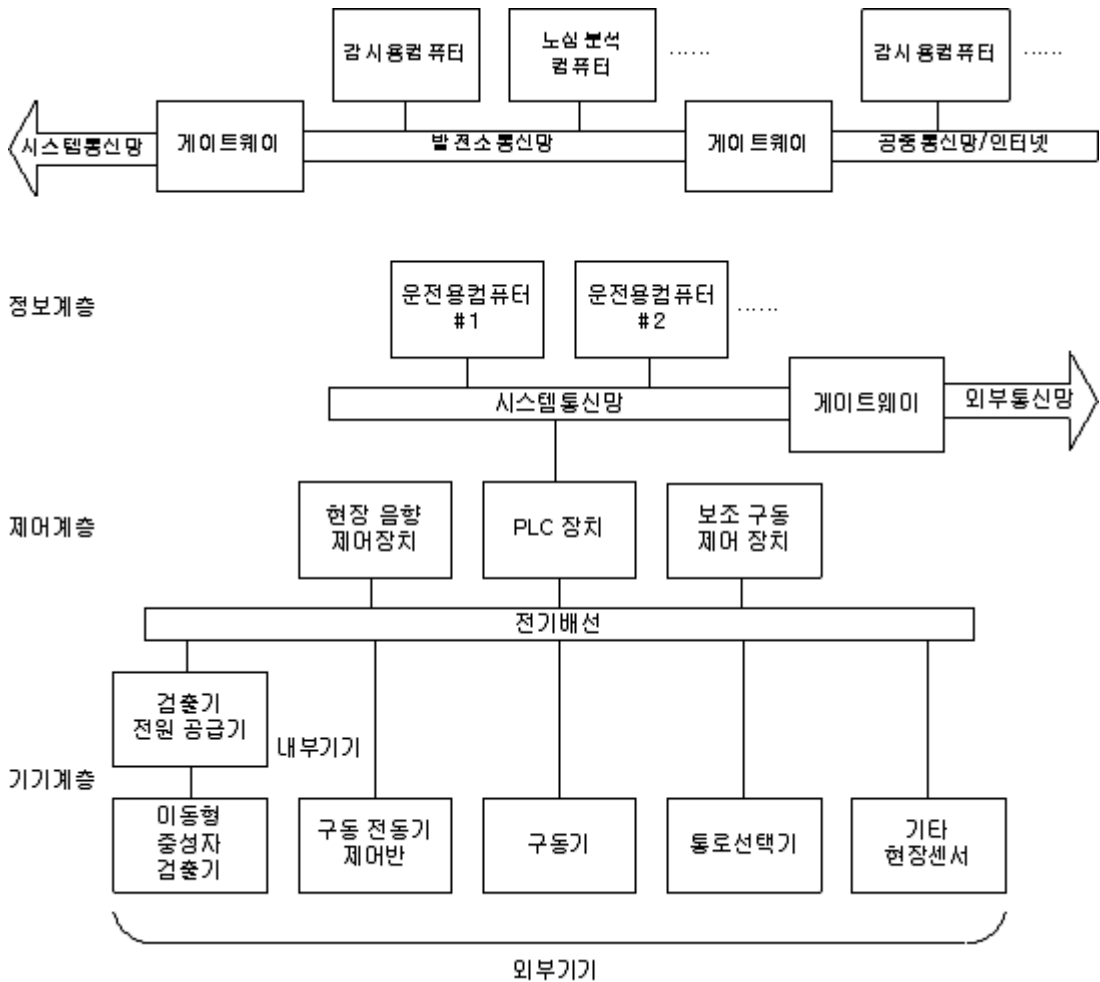


Figure 3. 노내핵계측계통 제어설비 구성도

## 나. 검출기 (Detector)

4개의 분열진리함(Fission Chamber)식 검출기(U-235가 90%이상 농축된 U3O8 사용)가 사용된다. 검출기는 직경이 약 4.75mm(0.187")이며 길이는 약 56mm(2.2")이다. 검출기의 끝부분에 길이 약 54m의 Helical Wrapped Cable과 Inconel Sheathed Coaxial Cable이 용접되어 있다.

## 다. 검출기 구동설비 (Detector Drive System)

중성자속 검출을 위해서 검출기를 삽입하는 구동계통은 Figure 4에 주어져 있다. 4개의 구동기와 8개의 제한 스위치(Withdraw & Safety Limit Switch 각 4개)와 4개의 내부 통로 선택기를 결합하고, 이를 정상상태 기준으로 시계방향 180도, 반시계 방향 90도를 회전할 수 있는 이중색인 통로선택기(Double Indexing Path Selector) 및 50개의 격리 밸브로 구성되어 있다. Table 2는 검출기 구동설비의 주요 사양을 알려준다.

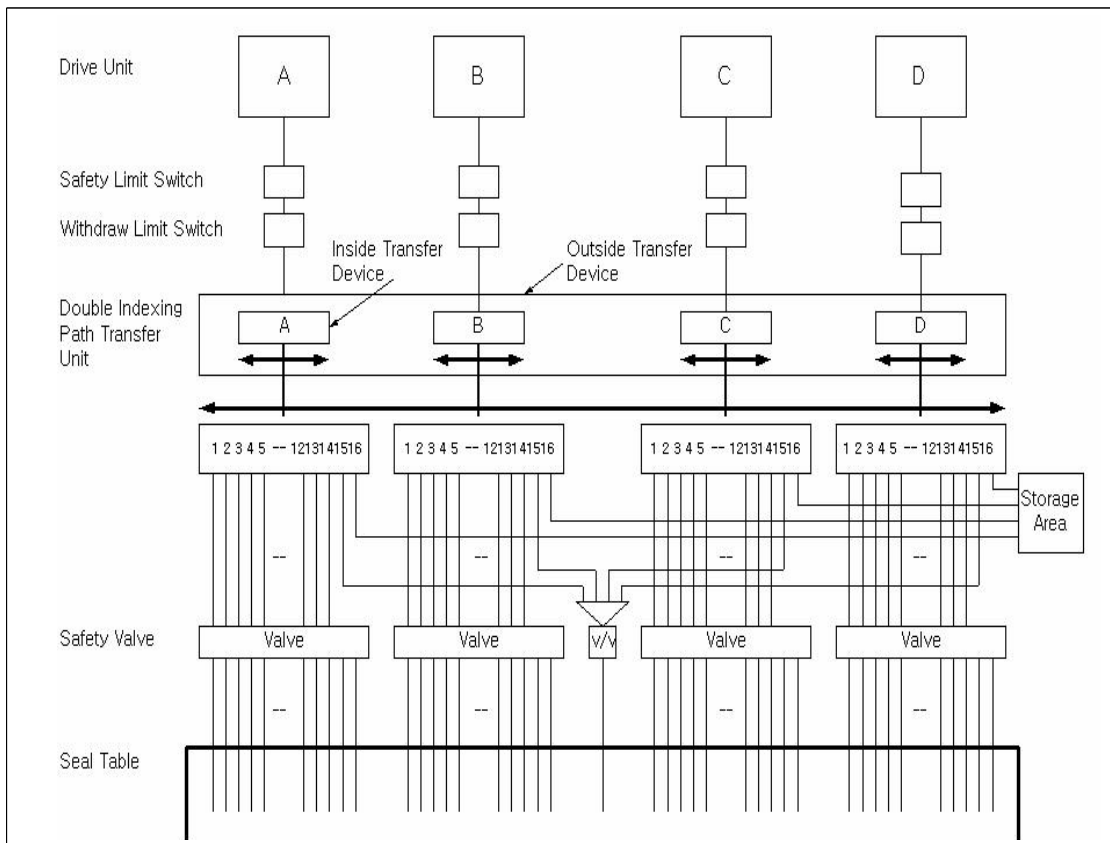


Figure 4. 검출기 구동설비 구성도



### (1) 구동기 (Drive Unit)

구동기는 밀봉판(Seal Table) 위 약 5m 되는 곳에 설치되어 있으며 나선형의 구동 케이블 끝에 붙어 있는 소형 검출기를 원자로 속으로 밀어 넣는 역할을 한다. 구동기는 A, B, C, D 4개로 나누어지며 각각 1개씩 4개의 검출기가 설치되어 있다. 각각의 검출기는 심블 내부를 움직이면서 중성자속 분포를 측정하는데, 각 검출기는 1개의 통로에만 사용하는 것이 아니라 이중통로선택기(Double Indexing Path Transfer Unit)를 회전시켜 다른 통로 또는 다른 그룹의 통로에도 사용할 수 있다. Figure 5는 구동기 외관의 모습을 보여준다.

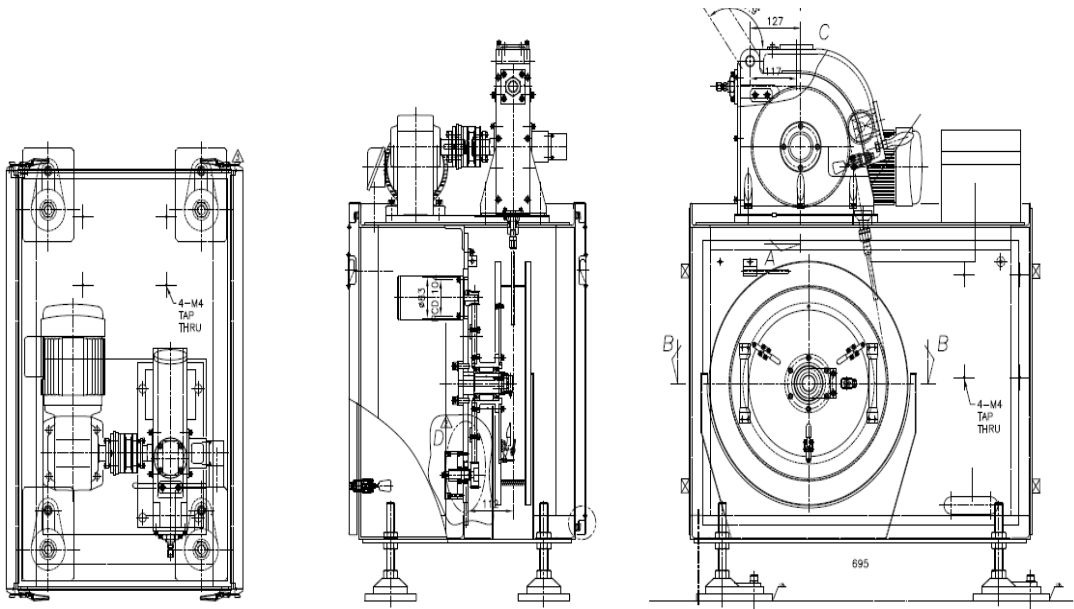


Figure 5. 구동기 외관

### (2) 기어모터

기어모터는 모터와 감속기어 일체형으로 3상 440V 0.75KW(1마력)의 유도모터와 1/40의 감속기어가 설치되어 있다. 모터 제어용 인버터에 의해 가변전압 및 가변주파수 (Variable Voltage Variable Frequency, VVVF) 제어방식으로 속도가 제어된다.

### (3) 토크리미터

토크리미터는 구동모터에 의해서 구동되는 케이블과 검출기를 보호하기 위해 헬리컬기어와 감속기어 사이에 설치되어 있다. 검출기 케이블에 무리한 힘이 가해지면 미끄러짐이 발생하도록 되어있으며 설계값이 3.927kgfm이고, 4.0kgfm(39.2Nm)에 설정되어 있다. 토크리미터의 설정값은 공구를 사용하여 현장에서 조절 가능하다.

(3) 헬리컬기어

헬리컬기어는 직경(PCD)이 247.4mm이며 토크리미터를 통해 기어모터로 구동된다. 헬리컬 기어의 표면에는 검출기 케이블이 물릴 수 있는 홈 306개가 균일하게 파여 있으며 저속으로 운전하면 60.96mm/sec, 고속으로 운전하면 582.9mm/sec로 움직인다.

(4) 위치전송기

헬리컬 기어의 축 끝단에는 위치전송기로 광학식 엔코더가 설치되어 있어서 헬리컬 기어의 회전을 측정하여 검출기의 위치를 측정하는 목적으로 사용된다. 헬리컬 기어가 1회전할 때 1000개의 펄스를 발생시켜 속도와 회전방향에 대한 정보를 제어반의 PLC 카운터 모듈에 제공한다.

(5) 검출기 저장릴

저장 릴은 구동모터를 저속에서 고속으로 혹은 갑자기 정지시킬 때 릴이 오버 런닝 하는 것을 방지하고 검출기가 삽입 혹은 인출될 때 저장릴에서 이탈하지 않도록 충분한 테이크 업 토크를 가지고 있다.

(6) 음향센서

각각의 구동기 내부에 설치되어 있으며 주제어실 제어반에서 구동기의 작동상태를 음향으로 확인하는 기능을 제공한다.

(7) 회전감지 마그네틱 센서

검출기 케이블이 풀리거나 감기는 동안 저장 릴이 회전하는 지를 자동으로 감지 하기 위해 저장 릴이 1회전 할 때마다 2번의 펄스를 발생하는 마그네틱 근접 센서가 구동기 내부 청정구역에 설치되어 있다.

(8) 제습기

각 구동기의 저장 릴 아래에는 1개의 110VAC 200W의 가열기가 부착되어 있어 격납용기 내부가 다습한 경우 가열기를 켜서 구동 케이블의 부식을 방지한다.

(9) 구동모터 현장조종기

검출기 케이블을 교체하거나 구동기를 정비할 목적으로 사용할 수 있도록 구동기 상부에는 구동모터를 현장에서 제어할 수 있는 현장조종기가 설치되어 있다. 조종기에는 검출기를 삽입하거나 인출할 수 있는 기능과 속도를 선택할 수 있는 기능이 마련 되어있다. 조종기에는 검출기 위치에 대한 정보를 제공하기 위해 인출 제한 스위치와 안전 제한스위치의 상태를 보여주는 램프와 저장 릴이 1/2회전할 때마다 켜지고 꺼지는 램프가 설치되어 있고, 구동모터와 토크모터의 전원 기동 버튼스위치가 있다.

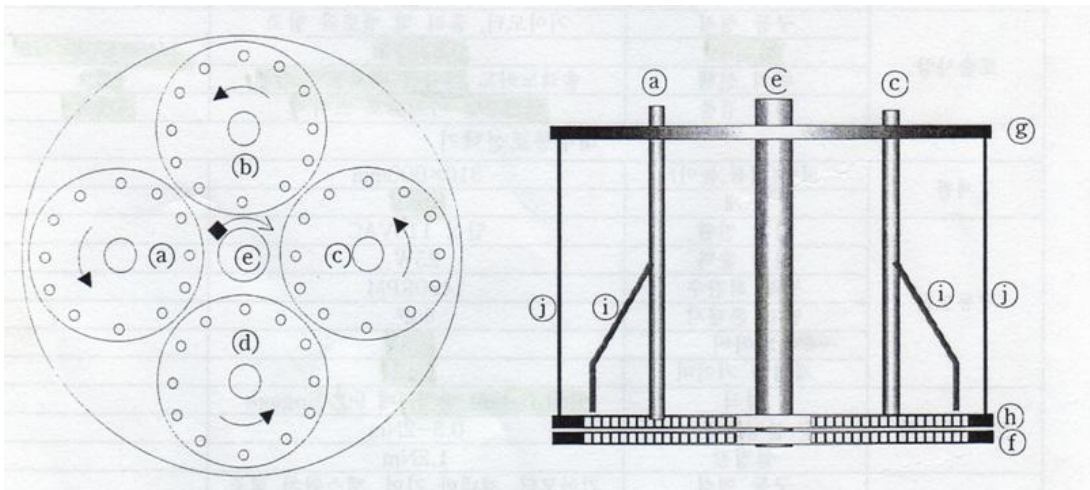
Table 2. 검출기 구동설비 주요 사양

항 목	세 목	사 양
제원	치수(길이, 너비, 높이)	861*595*1104mm
	무게	250kg
인버터	정격 전원	3상 380~480V 50/60Hz
	정격 전류	2.5A
	모터 속도 제어방식	VVVF, PWM방식, 2속, 점점
기어모터	형식	4극, 유도, 750W
	정격 전원	3상 440V 50/60Hz
	제어 모드	현장/수동/자동
	회전수(정격)	1800/45RPM
	회전수(고속)	1800/45RPM
	회전수(저속)	188/4.7RPM
	기어비	1/40
토크 리미터	형식	Belt Detent 방식, 매 90° Engage
	설정범위	15~70Nm
	설정값	38.5Nm(392.7kgfcm)
헬리컬 기어	Pitch Center Dia.	247.4mm
	잇수	306개
토출 사양	검출기 최대삽입력	31.75Kgf
	검출기 진행속도(고속)	582.9mm/sec
	검출기 진행속도(저속)	60.0mm/sec
위치전송기	전원	DC24V
	형식	광학식 엔코딩
	회전당 펄스수	1000개
	펄스당 해상도	0.78mm(0.195mm)

항 목	세 목	사 양	
검출기 저장릴	치수(길이, 너비, 높이)	400*60*100mm	
	수용 검출기 길이	50M	
	테이크업 토크	토크모터 역구동방식	
	토크모터	정격전원	단상 110VAC(변압55VAC)
		정격출력	40W(25W)
		정격회전수	900RPM
		연결콘덴서	30uF
		방열	냉각팬
	제동기	정격전원	24VDC
		최대 제동력	4Nm
	슬립링	단자수	4개
		최대 전류	500mA
		최대 회전수	12,000RPM
음향센서 (진동센서)	형식	가속도형	
	정격전원	24DC	
	감지범위	±5g	
마그네틱센서	형식	비접촉 마그네틱 방식	
	정격전원	100VAC or 100VDC	
	감지범위	0~4mm	
제습기	형식	가열기	
	정격전압	110V 50/60Hz	
	정격출력	200W	

### 라. 통로선택기

통로선택기는 검출기가 원자로 내부로 연결된 50개의 심블 중에서 현재 작업할 심블을 선택할 수 있도록 기계적인 메커니즘을 제공하는 장치이다. 통로선택기는 4개의 검출기 별로 할당된 다수의 통로들로 구성된 4개의 작업 그룹 중에서 1개를 선택하는 메커니즘과 그룹이 선택되면 각 그룹별로 12~13개의 작업 통로 중에서 1개의 통로를 선택하는 메커니즘이 함께 결합되어 있다. 통로선택기는 이러한 기능을 제공하기 위하여 이중색인 통로선택 메커니즘(Double Indexing Path Selection Mechanism)이라는 독특한 장치의 고안을 바탕으로 설계 및 제작되었다. 이중색인 통로선택 메커니즘은 아래의 Figure 6과 같이 구성되어 있다.



Ⓐ	내부통로선택기 A의 회전축	Ⓕ	하부고정판
Ⓑ	내부통로선택기 B의 회전축	Ⓖ	상부회전판
Ⓒ	내부통로선택기 C의 회전축	Ⓖ	하부회전판
Ⓓ	내부통로선택기 D의 회전축	Ⓖ	S형 안내관
Ⓔ	외부통로선택기의 회전축	Ⓖ	상하 회전판 연결봉

Figure 6. 이중색인 통로선택 메커니즘

이중색인(Double Indexing)구조는 외부통로선택기, 내부통로선택기 및 꼬임방지기로 구성 되어있다. 이중색인 통로선택기는 16분할 내부통로선택기 4대(A, B, C, D)의 회전축을 중심으로 방사형으로 배치하여 4대의 내부통로선택기가 별도의 메커니즘에 의해 회전하는 외부통로선택기에 포함되어 있는 이중적 구조를 가지고 있다. 여기서 외부통로선택기는 4개의 작업그룹을 선택하는 메커니즘을 제공하며, 내부통로선택기는 12~13개의 작업통로를 선택하는 메커니즘을 제공한다. 즉 정상운전 중에는 4대의 내부통로선택기가 각각 지정된 검출기를 지정된 그룹의 개별 통로를 선택하는 방식으로 운전되지만, 임의의 검출기, 구동기 또는 내부 통로선택기 모두를 인접한 그룹으로 회전시킴으로써 고장난 검출기, 구동기 또는 통로선택기를 인근 검출기, 구동기 또는 내부통로선택기로 대체하여 사용할 수 있다.

(1) 내부통로선택기(Inside Path Selector)

검출기가 노내 중성자속 측정을 위하여 내부 통로를 선택하는 장치로 모터, 기어, 타이밍벨트, 토크, 커플링 등으로 구성되어 있으며 총16개의 통로를 제공한다. 각 그룹별로 13개씩의 작업 통로와 보정통로 및 저장통로를 선택할 수 있도록 한다. 수동운전 및 반자동 운전모드에서 통로변경 작업을 수행할 때 사용한다.

■ 구동모터

내부통로선택기는 총16통로를 선택할 수 있으며 통로를 선택하는 제네바 기구가 설치되어 있다. 구동모터는 이 제네바기구를 회전시키는 기능을 가지고 있다.

■ 토크리미터

제네바기구는 구동모터에 의해 구동되는데 회전축에 토크리미터가 부착되어 걸림이 발생하면 회전축이 미끄러짐을 발생시키는 기능을 가지고 있다.

■ 꼬임방지기

꼬임방지장치는 1개의 외부 로터리조인트와 4개의 내부 로터리 조인트를 갖고 있으며 통로선택기 상부에 4개의 지지대에 의해 고정되어 임의의 검출기를 모든 심블에 이동시키는 기능을 가지고 있다.



Figure 7. 내부통로선택기

(2) 외부통로선택기(Outside Path Selector)

검출기가 노내중성자속 측정 시 외부 통로 선택 장치로 모터, 기어, 타이밍벨트, 토크 커플링, 음향센서 등으로 구성된다. 4대의 내부 통로선택기를 각각 시계방향(Clockwise)으로 90° 또는 180°, 반시계(Counter Clockwise)방향으로 90° 회전시킴으로서 각 검출기가 원래의 작업그룹 외에 인접한 타 작업 그룹의 Flux Map을 가능하게 한다.

■ 구동모터

외부통로선택기의 구동장치는 외부통로선택기 상부에 설치되어 있는데 구동모터가 동작하면 회전력은 감속기어를 거쳐 타이밍벨트에 의해 중심축의 풀리에 전달되어 회전하게 된다.

■ 토크리미터

외부통로선택기에는 토크리미터가 설치되어 있어서 회전하는 도중에 과도한 걸림이 발생하면 회전축이 미끄러지도록 되어 있다.

■ 센서박스

센서박스는 모두 4개의 마이크로스위치장착되어 있어서 센서박스가 각 모드별로 이동할 때 위치 지시봉 또는 제한 벽에 의해 스위치가 구동되는 패턴에 따라 현재의 운전모드에 관한 신호를 만들어 제어반으로 전송한다.

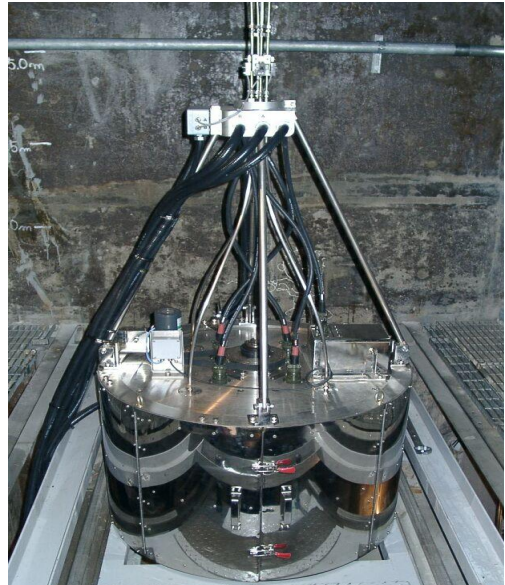


Figure 8. 외부통로선택기

마. 심블(Incore Thimble)

심블(검출기이동관)은 Figure 9의 그림과 같이 안내관을 통해서 원자로 용기 속으로 들어간다. 원자로 용기 속으로 들어간 심블의 끝은 막혀있으며 내부는 건조하다. 심블은 원자로 냉각재 압력과 대기 사이에 압력경계 역할을 하는데 심블과 안내관 사이의 기계적인 밀봉은 Seal table(밀봉테이블)에서 이루어진다. 밀봉 방법에는 저압밀봉과 고압밀봉의 두 가지가 있으며 저압밀봉은 원자로내의 압력이 낮을 때, 고압밀봉은 원자로 내부가 가압되어 고압이 되었을 때 적용한다. 정상운전 중에 심블은 원자로 내부의 핵연료 다발 속에 고정되어 있으며 핵연료 교체나 보수를 위해서만 원자로 용기의 바닥까지 약 4m 가량 인출해낸다. Seal table(밀봉테이블)의 높이는 핵연료 교체 기간 중 심블의 인출을 쉽게 하기위해 원자로 용기 상부 플랜지보다 위에 있다. Table 3은 심블 설치 목록이다.

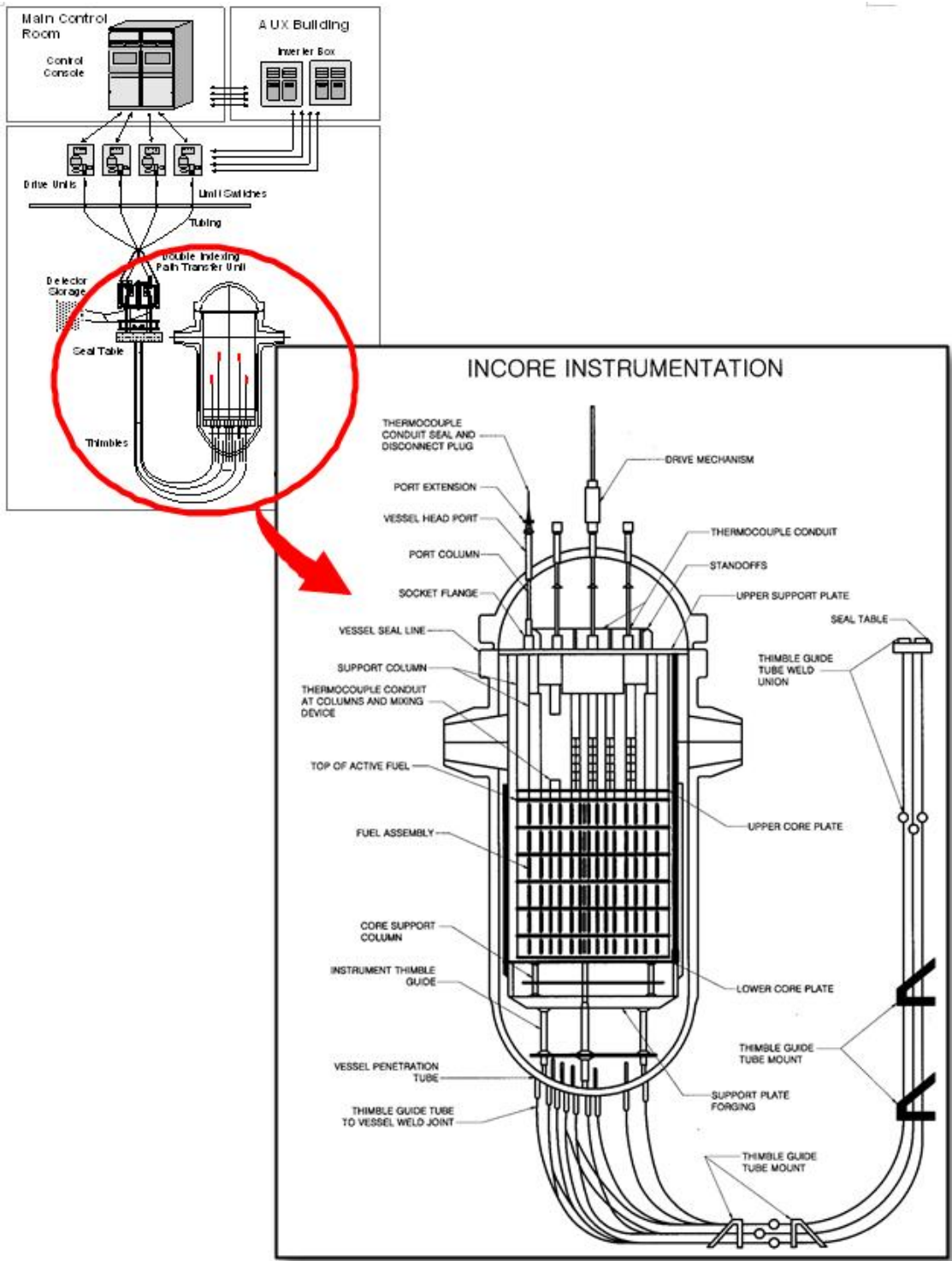


Figure 9. 노내핵계측계통 인코아 심블 구성도



Table 3. 심블 설치 목록

구 분	Thimble Number	구 분	Thimble Number
1	R08	26	H11
2	N05	27	G07
3	N08	28	F02
4	N07	29	F04
5	M03	30	F06
6	L04	31	G09
7	N12	32	G14
8	L06	33	F09
9	L05	34	F08
10	L09	35	E11
11	L08	36	E05
12	J03	37	D05
13	J05	38	D07
14	L11	39	F11
15	L14	40	F13
16	J10	41	D12
17	J07	42	D10
18	H03	43	C08
19	H01	44	D03
20	H04	45	B05
21	H06	46	B07
22	J12	47	B10
23	J15	48	C12
24	H13	49	A09
25	H11	50	B08

### 바. 보호관(Thimble Guide Tube)

원자로 용기 밑바닥에서 밀봉테이블까지 곡선형으로 연결되어 있으며 계측관을 보호하고 계측관과 냉각재의 압력경계를 형성한다.

### 사. Seal Table(밀봉테이블)

심플과 안내관사이의 기계적인 밀봉과 심플로 부터 격납건물 구조물까지 부하를 지지하는 역할을 한다. 상부의 판부분은 노내 계측기 밀봉하우징에 대한 지지 기능을 제공하고 하부의 판부분은 장전 수조의 바닥 구조물에 부착 심플의 지지 기능을 수행한다.

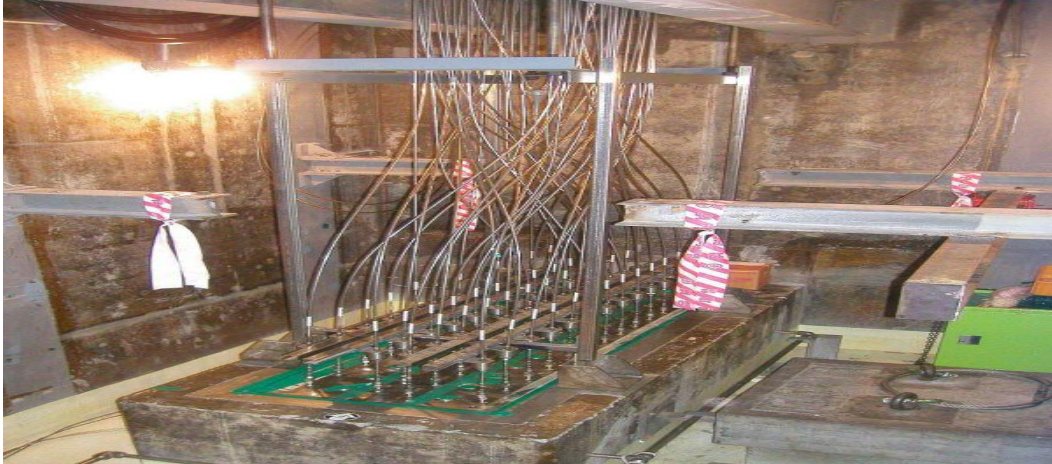


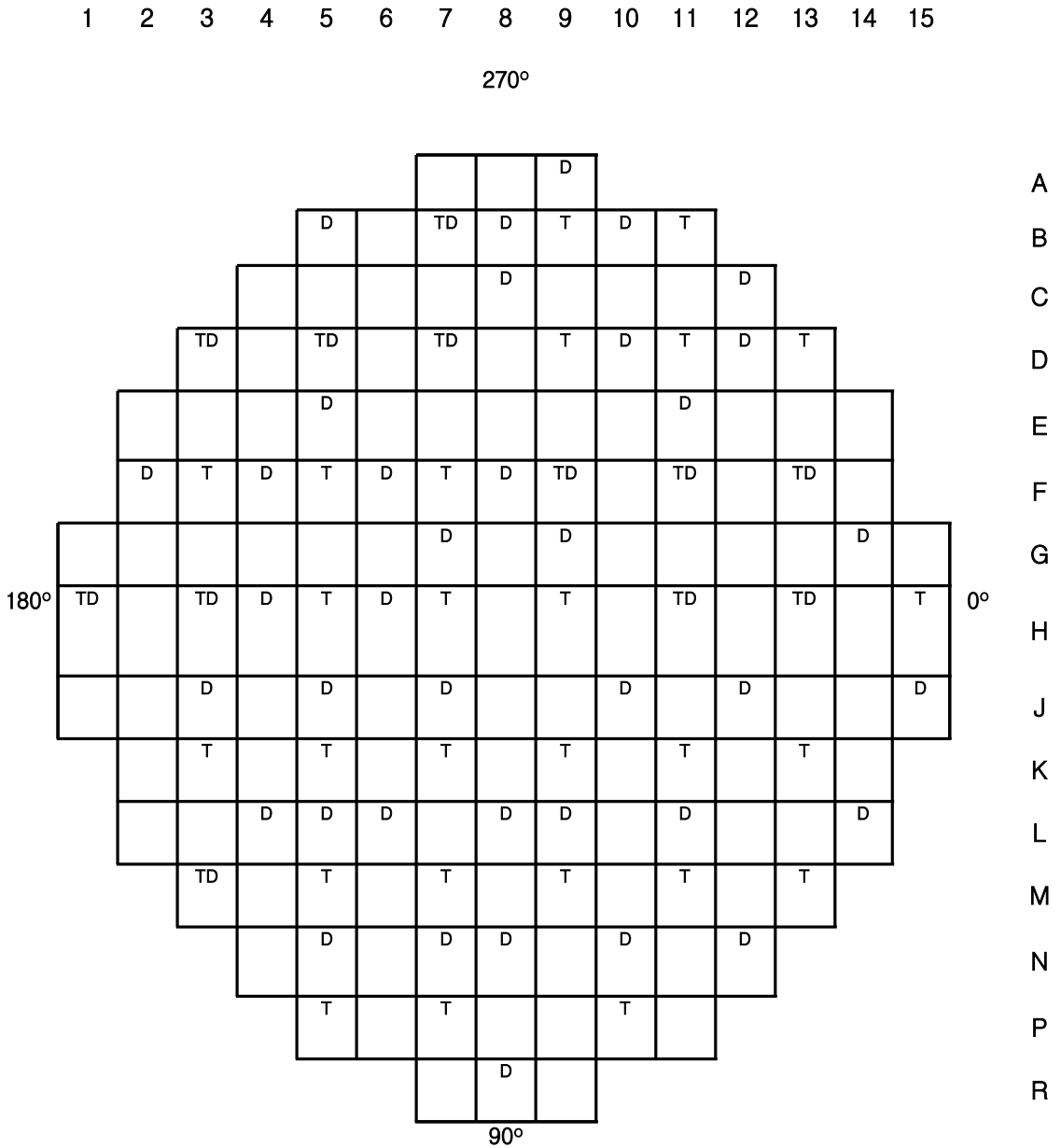
Figure 10. Seal Table(밀봉테이블)

### 아. 격리밸브

50개의 격리밸브가 설치되어 있으며 불이 내장된 체크 밸브로서 자동 조작된다. 만약 심플이 파열되어 냉각재가 새어나오는 경우 불이 밸브를 잠금으로써 막을 수 있다. 격리 밸브는 밸브 스텐드에 설치되며 Seal Table에 배치된 각 심플과 물리적인 무리가 없도록 간격을 조절할 수 있다.



Figure 11. 격리밸브



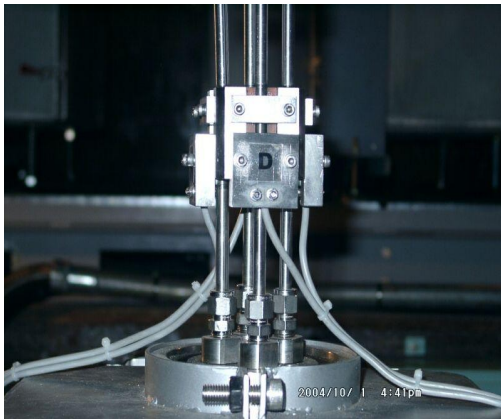
T : Thermocouple(39 Locations)  
 D : Movable In-Core Detector(50 Locations)

Figure 12. In-Core Flux Thimble Tube Locations

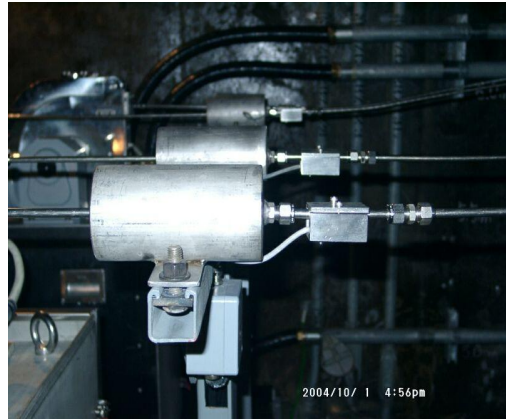
### 자. 제한스위치 집합체

제한스위치는 검출기 구동장치의 운전시에 여러 가지 제어 및 보호기능을 수행한다. 꼬임방지장치 바로 위쪽에 부착되어 있는 인출제한 스위치(Figure 13a)는 검출기의 움직임에 의해 동작하며, 검출기가 완전히 빠진 상태 즉 인출 램프가 꺼진(OFF) 상태가 아니면 외부통로선택기와 내부통로선택기가 동작하지 못하게 연동되어 있다. 제어반에서 원격으로 운전 중에 이 스위치가 꺼지면 자동으로 인출을 멈추게 되며 검출기가 통과하면, 제어반에 설치된 화면을 통해 통과 여부를 확인할 수 있다.

안전제한 스위치(Figure 13b)는 구동기 출구 가까이에 있는 배관 스탠드에 설치되어 있으며 검출기를 인출할 때 검출기가 헬리컬기어에 말려들어 파손되는 것을 방지하는 목적으로 구동모터에 공급되는 전원을 차단한다. 스위치는 내부에 반도체소자가 없는 자기 리드 스위치 방식의 근접스위치로서 평상시에는 내장되어 있는 영구자석이 균형을 이루어 내부의 리드스위치가 동작하지 않다가 자석에 반응하는 물체가 접근하면 균형이 깨지면서 동작한다.



a) 인출 제한 스위치



b) 안전 제한 스위치

Figure 13. 제한스위치 집합체

### 차. 밀봉유닛

원자로 내 중성자 분포 측정용 핵계측기의 이동통로인 심블(Incore Thimble)과 이를 감싸고 있는 안내관(가이드 튜브)사이로 냉각수가 누설되지 않도록 밀봉해주는 장치이다. 만일 정상 운전 중 밀봉유닛의 누설이 발생하면 격납건물 배수조의 수위증가, 격납건물 습도증가, 밀봉부 주변 공간방사선량 증가 등의 방법으로 즉각적인 누설여부 확인이 가능하다. Figures 14와 15는 밀봉유닛의 외관을 보여준다.



Figure 14. 밀봉유닛

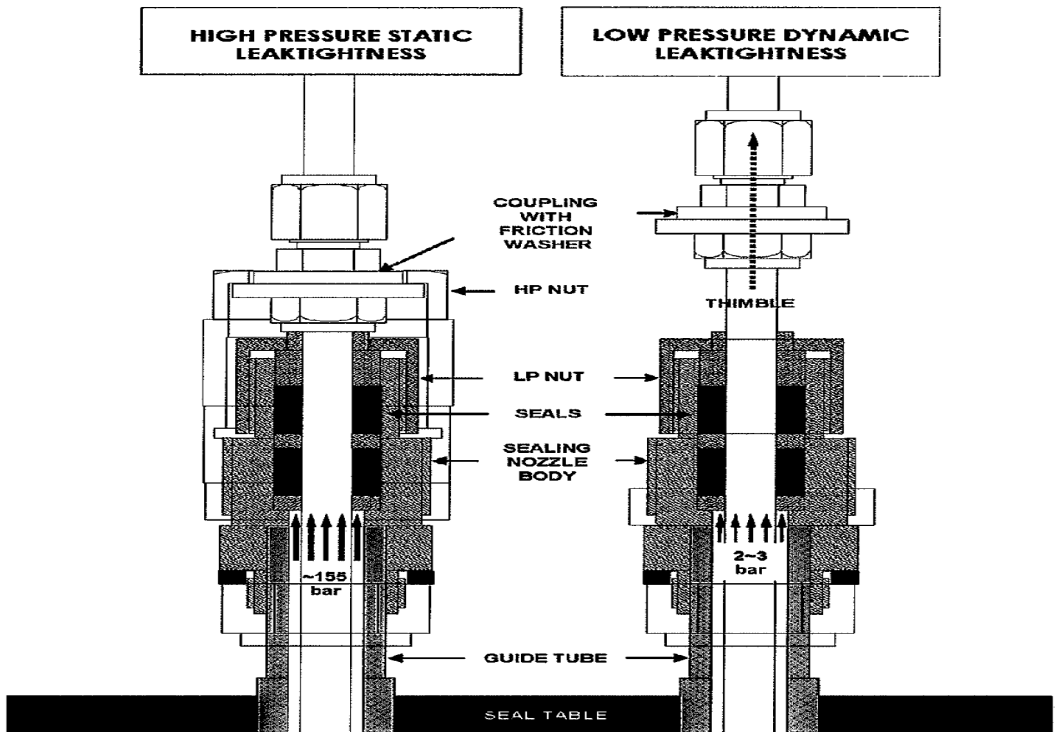


Figure 15. 저압 및 고압 밀봉유닛 방식

### 3. 와전류탐상시험(ECT)

심블(검출기이동관)의 일부는 노내 설치물 및 냉각재 유량에 직접 노출되어 있어 진동에 의한 마모, 균열 등 형상변화가 일어날 수 있다. 이에 매주기 계획예방정비 시 와전류 탐상시험(Eddy Current Test)를 수행하여 중성자속 검출기 이동관 (In-Core Flux Thimble Tube)의 건전성을 판단한다.

#### 가. 신호수집

와전류탐상시험은 자기비교형 차동법 및 표준비교형 절대법을 적용하여 심블(검출기 이동관)이 원자로에서 인출된 상태에서 Thimble Tube 검사용 탐촉자를 삽입한 후, Probe Push-Puller로 초당 24 inch의 속도로 탐촉자를 인출시키면서 신호를 수집한다.

탐촉자(Bobbin Probe)의 원리는 탐촉자 내부 코일(2ea)의 전류차를 검출하는 방식으로 탐촉자 내부 검출 Coil A, B가 심블의 건전부에 있으면 양 Coil에 흐르는 전류는 같지만 심블의 결함부를 지나는 순간은 Coil A, B에서 전류차이가 발생하는 원리이다. Table 4는 신호수집에 필요한 검사장비 및 소요자재의 목록이다.

Table 4. 검사장비 및 소요자재

구 분	품 명	수 량
신호수집	1. Remote Data Acquisition Unit * MIZ-70 R.D.A.U. * HP Workstation * Data Acquisition With Enable License 2. Push-Puller System	1 set
신호평가	Eddyner Data Analysis System * HP Workstation * HP Laser Printer * Eddyner Data Analysis With Enable License	1 Set
보정시험관	In-Core Thimble Tube ECT용 보정표준시험관	1 개
탐촉자	Thimble용 Bobbin Probe * ZBPF-T/LC/NF-E00.188-MR	4 개
기타	* Communication System * 각종 Cable	1 Set 1 Set

본 논문의 참고자료에서는 신호수집 장비로 다중주파수 와전류탐상검사 장비인 MIZ-70 Remote Data Acquisition Unit, Eddynet(Version : 11i, Patch : 1.14) Acquire Software를 사용하였고, 신호평가 장비로는 Eddynet (Version : 11i, Patch : 1.14) Bobbin Analysis를 사용하였다. 또한 검사에 사용된 보정시험관은 Wear scar를 사용하였으며, 검사주파수는 300, 140, 65, 및 30(kHz)의 4개 주파수를 사용하였다.

보정시험관은 시험대상 심블(검출기이동관)과 재질 및 규격이 동일하며 원주 방향의 길이가 공칭 90°로 공칭관 벽두께의 80%, 60%, 40%, 20% 및 10%의 깊이로 인공 결함이 가공되어 있다.

원자로건물 내부 작업자의 피폭저감과 검사장비의 오염 방지를 위하여 신호수집 장비는 원자로건물 외부에 설치하고 High-Performance Cable을 이용하여 Seal Table에 위치해 있는 탐촉자와 연결하여 사용한다. 신호수집실과 Seal Table 작업자간의 원활한 의사소통을 위하여 통신장비를 설치하며 사용전원의 균일한 전원 공급을 위하여 자동 전압 조절기 및 무정전 전원 공급 장치를 사용한다.

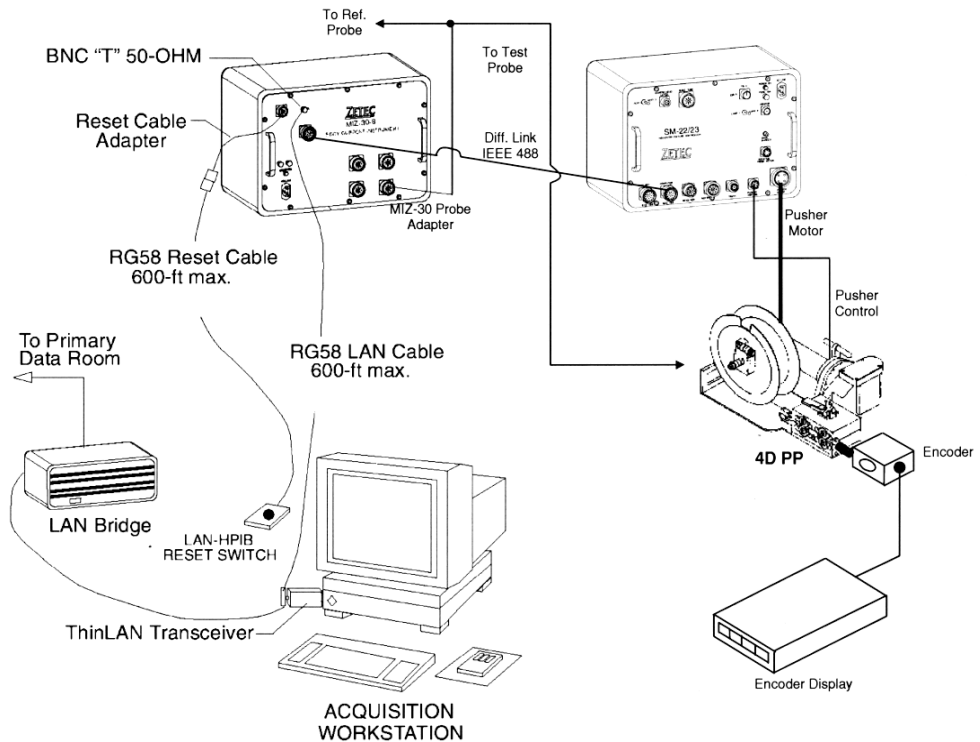


Figure 16. ECT System of Flux Thimble Tubes

## 나. 신호 평가

수집된 신호의 평가는 신호진폭에 의한 결함깊이 측정방법을 적용하는데, 보정시험관의 Noise를 수평으로 조정된 후 보정시험관의 인공결함 신호로 결함깊이 대 신호진폭간의 대비로 각각의 평가주파수에 대해서 5 Point 80, 60, 40, 20 및 10(%)의 Amplitude Curve를 작성한다. Set Volts는 Standard Tube의 40% Taper Wear 인공 결함을 Ch.4(140kHz)에서 7.00 volts로 설정한 후 다른 주파수는 상대적인 값을 갖도록 한다. 마모 지시 신호는 주파수 300, 140 및 65(kHz) 에서 마모신호를 비교한 후 마모깊이 평가는 140 kHz에서 평가 하며 검출된 마모지시의 깊이는 관 두께에 대한 백분율(%)로 기록한다.

## 다. 차기 예상 마모율 계산

수집된 신호는 마모량 계산과 함께 다음 운전개월 수를 고려하여 차기예상 마모율을 예측하고, 그 결과에 따라 적절한 조치를 취하게 된다.

안내관에 대한 차기예상 마모율의 계산방식은 다음 두가지 방법이 있다.

- KNP-89-707 : 1989년 5월 고리원자력 1호기(2 Loops)와 한빛원자력 2호기(3Loops)를 모델로 Westinghouse가 수행한 안전성평가 보고서에 제시된 계산방식
- WCAP-12866 : “Bottom Mounted Instrumentation Flux Thimble Wear” 에서 제시한 계산방식

두가지 방법은 각각 차기예상 마모율에 따른 검출기 안내관의 조치 방법을 제안하고 있으며, 각각의 조치방법은 다음과 같다.

Table 5. 차기예상마모율에 따른 검출기 안내관 조치방법

조치기준	KNP-89-707	WCAP-12866
검사주기	- 차기 예상마모율이 60% 이상 이동관이 있으면 : 1핵연료주기 후 검사 - 차기 예상마모율이 60% 이상 이동관이 없으면 : 2핵연료주기 후 검사	유틸리티는 이동관 검사를 계속 수행해야 한다.
보수기준	당해 연도 60% 이상 : 관막음 또는 관교체	다음 운전 주기 동안 80%를 초과하는 것으로 예측되면 교체 또는 재배치해야 한다.
예상마모율에 따른 보수기준	예상마모율 60% 이상 : 0.5 inch 길게 이동관 재배치, 관막음 또는 관교체	다음 운전 주기 동안 80%를 초과하는 것으로 예측되면 교체 또는 재배치해야 한다.



## 제 3 장 문제점 분석 및 개선

### 제 1 절 차기예상마모율

#### 1. 차기예상마모율 산출

차기예상마모량 산출은 당해 연도 검사 결과를 근거로 이동관의 마모율을 계산하고, 다음 한주기 동안 운전 개월 수를 고려하여 이동관에 대한 마모지시 깊이를 예측하여 운전 중 이동관의 건전성을 유지함으로서 10 CFR 50, App. A, General Design Criterion 14에서 요구하는 원자로 냉각재 압력경계(RCS Pressure Boundary)를 확립하고, 냉각재 누설로 인한 불시정지 등 심각한 사고를 방지함이 주된 목적이다.

#### 가. 차기예상마모율 계산식

한빛 1발전소에서 사용하는 심블(검출기이동관)에 대한 차기예상마모율을 계산하는 방식은 [KNP-89-707]과 [WCAP-12866] 두 가지가 있으며, 각각의 차기예상마모율 계산식은 다음과 같다.

□ KNP-89-707

$$- WR = (WL + 10\%) / NM \quad (1)$$

$$WLP = (WL + 10\%) + (WR \times X1) \quad (2)$$

여기서,

$WR$  : 1개월당 마모 깊이(%/월)

$WL$  : ECT 결과에 따른 현재의 마모 깊이(%)

$NM$  : 누적 운전개월 수(월)

10% : ECT 불확실성 보상 값

$WLP$  : 차기 검사 때까지의 예상 마모 깊이(%)

$X1$  : ECT 검사시점부터 차기 검사시점까지의 계획된 운전 개월수(월)

□ WCAP-12866

$$- W_a = W_d(N_a/N_d)^n \quad (3)$$

여기서,

$W_a$  : 차기 검사 때까지의 예상 마모 깊이(%)

$W_d$  : ECT 결과에 따른 현재의 마모 깊이(%)

$N_a$  : 차기 누적 운전 개월 수(월)

$N_d$  : 누적 운전 개월 수(월)

$n$  : 마모 추세에 의해 결정되는 지수

$$- n = \frac{\log(W_2/W_1)}{\log(N_2/N_1)} \quad (4)$$

여기서,

$W_1$  : 두 번의 연속 검사 중 첫 번째 검사했을 때의 마모깊이(%)

$W_2$  : 두 번의 연속 검사 중 두 번째 검사했을 때의 마모깊이(%)

$N_1$  : 두 번의 연속 검사 중 첫 번째 검사했을 때까지의 운전 시간(월)

$N_2$  : 두 번의 연속 검사 중 두 번째 검사했을 때까지의 운전 시간(월)

## 나. 차기예상마모율 계산식 문제점

차기예상마모율의 결과는 [KNP-89-707]과 [WCAP-12866] 중 어떤 계산식을 적용하였는가에 따라 달라질 수 있다. 두 계산식 모두 한빛1발전소 노형인 WESTHOUSE에서 제시한 오랜 기간 사용되어온 검증된 방식으로 사용에는 문제가 없으나 위 수식을 보면 일부 계산과정에서 차이가 있다. 또한 차기예상마모율 결과에 따라 심블(검출기이동관)에 대한 조치방법으로(Table 4. 차기예상마모율에 따른 검출기 안내관 조치방법 참조) [KNP-89-707]에서는 차기예상마모율이 60% 이상일 경우 검사주기와 보수기준을 제안하고 있는 반면, [WCAP-12866]에서는 차기예상마모율 80%로 제안하고 있다.

따라서 차기예상마모율을 어떤 산식으로 계산하는가에 따라 심블의 검사주기와 보수기준이 달라질 수 있고, 이는 경우에 따라 불필요한 정비를 야기할 수 있다. 불필요한 정비는 발전소 작업자에게 새로운 피폭을 발생시키고, 발전소 운영에도 시간 및 경제적

으로 손해를 입히므로 보다 합리적인 방식을 연구하고 정립할 필요가 있다.

## 2. 차기예상마모율 계산식 비교검토

차기예상마모율 계산식 비교검토에 앞서 슬라이딩 마모를 가장 정량적으로 잘 표현한 식은 Archard의 마모식이며 이는 다음과 같이 표현된다.

$$V_w = K_w F_N L \quad (5)$$

여기서,  $V_w$ 는 마모 체적( $in^3$ )  $K_w$ 는 마모계수( $in^2/lb$ ),  $F_N$ 은 직각 접촉력( $lb$ ),  $L$ 은 미끄럼 거리( $in$ )이다. 위 식에서 보면 시간당 마모되는 부피는 작용하는 힘과 상대 변위가 일정하면 변화가 없음을 알 수 있다. 힘과 상대변위가 지금까지의 조건과 동일하다고 가정했을 때, 표면에서 떨어져 나오는 마모량은 동일하지만 원통이라는 기하학적 형상 때문에 단위 깊이당 마모량은 동일하지 않다는 결론을 내릴 수 있다.

### 가. [KNP-89-707] 계산식 검토

KNP-89-707에서 마모깊이의 증가를 시간에 따라 선형으로 깊어진다고 보고 있으나, 단위시간당 마모율이 동일하더라도(마모가 진행되면 안내관 접촉하고 있는 구조물과의 틈이 넓어지게 되므로 접촉력이 작아지므로, 단위시간당 마모량은 감소하게 됨) 원통이라는 기하학적 모양 때문에 마모 깊이가 선형이 될 수 없다. 그러므로 마모깊이의 증가를 선형으로 본 KNP-89-707는 근거가 희박하다고 할 수 있다.

### 나. [WCAP-12866] 계산식 검토

WCAP-12866의 계산식을 보면 현장 데이터를 가지고 시간에 대한 마모깊이를 검토하여, 안내관의 마모 추세가 지수함수로 표현되는 것을 확인할 수 있다. 안내관의 마모율은 발전소 마다 차이가 난다. 비파괴검사 결과에 따르면, 루프의 수가 많을수록 마모율이 높아진다. 즉, 4루프 발전소의 안내관 마모율이 가장 크고, 그 다음으로 3루프, 2루프 발전소의 순서로 마모율이 작아지게 된다. 또한, 내부 Instrumentation Column의 직경이 작을수록, 안내관의 외경이 클수록, 다시 말해서 안내관과 내부 Instrumentation

Column 사이의 간극이 커질수록 마모율은 작아진다. 이처럼 발전소 별로 차이가 나는 마모율은 WCAP-12866에서는 해당 발전소의 마모 추세를 이용하여 보상하도록 되어 있다.

### 다. 계산식의 적용

차기예상마모율 계산식은 확실한 근거가 제시되어 있고 기하학적인 변수가 포함된 WCAP-12866를 적용하는 것이 합리적인 것으로 판단된다. 단, 사용되는 지수(식 (4)참조)는 연속적인 두 번의 검사결과를 이용할 것이 권고된다.(한 번의 검사결과만 있으면, 0.67 적용). 보수적인 마모 추세 예측을 위해서는 의미 있는, 즉, 한주기 동안 마모가 많이 진행된 시점과 그 이전 시점의 와전류탐상검사 결과를 포함하여야 할 것으로 판단된다.

## 3. ECT 검사 오차(불확실성 보상 값)

[KNP-89-707] 계산식의 조건에는 ECT 불확실성 보상값으로 10% 마진을 적용하고 있으나 [WCAP-12866]에서는 포함하고 있지 않다. 10%의 ECT 검사 오차를 검토해 보았다.

### 가. [KNP-89-707]과 [WCAP-12866] 오차 적용

[KNP-89-707]에서는 와전류검사 오차 10%를 검사 결과에 더하여 사용하고 있다 (식 (1) 참조). 이는 와전류탐상검사의 최대 오차를 근거로 설명하고 있으며, [WCAP-12866]에서는 와전류탐상검사의 오차를 반영할 필요가 없다고 설명하고 있다. 이에 대한 근거로 실제 와전류탐상검사 실험 결과를 제시하고 있는데 WCAP-12866에서 제안한 썬기형 혹은 플렛형 와전류탐상 표준시험편을 이용하여 수행한 안내관 검사결과는 항상 실제 마모 깊이보다 더 보수적이라는(즉, 더 깊게 평가된다는) 실험결과를 제시하고 있다.

### 나. 비교 결과

통상적인 ECT(와전류탐상검사)의 오차는 $\pm 10\%$ 로 보고 있으나 이 오차는 마모 깊이를 예측할 때 사용하지 않고, 정비 기준 같은 것을 결정할 때 사용한다. 예를 들어 증기 발생기 전열관 관막음 기준은 전열관 설치 두께의 40%인데 Reg. Guide 1.121에 따라 계산하면, 어떤 증기발생기 전열관도 설치 두께의 60%가 마모되더라도 전열관의 건전

성이 유지된다. 그럼에도, 40%가 나온 근거는 차기 검사를 수행할 때까지 예상 마모 증가율 10%와 와전류탐상검사의 오차 10%를 더하여 결정된 것이다. 증기발생기 전열관은 숫자도 많고 전열관의 모양(U-band 부위의 곡률반경), 지지하고 있는 Support가 다양하기 때문에 각각의 전열관에 대한 예측 마모율을 정하기 힘들기 때문에 일률적으로 예측 마모율을 10%로 하여 적용하고 있다. 이처럼 ECT(와전류탐상검사) 오차 10%는 실제 검사 결과에 10%를 더하여 검사 결과를 결정하는데 사용하는 것이 아니고, 정비기준 같은 것을 결정할 때 사용하게 된다.

[KNP-89-707]에서는 현재의 마모에 10%를 더하여 마모율을 결정하는데 사용하는 것은 와전류검사 오차를 이중으로, 즉 검사결과에서 한 번과 조치 기준에서 한 번씩 반영한 결과가 될 수 있다. 반면, WCAP-12866에서는 실험 결과를 근거로 안내관 와전류탐상검사 결과에 오차 10%를 고려할 필요가 없다고 명확하게 명시하고 있다.

그러므로, WCAP-12866에서 제시한 2종의 와전류검사 표준시험편을 사용하여 검사를 수행한다면 검사 오차 10%는 고려할 필요가 없는 것으로 판단된다.

#### 4. 차기예상마모율에 따른 정비기준

[KNP-89-707]에서는 차기예상마모율이 60% 이상일 경우 검사주기와 보수기준을 제안하고 있는 반면, [WCAP-12866]에서는 차기예상마모율 80%로 제안하고 있어 검토해 보았다.

##### 가. [KNP-89-707] 정비기준

당해연도 마모 깊이가 60% 이상인 안내관은 관막음 혹은 관 교체를 수행한다. 차기 예상 마모 깊이가 60% 이상되는 안내관이 있으면 1-핵연료주기 후 검사를 수행하고, 차기 예상 마모 깊이가 60% 이상인 안내관이 없으면 2-핵연료주기 후 검사를 수행한다. 예상 마모율이 60% 이상이고 마모의 길이가 0.5in 이상이면 관막음 또는 관교체를 한다.

##### 나. [WCAP-12866] 정비기준

안내관 검사는 계속해서 수행하여야 하고, 적절한 다음 검사 시기를 결정하기 위하여 안내관 마모 깊이를 예측하여야 한다. 다음 핵연료 주기 동안 80% 이상의 마모가

예상되는 안내관은 재배치 혹은 교체하여야 한다.

#### 다. 비교 결과

[KNP-89-707]에서 보수 기준으로 60%를 설정하였으나 시간이 오래 경과되어 근거를 명확하게 제시하는 자료를 찾을 수 없었다. 하지만 WCAP-12866에서는 실험과 모델링을 통해서 안내관이 80% 마모되더라도, 그 기능을 유지한다는 것을 증명하고 있다. 또한, 모델링을 통해서 마모 깊이가 안내관의 구조 건전성에 영향을 미치고 마모 길이는 크게 영향을 미치지 않는다는 것도 보여주고 있다. 따라서 안내관에 대하여 80% 마모를 보수 기준으로 보는 것은 충분히 보수적인 것으로 판단되고, 차기 검사 시기도 80% 마모를 기준으로 설정되어야 할 것으로 생각된다.

## 제 4 장 결 론

[KNP-89-707]의 발행 연도는 1989년이고 [WCAP-12866]의 발행 연도는 1991년이다. [KNP-89-707]계산식의 명확한 산출근거는 시간이 오래 지나 확보하기 어려워 내용을 정확히 알 수 없었지만, 두 보고서 모두 WESTINGHOUSE에서 발행한 것으로 미루어 볼 때 [WCAP-12866]에 더 새로운 기술적 내용이 들어 있을 것으로 생각된다. 따라서 한빛1발전소 중성자속검출기 안내관 와전류탐상검사와 관련하여, [WCAP-12866]의 내용을 따르는 것이 보다 합리적이라 판단된다.

- 차기예상마모율 계산식은 확실한 근거가 제시되어 있고 기하학적인 변수가 포함된 [WCAP-12866]에 제시된 계산식을 적용하는 것이 합리적인 것으로 판단된다. 단, 사용되는 지수는 연속적인 두 번의 검사결과를 이용할 것이 권고된다.(한번의 검사결과만 있으면, 0.67 적용). 보수적인 마모 추세 예측을 위해서는 의미 있는, 즉, 한주기 동안 마모가 많이 진행된 시점과 그 이전 시점의 와전류탐상검사 결과를 포함하여야 할 것으로 판단된다.
- [WCAP-12866]에서 제시한 2종의 와전류검사 표준시험편을 사용하여 검사를 수행한다면 검사 오차 10%는 고려할 필요가 없는 것으로 판단된다.
- 안내관에 대하여 80% 마모를 보수 기준으로 보는 것은 충분히 보수적인 것으로 판단되고, 차기 검사 시기도 80% 마모를 기준으로 설정하는 것이 합리적으로 판단된다. 다만 보수적인 성향의 원자력발전소 정비지침을 고려하여 검사 시기는 매주기 계획예방정비 시 수행하는 것으로 유연하게 적용하는 것을 추천한다.
- 따라서 본 연구 결과를 통해 ECT(와전류탐상검사)를 매주기 계획예방정비 시 수행하고, [WCAP-12866]을 활용하여 차기예상마모율을 산출함으로써 경우에 따라 발생할 수 있는 정비를 줄여 작업자의 불필요한 피폭을 저감시키고 원자력 발전소 안전운영의 신뢰도 제고를 기대하는 결론을 도출하였다.

## 감 사

한국수력원자력에 입사 이후 한빛 원자력본부 제1발전소 계측제어팀에서 지금까지 근무를 하고 있습니다.

발전소에 근무하면서도 원자력에 대한 저에 지식은 항상 부족하기만 했습니다. 이런 저에게 석사학위 과정의 길은 어쩌면 행운이었는지 모르겠습니다. 학위 과정을 진행하면서 발전소에서 얻은 경험을 정립하는데 도움이 되었고 깊이 있는 공부를 할 수 있는 기회가 되었습니다. 위 논문의 연구 또한 계측제어팀에서 근무 중 경험한 사례를 토대로 당시에 놓쳤던 부분까지 재정립을 통해 보다 깊이 있는 공부를 할 수 있는 기회가 되었습니다.

이 모든 것은 훌륭한 교수님들의 애정 어린 지도와 같이 공부했던 선배님들의 아낌없는 조언과 헌신적인 도움이 없었더라면 불가능했을 거라는 생각이 듭니다. 퇴근 후 교육훈련센터 강의실 불을 환하게 켜 채 서로 격려하며 같이 공부하던 시간들은 이제 저에게는 잊지 못할 추억으로 남을 것입니다. 먼저 본 논문을 지도해 주시고 뜨거운 열정과 자상함으로 저를 이끌어주신 나만균 교수님께 진심으로 깊은 감사의 말씀 올립니다. 그리고 학과 수업시간에 변함없는 애정과 관심으로 격려해주신 정운관 교수님, 김진원 교수님, 이경진교수님, 김종현 교수님, 송종순 교수님 머리 숙여 깊은 감사를 드립니다.



## 참고문헌

- [1] KHNP, YGN 1&2 DFMS system manual, 2007.
- [2] KHNP, Technical Correspondence, Technical Report of Expected In-core Thimble Tube Wear Rate, 2017.
- [3] WESTINGHOUSE, KNP-89-707 Flux Thimble Inspection Report Analysis & Safety Evaluation, Yonggwang Unit 2, 1989.
- [4] WESTINGHOUSE, WCAP-12866 Bottom Mounted Instrumentation Flux Thimble Wear, 1991.
- [5] KOREA PLANT SERVICE & ENGINEERING, DFMS ECT FINAL REPORT, 2017.
- [6] J.F. Archard, "Contact and Rubbing of Flat Surfaces," Journal of Applied Physics, Vol. 24, No. 8, pp. 981-988, 1953.