

부분적으로 물속에 잠긴 수직펌프의 자유진동 특성

Natural Vibration Characteristics Of Clamped-Free Cylindrical Shell Partially Submerged In Water

배 춘희†·구 재량†·곽 문규*

Bae, Chun Hee, Gu, Jae Raeyang, Kwak, Moon K

1. 서 론

대용량 발전소 터빈에서 일을 마치고 나오는 증기의 온도를 상온으로 낮추기 위하여 많은 냉각수가 필요하다. 이러한 대량의 냉각수로 바닷물이 사용되어지는데, 바닷물을 퍼 올리는 대부분의 펌프는 수직펌프로서 길이가 길며 대부분 물속에 잠겨져 있다. 특히 서해안에 설치된 수직펌프들은 5mm 이상 되는 조수 간만의 차이에 따라 물속에 잠긴 양수관의 동특성이 변화되어 많은 진동 문제를 발생시키고 있다. 따라서 본 연구에서는 펌프 양수관이 물속에 잠긴상태 이므로 부분적으로 유체와 접한 원통형태의 Shell 구조물로 보고, 이론적 모델로 부분적으로 잠긴 고정-자유 Shell 구조물로 정의하였다. 정의된 Shell 모델에 대하여 외부와 내부 유체에 대한 해석을 수행하고, Rayleigh-Ritz 방법과 부가질량 행렬접근법을 이용하여 바닷물 수위변화에 따른 고유진동 해석을 수행하였다. 또한 해석된 결과의 실용성 입증을 위해 현재 운전중인 펌프에 대하여 적용하였고 현장 실험을 통해 해석의 정확성을 검증하였다.

2. 수치해석

2.1 공기중 실린더 쉘의 운동에너지와 탄성에너지

아래 그림 1과 같은 Shell은 Shell의 반경(R), 두께(h), 길이(L), 수직축에 대하여 계측된 각도(θ), 실린더 길이를 따라가는 축(x), 각방향, x, θ 와 z 의 변위인 u, v, w 로 구성되어 있다. 여기서 실린더 Shell의 동적에너지는 아래와 같이 표현되어진다[Kwak et al. 2009]. 여기서 ρ 는 실린더 Shell의 질량밀도 이다.

$$T_s = \frac{1}{2} \rho \int_0^L \int_0^{2\pi} \int_{-h/2}^{h/2} (\dot{u}^2 + \dot{v}^2 + \dot{w}^2) R dz d\theta dx$$

또한 실린더 Shell의 탄성에너지는 다음과 같이 표현되어진다[Kwak et al. 2009].

$$V_s = \frac{1}{2} \int_0^L \int_0^{2\pi} \int_{-h/2}^{h/2} (\sigma_x \epsilon_x + \sigma_\theta \epsilon_\theta + \sigma_{x\theta} \epsilon_{x\theta}) R dx d\theta dz$$

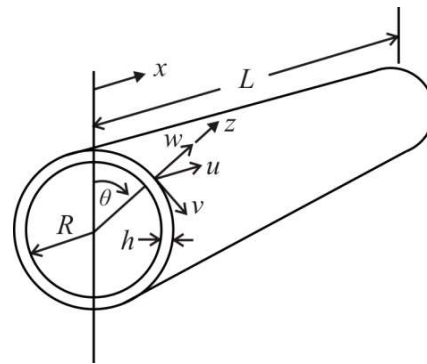


Fig. 1 Coordinate of Cylindrical Shell.

변위를 각각의 원주방향 모드와 관련된 n 개의 함수로 표현했기 때문에 공기중 Shell의 운동에너지와 탄성에너지는 아래와 같이 표현할수 있다

$$T_s = \sum_{n=1}^{\infty} T_{sn}, \quad V_s = \sum_{n=1}^{\infty} V_{sn}$$

여기서 T_{sn} 과 V_{sn} 는 각각 n 번째 원주모드와 관련된

운동에너지와 탄성에너지이고, 무차원변수 $\xi = x/L$,

$\alpha = L/R$, $\beta = h/R$ 를 도입하여 정리하면 $n(\geq 1)$

번째 원주방향 모드와 관련된 운동에너지와 탄성에너지가

다음과 같이 유도된다[Kwak et al.(2009)]:

† 배 춘희; 한국전력공사 전력연구원
E-mail : chbae@chbae.re.kr
Tel : (042) 865-7555, Fax : (042) 865-7539

* 동국대학교

$$T_{sn} = \frac{1}{2}(\dot{q}_{nu}^T M_{uu} \dot{q}_{nu} + \dot{q}_{nv}^T M_{vv} \dot{q}_{nv} + \dot{q}_{nw}^T M_{ww} \dot{q}_{nw})$$

$$V_{sn} = \frac{1}{2} q_{nu}^T K_{nuu} q_{nu} + \frac{1}{2} q_{nv}^T K_{nvv} q_{nv} + \frac{1}{2} q_{nw}^T K_{nvw} q_{nw} + q_{nu}^T K_{nuv} q_{nv} + q_{nv}^T K_{nvu} q_{nu} + q_{nu}^T K_{nuw} q_{nw}$$

2.2 유체- 구조 연성

물속에 잠긴 펌프는 아래 그림과 같이 표현되고

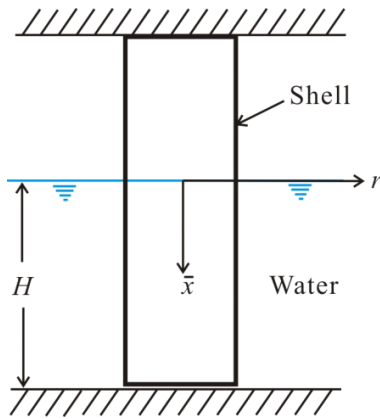


Fig. 2 Cylindrical Shell Partially Immersed in Water

n 번째 원주 방향모드에 대한 총 운동에너지는 셸의 운동에너지와 유체의 운동에너지를 합한 것으로 되며 다음과 같이 표현된다.

$$T_n = T_{sn} + T_{fn}$$

$$T_n = \frac{1}{2} [\dot{q}_{nu}^T M_{uu} \dot{q}_{nu} + \dot{q}_{nv}^T M_{vv} \dot{q}_{nv} + \dot{q}_{nw}^T (M_{ww} + M_{fwn}) \dot{q}_{nw}]$$

2.3 고유치 문제

물속에 잠긴 Shell의 운동에너지와 탄성에너지 식을 Lagrange's Eq.에 적용하면 실린더 셸의 n 차 원주 방향 모드에 대한 자유진동 문제가 다음 식으로 유도된다.

$$(M_a + M_f) \ddot{q}_n + K_n q_n = 0, \quad n = 1, 2, \dots$$

여기서 공기중에서의 모드사 수중에서 변하지 않는다는 가정을 사용하면 물속에 잠긴 Shell의 고유진동수는 아래와 같이 간단하게 표현된다

$$(\omega_{fn})_i = \frac{(\omega_{an})_i}{\sqrt{1 + \frac{\gamma \delta}{\alpha} \Gamma_{ni}}}, \quad n, i = 1, 2, \dots$$

여기서 $\Gamma_{ni} = (\bar{M}_{fn})_{ii}$ 는 무차원화된 부가수 질량 증분(NAVMI) 인자이다.

2.4 수치해석

현재 화력발전소 대용량발전소에서 운영되고 있는 아래 제원, $L = 10.698$ m, $R = 0.457$ m, $h = 0.027$ m, $V = 0.3$, $\rho = 7850$ kg/m³, $E = 210$ GPa의 펌프에 대하여 해수 수위별로 수치해석을 한결과 물속에서의 고유진동수는 공기중에 비하여 49% 낮아졌으며, 이를 상용코드인 ANSYS 해석결과 및 현장실험결과와 비교하였으며, 상세 결과는 아래 표와 같다,

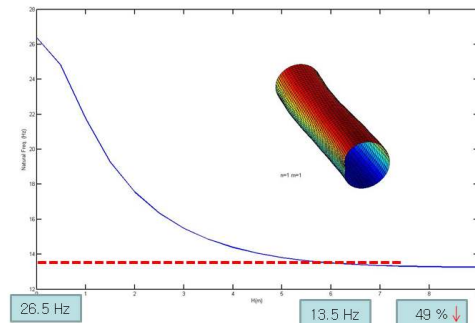


Fig. 3 Natural Frequency vs. Water Depth

Table 1 고유진동수 비교 결과

구분	수치해석	상용코드	실험결과
공기중	12.6Hz	14.2 Hz	15.8 Hz
물속	6.8Hz	9.4 Hz	8.5 Hz
감소율	49 %	33 %	46%

3. 결 론

1. 물속에 잠긴 펌프의 동특성을 Shell 모델을 생성하여 해석하였다
2. 펌프 양수관이 물속에 일정수위(4m) 잠기게 되면 고유진동수가 크게 낮아지며 그 이상 잠기게 되면 낮아지는 비율이 감소 한다
3. 현재 상업 운전중인 대형 수직펌프의 물속 동특성을 해석 한 결과 6m의 수위시 공기중에 비하여 49%가 낮아지며 실험에서는 46%가 낮아지는 것으로 나타나 해석의 타당함이 입증됨