

초음파를 이용한 마멸표면 평가

안효석 · 김두인

한국과학기술연구원 트라이볼로지연구센터

Ultrasonic Evaluation of Worn Surface

Hyo-Sok Ahn and Doo-In Kim

Tribology Research Center, Korea Institute of Science and Technology

Abstract – The feasibility of an ultrasonic technique using a pulse-echo method of normal-incident compressional waves was evaluated for its sensitivity to the worn surface and near surface damage due to wear. Worn surfaces were generated at various oscillation frequency under a given load and amplitude and these surface were in situ monitored using a ultrasonic wave detection system. Analysis of the ultrasonic waves received from the worn surface revealed a close relationship between the surface and near-surface damage and the maximum echo-amplitude of the compressional waves. The ultrasonic technique was successful in assessing the level of severity of the worn surface in real time during the wear process. It is also shown that the wear depth can be easily measured by the calculation of change of the specimen thickness based on the wave speed measured for the specimen medium.

Key words – ultrasonic compressional waves, worn surface, surface damage, wear test.

1. 서 론

마찰·마멸 실험장치를 이용한 일반적인 마멸실험에서 시험 시편의 실시간 마멸량, 마멸면의 상태를 관찰하기 어렵다. 시편의 상태를 관찰하기 위하여 실험 장치를 정지하여 시편의 상태를 관찰하고 다시 실험을 계속하는 반복과정을 통하여 시편의 변화를 단속적으로 관찰할 수는 있으나 이 경우 실험 재개 때마다 접촉조건이 변화하여 마찰 및 마멸현상의 변화가 유발될 가능성을 배제할 수 없어 마멸상태의 정확한 진단을 위해서는 주의가 요구된다. 본 논문에서는 이러한 실험의 중지 없이 비파괴검사 방법중의 하나인 초음파를 이용해 실시간에 마멸 표면을 평가하는 방법을 제시하였다.

초음파는 전파 매질내의 일반적인 크기의 결함, 균열 등을 탐상하기 위한 비파괴 검사법으로 널리 사용되고 있으나 근래에 들어 50 MHz 이상의 높은 공진주파수의 초음파 센서를 이용하여 압입(indentation test)에 의한 재료 내부의 미세균열(microcrack)과 소

성변형부를 탐지하는 연구가 보고된 바 있고[1,2] 저널 베어링의 화이트메탈(white metal) 층의 응착마멸 현상, 마멸두께와 와이핑(wiping) 파손을 실시간에 검지하기 위해 초음파 기술을 적용한 연구결과가 보고되었다[3]. Takeuchi 등[4]은 초음파를 이용하여 실제 접촉 면적과 초음파의 신호사이의 관계를 관찰하였으며 Long 등[5]은 초음파를 이용하여 마멸면에서의 변형 등에 관한 기초연구를 실시하였다.

본 연구에서는 미끄럼 속도의 변화에 따른 마찰계수와 마멸면의 상태변화를 초음파 신호의 변화를 통해 비교 관찰하고자 하였다.

2. 실험 장치 및 시편

본 실험에 적용한 초음파 해석은 Fig. 1(a)에서 보는 바와 같이 일반적으로 의료진단, 결함탐상, 두께측정 등에 사용되는 pulse-echo 방법[6-8]에 의거해 반사파의 최대 진폭치를 측정하여 수행하였다. 플레이트 시편에 설치된 초음파 송수신 센서에서 발진한 초

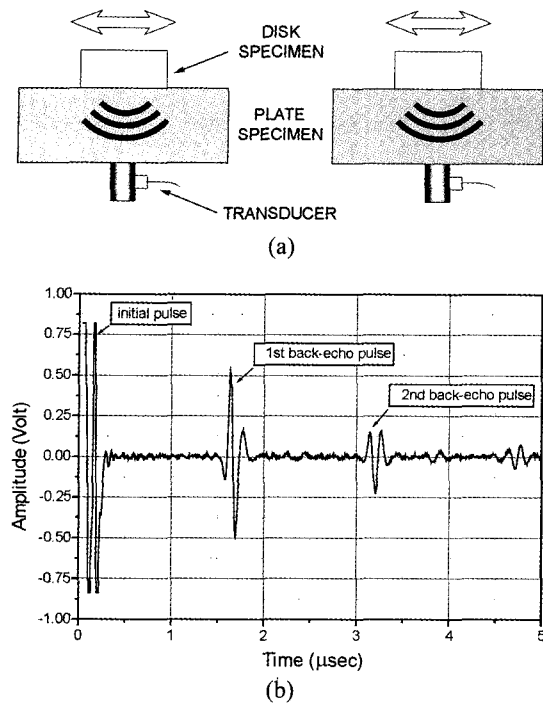


Fig. 1. Illustration of the pulse-echo ultrasonic method.

음파는 Fig. 1(b)에 보인 수신파형도와 같이 플레이트 시편을 통하여 전달된 후 플레이트 시편과 디스크 시편의 경계면에서 반사되어 첫 번째 반사파로 수신된다. 본 실험에 사용된 마멸시험기는 Plint & Partners사에서 제작한 고온 왕복동마멸시험기인 TE77이다. Fig. 2와 같이 고정되어 있는 플레이트 시편의 윗면에 디스크 시편이 놓여있고 디스크 시편의 원추

형 홈에 닿아 있는 편에 의해 하중이 전달되며 모터로부터 발생한 회전운동이 캠을 통하여 디스크의 왕복운동으로 변환된다. DC 모터의 속도 조절로 왕복운동의 진동수를 임의로 조절할 수 있다. 마찰·마멸 시험과 동시에 마멸면에서의 초음파 신호를 얻기 위하여 플레이트를 고정하는 컨테이너에 초음파 송수신용 센서(transducer)를 장착하였으며 이를 위하여 플레이트와 센서가 접촉할 수 있도록 지지대를 설치하였다. 센서는 플레이트 시편의 중앙부 뒷면에 위치시켜 미끄럼 접촉에 의해 발생하는 마멸트랙의 중앙부위에 대한 초음파 특성을 조사할 수 있도록 하였으며 플레이트 면과 최대한 밀착할 수 있도록 설치되었다. 이때 플레이트 시편과 센서의 경계면에서의 원활한 전파를 위한 커플런트로 상용 바셀린(Vaseline[®])을 사용하였다. 본 실험에 사용한 초음파 센서는 직경 6.4 mm, 발진주파수 20 MHz인 파나메트릭스사(PANAMETRICS) 제품인 V222 접촉형 센서이다. 초음파 신호 발진 및 수신을 위해 파나메트릭스사의 PULSER/RECEIVER MODEL 5073PR을 사용하였고, 수신된 초음파 신호의 수집 및 변환을 위하여 르크로이(Lecroy)사의 9450A 오실로스코프를 사용하였으며 GPIB를 사용하여 데이터를 컴퓨터에 저장하였다.

실험에 사용된 디스크 시편은 SS400강을 사용하였으며 플레이트 시편은 보론주철을 사용하였다. 시편의 표면 거칠기는 초기 마멸에 민감한 영향을 미치므로 모든 시편의 표면 거칠기를 약 0.2~0.3 μmRa 로 조정하였다. 각 시편의 모양은 Fig. 3과 같다.

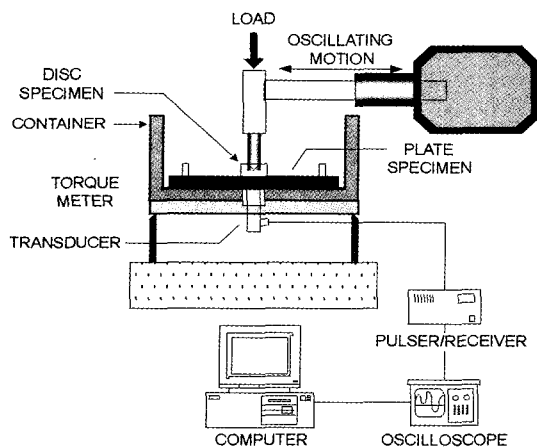


Fig. 2. Schematic diagram of the in situ ultrasonic measurement during reciprocating sliding wear process.

3. 실험 방법

본 실험은 실험실 분위기하에서 건조마찰 실험을

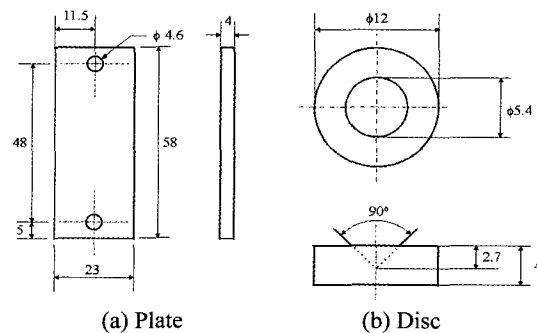


Fig. 3. Test specimens (units in millimeter).

실시하였으며 준비된 시편은 초음파 세척을 실시한 후 실험장치에 장착되었다. 본 실험에서의 수직하중은 150 N으로 일정하게 하였으며 실험시간은 최대 300초까지 실시하였고 진폭 15 mm하에 왕복 주파수는 2, 10, 20 Hz인 세 조건을 사용하여 미끄럼속도의 영향을 분석코자 하였다. 실험시 마찰계수와 초음파 신호를 관찰하였으며 실험후 마멸입자를 완전히 제거한 후 전자주사현미경(SEM: Scanning Electron Microscope)를 이용하여 플레이트 시편의 마멸면을 관찰하였으며 Taylor Hobson사의 Telysurf 6을 사용하여 표면 거칠기를 측정하였다. 플레이트의 마멸두께는 발진 초음파와 첫 번째 반사파 사이의 시간을 측정하여 각각의 플레이트 시편에서의 초음파 속도를 측정한 후 이를 이용하여 마멸두께를 계산하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

Fig. 4는 각 실험조건에서의 마찰계수의 변화를 보이고 있다. 2 Hz인 경우를 제외하고는 시험 시작 후 15초 이내에 마찰계수가 정상화되고 있으며 왕복동 속도가 높을수록 마찰계수가 증가함을 알 수 있다. 2 Hz인 경우에 발생한 시험 전반기의 마찰계수의 요동은 접촉이 디스크 시편의 가장자리 부위에서만 집중되어 안정적인 접촉이 이루어지지 않은 결과에 기인하며 접촉이 안정화 된 후반기에는 마찰계수의 변화가 심하지 않았다. 각 시험 시편의 플레이트 마멸면에 대한 주사전자현미경 사진은 Fig. 5의 (b)에서 (d)까지에 나타내었다. 시험 전의 표면 (Fig. 5(a))에 비해 플레이트 접촉면에서 심한 소성변형, 균열 발

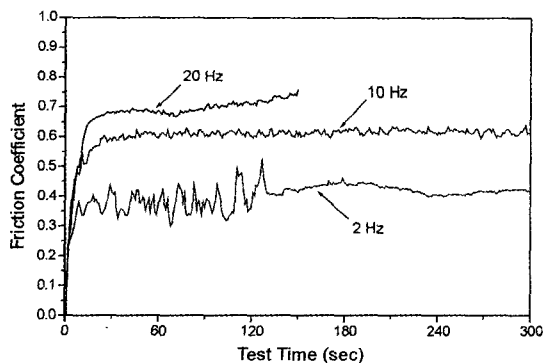
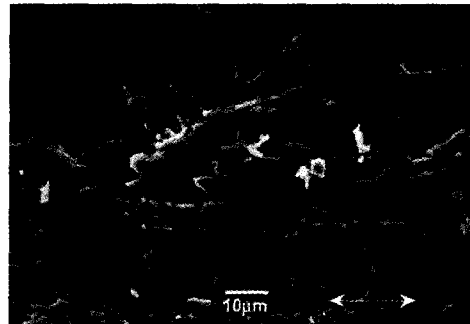


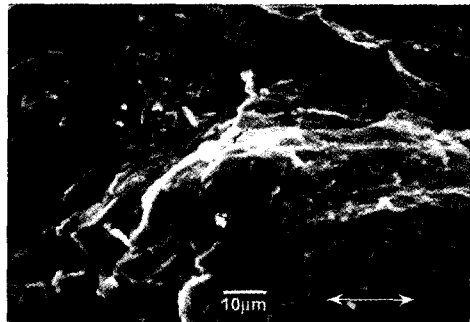
Fig. 4 Friction coefficient as a function of the sliding cycle.



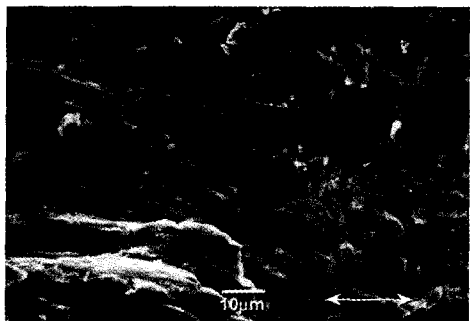
(a) specimen surface (before test)



(b) 2 Hz, 150 N, 300 sec

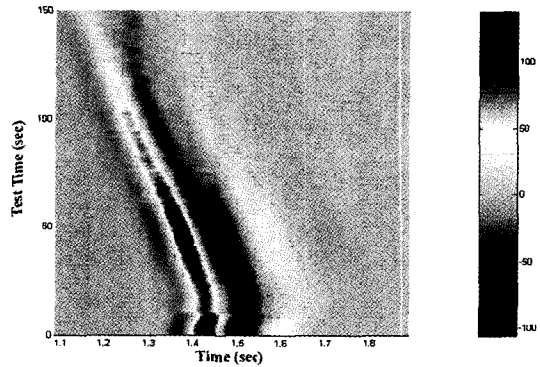
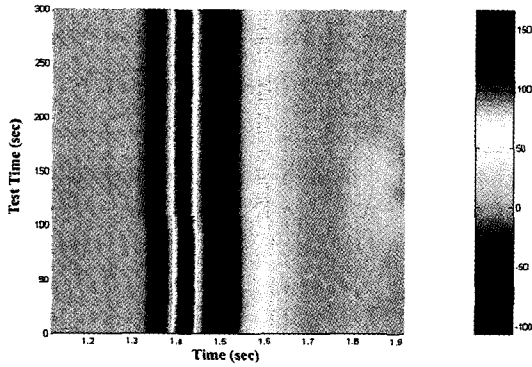
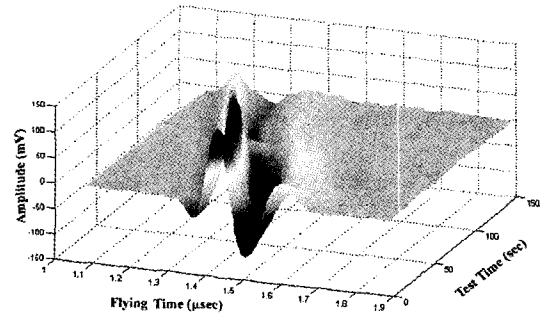
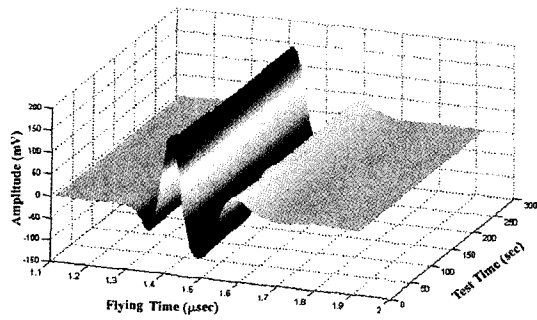


(c) 10 Hz, 150 N, 300 sec



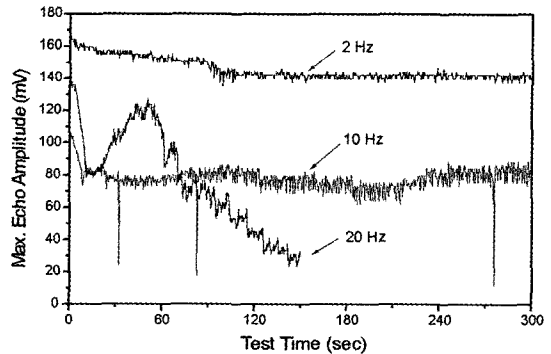
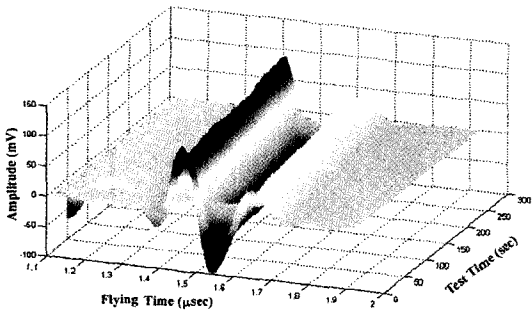
(d) 20 Hz, 150 N, 150 sec

Fig. 5. Scanning electron micrographs of the worn surfaces (The arrow indicates the sliding direction)

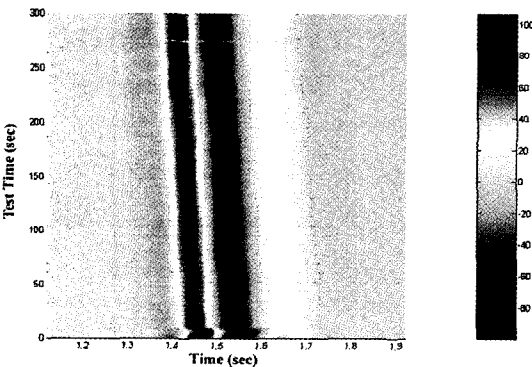


(a) 2 Hz, 150 N, 300 sec

(c) 20 Hz, 150 N, 150 sec



(d) Maximum echo amplitude



(b) 10 Hz, 150 N, 300 sec

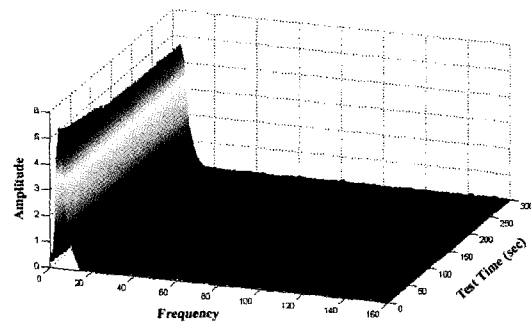
Fig. 6. The variation of ultrasonic waves as a function of test time.

생 및 피로마멸의 흔적을 발견할 수 있으며 그 정도는 주파수가 높아질수록 심해지고 있음을 관측할 수 있다. 주파수 10 Hz인 경우 접촉면에서 균열의 발생이 심화되기 시작하는 것이 관측되었으며 Fig. 5(c)와 같이 균열이 표면하부로 전파되고 있다. 특히 주파수 20 Hz의 시편의 경우, 접촉면의 수직방향으로의 심한 균열에 의해 표면하부 방향으로 많은 틈이 형성되어 있는 것이 보인다.

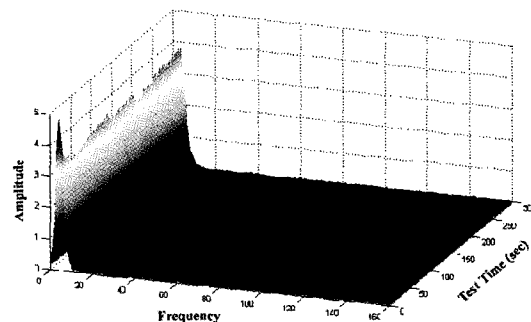
Fig. 6은 시험시간 경과에 따른 초음파 신호의 변화와 반사파의 최대 진폭치의 변화를 나타낸 것이다. 왕복 주파수가 10 Hz에서 20 Hz로 증가함에 따라 시험시간에 따른 초음파의 파형의 변화가 심함을 알 수 있으며 첫 번째 반사파의 수신시간 또한 급격히 감소하는 것이 관찰되었다. 수신된 파형의 변화는 크게 두가지의 원인에 기인될 수 있다. 첫째는 매질내의 초음파에 대한 적응성(material compliance)이며 그 예로 미세한 균열의 존재를 들 수 있다. 둘째로는 반사되는 매질 경계부의 불균일한 초음파 특성에 기인한 반사파간의 상간섭(phase interference) 현상이다. 마찰 및 마멸시험의 경우 마멸면에는 여러 가지 마멸기구가 복합적으로 작용하여 물성이나 구조면에서 복잡한 표면층을 형성하는 경우가 많다. 이 경우 초음파가 전파되어 이러한 표면층에서 반사되어 되돌아 올 때 상간섭 현상이 발생되게 된다. 본 연구에서는 Fig. 6에 보인 파형도에서 얻을 수 있는 가장 직접적인 정보인 최대 진폭치의 변화와 첫 번째 수신파의 도달 시간의 변화에 대해서 고찰코자 한다. 최대 진폭치의 변화는 앞에 설명한 두 가지 요인이 복합되어 나타나는 결과로서 마멸표면층의 상태(severity)를 평가할 수 있으며 수신파의 도달 시간은 매질의 두께 변화 즉 마멸두께를 구할 수 있는 정보를 제공한다.

주사 측정된 반사파 신호의 분석을 위하여 Fast Fourier Transform을 실시하였으며 Fig. 7에 도시하였다. Fig. 7의 (d)에서 보는 바와 같이 2 Hz의 경우 약 120초 경과후 Fast Fourier Transform의 최대값의 변화가 관찰되었으며 이것은 Fig. 4의 마찰계수의 변화와 함께 관찰되었으며 시험중 국부적인 마멸에서 전체적인 마멸로의 변화를 관찰할 수 있었다.

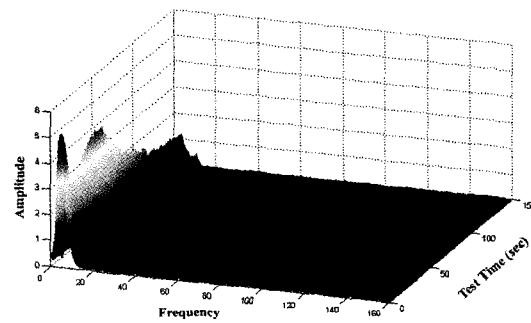
초음파를 이용한 표면 거칠기의 측정이 가능함이 가능함이 보고된 바 있으며[9], Fig. 7(d)에서 반사파의 변동폭의 변화와 Fig. 8의 표면 거칠기의 측정 결과를 비교해 보면 반사파의 변동폭을 관찰함으로써



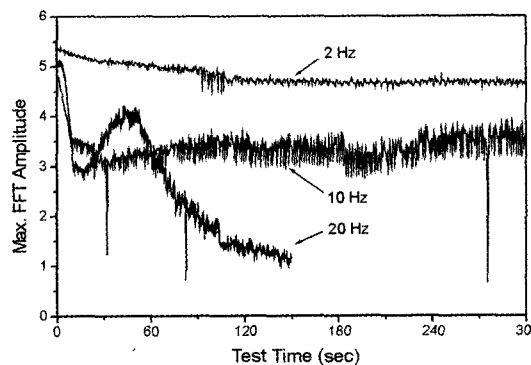
(a) 2 Hz, 150 Newton, 300 sec



(b) 10 Hz, 150 Newton, 300 sec



(c) 20 Hz, 150 Newton, 150 sec



(d) Maximum FFT signal

Fig. 7. Fast Fourier Transform of the ultrasonic waves.

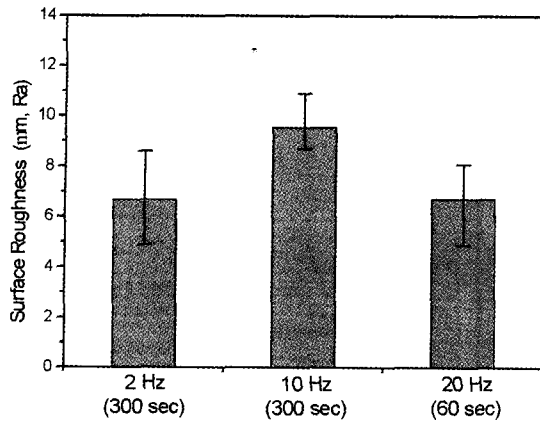


Fig. 8. Surface roughness values measured from the worn surfaces.

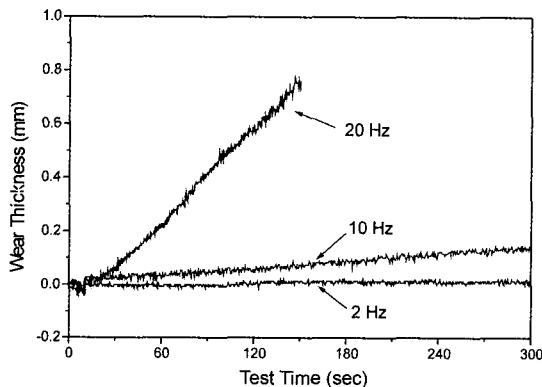


Fig. 9. Increase in the wear thickness as a function of test time.

마멸면의 거칠기 변화를 정성적으로 관찰할 수 있을 것을 알 수 있다. Fig. 7(d)에서 10 Hz일 때 반사파의 변동폭이 가장 크며 실험 후에 측정된 표면 거칠기도 같은 경향을 보임을 볼 때 표면 거칠기가 증가하면 초음파 신호의 변동폭이 비례하여 증가함을 알 수 있다.

Fig. 9에 나타난 마멸 두께의 변화율이 마멸율(wear rate)로 정의될 수 있으므로 마멸율의 변화 또한 실시간에 측정할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 전파 매질의 결함이나 균열 등을 탐상하기 위한 비파괴 검사 방법중의 하나인 초음파를 이용하여 실시간 마멸 표면 평가방법을 제시하였

으며 적용 가능성을 평가하였다. 제시된 실험방법을 이용하여 건조마찰 실험을 실시하였으며 초음파의 반사파, 마찰계수와 마멸 표면을 비교 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

미끄럼 속도를 증가시키면 마멸면에서 심한 소성 변형, 균열발생 및 피로마멸의 흔적이 발견되었고 그 정도는 미끄럼 속도가 높을수록 심해지며 측정된 반사파의 최대값의 변화량이 증가한다. 반사파의 변동폭으로 실시간 마멸면의 거칠기의 변화를 관찰할 수 있으며 반사파의 최대값의 변동폭은 마멸면 거칠기에 비례하여 증가하는 경향을 보였다. 또한 매질의 전파속도를 이용하여 실시간 마멸량의 변화를 측정할 수 있었다. 따라서 본 논문에서 제시한 초음파의 반사파를 이용한 방법으로 측정된 초음파 신호는 마멸표면의 손상과 밀접한 관계를 보였으며 실시간 마멸표면 평가에 적용될 수 있다.

참고문헌

- H.-S. Ahn, L. Wei, S. Jahanmir, "Nondestructive Detection of Damage Produced by a Sharp Indenter in Ceramics," *ASME J. of Eng. Mat. and Tech.* Vol.118 pp. 402-409, 1996.
- H.-S. Ahn, S. Jahanmir, J.A. Slotwinski, G.V. Blessing, "Detection of contact damage in ceramics by an ultrasonic method," *J. of Materials Research*, Vol.13, No.7, pp.1899-1904, 1998.
- 윤의성, 손동구, 안효석, "초음파의 형상인식법을 이용한 저널베어링의 마멸파손 검지," *대한기계학회논문집 제17권 제8호*, pp. 2061-2068, 1993.
- 竹内彰敏 外, "超音波支援による局所摩擦観測の試み," *日本機械學會論文集(C編)*, 63卷 611號, 2456-2463, 1997.
- M. Long, H.J. Rack, "Ultrasonic in situ continuous wear measurements of orthopaedic titanium alloys," *Wear*, Vol. 205, pp. 130-136, 1997.
- J. Karutkramer and H. Krautkramer, "Ultrasonic microstructural characterization," *JOM*, Vol. 44, pp. 31-35, 1992.
- A.P. Cracknell, *Ultrasonics*, Wykeham, London, 1980.
- A. Vary, "Ultrasonic measurement of material properties in Research Techniques in Nondestructive Testing," Vol. 4, Chapter 5, pp. 159-204, 1980.
- G.V. Blessing, J.A. Slotwinski, D.G. Eitzen and H.M. Ryan, "Ultrasonic measurements of surface roughness," *Applied Optics*, Vol. 32, No. 19, pp. 3433-3437, 1993.