



# 회계기계의 상태감시 및 진단을 위한 진동신호의 변환 및 표시소개

함 증 석\*

(한국과학기술원 기계공학과)

## 1. 머리말

발전소, 화학공장, 제철 제강 제지 설비 등에 있어서 회전기계류에 대한 상태감시나 이상진단은 생산성 및 안전성을 증대하고 비용의 절감에 있어서 필수적인 기술이며, 국내외적으로 그 수요가 증가하고 있다. 따라서 항공기 엔진, 터빈 발전기, 압축기, 전동기, 펌프 등의 회전기계의 상태감시나 이상진단을 효과적으로 하기 위하여 진동신호의 변환 및 표시방법을 소개한다.

회전기계의 진동신호의 표시는 대략적으로 나열하면 다음과 같은 것이 있다.

- 크기(magnitude)
- 시간파형(time wave plot)
- 경향(trend plot)
- 스펙트럼(spectrum plot)
- 축 선회 궤적(orbit plot)
- 허용영역선도(acceptance region plot)
- 축 중심위치선도(shaft centerline position plot)
- 보테 선도(bode plot)
- 극형식 선도(polar plot)
- Cascade/waterfall plot
- 방향성 스펙트럼선도 (directional spectrum plot)
- 웨이블렛 선도

- 방향성 웨이블렛 선도
- 차수 선도(order tracking plot)
- 캠벨다이아그램(campbell diagram)

상기에 열거한 표시방법은 여러 가지 신호처리 기법이 필요하며 대상기계의 상태나 진단에 필요한 특징을 효과적으로 나타내기 적절히 선택하여야 한다.

## 2. 진동신호 변환 및 표시

### 2.1 진동크기(Magnitude)

보통 진동신호에 크기에 있어서 RMS(root mean square) 값, 제로-피크값(0 to peak), 피크-피크 값(peak to peak) 값 등이 있다.

### 2.2 시간 파형 선도(Time Wave Plot)

이것은 가장 기본적인 선도로서 그림 1, 2와 같이 시간 축에 대한 진동신호의 진폭으로 나타내는 것으로서 대부분의 경우 이러한 파형에 많은 주파수의 진동신호가 포함되어 있어서 계의 특성을 파악하기 힘든 경우가 많다. 이 때에는 신호의 적당한 변환이나 가공이 필요하다.

### 2.3 경향 선도(Trend Plot)

이 선도는 그림 3과 같이 진동의 크기를 일정한 시간 간격마다 표시하여 전체적인 진동경

\* E-mail : jsham@kaist.ac.kr / Tel : (042)869-3056

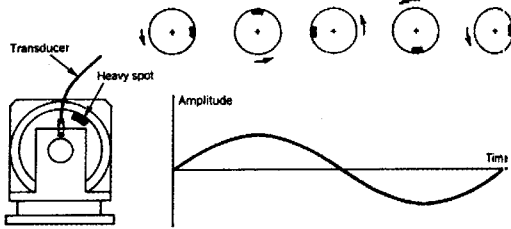


그림 1 불평형이 발생시킨 다일주파수 진동신호 파형

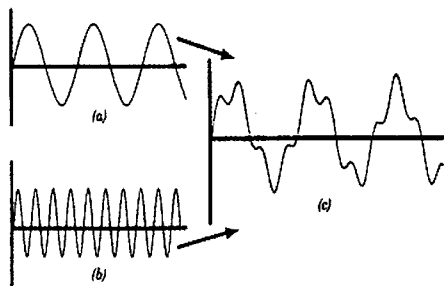


그림 2 2개의 정현파로 구성된 시간 파형

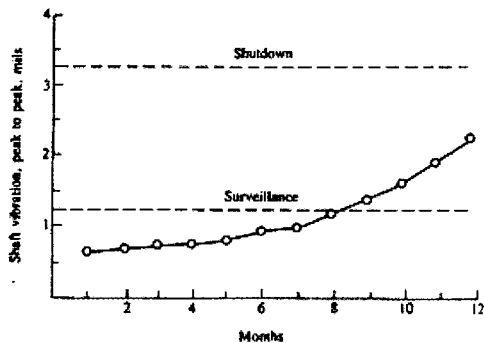


그림 3 터빈 축 경향선도 예

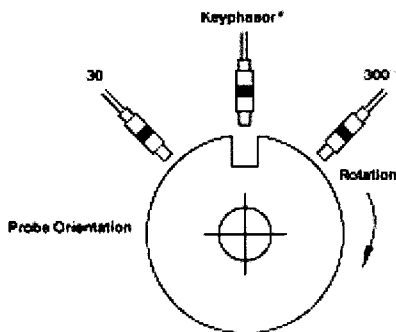


그림 4 진동센서 부착위치도

향 분석에 사용되며, 시스템의 상태감시에 빈번히 사용된다. 진동의 크기는 RMS, 제로-피크, 피크-피크 값 등이 사용된다.

### 2.4 축 선회 궤적 선도(Orbit Plot)

이 선도는 그림 4와 같이 진동변환기를 서로 수직으로 측정하여 축의 궤적을 평면 상에 나타낸 것으로서 회전기계의 특징을 나타내는 유력한 방법이다. 그림 5에 여러 원인에 의한 축 선회 궤도선도의 예가 나와 있으며, 축 궤적을 관찰하면 회전기계의 진동특징을 쉽게 파악할 수 있으나 이를 체계적으로 분석하기 위한 방향성 스펙트럼 분석법을 나중에 간략히 소개한다.

### 2.5 스펙트럼 선도(Spectrum Plot)

이 선도는 복잡한 시간영역의 신호를 주파수 영역으로 변환하여 주파수 성분 별로 나타낸 것으로서 일반 구조물 진동에서와 마찬가지로 회전기계에서 보편적으로 사용되고 있는 방법이다. 그러나 이 선도는 신호가 정상상태를 가정하고 있으므로 회전기계의 상태가 급격히 바뀌는 상황에서는 그 적용에 한계가 있다.

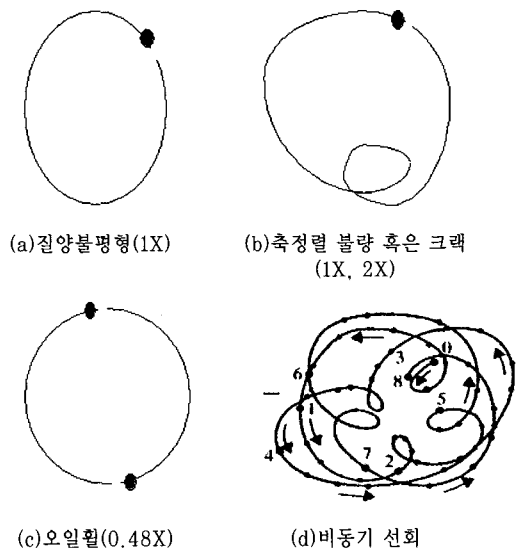


그림 5 선회궤적과 진동원인

## 2.6 방향성 스펙트럼 선도 (Directional Spectrum Plot)

서로 수직인 두 방향의 축 진동신호를 평면상에 나타내면 그림 7(a)와 같이 축 선회계적 선도가 되고, 이 두개의 신호를 하나의 변수(복소수)로 하여 푸리에 변환을 취하면 그림 7(b)와 같이 방향성 스펙트럼 선도로 표시할 수 있다.

일반적으로 단일 주파수로 이루어진 축의 선회계적은 서로 반대 방향인 2개의 원 형태의 선회계적이 결합한 것으로 나타낼 수 있으며, 이러한 방법은 회전체 해석에 있어서 유용한 방법을 제공한다. 그림 7(b)에서 양의 주파수 성분은 선회방향이 축의 회전방향과 같은 정방향 선회성분이 되고 음의 주파수 성분은 축의 회전방향과 반대인 역방향 선회성분이 된다.

## 2.7 허용영역 선도

### (Acceptance Region Plot)

이 선도는 회전속도성분 또는 그 배수 성분의 진동신호를 극좌표 형식으로 나타낸 것으로서 운전 중에 변화추이를 관찰하면 회전체의 부품탈락 또는 크랙 등을 검출할 수 있다.

## 2.8 축 중심 위치 선도

### (Shaft Centerline Position Plot)

이 선도는 축 선회계적 선도와 같이 2개의 수직방향으로 측정된 진동신호의 DC 성분만을 나타낸 것으로서 베어링에서 축의 위치 및 attitude angle 등을 알 수 있다.

## 2.9 보데 선도(Bode Plot)

이 선도는 회전속도에 대하여 회전수의 정수 배 진동 성분을 크기 및 위상으로 나누어 표시하는 것으로서 위험속도, 계의 감쇠특성 등을 파악할 수 있다.

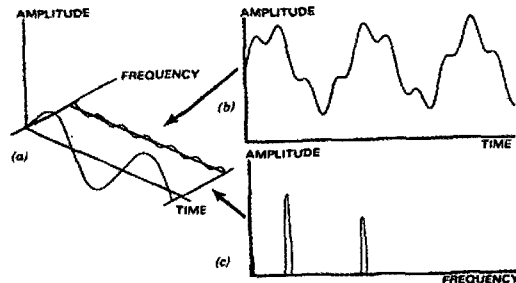
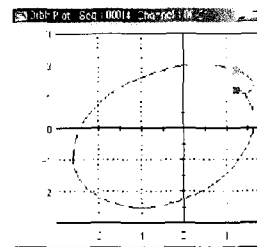
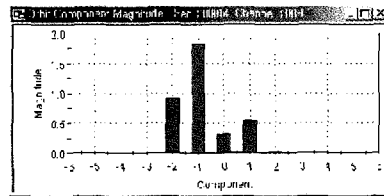


그림 6 신호의 시간과 주파수 영역과의 관계



(a)



(b)

그림 7 (a)선회계도, (b)방향성 스펙트럼

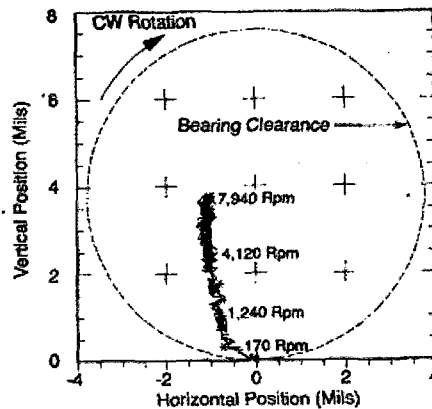


그림 8 Expander 기동 시 축 중심의 변화

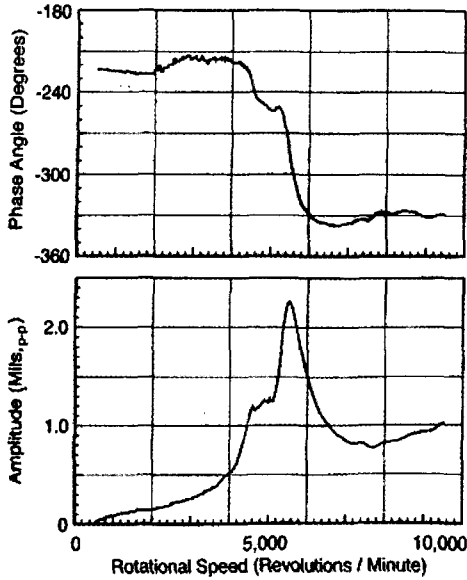


그림 9 보데선도: 원심압축기 기동시 신호

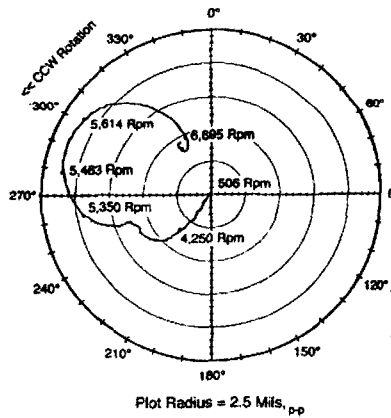


그림 10 극형식선도: 원심압축기 기동시 1X 성분

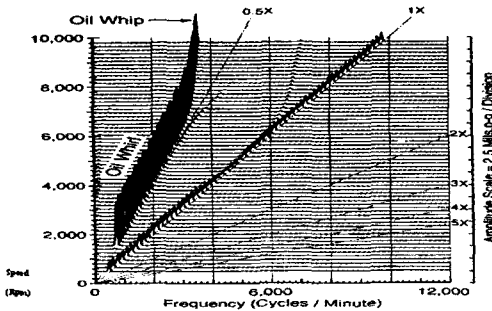


그림 11 터빈의 오일 힐과 오일 힐이 변하는 현상을 보여주는 cascade 선도

### 2.10 극형식 선도(Polar Plot)

이 선도는 보데 선도와 마찬가지로 각 회전수에서 진동의 크기와 위상을 극 형식으로 표시한 것이다.

위 그림과 같이 진동의 크기와 위상변화를 쉽게 관찰할 수 있다.

### 2.11 Cascade/Waterfall 선도

이 선도는 그림 11과 같이 각 주파수의 진동의 크기를 회전 속도 혹은 시간 별로 나타낸 것으로서 운전 속도 별로 진동 변화추이를 파악할 수 있다.

### 2.12 방향성 Cascade/Waterfall 선도

이 선도는 cascade 선도와 비슷하지만 1방향 스펙트럼 대신 방향성 스펙트럼을 사용한 점이 다르다. 서로 수직인 두 방향의 진동신호로써 표현되는 궤도 운동을 주파영역에서 나타내면 방향성 스펙트럼 선도가 되며, 양의 주파수 영역은 축 선회방향이 축의 회전 방향과 동일하고 음의 주파수 영역은 회전축과 반대 방향이 된다.

그림 12에서 (a)와 (b)는 실험실 회전체 실험에서 서로 수직하는 각 방향의 신호를 주파수 영역에서 표시한 것이며 그림 (c)는 두개의 신호를 하나의 변수로 취급하여 방향성 스펙트럼 형식으로 변환한 것이다. 즉 앞의 그림 두개는 일반적으로 사용하고 있는 스펙트럼 선도로서 방향성 스펙트럼 선도를 나타내는 그림 (c)에 비하여 회전체 동특성을 확인하는 데 상당히 복잡하고 어렵지만, 마지막 그림은 쉽게 파악이 가능하다.

### 2.13 웨이블릿 선도(Wavelet Plot)

이 선도는 신호의 통계적인 값이 급격히 변하는 과도 상태인 경우에 적합한 신호처리 및 표시 방법이다. 엔진의 경우와 같이 회전축 한

바퀴 동안 엔진 폭발로 인하여 과도 상태인 신호가 되며 보통의 푸리에 변환을 통하여서는

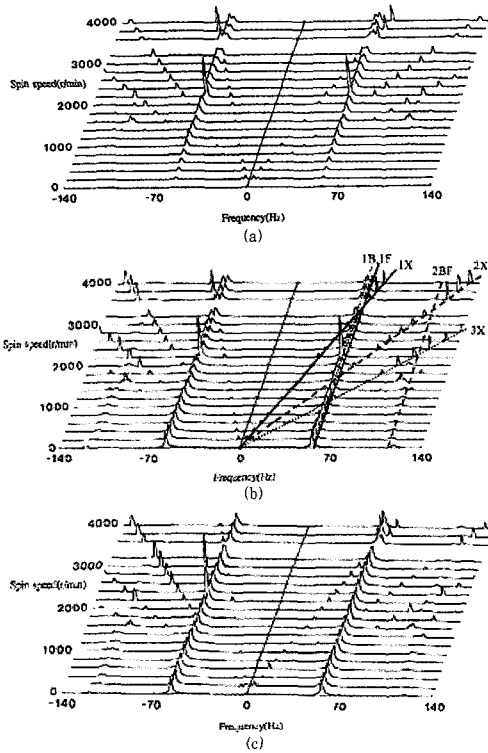


그림 12 일반 스펙트럼 선도(a), (b)와 방향성 스펙트럼 선도 (c)와의 비교

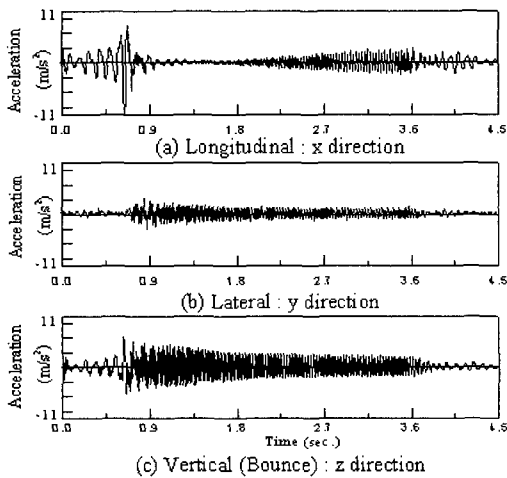


그림 13 엔진의 엔지기동/아이들링/정지 시 발생하는 엔진의 3방향 가속도 신호

주파수 특성을 파악하기 어려우므로 웨이블릿 변환을 사용하면 계의 특성을 파악할 수 있다. 이 방법은 일정한 시간 축과 주파수축의 평면 상에 진동의 크기를 나타냄으로써 시간변화에 대한 주파수 특성변화를 관찰할 수 있다.

### 2.14 방향성 웨이블릿 선도 (Directional Wavelet Plot)

이 선도는 방향성 스펙트럼 선도에서와 마찬가지로 두 수직방향의 신호가 나타내는 선회 신호를 대상으로 하여 웨이블릿 변환한 것으로서, 양과 음의 주파수 영역에서 각 선회의 방향성과 진동성분을 나타낸다. 즉, 임의의 시각에서 양 주파수 영역의 값은 회전축과 동일한 선회방향

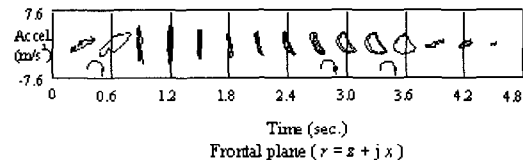


그림 14 그림 12에서 엔진의 평면 궤적 운동

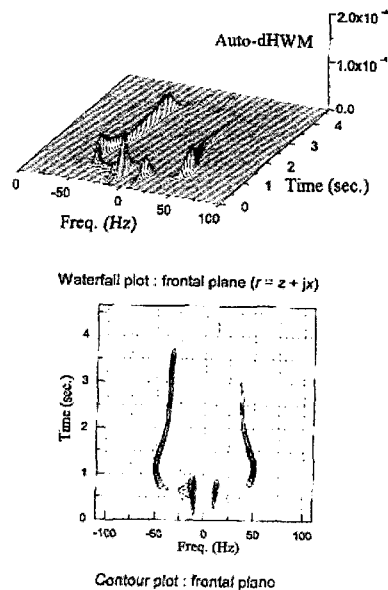


그림 15 엔진 기동/아이들링/정지 시 방향성 하모닉 웨이블릿 신호처리 예

의 신호를 나타내며 음의 주파수 영역에서의 값은 반대 방향의 선회신호를 나타낸다. 그림 13은 4기통 자동차 엔진의 crank on/idling/off 기간 동안 엔진에서 발생하는 세 방향 가속도 신호로서 과도 상태의 신호이다. 그림 14는 엔진 한 점의 평면궤도 운동을 나타낸 것이고 그림 15는 이를 웨이블릿 선도에 표시한 것이다.

### 2.15 차수 선도(Order Tracking Plot)

일반적으로 회전기계에서는 베어링, 기어, 블레이드 등 회전과 관련 있는 부품이 소음이나 진동의 발생원인이 되므로 회전속도에 관계 있는 소음진동을 발생시킨다. 따라서 주파수 영역으로 신호를 나타내는 것 보다 회전속도의 하모닉 성분으로 표시하는 것이 회전기계에서는 더 편리할 수 있다. 이러한 경우 회전수의 하모닉 성분을 차수라 하며 이를 임의의 회전속도에 대하여 신호의 크기를 표시하는 것을 차수 선도라 한다. 차수 분석은 한 바퀴 회전동안 일정한 각도로 신호를 샘플링하여 푸리에 변환하는 방법, 트래킹 필터를 사용하는 방법, short time 푸리에 변환방법(혹은 가버 변환) 등이 있다.

### 2.16 캠벨 다이어그램 (Campbell Diagram)

이 선도는 차수 분석의 결과를 나타낸 것으로

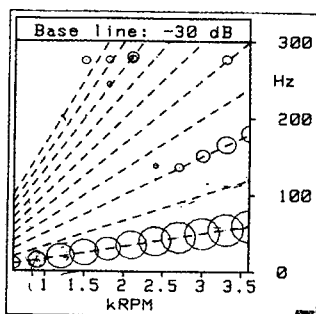


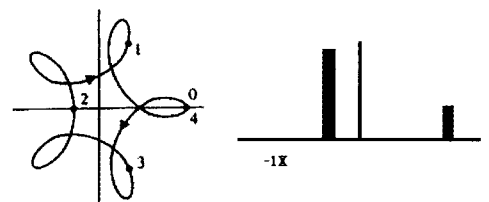
Fig. 64. Example of a Campbell Diagram

그림 16 캠벨선도

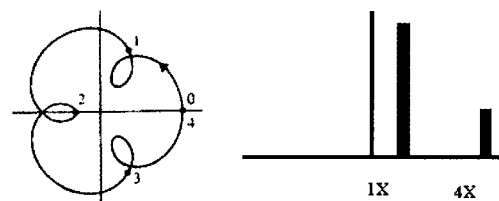
로서 그림 16에서와 같이 가로 축은 회전수로 하고 세로축은 주파수 축으로 하여 각 차수성분의 크기를 원의 크기로 나타내는데 속도변화에 따라 각 차수 성분의 크기를 파악할 수 있어 시스템의 동특성을 파악하는데 있어서 유력한 수단이 된다.

### 3. 방향성 스펙트럼의 유용성

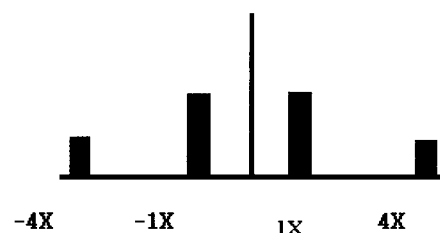
회전체 해석에 있어서 다양한 신호처리방법과 표시 방법이 존재하지만, 그 중에서도 선회계적은 회전체 계의 규명에 강력한 방법을 제공한다. 예를 들면 그림 5에서와 같이 진동을 야기시키는 원인에 따라 독특한 선회계적을 발생시킨다. 이와 같이 선회계적의 모양이나 기울기, 선회의 주파수 성분 등은 종래의 스펙트럼 방법을 사용해서는 구별이 가지 않는다. 따



(a)



(b)



(c)

그림 17 방향성 스펙트럼 선도와 일반 스펙트럼과의 비교



라서 방향성 스펙트럼으로 선회궤도를 해석 및 신호를 처리하게 되면 그 구분이 가능하게 된다. 예를 들면 아래 그림 17과 같이 (a)와 (b)의 경우는 선회궤도가 다르고 따라서 방향성 스펙트럼이 서로 다르다. 그러나 이들 두 경우에 있어서 한 개 방향의 신호를 일반 스펙트럼으로 신호처리 하면 (c)와 같이 나와 변별성이 없어진다. 구체적인 방향성 스펙트럼의 자세한 참고문헌을 참조하기 바란다.<sup>(14)</sup>

#### 4. 맺음말

회전기계의 상태감시 및 진단을 하기 위한 여러 가지 진동표시 방법과 변환에 대하여 간략하게 소개하였다. 실제로 현장에서 사용할 신호처리 방법과 표시방법은 사용자가 계의 특성에 따라 적절한 방법을 선택하여 사용하여야 한다. 특별히 여기서는 일반적으로 사용하던 방법 외에, 회전체의 특징을 효과적으로 추출하는 방법으로서 회전축의 선회를 분석하는 방향성 스펙트럼 선도에 대한 소개를 하였다. 이 방법은 웨이블렛, 차수분석에도 확장적용 할 수 있으며, 회전기계의 여러 원인별 선회궤도와 방향성 스펙트럼에 대한 자료가 축적되면 그 활용성이 증대되리라 판단된다.▲

#### 참고 문헌

(1) Lee, C. W. and Han, Y. S., 1998 "Directional Spectrum Analysis and its Applications to Rotating Machine Diagnose", NOVIC, KAIST, KOREA.  
 (2) 이종원, "방향성 스펙트럼의 이해," 한국

과학기술원 기계공학과.

(3) Lee, C.W., Han, Y.S. and Lee, Y.S., "Use of Directional Spectra of Vibration Signals for Diagnosis of Misalign-ment in Rotating Machinery", Fifth International Congress on Sound and Vibration, Adelaide, December 1997  
 (4) Lee, C.W., Han, Y.S., "Use of Directional Wigner Distribution for Identification of the Instantaneous Whirling Orbits in Rotating Machinery" , The Seventh International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (ISROMAC-7), Honolulu, p.126~ 134, February 1998  
 (5) 함종석, 이종원, 박성호, 양보석, 황원우, 최연선, 전오성, "회전기계 상태감시 및 진단시스템 개발," 소음진동공학회 2003 추계학술대회 pp.950-955.  
 (6) Lee, C. W., 1993, Vibration Analysis of Rotors, Kluwer Academic Publishers.  
 (7) Randall, R. B. and Tech., B. A. 1987, Frequency Analysis, B & K, Denmark.  
 (8) Vance, J. M., 1988 Rotordynamics of Turbomachinery, John Wiley & Sons, Inc.  
 (9) Ehrich, F. F., 1992 Handbook of Rotordynamics, McGRAW-HILL, Inc.  
 (10) Eisenmann Sr., R. C. and Eisenmann Jr., R. C., 1998 Machinery Malfunction Diagnosis and Correction, Prentice-Hall, Inc.  
 (11) Newland, D. E., 1993 Random Vibrations, Spectral & Wavelet Analysis, Longman Scientific & Technical.