

저압터빈 동익 자동초음파 검사기술 개발 현황



김 용 식
한전 전력연구원

I. 서론

원자력발전소 터빈은 증기를 동익에 충돌시켜 그 회전력으로 발전기를 회전시킴으로써 전기를 생산하는 발전소 핵심 설비 중 하나이다. 원자력발전소 터빈은 발전 중 1,800rpm으로 회전하게 되며, 터빈 로터 디스크에 부착된 동익은 회전에 따라 응력을 받게 된다. 1970년대 말 미국의 경우 원자력 발전소 저압터빈 동익에서 응력부식균열(SCC)이 발견된 이후 저압터빈 동익의 건전성 유지는 산업계의 중대한 문제로 대두되었다. 이때 저압 터빈 동익에서 결함이 발생하여 많은 발전소의 터빈들이 보수를 하거나 교체되었다. 1995년도 EPRI 조사에 의하면 미국 내 운전 중인 104개 발전소 터빈 중 41개 터빈에서 균열이 발생한 것으로 보고된 바 있으며, 이후 1980년대에 이루어진 조사 결과에서도 저압 터빈 동익 부위에서 발생하는 결함은 계속 증가되고 있는 것으로 확인되었다. 따라서 터빈의 건전성 확보를 위

하여 저압터빈 동익부위에 대한 비파괴검사의 중요성은 매우 중요하다. 본 고에서는 원자력발전소 저압터빈의 동익 루트부 건전성 평가 방법인 초음파 검사방법의 현황과 이를 적용한 사례를 소개하고자 한다.

II. 저압 터빈 동익의 파손 원인

1. 피로 파괴

터빈 부품의 피로파괴는 저 사이클 피로와 고 사이클 피로로 구분할 수 있으며, 전자는 주로 열응력에 기인하는 반면 후자는 진동에 의한 반복 응력에 기인한다. 터빈 동익은 고 사이클 피로의 영향을 주로 받는데, 고압단 동익은 Nozzle Passing Frequency(회전수×Nozzle수)에 의하여 가진되고, 저압단 동익은 회전수의 배수 주파수에 의하

여 가진된다. 따라서 이들 주파수와 동익 고유진동 주파수가 일치하지 않도록 설계하며 Off-Frequency 운전도 엄격히 제한된다.

2. 응력부식 균열(Stress Corrosion Crack)

응력부식 균열은 응력이 작용하는 곳에 부식성 환경이 존재하면 균열이 발생하는 현상이다. 이는 동익, 동익고정 Pin, Shroud Band, Tennon, Erosion Shield 등에서 발생하며 부식성 분위기는 주로 복수기관 누설로 인한 오염 해수에 기인하는 경우가 많다.

3. 침식

터빈 동익에서 발생하는 침식은 2가지로 구분되는데 첫째는 저압터빈의 저압단에서 발생하는 침식으로 습증기 습분에 의하여 발생한다. 둘째는 고,중압터빈 입구측 동익에서 발생하는 것으로 보일러관의 산화 Scale 유입에 의하여 발생된다. 이들 침식에 의하여 동익이 직접 절손되는 경우는 없고, 침식의 누적이 과도할시 강도 부족을 유발하여 절손된다.

4. 이물질 유입에 의한 충격

운전중 유입 이물질 혹은 탈락 부품이 동익에 충격을 주어 동익의 손상이 발생하는 현상이다.

5. Rubbing에 의한 손상

동익의 Rubbing에 의하여 Shroud Band, Tenon 등의 손상이 발생하며 심하면 동익 Tip의 절손(특히 Free Standing Blade의 경우)도 발생된다. Rubbing의 원인으로는 조립시 간격조정 불량과 운전시 물유입과 같은 케이스의 열적 불평형이 있다.

6. 설계불량

제작사의 설계가 잘못되어 동익사고가 발생하는 경우가

많으며, 특히 입증되지 않은 새로 설계 제작된 터빈에서 그러하다. 주로 공진 Margin 부족, 강도부족 등에 기인하므로 건설후 초기 운전시나 수년내에 문제가 발생, 노출되는 경우가 대부분이다.

7. 제작불량

모재 재질의 불균일, Erosion Shield 부착 및 열처리시 과도한 잔류응력 발생 등에 의하여 특정 Blade에서 균열이 발생, 절손 될수 있다.

8. 조립불량

동익이 잘 설계되고 제작되어도 동익 조립이 불량하면 고유진동주파수가 변하여 공진 유발할 수 있으며, Shroud Band 조립시 Tenon을 Over Pinning 하면 Tenon 균열이 발생될 수 있다.

9. 경년열화

장기간 운전함에 따른 재질 열화로 기계적 성질이 취약해져 균열이 발생, 절손되는 경우이며, 15년 이상 운전된 발전소의 동익 절손은 대부분 이 경우에 해당된다.

III. 터빈 동익 루트부의 손상시기

운전 후 5년 이내에 동익 설계 및 조립에 기인한 문제의 대부분이 동익 몸체 및 Root 균열, Tenon 절손, Shroud Band 탈락 등의 형태로 나타나므로, 동익 손상은 이 기간 중에 가장 많이 발생한다. 문제 해소 후 안정적인 운전이 이루어지다가 15~20년이 경과하면 동익 경년열화에 기인한 손상이 다시 증가한다. 이 경우는 그 동안의 운전상태(부분부하운전, 과부하운전, 기동정지 빈도), 정비정도, 설계시 Margin 정도 등에 영향을 받는다.

IV. 동익 루트부 검사 기술 현황

현재 국내 원자력발전소 터빈 동익 루트부 비파괴검사는 초음파탐상검사(UT), 자분탐상검사(MT) 또는 액체침투탐상검사(PT) 등의 수동 검사를 적용하고 있다. 특히 저압터빈 동익 루트부의 결함 발생 평가는 루트부 체결방식에 따라 여러 가지 방법이 적용되어 왔으나 기본적으로 펄스 에코방식의 수동 초음파 탐상방법이 주로 사용되고 있다. 그러나 수동초음파 탐상검사의 경우 검사결과 신뢰성의 저하, 기하학적인 형상에 의한 신호평가의 어려움, 기록의 보존성, 검사자 피로 누적 등과 같은 여러가지 문제를 가지고 있다. 최근에는 이러한 수동초음파 검사의 문제점을 해결하고자 많은 연구기관에서 자동 초음파 검사기법을 개발하고 있다. 또한 동익의 형상에 따라 Pin Finger 형인 경우에는 기존의 펄스-에코를 이용한 방법으로 검사자동화가 이루어지고 있다. Straddle mount type 등과 같은 동익 루트부 형상은 기하학적 형상의 복잡성으로 인해 수동 펄스 에코 초음파 검사 방법으로는 검사가 어렵고 시간이 오래 걸리는 경우에 대해 의료업계에서 적용되던 위상배열(phase array) 초음파 탐상 방법을 저압 동익 루트부 검사에 적용하려는 시도들이 활발하게 이루어지고 있다.

V. 펄스 에코법을 이용한 검사기술 개발

1. 검사 대상 터빈의 구조

본 검사기술개발에 적용된 저압 터빈은 13% 크롬강 재질이다. 본 터빈은 회전익이 받게 되는 여러 가지 기계적인 응력인 원심력, 비틀림 및 반복 하중 등에 대한 저항을 고려하여 제작되었다. 터빈의 사양을 보면 전체 길이 11,200mm인 로터에 디스크가 축 방향으로 모두 7개가 배열되어 중심부에서 1단(Stage)이 시작되어 양쪽으로 7단의 디스크가 설치되어 있다. 1,800rpm으로 회전하고 있으며 정격출력은 986MWe이다. 그림 1은 시험대상 저압터빈의 그림이며, 그림 2는 저압터빈 블레이드의 형상을 나타

낸 그림이다.

Blade와 Disc를 연결하는 부분인 Blade Root는 1단에서 5단까지는 Pin Finger Type으로서 Blade가 로터의 디스크에 설치되어 있다. 각 단 사이의 간격도 15cm에서 23cm까지 각각 다르게 나타나며 1단과 2단 사이의 간격이 가장 좁다. 그러나 검사를 위한 조건을 고려하면 2단과 3단 사이의 간격이 가장 좁은 60mm로 되어 있다.

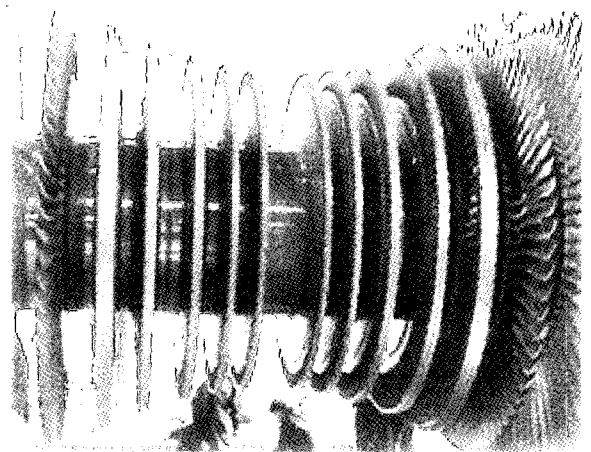


그림 1. Alsthome low pressure turbine

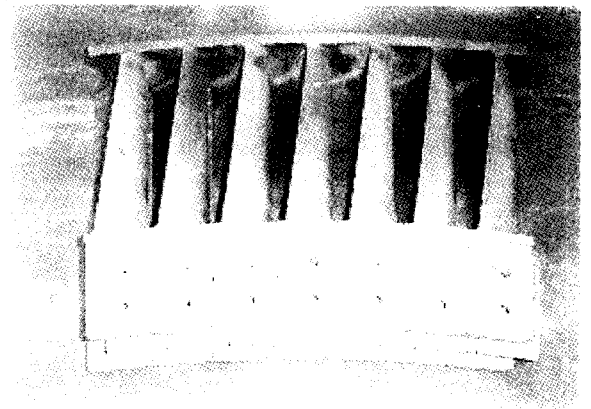


그림 2. 3rd stage low pressure turbine blade

Pin Finger Type은 디스크에 홈이 가공된 상태에서 Blade가 결합되어 측면에서 핀으로 체결된 구조로 제작되어 있으며 각 단에 따라 Blade의 길이가 다르므로 Blade에

작용되는 원심력을 지지하기 위해서는 단이 증가할 수록 Finger의 크기와 Pin의 수가 많아진다. 1단에는 Finger의 수와Pin의 수가 2개이며 5단에는 Finger의 수가 4개이다. 6단은 1단에서 5단까지의 구조와는 다르게 Straight Fir Tree Type으로 제작되었으며 7단은 Curved Fir Tree 방식으로 설치되어 있다.

터빈에 회전운동을 제공하는 Blade는 각 단을 통과하면서 압력이 감소하는 증기로부터 많은 회전운동에너지를 얻기 위하여 Blade의 크기가 점차적으로 증가하며, 각 단의 Blade수는 1단에서 7단까지 각각 210개, 210개, 143개, 120개, 91개, 77개, 65개로 구성되어 있다.

2. 검사 장비 개발

2.1 시편 제작

초음파 검사의 특성상 2, 3단 블레이드 루트부 검사에서 날개 부위는 초음파 검사에 거의 영향을 미치지 않을 뿐만 아니라, 제작상에 공정과 비용이 많이 소요되어 날개부위를 제거한 루트부위만을 저압터빈 재질과 유사한 성분의 소재로 시편을 제작하였다. 제작이 완료된 시편에서 신호를 취득한 결과, 현장에서 인출된 실제 블레이드에서의 초음파 속도와 거의 유사함을 알 수 있었다.

Pin Finger 형 블레이드 체결 방식은 2개의 Hole로 체결되어 있는 형태로써 Pin Hole 부위에 응력이 집중될 수 있다. ANSYS를 사용하여 응력 해석 수행 결과를 보면 그림 3과 같이 응력 집중이 나타나는 부위는 로터의 중심선으로부터 바깥쪽의Pin Hole이며 Hole중에서도 최대 응력이 걸리는 부위는 인장력 방향에 수직인 Tangential Surface 구역이 된다. 실제 계획 예방정비 기간 중 발생된 블레이드 결함의 대부분이 첫 번째 Hole에서의 결함이다.

위와 같이 발생되는 결함을 모의하기 위한 인공 결함은 그림 4와 같이 시편의 첫 번째 Hole에 대해 Slit Notch 0.25mm, 0.5mm, 1.0mm 와 모서리 부위 Round Notch 0.5mm, 0.75mm, 1.0mm를 두께 약 0.2mm로 방전 가공하였다.



그림 3. Stress distribution of blade

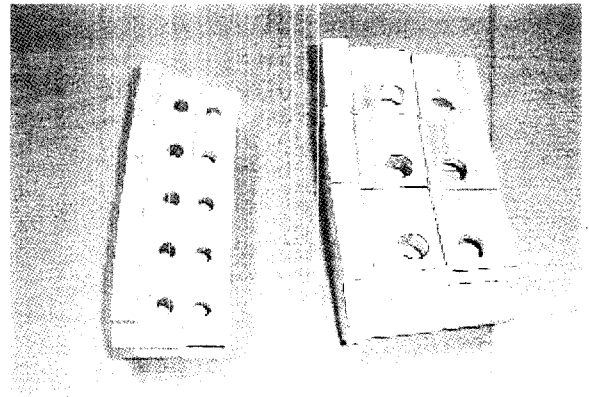


그림 4. Test specimen
(Left : 2nd stage blade root, Right : 3rd stage blade root)

2.2 Mock up 제작

터빈 로터의 실제 원주 길이를 확보하면서 블레이드를 삽입하는 형태의 Mockup은 그 규모나 무게 그리고 공간 활용면에서 불필요하므로 실험에 사용될 Mockup은 2개로 나누어서 제작을 하였다. 첫 번째 Mockup은 자동 장비의 회전성, 부착성 등을 판단하기 위하여 폭 6.5cm 정도의

철판으로 터빈 로터와 동일한 원주가 되도록 원형으로 제작하였다. 두 번째 Mockup으로 블레이드를 설치할 수 있고 자동장비가 이동하면서 삽입된 블레이드로부터 신호를 취득할 수 있도록 그림 5와 같이 제작하였다. Mockup의 몸체는 자동 탐상 스캐너가 부착되어 회전 할 수 있도록 자성체의 성질을 가진 철판으로 제작하였다.

2단 블레이드와 3단 블레이드를 모두 한 Mockup에 설치하기 위하여 한쪽 면은 2단 블레이드에 적합한 간격을 유지하도록 하였고, 다른 면은 3단 블레이드에 적합한 간격을 유지하도록 하였다. 또한 제작되는 자동 탐상 스캐너의 실험을 위하여 전체 로터의 1/2 Mockup에 2단 블레이드 105개, 3단 블레이드 71개가 장착되도록 Pin-hole을 가공하였다. Pin은 한쪽 끝에 제거용 링을 설치하여 블레이드 탈, 부착이 편리하도록 하였다. 각 블레이드에 대한 초음파 검사는 Leading side와 Trailing side의 양면에 대해 검사를 수행하여야 한다. 따라서 블레이드 시편의 양면이 Mockup에 설치되어 스캐너에 의해 검사가 수행될 수 있어야 한다.

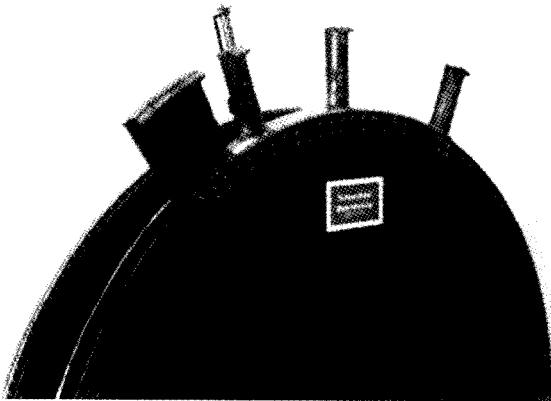


그림 5. Mock-up for automatic ultrasonic testing

2.3 스캐너 제작

초음파 시험을 위한 스캐너를 그림 6과 같이 제작하였다. 자동 스캐너를 구동하기 위한 Controller로 R/D Tech사의 MCDU-02를 사용하였으며, 탐상기를 로터에 부착시

키는 방법은 전원에 영향을 받지 않는 영구 자석으로 하고, 구동은 MCDU-02에 의해 조작될 수 있는 DC Servo Motor를 사용하였다. 자석은 터빈 로터와 일정한 공간을 유지할 수 있도록 탐상기에 설치하고 구동되는 바퀴는 DC Servo 모터와 체인을 이용하여 회전하도록 하였다. 스캐너의 폭은 로터의 각 단 사이로 들어가 스캐너가 움직일 수 있도록 해야 하므로 현장에서 실측한 자료를 근거로 결정하였다. 검사 시 탐촉자가 설치된 부분은 현장에서 2단 및 3단 검사 수행에 적합하도록 원주방향으로 어느 정도 이동이 가능하게 하였으며 탐촉자의 중앙이 스캐너의 중심에 위치하도록 하였다. 탐촉자는 지지대에서 검사면에 접촉하였을 때 적절한 Tension을 유지하도록 하였으며, 탐촉자 옆에는 접촉매질 공급 장치를 부착하였다. 또한 2단 검사 후 3단 검사 시 스캐너를 분리하지 않고 검사가 수행 가능하도록 하기 위하여 탐촉자 지지대는 회전이 가능하도록 제작하였다.

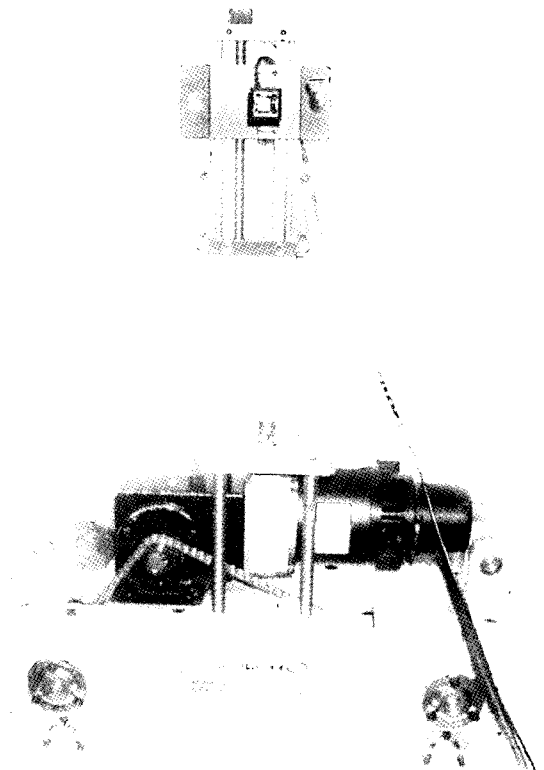


그림 6. Scanner for ultrasonic testing

2.4 검사 시스템 구성

저압 터빈 2, 3단 블레이드 루트를 검사하기 위한 검사 시스템은 초음파 신호 발생 장치인 μ Tomoscan, 자동 탐상기의 운동을 제어하는 MCDU-02, 자동 탐상 스캐너, 연속으로 접촉 매질을 공급하는 공급용 펌프, 신호 취득 및 평가용 PC, 정전 대비용 무정전 전원 공급 장치, 자료 저장 광디스크 드라이브, 결과물을 출력하는 칼라 프린터로 구성하였다. 그림 7은 시험장비의 구성도를 나타내었다. 초음파 신호를 발생하고 수신하는 장치로는 R/D-Tech사의 μ Tomoscan을 사용하였고 이에 따르는 신호 수집 및 평가 프로그램은 Tomoview 프로그램을 사용했다. MCDU-02는 PC에 설치되어 있는 Tomoview 프로그램에서 조작이 가능하며 자동 탐상 스캐너에 부착된 Encoder의 신호를 전송하여 이동거리를 기록할 수 있도록 되어 있다. 일반적으로 자동 검사에 많이 사용되는 접촉매질은 순수이나 터빈 로터 검사의 경우 탐상기 자체가 회전을 하면서 블레이드 검사를 수행하도록 되어 있어 물을 사용할 경우 아래로 흘러내리면서 회전하는 스캐너에 나쁜 영향을 미칠 수 있으며 하부에 떨어지는 물을 받아야 하는 물 받침대가 필요하므로, 점성이 있어서 잘 흘러내리지 않고 신호를 잘 전달시키는 특성이 있는 상용의 접촉매질을 사용하였다. 또한 접촉매질을 적합한 양으로 일정하게 공급하기 위하여 토출량이 낮은 Rotary 식 펌프를 선택하였다. 스캐너의 경우 접촉 방식이 영구 자석에 의한 접촉이므로 전원 상실 시 하부로 떨어질 염려는 없으나 신

호 취득 중단과 신호 평가등에 영향을 미칠 수 있어 무정전 전원 장치를 시스템에 같이 구성하였다. 터빈 블레이드 루트부에 대한 탐상은 탐촉자가 블레이드 옆면에서 검사를 수행하여야 내부의 Pin Hole로 신호가 전달될 수 있다. 블레이드 옆면의 형상은 폭이 매우 좁아 탐촉자가 접촉할 수 있는 면적이 아주 제한적이므로 이러한 사항을 고려하여 4×4 사각, 주파수 5MHz, 사용각도 35~45도의 탐촉자를 사용하였다.

3. 검사 기술 개발

스캐너의 적절한 초기 설정 상태를 파악하기 위하여 스캐너의 이송 속도와 신호 취득 시 Digitizing Rate, Data 저장 용량, Encoder Resolution의 설정값을 변경해 가면서 적절한 상태를 파악하였다. 상기의 자료들은 서로 연관성이 있으므로 하나의 변수를 정해놓고 다른 변수들을 변화시켜 가며 적절한 설정값을 취하였다. 실험 결과 Averaging : 1, Digitizing Freq. : 15.624, Acquisition : 60, Recurrence : 2000 등이 검사에 적합한 것으로 판단되었다.

저압터빈 2, 3단 블레이드 루트의 경우 연속하여 다이아프램에 Pin으로 고정되어 있으며 각 블레이드를 지나갈 때마다 약간의 높낮이 차이가 발생하여 특정 방향으로만 검사가 가능한 제약 조건이 발생하였다. 또한 터빈 블레이드 신호 취득 시의 문제점은 각 단과 단 사이의 경계부를 이동할 때 경계면이 수평이 아니므로 탐촉자의 흔들림이 발생하는 것이었다. 즉 전단과 후단 사이의 블레이드 면의 높이 차이가 발생하여 검사 시 한쪽 방향으로만 검사가 가능하고 각 단을 넘어갈 때 스캐너의 속도가 너무 빠르면 블레이드의 시작점에서 신호취득이 제대로 되지 않는 문제점이 발생한다. 따라서 적절한 검사 속도는 양질의 신호를 얻는데 아주 중요한 변수이며, 실험 결과 스캐너의 이동 속도는 5mm/sec 이상을 초과하지 않는 것이 적절하였다.

신호 탐상을 위한 기본 감도는 Rompas 2mm를 FSH 80%에 설정한 후 블레이드 결함시편을 자동 탐상하여 0.5mm Round Notch가 화면의 약 20%에 도달하였을 때를 기준으로 재 선정하였다. 검사 시 블레이드 면에 대한 적절한 탐촉자 위치를 선정하기 위해 블레이드 탐상면의

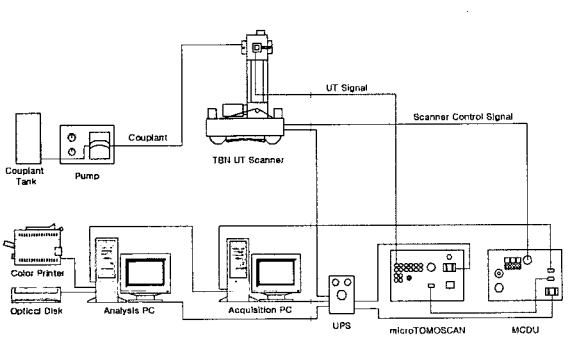


그림 7. Schematic diagram of test equipment

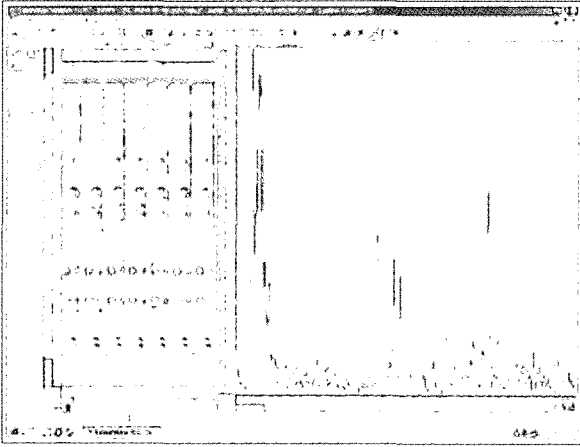


그림 12. 3rd stage specimen(round notch 1.0mm)

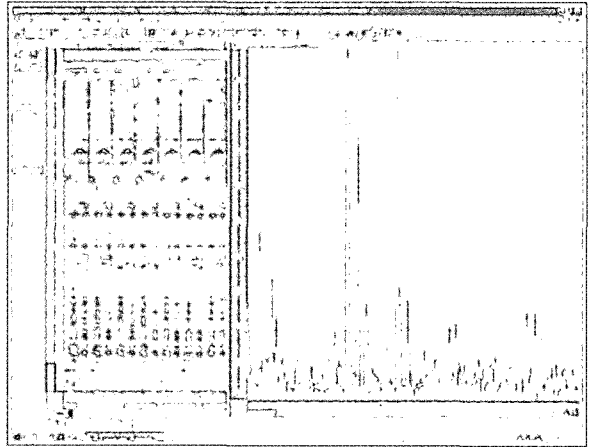


그림 15. 2nd stage specimen(slit notch 1.0mm)

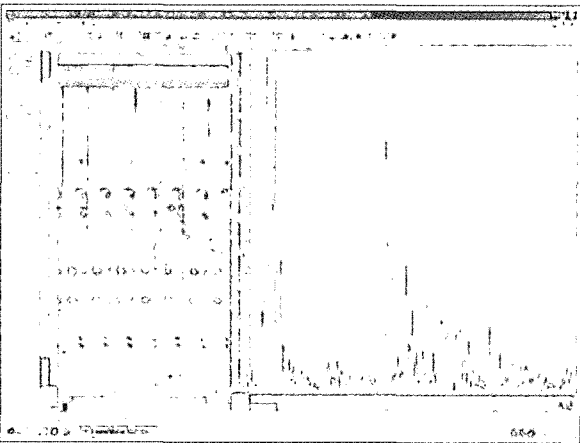


그림 13. 3rd stage specimen(Real crack)

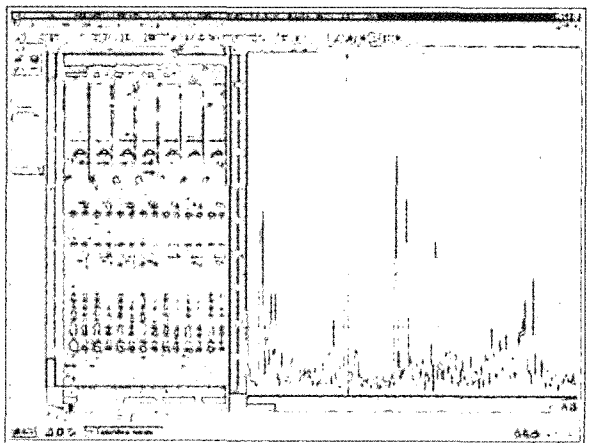


그림 16. 2nd stage specimen(round notch 0.5mm)

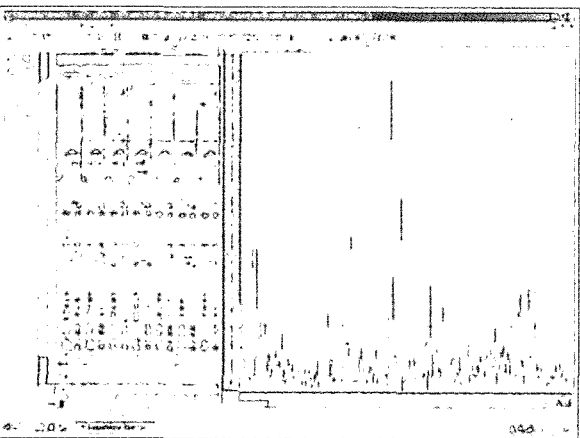


그림 14. 2nd stage specimen(slit notch 0.5mm)

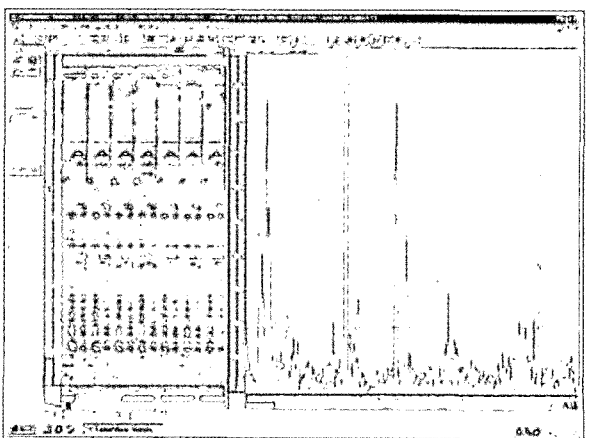


그림 17. 2nd stage specimen(round notch 1.0mm)

4. 현장 적용 검사

개발된 검사 장비의 적용성을 확인하기 위해 해당 발전소 계획 예방 정비 기간 중, 저압 터빈 분해 보수 기간동안 2, 3단 블레이드 루트부에 대한 자동 초음파 검사를 수행하였다.

현장 적용 검사를 통하여 제작된 자동 초음파 스캐너의 구동성 및 적용성을 확인하였고, Data 분석 결과 각 블레이드에서 취득한 초음파 신호는 건전한 것으로 판명되었다.

그림 18은 현장에서 2, 3 단 블레이드 사이에 스캐너가 설치되어 검사를 하고 있는 모습이다

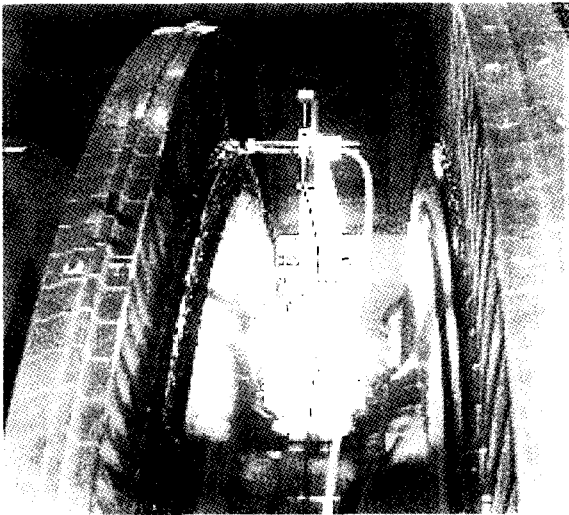


그림 18. Application of developed equipment

전연수가 증가됨에 따라 저압터빈의 손상 가능성도 매우 증가하고 있으며 실제로 국내 원전의 저압터빈 동익부 손상 사례도 많이 발견되고 있다. 저압터빈 동익의 손상은 터빈전체에 커다란 손상을 일으켜 막대한 경제적 손실뿐만 아니라 전력수급에 지대한 영향을 미친다. 따라서 저압터빈의 건전성 확보는 매우 중요하며 이를 위해서는 적절한 운전과 정비가 병행되어야 한다. 또한 저압터빈 동익의 탈락에 의한 대형사고를 사전에 방지하기 위한 건전성 평가 기술의 확보가 시급하다. 지금까지 적용된 비파괴검사방법중 초음파 탐상검사방법이 저압터빈 동익 루트부에 대한 건전성 평가를 위한 최선의 검사방법으로 평가되고 있으나 저압터빈 동익의 형상에 의한 제한으로 검사기술 개발에 많은 제약이 따르고 있다.

최근 성능이 뛰어난 여러 초음파 탐상장비 개발과 새로운 검사기법등이 개발됨으로써 형상 제한에 의해 검사가 어려웠던 저압터빈 동익들에 대한 자동 초음파 검사기술의 개발이 활발히 이루어지고 있다. 터빈의 건전성 확보를 위해 다양한 형태의 동익 형상에 따른 체계적인 자동초음파 검사기술 및 장비의 개발이 시급하다.

참고 문헌

1. "Inspection of Turbine Disk Blade Attachment Guide", EPRI TR-104026, 1994
2. "Third EPRI Turbine and Generator NDE, Life Assessment and Maintenance Workshop", EPRI TR-103392, 1994
3. "Round-Robin Turbine Blade Attachment Inspection Program", EPRI-TR-106749, 1997
4. "Guide to Optimized Nuclear Low-Pressure Turbine Rotor Inspection", EPRI-TR-107480, 1997

VI. 결 언

원자력발전소 저압터빈 동익의 자동초음파 검사기술의 현황과 개발동향에 대하여 살펴보았다. 국내 발전소의 운