

최소 분산 켈스트럼을 이용한 자동차 허브 베어링 결함 검출 Faults Detection in Hub Bearing with Minimum Variance Cepstrum

박 춘 수*·최 영 철**·김 양 한**·고 을 석***
Choon-Su Park, Young-Chul Choi, Yang-Hann Kim and

Key Words : Minimum Variance Cepstrum(최소분산 켈스트럼), 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.1 참조)

허브 베어링은 그 구조상 외륜과 내륜 사이의 볼 요소들이 서로 접촉 하여 하중을 지지하므로 과도한 하중이 작용하면 베어링을 구성하고 있는 요소들에서 결함이 발생할 수 있다. 이 외에도 많은 요인들이 허브 베어링의 결함을 발생 시키는 것으로 알려져 있다.^[1]

베어링의 결함 발생은 주기적인 충격 신호를 발생하게 하고 충격 신호는 시스템의 공진 주파수를 가진 하여 진동 및 소음을 만들어 낸다.^[2]

수많은 요소로 만들어진 차량에서 알지 못하는 결함에 의해 소음 및 진동이 발생할 경우 그 결함 위치를 찾기 위해 결함이 발생하리라 예상되는 요소를 분리하면서 찾아내는 것은 많은 시간과 노력을 요구한다. 이런 의미에서 차량의 요소를 분리하지 않고 결함 존재 유무 및 그 위치를 찾는 것은 매우 의미 있는 일이라 할 수 있다.

허브 베어링이 차량에 장착된 상태에서 신호(가속도 신호나 음향 신호)를 측정할 경우에는 베어링 신호뿐만 아니라 타이어의 잡음, 엔진으로부터의 신호 등 여러 가지 잡음과 함께 측정된다. 베어링 결함 신호가 작거나 여러 가지 원인에 의한 잡음이 상대적으로 큰 경우에는 베어링의 결함신

호를 관찰하기가 어렵게 된다. 이를 위해 충격신호가 잡음 속에 완전히 묻혀 있는 경우에도 결함을 검출할 수 있는 것으로 알려진 최소분산 켈스트럼 방법^[3]을 사용하여 허브 베어링의 결함을 검출을 시도하여 보자. 이 방법의 기본적인 아이디어는 우리가 원하는 신호가 임펄스 트레인(impulse train)형태로 측정 신호 속에 있다는 것을 아는 것으로부터 출발한다. 시간 영역에서 임펄스 트레인 형태의 신호는 주파수 영역에서 주기적인 형태의 신호 특성을 갖고 따라서 주파수 영역에서 잡음의 랜덤 신호와 확정 신호(deterministic signal)을 구분할 수 있는 방법을 이용할 수 있을 것이다.

2. 최소 분산 켈스트럼

최소 분산 켈스트럼은 자기 스펙트럼(Auto Spectrum)을 밴드패스 리프터(Lifter)를 씌워 큐프렌시(Quefrensy)영역으로 보내는 신호 처리로 일반적인 식은 다음과 같다.^[3]

$$F_{MVC} = \frac{1}{e^H (w^H R_x w)^{-1} e} \quad (1)$$

여기서, $e = [1, e^{j\tau}, \dots, e^{j\tau T}]^T$, R_x 는 $x(t)$ 에 대한 자기 상관함수를 나타내고, 위 첨자 H는 공액 전치 연산을 의미한다. 또, p는 리프터 차수를 의미하며, T는 전치(Transpose)를 의미한다. j는 복소수의 허수 단위로 $\sqrt{-1}$ 을 의미하고, w는 $k \times p$ 행렬을 나타내는 것으로 어떤 임의의 주파수 ω_0 에 대해서는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$w_0 = [1, e^{j\omega_0}, e^{j2\omega_0}, \dots, e^{j(k-1)\omega_0}]^T \quad (2)$$

* 한국 과학 기술원 기계공학과 대학원

E-mail : cpure77@kaist.ac.kr

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

** 한국 과학 기술원 기계공학과 대학원

*** 현대 자동차 연구소 시험 1팀

이런 식으로 표현되는 최소 분산 캡스트림은 주기적인 신호와 잡음의 주파수 영역에서의 차이를 이용하여 주기적인 신호가 잡음에 묻혀 있는 경우에도 리프터 차수를 높여가면 잡음의 파워는 줄어드는 대신 주기신호의 파워는 변함없다는 성질을 바탕으로 잡음이 상대적으로 많은 경우에 결함 신호의 주기를 찾는 데 효과적인 신호처리 방법이다.

3. 허브 베어링 및 결함 종류

3.1 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) 앵글러(Angular) 볼 베어링이다.

이러한 허브 베어링은 반경 방향 하중 지지뿐만 아니라 두 열(row)의 접촉각을 엇갈려 놓아

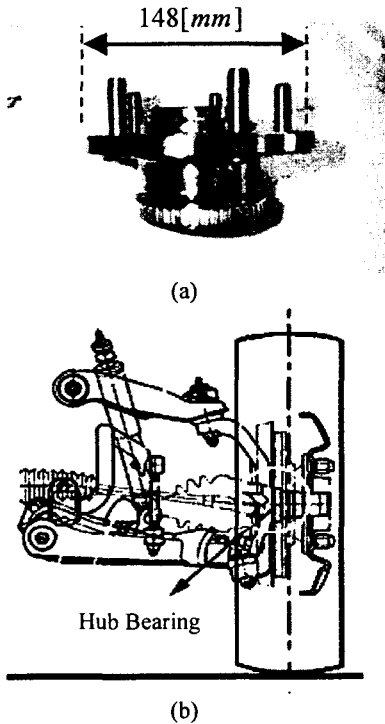


Fig. 1 Hub bearing (a) A double-row angular contact ball bearing, (b) Structure of a rear suspension system with a hub bearing and wheel



Fig. 2 Hub bearing faults. Man-made faults with electric drill pen, (a) An outer-race fault, (b) An inner-race fault

축방향 하중의 지지 능력을 가지고 있어 Fig.1 (b)에 보이는 것과 같이 차량의 바퀴와 서스펜션의 연결부에 널리 쓰이고 있다.

3.2 베어링 결함 종류

베어링은 크게 내륜, 외륜, 그리고 볼 요소로 나눌 수 있으며 과도한 하중, 마모 및 이상 운전 조건이 발생하면 이들 각 요소들에 결함이 발생하게 된다.

이들 각 요소에 결함이 존재할 때 어떤 결함 특성이 나타나는지 살펴보기 위해 Fig.2에 보이는 것처럼 전기 드릴펜(Electric Drill Pen)으로 외륜 및 내륜 요소에 인위적인 결함을 내어 실험을 수행하였다.

4. 실험 장치 및 구성

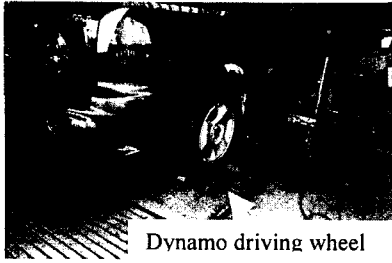
실험은 허브 베어링을 차량의 우측 뒷바퀴에 장착한 상태로 차량의 시동은 켜지 않은 채 다이내모를 120[km/h]의 속도로 구동하여 가속도 신호를 얻었다.(Fig.3) 이 때 바퀴의 회전속도는 930[RPM]이다.

허브 베어링의 부착 위치는 Fig.2(a)에서 보이는 것과 같이 진동 전달 경로를 고려하여 베어링과 직접 접촉하는 부품에서 센서의 부착이 용이한 곳을 선정하였다.

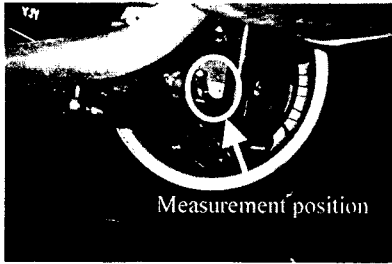
신호의 측정과 저장은 HP35670A를 이용해 65[kHz]의 샘플링 주파수로 측정하고 5 초간 데이터를 저장하였다. 또, 데이터의 추가적인 저장을 위해 DAT Recorder를 이용하였다

5. 실험 결과

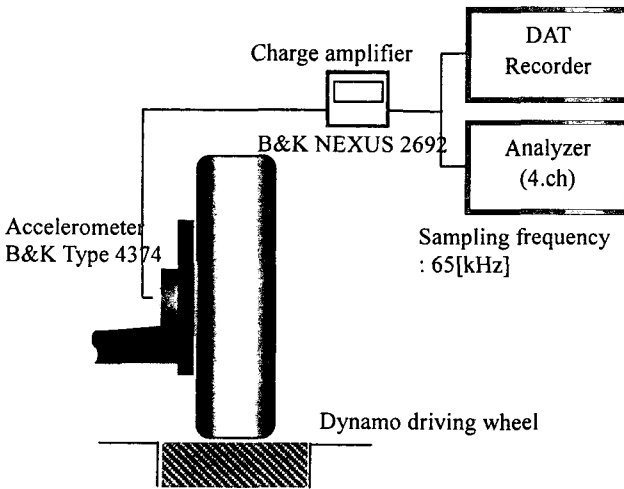
Fig.4~Fig.5는 각각 외륜과 내륜 결함에 대한



(a)



(b)



(c)

Fig.3. Experimental set-up (a) Photograph of a vehicle and dynamo driving wheel, 120[km/h], (b) A measurement point on right side rear suspension, (c) Schematic diagram of measurement devices

가속도 신호와 최소 분산 캡스트럼의 결과를 보여주고 있다. 신호처리를 위한 시간 데이터의 총 시간은 5 초이고, 데이터 길이(Record Length)는 125 [msec]로 75% 오버랩을 사용하였다.

가속도 신호에서는 베어링 결함에 대한 정보를 발견하기 힘들지만, 최소 분산 캡스트럼을 적용해 본 결과 외륜 결함이 있는 베어링에서는 13.5 [msec], 그리고 내륜 결함이 존재할 경우에는 9.2

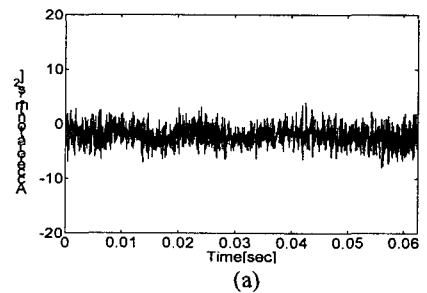
[msec]에서 피크가 존재함을 볼 수 있다. 이것은 주기가 각각 13.5[msec]와 9.2[msec]인 충격 신호 주기적으로 발생함을 의미한다.

베어링의 각 요소에 결함이 발생하여 회전하게 되면 결함이 상대운동을 하는 표면과 부딪히면서 주기적인 충격신호를 발생시킨다. 이 결함 주기는 결함의 위치, 예를 들어 내륜, 외륜 또는 볼에 따라 그 주기가 달라지기 때문에 이 결함 주기를 검출할 수 있다면 결함이 어디에 존재하는지 알 수 있을 것이다.

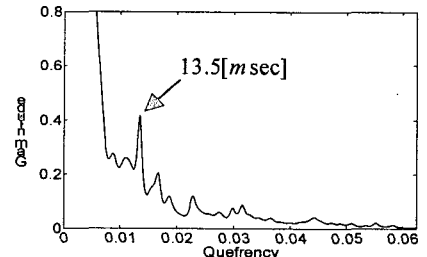
베어링의 기구학적 조건^[4]에 의해 외륜과 내륜에 결함이 존재할 경우 이론적으로 계산된 주기는 각각 13[msec]와 9.2[msec]로 Fig.4.(b)와 Fig.5.(b)의 신호처리 결과와 잘 일치함을 볼 수 있다.

6. 결함 예상 베어링에 적용

지금까지는 결함을 인위적으로 제작하여 결함의 위치와 형태를 명확히 알고 있는 허브 베어링에 대해 실험을 수행하였기 때문에 현실적인 문제와 떨어져 있는 결과들이다. 이런 면에서 Fig. 6 은 매우 중요한 결과이다. 실험에 사용된 베어링은 고속 내구 실험을 한 것으로 결함의 존재 유무와 위치를 모르는 허브 베어링이다. 이 베어링으로 실험한 결과는 Fig. 6 에서 볼 수 있듯이 9.1



(a)



(b)

Fig. 4. An outer-race fault bearing (a) Sampling frequency : 65[kHz], (b) MV Cepstrum : Lifter order-480, Time length-125[msec], Theoretical outer-race fault period-13[msec]

[msec]와 외륜 결함 주기에 해당하는 13.3 [msec]

를 검출하였다. 따라서 이 베어링에는 내륜과 외륜에 결함이 존재할 것으로 추측할 수 있다.

이러한 실험과 신호처리 결과를 확인하기 위해 베어링을 분리해본 결과 Fig.7 에 보이는 것과 같이 내륜과 외륜에 압흔 흔적을 발견할 수 있다.

7. 결론

인위적인 결함을 낸 베어링 단품에 대해서 최소 분산 웨이블릿을 이용하여 결함을 탐지한 선행 연구⁵⁾가 있다. 그러나 본 연구에서는 인위적인 결함뿐만 아니라 실제 발생한 결함을 가진 베어링에 대해서 자동차에 장착을 하여 베어링의 결함 검출을 시도하였다.

베어링의 각 요소에 대한 결함 특성을 알기 위해 허브 베어링 각 요소에 인위적인 결함을 만들어 차량에 장착하여 실험을 실시한 결과 각 요소의 이론적인 결함 주기에 해당하는 큐프렌스에서 피크가 발생함을 볼 수 있다. 또, 주행 중 발생한 결함에 대해서도 결함 위치에 해당하는 주기를 잘 찾음을 볼 수 있다.

베어링 단품이 아니라 차량과 같이 복잡한 시스템에 결합되어 있는 상태에서도 최소 분산 웨이블릿을 사용하여 결함을 잘 탐지할 수 있음을 알 수 있다.

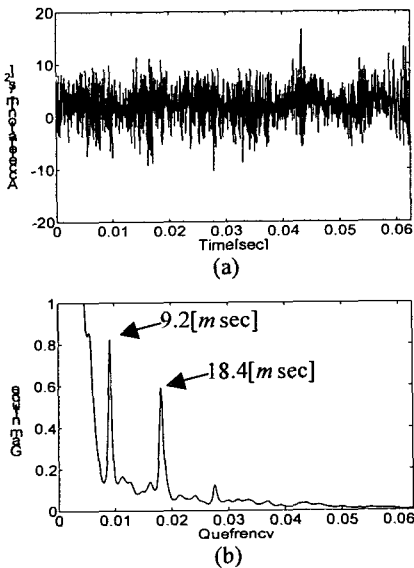


Fig.5. An inner-race fault bearing (a) Sampling frequency: 65[kHz], (b) MV Cepstrum : Lifter order-480, Time length-125[msec], Theoretical inner-race fault period-9.2[msec], Rhamonic-18.4[msec]

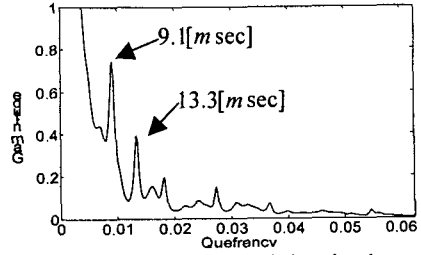


Fig.6. MV Cepstrum of fault bearing but not knowing where the faults are: Lifter order-480, Time length-125[msec], 9.1[msec]-The period of inner race fault, 13.3[msec]-The period of outer race fault



Fig.7. Photographs of fault expected bearing, (a) Outer-race fault, (b) Inner-race fault

인위적인 결함이 아닌 실제로 차량에 장착되어 사용되던 베어링에 결함이 예상되어 실험하여 나온 결과로부터 실제 운전 중에 발생한 결함도 잘 검출되는 것을 확인할 수 있다.

후 기

본 논문은 현대 자동차 연구소 시험 1 팀, 과학기술부의 국가지정 연구실 사업(NRL)과 교육인적자원부의 BK21 사업에 의한 연구 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) 정성원, 2003, “볼 베어링에서 발생하는 가진 베어링 주파수 및 특성”, 한국 소음 진동 공학회지, 제 13 권 제 3 호, pp.162~176
- (2) 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
- (3) 최영철, 김양한, 2000, “최소분산 웨이블릿을 이용한 노이즈 소에 묻힌 임펄스 검출 방법-이론”, 한국소음진동공학회지, 제 10 권 제 4 호, pp. 642~647
- (4) Eschmann, Hasbargen, Weigand, 1985, *Ball and Roller Bearings Theory-Design, and Application*, WILEY&Sons, pp.92~94, 342~355.
- (5) 최영철, 김양한, 2000, “최소분산 웨이블릿을 이용한 노이즈 소에 묻힌 임펄스 검출 방법-베어링 결함 검출에의 적용”, 한국소음진동공학회지, 제 10 권 제 6 호, pp. 985~990