

## 사용후 연료 건식저장용기 1/8 규모 축소모형 지진응답시험

### Seismic Response Tests of 1/8 Scale Model for a Spent Fuel Dry Storage Cask

이재한\* 구경희\* 서기석\* 이홍영\*\* 최병일\*\* 염성호\*\*\*  
Lee, J.H. Koo, G.H. Seo, G.S. Lee, H.Y. Choi, B.I. Yeom, S.H.

#### ABSTRACT

The seismic response tests of a spent fuel dry storage cask model of 1/8 scale are performed for an typical 1940 Elcentro earthquake. This paper focuses on the seismic response test data generation to check the overturning possibility of a storage cask and the slipping displacement on concrete slab bed. A simplified cask model is used to take into account the variations in seismic load magnitude and cask/bed interface friction. The test results show that the model gives an overturning response for an extreme condition.

#### 1. 서론

PWR 사용후연료 24 다발을 저장하기 위한 콘크리트 저장용기시스템은 3 개의 구성품인 캐니스터(Canister), 이송용기(Transfer Cask), 콘크리트 저장용기(Storage Cask)로 구성된다. 콘크리트 저장용기는 그림 1과 같이 사용후연료가 적재된 캐니스터를 저장하기 위한 단단하고 튼튼한 원통형 용기이다. 저장용기는 구조재인 내부 셸과 외부 셸, 그리고 내부 셸과 외부 셸 사이의 차폐 및 압축 강도를 제공하는 콘크리트 차폐체로 구성된다[1].

콘크리트 저장용기시스템은 설치판 위에 자유 입상구조물로 설치되며, 지진하중에 견디고, 지진이 발생하는 동안 전복되지 않음과 설치면 상의 미끄러짐 거리가 설치간격의 절반보다 적음을 보여주어야 한다. 저장용기의 설계지진 값은 수평방향 0.3g, 수직방향 0.2g를 적용하고 있다. 그러나 개념설계 중인 저장용기에 대한 지진거동 특성을 알아보기 위해 0.3g - 1.0g의 가상지진에 대한 다양한 조건에서 지진응답해석을 수행한 바 있다[2,3].

본 논문에서 다루는 저장용기의 내진시험은 진동대 시험시설의 성능과 지진해석방법론의 정확성 검증이라는 목표에 적절히 부합할 수 있도록 하였다. 이를 위해 시험체는 지진회전응답과 미끄럼 응답을 나타낼 수 있도록 1/8 축소규모로 제작하였다. 시험모델의 전체 무게는 약 500kg 정도 되며, 철 및 콘크리트 구조물로 이루어졌다. 이를 1축 진동대에 설치하고 예상 응답을 유도하기 위한 지진회전응답 시험과 미끄럼 마찰계수 측정시험을 수행하고 시험결과를 분석하였다. 지진응답시험은 입력지진강도와 저장용기와 설치면 사이의 편평도 조건에 대해 수행하였다. 사용한 지진크기는 수평으로 0.1g에서 0.35g 범위의 값을 사용하였다. 축소모델시험을 통하여 정확성이 입증된 지진해석방법론은 실 규모 건식저장용기의 해석적 지진설계에 사용될 예정이다.

\* 정회원, 한국원자력연구소, 책임연구원

\*\* 한국수력원자력(주) 환경기술연구원, 그룹장, 팀장

\*\*\* 충남대학교, 기계공학과, 박사과정

## 2. 본 론

콘크리트 저장용기의 주요 구조재인 내부 셸은 50mm, 외부 셸은 20mm의 두께로, 재질은 모두 탄소강으로 결정되어 설계되고 있다. 저장용기는 24개의 가압경수로 사용후연료가 적재되는 캐니스터의 무게 38.2톤을 포함한 최대 무게가 154.5톤으로 계산되었고, 저장용기 구조재의 원통실린더 길이는 5.885m로 주어졌다. 저장용기 구조재 직경은 그림 1과 같이 콘크리트 차폐체를 감싸는 외부원통(CYL-1)의 외경이 3.52m이고, 내부원통(CYL-2)의 외경은 1.98m로 주어졌다. 실 규모 저장용기에 대한 해석이 0.3g - 1.0g의 가상지진과 0.2 - 1.0 범위의 미끄럼 마찰계수를 갖는 경우를 가정하여 다양한 지진응답해석을 ABAQUS 프로그램을 활용하여 수행한 바 있다[2,3]. 그러나 실 규모에 대한 시험은 많은 예산과 대규모 시험시설이 필요하여 국내에서는 불가능하다. 본 연구에서는 지진해석방법론의 정확성 검증이라는 목표에 부합할 수 있으며 진동대 규모에 맞는 축소 규모 시험모델을 설계 제작하였다.

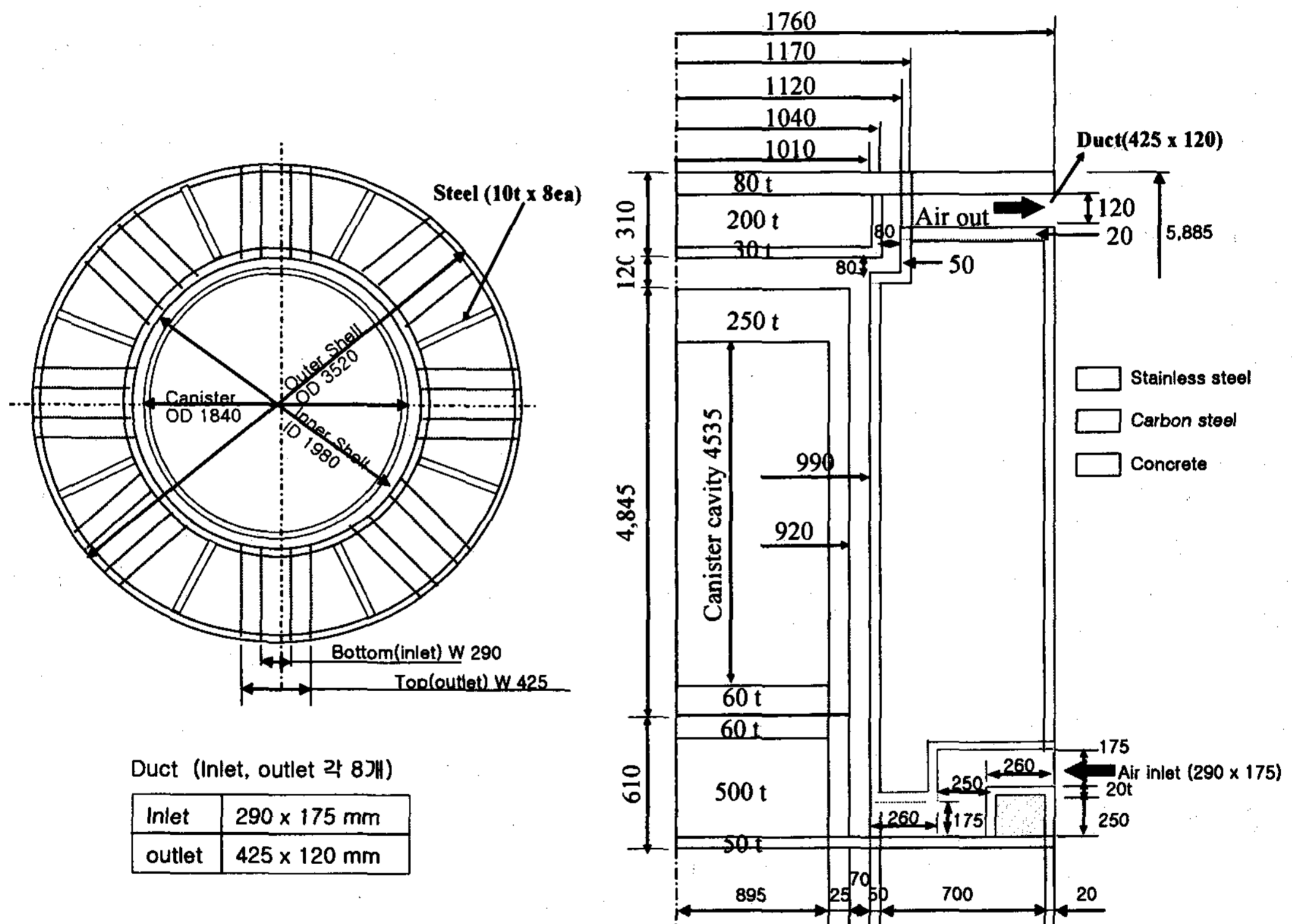


그림 1. PWR 사용후연료 콘크리트 저장용기 치수

### 2.1 축소 규모 지진시험모델

시험모델은 시험시설의 가진 규모를 고려하여 전체 무게가 약 500kg으로 철 및 콘크리트 구조물로 설계하였다. 문헌에 나타난 축소규모 시험용기에 대한 예비해석을 수행하였으며[4,5], 이로부터 시험체 설계를 위한 지진응답요건은 예상 지진회전응답( $3^{\circ} \sim 5^{\circ}$ ), 예상 미끄럼 변위(10mm ~ 30mm)로 설정하였다. 시험모델의 구성은 그림 2와 같이 본체(SS 304), 내부구조물(SS 304), 상부 덮개(SS 304), 하부덮개(SS 304), 하부지지물의 상부플랜지(SS 304)와 본체(강화콘크리트), 그리고 저장용기가 세워지는 바닥슬라브(강화콘크리트)로 이루어져 있다. 하부지지물은 3종류의 크기를

갖는 5개의 콘크리트 원통으로 이중에 3개는 스틸로 감싸져 있다.

축소 규모 시험체에 대한 다양한 지진응답 특성을 시험하기 위하여 다음과 같은 진동대 시험 항목들이 계획되었다.

- 하부지지물 크기(S500, S400, C300-1, C300-2, S300)에 따른 진동대 시험
- 미끄럼면 재질변화(Steel, 콘크리트, 기타)에 따른 진동대 시험
- 무게중심 변경(상부덮개 무게변경)에 따른 진동대 시험
- 내부구조물(Canister) 포함여부에 따른 지진응답 변화시험

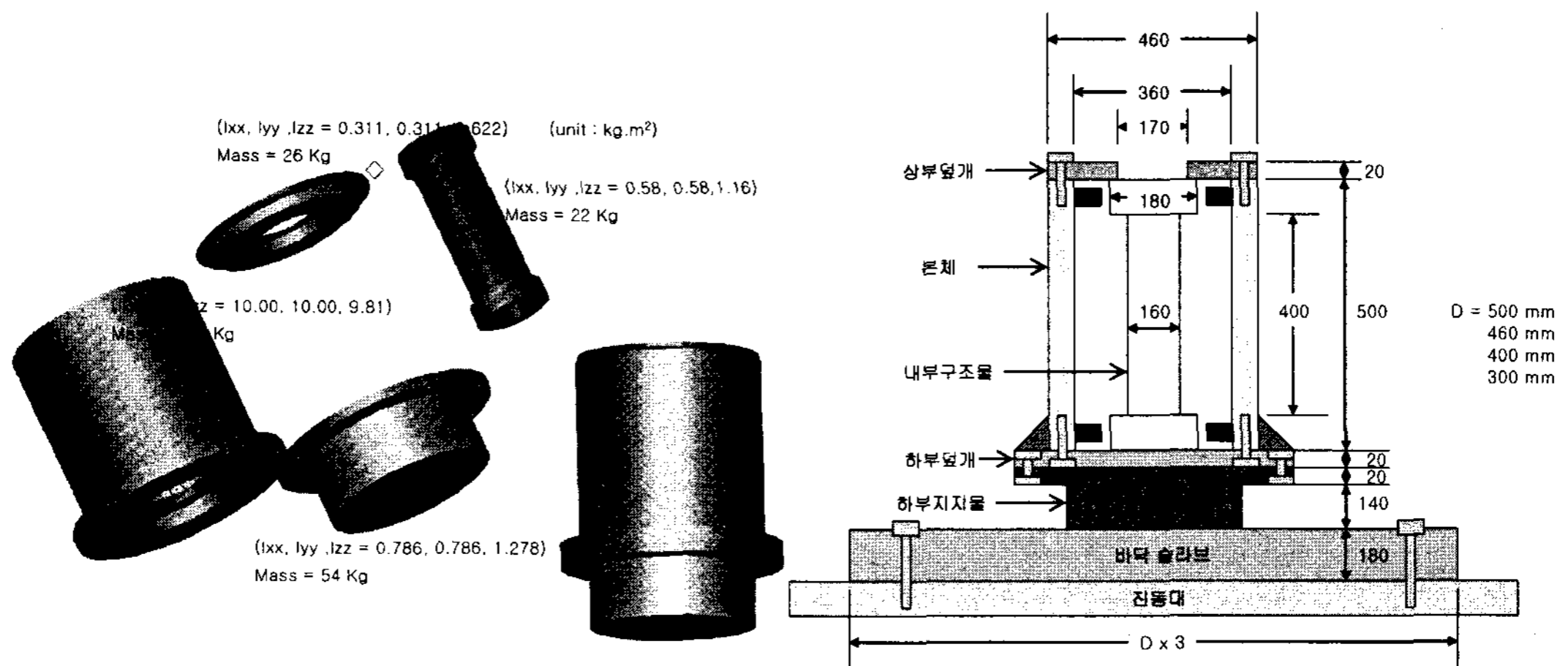


그림 2. 지진시험용 1/8 축소규모 저장용기(RS1/8-CASK) 모델

## 2.2 지진시험 개요

지진시험에 사용될 유압가진 진동대는 그림 3에 나타난 미끄럼베어링 type의 1축진동대이며 현재 수평 2.5톤의 유압가진기가 장착되어 있다. 본 진동대 시험장치의 최대 가진변위는  $\pm 12.5\text{cm}$ 이다. 현재 입력파형으로 고려하고 있는 Elcentro 지진파형은 0.1g당 약 3.2cm의 최대 변위를 나타내며 시험안전성을 고려하면 본 진동대로 시험할 수 있는 최대 입력지진의 크기는 0.3g 내지 0.4g가 된다. 따라서 본 시험기의 시험가능 범위 내에서 지진시험의 목적인 자유입상 저장용기에 대한 미끄럼 및 회전각의 지진응답 해석방법론의 검증에 위하여 축소 지진시험체가 앞서 기술한 바와 같은 예상 지진회전응답( $3^\circ - 5^\circ$ )과 미끄럼 변위(10mm - 30mm)를 나타내도록 하였다.

시험체의 주요 지진응답은 미끄럼 변위와 회전각(rocking angle)이다. 이들 지진응답을 측정하기 위한 시험측정계통의 센서에는 변위센서와 회전각 측정센서가 사용되며, 전체적인 측정 센서의 사용 갯수와 설치위치는 다음과 같다.

- 상부덮개에 가속도계 3개 (가진 방향 양 끝단에 수평방향 2개, 수직방향 1개)
- 상부덮개에 회전각 측정센서 2개
- 하부덮개에 미끄럼변위 측정센서 2개
- 진동대 수평방향에 가속도계 1개

진동대 시험에 사용된 지진파형의 가속도신호 수집은 진동대에 설치된 수평방향 가속도계를 사용하며 변위신호는 독일 Schenk사의 유압가진기에 장착된 센서를 사용한다. 지진응답 측정은 Schenk사의 유압가진기 제어시스템인 Labtronics 8800에 장착된 신호수집장비를 사용한다. 모든 측정센서는 신호증폭기를 사용하며 Labtronics 8800의 제어프로그램인 RS Plus에서 모든 시험측정계통들을 제어한다.

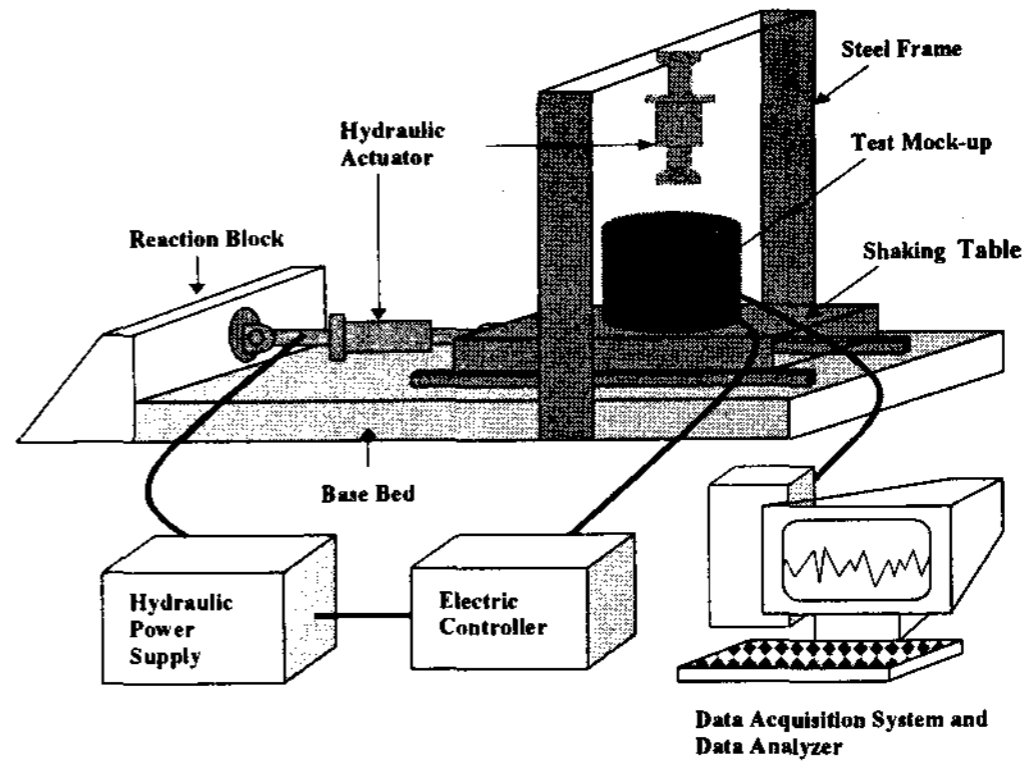


그림 3. 1축 진동대 시험시설 및 측정계통 개념

지진응답시험은 지진응답해석기술을 검증할 수 있는 시험내용을 고려하였으며 시험절차는 다음과 같다.

- 입력지진파형의 정확성 검토시험
- 지진파형 종류에 따른 지진응답시험
- 지진파형 가진크기에 따른 지진응답시험
- 시험체 무게중심 변경에 따른 지진응답시험
- 시험체 무게중심 변경과 지진하중 크기에 따른 지진응답시험
- 하부지지물 크기에 따른 지진응답시험
- 하부지지물과 바닥슬라브의 마찰조건 변경에 대한 지진응답시험

위에서 기술한 시험절차는 포괄적인 시험내용들을 포함하며 실제로 위의 지진응답시험절차는 목적하는 지진응답을 얻을 수 있을 때까지 적절히 조합하며 궁극적으로는 그림 4와 같이 실 규모 지진응답해석을 목표로 한다.

### 2.3 콘크리트 바닥슬라브 마찰특성시험

저장용기 모델과 바닥슬라브 사이의 마찰 특성을 파악하기 위해 두 종류의 시험을 수행하였다. 첫째는 단순 미끄럼 유발 마찰력 시험으로 자중과 마찰력의 비로 마찰계수를 계산한다. 시험은 저장용기 모델의 하부지지원통을 단단한 steel로 고정시키고, 진동대에 고정된 바닥슬라브를 이동시켜 미끄럼을 유발시키고 마찰력을 load cell로 읽는다. 그림 5는 대표적인 시험에 대한 마찰력 변화를 보여주고 있으며, 표 2에 시험 내용을 기술하였다. 미끄럼 마찰계수 측정을 위한 반복 미끄럼시험은 하부구조물의 인장에 의한 마찰력과 자중에 의한 수직력의 비로 측정하였다. 충분한 시험자료 분석이 끝나지 않았지만 마찰계수는 하부 콘크리트 바닥의 편평도와 인장속도에 따라 차이가 발생하였다. 계산한 마찰계수는 0.45 - 0.56 범위에 존재하였다.

둘째는 하부지지물을 Sine파로 단순 가진하여 미끄럼을 발생시키고, 이때 진동대에 고정된 바닥슬라브의 가속도와 슬라브 위에 놓아진 지지구조물의 측정가속도와의 비로 마찰계수를 나타낸다 [6]. 시험은 2-3Hz 사이의 Sine 파로 바닥슬라브 위에 위치한 하부지지물을 가진시킨다. 하부지지물과 바닥슬라브에 미끄럼이 없으면 두 물체에서 발생하는 가속도는 같지만 미끄럼이 발생하면 놓여진 물체의 가속도 값이 줄어든다. Sine파 가진 시험에 의한 최대가속도와 입력가속도 크기로 계산한 마찰계수는 0.68 - 0.95 범위로 바닥면과 시험조건에 따라 변화되었다.

기술한 두 가지 시험 방법에 따라 다르게 계산된 마찰계수의 차이점은 앞으로 시험방법과 시험

환경에 대한 충분한 검토가 필요한 부분이다.

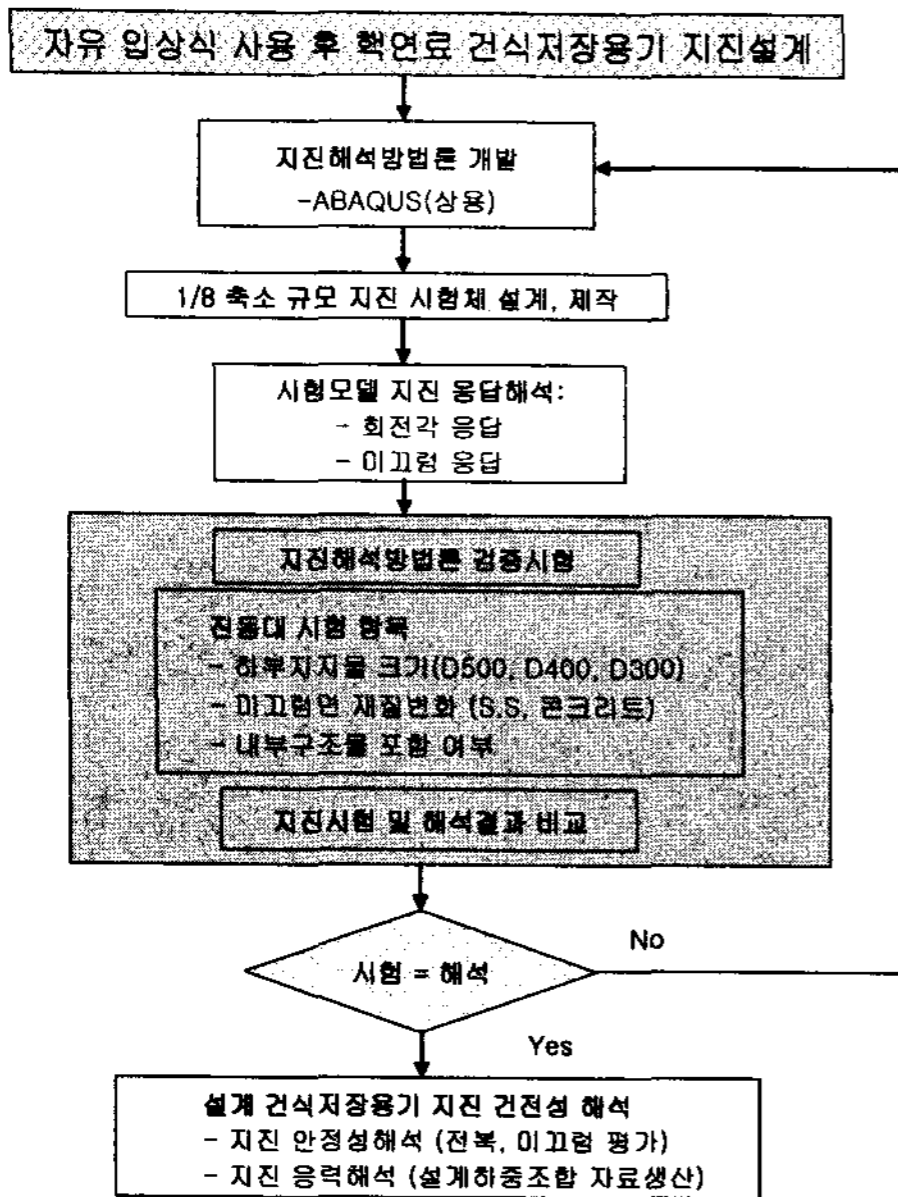


그림 4. 건식저장용기 지진설계 흐름도

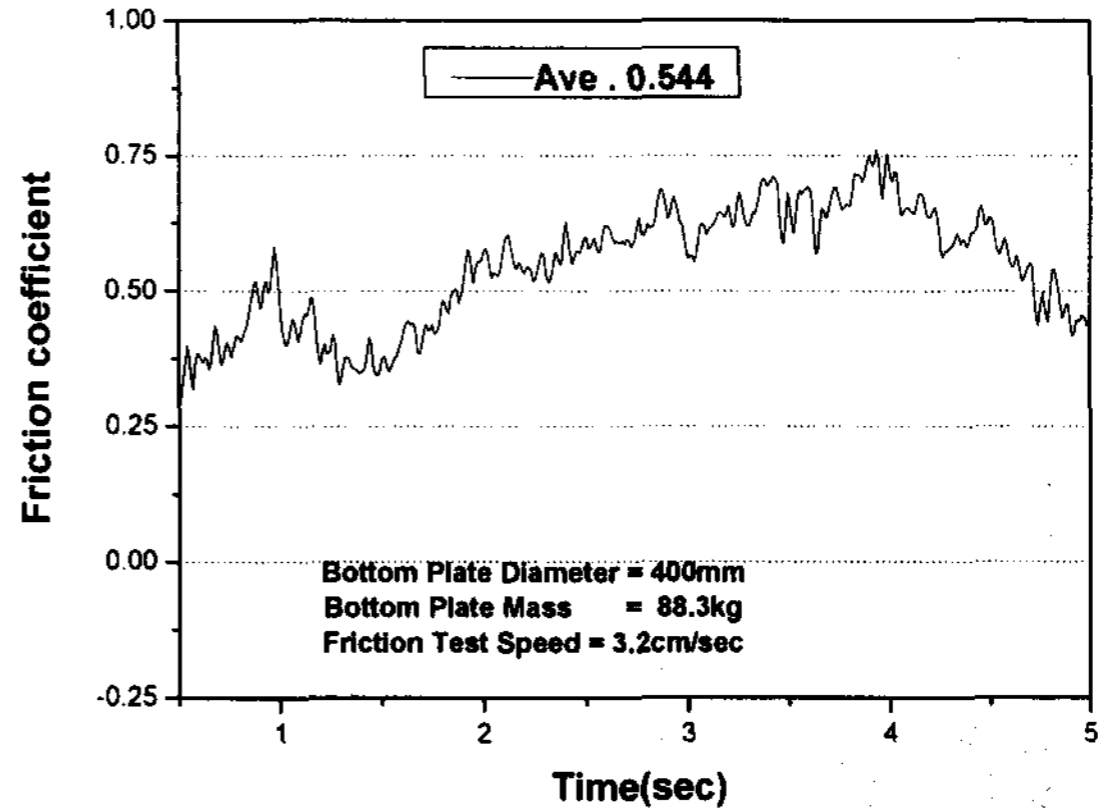
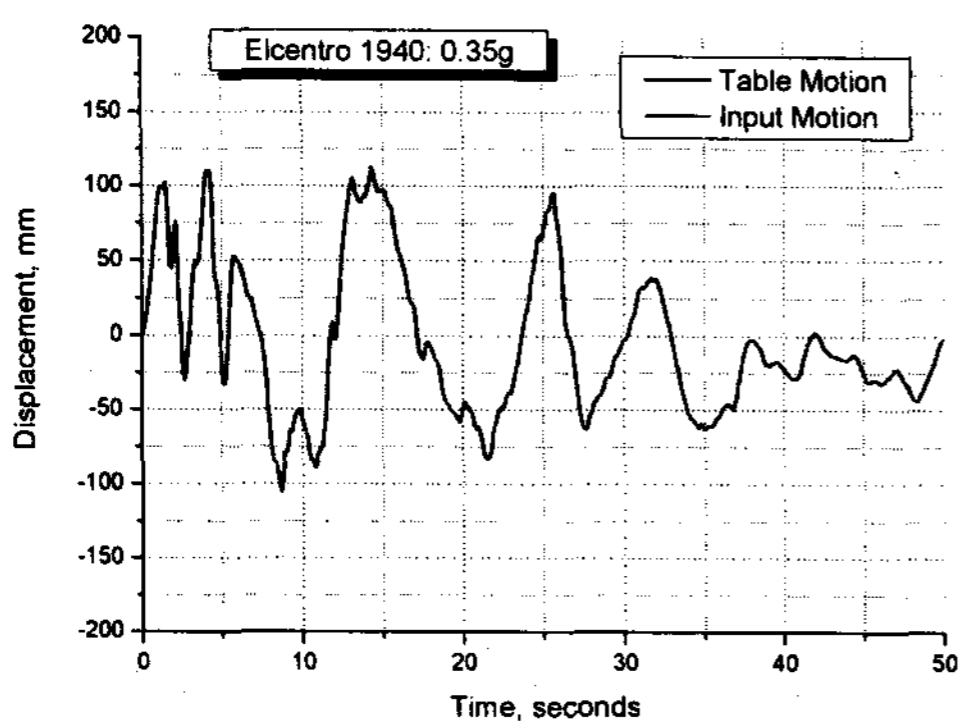


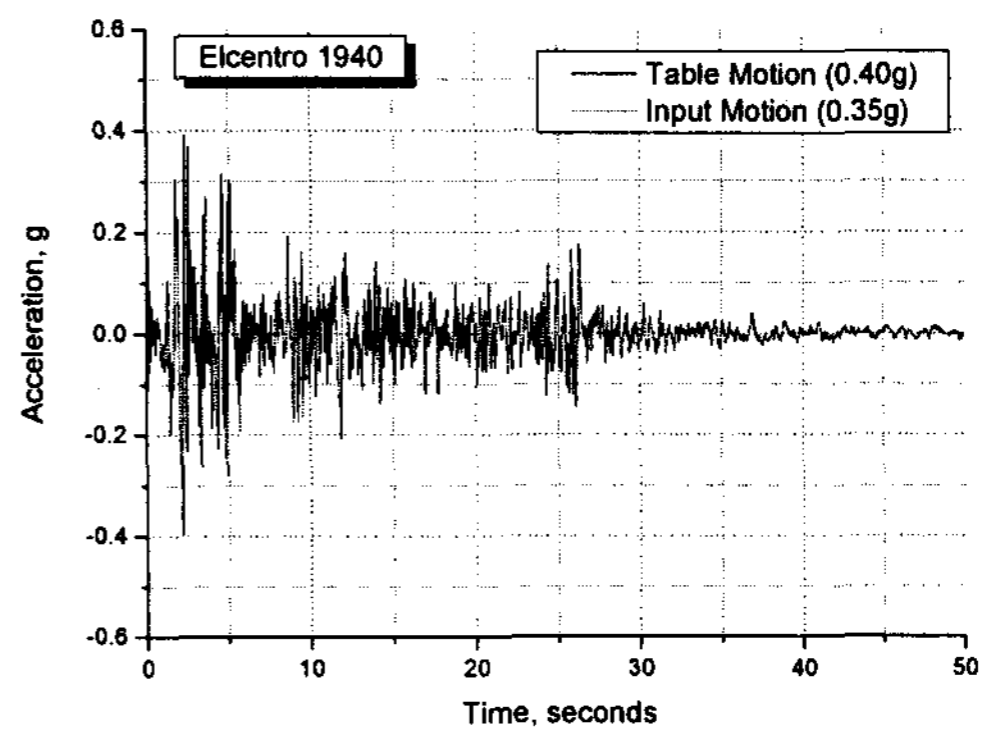
그림 5. 마찰계수 측정시험에서의 마찰력 변화

## 2.4 가진파형 생산

진동대 입력지진파형을 검증하기 위한 Elcentro 1940 지진기록에 대하여 제어기 입력신호와 진동대 응답 신호를 수집하여 비교하였다. 그림 6에 나타난 바와같이 제어기 입력신호와 시험장치에 진동대에 나타난 가진파의 비교에서 변위응답은 잘 일치하고 있으나, 가속도는 입력 최대 가속도 0.35g보다 약간 큰 0.4g가 발생됨을 알 수 있다. 진동대 계측 값을 기준으로 입력가속도 크기와 지진응답해석 범위가 결정될 수 있다.



(변위 응답)

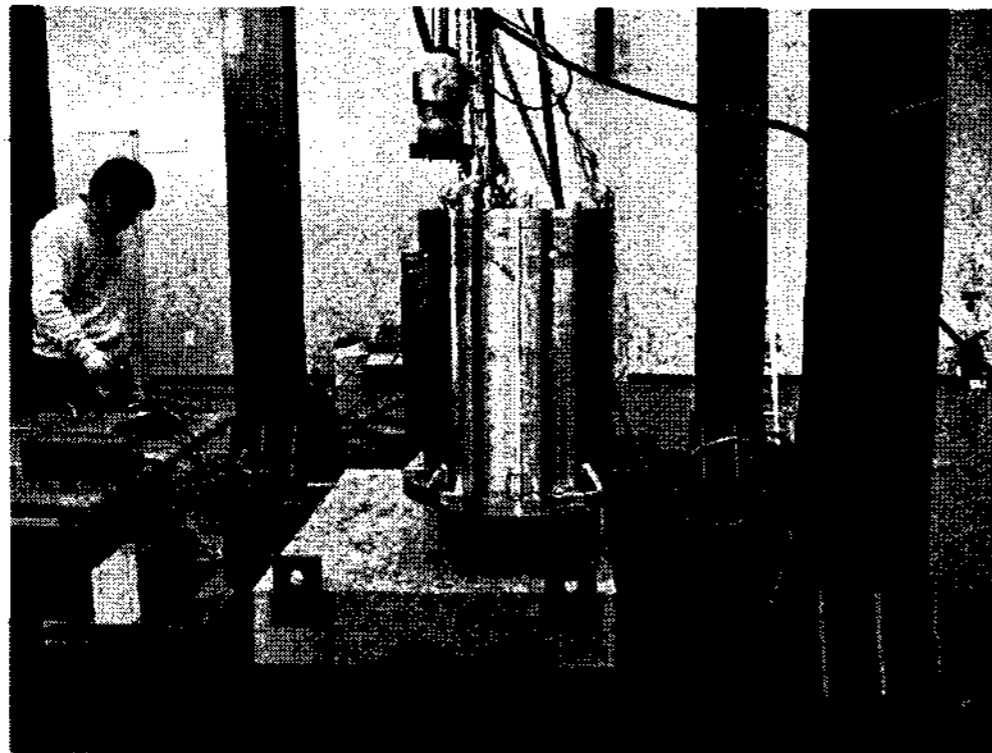


(가속도 응답)

그림 6. Elcentro 지진 기록에 대한 제어기 입력과 진동대 응답신호 비교

표 2. 미끄럼 마찰계수 측정 시험

하부지지물 종류	단방향 미끄럼시험	Sine파 가진시험(2.5Hz)
Concrete C300-1, 300mm, test1	0.454	0.74
Concrete C300-1, 300mm, test2	0.453	0.81
Concrete C300-2, 300mm, test1	0.563	0.95
Concrete C300-2, 300mm, test2	0.513	0.68
Steel S400, 400mm, test1	0.544	0.71



Total Weight	= 509.2kg
Moment of Inertia	= 34.5 kg.m <sup>2</sup>
Mass Center	= 0.4454m
Static Friction Coef.	= 0.7
Dynamic Friction Coef.	= 0.65
Damping Ratio	= 1.0%

그림 7. 지진응답시험 설치도 및 해석 시뮬레이션 조건

## 2.5 지진응답시험

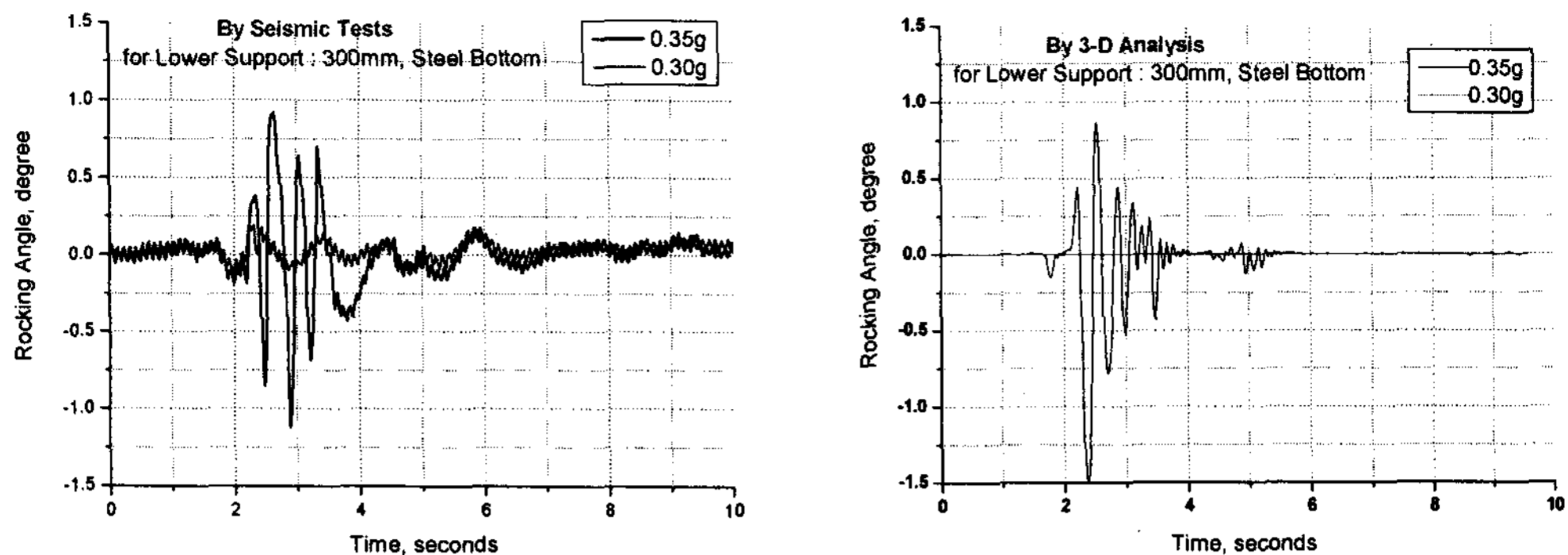
지진응답시험 장면은 그림 7에 나타난 바와 같으며, 지진시험은 2.5톤 용량의 1축 수평 가진기를 활용한다. 응답신호 계측은 4개의 가속도 센서와 비디오 촬영을 이용하였다. 가속도센서 위치는 진동대 1개, 시험체 3개(가진 방향 1개, 측면 1개, 수직방향 1개)이며, 각가속도계는 상단에 2개를 설치하였다. 시험개요에서 기술한 바와 같이 입력지진 크기, 하부지지물 크기, 바닥슬라브 바닥면 조건 등 다양한 변수에 대한 지진응답시험을 수행하였다.

- 입력지진파형 : Elcentro 1940 (0.1g, 0.2g, 0.25g, 0.3g, 0.35g)
- 하부지지물 크기 : 300mm
- 하부지지물 접촉조건 : Steel-Concrete 접촉조건

시험체의 무게중심을 높이기 위해 상단에 5개의 원판부가질량을 장착하였다. 가진 가속도 0.1g, 0.2g, 0.3g에 대해서 미끄럼 및 회전 지진응답이 거의 없는 것으로 나타났다. 0.35g 크기의 가진시 평탄한 바닥조건에서 최대 1.2도의 회전응답이 발생하였다. 또한 시험체 하부지지물과 바닥슬라브 사이의 접촉면 편평도 정도에 따라서 10도 이상의 지진응답이 민감하게 나타났다. 바닥면 요철 특성을 파악하기 위해 바닥슬라브에서 시험체 위치를 바꾸어 주면서 반복적인 시험을 수행하였다. 다양한 시험에서 바닥면에 존재하는 요철의 영향을 크게 받는 것을 확인할 수 있었다. 흔들림(rocking) 주기를 관찰한 결과 큰 회전각도에 대하여는 1Hz에서 2Hz, 작은 회전에 대하여는 최대 5 Hz 정도로 되었다. 미끄럼은 0.3g 이상의 가진 크기를 갖는 시험에서도 매우 작게 발생하였다. 앞으로 10-30mm의 미끄럼이 발생할 수 있도록 시험환경을 변경하여 시험할 계획에 있다.

그림 8은 진동대 가진에 따른 회전응답이 발생하기 시작하는 0.3-0.4g 사이의 가진 가속도 크

기에서의 시험과 이를 예측하는 ABAQUS 해석결과를 보여주고 있다. 현재 시험결과를 해석으로 예측하는 모델링방법이 어느 정도 구축되었고, 추가적인 해석정확성을 개선하는 과정에 있다.



(시험 응답가속도)

(해석 응답가속도)

그림 8. 지진응답시험 및 지진응답해석

### 3. 결론

사용후 연료 건식저장용기 1/8 규모 축소모형에 대한 1축 진동대 시험기를 이용한 Elcentro 수평지진응답시험을 수행한 결과 시험체 흔들림 (Rocking) 유발 조건은 하부지지구조물의 직경크기가 30cm이고, 입력지진 크기가 0.3g - 0.35g범위에서 발생하였다. 회전주기를 측정한 결과 5Hz 이하에서 발생되었다. 모든 시험된 경우에 미끄러짐 거리는 매우 작게 발생하였다. 미끄러짐 마찰계수를 측정한 결과 측정방법과 측정 조건에 따라 0.45에서 0.95까지 분포하는 것을 확인하였다.

본체 하부지지물과 바닥슬라브(Basemat) 사이의 접촉면 편평도가 지진응답결과에 많은 영향을 주었으며, 이에 대한 시험결과분석과 이를 고려하는 해석방법이 요구 되었다.

### 감사의 글

본 연구는 산업자원부 전력산업연구개발사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표합니다.

### 참고문헌

1. 서기석 외, 건식저장 시스템 구조/열해석 및 안전성시험 평가(2차년도 중간보고서), 한국원자력 연구소/원자력환경기술원, KAERI/CR-182/2004, 2004.
2. 이재한 외, 사용후연료 저장용기 자유입상 모델의 지진응답해석, 한국지진공학회 2003 추계학술 발표회, 2003.
3. 이재한 외, 자유입상 저장용기의 지진응답에 주는 변수영향분석, 한국원자력학회 2003 추계학술 발표회, 2003.
4. 염성호 외, 자유 입상식 사용후 핵연료 건식저장 Cask에 대한 지진응답해석, 2004 춘계학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 2004.
5. 구경희 외, 3차원 접촉모델을 사용한 자유 입상식 건식저장용기 지진응답해석, 2004 추계학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 2004.
6. K.Shira, K.Hirata and T.Saegusa, "Experimental Studies of Free-Standing Spent Fuel Storage Cask Subjected to Strong Earthquakes," Transactions of the 17th SMiRT K08-2, 2003.