

후방복사 리키 램파를 이용한 위상속도 분산곡선과 군속도의 측정

김영환¹, 송성진¹, 천권수¹, 권성덕²

¹ 성균관대학교 기계공학부

² 안동대학교 물리학과

Determination of phase velocity dispersion curve and group velocity using backward radiated leaky Lamb waves

Young H. Kim¹, Sung-Jin Song¹, Kwon Soo Chun¹ and Sung-Duk Kwon²

¹ School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, 440-746, Suwon

² Department of Physics, Andong National University, 760-749

* E-mail: yhkim@skku.ac.kr

요 약

유도초음파는 얇은 판재와 다층재료를 평가하는데 널리 사용되는데, 이를 정량적으로 이용하기 위해서는 위상 및 군속도의 분산선도는 필수적이다. 본 연구에서는 후방복사 리키 램파를 이용하여 위상속도 분산곡선과 군속도를 측정하였다. 물에 잠긴 판재에 입사각을 변화시키면서 판재에서 발생하는 후방복사 초음파 신호를 측정하였고, 후방복사된 초음파 신호는 유도초음파의 분산특성을 지남을 보였다. 입사각도와 수신된 파형의 주파수 분석을 통하여 램파의 위상속도 분산선도를 구하였다. 또한, 특정한 입사각에서 입사점을 변화시키면서 rf 파형의 시간대역 이동으로부터 군속도를 측정하였다.

1. 서 론

초음파는 시험체 내부에 존재하는 결함을 찾는 비파괴검사는 물론이고, 재료의 물성을 평가하는데에 널리 사용되고 있다[1]. 일반적으로 재료의 물성평가를 위해서는 초음파의 속도나 감쇠를 측정하는데, 이들은 모두 어느 정도 이상의 전파거리가 필요하여 판재나 표면 지역의 물성을 평가하는데에는 어려움이 많다. 이러한 경우에는 유도 초음파가 유용한 것으로 널리 알려져 있다. 시험체의 두께가 파장 정도로 얇아지면 유도초음파의 형태로 전파한다. 유도 초음파는 종파와 횡파가 중첩되면서 진행되는 파로서 무한히 많은 모드가 존재하며 유도초음파의 속도는 모드와 주파수에 따라서 달라진다. 주파수에 따른 유도초음파의 위상속도와 군속도의 관계를 분산선도라 하는데, 유도초음파를 적절히 이

용하기 위해서는 이들 분산선도를 아는 것이 매우 중요하다.

유도초음파의 속도를 측정하기 위해서는 두 개의 탐촉자를 사용한 pitch-catch 법이나 한 개의 탐촉자를 사용하여 판재의 모서리에서 반사되는 신호를 이용하는 pulse-echo법이 이용된다. 이 경우에 얻어지는 초음파 신호는 분산성으로 인하여 파형이 왜곡되므로 전파모드 및 초음파의 전파시간을 정확히 결정하기가 어렵다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 수신된 초음파 신호에 대해서 STFT(Short Time Fourier Transform)과 같은 시간-주파수 해석을 통하여 모드확인 및 전파시간의 정밀성 향상에 관한 연구가 수행되고 있다[2]. 그럼에도 불구하고 이렇게 얻어진 속도는 군속도이고 위상속도에 대한 정보를 얻기에는 아직은 미흡하다.

위상속도 정보는 입사각을 바꾸어 원하는 모드의 유도초음파를 발생시키는데 사용되고 있으나[3], 위상속도의 분산을 간편하고 빠르게 측정하는 방법은 아직까지 알려진 바가 없어서 지금까지는 이론적 분산 커브에 의존하고 있다. 최근 후방복사법으로 다층경계면 시편에서 일반화 램파의 속도 분산성 측정이 수행되었으나[4,5], 대개의 경우에는 A_0 와 같은 단순한 모드에 국한되어 있다. 선집속 초음파 현미경을 이용하여 비교적 간편하게 분산선도를 측정하는 연구사례도 보고되고 있는데, 입사각과 주파수의 제약으로 인하여 박판이나 박막으로 적용범위가 제한되고 있다[6].

물속에 담긴 시험체에 초음파를 입사시키면 특정한 입사각에서 표면파가 모드 변환에 의해 발생하고, 이 표면파가 산란파 에너지 누수로 인해서 입사한 방향으로 상당한 량의 초음파가 되돌아오는 후방복사가 일어난다. 후방복사 발생각으로 간접 측정된 표면파 속도의 주기성을 이용하여 니켈결정의 방향이 평가되었고[7],

후방복사에 의해 측정된 같은 재질의 박막층이 접착된 고체 표면에서의 표면파 분산성은 기존의 최소 반사법에 의한 측정치와 좋은 일치율을 보여주었다[8].

최근 레일리 입사각 근처에서 입사각 의존성을 보이는 후방복사 프로파일은 레일리 표면파의 발생과 산란, 그리고 분산 등의 특성에 의해 결정됨이 밝혀졌고 광대역 초음파를 사용하여 후방복사 초음파의 입사각 의존성으로부터 부분적인 레일리 표면파의 주파수 의존성의 평가가 시도되었다[9]. 후방복사 프로파일은 표면 지역의 특성들에 관한 많은 정보를 가지고 있기에 주목 받아왔다. 표면지역내 재질의 비균질성에 의한 산란에 의존하는 후방복사 에너지를 이용해서 산란원인중 하나인 다결정내 입계의 크기분포를 평가하는 연구가 수행되었으며[10] 전통적인 초음파 시험을 통해서 얻기 어려운 부식이나 마모에 의한 표층 열화 평가에도 효과적으로 활용될 수 있음도 보여 주었다[11,12].

한편 시험체의 두께가 파장 정도로 얇아지면 순수한 레일리 표면파가 존재하기는 어렵고 유도초음파의 형태로 전파한다. 따라서 박판에서는 레일리 표면파 뿐만 아니라 램파와 같은 유도 초음파를 같이 고찰해야 한다.

본 연구에서는 후방복사 프로파일을 측정하기 위해 단일 탐촉자를 사용하는 자동 초음파 각도 주사 시스템을 구성하였다. 입사각을 변화시키면서 시간영역에서의 파형과 주파수 스펙트럼을 측정하여 후방복사 프로파일을 획득하였다. 박판에서 후방복사를 이용하여 유도 초음파의 분산성을 조사하였다.

2. 이론적인 배경

2.1 유도초음파

무한공간의 고체 매질에서는 입자의 진동방향이 파의 진행방향과 평행한 종파와 입자의 진동방향이 파의 진행방향에 수직인 횡파가 존재하며 이들의 전파 속도는 매질의 밀도와 탄성계수에 의해 결정된다. 판에서는 두 표면이 경계면으로 작용하여 반사가 일어나며, 판 내부에서 표면으로 입사하는 파와 표면에서 반사하는 파가 서로 결합하여 판을 따라 전파하는 탄성파를 형성한다. 이와 같이 두 경계면 내에서 형성되어 전파하는 탄성파를 유도파 모드(guided mode) 또는 유도초음파라 하며 특히 판에서 전파하는 유도 초음파를 판파라고 부른다. 판파는 그 특성에 따라서 판에서 수평횡파가 전파하는 경우, 판에 무한매질이 접해있는 경우의 수평횡파 (Love wave), 판에서 종파와 수직횡파가 결합된 Lamb 파, 판에 무한매질이 접해있는 경우의 종파와 수직횡파가 결합된 일반화된 Lamb 파가 있다[13].

유도초음파는 일반적인 체적파(bulk wave)와는 매우 다른 특성을 가지게 되며 그 대표적인 차이점으로 무한개의 유도초음파 모드가 넓은 주파수 영역에 걸쳐 존재한다는 점과 대부분의 모드는 진동수와 벽면의 두께에 따라 전파속도가 변화하는 특성 즉 분산성을 갖는다는 것이다. 이 때 주어진 진동수 영역 내에 존재하는 유도초음파 모드의 분산특성을 나타낸 곡선을 분산선도라고 하며 이는 탄성파 이론에 대상구조물의 경계조건

이 주어짐으로 구하여진다[14].

판의 표면이 자유 상태에 있고 파의 전파 방향을 x 축으로 하고, 판의 두께 방향을 z 축이라 하자. 감쇠가 없고 두께가 $2h$ 이고 표면의 방정식이 $z = \pm h$ 인 등방성 평판을 가정하자. 경계조건을 만족하는 Lamb 파의 주파수 ω 와 파수 k 사이의 관계를 분산성이라 하는데, 이는 다음과 같은 특성 방정식에 의해 결정된다. 두 표면에서의 변위가 크기는 같고 방향이 반대인 대칭모드에서는 특성방정식이

$$(k^2 - \beta^2)^2 \cos ah \sin \beta h + 4k^2 \alpha \beta \cos \beta h \sin ah = 0 \quad (1)$$

와 같이 주어진다. 한편 두 표면에서의 변위가 크기와 방향이 같은 반대칭 모드에서는 특성방정식이

$$(k^2 - \beta^2)^2 \cos \beta h \sin ah + 4k^2 \alpha \beta \cos ah \sin \beta h = 0 \quad (2)$$

와 같이 주어진다. 식 (1)과 (2)에서 α 와 β 는 각각 종파와 횡파 파수 벡터의 방향 성분의 크기로

$$\alpha^2 = \left(\frac{\omega}{c_l}\right)^2 - k^2 \quad (3)$$

$$\beta^2 = \left(\frac{\omega}{c_t}\right)^2 - k^2 \quad (4)$$

이다. 여기서 c_l 와 c_t 는 각각 무한매질에서의 종파와 횡파의 속도이다.

분산성이 있는 파에서의 위상속도와 군속도는 다른데, 위상이 동일한 파면이 진행되는 속도인 위상속도는

$$v_p = \frac{\omega}{k} \quad (5)$$

로 주어지며, wave packet이 전파하는 군속도는

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} \quad (6)$$

로 정의된다. 감쇠가 없다고 가정하면 에너지 전파속도 v_e 는 군속도와 같다.

특정한 모드는 특정한 주파수 이상에서만 존재하는데, 이 경계가 되는 주파수를 단절주파수(f_c)라 한다. 단절 주파수에서는 위상속도는 무한대가 되고 군속도는 0 이된다. 따라서 단절 주파수에서는 $k=0$ 이다. 대칭 모드에서는 식(1)로부터

$$\cos ah \sin \beta h = 0 \quad (7)$$

와 같다. 이를 만족하기 위해서는

$$ah = \frac{\omega}{c_l} h = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2}, \dots \quad (8)$$

$$\beta h = \frac{\omega}{c_t} h = \pi, 2\pi, 3\pi, \dots \quad (9)$$

이다. 또한 반대칭모드의 경우는 식(2)로부터

$$\cos \beta h \sin ah = 0 \quad (10)$$

와 같다. 이를 만족하기 위해서는

$$ah = \frac{\omega}{c_l} h = \pi, 2\pi, 3\pi, \dots \quad (11)$$

$$\beta h = \frac{\omega}{c_t} h = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2}, \dots \quad (12)$$

로 주어진다.

2.2 리키 램파(Leaky Lamb wave)

그림 1과 같이 물에 잠긴 판재에서는 Lamb 파가 전파하면서 판재로부터 물로 에너지가 새어나가기 때문에 leaky Lamb 파라고 불리어진다. Leaky Lamb 파는 앞에서 기술한 바와 같이 판재에서 존재하는 유도 초음파의 특정 모드를 사용한다. Lamb 파에서는 판의 두께와 주파수가 주어졌을 때 다른 속도를 가지는 여러 모드가 동시에 존재할 수 있으며, 속도가 주어질 경우에는 다른 주파수를 가지는 몇가지 모드가 동시에 발생될 수 있다.

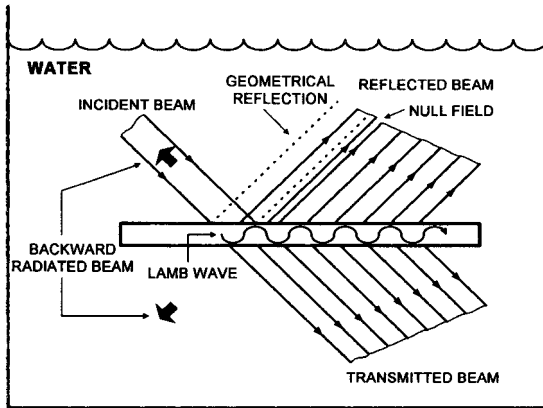


그림 1 리키 램파의 발생 모식도.

광대역 초음파를 판재에 입사시키면 입사파와 위상이 일치하는 Lamb 파 모드가 발생하여 판재를 따라서 전파하게 된다. 위상이 일치하기 위한 조건은 Snell의 법칙으로 불리는 굴절법칙으로

$$\frac{\sin \theta_i}{v_i} = \frac{\sin \theta_r}{v_r} \quad (13)$$

와 같다. 여기서 θ_i 는 입사각이고 $v_i = v_f$ 로 입사매질(물)에서의 초음파 속도이며, 판파에서 굴절각 $\theta_r = 90^\circ$ 이고 $v_r = v_p$ 는 판파의 위상속도이다. 따라서 입사각이 주어졌을 경우에 발생하는 Lamb 파의 위상속도는

$$v_p = \frac{v_f}{\sin \theta_i} \quad (14)$$

와 같다. 이와 같이 발생된 Lamb 파는 "null" 영역을 포함하는 반사된 빔, 굴절된 빔과 함께 입사방향으로 되돌아 가는 후방산란된 빔을 만든다. 근원적으로 경계면 후방산란 신호중 표면 탄성파에의 누수에 의해 후방산란되는 빔을 후방복사라 한다[9].

2.3 위상속도와 군속도 분산곡선

파동의 파수(k)와 주파수(ω)로부터 위상속도와 군속도는 식(5)와 (6)으로 주어진다. 따라서 군속도는

$$v_g = \frac{v_p^2}{v_p - \omega \frac{dv_p}{d\omega}} \quad (15)$$

와 같이 주어진다. 따라서, 위상속도 분산곡선을 정확히 구하면 식(15)로부터 군속도 분산곡선을 구할 수 있다.

3. 실험장치 구성

초음파의 발신과 수신은 Panametrics 5800 초음파 Pulser/Receiver와 중심주파수가 5MHz인 수침용 탐촉자를 사용하였다. 측정된 후방복사 초음파 신호는 digital oscilloscope(Lecroy LT342)에서 GPIB를 통해 PC로 전송된다. 정밀도가 $\pm 0.2 \mu\text{m}$ 인 Y, Z의 직선 운동축과 $\pm 0.015^\circ$ 정밀도의 회전축의 스테핑 모터를 컴퓨터에 연결하여 초음파의 입사각과 입사위치를 제어하였다. 두께가 0.64mm인 강판에 입사각을 0.1° 간격으로 변화시키면서 초음파를 입사시켜 후방복사된 초음파 신호의 파형을 수신하여 PC로 전송하였고 주파수 스펙트럼을 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 단절주파수와 판재의 물성

두께가 0.64mm인 말레이징 강판에 대하여 입사각을 바꾸면서 후방복사를 측정하였다. 모든 입사각에 대하여 후방복사가 발생하였는데, 입사각에 따른 후방복사의 최대진폭을 그림 2에 나타내었다. 그림 2에 나타난 바와 같이 입사각이 14.3° , 16.0° 와 30.0° 에서 강한 후방복사가 일어났다. 입사각에 따라서 일어나는 후방복사의 mechanism을 규명하기 위해서 대표적으로 입사각이 0° , 14.3° , 16.0° 와 30° 인 경우에 후방복사 신호의 파형과 주파수 스펙트럼을 고찰하였다.

그림 3은 입사각이 0° 일 때의 후방복사 초음파 신호와 주파수 스펙트럼이다. rf 파형에서 2~3 μs 에는 직접 반사되는 큰 신호와 함께 후방복사 신호가 같이 나타난다. 주파수 스펙트럼은 뒷부분의 후방복사 신호에 대한 것으로서 4.47 MHz와 4.76 MHz의 피크 주파수가 나타난다. 이는 입사각이 0° 이므로 식(14)로부터 위상속도가 무한대가 되기 때문에 단절주파수가 된다. 판재의 두께가 6.4 mm이고 강재에 물성이 유사하므로 단절주파수를 만족하는 종파와 횡파속도로는 5.72 mm/ μs 와 3.04 mm/ μs 또는 6.09 mm/ μs 와 2.86 mm/ μs 이다. 다

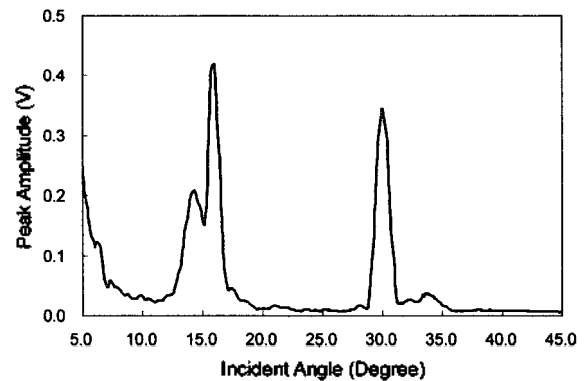


그림 2 입사각에 따른 후방복사 초음파의 최대 진폭.

큰 후방복사 신호를 종합하여 볼 때에 시험 대상체의 종파와 횡파의 속도는 각각 $5.72 \text{ mm}/\mu\text{s}$ 와 $3.04 \text{ mm}/\mu\text{s}$ 임을 알 수 있었다.

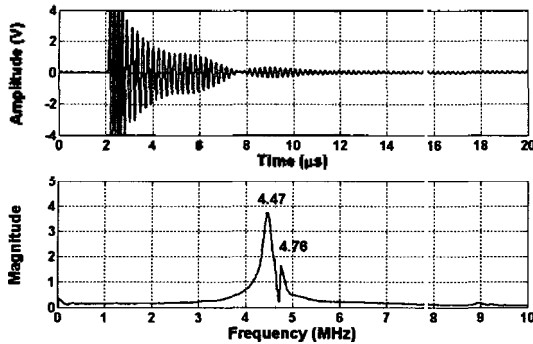


그림 3 입사각이 0° 일 때 후방복사 초음파 파형과 주파수 스펙트럼

4.2 위상속도 분산곡선

입사각이 14.3° 와 16.0° 일 때의 후방복사 초음파 신호를 각각 그림 4와 5에 나타내었다. 입사각이 단지 1.7° 만 바뀌었는데도 후방복사의 파형과 주파수 스펙트럼이 크게 달라졌는데, 이는 후방복사 초음파가 매우 큰 분산성을 지님을 의미한다. 이 현상은 레일리 표면파와 후방복사 원리와 마찬가지로 유도 초음파에 의한 후방복사로 이해할 수 있다. 즉, 입사각도가 주어지면 해당되는 초음파 속도가 결정되고, 그 속도에 해당하는 유도초음파의 모드가 판재 내부에 발생하게 된다. 발생된 유도파는 판재를 진행하면서 산란도거나 시험체의 모서리에서 반사되고 누수됨으로서 입사된 방향으로 복사되어 초음파 탐촉자에 되돌아 오게 된다.

입사각이 14.3° 인 경우에는 그림 4에서 시간대역 파형에 두개의 파동 묶음이 겹쳐져서 존재하고 가운데에 묻혀있는 파동 묶음은 저주파 성분을 지니고 있으며, 넓게 퍼져 있는 파동 묶음은 고주파 성분을 지니고 있는데, 이는 주파수 스펙트럼에서 각각 4.18MHz 와 4.66MHz 의 두 피크로 나타난다. 한편 입사각이 14.3° 이므로 식(14)로부터 위상속도는 $6.07 \text{ mm}/\mu\text{s}$ 이고 그림 7의 위상속도 분산곡선과 비교해 볼 때에 각각은 A_1 모드와 S_1 모드에 해당함을 알 수 있다.

입사각이 16.0° 인 경우에는 그림 5에서와 같이 시간대역 파형에 두개의 파동 묶음이 존재하고 뒤에 나타나는 파동 묶음은 저주파 성분을 지니고 있으며, 앞에 나타나는 파동 묶음은 고주파 성분을 지니고 있는데, 이는 주파수 스펙트럼에서 각각 4.72MHz 와 6.51MHz 의 두 피크로 나타난다. 입사각이 14.8° 이므로 위상속도는 $5.44 \text{ mm}/\mu\text{s}$ 로 주어진다. 그림 7의 위상속도 분산곡선으로부터 A_1 모드와 S_1 모드에 해당함을 알 수 있다. S_1 모드의 군속도가 A_1 모드보다 빠르기 때문에 앞에 나타난다. 또한, 2.27MHz 에서 약한 피크가 관찰되었는데, 이는 그림 8의 STFT 결과로부터 S_0 모드에 의한 피크임을 알 수 있었다.

입사각이 30.0° 인 경우에는 그림 6과 같이 시간대역 파형과 주파수 스펙트럼으로부터 분산성이 거의 없는 모드로 보인다.

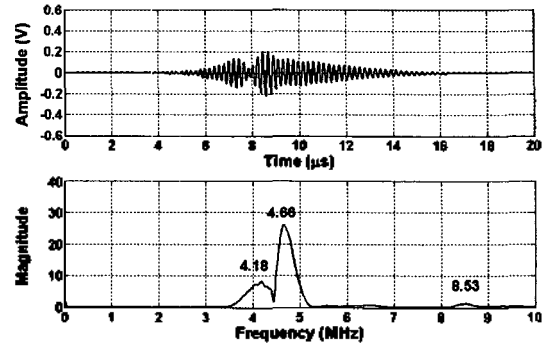


그림 4 입사각이 14.3° 일 때 후방복사 초음파 파형과 주파수 스펙트럼

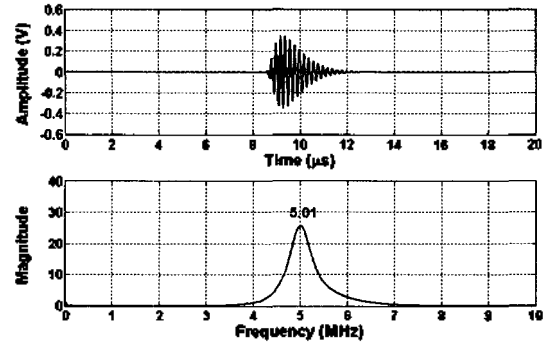


그림 5 입사각이 30.0° 일 때 후방복사 초음파 파형과 주파수 스펙트럼

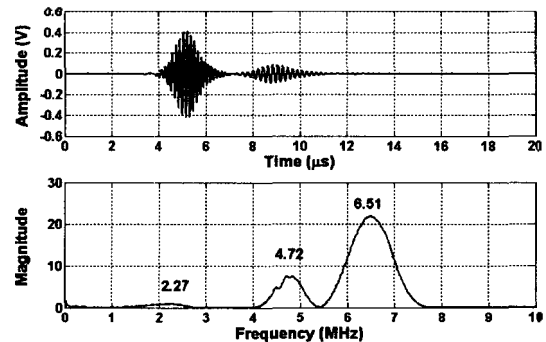


그림 6 입사각이 16.0° 일 때 후방복사 초음파 파형과 주파수 스펙트럼

이와같이 후방복사가 유도초음파에 의한 것이라면 발생하는 유도초음파와 후방복사는 유도초음파의 분산 선도를 만족할 것이다. 입사각을 변화시키면서 앞에서 논의한 바와 같이 위상속도와 그에 해당하는 주파수값을 측정하면 위상선도를 실험적으로 구할 수 있다. 입사각을 5° 부터 45° 까지 변화시키면서 후방복사 초음

파 신호를 측정하여 피크 주파수를 결정하였다. 입사각과 측정된 fd 값을 그림 7과 같은 전형적인 분산선도 위에 표시하여 그림 8에 나타내었다. 그 결과 A_0 , S_0 , A_1 , S_1 , S_2 , A_2 , S_3 모드와 잘 일치하였다. 따라서, 판재에서 발생하는 후방복사는 유도초음파에 의한 것으로 판단된다. 현재 사용한 탐촉자의 주파수 대역이 제한되어 있어서 fd 의 범위가 제한되어 있지만 다른 탐촉자를 사용하면 그 외의 fd 값에 대해서도 측정이 가능하다.

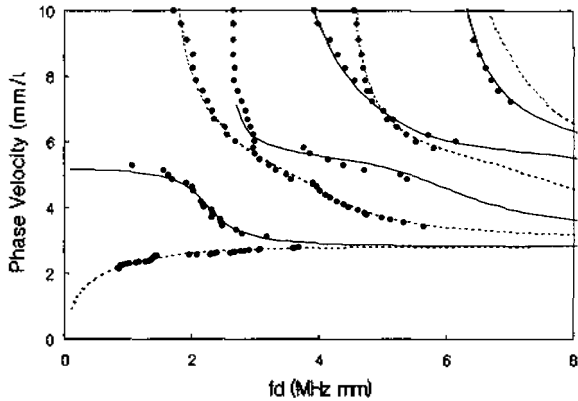


그림 7 후방복사 초음파를 이용하여 구한 위상속도 분산곡선

4.1 균속도 측정

균속도에 대한 정보를 알 수 있는 방법으로는 시간-주파수 분석법이 있는데 대표적으로 STFT (Short-Time Fourier Transform)을 들 수가 있다. 입사각이 16.0° 일 때 관측된 후방복사 신호의 STFT 결과를 그림 9에 나타내었다. 그 결과로 뚜렷이 구분되는 두 개의 파동 묶음이 각각 S_1 모드와 A_1 모드임을 알 수 있다. 시간대역 파형에서는 쉽게 구별이 되지 않지만 앞의 파동 묶음에는 S_0 모드가 같이 섞여있고, 이는 낮은 주파수이면서 S_1 모드보다 약간 먼저 도착하여 균속도가 빠르다는 것을 알 수 있다. STFT는 유도초음파를 해석하는 데에는 매우 유용하나, 이를 이용하여 정량적인 균속도를 결정하기에는 어려움이 많다.

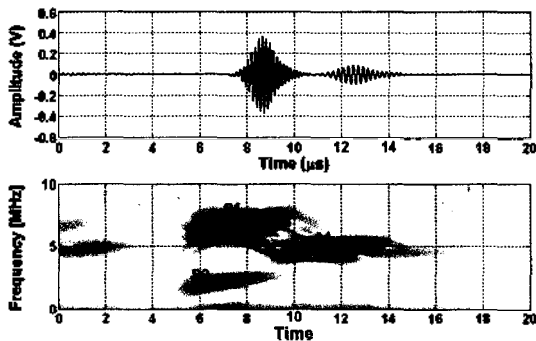


그림 8 STFT의 예. (입사각이 16.0° 일때).

균속도를 측정하기 위해서 입사각이 16.0° 로 하고, 입사점을 5 mm씩 이동하면서 후방복사 초음파 신호를 관찰하여 그 결과를 그림 8에 나타내었다. 앞 질에서 고찰한 바와 같이 그림 8의 앞에 나타나는 파동 묶음은 S_1 모드이고 뒤에 나타나는 파동 묶음은 A_1 모드이다. 입사점을 모서리에서 점차 뒤로 이동시킬 때에 A_1 모드는 S_1 모드에 비하여 보다 빠르게 뒤로 이동하고 또한 그 진폭이 급격히 줄어든다. 이는 A_1 모드는 B_1 모드에 비하여 속도가 느리고, 판을 따라 전파하면서 보다 많은 에너지를 물속으로 방출되기 때문이다.

입사점이 20 mm 이동함에 따라서 시간지연이 S_1 모드와 A_1 모드에서 각각 $9.15 \mu s$ 와 $11.87 \mu s$ 만큼 생겼다. 따라서, 각각의 모드에 대하여 균속도는 $4.37 \text{ mm}/\mu s$ 와 $3.36 \text{ mm}/\mu s$ 로 정할 수 있다. 균속도는 모드뿐만 아니라 주파수에 따라서도 다른 값을 갖는다. 입사각이 16.0° 일 경우에 측정된 균속도는 그림 6으로부터 이들은 S_1 모드는 6.51 MHz 에서 A_1 모드는 4.72 MHz 에서의 값이다.

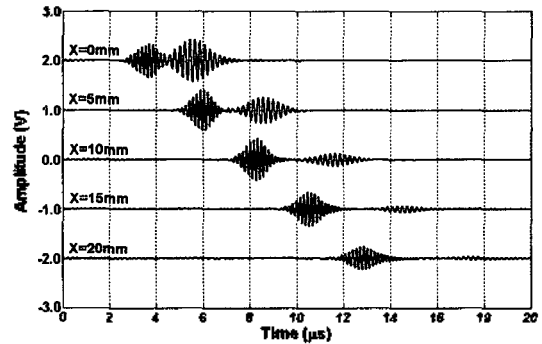


그림 9 입사점을 5 mm 씩 이동하였을 때에 관측된 후방복사 초음파 신호 (입사각: 16.0°).

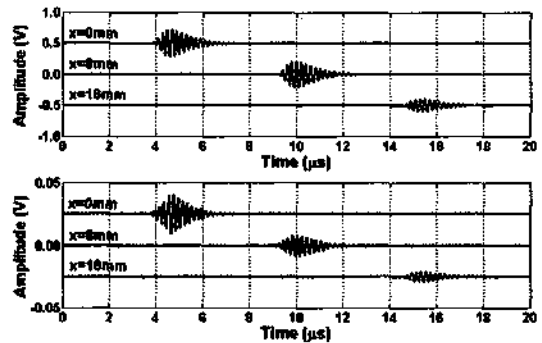


그림 10 입사점을 이동하였을 때에 관측된 후방복사 초음파 신호. (위: 입사각= 30.0° , 아래: 입사각= 32.0°).

입사점을 이동하면서 관측한 후방복사 초음파 신호의 또다른 예를 그림 10에 나타내었다. 윗부분은 입사각이 30.0° 일 때이고, 아래쪽은 입사각이 32.0° 일 때이다. 이들 파형은 거의 같으며, 주파수 성분도 그림 6과 같이 5 MHz의 비분산 초음파 신호이다. 입사각이 30.0° 일 때의 후방복사 신호가 입사각이 32.0° 일 때에 비하여 20배 정도 더 크다. 또한, 입사각이 32.0° 일 때

에는 진행거리에 따라서 진폭 감소가 더 크게 일어난다. 입사각이 32.0° 인 경우에는 A_0 모드가 발생된 것으로 추정되며 입사각이 16.0° 인 경우의 A_1 모드와 같이 에너지 누수가 더 크게 됨을 알 수 있다. 두 경우 모두 이동거리가 16 mm이고, 시간지연이 $10.58 \mu\text{s}$ 이므로 군속도는 $3.02\text{mm}/\mu\text{s}$ 로 레일리 표면파 속도와 거의 같다.

이와 같은 방법으로 다른 입사각에서 군속도 측정을 시도하였다. 대표적으로 입사각이 13.0° 인 경우에 4.50 MHz의 S_1 모드 군속도는 $3.59 \text{mm}/\mu\text{s}$ 이고, 입사각이 14.3° 에서는 4.66 MHz의 S_1 모드 군속도는 $2.94 \text{mm}/\mu\text{s}$ 이고 4.18 MHz의 A_1 모드 군속도는 $2.62 \text{mm}/\mu\text{s}$ 이었다. 그러나, 이러한 방법은 분산이 적은 경우에 적용할 수 있으며 이와 같이 얻어진 값들은 한 주파수 값에 국한된다.

5. 결 론

1. 자동화된 후방복사 프로파일 측정 장치를 제작하였으며 이를 이용하여 판재에서의 후방복사 초음파 프로파일을 측정하였다.
2. 판재에서는 레일리 임계각 이외에서도 후방복사 신호를 얻을 수 있었는데 이는 유도초음파에 의한 것임을 밝혔다.
3. 입사각이 0° 일 때의 후방복사 초음파는 단절 주파수와 관련이 있음을 밝히고 단절주파수로부터 종파와 횡파의 속도를 정할 수 있었다.
4. 입사각을 바꾸면서 판재에서의 후방복사 신호를 측정함으로써 판재의 위상속도 분산 특성을 얻을 수 있었다.
5. 입사점을 이동하면서 얻은 후방복사 초음파 신호의 시간지연으로부터 판재의 군속도를 측정할 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] J. Krautkrämer and H. Krautkrämer, Ultrasonic testing of materials (Springer-Verlag, Berlin, 1977).
- [2] 송성진, 박준수, 신현재, 한국비파괴검사학회지, 제 21권, pp. 406 (2001).
- [3] 송성진, 김영환, 이동훈, 이현동, 배철호 한국비파괴검사학회지 투고.
- [4] L. Adler, M. de Billy and G. Quentin, J. Appl. Phys. Vol. 68, pp. 6072 (1990).
- [5] F. Lakestani, J. -F. Coste and R. Denis, NDT&E Int. Vol. 28, pp. 171 (1995).
- [6] Y. -C. Lee, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 40, pp. 359 (2001)
- [7] L. Adler, S. -W. Wang, K. Bolland, M. de Billy and G. Quentin, J. Acoust. Soc. Am. Vol. 77, pp. 1950 (1985).)
- [8] S. D. Kwon, R. T. Ko and L. Adler, Evaluation of an imperfect Layered Substrate Using Back-scattering Technique, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 13B, pp. 1579-1586 (Plenum Press, New York, 1994).
- [9] S. D. Kwon, M. S. Choi and S. H. Lee, NDT&E Int. Vol. 33, pp. 275 (2000).
- [10] H. C. Kim, J. K. Lee, S. Y. Kim and S. D. Kwon, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 38, pp. 260 (1999).
- [11] 권성덕, 윤석수, 송성진, 배동호, 한국비파괴검사학회지, 제 20권, pp. 397 (2000).
- [12] S. D. Kwon, S. J. Song and Y. Z. Lee, "Evaluation of residual stress distribution using SAW" Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (In press).
- [13] B. A. Auld, Acoustic fields and waves in solids, Vol. II, Chap. 10 (John Wiley & Sons, New York, 1973).
- [14] I. A. Viktorov, Rayleigh and Lamb waves, physical theory and applications. p.72 (Plenum Press, New York, 1967).)