Transactions of KSAE, Vol. 19, No. 2, pp.72-77 (2011)

Copyright ⓒ 2011 KSAE
1225-6382/2011/110-10

차량 주행 상태에서 허브 베어링 이상을 진단할 수 있는 장치 개발

임 종 순[*1] · 박 지 헌[1] · 김 진 용[2] · 윤 한 수[3] · 조 용 범[4]

(주)일진글로벌 WTB 사업본부[1] · 자동차부품연구원 차체샤시기술연구센터[2] ·
단암시스템즈(주) 기술연구소[3] · (주)글로비즈 기술연구소[4]

Development of Diagnosis System for Hub Bearing Fault in Driving Vehicle

JongSoon Im[*1] • Jihun Park[1] • Jinyong Kim[2] • HanSoo Yun[3] • YongBum Cho[4]

[1]WTB Division, Iljin Global, 128-5 Samsung-dong, Kangnam-gu, Seoul 135-875, Korea
[2]Body & Chassis System Research Center, Korea Automotive Technology Institute, 74 Yongjung-ri, Pungse-myun, Dongnam-gu, Cheonan-si, Chungnam 330-912, Korea
[3]R&D Center, Danam Systems, Megavalley #701, 799 Gwanyang2-dong, Dongan-gu, Anyang-si, Gyeonggi 135-875, Korea
[4]R&D Center, Globiz, 111-2 Wonam-ri, Namsa-myeon, Cheoin-gu, Yongin-si, Gyeonggi 449-881, Korea
(Received 14 April 2010 / Accepted 11 October 2010)

Abstract : In this paper, we propose effective diagnosis algorithm for hub bearing fault in driving vehicle using acceleration signal and wheel speed signal measured in hub bearing unit or knuckle. This algorithm consists of differential, envelope and power spectrum method. We developed diagnosis system for realizing proposed algorithm. This system consists of input device including acceleration sensor and wheel speed sensor, calculation device using Digital Signal Processor (DSP) and display device using Personal Digital Assistant (PDA). Using this diagnosis system, a driver can see hub bearing fault(flaking) from the vibration in driving vehicle. With early repairing, he can keep good ride feeling and prevent accident of vehicle resulting from hub bearing fault.

Key words : Hub bearing(허브 베어링), Flaking(박리), Cepstrum(캡스트럼), Envelope detection(포락 검출), Diagnosis system(진단장치)

1. 서 론

허브 베어링은 차량의 현가장치를 이루는 부품 중 바퀴가 장착된 회전축을 지지하는 부품으로 그 구조 및 용량, 운전 조건, 품질, 내구 등의 문제로 인해 허브 베어링 내륜 또는 외륜에 흠집이 나타나는 박리(flaking) 손상이 발생하여 주행 중 소음·진동 및 열이 발생될 수 있다. 이러한 소음·진동은 승차감을 감소시키고, 장시간 고속으로 운행할 경우 허브 베어링 내부 온도가 크게 증가시켜 심한 경우 허브 베어링이 녹아내려 주행 중 바퀴가 빠지는 대형 사고를 일으킬 수 있다. 이러한 사고를 예방하기 위해서는 차량 주행 중 허브 베어링 박리에 의한 진동 신호를 정확히 규명하고 이상상태를 진단할 수 있는 장치가 반드시 필요하다.

볼베어링과 같은 회전기계에 대한 이상검출 신호처리 연구는 이미 오래 전부터 많은 연구가 진행되어 왔다. 먼저 진동 및 소음해석에 광범위하게 사용되는 스펙트럼해석[1]과 그 응용방법들로 방향성 스펙트럼[2], 이동창문(moving window)[3]등이 있다. 그리고 다른 방향으로 캡스트럼 해석 방법을 이용한 파워 캡스트럼[4], 최소 분산 캡스트럼[5]등이 제안되었다. 또 포락(envelope)을 검출하는 방법을 이용한 고주파 공

*Corresponding author, E-mail: imjongsoon@iljin.com

진법[6], 복소 포락[7] 등이 제안되어 사용되고 있다. 또 다른 방향으로 과도 신호의 검출에 효과적인 시간-주파수 해석으로 웨이블릿(wavelet)[8]과 능동적인 잡음 제거 알고리즘[9] 및 통계적인 접근[10]을 통한 기계 시스템의 상태 감시 방법 등도 제안되었다.

베어링 이상 검출을 위한 많은 신호 처리 방법이 있지만 주행하는 자동차에서 허브 베어링의 이상을 검출하는데 효과적인 방법은 아니다. 주행하는 차량은 다양한 노면과 속도조건에 따른 잡음들이 발생하게 되므로 이에 대처할 수 있는 알고리즘이 필요하다.

본 논문에서는 차량 주행상태에서 볼타입 허브 베어링의 이상을 진단할 수 있는 효과적인 알고리즘을 제시하였고, 이러한 알고리즘을 이용하여 입력장치 연산장치 출력장치로 구성되는 허브 베어링 이상 진단장치를 개발하였다. 제시된 진단알고리즘은 테이퍼롤러타입 허브베어링 및 등속조인트에도 적용할 수 있다.

2. 허브 베어링 이상 진단 알고리즘 개발

2.1 허브 베어링 이상 주파수

Fig. 1은 현가장치에 장착된 일반적인 허브베어링의 형상을 나타내고 있다. 허브 베어링은 반경방향과 축방향 하중 및 모멘트(moment) 하중을 동시에 견뎌야 하기 때문에 내·외륜이 볼과 규정된 접촉각으로 엇갈려 접촉하는 복열구조를 가진다.

허브 베어링은 Fig. 2와 같이 몇가지 중요한 변수로 구성된다. D는 피치(pitch) 지름으로 허브 베어링 축을 중심으로 서로 반대 방향에 있는 볼 요소의 중심까지의 거리를 나타내며, d는 볼의 지름이고, α는 접촉각으로 볼 요소들이 내·외륜과 접촉하고 있는

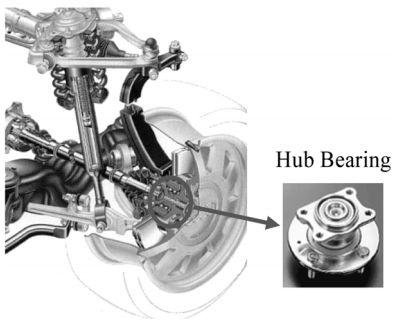


Fig. 1 Structure of a suspension system with the hub bearing

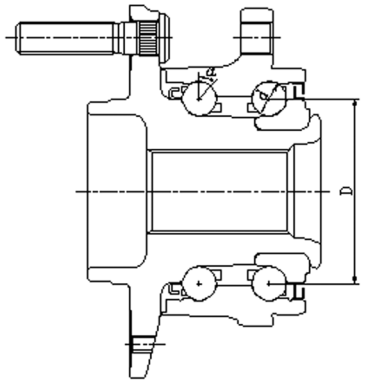


Fig. 2 Schematic diagram of the hub bearing

각으로 외륜의 반경방향으로 얼마나 기울어져 있는지를 나타낸다.

허브 베어링의 주요설계 변수와 회전주파수를 이용하여 식 (1), (2)와 같이 허브 베어링의 이상 주파수를 계산할 수 있다.[11]

$$f_{outer} = n\frac{z}{2}\left(1-\frac{d}{D}\cos\alpha\right)fr \quad (1)$$

$$f_{inner} = n\frac{z}{2}\left(1+\frac{d}{D}\cos\alpha\right)fr \quad (2)$$

여기서, f_{outer} : outer race fault frequency
f_{inner} : inner race fault frequency
n : fault number
z : ball number
d : ball diameter
D : ball pitch diameter
α : contact angle
fr : revolution frequency

2.2 허브 베어링 이상 신호추출

허브 베어링의 이상 모드는 대부분 구름피로에 의해 표면의 조각이 일부 떨어져 나가는 박리(flaking) 현상으로 나타난다. Photo. 1에 허브 베어링 외륜에 발생된 박리형상을 나타내었다.

허브 베어링에서 발생되는 박리 이상신호를 측정하기 위한 시편으로 중형자동차에 장착되는 두 종류의 허브베어링을 준비하였다. 첫 번째는 A/S시장에서 구매한 새제품이고, 두 번째는 차량에 장착되어 장시간 주행하다 허브 베어링 외륜에 박리 이상

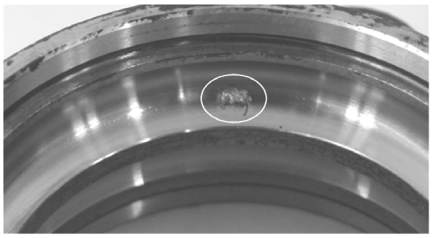


Photo. 1 Flaking of hub bearing outer

Table 1 Information of the hub bearing

Pitch diameter	50mm
Ball diameter	12.7mm
Contact angle	35 °
Number of balls	11 EA
Fault number	1 EA

이 발생된 제품이다. 시험에 사용된 허브 베어링의 주요 형상정보는 Table 1에 나타내었다.

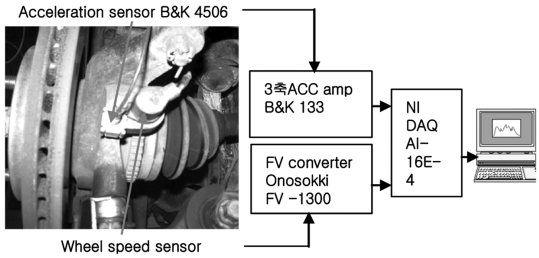


Fig. 3 Experimental measurement devices set up

허브 베어링 이상 신호를 측정하기 위한 시험장치 구성은 Fig. 3과 같이 가속도 센서(B&K 4506)를 너클에 부착하고 가속도 센서 앰프(B&k 133)에 연결하여 전압신호로 변환된 값을 데이터 수집장치(NI DAQ AL-16E-4)를 통하여 노트북에 저장되는 과정으로 이루어진다. 휠의 회전속도를 측정하기위해서는 휠 속도 센서의 펄스신호를 펄스전압변환기(Onosokki FV-1300)에 연결하여 전압신호로 변환된 값을 데이터 수집장치를 통하여 노트북에 측정신호를 저장한다. 이러한 시험 장치를 실차에 장착하고 포장도로 평탄노면을 약 80[km/h]로 주행하며 2000 [Hz]로 샘플링(Sampling)하여 Fig. 4와 같이 정상제품 가속도신호, 이상제품 가속도 신호, 회전속도신호를 얻었다.

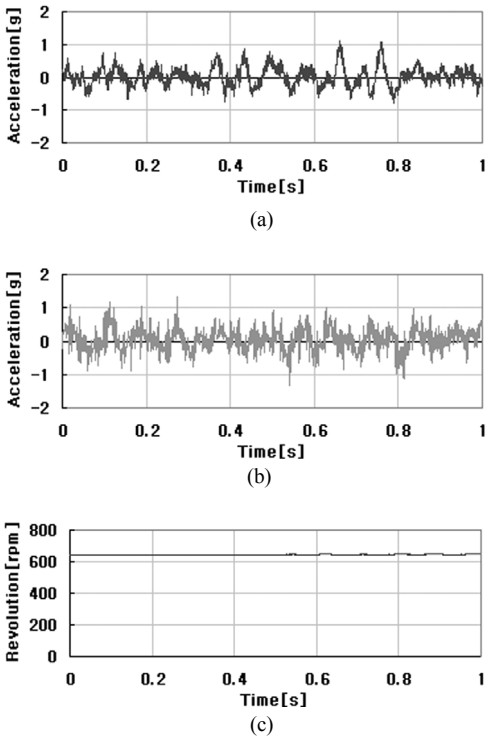


Fig. 4 Measured data, (a) Normal acceleration signal, (b) Abnormal acceleration signal (c) Wheel revolution speed signal

2.3 허브 베어링 이상 진단 알고리즘

본 논문에서는 Fig. 4와 같이 각종 노이즈(noise) 성분이 포함된 이상 가속도신호를 이용하여 허브 베어링 이상을 진단할 수 있는 효과적인 알고리즘을 제안하였다.

허브 베어링 진단 알고리즘은 Fig. 5에 제시된 바와 같이 1초 동안 허브 베어링 외륜 또는 너클에서 수직방향 가속도 신호와 휠 회전 속도 신호를 수집하고 수집한 가속도 데이터의 제곱평균제곱근(Root Mean Square) 을 계산하여 1[g]보다 작은지 확인한다. 이것은 벨지안 도로와 같은 특수노면을 배제하고 포장노면 데이터만 사용하기 위한 과정이다. 다음 단계에서는 Fig. 6(a)에 나타낸 것과 같이 입력된 가속도 신호를 미분하는데 이것은 각종 노이즈가 포함된 신호에서 허브 베어링 이상에 의한 충격신호를 증폭하기 위한 과정이다. 다음단계에서는 Fig. 6(b)에 나타낸 것과 같이 포락(envelope)을 계산하여 허브 베어링 이상신호에 대한 외곽함수를 구한다.

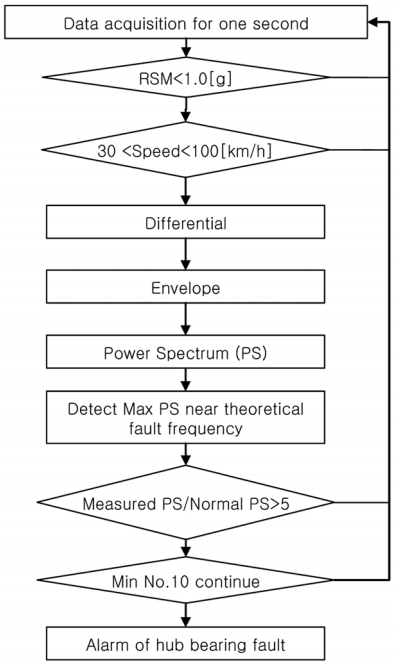


Fig. 5 Diagnosis algorism for hub bearing fault

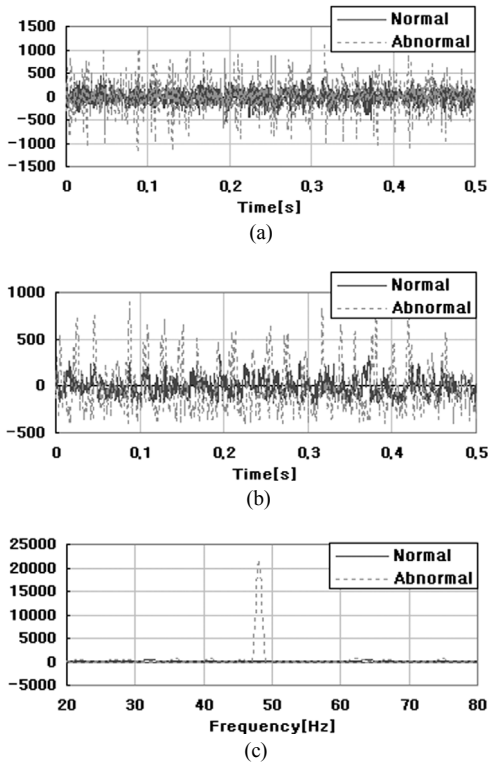
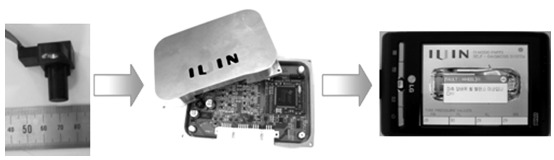


Fig. 6 Signal processing data, (a) Differential signal, (b) Envelope signal (c) Power spectrum signal

다음 단계에서는 Fig. 6(c)에 나타낸 것과 같이 파워 스펙트럼(power spectrum)를 계산하여 이상에너지의 주파수 분포를 구한 후 이론적인 허브 베어링 이상주파수 인근에 해당하는 최대 에너지 값을 추출한다. 이론적인 허브베어링의 이상주파수는 식 (1,2)에 Table 1의 데이터를 입력하여 구할 수 있다. 80[km/h](약640[rpm])주행할 때 허브 베어링 외륜의 이론적 이상주파수는 47[Hz]이고, 내륜은 71[Hz]로 계산된다. Fig. 6에 (c)와 같이 47Hz에서 피크(peak) 값이 추출되는 것으로 볼 때 허브 베어링 외륜에 이상이 발생된 것으로 추정할 수 있다. 추출된 에너지 값이 정상값보다 5배이상 크고, 이 값이 10회이상 연속적으로 유지될 때 허브 베어링에 이상이 발생되었다는 경고를 출력한다. 이것은 한 두 번의 노이즈 충격 신호에 의해 허브 베어링 이상으로 진단하는 오류를 방지하기 위한 과정이다.

3. 허브 베어링 이상 진단장치 개발

허브 베어링 이상 진단 알고리즘을 효과적으로 구현하기 위해 Fig. 7과 같이 입력장치, 연산장치, 출력장치로 구성되는 허브 베어링 이상 진단장치를 개발하였다.



(a) (b) (c)

Fig. 7 Development of diagnosis system for hub bearing fault, (a) Multi sensor : wheel speed sensor + acceleration sensor (b) Diagnosis ECU (Electronic Control Unit) (c) Diagnosis display using PDA (Personal Digital Assistant)

3.1 허브 베어링 이상 신호 입력장치 개발

허브 베어링의 이상을 진단하기 위해서는 Fig. 5와 같이 가속도 신호와 휠 속도 신호가 필요하다. 가속도 센서는 멤스 (MEMS : Micro Electro Mechanical Systems) 기술을 이용하여 소형이며 저가로 판매되는 제품을 사용하였고, 휠속도 센서는 기존 ABS (Anti lock Brake System) 입력으로 사용되는 센서를 그대로 사용하였다. 두 가지 센서를 독립적으로 사

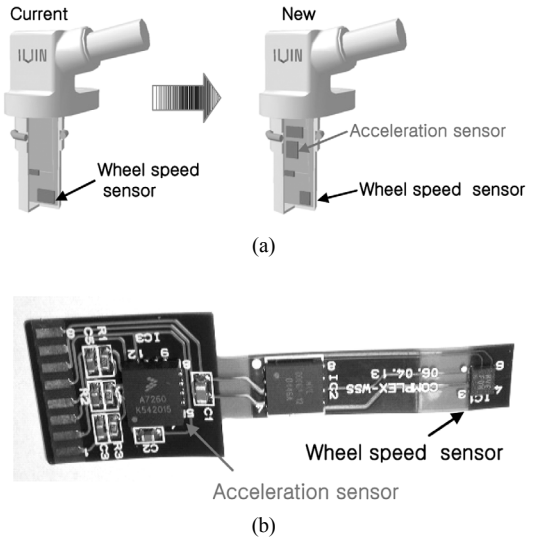


Fig. 8 Development of input device for diagnosis system, (a) Schematic diagram of input device (b) Electronic circuit of input device

용하는 것 보다 Fig. 8과 같이 휠속도 센서 내부에 가속도 센서를 삽입하여 구조를 단순화하고 생산성을 향상시킬 수 있는 허브 베어링 이상 진단 입력장치를 개발하였다.

3.2 허브 베어링 이상 신호 연산장치 개발

가속도 신호와 휠 속도 신호를 입력 받아 Fig. 5에서 제시한 연산을 원활하게 수행하기 위해서는 고속의 신호처리는 물론 각 바퀴에서 들어오는 모든 아날로그 가속도 신호를 원하는 속도 및 정확도로 A/D(Analog to Digital)변환 할 수 있어야 하며 펄스 파형의 휠 속도 신호를 받아들이기 위해서는 캡처(Capture) 기능을 가지고 있어야 한다. 이와 같은 기능을 만족하는 마이크로 컨트롤러(MCU : Micro Controller Unit)로 TI사의 TMS28XX계열의 칩(DSP: Digital Signal Processor)을 사용하였으며 입력되는 가속도센서 값의 보정과 필터링을 위해 저역필터(Lowpass Filter) 및 드래프트(Draft) 방지회로, 전압조정기(voltage regulator)회로를 하드웨어로 구성하였다. DSP는 아날로그 신호를 A/D 변환하여 얻어진 디지털 데이터에 대수적인 연산을 해 필터링이나 스펙트럼분석 등의 신호처리를 하는 것을 말한다. 기본적으로 아날로그 신호의 실시간 디지털 처리를

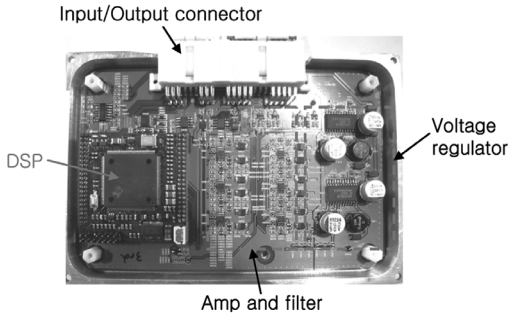


Fig. 9 Development of ECU for diagnosis system

목적으로 한다. DSP는 디지털신호를 수학적으로 빨리 계산할 수 있는 수학 연산 전문반도체로 마이크로프로세서도 이러한 기능을 수행하지만 수학연산만 전문으로 하는 DSP에 비해 속도가 느리다. DSP는 범용마이크로프로세서의 하드웨어 아키텍처(architecture)를 대폭적으로 개량, 고속 연산성과 소형화를 추구한 전용 프로세서이다. DSP를 사용하면 소프트웨어만을 교체함으로써 시스템을 업그레이드 할 수 있는 장점이 있다. 전압조정기 회로는 불안전한 전원을 양질의 전원으로 조정하는 역할을 하는 것으로 7 ~ 24V의 입력전원을 두 번의 정류과정을 거쳐서 5V및 3.3V의 정밀한 전원으로 만들어 준다. Fig. 9는 개발되어진 ECU(Electronic Control Unit)시스템을 보여주고 있다.

3.3 허브 베어링 이상 진단 출력장치 개발

허브 베어링 이상 진단 연산장치를 통하여 계산된 결과를 사용자(운전자)에게 전달하기 위한 방법으로 개인 휴대용 단말기(PDA : Personal Digital Assistant)를 사용하였으며 개발되어진 프로토콜을 통하여 ECU와의 유, 무선통신을 하게 된다. 프로그램은 Microsoft Pocket PC 2003 SDK를 이용하여 개발하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 차량이 일반 포장노면을 주행할 때 허브 베어링 외륜 또는 너클에서 가속도 신호 및 휠 속도 신호를 측정하고 측정 신호에서 허브 베어링의 이상을 진단할 수 있는 효과적인 알고리즘을 제시하였고, 제시된 알고리즘을 구현하기 위해 가

속도 센서와 휠 속도 센서로 구성되는 입력장치, DSP를 이용하여 알고리즘을 계산하는 연산장치와 PDA를 이용하여 계산결과를 운전자에게 나타내는 출력장치로 구성되는 허브 베어링 이상 진단장치를 개발하였다. 개발된 허브 베어링 이상 진단장치를 이용하면 주행 중 이상 소음 및 진동에 대하여 허브 베어링 이상을 규명할 수 있고 효과적으로 대응할 수 있어 허브 베어링 이상에 의한 승차감 저하 및 안전사고를 예방할 수 있다. 향후 완성차 및 모듈업체와 공동연구를 통하여 연산장치를 ABS 또는 ESP (Electronic Stability Program) ECU와 공유하고 출력장치를 자동차 계기판에 통합함으로써 좀 더 저렴하게 개발될 수 있다.

References

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 and C.-W. Lee, “Direction Spectrum for Identification of Characteristic Frequency of Rolling Bearings,” J. of Korean Society for Noise and Vibration, Vol.9, No.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 Singal 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, 2003.
6) J. Shin, J. C. Lee, J. E. Oh and K. Y. Jang, “Diagnosis of Bearing by High Frequency Resonance Technique,” J. of Korean Society of Automotive Engineering, Vol.14, No.5, pp.83-94, 1992.
7) 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.
8) Z. K. Peng and 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.
9) 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, No.3, pp.485-505, 1998.
10) A. C. Mccormick and A. K. Nandi, “Cyclo-Stationarity in Rotation Machine Vibrations,” Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.12, No.2, pp.225-242, 1998.
11) Tedic A. Harris, Rolling Bearing Analysis, John Wiley & Sons, New York, ch.4~6, 1991.