

## 第 3 章 誤整列 (Misalignment)

### 1. 精油所에서의 誤整列과 발란싱 問題

#### (Misalignment and Balancing Problem at a Refinery)

##### 1.1 振動 特性 (Vibration Characteristics)

Mexico의 Tula 정유소는 하루에 315,000 배럴의 석유를 정유하며 휘발유, 항공 연료, 액화가스, 등유, 경유 그리고 부탄을 멕시코시에 공급한다.

Tula 정유소의 1000마력 이상의 모든 설비는 Bently Nevada 장치에 의해 감시되고 있다. 1976년 정유소가 처음 건설되었을 때 Bently Nevada 7200 시스템을 갖춘 Siemens사의 25 MW 터빈발전기 2대가 설치되었다. 1988년에 3번째 터빈발전기가 설치되었다. 4개의 베어링을 갖춘 Siemens TG-3형의 32 MW급 터빈발전기는 증기터빈 끝에서 볼 때 시계방향으로 회전하며, 각 베어링에 XY Probe와 Keyphasor에 의해 최초로 감시되고 있었다. 지금은 Bently Nevada 3300시스템이 설치되어 있다. 또한, 3개의 터빈발전기는 정유소의 소내 전력을 공급한다.

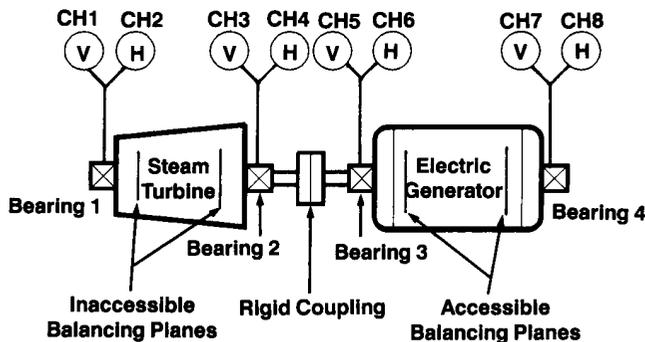


그림 3-1 Machine Train Diagram

새 발전기의 전기 분야 수리 후 기동 중에 Bently Nevada ADRE 3 시스템을 사용하여 진동을 측정된 결과 높게 나타났다. 두 번째 기동하여 이 기록된 자료를 분석한 결과 #1, 2, 3, 5 베어링에서 큰 Preload가 생긴 것이 나타났고 #2, 3 베어링은 그림 3-2와 같이 8자 모양의 Orbit을 나타냈다.

#2 베어링의 수평 Probe에서는 큰 2× 진동 성분이 나타났으며(그림 3-3), 그 진동치는 운전 속도에서 6 mils까지 나타났다(그림 3-4). #4 베어링의 수직 채널에서는 1차 공진시 8.5 mils의 진동 진폭이 나타났고 운전속도에서는 5.0 mils의 잔류 진동이 나타났다(그림 3-5).

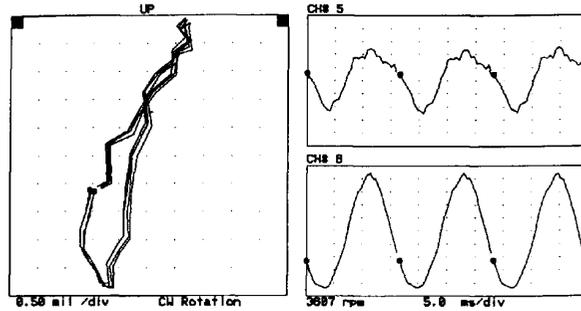


그림 3-2 8자 모양의 Orbit을 나타내는 기동중 자료

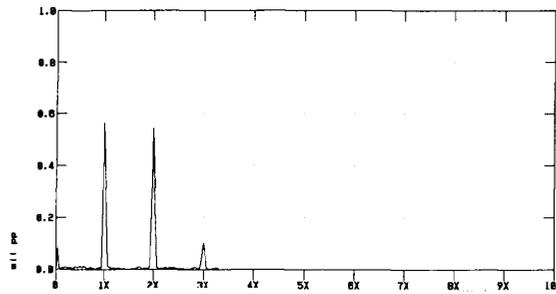


그림 3-3 2× 진동성분을 보여주는 #2 베어링

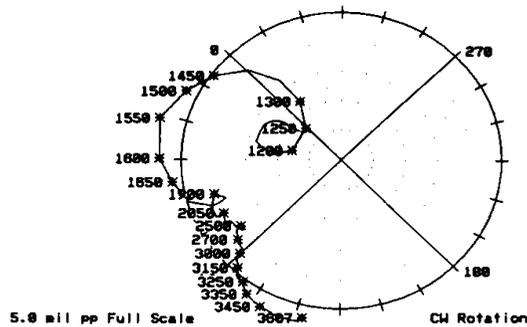


그림 3-4 #2 베어링의 무보상 Polar Plot

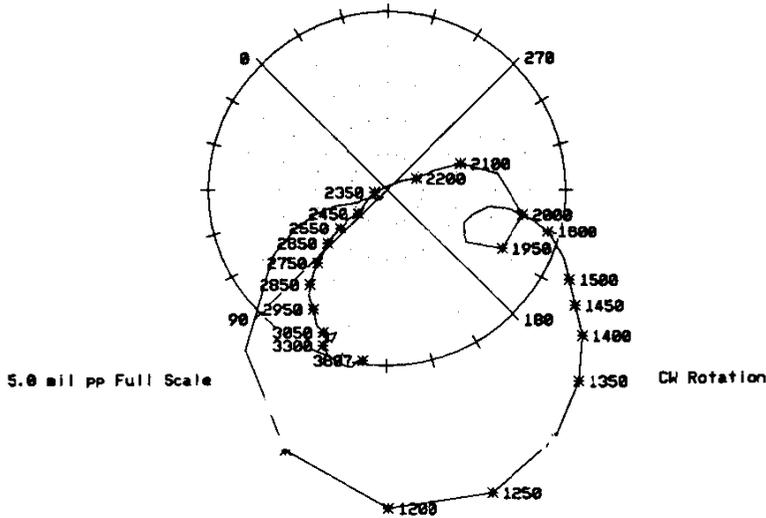


그림 3-5 #4 베어링의 무보상 Polar Plot

### 1.2 問題點 分析 및 診斷 (Analysis and Diagnosis of the Problem)

높은 진동값과 더불어 심한 Preload Orbit(8자 형태)이 존재하는 것으로 보아 극심한 Misalignment와 큰 불평형의 복합적인 문제인 것이 분명하게 드러났다.

운전속도(1×)에서의 성분과 똑같은 진폭을 두 배의 운전속도(2×)에서도 가지고 있다는 것은 Misalignment를 의미한다.

무보상 Polar Plot(그림 3-5)는 발전기 축이 휘어졌음을 나타내는 높은 Slow Roll 값을 보여준다. 또한 이 휨 상태는 1차 공진시 높은 진동값의 원인이기도 하다. 고 진동은 또한 로터가 선회형태(Pivotal Mode)에 가깝게 운전하고 있음을 보여준다.

Siemens사의 터빈 발전기는 유럽식 설계이고 통상 50 Hz(3000 rpm)로 운전된다. 미국과 마찬가지로 멕시코는 주로 60 Hz(3600 rpm)로 터빈 발전기가 운전된다. 그래서 발전기는 2차 모드에 가깝게 운전되고 있다. 터빈에는 발란싱용 개구부가 없었으며, 유일한 개구부는 발전기에만 있었다.

터빈 발전기의 분해에 필요한 시간과 비용의 절감 그리고 발란싱 설비를 가져와야 하기 때문에 정유소 직원들은 현장에서 발란싱 작업을 시도하기로 결정했으며, 이러한 결정을 하는데 다음의 요인들을 고려했다.

- 발전기의 Slow-Roll 값이 높았다.
- 증기터빈과 발전기 둘 다 선회 형태에 가깝게 움직였다.
- 증기터빈의 발란싱용 개구부가 없어 현장에서 발란싱 작업이 어려웠다.

현장 발란싱 작업을 위해 다음과 같은 범주를 정했다.

- Weight는 발전기의 두 개의 발란싱 면에서만 추가되거나 제거되어야 한다.
- 어떤 최소한의 기준을 위해 발전기만을 발란싱하는 일은 없어야 하며 증기터빈과 발전기를 같이 발란싱 하여야 한다.
- 1차 공진을 통과하는 동안의 진동값과 전체 기계가 운전속도에서의 잔류 진동값 사이의 발란싱 응답을 얻도록 노력하여야 한다.

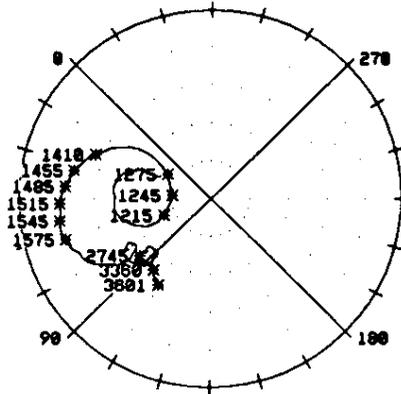
레이저빔을 이용한 Cold Alignment가 실시됐고 같은 장비로 나중에 Hot Alignment를 확인하였다. 증기터빈의 반경방향 이동이 입증되었고, 이것은 고압증기 입구관에서 발생한 것으로 생각되었다. 기계의 Alignment는 수정되었지만 터빈의 반경방향 이동의 원인은 문제점을 완전히 수정하기에 앞서 밝혀져야 할 필요가 있었다. 정유소 직원들은 터빈 발전기의 다음 정지중에 Misalignment를 줄이기 위한 작업을 계속하기로 계획했다.

Alignment 수정후 정유소 기술자들은 기계를 발란싱 하였다. Balancing 계산을 하는데 필수적인 Polar Plot를 만들기 위해 정지중에 터빈과 발전기의 모든 채널에서의 진동값이 기록됐다. TDM(Transient Data Manager)를 사용하여 온라인으로 각 베어링의 작동상태를 감시하였고 TDM 자료에는 정지과정과 운전속도에서 기록된 여과된 그리고 여과되지 않은 Orbit/Timebase Plots들이 포함됐다.

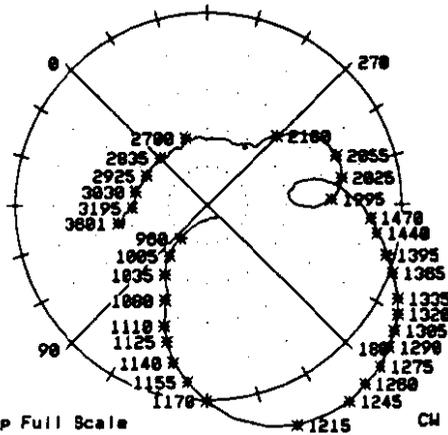
### 1.3 要約 (Summary)

터빈 발전기는 온라인으로 감시되었고 정격 부하에서 신뢰성 있게 운전하고 있었다. 모든 감시된 채널에서의 진동값은 임계속도와 운전 속도에서 감소했다 (그림 3-6과 3-7). Alignment 수정 후에 취한 Orbit Time Base 도표들은 앞서 보여준(그림 3-2) 8자 모양이 아니라 더 타원형으로 나타났다 (그림 3-8과 3-9). 또한 #2 베어링에서의 2× 성분은 사라졌다 (그림 3-10).

앞에서 언급한 기술을 사용함으로써 기계의 분해와 Balancing 설비의 이동이 필요 없게 됐다. 정비 비용과 전력생산 손실로 68,000 US\$의 비용이 들었지만 정비작업은 광범위해졌다.



5.0 mil pp Full Scale CW Rotation  
 그림 3-6 Alignment 후 #2 베어링의 무보상 Polar Plot



5.0 mil pp Full Scale CW Rotation  
 그림 3-7 Alignment 후 #4 베어링의 무보상 Polar Plot

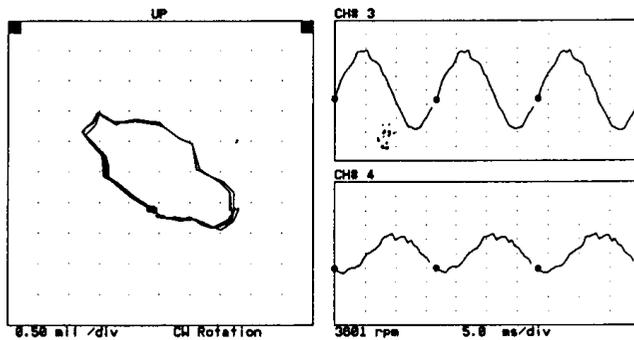


그림 3-8 Alignment 후 #2 베어링의 Orbit/Timebase Plot

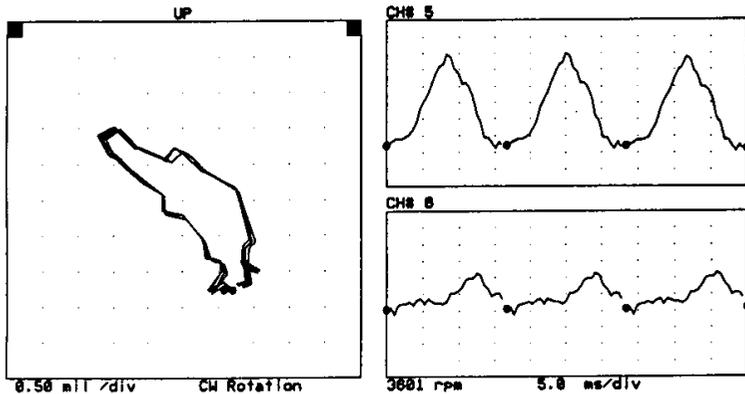


그림 3-9 Alignment 후 Orbit/Timebase Plot

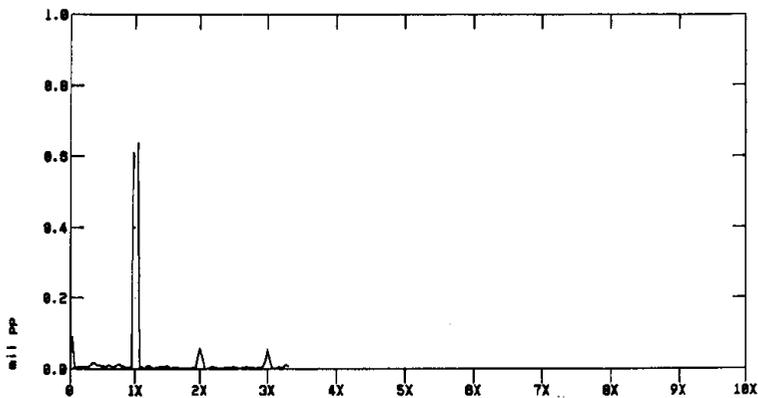


그림 3-10 2× 진동성분이 없는 #2 베어링

## 2. 軸 龜裂의 根本 原因 (The Root Cause of a Shaft Crack)

Bently Nevada Online Diagnostic System은 호주의 암모니아 플랜트에서 일하는 정비원에게 주요 합성 가스 압축기에서 축 균열이 발생하고 있을 것이라는 것을 확신시켜 주는 자료를 제공하였다. 이 사건은 1991년 10월에 발생하였다. 2× 진폭과 위상의 갑작스럽고 극적인 변화가 자료에서 나타났다. 이후에 이것은 매우 정확한 것으로 입증되었고, 기계를 정지시킴으로써 재앙을 불러일으킬 손상을 방지하였다.

Bently Nevada의 기계진단 및 얼라인먼트 전문가의 도움을 받아 공장직원들이 실시한 광범위한 조사결과 드디어 문제점의 근본 원인을 찾아내었다. 이 조사 결과에 따라 취해진 수정 작업으로 주요한 플랜트의 애로점이 제거되었으며 그런 문제점이 재발하지 않을 것이라는 확신을 주었다.

(1) 축 균열로 조업중단

합성 가스 압축기(그림 3-11)인 이 기계는 호주의 Incitec 공장에서 암모니아를 제조하는데 사용되고 있다.

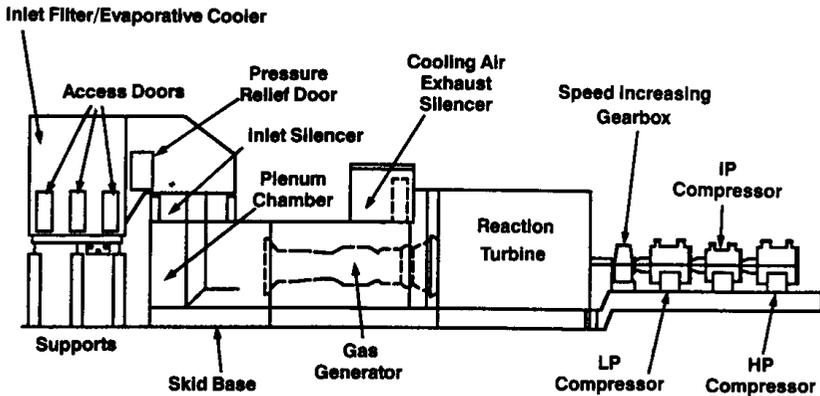


그림 3-11 이 합성 가스 압축기는 통상적이지 않다. 이것은 증기터빈 구동기를 사용하지 않고, 대신에 반동 터빈 내로 배기 시키는 가스 발생기에 의해 구동된다. 반동터빈은 3개의 “Barrel Type” 압축기를 증속 기어박스를 통해 구동한다.

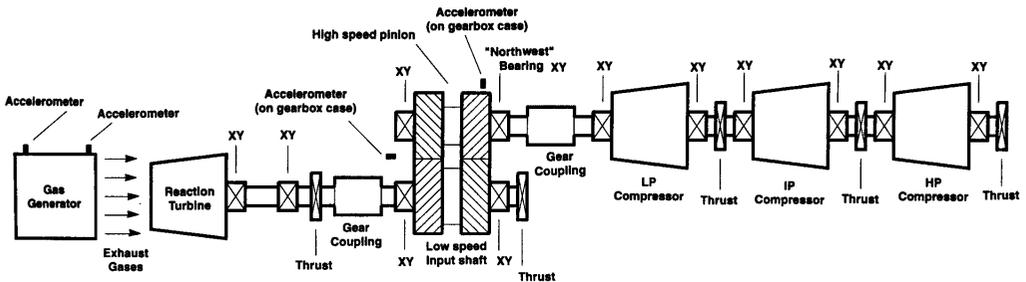


그림 3-12 진동변환기 설치 위치를 나타내는 기계 배열도

1985년에 이 암모니아 플랜트는 원래 설계 용량의 120%인 매일 약 635,000 kg으로 용량증대 시켰다. 그러나 시운전중 합성 가스 압축기의 증속 기어박스에서 심각한 문제점이 발생하였다. 이들 문제점은 너무나 심각해서 광범위한 기어 박스의 구조물 및 내부의 기계적인 개조가 요구되었다. 개조 이후에도, 암모니아 플랜트는 120%로 계속해서 운전할 수 없었다. 이것은 고속 피니언의 출력 측에 있는 베어링(현지에서는 “Northwest Bearing”으로 불림)의 온도 상승에 기인한 것이었다.

이전의 경험으로는 121℃를 초과하면 Northwest Bearing의 급속한 결함이 초래되었고 이온도에 도달 시 플랜트 작업원에게 경고를 줄 수 있도록 경보음이 설치되어 있었다. 온도 감시기에 경보가 발생하면 운전원은 베어링의 온도가 낮은 온도에서 안정하게 될 때까지 플랜트의 생산을 즉시 감소시켰다. Northwest Bearing이 갖는 이런 문제점으로 전체 플랜트 생산을 115%의 용량으로 제한시켰다.

때때로 Northwest Bearing의 온도가 117℃에서도 플랜트를 수 주 동안 120%의 플랜트 용량으로 운전하기도 하였다. 그리고 베어링 온도가 계단식으로 갑자기 상승하면 운전원은 베어링이 냉각될 때까지 생산을 감소시킨다. 때로는 베어링의 온도가 안정되기도 전에 생산이 112%로 감소되기도 하였다.

1991년 10월에 Dynamic Data Manager 시스템으로부터의 정보는 균열이 증속 기어박스의 입력 축에서 전파하고 있을지도 모른다고 제시하였다. 정비요원은 합성 가스 압축기를 즉시 정지시키라고 권고하였으며, 이로써 암모니아 플랜트와 후속 생산이 중단하게 되었다. 분해시 정비 기술자는 입력 축의 커플링 Taper부가 원주로 180도와 직경의 55%까지 균열되었음을 발견하였다. 예비품 기어가 설치되었고 기계는 다시 운전되었다. 균열된 축은 어떻게 탐지되고 기계가 어떻게 위험에서 구해지는지를 “축균열 문제” 항에서 언급한다.

## (2) 축 균열조사

손상된 기어는 고품질이었고 4년 가까이 운전되어 왔다. 축에 균열이 발생한 이유를 이해하고 재발을 방지하기 위해서 Incitec사는 그 문제에 관해 면밀한 조사를 시작했다.

Incitec사는 파단면의 현미경 관찰(Fractograph), 화학분석, 야금시험, 경도시험을 포함한 입력 축의 손상분석을 의뢰했다. 손상된 축의 현미경 분석결과 균열이 커플링의 Taper Keyway의 인접 부에서 시작했고 거기엔 푸레팅과 침식손상이 분명함을 보여주었다. 균열은 천천히 반경방향으로, 회전방향의 반대로 퍼져 커플링 Taper Keyway속으로 진전되었다. 그리고 나서 방향이 반전되어 회전방향으로 급속히 진행되었다. 손상분석 결과 축은 피로로 인하여 균열이 발생된 것으로 결론을 내렸다.

다음에 Incitec사는 Dynamic Data Manager(DDM) 시스템으로부터 진동의 경향과 경보 자료를 다시 조사했다. DDM은 기계가 정상상태로 운전중에 미리 설정된 시간 간격마다 또 경보가 발생할 때마다 자료를 자동으로 수집하고 저장한다. DDM 자료는 기계 문제들을 밝혀내고 어떻게 진전되었는지를 이해하는데 필수적이다. Incitec사는 그 후 DDM 시스템을 Bently Nevada Transient Data Manager 2(TDM2) 시스템으로

성능을 향상시켰다. TDM2는 DDM 시스템보다 훨씬 강력하다. 왜냐하면 TDM2는 정상상태의 자료에만 한정하지 않기 때문이다. TDM2는 기계의 과도상태 운전시 즉 기계의 속도나 부하가 변할 때의 자료를 수집한다. 기계의 기동과 정지시 수집된 과도상태 자료는 정상상태의 자료가 할 수 없는 기본적인 기계특성을 보여준다.

DDM에서 Thrust Position의 경향자료를 보면 기어 박스의 입력 축과 반동 터빈 로터가 비 통상적으로 축방향 이동이 있었음을 나타냈다. 이 경향 자료에서 반동 터빈 로터가 주기적으로 기어 박스로부터 멀어지고 가스 발생기 쪽으로 움직이며 동시에 기어 박스 입력 축은 반동터빈으로부터 떨어져 움직임을 보여주었다. 양축 상에서의 추력 베어링 온도 변화는 축방향 경향 자료에서 확인되었다.

경향 자료는 일정하지는 않았지만 비정상적인 축방향 운동이 24시간 주기로 발생함을 보여 주었다. 주간에는 기어 박스 입력 축과 반동 터빈로터가 서로 멀어져 움직이고, 야간에는 그 운동이 반대가 되었다. 암모니아 생산량과 축의 축방향 운동간의 상호 관련을 지어보면 특히 대형 축의 축방향 운동은 121℃이하로 Northwest 베어링 온도를 유지하기 위한 암모니아 생산량의 변화에 상응한다는 것을 명확히 알게 되었다.

오래된 기어들도 또한 조사되었다. 1970년대에 합성 가스 압축기의 기어박스로부터 취외된 것으로 생각되어지는 하나의 기어가 지금 조사중인 것과 크기와 위치가 동일한 균열이 입력 축 커플링 Taper상에 발생하였다.

### (3) 축정렬 불량으로 추정

조사결과 입력 축상의 균열은 반동터빈과 기어박스 사이의 심한 축정렬 불량에 의해 기인된 것으로 결론지었다. 그 이유들은 다음과 같다:

- 축정렬 불량은 피로손상을 야기 시키는 주기적인 힘을 발생시킬 수 있다. 균열이 시작되던 Keyway 부근에서 관찰된 부식은 아마 불완전한 커플링 체결이 원인이었을 것이다.
- 축정렬 불량은 두 유니트 사이의 Flexible Gear-Type 커플링을 “잠금상태(Lock-up)”가 되게 하며 이로 인해 기어박스 입력 축과 반동 터빈 로터 모두에서 관찰된 비 통상적인 축방향 운동을 야기 시켰을 것이다.

두 번째 균열된 축으로 인해 만일 터빈과 기어박스의 축정렬이 불량하였다면 오랫동안 축정렬 불량 상태로 있었을 것이라는 사실을 알게 되었다. 조사자들은 증가된 생산 요구를 수용하기 위해 1985년에 합성가스 압축기의 속도와 부하를 증가시킨 이후에 그러한 문제가 더욱 악화되었다고 확신했다.

또한 조사결과 추정된 측정렬 불량과 Northwest 베어링의 고온 사이에는 강한 관련성이 있음을 보여 주었다. 그러나 그 관련성의 정확한 특성은 명확하지 않았다.

#### (4) 정확한 열적 Offset(Rim)량

합성 가스 압축기는 전통적으로 오랫동안 경험해온 열적 Offset량을 이용해서 측정렬을 해왔다. OEM Manual에는 기계를 최초 구동에서부터 전운전 부하와 온도까지 올리고 그리고 재빨리 정지시켜 커플링 얼라인먼트 값을 점검하여 열적 Offset 값을 설정하도록 하고 있다. 기술자들은 과거의 측정치를 이용하여 기계를 얼라인먼트할 때마다 냉간 얼라인먼트 설정치를 개발해왔다. 반동터빈 로터는 기어박스 입력 축 보다 0.5 mm 낮은 Offset값을 사용하여 냉간 측정렬을 해왔다.

이번에는 공장 직원들이 더 정확한 열적 Offset값의 측정을 원했다. 그들은 기계들이 냉간 상태일 때와 운전온도에 있을 때 기어박스 Frame에 대한 반동터빈 케이싱의 위치를 측정하기로 결정했으며, 이러한 정보를 Hot Coupling Alignment 상태와 의심스러워했던 측정렬 불량량의 정도를 계산하는데 사용했다. 이것으로부터 그들은 두 기계들 간의 상이한 열적 성장을 보상해주기 위해 더 정확한 냉간 커플링 정렬 목표치를 개발할 수 있었다. 또한 공장 직원들은 측정렬 불량량이 Northwest 베어링의 과열을 야기시키고 있는지를 알기 위하여 기어박스과 저압 압축기사이의 열적 성장의 차이를 측정하고자 했다.

#### (5) 측정 기술

앞에서의 측정값들을 얻기에 충분한 정확성을 가진 두 가지 측정 시스템이 있다. 하나는 Laser System이고 다른 하나는 Bently Nevada의 Optical System이다. Laser System에서는 Laser 방출기/Sensor들이 커플링의 한쪽 면에 수평 및 수직 중심선상에 설치되어 있다. 반사프리즘은 커플링의 다른 쪽 면에 Sensor들의 반대편에 설치되어 있다. 기계가 냉간 상태일 때 Beam이 Prism으로부터 Laser의 중심까지 반사하도록 Laser를 조정한다. 기계가 운전속도에 도달할 때 Sensor상의 Laser Beam의 위치는 기계들의 열적성장의 차이를 나타낸다.

이 광학 시스템은 고정밀 유도 측정 장치이다. 그것은 기계의 수직 및 수평 중심선에 부착된 눈금과 특수한 광학 Telescope을 사용한다. 운전원들은 광학 Telescope를 통하여 눈금을 보고 기계들의 위치를 측정한다. 이러한 정보를 가지고 그들은 냉간 상태일 때와 운전온도일 때 모두 상대적인 기계위치를 표로 만든다.

Incitec사는 Laser System을 선택했다. 왜냐하면 그들은 다른 측정렬 문제의 해결을 도와줄 전문적인 지식을 개발하는 동안 이 문제를 사내에서 해결하길 원했다.

**(6) 정확한 Offset량 산출**

Incitec사는 Laser장비를 1992년 후반에 구입했다. 그들은 1993년 1월에 Laser 장비를 설치할 수 있도록 기계를 개조하기 위해 이틀 동안 합성 가스 압축기를 정지했다. Laser 장비 판매상의 대표는 장비가 적절히 설치되고 자료가 정확히 해석되는지 확인하기 위해 정지 기간 동안 참석했다.

기어박스과 저압 압축기 위에 Laser와 Prism들을 설치하기는 비교적 쉬웠다. 그러나 접근이 제한되고 배기가스 누출에 따른 열로 인하여 반동 터빈의 베어링 Tunnel에 반사 프리즘들을 설치하기는 어려웠다. 사실상 Laser Sensor들과 Prism들은 신뢰성 있는 운전을 위해서는 수냉각이 되어야만 했다.

Laser장치로 측정된 결과 반동터빈과 기어박스 사이에는 큰 측정렬 불량이 있었고, 기어 박스와 저압 압축기 사이에는 약간의 측정렬 불량이 있었다. 공장 기술자들은 Overhaul후 압축기들을 측정렬하는데 이 측정 자료를 사용하기 위해 Offset 목표치를 미리 준비했다. Overhaul은 1993년 2월에 암모니아 공장 정지 기간 동안 시행하기로 계획되었다.

**(7) 측정렬 실패**

합성 가스 압축기 Overhaul이 시행되었고 미리 준비한 Offset량으로 기계들을 다시 측정렬 하였다. 그러나 다시 시운전하는 동안 반동터빈의 진동진폭이 최소 운전 속도에서도 너무 심해서 기동을 중지해야만 했다.

공장 근무자들은 유니트 기동시 수집된 TDM 2의 자료를 재검토했다. 그 결과 반동 터빈과 기어박스에 심한 측정렬 불량을 보였고 기술자들은 Offset 목표치가 잘못 적용되어 왔다고 결론을 내렸다. 공장 근무자들은 Hot Alignment 상태를 측정할 시간이 없었다. 대신에 그들은 두 유니트 사이의 수직 Offset량을 0.38 mm로 감소시켰다.

다음날 오후 재 기동했을 때 진동치는 감소했지만 여전히 정지 전보다 훨씬 높았다. Incitec사는 Bently Nevada의 MDS와 연락했고 그들은 Modem 연결을 통하여 TDM2 자료를 재검토했다. Bently Nevada 기술자들은 단시간동안은 안전하게 운전될 수 있다고 결론을 내렸고 그래서 제품 생산은 문제를 재분석하는 동안 계속할 수 있었다. 그러나 기어박스 "Northwest 베어링"의 온도는 정지 전보다 훨씬 높았다. 베어링온도를 121°C 이하로 유지하기 위해서 운전원들은 제품생산을 104%까지 제한해야만 했다.

**(8) 후속조사**

분명하게 반동터빈, 기어박스과 저압 압축기는 올바르게 측정렬이 되지 않았다. 이것은 TDM2의 기어박스 "Northwest" 베어링과 저압 압축기 구동축 베어링의 평균

축 중심선 위치도에서 명백히 보여주었다.

이와 같은 유막 베어링을 갖는 기계에서는 로터가 증속함에 따라 Oil Wedge상으로 보통 부상한다. 정상적인 부하로 정격 운전속도에서 시계 방향으로 회전하는 축은 보통 베어링 하부 좌측의 사분면에 위치할 것이다. 이 로터는 불규칙한 운전위치 때문에 비정상적인 부하를 받고 있음이 그림 3-13과 3-14에서 분명하다.

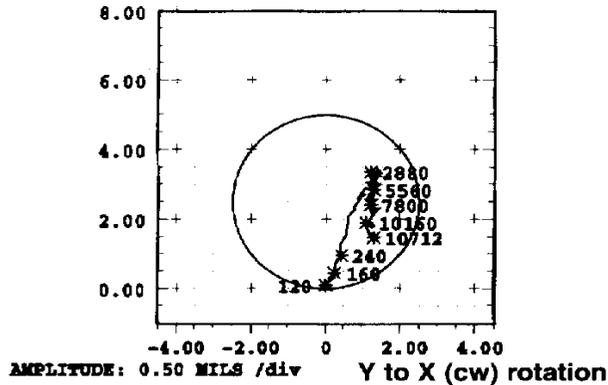


그림 3-13 기동중 “Northwest 베어링 내에서 기어박스 고속 피니언의 이동을 나타내는 축중심선도

Incitec사는 재 측정률이 실패한 이유를 알고 싶어 했고, 암모니아 생산을 최대로 하는 반면에 가능한 최단 시간 안에 기계를 정확하게 측정하고 싶어 했다. 공장 근무자들은 이번에는 Laser 측정률 장치와 Bently Nevada의 광학장치를 둘 다 사용하여 열적 성장을 다시 측정하기로 결정했다.

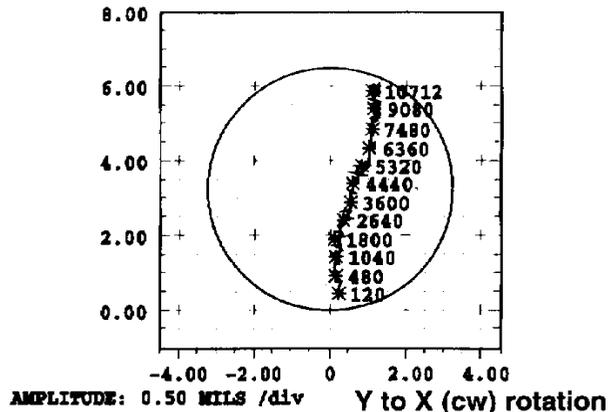


그림 3-14 기동중 저압 압축기의 구동축 베어링에서 축이동을 나타내는 축 중심선도

Laser장치 판매상 대표는 돌아왔고 광학측정을 위해 Bently Nevada 측정렬 전문가들은 그와 합류했다. 4월 말경에 기계가 뜨거운 상태에서 두 시스템이 측정을 위해 사용되었다. 그런 다음 유니트를 정지하여 약 8시간 동안 냉각하였다. 기계는 재 기동되었고 최대출력까지 상승시켜 최종 측정을 하였다.

Laser와 광학자료로부터 얻어진 그림에서 반동터빈과 기어박스 피니언 사이의 반경방향(Rim)과 축방향(Face)의 측정렬 불량을 나타내었다. 또한 두 시스템 모두 기어박스의 고속 피니언과 저압압축기 간에 측정렬 불량이 있었음을 나타내었다. 그러나 광학자료는 Laser 자료에서 명확하지 않았던 즉 기어박스가 재기동시 옆으로 움직였던 것도 보여주었다.

기술자들은 기어박스의 예상하지 못한 옆으로의 움직임은 측정렬 불량에 의한 힘에 의해 발생되었다고 확신했다. 왜냐하면 특히 기어박스 케이싱이 Pedestal에 Dowel Pin으로 고정되어있지 않았기 때문이다.

측정렬 목표치를 산출하는데 광학측정이 사용되었으며 목표치로써 기계가 운전하고 있을 때 최적의 Alignment를 가지게 하는 Cold Shaft Offset량을 제공하게 되었다.

### (9) 재 측정렬

측정렬 작업이 1993년 6월에 계획대로 완료되었다. Bently Nevada 측정렬 전문가가는 기계가 재 기동된 후에 광학측정 시행과 다른 조언을 하기 위해 현장에 있었다.

기계는 재 기동되었을 때 진동치는 1993년 2월 정지 전 값보다 훨씬 낮았다. 처음에는 공장은 본래 용량의 118%에서 운전하였다. Bently Nevada 측정렬 전문가는 기계 전반에 걸쳐 광학조사를 실시했다. 측정렬은 중압과 고압 압축기 사이의 수평방향 측정렬을 제외하고는 허용치 이내였다. 그러나 생산량이 증가됨에 따라 기어박스의 Northwest 베어링은 다시 뜨거워 졌고 생산량도 다시 99%까지 제한되었다.

### (10) 기어박스의 휨

측정렬 불량인 Northwest 베어링의 과열을 일으키지 않음이 분명하여 공장 근무자들은 기어박스의 강성 부족을 포함한 다른 가능성 있는 원인들에 대해 토의했다. 1987년에 Drain을 향상시키기 위해 기어박스 케이싱의 하부에 큰 구멍을 만들었다. 이 이론에 의하면 기어박스 케이싱은 부하상태 하에서 휨 즉 “Edge Loading”이 발생하고 있었고 Northwest 베어링을 과열시키고 있었다.

기어박스 휨를 측정하기 위해 다양한 기술들이 고려되었다. 그중 하나는 전체 케이싱 위에 Strain Gage를 설치하는 것이었다. 그러나 그것은 광학조사가 더 정확하고 효과적인 비용임이 확인되었다.

공장 근무자들은 합성 가스 압축기를 다시 정지시켰다. 기술자들은 고속 및 저속축의 수평 및 수직 중심선 위에 그리고 기어박스과 페데스탈 지지대위에 측정 Scale을 설치했다. 기술자들은 정지 전 합성 가스 압축기가 운전온도에 있을 때 전반적인 측정을 했다. 유니트가 냉각된 후 다시 측정하였지만 기어박스 커버가 제거되기 전이었다. 세 번째 측정은 기어박스를 점검하고 또 그 커버가 정확히 재설치 되는 가를 확인하기 위하여 커버를 다시 제자리에 올려놓은 후 시행하였다. 네 번째 측정은 유니트를 계통에 병입시킨 후 시행하였다.

각각의 측정결과 모든 기어박스의 이동은 열적성장에 기인한 것이지 기어박스 케이싱이나 페데스탈 지지대가 부하상태에서 휨이 발생한 것이 아님을 나타냈다.

### (11) 근본원인

근본원인은 기어박스를 점검했을 때 나타났다. 점검결과 두 개의 고속 피니언의 래디얼 베어링이 Edge-Loaded 상태였음을 나타냈다. 그러나 기어박스의 휨이 원인이 아니었다. 베어링들 위에 나타난 표시들로 보아 피니언이 베어링 베비트 면적의 25%이하에서 전 부하를 받는 그러한 부하상태에서 아래로 처지고 있음을 나타냈다.

이전의 기어박스 점검시에는 비록 Northwest 베어링이 과도한 부하를 받았지만 피니언의 부하는 양쪽 베어링에 균등하게 분포되었다. 고속 피니언의 새로운 유한요소 분석결과 Gear Area가 아주 경화된 것으로 확인되었다. 그러나 저널들은 부하 중에 0.04 mm 처짐을 보였다.

공장 근무자들은 부하가 걸렸을 때 기어박스과 저압 압축기 사이의 측정렬 불량이 저널의 원래 형태에서 벗어나도록 저널에 힘을 가했다고 결론지었다. 이제 측정렬 불량이 수정되었고, 베어링의 부하는 적어졌지만 더 적은 면적에 집중되었다. 그 이유는 Northwest 베어링이 기계가 측정렬된 후 훨씬 더 뜨거웠기 때문이다.

측정값들을 보면 고속 피니언이 냉각되었을 때는 베어링 저널이 베어링에 대해 정상적인 상태에 있었다. 기술자들은 베어링들을 상향으로 이동시키기 위해 베어링의 Inner Edge 아래 0.04 mm Shim들을 넣었다. 그런 다음 그들은 Babbitt 전체의 고른 접촉이 있을 때까지 베어링을 Scraping했다.

합성 가스 압축기를 재기동하기 전에 Shim들은 제거되었다. Shim들이 없으면 저부하시 래디얼 베어링의 Outer Edge들은 부하를 받게 되며, 이로 인해 더 높은 운전온도를 야기 시킨다. 그러나 전 부하에서 저널들이 처지게 되면 부하분포는 개선된다.

실제로 저 부하에서 합성가스 압축기가 재 기동됐을 때 양쪽의 고속 피니언 베어링들은 대략 이전보다 7°C정도 온도가 높았다. 그러나 부하가 증가함에 따라 온도는 안

정되었고 120%의 전 부하에 도달되었다. Northwest 베어링 온도는 결코 110°C를 초과하지 않았다.

(12) 결론

합성 가스 압축기가 갖는 문제점들은 복잡적이고 상호 관련되어 있었다. 그러나 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 정밀 측정은 필수적이다. 이 문제는 정적 및 동적 측정법의 측정뿐만 아니라 기계 진동을 감시, 추적 및 진단하기 위한 정확한 장비 없이는 해결될 수 없었다.
- 특히 주의 깊게 준비된 계획들이 잘못 진행될 때 경영진의 강력한 지원이 복잡한 문제 해결에 필수적이다.
- 가장 경험이 많은 공장 기술자들이라도 가끔은 복잡한 문제 해결에 다른 사람의 도움을 필요로 한다.

3. 水洗淨 펌프의 振動에 미치는 커플링 誤整列의 影響  
(Effect of Coupling Misalignment on Vibration of a Water Scrubber Pump)

수평형 원심 수세정 펌프(그림 3-15)의 진동 측정 중('89. 1. 13) 갑작스런 축방향 진동 증가 현상이 검출되었다. 측정위치 1A와 2A에서 취한 그림 3-16, 3-17 및 3-18의 진동 경향도 및 Waterfall Plot에서 진동증가 상태를 볼 수 있다. Waterfall Plot에서 주진동은 1×RPM(통상 1800 rpm)에서 나타났다. 진동기는 또 다른 문제점을 갖고 있었기 때문에 현장에서는 얼라인먼트 시행 대신에 전동기를 교체하기로 결정했다. 그 당시 새로운 커플링을 사용할 수 없어서 사용하던 커플링을 다시 사용했다. '89. 9. 7 진동 측정시는 그림 3-16과 3-18에서 보는 바와 같이 축방향 진동치가 감소하였는데 이는 얼라인먼트가 잘 되었다는 것을 의미한다. 축방향 진동은 '89. 10. 5이전까지는 안정적이었으나 금번 측정결과 1.0 in/sec를 초과하였다. 이때 문제점은 사용된 커플링의 과도한 마멸에 의한 것으로 나타났다. 커플링을 교체하고 얼라인먼트를 한 후 진동 값은 그림 3-16, 3-17 및 3-19의 '89. 11. 9 측정치에서 보는 바와 같이 허용값 이내로 다시 떨어졌다.

이상의 내용을 종합해 보면 다음과 같다.

- ① 수세정 펌프의 Misalignment는 첫째는 전동기 문제로 인한 것이고 둘째는 커플링 문제로 인한 것이다.
- ② 최종 얼라인먼트 실시와 커플링 교체후 진동치로 보아 얼라인먼트가 잘 시행된 것

을 의미한다.

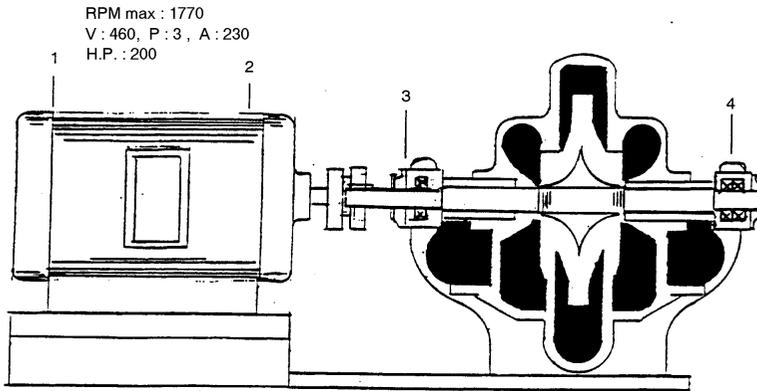


그림 3-15 수세정 펌프 배열도

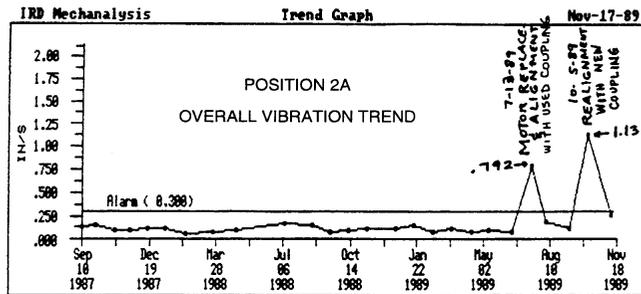
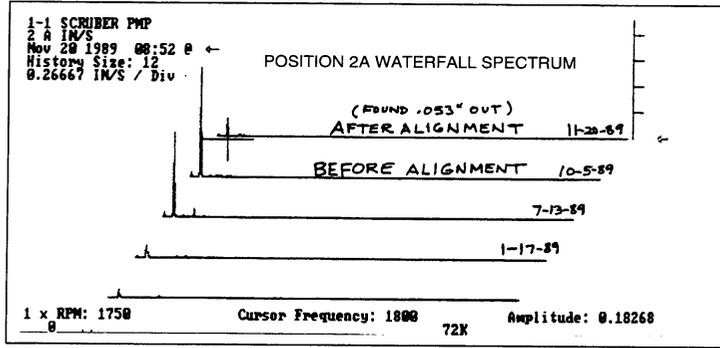


그림 3-16 얼라인먼트 시행 및 커플링 교체 전후 위치 2A에서 전체 진동경향

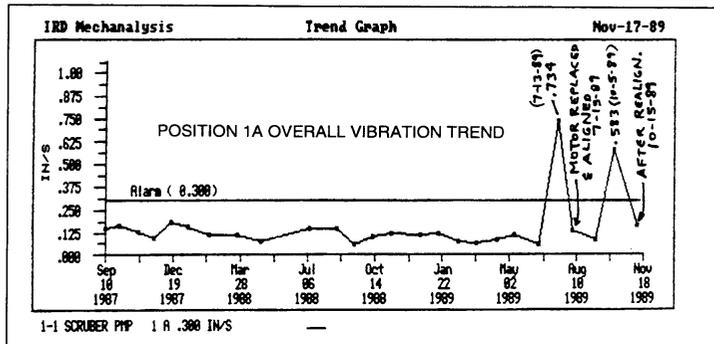
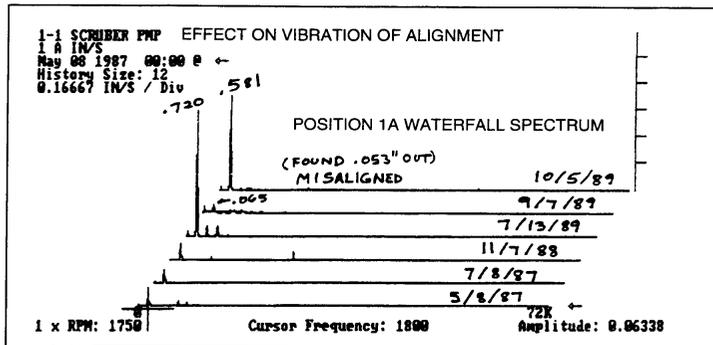
824 — 제2편 진동의 경험 사례



2% x 2.0000 = 0.040000      1 x RPM: 1750.00

Machine	Pos	Dir	Units	Date
1-1 SCRUBBER PMP	2	A	IN/S	

그림 3-17 얼라인먼트 시행 및 커플링 교체 전후 위치 2A에서 Waterfall Plot



IRD Mechanalysis Data Analysis System

Machine	Pos	Dir	Units	Alarm
1-1 SCRUBBER PMP	1	A	IN/S	.300

그림 3-18 얼라인먼트 시행 및 커플링 교체 전후 위치 1A에서

Waterfall Plot과 전체 진동경향

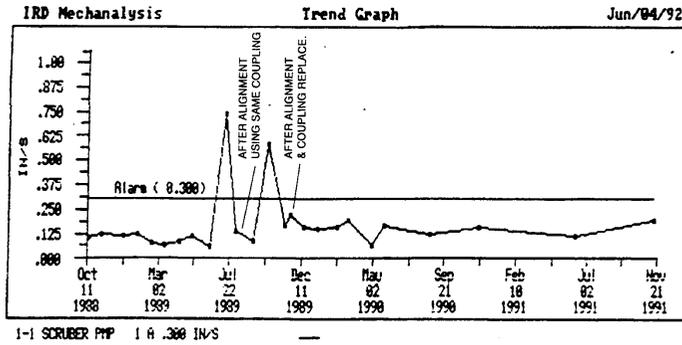


그림 3-19 Alignment 시행과 커플링 교체 위치 1A에서의 전체 진동경향