

초음파 수침법을 이용한 터빈베어링 Babbitt 금속 박리 검사 기술

Implementation of Ultrasonic Immersion Technique for Babbitt Metal Debonding in Turbine Bearing

정계조^{*†}, 박상기^{*}, 조용상^{*}, 박병철^{*}, 길두송^{*}

Gye-Jo Jung^{*†}, Sang-Ki Park^{*}, Yong-Sang Cho^{*}, Byung-Cheol Park^{*} and Doo-Song Kil^{*}

초 록 이 연구는 터빈베어링의 신뢰성을 평가하기 위하여 초음파 C-Scan 방법을 적용한 기술이다. 수침법에 관한 연구는 실험실과 현장검사 적용에 광범위하게 사용되는 기술이다. 여기에서는 C-Scan 방법을 이용하여 베어링의 모재와 Babbitt 금속간 경계부의 상태를 평가하였다. 수침법 C-Scan 방법에 의한 초음파 영상은 베어링 경계부의 상태를 확인하는데 효과적인 방법으로 사용될 수 있었다. 초음파 영상의 분해능을 높이기 위하여 집속형 탐촉자를 사용하고, Babbitt 금속과 베어링 모재간의 접합경계면에서 발생하는 초음파 음압 반사율을 측정하여 결함의 검출과 면적을 추정할 수 있었다. 초음파 수침법은 베어링 접합부의 박리위치와 박리면적의 경계면을 결정하여 크기를 계산하는데 아주 유용하게 사용될 수 있는 기술이며, 이 연구에서 개발된 기술은 화력발전소에서 사용되고 있는 터빈베어링의 건전성을 확보하는데 적용되었다.

주요용어: 수침법, Babbitt, 박리, C-Scan, 음압 반사율

Abstract This study is aimed for the implementation of ultrasonic method to assess the reliability of turbine bearings. A modified ultrasonic immersion technique was carried out in both laboratory experiment and field application. From the laboratory results, we confirmed that the condition of interface layer between the babbitt and base metal be monitored by the C-Scan. The C-scan image by the ultrasonic immersion test can be used successfully to observe the condition of interface layer. The testing with a focused transducer provides a promising approach for estimating the extent of the damaged region and observing the interface layer effectively. The difference of the ultrasonic reflection ratio between the bonding and debonding area at the interface layer is one of the key parameters for assessing the extent of the damaged area; additionally, the reflection amplitude exhibits a favorable correlation with the overall damage level. The technique developed in this study was applied to the inspection of the turbine bearings at several power plants in Korea whereby the applicability in the field can be ascertained.

Keywords: immersion technique, Babbitt, debonding, C-Scan, ultrasonic reflection coefficient

1. 서 론

화력발전소에 사용되는 터빈은 그 중량이 일반적

인 회전체에 비하여 상대적으로 매우 크며, 고속으로 회전(3600 rpm)되는 설비로서 안정성과 안전성이 반드시 확보되어야 하는 발전설비의 핵심기이

다. 베어링 Babbitt 금속 경계면에 박리현상이 발생하면 터빈에 진동을 유발하여 설비를 위협한 상태로 만들 수 있다. 따라서 설비운영중에 18개월 ~ 24개월 주기로 계획예방정비 기간중 초음파 펄스-반사법에 의하여 베어링 Babbitt 경계부의 건전성을 확인하고 있다. 현재 사용되고 있는 A-Scan 방법은 경계부의 반사율을 검출하거나 베어링의 저면 반사신호 소실여부를 확인하는 방법으로 6 dB 감쇄법을 사용하여 결합의 경계면을 검출하고, 주로 5 MHz, 10 MHz의 주파수와 수직형 탐촉자를 사용하고 있다. 그러나 이러한 A-Scan 방법의 단점은 다음과 같은 문제를 가지고 있다.

- 1) 초음파의 확산과 주파수 선정의 제한으로 지름 2.0 mm 이하의 결함을 검출하기가 용이하지 않다.
- 2) Babbitt 금속층의 두께가 5 mm 이하가 되면 웨지부착이 추가적으로 요구된다.
- 3) 베어링 가장자리와 연결된 결함을 검출하는데 어려움이 있다.
- 4) 박리면적을 계산하는데 있어서 정밀도가 떨어진다.

위와 같은 A-Scan 방법에 의한 검사방법의 단점을 극복하기 위하여 PC를 기반으로 일정한 깊이에 있는 터빈베어링 접합부의 단면에 대한 영상을 얻기 위하여 자동 C-Scan 방법과 집속형 탐촉자를 사용하였다[1].

2. 본 론

2.1. 수침법 검사기술의 이론

초음파를 경사지게 입사할 경우 경계면에서 굴절과 반사현상이 발생되고, 초음파의 특성상 모드 변환등의 여러 가지 현상이 동시에 발생한다. 따라서 굴절 및 반사 파동은 입사때 발생한 파동과 다른 거동을 보이게 된다. 그러나 수직으로 입사한 초음파는 경사지게 입사한 때에 발생한 여러 가지 복잡한 현상들을 제거할 수 있다. 즉 입사된 초음파는 Babbitt 경계면에서 반사율에만 관련하여 단순하게 해석할 수 있다[2]. 경계면이 단순한 탄성체이고 변위에 대한 연속성이 있으며 응력이 변위에 따라 일정하다면 반사파는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$F(t, x) = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} f(t, x) \quad (1)$$

즉 진폭은 시간 t 와 거리 x 에 대한 관계로 나타낼 수 있다. $F(t, x)$ 는 반사되는 음압이며, $f(t, x)$ 는 초기음압을 나타낸다. Z_1 과 Z_2 는 경계면에서 접해있는 금속의 음향 임피던스로서 각 재료의 속도 V_1, V_2 와 밀도 ρ_1, ρ_2 의 곱으로 정의할 수 있다. 따라서 식 (1)은 다음과 같이 표현된다.

$$F(t, x) = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1} f(t, x) \quad (2)$$

식 (2)는 베어링 접합상태는 재료의 고유 물성치인 속도와 밀도에 의해서 반사율이 변화됨을 나타내는 것이다. Babbitt 금속의 경우 접합상태가 완벽하고 $\rho_2 V_2 > \rho_1 V_1$ 인 경우 반사파의 각도가 입사파에 대하여 위상변화를 일으키지 않으면 반사파의 진폭은 입사파에 대하여 약 29%의 반사율을 나타낸다. 그러나 경계부위에 공기층이 존재하여 $\rho_2 V_2 \ll \rho_1 V_1$ 이면 반사파는 180°의 위상변화가 생기며 약 99%의 반사음압을 나타낸다. 따라서 반사파의 위상각과 진폭의 강도를 확인하면 접합부가 있는 곳의 정보를 확인하고 평가할 수 있다.

재료의 감쇠계수 α 를 고려하여 건전부에 대한 음압 P' 을 계산하면 아래 식 (3)이 되며 박리현상이 발생한 결함부의 음압은 식 (4)와 같이 계산할 수 있다.

$$P' = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} (1 - \alpha) P_0 \quad (3)$$

$$P'' = -\alpha P_0 \quad (4)$$

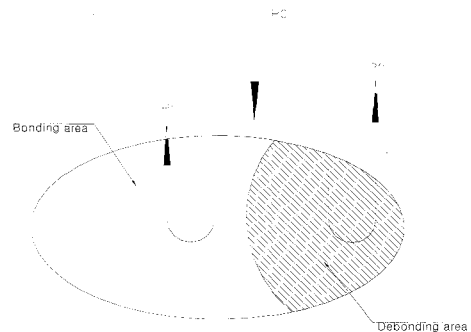


Fig. 1 Bonding/debonding reflection rate

펄스 반사법에 의한 기공의 검출은 접합부의 결합강도를 평가하는 비파괴적인 방법이 된다. 또한 초음파 탐촉자를 집속형으로 사용하고 탐촉자를 기계적으로 움직여 초음파의 진행위치를 변경해 주고 탐촉자의 위치정보와 함께 반사파의 크기를 검출하여 변환하면 결합을 평면화 하여 볼 수 있으며, 결합을 가로질러 탐촉자를 이송시키면서 결합까지의 초음파 전달거리를 기록하면 이상부위에 대한 수직 방향 단면을 나타낼 수 있다.

결합의 크기를 측정할 때 초음파 탐촉자의 위치 정보와 함께 기준이상의 음압반사율일 경우 박리된 것으로 판단할 수 있다. 이때 최소 검출 기준을 결정하기 위한 최소 반사 음압의 기준은 알고 있는 결합에 대한 음압의 크기를 기준으로 한다.

베어링의 접합상태가 좋은 경우 음향 일치성이 좋아서 경계부에서 돌아오는 초음파 에너지가 아주 작게 된다. 그러나 박리된 곳을 모사하기 위하여 가공된 인공결합에서 취득된 데이터에서는 음향 일치성이 떨어져 반사되는 초음파에너지가 아주 높게 된다[3].

2.2. PC를 기반으로한 C-Scan 수침검사 장치

PC를 기반으로한 수침검사 장치는 펄서/리시버, A/D 컨버터, 모터 제어기, 시스템 제어용 PC로 구성되고 스캐너라고 불리는 기계장치는 초음파 탐촉자를 고속으로 움직일 수 있는 4개의 축으로 구성되어 있다. X, Y, Z, R 등의 4축 구동 시스템으로 구성된 스캐너는 초음파 신호에 노이즈를 발생시키지 않아야 하며, 진동을 방지하고, 스캐너 구동간 반복 정밀도를 충분히 보장할 수 있어야 한다. 소프트웨어에서는 모든 하드웨어를 제어하면서 동시에 베어링 검사에서 얻어진 데이터를 수집하고 A, B, C-Scan으로 표현할 수 있다.

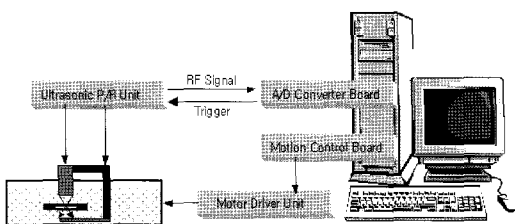


Fig. 2 The schematic Diagram of C-Scan system

수침법 검사시 송수신 방법을 적용하면 검사결과 의 감도를 향상시킬 수 있으나 일반적으로 검사대상체에 대한 접근이 한쪽으로만 제한되어 있다. 검사 수행시 발생하는 연속적인 진폭과 초음파 이동 시간에 대한 A-Scan 데이터는 전자적인 방법으로 게이트를 설정하여 기록된다. 전체 면적을 C-Scan 방법으로 검사한 결과는 베어링의 박리상태를 화면으로 확인할 수 있도록 표시해 준다. 특정 지점에 대한 결합정보는 초음파 센서를 이동시켜 결합의 위치에 대한 정보를 다시 취득하고 평가할 수 있다. 베어링 박리 검사는 건전부에 대한 경계면에서의 초음파 데이터와 박리부의 초음파 데이터를 비교하여 분리함으로서 박리부의 검출과 평가결과를 얻는 방법이다.

PC 기반 수침 검사 장치는 금속, 비금속 및 반도체등에 사용되며, C-Scan 센서는 항공기 구조검사에 driplless bubbler를 이용하는 등[4] 여러 재료의 신뢰성 평가에 사용되는 시스템이지만, 화력 발전소 주요설비 검사에 적절하게 사용될 수 있다. 현재는 검사 시스템 운영에 있어서 검사속도와 신뢰성이 확보되고 있으며, 검사결과에 대하여 검사자와 검사결과를 확인하고자 하는 모든 이들에게 상호 이해할 수 있는 정보를 제공하는 수준까지 발전하고 있다[5].

Babbitt 접합부 경계면에 존재하는 박리부가 초음파 탐촉자의 근거리 음장영역을 벗어나고, 집속되는 초음파 에너지 공간 면적의 1/2을 초과하고 검사대상체 표면과 평행하면, 초음파 진폭은 결합의 검출과 크기 측정에 적합하게 적용된다. 결합 크기 평가결과에 대한 신뢰성을 검증하기 위해서는 같은 깊이에 가공된 인공결합에서 검출된 데이터와 상호 비교하는 방법을 적용할 수 있으며, 인공결합의 형상 데이터와 C-Scan 시스템이 구현하는 정보결과와 상호 관계를 확인한 후 결합 평가에 직접 적용할 수 있다. 교정용 시편은 검사하고자 하는 베어링 재질과 동일하게 제작되어야 초음파검사시 발생하는 초음파의 감쇄 및 초음파 특성을 동일한 조건으로 유지할 수 있다[6].

현재 개발되어 적용되고 있는 수침법 검사는 다음과 같은 특징들이 있다. 첫째, 스캐너의 검사속도와 정밀도에 있어서 500 mm/sec의 스캐너 이송속도와 1 μ m의 간격의 정밀도를 유지할 수 있으나 Babbitt 검사에는 200 mm/sec 정도면 충분하다. 검사속도를 높일 경우에 대구경의 저널 베어링을 검

사에서 초음파 탐촉자를 움직이는 스캐너의 회전 관성력으로 인하여 검사결과를 표시하는 초음파 화상의 좌,우 측면위치가 서로 일치하지 않을 수 있어 검사품질에 제한을 가지고 온다. 둘째, C-Scan 검사를 수행한 후 특정 지점에 대한 정밀한 평가가 필요할 경우 초음파 탐촉자를 결함에 있는 곳으로 이송시켜 깊이정보를 얻는 방법으로 단면 형상을 표현하거나 검사결과 화면을 3차원적으로 표시할 수 있다. 셋째, 펄서 리시버의 성능이 향상됨에 따라 샘플링 시간을 최소화 할 수 있고 검사결과를 표시하는데 있어서 보다 좋은 영상을 구현할 수 있다. 또한 새로운 재료의 진동자 개발로 인하여 분해능을 더욱 향상시키는 방향으로 개발되고 있다. 넷째, C-Scan으로 화상처리된 결과에 대하여 검출된 결함을 분류하고 각각의 결함에 대한 번호 부여와 인접결함을 하나의 결함 또는 분리결함으로 처리하는 기술로 실제결함에 대한 정보를 보다 정밀하게 얻을 수 있다.

2.3. 인공결함 시편에 의한 결함검출평가 능력 실험

베어링 경계면 평가에 앞서 초음파 탐촉자의 성능검증과 검사조건 설정에 필요한 대비시편을 제작하였다. 평저공 구멍 가공된 인공결함은 베어링 금속과 Babbitt 금속의 경계부위에 가공되었으며 결함의 최소 크기 검출과 실제결함의 크기를 정확하게 표시할 수 있는지 여부를 보증하기 위하여 직경 1.5 mm에서 16 mm까지 10개의 평저공 구멍을 가공하고 실제크기와 동일하게 측정가능한지 여부와 최소 검출 능력을 확인을 위한 실험을 하였다.

가공된 인공결함을 일반적인 A-Scan 방법으로 시험하였을 경우 직경 1.5 mm와 2.0 mm의 인공결함은 검출능력에 어려움이 있었으며 특히 결함의 크

기를 측정하는 것은 불가능 하였다. 이는 A-Scan 방법으로 결함의 크기를 측정할 경우 결함의 경계면을 결정하는 것이 수침법에 의한 자동검사 방법에 비하여 상대적으로 많은 오차 요인이 존재하며, 수침법에 의한 자동 검사의 경우 결함의 검출능력은 가공된 인공결함의 최소 직경 1.5 mm 결함을 충분히 검출하였으며, 결함의 형상표현에서도 집속형 탐촉자를 이용한 결과 정확한 경계면을 구분할 수 있었다. Fig. 4는 내경 500 mm Babbitt 두께 10 mm 인 시편에서 얻는 C-Scan 이미지 이다.



Fig. 4 The result of C-Scan for artificial specimen

제작된 인공결함에 대하여 5 MHz, 10 MHz 초점 거리 25 mm인 탐촉자로 주파수를 변경하여 측정된 결과 검사화상의 해상도가 상대적으로 낮았으며 직경 1.5 mm 결함에 대해서는 5 MHz 탐촉자를 사용하였을 경우 검출능력을 보장할 수 없었다.

결국 이와 같은 결과는 초음파의 주파수를 높이고 주사간 상하 이동 거리를 작게하면(0.5 mm이하) 결함의 경계면에 대한 분해능과 감도를 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 현장 검사시 주사간 거리를 더욱 작게하여 정밀한 검사를 적용할 수 있으나 검사시간과 최소 검출 능력을 고려할 때 주사간 상하 이동거리는 0.5 mm 내외 이면 결함검출과 평가에 충분히 적용됨을 알 수 있다.

베어링검사에서 얻어지는 기준 신호는 Fig. 5와 Fig. 6과 같이 표현된다. 건전부에서 얻어지는 신호는 C-Scan 화상에서 배경 화면으로 나타날 것이며, 박리된 부분의 높은 진폭과 위상변화는 결함의 평가에 사용되는 핵심 데이터가 된다.

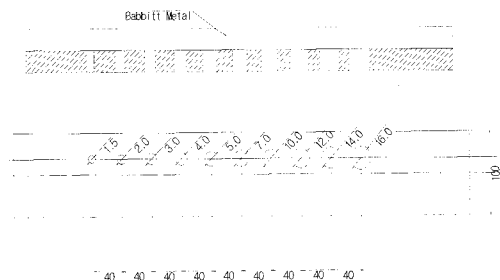


Fig. 3 Artificial FBH specimen

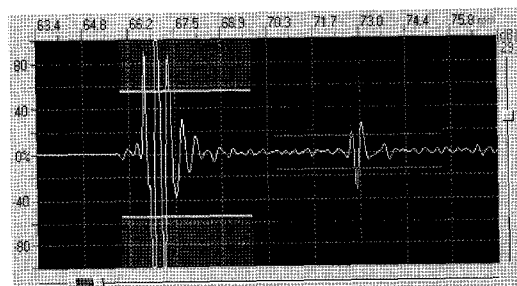


Fig. 5 The signal of good bonding interface



Fig. 6 The signal of debonding interface

2.4. 터빈베어링 C-Scan 검사 현장시험

터빈 베어링 건전성 평가에 대한 제작사의 일반적인 권고사항은 다음과 같다.

- 1) 베어링 가장자리에서 13 mm 이내에는 박리부가 존재해서는 않된다.
- 2) 단일 박리면적의 크기가 $625 \text{ mm}^2 (25\text{mm} \times 25\text{mm})$ 를 초과해서는 않된다.
- 3) 전체 박리 면적은 베어링 Babbitt 접합면적 전체의 10% 또는 15%를 초과해서는 안 된다 (베어링 형태와 제작사에 따라 10% 또는 15% 적용).

위와 같은 조건을 충분히 달성하기 위해서는 정밀도 떨어지는 일반적인 A-Scan 방법은 적절하지 않으며, 베어링 가장자리 박리부 검출과 박리면적 평가에 있어서 초음파의 확산과 수동 작업에 의한 박리부 경계지점 결정에 제한이 있기 때문에 신뢰성이 떨어진다.

Fig. 7은 500 HW 터빈 베어링을 검사하기 위한 PC기반 수침검사 시스템의 모습이며, Fig 8은 터빈 저널베어링을 검사한 C-Scan 결과이다. 검사된 저널베어링은 압력을 받는 하부 베어링으로서 베어링 중심지역에 박리현상이 일부 진행되고 있으나, 건전성 기준에는 적합하므로 평가되었다. 또한 Fig. 9의 스러스트 원형 베어링의 경우 A-Scan 수동검사에서 적합으로 평가된 경우이나 자동 C-Scan 검사결과 베어링의 가장자리를 따라 박리현상이 진행되고 있어 교체 정비사항으로 평가한 베어링이다.

이와 같이 고주파수 초음파를 이용한 펄스-에코 기법으로 관측하고자 하는 내부 계면에 초점을 맞추어 스캔함으로써 이미지를 얻게되는 C-Scan기법을 이용한 저널베어링 평가는 매우 유용한 신뢰성 검사기술이라 할 수 있다[7].

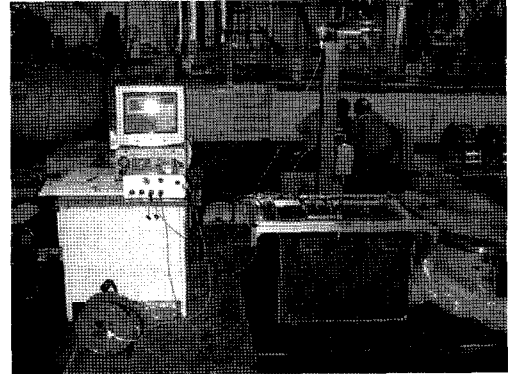


Fig. 7 The field testing of turbine bearing

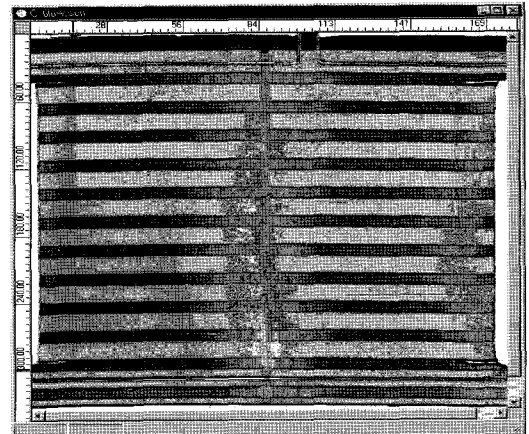


Fig. 8 The C-scan image of journal bearing

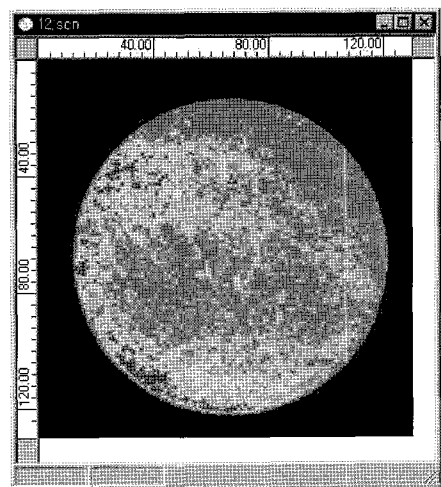


Fig. 9 The C-scan image of round thrust bearing

3. 결 론

PC를 기반으로한 수침법 C-Scan 검사방법은 집속형 탐촉자와 높은 주파수를 적용함으로써 종래의 검사방법에 비하여 베어링 Babbitt 금속 접합부에 대한 건전성 진단에 대한 신뢰성을 향상시켰다. 특히 자동 C-Scan에 의한 초음파 검사는 결합검출 정밀도와 경계부 분리능력이 뛰어나므로 박리면적의 정량적 평가에 필수적인 기법으로 인정된다.

C-Scan 검사방법의 결과로 나타나는 초음파 화상은 비파괴 평가 결과에 있어서 검사자와 설비운영자간에 직관적인 정보를 공유할 수 있고, 설비의 안정성과 신뢰성을 유지하는데 최적의 방법으로 사용된다.

참고문헌

- [1] 최민주, "비파괴 초음파 검사법의 의학적 활용: 초음파 C 스캔 영상을 이용한 미세 골절의 진단", 비파괴검사학회지, Vol. 22, No. 4, pp. 377-385, (2002)
- [2] G. J. Curtis, "Non-destructive testing of adhesively bonded structures with acoustic methods. Ultrasonic testing," John Wiley & Sons, pp. 519-520, (1982)
- [3] A. F. Brown, "Ultrasonic spectroscopy, Ultrasonic testing," John Wiley & Sons, pp. 167-215, (1982)
- [4] 권오양, "노후 항공기의 비파괴시험 평가", 비파괴검사학회지, Vol. 19, No. 1, pp. 37-38, (1999)
- [5] Yukio Ogura, "Ultrasonic testing of bonded interface by image techniques," Journal of Japanese Society for Nondestructive Inspection, Vol. 49, No. 10, pp. 224-230, (2000)
- [6] J. Szilard, "Review of conventional testing technique, Ultrasonic testing," John Wiley & Sons, pp. 25-52, (1982)
- [7] 장효성, 하 욱, 장경영, "초음파를 이용한 반도체의 신뢰성 평가", 비파괴검사학회지, Vol. 21, No. 6, pp. 598-606, (2001)