

볼 베어링의 조기 결함 검출 방법들의 비교

The Comparison Between Fault Detection Methods about Early Faults in a Ball Bearing

박 춘 수* · 김 양 한**

Choon-Su Park, Yang-Hann Kim

Key Words : Ball Bearing(볼 베어링), Fault Detection(결함 검출), Early Fault(조기 결함)

ABSTRACT

Ball bearings not only sustain the system, but permit the rotational component to rotate. Excessive radial or axial load and many other reasons can cause faults to be created and grown rapidly in each component. The grown faults make noise and vibration, which can make the system unstable. Therefore, it is important to detect faults as early as possible. For this reason, there have been many researches on fault detection method of early faults in a ball bearing. The fault detection methods can be categorized to several groups by signal processing methods. Not all the methods are efficient for finding early faults. We select representative methods known as efficient for detecting early faults and compare the results for inspecting which method is effective.

1. 서 론

볼 베어링은 내, 외륜과 볼 사이의 접촉을 통해 기계 시스템의 하중을 지지하면서 회전운동을 하는 기계 요소이다. 볼 베어링의 요소에 결함이 발생하면, 결함과 상대 접촉면의 충돌에 의해 진동 및 소음을 발생시킨다. 이 결함은 하중 및 연속적인 충돌에 의해서 급속하게 성장하여 전체 시스템을 불안정하게 한다. 결함에 의한 피해가 커지기 전에 결함을 진단하여 조치를 취하는 것은 중요하기 때문에 결함 검출에 관련된 신호 처리는 많은 연구가 되어 왔다.^[1-16]

볼 베어링의 결함을 검출하는 방법은 신호 처리 방법에 따라 몇 가지 범주(category)로 나눌 수 있다. 먼저 주파수 영역에서의 스펙트럼 해석(spectral analysis)을 이용하는 방법들^[1-3]을 한 범주로 묶을 수 있다. 그리고, 쿠프렌시 영역에서 살펴보는 캡스트럼 해석(cepstral analysis)을 이용한 방법들^[4,5]로 다른 그룹을 지을 수 있다. 세 번째로, 대역통과(band-pass) 혹은 저역통과(low-pass) 필터를 사용하여 포락(envelope)을 살피는 방법들^[6-9]이 하나의 그룹으로 묶일 수 있다. 네 번째로, 과도 신호의 검출에 효과적인 것으로 여겨지는 시간-주파수 해석방법(time-frequency analysis)이 있다. 여러 가지 시간-주파수 해석 방법 중에서 결함 신호를 검출하는 것에는 시간, 주파수 모두에서 해상도가 좋은 웨이블릿(wavelet)을 이용한 결함 검출 방법이 쓰이

고 있다.^[10-12] 이 외에도 Lee 와 White^[13]에 의해 능동적인 잡음 제거 알고리즘을 사용한 방법들로 결함을 검출하는 방법이 있고, 통계적인 접근^[14-16]을 통한 결함 검출 방법 등도 제안되었다.

볼 베어링 결함 검출을 위한 많은 신호 처리 방법이 있지만 모든 방법이 조기 결함을 검출하는데 효과적인 것은 아니다. 이 방법들 중 각 범주 별로 미세한 결함 검출에 효과적으로 알려진 방법들에 대해서 조기 결함 검출능력을 비교하여 보도록 하자.

2. 선정된 결함 검출 방법

볼 베어링의 결함 검출을 위해 제안된 많은 방법들 중에서 각 범주 별로 미세한 결함 검출에 효과적으로 알려진 방법들을 선정하였다. 먼저 스펙트럼 해석에서는 이동창문(moving window)방법^[3]을 선정하였다. 그리고, 캡스트럼 해석에서는 최소분산 캡스트럼(minimum variance cepstrum)^[5]을 선정하였다. 또, 포락 검출 방법으로 복소포락(complex envelope)방법^[9]을 사용하여 검출해 보도록 한다. 마지막으로 연속 웨이블릿(continuous wavelet)해석 방법을 선정하였다.

2.1 이동창문 해석^[3]

이동창문 함수 방법은 일정 크기의 창문을 측정된 신호에 대해서 이동시키며 각 위치에서 각각의 스펙트럼을 해석하고자 하는 신호에 적절한 크기의 폭(band)로 나눈다. 이때, 밴드의 폭을 너무 넓게 나누면 신호 대 잡음비가 좋은 영역을 그렇지 않은 부분과 제대로 나누지 못해 결함 주기를 찾는데 좋지 않고, 너무 잘게 나누면 각 밴드 별로 관찰하지 못해 식별력이 떨어지는 단점이 있게

* 한국과학기술원 기계공학과 노빅센터

E-mail : cpure77@kaist.ac.kr

Tel : (042) 869-3065, Fax : (042) 869-8220

** 정희원, 한국과학기술원 기계공학과 노빅센터

된다. 적절한 밴드로 나누어진 신호의 파워를 모두 더하여 시간에 대해 신호를 재구성한 후 다시 푸리에 변환을 하게 되면, 최종적으로 이동 창문 해석의 결과가 밴드 별로 주파수 성분으로 나타나게 된다.

2.2 복소포락 해석^[9]

측정된 신호를 저역 통과 필터를 통과시켜 얻은 포락의 관찰을 통해 결함의 주기를 살펴보는 방법이다. 이 방법은 푸리에 변환을 사용하지 않고, 구적 복조(quadrature demodulation)를 이용하여 두 신호를 위상차가 90°가 되는 두 조화 신호로 분리하여 신호의 포락을 구하는 방법이다.

2.3 최소분산 캡스트럼 해석^[5]

최소분산 캡스트럼은 주기적인 신호와 랜덤한 신호 사이의 차이점을 이용하여 두 신호를 구분하는 신호처리 방법으로 제안되었다. 베어링 결함 신호와 같은 주기적인 확정신호(deterministic signal)가 랜덤(random)한 속성의 잡음 속에 묻혀 있을 때, 두 신호의 특성 차이를 이용해 신호의 주기성을 찾는 것이 최소분산 캡스트럼의 목적이다.

2.4 연속 웨이블릿 해석

연속 웨이블릿 해석 방법은 일정한 형태를 지닌 모 웨이블릿(mother wavelet)의 크기를 늘이거나 줄이면서 관심 신호 상에 이동시켜 신호와 웨이블릿 상아의 유사성을 살펴보는 방법이다. 따라서 이 방법은 시간에 따라 변하는 비정상(non-stationary)신호의 시간에 따른 변화를 시간과 척도영역 모두에서 좋은 해상도로 살펴볼 수 있는 장점이 있다. 그러나 모 웨이블릿과 신호의 유사성을 따지는 것이므로 웨이블릿의 형상에 따라서 신호의 검출 능력이 달라진다. 따라서 해석신호의 종류에 따른 적절한 웨이블릿의 선정이 중요하다.

3. 실험에 사용된 베어링 및 실험 구성

3.1 실험에 사용된 베어링

실험에 사용된 베어링은 차량의 현가장치와 바퀴를 연결하여 차량의 하중을 지지하고, 바퀴의 회전을 가능하게 하는 허브 베어링이다. 허브 베어링은 Fig. 1에 보이는 것처럼 일정한 접촉각(contact angle)을 가지고 하중을 지지하는 복열(double-row) 앵글러(angular) 볼 베어링이다.

실험에 사용된 베어링은 승인시험(acceptance test)을 위해 고속 내구 시험을 거친 것으로 Fig. 2에 보이는 것처럼 내륜에 미세한 조기 결함이 있는 베어

링이다.

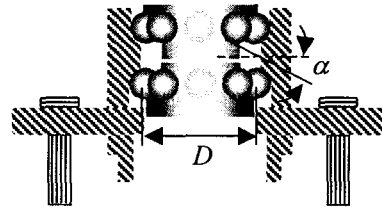


Fig.1 Schematic diagram of the hub bearing, where α is contact angle and D is pitch diameter

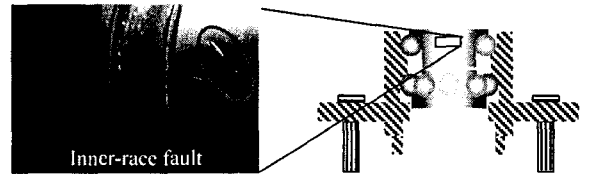


Fig.2 Photograph of early fault and its position at inner-race

3.2 실험 장치 및 구성

실험은 허브 베어링을 차량의 우측 뒷바퀴에 장착한 상태로 다이내모로 회전시켜 바퀴의 회전속도가 930[RPM]인 상태에서 가속도 신호를 얻었다.(Fig.3)

베어링 진동의 측정 위치의 선정은 진동원 및 진동 전달 매개체의 강성을 고려해야 한다.^[17] 매개체의 강성이 높으면 진동 전달이 잘되는데, 베어링의 경우 하중을 받아 접촉하고 있는 부위의 강성이 높아진다. 일정한 접촉각을 가지는 앵글러 컨택트 베어링의 경우에는 보다 큰 하중이 작용하는 방향이 추천된다. 자동차의 허브 베어링은 축방향으로의 측정이 반경방향 측정보다 좋을 것으로 예측할 수 있다.

가속도 신호를 측정하기 위한 측정 장치의 전체 구성도는 Fig. 3과 같다. 가속도계는 B&K Type 4374 가속도계를 사용하였다. 신호의 측정과 저장은 HP35670A를 이용해 65[kHz]의 샘플링 주파수로 측정 및 저장하였다.

4. 신호처리 결과

실험의 결과로 얻어진 시간영역 신호는 Fig.4와 같다. 그림에서 보듯이 결함이 없는 정상 베어링의 신호와 비교하여 차이가 없음을 알 수 있다. 즉, 측정된 신호만으로는 결함의 존재 여부를 확인할 수 없다.

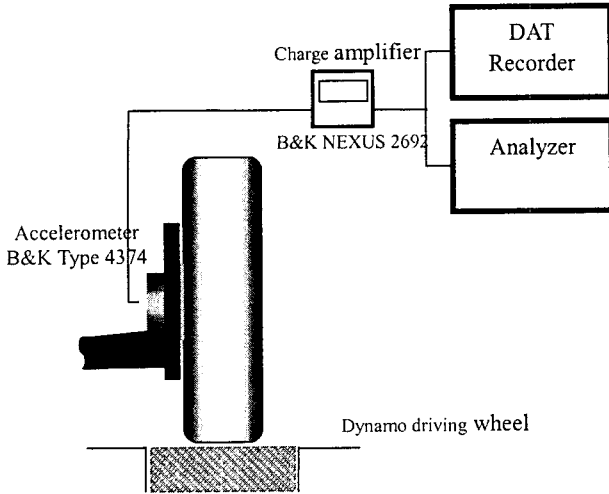


Fig.3. Experimental set-up (a) Schematic diagram of measurement devices – accelerometer (reference sensitivity: $0.1484[\mu\text{C}/\text{ms}^{-2}]$, upper frequency limit(+10%): 26 [kHz]), charge amplifier(gain: $10[\text{mV}/\text{ms}^{-2}]$, upper frequency limit: 30[kHz])

각 결함 검출 방법으로 신호 처리한 결과를 살펴 보도록 하자. Fig.5 는 이동창문해석 방법으로 조기 결함 신호를 신호 처리한 결과이다. 결과를 보면, 내륜 결함의 특성 주파수에 해당하는 110[Hz]에서 각 밴드 별로 피크가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 내륜에 결함이 있음을 나타낸다. Fig. 6 은 복소포락 해석 결과를 나타낸 것인데, 내륜결함 주기에 해당하는 9.2[msec]의 주기를 확인할 수 없다. 이에 반해 Fig.7 의 최소 분산캡스트럼의 결과에서는 내륜 결함 주기에서

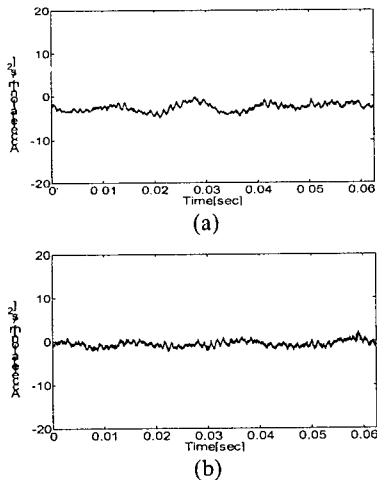


Fig.4 Measured acceleration signal, (a) a bearing with early fault at inner-race, (b) a normal bearing

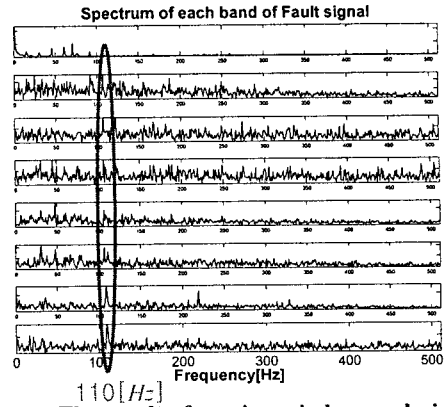


Fig.5 The result of moving window analysis of a bearing with early fault at inner race, 110[Hz]: inner-race fault frequency

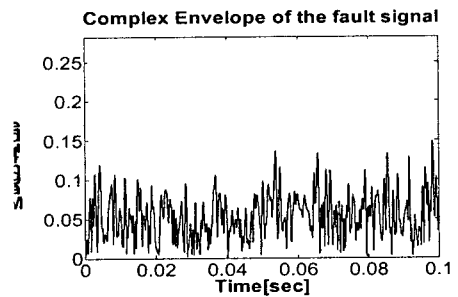


Fig.6 The result of complex envelope analysis of a bearing with early fault at inner-race

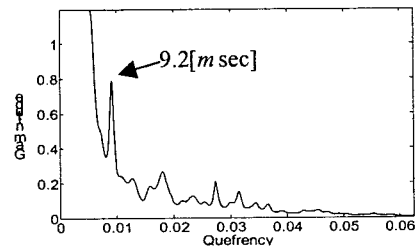


Fig. 7. The result of minimum variance cepstrum of a bearing with early fault at inner-race

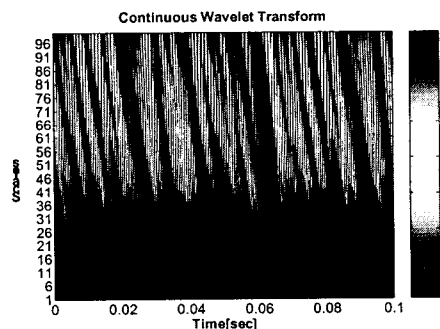


Fig.8 The result of continuous wavelet analysis of a bearing with early fault at inner-race

피크가 선명하게 발생하는 것을 볼 수 있다.

Fig.8 은 Daubechies 20 웨이블릿을 사용하여 연속 웨이블릿 해석을 수행한 결과이다. 결합 주기에 해당하는 주기적인 모습을 살펴보기 힘들다.

5. 결론

볼 베어링은 다양한 크기와 종류로 여러 분야에서 널리 쓰인다. 볼 베어링에 작용하는 하중이 크고 속도가 빠를수록 결합이 발생했을 때의 진동과 소음이 크고, 작은 결합도 빠르게 성장하여 심각한 문제가 된다. 따라서 조기에 결합을 검출하는 것은 기계 시스템의 신뢰성 확보 및 유지 관리 측면에서 중요하다.

이를 위해 많은 조기 결합 검출 방법이 제안되었다. 이 방법들을 사용하는 신호처리 방법에 따라 몇 가지 범주로 나누고, 조기 결합 검출에 적합한 대표적인 방법들을 선정하여 미세한 조기 결합 검출 능력을 비교하여 보았다. 신호처리 결과 실험에 사용된 조기 결합의 경우에는 최소분산 캡스트럼과 이동창문 방법이 조기 결합을 찾는 데 다른 두 방법보다 효과적임을 볼 수 있었다.

후 기

본 논문은 교육인적자원부의 BK21 사업에 의한 연구 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) J.I. Taylor, "Identification of bearing defects by spectral analysis," *Journal of Mechanical Design*, April, vol. 102, pp. 199~204, 1980
- (2) J.-P. Park, C.-W. Lee, "Directional spectrum for identification of characteristic frequency of rolling bearings," *J. of Korean Society for Noise and Vibration* Vol. 9(2), pp. 393~400, 1999
- (3) Y. -H. Kim, B. D. Lim and W. S. Cheung, "Fault detection in a ball bearing system using a moving window," *Mechanical systems and Signal Processing*, vol. 5, pp.461-473, 1991
- (4) D. Ho and R. B. Randall, "Manifestations of bearing fault vibrations in gearboxes," *Sixth International Congress on Sound and Vibration*, pp.2943~2950, 1999
- (5) Y.-C. Choi and Y.-H. Kim, "Fault detection in a ball bearing system using minimum variance cepstrum," *inter-Noise 2003*, Seogwipo, Korea, August 25-28, 2003
- (6) R. B. Randall, "A New Method of Modeling Gear Faults," *Journal of Mechanical Design* vol. 104, pp.256-267, 1982
- (7) P. D. Mc Fadden and J. D. Smith, "Model for the vibration produced by a single point defect in a rolling element bearing," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 96, pp.69-82, 1984
- (8) J. Shin, et al., "Diagnosis of bearing by high frequency resonance technique," *J. of Korean Society of Automotive Eengineering* Vol.14(5), pp.83~94, 1992
- (9) Y.-H. Kim, W.S. Cheung and Y. K. Kwak, "Complex envelope of the vibration signature of ball bearing system and its application to fault detection," *IV International Congress on Experimental mechanics*, Portland Oregon U.S.A., pp.461~473, 1988
- (10) Z. K. Peng, F. L. Chu, " Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics: a review with bibliography," *Mechanical systems and Signal Processing*, vol. 18, pp.199-221, 2004
- (11) D. Bader, P. Holstein, D. Mackenzie, H. Marx, O Holinski and K. Augsburg, "Real-time diagnostics for non-stationary gear noise on automotive tooth gears," *Inter noise 2004*, Prague, Czech Republic, August 22~25, 2004
- (12) Hongyu Yang, Joseph Mathew, Lin Ma, "Fault diagnosis of rolling element bearings using basis pursuit," *Mechanical systems and Signal Processing*, vol. 19, pp. 341-356, 2005
- (13) S. K. Lee and P. R. White, "The enhancement of impulsive noise and vibration signals for fault detection in rotating and reciprocating machinery," *Journal of sound and vibration*, vol. 217(3), pp. 485~505, 1998
- (14) A.C. McCormick and A. K. Nandi, " Cyclostationarity in rotating machine vibrations," *Mechanical systems and Signal Processing*, vol. 12(2), pp. 225-242, 1998
- (15) C. Capdessus, M. Sidahmed and J. L. Lacoume, " Cyclostationary processes: application in gear faults early diagnosis," *Mechanical systems and Signal Processing*, vol. 14(3), pp. 371-385, 2000
- (16) R. B. Randall, J. Antoni and S. Chobsaard, " The relationship between spectral correlation and envelope analysis in the diagnostics of bearing faults and other cyclostationary machine," *Mechanical systems and Signal Processing*, vol. 15(5), pp. 945-962, 2001
- (17) D. J. Ewins, *Modal testing: Theory and practice*, Research studies press LTD., B&K, pp.108~111, 1986