

〈論 文〉

초음파의 형상인식법을 이용한 저널베어링의 마멸파손 검지

윤의성* · 손동구* · 안효석*

(1993년 3월 6일 접수)

The Early Detection of Journal Bearing Failures by a Pattern Recognition of Ultrasonic Wave

Eui-Sung Yoon, Dong Goo Sohn and Hyo Sok Ahn

Key Words : Condition Monitoring(상태진단), Journal Bearing(저널베어링), Pattern Recognition(형상인식), Ultrasonic Wave(초음파)

Abstract

Condition monitoring technology is of great importance for the maintenance of complex machinery in view of its early monitoring of the abnormal condition and the protection against failure. Several methods have been used for the detection of failure of journal bearings, one of the main elements of mechanical system. The methods most frequently used are vibration and temperature monitoring, but these are unable to monitor the wear conditions exactly. In this study, an ultrasonic measurement method, one of the non-destructive testing methods, was introduced as the monitoring technology. Furthermore a pattern recognition method was applied to analyze the ultrasonic signal. The monitoring system using the pattern recognition method is composed of digital signal processing units and uses Hamming net algorithm for the recognition of ultrasonic waves. From the journal bearing wear test, the occurrence of adhesive wear of the white metal in rubbing contact with the shaft was exactly detected by this system, and the wear status of the journal bearing was monitored by measuring the wear thickness.

1. 서 론

최근 과학기술의 발전에 따른 생산공정의 자동화 및 무인화 추세에 따라 기계시스템의 파괴마멸진단을 위한 상태진단기술의 중요성이 날로 증가하고 있다. 상태진단기술중 비파괴검사에 의한 진단기술은 시험 대상을 손상시키지 않고 검사 목적을 달성하는 방법으로 현재 산업체에서 제품의 품질관리방

법과 대형 구조물의 안전관리수단 등으로 널리 사용되고 있다.

기계시스템의 핵심 부위인 저널베어링의 마멸파손을 감지할 수 있는 상태진단기술들로는 진동, AE(acoustic emission), 온도, 초음파, 오일 내의 오염입자 분석을 이용한 방법 등이 있으며⁽¹⁾ 현재 진동과 온도의 측정에 의한 방법이 대형 시스템에 적용되고 있으나, 타 부위의 진동 등으로 인하여 실제적인 저널베어링의 마멸상태 변화를 잘 대변해 주지는 못하고 있다.^(2,3)

본 연구에서는 비파괴검사에 의한 진단기술 중의

*정회원, 한국과학기술연구원 Tribology연구실

하나인 초음파를 이용하여⁽⁴⁾ 저널베어링의 마멸두께 측정에 의한 베어링의 마멸과손검지용 상태진단 기술을 개발하기 위하여, 형상인식(pattern recognition)의 한 방법인 신경회로망(neural network)의 Hamming network 기술을 도입하여^(5,6) 이중 매질로 구성되어 있는 저널베어링 내에서의 초음파 반사파형의 형상을 인식하고 이를 이용하여 두께를 측정하는 기술을 개발하고 기존의 문턱값(level threshold) 방법과 비교하였다.

2. 초음파 측정 원리

비파괴검사의 한 분야인 초음파를 이용한 저널베어링 두께 측정의 기본 개념은 Fig. 1과 같다. 저널베어링의 외부에 설치된 초음파 송수신용 탐촉자(transducer)에서 발생된 초음파는 반침쇠(back steel)를 통하여 전달된 후 반침쇠와 화이트메탈(white metal)의 경계면에서 일부가 반사되어 탐촉자로 되돌아 오며, 경계면을 통과한 초음파는 화이트메탈 내를 반침쇠와는 다른 속도로 통과한 후 저면에서 반사되어 탐촉자로 되돌아 온다. 이때 처

음 되돌아온 파형을 감지하여 반침쇠의 두께를 계산할 수 있으며, 경계면에서 반사되어 온 처음 반사파와 저면에서 반사되어 온 반사파와의 시간 차이를 검출하여 화이트메탈의 두께를 얻을 수 있다. 그러나 화이트메탈과 반침쇠 내에서 초음파는 온도 상승에 따라 그 속도가 느려지고 진폭이 감쇠된다. 또한 온도 상승에 따라 부피도 팽창한다. 따라서 정밀하게 마멸두께를 측정하려면 온도 변화에 따른 재료의 팽창과 초음파 속도를 정확히 측정하여 보정하여야 한다.

3. 초음파 파형처리

일반적인 신호처리기법 중, 초음파를 이용한 두께 측정에 효과적인 방법들은 문턱값(level threshold), 자기상관(auto-correlation), 상호상관(cross-correlation)을 이용한 방법 등이 있으며 영상처리에 사용되는 형상인식(pattern recognition)을 이용한 방법도 적용 가능하다.

문턱값방법은 처리구조가 단순하므로 처리속도가 빠르고 컴퓨터의 저장공간이 적어도 되는 장점이 있다. 그러나 측정 파형의 진폭 크기와 신호의 상승속도에 따라 설정크기의 위치가 변경되며, 측정 파형이 외부영향에 의하여 잡음이 혼합되는 경우에는, 파형의 중심이 상하로 이동하므로 측정이 불가능해진다. 또한 측정 매질의 온도 상승으로 인하여 초음파의 감쇠가 심한 경우에는 상대적으로 진폭의 크기가 감소하여 측정이 불가능하다.

문턱값 방법의 파형 크기에 따른 위치 변경의 단점을 보완하기 위하여 전체의 평균치가 '0'이 되게 이동시킨 후 레벨에 의하여 대략적인 위치를 구한 다음 '0'점을 추적하여 초음파 송신의 시작점과 반사파의 시작점을 측정한다. 이 경우 진폭에 따른 위치 이동과 파형 중심의 상하 이동의 단점은 보완할 수 있으나 신호의 시작이 '0'이 아닌 경우 '0'점을 찾지 못한다. 또한 위의 방법 중 '0'점이 아닌 최대치를 추적할 경우 최대치는 잡음의 영향으로 오차가 심하게 발생된다. 그리고 저면의 반사파와 경계면의 2차 또는 그 이상의 반사파가 인접되어 중첩될 경우 최대치의 이동은 두께와 무관하게 이루어진다. 또한 이 경우 문턱값방법으로서는 두 반사파를 분리할 수 없다.

자기상관을 사용하는 경우, 측정 파형 내에 존재하는 모든 주기성 성분들의 시간간격을 측정할 수

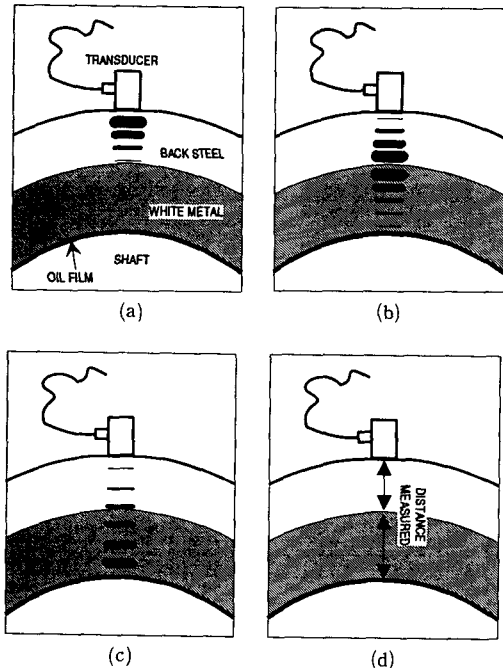


Fig. 1 The principle of wear thickness for Journal Bearing by the ultrasonic wave

있으며 일시적인 외부 잡음들을 대부분 제거시킬 수 있는 장점을 가진다. 그러나 이 방법은 처리시간이 길며, 연산에 필요한 컴퓨터의 내부기업 장소가 커야 하며, 반사파들의 상호간섭시 식별이 불가능해지는 단점을 지니고 있다. 그리고 입력파형과 출력파형이 지닌 주파수 성분이 동일하고 주기가 비슷할 경우에는 적용이 가능하나 저널베어링의 경우 반사파와 입력파 사이의 위상이 반전되어 있으며 반사면이 곡면이므로 반사파는 여러 시간지연파형에 의해 중첩되므로 파의 주기가 길어진다. 따라서 반사파와 입력파와의 상관관계(correlation)의 정도가 약해지므로 식별이 불가능해진다. 그리고 경계면에서의 반사파와 저면에서의 반사파가 서로 겹치는 경우, 즉 입사면과 경계면사이를 반복하여 반사된 반사파들이 저면에서의 반사파와 왕복주기가 비슷한 경우, 서로 혼합되어 경계면에서의 반사 시간만이 측정된다.

영상처리에 사용되는 영상인식 방법의 경우 처리시간은 다소 길어지지만 파형 상하이동에 의한 영향이 적고, 외부 잡음에 매우 강하며, 반사파들이 혼합되어 있는 경우에도 식별이 가능하다.

본 연구에서는 반사파들을 식별하기 위하여 영상인식의 한 방법인 신경회로망의 Hamming network을 사용하였다. Hamming network은 단순한 구조를 가지면서 인식속도가 고속이므로 현장 적용시 신경컴퓨터와 같은 추가적인 부가 장비가 없어도 알고리즘만으로도 사용이 가능하다. 또한 처리에 사용되는 기억장소가 적게 필요한 장점을 가지고 있다. 그러나 연속변량을 다루기 어렵다는 단점과 데이터 추정에 약한 점이 있어 본 연구에서는 연속변량을 다룰 수 있게 변경하여 적용하였다. Hamming network에서 사용되는 변수는 Hamming distance와 Matching score가 있다. Hamming distance는 두 형상에서 서로 대응하는 비트들 중 일치하지 않는 비트의 개수이고 Matching score는 일치하는 비트의 개수로 형상을 구성하는 총 비트의 개수에서 Hamming distance를 뺀 나머지 값이다. Hamming network에 있어서 최적 최소 오차의 분류는 다음과 같이 수행되어진다. 형상이 입력되면 그 입력 형상과 각 등급의 기준 형상과의 Hamming distance를 계산한 후 Hamming distance가 최소인 등급을 선택한 2진 형식의 입력 형상 X 가 등급 C_j 에 속할 경우 다음과 같이 표현된다.

if $X \in C_j$, then
 Hamming distance(W_j, X) < Hamming distance(W_k, X)
 for all $k=1, 2, \dots, m \ k \neq j$

여기서 W_j 는 등급 j 에 대한 기준형상이다.

Fig. 2는 Hamming distance와 Matching score를 계산하는 예를 보여준다. 10개의 입력 mode를 가지면 2가지 등급을 판정하는 Hamming network이다. 입력된 형상과 등급 A의 기준 형상과 비교시 Hamming distance는 6이며 Matching score는 4이다. 그리고 등급 B의 기준 형상과 비교시 Hamming distance는 4이며 Matching score는 6이므로 입력된 형상은 Hamming distance가 최소인 등급 B로 판정 받게 된다.

일반적인 Hamming network은 입력 및 가중치를 모두 2진 패턴(+1, -1, or +1, 0)만을 사용하나, 기계 분야에서 다루고자 하는 대부분의 신호는 정해진 범위에서 연속적인 값으로 표현되므로 기존의 Hamming network의 사용은 매우 어렵다. 그러나 Esther Levin⁽⁶⁾의 논문에서 기계 시스템과 유사한 경우 온도계 방식 표현방법을 사용하였다. 온도계 방식 표현이란 아날로그(analog) 값을 비례하는 양자화 레벨의 개수에 해당하는 만큼의 비트 개수를 한 단위의 숫자로 표현하였다. 2진의 이 벡터는 2개군으로 구성되며 처음 블록(block)은 모든 비트가 '1'의 값을 가지며 두번째 블록에서는 모

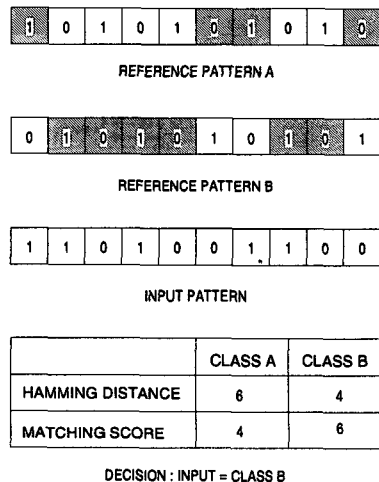


Fig. 2 The conception of Hamming distance and matching score

두 '0'이 된다. 처음 블록의 비트 개수는 표현하고자 하는 아날로그 값에 선형적으로 비례한다. 즉, 이것은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\underline{X} = \begin{cases} X_i = 1 & \text{if } 0 \leq i \leq m \\ X_i = 0 & \text{if } m < i \leq N \end{cases}$$

where N : The number of quantization level

그러나 이 표현 방법은 비트 수에 비하여 표현할 수 있는 값의 범위가 너무 작음으로 기억장소의 낭비가 많다. 데이터를 비트 단위가 아닌 연속 변량으로서 다루고자 할 경우 일반적인 개선방법으로는 한 입력의 데이터를 분산하여 표현하지 않고 한 가중치(weight)에 표현하는 것이다. 한개의 입력을 한개의 가중치에 표현하므로써 얻어지는 장점은 일반적 컴퓨터에서 사용하는 2진 표현을 사용할 수 있는 점과 다루는 가중치들이 한 개의 바이트(byte)로 구성되므로 같은 개수의 비트를 사용할 때 표현가능한 숫자범위를 증가시킬 수 있다는 점이다. 따라서 본 연구에서는 위의 방법을 이용하여 시간 데이터를 형상화 하였다. 기준형상으로는 상온에서 측정된 초음파 신호중에서 경계면의 반사된 파형과 저면에서 반사된 파형을 사용하였다. 그리고 출력은 기준 형상과 측정치와의 차이를 계산한 후 최소치를 갖는 점, 즉 Hamming distance가 최소인 위치를 선택하여 반사파의 시작점으로 결정하였다.

4. 실험

저널베어링 실험 장치는 시간적 추이에 따른 저널베어링의 마멸을 계속적으로 관찰할 수 있도록 제작하였고, 시험 부위, 하중용 유압장치, 윤활 장치 및 동력전달 장치로 구성되어 있으며 Fig. 3은 실험장치의 전체구성을 보여주고 있다.

Fig. 4는 저널 베어링에 초음파센서와 열전대의 설치를 위한 가공과 설치위치를 보여주고 있다. 열전대는 저널 베어링과 축과의 접촉면 온도를 측정하기 위하여 저널베어링의 반침쇠로부터 구멍을 내어 화이트메탈층의 최대한 표면에 접근시킨 부표면에 설치하였다. 초음파 센서는 저널베어링에서 유막 두께가 최소가 되는 위치인 하중 방향에서 회전 방향으로 10° 기울어진 위치에 부착하였으며 저널 베어링과 센서와의 접촉면은 평면으로 가공하였다.

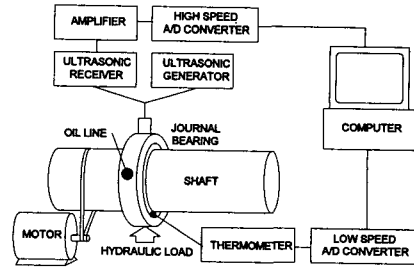


Fig. 3 Schematic diagram of journal bearing test rig and on-line monitoring system

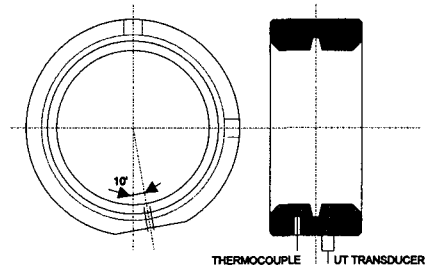


Fig. 4 Journal bearing setting with UT transducer and thermocouple

사용한 초음파 센서는 SONATEST 사의 제품으로 직경 6.4 mm, 발전주파수 15 MHz, 측정범위 0.026~1.1 in를 성능을 가지고 있다. 초음파 신호 발생 및 수신은 SONATEST 사의 MICROGAGE를 사용하였고, 수신된 신호의 수집 및 변환은 Lecroy 사의 digital storage oscilloscope model 9450을 사용하였으며 GPIB를 이용하여 컴퓨터로 전송하였다.

저널베어링의 마멸현상을 관찰하기 위해서는 윤활조건을 유체 윤활상태가 아닌 경계 윤활상태로 실험하여야 한다. 본 실험에서 윤활조건이 가능한 변수는 축회전수, 하중, 공급오일량이 있으나, 축 회전수는 일반 회전기계에서 많이 사용되는 1800 rpm으로 하였고 하중은 유압시스템에서 공급되는 유압으로부터 2.0~2.3 ton으로 하였으며 오일 공급량을 조절하여 윤활상태를 극한 조건으로 하여 실험하였다. 즉 오일 공급을 중단, 공급하므로써 베어링의 마멸을 유발시켰으며 그때의 저널베어링 두께를 측정하여 베어링의 마멸파손을 감지하였다.

화이트메탈층의 마멸량 측정은 무게측정과 두께 측정 그리고 초음파측정을 실험 전, 후로 수행하였

으며 실험에서는 초음파로만 측정하였다.

각 온도에서의 저널베어링 두께를 초기 온도 (18°C)의 두께로 산출하기 위하여 온도에 따른 재료의 팽창과 초음파의 속도 변화를 고려하여 보정한 초음파 속도를 이용하여 온도 상승에 따른 화이트메탈의 두께를 형상인식 방법에 의해 측정된 결과를 Fig. 5에 나타냈다. 형상인식 방법에 의하여 측정된 결과는 신호측정의 디지털 방식으로 인한 양자화 오차인 1비트의 오차(1 bit×3.4 km/sec×2.5 msec)를 제외하면 온도변화에 영향을 받지않고 일정함을 알 수 있었다. 따라서 형상인식 방법에 의한 측정방법을 초음파 두께 측정에 사용할 수 있음을 알 수 있다.

저널베어링의 마멸실험에서는 저널베어링의 윤활을 극한 조건으로 실험하였으므로 응착마멸이 발생됨을 관찰하였다. Fig. 6~Fig. 9은 저널베어링의 실험기간 경과에 따른 초음파 신호로 Fig. 6는 하중을 가하지 않은 상태로 시험기가 작동될 때 접촉면에 심은 열전대에 의하여 측정된 베어링의 부표면 온도가 73°C인 초음파 신호로, S는 초음파 센

서의 delay line과 저널베어링의 접촉표면의 반사파 신호이고, A는 반침쇠와 화이트메탈의 경계면에서 반사된 반사파 신호이며, B는 화이트메탈 저면의 반사파 신호이다. 이 경우에서 문턱값 방법을 이용할 때, 외부 잡음이 없고 파의 상하이동이 없으므로 양호하게 분석됨을 알 수 있다. 형상인식 방법의 경우 이 파형의 각 부위(S, A, B)를 기본형상으로 사용하게 된다.

Fig. 7은 정상 작동상태로 일정시간 경과 후 베어링의 부표면 온도가 101°C에 이르렀을 때의 신호이다. 신호의 형태는 큰 변화가 없으나 온도상승으로 감쇠율이 증가하여 신호의 감쇠가 커졌으며 초음파 속도의 감소와 부피 팽창으로 파의 왕복시간이 지연되어 나타나고 있다. 문턱값 방법에 의하여 이 파형을 분석할 경우 양호하게 분석됨을 알 수 있다. 형상인식 방법의 경우에도 이 파형의 각 부위의 파형이 기본형상과 큰 차이가 없으므로 양호하게 분석할 수 있다.

Fig. 8은 초음파 신호가 정상파형이 아닌 왜곡된 모습을 보여주고 있다. 이는 저널베어링 온도가 급

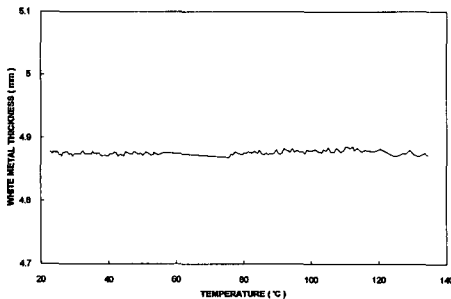


Fig. 5 The white metal thickness of journal bearing according to the variation of a temperature. (using compensated ultrasonic velocity)

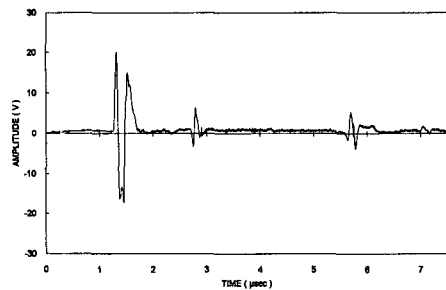


Fig. 7 The ultrasonic wave signal after normal running.(normal condition)

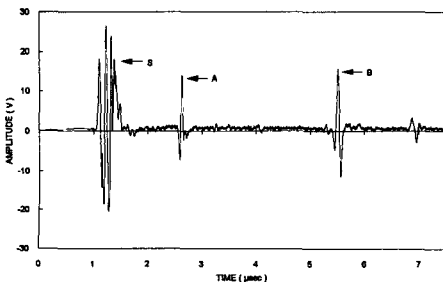


Fig. 6 The ultrasonic wave signal at the Initial point. (normal condition)

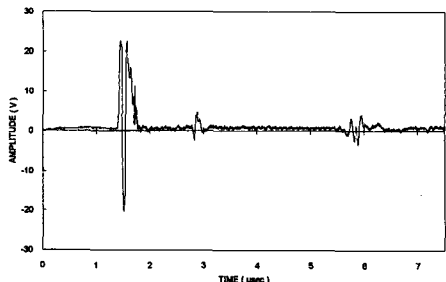


Fig. 8 The ultrasonic wave signal at the occurrence of adhesive wear.(abnormal condition)

상승한 결과로써 베어링의 부표면 온도가 190℃로 저널베어링의 화이트메탈층이 응착마멸되기 시작한 상태로 사료된다. 저널베어링의 주된 파손 형상은 윤활막 파손에 의한 응착마멸이므로 이러한 신호의 패턴을 인식하므로써 베어링의 응착마멸 현상을 정확히 감지할 수 있었다. 문턱값 방법을 이용하여 이 파형을 분석할 경우, 외부 잡음을 고려하여야 하기 때문에 문턱값을 내릴 수 없으므로 분석이 불가능해진다. 형상인식 방법의 경우 각 부위 별 파형으로 해석하므로 무리없이 해석이 가능하였다.

Fig. 9는 저널베어링이 응착마멸 후에 정상 작동될 때 베어링의 표면 온도 65℃의 초음파 신호로 파형에는 큰 변화 없이 화이트메탈 층이 마멸되어 두께가 감소하므로 파의 왕복시간이 짧아져 나타나고 있다. 즉 신호의 왕복시간에만 변화가 있을 뿐 정상파형으로 되돌아 오는 현상을 알 수 있었다.

Fig. 10~Fig. 11은 저널베어링 실험시간 경과에 따른 온도 측정 결과와 저널베어링 화이트메탈 층의 두께를 문턱값 방법과 형상인식 방법을 이용하여 측정된 결과를 보여주고 있다.

Fig. 10(a)과 Fig. 11(a)은 시간 경과에 따른 온도 변화 그래프이다. 온도 측정은 저널베어링의 화이트메탈 표면 가까이에 심은 열전대로 계속 측정하여 이를 평균한 값으로 측정 평균 기록 간격은 20초이다. Fig. 10(b), Fig. 10(c), Fig. 11(b), Fig. 11(c)은 시간경과에 따른 화이트메탈의 두께를 형상인식 법과 문턱값 방법을 이용하여 측정된 결과이다. 온도 측정과 형상인식 법에 의한 경우 초기에 하중이 가하여지므로 발생한 마멸과 세번의 응착마멸이 발생함을 알 수 있었으며 이는 문턱값 방법을 이용한 경우에도 동일한 경향을 나타낸다.

형상인식 방법에 의한 저널베어링의 마멸경향을

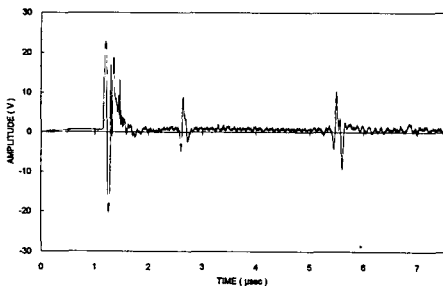
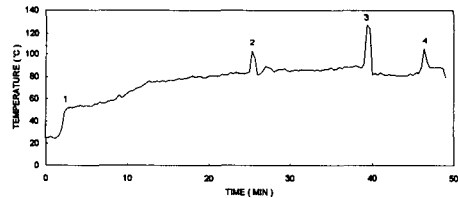
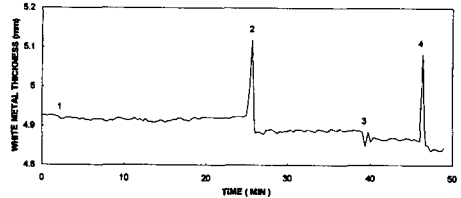


Fig. 9 The ultrasonic wave signal after the adhesive ware process.(normal condition)

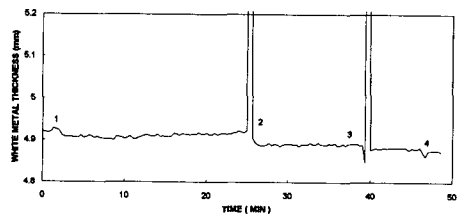
보면 Fig. 10(b)는 세번의 응착마멸이 발생된 실험 1의 결과로, (1)은 무부하 상태로 실험중에 하중을 가하므로써 저널베어링의 화이트메탈 층이 약 10 μm 마멸된 현상을 보여 주고 있으며 (2), (3), (4)는 응착마멸에 의해 화이트메탈 층이 40 μm, 20 μm, 20 μm 마멸된 현상을 보여주고 있다. 즉 실험 1에서는 총 90 μm가 마멸 되었음을 알 수 있었다. Fig. 11(b)에서도 세번의 응착 마멸이 발생된 실험 2의 결과로, (1)은 하중을 가하므로써 발생한 마멸로 약 20 μm이고 (2)는 응착 마멸이 발생하였으나 용융된 화이트메탈이 다시 그 위치에 응고된 결과로 화이트메탈 층의 두께 변화가 없으며 (3)은 응착마멸에 의해 화이트메탈 층이 30 μm 마멸이 되었으며 (4)는 응착 마멸이 발생하였으나 다른 부위의 용융된 화이트메탈이 측정 위치에 응고되어 화이트메탈 층의 두께가 10 μm 증가된 현상을 보여 주고 있다.



(a) Temperature

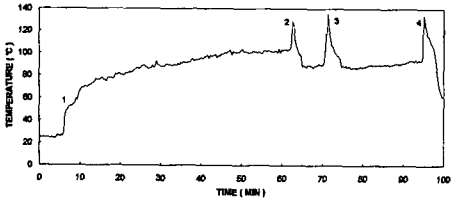


(b) The white metal thickness using the pattern recognition method

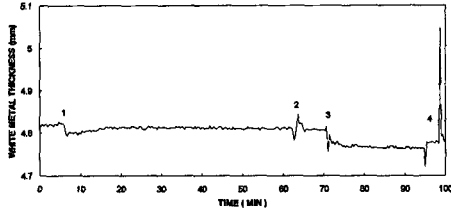


(c) The white metal thickness using the level threshold method

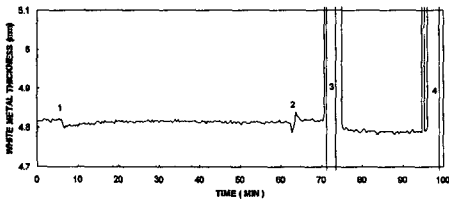
Fig. 10 The white metal thickness and temperature vs. operation time. (test 1)



(a) Temperature



(b) The white metal thickness using the pattern recognition method



(c) The white metal thickness using the level threshold method

Fig. 11 The white metal thickness and temperature vs. operation time. (test 2)

문턱값 방법에 의한 저널베어링의 마멸 경향을 보면 Fig. 10(c)의 (3), (4)와 Fig. 11(c)의 (3), (4)에서는 저널베어링의 마멸을 감지할 수 없음을 보여주고 있다.

응착 마멸시 발생하는 두께 측정의 오류는 신호 파형의 왜곡과 온도 보상시 측정 온도와 실제 전달 경로 상의 온도 분포가 다름으로 인한 것으로 이를 해결하기 위해서는 정확한 온도 구배를 구하여야 한다. 응착 마멸시 신호의 왜곡으로 인하여 문턱값을 이용한 측정은 불가능하게되므로 이 방법보다 형상인식법을 이용한 방법이 보다 안정됨을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 형상인식법에 의한 두께 측정으로 저널베어링 화이트메탈 층의 마멸 현상을 정확히 감지할 수 있으며 응착 마멸된 후의 마멸 두께를 정확히 측정할 수 있었다.

6. 결 론

본 연구에서는 비파괴검사 방법에 의한 상태진단 기술 중의 하나인 초음파를 이용하여 저널베어링의 마멸상태를 감지하기 위하여 형상인식 방법을 도입하였으며, 이를 이용하여 화이트메탈의 마멸상태를 측정하여 마멸파손을 감지하였다. 마멸파손 진단시스템을 저널베어링 시험기에 적용하여 실험한 결과 화이트메탈층과 축과의 마찰면에서 응착마멸이 발생할 경우 초음파 신호가 왜곡되므로 응착마멸 순간을 정확히 감지할 수 있으나 마멸두께는 측정할 수 없다. 응착마멸 후의 저널베어링 마멸두께 변화가 측정되므로 시간변화에 따른 마멸두께의 추이를 계속 관찰하므로써 베어링의 마멸 상태를 파악할 수 있다.

초음파를 이용한 상태진단에서 자동화를 위하여 형상인식 방법을 도입하였으며 아날로그 방식의 대표적인 방법인 문턱값 방법을 디지털화하여 형상인식 방법과 비교한 결과, 형상인식 방법을 이용한 저널베어링의 두께측정이 안정성에서 우월한 것으로 나타났다.

형상인식 방법을 이용한 상태진단은 향후 전자기술의 발달과 더불어 정확도 및 정밀도가 향상되리라 기대된다.

후 기

본 연구는 과학기술처에서 시행한 특정연구개발 사업에 의해 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Jones, H.M. & Scott, D., 1983, Industrial Tribology: The Practical Aspects of Friction, Lubrication and Wear, Vol. 8, Elsevier Scientific Publishing Co., New York, pp. 427~445.
- (2) Neale, M. J., 1973, Tribology Handbook, Newnes-Butterworths, pp. E1-E3
- (3) Tsuneo Someya et al, 1989, Journal Bearing Databook, Springer-Verlag, Berlin, pp. 1~12.
- (4) Grabendorfer & Gregor, 1975, Ultrasonic testing of materials, Springer-Verlag, New York, pp.

516~517

(5) Lippmann, R.P., 1987, "An Introduction to Computing with Neural Nets," ASSP, April, pp. 4~22

(6) Levin, E., 1989, "Neural Network Architecture for Adaptive System Modeling and Control," IEEE International Joint Conference on Neural Network, vol 2, pp. 311~315