

# 공진상태에 놓인 회전 기계류의 혼돈스런 진동 거동의 진단 및 해결 Vibration Behaviors of Rotating Machinery under Near-Resonant Condition

이 수 목† · 임 도 형\*  
Soo-Mok Lee, Do-Hyeong Lim

## 1. 서 론

동일한 설계 하에 동일한 제작 과정을 거친 여러 대의 회전 기계 중 특정 기계의 외견상 진동이 상당한 차이를 보인다면 우리는 일차적으로 그 기계의 부품 제작 및 조립 과정을 의심한다. 또한 그 기계가 두 개 이상의 주요 컴포넌트로 이루어져 있다면 그 진동의 원인이 그 중 어느 한 컴포넌트에서 올 가능성이 높다고 생각한다. 만약 컴포넌트를 서로 교환해서 운전하면 어느 쪽이 진동의 원인인지를 명확하게 알 수 있을 것이라고 논리적으로 단정하기도 한다.

본 논문은 허용치를 초과하는 축 진동을 보인 수직형 모터-펌프의 진동 문제를 진단하고 해결함에 있어서 위의 세가지 가정이 모두 사실이 아닐 수 있음을 예시해 보이고자 한다. 또한 그 과정에서 겪었던 혼란과 상반된 견해 그리고 결정적인 해결의 단서를 제공한 의견에 대해 기술하고자 한다.

## 2. 진동 현상

원전 발전소 복수 펌프 전동기 일부에서 경고치를 넘는 진동이 발생하여 수년에 걸쳐 수 차례의 원인 조사를 실시한 바 있으며 전동기를 재 입고하여 수리하기도 하였으나 여전히 허용치를 초과하는 진동이 발생하였다. 이에 저자들은 이러한 난해한 진동의 원인을 파악하고자 여러 차례의 현장 진동 계측과 관련 자료 조사를 수행하였다. 발생한 진동의 일반적인 특징은 다음과 같았다.

- ① 총 6대의 동일한 모터-펌프에서 1~2개가 다소 높은 축 진동과 구조 진동을 보여 모니터의 진동 경고치를 초과하였다. 타 펌프들의 진동 수준은 비교적 양호하였다.
- ② 가장 문제된 펌프의 축 진동의 경우 모터 상단에서 1차와 4차 성분이 크고 구조 진동의 경우는 1차 성분이 컸다. 축 진동은 주기적 진폭 변동(hunting)이 뚜렷하였다.
- ③ 모터 단독의 무부하 운전에서는 진동 크기가 줄어들었으나 축 진동 4차 성분은 여전하였다. 그러나 진폭은 일정하였다.
- ④ 구조물의 고유진동수(reed frequency)는 약 10 Hz 이었고 운전 회전속도는 1200 rpm, 20 Hz 이다.
- ⑤ 1000 Hz 이상의 RBPF(회전자 봉 통과 주파수) 성분이 강하게 나타났다.
- ⑥ 문제되는 펌프 위에 다른 펌프의 모터를 얹어서 시험한 결과 진동이 다소 개선되었다.

† 교신저자; 정희원, 현대중공업 미래기술연구소  
E-mail : [smlee@hhi.co.kr](mailto:smlee@hhi.co.kr)  
Tel : 031-289-5080  
\* 정희원, 현대중공업 그린에너지연구소

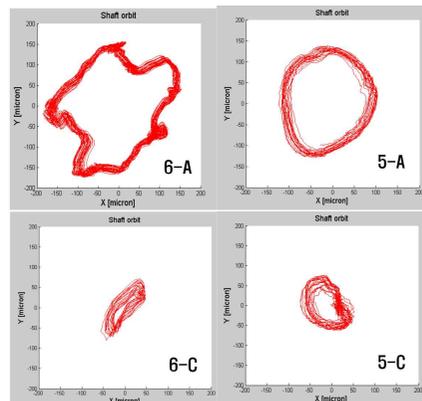


그림.1 동일하게 제작된 회전 기계의 서로 다른 진동 크기와 형태

### 3. 의견들 및 이에 대한 평가

① 전원 주파수의 두 배인  $2f_L$  (120 Hz) 진동 성분 및 RBPF 성분이 강하게 나타나므로 이는 전동기의 전기적인 결합에 원인이 있음을 의미한다. 회전자와 고정자간의 공극 편심 혹은 고정자의 winding이 헐거울 경우에 120 Hz 성분이 발생한다.

② 축 진동값이 hunting하는 것은 회전수 성분 주위에 불평형 전자기력에 의한  $2sf_L$  성분이 sideband로 나타나기 때문이다. 대상 전동기의 경우 하부를 롤러 베어링으로 잡고 있고 상부에 pad 베어링으로 되어 있어 하부를 중심으로 휘돌기 쉬운 구조이며 이에 의해 회전자의 동적 편심이 발생하고 회전수 성분 주위에  $2sf_L$  성분이 나타난다.

③ 축 4차 성분은 단순한 runout (표면의 비진원 효과) 일 수도 있다.

이러한 의견들에 대한 결과적인 평가는 아래와 같다.

① 문제삼은 120 Hz 성분은 정밀한 주파수 분해능 검사 결과 임펠러 날개 깃수 성분 (6차)임이 확인됨. 따라서 전기적 성분이 아니고 전동기의 결합도 아님. 또 RBPF 성분은 alarm을 유발한 저주파 진동과는 무관함.

② 원추형의 모터 축진동 모드의 제시로 부터 펌프 축과 연결된 상태에서의 전동기 축계 진동이 공진 상태에 있는 것이 아닌가 하는 의문을 가짐.

③ 몇차례 수리과정을 거치며 runout 검사를 해 보았음에도 이상이 없었으므로 최종적으로 축표면의 자화 상태의 불균일로 인한 electrical runout으로 결론 지음.

### 4. 문제 해결

축계의 휘돌림 진동 모드에 대한 정밀한 해석을 통해 추측대로 원추형의 축진동 1차 모드가 회전수 1차 기진력과 공진되어 있음을 확인하였다. 또한 이로부터 공진을 회피하는 방안으로 전동기 상부의 패드형 베어링의 강성을 올려 축진동의 고유진동수를 상승시키는 방법을 선택하였다. 베어링 면을 재설계하고 재 제작후 설치하여 성공적으로 진동을 저감시켰다. 문제되는 4차 성분은 electrical runout

에 의한 것임이 간접적으로 확인되었고 전동기 내부의 특별한 하자는 없는 것도 밝혀졌다. 물론 펌프에도 문제가 없었으며 유일한 문제는 결합된 펌프와 전동기 축계의 고유진동수가 우연히 회전수 1차 기진력과 공진된 사실이었다. 문제된 펌프 유닛의 진동 문제는 나머지 모든 유닛들에도 잠재되어 있었으며 단지 개별적 편차에 의해 운 좋게 적게 발견되었을 뿐이었다.

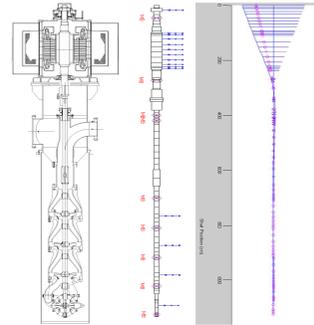


그림.2 펌프 개관, 축진동 해석모델 및 문제된 1차 진동모드

### 5. 결 론

왜 동일한 제품임에도 특정 기계만 문제가 되었을까? 비유로 설명하면 넓은 평지에 여러 명의 공수부대 요원이 낙하하면 모두 안전하게 착지하지만 계곡이나 호숫가에 낙하하면 그 중 운이 나쁜 요원 몇몇은 어려운 상황을 맞이한다. 모든 기계는 통계적으로 개별적 특성 편차를 갖고 있는데 운전조건이 비공진 영역에 놓이면 문제가 안되지만 공진 영역에 놓이게 되면 개개의 특성차 및 공진 일치 정도에 따라 외견상 매우 다른 크기나 양상의 진동을 보이게 된다. 이때 우리는 흔히 단순하게 관찰하고 평가하여 진동이 큰 샘플만 문제가 있다고 단정하는 실수를 저지를 수 있다. 본 원전 펌프 유닛의 난해한 진동의 경우도 너무나도 평범한 공진에 그 문제의 근본원인이 있었다.

### 후 기

본 사례의 경우 진동 문제의 원인을 진단하는 과정에서 고 양보석 교수께서 지적하고 조언해 주신 단서가 결정적인 문제 해결의 실마리가 되었음을 밝힙니다. 심심한 감사와 애도의 마음과 함께 삼가고인의 명복을 빕니다.