

표면탄성파를 이용한 마모 표면부의 평가

Evaluation of Abrasive Wear Face Using SAW

권성덕*[†], 윤석수*, 송성진**, 이영재**

Sung D. Kwon*[†], Seok S. Yoon*, Sung J. Song** and Young Z. Lee**

초 록 레일리(Rayleigh) 표면탄성파의 속도와 산란의 주파수 의존성을 이용하여 마모로 인해 열화된 AISI 1045강 시편의 깊이방향 잔류응력 분포(열화 가공기)의 비파괴적인 평가가 시도되었다. 액체/고체 경계면에 초음파가 특정각도로 입사할 때 발생한 표면탄성파의 산란과 복사로 인해 나타나는 후방복사 프로파일의 오른쪽 반치폭과 크기 그리고 발생각으로 잔류응력 분포의 해석도 가능하였으며 평균법에 의한 복사파의 세기 및 스펙트럼의 변화는 잔류응력 분포와 열화로 인해 발생한 미세 결합 밀도과의 연관성을 보여주었다.

주요용어: 표면탄성파, 후방복사, 잔류응력 분포, 미세결함

Abstract The frequency dependency of the Rayleigh surface wave was investigated indirectly by measuring the angular dependency of the backward radiation of the incident ultrasonic wave in the abrasion specimens, which was explained in view of the residual stress distribution. The peak intensity of the backward radiation profile decreased and the right half width of the profile increased with an increase of the variational rate of residual stress for the scuffing specimen. The peak intensity was also affected by the surface wave scattering during the propagation around the micro-damages. The peak angle might depend on not only the amount of residual stress but also the micro-structure. The result observed in this study demonstrates the high potential of the backward radiated ultrasound as a tool for the nondestructive evaluation of the subsurface gradients of materials.

Keywords: SAW, backward radiation, residual stress distribution, micro-defect

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(gradient)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 발생한 표면파의 산란과 에너지 누수로 인해 입사한 방향으로 상당량의 가간섭성 초음파가 되돌아오는 후방복사가 발생한다[4]. 최근 이 후방복사를 이용한 시편 표면지역의 미세구조에 대한 연구가 있었고[5] 광대역의 초음파를 사용하여 후방복사된 초음파의 입사각 의존성으로부터 부분적인 표면파 속도의 주파수 의존성의 평가가 시도되었다[6].

윤활 상태에서 미끄럼운동을 하는 기계요소는 대부분 경계윤활(Boundary Lubrication) 조건에서 작동하게 된다. 이러한 기계요소의 표면은 마멸에 의해 점차적으로 손상을 받을 뿐만 아니라 스커핑(scuffing)이라 하는 예상하기 어려운 표면파괴가 발생한다. 스커핑은 미끄럼 표면의 갑작스런 파괴형태를 말하는데, 일반적으로 마찰력의 증가와 표면이 거칠어지는 현상을 수반한다[7]. 이러한 표면파괴 현상은 길들이기(break-in) 과정에 의해 억제할 수 있는데 길들이기(break-in)란 가공된 새로운 표면에 부하지지능력을 향상시키기 위해 저하중과 저속에서 일정 시간 미끄럼운동을 수행하는 것으로 길들이기된 표면은 고하중과 고속에서도 표면이 파괴되지 않고 수명이 연장된다. 이는 미끄럼 면이 서로 적용하여 부가되는 고하중을 감당하기 좋은 상태로 바뀌기 때문으로 최고 20배 정도의 수명연장 효과를 가져오는 것으로 알려져 있다[8]. 표면파괴의 원인에 대해서는 재료표면의 변화와 보호막의 효과와 같은 표면에 관련된 현상으로 생각하는 것이 일반적이었다[7-9]. 하지만, 최근에 윤활유를 사용하지 않은 미끄럼 상황에서 표면 상호작용이 크고 그 영향이 표면아래 상당한 깊이까지 미치기 때문에 표면파괴에 이르는 과정은 표면아래의 잔류응력 분포까지 고려해야 한다는 이론이 제시되고있다[10].

본 실험에서는 여러 하중과 반복 횟수로 미끄럼 실험이 수행된 AISI 1045 강 마모시편에 대해 후방복사 프로파일의 정점각, 세기, 폭 그리고 복사파의 스펙트럼 등을 측정하고 X선 회절법으로 측정된 잔류응력 분포와의 연관성을 조사하여 마모시편의 잔류응력 분포, 미세구조 그리고 미세결함의 변화과정을 평가할 수 있는 비파괴적 기술의 개발을 시도한다.

2. 실험

마모시편으로는 지름 60mm, 두께 9mm의 AISI 1045 강 원형디스크를 이용하였으며, 이의 상대재로서 길이 6mm, 지름 6mm의 AISI 52100 강 원주를 사용하였다. 이들이 평유 속에 완전히 잠긴 상태에서 “cylinder-on-disk” 형태의 반복 미끄럼실험을 수행하였으며 이때 상대재 원주는 회전이동이나 평행운동이 없이 완전 고정된 상태였다.(Fig. 1) 미끄럼 실험조건은 Table 1과 같다. X선 회절 잔류응력 측정기를 사용하여 길이별 잔류응력을 약 5µm 간격으로 측정하였다. 편의상 스커핑이라는 표면파손(Failed)에 이르기 위해 수행된 미끄럼 반복실험을 스커핑이라 부른다. 후방산란 실험에 사용된 시편중 A는 길들이

기한 후(with break-in) 1360 사이클의 스커핑을 한 시편이며 B는 길들이기 한 후(with break-in) 10880 사이클의 스커핑으로 파손발생(Failed)이 막 시작한 시편 그리고 C는 길들이기를 하지 않고(without break-in) 1360 사이클의 스커핑으로 파손발생(Failed)이 시작된 시편이다.

입사각이 등각속도로 변하는 초음파 각도계 시스템을 사용하여 물속에 담겨진 시편에 대한 후방복사의 입사각 의존성을 측정하였다. 4.7MHz 중심의 광대역 초음파가 입사되었고 마모시편에 대해서 마모지역을 왕복하여 돌아온 평균편이 사용되었다. Fig. 2는 평균법과 초음파 측정 시스템의 구역그림이다.

Table 1 Normal load history used for scuffing test and break-in process

	Rotating speed	Normal Load		
		Initial	Increase rate	Final
Break-in	93 rpm	100N	50N/10min	200N
Scuffing	136 rpm	730N		

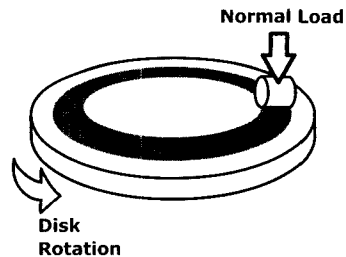


Fig. 1 Cylinder-on-disk type friction test

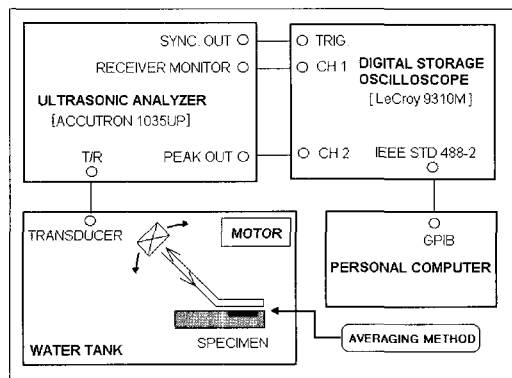


Fig. 2 Schematic measurement system of ultrasonic backscattering by an averaging method

3. 결과 및 논의

Fig. 3은 마모시편의 레일리 각 근처에서의 후방산란 프로파일을 나타내고 있다. 전반부의 후방산란 프로파일은 시편의 종류와 관계없이 구분이 쉽지 않은 매우 유사한 프로파일을 보여주어 시편 모양에 의한 따른 변화로 생각된다. 중반부에 나타난 표면파와 관련된 후방복사 프로파일은 시편에 따라 크기와 폭에서 확실하게 다른 프로파일을 보여주며 길들인후 1360 사이클의 시편 A, 길들인후 10880 사이클의 시편 B, 1360 사이클의 시편 C 순으로 후방복사 정점각에서의 세기는 감소했다. 후방복사 프로파일 이론[6]에 따르면 주파수에 따라 표면파 속도의 변화율이 클수록 후방복사가 발생하는 각도 영역은 넓어지게 되어 후방복사 폭은 증가한다. 이때 주파수의존 곡선에 대응되는 주파수 성분들이 넓어진 복사 발생 폭 범위내에서 에너지 재분배와 함께 정점의 세기가 작아져 후방복사 폭과 세기는 반비례 관계를 가진다. 따라서 정점각에서 후방복사 세기는 주파수 의존곡선의 변화율을 반영하며 작은 세기는 더 큰 주파수 의존성의 변화를 의미한다. 한편 후방복사는 무작위 후방산란파의 에너지 보다 더 클 때만이 측정가능하며 후방복사 정점의 세기는 무작위 후방산란파의 세기 비 약 10dB 내외로 알려져 있다. 에너지 재분배로 인해 작아진 후방복사의 일부 분은 산란효과에 의해 묻혀지므로 주파수 의존 곡선의 변화율에만 의존하는 순수 후방복사의 폭은 주어진 주파

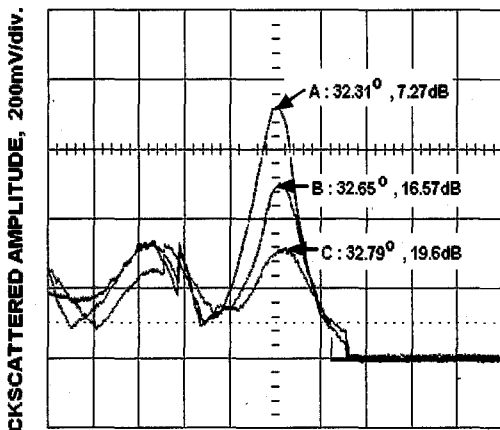


Fig. 3 Comparison of backward radiations of scuffing specimens(A: After 1360 cycles with break-in, B: After 10880 cycles with break-in) C: After 1360 cycles

수 영역, Δf 당 표면파가 발생하는 입사각의 범위, $\Delta \theta$ 인 주파수 폭 밀도, $\frac{\Delta \theta}{\Delta f}$ 가 고려되어야 하나 본 연구에서는 횡파의 산란효과에 의해 영향을 많이 받는 왼쪽 영역[11]을 제외하고 비교적 산란효과가 작은 오른쪽 프로파일의 크기가 정점크기의 반에서의 폭인 오른쪽 반치 폭(Half Width)을 후방복사의 폭으로 사용하였다.

Fig. 4에 보여진 X선 회절을 이용한 깊이방향으로의 잔류응력 분포를 보면 깊이방향으로 잔류응력 변화가 가장 심한 것이 시편 C이며 시편 B, 시편 A의 순으로 변화가 작다. Fig. 5에는 각 시편에서 측정된 후방복사 정점

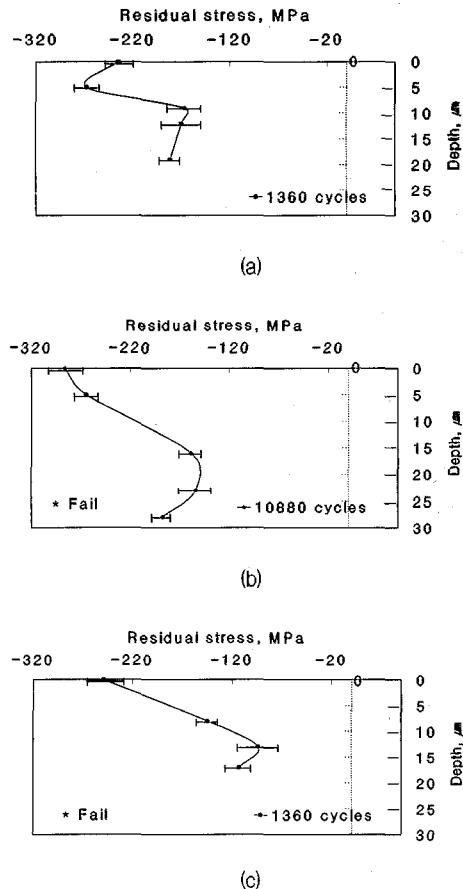


Fig. 4 Residual stress distribution, (a) Specimen 1360 cycles with break-in, (b) Specimen B after 10880 cycles with break-in, Failed, (c) Specimen C after 1360 cycles without break-in, Failed

세기와 오른쪽 반치폭이 그려져 있다. 여기서 y 축의 dB값은 수직입사때 반사된 신호의 세기에 대해 규격화된 값이다. 예상대로 세기와 반치폭은 반비례함을 보여주며 잔류응력 변화가 가장 심한 시편 C의 반치폭이 상대적으로 크게 그리고 세기는 작게 나타났다. 깊이방향 물성변화에 따른 표면과 속도의 주파수의존 곡선 변화에 관한 섭동이론[3]에 따르면 물성변화가 급격하게 변할수록 주파수 의존 곡선도 변화가 심해지는데 Fig. 5의 결과는 잔류응력 분포의 변화가 큰 순서대로 후방복사의 발생 각도영역이 증가하고 세기가 감소하고 있어 그 경향이 이론과 정성적으로 일치한다. Fig. 5에서 반치폭의 변화에 비해 세기의 변화가 더 큰 것은 후방복사의 세기에 영향을 주는 요인으로 표면과 속도의 주파수 의존성뿐 아니라 표면과 진행동안 산란에 의해 발생된 스펙트럼 변화도 고려되어야 함을 의미한다. 실제, 평균법에 의한 후방복사파의 주파수 스펙트럼을 보면 고주파 성분의 유실에 의한 중심 주파수의 이동이 나타나는데[11], Fig. 5의 결과는 스키퍼링 발생한 시편 B와 C에서 이러한 현상이 상대적으로 심하게 발생함을 의미한다. 따라서 잔류응력의 양 보다는 잔류응력 분포의 변화가 큰 시편일수록 산란을 일으키는 미세 결함의 밀도가 증가하며 레일리 산란으로 인한 고주파수 성분의 유실이 후방복사 세기의 추가적인 감소 요인이 되는 것으로 생각된다. 길들이기를 한 경우 열악한 마모조건하에서도 파괴가 쉽게 일어나지 않아 수명이 길어짐이 밝혀져 있고[8] Fig. 4에서 길들인 시편 A의 잔류응력 분포는 같은 마모조건인 시편 C 보다 잔류응력 변화가 작게 나타났다. 따라서 잔류응력 분포의 변화와 연관된 후방복사 프로파일의 측정으로 마모제품의 수명 평가가 가능하다고 할 수 있다.

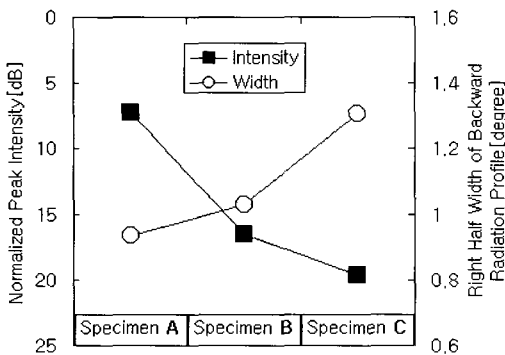


Fig. 5 Comparison between the peak intensity and half width of the backward radiation

Fig. 3에 표시되어 있는 후방복사 정점각을 스넬의 법칙에 적용하면 최대 에너지를 가진 표면파의 속도가 계산된다[4]. 작은 각은 더 큰 속도를 의미하며 측정된 표면과 속도는 시편 A가 가장 크고, 시편 B 그리고 시편 C 순서로 속도가 감소하는 것으로 나타났다. 측정된 정점각으로부터 계산된 속도는 각각 2770m/s, 2744m/s 그리고 2735m/s 이며 속도변화율은 약 1%에 해당된다. Fig. 4의 응력분포를 보면 이 순서는 잔류응력 분포의 깊이방향 변화가 증가하는 순서이기도 하지만 표면지역에 내재되어 있는 총 잔류응력의 양에 비례하여 가장 적은 양의 잔류응력을 가진 시편 C에서 가장 작은 속도값을 보임을 알 수 있다. 이는 잔류응력의 양이 표면과 속도에 영향을 주며 미세구조의 변화가 없다는 가정하에 즉 같은 탄성계수의 조건에서 압축 잔류응력만의 변화가 표면과 속도에 선형적으로 비례관계를 보여주는 연구결과[12]와도 정성적으로 일치한다. 그러나 잔류응력만의 변화만을 고려할 때 100MPa당 0.01%의 속도 변화율에 영향을 미친다는 이전의 연구 결과[12]와는 정량적으로는 약 100배의 차이로 속도 변화가 더 크게 나타났다. 이는 후방복사 정점각에 의한 표면과 속도 측정이 내재된 잔류응력의 양을 평가하는데 매우 민감함을 보여주는 증거이기도 하지만 한편으로는 속도에 영향을 미치는 요인으로 잔류응력뿐 아니라 동반되는 소성변형이나 미세결함 밀도의 변화에 의한 미세구조의 변화도 고려되어야 한다는 것을 의미한다.

$$v - v_0 = -v_0 H(\mu, \lambda, l, m, n) \sigma \tag{1}$$

여기서 v_0 와 v 는 각기 응력을 받지 않은 시편과 잔류응력이 내재된 시편에서의 표면과 속도이다. σ 는 압축 잔류응력이며 H 는 단위 응력당 속도의 변화율이다. μ, λ 는 라메(Lame)상수들이며 l, m, n 는 무나한(Murnahan) 상수들이다.

후방복사 정점각에 의한 표면과 속도 측정값은 표면과 속도의 주파수 의존성이 있는 매질에서는 반사율 측정법에 의한 속도와는 다르게 나타나며, 유한 너비와 펄스형태 표면과 빔이 전파될 때에 군속도와 산란에 의해 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있다[13]. 즉, 후방복사 정점각에 의해 계산된 속도값은 표면과 속도의 주파수 의존 특성과 산란으로 인한 주파수 성분에 영향을 미치는 소성변형이나 미세결함 밀도 등 여러 요인에 의해 복합적으로 영향을 받을 것으로 생각된다. 따라서 잔류응력의 표면과 속도

에 미치는 영향에 관한 이론과의 100배에 이르는 민감도의 증가는 (1) 잔류응력의 양, (2) 소성변형이나 미세결함 등에 의한 미세구조의 변화, (3) 잔류응력 분포에 의한 주파수 의존 특성, (4) 평균법에 의해 마모지역을 왕복하여 돌아오는 표면파의 산란으로 인한 주파수 성분의 변화등이 결합된 결과로 생각된다. 앞으로 후방복사 정점각에 미치는 영향에 대한 연구가 좀 더 필요하나 현재로는 정점각에 미치는 요인들의 비중을 구별할 수 없으며 결국 다른 요인들도 마모가 심해짐에 따라 커지는 잔류응력의 변화와 동반되어 발생된다는 의미에서 후방복사의 정점각은 압축 잔류응력 양의 간접적인 측정수단이 될 수도 있을 것이다. 시편 A와 시편 B의 잔류응력 양이 큰 차가 보이지 않음에도 속도값의 차가 상대적으로 큰 것은 시편 B가 시편 A와는 같은 길들여진 시편이지만 10배에 달하는 반복 마모 횟수로 인해 미세구조의 큰 변화를 겪었기 때문으로 생각된다. 식 (1)에 보여진 이론 적용에 있어 변화된 미세구조를 감안하여 다른 비례상수를 적용하거나 같은 비례상수 즉 같은 미세구조를 가진 것으로 여겨지는 시편들 사이의 비교를 통해 잔류응력과 속도값의 연관성을 논의해야 할 것이다.

4. 결 론

마모된 마찰로 인한 열화 과정에서 깊이 방향으로의 잔류응력 분포는 스키핑이라는 표면파과의 예측에 매우 중요하며 잔류응력 분포의 간접 평가인 후방복사의 발생영역이 커질수록 그리고 세기가 감소할수록 그 가능성은 높아진다고 할수 있다. 평균법에 의한 후방복사의 정점각은 잔류응력의 양과 연관된 이론보다는 매우 큰 민감도를 보여 주어 정점각에 미치는 영향에 관한 연구의 필요성과 함께 높은 응용 가능성을 보여 주었다. 표면파 속도의 주파수 의존성 정보를 가지고 있는 후방복사 프로파일의 반치폭과 정점의 세기는 잔류응력의 평가뿐 아니라 열화두께 그리고 부식강도 등 표면지역의 깊이에 따른 물성변화 (gradients)의 비파괴적 평가에 매우 유용할 것으로 본다.

후 기

본 연구는 성균관대학교 산업설비안전성평가 연구센터의 연구비 지원에 의해 이루어진 것으로 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

[1] I. A. Viktorov, Rayleigh and Lamb waves, Plenum Press, New York, (1967)
 [2] T.L.Szabo, J.Appl.Phys. 46(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 beam at liquid-solid interfaces," J. Appl. Phys., 2, pp.157-172, (1973)
 [5] 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)
 [6] 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)
 [7] K. T. Kim and K. C Ludema, "A correlation between low cycle fatigue properties and scuffing properties of 4340 steel," ASME J. of Tribology, Vol. 117, pp. 617-621, (1995)
 [8] Y.Z.Lee and K. C Ludema, "The shared load wear model in lubricated sliding: scuffing criteria and wear coefficient", Wear, Vol. 138, pp. 13-19, (1990)
 [9] S. C. Lee and H. S. Cheng, "Correlation of scuffing experiments with EHL analysis of rough surfaces," ASME Journal of Tribology, Vol.113, pp.318-326, (1991)
 [10] T. Sheiretov, H. Yoon and C. Cusano, "Scuffing under dry sliding conditions - part I: Experimental studies", Tribology Transaction, vol. 41, pp.435- 446, (1998)
 [11] 권성덕, 윤석수, 송성진, 배동호, "후방복사된 초음파를 이용한 12Cr강 부식 피로특성 평가" 비파괴검사학회지, Vol. 20, No. 5, pp. 397-401, (2000)
 [12] G. J. Curtis, Chapter 8, Ultrasonic Testing Edited by J. Szilard, 1982 John Wiley & Sons Ltd.
 [13] 권성덕, 윤석수, 이승희, "주파수 의존성이 표면탄성파의 속도 결정에 미치는 영향" 비파괴검사학회지, Vol. 19, No. 5, pp. 340-346, (1999)