

非破壞檢査에 의한 重電機器의 壽命診斷

박진호

현대중전기(주) 기술연구소 연구원

1. 머리말

최근 원자력발전을 비롯하여 수력, 화력발전설비는 DSS(Daily Start Stop) 운용 등의 가혹한 운용조건 등으로 운전시간이 증대되고 있는 실정이다.

이와 같은 상황에서 예기치 못한 운전정지를 방지하기 위해서는 신뢰성이 높은 예방보전 기술의 개발과 적용이 요구되고 있다.

특히 운전시간이 10만시간을 초과하는 터빈설비는 세계적으로 증가하는 추세에 있으며 經年火力設備의 수명진단에 관한 기술은 세계적으로 검토과제가 되고 있다.

한편 발전설비의 신설에 대해서는 立地確保의 제약 등이 있기 때문에 經年發電設備에 맞는 수명진단에 의한 부분적 改修, 부품교환에 의한 長壽命化 및 스크랩 앤드 빌트에 의한 전면적인 근대화가 전력의 안전공급에 필요사항이 되고 있다.

본고에서는 비파괴검사기술의 몇 가지 진전현황과 수력과 화력기기의 주요 部位에 적용되는 수명진단수법을 간단히 기술하고자 한다.

1. 漏洩磁束 探傷試驗

이것은 이미 棒, 管 등의 제조공정검사에 널리 사용되고 있다. 그러나 시험대상이 품질관리가 잘 되어 있고 표면이 평활한 부품에 대해서는 결함의 종류가 거의 비슷한 형태를 취하고 있으므로 신호출력의 결함크기가 거의 동일하게 된다.

누설자속탐상시험은 결함의 종류가 신호파형에 대응하게 되므로 매우 편리한 기법이 되고 있다.

한편 대상물이 形鋼, 管, 棒 등 단면이 일정한 것도 자기탐상을 할 경우에는 다음과 같은 문제점을 갖고 있다.

첫째, 제조시의 품질관리나 제조공정보다 제조시의 노이즈 크기나 파형이 불분명하며 특히 矯正機器에 의한 노이즈에 문제가 있다.

둘째, 管의 경우 內外面에 녹(鏽)이 부착되어 두께가 달라서 녹 제거에 많은 노력이 필요하게 된다. 또한 부식 구멍의 모양이 다르게 된다.

셋째, 強磁性熱交換機의 튜브에 대한 검출과 측정이 가능하나 內面の 녹 제거가 문제가 되고 있다. 그러나 시험비용이 저렴한 이점을 갖고 있다.

노이즈(磁氣雜音)는 재료측 뿐만 아니라 磁化界로부터도 발생하며 코일자화의 경우에는 노이즈가 매우 적다.

그러나 極間磁化의 경우는 진동 등에 의한 자극과 검사재료와의 거리 변동으로 검사재료의 자속이 변화되므로 큰 자기잡음이 발생한다. 이를 위하여 출력에 勵磁電流(檢査材料중의 磁束)에 역비례하는 전압을 인가함으로써 노이즈를 제거하고 있다. 현재 미크론 정도보다 한층 적은 균열을 탐상할 수 있는 검출기를 제작하는 것이 과제로 되어 있다.

2. 리모트필드 탐상법

리모트필드(渦流探傷試驗)법은 자기탐상의 일종으로서 최근 각광을 받고 있다. 이것은 回歸式에 의하여 모델화하며 수신코일에서 取속된 자장은 송신코일에서 관내를 전파하는 직접 전파와 管内厚部를 관통해서 관내로 되돌아오는 간접 傳播波의 벡터합으로 계산하게 된다.

리모트필드 와류탐상시험법을 이용해서 결함의 깊이를 평가하는 경우에 位相이 사용되고 있는데 이러한 방식이 결함의 체적과 관내 재질에 영향을 미치고 있다.

이를 위하여 체적에 영향을 주는 補正에는 리사쥬(Lissjous Figure) 평면 위상각을 그리고 관재질에 미치는 보정에는 주파수를 이용하면 유효하다는 것이 판명되었다.

3. 磁粉探傷試驗

이것은 表面開口 缺陷과 표면 바로 밑에 존재하는 溝狀缺陷에 의한 누설자장의 近似解를 이용한 후 缺陷 바로 위의 공간에 있는 磁粉에 작용하는 자기력의 표시식을 도출하는 것이다.

이것으로서 자분에 작용하는 자기력의 크기와 분포를 계산한다. 만일에 斷面急變部에서 발생하는 모의패턴의 發生象을 관찰하여 자분의 粒徑이

적은 경우에는 차이를 거의 확인할 수 있으나 임경이 크면 포화자속밀도가 적은 시험체 내에서는 단면의 급변지시가 발생하기 쉽게 된다.

한편 磁粉探傷에 있어서 자분의 자성은 가장 중요한 성질을 갖고 있으며 자기테이프용 자분의 자기적 성질측정에는 진동식 측정기가 사용되고 있다.

이 방식은 포화자속밀도는 물론 容器의 형상에 관계없이 $B-H$ 곡선을 그릴 수 있다. 자분탐상의 범위는 기계, 구조물, 주강, 鍛鋼, 形鋼, 板 등의 소재나 중간제품 및 완제품에 걸쳐 모두 응용되고 있으며 제품 제작시는 물론이고 사용중이나 보수, 수리시의 검사에도 사용되고 있다.

이상에서 설명한 탐상시험 이외에 방사선, 적외선 투과시험, 초음파 탐상시험 및 자기적 AE (Acoustic Emission) 시험 등이 있으나 생략한다.

4. 重電機器의 壽命診斷法

4·1 火力發電機器

4·1·1 터빈기기

터빈기기의 주요부분은 고온, 고압, 고속회전 등의 가혹한 조건에서 사용되기 때문에 經年的으로 劣化가 진행되고 있다.

이들의 劣化現象은 재료의 균열, 피로, 脆化 등으로 나타나며 部材의 사용조건에 따라서 열화가 동시에 발생함으로써 열화가 가속되는 것도 있다 (표 1 참조).

터빈설비에서는 이와 같은 材料의 劣化를 早期에 검출평가하는 것이 중요한 과제로 되어 있다. 이 때문에 余壽命을 균열진전수명으로 평가하는 이외에 주요 부위에 대해서는 균열발생수명으로 평가하고 있다.

균열발생수명의 평가법은 해석법, 비파괴계측법 및 파괴법으로 대별되며 각각 특징을 갖고 있다. 이들의 壽命評價法은 각 重電機器 메이커에서 독자적으로 축적한 데이터베이스에 의하여 개발,

<표 1> 터빈기에서 발생하는 경년열화 현상

열화 손상형태와 열화현상	주요 부품
재료열화	증기밸브, 로터
軟化	로터
脆化	로터
균열·크립	케이싱, 플랜지
피로	히터水道, 밸브 스템들
플러팅 피로	중심 스템들
응력부식균열	회전베인
부식 피로	회전베인
변형	플랜지, 케이싱
크립	배관
부식	배관
침식	노즐, 밸브
에로존·코로존	배관, 히터 본체
마모	베어링
진식	조속기

<표 2> 균열발생수명의 평가법과 특징

평가법	특징
해석법	임의 부위의 평가가 가능하다. 다만 경년열화 재료특성에 대한 방대한 데이터가 필요하며 데이터 부족부위에 대해서는 오차가 크다.
비파괴계측법	운전이력을 고려하지 않고 평가할 수 있다. 다만 부품형상에 의한 계측이 곤란한 경우도 있으며 또한 단독수법으로는 평가의 정확도가 불충분하다.
파괴법	실제 기기로부터 샘플을 채취하기 때문에 평가정도는 높으나 샘플 채취 가능한 부위가 한정되어 있다.

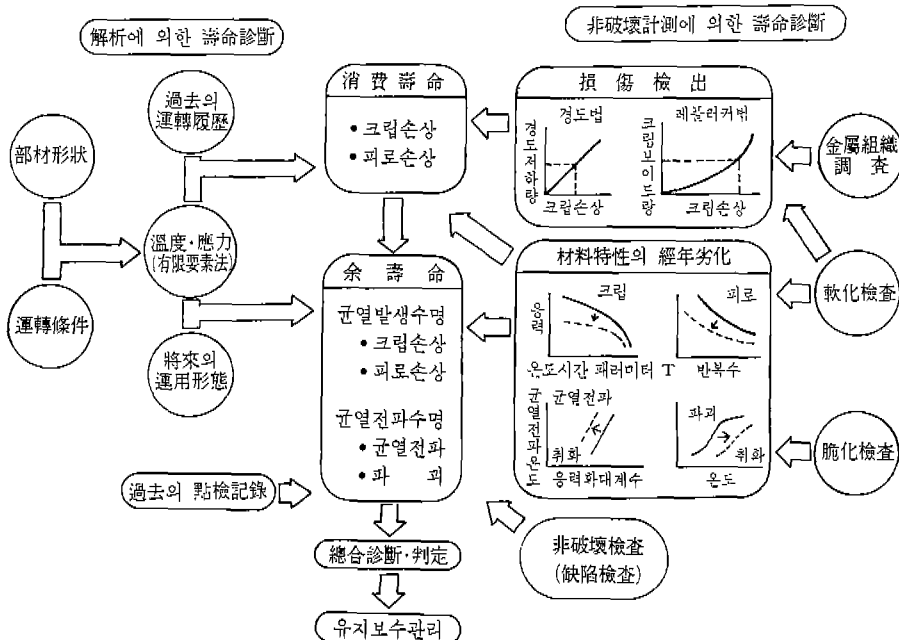
실용화되고 있으며 각자 특성있는 手法으로 實際機器에 적용하고 있다(표 2 참조).

한 예로서 日本 도시바에서 하고 있는 증기터빈의 余壽命診斷法의 개요를 그림 1에 나타내었다.

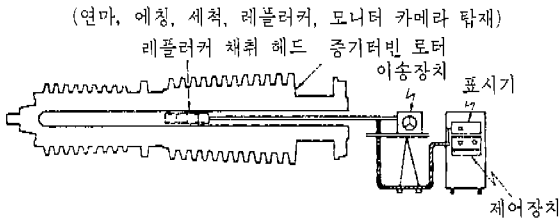
이 방법은 평가대상 부위에 발생하는 온도·응

력해석 및 과거의 운전이력이나 장래의 운용계획을 반영한 해석적 평가결과와 硬度計測, 레플러커법에 의한 보이드 및 탄화물평가와 分極시험으로 얻어진 전기화학적 특성 등의 非破壞計測 결과를 종합한 후 균열발생의 余壽命을 평가하는 것이다.

이와 같은 수명평가는 應力集中部가 대상이 되는 경우가 많기 때문에 미소한 코로나 R부위의 硬度計測 기술이나 또는 그림 2와 같은 터빈로터



<그림 1> 해석법과 비파괴계측법을 병용한 수명진단법



<그림 2> 터빈로터 중심구멍의 레플러커 채취장치의 모식도

중심의 레플러커 채취장치와 휴대용 전기분극장치 등이 개발되어 사용되고 있다.

균열발생수명의 평가가 적용되는 주요부품에는 터빈로터 이외에 터빈케이싱, 증기저지밸브, 고온 볼트 등 고온환경과 부식환경하에서 사용되는 각종 부품에의 적용이 바람직하다.

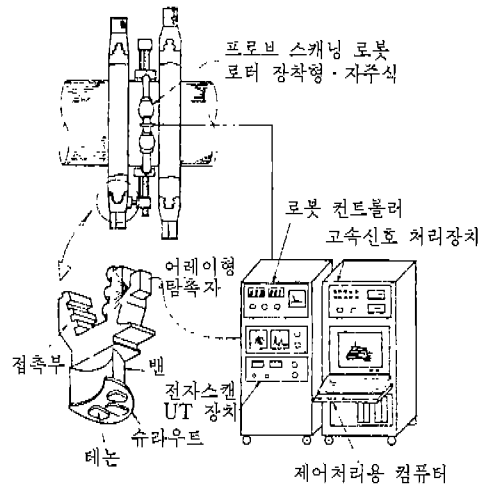
이들의 각종 재료에 대해서는 각종 환경조건에서 사용되어온 폐기부품을 이용하여 余壽命推定精度 向上을 조사하기 위한 데이터베이스를 축적하고 있다.

수명평가 대상부에서 소량의 시험편을 샘플링하여 파괴시험을 행하는 破壞法은 高精度로서 재료의 劣化를 평가할 수 있다. 그러나 임의의 部位로부터 시험편을 샘플링할 수 없으므로 실질적으로 기기에 적용하는 데는 제한이 따르는 경우가 많다.

이에 반하여 비파괴계측법은 적용제한도 적으며 단시간에 많은 箇所를 진단할 수 있기 때문에 硬度計測과 레플러커 채취를 할 수 있으며 또한 전기분극법 이외에도 전기저항법과 X선회절법 등의 각종 비파괴계측법을 적용할 수 있다. 한편 바크하우젠 노이즈 등을 이용한 수명평가법의 기술도 진행되고 있다.

그림 1 과 같은 균열진전 수명평가는 파괴역학적 수법을 이용한 것이나 균열진전속도와 파괴인성값 등의 재료특성은 열화의 정도를 고려한 값을 사용함으로써 보다 고정도의 평가를 할 수 있다.

그런데 터빈로터 중심구멍, 터빈 날개부분, 高



<그림 3> 터빈부의 전자주사형 초음파 탐상 시스템

中壓 터빈케이싱의 고정볼트 등의 균열이나 결함을 고정도로서 검출하기 위하여 開口合成信號處理法과 電子走査形 초음파 탐상법 등의 신기술이 검토되고 있으며 자동화기술의 개발로서 높은 再現性을 갖는 검사결과를 실현하고 있다.

그림 3은 전자주사법을 터빈 부분에 적용한 초음파탐상 시스템의 개요를 나타낸 것이다.

터빈부는 고온환경하에서 사용되며 로터회전에 의한 원심력을 받고 있다. 이 때문에 크립 (Creep) 손상이나 피로손상을 받을 염려가 있으므로 초음파탐상시험을 한다.

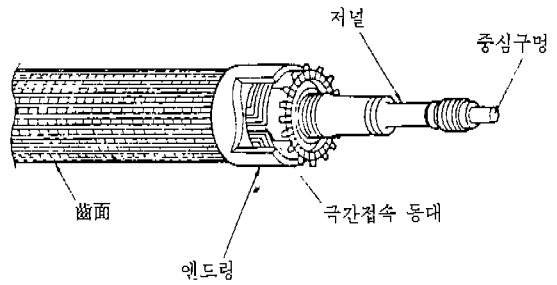
4·1·2 주요 열교환기

다음에는 復水器, 給水加熱器 및 脫氣器의 豫防保全에 적용되고 있는 非破壞檢査의 적용현황에 대하여 설명한다. 이들 기기에서 발생하는 주요 손상내용은 표 3과 같으며 검사에는 渦流探傷試驗, 磁粉探傷試驗 및 浸透探傷試驗이 많이 사용되고 있다.

한편 복수기의 냉각관에는 종래 알미늄합동관이 사용되었으나 海水에 의한 부식과 침식을 받아 두께가 감소되는 경우가 있다. 이 때에는 외류탐상법과

<표 3> 熱交換機器의 주요 劣化現象

기 기	주 요 부 품	주요 열화현상
냉 각 수	냉 각 관	침식, 부식
	본체(管束 등)	저사이클 피로 등
	水 室	부식
고 압 급 수	가 열 기	부식, 침식, 응력부식균열
	본체(管束 등)	저사이클 피로 등
	水 室	저사이클 피로 등
저 압 급 수	가 열 관	부식
	본 체	침식
탈 기 기	본 체	부식, 침식, 응력부식균열, 저 사이클 피로



<그림 4> 터빈발전기 로터의 주요 구성부품

<표 4> 터빈발전기 로터의 주요 열화현상

주요 부위	주요 열화현상	적용검사	주요원인
로 터 중심 구멍	저사이클 피로(결함, 균열의 유무 및 진전)	VT, MT, UT	기동정지
로 터 스테 이 부	플레이팅 피로(균열의 유무)	MT	기동정지 운전시간
로터저널부	비틀림 피로(균열의 유무)	MT, PT	단락사고 진동과대
로터프레임	피로, 크립(균열의 유무)	PT, UT	기동정지 온도부적
엔 드 링	응력부식 균열	PT, UT	정지중의 습 기
로터코일극 간접속강대	저사이클 피로(균열의 유무)	VT	기동정지
로터솔렛內 코 일	코일간 접촉면의 마모와 동분의 발생	VT	터닝회전 출 시 간

컴퓨터를 조합한 시스템으로서 검사를 하는데 최근에는 알미늄황동관 대신 耐蝕性이 높고 부식할 염려가 없는 티탄관으로 대체하고 있다.

한편 급수가열기에 대해서도 가열관에 황동을 사용하는 경우에는 侵蝕이 일어나므로 관의 두께가 얇아지는 현상에는 와류탐상시험을 적용하고 있다. 다만 강관을 사용하는 경우에는 와류탐상법의 적용이 곤란하므로 자기포화 와류탐상법, 리모트필드 와류탐상법 및 초음파탐상법 등의 검사법이 점차 개발되고 있다.

脫氣器에 대해서는 脫氣室內面이 드레인어택으로 침식과 용접부의 잔류응력을 받으므로 정기 검사시에는 磁粉探傷試驗 등이 실시되고 있다.

4.1.3 터빈발전기

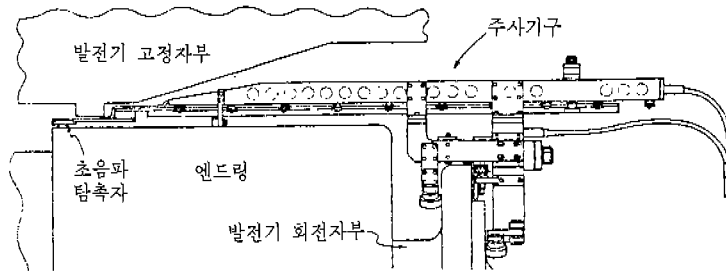
터빈발전기는 터빈기기에 비교하면 사용온도가 높으나 가동중과 기동정지 사이클에 의해서 각부의 열화가 진행되기 때문에 주요부품의 수명평가가 행하여진다.

특히 발전기로터는 그림 4와 같이 로터코일을 비롯해서 코일다발과 엔드링 등의 각종 재료가 복잡하게 조립되어 있으며 진동, 반복하중, 열사이클 등의 영향을 받기 쉬워 중요한 부분은 보수 관리의 대상이 되고 있다.

발전기의 로터 주위의 주요부품은 표 4와 같이 각부의 劣化 내용에 따라서 적절한 비파괴검사를 한다.

예를 들면 로터 재료에 대해서는 최근에 제강기술이 현저히 진보하여 무결함에 가까우나 經年 로터에는 중심구멍 근방에 비금속 개재물 등의 결함을 갖는 경우가 있어 각종 검사가 행해지고 있다.

이들의 검사는 터빈로터와 똑같이 파괴역학적 수법으로 余壽命評價를 하고 있으며 早期에 결함 검출을 위하여 원격자동화와 고정도화를 도모하고 있다.



<그림 5> 터빈발전기의 엔드링을 위한 초음파 탐상시험장치

또한 발전기 로터의 端部에 로터코일의 지지를 위한 엔드링은 18-Mn-5Cr의 非磁性 高耐力材를 사용하고 있다. 그러나 이와 같은 재료는 응력 부식균열(SCC)에 대한 감수성이 높고 플랜트 정지중 또는 사용전 보관중에 습기와 結露에 의하여 링 內面에 SCC가 발생하는 경우가 있으며 유럽에서는 운전중에 파괴되어 飛散한 예도 보고되고 있다.

그림 5는 정기검사시에 SCC의 발생 유무를 검사하는 초음파탐상 시험장치의 개요를 나타낸 것이다. 이 장치는 偏平形의 특수탐촉자와 주사 기구로 구성되어 있기 때문에 로터를 발전기 본체로부터 분리시켜서 초기단계에서 검사할 수 있다.

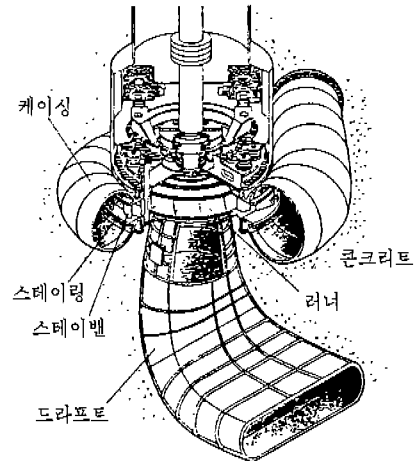
최근에는 18Mn-5Cr의 대체재료로서 SCC의 발생이 없는 18Mn-18Cr 재료를 개발하고 있으며 順次經年로터의 엔드링과 교환되고 있다.

터빈발전기에는 이상과 같이 각종 비파괴검사가 적용되고 있으나 수차발전기와 똑같이 코일 절연의 수명평가도 행하여지고 있다.

특히 터빈발전기에는 열열화, 전기열화 및 기계적 열화에 의한 절연내력 손모을을 산정하기 위하여 데이터베이스의 축적을 행하고 있으며 운전 이력에 따라서 절연수명의 평가가 가능하다.

4·2 水力發電機器

그림 6 과 같이 콘크리트에 매설된 케이싱과 스

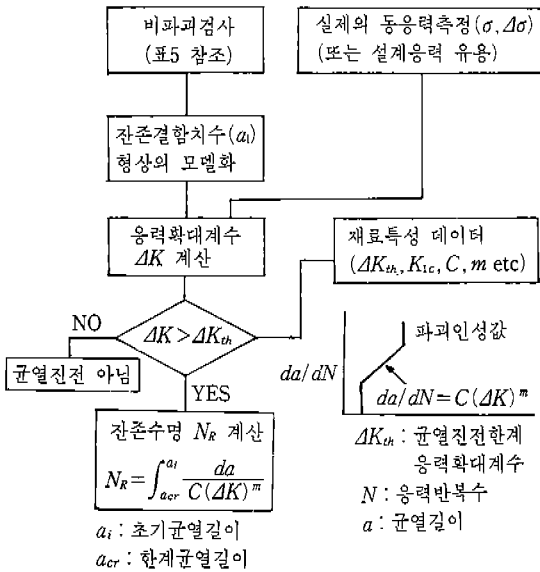


<그림 6> 수차기 구성의 모식도

테이링이 치명적인 손상을 받으면 대규모의 改修가 필요하게 되므로 이들의 부품은 수명진단에 있어서 중점적인 대상부위가 되고 있다.

經年設備의 대부분 부품은 주철과 주강제로서 제조 당시의 주조기술과 더불어 비파괴검사기술의 부족으로 구조결함이 있는 경우가 있다.

예를 들면 스테이밴(Stay Van) 부근에는 구조결함이 잔존해 있는 경우가 많은데 이들의 결함은 經年的인 부식열화에 의하여 표면에 노출되든가 또는 수차의 기동, 정지, 부하차단 등의 변동응력을 받아 피로균열을 발생하기 때문에 최종적으로는 스테이밴의 破斷에 이르게 된다.



<그림 7> 수차에 있어서 잔존수명 계산법

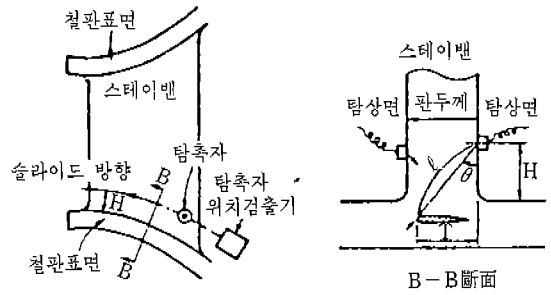
이와 같은 중대한 사고를 미연에 방지하기 위하여 수명 진단시에는 비파괴검사와 응력측정을 하며 그림 7과 같은 파괴역학을 이용한 흐름에 따라서 스테이벤의 잔존수명을 산정하고 있다.

오히려 스테이벤의 수명은 결함이 커져 응력확대계수가 재료의 破壊靱性値 K_{Ic} 에 도달하는 시점이나 또는 하중부하 단면적이 감소해서 작용응력이 引張強度에 도달하는 시점으로 정하고 있다.

한편 표 5와 같이 비파괴검사법에는 여러 가지

<표 5> 수차 열화진단에 사용되는 비파괴검사 항목

검 사 항 목	적용 목적과 요점
외 관 검 사	열화상태의 파악, 부식, 마모, 누수 등
자 분 탐 상 시 험	표면과 표면 바로 밑 결함의 검출과 길이 측정
금 속 조 직 검 사	균열 결함의 진전성 유무의 평가
결 합 깊 이 측 정	결합깊이 방향의 치수 측정(전위차법, 초음파법 등)
초 음 파 탐 상 시 험	내부 결함의 분포상태 파악과 치수측정
두 게 측 정	부식, 침식의 정도 파악



(a) B스코프 초음파 탐상법



(b) 스테이벤 내부결함의 추정결과 예

<그림 8> 스테이벤

가 적용되고 있으나 실제의 결합형상을 모델화하여 파괴역학을 적용하기 때문에 결합의 치수, 형상, 위치 등을 高精度로 측정하는 것이 중요하다.

특히 초음파탐상시험은 결합분포를 평면적으로 나타내기 때문에 B스코프 표시법이 사용되고 있다. 그림 8과 같이 초음파탐촉자를 主板에서 일정한 거리 H를 유지하면서 주사하고 결합 에코와 탐촉자 위치를 화상처리장치에 설치한 구조로 되어 있다.

즉 거리 H를 순차적으로 변화시켜서 탐상하고 탐상결과를 합성함으로써 결합형상과 치수를 정확히 구할 수 있다. 그런데 결함의 분포와 치수형상을 양호한 精度로서 구하기 위하여 탐상결함상을 3차원적으로 표시하는 데이터 처리장치도 개발되고 있다.

또한 표면결함에는 손브법이 적용되어 금속조직의 레플러커가 채취되는데 이것은 결함의 형상을 파악하기 위한 중요한 데이터를 제공하며 아울러 피로균열의 진전이 확인되는 경우에는 損傷域을 제거하여 수명개선을 도모한다.

한편 그림 7에 나타난 재료의 각종 특성치 C , m , K_{Ic} , ΔK_{th} 는 파괴역학의 적용에 필요한 수

치로서 改修水車材의 각종 재료시험에 의해서 결정된다.

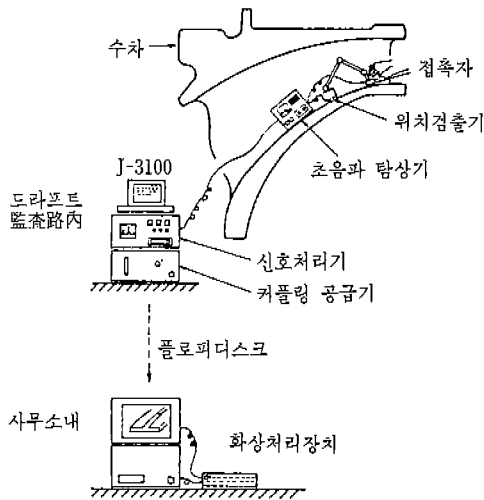
그러나 老板化가 높은 케이싱재의 주철과 주강재의 특성데이터는 아직 충분하지 않아 앞으로 수명평가에 대한 정도 향상에는 다양한 데이터의 수집이 바람직하다.

한편 수차러너, 가이드벤 등은 케이싱과 스테이벤 등에 비교하면 改修, 交換은 비교적 용이하나 이들의 部位에 대해서도 수명평가를 정확히 함으로써 예기치 못한 운전장치가 발생하지 않도록 예방보존에 주력하여야 할 것이다.

예를 들면 러너에 대해서는 캐비테이션 壤蝕이 발생한 경우 보수시기와 폐기시기에 대한 指針이 나와 있다.

또한 고낙차 대용량의 펌프수차에 대해서는 예방보존의 관점에서 정기검사시 磁粉探傷試驗과 浸透探傷試驗이 적용되는 이외에 超音波探傷試驗도 추가되어 제조시에 허용된 표면결함과 내부결함을 추적 조사하는 경우도 있다.

특히 펌프수차의 高應力 發生部位의 검사는 고 정도의 검사법이 요구되고 있어 그림 9 와 같은 3



<그림 9> 3차원 초음파 탐상시험 데이터 기록장치의 블록도

차원 형상의 탐상용 초음파탐상장치도 개발되고 있다.

이 장치는 수차러너 流水面과 같이 복잡한 3차원 곡면을 手探傷하였을 때에 探觸子의 走査位置에 따라서 試驗體 形狀을 판독함과 동시에 결함 위치를 시험체형상에 합치시켜서 화상으로 표시하도록 한 것이다.

수차발전기는 스테이터코일이 기동정지의 영향을 받아서 절연열화를 초래하므로 수명진단시 중요한 대상부위가 되고 있다.

코일의 열화요인으로서는 열적, 전기적, 기계적 및 환경적 요인으로 대별되며 권선의 건조상태, 교류전압의 손실, 절연물 중의 보이드 계측 등에 각종 비파괴시험이 실시되고 있다.

이들의 시험결과를 발전기의 운전이력 데이터와 병행하여 평가함으로써 코일의 殘損壽命이 추정되고 있다.

5. 壽命診斷技術의 課題

火力和 水力發電機器 이외에 전동기 등에도 비파괴검사를 실시하여 수명을 진단하고 있으나 본 고에서는 생략한다.

발전기기의 수명은 앞으로 한층 더 정확하고 早期에 평가할 수 있어야 하며 결함검사 정도의 향상과 재현성이 높은 비파괴검사기술의 개발은 불가결한 과제로 되어 있다.

특히 터빈기기에 대해서는 균열 발생시 수명평가의 精度 향상도 經年發電設備의 안전운용에 중요하며 부품 교환이나 설비의 갱신에도 신뢰성 있는 데이터가 바람직하다.

균열 발생시 수명진단기술에 대해서는 비파괴 계측법이 단시간에 많은 箇所를 평가할 수 있기 때문에 앞으로 중심적 기술이 될 것이라고 생각되나 이것은 재질, 劣化의 형태 및 程度에 따라서 평가능력에 큰 차이가 나므로 재료의 물리적, 조직적 변화와 상관관계를 갖는 계측법의 개발이 요망된다.