

Wideband Spectral Histogram 분석에 의한 회전기계 요소의 결함탐지

정암섭, 은희준, 임병덕
한국표준연구소 음향연구실

Fault detection of rotating machine elements
by wideband spectral histogram analysis

Wansub Jung, Heejoon Eun and Byoungduk Lim
Acoustics Lab., Korea Standards Research Institute

Abstract

The use of vibration signal for fault detection inside a machine (or its part) is not new, and a number of signal processing techniques are available at the moment. A common problem for all such techniques is the high level of background signals which often make it very difficult to distinguish the desired signals. We developed a new algorithm to detect the minute faults of rotating parts based on spectral histogram analysis. The technique has subsequently been applied to the bearings and has proved to be useful.

I. 서론

가동 중인 회전기계에서 발생하는 진동신호는 그 기계의 내부상태와 밀접한 상관관계를 갖고 있기 때문에 기계 상태진단의 도구로서 널리 사용된다. 진동과 기계상태의 상관관계 설정은 실험 데이터와 경험을 바탕으로 할 수 있으나 베어링이나 기어와 같은 회전부품에 대해서는 이론적 방법에 의해서 정확한 모델링이 가능하다. 따라서 적절한 power spectrum 분석에 이론적으로 예상되는 주파수 성분을 추적함으로써 부품의 상태와 결함의 종류를 판단할 수 있다.⁽¹⁾ 이 방법에서는 결함 주파수 성분이 배경 진동 성분 보다 충분히 큰 경우에 비교적 높은 신뢰도로서 결함의 유무를 밝혀낼 수 있다. 그러나 결함의 크기가 작은 경우에는 그에 대한 결함 주파수 성분을 배경 진동과 구별하는 것이 곤란해진다.⁽²⁾ 특히 VTR 헤드와 컴퓨터 disk driver 등에 쓰이는 고정밀 베어링의 미세결함은 기계 오동작의 주 원인이 되고 있다.

본 논문에서는 wideband spectral histogram 에 의해서 회전부품의 미세결함까지 탐지할 수 있는 기술을 소개하고자 한다.

이 기술은 짧은 시간신호의 샘플에 대한 wideband histogram 분석, 각 wideband의 enveloping 과 narrowband 분석과정으로 되어 있다.

본 논문에서는 이 기술을 실제 베어링에 적용하기 위해서 개발한 신호처리 algorithm, 실험장치 및 그 결과에 대해서 논술하고자 한다.

II. Wideband spectral histogram 분석방법의 이론적 배경

회전 기계 요소에 존재하는 결함 신호의 두드러진 특성은 회전축의 주파수에 비례하는 주기적 신호의 존재이다. 베어링 회전시 볼, 네.외륜의 접촉이 결함에서 이루어진다고 가정하자. 결함의 위치에 따라서 이론적으로 예측될 수 있는 시간간격을 갖고 충격이 주기적으로 발생되며 이상적인 경우에는 Fig. 1. 과 같은 충격신호로 가정할 수 있다.

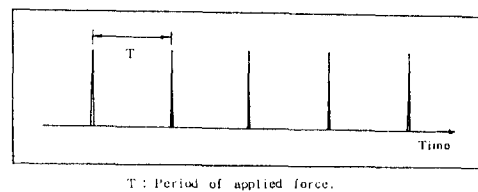


Fig. 1. Periodic impulse force applied.

Fig. 1의 각각의 충격에 의하여 베어링의 외륜에서 발생하는 진동을 시간함수로 기록하면 Fig. 2와 같이 계의 전달특성(impulse response)의 주기적인 series로 나타나게 된다. 따라서 결함이 적은 경우에도 다른 주파수 성분보다 상대적으로 베어링계의 전달 특성에 의한 고유 진동수 근방에서 피크가 크게 나타나기 때문에 이 특성을 이용하면 미세한 결함까지도 결함탐지가 가능하게 된다.

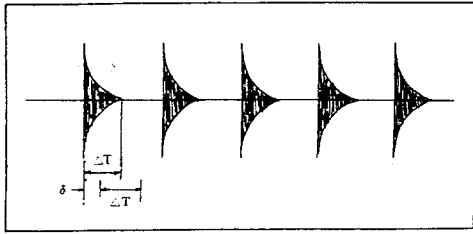


Fig. 2. Periodic vibration signal for a bearing with a single point fault.

이 기술의 기본적 개념은 Fig. 3 에 주어진 wideband spectral histogram에 의해서 설명될 수 있다. 이는 스펙트럼 분석에 필요한 시간신호의 샘플구간을 단계적으로 이동하면서 결정된 스펙트럼의 집합으로서, 스펙트럼을 시간함수로 나타낸 것이라고 볼 수 있다. 시간신호의 샘플구간 ΔT 가 Fig. 2. 의 첫번째 impulse 를 포함하는 경우에 이 시간구간을 스펙트럼 분석하면, Fig. 3. 의 왼쪽 첫번째 wideband spectrum 과 같이 베어링의 고유 진동수를 포함하는 주파수 밴드가 크게 나타난다.

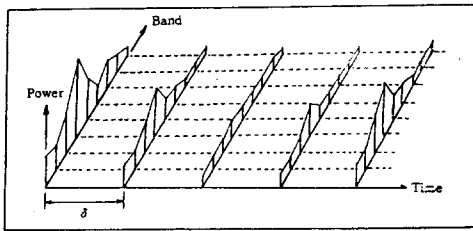


Fig. 3. Spectral histogram.

다음 단계로 ΔT 를 Fig. 2. 에서와 같이 δ 만큼 오른쪽으로 이동시켜 시간신호를 샘플하여 광대역 스펙트럼을 구하면, 첫번째 샘플의 고유 진동수를 포함하는 주파수 밴드의 스펙트럼 레벨보다는 감소되어 나타나게 된다. 이 같이 ΔT 를 단계적으로 이동하면서 스펙트럼을 구하면 Fig. 3. 과 같다. 고유 진동수를 포함하는 밴드의 크기가 주기적으로 변화하게 된다. ΔT 가 impulse 를 완전히 포함하는 경우에는 최대값을 나타내고, 반대로 ΔT 가 두개의 impulse 사이에 존재하여 어느 impulse도 포함하지 않는 경우에는 최소값을 나타낸다. 즉 Fig. 3. 의 고유 진동수를 포함하는 밴드의 주기성은 Fig. 2. 의 결함에 의한 impulse 발생 주기와 일치하게 된다. 이 같이 분석된 histogram 의 주기성을 이론적인 결함 주기와 비교함으로써 결함의 원인과 정도를 결정할 수 있게 된다.

레이스의 표면거칠기, 볼 및 네.외륜의 전원도 불량과 윤활유의 오염과 같은 연속적 결함이 베어링

에서는 존재한다. 이들 결함이 갖는 시간과 주파수 영역의 고유한 특성과 wideband spectrum과의 상관관계가 규명된다면 이들 결함도 wideband spectral histogram에 의하여 탐지될 수 있게 된다.

III. Wideband spectral histogram 분석방법에 의한 베어링 결함탐지

회전기계 요소로서 베어링이 갖는 결함의 종류와 그들이 갖는 고유한 특성과 신호처리 과정에서 발견된 문제점을 요약하면 아래와 같다.

- 결함 진동신호의 진폭변조 - 결함 반복 주기보다 짧은 시간신호의 광대역 분석
- 결함 신호의 급격한 감쇠 - 샘플링 속도의 고속화
- 미세 결함 신호의 탐지 감도 향상 - 샘플링 속도의 고속화와 bit resolution 중대
- 외륜 공진 주파수 대역의 노이즈 감도 - 광대역 분석
- 결함분류 및 판정방법의 효율화 - 통계적 판정법 개발
- 신호처리 고속화 - 신호처리 기법의 개발 및 hardware array processor 개발

이러한 문제점을 다각적으로 해결하기 위하여 wideband spectral histogram 분석방법을 시도하였다.

본 신호처리 과정은 Fig. 4. 에 표시된 바와 같이 광대역 신호분석, 광대역 신호에 대한 enveloping 과 enveloping 된 신호에 대한 협대역 주파수 분석으로 구성된다.

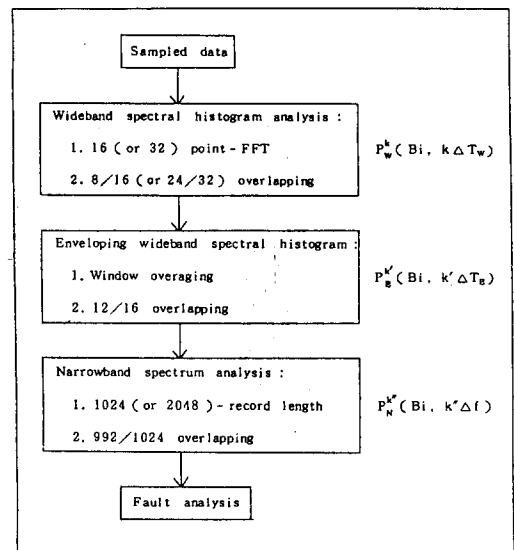


Fig. 4. Flow diagram of spectral histogram analysis.

광대역 분석은 16개의 샘플을 취하여 DC-25.6 kHz의 주파수 폭을 9개의 광대역으로 나누어 처리한다. 더욱이 결함 신호의 판별성을 향상시키기 위해서 샘플 신호의 50% overlapping을 하였다.

광대역 분석의 입력 데이터 길이를 LW, 샘플링 라임을 ST, i번째 광대역 밴드를 Bi, 입력 진동 x의 입력 데이터 첫번째 address를 bn라 할때, k번째의 광대역 spectral histogram Pw^k(Bi, kΔT_w)는

$$P_w^k(B_i, k \cdot \Delta T_w) = \frac{2 \cdot ST}{LW} |X(i \Delta f)|^2 \quad (1)$$

여기서

$$\Delta T_w = 8 \cdot ST$$

$$B_i = \frac{(i-1)}{ST \cdot LW}$$

$$X(l \cdot \Delta f) = \sum_{n=1}^{16} X_{bn+n} \cdot \exp(-j2\pi \frac{(l-1)(n-1)}{LW})$$

$$\Delta f = \frac{1}{ST \cdot LW} \quad (2)$$

결함발생 주파수를 보다 정확히 분석하기 위하여 대역별 spectral histogram을 포락화 처리하였다. 포락화된 광대역 spectral histogram의 시간 간격을 ΔT_E, 포락화를 위한 데이터 길이를 LE, m번째의 초기 입력 데이터 번호를 be라 할때, k'번째의 포락화된 광대역 spectral histogram P_E^{k'}(Bi, k'ΔT_E)는

$$P_E^{k'}(B_i, k' \Delta T_E) = \sum_{n=1}^{16} W_H(n) \cdot P_w^{be+n}(B_i, (be+n) \cdot \Delta T_w) \quad (3)$$

$$P_w^{be+n}(B_i, (be+n) \cdot \Delta T_w)$$

로 표시되며, (3) 식의 관계인자들은 아래와 같다.

$$\Delta T_E = 4 \cdot \Delta T_w \quad (75\% \text{ overlapping})$$

$$LE = 16 \text{ (혹은 } 24) \quad (4)$$

$$W_H(n) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot [1 - \cos(\frac{2\pi n}{LE+1})]$$

이 방법의 마지막 단계에서는 포락화된 대역별 histogram에 대해서 1024개의 데이터 길이마다 992/1024 중복화를 하면서 협대역 FFT분석을 한다. 이때 hanning window를 이용하여 결함 신호의 반복 주기성을 향상토록 하였다.

IV. 실험장치 및 결과 분석

실험 장치는 베어링 구동 장치, 센서 및 신호 증폭기, 진동 신호 수집장치 및 신호처리용 컴퓨터 그리고 베어링의 결함 진동 신호 특성을 분석하기 위한 계기들로 구성된다.

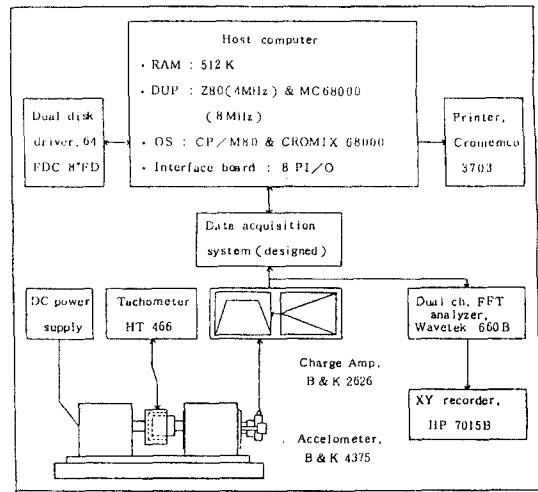


Fig. 5. Block diagram of experimental setup.

Table 1. Performance of the data acquisition system.

Channel	single
Resolution	12 bits (± 0.025 %)
Sampling time	<ul style="list-style-type: none"> Max. = 512 × 1.024 kHz (± 5ppm/h) 32 sampling times programmable
Buffer size	<ul style="list-style-type: none"> 64 k words (16 bits/words) Extensible to 1M words

Table 1.은 베어링 진동신호를 초고속으로 수집하기 위해 제작된 data acquisition system의 성능을 나타내고 있다.

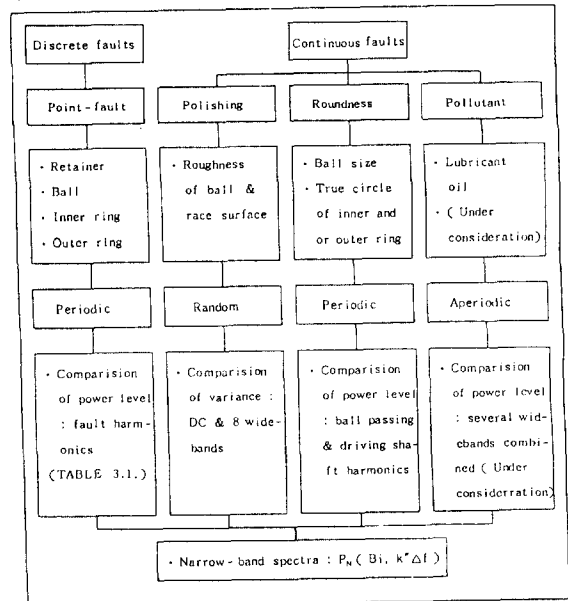


Fig. 6. Schematic diagram of bearing fault analyses.

본 연구는 우선 베어링의 결함신호에 대한 고유한 특성을 분류한 뒤 이들에 대한 이론적 결함탐지 기법을 이룩하였다. Fig. 6. 은 베어링이 갖는 결함 신호의 종류와 그들이 갖는 특성을 나타내고 있다. 그리고 Fig. 7.와 Fig. 8.은 본 연구에서 사용한 KBS 6304Z형 샘플 베어링에 대한 분석결과를 보여 준다.

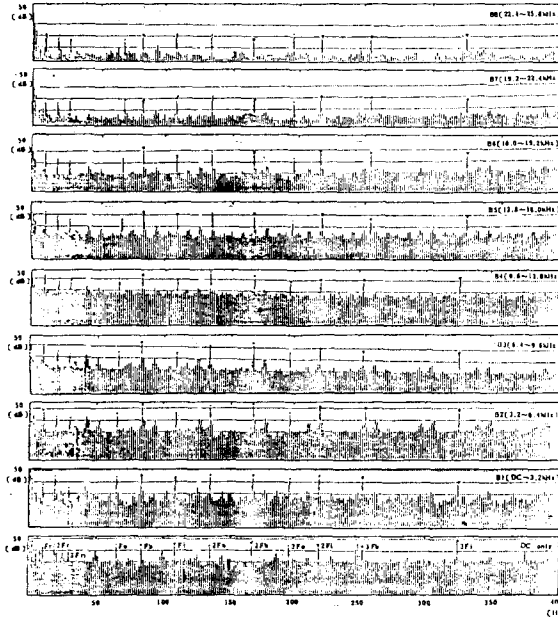


Fig. 7. Analyzed results of a sample bearing A.

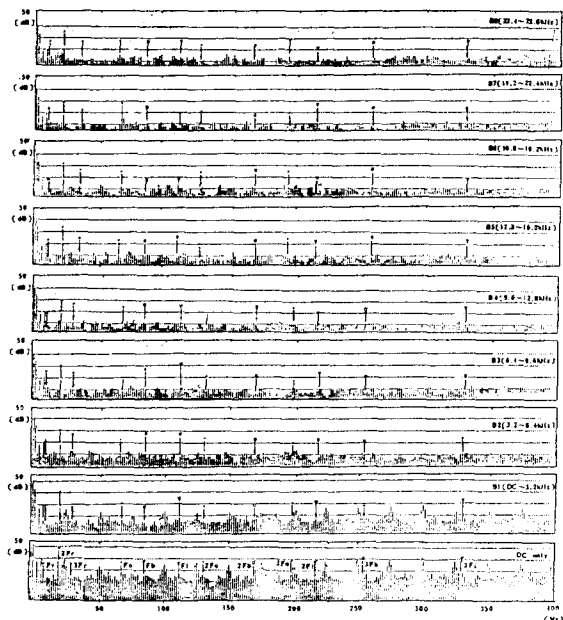


Fig. 8. Analyzed results of a sampling B.

이 결과에 대하여 간단히 논술하고자 한다.

불연속적 점결함에 대하여

점결함에 의한 8개의 광대역에 대하여 각 결함에 의한 진동발생 주기의 3차까지 조화성분을 비교 분석하였다. 점결함의 경우 Fig. 7와 8에서 나타난 바와 같이 외륜의 공진영역(B2와 B4)에서 결함 판정이 신뢰도가 높음을 볼 수 있다. 두 베어링에 있어서 불에 대하여는 [28 dB], 외륜에 대하여는 [25 dB], 내륜에 대하여는 [22 dB] 그리고 볼 고정기에 대하여는 30 [dB] 정도의 차이가 나고 있다. A 베어링의 경우 전반적인 결함특성이 높게 나타났으며, 특히 불의 결함이 가장 뚜렷이 나타남을 알 수 있다.

불과 레이스면의 연마상태에 대하여

베어링의 정밀도에 따라 차이는 있으나 연마상태에 의한 진동신호의 발생빈도나 전반적 진동 레벨이 차지하는 비중은 점결함에 비하여 높게 나타남을 알 수 있었다. 그리고 주 거성은 매우 랜덤한 특성을 나타내고 있었다. 몇몇 샘플 베어링의 기초실험에서 거칠기와 광대역의 본산은 매우 밀접한 관계가 있으며 조도가 증가할수록 광대역 본산은 증가함을 확인할 수 있었다. 그리고 동일 베어링에서 최대 본산의 차이는 외륜의 공진영역으로 나타났다. 그리고 2차 공진역의 B2 밴드에서는 13.9 [dB] 3차 공진역의 B4 밴드에서 16.2 [dB]의 본산차이를 나타내고 있었다. 이로부터 고주파 공진역이 표면거칠기에는 더욱 민감함을 알 수 있었다. 이는 가속도 픽업을 이용함으로써 확인된 점으로서 광대역 스펙트럼 분석법은 가속도 픽업의 이용이 적절함을 알 수 있었다.

볼 크기의 불균일 및 네.외륜의 진연도에 대하여 진연도 불량과 볼 외경의 불균일에 의한 진동 결함 신호는 저주파 신호로 고주파 광대역의 DC성분에서 가장 민감하게 나타난다. 또한 베어링 구동 시스템의 불균형 질량이나 축 중심선 배열에 매우 민감하게 변화함을 알 수 있었다. 따라서 구동축의 coupling과 회전축의 균형에 많은 주의를 기울였다. 특히 구동축의 자기 결함장치의 제작으로 베어링 노이즈에 대한 많은 문제점을 개선할 수 있었다.

본 항목들에 대한 결함 탐지에 있어서 회전축의 회전 주파수 성분의 상대적 진동 레벨을 각각 계산. 분석하는 것이 보다 정확함을 확인할 수 있었다. 두 베어링에 있어서 불의 불균일 정도에 대하여는 베어링 A가 1.5 [dB] 정도 그리고 네.외륜의 진연도에 대하여는 10.3 [dB] 정도 높게 나타났다.

V. 결 론

금번 연구에서 시도한 wideband spectral histogram 분석방법은 단순 파워 스펙트럼 분석방법에 비해서 베어링의 결함 종류와 정도를 더욱 정밀하게 결정할 수 있음을 확인할 수 있었다. 이 기술은 결함 진동 신호의 근본적 이해와 체계화에 새로운 방향을 제시할 수 있을 것으로 생각된다.

다만 이 기술을 활용하기 위하여는 신호처리 컴퓨터에 적합한 초고속 대용량 메모리 수 집장치가 필요하며 실시간 분석을 위해서는 hardware array processor가 절실히 요구된다. 금번 연구에서 얻은 경험은 이 기술을 실제 활용하는데 큰 도움이 될 것이다.

이 기술은 베어링 생산 라인에서의 품질관리 뿐만 아니라 자동차, 정밀공작기계, VTR헤드등에 쓰이는 정밀 베어링의 성능 검사에 이용될 수 있을 것이다. 앞으로 이 기술을 베어링 이외의 다른 회전기계 부품의 결함탐지에 적용하는 연구노력이 기대된다.

참 고 문 헌

1. P.D. McFadden and J.D. Smith, Model for the vibration produced by a single point defect in a rolling element bearing, Journal of Sound and Vibration(1984) - 96(1), 69 - 82.
2. 정밀속정자동화 기술 개발에 관한 연구, 한국표준연구소
제1차년도, KSRI-IR-57 (1983)
제2차년도, KSRI-IR-58 (1984)
제3차년도, KSRI-IR-87 (1985).