

진동신호를 이용한 기어체인의 고장진단

배 범 원* · 최 연 선**
(1999년 9월 6일 접수)

Fault Diagnosis of Gear Chain Using Vibration Signal

Bum Won Bae and Yeon Sun Choi

Key Words: Fault Diagnosis(고장진단), Gear Chain(기어체인), Adaptive Interference Canceling (적응간섭제거법), Spectrogram(스펙트로그램), Wavelet(웨이블렛)

Abstract

The Vibration signals of a gear driving system is often associated with gear tooth faults. Many studies have been done on the detection of impulsive vibration signals, which characterize the breakage of a gear tooth. Also, most of the studies on gear fault diagnosis are only about the fault existence at one gear-pair. This study concerns on the several possible faults of a geared motor that has three gear pairs. The measurement and analysis on the vibration signals of a running geared motor shows the relationship between the gear faults and the vibration signals. This study also shows that adaptive interference canceling technique can be appropriately applicable to detect which gear-pair has the fault, and that wavelet is better than spectrogram to figure out the gear fault.

1. 서론

기어는 높은 동력 전달효율과 다양한 속도비를 갖는 기계요소로서 동력 발생원인 모터와 함께 제작되어 감속을 통한 높은 구동력을 얻는데 많이 사용되고 있다. 기어구동부에서 발생하는 진동신호는 주로 기어물림과정에서 발생하는 것으로 축과 베어링을 통해 케이스 등 기어구동계 전체로 전달된다. 기어구동부의 고장은 대부분 기어의 설계 및 제작불량에 기인하며 운전 중 기어 치에서 발생하는 크랙 및 마모가 원인이 되기도 한다. 기어구동계에 고장이 있으면 진동과 소음이 발생하므로 제품에 대한 신뢰도가 하락하고 경우에 따라서 기어구동부가 사용되는 전체 시스템의 정지까지도 유발할 수 있다.

따라서 이러한 기어구동계의 고장을 조기에 감지하여 고장이 생긴 기어에 대한 처리 및 교환은 막대한 손실을 예방할 수 있다. 그러나, 여러 기어쌍이 조합되어 구성된 감속기의 경우에 한 쌍, 또는 한 쌍 이상의 기어 치에 고장이 발생할 경우, 고장이 있는 기어를 식별하는 것은 쉽지 않다. 또한 기어구동계에서는 치의 결함과 더불어 축의 정렬불량과 불균형 등 다양한 고장원인이 있을 수 있으며 또한 기어구동계에서 발생한 신호는 잡음에 노출되고 전파과정에서 변조되어 측정된 신호만으로 기어구동계의 고장원인이 되는 특정 기어만을 정확히 알아내기가 쉽지 않다. 이러한 기어구동계의 고장진단을 위해서 사용되는 방법으로는 주위 잡음 신호로부터 충격성분만을 분리하기 위해 2단계의 적응알고리즘을 이용하는 방법⁽¹⁾과 전체 신호 중 협대역의 주파수 레벨 값을 기준으로 하여 고장유무를 판단하는 움직이는 창(moving window)을 이용하는 방법⁽²⁾ 적응알고리즘을 이용하여 고장에 의해 발생된 위상 및 진폭이 변조된 신호와 맞물림주파수를 기준으로 만

* 성균관대학교 대학원

** 회원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : yschoi@yurim.skku.ac.kr

TEL : (0331)290-7440 FAX : (0331)290-5849

들어진 신호와의 차이를 분석하여 고장유무를 판단하는 방법,⁽³⁾ 시간-주파수(time-frequency) 해석방법인 위그너빌(Wigner-Ville) 분포나 시간-스케일(time-scale)해석방법인 웨이블렛(wavelet)해석을 통해 나타난 에너지분포를 이용하는 방법⁽⁴⁾ 등이 있다.

본 연구에서는 세 쌍의 기어 맞물림이 있는 소형 기어구동계에 대해 실험을 수행하고 측정된 진동신호를 분석하여 고장이 있는 기어쌍을 식별하는 방법과 기어구동계의 고장 유형을 구분하는 연구를 수행하였다. 기어치에 발생한 고장을 식별하기 위하여 적응간섭제거법을 사용하였고 또한 웨이블렛을 이용하여 기어치에서 발생한 고장을 도시하였다.

2. 기어 맞물림 주파수

기어쌍의 맞물림으로 발생하는 진동신호의 원인은 치의 형상, 부하조건, 윤활유 상태, 기어박스의 공진 등 다양하나, 대부분의 경우 기어의 회전량에 대한 피니언의 회전량의 이론값과 실제값의 차이로 정의되는 전달오차(transmission error)에 기인한다. 이러한 전달오차는 기어맞물림과정에서 이론적인 치의 형상과 실제 제작된 치의 형상과의 차이에서 발생한다. 이러한 제작상의 오차를 완전히 제거하는 것은 불가능하므로 기어 맞물림과정에서 진동과 소음은 정도의 차이는 있으나 항상 발생한다. 치의 형상이 이상적인 경우 일정 속도와 일정 하중상태에서는 다음과 같은 진동신호가 나타난다.⁽⁴⁾

$$x(t) = \sum_{k=1}^N X_k \cos(2\pi k f_m t + \phi_k) \quad (1)$$

여기서 X_k 은 조화성분의 크기, f_m 는 기어 맞물림주파수, k 는 맞물림주파수의 차수를 나타낸다. 그러나 기어치의 고장이 발생한 경우에는 위상 및 진폭의 변조가 생기므로 식 (1)은 다음과 같이 변형된다.

$$x(t) = \sum_{k=1}^N a_k(t) \cos(2\pi k f_m t + \phi_k(t)) + e(t) \quad (2)$$

여기서 $e(t)$ 는 부가되는 잡음성분을 나타낸다. 각각의 변조함수는 식 (3)과 식 (4)와 같으며 f ,

은 축의 회전속도를 나타낸다.

$$a_k(t) = \sum_{n=1}^M A_{k,n} \cos(2\pi f_r t + \phi_{k,n}) \quad (3)$$

$$\phi_k(t) = \sum_{n=1}^M \phi_{k,n} \cos(2\pi f_r t + \theta_{k,n}) \quad (4)$$

$a_k(t)$ 와 $\phi_k(t)$ 는 각각 시간에 따른 진폭 및 위상변조를 의미하며 기어치 접촉면의 불규칙한 형상으로 하중의 변화에 의해 진폭변조가 생기며, 일정치 않은 기어치 간격으로 인해서 접촉점이 엄격히 피치원의 위치에 있지 못하므로 위상변조가 생긴다.⁽³⁾ 이러한 변조현상은 기어치의 고장이 진행됨에 따라 넓은 주파수 범위로 확장되며 시간영역에서 충격성분의 형태로 나타나고, 주파수 영역에서는 맞물림주파수의 측파대(side-band)의 성분으로 나타난다. 이러한 경우 수식적인 표현이 어렵게 되며 전체 신호중 고장의 원인이 되는 신호를 찾는 것은 쉽지 않다. 따라서 기어구동계의 고장진단을 위해서는 전체 신호에서 해석이 요구되는 신호만을 분리하는 작업이 요구된다.

3. 기어진동의 신호처리

3.1 적응신호처리

적응신호처리(adaptive signal processing)는 신호처리과정에서 입력신호에 따라 전달함수의 값이 변하는 기능을 갖춘 신호처리로서 $H_k(z)$ 를 시스템의 특성을 나타내는 전달함수(transfer function), x_k 를 시스템으로의 입력, y_k 를 시스템의 출력, d_k 를 시스템의 목표신호이라고 할 때 다음과 같은 관계를 가진다.

$$y_k = \sum_{n=0}^L h_n(k) x_{k-n} \quad (5)$$

$$e_k = d_k - y_k \quad (6)$$

여기서 $h_n(k)$ 는 전달함수의 계수를 의미하며 e_k 는 오차신호이다. 전달함수의 계수는 출력신호 y_k 을 목표신호 d_k 에 근사화하기 위해서는 다음과 같은 오차신호의 자승평균치(MSE : mean square error)를 최소로 하는 값을 가져야 한다.

$$MSE = E[e_k^2] \quad (7)$$

여기서 $E(x)$ 는 x 의 기대치이며 위에서 정의된 식 (5)와 식 (6)을 대입하고 MSE의 값이 최소가 되기 위해서 전달함수의 계수는 다중입력에 대한 벡터표현으로 나타내면 다음과 같은 점화식으로 표현할 수 있다.

$$\mathbf{H}_{k+1} = \mathbf{H}_k - \mu \nabla_k \quad (8)$$

여기서 사용된 μ 는 수렴 매개변수(convergence parameter)이며, \mathbf{H}_k 와 ∇_k 는 다음과 같은 값을 의미한다.

$$\mathbf{H}_k = [h_0(k) \dots h_L(k)]^T \quad (9)$$

$$\nabla_k = \frac{\partial E[e_k^2]}{\partial \mathbf{H}_k} = -2e_k \mathbf{X}_k \quad (10)$$

이와 같이 기울기만을 이용하여 시점 k 에서 추정기울기 ∇_k 의 역방향으로 계수 \mathbf{H}_k 를 $\mu \nabla_k$ 만큼 조정하여 최적의 계수벡터에 이르기 위해 최소자승(Least Mean Square : LMS) 알고리즘을 적용하게 된다. 따라서 결국 식 (8)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{H}_{k+1} = \mathbf{H}_k + 2\mu e_k \mathbf{X}_k \quad (11)$$

또한 수렴매개변수인 μ 의 값의 안정된 범위가 입력 신호의 제곱 값 σ^2 에 따라 변하고, 다음과 같이 정규화된 값을 사용하면 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{H}_{k+1} = \mathbf{H}_k \frac{2\mu \epsilon_k \mathbf{X}_k}{(L+1) \sigma_k^2}, \quad 0 < \mu < 1 \quad (12)$$

여기서 L 은 필터계수의 갯수를 의미한다.

3.2 적응간섭제거법

식 (12)로부터 입력신호에 따라 필터계수가 변하는 것을 알 수 있으며 이러한 LMS 알고리즘을 바탕으로 복합된 신호로부터 원하는 신호만을 잡음의 영향을 받지 않으면서 추출할 수 있는 방법으로 가장 많이 사용되는 것은 적응간섭제거법(adaptive interference canceling)이다.

적응간섭제거법은 입력신호와 함께 분리하고자 하는 신호의 관련신호(correlated signal)를 입력으로 주어 Fig. 1에서와 같은 알고리즘을 통해 원하는 신호만을 분리하는 것으로 본 연구에서는 $s_k + n_k$ 를 치차불이 전동기(gear motor)의 케이스에서 측정된 가속도 신호, n_k 는 분리하고자 하는 기어쌍의 맞물림주파수의 여현성분으로 각 기어쌍의 신호에 해당하는 n_k 와 관련이 있는 신호로 주었다. 이와 같은 과정을 거쳐 출력신호 e_k 는 측정된 신호로부터 여타 다른 요인에 의해 발생된 신호를 제거한 기어 맞물림주파수 성분만을 의미하게 된다.

본 연구에 사용된 치차불이 전동기는 기어 맞물림에 의해 발생된 신호뿐만 아니라 모터와 전원주파수 성분 등 여러 신호의 복합된 신호특성을 나타내므로 순수한 기어만의 신호를 추출하기는 쉽지 않다. 그러므로 본 연구에서는 적응간섭제거법을 이용하여 측정된 진동신호로부터 세 개의 기어쌍에 해당하는 성분을 추출하여 결함이 발생한 기어쌍을 식별하고자 하였다.

4. 기어 신호 분석

4.1 Spectrum 과 Cepstrum

일반적으로 신호 $x(t)$ 에 대한 푸리에 변환(Fourier transform)은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$F[x(t)] = X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (13)$$

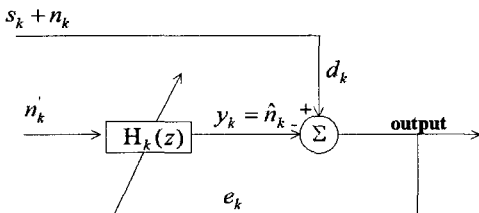


Fig. 1 Adaptive interference canceling

이러한 푸리에 변환은 주어진 시간영역의 신호를 서로 다른 주파수성분으로 분리하는 방법으로서 전체신호가 가지는 주파수 성분들을 잘 나타낼 수 있으므로 신호분석에 널리 이용되고 있다. 또한 이러한 푸리에 변환의 응용된 형태의 분석 방법으로는 셉스트럼(cepstrum)이 있으며, 이는 시간영역신호의 파워 스펙트럼(power spectrum)의 대수 파워 스펙트럼(logarithmic power spectrum)으로 정의되며 주파수분석 결과의 주기성을 알아내는 도구로 사용되어진다. 이러한 셉스트럼의 수학적 표현은 다음과 같다.

$$C(\tau) = |F\{\log F_{xx}(f)\}|^2 \quad (14)$$

여기서 $F_{xx}(f)$ 는 시간신호 $x_x(t)$ 의 파워스펙트럼이다.

$$F_{xx}(f) = |F\{x_x(t)\}|^2 \quad (15)$$

4.2 Spectrogram 과 Wavelet

이러한 푸리에 변환과 셉스트럼 분석방법은 전체 신호에 대한 해석이므로 충격신호와 같이 시간영역에서 일시적으로 발생하는 중요한 정보가 무시되는 단점이 있으므로 이를 극복하기 위하여 개발된 Short Time Fourier Transform(STFT)은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있으며 작은 가중치를 가지는 창 단위로 푸리에 변환을 수행하여 시간과 주파수의 함수로 나타내는 분석방법이다.

$$F[x_w(t, \tau)] = X_w(f, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} w(t-\tau)x(t)e^{-2i\pi ft} dt \quad (16)$$

여기서 $w(t)$ 는 창함수를 의미한다. 또한 공학적으로는 STFT의 계수의 제곱을 스펙트로그램(spectrogram)으로 정의한다.⁽²⁾ 따라서 이러한 스펙트로그램은 언제, 그리고 어떤 주파수성분에서 신호의 특이점이 발생했는지에 대한 정보를 제공한다. 그러나 창의 크기가 전체적으로 일정하기 때문에 일단 창의 크기가 결정되면 모든 주파수에 대해 동일하게 적용되므로 원하는 영역에 대한 세밀한 분해능을 가지지 못하기 때문에 정밀도가 제한되는 단점이 있다. 즉 시간영역과 주파수 영역에서 동시에 높은 분해능을 가질 수는 없

는 것이다.

이와 달리 웨이블렛 해석방법은 이러한 스펙트로그램의 일정한 창의 역할을 시간과 스케일에 따라 형태가 변하는 웨이블렛이라는 단위로 대신하여 전체 시간영역의 신호를 웨이블렛으로 분해하고 이를 다시 작은 시간영역으로 분해함으로써 분석하고자 하는 성분이 나타날 수 있는 분해능까지 분석하는 방법으로서, 웨이블렛의 형태와 유사성이 크면 높은 값을 가지게 됨으로써 신호의 국소적인 특징을 잘 표현할 수 있다. 또한, 웨이블렛의 형태에 따라 전체적인 신호 특성이 시간축 상에서 규명될 수 있어 고장이 생긴 회전요소의 진단에 유용하게 사용되고 있다.⁽⁵⁾ 본 연구에서 적용한 웨이블렛은 직교 웨이블렛으로서 다음과 같이 설명할 수 있다. 일반적으로 $t \in [0, T]$ 의 신호 $x(t)$ 는 유한개의 스케일 안에서 웨이블렛의 합으로 분해될 수 있다. 즉,

$$x(t) = w_0 + \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{2^j-1} w_{2^j+k} \phi(2^j t - kT) \quad (17)$$

여기서 w_0 와 w_{2^j+k} 를 직교 웨이블렛 변환이라 부르며 다음과 같이 정의된다.

$$w_0 = \int_0^T x(t) dt \quad (18)$$

$$w_{2^j+k} = \int_0^T x(t) \phi(2^j t - kT) dt \quad (19)$$

또한 $\phi(2^j t - k)$ 는 다음 두 가지를 만족한다.

$$\int_0^T \phi(2^r t - kT) dt = 0 \quad (20)$$

$$\int_0^T \phi(2^r t - kT) \phi(2^s t - lT) dt = \begin{cases} 1 & (r=s, k=l) \\ 0 & \end{cases} \quad (21)$$

이러한 직교 웨이블렛 변환 중 가장 대표적인 종류는 Daubechies 웨이블렛으로 Fig. 2에서와 같은 형상을 기본으로 하여 스케일에 따라 형상이 변화하고 시간영역에 걸쳐 이동하며 원신호와 유사성을 비교하게 된다. 이러한 Daubechies 웨이블렛은 알고리즘과 신호의 분리에 따른 오차성분이 없어 기어의 고장진단에 사용하기 적합하다.⁽⁷⁾ 따라서 본 연구에서도 이러한 Daubechies 웨이블렛을 이용하여 고장진단을 수행하였다.

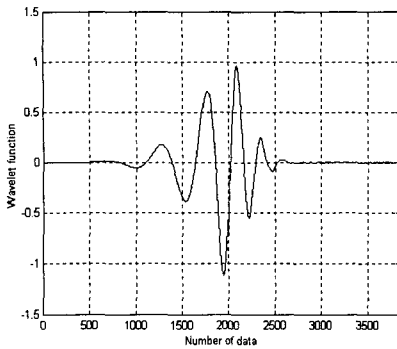


Fig. 2 Wavelet function of Daubechies

5. 기어구동실험

본 연구에서는 기어와 모터로 구성되는 산업용 소형 치차붙이 전동기(geared motor)에 대한 진동신호를 측정, 분석하였다. Fig. 3은 본 연구에서 사용된 치차붙이 전동기를 나타낸 그림으로 3개의 기어쌍이 맞물려 약 40:1의 감속비를 유지하도록 설계되었다. Fig. 4는 기어체인으로 각 기어의 잇수와 맞물림쌍을 나타내었다.

Table 1은 본 연구에 사용된 DC 치차붙이 전동기에 정격입력, 90V를 가하였을 때의 정격출력, 75rpm에 대해 이론적으로 계산한 각각의 기어맞물림주파수를 나타낸 것이다.

본 연구에서는 기어케이스 상단에 가속도계를 부착하여 기어체인에서 발생하는 진동신호를 측정하였다. 출력축의 회전수를 측정하기 위해서 마그네틱 픽업(magnetic pick-up)을 커플링(coupling) 위치에 설치하여 1회전 당 하나의 펄스(pulse)를 얻도록 하여 회전속도를 계산하였고, 입력 전압에 따라 회전속도를 변화시킬 수 있도록 DC 제어기(DC controller)를 사용하였다. 또한 직류전압을 파우더 브레이크(powder brake)에 가하여 커플링(coupling)과 연결한 출력축에 운전 중 부하를 주었다. 이와 같은 방법을 통해 얻은 진동신호는 A/D 보드를 거쳐 컴퓨터에 저장되고 MATLAB⁽⁹⁾을 이용하여 신호를 분석하였다. Fig. 5는 본 연구의 실험장치의 구성을 나타낸 그림이다.

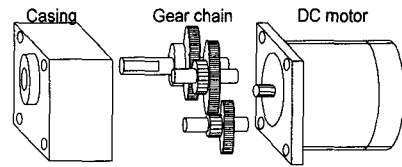


Fig. 3 Geared motor

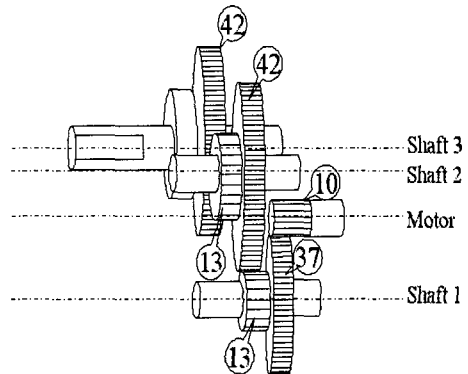


Fig. 4 Gear chain

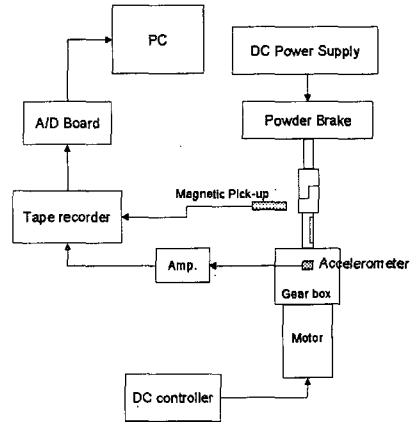


Fig. 5 Experimental set-up

Table 1 Gear meshing frequency (90V-75rpm)

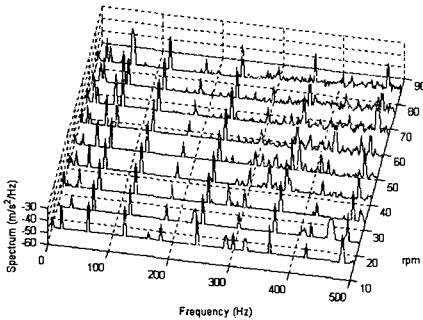
Gear set	Z		f_{mesh} (Hz)	Connection
	Gear	Pinion		
1st	37	10	627.5	Motor
2nd	42	13	169.6	
3rd	42	13	52.5	Output

6. 기어체인의 고장진단

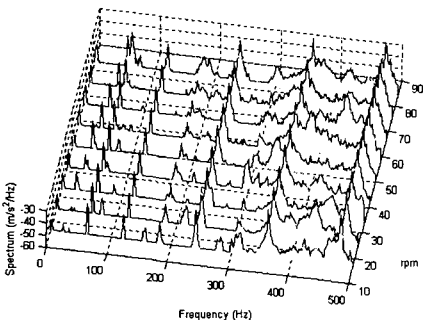
본 연구에서는 DC 치차불이 전동기로부터 진동신호를 측정하여 고장진단을 수행하였다. 먼저 부하조건에 따른 진동신호의 특성에 대해 알아보고 양품인 기어 치면에 크랙(crack)을 발생시켜 고장진단을 수행하였다. 크랙은 줄을 이용하여 기어 치면에 흠집을 발생시켜 기어쌍의 맞물림과정에서 충격 성분이 발생하게 하였다.

6.1 부하조건

기어는 동력전달을 위한 기계요소이므로 일반적으로 부하상태에서 운전하게 된다. 부하상태의 기어 맞물림은 무부하 상태의 단순 접촉과는 달리 심한 마찰과 더불어 치의 변형에 의한 간섭을 유발하므로 진동과 소음이 더 커진다. 이에 본 연구에서는 부하 상태와 무부하 상태의 신호를 비교해 보았다. 부하 상태에서 발생하는 기어구동계의 진동을 중심으로 신호를 분석하였다.



(a) Unloaded condition



(b) Loaded condition

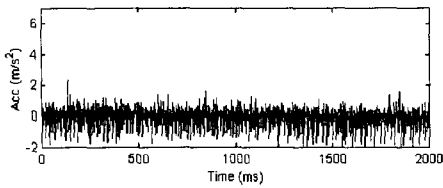
Fig. 6 Waterfall diagram of gear signals

Fig. 6은 부하 상태와 무부하 상태의 기어신호에 대한 waterfall 선도이다. 두 waterfall 선도에서 전원주파수 성분인 60Hz 및 그의 배수 성분이 확연히 나타나고 있다. Fig. 6(a)는 무부하 상태에서 측정된 진동신호의 waterfall 선도로써 첫 번째 기어쌍의 맞물림주파수 성분과 60Hz의 전원주파수 성분이 주요 성분임을 알 수 있으며 저주파 영역에서 축의 회전주파수 성분이 나타나고 있는 바, 이는 불평형에 기인한 성분으로 추정된다. Fig. 6(b)는 부하조건에서 측정된 진동신호로써 세 개의 기어쌍에서 각각 맞물림주파수 성분을 발생함을 알 수 있으며, 축의 회전주파수 성분도 나타남을 알 수 있다. 또한 전원주파수 성분인 60Hz 성분과 그의 배수 성분들이 크게 나타나고 있다. 부하조건에서는 200Hz 이상의 주파수 영역에서 광대역으로 진동레벨이 크게 나타나고 있다. 물론 부하상태가 무부하 상태보다 진동레벨이 크다. 그러므로 본 연구에서는 기어의 고장진단을 수행하기 위하여 각 쌍의 맞물림주파수 성분이 모두 나타나는 부하 상태의 진동신호를 분석하였다.

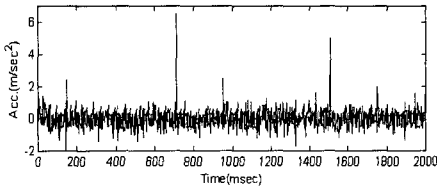
6.2 적응신호처리 및 주파수 분석

본 연구에서는 정상상태의 기어신호와 기어 치면에 크랙을 발생시킨 경우의 기어 신호를 각각 측정하여 적응간섭제거법을 적용하여 치차불이 전동기의 고장을 진단하였다.

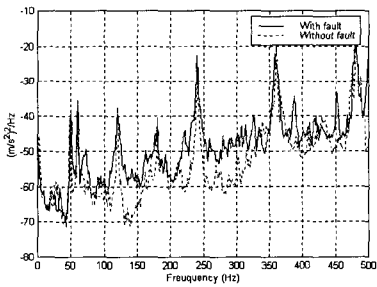
Fig. 7(a, b)은 부하 시 크랙이 발생하기 전의 진동신호와 크랙이 발생된 후의 진동신호를 비교한 그림으로 크랙이 있는 경우, Fig. 7(b)에서 보는 바와 같이 큰 진동폭의 충격성분이 발생됨을 알 수 있다. 또한 충격성분의 왼쪽에 작은 충격성분이 보이는 바, 이는 임의로 크랙을 낸 치와 함께 또 다른 치면의 상태가 불량함을 알 수 있다. 이는 치면의 상태를 점검한 결과 임의로 크랙을 낸 치에서 뒤로 12번째 치에 이상이 있음을 알 수 있었으며, Fig. 7(b)의 두 충격성분의 시간간격(140ms)을 계산한 결과와 일치함을 알 수 있었다. 즉 축의 한바퀴 회전(75rpm)에 소요되는 시간을 잇수(42)로 나눈 한치의 소요시간(20ms)을 계산함으로써 알 수 있다. 그러나 Fig. 7(c)에 보인 바와 같이 정상상태에 크랙을 발생시킨 후의 진동신호에 대한 스펙트럼으로부터는 두 신호 사이의 명확한 차이점을 확인하기가 어렵다. 또한



(a) Without fault

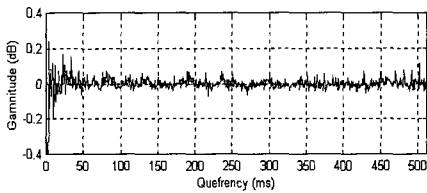


(b) With fault

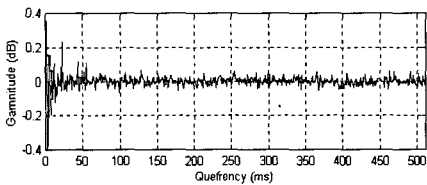


(c) Spectrum

Fig. 7 Overall vibration signals

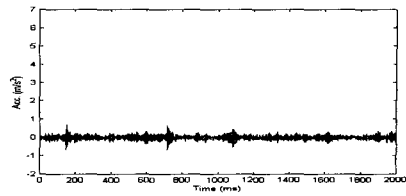


(a) Without fault

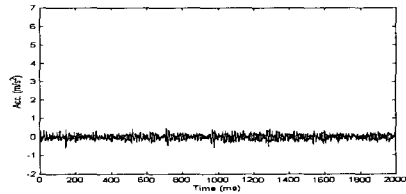


(b) With fault

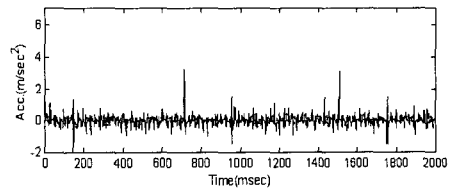
Fig. 8 Cepstrums of gear signals



(a) First meshing gear



(b) Second meshing gear



(c) Third meshing gear

Fig. 9 Decomposition of measured gear signals

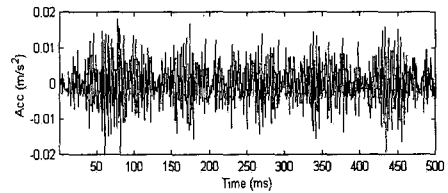


Fig. 10 Decomposition of second gear pair

Fig. 8(a, b)은 고장전후의 셉스트럼으로 공통적으로 세 번째 맞물림주파수에 해당하는 20ms의 신호가 나타남으로 알 수 있었다. 그러나 스펙트럼과 마찬가지로 크랙의 유무 및 위치를 감지하는 것은 불가능함을 알 수 있다.

이와 같이 발생된 충격성분의 원인을 분석하고자 크랙 발생 후의 진동신호에 Fig. 1의 적응간섭 제거법을 적용하여 각각의 기어쌍의 신호를 추출하여 보았다. 또한 수렴 매개변수로 정의되는 μ 값을 분리된 신호와 원신호의 시간 및 주파수 영역에서의 값을 비교하여 각 0.01의 값을 가지게

하였다.

Fig. 9는 세 쌍의 기어 맞물림신호로부터 적응간섭제거법을 이용하여 각각의 맞물림신호를 분해한 결과로서 분해된 세 번째 기어쌍의 진동신호(Fig. 9c)에 충격성분이 존재하며 두 번째, 첫 번째 기어쌍에서는 충격이 제외된 진동신호가 추출되었다. 이는 크랙이 세 번째 기어쌍에 존재한다는 것을 나타내며 세 번째 기어쌍에 임의로 크랙을 발생시킨 사실과 일치함으로써 적응간섭제거법을 이용한 기어신호의 분해가 타당함을 알 수 있다. 또한 Fig. 10은 적응간섭제거법에 의한 기어치의 맞물림상태를 분석하기 위하여 75 rpm으로 운전 중인 치차붙이 전동기의 두 번째 기어쌍의 진동신호를 적응간섭제거법을 통해 분리한 것으로 기어쌍의 맞물림이 정확하지 않은 상태인 느슨함(looseness)에서 볼 수 있는 현상이 발생함을 알 수 있었다.

6.3 시간-주파수 분석

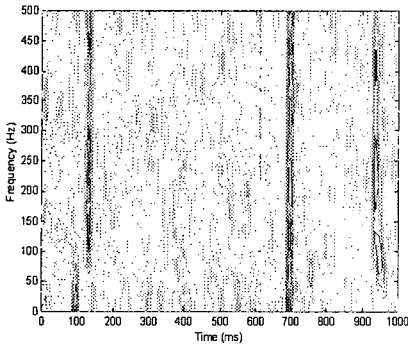


Fig. 11 Spectrogram of gear signals

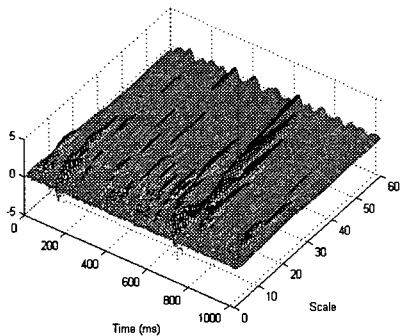
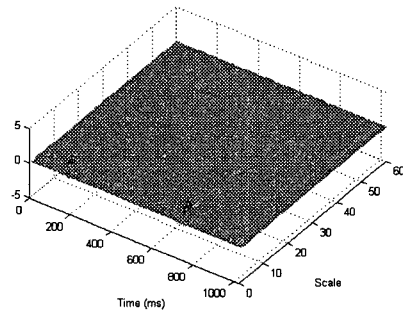
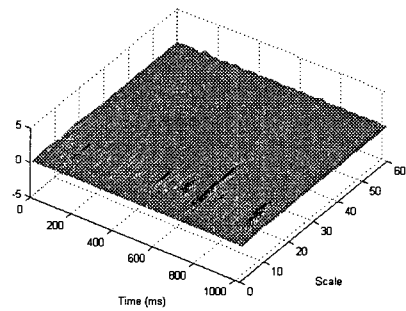


Fig. 12 Wavelet of gear signals

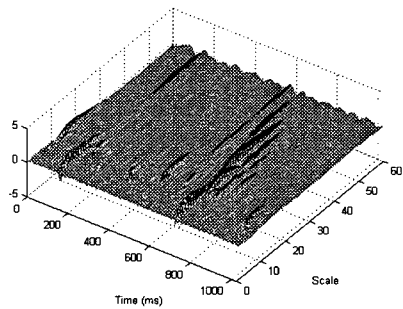
크랙 발생의 유무를 판단하기 위해서는 Fig. 7(c)과 같이 주파수 영역에서의 분석만으로는 불가능함을 알 수 있었다. 이에 본 연구에서는 시간-주파수 영역에서의 분석을 수행하기 위해서 Fig. 7(b)의 시간영역 신호를 이용하여 스펙트로그램과 웨이블릿 변환을 적용하여 Fig. 11과 Fig. 12와 같은 결과를 얻을 수 있다. Fig. 11은 크랙이 있는 경우의 스펙트로그램으로서 크랙에 의한 충격성분이 발생하는 700ms 영역에서 높은 진동



(a) First meshing gear



(b) Second meshing gear



(c) Third meshing gear

Fig. 13 Wavelet of gear pairs

레벨이 발생함을 알 수 있으며 충격에 의한 광대역의 진동성분이 발생하므로 y 축 전체에 걸쳐 모든 주파수 성분이 발생함을 알 수 있다. Fig. 12는 웨이블릿을 적용한 결과로써 유사성을 비교하는 형태가 급격한 충격 성분과 유사한 Daubechies 8(D8)를 이용하여 충격성분이 발생하는 700ms 부근의 값이 높게 나타남을 알 수 있다.⁽⁸⁾ 또한 크랙을 강제로 만든 치보다 12번째 뒤에 있는 치에서 이상이 있음을 보여주고 있다. 12번째 치인 것은 세 번째 기어쌍에서 각각의 기어치가 맞물리는 시간을 계산하여 알아낸 값으로서 실험이 완료된 후 기어케이스를 분해하여 조사해본 결과 역시 12번째 치에 약간의 이상이 있음을 알 수 있었다. 또한 Fig. 13은 적응간섭제거법을 통해서 분리된 각 신호에 대하여 웨이블릿을 이용하여 나타낸 것으로 각 신호의 주파수 값에 해당하는 스케일 영역에서 높은 값을 가지며 나타나는 것을 볼 수 있다. 즉, 스케일이 작을수록 높은 주파수값을 의미하므로 Fig. 13(c)의 세 번째 기어쌍의 신호를 웨이블릿을 이용하여 나타낸 것으로 고장의 위치를 명확히 알 수 있었다.

적용된 두 가지 분석방법을 비교할 경우 스펙트로그램은 분석하고자하는 신호에 따라 창함수의 크기를 적절히 조정해야 하며 그렇지 않으면 간섭현상에 의해 고장진단이 쉽지 않았다. 이에 비해 웨이블릿의 경우는 정해진 범위에서 스케일(scale) 조정을 조절함으로써 이상 신호가 있으면 특이 성분이 발생하며 크랙과 같은 충격성분을 쉽게 감지할 수 있다. 웨이블릿에 의한 결과는 스펙트로그램에 비해 간섭의 영향도 적게 받는 것을 알 수 있었으며 계산 시간도 스펙트로그램보다 웨이블릿 분석이 짧게 걸리는 것을 알 수 있었다.

7. 결 론

본 연구에서는 부하조건에 따른 진동신호와 기어 치면에 발생한 크랙에 의한 진동신호를 측정하는 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 적응간섭제거법을 이용하여 원하는 기어쌍의 신호를 추출할 수 있었으며 다수의 기어쌍이 있는 기어 체인에서 고장이 있는 기어쌍을 식별할 수 있었다. 또한 분리된 신호의 형태로부터 크랙, 기어 맞물림 불량 등 기어의 고장 원인을 알 수 있었다.

(2) 시간-주파수 분석방법을 이용하여 기어의 진동신호를 2차원 평면에 도시하면 기어의 고장 여부를 보다 확실히 검증할 수 있었다.

(3) 부하가 가해질 경우 기어 맞물림주파수 성분이 크게 나타남을 알 수 있으며 부하상태가 기어의 고장진단에 유리함을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) Lee, S. K. and White, P. R., 1998, "The Enhancement of Impulsive Noise and Vibration Signals for Fault Detection in Rotating and Reciprocating Machinery," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 217, No. 33, pp. 485~505.
- (2) Staszewski, W. J. and Tomlinson, G. R., 1997, "Local Tooth Fault Detection in Gearboxes using a Moving Window Procedure," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 11, No. 3, pp. 331~350.
- (3) Brie, D., Tomczak, M., Oehlmann H. and Richard, A., 1997, "Gear Crack Detection by Adaptive Amplitude and Phase Demodulation," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 11, No. 1 pp. 149~167.
- (4) Staszewski, W. J., Worden, K. and Tomlinson, G. R., 1997, "Time-Frequency Analysis in Gearbox Fault Detection Using the Wigner-Ville Distribution and Pattern Recognition," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 11, No. 5, pp. 673~692.
- (5) Wang, W. J. and McFadden, P. D., 1995, "Application of Orthogonal Wavelets to Early Gear Damage Detection," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 9, No. 5, pp. 497~507.
- (6) 이봉현, 최연선, 1998, "진동측정에 의한 전동공구 양산라인의 품질관리 자동화," 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집. pp. 173~178.
- (7) Newland, D. E., 1993, "An Introduction to Random Vibration, Spectral and Wavelet Analysis," Harlow: Longman.
- (8) Samuel D. Stearns, 1996. *Signal processing algorithm in MATLAB*, Prentice Hall.
- (9) The MathWorks, 1996, "Wavelet Toolbox User's Guide-Wavelet Toolbox."