기어박스에서의 베어링 결함 진단

Bearing Fault Diagnostics in a Gearbox

°김 흥 섭* , 이 상 권**

° Heung-Sup Kim* , Sang-Kwon Lee**

Key Words : Bearing Diagnostics, Self Adaptive Noise Cancellation, Envelope Analysis

ABSTRACT

Bearing diagnostics is difficult in a gearbox because bearing signals are masked by the strong gear signals. Self adaptive noise cancellation(SANC) is useful technique to seperate bearing signals from gear signals. While gear signals are correlated with a long correlation length, bearing signals are not correlated with a short length. SANC seperates two components on the basis of correlation length. Then we can find defect frequency component in the envelope spectrum of the bearing signals.

1. 서 론

회전 기계는 동력전달과 회전축 지지 등의 역할을 담당하는 기어나 베어링 등의 요소들로 구성된다. 회전 기계의 상태감시에 관한 연구는 오래 전부터 진행되어 왔다. 이러한 연구의 주요 목적은 베어링의 결함을 조기에 발견하여 기계의 손상으로 인한 경제적인 손실과 피해를 미연에 방지하기 위함이다. 일반적으로 회전 기계 요소들의 결함 유무 판정은 회전 기계의 작동 시에 발생하는 진동 신호를 이용한다. 결함을 가진 요소는 작동 시 이상 신호를 발생시키고, 이런 정보는 진동 신호로 나타나기 때문이다.

결함을 가진 베어링의 진동 신호는 주로 결함을 지닌 링의 표면과 그 매끄럽지 않은 표면을 지나는 볼의 충돌에 의해 발생한다. 결함과 볼의 충돌에 의한 충격파는 베어링 시스템을 자극하여 진동을 일으킨다(1). 베어링의 이상으로 인한 진동은 이렇게 발생하게 된다. 베어링 진동은 Hilbert 변환 기술로 얻어지는 envelope 을 스펙트럼 분석을 통하여 결함으로 나타나는 주파수를 확인할 수 있다 하지만, 베어링의 결함을 탐지하는 것은 경우에 따라 어려운 일이다. 왜냐하면, 기어박스 내에는 베어링의 결함에 의한 진동 뿐만 아니라 기어 맞물림에 의한 진동 등이 발생하기 때문이다. 더욱이 베어링 결함에 의해 나타나는 진동은 상대적으로 기어 진동에 비해 작아 묻혀버릴 가능성이 크기도 하다. 따라서 베어링 결함 진단에 있어 기어와 다른 노이즈로 부터 베어링 신호를 검출하는 방법이 연구되어져야 한다.

이에 본 논문은 기어박스 내에서 베어링의 결함 유무를 진단한 연구 결과를 서술하고자 한다. 본 논문에서는 베어링 신호를 기어와 다른 노이즈로 부터 분리하기 위해 Self Adaptive Noise Cancellation(SANC)를 사용하였다. SANC 는 적응필터의 두 입력신호를 원 신호와 원 신호의 시간지연 신호를 이용한 것을 말하며, 입력신호 간에 상관관계의 차에 의해 신호의 분리가 가능하다. 이렇게 분리된 베어링 신호의 해석은 envelope 스펙트럼 분석을 통하여 결함으로 인하여 나타나는 주파수를 확인하였다.

* 인하대학교 대학원 기계 공학과
E-mail:g22011013@inha.ac.kr
Tel:032)860-8957

** 정회원, 인하대학교 기계 공학과 교수

2. 이 론

2.1 베어링 결함 신호와 주파수

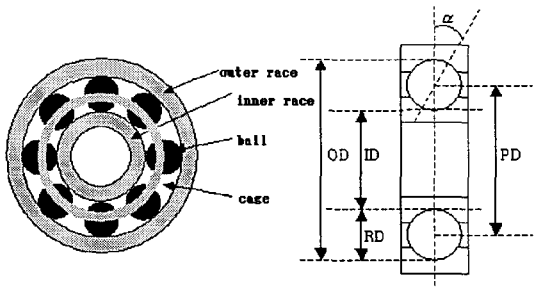


Fig.1 Ball bearing system

일반적으로 베어링의 구성요소는 구름요소(rolling elements), 두개의 링(ring or race), 케이지(cage) 등이다. 구름요소로는 볼(ball)과 롤러(roller) 등이 있고, 볼과 롤러 등이 운동하는 영역으로 두 개의 링, 외륜과 내륜이 있다. 케이지는 여러 개의 구름 요소들이 운동하며 볼의 간격을 유지시켜주는 역할을 한다. 이러한 요소들은 회전 기계 내에서 축 등의 회전이 쉽게 하지만, 접촉 피로와 마모는, 베어링이 결함을 갖게 하는 주된 원인이 된다(1).

베어링의 결함은 베어링 회전 시 진동을 유발시키는 데 그 신호는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다(2,3).

$$x(t) = \{d(t) \times a(t) \times q(t)\} * e(t) \qquad (1)$$

$x(t)$ 는 베어링 신호를 나타내며, $d(t)$ 는 주기적으로 나타나는 충격 신호이다. $a(t)$ 는 결함의 위치가 회전하면서 충격이 일어나는 위치가 변하므로 그 회전에 맞는 진폭의 크기와 방향을 바꿔주는 함수이다. 또 $q(t)$ 는 베어링에 작용하는 하중의 분포에 따라 진폭의 크기를 바꿔주는 함수를 나타내며, 마지막으로 $e(t)$ 는 충격파로 인한 베어링 시스템의 반응 신호이다. Fig.2 는 식(1)에 의해 만들어진 베어링 결함 신호이다.

스펙트럼에서 주요 주파수는 반응 주파수와 주변의 주파수 대역이다. 대개 스틸 재료의 특성상 수 kHz 이상의 주파수에서 반응한다. 또 충격파는 볼이 결함 부분을 지나는 일정한 시간에 의하여 나타나게 되는 데 그 주파수는 베어링의 기하학적인 형상을 고려하면 구할 수 있다. 이미 알려진 바와 같이 식(2)와 같다(1).

$$f_i = nf_r\left(\frac{1+(RD/PD)\cos\alpha}{2}\right)$$
$$f_o = nf_r\left(\frac{1-(RD/PD)\cos\alpha}{2}\right) \qquad (2)$$
$$f_b = fr\left(\frac{((RD/PD)\cos\alpha)^2}{RD/PD}\right)$$

축의 회전속도가 f_r 일때 f_i, f_o, f_b 는 각각 내륜, 외륜, 볼에 결함이 존재할 경우 볼이 결함을 지나는 주파수를 말한다.

2.2 Envelope Analysis

Envelope 스펙트럼은 베어링의 결함이 나타내는 주파수를 찾는데 이용되는 대표적인 분석 방법이다. Fig.3 은 결함을 가진 베어링 모델링 신호의 envelope 과 스펙트럼을 시뮬레이션한 것이다. 원

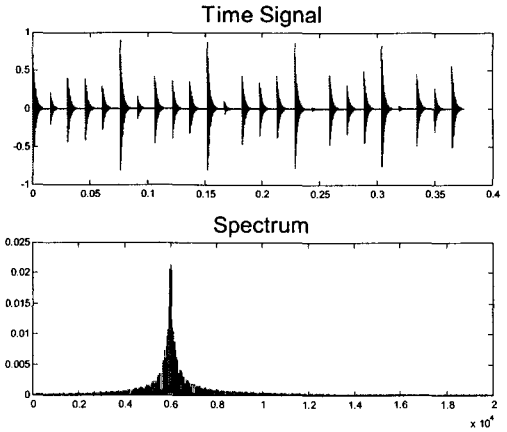


Fig.2 Simulation of bearing fault signal

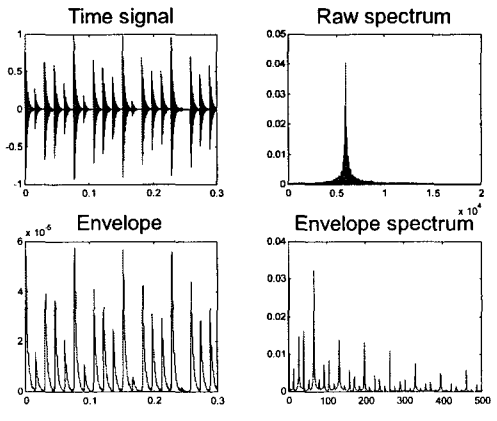


Fig.3 Envelope analysis using Hilbert Transform

신호의 주파수는 6kHz 의 고주파에서 반응을 나타내지만, envelope 을 구하여 스펙트럼을 살펴보면, 식(2)의 낮은 주파수들이 크게 나타난다. 이는 베어링의 결함으로 나타나는 충격의 주파수를 확인하는 데 유용하다. 신호의 envelope 은 Hilbert 변환 기술에 의해 얻어진다. 또 보통 주파수 대역은 Fig.2 와 같은 양상으로 나타나기 때문에 대역 통과 필터링을 이용하여 베어링 결함 신호만을 살펴볼 수 있다. 주파수 대역을 선정하여 그 대역만을 envelope 과정에 포함시키는 것 이다. 이는 데이터의 개수를 크게 줄여, 계산 시간을 크게 줄일 수 있다(4).

2.3 Self Adaptive Noise Cancellation(SANC)

결함 베어링을 포함하는 기어박스의 진동은 여러가지 요소에서 발생하는 진동으로 이루어진다. 진폭의 크기가 상대적으로 큰 기어의 맞물림에 의한 진동신호와 베어링의 결함부분과 볼이 부딪히면서 발생하는 베어링 결함 충격 신호, 그리고 광대역의 노이즈 신호등이 있다.

Self Adaptive Noise Cancellation(SANC)은 적응 필터의 두 입력신호를 원 신호와 원 신호의 시간 지연을 준 신호를 사용함을 말한다(4,5). 적응 필터의 원리는 두 개의 입력신호, 즉 원 신호와 그 신호의 시간 지연된 신호를 이용하여 상관관계를 따지는 데, 상대적으로 상관관계가 큰 신호는 필터링되고, 상관관계가 크지 않은 신호는 적응필터의 에러 신호로 남게 되는 것이다(4-7).

기어박스에서 발생하는 진동 신호 중 기어의 진동 신호는 축의 회전속도에 종속되어 일정한 회전속도에서 발생한 진동신호는 상대적으로 큰 상관관계를 가질 수 있다. 하지만, 베어링의 결함 신호는 그 주기는 가지고 있지만, 충격 신호의 특성이나, 미끄럼 등으로 인하여 축의 회전속도에 딱 맞게 종속되어지지 않는다. 따라서 베어링의 충격 신호는 기어의 진동신호에 비하여 상관관계가 떨어진다. 이런 신호의 특성을 이용하여 적응필터는 기어 신호를 필터링하여 베어링의 충격 신호를 얻을 수 있다. 이때 필터의 차수와 시간 지연의 크기 등을 조절함으로써, 적당한 상관성을 가진 신호는 통과를 시키고 그렇지 않은 신호는 에러로 남게 된다. 변수들에 대한 관계는 연구를 통해 알려져 있다.

적응 필터의 적용은 식(3)과 같다. 우리가 원하는 신호가 정해져 있을 경우 적응필터의 오차를 최소화하는 적응 필터 계수를 식(1)과 같이 적용하게 된다.(8,9)

$$y(k) = W_k^T X_k \tag{3}$$

여기서, W_k 는 필터의 가중 벡터이고, X_k 는 입력 신호의 일부이다.

LMS 알고리즘은 에러가 최소화되도록 가중 벡터를 설정한다.

$$W^* = R^{-1}P \tag{4}$$

하지만, LMS 알고리즘은 가중 벡터를 구하기 위해 원하는 신호와의 Expectation 을 필요로 하므로, 위의 기어 신호분리를 원할 때 기어 신호를 모르고 있듯이 가중 벡터를 구하기 위한 R, P 벡터를 구할 수 없다. 따라서, 우리가 원하는 가중 벡터를

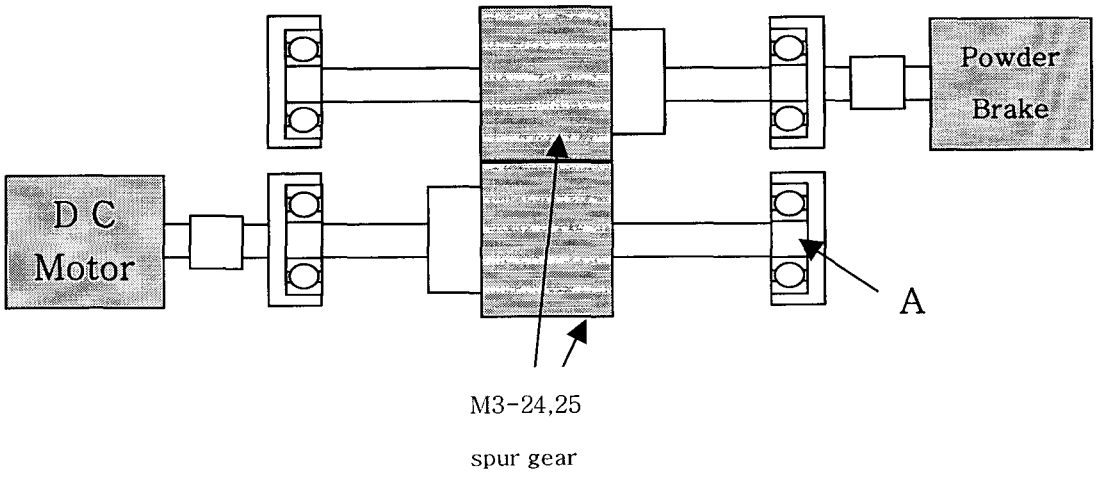


Fig. 4 Schematic diagram of test rig for bearing fault diagnostics

구하는 방법은 다음과 같은 오차를 고려한 반복적인 작업을 통하여 얻게 된다.

$$W_{k+1} = W_k + 2\mu e(k) X_k \qquad (5)$$

여기서 μ 는 적응 스텝 크기이다.

3. 실 험 방 법

본 연구에서 사용되어진 기어박스는 Fig.4 에 도시 되어져 있다. 본 실험장치는 0.75 KW 의 MSS-080M DC 모터와 SCM 재질의 M3-24 입력 축 평기어(spur gear)와 같은 재질의 M3-25 출력 축 평기어 한 쌍으로 구성되어 있으며, 축을 지지하는 베어링 시스템이 있다. 또 기어 시스템에 토크 부하(torque load)를 가해주기 위해 출력 축에 NKPB-1.2Y 파우더 브레이크(powder break)를 사용하였다.

본 실험에서는 약 750, 800, 900 rpm 의 입력 축 회전 속도와 1.5 Nm 의 토크 부하 상태에서 실험을 수행하였다. 결함을 가진 베어링은 볼 개수 8, 피치원지름 29mm, 볼 지름 약 6.746875mm 인 깊은 홈 볼 베어링을 사용, 단단한 베어링의 내륜 부분을 볼 이동방향의 수직 방향으로 기계 공작용 공구를 이용하여 홈을 내어 결함을 인위적으로 만들었다. 결함을 가진 베어링은 Fig.4 의 A 위치에 장착하였고, 진동 신호를 얻기 위해 결함 베어링이 위치한 베어링 하우징(bearing housing) 상단에 가속도계(accelerometer ; B&K 4384V)를 부착하였다. 기어 축 한 회전 당의 기준 펄스 신호(pulse signal)를 얻기 위해 입력 축 상의 커플링(coupling)에 있는 키(key) 고정용 구멍(hole)을 이용하여 간극 센서(gap sensor ; AEC-55MS-M)로부터 상대적인 기준 펄스 신호를 얻었다. 이렇게 얻어진 기어의 진동 신호와 기준 신호를 각각 증폭기(amplifier)를 통하여 증폭 시키고 DAQ 보드(BNC-2090)를 이용하여 펄스 신호를 기준으로 기어의 진동 신호를 트리거(trigger) 하였다.

4. 결 과 및 해 석

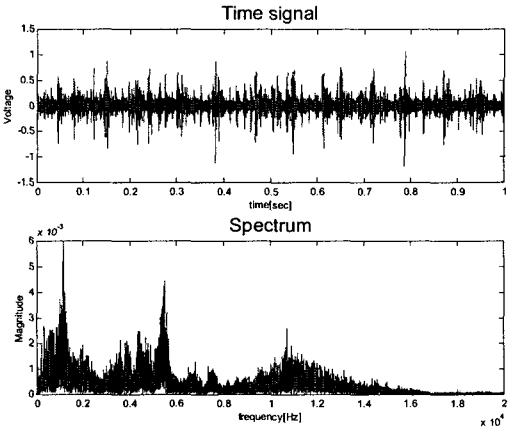


Fig.6 Time signal and Spectrum

실험은 회전속도 약 750, 800, 900rpm 에서 진행하여, Fig.6 과 같은 기어박스의 진동 신호를 얻었다. 우선 각 조건의 진동신호를 Hilbert 변환을 이용 envelope 을 구하였으며, envelope 스펙트럼에서 베어링 결함으로 인한 주파수 확인을 시도하였다. 또 본 논문에서 제안하는 SANC 를 통한 신호 분리 작업으로 베어링 진동신호를 얻고 마찬가지로 envelope 분석을 하였다. Fig.5 에 그 방법을 그림으로 나타내었다.

각 회전 수에서 결함으로 나타나는 예상 주파수는 식(2)에서 f_i 값에 의해 계산될 수 있는데, 750rpm 일 경우 62Hz, 800rpm 일 경우 66Hz, 900rpm 일 경우 74Hz 가 된다.

먼저 Fig.7 의 (a)는 Hilbert 변환 기술에 의해 얻어진 Envelope 의 스펙트럼이다. 화살표로 표시된 부분이 결함에 의해 나타난 주파수를 나타낸다. 750rpm 의 경우 예상되는 주파수가 62Hz 와 그 하모닉 성분이지만, 화살표를 보면 알 수 있듯이 주변의 주파수 성분들 때문에 의해 구분이 힘들다. 800rpm 과 900rpm 역시도 마찬가지로 어렵다. Fig.7 의 (b)는 본 논문에서 제안하는 SANC 적용 후의

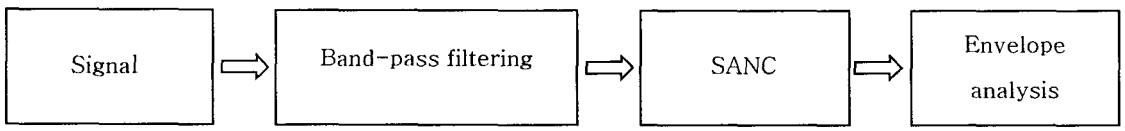
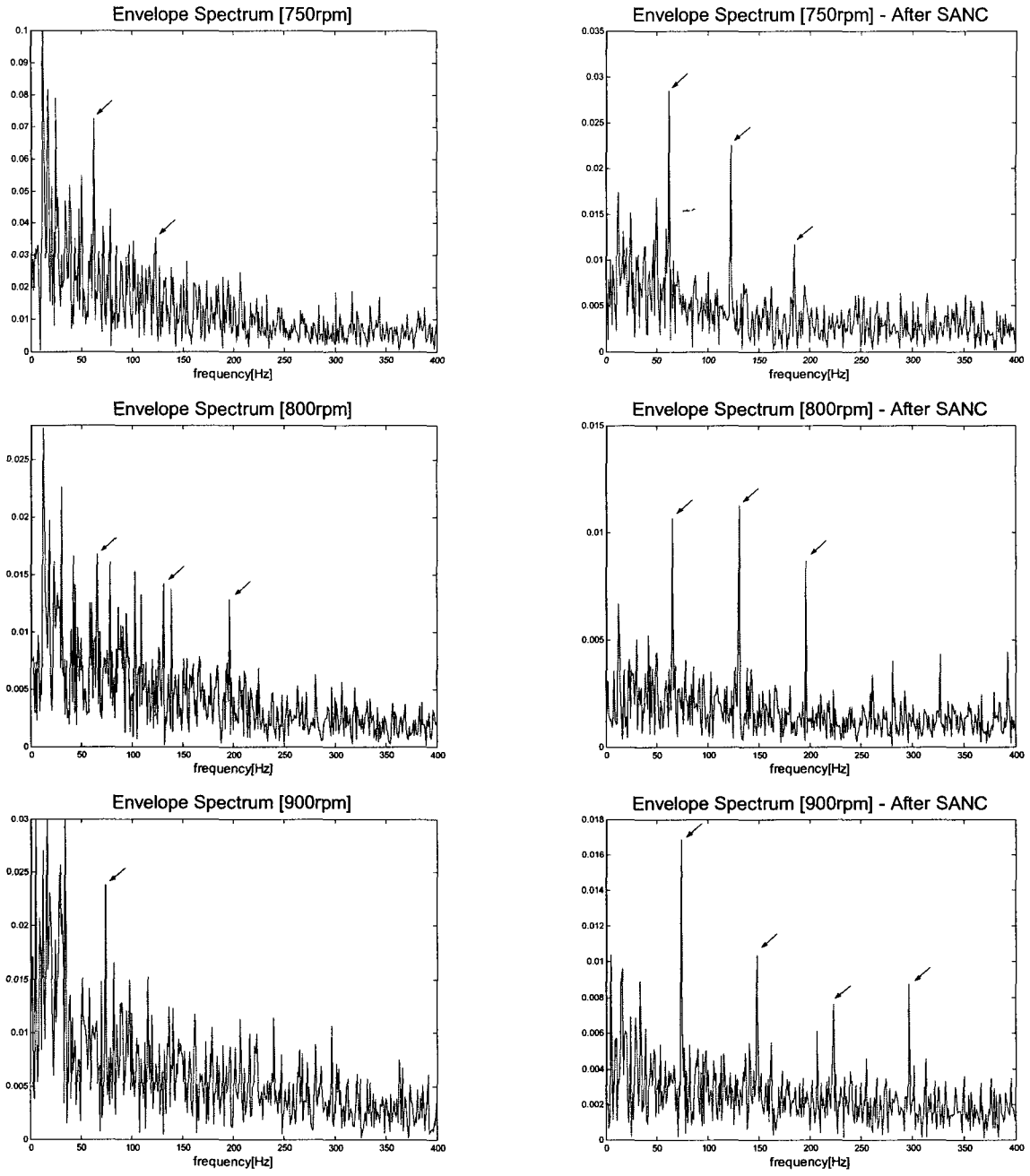


Fig.5 Two ways in which to use SANC in conjunction with envelope analysis



(a) (b)

Fig.7 (a) Envelope analysis using Hilbert transform technique (b) Envelope analysis using bandpass filtration and SANC

결과이다. 결과는 각각의 축 회전속도에 해당하는 볼이 결함을 지나는 주파수인 62, 66, 74Hz 를 확인할 수 있으며, 그것의 하모닉 성분까지도 뚜렷하게 확인할 수 있다. 결과적으로 베어링 결함을 진단 시 가장 대표적으로 사용해 오던 방법인 Hilbert 변환 기술에 의한 envelope 해석은 기어 진동 신호나 다른 노이즈 성분을 포함할 때 좋은 결과를 얻을 수 없는 반면에 본 논문에서 제시한 대역 통과 필터링과 SANC 를 이용한 방법은 베어링의 결함에 의한 충격 신호를 다른 진동 신호와 분리함으로써, envelope 스펙트럼 상에서 결함에 의한 주파수를 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 기어박스에서의 베어링 결함 진단에 있어 Hilbert 변화기술 적용과 대역 통과 필터링과 SANC를 적용하는 방법을 제시하였다.

기어박스의 진동신호에서 대역통과 필터링과 SANC 적응필터의 적용으로 베어링의 충격신호를 얻을 수 있으며, envelope 스펙트럼 상에서 베어링의 결함에 의한 주파수를 확인하였다. 하지만 베어링의 결함 진단에 전통적으로 사용되던 Hilbert 변환기술에 의한 envelope 스펙트럼은 기어나 다른 노이즈의 영향 때문에 결함 진단이 어렵다는 것을 알 수 있어 본 연구에서 제시한 방법이 유용성이 있음을 확인하였다.

참고문헌

(1) Johannes Brandlein and Paul Eschmann, 1999, "Ball and Roller Bearings", 1999 *Wiley*, pp92~97, 421~458.

(2) P.D.McFadden and J.D.Smith 1984 "Model for the vibration produced by a single point defect in a rolling element bearing", *Journal of Sound and Vibration* 96, pp69~82.

(3) P.D.McFadden and M.M.Toozhy,2000, "Application of synchronous Averaging to Vibration Monitoring Of Rolling Element Bearings.", *Mechanical System and Signal Processing* 14(6) pp891~906.

(4) D.Ho and R.B.Randall, 2000, "Optimisation of Bearing Diagnostic Techniques Using Simulated and Actual Bearing Fault Signals" *Mechanical System and Signal Processing* 14(5), pp763~788.

(5) 이상권, 2000, "능동 신호 처리 이용한 기어의 이상 진단", 학회창립 10 주년기념 소음진동 학술대회 논문집, pp1114~1118.

(6) Lee, S. K. and White, P. R., 1999, "Two-Stage Adaptive Line Enhancer and Sliced Wigner Trispectrum for the Characterization of Faults from Gear Box Vibration Data" ASME. *Journal of Vibration Acoustics*, Vol. 121, pp. 488~494.

(7) R.B.Randall, 2001, " Bearing Diagnostics In Helicopter Gearboxes." , 2001 *Condition Moitoring and Diagnostic Engineering Management.*

(8) Bernard Widrow and Samuel D. Stearns, 1985 "Adaptive Signal Processing" ,1985 *Prentice Hall.*

(9) J.Shiroishi,Y.Li,Sliang,T.Kurfess and S.Danyluk, 1997 , "Bearing Condition Diagnostics Via Vibration and Acoustic Emission Measurements" , *Mechanical System and Signal Processing* 11(5), pp693~705.