

# 진동을 이용한 설비 진단 1

- ISO 설비진단 기술자 자격인증 제도 및 회전기계의 진동 특징

## 1. ISO 진단기술자 자격인증제도

### 1.1 설비의 정비 방식

설비란 전력이나 철강, 화학 등의 플랜트에서 생산설비, 항공기나 선박, 차량 등의 이동 설비를 포함한 표현이다. 이들 설비의 정비방식은 신뢰성(Dependability) 용어 (JIS Z 8115:2000)에 의하면, 그림 1.1과 같이 분류된다.



그림 1.1 정비 방식의 분류

정비(Maintenance)는 보수(Repair) 또는 보전으로도 불리며, 설비를 운전이 가능한 상태로 유지하고, 고장(Failure)이나 결함(Fault) 등을 회복하기 위한 조치 및 활동으로 정의된다. 그림 1.1에서와 같이 정비는 관리상 설비의 고장 발생을 미연에 방지하기 위해 수행하는 예방정비(Preventive Maintenance, PM)과, 고장 발생 후에 설비를 정상상태로 복구시키기 위해 수행하는 사후정비(Breakdown Maintenance, BM)로 대별된다. 더욱이 예방정비는 가동시간 등을 기초로 정비를 수행하는 시간기반정비(Time-based Maintenance, TBM)과 설비 상태에 기초해 정비를 실시하는 상태기반정비(Condition-based Maintenance, CBM) 또는 예지정비

(Predictive Maintenance, PdM)으로 분류된다.

시간계획정비에서는 정기보수 등의 예방정비간격을 안전 측(Safety side)으로 취하는 것이 일반적이다. 따라서 이 정비방식에는

- 보수 후의 설비기동에 의해 일시적으로 고장률이 상승한다.
- 과잉정비(Over Maintenance)가 될 확률이 높다.
- 정기보수를 위한 설비정지에 의해 생산성이 저하된다.

등의 단점이 있다.

상태기반정비를 도입하는 것에 의해 시간계획정비가 가지는 이러한 단점을 극복할 수 있는 가능성이 있다. 경제적인 효과로서 정비비용의 5 %, 설비고장에 기인하는 생산손실(제품, 품질손실을 포함)의 30 %가 절감될 수 있다는 보고도 있다.

상태기반정비는 상태감시정보로도 불리며, ISO 13372 : 2004 에서는 예지정비로서도 정의되고 있다. 예지정비의 특징은 다음과 같다.

정기적으로 수애하는 것은 보수가 아니고 운전 중의 상태감시이며, 보수는 상태감시의 결과가 그 필요성을 나타내는(열화가 진행되었다고 판단됨) 경우에만 수행된다.

정기적인 상태감시에 의해 열화가 진행되고 있지 않다고 판단된 설비는 그래도 운전이 지속된다.

ISO 13372 : 2004에서는 고장의 근본원인에 대한 예로 베어링 손상에 대한 윤활유 오염의 검출과 수정을 목적으로 한 예지정비 사전정비(Proactive maintenance)로 정의하고 있다. 또한 상태기반정비에 대비하여 시간기반정비를 시간계획정비(Time scheduled maintenance)로 부르는 경우도 있다.

## 1.2 설비진단기술이란

상태기반정비(예지정비)에 의해 설비를 효율 좋게 유지, 관리하기 위해서는 대상으로 되는 설비의 상태를 정량적으로 파악하는 기술이 필요하고, 그 기술이 설비진단기술이다. 설비진단기술이란 설비의 현재까지의 상태를 확인하고 이상 혹은 고장에 관한 원인 및 장래에의 영향을 예지, 예측하고 필요한 대책을 찾아내는 기술이다. 설비진단은 사람을 위한 의사와 같이 설비의 의사로 불리는 경우도 있다.

설비진단기술은 1960년대 후반 유럽과 미국에서 항공, 우주, 군사, 원자력 설비의 조기 이상 감지를 목적으로 탄생하였다. 1970년대에 들어와 그 기술이 산업 플랜트의 설비정비 합리화에 이용되었다. 일본을 포함한 선진국 기업의 정비비용이 경영을 압박하도록 된 것이 계기가 되었다. 특히, 설비 고장이나 플랜트 사고에 대한 사회적인 신용도나 기업의 이미지 저하 등 금액으로는 직접 환산할 수 없는 요인을 중요시하는 최근의 경향이 설비진단기술의 보급을 후원하고 있다.

설비진단에 있어서의 설비의 상태란

- 고장의 원인이 되는 여러 스트레스의 상태
- 설비의 열화나 고장의 상태
- 설비의 성능이나 기능을 나타내는 운전상태

를 나타낸다. 스트레스에는 응력이나 부하뿐만이 아니고, 햇빛이나 분위기 온도, 습도, 가스 등의 요인도 포함된다. 이들 상태를 나타내는 상태 파라미터를 검출하고, 설비의 상태를 종합적으로 평가하는 것이 설비진단이다.

ISO 13372 : 2004에서는 설비진단을 설비(기계)의 상태감시와 진단으로 나누어 정의하고 있다. 즉,

- 상태감시란 설비의 상태를 나타내는 정보나 데이터를 검출, 수집하는 것
- 진단이란 이상상태의 특성을 나타내는 징후를 평가하는 것

이다. 상태감시는 예전부터 적용되고 있는 간이진단에 대응하고, 진단은 정밀진단에 대응한다.

### 1.3 설비진단의 기본 구성

진동을 이용한 설비진단의 기본 구성은 그림 1.2와 같다. 간이진단 방법으로는 설비의 상태를 인간이 계측기를 등을 사용하여 간헐적으로 조사하는 방법(점검)과, 감시 장치에 의해 연속적으로 감시하는 방법(상시감시)이 있다.

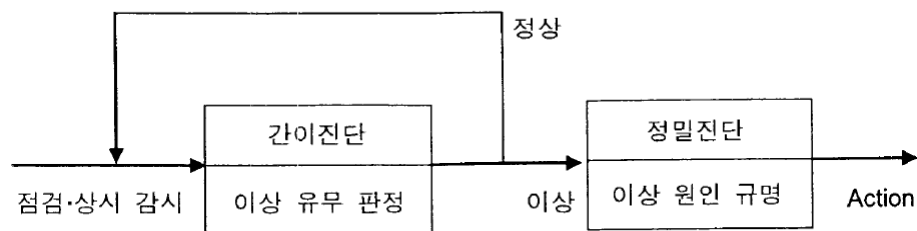


그림 1.2 설비진단의 기본 구성

## 간이진단

간이진단은 인간에 있어서 건강진단에 상당하고, 설비의 상태를 신속하고 효율적으로 파악하는 단계이다. 간이진단의 목적은

- 열화 경향관리에 의한 이상의 조기발견
- 경향관리 데이터의 외삽에 의한 고장 도달시점의 예측
- 자동정지 등에 의한 설비의 보호
- 정밀진단 대상 설비의 선정

등이다. 진동을 이용한 간이진단은 방법에 따라 다음의 3가지로 분류된다.

- (1) 사람에 의한 순회 진단 방법 - 사람이 휴대용 진단기기를 이용하여 설비를 순회하여 진단하는 방식이다. 간편하고 값싼 방식이지만, 투자대비 효과가 비교적 좋다.
- (2) 단자함(Terminal box)을 설치한 순회 진단 방법 - 진단 대상설비가 위험한 장소에 있고, 진단을 위해 접근할 수 없는 경우에 채용되는 방식으로, 설비에 진동센서를 부착하고 부근의 안전한 장소에 설치된 단자함에서 휴대용 진단기에 의해 측정하는 방식이다.
- (3) 상설 모니터에 의한 방법 - 중요한 설비를 상설의 감지장치를 이용하여 연속적으로 감시하는 방식이다. 이 방식은 고가이기 때문에, 돌발 고장에 의한 손해가 막대한 최 중요설비에 적용된다.

## 정밀진단

정밀진단은 간이진단에서 이상으로 판정된 설비의 상태를 상세하게 해석하고, 취해야 할 정비활동을 결정하는 단계이다. 정밀진단에서는

- 이상의 종류 및 발생위치 추정
- 추정된 이상의 위험도 파악 및 진행의 예측
- 최적 수복방법 및 수복시기의 결정

등을 수행한다.

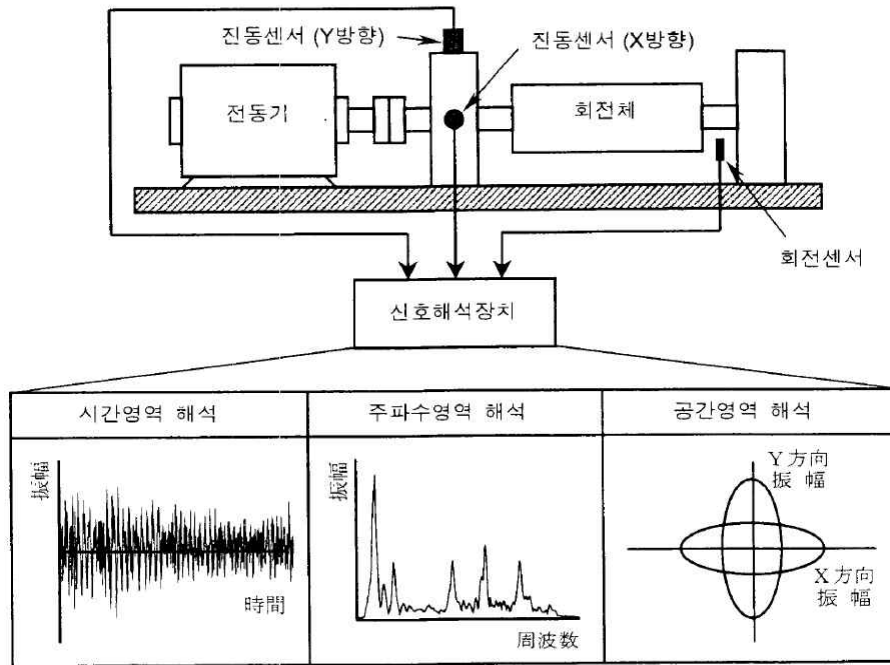


그림 1.3 정밀진단을 위한 해석 방법

그림 1.3의 회전기계의 진동진단을 예로 들어 정밀진단에 이용되는 해석방법에 대해 설명한다. 대표적인 해석방법으로는 다음의 3가지가 있다.

- (1) 시간영역 해석 - 시간파형, 진폭의 확률밀도함수 등을 이용하여 진폭의 크기나 시간적 변동, 파형의 충격성과 대칭성 등을 해석한다.
- (2) 주파수영역 해석 - FFT(고속 푸리에 변화) 등을 이용하여 진동에 어떤 주파수 성분(스펙트럼)이 포함되어 있는지를 해석한다.
- (3) 공간영역 해석 - 리사주 도형 등을 이용하여 회전축 중심(진동)이 공간적으로 어떤 궤적을 그리며 운동하는지를 해석한다.

#### 1.4 상태 파라미터에 의한 설비진단기술의 분류

설비진단에는 크게 구별하여 설비의 성능이나 기능을 나타내는 주 효과 파라미터를 이용하는 방법과 설비의 가동에 의해 발생하는 2차 효과 파라미터를 이용하는 방법이 있다. 주 효과 파라미터는 설비가 본래 목적을 수행할 때 관측되는 상태 파라미터로서, 전동기에서는 출력, 토크, 회전수 등이 해당되고, 펌프에서는 토출압력이나 토출유량 등이 해당된다. 주 효과 파라미터를 이용하여 설비의 상태감사를 하는 것은 성능감사(Performance monitoring) 또는 거동감시(Behavior monitoring)

으로 불린다. 이 방법은 일반적으로 특별한 센서를 필요로 하지 않고, 설비 상태를 간편하게 파악할 수 있는 장점이 있다.

2차 효과 파라미터란 설비의 가동에 의해 변화하는 진동, 음향, 온도 등의 부수적인 상태 파라미터를 말한다. 진단을 위해 전용 센서가 필요하고, 통상 복잡한 신호 처리를 필요로 하는 단점이 있지만, 이상의 조기발견 및 이상 원인이나 발생위치를 정확히 확인하는 데는 이 방법에 의한 진단이 적합하다. 따라서 주 효과 파라미터는 주로 간이 진단에 이용되고, 2차 효과 파라미터는 간이진단과 정밀진단에 모두 이용되는 것이 일반적이다.

또한 ISO 18436에서는 설비진단을 상태감시와 고장분석으로 나누어 정의하고 있다. 이들은 위에서 설명한 간이진단과 정밀진단에 거의 대응하고 있으나, 정확히는 약간 다른 부분이 있다.

### 1.5 ISO에서 기계의 상태감시와 진단 관련 규격

1990년 ISO의 기술위원회 TC 108(기계진동 및 충격) 총회에서 진동의 상태감시와 진단에 관한 규격의 제정 필요성에 대한 제안이 있었고, 1993년 이것을 담당할 분과위원회로 SC 5(기계의 상태감시 및 진단)가 발족하였다. 1994년부터 미국을 중심으로 한 SC 5 회의가 개최되고 있고, 일본에서도 수년의 준비기간을 거쳐 2000년 부터 일본기계학회를 간사기관으로 하는 SC 5 국내위원회가 본격적인 활동을 시작하였다. 이 위원회는 대학, 플랜트 제작사 및 사용자, 계측기 제작사 등으로부터 약 20명의 위원이 등록되어 있고, 매년 개최되는 SC 5 국제회의에 참가를 시작으로 하여 규격안 상정에 적극적인 활동을 전개하고 있다.

한국에서도 (사)한국소음진동공학회가 TC 108의 국내 간사기관으로 지정되어 활동하고 있으며, 산하 SC 5의 국내 간사기관의 업무를 한국산업안전공단에 위임하여 현재 약 12명의 전문위원이 등록되어 SC 5 국제회의 참석 및 국내 의견을 수렴하여 국제규격 제정에 반영되도록 노력하고 있다.

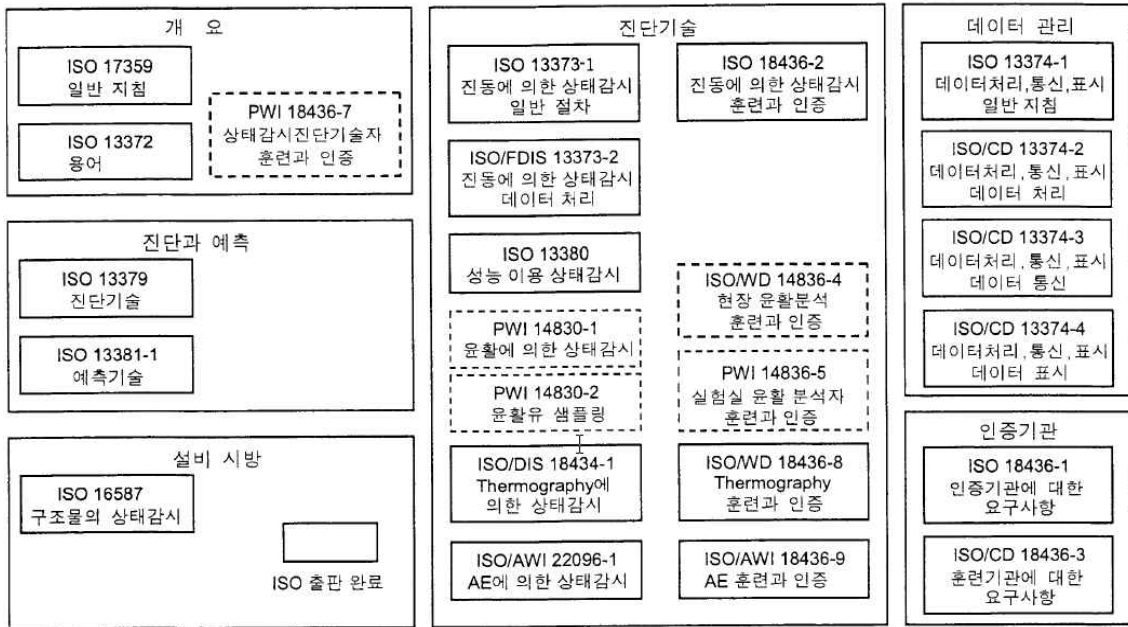


그림 1.4 ISO TC 108/SC 5 "기계의 상태감시 및 진단" 규격 및 규격안(2006년 5월 기준)

2007년 4월말 기준의 기계의 상태감시 및 진단과 관련된 규격 및 규격안의 상황을 그림 1.4에 나타내었다. 이미 10개의 규격이 발행되어 있고, 이후 계속 새로운 규격이 발행될 예정이다. 그림 1.4에서 진단기술자의 자격인증제도에 관한 규격이 ISO 18436 시리즈 “기술자의 자격을 위한 요구사항”으로 그 구성은 다음과 같다.

- 제 1 편 : 인증기관 및 인증절차에 관한 요구사항 (ISO 18436-1:2004)
- 제 2 편 : 진동분석 (ISO 18436-2:2003)
- 제 3 편 : 훈련시스템을 운영하는 기관을 위한 요구사항 (ISO DIS 18436-3)
- 제 4 편 : 현장 운할제 분석 (ISO DIS 18436-4)
- 제 5 편 : 운할제 실험실 기술자/분석자 (ISO CD 18436-5)
- 제 6 편 : 음향방출 (ISO DIS 18436-6)
- 제 7 편 : 서모그래피(Thermography) (ISO DIS 18436-7)
- 제 × 편 : 상태감시전문가 (ISO PWI)

**1.6 인증기관 및 인증절차를 위한 요구사항(ISO 18436-1:2004)**

이 규격에서는 기계의 상태감시를 수행하고, 기계결함을 확인하며 수정작업의 지시를 수행하는 기술자에 관한 인증시스템을 운영하는 기관에 대한 요구사항을 규정하고, 상태 감시 및 진단기술자의 인증절차를 명확히 하고 있다. 이 규격에 의해 아

래의 기술 등을 이용한 기계 상태를 평가하기 위한 휴대용, 성질 센서 및 기기를 이용한 측정, 해석 등을 수행하는 개인의 자격과 능력을 인증한다.

- 진동(Vibration)
- 윤활제 분석(Lubricant analysis)
- 음향 방출(Acoustic Emission)
- 서모그래피(Thermography)
- 상태감시전문가(Condition monitoring specialist)

각 기술은 난이도에 따라 초급, 중급, 및 고급의 3개 영역(Category)으로 분류하는 것을 권장하고 있으나, 필요에 따라서는 영역을 4단계 이상 또는 2단계 이하로도 분류할 수 있다. 인증절차의 개요를 그림 1.5에 나타낸다.

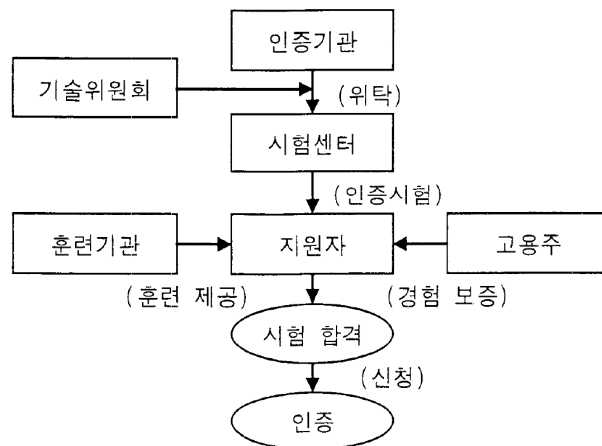


그림 1.5 인증절차의 개요

인증의 유효기간은 인증서(Certificate) 및 휴대용 카드에 기재된 인증일부터 5년을 초과하지 않는 것으로 되어 있고, 대부분 인증일로부터 5년으로 하고 있다. 그리고 중대한 중단 없이 업무활동을 만족스럽게 계속하고 있다는 것을 증거로 제출하는 것에 의해 다시 5년간의 인증 갱신을 받을 수 있도록 되어 있다. 중대한 중단(ISO 18436-1:2004)이란 인증자가 인증의 적용범위에 상당하는 의무를 다할 수 없는 365일을 초과하는 연속적인 기간, 2회 또는 그 이상의 합계가 인증서 유효기간의 2/5이상인 기간 동안의 업무의 이탈 또는 변경을 말한다.

ISO 18436의 인증을 받은 자는 국제적 원리에 따라 인간으로서의 고결함과 전문



가로서의 능력의 교훈을 인식하여야 하고, 인증을 취득한 기술자는 이하의 윤리규정을 따를 것을 요구하고 있다.

- (1) 환경, 안전, 건강 및 공공복지에 관심을 가지고, 전문가로서의 의무를 다한다.
- (2) 훈련과 경험에 관련된 측정, 해석만을 책임지고, 보상이 요구되는 경우에는 그 요구를 담당할 수 있는 별도의 전문가와의 계약을 권유한다.
- (3) 이성 있는 태고와 공명정대한 업무활동으로 동료, 고객 및 관계자와 접한다.
- (4) 공공의 복지에 반하지 않는 한 고용주, 고객, 동료 및 일반 대중으로부터 얻은 정보를 절대 누설하지 않는다.
- (5) 근거 없는 문서의 작성 및 이 규격에 기초한 인증 프로그램에 반하는 비윤리적인 행동을 하지 않는다.
- (6) 비기술적인 권위에 의해 기술적인 판단이 반복되는 것으로부터 파생되는 불리한 결론도 고용주가 고객에서 표명한다.
- (7) 고용주나 고객과의 이권투쟁을 피한다. 작업의 이행에 관해 그러한 투쟁이 발생한 경우, 상황을 관계자에게 신속히 전달한다.
- (8) 상태감시를 위한 측정, 해석기술의 적절한 수행에 필요한 기술적 지식의 새로운 습득을 수행하고, 기술의 유지에 노력한다.

### 1.7 진동분석에 의한 상태감시 및 진단(ISO 18436-2:2003)

이 규격에서는 기계의 상태감시 및 진단에 종사하는 진동분석 기술자에 관한 일반적 요구사항을 규정하고 있다. 이 규격의 인증은 휴대용 및 상설 센서, 기기를 이용하여 기계진동의 측정, 해석을 수행하는 기술자의 자격과 능력의 승인을 제공하는 것이다. 이 기술에서는 다음과 같은 4단계의 영역을 규정하고 있다.

- (1) 영역 I (Category I) - 1 채널 진동 측정기기를 취급하는 자격으로, 센서의 선택, 분석 및 측정 결과에는 책임이 없다.
- (2) 영역 II (Category II) - 1 채널 진동 측정기기를 사용하여 기계 진동의 기본적인 측정과 분석이 가능하다.
- (3) 영역 III (Category III) - 확립되고 일반화된 순서에 따라서 기계의 진동측정과 진동분석의 실행 및 지시가 가능하다.
- (4) 영역 IV (Category IV) - 모든 유형의 기계 진동 측정과 분석의 실행 및 지

시가 가능하다.

이 규격에서 규정(권장)하고 있는 훈련과정 및 훈련시간을 표 1.1에 나타낸다. 권장되는 최단기간의 실무경험 월수를 표 1.2에 나타낸다. 또한 인증시험의 문제수, 시험시간 및 합격선의 예는 표 1.3에 나타내었다.

### 1.8 해외에서 인증제도의 실시 현황

ISO 18436 시리즈는 미국 진동연구소(VI, Vibration Institute)가 실시하고 있던 자격시스템이 기본이 되었다. ISO 18436-2 발행 후, VI는 미국의 인증기관이 되어 지금까지 수행하던 자격시스템을 ISO 인증제도로 변경하였다. 영역 I ~ IV에 대한 합계로 현재 이미 약 2,000명의 기술자가 자격인증을 받고 있다. 또한 미국 내에 머무르지 않고 중남미, 동남아시아, 중근동에서도 동일한 인증서비스를 실시하고 있다.

영국은 영국비파괴시험협회 (BINDT, British Institute of Non-Destructive Testing)에서 인증기관으로 인증업무를 실시하고 있다. 일본은 일본기계학회(JSME)가 인증업무를 실시하고 있고, 2004년 7월 19일부로 VI와 ISO 18436-2 자격인증에 관한 상호인정협정(MRA, Mutual Recognition Agreement)을 체결하였다. 이후, VI 관련국과의 상호승인이 이루어지고, 또한 제도를 실시하지 않는 국가들과의 상호승인계약이 체결되게 되면 설비진단기술 자격인증은 세계에 널리 인지될 것이다.

우리나라는 2003년 초부터 인증기관 설립을 위한 준비활동에 이어 2007년 4월 정식으로 (사)한국소음진동공학회 산하에 인증기관인 “한국설비진단자격인증원 (KCI-MD, Korea Certification Institute for Machine Diagnostics)”을 설립하고, 5개의 훈련기관을 공식 지정하여 운영하고 있다. 이와 함께 일본기계학회로부터 인증시스템을 도입하였으며, 2007년 3월 일본기계학회, 7월에 VI와 상호인정협정을 체결하였다.

<표 1.1> 진동에 의한 기계의 상태감시 및 진단에 종사하는 기술자에 대한 훈련과정

과 목	훈련 시간(시간)			
	영역 I	영역 II	영역 III	영역 IV
1. 진동의 원리	6	4	2	4
2. 데이터 취득	8	4	2	2
3. 신호처리	2	4	3	8
4. 상태감시	2	4	3	1
5. 결함분석(고장분석)	2	4	8	6
6. 수정조치(대책처리)	2	4	6	16
7. 설비(장비)지식	8	4	4	-
8. 승인시험(인수시험)	2	2	2	-
9. 장비시험과 진단	-	2	3	4
10. 참조규격	-	2	2	2
11. 보고서와 서류	-	2	2	4
12. 결함심각도 결정	-	2	3	3
13. 회전체-베어링 동역학	-	-	-	14
훈련시간 합계	32	38	40	64

<표 1.2> 누적 경험의 권장되는 최단 기간

영역 I	영역 II	영역 III	영역 IV
6 개월	18 개월	36 개월	60 개월

<표 1.3> 인증시험의 상세 예

분류	문제 수	수험 시간	합격선
영역 I	50	2시간	75%
영역 II	100	3시간	
영역 III	100	4시간	
영역 IV	60	5시간	

## 2. 회전기계 진동의 특징과 측정방법

회전기계는 대부분의 설비에 있어 핵심 구동부가 되므로 운전 신뢰도가 특히 중요하다. 따라서 설계 시 진동문제를 예방할 수 있도록 진동에 대한 엄밀한 분석이 수행되어야 함은 물론 운전 중 진동을 감시하여 진동에 의한 설비의 파손이나 사고를 방지하도록 하는 제반 안전장치를 필요로 한다. 회전기계가 운전 중 과도한 진동 발생에 의해 파손되는 경우가 있으며, 대체로 큰 위험이 수반되며 회전기계의 파손에 의한 직접적인 손실뿐만 아니라 생산차질 등의 이차적 손실 또한 큰 문제점이 되고 있다. 이를 위해 기계나 설비 전체의 성능이나 안전성 확보에 핵심이 되는 회전기계 진동에 대한 이해를 위해 회전기계 진동 특징에 대하여 알아보려고 한다.

### 2.1 회전기계 진동의 특징

#### 단순 회전체계의 진동특성

회전체의 기본적인 특성을 알아보기 위해 그림 2.1과 같은 단순 회전체를 생각해 보도록 한다. 이 회전체의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

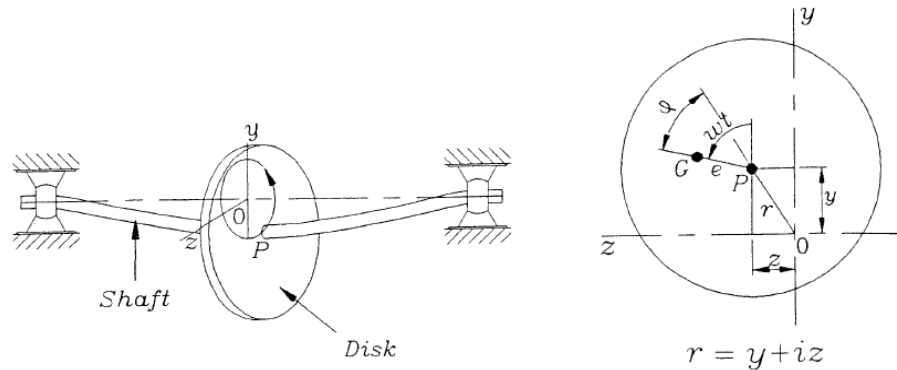


그림 2.1 단순회전체 모형

$$m\ddot{r} + c\dot{r} + kr = me\omega^2 e^{i\omega t} \dots\dots\dots (2.1)$$

불균형에 의한 강제진동응답은 다음과 같이 얻어진다.

$$r = r_0 e^{i\omega t} \dots\dots\dots (2.2)$$

또는

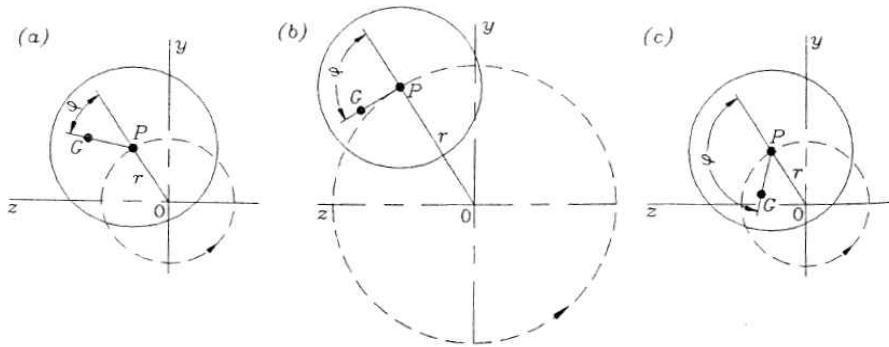
$$r = |r_o| e^{i(\omega t - \phi)} \dots\dots\dots (2.3)$$

여기서,

$$r_o = \frac{m\omega^2}{k - m\omega^2 + i\omega c} = |r_o| \omega^{-i\phi}$$

$$|r_o| = \frac{m\omega^2}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (\omega c)^2}}$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\omega c}{k - m\omega^2}$$



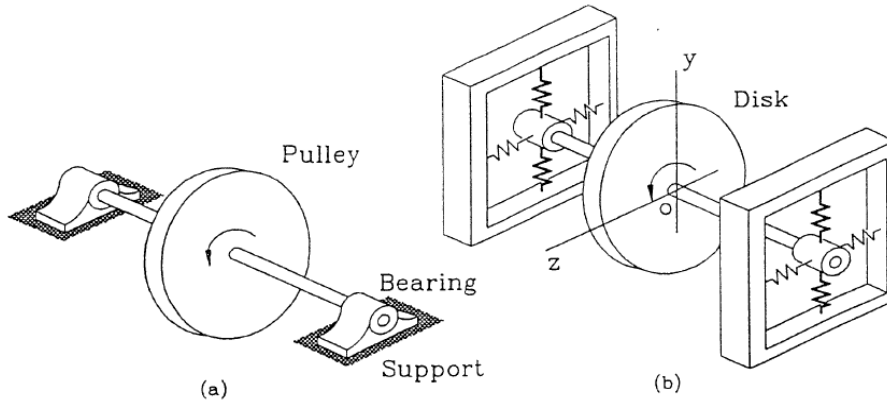
(a) 임계속도 이하      (b) 임계속도      (c) 임계속도 이상

그림 2.2 단순회전체 회전속도에 따른 선회궤적

식 (2-3)과 같이 얻어지는 불균형 진동응답 한주기를 yz평면에서 표시한 것을 선회(Whirl)라 하며 회전속도와 고유진동수의 비에 따라 선회응답을 그려보면 그림 2.2로 나타나게 되는데 저속에서는 불균형과 축의 변형상태가 예각을 이루며, 회전속도와 고유진동수가 같아지는 임계속도(Critical Speed)에서는 직각을, 고속에서는 둔각을 이룸을 알 수 있다. (감쇠가 적으면 각각 0°, 90°, 180°로 근사화)

회전체를 지지하고 있는 베어링 부분의 특성이 그림 2.3에서와 같이 수직 수평방향으로 차이가 나게 되면(이를 비등방성(Anisotropy)라고 함) 회전속도의 변화에 따른 불균형진동응답의 절대치가 그림 2.4와 같으며 회전속도에 따라 선회의 방향이 바뀌게 된다. 이때 회전방향과 같은 방향의 선회를 전진선회(Forward Whirl)라 하

고 반대 방향의 선회를 후진선회(Backward Whirl)라 한다.



(a) 대상모델

(b) 이상화한 모델

그림 2.3 이방성을 갖는 베어링에 의해 지지되는 회전체

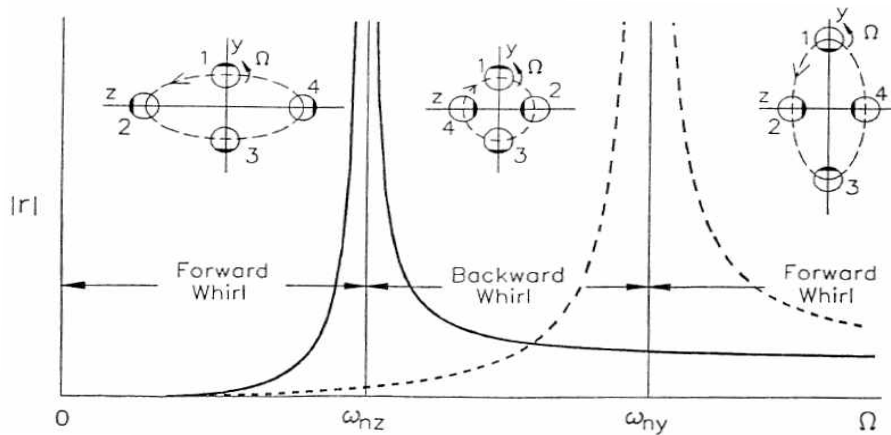
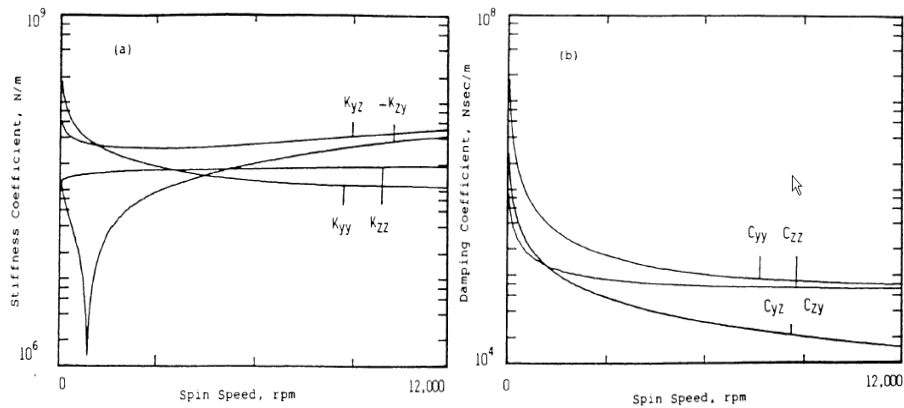


그림 2.4 이방성을 갖는 회전체의 회전속도에 따른 불균형 응답 변화

### 베어링의 효과

회전체에 사용되고 있는 베어링을 진동관점에서는 8개의 계수로 모델링한다. 즉 4개의 감쇠계수( $C_{yy}$ ,  $C_{yz}$ ,  $C_{zy}$ ,  $C_{zz}$ )로 그 특성을 나타내고 있다. 그림 2.5는 한 저널 베어링의 8개 계수를 회전속도에 따라 도시한 것이다. 베어링의 특성은 회전소도에 따라 크게 변화할 뿐 아니라 계수들간의 대칭성이 없게 되어 비등방성의 특성이 나타나게 되고 특히 Couple 항( $K_{zy}$ ,  $K_{yz}$ ) 등의 차이는 회전기계의 안정성에 영향을 준다.



(a) Stiffness coefficients                      (b) Damping Coefficients

그림 2.5 저널 베어링의 회전속도에 대한 동적계수 변화

### 자이로스코프 효과

회전체의 자세가 변하면 자이로스코프 효과가 발생한다. 그림 2.6은 고전적인 자이로스코프 응용의 한 예로서 배의 안정화에 사용된 경우이다. 그림에서 배가  $\phi$ 로 기울어지게 되면 회전체의 각운동량(Angular Momentum)이 변하게 되는데 이 변화는 자이로스코프의 BB 축에 대해 모멘트를 발생시켜 자이로스코프를  $\psi$  방향으로 기울어지게 하며 이로 인해 발생된 각운동량의 변화는  $\phi$ 의 반대방향으로 모멘트를 발생시키게 되므로 배의 기울어짐을 막게된다. 자이로스코프 효과는 회전체의 자세가 변동하려고 할 때 저항하는 모멘트를 나타낼 수 있으며 회전체의 진동에 있어서는 회전체의 진동모드에 따라 축의 강성을 강화하거나 반대로 약화하는 영향을 주게 되고 각 운동량과 관련이 있으므로 회전속도에 직접적인 관련을 갖는다. 그림 2.7은 각각 후진모드와 전진모드를 보여주는 것으로 자이로스코프 효과는 후진모드에서 축의 강성을 약화시키고, 전진모드에서는 축의 강성을 강화시키는 효과를 주게 된다. 그림 2.8은 외팔보의 형상에 따른 고유진동수의 변화를 나타낸다. 그림 2.9에서 나타낸 것은 유한요소방법에 의해 계산한 모델과 회전속도에 따른 고유진동수의 변화를 도시한 것이다. 회전속도에 대한 고유진동수의 변화를 도시한 이와 같은 그림을 Campbell 선도라고 하고 회전기계의 진동특성을 알아내는데 매우 유용하다. 예컨대 회전체의 임계속도(Critical Speed)는 고유진동수와 일치하는 회전속도를 나타내는 Campbell 선도를 이용하면 도식적으로 쉽게 알아낼 수 있다.

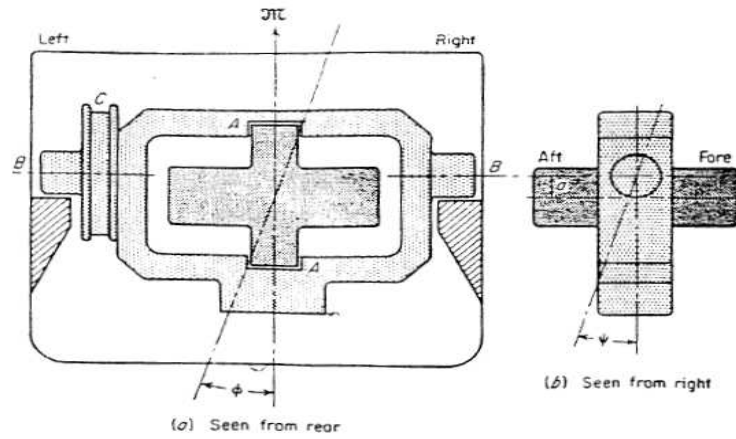


그림 2.6 자이로스코프의 응용 - Schlick의 배안정화 장치

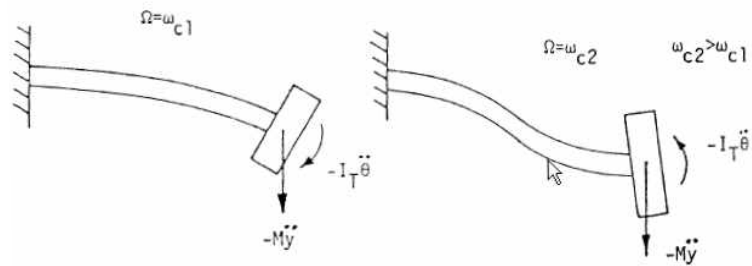


그림 2.7 외팔회전체의 진동모드에 따른 자이로스코프 효과

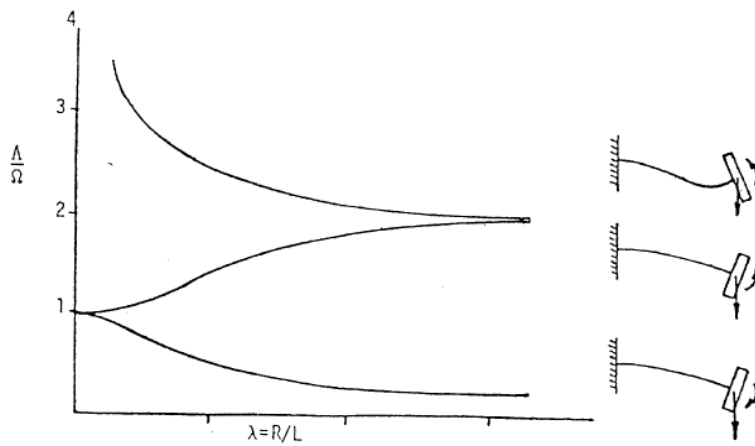
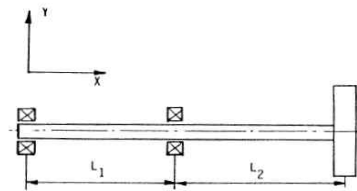


그림 2.8 외팔회전체의 디스크반경/축길이 비에 대한 고유진동수의 변화





**Shaft**

- shaft length 1.2 m  
( $L_1=L_2=0.6$  m)
- shaft diameter 6 cm
- shaft density  $7833 \text{ kg/m}^3$
- Young's Modulus  $2.068 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$

**Disk**

- mass 7.5 kg
- polar mass moment of inertia  $0.0368 \text{ kgm}^2$
- transverse mass moment of inertia  $0.0190 \text{ kgm}^2$

**Bearings**

- stiffness and damping coefficients  
 $k_{yy} = 2.548 \times 10^7 \text{ N/m}$   $k_{zz} = 3.806 \times 10^7 \text{ N/m}$   
 $c_{yy} = c_{zz} = 7000 \text{ Ns/m}$  the Others zero

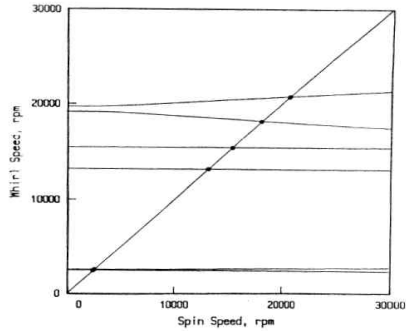


그림 2.9 외팔회전체의 Campbell Diagram - 회전속도에 대한 고유진동수의 변화

## 2.2 회전기계 진동의 측정

대표적인 회전기계인 터빈-발전기 시스템에 설치한 진동감시 시스템의 예는 그림 2.10에 나타내고 있다. 회전기계는 회전축의 반경방향과 축방향 진동 그리고 비틀림 진동의 세가지 형태로 진동이 나타나게 되는데 여기서는 가장 보편적이 반경방향 진동 측정을 중심으로 알아보려고 한다.

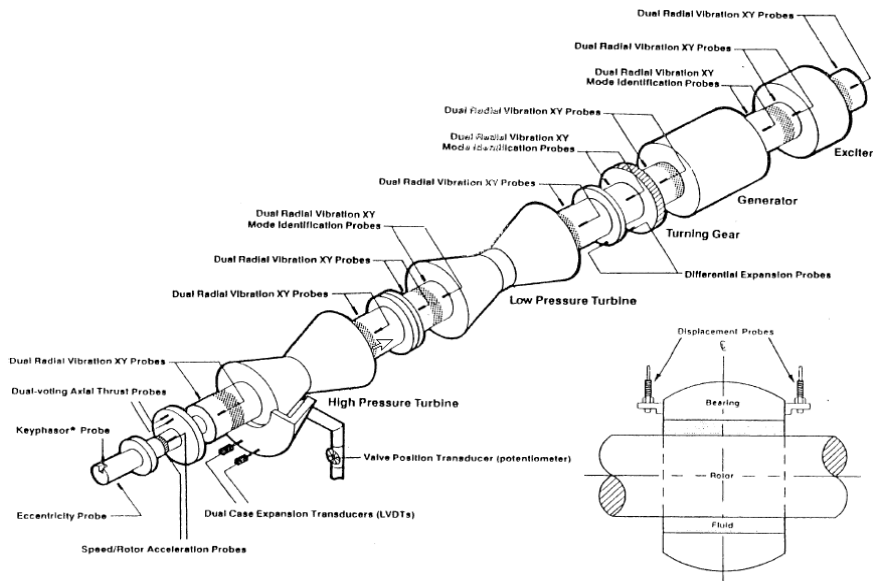


그림 2.10 터빈 발전기 시스템의 진동 감시 시스템

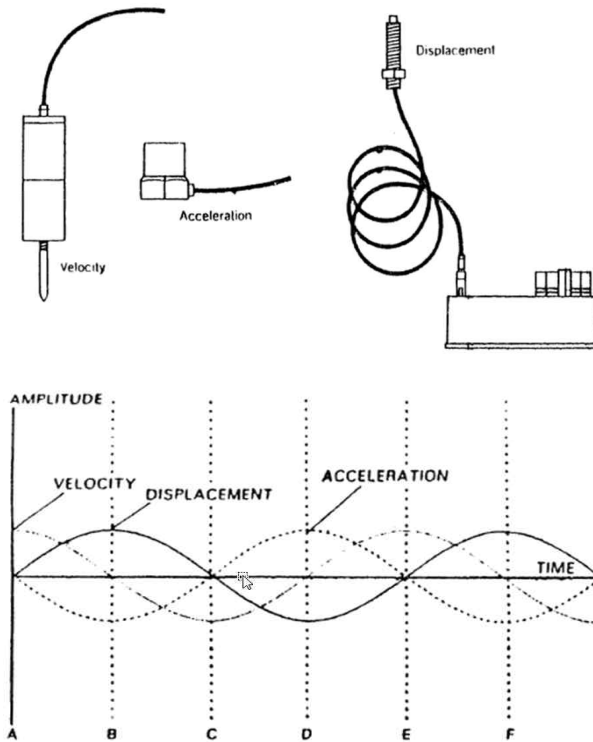


그림 211 진동측정을 위한 세가지 대표적인 센서 및 위상관계

### 진동측정을 위한 센서

진동을 나타내는 물리량은 변위, 속도, 가속도로서 진동측정 센서는 이와 같은 세 가지 물리량 중 하나를 측정하게 된다(그림 2.11 참고). 세가지 물리량은 서로 간에 미분이나 적분관계로 나타나므로 어느 하나를 측정하면 다른 물리량으로의 변환이 가능하다. 그러나 정현파 신호를 고려할 때 각각의 신호는 위상의 차이가 발생한다. 회전기계의 진동을 측정하기 위해 설정해야할 측정위치와 적절한 센서에 대한 내용을 그림 2.12에 예시하고 있다.

### 회전각, 회전속도 측정센서

회전기계로부터 진동만을 측정하게 되면 회전체의 절대각 위치에 따른 정보를 얻을 수 없게 되므로 특히 불균형에 의한 진동 같은 회전체의 절대각 위치가 중요한 경우에는 회전각을 알아낼 수 있도록 하는 센서를 이용한다. 회전체를 임계속도 이전에서 회전시키면 회전체의 무거운 축(Heavy spot)이 바깥쪽을 향하게 되는데 이때

연필 등을 이용하여 표시하면 무거운 부분의 위치를 알 수 있다(그림 2.13). 그러나 일반적으로 회전체의 절대 위치를 알아내기 위해서는 기준 위치가 필요하게 되며, 단순히 회전체의 절대각위치의 기준만을 나타내주는 Keyphasor용 Probe를 사용하기도 하고(그림 2.14) 절대각을 구할 수 있는 Absolute Encoder를 이용하기도 한다. Keyphasor를 위한 Probe로서는 Proximity 센서나 광학적 센서 등을 사용한다.

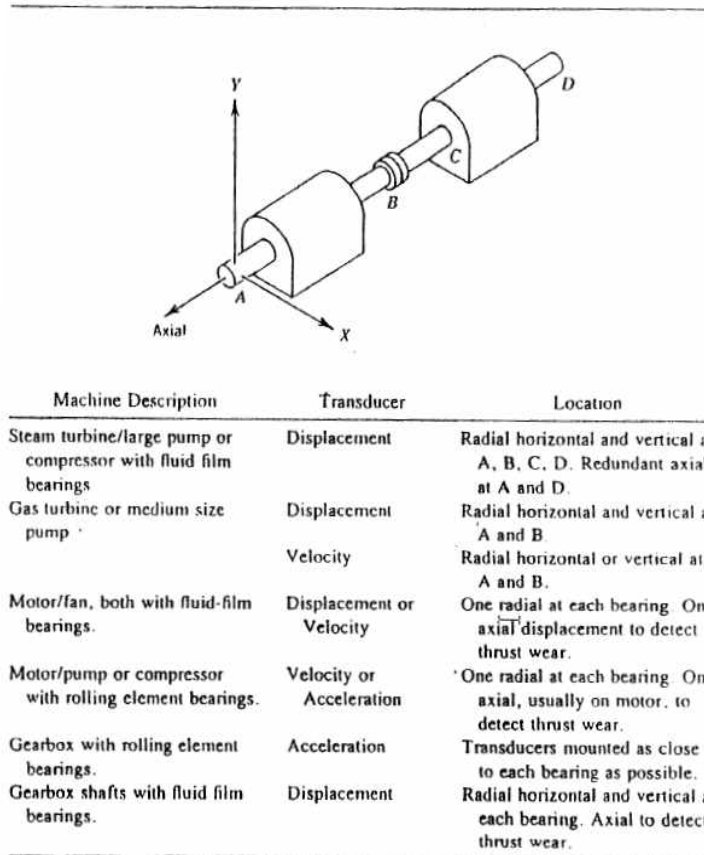


그림 2.12 기계에 따른 진동측정 센서 및 측정위치 선정

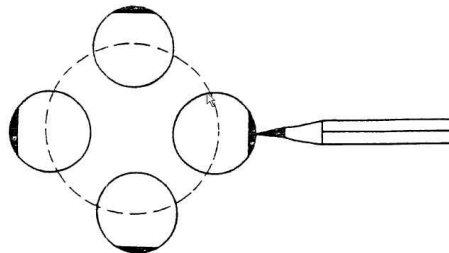


그림 2.13 연필에 의한 Heavy Spot의 측정 (저속회전중)

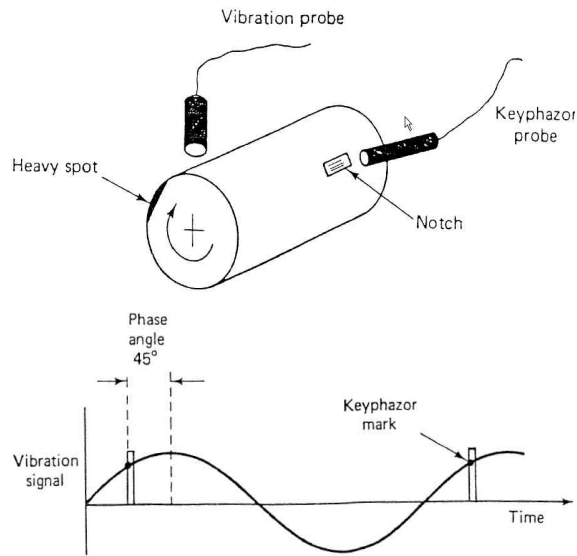


그림 2.14 Keyphasor Probe의 역할

회전속도를 측정하는 방법은 매우 다양하며 기계적인 방법으로 아직도 터빈이나 엔진등에서 사용되는 Flyball 시스템이 있고 전기적인 방법으로는 직류 타코미터나 교류 타코미터, 엔코더와 카운터를 결합하거나 레졸버(Resolver) 등을 사용한다. 또한 회전기계의 주요변수인 토크는 운전 중 측정에 여러 가지 어려움이 따르는 형편이며 모터 등에서 기동토크를 측정하는데 사용되는 기계적인 방법(그림 2.15)이나 전기천평방식을 이용한 간접측정법(그림 2.16) 등이 있으며, 그밖에 스트레인게이지와 슬립링을 이용한 방식 등이 상품화되어 있다.

### Orbital Plot

회전기계의 반경방향 진동은 선회(Whirl)응답이므로 수직방향과 수평방향 진동의 합성으로 진동현상을 나타내게 되는데 이를 Orbital Plot이라 한다. 그림 2.17은 수직축과 수평축에서 측정된 두 신호를 Orbital Plot으로 합성하는 것을 나타내고 있다. 대부분의 2 채널 오실로스코프는 이와 같은 Orbital Plot 기능을 갖고 있다. 또한 회전 절대각을 알기 위해 사용되는 Keyphasor Probe의 신호를 이용하면 이와 같은 그림에 각위치를 나타낼 수 있는데 그림 2.18은 이를 위한 장비 결합상태를 보여주고 있다. 그림 2.19에서는 임계속도 아래와 위에서 불균형 응답을 이와 같은 장치를 통해 얻은 것으로서 Keyphasor Mark의 위치에 따른 위상차를 알 수 있다.

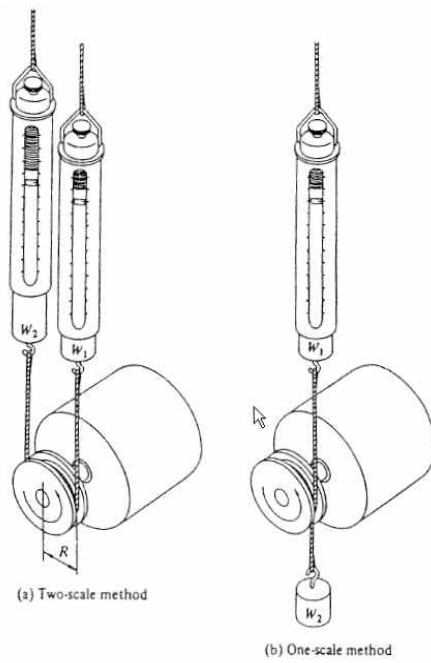


그림 2.15 기계적 토크 측정방법

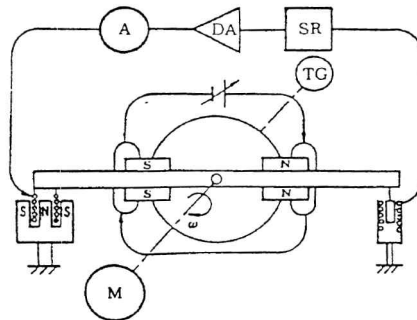


그림 2.16 전자기적 천평원리를 이용한 토크 측정장치

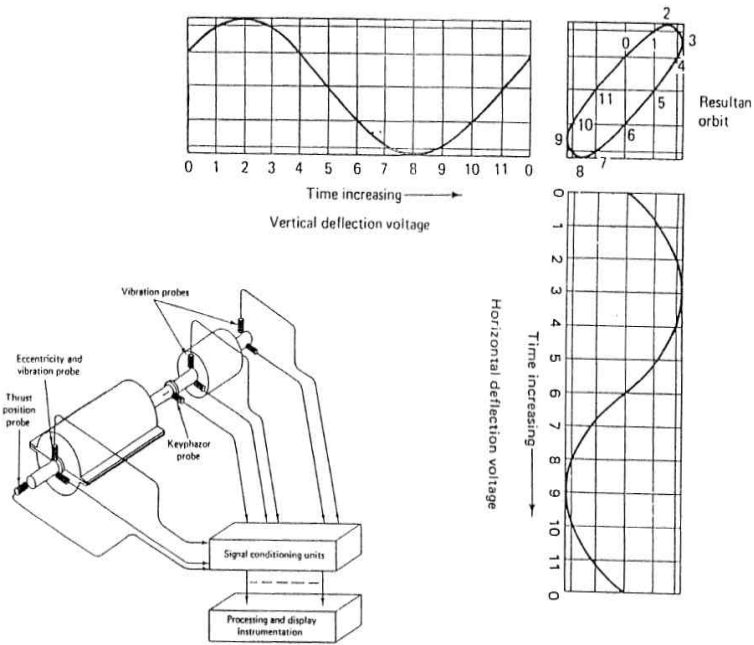


그림 2.17 실측에 의해 Orbital Plot을 구하는 원리

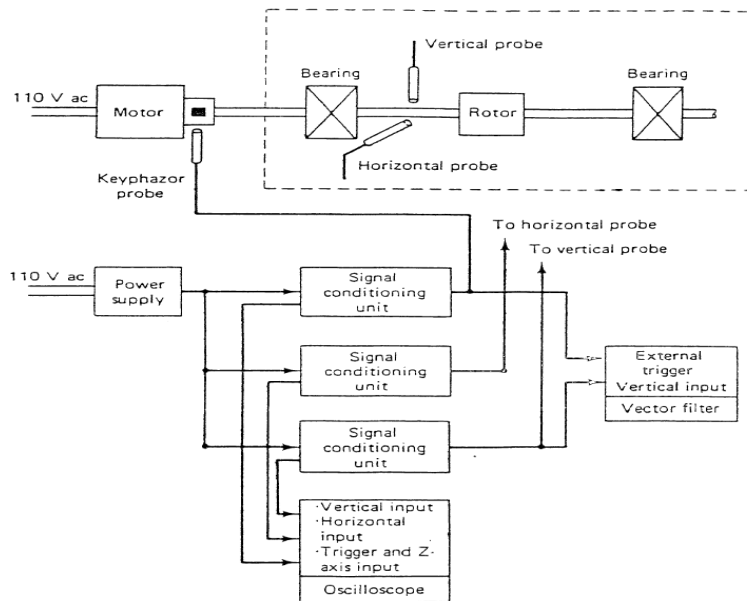


그림 2.18 Orbital Plot에서 Keyphasor 신호를 이용하는 방법

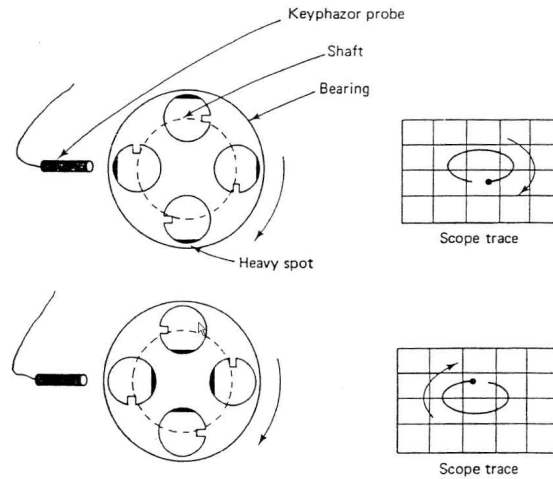


그림 2.19 Orbital Plot에서 Keyphasor 신호에 의한 위상각 정보

### Waterfall Plot

회전기계의 진동은 대체로 회전속도와 관련된 주파수성분이 많이 나타나므로 회전 기계의 진동을 분석할 때 회전속도를 일정한 폭으로 증가나 감소시키면서 주파수 분석을 행하게 되면 회전속도에 관련성 여부를 쉽게 파악할 수 있는데 이때의 그림을 Waterfall Plot이라 한다. 그림 2.20은 Waterfall Plot의 한 예를 보여주고 있다. 또한 일시에 회전속도를 변화시키면서도 마찬가지로 형태의 그림을 이용할 수 있다. (그림 2.21)

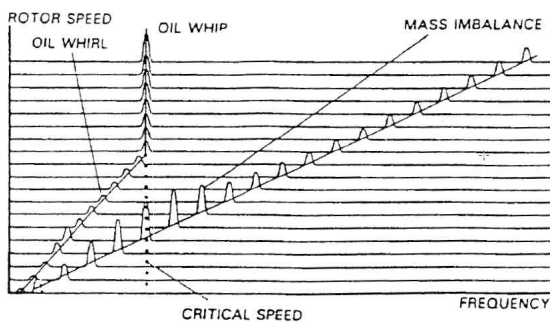


그림 2.20 Waterfall Plot

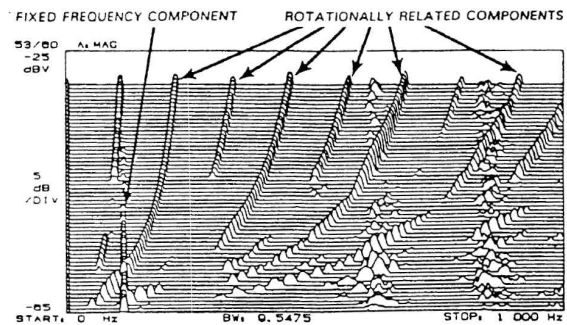


그림 2.21 Cast Down 중의 Waterfall Plot