

2003추계학술발표회 논문집  
한국원자력학회

## 자유입상 저장용기의 지진응답에 주는 변수영향분석 Parameter Effect Analyses on Seismic Responses of a Freestanding Storage Cask

이재한    서기석    구경희  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

정성환  
한국수력원자력(주) 환경기술연구원

염성호  
충남대학교 기계공학과 대학원

### 요 약

사용후연료 저장용기 자유입상 모델에 대한 지진응답에 영향을 주는 변수영향분석을 수행하였다. 사용한 지진하중은 US NRC RG1.60에 제시한 가속도스펙트럼을 이용하여 발생한 인공시간이력자료이다. 논문에서는 콘크리트 바닥에 특별한 구속조건 없이 세워진 저장용기의 지진하중에 의한 전복여부와 미끄럼 발생량에 대해 초점을 맞추었다. 단순화된 저장용기모델에 대한 지진하중 크기와 저장용기바닥과 콘크리트 설치면 사이 마찰계수의 변화에 의한 지진응답을 계산하였다. 해석결과는 저장용기가 지진크기와 마찰계수의 다양한 조합에 대하여 응답가속도와 미끄럼 거리등에서 충분한 여유를 갖고 있는 것을 확인하였다.

### ABSTRACT

The parameter effect analyses of a freestanding spent fuel storage cask are performed for an artificial time history seismic 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 concrete bed. Parametric analyses of a simplified cask model are performed to take into account the variations of seismic load in magnitude and interface friction between cask bottom and concrete bed. The analyses results show that the storage cask has a large marginal integrity in the response acceleration and slipping distance for various seismic loads and friction coefficients.

### 1. 서 론

PWR 사용후연료 21 다발을 저장하기 위한 건식 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 설치관 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 설계지진으로 수평방향 0.3g, 수직방향 0.2g를 적용하였으며, 설계지진에 대한 단순지진응답평가를 수행한바 있다[2].

본 연구에서 ABAQUS 전산프로그램을 이용하여 0.3g와 1.0g 사이의 가상지진가속도 크기 (ZPA)와 0.2와 1.0 범위의 미끄럼 계수에 대한 다양한 조합에 대한 지진응답해석을 통한 변수영향 분석을 수행하였다. 이를 바탕으로 최종 모델에 대한 저장용기의 전복여부, 최대 가속도, 설치면에서의 최대 미끄러짐 거리 등에 대한 내진평가를 수행하였다.

## 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 1.91m이다.

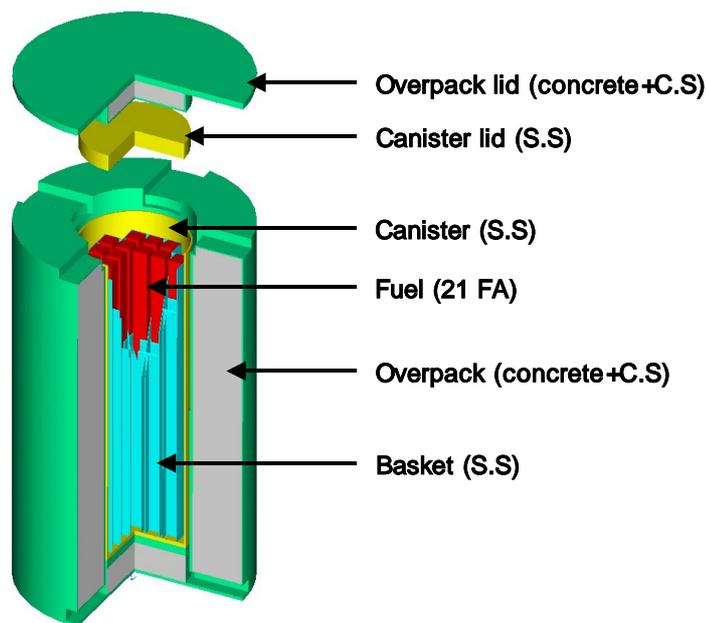


그림 1. 사용후연료 콘크리트 저장용기 개념도

## 2.1 원통구조물 지진해석 모델링

저장용기를 균일 직경을 갖는 원통구조물로 가정할 경우에 저장용기 방사선 차폐체를 감싸는 두 원통실린더의 단면 관성모멘트( $I_{cyl}$ )는 각각 식 (1) 및 식 (2)와 같다.

$$I_{cyl-1} = \pi \left( \frac{d_0^4 - d_i^4}{64} \right) = 0.3455m^4, \quad (1)$$

$$I_{cyl-2} = \pi \left( \frac{d_0^4 - d_i^4}{64} \right) = 0.1264m^4 \quad (2)$$

지진에 대한 시간이력해석은 예비적 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 그림 2와 같이 수직방향으로 압축강성만 제공하기위해 ABAQUS 비선형 스프링 요소인 JOINTC 요소를, 수평방향으로는 미끄럼 마찰조건을 성립시키는 ABAQUS 사용자 정의프로그램을 각각 사용하였다 [3,4].

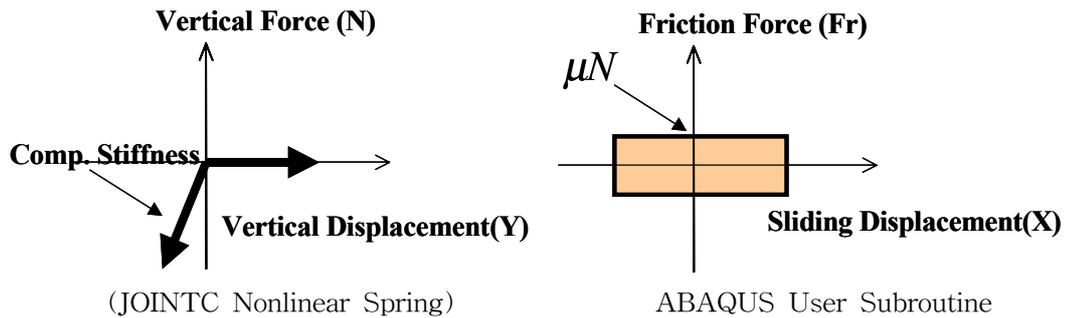


그림 2. 접촉면 수직 및 수평방향 해석모델링

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

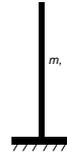
## 2.2 원통구조물 고유진동수 특성

예비 해석을 위해 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 외팔보 형태의 길이가  $l$ 인 단순 원통실린더 1차 고유진동수는 앞의 저장용기 원통 단면 관성모멘트 계산 값을 적용하면 식 (3)과 같이 계산된다.

$$f_n = \frac{(0.597\pi)^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI_{cyl}}{l^4 m}}, m = \text{mass per unit length} \quad (3)$$

$$= \frac{3.518}{2\pi} \sqrt{\frac{E(I_{cyl-1} + I_{cyl-2})}{l^4 m}}$$

$$= 29.0\text{Hz}$$



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.

ABAQUS 전산프로그램을 이용한 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 증폭시킬 것을 예측할 수 있다.

### 2.3 가상지진조건에 대한 지진응답의 변수영향분석

저장용기 설치면의 탄성영향을 고려한 좀더 구체적인 전복평가를 위하여 US NRC RG1.60에 제시한 가속도 스펙트럼을 근거로 작성한 그림 5의 수평 및 수직방향 가속도시간이력 설계지진 값을 기준으로 비선형 시간이력해석을 수행하였다. 이력 시간증분은 0.004초로 25초 동안 해석을 수행하였다. 모든 해석에서는 마찰력 계산에 필요한 수직력을 발생시키는 자중(1g)이 수직방향으로 작용하는 것으로 하였다.

저장용기 지진응답에 영향을 주는 변수영향분석은 입력지진강도의 크기와 저장용기와 설치면 사이의 마찰계수의 다양한 조합을 가정한 가상조건에서의 지진응답평가를 통하여 수행하였다. 사용한 지진크기는 수평으로 0.3g, 0.4g, 0.6g, 0.8g, 1.0g와 수직으로는 수평의 2/3 값을 사용한다. 마찰계수는 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 등 5개에 대하여 적용하였다. 변수영향분석에서는 마찰의 영향을 줄여주기 위해 수직방향중력가속도에서 입력지진가속도를 빼주었다.

최대 미끄럼 발생은 그림 6에 나타난 바와 같이 마찰계수가 작고, 지진가속도가 커질수록 커지고 있는 것을 확인할 수 있다. 그러나 저장용기 전복과 관련된 한쪽 들림 높이는 마찰계수가 클수록 커지는 것으로 나타났다. 또한 최대 발생가속도는 그림 7에서 보는바와 같이 마찰계수가 커지고, 입력가속도가 커질수록 큰 값을 주고 있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과로부터 미끄럼 거리와 들림 높이는 저장용기 바닥과 설치면 사이의 마찰계수 변화에 따라 해석의 보수성이 반대로 나타날 수 있다.

### 2.4 가상지진조건에 대한 지진응답해석

지진응답에 대한 변수영향분석을 바탕으로 마찰계수가 0.2와 1.0이고, 입력지진가속도가 1.0g인 두 경우에 대한 지진시간이력해석을 수행하였다. 두 경우 해석에서는 수직방향으로 1g의 중력가속

도를 가하였다. 해석결과는 표 1에 요약하였다.

최대 발생가속도는 그림 8에서 보는바와 같이 마찰계수가 1.0이고, 지진크기가 1g인 경우로 저장용기 상단에서 수직방향으로 23.5g, 수평방향으로 6.8g로 계산되었다. 가속도 성분은 그림 9에서 보는 바와 같이 광범위한 주파수 성분을 갖고 있는 것을 확인할 수 있다. 최대 응답가속도 값은 수평낙하에서 고려하는 45g와 비교하여 작은 값으로 낙하 등에 대한 구조건전성이 입증되는 경우에 충분한 건전성을 갖는다[1]. 또한 최대 가속도가 발생된 조건에서 저장용기 전복과 관련된 한 쪽 최대 들림은 그림 10에 나타난 바와 같이 26.2cm로 계산되어 전복이 발생할 수 있는 184cm 보다 작았다. 그리고 전복조건과 관계가 있는 저장용기의 최대 기울어짐 각은  $3.82^\circ$ 로 전복이 발생하는  $31.1^\circ$  보다 작았다. 흔들림과 관련된 주파수 성분은 0.7Hz에서 발생하는 것을 확인할 수 있다.

최대 미끄럼 발생은 그림 12에 나타난 바와 같이 마찰계수가 0.2이고, 지진크기가 1g인 경우로 53.3cm가 발생되었다. 이 값은 저장용기 배치간격의 절반보다 작아야 한다. 최대 발생가속도는 그림 12에서 보는바와 같이 저장용기 상단에서 수직방향으로 1.8g로 마찰계수가 1.0인 경우와 비교하여 매우 작은 것을 알 수 있다. 이와같이 마찰계수가 작은 경우는 대부분의 지진에너지가 미끄러짐에 의해서 흡수된 결과로 판단된다.

### 3. 결 론

저장용기의 설계지진에 대한 내진평가를 ABAQUS 해석에 의한 시간이력해석 평가를 수행하였다. 가상지진에 대한 다양한 조건의 해석결과 최대 수평 미끄럼은 마찰계수가 작은 경우에 발생하였으며, 반대로 최대가속도와 들림 높이는 마찰계수가 큰 경우에 발생하였다. 발생된 최대 가속도는 23.5g로 나타나 낙하사고에서 발생된 감속가속도 45g 보다 작기 때문에 별도의 구조해석이 필요하지 않았다. 최대 미끄럼 거리와 들림이 53.3cm와 26.2cm로 각각 계산되어 가상 지진에 의한 바닥의 미끄러짐과 들림으로 저장용기 사이의 충돌이 발생하지 않으며, 저장용기의 최대 기울어짐도 작아 전복으로 이어지지 않는 것을 확인하였다.

앞으로, 저장용기와 설치면 사이의 마찰조건 등에 대한 접촉요소를 사용한 상세한 모델링과 수평 및 수직방향 3축 동시 가진 경우에 대한 좀더 상세한 해석적/실험적 평가가 요구된다.

### 감사의 글

본 연구는 산업자원부 전력산업연구개발사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 포함합니다.

### 참고문헌

1. 서기석 외, 건식저장 시스템 구조/열해석 및 안전성시험 평가, 한국원자력연구소/원자력환경기술원, KAERI/CR-161/2003, 2003.1.
2. 이재한, 서기석 외, “사용후연료 저장용기 자유입상 모델의 지진응답해석,” 한국지진공학회 2003 추계학술발표회, 2003.
3. ABAQUS User's Manual for Revision 5.8(1999), Hibbit, Karlson & Sorenson Inc.
4. 이재한, 구경희, 유 봉, “면진시험구조물의 수평가진응답을 활용한 면진장치 비선형 해석모델개발,” 한국전산구조공학회 2002 춘계학술발표회, 2002.
5. HI-STORM-100 System T-SAR, Volume 2/6 Structural Analysis, Holtec Inc., 1997.

표 1. 가상지진하중에 대한 비선형 시간이력응답 해석결과

	가상지진하중 (1.0g H, 0.67g V)	설계지진에 대한 허용값
최대 회전 각도	3.82°	31.1°
최대 들림 높이	26.2 cm	184 cm
최대 상단가속도	6.8g H, 25.3g V	45 g
최대 미끄러짐	53.3 cm	수송용기 사이 간격

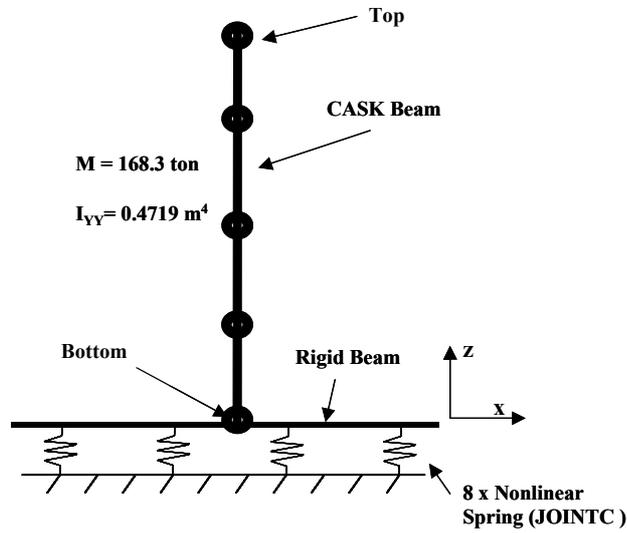


그림 3. 저장용기 및 설치면의 모델 개념도

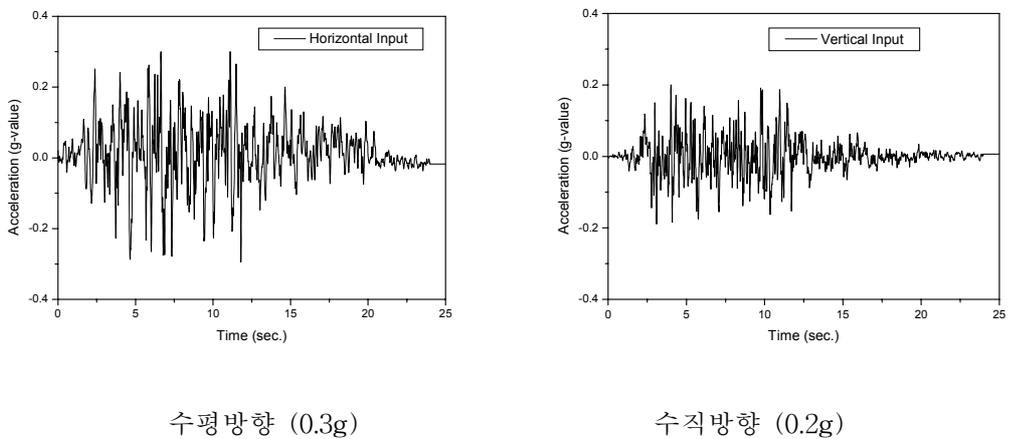


그림 5. NRC RG1.60에 근거한 지진시간이력자료



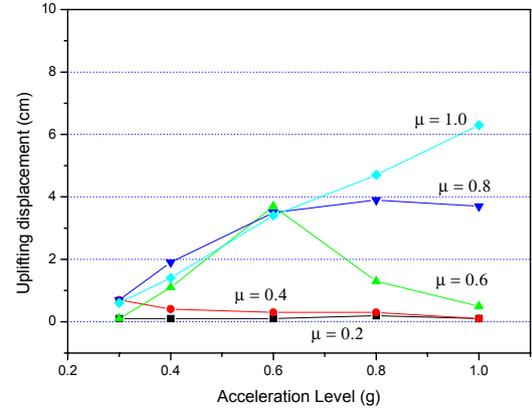
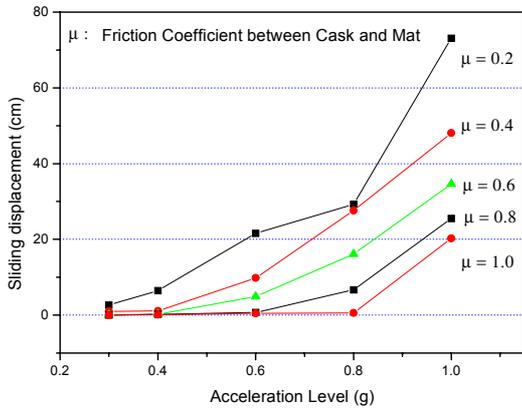


그림 6. 가상지진에서의 마찰계수와 입력가속도 크기에 따른 들림 및 미끄럼 크기

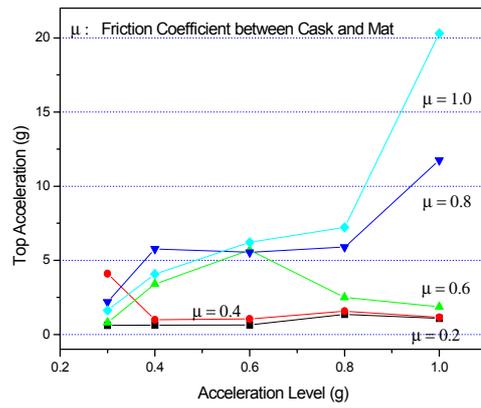


그림 7. 가상지진에서의 마찰계수와 가진가속도 크기에 따른 가속도 응답 특성

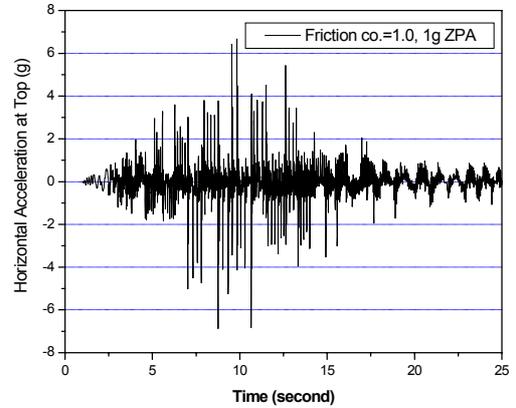
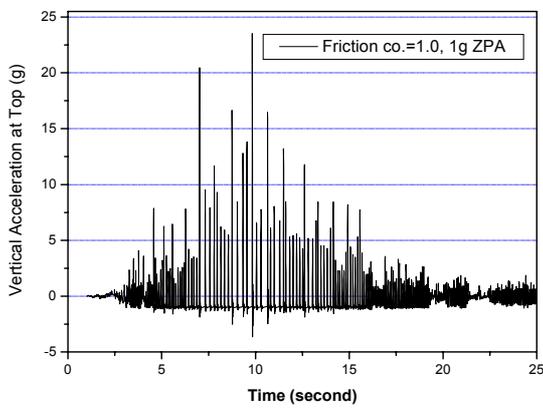


그림 8. 가상지진에서의 최대 수직 및 수평방향 가속도이력

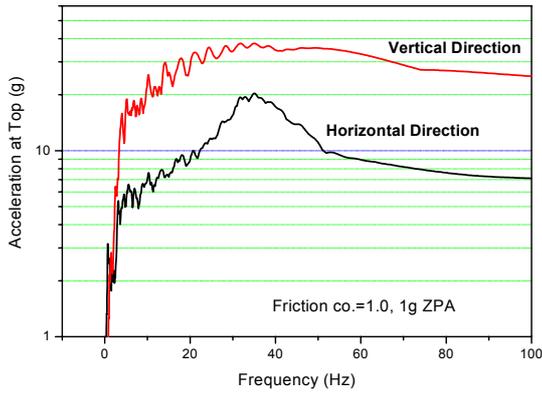


그림 9. 가상지진에서의 가속도응답스펙트럼

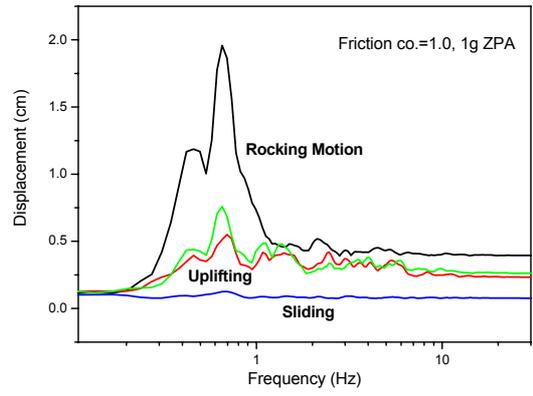


그림 10. 가상지진에서의 변위응답스펙트럼

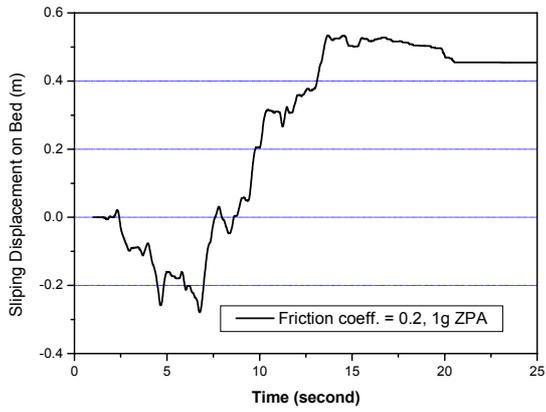


그림 11. 가상지진에서의 최대 미끄럼 변위

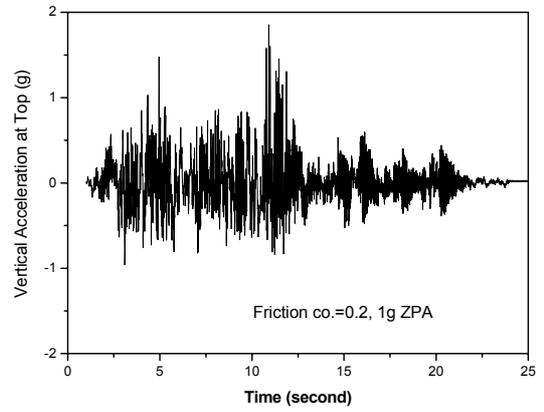


그림 12. 가상지진에서의 수직방향 가속도이력