회전기기 볼베어링의 외륜 결함 검출 기법 연구

정래혁 · 이병곤† · 이도환*
충북대학교 안전공학과 · *한국전력공사 전력연구원
(2009. 11. 16. 접수 / 2010. 5. 17. 채택)

Study on Detection Technique for Outer-race Fault of the Ball Bearing in Rotary Machinery

Rae-Hyuck Jeoung · Byung-Gon Lee† · Doo-Hwan Lee*
Department of Safety Engineering, Chung-Buk University
*Korea Electronic Power Research Institute
(Received November 16, 2009 / Accepted May 17, 2010)

Abstract : Ball bearings are one of main components that support the rotational shaft in high speed rotary machinery. So, it is very important to detect the incipient faults and fault growth of bearing since the damage and failure of bearing can cause a critical failures or accidents of machinery system. In the past, many researchers mainly performed to detect the bearing fault using traditional method such as wavelet, statistics, envelope etc in vibration signals. But study on the detection technique for bearing fault growth has a little been performed. In this paper, we verified the possibility for monitoring of fault growth and detection of fault size in bearing outer-race by using the envelope powerspectrum and probabilistic density function from measured vibration signals.
Key Words : ball bearing, outer-race, envelope signal processing, power-spectrum, probabilistic density function, fault growth, faulty characteristic frequency, rotary machinery

1. 서 론

오늘날 산업이 급속도로 발전함에 따라 펌프, 터빈, 공작기기 등과 같은 고속 회전기기에 대한 수요가 점차 확대되고 있으며, 다양한 분야에서 대형화, 고속화, 정밀화 되어 널리 활용되고 있다. 하지만 이로 인해 회전기기의 고장 및 파손과 같은 사고에 대한 안전성 확보 문제가 최근 중요하게 대두되었다. 회전기기 고장과 관련된 원인에는 여러 가지가 있으나 그들 중 회전축을 지지하는 베어링 손상이 높게 나타났으며, 주로 과도 부하나 부적절한 기기 운전이 주요 원인인 것으로 조사되었다. 베어링은 회전기기의 주요 구성 부품 중 시스템의 운전성과 안전성에 결정적인 영향을 미치는 주요 부품이기 때문에 기기 운전간 베어링 결함 발생을 조기에 검출하여 조치를 취하거나 결함의 진전 상태를 진단하여 교체 및 유지보수와 같은 업무를 시기적절하게 수행하는 것이 매우 중요하다. 요즘 산업계에서는 베어링 결함을 검출하기 위해 진동신호로부터 결함 특징 파라미터를 추출하여 분석하는 방법이 널리 사용되고 있는데, 특히 시간영역(Time-domain),주파수영역(Frequency-domain),시간-주파수영역(Time- Frequency), 캡스트럼 방법 등이 주로 이용된다. 베어링과 관련된 기존 연구들 중 베어링 결함 특성 주파수 검출 및 이와 관련된 신호처리 분야에서는 Chaturvedi[1] 등이 Adaptive Noise Canceller 기법을 회전기기의 베어링 결함 검출에 적용 하였으며, Taylor[2]는 주파수영역에서 스펙트럼 해석을 통해 결함 특성 주파수 검출가능성 여부를 조사하였다. 이외에 McFadden[3]은 공진주파수 영역에 대한 대역통과 필터와 포락신호 처리기법을 이용한 베어링 결함 검출 방법을 제안하였다. 또한 베어링 결함성장 특성과 관련된 연구에서는 Abdullah M.[4]가 진동신호를 이용한 시간영역분석에서 RMS 및 Kurtosis와 같은 특성값들에 대해 통계량분석법을 적용하여 베어링 결함 크기에 따른 신호특성 변

† To whom correspondence should be addressed.
bklee@chungbuk.ac.kr

화를 연구하였다. 하지만 결함이 크게 발생한 경우 특성값의 경향이 일정치 않아 검출이 어렵다는 문제점을 보였다. R. RUBINI.[5]은 베어링 조기결함 및 결함성장에 대해서 포락신호처리기법과 웨이블릿 분석기법을 적용하여 웨이블릿 분석기법이 결함 주파수 검출에 효율적임을 입증하였다. 그러나 웨이블릿 분석시 요구되는 차수 및 분해 레벨 등과 같은 설정요소가 해석 결과에 상당한 영향을 미치고 다양한 전문적 지식이 요구되기 때문에 사용이 어렵다는 문제점을 안고 있다.

이에 본 연구에서는 회전기기 지속 운전시 베어링 외륜에서 발생한 결함 부위의 진전 상태를 지속적으로 감시할 수 있는 좀 더 쉬운 접근 방안을 제안하였다. 이를 위해 포락신호처리기법과 파워스펙트럼분석 및 확률밀도함수[6] 분석 기법이 적용되었다.

2. 이론적 고찰

2.1. 베어링 결함주파수

일반적으로 구름베어링은 Fig. 1과 같이 2개의 링(내륜, 외륜) 사이에 전동체인 볼과 케이지가 삽입되어 있는 구조이다. 볼은 내륜 및 외륜에 일정한 접촉각을 가지고 접촉되어 있으며 볼과 볼 사이에는 상호간 접촉을 차단하기 위해 케이지가 삽입되어 있다.

베어링 내륜은 일반적으로 축의 회전속도와 동일하게 회전하기 때문에 내륜 및 외륜과 접촉해 있는 볼도 회전하게 된다. 그러므로 베어링을 구성하는 요소들 중 어느 하나에 결함이 존재하는 경우에는 결함 부위와의 접촉으로 인해 주기적인 충격력이 발생하게 된다. 이때 베어링과 내륜의 회전속도가 각각 다르기 때문에 결함부위에 따라서 각기 다른 결함 주파수를 갖는다. 손상 부위에 따른 주파수는 베어링의 회전속도와 기하학적 형상 및 치수로부터 다음과 같이 계산될 수 있다[7].

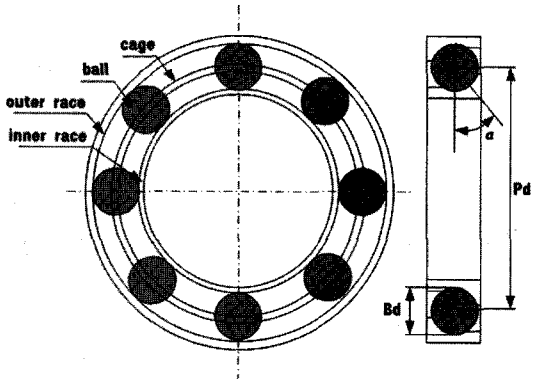


Fig. 1. Schematic diagram for geometry and dimension of angular contact ball bearing.

- 내륜 회전 주파수 (Rotating frequency)

$$Fr = \frac{N}{60} \text{ (Hz)} \quad (1)$$

- 케이지 주파수(Fundamental Train Frequency)

$$FTF = \frac{Fr}{2}\left(1-\left(\frac{D_b\cos\alpha}{D_p}\right)\right) \text{ (Hz)} \quad (2)$$

- 내륜 통과 주파수(Ball Pass Frequency of Inner race)

$$BPFI = \frac{Fr}{2}N_b\left(1+\left(\frac{D_b\cos\alpha}{D_p}\right)\right) \text{ (Hz)} \quad (3)$$

- 외륜 통과 주파수(Ball Pass Frequency of Outer race)

$$BPFO = \frac{Fr}{2}N_b\left(1-\left(\frac{D_b\cos\alpha}{D_p}\right)\right) \text{ (Hz)} \quad (4)$$

- 볼자전 주파수(Ball Spin Frequency)

$$BSF = \frac{D_p}{2D_b}Fr\left(1-\left(\frac{D_b\cos\alpha}{D_p}\right)^2\right) \text{ (Hz)} \quad (5)$$

2.2. 신호 처리

가속도 센서에서 측정된 진동 신호에는 전기적 및 기계적 원인에 의해 노이즈가 섞여 있다. 이를

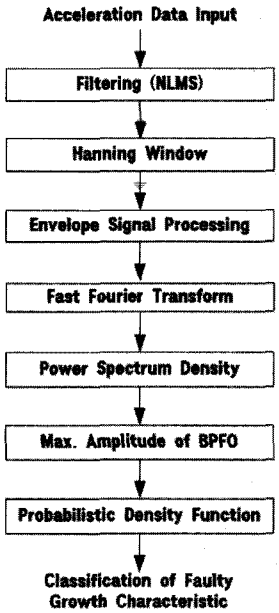


Fig. 2. Signal processing procedure of acceleration signal.

제거하기 위해 NLMS 알고리즘을 이용하였으며, 또한 신호의 밀도를 높여 데이터에 대한 정확도를 높이기 위해 절대치회로를 통과시켰다. 그런 후 반송파에 진폭 변조되어 합성된 신호로부터 변조파를 복조하기 위해 힐버트 변환(Hilbert transform)을 이용하였다. 신호에 대한 전처리 과정이 완료된 후 결함에 의한 주파수성분을 추출하기 위해 파워스펙트럼 분석을 수행하였으며, 결함 크기별 결함 특성주파수의 최대 진폭 성분 경향 변화를 확인하기 위해 결함 특성 주파수에 대한 확률밀도함수 분석을 수행하였다. 진동 신호에 대한 전반적인 신호처리 절차는 Fig. 2와 같다.

3. 실 험

3.1. 실험장치 및 방법

본 연구를 위해 Fig. 3과 같이 실험장치가 제작되었다. 구동부에는 출력이 3HP(2.2kW)인 3상유도전동기가 사용되었으며, 솔리드 커플링을 통해서 모터동력이 Test section부에 전달되도록 하였다. Test section부는 베어링하우징(Bearing housing)과 로터(Rotor) 및 축(Shaft)으로 구성되어 있으며, 모터쪽 베어링하우징에는 결함베어링(Fault bearing)이 모터 반대쪽에는 정상베어링(Normal bearing)이 장착되도록 하였다.

베어링 결함에 의한 진동을 측정하기 위해 샘플링 주파수가 1Hz~25kHz인 가속도 센서가 사용되었으며, 베어링하우징의 상부와 측면에 2축방향(축과 수평: axis-direction, 축과 수직: radial-direction)으로 각각 설치되었다. 각종 센서에서 측정된 신호는 하나의 PXI 기반으로 구성된 DAQ 모듈을 통해서 수집되도록 하였다. 특히, 진동 신호에 대해서는 입력분해능이 24bits이고, 채널당 최대 샘플링율이 204.8kS/s이며, 엘리어싱(Aliasing) 현상 방지기능이 있는 PXI-4495 모듈이 사용되었다.

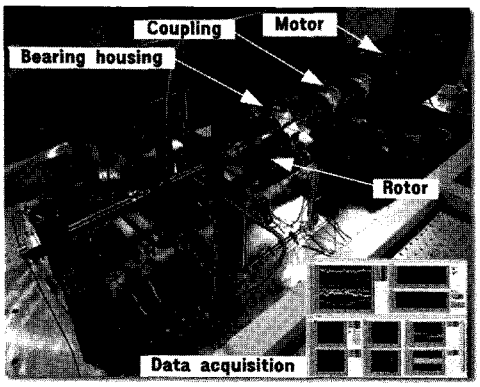


Fig. 3. Experimental set-up for bearing fault detection test.

3.2. 베어링 결함 시편

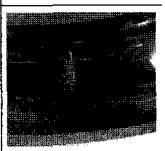
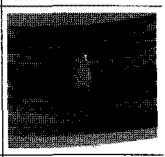
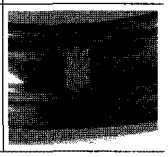
본 연구에서는 볼베어링의 유형들 중 일반적으로 산업계에서 널리 사용되고 있는 FAG사 7306B 모델 단일열 앵귤러 컨택트 볼베어링(Single-row angular contact ball bearing)이 사용되었으며, 베어링에 대한 상세 치수는 아래의 Table 1과 같다.

본 연구는 베어링 외륜 결함만을 대상으로 하기 때문에 베어링 결함 시편 외륜 표면에 Table 2와 같이 각각의 크기별로 인위적인 결함이 가공 처리되었다. 또한 베어링 외륜 결함에 볼 및 내륜에 의한 결함 특성이 혼합되는 것을 방지하기 위해서 시험 전 각각에 대한 상태를 확인하였다.

Table 1. Design specifications of test bearing

Lists	Values
Number of Ball (Nb)	11ea
Ball diameter(Bd)	13mm
Pitch diameter (Pd)	51.4mm
Contact angle (α)	40deg
Bore diameter	30mm
Outer diameter	72mm
Dynamic load rating	33,000N
Static load rating	22,100N

Table 2. Faulty size of inner race and faulty configuration

Type	Bearing No.	Faulty size of outer race	Faulty Configuration
Normal bearing	NB	-	
Faulty bearing	BOF#1	0.5mm×7mm (Length×Width)	
	BOF#2	2mm×7mm (Length×Width)	
	BOF#3	3mm×7mm (Length×Width)	

4. 결과 및 고찰

모든 시편에 대해서 동일 조건하에 5회씩 시험이 수행되었으며, 매 시험 마다 5초 정도 데이터가 측정되었다. 진동 신호에 대한 샘플링 개수는 초당 50,000개이며, 실험 결과는 아래와 같다.

4.1. 결함 크기별 진동 신호 특성

구동기의 회전속도 1,800rpm에서 결함이 없는 정상 베어링과 외륜 결함이 있는 베어링을 교대로 각각 장착하여 실험한 결과 Fig. 4 및 5와 같이 축방향과 반경방향 진동 신호가 발생되었다. 결함 베어링의 경우 정상 베어링에서 보이지 않는 펄스 형상의 주기적인 Bursting신호가 관찰되었고, 외륜 결함이 커질수록 결함부와 볼 사이의 접촉 충격력이 증가하여 Bursting신호의 진폭 크기가 점차 커지는 것을 볼 수가 있었다. 이에 Bursting신호 발생 시간 간격을 확인한 결과, 7.7msec($1/F_{BPOF}$) 마다 발생하였

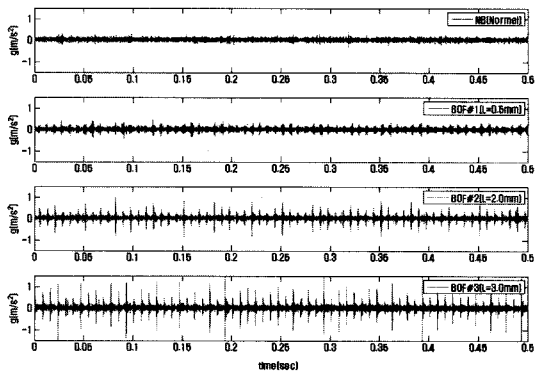


Fig. 4. Vibration signal in the radial-direction for faulty bearing and normal bearing.

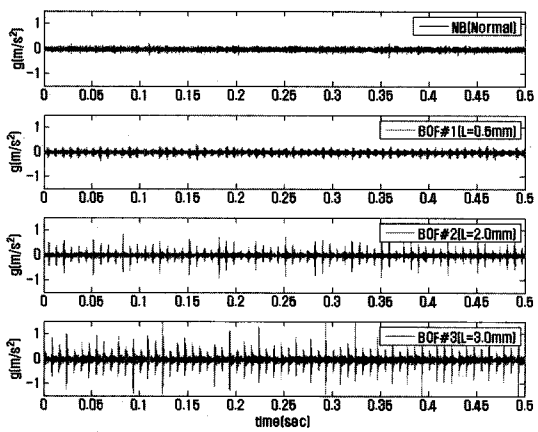


Fig. 5. Vibration signal in the axis-direction for faulty bearing and normal bearing.

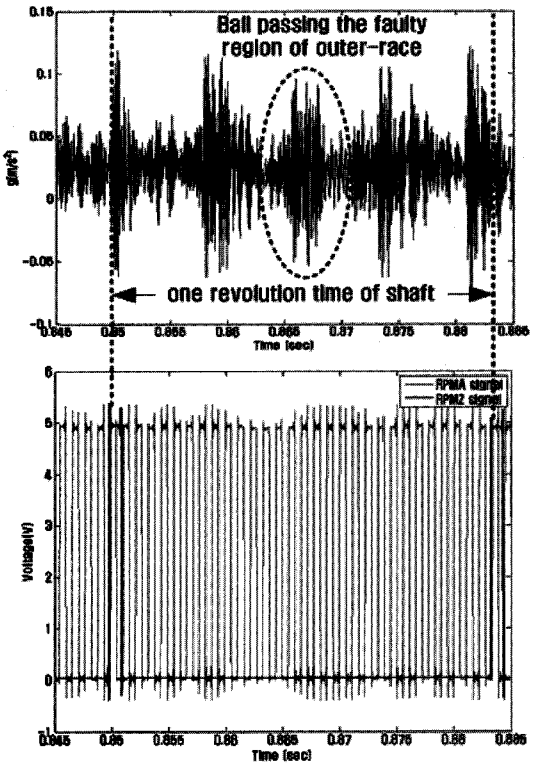


Fig. 6. Number of ball passing the faulty region during unit revolution.

으며, 베어링 외륜 결함 주파수 계산식 (4)에서 계산된 결과(7.5msec)와 0.2msec 정도 시간차가 있으나 거의 일치하는 것으로 나타났다. 여기서, 시간차 발생은 베어링에서 볼 회전 시 발생하는 슬리핑(slipping) 현상과 내륜 급회전에 의한 스피닝(spinning) 현상에 의한 것으로 판단된다.

이외에도 그림 Fig. 6에서 나타낸 가속도 및 엔코더 측정 RPMA(축 1회전당 30펄스), RPMZ(축 1회전당 1개펄스) 신호에 대한 시간영역분석을 통해 축 1회전 시 결함 부위를 통과하는 볼 개수에 대한 검출 가능성이 확인되었으며, 본 실험에서는 대략 4개 정도의 볼이 1회전 마다 외륜 결함 부위를 통과하였다.

4.2. 포락 신호의 파워스펙트럼

포락 신호 처리된 진동 시계열 신호에 대해 파워스펙트럼을 분석한 결과, Fig. 7 및 8과 같이 결함이 있는 모든 베어링의 경우 정상베어링에서 나타나지 않는 결함 특성 주파수성분 130.1Hz(1×BPFO)가 나타났다. 또한 앞서 보여준 시계열 신호의 Bursting 진폭 변화 결과와 마찬가지로 결함 크기에 따라서 파워스펙트럼 레벨이 점점 증가하였다. Fig.

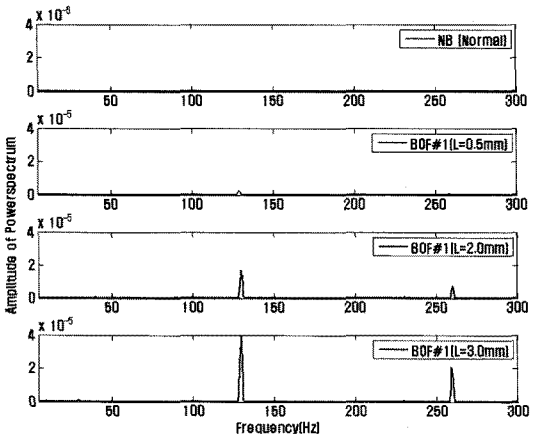


Fig. 7. Envelope powerspectrum(radial-direction).

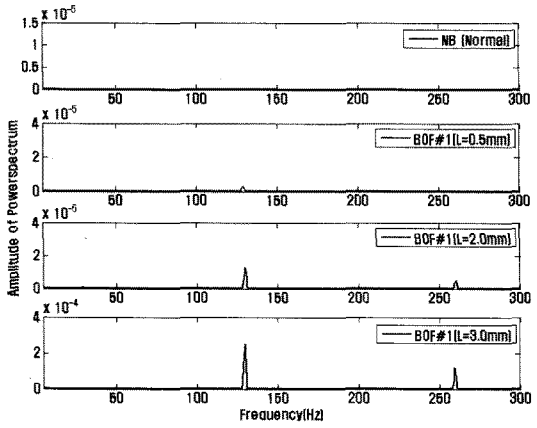


Fig. 8. Envelope powerspectrum(axis-direction).

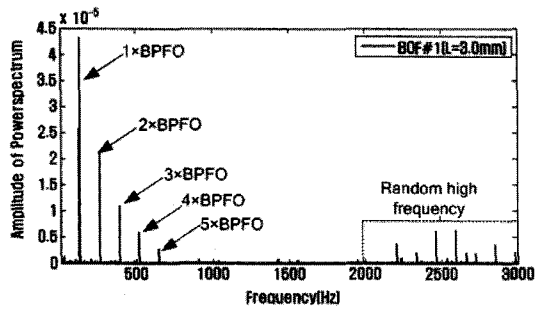


Fig. 9. Envelope powerspectrum at fault size=3.0mm.

9는 주파수 영역을 고주파 영역까지 확장하여 나타낸 파워스펙트럼 분석 결과로서, 베어링 과도 결함 시 발생 신호 특성인 3×BPFO 이상의 조화성분과 랜덤 고주파 성분(Random high frequency)이 뚜렷하게 나타났다. 이러한 결과들을 통해서 베어링 외륜 결함 및 결함 크기 변화에 따른 모사 실험이 정상적으로 수행되었음이 확인되었다.

4.3. 확률밀도함수 분포

앞서 나타낸 파워스펙트럼 분석 결과로부터 결함 특성 주파수 성분의 최대 에너지 레벨을 각각 추출하여 결함 크기에 따른 확률밀도함수(PDF) 분포를 Fig. 10과 11에 나타냈다. 그림에서 보면, 축방향과 반경방향 모두에서 결함 크기에 따라 손상부위의 충격에너지가 증가하여 결함 특성 주파수 성분의 에너지 레벨 분포가 모두 왼쪽에서 오른쪽으로 이동함을 보여주고 있다. 이것은 결함에 의한 진동 에너지 변화 상태를 나타낸 것으로서 베어링 결함 크기에 대한 변화를 정성적으로 감시할 수 있는 좋은 표식이 될 수 있음을 의미한다. 또한 Fig. 10의 축방향 진동신호에 대한 PDF분포 변화에서는 정상 베어링과 결함베어링 각각의 결함 크기별 분포가 명확하게 분리되었으나 Fig. 11의 반경방향 진동신호에 대한 PDF분포 변화에서는 일부 겹치는 영역(Normal & L=0.5mm, L=0.5mm & L=2.0mm)이 존재하는 것으로 나타났다. 이것은 베어링 결함 발생 시 축방향 진동신호를 이용하는 것이 반경방향 진동신호를 이용하는 것보다 베어링 결함 크기 변화 감시에 효율적이라는 것을 의미한다.

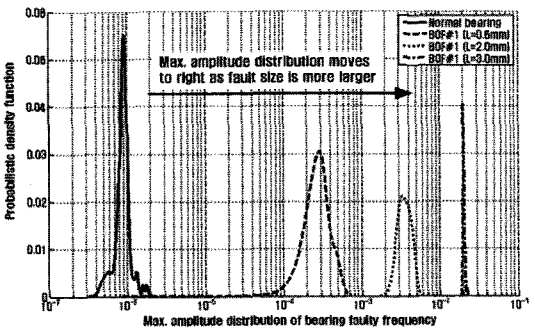


Fig. 10. Variation of PDF distribution of max. amplitude changed with the fault size(axis-direction).

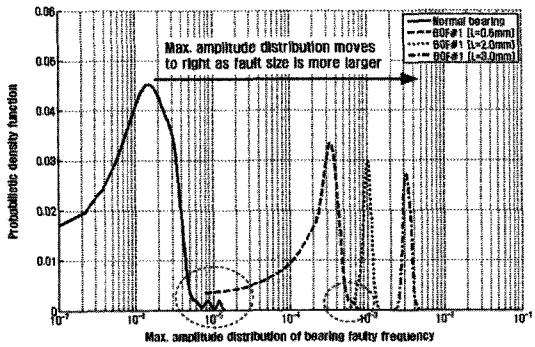


Fig. 11. Variation of PDF distribution of max. amplitude changed with the fault size(radial-direction).

5. 결 론

본 연구에서는 베어링 외륜의 결함 진전 상태에 대한 모델 모사 실험을 통해 결함 감시 방안을 제안하고자 진동신호를 이용하여 결함 감시가 가능한지 여부를 확인하였다. 이를 위해 정상베어링에 인위적인 결함을 크기별로 제공하여 베어링 외륜 결함 모델을 모사하였고, 포락신호처리와 파워스펙트럼분석 및 확률밀도함수 분포를 이용하여 결함 크기에 따른 특성 변화를 확인하였다. 연구에 대한 주요 결론은 다음과 같다.

1) 진동 신호를 이용하여 베어링에 결함이 있는 경우 정상베어링과 달리 기하학적 형상 및 운전주파수에 의해 결정되는 Bursting 신호가 발생된다는 사실을 확인하였다.

2) 포락신호처리 및 파워스펙트럼 분석 결과로부터 베어링 외륜 결함에 의해 발생되는 주파수 성분 확인이 가능하고, 결함부 크기가 증가함에 따라 결함 주파수 성분의 최대 에너지 레벨이 점점 증가된다는 사실을 확인하였다.

3) 결함주파수 성분의 최대 에너지 레벨에 대한 확률밀도분포 변화를 통해 베어링 결함 발생 및 결함 진전 상황이 충분히 감시될 수 있음을 확인하였다. 또한 베어링 외륜 결함을 감시하고자 할 경우 베어링하우징부에서 측정된 반경방향 진동신호보다는 축방향 진동신호가 좀 더 우수하다는 사실을 확인하였다.

감사의 글 : 본 논문은 2008년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1) G. Chaturvedi, "Adaptive Noise Cancelling and Condition Monitoring", J. of Sound and Vibration, 1981.
2) J. I. Taylor, "Identification of Bearing Defects by Spectral Analysis", Journal of Mechanical Design, 1980.
3) P. D. McFadden, J. D. Smith, "Model for the vibration produced by a single point defects in the rolling element bearing", J. of Sound and Vibration, 1984.
4) Abdullah M., Al-Ghamd and David Mba, "A comparative experimental study on the use of acoustic emission and vibration analysis for bearing defect identification and estimation of defect size", ELSEVIER, 2005.
5) R. RUBINI, U. MENEGHETTI, "Application of the Envelope and Wavelet Transform analysis for the Diagnosis of Incipient Fault in Ball Bearing", Mechanical Systems and Signal Processing, 2000.
6) S. Zhang, J. Mathew, L. Ma and Y. Sun, "Best basis-based intelligent machine fault diagnosis", ELSEVIER, 2004.
7) Diagnosis of Rolling Element Bearing Faults using Envelope analysis, SpectraQuest, 2009.