

## 동적 원심모형시험을 통한 지반 및 상부 구조물의 지진 하중 특성 Dynamic Centrifuge Modeling for Evaluating Seismic Loads of Soil-Foundation-Structures

이세현<sup>1)</sup>, Sei-Hyun Lee, 김동수<sup>2)</sup>, Dong-Soo Kim, 추연욱<sup>3)</sup>, Yun-Wook Choo,  
박홍근<sup>4)</sup>, Hong-Gun Park, 김동관<sup>5)</sup>, Dong-Kwan Kim

<sup>1)</sup> 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사후 연수 연구원, Post-Doctoral Researcher, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST

<sup>2)</sup> 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST

<sup>3)</sup> 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 연구교수, Research Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST

<sup>4)</sup> 서울대학교 건축학과 교수, Professor, Dept. of Architecture, Seoul National University

<sup>5)</sup> 서울대학교 건축학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Architecture, Seoul National University

**SYNOPSIS** : Korea is part of a region of low or moderate seismic zone in which few earthquakes have been monitored, so it is difficult to approve design ground motions and seismic responses on structures from response spectrum. In this study, a series of dynamic centrifuge model tests for demonstrating seismic amplification characteristics in soil-foundation-structure system were performed using electro-hydraulic shaking table mounted on the KOCED 5.0 m radius beam centrifuge at KAIST in Korea. The soil model were prepared by raining dry sand and  $V_S$  profiles were determined by performing bender element tests before shaking. The foundation types used in this study are shallow embedded foundation and deep basement fixed on the bottom. Total 7 building structures were used and the response of building structures were compared with response spectrum from the acceleration records on surface.

**Keywords** : Dynamic centrifuge testing, Soil-foundation-structure interaction, Seismic load, Response spectrum, Rocking response.

### 1. 서론

내진설계시 가장 중요한 항목은 깊이별 최대 지반가속도 및 구조물 주기에 따른 설계 응답스펙트럼 가속도 등 설계지진력을 결정하는 것이다. 설계지진력을 결정할 때, 가장 중요하게 고려해야 할 항목은 국지적인 지반조건이며 내진설계기준에서는 이를 반영하기 위해 지반의 특정 물성값을 바탕으로 지반을 분류하고, 각 지반종류에 따라 설계응답스펙트럼을 달리 적용하여 구조물의 지진 하중 산정에 반영하고 있다. 그러나 현재 국내 내진설계기준에서 제시된 지반 증폭계수 및 설계응답스펙트럼은 상부 구조물 및 하부 기초 형식을 고려하지 않은 지표면 자유장(Free field)에서의 응답을 결정하도록 되어 있어(건설교통부, 1997; 대한건축학회, 2009), 건축물의 지진하중을 합리적으로 예측하기 위해 고려되어야 할 지반-기초-구조물 상호작용(Soil-Foundation-Structure Interaction, SFSI)을 반영하지 못하고 있다(김용석, 2007). 또한, 국내의 경우 대지의 부족과 해안 신도시 건설의 증가로 인해 연약지반에 고층 또는 초고층

건물의 건설이 증가되고 있고, 이에 따라 하부 기초의 형식 및 지하층 규모가 다양해지고 있어 지반-기초-구조물 상호작용을 반영한 설계지진력 산정이 더욱 요구되는 실정이다. 특히, 기반암 깊이가 낮은 국내 지반 특성상 지하층 하부가 암반에 정착되어 상부 건축물, 물론 기초 위에 놓인 상부 건축물, 지표면 자유장에 놓인 건축물에 작용하는 지진하중은 크게 다를 것으로 예상된다.

본 연구에서는 지진의 규모와 발생빈도가 낮은 국내 지진학적 특성을 고려하여 최근 KOCED 지오센트리퓨지 실험센터에 도입된 동적 원심모형시험기를 이용하여 입력 지진하중에 의한 지반 내 가속도 증폭특성을 평가하였다. 더불어, 기초 형식 및 상부 구조물의 주기를 다양하게 하여 구조물의 지진하중을 평가하였고, 이를 지표면 자유장 가속도 기록으로부터 획득한 응답스펙트럼과 비교함으로써, 건축물의 신뢰성 있는 지진하중 산정을 위해 지반-기초-구조물 상호작용이 고려되어야 함을 확인하였다.

## 2. KOCED 동적 원심모형시험기

본 연구에서 사용된 KOCED 지오센트리퓨지 실험센터의 원심모형시험기는 프랑스 ACTIDYN SYSTEMES SA의 C72-2 모델로 Beam 형태, 회전반경 5m, 최대 용량 240g-tons의 규모를 갖는다. 여기에 전기제어-유압방식(Electro hydraulic servo type)의 2차원 진동대를 포함하여 원심모형시험 중 2차원 복합 지진운동의 모사가 가능하다. 적재하중이 없을 경우에는 최대 40g, 최대 적재하중 700 kg에 대해서는 최대 20g의 진동 가속도를 재현할 수 있고, 이는 최대 0.5g의 강진을 모사할 수 있는 가속도 수준이다(현재 국내 내진설계기준에 명시된 최대 설계 지진 가속도 : 0.22g).

또한, 유한한 모델 박스의 경계 조건을 실제 자연 상태에서의 조건으로 모사하기 위해, 등가전단보(Equivalent Shear Beam, ESB) 박스를 이용하여 모델을 구성하게 된다. ESB 박스는 10개의 알루미늄 Frame 층으로 구성되어 있고, 각 Frame을 볼 베어링과 지반의 강성과 유사한 고무로 연결하여 지진시 모델 박스에서 지반의 동적 거동과 유사한 거동을 보이도록 하였다. 현재 KAIST에서는 1차원, 2차원 진동대 시험을 위한 ESB 박스를 각각 1개씩, Rigid 박스 1개를 보유하고 있다. 본 연구를 위해 사용된 2차원 진동대의 주요 사양 및 모습을 표 1과 그림 1에 각각 나타내었다.

표 1. 2차원 진동대의 주요 제원

항 목	Q72-2 2차원 진동대
Payload 크기	0.67 m (L) × 0.67 m (W) × 0.65 m (H)
최대 모델 중량	700 kg
가용 원심 가속도 범위	10 - 100g
최대 지진 가속도 (최대 모델 중량의 경우)	20g
가용 하중 주파수 범위	40 - 300 Hz



(a) 진동대를 포함한 원심모형시험기



(b) 2차원 진동대



(c) 등가전단보(ESB) 박스

그림 1. KOCED 지오센트리퓨지 실험센터의 동적 원심모형시험 시설

### 3. 동적 원심모형시험 모형 구성 및 시험 조건

#### 3.1 모형 제작 및 시험 과정

본 연구에서는 인공적으로 생산한 건조 상태의 규사를 시험 시료로 사용하였고, 실험 중 가급적 침하가 발생하지 않도록 조심하게 낙사를 수행하여 토층 두께 60cm, 상대밀도 81% (건조단위중량  $1.55\text{g/cm}^3$ )의 지반 모형을 조성하였다. 그림 2는 얇은 기초를 포함한 시험 모형의 제작 과정을 보여준다. 시료를 낙사하기 전, 지반의 전단파속도 주상도 평가를 위한 벤더엘리먼트 어레이를 ESB 박스의 바닥에 고정시키고(a), 낙사를 수행한다(b). 낙사 진행 중 가속도계를 설치해야 할 높이에 도달하면 모형의 중앙부와 지진시 벤더엘리먼트 어레이의 영향이 미미할 것으로 판단되는 위치에 각각 가속도계를 설치하였다(c). 이후 얇은 기초를 설치해야 할 위치에 도달하면 표면을 평평하게 고른 후 가속도계가 부착된 얇은 기초 모형과 주변 지반의 여러 위치에 가속도계를 설치하였다(d). 이 후 다시 낙사를 수행 하여 얇은 기초를 매설하고, 상부 구조물 설치를 위해 표면을 다시 평평하게 하였다(e). 이후, 고유주기가 미리 측정된 구조물 모형을 얇은 기초 모형 위에 올리고, Rocking과 횡방향 응답 측정을 위한 가속도계를 설치하면 시험을 위한 모형 제작이 마무리 된다(f).

그림 3은 얇은 기초 및 깊은 지하층을 포함하는 시험 모형의 구성도를 나타낸다. 시험 구성을 고려하여 지반 내 위치 및 깊이에 따른 가속도 어레이를 구성하였고, 얇은 기초 및 지하층 구조물에도 가속도계를 부착하였다. 상부 구조물에는 진동 방향의 구조물 응답을 평가하기 위한 가속도계 1개와 지진시 구조물이 흔들리는 Rocking 정도를 평가하기 위해, 수직 방향으로 2개의 가속도계를 설치하였다.

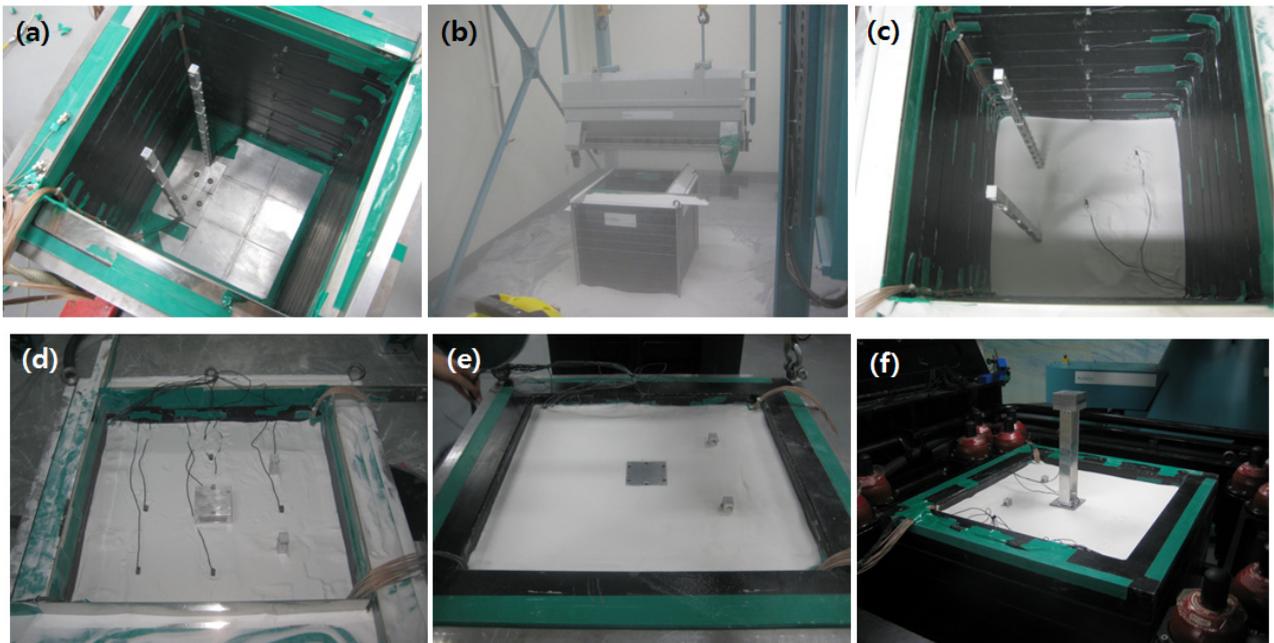


그림 2. 얇은 기초를 포함한 원심모형시험 모형 제작 과정.

그림 3. 시험 모형 구성에 대한 개략도

#### 3.2 얇은 기초, 깊은 지하층 및 상부 구조물 모형

얇은 기초 모형은 길이 70mm(L), 너비 70mm(W), 높이 30mm(H) 크기로 제작하였고, 동일 부피의 지반과 유사한 무게를 갖도록 하였다. 지하층 모형은 길이 120mm(L), 너비 90mm(W), 높이 600mm(H) 크기로 제작하였고, 주변 지반과 비교하여 단위 중량을 크게 할 목적으로 동일 부피의 지반보다 큰 무게

를 갖도록 하였고, 내부에 Strut를 설치하여 강성을 확보하였다. 기초 및 지하층 상부에 놓이게 될 구조물 모형은 진동 방향에 대해 1자유도를 갖는 진단보 형태로 제작하였고, 총 7개의 상부 구조물에 대해 모형의 공진 주파수가 20Hz부터 235Hz까지 분포하도록 하였다. 얇은 기초, 지하층, 상부 구조물 모형을 그림 4에 나타내었다. 또한 본 연구에서 사용한 원심 가속도에 대해 상사 법칙을 적용하여 원형 조건에서 모사하게 될 각 구조물의 주파수와 주기를 표 2에 나타내었다. 구조물의 주기는 구조물 층수의 1/10이라는 간단한 관계로부터 원심 가속도 20gc에서는 1층 이하~10층 구조물을 모사하게 되고, 원심 가속도 40gc에서는 2층 이하~20층 구조물을 모사한다고 가정할 수 있다.

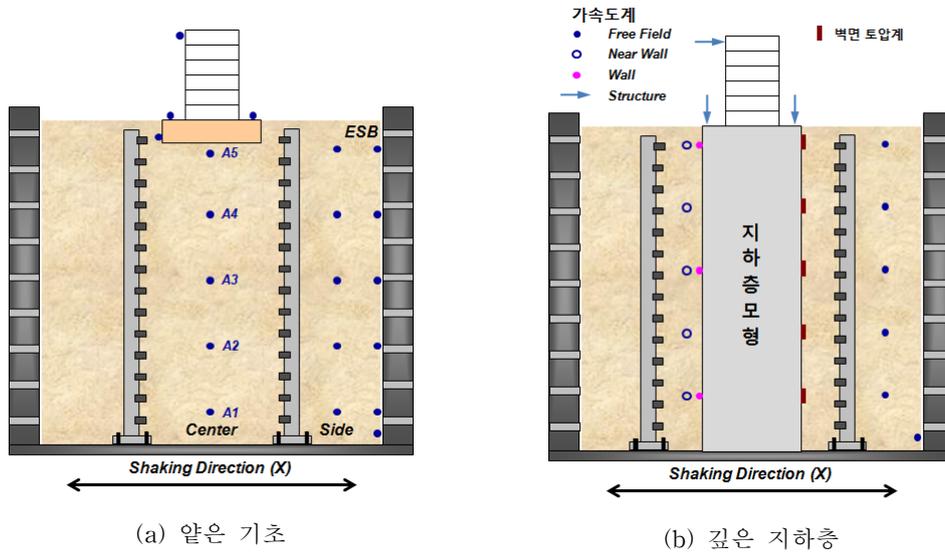


그림 3. 시험 모형에 대한 개략도

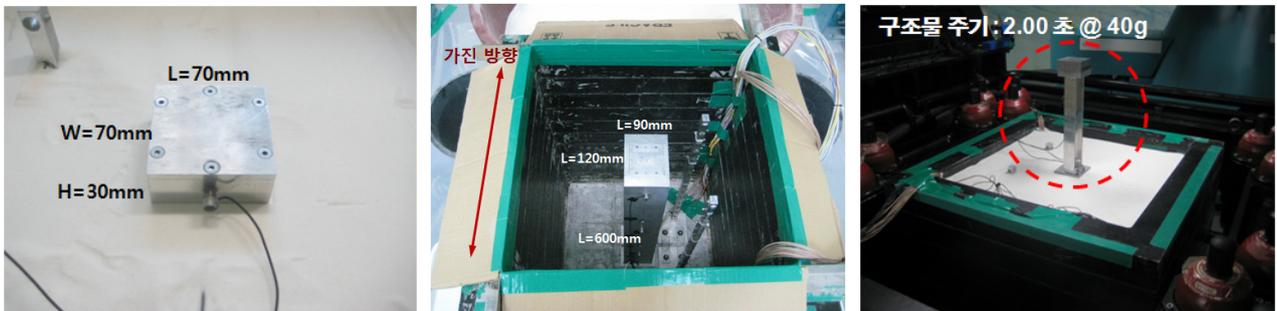


그림 4. 얇은 기초, 깊은 지하층, 상부 구조물 모형

표 2. 상부 구조물 모형의 모형 및 원형 주파수 조건

모형 공진 주파수 (Hz)	원형 공진 주파수 및 주기			
	원심 가속도 20gc		원심 가속도 40gc	
	공진 주파수(Hz)	주기(초)	공진 주파수(Hz)	주기(초)
235	11.8	0.08	5.9	0.17
118	5.9	0.17	2.9	0.34
77	3.8	0.26	1.9	0.52
57	2.9	0.35	1.4	0.70
44	2.2	0.45	1.1	0.90
31	1.5	0.65	0.77	1.30
20	1.0	1.00	0.5	2.00

### 3.3 원심모형시험 조건

본 연구에서는 원심 가속도를 20gc, 40gc로 순차적으로 증가시키면서 제작된 시험 모형에 지진 하중을 작용시켰다. 각 원심 가속도에서 모형 지반이 나타내는 지반 물성치를 표 3에 나타내었다. 이 때, 토층 평균 전단파속도 및 지반 고유주기는 입력 지진이 가해지기 전에 수행된 벤더엘리먼트 시험으로부터 획득하였다.

입력 지진파는 Northridge 지진(미국, 1994)과 Kobe 지진(일본, 1995)을 사용하였고, 지진 가속도 수준은 국내 내진설계기준에 제시된 내진성능수준을 고려하여 0.1gh 이하부터 0.3gh 까지 낮은 가속도부터 시작하여 순차적으로 증가시키며 지반 및 구조물의 응답을 측정하였다.

표 6. 각 원심 가속도에 대한 모형 지반의 원형 조건

시험 모형	모델 토층	Dr	원심가속도	H	$V_{S,Soil}$	$T_G$
SH60	60cm	82%	20 gc	12 m	194 m/s	0.25 초
			40 gc	24 m	234 m/s	0.41 초
BH60	60cm	73%	20 gc	12 m	171 m/s	0.28 초
			40 gc	24 m	214 m/s	0.45 초

## 4. 동적 원심모형시험 결과

### 4.1 지반 내 가속도 증폭 특성

선정된 두 개의 입력 지진파에 대해 낮은 가속도 수준부터 높은 가속도 수준으로 진동을 가하며 지중 및 구조물에 설치되어 있는 가속도 기록을 계측하였다. 대표적인 시험 결과로서 얇은 기초 하부 중앙에 깊이별로 매설되어 있는 가속도계로부터 획득한 지진응답을 그림 5에 나타내었다. 기반암 운동에 의해 지진파가 지표면으로 전파됨에 따라 가속도가 증폭되는 것을 명확히 확인할 수 있으며, 증폭 정도는 지반의 강성 조건에 따라 다양하게 나타날 것으로 판단된다.

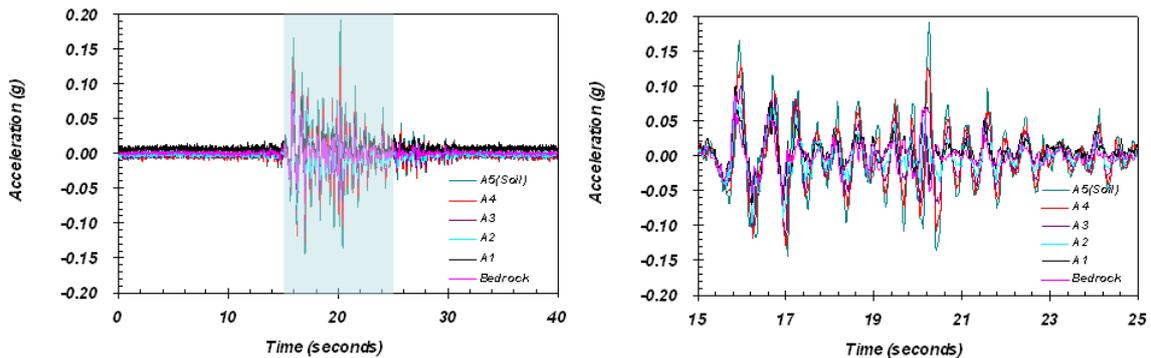
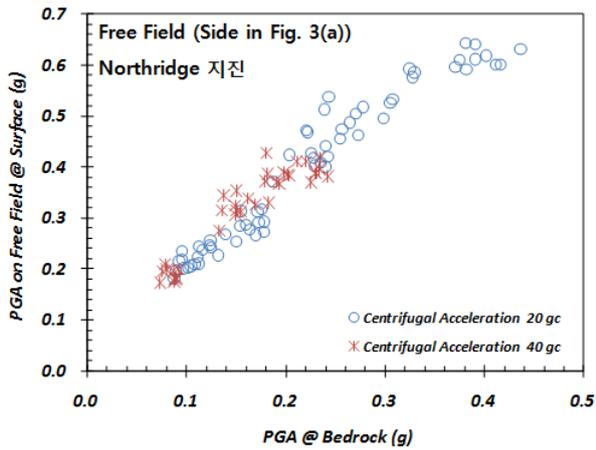
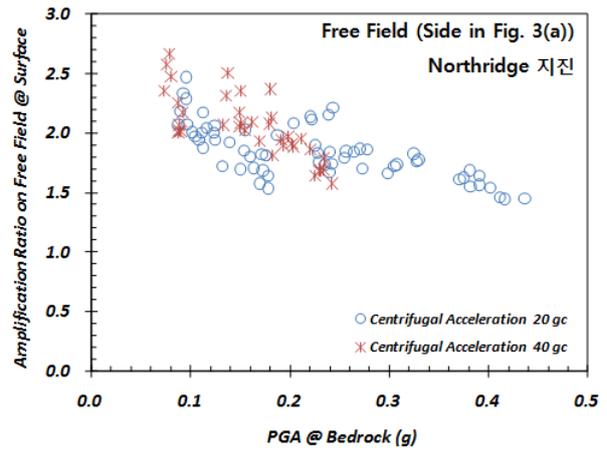


그림 5. 깊이별 시간영역 지반 가속도 증폭

지표면 자유장 가속도 시간 이력(그림 3(a)의 Side 위치 최상부 가속도 기록)으로부터 최대 지반 가속도(peak ground acceleration, PGA)를 획득하여 입력 기반암 가속도 수준에 따라 그림 6에 도시하였다. 기반암 가속도가 증가함에 따라 지표면 가속도 수준이 증가하고, 증폭비는 감소하는 것을 확인할 수 있다. 0.1g의 기반암 가속도 수준에 대해 2.2배 정도의 증폭이 지표면 근처에서 발생하게 되고, 0.2g의 가속도 수준에 대해서는 1.90배, 0.3g 수준에 대해서는 1.7배 정도의 증폭이 발생하고 있다. 이는 기반암 가속도의 수준이 증가함으로써 지반의 변형에 의한 비선형 특성이 반영된 것으로 판단된다.



(a) 지표면 자유장 가속도 기록

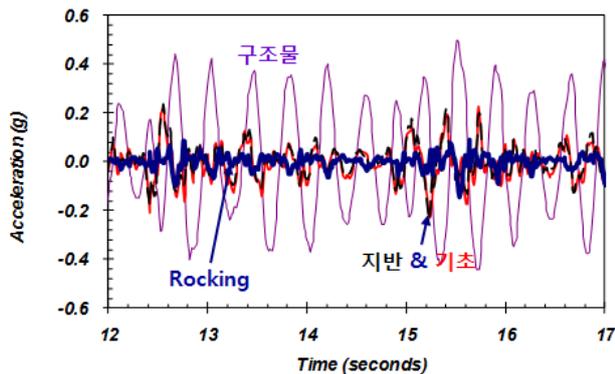


(b) 지표면 자유장 증폭비

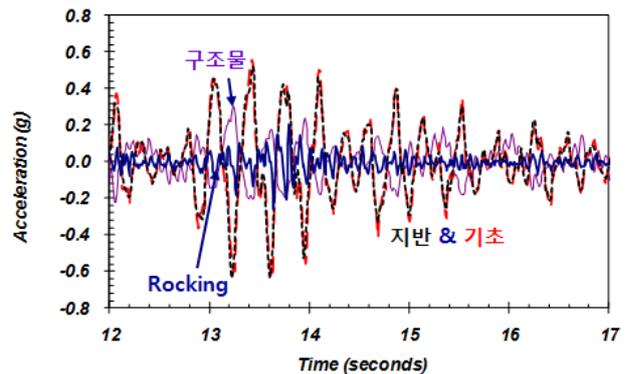
그림 6. 기반암 가속도에 따른 지표면 자유장 가속도 수준

#### 4.2 지반-기초-구조물 가속도 증폭 특성

구조물 기초 바로 아래에 위치한 가속도계 (Center, A5), 기초에 부착된 가속도계, 상부 구조물에 진동방향으로 부착된 가속도계 및 구조물에 수직으로 부착되어 구조물의 Rocking 운동을 측정하는 가속도계 응답을 그림 7에 비교하였다. 주기 0.26초 구조물에 대한 시험 결과에서는 구조물의 응답이 최대 0.5gh까지 나타나면서 약 0.23gh 정도로 유사하게 나타나는 기초와 지반의 응답에 비하여 두 배 정도 증폭이 발생하고 있다. 이는 원심 가속도 20gc에서 지반의 고유주기가 0.25초로 구조물의 주기와 유사하기 때문에 공진 현상이 발생한 것으로 판단된다. 이에 반해 Rocking 응답은 최대 0.15gh 정도로 기반암 가속도와 유사하게 계측되고 있다. 반면, 주기 0.65초 구조물에 대한 시험 결과에서는 지반의 고유주기와 차이로 인해 구조물의 응답이 기초와 지반의 응답에 비하여 크게 증폭이 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다. 이에 반해 Rocking 최대 응답은 구조물 응답과 유사할 만큼 크게 측정되고 있음을 확인할 수 있다.



(a) 구조물 고유주기 : 0.26초

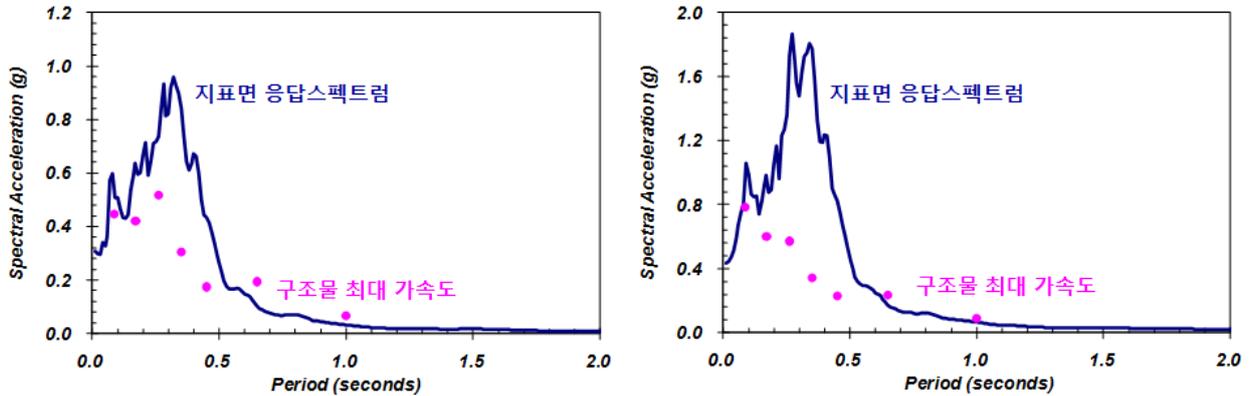


(b) 구조물 고유주기 : 0.65초

그림 7. 지표면, 기초, 구조물 횡방향 및 Rocking 가속도 시간 이력 비교(원심 가속도 20gc)

지중 최상부에서 계측된 가속도 신호로부터 응답스펙트럼을 작성하고, 이를, 시험이 수행된 각 주기의 구조물 최대 가속도 응답과 함께 그림 8에 나타내었다. 응답스펙트럼의 이론적 개념으로는 지표면 응답스펙트럼과 각 주기의 구조물 최대 가속도가 일치해야 하지만, 그림에서 보듯이, 많은 차이를 보이고 있다. 이는 그림 7에서 계측된 구조물의 Rocking 운동 때문인 것으로 판단된다. 일반적으로 응답스펙트럼

은 수평운동에 의한 구조물의 감쇠비만을 고려하여 작성된 것이지만, 실험에서는 수평 운동뿐 아니라, Rocking에 의한 감쇠비가 추가로 작용하고 있기 때문에 측정되는 구조물의 응답이 작은 것으로 판단된다. 그러나 주기 0.07초(원심 가속도 20gc), 0.13초(원심 가속도 40gc) 구조물은 구조물의 높이가 낮기 때문에 Rocking에 의한 영향이 크지 않아 유사한 응답을 나타내고 있다. 이로부터, 지표면에 깊게 매설되지 않은 얇은 기초에 의해 지지되는 구조물의 설계에서는 Rocking에 의한 영향을 함께 반영하여 구조물에 작용하는 지진하중을 산정할 필요가 있다.



(a) 원심 가속도 20gc, 지진가속도 0.119gh

(b) 원심 가속도 40gc, 지진가속도 0.228gh

그림 8. 지표면 응답스펙트럼 및 구조물 최대 가속도 비교

### 4.3 지반-지하층-상부구조물 가속도 증폭 특성

그림 3(b)의 Free field, Near wall(Cent), Wall 가속도계 어레이에서 최상부 가속도 시간 이력을 비교하여 그림 9에 나타내었다. 강성이 큰 지하층 모형의 영향으로 Near wall 가속도 시간 이력은 전체 시간 영역에서 Wall 에서의 응답과 유사하게 나타나고, Free field에서 계측되는 가속도보다는 작게 나타나고 있다.

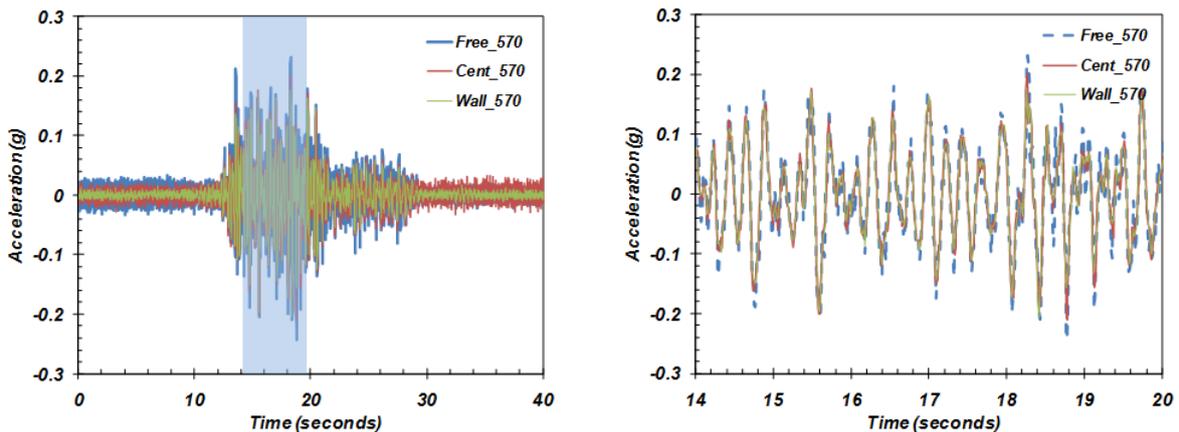
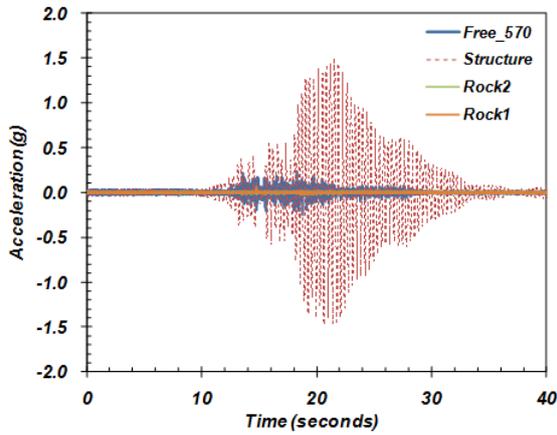


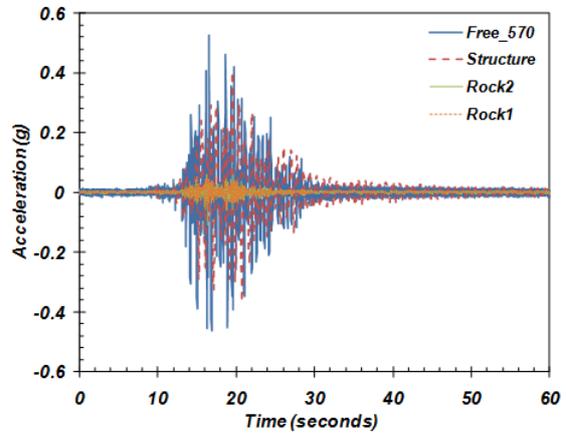
그림 9. Free field, Near wall(Cent), Wall 동일 높이에서의 가속도 시간 이력 응답 비교.

자유장 최상부 가속도계, 상부 구조물에 진동방향으로 부착된 가속도계 및 구조물에 수직으로 부착되어 구조물의 Rocking 운동을 측정하는 가속도계 응답을 그림 10에 함께 나타내었다. 원심 가속도 40gc에서 지반의 고유주기(0.45초)와 유사한 주기 0.52초의 구조물 응답은 최대 1.5gh까지 나타나면서 입력 기반암 가속도 0.12gh, 지표면 자유장 가속도 0.24gh와 비교하여 현격히 증폭되는 것을 확인할 수 있다.

이는 얇은 기초 위에 놓인 구조물과 달리 지하층이 기반암에 단단히 고정되어 있어 Rocking에 의한 감쇠가 발생하지 않기 때문이다. 실질적으로 그림에서 Rocking 가속도는 거의 발생하지 않음을 알 수 있다. 주기 0.9초 구조물 역시 Rocking 가속도는 계측이 되지 않고 있으나, 지반의 고유주기가 차이가 있으므로 구조물 응답의 증폭정도가 지표면에 비해 작은 것으로 판단된다.



(a) 구조물 주기 0.52초

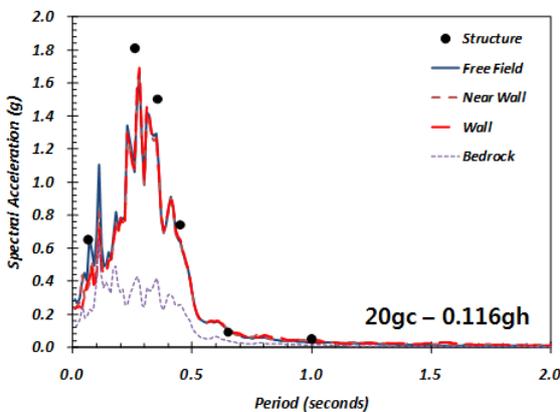


(b) 구조물 주기 0.9초

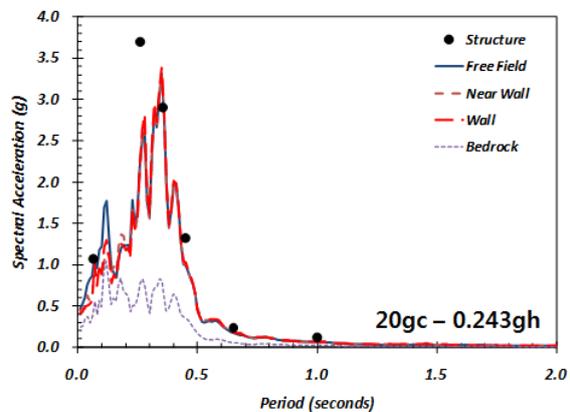
그림 10. 지표면, 구조물 횡방향 및 Rocking 가속도 시간 이력 비교(원심 가속도 40gc).

마찬가지로 자유장, 지하층 주변, 지하층에서 계측된 가속도 신호로부터 응답스펙트럼을 작성하고, 이를, 시험이 수행된 각 주기의 구조물 최대 가속도 응답과 함께 그림 11에 나타내었다. 앞선, 얇은 기초에서의 시험 결과와 달리 응답스펙트럼과 구조물의 최대 응답이 유사하게 나타나고 있다. 이는 Rocking에 의한 감쇠가 발생하지 않고, 오직 수평 운동에 의한 감쇠만 발생하고 있기 때문이다. 그러나 원심 가속도 40gc에서 주기 0.17초에 해당하는 구조물의 경우 과도하게 큰 응답이 계측되고 있다. 이는 입력 지진파의 영향으로 판단된다.

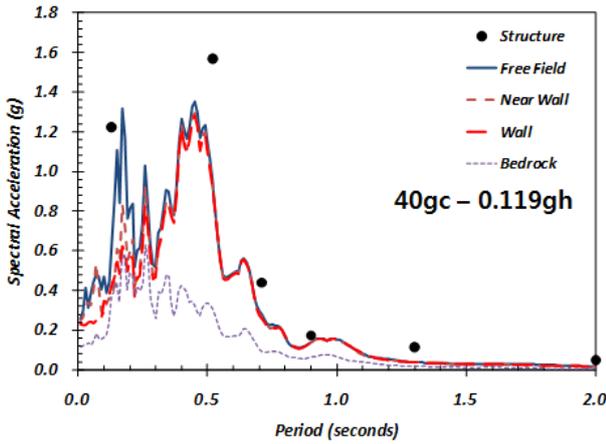
일반적으로 지하층이 기반암에 고정되어 있는 경우에는 지하층에 의한 가속도 증폭이 발생하지 않아  $S_A$  또는  $S_B$  지반의 설계응답스펙트럼을 사용하여 상부 구조물의 지진하중을 산정하는 것이 일반적이다. 그러나 본 시험 연구에서는 주변 지반의 큰 질량 및 관성력으로 인해 구조물에서 역시 증폭 현상이 발생하고, 이로 인해 상부 구조물도 큰 지진하중을 받고 있음이 확인되었다. 이는, 추후 좀 더 다양한 조건에서의 시험 연구와 수치해석 연구를 병행하여 실제 구조물에서도 이와 같은 응답이 발생하는지 알아볼 필요가 있다.



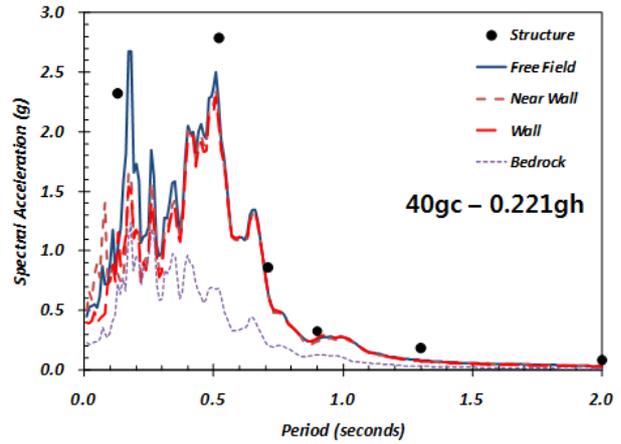
(a) 원심 가속도 20gc, 지진가속도 0.116gh



(b) 원심 가속도 20gc, 지진가속도 0.243gh



(c) 원심 가속도 40gc, 지진가속도 0.119gh



(d) 원심 가속도 40gc, 지진가속도 0.221gh

그림 11. Free field, Near wall, Wall 응답스펙트럼 및 구조물 최대 가속도 비교

## 5. 결론

본 연구에서는 지진시 지반-기초-구조물 시스템에 작용하는 지진하중 증폭특성을 확인해 보기 위해, 진동대를 포함한 동적 원심모형시험을 수행하였다. 균질한 규사를 낙사하여 지반을 조성하였고, 입력 지진하중을 적용하기 전, 벤더엘리먼트 시험을 통해 지반의 전단파속도 주상도를 획득하였다. 기초의 형태는 얇은 기초와 깊은 지하층으로 구분하여 시험을 수행하였고, 상부 건축물은 1층 이하의 저층 건축물부터 20층 정도의 고층 건축물까지 다양하게 모델링하였다. 입력 지진파는 Kobe와 Northridge 지진을 선정하였고, 다양한 가속도 수준에 따라 지반, 기초 및 상부 건축물에 작용하는 지진하중 증폭특성을 평가하였다.

기반암 가속도가 증가함에 따라 지표면에 계측한 가속도 수준은 증가하고, 지반의 비선형 특성이 반영되어 증폭비는 감소하는 것을 확인할 수 있다. 얇은 기초를 상부에 놓인 구조물에서는 Rocking에 의한 응답이 크게 측정되어 구조물 횡방향 최대 응답이 지표면 가속도 기록으로부터 획득한 응답스펙트럼에 비해 작게 평가되고 있다. 이로부터, 지표면에 깊게 매설되지 않은 얇은 기초에 의해 지지되는 구조물의 설계에서는 Rocking에 의한 영향을 함께 반영하여 구조물에 작용하는 지진하중을 산정할 필요가 있다. 깊은 지하층이 바닥에 단단히 고정되어 있는 경우에는 Rocking에 의한 구조물 응답의 감쇠가 발생하지 않아 구조물 횡방향 최대 응답과 지표면 응답스펙트럼이 유사하게 나타나고 있다.

## 감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구로서 (RF-2005-206-D00022 : 국내 지반환경 및 지하층구조를 고려한 건축물의 지진하중의 평가) 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. 건설교통부 (1997), “내진설계기준연구(II) - 내진설계성능기준과 경제성 평가”, 한국지진공학회.
2. 김용석 (2005), “구조물-지반 상호작용과 지진해석”, 구미서관.
3. 대한건축학회 (2009), “건축구조기준 및 해설.