

레이리각 근처에서 도색된 거친 표면으로부터 후방 산란된 초음파

Ultrasonic Backscattering on Painted Rough Surface at near Rayleigh Angle

권성덕*[†], 권용규*, 윤석수*

Sung D. Kwon*[†], Yong G. Kwon* and Seok S. Yoon*

초 목 1-71 μm 범위의 표면 거칠기를 가진 철 시편에 대해 물속에서 후방산란된 초음파의 입사각 의존성(프로파일)이 측정되었다. 거칠기가 도색에 의해 숨겨졌을 때 수직 프로파일은 거칠기에 대한 분별력이 사라졌으나 레이리 각 근처에서의 후방산란 프로파일은 거칠기 의존성을 여전히 보여주었다. 레이리 각에서 직접 복사된 프로파일 세기는 거칠기와 비례하였고 코너에서 반사되어 되돌아오는 표면파로부터의 후방복사의 세기는 거칠기와 반비례하였다. 도색 처리된 시편에서 0.03 파장 이하의 직접 후방복사에서 선형성이 관찰되었고 주기적 거칠기에 의해 발생한 비정상 저면 다중반사 현상이 사라졌다.

주요용어: 초음파, 후방산란, 레이리 표면파, 표면 거칠기, 도색

Abstract The angular dependence (or profile) of backscattered ultrasound was measured for steel specimens with a range of surface roughness, 1~71 μm . Backscattering profiles at or near the Rayleigh angle still showed roughness dependence while the assessment of surface roughness via normal profile became impossible due to the paint layer masking the roughness. The peak amplitude directly radiated at the Rayleigh angle was proportional to the surface roughness, while the averaged peak amplitude radiated from the backward propagating Rayleigh wave, produced by reflection at a corner, was inversely proportional. In the painted specimens, the linearity of direct backward radiation with the roughness was observed even at the roughness of less than three hundredths of a wavelength, and the abnormal multiple back reflection caused by periodic roughness disappeared.

Keywords: ultrasound, backscattering, Rayleigh wave, surface roughness, painting

1. 서 론

물속에 담겨진 고체 시편의 표면에 초음파가 입사하면 스넬의 법칙에 따라 물속에는 탐촉자로 표

면으로부터 되돌아온 초음파를 펄스-에코 방식으로 받는 경우 수직 입사 때는 최대의 반사파가 측정되고 연이어 두께방향으로의 저면다중반사 신호의 파열들이 측정된다. 그러나 입사각이 0° (수직입사)에

서 조금만 벗어나도 다시 탐촉자로 되돌아 오는 초음파의 세기는 급격하게 줄어들며 수직입사각 근처에서 입사각에 따라 후방산란파의 세기의 변화인 수직 프로파일은 탐촉자의 지향성(directionality)과 표면지역의 거칠기 및 입계같은 산란원에 의존한다. 하나의 탐촉자를 사용한 경우 입사한 방향으로 되돌아오는 초음파를 측정한다는 의미에서 이를 후방산란(backscattering)이라 부르며 입사지역의 거칠기나 입계의 분포 및 크기의 평가에 활용되어왔다[1-5]. 입사각이 증가함에 따라 급격하게 감소한 후방산란에너지가 레일리(Rayleigh) 표면탄성파가 발생하는 레일리카 근처에서 급격히 증가함을 사사키[6]가 처음 발견한 이후로 후방산란중 레일리카에서 발생하는 피크(peak)를 이용한 표면지역의 평가와 메카니즘에 관한 연구가 많이 수행되었다[7-10]. 지금까지 밝혀진 바로는 입사지역에 발생한 레일리 표면파가 거칠기나 입계같은 산란원에 의한 산란을 통해 역 방향으로 진행되는 표면파로 변환되고 표면파 발생의 역 메카니즘으로 입사한 방향으로 에너지를 누설하는 것으로 알려졌으며 에너지를 다시 물속으로 복사한다는 의미에서 이 현상을 후방복사(backward radiation)라 한다[10]. 최근 연구[11]에서 이 후방복사는 단순한 피크가 아니라 탐촉자의 방향특성, 표면파 속도의 주파수 의존성, 산란공식등에 의존하여 레일리카를 전후하여 어느정도 발생폭을 가지고 있음이 밝혀져 후방복사 프로파일이라고 한다. 최근 이를 이용한 부식 및 마모 같은 열화된 시편의 피로특성 평가[12-15]가 시도되어 후방복사 기술의 다양한 응용 가능성을 보여주었다. 그러나 이 기술의 현장적용과 확립을 위해서는 다양한 표면구조와 조합 그리고 산란원을 가진 시편에 대한 기초적이고도 심도 있는 연구의 뒷받침을 필요로 한다. 특히 후방복사 신호에 결정적으로 영향을 미칠 것으로 예상되는 표면 거칠기의 영향 평가는 거칠기 자체의 평가뿐만 아니라 표면 아래의 불연속적 구조 평가나 깊이방향 물성 변화의 평가를 위해서도 매우 중요하다고 할 수 있다. 본 연구자는 기계가공으로 주기적인 표면거칠기를 갖는 시편을 제작하여, 시편 표면을 도색하기 전과 후에 입사각 변화에 따른 초음파 후방산란 신호의 파형과 후방산란 프로파일을 조사하여 표면도색이 초음파 후방복사 응용기술을 개발하고자 하였다.

2. 실험

후방복사의 입사각 의존성 측정을 위하여 물 속에 담겨진 두께 18 mm의 시편에 대해 입사각이 등 각속도로 회전하는 초음파 각도계 시스템이 사용되었다. 4.7 MHz 중심의 광대역 초음파가 입사되었고 주기적 거칠기를 가진 시편에 대해서 후방산란의 입사각 의존성이 측정되었다. 측정된 후방산란 초음파 세기의 입사각 의존성은 수직입사를 전후한 수직 프로파일과 레일리 입사각 근처의 직접 후방복사 프로파일로 구성된다[11]. 한편 레일리카에서 발생된 표면파가 거친 표면을 따라 진행하다가 모서리에서 반사되어 후방으로 진행할 때의 누설과 역시 약간의 시간지연 후 입사 탐촉자에 도달하므로 이 신호를 선택하여 후방복사 프로파일을 측정하였다. 이 프로파일은 표면파가 왕복한 지역의 평균특성을 대변하므로 직접 후방복사와 구분하여 평균법 후방복사 프로파일이라 한다. Fig. 1은 후방산란 측정 시스템의 구성도이며 평균법 후방복사 측정의 도식적 설명이 같이 그려져 있다. 실험 시편은 가공전 가능한 동등한 시편조건을 만들기 위하여 압연재 연강을 800 - 850도에서 1시간 동안 열처리 한후 노냉한 시편에 밀링 속도를 조절하여 기계적으로 표면에 주기적인 거칠기가 만들어지도록 한 것을 사용하였으며, 그 거칠기(roughness, Ra)와 주기성(periodicity, Sm)의 범위는 각기 1-70 μm 그리고 100-500 μm 이다. Fig. 2는 조도계로 측정된 거친 표면의 프로파일이며 거칠기가 작아질수록 주기성이 무너지는 경향을 보이고 있다.

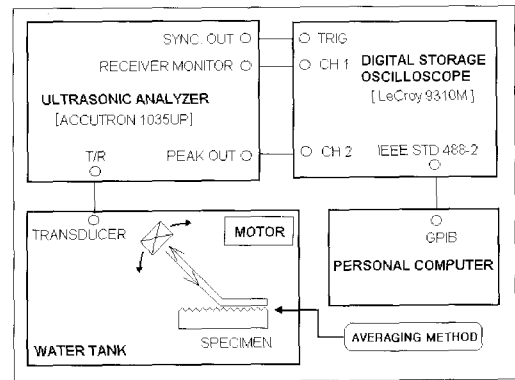


Fig. 1 Measurement system for ultrasonic back-scattering profiles

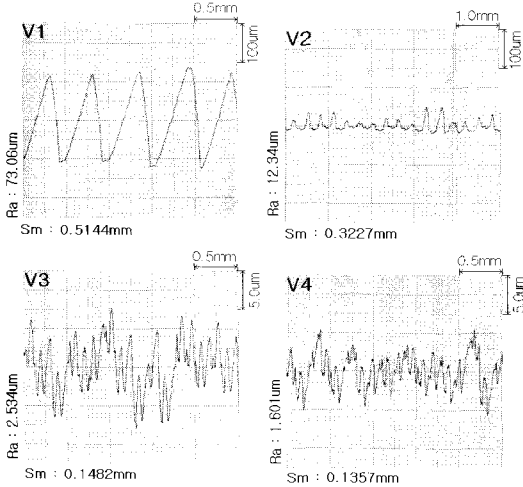


Fig. 2 Surface roughness profiles observed by Sufcoder 1700 (Kosaka Lab. Ltd)

3. 후방산란 프로파일의 비교

기존의 거칠기 평가기법으로 활용되던 수직산란 프로파일을 측정 한 결과 Fig. 3(a)와 같이 프로파일의 크기와 기울기의 변화는 거칠기가 클수록 작아지는 경향을 보이고 있으며 이는 기존의 거친표면에서의 후방산란 연구 결과들과[2,5,16,17] 정성적으로 일치한다. 그러나 Fig. 3(b) 처럼 도색이 되어 육안으로도 거칠기가 숨겨지고 구별이 불가능하게 되었을 때 수직 프로파일은 거칠기에 대한 분별력을 잃어버리고 비슷한 세기와 기울기의 프로파일을 보여주고 있다.

Fig. 4는 각기 다른 표면 거칠기를 가진 시편의 평균법 후방복사 프로파일의 비교이다. 이때 입사 지점은 모서리에서 1 cm 이므로 모서리에서 반사한 후방 진행 표면과의 왕복거리는 2 cm에 해당한다. 평균법으로 측정 한 후방복사의 세기는 표면 거칠기가 커질수록 그 후방복사의 세기는 작아지는 경향을 보여주고 있다. 이는 표면과의 진행동안 거칠기에 의한 레일리 산란 그리고 누수에너지에 의한 복합적인 감쇠로 인한 것으로 표면탄성파의 산란이 많이 되는 큰 거칠기 시편의 복사에너지가 작게 나타났다. 프로파일 패턴은 비교적 연속적이며 단순한 형태를 보여주고 있다. 탐촉자의 지향성 (directivity)에 의한 표면파 발생의 입사각 의존성 [11]이 그대로 유지되었음을 보여주며 표면아래

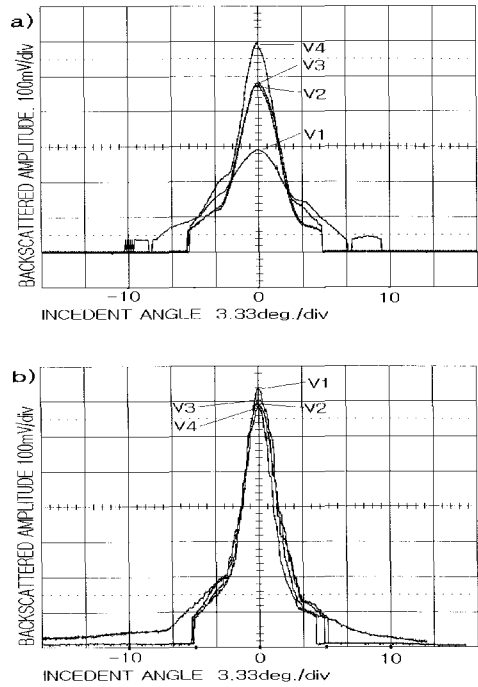


Fig. 3 Normal backscattering profiles: (a) unpainted and (b) painted

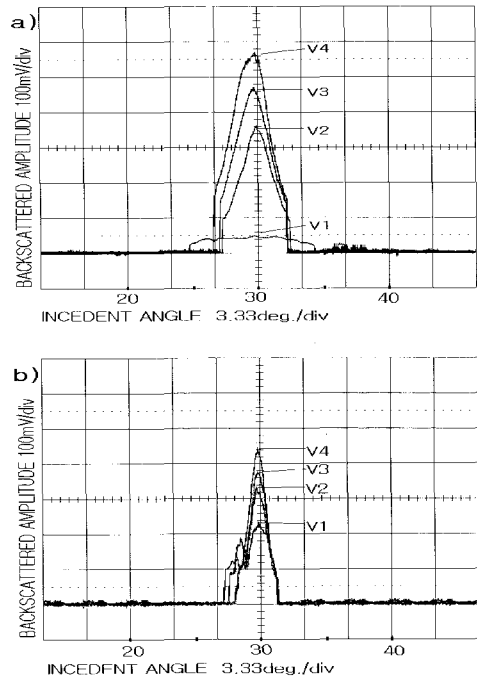


Fig. 4 Averaging backward radiation profiles: (a) unpainted and (b) painted

입계가 매우 균질하다는 증거이기도 하다. Fig. 5는 평균법에 의한 후방 복사 프로파일 정점세기의 거칠기 의존성과 도색 효과를 보여주고 있다. 도색전 작은 거칠기 영역에서 어느 정도 선형성을 유지하며 감소하던 의존성이 무너졌으나 거칠기 의존 경향은 남아있음을 알 수 있다. 평균법에서 도색처리하는 작은 거칠기 영역에서 거칠기 보다는 도색으로 형성된 다중 경계면과 지역적인 비균질성에 더 영향을 받게하는 것으로 생각되며 후방복사 프로파일도 도색전과는 다르게 조금 더 좁아지고 지역적인 특성에 의한 것으로 추정되는 작은 변화를 보여준다.

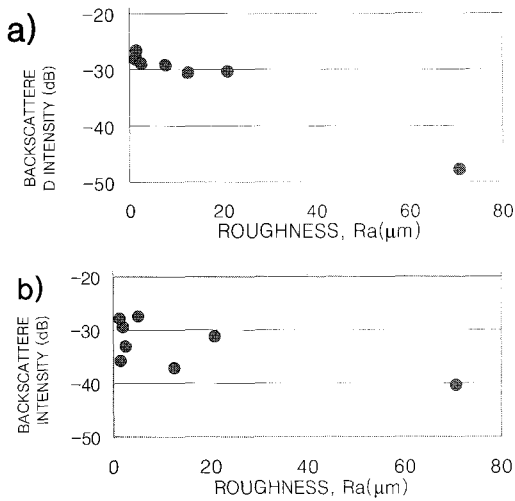


Fig. 5 Roughness dependence of averaged peak intensity : (a) unpainted and (b) painted

Fig. 6은 입사지역에서 발생된 표면파에 의한 직접법 후방복사 프로파일을 비교한 것이다. 평균법과 비교할 때 유사한 프로파일 패턴을 보여주고 있다. 도색 후 프로파일은 도색층에 의한 다중산란 효과와 지역적 특성차로 인해 프로파일의 패턴이 조금 복잡해졌음을 알 수 있다. Fig. 7은 평균법에 의한 후방 복사 프로파일 정점세기의 거칠기 의존성과 도색 효과를 보여주고 있다. 도색전 정점세기의 변화는 작은 거칠기 영역만 볼 때는 표면층 아래 미세구조의 영향이 상대적으로 커서 거칠기 의존성에 경향을 말하기 어려우나 전 영역으로 볼 때 거칠기 증가에 따라 정점세기가 증가하는 경향을 보여준다. 이 경향은 거친 표면일수록 입사 지역내 후방복사 현상의 앞 단계인 역 방향으로 진행되는 표면파로의 모드변환도 많아져 후방복사도 증가하

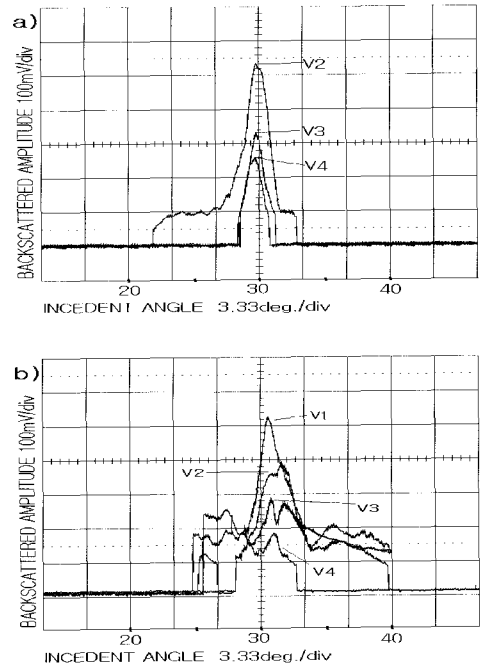


Fig. 6 Direct backward radiation profiles: (a) unpainted and (b) painted

는 것으로 설명된다. 다만 표면이 매우 거칠어지면 평탄 경계면 붕괴로 인한 표면파 발생의 감소로 인해 거칠기 의존성의 포화를 유발할 것으로 예상되나 실험에 사용된 시편의 거칠기 영역에서는 선형성이 유지되고 있다. 도색된 경우 작은 거칠기 영역에서는 여전히 정점세기가 거칠기에 비례하는 경향을 유지하고 있으나 $10 \mu\text{m}$ 정도에서부터 포화가 시작되어 표면거칠기가 $20 \mu\text{m}$ 이상일 때는 정점의 세기가 변하지 않는 포화현상을 보여준다. 이는 도색 경계면에서 거칠기가 증가할수록 입사빔 중심 방향은 레일리 각이지만 경계면에서 거친 표면에 의해 효율적으로 레일리 각으로 입사하는 초음파빔의 양이 줄어들어 물속 종파가 표면파로의 모드변환하는 효율의 감소하고 거칠기에 의한 산란에 의해 발생된 표면파가 역 방향진행 표면파로 모드변환하는 효율이 증가함으로 이 두요인의 평형으로 나타나는 경향으로 본다. Fig. 7 아래에 보여진 거칠기 의존성의 확대 그림을 볼 때 도색처리를 통해 0.03λ (레일리 파장) 보다 작은 거칠기 영역 (약 $18 \mu\text{m}$ 이하)에서 후방복사 세기가 거칠기에 대해서 민감하게 변함을 알 수 있다. 이 선형성의 관찰은 작은 거칠기 영역(0.03λ 이하)에서 도색층으로

인해 표면과 발생은 큰 변화 없이 같은 효율을 보여주는 반면 산란원 크기의 세제곱에 비례하는 초음파의 레일리 산란[18]에 의해 역 방향 진행 표면파의 급격한 증가와 동반된 후방복사 에너지의 증가로 설명된다. 압연재 연강에 상업적 열처리가 수행되어 시편내부가 비교적 균질할 것으로 추정되는 시편에서의 표면 거칠기 의존성에 관한 실험결과는 직접 후방복사법에서 도색처리를 활용한 거칠기의 평가 기법을 제안한다. 결과적으로 평균 후방복사 세기는 거칠기에 반비례하고 직접 후방복사 세기는 거칠기에 비례한다는 면에서 매우 대조적이다. 평균법은 표면과 왕복 진행 구간의 평균 특성 평가 그리고 직접법은 초음파 입사지역의 특성 평가라는 점에서 구별되며 도색은 직접법에서는 거칠기 의존성을 부각시키고 평균법에서는 거칠기 효과를 제거하는 효과를 보여준다고 할 수 있다.

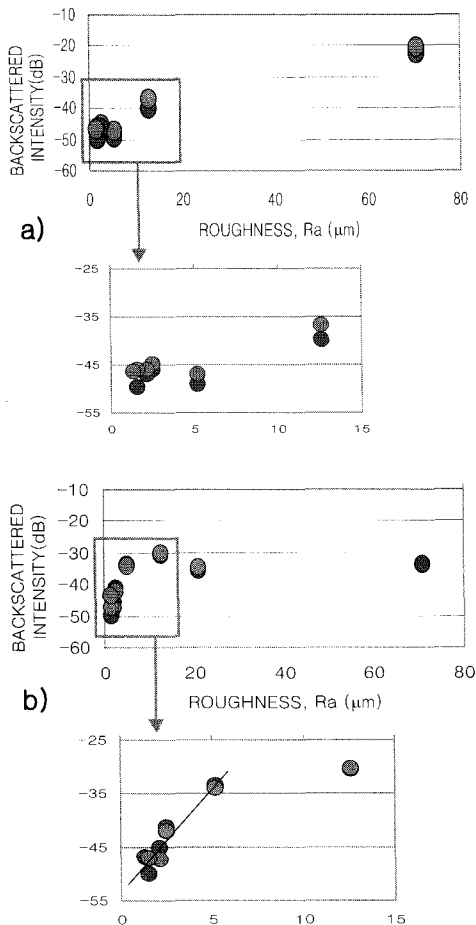


Fig. 7 Roughness dependence of direct peak intensity: (a) unpainted and (b) painted

4. 비정상적 저면(back relection) 다중반사 파열

Fig. 8은 73 μm의 거칠기와 514 μm의 공간적 주기를 가진 철 시편의 수직 입사때 18 mm의 두께 방향으로의 저면 다중반사에 의한 도색전과 도색후의 파열 그림이다. Fig. 8(a)의 도색전 파열을 볼 때 도색후의 정상적인 저면 다중반사 파열과는 다르게 급격한 감쇠가 나타나며 반사세기가 교차되는 형태를 보여주고 있다. 평탄한 표면의 시편에서 나타나지 않는 비정상적 반사 파열은 펄스-에코 방식에 의한 속도 측정과 감쇠지수 측정에 심각한 오류를 유발할 수 있으며 상대적으로 작은 거칠기 표면에서도 작으나마 이런 유사한 비정상적 측정 오류가 나타날 수 있으므로 매우 심각한 문제이며 최근 Guo 등[19]에 의해서도 주기적으로 거친 표면에서의 경계면 모드변환에 의한 측정오류의 문제점이 제기되었다.

도색전 시편에서 수직으로 입사하는 초음파 빔은 거시적으로 볼 때 평균입사각이 0°이나 미시적으로 초음파선(ray)으로 Fig. 9에서 설명된 것과 같이 미시적 경계면에 약 16°의 유효 입사각(effective incident angle)으로 입사한다고 볼 수 있다. 이 경우 Fig. 10에 보여진 물-철 경계면에서 종파가 입사할 때 굴절 종파 및 횡파의 전달률에 관한 그래프를 볼 때 추정된 효과적인 입사각 주변은 고체내 굴절 종파가 급격히 감소하거나 전반사하는 제 1 임계각 근처(약 15°)이며 동시에 횡파의 굴절율이 급격히 증가하는 영역이기도 하다. 거시적으로 수직하게 입사한 종파 빔이 미시적으로 효과적인 입사각에 의해 철 시편 내에서 종파와 횡파로 굴절되고 대부분의 에너지가 횡파로 모드변환 된다면 Fig. 8과 같이 종파에 의한 다중반사는 급격히 감소하고 속도가 약 절반인 횡파는 보다 큰 에너지로 두 배의 시간지연을 보이며 다중 반사되어 종파 파열들과 짝수 번으로 중첩되는 비정상적 파열을 보일 것이다.

Fig. 8(b)의 거친 표면을 도색 처리한 후 측정된 저면 다중반사 파열은 도색전의 비정상적 형태를 제거하고 종파에 의해 주도된 지수적인 감쇠의 파열을 보여준다. 따라서 거친 표면의 도색은 속도 측정과 감쇠지수 측정에서 나타날 수 있는 측정 오류를 방지하는 역할을 하였으며 거친 표면이 초음파 측정에서 오류를 유발할 가능성이 있는 경우 쉽게 제거될 수 있는 수용성 도료를 이용한 인위적이고 임시적인 도색을 통해 이를 극복하고 측정의 신뢰도를 높이는 새로운 측정방법이 가능할 것으로 본다.

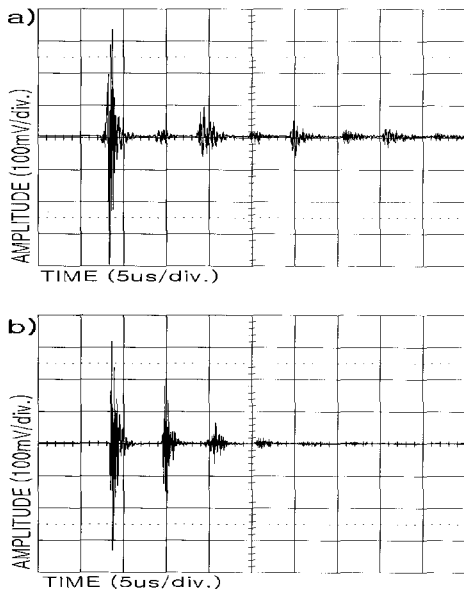


Fig. 8 Multiple back reflected wave signals of V1 specimen with $R_a = 73 \mu\text{m}$ and $S_m = 514 \mu\text{m}$ surface roughness shown in Fig. 2: (a) unpainted and (b) painted

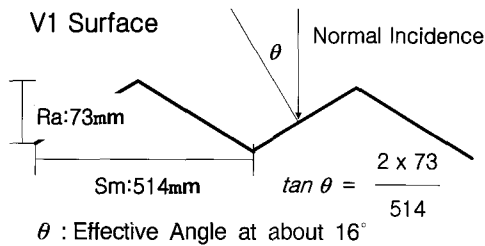


Fig. 9 Schematic illustration of effective incident angle

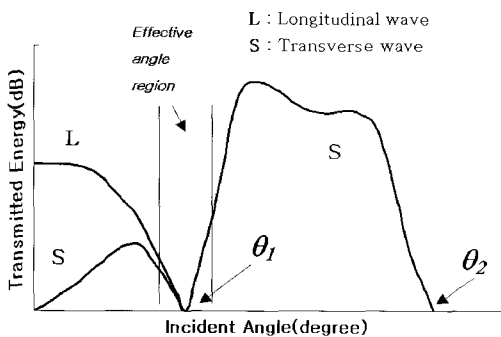


Fig. 10 Transmission coefficients for incidence of a plane wave from water to steel half-space (θ_1 and θ_2 are the 1st and the 2nd critical angles, respectively.)

7. 결 론

1-70 μm 범위의 주기적 표면 거칠기와 100-500 μm 의 주기성을 가진 철 시편과 60-80 μm 의 도색을 통해 거칠기가 가려진 시편에 대해 수직 및 후방복사 프로파일이 측정되었다. 수직 프로파일은 도색에 의해 시각적으로 사라진 표면 거칠기처럼 거칠기에 대한 의존성이 사라졌으나 레일리 각 근처에서 직접 후방복사된 프로파일과 구석반사에 의해 후방으로 진행되는 레일리 표면파로부터의 평균 후방복사 프로파일은 그 패턴과 세기에서 변화는 있었으나 거칠기에 대한 의존 경향은 유지되었다. 도색효과로 레일리각 직접 복사의 경우 거칠기가 0.03 파장보다 작은 영역에서도 거칠기에 대한 후방복사 정점세기 변화의 선형성이 관찰되었다. 매우 거친 표면(약 70 μm)에서 보여진 저면 다중반사의 비정상적 파열은 유효 입사각 변화에 의한 모드 변환으로 설명되었고 도색처리에 의해 정상적 파열이 획득되었다. 도색이 초음파를 이용한 거칠기 평가의 선형성을 향상시키거나 거친 표면에 의한 변형된 파열의 측정을 방지할 수 있음이 확인되어 거친 표면을 가진 시편에 대한 초음파 평가에서 제거가 가능한 도료로 인위적인 도색을 하여 신뢰성을 향상시키는 것이 가능함을 보여주었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (R05-2001-000-00086-0) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] Michel de Billy, Frederic Cohen-Tenoudji, Alain Jungmam, Gerard J. Quentin, "Possibility of assigning a signature to rough surfaces using ultrasonic backscattering diagrams", IEEE Trans Sonics Ultrason, Vol. Su-23, Issue 5, pp. 356-363 (1976)
- [2] Edward H. Chiang, Charles R. Meyer, Ronald S. Adler, Timothy J. Laing, Dale K. Debrick. and Jonathan M. Rubin, "Assessment of cylindrically curved rough surfaces using backscattered ultrasound", Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium, Vol. 2, pp. 977-980 (1993)

- [3] Scott A. Coker, Sung J. Oh, Ying C. Shin, "In-process monitoring of surface roughness utilizing ultrasound", *Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 68 No. 1, pp. 145-154 (1994)
- [4] M. Bilgen, J. H. Rose, "Acoustic backscatter from materials with rough surfaces and finite size microstructure: Theory", *JASA*, Vol. 101, Issue 1, pp. 264-271 (1997)
- [5] Bryan Bridge, Z. Tahir, "Omnidirectional scattering of 4-20 MHz ultrasound from randomly rough-machined aluminum surfaces", *British Journal of Non-Destructive Testing*, vol. 31, Issue 6, pp. 322-326 (1989)
- [6] S. Sasaki, "Back reflection of ultrasonic obliquely incident to solid surface in water", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 2, p. 198 (1963)
- [7] Ho Chul Kim, Jeong Ki Lee, Sang Young Kim and Sung Duk 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)
- [8] S. D. Kwon and H. C. Kim, "The back reflection of an ultrasonic beam with Gaussian profile at the liquid/solid interface", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 78, pp. 1384-1386 (1985)
- [9] P. B. Nagy and L. Adler, "Increased incoherent backscattering from a liquid-solid interface at the Rayleigh angle", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 96, Issue 4, pp. 2545-2637 (1994)
- [10] 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.*, Vol. 85, Issue 3, pp. 1355-1357 (1989)
- [11] Sung D. Kwon, Myoung S. Choi and Seung H. Lee, "The applications of ultrasonic backward radiation from a layered substrate submerged in liquid", *NDT & E International*, Vol. 33, Issue 5, pp. 275-281 (2000)
- [12] Sung D. Kwon, Sung J. Song, Dong H. Bae and Young 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)
- [13] S. J. Song, Y. H. Kim, D. H. Bae, M. H. Jung and S. D. Kwon, "Development of ultrasonic backward radiation testing system and its application to the evaluation of corrosion degradation of turbine blade materials" in p-11 of Poster I in AMDP 2002 CD material, 2002.10.16-19, GS Plaza, Daegu, Korea
- [14] 권성덕, 윤석수, 송성진, 배동호, "후방복사된 초음파를 이용한 12Cr강 부식 피로특성 평가", *비파괴검사학회지*, Vol. 20, No. 5, pp. 397-401 (2000)
- [15] 권성덕, 윤석수, 송성진, 이영제, "표면탄성파를 이용한 마모 표면부의 평가", *비파괴검사학회지*, Vol. 22, No. 2, pp. 193-197 (2002)
- [16] 권성덕, 이승희, "Ultrasonic Backscattering at the Rayleigh Angle on Water-Rough Glass Boundary", *계명대학교 기초과학 연구논문 제7집 제2호*, pp. 207-209 (1988)
- [17] Michel de Billy and Gerard J. Quentin, "Backscattering of acoustic waves by randomly rough surfaces of elastic solids immersed in water", *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 72, No. 2 (1982)
- [18] Emmanuel P. Papadakis, "Revised grain-scattering formulas and tables", *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 37, No. 4 pp. 703-710 (1965)
- [19] Y. Guo, F. J. Margetan, and B. R. Thompson, "Effects of periodic surface roughness on ultrasonic backscattered noise", in *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation* Vol. 20, pp. 1306-1313, edited by D. O. Thompson and D. E. Chimenti, Plenum Press, New York, (2001)