

원자력 발전소 저압 터빈 동익 자동 초음파 검사 기술 개발

Development of Automatic Ultrasonic Testing Techniques of Low Pressure Turbine Blade of Nuclear Power Plants

양승한*[†], 이정빈*, 김영호*, 윤병식*, 김용식*

Seung-Han Yang*[†], Jeong-Bin Lee*, Young-Ho Kim*, Byung-Sik Yoon* and Yong-Sik Kim*

초 록 원자력 발전소의 터빈에서 운전 연수 증가에 따라 pin finger형 블레이드 루트부에 균열이 발생하는 문제점이 발생되었다. 블레이드 루트부에 대한 비파괴검사는 매 계획 예방 정비기간 동안 수동 초음파 검사를 통하여 수행되어 왔으나, 검사의 신뢰성을 확보하기 위해 해당 설비에 대한 자동 초음파 검사 기술 개발의 필요성이 대두되었으며, 이에 따라 자동 초음파 검사 장비 및 검사 기술을 개발하였다. 개발된 검사 장비의 적용성을 확인하기 위해 계획 예방 정비 기간 중 저압터빈 2, 3단 블레이드 루트부에 대한 자동 초음파 검사를 수행하고, 다양한 형태의 터빈 검사에 확대 적용 가능성을 확인하였다.

주요용어: 자동 초음파 검사, 저압 터빈 동익

Abstract As the turbine running duration in nuclear power plants increases, cracks have been found in the pin finger type blade root area. The nondestructive examination for the blade root area has been carried out by manual ultrasonic examination during the overhaul period, but because of necessity to improve the reliability, we developed an automatic ultrasonic examination system and technique. To demonstrate the performance of the developed automatic ultrasonic examination system, low pressure turbine blades in the 2nd and 3rd stages of nuclear power plants were examined using the developed system. Its applicability nuclear power plant turbine roots of various types was also confirmed.

Keywords: automatic ultrasonic testing, low pressure turbine blade

1. 서 론

1969년 영국 Hinckley Point 원자력 발전소의 응력 부식 균열로 인한 저압 터빈 파손 사고로 인하여 산업계는 저압 터빈의 결함에 대해 관심을 가지게 되었다[1]. 이후 1970년대 말, 미국 가압 경수로형 원자력발전소의 저압 터빈 블레이드 부위에서 결함 발생이 처음 확인되었으며, 이러한 결함 발생에 따라 EPRI는 두 번에 걸쳐 저압 터빈 균열에

대한 사례를 분석하여 보고하였다.[2, 3] 이러한 분석 결과와 터빈의 운전 연수 증가에 따라 산업계는 미국에서 저압 터빈의 주종을 이루고 있는 GE의 straddle mount blade 형식과 Westinghouse의 axial entry blade 형식의 저압터빈에 대해서 검사 기법 연구를 진행하였다[4-6].

현재 국내에서는 터빈 블레이드에 대한 주기적인 비파괴검사는 공급사 권고지침에 따라 발전소 별로 매년 1대씩 수동 초음파 검사로 수행하여 왔으며,

터빈 운전 연수 증가에 따라 블레이드 루트부에서 결함 발생 확률이 증가하고 있으나, 열악한 검사환경(접근성) 및 검사물량의 과도로 인해 현재 사용하고 있는 수동 검사로는 블레이드 루트부의 복잡한 기하학적 형상, 접근성 취약, 검사자 능력 한계 등의 문제로 검사 신뢰도 확보 및 계획 예방 정비 기간 준수에 어려움이 상존해 있다. 이에 따라 검사 신뢰도 제고 및 검사의 신속성을 위해서 터빈 동익에 대한 자동초음파 검사기술 개발 필요성이 대두되었다.

본 연구에서는 GE의 straddle mount blade 형식과 Westinghouse의 axial entry blade 형식이 아닌 터빈의 각 블레이드와 다이어그램의 체결방식이 루트부에 결함 발생 가능성이 높은 pin finger 형으로 제작된 프랑스 Alsthom사의 저압 증동식 터빈을 대상으로, 저압 터빈 블레이드 루트부에 대한 자동초음파 검사 수행을 위하여 이에 적합한 장비 및 검사 기술을 개발하였다.

2. 저압 터빈 구조

본 연구의 대상인 저압 터빈은 회전익이 받게 되는 여러 가지 기계적인 응력인 원심력, 비틀림 및 반복 하중 등에 대한 저항을 고려하여 13% 크롬강을 이용하여 제작되었다. 전체 길이 11,200 mm인 로터에 디스크가 축 방향으로 모두 7개가 배열되어 중심부에서 1단(stage)이 시작되어 양쪽으로 7단의 디스크가 설치되어 있다. 1800 rpm으로 회전하고 있으며, 정격출력은 986 MWe 이다. Fig. 1은 Alsthom 저압 터빈 형상이며, Fig. 2는 3단 블레이드 형상이다. Blade와 disc를 연결하는 부분인 blade root가 1단에서 5단까지는 pin finger type으로서 blade가 로터의 디스크에 설치되어 있다. 각 단 사이의 간격도 15 cm에서 23 cm까지 각각 다르게 나타나며 1단과 2단 사이의 간격이 가장 좁다. 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 증가할수록 finger의 크기와 pin의 수가 많아진다. 1단에는 finger의 수와 pin의 수가 2개이며 5단에는 finger의 수가 4개이다. 6단은 1단에서 5단까지의 구조와는 다르게 straight fir tree type으로 제작되었으며 7단은 curved fir tree 방식으로

설치되어 있다. 각 단의 blade수는 1단에서 7단까지 각각 210개, 210개, 143개, 120개, 91개, 77개, 65개로 구성되어 있다.

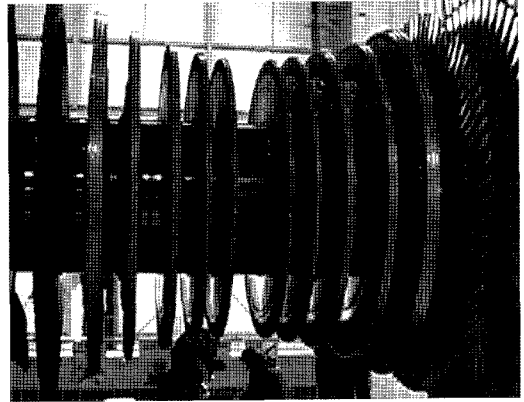


Fig. 1 Alsthom low pressure turbine

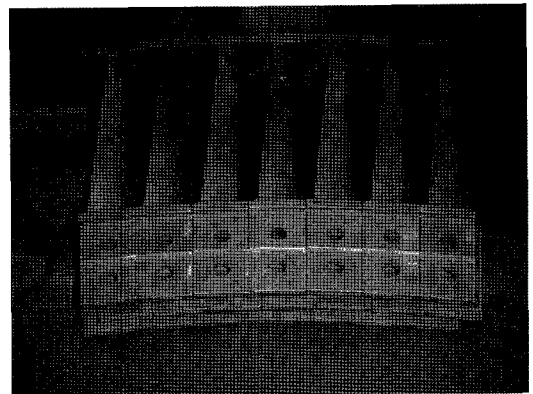


Fig. 2 3rd stage low pressure turbine blade

3. 검사 장비 개발

3.1. 시편 제작

초음파 검사의 특성상 2, 3단 블레이드 루트부 검사에서 날개 부위는 초음파 검사에 거의 영향을 미치지 않을 뿐만 아니라, 제작 상에 공정과 비용이 많이 소요되어 날개부위를 제거한 루트 부위만을 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 사용한 응력 해석 수행 결과를 보면 Fig. 3과 같이 응력 집중이 나타나는 부위는 로터의 중심선으로부터 바깥쪽의 pin 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.



Fig. 3 Stress distribution in blade

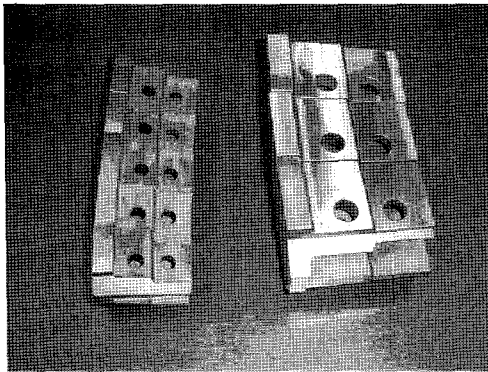


Fig. 4 Test specimen (Left : The 2nd stage blade root, Right : The 3rd stage blade root)

위와 같이 발생하는 결함을 모의하기 위한 인공 결함은 Fig. 4와 같이 시편의 첫 번째 Hole에 대해 slit notch 0.25 mm, 0.5 mm, 1.0 mm 와 모서리 부위 round notch 0.5 mm, 0.75 mm, 1.0 mm를 두께 약 0.2 mm로 방전 가공하였다.

3.2. Mock up 제작

터빈 로터의 실제 원주 길이를 확보하면서 블레이드를 삽입하는 형태의 mock up은 그 규모나 무게 그리고 공간 활용면에서 불필요하므로 실험에 사용될 mock up은 2개로 나누어서 제작을 하였다. 첫 번째 mock up은 자동 장비의 회전성, 부착성 등을 판단하기 위하여 폭 6.5 cm 정도의 철판으로 터빈 로터와 동일한 원주가 되도록 원형으로 제작하였다.

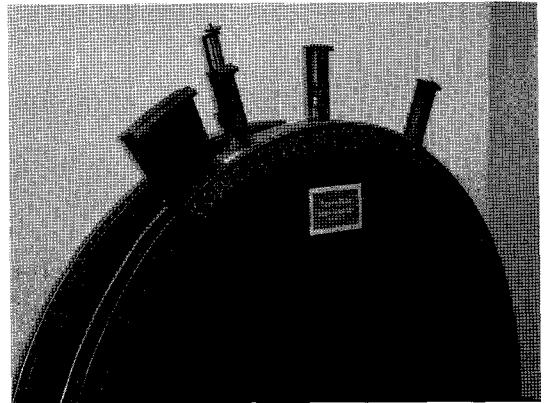


Fig. 5 Mock-up for automatic ultrasonic testing

Fig. 5는 두 번째 mock up으로 블레이드를 설치할 수 있고 자동장비가 이동하면서 삽입된 블레이드로부터 신호를 취득할 수 있도록 제작하였다. mock up의 몸체는 자동 탐상 스캐너가 부착되어 회전할 수 있도록 자성체의 성질을 가진 철판으로 제작하였다. 2단 블레이드와 3단 블레이드를 모두 한 mock up에 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.

3.3 스캐너 제작

자동 스캐너를 구동하기 위한 controller로 R/D Tech사의 MCDU-02를 사용하였으며, 탐상기를 로터에 부착시키는 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. Fig. 6은 이러한 스캐너의 형상을 보여준다.

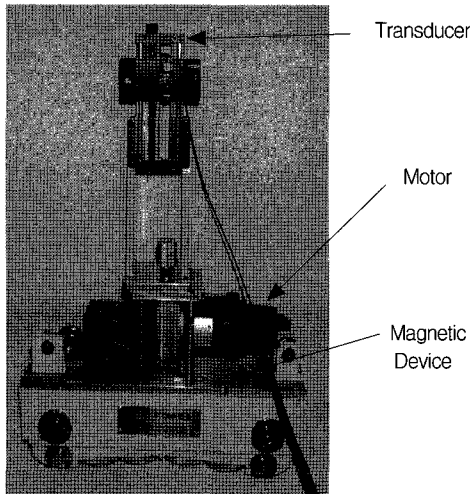


Fig. 6 Scanner for ultrasonic testing

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.

3.4 검사 시스템 구성

저압 터빈 2, 3단 블레이드 루트를 검사하기 위한 검사 시스템은 Fig. 7에 나타난 바와 같이 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 드라이버, 결과물을 출력하는 프린터로 구성하였다.

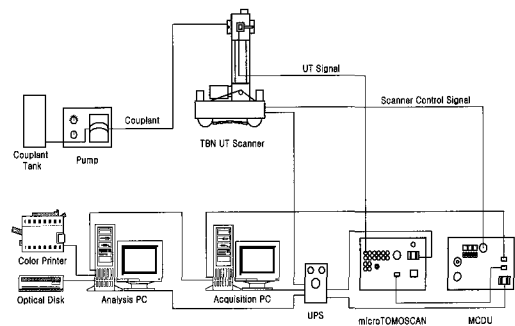


Fig. 7 Schematic diagram of test equipment

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 encorder의 신호를 전송하여 이동거리를 기록할 수 있도록 되어 있다. 일반적으로 자동 검사에 많이 사용되는 접촉 매질은 물이지만 터빈 로터 검사의 경우 탐상기 자체가 회전을 하면서 블레이드 검사를 수행하도록 되어 있어 물을 사용할 경우 아래로 흘러내리기 때문에, 점성이 있어서 잘 흘러내리지 않고 신호를 잘 전달시키는 특성이 있는 상용의 접촉 매질을 사용하였다. 또한 접촉 매질을 적절한 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 신호 취득 중단과 신호 평가 등에 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 5 MHz, 사용각도 35 ~ 45도의 탐촉자를 사용하였다.

4. 검사 기술 개발

스캐너의 적절한 초기 설정 상태를 파악하기 위하여 스캐너의 이송 속도와 신호 취득 시 digitizing rate, data 저장용량, 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 다이어그램에 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 신호 취득이 제대로 되지 않는 문제점이 발생한다. 따라서 적절한 검사 속도는 양질의 신호를 얻는 데 아주 중요한 변수이며, 실험 결과 스캐너의 이동 속도는 5 mm/sec 이상을 초과하지 않는 것이 적절하였다.

신호 탐상을 위한 기본 감도는 Rompas 표준 시험편에 있는 직경 2 mm 구멍으로부터의 반사 신호를 full screen height 80%에 설정한 후 블레이드 결합시편을 자동 탐상하여 0.5 mm round notch가 화면의 약 20%에 도달하였을 때를 기준으로 재 선정하였다. 검사 시 블레이드 면에 대한 적절한 탐촉자 위치를 선정하기 위해 블레이드 탐상면의 끝단 높이를 0으로 하여 신호를 취득하고 1 mm, 2 mm, 3 mm 아래방향), 1 mm, 2 mm(위 방향)으로 움직이며 신호

를 취득하여 결합 신호를 가장 잘 판별할 수 있는 위치를 평가하였다. 자동 탐상 스캐너를 이용하여 제작된 3단 건전 시편, 인공 결합 시편과 현장에서 발생된 결합 시편을 대상으로 신호 취득 실험을 수행하였으며, 수행한 결과는 다음과 같다.

Fig. 8에 나타낸 바와 같이 3단 건전 시편의 Hole에서 나타나는 B-SCAN 초음파 신호는 초생달 모양으로 나타나는 것을 알 수 있고, 이를 A-SCAN으로 보면 약 42 mm 부근에서 아주 높은 반사 에코가 발생함을 알 수 있다. 또한 블레이드 컷 번째 Hole 아래 부분에 단에서 발생하는 반사 에코가 있음을 알 수 있다.

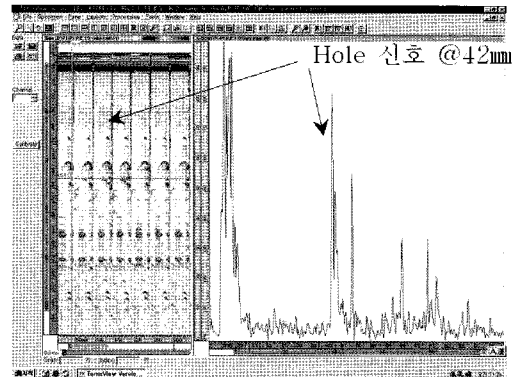


Fig. 8 3rd stage clean specimen

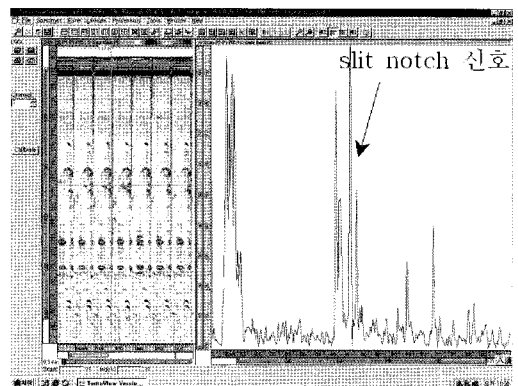


Fig. 9 3rd stage specimen (slit notch 0.5mm)

Fig. 9 ~ 12는 3단 모의 시편에서 얻은 신호로, round notch와 slit notch는 초음파 거리 약 46 mm 되는 지점에서 반사 에코를 나타내며, 같은 크

기의 notch인 경우, round notch에서 발생되는 에코는 slit notch에서 발생되는 반사 에코보다 다소 낮았다. 또한 Notch 크기 증가에 따라 에코의 크기도 증가함을 확인할 수 있었으나, 정량적인 관계는 도출하기가 어려웠다. 2단 블레이드에서 반사되는 에코의 신호는 3단 보다 가까운 34 mm에서 나타났으나, 비슷한 양상의 신호 경향을 보여 준다.

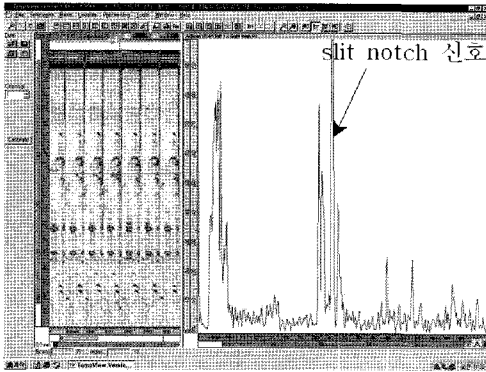


Fig. 10 3rd stage specimen (slit notch 1.0mm)

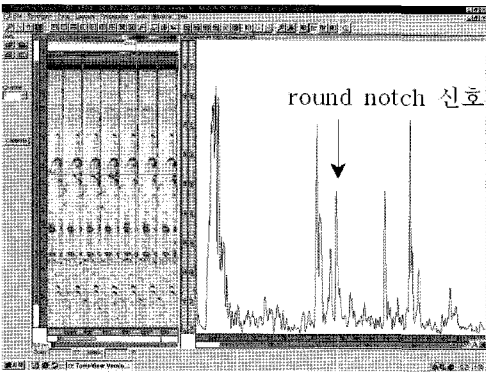


Fig. 11 3rd stage specimen (round notch 0.5mm)

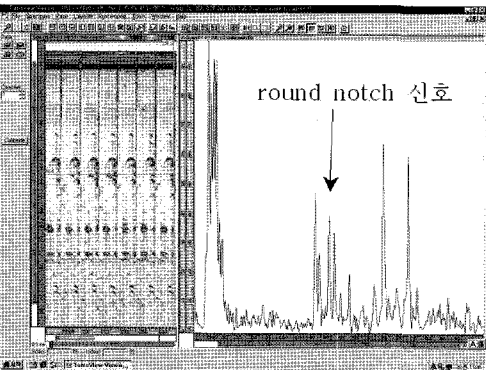


Fig. 12 3rd stage specimen (round notch 1.0mm)

Fig. 13은 발전소에서 과단되어 인출된 실제 결함에 대한 신호로서 약 60 mm 위치에서 커다란 반사 에코를 나타내고 또한 66 mm 부근의 블레이드 Hole 사이 단에서의 반사 에코가 소멸되었음을 알 수 있다.

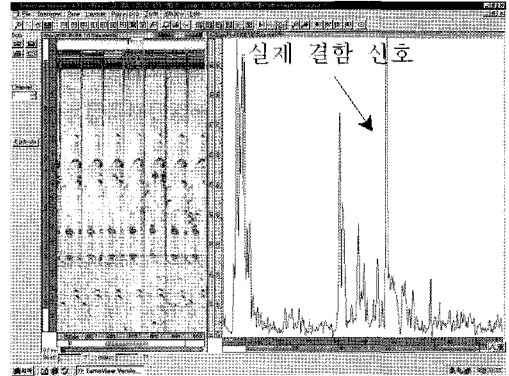


Fig. 13 3rd stage specimen (Real crack)

5. 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, 취득한 초음파 신호를 분석한 결과, 모든 블레이드는 건전한 것으로 판명되었다.

Fig. 14는 현장에서 저압 터빈 2, 3단 블레이드 사이에 스캐너가 설치되어 검사를 하고 있는 모습이다.

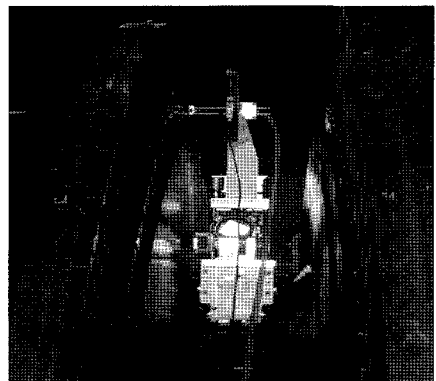


Fig. 14 Application of developed equipment

6. 결 론

본 연구를 수행하여 pin finger형 저압 터빈 2, 3 단 블레이드 부위에 대한 자동 탐상 스캐너를 제작하고 이를 운용할 시스템을 구성하였다. 취득되는 초음파 신호에 대한 평가기술을 개발하기 위하여 평가 대상 저압터빈과 유사한 재질의 시편을 제작 가공하였으며 각각의 시편에 모의 결함을 방전 가공하였다. 가공된 모의 결함 시편과 발전소에서 인출한 자연결함이 포함된 시편에 대한 초음파 탐상 결과, 결함을 명확히 구분할 수 있었다. 이를 현장에 적용하여 수동 검사 시 1일 소요되는 공정을 개발된 본 시스템으로 1시간에 검사를 완료하였으며, 자동 검사로 A-Scan 외에 B-Scan 데이터와 기록의 영구보존이라는 장점이 부가되었다. 이와 같은 성공적인 검사 수행 결과를 바탕으로, 향후 여타 발전소 다른 형식 터빈 검사에 확대 적용 가능성을 확인하였다.

참고문헌

- [1] "Investigation into the Consequences of the Failure of a Turbine-Generator at Hinckley Point 'A' power station," Proceedings: Institute of mechanical engineers, pp. 379-390, (1972)
- [2] "Steam Turbine Disk Cracking Experience," EPRI Report NP-2429, Vol. 1-7, (1982)
- [3] "LP Rotor Rim-Attachment Cracking Survey of Utility Experience," EPRI Report TR-107088, (1997)
- [4] "Inspection of Turbine Disk Blade Attachment Guide," EPRI TR-104026, (1994)
- [5] "Guide to Optimized Nuclear Low-Pressure Turbine Rotor Inspection," EPRI-TR-107480, (1997)
- [6] "Round-Robin Turbine Blade Attachment Inspection Program," EPRI-TR-106749, (1997)