

굴림 베어링 요소의 결함 검출시 음향 인텐시티 기술 적용에 관한 실험적 연구

이 준 서* · 차 경 옥**

An Experimental Study of the Application of the Sound-Intensity Technique on the Detection of Defect in Rolling Bearings

J. S. Lee* · K. O. Cha**

Key words : Sound-intensity technique(음향 인텐시티 기술), Sound-pressure technique(음압 기술), Rolling-bearing(회전 베어링), Cross-spectrum(크로스 스펙트럼), Detectability(검출력)

Abstract

The two-microphone sound-intensity technique has been used for the detection of defects in radially loaded ball bearings. The difference in the sound-intensity levels measured for bearings with no defect and for those with intentionally introduced defects of different sizes in their elements under various operating conditions of loads and speeds is demonstrated. The results show that the detectability of an outer-race defect is much better than that of an inner-race or ball defect. It is difficult to detect defects at lower speeds. Sound-pressure measurements were also performed for comparison, and it is shown that the detectability of defects by sound-intensity measurements is better than that by sound-pressure measurements.

1. 서 론

최근 공작기계가 고속화되고 그 주변 시스템이 거대화, 복잡화됨에 따라 시스템 구성요소에 대한 각각의 고장이나 결함은 전체 시스템의 기능 정지를 초래하여 생산에 커다란 차질을 가져올 뿐만 아

니라, 제품의 정밀도에 직접적인 영향을 미치게 된다. 이 경우, 특히 공작기계 시스템의 보전과 정밀도 유지라는 관점에서 기계 각각의 고장을 조기에 발견하고, 가혹한 조건에서도 엄밀한 정밀도를 유지하기 위한 공작기계 주축용 베어링의 고장 및 결함 검출에 대한 문제점 해결은 당연한 중요한 과제

* 충청대학 메카트로닉스학부 기계설계과(원고접수일 : 99년 3월)

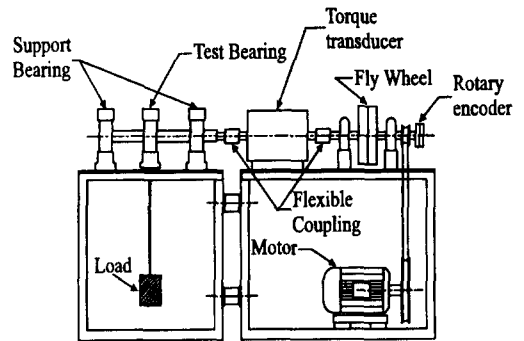
** 명지대학교 기계공학과

로 되고 있다. 베어링 고장진단에 관한 연구로는 진동해석, 온도 및 소음 변화, 오일 분석법 등을 이용하는 방법이 있다. 이 중에서 진동 감시는 아마도 가장 일반적이고 효과적인 기술이다. 그러나 신호의 취급 및 처리 등의 용이성이나 외부 노이즈를 고려하여 볼 때, 음향(소음) 측정은 이들 결합의 검출을 위해 사용될 수 있다. 베어링을 위한 결합 검출로서 음향학적 소음 측정을 사용한 연구 문헌은 매우 적다. 몇 가지 연구에서 음압 측정은 그들의 탐지가 만일 적당한 조치로 다른 소음원을 고립시킬 수 없을 경우, 베어링의 소음보다 다른 소음원에 의해 더 영향을 받을 수 있는 단점이 있지만 축으로부터 하중을 받는 볼 베어링 결합의 검출에 유용하다는 것을 보여준다.⁽¹⁾ 이와 관련된 다른 연구자⁽²⁾에 의하면 회전-요소 베어링의 결합 검출에서 음향 인텐시티 측정의 응용이 보고되어졌다. 그러나 음향 인텐시티 측정에서 베어링의 다양한 요소에 알고 있는 크기의 결합에 대한 영향은 문헌으로 보고된 것은 없다. 그러므로 본 연구에서는 하중과 속도의 다양한 운전 조건하에서 볼 베어링 요소에서 결합 검출을 위한 음향 인텐시티 측정이 유용함을 증명하는 관점으로 수행되었으며, 이러한 음향 인텐시티 측정 결과는 음압 측정 결과와 비교된다.

음향 인텐시티는 단위 면적을 통과하는 음 에너지 유동의 평균비로 정의한다. 이것은 순간 음압과 입자 속도의 시간 평균값으로 얻어진 것으로서 음향 인텐시티는 음향 입자 속도의 특성 때문에 스칼라량인 음압과는 달리 벡터량이 된다. 입자속도는 매우 가까이 위치한 두 개의 마이크로폰의 압력 구배를 측정함으로써 얻어지며, 주파수 영역에서의 음향 인텐시티는 2채널 FFT 해석기를 사용하여 두 개의 마이크로폰 신호사이의 크로스 스펙트럼의 허수부분으로부터 얻을 수 있다.⁽³⁾ 음향 인텐시티 탐침자는 두 개의 마이크로폰의 축을 따라서 0° 위치에서 최대이고 탐침자 축에 90°에서 최소를 가지는 코사인 방향 특성을 가진다.⁽⁴⁾ 일상의 공간에서 음향 인텐시티 측정법은 베어링의 모든 방향에서 거의 같은 응답을 가진 음압의 측정보다 더 나은 결합 검출을 할 것이라 기대된다.

2. 실험장치 및 방법

실험에 사용된 시험장치는 Fig.1(a)에 나타내었다. 회전축 위의 내부에 원형형태로 회전하는 측정 베어링과 같은 두 개의 지지 베어링이 설치되었다. 또한 회전부와 동력부 사이에 토크 센서를 설치하였으며, 연결은 플렉서블 커플링(Flexible coupling)을 사용하여 연결하였다. 동력부는 3마력의 AC모터에 의해 구동하였다. 실험장치의 측정부와 구동부에서 진동을 최대한 억제하기 위하여 두 부분으로 분리되어 설치하였고, 방진판에 의해 진동을 감소시켰다. 시험 베어링(깊은 홈 볼베어링, SKF 6002)은 지지 베어링의 중심, 베어링 하우스 내부에 설치했다. 또한, 시험 베어링은 Fig.1(b)에서 볼 수 있듯이 지렛대 배치에 의해 반경 방향 하중이 전해진다. 모터와 지지 베어링의 소음을 제거하기 위하여 시험 베어링을 제외한 모든 부분의 표면에 방탄유리 틀을 거품 종이로 싸서 보호했다.



(a) Bearing test rig.

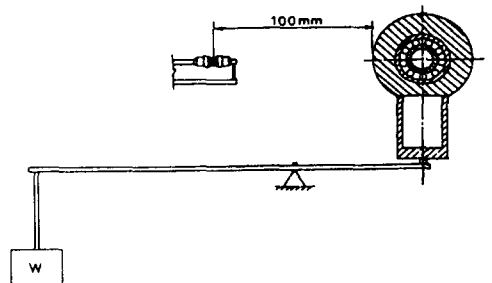


Fig. 1 Experimental set-up of rolling-bearing test

음향 인텐시티 탐침자는 시험 베어링 하우징에서 100mm 거리의 반경 방향으로 음향 인텐시티의 표준이 되는 위치에 설치하여 측정하였다(Fig.1(b)). 장치의 속도는 0rpm~12,000rpm으로 연속 변화할 수 있으며 100kgf 이상의 반경 방향 하중을 시험 베어링에 적용할 수 있다. 본 실험에서는 15mm의 보어를 가진 SKF 6002 베어링을 사용하였다. 원형의 결함은 이들 베어링의 레이스웨이(race way)나 볼에 생기게 했다. 150 μ m, 250 μ m과 500 μ m의 결함 직경과 50 μ m, 100 μ m과 150 μ m의 깊이를 가진 결함의 크기가 다른 베어링을 준비했다. 측정 전에 1,1,1-트리클로에틴으로 청소했고, 그리스 0.35g을 각 베어링에 작용했다.

전체적인 측정장치의 계략도는 Fig.2에 나타내었다. 음향 인텐시티 측정은 면 접촉 두 개의 마이크로폰 탐침자와 협대역에서 음향 인텐시티를 직접 나타낼 수 있는 2채널 FFT 해석기로 일상의 공간에서 수행하였다. 12mm떨어진 위치에 분리된 위상-결함 콘텐서 마이크로폰을 음향 인텐시티 탐침자로 사용하였다.

음향 인텐시티 기록은 그래픽 레코더로 얻었다. Igarashi¹⁾에 의해 보고되었던 것처럼 소음이 측상의 위치보다 반경에서 더 높은 것을 얻었다. 모든 음향 인텐시티 측정은 반경 방향의 고정된 위치에서 수행되었고, 각 베어링에서 100 스펙트럼의 선형 평균을 얻었으며, 음압 레벨도 동시에 기록했다. 250Hz에서 6.4kHz까지의 주파수 범위는 음향 인텐시티와 음압의 전체 레벨을 얻기 위해 사용되었다. 최대 6.7dB의 압력-인텐시티 값이 측정되었으나 대부분의 측정은 5dB이하이다.

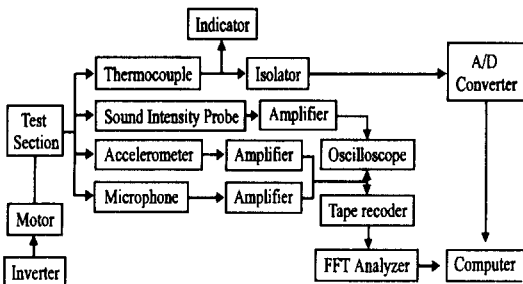


Fig. 2 Schematic diagram of data acquisition

3. 결과 및 고찰

3.1 음향 인텐시티 측정 결과

결함이 없는 베어링의 음향 인텐시티와 가장 큰 크기(즉 반경 500 μ m과 깊이 150 μ m)의 결함을 가진 베어링의 음향 인텐시티는 20kgf에서 100kgf 범위의 반경 방향 하중과 100rpm~1500rpm의 속도에서 측정하였다. 하중 60kgf과 1500rpm에서 얻어진 전형적인 음향 인텐시티 스펙트럼은 Fig.3에 나타내었다. 이것은 400Hz와 600Hz사이, 780Hz주변에서 주된 값을 보이며, 이것들은 결함에서 충격에 의한 가진으로 발생한 회전축이 있는 베어링 시스템의 공명 주파수들 때문에 발생

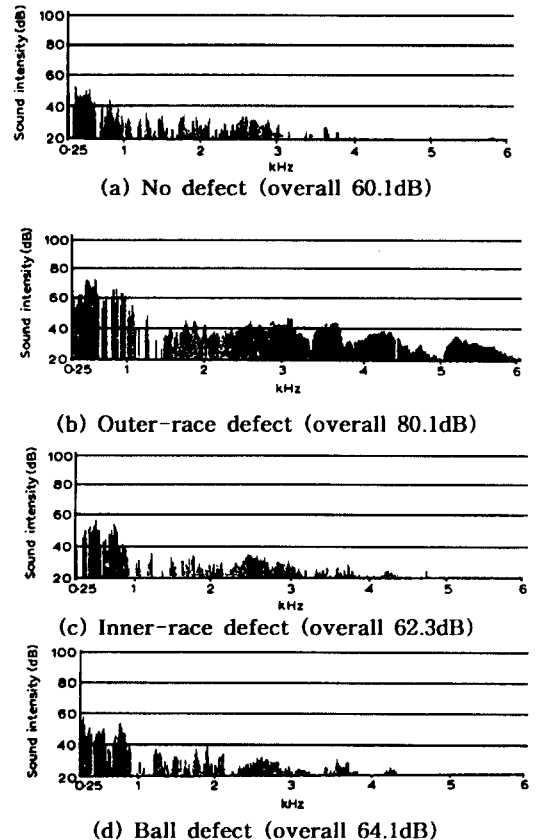


Fig. 3 Positive sound-intensity spectrum of bearing with no defect and with defects of 500 μ m diameter and 150 μ m depth at 60kgf load and 1500r/min

한 것이라 할 수 있다. 이것은 impact hammer로 베어링 하우징의 윗부분을 때리고, 가속도계로 하우징 바닥에서 응답을 측정할 때 관찰되는 주파수 응답 함수로 확인된다. 주파수 응답 함수는 600Hz와 756Hz에서 피크를 나타내지만, 결함이 있는 베어링의 음향 인텐시티 스펙트럼은 결함 때문에 4KHz이상의 주파수에서 피크를 나타낸다. 하지만 Fig.3(a)에서와 같이 이상이 없는 베어링에서는 이와 같은 주파수 성분이 나타나지 않는다.

결함이 없는 베어링과 결함이 있는 베어링에서 하중과 속도에 비례한 전체 음향 인텐시티의 그림은 각각 Fig.4과 Fig.5에 나타내었다. Fig.4에서 결함이 없는 베어링의 경우에 음향 인텐시티는 40kgf까지 증가하지만 하중이 더욱 증가할 경우 상수로 남고, 이러한 유사한 결과는 결함이 없는 베어링에서 음압 측정의 경우로 보고되어 왔다.⁽⁶⁾ 외부 레이스(race)에 결함이 있을 경우 음향 인텐시티 레벨은 하중이 증가할수록 감소하지만, 반면 내부 레이스(race)와 볼에 결함이 있는 경우에는 거의 상수로 남아있다. 외부 레이스(race)에 결함이 있을 때 음향 인텐시티 레벨은 비슷한 크기의 내부 레이스(race)에 결함이 있는 경우와 볼에 결함이 있는 경우보다 사실상 높게 나타내기 때문에

외부 레이스(race)의 결함을 찾는 것이 가장 쉽다. Fig.5에서는 결함이 없는 경우와 결함이 있는 베어링의 음향 인텐시티는 속도에 따라 점진적으로 증가함을 나타내고 있다. 그러나 결함이 없는 경우와 내부 레이스(race) 및 볼에 결함이 있는 경우에서, 베어링을 시험한 동안에 1000rpm까지 레벨의 증가를 이루고 있다. 결함이 없는 베어링에 있어서는 3000rpm~4000rpm이상의 속도에서 보고되어진 것이 있다.⁽⁶⁾ 결함 검출은 Fig.5에서도 나타나듯이 고속에서 소음 레벨에 영향을 끼치지 않는다. 사실, 결함 검출은 400rpm이하의 속도에서는 불충분하다. 외부 레이스(race)에 결함이 있을 경우와 결함이 없는 베어링 사이의 음향 인텐시티 레벨의 다른 점은 속도가 증가함에 따라 계속적으로 증가한다는 것이다.

Fig.6은 결함의 직경과 깊이가 다른 경우의 음향 인텐시티를 측정된 것이다. 이것들은 외부 레이스(race)나 볼에서 결함의 직경이 200 μ m보다 작으면 결함 탐지가 안되거나 미비하다라는 것을 보여준 것이다. 외부 레이스(race) 결함의 음향 인텐시티 레벨은 결함의 직경과 깊이가 각각 250 μ m과 100 μ m보다 클 때 점진적으로 적으로 증가한다.

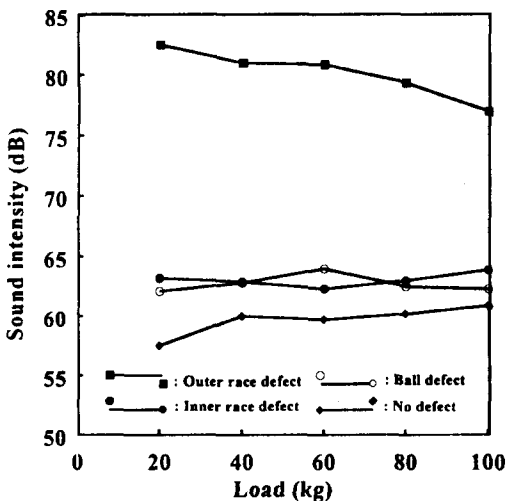


Fig. 4 Overall sound-intensity at 1500rpm.
(Defect size : diameter 500 μ m, Depth : 150 μ m)

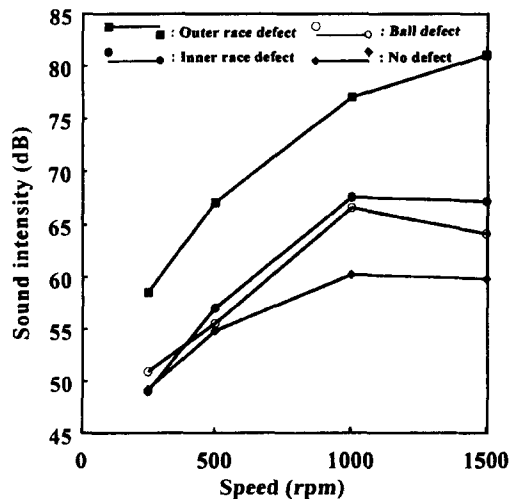
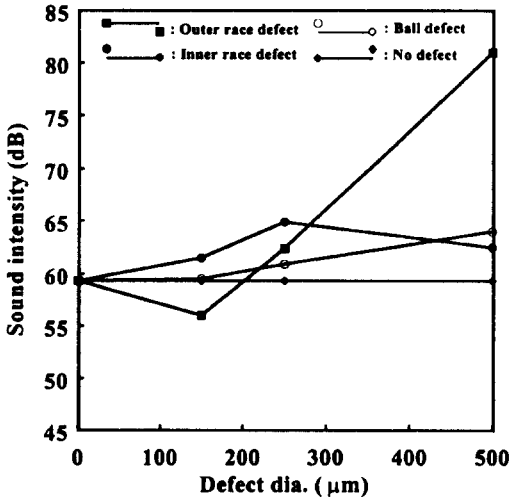
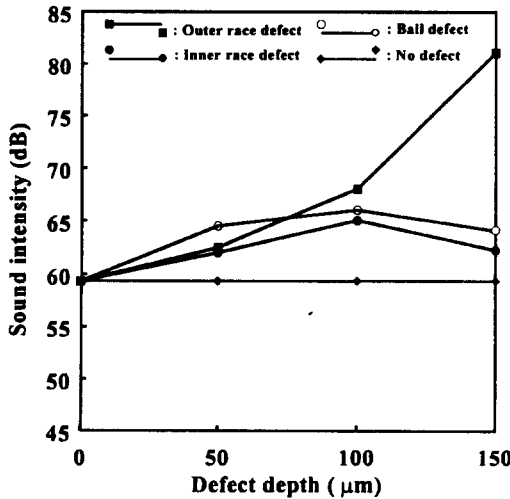


Fig. 5 Overall sound-intensity at 60kgf load.
(Defect size : diameter 500 μ m, Depth : 150 μ m)



(a) Defect depth : 150μm

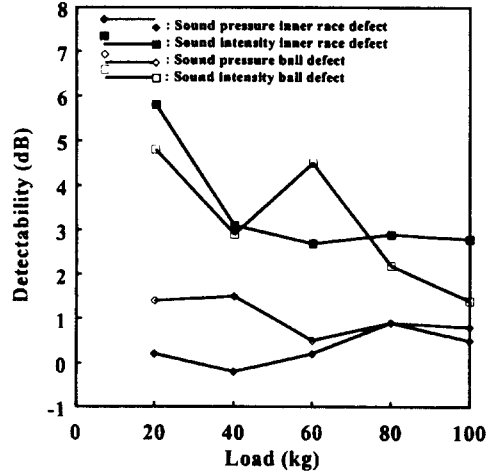


(b) Defect depth : 500μm

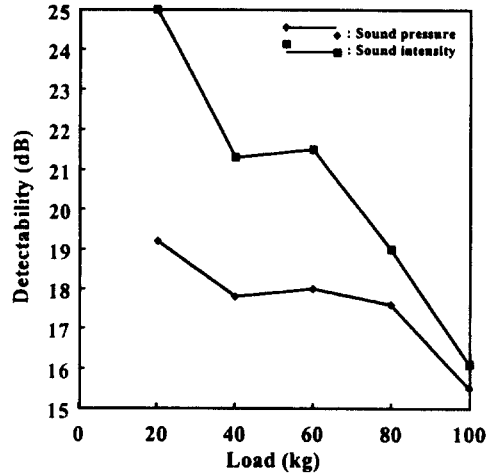
Fig. 6 Overall sound-intensity at 60kgf, 1500rpm

3.2 결함검출을 위한 음향 인텐시티와 음압 레벨의 비교

Fig.7~Fig.10에 나타낸 음향 인텐시티와 음압 측정의 결과는 결함이 있는 경우와 없는 경우의 레벨에서 차이를 확인하는 결함 검출의 형태이다. Fig.7(a)와 7(b)는 다른 하중에서 레이스(race)와



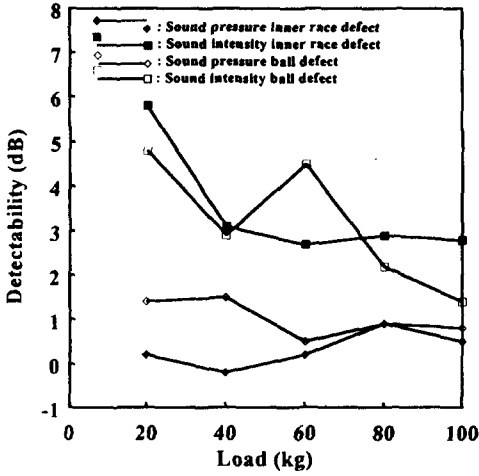
(a) Inner-race and ball defects at 1500rpm(Defect size : diameter 500μm, depth 150μm)



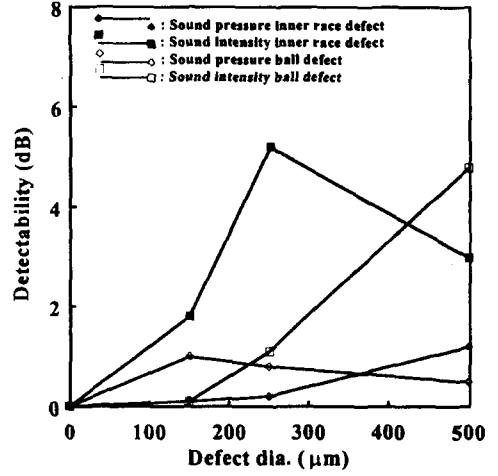
(b) Outer-race defects at 1500rpm(Defect size : diameter 500μm, depth 150μm)

Fig. 7 Defect detectability

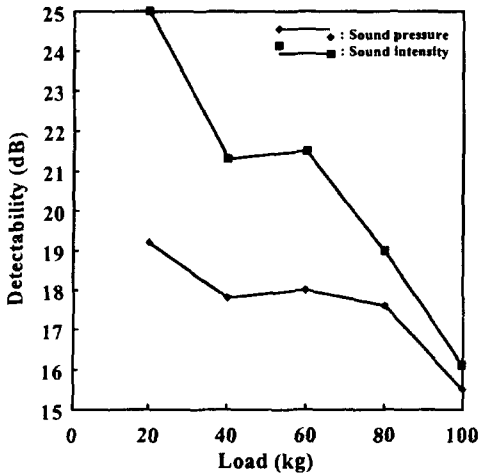
볼 결함의 검출을 나타내고 있다. 보통 음향 인텐시티 측정을 통한 결함 검출은 하중 증가에 따라 감소한다. 음향 인텐시티 측정의 결함 검출은 음압 측정을 통해 결함을 검출하는 것보다 좋다. Fig.8(a)처럼 음압 측정은 약 300rpm 이하에서 결함의 검출이 안되기 때문에 약 650rpm보다 낮은 속도에서 내부 레이스(race)와 볼 결함을 검출할 수 없다. 또한 Fig.8(b)와 같이 외부 레이스(race)



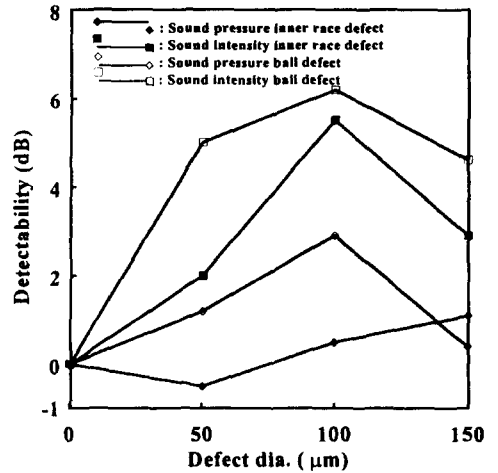
(a) Inner-race and ball defects at 60kgf load (Defect size : diameter 500 μ m, depth 150 μ m)



(a) Defect depth : 150 μ m



(b) Outer-race defects at 60kgf load (Defect size : diameter 500 μ m, depth 150 μ m)



(b) Defect diameter 500 μ m

Fig. 8 Defect detectability

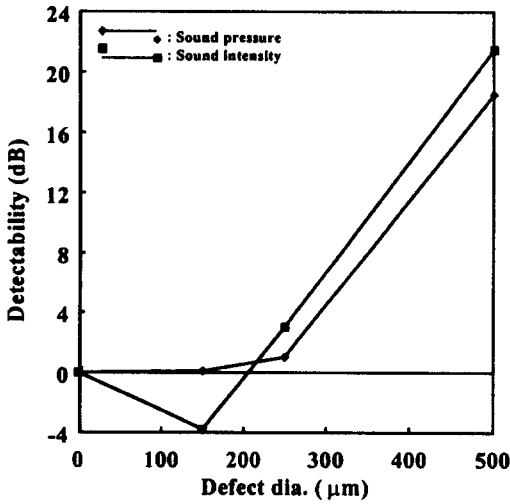
Fig. 9 Defect detectability of inner-race and ball defects at 60kgf, 1500rpm

의 결합 검출은 음향 인텐시티와 음압이 속도가 증가할수록 증가한다.

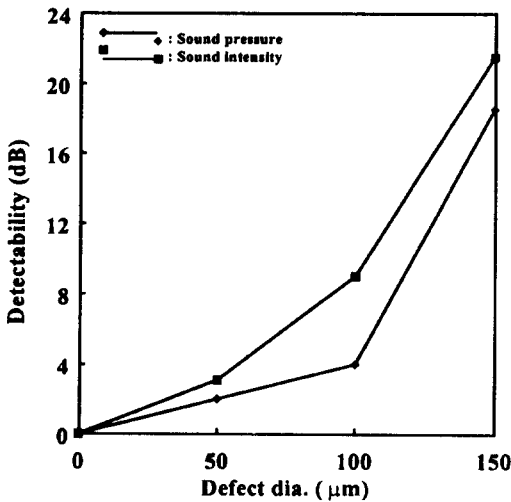
음향인텐시티 측정에 따른 결합 측정은 거의 모든 실험에서의 사용된 속도 범위를 통한 음압 측정에 따른 결합 검출보다 좋다. 보통 Fig.9와 Fig.10은 음향 인텐시티가 다른 결합 크기에서 음압 측정을 통한 결합 검출보다 좋다는 것을 나타낸다.

4. 결 론

본 실험에 따른 결론은 다음과 같다. 하중과 속도의 변화에 따른 볼 베어링에서 결합의 검출을 위한 음향 인텐시티 기술의 유용성은 입증되었다. 결합이 있는 베어링의 음향 인텐시티 주파수 스펙트



(a) Defect depth 150 μm



(b) Defect diameter 500 μm

Fig. 10 Defect detectability of outer-race defects at 60kgf, 1500rpm

림은 회전축이 있는 베어링 시스템 공명에 의한 것이므로 400Hz와 600Hz, 780Hz사이에서 중요한 피크를 포함하고 있다. 또한, 4KHz이상의 주파수에서 피크는 결함이 있는 베어링에서만 관찰이 된다. 외부 레이스(race)에서 결함의 검출은 내부 레이스(race)나 볼 결함의 검출보다 좋지만 보통

결함 검출은 하중이 증가할수록 감소하며 외부 레이스(race)에 결함이 있는 경우에는 결함 검출이 속도가 증가할수록 증가한다.

음향 인텐시티 측정은 연구에 사용된 하중과 속도 범위에서 음압 측정보다 좋은 편이다. 그러나, 낮은 속도에서는 결함의 검출은 어렵다. 음향 인텐시티와 음압에서 각각 약 300r/min과 650r/min보다 낮은 속도는 베어링에서 결함 검출을 할 수 없다.

참고문헌

1. Igarashi, T. and Yabe, S., "Studies on the vibration and sound of defective rolling bearings(Second report : Sound of ball bearings with one defect).", Bull. JSME, 26, pp.1791~8, 1983
2. Kim, P. Y., "A review of rolling-element bearing health monitoring(I), Preliminary test results on current technologies.", In Proceedings of Machinery Vibration Monitoring and Analysis Meeting, New Orleans, LA, USA, pp.127~37, 1984
3. Fahy, F. J., "Measurement of acoustic intensity using the cross-spectral density of two microphone signals.", J. Acoust. Soc. Am., 62, pp.1057~9, 1977
4. Gade, S., "Sound intensity and its application in noise control.", Sound & Vibr., 19(3), pp.14~26, 1985
5. Jayaram, V. D. and Jarchow, F., "Experimental studies on ball-bearing noise.", Wear, 46, pp.321~6, 1978
6. Lalwani, R. J., "Some aspects of ball-bearing noise.", In Proceedings INTER-NOISE 73, pp.171~4, 1973
7. S. Gade, K. B. Ginn, O. Roth and M. Brock, "Sound power determination in highly reactive environments using sound intensity measurements.", Proc. INTER-NOISE 83, pp.1047~1054, 1983
8. J. Y. Chung, "Cross-spectral method of measuring acoustic intensity without error caused by instrument phase mismatch.", J. Acoust. Soc. Am., 64, pp. 1613~1616, 1978