

2차원 유체-구조물-지반계의 지진응답해석 Earthquake Response Analysis for 2-D Fluid-Structure-Soil Systems

윤정방* 장수혁** 김재민*** 홍선기****
Yun, Chung-Bang Chang, Soo-Hyuk Kim, Jae-Min Hong, Sun-Ki

ABSTRACT

This paper presents a method of seismic analysis for a 2-D fluid-structure-soil interaction systems. With this method, the fluid can be modeled by spurious free 4-node displacement-based fluid elements which use 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 the near-field soil are discretized by the standard 2-D finite elements, while the unbounded far-field soil is represented by the dynamic infinite elements in the frequency domain. Since this method directly models the fluid-structure-soil interaction systems, it can be applied to the dynamic analysis of a 2-D liquid storage structure with complex geometry. Finally, results of seismic analyses are presented for a spent fuel storage tank embedded in a layered half-space and a massive concrete dam on a layered half-space.

1. 서론

국가의 경제규모가 커짐에 따라서 유류저장시설, 사용후 핵연료의 습식 저장시설, 댐과 같은 위험도가 높은 대규모 유체저장시설의 안전에 대한 관심이 더욱 커지고 있다. 이와 같은 대규모의 저장시설은 결함이나 파손으로 인하여 사고가 발생할 경우 사회에 미치는 효과와 재산상의 피해가 막대하므로, 구조물의 사용연한 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.

지반의 영향을 고려한 유체저장구조물의 지진응답해석에 관한 연구는 1980년대 후반부터 원통형구조물을 대상으로 본격적으로 이루어져왔다(Veletsos & Tang, 1990; Hori, 1990). 국내에서도 1990년대에 들어와서 댐 구조물, 사용후 핵연료의 습식 저장시설과 LNG저장시설의 건설증가와 더불어 지진시 대형기간시설물의 안전성에 관심이 높아지면서 연구가 활발하게 진행되어 왔다(Choun & Yun, 1996, 1999; 김재관 등, 1998; 김문겸 등, 1999; 김재관 & 조정래, 1999; 김제민 등, 1999).

본 연구에서는 2차원 유체저장구조물의 유체-구조물-지반 상호작용을 고려한 지진응답해석법에 대하여 연구하였다. 이를 위하여 유체는 사변형 4절점 변위형-유체요소(Kim & Yun, 1997)를 사용하여 유체의

* 한국과학기술원 토목공학과, 교수.

** 한국과학기술원 토목공학과, 박사과정.

*** 여수대학교 건설환경공학부, 조교수.

**** 여수대학교 건설환경공학부, 석사과정.

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 유체-구조물-지반계의 지진해석기법의 적용성을 살펴보기 위하여, 사용후 핵연료 저장시설과 중력식 콘크리트 댐 구조물에 대한 유체-구조물-지반의 상호작용을 고려한 지진해석을 수행하였다.

2. 운동방정식

2.1 4변형 사절점 변위형 유체요소 (Kim & Yun, 1997)

전단강성이 없는 비점성인 압축성 유체의 동적거동은 유한요소법을 이용하여 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{d}}_f + (\mathbf{K} + \mathbf{S})\mathbf{d}_f = \mathbf{f} \quad (1)$$

여기서 \mathbf{d}_f 는 절점변위, \mathbf{M} 은 질량행렬, \mathbf{K} 는 체적변형과 관련된 강성행렬이고, \mathbf{S} 는 자유면의 슬러싱(sloshing)과 관계된 강성행렬이며, \mathbf{f} 는 하중벡터이다. 유체의 거동을 사변형 4절점 변위형-유체요소로 나타낼 경우 변위형상함수는 다음과 같이 평면변형모우드와 곡면변형모우드의 선형조합으로 나타낼 수 있다.

$$\{\mathbf{N}(x, y)\} = \{\mathbf{N}_0(x, y)\} + \{\mathbf{N}_B(x, y)\} \quad (2)$$

이 두 변위장은 서로 직교하므로 질량행렬과 강성행렬 역시 각각의 요소에서 평면변형모우드와 곡면변형모우드에 의한 요소행렬의 중첩으로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{K}^e = \mathbf{K}_0^e + \mathbf{K}_B^e, \quad \mathbf{M}^e = \mathbf{M}_0^e + \mathbf{M}_B^e \quad (3)$$

일반적으로 식(2)에 나타낸 곡면변형모우드는 체적변형에 관계되는 변위형-유체요소의 정확성을 떨어지게 한다(Belytschko & Bachrach, 1986; Chen & Taylor, 1990). 따라서 요소강성행렬과 요소질량행렬에서 이와 관련한 성분을 제거하기 위하여 강성행렬구성시 (1 x 1) 감차적분을 적용하고 질량행렬 계산시 아래의 질량투영법을 사용하였다.

$$\mathbf{M}_0^e = \mathbf{Q}^T \mathbf{M}^e \mathbf{Q} \quad (4)$$

여기서 \mathbf{Q} 는 변환행렬로서 다음과 같이 형상함수를 평면변형모우드로 변환시켜주는 역할을 한다.

$$\mathbf{Q}(\{\mathbf{N}_0\} + \{\mathbf{N}_B\}) = \{\mathbf{N}_0\} \quad (5)$$

한편, 유체의 비회전운동조건은 다음과 같은 penalty 기법을 이용하여 구현할 수 있다.

$$\mathbf{K}_R^e = \alpha \int_{\Omega^e} \mathbf{R}^T \mathbf{R} d\Omega \quad (6)$$

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

2.2 유체-구조물-지반계의 지진응답해석

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

$$\begin{bmatrix} \mathbf{S}_{ff}(\omega) & \mathbf{S}_{fn}(\omega) & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{S}_{nf}(\omega) & \mathbf{S}_{nn}(\omega) & \mathbf{S}_{ns}(\omega) & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{S}_{sn}(\omega) & \mathbf{S}_{ss}(\omega) & \mathbf{S}_{si}(\omega) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{S}_{is}(\omega) & \mathbf{S}_{ii}(\omega) + \tilde{\mathbf{S}}_{ii}(\omega) & \tilde{\mathbf{S}}_{ie}(\omega) \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \tilde{\mathbf{S}}_{ei}(\omega) & \tilde{\mathbf{S}}_{ee}(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{d}_f(\omega) \\ \mathbf{d}_n(\omega) \\ \mathbf{d}_s(\omega) \\ \mathbf{d}_i(\omega) \\ \mathbf{d}_e(\omega) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{a}_i^{eqk}(\omega) \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} x_c(\omega) \quad (7)$$

여기서 하첨자 f 는 유체영역, n 은 유체와 구조물의 경계면, s 는 경계면을 제외한 구조물과 근역지반, i 는 근역지반과 원역지반 사이의 경계면 (즉, 유한요소와 무한요소 사이의 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 자유장응답으로부터 구할 수 있으며(Yun & Kim, 1996), $x_c(\omega)$ 는 자유장지반의 한 점에서 정의되는 통제운동으로서 지진입력이다. 본 연구에서는 지진입력으로 원역지반에서 수직으로 입사하는 평면파로 가정하였다. 이에 따라 수평지진은 수직입사 SV-파에 의하여 묘사되며 수직지진은 수직입사 P-파에 의하여 나타내어진다. 지진응답은 먼저 식(7)에서 통제운동의 크기를 단위값으로 하여 주파수응답을 구한 후, 이를 주파수영역에서 보간하여 전달함수를 구한 다음, 이에 통제운동의 Fourier 변환값을 곱하여 주파수응답을 구한다. 응답의 시간이력은 주파수응답의 Fourier 역변환을 취하여 구한다. 이 과정에서 전달함수의 보간기법, FFT(Fast Fourier Transform)기법 등 다양한 수치적 기법들이 사용된다(Kausel & Roesset, 1991; Humar & Xia, 1993; Humar et al, 1998).

3. 예제해석

본 연구에서 개발한 2차원 유체-구조물-지반 상호작용해석 프로그램을 검증하기 위하여, 고정지반과 고정지반 위에 성토된 유연한 지반상에 위치한 2차원 유체저장구조물에 대한 자유진동해석과 지진응답해석을 수행하고 이를 ANSYS 프로그램의 결과와 비교한 바 있다(김재민 등, 2000).

본 연구에서는 개발된 기법의 적용성을 살펴보기 위하여 사용후 핵연료의 습식 저장구조물과 중력식 콘크리트 댐 구조물에 대한 지진응답해석을 수행하였다.

3.1 예제 1: 사용후 핵연료의 습식 저장구조물

본 연구에서는 그림1과 같은 지반에 매입되어 있는 실제 크기의 사용후 핵연료 저장구조물의 지진해석을 수행하였다. 그림 1에 제원과 사용된 해석모델을 나타내었고, 입력지진은 기반암의 노두입력(outcrop input)으로 도로교시방서에서의 가속도계수 0.14, 암반(지반종류 I)인 경우의 가속도 응답스펙트럼에 상응하는 지진가속도를 그림 2와 같이 시뮬레이션하여 사용하였다. 그리고 재료감쇠비는 구조물과 지반에 대하여 2%, 유체에 대하여 0.5%를 사용하였다. 지진해석 결과로는 각각 두 가지의 지반조건에 대하여 내부저장탱크 상단(지점 A)과 외부격벽 상단(지점 B)에서의 가속도 응답스펙트럼을 구하여 그림 3에 나타내었다. 해석결과 내부저장탱크 상단(지점 A)에서는 수평지반의 강성변화에 따른 가속도응답스

펙트럼의 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 이와는 다르게, 외부격벽 상단(지점 B)에서는 수평층상지반의 조건에 따라 상당량의 가속도응답 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다.

3.2 예제 II : 중력식 콘크리트 댐 구조물의 지진해석

댐 구조물도 유체-구조물-지반이 서로 상호작용을 하고 있는 2차원 유체-구조물-지반계라고 볼 수 있다. 아울러 댐에서는 지반외에 유체영역 역시 상류방향으로 에너지의 적절한 방사가 이루어져야 하는데, 이를 위하여 본 연구에서는 상류방향의 유체영역 경계에 점성감쇠기(viscous damper)를 설치하였다. 이때 유체의 압축파속도는 1460m/s를 사용하였다. 본 예제구조물의 지반은 30m의 수평층과 반무한 기반암($V_s = 3000\text{m/s}$)으로 구성되어 있다고 가정하였다. 이 예제해석에서도 제3.1절에서 사용한 지진가속도를 노두입력으로 하는 지진응답해석을 수행하였다.

담수가 시작되기 전 상태와 만수상태에 이른 경우에 대하여 각각 두 가지의 수평층 지반조건($V_s = 700\text{m/s}$, $V_s = 3000\text{m/s}$)에 따른 입력지진에 대한 댐 마루에서의 수평응답의 전달함수를 구하였다. 그림 4에 담수전 댐과 만수시 댐에 대한 제원과 해석모델을 나타내었고, 그림 5에는 댐 마루에서의 수평응답의 입력지진에 대한 전달함수의 진폭을 나타내었다. 이 비교로부터 담수 유체의 유무에 따라 댐 구조물의 기본자유진동수가 변함을 알 수 있다. 그리고, 담수된 경우에도 층상지반의 전단파속도가 $V_s=700\text{m/s}$ 일때 기본자유진동수가 1.733Hz이고, 3000m/s일때 2.588Hz로 나타났다. 따라서, 댐 구조물의 기본자유진동수는 담수 유체 및 지지된 층상지반조건에 따라서 변화함을 알 수 있다. 지진응답해석 역시 각각 두 가지의 지반조건($V_s = 700\text{m/s}$, $V_s = 3000\text{m/s}$)에 대하여 댐마루에서 수평가속도응답의 응답스펙트럼을 구하여 그림 6에 보이었다. 담수 유체에 의한 유체-구조물 상호작용의 효과는 전단파속도 700m/s인 경우가 3000m/s인 경우보다는 비교적 더 크게 나타났다. 그러나, 가속도 응답의 크기는 지반조건이 700m/s인 경우가 지반조건이 3000m/s인 경우보다 더 작게 구해졌다. 따라서, 댐과 같은 초대형 구조체에서는 유체와의 상호작용이외에도 지반과의 상호작용효과가 크게 일어남을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 유체-구조물 상호작용과 지반-구조물 상호작용을 동시에 고려하여 2차원 유체저장구조물의 지진해석을 수행하였다. 이를 위하여 유체는 의사 영에너지모우드들이 제거된 사변형 4절점 변위형-유체요소를 사용하여 모형화하였고, 구조물과 근역지반은 2차원 평면변형 유한요소로 이산화하였으며, 평행층상 반무한 원역지반은 2차원 동탄성무한요소를 사용하여 나타내었다. 본 연구기법의 적용성을 살펴보기 위하여 지반에 매입된 사용후 핵연료 습식 저장구조물의 지반조건에 따른 기반암 노두에 입력되는 한국표준지진에 대한 수평지진응답해석을 수행하여, 지반의 조건이 구조물에 미치는 영향을 고찰하였다. 아울러 중력식 콘크리트 댐 구조물에 대해서도 지반조건에 따른 지진응답해석을 수행하였다. 이때 유체의 댐 상류방향으로 에너지방사를 나타내기 위하여 점성경계조건을 적용하였다. 이 예제에서도 지반조건에 따른 댐 구조물의 거동이 많이 다를 수 있었다. 위와 같은 예제해석을 통하여, 대형 유체저장구조물은 유체-구조물 상호작용과 지반-구조물 상호작용을 동시에 고려하여야 함을 알 수 있었다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 김문겸, 임윤목, 조성용, 조정환 (1999), “유한요소-경계요소 조합에 의한 원형 유체저장구조물의 3차원 주파수응답해석”, 한국지진공학회 춘계학술발표회 논문집, pp. 275-283.
2. 김재관, 박진용, 진병무, 조양희 (1998), “3차원 구형 액체 저장 Tank의 Rocking 응답”, 한국지진공학회논문집, 제2권 제1호, pp. 23-34.
3. 김재관, 조정래 (1999), “전달경계를 이용한 댐-호소계의 지진응답해석”, 한국지진공학회논문집, 제3권 제1호, pp.123-131.
4. 김재민, 윤정방, 김두기 (2000), “유한요소-무한요소를 사용한 2차원 지반-구조물계의 주파수영역 지진응답해석법”, 한국전산구조공학회 논문집, 심사중.
5. 김재민, 윤정방, 장수혁 (1999), “지반-구조물 상호작용을 고려한 원통형 유체저장탱크의 지진해석”, 한국지진공학회 가을학술발표회 논문집, pp. 83-90.
6. 김재민, 장수혁, 윤정방, 김영석(2000), “2차원 유체-구조물-지반 상호작용 전산프로그램”, 한국지진공학회 봄학술발표회 논문집, pp. 427-434.
7. 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.
8. 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
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. Humar, J.L. and Xia, H. (1993), “Dynamic response analysis in the frequency domain”, *Earthquake Eng. & Structural Dyn.*, Vol. 22, pp. 1-12.
13. Humar, J.L., Bagchi, A. and Xia, H. (1998), “Frequency domain analysis of soil-structure interaction”. *Computers & Structures*, Vol. 66, Nos. 2-3, pp. 337-351.
14. Kausel, E. and Roesset, J.M. (1991), “Frequency domain analysis of undamped systems”, *J. Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 118, No. 4, pp. 721-734.
15. 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.
16. 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.
17. 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*.

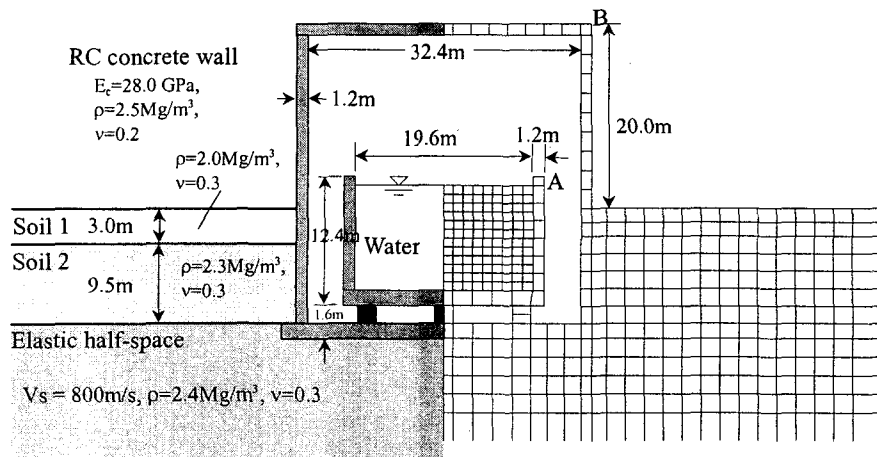


그림 1. 사용후 핵연료 저장구조물의 제원 및 해석에 사용된 유한요소와 무한요소 체눈 (예제 I)

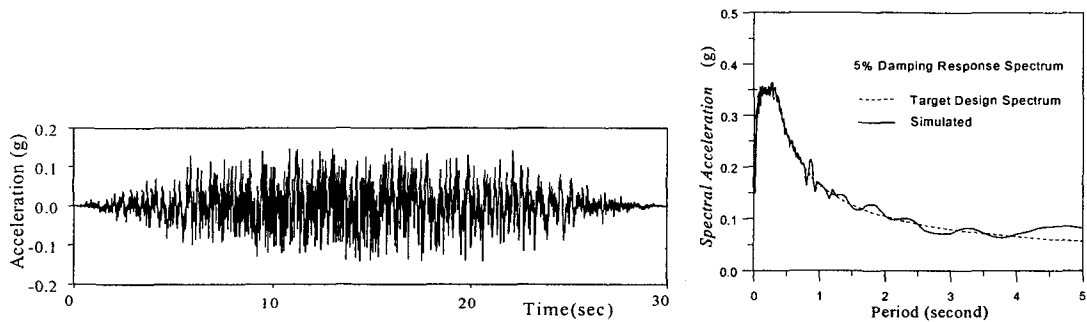


그림 2. 해석에 사용된 입력가속도의 시간이력 및 응답스펙트럼 (PGA=0.14g)

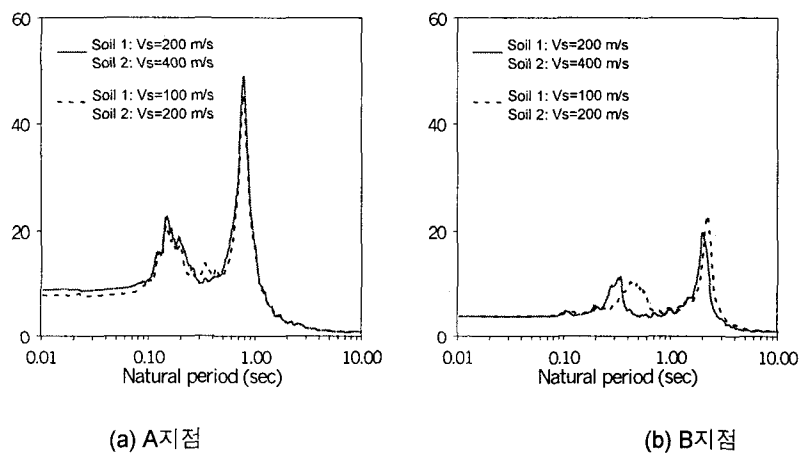
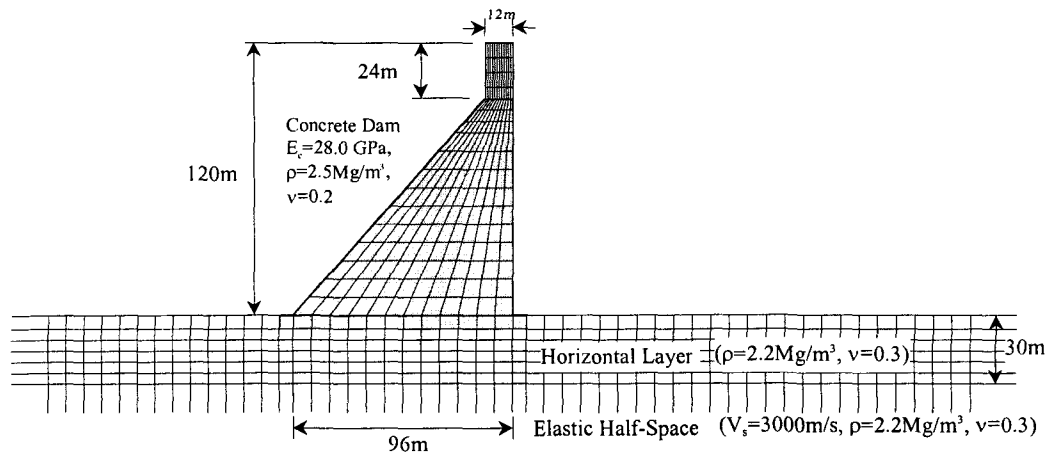
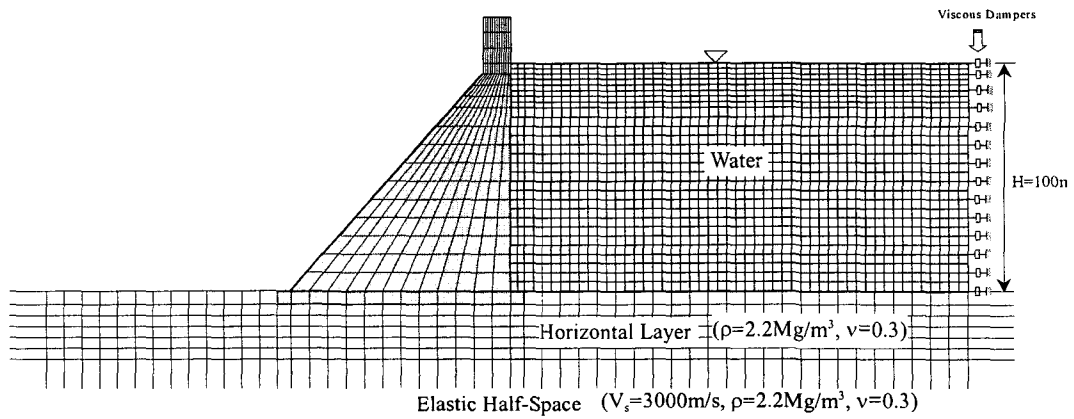


그림 3. 지반조건에 따른 사용후 핵연료 저장구조물의 내부 및 외부 벽체 상단에서의 가속도응답스펙트럼 비교 (5% 감쇠비)

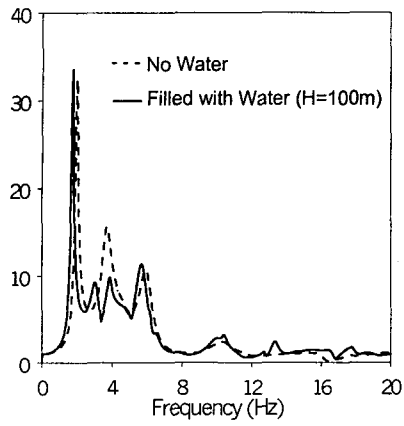


(a) 담수전 댐 구조물 및 유한요소와 무한요소 체는

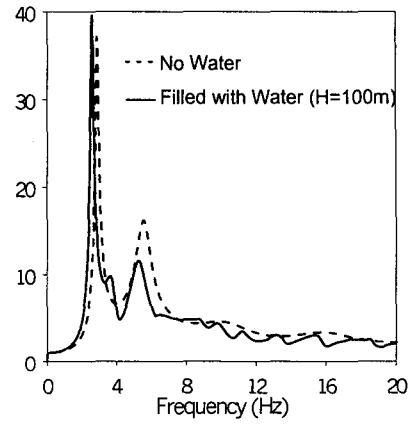


(b) 만수시 댐 구조물 및 유한요소와 무한요소 체는

그림 4. 댐 구조물의 제원 및 해석에 사용된 유한요소와 무한요소 체는 (예제 II)

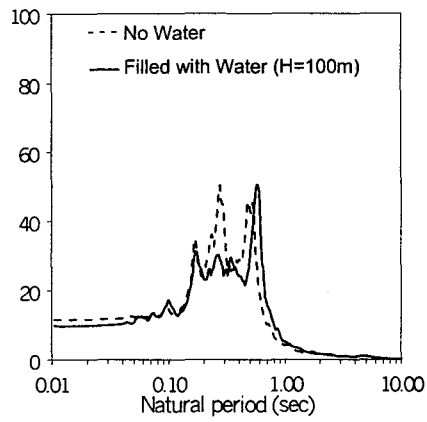


(a) 지반조건 ($V_s = 700\text{m/s}$)

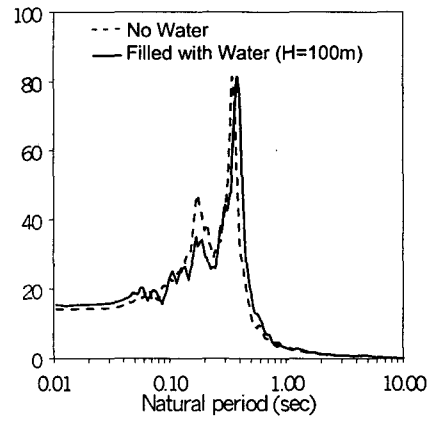


(b) 지반조건 ($V_s = 3000\text{m/s}$)

그림 5. 수평지진입력에 대한 댐 마루에서 수평응답의 전달함수



(a) 지반조건 ($V_s = 700\text{m/s}$)



(b) 지반조건 ($V_s = 3000\text{m/s}$)

그림 6. 지반조건에 따른 댐 마루에서 수평가속도의 응답스펙트럼 (5% 감쇠비)