

# 구형 면진유체저장조의 지진시 거동해석

## Seismic Response Analysis of Rectangular Tank with Base-Isolation System

전 영 선\*  
Choun, Young-Sun  
최 인 길\*  
Choi, In-Kil  
황 신 일\*  
Hwang,Shin-Il  
김 진 웅\*\*  
Kim, Jhin-Wung

.....

### 요 약

사용후핵연료 저장조는 지진하중에 대하여 운영기간중 자체의 구조적 건전성 및 저장된 사용후핵연료의 안전성을 확보할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 LRB 면진장치를 설치한 사용후핵연료 면진저장조의 지진시 거동특성을 파악하기 위하여 서로 다른 특성을 갖는 두종류의 지진에 대하여 지진해석을 하여 그 결과를 비면진 저장조에서의 응답과 비교하였다. 면진장치를 사용함으로써 지진시 상부구조로 전달되는 지진력과 응답을 크게 감소시켜 저장조와 저장된 사용후핵연료의 안전성 확보에 유리한 것으로 나타났다.

### Abstract

Spent fuel storage pool should maintain its structural integrity and the safety of stored spent fuels against design earthquake load. In this study, the seismic response analysis of the pool with LRB isolation system is performed for two different earthquakes. To investigate the seismic response of the base isolated pool, the analysis results are compared with the responses of conventional type. In conclusion, the base-isolation system is effective to reduce the seismic forces transmitted to the superstructure and the responses, and to secure the safety of the storage pool and stored spent fuel.

.....

### 1. 서 론

사용후핵연료는 내진등급 I 급으로 분류되는 발전소내의 저장조 또는 소외 저장시설의 저장조

에 저장한다. 사용후핵연료 저장조는 운영기간중 정상하중 뿐 아니라 자연재해 등의 극한하중에 대해서도 구조적 안전성이 확보되어야 함은 물론 저장된 사용후핵연료의 안전성을 유지할 수 있어야

\* 한국원자력연구소 선임연구원  
\*\* 한국원자력연구소 책임연구원

이 논문에 대한 토론을 1995년 9월 30일까지 본 학회에 보내 주시면 1996년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

한다. 저장조와 사용후핵연료의 저장 안전성에 가장 큰 영향을 미치는 외부하중은 지진하중으로서 이에 대한 안전성 확보는 사용후핵연료를 장기적으로 저장하는데 있어서 매우 중요하다.

지진하중에 대한 안전성을 확보하기 위한 방법으로서 면진구조에 대한 연구가 이미 세계적으로 널리 연구되고 있으며 면진장치를 채택한 건물이나 유체저장구조물 등이 강진에 대해서 매우 효과적으로 거동하는 것이 입증되고 있다[1,2,3].

사용후핵연료 저장조에 면진구조를 적용할 경우 수조에 전달되는 지진력이 감소되어 저장조의 구조적 안전성 및 저장된 사용후핵연료의 안정성이 크게 향상된다. 그러나 면진구조를 적용함으로써 자유수면의 유동이 증가하여 동수압이 증가될 가능성이 커지게 된다.

본 연구에서는 면진수조의 지진시 거동을 파악함으로써 면진장치의 사용후핵연료 저장조 및 기타 유체저장구조물에의 적용타당성을 분석하였다. 본 연구에서 채택한 면진장치는 LRB(Laminated Rubber Bearing)로서 지진특성에 따라 불안정한 거동특성을 나타내는 활동식 면진시스템(Sliding Type Isolation System)과는 달리 지진에 대해 안전성이 입증되어 세계적으로 가장 많이 사용되고 있다.

해석을 위해서 면진수조를 집중질량으로 모델링하여 수조 바닥에서의 시간이력을 구하고 이를 유한요소법으로 모델링한 유체-구조물 상호작용 해석모델에 입력하여 수조의 응답을 구하는 방법을 사용하였다.

2. 면진구조물의 운동방정식

면진구조물의 거동을 나타내는 운동방정식은 상부구조물과 면진장치에 대한 각각의 운동방정식을 연계하여 구할 수 있다.

2.1 상부구조물

상부구조물은 일반적인 구조물에 적용하는 기법을 사용하여 운동방정식을 구성한다. 본 연구에서는 상부구조를 그림 1과 같이 집중질량으로 모델링하였으며 면진장치의 질량이 상부구조물의

전체질량에 비해 매우 작으므로 해석시 면진장치의 질량은 무시하였다. 상부구조물의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -\{x_b + x_g\}[M]\{1\} \tag{1}$$

여기서,

- $[M], [C], [K]$  : 구조물의 질량, 감쇠 및 강성행렬
- $x$  : 각층의 바닥슬라브에 대한 상대 변위
- $x_b$  : 지반에 대한 바닥슬라브의 상대 변위
- $x_g$  : 지반가속도
- $\{1\}$  : 단위벡터

위의 식(1)을 연계되지 않은 모드 운동방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$y_i'' + 2\xi_i\omega_i y_i' + \omega_i^2 y_i = \Gamma_i(x_b'' + x_g'') \tag{2}$$

여기서  $y_i$ 는 Modal Amplitude,  $\Gamma_i = -\{\phi_i\}^T[M]\{1\} / \{\phi_i\}^T[M]\{\phi_i\}$ 이며,  $\phi_i$ 는 고유벡터이다. 또한  $\xi_i$  및

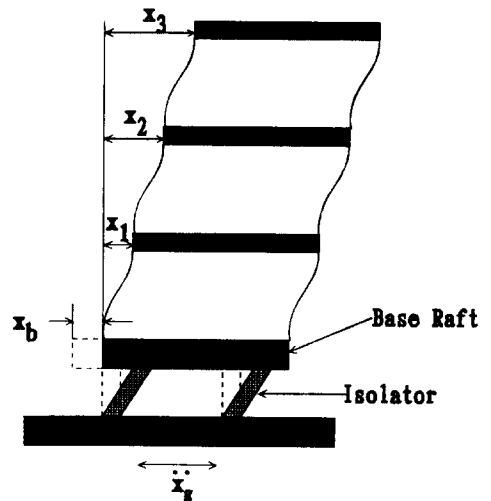


그림 1. 면진구조의 집중질량 모델

$\omega_i$ 는 각각 감쇠비 및 상부구조물의 고유진동수이다. 식(2)에서  $y_i$ 가 구해지면 다음과 같은 상부구조물의 바닥슬라브에 대한 상대변위를 구할 수 있다.

$$x_i = \sum_{j=1}^n \phi_{ij} y_j \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

### 2.2 LRB 면진장치

LRB 면진장치는 고무와 강판이 차례로 붙어있는 형태로서 선형 탄성적으로 거동한다. LRB 면진장치는 그림 2에서와 같이 횡방향의 스프링과 감쇠장치로 구성되어 있으므로 면진장치에서의 지배방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\ddot{x}_b + 2\xi_0 \omega_0 \dot{x}_b + \omega_0^2 x_b + \sum_{j=1}^n \beta_j y_j = -\ddot{x}_g \quad (4)$$

여기서,

$$\beta_j = -\frac{1}{M} \sum_{i=1}^n m_i \phi_{ij}$$

$$M = m_b + \sum_{i=1}^n m_i$$

$m_b$  : 바닥슬라브의 질량

$m_i$  : 각 절점에서의 집중질량

$$2\xi_0 \omega_0 = -\frac{C_0}{M}, \quad \omega_0^2 = \frac{K_0}{M}$$

$C_0, K_0$  : 면진장치의 감쇠값 및 강성도

식(2)와 식(4)는 가속도항으로써 서로 연계되어 있으므로 지반가속도를 입력하면 구조물과 면진장치의 변위, 속도 및 가속도 응답을 구할 수 있다.

### 3. 유체-구조물 시스템

유체가 균질하고 비점성, 비압축성, 비회전유동이라고 할 때 속도포텐셜  $\phi(x, z, t)$ 는 유체내에서 다음과 같은 Laplace 방정식을 만족시킨다.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (5)$$

또한 속도포텐셜은 수조에서 다음의 경계조건을

만족해야 한다.

$$\phi_{,x} |_{x=\pm L} = \dot{u} \quad (6)$$

$$\phi_{,z} |_{z=0} = 0 \quad (7)$$

$$\phi_{,z} |_{z=H} = \dot{\zeta} \quad (8)$$

$$\rho \phi |_{z=H} + \rho g \zeta = 0 \quad (9)$$

여기서  $\dot{u}(z, t)$ 는 벽체의 수평방향 속도이며,  $\zeta(x, t)$ 는 기준면에 대한 파의 높이를 나타낸다. 또한  $\rho$ 와  $g$ 는 각각 유체의 질량과 중력가속도를 의미한다.

식(5)와 경계조건식(6)을 만족하는 속도포텐셜은 다음과 같이 구해진다.

$$\phi(x, z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n(z, t) \sin \lambda_n x + x \dot{u}(z, t) \quad (10)$$

여기서

$$\lambda_n = \frac{(2n-1)\pi}{2L}$$

자유표면의 거동  $\zeta(x, t)$ 와 벽면의 수평변위  $u(z, t)$ 를 다음과 같이 표시하고 식(10)을 Laplace 방정식(5)와 경계조건식(7), (8), (9)에 대입하여 풀면  $A_n(z, t)$ 를 얻을 수 있다.

$$\zeta(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \eta_n(t) \sin \lambda_n x$$

$$u(z, t) = \langle 1 \quad z \quad z^2 \quad z^3 \rangle \begin{bmatrix} C_0(t) \\ C_1(t) \\ C_2(t) \\ C_3(t) \end{bmatrix}$$

여기서

$\eta_n(t)$  : 유체의 자유표면 거동변수

$C_i(t)$  : 벽면의 거동변수

앞에서 구한  $A_n(z, t)$ 을 식(10)에 대입하면 속도포텐셜은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \phi(x, z, t) &= \phi_1(x, z, t) + \phi_c(x, z, t) \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin \lambda_n x \left( \sum_{i=0}^3 E_{ni}(z) \dot{C}_i(t) \right) \\ &\quad - g \sum_{n=1}^{\infty} \sin \lambda_n x \frac{\cosh \lambda_n z}{\cosh \lambda_n H} \int \eta_n(t) dt \end{aligned} \quad (11)$$

여기서

$$\begin{aligned} E_{n0}(z) &= 1 - \frac{\cosh \lambda_n z}{\cosh \lambda_n H} \\ E_{n1}(z) &= z - \frac{\sinh \lambda_n z}{\lambda_n} + \left( \frac{\sinh \lambda_n H}{\lambda_n} - H \right) \frac{\cosh \lambda_n z}{\cosh \lambda_n H} \\ E_{n2}(z) &= z^2 - \left( \frac{2}{\lambda_n^2} + H^2 \right) \frac{\cosh \lambda_n z}{\cosh \lambda_n H} + \frac{2}{\lambda_n^2} \\ E_{n3}(z) &= z^3 + \frac{6}{\lambda_n^2} z - \frac{6}{\lambda_n^3} \sinh \lambda_n z \\ &\quad + \left( \frac{6}{\lambda_n^3} \sinh \lambda_n H - \frac{6H}{\lambda_n^2} - H^3 \right) \frac{\cosh \lambda_n z}{\cosh \lambda_n H} \end{aligned}$$

식(11)에서 앞의 항은 벽면의 변위에 관련된 항으로서 유체 유동의 충격성분을 나타내며 뒤의 항은 자유표면 거동에 관한 항으로서 대류성분을 나타낸다. 그러므로 수조의 벽면에 작용하는 동압력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p = -\rho \cdot \phi_{,t} = -\rho(\phi_{1,t} + \phi_{c,t}) \quad (12)$$

속도포텐셜 (11)을 경계조건식(8)에 대입하고 정리하여 얻은 자유표면 거동과 벽체의 절대가속도에 의한 운동방정식과 식(12)로부터 산출한 벽체의 절점하중에 관한 운동방정식을 조합하여 정리하면 다음과 같은 운동방정식을 얻을 수 있다 [4].

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & M_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{d}_r \\ \ddot{\eta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} KM^{-1}K & KM^{-1}\bar{S}^T \\ \bar{S}M^{-1}K & K_f + \bar{S}M^{-1}\bar{S}^T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_r \\ \eta \end{Bmatrix} \\ = -[M_e] \{ \ddot{d}_b \} \end{aligned} \quad (13)$$

여기서  $[M_e]$ 는 수조 바닥의 운동에 대한 유효질량 행렬로서 다음과 같이 표시된다.

$$[M_e] = \begin{bmatrix} KM^{-1}K_b + K[I, I, \dots, I]^T \\ \bar{S}M^{-1}M_b - \bar{S}^b \end{bmatrix} \quad (14)$$

윗 식에서  $[M]$ 과  $[K]$ 는 각각 질량 및 강성행렬,  $[M_f]$ 와  $[K_f]$ 는 자유표면의 거동과 관련된 질량 및 강성행렬,  $[S]$ 는 자유표면과 벽체의 상호작용에 관한 계수행렬,  $d_b$ 와  $d_r$ 은 수조 바닥의 변위와 수조바닥에 대한 벽체의 상대변위를 나타낸다.

#### 4. 지진시 거동해석

해석에 사용된 면진저장조는 아래의 그림 2와 같다. 입력지진으로는 각기 다른 지진과 특성을 갖는 1940년 El Centro 지진의 동서방향 성분과 1987년 일본 Ibaraki 지진기록을 이용하였으며(그림 3~4 참조) 모두 최대지반가속도를 0.2g로 하였다.

저장조의 고유진동수는 표 1과 같으며 해석에 사용된 LRB 면진장치의 고유진동수는 면진장치와 상부수조의 변형에너지를 사용하여 산정한 최적진동수 0.9Hz로 하였으며[5], 감쇠비는 보통 LRB에서 사용되는 10%로 하였다.

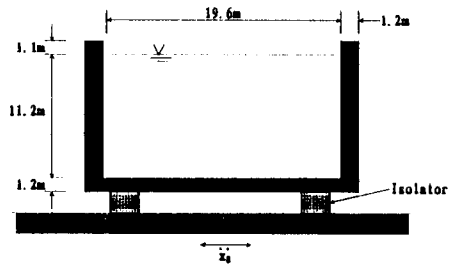
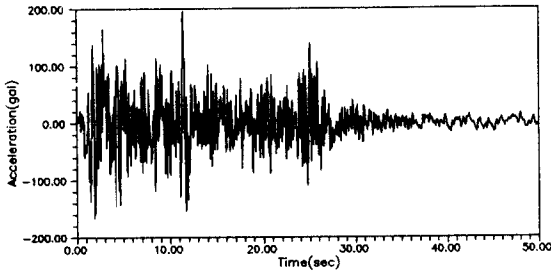


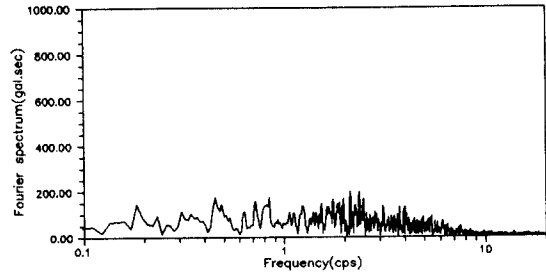
그림 2. 면진수조 해석모델

표 1. 저장조의 고유진동수(Hz)

모드	유체	구조물
1	0.19	2.98
2	0.35	23.99
3	0.45	475.74

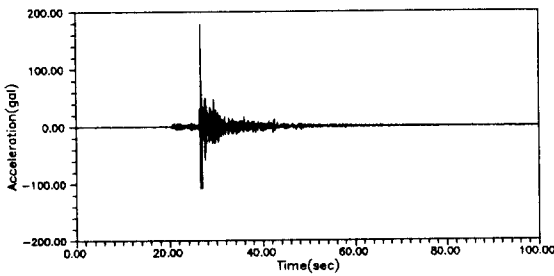


(a) 가속도-시간 이력

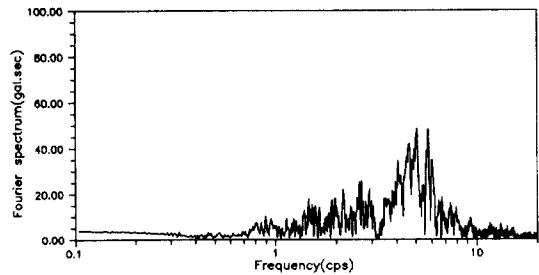


(b) Fourier 스펙트럼

그림 3. El Centro 지진기록

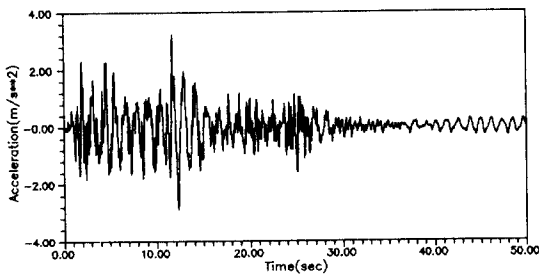


(a) 가속도-시간 이력

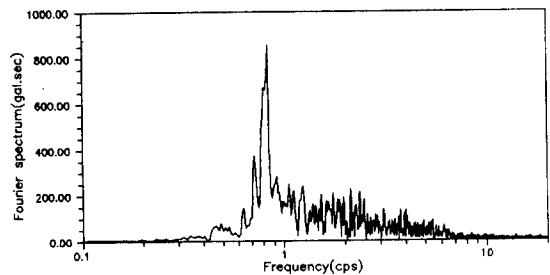


(b) Fourier 스펙트럼

그림 4. Ibaraki 지진기록



(a) 시간-이력 곡선



(b) Fourier 스펙트럼

그림 5. El Centro 지진에 대한 수조바닥에서의 가속도응답

El Centro 지진은 그림 3에서와 같이 저진동수에서 많은 최고치를 보이고 있는 대표적인 강진으로서 여기서는 동서 방향 성분을 사용하였다. 그림 5는 집중질량 모델을 사용하여 지진해석을 한 결과 얻은 수조 바닥에서의 가속도 시간이력과 Fourier 스펙트럼으로서 전달되는 지진파의 주기

가 길어지며 가속도의 진폭은 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 진동수의 최고치가 높은 진동수로 옮겨지는 것을 볼 수 있다. 수조 벽체 상단에서의 가속도는 그림 6과 같이 면진수조의 경우 0.33g로서 비면진수조의 0.6g에 비하여 반정도로 감소하였다. 그리고 수조 벽체의 상단과 바닥에서의 지

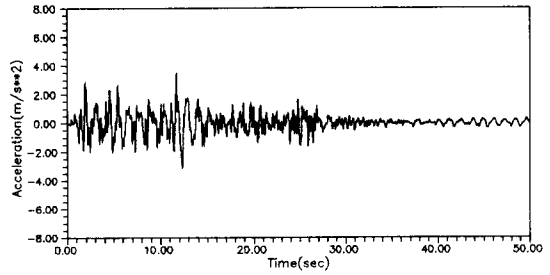
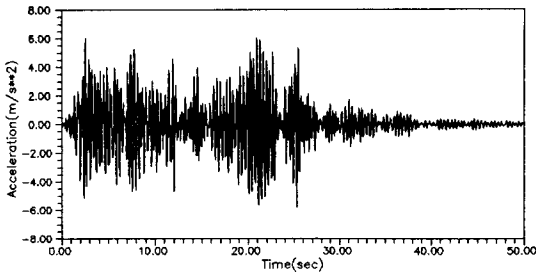


그림 6. 면진 및 비면진 수조 상부에서의 가속도응답 비교

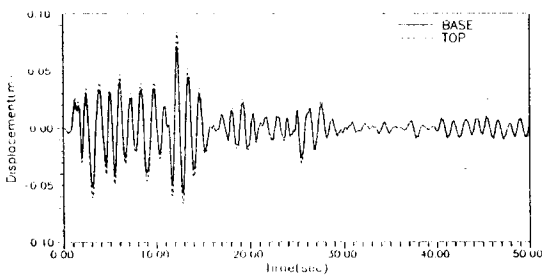
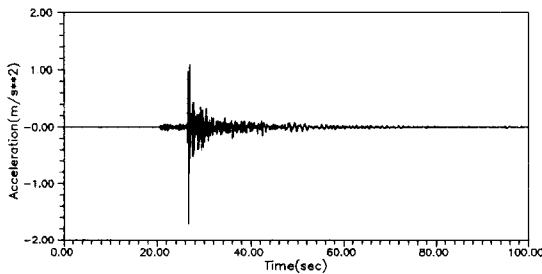


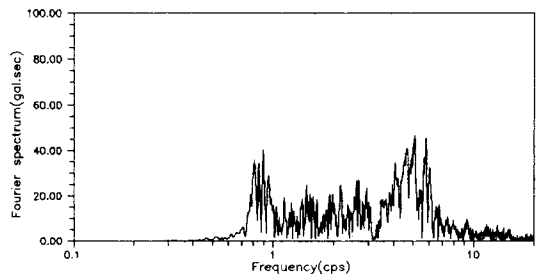
그림 7. 면진수조 벽체 상하부의 변위응답 비교

반에 대한 상대변위는 그림 7에서와 같이 큰 차이를 나타내지 않으므로 면진수조 벽체의 유연성에 의한 동수압은 감소됨을 알 수 있다.

그림 8은 발파하중과 유사한 특성을 갖는 일본에서 발생한 Ibaraki 지진(그림 4 참조)에 대한 응답으로서 주기와 진폭이 입력지진파와 거의 같음을 보여준다. 그리고 진동수의 최고치가 면진수조의 고유진동수 부근에서 발생하였다. 그림 9는 수



(a) 시간-이력 곡선



(b) Fourier 스펙트럼

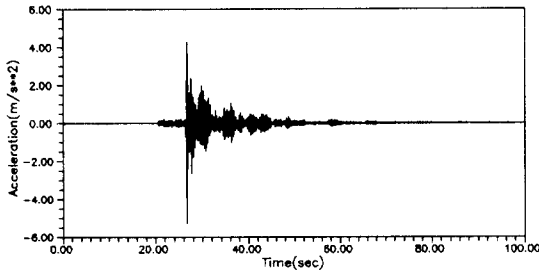
그림 8. Ibaraki 지진에 대한 수조바닥에서의 가속도응답

조 벽체 상단의 가속도 시간이력으로서 가속도의 최대값이 면진수조의 경우 0.17g, 비면진수조의 경우 0.55g로 나타나 면진수조의 경우 약 1/3 정도로 지진가속도를 감소시키는 것으로 나타났다. 또한 수조 벽체의 상단과 하단에서의 변위차는 그림 10에서와 같이 매우 작아 강체거동을 하고 있음을 보여준다.

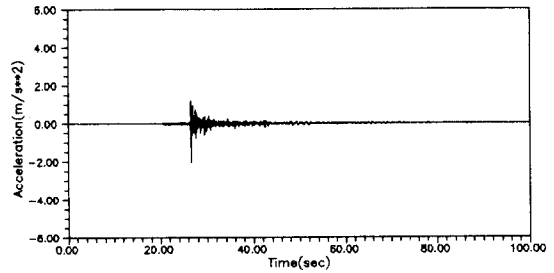
표 2는 면진수조의 지진해석 결과로서 고정식 기초의 수조에 비하여 현저하게 감소됨을 알 수 있다.

표 2. 저장조의 고유진동수(Hz)

지진응답		El Centro 지진		Ibaraki 지진	
		고정기초	LRB	고정기초	LRB
진단력 (ton)	충격성분	65.0	49.1	35.6	10.2
	유동성분	13.8	2.1	0.4	0.4
	합 계	78.8	51.2	36.0	10.6
휨모멘트 (t.m)	충격성분	311.3	269.8	185.7	46.0
	유동성분	93.3	14.6	2.6	2.6
	합 계	404.6	284.4	188.3	48.6
최대수면높이 (m)		2.42	0.47	0.06	0.06



(a) 비면진수조



(b) 면진수조

그림 9. 면진 및 비면진 수조 상부에서의 가속도응답 비교

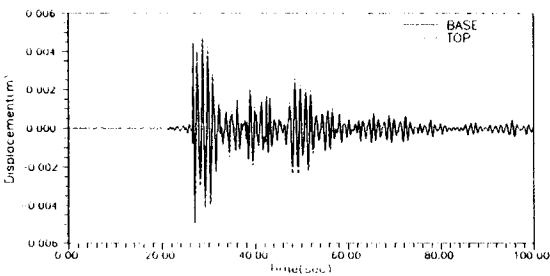


그림 10. 면진수조 벽체 상하부의 변위응답 비교

나라 유체저장구조물 그리고 안전성이 특히 요구되는 사용후핵연료 저장조와 같은 원자력 관련 구조물에서도 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다. 사용후핵연료 저장조의 경우 유동을 최소화 하기 위해 고감쇠 고무베어링의 사용이 바람직하다.

참 고 문 헌

1. Kelly, J.M., "Aseismic Base Isolation : Review and Bibliography," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 5, pp.202-216, 1986.
2. Bouchon, M., "Nuclear Spent Fuel Storage Pools on Aseismic Bearing Pads," *Proc. 9th World Conf. Earthquake Engineering*, pp. 633-638, 1988.
3. Chalhoub M.S. and J.M. Kelly, "Shake Table Test of Cylindrical Water Tank in Base-Isolated Structures," *J. of Eng. Mech.* 116, pp. 1451-1472, 1990.
4. Yun, C.B. et al., "Fluid-Structure Interaction Analysis for Spent Fuel Storage Structures," *Proc. 10th World Conf. Earthquake Engineering*, 4975-4980, 1992.
5. Kim, J. et al., "Performance for Base-Isolated Spent Fuel Storage Pool Structures," *SMiR-T-12*, Vol.K, pp.345-350, 1993.

(접수일자 : 1994. 9. 5)

5. 결 론

LRB 면진수조에 주파수 성분과 특성이 서로 다른 두 종류의 지진을 사용하여 거동해석을 한 결과 다음과 같은 사항들이 입증되었다.

- 1) 면진장치를 사용함으로써 상부구조에 전달되는 지진력을 효과적으로 감소시킬 수 있다.
- 2) 지반운동으로 인한 유체 저장조에서의 동수압을 면진장치를 사용함으로써 현저히 감소시킬 수 있다.
- 3) 또한 면진장치를 사용함으로써 자유수면 유동에 의한 파고를 감소시킬 수 있으므로 사용후핵연료 저장조와 같은 중요한 구조물에서 월류를 예방할 수 있다.

그러므로 면진장치는 일반구조물에서 뿐만 아