

## 1. 머리말

온라인 설비 진동 관리 시스템과 원격 접속 기능을 사용하여 설비 진단한 사례를 설명하고자 한다. 이와 같은 사례를 통해서 설비 보전 업무 및 설비 진동 관련 업무 담당자들의 설비 진동 관리 시스템의 효과에 대한 이해를 돕고 나아가서는 효과적인 설비 관리 방법을 통해서 최소비용으로 설비 관리의 효율성 및 생산성 향상을 기여할 수 있음을 알리고자 한다.

본 사례에서 언급하고 있는 해양 플랫폼은 유인 가스 생산 설비로 북해의 네덜란드 대륙붕에 위치하고 있다. 무인 생산 공장에서 나온 가스는 송유관을 통해 유인 공장으로 옮겨져 처리, 압축 및 건조된다. 이와 같은 공정을 끝낸 가스는 네덜란드의 터미널까지 연결되어 있는 송유관을 통해 수출된다.

## 2. 시스템 개요

### 2.1 기계 구성(Machine Train)

이 해양 플랫폼에서는 현지 압력(field pressure)이 낮아지는 문제로 인하여 가스 생산을 계속하기 위해 신형 가스 압축기(gas compressor) 2대를 플랫폼에 설치하였다. 각 압

축기는 14 MW aeroderivative 가스 터빈, 파워 터빈, 증속 기어박스 및 back-to-back 타입의 배럴 압축기로 구성되어 있다(그림 1). 이 압축기들은 독립적 또는 서로 병행해서 운전될 수 있도록 설계되어 있다.

### 2.2 온라인 설비 진동 관리 시스템

해양 플랫폼에서 안전 문제는 가장 기본적인 것이며 또한 가장 중요한 요소이다. 안전 문제와 함께 이들 두 대의 압축기는 가스 생산에 필수적이므로, 플랫폼 운영자는 기계 보호를 위해 벤틀리 네바다사의 3300 기계 보호 시스템을 설치하였다. 또한 이 시스템은 정상 운전 상태에서 모든 기계 보호시스템으로부터 입력되는 기계 정보를 연속적으로 수집하고 저장하는 컴퓨터화된 설비 관리 시스템인 벤틀리 네바다사의 Data Manager® 2000 시스템(이하 DM2000)과 연계되어 설치되었다. 이 시스템은 기계의 기동이나 정지와 같은 과도 상태와 경보 상황에서의 데이터 같은 중요한 운전 조건의 각종 데이터를 수집하며, 이 데이터들은 기계상태를 평가하고 압축기의 운전 조건을 최적화하는데 이용된다.

### 2.3 원격 진단 능력

설비 운전원들은 기계를 진단하는 과정에서 원격 접속 기능을 사용해서 벤틀리 네바다사의

\* E-mail : eungu.jang@bently.com / Tel : (02)2188-4900

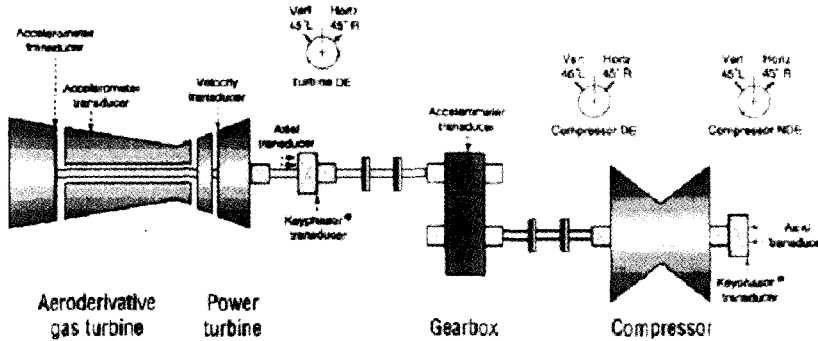


그림 1 터빈 압축기의 구성도

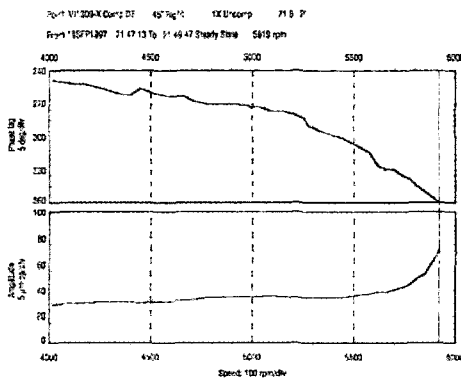


그림 2 기동하는 동안의 1X 진폭과 위상의 보데 선도

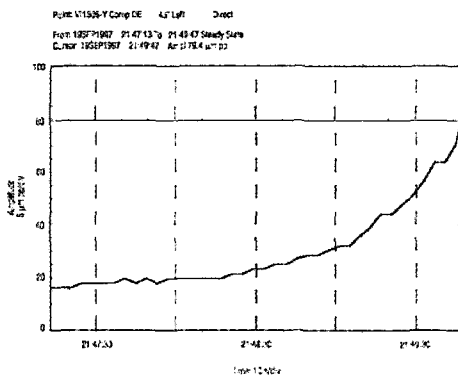


그림 3 기동하는 동안의 전체 진동 진폭의 경향 선도

구조이기 때문에 이런 원격 접속을 할 수 있는 전 세계 어느 곳에서도 설비에 대한 원격 진단 작업을 수행할 수 있다. 본 사례는 온라인 설비 진동 관리 시스템의 원격 접속 기능을 이용한 것으로서 이러한 원격 접속 능력으로 인하여 기계 문제의 신속한 해결능력이 크게 개선됨을 보여 준다.

### 3. 발생한 진동사례

#### 3.1 문제 발생

기계 가동이 시작되고 몇 달이 지난 1997년 9월, 원심 압축기 B에서 기계 기동 과정 중 높은 진폭의 진동문제가 발생하였고, 진동 진폭이 80  $\mu\text{m p-p}$ 에 이르러 설비가 불시 정지 되었다. 생산 차질로 인해 운전원이 즉시 설비 진단 전문가에게 원격 접속을 통한 기계 문제점의 분석을 의뢰하였다. 진동 경보가 발생하였을 때의 데이터는 이미 자동으로 온라인 설비 진동 관리 시스템에 의해 저장되어 있었으며 기계 상태 평가에 이용되었다. 기계가 정지되기 전과 기동하는 동안에 저장된 보데(bode) 및 경향(trend) 진동 데이터(그림 2와 3)를 보면 압축기 B에서 부하가 상승되는 동안 진동 진폭이 약 90°의 위상 변화와 함께 급격하게 증가하였음을 보여준다. 그러나 보다 중요한 것은

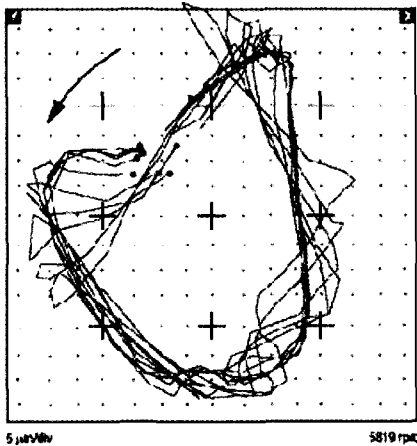
설비 진단 전문가로부터 설비 진단에 대한 도움을 받을 수 있다. DM2000 시스템은 네트워크 연결 또는 모뎀 접속을 통해 실시간 데이터와 저장된 데이터 파일에 모두 접근이 가능한

그림 4와 5에서 보는 바와 같이 궤도(orbit)의 형태이다.

기계가 가동되는 중에 수집된 진동 데이터를 보다 상세하게 검토해보면 1X 진동 진폭이 상

승함에 따라 궤도 모양은 거의 사각형에 가까운 비정상적인 형태로 변했다. 궤도 데이터는 축 중심선의 궤적을 나타내는 데이터로서(축의 상대 진동을 측정하는 변위센서가 움직이지 않는 경우) 이 데이터가 사각형 모양으로 나타날 수 있는 하나의 가능성으로는 진동 센서가 움직일 경우이다. 따라서 설비 진단 전문가는 운전원에게 케이스의 기초 볼트를 점검해 볼 것을 제안하였으며, 점검 결과 케이스 기초의 볼트들이 느슨하게 풀려 있는 것이 발견되었다. 그 당시 이 기계는 아직 하자보증기간 내에 있었기 때문에 기계제작자로부터 기계 상태를 점검 받을 수 있었다.

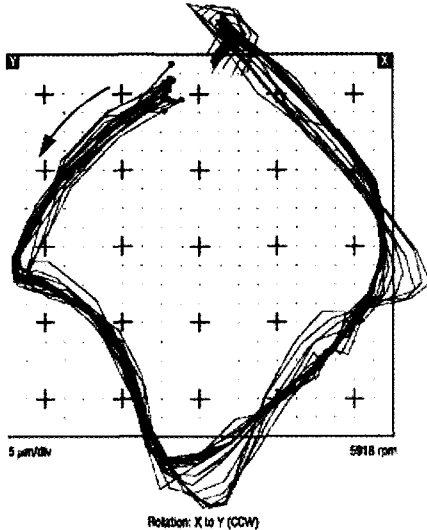
Y: V1100-Y Comp DE 45° Left Dir Amp: 82.1  $\mu\text{m pp}$   
 X: V1100-X Comp DE 45° Right Dir Amp: 84.4  $\mu\text{m pp}$   
 19SEP1997 21:49:37 Steady State Direct



Rotation: X to Y (CCW)

그림 4 압축기 구동 단의 궤도 패턴

Y: V1100-Y Comp DE 45° Left Dir Amp: 98.58  $\mu\text{m pp}$   
 X: V1100-X Comp DE 45° Right Dir Amp: 79.2  $\mu\text{m pp}$   
 19SEP1997 21:48:47 Steady State Direct



Rotation: X to Y (CCW)

그림 5 Trip된기 직전의 압축기 구동 단의 "사각형" 궤도 패턴

### 3.2 재가동

기계 제작자측에서 압축기를 운전에 적합하도록 재정렬 작업을 하고 기초 볼트를 정확하게 조이는 등 재가동 준비를 갖추었으며 당시 설비 진단 전문가는 기계 기동 중에 모터를 통해 원격으로 온라인 접속하여 설비 진단 활동을 수행하였다. 설비는 거의 7000 rpm까지 문제없이 기동 되었으나 7200 rpm에 이르자 갑작스럽게 높은 진동 현상이 다시 발생하였다. 운전 속도가 계속 증가하면서 진동 진폭이 2분 30초 만에 10에서 110  $\mu\text{m p-p}$ 까지 증가하였고 설비는 또 다시 불시 정지되었다. 운전원 들은 이전의 압축기의 문제가 완전히 해결되지 않은 것을 의심하였으나 당시 설비 진동 관리 시스템에 저장된 기계 데이터를 보면 궤도 형태와 Keyphasor® 모양이 이전의 궤도와는 근본적으로 다른 형태임을 보여주었으며 이는 곧 해당 기계가 이전과는 다른 문제를 가지고 있음을 보여주었다. 설비 진단 전문가는 약 2시간 30분이 채 못되어서 플랫폼을 방문하지도 않고 원격으로 이 새로운 문제가 선 회실속(rotating stall)이라는 것을 확인할 수 있었다.

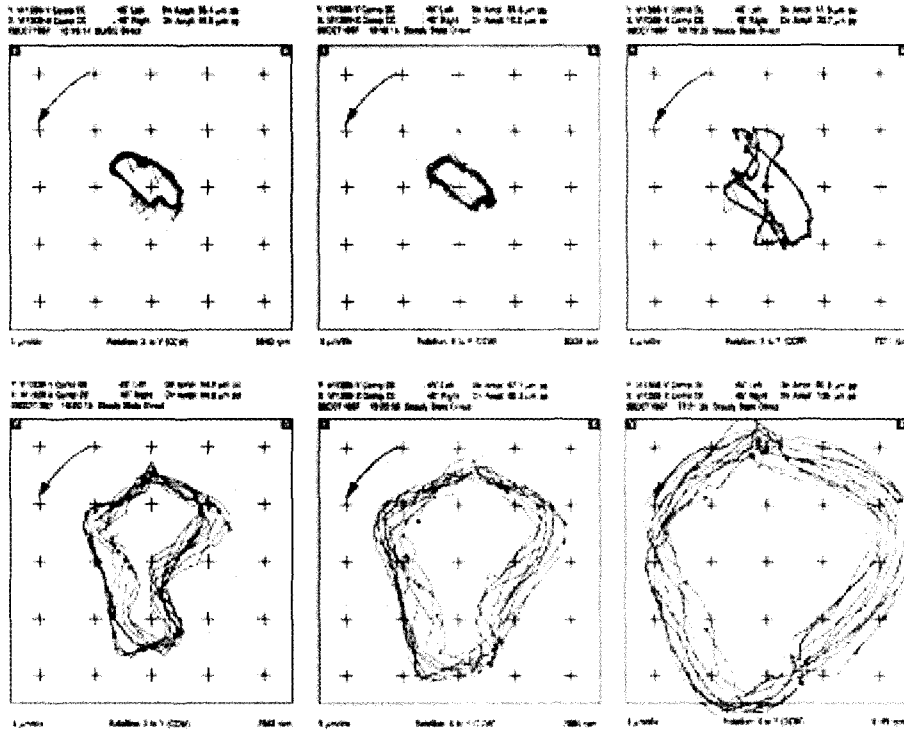


그림 6 압축기가 가동하는 동안의 궤도 패턴. 7271 rpm에서의 궤도 형태는 임펠러에서 발생한 원주방향 압력파에 의해서 나타나는 분수 조화 진동 성분에 의해서 영향을 받는다.

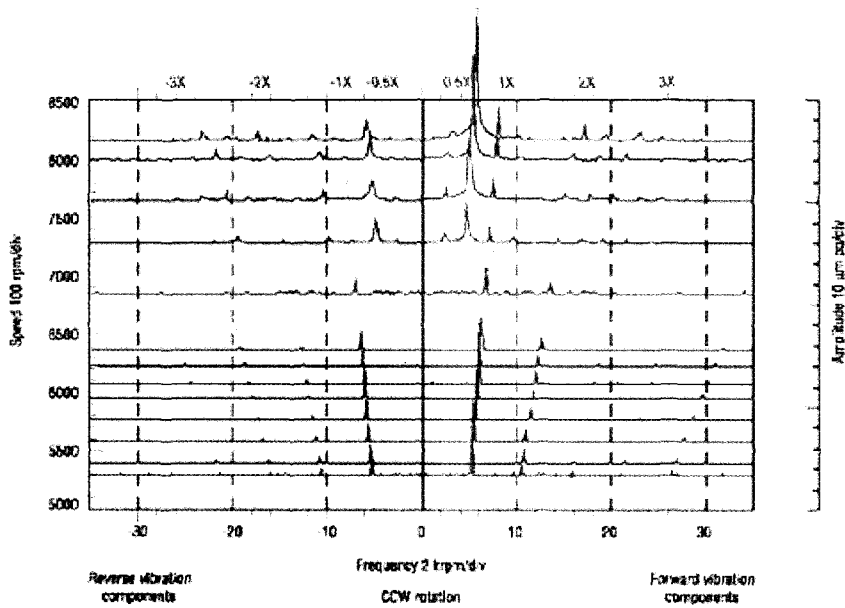


그림 7 0.65X 성분을 명확하게 보여주는 full 스펙트럼 cascade 선도.

### 3.3 선회 실속(Rotating Stall)

7000 rpm까지의 진동 데이터에서는 1X 진폭과 위상 형태가 정상으로 나타났지만, 그 이후의 기계 진동 상태는 불안정해졌고 분수 조화(sub-synchronous) 진동성분이 궤도에서 주도적으로 나타났다. Full 스펙트럼 cascade 데이터(그림 7)를 보면 약 0.65X 정도의 순방향 분수 조화 성분이 있음을 나타내고 있다. 원심 압축기의 회전속도를 기준으로 0.6X~0.8X 성분으로 나타나는 분수 조화 진동 성분들은 일반적으로 선회 실속 현상에 기인하는 것으로 알려져 있다.

선회 실속이란 연성된 aerodynamic/mechanical 시스템의 불안정 상태를 말하는 것으로 이로 인해 분수 조화 진동 주파수 성분을 가진 순방향 휘돌림 현상을 일으킨다. 이는 압축기에서 경계층 분리(boundary layer separation)에 의해 발생되며 결과적으로 디퓨저 또는 임펠러에서 유량의 흐름을 부분적으로 역류하게 하고 원주방향으로 전파되는 압력파(pressure wave)를 발생시킨다.

선회실속은 디퓨저내에서 발생하는 경우 전형적으로 0.10X~0.20X에서 발생하며, 임펠러 내에서는 0.60X~0.80X 성분으로 발생하므로 이를 토대로 알 수 있다.

선회실속 현상은 보통 압축기가 서지 점 근처에서 운전되고 있을 때 생기므로 압축기가 서지 점에 있는지를 확인하기 위해 공정 데이터를 점검하였다. 그러나 공정 데이터나 anti-surge 제어시스템의 데이터 어느 것을 통해서도 기계가 서지 근처에 있다는 것을 확인할 수 없었다. 사실 압축기의 바이패스 밸브는 기계 기동 중에 완전히 열려있었다. 진동데이터와 공정데이터 사이에 서로 모순점이 있어 기계 정비 관련 현장 감독이 서지 파이프를 점검할 것을 요청하였고 이 과정을 통해 몇 가지 놀라운 사실이 알려졌다.

### 3.4 점검

압축기 입구 스트레이너를 열고 확인해 본 결과 이들 필터의 대부분이 찢겨져 나갔거나 없어진 것을 확인하였다. 이들이 압축기로 빨려 들어갔다는 결론을 내렸고 이를 확인하기 위해 보어스코프 검사(Borescope inspection)를 실시하였다. 카메라를 압축기 입구에 집어넣자마자 큰 몽치의 필터가 바로 보였고 이것은 입구 가이드 베인 주변에 접혀진 채로 있었다(그림 8). 이 필터 조각이 압축기 입구를 막고 있었던 것이 분명했고 이것이 임펠러에서 선회 실속이 발생한 원인이었다. 따라서 비록 압축기 입구와 출구의 압력과 유량 상태가 서지 조건이 아님을 나타내었다고는 하지만, 필터 조각이 어느 정도 입구 흐름에 영향을 미쳐 임펠러의 운전점이 서지 한계점 근처로 움직여졌고, 이는 곧 경계층 분리현상(boundary layer separation)으로 이어졌다. 이러한 원인으로 특성이 뚜렷한 높은 진폭의 분수 조화 진동이 발생되었다.

### 3.5 근본적인 원인 분석

계속적인 점검 과정을 통해 압축기 A와 B의 입구 필터들이 부분적으로 또는 완전히 분해되



그림 8 압축기의 입구의 보어스코프사진. 입구 스트레이너의 큰 조각이 입구 가이드 베인의 주위에 접혀져 있으며, 압축기 입구를 막고 있다.



어 있음을 알게 되었다. 더 이상의 손상을 막기 위해 운전원은 이 필터들을 제거하기로 결정하였다.

#### 4. 원격 접속 기능

현장을 방문하지 않고도 원격으로 온라인 시스템에 쉽게 접속 할 수 있다는 것은 기계 관리 시스템에서 매우 중요한 기능임이 급변 사례를 통해 분명히 입증되었다. 운전자는 이러한 설비 진동 관리 시스템의 원격 접속 기능을 이용해 매우 심각한 기계 고장과 막대한 생산 손실을 사전에 피할 수 있다. 기계 진단 전문가는 원격으로 기계 관리 시스템에 온라인으로 접속하고, 모델을 통해서 기계 데이터에 접근할 수 있으므로 전문적인 제안을 시기 적절하게 제시할 수 있고 이로 인해 현장에서는 기계 문제에 대한 올바른 조치를 신속하게 취할 수 있다. 결과적으로 설비 진단 전문가가 직접 현장을 방문하지 않고 단지 데이터만을 이동시켜서 문제를 적절하게 진단할 수 있기 때문에 설비 진단에 소요되는 시간과 각종 비용들을 감소시킬 수 있고, 최단 시간 내에 문제의 원인을 제거하고 설비를 재 가동할 수 있게 되었다.

#### 5. 요약

균열 현상은 모든 필터에서 발생하였다. 1997년 9월 원심 압축기 B에서 발생한 지나친 진동 현상으로 여러 필터 중 한 필터가 부서져 임펠

러 흡입부로 빨려 들어갔다. 1997년 10월 기동 중에 선회실속 문제가 임펠러에서 발생하였고, 이 원인은 임펠러 eye가 부분적으로 막혔기 때문이었다. 압축기 입구와 출구의 전체 유량과 압력 상태는 정상이었기 때문에 어떠한 서지 현상도 anti-surge 시스템에 의해서 감지되지 않았다. 고장상태를 진단함으로써 압축기의 재가동을 방지하여 필터들이 부서졌다는 것을 확인하게 되었다. 이번 기계 점검과정을 통하여 원격진단의 중요성을 확인하였으며, 이에 회사는 원격서비스(remote service) 계약을 체결하여 현재 원격 진단 서비스 점검이 계약 기간에 따라 정기적으로 이루어지고 있다. 이와 같이 기계에 대한 정기적인 점검을 실시하는 목적은 기계의 결함이나 고장문제를 조기에 발견함으로써 중대한 고장으로의 진행을 사전에 예방하거나 또는 최소화 하는데 있다. 36.

#### 참고 문헌

- (1) Sorokes, J.M. Marshall, D.F., "A review of aerodynamically induced forces acting on centrifugal compressors, and resulting vibration characteristics of rotors," Proceedings of the 27th Turbomachinery Symposium, Texas A&M, September 1998.
- (2) Van de Braembussche, R.A., "Stability and range in centrifugal compressors," preprint TMP 1996-12, Von Karman Institute for Fluid Dynamics, Belgium. Page 4