

## 상 시 계 측 기 술

최 만 용  
한국표준과학연구원 방재기술연구센터

### On-Line Instrumentation

M. Y. Choi

Korea Research Institute of Standards and Science

#### 1. 서 언

산업사회가 다양화되고 급격한 발전을 하면서 생산 시스템이나 공공 복지시설 및 사회 간접 설비는 대형화되고 복잡화되는 추세에 있다.

거대한 시스템의 극소부분에서 이상 상태가 발생하면 시스템 전체가 작동되지 않고 경제적으로 막대한 손실과 수많은 인명 피해를 가져온다.

상시 계측 기술은 이러한 시스템에서 각 구조물에 존재하는 각종 물리·화학적 상태량을 정확히 측정하여 생산 정보나 경제 정보를 제공하고 사고의 사전 방지를 위한 객관적 자료를 공급하는 공학적 수단으로서 경제적인 손실을 최소화하는데 기여하고 있다.

따라서 이번 보고서에서는 지금까지 개발되어 온 상시 계측 시스템을 다음과 같은 항목으로 소개하면서 현황과 개발 방향을 제시하고자 한다.

- 계측기기 및 장치에서의 이상 검출·계측
- 플랜트 및 시스템에서의 상시 계측
- 회전기계에서의 상시 계측
- 구조물에서의 상시 계측

#### 2. 상시 계측 기술의 개념

장치 또는 시스템이 이상 상태에 있는가 어떠한가를 검지하는데 있어서는 대상으로 하는 시스템에서 관측 가능한 상태량을 검출해서 그것의 시간적 변화에 따른 이상 상태를 인지하는 것으로부터 시작된다.

시스템 상태량의 검출·측정의 방법에는 시스템이 가동중에 자발적으로 발생하는 신호가 적당한 센서를 통해서 검출되는 수동적 검출 방법과 시스템 외부로부터 강제적인 자극을 주어 그것의 신호를 측정해서 이상 상태를 검출하는 능동적 검출법으로 구분할 수 있다.

어떤 교량의 철관 용접부에서 결함이 발생하여 교량의 안전 진단을 수행할 경우 흔히 볼 수 있는 것은 다수의 초음파센서를 사용하여 결함의 크기를 측정하게 된다. 이 경우가 능동적 검출법에 해당되며 그때의 결함이 점차로 성장하고 있는가는 결함 주변의 내부 에너지 변화를 통하여 측정하게 되는데 이때 주로 AE(Acoustic Emission)방법이 사용된다. 이것을 수동적 검출 방법이라고 한다.

상시 계측 기술은 두가지 방법을 상호 보완적으

로 사용되면서 복합 계측 기능이 요구되는 추세에 있다.

교반기나 펌프 등의 회전기계에서의 트러블은 베어링 부분의 파손이나 결합보다는 Mechanical Seal (M/S)의 이상 상태로 인한 액이나 기체의 누설에 의한다. 우리나라는 물론 선진국의 상당수도 아직까지 종래의 방법 즉, Mechanical Seal의 정기적 수리, 교환에 의해 예방 보전을 하고 있다. 그러나 예방 보전만으로 누설을 피할 수 없는 것이다. 누설에 의한 위험, 제품 오염 방지, 플랜트의 정지 및 수리비의 증가 등을 해결하기에는 역부족이다.

이상 상태나 사고 또는 구성 부품의 수명이 정확히 예측될 수 있다면 사고를 피해서 손실을 최소화하는 방법이 실현될 수 있다. 이상 상태의 예지가 곤란한 이유에도 여러가지가 있지만 결국, 이상 상태의 모델 구축이 어려운 것이라고 말할 수 있다. 모델이 정확히 설정된다면 과거에 받은 입력 및 현상이 명확히 되어 예지 또는 조기 검출이 가능하다.

이상 상태 감시의 대상이 되는 것에 대한 과거의 데이터와 현재의 상태를 비교, 미래의 상태가 예측 가능하고 그 상태가 정상적인지를 알 수 있다. 또한 앞으로 이상상태가 발생할 수 있는 현상에 대해 해

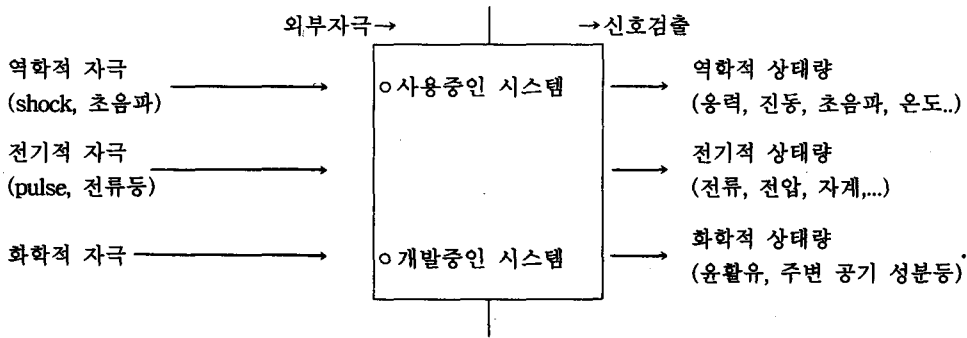


그림 1. 능동적 검출·측정법의 개념

한편 어느날 갑자기 M/S가 누설될까 하는 불안감은 교반기나 펌프를 운전하는 작업자에게는 큰 부담을 주게 되어 있다. 그러므로 M/S의 정기 교환시기를 앞으로 당긴다든가 하는 방법도 쓰고 있으나 사고 원인 제거에는 큰 도움을 주고 있지 못하다.

이상 상태 감시 및 계측을 위한 연구 개발은 선진국에서는 산업 안전 및 생산성 향상을 위해 일찌기 시작하여 거의 정착 단계에 있으나 국내 산업이 아직도 미숙 단계에 있고 화학장치산업 등 안전요구가 있는 산업이 최근에 발달하고 있기 때문에 고장, 파손 등에 대한 관심이 비교적 적었다.

그러나 최근 잇단 사고 유형을 보면 거대파손 현상이 다수의 인명 피해를 가져오는 현상이 두드러지고 있으며 이것을 공학적으로 어떻게 해결할까 하는 문제가 사회화되고 있다. 경부선 지하터널공사로 인한 대형 참사나 삼풍백화점 붕괴사고 등은 사전에 이와 같은 이상 상태 계측 시스템을 활용하였다면 방지가 가능하였다.

명이 가능하고 이에 대한 예측 모델의 기술이 가능하다.

한편 이상 상태 그 자체의 해명은 불가분으로 모델 구축이 불가능한 경우도 많다. 예를 들어 모델을 구축할 수 있어도 이상 상태가 발생하는 시기가 언제인지 모르므로 그 모델의 타당성을 실증하기 위한 데이터 수집은 곤란하다. 이상 상태 모델의 구축 방법은 다음의 2개로 대별할 수 있다.

첫째, 정상 상태의 구조를 정밀하게 기술해서, 이상 상태는 그것과 비교해서 취급하고 그것으로부터 이상을 예지한다.(a)

현상의 구조 해명을 철저히 해서 모델을 정밀화하고 그것으로부터 유추하여 이상을 기술한다.

둘째, 많은 이상 상태가 귀납으로서 그것의 일반화된 모델을 구축한다.(b)

예를 들어서 사고율의 와이블분포나 베드 튜브 등의 곡선은 일반화 고장 모델의 예이다. 그것을 이상 상태에 따라서 특수화하는 것으로부터 정상 상

태 모델과는 독립한 모델을 구축한다. (a)와 같은 경우는 기상 예보 등에 적용하기에 적당한 것이며 (b)의 경우는 설비의 수명 예측에 사용된다. 마모나 이상의 초기 상태, 또는 스트레스에 의한 고장 물리를 사용해서 수명이나 고장을 예지한다.

2.1. 검출의 광역성과 동시성

이상 상태를 예지하는 것 뿐만 아니라 그것의 발생시간이나 예측도 곤란한 경우가 대부분이다. 긴 파이프 라인이나 대형 탱크의 경우, 유체의 누설 장소나 시각을 예지하는 것은 불가능하다. 따라서 공간적으로도 넓은 대상으로부터 이상 상태가 발생한 즉시 정보를 수집할 수 있는 센싱기술이 필요하다.

종래의 센서는 대부분 한점의 상태밖에 검출할 수 없기 때문에 동종의 센서를 공간적으로 다수 배치하거나 1개의 센서를 주사하지 않으면 안되었다. 다수의 센서를 광역에 배치하는 경우 어디에 배치할 것인가 하나하나의 측정치가 공간적으로 대표성을 갖는가 하는 것이 문제이다. 한개의 센서를 주사하는 경우에 검출하는데 시간적 지연을 피할 수 밖에 없는 것으로 그 시간적 대표성이 문제가 된다.

즉 광역성과 동시성을 단번에 만족시키는 시스템 구축이 필요하다. 아울러 이상 검출 센서의 신뢰성은 감시, 진단하는 기기나 설비 자체 이상으로 중요한 것으로 단지 센서를 설치하는 의미가 아니다. 대상으로 하는 기기나 설비의 신뢰성을 향상시키려면 센서의 신뢰성만을 극단으로 높이는 것은 곤란하다. 이상이 발생하기 쉬운 장소는 센서 설치 조건으로서 엄밀한 경우가 많다.

따라서 2중의 시스템이나 용장 시스템의 구성에 의해서 전체 신뢰성을 개선한다. 이상 검출 시스템에 있어서는 신뢰성은 물론 안전성이 엄격하게 요구된다.

2.2. 이상 상태 검출 및 예지의 특징과 문제점

이상 상태 검출이나 예지는 이상의 징후를 나타내는 정보를 얻어서 사용한다. 공업 시스템의 이상 검출 및 예지 기술은 이 정보를 얻기 위한 센서를 개발하는 것과 정보를 얻은 후 이상의 정체를 확정하는 프로세스를 알고리즘으로 보강하는 문제, 즉 소프트웨어의 개발도 대단히 중요하다. 그래서 소

프트웨어가 담당해야만 되는 범위는 하드웨어의 능력(센서가 이상 상태의 정체를 어느 정도까지 직접적으로 얻을 수 있을까)에 크게 좌우된다.

일반적으로 센서류를 하나하나 보면 계측의 대상 범위는 기능 요소적이 아니고는 공간적으로 극히 한정되어 있고 현상적으로는 단일성을 갖고 있다. 그러나 실제에서는 그 징후를 정확히 잡을 수 있는 경우가 종종 있다.

이와 같은 경우는 이상이 검지된 것과 동시에 필연적으로 이상의 종류도 명확하게 된다. (이 진단형식을 “개별진단”으로 부른다) 이때 소프트웨어에서 해 주어야 하는 것은 센서 출력 신호로부터 이상 상태의 특징을 추출해 내는 것이다. (신호처리)

한편 기술적 이유(특정의 이상 상태를 정확히 잡을 수 있는 센서가 없다) 나 경제적 이유(설치 가격이 비쌀 경우)에 의해서 개별 진단 시스템이 구성될 수 없는 경우는 이상의 징후를 부분적으로 얻을 수 있는 센서를 복수개 배치해서 이들 센서 출력 신호를 종합적으로 분석해서 어떠한 종류가 이상한가를 식별하고 판정한다. (이 진단방식을 “시스템 진단”이라고 부른다)

시스템 진단에서는 이 종합적인 분석 프로세스가 한층 중요하다. 그리고 알고리즘을 구축하는 일이 소프트웨어의 중요한 역할이다. 진단 시스템을 구축할 때 거기서 사용하는 이상 상태의 허용 한도를 극대화하여 놓는 것이 중요하다.

공업 시스템은 자기 재생 능력을 갖지 않는 기계 시스템이므로 보전을 하지 않고 그대로 방치해 놓으면 열화가 시작되어 언젠가는 이상 상태가 발생한다. 여기에서 이상 상태라고 하는 것은 공업 시스템의 안전성, 신뢰성, 가동성을 표시하는 것으로 한다. (이상 상태 검출·예지 기술이 대상으로 하는 이상 상태는 통상적으로 이러한 종류를 말한다)

이상 상태 계측에서는 이력의 단계가 또는 이력의 정도가 문제화되지 않은 단계의 과정에서 검지하여 이상 상태에 도달하기까지의 기간을 예측한다 (이상 상태를 예측한다)는 것이 대단히 바람직한 것이다. 또는 대상으로하는 이상 상태에 따라서 그 위험성의 정도가 명확히 허용 한도를 넘게 됨을 예지하게끔 하지 않으면 안된다.

### 2.3. 이상 상태의 예지

이상 상태의 예지는 대부분의 경우 기술적으로 대단히 어려운 것에 속한다. 첫번째는 이상 상태의 성장 과정을 표현하는 현상이 기기나 재료 등의 내부에서 발생하기 때문에 그것을 직접 계측할 수 없는 것이고 둘째는 이상 상태의 성장 과정의 물리적 메카니즘(mechanism)이 선명하지 않다는 것이다.

현재 예지 기술이 확립되어 있는 것은 금속재료 분야 정도이다. 이 분야에서 예지 기술이 발달한 배경에는 금속재료 열화를 갖는 터빈 파괴사고나 열교환기관의 손상 사고가 공업 시스템에 있어서 치명적으로 되기 때문에 기초적 실험·연구가 축적되어 있다고 볼 수 있다.

## 3. 상시 계측 기술

이상 상태의 동정은 이상 상태 검출 예지 기술 중에서 소프트웨어의 의존도가 비교적 높은 것으로서 소프트웨어가 그 특질을 더욱 발휘해야만 한다.

계측 대상이 되는 시스템은 하나하나가 기능 구조를 달리하고 있으며 문제가 되는 이상 상태 내용도 일률적으로 되지 않고 있기 때문에 일반적으로 흔히 최적 알고리즘이라고 하는 것도 존재하지 않는다.

동정 알고리즘은 계측 대상의 특성을 잘 파악하고 적당히 사례별로 파악하여 구축하는 수 밖에 없다. 그때 고려해야만 되는 일반적인 사항으로서 다음과 같다.

- ① 상시 계측 시스템의 기능 구조는 논리적인가, 수치적인가
- ② 상시 계측에서 우선해야 되는 것은 신속성인가, 정밀성인가
- ③ 이용할 수 있는 신호는 무엇인가

①에 있어서는 계측 시스템이 논리적인가 수치적인가에 대해서 동정 알고리즘도 그것을 따르는 것이 원칙이다. 논리적인 공업 시스템의 전형례로서 전기·전자회로를 말할 수 있으며 큰 공업 시스템의 기능 구조는 논리성과 수치성이 교차되고 있다. ②와 같은 경우의 예로서는 운전용이라면 real time 응답이기 때문에 신속성이 요구되고 보전용에는 정확한 조치가 있기 때문에 정밀성이 요구된다. ③에서 특별히 시스템 진단의 경우, 기존의 신호(센서)를 유효히 활용하는 것을 우선 생각해 보아야 할 것이다.

그것은 공업 시스템의 지원 요소로서 진단 시스템의 소요 비용 측면 등을 잘 고려해야만 되는 문제가 있기 때문이다. 동정 알고리즘이 적용되는 대표적인 방법은 다음과 같다.

### 3.1. 상태 추정

상태 추정은 계측 대상 모델링에서 바로 뽑아낸 것으로 이 방법의 특징은 관측 신호 백색잡음층을 허용해서 이상 상태의 검출과 동정에 필요한 정보를 오차, 내부 상태 변수, 파라미터들 중에서 고집어 내는 것이다.

그러나 앞서 말했 듯이 계측 대상을 모델화하지 않으면 안된다. 통상의 모델화는 우선 정상 조건하에서 진단 대상의 동특성을 해명하고 다음에 이동 특성을 동정하고 싶은 이상 상태를 표시하는 것에 의해서 우선 시작된다. 따라서 상태 추정에 의한 어프로치는 일반적으로 제어계에 대해서는 용이하나 기계에 대해서는 곤란한 것으로 지적되고 있다.

### 3.2. 패턴 인식

패턴 인식은 다점계측치의 분포 형상(패턴)으로부터 경험을 바탕으로 직접 이상 상태를 밝혀 내보고자하는 방법이다. 여기서는 이상 상태의 메카니즘이 틀림없이 서있지 않으면 안되는 큰 특징을 갖고 있다. 패턴 인식을 진단에 사용할 때 꼭 알아 두어야 하는 것은 패턴 설정의 방법이다. 문자 도형 인식이나 음성 인식 등이 패턴 인식 본래의 분야에서 관측, 특정 추출, 식별이 기본적으로 패턴 인식의 프로세스 구성 요소로 된다.

그것은 취급하는 패턴에 선택의 여지가 없고 인식 기구에 의해서 조건에 만족할만한 경우를 나타낸다. 이에 반해서 진단의 경우는 계측치로부터 패턴을 구성하는 방법이 자유롭다.

그러나 계측 신호는 애초부터 기기나 설비의 기능을 감시하기 때문에 신호값으로부터 즉각 이상 상태를 동정하는 것은 곤란하다고 말할 수 있고 그것을 단지 구하기만 해도 식별 프로세스에 의해서 좋은 조건을 준비할 수 있다.

3.3. 소프트웨어에 의한 계측시스템의 신뢰성 설계  
공업 시스템중에는 그 사고가 아주 큰 피해를 줄뿐만 아니라 인명까지 앓아가는 경우도 적지 않다.

이러한 종류의 시스템의 감시·보호계나 중요 제어 계에는 더 큰 신뢰성이 요구되며 그 대책으로서 계측 시스템 2 out of 3 등의 신뢰성 설계를 하는 것은 잘 알려진 것이다. 그러나 웅장설계 자체는 경제성·보수성 면에서는 바람직한 것이 아니다.

최근에는 그 합리화를 목적으로 해서 종래의 하드웨어에 의한 웅장설계를 소프트웨어에 의해서 대체하고 있다.

### 3.4. 이상원인(異狀原因)의 측정 방법

상시 계측에 있어서는 이상이 검지가 되었다면 이상 상태의 발생 원인 요소, 정도를 탐색해서 수리, 보수 등의 대처를 하지 않으면 안된다. 이와 같은 이상의 요소, 원인, 정도를 측정하는 데는 이상의 징후, 정도 등과 관측 데이터의 특징량 또는 내부 상태와의 관계를 정확히 표현할 수 있는 모델을 작성해서 놓으면 그량의 상태 추정량으로부터 이상의 요소, 원인, 정도를 추정하는 것이 가능하다.

이 이상 발생 모델에 의해서 측정하는 방법은 다음과 같이 대별할 수 있다.

#### ① 관측 데이터 모델에 의해 방법

시스템으로부터 얻어진 관측 데이터를 모델화하여 그 모델의 파라미터의 정상시와의 변화량과 이상의 요소, 원인, 정도와의 관계를 이상장후전달기구(mechanism)나 경험적 지식으로부터 Fault Tree, Matrix 구조 또는 고장 사건을 중심으로 하여 정리하고 이상 원인 관계 모델을 작성하여 관측 데이터의 해석으로부터 이상의 장소, 원인, 정도를 아는 방법이다.

#### ② 내부 상태 모델에 의한 방법

시스템을 구성 요소별로 나누어 수학적 모델을 정확히 표현하고 입력과 출력 또는 내부 상태 파라미터의 정상치의 변화량에서 이상의 장소, 원인, 정도를 추정하는 방법이다.

### 3.5. 지식공학에 의한 상시 계측

전문가 시스템으로서 불리우는 지식공학을 이용한 시스템의 개발 연구는 1970년 후반부터 미국에서 활발히 진행되었고 일본에서는 1980년에 급속히 확장되었고 한국에서는 '80년말과 '90년초에 연구가 시작되었다. 이 방법이 상시 계측의 분화된 전문 지

식에 의한 판단과는 달리 전문 지식(신뢰성이 높은 해석 코드의 계산 결과를 포함)을 주체로 조직화한 지식 베이스를 이용해서 추론에 의해서 문제 해결을 행하는 것이다. 이상 진단에서의 본 방법의 특징은 다음과 같다.

- 지식 베이스와 추론 기구가 분명히 분리되어 있기 때문에 지식의 추가 수정이 용이함
- 단편적 지식을 집적할 수 있기 때문에 경험을 통해서 얻은 지식의 축적·전승이 가능함
- 개개의 지식에 확신도를 부여하여 가능성을 갖는 복수개의 원인 추출이 가능함
- 잘못된 신호의 혼입 또는 일부 신호의 누락 경우도 진단 가능이라고 하는 유연성을 갖는다.
- 결과에 따라서 과정의 제시가 가능하고 사용자의 의사 결정을 도울 수 있다.

## 4. 상시 계측 기술의 기술 현황

### 4.1. 계측기기 및 장치에서의 이상검출과 상시계측

계측기기는 플랜트 및 기계 시스템의 정상동작을 확보하고 시스템에서 발생하는 이상을 조속히 검출해서 처치 방법을 지시하고 경우에 따라서는 긴급 정지를 시킴으로서 사용 시스템의 고장, 오동작 안전한계를 넘는 오차발생을 막아준다. 그러나 계측기나 계측장치는 고집적화된 기계 시스템이기 때문에 본질적으로 고장이 절대 없다고 말할 수 없으며 웅장화 설계를 주체로 해서 고신뢰화 수단으로 처리하여 전체 시스템의 안전을 확보하고 있다.

프로세스용에 사용되는 공업용 센서의 이상 상태 진단은 최근에 마이크로프로세서( $\mu p$ )의 도입에 의한 센서 지능화에 따라서 이상 검출 및 고장에 대해서 자기 진단 기능을 갖도록 설계되고 있으며 프로세스 제어시스템은 단일 제어용 계산기에 제어 기능을 집중화시킨 DDC(Direct Digital Control)의 시대를 지나서 제어 규모에 대응하여 기능 분산을 하여 시스템 구성에 유연성을 주는 DCS(Distributed Control System)로 변화하였으며 이에 대한 설계 개념은 다음과 같다.

- 고장나기 어렵게 만든다.
- 고장의 영향을 받지 않도록 한다.
- 시스템을 정지시켜 보수한다.

이것을 구체화하기 위해서 제어측 및 대기측, 상식 계측을 실시하고 있다.

#### 4.2. 플랜트 및 시스템에서의 상시 계측

유체 수송 플랜트는 기본적으로 수송 펌프나 제어 밸브 등이 있는 송출 스테이션, 파이프 라인 및 제어 밸브, 저장 탱크 등이 있는 부분 등 3개 부분으로 나눌 수 있으며 인간의 사시감시가 안되는 파이프 라인부의 안전성 확보가 제일 문제로 된다. 특히 파이프 라인은 지하 매설되는 것이 많으므로 무엇인가 자동 검사장치가 필요로 한다.

파이프 라인의 안전 계측 시스템은 다음의 5종으로 구별할 수 있다.

- 유량 및 압력감시법
- 음향감시법
- 검지 케이블 및 검출 소자에 의한 측정법
- 비파괴시험 방법
- 검사 로봇의 활용

석유화학플랜트의 이상 검출 및 안전진단시스템은 사고 및 화재 방지, 가동을 저하 방지, 보전비의 저감 등을 목적으로하여 설치되고 있다. 석유화학플랜트는 다른 종류의 플랜트와는 다르게 가연성, 폭발성 또는 유독성 유체를 고압·고온으로 취급하고 있으며 다수·대량의 기기가 설치되어 있는 대규모 시스템이고 개개의 기기가 연속적으로 결합되어 있다.

따라서 하나의 이상이나 고장은 파급·확대되기 쉬운 상황이고 긴급 처리하지 않으면 안된다. 한편 1번의 사고가 나면 사고의 규모도 크게되어 사회적으로도 영향이 크다. 석유화학회사의 설비 투자는 어마어마하다.

이러한 조건하에서 석유화학플랜트의 이상 검출하였을 경우 기본적으로 해야되는 것은 플랜트를 안전하게 정지시키는 것이다. 그러나 플랜트 조업의 정지는 가동율의 저하를 가져오고 큰 손실을 갖는다. 그래서 가능한 플랜트의 운전은 계속하도록 한다. 하나의 기기의 고장 및 이상이 급속히 파급되기 때문에 대책이 늦어지면 고장 부위는 확대된다. 그러므로 이상 상태의 예지 및 조기 발견에서 기본적으로 요구되는 것은 확실하고 신속한 이상 원인의 규명, 적절한 처치를 어떻게 선택할 것인가가 가장 요구된다.

구체적으로 프로세스의 이상, 기기의 이상 및 고장, 오동작이며 이에 의해서 누출, 기기의 손상 및 제품 품질 불량 발생한다.

이상 검출에는 이상을 정확·신속히 검지할 수 있는 장소의 선정, 특정 항목, 수량, 응답 속도, 필요 정도, 측정 상호간의 관련·간섭 등에 대한 사전에 충분한 검토가 필요하다. 최근에는 플랜트의 외측으로부터 이상 상태를 검출하는 시스템이 개발되고 있다. 플랜트 중에서 비교적 누출 가능성이 큰 장소에서는 여러개의 센서를 사용할 수 밖에 없다.

여기서 센서의 다차원화가 요구되며 그 특성은 다음과 같다.

- 면 및 공간의 주사(scanning)
- 센서의 이동
- 센서 자체가 선 및 면으로 구성됨
- 신호 전파에 의한 검출

주요 설비에서 사용되는 상시 계측의 기본 측정은 표 1과 같다.

#### 4.3. 회전기계에서의 상시 계측

현재 포항제철소에는 약 2만여대의 각종 회전기계가 설치되어 있으며, 이러한 회전기계의 이상을 진단하는 방법으로 지금까지 진동을 이용한 설비진단법이 가장 널리 활용되고 있다. 따라서 회전기계의 진단에 필요한 진동의 기초 지식과 각 기계 요소별 발생할 수 있는 이상 진동의 종류 및 측정, 해석 방법에 대하여 설명하고자 한다.

가동중인 기계에 어떤 힘이 작용하여 서서히 흔들리거나 혹은 눈에 보이지 않을 정도로 빨리 흔들리는 현상을 「기계진동」이라 한다. 기계에 작용하는 이상 힘이 크게 되면 큰 진동을 일으키며 이것이 너무 과대하게 되면 기계는 파손되어 버린다.

우리는 보통 기계 진동의 크기를 측정하여 기계의 상태를 판단하고 있지만 이것은 기계 내부에 작용하는 이상 힘의 유무를 판단하거나 아니면 플립 등에 의하여 적은 힘이 작용하여 기계에 진동을 일으키기 쉬운 상태로 있지는 않은가를 진단하는 것이라고 말할 수 있다.

또 어느 정도의 빠르기로 진동이 반복되고 있으며 진동의 방향은 어느 방향인가 등을 조사하게 되면 기계의 내부에 어느 정도, 어떤 유형의 이상이

발생하고 있는가를 알 수가 있다.

그러나 우리들은 아직까지도 설비의 이상 징후를 사람의 오감에 의하여 점검하여 이상의 종류나 원인을 파악하는 경우가 많다.

이와 같은 오감에 의한 점검법중에서 「촉감」,

은 매우 중요한 일이다.

4.4. 구조물에서의 상시 계측 시스템 구축

구조물에서 대표적인 것은 교량, 터널, 댐 및 고층건축구조물 등이 있다. 초기 설계대로 구조물의 유지·관리를 위해서는 구조물 설치 상태를 주기적

표 1. 주요설비의 상시계측법과 개발현황

분 류	주요설비대상	주요측정방법	개 발 현 황
기계 요소	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 미끄럼베어링</li> <li>• 구름베어링</li> <li>• 치차장치</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 진동음향법</li> <li>• 전기저항법</li> <li>• 속도변동법</li> <li>• 기류분석법</li> </ul>	구름베어링은 SKF사의 충격펄스법, MTI사의 Ringing법, 신일본철강의 고주파진동법이 사용됨. 치차에는 Southampton대학 미국의 NASA등이 연구함. 미끄럼베어링은 음향법과 전기저항법이 사용됨
동력 전달 기구	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 구동축계</li> <li>• 고속회전체</li> <li>• 차축</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 진동음향법</li> <li>• AE법</li> <li>• 진동모드법</li> </ul>	구동축크랙검출에는 진동모드 및 AE법 연구가 활발함. 고속회전체의 경우 GE사 및 독일, 스웨덴에서 활발한 연구
유체 기계	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 수력기계</li> <li>• 유압기계</li> <li>• 공기기계</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 진동음향법</li> <li>• AE법</li> <li>• 진동모드법</li> </ul>	수차, 펄프진단에는 압력맥동법이 좋다 벨브리크 검출에는 온도법이나 기중초음파등이 사용된다. 유압기계 등에서의 진단기술은 역사가 진다.
원동기	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 엔진류</li> <li>• 터빈류</li> <li>• 유압모터</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 진동음향법</li> <li>• 효율, 성능법</li> <li>• 가스분석법</li> <li>• 압력맥동법</li> </ul>	원동기의 진단은 항공기, 군용전차등에서 오랜동안 사용함. 산업용터빈 모터에 대한 모니터링 실행중.
가공 기계	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 공작기계</li> <li>• 전단기계</li> <li>• 용접기계</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 진동음향법</li> <li>• 부하진류법</li> <li>• 불꽃검지법</li> <li>• AE법</li> </ul>	20여년 동안 진행되어옴. 용접기의 경우 자기진단기능이 포함됨.
정지 기계	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 압력용기</li> <li>• 구조물</li> <li>• 배관계통</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• AE법</li> <li>• 적외카메라법</li> <li>• 기계임피던스법</li> <li>• 초음파법</li> <li>• 부식모니터법</li> </ul>	압력용기 및 정지구조물, 특히 해양구조물에 대해서는 AE법의 적용연구가 많음. 종래의 NDI 및 공중초음파, 기계임피던스 변화법등이 사용됨
전기 기계	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 회전기기</li> <li>• 정지전기</li> <li>• 전압케이블</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 진동음향법</li> <li>• 전류해석법</li> <li>• 절연진단법</li> <li>• 정류진단법</li> </ul>	절연진단등 고전적인 진단방법이 많이 사용됨. 최근 신뢰성이 확보된 진동음향법, 전류해석법 등이 활발히 연구되고 있음

「청각」, 「온감」에 의한 방법과 광의의 진동현상과의 사이에 상관성이 있음을 알 수 있다.

따라서 종래의 오감점검법 대신에 실제로 진동현상을 측정함으로써 정량적인 진단이 가능하게 된다.

이와같이 기계의 이상을 진단하기 위하여 진동의 크기나 빠르기, 방향 등 진동의 성질을 알아내는 것

으로 또는 상시 감시가 필요하고 이상 상태 발견시는 즉각 보수조치를 취해야 한다.

구조물에서 발생하는 물리·화학적 계측 신호량은 응력, 부식, 음향, 변위 등 다양하다.

상시 계측 시스템에서는 이들을 신속하게 잡아내어 구조물을 제어하도록 기능이 설계되어 있다.

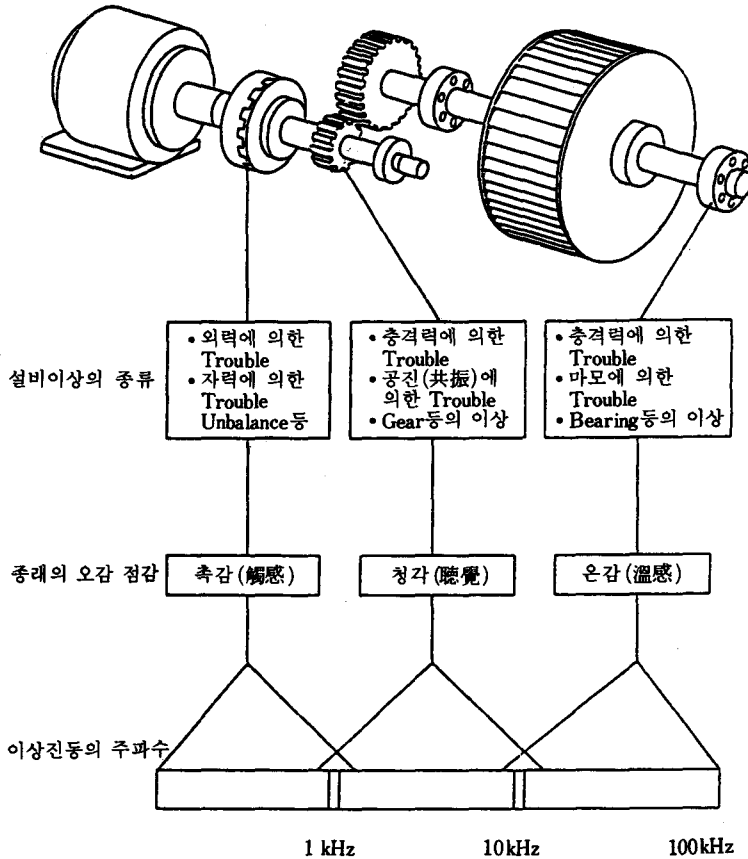


그림 2. 오감과 진동주파수와의 대비

최근에 발생되었던 많은 붕괴사고는 수백만원의 계측 시스템만 갖추고 감시하였더라면 사전 방지가 가능한 것으로 나타났다.

국내에서 구조물 상시 계측 시스템을 적용한 역사는 불과 15-16년에 불과하다. 지하철 4호선 공사 당시 동대문 (보물 1호)지하를 통과하는 터널을 뚫어야 했고 이때 그것을 원상태로 보존하기 위해 상시계측이 필요하였다. 이 때에 사용된 계측 시스템은 Histogram Recorder System 으로 주기적으로 온도, 경사량, 변위량, 진동량 등을 24시간 계측하였다.

외국에서는 교량의 경우 표 2와 같이 다양한 방법을 현재 운영하고 있다.

한편, 최근 산업의 발달과 차량의 증가로 인한 교통량의 급증으로 주요 고속도로 및 간선도로에서 심각한 교통 정체가 발생하고 있어 도로의 확장 공사가 계획, 시공되고 있으며, 이에 따라 교량의 확폭 또는 신설공사가 수반되고 있다. 교량의 확폭

공사를 실시할 경우에는 장기간 동안의 차량 통제가 제반 여건상 불가능하므로 현재 차선의 차량 통행하에서 기존 교량을 확폭 시공하는 방법이나, 기존 교량을 해체하고 신설 교량을 가설하는 방법이 채택되고 있다. 기존 교량을 해체하고 신설 교량을 가설하는 경우에는 공사 기간 동안 차량의 통행을 위하여 임시 우회도로를 가설하고 가교량을 설치하여 한시적으로 차량을 우회시키고 있는 실정이다. 그러나 이러한 가교량은 대부분이 단기간 동안 사용되고 철거되기 때문에 충분한 안전성 검토없이 가설되고 있어 안전사고 및 붕괴 등의 위험요소를 내포하고 있어 이에 대한 안전진단의 필요성이 대두되고 있다.

이에 따라서 한양대학교 장동일 교수 등은 고속도로상의 가교량을 선정하여 외관조사, 허용용력설계법, 신뢰성방법, SPFR에 의한 방법 및 동특성 노후 손상도 추정기법 등을 통하여 종합적으로 검토



표 2. 외국의 교량 자동계측 사례

교량명	소재지	교량형식	목적	설치계측기
금문교	샌프란시스코	현수교	지진후의 안전성 확인	- Tiltmeter(경사계) : 2개(주탑의 경사계측) - 자동계측기 : 전화 모뎀연결 - 응력측정 76개 설치계획등
Seattle Swing Bridge	씨애틀, 미국	Swing교, 강교	- 공사중 시공의 안전성 및 정밀도 - Swing중의 균형용시 및 원위치 확보	- Tiltmeter : 6개 설치 Swing post와 교량의 경사계측 - 자동계측기 : 전화 모뎀 연결
Three River Bridge	퀘벡 캐나다	강교	- 새굴 및 강의 흐름으로 인한 교각의 기울어짐 - 교량상판의 처짐	- 면내 경사계(4개) : 교각의 경사 측정 - 변형계(4개) : 교량상판의 처짐 - 전화 모뎀연결(자동계측)
H-3	하와이 미국	Segmental 콘크리트교	- 공사중 시공의 안전성 및 정밀도 - 설계치와 실측치의 비교 검토	- 경사계(27개) : Box girder의 경사계측 - 응력계측기(철근, 콘크리트)
Montreal Olympic Stadium	몬트리얼 캐나다		- 기적감각과 처진 건설기술의 시험장이 된 구조물의 안전성 계측	- 응력계측기 - 경사계 - 변형계
Perrot Ferry Bridge	Stanislans River 미국	Segmental 콘크리트교	교량처짐의 안전성 검토	- 경사계(6개) : 교량의 각 변형 측정
Sunshine skyway	미국	사장교	시설관리 유지	500개소의 응력 및 온도측정
Mississippi River	"	"	"	케이블에 가속도계(9개소) 데크에 가속도계(5개소) 종속계(5개소)
FAR	덴마크	사장교	"	- 시공중의 가속도계, 종속계, 온도계 - 케이블의 진동측정(11개소) - 경사각
PARANA River교	알렌티 파라과이	"	"	- 온도계, 스트레인게이지 - 케이블 정력 측정
Wye ERsking	영국	"	"	- 종속계 및 가속도계

분석하여 안전도 평가를 실시하였고 보수 및 보강 대책등을 제시하였다.

구조물의 안전진단은 크게 대상 구조물의 도면 검토, 이력 조사 및 외관 조사 등을 실시하는 현장

조사와 비파괴시험, 재하시험 및 특수 비파괴 또는 파괴시험을 실시하는 현장 측정으로 이루어진다.

따라서, 본 내용에서는 조사 대상 교량에 대해 구조적 재원 조사, 균열, 변상 등의 외관상 결함 조사 등의 현장 조사를 실시하였으며, 재하차량에 의한 현장측정을 실시하여 그 결과로부터 공용내하력을 도출하여 안전도 검사를 실시하였다. 또한 교량의 내하력을 평가하기 위하여 허용응력설계법, 신뢰성방법, LRFR(Load Resistant Factor Rating)에 의한 방법 및 동특성 노후 손상도 추정기법을 이용하였다.

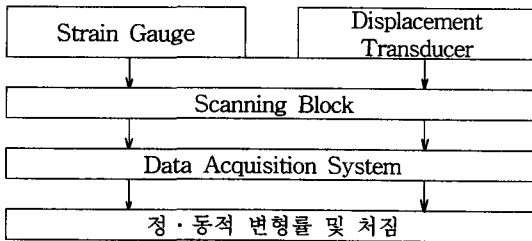
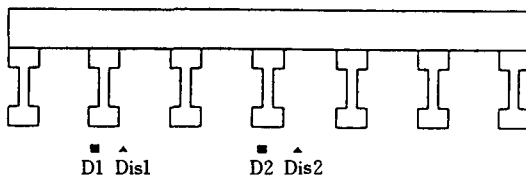


그림 3. 측정기기 구성 체계



D : Dynamic strain

Dis : Displacement Transducer

그림 4. 변형계이지 및 처짐측정기부착위치(측정경간8)

5. 결론

산업사회가 다양화되고 급격한 발전을 하면서 생산시스템이나 공공복지시설 및 사회간접설비는 대형화되고 복잡화되는 추세에 있다. 그러므로 거대시스템의 극소부분에서 이상 상태가 발생하면 시스템 전체가 가동되지 않으며 막대한 경제적 손실과 인명 피해를 가져온다.

전기·전자파의 잡음으로 인해 생산 설비의 중단이나 갑작스러운 가스 탱크의 폭발 및 버락에 의

한 정밀기기의 파손 등은 늘 우리곁에 있으며 불안감을 준다.

상시 계측이라 함은 이러한 시스템에서 존재하는 각종 물리·화학적 상태량을 정확히 측정하여 생산정보나 경제 정보를 제공하고 사고의 사전 방지나 경제적 손실을 최소화하는 것이다.

본 보고에서는 상시 계측에서 사용되는 기본 측정 개념을 바탕으로 계측기기 및 장치, 석유화학플랜트, 회전기계 및 구조물 등에서 사용되는 계측 방법을 조사하였다. 산업 및 공공복지시설의 증대와 함께 개인은 개인 안전과 업체에서는 시설·설비 안전을 통한 경제 이익 추구가 고조되고 있으며 특히 도난 방지시설은 바로 센서 및 계측시스템의 기술과 기동성 등으로 구성되고 있으며 회사나 상가 등에 많이 설치되고 있으나 그 동작의 신뢰성이 확보되어야 한다. 앞으로 상시 계측 분야의 수요는 급증할 것으로 예상된다.

따라서 측정 및 센서 기술의 종합화, 복합계측의 연구 개발 능력을 갖춘 한국표준과학연구원의 기여도가 클 것으로 본다.

참고 문헌

1. 山崎弘郎, 異狀の檢出豫知, 工業調査會, (1988)
2. 清水久二, 設備信賴性共學, KAIBUNDO, (1987)
3. 日本機械學會, 機械·構造物の安全性, 丸善株式會社, (1988)
4. 青島賢可, オーム社, (1974)
5. 한국산업안전학회, '93 추계학술 연구발표 논문집', (1993)
6. 한국산업안전학회, Vol. 8, No. 1, (1993)
7. 한국산업안전학회, Vol. 7, No. 4, (1992)
8. 日本能率協會, Safe Tech 93, (1993)
9. Anritsu사, 設備診斷機器, (1993)
10. 최만용 등, Mechanical Seal 이상 상태 계측시스템 KRISS-93-092-IR
11. 秋月影雄, "設備診斷技術と安全", 計測と制御, Vol. 24, No. 4, P15, (1985)
12. 한양대학교 산업과학연구소, "지하철 4호선과 종로 6가 정거장 건설 및 운행시 문화재 추가보호 대책 연구", (1983. 11)