

# 초음파탐상 검사를 이용한 증기터빈 블레이드 루트 핑거 균열 탐지기법 개발

## Development of Crack Detecting Method at Steam Turbine Blade Root Finger using Ultrasonic Test

윤완노<sup>1,✉</sup>, 김준성<sup>1</sup>, 강명수<sup>1</sup>, 김덕남<sup>2</sup>  
Wan No Yun<sup>1,✉</sup>, Jun Sung Kim<sup>1</sup>, Myung Soo Kang<sup>1</sup> and Duk Nam Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 한국전력공사 전력연구원 (KEPCO Research Institute)

<sup>2</sup> 한전 KPS, GT 정비센터 (KEPCO-KPS, Gas Turbine Technology Service Center)

✉ Corresponding author: yoonhwan@kepco.co.kr, Tel: 042-865-7512

Manuscript received: 2011.2.25 / Accepted: 2011.4.11

*The reliability of blade root fixing section is required to endure the centrifugal force and vibration stress for the last stage blade of steam turbine in thermal power plant. Most of the domestic steam turbine last stage blades have finger type roots. The finger type blade is very complex, so the inspection had been performed only on the exposed fixing pin cross-section area due to the difficulty of inspection. But the centrifugal force and vibration stress are also applied at the blade root finger and the crack generates, so the inspection method for finger section is necessary. For the inspection of root finger, inspection points were decided by simulating ultra-sonic path with 3D modeling, curve-shape probe and fixing jig were invented, and the characteristics analysis method of ultrasonic reflection signal and defect signal disposition method were invented. This invented method was actually executed at site and prevented the blade liberation failure by detecting the cracks at the fingers. Also, the same type blades of the other turbines were inspected periodically and the reliability of the turbine increased.*

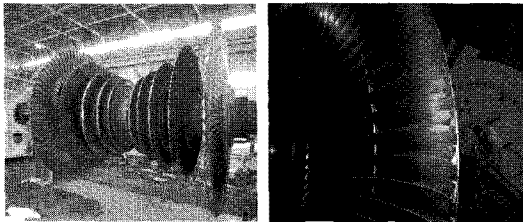
Key Words: Steam Turbine (증기터빈), Last Stage Blade (최종단 블레이드), Blade Root Finger (블레이드 루트 핑거), Ultra-sonic Test (초음파탐상검사), Detecting Root Finger Crack (루트 핑거 균열탐지)

### 1. 서론

화력발전소 터빈 로터 블레이드는 노즐에서 속도에너지로 변환된 증기의 운동 에너지를 회전에너지로 바꾸어주는 장치로서 여러 개의 단락(stage)으로 구성되어 있다. 터빈의 최종단락에 가까워지면 증기가 팽창되어 비체적이 커지게 되므로 길이가 긴 블레이드가 필요하게 되며, 최근에는 Fig. 1에서와 같이 길이가 40 인치인 최종단 블레이드가 개발되어 사용되고 있다.<sup>1</sup>

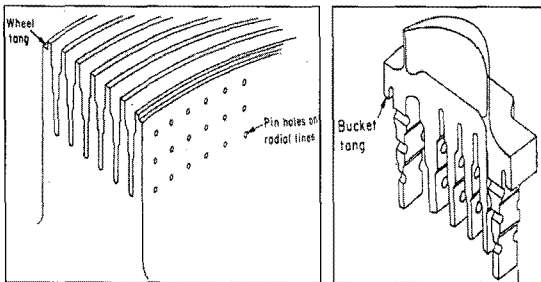
현재 사용되고 있는 40 인치 블레이드의 경우 정격 회전속도인 3600rpm 으로 회전될 때 약 230ton 의 원심력이 발생되고, 블레이드 길이가 길어 블레이드 진동에 의한 응력도 발생되기 때문에, 블레이드를 고정하는 루트 핑거(root finger)가 충분한 강도를 가져야 하며, 이 부위에 균열이 발생되지 않았는지 주기적으로 검사가 필요하다.<sup>2</sup>

최종단 블레이드를 고정하는 방식은 터빈 제작사에 따라 다르나, 국내에 설치된 대부분의 증기터빈 최종단 블레이드는 Fig. 2(a)와 같이 터빈 로



(a) Turbine rotor blade (b) 40 inch blade

Fig. 1 Last stage blade of steam turbine



(a) Turbine rotor wheel (b) Root finger

Fig. 2 Assembly of finger type blade

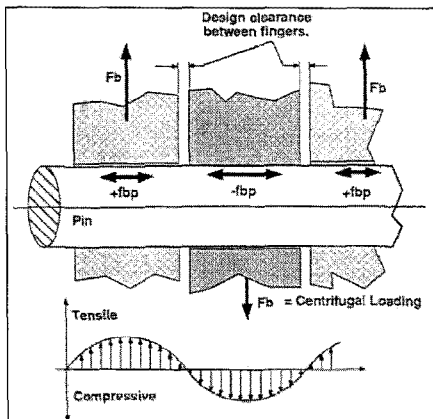


Fig. 3 Stress at root finger due to centrifugal force

터의 휠에 블레이드 루트가 안착될 수 있도록 원주방향으로 홈이 가공되어 있고, Fig. 2(b)와 같은 핑거 형태의 블레이드 루트 고정부를 조립하며, 3개의 고정핀을 이용하여 블레이드 루트를 고정하는 핑거(finger) 고정 방식이 적용되어 있다.

핑거형 블레이드는 핑거 형상이 복잡하여 블레이드가 조립된 상태에서는 루트 핑거 부위를 검사할 수 있는 방법이 없기 때문에, 기존에는 고정핀의 길이방향 단면 부위를 초음파검사 기법으로 고정핀의 건전성만을 검사하였다. 그러나 터빈 로터가 고속으로 회전하면 블레이드의 무게로 인해 발

생되는 원심력 때문에 Fig. 3에서와 같이 블레이드 루트 핑거에도 응력이 작용하여 균열이 발생할 수 있기 때문에 루트 핑거 부위의 검사가 필요하다.<sup>3</sup> 본 논문에서는 블레이드 루트 핑거의 취약부위를 분석하고, 특수 제작된 검사 장치를 이용하여 취약 부위의 균열을 탐지할 수 있는 기법을 개발하고 이를 검증하였다.

## 2. 블레이드 루트 핑거 취약부위 분석

### 2.1 최종단 블레이드 손상의 영향

증기터빈의 최종단 블레이드 1개의 무게가 약 20kg 이므로 3600rpm 으로 회전하게 되면 약 230ton 의 원심력이 발생된다.

$$F = W/g \times r \times \omega^2$$

$$= 20/9.8 \times 0.8 \times (2\pi \times 60)^2 \approx 230\text{ton}$$

여기서, F는 원심력, W는 블레이드 무게, g는 중력가속도, r은 로터 중심에서 블레이드 무게 중심까지의 거리,  $\omega$ 는 로터의 회전각속도이다.

이러한 원심력이 블레이드에 작용하는 상태에서 블레이드 루트 핑거에서의 균열로 인해 블레이드가 탈락될 경우 무게 불평형량이 매우 크고, 1개가 탈락되더라도 고속회전 중이기 때문에 인접 블레이드에도 충격을 주게 되어 다량의 블레이드가 거의 동시에 파손되므로, 엄청난 크기의 무게 불평형을 초래하여 상상을 초월할 정도의 고진동이 발생될 뿐 아니라, 터빈 발전기 축계에 파괴적인 손상을 초래할 수 있다.<sup>4</sup>

### 2.2 취약 부위 분석

Fig. 4에서와 같이 최종단 블레이드의 루트 핑거는 고정핀 주변에서 응력이 크게 발생된다.<sup>5</sup> 그러나, Fig. 5에서와 같이 구조적 형상에 의해 발생하는 예각 형상의 단면 감소부에서도 균열이 발생할 수 있다.

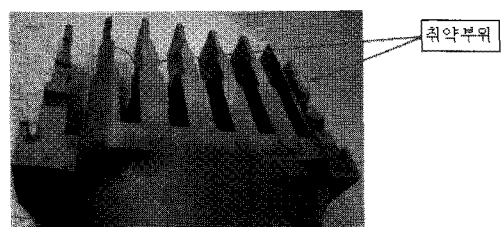


Fig. 4 Weak point due to section reduction and acuteness



Fig. 5 An example of root finger crack

이 부위는 블레이드 현의 형상에 따라 루트 플랫폼(root platform)부위가 현의 형태로 만들어지면서 필연적으로 발생하는 예각 부위이며, 횡거 하부로 내려갈수록 횡거의 단면이 감소되면서 발생하는 노치 부위이다. 이 부위에 원심력과 기동정지시에 발생하는 열응력 등이 작용될 경우 균열이 발생될 수 있으며, Fig. 5 는 실제로 이 취약부위에서 발생된 균열 사례를 보여주고 있다.<sup>6</sup> 여러 개의 루트 횡거 중에 어느 한 개의 횡거에서 균열이 발생될 경우 인접 횡거에 하중이 집중되어 인접 횡거에도 균열이 발생되며, 결국에는 원심력을 견디지 못하고 블레이드가 파단될 수 있다.

### 3. 블레이드 루트 횡거 검사 기법 개발

#### 3.1 문제점 분석

횡거형 블레이드의 경우 Fig. 4 에서와 같이 형상이 복잡하여 블레이드가 조립된 상태에서는 블레이드 루트 횡거 부위를 검사하기가 매우 어렵다. 해외에서는 고정핀 일부를 분해하여 노출된 구멍에 탐촉자를 넣어 루트 횡거의 건전성을 검사하거나 블레이드를 분해하여 검사하는 기법이 개발되어 있는 것으로 알려져 있다.<sup>7</sup> 그러나, 고정핀을 분해할 경우 재조립시에 고정핀 구멍을 리이밍(reaming) 가공하고 직경이 더 큰 고정핀을 제작하여 조립하여야 하므로, 이 방식의 검사가 반복될 경우 구멍의 직경이 자꾸 커질 수밖에 없기 때문에 상대적으로 루트 횡거 부위 단면적이 줄어들어 강도가 약해진다. 또한, 고정핀의 변형이나 고착 등의 문제로 인해 블레이드를 분해할 때 로터 휠이 손상될 경우에는 로터 전체를 교체해야 하기 때문에 이 검사 방식을 적용한다는 것은 사용자측에서는 큰 부담이 되며, 주어진 터빈 정비기간 동안 수많은 블레이드(로터 1 개에 최종단 블레이드 152 개)를 이 방식으로 모두 검사한다는 것은 현실적으로 어렵다. 따라서 기존에는 외부로 노출되어 있는 고정핀의 길이방향 단면 부위만을 초음파탐상 검사로 균열 유무를 검사하였다. 그러나, 원심력에 의한 응력은 고정핀만이 아니라 블레이드 루

트 횡거 부위에도 작용하고 있기 때문에 고정핀 부위만을 검사할 경우 루트 횡거의 건전성은 확인할 수 없다는 단점이 있다.

#### 3.2 시뮬레이션 분석

블레이드를 고정하는 루트 횡거는 Fig. 4 에서와 같이 각 횡거마다 두 개의 단면 수축부가 있고, 3 개의 고정핀 구멍이 있어 형상이 복잡하기 때문에, 정확한 위치에서 정확한 각도로 초음파 빔을 입사하지 않으면 취약 부위의 결함을 탐지해낼 수 없고, 블레이드 조립상태에서는 외부에 노출되어 있는 표면에 초음파 탐촉자를 부착해야 하기 때문에, 검사하고자 하는 부위에 초음파 빔이 입사될 수 있도록 탐촉자 위치와 입사각을 계산할 필요가 있다. 이를 위하여 블레이드 루트 횡거와 에어포일(airfoil) 부위를 레이저 형상측정기로 측정하여 3 차원으로 모델링하고, 어느 부위에서 어떤 각도로 초음파 빔을 입사하여야 취약부위의 결함을 탐지할 수 있는가를 알아낼 수 있도록 초음파빔 진행 경로를 시뮬레이션하였다. 블레이드 루트 횡거의 취약 부위는 블레이드의 입구측(leading edge)과 출구측(trailing edge)의 2 개소이며, 2 개의 단면 수축부 중에서 상부에 위치하고 있다. 이 부위에 초음파가 도달하고 균열에 의한 반사파가 검출될 수 있는 위치를 시뮬레이션으로 분석한 결과 경사각입사 2 개소와 수직 입사 2 개소가 가능한 것으로 나타났다. Fig. 6 은 경사각으로 입사했을 때 취약 부위의 결함을 탐지해낼 수 있는 위치를 나타내며, Fig. 7 은 수직으로 입사했을 때 취약부위의 결함을 탐지해낼 수 있는 위치를 나타낸다.

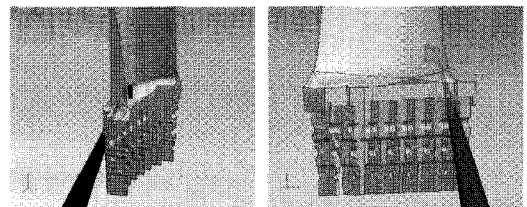


Fig. 6 Ultra sonic beam simulation (slope angle)

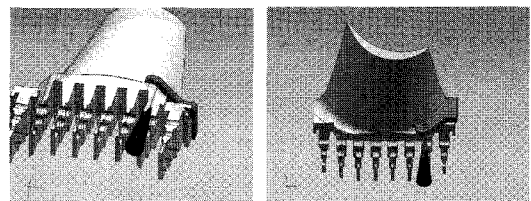


Fig. 7 Ultra sonic beam simulation (vertical)

### 3.3 곡면형상의 탐촉자와 지그 개발

3 차원 모델링 시뮬레이션 결과로 도출된 경사각 입사 방향의 2 개소는 블레이드 에어포일 압력부(concave side)의 곡면부위이기 때문에 경사각으로 초음파 빔을 입사하기 위해서는 곡면 형상에 맞는 탐촉자가 필요하다. 또한, 수직 방향 2 개소는 블레이드 비압력부(convex side)의 플랫폼 부위이기 하나, 에어포일의 뿌리부분과 중첩되는 부위이기 때문에 곡면 형상을 하고 있어 곡면 형상에 맞는 초음파 탐촉자가 필요하다. 이에 탐촉자를 부착하고자 하는 부위의 곡면과 동일한 곡면 형상을 갖는 초음파 탐촉자를 제작하였다. 경사각 입사 탐촉자의 경우 시뮬레이션 결과에서 도출된 각도인 70° 각도로 초음파 빔을 입사할 수 있도록 하였고, 수직 입사 탐촉자의 경우 부착 위치에서 수직으로 초음파 빔을 입사할 수 있도록 제작하였다.

### 3.4 대비시편 시험

Table 1 Examine technique chart

|                                                                                                                                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1) Equipment : Ultrasonic flaw detector<br>: GE Phaxor (KrautKramer USN60)                                                     |
| 2) Probe straight : Krautkramer MSW-QC Ø 5mm/2.25MHz<br>Angle : Krautkramer MSW-QC 70° wedge<br>Angle : Krautkramer MWB70/2MHz |
| 3) Tested range (Screen Adjust.) : Full scale 250mm                                                                            |
| 4) Tested sensitivity : 80% FSH from known reference<br>Scan sensitivity : +6dB                                                |
| 5) Couplant : Paste gel                                                                                                        |

3 차원 모델링 시뮬레이션 결과 도출된 개략적인 위치와 곡면 형상에 맞게 제작된 탐촉자를 이용하여, 대비시편 실험을 하였다. 대비시편에 인공 결함을 만들고, 시뮬레이션으로 도출된 위치에 초음파 탐촉자를 부착하였을 때 어떤 양상으로 신호가 나타나는가를 관찰하였으며, 인공 결함 검출 신호의 크기가 최대로 반사되는 정확한 위치를 도출하였다.

실험시는 Table 1 과 같은 초음파탐상 검사장비와 감도를 사용하였으며, 대비시편의 인공 결함 크기는 블레이드 입구부의 경우 축방향 9.7mm, 원주방향 13.2mm 이고, 블레이드 출구부의 경우 축방향 9.5mm, 원주방향 13.5mm 로 시험하였다.

실험 결과 경사각 입사 방식으로 루트 링거 취약 부위의 결함을 탐지해낼 수 있는 정확한 위치는 Fig. 8 에서와 같이 블레이드 입구측은 플랫폼

으로부터 높이 45mm, 날개 입구 선단으로부터 축방향 거리 40mm 의 위치였고, 블레이드 출구측은 플랫폼으로부터 높이 60mm, 날개 입구 선단으로부터 축방향 거리 30mm 의 위치였다. 수직 입사 방식으로 결함을 탐지해 낼 수 있는 위치는 Fig. 9 에서와 같이 블레이드 입구측과 출구측 모두 플랫폼 선단으로부터 63mm 위치였다.

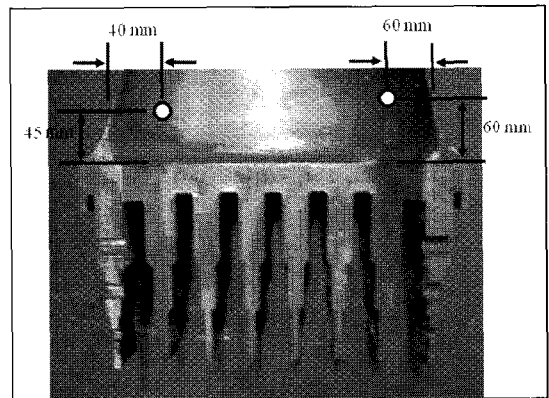


Fig. 8 Inspection point at slope angle

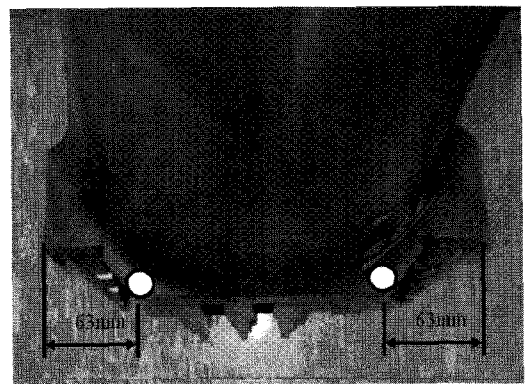
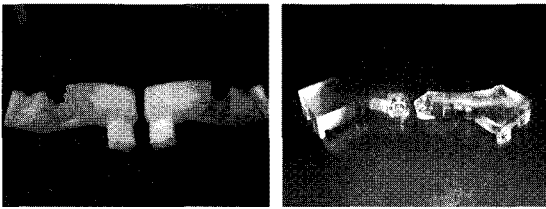


Fig. 9 Inspection point at vertical

### 3.5 탐촉자 고정용 지그 개발

초음파 탐촉자를 개발하여 시험한 결과, 측정하고자 하는 정확한 위치를 일일이 표시한 후 표시 위치에 탐촉자를 부착하여야 하는 불편함이 있었고, 부착 부위가 곡면 형상인데다가 블레이드가 조립된 상태에서는 장소가 협소하여 탐촉자를 제대로 부착할 수 없는 어려움이 있어, 탐촉자를 원하는 위치에 고정할 수 있는 지그를 개발하였다. Fig. 10(a)는 경사각 입사 탐촉자 고정용 지그이며, Fig. 10(b)는 수직 입사 탐촉자 고정용 지그이다. 경사각 탐촉자용 지그는 블레이드 입구 및 출구부

모서리와 플랫폼에 의해 지지되도록 하고, 수직 탐촉자용 지그는 블레이드 플랫폼 모서리에 끼워지도록 하여 탐촉자를 부착위치에 편리하게 고정시킬 수 있도록 하였다.



(a) Jig for slope angle (b) Jig for vertical

Fig. 10 Jig for ultrasonic inspection

**3.6 신호 특성분석과 결함신호 식별 방안**

블레이드 고정부 횡거는 형상이 매우 복잡하기 때문에 정해진 위치에서 초음파 빔을 입사할 때 블레이드 루트의 기하학적 형상 변화로 인해 여러 가지 반사 신호가 나타나게 된다.<sup>8</sup> 이 많은 반사 신호 중에서 결함 신호와 형상신호를 구분해야 하고 결함의 크기에 상응하는 기준 감도를 결정해야 한다. 이를 위하여 결함의 크기가 각기 다른 대비 시편을 준비하여 결함 크기별 신호의 크기, 결함 신호의 식별 방안 등을 고안하였다.

Fig. 11 은 블레이드 입구부에 균열이 없는 시험편을 경사각 입사 탐촉자로 검사시에 나타나는 화면이다. 모니터에 횡방향으로 표시된 청색 게이트는 기준 대비시편에서 정해진 기준신호의 60% 크기이고, 결함 존재 위치인 탐촉자로부터 약 148mm 거리 부근의 지점을 표시한 것이다. Fig. 14 에서 균열이 없는 시험편이므로 표시된 청색 게이트 부위에 신호가 검출되지 않고 있으며, 청색 게이트 부위 이외의 신호는 단면 형상에 의해 나타나는 신호이다.

Fig. 12 는 블레이드 입구부에 균열이 있는 시험편을 경사각 입사 탐촉자로 검사하였을 때 나타나는 신호 화면이다.

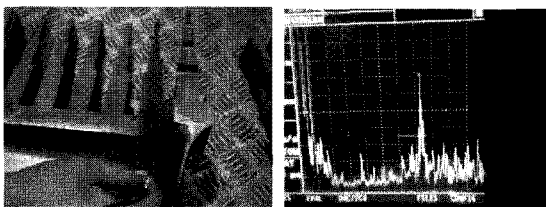


Fig. 11 Signal in case of no crack

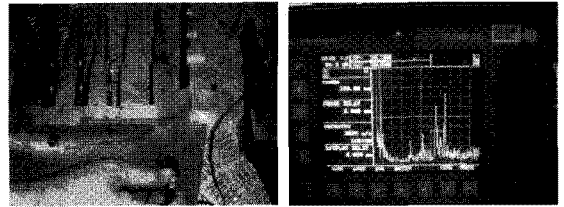


Fig. 12 Signal in case of crack existence

Fig. 12 에서 모니터에 횡방향으로 표시된 청색 게이트 범위내에 신호가 검출되는 것을 알 수 있으며, 단면 형상에 의해 나타나는 청색 게이트 부위 이외의 신호는 Fig. 11 과 동일하게 나타나고 있다.

Fig. 11, Fig. 12 와 같은 방법으로 블레이드 출구부에 균열이 있는 경우와 없는 경우도 경사각 입사 탐촉자로 검사했을 때의 특성을 분석하였고, 수직 입사 탐촉자를 이용한 경우도 동일한 방법으로 분석하였으며, 대비 시편의 기준신호 크기와 위치를 표시하여 블레이드 검사시 쉽게 결함신호를 판별할 수 있도록 하였다. Fig. 13 은 경사각 및 수직 입사 탐촉자 고정용 지그를 이용하여 실험하는 모습이다.

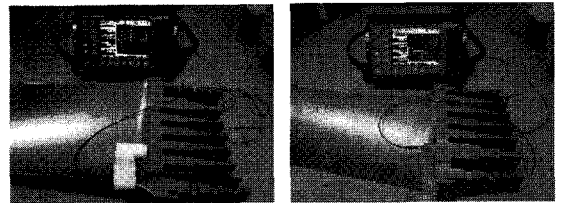


Fig. 13 Inspection with Jig for fixing probe

**4. 현장 적용 및 검증**

블레이드가 조립되어 있는 상태에서 루트 횡거의 결함을 탐지해낼 수 있는 기법을 개발하고, 블레이드의 에어포일 곡면부위에 사용 가능한 초음파 탐촉자와 고정용 지그의 제작, 대비시편을 이용한 결함 신호의 식별 방법 등의 개발을 완료한 후 실제 운전되고 있는 증기터빈의 정비 기간을 이용하여 최종단 블레이드 루트 횡거 부위를 검사하였다.

검사 결과 일부 블레이드에서 Fig. 14 에서와 같이 기준 결함 신호의 크기와 위치가 표시된 청색 게이트 부분에 균열로 예상되는 결함 신호가 검출되었다.

비파괴검사 결과 검출된 결함신호가 실제 균열 인가를 확인하기 위하여 Fig. 15 과 같이 블레이드를 분해하였다. 블레이드 분해를 위하여 컨티뉴어스 슈라우드(continuous shroud) 부위의 연결 블록을 제거하고, 루트 핑거의 고정핀 3 개를 제거하였다. 3 개중 하부 고정핀은 변형으로 분해가 불가하여 방전가공으로 제거하고 블레이드를 분해하였다.

블레이드 분해후 결함신호가 검출된 부위(탐촉자로부터 초음파 진행거리 148.48mm)를 검사한 결과 Fig. 16 에서와 같이 루트 핑거의 단면이 감소되는 예각 부위에 균열이 발생되어 있음이 확인되었다. 균열 길이는 원주방향으로 17mm, 축방향으로 15mm 로써 대비시편의 기준신호와 비교하여 예측한 길이와 거의 비슷한 크기였다.

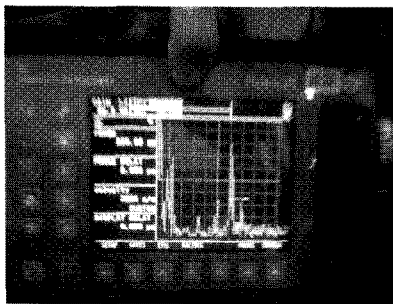


Fig. 14 Detection of defect signal



Fig. 15 Disassembling blade with defect signal

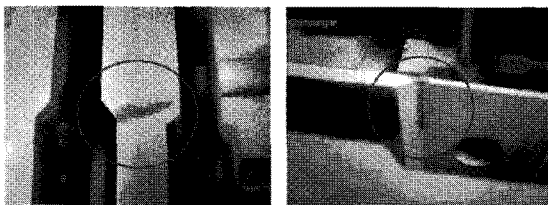


Fig. 16 Conformation of crack at root finger

약 230ton 의 원심력이 작용하는 블레이드 루트 핑거에 Fig. 19 와 같은 균열이 존재할 경우 인접 핑거의 하중 증가로 균열이 점차 확산되어 고속회전 중 블레이드 절손으로 인한 파급 손상이 발생

될 수도 있었으나, 새로 개발된 블레이드 루트 핑거 비파괴검사 기법을 이용하여 기존에는 검사할 수 없었던 루트 핑거의 균열을 탐지해냄으로써 새로운 초음파검사 기법의 신뢰성이 입증되었다.<sup>9</sup>

### 5. 결론

핑거형 터빈 블레이드는 핑거 형상이 복잡하여 블레이드가 조립된 상태에서는 루트 핑거 부위를 검사할 수 있는 방법이 없었으나, 본 연구에서는 루트 핑거의 취약부위를 분석하고, 특수 검사 장치를 이용하여 취약부위의 균열을 탐지할 수 있는 기법을 개발하였다. 본 연구에서 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 블레이드 루트 핑거 부위를 3 차원으로 모델링하여 초음파 빔 진행경로를 시뮬레이션 함으로써 블레이드 조립상태에서 결함 탐지 가능 위치를 도출하였다.
- 2) 결함 탐지를 위한 탐촉자 부착 위치가 곡면형상으로 되어 있어, 이 부위에 밀착시킬 수 있는 초음파 탐촉자를 개발하였다.
- 3) 대비시편에 인공 결함을 만들어 초음파 신호 특성을 분석하여 결함신호 판별 기법을 고안하였으며, 반사 신호 크기가 가장 크게 검출되는 위치를 도출하여 탐촉자 고정용 지그를 개발하였다.

본 연구에서 개발한 초음파탐상검사 기법을 활용하여 증기터빈 정비기간 중 최종단 블레이드 가 조립된 상태에서 루트 핑거 부위를 검사한 결과 결함 신호가 탐지되었으며, 결함 신호가 검출된 블레이드를 분해하여 검사한 결과, 결함 신호로 예측한 균열 크기와 실제 균열 길이가 거의 동일 하였으므로, 상기 검사 기법의 정확성과 신뢰성이 입증되었다.

또한 동일 유형의 핑거형 블레이드가 조립된 증기터빈에서 본 검사 기법을 이용하여 기존에는 검사할 수 없었던 부위까지 주기적으로 검사할 경우 터빈 발전기의 신뢰성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

### 참고문헌

1. Jeong, M. S., "Tendency of performance upgrade technology of steam turbine," The Plant Journal, Vol. 4, No. 4, pp. 7-14, 2008.
2. Weaver, F. L. and Prohl, M. A., "High frequency

- vibration of steam turbine buckets,” ASME, Vol. 78, pp. 169-180, 1958.
3. Clossen, M., Rauschenbach, H. and Siegel, M., “Lifetime extension through advanced non-destructive examination methods,” POWER-GEN Europe, pp. 1-10, 2006.
  4. Kim, G. Y. and Lee, W. K., “Root cause analysis of steam turbine generator incident on Termonorte Power Plant,” Report of KEPCO RI, TM.T06.S2005.063, pp. 2-66, 2005.
  5. Jeong, N. G., “Root cause analysis of steam blade root crack on Taean Power Plant,” Report of KEPCO RI, pp. 2-66, 2008.
  6. Tsay, L. W., Young, M. C., Chou, F. Y. and Shiue, R. K., “The effect of residual thermal stress on the fatigue crack growth of laser-annealed 304 stainless steels,” Materials Chemistry and Physics, Vol. 88, No. 2-3, pp. 348-352, 2004.
  7. Lamarre, A., Dube, N. and Ciorau, P., “Feasibility study of ultrasonic inspection using paced array of turbine blade root,” EPRI Workshop, pp. 2-14, 1997.
  8. Fredenberg, R., “Dovetail blade attachment experience using Phased Array Ultrasonic Test Techniques,” EPRI Workshop, pp. 2-6, 2001.
  9. Metala, M., “Advanced inservice inspection of turbine generator component,” EPRI Workshop, pp. 1-4, 2001.