

Condition Monitoring 기법에 의한 베어링의 이상진단

이 정철* 오 재응** 염 성하*** 권 오관****

- * 한양대학교 대학원 정밀기계공학과
 - ** 한양대학교 기계공학과
 - *** 한양대학교 정밀기계공학과
 - **** 한국과학기술원 기계유회환연구실
- (1987. 3. 24 접수)

Bearing Fault Diagnosis by Condition Monitoring Method

J·C Lee, J·E oh, S·H Yum and O·K Kwon.

Hanyang Univ. Graduate Student.

Dept. of Mech. Eng. Hanyang Univ.

Dept. of Precision Mech. Eng. Hanyang Univ

Mech. Eng., Korea Advanced Institute of science and Techology, Seoul, Korea.

(Received March 24, 1987)

ABSTRACT

Many kinds of condition monitoring technique as the preventive maintenance technique have been studied, so this study has investigated the possibility of checking the trend in the fault diagnosis of ball bearing, one of the important elements of rotating machine, by applying the cepstral analysis method. And computer simulation is conducted in order to identify obviously the physical meaning of cepstral analysis.

It is identified that cepstral analysis is effective method to distinguish between the basic and reflected wave by computer simulation, and we know that it is possible to apply the cepstral analysis to the arbitrary elements of rotating machine which are different in fundamental frequency. It is verified that cepstral analysis method is more effective than the other conventional method in bearing fault diagnosis.

1. 서 론

최근 발전·화학플랜트의 대형화에 따른 사고가 빈번히 발생하고 있는 실정이다. 주로 회전기계에서 발생하고 있으며 플랜트시스템의 신뢰성 및 가동율 향상을 위한 예방보존기술로 Condition monitoring 기술이 연구되고 있으며 적용방법에 따라 1) Run-to-break method, 2)

Time-based preventive maintenance method, 3) On-condition maintenance로 분류된다. 기계의 성능을 대별할 수 있는 측정변수의 선정 방법은 1) Dynamic method, 2) Nondestructive test, 3) Contaminant inspection method, 4) Trend analysis 등이다.

특히 Martins와 Gerges¹는 시간영역에서, Martin²은 스펙트럼해석법에 의해 진동특성에

의한 베어링의 손상에 대해서 연구하였으며, O. K. Kwon과 H. S. Kong³⁾은 R. P. D에 의해 마모입자분석에 관한 연구를 하였으며, 오 재웅⁴⁾은 Bispectrum과 Cepstrum해석법에 의해 베어링의 이상진단에 관한 연구를 하였다.

본 연구에서는 Condition monitoring기술의 하나인 Cepstrum의 물리적 의미를 정확히 파악하고자 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였으며, 진동특성에 의한 Cepstrum해석법을 회전기계요소의 하나인 볼베어링에 적용하여 결함을 관리하는 수단으로써의 가능성을 다른 이상진단기술과 비교 검토하였다.

2. 이론해석

2-1. Discrete화한 F. F. T.의 이론해석

기록된 시간데이터 $x(t)$ 의 Fourier변환은

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\pi ft} dt \quad (1)$$

로 정의되며 discrete화 하면

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \exp\left[-j \frac{2\pi kn}{N}\right] \quad (2)$$

으로 표현되며, Fig. 1과 같은 flow graph에 의해 계산한다.

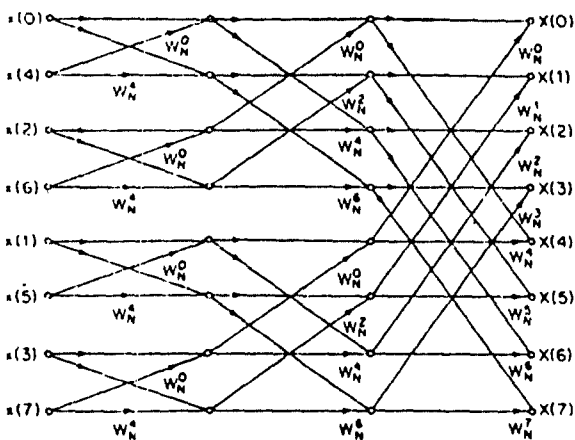


Fig. 1. Flow graph of complete decimation-in-time decomposition of an 8-point DFT computation.

2-2. 파워 Cepstrum의 이론해석

파워 Cepstrum은 데이터 $x(t)$ 의 Z-변환한 값의 2승에 대수를 취하여 다시 Z-변환한 값의 2승으로 정의되며

$$Cp(t) = \{Z(\log |X(z)|^2)\}^2 \quad (3)$$

로 표시된다. 단위원 ($Z = \exp(j\omega t)$)상에서의 Z-변환은 Fourier 변환이므로

$$Cp(t) = |\mathcal{F}\{\log F_{xx}(f)\}|^2 \quad (4)$$

로 표현된다.

데이터 $x(t)$ 가 두 파형이 중첩된 경우라면

$$x(t) = q(t) * r(t) \quad (5)$$

이고, 파워 스펙트럼에 대수를 취하면

$$\log |X(z)|^2 = \log |Q(z)|^2 + \log |R(z)|^2 \quad (6)$$

와 같이되어 대수를 취함으로써 두 파형이 분리된다. 식(3)에서

$$C_{px}(t) = C_{pq}(t) + C_{pr}(t) \quad (7)$$

가 되므로 파워 cepstrum으로 중첩된 두 파형을 분리할 수 있다.

직접파와 반사파(echo)가 복합된 경우에 $r(t)$ 는

$$r(t) = \delta(t) + a\delta(t - \tau) \quad (8)$$

가 되고 discrete화 하면

$$r(n \cdot \Delta t) = \delta(n \cdot \Delta t) + a\delta(n \cdot \Delta t - n_0 \cdot \Delta t) \quad (9)$$

Table 1. Comparison of RMS, Kurtosis, and Cepstrum value.

	Good condition	Transient condition	Bad condition
RMS (v)	0.08839	0.08678	0.08924
Kurtosis	4.50882	5.02637	5.76823
Cepstrum (dB)	2.03000	2.56000	4.87000

와 같이 표현되며, 파워 스펙트럼을 구하여 대수를 취하여 보면

$$\log |X(e^{j\omega t})| = \log |Q(e^{j\omega t})|^2 + \{1 + a^2 + 2a \cos(\omega n_0 \Delta t)\} \quad (10)$$

와 같다. 복합파형의 Z-변환한 값의 2승에 대수를 취한 것은 주기적으로 유사한 ripple을 포함한다. 이 ripple의 gamnitude와 quefrequency(ripple의 주파수)는 반사파의 진폭과 시간지연에 의존한다. 식(10)을 다시 Fourier 변환함으로써 반사파의 영향에 의해 발생하는 ripple의 특성을 명확히 알아볼 수 있다. 그러므로 파워Cepstrum해석법은 직접파와 반사파의 분리를 명확히 할 수 있다.

2-3. 확률밀도함수와 Kurtosis값의 이론 해석

실험을 N번 행하였을 경우 결과 A가 N[A]번 발생하였을 경우 A의 확률은 다음과 같이 정의되고

$$\text{Prob}[A] = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N[A]}{N} \quad (11)$$

정상상태에서의 확률분포함수는 모든 실험에 대하여 같으므로 1번의 측정으로 결정될 수 있으며 다음과 같이 표시된다.

$$P(x) = \text{Prob}[x(t) \leq \xi] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{T(x(t) \leq \xi)}{T} \quad (12)$$

확률분포 함수는 항상 0 이상이며 ξ 가 작아짐에 따라 0으로 수렴하며 ξ 가 커짐에 따라 1에 수렴한다. 중심이 ξ 이고 분할구간의 폭이 Δx 인 데이터에 대한 확률밀도 함수는 다음과 같다.

$$p(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\text{Prob}[x(t) \in \Delta x \epsilon]}{\Delta x} \quad (13)$$

확률밀도함수 $p(x)$ 의 평균치와 분산은

$$\mu = \int_{-\infty}^{\infty} x p(x) dx \quad (14)$$

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 p(x) dx$$

이고 Kurtosis값은 다음과 같이 정의된다.

$$K = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^4 p(x) dx}{\left\{ \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 p(x) dx \right\}^2} \quad (15)$$

이 값은 무차원화된 값이므로 입력데이터의 절대량에 관계없이 상대적인 값으로 표시되므로 설비 이상진단에 유효하게 사용된다.

3. 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 파워 Cepstrum의 고찰

Cepstrum해석법의 컴퓨터 시뮬레이션을 다음과 같이 4 경우에 대하여 직접파와 반사파로 이루어진 식(16)을 이용하여 행하였다.

$$x(t) = e^{-150t} \sin(2\pi ft) \{ \delta(t) + a\delta(t - \tau) \} \quad (16)$$

f 는 기본주파수, $\delta(t)$ 는 단위펄스함수, a 는 반사파의 감쇠 또는 증가율, τ 는 시간지연(반사파의 도착시간)을 나타낸다.

(case 1) 단순파형인 경우
($f=250\text{Hz}$, $\tau=25\text{msec}$)

식(16)은

$$x(t) = e^{-150t} \sin(2\pi \times 250t) \left\{ \delta(t) + \frac{2}{3} \delta\left(t - \frac{25}{1000}\right) \right\} = e^{-150t} \sin(2\pi \times 250t) + \frac{2}{3} e^{-150t - 25 \times 1000} \sin\left\{ 2\pi \times 250\left(t - \frac{25}{1000}\right) \right\} \quad (17)$$

로 표시되며 우변의 첫째항은 직접파, 둘째항은 반사파를 나타낸다. 직접파만 존재하는 경우는 Fig. 2와 같다. 파워 스펙트럼에서는 기본주파수 250Hz만을 나타내며 파워 Cepstrum에서는 직접파인 250Hz의 기본주파수에 의해 발생하는 값이 quefrequency 0msec부근에서 나타나고 있다. 직접파와 반사파가 같이 존재하는 경우는 Fig. 3과 같고 시간영역에서 25msec후에 반사파가 나타나며 파워 스펙트럼에서는 반사파에 의해 발생된 side band가 기본주파수를 따라 발생됨을 볼 수 있다. 파워 Cepstrum에서 qu-

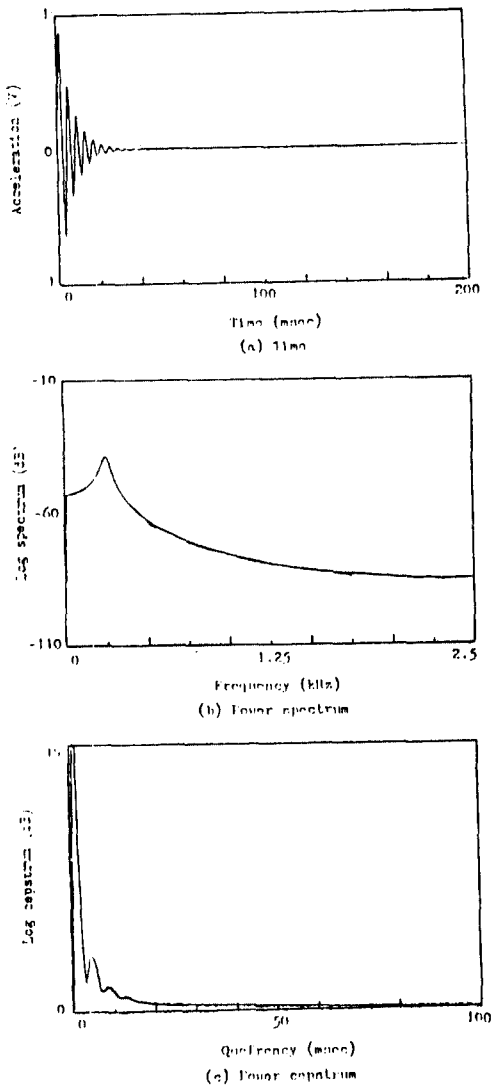


Fig. 2. Computer simulation result of power cepstrum by equation (17) without reflection-wave.

efrency Osec 부근에서는 Fig. 2 와 같으나 25, 50, 75msec에서는 Fig. 2 와 다르게 1 차, 2 차, 3 차 rahmonic이 발생하고 있음을 알 수 있다. 1 차 rahmonic은 시간지연과 일치하고 있으며 side band의 평균진폭크기를 나타낸다. 2 차 이상은 파형의 변형 (distorsion) 또는 필터의 특성과 side band의 상호작용과 같은 인위적인 요소에 의하여 영향을 받기 때문에 무시하여도 좋다.

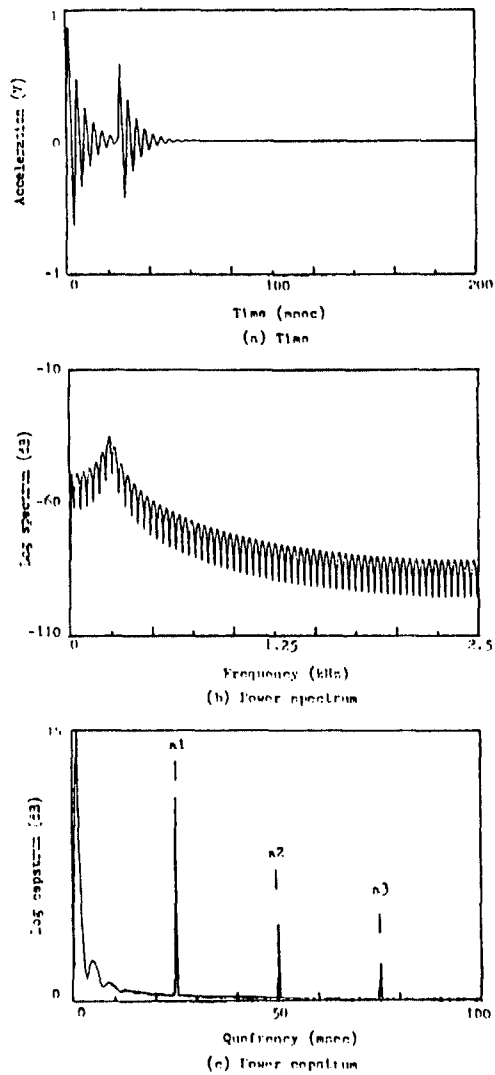


Fig. 3. Computer simulation result of power cepstrum by equation (17) with reflection-wave.

그러므로 파워 Cepstrum으로 side band의 특성을 명확히 할 수 있으며 1 차 rahmonic만이 Cepstrum에서의 크기를 결정지을 수 있다.

- (case 2) 복합파형인 경우
- ($f=250\text{Hz}$, $\tau=25\text{msec}$)
- ($f=500\text{Hz}$, $\tau=20\text{msec}$)

식(16)은

$$\begin{aligned}
 x(t) &= e^{-150t} \sin(2\pi \times 250 t) \\
 &+ \frac{2}{3} e^{-150(t-25/1000)} \sin\left\{2\pi \times 250\left(t - \frac{25}{1000}\right)\right\} \\
 &+ e^{-150t} \sin(2\pi \times 500t) + \frac{2}{3} e^{-150(t-20/1000)} \\
 &\sin\left\{2\pi \times 500\left(t - \frac{20}{1000}\right)\right\} \quad (18)
 \end{aligned}$$

로 표시되며 2 종류의 직접파와 반사파가 복합된 경우로 Fig. 4 와 같으며, 파워 스펙트럼에서

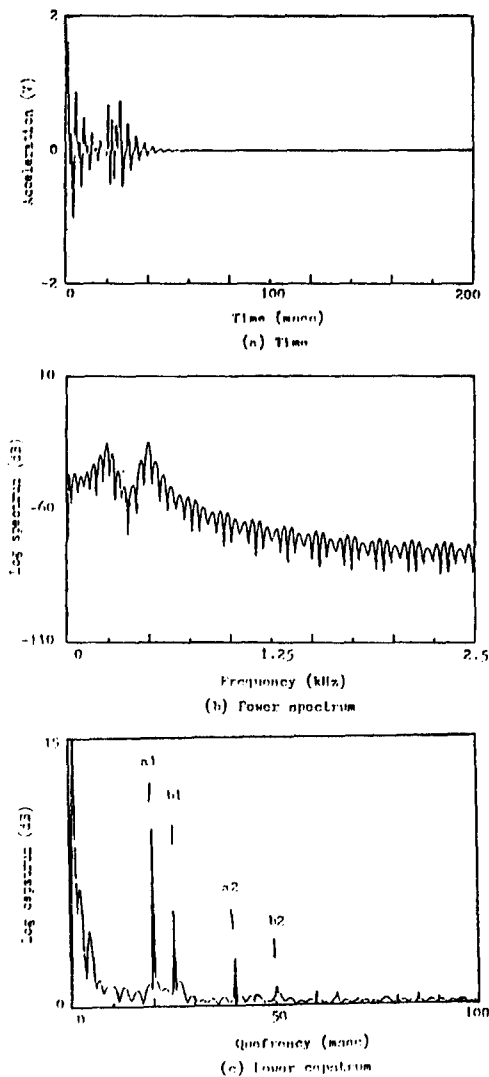


Fig. 4. Computer simulation result of power cepstrum by equation (18).

는 40Hz의 side band를 갖는 250Hz와 기본주파수 50Hz의 side band를 갖는 500Hz의 기본주파수가 나타나고 있으며 파워 Cepstrum에서 quefrequency 0msec 부근에서는 case 1 과 같으며 20, 25msec에서는 1 차, 40, 50msec에서는 2 차 rahmonic이 나타나고 있으며 1 차 rahmonic은 각각의 시간지연과 일치하며 side band 50, 40Hz에 해당한다. 파워 Cepstrum에서 quefrequency는 반사파의 시간지연에만 영향을 받으므로 이 quefrequency를 주목함으로써 어떠한 파형이 복합된 경우에도 직접파와 반사파의 구별을 명확히 할 수 있음을 알았다.

(case 3) 복합파형인 경우

$$(f=250\text{Hz}, \tau=25\text{msec})$$

$$(f=800\text{Hz}, \tau=20\text{msec})$$

case 2의 모든 조건이 같으나 복합파형중 한 파형의 기본주파수만 다른 경우로, 식(16)은

$$\begin{aligned}
 x(t) &= e^{-150t} \sin(2\pi \times 250 t) \\
 &+ \frac{2}{3} e^{-150(t-25/1000)} \sin\left\{2\pi \times 250\left(t - \frac{25}{1000}\right)\right\} \\
 &+ e^{-150t} \sin(2\pi \times 800 t) \\
 &+ \frac{2}{3} e^{-150(t-20/1000)} \sin\left\{2\pi \times 800\left(t - \frac{20}{1000}\right)\right\} \quad (19)
 \end{aligned}$$

로 표시되며 Fig. 5 와 같다. 파워 스펙트럼에서는 기본주파수 500Hz가 800Hz로 변화된 것이 외에는 case 2와 같음을 알 수 있으며 파워 Cepstrum에서도 크기의 변화가 약간 있을뿐 case 2와 똑같은 현상을 볼 수 있다. 그러므로 기본주파수가 다른 경우에도 시간지연만 같다면 파워Cepstrum은 변함없이 같음을 알 수 있다.

(case 4) 반사파의 크기가 큰 경우

$$(f=250\text{Hz}, \tau=25\text{msec})$$

case 1과 모든 조건이 같으나 반사파의 크기가 직접파의 크기보다 큰 경우로, 식(16)은

$$\begin{aligned}
 x(t) &= \frac{2}{3} e^{-150t} \sin(2\pi \times 250 t) \\
 &+ e^{-150(t-25/1000)} \sin\left\{2\pi \times 250\left(t - \frac{25}{1000}\right)\right\} \quad (20)
 \end{aligned}$$

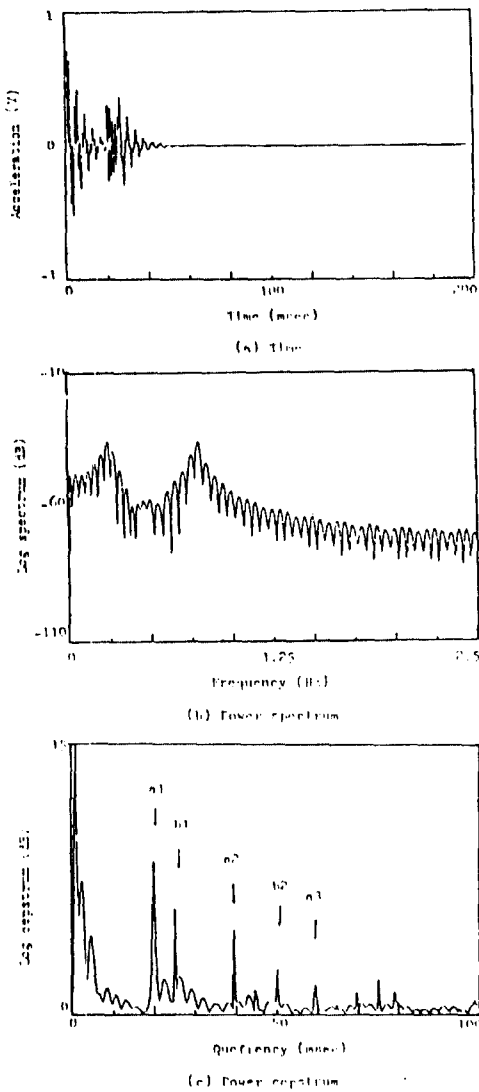


Fig. 5. Computer simulation result of power cepstrum by equation (19).

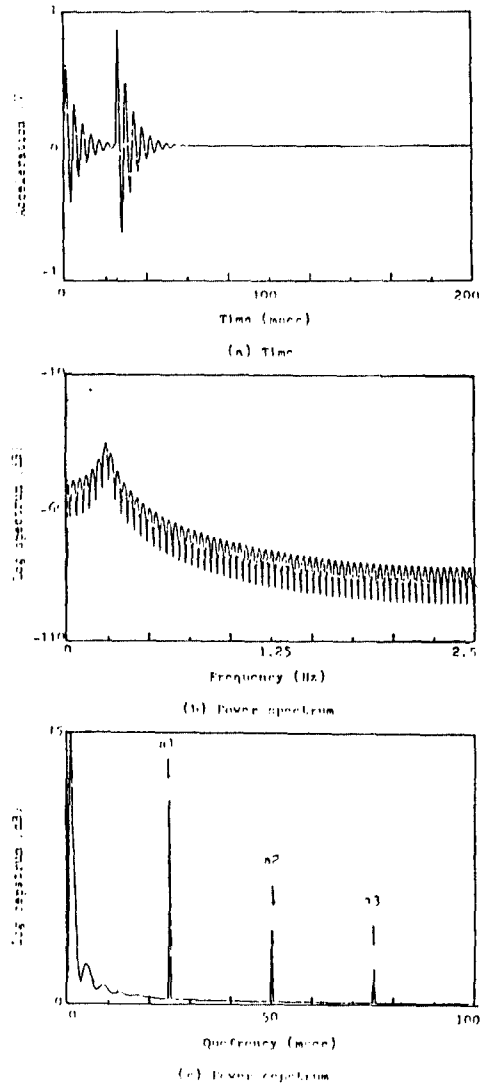


Fig. 6. Computer simulation result of power cepstrum by equation (20).

로 표시되며 Fig. 6 과 같다. 시간영역에서는 case 1 과 다르게 25msec 후에 나타나는 반사파의 크기가 큰 것을 볼 수 있으나, 파워 스펙트럼과 파워 Cepstrum에서는 case 1 과 똑같은 현상을 나타내고 있다. 그러므로 반사파의 크기에 무관하게 파워 Cepstrum에서는 결과가 같음을 알 수 있다.

4. 실험

본 연구에 사용된 베어링은 그리이스가 주입된 K사 제품 6207ZZ형 볼베어링이었으며, 베어링에 일정하중을 가하여 4000rpm으로 회전시켜 손상 발생시까지의 시간 변화에 따른 베어링의 진동특성을 측정하였다. 측정계 및 데이터 분석계의 계통도는 Fig. 7 에 보여주고 있다.

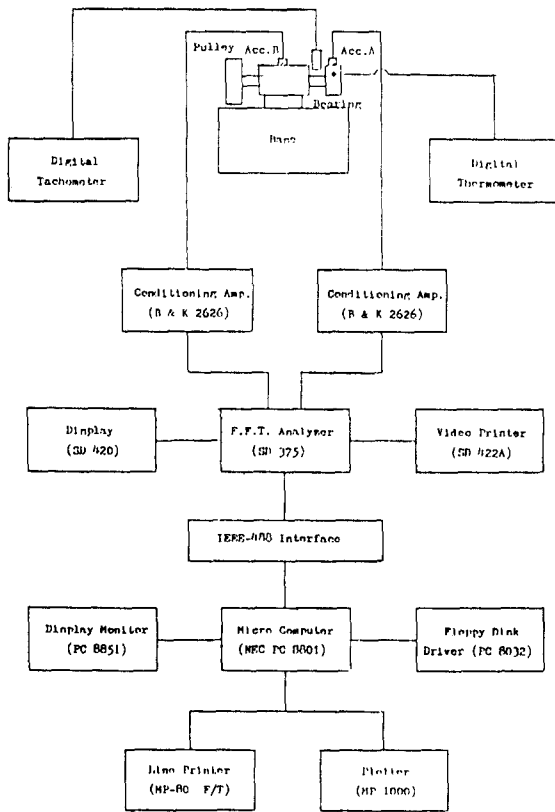


Fig. 7. Schematic diagram of measuring and analysis system.

5. 결과 및 고찰

5-1. 파형분석, 파워 스펙트럼, 파워 cepstrum의 비교

Fig. 8은 초기상태의 베어링의 진동특성을 나타내며, 파워 스펙트럼에서는 베어링 시스템의 진동특성을 뚜렷한 peak로 rahmonic을 이루어 나타내고 있으며, 파워 Cepstrum에서는 이 현상이 $a_1 - a_5$ 에 걸쳐 rahmonic으로 나타나고 있다.

일정시간 경과후 진동특성은 Fig. 9와 같다. 시간영역과 스펙트럼에서는 초기상태와 약간의 변화가 있을 뿐 거의 같음을 알 수 있으나 파워 Cepstrum에서 $a_1 - a_4$ 는 초기상태의 변함이 없으나 qurfrequency 30msec인 b_1 에서는 증가된 현상을 보여주고 있다. b_1 은 밴드폭 33.3Hz를 나타내는 side band에 해당하는 quefrequency 이며

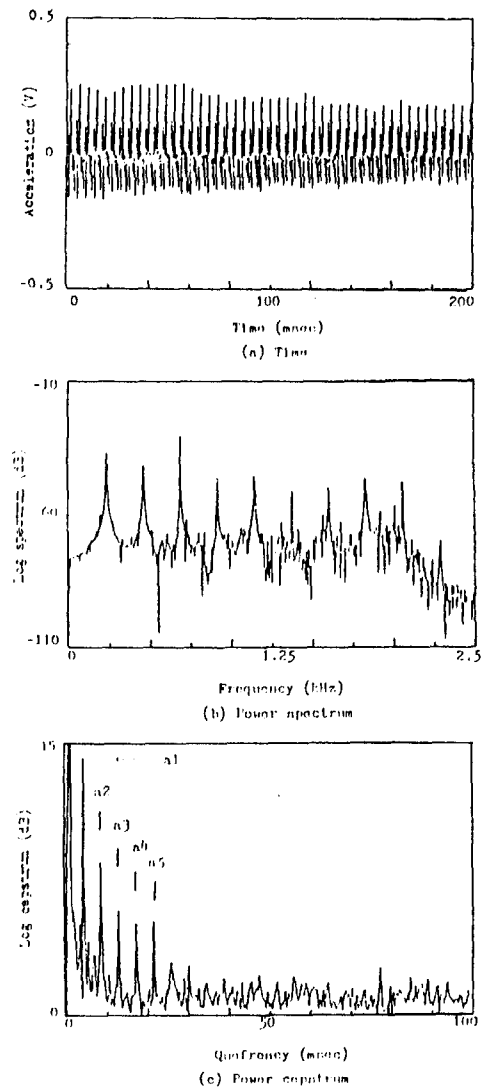


Fig. 8. Vibration characteristics of ball bearing in good condition.

이 side band는 베어링 회전주파수 66.6Hz (4000rpm)의 1/2차 모드와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

기준에 베어링 이상진단기술로 알려진 RMS 값, Kurtosis값에 의해 베어링 손상의 발생 초기에 측정된 결과는 Fig. 10과 같으며 시간영역에서는 초기 상태보다 커다란 변화가 없으며 파워 스펙트럼에서는 약간의 변화, 즉 side band

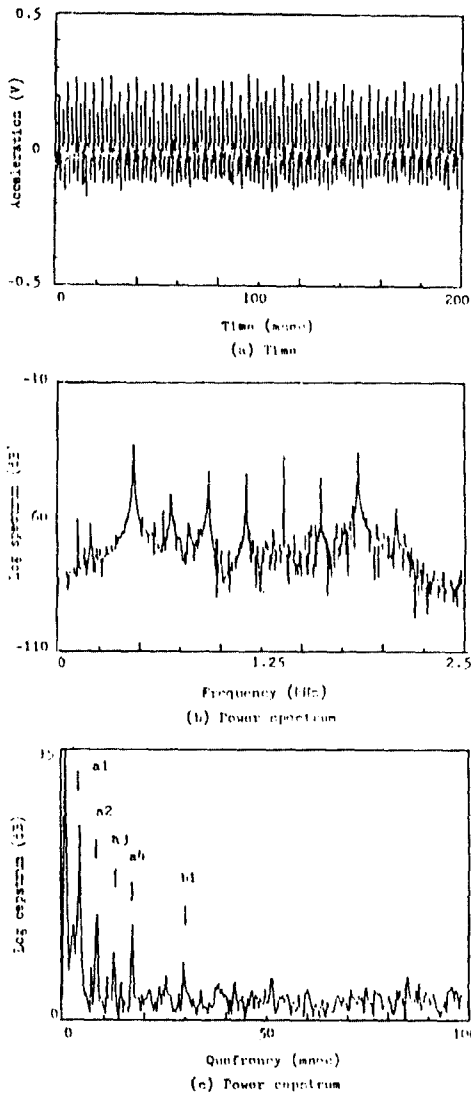


Fig. 9. Vibration characteristics of ball bearing in transient condition.

가 약간 증가된 현상을 볼 수 있으나 이와 같은 결과에 의해서는 이상발생 유무의 판단이 어렵다고 생각된다. 파워 Cepstrum에서 $a_1 - a_4$ 는 이상 유무에 관계없이 존재하지만, b_1 은 이상이 발생함에 따라 현저한 응답을 보이고 있다.

이와 같은 결과로부터 베어링 이상의 발생 유무를 진단하는데 시간파형 분석과 파워 스펙트럼에서는 판단하기 어려우나 파워 Cepstrum

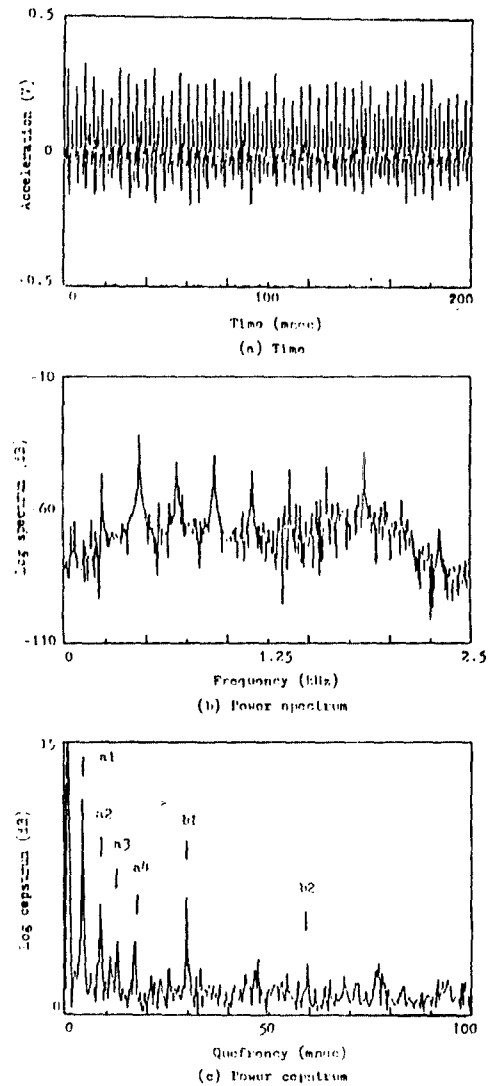


Fig. 10. Vibration characteristics of ball bearing in bad condition.

에서는 베어링 회전수의 1/2 차 모드에 해당하는 quefrency에 이상 발생시 1차 rahmonic 이 크게 증가되어 나타나며, 이 값을 주시함으로써 베어링의 이상진단에 유효함을 알았다.

5 - 2. 확률밀도함수, RMS값, Kurtosis 값 및 파워 Cepstrum의 비교

Fig. 11은 초기상태로부터 이상 발생시까지의

시간 데이터에 의한 확률밀도함수를 나타낸다. 초기상태인 Fig. 11(a)에서는 정규분포곡선을 그리고 있으나 보는 바와 같이 Fig. 11(b), (c)에서 보는 바와 같이 정규분포곡선에서 일그러지는 모습으로 나타나고 있으며, peak to peak 값이 증가되어 나타나고 있다. RMS 값과 Kurtosis 값 및 파워 Cepstrum과 비교하여 본 결과는 Table 1과 같다. RMS 값의 변화는 거의 없으며, Kurtosis 값은 계속 증가되어 나타내며, 파워 Cepstrum에서는 서서히 값이 증가하다 이상발생시 현저한 증가현상을 보이며, 또한 side band에 의해 발생하는 n차 rahmonic 이 나타남으로써 이상발생 유무판단에 좋은 기술이라 생각된다.

6. 결 론

Cepstrum 해석법을 컴퓨터 시뮬레이션하고 볼 베어링의 이상진단에 적용하여 기존의 이상진단 기술과 비교한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 Cepstrum 해석법이 직접파와 반사파의 분리에 유용함을 확인하였다. 또한 진동수가 다른 어떠한 회전체의 이상진단에도 파워 Cepstrum 해석의 적용이 가능함을 알았다.

2) Cepstrum 해석법을 이용한 베어링의 이상진단은 기존의 이상진단기술(RMS 값, Kurtosis 값, PDF) 보다 유용함을 알았다.

REFERENCES

1. Luiz G. Martins and N. Y. Gerges, "Comparison between Signal Analysis for Detecting Incipient Bearing Damage", Condition Monitoring '84, 10th-13th, April, 1984, U. K., pp. 191-204.
2. Ray. L. Martin, "Detection of Ball Bearing Malfunction", IBM General Systems Division, I & CS 2, December, 1970, pp. 1-4.
3. O. K. Kwon and H. S. Kong, "Some Implications of Wear Debris Analysis in Thermally Achived Wear Process-From Viewpoint of R. P. D.", Condition Monitoring '84, 10th-13th, April, 1984, U. K., pp. 751-764.
4. 오재응, "Bispectrum 해석에 의한 기기이상진단의 응용에 관한 연구", 한양대학교 산업과학 논문집, No. 18, 1984, pp. 117-123.
5. 오재응, 윤의성, 염성하, 권오관, "Cepstrum 해석법에 의한 베어링의 이상진단에 관한 연구", 1985년도 대한기계학회 춘계학술대회 초록집, June, 1985, pp. 259-264.
6. J. E. Oh, E. S. Yoon, S. H. Yum and O.K.Kwon, "A Study on Ball Bearing Fault Diagnosis by Cepstral Analysis", International Conference on Rotordynamics, Sep. 1986, pp. 397-401.

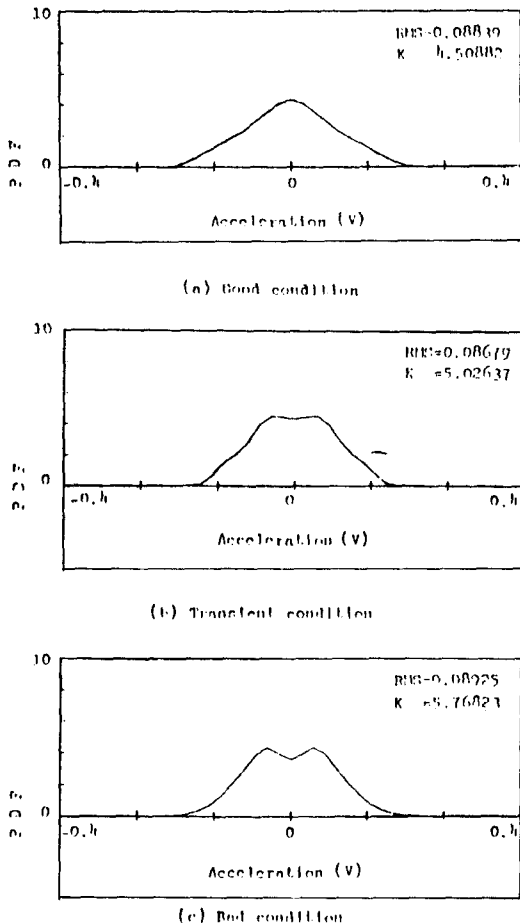


Fig11. Probability density function according to time history by Fig. 8, 9, 10.