

지반-구조물 상호작용을 고려한 원통형 유체저장탱크의 지진해석

Earthquake Analysis of Cylindrical Liquid Storage Tanks Considering Effects of Soil-Structure Interaction

김재민* 윤정방** 장수혁***
Kim, Jae-Min Yun, Chung-Bang Chang, Soo-Hyuk

ABSTRACT

This paper presents a method of seismic analysis for a cylindrical liquid storage structure on horizontally layered half-space considering the effects of the interior fluid and exterior soil medium in the frequency domain. The horizontal and rocking motions of the structures are included in this study. The fluid motion is expressed in terms of analytical velocity potential function, which can be obtained by solving the boundary value problem including the sloshing behavior of the fluid as well as deformed configuration of the structure. The effect of the fluid is included in the equation of motion as the impulsive added mass and a frequency-dependent convective added mass along the nodes on the wetted boundary with structure. The soil medium is presented using the 3-D axisymmetric finite elements and dynamic infinite elements. The present method can be applied to the structures embedded in ground as well as on ground, since it models the soil medium directly as well as the structure. For the purpose of verification, dynamic characteristics of a tank on homogeneous half-space is analyzed. Comparison of the present results with those by others shows good agreement.

1. 서론

원통형구조물은 그 구조적 장점으로 인하여 유체저장을 위한 구조물로 널리 사용되고 있다. 국내에서도 근래에 청정 에너지원으로 각광 받고 있는 액화천연가스(LNG)를 비롯하여 각종 유체는 거의 대부분 원통형구조물에서 저장되고 있는 실정이다. 특히 최근에 건설되고 있는 LNG저장 구조물은 매입된 경우 그 크기가 직경이 약 60m, 높이가 70m에 이르는 대규모 구조물이다. 이러한 대규모 구조물은 구조물의 파손이나 붕괴가 사회에 미치는 영향을 고려해서 엄격한 기준에 따라 설계되므로 구조물의 단면이 커지게 되며, 이와 같은 구조물 질량의 증가는 결과적으로 지진하중에 매우 취약하게 될 수 있다.

* 여수대학교 해양토목공학과 전임강사, 정회원
** 한국과학기술원 토목공학과 교수, 정회원
*** 한국과학기술원 토목공학과 박사과정, 정회원

지진과 같은 동적하중에 의하여 구조물 내부의 유체가 구조물과 상호작용함으로써 인하여 구조물에 작용하는 하중은 통상 충격성분(impulsive)과 대류성분(convective)으로 구분하고 있다. 충격성분은 내부유체의 일부가 구조물과 같이 움직임으로 인하여 구조물에 작용되는 유체의 관성력을 나타내며, 대류성분은 유체 자유표면의 슬러싱(sloshing)에 의해서 나타나는 성분이다. 이와 같은 유체-구조물 상호작용에 대해서는 지상 원통형 유체저장구조물에 대한 다양한 이론적 연구와 실험 및 실제 지진시 피해사례 분석을 통하여 많은 연구가 이루어졌으며, 현재에는 지상 원통형 유체저장구조물에 대한 실용적인 설계식이 제안되어 사용되고 있다(Balendra et al, 1982; Haroun, 1983).

그러나 지반의 영향을 고려한 경우의 구조물 응답이 무시한 경우에 비하여 클 수 있다는 가능성이 꾸준히 제기되어 왔고, 특히 직경에 비해서 높이가 높은 저장구조물인 경우 지반의 영향으로 인한 Rocking성분이 크게 나타난다는 논문이 발표되기도 하였다(Veletsos et al, 1987). 이와 같은 배경에서 1980년대 후반부터 암반상의 유체저장구조물에 대한 연구를 바탕으로 지반의 영향을 고려한 지상 원통형 유체저장구조물의 지진해석에 관한 연구가 본격적으로 이루어졌다(Veletsos & Tang, 1990; Hori, 1990; Natsiavas, 1990; Seebar et al, 1990). 국내에서도 사용후 핵연료 저장시설과 LNG 저장구조물과 관련하여 이에 대한 관심이 높아지면서 유체저장구조물에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다(윤정방 등, 1991, 1993; Choun & Yun, 1996, 1999; Kim & Yun, 1997; Jeong & Lee, 1998; 김재관 등, 1998; 김문겸 등, 1999).

유체-구조물 상호작용해석에서 유체영역은 유한요소 및 경계요소로 모형화되거나 포텐셜함수로 표현되어 진다. 한 예로 Haroun & Abou-Izzeddine(1992)등은 유동은 속도포텐셜함수로 나타내고, 지반은 기초부의 강성운동성분과 관련된 주파수종속 임피던스함수로 표현한 후 유체-구조물-지반의 상호작용해석을 수행하였다. 이들 연구의 결과는 지반의 영향을 고려한 해석이 구조물의 동적응답에 큰 영향을 미치고, 특히 지반의 조건에 따라 결과가 크게 달라진다는 것이었다. 더욱이 Wunderlich et al(1994)은 비선형해석을 수행하여 지반의 강성에 따라 지반-구조물 상호작용효과는 구조물의 좌굴에 큰 영향을 미친다고 보고했다. 따라서 보다 정확한 유체-구조물-지반 상호작용해석기법이 개발이 필요하다고 사료된다.

본 논문에서는 수평지진을 받고 있는 유연한 지반상에 놓인 원통형 유체 저장구조물에 대한 유체-구조물-지반 상호작용해석기법을 연구하였다. 이를 위하여 원통형구조물과 구조물 주위의 비균질 근역지반은 기존의 축대칭유한요소로 모형화하였으며 평행층상인 반무한 원역지반은 Yun et al(1995)이 개발한 축대칭무한요소로 모형화하였다. 유체의 영향을 고려하기 위하여 먼저 수평지진시 구조물의 유연성과 유체 자유표면의 슬러싱을 동시에 고려한 새로운 속도포텐셜함수를 유도하였다. 그리고 나서 이 속도포텐셜함수로부터 유동압을 구하고 이를 구조물과 유체의 경계면에서 등가절점하중으로 변환하여 유체의 영향을 전체 운동방정식에 포함시켰다. 그 결과 유체의 영향은 충격성분과 관련된 상수인 부가질량과 대류성분과 관련된 주파수종속 부가질량으로 나타내어졌다. 마지막으로 본 연구에서 개발된 기법의 검증을 위하여 균일한 반무한지반에 놓인 원통형 유체저장구조물에 대한 해석을 수행하고 기존의 연구결과와 비교하였다.

2. 운동방정식

본 연구에서는 그림1과 같은 축대칭 유체-구조물-지반 상호작용계를 고려하였고, 원통형 좌표계(r, θ, z)를 사용하였으며, 푸리에급수 전개기법을 사용하여 원주방향(θ)으로 하중 및 변위의 분포를 삼각함수로 나타내었다. 그리고 지진하중은 구조물의 거동에 주된 영향을 미치는 수평성분을 고려하여 평면대칭성분인 푸리에성분 $n=1$ 에 대하여 전체운동방정식을 정식화하였다.

2.1 속도포텐셜함수 및 동수압

원통좌표계에서 유체를 비점성, 비압축성으로 가정하고 비회전유동인 경우의 수평지진입력에 관계되는 속도포텐셜함수는 다음과 같이 나타낼 수 있고,

$$\phi(r, \theta, z; t) = \phi_1(r, z; t) \cos \theta \quad (1)$$

연속방정식은 다음과 같이 Laplace방정식으로 표현된다.

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi_1}{\partial r} - \frac{1}{r^2} \phi_1 + \frac{\partial^2 \phi_1}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

그리고 수평지진입력에 대한 자유표면과 구조물과의 경계면에서의 경계조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial r} = \dot{u}_r(z; t) \quad \text{at } r = R \quad (3)$$

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial z} = \dot{u}_z(r; t) \quad \text{at } z = 0 \quad (4)$$

$$\rho_f \dot{\phi}_1 + \rho_f g \xi = 0 \quad \text{at } z = H \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial z} = \dot{\xi} \quad \text{at } z = H \quad (6)$$

여기서 R 과 H 는 각각 유체영역의 반지름과 높이, $u_r(z; t)$ 과 $u_z(r; t)$ 는 각각 유체와 접하는 구조물의 수직벽면에서 $\theta = 0$ 일 때 r -방향 변위와 수평바닥에서 z -방향 변위이고, $\xi(r; t)$ 는 $\theta = 0$ 인 자유면에서 유체의 평균수평자유면에 대한 수직상대변위이며, g 는 중력가속도, ρ_f 는 유체의 질량밀도이다. 유체 자유표면의 수직변위와 유체와 접하는 구조물 바닥의 변위를 각각 식(7)과 식(8)과 같이 전개하고, 유체와 접하는 수직벽면의 수평변위를 식(9)와 같이 z 에 관한 3차 다항식으로 근사하였다.

$$\xi(r; t) = \sum_{m=1}^{\infty} J_1(\lambda_m r) \eta_m(t) \quad (7)$$

$$u_z(r; t) = \sum_{m=1}^{\infty} J_1(\lambda_m r) q_m(t) \quad (8)$$

$$u_r(z; t) \cong \mathbf{p}(z)^T \mathbf{c}(t) \quad (9)$$

여기서 $\mathbf{p}(z) = [1, z, z^2, z^3]^T$ 이고, $\mathbf{c}(t) = [c_0(t), c_1(t), c_2(t), c_3(t)]^T$ 로서 미정계수이며, $J_1(\cdot)$ 은 제1종 제1차 Bessel함수, $\lambda_n = \varepsilon_n / R$, ε_n 은 $J_1'(\varepsilon_n) = 0$ 을 만족시키는 상수들로서 처음 3개항을 나열하면 1.8411, 5.3314, 8.5363이다.

식(2)의 지배방정식과 식(3)의 경계조건을 만족하는 속도포텐셜함수는 다음과 같이 구할 수 있다(윤정방 & 이창근, 1987).

$$\phi_1(r, z; t) = \sum_{n=1}^{\infty} J_1(\lambda_n r) A_n(z; t) + r \dot{u}_r(z; t) \quad (10)$$

그리고 식(10)에서 $A_n(z; t)$ 은 미정함수로서 다음과 같은 z -방향에 관한 미분방정식과

$$\frac{d^2 A_n}{dz^2} - \lambda_n^2 A_n = -b_n \left\{ \frac{d^2 \mathbf{p}(z)}{dz^2} \right\}^T \dot{\mathbf{c}}(t) \quad (n=1, 2, \dots) \quad (11)$$

아래의 경계조건들을 만족하여야 한다.

$$\frac{\partial A_n}{\partial z} + b_n \left\{ \frac{\partial \mathbf{p}(z)}{\partial z} \right\}^T \dot{\mathbf{c}}(t) = \dot{q}_n \quad \text{at } z = 0 \quad (12)$$

$$\dot{A}_n + b_n \mathbf{p}(z)^T \ddot{\mathbf{c}}(t) + g \eta_n = 0 \quad \text{at } z = H \quad (13)$$

$$\frac{\partial A_n}{\partial z} + b_n \left\{ \frac{\partial \mathbf{p}(z)}{\partial z} \right\}^T \dot{\mathbf{c}}(t) = \dot{\eta}_n \quad \text{at } z = H \quad (14)$$

여기서

$$b_n = \frac{2R}{(\varepsilon_n^2 - 1)J_1(\varepsilon_n)} \quad (15)$$

이제 식(11)의 지배방정식과 식(12)~(13)의 경계조건을 만족하는 속도포텐셜함수 $\phi_1(r, z; t)$ 를 구하면 다음과 같다.

$$\phi_1(r, z; t) = \sum_{n=1}^{\infty} J_1(\lambda_n r) \left(\sum_{m=0}^3 b_n E_m(z) \dot{c}_m(t) + \tilde{E}_n(z) \dot{q}_n(t) - \frac{g}{\cosh(\lambda_n H)} \cosh(\lambda_n z) \int_0^t \eta_n(\tau) d\tau \right) \quad (16)$$

여기서 $E_m(z)$ 및 $\tilde{E}_n(z)$ 는 다음과 같다.

$$E_{n0}(z) = 1 - \frac{\cosh(\lambda_n z)}{\cosh(\lambda_n H)}, \quad E_{n1}(z) = z - \frac{\sinh(\lambda_n z)}{\lambda_n} - \left(H - \frac{\sinh(\lambda_n H)}{\lambda_n} \right) \frac{\cosh(\lambda_n z)}{\cosh(\lambda_n H)} \quad (17a, b)$$

$$E_{n2}(z) = z^2 + \frac{2}{\lambda_n^2} - \left(H^2 + \frac{2}{\lambda_n^2} \right) \frac{\cosh(\lambda_n z)}{\cosh(\lambda_n H)} \quad (17c)$$

$$E_{n3}(z) = z^3 + \frac{6}{\lambda_n^2} z - \frac{6}{\lambda_n^3} \sinh(\lambda_n z) - \left(H^3 + \frac{6}{\lambda_n^2} H - \frac{6}{\lambda_n^3} \sinh(\lambda_n H) \right) \frac{\cosh(\lambda_n z)}{\cosh(\lambda_n H)} \quad (17d)$$

$$\tilde{E}_n(z) = \frac{1}{\lambda_n} \{ \sinh(\lambda_n z) - \tanh(\lambda_n H) \cosh(\lambda_n z) \} \quad (18)$$

식(16)을 식(14)에 대입하고 수치적인 안정성 또는 미소한 유체의 점성을 고려하기 위하여 감쇠행렬을 도입하면 슬러싱운동(sloshing motion)에 대한 다음과 같은 모우드방정식을 얻을 수 있다.

$$\mathbf{M}_{\eta\eta}\{\ddot{\eta}(t)\} + \mathbf{C}_{\eta\eta}\{\dot{\eta}(t)\} + \mathbf{K}_{\eta\eta}\{\eta(t)\} = \mathbf{Q}_{\eta w}\ddot{\mathbf{d}}_w(t) \quad (19)$$

여기서 $\mathbf{M}_{\eta\eta}$, $\mathbf{C}_{\eta\eta}$ 및 $\mathbf{K}_{\eta\eta}$ 는 모두 대각행렬이고, $\ddot{\mathbf{d}}_w(t)$ 는 구조물과 유체의 경계면에서의 경계면에 수직한 구조물의 가속도벡터를 나타낸다.

유체의 유동에 의한 동압력은 다음과 같이 Navier-Stokes 방정식으로부터 구할 수 있다.

$$p_d(r, \theta, z; t) = -\rho_f \dot{\phi}(r, \theta, z; t) \quad (20)$$

이 압력분포함수로부터 구조물에 작용되는 절점하중벡터는 가상일의 원리를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{f}_w(t) = -\hat{\mathbf{M}}_{ww}\ddot{\mathbf{d}}_w(t) - \mathbf{Q}_{\eta w}^T\{\dot{\eta}(t)\} \quad (21)$$

이를 주파수영역으로 변환하고 식(19)로부터 슬러싱운동의 주파수응답을 구하여 대입하면,

$$\mathbf{f}_w(\omega) = \hat{\mathbf{S}}_{ww}(\omega) \mathbf{d}_w(\omega) \quad (22)$$

여기서

$$\hat{\mathbf{S}}_{ww}(\omega) = -\omega^2 \left(\hat{\mathbf{M}}_{ww} + \mathbf{Q}_{\eta w}^T [\mathbf{K}_{\eta\eta} + i\omega \mathbf{C}_{\eta\eta} - \omega^2 \mathbf{M}_{\eta\eta}]^{-1} \mathbf{Q}_{\eta w} \right) \quad (23)$$

로서 $i = \sqrt{-1}$ 이며, 식(23)의 우변에서 첫번째 항 $\hat{\mathbf{M}}_{ww}$ 는 유동의 충격성분과 관련된 부가질량, 두번째 항은 유동의 대류성분과 관련된 주파수종속 부가질량이다.

2.2 유체-구조물-지반계의 주파수영역 운동방정식

수평 지진하중이 작용되는 전체 유체-구조물-지반계의 운동방정식은 축대칭 유한요소와 무한요소를 이용한 구조물과 지반의 동적강성행렬, 등가지진하중 $\mathbf{f}_e^{egk}(\omega)$, 식(22)의 유동에 의한 절점하중을 결합하여 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{S}_{ww}(\omega) + \hat{\mathbf{S}}_{ww}(\omega) & \mathbf{S}_{wn}(\omega) & 0 \\ \mathbf{S}_{nw}(\omega) & \mathbf{S}_{nn}(\omega) & \mathbf{S}_{ne}(\omega) \\ 0 & \mathbf{S}_{en}(\omega) & \mathbf{S}_{ee}(\omega) + \tilde{\mathbf{S}}_{ee}(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{d}_w(\omega) \\ \mathbf{d}_n(\omega) \\ \mathbf{d}_e(\omega) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \mathbf{f}_e^{egk}(\omega) \end{Bmatrix} \quad (24)$$

여기서 하첨자 w 는 유체와 구조물의 경계면에 수직한 자유도, e 는 유한요소-무한요소 경계면에서의 자유도, n 은 w 와 e 를 제외한 구조물과 근역지반의 자유도를 나타내며, ω 는 원주파수, $\mathbf{S}(\omega)$ 와 $\tilde{\mathbf{S}}(\omega)$ 는 각각 유한요소와 무한요소에 의한 동적강성행렬을 나타낸다. 그리고 등가지진하중

$f_e^{eqk}(\omega)$ 는 무한요소의 강성행렬과 자유장응답으로부터 구할 수 있다(Yun & Kim, 1996). 마지막으로 슬러싱응답은 유체와 접하는 구조물의 응답을 식(24)를 이용하여 구한 후 이를 식(19)의 대입하여 구할 수 있다.

3. 예제해석 및 검증

본 연구에서 개발된 기법을 검증하기 위하여 균일 반무한지반에 놓인 원통형 유체저장구조물의 고유진동수를 다양한 지반조건(전단파속도; C_s)과 유체의 채움비(filling ratio; H/R)에 따라 계산하였다. 이 때 구조물의 두께와 유체영역의 반지름의 비(t/R)는 0.002이고 유한요소 및 무한요소를 사용한 해석모형은 $H/R=1.0$ 인 경우 그림2와 같다. 고유진동수는 주파수응답함수를 구하고 이로부터 추정하고, 이 값을 경암지반($C_s=5000\text{m/sec}$)에 대하여 구한 고유진동수로 정규화한 다음 기존의 연구결과(Veletsos & Tang, 1990)와 비교하여 표1에 정리하였다. 표1의 비교로부터 본 연구의 결과가 매우 우수하여 본 연구에서 유도한 속도포텐셜함수가 벽면의 수평운동과 바닥의 수직운동을 적절하게 묘사함을 알 수 있었다. 이에 따라 본 연구의 기법은 매입된 구조물의 지진응답해석에도 직접 활용될 수 있을 것으로 판단되었다.

4. 결론

본 연구에서는 수평지진하중을 받는 원통형 유체저장구조물의 동적응답을 유체-구조물-지반 상호작용을 고려하여 구하는 기법을 제시하였다. 유체 유동의 영향을 효과적으로 고려하기 위하여 수평방향 지진시 구조물의 유연성과 유체 자유표면의 슬러싱을 동시에 고려한 새로운 속도포텐셜함수를 유도하였다. 한편 구조물과 근역지반은 축대칭유한요소를 사용하고 원역지반은 축대칭무한요소를 사용하여 모형화하였다. 마지막으로 유체-구조물-지반 전체에 대한 운동방정식은 유동의 영향을 주파수종속 부가질량으로 정식화하여 구성하였다.

반무한 탄성지반에 놓인 원통형구조물의 고유진동수를 구하고 이를 기존의 연구결과와 비교하여 본 연구의 기법을 검증하였다. 비교 결과 본 연구에 의한 해가 매우 우수하여 본 연구의 기법은 매입된 유체저장구조물의 지진응답해석에도 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 삼성물산(주)의 연구비지원에 의하여 수행되었음을 밝히며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

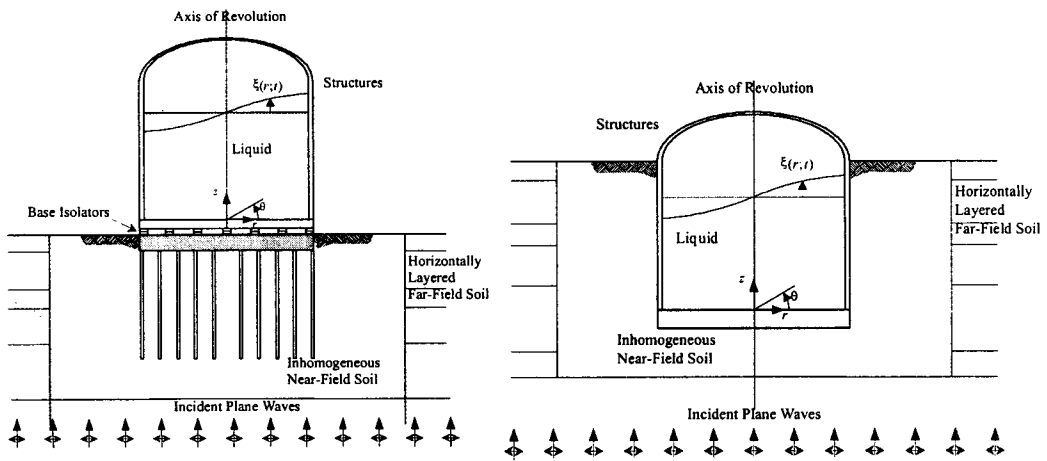
1. 윤정방, 이창근 (1987), "벽면의 유연성을 고려한 액체저장탱크의 동적해석," 대한토목학회 논문집, 제7권 제4호, pp. 21-29.
2. 윤정방, 김영석, 김재민 (1991), "사용후 핵연료 저장구조물의 지진시 유체-구조물 상호작용해석," 연구보고서, 한국과학기술원.

3. 윤정방, 김영석 (1993), “액화천연가스 저장구조물에 대한 내진해석,” 연구보고서, 한국과학기술원.
4. 김재관, 박진용, 진병무, 조양희 (1998), “3차원 구형 액체 저장 Tank의 Rocking 응답,” 한국지진공학회논문집, 제2권 제1호, pp. 23-34.
5. 김문겸, 임운목, 조성용, 조경환 (1999), “유한요소-경계요소 조합에 의한 원형 유체저장구조물의 3차원 주파수응답해석,” 한국지진공학회 춘계학술발표회 논문집.
6. T. Balendra, K.K. Ang, P. Paramasivam, and S.L. Lee (1982), “Seismic design of flexible cylindrical liquid storage tanks,” *Earthquake Eng. & Structural Dyn.*, Vol. 10, pp. 477-498.
7. Y-S. Choun, and C-B. Yun (1996), “Sloshing characteristics in rectangular tanks with a submerged block,” *Computers & Structures*, Vol. 61, No. 3, pp. 401-413.
8. Y-S. Choun, and C-B. Yun (1999), “Sloshing analysis of rectangular tanks with a submerged structure by using small-amplitude water wave theory,” *Earthquake Eng. & Structural Dyn.*, Vol. 28, pp. 763-783.
9. K-H. Jeong, and S-C. Lee, “Hydroelastic vibration of a liquid-filled circular cylindrical shell,” *Computers & Structures*, Vol. 66, Nos. 2-3, pp. 173-185.
10. Y-S. Kim, and C-B. Yun (1997), “A spurious free four-node displacement-based fluid element for fluid-structure interaction analysis,” *Engineering Structures*, Vol. 19, No. 8, pp. 665-678.
11. M.A. Haroun (1983), “Vibration studies and tests of liquid storage tanks,” *Earthquake Eng. & Structural Dyn.*, Vol. 11, pp. 179-206.
12. M.A. Haroun, and W. Abou-Izzeddine (1992), “Parametric study of seismic soil-tank interaction. I: horizontal excitation,” *Journal of Structural Eng.*, ASCE, Vol. 118, No. 3, pp. 783-812.
13. N. Hori (1990), “Effects of soil on the dynamic response of liquid-tank system,” *Pressure Vessel and Piping Division*, ASME, Vol. 112, pp. 118-123.
14. S. Natsiavas (1990), “Simplified models for dynamic response of tall unanchored liquid containers,” *Pressure Vessel and Piping Division*, ASME, Vol. 112, pp. 124-131.
15. R. Seebbar, F.D. Fischer, and Rammerstorfer (1990), “Analysis of a three-dimensional tank-liquid-soil interaction problem,” *Pressure Vessel and Piping Division*, ASME, Vol. 112, pp. 28-33.
16. A.S. Veletsos, and Y. Tang (1987), “Rocking response of liquid storage tanks,” *Journal of Eng. Mechanics*, ASCE, Vol. 113, pp. 1774-1792.
17. A.S. Veletsos, and Y. Tang (1990), “Soil-structure interaction effects for laterally excited liquid storage tanks,” *Earthquake Eng. & Structural Dyn.*, Vol. 19, pp. 473-496.
18. W. Wunderlich, B. Schapertons, and C. Temme (1994), “Dynamic stability of non-linear shells of revolution under consideration of the fluid-soil-structure interaction,” *Int. J. for Numerical Methods in Eng.*, Vol. 37, pp. 2679-2697.
19. C-B. Yun, J-M. Kim, and C-H. Hyun (1995), “Axisymmetric elastodynamic infinite elements for multi-layered half-space,” *Int. J. for Numerical Methods in Eng.*, Vol. 38, pp. 3723-3743.
20. C-B. Yun, and J-M. Kim (1996), “KIESSI—A computer program for soil-structure interaction analysis using finite and infinite element techniques,” *Research Rep.*, Dept. of Civil Eng., Korea Advanced Institute of Science & Technology.

표 1. 지반조건과 구조물형식에 따른 고유진동수비의 변화 (고유진동수/고정지반 고유진동수)

C_s of soil (m/sec)	Aspect Ratio (H/R)			
	0.5	1.0	2.0	3.0
914.4 (3000 ft/sec)	0.947 (0.952)	0.939 (0.931)	0.930 (0.931)	0.940 (0.930)
457.2 (1500 ft/sec)	0.863 (0.865)	0.785 (0.788)	0.782 (0.782)	0.796 (0.791)
304.84 (1000 ft/sec)	0.812 (0.800)	0.624 (0.643)	0.641 (0.638)	0.662 (0.646)

주: 괄호 안의 결과는 Veletsos & Tang(1990)의 결과임.



(a) 지상 유체저장구조물

(b) 매입 유체저장구조물

그림 1. 원통형 대형 유체저장구조물의 예

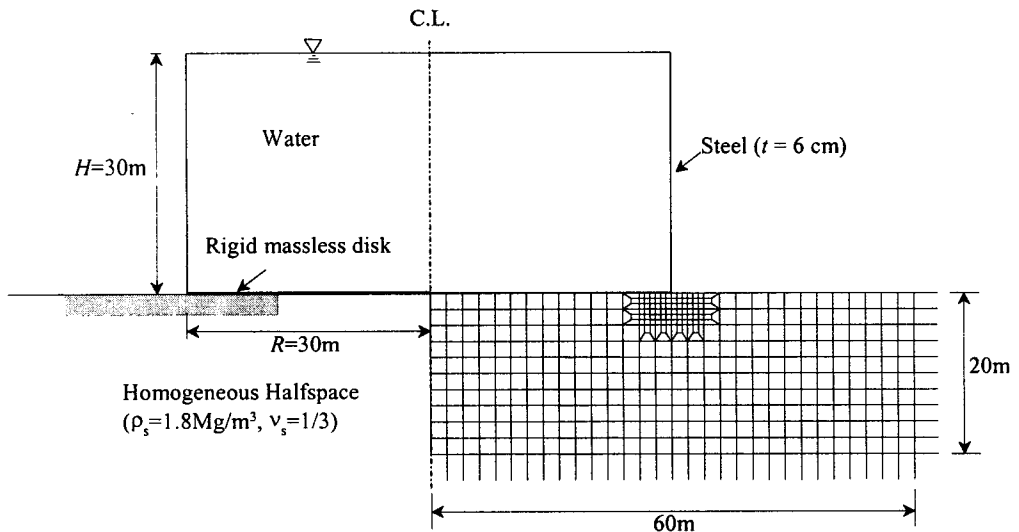


그림 2. 균일반무한체에 놓인 유체저장구조물의 해석모형 ($H/R=1.0$ 인 경우)