

저속 회전 베어링 결함 검출을 위한 AE와 가속도계 변환기 비교

The comparison of AE and Acceleration transducer for the early detection on the low-speed bearing

김효중*·구동식*·정한열*·앤디 탄**·김용한**·최병근†

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

Key Words : bearing defect (베어링 결함), AE (음향 방출), low-speed bearing (저속 베어링)**ABSTRACT**

Vibration monitoring of rolling element bearings is probably the most established diagnostic technique for rotating machinery. Acoustic Emission (AE) Analysis is an extremely powerful technology that can be used within a wide range of applications of non destructive testing. Therefore, this paper investigates the detection methods using AE for rolling element bearings about low-speed. Two transducers, the accelerometer and acoustic emission sensor, are used to acquire data and the results are compared for the capacity of early fault detection

1. 서론

회전기계는 기계의 구조적 특성상 진동이 발생 하게 된다. 이러한 진동은 기계설비나 구성 요소에 외력으로 작용하여, 설비나 구성요소에 손상과 이상 현상을 유발한다. 만일 결함이 초기에 진단된다면 짧은 시간에 적은 비용으로 보수가 가능하기 때문에 안정성과 경제성 측면에서 중요하다. 이렇게 기계의 상태를 정상적으로 측정하고, 문제의 검출이나 경우에 따라서는 판별까지 수행하는 활동인 상태 감시(condition monitoring : CM)가 중요시 된다. 더욱이 설비의 고도화에 의해 생산 능력이 증가되면서, 생산 활동 정지, 설비복구의 손실이 막대하게 되어 가므로 설비를 최대한 사용한계까지 효과적으로 이용하기 위해 예지 보전의 개념이 산업체에서 중요시 되고 있다. 예지 보전은 상태기준보전(condition based maintenance : CBM)이라고도 하는데, 설비진단 기술이나 상태감시를 통해 설비의 상태를 파악하고, 이를 토대로 기계요소 발생한 결함을 조기에 감지하여, 결함의 진전을 예측하고, 적절한 시기에 적절한 보전을

수행하는 것을 말한다.

회전기계의 베어링 결함의 초기 검출을 CBM의 측면에서 아주 중요하다. 그러나 기존의 CM에서 사용하는 ACC센서를 이용한 방법은 CBM에서 사용하기에는 한계가 있다. 특히 저속 베어링의 경우 베어링의 결함에서 발생하는 충격량이 적기 때문에 더욱 검출하기 힘들다.

따라서 본 논문에서는 높은 감도를 가지고 있어 보다 넓은 영역에서 진동 측정이 가능한 AE센서와 기존의 ACC 센서를 이용하여 결함을 검출 하여 보았고, 그 결과를 비교하여 보았다.

2. 이론적 배경**2.1 AE(acoustic emission)란?**

음향 방출 (Acoustic emission)이란 고체가 변형 또는 파괴 시 발생하는 음을 탄성파로 방출하는 현상이며, 이 탄성파를 AE센서로 검출하고 비 파괴적으로 평가하는 방법을 AE법이라고 한다. AE는 재료가 파괴되기 이전부터 작은 변형이나 미세한 크랙(crack)에서 발생한 동적 에너지를 감지 하기 때문에 AE의 발생 경향을 진단하여 재료와 구조물의 결함 및 파괴를 발견 및 예상할 수 있다. 물질 내부의 탄성파를 측정에 이용하므로 물질의 감쇠 특성에 따라선 수십 미터나 전파된 후에도 감지가 가능 하다. 그래서 기존의 다른 비파괴 검사법처럼 대상 전체를 측정 할 필요가 없기

† 최병근, 경상대학교 기계항공학부
E-mail : bgchoi@gnu.ac.kr
Tel:(055)640-3059 FAX : (055)640-3188

* 국립 경상대학교 대학원 정밀기계공학과
mechanical engineering , Queensland University of
** Technology, Australia

때문에 대형 구조물이나 가동 상태에서도 측정 할 수 있다. 그러나 현재 AE센서로는 여러 가지의 음향 방출원이 있을 경우 구분하기가 어렵고, AE측정 이전에 있던 결함의 발견이 어려우므로 더욱 연구가 필요하다. 그러나 다양한 분야 및 본 논문에서 AE에 대하여 관심이 증가하는 이유는 극도로 높은 감도 때문이다. 기존에 진동 측정에 사용되고 있는 ACC의 경우 30 kHz 까지가 한계이지만, AE의 경우 수 백 kHz 까지 가능하므로 많은 잠재성을 가지고 있다.

2.2 베어링 결함 신호와 주파수

베어링의 결함은 회전에 의해 충격을 일으키고, 이는 진동을 유발한다. 베어링의 응답에서 주요 주파수는 반응 주파수와 주변 주파수 대역이다. 충격과는 볼이 결함 부분을 지나는 동안에 나타나는데 재료의 특성상 수 kHz 이상에서 나타난다.

베어링의 결함 주파수인 외륜의 볼 통과 주파수 (ball passing frequency of outer race: BPFO)와 내륜의 볼 통과 주파수 (ball passing frequency of inner race: BPFI)을 구하는 방법은 알려진 바와 같이 식 (1)과 같다.

$$BPFO = \frac{Nb}{2} \left(\frac{1 - Bd \cos \theta}{Pd} \right) \times RPM \quad (1)$$

$$BPFI = \frac{Nb}{2} \left(\frac{1 + Bd \cos \theta}{Pd} \right) \times RPM$$

2.3 데이터 처리 및 평가

기계의 상태 감시와 진단을 위해서는 신호를 측정하여, 그 데이터를 분석해야 하지만, 바로 측정된 데이터는 불필요한 성분이 많고, 목적이나 신호의 특성에 따라 분석이 편리하도록 하기 위해서는 데이터 처리가 필수적이다.

따라서 본 논문에서는 Fig. 1과 같은 과정으로 데이터를 처리 하였다.

먼저 AE와 ACC 센서를 이용하여 진동 신호를 취득 하였다. 그리고 측정된 진동 파형에 포함된 불필요한 성분이나 유해 잡음 성분을 제거하기 위한 신호의 전처리 과정을 거

친 뒤 시간 영역 해석이나 주파수 영역 해석을 통하여 진단에 필요한 증상인 신호의 특성을 추출하고, 평가 방법에 따라 데이터를 변화 하여 분석 하였다.

2.3.1 전처리

기계에서 발생하는 진동신호는 통상 여러 가지 원인에 의해 잡음(noise) 등이 포함 되어있다. 따라서 진단 시에는 필요한 주파수 대역의 정보만 추출하기 위해서 필터링(filtering)과 포락선 처리(enveloping)가 필요하다.

따라서 본 논문에서는 고대역 통과 필터 (high pass filter : HPF)사용하여 각 영역 별로 신호를 filtering 하였고, 필터에 의한 처리만으로는 한계가 있으므로 포락선 처리(enveloping)를 통하여 변조 주파수와 피 변조 주파수사이의 비가 큰 신호로부터 변조주파수 성분의 정보를 얻어 분석 하였다.

2.3.2 파라미터 추출

상태 감시 및 진단의 목적이나 신호의 특성에 따라 정밀 분석에 편하도록 각종 특징 파라미터를 추출하는 방법은 여러 가지가 있으나. 본 논문에서는 대표적인 3가지 방법 RMS, Skewness, Kurtosis를 사용 하였다.

실효치(rms : root mean square)는 평균치의 정보와 산포 정도의 정보(분산)가 포함되어 있고, 신호가 가지는 에너지의 평방근을 의미한다. 따라서 신호의 진폭의 크기, 즉 물리량을 직접 나타내는 값으로 가장 자주 이용한다. 현재 각 진동 규격에서 진동의 심각정도 기준으로 사용하고 있다.

왜도(Skewness)란 시계열신호에 대한 관측 값들의 확률 밀도함수 분포의 비대칭 정도와 방향을 나타내는 값을 말한다. 평균치를 중심으로 파형의 왜곡 도를 나타낸다.

첨도(kurtosis)란 시계열 신호의 확률밀도함수 분포가 갖는 첨예의 정도를 나타내는 척도이다. 평균, 표준 편차, 왜도가 모두 같더라도 데이터 분포 형태가 다른 경우가 있을 수 있으므로 데이터의 양적 구조를 나타내기 위해 관측 값들이 중심에 집중되는 정도를 나타내는 첨도가 필요하다.

2.3.3 평가 방법

여러 가지 평가 방법이 있지만 본 논문에서는 PR과 PI값으로 평가 하였다.

PR이란 식(2)와 같이 결함 주파수와 조화성분(harmonic)의 피크 값(peak value)의 합을 전체 값의 평균으로 나눈 값을 말한다.

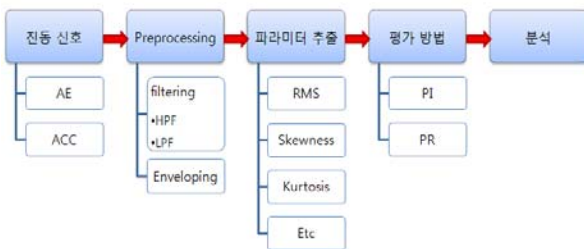


Fig.1 data processing

$$PR = \frac{N \times \sum_{j=1}^m P_h}{\sum_{k=1}^N A_i} \quad (2)$$

그리고 PI란 결함과 비결함의 차를 이용하여 크랙에 의한 진동의 크기를 알아보는 방법으로, 결함이 있을 때의 피크 값에 결함이 없을 때의 평균 피크 값으로 뺀 값을 dB로 표현한 것이다.

3. 실험 장치 및 실험 방법

3.1 실험 장치

실험은 Fig.2와 같이 Motor 와 gear box 그리고 각 input, load, test bearing부로 구성 하여 실험을 수행 하였다.

회전속도 조절을 용이하게 하기 위해 MTE 12 AL (220V, 50Hz, 1.5kW)의 motor를 사용하였고, 저속과 속도의 안정성을 위해 감속기(감속비 10:1)를 사용 하였다. input bearing부는 축을 지지 하고, load bearing부에 load cell 센서를 부착하여 일정한 하중 (load)을 부가하여 실험을 수행하였다. 그리고 test bearing부에 각각 ACC센서 (B&K)와 AE센서(R3a)를 test bearing case에 부착하여 실험을 수행하였다.

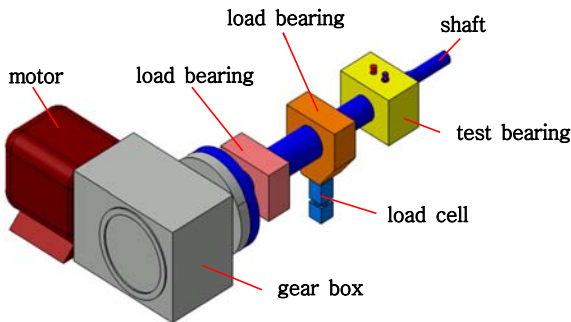


Fig.2 system of test about bearing fault



Fig.3 fault of bearing outer race

Fig. 3은 bearing의 outer race에 생성한 fault의 모습이다. 결함은 SKF N 307 bearing의 outer race에 인위적으로 fault1(미세 결함)과 보다 큰 fault2(결함)로 생성하여 실험을 수행 하였다.

3.2 실험 방법

ACC센서와 AE센서의 검출 능력을 비교하기 위해 test bearing부에서 동시에 측정 하였다. 그리고 실험 대상은 bearing의 outer race의 fault1, fault2로 실험을 수행 하였다. 그리고 Load 증가의 영향을 보기 위하여 각각 500N, 2000N, 5000N으로 주었고, 속도 변화의 영향을 보기 위하여 20rpm, 50rpm, 80rpm, 110rpm, 140rpm으로 속도를 변화하여 실험을 수행 하였다.

4. 실험 결과

4.1 ACC와 AE 센서의 검출 능력 비교

Fig. 4와 Fig. 5는 bearing의 outer race의 fault1에 Load는 5kN, 속도는 50rpm에서 AE센서와 ACC 센서로 측정하여 enveloping한 결과이다. 잡음을 제거하기 위해 각 구간별로 HPF를 하고, 검출 정도를 보기 위해 PR값을 표시 하였다. 각 그림에서 나타나는 녹색 점선은 베어링의 결함 주파수 성분인 BPFO를 나타낸다.

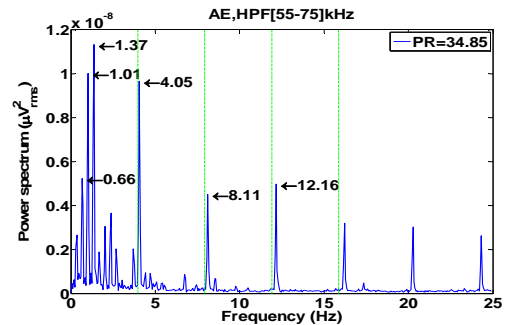


Fig. 4 Result of fault1 to AE at 50rpm & Load 5kN

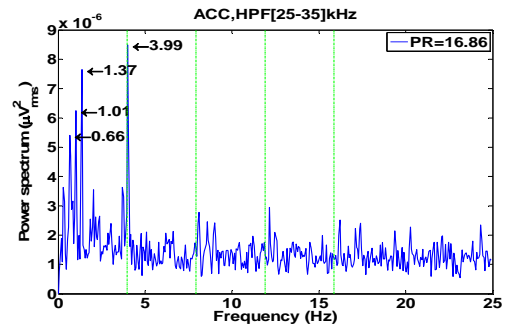


Fig. 5 Result of fault1 to ACC at 50rpm & Load 5kN

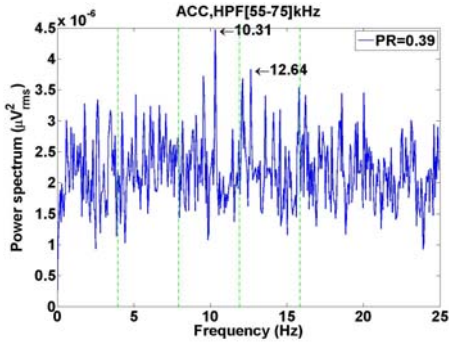


Fig. 6 Result of fault1 to ACC at 50rpm & Load 5kN

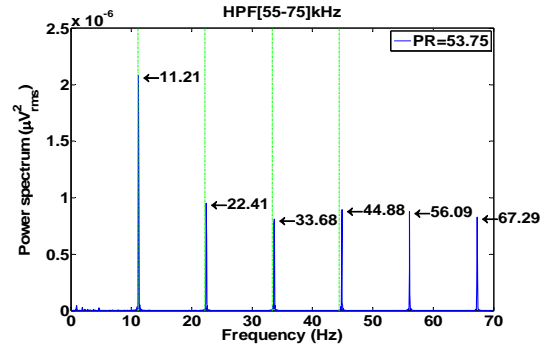


Fig. 7 Result of out race fault1 to AE at 140rpm & Load 5kN

Table. 1 Comparison of PR about HPF

sensor HPF	Load	AE			ACC		
		5kN	2kN	500N	5kN	2kN	500N
5~15 kHz		4.55	11.55	10.25	6.83	2.38	2.26
15~25 kHz		11.72	8.05	3.18	0.12	3.03	0.79
25~35 kHz		18.56	30.54	9.44	16.86	15.33	2.26
35~55 kHz		24.2	30.77	24.18	1.73	2.45	0.3
55~75 kHz		34.85	36.59	16.55	0.39	0.96	0.08
75~100 kHz		26.76	28.38	8.12	2.55	0.96	3.28

AE의 경우 베어링의 결함이 미세하지만, 베어링의 결함 주파수성분이 잘 검출된 것을 볼 수 있다. PR값을 보면 35 정도로 나왔다. 그러나 ACC는 결함 주파수가 검출이 안 되고 PR값도 AE에 비해 작은 것을 볼 수 있다.

Fig. 6은 fault1에 Load는 5kN, 50rpm으로 ACC 센서로 측정된 결과를 HPF를 55~75kHz로 한 결과이다. 이 결과를 보면 결함 주파수나 운전 주파수 등의 진동 검출의 특징을 찾아 볼 수 없다.

Table 1은 fault1에 50rpm에서 HPF를 센서와 load별로 비교한 것이다. 결과를 보면 AE의 경우 HPF가 55~75kHz, ACC는 25~35kHz일때 PR값이 가장 크다.

4.2 속도 및 Load에 따른 검출 능력 비교

Fig. 7과 Fig. 8은 fault1에 Load는 5kN, 속도는 140rpm에서 AE센서와 ACC 센서로 측정하여 enveloping 한 결과이다.

AE와 ACC 둘 다 결함 주파수가 검출되었고, PR값도 50rpm 보다 크게 나타나는 것을 볼 수 있다.

Fig. 9는 fault1의 결과를 rpm & Load별로 비교하여 PI값으로 표현한 것이다. 결과를 살펴보면 rpm와 Load가 증가 할수록 PI값이 증가 하는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 fault2에서 Load 5kN와 140rpm으로 하여 AE 센서로 측정된 결과이다. 결과를 살펴보면 fault1과 fault2의 차이는 찾아보기 힘들다.

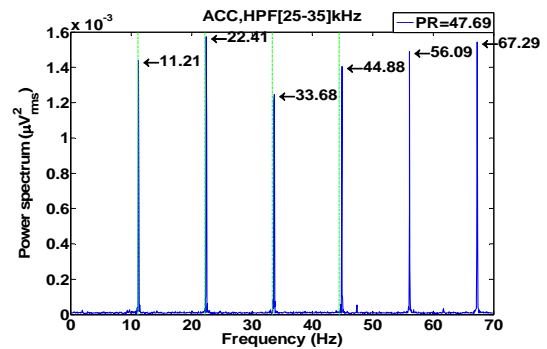


Fig. 8 Result of fault1 to ACC at 140rpm & Load 5kN

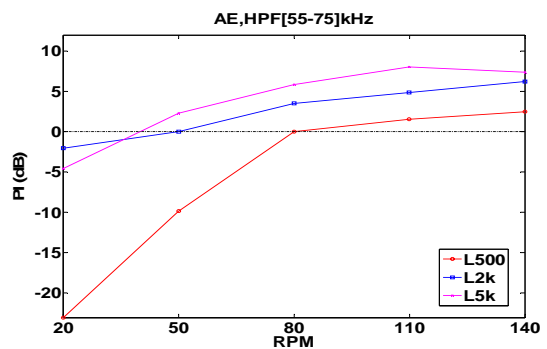


Fig. 9 result comparison of AE about rpm & Load

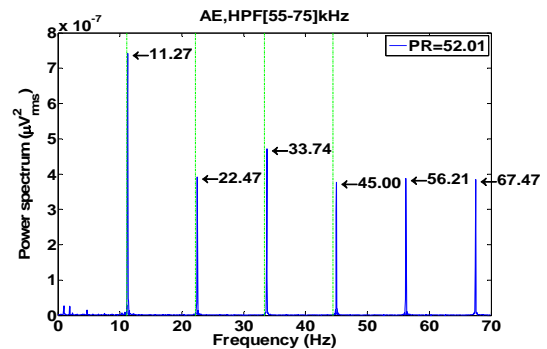


Fig. 10 Result of fault2 to AE at 140rpm & Load 5kN

5. 결론

저속 베어링의 결함은 발생하는 충격량이 적기 때문에 검출하기 힘들다. 그래서 높은 감도를 가진 AE센서를 이용하여 결함을 검출 하고, ACC와 비교하여 결함 검출 능력을 살펴보았다.

저속에서는 결함에 의한 탄성에너지가 작기 때문에 진동이 작아지고, 그로인해 ACC로는 검출하기 힘들었지만 AE는 물질 내부의 탄성파를 이용하기 때문에 잘 검출이 된 것으로 사료된다. 그리고 HPF를 비교한 결과, AE의 경우 HPF가 높은 주파수(55kHz이상)가, ACC는 낮은 주파수(30kHz이하)가 측정이 잘된다는 것을 알았다. 그리고 ACC는 HPF가 55kHz 이상에서, ACC의 감도가 30kHz이하 이므로, 진동의 특성을 보기 힘들었다. 그리고 rpm과 Load 별로 비교한 결과를 보면 AE는 rpm과 Load가 증가하면 결함에 의한 충격량이 증가 하므로 결함 검출이 잘되는 것을 보았다.

고속에서는 AE와 ACC 둘 다 잘 측정되어 AE의 장점을 찾아보기 힘들었다. 오히려 다른 진동 결함을 검출 할 수 있고, 정확한 평가 기준치를 가지고 있는 ACC가 더욱 효율적이다. 그러나 저속이나 높은 주파수의 진동 검출은 AE가 탁월하므로 CBM을 위한 결함의 초기 검출은 AE를 이용한 방법이 충분히 효과적이라고 사료된다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업, NURI(첨단기계산업기술혁신인력양성사업단)및 2단계 BK21의 지원으로 진행 되었다.

참 고 문 헌

(1) N. Tandon and A. Choudhury., 1999, A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defect in rolling element bearings, ITMME Centre, Indian Institute of Technology, India.

(2) Adbullah M. Al-Ghamd and David Mda., 2006 A comparative experimental study on the use of acoustic emission and vibration analysis for bearing identification and estimation of defect size, Mechanical Systems and Signal Processing, 1537-1571, Mechanical services Shops Department, Saudi Arabia

(3) 양보석, 2006, “기계설비의 진동 상태 감시 및 진단”, 도서 출판 이터비전.

(4) J. Shiroishi and Y. Li and S. Liang and T. Kurfess and S. Danyluk., 1997, Bearing condition diagnostics via vibration and acoustic emission measurements, Mechanical Systems and Signal Processing (1997) 11(5), 693-705, GWW School of Mechanical Engineering

(5) Andrew, K. S. Jardine and Daming, Lin., Dragan, Banjevic., 2006, "A review on machinert disgnostics and prognostics implementing condition-based maintenance", Mechanical System and Signal Processing ., Austria.

(6) N, Jamaludin and D. Mba, 2002, "Monitoring extremely slow rolling element bearings: part2", Mechanical System and Signal Processing., Austria.