

발전소용 입축펌프의 내진해석

최수용*, 박철희*, 홍성철**, 박용석**
(정희원) (정희원) (정희원)

Seismic Analysis of Vertical Pump in Power Plant

(Soo-Yong Choi, Chol-Hui Pak, Sung-Chul Hong, Yong-Suk Park)

1. 서론

현대 산업사회에서 발전소는 중요한 시설물이다. 특히 원자력발전소는 지진과 같은 천재지변시 매우 위험하기 때문에 내진설계가 필수적으로 요구되어진다. [1] 최근 국내 원자력발전소의 증가와 1986년 이후 만들어진 내진관련 법규에 따라 내진설계가 보편화 되어가고 있다. 본연구에서는 발전소에서 쓰이는 입축펌프를 해석대상기종으로하여 구조해석과 내진해석을 수행하였다.

입축펌프는 큰질량을 가진 모터가 펌프의 윗부분에 위치하고 있어 진동문제가 야기되는 기종이다. 펌프의 고유진동수는 기초부의 강성과 수조의 내수위에 따라 변하며, 펌프의 축계의 진동수에 비하여 구조계의 진동수가 운전회전수에 가깝기때문에 구조계의 진동이 문제시 된다.

해석에 있어서 펌프는 단면이 변하는 Euler Beam으로 보고 유한요소법을 사용하여 모델링하였고, 물의 저항에 의한 부가질량을 고려하였다. [10] 내진해석은 응답스펙트럼법으로 수행하였으며 GRS는 Housner가 0.2g에 대하여 제작한 것을 OBE 조건 (0.12 g)으로 Scaling 하여 사용하였다. [5] 각 모드에 대한 합성방법은 SRSS 법을 적용하였다. 또한 응답스펙트럼법과 시간이력해석의 결과를 비교하였으며, 시간이력해석에서, 수치해석방법으로는 Newmark 법을 적용하였다. 지진자료는, 1940년, California 에서 발생한 Elcentro 지진자료를 이용하였다. [6]

연구수행과정에서 기초강성계수와 수조내 물의 수위를 주된 인자로하여 이들의 값에 따라 변하는 고유진동수를 고찰하고, 지진입력시 예상되는 최대응답을 구하여, 비교분석하였다.

2. 펌프의 구조해석

① 펌프의 모델링

펌프는 파이프 형태로 수직으로 세워져있으며 길이가 15.3m 이고 모터의 질량이 19.5ton 으로 전체질량의 50% 를 초과하는 머리가 무거운 가분수 형태이다. Fig. 1 에서 보는 바와 같이 펌프는 상단부로부터 모터부와 플랜지연결부, Discharge Elbow, 배럴, 임펠러부로 구성되어 있으며, Discharge Elbow 하단부에 원주방향을 따라 12개의 앵커볼트로 고정되어 있다. 내진해석은 수평방향의 지진가속도에 대하여만 고려하였다. 수직방향은 이미 1g 의 중력가속도를 받고 있으며, 일반적으로 수직방향의 지진가속도에 대해서는 수평방향의 70% 정도를 고려한다고한다.

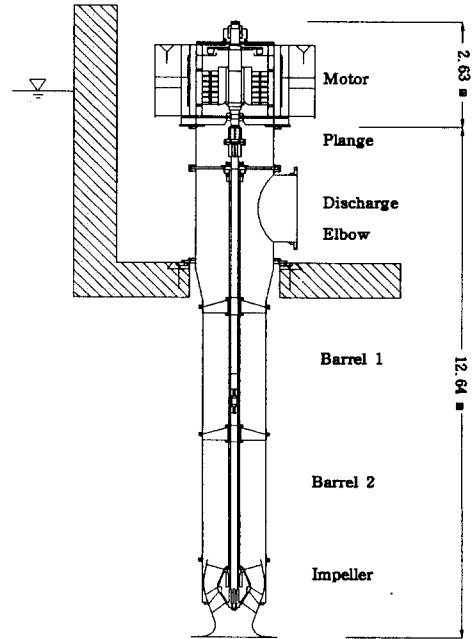


Fig. 1 Schematic Diagram of Seawater Lift Pump

* 인하대학교 기계공학과

** 인하대학교 기계공학과 대학원

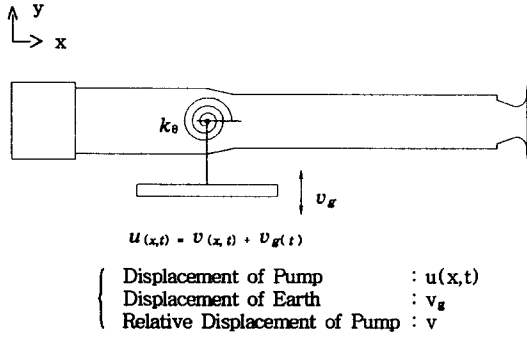


Fig. 2 Pump Model

Fig. 2 에서 보는 바와같이 펌프를 Beam 으로 간주하고, 지지부는 z축 회전운동에 대하여 모멘트를 갖는 비틀림 스프링으로 간주하였으며, 기초부가 흔들리는 기초가진으로 모델링하였다. 운동방정식은

$$\rho A \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} (EI \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}) = -\rho A \frac{\partial^2 v_g}{\partial t^2}$$

와 같이 표현된다. 유한요소모델을 위해 Fig. 3 과 같이 펌프를 45개의 요소로 분할하였다. Discharge Elbow부 아래로는 펌프 내에 물이 차있는 상태로 하였고, 물의 수위에 따라 부가질량을 고려하여 전체계의 질량행렬을 구하였다.

부가질량은 물의 저항력으로부터 산출되며, 저항력은 진동방향의 압력의 차이와 점성력 등에 의해 결정된다. 저항력은 유체를 이상유동이라 가정하고 압력의 차이에 대해서만 고려하였다. 물의 저항력은

$$F_x = - \int_S p \vec{n} dS$$

와 같이 나타나며, 파이프와 같은 원형 단면에 대해

$$F_x = - \rho_w \pi a^2 \dot{v}$$

와 같이 표현될 수 있다. 이것은 펌프의 상대가속도에 펌프의 체적에 해당하는 물의 질량을 곱하여준 양이다. 그러므로 이항을 고려하여, 질량행렬에 물에 의한 부가 질량을 더하여 주었다.

② 감쇠행렬의 고려

비교적 균일한 재료로 이루어진 구조물의 동적해석 시, 구조물의 감쇠행렬은 직교성을 만족하는 것으로 가정하고, Rayleigh 감쇠행렬을 적용하였다.

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K]$$

여기서 α 와 β 값은 1차와 2차 모드에서 구조감쇠계수가 정하여 질매 연립방정식으로 부터 구할수있다.

③ 기초강성계수

기초부는 볼트의 강성과 체결조건에 따라 달라지며, 이를 정확히 평가하기는 매우 어려우므로, 기초강성계수의 변화에 따른 고유진동수 특성을 살펴보았다. 그 결과, Fig. 4 와 같이 기초부의 강성계수가 증가함에 따라 고유진동수가 증가하며, 2차 고유진동수가 1차에 비해 더 많은 증가양상을 보여주고있다.

예상되어지는 기초강성계수는 4.6E10 kgfcm/rad 이며, 펌프의 운전회전수는 390rpm ~ 437rpm 으로 1차와 2차 고유진동수범위를 벗어나고있음을 알 수 있었다.

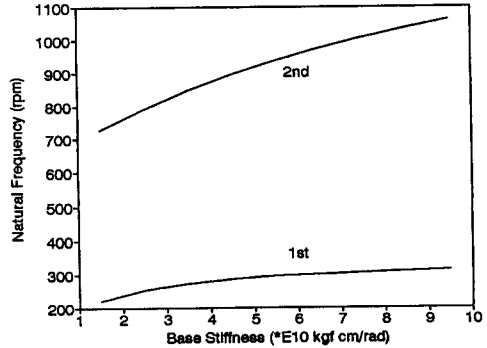


Fig. 4 Fundamental Frequencies of the System w.r.t. Various Base Stiffness

④ 물의 수위에 따른 부가질량의 영향

물의 수위가 달라짐에 따라 변하는 고유진동수가 Fig. 5 와 같으며, 각각에 해당되는 총질량과 유효질량 퍼센트가 Table 1 에 나와있다. 물의 수위가 달라짐에 따라 고유진동수의 변화가 미약하며, 수위가 감소할수록 1차 고유진동수가, 2차 고유진동수에 비하여 더 많이 증가하는 경향을 보였다. 이는 물의 수위에 따른 영향이 2차모드 보다 1차모드에 더 큰 영향을 주고있음을 말해주고있다. 수위가 올라갈수록, 1차 고유진동수는 내려가며 운전회전수와 멀어지므로 수위가 낮은 것에 비해 안정하다는 결과를 얻었다.

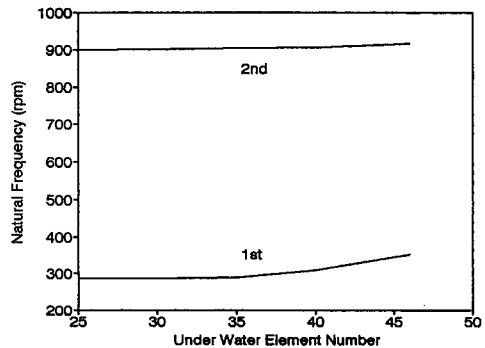


Fig. 5 Natural Frequencies w.r.t. various Water Level

3. 지진 응답 특성

① 응답 스펙트럼법

응답 스펙트럼법은 모드 해석(Modal Analysis)을 통해, 비연계화된 각각의 1 자유도계로부터 지진시 예측되는 최대응답을 GRS(Ground Response Spectrum)로부터 구하고, 각각의 모드를 적절한 방법으로 합성하여 계의 최대응답을 구하는 방법이다. 먼저 모드 해석을 통하여 고유진동수와 고유벡터를 구한 후 만들어진 Modal Matrix 를 곱하여 방정식을 n 개의 1 자유도계로 비연계화한다. 다음 각각에 대하여 GRS 로부터 최대응답을 구하고, 각 모드별 최대응답을 SRSS (Square Root of Sum Square)법으로 합성하여 계의 각 위치에서 최대응답을 구한다. 다자유도계로부터 비연계화된 방정식은

$$\ddot{q}_i + 2\xi_i \omega_i \dot{q}_i + \omega_i^2 q_i = -L_i v_g \quad (i=1,2,3\dots n)$$

이고, 여기서 L_i 는 모드참여계수 (modal participation factor)이다. 실제 계산에 있어서는 계산의 효율성을 증대 시키기 위하여 구조계의 자유도 수 보다 적은 수의 모드를 사용한다. 그러므로 해석에 포함시켜야 할 모드의 갯수를 정하는 적절한 기준이 필요하며, 이를 위하여 유효모드질량(Effective Modal Mass)을 사용하였다. i 번째 모드에 대한 유효모드질량은

$$\text{Effective Modal Mass} = L_i^2$$

이고, 해석에 포함되는 유효모드질량의 합이 전체유효모드질량의 90% 이상이 되도록 모우드 수를 정하는 것이 필요하다.

$$\frac{\sum_{i=1}^n L_i^2}{\sum_{i=1}^m L_i^2} \times 100 (\%) > 90 (\%)$$

본 연구에서는 92 개의 자유도 중 15 개의 자유도만을 고려하였으며, 이는 유효모드질량을 95% 정도를 고려한 것이된다. 각 모드에 대한 유효모드질량과 모드참여계수는 Table 2 에 나와있다. 계의 최대응답은 SRSS 법에 의하여 다음과 같이 구한다.

$$(v)_{\max} = \{ (v)_{(1),\max}^2 + (v)_{(2),\max}^2 + \dots + (v)_{(n),\max}^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$(v)_{(i),\max} = (\psi)^{(i)} L_i S_d(\xi, T) \quad (i=1,2,3\dots 15)$$

$S_d(\xi, T)$ 는 Spectral Displacement 이며, 감쇠율 ξ 와 주기 T 에 의하여 GRS 로부터 구한다. 해석에 사용한 GRS가 Fig. 6 에 나와있고, $(\psi)^{(i)}$ 는 각 모우드의 모드 벡터이며 모우드형상은 Fig. 7 과 같다.

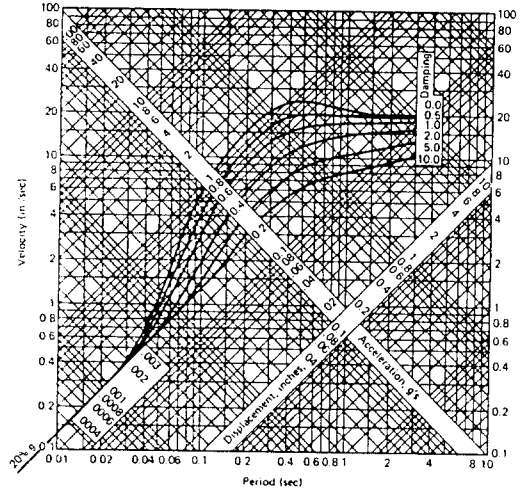


Fig 6 Ground Response Spectrum

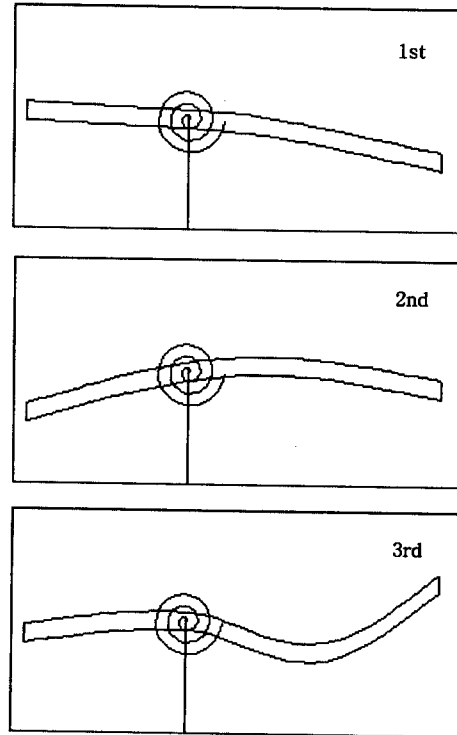


Fig. 7 Modeshapes of the System

그림에서와 같이 1차모드는 펌프 아래쪽이, 2차모드는 펌프의 윗부분이 주로 흔들리는 양상을 보여준다. Fig. 8 에서는 물의 수위가 최대일때, 기초강성계수가 변함에 따른 최대응답을 나타내고 있다. Fig. 8 을 보면 기초강성계수가 증가함에 따라 모터부의 진폭이 임펠러부에 비해 더 많은 감소량을 보여주고있음을 알 수있다. Fig. 9 는 수위의 변화에 따른 진폭을 보여주며 감

성체수는 $4.6E10$ kgf cm/rad 에 대하여 구하였다. 수위가 증가할 수록 임펄서부의 진폭이 모터부에 비해 많이 증가함을 보여주고있다.

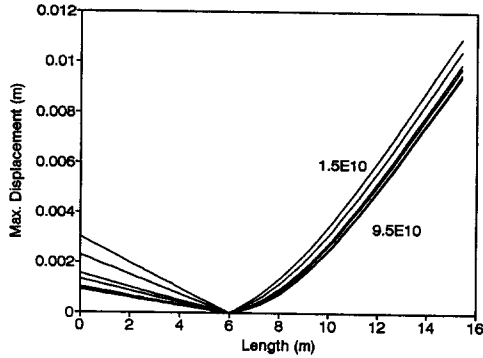


Fig. 8 Maximum Response of the system

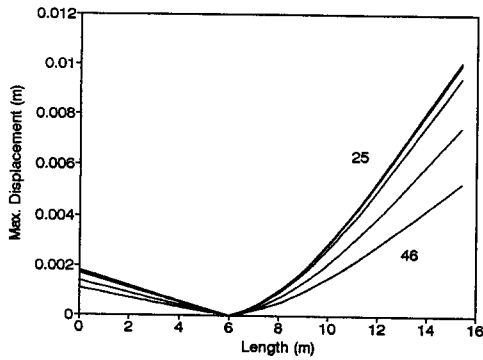


Fig. 9 Maximum Response of the system

② 응답스펙트럼법과 시간이력해석의 비교

시간이력해석은 실제 지진자료나 모의로 작성한 지진자료로부터 구조물의 시간에 따른 변위를 구하는 방법으로, 응답스펙트럼법에 비하면 복잡하고, 비교적 정확한 결과를 얻기위하여는 Time Step 을 작게하여야 하므로 시간이 오래걸린다. 시간이력해석은 모드해석으로부터 구하여진 비연계화된 방정식에 지진입력을 적용하여 시간에 따른 응답을 구한 후 Modal Matrix 를 곱하면 구조물 각 점에서의 시간응답이 구하여진다. 본 연구에서 사용된 지진자료는, 1940 년 5월 18일, 캘리포니아에서 발생한 Elcentro 지진에 대해 남북방향으로 축정한 자료를 이용하였다. 계의 응답을 구하는 데는 Newmark 법을 이용하였다. 시간이력해석을 수행하기 위해 사용한 Elcentro 지진자료는 전체시간을 5초로하였고 시간구간은 0.005초로 하였다. Elcentro 지진의 최대가속도는 0.31g 정도이며, Fig. 10 에서와 같이 주파수 성분으로 보았을 때 대부분이 20Hz 안에 속하여 있음을 알 수 있다. 시간이력해석을 통해 구하여진 최대응답과 응답스펙트럼법을 통해 구하여진결과가 Fig. 11 에 나와있으며, 응답스펙트럼법으로 구한 값에 비해

전체적으로 적은 값을 나타내고 있다. 이것은 시간구간을 0.005 초로 하였을때 5번째 모드부터는 고유진동수가 시간구간에 비해 크므로 Error 가 발생하여 4번째 모드까지 밖에 고려할 수 없는 이유에 기인한다. 보다 나은 결과를 얻기 위하여 전체시간을 길게하고 시간을 짧게할 수 있으나, 해석시간이 길어지고 계산기 기억용량의 한계때문에 그 이상으로 하기 어려웠다.

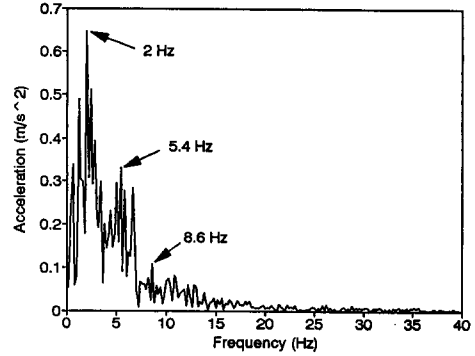


Fig. 10 Frequency Domain of Elcentro Earthquake

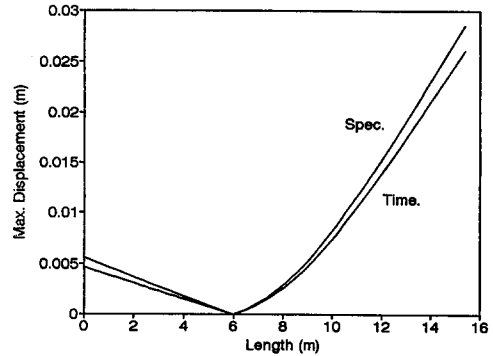


Fig. 11 Comparison of Time Response Analysis and Response Spectrum Analysis

4. 용력해석

펌프에 작용하는 모멘트가 1차와 2차 모우드에 대하여 Fig. 12 에 나와있다. 모드형상으로부터 알수있듯이 1차모드는 펌프의 아래쪽에 모멘트가 크게 작용하고 2차모드는 펌프의 윗쪽에 크게 작용함을 알 수 있다. 최대 용력은 Fig. 13 에 나와있으며, Discharge Elbow 의 지지부 아래쪽에서 65 Mpa 의 가장 큰 용력이 발생함을 보여주고있다. 이 지점은 최대응답의 그래프로부터 알 수 있듯이 곡률이 가장 큰 곳이며, 최대 용력은 펌프의 재질인 강의 항복강도를 넘지 않으므로 펌프는 소성변형이 일어나지 않음을 알 수 있다. 펌프의 각 부분에서의 최대용력과 모멘트의 구체적인 크기가 Table 3 에 나와있다.

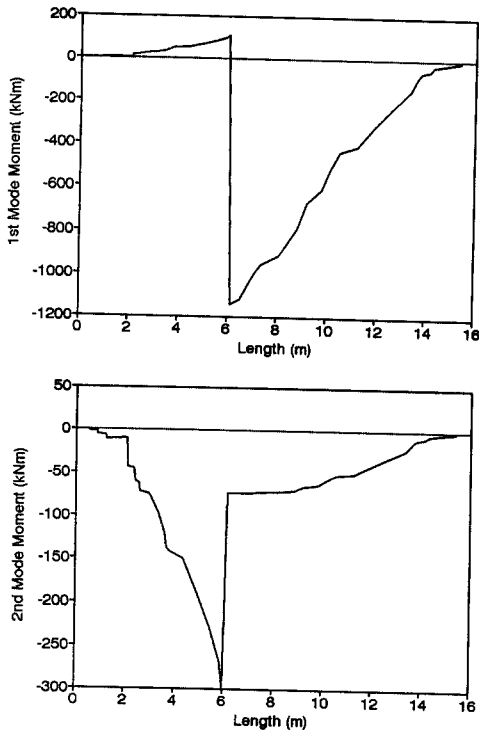


Fig. 12 Maximum Moment of Each Modeshapes

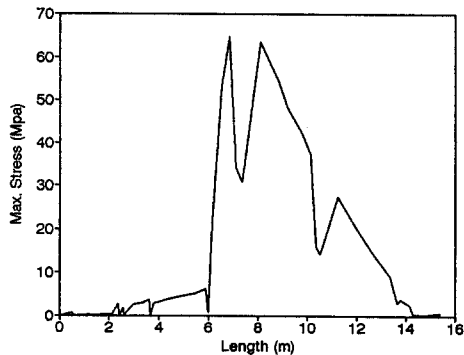


Fig. 13 Maximum Stress

5. 결론

펌프의 구조해석과 내진해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 펌프의 운전회전수에 대하여 고유진동수가 벗어남을 보여주므로 공진현상을 피할 수 있으며, 수위가 높을 때에 비해 수위가 낮을 때, 기초강성계수가 높을 때 1차 고유진동수의 증가로 운전회전수에 가까워져서 더 불안정함을 보여주었다.
- (2) 펌프 하단부의 진폭은 주로 1차모드에 의해 지배되며 수위의 영향에 민감하였고, 펌프의 상단부의 운동은 2차모드에 따르고 기초부의 강성계수에 민감한 것으로

나타났다.

(3) 0.12g 정도의 지진에 대하여 최대응력은 Discharge Elbow 하단부에서 발생하였으며 그 크기는 65 Mpa 으로 펌프의 재질인 강의 항복강도를 넘지 않는 것으로 밝혀졌다.

(4) 시간이력해석과 응답스펙트럼해석의 비교에서 스펙트럼해석이 짧은 시간 내에 더 안정한 설계범위를 보장하여주므로 시간이력해석에 비해 경제적인 해석방법임을 알았다.

(5) 보다 정확한 해석을 위하여는 펌프가 장착되는 위치의 지반의 특성과 과거 지진기록 등을 통하여 작성된 GRS가 요구되어진다.

7. 참고문헌

1. Design Response Spectra For Seismic Design of Nuclear Power Plant, US Atomic Energy Commission Regulatory Guide 1.60
2. US Nuclear Regulatory Commission, Appendix N, Dynamic Analysis Method N-1200
3. Structural Analysis and Design of Nuclear Plant Facilities, ASCE-manual and reports on engineering Practice No.58
4. Roy. R. Craig Jr, Structural Dynamics, An Introduction Computer Method, John Wiley & Son, 1981
5. N.M Newmark, W.J Hall, Earthquake Spectrum and Design, Earthquake Engineering Research Institute, 1982
6. Mario Paz, Structural Dynamic, Theory and Computation, Van Nostrand Reinhold, 1991
7. E. Oran Brigham, The Fast Fourier Transform and its Applications, Prentice-Hall International, 1988
8. 이동근 윤정방, 구조동력학의 개념 및 내진설계, 한국전산구조공학회, 1993
9. Maurice Petyt, Introduction to finite element vibration analysis, Cambridge University Press, 1990
10. Robert D. Blevins, Flow - Induced Vibration, Van Nostrand Reinhold, 1990
11. Glen V. Berg, Elements of Structural Dynamics, Prentice-Hall, 1988
12. 양보석 김원철, 입형 펌프의 동적응답해석, 대한기계학회논문집, 1985.5

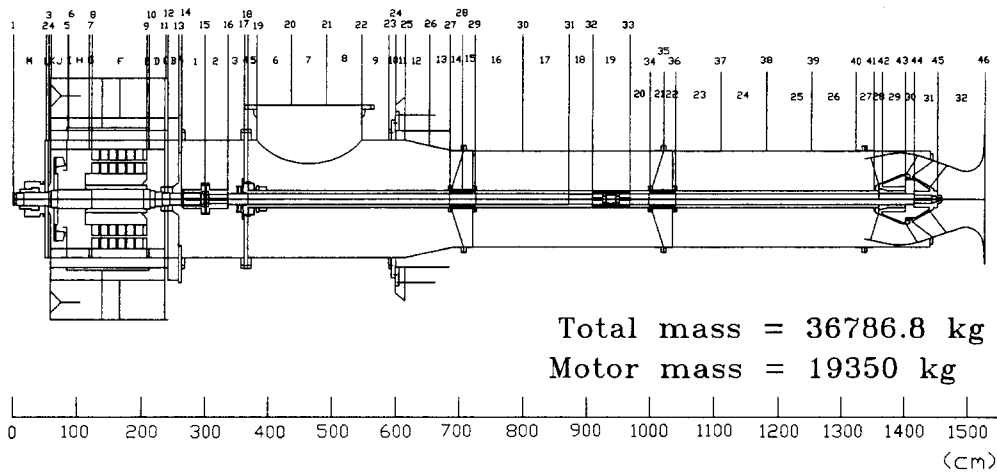


Fig. 3 Finite Element Model of Vertical Pump

Table 1 Natural Frequencies and Total Mass w.r.t Various Water Level

UnderWater Element No.	Total Mass (Kg)	Modal Part. (%)	Natural Frequencies 1st(rpm)	2nd(rpm)
25	77079.1	94.23	287.37	899.85
30	73282.8	94.80	287.51	901.34
35	69046.6	94.36	289.84	905.11
40	63357.5	94.19	310.77	906.28
46	60082.5	94.06	353.96	916.30

Table 2 Modal Participation Factor

Frequency (rpm)	Effective mass (Kg)	mass (%)
287.3	19111.2	24.794
899.9	23243.7	30.155
2094.4	14933.9	19.374
5573.3	1905.9	2.472
8197.4	4657.6	6.042
11837.1	2842.2	3.687
18816.2	357.7	0.463
22866.0	1954.3	2.535
29437.1	1030.8	1.337
38090.5	1.2	0.001
40682.1	821.7	1.066
51404.9	186.8	0.242
60717.9	240.2	0.311
68792.1	912.7	1.184
80953.0	435.4	0.564

Table 3 Stresses and Moments of Each Pump part

	Length (m)	Maximum Stress(Mpa)	Moment of Modeshapes (1st)	(2nd)	
Motor	1.185	0.3214	2.0660	-5.879	
	2.105	0.2034	15.3166	-42.848	
	2.36	2.7937	16.0833	-44.961	
Plange	3.605	3.77461	43.6291	-120.359	
	Discharge	7.095	34.1582	-997.539	-72.245
	Elbow	5.87	6.1821	99.014	-269.056
Base	5.98	0.8068	110.658	-299.958	
	6.13	20.8237	-1141.95	-72.681	
	6.52	53.2240	-1116.73	-72.648	
	6.84	64.822	-1051.21	-72.493	
Barrel	8.82	54.695	-788.877	-69.217	
	9.8	42.095	-609.954	-62.567	
	10.115	37.326	-518.057	-57.326	
	11.2325	27.501	-410.738	-49.662	
	12.6475	14.478	-225.881	-31.401	
Impeller	13.788	3.8280	-61.304	-9.721	
	14.663	0.1256	-21.202	-3.568	