

汽力發電設備의 豫防保全을 위한 非破壞試驗



張 洪 根 (KIMM 시험평가부장)

- '58. 4-'63. 2 한양대학교 공과대학 원자력공학과 (학사)
- '85. 3-'87. 2 국립부산수산대학교 공과대학 기계공학(석사)
- '63. 5-'69. 2 원자력연구소 보건물리학연구소, 연구원
- '69. 2-'79. 8 한국공업검사(주), 상무이사
- '79. 9-'90. 4 한국기계연구소 비파괴시험실장, 시험평가부장
- '90. 5-'91. 8 과학기술정책연구소 기술평가위원
- '91. 9-현재 한국기계연구원, 책임연구원

1. 序 論

經濟 규모의 擴大로 全力需要가 增加함에 따라 發電設備의 규모도 大型化되고 發電方式도 多樣化되는 추세에 있으므로 良質의 電力生産과 供給의 必要性이 높아짐에 따라 高度의 運用技術과 設備의 試驗, 檢査技法 및 補修管理技術이 要請되고 있다. 汽力發電所의 事故는 경우에 따라서는 電力 供給區域 全體의 生活 및 生産活動을 停止시키는 사태를 유발하기도 하므로 事故豫防을 위한 機器의 철저한 点檢과 補修가 뒤 따라야 할 것이다.

汽力發電 設備에서 特히 steam turbine은 高速 回轉機器로서 unit의 大容量化에 따라 점차 高溫, 高壓化 되는 傾向으로 이에 따라 各部分을 構成하는 材料는 매우 엄격한 것이 要求된다. Steam turbine을 構成하고 있는 rotor나 blade 등의 主要部品들은 장기간에 사용함에 따라 經年劣化나 균열이 發生되어 나아가서는 기기가 破損되어 대형 사고를 誘發하는 경우도 있다. Turbine 사고 중에서도 turbine totor의 事故는 長期間의 보수와 많은 經費가 所要되므로 turbine totor의 유지, 관리는 가일층 主要視되고 있다.

본고에서는 fossil power plant를 構成하고 있는 boiler, condenser tube, feedwater tube, deaerator, turbine rotor, blade 등의 主要 components에 對한 非破壞試驗技法에 대하여 記述한다.

2. Fossil power plant의 preventive maintenance를 爲한 非破壞試驗

汽力發電所에서 發電 效率를 低下시키는 요인으로는 boiler, condenser, feedwater heater tube의 損傷 및 turbine rotor, turbine blade, turbine disc 등의 損傷 등을 들 수 있다.

非定期的인 發電中斷의 回數를 減少시키고 補修를 위한 重要部品の 교체작업 등 發電所의 preventive maintenance program의 일환으로 非破壞試驗은 발전소의 boiler, condenser 및 feed water tube의 損傷, turbine blade에 존재하고 있는 stress corrosion crack의 探傷, turbine rotor의 健全性 診斷 및 life time prediction 등의 資料로서 廣範圍하게 이용이 되고 있다. 發電所의 主要 components에 대한 包括的인 preventive maintenance program은 보수작업을 爲한 期間短縮 뿐만 아니라 귀중한 人命의 被害와 財産의 損失을 未然에 防止 할 수 있어 많은 發電所에서 自體的으로 계획을 수립하여 실시하고 있다.

Fossil power plant의 maintenance에 適用되는 비파괴시험은 熟練된 技能員이나 經驗이 豊富한 NDT engineer가 特殊한 visual aids를 사용하는 경우도 있지만 大體는 肉眼檢査 後 여러가지 非破壞 試驗方法 中 適切한 方法을 選擇, 適用한다. Fossil power plant에 이용되는 非破壞 試驗方式은 표 1과 같다. 일반적으로 非破壞 試驗法은 surface inspention과 volumetric inspection method로 區分한다.

1) Surface inspection method

表面 및 表面直下에 존재하는 不連續(discontinuities)을 探傷하는 試驗方法으로 肉眼檢査를 包含하여 液體浸透探傷試驗(PT)과 磁粉探傷試驗(MT) 및 渦流探傷試驗(ET)이 이에 속한다.

2) Volumetric inspection method

表面으로부터 13mm 以上の 距離에 存在하는 discontinuities를 探傷하는 試驗方法으로 放射線透過試驗(RT)과 超音波探傷試驗(UT)이 있다. RT는 發電所의 建設時 주로 利用이 되며 UT는 maintenance inspection시 廣範圍하게 利用되고 있다.

2.1 Boiler

Boiler tube의 缺陷은 發電所에서 非定期的 發電中斷의 主 原因이 된다. 發電中斷은 發電效率를 低下시킴으로서 때때로 計劃된 電力生産을 하기 위하여 발전용량을 최대로 올려야 하는 계기가 되며, 結果적으로 전력생산 단가를 상승시키는 요인이 되는 것이다.

計劃된 發電中斷 期間中 boiler tube의 損傷은 非破壞的으로 조기發見할 수 있다. Boiler의 損傷은 erosion을 包含해서 exfoliation, fatigue cracking, hydrogen damage 등을 들 수 있으며 tube의 교체 여부를 결정한다. UT는 tube의 두께 測定에 主로 利用이 되고 있으며 crack 및 hydrogen damage 探傷에도 널리 活用된다.

縱波(longitudinal wave)를 利用한 두께 測定方法과 橫波(shear wave)를 利用한 tube 內面에 발생한 crack의 탐상방법을 그림 1에 圖示하였다.

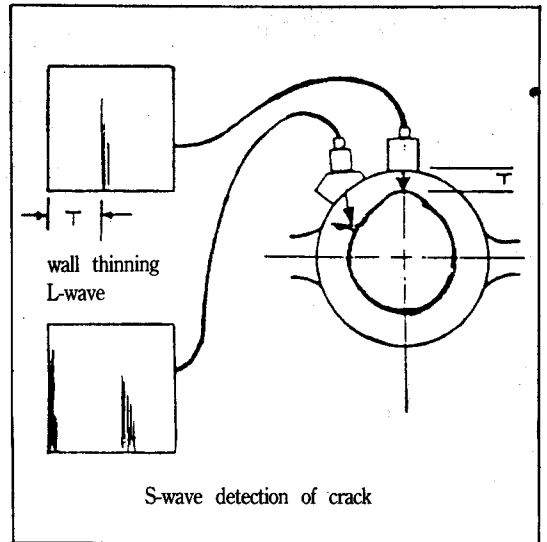


그림 1. 超音波探傷試驗法에 依한 두께 및 균열 탐상

Boiler의 缺陷探傷에는 UT가 主로 利用 되지만 MT나 PT를 併行함으로서 效果的으로 缺陷을 探傷할 수 있다.

UT法은 큰構造物의 試驗에는 時間이 많이 所

표 1. 發電設備의 主要 components에 적용되는 비파괴시험법

NDE METHOD	BOILER HEAT TRANSFER TUBES		CONDENSER	FEEDWTR HEATER	TURBINE/GENERATOR ROTORS		TURBINE
	ID	OD	ID TUBES	ID TUBES	OUTSIDE	BORESIDE	BLADES
VT	Fiberoptics & CCTV through access windows cut into tubes.	Visual exam. for sagging, distortion of tube wall	Usually not used. Small CCTV for special problems	Usually not used.	Visual exam. for cracks.	Rigid borescope	Mirror-aided visual exam. for defects/ fiberoptics thru access parts. Limited use.
PT	Not Used	Used to detect crack	Not used	Not used	Limited use. Supplement to MT	Limited PT using remote systems	Used for non-forromagnetic areas of blades & supplementns to MT
MT	Not Used	Limited use for cracks in welds	Not used	Not used	Major surface exam ; draped & bucking field techniques	Major surface exam ; central conductor & yoke methods	Major surface exam ; draped coil, bucking field & yoke
UT	Used from Steam & mud drum penetrations for wall-thickness measurements	Used for wall thickness & detecting cracks	Usally not used ; how ever can sup Plement ET in analysis in/near tube support area	Used for carbon steel tubing & supplement to ET for flaw analysis. Slow	Supplement to bore or when bore is inaccessible.	Used for detecting service-induced sub-surface cracks.	Limited use Used for cracks in shroud area
RT	Not Used	Limited use to detect cracking & inspect repair welds	Normally not used	Normally not used	Normally not used	Normally not used	Limited used in blade-to-blade attachments
ET	Not Used	Not used	Used to determine wall-thinning & detect cracks	Used to determine wall-thinning & detect cracks in non-forromagnetic tubing ; not applicable to ferromagnetics	Not used	Limited use surface defects only	Limited use Highly sensitive to small surface cracks. Remote inspector, is possible through access parts.

要되며 operator는 고도의 熟練된 技術者가 아니면 試驗結果에 對한 信賴性이 낮은 것이 단점이다.

Tube외에 steam drum 및 mud drum도 boiler의 critical components로서 주기적인 maintenanc inspection이 要求되며 이들 components에 對한 非破壞 試驗은 UT, MT, PT 및 borescope를 이용한 VT method가 利用된다.

2.2 Condenser 및 feedwater heater

발전소의 steam plant에서 condenser tube의 損傷은 이를 補修하기 爲하여 가동을 中斷해야 하기때문에 發電生産單價를 上乘시키는 要인이 된다. 損傷된 condenser tube로 부터 물의 누설은 steam generator와 turbine 등의 주요 components에 損傷을 끼치는 原因이 된다.

Feedwater heater tube損傷의 경우에는 補修時 tube를 分離하기 어렵기 때문에 unit別로 교체해야 하는 問題點을 안고 있어 補修가 計劃된 공정보다 흔히 지연되는 경우가 많다.

이들 tube의 損傷으로 因한 물의 누설을 防止하기 爲하여 정기 補修時 適用되는 非破壞試驗法으로는 ET method가 주로 많이 利用된다.

內插型 probe를 使用하여 tube의 內面에서 crack이나 pitting 등의 缺陷을 探傷한다. ET法은 一般的으로 表面 및 表面直下 缺陷探傷에 適用되며 材質의 conductivity, permeability 및 使用되는 frequency에 따라 表面으로 부터 探傷possible 浸透 깊이가 달라지게 된다.

Tube의 材質이 carbon steel의 경우에는 探傷 결과의 解析이 難解하기 때문에 特殊하게 考案된 transducer를 tube內面에 插入하여 試驗하는 UT法이 利用된다. 最近에 ferromagnetic material에 對한 ET試驗裝備가 開發되어 판매되고 있다.

2.3 Deaerator

發電소의 deaerator system은 보통 water storage tank와 deaerator로 構成되는데 deaerator는 수조 tank 上部에 設置된 작은 加壓 tank를 指稱한다.

Deaerator는 가열 및 冷却用 순환수의 酸素를

제거하는 기능을 갖고있다. 특히 산소는 boiler나 turbine 등 主要 components에 부식을 加速化시키는 傾向이 있다. 過去에는 重要視하지 않았으나 最近에 와서 製紙工業에서 deaerator의 catastrophic failure가 發生된 事例가 있어 發電所에서도 deaerator system에 對한 非破壞試驗이 要求되고 있다.

Deaerator에 對한 非破壞試驗으로는 tank 內面에서 熔接部位, nozzle reinforcement, inner radius 및 열이나 機械的인 應力이 集中 되는 기타 부위에 對한 surface inspection method로 MT를 利用한다. MT method로는 arc strike를 방지하기 爲하여 prod法은 적용하지 않고 yoke法으로 試驗한다. deaerator system에 對한 volumetric inspection의 경우에는 RT나 UT法을 利用한다.

2.4 Turbine rotor, generator rotor

發電所 turbine rotor나 generator rotor는 forging process에 의하여 제조한다. 製造時 voids나 non-metallic inclusion 등의 제조결함은 그림 2-A와 같이 중심에 집중하거나 산재하게 된다. 中心에 集中된 缺陷은 대개 70-125 mm 또는 그 이상의 크기로 中心에 구멍을 파서 除去한다. 이렇게하여 만든 rotor를 bore rotor라고 한다.(그림 2-B)

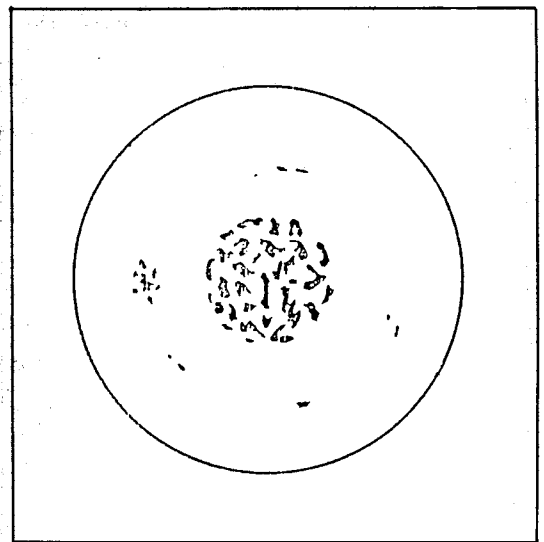


그림 2-A 中心에 集中된 缺陷

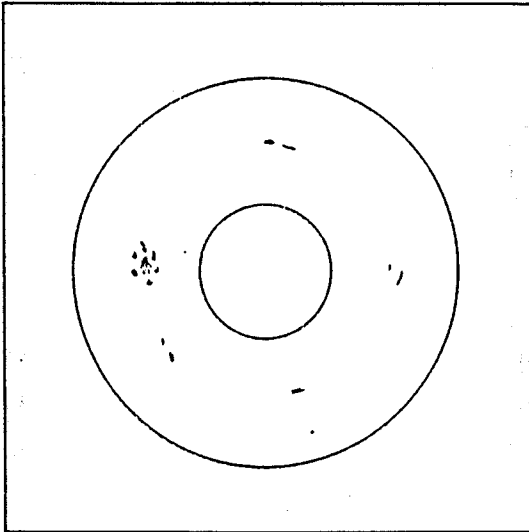


그림 2-B 中心에 集中된 缺陷의 除去
(Bore rotor)

2.4.1 Manufacturing inspection

Rotor shaft에 對한 缺陷探傷은 rotor外部에서 UT로 試驗한다.

中心에 集中된 缺陷은 除去한 後 bore 内面에서 VT, MT 및 UT 試驗을 併行한다. 中心에 集中된 缺陷은 試驗 結果 使用上 지장을 초래할 수 있는 큰 缺陷일 경우는 廢棄하고 다시 製造하지만

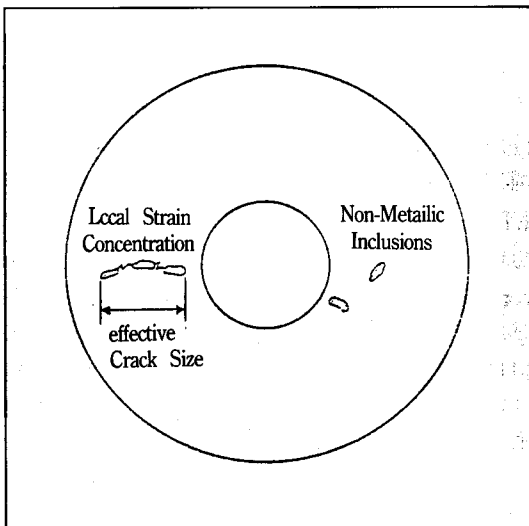


그림 3. Local strain 集中으로 因한 crack의 發生

voids나 non-metallic inclusion 등의 작은 flaws는 使用에 큰 地장을 초래하지 않으므로 그대로 使用한다. 製造時 發生된 작은 flaws는 使用中 長期間 동안 열이나 機械的인 應力이 加해지게 되므로 그림 3과 같이 local strain이 集中되어 crack으로 進전하게 된다.

2.4.2 In-service inspection

2.4.2.1 Rotor interior inspection

다음 事項中 1에 해당되는 모든 發電用 rotor는 非破壞試驗을 실시 하여야 한다.

- ① 製造時 UT를 하지 않은 모든 rotor
- ② Inlet temperature가 482°C(900°F) 以上으로 使用開始 10년이 초과된 모든 rotor
- ③ 300 starting cycle이 초과된 모든 rotor
- ④ 試驗結果缺陷이 存在하고 있는 rotor로서 缺陷의 成長 與否를 점검할 必要가 있다고 判斷되는 모든 rotor

2.4.2.2 試驗 方法

Turbine rotor나 generator rotor의 稼動中 試驗으로서 interior inspection methods는 다음의 方法이 適用되고 있다.

- ① Diameter 測定
Rotor의 diameter測定에는 一般的으로 star gauge나 이와 類似한 gauge를 使用하여 bore 内面에 挿入하여 測定한다.
- ② Visual testing(VT)
Bore 内面 VT에는 特殊하게 高안된 borescope로써 内面의 狀態를 CCTV camera, video tape recorder 및 TV monitor를 利用하여 記錄한다.
- ③ 磁粉探傷試驗(MT)
Bore 内面의 表面 및 表面直下에 存在하는 crack-like indications 探傷하기 爲하여 blind bore의 경우에는 yoke type의 磁粉探傷器를 使用하며 그 外의 경우에는 yoke type를 使用하기도 하지만 一般的으로 中心 導體(central conductor)를 使用한 MT method가 利用된다.
磁粉은 感度가 優秀한 형광磁粉이 使用되며

black light를 borescope에 연결하여 나타난 indications을 觀察한다.

④ 超音波探傷試驗(UT)

Bore 内部에 transducer를 挿入하여 bore의 全表面으로부터 内部에 存在하는 缺陷을 探傷한다. Rotor bore의 UT에는 2-3 channel의 ultrasonic flaw detector를 使用하여 수직(종파) 45° 및 60° (橫波) transducers를 同時に 前進, 回轉시켜 全内面을 scanning한다.

Reacordable indication은 CRT screen과 CCTV camera를 통하여 video tape recorder에 記錄한다.

나타난 indication은 使用된 calibration block로부터의 signal과 比較하여 分析한다. UT data를 分析하기 爲하여 다음 因子들의 影響을 고려하여야 한다.

- Calibration reflector의 크기와 형태(SDH/FBH)
- Signal amplitude의 percentage(recoding threshold)
- Transducers의 크기, 주파수 및 beam의 特性
- Scan increment
- 縱波 및 橫波의 信賴性

試驗結果 使用上 지장을 초래할 수 있는 缺陷이라고 判斷되면 機械加工 등으로 이 缺陷을 除去하여야 하는데 接近이 不可能하여 缺陷을 除去할 수 없거나 接近할 수 있다 하더라도 構造的인 한계때문에 除去 할 수 없는 경우에는 一般的으로 rotor는 廢棄 處理하거나 運轉負荷를 낮추어 使用한다.

缺陷으로 因한 계속 使用與否는 다음 事項을 고려하여 결정하여야 한다.

- 용점을 包含한 履歷(cold start, load follower, base loaded, etc)
- 過去 運轉履歷(cold start, load follower, base loaded, etc)
- Stess analysis
- 初期 試驗 記錄과 稼動中 試驗記錄(缺陷의 生成 및 成長)

(2) Rotor exterior inspection

Rotor의 外部試驗은 rotor body의 dimension check, body와 rotating parts에 對하여 非破壞試驗을 實施한다.

(가) Dimention check

Rotor와 journal의 diameter를 測定하다.

(나) Body 및 rotating parts에 對한 非破壞試驗

Rotor의 body는 形狀이 複雜하고 blade를 除去하는데 長期間이 所要되기 때문에 UT는 適用하기 어렵다. Cable을 使用한 습식 형광 磁粉 探傷試驗(MT)을 適用하는 것이 一般的인 試驗方法이다. Rotating parts로는 journal部位에 對한 마모, 均열與否를 점검한다.

2.5 Turbine blade

Steam turbine에서 blade의 損傷이 美國內 火力發電所의 50% 以上이 發電中斷한 主因이었으며 1978年度 한 해에 LP blade의 損傷으로 265萬弗 以上の 損害가 있었다. Blade損傷의 特徵으로는 blade 한개가 깨어지므로서 많은 다른 blade가 연쇄적으로 破損된다는 點이다. blade의 稼動中 試驗으로는 대개는 計劃된 보수 期間中에 實施하며 MT, PT, UT 및 ET가 利用된다.

EPRI의 조사연구보고서에 의하면 NDT methods 中 가장 널리 利用되는 方法은 MT이나 root section, attachment area는 적절한 磁化를 할 수 없기 때문에 最近에는 point vector technique을 使用한 ET法이 다른方法에 대비하여 效果적으로 利用되고 있다. ET法은 blade에 發生된 fatigue crack, stress corrosion crack 등의 均열 探傷에 他 方法에 比하여 感도가 우수하며 試驗 할 部位에 對한 세척정도가 MT나 PT를 適用할 경우처럼 要求 되지는 않으며 正確한 結果 判定을 爲해서는 operator의 熟練도가 要求된다.(表 2)

Blade의 缺陷의 形態로는 均열이 68.1%로 가장 높은 빈도이고 erosion이 그다음 순위로 나타났다. 缺陷의 발생位置로서는 leading edge, tenon, trailing edge 순으로 나타난 것으로 보고되고 있다.(表 3)

표 2. Blade시험에 利用되는 非破壞試驗方法

NDT METHODS USED (%)						
Visual (VT)	Liquid Penetrant (PT)	Magnetic Particle (MT)	Eddy Current (ET)	Ultrasonics (UT)	Radiography (RT)	Other
45.80	13.8	35.7	1.4	1.4	1.2	0.7

표 3. Blade의 欠陷의 位置와 形態

Defect Types (%)					Location of Defects By Area (%)							
Cracks	Erosion	Loose Protective Strips	Pits	Other	Trailing Edge	Leading Edge	Shroud	Tenon	Platform	Blade Root	Disk Root	Lashing-Tie Wire
68.1	20	3.64	4.16	3.98	12.7	22.9	11.67	19.85	4.38	11.38	2.33	14.74

2.6 Turbine disc

모든 turbine disc는 습한증기 下에서 운전되고 있어 特히 stress를 많이 받는 部位에서는 응력부식 균열로부터 위험을 안고 있다. 균열의 발생에 대한 원인은 명확하게 밝혀진 것은 아니지만 local stress, 표면조건 및 mating surface간의 증기 흐름의 특성 등에 기인된다고 알려지고 있다.

Turbine disc의 keyway나 rim의 응력부식균열 및 피로균열 등의 crack detection에는 pulse echo 및 pitch/catch technique의 초음파 탐상시험이 이용되고 있다.



그림 4. Turbine disc keyway의 非破壞試驗

3. 結 論

Fossil power plant의 主要 components에 대한 最適 非破壞試驗(nondestructive examination)의 適用은 非定期的인 發電中斷의 回收을 減少시키고 主要部品の 交替 作業 等 發電設備의 preventive maintenance와 効果的인 電力系統의 安全運用을 위한 적절한 對策을 樹立하는 診斷수단일 뿐 아니라 壽命豫測의 重要한 資料로 널리 活用되고 있다.

참 고 문 헌

1. 張洪根 外, 發電設備 診斷技術開發 한국전력공사 기술연구원 1986. 8
2. E. R. Reinhart, The use of Nondestructive Testing in Fossil Power Plant Maintenance, 1984.
3. J. P. Porter, E. R. Reinhart and T. Armor, Critical Assessment of Nondestructive Evaluation Methods of Turbine Blades, July, 1982.
4. A. F. Armor, and L. G. Rayers, Incipient Failure Detection for Fossil Power Plant Components, 1983.
5. J. P. Poter, E. R. Reinhart and C. C. Allen, Inspection Procedures for Rotor. 1984.

6. Work Statement for Bore Preparation and Bore-side Nondestructive Evaluation of Turbine & Generator Rotors, R&A ND-100, 1982.
7. Tom Alley, Generator Rotor Evaluation, 1984.
8. Nondestructive Examination of Steam Turbine Blade, EPRI CS-3675, 1984.
9. Nondestructive Evaluation of Steam Turbine Rotors, EPRI NP-744, 1978.
10. Kuniharu Uchida and Tatsuo Seguchi, Nondestructive Examination in Life Assessment Technique for Hydraulic and Fossil Power Plant Components, JSNDI No 42, Vol. 4.

1982	1984
1984	1984

1982 1984 1984 1984
1984 1984 1984 1984
1984 1984 1984 1984
1984 1984 1984 1984
1984 1984 1984 1984
1984 1984 1984 1984
1984 1984 1984 1984