

## 핀-핑거형 터빈 동익 루트의 초음파탐상에서의 기하신호 해석

최명선, 정현규, 주영상, 임형택, 윤광식  
한국원자력연구소 비파괴평가사업부

**요약** 핀-핑거형 터빈 동익 루트의 사각 초음파탐상에서의 기하신호가 해석된다. 동익루트의 기하가 설명되고, 기하신호가 형성되기 위한 반사조건들이 제시된다. 그리고, 이 기하신호의 빔경로에 관한 일반식들이 유도되고 검증된다. 이 기하신호는 리가먼트 모서리 신호이며, 그 위치와 진폭은 핀홀과 리가먼트의 크기 및 탐촉자의 빔지향 특성으로부터 결정될 수 있다는 것이 보여진다.

### 1. 서론

터빈은 고온 고압하의 고속 회전 설비이므로 운전 기간이 길어짐에 따라 동익, 로터, 혹은 디스크 부위에 취화, 응력부식, 부식피로 등에 기인된 결함이 발생할 가능성이 크다. 실제 터빈 부품의 파손으로 인해 발전소의 강제 및 불시정지 사례가 발생함에 따라, 사고 예방을 위한 비파괴검사의 중요성이 크게 증가되고 있다.<sup>1-4)</sup>

최근, 핀-핑거(pin-finger)형 동익 루트 부위의 초음파탐상기술이 개발되어 왔다.<sup>5)</sup> 이 기술은 동익이 체결된 상태에서도 접근이 가능한 부분(날개와 루트의 중간)에 소형의 초음파탐촉자를 접촉시켜 발생시킨 횡파 사각빔을 이용함으로써 동익의 해체를 요구하지 않으며, 동익 파손의 주된 원인인 핀홀 표면에서 동익 축의 수직 방향으로 발생하는 균열에 매우 민감하였다. 그러나, 동익 루트 부위의 복잡한 형상 때문에, 결함신호 해석에 상당한 주의가 요구되었다. 특히, 짧은 리가먼트(ligament) 영역에서는 핀홀 표면에서의 산란에 기인되는 것으로 여겨지는 기하신호가 탐상기의 화면에서 결함신호와 거의 같은 위치에 나타나 신호 해석에 어려움이 있었다.

본 연구에서는 이 기하신호의 빔경로를 명확히 규명하고자 한다. 먼저, 핀-핑거형 동익의 기하가 설명된다. 그리고 이 기하신호가 형성되기 위한 두가지 반사 조건이 제시되고, 이것으로부터 빔경로에 대한 일반식들이 유도된다. 끝으로, 실제 동익에서의 인공결함신호와 기하신호를 관측함으로써 본 해석의 타당성을 검증한다.

### 2. 핀-핑거형 동익의 기하

Fig. 1은 핀-핑거형 동익의 전형적인 예를 보여준다. 이것은 현재 고리 원자력발전소 저압 터빈 5단 동익으로 사용되고 있으며, 본 고에서는 "참고 동익"으로 명명한다. 동익루트는 로터 중심선으로부터의 위치에 따라 "외부"와 "내부"로 구분되는 2개의 핀홀을 각각 포함한 세 부분으로 구성되며 증기 유동 방향에 따라 "leading(L) side", "center", 그리고 "trailing(T) side"로 구분된다. 실제 파손 사고는 대부분 L side 혹은 T side의 외부 핀홀에서 동익 축에 수직한 방향으로 성장한 균열에 기인되었다. 그래서 이러한 균열을 초기에 탐지하기 위한 초음파 검사기술이 개발되어 왔다. Fig. 1에서 검게 표시된

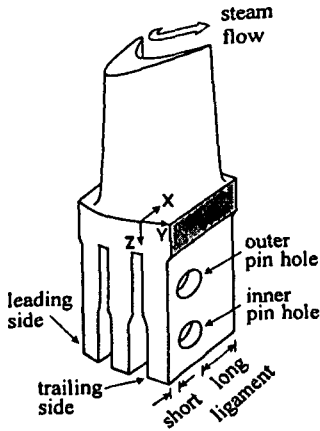


Fig. 1. Pin-finger type of turbine blade.

부분은 동익에 체결된 상태에서도 초음파탐촉자가 접근 가능한 부위를 나타낸다.

Fig. 2(a), (b), (c)는 각각 동익 루트의 XZ, YZ, XY 단면을 도식적으로 보여준다. XY 단면도는 관심 부위인 외부 핀홀의 중심부에 대해 나타내었다. 여기서 각 부분의 치수는 일반적인 기호로 표시하였다. 그리고 참고 동익에 대응되는 치수 값들 또한 이 Fig. 2(d)에 나타내었다. 여기서, L side 와 T side에서의 리가먼트의 크기에 차이가 있음에 주목해야 한다. 그리고 핀홀의 반경 R과 짧은 리가먼트의 크기 B<sub>1</sub>가 윗 절에서 언급된 기하신호에 결정적인 영향을 끼친다는 것을 다음 절에서 보게 될 것이다.

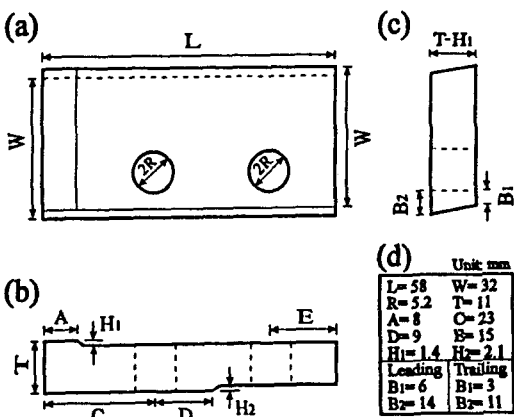


Fig. 2. (a) XZ, (b) YZ, (c) XY cross section of blade root and (d) the dimensions of the reference blade.

### 3. 기하신호의 빔경로

현재의 초음파검사기술은 Fig. 3과 같이 횡파 사각탐상법을 사용하여 외부 핀홀의 상단 표면균열을 1 스킵 에코로써 탐지한다. 그러므로, 동익 루트의 치수에 따라 최적굴절각  $\theta_0$ 가 다음 식에 의해 결정된다.

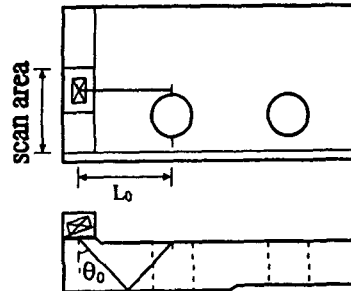


Fig. 3. Beam path of a defect signal.

$$L_0 = (2T - H_1) \tan \theta_0 \quad \dots \dots \dots (1)$$

여기서, L<sub>0</sub>는 초음파빔의 입사점(Z=A/2)과 핀홀의 중심(Z=C) 사이의 거리(L<sub>0</sub>=C-A/2)로 굴절각  $\theta_0$ 에 대한 1 스킵 거리이다. 이 최적굴절각  $\theta_0$ 는 단지 동익 루트의 치수만의 함수이다. 그리고, 임의의 굴절각  $\theta$ 에 대응되는 빔경로의 길이 V는 다음과 같이 표현된다.

$$V = (2T - H_1) / \cos \theta \quad \dots \dots \dots (2)$$

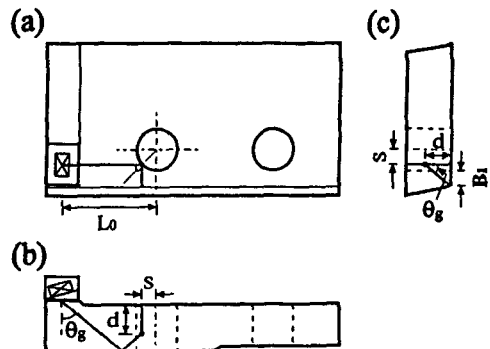


Fig. 4. Beam path of a geometric signal.

굴절각이  $\theta_g$ 인 빔속(ray)에 의해 기하신호가 형성되기 위해서는, Fig. 4(a)와 (b)에서 보여주듯이, 먼저 편홀에서 반사된 신호가 XZ 평면상의 Z축에 수직 방향(-X축 방향)으로 진행되어야 할 것이다. 그러므로, 편홀표면에서 직각 반사가 일어나도록 탐촉자가 위치되어야 한다. 이 조건은 다음과 같은 수식으로 표현될 수 있다 :

$$(2T - H_1 - d)\tan\theta_g = L_0 - S \quad (3)$$

여기서,  $S = R \cos(45^\circ) = R/\sqrt{2}$ 이고, d는 편홀 상단으로부터 반사점의 깊이를 나타낸다. 그리고 나서, Fig. 4(c)에서 나타낸 것처럼, 편홀 표면에서 반사된 빔은 동익 루트의 옆면을 향하면서 각  $\theta_g$ 로 표면을 향해 올라갈 것이다. 이 빔이 리가먼트의 모서리로 입사될 때 후방반사에 의한 기하신호가 기대된다. 그러므로, 기하신호 형성의 두번째 조건은 다음과 같은 수식으로 표현될 수 있다 :

$$B_1 + (R - S) = d \tan\theta_g \quad (4)$$

그리고, 식 (3)과 식 (4)를 조합하면 다음 식을 얻는다 :

$$(2T - H_1)\tan\theta_g = L_0 + \Delta L \quad (5)$$

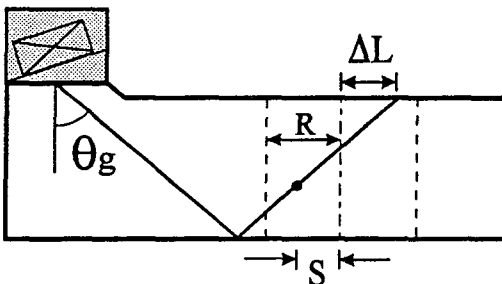


Fig. 5. Projection of the beam path on XY plane to YZ plane.

여기서,  $\Delta L = B_1 - (\sqrt{2} - 1)R$ . Fig. 5에서 보여주듯이, 편홀 표면에서 반사되어 리가먼트의 모서리로 진행하는 빔의 경로(Fig. 4(c)를 참고)를  $90^\circ$  회전

시켜 YZ 평면에 그리면, 이 모서리는 편홀 중심으로부터  $\Delta L$  만큼 떨어진 위치에 놓이게 된다. 그래서, 식 (3)은 굴절각이  $\theta_g$ 인 빔속에 의해 리가먼트의 모서리가 1 스킵 에코로 탐지되는 조건으로 이해될 수 있다. 이  $\Delta L$ 은 편홀과 리가먼트의 크기에만 의존한다. 그리고, 이 기하신호의 빔경로  $V_g$ 는  $\theta_g$ 를 식 (2)에 대입함으로써 쉽게 얻어질 수 있다.

#### 4. 검증 실험

Fig. 2에 나타난 참고 동익에 대한 칫수 값들을 앞절에서 유도된 식들에 대입하면, 다음의 결과들을 얻을 수 있다. 즉 참고 동익에 대한  $\theta_0$ 와  $V_0$ 는  $42.7^\circ$ 와 28.0mm이고, T side와 L side에서의  $\theta_g$ 와  $V_g$ 는 각각  $43.9^\circ$ 와 28.6mm 그리고  $48.0^\circ$ 와 30.8mm 이다. 그러므로 교정된 탐상기의 화면상에서, T side와 L side에서의 기하신호는 각각 결함신호보다 0.6mm와 2.8mm 뒤에 나타나게 될 것으로 기대된다. 여기서 참고 동익에 대한 인공결함신호와 기하신호를 관측함으로써 이 결과들을 검증하고자 한다.

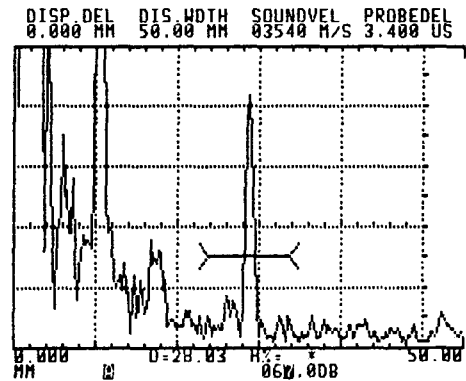


Fig. 6. Signal from the artificial surface defect.

실험장치는 이미 이전의 논문<sup>5)</sup>에서 상세히 기술되었다. 여기서는 USD-10 디지털 초음파탐상기와 굴절각이  $41^\circ$ 인 탐촉자(크기 :  $4 \times 4$ mm, 주파수 : 5 MHz), 그리고 반경이 0.5mm인 사분원 형태의 인공 표면결함이 long ligament side에 개재된 참고 동익을 사용하였다. 먼저, 이 인공표면결함을 1 스킵 에코를 탐지하여 그 경로가  $V_0 (= 28.0$ mm)가 되도록

장치를 교정하였다.(Fig. 6) 이것은 탐촉자의 빔축에 대한 굴절각(41°)이 최적굴절각인  $\theta_0(42.7^\circ)$ 와 조금 다르다 해도 인공결함으로부터의 1 스킵 에코는 굴절각이  $\theta_0$ 인 빔축에 의해 형성되기 때문이다. 교정 과정에서 사용된 횡파 속도는 3540m/s 이었으며, 이는 참고 동익에 대해 실제 측정된 값이다. 그리고, 빔경로의 길이는 에코와 게이트의 첫번째 교점으로부터 측정되어 오실로그래프의 중앙 하단에 D=XX. XX로 표시되도록 하였다.

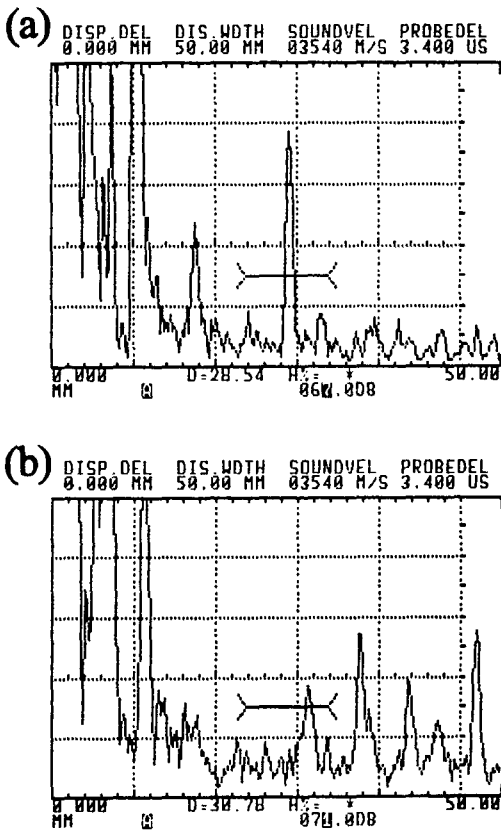


Fig. 7. Geometric signals from (a) T side and (b) L side.

Fig. 7(a)와 (b)는 각각 T side와 L side에서 관측된 기하신호를 보여준다. 측정된  $V_g$ 값은 각각 28.54 mm와 30.78mm로써 예측된 결과와 좋은 일치를 보인다. 그리고, 이  $V_g$ 값들의 차이에 비해, 수신기의 증폭이득을 4dB 증가시켰음에도 불구하고 L side에

서의 기하신호의 진폭이 T side에서의 그것보다 훨씬 작음을 볼 수 있다. 이것은 L side와 T side에서의  $\theta_g$ 가 탐촉자의 빔축으로부터 벗어난 정도(2.9°와 7.0°)로부터 이해될 수 있다. 그러므로 이 기하신호들의 진폭비는 탐촉자의 빔지향 특성에 의해 결정됨을 알 수 있다. 그리고, T side에서의 기하신호의 진폭은 크기가 0.5mm인 인공결함신호의 진폭과 비슷한 정도임을 볼 수 있다. 국내 원전의 터빈 동익들처럼 외국에서 제작되어 그 대비시험편을 확보하기 어려운 경우, 이 기하신호가 장치교정 및 감도설정 에 이용될 수 있을 것이다. 탐촉자의 굴절각이  $\theta_0$ 보다 크게 되면 결함신호보다 오히려 기하신호가 강조될 것이다. 그러므로, 실제 검사를 위한 탐촉자의 선택에는 세심한 주의가 요구된다.

5. 결 론

핀-핑거형 터빈 동익 루트의 초음파탐상시 결함신호 위치에 나타난 기하신호는 핀홀에서 90° 반사된 빔축에 의한 리가먼트 모서리신호이다. 이 신호의 위치와 진폭은 핀홀과 리가먼트의 크기 및 탐촉자의 빔지향 특성으로부터 결정될 수 있다. 대비시험편을 확보하기 어려운 경우, 이 기하신호가 장치교정 및 감도설정 에 이용될 수 있을 것이다. 그리고, 기하신호와 결함신호의 구별에 관한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

실험장치의 사용에 도움을 주신 한국전력기술연구원의 손영수 부장님과 이성호 과장님께 감사드립니다.

참고 문헌

- 1) "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)
- 2) G. A. Lamping, "Advanced NDE Method for Steam Turbine Blading", EPRI-CS-4001, Proceed-

- ings, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA (July 1985)
- 3) 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)
- 4) A. Puri, "Steam Turbine Blade Root Inspection to Detect Fatigue Crack Initiation", Steam Turbine/Generator NDE Workshop & Vendor Equipment Fair (Sep. 1989)
- 5) 정현규, 정민화, "터빈 동익 Root부 초음파 탐상", 비파괴검사학회지 Vol. 13, No.3(1993), pp. 24-30

## An Interpretation of the Geometric Signal in Ultrasonic Testing for the Pin-Finger Type of Turbine Blade Roots

M. S. Choi, H. K. Jung, Y. S. Joo, H. T. Lim and K. S. Yoon  
NDE Division, Korea Atomic Energy Research Institute

**Abstract** Interpreted is the geometric signal in the angle beam ultrasonic testing for the pin-finger type of turbine blade roots. The geometry of the blade roots is described and the reflection conditions for appearance of the geometric signal are proposed. The general equation for its beam path is derived and verified. As the results, it is found that the geometric signal is the back reflection from the ligament edge, and its position and amplitude can be determined from the dimension of blade root and the beam directivity of transducer.

---

(Received : May 21, 1994)