

저속 회전 기계의 베어링 Condition Monitoring을 위한 AE 변환기 적용

The application of AE transducer for the bearing condition monitoring of low-speed machine

정한얼*, 구동식*, 김효중*, 앤디 탄**, 김용한***, 최병근†

H. E. Jeong, D. S. Gu, H. J. Kim, Tan. Andy, Y. H. Kim and B. K. Choi

Key Words : AE (음향 방출), Fault bearing (결함 베어링), Envelope analysis (포락선 처리 분석), PR (피크율)

ABSTRACT

Acoustic emission (AE) was originally developed for non-destructive testing of static structure, but over the year its application has been extended to health monitoring of rotating machines and bearings. It offers the advantage of earlier defect detection in comparison with monitoring bearing. This study was diagnosed low-speed machine which had a fault bearing for early detection by AE. And the artificial faults in a experimentation bearing was made for the bearing signals from difference speed and load were compared and analyzed by AE.

기 호 설 명

B_d : 볼의 직경,	N_s : 데이터의 수
P_d : 피치 직경	σ : 표준 편차
N : 볼의 수	\bar{x} : 평균 값
x_1 : 편차	x_n : 주파수 신호의 크기
f_r : 내륜의 1초당 회전수	β_1 : 왜도
ϕ : 접촉각	β_2 : 첨도
x_{rms} : 실효치(RMS)	PR : Peak Ratio

1. 서 론

오늘날 우리 일상에서는 수많은 기계 설비들이 사용되고 있다. 이러한 기계 설비들을 대상으로 하여 설비진단기술이나 상태감시에 근거하여 설비부품의 상태를 정확히 파악하고, 부품에서 발생하는 결함을 가능한 조기에 검지하여, 그

경과를 추적하여 금후의 진전을 예측하고, 적절한 시기에 적절한 보전을 수행하는 방식이 상태기준보전(CBM : Condition Based Maintenance)이다⁽¹⁾.

회전 기계에서도 상태감시에 관한 연구는 오래전부터 진행되어 왔으며, 이러한 연구의 주요 목적은 베어링의 결함을 조기에 발견하여 기계의 손상으로 인한 경제적인 손실과 피해를 미연에 방지하기 위함이다.

베어링 결함에는 구름 피로(Fraking)와 마멸(Wear), 크랙, 압흔 등이 있다. 이러한 베어링 결함은 하중 과대, 이물질의 혼입, 윤활 불량, 이물질 침입, 큰 충격하중을 받을 경우 발생한다.

또한 저속 회전 기계의 베어링 결함의 경우에 진단을 하기 위해서는 측정 변수를 정확히 선택하여야 하며, 구조물 자체에서 발생하는 노이즈의 분리 방법, 또한 센서에서 인식하는 신호의 크기가 Roll-off 주파수 범위에 포함되어 있어 Roll-off Filter에 영향을 미치지 않도록 주의하여야 한다⁽²⁾.

본 연구에서는 AE(Acoustic emotion)를 사용하여 저속 회전시의 회전 기계에서의 베어링 결함을 조기에 발견하여 진단하고자 하였다. 그러기 위하여 베어링에 결함을 인위적으로 생성하였으며, 회전 기계의 회전 속도와 하우징에 의해 베어링에 전달되는 하중을 달리하여 실험하였다. 이렇게 획득한 베어링 결함 신호를 통계량 해석을 사용하여 베어링의 결함에 따른 변화를 비교 및 분석하고자 하였다.

† 최병근, 국립 경상대학교 기계항공 공학부, 해양산업연구소
E-mail : bkchoi@gnu.ac.com
Tel : (055) 640-3180, Fax : (055) 640-3188

* 국립 경상대학교 대학원
Mechanical engineering, Queensland University of Technology, Australia.
**

2. 이론적 배경

2.1 AE 원리⁽³⁾

Acoustic Emission(음향의 방출)이란 고체가 변형 또는 파괴 시에 발생하는 음을 탄성파로 방출하는 현상이며, 이 탄성파를 AE 센서로 검출하고 비 파괴적으로 평가하는 방법을 AE법이라 한다. AE는 재료가 파괴되기 이전부터 작은 변형이나 미세한 크랙(crack)의 진행과정에서 발생하기 때문에 AE의 발생 경향을 진단하여 재료와 구조물의 결함 및 파괴를 발견 및 예상할 수 있다. 그리고 회전체에서 방출되는 AE는 주로 초음파 영역(20KHz~2MHz)의 신호를 대상으로 하고 있으며, 재료의 결함 자체가 방출하는 동적 에너지를 감지한다.

2.2 베어링의 결함 신호와 주파수⁽⁴⁾

구름 요소 베어링은 일반적으로 홈(raceway) 내를 회전하는 여러 개의 볼 또는 롤러 사이에 내륜 (Inner ring)과 외륜(Outer ring)의 2개의 링으로 구성되어 있다. 베어링의 진동체(rolling element)의 구조에 따라서 볼 베어링, 구름 베어링, 니들 베어링 등으로 구별되며, 하중을 지지하는 방향에 따라 반경 베어링과 스러스트 베어링으로 구별된다.

구름 요소 베어링에서 볼 요소들은 회전 기계 내에서 축 회전을 쉽게 하지만, 접촉 피로와 마멸은 베어링이 결함을 야기 시키는 주된 원인이 된다.

또한, 회전 기계의 회전 시에 베어링 결함은 진동을 유발시킨다.

그리고, 구름 요소 베어링에서는 베어링 형상과 운전 속도에 따라 결정되는 베어링 특징 주파수가 검출되며, 이때 측정된 진동의 크기로 베어링의 상태를 알 수 있다. 식 (2), (3), (4)는 일반적으로 알려져 있는 베어링의 특징 주파수를 구하는 수식이다.

$$BPFO=f_o=\frac{f_r}{2}M\left[1-\frac{B_d}{P_d}\cos\phi\right] \text{ (Hz)} \quad (2)$$

$$BPFI=f_i=\frac{f_r}{2}M\left[1+\frac{B_d}{P_d}\cos\phi\right] \text{ (Hz)} \quad (3)$$

$$BSF=f_s=\frac{P_d}{2B_d}f_r\left[1-\left(\frac{B_d}{P_d}\right)^2\cos^2\phi\right] \text{ (Hz)} \quad (4)$$

2.3 신호 처리 및 분석 방법

(1)Envelope Analysis⁽⁵⁾

Envelope 스펙트럼은 베어링의 결함이 나타내는 주파수를 찾는데 이용되는 대표적인 분석 방법이다. 베어링 결함이 발생한 경우, 볼이 결함 부위를 통과할 때마다 충격력이 가진되어 베어링의 고유 진동수에 대응하는 진동이 발생한다. 이 경우 결함 주파수와 베어링의 고유 진동수는 크게 다르게 된다. 즉 얻어진 진동 파형은 베어링의 고유 진동에

의한 파형을 결함에 의한 반복 주파수로 진폭 변조된 것이다. 설비 진단에 필요한 정보는 베어링의 고유 진동이 아니고 결함에 의해 발생한 진동 성분이다, 이와 같이 변조 주파수와 피 변조 주파수 사이의 비가 큰 신호로부터 변조 주파수 성분의 정보를 얻는데 효과적이다.

(2)실효치(rms: root mean square)

신호의 진폭의 크기를 직접 나타내는 값으로 잘 이용된다. 진동의 심각한 정도를 나타내는 특성인 진동 진폭을 정량화하는 방법으로 실효치를 사용하고 있다. 이는 시간에 대한 변화량을 고려하는 진동의 파괴적 능력을 나타내는 에너지량과 직접 관련된 진폭을 표시하므로 진동 크기의 표현에 가장 적절하다. 실효치 계산식은 다음과 같다.

$$x_s=\sqrt{\frac{1}{N_s}\sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (5)$$

(3)왜도(skewness)

시계열 신호에 대한 관측 값들의 확률밀도함수 분포의 비대칭 정도와 방향을 나타내는 값으로 평균치를 중심으로 하여 진동 파형의 왜곡된 정도를 나타낸다. 진동 파형이 대칭이라면, $\beta_1=0$ 이 되고, $\beta_1>0$ 이면 양의 방향으로, $\beta_1<0$ 이면 음의 방향으로 왜곡되는 것을 나타낸다. 평균과 분산이 차원을 가지는 양이지만, 왜도는 무차원의 양이다.

$$\beta_1=\frac{\frac{1}{N_s}\sum_{i=1}^N x_i^3}{\sigma^3} \quad (6)$$

(4)첨도(kurtosis)

진동파형이 얼마나 충격적인가, 즉 파형이 얼마나 예리한가를 나타내는 값으로 베어링의 결함 진단에 효과적이다. 구름 베어링이나 기어 장치에 국부 결함이 발생하면, 그 진동은 충격적으로 된다. 따라서 이 값은 구름 베어링이나 기어 장치의 진단이 널리 이용되고 있다. 첨도는 파형의 4차 모멘트를 표준편차 σ 의 4승으로 나누어 규격화한 값이다.

$$\beta_2=\frac{\frac{1}{N_s}\sum_{i=1}^N x_i^4}{\sigma^4} \quad (7)$$

(5)PR(peak ratio)

스펙트럼의 평균값(A)과 피크 값(P_h)의 합을 이용하여 결함의 정도를 표시해주며, 피크 비는 베어링의 결함의 유무를, 피크 값은 결함의 정도를 나타낸다. 식(3)은 PR(peak ratio)을 수식으로 나타내었다.

$$P.R.=\frac{N_s \times \sum_{j=1}^m P_h}{\sum_{k=1}^N A} \quad (5)$$

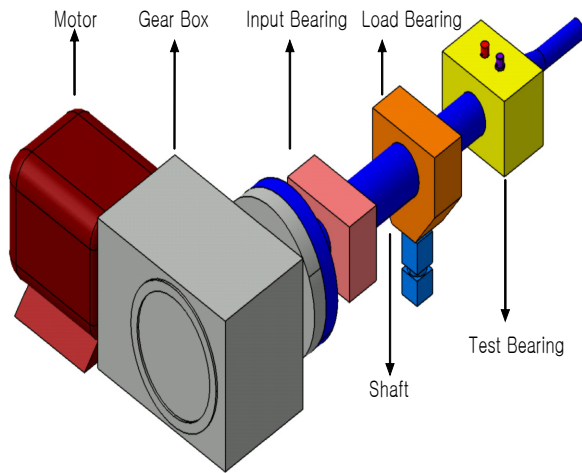


Fig. 1 Experimentation installation

3. 실험 장치 및 방법

본 연구에서는 구름 요소 베어링의 결함에 대한 베어링의 결함 진단을 AE 변환기를 이용하여 알아보기 위하여 Fig. 1가 같은 실험 장치를 제작하여 실험하였다.

또한, 축 회전 속도를 기어 박스(감속비 10.1:1)를 사용하여 20, 50, 80, 110, 140 rpm으로 구분하고, 베어링에 가해지는 하중을 500 N, 2 kN, 5 kN으로 설정하여 회전 속도와 하중의 변화에 따른 베어링 결함 신호를 알아보고자 하였다.

실험 장치 작동 시에 회전 속도와 베어링에 가해지는 하중에 대한 베어링의 결함 신호를 얻기 위하여 베어링(SKF N 307)의 외륜에 결함이 있을 경우와 내륜에 결함이 있을 경우로 인위적으로 생성하였으며, 결함의 종류는 국부 결함과 분포 결함으로 구분하여 실험하였다. 그리고 윤활 상태는 일정하게 하여 윤활 상태에 의한 외력을 최소화 하였다.

AE 센서를 이용하여 15초간 15회 이상으로 저장하였으며, MATLAB을 이용하여 불필요한 성분이나 잡음을 제거하기 위한 신호의 전처리과정을 거친 뒤, 분석 파라미터인 실효치(rms), 왜도(skewness) 및 첨도(kurtosis)를 계산하였다. 그리고 포락선 처리된 주파수 영역에서 계산된 PR값을 이용하여 결함의 유무를 알아보았다.

4. 실험 결과

Fig. 2는 외륜에 결함을 가진 베어링을 회전 속도는 80 rpm 하중을 5 kN으로 하여 실험한 결과이다. Fig 2에서와 같이 회전 속도가 80 rpm 이상일 경우 고주파수밴드(HPF)의 55-100 kHz 영역에서 베어링 결함 주파수(6.44 Hz)와 조화 성분(12.81, 19.25, 25.69 Hz)이 탁월하게 발생함을 알 수 있었다. 그러나 55 kHz이하의 영역에서는 베어링 결함 주파수가 확연하게 발생하지 않았다. 그리고 회

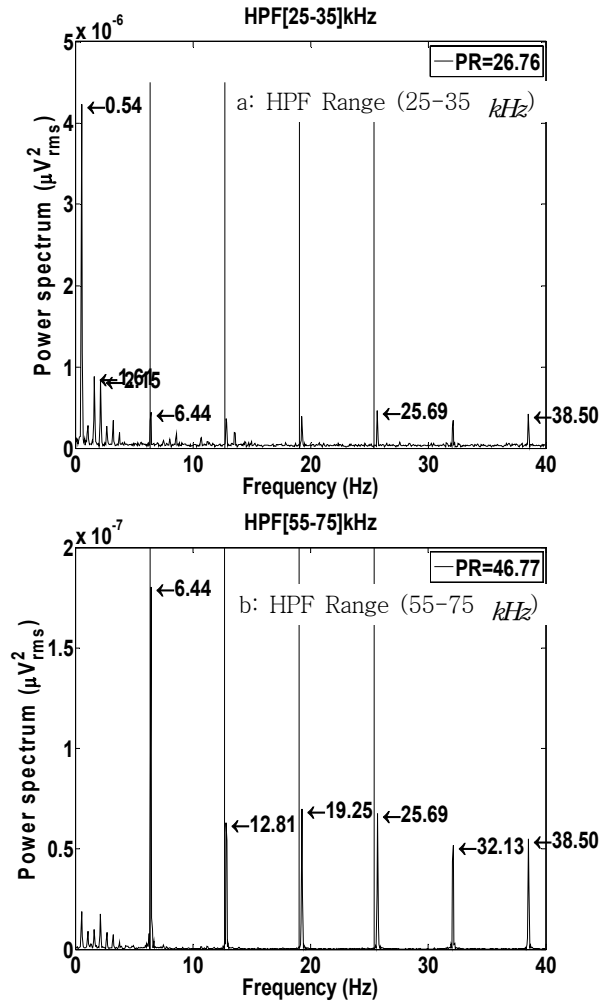


Fig. 2 Result of outer fault bearing in 80 rpm & load 5 kN

Table 1 Outer fault bearing of PR about rpm & load

rpm	load (N)	HPF Range(kHz)			
		25-35	35-55	55-75	75-100
50 rpm	500	9.44	-24.18	16.55	8.12
	2k	30.54	30.77	36.59	28.36
	5k	18.56	24.20	34.85	26.76
80 rpm	500	7.31	3.22	35.33	28.12
	2k	20.02	20.02	45.93	40.10
	5k	26.76	30.89	46.77	44.75
110 rpm	500	14.83	16.85	44.23	38.97
	2k	14.31	10.73	48.40	44.45
	5k	33.65	34.13	51.38	48.65
140 rpm	500	19.13	19.88	48.22	44.94
	2k	31.36	17.07	52.01	47.53
	5k	38.01	33.36	53.75	51.86

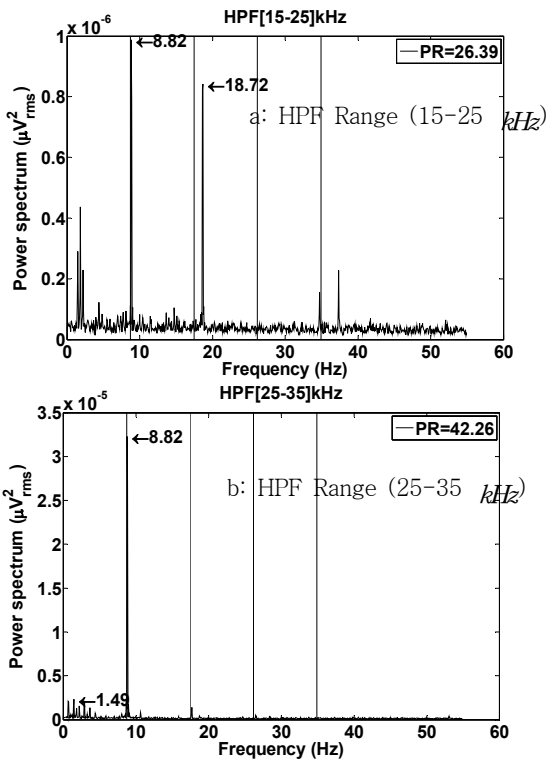


Fig. 3 Result of distribution fault bearing in 110 rpm & load 500 N

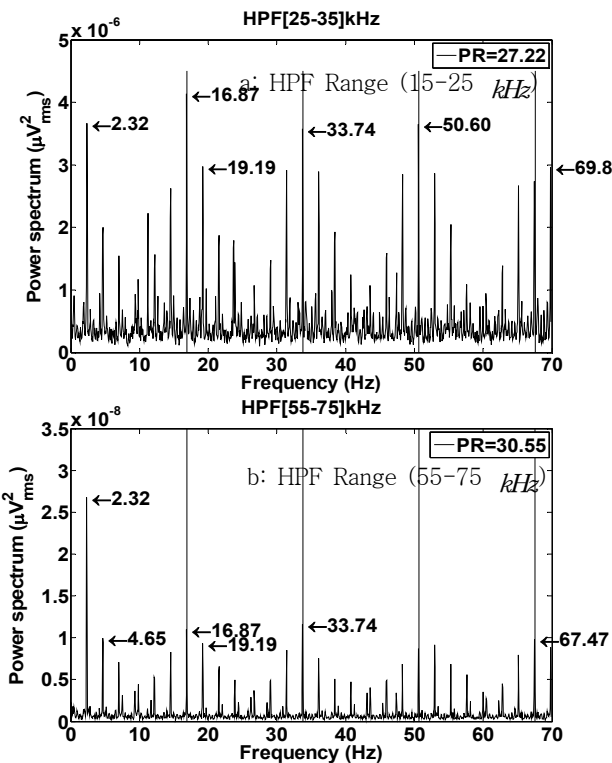


Fig. 4 Result of inner fault bearing in 140 rpm & load 500 N

전 속도와 하중의 변화에 대하여 베어링 결함 주파수의 경향을 알고자 실험한 결과를 토대로 Table. 1과 같이 회전 속도와 하중의 변화에 따른 PR값을 정리하였다. 분석 결과 회전 속도가 80 rpm 이상 또는 하중이 2 kN 이상일 경우에 55~100 kHz의 범위 내에서 베어링의 결함 주파수 성분이 탁월하게 발생함을 알 수 있었다.

Fig. 3은 분포 결함 베어링에 대한 실험 결과로, PR값은 15~25 kHz의 범위에서 26.39 dB로 나타났으며, 25~35 kHz 범위에서는 42.29 dB로 매우 높게 나타났다. 하지만 결함 주파수(BPFO)의 1X 성분(8.82 Hz)만이 탁월하게 나타나고 있을 뿐, 그 외의 조화 성분(2X, 3X, 4X)은 전혀 나타나지 않았다. 또한, 모터의 운전 주파수 성분인 18.72 Hz가 15-25 kHz 영역에서는 발생하였지만 25 kHz 이상의 영역에서는 자동 제거함을 알 수 있었다.

Fig. 4는 베어링의 내륜에 결함이 존재할 경우의 실험 결과로써 결함 주파수 성분(16.87 Hz) 및 조화 성분(33.74, 50.60, 67.47 Hz)의 진폭이 명확히 나타남에도 불구하고, 전체적으로 BSF에 의한 측대역파(Sideband)가 강하게 발생하고 있기 때문에 전 주파수에 걸친 평균값이 높게 되어 PR값이 높게 나타나지 않음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 AE 변환기를 사용하여 저속회전시의 회전 기계에서의 베어링 결함을 조기에 발견하여 진단하고자 하였다.

실험 결과, 베어링 외륜의 극부 결함의 경우에는 회전 속도가 80 rpm 이상 또는 하중이 2 kN 이상일 경우에 55~100 kHz의 범위 내에서 베어링의 결함 주파수 성분이 탁월하게 발생함을 알 수 있었다. 하지만 내륜 결함 및 분포 결함의 경우에는 외륜 결함의 경우만큼 결함을 확연히 검출해내지 못 함을 알 수 있었다.

또한, 25 kHz 이상의 고주파 영역을 취하였을 경우 잡음(모터의 운동 주파수)가 제거 됨을 알 수 있었다.

그러므로 외륜 결함의 경우 아주 미세한 결함과 결함의 초기 단계일 경우 고주파밴드(HPF: 50 ~ 100 kHz)에서 AE 변환기가 유용하게 사용될 수 있다는 것을 확인하였으며, 고주파 영역을 취함으로써 잡음(noise)이 자동으로 제거되는 장점 또한 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 NURI(첨단기계산업기술혁신인력양성사업단), 2단계 BK21 및 산업자원부의 지역혁신 인력양성 사업의 지원으로 진행되었다.

참 고 문 헌

- (1) Andrew K. S. Jardine and Daming Lin., Dragan Banjevic., 2006, "A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance", Mechanical System and Signal Processing, Austria.
- (2) N. Jamaludin and D. Mba, 2002, "Monitoring extremely slow rolling element bearings: part2", Mechanical System and Signal Processing., Austria.
- (3) 정재현, 석창성, 김영진, 1996, "음향방출법을 이용한 고속회전마찰제의 거동 및 안정성 해석", 춘계학술대회 논문집, 대한기계학회, pp.7~12.
- (4) S. A. McInerney and Y. Dai, 2003, "Basic Vibration Signal Processing for Bearing Fault Detection", IEEE.
- (5) 김홍섭, 이상권, 2002, "기어박스에서의 베어링 결함 진단", 기계의 날 선포 및 2002년도 기계관련 산학연 연합 심포지엄, pp.611~616.
- (6) 양보석, 2006, 기계설비의 진동 상태 감시 및 진단, 인터 버전, 5장.