

면진수조의 2차원 동적 해석기법 개발

2-D Dynamic Analysis Method of Base-Isolated Pool Structure

전 영 선*

Choun, Young-Sun

최 인 걸*

Choi, In-Kil

김 진 웅**

Kim, Jhin-Wung

요 약

본 연구에서는 면진수조의 2차원 동적 해석기법을 개발하고 축소모델을 사용한 진동대실험을 통하여 해석 기법의 타성성을 검증하였다. 수조의 벽체는 집중질량을 사용하여 모델링하였으며 유체의 부가질량을 벽체의 절점에 부가함으로써 유체의 동수역학적인 영향을 고려하였다. 면진수조의 운동방정식은 벽체와 유체로 구성된 상부구조의 운동방정식과 바닥슬래브와 면진장치로 구성된 하부구조의 운동방정식을 연계하여 구하였다. 진동대 실험에서는 투명한 아크릴로 제작한 모형수조를 사용하였으며 면진장치는 4개의 고감쇠 적층 고무베어링(High Damping Laminated Rubber Bearing)을 사용하였다. 축소모델에 의한 실험결과는 대체적으로 해석결과와 잘 일치하였으며 계산결과가 다소 보수적인 것으로 나타났다.

Abstract

This study develops 2-D analysis method of a base-isolated pool structure, and verifies the method through shaking table test using a scaled model. A wall of the pool structure is modeled as lumped mass, and added mass of the fluid is imposed on the nodes of the structure to consider the hydrodynamic effect of contained fluid. The equation of motion of base-isolated pool structure is obtained by coupling of two equations for superstructure composed of wall and fluid, and for bottom slab and isolator. The scaled model for shaking table test is made with transparent acryle, and 4-high damping laminated rubber bearings are used. The responses of the scaled model by the test are generally good agreement with those by the analysis. It is shown that 2-D analysis method gives somewhat conservative results.

* 한국원자력연구소 선임연구원

** 한국원자력연구소 부장.

이 논문에 대한 토론을 1996년 3월 31일까지 본 학회에 보내주시면 1996년 9월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

사용후핵연료 저장조는 수십년동안 사용후핵연료의 저장 안전성 뿐만 아니라 그 구조적 건전성이 보장되어야 한다. 이를 위해서 저장조 구조물은 운영기간에 발생가능한 모든 비정상 사고하중과 자연현상으로 인한 재해에 대하여 충분히 저항할 수 있는 내력과 내구성을 가져야 한다.

일반건물 뿐만 아니라 교량, 유체저장탱크, 원자력발전소 등에 널리 적용되고 있는 면진시스템^{1,2,3,4)}은 원자력 구조물의 설계에서 가장 중요한 지진의 영향을 최소화하기 위한 장치로서 구조물의 진동주기를 길게하거나 지진에너지를 흡수함으로써 구조물에 발생하는 응력을 감소시키며 구조물의 안전성을 향상시킬 수 있다.

이러한 면진시스템을 수조에 채택했을 때 유체와 구조물의 지진에 대한 거동을 정확하게 해석하기 위해서는 면진장치와 유체 그리고 구조물의 상호작용을 고려하여야 하며 지반이 연약한 경우에는 지반과의 상호작용도 함께 고려하여야 한다. 일반적으로 원자력 관련 구조물은 지반이 견고한 암반층에 위치하게 되므로 유체-구조물-면진장치의 연계시스템에 대한 동적해석 기법의 개발이 필요하다.

이를 위하여 본 논문에서는 면진수조 구조물을 집중질량으로 모델링하여 해석할 수 있는 2차원 해석기법을 개발하였으며 개발된 해석기법을 검증하기 위하여 진동대실험을 수행하였다.

2. 해석모델

면진수조의 2차원 해석을 위해서 집중질량 모델을 사용하였다. 수조구조물의 벽체의 질량을 집중질량으로 모델링하고 유체와의 상호작용을 고려하기 위해서 유체를 부가질량으로 모델링하였다.

면진수조의 운동방정식은 수조의 바닥슬래브와 면진장치의 운동방정식을 구한 후 부가질량을 포함한 수조 벽체의 운동방정식과 연계하여 구할 수 있다.

2.1 수조 벽체의 모델링

면진장치를 사용한 구조물에서는 상부구조물은 선형탄성거동을 한다고 가정할 수 있다. 이러한 가정은 면진장치를 사용하는 목적이 상부구조물에 전달되는 지진력을 감소시킴으로써 상부구조물이 탄성한계 내에 있도록 하기 위함이므로 타당하다고 할 수 있다.

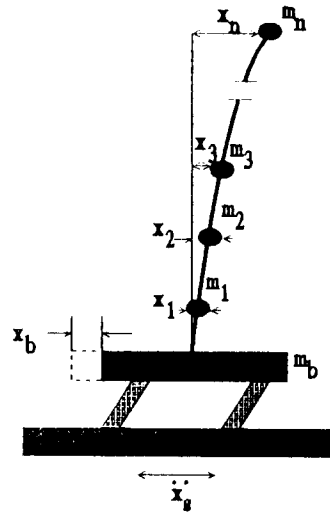


그림 1. 집중질량모델

그림 1의 집중질량모델에서 상부구조물인 수조의 벽체가 바닥슬래브에 고정된 것으로 가정하고 절점에서 모멘트가 작용하지 않는다고 하면 유연도법 또는 직접강성도법과 Condensation 기법에 의하여 수평변위를 미지수로 갖는 다음과 같은 벽체의 운동방정식을 유도할 수 있다.

$$[M^w] \{\ddot{x}\} + [C^w] \{\dot{x}\} + [K^w] \{x\} = - [M^w] \{1\} (\ddot{x}_b + \ddot{x}_g) + \{F^w\} \quad (1)$$

- 여기서, $[M^w]$: 수조 벽체의 질량행렬
- $[C^w]$: 수조 벽체의 감쇠행렬
- $[K^w]$: 수조 벽체의 강성행렬
- $\{x\}$: 수조 벽체의 바닥슬래브에 대한 상대변위벡터
- $\{1\} = \langle 1 \ 1 \ \dots \ 1 \rangle^T$
- \ddot{x}_b : 바닥슬래브의 지반에 대한 상대가속도
- \ddot{x}_g : 지반가속도

{F^w} : 절점에 작용하는 외력벡터

2.2 유체의 부가질량 산정

면진수조의 유체-구조물 상호작용의 영향을 평가하기 위하여 부가질량 기법을 적용하였으며 유한요소로 모델링하였다.⁵⁾

비점성, 비압축성 이상유체의 비회전흐름은 속도포텐셜(Velocity Potential)로 나타낼 수 있으며, 속도포텐셜 $\phi(z,t)$ 는 유체의 각 경계와 영역(그림 2 참조)에서 다음의 방정식들을 만족한다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial z_i} = \dot{u}_i \quad \text{in } \Omega \quad (2)$$

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (3)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{p}{\rho} = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} + \rho g \eta = 0 \quad \text{on } S_f \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \vec{n}} = \dot{\eta} \quad \text{on } S_f \quad (6)$$

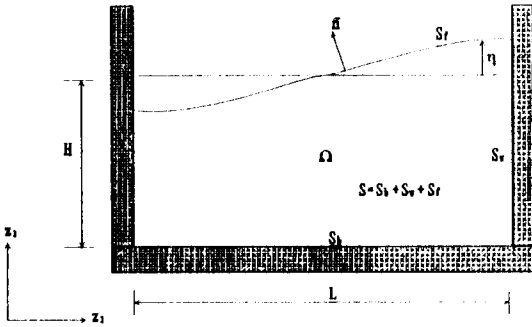


그림 2. 유체의 영역과 경계

여기서, $\dot{u}_i = \dot{u}_i(z)$ 는 관성좌표계에서의 유체속도벡터의 i축 방향 성분, $p=p(z)$ 는 유체의 압력, $\eta=\eta(z,t)$ 는 자유수면의 높이변화, $\vec{n}=\vec{n}(z)$ 는 경계에서의 외향 법선벡터를 각각 의미하며, ρ 는 유체의 단위체적당 질량, g 는 중력가속도, Ω 는 유체영역, S_f 는 자유수면을 각각 나타낸다.

유체운동을 유한요소로 모델링할 때 각 요소내에서의 속도포텐셜은 요소 절점에서의 속도포텐셜 ϕ_e 와 형상함수 N 으로써 나타낼 수 있다. 그러므로 8절점 Isoparametric 요소를 사용하면 식 (7)

로써 각 요소에서의 속도포텐셜을 표현할 수 있다.

$$\phi = \sum_{j=1}^8 N^j \phi_e \quad (7)$$

식 (3)에 Galerkin방법을 적용하고 벡터 Identity 와 Gauss Divergence Theorem을 이용하면 가중잔류치(Weighted Residual) R_i 가 구해진다.

$$\begin{aligned} R_i &= \int_{\Omega_e} N^i \nabla^2 \phi dV \\ &= - \int_{\Omega_e} (\nabla N^i \cdot \nabla \phi) dV + \int_{S_e} N^i \nabla \phi \cdot \vec{n} dS \\ &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, 아래첨자 e는 요소영역을 의미하며 S는 요소의 경계를 나타낸다.

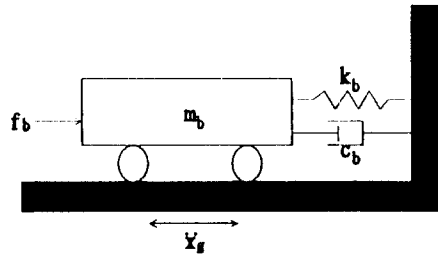


그림 3. 하부구조의 역학적 모델

식 (8)에서 절점에서의 속도벡터 $\nabla \phi \cdot \vec{n}$ 을 그림 3에서 정의된 절점속도벡터 q 라 하고 식 (7)을 식 (8)에 대입하여 정리하면 형상함수별 가중잔류치를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} R_i &= - \sum_{j=1}^8 \phi_e \int_{\Omega_e} (N^i_{,k} N^j_{,k}) dV \\ &+ \sum_{j=1}^4 \int_{S_e} N^i q dS = 0, (k=1, 2) \end{aligned} \quad (9)$$

윗식을 다시 정리하면 각 요소에 대한 방정식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$[K_e] \{ \phi_e \} = [H_e] \{ q_e \} \quad (10)$$

(8×8)(8×1) (8×12)(12×1)

유체영역 Ω 의 분할된 각 요소에 대하여 절점에
서의 법선방향속도에 관한 방정식을 구한 후 직접
강성도법에서와 같은 조합방법을 이용하면 전체
유체영역 Ω 에서의 운동방정식을 식 (11)과 같이
얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} K_{BB} & K_{BI} \\ K_{IB} & K_{II} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_B \\ \phi_I \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{BB} & 0 \\ H_{IB} & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_B \\ q_I \end{Bmatrix} \quad (11)$$

여기서 아래첨자 B는 경계상의 절점, I는 내부
절점을 의미한다.

식 (11)에 Static Condensation을 적용하면 경
계상의 절점포텐셜벡터와 절점속도벡터와의 관계
식이 구해지고 다시 시간에 대하여 미분한 후 조
건식 (2), (5), (6)을 대입하면 경계상의 절점압력
벡터와 절점가속도벡터와의 관계식이 다음과 같
은 형태로 유도된다.

$$\begin{bmatrix} A_{ww} & A_{wf} \\ A_{fw} & A_{ff} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_w \\ \eta \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{ww} & B_{wf} \\ B_{fw} & B_{ff} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_n \\ \ddot{\eta} \end{Bmatrix} \quad (12)$$

식 (12)에서 자유수면 유동의 영향을 무시하고
접촉경계에 분포된 압력을 가상일의 원리를 적용
하여 절점력벡터로 변환하면 절점가속도벡터와
절점력벡터와의 관계식이 다음과 같이 얻어진다.

$$[M^I]\{\ddot{u}^I\} = -\{F^I\} \quad (13)$$

여기서, $[M^I]$ 는 부가질량행렬, $\{\ddot{u}^I\}$ 는 관성좌표
계에서의 수평방향 절점가속도 벡터, $\{F^I\}$ 는 구조
물에 작용하는 절점력벡터이다.

만일 수조의 두 벽체가 동일하다면 Condensation에
의하여 한쪽 벽체에서의 절점가속도와
절점력벡터와의 관계식이 다음의 식 (14)와 같은
형태로 나타낼 수 있다.

$$[M^I]\{\ddot{u}^I\} = -\{F^I\} \quad (14)$$

여기서, $\{F^I\}$ 과 $\{\ddot{u}^I\}$ 는 각각 한쪽 벽체에 작용하는
절점력벡터와 절점가속도벡터이며 부가질량행렬

$$[M^I] = \frac{1}{2} [M_{11}^I + M_{12}^I + M_{21}^I + M_{22}^I] \quad (15)$$

이다. 식 (15)에서 M_{ij}^I 는 전체 부가지량행렬 $[M^T]$

의 부분행렬이다.

2.3 상부구조의 모델링

수조 벽체의 운동방정식 (1)에서 바닥슬래브에
위치한 절점의 자유도를 분리하면 부가질량행렬
 $[M^I]$ 과 절점가속도벡터 $\{\ddot{u}^I\}$ 및 절점힘벡터 $\{F^I\}$ 은
다음과 같이 표현된다.

$$[M^I] = \begin{bmatrix} m_{11} & \dots & m_{1n} & m_{1b} \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ m_{n1} & \dots & m_{nn} & m_{nb} \\ m_{b1} & \dots & m_{bn} & m_{bb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{ww}^I & M_{wb}^I \\ M_{bw}^I & M_{bb}^I \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\{\ddot{u}^I\} = \begin{Bmatrix} \ddot{x} + \{1\}(\ddot{x}_b + \ddot{x}_g) \\ \ddot{x}_b + \ddot{x}_g \end{Bmatrix} \quad (17)$$

$$\{F^I\} = \begin{Bmatrix} f_w \\ f_b \end{Bmatrix} \quad (18)$$

여기서 아래첨자 w와 b는 각각 벽체와 바닥
슬래브를 표시한다.

식 (16), (17) 및 (18)을 앞의 식 (14)에 대입하
면

$$[M_{ww}^I]\{\ddot{x}\} + ([M_{ww}^I]\{1\} + \{M_{wb}^I\})(\ddot{x}_b + \ddot{x}_g) = -\{f_w\} \quad (19)$$

$$\langle M_{bw}^I \rangle \{\ddot{x}\} + (\langle M_{bw}^I \rangle \{1\} + M_{bb}^I)(\ddot{x}_b + \ddot{x}_g) = -f_b \quad (20)$$

여기서, 기호 $\langle \rangle$ 는 Row 벡터를, $\{ \}$ 는 Column
벡터를 각각 의미한다.

식 (19)의 $\{f_w\}$ 를 식 (1)의 $\{F^w\}$ 에 대치하면 상부
구조의 운동지배방정식은 아래의 식과 같이 구해
진다.

$$[M^w + M_{ww}^I]\{\ddot{x}\} + [C^w]\{\dot{x}\} + [K^w]\{x\} = -([M^w + M_{ww}^I]\{1\} + \{M_{wb}^I\})(\ddot{x}_b + \ddot{x}_g) \quad (21)$$

2.4 하부구조의 모델링

면진장치와 바닥슬래브로 구성되는 하부구조는
그림 4와 같이 모델링할 수 있다. 하부구조에 작용
하는 힘 f_b 는 상부구조에서 전달되는 관성력 f_b^w 와

바닥슬래브에 작용하는 절점력인 f_b 의 합으로 표현된다.

식 (21)로 부터 상부구조에서 하부구조로 전달되는 관성력의 합 f_b 는 다음과 같이 구해진다.

$$f_b = -\{1\}^T [M^w + M_{ww}^l] \{\ddot{x}\} - \{1\}^T ([M^w + M_{ww}^l] \{1\} + \{M_{wb}^l\}) (\ddot{x}_b + \ddot{x}_g) \quad (22)$$

그러므로 하부구조의 운동방정식은 식 (20)의 f_b 와 식 (22)의 f_b 로 부터 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$(m_b + M_{bb}^l + \langle M_{bw}^l \rangle \{1\} + \{1\}^T [M^w + M_{ww}^l] \{1\}) \ddot{x}_b + c_b \dot{x}_b + k_b x_b + (\{1\}^T [M^w + M_{ww}^l] + \langle M_{bw}^l \rangle) \{\ddot{x}\} = - (m_b + M_{bb}^l + \langle M_{bw}^l \rangle \{1\} + \{1\}^T [M^w + M_{ww}^l] \{1\}) \ddot{x}_g \quad (23)$$

여기서, m_b : 바닥슬래브의 질량
 k_b : 면진장치의 강성
 c_b : 면진장치의 감쇠값

2.5 면진수조의 모델링

상부구조와 하부구조의 운동방정식 (21)과 (23)을 재정리하면 다음과 같다.

$$[M_s] \{\ddot{x}\} + [C_s] \{\dot{x}\} + [K_s] \{x\} + \{Q_s\} \ddot{x}_b = -\{Q_s\} \ddot{x}_g \quad (24)$$

$$M_b \ddot{x}_b + c_b \dot{x}_b + k_b x_b + \langle Q_b \rangle \{\ddot{x}\} = -M_b \ddot{x}_g \quad (25)$$

여기서, $[M_s] = [M^w + M_{ww}^l]$
 $[C_s] = [C^w]$
 $[K_s] = [K^w]$
 $\{Q_s\} = [M_s] \{1\} + \{M_{wb}^l\}$

$$M_b = m_b + M_{bb}^l + \langle M_{bw}^l \rangle \{1\} + \{1\}^T [M_s] \{1\}$$

$$\langle Q_b \rangle = \{1\}^T [M_s] + \langle M_{bw}^l \rangle$$

상부구조의 운동이 식 (24)의 무감쇠 시스템의 제1차 고유모드에 의하여 근사될 수 있다고 가정하면 상대변위벡터는 다음과 같이 표현된다.

$$\{x\} = \{\phi_1\} y \quad (26)$$

여기서 $\{\phi_1\}$ 은 제 1차 고유모드벡터이고, $y = y(t)$ 는 모드좌표이다. 식 (26)을 식 (24)와 (25)에 대입하면 다음과 같이 단순화된 식을 얻을 수 있다.

$$\ddot{y} + 2\xi_1 \omega_1 \dot{y} + \omega_1^2 y + d_1 \ddot{x}_b = -d_1 \ddot{x}_g \quad (27)$$

$$\ddot{x}_b + 2\xi_b \omega_b \dot{x}_b + \omega_b^2 x_b + d_b \ddot{y} = -\ddot{x}_g \quad (28)$$

여기서, $\omega_1^2 = \frac{\{\phi_1\}^T [K_s] \{\phi_1\}}{\{\phi_1\}^T [M_s] \{\phi_1\}}$

$$d_1 = \frac{\{\phi_1\}^T \{Q_s\}}{\{\phi_1\}^T [M_s] \{\phi_1\}}$$

ξ_1 = 모드감쇠비

$$\omega_b^2 = \frac{k_b}{M_b}$$

$$d_b = \frac{\langle Q_b \rangle \{\phi_1\}}{M_b}$$

ξ_b = 면진장치의 감쇠비

위의 두 식 (27)과 (28)을 조합하면 다음의 연계된 운동방정식을 유도할 수 있다.

$$[M_c] \{\ddot{U}_c\} + [C_c] \{\dot{U}_c\} + [K_c] \{U_c\} = \{F_c(t)\} \quad (29)$$

여기서, $[M_c] = \begin{Bmatrix} 1 & d_1 \\ d_b & 1 \end{Bmatrix}$
 $[C_c] = \begin{Bmatrix} 2\xi_1 \omega_1 & 0 \\ 0 & 2\xi_b \omega_b \end{Bmatrix}$
 $[K_c] = \begin{Bmatrix} \omega_1^2 & 0 \\ 0 & \omega_b^2 \end{Bmatrix}$
 $\{U_c\} = \begin{Bmatrix} y \\ x_b \end{Bmatrix}$
 $\{F_c(t)\} = - \begin{Bmatrix} d_1 \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{x}_g$

3. 면진수조의 진동대실험

면진수조의 2차원 동적해석기법을 검증하기 위하여 축소모델을 이용한 진동대실험을 수행하였다. 축소모델의 제원은 사용할 진동대의 성능, 모델재료의 종류 및 특성치, 예비해설결과 등을 고려하여 결정하였다.

축소모델의 크기는 응답이 잘 측정될 수 있도록 가능한 크게 하였으며 축소모델의 재료로서는 내부유체의 거동을 용이하게 관찰할 수 있도록 투명한 아크릴을 사용하였다. 실험에 사용한 모형수조의 제원 및 동적특성은 표 1과 같다.

표 1. 모형수조의 제원 및 동적 특성

구분	단위	모형수조
재료특성	종류	투명아크릴
	탄성계수	KN/m ² 2.9×10 ⁶
	단위중량	kg/m ³ 1,200
수조제원	크기(내부)	m 2.2×1.15×0.9
	벽체두께	cm 3.5
	수위	m 0.7
수조중량	구조물	ton 1.4
	유체	ton 1.8
	합계	ton 3.2
고유진동수	유체	Hz 0.8
	구조물	Hz 20.0
	연계시스템	Hz 14.0

실험에서 사용한 4개의 면진장치는 일본의 Bridgestone에서 제작한 그림 5의 고감쇠 적층고무베어링(High Damping Laminated Rubber Bearing)을 사용하였으며 그 제원은 다음과 같다.

- 수평강성 및 수평고유진동수

수평변위(cm)	0.5	1.0	1.5	2.0
수평강성(kgf/cm)	112.0	94.5	80.5	69.5
수평고유진동수(Hz)	1.99	1.83	1.69	1.57

- 연직강성 : $K_v = 40,304.3 \text{ kgf/cm}$
- 연직고유진동수 : 38 Hz
- 감쇠계수 : 16%
- 최대허용변위 : 150%

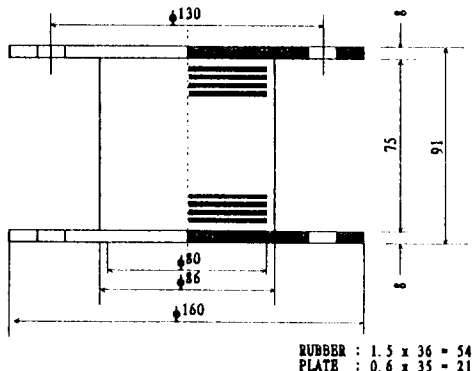


그림 4. 면진장치모델

입력지진으로서는 1940년도에 발생한 El Centro 지진의 가속도 시간이력을 최대지반가속도가 0.2g가 되도록 조정하여 사용하였으며 실험에서 사용한 지진의 지속시간과 시간간격을 각각 14초와 0.005초로 하였다.

해석기법의 타당성을 알아보기 위하여 모형 면진수조의 바닥슬래브와 수조 상부에서의 가속도 응답을 비교하였다. 그림 6과 그림 7에서 보는 바와 같이 0.5초 전후에서 나타나는 최대응답을 제외하면 전시간에 걸쳐 유사한 응답을 보여주고 있다. 이것은 실험에 사용한 진동대가 최대진폭이 5초 부근에서 발생하는 입력지진 가속도를 정확하게 재현하지 못하는 기계적 성능의 한계에 의한 결과로 보여진다.

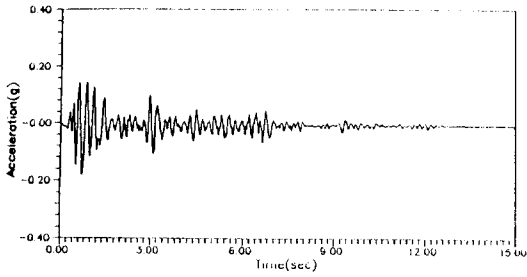
가속도응답을 주파수 영역에서 해석한 결과는 그림 8, 그림 9와 같다. 그림 8에서 보는 바와 같이 실험 및 해석에 의한 응답의 성분이 거의 유사하게 나타났으며 두 결과 모두 면진수조의 고유진동수인 4.5Hz 부근에서 최대치를 보여주고 있다.

수조 상부에서는 그림 9에서 보는 바와 같이 최대치가 두 곳에서 발생된다. 실험결과에서는 면진구조물의 고유진동수인 4.5Hz와 약 10.5Hz 부근에서 최대치가 발생되며, 해석결과에서는 4.5Hz와 약 9Hz 부근에서 최대응답이 나타나고 있다. 이것은 수조 벽체의 중앙 상단이 함께 진동하고 있음을 보여주는 것이다. 두번째 최대치의 진동수가 실험결과와 상이한 것은 실제 수조구조물의 벽면은 양측이 측벽에 의해 구속되어 있으므로 해석시 사용된 캔틸레버 모델에 비해 그 강성이 크기 때문인 것으로 판단된다.

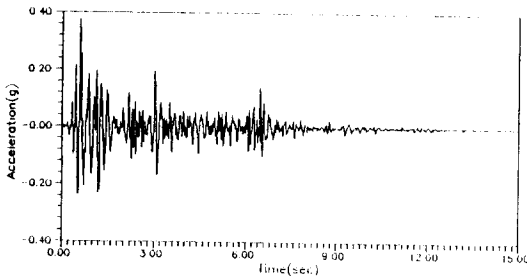
이상의 결과로 볼때 해석시 면진장치의 정확한 모델링은 수조의 응답을 평가하는데 있어 매우 중요하며, 응답이 면진수조의 고유진동수와 상부구조물의 첫번째 고유진동수에서 최대치를 나타내므로 구조물의 첫번째 고유진동수만을 사용한 본 논문의 해석기법이 타당한 것으로 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 면진수조의 2차원 동적 해석기법을 개발하였으며 모형실험을 통하여 해석기법의

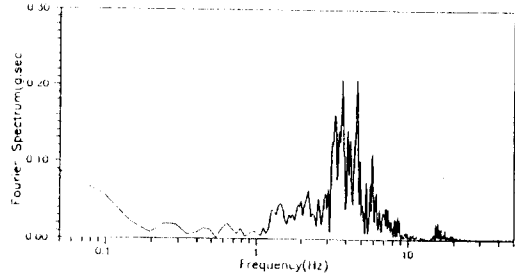


(a) 실험결과

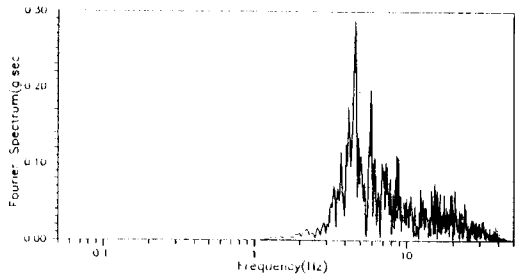


(b) 2차원 해석결과

그림 5. 바닥슬래브에서의 가속도응답

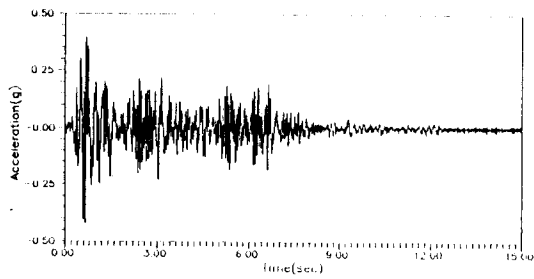


(a) 실험결과

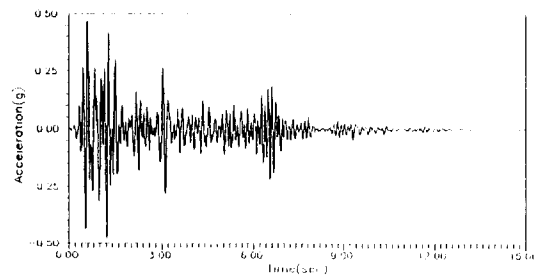


(b) 2차원 해석결과

그림 7. 바닥슬래브 가속도응답의 Fourier 스펙트럼

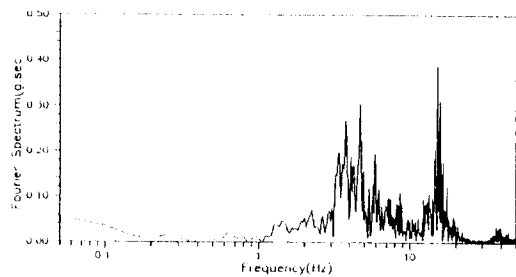


(a) 실험결과

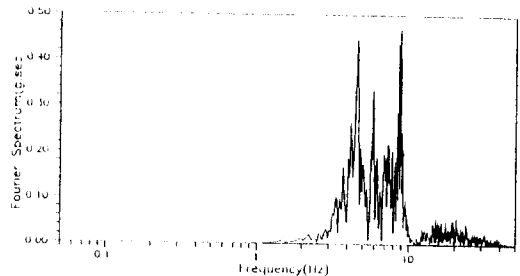


(b) 2차원 해석결과

그림 6. 구조물 상부에서의 가속도응답



(a) 실험결과



(b) 2차원 해석결과

그림 8. 구조물상부 가속도응답의 Fourier 스펙트럼

타당성을 입증하였다.

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 수조구조물의 동적 해석시에 구조물 벽체의 첫번째 고유진동수만을 고려하여도 비교적 정확한 구조물의 거동을 파악할 수 있다.
- 2차원해석기법은 3차원해석기법에 비하여 계산시간이 적게 소요되고 보수적인 값을 나타내는 경향이 있으므로 간편하게 사용할 수 있다.
- 수조벽체의 유연성이 큰 경우에는 2차원해석기법을 사용해도 어느정도 정확한 거동을 나타낼 수 있다.

본 논문에서 제시한 방법이 면진수조의 거동을 비교적 잘 나타내고 있지만 보다 정확한 결과를 얻기 위해서는 상부구조물의 3차원 구속조건을 고려할 수 있는 기법의 개발이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 방사성폐기물 관리기금 사업의 연구 결과로서 면진수조의 진동대실험에 필요한 면진장치를 제공해주신 일본의 Bridgestone사에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Kelly, J. M., "Aseismic Base Isolation: Review and Bibliography," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.5, No.3, 1986, pp. 202-216.
- [2] Robinson, W. H., "Applications in New Zealand to New Constructions and Retrofitting of Existing Buildings, Bridges and Industrial Plant," *Proceedings of the International Post-SMiRT Conference Seminar on Isolation, Energy Dissipation and Control of Vibrations of Structures*, Capri, Italy, 1993, pp.41-55.
- [3] Lee, D. E., "The Base Isolation of Koeberg Nuclear Power Station 14 Years After Installation," *Proceedings of the International Post-SMiRT Conference Seminar on Isolation, Energy Dissipation and Control of Vibrations of Structures*, Capri, Italy, 1993, pp.439-444.
- [4] Bouchon, M., "Nuclear Spent Fuel Storage Pools on Aseismic Bearing Pads," *Proceedings of the Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, Vol.V, 1988, pp.633-638.
- [5] 진영선, 김진웅, 최인길, 사용후핵연료 저장조의 면진구조해석, KAERI- NEMAC /RR-72 /93, 과학기술처, 1993.