

유체-구조물 상호작용 효과를 고려한 직사각형 단면의 수조구조물의 동적 해석

박장호 · 권기준*[†]

동국대학교 토목환경공학과 연구원 · *한경대학교 안전공학과
(2000. 5. 16. 접수 / 2000. 6. 29. 채택)

Dynamic Analysis of Rectangular Liquid Storage Containers Considering Fluid-Structure Interaction effects

Jang-Ho Park · Ki-Jun Kwon*[†]

Department of Civil & Environmental Engineering, Dongguk University
*Department of Safety Engineering Hankyong National University
(Received May 16, 2000 / Accepted June 29, 2000)

Abstract : The effects of internal fluid motion have to be considered in the analysis of liquid storage containers. Therefore this thesis developed a three-dimensional boundary element-finite element method for the analysis of rectangular liquid storage containers. The irrotational motion of inviscid and incompressible ideal fluid is modeled by using boundary elements and the motion of structure by finite elements. Coupling is performed by using compatibility and equilibrium conditions along the interface. Dynamic response characteristics of rectangular liquid storage containers such as sloshing motion, hydrodynamic pressure, displacement by fluid-structure interaction are investigated.

Key Words : fluid-structure interaction, coupled FEM-BEM method, sloshing rectangle container, dynamic behavior

1. 서 론

액체를 저장하기 위해서는 원통형이나 원형 구조물이 주로 사용되고 있으나, 사용후 핵연료 저장시설과 같이 내부에 무거운 물체를 유체 내에 저장하기 위해 건설되는 시설에는 직사각형 단면의 대형 철근콘크리트 구조가 사용되는 경우가 있다. 이러한 수조구조물에 지진과 같은 동하중이 작용하게 되면 내부 유체의 운동으로 인하여 유체와 구조물간의 상호작용이 발생하여 매우 복잡한 거동을 보인다. 따라서 설계지진에 대하여 수조구조물을 설계하기 위해서는 내부 유체의 운동으로 인한 유체-구조물 상호작용의 영향이 반드시 고려되어야 한다.

초기에는 구조물의 강성이 충분히 크다고 보고 수조구조물을 강체로 가정하여 내부 유체의 운동을 해석함으로써 유체동압력과 자유수면의 높이 변화를 산출하였다. Housner는 구조물을 강체로 가정하여 간단한 해석적 방법에 의한 동적해석방법을 제안하였다¹⁾. 이 방법에서 Housner는 유체를 구조물과 함께 움직이는 충격성분과 유체의 유동에 의한 대류성분의 두 성분으로 분리하여 해석을 하였다. 그러나 최근 지진에 의하여 강체로 설계된 수조구조물에 상대적으로 큰 피해가 발생함으로써 구조물의 유연성을 고려한 유체-구조물 상호작용에 대한 연구가 다수 이루어졌다²⁾. 이러한 유체-구조물 상호작용에 대한 연구는 주로 원형 수조구조물에 대하여 이루어졌고 직사각형 수조구조물에 대한 연구는 많지 않으며 2차원 해석 방법에 의하여 이루어졌다^{3~5)}. 이러한 2차원 해석

[†]To whom correspondence should be addressed.
kjkwon@hmv.hankyong.ac.kr

방법은 해석상의 간편성을 가지고 있으나, 수조구조물의 3차원 형상 특성을 충분히 고려할 수 없다. 또한 유체의 유동을 고려한 연구도 많지 않다.

본 논문에서는 직사각형 수조구조물의 3차원 형상 특성 및 유체동압력과 유체 자유수면의 sloshing을 평가할 수 있는 3차원 경계요소-유한요소 연계법을 개발하였다. 3차원 경계요소-유한요소 연계법에서 구조물의 운동은 판요소를 이용한 유한요소를 사용하여 모델링하였으며, 유체의 운동은 경계요소로 모델링한 후 유체와 구조물 경계면에서 경계조건을 부과하여 경계요소와 유한요소를 연계하였다. 본 논문에서 제시한 해석방법을 이용하여 지반운동을 받는 직사각형 수조구조물의 해석을 수행하였으며, 해석결과로 유체의 유동과 유체동압력뿐만 아니라 수조구조물에 대한 전체적 거동특성을 파악하였다.

2. 경계요소-유한요소 연계법

Fig. 1과 같은 직사각형 단면의 수조구조물에 대한 동적 해석기법으로 3차원 경계요소-유한요소 연계법을 개발하였다. 비점성, 비압축성 이상 유체의 비회전 운동은 경계요소법을 사용하여 모델링하였으며⁶⁾, 유연한 벽체로 구성된 구조물의 운동은 유한요소법을 사용하여 모델링하였다⁷⁾. 그리고 유체와 구조물 경계면에서 적합조건과 평형조건을 만족하도록 경계요소와 유한요소를 연계하였다^{8,9)}.

경계요소법은 유체 운동에 대한 지배방정식으로 다음의 Lagrange-Green Identity로부터 구한 경계적분식을 사용한다.

$$\varphi(\xi, t) = \int_s \varphi(\mathbf{x}, t) \frac{\partial G(\mathbf{x}, \xi)}{\partial n} ds - \int_s \frac{\partial \varphi(\mathbf{x}, t)}{\partial n} G(\mathbf{x}, \xi) ds \quad (1)$$

여기서, $\varphi(\mathbf{x}, t)$ 은 Fig. 1의 유체 영역에서 Laplace 방정식을 만족하는 속도 potential을, $G(\mathbf{x}, \xi)$ 은 Green 함수를 의미하며, \mathbf{n} 은 유체 경계에서의 외향법선벡터를 나타낸다. 유체 운동에 대한 경계적분식 (1)을 유체의 경계를 따라 이산화하면 다음과 같은 유체의 운동에 대한 이산화된 경계적분식이 얻어진다^{5,9)}.

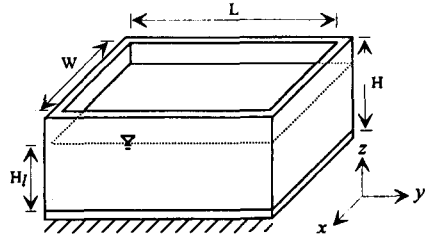


Fig. 1. 직사각형 수조구조물의 해석모델

$$[G] \left\{ \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right\} + [T] \{ \varphi \} = \{ 0 \} \quad (2)$$

여기서, G 와 T 는 행렬계수이다.

지진과 같은 동하중이 수조구조물에 작용할 경우 유체의 자유수면은 요동을 하게 되며, 이때 유체의 자유수면은 운동학적 경계조건(kinematic boundary condition)과 동역학적 경계조건(dynamic boundary condition)을 만족하여야 한다¹⁰⁾. 평균수면에서 자유수면까지의 높이를 $\eta(x, y, t)$ 라고 정의하면 유체 자유수면에서의 선형화된 운동학적 경계조건과 동역학적 경계조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \varphi(\mathbf{x}, t)}{\partial z} = \frac{\partial \eta(x, y, t)}{\partial t} + \dot{u}_{gz}(t) \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varphi(\mathbf{x}, t)}{\partial t} + g\eta(x, y, t) = 0 \quad (4)$$

여기서, g 는 중력가속도를 나타내며, \dot{u}_{gz} 는 수직방향 지반속도를 의미한다. 구조물과 유체 경계면에서의 경계조건은 구조물의 벽면에 수직한 유체 입자의 속도성분이 구조물의 절대속도와 동일하므로 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{\partial \varphi(\mathbf{x}, t)}{\partial t} = \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_b \quad (5)$$

여기서 \mathbf{v}_b 는 구조물과 유체 경계면에서 유체입자의 절대속도를 나타낸다. 유체의 운동에 의해 구조물의 벽면에 작용하는 유체동압력 $P(\mathbf{x}, t)$ 는 Bernoulli 방정식으로부터 다음과 같이 얻어진다.

$$P(\mathbf{x}, t) = -\rho \frac{\partial \varphi(\mathbf{x}, t)}{\partial t} \quad (6)$$

이산화된 경계적분식 (2)를 시간에 대하여 미

분하고, 여기에 식(3), (4), (5)로 정의된 경계조건들과 식(6)의 관계식을 대입하여 정리하면 구조물의 벽면에 작용하는 유체동압력과 유체 유동에 대한 방정식을 얻을 수 있다⁸⁾.

$$P = P_1\{\dot{v}_p\} + P_2\{\ddot{\eta}\} + P_3\{\eta\} + P_4\{1\} \ddot{u}_g \quad (7)$$

$$M_{\eta p}\{\dot{v}_p\} + M_{\eta \eta}\{\ddot{\eta}\} + K_{\eta \eta}\{\eta\} + M_{\eta \eta}\{1\} \ddot{u}_{gz} = \{0\} \quad (8)$$

여기서, \dot{v}_p , P 는 각각 구조물과 유체 경계면의 절점 절대가속도벡터와 유체동압력벡터이며, η , $\ddot{\eta}$ 는 각각 유체 자유수면에서의 절점 변위벡터와 가속도벡터를 나타내고, 밑첨자 "p"는 구조물과 유체의 경계면에 위치한 절점을, 밑첨자 "η"는 자유수면에서의 절점을 의미한다.

직사각형 수조구조물은 판과 슬래브로 이루어진 3차원 구조물로서 그 영향을 고려할 수 있도록 구조물의 거동을 판요소를 사용한 유한요소법으로 모델링하면 지반운동과 외부하중을 받는 구조물의 이산화된 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[M^s]\{\ddot{u}\} + [C^s]\{\dot{u}\} + [K^s]\{u\} = -[M^r][r^s]\{\ddot{u}_g\} + f(t) \quad (9)$$

여기서, M^s, C^s, K^s 는 각각 구조물의 질량행렬, 감쇠행렬 및 강성행렬을 의미하며, r^s 는 지진 영향계수행렬을 나타낸다. 또한 $f(t)$ 는 외부하중에 의한 절점하중으로 수조구조물의 동적해석에서는 유체동압력에 의한 등가절점하중벡터를 의미하며, u 는 구조물 절점의 지반에 대한 상대변위벡터를 나타내고 \ddot{u}_g 는 지반가속도벡터를 의미한다.

구조물의 유한요소와 유체의 경계요소를 연계하기 위해서는 구조물과 유체 경계면에서 유체입자의 절점가속도가 구조물의 법선방향 절점가속도와 동일하다는 적합조건과 구조물 절점과 유체 절점에 작용하는 하중이 동일하다는 평형조건이 만족되어야 한다. 구조물과 유체 경계면에서 평형조건을 만족시키기 위하여 유체절점압력은 구조물에 작용하는 등가의 절점하중으로 변환하여야 한다.

$$f = LP = M_{pp}\{\dot{v}_p\} + M_{p\eta}\{\ddot{\eta}\} + K_{p\eta}\{\eta\} + M_{p\eta}\{1\} \ddot{u}_{gz} \quad (10)$$

여기서 $M_{pp} = LP_1$, $M_{p\eta} = LP_2$, $K_{p\eta} = LP_3$ 이고, L 은 분포된 표면력을 절점력으로 변환하는 행렬(Distribution Matrix)이다. 구조물과 유체 경계면에서 적합조건을 만족시키기 위하여 유체의 절점변위를 지반의 변위와 지반에 대한 상대변위의 합으로 나타내고, 절점변위 u 를 유체와 구조물 경계면의 절점변위 u_p 와 그 외의 절점변위 u_o 으로 분리한 후 정리하면 수조구조물에 대한 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$[M] \begin{Bmatrix} \ddot{u}_o \\ \ddot{u}_p \\ \ddot{\eta} \end{Bmatrix} + [C] \begin{Bmatrix} \dot{u}_o \\ \dot{u}_p \\ \dot{\eta} \end{Bmatrix} + [K] \begin{Bmatrix} u_o \\ u_p \\ \eta \end{Bmatrix} = -[M][r]\{\ddot{u}_g\} \quad (11)$$

$$[M] = \begin{bmatrix} M_{oo}^s & M_{op}^s & 0 \\ M_{po}^s & M_{pp}^s + M_{pp} & M_{p\eta} \\ 0 & M_{\eta p} & M_{\eta\eta} \end{bmatrix},$$

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{oo}^s & C_{op}^s & 0 \\ C_{po}^s & C_{pp}^s & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{oo}^s & K_{op}^s & 0 \\ K_{po}^s & K_{pp}^s & K_{p\eta} \\ 0 & 0 & K_{\eta\eta} \end{bmatrix}$$

여기서, r 은 지진영향계수행렬을 나타낸다. 수조구조물에 대한 운동방정식(11)은 유체-구조물 상호작용의 영향을 유체의 부가질량행렬과 유체의 유동에 의한 강성행렬의 형태로 반영한다.

3. 유체-구조물 상호작용 해석

본 논문에서 제시한 3차원 경계요소-유한요소 연계법을 사용하여 직사각형 수조구조물의 거동에 영향을 미치는 주요 인자들에 대하여 해석을 수행하고 수조구조물의 동적 거동을 고찰하였다^{9,11)}. Fig. 1의 해석모델에서 구조물 높이($H=15m$)와 벽체 두께($t_s=1.2m$)는 고정을 시키고, 구조물 길이 L , 구조물 폭 W , 유체 수심 H_f , 구조물 감쇠를 변화시키며 해석을 수행하였다. 구조물의 재료 성질은 탄성계수 $E=2.1 \times 10^{10} N/m^2$, 밀도 $\rho=2400 kg/m^3$, 포아송비 $\nu=0.17$ 이고, 입력지반운동은 1940년 El Centro 지진 가속도 시간이력의 N-S 성분을 최대가속도 0.2g로 조정하여 입력하였다.

수조구조물에서 구조물 폭(W) 20m, 유체 수심(H) 12m인 경우 구조물 길이가 증가함에 따라 수

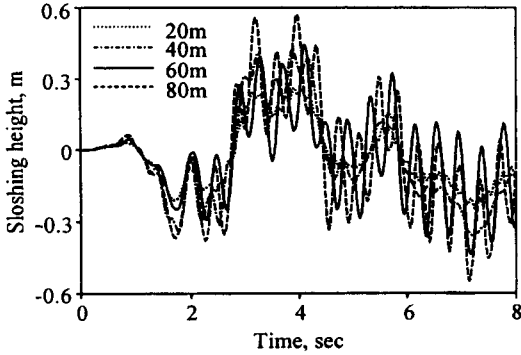


Fig. 2. 구조물 길이에 따른 구조물 벽면에서 발생하는 유체 자유수면 sloshing의 시간이력

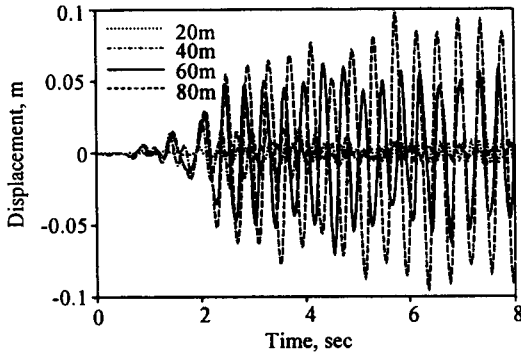


Fig. 3. 구조물 길이에 따른 구조물 벽체 중앙 상단의 변위 시간이력

조구조물 길이방향 구속조건의 영향으로 구조물의 동적 거동과 유체 자유수면의 sloshing이 증폭되었다. Fig. 2는 구조물 길이에 따른 유체와 구조물 벽체 중앙 단면의 경계점에서의 유체 자유수면 sloshing의 시간이력을 도시한 것이다. 유체 sloshing 모드에 의한 전반적인 경향은 동일하나 구조물 벽체의 진동에 연계된 sloshing 성분이 커지는 것을 볼 수 있다. Fig. 3은 구조물 길이의 변화에 따른 구조물 벽체 중앙 상단에서의 상대변위를 비교한 것이다. 구조물 길이가 길어짐에 따라 수조구조물 길이방향 구속조건 영향의 감소로 인하여 구조물 변위가 커지고 구조물 고유진동수가 감소하고 있다. 구조물 벽면에 작용하는 유체 동압력은 구조물 거동과 밀접한 관계를 가지므로 구조물 길이가 길어짐에 따라 구조물 거동과 함께 증가하고 있다.

구조물 감쇠는 구조물의 동적 거동을 지배하는 중요한 요소이다. Fig. 4와 Fig. 5는 구조물 길이(L) 60m, 구조물 폭(W) 20m, 유체 수심(H) 12m인

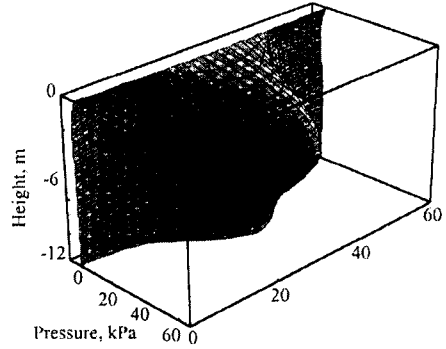


Fig. 4. 구조물 감쇠비가 0%일 때 구조물 벽면에 작용하는 유체동압력의 공간적 분포

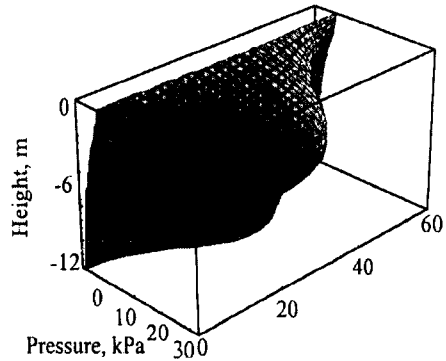


Fig. 5. 구조물 감쇠비가 4%일 때 구조물 벽면에 작용하는 유체동압력의 공간적 분포

수조구조물에서 각각 구조물에 감쇠가 없는 경우와 구조물 감쇠비로 4%를 사용한 경우에 구조물 벽면에 작용하는 바닥단단력이 최대가 되는 유체 동압력의 3차원 분포형상을 도시한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 유체동압력은 구조물 감쇠에 의하여 크게 감소하였다. 구조물 감쇠에 의하여 유체 자유수면의 sloshing은 감소하지만, 이러한 유체 자유수면 sloshing의 감소는 구조물 벽체의 진동과 관련된 성분의 감소에 의한 것이다. 일반적으로 구조물에서 감쇠가 커지면 구조물의 응답이 감소하는 것과 마찬가지로 수조구조물에서도 감쇠가 커지면 구조물의 응답이 감소하였다.

구조물 폭과 유체 수심의 증가는 구조물 내부 유체의 증가를 의미하며, 이는 구조물에 작용하는 유체 부가질량의 증가를 의미한다. 따라서 구조물 폭과 유체 수심의 증가는 구조물 변위의 증가를 가져오게 된다. Fig. 6은 구조물 길이(L) 60m, 유체 수심(H) 12m인 수조구조물에서 구조물 폭의 변화에 따른 유체 자유수면 sloshing의 시

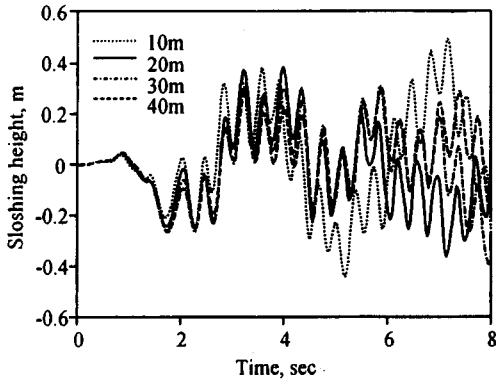


Fig. 6. 구조물 폭에 따른 구조물 벽면에서 발생하는 유체 자유수면 sloshing의 시간이력

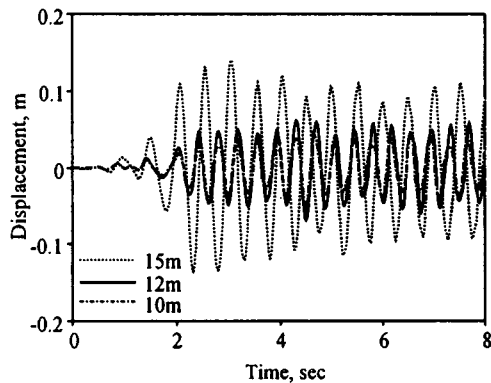


Fig. 7. 유체 수심에 따른 구조물 벽체 중앙 상단의 변위 시간이력

간이력을 도시한 것이다. 구조물 폭의 증가는 구조물 벽체의 진동에 연계된 sloshing 성분의 증가와 유체 sloshing의 고유진동수 변화를 유발하여 유체 자유수면 sloshing의 시간이력의 전체적인 경향에 변화를 가져왔다. Fig. 7은 구조물 길이(L) 60m, 구조물 폭(W) 20m인 수조구조물에서 유체 수심의 변화에 따른 구조물 벽체 중앙 상단에서의 상대변위를 비교한 것이다. 유체 수심이 증가함에 따라서 상대변위도 증가하고 있다. 또한 구조물 벽면에 작용하는 유체동압력도 유체 수심이 증가함에 따라 구조물 거동과 함께 증가하였다. 그러나 유체 자유수면 sloshing에서 전반적인 경향 변화는 크지 않았다.

4. 결론

사용후 핵연료 저장시설과 같이 내부에 무거운

물체를 유체 내에 저장하기 위해 건설되는 시설에는 직사각형 단면의 대형 철근콘크리트 구조가 사용된다. 현재까지 직사각형 수조구조물에서의 유체-구조물 상호작용 해석은 수조구조물을 강체로 가정하거나, 2차원 해석방법에 의하여 이루어졌다. 이러한 해석방법들은 해석상의 간편성은 있으나, 수조구조물의 3차원 형상의 영향을 충분히 고려할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 이를 고려한 수조구조물의 동적 거동 및 유체동압력과 유체 자유수면의 sloshing을 평가할 수 있는 3차원 경계요소-유한요소 연계법을 개발하였다.

직사각형 수조구조물의 주요 인자들에 대하여 수조구조물의 동적 거동 특성을 파악하였다. 구조물 길이는 구조물 특성을 결정하는 주요 인자이다. 구조물 길이가 커질수록 구조물의 고유진동수는 작아지고, 구조물 가속도와 변위는 커지며, 구조물에 작용하는 유체동압력은 크게 증폭되고, 구조물 진동과 연계된 sloshing에 의하여 유체 자유수면 sloshing도 증폭된다. 구조물 감쇠는 구조물의 동적 응답을 지배하는 주요 인자이다. 구조물에 감쇠가 커지면 구조물 변위와 가속도 그리고 구조물에 작용하는 유체동압력은 크게 감소한다. 또한 구조물 진동과 연계된 sloshing의 감소로 유체 자유수면 sloshing도 감소하는 경향을 보이며, 특히 구조물 감쇠가 큰 경우에는 유체 자유수면 sloshing은 비연계하여 고려해도 무방할 것이다. 구조물 폭과 유체 수심은 구조물에 가해지는 유체 부과질량과 밀접한 관계를 가지고 있다. 구조물 폭이 증가하면 구조물의 동적 응답과 유체동압력은 증가하며, 유체 sloshing 진동수는 작아진다. 반면에 유체 수심은 구조물의 동적 응답과 구조물에 작용하는 유체동압력은 증폭시키나, 유체 sloshing의 진동수에는 큰 영향을 주지 않는다.

본 연구에서는 3차원 경계요소-유한요소 연계법을 개발하였으며, 이를 통하여 직사각형 수조구조물의 주요 인자들에 대하여 수조구조물의 동적 거동 특성을 파악하였다. 이로부터 수조구조물의 설계시 이를 이용함으로써 수조구조물에 대한 내진 안전성을 높일 수 있을 것이다.

참고문헌

1) G. W. Housner, "Dynamic pressure on accelerated

- fluid container”, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 47, pp. 15~35, 1957.
- 2) Franz G. Rammerstorfer, Knut Scharf and Franz D. Fisher, “Storage tanks under earthquake loading”, Applied Mechanics Review, ASME, Vol. 43, pp. 261~282, 1990.
 - 3) M. A. Haroun and G. W. Housner, “Seismic design of liquid storage tanks”, Journal of the technical councils of ASCE, ASCE, Vol. 107, pp. 191~207, 1981.
 - 4) M. A. Haroun and G. W. Housner, “Earthquake response of deformable liquid storage tanks”, Journal of applied mechanics, ASME, Vol. 48, pp. 411~418, 1981.
 - 5) 고현무, 김재관, 박장호, “경계요소-유한요소 연계법에 의한 구형 수조구조물의 동적거동 특성해석”, 대한토목학회 논문집, Vol. 14, No. 5, pp. 1033~1042, 1994.
 - 6) P. K. Banerjee, The Boundary Element Methods in Engineering 2nd edition, McGraw-Hill, 1993.
 - 7) R. D. Cook, D. S. Malkus and M. E. Plesha, Concepts and Application of Finite Element Method, John Wiley & Sons Inc., 1989.
 - 8) 고현무, 박장호, 김재관, “3차원 경계요소-유한요소 연계법에 의한 구형 수조구조물 상호작용 해석”, 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp. 61~64, 1994.
 - 9) H. M. Koh, J. K. Kim, and J. -H. Park, “Fluid-structure interaction on analysis of 3-D rectangular tanks by a variationally coupled BEM-FEM and comparison with test results”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 27, pp. 109~124, 1998.
 - 10) I. G. Currie, Fundamental mechanics of fluid, McGraw-Hill Inc., 1974.
 - 11) Koh, H. M., Kim, J., Park, J. -H. and Kim, S. J. “Recent research on seismic isolation considering fluid-structure interaction effects in Korea,” Seismic, Shock, and Vibration Isolation, ASME PVP-Vol. 34441, 1996, pp. 47~54.