

주파수 대역별 후방복사 프로파일 Spectral Backward Radiation Profile

김학준*, 권성덕**†

Hak-Joon Kim* and Sung-Duk Kwon**†

초 록 후방복사된 초음파의 입사각 의존성(프로파일)은 입사지역이 다층경계이거나 깊이방향으로 물성변화가 있을 때 주파수 의존적이다. 지금까지 측정된 후방복사 프로파일은 주로 사용된 탐촉자의 중심 주파수의 특성에 의존하여 표면탄성파의 전반적인 주파수 의존 특성을 이해하는 데는 어려움이 많았다. 디지털 오실로스코프의 DFP(digital filter package)를 이용하여 주파수 대역별 후방복사 프로파일이 실시간 획득되었다. #1200 사포로 표면 처리된 상업적 강재 시편에 대한 주파수 대역별 측정으로부터 표면탄성파가 2% 정도의 음의 기울기(loaded case) 속도 분산성이 있음을 알았고 심하게 녹이 쓴 시편에서는 주파수 대역별로 프로파일의 형태에 큰 변화를 보였다. 주파수 대역별 후방복사 프로파일은 분산성을 가진 표면지역에 대한 비파괴적 평가에 매우 유용할 것으로 본다.

주요용어: 초음파, 표면 탄성파, 후방복사 프로파일, 주파수 스펙트럼

Abstract Ultrasonic backward radiation profile is frequency-dependent when the incident region has deptional gradient of acoustical properties or multi-layers. Until now, we have measured the profiles of principal frequencies of an used transducers so that it was not easy to characterize the frequency dependence of the SAW(surface acoustic wave) from the backward radiation profile. We tried to measure the spectral backward radiation profiles using DFP(digital filter package) in a Lecroy DSO(digital storage oscilloscope). The measured spectral profiles showed that the steel specimen of #1200 surface treatment have 2% SAW velocity dispersion of the loaded case and the severly rusty steel specimen have the very big changes in the shape and pattern of the spectral profile. It is concluded that the spectral backward radiation profiles could be very effective tool to evaluate the frequency dependence of surface area.

Keywords: ultrasound, SAW, backward radiation profile, frequency spectrum

1. 서 론

레이리 표면탄성파는 깊이에 따라 지수적으로 감소하는 변위를 보이며 표면을 따라 전파된다. 표면파의 효과적인 침투깊이는 한 파장 정도이며[1] 따라서 표면파의 전파특성은 표면지역 한 파장이내의 깊이에 따른 물성변화(gradients)에 의해 결정된다.

파장은 주파수에 반비례하므로 깊이에 따른 물성변화가 있는 경우 표면파의 속도는 주파수에 의존하며 이 주파수 의존성(dispersion)으로부터 표면지역 물성변화의 유추도 가능하다[2,3] 물속에 담겨진 시편표면에 초음파를 입사시키면 특정 입사각에서 표면파가 모드전환에 의해 발생하고 발생된 표면파의 산란파 에너지 누수로 인해 입사한 방향으로

상당량의 가간섭성 초음파가 되돌아오는 후방복사(Fig. 1)가 발생한다[4]. 최근 이 후방복사를 이용한 시편 표면지역의 미세구조에 대한 연구가 있었고[5] 광대역의 초음파를 사용하여 후방복사된 초음파의 입사각 의존성으로부터 부분적인 표면과 속도의 주파수 의존성의 평가가 시도되었다[6]. 최근 후방복사된 초음파를 이용한 재료물성 평가에 대한 연구는 베릴륨 합금층, 도색층, 거칠기 효과 등 여러 분야에 대한 응용으로 확대되고 있다[7-9]. 그러나 측정된 프로파일로부터 주파수 특성 정보를 유추하는 것은 시간적으로 많은 시간을 필요로 하며 보다 정량적인 표면상태의 평가에는 어려움이 있다.

구조물의 중요한 부분들에는 뛰어난 기계적 특성을 가지는 고성능 재료들이 요구되어진다. 단일 재료를 사용할 경우에 고강도, 높은 절연성 그리고 내부식성과 같은 특성들을 동시에 만족시키기는 어렵지만, 다층접합 재료는 이러한 문제들을 해결할 수 있다. 이런 다층재료에서 전파되는 램파는 판에서 진행하는 대표적인 유도 초음파로, 그 속도는 탄성계수와 밀도뿐만 아니라 판재의 두께와 파의 주파수에 의해 결정된다[1]. 이와 같이 램파는 두께와 주파수에 따라서 여러 모드가 다른 위상속도와 군속도로 전파가 가 때문에 그 신호를 이해하고 분석하는 데에 많은 어려움이 있지만, 얇은 판재에 대한 비파괴평가나 광범위 탐상과 같은 분야에서 널리 사용된다. 이 경우에도 후방복사 프로파일을 측정하면 램파의 다양한 모드와 분산성으로 인해 Fig. 2와 같이 여러 개의 세부프로파일을 가지는 형태를 보여준다. 각 세부 프로파일 정점에서의 RF 신호의 스펙트럼을 분석하면 여러 개의 모드가 같이 존재함을 알수 있으나 나타나는 세부 프로파일은 그 모드들 중에서 가장 큰 세기를 가진 주파수 성분의 특성만을 보여준다. 입사각에 따라 모드의 변화와 전파특성의 변화로 각 세부 프로파일의 주파수 성분뿐 아니라 해당 모드도 같이 변하여 측정된 프로파일로부터 어느 한 가지 모드의 특성을 해석하는 것은 매우 어려운 실정이다.

본 연구에서는 디지털 오실로스코프의 실시간 주파수 밴드 필터링 기능을 이용하여 광대역 탐상자의 주파수 스펙트럼에서 1 MHz 대역으로 RF 신호를 분할한 후 주파수 대역별 후방복사 프로파일을 측정을 시도하고 그 응용 가능성을 살펴보아 새 비파괴 평가 기법의 개발을 추진하였다.

2. 실험

실험 시편은 일반적 강재 블록으로 표면은 #1200 사포로 연마되었고 연마과정에서 깊이방향으로 미소한 음향학적 변화(gradient)를 가진 것으로 가정되었다. 측정이 끝난 후 적은 상태에서 상당기간 두어 표면이 심하게 녹슬게 한 후 다시 한번 측정이 수행되었다. Fig. 3은 후방복사 초음파 측정 시스템의 구성도이다. 물속에 담겨진 시편에 대해 자동화 후방복사 시스템으로 후방복사 신호가 측정되었고 측정된 후방복사 신호는 입사지역에서 직접 후방복사된 파와 시편 구석에서 반사되어 돌아온 복사파가 중첩되도록 입사지점을 구석에 가깝게 두어 측정하는 구석 반사법(corner reflection)을 선택하여 주파수 성분의 유실을 방지하였다[10]. 5 MHz 중심의 광대역 탐상자가 사용되었으며 Fig. 4(a)에

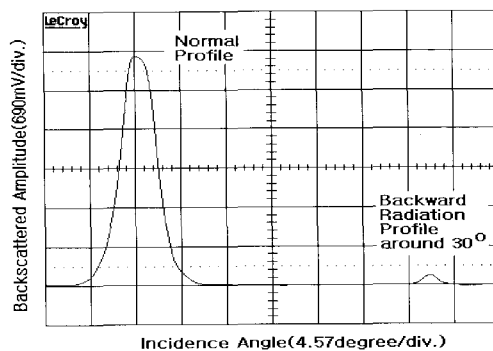


Fig. 1 Angular dependence (profile) of backscattering involving backward radiation profile from a steel block(with the surface treated by #1200 sand paper)

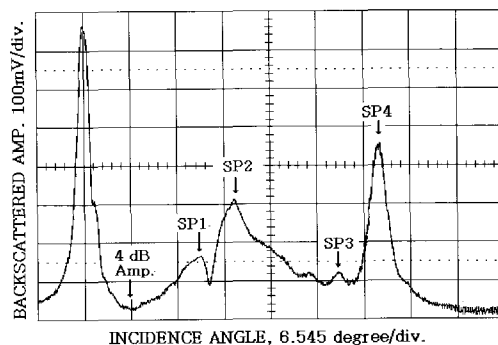


Fig. 2 Lamb backward radiation profile of zirconium plate

서 보듯이 약 20 dB 기준 2-8 MHz의 넓은 영역 스펙트럼을 보여준다. 디지털 오실로스코프(Lecroy waverunner LT374)의 DFP(Digital Filtering Package)기능을 이용해 1 MHz 대역별로 RF 신호가 획득되었고 이 신호는 Trend 기능을 이용해 최대 Amplitude 값이 실시간으로 그려져 입사각에 따른 수직신호 근처의 수직 프로파일(normal profile)과 레일리각 근처의 후방복사 프로파일(backward radiation profile)을 포함하는 후방산란 프로파일이 측정되었다.

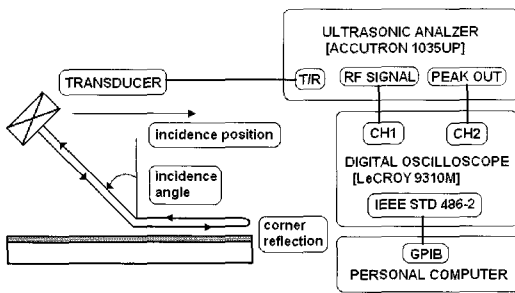


Fig. 3 Measurement system of ultrasonic backward radiation profile

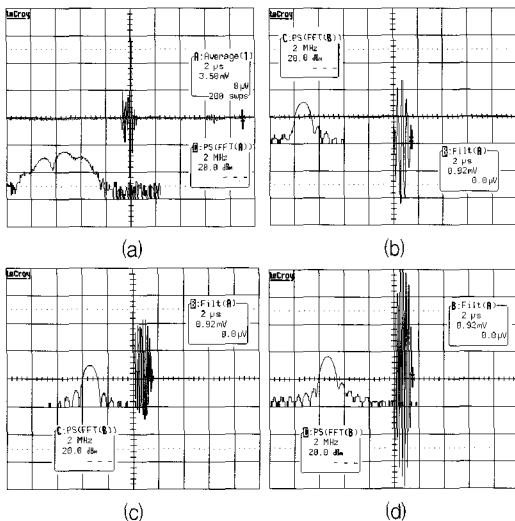


Fig. 4 Normal RF signals and its FFT spectra (a) unfiltered (b) band 2-3 MHz (c) band 4-5 MHz (d) band 6-7 MHz

3. DFP의 적용

푸리에(Fourier) 이론에 따르면 모든 임의의 파동은 길이와 형태에 의존하여 각기 크기가 다른 주기적

인 여러 주파수의 파동의 중첩으로 이루어져 있다. Fig. 4(a)는 본 실험에 사용된 5 MHz 중심의 광대역 탐촉자로부터 발생한 초음파 펄스(pulse)가 물속에 잠겨진 강재 블록의 표면에 수직반사되어 돌아온 RF신호와 FFT이다. 예상된 것과 같이 5 MHz 중심의 넓은 스펙트럼(2-8 MHz, 20 dB)을 보여주는 광대역임을 확인 할 수 있었다. Fig. 4(b)-(d)는 이 RF 수직 신호를 DFP 기능을 이용하여 각기 2-3, 4-5, 6-7 MHz의 주파수 대역별 밴드패스 필터링한 RF신호와 그 FFT 스펙트럼이다. 스펙트럼으로부터 DFP에 의한 필터링이 잘 되어 있음을 알 수 있고 RF신호 세기의 차이는 탐촉자의 주파수 응답 특성에 따른 결과이다.

4. 대역별 후방복사 프로파일

4.1 #1200 처리 표면

Fig. 1은 #1200 사포로 표면 처리된 비교적 깨끗한 표면에 대한 후방산란 프로파일이다. 수직 입사각 영역의 수직 프로파일과 표면파가 발생하는 레일리 입사각 영역(30° 주위)의 후방복사 프로파일로 이루어져 있다. 두 프로파일 모두 탐촉자의 지향성 함수를 닮은 대칭성 프로파일을 보여주고 있으며, 특히 후방복사 프로파일은 탐촉자로부터 입사한 넓은 영역에 걸친 주파수 성분들의 표면파 분산특성에 의존한다[6]. Fig. 5는 실시간 밴드패스 기능(DFP)을 적용하여 획득한 주파수 대역별 RF 신호로부터 측정된 레일리각 근처의 후방복사 프로파일들이다. 적용된 주파수 대역은 2 MHz에서 8 MHz까지 1 MHz 대역을 가진 6개 구간이었다. Fig. 1과 같이 필터링이 안 된 후방복사 프로파일이 대칭성을 유지하는 반면 필터링된 주파수 대역별 프로파일들은 비대칭성을 보이기도 하고 크기 및 패턴에서 차이가 있다. 5-6 MHz 대역이 4-5 MHz 대역보다 입사 에너지는 작음에도 후방복사 프로파일은 상대적으로 크게 나타난 것은 표면파의 산란과 관계된 시편특성으로 판단되며 전반적으로 프로파일의 크기는 탐촉자의 주파수 특성을 따르고 있다.

후방복사 프로파일은 표면지역이 깊이방향으로 섭동되어 음향학적 물성 기울기(gradient)를 가지는 경우 그 지역 발생 표면파는 주파수 성분에 따라 다른 속도, 즉 다른 발생 입사각을 가지는 주파수

분산성을 가진다. 이 경우 후방복사 프로파일 영역 내 모든 RF신호들은 입사각별로 다른 주파수 스펙트럼을 가지므로 프로파일 형태도 분산성에 따라 다르게 나타난다[3,6]. 표면파가 분산성을 가지는 경우 주파수 대역별로 후방복사 프로파일을 분리하면 각 프로파일들은 다른 정점 각(peak angle)을 가질 것이 예상된다. Fig. 6은 Fig. 5에서 보여진 대역별 후방복사 프로파일의 정점 각으로부터 표면파의 속도를 계산하여 그린 분산선도이다. 비록 약 2%(60 m/s) 범위 내에서의 작은 변화이지만 레일리 표면파 속도의 주파수 의존 분산성이 확인되었다. 주파수 증가에 따라 속도가 감소함은 1 mm 범위 안에서는 표면에 가까울수록 표면층이 더 연화되어 있음을 의미한다. 6 MHz 이후의 고주파 지역에서 분산성이 나타나지 않음은 표면에 얇은 막 형태의 연화지역이 존재할 가능성을 보여준다. Fig. 7은 주파수 대역별 후방복사 프로파일의 정점 세기를 수직프로파일의 대역별 세기에 대해 규격화하여 탐촉자 주파수 응답특성의 영향을 제거한 후방복사 세기의 주파수 의존성이다. 주파수 증가에 따라 규격화된 후방복사 프로파일 정점 세기의 값은 작아지며 이는 입사된 주파수 성분의 세기가 같은 경우에 주파수가 클수록 후방복사파가 더 많이 발생함을 의미한다. 이 의존성은 주파수에 비례하는 누설(leaky) 표면파의 누설율에 의한 것이며 낮은 주파수 영역에서 의존성의 변화는 시편의 입사지역 산란효과로 보인다[4].

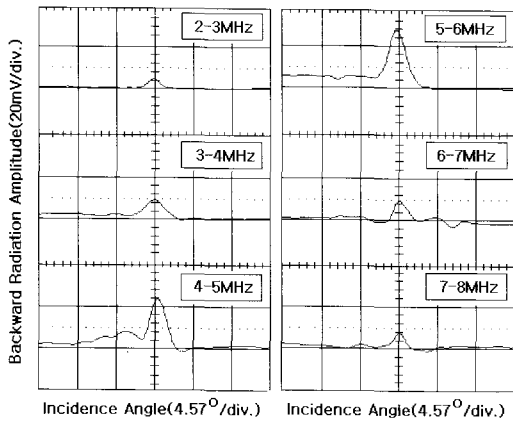


Fig. 5 Spectral backward radiation profiles around Rayleigh angle on water-steel (#1200 surface treatment) interface

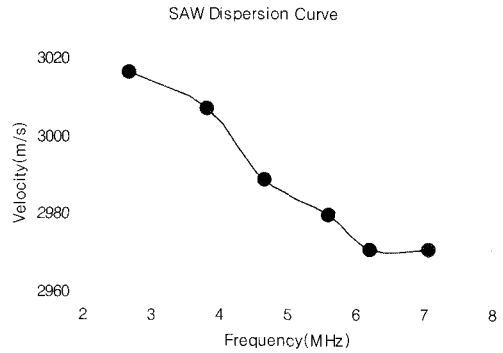


Fig. 6 Velocity dispersion curve of SAW obtained from the peak angle of spectral backward radiation profile

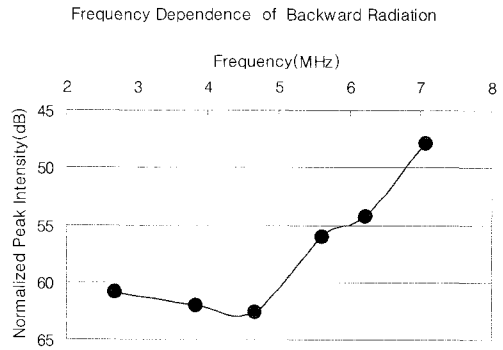


Fig. 7 Frequency dependence of backward radiation intensity normalized to spectral normal intensity(Normalized Peak Intensity = $20 \log(AN/AB)$, where AB and AN are a backward radiated amplitude at peak and a normally reflected amplitude, respectively).

4.2 녹이 심한 표면

Fig. 8은 심하게 녹이 쓴 표면에 대한 후방 산란 프로파일이다. Fig. 1과 같이 수직 프로파일과 후방복사 프로파일로 이루어져 있으나 특이한 점은 수직 프로파일의 정점 부분이 대칭성을 보이지 않고 갈라져 있는 것이다. 녹이 쓴 정도가 손으로 만져도 요철이 느껴질 정도임을 감안할 때 표면의 심한 거칠기에 의한 입사파 다발의 갈라짐에 의한 것으로 보인다. 한편 후방복사 프로파일은 수직 프로파일과는 다르게 여전히 대칭성을 유지하고 있어 거칠기 산란 보다는 표면파의 발생과 전파특성에 의존하는 특성을 보여준다[6].

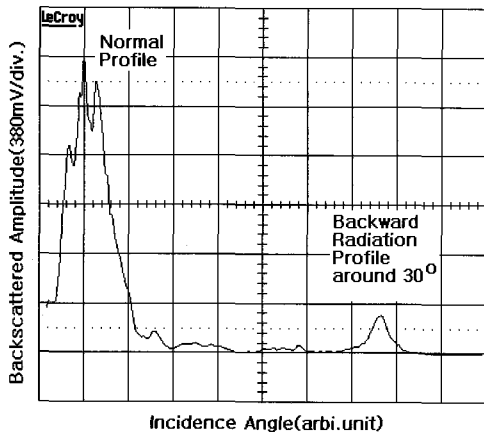


Fig. 8 Angular dependence of backscattering of severely rusty steel

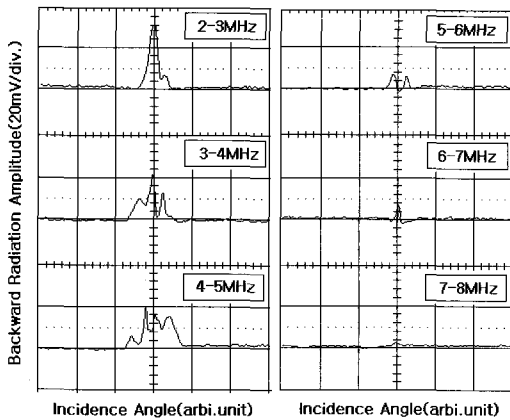


Fig. 9 Spectral backward radiation profiles around Rayleigh angle on water-steel(severely rusty surface) interface

Fig. 9는 Fig. 5와 동일한 조건과 방법으로 측정된 주파수 대역별 후방복사 프로파일들이다. 주파수 대역별 후방복사 프로파일은 Fig. 8의 후방복사 프로파일과는 크기와 모양에서 매우 다르게 나타났다. 이는 표면지역이 주파수에 따라 매우 다른 전파와 산란특성을 가지고 있음을 말한다. 특히 대칭성과 폭에서 큰 변화를 보이는 3-5 MHz 영역은 시편의 입사지역의 표면 거칠기나 내재된 결함이 이 영역에 대응된 파장에 민감한 크기를 가지고 있음을 예상할 수 있고 표면파의 분산성에서도 이 주파수 영역에서 가장 큰 변화가 있을 것으로 추정된다 [6]. Fig. 5를 보면 탐촉자 특성에 맞게 중심주파수

영역에서 후방복사 세기가 최고인 반면 Fig. 9의 높은 표면에서는 저주파에서 후방복사 세기가 최대를 보이다가 주파수가 높아질수록 급격히 감소하는 경향을 보인다. 이는 주파수에 선형 비례하는 누수효과로 인한 증가보다 거친 표면에 의해 주파수 세제곱에 비례하는 레일리(Rayleigh) 산란에 의한 감소 효과가 더 큰 비중을 차지한 것으로 판단된다. 주파수 대역별로 필터링하여 구한 주파수 대역별 후방복사 프로파일은 대역별로 매우 다른 패턴을 보여주고 있음을 확인하였고 기존의 후방복사 프로파일에서는 확인할 수 없었던 입사지역에서 발생한 표면파의 주파수 대역별 전파특성을 알 수 있었다.

5. 결론

코너반사법에 의해 후방복사파가 디지털 오실로스코프의 주파수 밴드 필터링 기능인 DFP(digital filter package)를 이용하여 주파수 대역별로 실시간 분리되고 주파수 대역별 후방복사 프로파일이 측정되었다. 상업적 강재 블록에 대한 주파수 대역별 후방복사 프로파일로부터 #1200 사포로 연마된 표면인 경우 표면이 아래지역에 비해 연화되어 있음을 확인하였다. 후방복사파의 주파수 대역별 세기 변화는 누설 및 산란 효과로 설명되었고 녹이 심하여 거친 표면을 가진 시편에서는 산란효과가 우세하여 주파수 증가에 따라 후방복사 세기는 감소하였다. 시편에 따라 주파수 대역별로 다양한 프로파일 패턴을 보여주었고 평가대상의 민감 주파수 결정에 활용될 수 있을 것으로 본다. 실시간 주파수 대역별 RF신호의 추출은 분산성을 가진 시편에 대한 직관적인 정보를 주는 비파괴 기법으로써의 가능성을 보여 준다. 특히 다양한 분산성을 보이는 판재나 다층구조에 대해 이 기법을 적용할 경우 매우 유용할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2004-000-10822-0)지원으로 수행되었음.

참고문헌

[1] I. A. Viktorov, "Rayleigh and Lamb waves," Plenum Press, New York (1967)

- [2] T. L. Szabo, "Obtaining subsurface profiles from surface acoustic wave velocity dispersion," *J. Appl. Phys.* Vol. 46, No. 4, pp. 1448-1454 (1975)
- [3] S. D. Kwon and H. C. Kim, "Dispersion of acoustic surface waves by velocity gradients," *J. Appl. Phys.*, Vol. 62, pp. 2660-2664 (1987)
- [4] H. L. Bertoni and T. Tamir, "Unified theory of Rayleigh angle phenomena for acoustic beams at liquid-solid interfaces," *J. Appl. Phys.*, Vol. 2, pp. 157-172 (1973)
- [5] H. C. Kim, J. K. Lee, S. Y. Kim and S. D. Kwon, "Influence of microstructure on the ultrasonic backscattered energy from a liquid/solid interface at the Rayleigh angle," *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 38, Part 1, No. 1A, pp. 260-267 (1999)
- [6] 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 International*, Vol. 33, No. 5, pp. 275-281 (2000)
- [7] 황용화, 권성덕, 최현욱, 박춘호, 이영호, "베릴륨 표면확산 층을 가진 지르코늄 판재에서의 후방복사 프로파일", *비파괴검사 학회지*, Vol. 23, No. 4, pp. 342-348, (2003)
- [8] 권성덕, 권용규, 윤석수, "레이저각 근처에서 도색된 거친 표면으로부터 후방 산란된 초음파", *비파괴검사 학회지*, Vol. 24, No. 1, pp. 1-7, (2004)
- [9] 권성덕, "무작위로 거친 표면에서의 후방복사 초음파", *비파괴검사 학회지*, Vol. 25, No. 1, pp. 9-14, (2005)
- [10] S. D. Kwon, S. J. Song, D. H. Bae and Y. Z. Lee, "Nondestructive Evaluation of the Characteristics of Degraded Materials Using Backward Radiated Ultrasound," *KSME International Journal* Vol. 16, No. 9, pp. 1084-1092, (2002)