

2차원 유체-구조물-지반 상호작용해석 전산프로그램

A Computer Program for 2-D Fluid-Structure-Soil Interaction Analysis

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

ABSTRACT

This paper presents a computer program for a 2-D fluid-structure-soil interaction analysis. With this computer program, the fluid can be modeled by a spurious free 4-node displacement-based fluid element which uses rotational penalty and mass projection technique in conjunction with the one point reduced integration scheme to remove the spurious zero energy modes. The structure and near field soil are discretized by the standard finite elements, while the unbounded far field soil is represented by the frequency dependent dynamic infinite elements. Since this method models directly the fluid-structure-soil system, it can be applied to the dynamic analysis of 2-D liquid storage structure with complex geometry. For the purpose of verification, dynamic analyses for tanks on a rigid foundation and on compliant embankment are carried out. Comparison of the present results with those by ANSYS program shows good agreement.

1. 서론

국가의 경제규모가 커지고 국민의 의식수준이 높아짐에 따라서 대형유류저장시설, 원자력발전 폐기물 저장시설과 같은 위험도가 높은 대규모 유체저장시설의 안전에 대한 관심이 더욱 커지고 있다. 그리고, 이와 같은 대규모의 저장시설 등의 결함이나 파손으로 인하여 사고가 발생할 경우 사회에 미치는 효과와 재산상의 피해가 막대하므로, 구조물의 사용년한 동안 구조적 안전성의 확보가 필수적이다. 특히, 대규모 유체저장시설은 저장되어 있는 유체로 인하여 질량이 매우 크므로 지진과 같은 질량에 비례해서 작용하는 하중에 매우 취약한 특성을 나타내고 있다. 이에 대한 내진설계 기법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫번째는 면진장치를 설치하여 상부 구조물로 전달 되는 유효지진입력을 줄여주는 방법이며, 두번째는 구조물의 대부분을 지반에 묻히게 건설하여 유

* 여수대학교 건설환경공학부 조교수, 정회원
** 한국과학기술원 토목공학과 박사과정, 정회원
*** 한국과학기술원 토목공학과 교수, 정회원
**** 현대중공업㈜, 해양구조설계부 차장

효진진하중을 감소시키는 방법이다.

지반의 영향을 고려한 유체저장구조물의 지진응답해석에 관한 연구는 1980년대 후반부터 원통형구조물을 대상으로 본격적으로 이루어져왔다(Veletsos & Tang, 1990; Hori, 1990; Seebar et al, 1990). 국내에서도 1990년대에 들어와서 사용후 핵연료 저장시설과 LNG저장시설의 증가와 이에 관한 안전에 관심이 높아지면서 연구가 활발하게 진행되어 왔다(Choun & Yun, 1996, 1999; 김재관 등, 1998; 김문겸 등, 1999; 김재민 등, 1999).

본 연구에서는 2차원 유체저장구조물의 유체-구조물-지반 상호작용을 고려한 지진응답해석을 수행할 수 있는 전산프로그램을 개발하였다. 이를 위하여 유체는 4절점 변위형 유체요소를 사용하여 나타내었고, 구조물과 근역지반은 일반적인 유한요소로 나타내고 원역지반은 2차원 동탄성 무한요소로 나타내었다.

일반적으로 변위형-유체요소는 기존의 유한요소기법을 그대로 적용할 수 있다는 장점이 있지만, 과도한 전단강성에 의해서 생기는 locking현상, 감차적분을 적용할 때 발생하는 의사 영 에너지 모드 등 많은 문제점등을 내포하고 있었기 때문에 이에 대한 연구가 많이 이루어져 왔다(Belytschko & Bachrach, 1986; Chen & Talor, 1990). 본 연구에서는 이들의 연구성과를 바탕으로 Kim & Yun(1997)에 의해서 제안된 사변형 4절점 변위형-유체요소를 사용하여 유체의 거동을 표현하였다. 지반-구조물계의 지진응답해석법은 2차원 유한요소와 평행층상 반무한지반의 모형화에 사용할 수 있는 2차원 동탄성무한요소를 이용하고 지진입력은 수직입사 평면파로 가정한 후 부구조법을 사용하여 모형화하였다(김재민 등, 2000).

본 연구에서 개발된 프로그램의 검증을 위해서 먼저 고정지반상에 놓인 2차원 사각 유체저장구조물의 지반조건에 따른 고유진동수를 구하고, 이를 ANSYS의 결과와 비교하였다. 그리고, 유연지반상에서의 거동을 살펴보기 위해서 성토된 지반상에 놓인 2차원 유체저장구조물의 고유진동수와 벽체 상단에서의 가속도응답을 역시 ANSYS의 결과와 비교하였다.

2. 운동방정식

2.1 사변형 4절점 변위형-유체요소

전단강성이 없는 비점성인 압축성 유체의 동적평형방정식은 다음과 같다.

$$K_f \nabla \nabla^T \mathbf{u}_f - \rho_f \ddot{\mathbf{u}}_f = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (1)$$

여기서 \mathbf{u}_f 는 유체의 변위벡터이고 ρ_f 는 유체의 질량밀도이며 K_f 는 유체의 체적계수를 나타낸다. 식 (1)을 경계조건 등을 적용하여 weak form으로 나타내면 다음과 같다.

$$\int_{\Omega} \{ \rho_f \mathbf{w}^T \ddot{\mathbf{u}}_f + K_f (\nabla^T \mathbf{w})^T (\nabla^T \mathbf{u}_f) \} d\Omega + \rho_f g \int_{\Gamma} (\mathbf{w}^T \mathbf{n})(\mathbf{n}_g^T \mathbf{u}_f) d\Gamma = - \int_{\Gamma} (\mathbf{w}^T \mathbf{n}) \bar{p} d\Gamma \quad (2)$$

여기서, \mathbf{w} 는 가중함수, \bar{p} 는 경계상(Γ_p)에서의 압력, \mathbf{n} 은 각각의 경계상에서의 수직방향벡터이고, \mathbf{n}_g 는 중력방향을 나타내는 벡터이며, \mathbf{g} 는 중력가속도 값이다.

식(2)에 유한요소법을 적용하여 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{d}}_f + (\mathbf{K} + \mathbf{S})\mathbf{d}_f = \mathbf{f} \quad (3)$$

이때, \mathbf{M} 은 질량행렬, \mathbf{K} 는 체적변형과 관련된 강성행렬이고, \mathbf{S} 는 슬러싱과 관계된 강성행렬이며, \mathbf{f} 는 하중벡터이다.

유체의 변위를 미지량으로 하는 사변형 4절점 변위형-유체요소의 형상함수는 다음과 같이 일정 변형모드와 휨 모드로 나타낼 수 있다.

$$\{\mathbf{N}(x, y)\} = \{\mathbf{N}_0(x, y)\} + \{\mathbf{N}_B(x, y)\} \quad (4)$$

이때, $\{\mathbf{N}_0(x, y)\}$ 와 $\{\mathbf{N}_B(x, y)\}$ 는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\{\mathbf{N}_0(x, y)\} = \mathbf{a}_0 + \mathbf{a}_x x + \mathbf{a}_y y, \quad \{\mathbf{N}_B(x, y)\} = \mathbf{b}\xi(x, y)\eta(x, y) \quad (5)$$

여기서 상수벡터인 \mathbf{a}_0 , \mathbf{a}_x , \mathbf{a}_y , \mathbf{b} 는 요소의 절점좌표에 따라 변하는 상수벡터들이다. 식(5)에서 형상함수 $\{\mathbf{N}_0(x, y)\}$ 는 그림 1에 나타낸 처음 6개의 변형모우드와 관련된 변위장이며, $\{\mathbf{N}_B(x, y)\}$ 는 나머지 두개 모우드에 관련된 변위장이다. 이 두 변위장은 서로 직교하므로 식(3)의 질량행렬과 강성행렬 역시 각각의 요소에서 평면변형모우드와 휨모우드의 중첩으로 아래와 같이 나타낼 수 있다 (Kim & Yun, 1997).

$$\mathbf{K}^e = \mathbf{K}_0^e + \mathbf{K}_B^e, \quad \mathbf{M}^e = \mathbf{M}_0^e + \mathbf{M}_B^e \quad (6)$$

일반적으로 식(5)에 나타낸 휨모우드는 체적변형에 관계되는 유체요소의 정확성을 떨어지게 한다(Shugar & Katona, 1975). 따라서 요소강성행렬과 요소질량행렬에서 이와 관련한 성분을 제거하여야 한다. 본 연구에서는 이를 위하여 강성행렬구성시 (1 x 1) 감차적분을 적용하고 질량행렬 계산시 아래의 질량투영법을 사용하였다.

$$\mathbf{M}_0^e = \mathbf{Q}^T \mathbf{M}^e \mathbf{Q} \quad (7)$$

여기서, 변환 행렬 \mathbf{Q} 는 다음과 같이 형상함수를 평면변형모드로 변환시켜주는 역할을 한다.

$$\mathbf{Q}(\{\mathbf{N}_0\} + \{\mathbf{N}_B\}) = \{\mathbf{N}_0\} \quad (8)$$

위의 질량투영법을 사용해서 그림 1에 나타난 휨모드(7,8번 모우드)에 관련된 의사 영에너지모우드들을 제거시킬 수 있지만, 회전변위에 관련된 영에너지모우드(그림 1에서 3번 모우드)는 제거되

지 않는다. 따라서, 이와 같은 회전변위에 관련된 모드는 비회전 운동조건을 식 (9)과 같은 penalty 기법을 이용하여 저차모드에서 고차모드로 이동시킬 수 가 있다 (Kim & Yun, 1997).

$$\mathbf{K}_R^e = \alpha \int_V \mathbf{R}^T \mathbf{R} d\Omega \quad (9)$$

여기서, \mathbf{R} 은 회전변형도와 절점변위벡터 사이의 관계를 나타내는 행렬이고, α 는 penalty 수로서 통상적으로 $100K_f$ 을 사용한다. 위의 식(9)의 적분을 수행할 때 감차적분을 사용하여야 한다.

결과적으로 사변형 4절점 변위형-유체요소의 강성행렬과 질량행렬은 다음과 같이 구한다.

$$\mathbf{K}^e = \mathbf{K}_0^e + \mathbf{K}_R^e, \quad \mathbf{M}^e = \mathbf{M}_0^e \quad (10)$$

2.2 유체-구조물-지반계의 지진응답해석

수평 지진하중이 작용되는 2차원 유체-구조물-지반계의 운동방정식은 4절점 변위형-유체요소, 유한요소, 무한요소의 동적강성행렬과 근역지반과 원역지반 사이의 경계면에서 정의되는 등가지진 하중을 이용하여 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{S}_{ff}(\omega) & \mathbf{S}_{fn}(\omega) & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{S}_{nf}(\omega) & \mathbf{S}_{nn}(\omega) & \mathbf{S}_{ns}(\omega) & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{S}_{sn}(\omega) & \mathbf{S}_{ss}(\omega) & \mathbf{S}_{si}(\omega) & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{S}_{is}(\omega) & \mathbf{S}_{ii}(\omega) + \tilde{\mathbf{S}}_{ii}(\omega) & \tilde{\mathbf{S}}_{ie}(\omega) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \tilde{\mathbf{S}}_{ei}(\omega) & \tilde{\mathbf{S}}_{ee}(\omega) & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{d}_f(\omega) \\ \mathbf{d}_n(\omega) \\ \mathbf{d}_s(\omega) \\ \mathbf{d}_i(\omega) \\ \mathbf{d}_e(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{a}_i^{eqk}(\omega) \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{x}_c(\omega) \quad (11)$$

여기서 하첨자 f 는 유체영역, n 은 유체와 구조물의 경계면, s 는 경계면을 제외한 구조물과 근역지반, i 는 근역지반-원역지반 (또는 유한요소-무한요소) 경계면, e 는 원역지반 만의 자유도를 나타내며, ω 는 원주파수, $\mathbf{S}(\omega)$ 와 $\tilde{\mathbf{S}}(\omega)$ 는 각각 유한요소와 무한요소에 의한 동적강성행렬을 나타낸다. 그리고 $\mathbf{a}_i^{eqk}(\omega)$ 는 등가지진하중의 계수벡터로서 무한요소의 강성행렬과 단위통제운동에 의한 자유장응답 으로부터 구할 수 있으며(Yun & Kim, 1996), $\mathbf{x}_c(\omega)$ 는 자유장지반의 한 점에서 정의되는 통제운동 으로서 지진입력이다. 본 연구에서는 지진입력으로 원역지반에서 수직으로 입사하는 평면파로 가정 하였다. 이에 따라 수평지진은 수직입사 SV-파에 의하여 묘사되며 수직지진은 수직입사 P-파에 의 하여 나타내어진다. 지진응답은 먼저 식(11)에서 통제운동의 크기를 단위값으로 하고 주파수응답 을 구한 후 이를 주파수영역에서 보간하여 전달함수를 구한 다음, 이에 통제운동의 Fourier 변환값 을 곱하여 주파수응답을 구한다. 응답의 시간이력은 주파수응답의 Fourier역변환을 취하여 구한다. 이 과정에서 일반적으로 FFT (Fast Fourier Transform) 기법이 사용된다. 이 과정을 요약하면 그림2 와 같다.

3. 예제해석 및 검증

3.1 예제 1: 고정지반상에 놓인 2차원 유체저장구조물

본 연구에서 개발한 2차원 유체-구조물-지반 상호작용해석 프로그램을 검증하기 위해서 균일 반무한지반에 놓인 2차원 유체저장구조물의 기본 고유진동수를 계산하였다. 이 때 구조물은 철근 콘크리트 구조물로서 제원은 그림 3(a)와 같다. 고유진동수는 주파수응답함수에서 최대진폭주파수로 추정하였고, 이 값을 ANSYS의 해석결과와 비교하여 표1에 정리하였다. ANSYS 프로그램을 이용한 해석에서는 구조물을 위해서는 2차원 고체요소(Solid 42)와 유체를 위해서는 2차원 유체요소(Fluid 79)를 사용하였다. 표 1의 비교로부터 슬러싱모우드와 구조변형모우드 모두 본 연구의 결과와 ANSYS 프로그램을 이용한 해석결과가 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

3.2 예제 2: 성토지반에 놓인 유체저장구조물의 지진해석

본 절에서는 그림 3(b)와 같이 암반위에 성토된 지반에 놓인 유체저장구조물에 대한 지진해석을 수행하였다. 앞의 제3.1절과 마찬가지로 먼저 유체저장구조물의 기본 고유진동수를 계산하여 그 결과를 ANSYS의 결과와 비교하여 표 1에 나타내었다. 이 경우에도 본 연구의 결과와 ANSYS 프로그램을 이용한 자유진동해석 결과가 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

마지막으로 암반의 수평지진입력으로 El Centro 지진기록(NS-성분, PGA=0.348g, 1940)을 사용한 지진해석을 수행하고 벽체상단에서 수평가속도의 가속도응답스펙트럼 구하여 ANSYS에 의한 결과와 비교하여 그림 4에 나타내었다. 본 연구의 기법을 사용한 해석에서는 구조물과 지반 모두 2% 이력감쇠비를 사용하였고 유체에 대해서는 0.5% 이력감쇠비를 가정하였으며, ANSYS 해석에서는 2% 감쇠비에 상응하는 Rayleigh 점성감쇠를 적용하였다. 지진해석결과의 비교에서도 본 연구에서 개발된 유체-구조물-지반 상호작용해석용 프로그램과 ANSYS의 결과가 잘 일치하여 본 연구에서 개발한 전산프로그램의 적용성을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 유체-구조물 상호작용과 지반-구조물 상호작용을 동시에 고려하여 2차원 유체저장구조물의 지진해석을 수행할 수 있는 전산프로그램을 개발하였다. 이를 위하여 유체는 의사영 에너지모우드들이 제거된 사변형 4절점 변위형-유체요소를 사용하여 모델링하였고, 구조물과 근역지반은 2차원 평면변형 유한요소로 이산화하였으며, 평행층상 반무한 원역지반은 2차원 동탄성무한요소를 사용하여 나타내었다. 개발된 전산프로그램을 검증하기 위하여 고정지반에 건설된 2차원 유체저장구조물에 대한 고유진동수를 구하고, 이를 상용프로그램인 ANSYS에 의한 결과와 비교하였다. 마지막으로, 본 기법의 적용성을 보이기 위해서 성토된 유연한 지반상에 놓인 유체저장구조물에 대한 고유진동수를 구하고 El Centro 지진에 대한 수평지진응답해석을 수행하여 구조물의 가속도응답을 ANSYS의 결과와 비교하였다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(과제번호: 1999-1-311-001-3)의 재정지원으로 수행되었으며 이의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김문경, 임윤묵, 조성용, 조경환 (1999), “유한요소-경계요소 조합에 의한 원형 유체저장구조물의 3차원 주파수응답해석”, 한국지진공학회 춘계학술발표회 논문집.
2. 김재관, 박진용, 진병무, 조양희 (1998), “3차원 구형 액체 저장 Tank의 Rocking 응답”, 한국지진공학회논문집, 제2권 제1호, pp. 23-34.
3. 김재민, 윤정방, 김두기 (2000), “유한요소-무한요소를 사용한 2차원 지반-구조물계의 주파수영역 지진응답해석법”, 한국전산구조공학회 논문집, 심사중.
4. 김재민, 윤정방, 장수혁 (1999), “지반-구조물 상호작용을 고려한 원통형 유체저장탱크의 지진해석”, 한국지진공학회 가을학술발표회 논문집.
5. Belytschko, T. and Bachrach, W. E. (1986), “Efficient Implementation of quadrilaterals with high coarse-mesh accuracy”, *Comput. Meths. Appl. Mech. Engrg.*, Vol. 54, 1986, pp.279-301.
6. Chen, H. C. and Taylor, R. L. (1990), “Vibration analysis of fluid-soil systems using a finite element displacement formulation”, *Int. J. for Numerical Methods in Eng.*, Vol. 29, pp. 683-698
7. Choun, Y-S. and Yun, C-B. (1996), “Sloshing characteristics in rectangular tanks with a submerged block”, *Computers & Structures*, Vol. 61, No. 3, pp. 401-413.
8. Choun, Y-S. and Yun, C-B. (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. Hori, N. (1990), “Effects of soil on the dynamic response of liquid-tank system”, *Pressure Vessel and Piping Division, ASME*, Vol. 112, pp. 118-123.
10. Kim, Y-S. and Yun, C-B. (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. Seebbar, R., Fischer, F. D. and Rammerstorfer (1990), “Analysis of a three-dimensional tank-liquid-soil interaction problem”, *Pressure Vessel and Piping Division, ASME*, Vol. 112, pp. 28-33.
12. Shugar, T. A. and Katona, M. G. (1975), “Development of finite element head injury model”, *J. of Engineering Mechanics Div., ASCE*, Vol. 101, pp223-239
13. Swanson Analysis System, Inc., *ANSYS User's Manual*, Canonsbury, PA, 1989.
14. Veletsos, A. S. and Tang, Y. (1990), “Soil-structure interaction effects for laterally excited liquid storage tanks”, *Earthquake Eng. & Structural Dyn.*, Vol. 19, pp. 473-496.
15. Yun, C-B. and Kim, J-M. (1996), “KIESSI-AX3D: 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. 유체저장 구조물의 고유진동수 비교

동적응답		예제 1		예제 2	
		본 연구	ANSYS	본 연구	ANSYS
슬러싱 모드	1 st	0.146	0.149	0.330	0.332
	2 nd	0.269	0.277	0.574	0.578
구조변형 모드	1 st	1.880	1.933	2.502	2.441
	2 nd	9.961	10.443	14.11	13.70

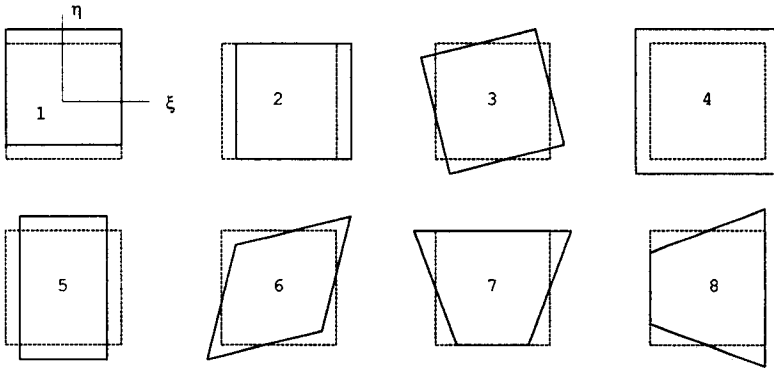


그림 1. 사변형 4절점 변위형-유체요소의 변형모우드

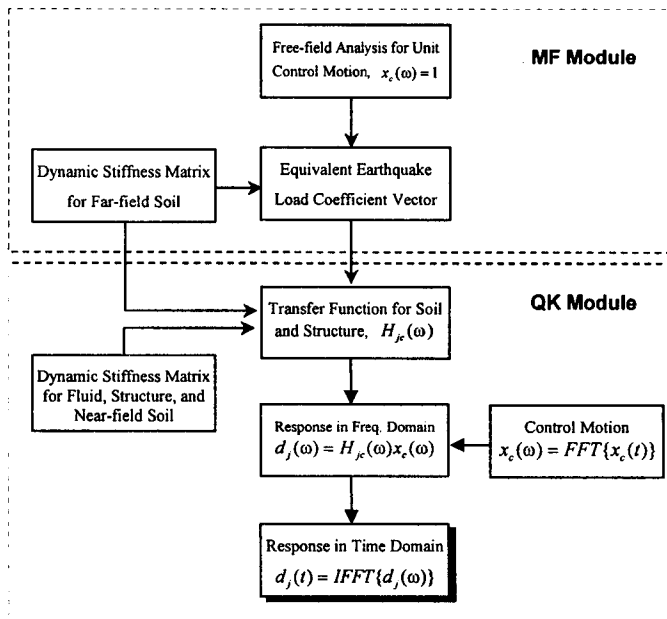
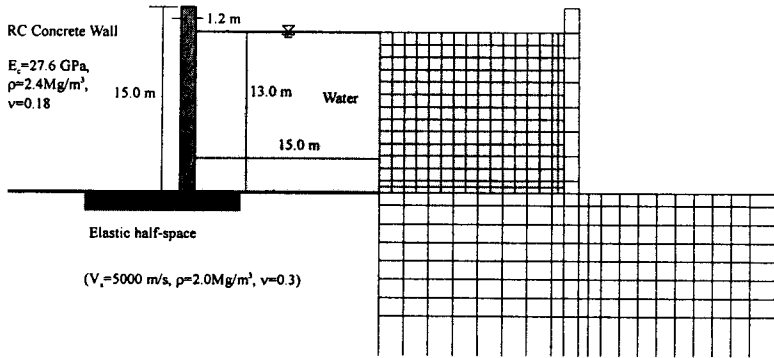
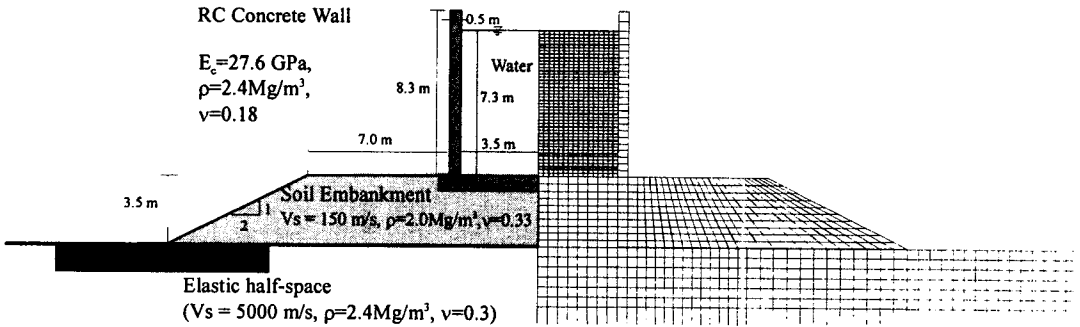


그림 2. KIESSI-2D 전산프로그램의 유체-구조물-지반 상호작용 해석과정



(a) 예제 1: 고정지반상에 놓인 지상유체저장구조물의 해석모형



(b) 예제 2: 성토된 유연한 지반상에 놓인 지상유체저장구조물의 해석모형

그림 3. 예제해석에 사용된 유체저장구조물의 제원 및 해석에 사용된 유한요소-무한요소 체논

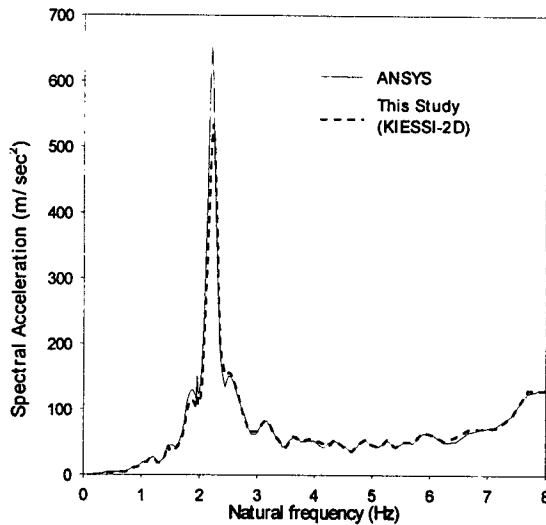


그림 4. 예제2 구조물의 벽체상단 수평가속도의 가속도응답스펙트럼 비교 (5% 감쇠비)