

## 2. 해설기사

### 공진문제 해결을 위한 Operating Deflection Shape과 모달해석

#### Operational Deflection Shape and Modal Analysis Testing To Solve Resonance Problems



김 창 남

Chang-Nam Kim

- (주) 티엔텍 소유진동 기술지원부
- E-mail : vibtech@tientech.com

### 1. 서 론

많은 기계 기술자들은 기계진동문제에 직면하면 매우 곤란을 느끼게 된다. 이 글은 이러한 문제를 모달(Modal) 해석과 Operational Deflection Shape(ODS)를 사용하여 해결하는 방법을 설명한다. ODS와 모달 기법은 진동원을 이해하는 데에 유용하고 강력한 도구이다. 주파수분석기를 이용하여 진동을 측정하고, Vibrant Technology사의 ME'scope ODS/ 모달 소프트웨어 그리고, MSC사의 NASTRAN를 이용하여 진동문제를 해결하는 방법에 대해 설명하고자 한다.

이 글에서는 수직펌프의 경우에 대해, 진동문제 인식으로부터의 공진실험, ODS 실험, 모달분석 등의 실험순서를 통해 사례연구를 소개한다.

ODS와 모달 분석은 기계의 운동에 대해 선명하게 보여주기 때문에, 다음의 예처럼 유한요소해석은 펌프구조물의 모델링과 공진을 회피하기 위해 강제 진동으로부터 고유진동수를 옮기기 위한 구조변경에 이용된다.

### 2. 공진 실험/ODS/Modal과 유한요소해석에 대한 사례연구

#### 2.1 펌프 1의 진동

펌프 1~4는 오수펌프로, Morris Two-vane, 수직, 원심펌프이다. 펌프 1 과 2의 구동모터는 가변 800 마력의 신형모터이며, 펌프 3 과 4의 구동모터는 구형 유체가감식 속도조절모터이다. 운전속도는 700~890rpm이다. 펌프는 바닥에 볼트로 고정되어져 있고, 모터는 15피트의 긴 구동축을 가지고 튜브(Tube)의 상부에 지지되어 있다.

신형모터는 구형모터보다 800 파운드(pound) 이상 무겁게 설계되었으며, 신형모터로 교체 후 진동이 커지면서 다음과 같은 진동양상이 파악 되었다.

- 최대진동이 0.9 inches/s-peak (IPS) at 2nd order, 진동은 배출 파이프 방향.
- 최대 진동은 펌프속도 820 rpm에서 발생.
- 펌프를 설계된 속도로 운전할 수 없음, VFD는 820~890 rpm 을 초과하게 프로그램 되어 있음.

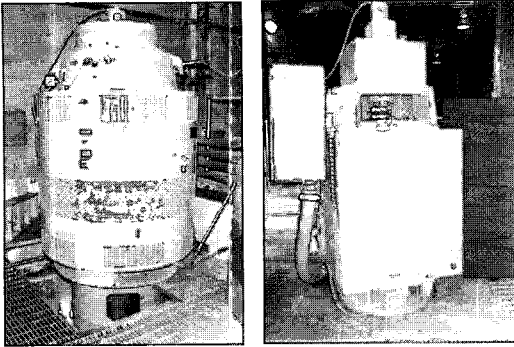


Fig. 1 Left : new motor (pumps 1 & 2), right : old motor (pumps 3 & 4)

2.2 Baseline data 취득

베이스라인데이터(Baseline data)는 진동문제 발생시 원인을 파악하기 위한 기본 진동 데이터이다. 일반적으로 기계구조물의 각 위치에서의 진동값을 가속도계와 주파수 분석기를 이용하여 진동을 측정하게 된다.

원인을 정확히 파악하기 위해 베이스라인 데이터를 펌프속도 870rpm(14.5Hz)에서 측정하였다. Fig. 2에 각 측정위치와 그 위치에서 측정한 베이스라인 데이터를 보인다. 최대진동은 모터에서 수평방향으로 2X 운전속도에서 0.7 IPS이다.

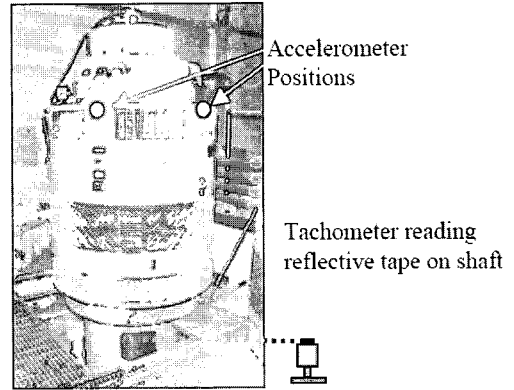


Fig. 3 Setup for coast-down testing

2.3 Coast-down 실험

Coast-down 실험은 가변하는 기계의 진동을 회전수별로 측정하는 방법이다. 엔진과 같이 회전수의 조절이 가능할 경우에는 회전수를 공 회전수부터 최대 회전수까지 천천히 높이거나(Run-up), 최대회전수부터 공회전까지 천천히 낮추면서(Run-down) 회전수별 진동을 측정하게 된다. 일반적으로 이러한 방법을 rpm 트래킹(Tracking) 또는 차수 분석이라고 한다.

그러나 오수펌프의 경우에는 회전수를 천천히 조절할 수가 없어 Run-up이나 Run-down 실험을 할 수 없다. 이런 경우에는 최대회전수에서 전원을 차단하고, 드래그(Drag) 토크에 의해 천천히 감속되면서 멈추는 동안 회전수에 대한 진동을 측정하게 된다. 이런 경우를 Coast-down 실험이라고 한다.

펌프는 최대회전수 (899rpm or 15 Hz)로 구동한 후, 모터속도를 VFD로 천천히 감속하며, 회전속도계와 가속도계로 회전수와 진동을 주파수 분석기에 저장하였다. Fig. 3에 Coast-down 실험을 위한 실험장치의 설치를 보인다.

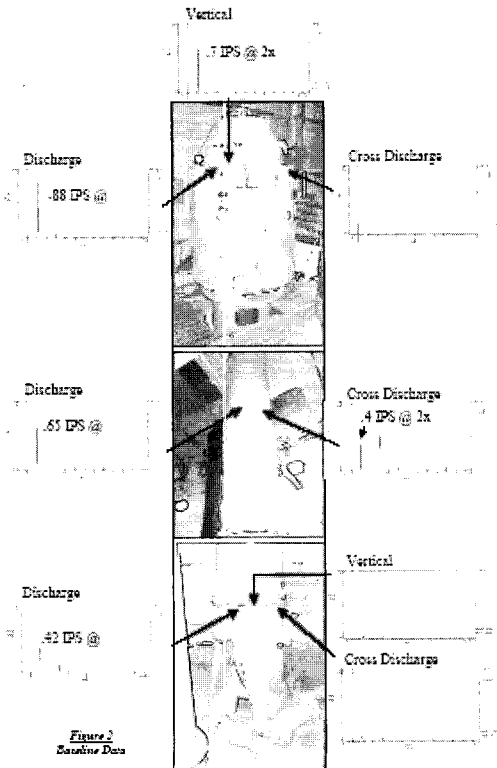


Fig. 2 Baseline data

Fig. 4 에서와 같이 Coast-down 실험 결과는 29.2 Hz에 수평방향으로 고유진동수가 있음을 보여준다. 공진은 펌프속도 876rpm의 2배수성분에서 발생하고, 진동값은 0.9 IPS - 29.2 Hz이다. 2X 회전 성분으로 판명된 진동이 펌프구조물의 어떤 부분의 고유진동수를 가진하여 진동을 일으키는 것으로 생각된다. Fig. 5를 보면 수직방향의 고유진동수는 최대운전속도 이상에 있는 것으로 판단된다.

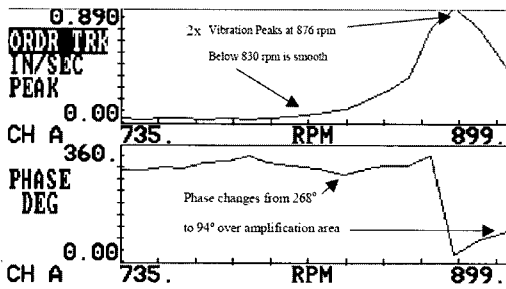


Fig. 4 2X coast-down bode plot data(discharge direction)

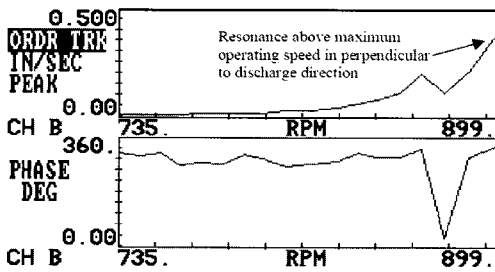


Fig. 5 2X coast-down bode plot data (perpendicular discharge direction)

2.4 공진실험

Coast-down 실험결과, 2X 진동성분의 공진을 발생시키는 것으로 판단하여, 고유진동수를 정확히 파악하기 위하여 공진실험을 실시하였다.

공진실험은 구조물의 고유진동수를 파악하기 위한 실험으로 힘 변환기가 달린 임팩트 해머로 구조물을 충격 가친하고, 그 응답을 가속도계로 받아 입력(힘) 대 출력(가속도) 비의 함수인 주파수응답 함수(전달함수라고도 함)를 측정하여 고유진동수를 찾는 방법이다.

펌프를 멈추고 Fig. 6과 모터에 대해 공진실험을 실시하였다. Fig. 7과 Fig. 8에 공진실험결과를 보인다.

고유진동수는 수평방향으로 5 Hz, 30 Hz, 39 Hz이며, 펌프가 830-890 rpm으로 운전되어, 운전성분의 2X 성분이 30 Hz와 일치하여 공진을 발생시킨다는 사실을 알 수 있다.

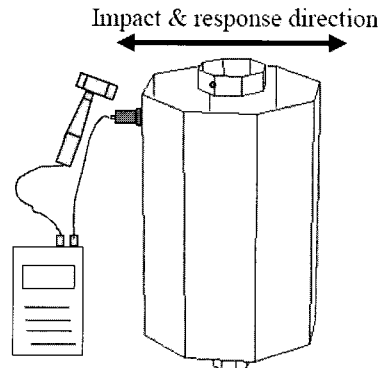


Fig. 6 Impact testing setup

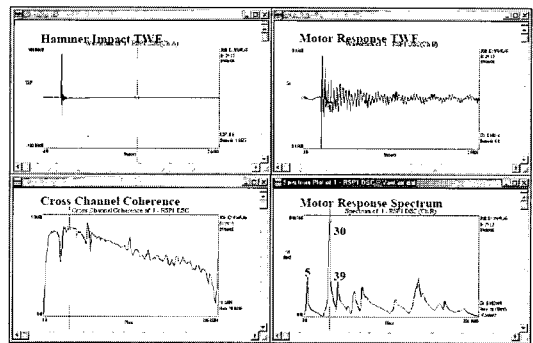


Fig. 7 Discharge direction impact test

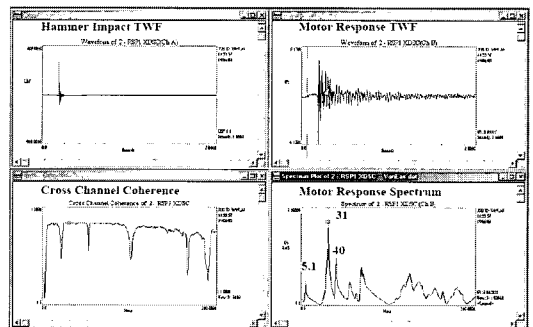


Fig. 8 Cross-discharge direction impact test

펌프는 두 개의 베인(Vane)을 가지고 있고, 베인 통과주파수(Vane-pass frequency = 펌프속도 X 베인 수) 또는 베인의 측정렬불량이 공진의 원인이 될 수 있다. Coast-down 실험결과를 보면, 2X 진동이 830 rpm 이하에서는 완만하여, 진동의 크기는 베인통과주파수 또는 측정렬불량과 연관되어 있지만, 매우 작은 영향만 미칠 것으로 판단된다.

5 Hz의 고유진동수는 운전범위내의 어떤 가진력 과도 일치하지 않으므로, 이 진동은 단지 기동시 또는 Cast-down에서만 영향을 미치게 된다. 수직방향의 고유진동수는 수평방향과 매우 근접해 있고, 수직방향의 2X 진동은 수직방향보다 작다.

2.5 펌프 1~4에 대한 고유진동수와 강성비교

다른 세 개의 펌프에 대해서도 공진실험을 수행하였고, 그 결과 고유진동수와 강성 값을 Table 1에 보인다.

펌프 1 과 2, 펌프 3과 4 의 고유진동수는 비슷해야 하지만 그렇지 않았다. 고유진동수와 강성은 기계 기초(Base)에서의 경계조건에 의해 더 영향을 받는다. 모든 고유진동수에서 감쇠가 작다는 것이 Narrow skirts로 알 수 있다. 이것은 2X 운전속도에서 큰 진폭의 원인이 될 수 있는 측정렬불량 또는 날개 통과주파수의 2배수 진동에너지의 크기가 작다는 것을 의미 한다.

Table 1. Natural frequency and stiffness for pump 1~4

	P1	P2	P3	P4
Natural Frequency(Discharge Dir)-cpm	30.0	22.5	33.7	28.6
Stiffness(Discharge Dir)-mils/lb.	.011	.024	.008	.017
Natural Frequency(X-Discharge Dir)-cpm	31.2	22.7	36.8	28.5
Stiffness(X-Discharge Dir)-mils/lb.	.011	.017	.007	.021

Fig. 9는 각 펌프의 고유진동수와 2X 운전속도 사이의 근접관계를 보여준다. 펌프 1(수평 방향)과 펌프 4(양 방향)의 고유진동수가 2X 운전속도와 근접하게 나타난다. 30 Hz가 고유진동수이기 때문에 펌프 1번은 공진이 발생하고, 펌프 4번은 2X 운전속도의 상단 끝에서 충분히 떨어져 있기 때문

에 공진이 발생하지 않았다. 펌프 2번과 3번은 2X 운전속도 밖이다.

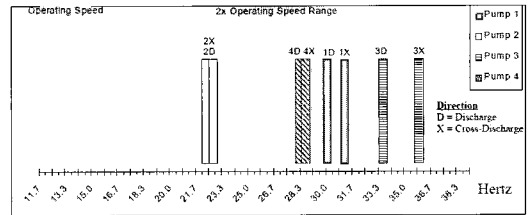


Fig. 9 Natural frequencies near 2X operating speed range for pump 1~4

2.6 Operational Deflection Shape 실험

ODS는 기계가 운전되는 동안 구조물의 변형모양을 보기 위한 실험이다. 일반적으로는 모든 측정점에 대해 동시에 측정하여야 하나, 이 경우에는 측정에 필요한 센서 및 주파수분석기의 채널수가 측정점의 개수만큼 필요하게 되어 측정시스템이 커지고 가격도 고가가 되어 측정이 곤란하다.

여기서는 이를 보완하기 위하여 회전수를 고정하고 측정의 시작기준을 회전 속도계로 기준을 잡고, 두 개의 가속도계를 이용하여 하나의 가속도계는 기준, 다른 하나의 가속도계는 응답으로 하여 ODS에 필요한 ODS 스펙트럼을 측정하였다.

ODS 스펙트럼은 각 가속도계의 오토-스펙트럼의 진폭과 크로스-스펙트럼의 위상을 가지는 스펙트럼으로 위상 스펙트럼이라고도 한다.

하지만 이 방법은 동시에 측정해야하는 조건을 회전 속도계를 이용하여 동시 측정에 상응하는 결과를 얻어내기 때문에 측정하는 동안 진동의 변화가 없어야 한다. 진동의 변화가 있으면 측정점간에 진동진폭과 위상이 변하기 때문에 측정결과가 무의미하게 된다. 즉 진동의 변화란 운전속도의 변화나, 이상진동의 발생이 없어야 한다는 것을 의미한다.

2X 운전속도에서 구조물의 진동모드를 보기 위해 ODS 실험은 ME'scope ODS 소프트웨어를 사용하여 펌프 1번에 대해서만 수행하였다.

ODS를 구하기 위해서는 각 측정위치에서의 진폭과 위상 그리고 Fig. 10과 같이 기계구조물의 모델링을 필요로 한다. 펌프 1에 대해 250점에서 모터를 회전수 872 rpm으로 고정하여 데이터를 취득하

였다. 레이저 회전 속도계를 트리거(Trigger)로 이용하여 위상정보를 수집하였다.

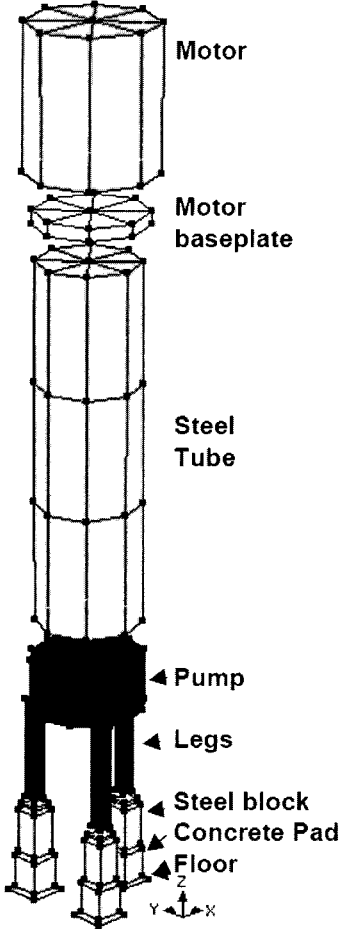


Fig. 10 ODS model

주파수 분석기에서 측정한 ODS 스펙트럼 데이터를 ME'scope ODS 소프트웨어로 보내 ODS를 해석한 결과를 Fig. 11에 보인다. ODS은 각 측정점에서의 진폭과 측정점간의 위상만으로 변형모양을 보여주기 때문에 위상정보가 매우 중요하게 된다.

Fig. 11을 보면 강제로 된 튜브부가 굽힘이 발생하고 있는 것을 알 수가 있다. 이는 구조물에서 튜브의 굽힘 고유진동수와 2X 운전속도의 기진력이 공진하고 있음을 보여준다.

또한 튜브 펌프 기초의 다리부들 중의 하나에 풀려 있는 것처럼 보인다. 풀림은 볼트 조임의 풀림

등, 고정부가 느슨해진 것을 의미한다. 이러한 풀림 현상을 파악하는 것은 ODS를 활용하는 것이 효과적이다.

이를 좀 더 자세히 알아보기 위해 기초의 다리부에 대해서만 모델링 후 ODS 분석을 하였다.(Fig. 12)

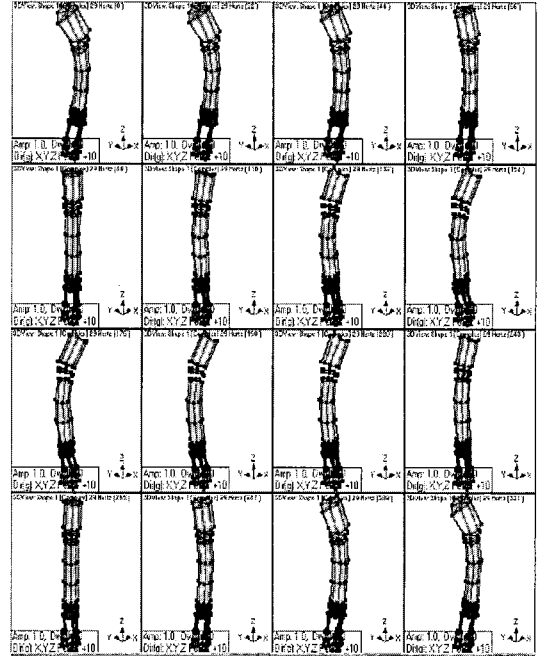


Fig. 11 ODS animation for 29Hz

다리부에 대한 ODS 실험결과 2X 운전속도에서 굽힘 모드가 나타난다. Cast steel block과 Concrete pad 사이에 Fig. 11과 같이 상대운동이 발견되고, 하나의 다리가 다른 다리에 비해 큰 운동을 하고 있다. 풀림현상이 펌프 구조물의 고유진동수를 낮게 하여 2X 운전속도의 영역으로 고유진동수를 바꿔게 한 것으로 생각하여, 볼트로 콘크리트와 심 블록(Shim block)을 고정 후 진동을 확인하였으나, 진동에는 거의 영향이 없어 튜브의 공진에 의한 굽힘이 주된 문제라는 것을 파악하였다.

ODS의 결과는 기계의 모션을 보여주기 때문에 측정렬불량 또는 풀림현상과 같은 기계결함을 파악하는데 큰 도움이 된다. ODS를 이용하면 다음과 같은 부분을 확인할 수 있다.

- 전체 모션의 관찰: 기계요소 간에 상대 운동이 없이 기계가 구동되고 있는지, 진동전달부에 지지된 기계와 바닥간의 상대운동이 있는지.
- 베어링하우징과 축의 상대운동 관찰 (축의 진동 데이터를 취득해야 한다): 축정렬불량 확인 가능.
- 볼트와 용접연결부 사이의 상대운동과 위상 관찰 : 풀림을 확인. 풀림 문제는 다른 주파수에서 비슷한 모션을 보임.
- 기계 베이스의 비틀림 관찰 : 비틀림 굽힘 모드 또는 구조적 취약부를 확인 가능
- 구조 요소의 굽힘 관찰 : 공진의 확인 (주의 - ODS가 공진임을 입증하지 않음.)
- 기계의 다리(Foot) 또는 기초의 부분 모션 관찰 : 연약 다리 확인 가능.

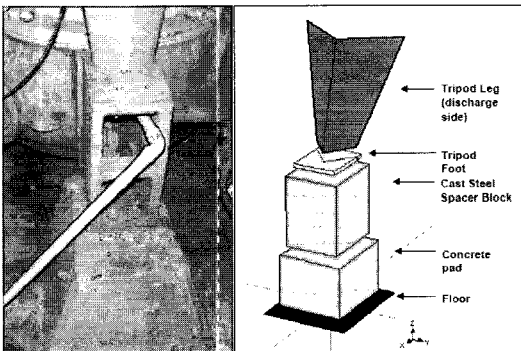


Fig. 12 Picture of pump foot & OSD model

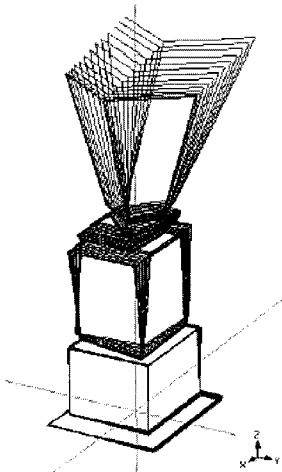


Fig. 13 ODS animation of discharge side leg

공진문제는 모달실험과 요한요소해석으로 해를 구하는 것을 요구하기 때문에 종종 해결하기가 매우 어렵다. 현장에서 매우 간단하게 질량과 강성을 추가하여 고유진동수를 변경해 보면, 공진을 피하기 위해 어느 정도 변경을 하여야 하는지 정성적인 생각을 얻을 수 있다.

구조물이나 기계의 윗부분에 모래주머니 등을 추가하여 질량을 변경하거나, 쇠 또는 나무 막대로 기계와 고정된 벽 사이에 추가하여 강성을 변경해 볼 수 있다.

Fig. 14와 같이 펌프 1번에 대해 8" x 8" 나무막대로 건물의 벽과 굽힘이 가장 큰 튜브의 중간부 사이에 고정하여 Coast-down 실험을 수행하였다. 이 결과를 Fig. 15에 보인다.

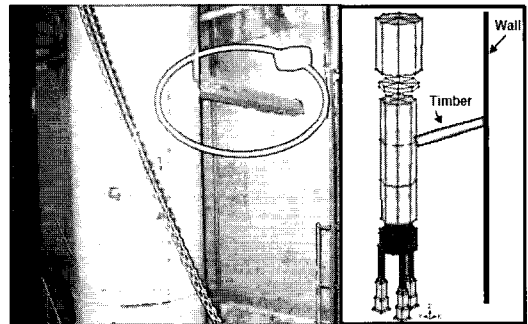


Fig. 14 Picture 8" x 8" timber used stiffen tube(left) and ODS model

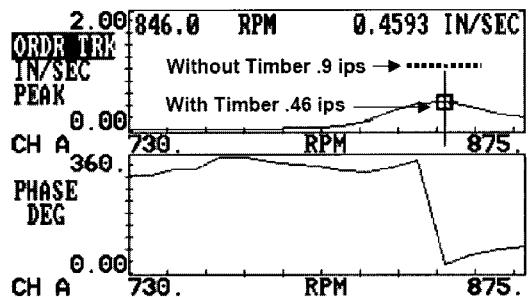


Fig. 15 2x Coast-down bode plot of #1 pump with a 8" x 8" timber wedged between the building wall and the pump tube

구조물의 고유진동수는 크게 변하지 않는 것으로 나타났으나, 공진의 응답은 0.89 IPS 에서 0.45 IPS 로 약 절반 정도로 줄어들었다. 하지만 이 방법

은 현장에서의 임시적인 대책일 뿐, 공진문제를 완전히 해결하기 위해서는 구조변경을 하여야 한다.

2.7 ODS, Coast-down 과 공진 실험의 결론

ODS 는 2X 운전속도에서 구조물이 굽힘 운동을 한다는 것을 보여 준다. 29 Hz의 공진이 원인이 되는 기진력은 측정렬불량 또는 베인 통과 주파수로 부터의 2X 운전속도 진동이다. 2X 진동을 줄이기 위해서는 펌프의 운전속도를 바꾸어야 하나 불가능하다. 구조물의 질량과 강성을 변경하면 모든 고유진동수가 바뀌게 된다. 공진을 피하기 위해서는 29 Hz의 고유진동수를 2X 운전속도 밖으로 옮겨야 한다. 이를 위해 모달해석과 유한요소해석을 이용한다.

2.8 모달실험

모달실험은 주파수응답함수(FRF) 데이터로 실험모드해석을 하는 방법이다. 실험방법은 공진실험 g 과 동일하나, 진동모드를 얻기 위해서는 구조물을 격자로 나눠 측정점의 갯수를 충분하게 정해 주어야 한다.

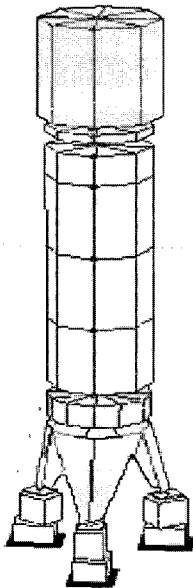


Fig. 16 Modal model

주파수 분석기를 이용하여 모든 측정점에 대해 주파수응답함수를 측정하고 그 결과를 ME'scope 모달 소프트웨어로 보내 해석을 수행한다. ME'scope 모달 소프트웨어는 상용화된 실험모드 해석 소프트웨어로 Curve fitting에 의해 대상체의 모달 파라미터(고유진동수, 감쇠비, 모드벡터)를 계산해 주는 프로그램입니다. 모달 파라미터를 구하면, 각 고유진동수에서의 모달질량, 모달강성, 모달감쇠를 알 수 있기 때문에 동적구조변경 소프트웨어(Structure Dynamic Modification software - ME'scope SDM software)를 이용하면 구조변경 후의 진동특성을 예측할 수 있다.

펌프 1번에 대한 모달해석은 주파수응답함수를 194점에 대해 측정하였다. 12 파운드 무게의 해머로 모터의 상단부에서(수평(X)방향)으로 가진하고, 가속도계로 0-100Hz 에서 응답을 측정하였다. 194개의 주파수응답함수 F를 검토한 결과를 Table 2에 보인다. Fig. 18에 문제가 되고 있는 29.8 Hz의 진동모드를 보인다. 872 rpm에서의 ODS와 유사하게 나타나며, 이는 펌프의 진동이 공진문제라는 것을 확인시켜 준다.

Table 2. Pump #1 modal frequencies

Frequency (Hz)	Mode Description
25	First bending mode
25	First torsional mode-not sufficiently excited in the modal survey
29.81	Second bending mode, Shaft/Support Pipe in Phase
39.3/39.9	Second bending mode, Shaft/Support Pipe out of Phase
51.4	Vertical mode
56.3	Third bending mode

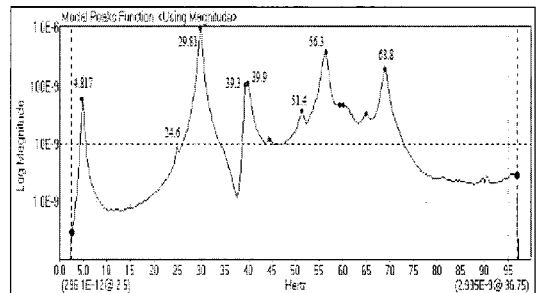


Fig. 17 Modal peaks plot is a summation of all FRF measurements

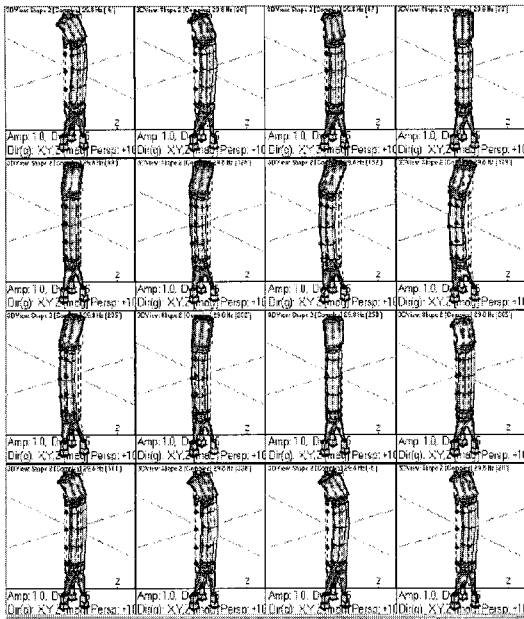


Fig. 18 Frames view of 29.8 Hz natural frequency

이러한 공간문제를 해결하기 위해서는, 주파수응답 함수를 Curve fitting하여 모달 파라미터를 얻고, ME'scope SDM 소프트웨어를 이용하여 구조변경을 하거나, 유한요소해석 소프트웨어를 이용하여 변경후의 예측계산을 수행한다.

ME'scope SDM은 모달해석으로부터 얻어진 결과를 사용하기 때문에 별도의 모델링이 필요없고, 측정점의 갯수만큼의 자유도에 부가요소의 자유도만으로 계산하기 때문에 계산 시간이 유한요소해석보다 빠르고, 정확하다. 하지만 ME'scope SDM은 유한요소의 추가만 가능하고 자체 모델의 변경은 불가능하여, 여기서는 유한요소해석으로 구조변경시의 해석을 수행하였다.

2.9 유한요소해석 (FEA)

강제진동으로부터 고유진동수를 옮기기 위한 구조변경을 위해 펌프 1에 대해 유한요소해석을 MSC/NASTRAN을 이용하여 모델링과 해석을 수행하였다. 유한요소모델은 Fig. 19와 같이 6575개의 Beam, Sell, Sold 요소로 이루어져 있다.(Fig.19)

유한요소해석 결과, 펌프 1의 고유진동수에 대해 실험과 비교한 값을 Table 3에 보인다. 40 Hz 이하에서는 매우 근사하게 예측되었음을 확인할 수 있고, 이를 바탕으로 구조변경시의 고유진동수 등을 예측해보도록 한다.

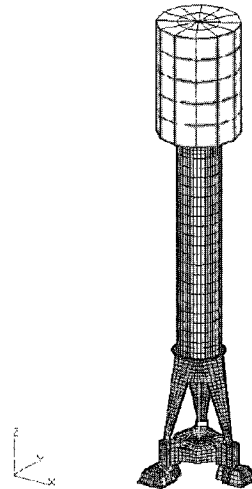


Fig. 19 FEM Model

Table 3. Correlation of measured and predicted natural frequencies of pump 1

Mode Shape Description	Measured Value (Hz)	Analytical Prediction (Hz)
1 <sup>st</sup> Bending	4.8	4.4
1 <sup>st</sup> Bending		4.4
Torsion	24-25	23.5
2nd Bending, Shaft/Support Pipe in Phase	29.8	29.2
2nd Bending, Shaft/Support Pipe in Phase		29.5
2nd Bending, Shaft/Support Pipe out of Phase	39.2	41.8
2nd Bending, Shaft/Support Pipe out of Phase	39.9	42.2
Vertical Extension	51.4	60.3

29Hz의 고유진동수를 2X 운전속도보다 높게 올리기 위해 현자의 구조기술자는 강성의 추가를 추천했다. 강성의 추가는 튜브의 길이를 줄이거나, 두께를 증가시키거나, 다른 모터를 사용하거나, 바닥 부착을 개선하거나, 건물과 튜브사이에 브레이싱 (Bracing) 설치가 가능하다. 그러나 현실적으로는 펌프 튜브 길이를 줄이는 것만 가능하며, Table 4에서와 같이 튜브 길이를 48, 62, 72 인치로 변경할



경우에 대해 유한요소해석을 재 수행하였다.

해석결과 48 인치로 변경하면 29.2 Hz의 고유진동수를 37.1 Hz로 이동 가능하여, 튜브를 48 인치로 길이를 변경하여 공진문제를 해결하였다. Fig. 20을 보면 굽힘 고유진동수가 2X 운전속도구간보다 많이 떨어져 있어 공진이 발생하지 않음을 알 수 있다.

Table 4. Effect of support pipe length on the predicted natural frequencies of pump 1

Mode Shape Description	Baseline (Hz)	T <sub>y</sub> =0.75" (Hz)	Length Reductions		
			48" (Hz)	62" (Hz)	72" (Hz)
1st Bending	4.4	4.8	5.4	5.8	6.2
1st Bending	4.4	4.9	5.4	5.9	6.3
Torsion	23.5	25.5	24.6	25.1	25.5
2nd Bending, Shaft/Support Pipe in Phase	29.2	30.0	37.1	39.9	41.8
2nd Bending, Shaft/Support Pipe in Phase	29.5	30.2	37.3	40.2	42.2
2nd Bending, Shaft/Support Pipe out of Phase	41.8	39.2	49.6	54.1	58.5
2nd Bending, Shaft/Support Pipe out of Phase	42.2	39.6	49.8	54.2	58.6
Vertical Extension	60.3	64.9	64.4	66.0	67.3

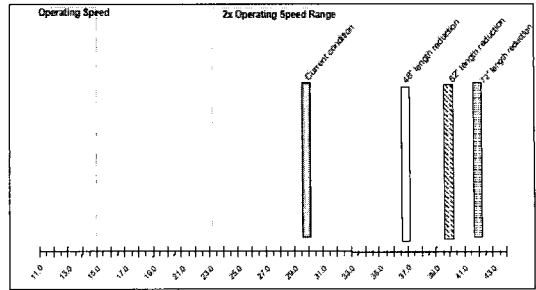


Fig. 20 Pump 1 second bending mode frequency shift with pipe length reduction

### 3. 결 론

공진실험과 ODS 실험은 진동문제를 해석하고 해결하는데 매우 유용한 방법이다. 공진이 발생했을 경우, 모든 고유진동수와 진동모드를 확인하는 데에는 모달실험이 필요하다. 진동모드를 알지 못하면 어떻게 공진을 해결할 것인지를 알 수 없다. 공진을 해결하기 위한 구조변경시 가장 좋은 방법은 ME'scope SDM 또는 유한요소해석 소프트웨어를 이용한 구조변경해석이다.