

## 第 12 章 電氣的인 問題 (Electrical Problems)

### 1. 1次 送風機의 電動機에서 電氣的인 問題點 檢出 (Detection of an Electrical Problem on a Primary Air Fan Motor)

#### 1.1 背景 (Background)

TA사는 연간 예지정비 계약을 체결한 사용자로부터, 그 들의 1차 및 2차 송풍기에 대해 실시간 분석을 실시한 후, 문제점을 간략한 보고서로 지적해 달라는, 기술적 제휴를 요구받았다. 이런 모든 설비들의 전동기 축에는 Fan Wheel이 장착되어 있다.

#### 1.2 結果 및 結論 (Results and Conclusions)

그림 12-1에 있는 1, 2차 송풍기에 약간의 문제점이 있는 것이 발견되었다. 그림 12-2와 12-3에서와 같이 위치 1A 및 1H에서 측정된 전동기의 내외측 베어링의 수평 방향과 축방향에서  $1 \times \text{RPM}$  진동이 우월하며, 이 둘의 크기는 각각  $0.320 \text{ in/sec}$ 와  $0.375 \text{ in/sec}$ 이었다. 이 둘의 크기는 이런 형태의 송풍기에서의 일반 경보치인  $0.275 \text{ in/sec}$ 를 초과한 것이다.

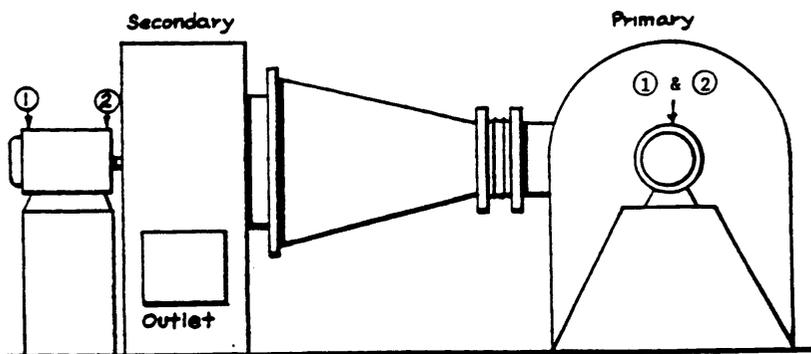


그림 12-1 1, 2차 송풍기 및 진동측정 위치도

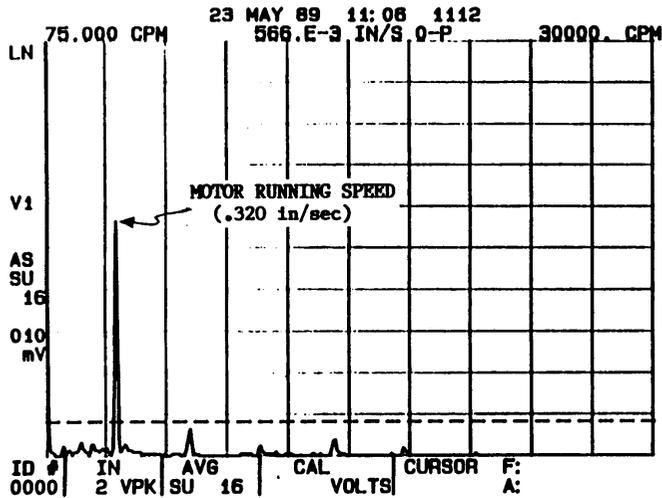


그림 12-2 위치 1H에서의 진동 스펙트럼

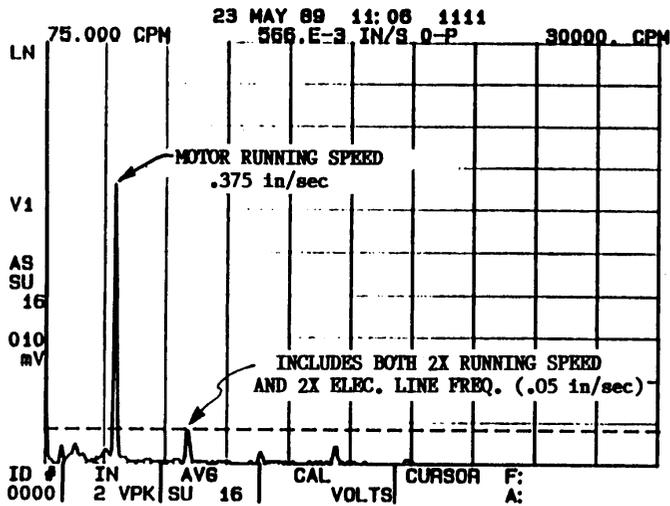


그림 12-3 위치 1A에서의 진동 스펙트럼

표 12-1은 각 측정점에서의 1×RPM 진동 크기와 위상을 비교한 것이다. 내외측 베어링 사이의 수평방향 위상차는 14°이고 수직방향 위상차는 29°로 거의 비슷하다는 것에 주목하라. 이것은 가장 가능성 높은 진동 원인이 불평형이라는 것을 의미한다. 이 송풍기는 Overhung 형태이기 때문에, 축방향 측정값은 불평형에 의해 영향을 받는다.

표 12-1 각 측정점에서의 1×RPM에서 진폭 및 위상각 비교

측정위치	1H	2H	1V	2V	1A	2A
속도 (in/s)	0.320	0.346	0.274	0.259	0.375	0.038
위상 (Deg.)	90°	104°	205°	176°	336°	316°
위상차	1H-2H = 14°		1V-2V = 29°		1A-2A = 20°	

그림 12-4는 위치 1A에서 측정된 스펙트럼으로, 2× 전력계통 주파수(7200 cpm)와 2×RPM을 분리하기 위해 화상 확대한 것이다. 7200 cpm 진동이 발생하고 있었으며, 가끔 전기적인 문제점으로 간주되는 진동소음이 전동기에서 발생하였다는 것을 명심하라. 이 화상 확대한 스펙트럼에서 보면, 7200 cpm 주위에 극 통과 주파수( $F_p$  = 슬립 주파수×극수)의 측대파를 가지고 있는 0.124 in/sec 크기의 2× 전력계통 주파수 (7200 cpm)가 있다. 공칭 3600 rpm 전동기는 극수가 2극이고 슬립 주파수는 38 cpm이므로, 이것은 로터와 고정자 사이에 가변 간극이 있음을 의미한다 (이것은 Fan Wheel의 불평형에 의해 영향을 받았기 때문일 것이다).

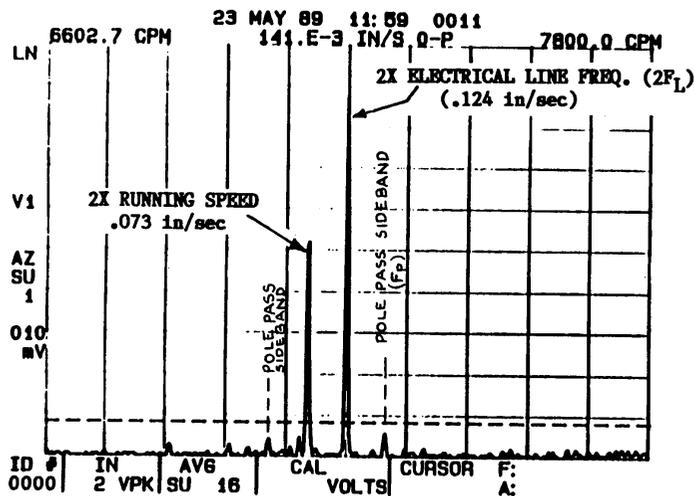


그림 12-4 위치 1A에서의 720 cpm 부근의 Zoom Spectrum

### 1.3 勸告事項 (Recommendations)

- ① 먼저 Fan Wheel의 발란싱을 실시한다. 이는 표 12-1의 위상 분석 결과, 뚜렷한 정적 불평형(내외측 베어링간의 위상차가 단지 15°에서 30° 정도뿐임)을 나타내고 있기 때문에, 일면 발란싱만 실시하여도 해결될 것 같다.

② Fan Wheel Balance를 실시한 후, 그림 12-1과 같이, 모든 위치에서 측정을 반복해야 한다. 여기서 1차적인 관심은, 그림 12-4와 같이, 위치 1A에서 측정한 2 × 전력계통 주파수에서의 높은 진동치(0.124 in/sec)가 허용치(0.06 in/sec 이하)까지 감소될 수 있나 하는 것이다. 만일 그렇게 되지 않는다면, 차후 점검시 이 주파수에서의 진동 상태를 정밀하게 경향 감시해야 한다.

## 2. 큰 故障으로 進展된 電動機의 電氣的 問題點의 追跡 (Trending of a Motor Electrical Problem Which Eventually Conclude with Catastrophic Failure)

### 2.1 背景 (Background)

예지정비 진동 프로그램에 따라 TA사가 2개월마다 측정한 Air Handler 진동기의 진동치가 꽤 높았는데, 그림 12-5에서와 같이 1988년 9월 26일과 1989년 1월 31일 측정된 7200 cpm(2× 전력계통 주파수)에서의 진동치는 0.095 in/sec로 안정된 크기였다. 이 이후에 취한 진동 스펙트럼은 로터 편심 혹은 고정자 철심의 단락에 의한 불균일한 공극이 있음을 나타내고 있었다. 1989년 3월 22일 점검에서, 7200 cpm의 진동치가 0.265 in/sec로 커졌으며, 또한 1800 cpm(1× 전동기 회전수)의 진동치도 0.095에서 0.130 in/sec로 증가하였다. 1800 cpm의 진동치 증가는, 아마 회전자 철심의 단락을 수반하는 고정자의 국부적 과열로 인해 발생되었을 것이다. 이러한 국부적 과열은 로터의 편심, 전동기 축의 휨, 불평형의 발생, 윤활 파괴를 초래할 수 있다. 1989년 5월 23일에 실시한 다음 점검에서, 그림 12-5와 같이 7200 cpm 및 1800 cpm의 진동치가 각각 0.265 in/sec 및 0.2025 in/sec로 둘 다 증가하였다. 또한 7200 cpm의 조화 주파수인 14400, 21600 및 28800 cpm 등을 볼 수 있다.

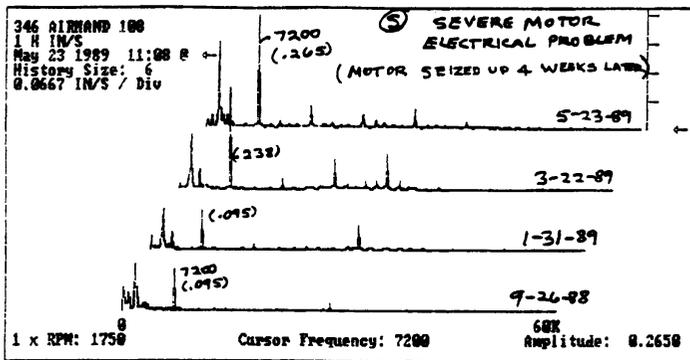


그림 12-5 전동기의 진동 스펙트럼

## 2.2 結論 (Conclusions)

전동기의 전기적인 상태가 점차 나빠지고 있다.

## 2.3 勸告事項 (Recommendations)

7200 cpm에서 0.238 in/sec라는 과도한 진동치와 지난번의 조사에서 7200 cpm의 진동치가 0.095 in/sec으로 부터 심한 상승 추세였기 때문에, 전동기가 심하게 손상되기 전에 교체하든지 혹은 분해 정비를 해야한다고 사용자에게 3월 22일 강력하게 권고하였다. 그런데도 아무런 정비도 하지 않았으며 계속해서 이 진동치가 증가하여 5월 23일 측정시 7200 cpm에서 0.265 in/sec까지 상승하자, TA사 기술자는 떠나기 전에 “즉시 조치가 필요함”이라는 보고서를 남기고 다시 한번 급히 정비하도록 요구하였다.

## 2.4 結果 (Results)

전동기 교체나 분해 정비를 하지 않은 상태에서 5월 23일 점검 일로부터 약 2주 후에 전동기가 멈춰버렸다. 로터의 국부적이고 불균일한 과열로 인해, 전동기 로터와 고정자가 접촉되어 전동기에 심한 손상이 발생했음이 보고되었다.

## 3. 引受 試驗시 遠心 冷却機 電動機의 不合格 (Rejection of a Centrifugal Chiller Motor during Acceptance Testing)

### 3.1 背景 (Background)

TA사는 그림 12-6, 12-7과 같은 플랜지 장착형 전동기를 가지는 냉각기의 인수 시험에 기술적 의견을 해달라는 요구를 받았다. 만일 문제점이 발견되면, 그 문제점을 해결하기 위한 방안도 추천해 달라는 요구도 받았다.

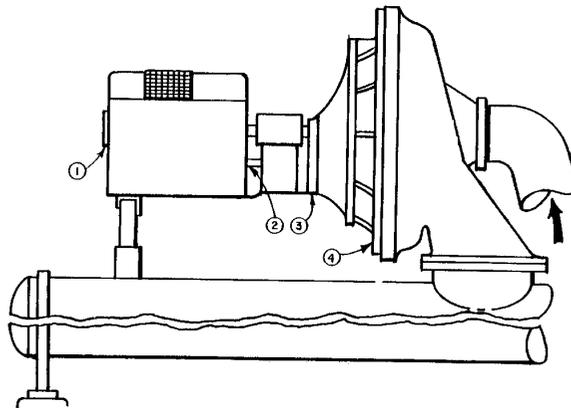


그림 12-6 냉각기와 전동기의 진동측정 위치

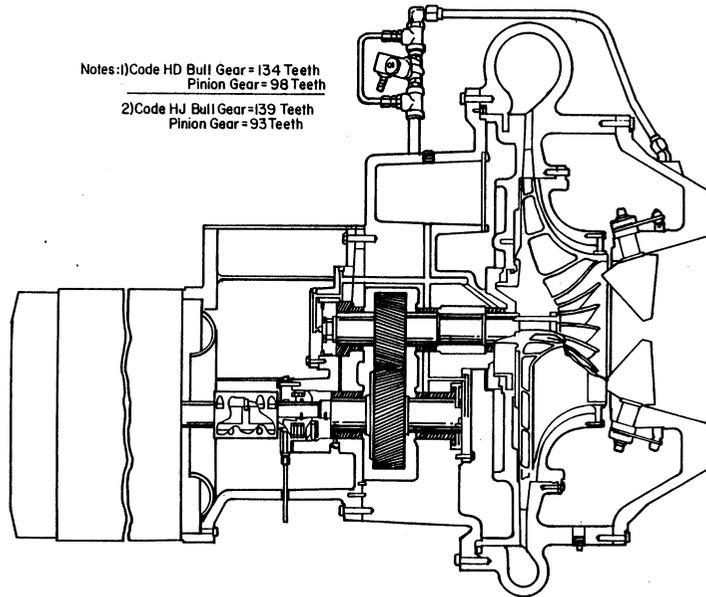


그림 12-7 냉각기의 단면도

### 3.2 結果 (Results)

기동하자마자 그림 12-8의 상부에 있는 순시 스펙트럼에서와 같이 7200 cpm에서 큰 진동(0.139 in/sec)이 감지되었다. 이런 7200 cpm의 진동치가 전기적인 문제점으로 인한 전력계통 주파수( $2 \times 3600$  cpm)와 관련되어 발생하는 것인지, 혹은 이완이나, 축정렬 상의 문제로 인한 2배의 전동기 회전수에 의해 발생하는 것인지를 결정해야 했다. 화상 확대된 그림 12-9를 보면 전동기가 3591 rpm으로 회전하고 있고 최대 주파수가 12,000 cpm이기 때문에, 30 cpm 스펙트럼 해상도로는 위의 어느 경우에 해당되는지를 규명할 수 없다. 이 문제를 풀기 위해서 동기 시간 평균화(Synchronous Time Averaging)를 적용했다.

동기 시간 평균화란, 동기 신호(Photocell 혹은 전자석 Pickup)를 사용하여, 분석하고자 하는 기기로부터 불규칙한 압 진동같은 비동기 진동성분을 필터링 하여 동기 진동 성분만을 통과시키는 방법으로 진동을 샘플링 하는 것이다.

그림 12-8의 아래 그림은 동기 시간 평균화 스펙트럼이고, 위 그림은 순시 스펙트럼이다. 이들 스펙트럼에서 이른바 7200 cpm의 진동치가 각각 0.011 in/sec와 0.139 in/sec로 크게 차이가 있음을 명심하라. 이것이 의미하는 바는 약 0.011 in/sec는  $2 \times$  RPM ( $2 \times$  전동기 속도)에서의 진동치이고, 0.130 in/sec는 7200 cpm인  $2 \times F_L$  ( $2 \times$  전력

계통주파수)에서의 진동치로써 이 값은 새로 설치되는 전동기에서는 허용될 수 없는 높은 값이다(7200 cpm에서의 진동은 전동기속도인 3519 rpm과 동기할 수 없으므로 충분히 여러 번 평균화하면 동기 시간 평균화한 스펙트럼으로부터 구분해 낼 수 있다). 상기 결과를 더욱 확인하기 위해서 그림 12-10과 같은 Coastdown 시험을 통하여 스펙트럼을 수집하였다. 전원을 차단하기 바로 전의 스펙트럼상에는, 1× 진동기 진동성분(공칭 3600 cpm)이 우월하고, 7200 cpm에서도 다른 우월 진동성분이 있음을 보여준다. 전기적으로 유발된 진동 특성처럼, 전원을 차단하자마자 7200 cpm 피크값이 순간적으로 사라졌다는 것을 명심하라. 이것은 전동기의 문제점이 전기적이라는 또 다른 증거이다.

다른 스펙트럼을 좀 더 확인한 결과, 전기적인 문제는 고정자의 편심 혹은 고정자 철심의 단락에 의한 것이라는 것을 발견하였다.

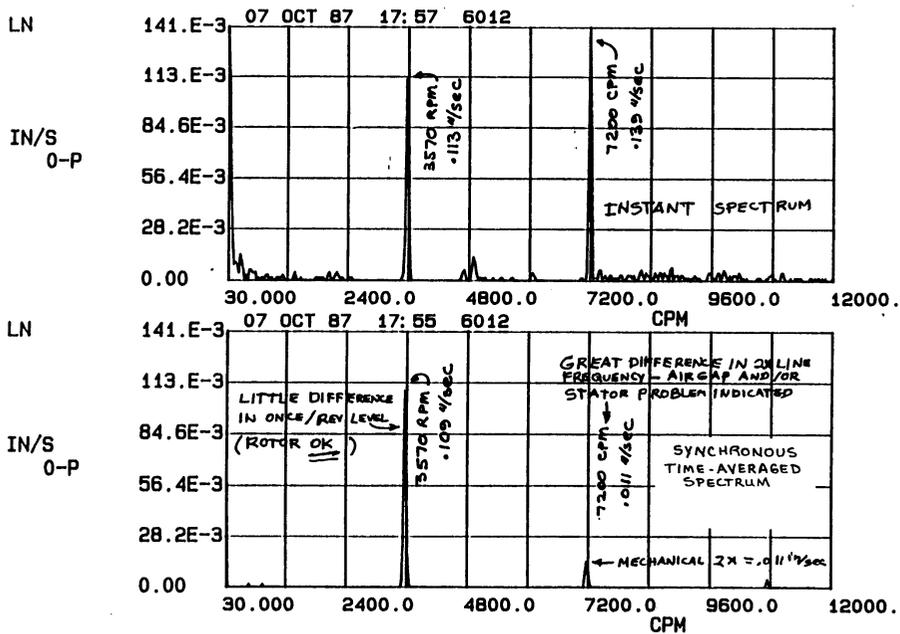


그림 12-8 순시 및 동기 시간 평균화 스펙트럼 비교

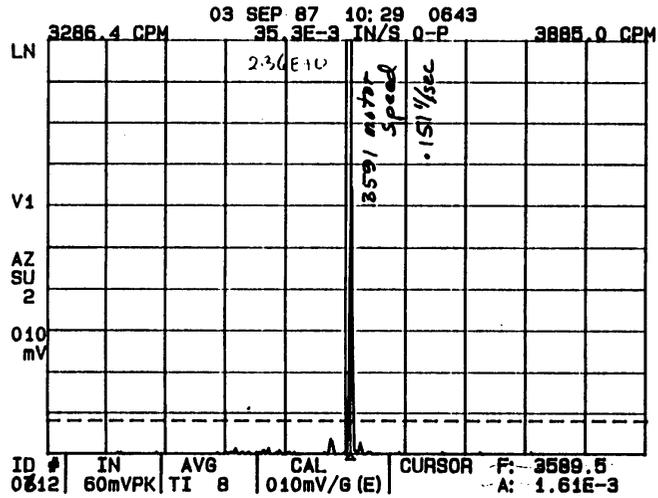


그림 12-9 전동기 속도 확인을 위한 Zoom Spectrum

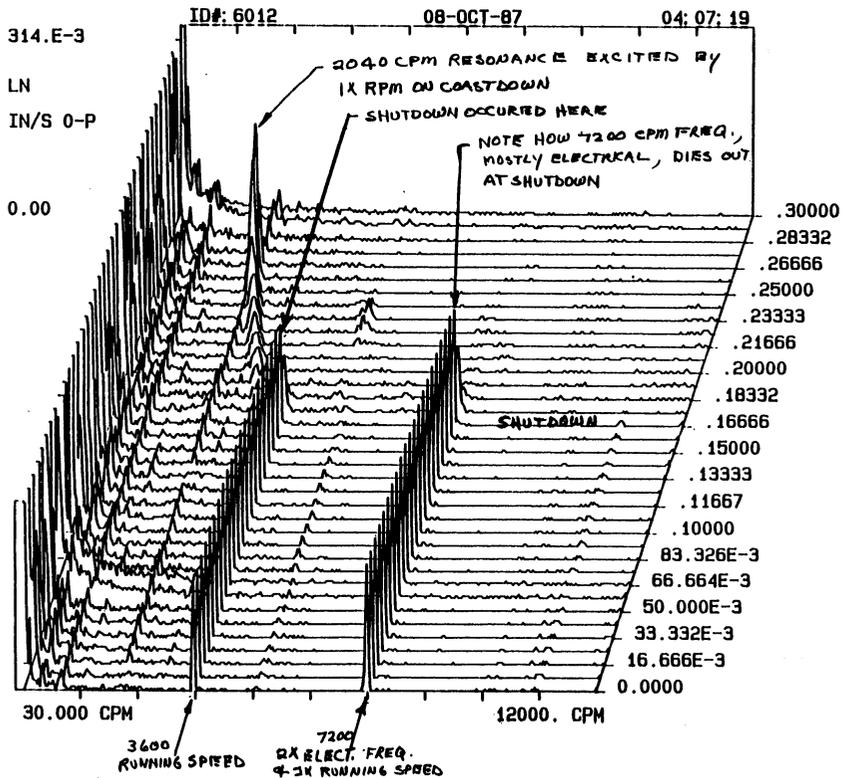


그림 12-10 위치 1H에서의 Waterfall Plot

### 3.3 結論 (Conclusions)

고정자의 편심 혹은 고정자 철심의 단락에 의한 전기적인 문제점이 이 신품 전동기에 있었다. 만일 인수하였다면 전동기의 운전 수명이 눈에 띄게 줄어들었음을 경험했을 것이다.

### 3.4 勸告事項 (Recommendations)

- ① 신품 전동기를 불합격 조치하고 이런 문제점을 교정하던지 혹은 이런 문제점이 없는 다른 전동기로 교체하던지 조치를 취한다.
- ② 교정 혹은 교체한 전동기에 대해 인수 시험을 수행한다.

## 4. 乾燥機 排氣 Fan 電動機의 로터 바 弛緩 檢出 (Detection of Loose Rotor Bars in a Dryer Exhaust Fan Motor)

### 4.1 背景 (Background)

전동기의 전기적인 상태를 평가할 특별한 목적으로, 기동 토크가 큰 7개의 전동기에 대해 분기별로 실시간 분석기로 진동 측정을 수행하도록 TA사와 연간 계약이 되었다. 이 분석기로의 측정은 이미 시행되고 있는 일반 월별 예지정비 프로그램의 측정작업 외에 추가로 시행되는 작업으로, 기계 승속중(0~300000 cpm 범위) 순시 진동 스펙트럼 및 Peak-hold 스펙트럼의 수집 그리고 운전 속도( $F_M$ ), 전력계통 주파수( $F_L$ ), 두 배의 전력계통 주파수 ( $2F_L$ )와 정상 운전중의 RBPF 등의 Zoom Spectrum 분석이 포함되어 있다. 그림 12-11은 위의 방법을 이용하여 전동기 로터 바의 이완을 진단한 건조기 Fan이다.

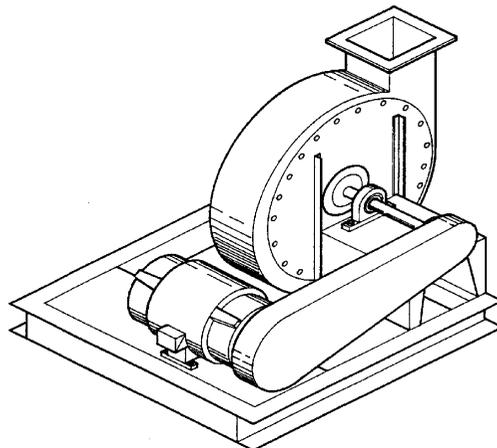


그림 12-11 건조기 배기 Fan (1750 rpm, 350 HP 전동기, 57개의 로터 바)

모든 진동 스펙트럼은 실시간 분석기와 가속도계를 사용하여 얻은 것이며, 모든 데이터는 Peak 속도 스펙트럼을 사용하여 분석하였다.

이 설비는 350마력 유도 전동기를 동력원으로 하는 대형 벨트 구동 Overhung 형태의 Fan으로, 사용자는 계약서를 통해 로터 바 수량을 알고 있었다. 이 건조기 배기 Fan의 로터바의 수는 57개이며, 약 1795 rpm 정격 속도로 운전되고 있어, Rotor Bar Pass Frequency(RBPF)는 약 102,315 cpm( $1795 \times 57 \text{ bars} = 102,315$ )이다.

#### 4.2 結論 (Conclusions)

1990년 10월 점검시 정상적인  $2 \times \text{RBPF}$  진동치보다 높은 진동치가 검출되어, 그 당시 전동기의 전기적 문제점의 경향이 관심의 대상이 되었다. 그림 12-12에서와 같이 1990년 10월 점검시에는  $2F_L$  측대과중 하나의 진동치가  $2 \times \text{RBPF}$  보다 실제로 더 컸다. 이 때의 운전 데이터상에는 어떤 비정상적인 것도 나타나지 않았다.

차기 계획 점검날인 1991년 2월 분석기로의 점검은 설비 운용상 정상 운전 속도에서만 실시하였다. 이 때 수집한 그림 12-12의 데이터를 보면,  $2 \times \text{RBPF}$  및  $2F_L$  측대과의 진동치가 매우 커졌음( $2F_L$ 의 경우 0.017 in/sec에서 0.163 in/sec로)을 알 수 있다.

1991년 5월 실시한 점검시에 승속시험도 실시하였는데, 전동기의 큰 손상을 막기 위해서는 사용을 중지하는 것이 필요하다는 시험 결과가 나왔다. 그림 12-12는 1990년 10월, 91년 2월 및 5월 점검시 측정된 0~300,000 cpm 범위의 스펙트럼을 비교한 그림으로, 로터 바 상태가 계속해서 나빠지고 있음을 보여주고 있다. 그림 12-13은 기계의 승속중에 발생한 0~300,000 cpm의 Peak-Hold 스펙트럼으로, 10월부터 5월까지 뚜렷한 변화가 있었음을 보여주고 있다. 그림 12-14는 건조기 배기 Fan #1, 2의 승속시의 Waterfall Plot를 비교한 그것으로, #2는 상태가 양호하고, #1은 로터 바가 이완되어 있음을 나타내고 있다.

#### 4.3 結果 및 勸告事項 (Results and Recommendations)

전동기 사용을 중단하고, 분해후 회전자 도체 이완에 대해 점검한다. 전동기는 그 후에 사용이 중단되었다.

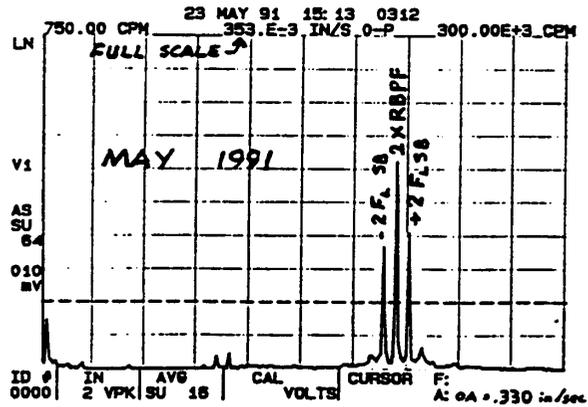
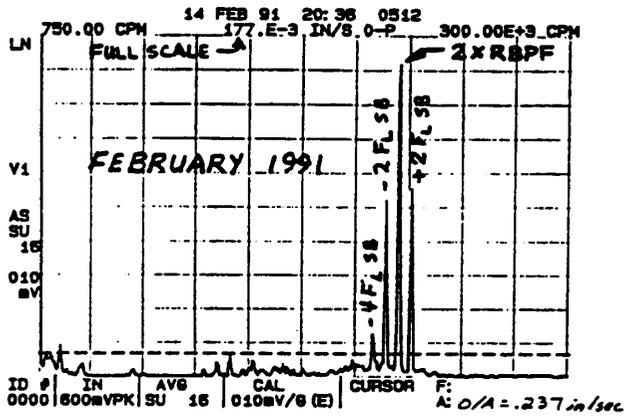
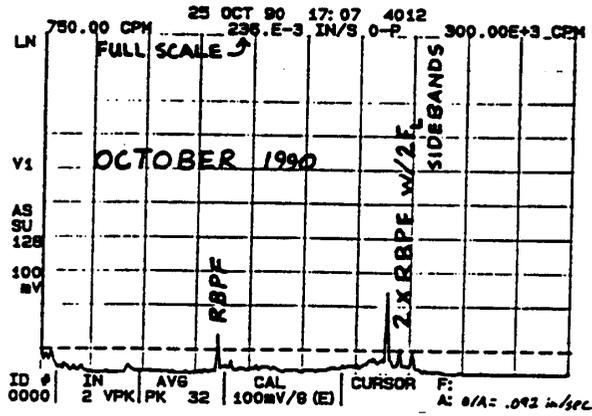


그림 12-12 외측 전동기 베어링에서 수평방향의 진동 스펙트럼 (2×RBPF의 진동 진폭 증가)

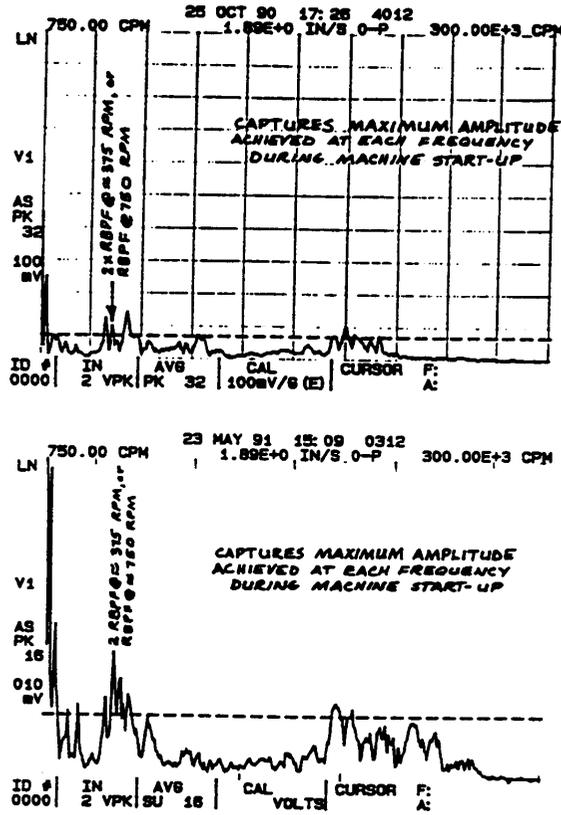


그림 12-13 외측 전동기 베어링에서 수평방향의 진동 스펙트럼 (전동기 기동 운전시의 Peak Hold 스펙트럼)

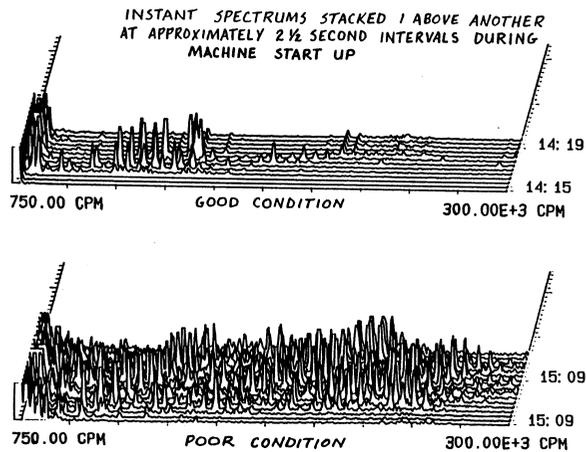


그림 12-14 기동시의 Waterfall Plot (위 그림은 2호기 아래 그림은 1호기)

## 5. 可變速 冷却機 電動機의 相 問題點 檢出 (Detection of Phasing Problem in a Variable Speed Chiller Motor)

### 5.1 背景 (Background)

TA사는 대규모 제작 설비의 예지정비 프로그램 조사를 수행하는 계약을 맺었다. 이 계약에 포함된 설비에는, 가변속 전동기를 동력원으로 하는 원심 냉각기도 포함되어 있었다. 그림 12-15는 이 기기의 도면이다. 정상적인 예지정비 프로그램 데이터 수집 동안에는 전력계통 주파수를 60 Hz( $F_L=3600$  cpm)에 맞추어 놓았다. 계속해서 데이터를 수집해 가던 중 1989년 2월 그림 12-16과 같이  $2F_L(7200$  cpm)에서 극히 큰 진동치가 나타났다.

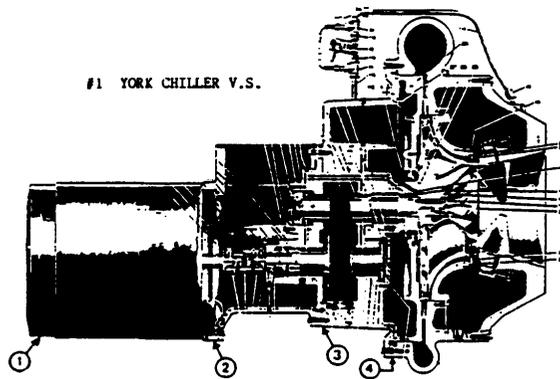


그림 12-15 냉각기의 구조와 진동측정 위치

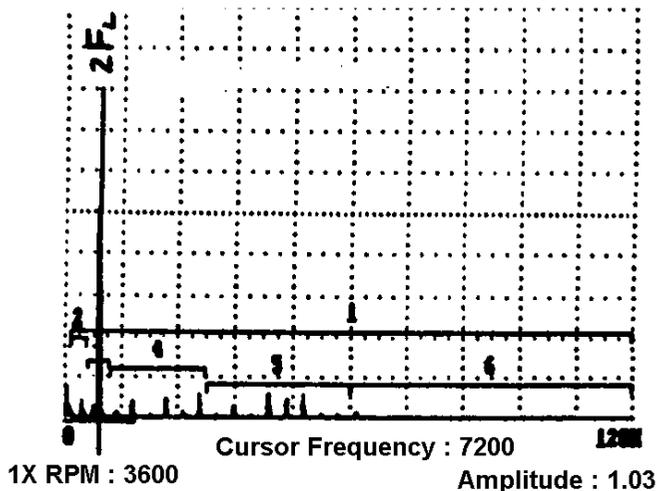


그림 12-16 전동기의 위치 1H에서의 진동 스펙트럼

### 5.2 結論 및 勸告事項 (Conclusions/Recommendations)

발생된 문제가 정말로  $2F_L$  주파수에서 인지를 확인하기 위해 인버터 주파수를 53 Hz( $F_L=3180$  cpm)로 조정하였으며, 0~12000 cpm, 3200 Line FFT로 수집하였다.

그림 12-17은 이렇게 수집된 데이터이며,  $2F_L$  (6390 cpm) 에서 높은 진동치가 나타나 있다. 또한 이 스펙트럼에는  $2F_L$  주위에  $1/3F_L$  간격으로 측대파가 있고,  $1/3F_L$ 의 기본 주파수도 나타나 있다.  $2F_L$ 을 화상 확대한 그림 12-18을 보면 한층 더 정확히 주파수를 구분할 수 있다.  $2F_L = 6371.2$  cpm, 그리고  $1/3F_L = 1095$  cpm 이다. 사용자 (물론 냉각기 제작자도 포함)는 진동치가 허용치를 넘고 있으며, 전동기 3상중 단지 1개상에만 영향을 미치고 있는 어떤 문제점이 있다는 것을 나타내고 있다는 사실을 알고 있었다.

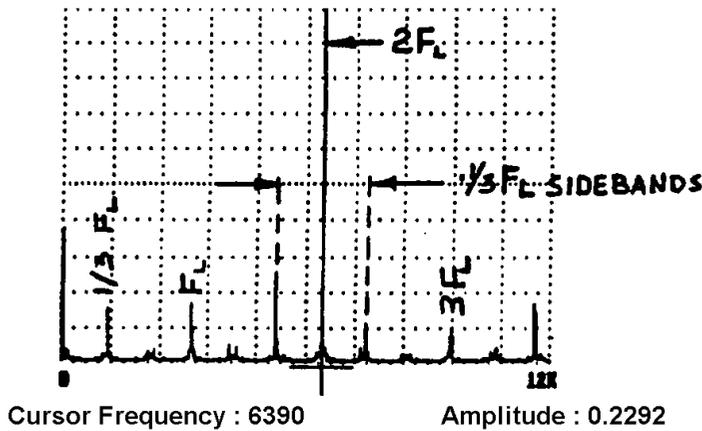


그림 12-17 그림 12-16의 Zoom Spectrum

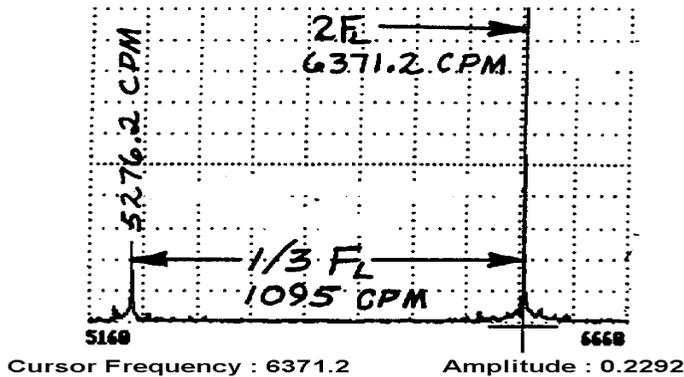


그림 12-18  $2F_L$  주파수에서 문제점이 있는지를 확인하기 위해 인버터 주파수를 53 Hz(3180 cpm)으로 조정후의 진동 스펙트럼

### 5.3 措置結果 (Results of Actions)

냉각기 제작자가 진동기 단자함의 결선 상태를 점검한 다음 아무 문제가 없다고 보고하였다. 좀 더 조사토록 건의하였고, 진동기 하우징 내부의 고정자 권선 한 접속부 위에서 육안으로도 소손 흔적이 뚜렷한 느슨한 곳이 발견되었다. 정비가 이루어 졌으며, 이 후 진동 기록치에는 진동으로 인한 문제점이 없어졌다. 그림 12-19 Waterfall Plot를 보면 명확히 알 수 있다.

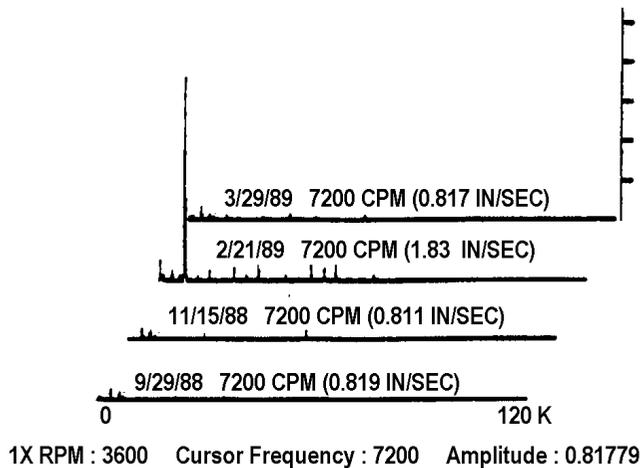


그림 12-19 진동기 수리 전후의 진동치를 나타내는 Waterfall Plot

## 6. 誘導 電動機에서 로터 바의 龜裂 檢出 (Detection of Multiple Cracked Rotor Bars within an Induction Motor)

특히 주요 전동기를 평가할 경우, 내재하는 문제점들을 진단하고 또 이 문제점의 심각성을 평가하여 (전동기뿐만 아니라 구동장치도 포함) 이들 결과를 이용하는 전동기 전류 및 진동신호 기술을 조합하는 것은 좋은 착상이다. 발전소의 대형 유인 통풍기에서 이런 특별한 경우가 있었다. 쌓인 Soot를 불어내기 위해서는 통풍기의 속도가 주기적으로 변화되었다. 승속시에 전동기 내부로부터 심하게 우는 소리가 있음이 보고되었고, 발전소 예지 정비 팀원의 측정에 의하면 61,440 cpm(1024 Hz)에서의 진동치가 4g를 초과하는 것으로 나타났다. 과거 이 설비는 경보가 발생하여 몇 번 정지된바 있으며, 이로 인해 꽤 금전적인 대가를 치렀다. 구동기는 명판상 885 rpm, 467Amps, 460Volts, 60 Hz로 기재되어 있는, 400마력 가변속 전동기였다.

이 전동기에는 70개의 로터 바가 있다고 알려져 있으며, SKF 6222 볼 베어링이 장착되어 있었다. 그림 12-20에 전동기(측정위치 1,2) 및 Fan(측정위치 3,4)의 진동 측정

위치가 표시되어 있다. 그림에서와 같이 수평, 수직 그리고 축방향에 대해 진동 측정을 실시하였다. 이 유니트에 대해서 철저한 진동 및 위상분석을 실시하였으며, 측정 결과는 4채널 Tape Recorder에 기록하였다. 협대역 실시간 분석기를 사용하여, 진동 및 전류 신호 분석을 실시하였다. 진동 측정시 속도 및 가속도 값도 기록되었으며, 고유주파수, 충격, 승속 및 감속시의 평가 등을 포함하는 몇 번의 시험을 수행하였다.

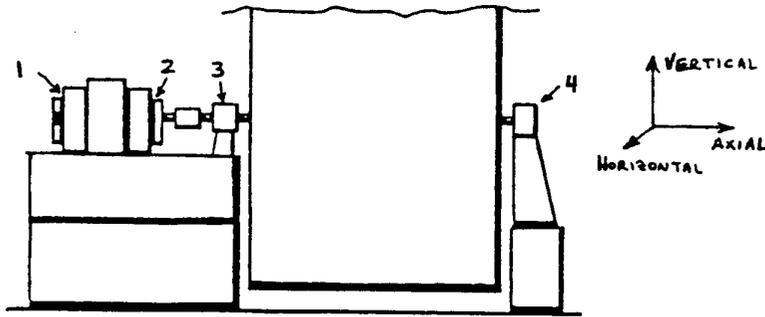


그림 12-20 유인통풍기의 진동측정 위치도

진동분석용 전기적 문제점을 찾아내는 각각의 중요한 신호 패턴을 표 12-2에 요약하였다. 이 신호 패턴을 전류 신호 분석 패턴과 비교해 보면, 유사점과 틀린 점이 약간씩 있다. 예를 들면, 로터 바 문제점의 경우, 진동 분석에서는 극 통과 주파수가 특히  $1 \times \text{RPM}$  부근에 나타나는가를, 반면에 전동기 전류 분석에서는 전력계통 주파수 주변에 동일한 극 통과 주파수가 집중되는가를 찾는다. 또한 주요 주파수에 대한 측대파의 상대적인 크기가 중요하다 (이 신호에 대해 이와 같은 관점으로 보는 것은 전류 분석의 경우에는 더 중요하다).

약간 틀린 점은 가변 공극 문제가 있는 곳에 있다. 진동을 분석하는 경우 사람들은  $2 \times$  전력계통 주파수 영역 특히 여기서의 높은 진폭과 그 주변에 극 통과 주파수가 있느냐 없느냐를 찾아본다. 하지만 진동 측정에서는 로터바 통과 주파수(로터 바 $\times$ RPM)로 알려진 Rotor Slot 주파수 영역에서 보다 높은 주파수를 찾아보아야 한다. 이 값은 여전히 일반적인  $f_{AG}$ 의 값 이내이고, 두 경우에 있어서, 사람들은 주요 주파수( $f_{AG}$  혹은 RBPF) 주위에  $2 \times$  전력계통 주파수 측대파를 주로 찾아보고 있다.

예제로 돌아가서, 진동이나 전류 신호분석 어느 쪽에서도 로터와 고정자 사이의 공극과 관련있는 문제점을 발견하지 못했다. 하지만 이 두 분석을 통해 로터 바의 문제점을 발견하였다.

표 12-2 전력계통의 전류와 좌측 극 통과 주파수에서의 측대파 진폭을 비교할 때 로터 상태 평가용 전동기 전류분석 가혹정도표

범주	$f_L/F_{SL}$ dB	$f_L/F_{SB}$ 비	$f_{SB}/f_L$ 비	로터 상태 판정	권고 교정 조치
1	>60 dB	>1000	<0.10%	매우 좋음	필요 없음
2	54-60	501-1000	.10-.20%	좋음	필요 없음
3	48-54	251-501	.20-.40%	적당함.	계속적 점검, 경향만 감시
4	42-48	126-251	.40-.79%	로터 바 균열이 진전되고 있거나, 혹은 용접부위(단락환) 고저항 문제점	점검 주기를 단축, 경향 정밀 감시
5	36-42	63-126	.79%-1.58%	두 개 정도의 로터 바 크랙 혹은 부러졌거나, 용접부위(단락환) 고저항 문제점	문제원인과 심각성을 알기 위해 진동시험을 실시하라
6	30-36	32-63	1.58-3.16%	여러 개의 로터 바와 단락환의 균열 혹은 부러짐이 나타남. 또한 슬립링과 접속부위 문제	가능한 빨리 분해 점검하라
7	<30 dB	<32	>3.16%	여러 개의 로터 바와 단락환의 부러짐이 확실시 됨. 전반적인 심각한 문제	분해 점검하거나 혹은 교체하라

- ① 최소 유도전동기 부하 = 80%
- ②  $f_L$  = 전력계통 주파수의 크기 (dB 혹 Amps)
- ③  $f_{SB}$  = 전력계통 주파수 원편 첫 번째 극 통과 측대파의 크기(dB 혹 Amps)
- ④ 극 통과 주파수 = 극수 × 슬립 주파수 (Hz 혹은 cpm)
- ⑤ 슬립 주파수 = 2배 전력계통 주파수/극수 - 전동기 회전수

그림 12-21은 0에서 30,000 cpm(500 Hz)까지의 광대역 스펙트럼으로, 무수한 전동기 회전속도의 조화 주파수가 스펙트럼 전반에 걸쳐 나타나 있다. 1×와 3×RPM 사이인 낮은 조화주파수 근방, 7×와 12×RPM 사이인 중간 조화주파수 및 22×와 26×RPM 사이인 높은 조화주파수 부근에서 일련의 “화상 확대 스펙트럼”을 수집하였다. 그림 12-21은 화상 확대한 스펙트럼중 하나로 22×와 25×RPM 사이를 집중하여 나타낸 것이다. 이와 같은 높은 조화 주파수에서도, 이들 각각은 약 60 cpm (실제는 60.9 cpm =

1.009 Hz) 간격으로 일련의 극 통과 주파수 측대파가 둘러싸고 있었다. 그러므로, 스펙트럼에서 많은 극 통과 주파수(P) 측대파를 가지고 있어, 명확한 로터 바 문제점이 있음을 나타내었다.

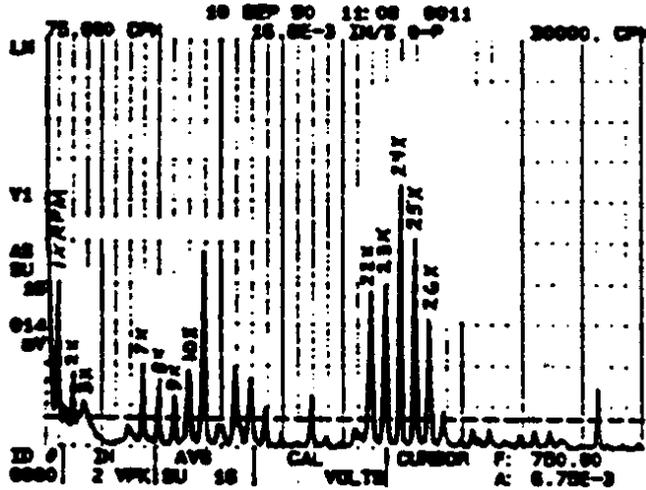


그림 12-21 전동기 운전속도 조화파가 많이 있는 스펙트럼

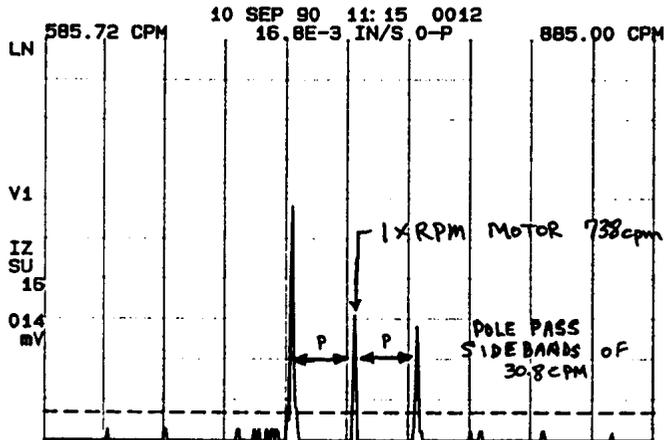


그림 12-22 외측 전동기 베어링(위치:1H)에서 1×RPM과 극 통과 주파수의 측대파

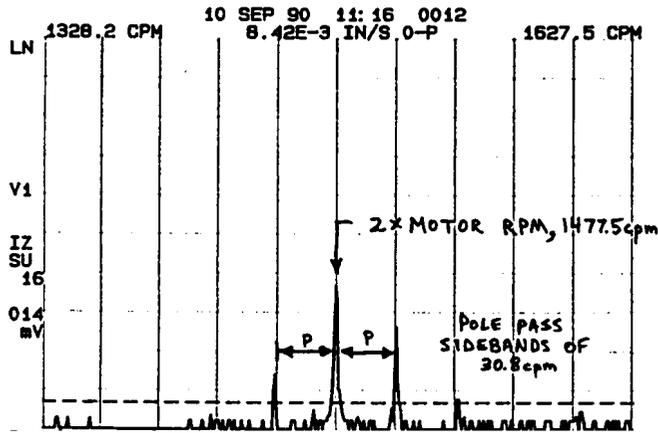


그림 12-23 외측 전동기 베어링 (위치:1H)에서 23×RPM과 극 통과 주파수의 측대파

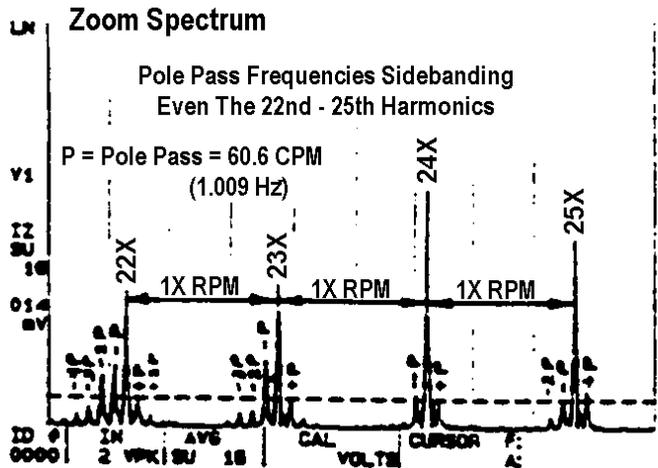


그림 12-24 높은 차수 조화파에서 일련의 극 통과 주파수는 로터 바의 문제점을 의미

다음, 통풍기를 구동하는 전동기(3상) 각 상에서 몇 개의 전류 스펙트럼을 수집하였다. 그림 12-25는 그 중 하나이며, 전력계통 주파수  $f_L$ 은 51.023 Hz에 있고 극 통과 주파수 측대파  $f_{SB}$ 는 49.924 Hz에 있음에 유의하라. 또한 Log 진폭 스케일로 표시한 계통주파수 전류의 크기는 1.89 EU(Engineering Unit)인데 이와 비교하여 극 통과 주파수 측대파는 0.051 EU임에 유의할 필요가 있다 (시간이 촉박하여, 전류를 0 dB 정격에 교정하지 못하였다). 그림 12-25는 dB 계산을 어떻게 하는 가를 나타내는 것으로, 그림에 있는 식에 값들을 대입한다. 계산결과  $f_L/f_{SB}$ 의 비가 단지 31.4 dB (즉  $f_L$ 이  $f_{SB}$ 보다 단지 31.4 dB 높았다) 이었다. 표 12-2에서 보면, 이와 같은 경우 이 전동기는

“Rotor Bar와 End Ring에서 다수의 크랙 혹은 손상”이 있음을 의미한다.

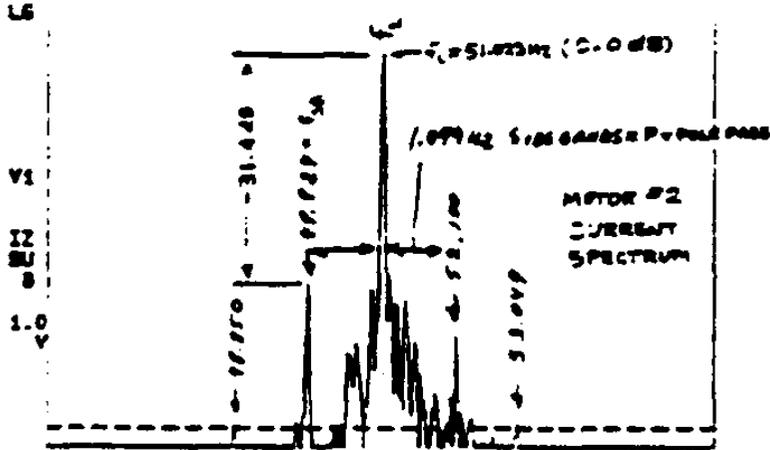


그림 12-25 전동기 각상에서 취한 전류 스펙트럼

분석을 진행하고 있는 동안, 이 구역 관리자는 자기가 “이상한 소음”을 들은 적이 있는 #4 전동기에 대해서도 긴급히 동일한 분석을 해줄 수 있느냐고 물어 왔다. 이에 따라, 유사한 전류 스펙트럼 분석을 실시하였으며, 그림 12-26에 그 결과가 나타나 있다. 이 전동기의 경우,  $f_L/f_{SB}$ 의 비가 33.7 dB (전동기 #2의 것보다 약간 좋음)로 나타났지만, 전력계통 주파수 좌·우측에 보이는 극 통과 주파수 측대와의 2차 군이 있는 것으로 보아 #2 전동기보다 더 상태가 나쁜 것으로 느껴졌다. 떠나기 전에 이 공장내의 다른 두 전동기에 대해서도 유사한 시험을 실시하였으며, 그 결과는 매우 만족스러웠다.

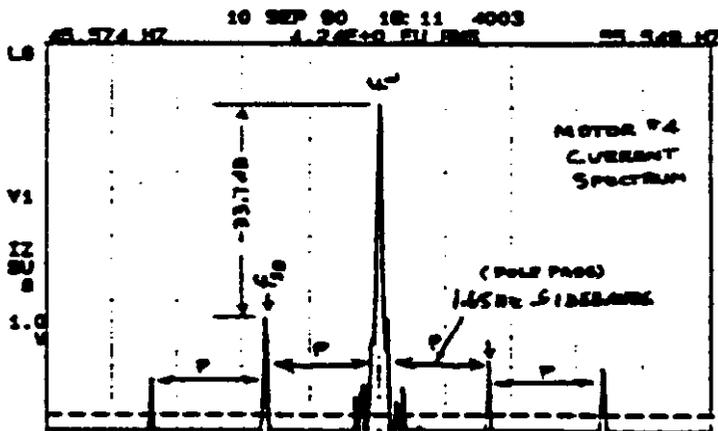


그림 12-26 #4 전동기의 전류 스펙트럼

TA사는 즉시 두 전동기에 대해 점검 및 분해 정비를 건의하였고, 나중에 사용자와 함께 실시한 재점검중에 전동기를 분해하자 말자, 두 전동기가 모두 “거의 폐기 상태”임을 알게 되었다. 이 두 경우, 여러 개의 로터 바가 부러졌거나 균열되었고 단락환에 심한 손상이 있었던 경우였다. #4 전동기도 로터 권선에 심한 손상이 있었고 고정자와 접촉한 흔적이 있었다.

## 7. 同期 電動機에서 코일 弛緩에 의한 電氣的 問題 檢出 (Detection of Electrical Problems within a Synchronous Motor due to Loose Coils)

### 7.1 背景 (Background)

3호기 압축기 구동 전동기는 회전수가 514 rpm이고 400 HP G.E.제 동기전동기이다. 압축기는 90° 대향형인 두 피스톤이 장착되어 있고 토출압력이 110 psi 이다. G.E.에 확인한 결과, 전동기는 14극이며 극당 6 코일로 총 84 코일로 구성되어 있음을 알 수 있었다. 그림 12-27에 진동 측정 위치가 표시되어 있다.

3호기 압축기는 고정자 고장과 회전자 고장 등을 포함한 몇 번의 전동기 고장이 발생한 바 있다. 1990년 1월 26일 전동기의 건강상태를 확인하기 위해 진동상태 점검을 실시하였다. 또한 3호기와 비교하기 위해 4,5,6호기 압축기에 대해서도 측정을 실시하였다. 이런 비교는 이상 상태를 진단하는데 도움이 된다.

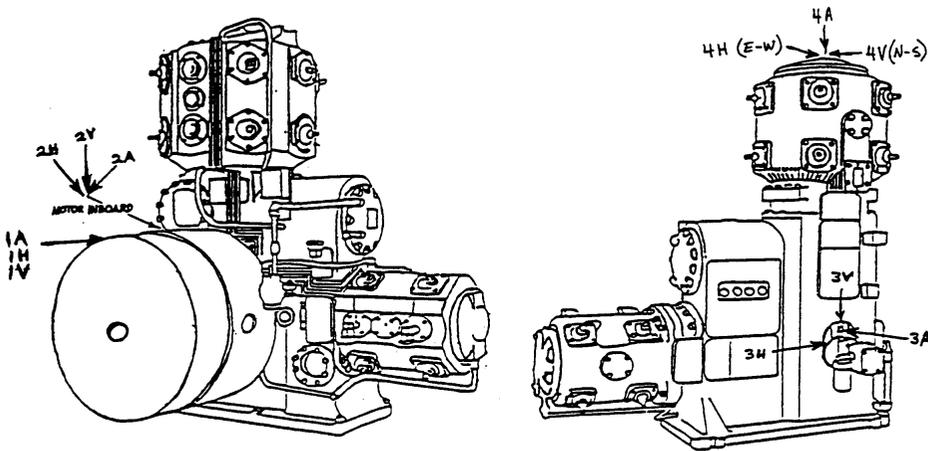


그림 12-27 전동기와 압축기의 진동 측정 위치도

### 7.2 結論 (Conclusions)

그림 12-28은 전동기 위치 1V에서 측정된 60,000 cpm 스펙트럼으로 많은 회전 속도 조화성분이 보이는데, 이는 베어링이 느슨해 졌거나 혹은 간극이 과도하게 큼을 나타낸다. 베어링의 간극과 볼트 체결력 점검을 건의하였다.

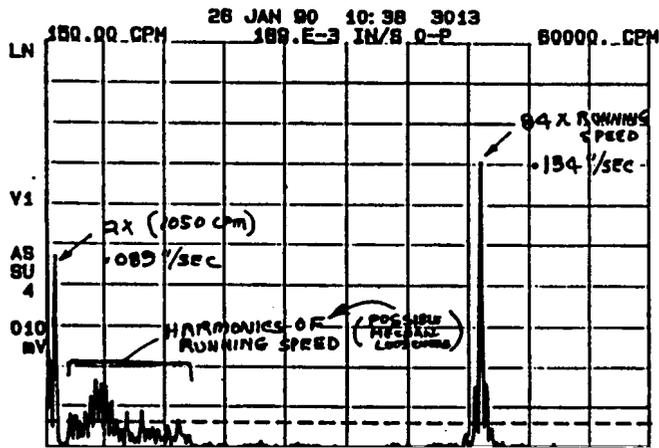


그림 12-28 위치 1V에서 전부하시 진동 스펙트럼

또한, 3호기 압축기의 진동 신호에는 전동기의 전기적인 문제점도 나타나 있었다. 이런 압축기 설계 형태에 있어서 (1×RPM은 회전수는 1차 적인 왕복동력과 일치) 2차 적인 왕복동력과 일치하는 2×RPM에서 뚜렷한 피크치가 그림 12-28에 나타나 있다. 아마 이 그림에서 가장 중요한 것은 전동기 회전수의 84배인 43,200 cpm에서의 피크일 것이다 (측정위치는 그림 12-27과 같다). 그림 12-28에서 우월한 높은 주파수의 Spike 모양은 3호기 압축기에서만 발생한다는 것을 알았다. G.E.를 통해 3호기 압축기 전동기는 극당 6개의 코일이 설치된 14극으로 총 84코일이 설치되어 있음을 알았다. 때문에, 그런 높은 주파수 Spike가 전동기 속도의 84배에서 발생하였으며 이것이 코일 통과 주파수이다. 그러므로 전동기에 느슨한 코일이 있을 것으로 예상되었다. 그림 12-29는 84배 주파수에 대한 고해상도 Zoom 그림으로 전동기 회전속도 측대파를 보여주고 있다. 이 전동기 회전속도 측대파는 84×RPM에서만 510 cpm과 관련이 있고, 다른 어떤 것과는 관련이 없다는 것을 나타내고 있었다.

전기적인 문제인가를 좀더 명확히 밝히기 위해 부하시험을 실시하였다(만일 진동치가 부하 감소와 더불어 뚜렷이 감소된다면, 동기전동기 내부의 코일 이완 같은 전기적인 문제일 것이다). 부하시험 결과 84배 주파수에서의 진폭이 부하 감소와 더불어 현저

히 낮아졌으며, 이 결과는 그림 12-30, 12-31, 12-32 및 12-33에 나타나 있다.

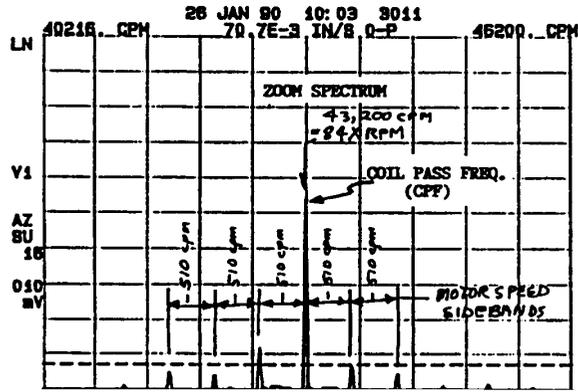


그림 12-29 위치 1A에서 전부하시 84×RPM 부근의 진동 스펙트럼

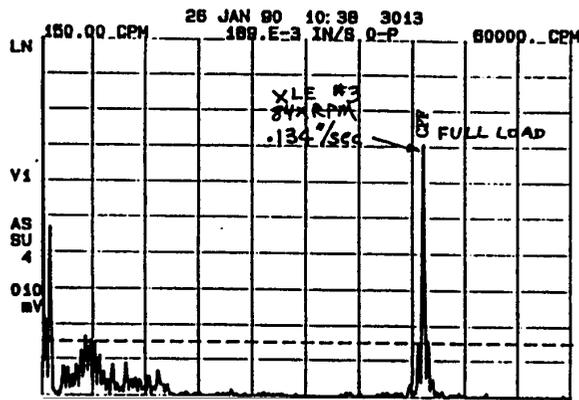


그림 12-30 위치 1V에서 전부하시 코일 통과 주파수에서의 진동 스펙트럼

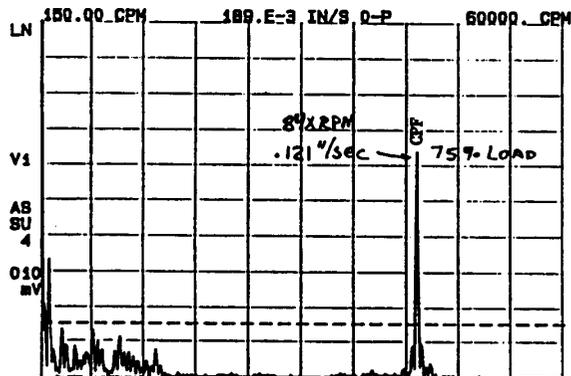


그림 12-31 위치 1V에서 3/4 부하시 코일 통과 주파수에서 진동 스펙트럼

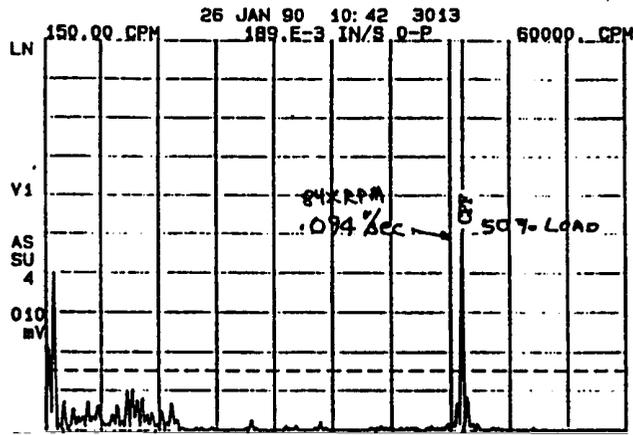


그림 12-32 위치 1V에서 1/2 부하시 코일 통과 주파수에서 진동 스펙트럼

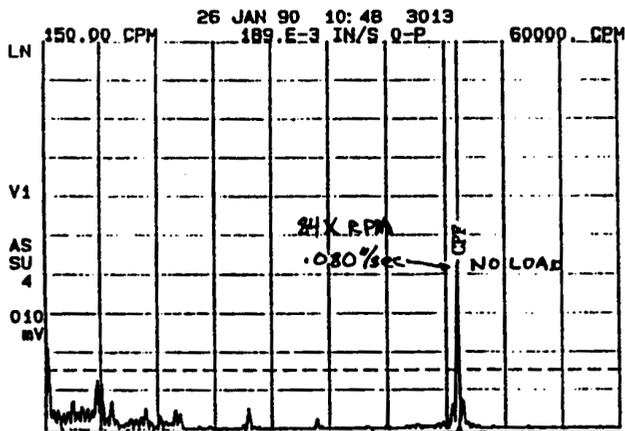


그림 12-33 위치 1V에서 무부하시 코일 통과 주파수에서 진동 스펙트럼

전동기 제작사인 G.E.를 통해서, 다른 곳에 사용되고 있는 전동기보다는 왕복동 압축기에 사용되는 전동기에서 고정자 코일의 이완 현상이 더 흔한 일이며, 일단 동기전동기의 코일이 이완되면 고장 진전이 빨라 조기 손상을 초래할 수 있다는 것을 알았다. 최대 진동치가 84배 회전속도(Coil Pass 주파수)에서 발생하고 있기 때문에 이 진동원이 코일 이완에 의한 것일 것이다.

### 7.3 勸告事項 (Recommendations)

- ① 압축기 베어링의 과도한 마멸 여부를 점검하고 만일 간극이 규정 한도를 초과하면 교체한다.

- ② 전동기의 고정자 코일 이완 여부를 점검해야 한다. 이완된 고정자 코일이 발견되면, 이런 종류에 사용되는 전동기에서는 코일 이완은 인정된 잠재적인 문제점이기 때문에 적절한 Coil Wedging을 보증하기 위해서는 원 제작사의 설명서를 적용해야한다. 만일 이완된 코일이 발견되면, G.E.사에서는 수년간 운전하는 동안에 생긴 많은 공간에 에폭시 형태의 액체를 부어 교정한다.

### 7.4 措置結果 (Results of Corrective Actions)

전동기를 G.E. 전동기 수리 공장으로 보냈고, 거기서 코일이 정말 이완되어 있었음을 확인하였다. 전동기 구조상 완전한 수리를 하기 위해서 정비원이 직접 고정자 코일로 접근하는 것은 불가능하였다. 하지만, 그들은 에폭시 자재를 Gap 사이에 부어 넣어 할 수 있는 최대 한도로 각 극에 있는 공간을 채워 없앴다.

수리한 회전자를 다시 설치한 후, 코일 통과 주파수(84×RPM)에서의 진동치는 그림 12-34와 12-35에서 비교한 것처럼, 0.134 in/sec에서 단지 0.059 in/sec로 감소하였다. 다시 한 번 부하에 대한 코일 통과 주파수의 진동치 변화(감도)를 평가하기 위해 부하 시험을 반복하였다. 현재는 부하시 0.134 in/sec에서 무부하시 0.080 in/sec까지 감소된 것 외에, 코일 통과 주파수에서도 부하시 0.059 in/sec에서 무부하시 0.046 in/sec로 감소하였다. 이것은 이 동기 전동기의 전기적인 운전상태가 매우 좋아 졌다는 징조이다.

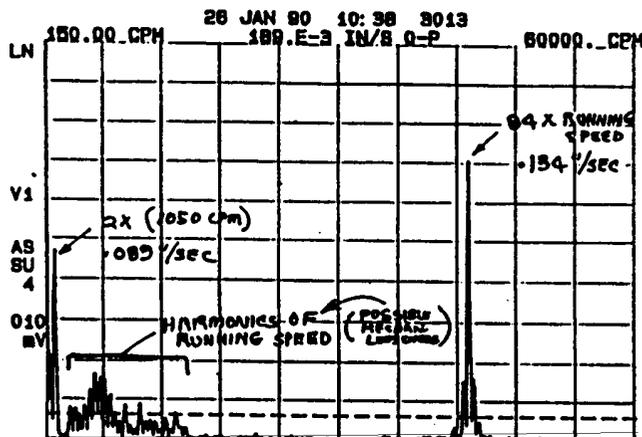


그림 12-34 위치 1V에서 전부하시 코일 통과 주파수에서 진동 스펙트럼 (수리전)

1004 — 제2편 진동의 경험 사례

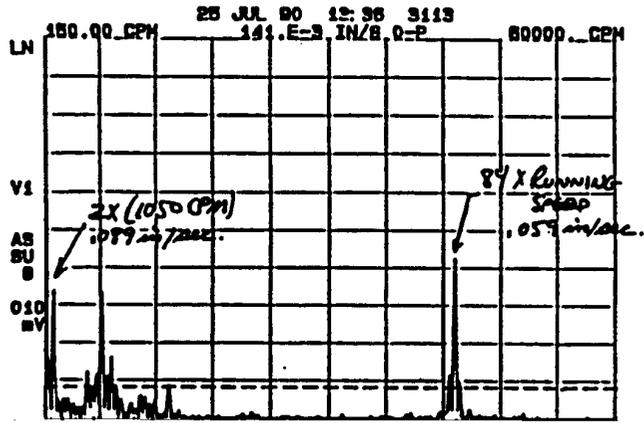


그림 12-35 위치 1V에서 전부하시 코일 통과 주파수에서 진동 스펙트럼(수리후)