

사용후연료 저장용기 자유입상 모델의 지진응답해석 Seismic Response Analysis of Freestanding Model of a Spent Fuel Storage Cask

이재한* 서기석** 구경희** 이홍영*** 최병일*** 정성환***
Lee, J.H. Seo, G.S. Koo, G.H. Lee, H.Y. Choi, B.I. Chung, S.H.

ABSTRACT

The seismic response analysis of a freestanding spent fuel storage cask model are performed for an artificial time history acceleration generated by the basis on the US NRC RG1.60 response acceleration spectrum. This paper focuses on the structural stability by seismic loads to check the overturning possibility of storage cask and the slipping displacement on bed. Parametric analyses of a simplified cask model are performed to take into account the variations in seismic load magnitude and cask/bed interface friction. The analyses results show that the storage cask has a large marginal integrity in the response acceleration and slipping distance for both design seismic and beyond design seismic loads.

1. 서론

PWR 사용후연료 21 다발을 저장하기 위한 전식 저장시스템은 콘크리트 저장용기시스템으로 3 개의 구성품인 캐니스터(Canister), 이송용기(Transfer Cask), 콘크리트 저장용기(Storage Cask)로 구성된다. 원자로에서 연소 후 방출된 사용후연료는 저장 풀에 습식으로 일정기간 저장되어 냉각된 후 캐니스터에 적재되고, 이 캐니스터는 이송용기를 사용하여 콘크리트 저장용기에 옮겨져 저장하게 된다. 콘크리트 저장용기는 그림 1과 같이 사용후연료가 적재된 캐니스터를 저장하기 위한 단단하고 튼튼한 원통형 용기이다. 콘크리트 저장용기는 구조재인 내부 셸과 외부 셸, 그리고 내부 셸과 외부 셸 사이의 차폐 및 압축 강도를 제공하는 콘크리트 차폐체로 구성된다.

콘크리트 저장용기시스템은 설치판 위에 자유 입상구조물로 설치되며, 지진으로 비롯되는 가속도 하중에 견디고, 지진이 발생하는 동안 전복되지 않음과 설치면 상의 미끄러짐 거리가 설치간격의 절반보다 적음을 보여주어야 한다. 지진하중은 NRC Reg. Guide 1.60에 제시한 수평 및 수직 방향에 대한 응답스펙트럼을 활용하여 보수적인 지진시간이력하중을 발생하여 사용한다. 저장용기 건전성 평가에 사용한 지진가속도 크기(ZPA)는 설계지진으로 수평방향 0.3g, 수직방향 0.2g를 적용하였으며, 지진응답평가에서는 0.3g - 1.0g의 가상지진과 0.2 - 1.0 범위의 미끄럼 계수에 대한 응답도 계산하였다.

저장용기의 내진평가는 단순모델에 의한 수식평가와 ABAQUS 전산프로그램을 이용한 시간이력해석평가를 모두 수행하였다. 평가 내용은 저장용기의 전복여부, 최대 가속도, 설치면에서의 최대 미끄러짐 거리등이다.

* 정희원, 한국원자력연구소, 책임연구원

** 한국원자력연구소, 책임연구원

*** 한국수력원자력(주) 환경기술연구원, 그룹장/팀장/과장

2. 본 론

개념설계 단계에 있는 콘크리트 저장용기의 주요 구조재인 내부 셸은 50mm, 외부 셸은 20mm의 두께로, 재질은 모두 탄소강으로 결정되어 있다. 이러한 저장용기는 21개의 가압경수로 사용후연료 적재하는 캐니스터의 무게 33.4톤을 포함한 최대 무게가 168.3톤으로 계산되었고, 저장용기 구조재의 원통실린더 길이는 5.885m로 주어졌다. 저장용기 구조재 직경은 그림 1과 같이 콘크리트 차폐체를 감싸는 외부원통(CYL-1)의 외경이 3.55m이고, 내부원통(CYL-2)의 외경은 1.91m로 주어졌다.

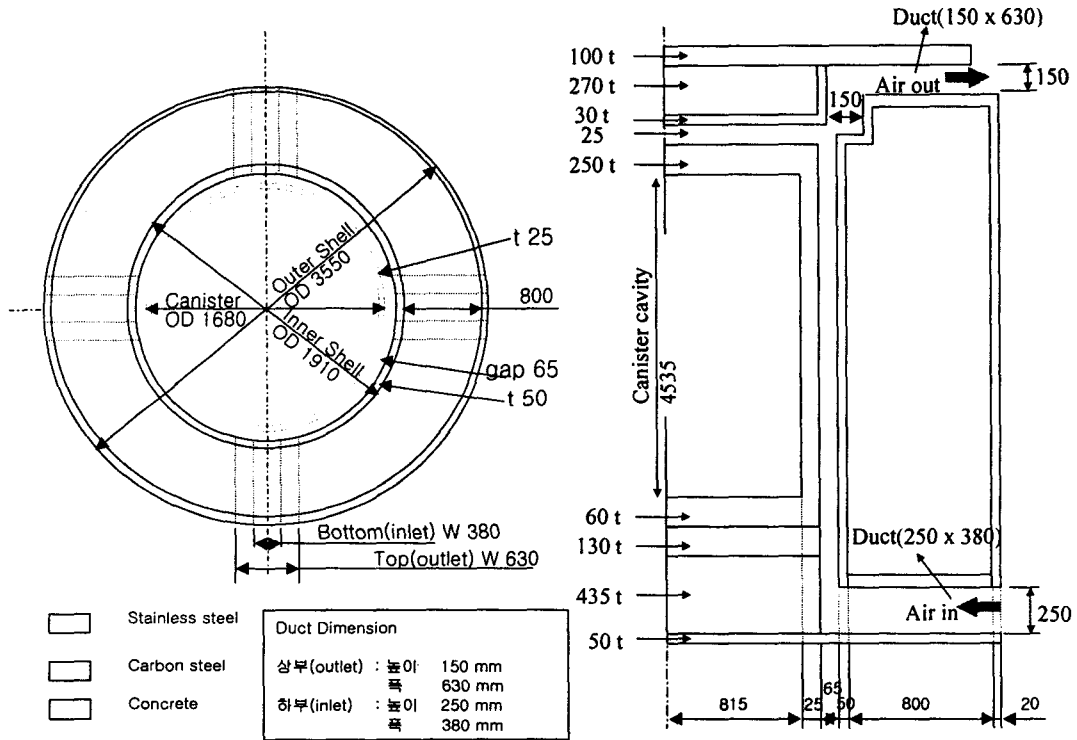


그림 1. PWR 사용후연료 콘크리트 저장용기 치수

2.1 단순모델에 의한 지진평가

저장용기를 단일 직경을 갖는 원통구조물로 하여 단순 외팔보(cantilever)로 가정할 경우에 계산식을 이용하여 1차 고유진동수를 계산할 수 있다. 저장용기가 하단구속 없이 서 있지만 보수적 평가를 위해 하단 고정된 외팔보 모델로 가정하여 고유진동수를 계산한다. 고유진동수 계산을 위한 저장용기 두 원통실린더의 단면 관성모멘트(I_{cy})는 각각 식 (1) 및 식 (2)와 같다.

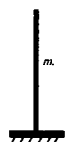
$$I_{cy-1} = \pi \left(\frac{d_o^4 - d_i^4}{64} \right) = 0.3455m^4 \quad (1)$$

$$I_{cyl-2} = \pi \left(\frac{d_o^4 - d_i^4}{64} \right) = 0.1264m^4 \quad (2)$$

외팔보 형태의 길이가 l 인 단순 원통실린더 1차 고유진동수는 앞의 계산 값을 적용하면 식 (3)과 같이 계산된다.

$$f_n = \frac{(0.597\pi)^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI_{cyl}}{l^3 m}}, \quad m = \text{mass per unit length} \quad (3)$$

$$= \frac{3.518}{2\pi} \sqrt{\frac{E(I_{cyl-1} + I_{cyl-2})}{l^3 m}}$$

$$= 29.0Hz$$


고유진동수 계산과정에서 두 가지 보수적인 가정이 도입되었다. 첫째는 저장용기의 콘크리트 차폐체를 감싸는 두 원통실린더의 통합 관성모멘트는 상하 연결된 두 실린더를 독립된 구조물로 가정하여 각각의 관성모멘트를 단순 합산하였고, 둘째는 저장용기 하단 변위 구속조건 설정은 고유진동수를 낮추는 보수적인 가정이다. 이로부터 식 (3)에서 계산한 저장용기 1차 고유진동수 29Hz는 지진 영주기가속도(ZPA)의 고유진동수 한계값 33Hz 보다 조금 작지만 두 가정에 의해서 저장용기는 지진에 대하여 실제 거동에서 강제운동을 한다고 예측할 수 있다.

가진 영역에서 강제 거동으로 공진주파수를 갖지 않는 자유 입상구조물의 지진하중에 의한 전복평가는 보수적인 정적해석을 수행할 수 있다. 즉 수직방향으로 지진가속도에 의한 반중력 방향 하중을 가한 상태에서 수평방향으로 지진가속도와 동등한 정하중을 주어, 저장용기의 복원모멘트에 의한 전복 가능성을 평가한다.

저장용기의 바닥면 직경이 D , 무게가 W 이고, 무게중심까지의 높이가 H 인 경우의 전복시킬 수 있는 최소 지진가속도를 계산한다. 수평방향 지진가속도가 g 이고, 수직방향 지진가속도도 위쪽으로 수평방향과 같은 g 만큼 작용한다고 할 때 전복가속도는 저장용기 바닥 외각 한 점에서의 모멘트 평형에서 다음 식 (4)와 같다.

$$WHg \leq W(1-g)D/2 \quad (4)$$

$$g \leq \frac{D/2}{H+D/2}$$

$$g \leq 0.376$$

여기서, 직경 D 가 3.55m이고, 저장용기 무게 W 는 168.3톤, 무게중심 높이 H 는 저장용기 전체 높이가 5.885m의 절반인 2.94m로 설정하였다. 이러한 접근법은 용기의 모든 바닥 면이 항상 접촉하는 경우로 실제로는 용기의 일부 바닥이 들떠 있어도 전복은 발생하지 않는다. 저장용기가 설치되는 부지의 설계지진하중이 수평방향으로 0.3g, 수직방향으로 0.2g이므로 이들 값은 전복가능 지진가속도 0.376g보다 작아 전복시작을 위한 바닥면 들림이 발생하지 않는다.

지진에 의한 미끄러짐의 발생여부를 마찰력 계수에 의한 저항력과 지진 가력의 관계에서 검토하고자 한다.

- 최저 미끄러짐 저항력(Fr) : $Fr = \text{마찰계수} \times (\text{최소무게})$
 $= \mu \times (W - 0.2W)g$

$$= 0.8 \mu Wg$$

- 수평지진에 의한 가력(Fs) : $F_s = 0.3Wg < 0.8 \mu Wg (=F_r)$

위로부터 마찰계수(μ)가 0.375 이상이면 미끄러짐이 발생하지 않는다.

2.2 시간이력해석에 의한 지진평가

단순모델에 대한 저장용기의 전복여부를 수식평가 방법으로 평가한 결과 설계지진에 대하여도 전복이 발생하지 않을 것으로 예측하였다. 저장용기 설치면의 탄성영향을 고려한 좀더 구체적인 전복평가를 위하여 US NRC RG1.60에 제시한 가속도 스펙트럼을 근거로 작성한 그림 2의 수평 및 수직방향 가속도시간이력 설계지진에 대한 비선형 시간이력해석을 수행하였다.

지진에 대한 시간이력해석은 신속한 평가를 위하여 저장용기 내부구조물이 균일한 질량분포를 갖는 것으로 가정한다. 저장용기 모델에서 사용한 요소는 균일한 질량분포를 갖는 보요소로 한다. 저장용기 하부 바닥면과 저장용기 설치면(ISFSI) 사이의 접촉조건에 사용한 요소는 수직방향으로 압축만 존재하고 수평방향으로 마찰조건을 성립시키는 ABAQUS 비선형 스프링 요소인 JOINTC 요소와 ABAQUS 사용자 정의프로그램을 사용하였다[1,2].

저장용기를 받치는 용기 설치면의 접촉강성(S_1)은 설치면(ISFSI)에 가해진 힘(F)과 처짐량(δ)에 의한 계산값($S_1 = F/\delta$)을 사용해야 하지만 처짐량에 대한 자료가 없기 때문에 본 연구에서는 참고문헌[3]의 자료인 $7,840 \times 10^6 N/m$ 를 8개의 접촉점에 분산하여 사용한다. 접촉면의 마찰계수는 미끄러짐과 전복 가능성이 보수적으로 평가되도록 0.2와 1.0 사이에서 계산을 했다. 해석모델은 그림 3과 같이 수송용기에 대해 5개 절점과 4개 보요소로 모델링하고, 접촉면에 대해 원주방향으로 8개의 비선형 JOINTC 요소를 사용하였다.

고유진동수 해석결과는 그림 4와 같으며, 고유진동수는 설치면 압축강성에 의한 10.7Hz의 수평방향 회전모우드와 31.9Hz의 수직방향 압축모우드가 발생되었다. 수직 인장방향으로는 강성이 없기 때문에 시간이력해석에서는 두 강성의 결합모우드가 나타날 것으로 예측된다. 그리고 저장용기 자체의 1차 굽힘모우드가 61.1Hz에서 발생하였다. 저장용기 굽힘 고유진동수 61.1Hz는 단순 계산에서 보수적으로 계산한 29Hz와 비교하여 높은 값으로 단순 계산의 타당성을 보여주고 있다. 그러나 설치면의 압축강성에 의한 10Hz 근처의 고유진동수는 저장용기에 전달될 지진하중이 저장용기 설치면을 통하여 어느 정도 증폭될 것을 예측할 수 있다.

0.3g와 0.2g의 수평과 수직방향 지진하중에 대한 지진응답계산결과는 표 1에 나타내었다. 이력 시간증분은 0.004초로 25초 동안 해석을 수행하였다. 해석결과 저장용기에 발생하는 최대 가속도는 저장용기 상단에서 2.87g로 나타났고, 설계지진에 대하여 바닥면 수평방향으로 0.24mm의 작은 미끄러짐이 발생하였고, 바닥면 수직방향으로도 3mm 정도로 매우 작은 들림이 나타났다. 그러나 이들 값은 저장용기의 탄성 설치판과 저장용기의 유연성에 의한 국부 가속도의 영향으로 판단된다. 저장용기를 강체로 모델링한 경우에는 수평 미끄러짐이 발생하지 않았다. 또한 저장용기 하부에 대한 상부의 상대적 수평변위는 그림 5와 같이 최대 4mm 정도로 작은 범위 내에서 움직임을 보였다.

저장용기는 지진 중에 전복되지 않는다는 것을 계산으로 확인하였기 때문에 지진하중에 의한 저장용기 내의 MPC와 내부구조물의 응력에 따른 건전성은 낙하/충돌 해석에 의한 하중과 비교함으로써 평가할 수 있다. 지진하중에 의해 발생된 최대 응답가속도는 저장용기 상단에서 2.87g로 이 값은 낙하사고 등 비정상 운전사고에서 발생하는 감속 가속도인 45g 보다 작기 때문에 낙하 등에 대한 구조건전성이 입증되는 경우에 별도의 해석이 필요하지 않다[4]. 이상의 결과로부터 저장용기 바닥의 미끄러짐과 들림은 설계지진에 대하여 매우 작은 정도로 발생하는 것을 확인하였지만 저장용기의 전복으로 이어지는 않는 것을 확인하였다.

2.3 가상조건에 대한 지진응답평가

입력지진강도의 크기와 저장용기와 설치면 사이의 미끄럼 계수의 다양한 조합을 가정한 가상조건에서의 지진응답 평가를 수행하였다. 사용한 지진크기는 수평으로 0.3g, 0.5g, 0.7g, 0.9g, 1.0g와 수직으로는 수평의 2/3 값을 사용한다. 마찰계수는 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 등 5개에 대하여 적용하였다.

지진시간이력해석 평가결과 최대 발생가속도는 그림 6에서 보는바와 같이 마찰계수가 1.0이고, 지진크기가 1g인 경우로 저장용기 상단에서 23.5g로 계산되었다. 이 값은 수평낙하에서 고려하는 45g와 비교하여 작은 값이다. 최대 미끄럼 발생은 그림 7에 나타낸 바와 같이 마찰계수가 0.2이고, 지진크기가 1g인 경우로 53.3cm가 발생되었다. 이 값은 저장용기의 설치 거리의 절반보다 작아야 한다. 저장용기의 전복과 관련된 한쪽 최대 들림은 최대 가속도가 발생된 조건에서 26.2cm로 계산되어 전복이 발생할 수 있는 184cm 보다 작았다. 그리고 전복조건과 관계가 있는 저장용기의 최대 기울어짐 각은 3.82°로 전복이 발생하는 31.1° 보다 작았다. 이러한 결과로부터 가상 지진에 의한 저장용기 바닥의 미끄러짐과 들림은 저장용기 사이의 충돌이나 저장용기의 전복으로 이어지는 않는 것을 확인하였다.

3. 결 론

저장용기의 설계지진에 대한 내진평가는 단순모델에 의한 수식평가와 ABAQUS 해석에 의한 시간이력해석 평가를 모두 수행하였다. 단순 보로 계산한 지진하중에 대한 보수적인 수식계산결과 전복가능 지진가속도는 0.376g로 나타나 설계지진의 크기보다 커 전복시작을 위한 바닥면 들림이 발생하지 않는 것으로 나타났다. 지진에 의한 마찰 저항력과 지진 가력의 관계에서 마찰계수가 0.375 이상이면 미끄러짐이 발생하지 않는 것으로 나타났다.

설계지진에 대하여 ABAQUS 해석으로 계산한 저장용기에 발생하는 최대 가속도는 저장용기 상단에서 2.87g로 나타났고, 바닥면 수평방향으로 0.24mm의 작은 미끄러짐이 발생하였다. 바닥면 수직방향으로도 3mm 정도로 매우 작은 들림이 나타났다. 발생된 최대 응답가속도 2.87g는 낙하사고에서 발생된 감속 가속도보다 작기 때문에 별도의 구조해석이 필요하지 않았다.

가상지진에 대한 다양한 조건의 해석결과 최대 가속도는 23.5g로 나타나 구조적으로 건전하며, 최대 미끄럼 거리는 53.3cm로 계산되어 가상 지진에 의한 저장용기 사이의 충돌이 발생하지 않으며, 저장용기의 기울기도 작아 전복으로 이어지는 않는 것을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 전력산업연구개발사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표합니다.

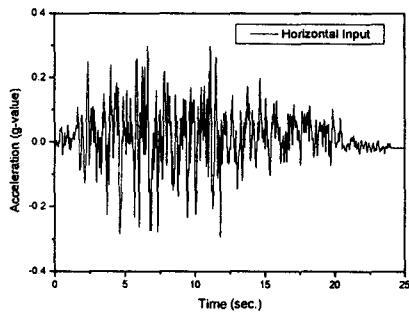
참고문헌

1. ABAQUS User's Manual for Revision 5.8(1999), Hibbit, Karlson & Sorenson Inc.
2. 이재한, 구경희, 유 봉, "면진시험구조물의 수평가진응답을 활용한 면진장치 비선형 해석모델개발," 한국전산구조공학회 2002 춘계학술발표회, 2002.
3. HI-STORM-100 System T-SAR, Volume 2/6 Structural Analysis, Holtec Inc., 1997.
4. 서기석 외, 전식저장 시스템 구조/열해석 및 안전성시험 평가, 한국원자력연구소/원자력환경기술원, KAERI/CR-161/2003, 2003.

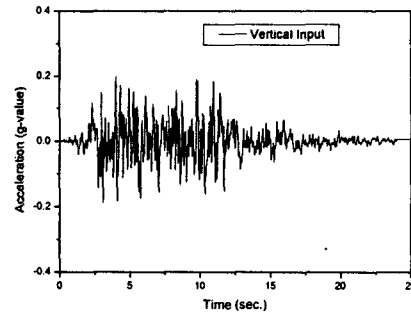
표 1. 설계지진하중에 대한 비선형 시간이력 해석결과

	설계지진하중 (0.3g H, 0.2g V)	허용값
최대 회전 각도	Negligible	31.1°
최대 들림 높이	0.32 cm	184 cm
최대 상단가속도	0.87g H, 2.87g V	45 g
최대 미끄러짐	0.024 cm*	수송용기 사이 간격

* : 저장용기에 대한 강체 모델에서는 미끄러짐이 없음.



수평방향 (0.3g)



수직방향 (0.2g)

그림 2. US NRC RG1.60에 근거한 지진시간이력자료

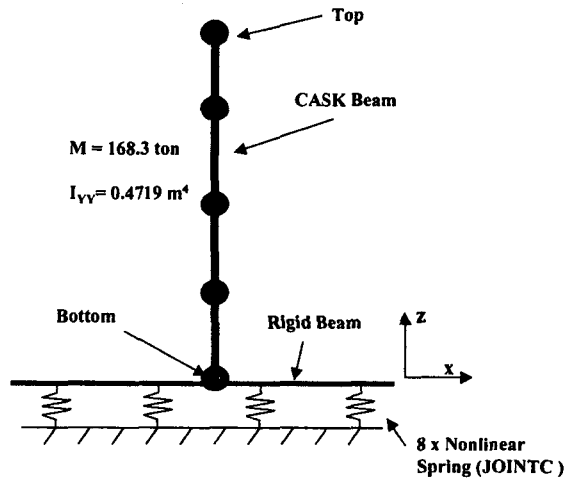


그림 3. 저장용기 및 설치면의 모델 개념도

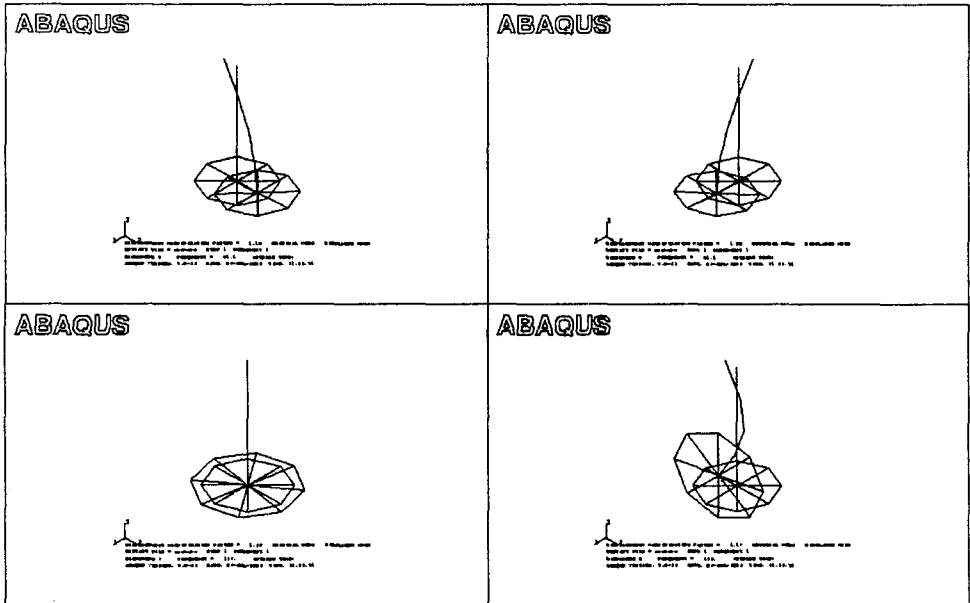
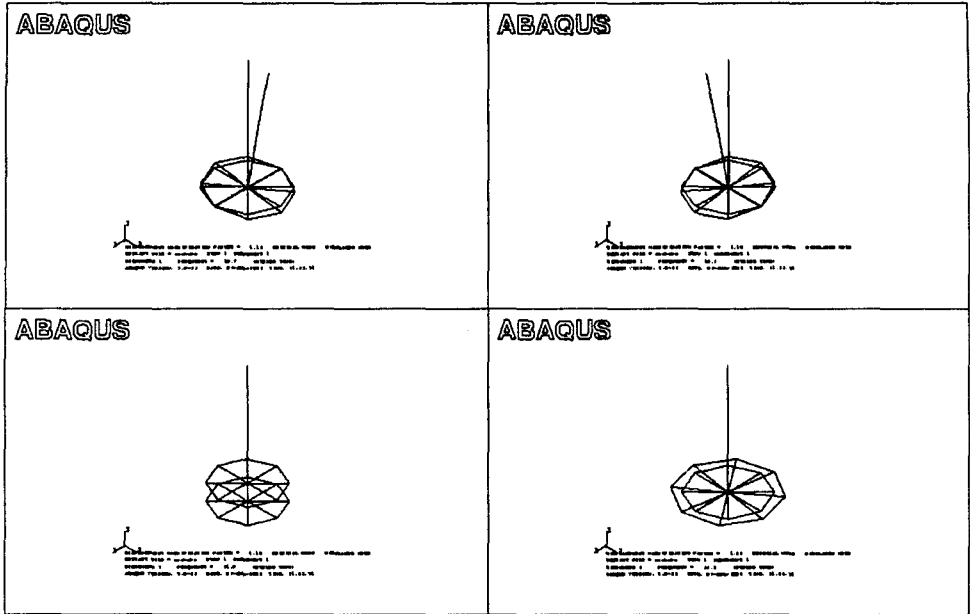
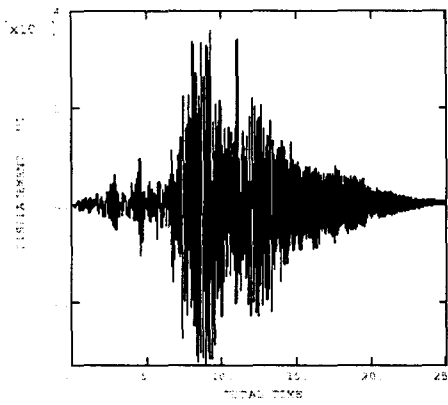
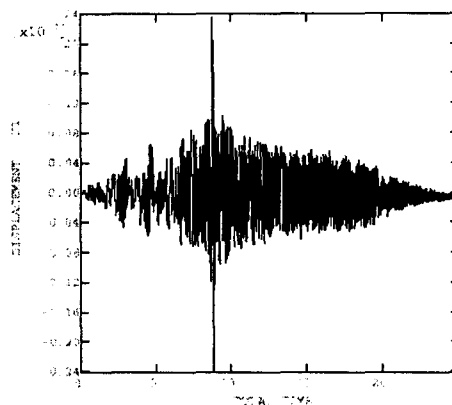


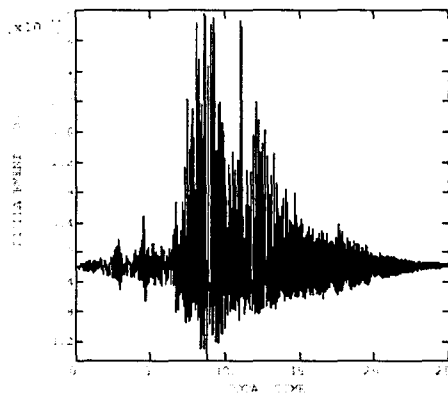
그림 4. 저장용기 고유진동수 해석결과



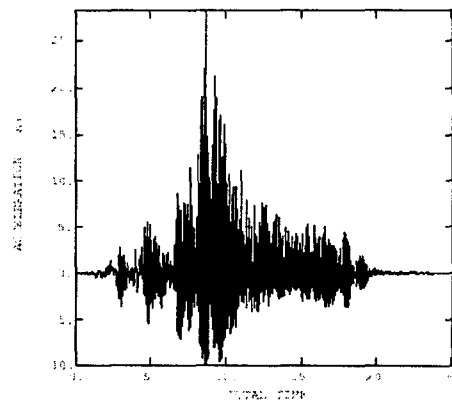
(상/하부 수평변위 차이, m)



(바닥면 수평변위, m)



(바닥면 수직변위, m)



(상부 수직지진응답가속도, m/sec²)

그림 5. 저장용기 설계지진응답해석 결과 (0.3g H, 0.2g V)

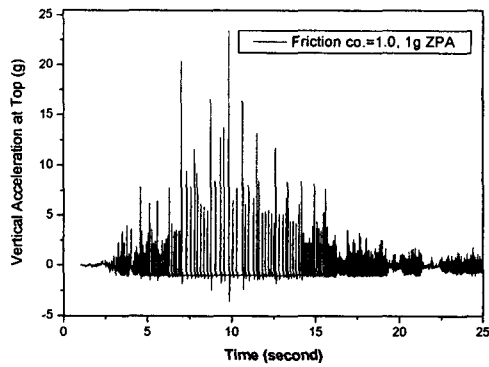


그림 6. 가상지진에서의 최대 가속도

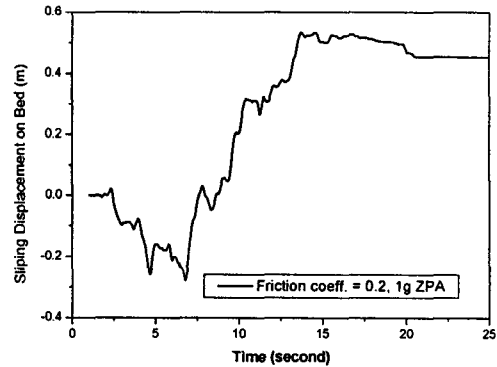


그림 7. 가상지진에서의 최대 미끄럼 변위