



전창빈

배관계 감시를 통한 플랜트 신뢰성 향상 방안

연세대학교 기계공학과 석사
냉동공조기계기술사
(현) 한국전력기술(주) 진동전문가

1. 개요

플랜트 배관은 내부 유체의 영향으로 어느 정도 진동한다. 곡관부가 많은 복잡한 배관계에서는 난류유동이 배관진동의 중요한 영향이 되지만 분기관과 같은 불연속부에서는 압력맥동이 발생하고 배관의 음향특성에 의해 압력맥동이 증폭되어 배관에 고진동이 발생하기도 한다. 배관계의 동특성은 대부분 저주파이므로 난류유동에 의한 저주파진동(10 ~ 30 Hz)에 의해 공진하기 쉽다. 배관계에 고진동이 발생하면 배관계와 부속물에 점진적인 피로 파괴가 생길 수 있고 과도 진동이 발생하면 배관계 전체가 변형되거나 지지대가 파괴될 수 있다. 운전 중 플랜트의 배관진동 문제는 운전 정지를 초래하고, 상당한 비용 문제를 발생시킬 수 있다.

선진국에서는 이러한 문제를 관련 코드와 법규에서 언급하고 있으며 진동의 영향을 줄이기 위해서 허용 기준을 적용하여 설계하고 있다. 배관계의 진동을 효과적으로 관리하기 위해서 2단계 프로그램을 적용할 수 있다. 1단계는 플랜트 설계 단계에서 진동을 고려하는 것이고 2단계는 운전 단계에서 진동의 영향을 관찰하는 것이다. 최근 플랜트의 건설경향은 더 많은 시험과 관찰을 수행하여 건전성을 확인하는 것으로 이러한 경향은 측정 장비와 측정 기술의 발달로 급 가속되고 있다. 시험과 관찰을 하면 비용은 들지만 이에 따라 플랜트의 신뢰도는 향상되고 해석모델도 개선할

수 있고 해석결과의 모호성도 줄여 설계 보수성을 줄이게 되는 효과를 얻을 수 있다.

배관계 감시를 수행하면 세 가지 큰 장점을 얻을 수 있다. 첫째 측정변수를 이용한 상세한 해석으로 설계 시 포함된 보수성을 줄이고 정확한 해석 결과를 얻을 수 있으며, 둘째 근본원인분석을 통해 적절한 시정조치 방안을 도출하여 진동문제를 해결할 수 있다. 배관계 전체에서 과도한 진동이 관측될 경우에는 진동의 원인을 제거하는 것이 가장 효과적인 해결 방법이다. 예를 들어 밸브에서 캐비테이션이 발생 하는 경우, 밸브 인접 배관을 진동 방향에 대해 구속하는 것보다는 캐비테이션이 발생하지 않도록 설계된 밸브를 사용하거나 밸브 후단에 오리피스를 설치함으로써 캐비테이션으로 인한 진동을 근본적으로 방지하는 것이 더 효과적인 해결 방법이다. 셋째 배관계 거동을 감시함으로써 비정상적인 운전 모드를 개선할 수 있다. 이와 같이 감시를 통한 원인분석 및 시정조치는 배관계의 구조적 특성을 개선하여 배관계를 설계 수명 동안 사고에 대해 견딜 수 있도록 하는 것으로 플랜트의 신뢰성 향상에 기여한다. 즉 배관계 감시는 수격 현상과 유체유발진동으로 인한 과도한 진동을 완화시키거나 제거함으로써 배관계가 설계 수명 동안 건전성을 유지하도록 하는 것이다.

특히, 배관계 감시는 배관손상과 같은 문제가 발생했을 때 원인과 영향을 조사하거나 계통운전의 위험성을 즉각적으로 규명하는데 필수적이다. 만



약 파손된 지지대를 발견한 후 지지대의 결함으로 단정짓고 자세한 조사 없이 지지대를 보강 교체하였다면 적절한 시정조치가 될 수도 있지만 원인에 따라 심각한 결과를 초래할 수 있다. 즉, 지지대가 수격 현상과 같은 큰 과도 하중을 견디지 못하고 파손된 경우라면, 지지대 보강은 적절한 조치가 될 것이다. 그러나 배관 내부의 예상치 못한 온도 구배에 따라 지지대에 과도한 하중이 가해져서 파손된 경우라면, 지지대의 보강 교체는 역으로 배관거동에 나쁜 영향을 끼치고 이로 인하여 배관이 휘어짐에 따라 배관계에 과도한 응력이 발생하게 된다.

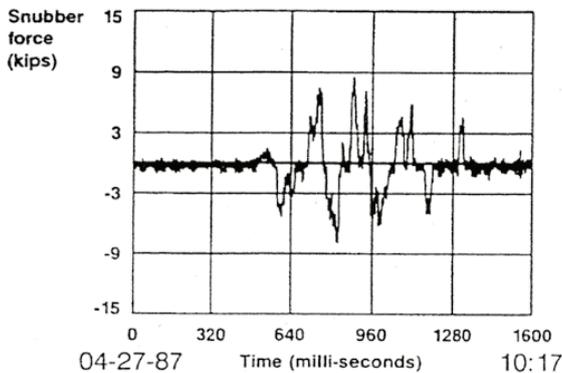
본 보고서에서는 근본원인분석, 측정변수 및 센서, 데이터 수집 및 분석, 그리고 배관계 거동 감시 절차 등에 관하여 기술하고 해외 원자력 발전소의 가압기 감압밸브 누출 사고의 사례를 통해 근본원인분석 절차와 효과적으로 설계를 개선한 과정을 소개하고자 한다.

2. 근본원인분석 절차

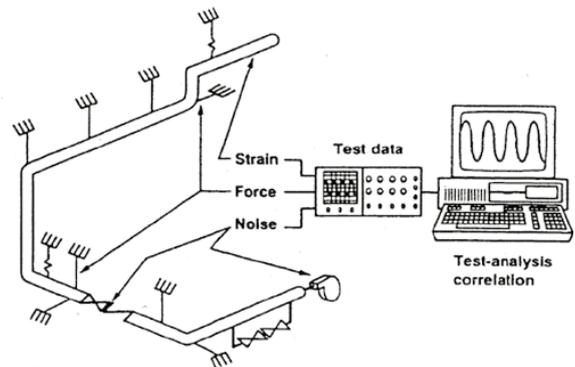
근본원인분석은 배관계에 발생한 손상의 원인을 찾기 위해 실시한다. 분석의 성공 여부는 손상과 관련된 정보의 유용성과 정확성에 달려 있으며 배관계 거동을 감시함으로써 사고가 발생한 원인,

시기, 위치 등에 대한 상세한 정보를 얻을 수 있다. 손상의 원인을 결정하기 위하여 센서로 배관계 거동을 측정하며 변위, 온도, 압력, 힘, 가속도 그리고 주파수 등과 같이 다양한 형태의 변수를 측정하여 배관계의 거동을 수치 데이터로 확인할 수 있다. 예를 들어 LVDT(Linear Variable Differential Transducer)는 변위를 측정함으로써 진동 또는 열팽창 정도를 수치 데이터로 알 수 있으며, 밸브의 개도를 측정해서 계통의 운전모드를 감시하는데 이용하기도 한다. 스트레인 게이지를 이용하면 기기 노즐에 발생하는 응력, 변형률, 배관에 작용하는 하중을 알 수 있으며, 온도 센서는 저 유량 상태나 밸브에서 누출이 생길 경우 온도를 측정하는데 사용된다. 압력 센서는 배관에서 발생하는 압력 맥동을 측정하는데 사용되며 진동의 원인과 계통의 운전모드에 대한 정보를 알 수 있다.

사고가 발생한 시기는 사고의 원인을 알 수 있는 실마리를 주기도 한다. 그림 1은 배관 지지대에 로드 핀을 설치하여 지지대에 가해진 과도하중을 측정한 데이터로 과도 하중이 발생한 시기를 알 수 있다. 이 데이터에는 과도 하중이 시간과 하중의 크기로 상세하게 기록되므로 측정데이터를 운전모드와 비교하면 과도 하중이 발생한 운전조건을 확인할 수 있으며 분석결과를 이용하여 적절



[그림 1] 로드핀으로 측정한 과도하중 데이터



[그림 2] 배관 감시 시스템 예



<표 1> 배관계 거동 감시에 사용하는 센서의 종류 및 특성

	측정 변수	적 용	특 성
Accelerometer	<ul style="list-style-type: none"> 가속도 속도, 변위 (적분, 이중 적분) 	<ul style="list-style-type: none"> 배관 진동 (변위, 가속도 측정) 회전 기기 진동 (변위, 속도, 가속도 측정) 구조물 진동 (변위, 가속도 측정) 	<ul style="list-style-type: none"> 광범위한 주파수 영역 (1 Hz? N KHz)에서 사용 높은 주파수에서 민감하게 반응 낮은 주파수에서 잡음에 의한 간섭이 생길 수 있음 측정 부위에 부착 용이 사용 온도 제한
LVDT (Linear Variable Differential Transducer)	<ul style="list-style-type: none"> 변위 	<ul style="list-style-type: none"> 배관 진동 (0Hz ~ 200Hz) 배관 열팽창 변위 밸브 열림 위치 	<ul style="list-style-type: none"> 변위를 직접 측정(적분이 불필요함) Free Floating Core LVDT : 설치가 어려움 (부착용 기구가 필요) Spring Loaded LVDT : 손으로 잡은 채로 측정이 가능하며 부착용 기구 사용도 가능 Lanyard보다 부서지기 쉬움
Lanyard Potentiometer	<ul style="list-style-type: none"> 변위 	<ul style="list-style-type: none"> 배관 진동 (0Hz ~ 30Hz) 배관 열팽창 변위 밸브 열림 위치 	<ul style="list-style-type: none"> 직접 측정(적분이 불필요함) Lanyard의 장력에 의해 측정(사용 주파수 영역이 제한됨) 큰 변위의 측정에 적합 LVDT와 같이 고정 부위와 이동 부위에 부착시키기 위한 기구 필요
Strain Gauge	<ul style="list-style-type: none"> 측정 부위의 변형률 Wheatstone Bridge를 이용하여 측정된 변형률을 굽힘 응력, 비틀림 응력, 힘, 압력으로 변환함. 	<ul style="list-style-type: none"> 배관 응력(정적, 동적) 구속 하중(정적, 동적) 압력 맥동(Hoop Stress) 	<ul style="list-style-type: none"> 용도에 따라 형태와 크기가 다양함 신호 조절기가 포함되지 않아 가격이 저렴함 용접점이 접착식보다 설치가 용이함 온도에 따라 스트레인이 변하므로 보정을 해주어야 함 정확한 결과를 얻기 위해서는 게이지와Wheatstone Bridge에 대한 이해가 필요함
Load Pin (Force Transducer)	<ul style="list-style-type: none"> 구속 하중 	<ul style="list-style-type: none"> 배관 진동(정상 상태 진동 및 과도 진동) 배관 열팽창 하중 	<ul style="list-style-type: none"> 설치가 어려움 주문 제작으로 제작에 많은 시간이 걸리고 가격이 비싼 결점이 있음 핀 내부에 Strain Gauge가 내장됨
Dynamic Pressure Transducer	<ul style="list-style-type: none"> 배관 내 유체의 압력 맥동 	<ul style="list-style-type: none"> 배관 진동 (정상 상태 진동 및 과도 진동) 	<ul style="list-style-type: none"> 압전(Piezoelectric)형식이 주로 사용됨 사용 온도가 제한됨 Tap Line에 설치시 음향 공진으로 인한 맥동을 고려해야 함
Thermal Couple	<ul style="list-style-type: none"> 온도 	<ul style="list-style-type: none"> 배관 열팽창 Thermal Stratification Strain Gauge의 온도보정 	<ul style="list-style-type: none"> 가격이 저렴 측정 부위에 용접 또는 접착하여 설치(측정 부위에 접촉시켜 측정할 수 있음) 측정 범위에 따라 형태가 다양함 측정 영역에서 저항이 비선형으로 변화 (선형화할 수 있는 프로그램이나 장치가 필요)

3.2 변형률

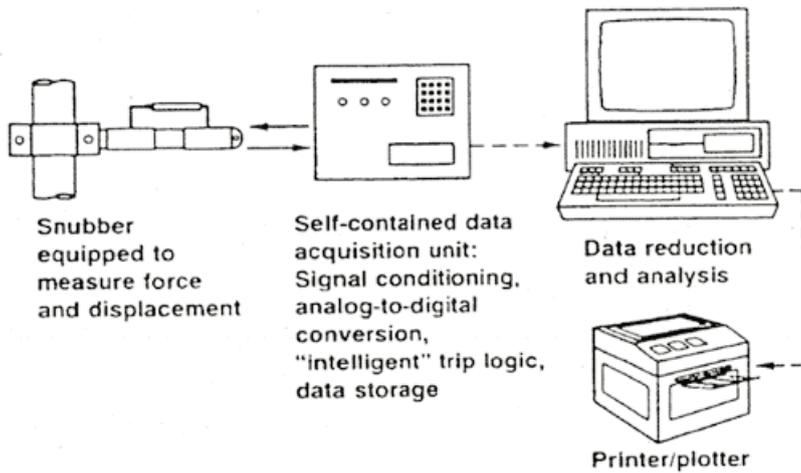
스트레인 게이지는 다양한 형태와 크기를 가지고 있으며 측정 하고자 하는 부위에 점용접으로 쉽게 설치할 수 있다. 스트레인 게이지는 지지대,

철 구조물, 콘크리트 그리고 보일러 내부 배관 등 상온부터 1,000°F이상의 고온까지 광범위한 온도 조건에서 사용이 가능하다.

스트레인 게이지로 측정된 데이터로부터 배관계



Self-contained digital data acquisition system

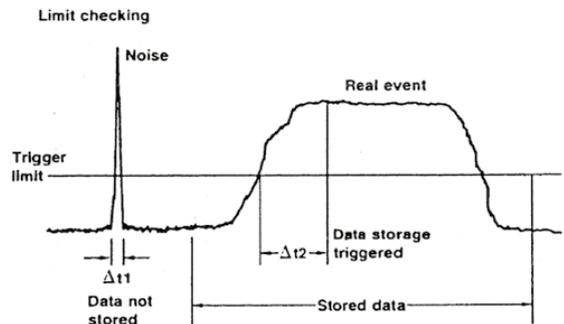


[그림 6] 데이터 취득 시스템

를 분석하려면 많은 인력이 필요하였다. 이와 같은 데이터 수집 방식은 비용 면에서 경제성이 없었고 배관계 거동을 감시하는데 많은 제한 조건도 있었다.

최근 휴대용 측정 장비의 개발, 개인용 컴퓨터의 발달, 분석 프로그램의 개발로 배관계의 감시는 기술적인 면과 비용 면에서 과거와 비교해 보면 크게 향상되었다. 개인용 컴퓨터의 확장 슬롯에 직접 A/D 변환기를 장착함으로써 분석 장비의 휴대가 간편하게 되었다. 그리고 원하는 데이터만을 분류 저장할 수 있는 분석 프로그램의 개발로 방대한 양의 데이터를 처리할 수 있게 되었고 이에 따라 엔지니어가 데이터 분석과 문제의 근본 원인을 찾는 데 더 많은 노력을 기울일 수 있게 되었다. 이와 같은 감시 방법의 개선은 센서에서 받은 신호를 적당한 공학용 단위로 자동적으로 변환해서 얻은 수치 데이터를 효과적으로 분류함으로써 가능하게 되었다.

그림 6은 데이터 취득 시스템의 예를 보여준다. 이 시스템에는 신호 조절기, A/D 변환기가 포함되어 있으며 설정치이상의 필요한 데이터만을 저장한다.



[그림 7] 신호 중 잡음과 설정치

그림 7은 신호 중 잡음을 분리하여 제거하는 방법을 보여주며 이와 같은 방법을 이용하여 데이터를 선별하여 저장할 수 있다. 그림과 같이 전기적 잡음에 의한 뾰족한 모양의 신호는 Δt_1 (1/1000초 이하)의 매우 짧은 순간 발생하므로 Δt_2 이상 지속되는 신호만을 저장하도록 데이터 취득 시스템 내에 설정치를 정하면 잡음의 저장을 막을 수 있다. 이와 같이 설정치를 정함으로써 데이터 취득 시스템 내의 메모리를 절약할 수 있으며 장기간 감시를 통하여 필요한 배관계 거동 데이터를 얻을 수 있다.



5. 배관계 거동 감시

5.1 감시 방법

배관계 감시는 감시 시간에 따라 크게 장기간 감시와 단기간 감시로 분류하며 단기간 감시를 일반적으로 이용한다. 감시는 센서를 설치하는 것과 특정 시기 동안 배관계 거동에 대한 데이터를 기록하는 것을 포함한다.

1) 단기간 감시

단기간 감시에는 배관계 건전성 검증 시험절차와 같은 시운전 시험 절차가 필요하며 배관계에 사고가 발생할 가능성이 있는 운전 모드로 계통을 운전하면서 배관계 거동을 측정한다. 예를 들어 잠재적인 과도 진동이 생길 수 있는 배관계에 대하여 배관계 거동을 측정하기 위하여 수격 현상과 같은 과도 진동이 발생하도록 계통을 운전하면서 배관계의 반응을 감시해야 한다. 즉 단기간 감시는 펌프 트립과 같은 비정상적인 운전 상태에 대한 상세한 정보를 얻기 위하여 사용한다.

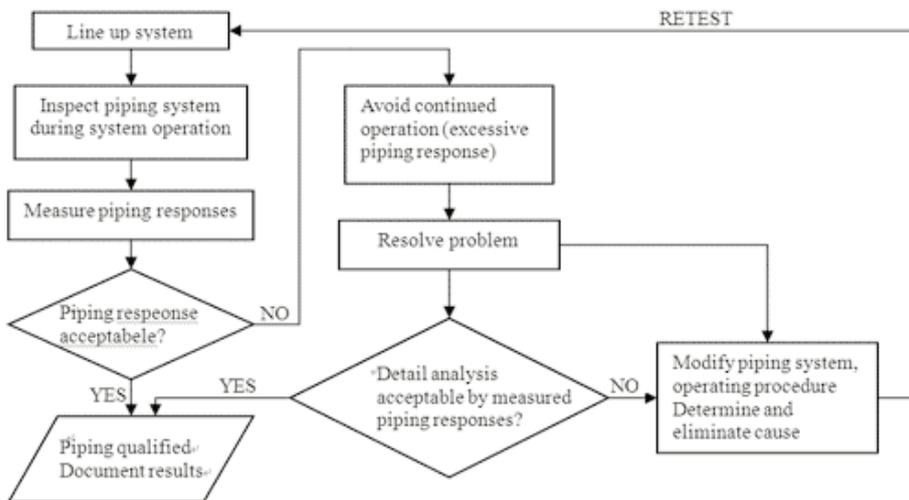
2) 장기간 감시

디지털방식의 데이터 취득 시스템과 데이터를 선별하여 저장하는 기술이 개발되면서 운전 중 배관계에 대한 장기간 감시가 가능하게 되었다. 장기간 감시는 사고 발생 원인, 시기, 위치에 대한 정보가 전혀 없는 경우에 유용하며 감시 기간은 하루가 될 수도 있고 일년 이상이 될 수도 있다. 특별한 시험 절차가 필요치 않으며 계통을 정상적으로 운전하는 동안 배관계를 감시한다. 즉 장기간 감시는 계통을 정상적으로 운전하는 중에 발생하는 배관계의 비정상 거동에 대한 상세한 정보를 얻기 위하여 사용한다.

5.2 감시 절차

배관계의 사고 상황에 따라 구체적인 원인 분석 방법과 효과적인 설계 개선 방법이 결정되듯이 사고의 증상과 원인에 따라 배관계에 대한 감시 범위, 감시 방법, 데이터 취득 시스템, 측정 변수 등이 결정된다. 다음의 배관계 거동 감시 절차를 이용하면 배관계에 발생하는 문제를 보다 효과적으로 해결 할 수 있다.

- ① 중요 측정 변수를 결정한다.
- ② 사용할 데이터 취득 시스템을 세부적으로 결



[그림 8] 배관계 감시 절차



정한다.

- ③ 적합한 센서를 선택한다.
- ④ 센서를 설치하기 위한 부착용 기구를 제작한다.
- ⑤ 측정 부위에 센서를 설치하고 데이터 취득 시스템을 연결한다.
- ⑥ 자료를 수집하고 분석한다.
- ⑦ 배관계의 건전성을 검증한다.
- ⑧ 적절한 설계 개선을 한다.
- ⑨ 개선된 배관계에 대하여 다시 건전성을 검증한다.

그림 8은 배관계 건전성 검증을 위한 배관계 감시 절차의 예를 보여준다. 먼저 잠재적인 사고 가능성이 있는 배관계를 선정하여 현장 조사를 실시하며 측정할 지점을 선정하고 육안 검사를 통해 과도한 진동, 배관 지지대의 파손, 배관계의 열팽창에 의한 배관과 배관 지지대의 고착, 클램프의 회전 및 이탈, 나사 연결부의 풀림, 비정상 운전에 의한 소음 등 배관계의 이상 징후를 조사한다. 선정된 측정 지점에 센서를 설치하고 데이터 취득 시스템을 연결하여 배관계의 반응을 측정하며 수집된 데이터를 미리 설정한 허용 기준과 비교하여 배관계의 건전성을 검증한다. 이 과정에서 검증되지 못한 측정 지점은 측정 데이터를 적용하여 실제 배관계의 거동과 유사하도록 유사 해석을 수행하며 이것을 통하여 배관계 전체의 응력 수준을 결정할 수 있다. 이와 같은 상세 해석이 코드의 허용 조건을 만족하지 못하면 과도한 배관계 반응의 원인을 규명하여 배관계의 형상 변경, 배관 지지물 추가 설치 등의 설계 개선을 하거나 배관계가 과도한 반응을 하지 않도록 운전 절차를 개선할 수 있다. 설계 개선 후에는 변경된 배관계를 감시 절차에 따라 다시 검증하여야 한다.

6. 가압기 감압밸브 적용사례

가압기 감압밸브 누출사고는 PWR(Pressurized Water Reactor) 발전소에서 간혹 발생하는 사고

로 발전소 예열 중 감압밸브에서 증기가 과도하게 누출되어 생기는 문제이다. 즉 감압밸브 노즐 부위에 큰 하중이 가해져서 발생하는 문제로 원인을 유추할 수 있다. 누출이 생기는 운전모드와 원인을 추적하고 노즐에 가해지는 하중이 허용범위 내에 드는지 계산하기 위해 측정 계기를 부착하여 하중을 측정한다.

여기서는 미국의 Salem 2호기 PWR 발전소에서 발생했던 가압기 감압밸브 누출 사고를 예로 들어 근본원인분석 과정 및 설계 개선 과정을 요약하여 설명한다.

가. 감압밸브에 과도한 하중이 가해졌다고 가정하면 다음 사항들을 예측할 수 있다.

- 감압밸브 몸체의 변형으로 인한 증기 누출
- 감압밸브 후단 배관계의 열팽창
- Cold spring(배관 설치 시 여유가 크게 생겨 배관을 잡아당겨 감압밸브에 연결시킴으로 배관계 및 감압밸브에 잔류응력 및 변형이 발생)

나. 가압기에 사용된 감압밸브의 특성

- 스프링으로 작동되는 감압밸브 사용
- 밸브 시트(Seat)면에서 만능적인 증기 누출이 생김

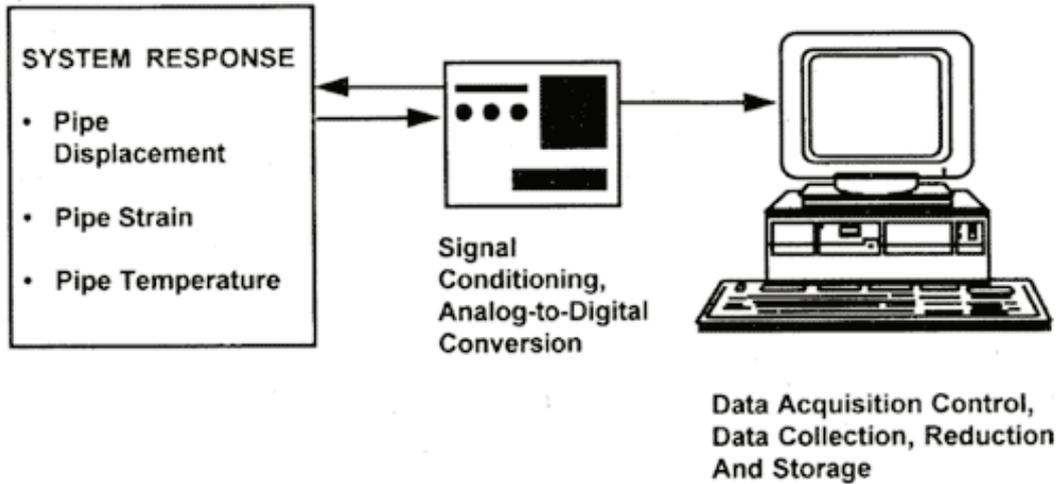
다. 배관계 감시의 목적

- 가압기 감압밸브에 작용하는 모멘트 측정
- 허용 설계 기준과 비교
- 열팽창 변위 검증
- 증기 누출 후 배관계 거동 측정

라. 데이터 취득 시스템과 측정 계기 부착

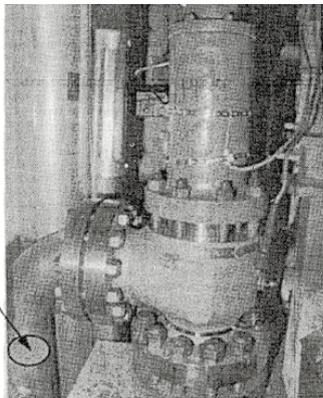
- **그림 9**는 감시를 하기 위한 데이터 취득 시스템의 구성을 보여준다. 측정변수로는 변위, 변형율, 온도를 선택하였다. 신호조정기와 A/D 변환기를 설치하였고 컴퓨터에서 데이터를 선별 저장하고 분석하였다.

- **그림 10**은 감압밸브에 가해지는 모멘트를 측정하기 위한 스트레인게이지와 열전대의 부착위치를 보여준다. 밸브와 연결되는 배



[그림 9] 데이터 취득 시스템

Location of Strain Gages and Thermal Couples



[그림 10] 스트레인게이지와 열전대 설치 위치



[그림 11] Stanchion과 지지대 구조물의 고착

관 주위에 90° 간격으로 스트레인게이지를 부착하여 배관에 생기는 변형을 측정하였으며 배관의 열팽창 여부를 알기 위하여 열전대를 이용하여 스트레인게이지 주변의 온도를 함께 측정하였다.

마. 감시 결과 분석

- 가압기 압력 1990 psi 근처에서 심각한 변형을 측정할 수 있었다. 인장 하중 증가율이 커졌으며, 모멘트도 50 % 정도 증가하였다.

감압밸브에서 누출이 생기고 배관의 온도가 상승하였다.

- 가압기의 압력을 1,750 psi 로 내렸을 때 감압밸브의 누출이 멈추었다.
- 감압밸브와 관련 배관에 대한 현장조사를 실시하여 배관과 지지대가 고착되어 있음을 발견하였다(그림 11)

바. 설계 개선

- Stanchion을 제거하였으며 이에 따라 축방향



하중이 약 30%, 모멘트가 약 65% 줄었다.

- Lug의 일부를 제거함으로써 배관 지지대와 Lug가 고착되지 않도록 조치하였다.
- 지지대와 배관 사이의 여유를 크게 하였다.
- 성능이 좋은 constant spring 으로 spring 지지대를 교체 하였다.

사. 감압밸브 증기누출 원인 및 시정조치 결과

- 열팽창에 의한 배관과 지지대 사이의 고착이 감압밸브에 과도한 하중으로 작용하여 감압밸브에서 증기가 누출되었다.
- 지지대 고착부를 제거하고 spring 지지대를 교체한 결과 감압밸브에서 증기의 누출이 멈추었다.
- 가압기 감압밸브 누출에 대한 근본적인 원인을 찾을 수 있었으며 효과적인 설계 개선이 가능하였다.

7. 결론

배관계에 대한 감시는 비정상 운전에 의한 배관계 사고의 근본적인 사고 원인을 밝히는데 효과적이다. 사고의 근본 원인 분석을 위하여 사고와

관련된 정보를 정확한 수치 데이터로 취득하는 것이 무엇보다 중요하며 배관계 거동을 감시함으로써 필요한 정보를 효과적으로 취득할 수 있다.

운전 중 플랜트 배관계에서 발생할 수 있는 사고를 정확히 분석하기 위해서는 분석 기술뿐만 아니라 감시 장비 및 분석 프로그램을 도입하여 배관계 거동에 대한 상세한 정보를 수집할 수 있는 능력도 함께 갖추어야 한다. 최근에 배관계 거동을 감시할 수 있는 장비와 데이터를 분석할 수 있는 프로그램은 크게 향상된 반면 필요한 데이터를 취득하는데 드는 비용은 줄었다. 이것은 개인용 컴퓨터의 발달, 휴대용 측정 장비의 개발, 그리고 방대한 데이터를 선별하여 저장하는 기술이 개발됨으로써 가능하게 된 것으로 적은 비용으로도 광범위한 배관계의 거동을 감시할 수 있게 되었다.

배관계 거동을 감시함으로써 배관계 손상에 대하여 근본원인분석을 통해 적절히 설계 개선 대책을 세울 수 있으며, 배관 건전성 검증을 통해 배관계가 설계 수명 동안 기능을 유지할 수 있도록 플랜트 신뢰성 향상에 크게 공헌하고 있다. 