

무작위로 거친 표면에서의 후방복사 초음파

Ultrasonic Backward Radiation on Randomly Rough Surface

권성덕

Sung D. Kwon

초 록 표면 거칠기가 다른 유리시편에 대해 후방 복사된 초음파 세기의 입사각 의존성(프로파일)이 측정되었다. 후방복사 세기와 레일리(Rayleigh) 표면파 속도는 표면 거칠기에 비례하였고 이 경향은 각기 초음파의 산란규칙과 경화현상으로 설명되었다. 후방복사 프로파일의 면적 역시 표면 거칠기에 민감함을 보여 표면상태에 대한 새로운 비파괴적 평가 변수의 가능성을 보였다. 레일리 각 C-스캔 기법은 화상 명도의 반전과 높은 신호대 잡음비(S/N)를 보여주었다.

주요용어: 초음파, 후방복사, 표면 거칠기, 표면 탄성파, C-스캔

Abstract The angular dependence(profile) of backward radiated ultrasound was measured for glass specimens with random surface roughness using ultrasonic goniometer that can change the incident angle continuously. It was concluded that the roughened region had greater acoustic impedance than the unperturbed region. The comparison of backward radiations showed that the amplitude of peak and the area of radiation profile were increased with surface roughness. It was suggested from the sensitive dependence of the profile area that the profile of backward radiation could be applied to in the nondestructive evaluation of surface region. Inclined C-scan technique with the transducer inclined at Rayleigh angle showed the reverse of luminosity and the high signal to noise ratio so that it provided high resolution.

Keywords: ultrasound, backward Radiation, surface roughness, SAW, C-scan

1. 서 론

초음파 빔(beam)이 액체/고체 경계면에 레일리(Rayleigh)각으로 입사할 때 고체의 표면지역에는 리키(leaky) 레일리 표면파가 발생된다. 이 리키 표면파는 공기나 진공같은 자유경계에서의 순수 레일리 표면파와 거의 같은 특성을 가지고 있으나 파의 진행동안 액체로의 에너지 복사로 인해 반사빔은 Fig. 1 과 같이 기하학적으로 반사지점의 이동을 보이는 쇼흐(Schoch) 변위, 표면파의 발생과 쇼흐 변

위로 인한 최소 반사율, 입사방향으로 되돌아가는 누설에너지인 후방복사 그리고 기하학적 반사파와 누설파의 상쇄간섭 지역인 널(null) 지역 등의 현상들을 포함한 비대칭 패턴을 보여준다[1,2]. 특히 입사한 방향으로 일반적인 산란보다 많은 양의 에너지가 되돌아오는 후방복사 현상의 다양한 응용가능성[3,4] 및 생성원인의 규명 등에 많은 연구가 진행되어 왔다[5-8]. 특별히 표면파는 에너지의 대부분이 한 파장 이내에 한정된 채로 진행하는 특성으로 인해 표면지역의 물성 변화에 민감하게 반응하므로

후방복사 방법이나 최소 반사율 방법 등을 통해 표면지역의 비파괴적 평가에 이용하는 연구가 많이 수행되었다[9,10].

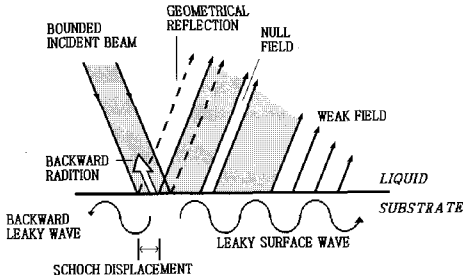


Fig. 1 Nonspecular reflection on liquid / layered substrate

경계면이 액체로 대체될 때는 진공일 때에 비해 표면파의 속도가 0.1% 만큼 증가하며 이와 함께 액체로의 에너지 복사가 나타난다. 이 에너지 복사(leaky 파)로 인해 표면파의 진행 거리는 열 파장 정도가 되는 것으로 알려져 있다[11,12]. 표면에 나타나는 거칠기나 결함은 이 표면파의 진행특성뿐 아니라 산란에도 큰 영향을 미쳐 궁극적으로 후방으로 진행되는 표면파와 후방산란(backscattering)중 표면파로부터의 누설 에너지인 후방복사에도 아주 민감한 영향을 준다. 본 연구에서는 무작위 표면 거칠기가 후방복사의 발생각도, 크기 그리고 프로파일(profile)의 면적 등에 미치는 영향을 조사한다. 이와 함께 후방복사의 최대 발생 각인 레일리 각을 입사각으로 고정된 경사각 C-스캔 기법을 시도하여 표면 거칠기 평가기술의 가능성을 타진한다.

2. 실험

본 실험은 표면층의 부식에 의한 표면층의 변화를 평가하는 이상적 모델로서 유리시편에 여러 종류의 사포를 사용해 무작위로 표면 거칠기를 만든 후 광학 현미경으로 대각선 방향 교점 측정법(cross counting method)으로 표면 거칠기를 측정했다. 다음으로 시편을 물 속에 넣어 액체/고체 경계면을 만든 뒤 초음파 입사각을 일정한 각속도로 연속적으로 변화시키며 후방 산란된 초음파 세기의 입사각 의존성을 측정한 뒤 레일리 각 근처에서 표면파로부터의 누설에너지로 인해 나타난 후방복사의 프로파일을 획득했다. 후방복사 최대발생 세기와 각

도 그리고 프로파일의 면적 등의 표면 거칠기에 따른 변화를 살펴봤다. 또한 획득된 후방복사 프로파일로부터 후방복사의 최대 발생 각들을 획득하고 그 평균값으로 입사각을 고정시킨 후 수직방향 C-스캔과 동일한 방법으로 경사각 C-스캔을 수행하여 후방복사된 신호크기의 영상을 얻고 수직탐사결과와 비교 분석되었다. C-스캔용 시편은 넓은 띠 모양의 세 가지 표면 거칠기 영역을 한 시편에 두어 거칠기 차이에서 오는 효과를 동시에 비교할 수 있도록 하였다. 탐사를 위해 사용된 탐촉자는 직경 0.5", 초점거리 2"의 초점용 탐촉자로 5 MHz 공진형이었다. Fig. 2는 본 실험에 사용된 초음파 각도계와 실험 시스템의 개요도이며 Table 1은 시편준비에서 사용된 사포의 메쉬(mesh) 번호와 측정된 표면 거칠기 그리고 시편 번호이다.

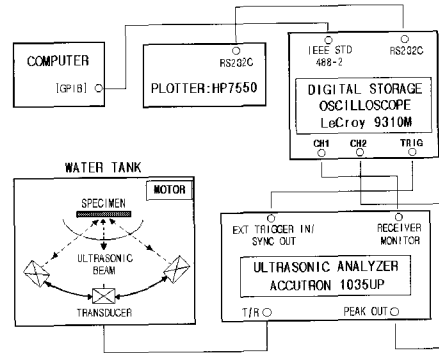


Fig. 2 Measurement system of angular profile of ultrasonic backscattering

Table 1 Mesh number of sand paper and the surface roughness measured by cross counting method

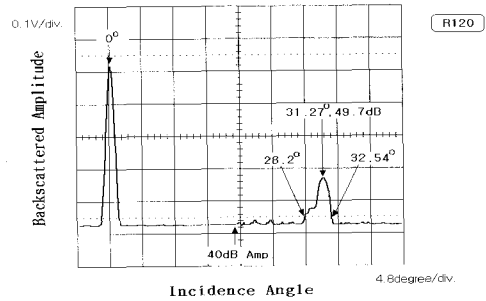
SPECIMEN	MESH NUMBER	SURFACE ROUGHNESS(μm)
R120	# 1200	5.31
R080	# 800	6.25
R040	# 400	8.8

3. 결과 및 논의

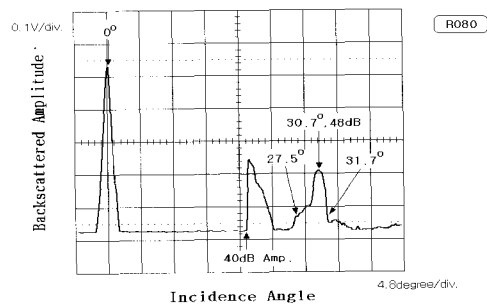
Fig. 3 에는 무작위 거칠기를 가진 유리시편에 대해 후방 산란된 초음파의 입사각 의존성이 프로파일 형태로 보여진다. 입사각이 수직에서 조금씩 커짐에 따라 급격히 감소하는 특성을 가진 후방산

란 신호들을 수직 신호와 같은 스케일로 보기 위하여 후방복사가 나타나기 전 임의의 각도에서 40 dB의 증폭을 수행하였다. Fig. 3의 후방복사 프로파일들 전에 나타나는 큰 진폭 신호들은 40 dB의 급격한 증폭으로 인해 나타난 것으로 실제는 입사각 증가에 따라 후방산란 신호의 지속적인 감소의 일부를 나타낸다[14]. Fig. 3(b)와 (c)에서 이 인위적인 큰 진폭이 큰 것은 표면 거칠기가 상대적으로 크기 때문이다. 사용된 사포의 메쉬번호가 작을수록 즉 측정된 표면 거칠기(Table 1)가 클수록 후방복사 정점의 세기는 커지는 경향을 보이는 반면, 정점이 나타나는 각도는 작아지고 있다. 스넬(Snell)의 법칙에 따르면 작은 각도는 그때 발생된 레일리 표면탄성파의 속도가 크다는 것을 의미한다. 거칠기에 따른 정점의 세기의 증가는 산란계수가 산란자의 크기의 세제곱에 비례하는 초음파의 레일리 산란법칙에 따라 산란원 역할을 하는 표면 거칠기가 커지면 후방으로 진행되는 표면탄성파와 그로부터 입사방향으로 되돌아가는 후방복사 에너지도 증가한다고 볼 수 있다. 정점 복사 세기의 편차범위는 4 dB 정도였고 거칠기가 클수록 표면파의 속도가 크게 나타난 것은 표면 연마를 하는 동안 메쉬 번호가 낮은 즉 큰 연마입자를 가진 사포에 의한 표면지역의 경화나 물성 변화로 인하여 연마되지 않은 비 섭동 지역이나 작은 연마입자에 의한 연마지역보다 더 큰 음향학적 임피던스를 가지기 때문으로 본다[13].

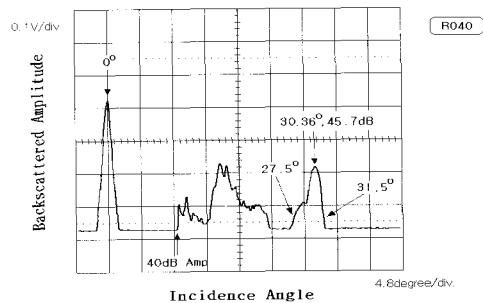
Fig. 4에는 후방산란의 입사각 의존성에 나타난 후방복사의 프로파일이 정점을 일치시켜 비교되어 있다. 거칠기가 큰 시편에서 프로파일 정점의 세기가 상대적으로 크게 나타났으나 그 차이가 그렇게 크지는 않았다. 특징적인 것은 정점을 중심으로 오른쪽 즉 더 큰 각도영역에서 크기의 차이 외에는 그 프로파일의 모양이 매우 유사하고 왼쪽 부분은 시편마다 다른 패턴을 보여주며 그 면적도 오른쪽보다 넓어 확실한 비대칭성을 보여준다. 입사각이 레일리 각에 가까워지면 입사 빔의 방향성 분포(directivity)의 영향으로 소량 발생하기 시작하는 레일리 표면파와 직각 가까이 굴절된 고체 표면 근처의 횡파들이 표면지역(surface and subsurface)에서 표면 거칠기나 고체 내 비 균질 요인들에 의해 산란되고 그 일부가 역 방향 표면파로 전환된다. 이 역 방향 표면파로부터의 누설 에너지가 입사방향으로 되돌아오게 되므로 그 패턴은 표면 상태



(a) R120; rough surface (ground with #1200 sand paper)



(b) R080; rough surface (ground with #800 sand paper)



(c) R040; rough surface (ground with #400 sand paper)

Fig. 3 Backscattering profiles of glasses (5 MHz)

에 민감하게 변하게 되는 것이다. 입사각이 정점 각을 지나 프로파일의 오른쪽으로 이동하게 되면 (입사각이 커지면) 고체 내에는 이미 횡파가 존재하지 않고 표면파의 양도 급격히 줄어들어 후방 복사되는 에너지는 탐촉자의 방향성 특성에만 의존하므로 표면 상태의 영향을 받지 않는 프로파일을 보이게 된다. 따라서 Fig. 4에 나타난 바와 같이 오른쪽은 표면 거칠기에 상관없이 거의 같은 패턴을 보여

주게 된다. 이러한 과정은 Fig. 5에 도식적으로 나타내었다. 이러한 이유에서 후방복사 프로파일을 이용한 표면 거칠기나 표면 결정입계의 산란효과에 대한 평가가 목적인 때는 프로파일의 전반부(왼쪽 프로파일)에 더욱 관심을 가져야 한다.

표면지역에서 표면파의 산란과 후방복사 현상이 최대 발생 각에서만 일어나는 것이 아니라 후방복사 프로파일 전 영역에서 일어나므로 표면 거칠기의 후방복사에 대한 영향을 조사하기 위해서는 정점의

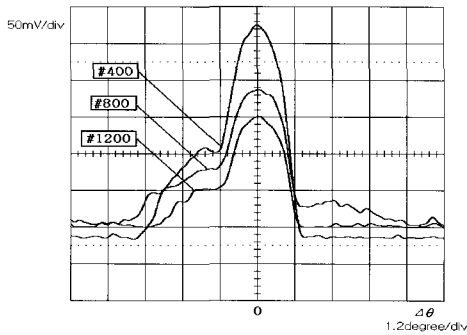


Fig. 4 The comparison of profiles of backward radiation of R040, R080 and R120. (5 MHz)

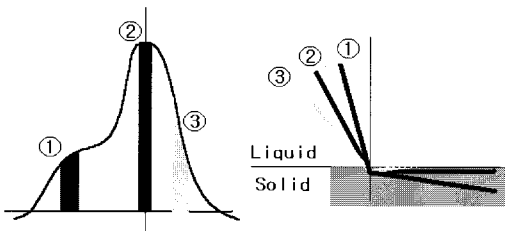


Fig. 5 Explanation of asymmetry shown in most of backward radiation profiles

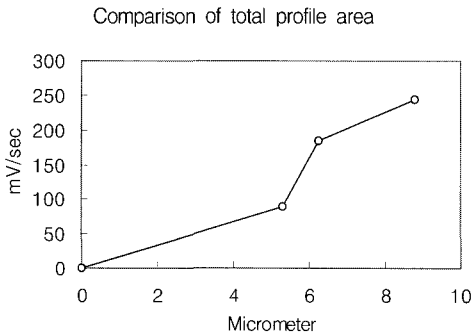


Fig. 6 Normalized area of total profile versus surface roughness : R040, R080 and R120. (5 MHz)

세기보다는 프로파일이 적분된 면적의 비교가 더 확실한 연관성을 보여줄 것이 예상된다. Fig. 6은 Fig. 4의 프로파일을 적분하여 시편의 표면 거칠기 차이에 따른 면적변화를 연마되지 않은 시편에서 획득된 후방복사 프로파일 면적을 영점 기준으로 하여 나타낸 것이다. Fig. 6의 결과는 후방복사 프로파일의 면적이 표면 거칠기의 작은 변화에도 민감하게 변하고 있어 후방복사 정점의 세기나 정점 각[14] 보다는 더 효율적으로 표면지역의 산란원의 정성적 평가에 이용될 수 있음을 보여준다.

후방복사 면적을 표면 거칠기의 평가에 활용하는 것은 그 민감도에 비추어 매우 우수한 평가기법임에는 틀림없으나 스캔을 요구하는 넓은 지역을 대상으로 하는 대량의 평가에는 적용할 수 없는 문제점이 있다. 레일리 표면파가 최대 발생되는 후방복사 정점 각 역시 표면 거칠기에 민감함이 밝혀졌고 쉽게 측정될 수 있으므로 후방복사 에너지를 측정하면서 동시에 많은 지역을 평가할 수 있는 경사각 C-스캔 기법을 도입하였고 전형적인 수직입사 C-스캔 결과와 비교되었다. Fig. 7과 Fig. 8에는 전형적 수직 C-스캔과 레일리 각에서 고정된 입사각을 사용하는 경사각 C-스캔 화상 결과가 각기 나타나 있다. Fig. 7의 수직탐사에서는 거칠기 차이에 따른 반사율의 변화로 인해 화상에서 약간의 명도차를 보여주나 어떤 경향을 보여주진 않는다. 또한 표면 처리 지역과 미처리 지역과의 경계도 확실하지 않다. 한편 Fig. 8에 보이는 경사각 탐사 결과는 수직 탐사와는 두 가지 점에서 큰 차이를 보여준다. 첫째는 수직 탐사 때와는 명도의 반전을 보여준다. 배경이 어둡게 나타나고 거칠기가 존재하는 지역이 밝게 나타나며 거칠기가 심할수록 상대적 밝기가 좋아져 보인다. 두 번째로 배경 대 거칠기 지역의 명도 비 즉 신호대 잡음비(S/N)가 수직 탐사에 비해 현저히 커서 배경과 거칠기 존재지역의 구분이 확실하고 거칠기의 정량적 구분이 어느 정도 가능하다는 것이다. 사포 #1200에 의해 연마된 지역의 구분은 경사각 C-스캔 역시 불가능하였다. Fig. 3에서 보듯이 #800에 비해 후방복사의 세기가 약 2 dB 정도로 매우 작은 세기차이를 보여주어 배경과의 구분이 쉽지 않기 때문이며 높은 진동수 즉 더 짧은 파장의 초음파를 사용함으로써 극복될 것으로 본다. 새로이 시도된 경사각 C-스캔 기법은 표면 거칠기에 한정된 응용뿐 아니라 표면결함에 까지 확대 적용되었을 때 능동적인 표면지역 문제점 파악과 분해능 개선에 큰 역할이 기대된다.

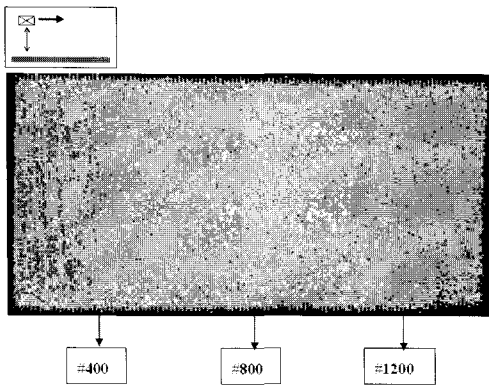


Fig. 7 Typical normal C-SCAN of glass specimen with three different surface roughness band: R040, R080 and R120 (5MHz)

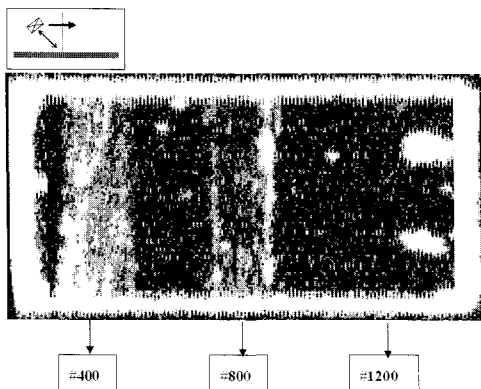


Fig. 8 Inclined C-SCAN of glass specimen with three different surface roughness band: R040, R080 and R120 (5 MHz) where inclined angle was 30 degree at which the Rayleigh surface wave was maximally generated.

4. 결론

표면 거칠기가 후방복사에 미치는 영향을 살펴보기 위해 사포에 의해 표면 처리된 무작위 표면 거칠기를 가진 유리시편에 대해 물 속에서 초음파의 입사각을 연속적으로 바꾸어 후방 산란된 초음파 세기의 입사각 의존성 즉 프로파일의 측정되었다. 그중 레일리 표면파의 발생과 관련된 후방복사 정점의 세기는 표면 거칠기와 함께 증가함을 보였고 이는 초음파의 산란규칙 설명되었다. 후방복사 프로파일의 비대칭성의 원인이 도식적으로 설명되었고 이로부

터 프로파일의 정점을 기준으로 전반부가 표면지역의 특성에 민감함을 밝혔다. 후방복사 프로파일의 면적은 다른 변수들에 비해 표면 거칠기의 변화에 매우 민감한 변화를 보여 주었으며 이로 인해 표면지역의 비파괴적 평가에 응용될 때 좋은 결과가 예상된다. 후방복사 최대 발생각을 입사각으로 고정 한 경사각 C-스캔 기법은 수직 탐사법과 비교할 때 연마되지 않은 지역인 배경과 거친 표면지역의 화상의 명도가 반전되어 나타났고 표면 거칠기에 따른 신호대 잡음비(S/N)가 수직 탐사에 비해 현저히 향상되었다. 이 기법은 능동적인 표면지역 문제점 파악과 분해능 개선에서 큰 역할을 할 것으로 기대되며, 표면지역의 결함 같은 다른 문제점 파악에까지 확대 적용될 수 있을 것으로 본다.

참고문헌

- [1] W. G. Neubauer, "Ultrasonic reflection of a bounded beam at Rayleigh and critical angle for a plane liquid-solid interface," J. Appl. Phys. Vol. 44, No. 1, pp. 48-55, (1973)
- [2] 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)
- [3] P. B. Nagy, A. Jungman and L. Adler, "Measurements of backscattered leaky Lamb waves in composite plates," Materials Evaluation, Vol. 46, No. 1, pp. 97-100, (1988)
- [4] M. de billy, L. Adler and G. Quentin, "Measurements of backscattered leaky Lamb waves in plates," J. Acoust. Soc. Am., 75(3), pp. 998-1001, (1984)
- [5] S. Sasaki, "Back reflection of ultrasonic wave obliquely incident to solid surface in water," Jpn. J. Appl. Phys. 2, 198 (1963)
- [6] Andrew N. Norris, "Back reflection of ultrasonic waves from a liquid-solid interface," J. Acoust. Soc. Am., 73(2), pp. 427-434, (1983)
- [7] H. C. Kim and S. D. Kwon, "The back reflection effects of an ultrasonic beam with a Gaussian profile at the liquid-solid interface," J. Acoust. Soc. Am., 78(4), pp. 1384-1386, (1985)

- [8] P. B. Nagy and L. Adler, "On the origin of increased backward radiation from a liquid-solid interface at the Rayleigh angle," J. Acoust. Soc. Am., 85(3), pp. 1355-1357, (1989)
- [9] 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)
- [10] S. D. Kwon, R. T. Ko and L. Adler, "Evaluation of an imperfect Layered Substrate Using Backscattering Technique," Review of Progress Quantitative Nondestructive Evaluation, edited by D. O. Thompson and D. E. Chimenti, Vol. 13B, pp. 1579-1586, Plenum Press, New York, (1994)
- [11] Ed. J. Szilard., Ultrasonic Testing, John Wiley & Sons Ltd., (1982)
- [12] I. A. Viktorov, Rayleigh and Lamb Waves, Plenum Press, New York, (1967)
- [13] S. D. Kwon and H. C. Kim, "The dispersion of acoustic surface waves by velocity gradients," J. Appl. Phys. 62(7), pp. 2660-2664, (1988)
- [14] 권성덕, 이승희 "Ultrasonic Backscattering at the Rayleigh Angle on Water-Rough Glass Boundary," 계명대학교 기초과학 연구논문, 제7집 제2호, pp. 207-209, (1988)