

발전설비의 유지보수와 비파괴검사 현황(I) - 화력발전소를 중심으로 -

Maintenance of Power Plant Facilities and Nondestructive Inspection(I) - Thermoelectric Power Plant -

박익근*

Ik-Keun Park*

1. 개 요

우리들의 일상생활에서 안전의 확보가 필수적이라는 것은 말할 필요가 없다. 공업제품이나 구조물은 사용 개시와 함께 열화가 시작되고 인간이 노화되면 청년기에 보였던 왕성한 기능을 다 할 수 없듯이 구조물 또한 사용 재료의 경년열화에 의해서 예기치 못한 기능의 손상이나 파괴사고를 일으키는 경우가 많다. 이는 마치 인간이 충분한 건강을 유지하기 위하여 정기적인 건강진단이나 성인병 예방진단이 필요하듯이, 재질의 열화 정도를 정확하게 진단하고 평가함으로써 기계나 구조물의 수명을 예측하고 파괴사고를 예방하는 것이 필요하다.

현재 국내 발전 설비의 상당부분은 60~70년대에 건설되어 노후화된 상태로 그 수명이 다해 사용 중지된 것도 있고 다해가는 것도 있다. 발전설비의 수명관리를 위한 핵심기술은 크게 발전설비의 열화 및 노후화 확인 평가를 위한 비파괴평가(NDE) 기술과 수명평가를 위한 파괴역학분석(fracture mechanics analysis; FMA) 기술로 분류할 수 있다. 비파괴검사기술은 수명관리의 첫 단계이며, 그 이후 이어지는 모든 수명관리 활동에 대한 기본 자료를 제공하는 핵심 과정이기 때문에 그 신뢰성 확보가 무엇보다도 중요하다.

발전설비의 건전성(integrity)을 확인하기 위해 정

기적으로 적용되는 비파괴검사가 보수검사(maintenance inspection)이다. 발전설비는 건설완료 후 운전을 시작하면 그 후 주기적으로 수행하는 계획예방정비기간(overhaul period)을 제외하고는 장기간에 걸쳐 계속적으로 운전될 뿐 아니라 발전설비 부품은 운전 중 고온, 고압, 부식, 기계적 응력 및 진동 등의 열악한 조건하에서 가동된다. 따라서 가동 중에 부품의 결함발생 혹은 조기 파손의 가능성이 매우 높다. 설비에 따라서는 설계 수명을 초과해도 건전성을 확인해가며 계속해서 사용하고 있다. 보수검사는 산업설비의 안전성 확보에 불가결한 기술로 균열 등의 결함을 조기에 발견하는 것뿐만이 아니고 그 결함이 사고로 이어질 것인지 아닌지를 판단할 필요가 있다. 사고로 이어질 가능성이 있는 결함이 검출된 경우에는 바로 보수 등의 대책을 강구하는 것이 가장 중요하다. 보수검사에서는 파괴에 결정적인 요인으로 작용하는 결함인가를 판단하기 위해 결함의 정보를 파악하는 것과 함께 결함의 성장을 아는 것이 중요하다.

다시 말해 발전설비는 엄격한 품질보증(QA)과 정기적으로 가동중검사(In-Service Inspection; ISI) 및 시험 또는 온라인 모니터링(On-Line Monitoring; OLM)을 실시하여 구조물의 안전성을 진단하고, 현재의 설비를 그대로 사용할 것인가? 또는 교체하여야 할 것인가? 그대로 사용한다면 취약부위는 어디

* 서울산업대학교 비파괴평가기술연구소(Research Institute for Nondestructive Evaluation, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743) E-mail: ikpark@snut.ac.kr

이며 언제 보수하여야 하는가? 또 교체한다면 그 시기는 언제인가? 등에 대한 기술적 예측이 필요하게 된다. 특히, 고온설비의 수명평가/연장기술(life assessment/extension technology)은 예방보수(preventive maintenance)단계를 넘어 예측보수(predictive maintenance)에 근거한 최적보수(optimal maintenance)를 목표로 하고 있다. 예측보수를 위해서는 수명을 정확히 판단하는 기술이 선행되어야 한다.

발전설비의 건전성을 주기적으로 확보하는데 경제성, 가반성(可搬性), 조작성(操作性) 등이 우수하고 현장 유용성이 검증되어 현재 많이 사용되고 있는 NDE 기법은 외부 결함탐상을 위하여 육안시험(VI), 침투탐상시험(PT), 자분탐상시험(MT) 등이 사용되고, 내부결함탐상을 위하여 방사선투과시험(RT), 초음파탐상시험(UT)[1], 와류탐상시험(ECT), 그리고 실시간 결함 탐상을 위하여 음향방출시험(AE) 등이 활용되고 있다.

본 해설에서는 화력발전소를 중심으로 각 비파괴 검사기술이 보수검사에 어떻게 적용되고 있는가에 대한 현황과 새로운 적용 예 등을 소개하고자 한다.

2. 화력발전소의 현황 및 비파괴검사 대상 및 방법

2.1. 현황

표 1은 전원별 발전설비 구성, 표 2는 화력발전소별 가동 운영기간, 표 3은 수력, 화력 및 원자력

발전소의 발전소 형식별 발전용량을 나타내고 있다. 표 4는 20년 이상 가동중인 화력발전소 현황을 나타낸다.

표 1 전원별 발전설비 구성

[단위 : 만KW(%)]

구 분	1998	2000	2005	2010	2015
원자력	1,202 (27.5)	1,372 (27.5)	1,772 (28.0)	2,343 (31.4)	2,765 (34.2)
석 탄	1,140 (26.0)	1,410 (28.3)	1,902 (30.1)	2,130 (28.5)	2,172 (26.8)
L N G	1,222 (27.9)	1,344 (26.9)	1,690 (26.8)	1,755 (23.6)	1,980 (24.5)
석 유	501 (11.4)	474 (9.5)	460 (7.3)	533 (7.2)	473 (5.9)
수 력	312 (7.2)	387 (7.8)	490 (7.8)	693 (9.3)	693 (8.6)
합 계	4,377 (100)	4,987 (100)	6,314 (100)	7,454 (100)	8,083 (100)

표 2 화력발전소별 가동 운영기간

운영기간 \ 구분	기 수	점유율 (%)	비 고
30년 이상	12 기	18.75	
20년 이상	21 기	32.81	
10년 이상	9 기	14	
10년 이하	22 기	34.3	
총 계	64 기	100	

* 작성 일자 : 2004년 3월 현재 건설중인 발전소 제외

표 3 발전소 형식별 용량

구 분			2000년 기준	
			용량(MW)	구성비(%)
수 력			3,130	7.1
화 력	기 력	석 탄	10,300	23.4
		국내탄	1,100	2.5
		중 유	4,340	9.9
		LNG	1,537	3.5
	복합화력		11,385	25.9
	내 연 력		155	0.4
소 계			28,817	65.6
원 자 력			12,016	27.3
합 계			43,963	100.0

표 4 화력발전소별 가동 운영기간 (20년 이상)

발전소명	구분	준공년도	사용기간	비 고
서울화력	4 호기	1971	33 년	
	5 호기	1969	35 년	
인천화력	1호기	1970	34 년	
	2호기	1974	30 년	
	3호기	1978	26 년	
	4호기	1978	26 년	
부산화력	3호기	1968	32 년	발전소 폐지
	4호기	1969	32 년	
영월화력	1호기	1965	35 년	발전소 폐지
	2호기	1965	35 년	
영동화력	1호기	1972	32 년	
	2호기	1979	25 년	
호남화력	1호기	1972	32 년	
	2호기	1972	32 년	
여수화력	1호기	1975	29 년	
	2호기	1977	27 년	
울산화력	1호기	1970	34 년	
	2호기	1971	33 년	
	3호기	1973	31 년	
	4호기	1979	25 년	
	5호기	1980	24 년	
	6호기	1981	23 년	
영남화력	1호기	1972	32 년	
	2호기	1970	34 년	
군산화력	1호기	1968	33 년	발전소 폐지
북제주화력	1호기	1982	22 년	
남제주화력	1호기	1979	25 년	
	2호기	1980	24 년	
평택화력	1호기	1980	24 년	
	2호기	1980	24 년	
	3호기	1983	21 년	
	4호기	1983	21 년	
서천화력	1호기	1983	21 년	
	2호기	1983	21 년	
삼천포화력	1호기	1983	21 년	
	2호기	1984	20 년	
보령화력	1호기	1983	21 년	
	2호기	1984	20 년	

2.2. 비파괴검사 대상 및 방법

표 5는 화력발전소의 비파괴검사 현황과 적용방법을 요약한 것이다.

표 5 화력발전소의 비파괴검사 현황과 적용방법

항 목	내 용
법 규제	· 전기사업법 - 용접부 사용전검사(변경인가 또는 신고대상)
유지보수 상태	· 계획예방정비 · 경상 정비 · 안전진단 및 수명평가
발전소 차이점	· 보일러 설비 · 고온·고압 · 재질 저탄소강 및 고합금강 · 터빈 3,600rpm · 발전용량 약500~800MW(신규)
비파괴검사 현황	· 계획예방정비 및 경상정비 기간에 안전진단·수명평가의 목적으로 결함 검출과 재질열화평가를 실시함.
비파괴시험 적용 방법	· 결함 검출 - RT, UT, MT, PT, ECT, UTT · 안전진단 및 수명평가 - 표면복제법, 경도측정, 입계부식법, 압입경도측정, 전기화학법, 응력해석, 소형파괴시험, 파괴시험 등

가. 용접부 사용 전 검사 : 변경인가 또는 신고 대상

- (1) 사용전검사 : 전기사업법 제61조 및 제 63 조에 동 시행규칙 제31조 적용
- (2) 검사 기관 : 산업자원부/한국전기안전공사
- (3) 검사 대상 : 발전소 운영기간이나 정비기간 중 용기 및 배관 설치·대체공사에 따른 변경공사계획인가 또는 신고 대상 기기
- (4) 비파괴검사 방법 : 비파괴검사 대상 기기에 대하여 기술기준에 따라 RT를 실시하며, 내압시험이 불가능한 기기는 비파괴시험으로 RT, UT, MT 및 PT 방법 중에서 하나를 선택하여 수행

나. 법정 검사(정기검사)

- (1) 정기검사 : 전기사업법 제65조 및 동 시행규칙 제32조 적용
- (2) 검사 기관 : 산업자원부/ 한국전기안전공사
- (3) 검사 대상 및 시기
 - 증기터빈 : 4년 이내
 - 가스터빈, 보일러, 열교환기 및 발전기 : 2년 이내
- (4) 비파괴검사 방법 : 정기검사 기간에 비파괴 검사 실시

다. 발전사업자(수검자) 자체 수행

- (1) 계획예방정비 : 전기사업법 정기검사 시기 및 발전소 유지보수, 안전진단 및 수명평가의 목적으로 일시 정지하여 수행

(가) 현장 비파괴검사 적용 현황
 법적 규제 요건이 없고 자체적으로 계획예방정비 기간에 유지보수, 안전진단 및 수명평가의 목적으로 비파괴시험 및 재질열화 평가를 실시

- ① 용접부 및 재질 결합 검출
 - RT, UT, MT, PT

② 용접부 및 재질 손상평가

- 표면복제법, 입계부식법, 압입경도시험법, 전기화학시험 및 경도 측정

- 재질 평가법으로 가장 많이 적용하고 있는 방법은 표면복제법

③ 배관 및 압력용기 부식에 따른 두께 감육 측정

- 초음파두께측정

④ 복수기 및 급수가열기 세관(전열관)검사

- ECT, LT(기밀 또는 수압시험)

- (2) 경상 정비 : 운전 중에 유지보수의 목적으로 수행하며 기기 중요도에 따라 비파괴시험을 실시

2.2.1. 비파괴시험 대상 및 방법

표 6에서 표 14는 각 설비의 기기별 비파괴검사의 대상과 방법을 나타내고 있다.

표 6 증기터빈

검사 대상	검사 부위	비파괴시험
Journal Bearing	베어링 면 및 베어링 바비트(Babbitt)박리	PT, UT
Thrust Bearing	베어링 면 및 베어링 바비트(Babbitt)박리	PT, UT
E.T.G Worm Gear	표면	PT
HP Loop Pipe Heating Bolt	표면	MT
HP, IP, LP Rotor	로터 본체 블레이드 루트부 Disc 직하 Grove 부위	MT, UT, 표면복제, 전기화학, 압입, 경도시험
HP, IP, LP Blade	Blade 면 블레이드 루트부	MT, UT
Coupling	저응력 저온부	표면복제 경도측정
HP, IP, LP Casing	케이싱 내, 외부 표면 케이싱 상부 1단 2단 내표면	MT, 표면복제, 경도측정
Diaphragm	2단, 3단, 8단, 9단	MT, 표면복제, 경도측정
HP, IP, LP Casing Bolt	Bolt면	MT, 표면복제
Nozzle Block	Nozzle Block의 표면	MT, 표면복제, 경도측정
터빈고온배관	HP, IP, LP 추기 배관 용접부	MT, UT, 두께측정
	Cross Over Pipe 용접부	MT, UT
	Loop Pipe 용접부	MT, UT, 경도측정

표 7 보일러

검사 대상	검사 부위	비파괴시험
Economizer Inlet Header	헤더 본체, 용접부 헤더, 헤더 내부	MT, UT, UTT, VT(내시경)
Feed Water Inlet Nozzle Stud	용접부 본체	MT, UT, UTT
Outlet Header	헤더 본체 용접부 헤더	MT, UT, UTT
Feed Water Outlet Nozzle Stud외	STUD 용접부 본체	MT, UT, UTT
Platen S/H Inlet Header	Header 용접부	MT, UT
	Tube 용접부	MT
	Nozzle 용접부	MT, UT
Platen S/H Outlet Header	Header 용접부	MT, UT, 표면복제, 경도
	Tube 용접부	MT, 표면복제, 경도
Rear Pendent S/H Outlet Header	Header 용접부	MT, UT, 표면복제, 경도, VT(내시경), 입계부식
	Tube 용접부	MT, UT, 표면복제, 경도, UTT
	Nozzle 용접부	MT, UT, 표면복제, 경도, UTT
Front Pendent S/H Outlet Header	Header 용접부	MT, UT, 표면복제, 경도, 입계부식
	Tube 용접부	MT, UT, 표면복제, 경도, UTT
Desuperhearer	Header 용접부	MT, UT, 표면복제, 경도
	Tube 용접부	MT, UT, 표면복제, 경도

표 8 드럼

검사대상	검사 부위	비파괴시험
Steam Drum	본체 용접부	MT, UT
	Down comer Stud 용접부	MT, UT
	Riser Tube Stud 용접부	MT
	Saturated Steam Tube Stud 용접부	MT, UTT
Supply Drum	본체	MT, UT
	Inlet Nozzle	MT, UT, UTT

표 9 주요배관

검사 대상	검사 부위	비파괴시험 방법
Main Steam Pipe Reheat Steam Pipe 기타 고압 배관	Y-PIECE 부 용접부 곡관부 LUG 용접부 직관부	MT, UT, UTT, 압입경도시험, 표면복제 입계부식

표 10 주요 밸브

검사 대상	검사 부위	비파괴시험 방법
MSV ICV CRV 기타 주요 밸브	밸브케이싱 내부 및 연결용접부 밸브케이싱 내부 용접부 밸브 부품	MT, UT, 표면복제, 경도,

표 11 발전기 로타

검사 대상	검사 부위	비파괴시험
주발전기	Gen Seal Ring Rotor Wedge Rotor End Ring	UT
	Gen Seal Ring Rotor Wedge Rotor End Ring Rotor Fan Blade	PT

표 12 급수펌프

검사대상	검사 부위	비파괴시험
MFP A, B, C	Journal Bearing	PT, UT
	Thrust Bearing	PT, UT
	Shaft, Impeller, Gear	MT
	GB Journal Bearing	PT, UT
	GB Thrust Bearing	PT, UT
	Motor Bearing(DE Side, NDE Side)	PT, UT
	Coupling Hub	MT
BFPT A, B, C	Journal Bearing	PT, UT
	Thrust Bearing	PT, UT
	Shaft, Impeller, Gear	MT
	Motor Bearing(DE Side, NDE Side)	PT, UT
	Coupling Hub	MT
	Casing	MT
	Rotor	MT, 표면복제, 경도

표 13 급수가열기

검사 대상	검사 부위	비파괴시험
급수가열기 (저압: 1, 2, 3, 4) (고압: 5, 6, 7, 8)	용기 본체	UT, LT
	맨홀 및 노즐 용접부	MT or PT
	경관	UT
	세관(전열관)	ECT, LT

표 14 복수기

검사 대상	검사 부위	비파괴시험
복수기 (BOX : 1, 2, 3)	세관(전열관)	ECT, LT
	세관(확관용접부)	LT

3. 화력발전소의 경년열화와 수명평가

3.1. 개요

화력발전소의 주요 고온배관 부재의 열화(gradation)·손상(damage)은 고온·고압하의 장시간 사용에 따라 품질, 성능, 강도 등이 저하하는 현상으로 기계구조물의 수명에측 또는 건전성 평

가를 위해 매우 중요하다. 현재 재료강도학적 검토 대상이 되는 열화의 종류는 크게 3가지로 나눌 수 있다[1]. 첫째 재질형 열화, 둘째 크랙형 열화, 셋째 표면손상 열화(피로, 부식 등 포함) 등으로 나눌 수 있으며, 재질열화는 내부까지의 재료의 변화를 동반하는 현상이며, 부식에 의한 열화는 주로 외부 표면 등과 같은 경계면의 열화 현상으로 생각되며, 파괴, 파손의 도중단계는 피로, 응력 부식 피로, 크리프 및 마모 등과 같은 현상을 들 수 있다.

최근에는 이러한 경년열화에 의한 파손사례는 최대 설계수명과 경제성 향상을 위한 가혹한 운전조건 등으로 인해 발전설비의 보일러 및 터빈 등에서 흔히 발견되어 문제 시 되고 있으며 이에 따른 사회적, 경제적인 손실은 물론 인명피해를 초래 할 수 있다. 현재 국내 화력발전소의 52% 이상이 운전 년 수가 20년을 넘고 있으며 30년을 경과한 것도 19%를 상회하고 있는 실정이다. 그러므로 이에 대한 대응책으로 고온부재의 경년 열화 평가 및 잔여 수명에측은 노후화된 고온설비의 안전성 및 효율적인 운전조건을 확보하기 위하여 매우 중요한 문제로 대두되고 있으며 설비의 노후화 정도를 정량적으로 평가할 수 있는 기술을 개발하여 설비의 열화도 평가에 대한 표준화 기술을 확보할 필요성이 요구되고 있다.

화력발전소 보일러, 터빈 및 증기파이프 등의 고온 배관부재에 경년열화·손상 평가에 주로 이용되고 있는 비파괴적 잔여 수명평가기술로는 Barkhausen Noise법[2], 전기저항법, 경도측정법, 표면복제법, 입계부식법, 전기화학측정법, 방사선 투과시험법 등이 보고 되고 있다. 이들 방법 모두는 측정개소가 매우 제한적인 뿐만 아니라 검사과정의 복잡하고 시험결과 도출에 많은 시간과 비용이 요구되며, 측정변수의 해석이 어려워 아직 시험결과에 대한 신뢰성이 낮아 현장 적용의 어려움이 수반되고 있는 것도 사실이다. 따라서 결함의 종류나 재료의 열화 정도를 조사하는 고감도, 고정밀도의 정량적비파괴진단·평가(Quantitative NDE; QNDE)기법의 확립이 불가결하며, 이것이 확립되지 않는 한 가동 중인 구조물들의 안전성 및 신뢰성 확보와 잔여수명에측기술의 비약적 발전은 기대할 수 없다.

각종 플랜트의 건전성과 신뢰성을 확보하고 그 기기의 수명연장을 기하기 위해서는 플랜트 기기

재료의 잔여수명평가에 관해 가동 중의 재료특성 변화의 파악, 그 메카니즘의 해명, 그리고, 재료열화의 조기검출에 대한 기술개발이 필요하다. 특히, 플랜트의 주요 장치재료에 대해 경년에 의한 재료 특성 변화의 조기검출이 중요하다. 이 재료특성 변화의 평가에서는 데이터베이스에 기초한 예측식, 열화의 시뮬레이션, 비파괴계측, 미소 파괴계측 등 여러 각도로부터 검토가 필요하다고 생각된다.

그림 1은 플랜트의 수명관리 및 예측보수의 고려방법의 기본을 나타내고 있다[3]. 재료특성의 경년변화는 사용중에 일어나는 재료내부의 조직변화에 의한 것이고, 전체가 취화의 진행, 크리프에 의한 균열, 피로균열, 응력부식균열의 진전 등이다. 이 중 재료전체의 취화에 의한 경년열화는 설계시 다시 말해 운전개시 시와 비교하여 파괴를 유발하는 한계가 되는 결함치수를 현저하게 감소시킨다. 그 결과 설계 시에 문제가 되지 않는 작은 균열도 파괴로 이어져 장치의 잔여수명을 단축하는 것이 된다. 따라서 잔여수명예측을 위해 재료 열화 및 결함의 정량적비파괴검사가 특히 중요한 과제가 된다.

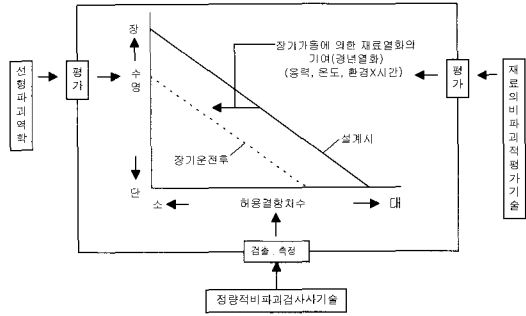


그림 1 수명관리 및 예측보수의 고려방법

그림 2는 손상의 정량화와 수명연장기술의 개발 개념을 예시한 것이다[3]. 이 그림에서 알 수 있듯이 고온에서 장시간 사용된 실기 부재의 정확한 경년열화의 실태를 측정하고, 이의 잔여수명의 연장을 실행하기 위해서는 역학적인 파라메타로 손상을 해석하는 것과 재료특성의 변화, 즉 조직변화에 기초한 열화기구의 해명이 절대적임을 설명하고 있다.

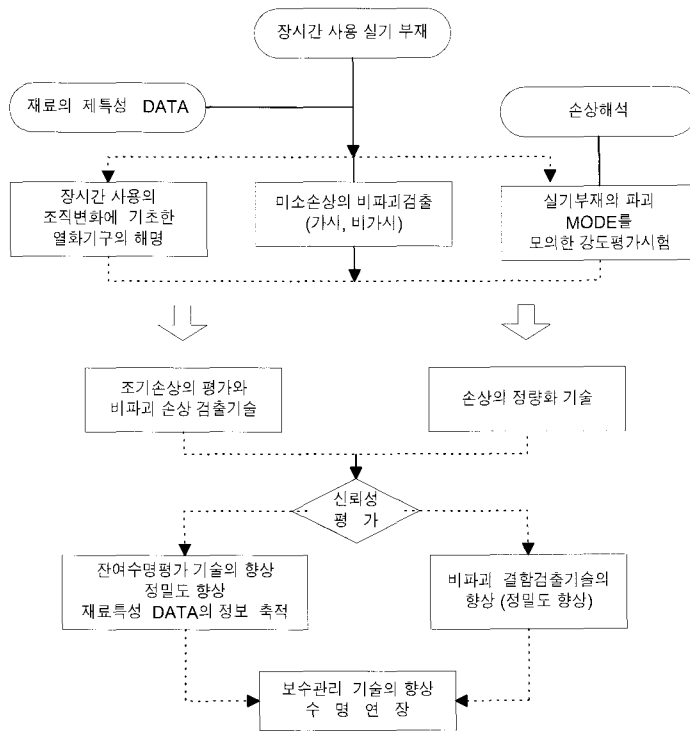


그림 2 손상의 정량화와 수명연장기술의 개발 개념[1]

3.2 경년열화 요인과 평가법

표 15와 표 16은 화력발전소 주요 설비의 기기별 경년 열화 요인과 평가법을 나타내고 있으며, 표 17은 화력발전소 주요 내압부의 손상원인을 분류한 것이다.

3.2.1 경년 열화 요인과 평가법

표 15 보일러 및 배관 설비

기기명	검사 부위	경년열화 요인	비파괴 시험	재질 열화 평가
드럼	배관연결부, 축방향 및 원주방향 용접부	열피로 균열	PT, MT, UT	응력해석법 표면복제법 입계부식법 경도측정
	본체, 배관연결부	부식감육	VT, UT	표면복제법 입계부식법
수냉관 헤더	배관용접부	열피로 균열	PT, MT	응력해석법 표면복제법 입계부식법
과열기 헤더	배관연결부 및 용접부	크리프 열피로 균열	PT, MT	"
재열기 헤더	배관연결부 및 용접부	크리프 열피로 균열	PT, MT	"
절탄기 헤더	배관용접부	열피로 균열	PT, MT	"
튜브 (수냉벽 제외)	튜브 및 용접부	크리프, 마모, 부식 열응력에 의한 피로	PT, MT, UT	표면복제법 입계부식법
주 배관 (주증기관, 재열증기관등)	배관용접부	열피로 균열	PT, MT	응력해석법 표면복제법 입계부식법
	축방향 및 원주방향 용접부	크리프	PT, MT, UT, RT	
주요밸브 (안전 밸브 등)	본체, Seat	마모, 열피로 균열	VT, PT, MT, RT	응력해석법 표면복제법 입계부식법

표 16 터빈 및 부속설비

기기명	검사 부위	경년열화 요인	비파괴시험	재질열화평가
터빈 (LP, IP, HP)	케이싱	피로, 크리프	MT, PT	표면복제법 입계부식법 압입경도측정 응력해석
	로타	피로, 크리프	UT, MT, VT	
	블레이드	피로, 크리프 침식, 부식	MT, UT	
	베어링	피로, 크리프	PT, UT	
발전기	로타	저주기 피로	UT, MT, VT	표면복제법 입계부식법 압입경도측정 응력해석 교류시험 직류시험
	End Ring	응력 부식 피로	MT, UT	
	고정자	절연물 열화 저주기 피로 온도 누적 부하 변동 기동 정지	MT, UT	
	베어링	피로, 크리프	MT, UT	
급수가열기 (저압: 1, 2, 3, 4) (고압: 5, 6, 7, 8)	용기 본체 맨홀 및 노출 용접부 경관 세관(전열관)	크리프 부식감육, 공식	MT 또는 PT ECT, LT	표면복제법
복수기 (BOX : 1, 2, 3)	세관(전열관) 세관(확관용접부)	크리프 부식감육, 공식	ECT, LT	-

표 17 화력발전소 내압부의 손상 분류(원인별)

원 인	비 율
열 피로	47 %
부식, 마모	16 %
재료, 시공불량,	16 %
크리프	11 %
기계적 피로	5 %
기타	5 %

3.2.2 기기별 손상기구

화력발전소 주요 설비의 기기별 손상기구를 세부적으로 나타내면 표 18에서 표 20과 같다.

표 18 보일러 및 배관 설비

설 비	손 상 기 구					
	Creep	Fatigue	Erosion	Corrosion	Dielectric Breakdown	Rubbing Wear
Drums		○		○		
Superheater Headers	○	○		○		
Reheater Headers	○	○		○		
Waterwall Headers		○		○		
Economizer Inlet Header		○		○		
Downcomers		○				
Main Steam Piping	○	○				
Hot Reheat Piping	○	○				
Superheater Tubing	○	○	○	○		
Reheater Tubing	○	○	○	○		
Waterwall Tubing		○	○	○		
Duckwork			○	○		
Precipitator			○	○		

표 19 터빈설비

설 비	손 상 기 구					
	Creep	Fatigue	Erosion	Corrosion	Dielectric Breakdown	Rubbing Wear
Rotor	○	○				
Shell	○	○				
Steam Chest	○	○	○			
Casing	○	○				○
Blades		○	○	○		
Generator Rotor		○		○		
Stator Windings		○	○		○	
Insulation			○			
Retaining Rings				○		

표 20 기타 설비

설비	손상기구					
	Creep	Fatigue	Erosion	Corrosion	Dielectric Breakdown	Rubbing Wear
Intake and Discharge Structures			○	○		
Structural Steel				○		
Stack Liners				○		○
Station Main Transformers				○	○	
Condenser			○	○		
Feedwater Heaters			○	○		
Instrumentation and Controls					○	○
Auxiliary Switchgear					○	○

4. 화력발전소 보수검사와 비파괴검사 기술의 적용

4.1. 화력발전소의 보수와 관리

화력 발전 설비의 보수·관리를 위한 보전 방법은 JIS Z 8115에서 분류한 바와 같이 그림 3과 같다[3]. 이는 보전 방법의 개념으로 발전 설비에서 예방보전이라는 것은 신뢰성을 상실하기 전에 보수를 하는 것이기 때문에 경년 시간, 경년·수리이력에 근거하여 보전을 실시하는 TBM(time based maintenance)과 설비진단을 실시하고 그 결과로부터 경년 상황이나 열화 상황을 잔여 수명 등의 관점으로부터 기술적으로 평가하여 보전을 실시하는 CBM(condition based maintenance)이다. 그림 4는 예방보전의 관점에서 본 화력발전 설비의 보수·관리 사이클을 체계적으로 나타내고 있다.

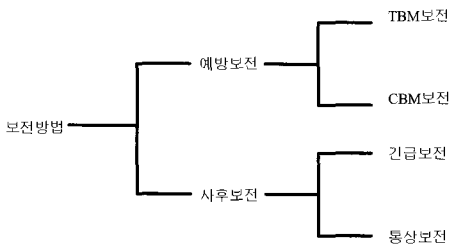


그림 3 보전 방법

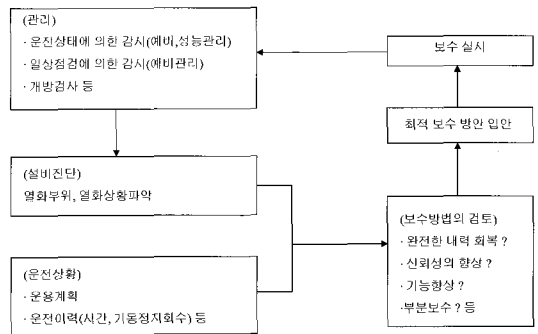


그림 4 화력발전 설비의 보수·관리

4.2 화력발전소의 기기의 수명

기기의 수명을 고려하는 데는 2가지를 들 수 있는데 하나는 설계수명에 대한 것이다. 기기를 설계하는 경우의 설계 수명에는 재료 데이터의 특성값에 대한 안전율이나 설계 단계에서의 안전율을 포함하는 것이 많고 실제의 운전조건은 설계 조건에 대해 안전 사이클인 경우가 많다. 그림 4는 기동 정지로부터 사이클 피로를 받는 감육 부재의 균열 발생, 균열 전진에 관한 일반적인 평가방법을 나타내고 있다. 그림 5와 같이 피로한계선도의 설계에서는 실선으로 나타내고 재료의 피로한도에 대한 여유값, 설계 단계에서 마진 등이 포함되는 것이 대개의 실상이다.

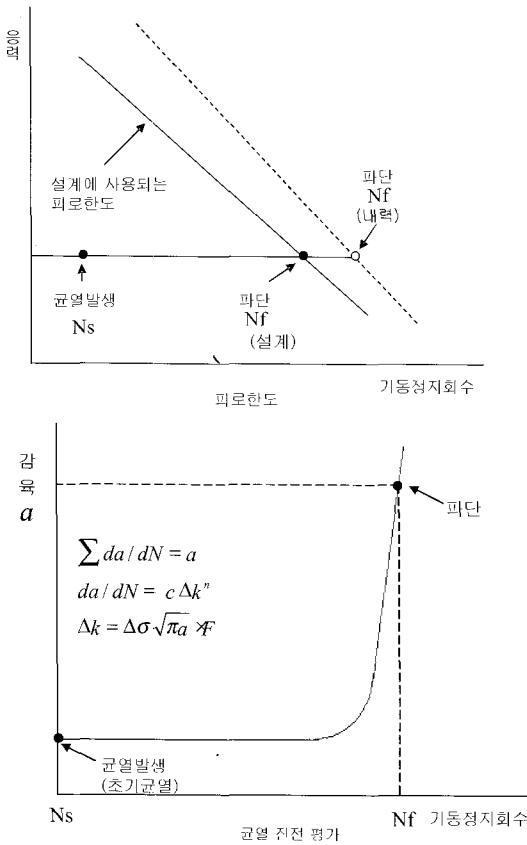


그림 5 균열 발생과 진전에 관한 평가 기법

4.3. 비파괴검사 기술의 적용

4.3.1. 방사선투과시험(RT)

방사선투과시험(RT)은 적용빈도가 가장 높은 비파괴시험 방법으로 방사선의 투과·흡수는 경년손상의 검출보다는 결함검출에 이용되고 있고, 방사선의 회절은 X선 회절 곡선의 반가폭의 측정이나 피로수명의 예측에 적용되고 있으나 크리프수명의 예측도 가능성이 보고된 바 있다. 양전자감소법은 양전자빔에 의한 금속중의 이온과의 상호작용을 이용하기 때문에 수소취화의 검출에 적용되고 있다. 국내 법규의 경우, X선 필름을 사용한 투과 촬영이 외의 적용은 인정되지 않고 있으나 ASME, API 등에서는 Image Intensifier(II)를 사용하는 투시법등 디지털 라디오그래피의 사용도 당사자간의 합의하에 인정되어지고 있다. 또한, Ytterbium 169 등의 저에

너지 γ -선이 실용화 되어, 소구경관의 RT 신뢰성 향상에 기여하고 있다. 게다가, 중성자 선원과 고에너지 X-선의 현장 검사에 적용도 모색되고 있다.

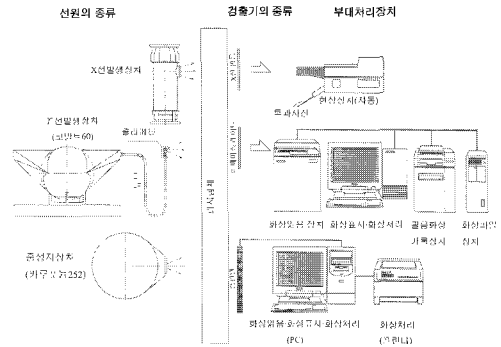


그림 6 보수검사에 적용되는 대표적인 방사선투과 시험 방법의 개념도

4.3.2 초음파탐상시험(UT)

그림 7은 현재까지 적용 또는 제안되고 있는 초음파탐상시험에 의한 보수검사 기법을 정리한 것이다. 에코높이와 그 변화를 이용한 기법, 전파시간차를 이용하는 방법 및 Spectroscopy법 등을 기본으로 한 여러 방법이 이용되고 있다. 최근에는 광범위 비파괴탐상을 효율적으로 수행할 수 있는 유도초음파(ultrasonic guided wave)법의 적용이 시도되고 있다[47]. 유도초음파는 구조물의 기하학적인 구조를 따라 전파하는 파로서 기존의 종파나 횡파를 사용한 국부검사(point by point)법에 비해 탐촉자의 이동없이 고정된 지점으로부터 대형 설비 전체를 한번에 탐상할 수 있어 기존의 비파괴기법에 비해 시간적, 경제적 효율이 뛰어나다. 또한 보온재나 제한된 공간으로 인하여 검사자의 접근이 곤란하고 복잡하다든가, 다양한 피검사체의 형상을 따라 원거리 초음파탐상이 어려운 발전설비의 보수검사에 적극 활용되고 있다. 반면 유도초음파는 상기와 같은 장점을 가지고 있음에도 불구하고 발전설비의 보수검사에 적용하는데 아직 해결되어야 할 어려움이 남아있다. 이는 유도초음파가 전파해가는 모드가 무한히 많이 존재함으로 인해 다양한 모드의 선택을 통한 측정 민감도를 향상시킬 수 있는 장점도 있지만, 여러 개의 모드가 동시에 수신될

때 신호해석과 모드확인(mode identification)이 어렵다는 것이다[8]. 그러나 이러한 문제를 극복하기 위한 노력으로 1990년대에 열 교환기 튜브나 파이프에 비파괴검사에 적용하기 위해 이론적 연구와 실험적 연구가 급속도로 진행되고 있다.

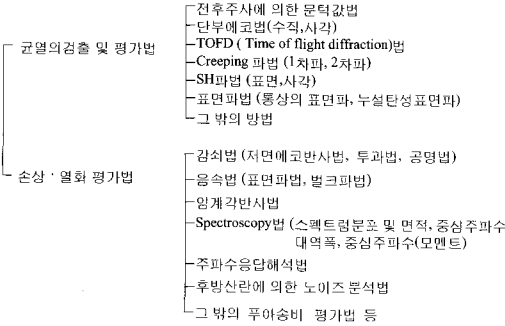


그림 7 초음파탐상에 의한 보수검사 기법

4.3.3. 자기탐상시험(MT, MFLT)

자기탐상법은 강자성체의 시험체를 자화하여 시험체 표층부에 존재하는 “자기적 불연속부(결함)”에 의해 공간에 누설되는 이른바 “결함누설자속(flux leakage flux)”을 검지·계측하여 결함을 검출 평가하는 비파괴검사 방법이다. 이 탐상법은 결함누설자속의 검출방법에 따라 자분탐상시험(magnetic particle testing;MT)과 누설자속탐상시험(magnetic flux leakage testing;MFLT) 2가지로 크게 나눌 수 있다. 두 가지 모두 원리적으로는 동일한 결함검사기술로 강자성 시험체를 자화시키면 내부에 자기(자속의 흐름)가 생긴다. 이 때 균열 등의

표면결합이 존재하면 자기저항차에 의해서 자속선이 흐트러지게 되고, 시험체 내부의 자속밀도가 높으면 자속의 일부가 외부공간으로 누설된다. 이것을 누설자속이라고 한다. 시험체의 표면에 강자성체의 분말 입자를 도포시키면 이 누설자속부에 그 입자가 부착되는데, 부착되어 모인 강자성 입자에 의해 형성된 지시모양(자분모양이라고도 함)을 관찰함으로써 결함의 존재여부·길이·형상 등을 알아낼 수 있다. 이것이 자분탐상시험(MT)이다. 자분모양의 폭은 결함의 폭보다 커지기 때문에 미세한 균열도 검출이 가능하지만 균열깊이에 대한 정보는 얻을 수 없다.

한편, 자분을 사용하는 신에 자계감응센서를 이용해서 균열의 누설자속밀도의 분포와 강도를 계측하고, 이것을 직접 전기신호로 변환시켜 결함을 평가하는 것이 누설자속 탐상시험법(MFLT)이다. 검출소자로서 Hall소자, 자기저항소자, SMD소자 등이 있고, 누설자속을 자속테이프의 자성 막에 전사하고, 그것을 자기헤드에서 전기신호로 재생하는 방법(magnetography)도 있다1). 균열 등의 결함 깊이, 결함 폭과 누설 자속밀도의 크기는 밀접한 관련이 있기 때문에 검출소자에서 누설자속밀도의 크기와 그 분포(또는 누설 자계의 강도와 분포)를 정량적으로 계측하면 결함 깊이도 평가할 수 있게 된다. 단, 이 기술로는 결함누설자속밀도의 크기가 시험체 표면에서 검출소자까지의 거리(이를 리프트 오프(lift off)라고 함)가 길어짐에 따라 현저하게 감쇠하기 때문에 리프트 오프(lift off)를 작게 고정하여 측정해야 한다. MFLT기술은 보수검사로의 적용의 입장으로 본다면 균열 검출능은 MT에 비교해서 다소 떨어지지만 균열의 정량적 평가와 자동화가 가능하다는 면에서 많이 사용되어지고 있다.

표 21 대표적인 방사선투과시험의 시스템의 특징

기술내용 시스템	감도 (촬영)	해상도 (검출능)	다이내믹 레인지 (데이터정보의범위)	실시간	화상의 내연화성	검출기의 유연성	검출기의 중량	계측의 작업성	데이터 보존용량	현장에서의 적용성
필름	○	◎	○	△	○	◎	◎	△	△	◎
이미징 프레이트	△	○	△	○	△	○	△	△	△	○
평판넬 센서	◎	△	△	◎	◎	△	△	◎	◎	△

※ ◎ → ○ → △ : 성능 또는 취급상의 우수성의 정도를 나타냄.

4.3.4. 기타 비파괴검사 방법

화력·복합발전소 보수검사에 활용되고 있는 그 외 비파괴검사 기술로는 침투탐상시험(liquid penetrant testing; PT)과 스트레인측정(strain measurement; SM) 등이 있고, 최근에 새로운 비파괴시험 방법으로는 비접촉법이 눈길을 끌고 있다. 피검사 재료나 구조물을 비파괴적으로 검사, 평가를 하기 위해서는 비접촉적으로 하는 것이 가장 이상적이다. 현재 비접촉에 의한 NDE 기법으로는 기존의 방사선투과검사(RT), 외전류탐상(ECT) 외에 공중전파초음파센서(air-coupled transducer; 이하 ACT라 한다)와 전자초음파탐촉자(electro-magnetic acoustic transducer; EMAT), 레이저 초음파(laser-based ultrasonics; LBU)에 의한 방법 등이 있다. 여기서 LBU는 레이저 조사에 의한 재료의 abrasion 손상 위험이 있고 아직 실험실 레벨로 현장 적용을 위해서는 해결되어야 할 문제가 많은 실정이다.

비접촉에 의한 전자초음파법의 비파괴검사에 응용은 기존의 접촉식 초음파검사에서 불가피한 접촉 매질(음향 결합제)을 사용하지 않고 검사대상(금속) 표면으로부터 수 mm정도 떨어져 초음파의 송수신이 가능한 1968년 Wallance의 논문이 발표된 이래 약 30년의 역사를 가지고 있고, 1970년대의 R. B. Thompson 등은 로렌쯔 힘 및 자왜효과를 이용한 EMAT의 구동 원리를 상세히 검토하였고, 1980년대에는 B. W. Maxfield 등에 의해 현재도 급속히 연구가 진행되고 있다.

EMAT법[12]은 기존의 압전소자를 이용하는 경우와 다르게 비접촉으로 초음파를 여기·수신이 가능하다. 다시 말해 외부 자계로 도체 표면에 근접시킨 자왜효과에 의해 도체 자체가 가진된다. 또 역의 과정으로부터 초음파를 수신하게 된다. 이 때문에 측정 대상이 도전 재료에 한정되어 비 접촉 측정이 가능하며, 거칠은 탐상면, 도막이 있는 부분 또는 고온 재료 등에 종래의 접촉식 초음파로 곤란했던 측정 대상물에 적용이 가능하게 된다. EMAT의 중요한 특징으로는 비접촉 측정이 가능하다는 것, 따라서 표면 처리가 불필요하고 코팅, 보호막 부착, 도막 등의 영향을 받지 않는다. 최근에는 또한 가지의 새로운 비 접촉 검사기법으로 공중전파 초음파 센서(ACT)를 이용한 공기결합 초음파법이 실현 가능해지고 있다. 종래, 공중 전파에 의한 초음파비파괴검사는 수십 KHz-200KHz의 저주파수를

이용하여 액체나 기체의 성질과 상태 평가 또는 공기 중에서의 거리 측정에 의한 형상 인식 등에 머물러 있었다. MHz order의 고주파수 대역에서 공기 중에서의 초음파의 고 감쇠성, 고체 재료와 공기와의 고 임피던스 미스매칭에 기인하는 감도의 저하가 그 원인이다. 그러나 D. W. Schindel 등에 의한 최근 개발된 콘덴사 형의 공기결합초음파센서(ACT)를 이용하는 것으로부터 100KHz - 2.3MHz의 광 대역에서 공중 전파 초음파를 발생하는 것이 가능하게 되고 이것을 고체 내부의 평가에 이용할 수 있게 되었다. 이러한 완전 비접촉비파괴검사기법을 이용하는 것으로부터 검사의 객관성 향상 및 온라인 검사에의 적용이나 검사의 자동화가 용이하게 되고 적용범위의 확대가 급속히 진행되고 있다.

감사의 글

본 해설 원고 작성에 자료를 제공해 준 한국전력 전력연구원과 한국전기안전공사 관계자 여러분께 감사드립니다. 그리고 한국비파괴검사학회지 4호에서는 발전설비의 유지보수와 비파괴검사 현황(II) - 원자력발전소를 중심으로 -에 대해 소개할 예정입니다.

참고문헌

- [1] 후방산란초음파를 이용한 재료의 열화·손상 평가, 한국표준과학연구원 연구보고서, (1997)
- [2] 小幡 充男, 伊藤 勇一, "バルクハウゼンノイズ法による3Ni-Cr-Mo-V鋼の焼もどし脆化の非破壊評價", 日本機械學會論文集 A, 56(527), pp. 1677-1684, (1990)
- [3] 眞保正道, "火力發電設備の最適保守管理方法", 水力原子力發電, Vol. 53, No. 9, (2002)
- [4] H. J. Shin, "Nondestructive testing by using guided wave technique," Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 20, No. 3, pp. 238-245, (2000)
- [5] Peter J. Mudge and Alan M. Lank, "A Long Range Method of Detection of Corrosion under Insulation in process Pipework," Journal of the Japanese Society of Non-Destructive Inspection, Vol. 46, No. 4, pp. 314-319, (1997)

- [6] Joseph L. Rose and Dale Jiao, "Ultrasonic Guided wave NDE for Piping," *Materials Evaluation*, Vol. 51, No. 5, pp. 1310-1313, (1996)
- [7] S. P. Pelts, D. Jiao, and J. L. Rose, "A Comb Transducer for Guided Wave Generation and Mode Selection," *IEEE Ultrasonics Symposium*, pp. 857-860, (1996)
- [8] S. Pelts, J. L. Rose and Y. Cho, "A Comb Transducer for Guided Wave Mode Control," *Review of Progress in Quantitative NDE*, Vol. 18, pp. 1029-1036, (1998)
- [9] Hegeon Kwun, Sang-Young Kim and Glenn M. Light, "Long-Range Guided Wave Inspection of Structures Using the Magnetostrictive Sensor," *Journal of the Korean Society for Non-Destructive testing*, Vol. 21, No. 4, pp. 383-390, (2001)
- [10] H. J. Shin and S. J. Song, "Time-localized frequency analysis of ultrasonic guided waves for nondestructive," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, D. O. Thompson and D. E. Chimenti eds, Plenum Press, New York, Vol. 19, pp. 709-716, (1999)
- [11] Takahiro Hayashi and Koichiro Kawashima, "Mode Extraction from Multi-modes of Lamb Waves," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, D. O. Thompson and D. E. Chimenti eds, Plenum Press, New York, Vol. 21, pp. 219-224, (2002)
- [12] Masahiko Hirao, *EMATS for science and industry*, KAP Press, (2003)