

## 12-1

### 실험한옥 구조성능시험 보고서

- 12-1-1 실물 실험한옥 진동실험보고서
- 12-1-2 전통한옥 소규모 시험체(1/15) 진동실험보고서
- 12-1-3 실험한옥 소규모 시험체(1/15) 진동실험보고서
- 12-1-4 실험한옥 대규모 시험체(1/4) 정적 및 동적실험보고서

작성자 : 연구책임자 김영민

연락처 : 경기도 용인시 처인구 명지로 116 명지대학교 건축대학 12315호  
Tel:(031)330-6490 Fax:(031)031-330-6487

## < 목 차 >

1. 실험한옥 구조성능 실험 보고서	3
1.1 실물 실험한옥 진동실험 보고서	4
1) 실험개요	4
2) 실험계획	4
3) 구조물 별 가속도계 설치	4
(1) 부위별 성능 테스트동	4
(2) 시공 및 성능 테스트동	6
(3) 전통한옥 성능 테스트동	8
4) 실험결과	10
(1) 부위별 성능 테스트동	10
(2) 시공 및 성능 테스트동	12
(3) 전통한옥 성능 테스트동	15
5) 소결	16
1.2 전통한옥 및 실험한옥 소규모 시험체(1/15 스케일) 진동실험보고서	17
1) 전통한옥 소규모 시험체(1/15 스케일) 동특성평가	17
(1) 실험개요	17
(2) 시험체	17
(3) 실험내용	18
(4) 실험결과	20
2) 신한옥 소규모 시험체(1/15스케일) 동특성평가	26
(1) 실험개요	26
(2) 시험체	26
(3) 실험내용	27
(4) 실험결과	29
3) 소결	36
1.3 실험한옥 대규모 시험체(1/4 스케일) 정적 및 동적실험 보고서	37
1) 실험개요	37
2) 실험계획	37
(1) 실험체 계획	37
(2) 시험체 제작과정	39
(3) 접합부 특성	41
(4) 상재하중	43
3) 실험한옥 대규모 시험체 정적 실험	44
(1) 실험 개요	44
(2) 실험 환경	44
(3) 실험방법	47
(4) 구조해석 모델링	47
(5) 실험결과 및 분석	49

(6) 수치분석을 통한 강성평가-----	61
(7) 강성에 따른 모멘트 변화-----	67
(8) 구조해석 모델링을 통한 강성평가-----	70
(9) 소결-----	73
4) 실험한옥 대규모 시험체 동적 실험-----	74
(1) 실험 개요 -----	74
(2) 실험계획 -----	74
(3) 동적실험 결과 및 분석 -----	78
(4) 구조해석 모델링 -----	119
(5) 소결 -----	121

## 1. 실험한옥 구조성능 실험 보고서

세계적으로 지진에 의한 피해가 증가하여 건물의 내진성능을 확보함에 있어 일부 건축물에 대하여 내진설계가 의무화 되었으나 한옥은 콘크리트구조나 철골구조만큼 내진에 대한 연구가 널리 알려져 있지 않다. 한옥의 동특성에 대한 기존 연구가 있었지만 대개 중층 목조문화재를 대상으로 주로 연구가 이루어졌으며, 주거건물인 전통한옥과 실험신한옥의 내진성능에 관한 연구는 찾아보기 어렵다. 그러므로 본 연구에서는 전통한옥과 실험신한옥의 동적특성을 동시에 평가하고자 한다. 실제 건축물에 상시미진동실험, 인력가진실험 그리고 충격하중(임팩트해머)을 통하여 건축물의 고유진동수와 감쇠비를 예측한 후, 전통한옥과 실험신한옥의 축소실험체를 진동대 실험을 통해 동적특성을 파악하였다. 특히 진동대 실험에선 각각의 건물에 다양한 크기의 가진을 통해 발생한 응답을 정리하고, 전통한옥과 실험신한옥의 서로 다른 접합부 특성이 건물의 전체적인 강성에 미치는 영향을 분석해 보았다. 전통한옥의 경우 접합부는 맞춤과 이음으로 구성되어 있어 지붕에서 내려오는 큰 하중이 접합부를 구속시켜주고, 실험신한옥의 경우에는 접합부를 철물로 접합하고 지붕의 하중을 줄여 건물의 전체적인 하중이 감소되었다. 또한 이러한 실험을 바탕으로 실험신한옥에 대하여 1/4스케일 실험체를 통해 동적 및 정적하중 실험을 실시하였다. 본 연구에서 축소실험체를 사용한 것은 현실적으로 실물 크기에 진동을 가하여 동특성을 파악하는 것은 현실적인 제약이 있다. 또한 마찰 특성을 고려한 접합부 해석 모델링을 통하여 접합부간 마찰력이 동특성에 미치는 영향을 연구하고 그 결과를 상호 비교하여 신뢰성을 검증하였다.

## 1.1 실물 실험한옥 진동실험 보고서

### 1) 실험개요

실험한옥에 대한 통합구조기술 개발을 위하여 지진 시 구조안전성에 있어서 구조물의 거동을 조사하여 동적특성을 분석하고자 하였다. 이는 건물의 고유 주기를 바탕으로 가정된 지진에 대한 응답을 구하는 것이다. 실험대상 건물은 한옥기술개발연구 3차년도에 명지대학교 자연캠퍼스에 건설된 실험한옥(Mock-up)이다. 실험대상은 총 3동으로 시공 및 성능 테스트동, 부위별 성능 테스트동, 전통한옥 테스트동이 있다.

실험한옥(Mock-up)의 동적특성 분석을 위하여 각 건물에 대하여 동적가력실험을 하였다. 이를 통해 건물의 동적특성에 있어서 각 건물마다 지니는 고유진동, 감쇠비 및 가속도 등 건물마다 다른 진동특성을 통해 각 구조물의 구조적 특성을 파악하고자 하였다. 동적가력 실험방법으로는 인력가진 및 충격하중(임팩트해머)을 통하여 계측하였다. 실험을 위한 가속도 센서는 각 건물의 대량 및 보에 설치하였다. 건물의 전체거동을 확인하기 위하여 여러 위치에서 가속도 응답을 측정하였다.

### 2) 실험계획

실험한 건물은 명지대 내 위치한 Mock-up 구조물 3개동(부위별 성능 테스트동, 시공 및 성능테스트동, 전통한옥)을 대상으로 진행하였다. 각 건물에 대하여 상시미진동 테스트, 충격하중 테스트 그리고 인력가진 테스트로 총 3가지의 실험을 통하여 동특성을 평가하였다. 계측방법은 설정된 축방향에 미진동계측이 가능한 가속도계를 설치하여 각 실험 방법별로 가속도응답을 계측하였다. 가속도계측으로 대상 구조물의 고유진동수 및 감쇠비를 추출하고자 하였다.

### 3) 구조물 별 가속도계 설치

#### (1) 부위별 성능 테스트동



그림 1. 부위별 성능 테스트동

부위별 성능 테스트동은 가로 3칸, 세로 1칸의 전통한옥이며, 구조재로 쓰인 목재는 모두 집성목이다. 주간거리는 모두 2,400mm로 동일하다. 양측 방과 방사이 중앙의 때문에 X, Y방향으로 가속도센서를 설치하였다. 자세한 위치는 아래의 그림과 같다.

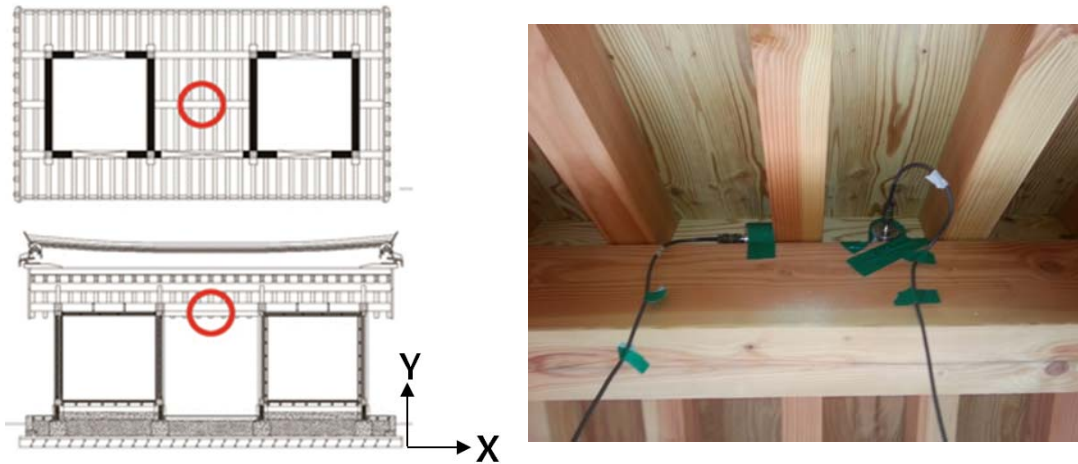


그림 2. 전통한옥 성능 테스트동 가속도센서 설치

부위별 성능 테스트동의 인력가진 및 충격하중 실험도 시공 및 성능 테스트동과 동일하게 이루어졌다. 4명의 사람이 한 방향으로 메트로놈의 진동수에 맞춰 동시에 건물을 가진 하였다. 충격하중 또한 X, Y방향으로 바꾸어가며 최대 5N으로 가력 하였다.



그림 3. 부위별 성능 테스트 동의 인력가진실험(좌) 및 충격하중실험(우)

(2) 시공 및 성능 테스트동

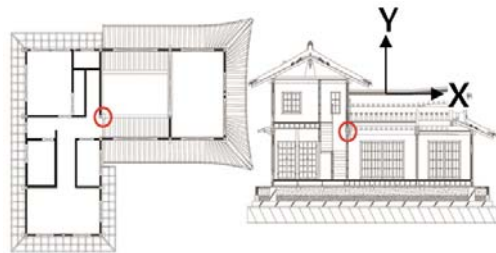


그림 4. 시공 및 성능 테스트동

시공 및 성능 테스트동은 개량 한옥의 2층 신한옥으로서 중층 목구조로써 가로, 세로 각 3칸의 ‘ㄱ’자 형태의 평면을 가지고 있다. 한쪽은 1층이며 다른 쪽은 2층의 형태이다. 철물로 접합되어 있는 주요구조부재는 모두 집성목이다.



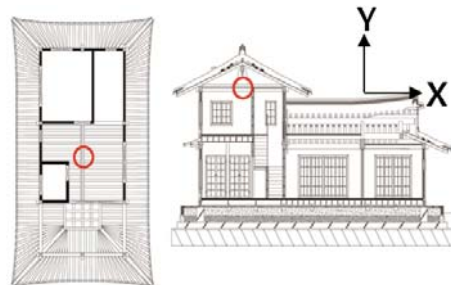
1층 거실 센서 설치



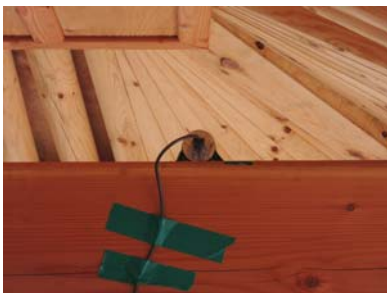
1층 거실 센서 설치위치



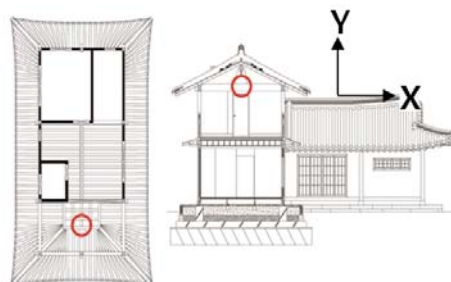
2층 거실 센서 설치



2층 거실 센서 설치위치



2층 누마루 센서 설치



2층 누마루 센서 설치위치

그림 5. 시공 및 성능 테스트동 가속도센서 설치

건물의 동적 힘을 측정하고 비대칭 평면의 비틀림의 영향을 검토하기 위하여 가속도센서를 1층과 2층으로 나누어 설치하였다. 1층 거실에 2개, 2층 거실에 2개 그리고 2층 누마루에 1개를 설치하여 총 5개를 설치하였다. 가속도센서의 설치위치는 위의 그림과 같다.

아래의 그림은 인력가진 및 충격하중 실험을 보여준다. 인력가진실험은 4명 이상의 사람이 일정한 진동수에 맞춰 동시에 가진 하였다. 진동수는 메트로놈을 이용하였다. 임팩트해머는 최대 5N으로 가력 하여 고유진동수를 측정하였다.



그림 6. 시공 및 성능 테스트동의 인력가진(좌) 및 충격하중실험(우)



## (3) 전통한옥 성능 테스트동



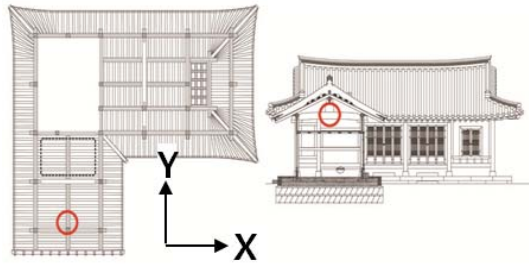
그림 7. 전통한옥 성능 테스트동

전통한옥 성능 테스트동은 ‘ㄱ’자 형태의 전통한옥으로 방2개와 대청, 부엌으로 구성되어 있다. 주간거리는 X방향으로 3,600mm, 4,800mm, 2,400mm로 서로 상이하지만, Y방향으로는 각 2,400mm로 동일하다. 가속도 센서는 부엌과 대청에 2개씩, 방에 1개를 설치하여 총 5개를 설치였다. 아래의 그림에 가속도 센서의 위치가 나타나 있다.

전통한옥 성능 테스트동의 인력가진 및 충격하중실험도 위의 실험과 동일하게 이루어졌다. 4명 이상의 사람이 한 방향으로 메트로놈의 진동수에 맞춰 동시에 건물을 가진 하였다. 아래 그림과 같이 임팩트해머 또한 X, Y방향으로 바꾸어 가며 최대 5N으로 가력 하였다.



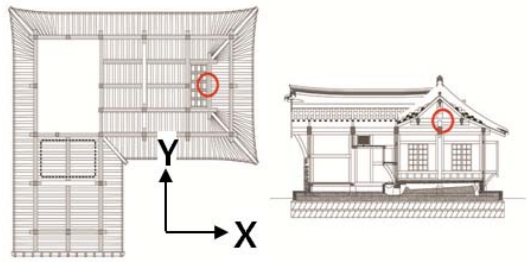
부엌 센서 설치



부엌 센서 설치위치



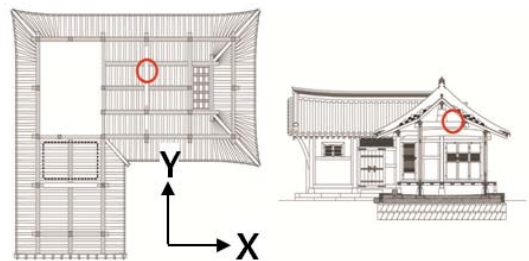
방 센서 설치



방 센서 설치위치



대청 센서 설치



대청 센서 설치위치

그림 8. 전통한옥 성능 테스트동 가속도센서 설치



그림 9. 전통한옥 성능 테스트동 충격하중실험

#### 4) 실험결과

##### (1) 부위별 성능 테스트동

##### 가) 충격하중 실험



그림 10. 부위별 성능테스트동 충격하중실험

그림 11. 부위별 성능테스트동 인력가진실험

충격량 측정이 가능한 임팩트해머를 사용하여 중앙부 기둥을 각 계측방향별로 4회씩 개별 타격하였다. 충격하중으로 발생한 가속도응답을 바탕으로 대상 구조물의 고유진동수를 평가하였다.

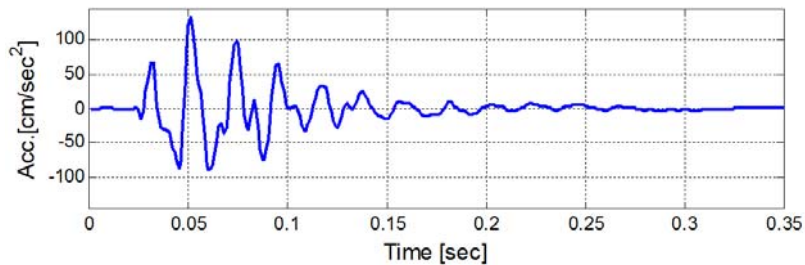


그림 12. X방향 가속도 응답 시간이력

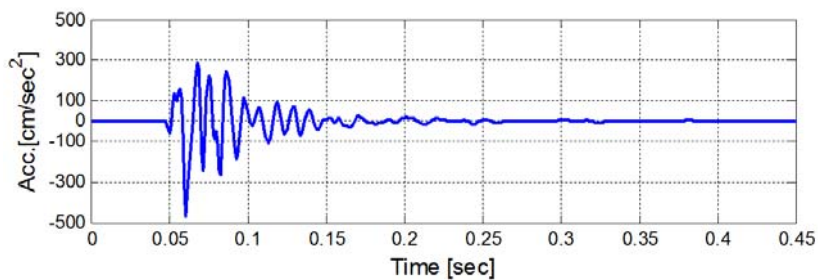


그림 13. Y방향 가속도 응답 시간이력

가속도 크기에 대하여 X방향과 Y방향을 비교해보면 Y방향의 가속도가 더 큰 것을 알

수 있다. 아래의 그림에서는 방향별 고유진동수를 나타내는 그림이다. X방향의 경우 8.5Hz이고 Y방향은 10.86Hz임을 확인할 수 있다.

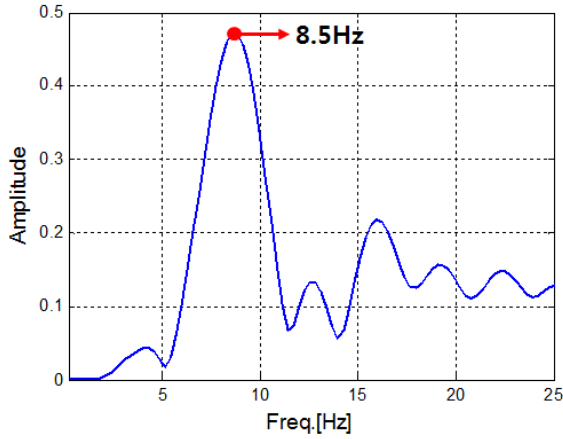


그림 14. X방향 주파수 응답

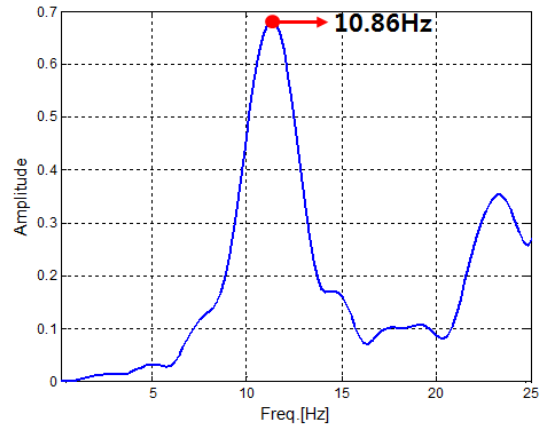
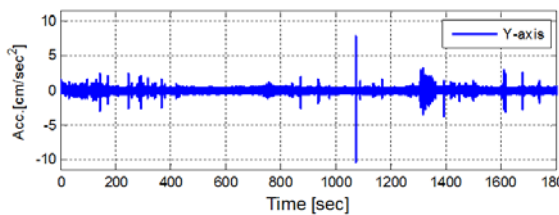
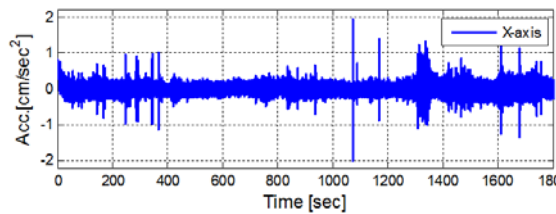


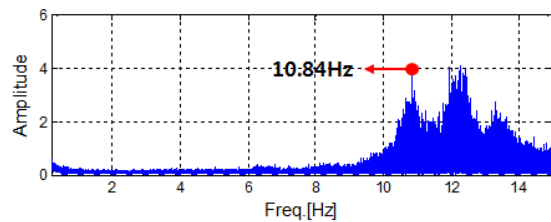
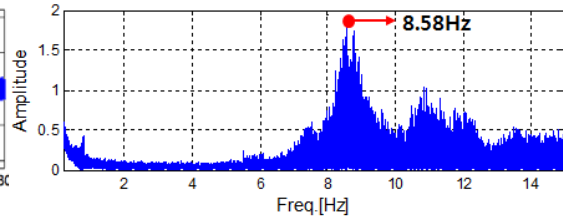
그림 15. Y방향 주파수 응답

나) 상시미진동 실험

설치된 계측기를 사용하여 외력이 없는 상태의 응답을 30분간 계측하였다. 시간이력 결과의 응답이 크게 나타나는 부분은 차량 운행에 따른 진동이 전달된 것이다. 상시미진동 실험에서도 충격하중 재하 실험에서와 동일한 고유진동수가 나타나는 것을 확인할 수 있다.



a. 가속도 응답 시간이력



b. 주파수 응답

그림 16. 부위별 성능 테스트동 상시미진동 실험 결과

(2) 시공 및 성능 테스트동

건물의 평면이 ‘ㄱ’자 형태이며 중층이기 때문에 비틀림이 예상되어 2층 누마루 층랑에 X방향으로 계측기를 추가 설치하였다.



그림 17. 2층 누마루 층랑에 X방향 계측기설치



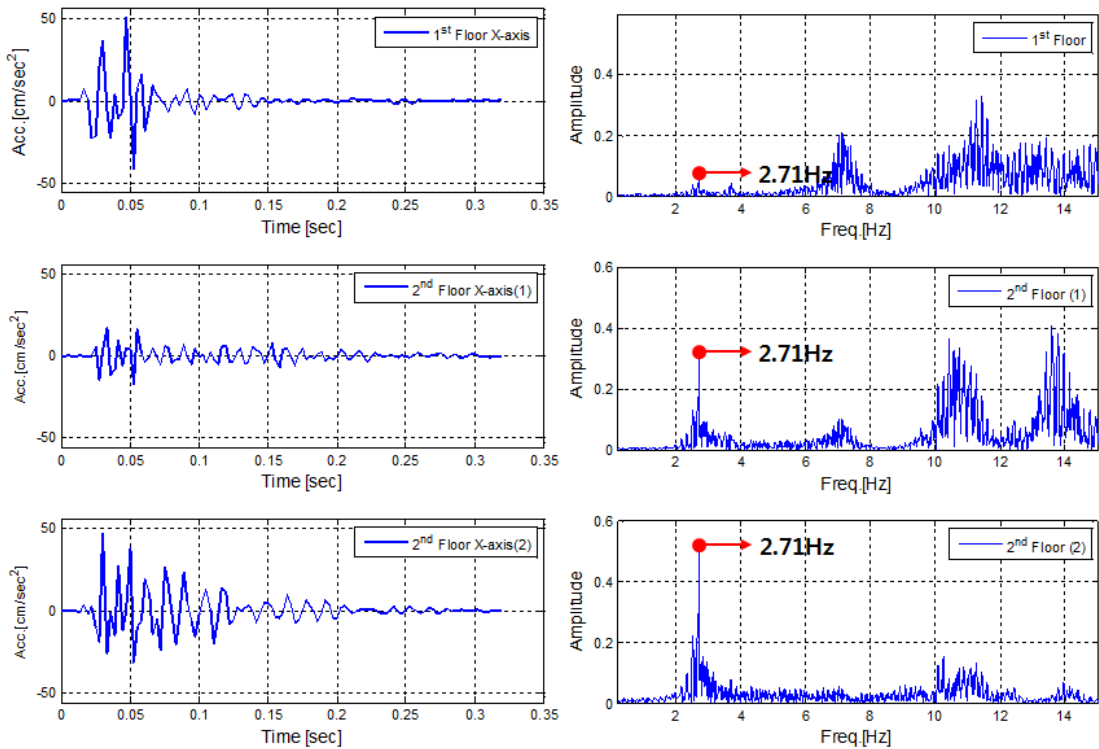
그림 18. 충격하중실험



그림 19. 인력가진실험

가) 충격하중 실험

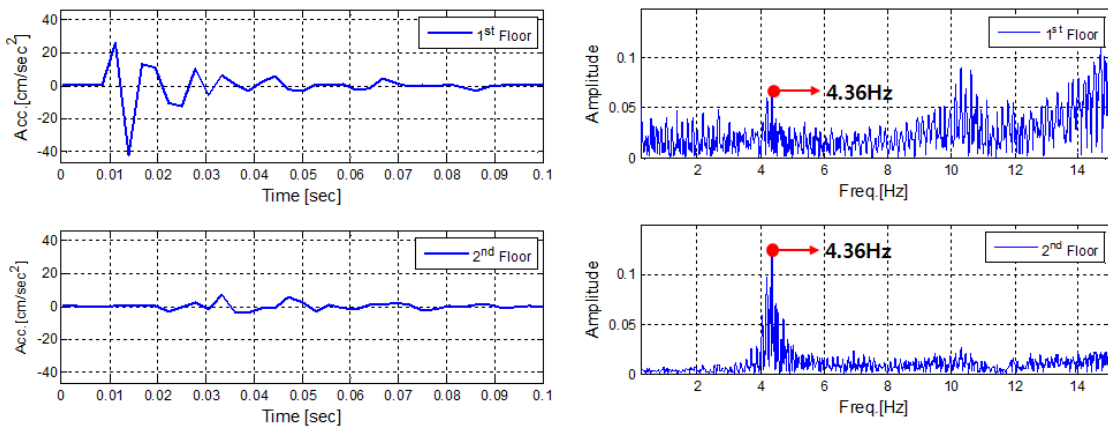
임팩트해머를 사용한 충격하중 실험결과 X방향의 1차모드 고유진동수는 2.71Hz이고, Y방향 1차모드 고유진동수는 4.36Hz로 나타났다.



a. 가속도 응답 시간이력

b. 주파수 응답

그림 20. 시공 및 성능테스트동 X방향 충격하중 실험 결과



a. 가속도 응답 시간이력

b. 주파수 응답

그림 21. 시공 및 성능테스트동 Y방향 충격하중 실험 결과

나) 상시미진동 실험

상시미진동 실험에서 복층부분의 X방향의 고유진동수는 2.68Hz로 나타났다. 본 건물은 단층부와 복층부가 서로 구분되어 거동하는 것으로 판단된다. 따라서 독립된 단층부에 대한 모드검토는 추가적인 분석이 필요하며 이에 따라 복층부의 Y방향 모드도 함께 검토가 필요하다.

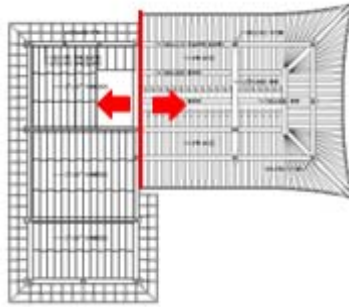
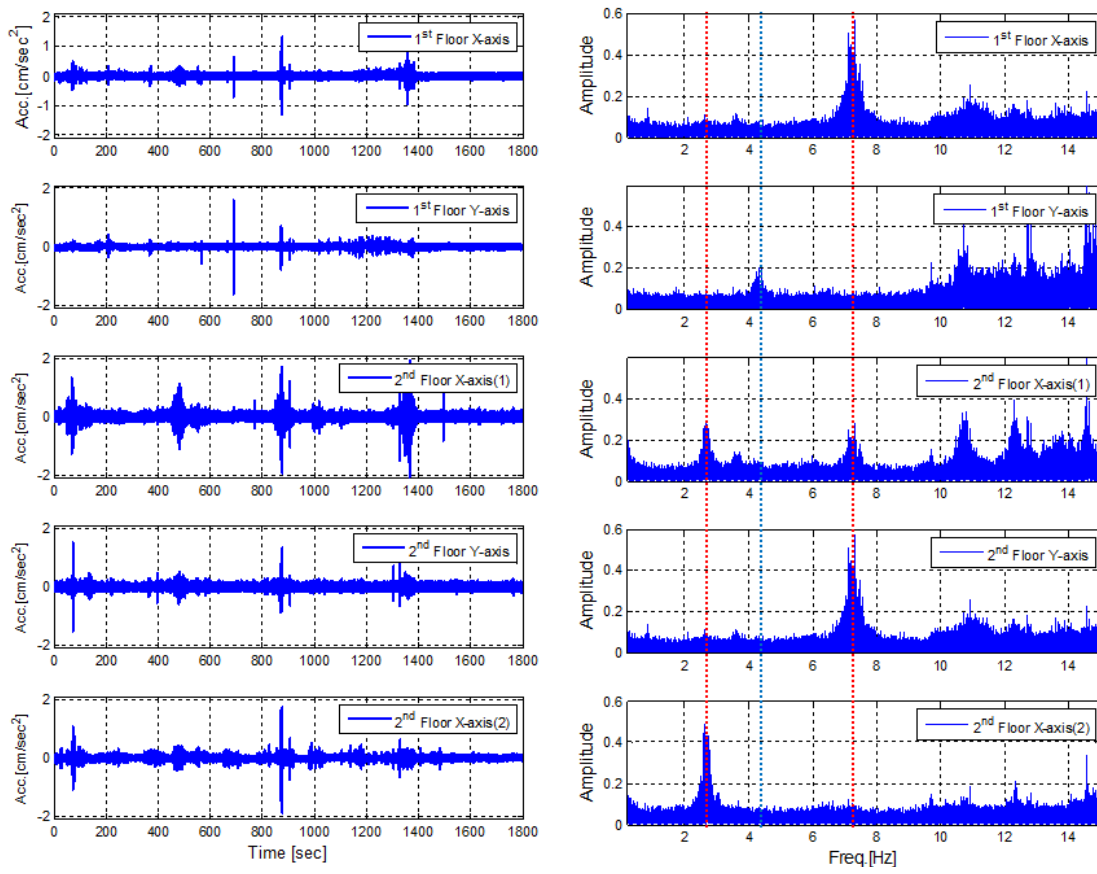


그림 22. 단층부와 복층부의 구분 거동



a. 가속도 응답 시간이력

b. 주파수 응답

그림 23. 시공 및 성능테스트동 미진동 실험 결과

(3) 전통한옥 성능 테스트동

가) 상시미진동 실험

상시미진동 계측을 통해 X, Y방향의 1차모드 고유진동수가 4.04Hz로 동일하게 나타났다. 이를 각 계측 결과에 대한 FFT 증폭비를 통해 확인한 결과, 아래의 그림과 같은 방향으로 1차모드가 있음을 확인하였다.

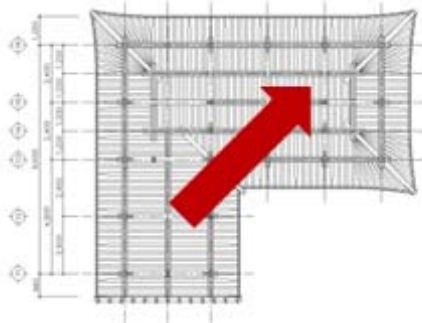
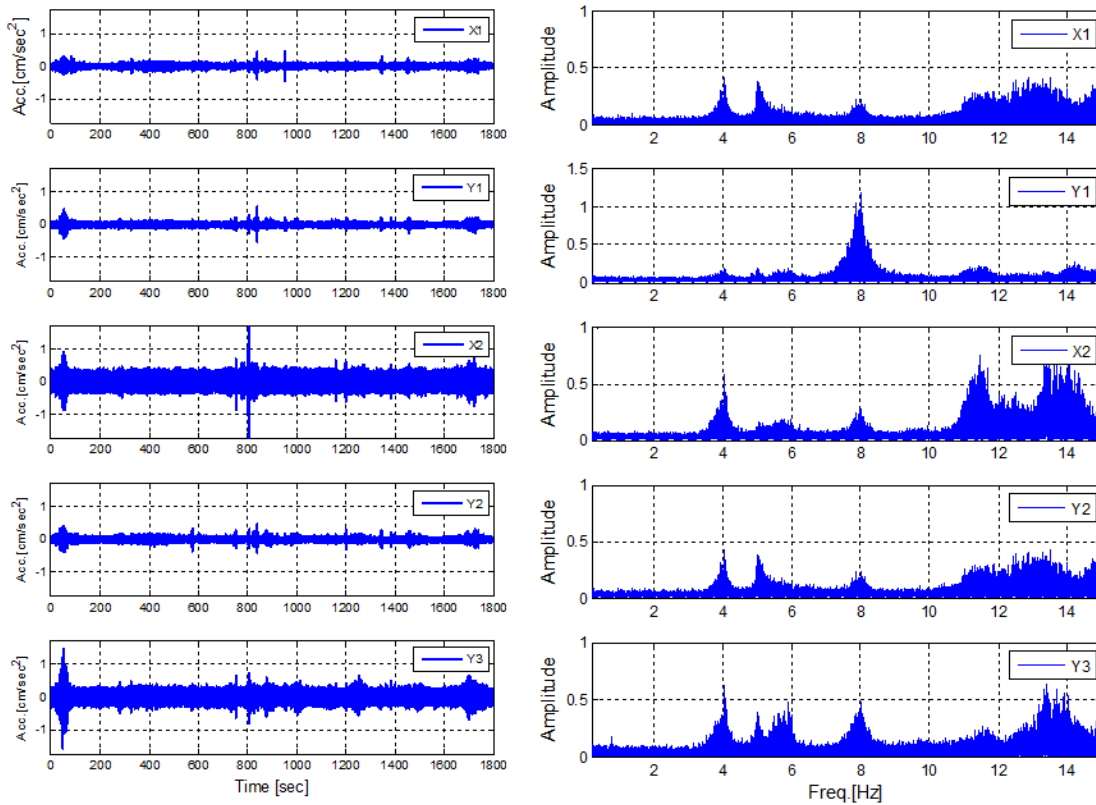


그림 24. 전통한옥 1차모드 진동방향



그림 25. 해머임팩트실험



a. 가속도 응답 시간이력

b. 주파수 응답

그림 26. 전통한옥 상시미진동 실험 결과



## 5) 소결

실험한옥에 대하여 상시미진동 실험, 인력가진 실험 그리고 충격하중 실험을 수행하고, 시험을 통해 확인한 사항은 다음과 같다.

부위별 성능테스트동은 X방향 고유진동수가 8.5Hz, Y방향 고유진동수가 10.84Hz로 구조물의 질량은 같으므로 Y방향으로 강성이 더 크다는 것을 확인하였다. 시공 및 성능테스트동은 단층부와 복층부가 다소 다른 고유진동수를 보이므로 두 구조물이 일체화되지 않는 거동을 나타낸다. 그러므로 단층부 혹은 복층부를 개별적으로 분석해야 하나 현실적으로 해체가 불가능하므로 축소시험체를 통한 분석이 필요하다. 마지막으로 전통한옥동은 비대칭형태이기는 하나 구조물이 일체로 거동하였으며, 건물의 대각선 방향으로 1차 모드가 나타났다.

## 1.2 전통한옥 및 실험한옥 소규모 시험체(1/15 스케일) 진동실험보고서

### 1) 전통한옥 소규모 시험체(1/15 스케일) 동특성평가

#### (1) 실험개요

전통한옥의 경우 접합부를 맞춤과 이음으로 접합하고, 지붕에 보토, 적심, 기와 등으로 인해 지붕하중이 커지게 된다. 이는 지붕구조물의 무게가 무거워지게 되며, 지진에 매우 취약한 구조를 이루게 된다. 또한 현대식 접합이 아닌 전통적인 맞춤과 이음의 형식으로 되어있어 지진력에 대해 어떻게 거동이 되는지에 대한 연구가 부족한 것이 현실이다. 이에 본 실험에서는 강릉에 위치하고 있는 오죽헌을 1/15스케일로 제작하여 동적실험을 통해 거동특성을 알아보았다. 동특성 평가는 백색잡음 실험으로 파악된 고유진동수에 맞추어 공진하중 실험, 마지막으로 실제지진하중과 인공지진하중으로 가력 하여 그 응답을 검토하였다.

#### (2) 시험체



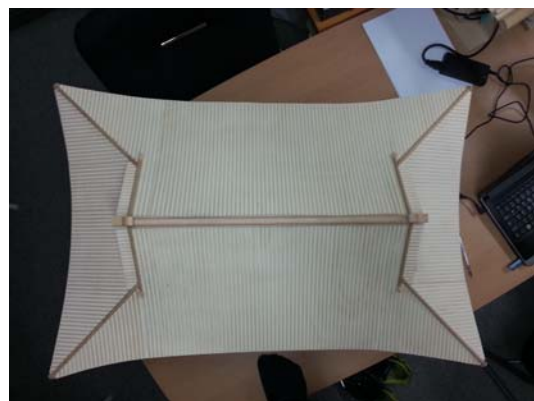
(a) 정면의 모습



(b) 좌측면의 모습



(c) 3차원 모습



(d) 지붕평면의 모습

그림 27. 전통한옥 소규모 시험체(1/15 스케일) 모습

(3) 실험내용

다음은 진동대에 설치된 전통한옥 시험체의 모습이다.

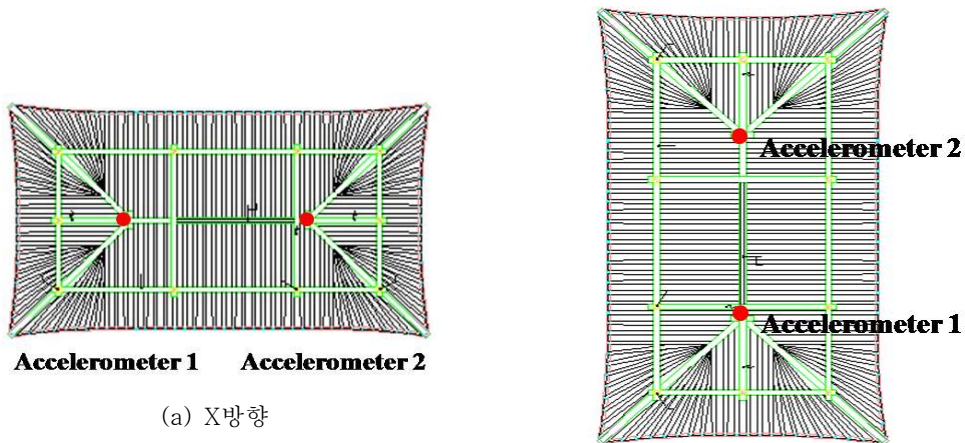


(a) 정면

(b) 입면

그림 28. 전통한옥 소규모 시험체(1/15 스케일)의 진동대에 설치된 모습

다음 그림은 지붕에 설치된 가속도계 센서의 위치이다.



(a) X방향

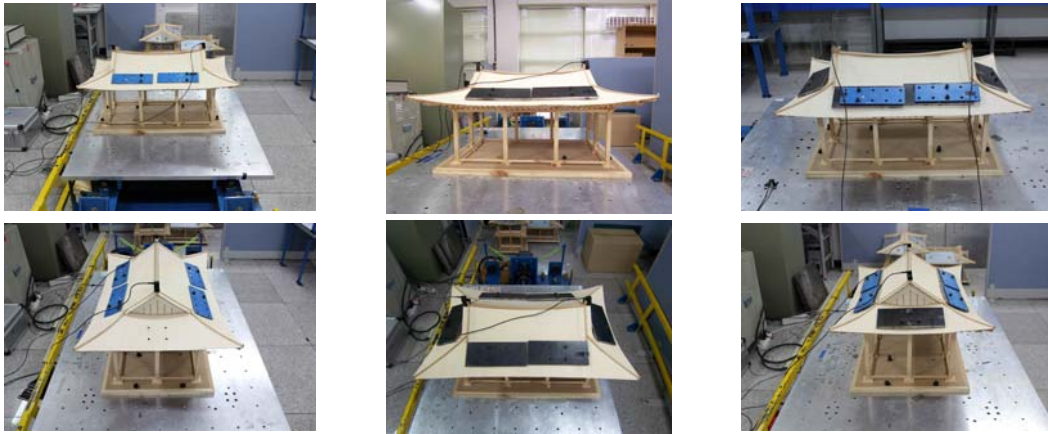
(b) Y방향

그림 29. 전통한옥 소규모 시험체(1/15 스케일)의 가속도계 설치 위치

지붕과 바닥하중 크기에 의한 접합부 강성변화를 알아보기 위해 전통한옥에 추가적으로 하중철판을 적재하면서 실험하였다. 적재하중의 비율은 0.2:1:1.2로 진행하였다.

표 1. 전통한옥 소규모 시험체(1/15 스케일)의 지붕하중 별 실험 케이스

(단위: g)	Case 1	Case 2	Case 3
지붕하중	2.73	11.8	14.21
하중비율	0.2	1	1.2



(a) Case 1

(b) Case 2

(c) Case 3

그림 30. 전통한옥 소규모 시험체(1/15 스케일)의 하중체 적재 모습

(4) 실험결과

가) 가진하중

진동실험에 가해진 하중은 0.7Hz에서 10Hz까지의 진동수 대역을 포함하는 백색잡음이다. 진동대의 가진 용량을 조절하기 위해 입력하는 Gain값의 단위는 Volt이며, 이 Gain값을 조절하여 백색잡음의 크기를 조절한다.

백색잡음의 크기 조절을 위한 Gain값과 진동대에 부착된 가속도계의 계측값을 비교한 결과는 다음과 같다. 아래의 그림은 백색잡음 크기에 따른 가속도 시간이력 해석의 결과이다.

표 2. 전통한옥 소규모 시험체(1/15 스케일)의 백색잡음 입력값과 출력값의 비교

Gain (volt)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
최대가속도 ( $m/s^2$ )	0.5	1.29	1.55	2.0	2.33	2.45

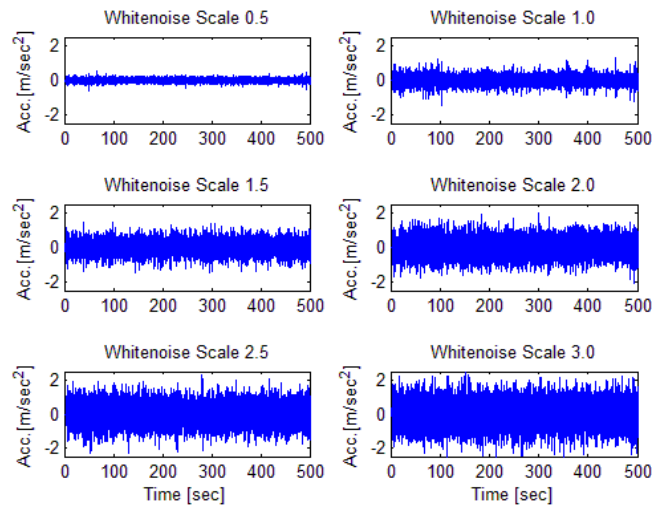


그림 31. 백색잡음 크기에 따른 가속도 시간이력 해석

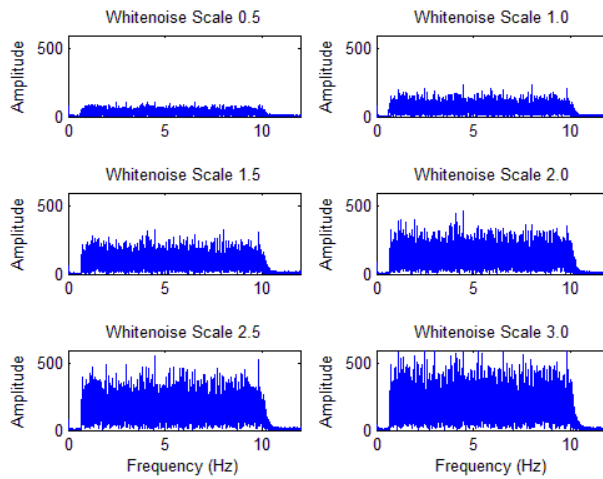


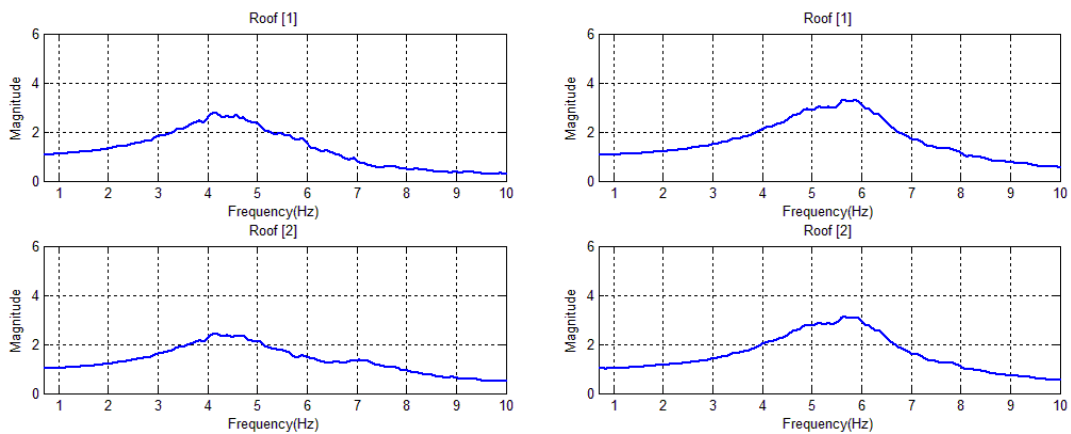
그림 32. 백색잡음 크기에 따른 주파수 분석 결과

위의 그림은 진동대 가속도계에서 측정된 백색잡음 시간이력과 주파수 분석 결과이다. 0.7Hz에서 10Hz까지의 특정 주파수 범위에서 일정한 증폭비를 보이며 크기가 거의 일정하게 분포하는 것을 볼 수 있다

나) 백색잡음 실험 및 분석

전통한옥(Case 2, Gain값 1.0 기준)

아래의 그림과 같이 백색잡음 Gain값이 1일 때, 전통한옥의 X방향 고유진동수는 4.17Hz, 전통한옥의 Y방향 고유진동수는 5.65Hz으로 Y방향의 고유진동수가 더 크게 나타났다. 이는 Y방향의 강성이 더 크다는 것을 나타낸다.



(a) X방향 응답

(b) Y방향 응답

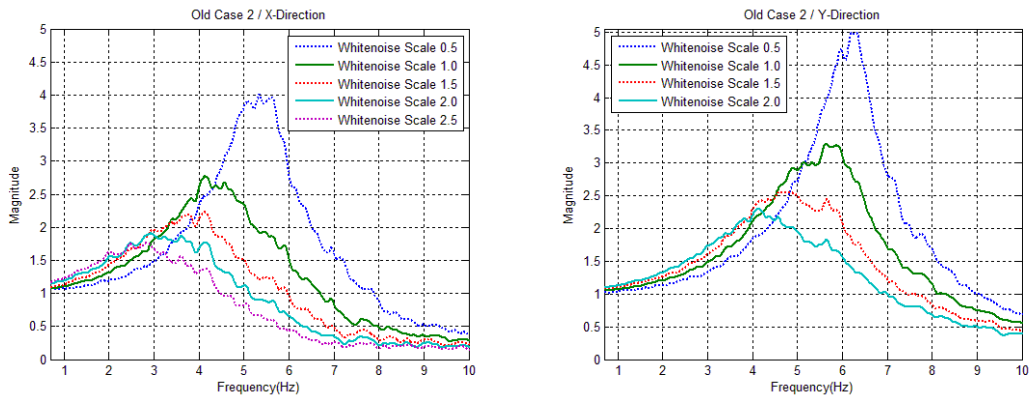
그림 33. 전통한옥의 백색잡음 실험결과

위 그림의 그래프를 표로 정리하였다.

표 3. 계측 위치별 고유진동수

가속도계 번호	1	2
전통한옥 X방향	4.14 Hz	4.18 Hz
전통한옥 Y방향	5.65 Hz	5.65 Hz

아래의 그림에서 백색 잡음의 크기가 커질수록, 고유진동수는 작아지며, 전달함수 값의 최고점(Max Magnitude)도 작아진다. 실험체의 질량은 일정하므로 백색잡음의 크기가 커질수록 시험체의 강성이 작아지고 있다는 것을 알 수 있다. 큰 힘을 받을수록 구조물이 크기 변형되면서 접합부에서 이격이 더 크게 발생한다. 이는 접합부재간의 마찰강성을 감소시키며 결과적으로 구조물 전체의 강성이 작아진다는 추론이 가능하다.



(a) X방향 전달함수 변화

(b) Y방향 전달함수 변화

그림 34. 전통한옥의 백색잡음 실험결과

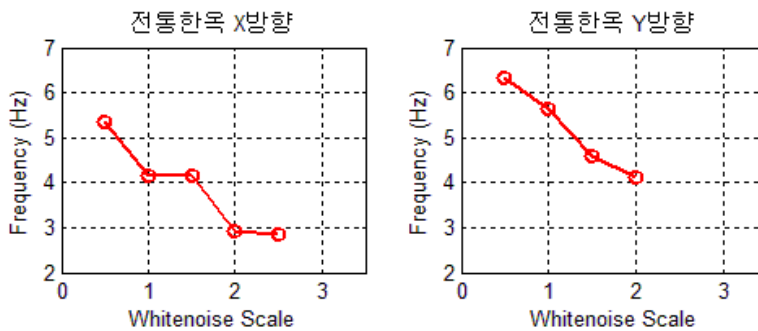


그림 35. 백색잡음 크기에 따른 고유진동수 변화

표 4. 백색잡음 크기에 따른 최대 가속도

(단위 : m/sec<sup>2</sup>)

백색잡음 크기 (volt)	0.5	1	1.5	2	2.5	3
전통한옥 X방향	0.40	0.27	0.21	0.19	0.15	-
전통한옥 Y방향	0.50	0.33	0.26	0.22	-	-

1차적으로 자유진동 파형을 사용한 FFT를 통해 고유진동수를 먼저 확인한 후, 확인된 진동수 영역에 대한 필터링 후 시간이력을 재구성하였다. 아래의 그림은 필터링 이후의 시간이력 형상과 자유진동파형을 사용한 FFT 결과를 타나낸 것이다.

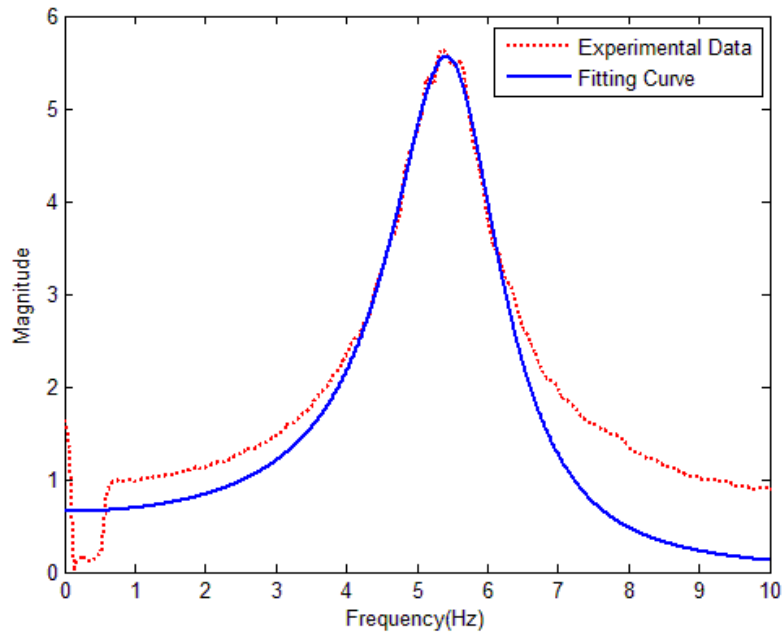


그림 36. 필터링을 통한 전달함수 응답

아래의 그림과 같이 백색잡음의 크기가 커지면 감쇠비도 커지는 것을 확인하였다.

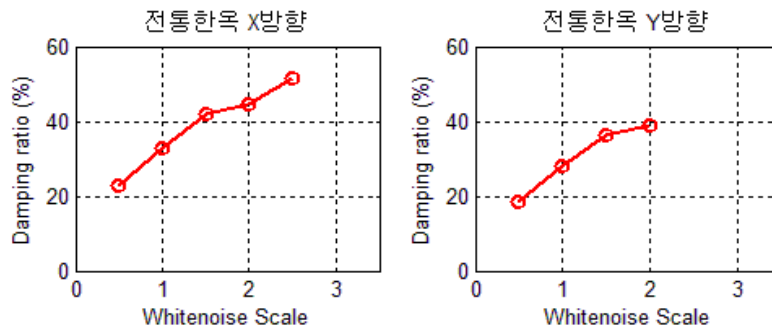
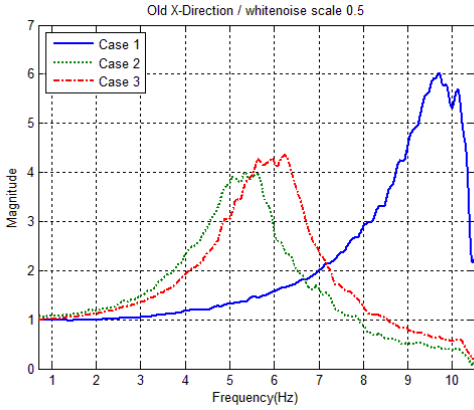


그림 37. 백색잡음 크기에 따른 감쇠비

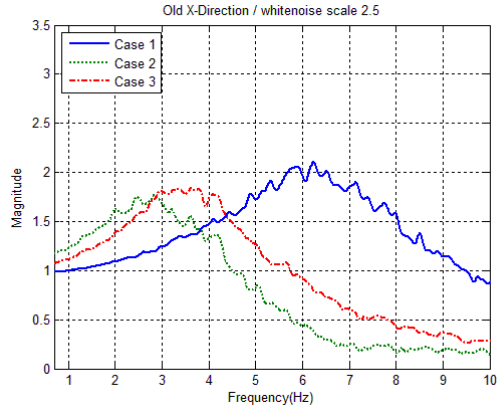


(가) 시험체 무게에 따른 전달함수 분석

① X방향



(a) 백색잡음 크기 0.5 volt



(b) 백색잡음 크기 2.5 volt

그림 38. 시험체 무게에 따른 전달함수 분석

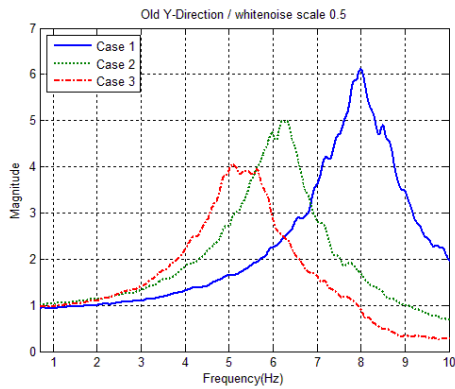
표 5. 적재하중 별 시험체 무게

	Case 1	Case 2	Case 3
골조무게 (g)	3.83	3.83	3.83
1층 지붕하중 (g)	2.73	11.8	14.21
합계 (g)	6.56	15.62	18.04
ratio ( $1/\sqrt{m}$ )	0.42	1	1.15

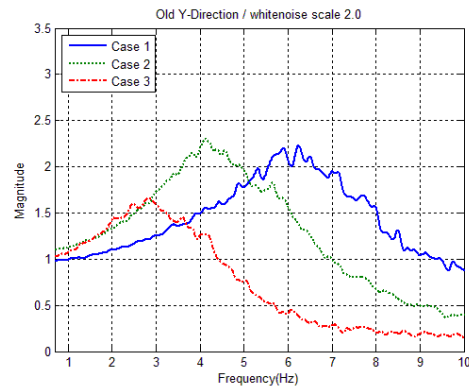
표 6. 적재하중 별 백색잡음 크기에 따른 고유진동수 비교

백색잡음 크기 (volt)	0.5			2.5		
	실험값	이론적 예측값	오차율 (%)	실험값	이론적 예측값	오차율 (%)
Case 1	9.7			6.24		
Case 2	5.35	6.28	-27.31	2.48	4.04	-71.06
Case 3	6.24	5.85	+ 10.19	3.64	3.76	-4.90

②Y방향



(a) 백색잡음 크기 0.5 volt



(b) 백색잡음 크기 2.5 volt

그림 39. 적재하중 별 백색잡음 크기에 따른 전달함수 응답 비교

표 7. 적재하중 별 백색잡음 크기에 따른 고유진동수 비교

백색잡음 크기 (volt)	0.5			2.0		
	실험값	예상값	오차율 (%)	실험값	예상값	오차율 (%)
Case 1	7.99			6.24		
Case 2	6.22	5.18	+ 40.66	4.13	4.05	+ 3.71
Case 3	5.09	4.82	+ 8.3	2.84	3.77	-37.77

## 2) 신한옥 소규모 시험체(1/15스케일) 동특성평가

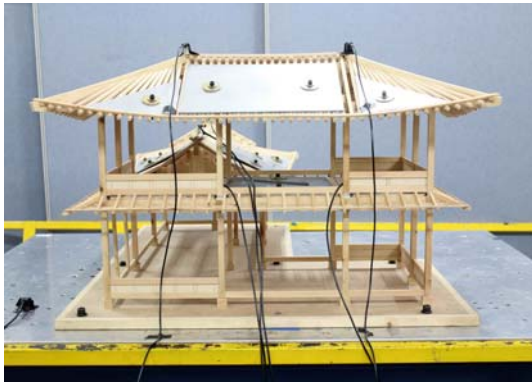
### (1) 실험개요

전통한옥의 접합부는 대부분 맞춤과 이음으로 되어있는 반면, 신한옥의 접합부에 철물에 주로 사용하고 있다. 또한 전통한옥과는 다르게 적심과 보토가 적거는 없고, 전통기와 대신에 새로운 재료와 한식기와의 사용으로 지붕하중의 무게도 많이 줄어들었다.

신한옥 역시 전통한옥과 마찬가지로 지진력에 대해 어떻게 거동되는지에 대한 연구는 부족하다. 이에 현재 명지대학교에 지어져 있는 실험한옥(시공 및 성능 테스트동)을 1/15 스케일로 제작하여 동적실험을 통해 동적거동특성을 알아보았다. 동 특성 평가로는 전통한옥과 마찬가지로 백색잡음하중, 공진하중, 그리고 실제지진하중과 인공지진하중을 가력 하여 그 응답을 검토하였다.

### (2) 시험체

아래 그림은 신한옥 소규모 시험체의 모습이다.



(a) 정면



(b) 측면

그림 40. 신한옥 소규모 시험체(1/15스케일)의 모습

(3) 실험내용

다음은 가속도계 센서의 부착위치이다.

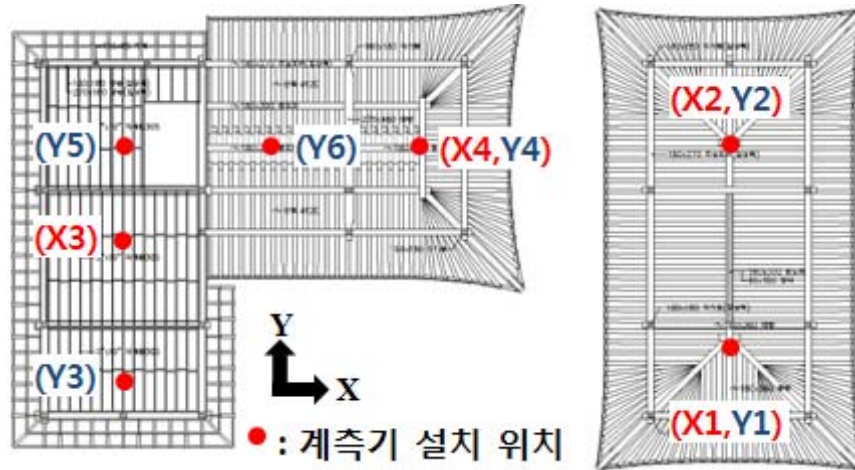


그림 41. 신한옥 소규모 시험체(1/15스케일)의 가속도계 센서의 설치위치

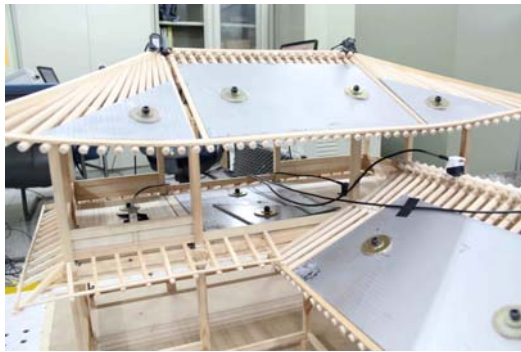
가) 하중체 무게 조정

지붕과 바닥하중 크기에 의한 접합부 강성 변화를 알아보기 위해 신한옥과 전통한옥에 추가적으로 철판을 적재하였다. 신한옥의 하중 비율은 2층 바닥, 1층 지붕, 2층 지붕이 1:2:3이 유지되도록 철판을 적재한다.

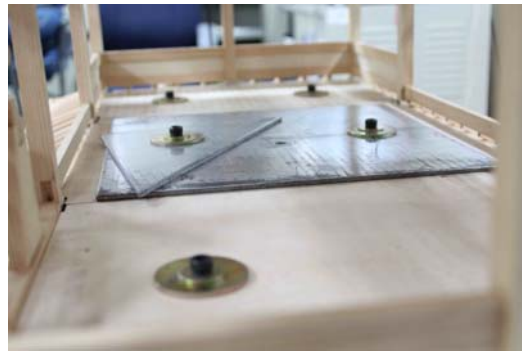
Case 1은 지붕철판 1장, 바닥철판 0.5장, Case 2는 지붕철판 2장, 바닥철판 1장, Case 3는 지붕철판 4장, 바닥철판 2장에 상응하는 하중체를 적재하여, Case별 전체 적재하중의 비율은 0.5:1:1.5가 된다.

표 8. 적재하중 별 하중체 적재 질량

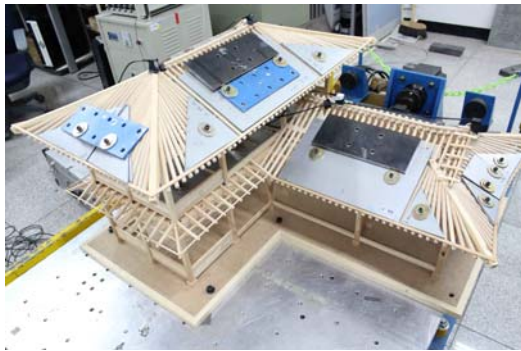
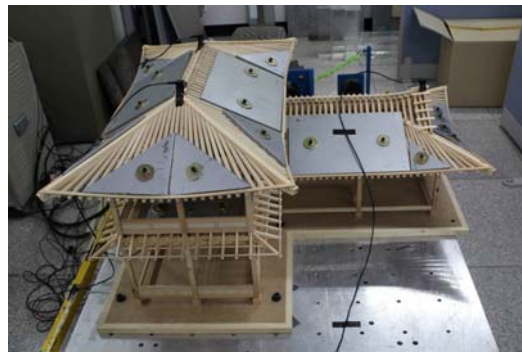
(단위: kg)	Case 1	Case 2	Case 3	ratio
복층부 바닥	2	3.9	6.15	1
단층부 지붕	4.1	8.2	12	2
복층부 지붕	5.9	11.8	18	3
합계	12.1	24	36.2	
ratio	0.5	1	1.5	



(a) Case 1



(b) Case 1



(c) Case 1

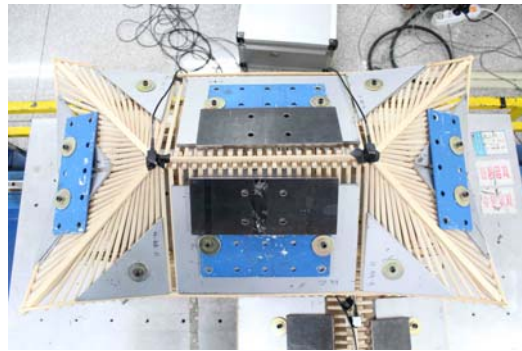


그림 42. 적재하중 별 시험체 모습

(4) 실험결과

가) 가진하중

진동실험에 가해진 하중은 0.7Hz에서 10Hz까지의 진동수 대역을 포함하는 백색잡음이다. 진동대의 가진 용량을 조절하기 위해 입력하는 Gain값의 단위는 Volt이며, 이 Gain값을 조절하여 백색잡음의 크기를 조절한다.

백색잡음의 크기 조절을 위한 Gain값과 진동대에 부착된 가속도계의 계측값을 비교한 결과는 다음과 같다.

표 9. 신한옥 소규모 시험체(1/15 스케일)의 백색잡음 입력값과 출력값의 비교

Gain (volt)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
최대가속도 ( $m/s^2$ )	0.5	1.29	1.55	2.0	2.33	2.45

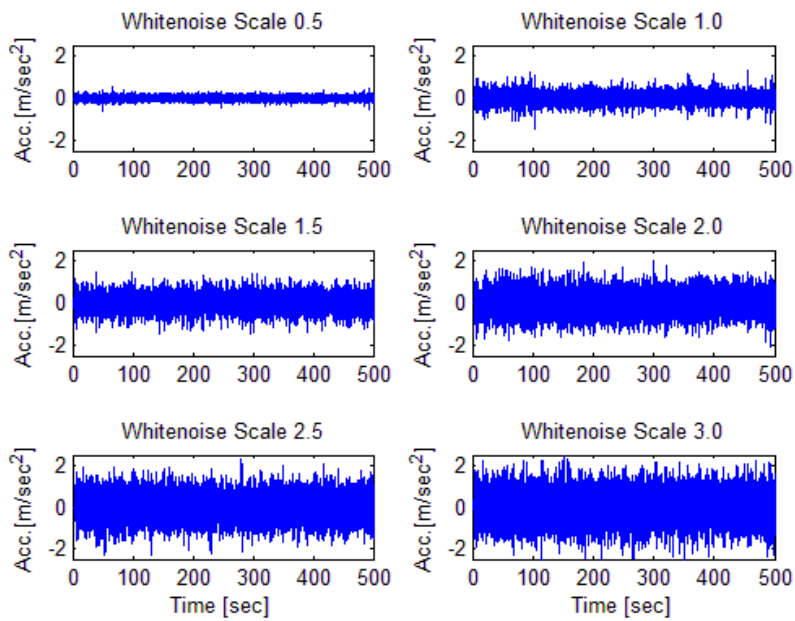


그림 43. 백색잡음 크기에 따른 가속도 시간이력 해석

다음의 그림은 진동대 가속도계에서 계측된 백색잡음 시간이력과 주파수 분석결과이다. 같이 0.7Hz에서 10Hz까지의 특정 주파수 범위에서 일정한 증폭비를 보이며 크기가 거의 일정하게 분포하는 것을 볼 수 있다.

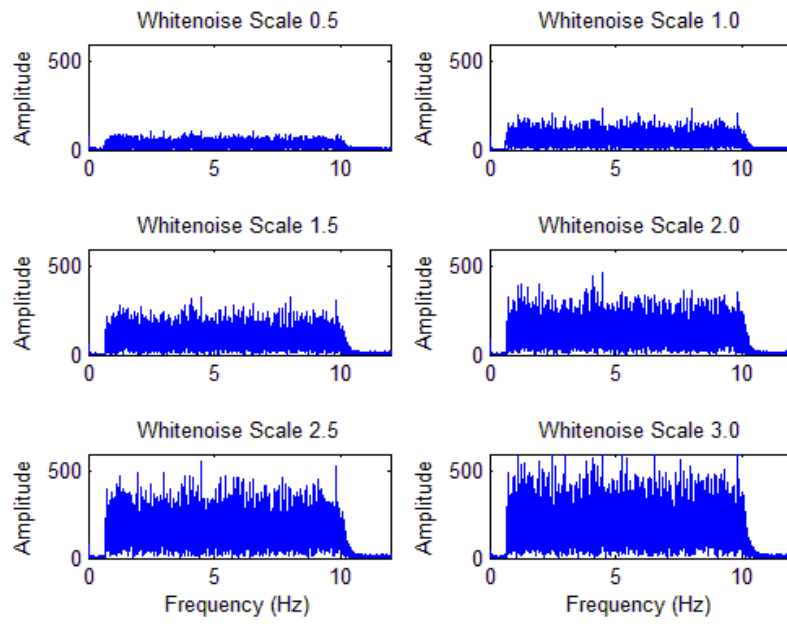


그림 44. 백색잡음 크기에 따른 주파수 분석 결과

나) 백색잡음 실험 및 분석

(Case 2, Gain값 1.0 기준)

아래의 그림은 진동대 가속도와 구조물의 각 위치에서 계측된 가속도 사이의 전달함수를 나타낸 그래프이다. 신한옥의 X방향 동적응답을 분석한 결과, 복층부 지붕과 단층부 지붕 그리고 복층부 바닥 모두 약 5.96Hz의 같은 고유진동수 성분이 나타났으나, Y방향의 경우 단층은 5.96Hz, 복층은 6.22Hz로 단층과 복층의 고유진동수가 다른 것이 확인되었다. 또한 단층부 지붕(가속도계 4번, 6번)에서 1차 모드 이외의 모드가 계측되었으며 이는 단층 한옥이 1차적으론 복층부와 같은 진동수로 진동하면서도 또 다른 모드(2차 모드)로 거동한다.

특히 4번 가속도계에서의 2차 모드 증폭비가 크며, 백색잡음 Gain값이 1일 때, 전통한옥의 X방향 고유진동수는 4.17Hz, 전통한옥의 Y방향 고유진동수는 5.65Hz으로 Y방향의 고유진동수가 더 크며, 이는 Y방향으로 거동 시 구조물의 강성이 더 크다는 것을 나타낸다.

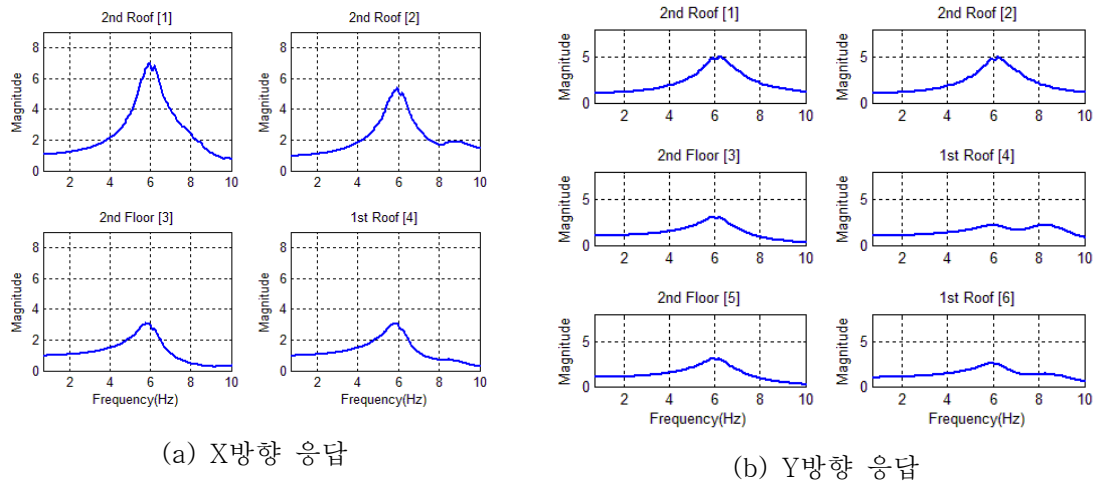


그림 45. 신한옥의 백색잡음 실험결과

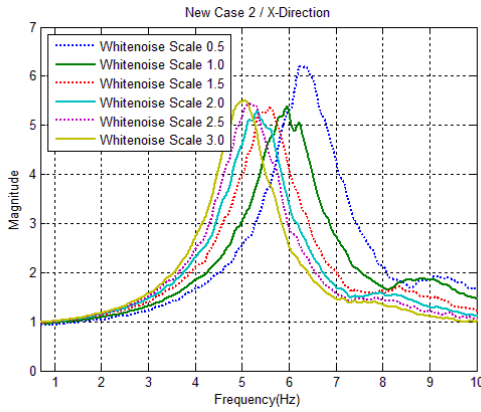
표 10. 계측 위치별 고유진동수

가속도계 번호	1	2	3	4	5	6
신한옥 X방향	5.963	5.955	5.938	5.938	-	-
신한옥 Y방향	6.219	6.219	5.953	5.955	5.953	5.949

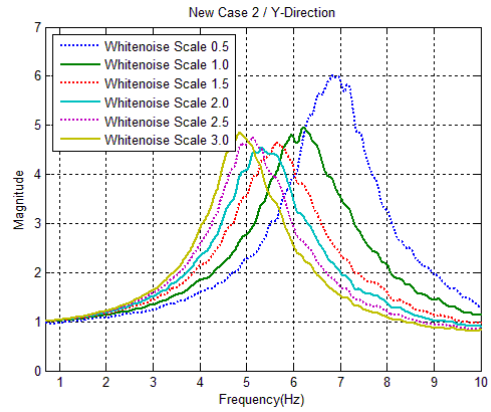


(가) 백색잡음 크기에 따른 전달함수 분석

- 신한옥 X방향 (Case 2 기준)



(a) X방향 전달함수 변화



(b) Y방향 전달함수 변화

그림 46. 신한옥의 백색잡음 실험결과

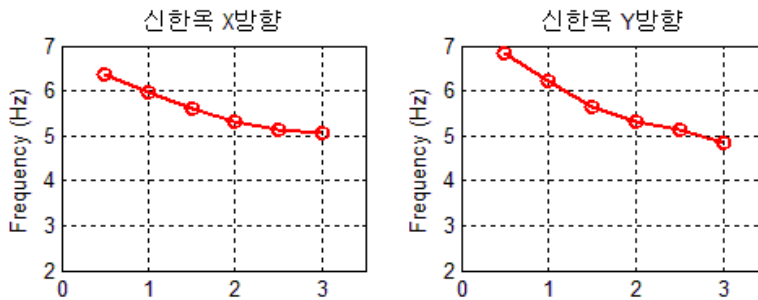


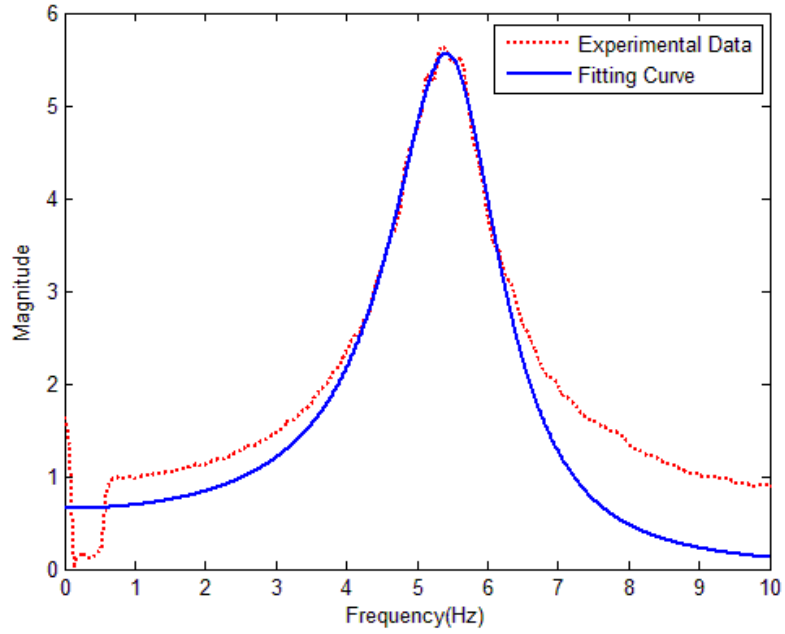
그림 47. 백색잡음 크기에 따른 고유진동수 변화

백색잡음의 크기가 커질수록 고유진동수는 작아지며 전달함수 값의 최고점(Max Magnitude)도 작아진다. 실험체의 질량은 일정함으로 강성이 작아지고 있다는 것을 알 수 있다. 큰 힘을 받을수록 구조물의 변위가 크게 변화하면서 접합부에서의 이격이 발생한다. 이는 접합부재간의 마찰강성을 감소시키며 결과적으로 구조물 전체의 강성이 작아지게 된다는 추론이 가능하다. 접합부의 마찰강성은 지붕하중, 바닥하중과 연관이 있으며 접합부에 수직력을 가하고 있는 지붕하중과 바닥하중이 클수록 접합부의 마찰강성은 증가할 것이란 예상이 가능하다.

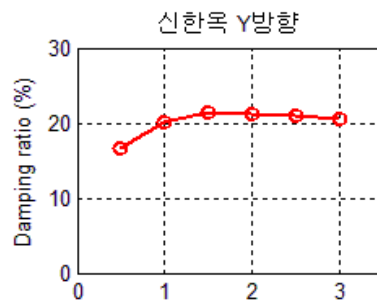
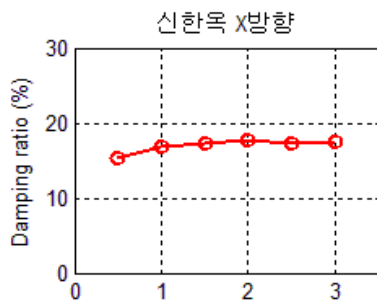
- 감쇠비 분석결과

전달함수 분석 결과를 통해 확인된 주파수 영역의 곡선에 대한 곡선맞춤(Curvefitting) 방법을 이용해 감쇠비를 구한다. 곡선 맞춤을 위해 산정하는 주파수 응답의 증폭을 의미하는 동적응답증폭계수를 사용하여 임의의 곡선을 생성한 후, 비교하고자 하는 곡선

과의 비교를 통해 그 차가 가장 작은 것을 사용한다. 분석을 위해 Matlab함수 중 lsqcurvefit함수를 사용하였다.



백색잡음 크기 (volt)	0.5	1	1.5	2	2.5	3
신한옥 X방향	0.153	0.168	0.173	0.176	0.172	0.174
신한옥 Y방향	0.166	0.202	0.215	0.213	0.210	0.206

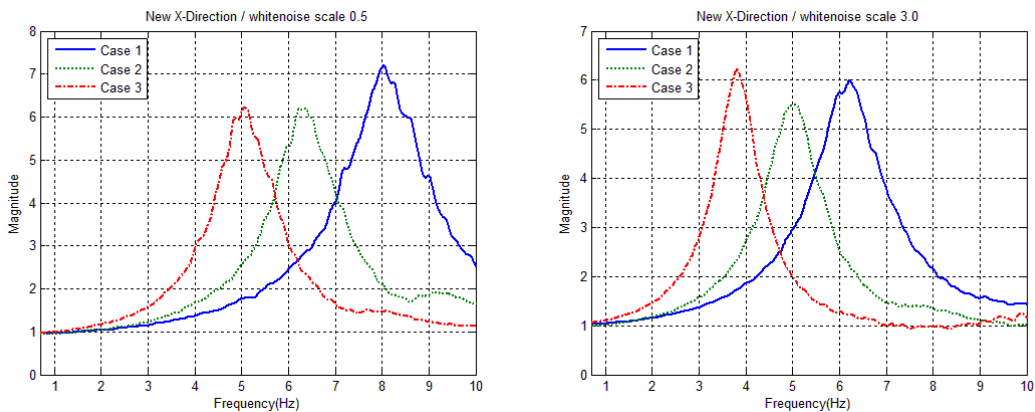


(나) 실험체 무게에 따른 전달함수 분석

백색잡음의 크기가 0.5일 때와 3.0일 때의 실험체 무게별 전달함수를 나타낸 그래프이다. 실험체 무게는 Case 1, Case 2, Case 3 순으로 증가한다. 실험체 무게가 무거울수록  $f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$  의 식과 같이 고유진동수는 작아지는 경향을 보인다.

다음 표는 Case 1(실험체 하중이 가장 작은 경우)과 비교해 Case 2, Case 3 각각의 추가된 하중값을 적용하여  $f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$  식에 의해 추론할 수 있는 Case 2와 Case 3의 고유진동수 예상값을 나타낸 표이며, 예상값과 실험값과의 오차율을 계산하였다. 오차율의 부호가 + 라면, 이는 추가된 하중이 고유진동수를 감소시키지만, 추가된 하중의 영향으로 증가한 마찰강성으로 인해 고유진동수가 감소하는 정도가 작다는 것을 의미한다.

① X방향



(a) 백색잡음 크기 0.5 volt

(b) 백색잡음 크기 3.0 volt

그림 48. 실험체 무게에 따른 전달함수 분석

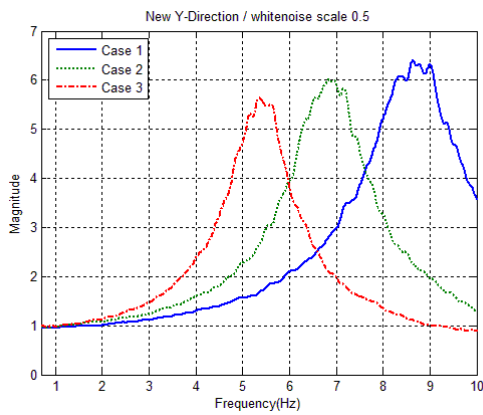
표 12. 적재하중 별 백색잡음 크기에 따른 고유진동수 비교

(단위: kg)	Case 1	Case 2	Case 3
골조무게	3.4	3.4	3.4
추가하중	12.1	24	36.2
합계	15.45	27.45	39.62
ratio ( $1/\sqrt{m}$ )	0.56	1	1.44

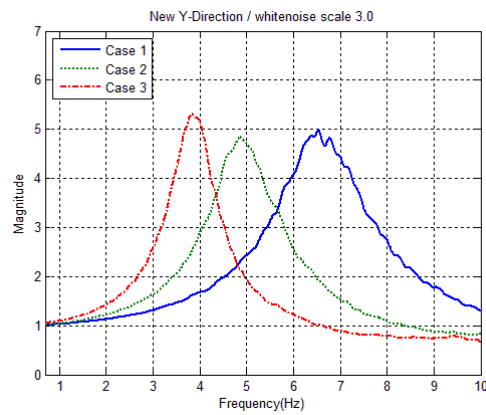
표 13. 적재하중 별 백색잡음 크기에 따른 고유진동수 비교

백색잡음 크기 (volt)	0.5			3.0		
	실험값	예상값	오차율 (%)	실험값	예상값	오차율 (%)
Case 2	6.36	6.03	+ 16.69	5.07	4.67	+ 25.42
Case 3	5.06	5.02	+ 1.49	3.82	3.89	-3.03

② Y방향



(a) 백색잡음 크기 0.5 volt



(b) 백색잡음 크기 3.0 volt

그림 49. 시험체 무게에 따른 전달함수 분석

표 14. 적재하중 별 백색잡음 크기에 따른 고유진동수 비교

백색잡음 크기 (volt)	0.5			3.0		
	실험값	예상값	오차율 (%)	실험값	예상값	오차율 (%)
Case 2	6.84	6.48	+ 16.55	4.85	4.91	-3.51
Case 3	5.35	5.40	-1.42	3.84	4.08	-9.96

### 3) 소결

실험한옥 및 전통한옥의 1/15 크기 축소시험체의 진동대 실험을 통해 확인한 사항은 다음과 같다.

가진하중의 크기가 증가할수록 고유진동수가 감소하였다. 이는 접합부의 이음과 맞춤에서 이격이 더 크게 발생하여 접합부 강성이 이에 비례하여 감소된다고 추론할 수 있다.

신한옥은 백색잡음의 크기가 증가할수록 감쇠비의 증가폭이 작은 반면, 전통한옥은 감쇠비가 크게 증가하는 것을 보였다. 이는 전통 접합부에서의 부재 간 마찰에 의한 에너지 소산능력이 철물로 된 신한옥 접합부보다 큰 것으로 사료된다.

접합부 마찰특성을 고려한 구조해석 모델링으로 구조물의 비선형 거동을 모사한 결과 신한옥은 이선형 모델만으로 거동이 모사되는 반면, 전통한옥은 추가적으로 발생하는 마찰력까지 고려해야 유사한 거동을 모사할 수 있었다. 이는 접합부에서 미끄러짐이 발생하고 이것이 구조물의 동적거동에 큰 영향을 준 것으로 판단된다.

본 실험은 시험체 제작에 있어서 벽체 등 비구조요소를 고려하지 못하였고 축소시험체의 상사법칙에 맞는 하중재하를 하지 못하여 실물 한옥과는 다소 다른 결과를 도출할 수밖에 없는 한계가 있다.

### 1.3 실험한옥 대규모 시험체(1/4 스케일) 정적 및 동적실험 보고서

#### 1) 실험개요

실험한옥의 상재하중과 가진 크기에 따른 동적응답특성을 분석하기 위하여 1/4 대규모 축소 시험체를 제작하여 정적가력 및 다양한 진동대 실험을 수행하였다.

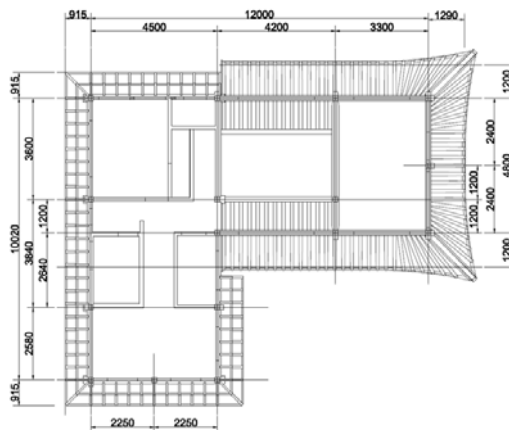
본 실험을 통해 실험한옥의 고유진동수 및 감쇠비를 추출하여 동적특성을 파악한 후 접합부 강성을 도출하고자 한다. 실험한옥의 동적특성을 바탕으로 구조해석모형을 구축하고, 주거용 한옥의 내진설계의 기초자료로 활용한다.

#### 2) 실험계획

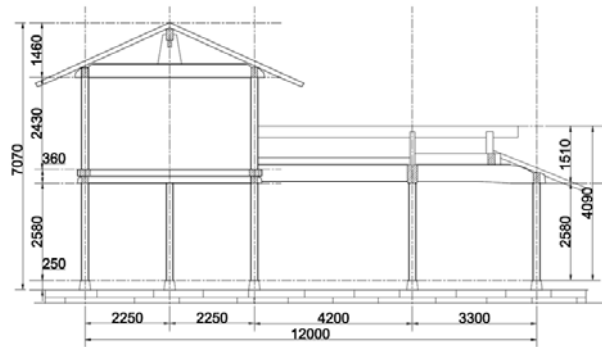
##### (1) 실험체 계획

접합부 특성에 따른 구조성능을 검토하기 위한 실험체는, 선행 연구를 위해 명지대학교 내에 제작한 시공 및 성능 테스트동(이하 신한옥)을 모델로 하였으며, 아래의 그림과 같이 ‘ㄱ’자 형태의 평면형태를 가지며, 총 2층 높이의 구조물로 단층부와 복층부로 나누어져 있다.

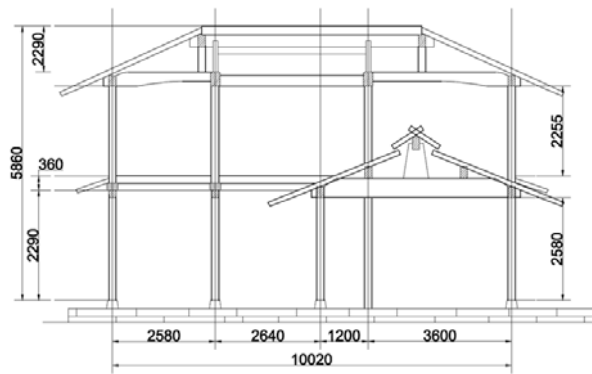
실험체의 정확한 구조성능을 판단하기 위해서는 실물과 동일하게 제작한 상태에서 실험을 수행하는 것이 합리적이거나, 실험동의 규모 및 기기의 한계에 의해 실제 구조물의 구조 및 동적 특성을 고려한 축소모형을 사용한 실험을 수행하였다. 실험체의 축소 방법은 상사법칙에 따라 부재의 규모 및 크기 등을 축소하며, 본 실험체는 1/4 크기로 축소하였다. 이러한 축소모형에서도 주요 실험 변수인 접합부 강성을 동일하게 모사하기 위하여 실제 구조물과 동일하게 목재는 집성목을 접합부는 철물접합으로 제작하였다.



(a) 평면도



(b) 횡단면도



(c) 종단면도

그림 50. 시공 및 성능테스트동 평면도

(2) 시험체 제작과정

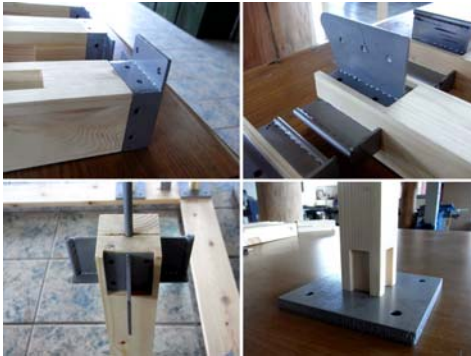
시험체를 치목한 후 부재에 맞는 접합부 철물을 제작하여 전체를 조립하였다. 본 1/4 시험체는 서까래 대신 하중체를 이용하여 하중을 재하 할 수 있도록 하중체 함을 단층 지붕 및 복층 지붕에 설치하였다. 또한 복층 바닥에도 하중체 함을 제작하였다. 시험체는 제작소에서 모두 조립하여 실험동으로 옮긴 후 슬라이딩 테이블에 고정하였다.



(a) 1/4축소 시험체 치목



(b) 접합부 철물



(c) 철물 접합부 조립



(d) 부재 조립



(e) 토대 및 1층 기둥 조립



(f) 전체 골조 조립





(g) 단층부 하중함 조립



(h) 복층부 하중함 조립

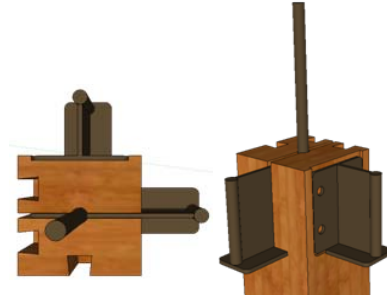
그림 51. 1/4 대규모 축소 시험체 제작과정

(3) 접합부 특성

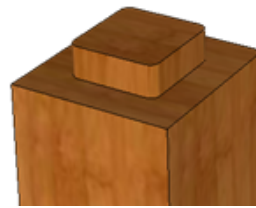
제작한 실험체의 접합부는 기존 한옥의 전통적인 접합방식과 유사하나, 추가적으로 목재에 홈을 파고 철물을 목재에 끼우는 방식을 사용하였다. 이러한 접합방식으로 제작한 접합부는 전단접합과 모멘트접합의 중간에 속한다고 볼 수 있다.



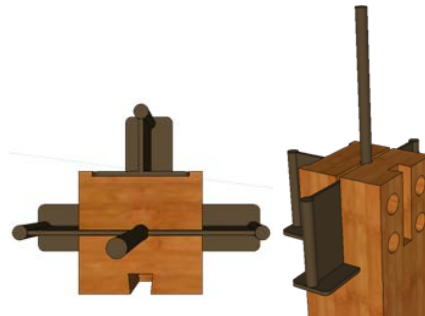
(a) 1층 내부 모서리 기둥



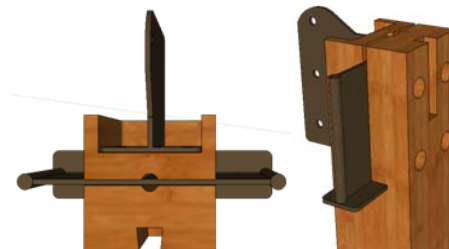
(b) 내부 기둥



(c) 외부 중간기둥



(c) 대들보와 연결된 외부 중간기둥





(e) 2층 기둥



(f) 창방 및 평방 접합



(g) 대들보 접합

그림 52. 시공 및 성능 테스트동 접합부

(4) 상재하중

시험체의 축소비율에 맞춘 상재하중을 재하하기 위하여 상사법칙을 적용하였다. 3/3 시험체(Load case3)는 상사법칙이 적용된 무게이며, 상재하중을 줄여가며 하중에 따른 강성 변화를 살펴보고자 하였다. 상재하중은 하중철판을 복층 지붕, 단층 지붕 및 복층 바닥에 재하 하였다. 하중철판의 규격과 무게는 아래와 같다.

규격 : 250mm×400mm×10mm

무게 : 70.56N(7.195kg)

하중재하는 총 3단계로 구분하였다. 상사법칙을 적용한 하중은 전체하중을 재하한 것으로 3/3시험체(Load case1)이고 전체하중의 2/3를 재하한 경우는 2/3시험체(Load case2)이다. 마지막으로 전체하중의 1/3을 재하한 경우는 1/3시험체(Load case1)로 정의하였다. 상사법칙을 적용한 3/3시험체는 총 562개의 하중체를 재하 하였으며, 그 무게는 총 39,654.7N이다. 하중체는 1층 및 2층 지붕과 2층 바닥하중에 균등하게 분배하여 적용하였다.

표 15. 각 하중별 하중체 무게 및 개수

	1/3시험체	2/3시험체	3/3시험체
1층지붕 (N)	4,445.3	8,890.6	13,406.4
2층지붕 (N)	6,213.6	12,418.6	18,627.8
2층바닥 (N)	2,540.2	5,080.3	7,620.5
하중체 개수	187개	374개	562개
총 무게 (N)	13,199.0	26,389.4	39,654.7



그림 53. 하중체 합 및 하중체 재하

### 3) 실험한옥 대규모 시험체 정적 실험

#### (1) 실험 개요

실험한옥 정적가력 실험 목적은 지붕하중 크기(상재하중)에 따른 수평변위로부터 접합부 강성증대 효과를 분석하기 위함이다. 또한 형태의 대칭, 비대칭성에 따른 건물의 특성을 확인하고 강성에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 이를 위하여 전체 시험체 및 복층부 시험체를 각각 가력 하여 실험하였다.

가력변위의 범위는 각 하중별로 10mm, 15mm, 20mm이며 시험체에 동등한 힘을 주어 가력하기 위하여 가력프레임을 설치하였다. 변위는 액추에이터의 변위계로 측정하였다.

#### (2) 실험 환경

##### 가) 슬라이딩 테이블

슬라이딩 테이블에 시험체를 놓아 두 개의 액추에이터로 시험체를 가력 하였다.

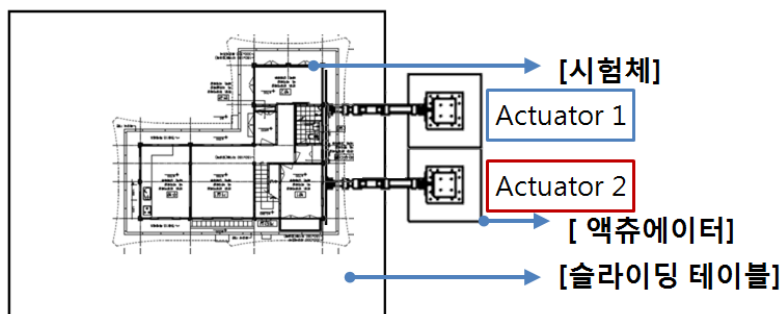


그림 54. 실험 환경(슬라이딩 테이블)

액추에이터는 시험체를 직접 가력하며 변위는 액추에이터의 변위계로 측정하였다.

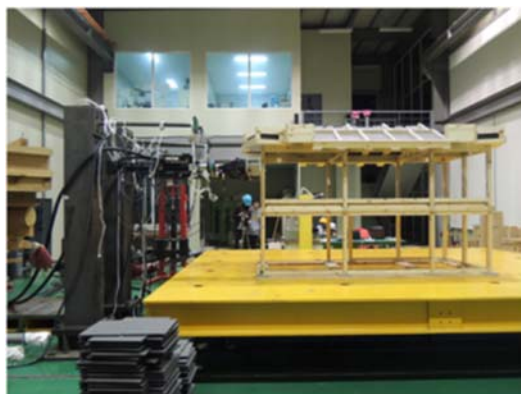


그림 55. 정적가력 액추에이터

나) 정적가력 위치

가력의 위치는 2층 기둥에 가력프레임을 수평으로 설치하고 연결지그를 이용하여 액츄에이터와 가력 프레임을 연결하였다. 가력프레임을 설치한 이유는 제한된 2개의 액츄에이터로 시험체를 동일하게 가력하기 위함이다. 가력프레임의 단면은 150X150X7/10의 H형강을 사용하였다. X방향 가력 프레임의 길이는 2,750mm이고, Y방향 가력 프레임의 길이는 1,700mm이다. 가력 프레임은 다음 아래의 그림과 같다.

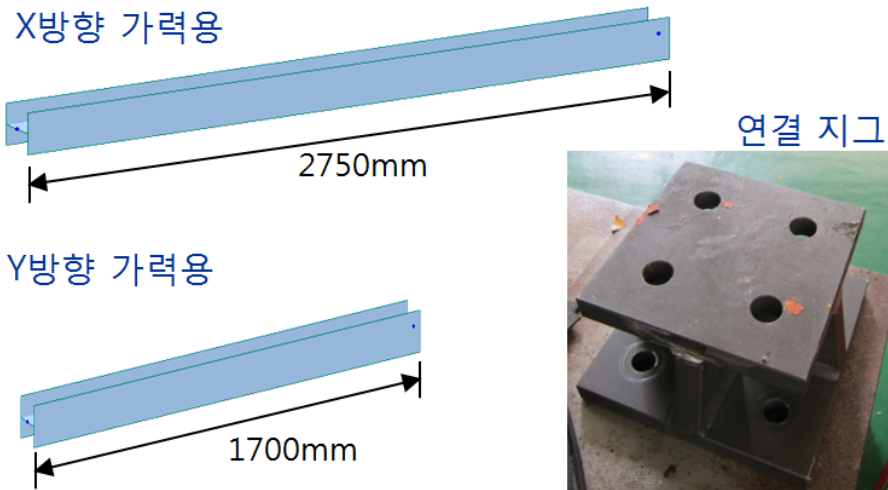
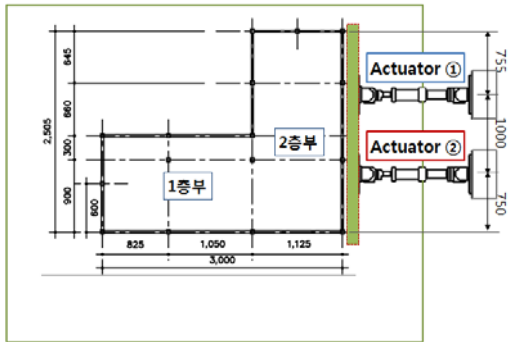


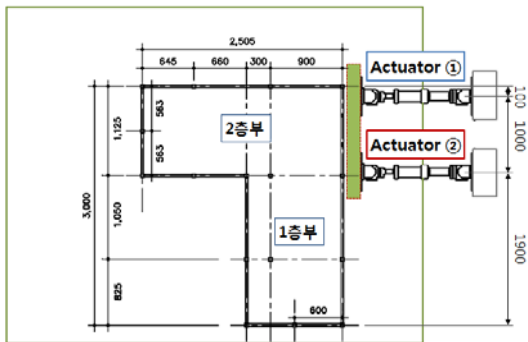
그림 56. 가력용 프레임 및 연결 지그



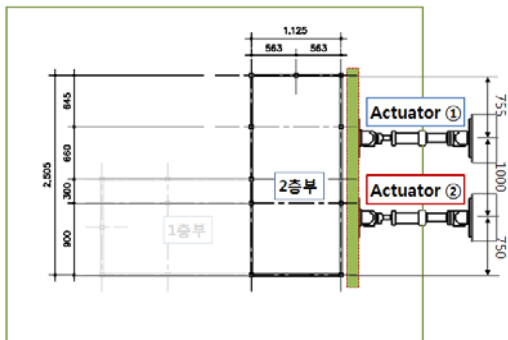
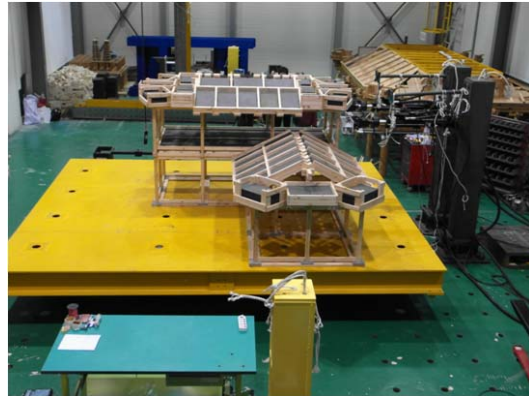
그림 57. 가력프레임 설치 및 가력 모습



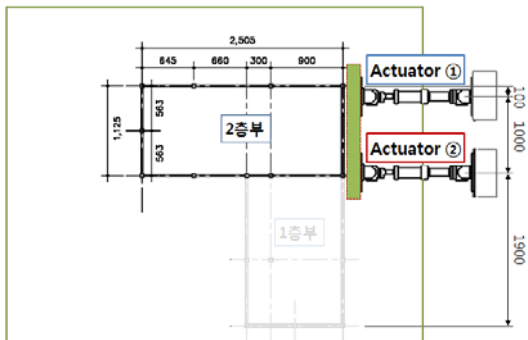
(a) 전체 시험체 X방향 가력



(b) 전체 시험체 Y방향 가력



(c) 복층부 시험체 X방향 가력



(d) 복층부 시험체 Y방향 가력

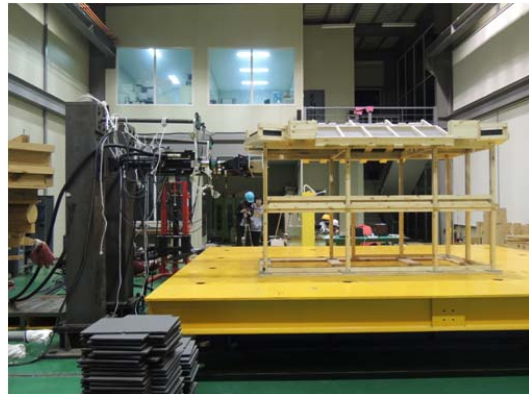


그림 58. 시험체별 액츄에이터 정적가력 위치

(3) 실험방법

가) 가력방법

시험체가 비대칭 평면이기 때문에 직접적으로 하중을 가할 시 동일한 힘으로 가력이 되지 않는 문제점을 예방하기 위하여 시험체에 가력보를 설치하였다. 철골프레임은 볼트접합을 이용하여 액츄에이터와 연결하였다. 액츄에이터의 총용량은 50,000N이다. 가력위치는 복층부 기둥이며 지면에서 1450mm 높이이다. 변위제어 방식으로 가력 하였다. 전체 시험체와 복층부 시험체의 상재하중을 변화시키고 각 상재하중에 10, 15, 20mm로 변위제어방식으로 가력 하였다.

나) 측정방법

전체 시험체 및 복층부 시험체에 각 상재하중 마다 X, Y방향으로 10, 15, 20mm씩 가력 하였다. 변위는 액츄에이터로 측정하였으며 변위에 따라 가력 힘을 측정하였다. 액츄에이터에서의 가력 변위에 따른 작용력을 액츄에이터에 연결된 장비를 통하여 측정하였다.

다) 분석방법

액츄에이터의 변위제어를 통하여 가력 힘을 측정하여, 힘과-변위의 관계로부터 강성을 계산하였다. 이를 통해 강성의 전체 흐름을 분석하고, 간략한 골조 모델링을 통해 보-기둥 사이의 강성변화를 확인하였다. 상기 자료를 바탕으로 구조해석 모델링 결과와 비교하여 본 실험한옥의 강성을 산정하였다.

(4) 구조해석 모델링

아래의 그림과 같이 구조해석 모델링은 범용 구조해석 소프트웨어인 midas Gen으로 수행하였다. 실험결과와 비교 분석을 위하여 구조해석 모델링 역시 실물크기의 1/4로 모델링 하였으며, 시험체와 동일한 부재 요소와 크기로 모델링하였다. 그러나 지붕하중을 재하 하는 방법은 실험과 유사한 방법으로 고려하기 위하여 하중적재함 대신 실물과 유사하게 지붕구조를 모델링하였다.

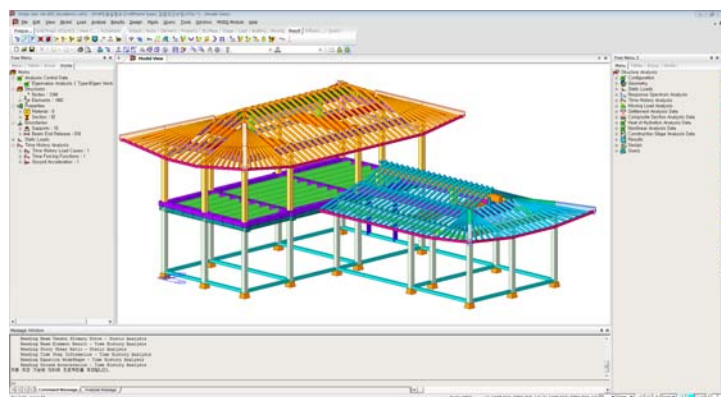


그림 59. 구조해석 모델링



또한 철물 접합은 기둥-보 접합부의 회전강성으로 모델링하였다. 구조해석모델링과 1/4 시험체의 무게를 동일하게 맞추기 위하여 1/4 스케일 시험체의 중량을 계산하여 구조해석 모델링에 부족한 무게는 추가하여 재하 하였다. 추가적으로 재하 한 무게는 다음 표와 같다.

표 16. 추가 재하 무게

하중재하요소	추가 무게(N)
1층 서까래	30.8
2층 서까래	29.1
2층 바닥	29.5
1층 토대	35.6

아래의 그림과 같이 평방과 창방 사이의 연결은 압축력만 받는 연결재를 추가하여 모델링 하여 평방과 창방이 일체로 거동하게 하였다. 또한 서까래와 도리 사이에도 연결재를 두어 압축력만 작용할 수 있게 하였다.

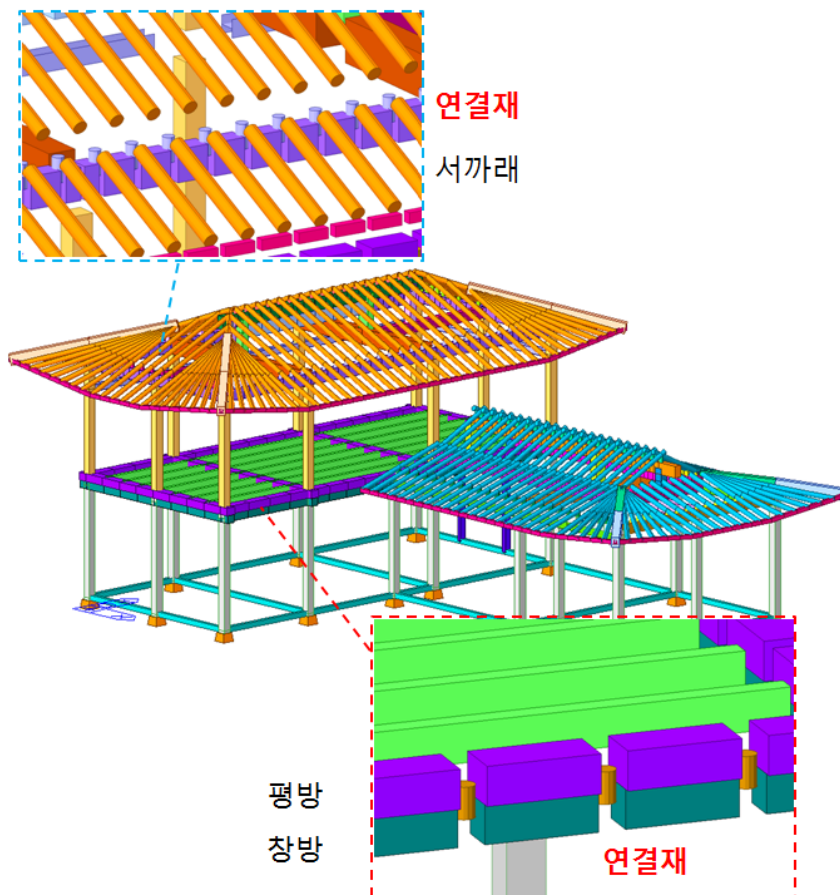


그림 60. 구조해석 모델링 압축 연결재 사용

(5) 실험결과 및 분석

가) 최대 정적가력 힘

(가) 전체 시험체 X방향가력

전체 시험체를 X방향으로 가력 했을 때 각 상재하중과 가력변위에 따른 최대 정적가력 힘은 다음과 같다. 상재하중이 커질수록 최대 가력힘은 증가하지만 전체적으로 큰 차이를 보이지 않는다. 아래의 표에서와 같이 두 개의 액츄에이터를 살펴보면 Actuator 2의 가력 힘이 Actuator 1보다 큰 것을 알 수 있다. 이는 단층부가 연결되어 있는 부분에 더 큰 힘이 가해지는 것을 확인할 수 있다. 가력 변위별로 가력 증가량을 살펴보면 15mm를 가력 할 때보다 20mm를 가력 할 때 가력 증가량이 커진다. 그러나 하중이 커질수록 가력 증가량이 감소하는 것으로 보아, 지붕에 큰 하중이 작용할수록 접합부의 마찰력이 커짐을 예상할 수 있다.

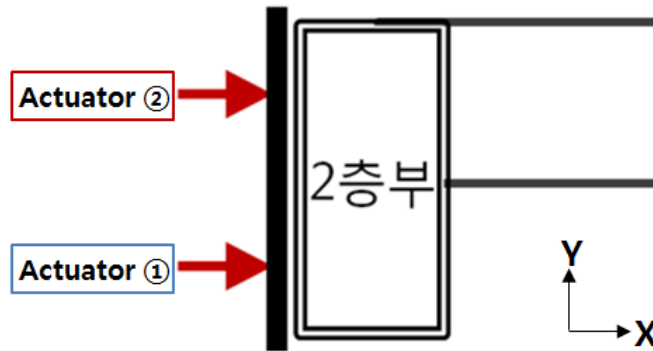


그림 61. 전체 시험체 X방향가력

표 17. 전체 시험체 X방향 가력힘

	목표변위(mm)	Actuator 1(N)	Actuator 2(N)	전체 가력힘(N)	가력 증가량(N)
1/3 시험체	10	630.40	1,059.30	1,689.70	.
	15	837.08	1,444.41	2,281.49	591.79
	20	1,202.83	1,900.72	3,103.55	822.06
2/3 시험체	10	678.50	1,243.17	1,921.67	.
	15	896.63	1,688.22	2,584.85	633.18
	20	1,258.14	2,165.40	3,423.54	838.69
3/3 시험체	10	997.59	1,347.96	2,345.55	.
	15	1,142.98	1,787.15	2,930.13	584.58
	20	1,364.51	2,169.19	3,533.70	603.57

(나) 전체 시험체 Y방향가력

전체 시험체 Y방향의 최대 가력 힘은 전체 시험체 X방향의 최대 가력 힘보다 작다. 전체 시험체 X방향과 조금 다른 점은 가력변위가 커질수록 가력 힘의 증가량이 작아지는 것이다. 이로써 X방향이 Y방향 횡강성이 더 크다고 볼 수 있다.

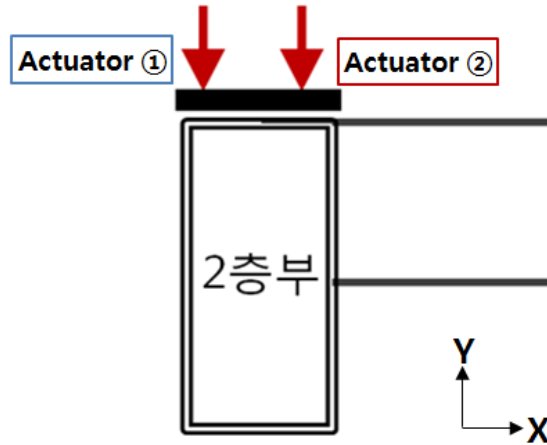


그림 62. 전체 시험체 Y방향가력

표 18. 전체 시험체 Y방향 가력힘

	목표변위(mm)	Actuator 1(N)	Actuator 2(N)	전체 가력힘(N)	가력 증가량(N)
1/3 시험체	10	251.62	1,094.18	1,345.80	.
	15	436.02	1,495.01	1,931.03	585.22
	20	645.53	2,149.35	2,794.88	863.86
2/3 시험체	10	353.76	1,178.69	1,532.45	.
	15	484.40	1,651.61	2,136.01	603.56
	20	677.51	2,096.03	2,773.54	637.54
3/3 시험체	10	351.72	1,405.84	1,757.56	.
	15	507.02	1,866.42	2,373.44	615.88
	20	720.73	2,252.31	2,973.04	599.60

(다) 복층부 시험체 X방향 가력

복층부 시험체는 전체 시험체보다 전체적으로 가력힘이 작다. 이로부터 전체 시험체에서 단층부가 횡강성이 미치는 영향을 확인할 수 있다. 또한 전체 시험체와는 달리 두 개의 액츄에이터의 가력힘이 비슷하다. 이는 복층부 시험체는 평면이 대칭이기 때문이다.

상재하중이 증가하면 가력힘도 증가하는 것은 전체적으로 비슷한 양상을 보인다.

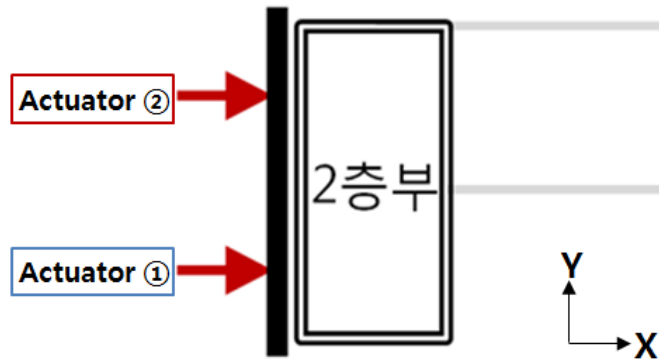


그림 63. 복층부 시험체 X방향 가력

표 19. 복층부 시험체 X방향 가력힘

	목표변위(mm)	Actuator 1(N)	Actuator 2(N)	전체 가력힘(N)	가력 증가량(N)
1/3 시험체	10	630.56	608.56	1,239.12	.
	15	860.37	743.12	1,603.49	364.37
	20	1,055.94	864.33	1,920.27	316.78
2/3 시험체	10	677.36	728.55	1,405.92	.
	15	922.35	861.25	1,783.59	377.68
	20	1,191.01	1,061.34	2,252.34	468.75
3/3 시험체	10	761.59	762.04	1,523.63	.
	15	1,062.88	1,072.81	2,135.69	612.06
	20	1,281.88	1,191.17	2,473.05	337.36

(라) 복층부 시험체 Y방향 가력

복층부 시험체 Y방향 가력은 상재하중 증가에 따라 가력힘의 크기가 증가하지 않고 오히려 다소 감소하는 것으로 나타났다. 이는 Actuator의 초기값 설정 오류에 의한 것으로 보인다. 다만, 동일상재하중에 대해서는 목표변위가 커지면 가력힘도 증가하는 것으로 나타나 다른 실험과 동일한 경향을 나타내고 있다. 또한 복층부 시험체 X방향보다 전체적으로 최대 가력힘이 큰 것으로 보아 Y방향의 횡강성이 X방향 보다 크다는 것을 확인할 수 있다.

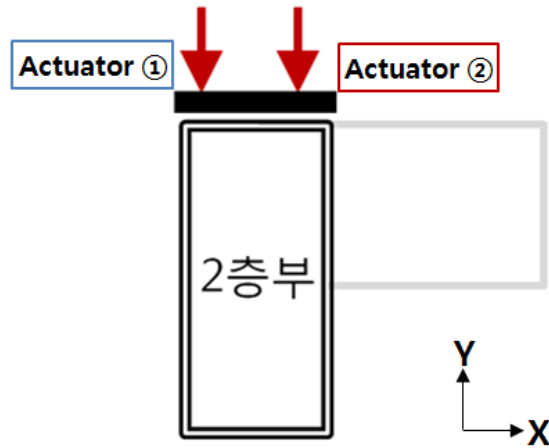


그림 64. 복층부 시험체 Y방향 가력

표 20. 복층부 시험체 Y방향 가력힘

	목표변위(mm)	Actuator 1(N)	Actuator 2(N)	전체 가력힘(N)	가력 증가량(N)
1/3 시험체	10	875.59	815.51	1,691.11	·
	15	1,030.31	1,092.91	2,123.22	432.11
	20	1,234.62	1,318.38	2,553.00	429.78
2/3 시험체	10	463.10	1,037.67	1,500.76	·
	15	672.21	1,332.47	2,004.68	503.92
	20	924.89	1,590.42	2,515.31	510.62
3/3 시험체	10	601.07	783.34	1,384.40	·
	15	861.17	1,128.95	1,990.12	605.72
	20	1,088.99	1,415.20	2,504.18	514.06

나) 하중-변위 관계

(가) 전체 시험체 X방향 가력

위의 실험을 바탕으로 최대 가력 힘과 최대 변위를 통해 시험체 및 가력방향 별 강성을 알아보았다. 아래 하중-변위 그래프에서와 같이 정확한 이선형 거동을 확인할 수 없지만 선형거동이라고 보기엔 어려움으로 수치 해석을 위하여 할선법을 이용하여 강성을 산정하였다. 그러나 임의의 할선을 그어 횡강성을 산정 하였으므로 정확한 수치적 결과보다는 강성의 흐름을 파악하는 것에 초점을 두었다. 상재하중이 커질수록 할선의 기울기가 점점 급해지는 것을 확인할 수 있으며 이는 상재하중이 증가할수록 횡강성이 커진다는 것을 의미한다.

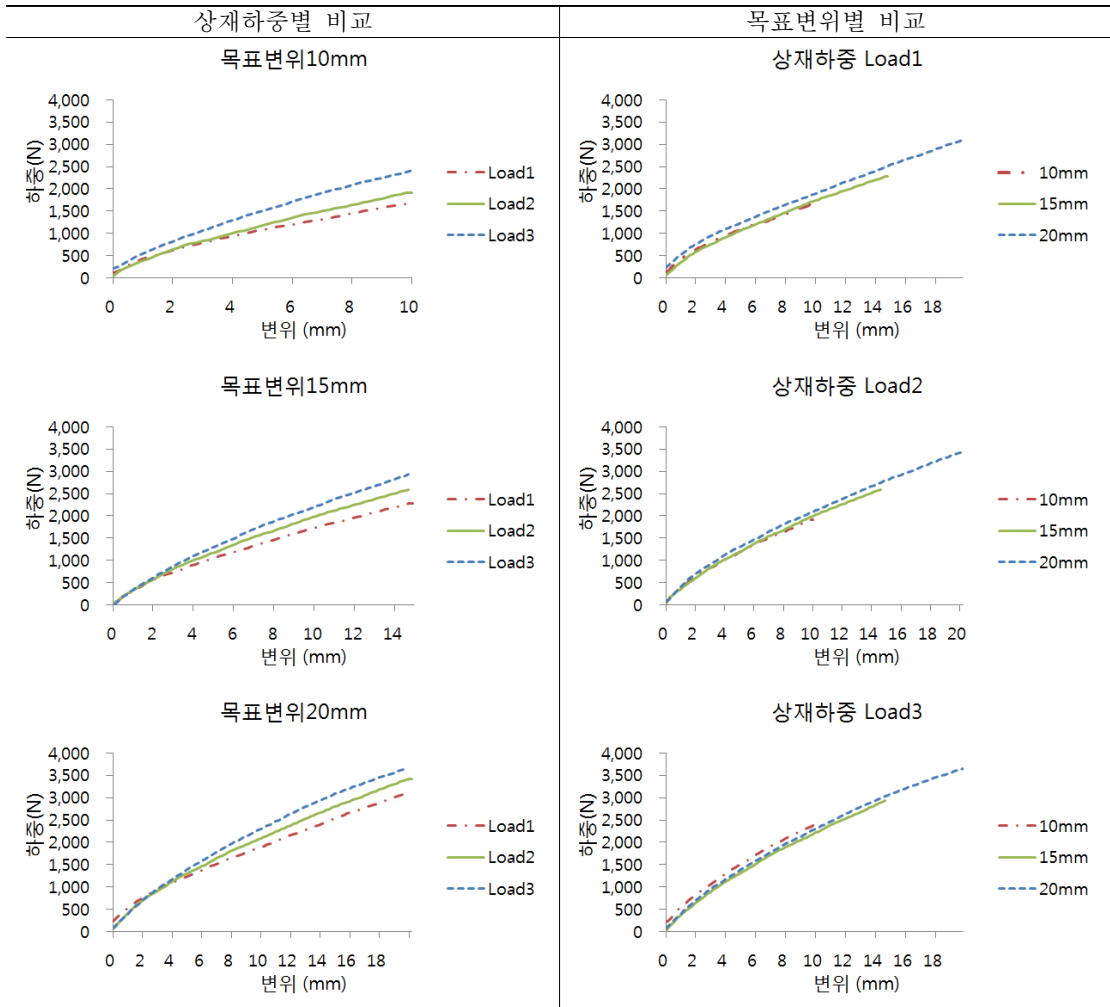
표 21. 전체 시험체 X방향 가력 시 횡강성 계산

	1/3 시험체(Load1)	2/3 시험체(Load2)	3/3 시험체(Load3)
10 mm			
15 mm			
20 mm			

아래의 표는 위의 표를 바탕으로 상재하중과 변위를 각각 기준으로 하여 횡강성을 비교해 보았다. 상재하중별로 비교해 보았을 때, 상재하중이 커질수록 횡강성이 대체적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다.

반면에 동일 상재하중에서 목표변위를 변화시켜 비교하였을 때, 유사한 하중-변위 곡선을 보이는 것으로 보아 횡강성곡선이 목표변위 증가에 따라 큰 변화가 없음을 확인할 수 있다.

표 22. 전체 시험체 X방향 가력 시 상재하중 및 변위별 횡강성 비교



(나) 전체 시험체 Y방향 가력

전체 시험체의 Y방향 횡강성도 X방향과 동일한 방법으로 검토하였다.

표 23. 전체 시험체 Y방향 가력 시 횡강성 계산

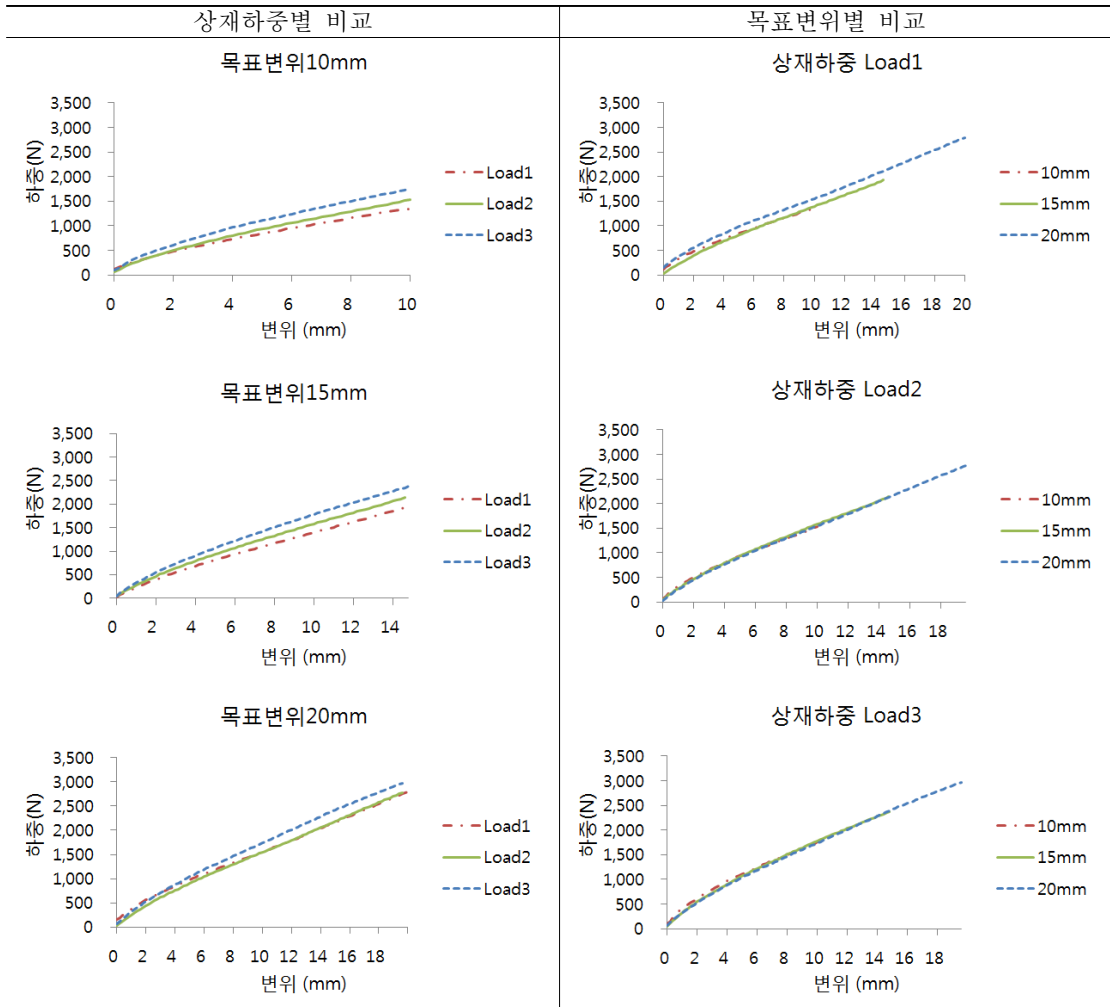
	1/3 시험체(Load1)	2/3 시험체(Load2)	3/3 시험체(Load3)
10 mm			
15 mm			
20 mm			

Y방향의 경우도 상재 하중이 커질수록 강성이 대체적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 한편, 최대 목표변위 20mm의 경우에는 상재하중 2/3 시험체(Load2)와 3/3 시험체(Load3)의 횡강성이 거의 비슷함을 보였다.

상재하중에서의 변위를 비교하였을 때, 위의 X방향과 동일하게 강성이 비슷함을 보였다. 반면에 동일 상재하중에서 목표변위를 변화시켜 비교하였을 때, 유사한 하중-변위 곡선을 보이는 것으로 보아 횡강성곡선이 목표변위 증가에 따라 큰 변화가 없음을 확인할 수 있다.



표 24. 전체 시험체 Y방향 가력 시 상재하중 및 변위별 횡강성 비교



(다) 복층부 시험체 X방향 가력

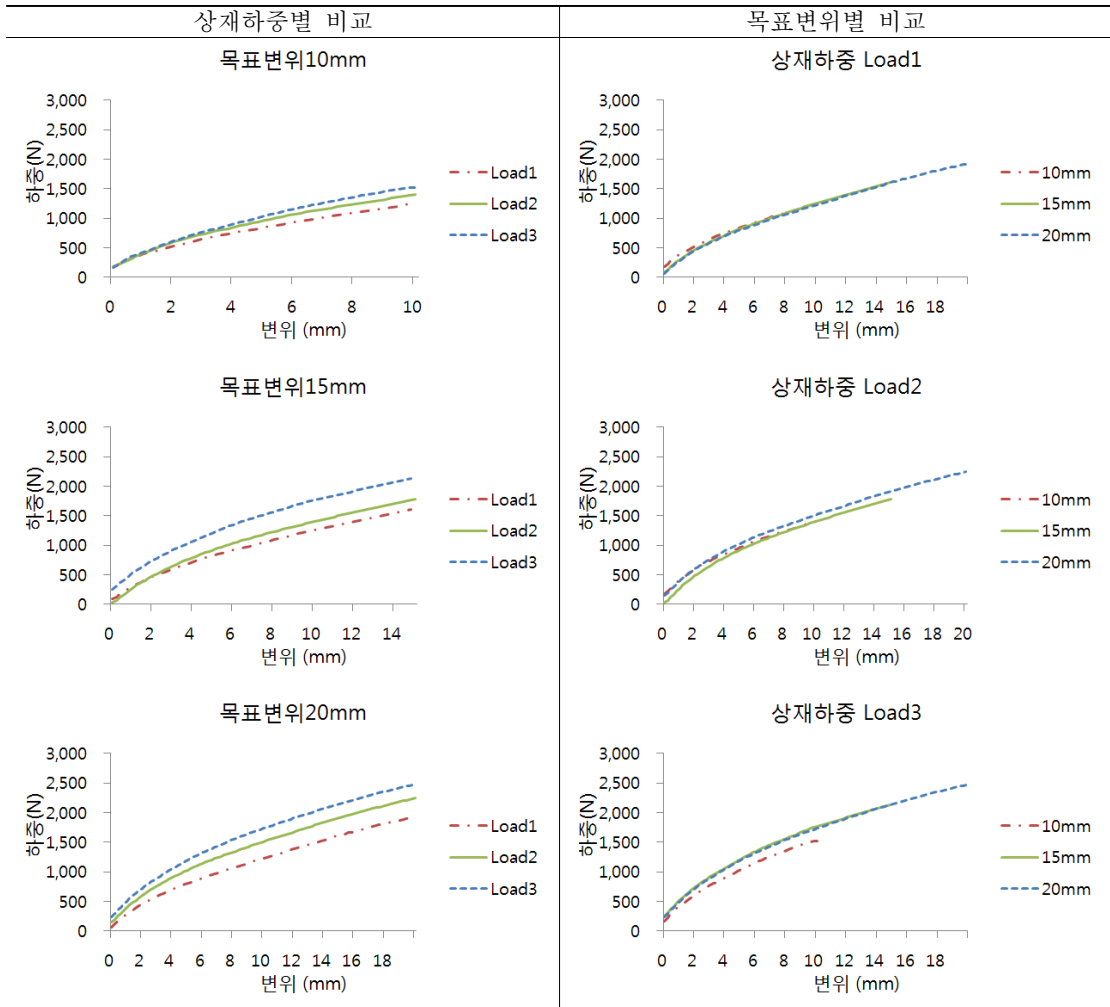
복층부 시험체의 실험목적은 전체 시험체가 비대칭의 건물이므로, 대칭인 건물의 실험을 통해 복층부만의 횡강성을 확인하여 신한옥 접합부의 강성을 도출하고 이를 통해 추가적으로 단층부의 강성 기여도를 분석하기 위함이다.

표 25. 복층부 시험체 X방향 가력 시 횡강성 계산

	1/3 시험체(Load1)	2/3 시험체(Load2)	3/3 시험체(Load3)
10 mm			
15 mm			
20 mm			

아래의 표에서 보면 전체 시험체와 마찬가지로 전체적인 강성의 흐름은 2층 시험체도 유사한 경향을 보인다. 반면에 동일 상재하중에서 목표변위를 변화시켜 비교하였을 때, 유사한 하중-변위 곡선을 보이는 것으로 보아 횡강성곡선이 목표변위 증가에 따라 큰 변화가 없음을 확인 할 수 있다. 구체적인 강성변화에 대한 수치 분석은 다음 장에서 기술하였다.

표 26. 복층부 시험체 X방향 가력 시 상재하중 및 변위별 횡강성 비교



(라) 복층부 시험체 Y방향 가력

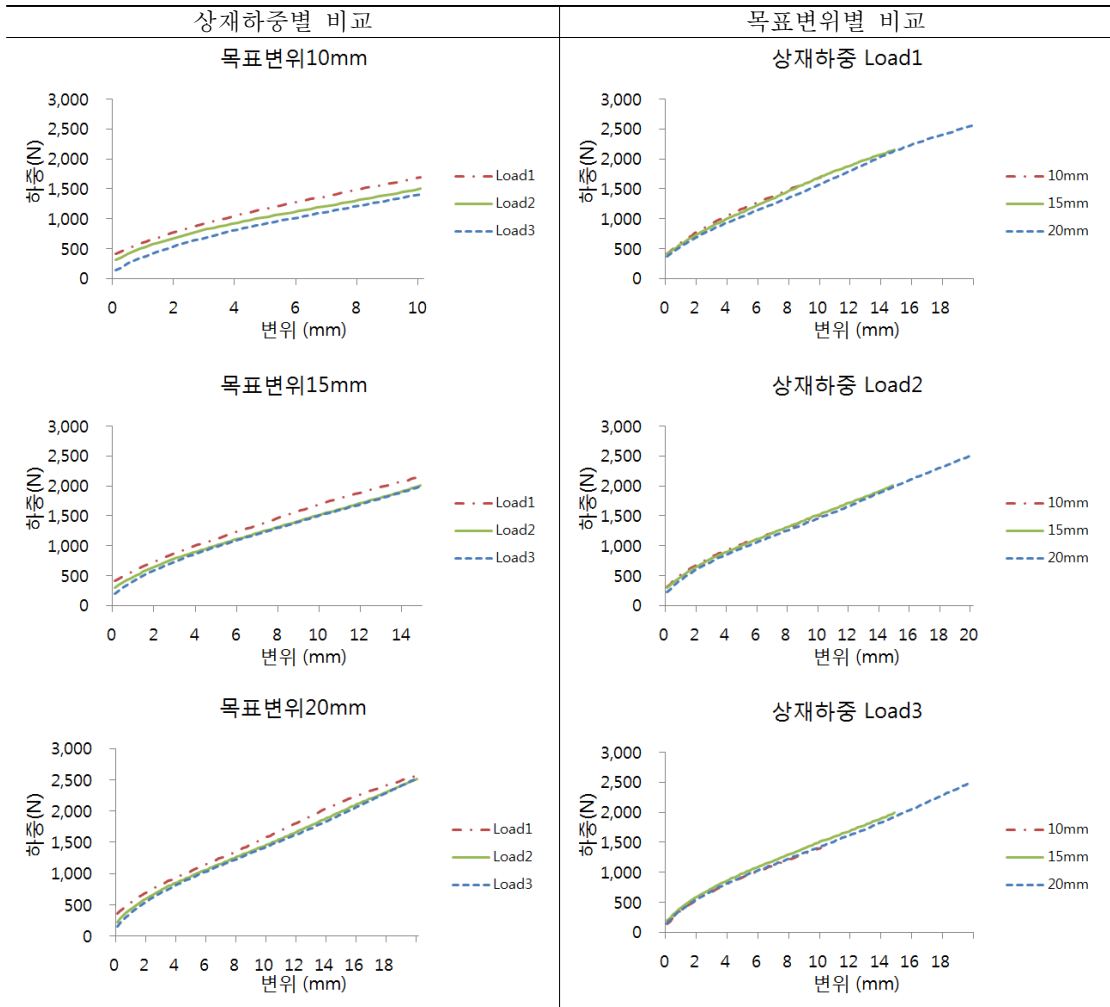
앞에서 언급한 바와 같이 복층부 시험체의 Y방향 가력시 초기 가력 설정값 오류가 있었다. 그러나 횡강성의 전체적인 흐름은 파악할 수 있으므로 앞의 분석과 동일하게 분석하였다. 복층부 시험체 Y방향 가력시에도 상재하중이 증가할 수록 횡강성이 조금씩 증가하는 것을 확인할 수 있다.

표 27. 복층부 시험체 Y방향 가력 시 횡강성 계산

	1/3 시험체(Load1)	2/3 시험체(Load2)	3/3 시험체(Load3)
10 mm			
15 mm			
20 mm			

복층부 시험체 X방향 가력과 동일하게 상재하중 및 변위별 강성이 비슷함을 확인할 수 있었다. 반면에 동일 상재하중에서 목표변위를 변화시켜 비교하였을 때, 유사한 하중-변위 곡선을 보이는 것으로 보아 횡강성곡선이 목표변위 증가에 따라 큰 변화가 없음을 확인할 수 있다.

표 28. 복층부 시험체 Y방향 가력 시 상재하중 및 변위별 횡강성 비교



(6) 수치분석을 통한 강성평가

가) 전체 시험체 X방향 가력

하중과 변위 그래프의 할선을 이용하여 횡강성을 수치적으로 도출하였다. 이렇게 도출된 횡강성이 완벽하게 정확하지 않은 한계점이 있으나, 전체적인 강성의 흐름을 파악할 수 있다는 것에 더 큰 의미가 있다. 상기와 같이 도출된 강성의 뒷받침을 위해 추가적으로 곡선 맞춤(curve fitting)을 이용하여 횡강성을 구하여 비교하였다.

표 29. 목표변위별 상재하중 변화에 따른 강성

상재하중	목표변위		10mm			
	시작지점		종료지점		횡강성(N/mm)	횡강성 증가률
	변위(mm)	작용력(N)	변위(mm)	작용력(N)		
1/3 시험체(Load1)	0.55	300.34	10.01	1,689.65	146.86	·
2/3 시험체(Load2)	0.98	323.16	8.38	1,668.62	181.89	24%
3/3 시험체(Load3)	1.01	537.11	8.809	2,219.03	215.76	17%

상재하중	목표변위		15mm			
	시작지점		종료지점		횡강성(N/mm)	횡강성 증가률
	변위(mm)	작용력(N)	변위(mm)	작용력(N)		
1/3 시험체(Load1)	1.15	283.01	14.95	2,272.25	144.22	·
2/3 시험체(Load2)	1.05	186.69	14.16	2,467.32	173.90	21%
3/3 시험체(Load3)	1.78	473.35	13.15	2,651.37	191.57	6%

상재하중	목표변위		20mm			
	시작지점		종료지점		횡강성(N/mm)	횡강성 증가률
	변위(mm)	작용력(N)	변위(mm)	작용력(N)		
1/3 시험체(Load1)	1.15	515.41	18.63	2,943.36	138.94	·
2/3 시험체(Load2)	0.74	328.82	17.38	3,101.54	166.56	20%
3/3 시험체(Load3)	1.76	519.12	17.22	3,312.89	180.66	8%

상재하중이 커질수록 횡강성이 커지는 것을 알 수 있다. 상재하중이 1/3 증가했을 때 평균적으로 약 20%가 증가하였고, 2/3 증가했을 때 6~17%가 증가하였다. 또한 목표변위가 커지면 횡강성은 대체적으로 작아지는 경향을 보였다. 할선을 이용한 횡강성과 아래의 곡선맞춤을 이용한 횡강성을 비교하면 큰 차이는 없는 것을 확인할 수 있다.

표 30. 곡선맞춤을 이용한 강성 계산

목표변위	10mm	15mm	20mm
상재하중			
1/3 시험체(Load1)	147.61	142.36	134.02
2/3 시험체(Load2)	175.34	164.91	155.91
3/3 시험체(Load3)	214.16	190.99	175.50

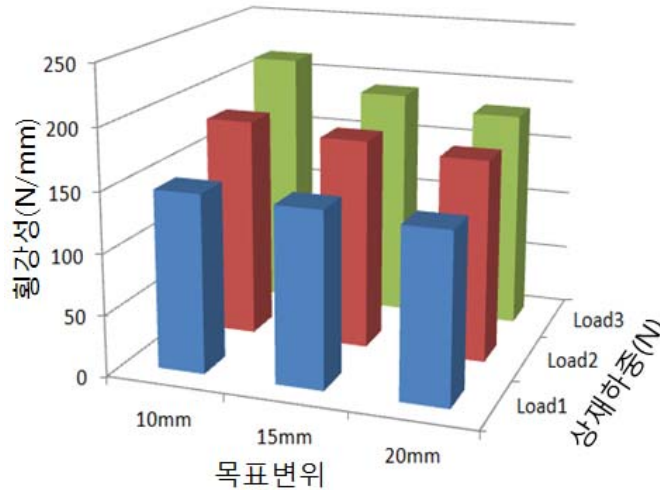


그림 65. 상재하중 및 목표변위별 도출된 횡강성의 비교 그래프

나) 전체 시험체 Y방향 가력

상재하중이 커질수록 횡강성이 커지는 것을 알 수 있다. 상재하중이 1/3 증가했을 때 평균적으로 약 6~17%가 증가하였고, 2/3 증가했을 때 8~14%가 증가하였다. 또한 목표변위가 커지면 횡강성은 대체적으로 작아지는 경향을 보였다. 할선을 이용한 횡강성과 아래의 곡선맞춤을 이용한 횡강성을 비교하면 큰 차이는 없는 것을 확인할 수 있다.

표 31. 목표변위별 상재하중 변화에 따른 강성

목표변위 상재하중	10mm				평균 횡강성(N/mm)	평균 횡강성 증가률
	시작지점		종료지점			
	변위(mm)	작용력(N)	변위(mm)	작용력(N)		
1/3 시험체(Load1)	1.59	391.79	7.61	1093.78	116.68	·
2/3 시험체(Load2)	1.58	427.29	7.39	1222.62	136.93	17%
3/3 시험체(Load3)	1.38	490.96	7.60	1457.49	155.28	14%

상재하중 \ 목표변위	15mm					
	시작지점		종료지점		횡강성(N/mm)	횡강성 증가률
	변위(mm)	작용력(N)	변위(mm)	작용력(N)		
1/3 시험체(Load1)	2.399	397.349	10.785	1441.039	124.45	·
2/3 시험체(Load2)	2.608	507.25	11.402	1700.696	135.71	9%
3/3 시험체(Load3)	2.41	587.61	11.596	1957.153	149.09	10%

상재하중 \ 목표변위	20mm					
	시작지점		종료지점		횡강성(N/mm)	횡강성 증가률
	변위(mm)	작용력(N)	변위(mm)	작용력(N)		
1/3 시험체(Load1)	2.008	559.128	19.999	2794.883	124.27	·
2/3 시험체(Load2)	2.801	512.113	19.98	2773.543	131.63	6%
3/3 시험체(Load3)	3.201	678.313	16.006	2493.383	141.74	8%

할선을 이용한 강성계산과 아래의 곡선맞춤을 이용한 강성을 비교하면 전체적으로 상재하중이 커지면 강성이 증가하고 목표변위가 커지만 강성이 작아지는 흐름은 동일하다.

표 32. 곡선맞춤을 이용한 강성 계산

목표변위 \ 상재하중	10mm	15mm	20mm
1/3 시험체(Load1)	116.68	124.45	124.27
2/3 시험체(Load2)	136.93	135.71	131.63
3/3 시험체(Load3)	155.28	149.09	141.74

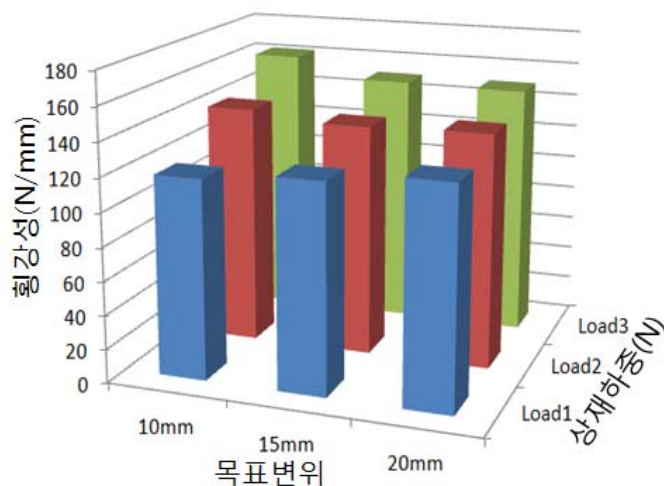


그림 66. 상재하중 및 목표변위별 도출된 횡강성의 비교 그래프



다) 복층부 시험체 X방향 가력

전체 시험체와 동일하게 복층부 시험체도 상재하중이 커질수록 강성이 증가하며, 평균 9.5%가 증가한다. 상재하중이 1/3 증가했을 때 평균적으로 약 8~12%가 증가하였고, 2/3 증가했을 때 7~16%가 증가하였다. 또한 전체 시험체보다 강성이 작은 것으로 나타났으며 이는 단층부가 횡강성에 영향을 미치기 때문으로 분석된다.

표 33. 목표변위별 상재하중 변화에 따른 강성

목표변위 상재하중		10mm					
		시작지점		종료지점		횡강성(N/mm)	횡강성 증가률
		변위(mm)	작용력(N)	변위(mm)	작용력(N)		
1/3 시험체(Load1)	0.33	230.35	9.18	1,176.85	106.96	·	
2/3 시험체(Load2)	0.95	408.52	8.77	1,308.04	115.02	8%	
3/3 시험체(Load3)	0.81	349.44	9.58	1,491.09	130.19	13%	

목표변위 상재하중		15mm					
		시작지점		종료지점		횡강성(N/mm)	횡강성 증가률
		변위(mm)	작용력(N)	변위(mm)	작용력(N)		
1/3 시험체(Load1)	0.951	262.488	12.394	1,418.31	101.00	·	
2/3 시험체(Load2)	1.581	404.096	12.226	1,580.16	110.48	9%	
3/3 시험체(Load3)	0.949	471.217	12.376	1,941.51	128.66	16%	

목표변위 상재하중		20mm					
		시작지점		종료지점		횡강성(N/mm)	횡강성 증가률
		변위(mm)	작용력(N)	변위(mm)	작용력(N)		
1/3 시험체(Load1)	1.38	325.28	15.60	1,643.70	92.72	·	
2/3 시험체(Load2)	1.16	439.41	16.39	2,014.51	103.46	12%	
3/3 시험체(Load3)	1.59	598.25	16.40	2,237.12	110.62	7%	

할선을 이용한 강성계산과 아래의 곡선맞춤을 이용한 강성을 비교하면 큰 차이는 없으며 전체적인 흐름은 동일하다.

표 34. 곡선맞춤을 이용한 강성 계산

목표변위 상재하중	10mm	15mm	20mm
1/3 시험체(Load1)	98.71	95.38	85.91
2/3 시험체(Load2)	112.94	108.04	95.70
3/3 시험체(Load3)	128.69	119.71	101.64

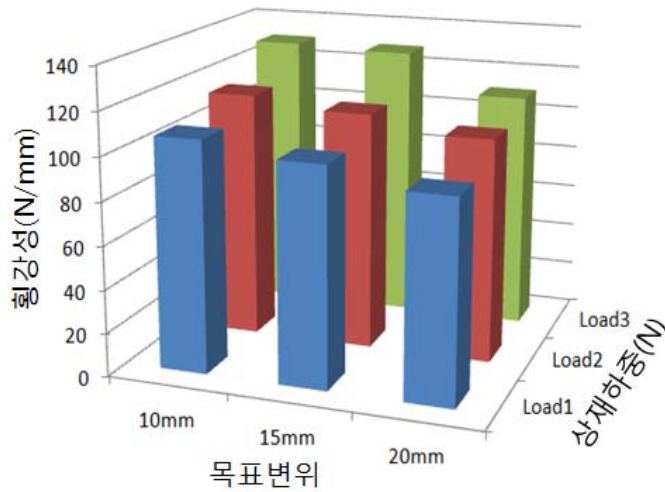


그림 67. 상재하중 및 목표변위별 도출된 횡강성의 비교 그래프

표 35. 단층부가 횡강성에 미치는 영향

목표변위	10mm (N/mm)		단층부 횡강성 효과율
	전체시험체 횡강성	복층부시험체 횡강성	
상재하중			
1/3 시험체(Load1)	116.68	106.96	9%
2/3 시험체(Load2)	136.93	115.02	19%
3/3 시험체(Load3)	155.28	130.19	19%

목표변위	15mm (N/mm)		단층부 횡강성 효과율
	전체시험체 강성	복층부시험체 횡강성	
상재하중			
1/3 시험체(Load1)	124.45	101.00	23%
2/3 시험체(Load2)	135.71	110.48	23%
3/3 시험체(Load3)	149.09	128.66	16%

목표변위	20mm (N/mm)		단층부 횡강성 효과율
	전체시험체 강성	복층부시험체 횡강성	
상재하중			
1/3 시험체(Load1)	124.27	92.72	34%
2/3 시험체(Load2)	131.63	103.46	27%
3/3 시험체(Load3)	141.74	110.62	28%

위의 표를 살펴보면 전체시험체의 횡강성과 복층부 시험체의 횡강성을 비교하여 단층부가 횡강성에 미치는 영향을 알아보았다. 목표변위가 커질수록 단층부의 횡강성 효과율이 더 크다. 반면에 목표변위 10mm를 제외한 나머지는 상재하중이 작아질수록 단층부의 횡강성의 효과가 커지는 것을 확인할 수 있다.

라) 복층부 시험체 Y방향 가력

초기가력 설정값의 오류에 의해 실험결과가 다른 시험과 반대로 나오거나, 확인한 흐름을 찾을 수 없었다.

표 36. 목표변위별 상재하중 변화에 따른 강성

목표변위 상재하중		10mm					
		시작지점		종료지점		횡강성(N/mm)	횡강성 증가률
		변위(mm)	작용력(N)	변위(mm)	작용력(N)		
1/3 시험체(Load1)	0.40	498.63	8.61	1554.15	128.56	·	
2/3 시험체(Load2)	0.40	408.52	7.81	1297.30	119.89	-7%	
3/3 시험체(Load3)	0.40	252.02	8.39	1257.68	125.78	5%	

목표변위 상재하중		15mm					
		시작지점		종료지점		횡강성(N/mm)	횡강성 증가률
		변위(mm)	작용력(N)	변위(mm)	작용력(N)		
1/3 시험체(Load1)	0.79	519.58	13.00	1979.19	119.51	·	
2/3 시험체(Load2)	0.80	427.76	11.61	1661.71	114.15	-5%	
3/3 시험체(Load3)	0.79	345.10	12.59	1745.35	118.62	4%	

목표변위 상재하중		20mm					
		시작지점		종료지점		횡강성(N/mm)	횡강성 증가률
		변위(mm)	작용력(N)	변위(mm)	작용력(N)		
1/3 시험체(Load1)	0.39	409.18	18.77	2462.29	111.67	·	
2/3 시험체(Load2)	0.42	331.66	16.02	2106.95	113.81	2%	
3/3 시험체(Load3)	0.60	258.87	12.98	1712.62	117.43	3%	

표 37. 곡선맞춤을 이용한 강성 계산

목표변위 상재하중	10mm	15mm	20mm
1/3 시험체(Load1)	124.21	114.63	108.78
2/3 시험체(Load2)	107.87	105.54	105.65
3/3 시험체(Load3)	115.77	112.36	109.20

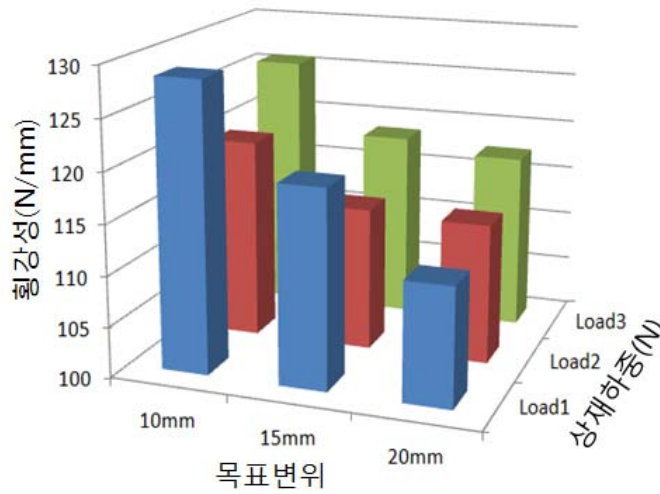


그림 68. 상재하중 및 목표변위별 도출된 횡강성의 비교 그래프

(7) 강성에 따른 모멘트 변화

구조해석 모델링의 기둥-보 접합부에 회전강성을 입력하기에 앞서, 기둥과 보의 회전강성에 따른 모멘트 변화를 확인하기 위하여, 골조를 모델링 하였다. 하중은 수직하중만을 고려하여 보 단부와 기둥상부의 모멘트 변화를 확인하였다.



그림 69. 기둥-보 골조 모델링

가) 강성 100%

아래의 그림과 같이 회전강성이 100%인 경우 보 단부의 최대 휨모멘트는 18.7N·m 이다

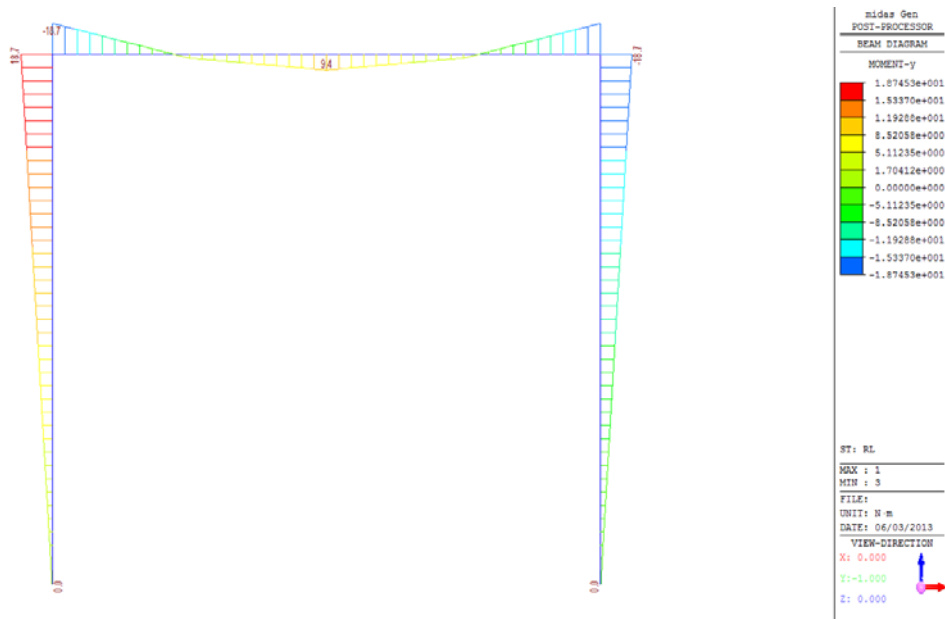


그림 70. 회전강성비 100%일 때 휨모멘트도

나) 강성 20%

회전강성이 20%일 때 보 단부의 최대 휨모멘트는 6.2N·m이다.

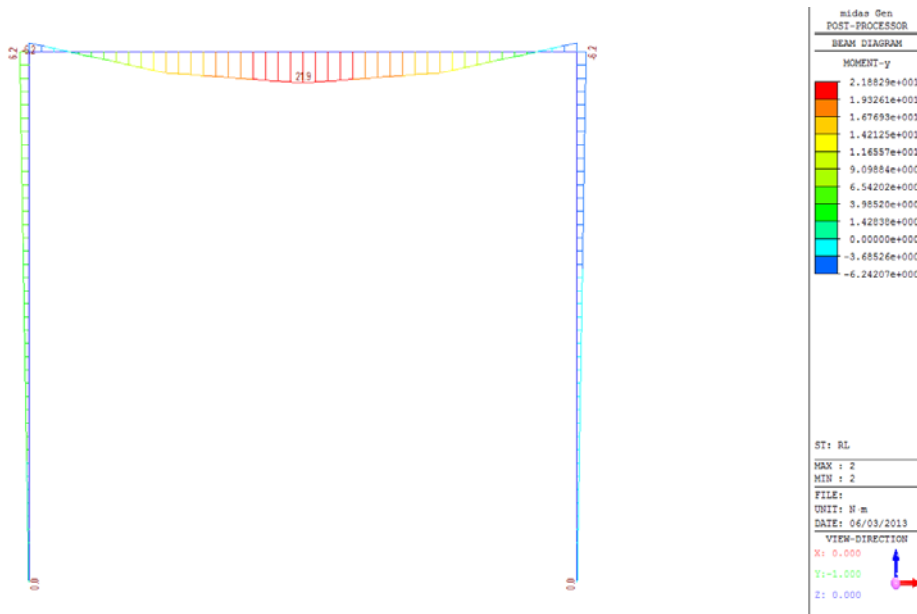


그림 71. 회전강성비 20%일 때 휨모멘트도

다) 강성 0%

회전강성이 0%일 때 보 단부의 휨모멘트는 0으로 보가 분포하중을 받았을 때 보 중앙의 휨모멘트는  $\frac{wl^2}{8}$ 의 식으로 계산한 값과 동일한 28.1N·m이다.

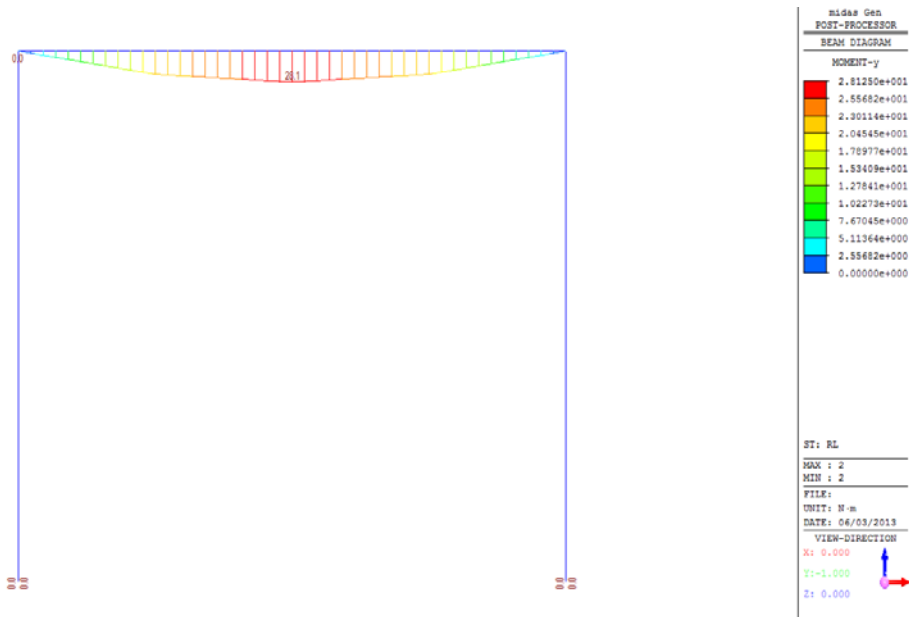


그림 72. 회전강성비 0%일 때 휨모멘트도

아래의 그래프에서 살펴보면 기둥과 보의 회전강성이 커질수록 보단부 휨모멘트는 증가하는 일반적인 양상을 확인할 수 있다. 완벽하게 비례관계는 아니며, 회전강성이 증가할수록 기울기의 증가는 둔화되는 것을 볼 수 있다.

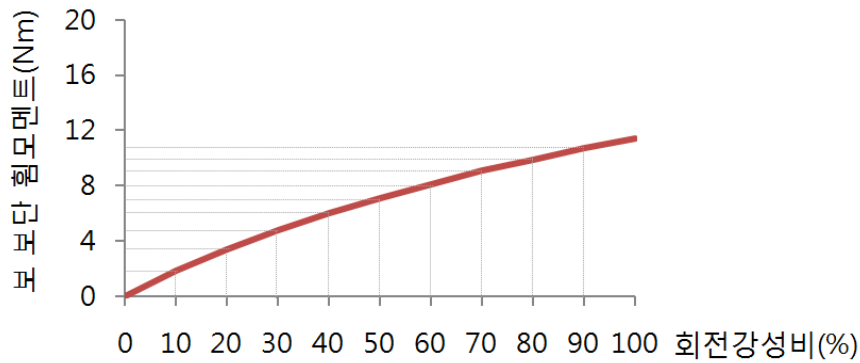


그림 73. 회전강성-단부 휨모멘트 관계

강성 보와 기둥간의 접합부 회전강성 변화에 따른 보의 단부모멘트 변화량을 아래 그래프로 확인하였다. 회전강성이 증가할수록 단부모멘트 변화량이 지속적으로 감소하는 것을 볼 수 있다.

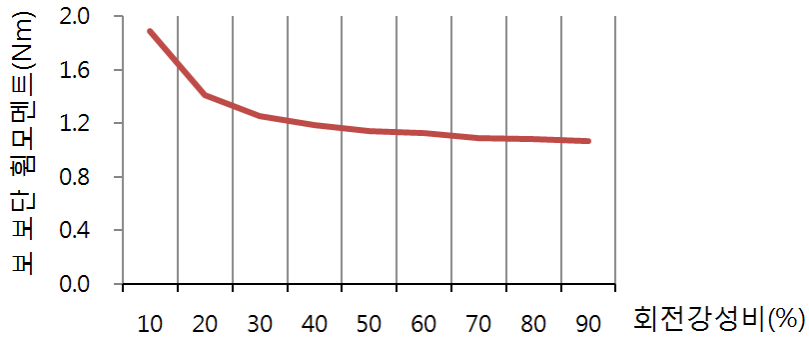


그림 74. 기둥-보 접합부 회전 강성 변화에 따른 보 단부모멘트 변화량

(8) 구조해석 모델링을 통한 강성평가

실험한옥의 1/4축소시험체에 대하여 구조해석 모델링을 수행하고 해석을 하여 횡강성을 평가하였다. 앞에서 언급한 바와 같이 하중적재함 대신 상재하중을 효율적으로 재하하기 위하여 서까래를 모델링 하였으며, 평방과 창방, 도리와 서까래를 이어주기 위하여 압축만 받는 연결재를 추가적으로 모델링하였다. 신한옥의 접합부는 모두 동일한 형식의 철물 접합을 사용하였으며, 모두 부위의 강성을 다르게 모델링할 수 없는 현실적인 문제로 인하여 동일한 회전강성을 부여하였다.

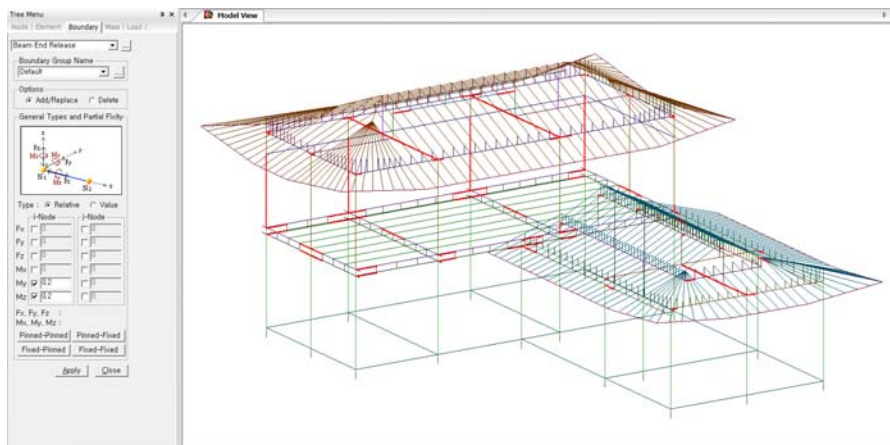


그림 75. 1/4 실험체 구조해석 모델링

아래의 그림과 같이 보-기둥 접합부의 회전강성은 Beam End Release기능을 이용하여 입력하였다. 이때 입력하는 값은 상재하중을 부과한 상태에서 목표변위시 액츄에이터에 작용하는 힘을 부과하고, 보와 기둥의 접합부 회전강성을 변화시켜 갔을 때 목표변위에 도달하는 시점에서의 회전강성으로 찾았다.

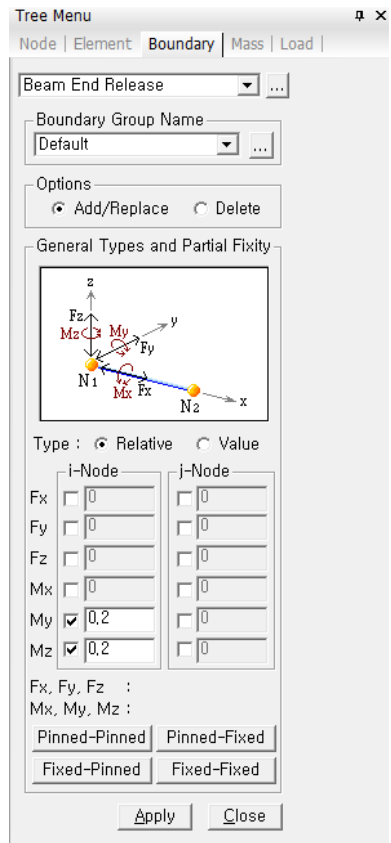


그림 76. 보-기둥의 강성값 입력

그 결과 상재하중이 커질수록 강성이 커지는 것을 보아 마찰력이 커짐을 예상할 수 있으며, 전체적으로 상재하중별 목표변위의 변화에 의한 강성 차이는 크지 않음을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과는 활선에 의한 강성 값의 흐름과 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

또한 시험체별 가력 방향에 따라 강성이 다르지만, 상사 법칙을 따른 Load3의 경우가 실제와 거의 비슷하다고 볼 수 있으므로 이를 기준으로 본 신한옥의 강성값을 제안하고자 한다.

아래의 표는 수평하중에 의한 1/4 축소 시험체의 상재하중별 KBC2009 기준에 따른 지진하중에서의 밀면전단력과 풍하중에서의 밀면전단력을 나타낸다.

표 38. 수평하중에 의한 밀면 전단력 및 최대 풍하중

	지진하중 시 밀면 전단력 (N)	풍하중의 밀면전단력(N)
1/3 시험체(Load1)	1,867.74	2,859.43
2/3 시험체(Load2)	3,074.93	2,859.43
3/3 시험체(Load3)	4,509.79	2,859.43

상재하중이 3/3 시험체(Load3)일 때의 지진하중에 의한 밀면 전단력은 4,509.79N이다.



표 39. 전체 시험체 X방향 가력힘

	목표변위(mm)	전체 가력힘(N)
1/3 시험체(Load1)	10	1,689.70
	15	2,281.49
	20	3,103.55
2/3 시험체(Load2)	10	1,921.67
	15	2,584.85
	20	3,423.54
3/3 시험체(Load3)	10	2,345.55
	15	2,930.13
	20	3,533.70

표 40. 전체 시험체 Y방향 가력힘

	목표변위(mm)	전체 가력힘(N)
1/3 시험체(Load1)	10	1,345.80
	15	1,931.03
	20	2,794.88
2/3 시험체(Load2)	10	1,532.45
	15	2,136.01
	20	2,773.54
3/3 시험체(Load3)	10	1,757.56
	15	2,373.44
	20	2,973.04

표 41. 복층부 시험체 X방향 가력힘

	목표변위(mm)	전체 가력힘(N)
1/3 시험체(Load1)	10	1,239.12
	15	1,603.49
	20	1,920.27
2/3 시험체(Load2)	10	1,405.92
	15	1,783.59
	20	2,252.34
3/3 시험체(Load3)	10	1,523.63
	15	2,135.69
	20	2,473.05

위의 표는 시험체의 상재하중에 따른 가력변위별 전체 가력힘이다. 구조물을 설계할 때, 골조의 강성값을 제안하기 위하여 정적 가력 힘은 실제 1/4축소 시험체에 수평하중이 작용했을 때의 밀면 전단력과 가장 근접한 경우로 설계 되어야 한다. 이에 따르면 상재하중이 Load3일 때 가장 근접함으로 강성 값도 이를 고려하여 제안하고자 한다.

아래의 표에서 살펴보면 평균값으로 강성을 고려하였을 때, 보-기둥 접합부의 회전강성비를 20%로 제안하고자 한다.

표 42. 전체 시험체 X방향 회전 강성비

목표변위 상재하중	10mm	15mm	20mm
1/3 시험체(Load1)	0.22	0.155	0.155
2/3 시험체(Load2)	0.37	0.25	0.23
3/3 시험체(Load3)	0.70	0.37	0.25

표 43. 전체 시험체 Y방향 회전 강성비

목표변위 상재하중	10mm	15mm	20mm
1/3 시험체(Load1)	0.10	0.10	0.10
2/3 시험체(Load2)	0.155	0.12	0.12
3/3 시험체(Load3)	0.25	0.15	0.15

표 44. 복층부 시험체 X방향 회전 강성비

목표변위 상재하중	10mm	15mm	20mm
1/3 시험체(Load1)	0.28	0.11	0.06
2/3 시험체(Load2)	0.80	0.25	0.15
3/3 시험체(Load3)	0.78	0.70	0.22

(9) 소결

실험한옥을 1/4 크기로 축소하여 제작한 시험체에 대한 정적가력 실험을 통해 확인한 사항은 다음과 같다.

- 구조물의 상재하중이 증가하면 횡강성이 증가하고, 구조물에 작용하는 가력변위가 커지면 횡강성이 감소하는 결과를 보였다.
- 복층부 시험체의 횡강성과 전체 시험체의 횡강성을 비교하여 단층부가 전체 시험체의 횡강성에 미치는 영향을 분석한 결과, 가력변위가 커질수록 단층부의 횡강성 효과가 크며 단층부는 최소 9%에서 최대 28%의 횡강성 증대 효과를 보였다.
- 실험 결과를 바탕으로 구조해석 모델링을 통해 횡강성을 평가하였다. 그 결과 건물에 작용하는 지진하중과 풍하중에 의한 최대 밀면 전단력을 고려하여 기둥-보 접합부의 회전강성을 20%로 제안하였다.
- 본 실험은 구조물의 기둥-보 접합부의 상태를 모두 동일하게 가정하고 실험하였으므로 각각의 접합부에 대한 상세한 회전강성을 도출하지 못한 한계점이 있다.

#### 4) 실험한옥 대규모 시험체 동적 실험

##### (1) 실험 개요

본 연구에서는 명지대학교 내에 지어진 실험한옥의 동적특성을 평가하기 위하여 실험한옥을 1/4 시험체로 제작하여 진동대 실험을 수행하였다. 진동대 실험은 임팩트 해머에 의한 충격하중, 조화하중, 우리나라 건축구조기준에 따른 인공지진, 그리고 미국 캘리포니아 El-Centro 지진의 총 4가지 경우에 대하여 수행하였다.

상기와 같은 실험을 통해 실험한옥의 고유진동수를 추출하고 자유진동 파형을 통해 감쇠비를 추출한다. 이는 구조물의 고유한 특성을 파악하는 것으로, 내진설계의 기본 자료가 된다.

또한 동일 시험체에 대한 정적가력 실험으로 도출한 기둥-보 접합부의 회전강성비와 진동대 실험을 통하여 도출한 구조물의 기본적인 동적특성인 고유진동수 및 진동모드, 감쇠비를 바탕으로 구조검토를 위한 해석모델을 수립하였다. 이는 추후 다양한 신한옥에 대한 해석모델 생성시 접합부 모델링 방법 등 다양한 기초자료로 활용될 수 있을 것이라 기대된다.

##### (2) 실험계획

제작된 실험체에 대한 실험은 크게 동적특성평가와 구조성능 평가로 구분할 수 있으며, 동적특성평가는 실험체의 진동수, 모드형상, 감쇠비 등을 평가하기 위해 충격하중, 백색잡음, 조화하중 실험을 계획하였고, 구조성능 평가는 실험체의 고유진동수와 동일한 조화하중 실험과 실제 및 인공 지진하중 실험을 계획하였다. 이러한 각각의 하중 생성은 인력을 통한 충격력 생성방법(충격하중 실험)과 동적 가력기(Dynamic Actuator)를 이용한 방법을 구분하여 하중을 가진하였다.

가진 방법은 충격하중의 경우, 가해진 힘의 크기를 측정할 수 있는 고무망치(Impact Hammer)와 50kN 용량의 동적 가력기를 사용해 슬라이딩 테이블에 진동을 발생시키는 방법을 사용하였다.

##### 가) 실험방법

앞서 기술한 바와 같이 실험의 목적에 따라 가진하중을 달리하여 실험체에 하중을 가하게 된다.

동적 특성 평가에 사용하는 하중은 충격하중, 백색잡음, 조화하중 등이 있으며, 각각의 하중의 특성은 아래와 같다.

##### - 임팩트 해머 (충격하중 및 인력가진)

건축 구조물의 동특성을 알아보기 위한 진동 시험에 쓰이는 가진 방법으로써 인간이 건축물을 가진하는 방법이다. 이 방법은 인력을 통해 건물의 고유주기에 동조되는 반복가진을 행하면 건물의 응답이 공진에 의해 증폭하게 되고, 동조현상 및 동조 이후 발생하는 자유진동 파형에 의해 고유진동수 및 감쇠비를 추출할 수 있다.

##### - 백색잡음

백색잡음(Whitenoise)란 모든 주파수 대역에서 고르게 분포하는 기본적인 잡음을 지칭할 때 사용되는 말이다. 백색잡음을 사용하는 이유는 진동대에 설치된 시험체에 특정 주파수

범위의 일정한 증폭비를 갖고 있는 하중을 사용함으로써, 시험체의 고유진동수와 동조가 이루어지는 경우 공진 응답을 발생시킬 수 있다. 이러한 특성에 기반하여 대부분의 동적실험에서는 대상 시험체의 고유진동수를 위해 백색잡음 실험을 수행한다.

- 조화하중(Harmonic Load)

조화하중(harmonic load)으로써 하중 진폭의 시간에 따른 변화가 정현파(sin파)형태를 가지고 주기적으로 반복되는 하중을 의미한다. 백색잡음 실험을 통하여 고유진동수의 파악이 어려운 경우, Sine Sweep test를 수행하여 FFT분석에 따라 파악되는 응답 증폭비를 비교하여 고유진동수를 평가하고, 조화하중을 통한 공진 테스트를 수행하여 가진 크기에 따른 실험체의 응답특성을 평가하는 실험을 수행하게 된다. 이 때 조화하중에 의해 나타난 응답을 제외하고 가진이 종료된 후 발생하는 자유진동(Free Vibration)을 사용하여, 대수감소법의 사용하여 감쇠비를 추출하기도 한다. 본 실험에서도 위의 과정으로 수행하였다.

지진에 대한 구조성능을 평가하기 위한 방법으로는 지진계를 통해 실제 발생한 지진을 모사하거나 구조설계 시 적용하는 지진하중을 인공적으로 생성하여 동적 가력기 등을 이용해 모사하는 방법을 사용한다. 이러한 특성에 의해 본 실험에서 사용한 하중의 특성은 아래와 같다.

- El Centro 지진

El Centro지진은 1940년 5월 미국 샌프란시스코 El Centro에서 발생한 리히터 규모 7.1의 강진이다. 1940년 이전에도 지진계를 이용하여 지진을 측정하였으나, 대지진이 발생하면 지진계의 바늘이 튀어버려 제대로 기록을 할 수 없었다. 그러나 1940년경에는 300gal이 넘는 진동도 기록할 수 있는 강진계가 개발되어 처음으로 기록된 지진이 El Centro지진이다. 이 지진파는 건축물 지진 해석 시 가장 널리 사용하고 있는 지진 데이터 중 하나로 정식명칭은 Imperial Valley Earthquake이다.

- 인공지진

인공지진하중을 사용한 지진하중 모사는 구조설계를 위해 사용하는 인공지진하중 생성과 동일한 방법으로 생성한다. 이는 실제 지진기록에서 설계기준 상의 스펙트럼을 만족시킬 수 없기 때문이며, 설계 응답스펙트럼에 부합하는 인공지진을 산정한다.

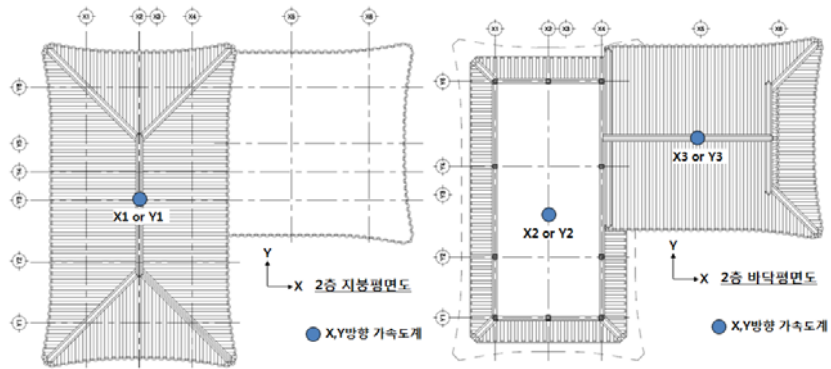
나) 측정방법

본 실험에서는 다양한 하중을 모사하기 위한 동적 가력기가 설치된 슬라이딩 테이블에 실험을 고정한 후, 하중 모사를 통한 응답 특성을 확인하였다. 이러한 응답 특성은 보통 가속도계(Accelerometer)를 사용한 입력 및 출력의 가속도(Acceleration) 측정과 그에 따라 발생하는 변위(Displacement)를 측정하고, 실제 진동 가력기를 통해 나타난 힘도 함께 측정한다.

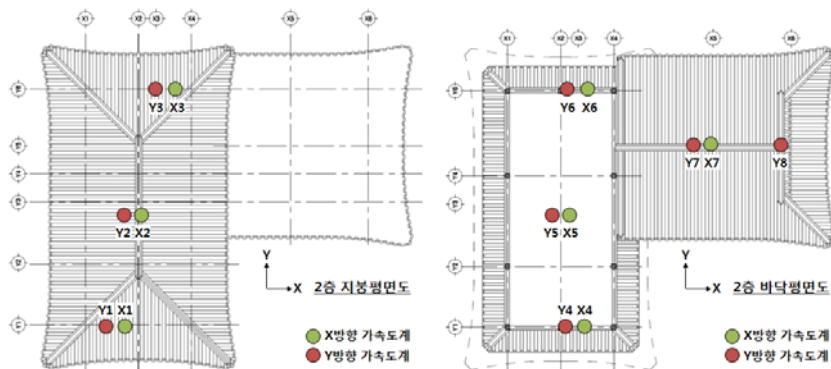
본 실험에서 사용한 가속도계는 하중 특성을 고려하여 사람이 인지할 수 없는 수준의 진동을 계측하기 위한 고감도 가속도계( $\pm 0.5g$  용량,  $g = \text{중력가속도}(9.81\text{m/sec}^2)$ )와 일정 크기 이상의 진동을 측정하는 가속도계( $\pm 2g$  용량) 2가지를 사용하였고, 가진된 하중의 변위 및 힘은 진동 가력기에 설치된 변위계와 로드셀을 사용하여 측정하였다.



그림 77. 슬라이딩 테이블에 진동 가력기 설치



(a) 고감도 가속도계 설치 위치



(b) 저감도 가속도계 설치 위치

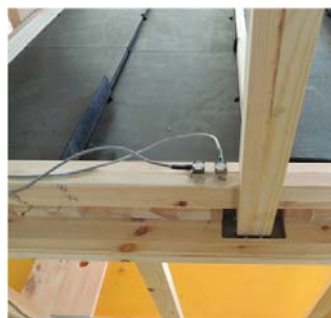
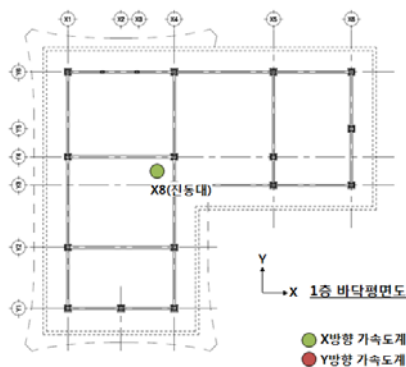


그림 79. 가속도계 설치위치

다) 분석방법

앞서 기술한 바와 같이 동적 가력기를 통해 입력한 각각의 하중에 따라 실험체에 나타난 응답을 가속도계를 이용하여 측정한다. 측정된 가속도는 실험 목적에 따라 실제 나타난 가속도의 시간경과에 따른 응답을 확인하여 가속도의 크기를 확인하고, 이를 바탕으로 진동수 응답 등을 평가하기 위한 FFT, 전달함수 등을 분석한다.

(3) 동적실험 결과 및 분석

가) 충격하중 실험

충격하중 실험은 통상 실제구조물과 같이 실험을 통한 동적특성을 평가하기 힘든 경우에 사용하는 방법이나, 본 실험에서는 동적실험 전에 실험체의 고유진동수 확인을 위해 수행하였다.

충격하중을 재하하는 위치를 5개소로 지정하여 임팩트 해머를 사용하여 일정 크기로 타격한 후 발생한 진동을 측정하였다. 이는 실험체가 1/4 크기로 축소되어 구조물에 직접적으로 하중을 가한 경우와 간접적으로 가한 경우의 진동 특성이 변화 될 수 있기 때문이다.

(가) 1/3시험체(Load case1)

1/3 시험체(Load case1) 실험체에 대한 충격하중 테스트 결과를 아래의 표와 그림에 나타내었다. 표에서와 같이 하중 재하 위치에 따라서 다소 진동수가 다르게 나타나고 있으나, 2.8Hz에서 진동수 분포를 보이고 있다. 또한 X방향의 경우 1차 모드 고유진동수인 2.8Hz 성분을 제외한 다른 진동수 성분이 미소하게 나타나고 있으나, Y방향은 1, 2층에 동일하게 나타나는 2.8Hz과 함께 2층부에만 나타나는 3.5Hz 성분이 크게 증폭됨을 알 수 있다.

상재하중이 1/3시험체(Load case1)의 고유진동수는 아래의 표와 같이 1층과 2층이 거의 유사하지만 Y방향의 경우, 1차 모드 이외의 모드가 계측되었다.

표 45. 상재하중 1/3시험체의 고유진동수

		1층 고유진동수(Hz)	2층 고유진동수(Hz)
X방향 가속도계	X1	2.84	2.84
	X2	2.83	2.83
	X3	2.79	2.79
	X4	2.79	2.79
	X5	2.82	2.82
Y방향 가속도계	Y1	•	•
	Y2	2.83	2.83 / 3.54
	Y3	2.74	2.74 / 3.55
	Y4	2.75	2.75 / 3.52
	Y5	2.82	2.82 / 3.60

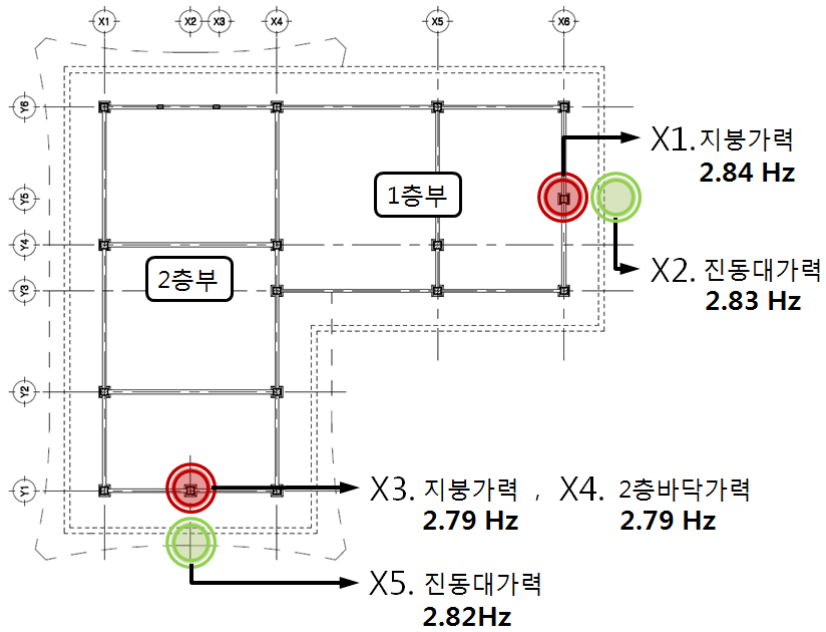


그림 80. 1/3 시험체(Load case1) 가속도계 X방향 고유진동수

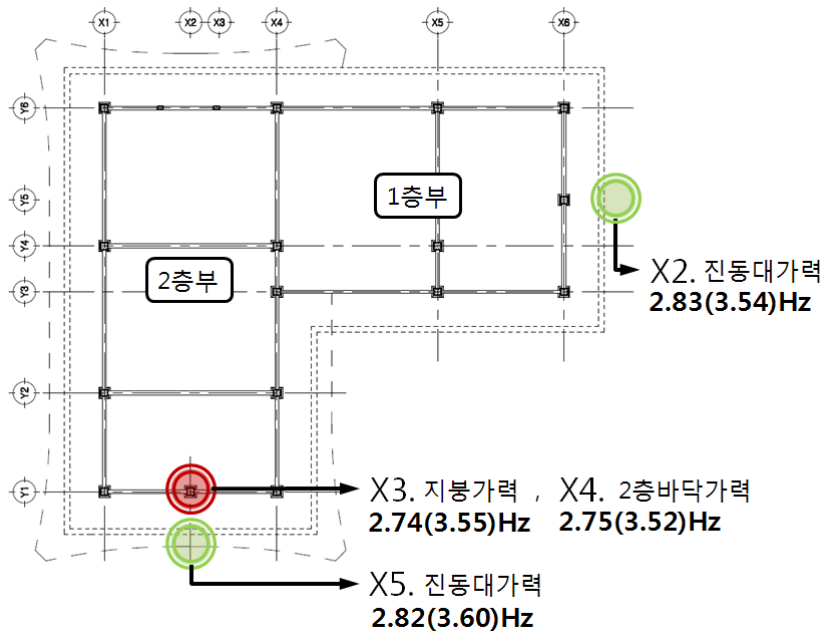


그림 81. 1/3 시험체(Load case1) 가속도계 Y방향 고유진동수



(나) 2/3 시험체(Load case2)

2/3 시험체(Load case2)에 대한 각 방향 가력을 통해 나타난 진동수 분포를 아래의 표와 그림에 나타내었다. 표에서와 같이 가력지점에 따라 진동수가 다소 상이하게 나타나고 있으나 2.24Hz 성분이 주된 성분임을 알 수 있고, 1/3 시험체(Load case1)보다 낮은 진동수인 2.4Hz를 보임을 알 수 있다. 이는 진동수를 결정하는 주요 변수인 상재하중이 증가하였기 때문이다. Y방향 진동수도 2.2Hz에서 평균적인 분포를 보여, 질량 증가에 따른 진동수 감소 현상을 동일하게 확인 할 수 있다. 하지만 1/3 시험체(Load case1)의 결과와 다르게 아래의 그림과 같이 총 3개의 진동수 성분이 분석결과에서 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 X, Y 방향의 진동수 뿐 아니라, 비틀림 모드가 나타남을 의미한다.

상재하중이 2/3 시험체(Load case2)의 고유진동수는 아래의 표와 같이 X방향으로는 1층과 2층이 거의 유사하지만 Y방향의 경우, 1차모드 이외의 모드가 계측되었다.

표 46. 상재하중 2/3시험체의 고유진동수

		1층 고유진동수(Hz)	2층 고유진동수(Hz)
X방향 가속도계	X1	2.24	2.24
	X2	2.24	2.24
	X3	2.28	2.28
	X4	2.21	2.21
	X5	2.24	2.24
Y방향 가속도계	Y1	2.82 / 4.62(4.65)	2.17(2.82) / 4.62
	Y2	2.85 / 4.65	2.16(2.90) / 4.65
	Y3	2.20 / 4.62(4.65)	2.20(2.82) / 4.61
	Y4	2.23 / 4.59(4.65)	2.23(2.80) / 4.60
	Y5	2.14 / 4.68	2.14 / 4.68

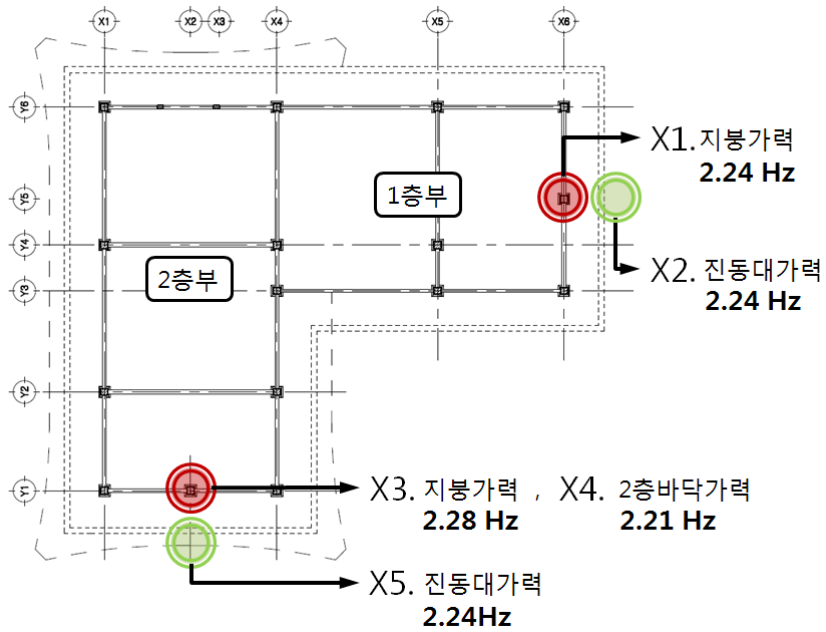


그림 82. 2/3 시험체(Load case2) 가속도계 X방향 고유진동수

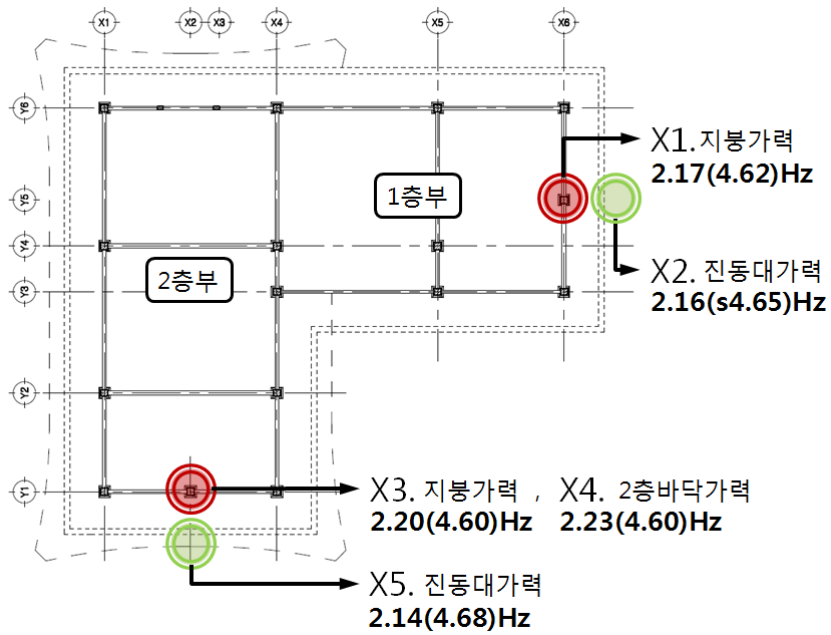


그림 83. 2/3 시험체(Load case2) 가속도계 Y방향 고유진동수

(다) 3/3 시험체(Load case3)

3/3 시험체(Load case3)에 대한 시험 결과를 아래의 표와 그림에 나타내었다. 아래의 표에서 3/3 시험체(Load case3) 실험체의 진동수는 X, Y방향의 1차 모드 진동수가 모두 질량 증가에 따라 감소함을 알 수 있다. 또한 앞선 시험에서는 Y방향에서만 모드 분리되어 나타난 것에 비해 질량이 증가함에 따라 1차모드에서 3차모드까지 모든 방향에서 나타남을 확인 할 수 있다.

표 47. 상재하중 3/3시험체의 고유진동수

		1층 고유진동수(Hz)	2층 고유진동수(Hz)
X방향 가속도계	X1	1.89 / 4.45	1.89 / 4.46
	X2	1.88 / 4.50	1.88 / 4.50
	X3	1.85 / 4.43	1.85 / 4.43
	X4	1.85 / 4.50	1.86 / 4.50
	X5	1.86 / 4.46	1.86 / 4.46
Y방향 가속도계	Y1	2.31 / 4.48	1.81 / 4.48
	Y2	2.39 / 4.43	1.83 / 4.52
	Y3	2.38 / 3.84	1.82 / 4.52
	Y4	2.35 / 4.45	1.80 / 4.45
	Y5	2.47 / 4.50	1.81 / 4.50

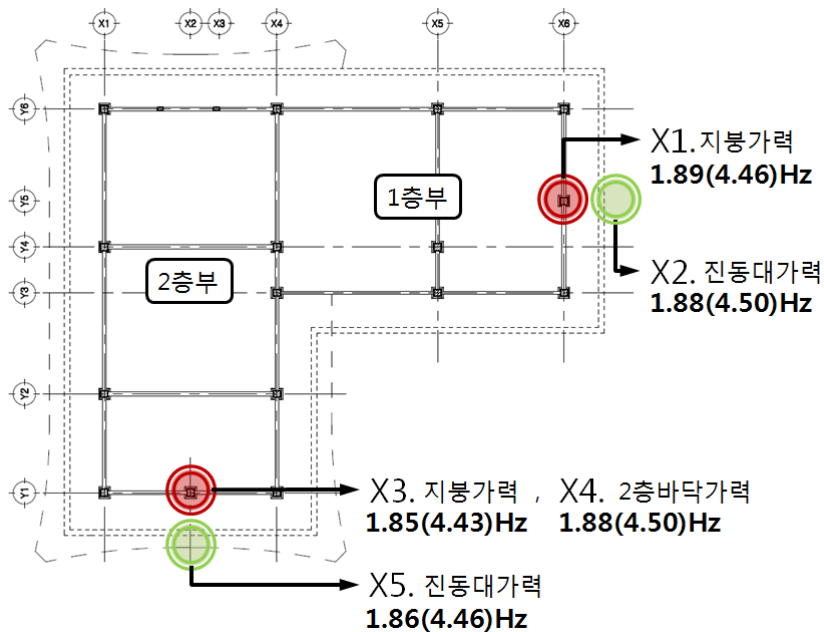


그림 84. 3/3 시험체(Load case3) 가속도계 X방향 고유진동수

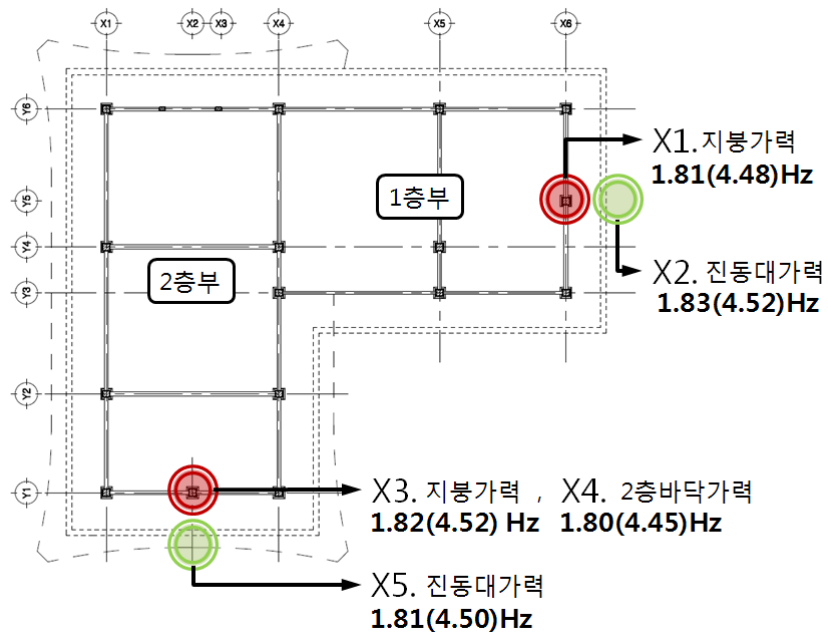


그림 85. 3/3 시험체(Load case3) 가속도계 Y방향 고유진동수

나) 조화하중(Harmonic Load)

충격하중 시험을 통해 1차적으로 확인된 시험체의 상재하중 별 진동수를 기준으로 정확한 진동수 평가를 위한 조화하중 시험을 수행하였다. 조화하중 실험은 통상 1차 모드로 판단되는 진동수를 기준으로 일정 간격의 진동수로 동일한 가속도가 구현되도록 가진 하고, 그에 따라 나타난 응답의 크기를 바탕으로 고유진동수를 평가하는 방법이다. 이러한 조화하중 시험은 최소에서 최대 진동수 구간을 설정한 후 일정 간격으로 진행하는 Sin Sweep 테스트와 Sin Step 실험으로 구분할 수 있으며, 본 실험에서는 각각의 진동수 가진 후 발생하는 자유진동수까지 측정하는 방법으로 실험을 수행하였다.

(가) Sin Step 시험

상재하중별 1/3 시험체(Load case1), 2/3 시험체(Load case2), 3/3 시험체(Load case3) 시험체의 충격하중 테스트 결과를 바탕으로 조화하중 가진 범위를 결정하였다.

먼저, 1/3 시험체(Load case1)는 1.5~4.0Hz 까지 0.5Hz 간격으로 한 후, 고유진동수로 판단되는 부분인 2.8~3.0Hz 사이를 0.3Hz 간격으로 매 가진 시마다 40초간 가진하였다.

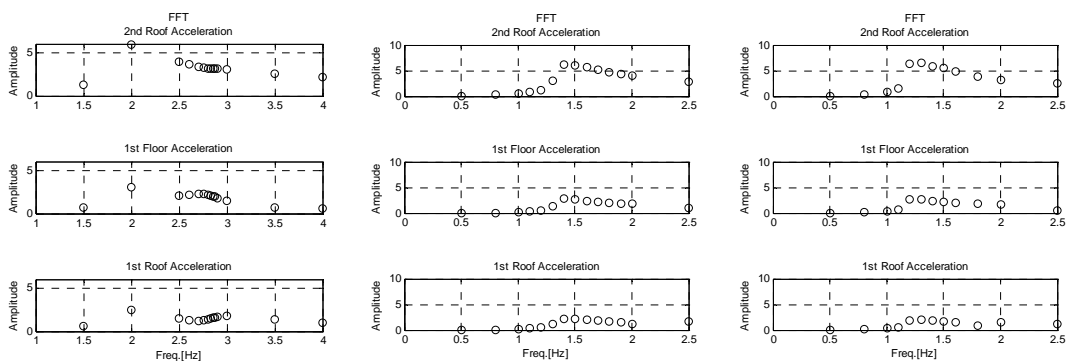
2/3 시험체(Load case2)는 0.5Hz~2.5Hz범위로 가진 하였고, 특히 1.0~2.0 Hz 사이는 0.1Hz 간격으로 각각 40초간 가진하였다.

마지막으로 3/3 시험체(Load case3)는 0.5Hz~4.0Hz까지 가진 하고, 1.0~2.0Hz 사이를 0.1Hz 간격으로 각각 40초간 가진하였다.

가진 한 진동수별 응답은 입력/출력된 가속도 응답을 개별 FFT 분석한 후, 입력 대 출력의 비로 전달함수를 구성하였으며, 이때 가진 한 진동수에 대한 최대값을 확인하였다. 이러한 입·출력 관계에 대한 전달함수 구성에서는 초기 상승 및 가진 종료 후 자유진동 구간을 제외한 정상상태 응답만을 사용하여야 정확한 관계를 확인 할 수 있다.

아래 그림은 상재하중 별 조화하중 실험결과를 나타낸 것이다.

그림에서와 같이 동일한 크기의 가속도를 입력한 경우에도 진동수에 따른 증폭되는 값이 있음을 확인 할 수 있다. 이를 통해 확인된 1/3 시험체(Load case1)의 고유진동수는 2Hz 이고, 2/3 시험체(Load case2)의 고유진동수는 1.5Hz, 그리고 3/3 시험체(Load case3)는 1.3Hz임을 확인하였다.



(a) 1/3 시험체(Load case1)      (b) 2/3 시험체(Load case2)      (c) 3/3 시험체(Load case3)

그림 86. 상재하중 별 조화하중 실험결과

(나) 공진하중 시험

앞서 수행한 Sin-Step 시험을 통해 확인한 하중 별 고유진동수에 대한 공진하중 테스트를 수행하였다. 공진하중 테스트는 파악된 고유진동수와 동일한 진동수를 갖는 조화하중을 입력변위를 다르게 하여 발생하는 최대 가속도의 크기에 따른 응답의 특성을 확인하는 것으로 질량과 강성이 동일한 상태에서 입력하중의 크기 변화는 감쇠크기를 확인할 수 있는 중요한 요소이다.

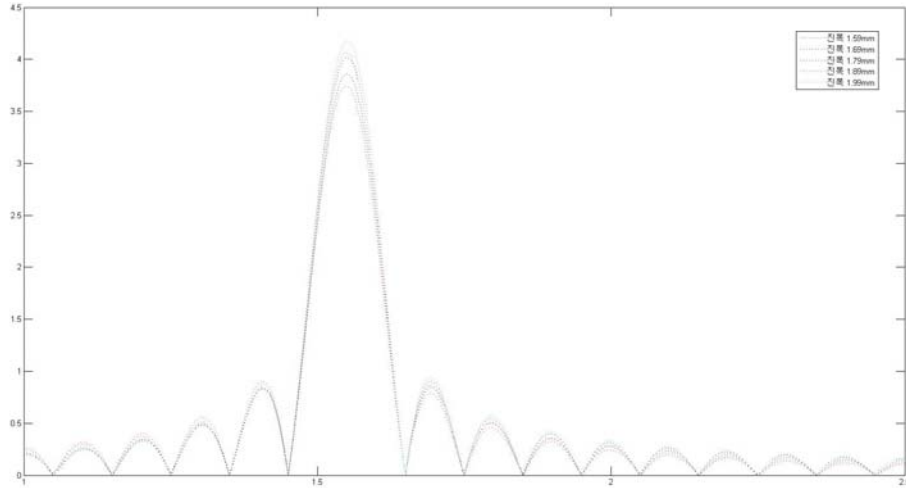


그림 87. 가진 진폭별 전달함수

①1/3 시험체(Load case1)

표 48. 진폭별 공진하중 시험 X방향

진폭(mm)	1.99	2.07	2.17	2.27	2.37
구분					
고유진동수(Hz)	2.12	2.09	2.33	2.07	2.06
감쇠비(%)	7.8	7.7	6.8	7.8	7.7

표 49. 진폭별 공진하중 시험 Y방향

진폭(mm)	0.50	0.75	0.97	1.25	1.50
구분					
고유진동수(Hz)	3.10	3.10	3.20	3.25	3.23
감쇠비(%)	3.9	3.6	4.2	4.2	4.1

②2/3 시험체(Load case2)

표 50. 진폭별 공진하중 시험 X방향

진폭(mm)	1.59	1.69	1.79	1.89	1.99
구분					
고유진동수(Hz)	1.65	1.67	1.68	1.65	1.69
감쇠비(%)	8.6	8.3	8.4	8.1	8.9

표 51. 진폭별 공진하중 시험 Y방향

진폭(mm)	0.33	0.58	0.83	1.08	1.33
구분					
고유진동수(Hz)	2.49	2.56	2.62	2.57	2.58
감쇠비(%)	6.6	3.5	3.3	3.9	3.9

③3/3 시험체(Load case3)

표 52. 진폭별 공진하중 시험 X방향

진폭(mm)	1.42	1.52	1.62	1.72	1.82
구분					
고유진동수(Hz)	1.50	1.52	1.55	1.43	1.59
감쇠비(%)	7.0	6.8	6.6	6.6	6.9

표 53. 진폭별 공진하중 시험 Y방향

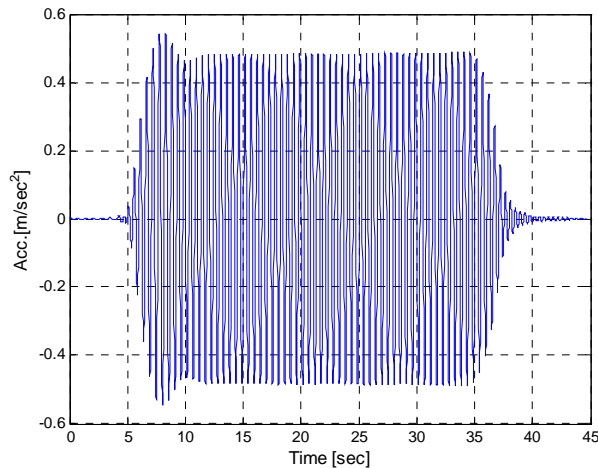
진폭(mm)	0.35	0.60	0.85	1.10	1.35
구분					
고유진동수(Hz)	1.72	2.09	2.18	2.07	2.06
감쇠비(%)	2.1	4.0	3.7	3.9	4.3

(다) 고유진동수 및 감쇠비 추출

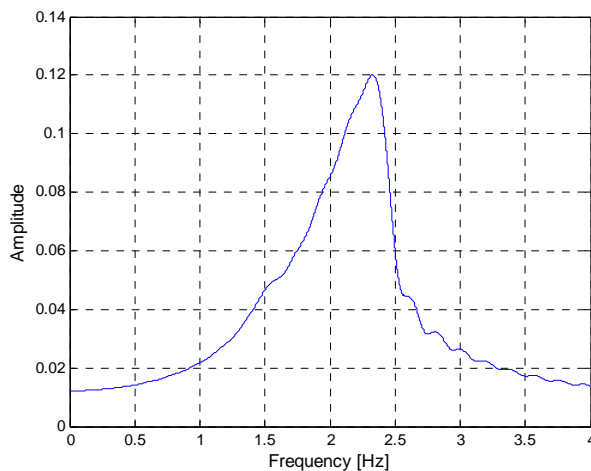
입력하중과 시험체의 공진 시 발생하는 자유진동은 시험체의 고유진동수와 감쇠비를 확인하는데 매우 유용한 자료이다. Mock-up 구조물에 대한 선행 연구인 인력가진 시험을 통해 공진 후 발생한 자유진동파형을 사용한 고유진동수 및 감쇠비 추출과 동일한 원리로 본 시험에서도 동일한 방법을 사용하여 평가하였다.

하지만 본 시험에서 계측된 결과에서는 복층부의 진동수가 하나의 이력에 모두 포함되어 있고, 계측 시 발생한 잡음(Noise)에 의해 자유진동 공진주파수의 주파수에 따른 자유진동을 확인하는 것은 쉽지 않다. 이에 1차적으로 자유진동 파형을 사용한 FFT를 통해 고유진동수를 먼저 확인한 후, 확인된 진동수 영역에 대한 필터링 후 시간이력을 재구성하였다. 아래의 그림은 필터링 이후의 시간이력 형상과 자유진동파형을 사용한 FFT 결과를 나타낸 것이다.

필터링 된 자유진동 파형에서의 감쇠비 추출은 감쇠자유진동에서 감쇠비 추출을 위해 많이 사용되는 대수감소법을 사용하여 평가하였으며, 자유진동 파형과 대수 감소법에 따라 확인된 각 스텝별 최대값을 확인한 결과이다.

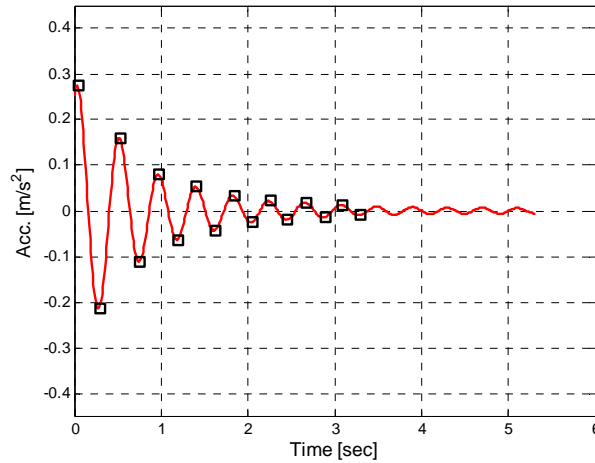


필터링 이후의 시간이력해석



자유진동파형을 사용한 FFT





감쇠자유진동에서의 감쇠비

그림 88. 공진하중 실험을 통한 고유진동수 및 감쇠비 추출

이러한 과정을 통해 확인된 상재하중 별 고유진동수와 감쇠비는 아래의 표와 같다.

표 54. 고유진동수(복층 지붕)

상재하중 가진방향	고유진동수(Hz)		
	1/3 시험체	2/3 시험체	3/3 시험체
X방향	2.33	1.68	1.55
Y방향	3.20	2.62	2.18

표 55. 자유진동에 의한 감쇠비

상재하중 가진방향	감쇠비(%)		
	1/3 시험체	2/3 시험체	3/3 시험체
X방향	6.8	8.4	6.6
Y방향	4.2	3.3	3.7

다) El Centro 지진

실제 지진하중에 대한 시험체의 응답특성을 확인하기 위하여 동일한 최대가속도를 갖는 지진파를 사용하여 시험체의 질량 변화에 따른 경향을 확인하였다. 이 때, 사용한 El Centro 지진파는 가속도 응답이다. 하지만 실제 동적가력기를 구동하기 위해서는 속도/변위를 입력으로 하여야 하므로, 지진파에 대한 수치적분 또는 적분필터를 통한 속도/변위 파형을 생성하여야 하며, 이러한 변환 과정에서 실제 지진파와 완전히 동일한 파형이 구현되지는 않을 수 있다. 하지만 실제 시험체에 대한 시험 전, 입력하중을 가진 하여 비교한 결과, 실제 지진파와 거의 동일한 파형으로 구현되어 실험을 수행하였다.

실제 El Centro 지진파의 경우 최대 0.35g의 가속도 크기를 갖고 있으나, 동적가력의 최대 성능과 축소된 모델 등을 고려하여 최대 크기를 0.07g로 변환하여 가진 하였고, 각 축 방향별 응답을 개별 평가하기 위하여 실험체를 회전시켜 개별 가진하여 응답을 검토하였

다.

다음 표는 El Centro 지진과 가진에 따라 각각의 상재하중별 진동수를 1, 2층으로 구분하여 나타낸 것이다.

표에서와 같이 X방향 1차모드 진동수는 1, 2 층 모두 동일하게 나타나고 있으며, 단층부에서 2차모드 응답이 추가로 나타남을 알 수 있다. 또한 Y 방향 진동수는 개별적인 분석 결과에서 설명이 필요하나, 입력된 하중에 의한 진동의 증폭이 없어, 1차모드 응답을 제외한 기타 모드를 확인할 수 없었다.

본 실험결과에서도 앞서 기술한 실험결과와 동일하게 상재하중 증가에 따른 진동수 감소 현상은 동일하게 나타남을 확인 할 수 있다.

표 56. El Centro 지진과 가진에 따른 상재하중별 고유진동수

	고유진동수 상재하중	단층부 고유진동수(Hz)	복층부 고유진동수(Hz)
	X방향 가진	1/3 시험체	2.41(6.01)
2/3 시험체		1.60(4.53)	1.61
3/3 시험체		1.30(3.86)	1.31
Y방향 가진	1/3 시험체	2.93	2.74
	2/3 시험체	1.95	1.95
	3/3 시험체	1.68	1.64

(가) X방향

①1/3 시험체(Load case1 )

아래의 그림은 가력기를 통해 구현된 하중의 파형과 그에 따른 단층 및 복층부 가속도 응답을 시간흐름에 따라 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 동일시간에 입력된 하중에 의해 1, 2층 부의 가속도 응답이 다르게 나타남을 알 수 있으며, 이는 입력된 하중에 따른 증폭의 크기를 판단하는데 사용할 수 있다. 또한 입력/출력의 관계를 통해 진동수를 분석하는 경우, 구현된 가속도와 그에 따른 응답을 사용한 전달함수 분석을 통해 층별 고유진동수와 함께 모드 형상을 판단할 수 있으며, 실제 전달함수 분석을 통해 나타난 결과는 아래의 그림과 같다.

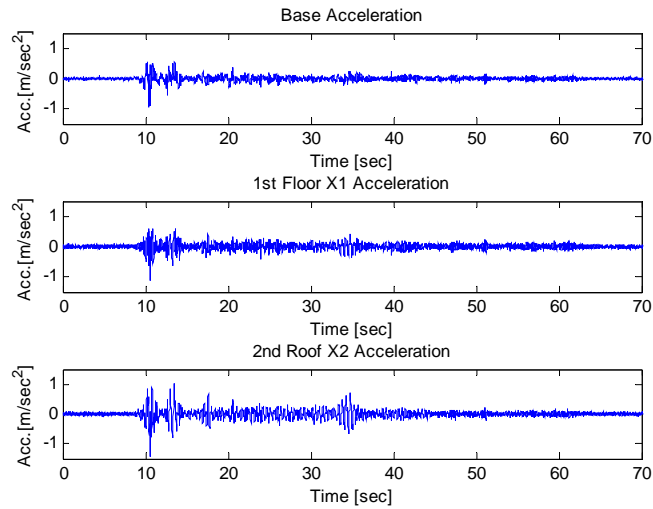


그림 89. 시간에 따른 가속도 응답

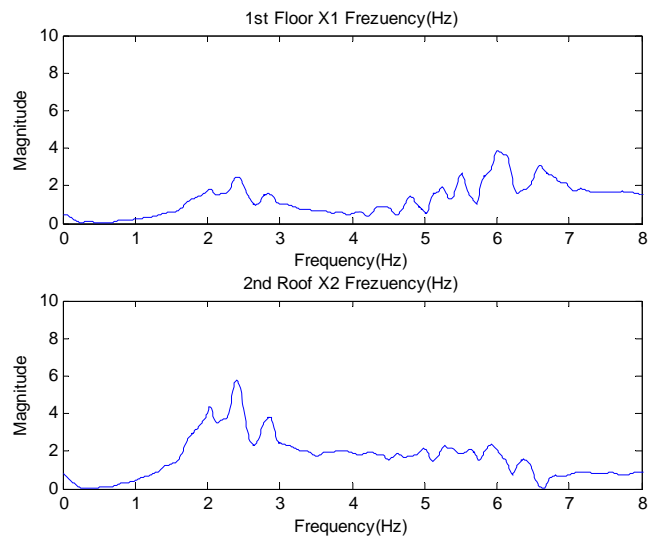


그림 90. 각 층별 전달함수

그림에서와 같이 2~3Hz 사이의 주파수에서 3개의 응답이 나타남을 알 수 있다. 하지만 복층부 전달함수에는 2.4Hz 응답이 가장 크게 나타나 가장 큰 에너지를 갖고 있음을 알 수 있다. 또한 단층부에서 6Hz에서 나타나는 진동수 성분이 복층부에서는 나타나지 않는 것을 통해 단층 및 복층부의 2차적인 진동 특성이 다름을 알 수 있다. 이러한 응답 특성을 정확하게 확인하기 위해서는 각 계층기 위치 및 가진 방향과 직교한 방향의 응답을 동시에 비교하고, 그에 따른 모드 특성을 확인하여야 한다. 시험체의 경우 단층부와 복층부의 평면 형태가 다르고 단층부에서의 접합 특성을 고려할 때, 독립된 단층부의 진동수와 복층부의 진동수 성분이 상이하여 나타나는 결과로 유추되며, 이에 대한 추가적인 분석이 필요하다.

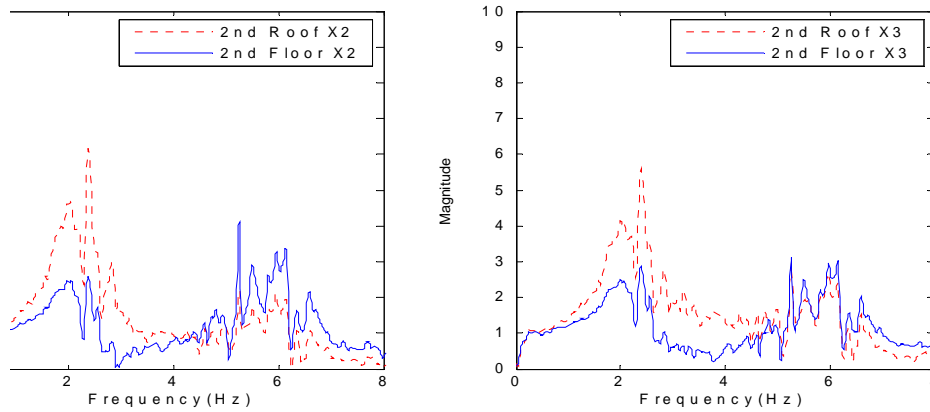


그림 91. 복층부 지붕 및 단층 상부(복층부 바닥) 응답 특성 비교

이러한 응답 특성을 비교하기 위하여 복층부 구조물의 지붕과 단층부 상부(복층부 바닥)를 비교하여 아래의 그림에 나타내었다. 그림에서와 같이 1차모드인 2.4Hz 주파수 응답은 복층부가 더욱 크게 나타나고 있으며, 단층부에서는 5~6Hz 부분의 응답이 더욱 크게 나타남을 알 수 있다. 또한 동일한 단층부에서의 위치별 응답은 아래의 그림과 같으며, 독립적인 단층부의 진동수가 2.4Hz 응답은 거의 없는 상태로 5.7Hz 성분이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

또한 동일한 층 응답의 경우에도 증폭비가 다르게 나타나고 있어 동일한 변형량을 갖지 않음을 알 수 있다.

이러한 경향은 2층으로 구성된 부분과 1층으로 구성된 부분은 일체거동을 하지 않고, 개별적인 거동을 하고 있음을 의미하며, 그에 따라 서로 영향을 주고 있음을 확인 할 수 있다.

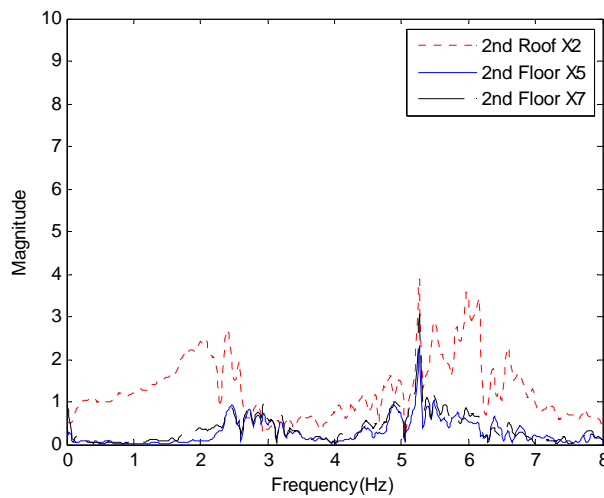


그림 92. 복층부에서의 위치별 응답 특성

② 2/3 시험체(Load case2)

상재하중을 증가시킨 시험체에 대한 가속도 시간이력을 아래의 그림에 나타내었다. 1/3 시험체(Load case1)의 결과에서보다 각층의 가속도 응답이 증폭하는 구간이 더 많아짐을 알 수 있다. 또한 단층부 및 복층부의 증폭 구간은 동일하나, 증폭된 이후의 파형이 서로 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다.

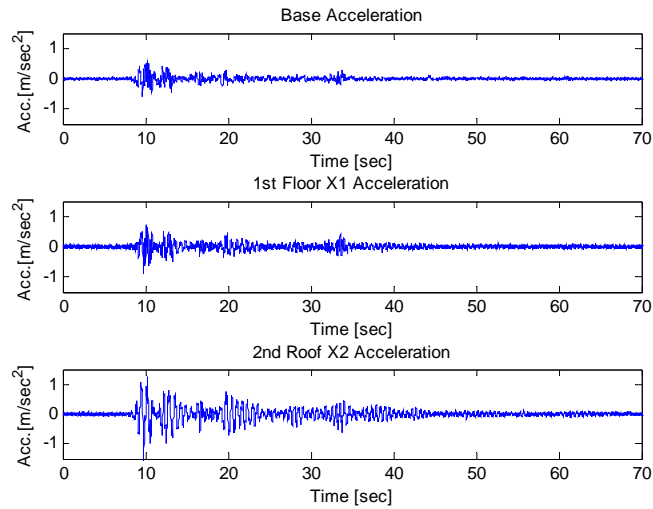


그림 93. 시간에 따른 가속도 응답

이러한 가속도 응답에 대한 전달함수를 아래 그림에 나타내었으며, 그림에서와 같이 단층부 및 복층부의 고유진동수가 1/3 시험체(Load case1)보다 낮은 것을 알 수 있다. 이는 앞서 기술한 바와 같이 상재하중의 증가에 따른 현상이다. 또한 상재하중이 증가함에 따라 1차 모드 진동수가 1.6Hz 단일 성분으로 나타나고 있음을 알 수 있다.

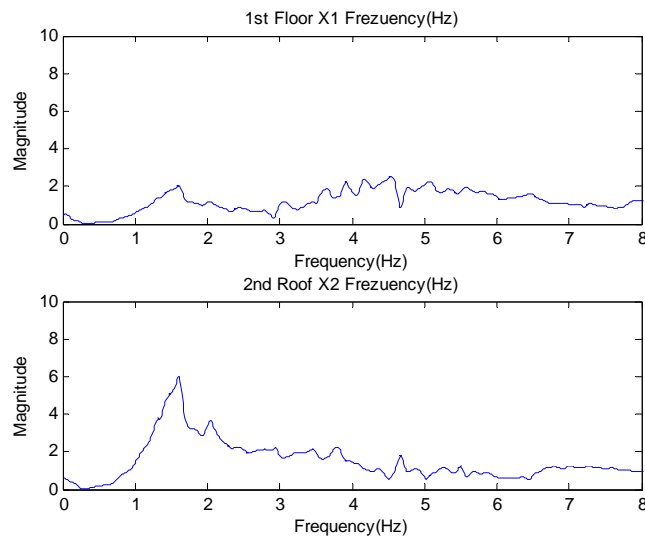


그림 94. 각 층별 전달함수

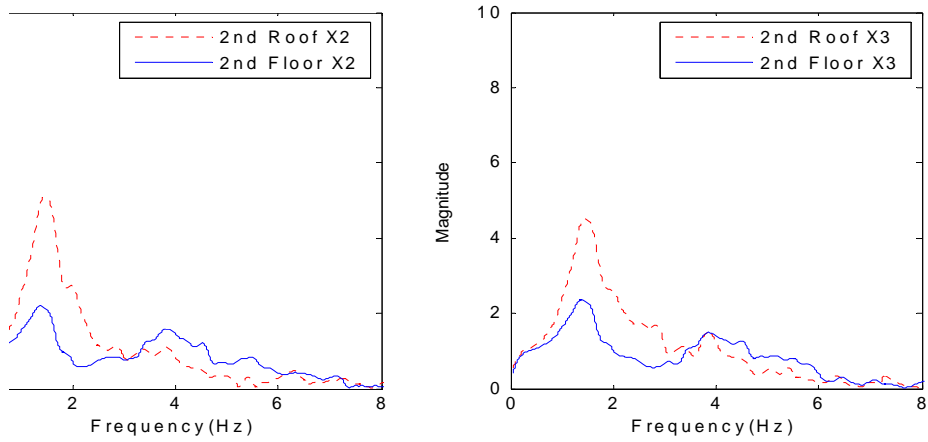


그림 95. 복층부 지붕 및 단층부 상부(복층부 바닥) 응답 특성 비교

위의 그림은 복층부를 중복하여 나타낸 것으로 1차모드의 성분의 증폭비가 단층부 보다 복층부에서 크게 나타남을 확인 할 수 있고, 이후 2차 모드 응답이 1층에서 더욱 크게 나타남을 알 수 있다.

③3/3 시험체(Load case3)

3/3 시험체(Load case3)에 대한 실험결과는 아래의 그림과 같다. 그림에서와 같이 상재 하중 증가에 따라 진동의 증폭이후, 지속시간이 증가하고, 그에 따른 이력형상 또한 다르게 나타남을 알 수 있다. 또한 각 층별 전달함수 분포에서도 진동수의 감소와 함께 단층부 진동수가 2차 모드에서 더 크게 나타나는 것을 확인 할 수 있다.

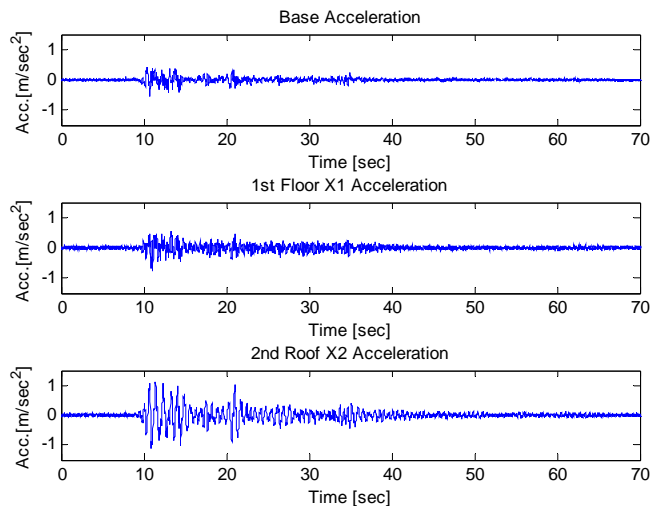


그림 96. 시간에 따른 가속도 응답

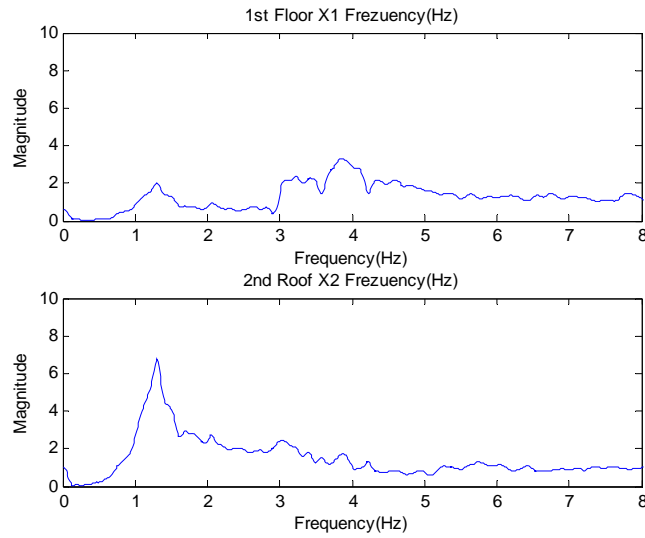


그림 97. 각 층별 전달함수

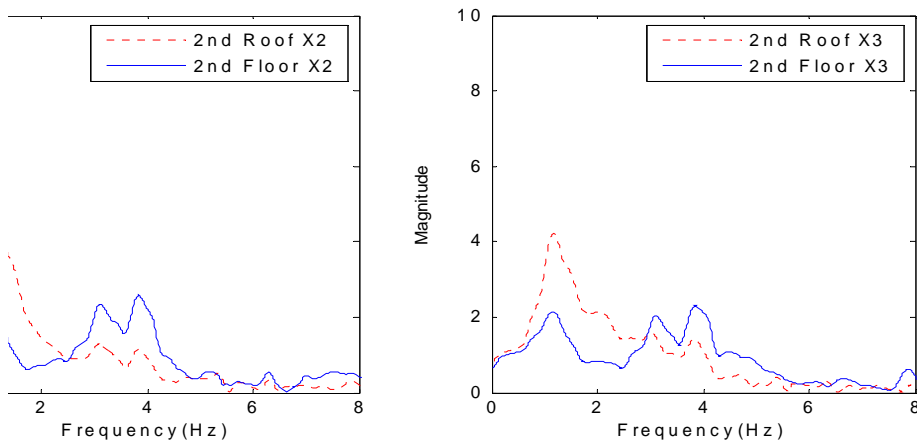


그림 98. 복층부 지붕 및 1층 상부(2층 바닥) 응답 특성 비교

아래의 그림은 단층부 및 복층부의 전달함수를 비교한 것으로, 단층부 응답(복층부 바닥)이 2차 모드에서 더욱 크게 나타나고 있음을 알 수 있으며, 독립된 단층부의 영향으로 진동수가 2개로 분리됨을 알 수 있다.

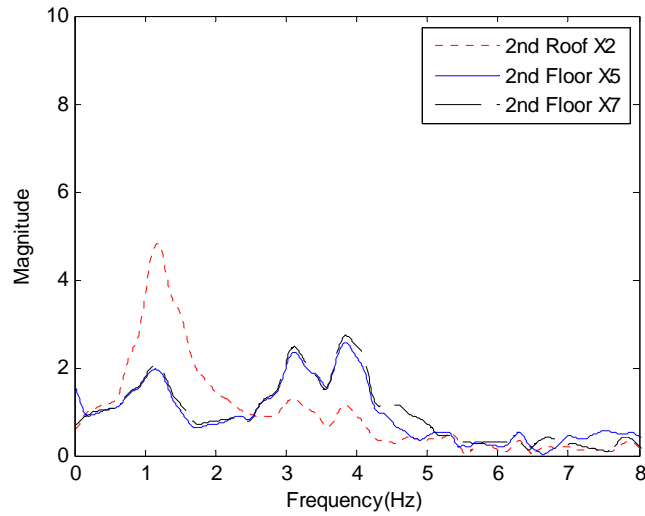


그림 99. 복층부에서의 위치별 응답 특성

(나) Y방향

① 1/3 시험체(Load case1)

아래의 그림은 1/3 시험체(Load case1)에 대한 Y방향 가진 결과를 나타낸 것이다. 입력된 하중에 의한 가속도 증폭 현상이 거의 없음을 알 수 있다. 비록 계측기에서 발생한 잡음에 의해 실제 파형을 식별하기 쉽지 않은 상태이나, 입력된 하중의 특성이 구조물에 영향을 미치지 않기 때문에 응답의 증폭이 발생하지 않는 것이다.

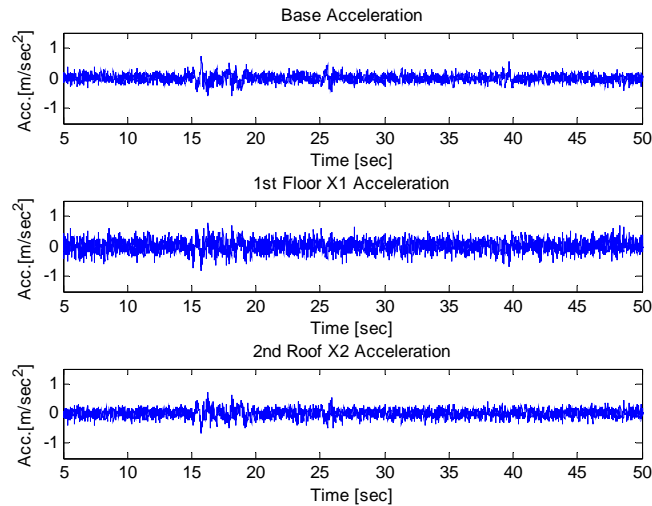


그림 100. 시간에 따른 가속도 응답



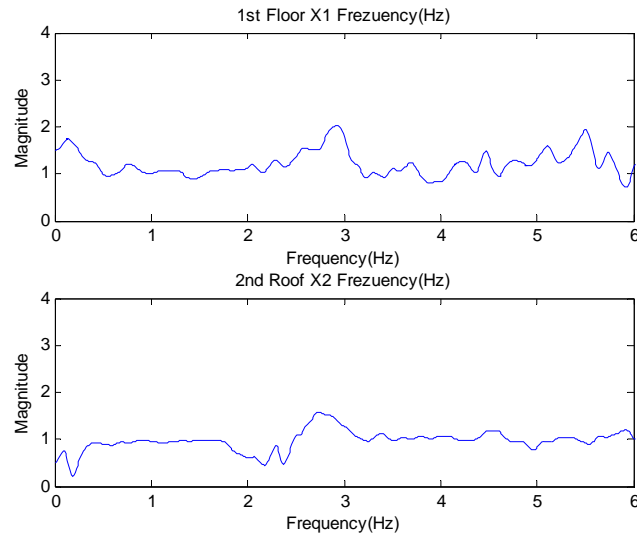


그림 101. 각 층별 전달함수

②2/3 시험체(Load case2)

상재하중을 증가시킨 2/3 시험체(Load case2)도 1/3 시험체(Load case1)와 동일하게 입력된 하중에 의한 큰 영향을 나타내지 않음을 알 수 있다. 이러한 결과는 입력된 하중의 파형을 구조물에서 계측한 파형에서 빼는 경우 바로 확인 할 수 있을 정도로 미약하게 반응하는 것으로 각 층별 전달함수 그래프인 아래의 그림에서의 증폭비를 통해 확인 할 수 있다.

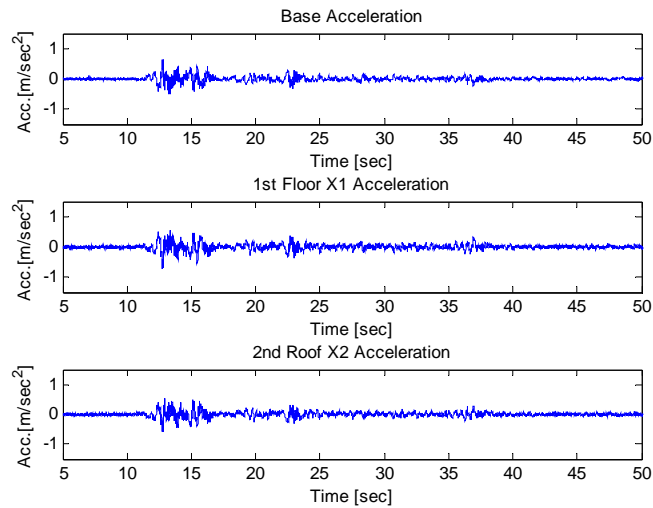


그림 102. 시간에 따른 가속도 응답

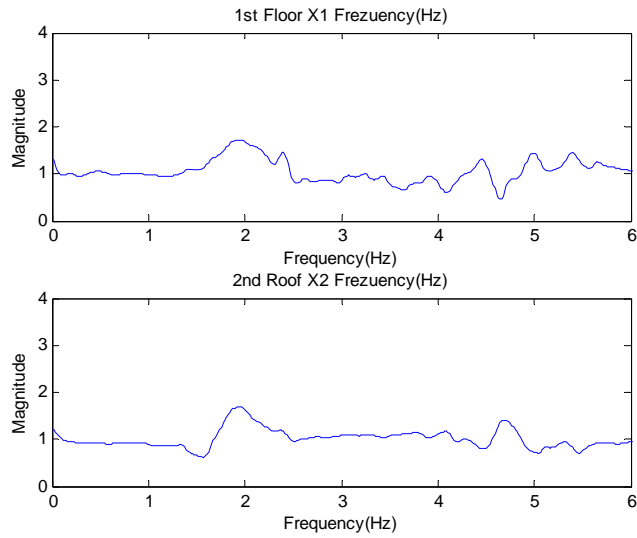


그림 103. 각 층별 전달함수

③3/3 시험체(Load case3)

3/3 시험체(Load case3)도 앞서 기술한 1/3 시험체(Load case1), 2/3 시험체(Load case2)의 결과와 동일하게 입력된 하중에 의한 영향이 미약함을 알 수 있다.

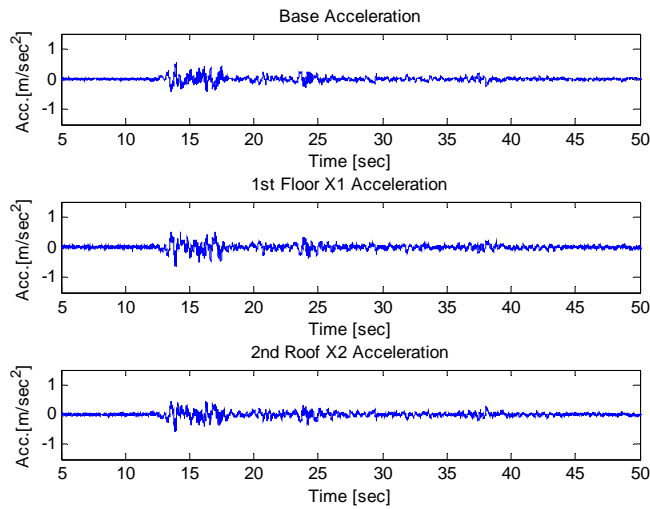


그림 104. 시간에 따른 가속도 응답

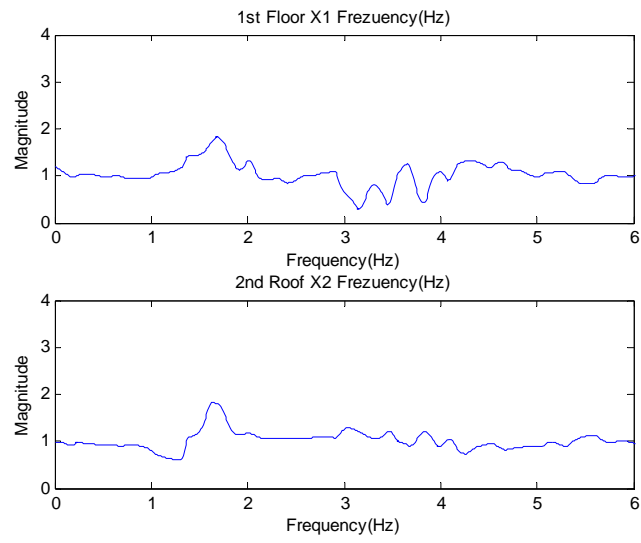


그림 105. 각 층별 전달함수

라) 인공지진 (KBC2009)

앞서 기술한 El Centro 지진하중에 따른 응답 평가는 실제 지진하중에 따른 구조물의 거동 분석과 함께 유사한 선행 연구등에서 동일한 하중을 사용하여 검토한 결과와 비교가 가능한 이점이 있다. 하지만 우리나라의 지반 특성과 설계 시 지진하중을 고려한 평가를 위해서는 건축구조기준에서 제시하고 있는 설계 지진하중에 따른 하중에 대한 거동 특성에 대한 검토가 필요하다. 따라서 본 시험에서는  $S_b \sim S_d$ 까지의 지반별 인공지진을 생성하여 실험을 수행하였으며,  $S_b, S_c$  지반의 지진하중은 0.07g로 스케일링하고,  $S_d$  지반은 0.03g로 스케일을 감소하여 가진 하였다.

(가)  $S_b$ 지반

표 57.  $S_b$ 지반 인공지진에 따른 상재하중별 고유진동수

	고유진동수		
	상재하중	단층부 고유진동수(Hz)	복층부 고유진동수(Hz)
X방향	1/3 시험체	1.95(5.45)	1.95
	2/3 시험체	1.58(4.29)	1.60
	3/3 시험체	1.38(3.66)	1.38
Y방향	1/3 시험체	1.98(5.23)	1.96
	2/3 시험체	1.34(3.88)	1.33
	3/3 시험체	1.15(3.32)	1.12

① 1/3 시험체(Load case1)

$S_b$  지반 특성을 갖는 인공지진하중 가진에 따른 1/3 시험체(Load case1)에 대한 각 축방향별 응답을 아래의 그림에 나타내었다. X방향 응답의 경우 복층부에서 확인된 진동수는 1.95Hz로 나타났으며, 단층부도 또한 1차모드 응답이 동일하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 하지만 5.4Hz 영역의 주파수에서 증폭비가 크게 증가하여 단층부는 1차모드 응답보다 2차모드 응답이 더 크게 발생함을 알 수 있다.

또한 동일한 복층부 지붕의 응답의 경우에도 모두 동일한 증폭비가 아닌 단부(X1)으로 갈수록 증폭비가 커지는 것을 알 수 있다.

하지만 Y방향 가진시에는 1, 복층부 모두 2차 모드 응답이 7Hz이상에서 다소 나타나고 있으나, 큰 영향이 없음을 알 수 있다.

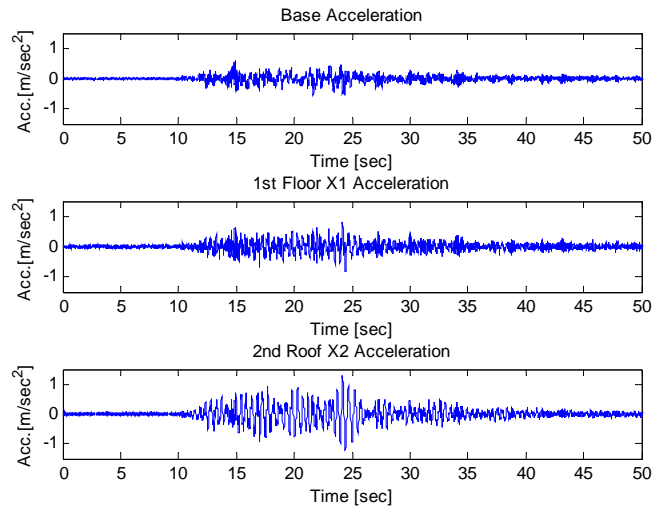
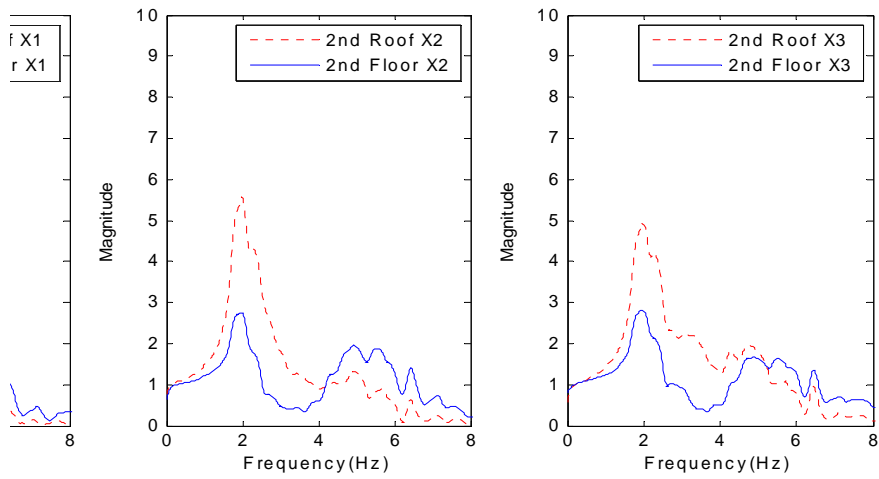


그림 106. 시간에 따른 가속도 응답



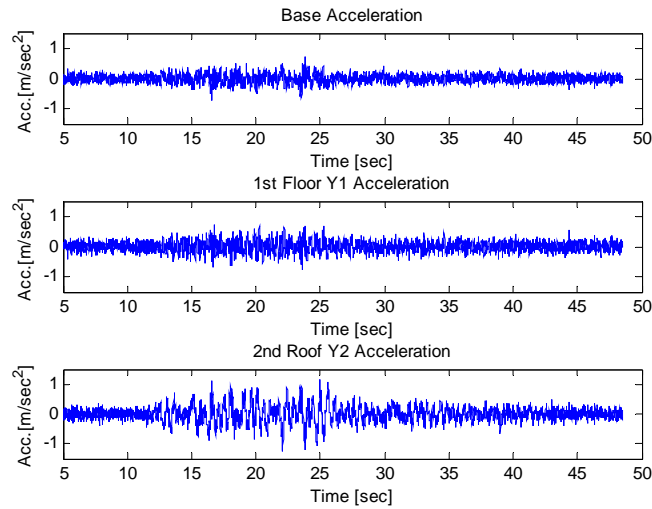


그림 108. 시간에 따른 가속도 응답

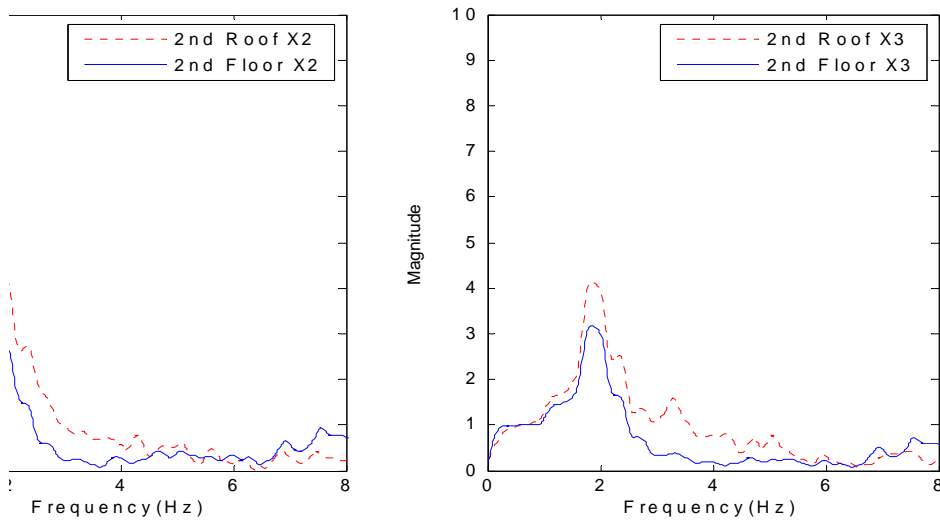


그림 109. 복층부 지붕과 1층 상부(2층 바닥) 응답 특성 비교

② 2/3 시험체(Load case2)

상재하중을 증가시킨 2/3 시험체(Load case2)의 X, Y방향에 대한 가속도 응답 결과를 아래의 그림에 나타내었다. 상재하중 증가에 따른 진동수 감소 현상은 동일하게 발생하고 있으며, X방향 응답에서와 같이 복층부 응답과 단층부 응답이 특성이 다르게 나타남을 알 수 있다. 특히 상재하중 증가에 따라 2차모드의 증폭비가 더욱 크게 발생하여, 각각의 응답 특성이 뚜렷하게 나타나고 있다.

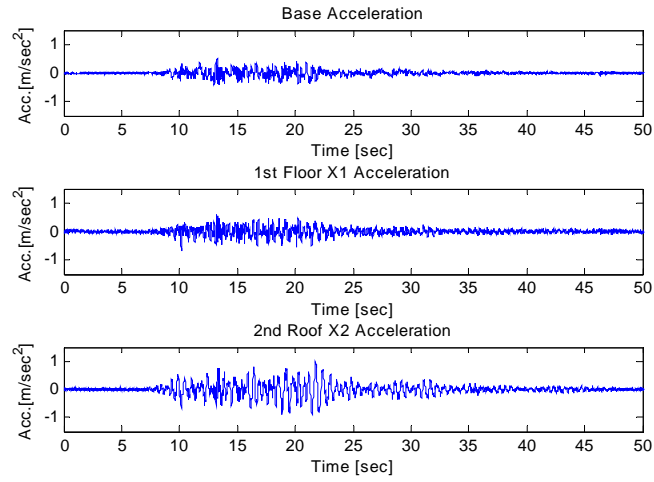


그림 110. 시간에 따른 가속도 응답(X방향)

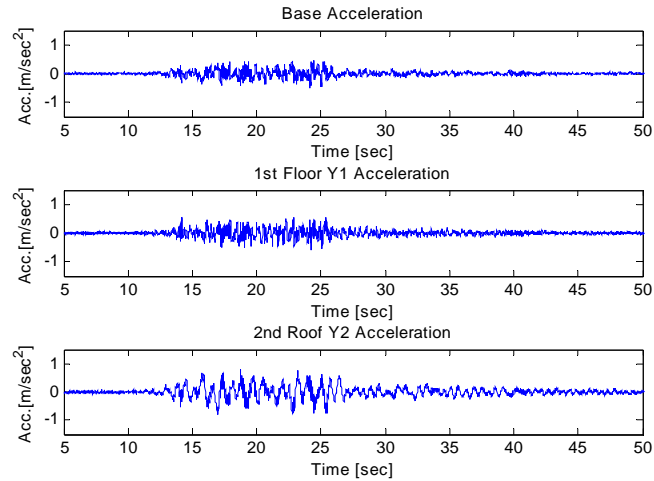


그림 111. 시간에 따른 가속도 응답(Y방향)

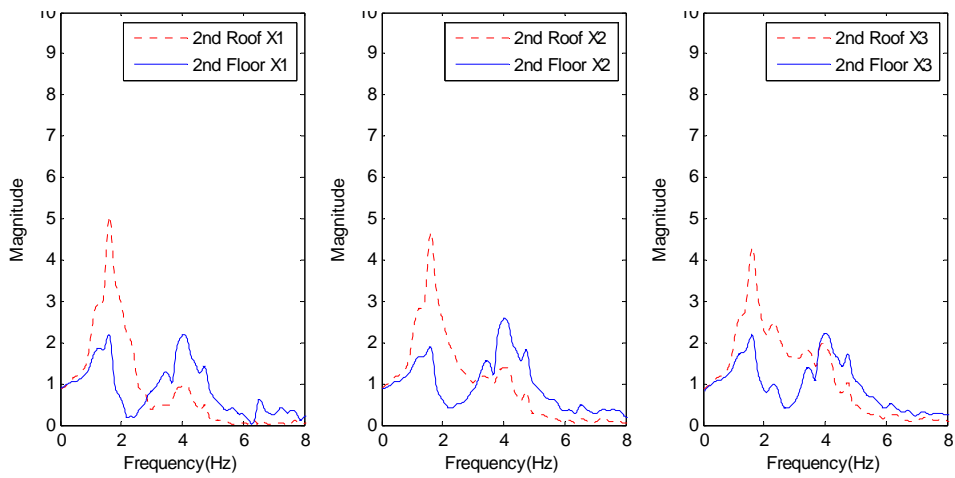


그림 112. 복층부 지붕과 단층부 상부(복층부 바닥) 응답 특성 비교(X방향)

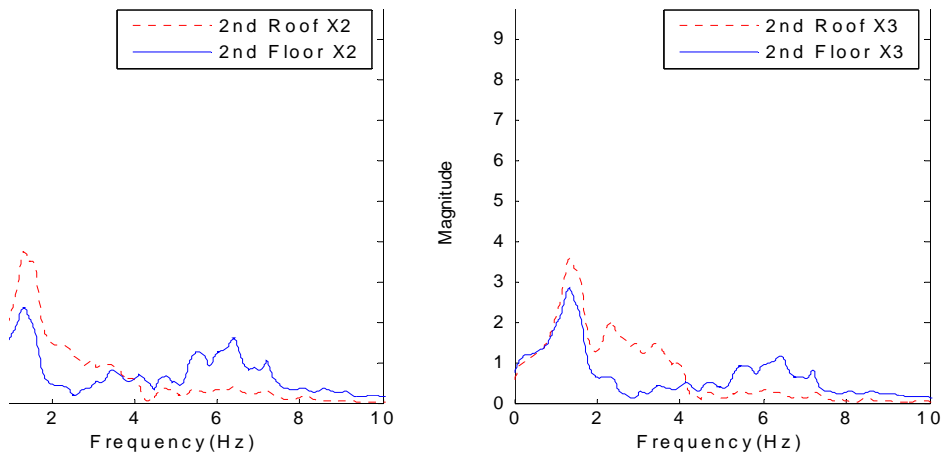


그림 113. 복층부 지붕과 상부(복층부 바닥) 응답 특성 비교(Y방향)

③ 3/3 시험체(Load case3)

상재하중 증가에 따라 발생하는 진동수 감소 현상과 함께, 복층부 지붕의 응답의 편차가 단부(X1)로 갈수록 크게 나타남을 알 수 있다.

또한 단층부는 1차모드 응답보다 2차모드 응답이 더욱 크게 나타나고 있어, 독립된 단층부 응답이 복층부 구조물에 크게 영향을 미침을 알 수 있다.

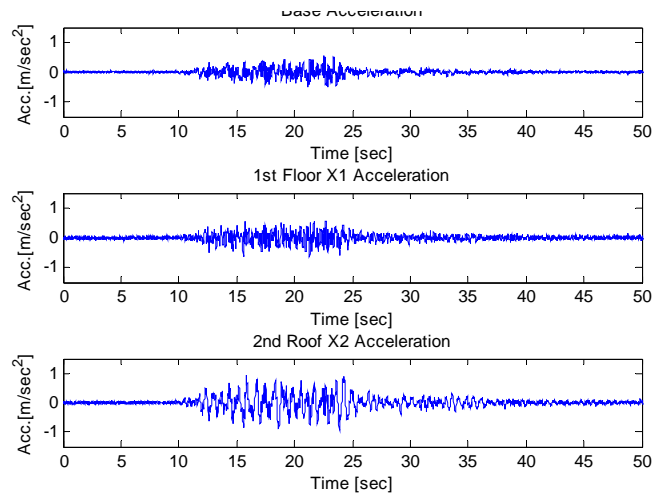


그림 114. 시간에 따른 가속도 응답(X방향)



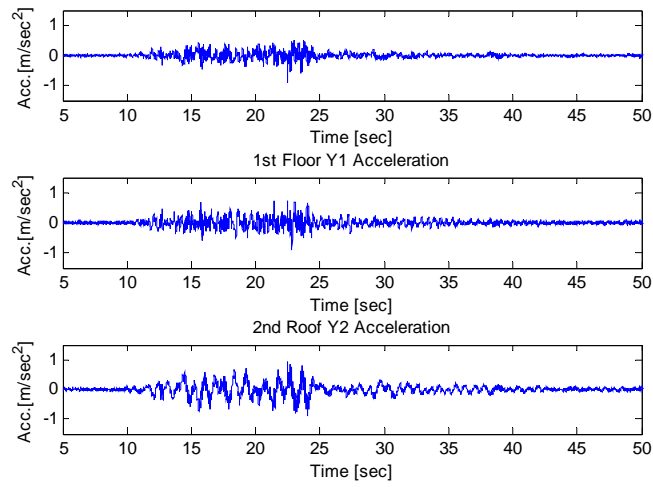


그림 115. 시간에 따른 가속도 응답(Y방향)

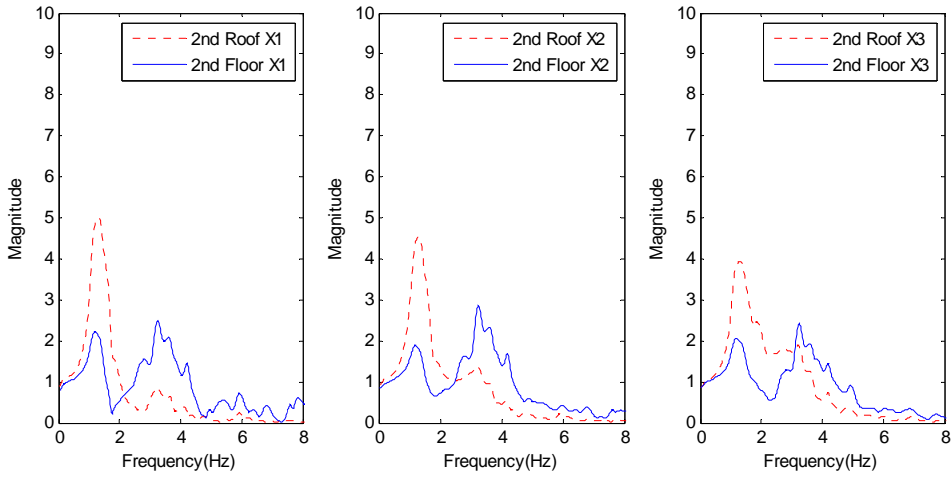


그림 116. 복층부 지붕과 상부(복층부 바닥) 응답 특성 비교(X방향)

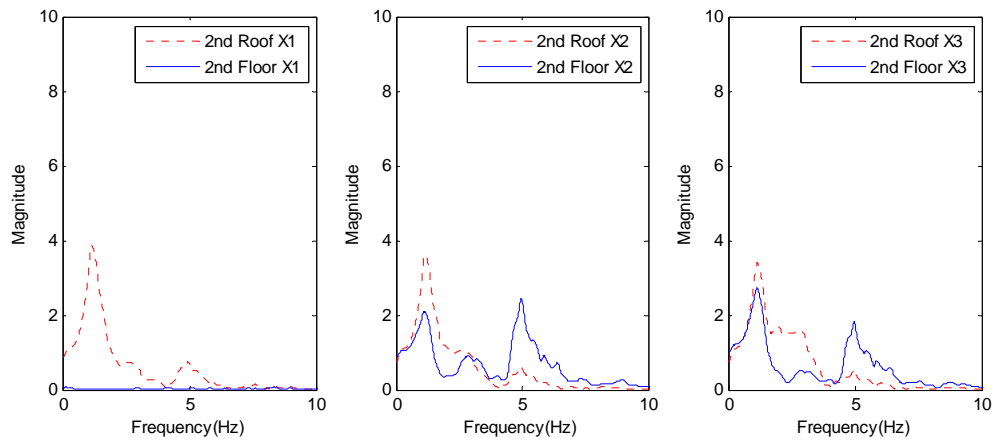


그림 117. 복층부 지붕과 상부(복층부 바닥) 응답 특성 비교(Y방향)

(나)  $S_c$ 지반

	고유진동수 상재하중	단층부 고유진동수(Hz)	복층부 고유진동수(Hz)
	X방향 가진	1/3 시험체	2.01(5.41)
2/3 시험체		1.59(3.78)	1.59
3/3 시험체		1.35(3.90)	1.34
Y방향 가진	1/3 시험체	1.93(4.85)	1.95
	2/3 시험체	1.30(3.93)	1.34
	3/3 시험체	1.07(3.20)	1.23

① 1/3 시험체(Load case1)

$S_c$  지반 특성을 갖는 인공지진에 대한 1/3 시험체(Load case1)의 X, Y방향 응답특성인 시간이력과 전달함수를 아래의 그림에 나타내었다.

X방향 응답은 2Hz에서 1차모드에서 나타나고 있으며, 단층부에서는 5.4Hz에서 2차모드가 나타남을 알 수 있다. 하지만 Y방향 응답은 1.95Hz로 X방향의 1차모드와 다른 진동수가 나타나고 있으며, 2차모드는 크게 나타나지 않고 있다. 상재하중이 적은 경우 1차모드 응답이 크게 작용하고, 2차 모드 응답이 증폭되지 않는 것으로 판단된다.

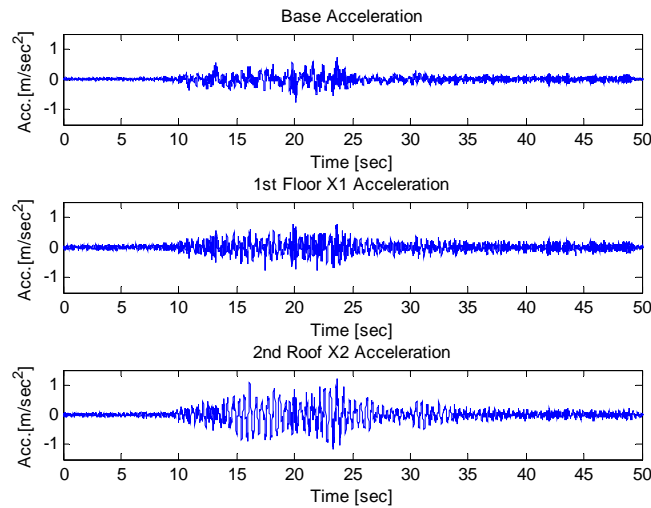


그림 118. 시간에 따른 가속도 응답(X방향)

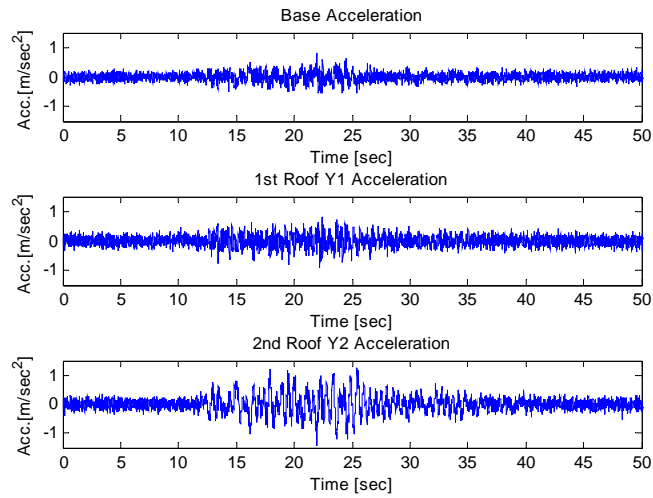


그림 119. 시간에 따른 가속도 응답(Y방향)

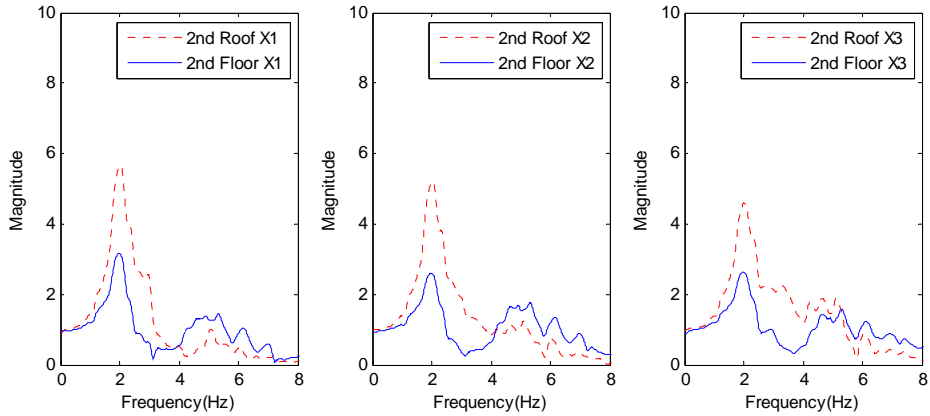


그림 120. 복층부 지붕과 상부(복층부 바닥) 응답 특성 비교(X방향)

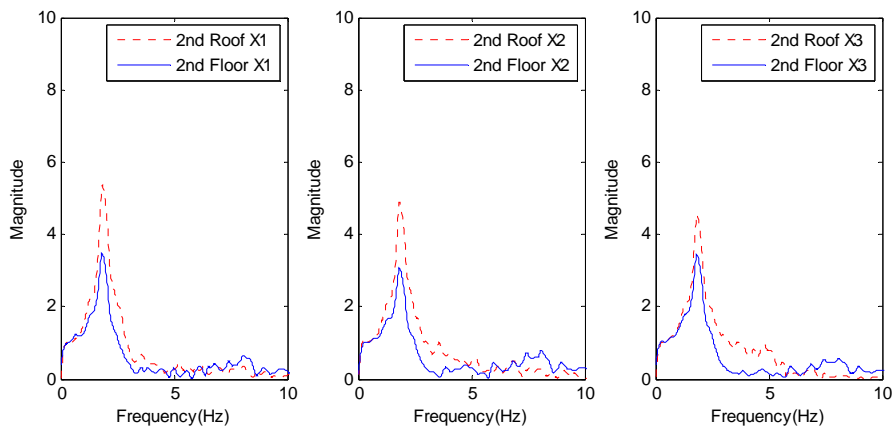


그림 121. 복층부 지붕과 상부(복층부 바닥) 응답 특성 비교(Y방향)

② 2/3 시험체(Load case2)

상재하중이 증가한 2/3 시험체(Load case2)는 진동수 감소와 함께 단층부 응답의 2차모드가 크게 증폭하였다. 하중 증가에 의해 층별 응답이 분리되고 독립된 단층부 응답이 크

계 나타나면서 복층부에 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

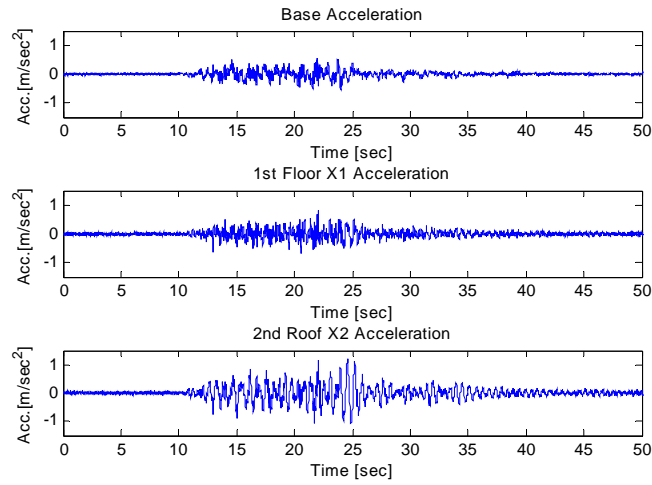


그림 122. 시간에 따른 가속도 응답(X방향)

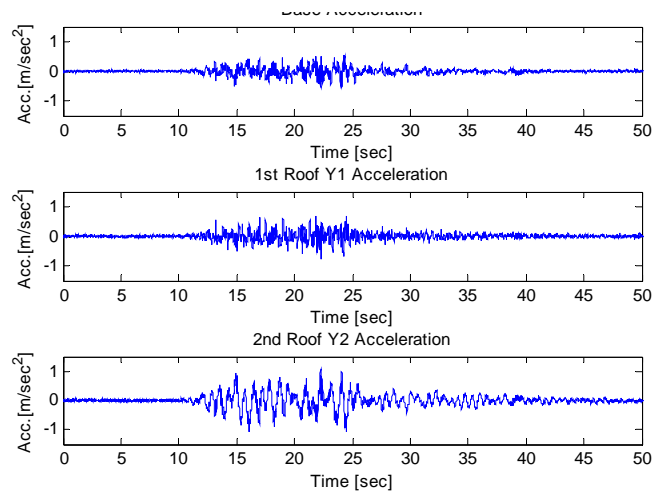


그림 123. 시간에 따른 가속도 응답(Y방향)

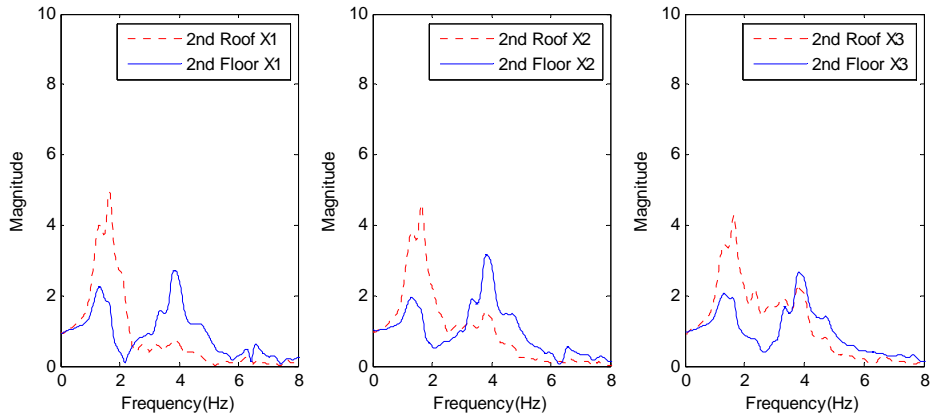


그림 124. 복층부 지붕과 상부(복층부 바닥) 응답 특성 비교(X방향)

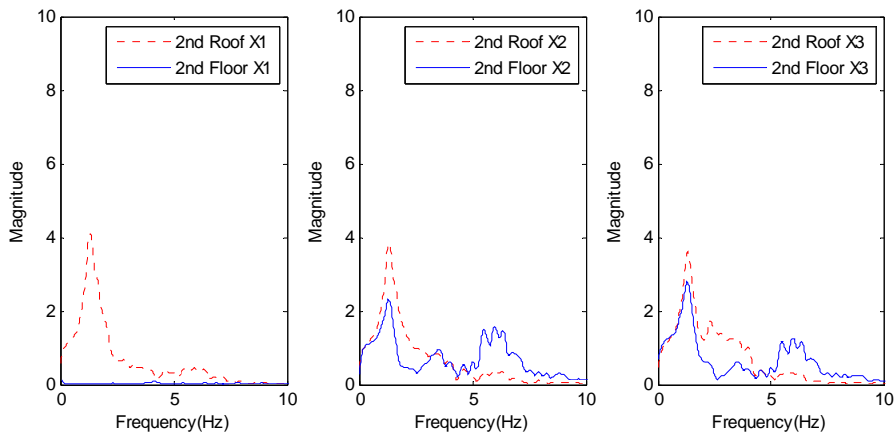


그림 125. 복층부 지붕과 상부(복층부 바닥) 응답 특성 비교(Y방향)

③ 3/3 시험체(Load case3)

3/3 시험체(Load case3)의 응답특성은 X방향에서 상재하중 증가에 따른 진동수 감소, 단층부 2차모드 증가와 같은 동일한 현상이 나타나고 있으나, Y방향은 1차 모드 응답의 비슷한 진동수 영역에서 분리되는 현상이 나타났다.

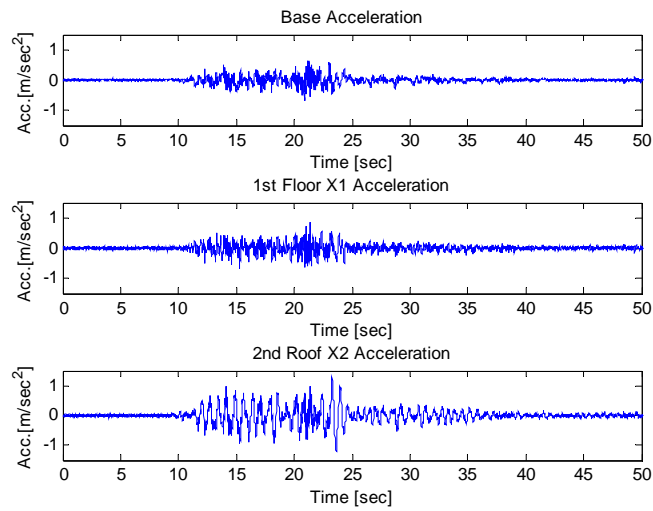


그림 126. 시간에 따른 가속도 응답(X방향)

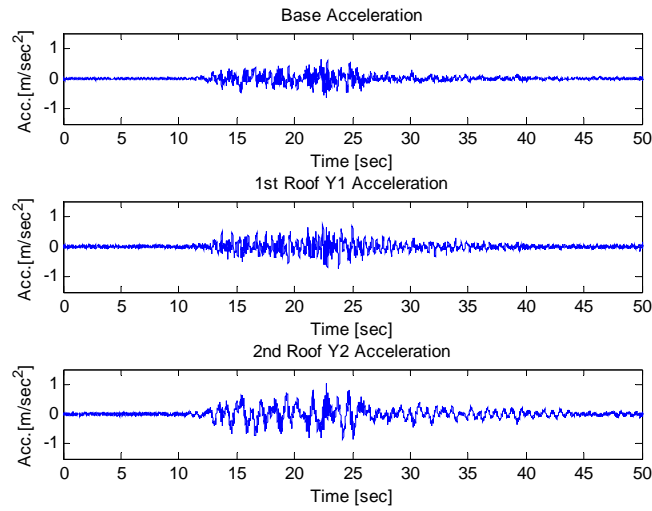


그림 127. 시간에 따른 가속도 응답(Y방향)

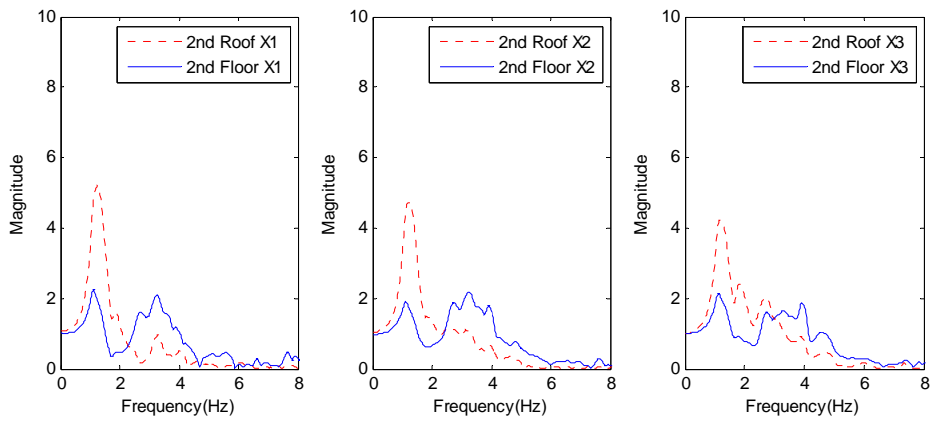


그림 128. 복층부 지붕과 상부(복층부 바닥) 응답 특성 비교(X방향)

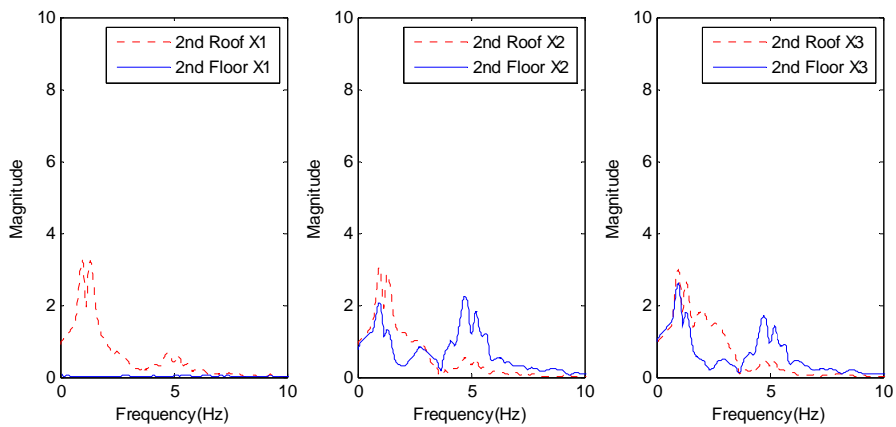


그림 129. 복층부 지붕과 상부(복층부 바닥) 응답 특성 비교(Y방향)

(다) S<sub>d</sub>지반

	고유진동수 상재하중	단층부 고유진동수(Hz)	복층부 고유진동수(Hz)
	X방향 가진	1/3 시험체	2.14(6.44)
2/3 시험체		1.93(4.15)	1.91
3/3 시험체		1.42(4.06)	1.42
Y방향 가진	1/3 시험체	2.02(3.19)	2.02
	2/3 시험체	1.38(3.88)	1.61
	3/3 시험체	1.26(3.33)	1.27

① 1/3 시험체(Load case1)

S<sub>d</sub> 지반은 하중의 특성상 0.03g로 조정하여 가진 하였으며, 그에 따른 1/3 시험체(Load case1)의 응답특성을 평가한 결과를 아래의 그림에 나타내었다.

그림에서와 같이 Y방향은 2차 모드에 해당하는 주파수가 나타나지 않음을 알 수 있으며, X방향은 2Hz에서 1차 모드진동수를 나타낸 후, 5~6Hz 사이에서 2차 모드 진동수가 나타남을 알 수 있다. 구조물의 방향성에 의해 독립된 단층부의 응답이 복층부에 영향을 미침을 알 수 있다.

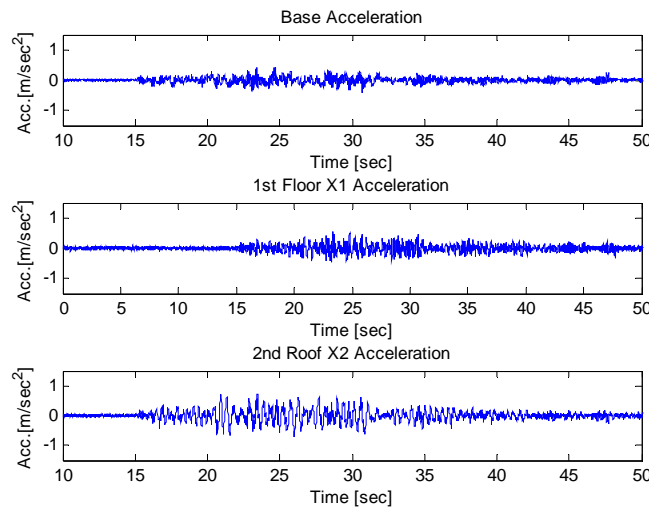


그림 130. 시간에 따른 가속도 응답(X방향)

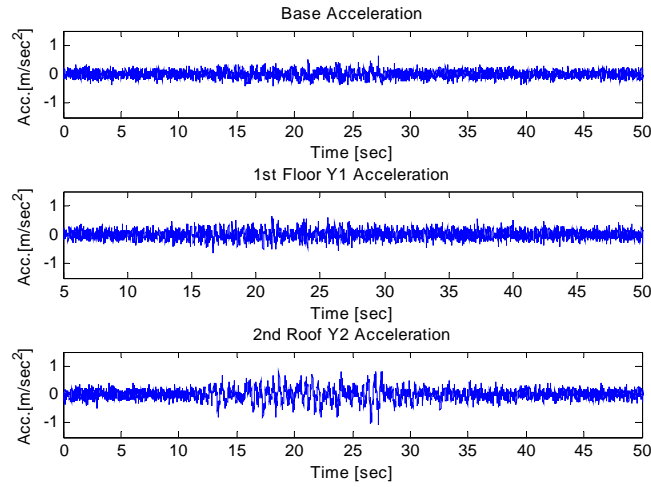


그림 131. 시간에 따른 가속도 응답(Y방향)

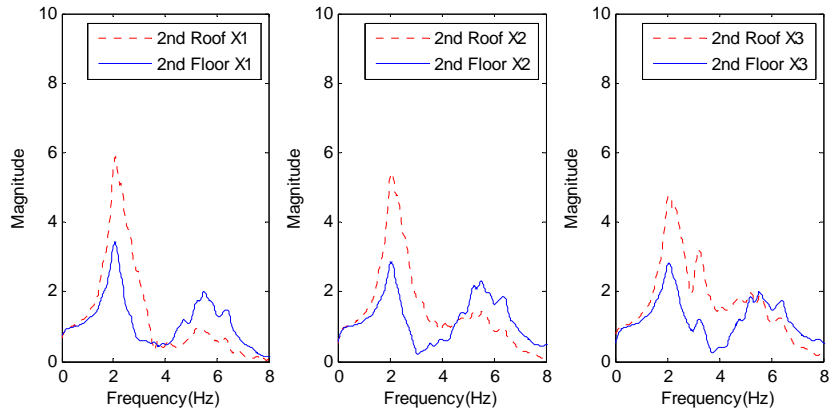


그림 132. 복층부 지붕과 상부(복층부 바닥) 응답 특성 비교(X방향)

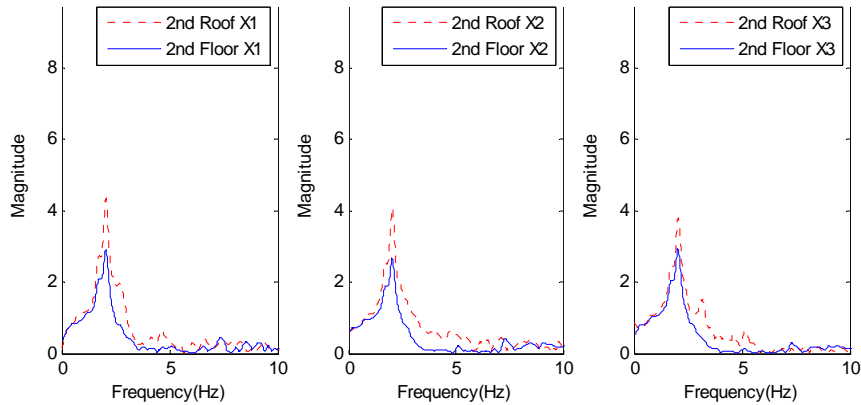


그림 133. 복층부 지붕과 상부(복층부 바닥) 응답 특성 비교(Y방향)

② 2/3 시험체(Load case2)

상재하중 증가에 따라 단층부 2차 모드 응답이 크게 증폭되어 1차 모드보다 큰 증폭비를 나타내고, Y방향응답에서도 3Hz에서 2차 모드, 7Hz에서 3차모드가 발생하고 있다. 이는 1/3 시험체(Load case1)의 Y방향 응답과 큰 차이를 보이는 것은 물론 다른 지반하중에



따른 응답 특성과도 구별되는 현상이다.

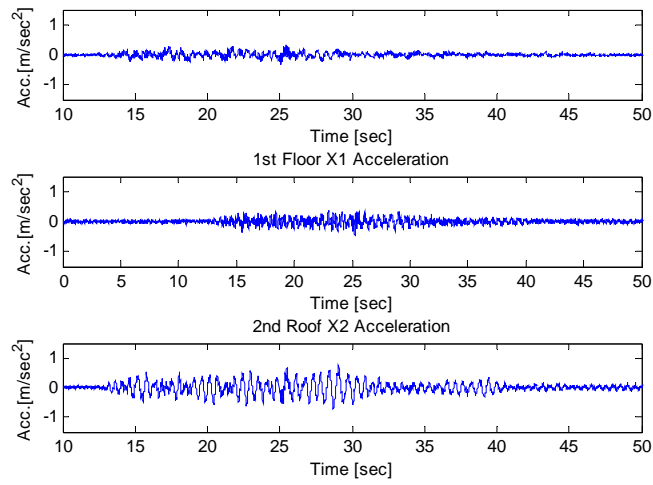


그림 134. 시간에 따른 가속도 응답(X방향)

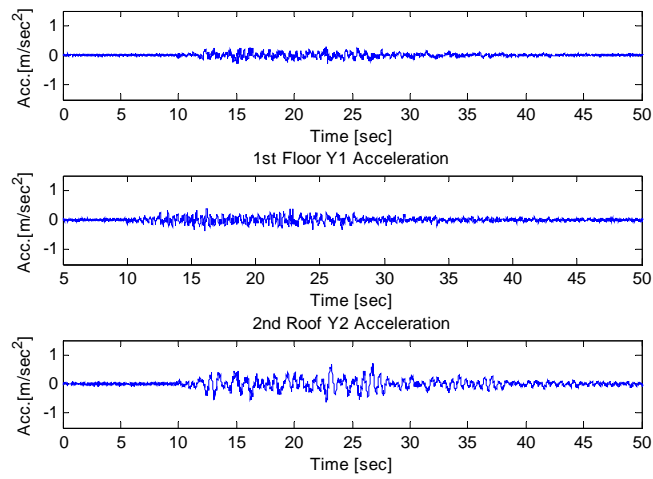


그림 135. 시간에 따른 가속도 응답(Y방향)

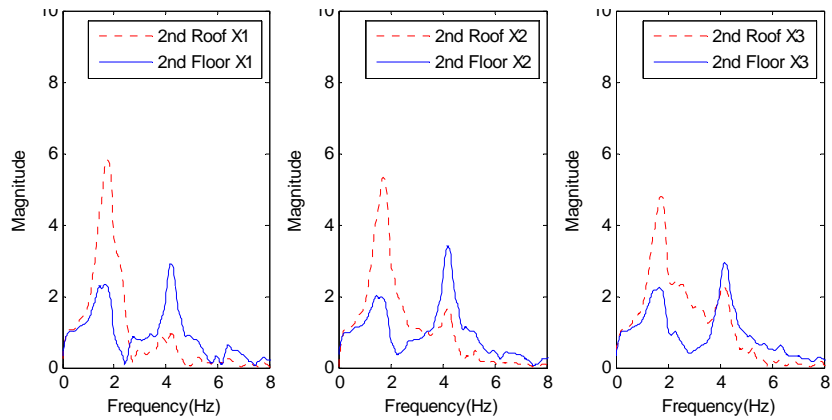


그림 136. 복층부 지붕과 상부(복층부 바닥) 응답 특성 비교(X방향)

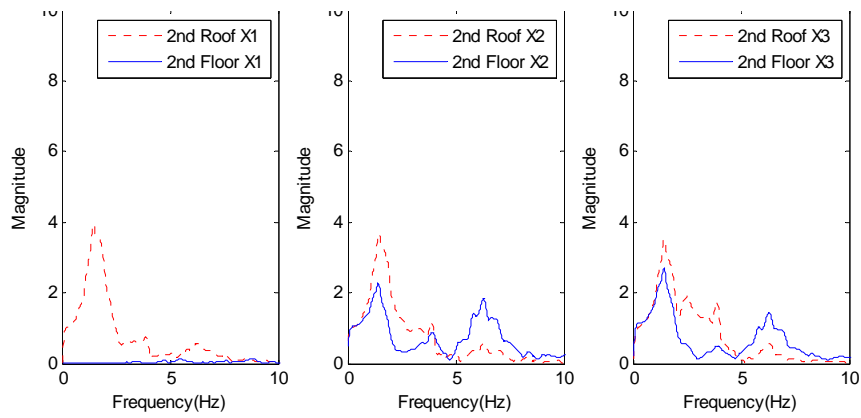


그림 137. 복층부 지붕과 상부(복층부 바닥) 응답 특성 비교(Y방향)

③ 3/3 시험체(Load case3)

3/3 시험체(Load case3)는 상재하중 증가에 따른 현상이 동일하게 발생하였다. 또한 Y방향 주파수 응답에서도 총 3개의 모드가 나타나고 있다.

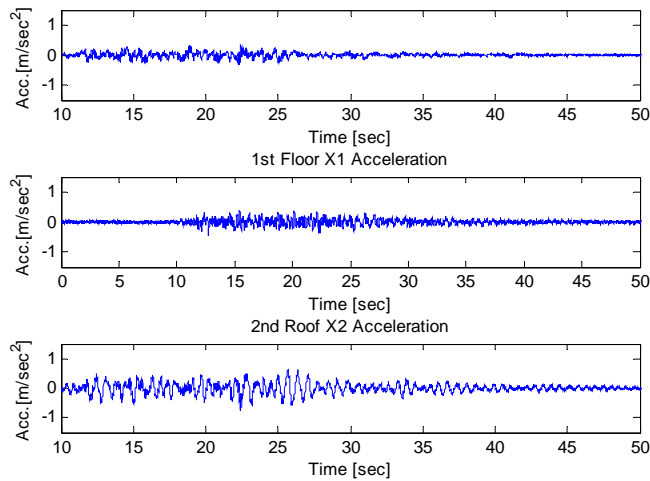


그림 138. 시간에 따른 가속도 응답(X방향)

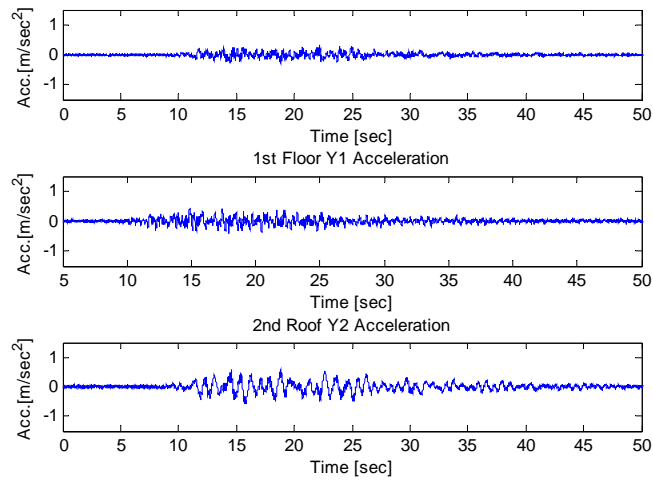


그림 139. 시간에 따른 가속도 응답(Y방향)

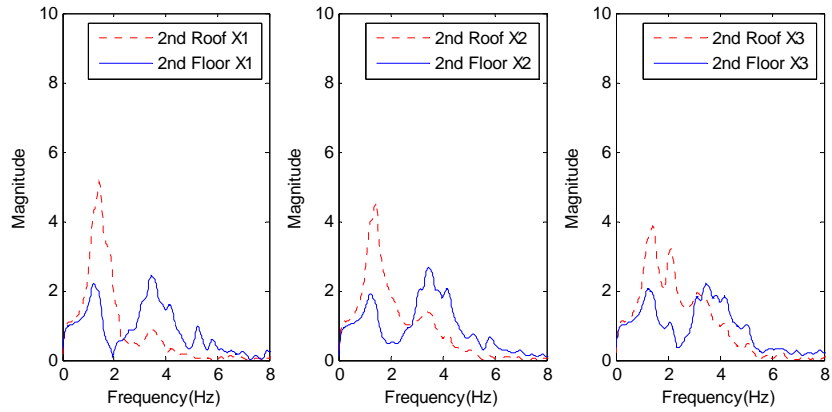


그림 140. 복층부 지붕과 상부(복층부 바닥) 응답 특성 비교(X방향)

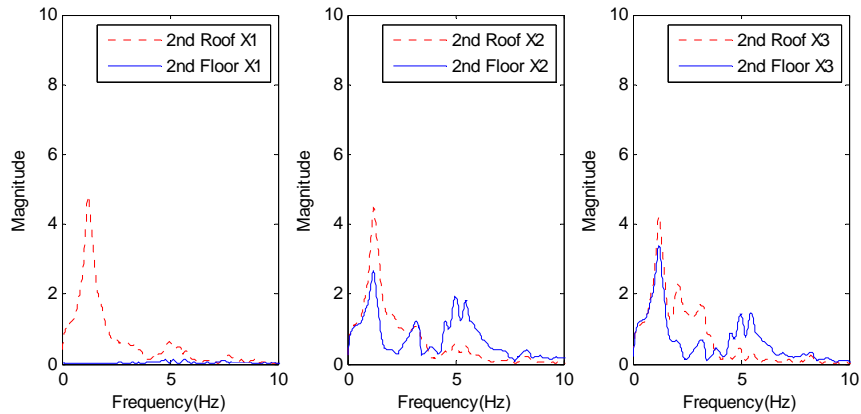


그림 141. 복층부 지붕과 상부(복층부 바닥) 응답 특성 비교(Y방향)

마) 지진하중에 따른 구조물의 강성 변화

El Centro 및 지반 특성별 인공지진하중의 실험 결과를 바탕으로 상재하중별 최대가속도 및 강성을 추출하였다.

(가) El Centro 지진파에 의한 최대가속도 및 고유진동수

표 60. El Centro 상재하중별 최대가속도 (Unit : m/sec<sup>2</sup>)

상재하중 가속도계 방향	1/3 시험체 (Load case1)	2/3 시험체 (Load case2)	2/3 시험체 (Load case2)
X방향	1.475	1.610	1.263
Y방향	1.031	0.790	0.730

표 61. El Centro 상재하중별 고유진동수 (Unit : cycle/sec)

상재하중 가속도계 방향	1/3 시험체 (Load case1)	2/3 시험체 (Load case2)	2/3 시험체 (Load case2)
X방향	2.404	1.607	1.305
Y방향	0.136	2.417	2.026

(나) Sb지반 인공지진에 의한 최대가속도 및 고유진동수

표 62. 인공지진(sb 0.07g)상재하중별 최대가속도 (Unit : m/sec<sup>2</sup>)

상재하중 가속도계 방향	1/3 시험체 (Load case1)	2/3 시험체 (Load case2)	2/3 시험체 (Load case2)
X방향	1.352	1.059	1.000
Y방향	1.259	0.886	0.999

표 63. 인공지진(sb 0.07g) 상재하중별 고유진동수 (Unit : cycle/sec)

상재하중 가속도계 방향	1/3 시험체 (Load case1)	2/3 시험체 (Load case2)	2/3 시험체 (Load case2)
X방향	1.953	1.596	1.375
Y방향	1.978	1.575	1.358

(다) Sc지반 인공지진에 의한 최대가속 및 고유진동수

표 64. 인공지진(sc 0.07g)상재하중별 최대가속도 (Unit : m/sec<sup>2</sup>)

상재하중 가속도계 방향	1/3 시험체 (Load case1)	2/3 시험체 (Load case2)	2/3 시험체 (Load case2)
X방향	1.337	1.325	1.264
Y방향	1.274	1.190	1.335

표 65. 인공지진(sc 0.07g) 상재하중별 고유진동수 (Unit : cycle/sec)

상재하중 가속도계 방향	1/3 시험체 (Load case1)	2/3 시험체 (Load case2)	2/3 시험체 (Load case2)
X방향	2.032	1.589	1.341
Y방향	1.948	1.341	1.232

(라) Sd지반 인공지진에 의한 최대가속 및 고유진동수

표 66. 인공지진(sd 0.03g)상재하중별 최대가속도 (Unit : m/sec<sup>2</sup>)

상재하중 가속도계 방향	1/3 시험체 (Load case1)	2/3 시험체 (Load case2)	2/3 시험체 (Load case2)
X방향	0.771	0.795	0.819
Y방향	0.818	0.618	0.619

표 67. 인공지진(sd 0.03g) 상재하중별 고유진동수 (Unit : cycle/sec)

상재하중 가속도계 방향	1/3 시험체 (Load case1)	2/3 시험체 (Load case2)	2/3 시험체 (Load case2)
X방향	2.156	1.585	1.417
Y방향	2.024	1.611	1.269

(마) El Centro 지진파에 의한 강성 비교

표 68. El Centro 상재하중별 강성 비교(X방향)

상재하중	1/3 시험체 (Load case1)	2/3 시험체 (Load case2)	2/3 시험체 (Load case2)
질량(ton)	1.625	2.944	4.271
강성(kN/m)	370.526	299.91	286.875

표 69. El Centro 상재하중별 강성 비교(Y방향)

상재하중	1/3 시험체 (Load case1)	2/3 시험체 (Load case2)	2/3 시험체 (Load case2)
질량(ton)	1.625	2.944	4.271
강성(kN/m)	130.556	187.608	186.779

(바) Sb지반 인공지진에 의한 강성 비교

표 70. 인공지진(sb 0.07g) 상재하중별 강성 비교(X방향)

상재하중	1/3 시험체 (Load case1)	2/3 시험체 (Load case2)	2/3 시험체 (Load case2)
질량(ton)	1.625	2.944	4.271
강성(kN/m)	244.542	295.819	318.476

표 71. 인공지진(sb 0.07g) 상재하중별 강성 비교(Y방향)

상재하중	1/3 시험체 (Load case1)	2/3 시험체 (Load case2)	2/3 시험체 (Load case2)
질량(ton)	1.625	2.944	4.271
강성(kN/m)	250.843	288.085	310.650

(사) Sc지반 인공지진에 의한 강성 비교

표 72. 인공지진(sc 0.07g) 상재하중별 강성 비교(X방향)

상재하중	1/3 시험체 (Load case1)	2/3 시험체 (Load case2)	2/3 시험체 (Load case2)
질량(ton)	1.625	2.944	4.271
강성(kN/m)	264.726	293.230	302.921

표 73. 인공지진(sc 0.07g) 상재하중별 강성 비교(Y방향)

상재하중	1/3 시험체 (Load case1)	2/3 시험체 (Load case2)	2/3 시험체 (Load case2)
질량(ton)	1.625	2.944	4.271
강성(kN/m)	243.292	208.842	255.678

(아) S<sub>d</sub>지반 인공지진에 의한 강성 비교

표 74. 인공지진(sd 0.03g) 상재하중별 강성 비교(X방향)

상재하중	1/3 시험체 (Load case1)	2/3 시험체 (Load case2)	2/3 시험체 (Load case2)
질량(ton)	1.625	2.944	4.271
강성(kN/m)	298.021	291.755	338.230

표 75. 인공지진(sd 0.03g) 상재하중별 강성 비교(Y방향)

상재하중	1/3 시험체 (Load case1)	2/3 시험체 (Load case2)	2/3 시험체 (Load case2)
질량(ton)	1.625	2.944	4.271
강성(kN/m)	262.646	301.406	271.266

EI Centro 및 지반특성별 인공지진하중에 대한 동적성능 평가를 검토한 결과 상재 하중이 증가할수록 최대가속도는 감소하며, 이는 하중 증가에 따라 증가한 강성과 감쇠비에 의해 진폭이 감소하는 것으로 판단된다.

EI Centro 및 지반특성별 인공지진하중에 대하여 진동수에 따른 강성을 추측한 결과, 전체 적으로 상재하중이 증가할수록 강성이 증가하였다.

(4) 구조해석 모델링

구조해석 모델링은 범용 구조해석 소프트웨어인 midas Gen으로 수행하였다. 실험결과와 비교 분석을 위하여 구조해석 모델링 역시 실험크기의 1/4로 축소하여 모델링 하였으며, 시험체와 동일한 부재 요소와 크기로 모델링하였다. 그러나 지붕하중을 재하 하는 방법과 이미지를 고려하여 신한옥 1/4 대규모 시험체와 다르게 서까래를 모델링 하였다.

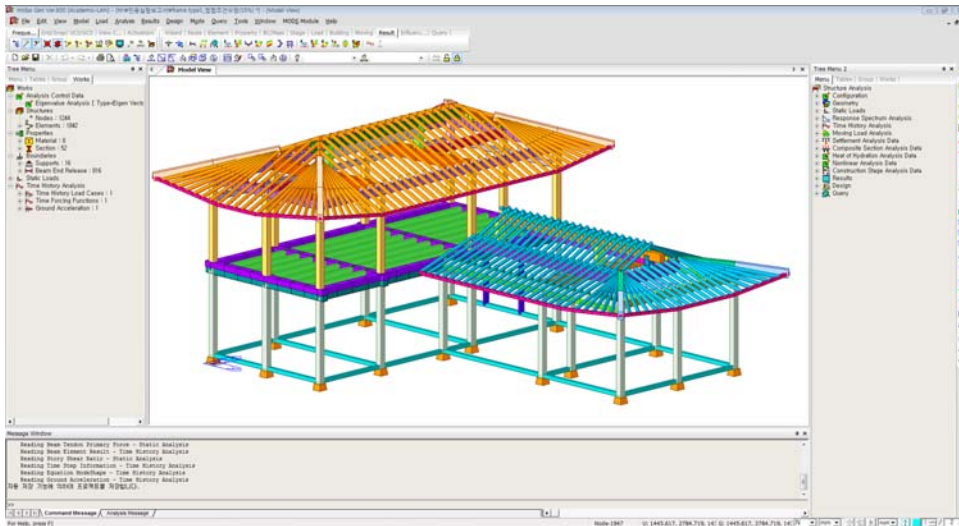


그림 142. 구조해석 모델링

또한 철물 접합은 보-기둥의 접합부 강성으로 모델링하였다. 구조해석모델링과 1/4 시험체의 무게를 동일하게 맞추기 위하여 1/4시험체의 중량을 계산하여 구조해석모델링에 부족한 무게는 추가하여 재하 하였다. 추가적으로 재하 한 무게는 다음 표와 같다.

표 76. 추가 재하 무게

하중재하요소	추가 무게(N)
1층 서까래	30.8
2층 서까래	29.1
2층 바닥	29.5
1층 토대	35.6

아래의 그림과 같이 평방과 창방 사이의 연결은 압축력만 받는 연결재를 추가하여 모델링 하여 평방과 창방이 일체로 거동하게 하였다. 또한 서까래와 도리 사이에도 연결재를 두어 압축력만 작용할 수 있게 한다.

다음의 구조해석 모델로 고유치 해석을 수행하여, 신한옥 1/4대규모 축소 시험체의 고유진동수와 유사함을 확인하고자 하였다.



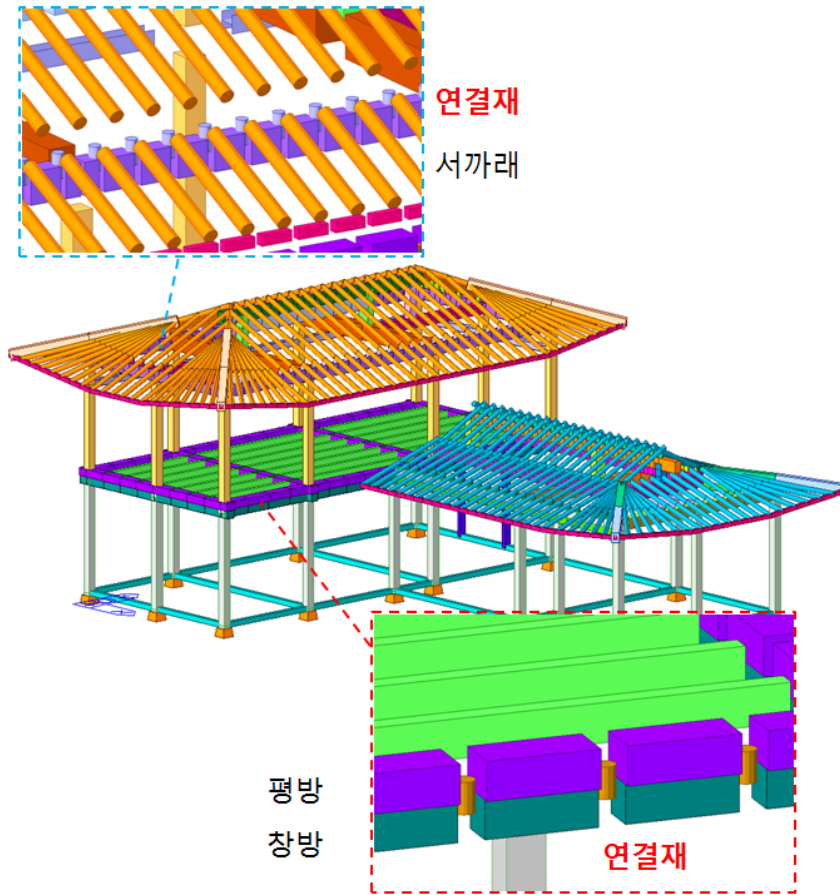


그림 143. 구조해석 모델링 압축 연결재 사용

표 77. 구조해석 모델링을 통한 고유치 해석 결과

모드	모드참여율(%)			고유진동수(Hz)
	TRAN-X	TRAN-Y	ROTN-Z	
1	0.27	93.04	0.02	1.22
2	95.50	0.23	33.4	1.34
3	0.28	2.97	1.01	1.59
4	0.49	2.24	0.299	3.45

(5) 소결

실험한옥의 1/4 축소 시험체에 대한 진동대 실험을 통해 확인한 사항은 다음과 같다.

- 동적특성을 확인하는 충격하중 및 조화하중 실험결과 단층부 및 복층부 구조물의 1차모드 고유진동수가 서로 다름을 확인하였다. 이는 동일한 1층의 경우에도 접합부가 완전한 강접 상태로 연결되어 있지 않음을 의미한다.
- 동일한 하중에 대해서 독립적인 거동 특성에 의해 1층에서 발생한 진동특성이 복층부 구조물에 2차 모드를 발생시키고, 그에 따른 비틀림이 발생하였다. 이러한 현상은 상재하중이 증가할수록 단층부의 2차 모드를 크게 증폭시켜 단층부와 복층부가 다른 거동을 일으키도록 하는 원인이 될 수 있다.
- 공진하중 테스트 결과 나타난 자유진동 파형을 바탕으로 고유진동수와 감쇠비를 평가한 결과 상재하중 증가에 따라 진동수가 감소하고 감쇠비가 증가하는 것으로 나타났으나, 단순히 상재하중 증가에 의한 결과가 아닌 증가된 하중에 의해 접합부의 강성도 함께 증가하여 나타난 결과로 판단되며, 증가한 하중은 접합부 이력에서 감쇠를 증가시키는 효과도 갖는 것으로 판단된다.
- El Centro 및 지반특성별 인공지진하중에 대한 동적성능 평가를 검토한 결과 상재하중이 증가할수록 최대가속도는 감소하는 것으로 나타났다. 이는 하중 증가에 따라 증가한 강성과 감쇠비에 의해 진폭이 감소하는 것으로 판단된다.
- 다양한 지진하중에 대한 진동대 실험 결과를 바탕으로 상재하중별 진동수에 따른 횡강성을 추출한 결과, 대부분의 결과에서 상재하중이 증가할수록 횡강성이 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 상재하중이 시험체 접합부를 압축하여 이곳에서의 마찰력이 증대되어 횡강성이 증가하는 것으로 판단할 수 있으며, 이에 대한 자세한 분석은 후속 연구에서 추가적인 실험 및 이론적인 검증이 필요하다고 사료된다.