

종파 임계각 근처에서 사각 탐촉자의 횡파굴절각

이 정기, 임 성진
대한검사기술(주) 부설연구소

Refraction angle of the transverse wave near the longitudinal critical angle in angle beam transducer

Jeong-Ki Lee, Seong-Jin Lim
R&D Center, Korea Inspection & Engineering Co., Ltd.
E-mail : leejk@hitel.net

요 약

복잡한 형상을 지닌 터빈 블레이드의 결함을 검사하기 위해 현재 35°, 38°, 40°의 횡파 굴절각을 지닌 탐촉자를 사용하고 있다. 이와 같은 굴절각은 초음파 빔의 경로를 Snell의 법칙에 의해 설정하고 있다. 그러나 터빈 블레이드 검사용 초음파 탐촉자를 제작하는 과정에서 35°의 횡파 굴절각을 갖는 경사각 탐촉자는 제작이 어려움을 알았다. 이러한 원인은 철강재료의 종파임계각이 33.2°의 횡파굴절각에 대응되며, 종파임계각 근처에서는 전반사 현상 때문에 에너지 투과율이 매우 작아 실제 시험대상체에 입사되는 에너지가 거의 없으며 또한 횡파굴절각이 약 37.5° 일때에 횡파의 에너지 투과율이 최대가 되어 wedge를 37.5° 이하의 횡파굴절각을 갖도록 설계하더라도 측정율하면 37.5° 근처의 횡파굴절각을 갖게 된다. 즉, 종파임계각 근처에서는 전반사 현상에 의해 경계면에서의 에너지 투과가 매우 작아 횡파 굴절각은 Snell의 법칙이 아닌 초음파 에너지의 투과 정도를 나타내는 echo transmittance의 크기에 의해 결정된다.

1. 서론

복잡한 형상을 지니고 있는 발전 설비 부품인 터빈 블레이드는 운전 중 rotor 회전에 의한 원심력과 유입 증기에 의한 굽힘 응력이 작용되어 운전 시간이 지남에 따라 부식에 의한 결함 발생 외에 부식피로 균열, erosion, 진동 및 원심력에 의한 균열 등 매우 다양한 원인에 의해 손상되고 있다[1]. 따라서 터빈 블레이드는 설비 해체 후 육안검사, 액체침투검사, 자분탐상검사 등 비파괴검사를 수행하여 결함 유무를 판정하고는 있으나, root부의 피로균열과 같은 미세한 결함의 검출에는 많은 어려움이 있어 미세 결함 검출을 위하여 여러 가지 방법의 초음파 검사를 수행하고 있다[1]. 그러나 터

빈 블레이드의 복잡한 구조에 의해 초음파 신호 해석에 어려움이 있으며, 또한 초음파 탐촉자를 접촉시키기 위한 부위도 제한되어 검사에 어려움이 있는 실정이다. 현재 국내에서 사용하고 있는 터빈 블레이드 root부에 대한 초음파검사는 복잡한 형상과 접촉부위의 제한에 의하여 압전소자의 크기를 4×4 mm로 한 소형의 탐촉자를 사용하며, 또한 굴절각이 35°, 38°, 40°(또는 다른 각도) 등 터빈 블레이드의 형상에 따라 검사 부위에 초음파가 도달할 수 있는 굴절각을 갖도록 특별하게 제작하여 사용하고 있다.

그러나 이러한 검사에 사용하는 초음파 탐촉자는 지금까지 Krautkramer사 등 외국에서 제작된 초음파 탐촉자를 수입하여 사용하여 온 관계로 제작사에서 제공하는 굴절각을 그대로 믿고 사용하여 왔다. 당 연구소에서는 이에 사용하는 탐촉자를 개발하면서 35° 굴절각을 갖는 초음파 탐촉자의 경우 snell의 법칙에 의한 굴절각 계산에 맞추어 wedge를 제작하여 측정해 본 결과 초음파 빔의 굴절각이 35°가 이루어지지 않음을 발견하였다.

본 논문에서는 35° 근처에서 Snell의 법칙이 적용되지 않는 원인을 고체-고체 경계면에서 굴절각 변화에 따른 초음파 echo-transmission 곡선을 기초하여 고찰하여 보았다.

2. 고체-고체 경계면에서 초음파의 투과율

Fig. 1에서와 같이 고체-고체 경계면에 입사각을 가지고 초음파가 입사하면 반사와 굴절은 다음과 같은 Snell의 법칙을 따라 초음파 진행방향이 결정된다.

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} = \frac{c_i}{c_r} \quad (1)$$

여기서 θ_i 는 입사각이고, θ_r 은 반사각 또는 굴절각이며, c_i 는 입사파 모드의 속도이고, c_r 은 반사파 또는 굴절파 모드의 속도이다. 고체에서는 종파와 횡파가 모두 존재하기 때문에 입사파가 종파 또는 횡파일지라도 반사파와 굴절파는 입사파 모드와 다른 모드가 생성되는데 이를 모드 전환이라고 한다. 이와 같은 모드 전환 때문에 경계면에서의 초음파의 반사와 투과는 복잡한 현상으로 나타나는데, 모드 전환 현상을 고려한 경계면에서의 초음파의 음압 투과율과 반사율은 Kuhn 등에 의하여 이미 정립되었다[2].

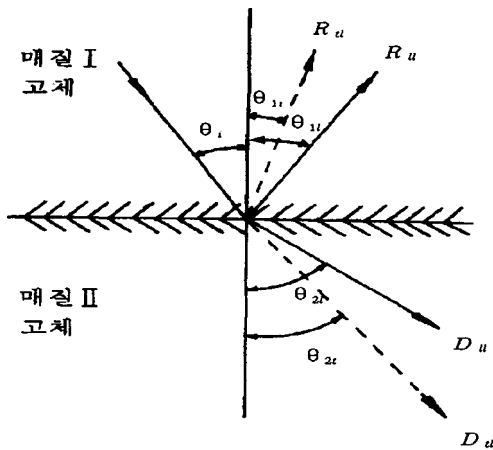


Fig. 1 고체-고체 경계면에서의 초음파의 반사 및 굴절

Fig. 1에서와 같이 고체-고체 경계면에 종파 모드인 초음파가 입사각을 가지고 매질 1로부터 매질 2로 입사될 때 종파 모드 반사율, R_{ll} 과 횡파 모드 반사율, R_{ll} 은 다음과 같다[2]

$$R_{ll} = 1 - \frac{\cos^2 2\theta_{1l}}{N \sin^4 \theta_{1l}} \tan \theta_{1l} \quad (2)$$

$$R_{ll} = \frac{2 \cos 2\theta_{1l}}{N \sin^2 \theta_{1l}}$$

여기서 N 은 표현을 간단히 하기 위하여 도입된 것으로 다음과 같다.

$$N = 2 \cot \theta_{1l} + \frac{\cos^2 2\theta_{1l}}{2 \sin^4 \theta_{1l}} \tan \theta_{1l} + \frac{2\rho_2 c_{2l}^4}{\rho_1 c_{1l}^4} \cot \theta_{2l} + \frac{\rho_2 \cos^2 2\theta_{2l}}{2\rho_1 \sin^4 \theta_{1l}} \tan \theta_{2l}$$

그리고, ρ 는 매질의 밀도이고, c 는 매질에서 전파하는 초음파 모드의 속도이며, θ 는 초음파 진행방향에 경계

면의 법선과 이루는 각도이고, 아래첨자 l 과 t 는 각각 종파와 횡파를 나타내는 것이며, 또 아래첨자 1과 2는 매질을 구분하는 번호이다. 이해를 돕기 위하여 θ_{1l} 은 입사 종파모드의 입사각과 종파 모드의 반사각이고, θ_{2t} 는 매질2로 굴절된 횡파모드의 굴절각이다.

위와 같이 종파가 입사하는 경우에 종파모드 투과율, D_{ll} 과 횡파모드 투과율, D_{ll} 은 다음과 같다.

$$D_{ll} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{\cos 2\theta_{1l} \cos 2\theta_{2l}}{N \sin^4 \theta_{1l}} \tan \theta_{2l} \quad (3)$$

$$D_{ll} = \frac{2\rho_2 c_{2l}^2}{\rho_1 c_{1l}^2} \frac{\cos 2\theta_{1l}}{N \sin^2 \theta_{1l}}$$

여기서 사용된 모든 매개 변수 및 첨자는 위의 반사율에서 사용된 것과 같으며, 매질 2에서 매질 1로 초음파가 입사되는 경우에는 아래첨자 1과 2만 교환하면 된다.

만일 입사되는 초음파의 모드가 횡파인 경우의 반사율과 투과율은 다음과 같다[2].

$$R_{ll} = \frac{4c_{1l}^2}{c_{1t}^2} \frac{\cos 2\theta_{1l}}{N \sin 2\theta_{1l}} \cot \theta_{1l} \quad (4)$$

$$R_{ll} = \frac{4}{N} \cot \theta_{1l} - 1$$

$$D_{ll} = -\frac{4\rho_2 c_{2l}^2}{\rho_1 c_{1l}^2} \frac{\cos 2\theta_{2l}}{N \sin 2\theta_{2l}} \cot \theta_{1l} \quad (5)$$

$$D_{ll} = \frac{4\rho_2 c_{2l}^2}{\rho_1 c_{1l}^2} \frac{1}{N} \cot \theta_{1l}$$

여기서 R_{ll} 와 R_{ll} 는 각각 종파와 횡파모드의 반사율이며, D_{ll} 와 D_{ll} 는 각각 종파와 횡파모드 투과율이다.

일반적으로 경사각 탐촉자는 탐촉자 내에서 종파를 발생시켜 검사대상체에 횡파를 입사시키는 것을 많이 사용하며 시험대상체 내의 불연속부로부터 반사되어 오는 echo 신호를 수신하게 된다. 따라서 탐촉자 내의 wedge와 시험대상체와의 경계면에 wedge로부터 종파를 입사시켜 투과 굴절시켜 사용한다. 이 때 탐촉자에서 수신되는 초음파는 시험대상체에서 wedge로 투과되는 경우이기 때문에 이를 분석하는 데에는 echo transmittance를 사용한다. Echo transmittance는 시험대상체(즉 매질2)에 무한히 큰 평면 반사체가 있어 시험대상체로 굴절되어 들어간 초음파가 모두 다시 경계면으로 되돌아오게 하여 wedge로 다시 투과되도록 하였을 때 돌아오는 초음파의 음압비로 정의한다. 따라서 일반적인 경사각 탐촉자의 경우의 echo transmittance는

위의 투과율에서 D_{II} 과 D_{II} 의 곱으로 나타낼 수 있다.

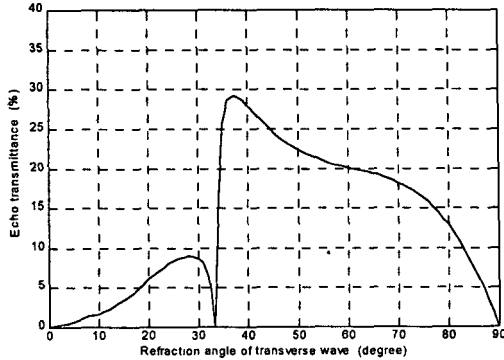


Fig. 2 Echo transmission curve on transverse wave

Fig. 2는 아크릴과 철강재료의 경계면에서 횡파의 echo transmittance를 나타낸 그림이다. 이 그림은 철강재료의 종파와 횡파의 속도를 각각 5,900 m/s와 3,230 m/s으로 하고 밀도는 7.8 g/cm³로 하였으며, 아크릴은 우리가 제작한 탐촉자 wedge에 대한 종파와 횡파의 속도로 각각 2,730 m/s와 1,450 m/s, 밀도는 1.19 g/cm³를 적용하여 계산하였다. 이 그림에서 echo transmittance가 0이 되는 지점은 종파 임계각에 해당하는 곳으로 아크릴로부터 철강재료로 초음파가 입사하면 종파 임계각은 27.6°이고 이 때의 횡파 굴절각은 33.2°가 된다. 또한 echo transmittance가 최대가 되는 횡파굴절각은 37.6°이다.

3. 종파 임계각에서 횡파 굴절각

Fig. 2에서 echo transmittance가 0이 되는 지점은 종파 임계각에 해당되는 것으로 이 지점에서는 전반사가 일어나 에너지 투과가 없게 된다. 그리고 이러한 종파 임계각 θ_{C1} 에 해당되는 횡파 굴절각은 다음의 관계를 갖는다.

$$\sin \theta_{C1} = \frac{c_{1t}}{c_{2l}} \quad (6)$$

여기서 c_{1t} 과 c_{2l} 는 각각 입사 매질과 투과 매질에서의 종파 속도이다.

고체-고체 경계면에 종파모드의 초음파를 종파 임계각으로 입사시켰을 때 횡파의 진행방향을 결정하는 횡파 굴절각은 앞의 식 (1)의 Snell의 법칙에 의해서

$$\frac{\sin \theta_{2t}}{\sin \theta_{C1}} = \frac{c_{2t}}{c_{1l}} \quad (7)$$

인 관계를 갖는다. 여기에 종파 임계각에 대한 식을 대

입하면

$$\sin \theta_{2t} = \frac{c_{1l}}{c_{2l}} \frac{c_{2t}}{c_{1l}} = \frac{c_{2t}}{c_{2l}} \quad (8)$$

이 된다. 이 식은 종파 임계각에 해당하는 횡파 굴절각은 입사되는 매질의 물성과는 관계가 없으며, 오직 굴절되는 매질의 종파와 횡파의 비에 의해서 횡파의 진행 방향이 결정됨을 의미한다.

4. 탐촉자의 제작

터빈 블레이드 검사용 탐촉자는 검사 대상체의 복잡한 구조와 접촉 부위의 제한 때문에 5 MHz의 중심주파수를 갖는 진동자를 4 × 4 mm의 크기로 가공하여 35°, 38°, 40°의 초음파 횡파 굴절각을 갖도록 제작한 wedge에 부착하여 제작하였다. 이러한 굴절각이 나오도록 wedge의 각도는 시험대상체에서의 횡파의 속도는 3,230 m/s으로 하여 Snell의 법칙을 적용하여 가공하였다. Wedge는 밀도가 1.19 g/cm³이고 종파와 횡파의 속도는 각각 2,730 m/s와 1,450 m/s의 아크릴을 사용하였다. 가공된 wedge의 각도는 각각에 대하여 29°, 31.4°, 33°이었다. 이와 같은 wedge를 사용하여 제작한 탐촉자의 굴절각은 STB-A1 block에서 일반적으로 비파괴검사에 사용하는 초음파 탐상기를 사용하여 KS-B0817에 준하여 측정하였다[3]. Fig. 3은 터빈 블레이드 검사용으로 만든 초음파 탐촉자를 나타낸 사진이다.

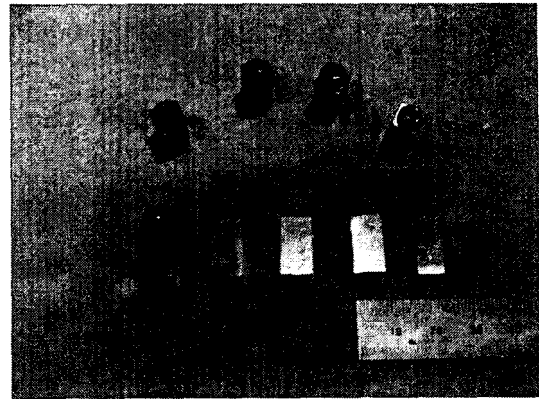


Fig. 3 제작한 탐촉자

5. 결과 및 분석

모든 초음파 탐촉자는 공간에 대한 지향성을 갖는데, 사각형 진동자에 대한 음압의 지향성은 다음과 같다[4].

$$p = p_0 \left(\frac{\sin X_1}{X_1} \right) \left(\frac{\sin X_2}{X_2} \right) \quad (9)$$

여기서 X_1 과 X_2 는 다음의 관계에 있고,

$$X_1 = \pi(D_1/\lambda)\sin\gamma_1$$

$$X_2 = \pi(D_2/\lambda)\sin\gamma_2$$

또, D_1 과 D_2 는 진동자의 각 변의 길이이고 λ 는 파장이며, γ_1 과 γ_2 는 각 변에 대응되는 퍼짐각이다. 위 식에서 음압이 1/2(즉, 6 dB down)이 되는 퍼짐각을 계산하면 다음의 관계를 얻게 된다.

$$\sin\gamma_{6dB} = 5.97 \frac{\lambda}{D} \quad (10)$$

본 연구에서 제작된 탐촉자의 진동자 크기는 4×4 mm이고 중심주파수가 5 MHz를 사용하였으므로 사용한 wedge와 STB-A1 block에서의 퍼짐각은 각각 54° 와 74.6° 이다. 따라서 입사파의 음압은 퍼짐각이 커질수록 줄어들기는 하나, 이러한 퍼짐 현상 때문에 고체-고체 경계면에 하나의 입사각을 가지고 입사하는 것이 아니라 설계된 입사각을 중심으로 일정 범위의 입사각 분포를 가진다.

본 연구를 위해 제작된 탐촉자에 대해 KS-B0817에서 제시한 방법으로 측정된 횡파굴절각을 설계된 각도와 함께 Table 1에 나타내었다. 38° 와 40° 의 횡파굴절각으로 설계한 탐촉자는 설계각과 유사한 각이 측정된 반면에 35° 의 횡파굴절각을 갖도록 제작한 탐촉자는 횡파굴절각이 38° 로 측정되었다. 그리고 38° 와 40° 의 횡파굴절각을 갖는 탐촉자의 경우 측정된 굴절각이 차이가 나는 것은 제작 및 측정에서 발생하는 오차에 기인한다.

Table 1 제작된 초음파 탐촉자의 횡파굴절각

Nominal angle	Wedge angle	measured Refraction angle	sensitivity
35 degree	29 degree	38 degree	57 dB
38 degree	31.4 degree	39 degree	70 dB
40 degree	33 degree	39.5 degree	79 dB

위와 같이 35° 의 횡파굴절각을 갖는 탐촉자의 경우 설계각에서 상당히 벗어난 횡파 굴절각을 갖는 것으로 측정되었는데 이것은 설계된 횡파굴절각이 종파임계각에 대응되는 횡파 굴절각에 가까워서 echo transmittance가 작아 경계면으로 설계된 각도로 초음파 에너지를 투과시키지 않고 echo transmittance가 큰 각도로 초음파 에너지가 경계면을 투과하기 때문이다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 아크릴과 철강 재료 경계면에서의 echo transmittance는 횡파굴절각이 37.5° 일 때 최대가 된다. 따라서 wedge는 횡파굴절각이 35° 가 되도록 하였어도 종파임계각 근처에서 전반사 현상에 의한 echo transmittance가 작은 각의 초음파는 그 에너지를 잘 전달하지

못하고, echo transmittance가 큰 각의 초음파의 에너지를 잘 전달하므로 측정된 횡파굴절각은 echo transmittance가 최대가 되는 37.5° 에 가까운 38° 로 측정된 것이다. 측정값과 echo transmittance가 최대가 되는 각과의 차이는 입사점 측정 및 굴절각 측정에서 오는 오차에 의한 것으로 판단된다.

종파 임계각에서는 전반사 현상 때문에 초음파 에너지가 경계면을 투과하지 못하여 echo transmittance가 최소가 되며, 여기에서 횡파굴절각(즉 입사각)의 증가하면 echo transmittance는 급격히 증가하여 최대값에 도달하게 된다. 따라서 종파임계각 근처에서의 횡파굴절각은 Snell의 법칙보다는 경계면에서의 echo transmittance 크기에 크게 의존하게 된다. 일반적으로 경사각 탐촉자를 설계 제작하는데 있어 Snell의 법칙만을 생각하게 되는데, 종파임계각 근처의 횡파굴절각을 갖는 탐촉자를 제작하는 경우에는 반드시 echo transmittance를 고려하여야만 한다.

6. 결론

본 논문에서는 터빈 블레이드와 같은 복잡한 구조를 검사하기 위한 경사각 초음파 탐촉자를 제작하여 횡파굴절각을 측정된 결과 Snell의 법칙을 따르지 않는 현상이 발견되어 이를 분석하였다. 경사각 탐촉자를 사용하여 초음파 탐상을 하는 경우 wedge와 시험대상체는 고체-고체 경계면을 형성한다. 이러한 고체-고체 경계면에서 전반사 현상이 일어나는 종파임계각에 해당하는 횡파굴절각은 탐촉자 제작에 사용하는 wedge의 물성에는 무관하고 오직 시험대상체의 종파와 횡파의 속도에만 의존하였으며, 종파임계각에서는 전반사 현상에 의해 echo transmittance가 최소가 되는데, 이러한 종파임계각부터 echo transmittance가 최대가 되는 각도까지는 횡파굴절각의 결정이 Snell의 법칙에 의존하지 않고 echo transmittance이 최대가 되는 각도로 결정되었다.

참고문헌

- [1] "터빈 Blade Root부 결함 탐지 기술 개발," 한국전력공사 기술연구원, KRC-90G-J04, 1992
- [2] G. J. Kuhn and A. Lutsch, "Elastic wave mode conversion at a solid-solid boundary with transverse slip," J. Acoust. Soc. Am., 33 pp. 949-954, 1964
- [3] "금속재료의 펄스 반사법에 따른 초음파탐상시험법," 한국공업규격, KS-B0817 부속서2, 1991
- [4] J. Krautkramer and H. Krautkramer, Ultrasonic Testing of Materials, 4th ed., Springer-Verlag, 1990