

## 수직펌프의 진동 연구

김 연 환\*, 김 회 수, 이 준 신, 배 용 채, 이 현

### A Study on Vibration of Vertical Pump

Yeon-Whan Kim\*, Hee-Soo Kim, Jun-Shin Lee, Yong-Chae Bae, Hyun Lee

#### Abstract

The natural frequencies of the support system for a vertical pump, which are a key factor affecting the dynamic stability of the pump support system, are not easily predictable with analytical approaches only, due to the difficulties estimating the effective stiffness of the connections between the concrete base, the motor structure, the discharge elbow and the suction column of the pump system. This paper presents the results of a finite element analysis and an experimental study performed to identify and modify the characteristics of the pumping structure. The difficulties of modelling the effective stiffness were overcome by utilizing experimental results in the analysis. Based on analytical and experimental results, appropriate structural modifications are taken to reduce excessive vibration of the pump system to a satisfactory level. .

#### 1. 서 론

대형 수직 펌프는 발전소에서 열낙차의 극대화를 위하여 터빈의 배출 증기를 응축수로 변환시키는 복수기의 튜브 측에 해수(냉각수)를 공급하거나 원자로의 냉각재 펌프의 온도 조절용 해수를 공급한다.

수직 펌프는 설치 면적이 적고 대용량 저 수위용에 적합하도록 설계되기 때문에 몇 가지 중요한 동력학적 문제를 가지고 있다. 펌프의 지상 구조물은 전동기가 선단에 설치된 길고 유연한 외팔보 구조이어서 모터 자체에 주는 작은 량의 불균형력에도 매우 쉽게 진동 가진원으로 작용될 수 있다. 지하의 양수관도 길고 유연한 외팔보 거동의 고유진동 특성에 의해 문제를 야기 할 수 있으나 접근이 용이하지 않다. 또한, 수직펌프는 펌프, 전동기, 전동기 지지대, 양수관, 그리고 토출관의 부분들을 각각 설계 제작 후 현장에서 조립되는 종합적 구성체이기 때문에 전체의 동력학적 특성을 정확히 예측하기가 어렵고, 그 제한적 특성으로 쉽게 펌프의 회전 주파수 근처에 있음으로써 진동 진폭이 진동의 허용치를

벗어나는 문제가 발생한다. 수직펌프의 상부는 무거운 전동기를 외팔보 형태로 지지하는 구조로서, 고정된 지지 구조물의 강성에 비하여 펌프의 질량이 상대적으로 크기 때문에 토출방향 및 그 직각방향의 1 차 고유진동수의 위치가 각각 10 Hz 이하에 위치하는 동력학적 제한성을 갖으며 펌프의 운전주파수는 공진점 아래 또는 위쪽에 오도록 설계하는 것이 일반적이다. 펌프의 정상 운전시 자체의 회전력과 해수의 불순 성분 등이 회전날개 부위에 영향을 줌으로써 발생하는 마모 및 부식에 의한 불평형 특성의 발생, 베어링의 간극변화 및 쉘내를 흐르는 유동 특성 등은 펌프의 주요한 외부 가진원이 된다.

따라서, 일반적으로 펌프의 정지 부분 및 회전 부분의 고유진동 특성이 자체의 가진 주파수와 20% 이상 떨어지도록 설계한다. 회전 부위의 고유 진동수는 예측이 용이하나 고정 부위의 고유 특성은 기초와 연결 부위의 볼트 조임 상태에 따른 강성 변화 등의 영향이 크기 때문에 예측이 매우 힘들다. 따라서, 수직 펌프의 고유 진동수를 결정하는 주요 부위는 펌프 지지대와 기초의 고정 부분이며 이 부분의 강성을 예측하는 것이 수직 펌프 구조물 진동 문제의 가장 중요한 변수이다.

\* 한전 전력연구원 기계공학연구소

본 연구는 화력발전소의 해수 순환수 펌프의 진동 문제를 해결하고자 수행되었으며, 펌프의 진동이 상부 지지구조물과의 공진특성에 의하여 야기되는 진동문제임을 확인하고 펌프의 기초와 전동기 지지대의 동특성의 해석에 주안점을 두고 수행하였다. 전동기 지지대는 창문 방향에 따라 두 가지 형태를 갖는데 그 진자는 창문이 토출 방향에 있으며, 후자는 토출의 직각 방향으로 설치되어 있다. 설치 방향에 따라서 모달 변수들이 서로 다르게 나타난다. 본 연구는 양자의 특성을 비교 후, 후자의 펌프 형태를 대상으로 구조 변경을 수행하였다. 또한, 모터 질량에 의한 외팔보 거동 특성을 확인하고자 충격 햄머링 응답 시험을 수행하여 대상 펌프의 진동문제의 원인을 규명하고, 주파수응답시험 및 유한요소법 (finite element method) 을 사용하여 펌프 구조물의 기초 강성을 추정하며 전동기 지지대의 진동거동을 해석, 및 지지대의 구조 변경후의 진동 특성을 예측하므로써 진동 문제를 해결한다.

## 2. 대상 펌프의 진동문제

대상 펌프의 형태는 Fig. 1 과 같이 혼합 유체 펌프 형식으로 용량은 23,100 m<sup>3</sup>/hr, 양정 7.5 m, 회전수 321 rpm 급이다. 700 kw, 14.8 톤의 상부의 전동기는 펌프 내부의 로타와 한 몸체를 이루며, 이것을 지지하는 원통형 구조인 모터 지지대, 토출관, 및 해수를 유입하는 양수관으로 구성된다. 또한 지지부의 강성을 증대시키고 비틀림에 의한 좌굴 특성을 방지하고자 그림과 같은 수직 및 수평 리브들이 구조물에 용접되어 있다. 모터 지지대에는 보수 및 점검을 위해 서론에서 언급한 것처럼 창문이 토출방향 (Parallel Window Type) 및 토출직각방향 (Transverse window Type) 의 두 형태로 설치되어 현장에서 운영되고 있다.

수직 펌프의 경우 진동의 제한치는 양수관을 지지하는 기초의 용력에 근거하여 모터 상단의 변위로 산정한다. 최대 한계치인 180  $\mu\text{m}$ , p-p 를 초과되어 펌프의 운전 상태가 악화되면 충분한 기능을 발휘할 수 없게 되며 250  $\mu\text{m}$ , p-p 를 벗어나면 기초부위에 손상이 발생할 수 있다. 최대 진동치 산정식은 식(1) 과 같다.

$$d_{\max} = \sqrt{\frac{15000}{\text{rpm}} \times 25.4^2} \quad \mu\text{m}, \text{ p-p} \quad (1)$$

일반적으로 수직 펌프의 진동 권고치는 120  $\mu\text{m}$ , p-p 이내 이어야 하나, 대상펌프의 전동기 상부 진동치는 펌프 진동의 최대 한계치인 180  $\mu\text{m}$ , p-p 값을 초과하여, Fig 4-(a)의 토출관쪽에 창문을 갖는 모터 지지대 펌프의 경우에는 691 $\mu\text{m}$ , p-p이고 Fig 4-(b)의 토출관의 직각 방향에 창문이 있는 경우에는 222  $\mu\text{m}$ , p-p를 나타내었다.

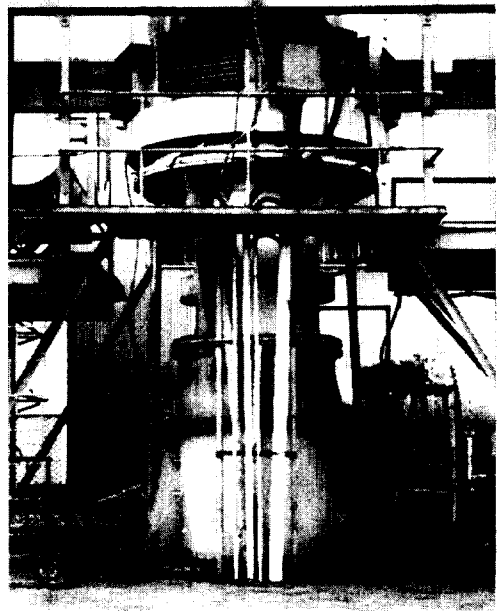


Fig. 1. Original Pump Type

이러한 과도 진동의 원인으로 가장 우선되는 불평형에 초점을 두고 조사하였으나, 펌프의 날개 부위에서 부식이나 마모에 의한 현상을 발견할 수 없었으며 베어링 부위도 이상적인 상태였다. 회전 부분의 진동은 허용치 이내에서 있었고, 전동기 자체 진동도 공장 시험 결과 30  $\mu\text{m}$ , p-p 이하로 매우 양호하였으나 전동기를 지지대와 체결후의 진동치는 운전 한계치를 넘었으며 정상 상태 스펙트럼중 회전수에 해당하는 5.375 Hz 에서 큰 피크를 나타내었다. 즉, 진동의 주원인이 펌프의 전동기 지지대 및 기초의 강성 특성과 전동기 무게와 만드는 고유특성이 회전주파수 근처에 있음으로써 발생하는 공진 현상일 것으로 예측할 수 있었다.

### 3. 기존펌프의 주파수 응답 시험

펌프 구조물의 공진 현상은 주파수 응답 시험을 통해 확인 될 수 있다. 구조물을 가진 할 수 있는 방법은 충격 햄머링법, 가진기에 의한 스윙 또는 램덤가진법, 그리고 펌프 자체의 기동 및 정지를 하는 방법 등이 있다. 본 시험은 창문방향에 따른 두 형태의 전동기 지지대에 대하여 실시되며 대형 해머를 사용하여 상부 구조를 가진한다. 해머에는 가진력을 측정하기 위한 힘변환기가 부착되어 있으며 가속도 센서를 전동기상부에 설치하고 토출구 방향 및 토출구 직각 방향의 전동기 플랜지 부위를 가진하며 증폭기를 사용하여 증폭된 신호와 가진신호를 계측한다.

Fig. 2 및 Fig. 3 는 전동기 지지대의 창문 방향에 대한 임팩트시험의 주파수 응답 함수 곡선이며, 이를 통해 모달변수를 얻는다. Table 1 및 Table 2 는 기존펌프의 고유진동특성이다. 두 형태 모두 구조물의 각 방향의 1차 고유진동수가 운전주파수인 5.375 Hz에 근처에 있으므로 나타나는 구조적 공진문제를 알 수 있으며, 모드 1 는 토출방향에 대하여, 모드 2 는 토출 직각방향에 대한 거동을 기술한다.

Table 1. Natural Frequencies of Original Pump

Window Type	Mode 1	Mode 2
Parallel window	5.47	5.93
Transverse window	5.375	6.00

Table 2. Damping ratios of Original Pump

Window Type	Mode 1	Mode 2
Parallel Window	0.035 ( 14 )	0.001 ( 500 )
Transverse Window	0.015 ( 33 )	0.017 ( 29 )

※ ( ) : 공진점에서의 증폭계수임.

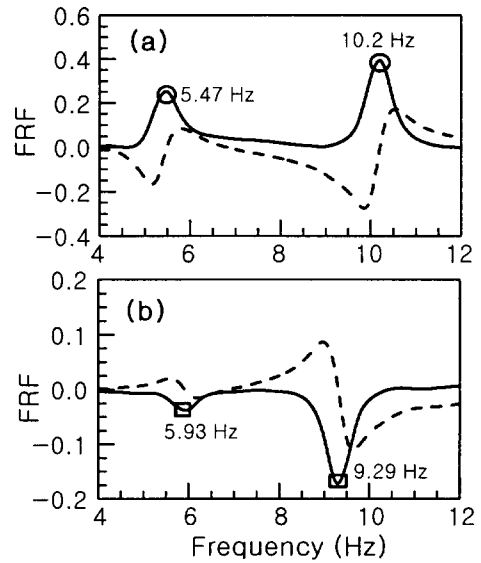


Fig. 2. Frequency Response functions of Parallel Window Type  
(a) Discharge Direction,  
(b) Direction Perpendicular to Discharge

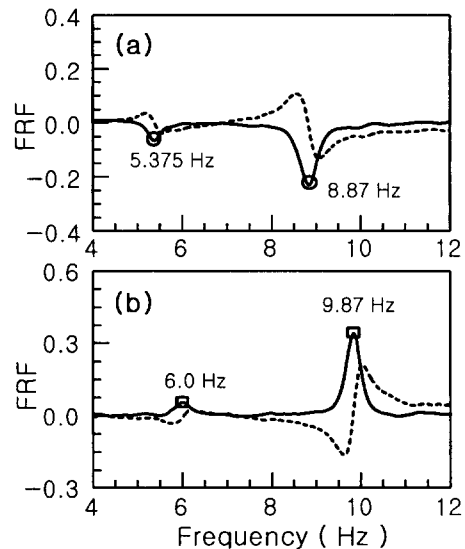


Fig. 3. Frequency Response functions of Transverse window Type,  
(a) Discharge Direction  
(b) Direction Perpendicular to Discharge.

#### 4. 기존 펌프의 진동

Fig.4-(a)의 창문방향이 토출구쪽에 설치된 경우 구조진동은 창문이 없는 방향으로 매우 큰 공진을 나타낸다. 전동기 지지대의 창문효과는 구조물의 각 방향에 대한 감쇄율에 영향을 준다. 토출구쪽에 있는 창문효과는 토출구의 감쇄효과와 더불어 그 방향의 감쇄율을 배가시키며 반대로 창문이 없는 방향은 감쇄특성이 거의 사라지는 경향을 보인다.

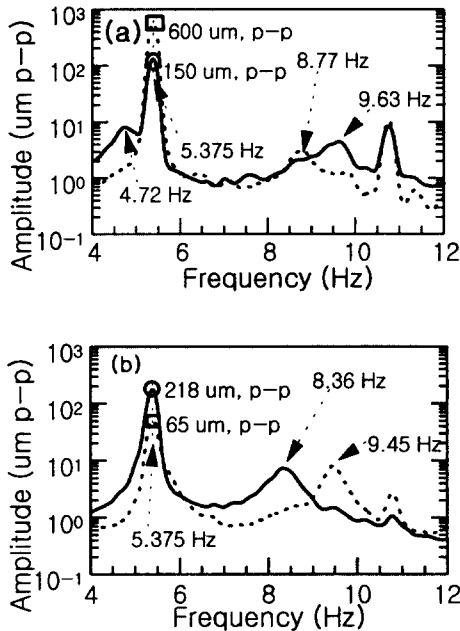


Fig. 4. Comparison of Vibrations at Normal Operation ;  
 (a) Parallel Window Type,  
 (b) Transverse Window Type.

Fig. 4-(b)의 토출구 직각방향으로 창문이 있는 경우는 양방향에 거의 비슷한 감쇄율을 가져 공진에 대하여 전자보다는 안정된 응답을 나타낸다. 이를 수치적으로 표현하기 위하여 식 (2)를 적용하면 Table 2의 ( )의 결과를 얻는다. 단, 이 값은 유체의 감쇄효과를 고려치 않은 수치이다.

또한, Fig. 4에서 Fig. 2 및 Fig. 3과 비교시 발견할 수 있는 또 하나의 중요한 사실은 유체에 의한 부가 질량효과이다. 양쪽 모두에서 약 0.5 Hz의 부가질량효과를 확인할 수 있다. 그 특성에 의하여 기

동시에는 변화된 토출방향의 의 공진특성의 영향을 받으며, 정상운전시에는 변화된 토출직각방향의 영향을 주로 받고 있음을 알 수 있다. 따라서, 증폭계수가 가장 큰 창문이 토출구쪽에 있는 펌프의 토출구 직각방향 진동이 가장 크게 증폭되고 있음을 알 수 있다.

창문의 감쇄특성과 부가질량에 의한 공진점의 이동효과를 동시에 고려하면 창문이 토출구의 직각방향에 있는 구조가 더 바람직하다.

$$R = \frac{1}{2\zeta} \quad (2)$$

여기서,  $R$  = 공진점에서의 증폭 계수  
 $\zeta$  = 구조물의 감쇄율

#### 5. 유한요소 해석

대상 펌프는 직경에 비하여 두께가 50 대 1 이하인 원통구조 및 평면으로 구성되어 있다. 상용프로그램인 ANSYS를 사용하여 원통은 얇은 셸구조로서 평판요소 (Shell63)로 모델링하고, 창문, 리브, 토출관 등은 재분할하여 형상비, 연결성 및 선형성을 확보하며, 전동기 무게는 집중질량으로 환산하여 전동기의 무게중심에 작용하도록 그 점과 모터의 플랜지를 강체인 트러스트 (SPAR8)로 가정하여 모델링하였다. 기초의 수평방향 변위는 구속시키고 수직기초 및 상부구조의 각 플랜지 연결 특성에 의한 전체 지지강성은 14 번 스프링요소를 사용한다.

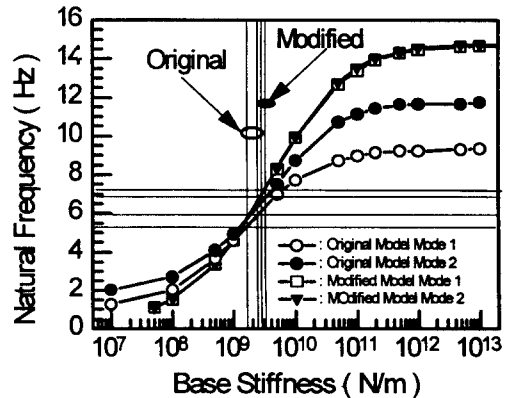


Fig. 5. Shifted Natural Frequencies by Support Stiffness

지지강성에 따른 고유진동수는 Fig. 5 과 같이 기초 및 상부지지구조물의 지지강성의 변화에 의하여 민감하게 영향을 받음을 알 수 있다. 충격 응답 시험을 근거로 볼 때 상부구조의 지지강성은 기존펌프 중 토출방향의 직각방향에 참문을 갖는 펌프에서 토출방향의 경우  $1.2 \times 10^9$  N/m, 토출직각방향의 경우는  $2.1 \times 10^9$  N/m, 따라서 지지강성을 견고히 하는 것이 가장 중요한 변수임을 알 수 있다.

## 6. 새 모델의 선정

상부구조의 지지강성 중 기초에 의한 강성의 변화보다는 전동기 지지대, 토출곡관 등의 연결 특성 및 구조 변화가 용이한 결과를 줄 수 있음을 예상할 수 있다.

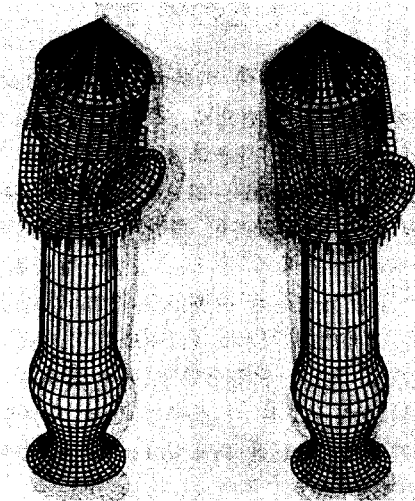


Fig. 6 Vibration Behavior of Modified Pump

따라서, 본 연구에서는 전동기 지지대 및 토출곡관에 대한 재설계를 시도하여 양방향의 각 1차 고유진동 거동이 운전주파수에서 30 % 이상 떨어지도록 상부 지지구조를 재 설계한다. 강성을 증가시키는 방법은 원통의 관성 모멘트를 증가시키면서 질량 증가 효과가 최소화 되도록 해야한다. 지지대는 전동기의 직경에 맞추어 증가시켰으며, 여기에 링리브 및 수직 리브에 의하여 강성을 보조하면서 좌굴특성을 피하도록 설계한다. 이를 위하여 각 변수의 효과를 해석한 결과 링리브 갯수, 리브의 두께, 및 플랜지의 두께가 증가에 따라 구조 강성이 증가함을 보

였다. 그중에서도 리브가 기여하는 정도가 큼을 나타내어 경제성 및 재료구매 제한성을 고려하여 재설계에 의하여 고유진동수는 30% 이상의 강성 증가를 예상할 수 있다. Fig. 6은 재설계된 상부구조물의 토출방향 및 그 직각방향의 진동거동을 보여준다.

## 7. 구조 변경후의 동특성

Fig. 7 는 새로 제작된 모델의 진동특성을 보여주며, Table 3 는 구조 변경후의 고유진동수이다. 상부 구조물을 재설계후 현장에 설치시의 토출방향 및 토출직각방향의 각 1차 고유진동수가 운전주파수인 5.38 Hz에 대하여 토출방향에 대하여는 37 % 이상 떨어졌으며, 토출직각방향 모드는 29 % 이상 떨어지는 결과를 얻었으며, 감쇄율도 기존 펌프보다 2 배 이상 증가하였으며, 부가질량에 의한 영향도 기존펌프보다 상당히 감소하였다. 따라서, 정상상태 운전시의 최대 진동은 30  $\mu$ m 이내로 매우 양호한 결과를 주었다. 충격 응답 시험을 근거로 볼 때 Fig. 5의 새모델에 대한 상부구조의 지지강성은 토출직각방향은  $2.9 \times 10^9$  N/m 으로 기존치 보다 향상되었으며 특히 토출구방향의 강성이  $3.1 \times 10^9$  N/m로 두드러지게 향상되었다.

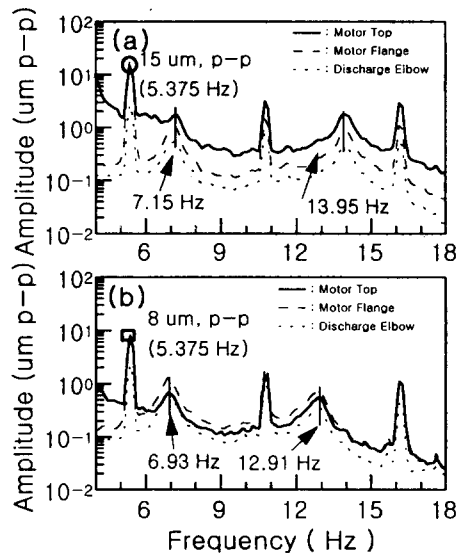


Fig. 7. Vibration at Normal Operation  
(a) Discharge Direction  
(b) Transverse to Discharge

Table 3. Modal Parameter ratio of Modified Type

Parameter	Mode 1	Mode 2
Natural Frequency	7.39 (7.15)	6.98 (6.93)
Damping ratio	0.03	0.03

※( ) : 부가질량에 의하여 변경된 고유진동수임.

## 8. 결 론

- 본 수직펌프의 경우 전동기 지지대의 창문의 위치는 구조물의 각 방향 감쇄율에 영향을 줄 수 있으며 경우에 따라 불안정한 거동의 원인이 될 수 있다.

- 기존 펌프와 같이 구조강성이 약할 때 대용량의 유체 유동에 의한 부가질량 효과는 펌프설계 및 운전 전에 큰 장애요소가 될 수 있으므로 정확한 예측이 필요하다.

- 회전 부위의 고유 진동수는 예측이 용이하나 상부구조의 강성은 기초, 모터 지지대 및 토출곡관 등의 연결된 지지강성의 영향이 매우 크기 때문에 예측이 어렵다.

- 공진을 피하는 가장 중요한 변수는 지지강성의 설계에 있다. 새모델은 상부구조의 지지강성이 증가 되도록 재설계하여 구조물의 양방향 1차 고유 진동수를 운전 주파수인 5.375 Hz 보다 토출방향에 서는 37 % 이상, 그리고 토출 직각방향 에서는 29 % 이상 떨어지는 결과를 얻었다. 또한 구조물의 감쇄계수도 기존모델보다 배이상 증대되어 매우 안정된 결과를 주었다.

## 참고문헌

- (1) 양보석, 김원철, 1989. "수직펌프의 동적 응답 해석", 대한기계학회 논문집 제13권 제 3호, PP 362~372.
- (2) 최원호, 양보석, 1994, "대형입형펌프의 진동문제", 한국소음진동학회 춘계학술대회논문집, PP 148~153.
- (3) 최원호, 양보석, 1997, "산업용 원심펌프의 공진 문제와 정확한 진동측정법", 유체기계연구개발협의회 강연회 논문집, PP 166~172.
- (4) J. E. Corley, 1980, "Vibrational Problems of Large Vertical Pumps and Motors", Proceedings

of 9th Turbomachinery Symposium, PP 75~82.

(5) Donald R. Smith, Glenn M. Woodward, 1986, "Vibration Analysys of Verticl Pumps", Proceedings 15th Turbomachinery Symposium, PP 61~68.

(6) R. E. Comman, 1986, "Analytical And Experimental Techniques for Solving Pump Structural Resonance Problems", Proceedings of The 3th International Pump Symposium, PP 27~32.

(7) Francis S. Tse, Ivan E. Morse, Rolland T. Hinkle, 1978, "Mechanical Vibrations Theory and Applications second Edition", Allyn and Bacon, Inc., ISBN 0-205-06670-4, PP 38~40.