

영광원자력 5호기 제1주기 1차 가동중점검 수행 결과 The Results of First In-Service Inspection for Younggwang Nuclear Power Plant Unit 5

김영호, 윤병식, 김용식, 남민우, 이희중
한전 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

김한중, 문용식, 김왕배, 박철용
한국수력원자력(주)

요 약

2003년 4월 영광5호기 제1주기 1차 가동중점검(ISI : In-Service Inspection)를 전력연구원과 한수원(주)가 공동으로 수행하였다. 원자력발전소 운전에 따른 경년열화 등에 의하여 원자력발전소 주요 기기 및 재료 등에 손상이 발생할 가능성이 있어 원자력법 및 관련 기술기준에서는 비파괴 검사 방법을 이용하여 원자력발전소 주요 기기 및 배관의 용접부 등 취약 부위에 대한 건전성을 주기적으로 평가하도록 하고 있는데 이를 “가동중점검” 이라 한다. 영광 5호기 가동중점검은 기기, 배관 및 구조물 비파괴검사, 압력용기 자동 초음파탐상검사, 원자로 내부 구조물 육안검사 및 증기발생기 전열관 와전류탐상검사로 구분하여 수행하였으며, 그 결과, 기기, 배관 및 구조물과 원자로 압력용기 용접부에 대해서는 특이 사항 발생 없이 적용 규격에 만족되고 건전한 것으로 평가되었다. 그러나, 원자로 내부 구조물 육안검사 결과, 노심지지구조물의 주 지지빔 상부에서 길이 약 4mm, 폭 2mm 정도의 금속성 바이트 칩을 발견되어 이를 제거하였고, 추가 확인을 위해 원자로 내장품을 인양한 후 검사한 결과 원자로 Bottom Head와 Flow Skirt 사이에서 원통형 실린더 3개(열전달 완충판)가 발견되어 이를 제거하였다. 아울러, 원자로 하부의 내부 표면의 피복재 손상부위 2개소를 확인하였으며 이는 열전달 완충판이 떨어져 나오면서 원자로 하부 표면에 손상을 주었기 때문인 것으로 판명되었다.

Abstract

The first In-Service Inspection(ISI) was performed by co-work between KEPRI(Korea Electric Power Research Institute) and KHNP(Korea Hydro and Nuclear Power Co., Ltd.). As the age of nuclear power plant is increased, the possibility of the degradation of the major components and materials will be increased. So that, The major components and weldment of piping or vessel have to be inspected by the regulation code, this kind of work is called In-Service Inspection(ISI). The ISI for Younggwang unit 5 was conducted in four different fields, these are 1)all non-destructive inspections for components, piping weldments and structures, 2)Automated ultrasonic inspection for pressure vessels, 3)visual inspection for the interior structures of reactor, 4)eddy current inspection for heat exchange tubes of steam generators. As the results, there was no big indications except that three drop-offed pipes were found between bottom head and flow skirt in lower reactor vessel and it was turned out to be from thermal sleeves had been installed in the safety injection piping to reactor coolant piping line. Also, the bottom of reactor vessel was damaged by the impact of drop-offing thermal sleeves.

I. 서론

2003년 4월 영광5호기 제1주기 1차 가동중검사(ISI : In-Service Inspection)를 전력연구원과 한수원(주)가 공동으로 수행하였다. 원자력발전소 운전에 따른 경년열화 등에 의하여 원자력발전소 주요 기기 및 재료 등에 손상이 발생할 가능성이 있어 원자력법 및 관련 기술기준에서는 비파괴 검사 방법을 이용하여 원자력발전소 주요 기기 및 배관의 용접부 등 취약 부위에 대한 건전성을 주기적으로 평가하도록 하고 있는데 이를 가동중검사라 한다. 영광 5호기 가동중검사에서는 기기, 배관 및 구조물 비파괴검사, 압력용기 자동 초음파탐상검사, 원자로 내부 구조물 육안검사 및 증기발생기 전열관 와전류탐상검사로 구분하여 수행하였으며, 특히, 배관 용접부에 대한 초음파탐상검사는 국내 최초로 기량검증(Performance Demonstration : PD) 방법을 적용하여 검사를 수행하는 괄목할 만한 성과를 달성하였다.

○ 기기, 배관 및 구조물 비파괴검사

본 점검 차수의 점검 계획부위 총 616개소 중 코드요건 상 초음파검사 대상이 아닌 소켓 용접부 1개소와 계획예방정비기간 및 발전소 기동시 발전소에서 수행되는 육안검사 13개소를 제외한 기기, 배관 및 구조물 검사부위 309개소와 격납건물 라이너관 293개소 등 총 602개소에 대한 수동 초음파탐상검사, 액체침투검사, 자분탐상검사 및 육안검사 결과 특이사항 없이 건전한 것으로 평가되었다.

○ 압력용기 자동 초음파탐상검사

증기발생기 및 가압기 용접부 4개소에 대한 자동 초음파탐상검사 결과 증기발생기 '01' G2 용접부에서 9개, G4 용접부에서 1개 및 가압기 G1 용접부에서 4개 등 총 14개의 기록이 요구되는 지시가 검출되었으나 전량 용접부 루트에 존재하는 점(Spot) 형태의 지시으로써 코드 허용치를 초과하는 결함은 검출되지 않아 검사대상 용접부 모두 건전한 것으로 평가되었다.

○ 원자로 내부 구조물 육안검사

원전연료 인출후 원자로 내부 구조물 육안검사 결과 노심지지구조물의 주 지지빔 상부에서 길이 약 4mm, 폭 2mm 정도의 금속성 화이트 칩을 발견하여 제거하였고, 추가 확인을 위해 원자로 내장품 인양후 검사 결과 원자로 Bottom Head와 Flow Skirt 사이에서 원통형 실린더 3개(열전달 완충판)를 발견, 제거하였으며 원자로 하부의 내부 표면 피복재 손상부위 2개소를 확인하였다. 또한 수동초음파검사를 이용하여 열전달 완충판이 설치된 배관의 완충판 잔존 여부를 점검하였다. 이러한 검사 결과를 발전소에 보고하여 2건의 부적합사항보고서(NCR)가 발행, 처리계획에 따라 적절하게 조치되었다.

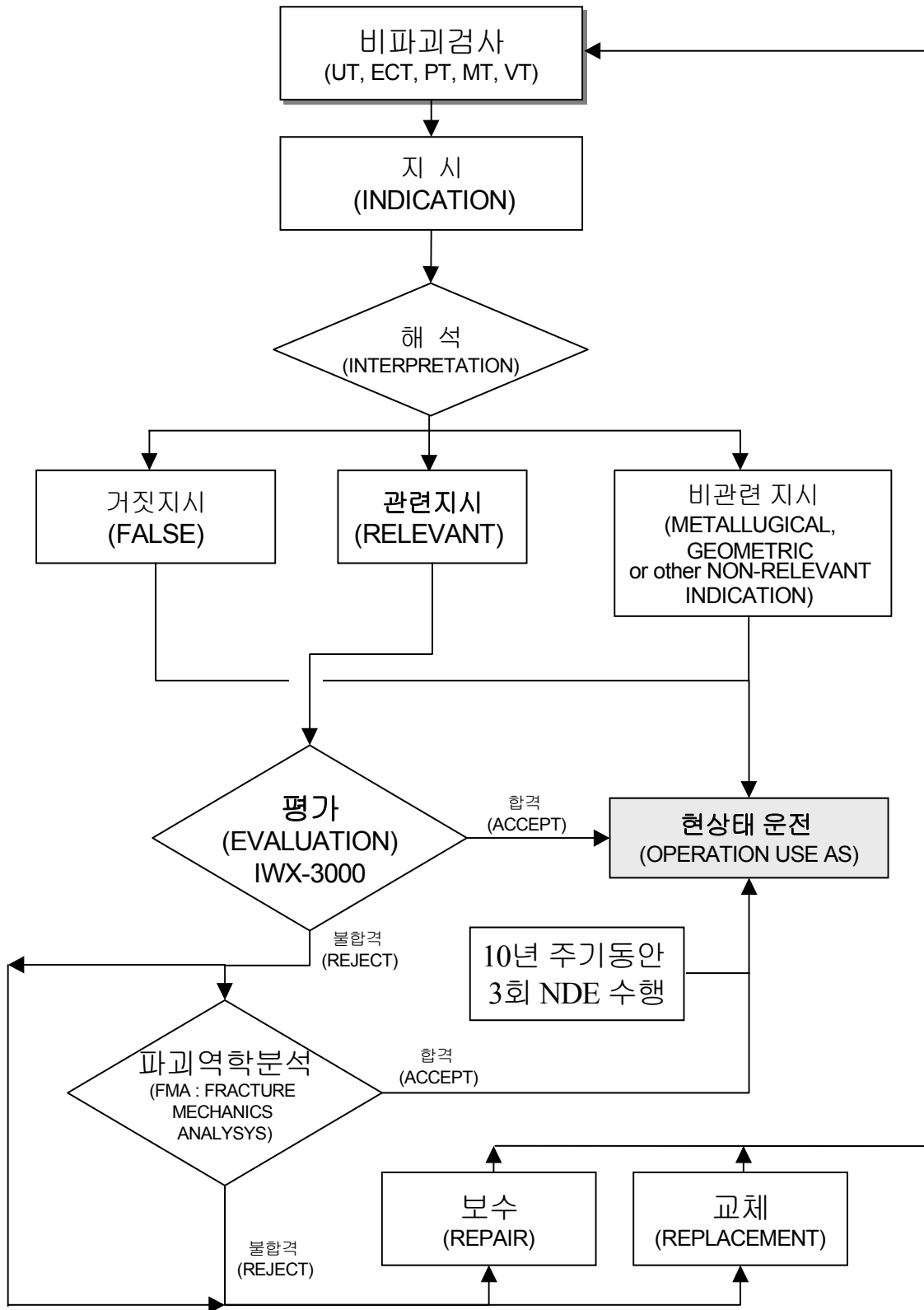
결함 전열관과 원자로 내부표면 피복재 손상부위를 제외한 영광5호기의 모든 가동중점검 부위는 건전한 것으로 평가되었으며, 이들 결함 전열관 및 피복재 손상부위는 관련 규격 및 절차에 따라 적절하게 조치되어 규제기준 및 적용규격에 만족함을 확인하였다. 특히 국내 최초로 기량검증(PD) 초음파탐상검사 기술을 시범 적용하여 향후 국내 기량검증 제도의 전면 시행을 대비하고 현재 구축중인 한국형 기량검증 시스템에 대한 사전평가의 계기가 되었을 뿐만 아니라 기존 기술로는 검사가 곤란하였던 Safe End 용접부에 대하여 종파탐촉자를 이용하여 검사하는 등 검사품질 및 신뢰성을 제고 하였다.

II. 본론

1. 가동중검사 일반

비파괴검사 각 분야별로 수행한 검사 결과는 해당 비파괴검사절차서의 검사기록지에 기록하며, 검사결과는 Level I 또는 Level II 유자격자가 기록한다. 비파괴검사 결과로 취득한 검사자료의 분석은 해당 분야 Level II 혹은 Level III가 절차서 요건 및 판정기준에 따라 평가를 수행한다. 발견된 지시를 평가한 결과 판정기준을 초과하여 조치가 필요한 "결함"(Defect)으로 평가되었을 경우에는 관련 내용을 해당 사업소에 통보한다. 비파괴검사를 통해 지시가 검출된 경우에 대한 처리 절차는 <그림 1>의 "비파괴검사 지시 처리 흐름도"에 나타냈다. 판정기준을 초과한 결함이

발견되어 해당 사업소의 요청이 있을 경우 코드요건에 따라 파괴역학분석을 수행하여 결함의 향후 거동과 안전성을 평가할 수 있다. 또한 보수 또는 교체 등의 조치가 필요할 경우에는 코드요건을 만족하는 조치내용을 사업소에 권고한다.



<그림 1> 비파괴검사 흐름도

2. 기기, 배관 및 구조물 비파괴검사

2.1 기기, 배관 및 구조물 비파괴검사

Class 1, 2, 3 기기, 배관 및 구조물에 대한 가동중점검은 Sec. XI의 Article IWB-2000, IWC-2000, IWD-2000, IWF-2000요건을 적용하여 수행하였다. 또한, 본 점검에는 ASME Sec. XI '96년도 추록을 포함한 '95년판 코드를 적용하였으며 비파괴검사기술은 Sec. XI, IWA-2200 코드 요건에 따라 초음파탐상검사(UT : Ultrasonic Testing), 액체침투탐상검사(PT : Liquid Penetrant Testing), 자분탐상검사(MT : Magnetic Particle Testing) 및 육안검사(VT : Visual Testing) 등을 적용하였다.

점검대상으로 선정된 기기, 배관 및 구조물의 부위에 대한 검사는 비파괴검사 기술별로 작성된 한수원(주) 가동전·중 점검 절차서에 따라 수행되었으며, 점검 방법별 부위는 총 309개소(Class 1 : 162개소, Class 2 : 133개소, Class 3 : 14개소)로써 초음파탐상검사 103개소, 액체침투탐상검사 62개소, 자분탐상검사 56개소, 육안검사 88개소이며, 점검 기기의 ASME 코드 안전등급 및 점검방법별 점검 기기 현황은 <표 1>, <표 2> 및 <표 3>과 같다.

2.2 격납건물 Liner Plate 비파괴검사

격납건물 Liner Plate의 가동중점검은 영광 5호기 장기 가동중점검 계획서에 따라 한수원(주) 가동중점검 절차서인 “격납용기 비파괴검사(검사-CV-01)”를 적용하였으며, ASME Sec. XI, Table IWE 2500-1에 따라 검사 범주별로 분류된 Liner Plate 압력유지 경계부, 관통 용접부, 내부표면, 밀봉부, 가스켓, 습기 차단장치, 이중급속 용접부, 볼트류 등을 포함한 점검부위는 총 293개소로 290개소에 육안검사를, 3개소에 액체침투탐상검사를 적용하였다. 상세 현황은 <표 4>에 명시하였다.

격납용기 검사 대상 중 연료 이송관 및 격납건물 장비 출입구 체결 볼트 9개에 대한 Bolt Torque or Tension Test는 ASME Sec. XI Table IWE-2500-1 Item No. E8.20의 Note (5)에 의거, 금번 계획예방정비시 연결부가 분해·조립되기 때문에 검사에서 제외하였다.

<표 1> 점검 등급(Class) 및 방법(Method)별 점검부위 현황

Class \ Method	계획/실적				
	UT	PT	MT	VT	계
Class 1	51/51	32/32	23/23	69/56(주1)	175/162
Class 2	53/52(주2)	30/30	33/33	18/18	134/133
Class 3	-	-	-	14/14	14/14
격납건물 Liner Plate 검사	-	3/3	-	290/290	293/293
합 계	104/103	65/65	56/56	391/391	616/602

주 : 1. 발전소 점검사항 13개소 :

Snubber 육안검사(VT-3) 6개소, 계통 누설검사(VT-2) 7개소

2. 점검 부위 변경 사항(검사 제외 : UT 1개소)

<표 2> 계통 및 등급별 점검부위 현황
(기기, 배관, 지지구조물 수동검사)

계획/실적

Class Method System	1				2				3	합계
	UT	PT	MT	VT	UT	PT	MT	VT	VT	
RPV ⁴	18/18		18/18	37/36						73/72
PZR	2/2			1/0						3/2
S/G	2/2			1/0	2/2		1/1			6/5
RC	26/26	26/26	5/5	8/5						65/62
CVC		1/1								1/1
SIS	3/3	4/4		2/2	18/17	25/25		14/14		66/65
RCP				12/8						12/8
RG		1/1		1/1						2/2
Valve ¹				5/4						5/4
Hx ²				1/0	2/2		2/2		3/3	8/7
Pump ³				1/0		2/2		1/1		4/3
CS					2/2	2/2				4/4
MS								1/1		1/1
FW					4/4		4/4	1/1		9/9
SD					3/3		3/3	1/1		7/7
AF					1/1	1/1			4/4	6/6
DG									5/5	5/5
CC									2/2	2/2
총계	51/51	32/32	23/23	69/56	32/52	30/30	10	18/18	14/14	279/265

주 : 1. Class 1 계통에 존재하는 모든 밸브
 2. RGHx, LDHx, CSHx, SCHx
 3. Class 2 계통의 LPSI Pump, HPSI Pump, CS Pump

<표 3> 계통 및 등급별 점검부위
(고에너지배관 검사)

계획/실적

Method System	UT	MT	계
MS	15/15	17/17	32/32
FW	6/6	6/6	12/12
총 계	21/21	23/23	44/44

<표 4> 계통 및 등급별 점검부위 현황
(격납건물 Liner Plate 검사)

계획/실적

검사대상 시험 항목	E-A	E-B	E-D	E-F	E-G	합계
Wall Liner Plate	87/87					87/87
Dome Liner Plate	34/34					34/34
Wall L/P Reinforcement	125/125					125/125
Dome L/P Reinforcement	27/27					27/27
RCB Penetration Welds		6/6				6/6
Wall Liner Plate						-
RCB Penetration Sleeve						-
Seal						-
Moisture Barrier			2/2			-
Dissimilar Metal Weld				3/3		3/3
Pressure Retaining Boltings					9/9	9/9
총계	273/273	6/6	2/2	3/3	9/9	293/293

2.3 결점사항보고서(CNF) 사항

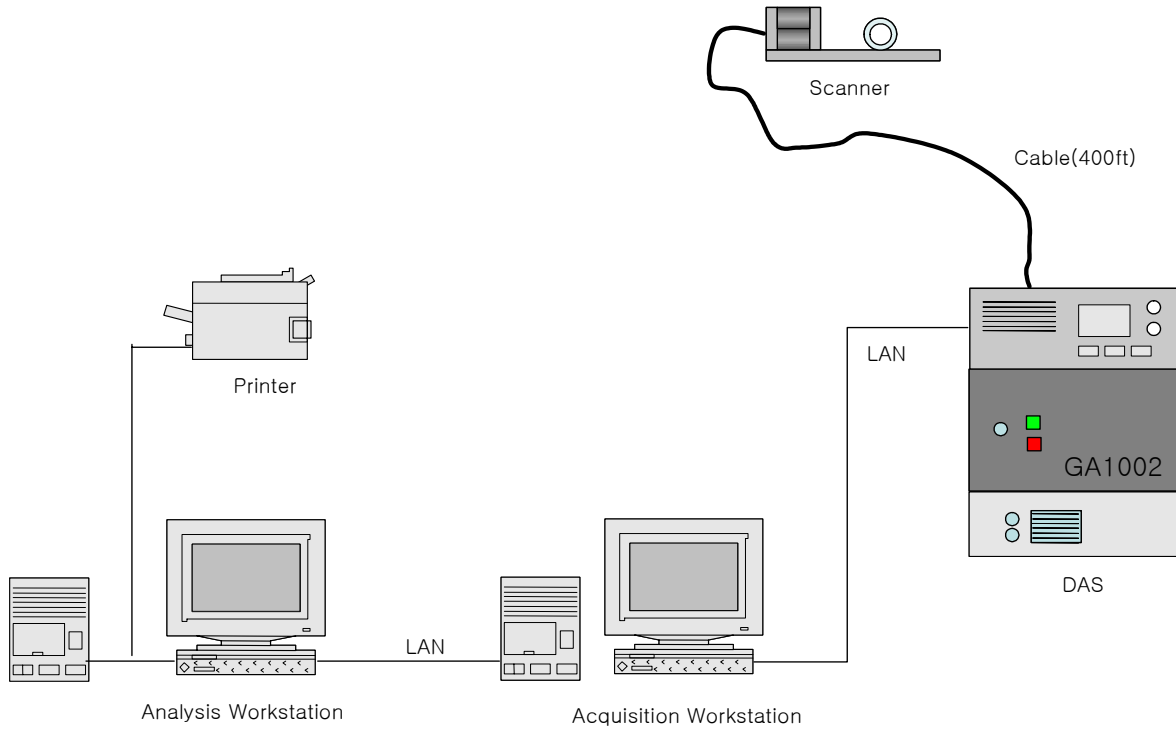
주증기배관 용접부에서 가동전검사(PSI)시 보고되지 않은 자분탐상검사(MT) 지시가 검출되어 이에 대한 추가검사(UT, PT, ECT, RT Film 검토 및 기술평가)를 수행한 결과 투자율 변화에 기인한 지시(Indication)로 확인되었다.

3. 압력용기 자동 초음파탐상검사

3.1 검사 장비

자동초음파검사 장비는 Westinghouse AMDATA에서 제작한 Multichannel 자동초음파검사 장비(I/UX-4r)로서 데이터 평가 소프트웨어 (IntraSpect, Version 5.7.1)를 내장하고 있는 최신 System이며, 영광5호기 검사에는 4-UT Channel로 구성하여 검사에 적용하였다. <그림 2>는 DC Servo Motor Scanner인 5080 Scanner와 GA 1002 Scan Controller를 이용한 자동초음파검사 시스템 구성도를 나타내고 있다.

마그네틱 휠이 부착된 Scanner는 CV내의 검사대상 용접부에 부착되어 컨테이너내의 DAS에 의하여 구동되며, 각각은 400 feet Cable로 연결되어 있다. 데이터 취득 시스템(HP C3600 Workstation)과 DAS는 LAN으로 통신을 수행하며 UT 신호처리에 필요한 위치 정보 및 초음파 신호를 수집하여 초음파 이미지를 처리하도록 구성되어 있다. 취득된 데이터는 각각 Magnetic Optical Driver로 Back-up하였으며 신호평가 중 필요에 따라 컬러레이저 프린터로 출력을 하도록 하였다. 자동초음파검사 System의 주요 구성품은 <표 5>와 같다.



<그림 2> 자동초음파검사장비 시스템 구성도

<표 5> 자동초음파검사장비 주요 구성품

장 비 명	제작사 및 Model	기 능
1. INTRASPECT 프로그램	미국 Wesdyne사	-UT신호취득/평가 프로그램 -Scanner 원격 제어
2. HP Workstation	HP 3600	INTRASPECT 프로그램 운영
3. DAS(Data Acquisition System)	Wesdyne	검사 Data 취득
4. Motion Control System	Wesdyne GA1002	Scanner 제어
5. Scanner & Guide Track	5080	용접부 원격 Scan
6. UT Pulser/Receiver	Wesdyne, 4CH	초음파신호 발생 및 처리
7. Transducer	W Triplex/Duplex	초음파 발생 및 수신
8. Cable (400ft)	Wesdyne	CV내 스캐너와 컨테이너내 장비 연결
9. Calibration Block	영광 3발전소	장비 보정

10. Standard Block	IIW & Rompas	장비 보정 및 점검
11. Intercom	미국David Clark사	CV내와 콘테이너 검사자 통신
12. Beam Simulator	CALin	장비 Linearity Check
13. UPS	경신기전	무정전 전원 공급
14. 온도계	EXTECH 42525	용접부 표면 온도 측정

3.2 검사 결과

검사대상 4개 용접부에 대한 자동초음파검사 데이터를 평가한 결과, 신호 진폭이 20% DAC을 초과함으로써 기록이 요구되는 지시(Recordable Indication)는 증기발생기 '01' G2 용접부에서 9개, G4 용접부에서 1개, 가압기 G1 용접부에서 4개 등 총 14개가 검출되었으며, 가압기 G2에서는 지시가 검출되지 않았다. 이러한 지시를 분석하기 위해서 PSI 및 방사선투과검사 데이터를 포함한 이전에 수행한 비파괴검사 기록과의 상호 상관관계를 검토한 결과 검출된 지시들의 진폭은 전체적으로 유사하였으며, 모두 Fit-up 루트 용접 패스 부근에 위치하고 있는 것으로 분석되었다. 지시가 검출된 용접 패스부위는 백가우징이 적절하게 이루어지지 않을 경우 일반적으로 지시가 흔히 발생하는 부위이다.

모든 지시는 동일한 Metal path위치에서의 20% DAC과의 비교를 통하여 평가를 수행하였으며, 거리에 따른 빔 분산 등을 고려하여 지시들을 평가한 결과 모든 지시들은 용접과 관련된 Spot 반사체로서 관통깊이(through wall depth) 측정이 요구되지 않는 지시로 최종 평가되었다. 또한 자동검사제한 부위에 대한 수동 초음파검사 결과, 진폭이 20% DAC이상으로 기록이 요구되는 지시가 증기발생기 '01' G2 용접부에서 1개, 가압기 G1 용접부에서 1개 등 총 2개가 검출되었으며, 지시들은 자동초음파검사에서 검출된 지시와 동일한 용접 Spot지시로 평가되었다.

4. 원자로 내부 구조물 육안검사

원자로 내부 구조물 육안검사는 영광 5호기 장기 가동중점검계획서 요건에 따라, 접근 가능한 부위를 대상으로 압력용기 내부¹⁾ 표면은 매 1주기(10년)동안 4회, 벨트라인 내와 위아래²⁾에 부착된 내부 부착물은 접근 가능한 부위를 대상으로 1회, 핵연료지지 구조물³⁾은 3회의 점검을 수행토록 되어 있다. 금번 점검에서는 Sec. XI, Table IWB-2500-1요건에 따라, 접근 가능한 부위를 대상으로 압력용기 내부와 핵연료지지 구조물에 대한 수중 원격 육안검사(VT-3)를 수행하여 건전성을 평가하였다.

Lower Internals Assembly를 제거하지 않은 상태에서 수행한 1차 육안검사 결과 Core Support Structure의 Main Support Beam 상부에서 이물질이 발견되어 2차 육안검사를 수행하였다. 이 결과, 원자로 안전주입배관에서 이탈된 열충격 완충판(Thermal Sleeve)이 Bottom Head와 Flow Skirt 사이에서 발견되어 이를 제거하였고, Thermal Sleeve가 위치한 인접 구조물의 건전성을 점검하기 위하여 수행한 3차 육안검사를 통하여 Bottom Head에서 손상부위를 발견하였다. 손상부위에 대한 조치로서, 필요한 Indication Replica Jig를 설계하여 지원하였고, 본 Jig를 사용하여 Bottom Head Indication의 탁본을 생성, 안전성평가에 사용하였다. 또한 Thermal Sleeve 이탈로 인하여 Cold-Leg 배관 및 CSB⁴⁾ 외면에 발생할 수 있는 손상여부를 점검하기 위하여 4차 육안검사를 수행하였다. 육안검사와 병행하여 Thermal Sleeve의 잔존 여부를 확인하기 위하여 원자로 안전주입배관의 외부에서 초음파탐상검사(UT)를 수행하였다.

4.1 검사 장비 및 자재

본 점검에 사용되는 수중 원격육안검사 시스템은 아래 <그림 3>에 나타낸바와 같이 원자로 압력용기 내면 및 내장품의 원격 육안검사가 가능한 컬러 CCD⁵⁾ 카메라 및 조명장치, 디지털 녹화

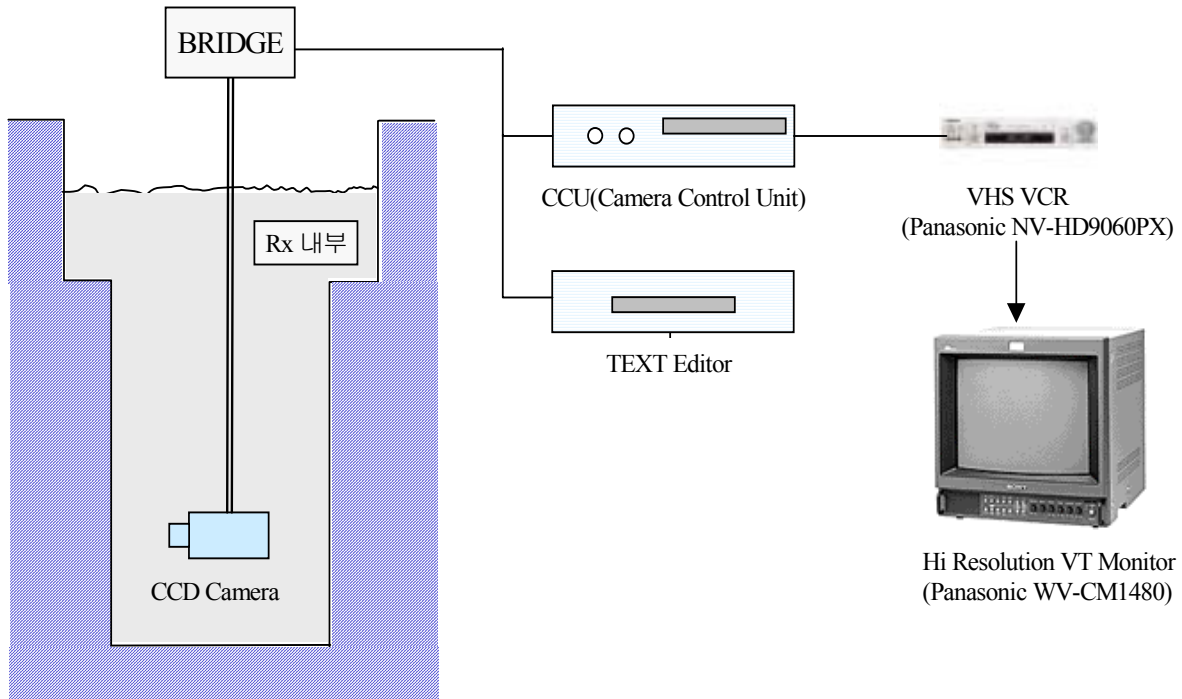
1) 원자로 압력용기 내부 : "Vessel Interior(VT-3)"

2) 벨트라인 내 및 위아래 : "Interior attachment within(VT1) & beyond beltline region(VT-3)"

3) 핵연료지지 구조물 : "Vessel core support structure(VT-3)"

4) CSB : Core Support Barrel : 노심 지지동체

및 감시장치, 카메라 거치대 등으로 구성되어 있다.



<그림 3> 원자로 내부 육안검사 장치도

<표 6> 원자로 내부 육안검사 장치 구성품

기기명	모델	제작사
1. Camera Ass'y	SC-18	미국 ROS
2. Pan/Tilt Ass'y	PT-5	"
3. Camera Cable	30m	"
4. Integrated Camera Controller	-	"
5. VCR	HR-S	JVC
6. Monitor	PMCS14	PELCO
7. VIDEO Typewriter	VTW150	JVC
8. Lighting	HPS-1000	ROS
9 Camera Poles	3m/개, 6개	KEPRI

4.2 육안검사 결과

Lower Internals Assembly가 설치된 상태에서 카메라로 접근 가능한 부위(Vessel Flange, Core Barrel, Core Support Structure)를 대상으로 육안검사를 수행한 결과 Core Support Structure의 Main Support Beam 상부에서 길이 약 4mm, 폭 2mm 정도의 금속성 바이트 칩이 발견되어 제거하였다. 1차 육안검사 결과 Lower Internals Assembly를 제거한 후 원자로 용기 하부의 이물질 존재 여부를 검사한 결과, Bottom Head와 Flow Skirt 사이에서 3개의 Thermal

5) CCD : Charge Coupled Device, 반도체소자 카메라

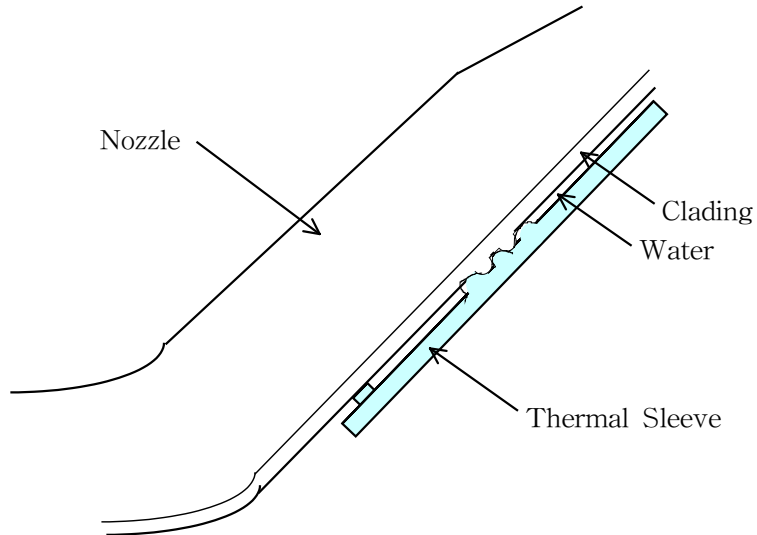
Sleeve가 발견되었다. 이의 처리를 위해서 CNF를 발행하여 관련 절차에 따라 조치토록 하였다. 2차 육안검사 결과로 발견된 Thermal Sleeve를 제거한 후 Thermal Sleeve가 위치한 인접 구조물의 건전성을 점검하기 위해 수행한 육안검사 결과, Thermal Sleeve에 의한 원자로 하부의 내부 표면 피복재 손상부위 2개소를 발견하여 치수를 측정하였다. 또한 손상 부위의 정확한 치수를 측정하기 위해서 3-D Laser Profilometry장비를 사용하여 2개의 탁본에 대한 정밀측정을 수행하였다. Thermal Sleeve 이탈로 인하여 Cold-Leg 배관 및 CSB 외면에 발생할 수 있는 손상여부를 점검하기 위해 수중 원격 카메라를 이용하여 접근이 가능한 Cold-Leg 배관 입구와 CSB 외면검사를 수행하였다.

<표 7> 원자로 육안검사 결과 요약

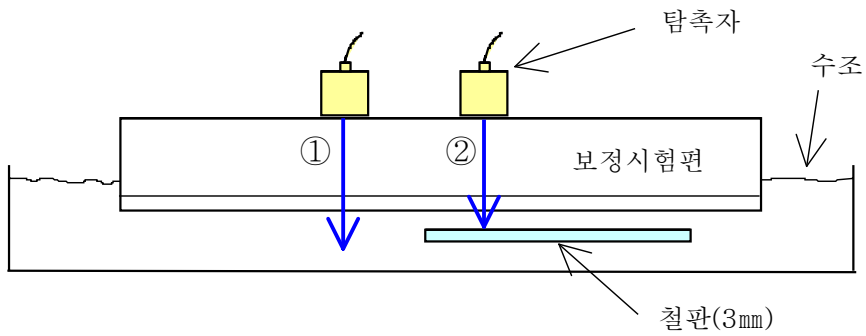
구분	검사부위	적용 요건	검사결과		비고
1차 육안 검사	가.Vessel Flange	ASME Section XI& V	구조물 건전성	만족	
			이물질 존재여부	만족	
	나.Core Shroud	“	구조물 건전성	만족	
			이물질 존재여부	만족	
	다.Core Support Structure	“	구조물 건전성	만족	
			이물질 존재여부	Main Support Beam 상부에서 흑갈색 이물질이 발견되어 제거함. *인출후 확인결과 : 길이 약 4mm, 폭 2mm정도의 흑갈색 바이트 칩	
2차 육안 검사	Vessel Lower Head	ASME Section XI& V	이물질 존재여부 및 인접 구조물 건전성	Thermal Sleeve 3개 발견	위치 : 20°, 190°, 340°
3차 육안 검사	Vessel Lower Head와 Flow Skirt 사이	ASME Section XI& V	이물질 존재여부 및 인접 구조물 건전성	340° 방향 Thermal Sleeve 양끝단 위치에서 2개 Indication이 발견됨	
4차 육안 검사	Cold-leg 배관입구 및 CSB외면	ASME Section XI& V	구조물 건전성	특이사항 없음	

4.3 Thermal Sleeve 잔존여부 확인 초음파검사 결과

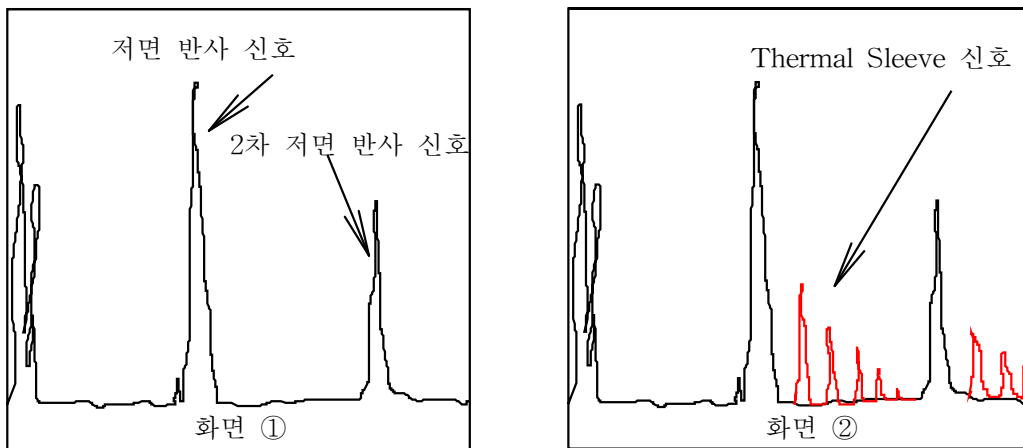
원자로 육안검사를 통하여 발견된 Thermal Sleeve의 이탈 위치를 파악하기 위하여 Thermal Sleeve가 설치되어있는 위치에서 초음파탐상 방법으로 잔존 여부를 확인하였다. 안전주입배관에 설치된 Thermal Sleeve의 개략도는 <그림 4>와 같으며, 이와 같은 형상에서 초음파 신호의 특성을 파악하기 위하여 <그림 5>와 같은 모의시험편을 구성하여 <그림 6>과 같은 결과를 얻었다. 즉, Thermal Sleeve가 정상적으로 장착되어 있는 경우는 <그림 6>의 ②와 같이 저면 반사신호 사이에서 작은 신호가 반복되어 나타났으며, 없는 경우는 이러한 신호가 나타나지 않았다. 이러한 모의시험을 바탕으로 Thermal Sleeve가 존재하는 4군데의 안전주입배관에 대하여 검사를 실시하여 <표 8>과 같은 결과를 얻었으며, 이에 대한 초음파 신호는 <그림 7> 및 <그림 8>과 같았다.



<그림 4> Safety Injection Nozzle 및 Thermal Sleeve



<그림 5> 모의시험편 배치도

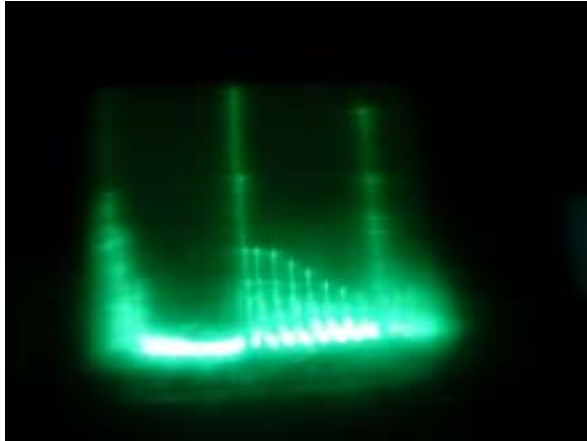


<그림 6> 모의시험에 대한 초음파 신호

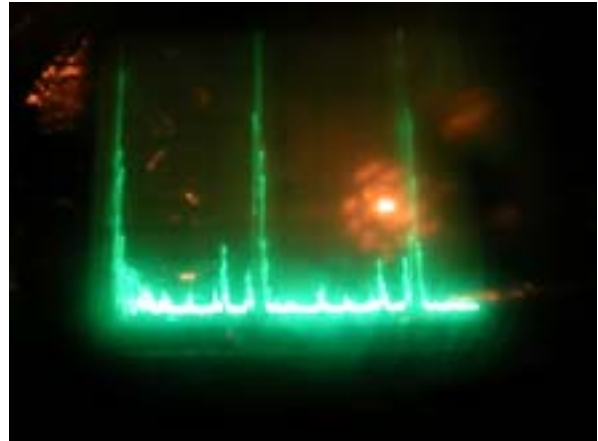
Loop 1A의 Safety Injection(SI) Nozzle과 Hot Leg의 Surge Nozzle에서 Thermal Sleeve의 존재가 확인되었다. Loop 1A SI Nozzle의 Thermal Sleeve의 가장자리는 Cone 경계부위에서 13.5inch 정도 위치에 있는 것으로 확인되었다. Loop 1A를 제외한 Loop 2A, 1B, 그리고 2B의 Thermal Sleeve는 존재하지 않는 것으로 확인됨으로서, 원자로 하부에서 발견된 Thermal Sleeve는 이곳에서 이탈된 것임이 확인되었다.

<표 8> Thermal Sleeve 잔존여부 확인 결과

Nozzle 명	Sleeve 존재 여부	Sleeve 경계 위치
Loop 1A	존재	Cone 경계에서 약 13.5"
Loop 2A	이탈	N/A
Loop 1B	이탈	N/A
Loop 2B	이탈	N/A



<그림 7> RCP 1A측 SI Nozzle UT Screen



<그림 8> RCP 2A측 SI Nozzle UT Screen

III. 결론

영광 5호기 기기, 배관 및 구조물에 대한 가동중점검은 제1주기 장기 가동중점검계획서(LTP)에 계획된 모든 점검 부위에 대하여 수행하였으며, 특히 사항 발생 없이 적용 규격에 만족되고 건전한 것으로 평가되었다. 특히, 자동초음파탐상검사를 통하여 증기발생기의 4개 용접부에 대한 건전성을 평가하한 결과 코드 허용치를 초과하는 지시는 검출되지 않았으나, 20% DAC를 초과하여 기록이 요구되는 지시(Recordable Indication)는 총 16개가 검출되었다. 다양한 평가기법을 사용하여 세밀히 분석, 평가한 결과 이들 지시들은 전량 용접 루트부에 존재하는 Spot 지시로 평가되어 별도의 조치가 필요하지 않는 건전한 것으로 판단되었다. 배관용접부에 대한 수동초음파탐상검사의 경우에는 국내 최초로 기량검증 방법을 적용하여 검사함으로써 결과의 신뢰도를 향상 시키는 중요한 계기가 되었을 뿐만 아니라, 후속 원자력발전소의 가동중점검사시 이를 적용할 수 있는 발판이 되었다는데 큰 의미가 있다고 판단된다.

육안검사는 카메라로 접근이 가능한 부위를 대상으로 수행하였으며, 점검중 발견된 이물질과 손상 부위에 대해서는 발전소에 보고하여 적절하게 조치되었다. 그러나, 발견된 손상부위는 향후 추이 관찰을 위해 차기 검사시 육안검사를 수행하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

증기발생기 전열관 와전류탐상검사 수행 결과, 관막음으로 권고된 4개의 전열관을 제외한 증기발생기 전열관의 건전성은 특별한 문제가 없는 것으로 나타났으며, 검출된 지시에 대해서는 지속적으로 관리하고 감시함으로써 증기발생기 전열관의 건전성 확보를 위한 노력을 경주하여야 할 것으로 판단된다.

이상과 같이, 전력연구원과 한수원(주)가 주관이 되어 국내 최초로 전력사 자체로 영광5호기 가동중점검을 성공적으로 수행하였으며, 이를 통하여 전력사 자체의 가동중점검 기술 능력을 배양하였고, 향후 발생할 수 있는 현장문제에 보다 적극적이고 능동적으로 대처할 수 있는 능력과 타 업체를 활용한 가동중점검시 그 작업 및 결과에 대한 감독 및 평가를 합리적이고 효율적으로 수행할 수

있는 역량을 구비함으로써 국민적 관심이 되고 있는 원자력발전소의 안전성 및 건전성 확립에 만전을 기할 수 있는 발판을 마련하였다는데 큰 의미가 있다고 판단된다.

※ 참고문헌

- [1] 영광 5, 6호기 최종 안전성 분석보고서 (FSAR)
- [2] ASME B&PV Code Section XI, "Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components", 1995 Edition & 1996 Addenda
- [3] ASME B&PV Code Section V, "Nondestructive Examination", 1995 Edition & 1996 Addenda
- [4] 미국 비파괴검사학회(ASNT) SNT-TC-1A, "Personnel Qualification and Certification in Nondestructive Testing", 1984 Edition
- [5] ANSI/ASNT CP-189, 1991 Edition
- [6] 미국원자력 규제법 및 규제위원회(US NRC)의 지침
 - (1) US NRC 10 CFR 50.55a, "Codes & Standards"
 - (2) US NRC 10 CFR 50 Appendix B, "Quality Assurance Requirements for Nuclear Power Plants and Fuel Reprocessing Plants".
 - (3) US NRC Regulatory Guide 1.65, "Material & Inspections for Reactor Vessel Closure Studs".
 - (4) US NRC Regulatory Guide 1.147, "Inservice Inspection Code Case Acceptability-ASME Section XI, Division 1"
 - (5) US NRC Bulletin 88-08, "Thermal Stress in piping Connected to Reactor Coolant Systems".
- [7] 영광원자력 5호기 1주기 장기 가동중점검 계획서
- [8] 한수원(주) 품질보증계획서 및 품질보증 절차서
- [9] 영광 5, 6호기 "Piping and Instrumentation Diagrams"