

지진계측데이터에 근거한 유체저장탱크의 동적응답 평가

Evaluation of Dynamic Response for Liquid Storage Tank using the Observed Earthquake Data

허택영^{*} · 이종림^{**} · 연관희^{***} · 조의경^{****}

Heo, Taek-Young · Lee, Jong-Rim ·

Yun, Kwan-Hee · Cho, Eu-Kyeong

ABSTRACT

A study to evaluate the seismic response of 1/2-scaled liquid storage tank constructed in Hualien, is performed. And this study is to identify the liquid-structure-soil interaction by observed earthquake data and analyzed results. After the calculation of soil impedance for the test site by SASSI code, 3-dimensional seismic response analysis is performed by BEM-FEM-Impedance Method with the consideration of liquid-structure-soil interaction when the tank is excited by real earthquake. The observed acceleration and hydrodynamic pressure are compared with the numerical results. This comparisons show good agreement in predominant frequency and maximum hydrodynamic pressure. And the free surface sloshing motion due to earthquake loadings is computed in time domain.

1. 서론

일반적으로 유연한 지반상에 위치한 구조물은 견고한 지반이나 암반상에 위치한 구조물과는 달리 구조물을 지지하고 있는 지반과 상부구조물의 특성에 따라 지반을 통해 전달되는 지진운동에 의해 지반-구조물 상호작용이 유발된다. 현재까지 국내에 건설된 원자력발전소 구조물의 대부분은 암반상에 위치하기 때문에 내진해석시 거의 모두가 지반-구조물 상호작용의 영향을 무시한

^{*}한국전력공사 전력연구원 일반연구원, 정회원

^{**}한국전력공사 전력연구원 책임연구원, 정회원

^{***}한국전력공사 전력연구원 일반연구원, 정회원

^{****}현대건설 기술연구소 선임연구원, 정회원

고정기초 구조물로 가정하여 해석을 수행하였다. 그러나 이미 확보된 부지만으로는 계획된 원자력발전소 시설을 모두 수용할 수 없기 때문에 새로운 부지가 확보되어야 하는데 새로 확보될 부지는 지반-구조물 상호작용의 영향이 크게 나타날 수 있는 연암이나 토양지반일 가능성이 있다. 이 경우 내진해석을 수행하기 위해서는 지반-구조물 상호작용 해석에 대한 해석요소들을 파악하고 각 해석요소들이 내진해석결과의 동적응답에 미치는 영향과 특성들을 분석하여야 한다.

이러한 이유로 선진외국에서도 원전구조물 및 기기계통설비의 내진설계에 필요한 기초자료의 확보와 내진해석기술의 향상을 위해 그 동안 관련 분야에 대한 이론연구는 물론이고 축소모델을 이용한 몇 차례의 실증연구를 수행하였다.

이와 같은 연구활동의 일환으로 대만의 화련지방에 대형 원자로건물 모델을 건설하는 국제공동연구인 “대만 화련 내진모델시험”이 1988년에 착수되었다. 본 국제공동연구는 미국의 EPRI와 대만의 대만전력이 주관하고 일본(TEPCO, CRIEPI), 미국(NRC), 프랑스(CEA, EDF, Framatome)가 공동 참여하여 착수되었으며, 한국은 한전 전력연구원, 한국원자력안전기술원, 한국전력기술(주)이 공동 참가하였다.

대만의 화련지방은 MM진도 5이하의 지진이 자주 발생하는 곳으로, MM진도 7이상의 강진도 일년에 1회 정도의 확률로 발생하고 있는 세계적인 지진다발지역 중의 하나이다. 본 국제공동연구에는 총 연구비 미화 350만 달러가 투자되었으며, 연구수행을 위해 100만 kW급 원자로건물의 1/4 축소모델(직경 10.5m, 높이 16.1m)과 유체저장탱크의 1/2 축소모델(직경 7m, 높이 8.3m)이 건설되었다. 본 연구에 참여한 각국의 참가기관들은 원자로건물과 유체저장탱크 축소모델의 설계 및 건설, 부지의 지반조사, 지진계측시스템 설치, 강제가진시험^{13,14}과 실제 지진발생시 지반-구조물 상호작용 해석, 내진해석 절차서 작성 등의 업무를 각국의 참가 기관별로 분담하여 수행하였다. 본 국제공동연구에서 수행된 연구내용 중 원자로건물 축소모델의 지진응답에 대한 연구결과는 그동안 국내외에서도 수차례 발표된 바 있다.

본 연구에서는 유체저장탱크의 지진응답에 대한 비교연구를 수행하였다. 이를 위해 우선 대만 화련 부지에서 실제 지진발생시 계측된 지진응답자료를 수집하여 분석하였으며, 이 결과에 대한 비교분석을 위해 유체-구조물-지반 상호작용을 고려한 유체저장탱크 축소모델의 3차원 동적해석을 수행하였다. 3차원 동적해석은 2단계로 나누어 수행하였다. 1 단계는 구조물과 지반의 상호작용을 고려하는데 필요한 대상부지의 지반 임피던스를 구하는 과정이고 2 단계는 유체-구조물-지반의 상호작용을 동시에 고려하여 입력지진에 대한 3차원 동적해석을 수행하는 과정이다.

1 단계의 작업수행에는 구조물-지반 상호작용 전용해석코드인 SASSI^{110,111}를 이용하였으며, 2 단계에서는 유체-구조물-지반 상호작용을 해석할 수 있는 TANKSSI 코드를 개발하여 사용하였다.

2. 유체저장탱크 축소모델의 개요 및 지진계측데이터

2.1 개요

대만 화련 대형내진모델시험 부지에는 지진발생시 지반-구조물-유체의 상호작용^{11,6,71} 관계를 규명하는데 필요한 데이터를 얻기 위하여 유체저장탱크의 건설이 추진되어 1995년 9월에 완공되었다. 그림 1 은 대표적인 유체저장탱크 실물을 1/2 크기로 축소하여 건설된 원형탱크의 모식도이

다. 탱크의 직경이 7m, 높이 8.6m이고 두께는 부분적으로 조금씩 다르지만 대체적으로 3.5mm이다.

지질시험 및 보어링시험의 결과에 의하면 지표면에서 약 100m 깊이까지 지반의 전단파 속도는 400m/sec 정도로써 상층부 5m는 점토질 모래, 그 아래는 3cm에서 7cm 사이의 자갈로 구성되어 있는 것으로 보고되고 있다¹²⁾.

지진발생시 탱크의 지진응답을 측정하기 위한 측정위치는 그림 2에 나타난 바와 같이 기초 상부면에서부터 유체저장탱크 벽면으로 1.0, 3.0, 4.7, 5.7, 7.6m 높이의 남-서방향(VP1-VP4, CP1 및 VA1-VA4, CA1)과 남-동방향(VA5-VA8, CA4 및 VA5-VA8, CA4)의 수직단면에 설치되어 있다.

2.2 지진계측데이터

1993년 7월부터 1995년 10월까지 대만 화련 대형내진시험 부지에는 9차례의 지진이 발생하여 계측되었다. 이들 지진들은 최대가속도가 10gal에서 135gal로 매우 다양하였다⁹⁾. 이 가운데 1995년 10월 7일 발생한 지진은 규모가 4.7로 대형내진모델시험 부지의 인접지역에서 발생하였으며 진원 발생 깊이는 약 0.6km였다. 시험 부지로부터 진앙의 거리와 방위각은 각각 약 17.6km와 160.7°이다. 이 지진은 그 동안 발생한 9차례의 지진 중 가장 작은 규모의 지진으로 유체저장탱크 축소모델에서 유일하게 처음으로 계측되었다. 그림 3은 유체저장탱크의 인접 지표면 관측지점에서 기록된 지진가속도 시간이력으로 방향성분별 최대지반가속도는 수직성분은 4.8gal, 수평성분은 10.0gal (E-W방향) 및 7.3gal (N-S방향) 이었다. 그리고 그림 4는 지진가속도의 Fourier 스펙트럼으로서 Fourier 진폭의 최대값은 2Hz 부근에서 나타났으며 세방향 성분 모두 비슷한 진동수 성분을 포함하였다. 그림 5의 수평방향 가속도성분의 극좌표도를 보면 N-S방향 성분과 E-W방향 성분이 시간이력상에서 서로 독립적으로 운동함을 알 수 있다.

3. 유체저장탱크의 지진응답해석

유체저장탱크¹²⁾의 지진응답해석시 유체-구조물-지반 상호작용을 고려하기 위해 1단계에서 지반 임피던스를 계산하고 이 계수를 지반과 구조물 사이의 상호작용 효과를 고려하기 위한 스프링과 대시포트의 입력값으로 이용하였다. 그리고 이 값을 사용하여 2단계에서는 유체-구조물-지반 상호작용 해석을 위한 구조물의 3차원 지진응답해석을 수행하였다.

3.1 지반 임피던스의 계산

그림 1에서 보는 바와 같이 지반이 반무한탄성체가 아니 수평다층구조인 경우의 지반 스프링 상수 및 등가감쇠상수는 SASSI 프로그램을 이용하여 얻어진 지반 임피던스 계수로부터 계산되었다. SASSI 프로그램을 이용하여 지반 임피던스를 계산하기 위해, 단위하중 하에서 구조물의 총 질량이 고려된 기초의 매입이나 지반의 조건을 고려하여 지반의 스프링상수와 감쇠상수(임피던스)를 계산한다.

3.2 유체-구조물-지반 상호작용계의 정식화

그림 6 에서 보는 바와 같이 탱크는 지반에 의하여 지지되어 있고 반경이 R, 길이가 L, 그리고 두께가 h인 원통형 구조로 이루어져 있다. 높이 H만큼 유체로 채워져 있으며 바닥면은 원형의 강체원판으로 이루어져 있다고 가정하고 이것이 변형가능한 지반 위에 놓여 있다고 가정한다.

바닥의 중심을 원점으로 가정한 직교좌표계를 사용하며, 진동 중의 자유수면 높이를 표현하기 위하여 $\eta(x, z, t)$ 를 정지수면에서의 높이로 정의한다. 영역 V는 유체영역을, 그리고 S_j , S_w , S_b 는 각각 유체의 자유수면, 벽면, 바닥면을 나타낸다.

3.2.1 가정

유체저장탱크를 3차원으로 모델링하여 본 연구에서 사용한 TANKSSI 프로그램으로 해석하기 위해 유체-탱크-지반의 상호작용계를 다음과 같이 가정하였다⁶⁾.

- 유체저장탱크 구조물은 쉘요소로 선형탄성거동을 한다.
- 지반은 반무한체의 탄성지반이다.
- 유체저장탱크는 지반 위에 강결되어 있다.

3.2.2 유체운동을 지배하는 조건식

유체의 운동은 x, y, z 축 각각의 운동방향으로 속도포텐셜의 성분으로 표현할 수 있다.

$$v_x = \frac{\partial \psi}{\partial x}, \quad v_y = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v_z = \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad (1)$$

여기서, v_x , v_y , v_z 는 각 방향으로의 유체흐름의 절대속도이다.

본 연구에서는 유체의 흐름은 비압축성, 비점성, 비회전성을 가지는 이상유체로 가정하였다. 이때 속도포텐셜 $\psi(x, y, z, t)$ 는 V영역에서 Laplace 방정식을 만족한다.

$$\nabla^2 \psi = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

자유면에서는 두 개의 경계조건이 도입되는데, 자유면에 있는 유체는 항상 자유면에만 존재하는 운동역학적인 경계조건상태이다

탱크와 유체의 경계면에서 유체동압력 $P(x, y, z, t)$ 는 아래와 같이 표기할 수 있다.

$$P(x, y, z, t) = -\rho \frac{\partial \psi(x, y, z, t)}{\partial t} \quad (3)$$

이때, ρ 는 유체의 밀도이다.

3.2.3 유체저장탱크와 기초의 지배조건

방정식 (2)에서 유체 체적의 경계적분식은 다음과 같이 행렬로 나타낼 수 있다.

$$[A]\{\psi\} - [B]\left\{\frac{\partial\psi}{\partial n}\right\} = \{0\} \quad (4)$$

여기서 A와 B는 경계적분식의 영향계수 행렬이고, ψ 와 $\frac{\partial\psi}{\partial n}$ 는 미지 포텐셜벡터와 그것의 수직 gradient이다.

$$[M_{FS}]\{\vec{n} \cdot \vec{a}\} + [M_{FF}]\{\vec{\eta}\} + [K_{FF}]\{\eta\} + [M_{FF}]\{(\ddot{u}_y)_i\} = \{0\} \quad (5)$$

여기서 $M_{FS} = B_{FS} - \bar{A}_{FS} \bar{A}_{SS}^{-1} B_{SS}$, $M_{FF} = B_{FF} - \bar{A}_{FS} \bar{A}_{SS}^{-1} B_{SF}$,
 $K_{FF} = \bar{A}_{FF} - \bar{A}_{FS} \bar{A}_{SS}^{-1} A_{SF}$ 이다.

3.2.4 지반-구조물 상호작용계의 조합

유한 쉘요소로 모델링된 탱크와 기초의 임피던스 함수, 지반의 운동으로 인한 유체의 운동방정식 및 유체의 동적 힘들의 조합은 아래의 방정식으로 조합할 수 있다.

$$\begin{aligned} & [M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} \\ & = -[M][r] \begin{pmatrix} \ddot{u}_{xg} \\ \ddot{u}_{yg} \\ \ddot{u}_{zg} \end{pmatrix} + \{F_p\} \\ & = -[M][r] \begin{pmatrix} \ddot{u}_{xg} \\ \ddot{u}_{yg} \\ \ddot{u}_{zg} \end{pmatrix} + [L]\{P\} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\{U\} = \begin{pmatrix} U_s \\ U_b \end{pmatrix}$$

여기서, $\{U_s\}^T$ 는 구조물의 자유도이며 $\{U_b\}^T$ 는 기초의 자유도이다.

M , C , K 는 지반-구조물 상호작용계의 조합된 질량, 감쇠, 및 강성행렬이며, r 는 지진영향행렬이다. F_p 는 유체의 절점압력벡터를 등가의 절점력벡터로 나타낸 것이다. L 은 압력-힘의 변환행렬이다. 유체의 동적거동과 지반-구조물의 동적거동을 조합하기위해 다음과 같은 관계를 만족해야 한다.

$$\{\vec{n} \cdot \vec{a}\} = [N]\{\dot{U}\} \quad (7)$$

여기서, N 은 전체좌표계에서의 수직방향으로의 변환행렬이다.

방정식 (6)에서 압력벡터 P를 소거하여 방정식 (5)와 서로 조합하면 방정식 (8)로 된다.

$$\begin{bmatrix} M_{PP} & M_{PF} \\ M_{FP} & M_{FF} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{U} \\ \vec{\eta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{U} \\ \vec{\eta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{PP} & K_{PF} \\ 0 & K_{FF} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U \\ \eta \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} M_{PP} & M_{PF} \\ M_{FP} & M_{FF} \end{bmatrix} [R] \begin{Bmatrix} \ddot{u}_{xg} \\ \ddot{u}_{yg} \\ \ddot{u}_{zg} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

여기서 R은 조합된 전체계에 대한 지진영향행렬이다.

4. 수치해석 및 비교분석

4.1 해석모델의 제원 및 재료특성

본 연구에서 사용한 모델은 강재로 만들어진 대만 화련 유체저장탱크이며 지반과 탱크의 개략적인 형상은 그림 1 과 같다. 제원 및 재료특성은 표 1에 나타내었으며 지반의 재료특성은 표 2에 나타내었다.

표 2 의 시험모델 부지 지반은 지질조사 자료를 기초로하여 지표면에서부터 각각의 지층 두께가 2m, 3m, 7m, 8m인 4개의 지층으로 가정하였다. 전단파속도는 최상부 지층에서는 130m/sec이며 최하부 지층에서는 400m/sec이다.

강재로 만들어진 탱크의 높이는 8.6m, 반경은 3.5m이고 유체의 높이는 7.0m이다. 이때 탱크의 기초는 0.75m인 콘크리트 구조로 되어 있으며 강체거동을 하는 것으로 가정하였다.

4.2 모델해석

구조물과 지반의 상호작용을 고려하기 위해 지반은 그림 7 에서 보는 바와 같이 3차원 스프링과 대시포트로 이상화하였다¹⁰⁾. 이때 스프링상수 및 감쇠상수를 계산하기 위해 총 20m 깊이까지는 4개의 지층으로, 기반암은 반무한탄성체로 가정하여 구조물-지반 상호작용 전용해석코드인 SASSI를 사용하여 임피던스 해석을 수행하였다.

유체저장탱크 축소모델의 지진응답해석을 위해서 본 연구에서 개발한 TANKSSI 전산코드를 사용하였다. 유체저장탱크는 24개의 9절점 유한셀요소로 이상화하였고, 유체는 194절점 56개의 요소를 가지는 경계요소로 이상화하였다. 또한 지반은 3차원 스프링과 대시포트를 사용하여 이상화하였다. 수면은 자유면으로서 중력만 작용하는 것으로 가정하였다

4.3 수치해석 결과 및 비교분석

본 연구에서는 유체저장탱크의 지진에 대한 동적거동을 규명하기 위해 대만 화련 시험부지에 실물 크기의 1/2로 축소 건설된 탱크모델에서 계측된 지진응답을 분석하였다. 또한 본 연구에서 개발된 TANKSSI 프로그램을 이용하여 탱크의 가속도응답 및 압력응답을 계측 결과와 비교하였다.

그림 8 은 탱크높이에 따른 가속도응답의 계측결과와 해석결과를 Fourier 스펙트럼으로 나타낸 것이다. 이 그림에서 계측결과와 해석결과는 약 5.4Hz, 14Hz 부근에서 탁월진동수를 나타내고 있으며 기본진동수인 5.4Hz에서 계측결과와 해석결과가 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 계측한 가속도응답 결과에서는 기계진동이나 주위 환경에 의해 약간의 노이즈가 있었지만 해석치와 계측치를 서로 비교한 결과 탁월진동수에서는 비교적 잘 일치하였다. 그러나 진폭은 해석결과보다 계측결과에서 약간 작게 나타났다. 이것은 구조물과 지반의 감쇠비가 충분히 반영되지 않았기 때문에 생긴 결과로 추정되며 앞으로 감쇠비가 충분히 고려된 해석이 이루어져야 할 것으로 판단된다. 그림 9 는 최대 동압력분포의 계측결과와 해석결과를 서로 비교한 그림이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 최대 동압력분포는 상부보다 하부에서 더 크게 나타났다. 그림 10 는 시간변화에 따

른 자유수면의 높이변화를 나타낸 것이다. 유체와 탱크의 왼쪽 경계면(그림 10(a)) 과 오른쪽 경계면(그림 10(b)) 에서 자유수면 높이가 서로 대칭으로 나타나고 있으며, 탱크와 유체의 경계면에서 유체의 출렁임이 가장 크게 일어남을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구는 대만 화련 시험부지의 인접지역에서 발생한 지진에 대해 유체저장탱크의 지진응답을 계측하여 분석하였다. 이때 계측된 결과의 비교분석을 위해 유체-구조물-지반의 상호작용을 고려한 3차원 해석코드인 TANKSSI를 개발하여 사용하였으며, 이때 유체와 탱크는 각각 경계요소 및 유한요소로 모델링하였고 기초지반은 스프링과 대시포트로 이상화하였다. 동적해석에서 얻어진 해석결과를 실제 지진발생시 계측한 지진응답데이터와 비교한 결과, 계측치와 해석치의 탁월진동수는 5.4Hz, 14Hz 부근에서 나타났다. 최대 동압력분포에 대한 계측결과와 해석결과를 서로 비교했을 때 매우 만족한 결과를 얻을 수 있었다.

본 연구에서는 최대지반 가속도성분이 10.0gal인 지진에 대해 시험모델에서 계측된 지진응답을 평가하였다. 해석결과와 계측결과를 서로 비교한 결과 기본진동수에서는 비교적 잘 일치하였으나 진폭은 해석결과보다 계측결과에서 약간 작게 나타났다. 이것은 구조물의 감쇠비와 지반의 강성이 충분히 고려되지 않았기 때문에 생긴 결과로 추정되며 향후 강진에 대한 지진응답해석시 이러한 요인들을 고려하여 해석을 수행한다면 유체-구조물-지반 상호작용 규명에 많은 도움이 될 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 고현무, 김재관, 박정준(1995), "구형 유체저장 구조물의 유체-구조물 상호작용에 관한 해석적 연구", 대한토목학회논문집, 제 15권, 제 4호, pp765-775.
2. 김기환 외(1991), "대형내진모델시험을 통한 내진해석기술개선에 관한 연구(I)", 연구보고서, KOPEC/91-T023, 한국전력기술주식회사.
3. 박형기, 조양희(1996), "부분구조법에 의한 화련 대형내진시험구조물의 강제진동시험에 대한 상관해석", 대한토목학회논문집, 제 16권, 제 1-6호, pp. 735-742.
4. 윤정방, 김재민, 김문수, 현창현(1995), "지진시험용 Hualien 대형구조물의 강제진동시험에 대한 상관해석", 대한토목학회논문집, 제 15권, 제 5호, pp. 1148-1158.
5. 이종림 외(1995), "원전의 내진해석 기술개선에 관한 연구(I)", 연구보고서, KRC-90H-J05, 한국전력공사 전력연구원.
6. 조의경, 장승필(1993), "경계요소법을 이용한 유체저장탱크의 3차원 유체유동해석", 한국강구조학회지, 제 5권, 제 2호, pp. 229-240.
7. F-D, Fischer, and R, Seeber(1988), "Dynamic Response of Vertically Excited Liquid Storage Tanks Considering Liquid-Soil Interaction," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 16, pp. 329-342.
8. M-A, Haroun, and A-I, Wajdi(1992), "Parametric Study of Seismic Soil-Tank Interaction.

- I:Horizontal Excitation," Journal of Structural Engineering, Vol. 118, No. 3, pp. 783-797.
9. W-G, Huang, C-C, Lin, S-N, Cheng, and Y-T, Yeh(1996), "Strong-Motion Earthquake Records on the 7 October, 1995, in LSST Array, Hualien," Report, IESER96-001, Taiwan Power Company, Institute of Earth Sciences Academia Sinica Republic of China.
 10. J, Lysmer(1988), "SASSI Theoretical Manual," The Regents of the University of California, San Francisco, California.
 11. J, Lysmer(1988), "SASSI User's Manual," The Regents of the University of California, San Francisco, California.
 12. A-S, Veletsos, Y, Tang, and H-T, Tang(1992), "Dynamic Response of Flexibly Supported Liquid-Storage Tanks," Journal of Structural Engineering, Vol. 118, No. 1, pp. 264-283.

표 1. 탱크 및 유체의 제원과 재료특성

탱크	포아송비	0.3
	밀도(kg/m^3)	7850.0
	탄성계수(N/m^2)	2.067×10^{11}
	히스테리시스 감쇠계수(%)	2.0
	높이(m)	8.6
	반경(m)	3.5
	탱크 두께(mm)	3.5
유체	밀도(kg/m^3)	1000.0

표 2. 지반의 재료특성

지층	두께 (m)	밀도 (t/m^3)	포아송비	S-파 속도 (m/sec)	P-파 속도 (m/sec)	S-파 감쇠계수	P-파 감쇠계수
1	2.0	1.69	0.3	130	295	0.02	0.02
2	3.0	1.93	0.3	200	1020	0.02	0.02
3	7.0	2.42	0.3	270	1135	0.03	0.03
4	8.0	2.42	0.3	400	1681	0.04	0.04

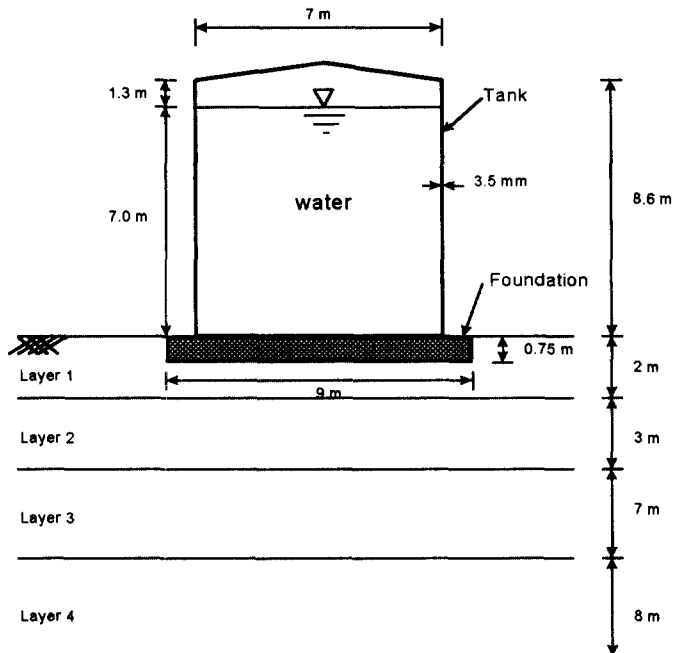


그림 1 Hualien 시험부지에 건설된 1/2축소모형의 유체저장탱크

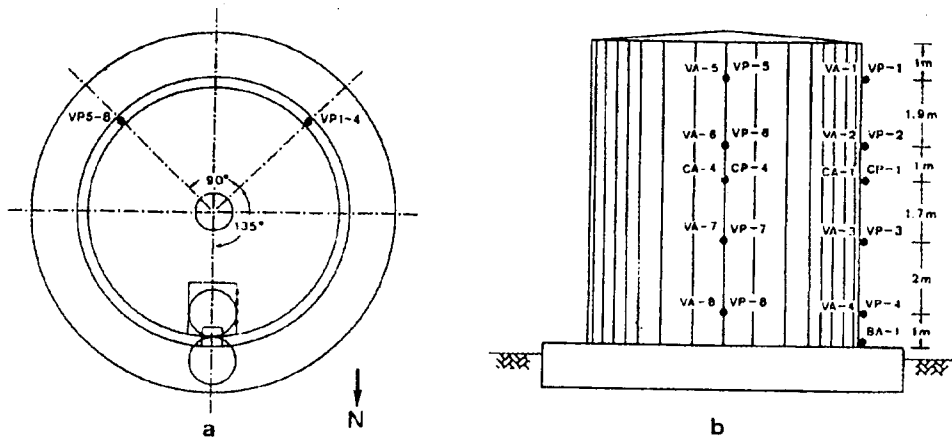


그림 2 지진응답의 계측 위치

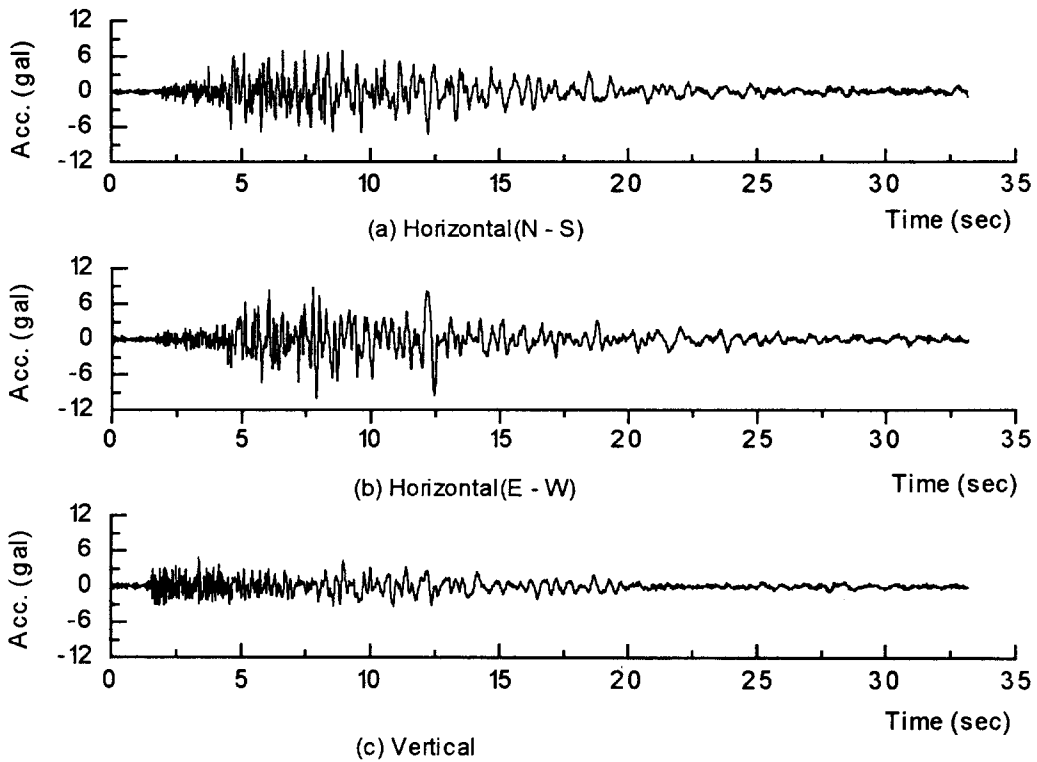


그림 3 입력지진의 시간이력 가속도 (1995. 10. 7)

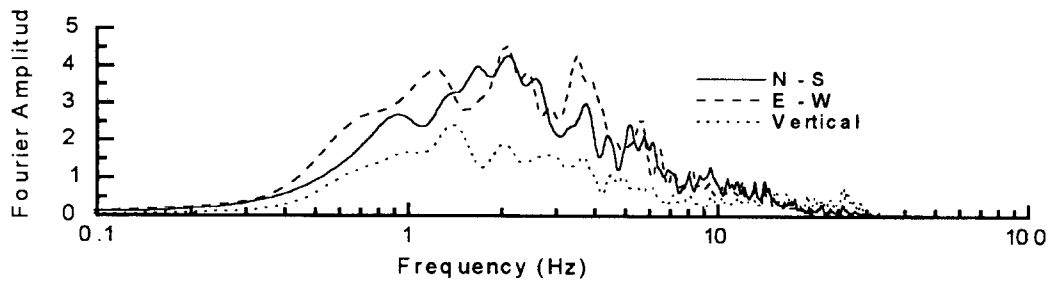


그림 4 입력지진 가속도의 Fourier 스펙트럼

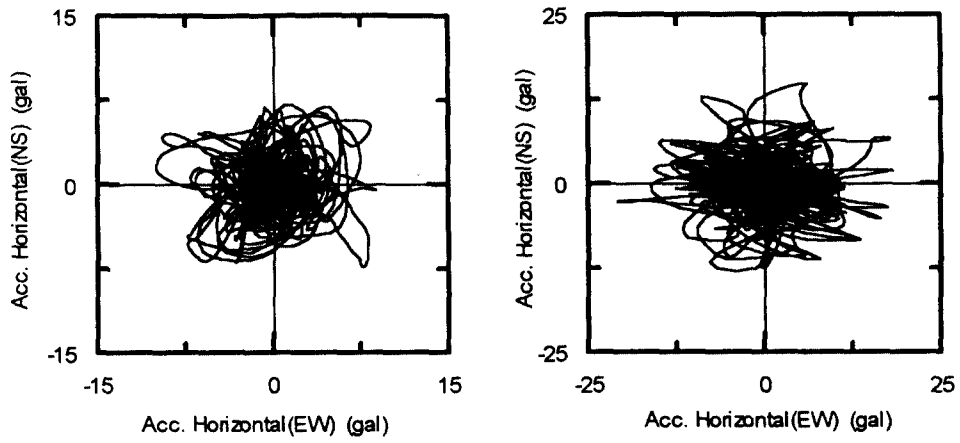


그림 5 수평방향 가속도성분의 극좌표도

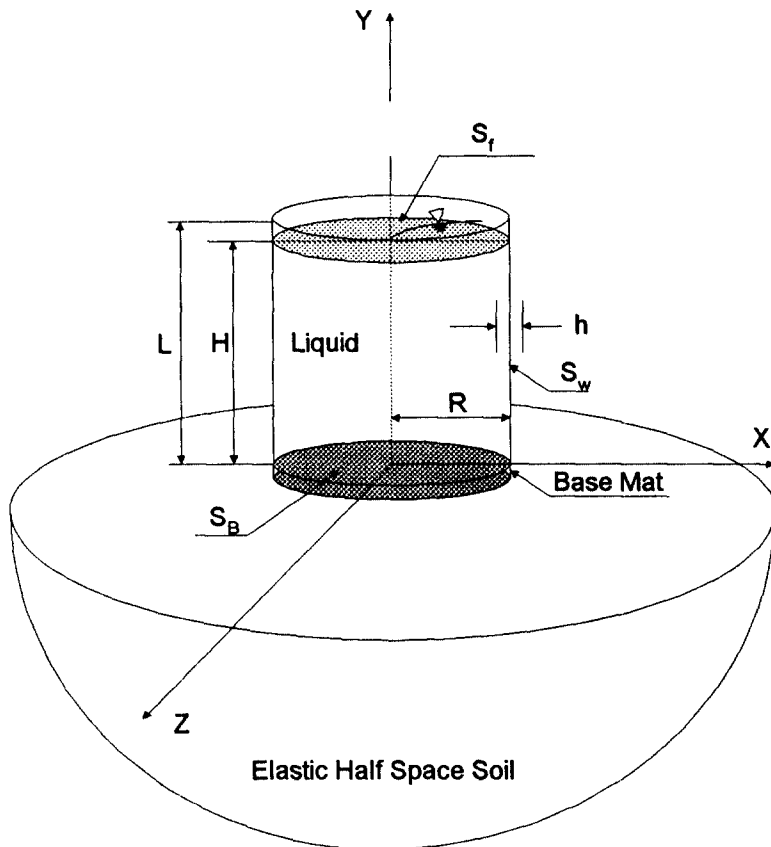


그림 6 고려하는 유체-구조물-지반 상호작용계

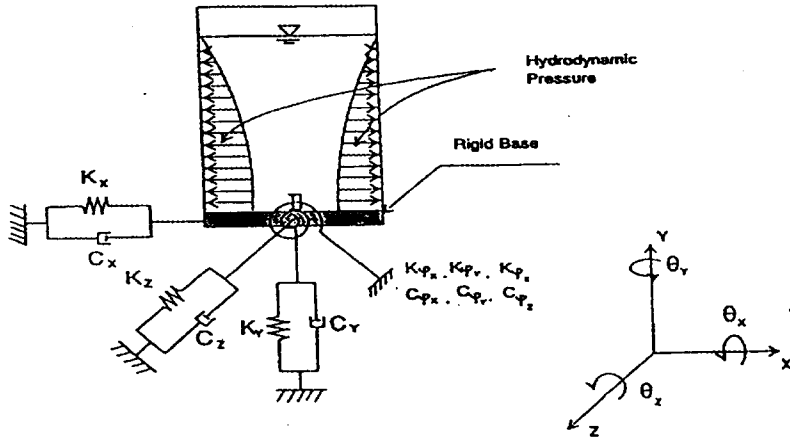


그림 7 유체-구조물-지반의 이상화

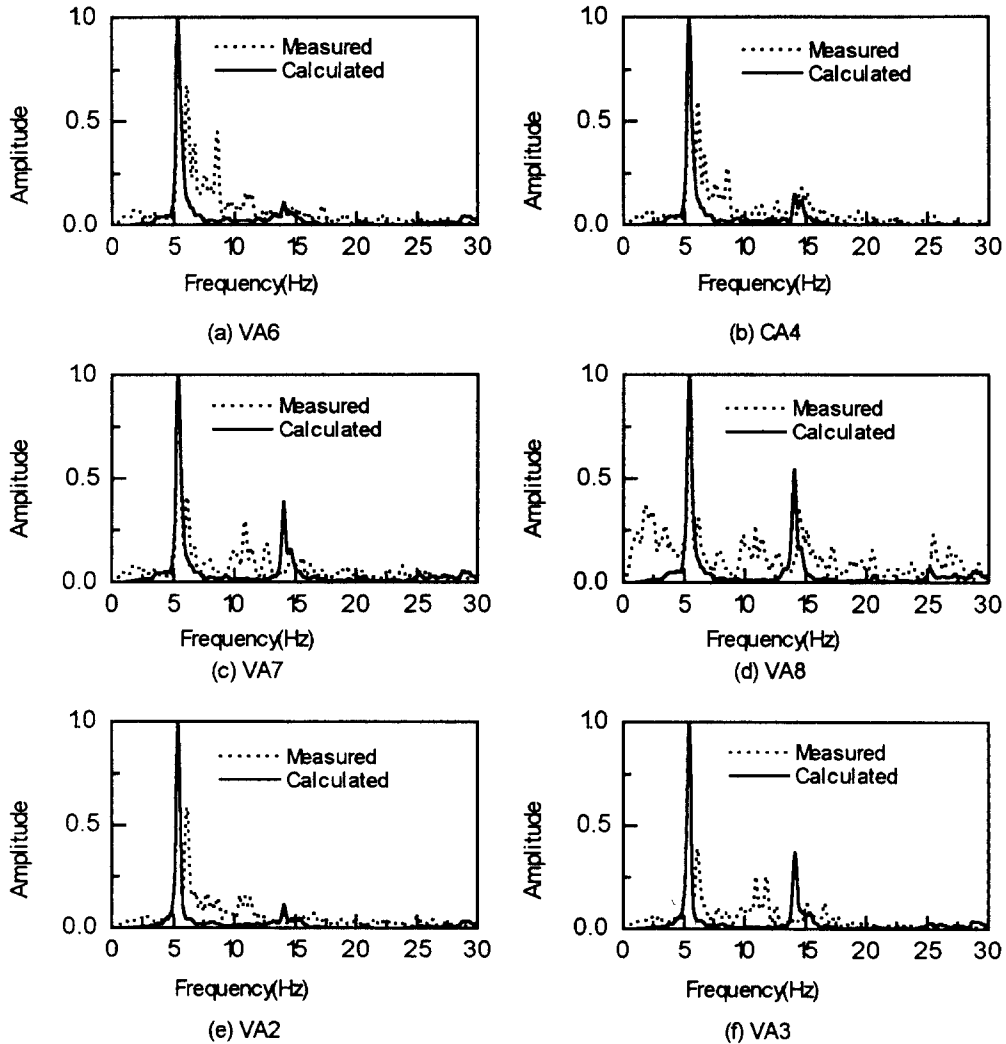


그림 8 가속도 응답의 Fourier 스펙트럼(Normalized Amplitude)

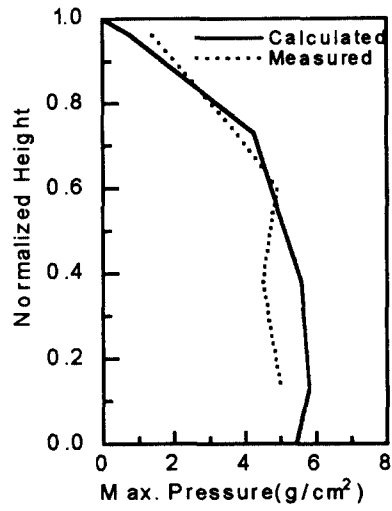


그림 9 최대 동압력분포

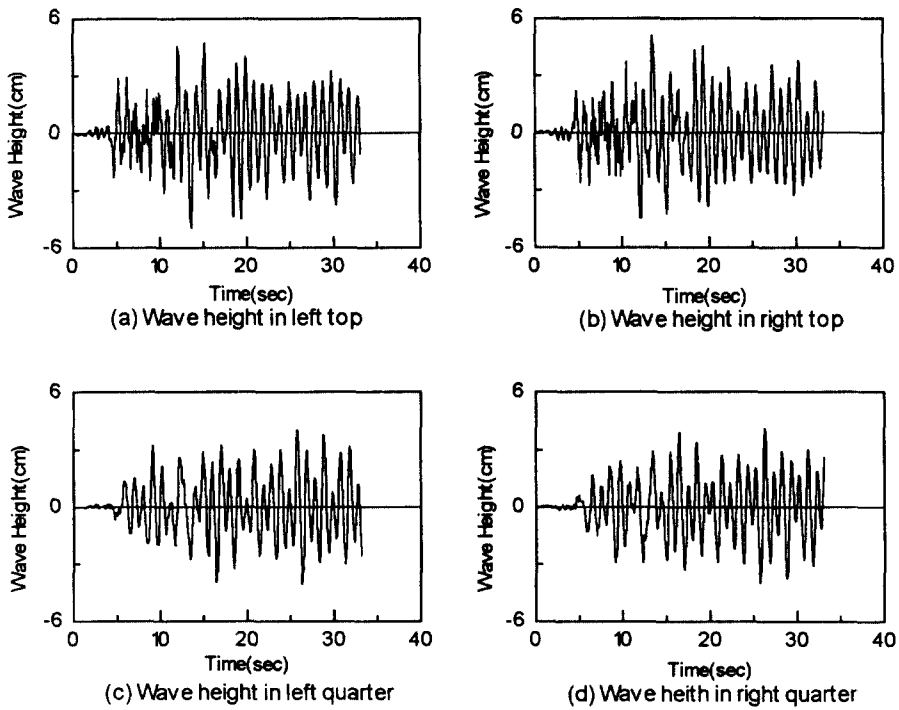


그림 10 자유수면의 유동