

사용후핵연료 저장 기초격리 수조구조물의 최적비용설계  
Optimal Cost Design of Base-Isolated Pool Structures  
for the Storage of Nuclear Spent Fuel

고현무 · 박관순 · 송준호

서울대학교 지구환경시스템 공학부  
서울특별시 관악구 신림동 산 56-1

요 약

지진격리된 수조구조물의 최적 내진설계법 및 비용효율성 평가법을 제시하였다. 입력지반운동은 가속도계수-지반계수 조합의 응답스펙트럼에 상응하는 스펙트럼 밀도함수의 형태로 모델링하였다. 유연한 벽체와 저장된 유체간의 상호작용은 부가질량의 형태로 고려되었으며, 최적화를 위한 설계변수로는 벽체 두께와 격리장치의 강성을 선택하였다. 파손확률을 산출하기 위하여, 구조물-격리장치 시스템의 전달함수 벡터를 운동방정식으로부터 유도한 후, 불규칙 진동론에 근거를 둔 스펙트럼 해석법을 사용하였다. 예제를 통한 설계 및 비용효율성 평가 결과에 따르면, 격리 수조구조물의 비용효율성은 중·저진 지역과 견고한 지반에서 상대적으로 높으며 이러한 지역에서는 설계변수 최적값의 손상비용 규모에 대한 민감도 역시 상대적으로 낮은 것으로 나타났다.

Abstract

A method of cost-effectiveness evaluation for seismic isolated pool structures is presented. Input ground motion is modeled as spectral density function compatible with response spectrum for combination of acceleration coefficient and site coefficient. Interaction effects between flexible walls and contained fluid are considered in the form of added mass matrix. Wall thickness and isolator stiffness are adopted as design variables for optimization. Transfer function vector of the structure-isolator system is derived from the equation of motion. Spectral analysis method based on random vibration theories is used for the calculation of failure probability. The exemplifying designs and analyses show that cost-effectiveness of isolated pool structure is relatively high in low-moderate seismic region and stiff soil condition. Sensitiveness of optimal design variables to assumed damage scales is relatively low in such region.

1. 서 론

유체를 통해 원자력 폐기물의 방사능을 차폐시키는데 주로 사용되는 직사각형 수조구조물은 지진과 같은 재해에도, 방사능에 대한 방벽기능을 제공하며, 방사성 차폐를 위한 최소 안전수심을

유지할 수 있도록 설계되어야 한다. 최근 들어, 예상되는 지진하중을 구조물 하단에 장착된 격리 장치를 통해 감소시킴으로써, 구조물 건설에 드는 초기 건설비용을 절감하고자 하는 노력이 이루어지고 있으며, 이 지진격리 수조구조물의 응답해석에 관한 연구가 계속되고 있다.<sup>(1,2,3)</sup> 이러한 연구는 특정조건에서 수조구조물을 건설하고자 하는 설계자가 격리 시스템을 채택할 것인지, 만약 채택한다면, 어떻게 그 구조물의 사회적 비용을 극대화할 수 있을 것인지에 도움을 줄 수 있을 것이다. 총 사용기간비용 최소화에 의한 비용효율성 평가 및 최적설계법은 이미 건축물이나 교량<sup>(4)</sup> 등에서 적용, 개발된 바 있으나, 격리 수조구조물에 이러한 방법을 적용하기 위해서는 수조구조물의 유체와 구조물의 상호작용이 고려되어야 하고, 비용효율성 평가에서 실제로 고려되는 조건을 반영할 수 있는 입력지반운동 모델이 선택되어야 한다. 이러한 점을 고려할 수 있는, 단순화되고 통일성을 갖춘 비용효율성 평가-최적 설계방법이 지진격리 수조구조물에 대해 별도로 개발되어야 할 필요가 있다.<sup>(5)</sup>

따라서, 이 연구에서는 비용효율성 평가에서 반영하고자 하는 가속도조건, 지반조건에 따라 입력지반운동을 모델링하고, 부가질량행렬의 형태로 유체-구조물 상호작용을 반영하도록 하였다. 또한 지진격리 수조구조물의 전달함수 벡터를 유도하여 스펙트럼 해석을 통해 파손확률을 산출할 수 있도록 하였다. 최적설계변수를 선정하고, 이들로 비용함수를 정의하고 최소화하는 방법을 개발하였다. 예제 적용을 통해 개발된 방법의 적용성을 검증하고, 주어진 여러 가지 조건이 비용효율성 및 최적설계안에 어떤 영향을 미치는지를 알아보고, 일반적인 경향을 추정하였다.

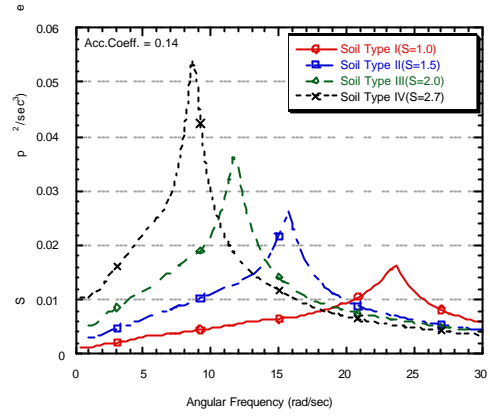
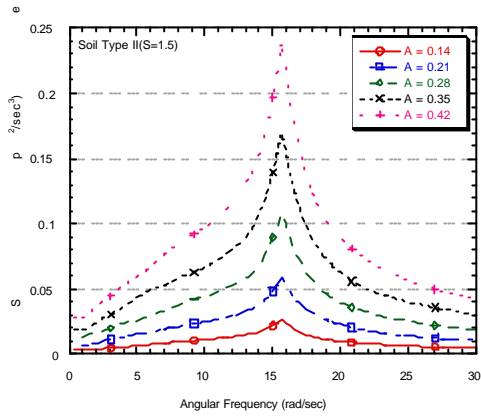
## 2. 입력 지반운동 모델링

지금까지 입력지반운동의 스펙트럼 밀도함수 모델로 Kanai-Tajimi, Clough-Penzien, Modified Clough-Penzien Model 등 많이 개발되어 왔으나<sup>(3)</sup>, 지진스펙트럼 밀도함수를 정의하는 매개변수들의 개수가 많고 이들 매개변수가 특정지역의 가속도 및 지반특성과 어떠한 상관관계를 갖고 있는지를 밝혀내기가 쉽지 않아 지진특성에 따라 최적설계안을 구하고 비용효율성을 평가하고자 하는 이 연구의 목적에 잘 부합하지 않는다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 이 연구에서는 시방서의 응답스펙트럼에 상응하는 스펙트럼 밀도함수를 생성하였다.<sup>(6)</sup> 먼저 각 지역마다 설정된 가속도계수 및 지반계수로 응답스펙트럼을 구성하고, 초기에 백색잡음(White Noise)으로 가정된 스펙트럼 밀도함수에서 스펙트럼 표현법(Spectral Representation Method)<sup>(7)</sup>에 의해 생성된 시간이력으로 별도의 응답스펙트럼을 구성한다. 이들 시방서의 응답스펙트럼과 생성된 시간이력의 응답스펙트럼을 비교하여 다음 식(1)과 같이 스펙트럼 밀도함수를 보정하는 과정을 반복함으로써 특정지역의 가속도계수, 지반계수 조합에 상응하는 스펙트럼 밀도함수 모델을 시방서의 응답스펙트럼을 매개로 생성할 수 있다.

$$S_g(\omega) \rightarrow S_g(\omega) \left[ \frac{RSA(\omega)}{RSA_s(\omega)} \right]^2 \quad (1)$$

여기서,  $RSA(\omega)$ 는 시방서의 응답스펙트럼,  $RSA_s(\omega)$ 는 스펙트럼 밀도함수  $S_g(\omega)$ 로부터 모사된 응답스펙트럼이다. 이 연구에서는 American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) 지진격리시방서<sup>(7)</sup>의 응답스펙트럼을 사용하였다.

그림 1(a)에서 확인할 수 있는 바와 같이 가속도 응답스펙트럼으로부터 생성된 가속도 스펙트럼 밀도함수의 크기는 가속도계수에 비례한다



(a) 가속도계수에 따른 스펙트럼 밀도함수

(b) 지반계수에 따른 스펙트럼 밀도함수

그림 1. 가속도계수 및 지반계수에 따른 스펙트럼 밀도함수 모델의 변화

이것은 가속도계수로 표현된 특정지역의 지진 가속도 크기를 이 모델이 잘 반영하고 있음을 의미한다. 그림 1(b)는 지반계수가 증가할수록 즉, 연약지반일수록 스펙트럼 밀도함수가 저주파쪽으로 이동하면서 동시에 그 크기가 증가함을 보여준다. 그러므로 이 연구의 스펙트럼 밀도함수 모델은, 연약지반의 저주파 지반운동 특성 및 지반-구조물 상호작용으로 인한 지반운동 규모확대를 나타내기 위한 지반계수를 응답스펙트럼에 근거하여 잘 모사하고 있음을 알 수 있다.

### 3. 유체-구조물 상호작용

유연 수조구조물에서 구조물의 벽면에 작용하는 유체 동압력은 유체-구조물 상호작용에 의해 크게 증폭되므로, 파손확률 추정에서 이를 반드시 반영하여야 한다. 이 연구에서는 유체 표면의 슬라싱(Sloshing)에 의한 대류(Convective)압력 성분은 상호작용의 영향이 경미하다는 사실에 근거하여 유체의 충격압력성분만을 유한요소 모델링에 의해 벽체에 부가되는 질량으로 환산하는 부가 질량행렬법을 사용하였다.<sup>(3,9,10)</sup> 비압축성, 비점성의 이상유체의 비회전류는 다음의 조건 방정식들을 만족하는 속도포텐셜  $\phi(\mathbf{x}, t)$ 로 나타낼 수 있다(그림 2).

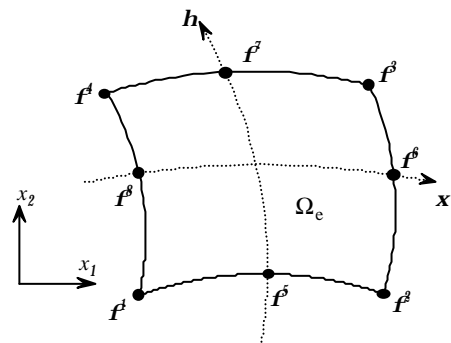
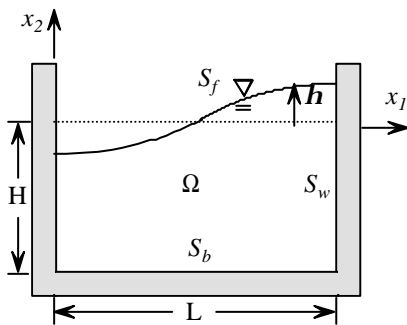


그림 2. 수조 구조물에 저장된 유체의 영역과 경계    그림 3. 요소의 영역과 경계 및 절점 포텐셜

$$u_i = \frac{\partial \phi}{\partial x_i}, \quad \nabla^2 \phi = \left( \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} \right) \phi(\mathbf{x}, t) = 0, \quad \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{p}{\rho} = 0 \quad \text{in } \Omega,$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + g\eta = 0 \quad \text{on } S_b, \quad \frac{\partial \phi}{\partial n} = \eta \quad \text{on } S_f \quad (2)$$

여기서,  $\mathbf{z} = (z_1, z_2)$ 는 관성좌표계에서의 위치벡터,  $u_i = u_i(\mathbf{z})$ 는 관성좌표계에서의 유체 속도벡터의  $i$ 축 방향 성분,  $p = p(\mathbf{z})$ 는 유체의 압력,  $\eta = \eta(\mathbf{z}, t)$ 는 자유수면의 높이 변화,  $\mathbf{n} = \mathbf{n}(\mathbf{z})$ 는 경계에서의 외향법선벡터를 뜻한다. 또한  $\rho$ 는 유체의 질량,  $\mathbf{g}$ 는 중력가속도,  $\Omega$ 는 유체의 영역,  $S_j$ 는 자유수면을 각각 의미한다. 각 요소에서의 속도 포텐셜  $\phi$ 는 다음과 같이 절점 포텐셜  $\phi_e^j$ 로 나타낼 수 있다(그림 3).

$$\phi = \sum_{j=1}^8 N^j \phi_e^j \quad (3)$$

여기서,  $N^j$ 는 8절점 Isoparametric 요소의 형상함수이다. 식 (2)에 Galerkin 방법을 적용하고 Vector Identity와 식(3)을 이용하여 형상함수별 가중잔류치 (Weighted Residual)  $R_i$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.<sup>(9)</sup>

$$\begin{aligned} R_i &= \int_{\Omega} N^i \nabla^2 \phi dV \\ &= \int_{\Omega} (-\nabla N^i \nabla \phi) dV + \int_{\Omega} \nabla (N^i \nabla \phi) dV \\ &= -\sum_{j=1}^8 \phi_e^j \int_{\Omega} (N^i,_{,k} N^j,_{,k}) dV + \sum_{j=1}^8 \int_{S_j} N^i q dS = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,  $q$ 는 경계에서의 법선방향 속도로서  $q = \nabla \phi \cdot \mathbf{n} = \phi,_{,x}$ 이고  $\Omega_e$ 는 요소의 영역,  $S_e^j$ 는 요소의 경계를 나타낸다. 이때 각 절점에서의 법선방향 속도 성분  $q_e^j$ 라 하고, 속도 포텐셜에 사용된 형상함수  $N^i$ 를 식 (4)에 대입하면 다음과 같은 행렬방정식을 유도할 수 있다.

$$[A_e]\{\phi_e\} = [H_e]\{q_e\} \quad (5)$$

$(n_e \times n_e)(n_e \times 1)$      $(n_e \times (n_e + 4))(n_e + 4) \times 1$

여기서,  $n_e$ 는 요소의 절점 개수이다.

식 (5)와 같은 절점속도포텐셜과 절점속도벡터의 관계식을 각 요소별로 구한 후 전체 유체영역에 대해 직접강성도법(Direct stiffness method)에 의해 조합함으로써 전체운동영역  $\Omega$ 에 대한 운동 지배 방정식을 구한다. 이 방정식을 유체영역과 유체경계에 대해 분획한 후, Static Condensation에 의해 경계상의 절점 포텐셜 벡터와 절점 속도벡터의 관계식을 구할 수 있다. 이를 시간에 대해 미분한 후, 식 (2)를 대입함으로써, 경계상의 절점 압력벡터와 절점 가속도 벡터 관계식을 도출한다. 유체의 자유수면에서 슬라싱의 영향을 고려하지 않는 Impulsive 경계조건 식을 적용하고 접촉 경계의 압력벡터에 가상일의 원리(Principle of Virtual Work)를 적용하여 절점력 벡터로 변환하면 다음과 같은 형태의 절점 가속도벡터와 절점력 벡터와의 관계식이 구하여진다.<sup>(9)</sup>

$$[M^T]\{\ddot{\mathbf{u}}^T\} = -\{F^T\} \quad (6)$$

여기서,  $\ddot{\mathbf{u}}^T$ 는 관성좌표계에서의 수평방향 절점 가속도 벡터,  $\{F^T\}$ 는 구조물에 작용하는 절점력벡터이고,  $[M^T]$ 는 부가질량행렬이다. 두 축벽이 동일하다면 Condensation에 의해 한쪽 축벽에서의 절점가속도와 절점력 벡터와의 관계식을 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$[M^U]\{\ddot{\mathbf{u}}\} = -\{F^U\} \quad (7)$$

여기서,  $\{F^U\}, \{\ddot{\mathbf{u}}\}$ 와  $[M^U]$ 은 각각 한쪽 벽면에 작용하는 절점력 벡터, 절점 가속도 벡터, 부가질량행렬이다.

#### 4. 지진격리 수조 구조물 모델링

지진격리된 수조구조물 역시 반복계산이 용이하도록 그림 5와 같은 집중변수모델(Lumped Parameter Model)로 모델링하였다. 바닥 슬랩 위의 축벽에서 회전관성의 영향이 경미하다면 그 지배방정식은 수평방향의 자유도만으로 표현되는 다음과 같은 방정식으로 Condensation될 수 있다.

$$[M^w]\{\ddot{x}\} + [C^w]\{\dot{x}\} + [K^w]\{x\} = -[M^w]\{1\}(\ddot{x}_b + \ddot{x}_g) + \{f^w\} \quad (8)$$

여기서,  $[M^w], [C^w], [K^w]$ 은 각각 수평방향 자유도로 condensation된 축면 벽체의 질량, 감쇠, 강성행렬,  $\{\ddot{x}\}, \{\dot{x}\}, \{x\}$ 은 벽체의 수조바닥에 대한 상대가속도, 상대속도, 상대변위,  $\ddot{x}_b$ 는 수조 바닥의 지반에 대한 상대가속도,  $\ddot{x}_g$ 는 지반가속도,  $\{f^w\}$ 는 절점에 작용하는 수평 외력벡터이다.

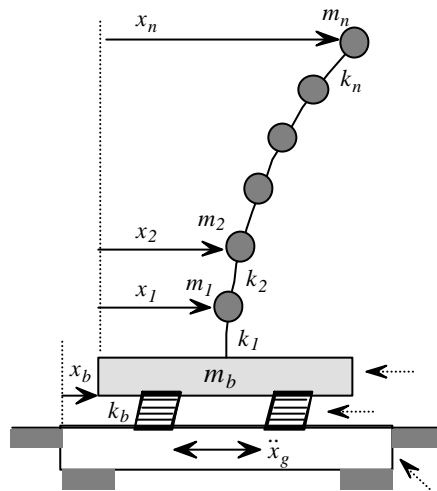


그림 4. 수조구조물의 집중변수 모델

식(8)에서 바닥슬랩에 위치한 절점의 자유도를 분리하면 부가질량행렬과 절점 가속도 및 절점력 벡터는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\{f^l\} = \begin{pmatrix} f_{ww}^l \\ f_{bb}^l \end{pmatrix}, \quad \{\ddot{u}^l\} = \begin{pmatrix} \{\ddot{x}\} + \{1\}(\ddot{x}_b + \ddot{x}_g) \\ \ddot{x}_b + \ddot{x}_g \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$[M^l] = \begin{bmatrix} m_{11} & \cdot & \cdot & m_{1n} & m_{1b} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ m_{n1} & \cdot & \cdot & m_{nn} & m_{nb} \\ m_{b1} & \cdot & \cdot & m_{bn} & m_{bb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{ww}^l & M_{wb}^l \\ M_{bw}^l & M_{bb}^l \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서,  $\{f^l\}$ 은 절점력 벡터,  $\{\ddot{u}^l\}$ 은 절점가속도 벡터이고, 첨자의 b는 격리장치, 첨자의 w는 벽체를 의미한다.

이들 식을 식 (7)에 대입하고, 상·하부구조의 연계를 고려하여 운동지배방정식을 정리하면 다음과 같다<sup>(3)</sup>.

$$[M_s]\{\ddot{x}\} + [C_s]\{\dot{x}\} + [K_s]\{x\} + \{Q_s\} \ddot{x}_b = -\{Q_s\} \ddot{x}_g \quad (11)$$

$$M_b \ddot{x}_b + c_b \dot{x}_b + k_b x_b + \{Q_b\} \{\ddot{x}\} = -M_b \ddot{x}_g \quad (12)$$

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

$$\{Q_s\} = [M^w + M_{ww}^1]\{1\} + \{M_{wb}^1\}, \quad \{Q_b\} = \{1\}^T [M^w + M_{ww}^1] + \{M_{bw}^1\},$$

$$M_b = m_b + M_{bb}^1 + \{1\}^T [M^w + M_{ww}^1]\{1\} + \{1\}^T [\{M_{wb}^1\}],$$

## 5. 한계상태 정의 및 파손확률 추정

### 5.1. 한계상태의 정의

수평 지반운동으로 인한 벽체의 파손은 전단력으로 인한 파손과 휨 모멘트로 인한 파손으로 나눌 수 있다. 단위 폭의 벽체에 전단력으로 인한 파손을 발생시키는 수평력의 크기는 다음 식(13)과 같다.

$$P_V^{lim} = \sigma_{ck} t_w \quad (13)$$

여기서,  $P_V^{lim}$ 은 전단파손 수평력,  $\sigma_{ck}$ 는 콘크리트 강도,  $t_w$ 는 벽체의 두께이다.

휨 모멘트로 파손을 발생시키는 수평력의 크기는 다음과 같다.

$$P_M^{lim} = \frac{M^{lim}}{H} = \frac{\sigma_{ck} t_w^2}{6} / H = P_V^{lim} \left( \frac{t_w}{6H} \right) \quad (14)$$

여기서,  $M^{lim}$ 는 벽체 전도모멘트의 한계값,  $H$ 는 벽체의 높이이다.

벽체에서는  $t_w/6H$ 의 값은 일반적으로 1에 비해 매우 작은 값이므로, 전단파괴를 일으키는 수평력 한계값  $P_V^{lim}$ 이 모멘트 파괴를 일으키는 수평력 한계값  $P_M^{lim}$ 보다 훨씬 큰 값을 갖는다. 따라서, 동일한 수평력이 가해질 때, 휨모멘트 파괴가 먼저 일어나므로, 이 연구에서는 벽체 파손의 한계상태를 휨 모멘트에 대해서만 정의하였다. 즉 벽체의 전도모멘트가 한계값을 넘어서는 것을 벽체의 한계상태로 정의한다.

$$M_o \geq M^{lim} \quad (15)$$

여기서,  $M_o$ 는 해석을 통해 구한 벽체의 전도모멘트값이다.

격리장치의 한계상태는 격리장치의 수평변위가 다음의 값을 초과할 때로 정의한다.

$$d_b \geq d_b^{lim} = \gamma^{lim} h_b \quad (16)$$

여기서,  $d_b$ 는 격리장치의 수평변위,  $\gamma^{lim}$ 는 격리장치의 수평 국부전단변형률 한계값(보통 250%),  $h_b$ 는 격리장치의 높이이다.

### 5.2. 파손확률의 추정방법

위의 식(15),(16)과 같은 파손판단을 위해서는 응답의 통계학적 추정이 필요하다. 이 연구에서는 스펙트럼 해석을 통해 벽체의 모멘트와 격리장치 수평변위의 표준편차를 추정하고, 이 값에 근거하여 미리 정한 한계상태 수준을 넘어서는 확률을 산출하는 방법을 사용하였다.

식 (11),(12)의 두 방정식으로 다음과 같은 하나의 행렬 방정식을 구성할 수 있다.

$$[M_e]\{\ddot{x}\} + [C_e]\{\dot{x}\} + [K_e]\{x\} = -\{M_g\} \ddot{x}_g \quad (17)$$

여기서,  $[M_e] = \begin{bmatrix} [M_s] & \{Q_s\} \\ \{Q_b\} & M_b \end{bmatrix}$ ,  $[C_e] = \begin{bmatrix} [C_s] & \{0\} \\ \{0\} & c_b \end{bmatrix}$ ,  $[K_e] = \begin{bmatrix} [K_s] & \{0\} \\ \{0\} & k_b \end{bmatrix}$ ,

$$\{M_g\} = \begin{Bmatrix} Q_{aj} \\ M_b \end{Bmatrix}, \quad \{\ddot{x}^t\} = \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{x}_b \end{Bmatrix}, \quad \{\dot{x}^t\} = \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_b \end{Bmatrix}, \quad \{x^t\} = \begin{Bmatrix} x \\ x_b \end{Bmatrix}$$

이 방정식으로부터, 각 절점 수평변위의 지반가속도에 대한 응답을 나타내는 전달함수 벡터를 유도할 수 있다.<sup>(11)</sup>

$$\{h(\omega)\} = (\omega^2[M_e] - i\omega[C_e] - [K_e])^{-1}\{M_g\} = \begin{Bmatrix} h_w(\omega) \\ h_b(\omega) \end{Bmatrix} \quad (18)$$

여기서,  $\{h(\omega)\}$ 는 각 절점 수평변위의 지반가속도에 대한 전달함수를 나타내는 벡터,  $\{h_w(\omega)\}$ 는 벽체 각 절점 수평변위의 지반가속도에 대한 전달함수 벡터,  $h_b(\omega)$ 는 격리장치 변위의 지반가속도에 대한 전달함수이다. 벽체 밑바닥의 전도모멘트는 각 절점의 수평탄성력에 각 절점의 높이를 곱한 값의 합으로 구할 수 있다.

$$M_o = \{H\}^T\{f_o\} = \{H\}^T[K_s]\{x\} \quad (19)$$

여기서,  $\{H\}$ 는 각 절점의 높이를 나타내는 벡터이다. 전도 모멘트의 지반가속도에 대한 전달함수 역시 유도할 수 있다.

$$h_{M_o}(\omega) = \{H\}^T[K_s]\{h_w(\omega)\} \quad (20)$$

응답의 스펙트럼 밀도함수는 지반운동의 스펙트럼 밀도함수와 응답의 전달함수를 통해 구할 수 있다.<sup>(12)</sup> 따라서, 전도 모멘트의 스펙트럼 밀도함수는 다음 식(21)과 같이 구할 수 있다.

$$S_{M_o}(\omega) = |h_{M_o}(\omega)|^2 S_g(\omega) \quad (21)$$

같은 방법으로 지진격리장치 수평 변위의 스펙트럼 밀도함수는 식(22)와 같이 표현할 수 있다.

$$S_b(\omega) = |h_b(\omega)|^2 S_g(\omega) \quad (22)$$

각 응답은 수평방향 대칭조건에 의해 평균을 0으로 가정할 수 있고, 이 때 표준편차는, 스펙트럼 밀도함수를 주파수영역에 대해 적분함으로써 구할 수 있다.

$$\sigma_{M_o}^2 = E[M_o^2] = \int_{-\infty}^{\infty} S_{M_o}(\omega) d\omega, \quad \sigma_{\dot{M}_o}^2 = E[\dot{M}_o^2] = \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 S_{M_o}(\omega) d\omega \quad (23)$$

$$\sigma_{d_b}^2 = E[d_b^2] = \int_{-\infty}^{\infty} S_{d_b}(\omega) d\omega, \quad \sigma_{\dot{d}_b}^2 = E[\dot{d}_b^2] = \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 S_{d_b}(\omega) d\omega \quad (24)$$

응답이 미리 정해 둔 한계상태를 단위시간동안 양의 기울기로 넘어서는 빈도수는 다음과 같이 구할 수 있다.<sup>(12)</sup>

$$\nu_{M_o}^+ = \int_0^{\infty} p(M_o^{\lim}, \dot{M}_o) \dot{M}_o d\dot{M}_o, \quad \nu_{d_b}^+ = \int_0^{\infty} p(d_b^{\lim}, \dot{d}_b) \dot{d}_b d\dot{d}_b \quad (25)$$

여기서,  $\nu_{M_o}^+$ 는 전도모멘트가 한계상태를 양의 기울기로 단위시간동안 넘어서는 빈도수,  $\nu_{d_b}^+$ 는 격리장치 수평변위가 한계상태를 양의 기울기로 단위시간동안 넘어서는 빈도수,  $p(x, \dot{x})$ 는 응답과 응답 시간변화율의 결합 확률밀도함수이다.

입력지반운동이 Gaussian분포를 따른다고 가정하면, 이 입력지반운동에 의한 선형시스템의 응답 역시 Gaussian분포를 따른다. Gaussian결합 확률밀도함수를 식(25)에 대입하고, 양방향으로 파손이 일어날 수 있음을 반영하여 파손빈도수를 양의 기울기 빈도수의 2배로 구하면 다음과 같다.

$$\nu_{M_0} = 2\nu_{M_0}^+ = \frac{1}{\pi} \frac{\sigma_{M_0}}{\sigma_{M_0}} \exp\left(-\frac{(M_0^{lim})^2}{2\sigma_{M_0}^2}\right) \quad (26)$$

$$\nu_{d_1} = 2\nu_{d_1}^+ = \frac{1}{\pi} \frac{\sigma_{d_1}}{\sigma_{d_1}} \exp\left(-\frac{(d_1^{lim})^2}{2\sigma_{d_1}^2}\right)$$

여기서,  $\nu_{M_0}$ 는 전도모멘트의 초과 빈도수,  $\nu_{d_1}$ 는 격리장치 수평변위의 초과빈도수이다.

응답이 지진지속시간 동안 그 한계상태를 넘어서는 사건의 횟수가 Poisson 분포를 따른다고 가정하면, 지속시간 동안  $x$ 회의 파손이 일어날 확률은 다음과 같다.

$$P(X_{t_d} = x) = \frac{(\nu_k t_d)^x}{x!} \exp(-\nu_k t_d) \quad (27)$$

여기서,  $t_d$ 는 지진지속시간,  $X_{t_d}$ 는  $t_d$  동안 파손이 일어난 횟수의 확률변수,  $P(X_{t_d} = x)$ 는 지진지속시간 동안 파손이  $x$ 회 일어날 확률,  $\nu_k$ 는 식(26)에서 정의된,  $k$ 한계상태의 초과빈도수이다. 지진지속시간 동안 한 번이라도 한계상태  $k$ 가 일어나는 사건은 한번도 일어나지 않는 사건의 여사건이므로, 식(27)의  $x$ 에 0을 대입하여 구한 파손이 일어나지 않을 확률을 이용하여 다음과 같이 그 확률을 구할 수 있고, 이는 지진이 발생했을 때  $k$ 한계상태가 일어날 조건부확률이다.

$$P_{ksy} = 1 - P(X_{t_d} = 0) = 1 - \exp(-\nu_k \cdot t_d) \quad (28)$$

### 5.3. 수조구조물의 파손확률 산출

그림 5는 이 연구의 방법론을 적용, 해석할 지진격리 수조구조물의 제원이다. 유체 및 수조 구조물 철근콘크리트 벽체의 역학적 특성치는 표 1과 같다. 이 중 격리장치의 수직 한계응력은 해석의 대상이 되는 격리장치 강성의 범위를 결정하는데 사용되었다.

표 1. 수조구조물의 파손확률 산출에 사용된 계수

철근콘크리트 탄성계수 $E$	$2.1 \times 10^4 \text{ N/m}^2$	격리장치의 감쇠비 $\xi_b$	20%
철근콘크리트 밀도 $\rho_{conc}$	$2400 \text{ kg/m}^3$	격리장치 수직한계응력 $\sigma_v$	$7.84 \times 10^6 \text{ N/m}^2$
철근콘크리트 최대응력 $\sigma_{ck}$	$2.058 \times 10^7 \text{ N/m}^2$	격리장치 전단계수 $G$	$9.84 \times 10^3 \text{ N/m}^2$
유체 밀도 $\rho_w$	$1000 \text{ kg/m}^3$	강진지속시간 $t_d$	6.6 sec

해석대상 구조물은 높이 16.4m, 길이 20m, 폭 7.4m 인 한쪽 방향으로 길이가 긴 직사각형 모양의 수조구조물이다. 유체의 깊이는 12m이고, 해석의 편의를 위해 그림과 같이 길이 방향의 지반운동에 대해서만 해석을 수행하였다.

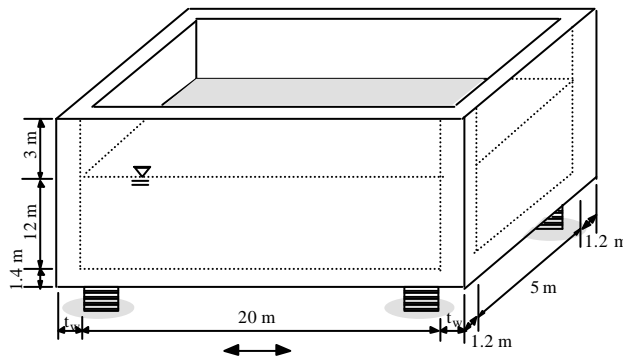


그림 5. 해석대상 수조구조물



격리장치는 4개가 설치되었다. 바닥 슬랩은 두께가 1.4m인 강체로 모델링되었다. 해석대상 지반은 동방향에 수직인 벽체의 두께  $t_w$ 를 변화시키면서 파손 확률 및 사용기간비용을 산출하였으며, 지반 운동방향에 평행한 벽체의 두께는 1.2m이다. 그림 6은 여러 지반운동 모델에 대해 벽체두께에 따른 벽체의 파손 확률 변화를 산출한 결과이다. Isolated I은 격리장치 강성이  $4.42 \times 10^6$  N/m, Isolated II는 격리장치 강성이  $6.50 \times 10^6$  N/m이다.  $A=0.14$ ,  $A=0.28$  공통적으로 상대적으로 연약한 지반일수록(Soil Type IV) 격리를 통한 벽체 두께 감소효과가 줄어드는 것을 알 수 있다. 한편 가속도계수가 증가하면, 전반적으로는 벽체두께 감소효과가 커지지만, 이 연구에서 관심을 갖는 0가까운 값의 파손확률을 갖는 벽체 두께를 비교하면, 벽체두께 감소효과가 줄어드는 것을 알 수 있었다.

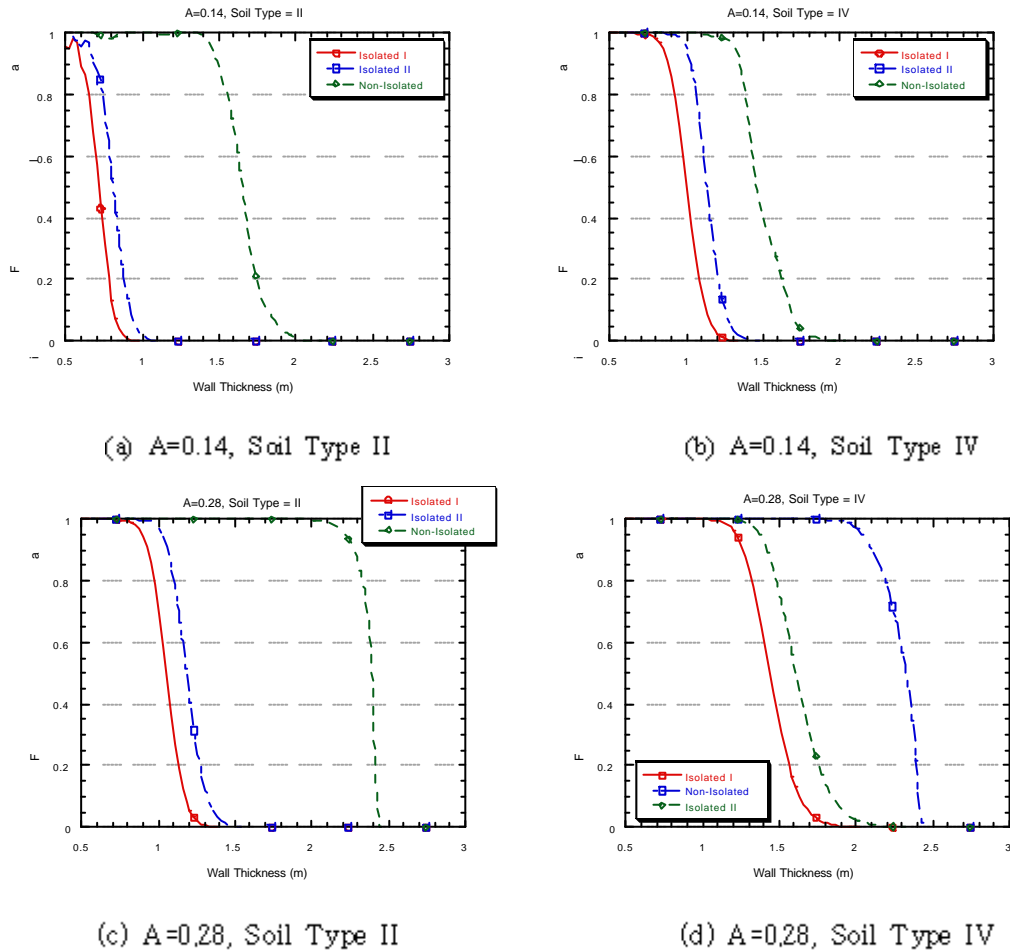


그림 6. 벽체두께 및 격리장치 강성에 따른 벽체 파손확률의 변화

## 6. 최적설계 및 비용효율성 평가

이 연구에서는 지진격리 수조구조물의 최적설계 및 비용효율성 평가를 최소 사용기간비용 개념에 근거하여 수행하였다. 사용기간 비용 추정을 위해서는 먼저 구조물의 초기건설비용, 예상 손실비용 등이 포함된 사용기간비용을 구조물의 최적화 설계변수를 사용하여 정의해야 한다. 최적화 설계변수로는 벽체두께( $t_w$ )와 격리장치의 강성( $k_0$ )를 선택하였다. 이는 지진격리된 수조구조물이 낮은 강성의 격리장치를 통해 구조물 전체의 주기를 옮겨 벽체두께를 줄여 초기비용을 절감하는 특성을 가지므로 사용기간비용 최소화 주된 변수가 강성( $k_0$ )과 벽체두께( $t_w$ )가 되기 때문이다.

격리구조물의 사용기간비용함수의 기대값은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$E[C_{iso}(t_{iso}, k_b)] = C_{\omega}V_{\omega}(t_{\omega}) + C_{iso}V_{iso}(k_b) + C_d \vec{r}_d \cdot \vec{P}_f(t_{\omega}, k_b) \frac{\nu}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_{iso}}) \quad (29)$$

여기서,  $C_{\omega}$ 는 벽체 단위부피당 건설비용,  $V_{\omega}(t_{\omega})$ 는 벽체의 부피,  $C_{iso}$ 는 격리장치의 단위부피당 가격,  $V_{iso}(k_b)$ 는 격리장치의 부피,  $C_d$ 는 가정된 손상비용 규모,  $\vec{r}_d$ 는 각 한계상태별 손상비용 비율 벡터,  $\vec{P}_f(t_{\omega}, k_b)$ 는 각 한계상태별 지진발생시 조건부 파손확률,  $\nu$ 는 지진발생확률,  $\lambda$ 는 감가상각비,  $t_{iso}$ 는 총 사용기간이다.  $\frac{\nu}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t_{iso}})$ 는 지진발생확률 및 감가상각비를 고려하기 위한 것으로 지진의 발생횟수가 포아송 분포를 따른다고 가정하여 유도하였다.<sup>(24)</sup>

건설비용의 절대적인 값은 그때그때 변화할 수 있으므로, 식 (29)의 비용함수를 벽체 단위부피당 건설비용으로 나누어 정규화시킨 값을 최적화를 위한 비용함수로 사용하였다. 이 때, 모든 비용은 그에 상응하는 건설비용을 유발하는 벽체부피의 단위로 표현된다. 또한 비격리 수조구조물의 경우에는 초기비용 산정에 있어서 격리장치 비용이 없고, 파손확률은 벽체 두께만의 함수가 되며 파손확률은 벽체파손에 대해서만 산정한다.

$$E[\tilde{C}_{iso}] = V_{\omega}(t_{\omega}) + r_{iso/\omega}V_{iso}(k_b) + V_f \vec{r}_d \cdot \vec{P}_f(t_{\omega}, k_b) \frac{\nu}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_{iso}}) \quad (30)$$

$$E[\tilde{C}_{non}] = V_{\omega}(t_{\omega}) + V_f P_f(t_{\omega}) \frac{\nu}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_{iso}}) \quad (31)$$

여기서,  $E[\tilde{C}_{iso}]$ 는 격리수조구조물의 정규화된 사용기간비용 함수의 기대값,  $r_{iso/\omega}$ 는 동일부피 격리장치가격 대 벽체건설비용비율,  $V_f$ 는 단위부피 벽체건설비용으로 정규화된 손상비용 규모,  $E[\tilde{C}_{non}]$ 는 비격리구조물의 정규화된 사용기간비용 함수의 기대값이다.

격리 수조구조물의 사용기간비용 최소화에 의한 최적설계는 식(30)의 비용함수를 최소화하는 최적 격리장치 강성  $k_b^{opt}$  - 벽체두께  $t_{\omega}^{opt}$  조합을 찾음으로써 이루어진다. 또한 격리 수조구조물의 비격리 수조구조물에 대한 비용효율성은 다음의 계수를 통해 평가할 수 있다. 이 비용효율성 계수가 1보다 작을 때 격리구조물의 비용효율성이 있다고 평가할 수 있다.

$$E_{iso/non} = \frac{E[\tilde{C}_{iso}]_{min}}{E[\tilde{C}_{non}]_{min}} = \frac{V_{\omega}(t_{\omega}^{opt}) + r_{iso/\omega}V_{iso}(k_b^{opt}) + V_f \vec{r}_d \cdot \vec{P}_f(t_{\omega}^{opt}, k_b^{opt}) \frac{\nu}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_{iso}})}{V_{\omega}(t_{\omega}^{opt}) + V_f P_f(t_{\omega}^{opt}) \frac{\nu}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_{iso}})} \quad (32)$$

여기서,  $E_{iso/non}$ 는 격리수조구조물의 비격리 수조구조물에 대한 비용효율성 계수이고,  $t_{\omega}^{opt}$ 는 격리와 비격리에 대해 별도로 구한 값을 사용한다. 이 연구에서는 앞 절 그림 5의 구조물을 예로 들어 격리 수조구조물의 비용효율성의 특징을 여러 가지 경우에 대해 고찰하였다. 이 때 사용된 계수들은 표 2와 같다.

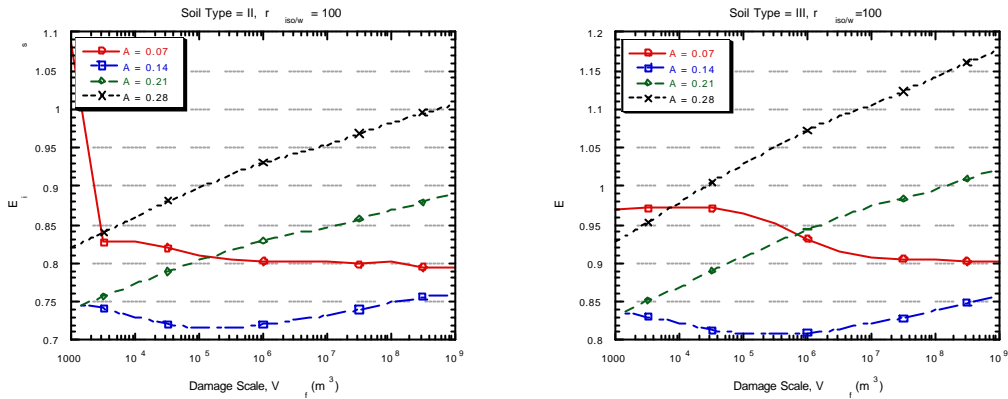
표 2. 수조구조물 비용효율성 평가에 사용된 계수

손상비용 비율 벡터 $\vec{r}_d$ (벽체, 격리장치) = (0.9:0.1)	지진발생확률 $\nu$	10% (50년)
총 사용기간 $t_{iso}$	50년	감가상각비 $\lambda$
		5%

한계상태별 손상비용 비율 벡터  $\vec{r}_d$ 는 벽체 파손: 격리장치 파손 = 0.9 : 0.1로 가정하였으며, 총

사용기간  $t_{\&\&}$ 을 50년으로 잡고, 지진발생확률  $\nu$ 는 재현주기를 500년으로 가정하여 10%(50년간), 감가상각비  $\lambda$ 는 5%로 하였다. 이 연구에서는 예제의 결과를 토대로 지진격리 구조구조물의 최적설계안 및 비용효율성의 특성을 다음과 같이 살펴보았다.

### 6.1. 지반가속도의 크기와 비용효율성



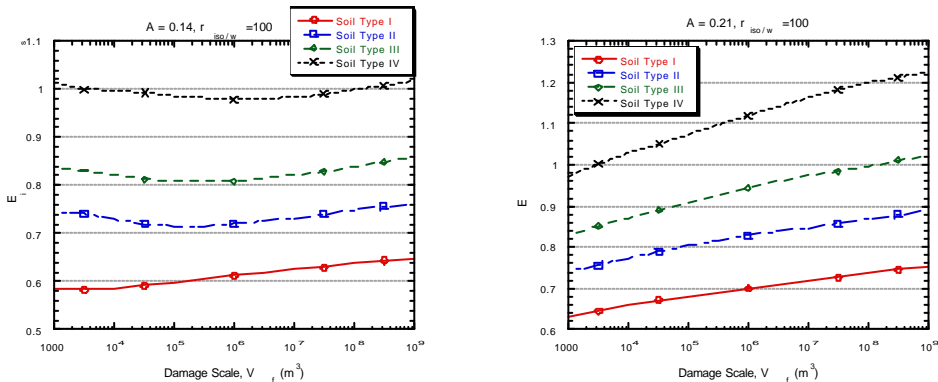
(a) Soil Type II,  $r_{soil/w} = 100$

(b) Soil Type III,  $r_{soil/w} = 100$

그림 7. 지반가속도에 따른 비용 효율성

그림 7에서 보는 바와 같이 여러 지반에서 공통적으로 지반가속도가 증가할수록 격리구조물의 비용효율성은 상대적으로 낮아진다. 이는 앞장에서 살펴본 바와 같이 강진지역일수록 격리장치의 벽체감소효과가 떨어지기 때문이다. 가속도계수가 0.07일 때는 유독 전체적인 경향에 무관한 결과를 보이는 것으로 나타났는데, 이는 가속도계수가 너무 낮은 지역에서는 격리장치가 제대로 거동할 수 있도록 하는 벽체 두께에서는 이미 벽체만으로도 내진능력을 갖추고 있기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 격리장치의 비용효율성을 극대화할 수 있는 적절한 지진가속도의 크기 범위가 각 경우마다 존재하므로 격리장치를 사용할 때에는 주어진 구조시스템이 건설지역의 가속도크기에 대해 어느 정도의 비용효율성을 갖는지를 판단할 필요가 있다.

### 6.2. 지반조건과 비용효율성



(a)  $A=0.14, r_{soil/w} = 100$

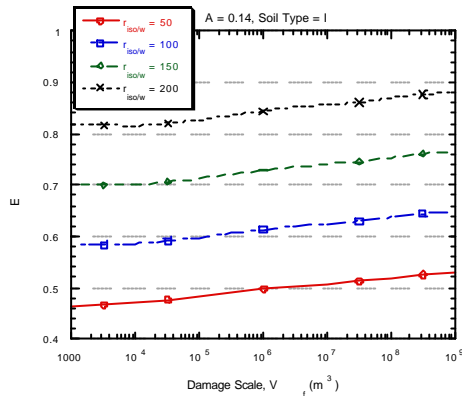
(b)  $A=0.21, r_{soil/w} = 100$

그림 8. 지반조건에 따른 비용 효율성의 변화

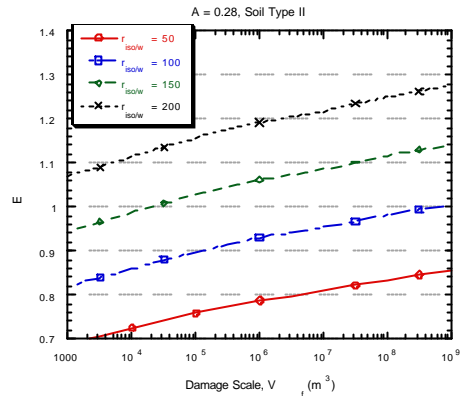
그림 8에서 보는 바와 같이 일반적으로 연약지반일수록 비용효율성이 떨어지는 것으로 판단되었다. 연약지반의 장주기 지반운동은 격리장치의 주기이동에 의한 지진력 감소효과를 상쇄시켜 그

비용효율성을 떨어뜨리는 것으로 판단되었다.

### 6.3. 격리장치 비용과 비용효율성



(a) A=0.14, Soil Type I



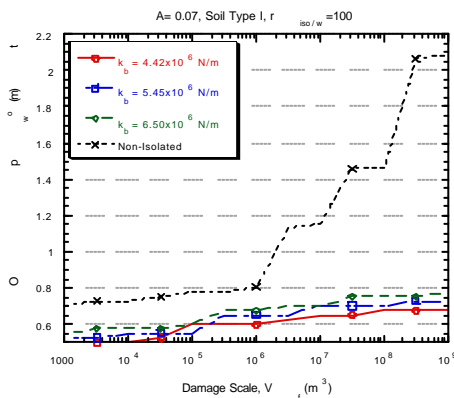
(b) A=0.28, Soil Type II

그림 9 격리장치비용에 따른 비용효율성의 변화그림

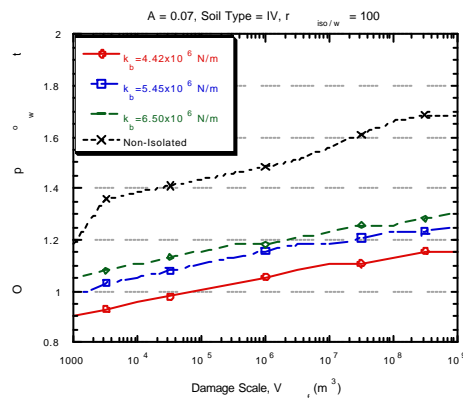
격리장치의 비용이 클수록 비용효율성이 낮아지는 것은 당연한 결과이나, 비용효율성은 격리장치 비용에 매우 민감함을 알 수 있었다. 방사능 유출 등으로 인한 무한에 가까운 손상비용을 가정한 다 하더라도 격리와 비격리구조물의 비용효율성은 격리장치 비용에 따라 크게 차이가 나므로, 격리장치의 비용 절감은 그 구조물의 사회적 비용 절감에 있어서 매우 중요한 요인이라 할 수 있다.

### 6.4. 격리와 비격리의 최적 벽체두께의 민감도 비교

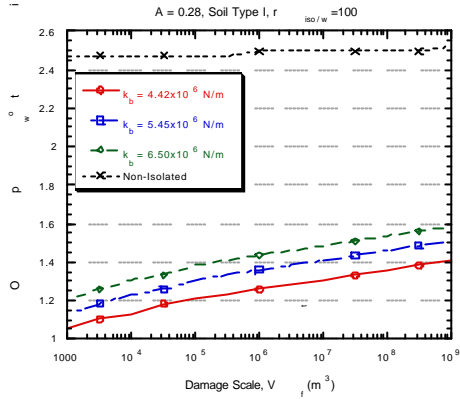
사용기간비용을 최소화하는 벽체두께를 최적 벽체두께로 정의할 때, 격리와 비격리의 각각의 최적설계안의 손상비용 규모에 대한 민감도를 하중조건마다 조사하였다. 강진, 연약지반일수록 격리 시스템의 최적설계안의 민감도가 높아지는 것을 볼 수 있었다. 손상비용 규모를 크게 정의하면 비용함수에서 이 손상비용에 곱해지는 파손확률의 값이 최소화과정에서 더 낮아지게 된다. 따라서, 손상비용규모에 대한 민감도가 높다는 것은 낮은 파손확률을 갖는 구조물을 설계할 수 있는 능력이 떨어지는 것을 의미한다. 따라서, 강진, 연약지반에서는 격리를 통한 지진력감소 효과가 상대적으로 낮아진다는 것을 이 결과를 통해 알 수 있다.



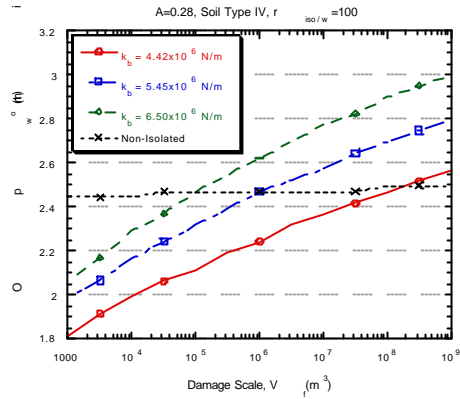
(a) A=0.07, Soil Type I,  $r_{iso}/w=100$



(b) A=0.07, Soil Type IV,  $r_{iso}/w=100$



(c)  $A=0.28$ , Soil Type I,  $r_{iso/w}=100$



(d)  $A=0.28$ , Soil Type IV,  $r_{iso/w}=100$

그림 10. 격리와 비격리의 최적 벽체두께의 민감도 비교

### 6.5. 격리장치 비용과 최적 벽체두께의 민감도

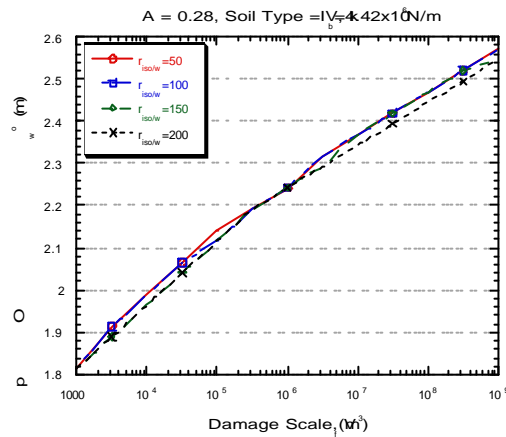


그림 11. 격리장치의 비용과 최적벽체두께의 민감도

그림 11에서 보는 바와 같이, 최적 벽체두께값은 격리장치의 비용에 거의 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 6.4절의 결과와 비교해보면, 격리장치비용은 비용효율성 값에는 큰 영향을 미치지 않지만, 최적설계안을 구하는데 있어서는 큰 영향을 미치지 않는다. 이것은 곧 사용기간비용을 최소화하는 격리 수조구조물의 최적설계에서 격리장치의 비용에 관계없이 최적 벽체두께를 결정할 수 있다는 것을 의미한다.

## 7. 결론

이 연구에서는 사용기간 비용을 최소화함으로써 지진격리 수조구조물을 최적설계하고, 이 최소 사용기간비용으로 주어진 조건에서 비격리 수조구조물에 대한 비용효율성을 평가할 수 있는 방법을 개발하였다. 또한 이 방법을 해석예제에 적용하여 지진격리 수조구조물의 비용효율성 및 최적설계안의 민감도를 여러 가지 측면에서 분석하였다.

그 결과, 강진지역, 연약지반에서는 지진격리의 주기이동에 의한 지진력감소-초기비용 절감 효과가 상대적으로 낮아서, 비용효율성이 떨어지는 것을 알 수 있었다. 그러나, 지진력이 미약한 약

진지역에서는 지진격리가 효과를 발휘할 수 있는 벽체의 두께이면 이미 비격리로도 파손확률을 충분히 줄일 수 있으므로 중·약진 지역에서의 지진격리의 비용효율성이 가장 높다는 판단을 할 수 있었다. 지진격리비용은 비용효율성을 크게 좌우하는 요소이지만, 최적 벽체두께를 결정하는데 있어서는 거의 영향을 주지 못한다. 따라서, 저렴한 지진격리장치를 개발하는 것이 지진격리구조물의 사회적 비용을 절감하는데 있어서 매우 중요한 요소이지만, 최적설계의 변경을 가져오지는 않는다. 강진지역, 연약지반에서는 지진격리구조물 최적설계안의 손상비용규모에 대한 민감도 역시 높은 것으로 나타났다. 이는 이 지역에서 지진격리구조물이 높은 신뢰도를 갖는 구조시스템을 설계하는 것이 어렵다는 것을 의미한다. 개발된 방법은 특정 조건에서, 최소 사용기간비용을 갖도록 격리 수조구조물을 최적설계할 수 있도록 도움을 주며, 비격리와외의 비교를 통해 격리와 비격리 중 어떤 구조시스템을 선택할 것인지에 대한 판단의 근거를 제공해줄 수 있다. 광범위한 예제 적용을 통해, 격리 수조구조물의 최적설계 및 비용효율성의 일반적 경향을 파악하는 데도 도움을 줄 수 있을 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국과학재단 우수 연구센터 지원금에 의한 것입니다.

### 참고문헌

1. Koh, H.M., Kim, J.K. and Park, J.-H., "Fluid-structure interaction analysis of 3-D rectangular tanks by a variationally coupled BEM-FEM and comparison with test results", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Feb. 1998.
2. Kim, J.K., Koh, H.M., and Kwahk, I.J., "Dynamic Response of Rectangular Flexible Fluid Containers," *Journal of Engineering Mechanics*, 1996, pp. 807-817.
3. 고현무, 김재관, 박관순, 하동호, "유체-구조물 상호작용을 고려한 면진구조물의 추계학적 응답 해석," 대한토목학회 논문집, 제 14권 제 3호, 1994, pp. 463-472
4. 고현무, 송준호, "사용기간비용 최소화에 의한 지진격리교량의 경제성 평가," 대한토목학회 논문집, 제 19권 제 1-4 호, 1999.
5. Koh, H.M., Park, K.S., Song J., "Optimal Seismic Design Method for Base-Isolated Pool Structure by Minimizing Life Cycle Cost," *Proc. of SMIRT-15*, 1999.
6. Soong, T.T. and Grigoriu, M., *Random Vibration of Mechanical and Structural Systems*, Prentice-Hall Inc., NJ., 1993.
7. Shinzuka, M. and Deodatis, G., "Simulation of Stochastic Processes by Spectral Representation," *Applied Mechanics Review*, ASME, 44(4), 1991, 191-203.1.
8. AASHTO, *Guide Specifications for Seismic Isolation Design*, Draft, AASHTO T-3 Task Group, 1997.
9. Balendra, T., K.K. Ang P.Paramasivam and S.L.Lee, "Sesimic Design of Flexible Cylindrical Liquid Storage Tanks," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.10, 1982, pp. 477-496
10. Cook, R.D., Malkus,D.S. and Plesha,M.E., *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*, John Wiley & Sons, Inc., 1989.
11. Chang G.S., Liu W.D., Nobari, F.S., Kartoum, A., Chen, X., "Design Issues of Seismic Isolation of Major Bridges," *Proc. of the National Seismic Conference on Bridge and Highways*, 1997, pp. 745-756.
12. Lutes, L.D. and Sarkani, S., *Stochastic Analysis of Structural and Mechanical Vibrations*, Prentice Hall, Inc., NJ, 1997.
13. Newland, D.E., *An Introduction to Random Vibrations, Spectral Wavelet Analysis*, John Wiley and Sons Inc., N.Y., 1993.
14. Wen, Y.K. and Ang, A.H-S., "Reliability and Cost-Effectiveness of Structures with Active Control," *Proc. of the International Workshop on Intelligent Systems*, 1991, pp. 63-76.