

음향 인텐시티를 이용한 결함이 있는 베어링의 특성에 관한 실험적 연구

이해철*, 김명균 (명지대학교 대학원 기계공학과),
안기순 (인덕대학 기계과), 차경옥 (명지대학교 기계공학과)

An Experimental Study on the Characteristic of Bearings with a Defect using the Sound-Intensity Technique

C. H. Lee*, M. K. Kim (Graduate School, Myongji Univ.),
K. S. An (In-Duk College), K. O. Cha (Myongji Univ.)

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. A change in the intensity frequency spectrum because of the defects is observed. 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. 서론

최근 기계 상황 감시는 공장 거대화 에 따른 유용성을 위하여 낮은 유지비와 보다 나은 생산성 및 안전성에 대한 고려가 증가되고 있다. 기계 고유의 특성은 기계의 여러 가지 요소들, 즉 기어, 베어링, 커플링, 축 등이 원활하게 운전하는데 의존한다. 특히, 롤링 베어링은 상황 감시 기술을 요구하는 기계의 중요한 성분이다. 기계의

회전부에서 사용되고 있는 롤링 베어링은 유한개의 전동체를 사이에 두고 하중을 받기 때문에, 진동 및 소음을 발생하기 쉬운 단점에 있다. 최근 기계가 고속화되고 그 주변 시스템이 거대화, 복잡화됨에 따라 기계 시스템 구성요소에 대한 각각의 고장이나 결함은 전체 시스템의 기능 정지를 초래하여 생산에 커다란 차질을 가져올 수 있다. 따라서 몇몇의 상황-감시 기술 자체는 현재 회전-요소 베어링에서 결함 검출을 위해 사용되어진다. 베어링의 이상진단에 관한 연구로서는 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 이들의 결함 검출을 위해 사용될 수 있다. 베어링을 위한 결함 검출로서 음향학적 소음 측정을 사용한 연구 문헌은 매우 적다. 음압 측정은 그들의 탐지가 만일 적당한 조치로 다른 소음원을 고립시킬 수 없을 경우, 베어링 소음보다 다른 소음원에 의해 더 영향을 받을 수 있는 단점이 있지만, 축(shaft) 상에서 하중을 받는 볼 베어링의 결함 검출에 유용하다는 것을 나타내기도 한다.¹⁾ 또한 이에 대한 관련 연구자들²⁾에 의하면 회전-요소 베어링의 결함 검출에서 음향 인텐시티 측정의 응용이 보고되기도 하였다. 그러나, 음향 인텐시티 측정에서 베어링의 다양한 요소에

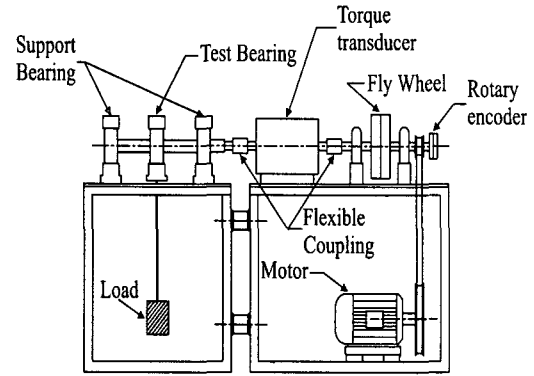
알고 있는 크기의 결함에 대한 영향은 문헌으로 보고된 것은 거의 없다.

본 연구는 하중과 속도의 다양한 운전 조건으로부터 다른 볼 베어링 요소에서 알고 있는 크기의 검출된 결함을 위한 음향 인텐시티 측정이 유용함을 증명하는 관점으로 수행되었으며, 음향 인텐시티 측정의 결과는 음압 측정의 결과와 비교하고자 한다. 음향 인텐시티는 단위 면적을 통과하는 음 에너지 유동의 평균비로 정의한다. 그것은 순간 음압과 입자 속도의 시간 평균곱으로 얻어진 것으로서, 음향 인텐시티는 음향 입자 속도의 벡터 특성 때문에 벡터량이 된다(스칼라량인 음압과는 달리). 그러므로 본 실험에서의 입자속도는 매우 가까이 위치한 두 개의 마이크로폰의 압력구배를 측정함으로써 얻을 수 있으며, 주파수 영역에서의 음향 인텐시티는 2채널 FFT 해석기를 사용하여 두 개의 마이크로폰 신호사이에서 교차-스펙트럼의 허수부분으로부터 얻을 수 있다.³⁾ 음향 인텐시티 탐침자는 0° 위치에서 최대이고(즉, 두 개의 마이크로폰의 축을 따라서) 탐침자 축에 90° 에서 최소를 가지는 코사인 방향 특성을 가진다.⁴⁾ 베어링 결함 검출시에 음향 인텐시티 측정법은 모든 방향에서 같은 응답특성을 나타내는 음압측정법보다 더 나은 결과를 기대할 수 있다.

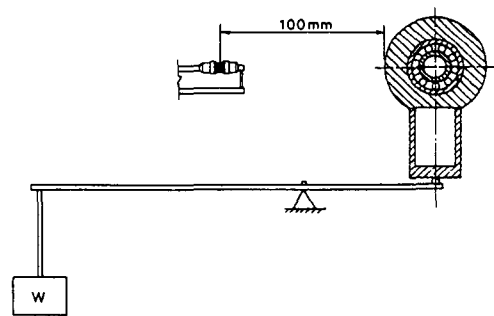
2. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 시험장치를 Fig.1(a)에 나타내었다. 회전축 위의 내부에 원형형태를 회전하는 측정 베어링과 같은 두 개의 지지 베어링이 설치되었다. 또한 회전부와 동력부 사이에 토크 센서가 설치되고, 연결은 Flexible coupling을 사용하여 연결하였다. 동력부는 3마력의 AC 모터에 의해 구동하였으며, 실험장치에서 측정부와 구동부는 진동을 최대한 억제하기 위하여 두 부분으로 분리되어 설치되었고, 방진판에 의하여 진동을 감소시켰다. 시험 베어링(깊은 홈 볼베어링, SKF 6002)은 지지 베어링의 중심, 베어링 하우징 내부에 설치했다. 또한, 시험 베어링은 Fig.1(b)에서 볼 수 있듯이 지렛대 배치에 의해 반경 방향 하중이 전해진다. 모터와 지지 베어링

의 소음을 제거하기 위하여 시험 베어링을 제외한 모든 부분의 표면에 방탄유리 틀을 거품 종이로 싸서 보호했다. 음향 인텐시티 탐침자는 하우징으로부터 100mm 거리에 반경 방향인 시험 베어링 하우징에서 음향 인텐시티 표준을 측정할 곳에 설치했다(Fig.1(b)).



(a) Bearing test rig.



(b) Loading arrangement and sound-intensity probe position

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

장치의 속도는 0~12,000rpm으로 연속적인 변화가 가능하고, 100kgf 이상의 반경 방향 하중을 시험 베어링에 적용할 수 있다. 본 실험에서는 15mm의 보어를 가진 SKF 6002 베어링이 사용됐다. 원형의 결함은 이들 베어링의 마찰면이나 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, 그리

스 0.35g을 각 베어링에 작용했다.

전체적인 측정장치의 개략도는 Fig.2에서 보는 것과 같다. 인텐시티 측정은 면접촉 두 개의 마이크로폰 탐침자와 협대역에서 음향 인텐시티를 직접 나타낼 수 있는 듀얼-채널 FFT analyzer로 일상의 공간에서 수행되었다. 12mm떨어진 위치에 분리된 위상-결합 콘덴서 마이크로폰은 인텐시티 탐침자에 사용되며, 음향 인텐시티의 기록은 그래픽 레코더에 의해 얻었고, Igarashi에 의해 보고되었던 것처럼 소음이 축 상의 위치보다 반경에서 더 높은 것을 얻었다¹⁾.

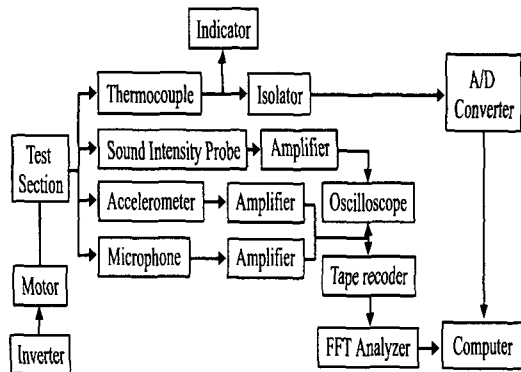


Fig.2 Schematic diagram of data acquisition

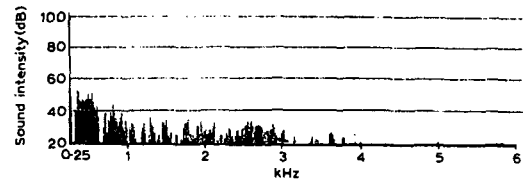
모든 인텐시티 측정은 반경 방향의 고정된 위치에서 수행되었고, 각 베어링에서 100 스펙트라의 선형 평균을 얻었다. 음압 레벨도 동시에 기록했다. 250Hz에서 6.4kHz까지의 주파수 범위는 음향 인텐시티와 음압의 전체 레벨을 얻기 위해 사용되었다. 최대 6.7dB의 압력-인텐시티 값이 측정되었지만, 대부분의 측정은 5dB이하이다.

3. 결과 및 고찰

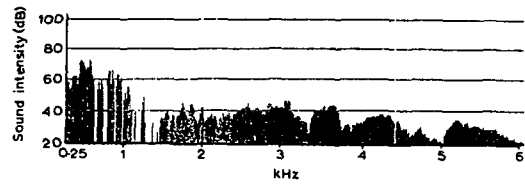
3.1 음향 인텐시티 측정 결과

결함이 없는 베어링의 음향 인텐시티와 가장 큰 크기(즉 반경 500 μ m와 깊이 150 μ m)의 결함을 가진 베어링의 음향 인텐시티는 20kgf에서 100kgf 범위의 반경 방향 하중과 100~1500rpm의 속도에서 측정되었다. 하중 60kg과

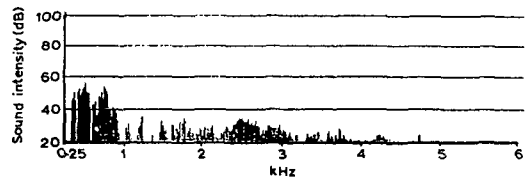
1500rpm에서 얻어진 전형적인 음향 인텐시티 스펙트라는 Fig.3에 표시하였다.



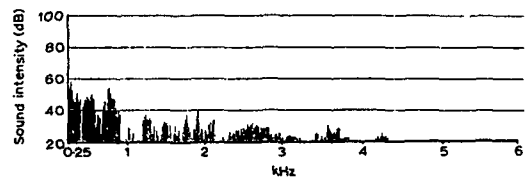
(a) No defect (overall 60.1dB)



(b) Outer-race defect (overall 80.1dB)



(c) Inner-race defect (overall 62.3dB)



(d) Ball defect (overall 64.1dB)

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

이것은 400과 600Hz사이와 780Hz 주변에서 주된 피크를 보이며, 그 이유는 결함에서 충격에 의한 가진으로 발생한 회전축이 있는 베어링 시스템의 공명 주파수들 때문에 발생한 것이라고 볼 수 있다. 이것은 임팩트 해머로 베어링 하우징의 윗부분을 때리고, 가속도계로 하우징 바닥에서 응답을 측정할 때 관찰되는 주파수 응답 함

수로 확인된다. 주파수 응답 함수는 600Hz과 756Hz에서 피크를 보여준다. 결함이 있는 베어링의 음향 인텐시티 스펙트라(Fig.3)는 결함 때문에 4kHz이상의 주파수에서 피크를 나타낸다. 한편 이들 주파수의 성분은 이상이 없는 베어링의 스펙트럼에서는 나타나지 않는다(Fig.3(a)). 결함이 없는 베어링과 결함이 있는 베어링에서 하중과 속도에 비례한 전체 음향 인텐시티의 그림은 각각 Fig.4과 Fig.5에 주어진다. Fig.4의 결함이 없는 베어링의 경우에 인텐시티는 40kgf까지 증가하고 하중이 더욱 증가하면 상수로 남는다. 유사한 결과는 결함이 없는 베어링에서 음압 측정의 경우로 보고되어 왔다⁵⁾.

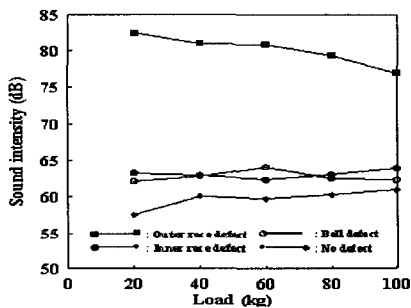


Fig.4 Overall sound-intensity at 1500r/min. (Defect size : diameter 500 μ m, Depth : 150 μ m)

외부 마찰면에 결함이 있는 경우에 음향 인텐시티 레벨은 하중이 증가할수록 감소하고, 이에 반하여 내부 마찰면과 볼에 결함이 있는 경우에는 거의 상수로 남아있다. 외부 마찰면에 결함이 있을 때 인텐시티 레벨은 비슷한 크기의 내부 마찰면에 결함이 있는 경우와 볼에 결함이 있을 때보다 사실상 높게 나타나고 이 때문에 외부 마찰면의 결함을 찾는 것이 가장 쉽다.

결함이 없는 경우와 결함이 있는 베어링의 음향 인텐시티는 Fig. 5에 표시된 것처럼 속도에 따라 점진적으로 증가한다. 그러나 결함이 없는 경우와 내부 마찰면과 볼에 결함이 있는 경우에서, 레벨의 증가는 베어링을 시험한 동안에 1000rpm까지이다. 결함이 없는 베어링에 대한 문헌은 3000rpm~4000rpm이상의 속도에서 보고되어진 것이 있다^{5),6)}. 결함 검출은 Fig.5에서도 나타나듯이 고속에서 소음 레벨에 영향을

끼치지 않는다. 사실 결함 검출은 400rpm이하의 속도에서는 불충분하다. 외부 마찰면에 결함이 있는 경우와 결함이 없는 베어링 사이의 음향 인텐시티 레벨의 다른 점은 속도가 증가함에 따라 계속적으로 증가한다는 것이다.

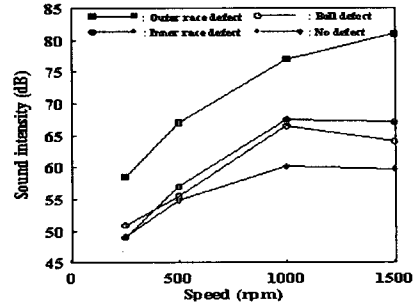
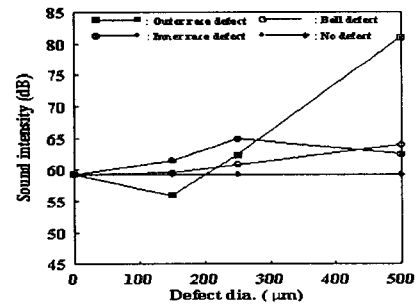
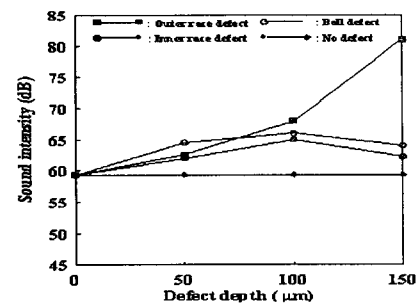


Fig.5 Overall sound-intensity at 60kgf load. (Defect size : diameter 500 μ m, Depth : 150 μ m)



(a) Defect depth : 150 μ m



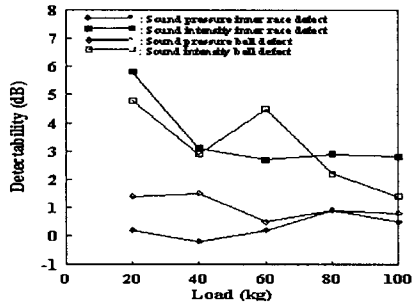
(b) Defect diameter : 500 μ m

Fig.6 Overall sound-intensity at 60kgf, 1500r/min

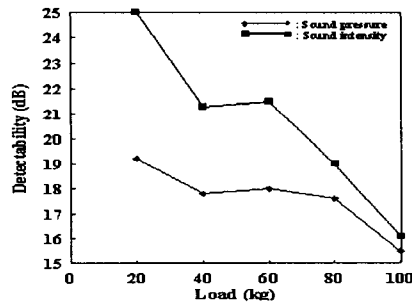
Fig.6는 결함의 직경과 깊이가 다른 경우의 음향 인텐시티를 측정 한 것이다. 이것들은 외부 마찰면이나 볼에서 결함의 직경이 $200\mu\text{m}$ 보다 작으면 결함 탐지가 안되거나 미비하다라는 것을 보여준다. 외부 마찰면 결함의 음향 인텐시티 레벨은 결함의 직경과 깊이가 각각 $250\mu\text{m}$ 및 $100\mu\text{m}$ 보다 클 때 점진적으로 증가한다.

3.2 결함검출을 위한 음향 인텐시티와 음압레벨의 비교

Fig.7~Fig.10에 나타낸 음향 인텐시티와 음압 측정의 결과는 결함이 있는 경우와 없는 경우의 레벨에서 차이를 확인하는 결함 검출의 형태이다.



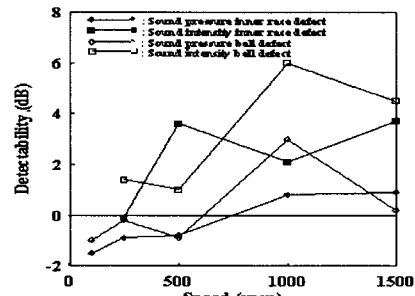
(a) Inner-race and ball defects at 1500r/min
(Defect size : diameter $500\mu\text{m}$, depth $150\mu\text{m}$)



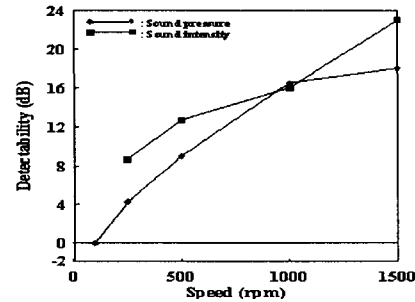
(b) Outer-race defects at 1500r/min
(Defect size : diameter $500\mu\text{m}$, depth $150\mu\text{m}$)

Fig.7 Defect detectability

Fig.7(a)와 7(b)는 다른 하중에서 마찰면과 볼 결함의 검출을 나타낸 것이다. 보통 음향 인텐시티 측정을 통한 결함 검출은 하중 증가에 따라 감소한다. 음향 인텐시티 측정의 결함 검출은 음압 측정을 통해 결함을 검출하는 것보다 좋다. 음압 측정은 약 300rpm 이하에서 결함의 검출이 안되기 때문에, 약 650rpm보다 낮은 속도에서 내부 마찰면과 볼 결함을 검출할 수 없다 (Fig.8(a)). 외부 마찰면의 결함 검출은 음향 인텐시티와 음압이 속도가 증가할수록 증가한다 (Fig.8(b)).



(a) Inner-race and ball defects at 60kgf load
(Defect size : diameter $500\mu\text{m}$, depth $150\mu\text{m}$)

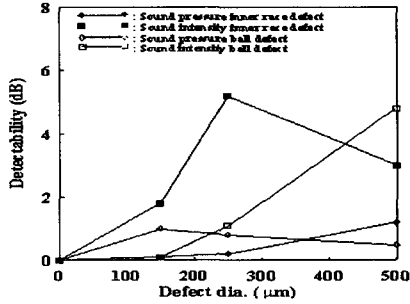


(b) Outer-race defects at 60kgf load
(Defect size : diameter $500\mu\text{m}$, depth $150\mu\text{m}$)

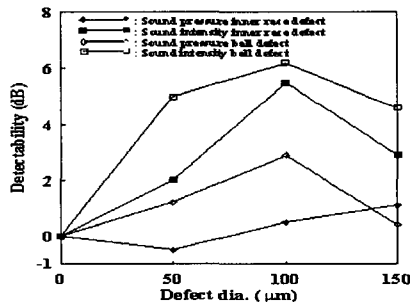
Fig.8 Defect detectability

음압 인텐시티 측정에 따른 결함 측정은 거의 모

든 실험에서의 사용된 속도 범위를 통한 음압 측정
 정에 따른 결함 검출보다 좋다. 보통 Fig.9와
 Fig.10은 음향 인텐시티가 다른 결함 크기에서
 음압 측정을 통한 결함 검출보다 좋다는 것을 나
 타낸다.

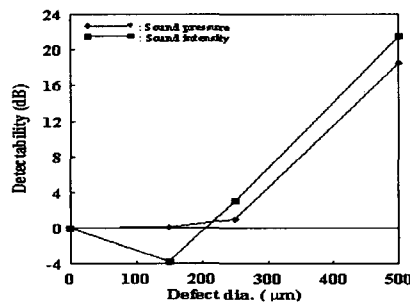


(a) Defect depth : 150 μ m

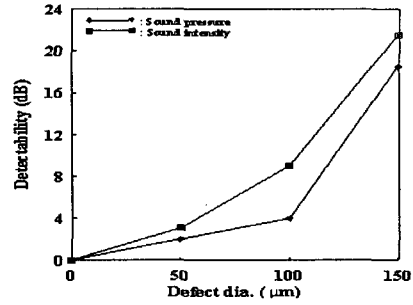


(b) Defect diameter 500 μ m

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



(a) Defect depth 150 μ m



(b) Defect diameter 500 μ m

Fig.10 Defect detectability of
 outer-race defects at 60kgf,
 1500r/min

4. 결 론

본 실험에 의해 도출한 결론은 다음과 같다.
 하중과 속도의 변화에 따른 볼 베어링에서 결함
 의 검출을 위한 음향 인텐시티 기술의 유용성은
 입증되었다. 결함이 있는 베어링의 음향 인텐시
 티 주파수 스펙트라는 회전축이 있는 베어링 시
 스템 공명의 가진 때문에 400Hz과 600Hz, 그리
 고 780Hz사이에서 중요한 피크를 포함한다. 4kHz
 이상의 주파수에서 피크는 결함이 있는 베어링에
 서만 관찰이 된다. 외부 마찰면에서 결함의 검출
 은 내부 마찰면나 볼 결함의 검출보다 좋다. 보
 통 결함 검출은 하중이 증가할수록 감소한다. 외
 부 마찰면에 결함이 있는 경우에는, 결함 검출이
 속도가 증가할수록 증가한다.

음향 인텐시티 측정은 연구에 사용된 하중과
 속도 범위에서 음압 측정보다 좋다. 낮은 속도
 에서 결함의 검출은 어렵다. 음향 인텐시티와 음압
 에서 각각 약 300rpm과 650rpm보다 낮은 속
 도는 베어링에서 결함 검출을 할 수 없다.

< 참고 문헌 >

- (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(II). 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.Acount. Soc. Am., 62, pp.1057~9, 1977
- (4) Gade, S., "Sound intensity and its application in noise control.", Sound & Vibration., 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
- (9) T.Yoshioka and T.Fujiwara(1984), "Application of acoustic emission technique to detection of rolling bearing failure", Acoustic Emission Monitoring And Analysis in Manufacturing, ed. David A. Dornfeld, ASME, New york, pp. 55-75
- (10) L.M. Rogers(1979), "The application of vibration signature analysis and acoustic emission source location to online condition monitoring of anti-friction bearings", Tribology International, 12(2), April, 51-59
- (11) J.D Smith (1982), "Vibration monitoring of bearings at low speeds", Tribology International, 15(3), June, 139-144.