

신호대 잡음비에 무관한 허브 베어링 결함 검출 방법[#]

Faults Detection Method Unrelated to Noise Ratio in a Hub Bearing

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

(2004년 7월 30일 접수 : 2004년 10월 19일 심사완료)

Key Words : Minimum Variance Cepstrum(최소분산 캡스트럼), Hub Bearing(허브 베어링), Faults Detection (결함 검출)

ABSTRACT

Hub bearings not only sustain the body of a car, but permit wheels to rotate freely. Excessive radial or axial load and many other reasons can cause defects to be created and grown in each component. Therefore, vibration and noise from unwanted defects in outer-race, inner-race or ball elements of a Hub bearing are what we want to detect as early as possible. 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 signal has 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

자동차에서 허브 베어링은 차량의 하중을 지지하고, 바퀴와 차체를 연결하면서 바퀴의 회전 운동을 가능하게 하는 요소이다.(Fig.1참조) 허브 베어링은 외륜과 내륜 사이에 있는 볼들이 접촉 하면서 회전하므로 과도한 하중이 작용하면 베어링을 구성하고 있는 요소들에서 결함이 발생할 수 있다. 결함이 존재하는 베어링을 일정하게 회전시키면 주기적인 충격이 발생하고, 이것은 시스템의 공진 주파수를 가진 하여 진동 및 소음이 생기는 것으로 알려져 있다.^{예(1)}

허브 베어링이 차량에 장착된 상태에서 신호(가속도 신호나 음향 신호)를 측정할 경우에는 베어링 신호뿐만 아니라 타이어의 잡음(noise), 엔진으로부터의 신호 등 여러 가지 잡음과 함께 측정된다. 베어링 결함 신호가 작거나 여러 가지 원인에 의한 잡음이 상대적으로 큰 경우에는 베어링의 결함신호를 관찰하기가 어렵게 된다. 이런 경우 베어링의 결함을 가능한 빨리 검출하기 위한 신호처리 방법들이 연구되어 왔다. 이 중 대표적인 것을 예로 들면 우선 Taylor⁽²⁾는 주파수 영역에서 스펙트럼 해석(spectral analysis)을 통해 베어링 결함을 살펴본 경우를 들 수 있다. Randall⁽³⁾은 캡스트럼(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 구하여 결함을 검출하는 방법을 사용하였으나 잡음이 많아서 공진 주파수를 찾기 힘든 경우에는 적용하기 힘든 방법이다. Kim, Cheung과 Kwak⁽⁵⁾은 Qu-adrature demodulation을 이용한 Complex envelope의 관찰로 결함 검출을 시도하였으

[†] 책임저자 : 정희원, 한국과학기술원 대학원 기계공학과
E-mail : cpure77@kaist.ac.kr

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

* 정희원, 한국과학기술원 기계공학과

** 현대 자동차 연구소 시험 1팀

이 논문은 2004 춘계학술대회 우수발표논문으로 추천되었음.

나 잡음이 상대적으로 많은 경우에는 역시 결합 검출이 힘들다. 또, Kim et al⁽⁶⁾, 은 신호대 잡음비(signal to noise ratio)에 따른 결합 검출을 이론적으로 해석하여 잡음이 상대적으로 많은 경우에도 결합을 검출할 수 있는 방법으로 무빙 윈도우(moving window)를 제안하였다. 그러나 이 방법은 신호처리하기 전 윈도우의 크기와 이동 스텝 크기를 정해주어야 하는 어려움이 있다.

주기적인 충격신호가 잡음 속에 완전히 묻혀 있는 경우에도 결합을 검출할 수 있는 것으로 알려진 방법 중 최소분산 캡스트럼⁽⁷⁾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. 이러한 기본 아이디어에서 출발하여 주기적 충격신호의 주기를 잡음의 정도에 무관하게 찾을 수 있는 방법이 잘 알려져 있다.⁽⁷⁾ 본 연구는 이 방법이 실제 차량에 장착된 허브 베어링의 경우에도 적용이 가능한가를 검증하기 위한 것이다.

2. 허브 베어링 및 결합 신호 특성

2.1 허브 베어링

실험에 사용된 허브 베어링은 Fig.1(a)에 보이는 것처럼 허브 어셈블리에 장착되어 생산되는 베어링으로 일정한 접촉각(contact angle)을 가지고 하중을 지지하는 복열(double-row) 앵귤러(angular) 볼 베어링이다. 이러한 허브 베어링은 반경 방향 하중 지지뿐만 아니라 두 열(row)의 접촉각을 엇갈려 놓아 축 방향 하중의 지지 능력을 가지고 있어 Fig.1(b)에 보이는 것과 같이 차량의 바퀴와 서스펜션의 연결부에 쓰이고 있다.

실험에 사용된 허브 베어링의 주요 형상 정보를 Table 1에 나타내었다. 피치 지름(pitch diameter)은 허브 베어링의 축을 중심으로 서로 반대 방향에 있는 볼 요소의 중심까지의 거리를 의미한다. 그리고, 접촉

각은 볼 요소들이 내, 외륜과 접촉하고 있는 각이다. 이 각은 외륜의 반경방향으로부터 얼마나 기울어져 있는지를 나타낸다. 이러한 형상 정보는 각 결합 별 예상 주기를 이론적으로 구하는데 필요하다.

2.2 베어링 결합 신호 특성

베어링 요소에 결합이 존재하게 되면, 일정 속도의 회전과 결합과 상대요소들의 접촉에 의해 주기적인 충격신호가 발생한다. 이 결합 주기는 결합의 위치,

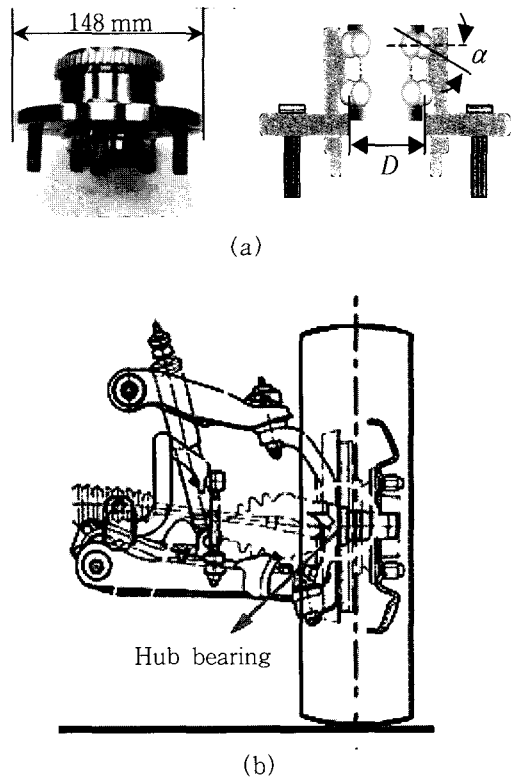


Fig.1 The hub bearing system, (a) Photograph and Schematic diagram of the hub bearing, where α is contact angle and D is pitch diameter, (b) Structure of a suspension system with the hub bearing and wheel

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)	12 EA

즉 내륜, 외륜 또는 볼에 따라 주기가 다르므로 결함 존재 유무뿐만 아니라 결함 위치에 대한 정보를 가지고 있다.

결함에 의한 주기적인 충격신호를 측정 신호에서 확실히 파악할 수 있다면 결함 유무 판단을 위한 추가적인 노력이 필요 하지 않을 것이다. 하지만, 주변 잡음의 영향으로 주기적인 충격신호를 측정 신호에서 관찰할 수 없을 때, 주기적인 결함 신호를 검출해내는 신호처리 방법이 필요하게 된다.

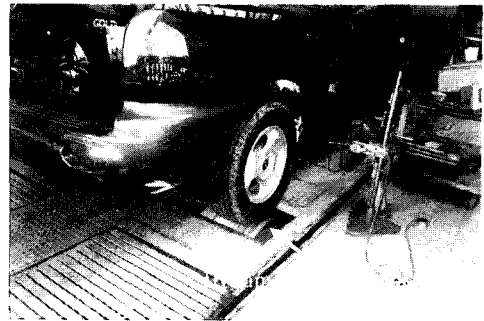
3. 실험 조건 및 장치 구성

허브 베어링은 축방향 하중뿐만 아니라 반경 방향 하중을 지지하기 위해 특정한 접촉각으로 내, 외륜 및 볼 요소가 접촉하고 있다. 접촉각은 허브 베어링에 작용하는 하중 및 속도의 변화에 따라 달라진다.⁽⁸⁾ 이는 결함이 존재하더라도 그 크기가 하중 및 속도 조건의 변화에 의한 접촉각의 변동보다 작을 경우에는 결함이 없는 것으로 파악될 수 있음을 의미한다. 따라서 실제 차량 주행 중에 발생하는 결함을 가장 잘 검출할 수 있는 조건은 차량에 장착되어 있는 상태에서 주행하는 조건이 될 것이다.

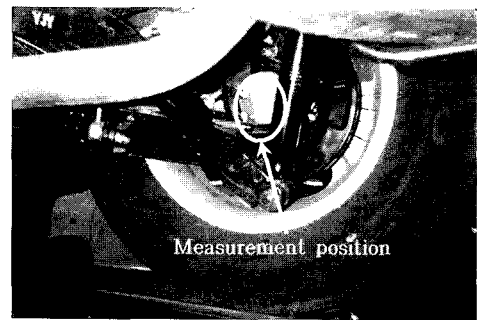
이를 위해 실험조건은 실제로 허브 베어링을 차량의 우측 뒷바퀴에 장착한 상태로 실시하였다. 그리고 실제 도로에서는 도로의 상황에 따라 베어링에 부가되는 하중 조건이 바뀌게 되므로, 이를 배제하기 위해서 다이내모에 차량을 올려서 120 km/h의 속도로 회전시키며 가속도 신호를 얻었다.(Fig. 2)

진동 신호 측정을 위해서 가속도계를 사용하였다. 가속도계는 B&K Type 4374를 사용하였는데, 이 가속도계는 26 kHz의 상한 주파수를 가지며, 기준 감도(reference sensitivity)는 $0.1484 \text{ pC/ms}^{-2}$ 이다. 가속도계 부착 위치는 Fig. 2(b)에서 보이는 것과 같이 진동 전달 경로를 고려하여 허브 베어링과 직접 접촉하는 부품 중에서 센서의 부착이 용이한 곳을 선정하였다.

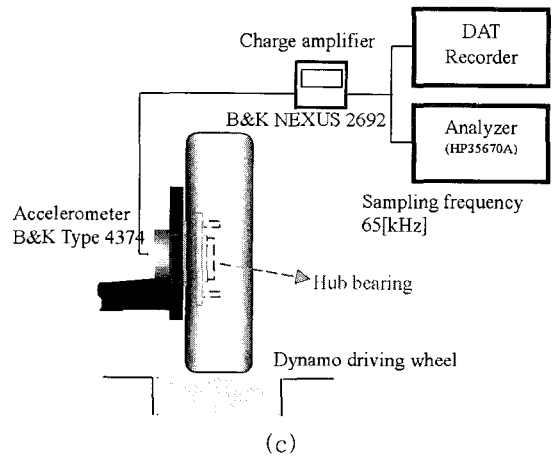
주행에 따른 바퀴 회전 속도를 알아내고, 회전 속도의 변화를 살펴보기 위해 회전속도계(tachometer)를 설치하여 허브 베어링 회전 속도 신호를 동시에 측정 및 저장하였다. 가속도 신호의 테이더는 4채널 주파수 분석기(HP35670A)를 이용해 65 kHz의 샘플링 주파수로 5초간 측정 및 저장하였다. 또, 데이터의



(a)



(b)



(c)

Fig. 2 Experimental set-up (a) Photograph of Dynamo test, 120 km/h, (b) A measurement point on right side rear suspension part contacted with the hub bearing, (c) Schematic diagram of measurement-accelerometer(reference sensitivity: $0.1484 \text{ pC/ms}^{-2}$, upper frequency limit (+10 %): 26 kHz), charge amplifier (gain : 10 mV/ms^{-2} , upper frequency limit : 30 kHz), DAT recorder(sampling frequency using 4 channels: 40 kHz)

추가적인 저장을 위해 DAT(digital audio tape) recorder를 이용하였다. 레코더는 4채널을 사용하고 2배의 속도로 저장하여 40 kHz로 샘플링 하였다.

4. 인위적인 결함 베어링에 적용

베어링 요소에 결함이 존재할 때 최소 분산 캡스트럼에 어떠한 특성이 나타나는지 살펴 보도록 하자. 각 요소의 결함 특성을 살펴보기 위해서 각각의 요소에

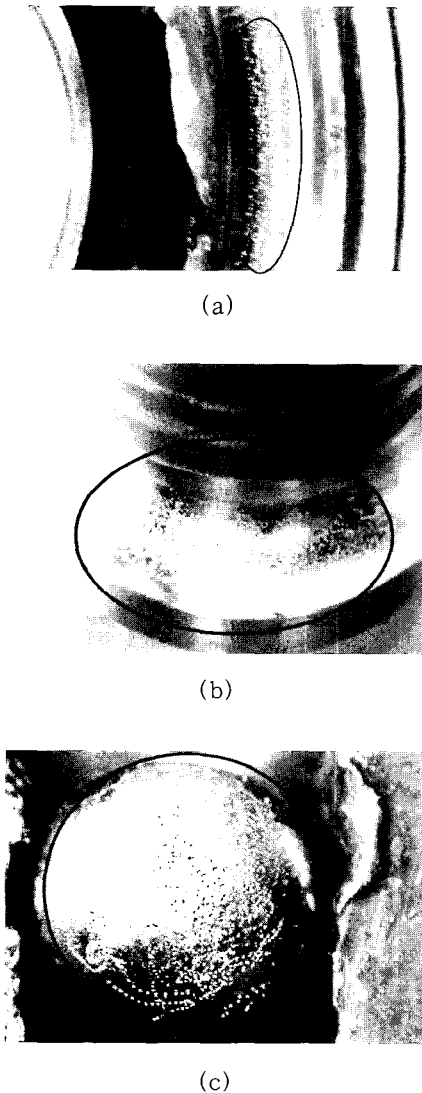


Fig. 3 The Hub bearing faults which were made by electric drill pen artificially, (a) An outer-race fault, (b) An inner-race fault, (c) A ball-element fault

결함을 Fig. 3에 보이는 것처럼 전기 드릴펜(electric drill pen)을 사용하여 인위적으로 제작하였다.

베어링의 기하학적 형상 정보와 회전 속도를 알면 베어링 회전 운동의 기구학적 조건에 의해서 각 결함 위치 별 결함 주기를 계산할 수 있다.⁽⁹⁾

이런 정보들로부터 계산된 외륜, 내륜과 볼의 이론적인 결함예상 주기는 각각 13.4 msec, 9.1 msec와 15.9 msec이다.

Fig. 4~Fig. 6은 각각 외륜, 내륜 및 볼 요소에 단일 결함이 존재할 때의 가속도 신호와 최소 분산 캡스트럼의 결과를 보여주고 있다. 신호처리를 위한 시간 데이터의 총 시간은 5초이고, 데이터 길이(record length)는 125 msec로 75% 오버랩(overlap)을 하여 신호처리 하였다.

최소 분산 캡스트럼을 이용하여 신호 처리한 결과, 각 요소의 결함을 나타내는 주기를 정확하게 예측하고 있음을 확인할 수 있다. 비교적 큰 결함을 가진 인위적인 결함 베어링이지만, 측정된 가속도 신호에

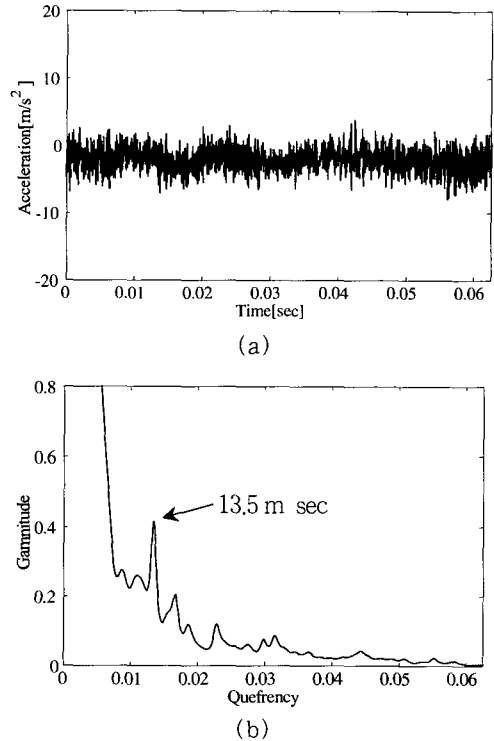


Fig. 4 An outer-race fault bearing (a) Measured acceleration signal, (b) MV Cepstrum: Lifter order-480, Time length-125 msec, Theoretical outer-race fault period-13.4 msec

서는 결함에 의해 발생하는 주기적인 충격 신호를 발견하기 힘들고 주기적인 경향의 존재만 예측할 수 있다. 하지만, 최소 분산 캡스트럼을 적용해 신호 처리한 결과를 보면 각각의 결함 주기를 잘 보여주는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4의 외륜 결함이 있는 베어링에서는 결함 예상 주기와 비슷한 13.5 msec에서 피크가 나타나는 것을 볼 수 있고, Fig. 5의 내륜 결함의 경우에도 9.2 msec와 그의 라모닉(rharmonic)이 선명하게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 볼 요소에 결함이 있는 경우에도 예상 결함 주기와 일치하는 15.9 msec에서 피크가 발생함을 볼 수 있다.

차량 구동 중에는 무수히 많은 잡음 성분이 존재하고, Fig. 4~6의 측정 신호를 통해 주기적인 충격신호가 잡음 성분에도 오염되어 있음을 볼 수 있다. 랜덤한 성질을 가지는 잡음 성분과 주기적인 충격신호가 같이 존재할 때 잡음 신호의 영향을 제거시키는 방법을 통해 좋은 결함 검출 결과를 볼 수 있다. 즉, 최소분

산 캡스트럼을 이용하여 잡음 속에 묻힌 주기적인 충격 신호를 해당 결함 주기를 통해서 찾을 수 있음을 확인할 수 있다.

5. 결함 예상 베어링에 적용

지금까지는 결함을 인위적으로 제작하여 결함의 위치와 형태를 명확히 알고 있는 허브 베어링에 대해 실험을 수행하였기 때문에 실제 발생하는 결함과는 동떨어진 결과들이다. 좀 더 실제적인 결함 검출 문제에 대해 접근해 보기 위해서 베어링 단품으로 고속 내구 실험을 실시한 베어링과 실제 차량에 장착되어 사용되던 베어링에 대해서 실험과 신호처리를 통해 결함 검출을 시도하여 보자. 그리고, 그 결과를 확인해 보기 위해서 실험에 쓰인 베어링을 직접 분해하여 결함을 확인해 보도록 한다.

결함이 예상되는 베어링들을 실험 차량에 장착하여 측정된 가속도 신호는 Fig. 7과 같다. Fig. 7(a)는 단

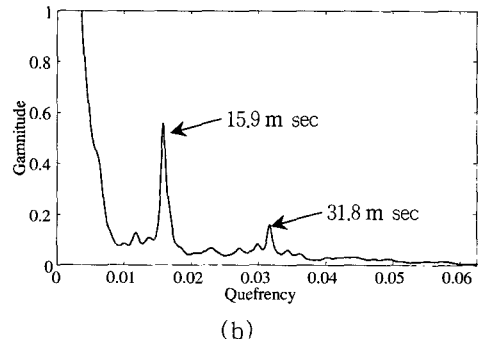
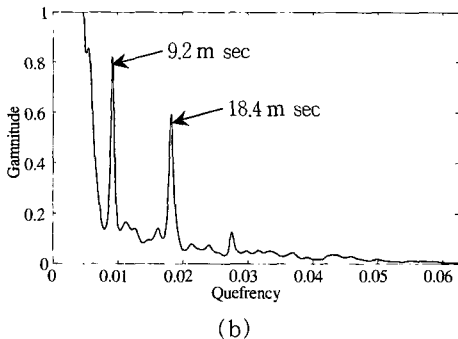
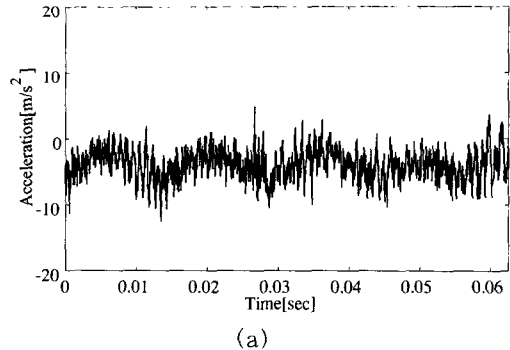
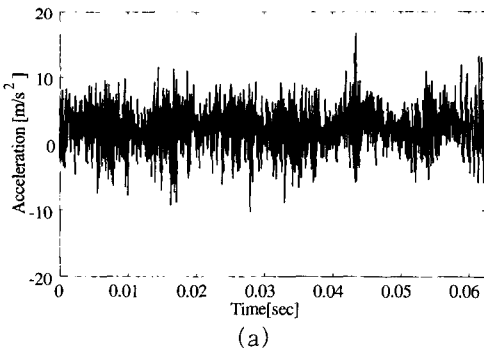


Fig. 5 An inner-race fault bearing (a) Measured acceleration signal (b) MV Cepstrum: Lifter order-480, Time length-125 msec. Theoretical inner-race fault period-9.1 msec, 18.4 msec : Rharmonic

Fig. 6 A ball-element fault bearing (a) Measured acceleration signal, (b) MV Cepstrum: Lifter order-480, Time length-125 msec. Theoretical ball-element fault period-15.9 msec, 31.8 msec : Rharmonic

품으로 고속 내구 실험한 베어링의 가속도 신호이며, Fig. 7(b)는 차량에 장착되어 사용되던 베어링의 가속도 신호이다.

측정 데이터를 통해 알 수 있듯이 고속 내구 실험 베어링은 가속도 레벨이 Fig. 8의 정상 베어링의 가속도 레벨과 비슷한 레벨을 가지는 것을 볼 수 있으며, 주기적인 형태의 충격 신호도 보이지 않는다. 그러나,

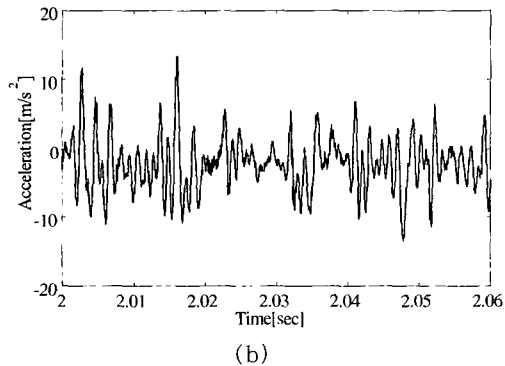
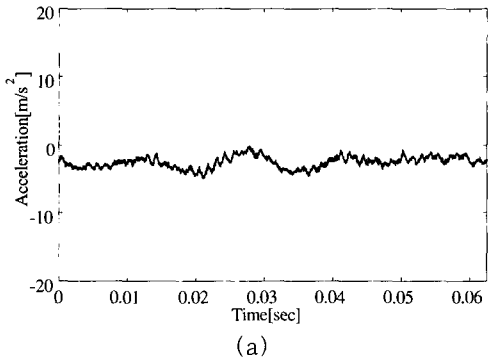


Fig. 7 Measured acceleration signals of fault-expected bearings (a) A bearing after a durability test in high speed, (b) A used bearing equipped with a vehicle

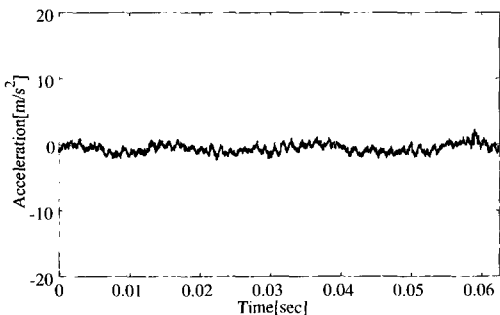


Fig. 8 Measured acceleration signals of a normal bearing

장착되어 사용되던 베어링은 가속도 레벨도 크며 주기적인 결함을 관찰할 수 있다. 이 결과만 보면 고속 내구 실험 베어링에는 결함이 없는 것으로 생각된다.

그러나, 두 결함 예상 베어링을 최소 분산 캡스טר럼으로 신호 처리한 결과를 보면 두 가지 모두 결함이 존재함을 확인할 수 있다. Fig. 9는 그 결과를 보여준다. Fig. 9(a)의 신호 처리 결과를 보면 내륜과 볼 요소에 해당하는 주기에서 피크가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 측정된 시간 데이터에서는 결함을 확인할 수 없으나 이 신호 속에는 내륜과 볼 요소에 존재하는 결함에 의해서 주기적인 충격 신호가 존재함을 예상할 수 있다. 그리고, Fig. 9(b)의 결과는 확실하게 내륜과 외륜 요소에 결함이 존재함을 알려 주고 있다. 즉 이 베어링에는 내륜과 외륜에 결함이 동시에 존재할 것으로 추측할 수 있다. 결함 예상 베어링들에 대해서 실시한 실험과 신호처리 결과를 확

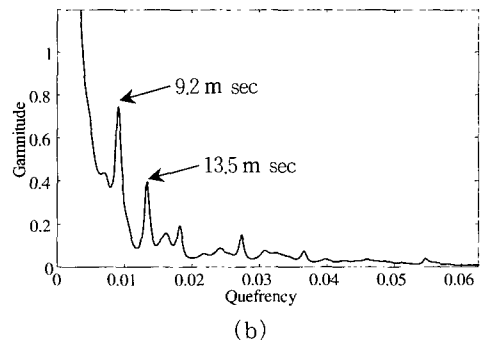
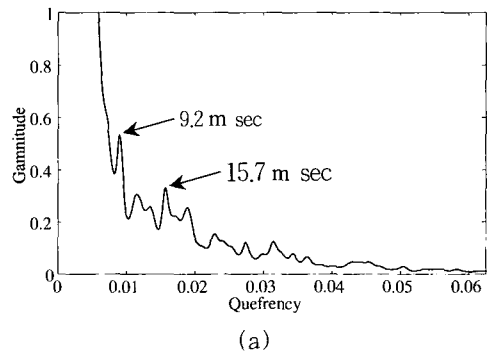


Fig. 9 Minimum Variance Cepstrum: Lifter order-480 and time length-125 msec and theoretical inner-race fault period: 9.1 msec and outer-race fault period: 13.4 msec, and ball-element fault period-15.7 msec (a) A bearing after a durability test in high speed, (b) A used bearing equipped with a vehicle

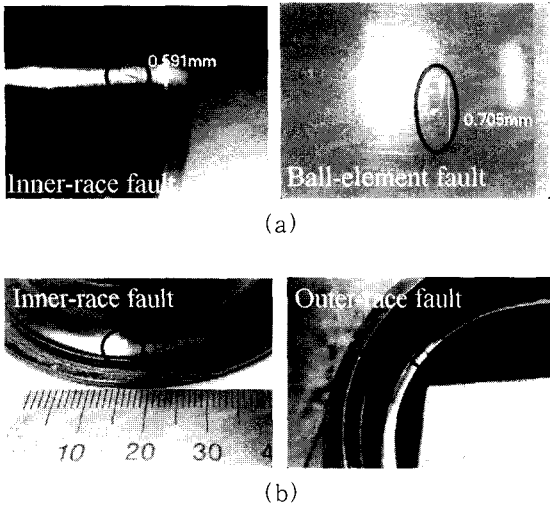


Fig. 10 Photographs of Disassembled fault-expected bearings, (a) A high speed durability test bearing, (b) A used bearing in equipped with a vehicle

인하기 위해 베어링을 분리해서 살펴보았다. 단품으로 고속 내구 실험한 베어링의 경우 Fig. 10(a)에서 볼 수 있듯이 내륜과 볼 요소에 아주 미세한 결함이 존재함을 볼 수 있다. 그리고, 차량에 장착되어 사용되었던 베어링은 Fig. 10(b)에서 볼 수 있듯이 외륜과 내륜에 볼에 찍힌 압흔 흔적을 발견할 수 있다.

6. 결 론

인위적인 결함을 낸 베어링 단품에 대해서 최소 분산 캡스트럼을 이용하여 결함을 탐지한 선행 연구⁽¹⁰⁾가 있었다. 그러나 본 연구에서는 인위적인 결함뿐만 아니라 실제 차량에 장착되어 구동 중 발생한 결함을 가진 허브 베어링에 대해서 자동차에 장착된 상태에서 허브 베어링의 결함 검출을 시도하였다.

우선 베어링의 각 요소에 대한 결함 특성을 알기 위해 허브 베어링 각 요소에 인위적인 결함을 만들었다. 이 인위적인 결함 베어링들을 차량에 장착하여 실험을 실시한 결과, 각 요소의 이론적인 결함 주기에 해당하는 큐프렌스에서 피크가 발생함을 확인할 수 있다. 또, 주행 중 발생한 결함에 대해서도 결함이 존재하는 위치에 해당하는 주기를 잘 찾을 수 있다.

베어링 단품에 대한 실험이 아니라 여러 가지 잡음 성분이 많이 발생하는 차량과 같이 복잡한 시스템에

결합되어 있는 상태에서도 최소 분산 캡스트럼을 사용하여 결함을 잘 탐지할 수 있음을 알 수 있다.

그리고, 인위적인 결함이 아닌 고속 내구 실험을 통해 발생한 결함 및 실제로 차량에 장착되어 사용되었던 베어링에 대해서 실험하여 나온 결과로부터 실제 운전 중에 발생한 결함도 잘 검출되는 것을 확인할 수 있다.

후 기

이 논문은 현대 자동차 연구소 시험 1팀과의 산학 협동과제로 주로 지원된 연구결과이며, 이에 더하여 연구의 일부가 과학기술부의 국가지정 연구실 사업(NRL)의 지원 및 교육인적자원부의 BK21사업에 의한 연구 지원으로 수행되었습니다. 협조 및 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) McFadden, P. D. and Smith, J. D., 1984, Vibration Monitoring of Rolling Element Bearings by High-frequency Resonance Technique—a Review, *Tribology international*, Feb., Vol. 17, No. 1, pp. 3~10.
- (2) Taylor, J. I., 1980, Identification of Bearing Defects by Spectral Analysis, *Journal of Mechanical Design*, April, Vol. 102, pp. 199~204.
- (3) Randall, R. B., 1987, Frequency analysis, *B&K*, pp. 271~304.
- (4) McFadden, P. D. and Smith, J. D., 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) Kim, Y. -H., Chung, W. S. and Kwak, Y. K., 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) Kim, Y. -H., Lim, B. D. and Chung, W. S., 1991, Fault Detection in a Ball Bearing System Using a Moving Window, *Mechanical Systems and*

Signal Processing, Vol. 5, pp. 461~473.

(7) Choi, Y.-C. and Kim, Y. -H., 2000, Detection of Impulse Signal in Noise Using a Minimum Variance Cepstrum-theory, Transaction of Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 10, No. 3, pp. 642~647.

(8) Tedric A. Harris, 1990, Rolling Bearing Analysis Third Edition, WILEY Interscience, ch. 4, 5, 7.

(9) Eschmann, Hasbargen, Weigand, 1985, Ball and Roller Bearings Theory-Design, and Application, WILEY&Sons, pp.92~94, pp.342~355.

(10) Choi, Y.-C. and Kim, Y. -H., 2000, Detection of Impulse Signal in Noise Using a Minimum Variance Cepstrum-application on Faults Detection in a Bearing System, Transaction of Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 10, No. 6, pp. 985~990.