

원자력발전소 가동중검사 참여 경험

The Experience of In-Service Inspection for Nuclear Power Plant

김영호, 남민우, 김용식, 양동순, 양승한
한전 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

원자력발전소 운전에 따른 경년열화 등에 의하여 원자력발전소 주요 기기 및 재료 등에 손상이 발생할 가능성이 있어 원자력법 및 관련 기술기준에서는 비파괴검사 방법을 이용하여 원자력발전소 주요 기기 및 배관의 용접부 등 취약 부위에 대한 건전성을 주기적으로 평가하도록 하고 있는데 이를 “가동중검사”라 한다. 영광 6호기 가동중검사는 기기, 배관 및 구조물 비파괴검사, 압력용기 자동 초음파탐상검사, 원자로 내부 구조물 육안검사 및 증기발생기 전열관 와전류탐상검사로 구분하여 수행하였다. 원자력발전소 계통의 주요기기에 대한 비파괴검사 결과, 기기, 배관 및 구조물과 원자로 압력용기 용접부에 대해서는 특이 사항 발생 없이 적용 규격에 만족되고 건전한 것으로 최종 평가되었다. 특히, 배관 용접부에 대한 초음파탐상검사는 영광 5호기에서와 마찬가지로 ASME Code Sec. XI 1995년도 판에 따라 기량검증(Performance Demonstration : PD) 방법을 적용함으로써 검사 신뢰도를 확보하였다는데 큰 의미가 있다.

Abstract

As the age of nuclear power plant is increased, degradation of the major components and materials will be increased, therefore the major components and weldment of piping or vessel shall be inspected by non-destructive examination methods according to regulation codes. This work is called In-Service Inspection(ISI). The ISI for Yonggwang unit 6 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 were no big indications, and finally all indications detected during inspection were evaluated as the non-relavent indications. Especially for the weldment of pipes, PD(Performance Demonstration) was applied as a UT inspection method according to 1995 edition of ASME code Sex. XI, this resulted in improvement of the reliability of UT inspection.

I. 서론

원자력발전소 운전에 따른 경년열화 등에 의하여 원자력발전소 주요 기기 및 재료 등에 손상이 발생할 가능성이 있어 원자력법 및 관련 기술기준에서는 비파괴검사 방법을 이용하여 원자력발전소 주요 기기 및 배관의 용접부 등 취약 부위에 대한 건전성을 주기적으로 평가하도록 하고 있는데 이를 가동중검사라 한다. 영광 6호기 가동중검사에서는 기기, 배관 및 구조물 비파괴검사, 압력용기 자동 초음파탐상검사, 원자로 내부 구조물 육안검사 및 증기발생기 전열관 와전류탐상검사로 구분하여 수행하였으며, 특히, 배관 용접부에 대한 초음파탐상검사는 영광 5호기에서와 마찬가지로 기량검증(Performance Demonstration : PD) 방법을 적용하여 검사를 수행하는 괄목할 만한 성과를 달성하였다.

○ 기기, 배관 및 구조물 비파괴검사

본 점검 차수의 점검계획 부위는 UT 101개소, PT 61개소, MT 55개소, VT 95개소 등 총 312개소로 용접부 안전성 향상 대책에 따른 Class 1(4" 미만) 배관 UT 27개소(붙임 참조)를 추가로 수행하였다. 격납건물 라이너판 점검계획 부위는 총 292개소이며, 이러한 검사부위에 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 기록이 요구되는 지시가 검출되었으나 전량 용접부 루트에 존재하는 금속학적 비관련 지시인 점(Spot) 형태의 지시로써 검사대상 용접부 모두 건전한 것으로 평가되었다.

○ 원자로 내부 구조물 육안검사

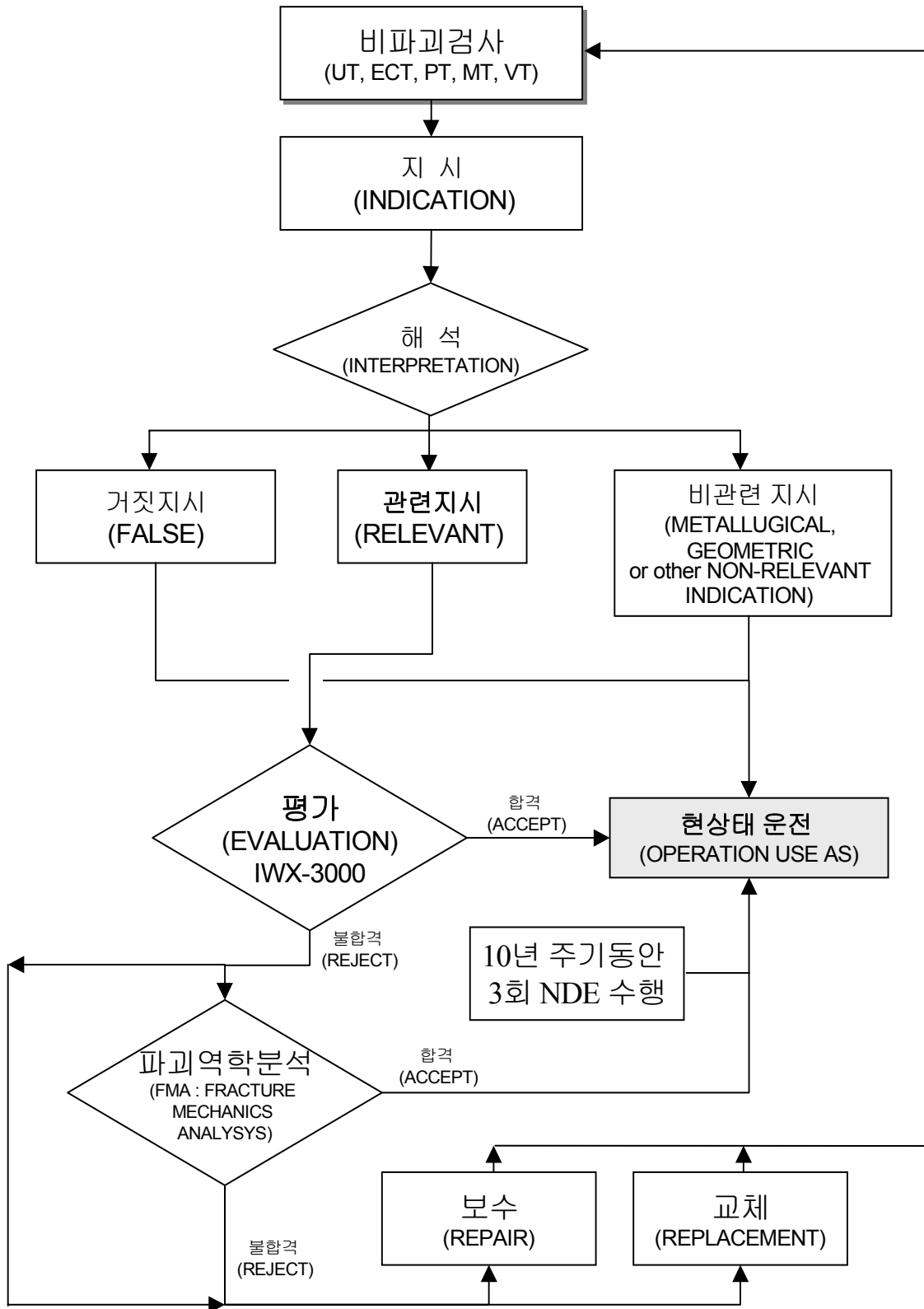
원자로 내부 구조물 육안검사는 Sec. XI, Table IWB-2500-1요건에 따라, 접근 가능한 부위를 대상으로 압력용기 내부와 핵연료지지 구조물에 대한 수중 원격 육안검사(VT-3)를 수행하여 건전성을 평가하였다.

영광 6호기의 모든 가동중검사 부위는 건전한 것으로 평가되었다. 특히 영광 5호기 적용에 이어 기량검증(PD) 초음파탐상검사 기술을 적용함으로써 향후 국내 기량검증 제도의 전면 시행을 대비하고 현재 구축중인 한국형 기량검증 시스템의 효용성을 입증하는 계기가 되었을 뿐만 아니라 기존 기술로는 검사가 곤란하였던 스테인레스 강의 용접부 관통 반대편 검사에 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 나타났다. 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 부위는 UT 101개소, PT 61개소, MT 55개소, VT 95개소 등 총 312개소와 용접부 안전성 향상 대책에 따른 Class 1(4" 미만) 배관 27개소에 대한 UT 검사를 추가하였다. 점검 기기의 ASME 코드 안전등급 및 점검방법별 점검 기기 현황은 <표 1>과 같다. 검사 결과 특이 사항 발생 없이 적용 규격에 만족하는 것으로 최종 평가되었다.

2.2 격납건물 Liner Plate 비파괴검사

격납건물 Liner Plate의 가동중점검은 영광 6호기 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, 이중금속 용접부, 볼트류 등을 포함한 점검부위는 총 292개소로 289개소에 육안검사를, 3개소에 액체침투탐상검사를 적용하였다.

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

Method \ Class	Method				계
	UT	PT	MT	VT	
Class 1	51/51	32/32	23/23	56/56	162/162
Class 2	50/50	29/29	32/32	25/25	136/136
Class 3	-	-	-	14/14	14/14
용접부 안전성 가검사(4"미만)	0/27	-	-	-	0/27
주급수배관 추가검사	-	-	0/11	-	0/11
총 계	101/128	61/61	55/66	95/95	312/350

<표 2> 계통 및 등급별 점검부위 현황 (격납건물 Liner Plate 검사) (계획/실적)

시험 항목 \ 검사 대상	시험 항목				합계
	E-A	E-B	E-D	E-F	
Wall Liner Plate(VT)	20/20				20/20
Dome Liner Plate(VT)	34/34				34/34
Wall L/P Reinforcement(VT)	125/125				125/125
Dome L/P Reinforcement(VT)	28/28				28/28
RCB Penetration Welds(VT)		6/6			6/6
Moisture Barrier(VT)			2/2		2/2
Dissimilar Metal Weld(PT)				3/3	3/3
KINS 요구사항(VT)	74/74				74/74
계(LTP)	281/281	6/6	2/2	3/3	292/292
추가검사	0/1,545				0/1,545
총계	281/1,826	6/6	2/2	3/3	292/1,837

3. 압력용기 자동 초음파탐상검사

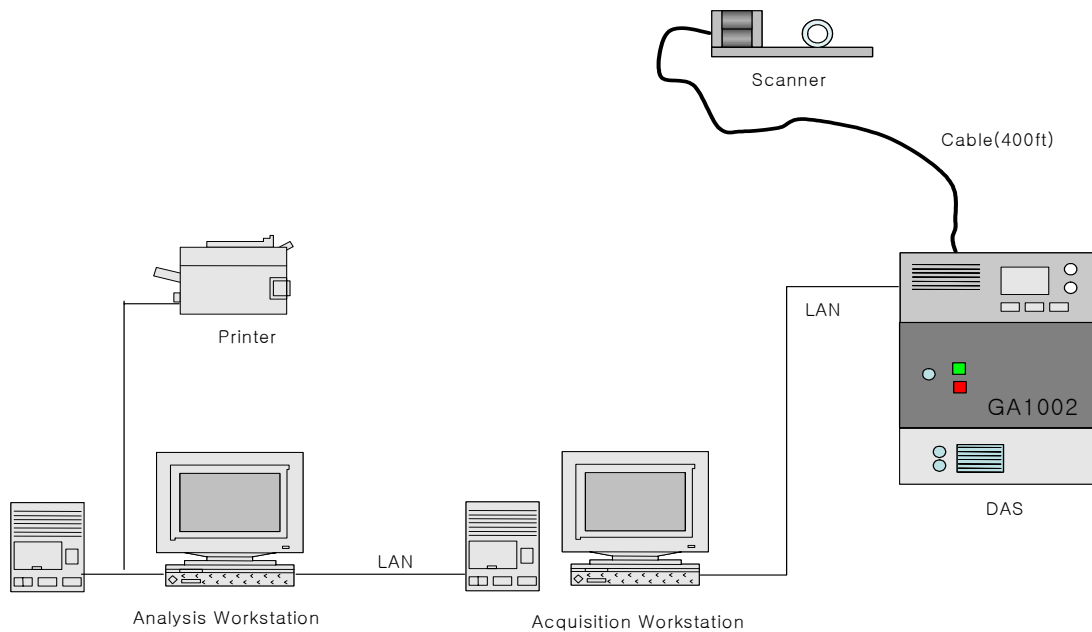
3.1 검사 장비

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, 영광 6호기 검사에는 4-UT Channel로 구성하여 검사를 수행하였다. <그림 2>는 DC Servo Motor Scanner인 5080 Scanner와 GA 1002 Scan Controller를 이용한 자동초음파검사 시스템 구성도를 나타내고 있으며 <표 3>은 주요 구성품을 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.

3.2 검사 내용

증기발생기 원주 용접부 2개소(G2, G4)와 가압기 원주 용접부 2개소(G1, G2) 총 4개 용접부에 대하여 자동초음파검사를 수행하였다. 용접부 주사를 위해 주사장치를 안내하는 Guide Track을 원주 용접부 중심으로부터 약 15인치 떨어진 위치에 용접부와 평행으로 설치하여 주사장치를 운전하였다. 검사에는 0°, 45°, 60° 3가지 각도 데이터를 동시에 취득이 가능한 3중 탐촉자(Triplex Tr)와 70° 각도의 2중 탐촉자(Duplex Tr) 등 2가지 탐촉자를 사용하여 코드에서 요구하는 검사체적(Examination Volume)을 검사하였으며, 탐촉자 주파수는 2.25 MHz이고 크기는 원형 3/4"를 사용하였다. 지시평가를 위해서 각 용접부의 보정시험편에 가공되어 있는 측면 가공홀(SDH¹⁾)을 이용하여 DAC²⁾ 곡선을 작성하였으며, 진폭이 20% DAC 이상인 지시들을 기록하였다.



<그림 2> 자동초음파검사장비 시스템 구성도

1) SDH(측면가공홀) : Side Drilled Hole
2) DAC(거리진폭보정) : Distance Amplitude Correction

<표 3> 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

3.3 검사 결과

검사대상 4개 용접부의 데이터를 평가한 결과, 신호 진폭이 20% DAC을 초과하여 기록이 요구되는 지시(Recordable Indication)가 검출되었다. 이들 지시의 분석을 위해서 가동전검사(PSI), 건설기록 및 방사선투과검사 자료를 포함한 이전에 수행한 모든 비파괴검사 기록을 종합하여 검토하였다. 이들 기록을 분석하여 상호 상관관계를 검토한 결과 검출된 지시들의 진폭은 전체적으로 일치하였으며, 모두 Fit-up 루트 용접 패스 부근에 위치하고 있는 것으로 평가되었다. 지시가 검출된 용접 패스부위는 일반적으로 백가우징이 적절하게 이루어지지 않을 경우 흔히 지시가 발생하는 부위이다. 모든 지시는 지시들의 해당 Metal path와 동일한 위치에 있는 보정 반사체(Calibration reflector)의 수직 빔 프로파일 20% DAC과 비교하였다. 이와 같은 빔 프로파일을 고려하여 지시들을 평가한 결과 모든 지시들은 용접과 관련된 Spot 반사체로서 관통깊이(Through wall depth) 측정이 요구되지 않는 비관련지시로 최종 평가되었다.

4. 원자로 내부 구조물 육안검사

4.1 검사 시스템

본 점검에 사용되는 수중 원격육안검사 시스템은 아래 <그림 3>에 나타낸바와 같이 원자로 압력용기 내면 및 내장품의 원격 육안검사가 가능한 컬러 CCD³⁾ 카메라 및 조명장치, 디지털 녹화 및 감시장치, 카메라 거치대 등으로 구성되어 있다.

4.2 검사 내용

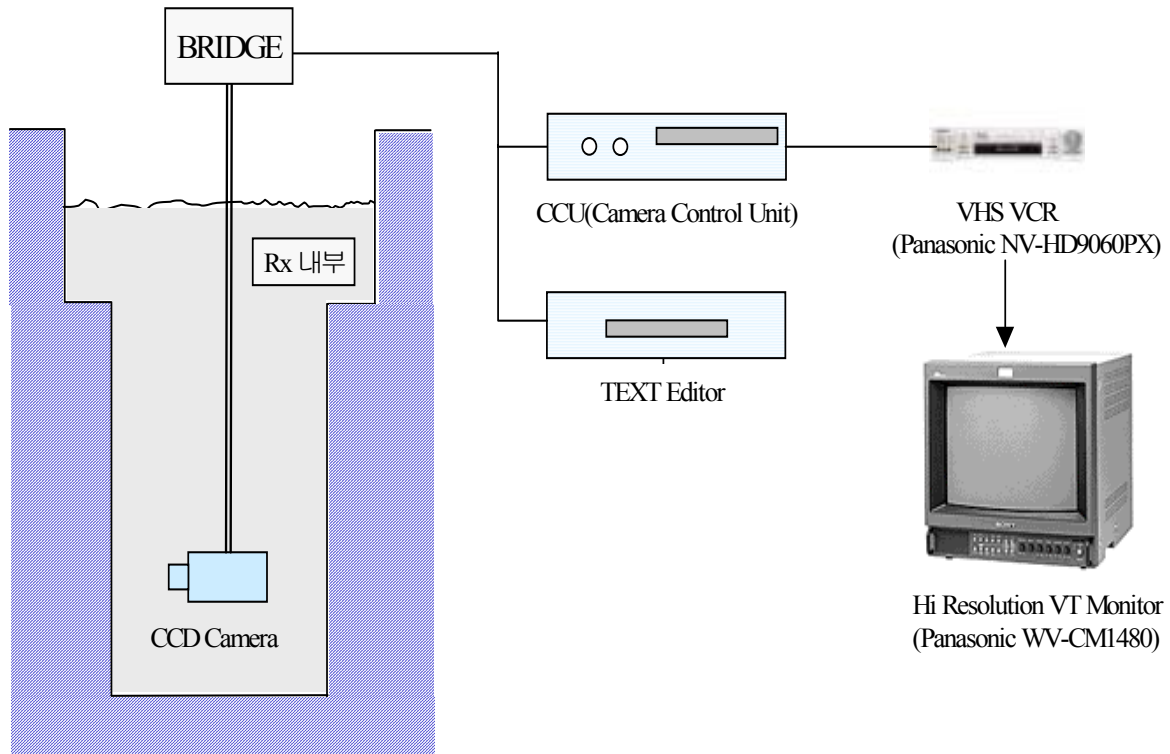
원자로 내부 구조물 육안검사는 영광 6호기 장기 가동중점검계획서 요건에 따라, 접근 가능한 부위를 대상으로 압력용기 내부⁴⁾ 표면은 매 1주기(10년)동안 4회, 벨트라인 内와 위아래⁵⁾에 부착된 내부 부착물은 접근 가능한 부위를 대상으로 1회, 핵연료지지 구조물⁶⁾은 3회의 점검을 수행토록 되어 있다. 금번 점검에서는 Sec. XI, Table IWB-2500-1요건에 따라, 접근 가능한 부위를 대상으로 압력용기 내부와 핵연료지지 구조물에 대한 수중 원격 육안검사(VT-3)를 수행하여 건전성을 평가하였다.

3) CCD : Charge Coupled Device, 반도체소자 카메라

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

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

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



<그림 3> 원자로 내부 육안검사 장치도

III. 결론

영광 6호기 기기, 배관 및 구조물에 대한 가동중검사는 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)가 검출되었으나 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 영광 5호기 가동중검사에 이어 기량검증 방법을 적용하여 검사함으로써 검사의 신뢰도를 향상 시키는 중요한 계기가 되었을 뿐만 아니라, 후속 원자력발전소의 가동중검사이 이를 적용할 수 있는 발판이 되었다는 데 큰 의미가 있다고 판단된다.

전력연구원과 한수원(주)가 주관이 되어 영광 5호기에 이어 가동중검사를 성공적으로 수행하였으며, 이를 통하여 가동중검사 기술 능력을 배양하였고, 향후 발생될 수 있는 현장 문제를 보다 적극적으로 능동적으로 대처할 수 있는 능력을 배양하는 계기가 되었으며, 타 업체를 활용한 가동중검사 수행시 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 마련하였다는 데 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