論文 한국정밀공학회지 제13권 제3호 (1996년 3월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 13. No 3. March. 1996.

위상스펙트럼을 이용한 볼베어링의 국부결함 검출

윤 종 호*, 이 장 무**

Detection of Localized Defects in Ball Bearing Using Phase Spectrum

J. H. Yoon,* J. M. Lee**

ABSTRACT

Recently, vibrational signal processing as a tool of machinery diagnosis has been actively studying. In this study, a new scheme for detection and diagnosis of localized defects in ball bearings, using unwrapped phase spectrum of FFT is described. The characteristic phase spectra for such defects shows linearly varying patterns due to the repetitive impact signals generated by localized defects, i.e., one linear line for single defect and various linearly changing shape according to angle between the two defect located points. The effectiveness of this method is confirmed by computer simulation and experiments on bearings with single or double defects at different locations.

Key Words : Ball Bearing(볼베어링), Defect Detection(결함검출), Phase Spectrum(위상 스펙트럼), Digital Signal Processing(이산신호처리), Computer Simulation(컴퓨터 시뮬레이션)

1. 서 론

장시간 운전되는 기계의 부품들 특히, 베어링이나 치차등은 사용시간의 경과에 따라 퇴화하게 된다. 만약 이 부품들의 결함현상이 초기에 발견되지 않으면 高價의 기계가 돌발적으로 손상 또는 파괴될 수 있다. 따라서 기계의 파손부위 및 상태를 조기에 판정하고 대책을 수립함으로써 기계부품과 기계의 손상빈도수를 줄이고, 수리시기를 생산에 지장이 제일 적은 적절한 일시를 채택함으로써 기계류의 손상 또는 파괴로 인한 생산손실을 최대한 줄일 수 있다.

기계의 상태를 진단하기위한 연구들 중에서 진단신호처리기법에 대한 연구의 역사를 살펴보면 Dyer와 Stewart[1]가 통계적인 방법을 이용한 구름베어링의 결함검출을 시도하였다. 이들은 尖度(Kurtosis)해석을 이용하면 베어링의 속도나 부하상태와는 무관하게 손상에 따라 첨도가 변하는 것을 밝히고, 비교적 낮은 진동수대역(3-5,000Hz)에서 결함검출이 빨리 이루어질 수 있음을 보여 주었으며, 이 값이 3 이상이 되면 기준치와의 비교없이 그 자체만으로도 임박한 파손지표로써 유용함을 확인하였다. 스펙트럼을 이용한 기계진단은 Randall[2] 등이 진동신호를 1 또는 1/3 옥타브

* 경북산업대학교 공과대학 기계설계학과
** 서울대학교 공과대학 기계설계학과

스펙트럼분석을 하여 적용한 바 있다. O'Dea[3], Osuagwu[4] 등은 진동신호의 협대역 스펙트럼분석을 하여 진단에 적용하면 조기에 많은 정보를 얻을 수 있지만은 계산시간이 많이 걸리고 회전속도 등이 변화할 때 스펙트럼비교분석이 어려움을 밝혔다. 그 밖에 진단신호처리에 대한 연구로 Randall[2]은 치차박스 진단에 켑스트럼을 이용하여 복잡한 주기성을 갖는 스펙트럼들의 특성을 좀 더 분명히 밝힐 수 있음을 보여 주었으며, 清水 등[5]은 비선형계의 해석에 많이 이용되는 바이스펙트럼(bispectrum)을 기계진단에 도입하여 결함 검출을 위한 연구를 수행한 바 있다. 그러나 이와 같은 진단 신호처리기법들은 Mathew 등[6]의 연구에서도 언급된 바와 같이 상기의 여러가지 방법들은 베어링의 손상형태에 따른 가치를 갖게 되며, 전반적으로 주파수 영역의 매개변수들이 시간영역매개변수들보다 결함검출에서 안정성을 보여 주었지만 베어링 손상검출에 한가지 방법에만 전적으로 의존하는 것은 바람직한 방법이 아님을 알 수 있다. 또한 짧은 데이타에서도 高精度 스펙트럼분석방법과 복합결함의 배열을 해석하기위한 위상 스펙트럼같은 신호처리 방법의 도입은 이루어 지지 않았다.

본 연구에서는FET해석에서 얻어지는 위상을 이용하여 결함을 진단할 수 있음을 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통하여 확인할 수 있었다. 결함신호의 경우에는 반복되는 충격신호로인하여 선형적으로 변화하는 위상패턴을 보여주었다.

2. 이론적인 고찰

2.1 위상 스펙트럼

위상스펙트럼을 이론적으로 고찰하기 위해 Fig.1과같이 내륜에 하나의 점결함이 있는 베어링을 생각해 보자.

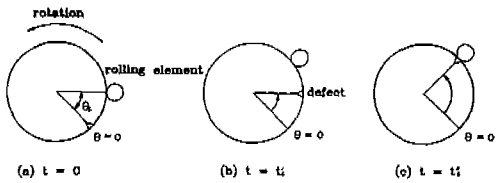

Fig. 1 Definition of the position of defect on ball bearing

진폭이 d_o 인 충격이 반복되는 신호를 d(t)라 하면,

$$d(t) = d_o \sum_{k=1}^{\infty} \delta(t - kT_i) \tag{1}$$

여기서 Ti는 반복충격신호의 주기, $\delta(t)$는 단위 충격함수이다. 식(1)의 푸리에 변환은 다음 식으로 계산된다.

$$D(f) = d_o f_{ir} \sum_{k} \delta(f - kf_{ir}) \tag{2}$$

여기서은 f_{ir} 내륜의 통과주파수(pass frequency)를 나타낸다.

베어링의 반경방향 하중분포함수를 q(t), 결함과 진동센서사이의 전달함수를 a(t), 그리고 각 충격파들의 감쇠곡선을 e(t)라하고, 이 들의 푸리에 변환을 각각 Q(f),A(f) 및 E(f)라 하면, 변환기로부터 얻어지는 복변조된 신호 v(t)와 그 진폭스펙트럼 V(f)는 다음과 같다.

$$v(t) = \{q(t)\ \ a(t)\ \ d(t)\} * e(t) \tag{3}$$

$$V(f) = \{Q(f) * A(f) * D(f)\}\ \ E(f) \tag{4}$$

반시계 방향으로 회전하는 축에서 볼과 결함의 초기 사잇각을 θ_i이라 하고, t = 0에서 결함의 위치(θ)를 0 으로 정의하자. 내륜결함이 볼의 위치까지 회전하는 시간 t_i' 와 내륜결함과 볼이 만나는 시간 t_i''는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$t_i' = \frac{\theta_i}{2\pi f_r} \tag{5}$$

$$t_i'' = \frac{\theta_i}{2\pi(f_r - f_c)} \tag{6}$$

여기서 f_r 과 f_c 는 각각 축의 회전속도와 케이지의 회전속도를 나타낸다. 내륜결함의 통과진동수, 축의 회전속도와 케이지의 회전속도 사이에는

$$\frac{f_{ir}}{f_r - f_c} = N \tag{7}$$

의 관계가 있다.[7] 따라서 볼과 결함이 만나는 시간 t_i''는 다른 방법으로 표현될 수 있다.

$$t_i'' = \frac{\theta_i}{2\pi} \frac{N}{f_{ir}} \tag{8}$$

즉, t_i' 와 t_i'' 는 θi에 비례한다. 시계열 신호$x(t)$에서의 시간이동 t_o는 스펙트럼 $X(f)$에서 위상이동으로 나타난다. 즉, $x(t)$ 와 $x(t-t_o)$ 를 푸리에 변환하면 각각$X(f)$와 $X(f)\ e^{-j2\pi ft_o}$ 로 된다. 하중분포 $q_i(t)$와 전달함수$a_i(t)$는 똑같이 시간이 t_i' 만큼 지연되어 나타난다. 따라서 이들의 곱은 단일 함수$C_i(t)$로 표현할 수 있다.

$$c_i(t) = c\left(t-t_i'\right) \tag{9}$$

$$C_i(f) = C(f)\ e^{-j2\pi f\ t_i'} \tag{10}$$

마찬가지로 반복되는 충격파들은 다음 식으로 정의할 수 있다.

$$d_i(t) = d\left(t-t_i''\right) \tag{11}$$

$$D_i(f) = D(f)\ e^{-j2\pi f\ t_i''} \tag{12}$$

Fig.1의 θi위치에서 단일 결함에 대한 진동 스펙트럼은 다음과 같다.

$$V_i(f) = \left\{C_i(f)*D_i(f)\right\}E(f) \tag{13}$$

여기서

$$C_i(f)*D_i(f) = D_o f_{ir}\sum_k\left[C\left(f-kf_{ir}\right)e^{-j2\pi\left\{t_i'f+\left(t_i''-t_i'\right)kf_{ir}\right\}}\right]$$
$$= d_o f_{ir}\sum_k C\left(f-kf_{ir}\right)e^{j\phi_i} \tag{14}$$

앞의 식에서 위상ϕ_i 는

$$\phi_i = -2\pi\left\{t_i'f+\left(t_i''-t_i'\right)kf_{ir}\right\} \tag{15}$$

가 된다. 식(5)와(6)을 식(15)에 대입하면 ϕ_i에 대한 식이 얻어진다.

$$\phi_i = \frac{-\theta_i}{f_r}\left\{\left(f-kf_{ir}\right)+\frac{kf_{ir}}{1-\left(f_c/f_r\right)}\right\} \tag{16}$$

이론적으로 진폭스펙트럼 V(f)는 m 과 n을 정수라 할 때, 다음 식과 같은 진동수들에서만 '0'이 아니다.

$$f = mf_{ir}+nf_r \tag{17}$$

식(17)을 식(16)에 대입하면, 위상에 관한 선형관계식이 얻어진다.

$$\phi_i = -\theta_i(mN+n) \tag{18}$$

앞의 식은 θ_i 에 있는 하나의 점결함에 대한 스펙트럼의 위상을 나타내며 항상 θ_i의 정수배가 된다. $m=0$ 일때, $f=0$에 중심을 둔 스펙트럼들의 위상이 얻어지고; $m=1$일때 $f=f_{ir}$에 중심을 둔 스펙트럼들이 얻어진다. 두 위상의 경사도는 같지만 $f=f_{ir}$에 중심을 갖는 성분들의 위상은 편심되어 나타난다. $\theta_i=0$ 인 경우에 위상 ϕ_i 는 0 이 되며, 모델은 단순한 단일 결함형태로 된다.

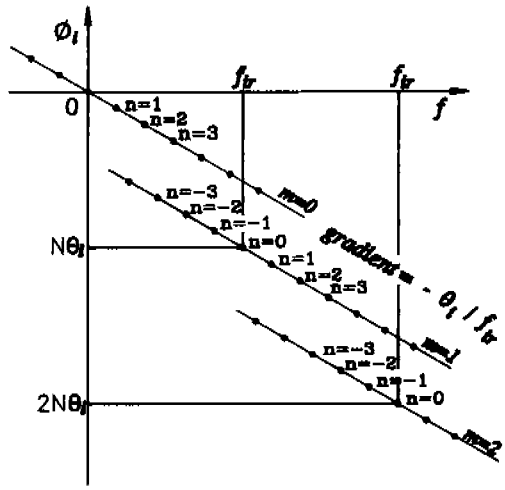

Fig. 2 Phase spectrum for a single point defect

2.2 위상 펼침(Phase unwrapping)[9]

위상펼침은 복소 켑스트럼을 계산하기 위해서 도입되었으며, 실수 수열 $x(n)$의 복소켑스트럼 $\hat{x}(n)$은 Oppenheim과 Schafer[8]가 제안한 것처럼 이산푸리에변환(DFT)의 복소 대수값을 푸리에 역변환(IDFT)하는 것으로 식(19)와 같이 계산될 수 있다.

$$\hat{x}(n) = IDFT\left[\log\left\{DFT\left(x(n)\right)\right\}\right] \tag{19}$$

여기서 DFT의 길이는 켑스트럼 혼성(aliasing)을 피할 수 있을 만큼 충분히 크게한다. 상기 계산에 포함된 복소대수연산을 하기위해서는 x(n)의 위상을 주파수 영역에서 평가하는 것이 요구된다. 이러한 요구에서 Tribolet는 위상 펼침에 대해 적응 수치적분 알고리즘을 이용한 계산법을 제안하였다. 이 기법은 각각의 진동수에서 펼친 위상을 계산하기 위해 主 位相値(principal value of phase)과 위상도함수를 모두 이용한다. 위상 도함수의 계산은 실수열 x(n)과 nx(n)모두의 이산푸리에 변환에 대한 지식을 필요로 한다.

위상펼침 알고리즘의 기본 개념은 다음과 같다. Ω_1을 임의 주파수라 하면, $ARG\left[X\left(e^{j\Omega_1}\right)\right]$은 주 위상치가 되며, $\arg\left[X\left(e^{j\Omega_1}\right)\right]$은 펼친 위상이 된다. 그리고 $\arg'\left[X\left(e^{j\Omega_1}\right)\right]$ 은 Ω_1에서의 위상 도함수이다. Ω_1에서 허용가능한 위상치들의 집합은

$$\{ARG\left[X\ e^{j\Omega_1}\right]+2\pi l,\ \ l \text{ 은 정수}\} \tag{20}$$

여기서, l 은 정수이고, 위상펼침 문제는

$$\arg\left[X\left(e^{j\Omega_1}\right)\right]=ARG\left[X\left(e^{j\Omega_1}\right)\right]+2\pi l_c(\Omega_1) \tag{21}$$

이 되도록 올바른 정수치 $l_c(\Omega_1)$을 결정하는 것이다. $\Omega_0<\Omega_1$ 인 진동수에서 펼친위상이 알려져 있다고 가정하면, $\Omega_1, a\bar{r}g\left(e^{j\Omega_1}\right)\|\ \Omega_0]$에서의 위상추정치는 다음 식으로 정의 될 수 있다.

$$a\bar{r}g\left[X\left(e^{j\Omega_1}\right)\|\Omega_0\right]=\arg\left[X\left(e^{j\Omega_0}\right)\right]+\frac{\Omega_1-\Omega_0}{2}\left\{\arg'\left[X\left(e^{j\Omega_0}\right)\right]+\arg'\left[X\left(e^{j\Omega_1}\right)\right]\right\} \tag{22}$$

이 추정치는 단계구간 $\Delta\Omega=\Omega_1-\Omega_0$가 적어질수록 개선되는 것을 쉽게 알 수 있다. Ω_1에서의 위상 추정치는 THLCON을 경계수준(threshold level)이라할 때

$$\left|a\bar{r}g\left[X\left(e^{j\Omega_1}\right)\|\Omega_0\right]-ARG\left[X\left(e^{j\Omega_1}\right)\right]+2\pi l_c(\Omega_1)\right|<THLCON<\pi \tag{23}$$

가 되도록 $l_c(\Omega_1)$이 존재하면, 안정된(consistent) 것으로 정의한다. 따라서 이 알고리즘의 기본 개념은 안정된 위상추정치가 얻어질 때까지 스텝의 크기 $\Delta\Omega$를 적응시키는 것이다. 식(23)에서 얻어진 $l_c(\Omega_1)$을 식(21)에 대입하면 $\Delta\Omega$에서의 펼쳐진 위상이 얻어진다. 이렇게 펼쳐진 위상은 $a\bar{r}g\left[X\left(e^{j\Omega_2}\right)\|\Omega_1\right], \Omega_2>\Omega_1$등의 계산에 응용된다.

3. 실 험

3.1 베어링 시편 [10]

베어링 결함들의 패턴을 만들기 위해서는 다양한 시험편들이 요구된다. 베어링의 결함은 내외륜의 국부결함은 스크래치를 궤도면에 주었으며, 볼의 국부결함은 로크웰 경도계로 압입자국을 주거나 전기연필로 방전시켜 만들었다. 케이지의 결함은 베어링의 케이지에 외부에서 압입홈집을 주어 만들었다.

본 연구에서 베어링시험용으로 사용된 볼베어링은 단열깊은 홈 볼베어링 6205(개방형)을 사용하였으며, 그 주요 사양과 특성 주파수는 Table 1 및 Table 2와 같다.

Table 1 Specifications of test ball bearing (KBC 6205)

specification	size(mm)
pitch diameter	39
ball diameter	7.938
inner diameter	25
outer diameter	52
number of balls	9 e.a.

Table 2 Typical frequencies of test bearing

component	frequency(Hz)
shaft rotation	30.0
inner race defect	162.83
outer race defect	107.17
rolling element spin	70.643
rolling element defect	141.286
rolling element train	11.947

3.2 시험 장비

본 연구에서 사용된 장비들의 주요 사양은 다음과 같다.

진 동 센 서 : 가속도계(B&K 4375),
증 폭 기 : 전하증폭기 (Charge amplifier, B&K 2635),
가 변 필 터 : NF Model FV-606T, 36 (dB/oct),
A/D 변환기 : Lab Master DMA (A/D 16 채널, 표본화 속도;100 kHz),
FFT 분석기 : ONO SOKKI (CF-500, 2채널, 20 kHz),
데이타 레코더 : Shinkoh 9101, reel 타입,
오실로스코프 : TEKTRONIX 4 CH

등을 사용하였으며, 베어링의 구동장치는 Fig.3에서 보는 바와 같으며 직접설계 및 제작하였다.

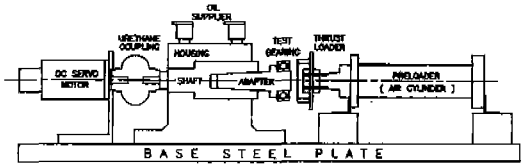

Fig. 3 Bearing test rig

4. 컴퓨터 시뮬레이션과 실험결과의 고찰

4.1 단일 결함

Fig.4는 회전기계 특히, 베어링의 결함신호 특성을 시뮬레이션한 것이다.그림(a)는 시간영역에서 반복되는 충격감쇠 정현파를 보여주고 있으며, 그림(b)는 이 신호의 FFT를 를 이용한 파워스펙트럼을 보여준다. 또한 그림(c)와 (d)는 각각 접혀진 위상과 펼친위상 스펙트럼을 나타낸다. 그림(d)에서 볼 수 있듯이 반복충격파들의 경우에 그 위상 스펙트럼은 식(17)에서 m=0인 경우에 해당되는 것으로써 위상이 선형적으로 감소되는 모습을 보여준다. 이 것들과 비교하기 위하여 Fig.5에 컴퓨터시뮬레이션으로 계산된 불규칙한 신호[그림(a)]의 파워 스펙트럼[그림(b)], 겹쳐진 위상[그림(c)] 및 펼쳐진 위상스펙트럼[그림(d)]을 나타내었다. Fig.4(d)와는 대조적으로 위상 스펙트럼이 불규칙하게 변하는 것을 알 수 있다.

Fig.6에서는 정상베어링의 진동신호와 결함으로 인한 반복충격파가 있는 베어링진동신호들의 위상스펙트럼을

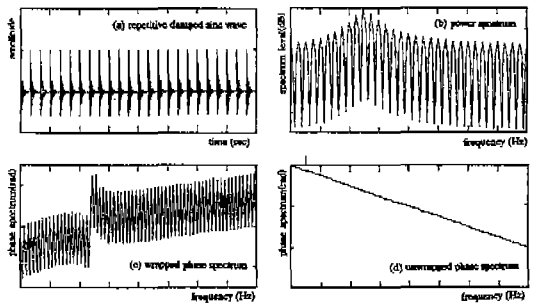

Fig.4 Bearing fault simulation and its spectra

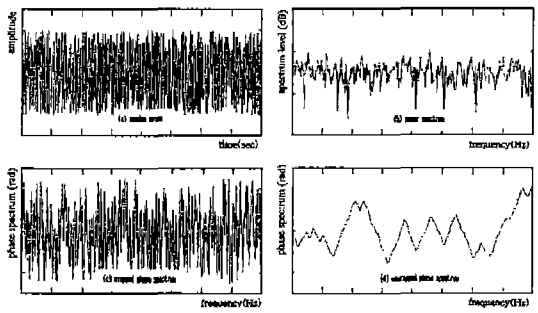

Fig.5 Random noise simulation and its spectra

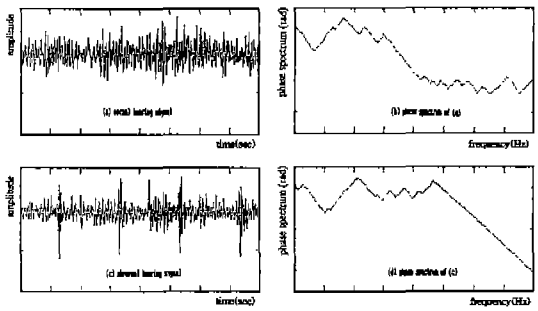

Fig.6 Comparison of phase spectra between normal and abnormal bearing

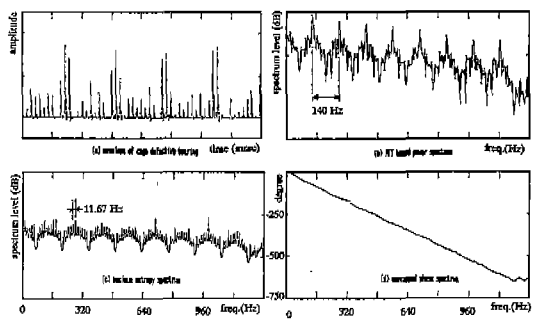

Fig.7 Envelope and spectra of the vibration signal with a cage defect

비교한 그림이다. 결함이 있는 경우에는 베어링의 궤도(race)가 가진되어 高 진동수의 충격파가 발생되어 위상들이 고 진동수 영역에서는 선형적으로 변화되는 것을 관찰 할 수 있다. 또한 Fig.7에서는 케이지 결함이 있는 베어링의 위상스펙트럼해석결과를 보여주고 있다. 그림(a)는 결함신호의 포락선이고, 그림(b)는 포락선신호를 FFT분석한 결과인 데 볼결함의 특성주파수인 140 Hz간격의 스펙트럼이 뚜렷하게 나타나고 있으나, 그림(c)에서처럼 최대 엔트로피법으로 계산된 스펙트럼에서는 케이지결함 특성주파수인 11.67Hz가 뚜렷하게 나타나지 않음을 알 수 있다. 그림(d)에서 보는 바와 같이 단일 결함의 경우에 선형적으로 나타나는 것이 확인 되었다.

4.2 다중 결함의 시뮬레이션 해석

Fig.8에서는 결함이 두개씩 있는 회전기계 부품들의 신호특성을 알아보기위해 컴퓨터시뮬레이션한 신호들을 보여준다. 그림에서 큰 진폭은 100이고, 작은 진폭은 50이다. 충격을 모델링한 신호들의 진폭크기는 큰 의미가 없으며, 국부결함들 사이의 상대위치에 따른 신호특성을 살펴보고자 한다. 그림(a)는 진폭이 100인 단일 결함이 있는 경우의 신호모델을 나타내고, 그림(b)에서 (e)까지는 내륜, 외륜, 케이지 또는 볼 등에 결함이 2개 존재하는 경우, 두 결함사이의 사잇각에 따라 만든 신호모델로서 그림(b)는 $\pi/4$ (rad), 그림(c)는 $\pi/2$ (rad), 그림(d)는 $3\pi/4$ (rad), 그림(e)는 π(rad)만큼 두 결함을 배열시켰다. 그리고 그림(f)는 특성주파수가 상이한 부품들에 1 개씩 두 개의 결함이 존재하는 경우의 신호모델을 나타낸다.

Fig.9와 Fig.10은 Fig.8의 신호모델들에 대응되는 파워 스펙트럼과 위상스펙트럼을 각각 나타낸다. 파워스펙트럼은 결함의 상대적인 위치에 따라 변조된 모습을 보여주고 있으나, 이 패턴만으로는 결함의 상대위치를 파악하기가 어려움을 알 수 있다. 그러나 Fig.10의 위상스펙트럼들에서는 결함들의 상대적인 위치에 따라 매우 판이한 위상패턴을 보여주고 있어서 결함들의 상대위치 파악에서 매우 유용한 방법이 될 수 있음을 보여준다. 그림(f)의 경우에는 상이한 진동수를 갖는 두 결함이 동시에 일어남으로써 스펙트럼이 중첩되어 복잡한 형상을 보여 주었다.

5. 결 론

회전기계의 결함진단 방법으로서 FFT분석에서 얻어지는 위상스펙트럼 해석방법이 유용한 방법임을 확인하였

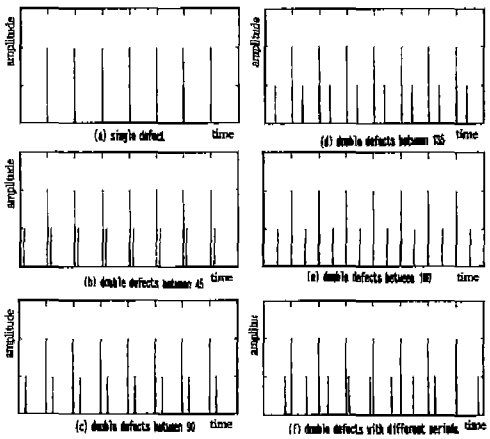

Fig.8 Envelope signal models with two localized defects

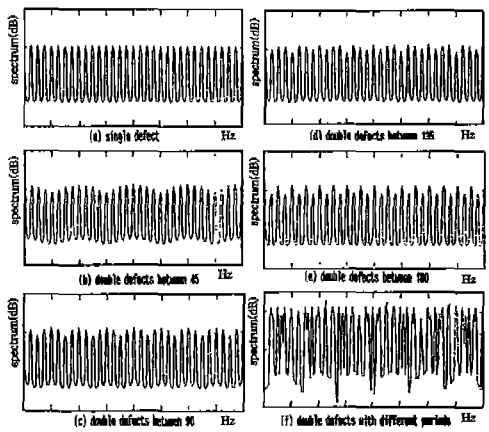

Fig.9 Power spectra of the signal models in Fig.8

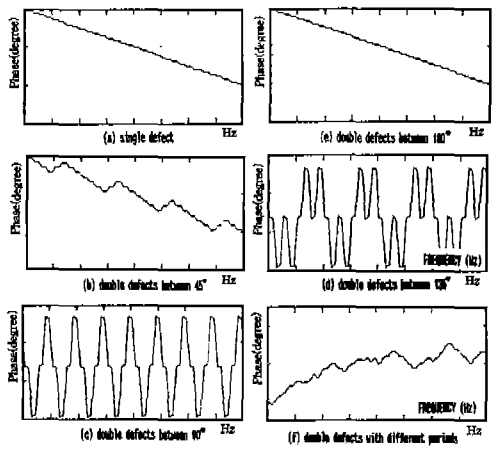

Fig.10 Phase spectra of the signal models in Fig.8

다. 국부 결함이 있는 경우에 위상 스펙트럼은 반복되는 충격파로 인하여 선형적으로 변화되는 패턴을 이론전개와 실험을 통하여 알 수 있었다. 2개씩 있는 결함모델들에서는 결함의 배치에 따라 특색있는 위상스펙트럼 패턴들이 나타난다. 즉, 위상 스펙트럼은 파워스펙트럼이나 켑스트럼에서는 구분이 잘 되지 않는 다중결함들의 배열위치 판별에 유익한 방법임을 컴퓨터시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

후 기

본 연구의 일부는 경북산업대학교 교내 일반연구비의 지원으로 이루어진 것이며, 이에 학교당국에 감사드립니다.

참고문헌

1. Dyer,D., and Stewart,R.M., "Detection of Rolling Element Bearing Damage by Statistical Vibration Analysis," Trans.ASME, J. of Mech. Design, 100(2), pp.229-235, 1978.
2. Randall,R.B., Frequency Analysis, 3rd ed., B&K, 1987.
3. O'Dea,D.M., "User Experience with Computerized Machinery Vibration Analysis," Hydrocarbon Processing, Dec.1975, pp.81-84.
4. Osuagwu,C.C., and Thomas,D.W., "Effect of Inter-Modulation and Quasi-Periodic Instability in the Diagnosis of Rolling Element Incipient Defect," J. of Mechanical Design, Vol.104, Apr.1982, pp.296-302.
5. 清水久二,天野由夫, "振動分析에 의한 設備診斷技術의 硏究 - Bispectrum 導入의 基礎 硏究," 安全工學, 16卷 4號, 1977, pp.219-224.
6. Mathew,J., and Alfredson,R.J., "The Condition Monitoring of Rolling Element Bearings using Vibration Analysis," J. of V.A.S.R. in Design, July 1984, Vol.106, pp.447-453.
7. Harris,T.A., "Rolling Bearing Analysis", 2nd ed., John Wiley & Sons, pp.229-252, 1984.
8. Oppenheim,A.V., and Schafer,R.W., "Discrete-time Signal Processing" , Prentice-Hall,N.Y., Chapter 12, 1989.
9. IEEE D.S.P. Committee, "Programs for Digital Signal Processing" , IEEE Press, pp.7.1-2 3 , 1979.
10. 윤종호, 김성걸, 김종현, 유정훈, 이장무, "회전기계 볼베어링의 자동 진단시스템에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제19권 제8호, pp.1787-1798, 1995.