

# 사용후핵연료 저장용기의 지진시 활동거동

## Sliding Response of Spent Fuel Storage Cask to Earthquake

최 인 길\*                      전 영 선\*  
Choi, In-Kil                      Choun, Young-Sun

---

### ABSTRACT

In this study, sliding response analysis of free standing structure such as multi-purpose nuclear spent fuel storage cask is performed. The governing factors of sliding response are aspect ratio of structure and ground acceleration. The vertical acceleration component is very important factor in the sliding response of the structure. Based on the mathematical model, computer program is developed using direct forward integration method to predict the sliding response. Using the program, several parametric studies were made for sinusoidal ground motion and for El Centro 1940 earthquake and Mexico 1973 earthquake. From the results, it is known that the frequency content and duration of strong motion affect the sliding of the structure.

---

### 1. 서론

본 연구는 지반이나 기초에 고정되어 있지 않은 자립형 구조체의 지진시 거동에 대한 연구중 바닥면이 높이에 비해 충분히 넓은 경우에 발생하는 Sliding거동을 산정하기 위하여 수행되었다. 이러한 자립형 구조체는 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 원자력발전으로 인해 발생하는 사용후핵연료를 저장하기 위한 사용후핵연료 건식저장시설의 하나인 다목적 저장용기의 지진시 구조적 안전성을 확보하기 위하여 수행하였다. 사용후핵연료는 높은 방사선과 붕괴열을 발생시키므로 이러한 물질을 저장하고 있는 구조물의 구조적 건전성 확보는 공공의 건강과 환경을 위해 매우 중요한 사항이다.

건식저장시설의 형태에는 Vault, Concrete Cask, Steel Cask, Dry Well 등이 있으며[1] 본 연구에서 고려한 다목적 저장용기는 사용후핵연료를 원자력발전소로부터 중간저장시설 까지 수송하는데 사용될 뿐 아니라 수송된 사용후핵연료를 그대로 저장하기 위한 수송과 저장 겸용의 용기를 말한다. 이러한 경우 저장시설내의 기초면 위에 다목적 저장용기가 아무런 지지물 없이 적치됨으로 인하여 지진 등의 재해로부터의 건전성 확보가 매우 중요하며 특히 지진시 저장용기의

---

\* 한국원자력연구소 선임연구원

Sliding 및 Overturning 거동 등에 대한 예측이 매우 중요하게 된다. 다목적 저장용기가 지반운동을 받으면 Sliding, Rocking 또는 Overturning이 발생하게 된다. Sliding이나 Rocking이 발생할 경우 인접용기와의 상호 충돌에 의해 저장용기 및 내부에 저장된 사용후핵연료의 건전성을 유지하기 곤란하게 되며 특히 Overturning이 발생할 경우에는 저장용기안에 충분한 간격이 유지되지 않았을 경우 연속적인 Overturning 발생과 함께 저장 안전성에 심각한 문제를 발생시킬 수 있다 [2,3,4].

본 연구는 이러한 다목적용기의 지진시 거동을 평가하여 사용후핵연료의 저장안전성을 확보하기 위한 연구의 일환으로 지진하중 작용시 다목적 용기의 Sliding 거동을 예측하기 위한 수치해석 모델설정과 이를 이용한 프로그램을 작성하였다. 또한 이 프로그램을 이용한 여러 가지 해석예를 통하여 자립형 구조체의 Sliding 거동 특성을 평가하였다.

## 2. 자립형 구조체의 거동

기초나 바닥에 고정되어 있지 않은 자립형 구조체가 수평 및 수직방향의 지진하중을 받을 때 구조체는 Sliding, Rocking 및 Overturning이 발생하거나 지진강도가 매우 작을 경우에는 그대로 현상태를 유지하게 된다. 자립형 구조체의 Sliding이나 Overturning에 영향을 미치는 주요인자로는 구조체와 구조체가 놓인 바닥면과의 마찰계수, 구조체의 형상, 지진의 강도 및 진동수성분 등이 있다. 특히 수직방향의 지진하중은 매우 중요한 인자로서 수직방향의 지진가속도가 아래로 작용하게 되면 구조체의 유효질량을 감소시켜 Sliding시 마찰력을 감소시키며 Rocking 거동시 복원력을 감소시킴으로서 거동에 큰 영향을 미치게 된다[5].

자립형 구조체를 강체로 가정하여 그림 1(a)와 같은 구조체가 수평방향의 지진하중을 받을 경우 구조체의 평형방정식은 다음과 같다.

$$M\ddot{u} = \mu_s W_e \quad (1)$$

여기서,  $M$ 과  $W_e = W(1 + \dot{v}/g)$ 는 각각 구조체의 질량과 유효중량을 나타내며  $g$ 는 중력가속도를 나타낸다. 또한  $\mu_s$ 는 접촉면의 정마찰계수를 나타내며  $\ddot{u}$ 와  $\dot{v}$ 는 각각 지반의 수평 및 수직 가속도를 나타낸다. 위의 식 (1)에서와 같이 구조체의 수평관성력과 유효마찰력이 평형을 이루거나 유효마찰력이 큰 경우에는 구조체가 정지상태로 있게되나 관성력이 마찰력 보다 커지게 되면 활동을 시작하게 된다.

위의 식 (1)을 양변을 구조체의 질량으로 나누어 다시쓰면 다음의 식 (2)와 같이 된다.

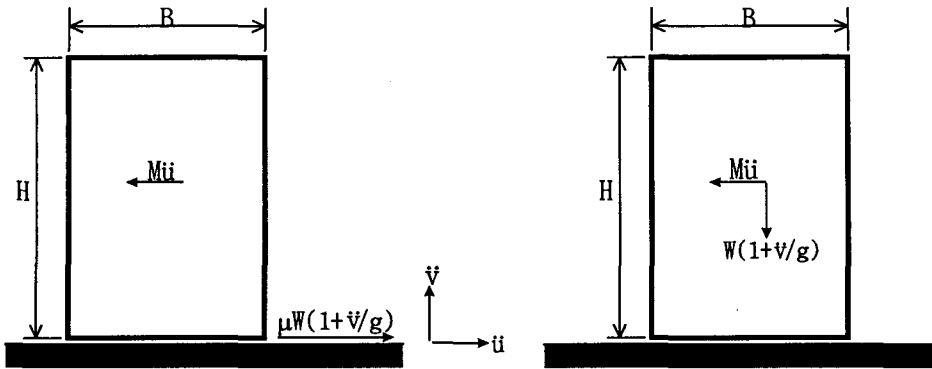
$$\ddot{u} = \mu_s g(1 + \dot{v}/g) \quad (2)$$

위의 식으로 부터 구조체가 Sliding을 시작하기 위한 조건은 다음의 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ddot{u} > \mu_s g(1 + \dot{v}/g) \quad (3)$$

Sliding이 방지되어 있을 경우 구조체는 Rocking거동을 하게되며 그림 1(b)에서 보는 바와 같이 수평 관성력에 의한 모멘트와 복원모멘트의 관계로부터 다음의 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$M\ddot{u}(H/2) = W(1 + \dot{v}/g)(B/2) \quad (4)$$



(a) Sliding (b) Rocking

그림 1 수평 및 수직 지반운동을 받는 자립형 구조체

위의 식으로부터 구조체가 Rocking을 시작할 조건은 다음과 같이 구해진다.

$$\ddot{u} > (B/H)g(1 + \dot{v}/g) \quad (5)$$

위의 식 (2)와 (5)로부터  $\mu_s$ 가  $B/H$ 보다 작은 경우에는 Sliding거동을 하며 클 경우에는 Rocking거동을 함을 알 수 있다. 즉 구조체의 바닥면이 클 경우에는 Sliding거동이 지배적이며 바닥면이 작을 경우 Rocking거동이 지배적으로 되어 Overturning이 발생할 가능성이 큼을 보여주고 있다.

### 3. 자립형 구조체의 Sliding 거동

수평 및 수직 지반운동에 의해 구조체가 Sliding을 시작하는 시점은 앞에서의 식 (3)에서의 조건에 따른다. 구조체가 Sliding을 시작하면 구조체의 운동방정식은 아래의 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$\ddot{x} = \mu_D g(1 + \dot{v}/g) \cdot [\text{sign}(\dot{s})] \quad (6)$$

여기서  $\ddot{x}$ 는 구조체의 절대가속도를 나타내며,  $\dot{s}$ 는 구조체의 지반에 대한 상대속도를 나타낸다. 위의 식으로부터  $\dot{s}$ 가 0일때 위의 식 (3)의 조건을 만족하면 계속하여 Sliding이 일어나나 식 (3)의 조건을 만족하지 못할 경우에는 상대운동 없이 지반과 같이 거동하게 된다. 이때의 구조체의 절대가속도  $\ddot{x}$ 는 수평 지반가속도  $\ddot{u}$ 와 같아지게 된다. 위의 식으로부터 구조체의 거동은 구조체의 중량과 무관함을 알 수 있다. 또한 위의 식은 수직 지반가속도  $\ddot{v}$ 가 중력가속도와 반대방향으로 중력가속도 보다 크게 작용하면 구조체가 지반으로부터 분리되어 적용이 불가능하다. 그러나 이러한 경우는 그 발생가능성이 매우 낮으므로 일반적인 경우에는 위의 식의 적용이 가능하다.

또한 위의 식 (6)에서  $\mu_D$ 는 접촉면에서의 동마찰계수를 나타내며 본 연구에서는 해석상의 편

의를 위하여 정마찰계수와 같은 것으로 가정하여 항시 일정한 값으로하여 계산하였다. 일반적인 재료들의 동마찰계수는 표 1과 같다. 정적 마찰계수는 보통 동마찰계수에 비해 20 - 50%정도 크다.

또한 같은 재료일지라도 접촉면의 처리상태나 도장 유무 등에 따라 큰 차이를 보이고 있다. 마찰계수는 또한 접촉면의 압력과는 무관하며 Sliding 속도에 따라 달라지게 되며 따라서 접촉면의 재질과 도장 유무 등의 상태에 크게 좌우된다[4]. 그러므로 자립형 구조체의 정확한 Sliding거동을 예측하기 위해서는 실험을 통한 접촉면의 재질 및 상태에 따른 정확한 마찰계수의 획득이 필수적이라 하겠다.

표 1 동마찰계수

재료	동마찰계수
Concrete	0.18 - 0.60
Plywood	0.26 - 0.30
Teflon	0.10 - 0.15
Graphite	0.09 - 0.12

이러한 구조체의 지진시 Sliding거동을 예측하기 위한 수치해석 모델에서는 구조체의 거동이 Rocking이 발생하지 않고 단지 Sliding만이 발생한다고 가정하여 계산하였다. 즉 앞서 설명한 바와 같이 이론적으로  $\mu_s$  가  $B/H$  보다 작고 식 (5)를 만족하면 Sliding거동을 하는 것으로 가정하였다. 실제적으로 이러한 식을 적용하기 위해서는 기초와 구조체의 접촉면이 완벽하게 평면이 되어야한다.

#### 4. 해석방법

앞서 기술한 자립형 구조체의 동적 운동방정식인 식 (6)을 풀기 위하여 직접적분법을 사용하였다. 일반적으로 지반운동 기록은 0.01 - 0.025초 정도의 간격으로 기록되어 있으므로 본 연구에서는 해석의 정확도를 높이기 위하여 계산시 입력지진의 시간간격을 세분하여 사용하였으며 이때의 지진가속도의 크기는 선형보간법을 이용하여 산정하였다.

$\Delta t$  동안의 가속도의 증분은 선형으로 가정하여  $i$  단계에서의 지반가속도  $\ddot{u}_i$  및 구조체의 가속도  $\ddot{x}_i$ 로부터 다음의 식들을 이용하여 지반의 속도, 변위 및 구조체의 속도, 변위 및 상대속도를 구할 수 있다. 즉

$$\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + \frac{1}{2}(\Delta t) (\ddot{u}_i + \ddot{u}_{i+1}) \quad (7)$$

$$\dot{x}_{i+1} = \dot{x}_i + \frac{1}{2}(\Delta t) (\ddot{x}_i + \ddot{x}_{i+1}) \quad (8)$$

$$u_{i+1} = u_i + \frac{1}{2}(\Delta t) (\dot{u}_i + \dot{u}_{i+1}) \quad (9)$$

$$x_{i+1} = x_i + \frac{1}{2}(\Delta t) (\dot{x}_i + \dot{x}_{i+1}) \quad (10)$$

$$s_{i+1} = u_{i+1} - x_{i+1} \quad (11)$$

위의 식 (7) - (11)의 오른쪽 항 중에서  $\ddot{x}_{i+1}$ 을 제외하고 모두 알고 있는 값이다.  $\dot{x}_{i+1}$ 은 앞의 식 (6)으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{x}_{i+1} = \mu_D g (1 + \ddot{v}_{i+1}/g) \cdot [\text{sign}(\dot{s}_{i+1})] \quad (12)$$

그러나 위의 식 (12)에서  $s_{i+1}$  역시 미지수 이다. 그러나 상대속도의 방향이 바뀌는 단계를 제외 한 경우에는  $s_{i+1}$ 와  $s_i$ 는 동일한 값으로 가정하여 계산하여도 무관하다. 단 전후 두단계에서 상대속도의 방향이 변할 경우에는 전단계의 상대속도  $s_i$ 를 0으로 놓고 계산하였다.

또한 위의 식 (11)로부터 구한  $s$  는 구조체의 상대변위로 지반운동이 끝난후의 최종적인 영구 변위가 되는 것이다.

### 5. 수치해석에

수치해석에 사용된 구조체는 대용량 사용후핵연료 수송용기로서 그 크기는 직경 2.486m, 높이 5.305m이다[6]. 먼저 자립형 구조체의 Sliding거동에 미치는 수직성분의 영향을 살펴보기 위하여 크기 0.5g, 진동수 5Hz의 수평 조화하중만을 가했을 경우의 거동과 수평성분의 1/2의 수직성분을 추가로 가했을 경우의 Sliding거동을 그림 2와 3에 각각 나타내었다. 이때 마찰계수는 0.2로 가정 하였다.

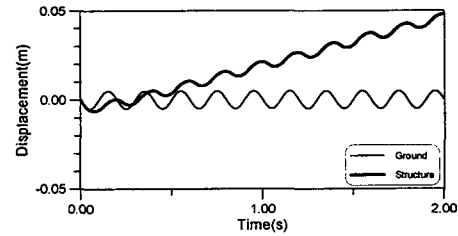
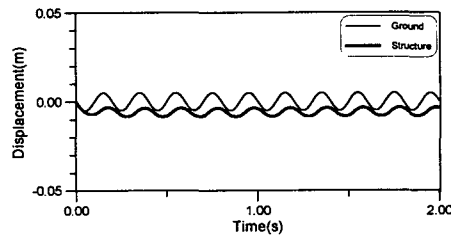
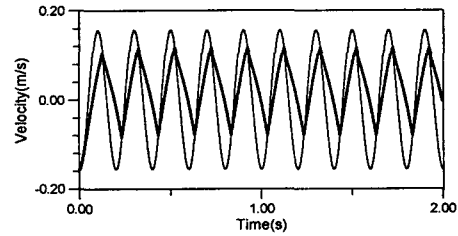
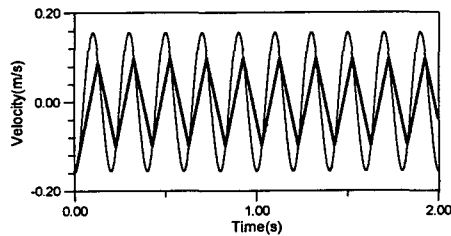
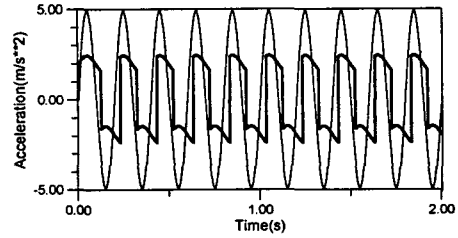
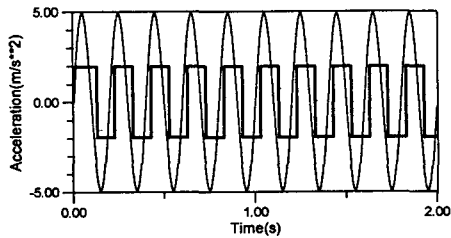


그림 2 수평 조화하중 하에서의 구조체의 Sliding거동

그림 3 수평 및 수직 조화하중 하에서의 구조체의 Sliding거동

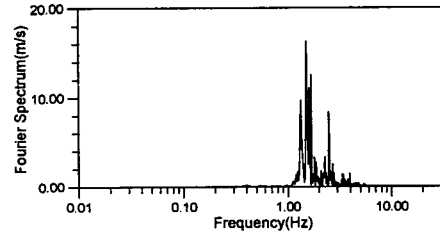
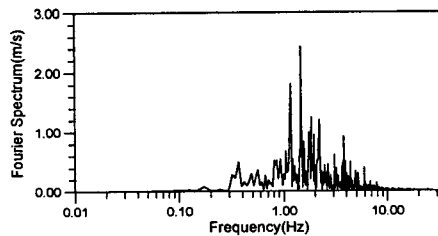
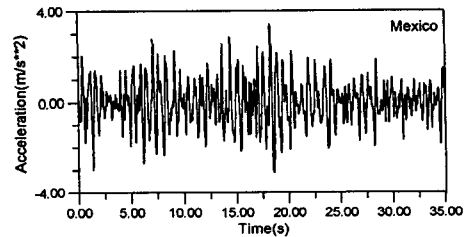
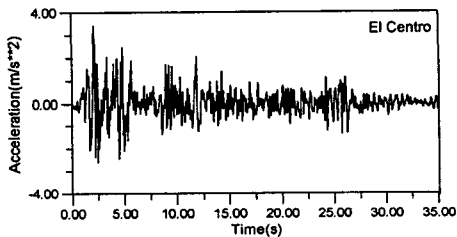
그림 2의 가속도응답에서 보는 바와 같이 수평성분 만을 가했을 경우 구조체의 가속도는 직사각형 모양으로 마찰력과 중력가속도를 곱한 값을 넘지 못하였으나 그림 3에서의 가속도응답에서 보는 바와 같이 수직성분이 가해지면 유효질량의 감소에 따라 수평성분 만을 가했을 경우 보다 큰 가속도응답을 보여주고 있다. 따라서 수직성분이 가해질 경우 구조체의 속도응답도 크게 나타났으며 속도가 0인 점을 기준으로 할 때 양방향의 속도성분이 크게 나타났다. 이러한 이유로 그림 2에서 보는 바와 같이 수평성분만을 가했을 경우 같은 크기로 Sliding이 계속 반복되었으나 수직성분을 가하면 그림 3에서와 같이 속도성분을 적분하여 변위를 구하는 것이므로 양방향 성분의 적분값의 누적에 따라 상대변위가 크게 증가되며 진동시간이 증가함에 따라 계속적으로 증가함을 알 수 있다.

진동주기가 구조체의 Sliding에 미치는 영향을 보기위하여 위와 동일한 구조체에 대하여 조화하중의 진동수를 1Hz, 3Hz, 5Hz, 7Hz 및 9Hz에서의 거동을 비교하여 보았다.

표 2에서 보는 바와 같이 조화진동의 진동수가 증가함에 따라 상대변위는 급격히 감소됨을 알 수 있다. 특히 수직운동이 없는 경우의 감소가 더욱 크게 나타났다. 그러나 1Hz에서의 두 변위 비교에서 수평운동만을 가할 경우의 상대변위가 크게 나타나는 것은 진동주기가 길어 조화진동의 지속시간 동안 진동횟수가 적어 증가된 양이 적기 때문이며 지속시간이 길어지면 상대적으로 큰 차이를 나타내면서 수직운동을 가할 경우가 크게 나타난다. 위의 경우는 진동지속시간이 2초로 한정된 경우의 결과를 보여주고 있으나 지속시간이 길어짐에 따라 수평운동의 경우 동일한 크기로 반복되나 수직운동을 동시에 가했을 경우에는 지속적으로 그 크기가 증가하게 된다.

표 2 조화하중의 진동수 변화에 따른 활동거동

진동수(Hz)	상대변위 (m)	
	수평진동	수평진동 + 수직진동
1	0.25	0.12
3	0.028	0.073
5	0.01	0.048
7	0.005	0.035
9	0.003	0.028



(a) El Centro 지진

(b) Mexico 지진

그림 4 입력지진의 시간이력 및 Fourier Spectrum

실제 지반운동에 대한 사용후핵연료 대형용기의 Sliding거동을 보기위하여 진동수성분이 서로 다른 두가지의 지진기록에 대한 구조체의 Sliding거동을 해석하였다. 해석에 사용된 지진기록을 1940년 El Centro 지진기록의 S00E성분과 1973년 Mexico(La Villita Dam)지진의 기록을 사용하였다. 이때 두지진의 최대지반가속도는 El Centro지진의 최대지반가속도인 0.34g를 사용하였다. 또한 수직성분은 수평성분의 1/2을 사용하였다. 그림 4에서 보는 바와 같이 El Centro지진에 비해 Mexico지진은 강진지속시간이 매우 길며 진동수성분이 저진동수 영역에 집중되어 있음을 알 수 있다. 두 지진기록을 이용하여 마찰계수 0.2인 대형용기의 Sliding거동을 해석한 결과 그림 5에서 보는 바와 같이 동일한 강도의 지진에 대해서도 강진지속시간 및 진동수성분에 따라 구조체의 상대변위가 6배 가량 증가함을 알 수 있다. 이 결과를 볼 때 구조체의 Sliding 거동은 가속도 보다는 속도에 의해 그 크기가 좌우됨을 알 수 있다.

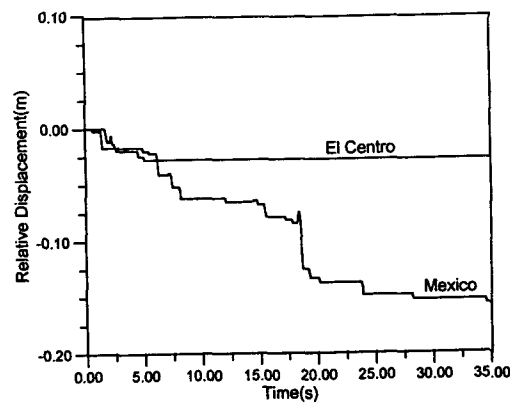


그림 5 입력지진가속도에 따른 상대변위 비교

동일한 지진가속도에 대하여 접촉면에서의 마찰계수에 따른 응답특성을 분석하기 위하여 두 지진가속도에 대하여 접촉면의 마찰계수가 각각 0.1, 0.15, 0.2, 0.25 및 0.3일 경우의 최대 상대변위를 표 3에서 비교하여 보았다. 마찰계수의 크기에 관계없이 저진동수 성분을 가지고 강진 지속시간이 긴 지반운동에 대한 상대변위가 크게 나타났으며 이러한 특성을 갖는 지진하중에서의 마찰계수의 변화에 따른 최대변위의 변화가 더 작게 나타났다.

마찰계수	상대변위 (m)	
	El Centro	Mexico
0.10	0.125	0.370
0.15	0.048	0.280
0.20	0.028	0.156
0.25	0.008	0.077
0.30	0.004	0.036

#### 4. 결론

이상의 사용후핵연료 대형 수송용기에 대한 조화하중 및 실제 지진기록에 대한 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 자립형 구조체의 거동은 구조체의 중량과 무관하며 세장비에 따라 Sliding 또는 Rocking 거동을 하며 마찰계수가 구조체의 폭과 높이에 대한 비보다 작은 경우에 Sliding이 일어난다.
- 구조체의 Sliding 거동에서 수직성분의 하중이 가해지면 유효질량의 감소로 인하여 구조체의 활동에 미치는 영향이 매우 크게 나타났다.
- 동일한 최대지반가속도를 갖는 지반운동에 대하여 지반운동의 진동수가 작을수록 최대변위가 크게 발생하였다.
- 실제 지진하중에 대하여 지진하중의 진동수 성분과 강진지속시간에 따라 응답에 큰 차이를 보여주었다. 저진동수가 지배적인 지진하중의 경우에 변위가 크게 발생하였으며 특히 강진지속시간이 긴 경우 더욱 큰 변위가 발생한다.
- 동일한 지반운동에 대하여 마찰계수가 증가함에 따라 구조체의 상대변위는 급격히 감소하였으며 저진동수 특성을 가지며 강진지속시간이 긴 지진하중의 경우 변위 마찰계수의 증가에 따른 변위의 감소율이 작게 나타났다.

이상의 결과로부터 사용후핵연료 다목적 용기와 같이 지반 또는 기초저면위에 고정되어 있지 않은 자립형 구조체의 설계시에는 지진하중 작용시의 상대변위를 정확히 예측하여 용기간에 충분한 거리를 두어 상호 충돌의 발생을 방지하고 적절한 세장비를 확보하여 Overturning을 방지하여야 한다. 또한 정확한 Sliding 거동의 예측을 위해서는 접촉면의 재료 및 조건에 따른 정적 및 동적 마찰계수를 실험을 통하여 정확히 산정하여야 한다.

#### 참고문헌

- [1] 김진웅, 전영선, 최인길, 사용후핵연료 중간저장구조물에 관한 구조공학적 고찰, KAERI/TR-131/88, 과학기술처, 1988.
- [2] K. Shirai, T. Ito, and Y. Ozaki, Establishment of Cask Storage Technology for Spent Fuel - Evaluation of Tipping-Over of Cask subjected to Strong Earthquake Motion, U92037, CRIEPI, 1992.
- [3] T. Ikushima, CASKETSS-2 ; A Computer Code System for Thermal and Structural Analysis of Nuclear Fuel Shipping Casks (Version 2), JAERI-M 91-129, 1991.
- [4] T. Ikushima, Rocking : A Computer Program for Seismic Response Analysis of Radioactive Material Transport AND/OR Storage Casks, JAERI-Data/Code 95-017, 1995.
- [5] M. Aslam, W. G. Godden, and D. T. Scalise, Sliding Response of Rigid Bodies to Earthquake Motions, LBL-3868, 1975.
- [6] 노성기 외, 사용후핵연료 관리기술개발 -사용후핵연료 수송기술 개발-, KAERI/NEMAC/RR-158/95, 1995.