

# 후방복사를 이용한 램파의 위상속도 분산과 군속도의 측정

## Determination of Phase Velocity Dispersion Curve and Group Velocity of Lamb Waves Using Backward Radiation

송 성 진\*, 김 영 환\*, 권 성 덕\*\*, 정 용 무\*\*\*  
(Sung-Jin Song\*, Young H. Kim\*, Sung-Duk Kwon\*\*, Yong-Moo Cheong\*\*\*)

\* 성균관대학교 기계공학부, \*\* 안동대학교 물리학과, \*\*\* 한국원자력연구소 원자력재료기술개발팀  
(접수일자: 2002년 9월 30일; 수정일자: 2002년 11월 15일; 채택일자: 2002년 12월 4일)

유도초음파는 얇은 판재와 다층재료를 평가하는데 널리 사용되는데, 이를 정량적으로 이용하기 위해서는 위상 및 군속도의 분산 곡선은 필수적이다. 본 연구에서는 누수 램파의 후방복사 신호를 측정하기 위한 측정장치를 개발하였다. 시험편을 회전시켜서 입사각을 변화시켰으며, 2차원 평면에서 움직이면서 입사 위치를 바꾸었다. 광대역 초음파 탐촉자를 사용하여 탄성판에서 발생하는 누수 램파 후방복사 신호를 측정하였다. 입사각으로부터 위상속도가 결정되며, 이에 해당하는 램파의 특정모드가 판재 내에 강하게 발생되고, 이 램파는 시험편의 앞뒤로 진행하면서 물속으로 에너지를 방출한다. 동일한 탐촉자를 사용하여 누수 램파의 후방복사 신호를 검출하고, 이 신호의 주파수 성분은 분산곡선에 대한 정보를 지닌다. 입사각도와 수신된 파형의 주파수 분석을 통하여 램파의 위상속도 분산곡선을 구하였다. 또한 특정한 입사각에서 입사점을 변화시키면서 초음파 신호의 시간대역 이동으로부터 군속도를 측정하였다.

**핵심용어:** 누수 램파, 후방복사 초음파, 박판, 분산곡선, 위상속도, 군속도

**투고분야:** 초음파 및 탄성파 분야 (4.2), 물리음향 및 광음향 분야 (9.1)

The guided wave has been widely employed to characterize thin plates and layered media. The dispersion curves of phase and group velocities are essential for the quantitative application of guided waves. In the present work, a fully automated system for the measurement of backward radiation of LLW has been developed. The specimen moves in two dimensional plane as well as in angular rotation. The signals of backward radiation of LLW were measured from an elastic plate in which specific modes of Lamb wave were strongly generated. Phase velocity of the corresponding modes was determined from the incident angle. The generated Lamb waves propagated forward and backward with the leakage of energy into water. Backward radiated LLW was detected by the same transducer and its frequency components were analyzed to extract the related information to the dispersion curves. The dispersion curves of phase velocity were measured by varying the incident angle. Moving the specimen in the linear direction of LLW propagation, group velocity was determined by measuring the transit time shift in the ultrasonic waveform.

**Keywords:** Leaky Lamb wave, Backward radiated ultrasound, Thin plate, Dispersion curve, Phase velocity, Group velocity

**ASK subject classification:** Ultrasonic and elastic waves (4.2), Physical acoustics and photo-acoustics (9.1)

## I. 서론

초음파는 시험체 내부에 존재하는 결함을 찾는 비파괴

검사는 물론이고 재료의 물성을 평가하는데 널리 사용되고 있다[1]. 일반적으로 재료의 물성평가를 위해서는 초음파의 속도나 감쇠를 측정하는데, 이들은 모두 어느 정도 이상의 전파거리가 필요하여 판재나 표면 지역의 물성을 평가하는데는 어려움이 많다. 더욱이 박막의 경우에는 그 물성이 부피가 큰 경우와는 다르기 때문에, 미소전자기계

책임저자: 김영환 (yhkim@skku.ac.kr)  
4-0-746 경기도 수원시 장안구 천천동 300  
성균관대학교 기계공학부 (SAFE 연구센터)  
(전화: 031-290-7460; 팩스: 031-290-5276)

학시스템 (MEMS: Micro Electro Mechanical System)과 같이 박막을 이용하는 기술에서는 그 물성 평가에 관하여 많은 연구가 수행되었다[2]. 이러한 경우에는 유도 초음파가 유용한 것으로 널리 알려져 있다[3].

무한공간의 고체 매질에서는 입자의 진동방향이 파의 진행방향과 평행한 종파와 입자의 진동방향이 파의 진행 방향에 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 유도 파 모드 (guided mode) 또는 유도초음파라 하며 특히 판에서 전파하는 유도 초음파를 판파라고 부른다. 판파는 그 특성에 따라서 판에서 수평횡파가 전파하는 경우, 판에 무한매질이 접해 있는 경우의 수평횡파 (Love wave), 판에서 종파와 수직횡파가 결합된 판파 (Lamb wave), 판에 무한매질이 접해 있는 경우의 종파와 수직횡파가 결합된 일반화된 판파가 있다[4].

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 분산곡선이라고 하며 이는 탄성파 이론에 대상구조물의 경계조건이 주어짐으로 구하여진다[5]. 유도초음파를 효과적으로 이용하기 위해서는 이들 분산곡선을 아는 것이 매우 중요하다.

유도초음파의 속도를 측정하기 위해서는 송신용 탐촉자와 수신용 탐촉자를 따로 사용하거나 하나의 탐촉자를 송수신 겸용 탐촉자를 사용하여 초음파의 전파시간을 측정한다. 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[6]. 그럼에도 불구하고 이렇게 얻어진 속도는 균속도이고 위상속도에 대한 정보를 얻기에는 아직은 미흡하다.

위상속도 정보는 입사각을 바꾸어 원하는 모드의 유도 초음파를 발생시키는데 사용되고 있으나[7], 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[8,9], 대개의 경우에는  $A_0$  와 같은 단순한 모드에 국한되어 있다. 선집속 초음파 현미경을 이용하여 비교적 간편하게 분산곡선을 측정하는 연구사례도 보고되고 있는데, 입사각과 주파수의 제약으로 인하여 박판이나 박막으로 적용범위가 제한되고 있다[10,11].

물속에 담긴 시험체에 초음파를 입사시키면 특정한 입사각에서 표면파가 모드 변환에 의해 발생하고, 이 표면파가 산란과 에너지 누수로 인해서 입사한 방향으로 상당한 량의 초음파가 되돌아오는 후방복사가 일어난다. 후방복사 발생각으로 간접 측정된 표면파 속도의 주기성을 이용하여 니켈결정의 방향이 평가되었고[12], 후방복사에 의해 측정된 같은 재질의 박막층이 접착된 고체 표면에서의 표면파 분산성은 기존의 최소 반사법에 의한 측정치와 좋은 일치를 보여주었다[13].

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[14]. 후방복사 프로파일은 표면지역의 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[15] 전통적인 초음파 시험을 통해서 얻기 어려운 부식이나 마모에 의한 표층 열화 평가에도 효과적으로 활용될 수 있음도 보여 주었다[16,17]. 한편, 대상 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 판재에서의 초음파 분산성에 대하여 연구하기 위해서 후방복사 누수 램파를 측정하였다. 이를 위하여 단일 탐촉자를 사용하는 자동 초음파 각도 주사 시스템을 구성하였다. 입사각을 변화시키면서 시간영역에서의 파형과 주파수 스펙트럼을 측정하였다. 입사각과 후방복사 초음파의 주사수 스펙트럼으로부터 판재에서 유도 초음파의 위상속도 분산성을 조사하였으며, 균속도를 측정하였다. 단절주파수로부터 판재의 종파와 횡파

속도를 결정할 수 있었으며, 이 값으로부터 계산한 위상 속도 분산곡선과 후방복사 초음파로 측정된 분산곡선은 잘 일치하였다. 입사점을 이동하면서 발생한 시간 지연으로부터 군속도를 측정할 수 있음을 보였다.

## II. 이론적인 배경

판재의 특성방정식에 대해서는 많은 문헌에서 언급되고 있으므로 본 논문에서는 생략한다. 램파에서 특정한  $m$  또는 특정한 주파수 이상에서만 존재하는데, 이 경계가 되는 주파수를 단절주파수 ( $f_c$ )라 한다. 단절 주파수에서는 위상속도는 무한대가 되고 군속도는 0이 된다. 즉, 단절 주파수에서는  $k=0$ 이다. 두께가  $2h$ 인 등방성 평판에서 이를 만족하는 조건은 대칭모드에서는

$$\frac{\omega}{c_l} h = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2} \dots \quad (1)$$

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

이고, 반대칭 모드에서는

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

$$\frac{\omega}{c_t} h = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2} \dots \quad (4)$$

이다.

그림 1과 같이 물에 잠긴 판재에서는 램파가 전파하면서 판재로부터 물로 에너지가 새어나가기 때문에 누수 램파라고 불리어진다. 램파에서는 판의 두께와 주파수가

주어졌을 때에 다른 속도를 가지는 여러 모드가 동시에 존재할 수 있으며, 속도가 주어질 경우에는 다른 주파수를 가지는 몇가지 모드가 동시에 발생될 수 있다.

광대역 초음파를 판재에 입사시키면 입사파와 위상이 일치하는 램파 모드가 발생하여 판재를 따라서 전파하게 된다. 위상이 일치하기 위한 조건은 Snell의 법칙으로 주어진다. 입사각을  $\theta_i$ 라 하고, 입사 초음파파의 속도는 입사매질 (물)에서의 초음파 속도  $v_i$ 이며, 판파는 판을 따라 진행하므로 굴절각은  $90^\circ$ 이고, 굴절파의 속도는 판파의 위상속도  $v_p$ 이다. 따라서 입사각이 주어졌을 경우에 발생하는 램파의 위상속도는

$$v_p = \frac{v_i}{\sin \theta_i} \quad (5)$$

와 같다. 이와 같이 발생된 램파는 판을 따라 진행하면서 물속으로 에너지를 방출하는데 이를 누수 램파라 한다. 누수 램파는 직접 반사된 파와 간섭을 일으켜서 서로 상쇄되는 영역을 생성하며, 판의 반대 방향으로 누수된 에너지는 투과 빔을 만든다. 또한 매질 내의 불균일 등으로 인하여 진행방향과 반대로 되돌아 가면서 다시금 누수 램파 (후방산란된 빔) 또한 생성된다. 근원적으로 후방산란은 후방복사 신호를 지배하며 후방산란된 빔을 후방복사라 부른다[14]. 후방복사를 측정하는 방법은 크게 세가지로 나눌 수 있다. 입사점 근처에서 발생하는 직접법, 판재의 모서리와 같이 기하학적 반사체에서 반사되는 평균법, 그리고 입사점이 모서리와 같은 기하학적 반사체 근처일 때에 두가지가 같이 존재하는 구석법이 있다. 본 연구에서는 모서리 반사 신호를 이용하는 간접법을 사용하여 후방복사 신호를 측정하였다.

## III. 실험 및 결과 고찰

### 3.1. 실험장치 구성

본 연구에서 사용된 후방복사 초음파 실험장치의 구성도를 그림 2에 나타내었다. 초음파의 발신과 수신은 Panametrics 5800 초음파 송수신기와 중심주파수가 5 MHz인 수침용 탐촉자를 사용하였다. 측정된 후방복사 초음파 신호는 디지털 오실로스코프 (Lecroy LT342)에서 GPIB를 통해 PC로 전송된다. 정밀도가  $\pm 0.2 \mu m$ 인 X, Y의 직선 운동축과  $\pm 0.015^\circ$  정밀도의 회전축의 스테핑 모터를 컴퓨터에 연결하여 초음파의 입사각과 입사위치를 제어하였다. 두께가 0.64mm인 강판에 입사각을  $0.1^\circ$

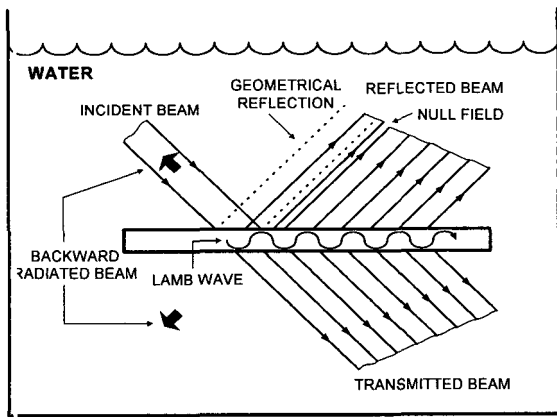


그림 1. 누수 램파의 발생 모식도  
Fig. 1. Schematic diagram of leaky Lamb wave generation.

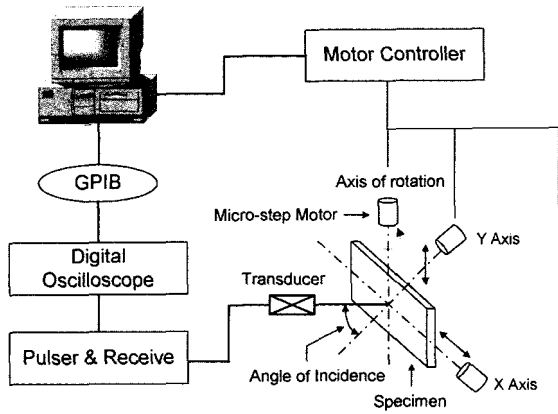


그림 2. 후방복사 초음파 시험장치  
Fig. 2. Schematic diagram of backward radiation experimental setup.

간격으로 변화시키면서 초음파를 입사시켜 후방복사된 초음파 신호의 파형을 수신하여 PC로 전송하였고 주파수 스펙트럼을 측정하였다.

### 3.2. 단절주파수와 판재의 물성

두께가 0.64 mm인 말레이징 강판에 대하여 입사각을 바꾸면서 후방복사를 측정하였다. 모든 입사각에 대하여 후방복사가 발생하였는데, 입사각에 따른 후방복사의 최대 진폭을 그림 3에 나타내었다. 그림 3에 나타난 바와 같이 입사각이 14.3°, 16.0°와 30.0°에서 강한 후방복사가 일어났다. 입사각에 따라서 일어나는 후방복사 발생기구를 규명하기 위해서 대표적으로 입사각이 0°, 14.3°, 16.0°와 30°인 경우에 후방복사 신호의 파형과 주파수 스펙트럼을 고찰하였다.

그림 4는 입사각이 0°일 때의 후방복사 초음파 신호와 주파수 스펙트럼이다. rf 파형에서 2~3 μs에는 직접 반

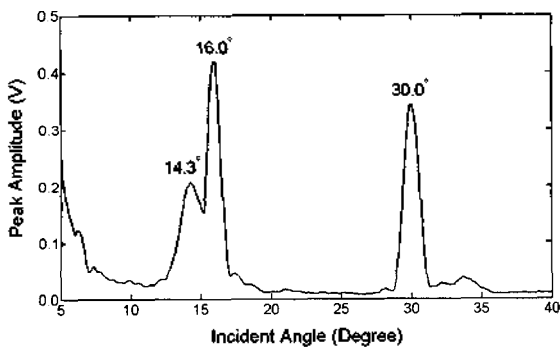


그림 3. 입사각에 따른 후방복사 초음파의 최대 진폭  
Fig. 3. Angular dependence of backward radiated ultrasound amplitude.

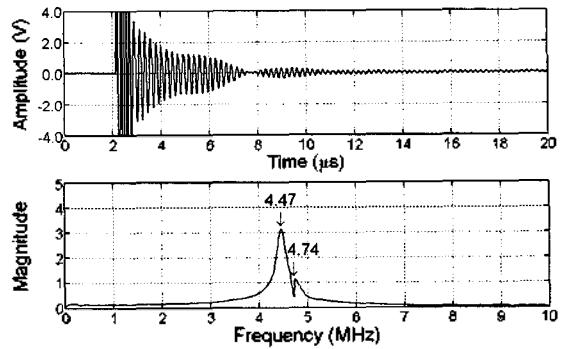


그림 4. 입사각이 0°일 때 후방복사 초음파 파형과 주파수 스펙트럼  
Fig. 4. The rf waveform and frequency spectrum of backward radiated ultrasound at the incident angle of 0°.

사되는 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 (5)로부터 위상속도가 무한대가 되기 때문에 단절주파수가 된다. 단절주파수는 식 (1)-(4)로 주어지므로, 판재의 두께가 0.64 mm이고 강재와 물성이 유사하므로 단절주파수를 만족하는 종파와 횡파속도로는 5.72 mm/μs와 3.04 mm/μs 또는 6.09 mm/μs와 2.86 mm/μs이다. 다른 후방복사 신호를 종합하여 볼 때에 시험 대상체의 종파와 횡파의 속도는 각각 5.72 mm/μs와 3.04 mm/μs임을 알 수 있었다.

### 3.3. 위상속도 분산곡선

입사각이 14.3°와 16.0°일 때의 후방복사 초음파 신호를 각각 그림 5와 6에 나타내었다. 입사각이 단지 1.7°만 바뀌었는데도 후방복사의 파형과 주파수 스펙트럼이 크게 달라졌는데, 이는 후방복사 초음파가 매우 큰 분산성을 지님을 의미한다. 이 현상은 레일리 표면파 후방복사

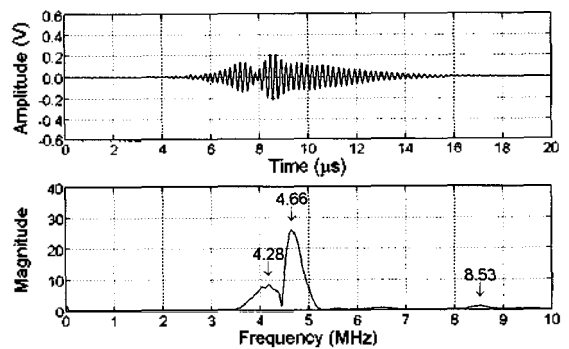


그림 5. 입사각이 14.3°일 때 후방복사 초음파 파형과 주파수 스펙트럼  
Fig. 5. The rf waveform and frequency spectrum of backward radiated ultrasound at the incident angle of 14.3°.

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 산란되거나 시험체의 모서리에서 반사되고 누수됨으로서 입사된 방향으로 복사되어 초음파 탐촉자에 되돌아 오게 된다.

입사각이 14.3°인 경우에는 그림 5에서 시간대역 파형에 두개의 파동묶음이 겹쳐져서 존재하고 가운데에 묻혀 있는 파동묶음은 저주파 성분을 지니고 있으며 넓게 퍼져 있는 파동묶음은 고주파 성분을 지니고 있는데, 이는 주파수 스펙트럼에서 각각 4.18 MHz와 4.66 MHz의 두 피크로 나타난다. 한편 입사각이 14.3°이므로 식 (5)로부터 위상속도는 6.07 mm/μs이고 그림 8의 위상속도 분산곡선과 비교해 볼 때에 각각은 A<sub>1</sub> 모드와 S<sub>1</sub> 모드에 해당함을 알 수 있다.

입사각이 16.0°인 경우에는 그림 6에서와 같이 시간대역 파형에 두개의 파동묶음이 존재하고 뒤에 나타나는 파동묶음은 저주파 성분을 지니고 있으며, 앞에 나타나는 파동묶음은 고주파 성분을 지니고 있는데, 이는 주파수 스펙트럼에서 각각 4.72 MHz와 6.51 MHz의 두 피크로 나타난다. 입사각이 14.8°이므로 위상속도는 5.44 mm/μs로 주어진다. 그림 8의 위상속도 분산곡선으로부터 A<sub>1</sub> 모드와 S<sub>1</sub> 모드에 해당함을 알 수 있다. S<sub>1</sub> 모드의 군속도가 A<sub>1</sub> 모드보다 빠르기 때문에 앞에 나타난다. 또한 2.27 MHz에서 약한 피크가 관찰되었는데, 이는 그림 9의 SIFT (Short Time Fourier Transform) 결과로부터 S<sub>0</sub> 모드에 의한 피크임을 알 수 있었다.

입사각이 30.0°인 경우에는 그림 7과 같이 시간대역 파형과 주파수 스펙트럼으로부터 분산성이 거의 없는 모드로 보인다.

이와같이 후방복사가 유도초음파에 의한 것이라면 발생하는 유도초음파와 후방복사는 유도초음파의 분산곡선을 만족할 것이다. 입사각을 변화시키면서 앞에서 논의한 바와 같이 위상속도와 그에 해당하는 주파수 값을 측정하면 위상속도 분산곡선을 실험적으로 구할 수 있다. 입사각을 5°부터 45°까지 변화시키면서 후방복사 초음파 신호를 측정하여 피크 주파수를 결정하였다. 입사각과 측정된 *fd* 값을 그림 8과 같은 전형적인 분산곡선 위에 표시하여 나타내었다. 여기서 분산곡선을 구할 때 사용된 종파와 횡파의 속도는 그림 4의 단절 주파수에서 구한 값을 사용하였다. 그 결과 A<sub>0</sub>, S<sub>0</sub>, A<sub>1</sub>, S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, A<sub>2</sub>, S<sub>3</sub> 모드의 경우에 실험으로 구한 분산곡선과 계산된 분산

곡선이 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.

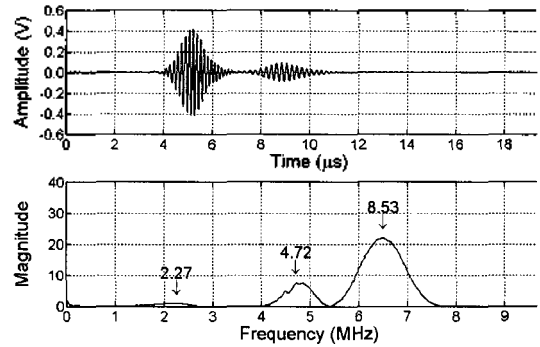


그림 6. 입사각이 16.0°일때 후방복사 초음파 파형과 주파수 스펙트럼  
Fig. 6. The rf waveform and frequency spectrum of backward radiated ultrasound at the incident angle of 16.0°.

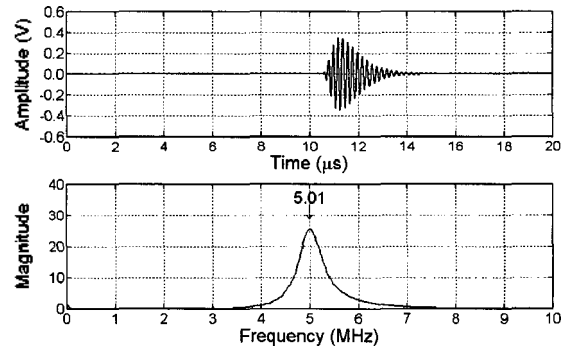


그림 7. 입사각이 30.0°일때 후방복사 초음파 파형과 주파수 스펙트럼  
Fig. 7. The rf waveform and frequency spectrum of backward radiated ultrasound at the incident angle of 30.0°.

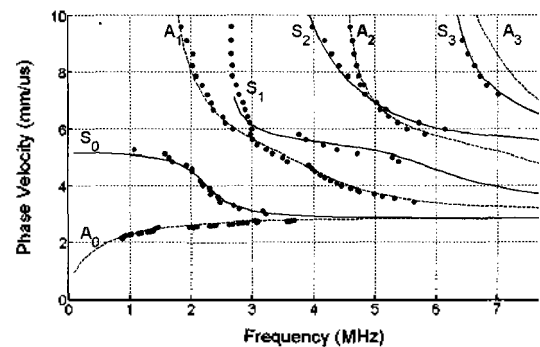


그림 8. 후방복사 초음파를 이용하여 구한 위상속도 분산곡선  
Fig. 8. Phase velocity dispersion curves obtained by the backward radiation of leaky Lamb waves.

### 3.4. 균속도 측정

간접법으로 측정된 후방복사 신호는 램파가 모서리까지 진행했다가 반사한 신호이므로 균속도에 대한 정보를 지니고 있다. 균속도에 대한 정보를 알 수 있는 방법으로는 시간-주파수 분석법이 있는데 대표적으로 STFT을 들 수가 있다. 입사각이 16.0°일 때 관측된 후방복사 신호의 STFT 결과를 그림 9에 나타내었다. 그 결과로 뚜렷이 구분되는 두 개의 파동묶음이 각각 S<sub>1</sub> 모드와 A<sub>1</sub> 모드임을 알 수 있다. 시간대역 파형에서는 쉽게 구별이 되지 않지만 앞의 파동묶음에는 S<sub>0</sub> 모드가 같이 섞여 있고, 이는 낮은 주파수이면서 S<sub>1</sub> 모드보다 약간 먼저 도착하여 균속도가 빠르다는 것을 알 수 있다. STFT는 유도초음파를 해석하는 데에는 매우 유용하나, 이를 이용하여 정량적인 균속도를 결정하기에는 어려움이 많다.

균속도를 측정하기 위해서 입사각이 16.0°로 하고, 입사점을 모서리의 반대방향으로 5 mm씩 이동하면서 후방 복사 초음파 신호를 관찰하여 그 결과를 그림 10에 나타내었다. 앞 절에서 고찰한 바와 같이 그림 10의 앞에 나타나는 파동묶음은 S<sub>1</sub> 모드이고 뒤에 나타나는 파동묶음은 A<sub>1</sub> 모드이다. 입사점을 모서리에서 점차 뒤로 이동시킬 때에 A<sub>1</sub> 모드는 S<sub>1</sub> 모드에 비하여 보다 빠르게 뒤로 이동하고 또한 그 진폭이 급격히 줄어든다. 이는 A<sub>1</sub> 모드는 S<sub>1</sub> 모드에 비하여 속도가 느리고, 판을 따라 전파하면서 보다 많은 에너지를 물속으로 방출되기 때문이다.

입사점이 20 mm 이동함에 따라서 시간지연이 S<sub>1</sub> 모드와 A<sub>1</sub> 모드에서 각각 9.15 μs와 11.87 μs 만큼 생겼다. 따라서, 각각의 모드에 대하여 균속도는 4.37 mm/μs와 3.36 mm/μs로 정할 수 있다. 균속도는 모드뿐만 아니라 주파수에 따라서도 다른 값을 갖는다. 입사각이 16.0°일 경우에 측정된 균속도는 그림 7로부터 이들은 S<sub>1</sub> 모드는 6.51 MHz에서 A<sub>1</sub> 모드는 4.72 MHz에서의 값이다.

입사점을 이동하면서 관측한 후방복사 초음파 신호의 또다른 예를 그림 11에 나타내었다. 윗부분은 입사각이 30.0°일 때이고, 아래쪽은 입사각이 32.0°일 때이다. 이들 파형은 거의 같으며, 주파수 성분도 그림 7과 같이 5 MHz의 비분산성 초음파 신호이다. 입사각이 30.0°일 때의 후방복사 신호가 입사각이 32.0°일 때에 비하여 20 배 정도 더 크다. 또한 입사각이 32.0°일 때에는 진행거리 에 따라서 진폭 감소가 더 크게 일어난다. 입사각이 32.0°인 경우에는 그림 8의 위상속도 분산곡선으로부터 A<sub>0</sub> 모드가 발생된 것으로 추정된다. 이 모드는 입사각이 16.0°인 경우의 A<sub>1</sub> 모드와 같이 에너지 누수가 더 크게 일어났다. 입사각이 30.0°일 때의 후방복사 신호에 해당

하는 모드는 아직 규명되지 않았으며, 앞으로 이 모드에 대한 연구를 진행하려고 한다. 두 경우 모두 이동거리가 16 mm이고, 시간지연이 10.58 μs이므로 균속도는 3.02 mm/μs로 단절주파수로부터 결정된 횡파 속도와 거의 같다.

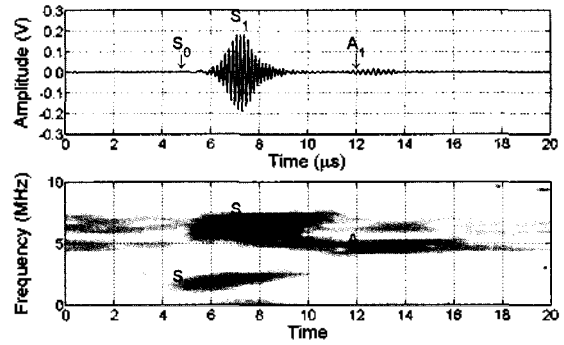


그림 9. SFTF의 예. (입사각이 16.0°일 때)  
Fig. 9. An example of short-time Fourier transform of backward radiated ultrasound (at the incident angle of 16.0°).

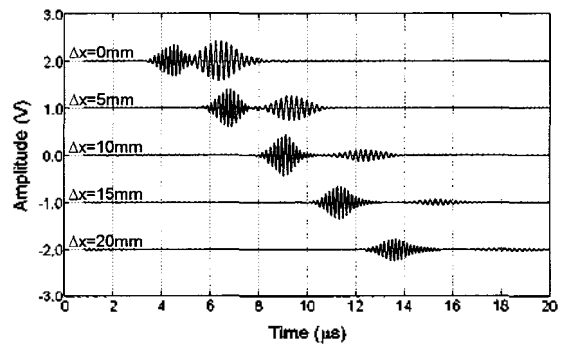


그림 10. 입사점을 5 mm씩 이동하였을 때에 관측된 후방복사 초음파 신호 (입사각: 16.0°)  
Fig. 10. Backward radiated ultrasound for the moving incident position (at the incident angle of 16.0°).

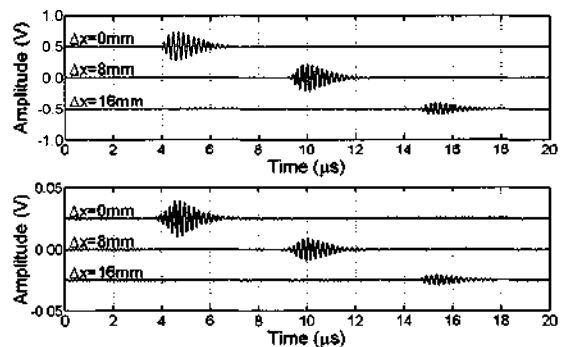


그림 11. 입사점을 이동하였을 때에 관측된 후방복사 초음파 신호 (위: 입사각=30.0°, 아래: 입사각=32.0°)  
Fig. 11. Backward radiated ultrasound for the moving incident position (upper: at the incident angle of 30.0° and lower: at the incident angle of 32.0°).

이와 같은 방법으로 다른 입사각에서 군속도 측정을 시도하였다. 대표적으로 입사각이 13.0°인 경우에 4.50 MHz의 S<sub>1</sub> 모드 군속도는 3.59 mm/μs이고, 입사각이 4.3°에서는 4.66 MHz의 S<sub>1</sub> 모드 군속도는 2.94 mm/μs이고 4.18 MHz의 A<sub>1</sub> 모드 군속도는 2.62 mm/μs이었다. 그러나, 이러한 방법은 분산이 적은 경우에 적용할 수 있으며 이와 같이 얻어진 값들은 특정한 주파수에서의 값이다.

### IV. 결론

자동화된 후방복사 프로파일 측정 장치를 제작하였으며 이를 이용하여 판재에서의 후방복사 초음파 프로파일을 측정하였다. 판재에서는 레일리 입계각 이외에서도 후방복사 신호를 얻을 수 있었는데 이는 유도초음파에 의한 것임을 밝혔다. 입사각이 0°일 때의 후방복사 초음파는 단절 주파수와 관련이 있음을 밝히고 단절주파수로 부터 종파와 횡파의 속도를 정할 수 있었다. 입사각을 바꾸면서 판재에서의 후방복사 신호를 측정하고, 입사각과 후방복사 초음파의 주파수 스펙트럼으로부터 판재의 위상속도 분산 특성을 얻을 수 있었다. 또한 입사점을 이동하면서 얻은 후방복사 초음파 신호의 시간지연으로부터 판재의 군속도를 측정할 수 있었다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력 중장기사업의 중수로 피터관 열화/예측 및 검사 기술 개발과제의 일환으로 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다. 또한 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원에도 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. J. Krautkrämer and H. Krautkrämer, *Ultrasonic Testing of Materials*, Springer-Verlag, Berlin, 1977.
2. C. M. Hernandez, T. W. Murray and S. Krishnaswamy, "Photo-acoustic characterization of mechanical properties of thin films," *Appl. Phys. Lett.* **80** (4), 691-693, 2002.
3. 조윤호, "유도초음파에 대한 이해와 응용," *비파괴검사학회지*, **21** (4), 446-460, 2001.

4. B. A. Auld, *Acoustic Fields and Waves in Solids*, John Wiley & Sons, New York, II, Chap. 10, 1973.
5. I. A. Viktorov, *Rayleigh and Lamb Waves, Physical Theory and Applications*, Plenum Press, New York, 72, 1967.
6. 송성진, 박준수, 신현재, "폴리에틸렌 코팅 가스배관의 광범위 탐상을 위한 유도초음파 모드 선정 및 결함 검출," *비파괴검사학회지*, **21** (4), 406-414, 2001.
7. 송성진, 김영환, 이동훈, 이현동, 배철호, "스케일이 있는 급수 관내의 유도초음파의 전파 특성에 관한 연구," *비파괴검사학회지* 게재예정, 2003.
8. L. Adler, M. de Billy and G. Quentin, "Evaluation of friction-welded aluminum-steel bonds using dispersive guided modes of a layered substrate," *J. Appl. Phys.* **68** (12), 6072-6076, 1990.
9. F. Lakestani, J. F. Coste and R. Denis, "Application of ultrasonic rayleigh waves to thickness measurement of metallic coatings," *NDT& E Int.* **28** (3), 171-178, 1995.
10. Y.-C. Lee, "Measurements of multimode leaky lamb waves propagating in metal sheets," *Jpn. J. Appl. Phys.* **40** (1), 359-363, 2001.
11. 김진오, "표면탄성파 전파속도 측정에 의한 초격자 다층 박막의 유효탄성계수 결정," *한국음향학회지*, **19** (5), 41-45, 2000.
12. L. Adler, S.-W. Wang, K. Bolland, M. de Billy and G. Quentin, "Rayleigh backscattering of ultrasonic beam from single crystal nickel in 111 and 110 planes," *J. Acoust. Soc. Am.* **77** (5), 1950-1953, 1985.
13. S. D. Kwon, R. T. Ko and L. Adler, "Evaluation of an imperfect layered substrate using backscattering technique," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, **13B**, 1579-1586, Plenum Press, New York, 1994.
14. S.-D. Kwon, M.-S. Choi and S.-H. Lee, "The applications of ultrasonic backward radiation from a layered substrate submerged in liquid," *NDT&E Int.* **33** (5), 275-281, 2000.
15. H.-C. Kim, J.-K. Lee, S.-Y. Kim and S.-D. Kwon, "Influence of the microstructure on the ultrasonic backscattered energy from a liquid/solid interface at the Rayleigh angle," *Jpn. J. Appl. Phys.* **38** (1), 260-267, 1999.
16. 권성덕, 윤석수, 송성진, 배동호, "후방복사된 초음파를 이용한 12Cr강 부식 피로특성 평가," *비파괴검사학회지*, **20** (5), 397-401, 2000.
17. S.-D. Kwon, S.-J. Song and Y.-Z. Lee, "Evaluation of residual stress distribution using SAW," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, **21**, 1703-1707, AIP, New York, 2002.

### 저자 약력

● 송 성 진 (Sung-Jin Song)



1981년: 서울대학교 기계공학과 (공학사)  
 1983년: 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사)  
 1991년: Iowa State University, Dept. Aero. Eng. & Eng. Mechanics (공학박사)  
 1983년 3월~1987년 12월: 대우중공업(주) 전략기획부 대리  
 1992년 7월~1993년 8월: 포항산업과학연구원 주임 연구원  
 1993년 9월~1998년 2월: 조선대학교 기계설계공학과 조교수

1998년 3월~현재: 성균관대학교 기계공학부 부교수  
 ※ 주관심분야: 초음파 탐상시험 모델링, 초음파 탐상 신호해석 지능화

● 김 영 환 (Young H. Kim)



1979년: 서울대학교 과학교육학과 (이학사)  
1981년: 한국과학기술원 물리학과 (이학석사)  
1990년: 한국과학기술원 물리학과 (이학박사)  
1981년 3월~1996년 1월: 한국표준과학연구원 비파  
과평가연구실 책임연구원  
1996년 1월~2000년 5월: 대한검사기술(주) 부설연구  
소 소장  
2000년 6월~현재: 성균관대학교 기계공학부 연구  
교수

\* 주관심분야: 초음파 물리, 초음파의 송수신, 초음파 전파, 초음파 물성계측

● 권 성 덕 (Sung-Duk Kwon)



1981년 2월: 경북대학교 물리학과 (이학사)  
1984년 2월: 한국과학기술원 물리학과 (이학석사)  
1988년 2월: 한국과학기술원 물리학과 (이학박사)  
1991년 12월~1992년 12월: 오하이오 주립대학 동  
점공학과 (박사후 과정)  
1988년 3월~현재: 인동대학교 물리학과 교수

\* 주관심분야: 후방복사 초음파, 유도 초음파, 다층  
경계면 평가, 열화 표면지역 평가.

● 정 용 무 (Yong-Moo Cheong)



1977년 2월: 서울대학교 금속공학과 (공학사)  
1979년 2월: 한국과학기술원 재료공학과 (공학석사)  
1987년 12월: Univ. Texas at Austin 재료공학과  
(공학박사)

1988년 1월~현재: 한국원자력연구소 책임연구원  
\* 주관심분야: 비파괴 재료특성 평가, 초음파검사,  
외전류검사, 전류응력