

파워스펙트럼 및 신경망회로를 이용한 기어박스의 결함진단 및 결함형태 분류에 관한 연구

이 상 권*

(2002년 7월 23일 접수, 2003년 2월 26일 심사완료)

Fault Detection and Damage Pattern Analysis of a Gearbox Using the Power Spectra Density and Artificial Neural Network

Lee, Sang Kwon

Key Words : Fault Detection(결함 진단), Gear Box (기어박스), Pattern Analysis (결함 형태분류), Neural Network (신경망회로)

Abstract

Transient vibration generated by developing localized fault in gear can be used as indicators in gear fault detection. This vibration signal suffers from the background noise such as gear meshing frequency and its harmonics and broadband noise. Thus in order to extract the information about the only gear fault from the raw vibration signal measured on the gearbox this signal is processed to reduce the background noise with many kinds of signal-processing tools. However, these signal-processing tools are often very complex and time waste. Thus, in this paper, we propose a novel approach detecting the damage of gearbox and analyzing its pattern using the raw vibration signal. In order to do this, the residual signal, which consists of the sideband components of the gear meshing frequency and its harmonics frequencies, is extracted from the raw signal by the power spectral density (PSD) to obtain the information about the fault and is used as the input data of the artificial neural network (ANN) for analysis of the pattern of gear fault. This novel approach has been very successfully applied to the damage analysis of a laboratory gearbox.

1. 서 론

자동차, 항공기 등의 수송 기계와 일반 공작 기계의 동력 전달 장치로서 오랜 동안 사용 되어온 기어는 중요한 기계 부품으로 인정되어 왔다. 따라서 기어의 결함 진단에 대한 여러 가지 연구가 진행되어 왔다. 이러한 연구의 주요 목적은 기어의 결함을 조기에 발견하여 기계의 손상으로 인한 경제적인 손실과 인명 피해를 미연에 방지하기 위함이다.

기어의 결함을 진단하는 연구는 주로 기어 시

스템으로부터 측정된 진동 신호에 바탕을 두고 있다. 이러한 진동 신호는 여러 가지 원인으로 인해서 발생되므로 복잡한 형상을 나타낸다. 특히 기어의 지엽적 결함(local fault)은 기어 이(齒)의 갑작스러운 강성 변화에 의한 충격과 진동으로 나타난다.

기어 시스템의 진동 신호로부터 이런 충격과 신호를 찾아내기 위한 방법으로 주파수 추출법,⁽¹⁾ 및 적응신호처리 기술^(2,3) 등을 이용하여 배경잡음을 제거한 후에 충격파를 형성하는 잔류신호(Residue Signal)⁽⁴⁾를 탐지하여 기어의 결함을 진단하는 방법은 많이 사용되고 있다. 최근 들어서는 디지털 신호 처리 기법의 발전에 힘입어 이러한 잔류신호에 대한 주파수 정보를 탐지하기 위해서 시간-주파수 분석법,^(5,6) 이산 웨이블릿 변환(discrete wavelet transform),^(7,8) 연속 웨이블릿 변환

* 회원, 인하대학교 기계공학과

E-mail : sangkwon@inha.ac.kr

TEL : (032)860-7305 FAX : (032)868-1716

(continuous wavelet transform)⁽⁹⁾ 등이 이용되어지고 있다. 이러한 과정에서 배경잡음 제거하는데 필요한 신호처리 기술을 이해해야 하는 복잡성과 신호처리 기술의 적용으로 인한 시간의 낭비를 최소화하기 위해서 본 연구에서는 일반적으로 널리 사용되는 파워스펙트럼 (power spectra density)⁽¹⁰⁾과 신경망회로 (neural network)⁽¹¹⁾를 이용하여 기어박스에서 측정된 신호로부터 직접 잔류신호만을 추출하여 결함기어의 결함과 결함 형태를 분류하는 간단한 방법에 관한 연구를 시행하였다.

2. 이론해석

2.1 파워스펙트럼 (PSD)

기어박스에서 측정된 진동 신호를 $x(n)$ 에 대한 파워스펙트럼 $P_{xx}(f)$ 은 Wiener-Khinchin⁽¹⁰⁾ 이론에 따르면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{xx}(f) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} r_{xx}[k] \exp(-j2\pi f k) \quad (1)$$

여기서 k 는 시간 지연을 나타낸다. 그리고 $r_{xx}[k]$ 는 자기상관함수이며 다음과 같이 표현된다.

$$r_{xx}[k] = E\{x^*[n]x[n+k]\} \quad (2)$$

여기서 기호 E 는 기대값을 나타낸다. 파워스펙트럼은 신호에 포함된 각 주파수 성분을 표시한다. 본 연구에서는 기어의 진동신호에 대한 주파수 분석을 위해서 파워스펙트럼 방법을 적용하였다.

2.2 기어 진동 신호의 잔류신호

일정한 하중과 속도하에서 이상적으로 제조된 기어의 진동 신호 $x(t)$ 는 기본 물림 주파수 (fundamental tooth meshing frequency ; f_m)와 그 조화 (harmonic) 성분들의 합으로 나타낼 수 있다.

$$x(t) = \sum_{n=0}^N X_n \cos(2\pi n f_m t + \Phi_n) \quad (3)$$

여기서 X_n 은 각 성분들의 진폭이고 Φ_n 은 그때의 위상을 나타낸다. 기어가 지엽적 결함을 가지면 기어 이(齒) 주변에 강성 변화를 유발 시킨다. 이런 변화는 진폭 변조 함수 $a(t)$ 와 위상 변조 함수 $b(t)$ 로써 표현 되어질 수 있다. 이와 같이 변조

되어진 기어의 진동 신호 $y(t)$ 는 다음과 같이 표현 되어진다.

$$y(t) = \sum_{n=0}^N X_n (1 + a_n(t)) \cos(2\pi n f_m t + \Phi_n + b_n(t)) \quad (4)$$

여기서 지배적인 하모닉 성분과 그 주위의 측대역 (sideband) 성분들으로써 변조 되어진 기어의 진동신호를 근사적으로 표현할 수 있다.

다음으로 근사적인 진동 신호 $z_n(t)$ 의 해석적 신호(analytic signal)를 이용하여 위상 변조 함수 $b_n(t)$ 를 구할 수 있다. 이 해석적 신호 $c_n(t)$ 는 다음과 같다.

$$c_n(t) = z_n(t) + jH(z_n(t)) \\ = X_n (1 + a_n(t)) \exp(j(2\pi n f_m t + \Phi_n + b_n(t))) \quad (5)$$

여기서 $H(z_n(t))$ 는 근사적인 진동 신호 $z_n(t)$ 의 Hilbert 변환이다. 식 (7)로 부터 위상 변조 함수 $b_n(t)$ 는 다음과 같이 얻어진다.⁽⁴⁾

$$b_n(t) = \arg(c_n(t)) - (2\pi n f_m t + \Phi_n) \quad (6)$$

이러한 측대역 성분을 시간 역역에서 보면 잔류신호(Residue Signal)가 되며, 이것의 주파수성분은 파워스펙트럼을 이용하면 쉽게 구할 수 있다.

2.3 신경망회로

기어박스의 다양한 결함 형태를 분류하기 위해서 객관적인 접근방법이 필요하며 본 연구에서는 신경망회로를 도입하였다. 신경망회로 기술은 기어시스템의 결함에 대한 자세한 지식이 필요 없이 결함에 대한 규명과 결함 형태를 분류한다. 신경망회로는 인간의 뇌신경회로를 모방한 것으로서 이러한 복잡한 신경회로를 가중치를 이용하여 상사 시킨다. 이러한 가중치는 학습과정을 통하여 얻어지면 각 학습과정에 사용되어지는 결함에 대한 사전 정보는 필요하다. 본 연구에 사용된 신경망회로는 다층인식(multiplayer perceptron) 신경회로로서 역전파 알고리즘 (back propagation)을 이용한다.⁽¹¹⁾ 이때 사용되는 효율적인 알고리즘은 Marquardt 알고리즘으로 알려져 있으며 본 연구에서도 이 알고리즘을 이용하였다. Fig. 1은 본 연구에 사용된 전형적인 다층 신경망회로를 나타낸다. 신경망회로의 성능을 향상시키기 위해서는 입력데이터를 축소시켜서 형태인식을 쉽게 하는 과정이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 형태인식추출과

정으로서 기어에서 측정된 잔류신호에 대한 주파수 분석 결과를 사용하였다. 이 값은 기어박스에 측정된 신호의 파워스펙트럼에서 구하였다.

3. 실험방법

3.1 실험 장치 및 데이터 수집 과정

본 연구에서 사용되어진 기어의 결함 진단을 위한 기어 시스템 실험 장치의 개략도가 Fig. 2 에 도시 되어져 있다. 본 실험장치는 0.75 kW의 MSS-080M DC 모터와 SCM 재질의 M3-24 입력 축 평치차(spur gear)와 같은 재질의 M3-25 출력 축 평치차 한 쌍으로 구성되어 있으며 기어 시스템에 토크 부하(torque load)를 가해주기 위해 출력 축에 NKPB-1.2Y 파우더 브레이크(powder break)를 사용하였다. 이 파우더 브레이크는 실험 장치에 추가적인 진동을 유발시키지 않고 안정적인 에너지 소산을 시킬 수 있는 장치이다. 본 실험 장치에서 입력 축 회전 속도는 DC모터에 연결되어진 DC속도 조절기(DC speed controller)로써 조절이 가능하고 파우더 브레이크에 연결되어진 DC토크 부하 조절기(DC torque load controller)로써 기어 시스템에 가해주는 토크 부하를 결정할 수 있다.

본 실험에서는 750 rpm 의 입력 축 회전 속도와 2.94 Nm 의 토크 부하 상태에서 실험을 수행하였다. 또한 결함을 갖는 기어를 입력 축 기어로 하였으며 이에 의한 진동 신호를 얻기 위해 가장 근접해 있는 베어링 하우스(bearing housing) 상단에 가속도계(accelerometer ; B&K 4366)를 부착하였다.

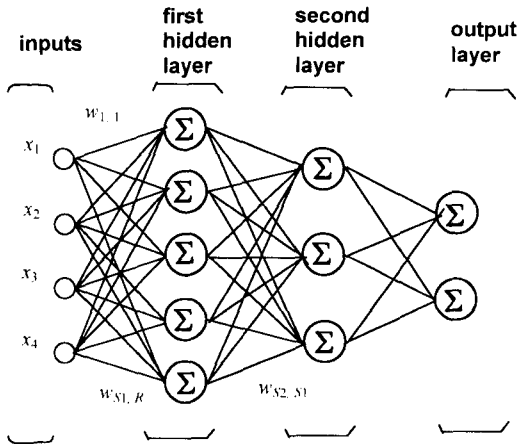


Fig. 1 Multilayer perceptron architecture

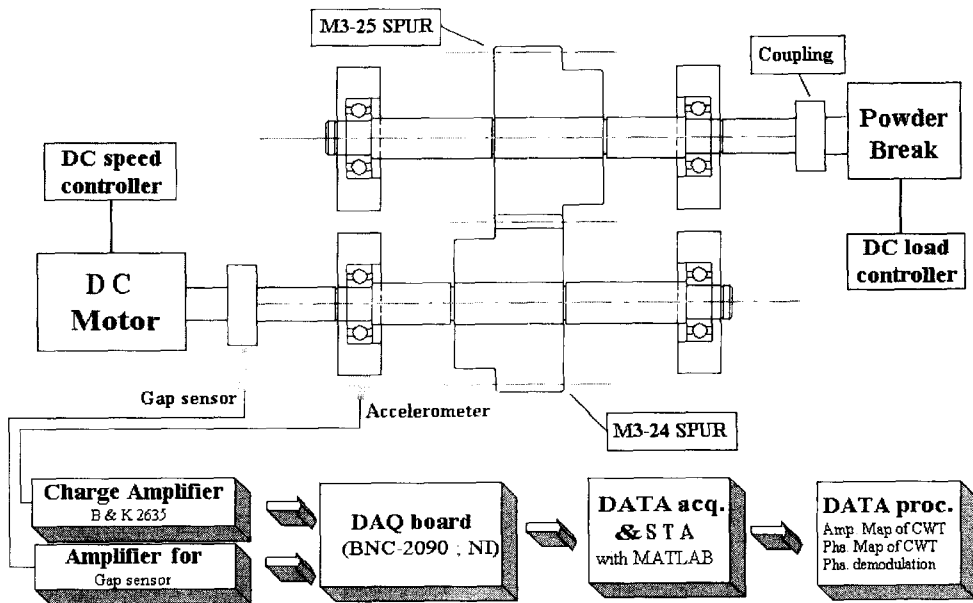


Fig. 2 Schematic diagram of Test Rig for gear fault detection

Table 1 Data on the test gear set

	Module	No. of tooth	Diameter of pitch circle (mm)	Width of tooth (mm)	Thickness of tooth (mm)
Pinion	3	24	72	30	4.71
Gear	3	25	75	30	4.71

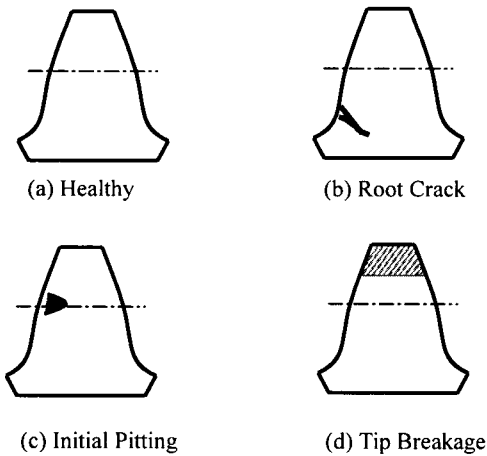


Fig. 3 Details of gear fault for experiment

기어 축 한 회전 당의 기준 펄스 신호(pulse signal)를 얻기 위해 입력 축 상의 거플링(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. 이 트리거 되어진 신호들을 동시 시간 평균화(synchronous time average; STA) 하여 기어축 한 회전에 대한 기어 시스템의 진동 신호를 얻었다.

3.2 기어 결함 형태 및 위치

기어의 지엽적 결함 형태 중 가장 일반적이고 중요한 형태는, 이뿌리 크랙, 이면 피로(surface fatigue)에 의한 피팅 파손과 굽힘 피로(bending fatigue)에 의한 절손 파손이다.⁽¹²⁾

피팅 파손은 이면의 접촉응력이 재료의 피로 한도를 넘었을 때에 반복 하중에 의해 이면 또는 내부

에 미세한 균열이 발생하여 거기서 작은 조각이 탈락하고 이면에 웅덩이를 만드는 손상으로 기어의 피치선(pitch line) 바로 아래 부분에서 파손이 시작되는 특징이 있다. 절손 파손은 순간적인 과부하(overload) 또는 구조물의 부적절한 설치(misalignment), 베어링 파손, 큰 이물질의 침투 등으로 인한 굽힘 피로의 누적으로 비교적 큰 금속편이 이면으로부터 박리하는 손상으로 조립이나 제조 과정 등에서도 발생할 수 있다.

Fig. 3은 본 실험에서 사용되어진 정상 기어와 지엽적 결함을 갖는 기어의 형상을 나타내고 있다. 사용된 기어의 제원은 Table. 1과 같다. Fig. 3의 (a)는 정상기어이며, Fig. 3의 (b)는 이 뿌리의 크랙을 나타내며, Fig. 3의 (c)는 비교적 미세한 결함 형태인 초기 피팅을 갖는 기어를 실험용으로 제작한 것으로 피치선 바로 아래 부분에 이 두께(tooth thickness)의 20%를 줄(file)로써 갈아주었다. 또한 Fig. 3의 (d)는 비교적 큰 결함 형태인 상단 절손을 갖는 기어를 나타낸 것으로 기어 작용 높이(working depth)의 25%를 줄로써 제거해주었다. 이와 같은 결함을 가지는 기어를 전체 24개의 이(Tooth)중 14번째 이에 대하여 결함을 주어서 기어의 결함 진단 실험을 실시 하였다.

4. 결함진단 및 결함 형태분류

기어의 결함 진단을 위해 Fig. 3에서 제시한 3가지 경우에 대해 동일한 조건 하에서 실험을 실시 하였다. 가속도계로부터 나오는 진동 신호와 기준 펄스 신호를 이용하여 기어축 한 회전 당 동시 시간 평균화 되어진 시간영역 신호를 추출하였다. Fig. 4는 이러한 결과를 나타내며 Fig. 4(d)의 경우는 이의 절손에 의한 결과로서 시간영역 결과로서 이의 절손에 의한 충격파를 알 수 있다. 그러나 Fig. 4의 (a), (b), (c)는 분류가 명확하지 않다. 이들 진동 신호를 이용하여 결함을 분류하기위해서 각 신호에 대하여 파워스펙트럼을 이용한 주파수 분석 결과는 Fig. 5에 나타나 있다. 여기서 f_1, f_2, f_3 는 이의 물림 주파수와 그것의 하모닉 주파수 성분을 표시한다. 이들 주파수의 측대역(sideband) 성분은 이의 결함에 의해서 발생하는 신호의 변조를 나타내는 잔류신호에 대한 정보를 나타낸다. 특히 Fig. 5에서 물림 주파수의 3차 성분주변의 측대역 성분은 다른 차수의 측대역 성분보다 차이가 다소 많다. 이것은 Fig. 3에서 보여주는 결함 형태를 구별하는데 용이하게 사용할 수가 있다.

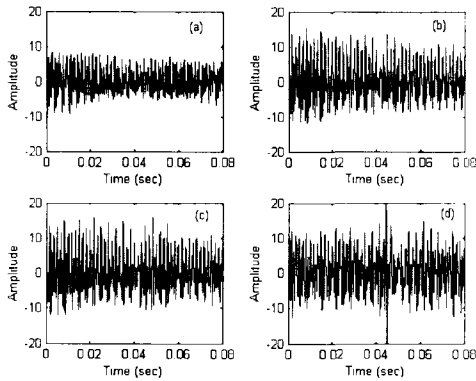


Fig. 4 Time history for vibration signals measured on gearbox, (a) Healthy gear (b) Root crack (c) Initially pitted gear (d) Tip broken gear

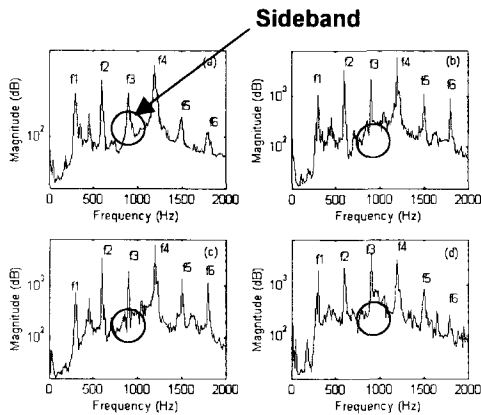


Fig. 5 Power spectra density for vibration signal measured on gearbox, (a) Healthy gear (b) Root crack (c) Initially pitted gear (d) Tip broken gear

따라서 본 연구에서는 불림 주파수의 3차 성분의 즉대역 성분을 사용하여 각각의 결함 형태를 분류하기 위해서 사용되는 신경망 회로의 입력 데이터로서 사용 하였다. 사용된 즉대역 주파수 성분의 개수는 17개 였다.

사용된 MLP신경망화 회로의 Hidden Layer의 개수는 4개 이며 입력 데이터 벡터는 17 x 200 이다. 여기서 17은 즉대역 성분이며, 200은 4개의 기어의 결함 종류에 대하여 얻어진 50 사이클 데이터를 순차적으로 배치하였다. 학습과정에서는 각각의 결함이 존재하는 경우에는 "1"의 값을 할당 하였으며, 결함이 존재하지 않으면 "0"이 된다. 따라서 학습에 사용된 행렬은 4x200 개이다.

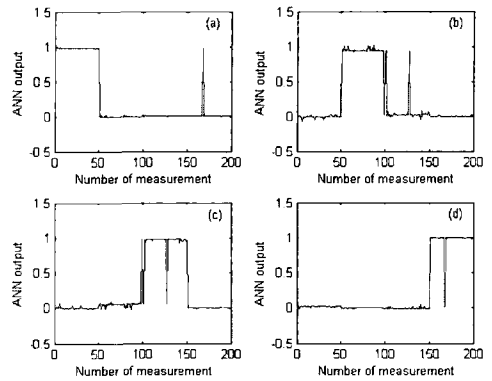


Fig. 6 Fault detection and pattern analysis using the PSD and artificial neural network, (a) Healthy gear (b) Root crack (c) Initially pitted gear (d) Tip broken gear

Fig. 6 은 학습과정을 거친 후 새로운 실험 데이터를 취득하여 학습된 신경망 회로에 적용한 결과이다. 이 결과는 4개의 결함 형태를 가진 신호를 순차적으로 적용한 결과 결함형태에 대한 분류는 아주 양호하다. Fig. 5(a)는 Fig. 6(a)에 해당하며 Fig. 3(a)에서 보여주는 정상기어의 경우를 나타내며, Fig. 5(b)는 Fig. 6(b)에 해당하며 이 뿌리에 크랙이 발생한 것이며, Fig. 5(c)는 Fig. 6(c)에 해당하며 초기 피팅에 대한 결과이며, Fig. 5(d)는 Fig. 6(d)에 해당하며 이의 절손에 대한 결함 진단 및 분류이다.

각각의 경우에 대한 진단 결과 및 결함형태에 대한 분류 알고리즘의 성능은 Table 2에서 알 수 있다. 정상신호는 100% 탐지하며 절손의 경우를 정상으로 오탐지하는 경우가 1%의 있다. 즉 정상이 아닌 경우를 정상으로 탐지하는 경우이다. 이 뿌리의 크랙의 경우는 98%의 탐지와 2%의 미탐지와 1%의 오탐지가 있었다.

평치차의 다른 세트를 Table 1 의 기준을 따라서 제작하여 Fig. 3에서 보여 주는 형태로 손상을 주어 파워스펙트럼과 신경망회로를 이용하여 결함을 분류하면 Fig. 7과 같다. 이 경우에도 결함이 존재하면 "1" 이 신경망 회로에서 출력되며, 결함이 존재하지 않는 경우에는 "0" 이 출력된다. 이 신경망 회로에 사용된 가중치는 Fig. 6에 사용된 가중치와 동일하며 학습효과가 다른 기어 세트를 이용한 것이므로 완전하게 "1" 에 일치하지는 않지만 결함기어와 정상 기어는 분명히 구별이 되며, 결함의 형태도 확연히 구별된다.

이 기어세트에 대한 결함 진단 및 분류에 대한 알고리즘 성능에 대한 정리는 Table 3과 같다.

Table 2 Detection ratio of the damage

	Health	Root crack	Initial pitting	Tip brakeage
Detection	100	98	98	98
Non Detection	0	2	2	2
Wrong Detection	1	1	0	0

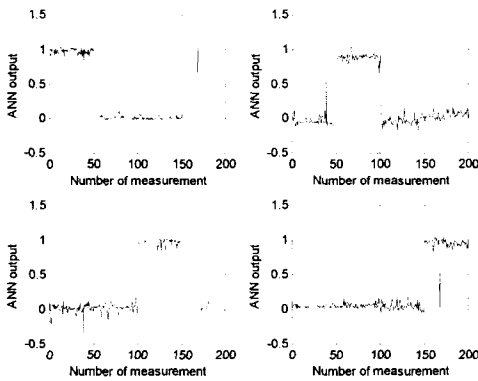


Fig. 7 Fault detection and pattern analysis using the PSD and artificial neural network, (a) Healthy gear (b) Root crack (c) Initially pitted gear (d) Tip broken gear

Table 3 Detection ratio of the damage

	Health	Root crack	Initial pitting	Tip brakeage
Detection	100	98	100	98
Non Detection	0	2	0	2
Wrong Detection	1	1	0	0

Table 2와 Table 3의 결과의 차이는 초기 피팅 (Initial pitting) 손상의 경우이다. 이것은 초기 선상의 결함은 결함 정도가 다른 결함에 비하여 심하지 않기 때문이다. 그러나 이 결과들은 매우 양호하며 100% 탐지를 위해서는 배경소음을 제거한 후에 시간 주파수 분석 등의 고등신호 처리 기술을 적용하여 결함형태를 분류하는 고등신호처리 기술⁽³⁾의 적용이 필요한 하다. 이 경우는 복잡한 신호 처리과정을 요구한다. 본 연구는 100%의 완벽한 결함의 탐지 및 분류는 아니지만 쉽게 적용할 수 있는 방법에 대한 연구이므로 현재의 결과는 효율적으로 기어 손상 및 결함의 분류에 적용 할 수가 있다.

5. 결론

- (1) 본 연구에서는 비교적 큰 결함 형태인 상단 절손을 갖는 기어와 미세한 결함 형태인 초기 피팅을 갖는 기어의 경우 그리고 이뿌리 크랙 등에 대한 기어의 결함을 탐지하며 분류하기 위해서 파워스펙트럼 기술과 신경망회로 기술을 적용하였다.
- (2) 결함의 탐지와 결함의 분류는 98% 탐지할 수 있는 성공적인 결과를 얻을 수 있다. 이 방법은 적용이 쉬운 파워스펙트럼을 이용한 결과이다.
- (3) 기어세트에 의한 차이는 초기피팅과 같은 결함이 아주 미소한 경우를 제외하고는 결함의 분류를 잘 구별 할 수가 있다.
- (4) 결함이 미소한 초기 피팅과 같은 평치차의 결함도 100% 결함진단 및 결함을 분류하기 위해서는 배경잡음을 제거하는 신호처리 과정과 비정상신호 분석에 필요한 선행 신호처리 기술이 필요하다.

후 기

이 논문은 2000학년도 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었음.(INHA-21961)

참고문헌

- (1) Stewart, R. M., 1977, "Some Useful Data Analysis Techniques for Gearbox Diagnostics," *Institute of Sound and Vibration Research*, University of Southampton, Report MHM/R/10/77.
- (2) 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. 3, pp. 485~505.
- (3) Lee, S. K. and White, P. R. 1999, "Two-Stage Adaptive Line Enhancer and Sliced Wigner Trispectrum for the Characterisation of Faults from Gear Box Vibration Data," *Journal of Vibration and Acoustics, Transaction of ASME*, Vol. 1, pp. 488~512.
- (4) McFadden, P. D., 1986, "Detecting Fatigue Cracks in Gears by Amplitude and Phase Demodulation of Meshing Vibration," *Journal of Vibration Acoustics Stress and Reliability in Design, Transactions of ASME*, Vol. 108, pp. 165~170.
- (5) Lee, S. K. and White, P. R., 1997, "Higher-Order Time-Frequency Analysis and Its Application to Fault Detection in Rotating Machinery," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 11, No. 4, pp. 637~650.
- (6) Lee, S. K., 1999, "Fault Diagnosis of a Gearbox Using the Sliced Wigner Fourth Order Time Frequency

- Method Smoothed by a New Kernel," *KSME International Journal*, Vol.13, No.12, pp. 940~947.
- (7) 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.
- (8) Park, H., Kim, S. H., Lee, M. H. and An, J. H., 1996, "Failure Detection of a Toll Using Wavelet Transform for Electric Signal of Moving Motor," *Transaction of KSPE*, Vol. 13, No. 9, pp. 31~37.
- (9) Lee, S. K. and Sim J. S., 2001, "Fault Detection of a Gear with Initial Pitting Using a Zoomed Phase Map of Continuous Wavelet Transform" *Transaction of KAME A*, Vol. 25, No. 11, pp. 1759~1766.
- (10) Kay, S. M., 1988, "Modern Spectral Estimation," Printice Hall.
- (11) Hagan, M. T., 1996, "Neural Network Design," PWS Publishing Company.
- (12) So, C. B., 1995, *Gear and Having Work*, Electric mechanic Research, pp. 237~247.