

주파수 의존성이 표면탄성파의 속도 결정에 미치는 영향

The Effect of Dispersion Relations on the Determination of Surface Acoustical Wave Velocity

권성덕*, 윤석수*, 이승희**

Sung D. Kwon*, Seok S. Yoon* and Seung H. Lee**

초 록 액체/고체 경계면에 표면파가 발생할 때 나타나는 최소반사 및 후방복사 현상을 이용하여 brass와 aluminum 시편 그리고 copper/stainless steel, nickel/brass, nickel/aluminum 도금시편에 대한 표면 탄성파 속도의 주파수 의존성이 측정되었다. 측정된 속도의 분산관계는 일반화 램 표면파의 분산 특성과 잘 일치하였다. 시편들의 분산 특징에 따라 최소반사와 후방복사에 의해 결정된 속도 차이의 경향이 다르게 나타났다. 이러한 대응 관계는 두 현상의 생성 메커니즘과 군속도의 도입으로 설명되었다.

주요용어 : 표면탄성파, 최소반사, 후방복사, 군속도, 속도의 분산, 램표면파

Abstract Minimum reflection and backward radiation methods on liquid/solid interface were used to determine the velocity dispersion relation of acoustical surface wave for brass and aluminum substrates and copper/stainless steel, nickel/brass, and nickel/aluminum layered substrates. Dispersion data agreed to dispersion characteristics of a generalized Lamb wave. The difference between velocities determined by two phenomena was closely related to the dispersion characteristics. This correspondence was explained by considering the generation mechanism of surface waves and the concept of group velocity.

Keywords: surface acoustical wave, minimum reflection, backward radiation, group velocity, dispersion of velocity, Lamb wave

1. 서 론

초음파 빔 (beam)이 액체/고체 경계면에서 레일리 (Rayleigh)각으로 입사할 때 고체의 표면지역에는 리키 (leaky) 레일리 표면파가 발생된다. 이 리키 표면파는 공기나 진공 같은 자유경계에서의 순수 레일리 표면파와 거의 같은 특성을 가지고 있으나 속도에서 0.1% 이하의 증가와 파의 진행동안 액체로의 에너지 복사로 인해 표면파의 진행 거리는 열 파장 정도이며 쇼흐 (Schoch) 변위, 최소반사, 후방 복사 등의 현상들을 포함한 비대칭 반사면을 보여준다 (Fig. 1). 레일리 입

사각으로 입사할 때 에너지의 대부분이 표면 탄성파로 전환된다. 따라서 반사율의 입사각 의존성에서 반사율이 급격히 감소하는 최소반사 (minimum reflection) 현상이 나타난다 [1,2]. 한편 레일리 각에서 발생된 표면파는 입사지역에 존재하는 여러 산란원들에 의해 산란되고 그중 상당량의 에너지는 반대방향으로 진행되는 역방향 표면파로 전환된다. 이 후방으로 진행되는 리키 표면파로부터의 복사에너지가 경계면 산란에 의한 일반적인 후방산란에 추가되어 후방산란의 입사각 의존성에서 급격한 증가를 보여주는 후방복사 (backward radiation) 현상을 보여준다 (초기에는

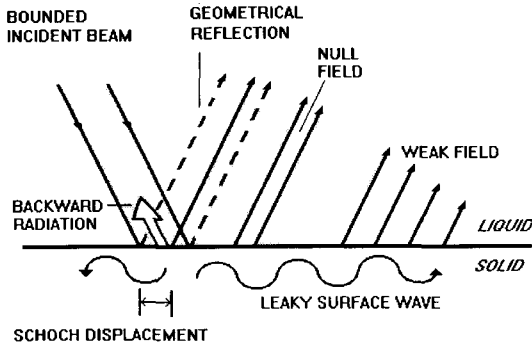


Fig. 1 Nonspecular reflection field at Rayleigh angle on liquid/solid boundary

후방산란 봉우리(peak)라 불리었음(3,4).

표면파는 에너지의 대부분이 한 파장 이내에 한정된 채로 진행하므로 표면지역의 물성 변화에 민감하게 반응하며 그 속도 변화를 후방복사와 최소반사를 이용해 측정하여 표면지역의 비파괴적 평가에 이용하는 연구가 많이 수행되었다(5-7). 이때 표면 탄성파의 속도는 최소반사 또는 후방복사가 일어나는 입사각을 측정하고 액체내 종파의 속도값을 스넬(Snell)의 법칙에 적용하여 결정된다. 그러나 두 방법에 의해 측정된 속도값이 어느 정도 일치하는지 그리고 차이가 있으면 그 원인은 무엇인지 등에 관한 비교연구는 수행된 적이 없고 일반적으로 동일하게 취급되었다. 본 연구에서는 물에 잠겨진 순수 고체층 시편(substrate) 및 얇은 표면층을 둔 고체층 시편(layered substrate)에 대해 최소반사 현상과 후방복사 현상을 이용하여 결정된 표면 탄성파의 속도들을 비교하고 표면파의 주파수 의존성 사이의 상관 관계를 살펴본다.

2. 실험

액체/고체 경계면에서 초음파의 반사율과 후방산란의 입사각 의존성을 살펴보기 위해 초음파 각도계가 제작되었다. Fig. 2에 초음파 발생 및 측정 시스템과 제작된 초음파 각도계가 그려져 있다. 초음파 각도계의 특성은 다음과 같다. (1) 탐촉자 회전에 의한 입사각 조절 (2) 시편의 수평이동에 의한 입사지역 조절 (3) 연속적인 입사각 조절. 실험에 사용된 탐촉자는 1, 5, 10MHz의 공진형이었고 Matec 6600 시스템에 의해 유도된 주파수는 1, 3, 5, 10, 15MHz의 톤버스터

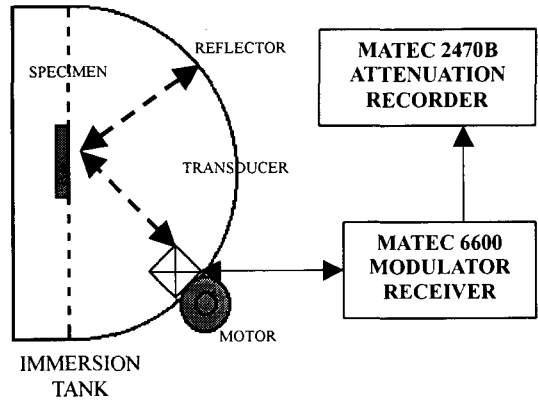


Fig. 2 Experimental setup and ultrasonic goniometer

(toneburst)형이었다. 여기서 유도된 3, 15MHz 주파수는 각기 1, 5MHz 탐촉자의 3차 조화 공진이다. 순수 고체층 시편들로 크기 100×160×10mm³의 stainless steel, brass 그리고 aluminum 시편이 준비되었다. 측정면은 모두 # 1200의 사포에 의해 표면 처리되었고 이들 시편에 각기 copper와 nickel을 전기 도금시켜 얇은 고체층/고체층 시편들이 제작되었다. 제작된 도금시편의 조합과 도금 층의 두께는 copper/steel (0.15mm), nickel/brass (0.2, 0.3mm), nickel/aluminum (0.1, 0.3mm)이었다.

초음파 각도계는 모터가 부착된 탐촉자를 10.515°/min의 속도로 회전시켜 입사각을 연속적으로 바꾼다. 이때 초음파가 입사하면 시편에서 직접 후방 산란되는 파와 반원형 반사대에 의해 이중 반사되는 파가 다시 탐촉자로 되 돌아온다. 각 신호 세기의 시간에 대한 변화는 기록계에 그려지고 시간축을 입사각으로 환산시키면 후방 산란파 및 반사파의 입사각 의존성이 된다. 최소반사와 후방복사 봉우리가 보여지는 입사각이 측정되면 다음의 스넬의 법칙에 따라 대응되는 표면파의 속도, v_R 이 계산된다(5,8).

$$v_R = \frac{v_w}{\sin \theta_R} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 v_w 는 물 속에서 종파의 속도 그리고 θ_R 은 후방복사 봉우리나 최소반사가 나타나는 입사각이다.

3. 일반화 램 표면파 속도의 분산 특성

파넬과 애들러(Farnell & Adler)(8)에 따르면 얇은 고체층/고체층(layered substrate)의 표면지역에 존재하는 일반화 램(Lamb) 표면파의 전파특성 특히 속도의 주파수에 관한 분산관계는 얇은 층과 아래 고체층의 횡파 속도 비에 따라 특징적으로 분류되며 그 분류 조건과 명칭은 다음과 같다.

- (1) loaded $\left(\frac{v_{H1}}{v_{H2}} < \frac{1}{\sqrt{2}}\right)$
- (2) intermediate $\left(\frac{1}{\sqrt{2}} < \frac{v_{H1}}{v_{H2}} < \sqrt{2}\right)$
- (3) stiffened $\left(\frac{v_{H1}}{v_{H2}} > \sqrt{2}\right)$

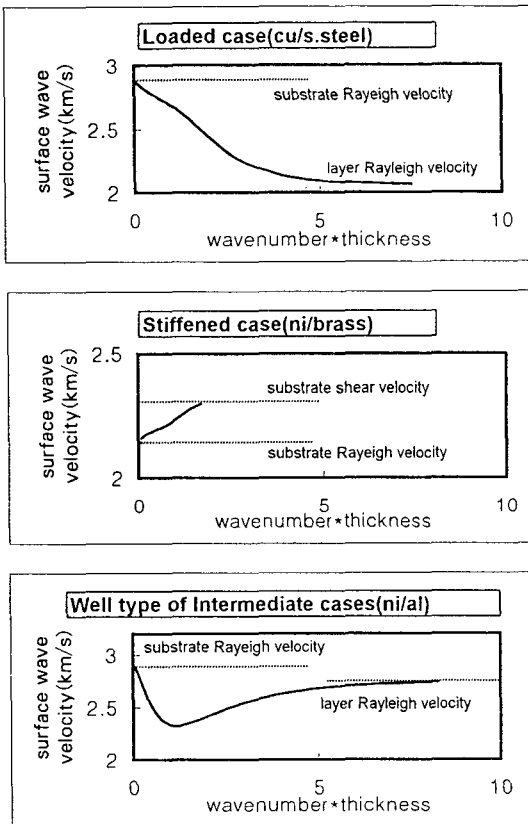


Fig. 3 Typical dispersion relations of a generalized Lamb wave. After ref. (8)

여기서 v_{H1} 와 v_{H2} 는 각기 얇은 층과 고체층의 횡파 속도이다.

Fig. 3에 일반화 램파의 분류별 전형적 분산 특성이 나타나 있다(8). 모든 경우 표면파의 속도는 고체층의 레일리 표면파 속도에서 출발하나 주파수 증가에 따라 다양한 분산관계를 보여준다. Loaded 경우는 주파수나 층의 두께가 증가함에 따라 표면파의 속도는 점차 감소하다가 결국 얇은 층의 레일리 표면파 속도값에 수렴하는 형태를 보여준다. Stiffened 경우는 loaded 경우와는 반대 경향을 가지나 특징은 고체층의 횡파 속도값에서 끊어버림(cut off)이 일어나 그 이상의 속도값을 가진 표면파가 존재하지 않게 된다. Intermediate 경우는 주파수에 따라 두 재질의 레일리 표면파 속도값을 벗어나기도 한다 그러나 출발 속도값과 수렴 속도값은 다른 경우와 마찬가지로 고체층과 얇은 층의 레일리 속도값이 된다. 그림에 나타난 intermediate 경우는 실험에 사용된 시편인 Ni/Al의 경우처럼 우물 형태의 의존성을 보이는 경우이다. 그러나 같은 intermediate 경우라도 시편의 조합에 따라 우물 형태와 다른 경향의 분산관계도 가능하다(8). 이런 분산관계는 주파수에 따라 표면아래 표면파 변위가 매우 다양하게 변화하기 때문이다.

4. 결과 및 논의

4. 1. 표면파 속도의 주파수 의존성

Fig. 4에는 이중 반사된 초음파와 후방 산란된 초음파 세기의 입사각 의존성이 나타나있다. 그림에 보여지는 최소반사각과 후방복사의 봉우리 각을 식 (1)의 스넬의 법칙에 적용해서 표면파의 속도가 결정되었다. Fig. 5 (a)와 (b)에는 각기 brass와 aluminum 순수 고체층 시편들에 대한 레일리 표면파 속도의 측정값들이 여러 주파수에 대해서 보여진다. 후방복사와 최소 반사를 이용한 두 가지 방법 모두 실험에 사용된 모든 주파수 영역에서 주파수에 거의 의존하지 않으며 일치한 측정치를 보여준다. Fig. 6은 얇은 고체층/고체층 시편인 copper/stainless steel에 대한 일반화 램파 속도의 주파수 의존성 결과이다. 주파수가 증가함에 따라 속도값이 감소하여 결국 copper의 레일리 표면파 속도값에 수렴하는 분산관계를 보여준다. Fig. 7에 보여진 nickel/brass 시편의 주파수 의존 측정치는 brass의 레일리 표면파 속도에서 시작하여 주파수에

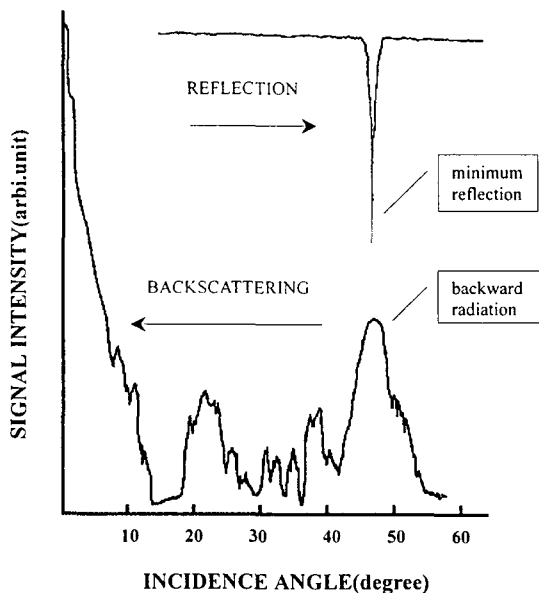


Fig. 4 Angular dependence of double reflected and backscattered ultrasounds (At initial stage, the measurement of double reflected signal was impossible because of the size of transducer)

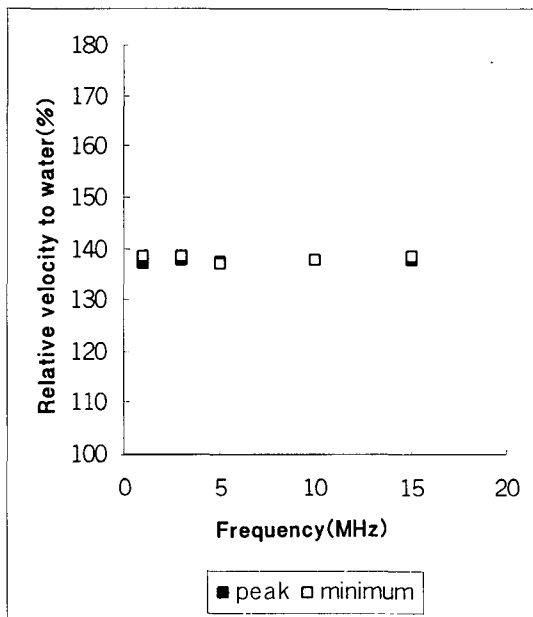
따라 속도값이 비선형적으로 증가하다가 높은 주파수에서 nickel의 레일리 속도에 수렴함을 보여준다. Fig. 8에 나타난 nickel/aluminum 시편의 주파수 의존 경향에서 매우 흥미로운 행위를 보여준다. Aluminum의 레일리 속도값에서 시작하여 주파수가 증가함에 따라 kd(파수x얇은 층 두께)가 2~3 영역까지 감소하다가 다시 증가하여 nickel의 레일리 속도값에서 수렴하는 우물형태의 분산관계를 보여주었다.

실험에 사용된 시편들은 Table 1에 보여진 횡파 속도값과 앞장의 일반화 램 표면파 분류 조건에 따라 다음과 같이 분류된다.

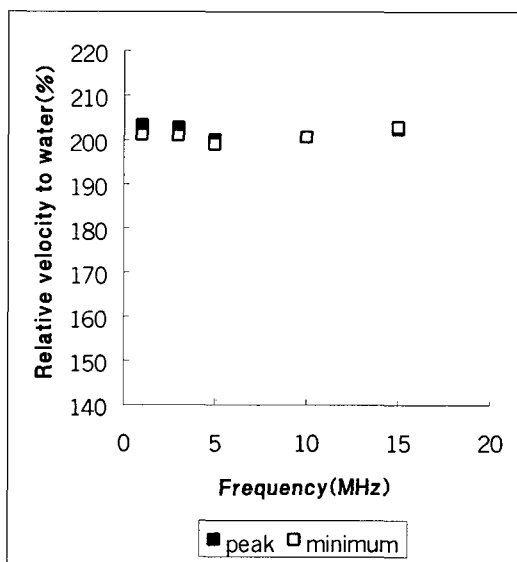
Table 1 Bulk wave velocities of specimens

Material \ Wave mode	Longitudinal (km/s)	Transverse (km/s)
Nickel	5.63	2.96
Aluminum	6.13	3.12
Copper	4.5	2.2
Brass	4.6	2.3
Stainless steel	5.66	3.12

- 1) copper/stainless steel 시편 : loaded 경우
 - 2) nickel/brass 시편 : stiffened 경우
 - 3) nickel/aluminum 시편 : intermediate 경우
- Fig. 6, 7 그리고 8에서 보여진 각 시편의 측정된 일



(a)



(b)

Fig. 5 Dispersion relations of (a) brass substrate and (b) aluminum substrate

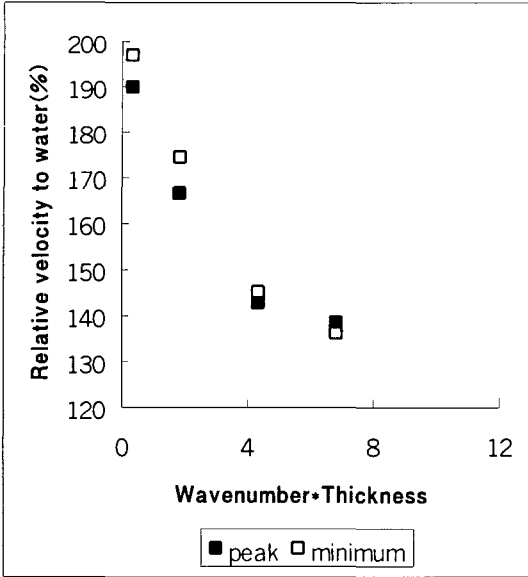


Fig. 6 Dispersion relation of copper/stainless steel layered substrate

반파 램 표면파들의 분산관계들은 시편들의 횡파속도값에 의한 이론적 분류에 따른 전형적인 주파수 의존 특성(Fig. 3)과 잘 일치함을 알 수 있다. 다만 Fig. 7의 stiffened 경우인 nickel/brass 시편에서는 전형적인 끊어버림이 나타나지 않고 nickel의 레일리 표면파 속도까지 연속적인 증가를 보이고 있다. 그 이유는 시편의 도금층과 고체층 사이에 존재하는 불완전 접합에 의한 것으로 예상된다[9].

4. 2. 최소반사와 후방복사 속도값의 비교

Fig. 5 (a)와 (b)에 보여진 brass와 aluminum 순수 고체층 시편들에 대한 레일리 표면파 속도들을 측정 방법에 따라 비교해보면 후방복사와 최소반사를 이용한 두 가지 방법 모두 실험에 사용된 모든 주파수 영역에서 일치한 속도값을 보여준다. 이 결과들을 볼 때 표면 지역의 깊이에 따른 물성의 변화가 없는 순수 고체층에 대해서는 toneburst형의 입사 빔에 의한 최소 반사와 후방복사 봉우리가 일어나는 입사각은 동일하다고 볼 수 있다. Fig. 6의 copper/stainless steel에 대한 최소반사 및 후방복사의 실험치의 비교는 주파수 전 영역에서 후방복사에 의한 속도값이 최소반사에 의한 값보다 작게 나타났고 그 차이는 낮은 주파수 영역에서

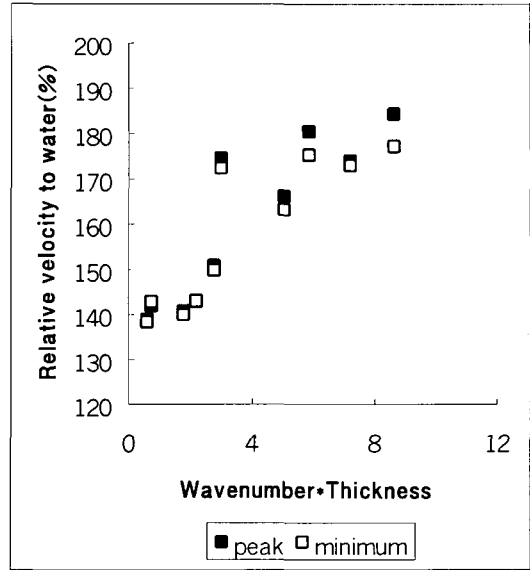


Fig. 7 Dispersion relation of nickel/brass layered substrate

조금 더 큼을 알 수 있다. Fig. 7에 보여진 nickel/brass 시편에 대한 두 측정치의 비교는 후방복사 값이 주파수 전 영역에서 최소반사 값보다 크게 나타났고 높

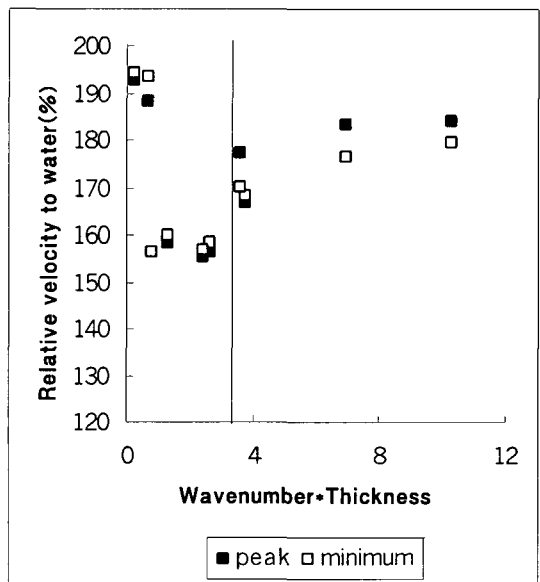


Fig. 8 Dispersion relation of nickel/aluminum layered substrate

은 주파수에서 그 차가 약간 커진다. Fig. 8에 보여진 nickel/aluminum 시편의 일반화 램파 속도의 주파수 의존에서는 주파수에 따라 속도값이 감소하는 우물 왼쪽 영역에서는 후방복사 값이 작게 나타나다가 우물 오른쪽인 속도 증가 지역에서는 최소반사 값이 작게 나타나는 이중성을 보여주었다.

두 속도값 측정 방법의 비교에서 나타난 공통된 결과를 정리하면 표면파 속도의 주파수 의존성이 없는 순수 고체층에서는 두 방법에 의한 측정치가 거의 같아 실험법에 구애받지 않지만, 얇은 층이 존재해 표면파 속도의 주파수 의존성이 있는 경우에는 주파수 증가에 따라 속도값이 감소하는 영역에서는 최소반사에 의한 속도값이 더 크게 그리고 속도값이 증가하는 영역에서는 후방복사에 의한 속도값이 더 크게 나타났다. 이와 같이 두 속도값의 차이의 일관성 있는 경향은 표면 탄성파가 전파되는 매질의 분산 특성과 아주 밀접한 관계가 있음을 알려준다.

4.3. 분산 특성과 속도 차이의 상관 관계

매질의 분산 특성에 따라 최소반사법과 후방복사법의 측정치가 다른 경향을 보임을 설명하기 위해서는 이 현상들의 생성 메카니즘과 표면파의 전파특성이 고려되어야 한다. 여기서 분산매질에서 속도의 변화율에 따라 다른 값을 가지는 군속도 개념을 도입한다. 실험에 사용된 초음파는 톤버스터(toneburst)형태로 이는 중심 주파수인 ω_0 를 중심으로 여러 주파수 성분이 중첩된 펄스 형태이다. 이때 주파수 스펙트럼의 폭은 펄스 폭에 반비례한다. 여러 주파수 성분을 가진 파동이 분산매질에서 진행할 때 중첩파동의 최대 크기의 속도는 군속도로 진행하므로 본 실험에서 분산매질에 발생된 표면파는 군속도로 진행한다고 볼 수 있다. 일반적으로 군속도,

$$v_g = v \left[1 - \frac{\omega}{v} \left(\frac{dv}{d\omega} \right) \right]^{-1} \dots\dots\dots (2)$$

로 정의되며 약간의 변형을 통해

$$v_g = v + k \frac{dv}{dk} \dots\dots\dots (3)$$

로 표현된다. 여기서 v , ω 그리고 k 는 각기 위상속도,

주파수 그리고 파수이다. 식 (3)의 군속도 정의에서 보듯이 표면파 속도의 주파수 의존성이 없는 경우에는 $\frac{dv}{dk} = 0$ 이며 따라서 $v_g = v$ 즉, 군속도와 위상속도는 같다. 그러나 주파수에 따라 속도가 감소하는 경우에는 $\frac{dv}{dk} < 0$ 이며 항상 군속도가 위상속도보다 작게된다. 주파수 의존 곡선 안에 주파수에 따라 속도가 증가하는 영역이 있다면 반대로 $\frac{dv}{dk} > 0$ 가 되어 군속도가 위상속도보다 크게된다.

Fig. 5의 비분산성 시편에서는 후방복사와 최소반사, 두 가지 측정법에 의한 속도값들이 거의 모든 주파수 영역에서 일치하고 있다. 주파수의 증가에 따라 표면파의 속도가 감소하는 Fig. 6의 loaded 경우 모든 주파수 영역에서 후방복사에 의해 결정된 속도값이 최소반사에 의한 속도값 보다 작게 나타났고 주파수에 따라 속도가 증가하는 Fig. 7의 stiffened 경우는 후방복사에 의한 속도값이 크게 나타났다. Fig. 5-7의 결과로부터 $\frac{dv}{dk} \approx 0$ 인 경우에는 두 측정 속도값의 차이가

없으며, $\frac{dv}{dk} < 0$ 경우는 후방복사에 의한 속도값이 작

고 $\frac{dv}{dk} > 0$ 경우는 후방복사에 의한 값이 크게 나타난 것으로 정리되며 이 경향은 앞에서 논의된 분산 특성에 따른 위상속도와 군속도의 비교와 경향이 같다. 따라서 군속도와 후방복사에 의한 속도 그리고 위상속도와 최소반사에 의한 속도사이에는 정성적인 대응관계가 있다. 주파수 증가에 따라 속도가 감소하다가 다시 증가하는 Fig. 8의 intermediate 경우에도 loaded 경우 같은 $\frac{dv}{dk} < 0$ 영역에서는 후방복사에 의한 값이 작고

stiffened 경우 같은 $\frac{dv}{dk} > 0$ 영역에서는 후방복사에 의한 값이 크게 나타나 같은 대응관계가 성립함을 보여준다. 서론에서 언급된 것과 같이 최소반사는 입사한 초음파중 가장 큰 크기를 가진 중심주파수 ω_0 성분이 표면파로 최대 전환될 때의 입사각에서 보여주므로 [1, 2] 최소반사에 의해 결정된 표면파 속도값이 단일 주파수로 이루어진 파동의 전파속도인 위상속도를 대변한다고 할 수 있다. 한편 후방복사에서는 이미 진행을 시작한 표면파가 산란에 의해 역방향 진행의 표면파로 전환되고 표면파의 전파속도인 군속도에 $\frac{dv}{dk} > 0$ 의해 결정

된 각도로 주 에너지를 복사하게 된다. 따라서 측정 탐촉자에 되돌아와 후방복사 봉우리를 나타내는 입사각은 표면파의 최대 발생조건인 최소반사각, 군속도에 의해 결정되는 주 에너지 복사각 그리고 표면지역 산란 등 여러 요인에 의해 결정되므로 [3, 4] 후방복사에 의한 속도값은 군속도의 영향을 많이 받은 속도값을 대변한다고 할 수 있다.

5. 결 론

측정된 표면파 속도의 주파수에 대한 분산관계들은 일반화 램 표면파의 분산 특성과 잘 일치하였으며 이 분산관계의 분석을 통해 표면지역의 물성 및 상태 평가도 가능하다. 최소반사에 의해 결정된 표면파 속도값이 위상속도를 대변하고 후방복사에 의한 속도값은 군속도의 영향을 많이 받음을 알았다. 따라서 표면지역에 깊이에 따른 물성 변화가 있을 때는 최소반사와 후방복사에 의한 표면파 속도 측정값이 일반적으로 일치하지 않으므로 평가 목적에 따라 적합한 방법이 선택되어야 하며 결과의 분석에도 차별이 필요하다.

참고문헌

- [1] H. L. Bertoni and T. Tarmir, "Unified theory of Rayleigh angle phenomena for acoustic beams at liquid-solid interfaces", *Appl. Phys.* 2, pp. 157-172, (1973)
- [2] W. G. Neubauer, "Ultrasonic reflection of a bounded beam at Rayleigh and critical angle for a plane liquid-solid interface", *J. Appl. Phys.* 44(1), pp. 48-55, (1973)
- [3] S. D. Kwon, "Backward radiation of ultrasonic waves from layered substrate", *B. Basic Sci. Andong N. Uni.* 5, pp. 17-21, (1994)
- [4] Sung D. Kwon, Dong J. Yoon and Bong Y. Ahn "The application of angular profile of ultrasonic backscattering on the layered substrates", *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, edited by D.O. Thompson and D.E. Chimenti, Vol. 17A, pp. 97-103, Plenum Press, New York, (1998)
- [5] R. T. Ko, P. B. Nagy and L. Adler, "Experimental study of interface properties between layer and substrate", *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, edited by D.O. Thompson and D.E. Chimenti, Vol. 11B, pp. 1967-1973, Plenum Press, New York, (1992)
- [6] L. Adler, S. W. Wang, K. Bolland, M. de Billy and G. Quentin, "Rayleigh angle backscattering of ultrasonic beam from single crystal nickel in 111 and 110 planes", *J. Acoust. Soc. Am.*, 77(5), pp. 1950-1953, (1985)
- [7] S. D. Kwon, S. S. Yoon, H. D. Han and D. J. Kim "The effect of interfacial roughness under painting layer on the ultrasonic backward radiation, proceedings of 4th FENDT, KSNT", pp. 529-537, (1997)
- [8] G. W. Farnell and E. L. Alder, *Elastic wave propagation in thin layers (Physical acoustics, Vol. IX, Academic Press)*
- [9] 권성덕, 윤석수. "초음파를 이용한 얇은 고체층의 불완전 집합면의 평가", *한국물리학회, 응용물리*, 9(5), pp. 601-609, (1996)