

웨이브렛변환을 이용한 기어결함의 진단

The Detection of Gear Failures Using Wavelet Transform

박성태*·김재웅**·양건국***

Park Sung-Tae, Gim Jae-Woong, Jianguo Yang

Key Words : Wavelet Transform, DWT, CWT, Fourier Transform, gear defect

ABSTRACT

This paper presents that the Wavelet Transform can be used to detect the various local defects in a gearbox. Two types of defects which are broken tooth and localized wear, are experimented and the signals are collected by accelerometer and analyzed. Because of the complexity of the signals acquired from sensor, it is needed to identify the interesting signal. The natural frequencies of shafts and the gear mesh frequency(GMF) is calculated theretically. DWT, CWT and the aplication are used to extract a gear-localized defect feature from the vibration signal of the gearbox with the defective gear. The results shows the transform is more effective to detect the failures than the Fourier Transform.

1. 서론

기계시스템의 주요 소음, 진동 발생원으로는 주로 기어, 베어링, 회전축, 벨트 등과 같은 회전요소가 있다. 이중에서도 동력전달에 사용되는 기어의 결함에 의해 기계적 성능저하 외에도 막대한 경제적 손실 및 인명피해를 초래할 수 있으므로, 이를 사전에 예방하기 위해 여러 가지의 결함진단 방법이 연구되고 있다.[1]

진동원에서 발생한 신호에는 시스템의 물리적 현상을 내포하고 있다. 시스템으로부터 나온 신호는 소실되기도 하고 일부는 매체를 통해 전달되어 나온다. 다른 요소로 전달된 신호를 외부의 센서를 이용하여 신호를 획득, 분석함으로써, 시스템을 중단이나 해체가 없어도 결함진단이 가능하다.

본 논문에서는 시간-주파수영역의 분석방법인 웨이브렛 변환을 이용하여, 마모와 파손의 기어결함에 의해 발생하는 신호를 정상신호와 비교, 분석함으로써 결함진단 방법을 제시한다. 웨이브렛 변환은 푸리에변환과 같은 기존의 변환과는 다른 장점을 가지고 있다. 기저신호인 웨이브렛함수의

특성상, 충격파와 같이 급격하게 변화하는 신호나 비정상신호에 강력한 분해능력을 나타낸다. 변환의 결과에서 각 레벨에 대한 스펙트럼 선도를 구하여 기어의 결함을 진단할 수 있는 가능성을 보여준다.

2. 웨이브렛변환의 이론

Grossmann 과 Morlet 은 웨이브렛함수 $\psi(t)$ 로부터 다음과 같이 웨이브렛집합 $\psi_{b,a}(t)$ 을 정의하였다.[2]

$$\psi_{b,a}(t) = \frac{1}{\sqrt{a^n}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

여기서 n 은 에너지 유한을 위한 상수값으로 주로 n=1 또는 2 를 사용하며, b 는 전이변수(shift)이며 a 는 양수로서 팽창변수(dilation) 또는 스케일이라 한다. 신호 f(t)에 대한 연속웨이브렛 변환(CWT)은 다음과 같이 정의된다.

$$W^f(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\psi_{b,a}^*(t)dt \quad (2)$$

웨이브렛함수는 시간영역에서 a 가 1 보다 클 때는 팽창효과가 있어 웨이브렛변환시 원신호의 저주파성분 분석에 용이하며, a 가 1 보다 작을 때는 압축효과로 인해 고주파성분 분석에 용이하다. 그리고 그 압축범위가 0 에서 1 사이이므로 충격파와 같은 고주파성분에서 민감하게 반응하게 된다.

* RRC, 울산대학교 기계자동차공학부
E-mail : spark@mail.ulsan.ac.kr
Tel : (052) 259-2131, Fax : (052) 259-1680
** RRC, 울산대학교 기계자동차공학부
*** 외국인, R.R.C. School of Automobile Engineering,
Harbin Institute of Technology, Weihai, China

연속웨이브렛 변환에서 사용되어진 웨이브렛을 이분구간으로 샘플링할 경우 ($a = 2^{-j}, b = 2^{-j}k, j, k \in \text{integer}$) 직교웨이브렛을 구성할 수 있으며 이를 이용한 변환을 이산웨이브렛 변환(DWT)이라 정의한다.

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{\frac{nj}{2}} \psi(2^j t - k) \quad (3)$$

$$W^j(j, k) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{j,k}^*(t) dt \quad (4)$$

위와 같이 직교웨이브렛을 이용한 이산웨이브렛 변환은 연속웨이브렛 변환에 비해 스케일 a가 변화함에 따라 신호의 수가 반감하는 2분 구간 샘플링 특성을 지닌 직교웨이브렛에 의해 연산수가 감소한다는 장점을 지니고 있다. Stephan Mallat 이 다해상도 분석이론에 직교기저를 이루는 웨이브렛을 접목시킨 다해상도 분석방법(Multi-Resolution Analysis)에 의해 신호를 근사영역(Approximation)인 저주파성분과 세부영역(Detail)인 고주파성분으로 분해할 수 있고, 역으로 분해된 신호들을 직교성을 이용하여 합성할 수도 있다. 현재 여러 분야에서 웨이브렛변환이 적용되고 있다.[3] [5]

3. 실험장치 및 실험

실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같이 2단 기어 감속기와 구동모터, 부하장치인 다이내모미터와 다이내모제어장치, 그리고 진동센서 및 진동측정장치로 구성되어 있다. 그리고 실험에서 사용된 장치모델명은 Table 1과 같다.

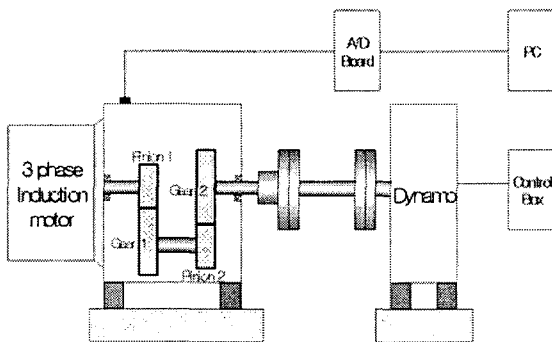


Fig. 1 실험장치의 개략도

실험은 정상기어와 이상기어(마모, 파손)에 대하여 각각 부하를 0%, 60%, 80%, 100%로 증가시키면서 수행하였다. 마모치차는 한 개 기어의

한쪽 치면을 연산기로 마모시킨 것을 사용하고, 파손의 경우는 이쪽의 50%이상을 절제하여 각각 실험을 수행하였다.

[장치명]	[모델명]
감속기	FHB(type) 1/20(ratio)
	이 수 : Pinion 1 : 16 개 Gear 1 : 70 개 Pinion 2 : 16 개 Gear 2 : 73 개
구동모터	TE-F(type) 11KW(15Hp) 1800rpm
다이내모미터 및 제어장치	DYTEK Dynamometer
진동센서	PCB 353B14

Table 1 실험장치의 사양

4. 기어의 주요신호 분석

Fig. 2는 진동센서에 의해 수집된 시간영역신호를 나타낸다. 수집된 신호에는 기구요소들의 맞물림 충격과 불균형으로 인한 진동, 구조물 자체의 진동 및 노이즈 등 많은 정보를 지니고 있다. 이로 인해 정상기어나 이상기어에서 보이는 신호의 특성을 시간영역에서 서로 구별해내는 것은 거의 불가능하다. 기어의 회전주기, 기어치간의 물림주파수, 각 축의 고유진동수 등의 기본데이터가 진단에 부차적으로 요구된다.

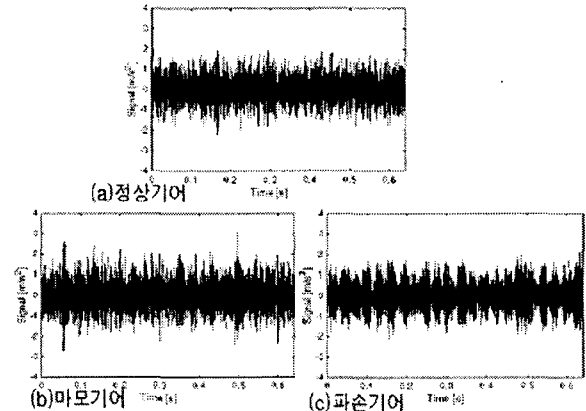


Fig. 2 시간영역에서의 진동신호

기어 진동장치에서 기어맞물림주파수(GMF)는 다음과 같이 계산된다.

$$f_{GMF} = f_{rev} \cdot z = \frac{n \cdot z}{60 R} \quad (5)$$

Pinion 1과 Gear 1 : 480.00 [Hz]

Gear 2와 Pinion 2 : 109.71 [Hz]

여기서 f_{rev} 는 축의 회전속도, z은 기어이수이고 R은 감속비이다.

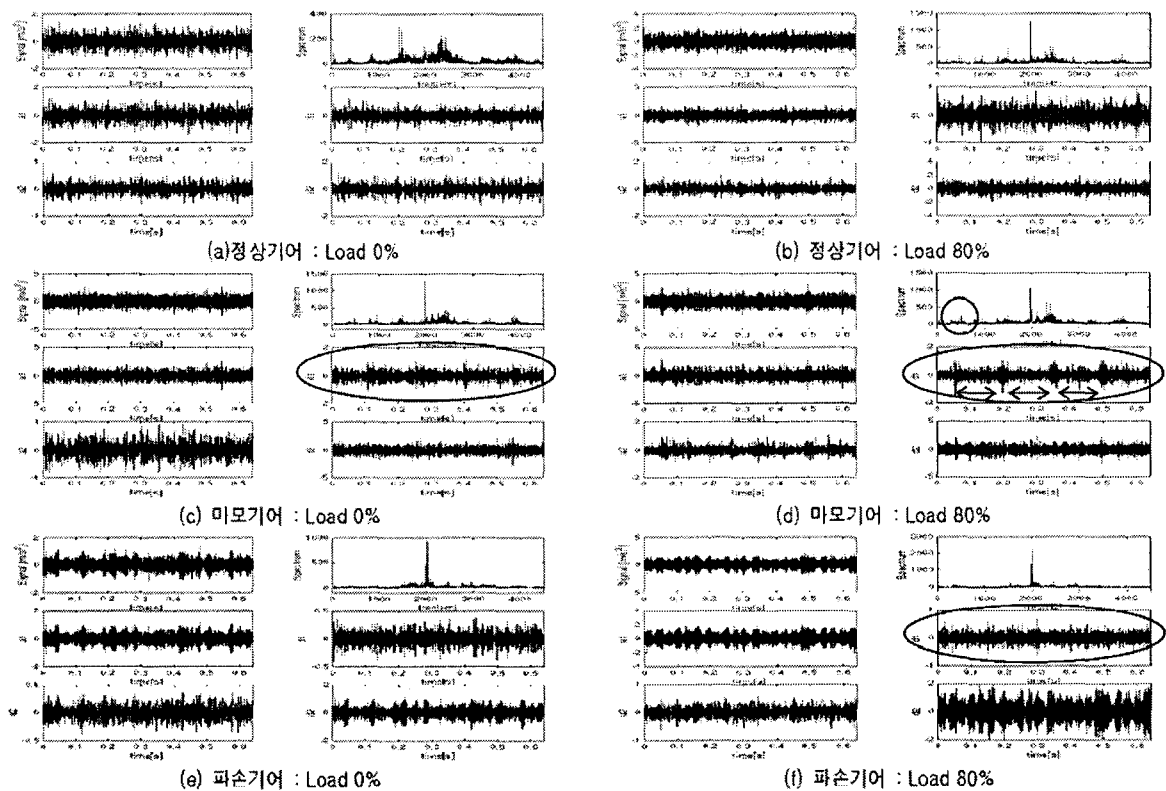


Fig. 3 정상, 마모 및 파손기어의 FT과 DWT결과

Fig. 2 에서 보는 바와 같이 시간영역신호에서 기어회전주기와 기어맞물림주파수를 파악하는 것은 불가능할 수도 있다. Fig. 3 은 획득신호에 대한 주파수분석 및 이산웨이브렛변환 결과의 일부분을 나타낸 것이다. 여기서 사용된 웨이브렛은 'db12'이며 7Level 까지 분석하였다. 그림에서 알 수 있듯이 부하가 증가함에 따라 기어맞물림주파수 480Hz 를 뚜렷하게 확인할 수 있다. 특히 이산웨이브렛변환을 이용하여 신호를 근사영역인 저주파와 상세영역인 고주파대역으로 분해함으로써 시간영역에서도 확인할 수 있다. Fig. 3의 (d)의 고주파대역인 d1 을 보면 주기가 약 0.145 초 간격으로 충격파가 발생함을 볼 수 있는데, 이는 기어 1 의 회전주기에 의한 기어맞물림주파수 480Hz 에 해당된다. 주파수영역의 1980Hz 근방에서 에너지집중은 FEM 해석에 의하면 축 1 에 대한 1 차 고유진동수로 추정된다.

5. 기어결합의 진단방법

위의 신호분석에서 알 수 있는 바와 같이 웨이

브렛변환만으로는 완전하게 신호의 특성을 규명하는 것이 불가능하다. 지금까지는 주로 주파수분석을 통해 정상 상태와 손상된 상태의 스펙트럼을 기어맞물림주파수와 같은 특정주파수와 비교함으로써 결함의 속성과 진전정도를 파악하고 있다.

본 논문에서는 각 스케일(레벨)에 대한 웨이브렛스펙트럼을 제시하여 전체에너지 경향을 비교함으로써 결함의 진단방법을 보여준다. 이것은 연속웨이브렛변환에서 각 스케일(레벨)에 대한 스펙트럼의 합으로 정의한다.

$$W(a) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |W^f(a, n)|^2 \quad (6)$$

여기서 N 은 수집된 신호의 개수, a 는 스케일값, n 은 시간축을 따른 이동을 나타내며, $W^f(a, n)$ 은 연속웨이브렛변환의 결과이다. 식 (6)은 스케일의 변화에 따른 신호의 에너지분포를 나타내는 것으로 에너지가 어떻게 분포되어있는지를 알 수 있다. 연속웨이브렛의 특성상 스케일 a 값을 작게 할수록 분석능력은 좋아지나, 연산시간이 길어지므로 신호특성에 따라 적절히 조정할 필요가 있다. 본 논문에서는 a 를 0.1 로 사용하였다.

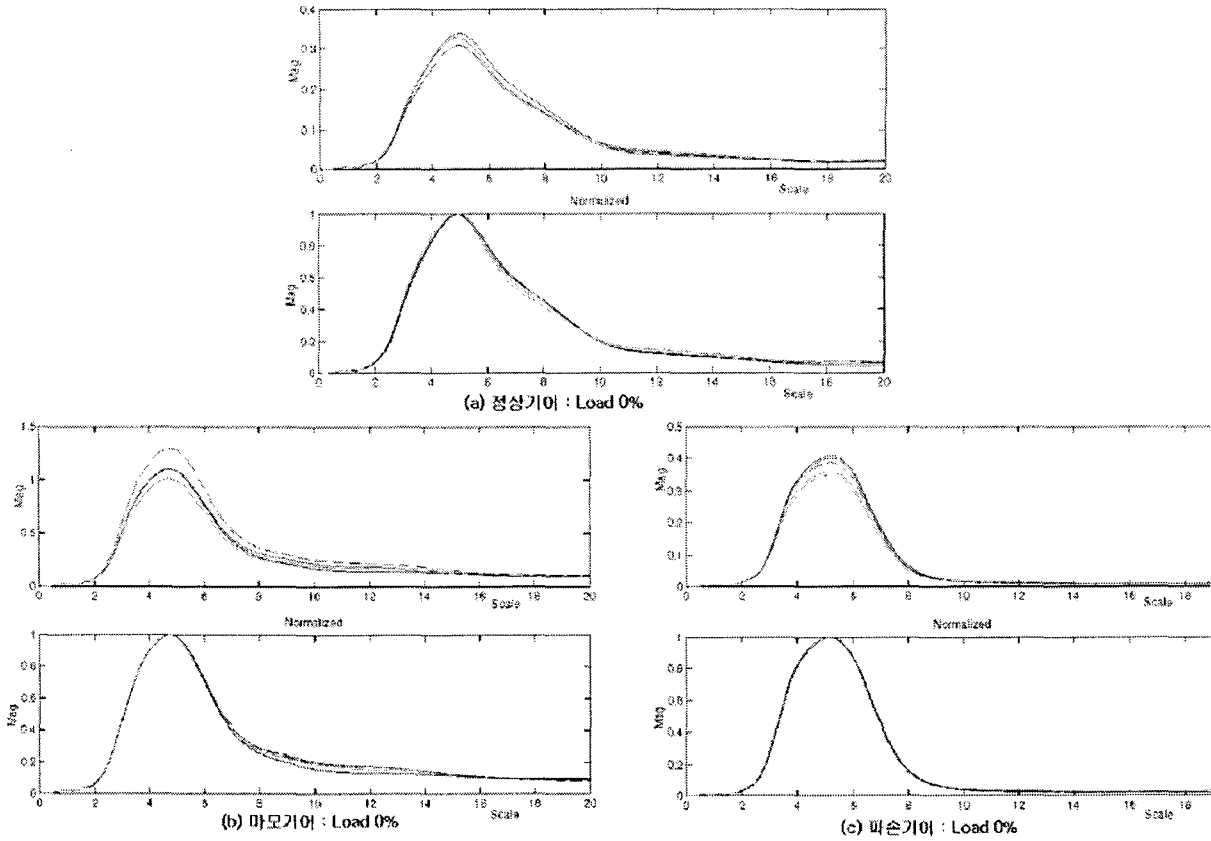


Fig. 4 스케일변화에 따른 에너지분포

Fig. 4 는 같은 상태의 기어에서 반복 실험하여 얻은 신호를 식(6)으로 표현한 것이다. 또한 그것의 최대치를 1로 정규화하여 각 그림의 아래에 나타내었다. 정규화한 그래프를 보면 그 전체적인 형태에서는 변화가 없다. 이것은 같은 상태의 기어에서는 같은 에너지분포 경향을 보여줄 것을 의미한다. 그러나 기어상태에 따라서는 확연한 차이를 보이고 있다.

Fig. 5 는 각각의 부하에 대한 정상, 마모 및 파손기어에 대한 결과이다. 최대값의 크기는 부하의 크기에 많은 영향을 받으므로, 같은 부하에서의 기어의 결함을 진단하기 위해 최대치를 1로 정규

화한 그래프도 같이 나타내었다. 각 기어 상태에 대하여 그래프상으로 구별을 할 수 있는 데, 그 특징을 크게 세가지로 나눌 수 있다. 최대값 지점과 상승 및 하강영역에서의 경향, 그리고 스펙트럼크기에 대한 스케일 폭의 특성이다. 먼저 최대값 지점을 보면 scale 쪽에서 부하에 관계없이 마모<정상<파손 순서로 나타나는 데, 이는 기어의 상태에 따라 에너지가 집중되는 부위가 전이된 것을 의미한다.

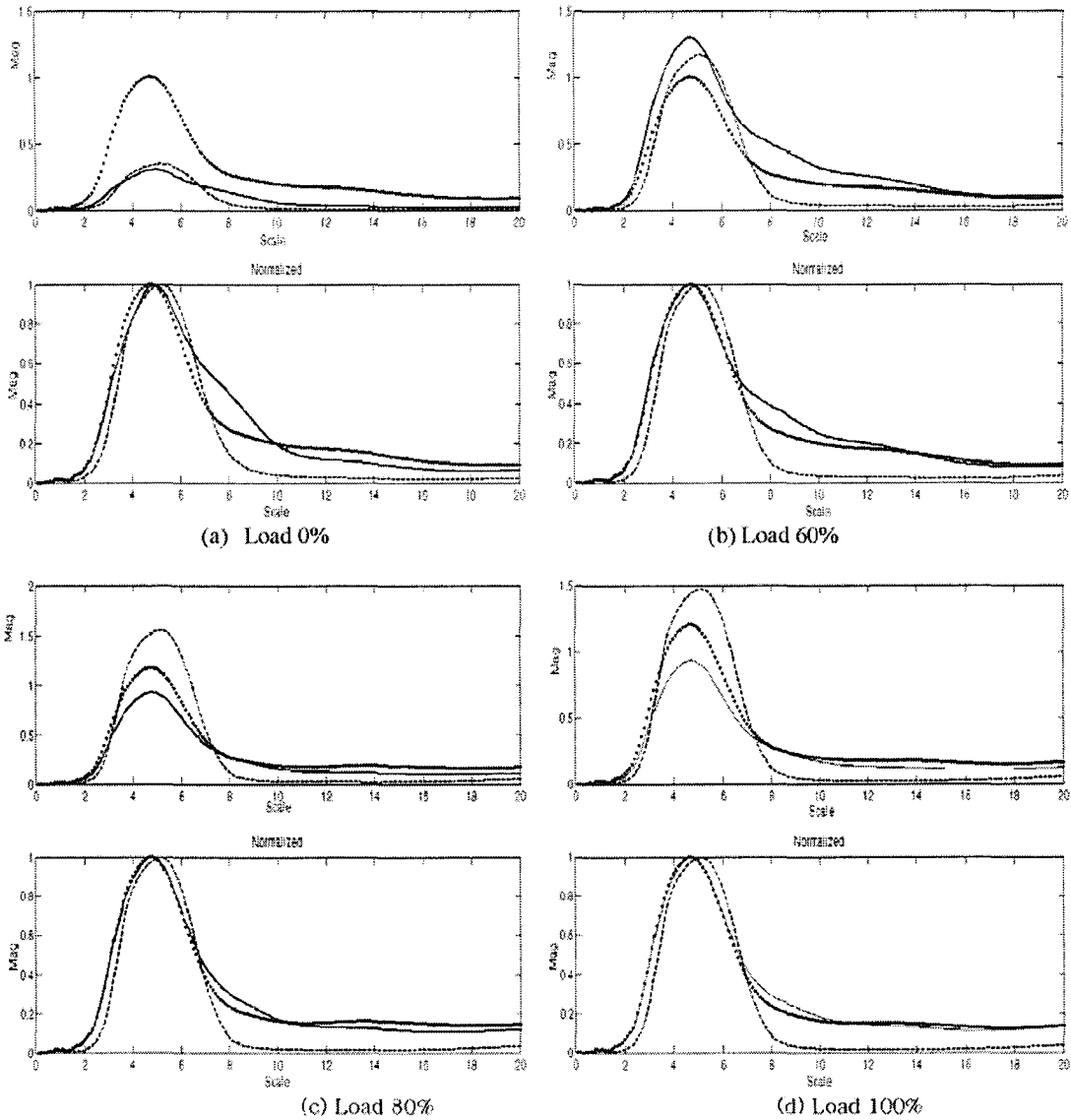


Fig. 5 각 부하에 대한 기어의 결합상태 [- : 정상, • : 마모, --- : 파손]

그리고 파손기어에 대해서는 다른 기어와는 달리 상승과 하강영역이 매우 낮은 값을 보인다. 하강하는 부위의 기율기 절대값은 정상<마모<파손 순이며 정상기어의 하강영역에서는 가장 낮은 기율기로 점점 낮아짐을 보여주고 있다. 정규화된 스펙트럼크기에 대한 스케일폭을 나타낸 Fig. 6

을 보면, 가로축의 0.3~0.5 범위에서 스케일폭이 파손<마모<정상 순으로 보인다. 그리고 같은 기어 상태에서 부하가 증가함에 따라 정규화된 같은 스펙트럼크기에 대하여 스케일폭이 낮아짐을 보여준다. 이는 결합이 생기면서 에너지가 최대치부근에서 집중된 것을 의미한다.

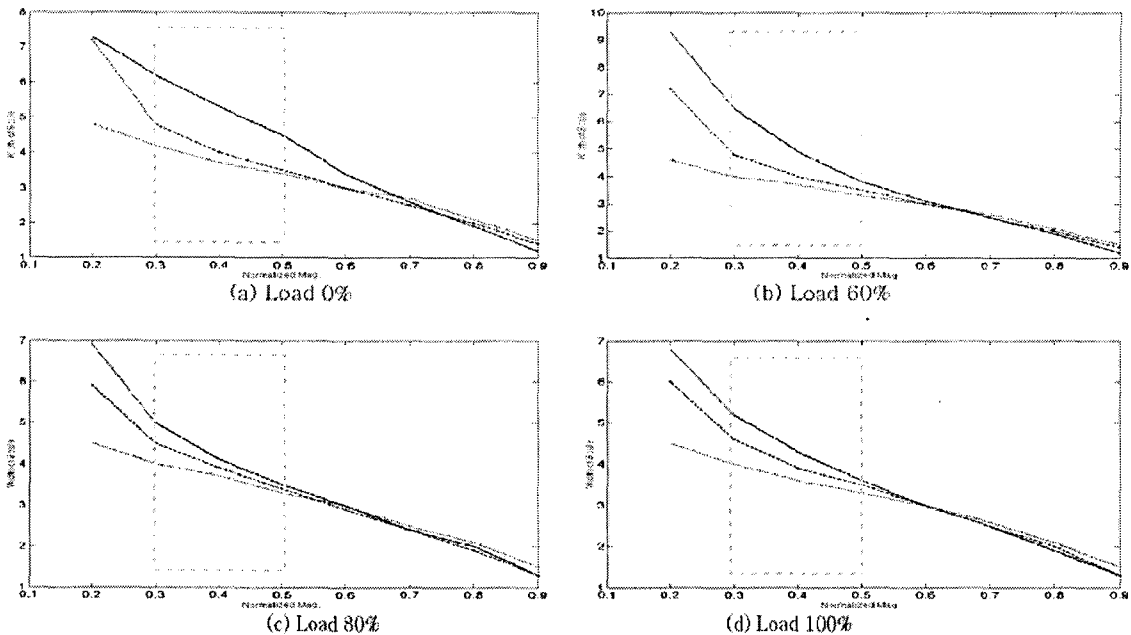


Fig. 6 정규화된 스펙트럼크기에 대한 스케일폭 [— : 정상, - - : 마모, : 파손]

6. 결론

웨이브렛 변환을 이용한 기어결함 진단방법의 가능성을 제시하였다. 식 (6)에서 정의된 것처럼 스케일에 대한 웨이브렛스펙트럼을 사용하여 기어의 결함 상태를 진단방법을 제시하였다. 이는 기존의 주파수분석보다 간단하면서도 직관적으로 알아볼 수 있다는 장점을 지니고 있다.

(1) 기어의 결함상태에 따라 최대치의 지점이 이동한다. 이는 그래프의 전체적인 개형을 바꾸는 것으로 물리적으로 결함상태에 따라 에너지가 이동한 것을 의미한다. 본 실험의 결과 최대치의 지점은 정상기어에 비해 마모의 경우는 작아지고, 파손의 경우는 더 크게 나왔다.

(2) 결함이 생기면 하강영역에서 기울기의 절댓값이 정상기어에 비해 증가한다.

(3) 정규화된 스펙트럼크기에 대한 스케일폭의 그래프에서 볼 수 있는 것처럼 결함이 생기면서 에너지가 최대치부근에 집중된다.

후 기

본 연구는 "과학기술부-한국과학재단 지정 울산대학교 기계부품 및 소재 특성평가 센터" 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

- [1] Oguamanam D. C. D., 1994., Thesis of University of Waterloo, "Gear Damage Analysis and Processing Techniques"
- [2] A. Grossman and J. Morlet 1984 SIAM Journal of Mathematics 15, 723~736, "Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape"
- [3] Sung-Tae Park, Yang Jianguo, 2002. The Korean Society of Automotive Engineers, p202~206, "Wavelet-based Knock Detection for gasoline engines"
- [4] Sung-Tae Park, Yang Jianguo, 2002, "Detection for bearing-localized Defects based on Discrete Wavelet Transform"(to be published on Mechanical System and Signal Processings)
- [5] 이승훈, 윤동환, 2002, 진한노서, "Introduction to the Wavelet Transform"
- [6] Michel Misiti, Yves Misiti, Georges Oppenheim and Jean-Michel Poggi, 1996, "Wavelet Toolbox User's Guide for Use with MATLAB."
- [7] Barbara Burke Hubbard, 1998, "The World According to Wavelets"
- [8] Namim Baydar and Andrew Ball, 2000. Ideal Journal of Mechanical System and Signal Processing(2001), 1091~1107, "A Comparative Study of Acoustic and Vibration signals in Detection of Gear Failures Using Wigner-Ville Distribution"
- [9] 장현배, 2001, 대우학술총서, 공동연구, 웨이블릿 이론과 응용