DOI : 10.5050/KSNVE.2010.20.2.185

저속회전축의 균열 검출을 위한 음향방출기법의 적용

Application of the AE Technique for The Detection of Shaft Crack with Low Speed

구 동 식*·김 재 구*·최 병 근†

Dong Sik Gu, Jae Gu Kim and Byeong Keun Choi

(2009년 11월 26일 접수 ; 2009년 12월 23일 심사완료)

Key Words : Acoustic Emission(음향방출), Condition Monitoring(상태감시), Fault Diagnosis(결함 진단), Shaft Fault(축 결함), Rotating Machine(회전기계), Crack Growth(균열 진전)

ABSTRACT

Condition monitoring(CM) is a method based on non-destructive test(NDT). So, recently many kind of NDT were applied for CM. Acoustic emission(AE) is widely used for the early detection of faults in rotating machinery in these days because of high sensitivity than common accelerometers and detectable low energy vibration signals. And crack is considered one of severe fault in the rotating machine. Therefore, in this paper, study on early detection using AE has been accomplished for the crack of the low-speed shaft. There is a seeded initial crack on the shaft then the AE signal had been measured with low-speed rotation as the applied load condition. The signal detected from crack in rotating machine was detected by the AE transducer then the trend of crack growth had found out by using some of feature values such as peak value, skewness, kurtosis, crest factor, frequency center value(FC), variance frequency value(VF) and so on.

1. 서 론

회전체의 결함 검출에 대한 많은 연구들이 수행되었으며, 그 연구들을 바탕으로 상태 감시(condition monitoring) 기술은 비약적인 발전을 거듭하였다. 회전체의 핵심 요소인 베어링과 기어 등에 대한 기술이 특히 발전을 이루었으며, 모터 및 커플링에 대한 부분도 그 뒤를 잇고 있다. 하지만 이렇게 비약적인 발전을 이루면서도 아직 명료한 결과를 나타내지 못하는 것이 바로 균열(crack)이다.

† 교신저자; 정회원, 경상대학교 해양산업연구소
E-mail : bgchoi@gnu.ac.kr
Tel : (055)640-3186, Fax : (055)640-3188

* 정회원, 경상대학교 대학원 정밀기계공학과

이 논문은 2009 추계 소음진동 학술대회에서 우수논문으로 추천되었음.

균열을 검출하기 위한 연구는 주로 비접촉식 변위계를 통해 이루어졌으며, 축에 균열이 발생되었을 때 축의 고유진동수와 회전 속도에 관련된 주파수들이 변화된다는 연구 결과가 발표되고 있다[1~3]. 하지만 변위계를 통해 검출되어지는 균열의 신호는 축 직경의 40 % 이상이 균열되었을 때 나타나게 된다. 축 직경의 40 % 이상의 균열은 빠른 시간 내에 진행되어 샤프트의 파괴를 발생시킬 수 있는 위험한 상태이다.

그러므로 이 연구에서 축에 발생된 균열을 검출하기 위해 음향방출센서(acoustic emission sensor; AE sensor)를 사용하였으며, 초기 균열을 샤프트 직경의 10 %로 하여 축이 파단되는 순간까지의 신호를 취득하였다. 취득된 신호를 이용하여 각 신호의 시간 파형 및 파워 스펙트럼을 분석하였고, 여러 가지의 특징값(feature value)을 얻었으며, 이를 바

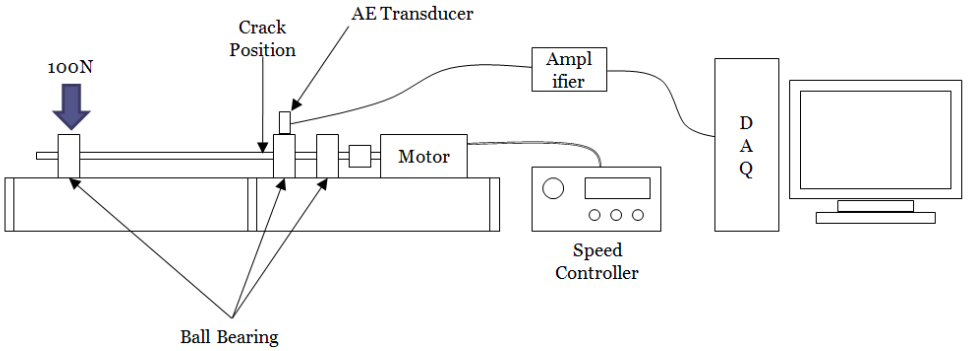

Fig. 1 Experimental system

Table 1 Experimental condition

Rotating speed	480 rpm
Preamplifier level	40 dB
Threshold level	45 dB
Analog filter	1 k ~ 3 MHz
Sampling frequency	2 MHz
Recording time	0.5 sec
Recording time interval	240 sec
Bearing type	NTN #6200

탕으로 균열이 진전되는 과정의 특성을 살펴보았다.

2. 실험 방법

실험 장치는 Fig. 1과 같이 Rotor-Kit(RK4, Bently Nevada), Speed Controller, AE 센서, 전치증폭기(Pre-amplifier), DAQ 시스템으로 구성하였다. 그리고 Table 1은 AE 신호 취득을 위한 DAQ 시스템 설정을 나타낸다.

이 실험을 위해 사용된 축은 길이 280 mm, 직경 10 mm이며, 그 물성치는 Table 2와 같다. 또한 초기 균열은 Jeweler's saw를 사용하여 깊이 1 mm, 폭 0.5 mm로 절단되었으며, 위치는 Fig. 1과 같이 AE 센서가 설치되는 베어링에서 4 mm 떨어진 곳에 위치하도록 하였다.

축의 지지를 위한 베어링은 3개의 NTN #6200이 사용되었으며, AE 신호를 베어링의 표면으로부터 센서로의 전달효율을 높이기 위해 커플란트(Couplant)로 부동액(anti-freezing liquid)을 사용하였다[4].

Table 2 Parameters of test shaft

Parameters	Specifications
Length (mm)	280
Diameter (mm)	10
Young's modulus (MPa)	208.11
Density (kg/m^3)	7,801
Poisson ratio	0.3

축의 회전 속도는 480 RPM(8 Hz)로 설정이 되었으며, 베어링에서 발생되는 결함주파수인 외륜주파수(ball passing frequency of outer race, BPFO), 내륜주파수(ball passing frequency of inner race, BPFI) 및 케이지주파수(fundamental train frequency, FTF)는 24.4 Hz, 39.6 Hz 및 3.04 Hz이다.

3. 신호처리

3.1 포락처리(Envelope Analysis)

포락처리는 진동 신호로부터 주기적으로 발생되는 충격 신호의 검출을 위해 널리 사용되고 있는 기법이다. 이는 진동 신호에 의해 가려진 에너지가 낮은 신호를 검출할 수 있는 이점을 가지고 있다.

포락처리는 일반적으로 (1) 대역통과필터(band-pass filter), (2) 파형 교정(wave rectification), (3) 힐버트 변환(Hilbert transform), (4) 저역통과필터(low-pass filter) 및 파워 스펙트럼의 4 단계를 거치게 된다. 포락처리를 위한 대역통과필터는 기계적 특성으로 발생되는 낮은 주파수의 높은 진폭을 가지는 진동 신호를 제거하는 역할을 하게 된다. 따라서 이 대역폭을 설정하는 것이 포락처리에서 가장 중요한 부분이라 할 수 있다[5].

이 연구에서 주어진 대역통과필터의 범위는 200 kHz ~ 350 kHz로 선정되었다. 이는 신호처리를 거치지 않은 신호의 파워 스펙트럼을 살펴본 결과 200 kHz와 350 kHz 사이에서 높은 진폭이 나타났으며, 이 대역의 진폭이 균열 진전에 따라 변화되는 현상을 나타내었기 때문이다.

3.2 이산웨이블릿 변환

이산웨이블릿 변환(discrete wavelet transform)은 기어결함을 검출하기 위한 연구에서 많이 사용되고 있는 방법으로, 신호 내에 포함되어 있는 충격파를 찾는데 효과적인 것으로 알려져 있다[6~9].

이 연구에서는 매트랩의 Wavelet tool box에 포함되어 있는 function을 사용하였으며, 사용된 이산웨이블릿 변환 함수는 도비치(Daubechies)로 그 레벨은 4로 설정을 하여 신호 처리를 하였다. 매트랩의 Wavelet tool box에서 수행되는 웨이블릿 변환은 Fig. 2와 같이 웨이블릿의 레벨이 증가될 때 신호는 중심 주파수를 기준으로 저주파와 고주파로 나뉘게 된다.

3.3 AE 신호의 전처리

따라서 이 연구에서 특징값을 계산하기 위해 수행된 전처리 방법은 Fig. 3과 같이 포락처리에 이산웨이블릿변환을 적용한 형태로 이루어졌다. 대역통과필터를 거친 AE 신호는 기계적으로 발생되는 높은 진폭의 노이즈는 모두 제거된 상태이지만, 여전히 선택되어진 영역내의 노이즈는 그대로 포함하고 있는 상태이다. 이러한 상태이서 AE 소스(source)와 유사한 형태인 충격파형과 관련 없는 노이즈를 제거하기 위해 이산웨이블릿 변환을 적용하였다.

이산웨이블릿 변환을 거친 신호는 힐버트 변환을 통하여 일반적으로 상태감시를 사용되는 주파수 범위로 신호의 주파수를 변환하게 된다. 변환된 신호는 고주파수 대역에서 포함하고 있는 신호의 특성을 그대로 보유하고 있기 때문에 변환된 신호의 파워 스펙트럼에서는 베어링에서 발생되는 주파수 및 운전주파수를 확인 할 수 있다.

Fig. 4는 신호처리 과정을 거치지 않은 시간파형(a), 파워 스펙트럼(b)과 신호처리 과정을 거친 파워

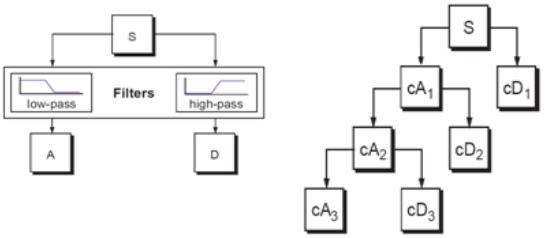

Fig. 2 Wavelet procedure in matlab tool box

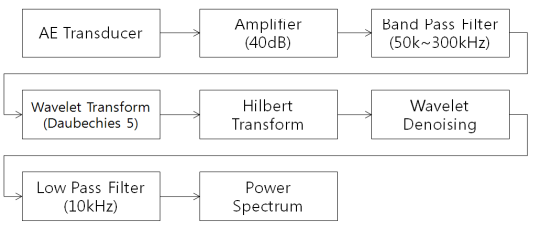

Fig. 3 Block diagram of the signal processing

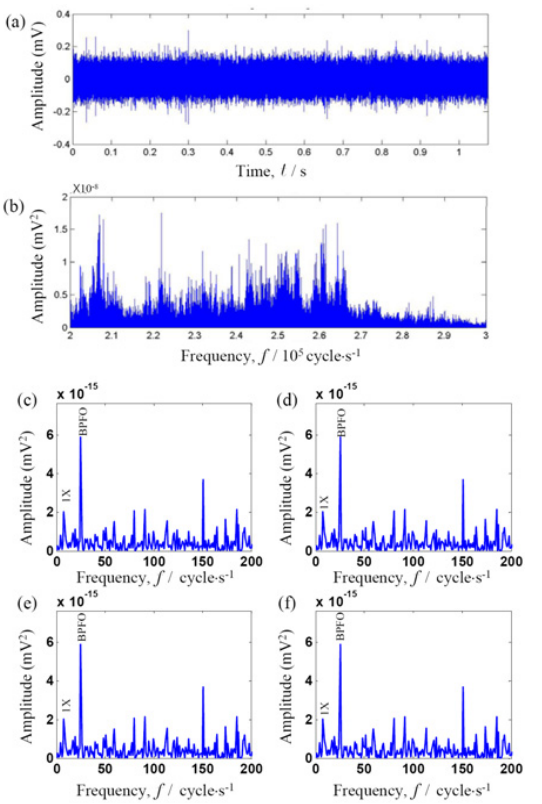

Fig. 4 Time domain and frequency domain of the signal after 13 minutes, (a) time wave of the raw signal, (b) power spectrum of the raw signal, (c) ~ (f) power spectrum of the wavelet level 1 ~ 4 signals

스펙트럼(e~f)을 나타낸다. AE 신호가 Fig. 3과 같은 과정의 신호처리를 거치게 되면, 이산웨이블릿에 의해 4개의 레벨로 분리가 되기 때문에 Fig. 4의 (e)~(f)와 같이 4가지의 파워 스펙트럼을 얻게 된다. 이와 같이 (e)~(f)에선 운전주파수(8 Hz) 및 외륜주파수(24 Hz)가 잘 나타나고 있음을 알 수 있다.

4. 실험 결과

4.1 경향 분석

축의 파단까지는 총 1,614분이 소요되었으며, Fig. 5는 파단된 축의 단면을 나타내고 있는 것으로, 균열이 단계적으로 진행된 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 8가지의 특징값(시간 영역 : peak, RMS, Kurtosis, crest factor, standard error; 주파수 영역 : root mean square freq.(RMSF), freq. center(FC), root variance freq.(RVF))을 나타내는 것으로 수평축은 시간(분)이며, 수직축은 평준화(normalizing)된 값을 나타낸다. 시간 영역의 5가지 중 peak 값을 제외한 4가지는 확률밀도(probability density)와 밀접한 관계가 있으며, 주파수 영역의 RMSF와 FC는 신호의 주 주파수의 위치와 관련이 있고, RVF는 파워 스펙트럼의 주파수 집중도와 관련이 된다.

Fig. 6과 같이 RMS를 제외한 7가지의 특징값들은 모두 유사한 경향을 보이고 있으며, 이를 정리하면 다음과 같은 과정으로 요약할 수 있다.

(1) 실험 시작 후 약 300분까지 서서히 감소.

(2) 약 300분과 450분 사이에서 매우 낮은 특징값 발생.

(3) 약 450분 이후, 급격히 증가되어 300분 이전의 값들에 비해 높게 나타남.

(4) 약 700분까지 서서히 감소.

(5) 약 700분과 800분 사이에 (4)의 감소보다 다소 빠르게 감소된 이후 일정시간 유지.

(6) 특징값은 축이 파단될 때까지 급격히 증가.

이상과 같이 균열이 진전되는 동안 특징값은 6단계의 경향을 나타내고 있다. 이는 일반적으로 알려진 베어링 또는 기어와 같은 요소의 결함 진행 경향과는 큰 차이가 있는 것을 알 수 있다. 특히, 두 번째 단계에서 특징값들의 급격한 저하는 축계에 균열이 발생되어 진전될 때 나타날 수 있는 특별한 단계라 할 수 있을 것으로 사료된다.

4.2 주파수 분석

Fig. 7은 경향 분석에서 나타낸 각 단계별 대표 파워 스펙트럼을 나타낸 것이다. 파워 스펙트럼은 1 kHz까지 나타내었으며, 200 Hz 이하의 진폭을 더욱 자세히 보기 위해 각 파워 스펙트럼 내에 확대

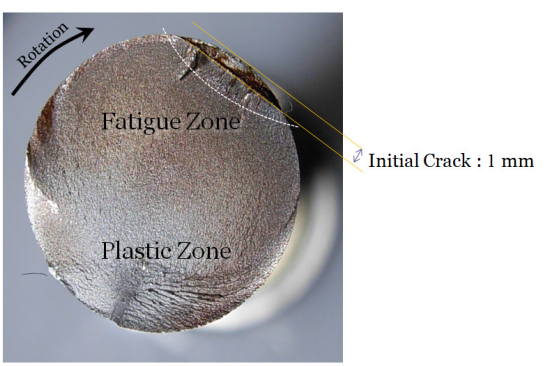

Fig. 5 Cross section of the cracked shaft

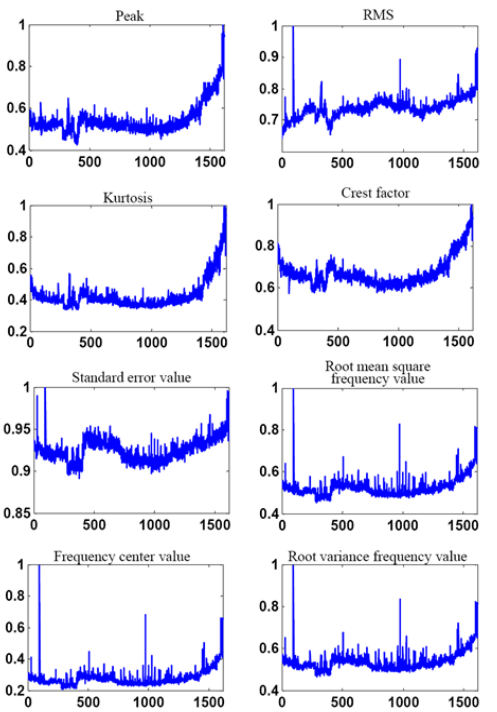

Fig. 6 Features of the preprocessed signals by discrete wavelet level 1(horizontal axis: minute, vertical axis: non-dimensional value)

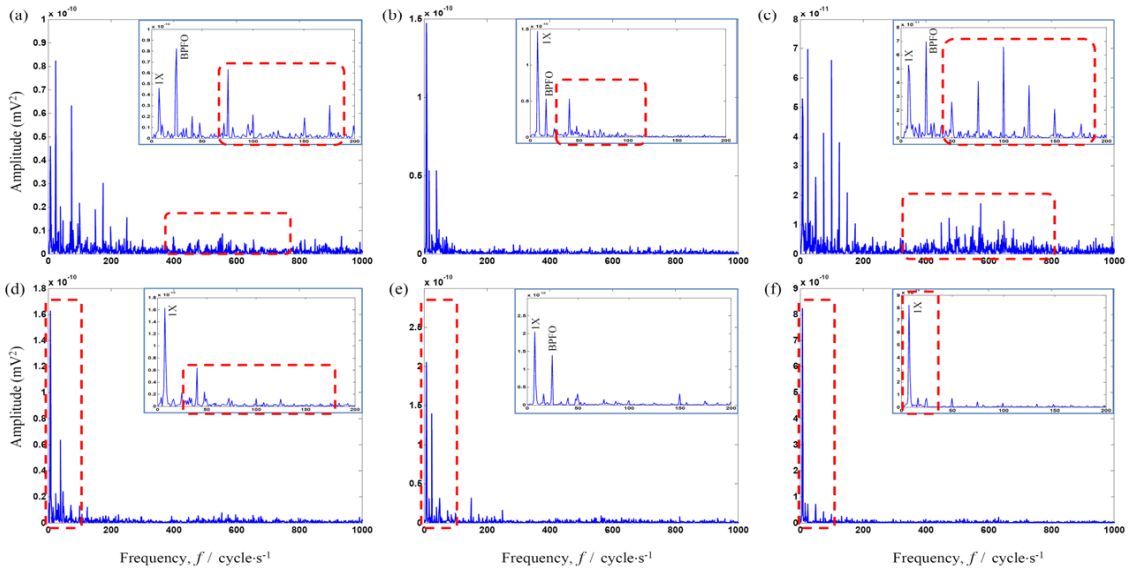

Fig. 7 Power spectrum at 200 minute(a), 337 minute(b), 562 minute(c), 896 minute(d), 1400 minute(e) and 1600 minute(f)

하여 표시하였다.

앞서 기술한 바와 같이 1단계(Fig. 7(a))에서 운전주파수(1X)와 외륜주파수(BPFO)가 발생되며, 운전초기에 발생되는 불규칙한 주파수들을 확인할 수 있다. 그리고 2단계(Fig. 7(b))에선 1단계에서 발생되던 불규칙한 주파수들이 사라진 것을 알 수 있으며, 1X 성분이 가장 탁월하게 발생되고 있음을 알 수 있다. 2단계에서 특징값들이 급격히 감소한 것은 1X를 제외한 진폭들이 모두 감소하였기 때문인 것으로 사료된다. 특징값들이 급격히 증가하여 초기 단계보다 높은 값을 나타낸 3단계(Fig. 7(c))에서 1X 및 BPFO와 이의 조화성분이 매우 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 575 Hz를 중심으로 BPFO와 동일한 25 Hz로 사이드밴드(sideband)가 발생된다. 2 단계에서 나타나지 않은 100 Hz 이상의 주파수들이 급격히 높게 나타나기 때문에 전반적으로 특징값들이 Fig. 6과 같이 짧은 시간 내에 증가될 수 있음을 확인 할 수 있다. 3 단계 이후 1X 및 BPFO의 조화성분들은 진폭이 서서히 줄어드는 것을 Fig. 7(d)~(f)를 보면 알 수 있다. 하지만 조화성분들이 사라진 이후, 1X가 서서히 성장하는 것을 확인할 수 있다. 이는 균열이 일정 수준 이상으로 진전되어 축이 굽힌 상태로 회전함에 따라 1X가 증가하는 것으로 사료된다.

그리고 Fig. 7(c)에서 100 Hz를 중심으로 높은 진폭이 대칭적으로 발생되고 있음을 확인할 수 있고, 이 주파수들은 BPFO의 조화성분들과 동일하다. 일반적으로 조화성분들은 고차로 갈수록 진폭값이 낮아지는 형태이나, 이 연구의 경우에선 100 Hz 주변으로 BPFO의 사이드밴드가 발생되고 있는 것과 유사한 형태이다.

5. 결 론

이 연구는 회전하는 축에 균열이 발생하였을 때, AE 기법을 사용하여 균열을 조기에 검출하기 위한 특징들을 살펴보았다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) AE 신호의 노이즈를 제거하기 위해 raw 신호의 파워 스펙트럼에서 높은 진폭을 나타내는 범위를 검토하여 포락처리를 위한 대역통과필터에 적용하였으며, 충격파형의 신호를 더욱 잘 나타내기 위해 이산웨이블릿 변환을 추가 설정하였다. 포락처리와 이산웨이블릿 변환을 거친 신호의 파워 스펙트럼에서 운전주파수와 베어링의 외륜주파수가 잘 표현되고 있음을 확인했다.

(2) 균열의 진전에 따른 신호의 특성을 파악하기 위해 8가지의 특징값에 대한 경향을 분석한 결과, RMS를 제외한 7가지의 특징값이 서로 유사한 경

향을 나타내었으며, 이를 6단계로 구분하였다. 6단계 중 2단계는 일반적인 기계요소의 결함에서 발생되지 않는 특이한 특성인 것으로 사료된다.

(3) 각 단계에 대한 파워 스펙트럼을 살펴본 결과, 3단계에서 575 Hz를 중심으로 외륜통과주파수의 사이드밴드가 발생되었으며, 외륜통과주파수의 조화성분들이 매우 큰 진폭으로 발생됨을 확인하였다.

(4) 3단계 이후 외륜통과주파수의 조화성분은 그 진폭이 감소하는 반면, 1X의 진폭은 서서히 증가하여 축이 파단될 때까지 증가함을 알 수 있었다.

따라서 이 논문에서 수행된 회전하는 축의 균열의 진전에 대한 결과는 균열의 조기 검출에 유용한 자료가 될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

이 연구는 BK21의 친환경냉열에너지기계연구사업팀의 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

(1) Sekhar, A. S. and Prabhu, B. S., 1998, “Condition Monitoring of Cracked Rotors Through Transient Response,” Mech. Mach. Theory., Vol. 33, No. 8, pp. 1167~1175.

(2) Mba, D. and Hall, L. D., 2002, “The Transmission of Acoustic Emission Across Large-scale Turbine Rotors,” NDT&E International, Vol. 35, pp. 529~539.

(3) Wang, X. H., Zhu, C. M., Mao, H. L. and Huang, Z. F., 2009, “Wavelet Packet Analysis for the Propagation of Acoustic Emission Signals Across Turbine Runners,” NDT&E International, Vol. 42, pp. 42~46.

(4) Li, C. and Nordlund, E., 1993, “Technical Note : Effects of Couplants on Acoustic Transmission,” Rock Mechanics and Rock Engineering, Vo. 26, No. 1, pp. 63~69.

(5) Sinou, J. J., 2009, “Experimental Response and Vibrational Characteristics of a Slotted Rotor,” Common Nonlinear Sci. Numer. Simulate, Vol. 14, pp. 3179~3194.

(6) Shi, D. F., Wang, W. J. and Qu, L. S., 2004, “Defect Detection for Bearings Using Envelope Spectra of Wavelet Transform,” J. Vibration and Acoustics, Vol. 126, No. 4, pp. 567~573.

(7) Cempel, C., 1991, Vibroacoustic Condition Monitoring, Ellis Horwood, Chichester, UK.

(8) Tang, K. S., Man, K. F., Kwong, S. and He, Q., 1996, “Genetic Algorithms and Their Applications,” IEEE Signal Processing Magazine, Vo. 13, pp. 22~37.

(9) Jack, L. B. and Nandi, A. K., 2000, “Genetic Algorithms for Feature Extraction in Machine Condition Monitoring with Vibration Signals,” IEEE Proceeding of Vision & Image Signal Processing, Vol. 147, pp. 205~212.

(10) Darpe, A. K., Gupta, K. and Chawla, A., 2004, “Coupled Bending, Longitudinal and Torsional Vibrations of a Cracked Rotor,” Journal of Sound and Vibration, Vol. 269, pp. 33~60.

(11) Ishida, Y., 2008, “Cracked Rotors: Industrial Machine Case Histories and Nonlinear Effects Shown by Simple Jeffcott Rotor,” Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 22, pp. 805~817.

(12) Jun, O. S., 2008, “Analysis of Harmonic Vibration of Cracked Rotor,” Transactions of Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vo. 18, No. 1, pp. 35~46.