

AE신호를 이용한 기어 정렬불량의 진동 특성 분석

Vibration Characteristic Analysis Using Acoustic Emission Signal

구 동 식*, 이 정 환*, 김 병 수*, 양 보 석**, 최 병 근†

Dong Sik Gu, Jeong Hwan Lee, Byeong Su Kim, Bo Suk Yang and Byeong Keun Choi

(2008년 9월 4일 접수 ; 2008년 12월 1일 심사완료)

Key Words : Acoustic Emission Signal(음향방출신호), Envelope Analysis(포락처리), Gear Misalignment(기어 정렬불량)

ABSTRACT

Gear system has been widely used in industrial applications and unexpected failures of gears are not only extremely damaging but also leading to economic losses. So, early detection of fault is important for diagnosis machine condition. And acoustic emission is an efficient non-destructive testing technique for the diagnosis of machine health and is useful technique for early detection of fault because it can find low-amplitude and high-frequency signal on account of high sensibility. Therefore, in this paper, the AE signal was measured and preprocessed using envelope analysis for gearbox with misalignment between pinion and gear. And then the gear misalignment's vibration characteristic were analyzed.

1. 서 론

음향방출(acoustic emission) 기법은 최근 기계 상태 감시 및 진단을 위해 결함의 조기 검출에 그 초점을 둔 연구에 많이 적용되고 있으며, 특히 베어링 및 기어에 대한 적용이 주를 이루고 있다⁽¹⁾.

베어링에서 발생 가능한 결함은 간단한 수식으로 계산될 수 있기 때문에 결함 검출 능력을 평가하기 위한 실험에서는 대부분 베어링이 사용되고, AE의 검출 능력을 증명하기 위해 베어링의 결함에 대한 연구가 활발하였다. 베어링 결함을 검출하기 위해 적용된 AE는 감도가 기존의 가속도계에 비해 높은 만큼 결함의 조기 검출에도 좋은 결과를 나타내고 있는 것으로 알려지고 있다. 그리고 베어링 결함 주

파수를 검출하기 위해 사용되는 신호처리 기법으로 HFRT(high frequency resonance technique)가 적합하고, 그 결과로 베어링의 결함 주파수가 주파수 스펙트럼 상에 확연히 드러나게 된다⁽²⁾.

반면에 기어의 경우는 베어링과 다소 차이가 있다. 기어는 기본적으로 진단에 사용되는 주파수는 GMF(gear mesh frequency) 또는 고유진동수(natural frequency)가 사용되고 있다. 기어에서는 기어의 잇수와 회전수로 결정되는 GMF가 반드시 나타나게 되어 있으며, GMF의 진폭 크기 또는 그 배수 성분의 발생 정도에 따라 결함이 있는 것으로 판단을 하고 있다. 하지만 GMF만으로는 베어링과 같이 어떠한 부분에 결함이 발생한 것인지에 대한 정보는 얻을 수 없다. 특히 지금까지의 연구에서 기어의 결함을 검출하기 위한 신호처리 기법은 대부분 웨이블릿 변환을 적용한 것으로, 그 결과는 베어링의 경우에 비해 많이 미흡한 상황이다⁽³⁾.

이렇듯 AE를 적용한 연구들은 실질적으로 상당수 진행이 되고 있는 상황이나, 각각 연구 대상에 따라 AE 신호의 전처리 방법이 일정치 않아 실질적인 기계

† 교신저자; 정회원, 경상대학교 기계항공공학부, 해양산업연구소

E-mail : bgchoi@gnu.ac.kr

Tel : (055)640-3186, Fax : (055)640-3188

* 경상대학교 대학원 정밀기계공학과

** 정회원, 부경대학교 기계공학과

상태 감시 및 진단 시스템에 적용하기란 쉽지 않다.

따라서 이 논문에서는 베어링의 결함 검출에서 뛰어난 성능을 보이고 있는 HFRT를 기어에 적용함으로써 기어 결함 검출을 위한 적합성을 확인하였으며, 기어 정렬불량에 대한 AE 신호의 특성을 분석하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 신호 취득

AE 신호를 취득하기 위해 사용된 변환기, 증폭기, 데이터 수집 보드 및 소프트웨어는 미국의 PAC (physical acoustics corporation)사의 것을 사용하였으며, 그 상세 정보는 Table 1과 같다.

AE 센서는 기어와 가장 가까운 베어링 부에 설치되는 것이 일반적이나, 이 실험에 사용된 기어상자의 베어링 부의 하우징이 협소하여 센서를 부착하기 위한 공간이 충분하지 못하였기 때문에 베어링 하우징 이외에 가장 적합한 기어상자의 케이스에 모터 축과 수평방향으로 높이가 같은 위치에 설치하여 데이터 취득을 수행하였다. 아날로그 필터는 1 kHz~1 MHz로 설정하였으며, 문턱치(threshold)는 32 dB, 증폭기의 게인(gain) 값은 60 dB, 샘플링 주파수 5 MHz로 설정하였으며, 트리거는 1월 8일부터 22일까지 모터가 구동되는 동안 매 30분마다 4초씩 저장하는 것으로 설정되었다.

2.2 실험 장치

기어 상자는 3마력의 3상 유도전동기에 강제 커플링으로 결합된 피니언과 부하로 연결된 기어로 구성되었다. Fig. 1과 같이 피니언의 잇수는 50개, 피치 지름은 100 mm, 기어는 70개 및 140 mm로 제작되었으며, 피니언은 제작 과정 중 열처리과정을 거

치지 않았다. Table 2는 기어상자의 상세 정보이다.

2.3 포락처리(envelope analysis)

포락처리는 AE 신호를 이용한 기계진단 분야에 가장 많이 적용되고 있는 전처리 과정으로, 특히 구

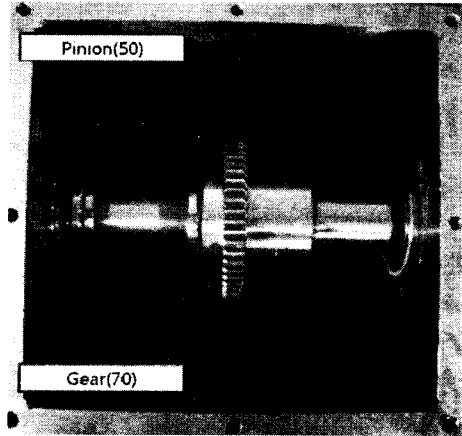


Fig. 1 Experiment gearbox

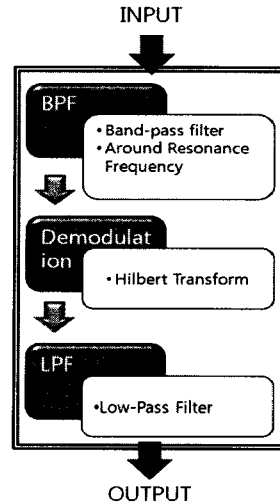


Fig. 2 Procedure of envelope analysis

Table 1 Specifications of AE system

2 Channel AE system on PCI-board	18-bit A/D conversion 10 M samples/sec rate (on one channel, 5 M samples/second on 2 AE channels).
AE Sensor (wideband type)	Peak sensitivity V/(m/s)[V/ μ bar] : 55 [-62] dB Resonant Freq. V/(m/s)[V/ μ bar] : 125 [650] kHz
Preamplifier 20/40/60 dB gain	Wide dynamic range < 90 dB single power/signal BNC or optional separate power/signal BNC

Table 2 Specifications of gearbox

	Pinion	Gear	Bearing(NSK HR32206J)		
Number of teeth	50	70	Number of rolling element	17	BPFO : 124.8 Hz BPFI : 300.1 Hz FTF : 7.34 Hz BSF : 42.87 Hz
Speed of shaft	25.01 rev/s		Diameter of outer race	62 mm	
Meshing frequency	1250 Hz	1750 Hz	Diameter of inner race	30 mm	

를요소 베어링의 결함 진단에 주로 이용되고 있다. 포락처리 과정은 일반적으로 Fig. 2와 같이 대역 통과 필터(band-pass filter), 변조(demodulation), 저역 통과 필터(low-pass filter)의 순서로 진행이 된다.

대역 통과 필터는 기계적 진동 요소에 의해 발생되는 저주파·고진폭의 신호를 제거할 수 있으며, 대역 통과 밖의 랜덤 노이즈(random noise)를 제거하는 역할을 하기 때문에 그 범위의 설정은 매우 중요하다 할 수 있다⁽⁴⁾. Fig. 3은 AE 신호를 이용한 포락처리의 예를 나타낸다.

3. 정렬불량(Misalignment)⁽⁵⁾

Fig. 4는 IRD에서 제시한 기어 정렬불량 시에 발생 가능한 주파수에 대한 것이다. 기어의 정렬불량은 항상 고차 GMF 주파수를 발생시키고, 특히 1배

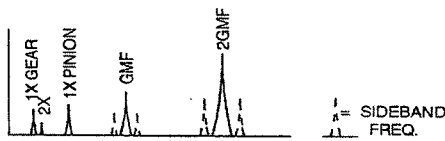


Fig. 3 Spectrum indicating misalignment of gear

GMF 주파수의 진폭보다 2배 또는 3배의 GMF의 진폭이 높게 나타나는 것이 일반적이다. 하지만 종종 1차 GMF 주파수가 아주 작은 진폭을 가지고 있는 경우도 있다.

그리고 GMF 및 2배 GMF 주파수를 중심으로 1X 또는 2X의 측대역파(sideband frequency)가 발생가능하다.

4. 데이터 분석

4.1 AE 신호의 FFT

포락처리를 위한 BPF 대역을 결정하기 위하여 저장된 AE 신호를 FFT를 통하여 주파수 변화를 살펴 보았다. Fig. 5와 Fig. 6은 각각 1월 8일과 1월 22일에 측정된 AE 데이터의 시간 파형과 푸리에 변환의 파워스펙트럼이다.

두 그림에서 대체로 50 kHz 이하 영역에서 높은 진폭이 나타나고 있고, 특히 1월 22일에 측정된 데이터에 40 kHz와 50 kHz 사이에 나타나는 피크는 1월 8일의 데이터에는 나타나지 않음을 알 수 있다.

이 주파수는 1월 8일부터 22일까지 15일 동안 시간이 지남에 따라 서서히 그 진폭값이 증가하였음을

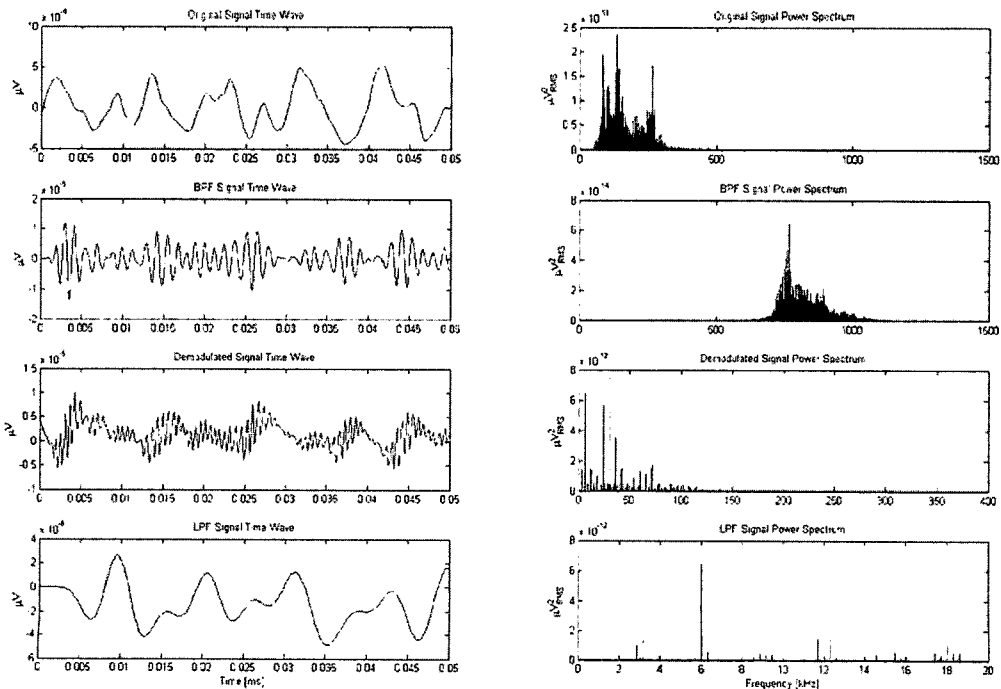


Fig. 4 A example of envelope analysis using AE signal

확인하였다. 그러므로 포락처리를 위한 BPF 주파수 대역은 40 kHz ~ 50 kHz로 설정하여 포락처리를 수행하였다.

4.2 포락처리

푸리에 변환을 통해 설정된 BPF의 대역을 사용하여 15일간 저장된 모든 데이터에 대해 포락처리를 실시하였다. 포락처리 과정 중 demodulation 과정을 위해 힐버트 변환(Hilbert transform)을 사용하였으며, Matlab⁽⁶⁾을 통하여 신호처리 및 그래픽 작업을 수행하였다.

힐버트 변환⁽⁷⁾의 결과는 다음과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$y(t) = x(t) + jH(t) \tag{1}$$

여기서, $x(t)$ 는 힐버트 변환의 입력 신호, $y(t)$ 는 출력이며, $H(t)$ 는 $x(t)$ 의 힐버트 변환된 부분이다.

이와 같이 힐버트 변환의 결과는 입력과 그 입력의 힐버트 변환된 허수부와의 합으로 표현되어진다.

그러므로 이 연구에서는 힐버트 변환된 허수부만을 취하여 파워스펙트럼으로 나타내었고, 특징값 또한 이를 이용하여 계산되었다.

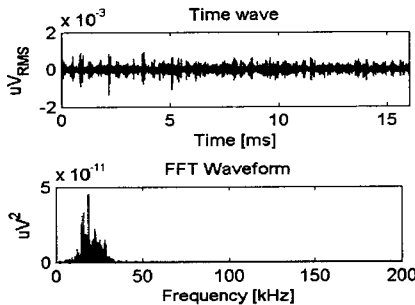


Fig. 5 Time wave & power spectrum of 01/08

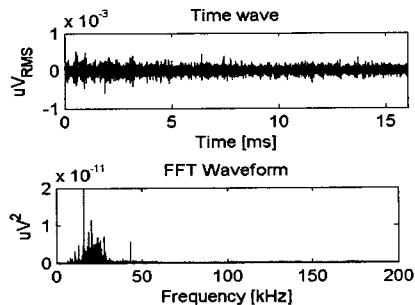


Fig. 6 Time wave & power spectrum of 01/22

Figs. 7~9는 포락처리된 AE 신호의 파워스펙트럼을 나타내는 것으로 1월 9일, 16일과 19일에 측정된 데이터이다. Fig. 7과 같이 실험 초기에 GMF의 2배 성분인 2.44 kHz와 이의 배수들이 나타남을 알 수 있다. 그리고 Fig. 9와 같이 실험 종료 직전의 스펙트럼에서 가장 높은 피크는 2.44 kHz에서 나타나고, 그 외에 높게 나타나던 주파수들(배수 성분)은 모두 줄어든 것을 확인할 수 있다.

기어에 정렬불량이 발생하였을 경우, 기어의 운전 주파수(회전주파수)와 이의 배수, 그리고 GMF의 1배수 및 2배수가 탁월하게 나타나는 것을 3장에서 확인하였다.

그러므로 이 연구에서 기어 정렬불량의 초기 조

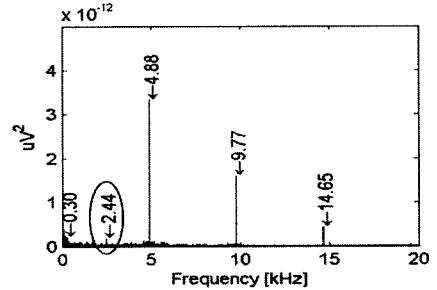


Fig. 7 The result of envelope analysis of 01/08

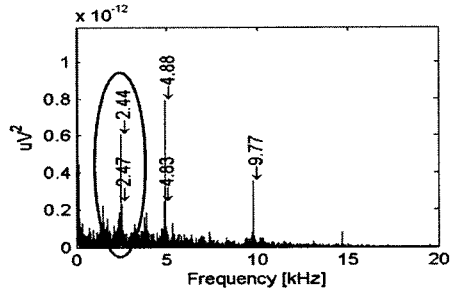


Fig. 8 The result of envelope analysis of 01/16

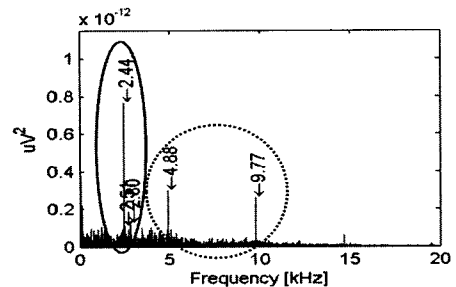


Fig. 9 The result of envelope analysis of 01/19

건은 기어가 온전한 상태에서 정렬불량을 가졌고, 그 때문에 기어 상자에 설치된 피니언과 기어 사이에 과도한 마모 현상이 발생하게 되어 고주파수 대역의 배수 성분들이 높게 나타나게 되었음을 알 수 있다. 하지만 시간이 지나면서 두 기어 사이에 발생하는 마모량은 점차 줄어들게 되고, 마모에 의해 발생하는 신호보다 정렬불량에 의한 신호가 더욱 강하게 나타나게 되어 Fig. 9와 같이 2배 GMF를 제외한 고차 성분들은 감소한 것으로 사료된다.

4.3 특징값(Feature) 계산

앞 절에서 설명된 바와 같이 특징값 역시 힐버트 변환의 출력에서 허수부만을 사용하여 계산되었다. 특징값은 총 14개로 지정이 되었으며, 그 중 Skewness, Kurtosis, RMS 등을 중심으로 하여 시간의 흐름에 따른 경향을 살펴보았다.

시간이 지남에 따라 가장 뚜렷한 변화를 나타낸 것이 Kurtosis이며, RMS는 다소 불안정적이거나 감소하는 경향을 나타내었다. 하지만 Skewness는 그 변화가 들쭉날쭉하여 시간에 따른 특징적인 경향은 찾

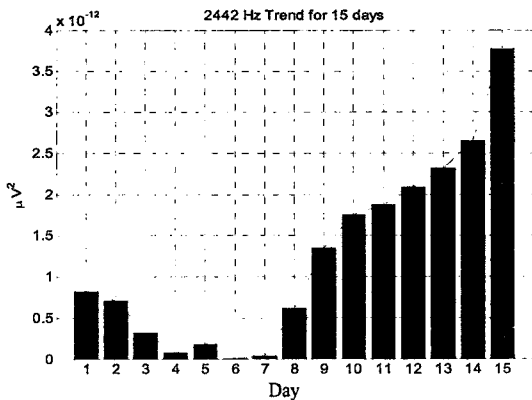


Fig. 10 Vibration level trend of 2442 Hz(2GMF)

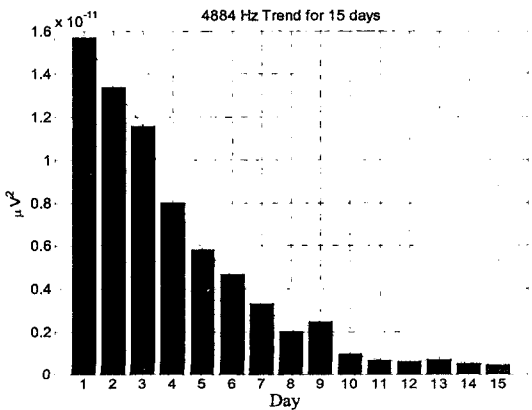


Fig. 11 Vibration level trend of 4GMF

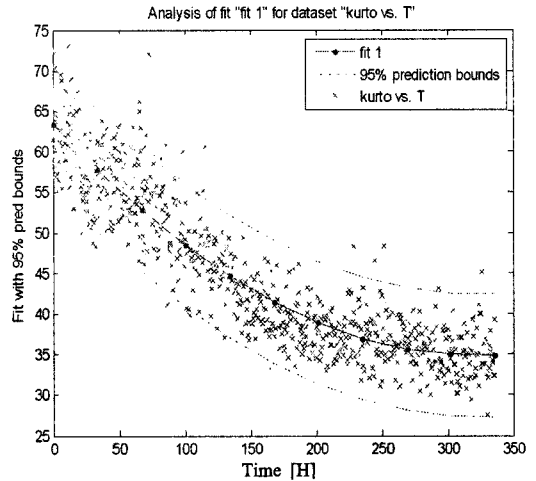


Fig. 12 Curve fitting of Kurtosis

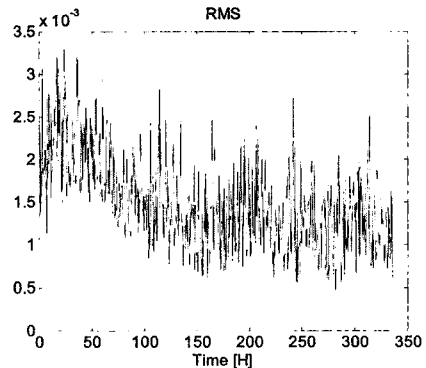


Fig. 13 RMS

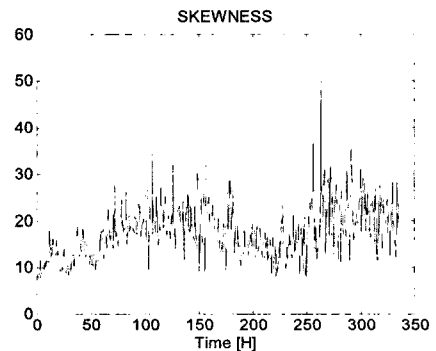


Fig. 14 Skewness

아보기 어렵다. 그리고 GMF의 2배수 및 4배수의 진폭 변화를 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었다. 2배수는 시간이 지남에 따라 초기의 6일 동안 미소하게 감소되었으나 7일째 이후부터 급격히 증가됨을 알 수 있고, 4배수는 지속적으로 감소하다 10일째 이후부터 유사한 값을 유지함을 알 수 있다.

Figs. 12~14는 각각 저장된 모든 데이터에 대한 Kurtosis의 곡선추정(curve fitting) 결과와 RMS 및 Skewness를 나타내었다.

Kurtosis는 활률밀도함수(probability density function)의 형태와 관련이 있는 것으로, 확률밀도함수의 형태가 좌우로 넓게 퍼져 있는 형태인 경우엔 Kurtosis 값이 높게 나타나게 되며, 뾰족한 경우에는 작은 값으로 나타난다. 그러므로 Kurtosis 값이 높은 것은 AE 신호가 진폭의 최대와 최소 사이에서 지속적으로 높게 나타난다는 것을 의미하며, 낮은 값은 낮은 진폭의 신호가 대부분을 차지하고 있으며 상대적으로 높은 진폭을 나타내는 신호는 많지 않다는 것을 의미한다. 이 연구에서 Kurtosis 값이 감소한다는 것은 초기에 발생된 마모에 의해 높은 진폭을 가지는 신호가 지속적으로 발생되었으며, 이후 마모의 정도가 감소함에 따라 지속적으로 발생되던 높은 진폭의 신호가 줄어든다는 것을 알 수 있다. 그리고 최종적으로 기어의 이가 충분히 마모가 되어, 그 이상 마모는 진전되지 않고 정렬불량에 의한 신호만 발생하게 되어 높은 진폭을 나타내는 신호는 그만큼 감소한 것이다.

특히 Kurtosis의 곡선추정 결과에서는 실제 신호로부터 계산된 Kurtosis 값이 곡선추정 결과에 따른 95% 이내의 예측 범위 내에 존재하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 Kurtosis는 베어링의 결함 진단 및 경향 분석에 많이 사용되는 특징값으로 기어 결함 역시 적용 가능함을 이 연구에서 확인할 수 있었다.

5. 결 론

HFRT는 베어링 결함 검출에 주로 사용되어져 왔으나, 이 연구의 결과에 따라 HFRT의 하나인 포락처리는 기어의 결함 검출에 충분히 적용 가능한 것으로 확인되었다. 포락처리의 BPF 주파수 대역은 퓨리에 변화를 통하여 시간에 따라 변화를 나타내는 주파수를 중심으로 설정이 되었으며, 포락처리 후의

주파수 스펙트럼에서 GMF의 2배 성분 및 이의 배수 성분들이 시간이 지남에 따라 변화한다는 것을 확인하였다.

또한 2배 GMF의 배수 성분들은 정렬불량에 의해 기어가 마모될 때 높게 나타나며, 마모가 없는 정렬불량 상태에서는 2배 GMF가 강하게 나타남을 확인하였다.

그리고 일반적으로 기계 상태 감시에 사용되는 RMS는 이 연구에서 다소 감소되는 경향을 보이고 있으나, 그 변화정도가 작으며 불규칙적인 부분을 포함하고 있어 AE 신호를 이용한 상태 진단에 사용은 가능하나 그 정확도는 높지 않은 것으로 사료된다.

하지만 Kurtosis의 곡선추정 결과, 측정된 모든 데이터는 추정 결과의 95% 예측 범위 내에 존재하고 있는 것을 확인하였다. 그러므로 AE 신호를 사용한 상태 감시에서는 Kurtosis가 유용하게 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

이 연구는 교육과학기술부(MEST) 및 한국산업기술재단(KOTEF)의 지역혁신인력양성사업과 경상대학교 2단계 BK21 친환경 냉열에너지기계 연구사업팀의 지원으로 수행되었다.

참 고 문 헌

- (1) Mba, D. and Raj B.K.N. Rao, 2006, "Development of Acoustic Emission Technology for Condition Monitoring and Diagnosis of Rotating machines: Bearings, Pumps, Gearboxes, Engines, and Rotating Structures," The Shock and Vibration Digest, Vol. 38, No. 1, pp. 3~16.
- (2) Shiroishi, J., Li, Y., Liang, S., Kurfess, T. and Danyluk, S., 1997, "Bearing Condition Diagnosis Via Vibration and Acoustic Emission Measurements," Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 11, No. 5, pp. 693~705.
- (3) Shiroishi, J., Li, Y., Liang, S., Danyluk, S. and Kurfess, T., 1999, "Vibration Analysis for Bearing Outer Race Condition Diagnosis," Journal of Brazil Society Mechanical Science, Vol. 21, No. 3, pp.

484-492.

- (4) Kim, Y. H., Andy, C. C. Tan, Joseph, M., Vladis, K. and Yang, B. S., 2007, "A Comparative Study on the Application of Acoustic Emission Technique and Acceleration Measurements for Low Speed Condition Monitoring," Proceedings of the 12th Asia-Pacific Vibration Conference(APVC2007).
- (5) Berry, J. E., 1994, IRD Advancement Training Analysis II - Concentrated Vibration Signature Analysis and Related Condition Monitoring Techniques, IRD Mechanalysis, Inc., pp. 6-149~6-155.
- (6) Signal Processing Toolbox User's Guide, Math Works, Inc., 1999.
- (7) Randall, R. B., 1987, "Frequency Analysis," Bruel & Kjaer Book.
- (8) Mba, D. and Bannister, R. H. and Findlay, G. E., 1999, "Condition Monitoring of Low Speed Rotating Machinery Using Stress Waves : Part1 and Part2," Proc. Inst. Mech. Eng. 213(3, Part E), pp. 153~185.
- (9) Mba, D., 2001, "The Detection of Shaft-seal Rubbing in Large-scale Turbines Using Acoustic Emission," 14th International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management (COMADEM'2001), Manchester, UK, 4-6 September 2001, pp.21~28.
- (10) Mba, D., Cooke, A., Roby, D. and Hewitt, G., 2003, "Opportunities Offered by Acoustic Emission for Shaft-steal Rubbing in Power Generation Turbines : A Case Study," International Conference on Condition Monitoring, Oxford, sponsored by the British Institute of NDT UK, pp. 280~286.
- (11) Kim, Y. H., Andy, C. C. Tan, Joseph, M. and Yang, B. S., 2007, "Experimental Study on Incipient Fault Detection of Low Speed Rolling Element Bearings : Time Domain Statistical Parameters," 12th Asia-Pacific Vibration Conference(APVC2007).
- (12) Ronnie, K. M., Eric, V. K. H. and Patrick, O. M., 2005, Nondestructive Testing Handbook Volume 6 - Acoustic Emission Testing, American Society for Nondestructive Testing, Columbus.
- (13) Park, K. H., Jung, S. J., Wee, H., Kim, J. S., Han, K. S. and Kim, M. H., 2008, "A Study on the Fault Detection of Auto-transmission according to Gear Damage," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 18, No.1, pp. 47~56.