

베어링 초 미세 결함 검출방법과 실제 적용

Bearing ultra-fine fault detection method and application

박 춘 수*·최 영 철**·김 양 한**·고 을 석***

Choon-Su Park, Young-Chul Choi, Yang-Hann Kim and Eul-seok Ko

Key Words: Bearing(베어링), Fine fault(미세 결함), Fault Detection(결함 검출), Minimum Variance Cepstrum(최소 분산 켈스트럼)

ABSTRACT

Bearings are elementary machinery component which sustain loads and do rotating motion. Excessive loads or many other reasons can cause incipient faults to be created and grown in each component. Moreover, it happens that incipient faults which were caused by manufacturing or assembling process' errors of the bearings are created. Finding the incipient faults as early as possible is necessary to the bearings in severe condition: high speed or frequently varying load condition, etc. How early we can detect the faults has to do with how the detection algorithm finds the fault information from measured signal. Fortunately, the bearing fault signal makes periodic impulse train. This information allows us to find the faults regardless how much noise contaminates the signal. This paper shows the basic signal processing idea and experimental results that demonstrate how good the method is.

1. 서 론

베어링은 하중을 지지하면서 회전운동을 하는 기계요소로서 구동 조건(operating condition)에 따라 크기 및 재질, 종류, 윤활 조건 등이 다른 수많은 베어링이 존재한다. 여러 종류의 베어링들 중 볼이나 롤러가 내, 외륜 사이에서 회전운동을 하는 베어링을 구름 베어링(rolling bearing)이라 한다. 구름 베어링은 그 구조상 외륜과 내륜 사이의 회전 요소들이 서로 접촉하여 하중을 지지하므로 과도한 하중이 작용하거나 이상 운전 조건 등에 의해 베어링을 구성하고 있는 요소들(내륜, 외륜 및 볼)에서 결함이 발생할 수 있다.

베어링이 구동 중 발생한 초기 결함은 발생 당시에는 크기가 작아 영향을 주지 않더라도 계속적인 구동에 의해 결함이 성장하게 되면, 점차 큰 충격 신호가 발생하고 이는 시스템의 공진 주파수를 가진 하여 원치 않는 진동 및 소음을 만들어 낸다.^[1] 특히, 고속으로 회전하거나 급격하게 하중이 변하는 조건에 있는 베어링의 경우에는 작은 결함이 급격히 성장하게 되므로 이러한 초기 결함을 가능한 빨리 찾아내는 것이 중요하다.

베어링에 발생하는 초기 결함은 실제 구동 중에도 발생하지만, 베어링이 사용되기 전에 제작이나 조립상의 실수 등으로 발생할 수도 있다. 즉, 베어링이 구동되기 전에 이미 초기 결함을 가지고

있는 것이다. 이 경우는 결함을 가지고 구동되기 시작하는 것이므로 진동 및 소음의 발생에 취약할 수 밖에 없다. 따라서 생산된 베어링에 대해서 초기 결함을 가지고 있는지에 대한 검사가 필요하다. 초기 결함이 있는지에 대한 검사를 하기 위해서는 초기 결함을 찾아내는 방법이 필요하다. 초기 결함은 작으므로 생성되는 충격신호도 작아 작동 잡음(operating noise)속에 묻혀 관찰하기가 어려우므로 결함 검출과 관련된 여러 방법들에 대해서 살펴보고 알맞은 방법을 선정하도록 해야 한다. 이러한 방법을 정상 출고된 베어링 시편에 적용하여 미세한 초기 결함 검출 가능 여부를 검증하고자 하는 것이 이 논문의 목적이다.

2. 베어링 결함 검출 방법

베어링의 결함을 검출하기 위한 신호처리 방법들은 오랫동안 다양하게 연구되어 왔다.^[1-7] 베어링 결함 신호가 작은 미세 초기 결함의 경우에는 베어링의 결함신호를 관찰하기가 어렵게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 베어링 결함 검출에 사용된 여러 방법들에 대해 알아보고 미세 결함을 검출하기 위해 알맞은 방법을 선정하도록 하자. Taylor^[2]는 주파수 영역에서 스펙트럼 해석(spectral analysis)을 통해 결함 특성 주파수(characteristic frequency) 관찰로 베어링 결함을 살펴 보았다. Randall^[3]은 켈스트럼(cepstrum)을 이용하여 베어링 및 기어박스의 결함을 해석하였는데, 잡음이 많은 경우에는 적용하기 힘든 단점이 있다. McFadden과 Smith^[4]는 진동 신호의 공진 주파수에 대역통과 필터를 씌운 후 포락을

* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

E-mail: cpure77@kaist.ac.kr

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

** 정회원, 한국과학기술원 기계공학과 대학원

*** 현대 자동차 연구소 시험 1팀

구하여 결함을 검출하는 방법을 제안하였으나 잡음에 의해 결함에 의해 발생하는 공진 주파수를 찾기 힘든 경우에는 적용하기 힘든 방법이다. Kim, Cheung 과 Kwak^[5]은 측정 신호에 결함 신호의 공명 주파수(ringing frequency)로 구적 복조(quadrature demodulation)하여 저역통과 필터(low-pass filter)를 통해 얻은 복소 포락(complex envelope)의 관찰로 결함 검출을 시도하였으나 신호 대 잡음비(signal to noise ratio)가 $-20[\text{dB}]$ 이하가 되면 결함 검출이 힘들다. 또, Kim et al. 은 신호 대 잡음비에 따른 결함 검출 방법을 이론적으로 유도하여 잡음이 상대적으로 많은 경우에도 결함을 검출할 수 있는 방법으로 이동 창문(moving window)방법을 제안하였다.^[6] 그러나 이 방법은 신호처리하기 전 결함의 종류에 알맞은 윈도우의 크기와 이동 스텝 크기를 정해주어야 하는 어려움이 있다.

주기적인 충격신호가 잡음 속에 완전히 묻혀 있는 경우에도 결함을 검출할 수 있는 것으로 알려진 방법 중 최소분산 캡스트럼^[7-8]이 있다. 이 방법의 기본적인 아이디어는 우리가 원하는 신호가 임펄스 트레인(impulse train)형태로 측정 신호 속에 있다는 사실로부터 출발한다. 시간 영역에서 임펄스 트레인 형태의 신호는 주파수 영역에서 주기적인 형태의 신호 특성을 갖는다. 잡음 신호는 랜덤(random)하므로 확정 신호(deterministic signal)와는 신호특성이 구별된다. 이러한 신호특성의 차별성을 이용하여 잡음에 강인한 신호처리, 이 경우에는 주기신호를 찾아낼 수 있는 방법을 생각하여 볼 수 있다. 따라서 최소 분산 캡스트럼을 이용하여 실험을 통해 베어링의 미세한 결함 검출에 적용하여 보았다.

3. 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 허브 어셈블리에 장착되어 생산되는 베어링으로 일정한 접촉각(contact angle)을 가지고 하중을 지지하는 복열(double-row) 앵글러(angular) 볼 베어링이다. 실험에는 베어링 제조 회사에서 정상 출고된 베어링 시편 12 개를 사용하였다.

허브 베어링의 주요 형상 정보를 Table. 1에 나타내었다. 피치 지름(pitch diameter)은 베어링의 축을 중심으로 서로 반대 방향에 있는 볼 요소의 중심까지의 거리를 의미한다. 그리고, 접촉각은 볼 요소들이 내, 외륜과 접촉하고 있는 각이다.

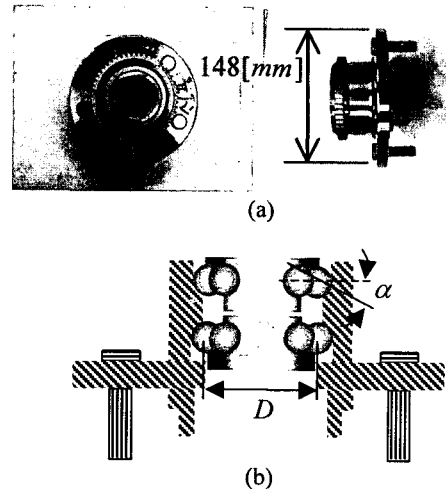


Fig.1 Photographs of Hub bearing (a) Top view (left-hand side), side view (right-hand side), (b) Schematic diagram of the hub bearing, where α is contact angle and D is pitch diameter

Table 1 Shape information of the Hub bearing

Pitch diameter (D)	54 mm
Ball diameter (d)	12.7 mm (1/2 inch)
Contact angle (α)	35°
Number of balls(z)	24 EA (12×2)

4. 실험 장치 및 구성

베어링을 회전시켜 진동 신호를 측정하기 위해 구성된 측정 장치의 전체 구성도를 fig. 2(a)에 개략적으로 나타내었다. 구동 장치로 1.5[HP]의 출력을 내는 단상 유도 전동기를 사용하였다. 베어링과 모터 샤프트 사이에 커플링(Coupling)을 끼워 모터 샤프트의 회전이 그대로 베어링 내륜으로 전달되도록 하였다. 커플링과 베어링 내경 사이의 연결은 고무링을 제작하여 커플링과 베어링 내경이 축방향 하중에 의해 밀착되어 회전하도록 하였다. 그리고 베어링 외륜의 고정은 모터를 위에 올려 무게(21[kg])에 의해 베어링과 고무판이 밀착되어 고정될 수 있도록 구성하였다.

진동 신호 측정을 위해서 가속도계를 사용하였다. 가속도계는 B&K Type 4374 를 사용하였는데, 이 가속도계는 26[kHz]의 상한 주파수를 가지며, 기준 감도(reference sensitivity)는 $0.1484 [\text{pC}/\text{ms}^{-2}]$ 이다. 모터의 회전 속도는 디지털

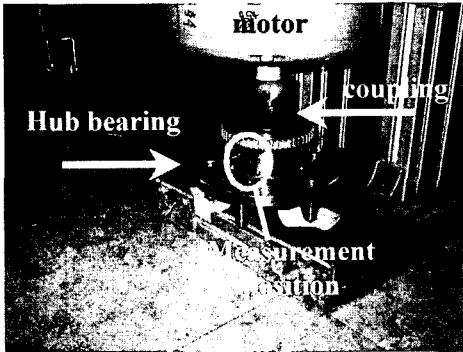
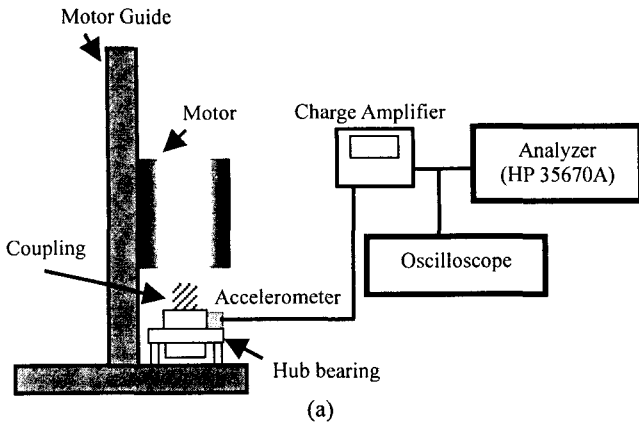


Fig.2. Experimental set-up (a) Schematic diagram of measurement devices – accelerometer (reference sensitivity: 0.1484[mV/ms²], upper frequency limit(+10%): 26 [kHz]), charge amplifier(gain: 10[mV/ms²], upper frequency limit: 30[kHz]), motor(one-phase induction motor, 1.1[KW], 1790[RPM]) (b) Photograph of experimental set-up and measurement position

회전속도측정기(tachometer)로 측정한 결과 1790[RPM]으로 회전 하는 것을 확인 하였다. 가속도 신호의 데이터는 4 채널 주파수 분석기(HP35670A)를 이용해 65 [kHz]의 샘플링 주파수로 5초간 측정 및 저장을 하였다.

5. 실험 결과

베어링의 기구학적 조건에 의해 외륜과 내륜 및 볼에 결함이 존재할 경우 이론적으로 계산된 주기는 각각 6.9[msec]와 4.7[msec], 그리고 8.2[msec]이다.^[9] 신호처리 결과 이런 결함 주기를 나타내는 정보를 확인할 수 있다면, 베어링 결함의 존재 유무 및 위치를 알 수 있을 것이다.

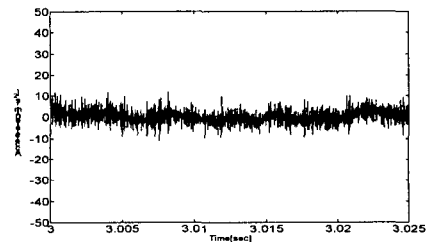
12 개의 정상 출고된 베어링을 회전 시켜 얻은 진동 신호는 Fig. 3 과 같이 12 개의 베어링에서 측정되는 가속도 레벨은 ± 10 [m/s²] 정도임을 알 수 있고 특별한 결함 주기는 관찰되지 않는다. 그러나 실제

로 신호처리 후 분해해서 확인해 본 결과 Fig.3(a)의 베어링에서는 결함을 관찰할 수 없는 반면에, Fig.3(b)의 베어링에서는 미세한 결함이 존재하는 것을 확인하였다. 즉, 일반적인 가속도 신호의 관찰을 통해서 결함이 존재하지 않는 베어링이라고 판단할 수 있다. 그러나 이 베어링들의 가속도 신호를 최소 분산 캡스트럼을 이용해 신호처리를 한 결과 미세 결함이 없는 8 개의 베어링에서는 결함 주기를 발견할 수 없었지만, 미세 결함을 가지고 있는 4 개의 베어링에서는 특정 결함 주기에 해당하는 피크를 발견할 수 있었다.

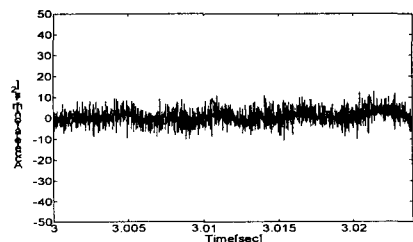
결함을 나타내는 4 개의 베어링 중 3 개의 베어링에서 내륜 결함이 존재함을 나타내었고, 다른 1 개의 베어링에서는 외륜에 결함이 있는 것으로 나타났다.(Table 2 참조) Fig. 5 에 결과를 결함 별로 하나씩만 나타내었다. 신호 처리 결과를 확인하기 위해 이들을 분해하여 살펴본 결과 4 개의 베어링에서는 fig. 6 에 보이는 것처럼 결함이 예상되는 요소에 약 2[mm]이하의 미세한 결함들이 존재하는 것을 확인할 수 있었고, 다른 8 개의 베어링에서는 미세한 결함을 발견할 수 없었다.

Table 2 Result of the experiment

Total number of bearings		12 EA
Number of bearings w/o fine fault		8 EA
Number of bearings with fine fault	Inner-race	3 EA
	Outer-race	1 EA



(a)



(b)

Fig.3. Measured acceleration signal (a) a bearing without fine fault, (b) a bearing with fine fault

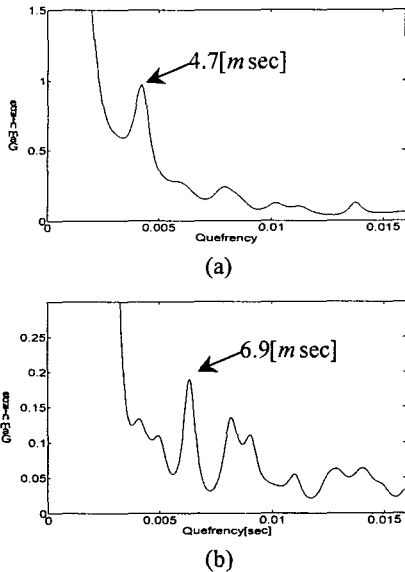


Fig.5. MV Cepstrum of four normal bearings with fine fault: Lifter order-480, Time length-125[msec], 4.7 [msec]- The period of inner race fault, 6.9[msec]-The period of outer race fault, 8.2[msec]-The period of ball element fault

6. 결론

고속의 회전을 하는 베어링이나 작용하는 하중 및 속도 변화가 많은 조건에서 구동되는 베어링은 결함이 커져서 이상 현상을 나타내기 전에 결함을 발견하는 것이 필요하다. 가혹한 운전 조건에 의해서 조그만 결함이 빠르게 성장하여 시스템 전체를 정지시키는 등의 문제를 발생시키기 때문이다. 차량의 허브 베어링도 급격한 하중 및 속도의 변화가 발생할 수 있는 조건을 가지므로 초기 결함을 검출하는 것이 필요하다.

베어링에 초기 결함이 존재하는지 여부를 확인하는 첫 단계는 갓 생산되어 나온 베어링이 제작 및 가공상의 요인에 의해 발생한 결함을 가지고 있는지 여부를 확인하는 것이 된다. 이를 위해 정상 출고된 베어링 샘플 12 개에 대해서 진동 신호를 측정하고 최소분산 캡스트럼을 이용하여 결함의 존재 여부를 살펴보았다. 실험 결과 4 개의 베어링에서 결함이 존재하는 것으로 나타났고 이를 분해하여 확인한 결과 미세한 초기 결함을 잘 예측하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

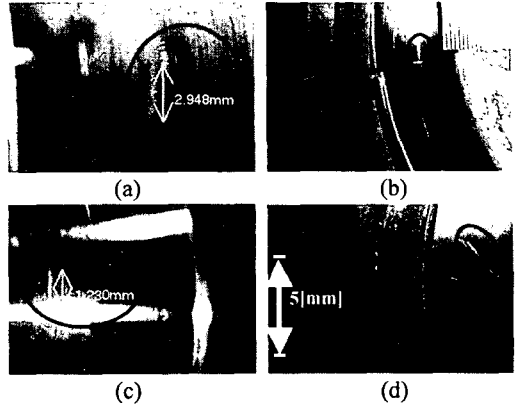


Fig.6 Photographs of each normal bearings' faults, (a) Inner-race fault, (b) Inner-race fault, (c) Outer-race fault, (d) Inner-race fault

후 기

본 논문은 현대 자동차 연구소 시험 1 팀과의 산학 협동과제로 주로 지원된 연구결과이며, 이에 더하여 연구의 일부가 교육인적자원부의 BK21 사업에 의한 연구 지원으로 수행되었습니다. 협조 및 지원에 감사 드립니다

참고문헌

- (1) P. D. McFadden, J. D. Smith, 1984, "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
- (2) J.I. Taylor, 1980, "Identification of Bearing Defects by Spectral Analysis," *Journal of Mechanical Design*, April, Vol. 102, pp. 199-204
- (3) R.B. Randall, 1987, *Frequency analysis*, B&K, pp. 271-304
- (4) P. D. McFadden, J. D. Smith, 1984, "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
- (5) Y. -H. Kim, W. S. Chung and Y. K. Kwak, 1988, "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. 1067-1071
- (6) Y. -H. Kim, B. D. Lim and W. S. Chung, 1991, "Fault detection in a ball bearing system using a moving window," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 5, pp. 461-473
- (7) Y.-C. Choi, Y. -H. Kim, 2000, "Detection of impulse signal in noise using a minimum variance cepstrum-theory," *Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 10(3) pp. 642-647
- (8) C.-S. Park, Y.-C. Choi, Y.-H. Kim, and E.-S.Ko, 2004, "Faults Detection in Hub Bearing with Minimum Variance Cepstrum," *Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference*, pp.593-596
- (9) Tedric A. Harris, 1990, *Rolling bearing analysis third edition*, WILEY Inter-science, ch. 4, 5, 7