

## 터빈 동익 Root부 초음파 탐상

정 현 규\*, 정 민 화\*\*

\* 한국원자력연구소, 원자로 구조검사실

\*\* 한국전력공사, 기술연구원 발전연구실

요 약 원자력발전소 터빈 계통의 손상중에서 blade의 파손에 따른 원전의 불시 정지가 발생함에 따라 blade 균열 검출을 위한 초음파 탐사의 필요성이 증가하고 있다. 그러나 터빈 blade root부 결함 탐지를 위한 초음파검사 방법은 그 형상의 복잡성으로 인하여 검사 기술이 아직 확립되지 않아 검사의 신뢰성 확보에 대한 많은 연구가 요망되고 있다. 본 연구에서는 터빈 blade에 인공 결함을 가공한 다음 초음파 탐사시 복잡한 형상을 가진 blade root부 구멍 주위의 결함 검출 능력, skew angle 영향, 실제 결함과 기하학적 신호사이의 신호 구분에 대한 내용을 조사하였으며, 또한 RF 신호수집, 해석을 통하여 신호 분류 특성에 대한 연구도 병행하였다. 실험 결과 pin hole 주위의 초음파 균열 탐지를 위하여 인공 결함이 있는 blade 시편을 이용함으로써 결함 검출을 위한 최적 검사조건을 도출이 가능하였고, blade의 복잡형상에 기인한 기하학적 영향을 줄이기 위해서는 skew angle 이 필수적인 것으로 나타났다. 따라서 본 연구 결과를 적용하면 blade root 부위의 내부 균열 탐지를 위해 blade 를 해체함이 없이 현장 검사의 신뢰도를 제고할 수 있다.

### 1. 서 론

원자력발전소 운전호기의 가동년수가 증가함에 따라 2차계통인 터빈설비의 주요 부품 손상에 따른 잦은 사고로 인하여 원전의 가동중지 사례가 발생되고 있는바, 원전의 안정성 확보와 가동을 향상시키기 위하여 강제 및 불시정지의 사고예방에 상당한 관심이 집중되고 있다. 원전 증기터빈은 재래의 화력 터빈의 경험을 기초로 하여 수분분리기(moisture separator)와 증기재열기(steam reheater)가 부착되어 있고 증기의 진행경로는 먼저 고압터빈으로 들어가서 수분분리기와 재열기를 통과한 다음 저압터빈을 지나 복수기로 흐르게 된다.

터빈은 고온고압하에서 고속으로 회전하는 설비이므로 장시간 운전하는 동안에 blade, rotor 또는 disc 부위에 취화, 응력부식, 부식피로등의 결함발생 가능성이 높은 부품으로 알려져 왔다.<sup>(1)</sup> 그중 터빈 blade는 매우 다양한 원인에 의해 손상되고 있는데 EPRI 보고서<sup>(2)</sup>에 의하면 대부분의 blade 파손 사례가 저압터빈에서 발생하고 있는 것으로 나타났다. Fig. 1은 저압터빈의 구성도를 나타내고 있다.<sup>(3)</sup> 이에 대한 비파괴검사 방법으로 blade 를 해체한 후 육안검사(VT), 자분검사(MT)가 주로 수행되고 있으나 이 경우 root 부위의 피로균열(fatigue crack)과 같은 미세한 결함의 검출에는 많은 어려움이 따를 뿐 아니라 blade 재체결시 공기지연 및 blade balan-

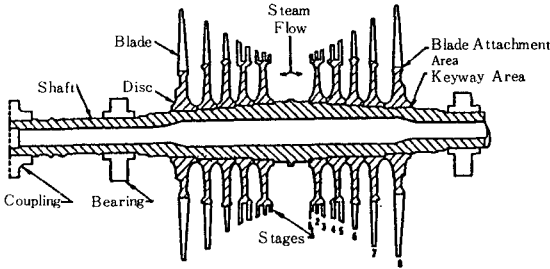


Fig. 1 Typical low pressure turbine configuration

cing을 고려해야 하는 등 여러가지 문제가 대두되고 있으므로 체결 상태에서의 blade 부위에 대한 비파괴 검사 기술개발은 시급한 과제이다. blade root부위에 대한 초음파검사는 blade의 여러가지 체결방법과 같은 체결방법일지라도 root 형상의 다양성, 또한 같은 형상이면서 크기의 영향을 고려해야 하므로 검사방법, 결함평가 및 신호해석에 어려움이 따르고 있다. 외국의 경우 blade root 부위의 초음파 검사기술 확립을 위한 많은 연구가 진행되고 있으며<sup>(4)</sup> 터빈 제작사들은 독자적인 검사기술 및 절차를 마련해 놓고 있으나 국내에서는 아직 검사기술의 자립화 및 응용도에 있어 낙후한 실정을 면치 못하고 외국 기술자의 기술지도 및 자문을 받고 있는 실정이다.

터빈 blade 검사에 관해서는 적용 code, spec 및 검사 standards가 아직 확립되어 있지 않고 제작사의 일방적인 권고사항과 검사요구에 의해 지배되고 있는 형편이다. 그러므로 이 분야에 대한 초음파 검사는 stress analysis, fracture mechanics, material behavior 등을 통한 fitness for purpose (Fig. 2 참조)를 적용하여 검사방법 및 합부판정에 이르는 초음파 검사기술을 확립하여 검사절차에 대한 standard가 향후 설정되어야 할 것이다.<sup>(5)</sup> 본 연구에서는 고리 원자력 발전소 터빈 blade root 부위에 있어서 균열이 발생하기 쉬운 취약위치를 조사하고 저압 터빈 blade의 root부 초음파 검사를 위한 인공 결함을 가진 모형시편 및 실제 blade root 내부에 인공 결함을 방전 가공하여 결함의 검출능력을 측정 하였으며 또한 root 내부에 존재하는 실제 결함과 형상의 복잡성으로 인해 발생하는 기하학적 신호를

인식 확인함으로써 blade 를 해체하지 않고 root 내부에 존재하는 결함을 탐지하기 위한 초음파 검사 기술을 확립하고 실제 현장에 적용하여 그 신뢰도를 제고하고자 하였다.

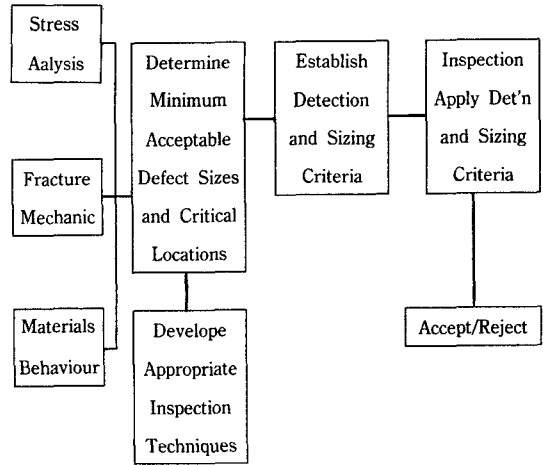


Fig. 2 Fitness-for-purpose approach

2. 응력 해석

Blade에 가해지는 주된 힘은 회전에 의한 원심 인장력과 굽힘력이다. 또한 blade 에는 정상상태 힘 뿐만아니라 노즐 출구에서의 진동 힘 및 불균일 증기 흐름을 받게되며 fatigue stimuli를 제공하는 또 다른 불균일 유체 흐름도 받게된다.

1단 blades는 국부적인 증기 흡입 시 매우 복잡한 충격에 노출되기도 하고 모든 blade 들은 종종 발생하는 과속도 응력과 start-stop transient에 의한 피로 응력을 견디어 내어야 한다.

특히 저압 터빈의 pin-finger 형 5단 blade 체결은 2개 hole로서 체결되어 있고 작용하는 응력 level을 고려하여<sup>(6,7)</sup> ANSYS program을 이용하여 응력 분포를 계산하였다.<sup>(8)</sup>

Blade root 부위의 형상이 일반 모델에 비해 복잡하기 때문에 root 부의 한쪽 면만을 잘라 해석하였으며 실제 steam flow에 의해 응력을 받는 blade는 날개 모양이지만 tapered 사각 기둥으로 단순화 시켰으며 root 부위는 해석의 주요 관심사이므로 비교적 작은 mesh로 modelling 하였다.(Fig. 3 참조)

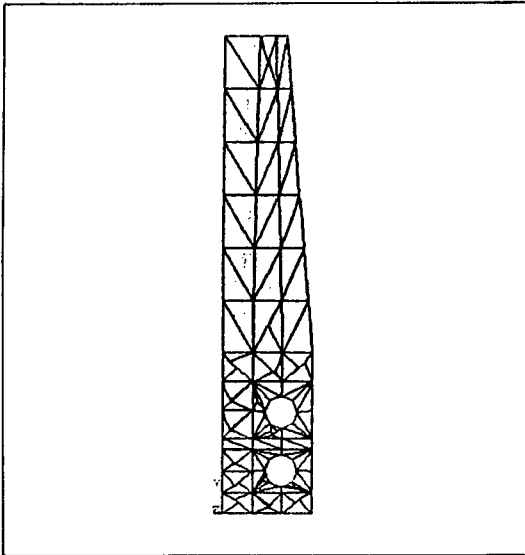


Fig. 3 2 Dimensional mesh generation in the blade

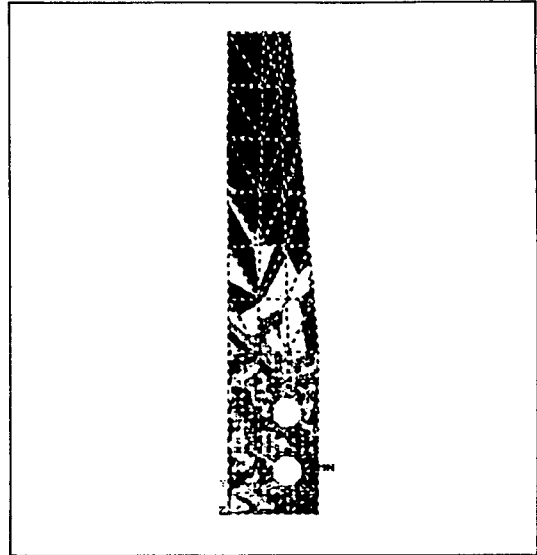


Fig. 4 Stress distribution in the turbine blade

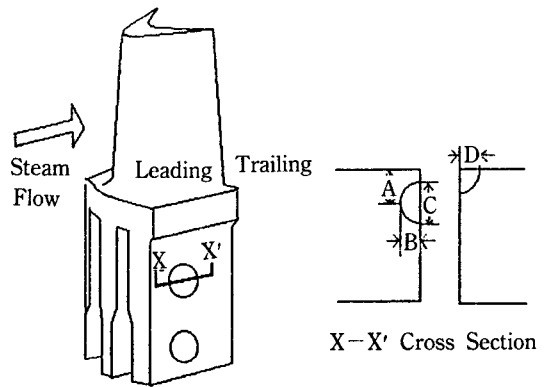
경계조건으로는 blade 의 회전으로 인한 인장력을 지지할 수 있는 hole에서의 180도 에서 360도의 완전 고정과 회전력을 받는 부위의 X방향으로 (root 부의 양 옆면) 고정하였다. 하중조건으로는 관성을 고려하여 blade 끝에서의 인장력을 주었고 X방향에 대해 steam flow와 blade 형상이 날개 모양임을 고려하여 blade 옆면과 뒷면의 중간 위치에서 면압을 주었다. 하중의 크기를 고려해 보면 blade 가 steam flow에 의해 회전하게 되면 처음에는 측면에서 작용하는 면압에 의한 굽힘력이 blade 에 많은 영향을 주지만 고속회전이 되면 blade 의 무게에 의한 원심력으로 인장력인 steam flow에 의한 측면면압 보다 훨씬 더 큰 영향을 받게된다. 이런 이유로 본 해석에서도 면압 보다 인장응력을 훨씬 크게 주어서 계산하였다.

응력 해석 결과를 Fig. 4에 나타내었으며 응력집중이 나타나는 부위는 rotor의 중심선으로 부터 바깥쪽의 pin hole 이며 hole 중에서도 최대 응력이 걸리는 부위는 인장력 방향에 수직인 가장자리 위치이다.

3. 시험편 설계 및 실험

1) Blade에서의 인공결함 가공

실제 root 부위의 결함에 대한 초음파 검사시의 신호 수집 및 신호해석을 위해 blade root부위에



Type Drt	Round Notch (Type 1)			Round Notch (Type 2)
	A	B	C	D
1	1.0	0.25	0.5	0.25
2	1.0	0.5	1.0	0.5
3	1.0	0.75	1.5	0.75
4	1.5	1.0	2.0	1.0

Fig. 5 Kori blade specimen drawing

EDM notch를 가공하였으며 Fig. 5에 나타나 있다.

2) 실험방법 및 장치 구성

Blade의 검사 조건을 결정하기 위한 내용으로는 주사각도, 주파수 및 탐촉자 치수 등이며 열거하면 다음과 같다.

(1) 각도 선택시 검사부위를 충분히 포함 할 수 있도록 각도 범위를 결정해야 하고 사각 탐상시 투과 에너지도 같이 고려하여 37도에서 45도 까지 범위에서 결함을 검출코자 한다.

(2) 주파수 선정이유는 가능한 한 미세 균열 탐지가 가능한 감도 증가와 이에 따른 감쇠 문제는 빔 경로가 짧아서 무시할 수 있으므로 5MHz로 결정하였다.

(3) 탐촉자 크기는 blade 형상을 고려하여 초음파 빔의 유효 단면적이 접촉부위를 통과할 수 있도록 하여야 한다.

Blade root 부위의 초음파 검사에 사용된 탐촉자의 주파수는 5MHz, 굴절각 38도, 40도, 42도, 44도이며 그 목록은 아래와 같다.

Table 1. Search Unit List

Angle	제작회사	Part번호	주파수	Size
38	Mat.Eval	J405	5MHz	4+4mm
40	Mat.Eval	J405	5MHz	4+4mm
42	Mat.Eval	J405	5MHz	4+4mm
44	Mat.Eval	J405	5MHz	4+4mm

본 실험장치에 대한 구성은 Fig. 6에 있는 도식도에 나타나 있다. 그러므로 본 실험은 실제 현상에 적용할 수 있는 초음파 탐상기를 사용하여 초음파 검사의 검출 능력 설정과 결함 위치 및 굴절각도에 따른 신호 identification 그리고 초음파 신호세척, 검사 신뢰도 향상 및 검사 자동화를 위하여 실험실에서 가능한 초음파신호의 A/D변환, RF신호수집, 수집된 신호의 3차원 화상처리 그리고 형상 인식법 등을 수행하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

실제 blade의 root 부위구멍 주위에 trailing side에 1.0, 0.5mm, leading side에 0.75, 0.25mm크기를 가진 surface 및 subsurface round notch를 EDM으로 가공하여 각각의 blade에다 실험을 수행하였다. Blade에서의 신호전파를 고찰해 보면 trailing side에서는 blade edge 부위에서 결함신호와 기하학적 신호가 같은 빔 진행거리에서 나타나는데 기하학적 신호는 Fig. 7에서 나타난 바와 같이 빔의 퍼짐에 의해서 원통형의 표면에서 파의 변환 및 반사 신호가 발생되기 때문이며 leading side에서는 Fig. 8에 나타난대로 결함 신호와 기하학적 신호가 구분이 되는데 이는 trailing side에서의 pin hole과 edge side에서의 간격이 leading side에서의 간격과 상이하기 때문에 결함 신호보다 약 2.5mm뒤에 나타나고 있다.

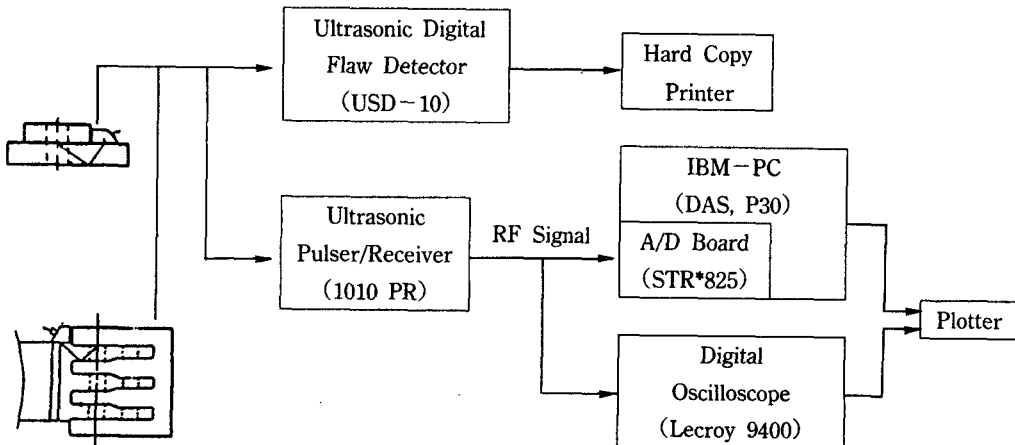


Fig. 6 Block diagram for experiment

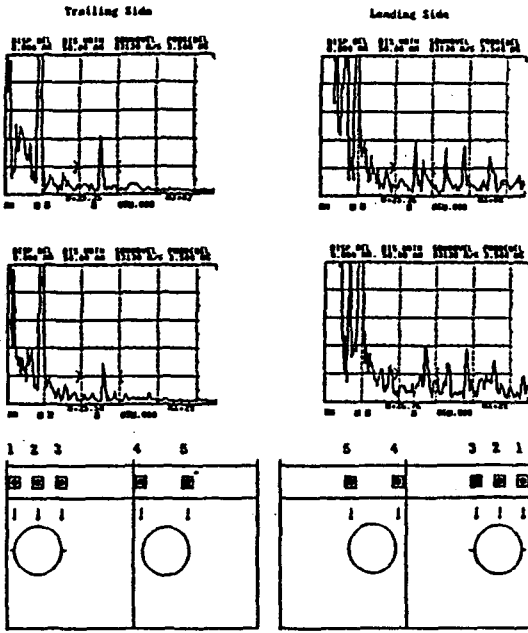


Fig.7

Fig. 8

결합이 있는 hole 주위로부터의 A-scan data를 DAS software를 이용하여 3-D plotting 함으로써 탐촉자의 이동범위가 다 포함되도록 accumulation 하면 Fig. 9에서와 같이 나타내어 신호 식별을 용이하게 할 수 있다. 3-D plotting은 검사 장비의 자동화에 의한 적용 가능성을 시도한 방법으로서 결합 신호를 시각화 할 수 있는 방법중의 하나이다.

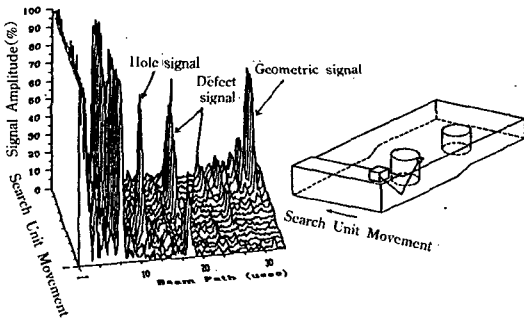


Fig. 9 Modified A-scan(angle 38, round Notch 1.0 mm)

Blade edge에서 hole 주위의 결합탐지를 위한 검사 수행시 건전한 부위에서 기하학적 신호가 발생되는 바, 이의 신호 규명을 위해 결합 신호와 기하

학적 신호에 대한 skew angle 영향을 고찰하였다. Fig. 10에서 나타난 바와 같이 trailing 및 leading side에서 skew angle이 없이 빔이 결합에 수직으로 입사하는 경우 기하학적 신호와 결합 신호가 동시에 나타나며 +방향으로 skew를 주면 결합 신호는 진폭이 증가하는 반면에 기하학적 신호의 진폭은 감소하는 현상이 나타나는데 이는 기하학적 신호가 skew angle로 인하여 cylinder 표면에서 beam이 거의 산란되어 버리고 반면에 결합신호는 edge effect로 인해 진폭이 증가된다고 생각된다. 한편 -방향인 경우는 결합 및 기하학적 신호 모두 산란에 의해 진폭이 감소됨을 알 수 있다.(Fig. 11 참조) 따라서 leading 과 trailing side에서 +방향으로 거의 8도 이상의 skew angle을 주면 기하학적 신호는 없어지므로 blade edge 부위에서의 hole 주위 결합 검출시 일단 신호가 검출되면 그 신호가 기하학적 신호인지 아닌지를 판단하기 위해서는 적절한 skew angle을 부여함이 필수적이라고 생각된다.

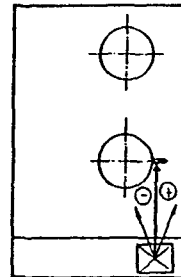


Fig. 10 Beam skewing angle

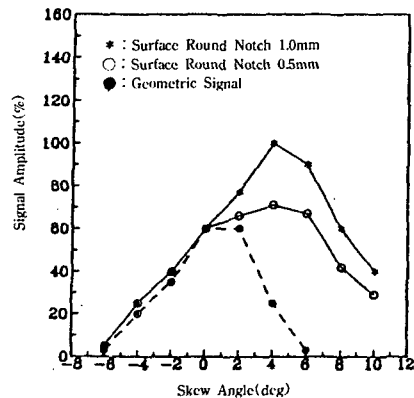


Fig. 11 Effect of skew on trailing side (geometry vs. round notch 1.0, 0.5mm)

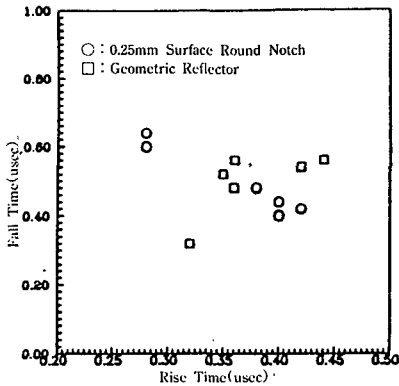


Fig. 12 Cluster of plot rise time vs. fall time for 0.25mm surface round notch and geometric reflector

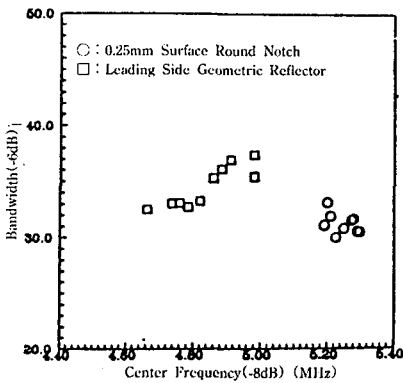


Fig. 13 Cluster plot of center freq. vs. bandwidth for 0.25mm surface round notch signal and geometric reflector

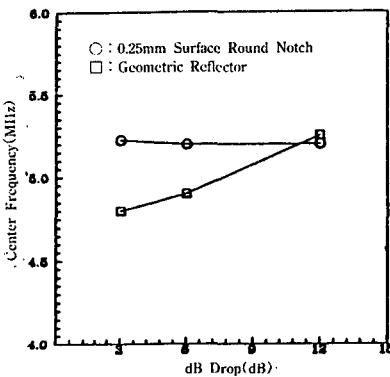


Fig. 14 Center frequency variation for 0.25mm surface round notch vs. geometric reflector

초음파 pulser/receiver, A/D 변환기와 IBM-PC를 이용하여 blade root부의 각 결합에서 굴절 회파 RF 신호를 수집한 다음 주파수 분석을 실시하여 그 신호가 갖고 있는 여러가지 parameter를 추출하였다. 그 결과 time domain의 RF 특성치, 즉 신호의 형상 (rise time, fall time, waveform duration)은 큰 차이점을 보이지 않았고 frequency domain의 신호 특성치, 즉 frequency band width(-6dB, -12dB), center frequency difference가 큰 차이를 보이는데 이것은 빔이 scattering에 의한 반사 신호로써 주파수가 어느정도 변형을 주는 결과를 가져 오는 것으로써 결합 신호와 기하학적 신호를 구별할 수 있음이 실험실에서 입증되었다. 이러한 신호 특성치들을 feature domain plotting 하면 Fig. 12에서와 같이 time domain의 rise time, fall time등은 서로 중첩되어 나타난다. 이러한 중첩은 신호 발생원 구분을 어렵게 한다. 반면 Fig. 13에서와 같이 주파수 domain의 변수들은 초음파 신호 형상 인식에 좋은 특성치가 될 수 있다. Fig. 14은 center frequency의 값이 결합 신호의 경우 크게 변하지 않으나 기하학적 신호는 크게 변함을 알 수 있다. 즉, 기하학적 신호는 주파수 spectrum의 대칭성이 크게 저하되는데 이러한 주파수 대칭성도 초음파 신호 구분에 좋은 변수가 될 수 있었다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 pin finger type 저압 터빈 blade root 부위 균열 탐지를 위한 초음파 검사 기술 확립을 위하여 blade root부위에서 발생하는 초음파신호 특성에 대해 실험 고찰한 결과 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) Pin finger형 blade 에 가해지는 원심 인장력과 굽힘력을 고려하여 응력 해석 program인 ANSYS 을 사용한 결과, 응력 집중 부위는 root부 outer pin hole이며 hole 중에서도 인장력에 수직인 edge부위이며 이곳을 주요 검사대상 부위로 선정했다.

(2) Blade의 초음파검사시 탐상 부위의 협소함을 고려하여 소형 탐촉자를 사용하였고, 표면 및 표면 하 결합에 관계없이 접촉법에 의한 회파 사각 탐상 방법으로 결합검출의 유효성이 확인되었고 표면하

결합의 정확한 조사를 위해서는 검사범위를 포함하는 여러 가지 각도 선정이 바람직하다.

(3) 신호 해석상 blade의 복잡한 형상 때문에 결합 검출시 기하학적 신호가 함께 나타나므로 신호 규명을 위해 skew angle를 사용하거나 주파수 영역의 특성치(band width, center frequency difference)로 결합 신호와 기하학적 신호의 신호 분류가 가능하다.

**참 고 문 헌**

- 1) R. Viswanathan, Damage Mechanisms and Life Assessment of High Temperature Components, pp 265-328
- 2) "Non-destructive Examination of Steam Turbine Blades : An Assessment", EPRI-CS-3675, Research Project 1266-24, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, Nov. 1984
- 3) Gerald A. Lamping, "Advanced NDE Method for Steam Turbine Blading.", EPRI CS-4001, Proceedings, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, July 1985.
- 4) A Puri, "Steam Turbine Blade Root Inspection to Detect Fatigue Crack Initiation", Steam Turbine/Generator NDE Workshop & Vendor Equipment Fair, Sep. 1989
- 5) Cargill, J.S., "Review of Progress in Quantitative NDE", Vol. 1, pp83-96, Plenum Press, New York, NY, 1982.
- 6) GEC Report No. D.287, "Investigation into the cause of failure of blading on stage 5 LP at Korea nuclear unit 5 power plant", General Electric Company, Jan. 1987
- 7) R. E. Peterson, "Stress concentration Factors", John Wiley & Sons Inc., 1974, pp 108-112
- 8) ANSYS Engineering Analysis System User's Manual, June 1 1987
- 9) "고리원자력 3, 4호기 저압터빈 5단 동익 보고서", 한국전력공사, 고리 제2발전소 기계부, Dec. 1987

## Ultrasonic Flaw Detection of Turbine Blade Roots

H.K. Jung\*, and M.H. Chung\*\*

\* Korea Atomic Energy Research Institute

\*\* Korea Electric Power Corporation

**Abstract** The necessity of ultrasonic inspection to detect the cracks in turbine blade is being increased as the forced outage of nuclear power plants have been occurred due to blade failure in turbine components. However, the complex blade root geometry causes the ultrasonic inspection technique not to be established yet and much effort is required to set up a more reliable inspection. In this paper, the ultrasonic inspection technique for flaw detectability, skew angle effect, identification of flaw and geometric signal have been investigated with a test block and discussed the interpretation of ultrasonic signal through the acquisition and analysis of RF waveform. The experimental results show that the proper examination procedure can be established. It is required that the skew angle is essential to decrease the effect of signals from the complex blade geometry. The present results of this study can be applied to the site inspection without blade disassembly.