

# 건물의 상시진동계측과 인력가진계측을 통한 동적특성 비교

## Comparison of Dynamic Property Estimation by Transient Vibration and Synchronized Human Excitation

장 영 주\*      조 봉 호\*\*      김 흥 진†  
Jang, Young-Ju      Cho, Bong-Ho      Kim, Hongjin

### 요 지

본 논문에서는 저층건물을 대상으로 상시진동계측과 인력가진계측을 수행하고 동적특성을 산정하여 계측방법에 따른 고유진동수, 감쇠비, 모드형상 식별결과를 비교하였다. 이를 통해 가진기 실험이 어려운 구조물에 대한 동적특성 산정방법의 유효성을 검증하였다. 계측결과 인력가진계측을 통해 구한 감쇠비가 상시진동계측을 통해 구한 감쇠비에 비해 큰 값을 산정하는 것을 확인할 수 있었으며, 계측방법과 상관없이 모드형상은 거의 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 장방향 건물의 경우 장방향의 강성이 커서 단방향으로 1차모드가 나타날 것으로 예측되었으나, 내부 칸막이벽이 조적조인 경우 조적에 의한 강성기여분이 상당히 커서 장방향으로 1차모드가 나타남을 알 수 있었다.

**핵심용어** : 상시진동, 인력가진, 시스템식별, 고유진동수, 감쇠비, 모드형상

### Abstract

The transient vibration test and synchronized human excitation is performed for low-rise concrete buildings and their identified natural frequency, damping ratio, and mode shape are compared. Form the identified dynamic parameters, it was found that the damping ratio obtained through the synchronized human excitation test is greater than those obtained from the transient vibration test. However, the mode shapes of the first mode are not significantly different regardless of the test method. Further, the stiffness of the interior brick partition considerably affect the stiffness of the entire building such that the first natural mode of rectangular shaped building occurred in the longitudinal direction rather than transverse direction.

**Keywords** : *transient vibration, synchronized human excitation, system identification, natural frequency, damping ratio, mode shape*

### 1. 서 론

일반적으로 구조동역학에서의 가장 기본적인 문제는 대상 구조물의 진동특성을 나타내는 변수를 정확히 결정하는 것이다. 이러한 변수에는 고유진동수, 감쇠비, 모드형상 등이 있으며, 정확한 변수산정을 통해 진동특성을 산정하는 것은 과다한 진동문제의 해결, 해석적으로 모델링하기에 복잡한 구조물의 동적해석, 해석모델의 검증 및 개선, 그리고 사용 중인 구조물에 발생하는 동적하중 및 응답의 계산 등과 같은 다양한 목적에 사용된다(한중석, 1995). 또한 능동 또는 수

동제어장치를 이용하여 구조물의 진동성능을 보강하고 동적 응답을 저감하고자 할 때에도 구조물의 정확한 동적특성을 파악하는 것은 매우 중요한 사항이다.

완공된 구조물의 동적특성을 계측하기 위하여 사용되는 방법에는 가진기 실험, 인력가진법, 상시진동계측 등이 있다. 가진기 실험은 진동발생기를 이용하여 일정 진동수로 구조물을 가진한 후 구조물의 응답을 계측하는 방법이다(Chopra, 2007). 가진기 실험의 경우 가진력이 커서 노이즈의 영향을 받지 않아 신뢰성있는 결과를 얻을 수 있는 반면에, 가진기가 고가이고 가진기 중량에 대한 제약 등으로 인해 동적특성 계측에 사용되

† 책임저자, 정회원 · 경북대학교 건축토목공학부 조교수  
Tel: 053-950-7539 ; Fax: 053-950-7539  
E-mail: hjk@knu.ac.kr

\* 경북대학교 건축토목공학부 석사과정

\*\* 아주대학교 건축학부 조교수

• 이 논문에 대한 토론을 2011년 8월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2011년 10월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

기에는 현실적인 제약이 많다. 인력가진계측은 인력으로 건물 을 가진시킨 후 가진을 중지하여 건물의 자유진동과형을 얻는 방법으로 노이즈의 영향을 받지 않아 신뢰성있는 동특성을 산정할 수 있는 장점이 있다. 그러나 고차모드의 경우 인력으로 정확히 가진 하기 어려워 고유진동수가 적은 건물에서만 정확한 값을 산정할 수 있다(윤성원, 2003). 상시진동계측은 추가적인 외력이 없는 상태에서 가장 쉽게 계측할 수 있는 방법으로 고 차 모드까지 산정할 수 있는 장점이 있다. 그러나 건물의 가속 도 응답 진폭이 작아 노이즈에 의한 영향이 커서 센서와 데이 터 수집장치의 높은 정밀도가 요구된다(조순호, 2004).

본 논문에서는 저층건물을 대상으로 상시진동계측과 인력 가진계측을 수행하여 동적특성을 산정하였다. 이를 통해 가 진기 실험이 어려운 구조물에 대한 동적특성 산정방법의 유효성을 검증하였다. 계측은 저층건물 4개동에서 수행하였으 며, 먼저 건물의 상시진동계측을 통하여 동특성을 분석한 후 이를 바탕으로 건물의 고유 진동수를 산정하여 인력가진 실험을 수행하였다.

## 2. 계측 개요

### 2.1 계측 대상 건물

본 연구를 위한 대상 건물은 경북대학교 내에 위치한 4~5층 저층 건물 4동이다(표 1). 대상건물 모두 전 층이 동일 한 평면을 가지고 있으며 평면 형상 또한 모두 직사각형이다 (그림 1). 표 1에서 볼 수 있듯이 건물의 장변이 단변에 비해 상당히 크기 때문에 장변의 강성이 단변의 강성에 비해 상대적으로 크고 장변방향의 고유진동수가 단변방향에 비해 크게 예측되는 건물이다. 장변 대 단변의 비는 건물 3이 3.18로

표 1 실험 건축물의 개요

건물	준공연도	층수	높이(m)	평면(m)		
				장변(A)	단변(B)	A/B
건물 1	1973	4	14.0	70.0	18.4	3.80
건물 2	1976	4	21.2	67.0	17.0	3.94
건물 3	1980	4	14.8	54.0	17.0	3.18
건물 4	1995	5	18.6	87.0	16.6	5.24

가장 작고 건물 4가 5.24로 가장 크다. 대상건물 모두 철근 콘크리트조의 건물이고 칸막이벽은 조적조로 이루어져 있다.

### 2.2 계측 장비

계측을 위해 가속도계, 데이터 수집장치, 메트로놈이 사용 되었다(그림 2). 가속도계는 Force-balanced 형의 가속도계



(a) 데이터 수집장치



(b) 가속도계

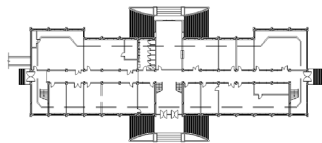


(c) 메트로놈

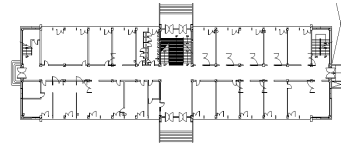


(d) 계측시스템 구성

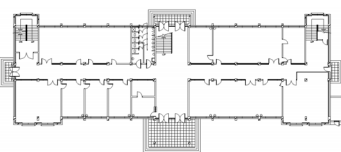
그림 2 계측시스템



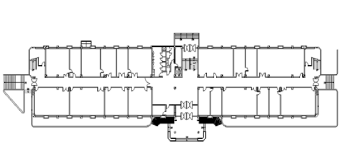
(a) 건물 1



(b) 건물 2



(c) 건물 3



(d) 건물 4

그림 1 계측 건물 전경 및 기준층 평면도

인 Kinematics 사의 Episor ES-U2를 6개 사용하였고, 데이터 수집장치는 24bit 분해능을 갖는 Keynes Controls 사의 Netpod 4003 System을 사용하였으며 메트로놈은 SEIKO 사의 SQ100-88을 사용하였다.

상시진동의 경우 진동크기가 매우 작기 때문에 가속도계의 계측 범위는 가속도계가 갖는 가장 정밀한 수준인  $\pm 0.25g$ 로 하였으며, 계측 Sampling rate는 200Hz으로 하였다. 메트로놈의 템포범위는 30~250beat이며, 이를 주파수로 전환하면 0.50Hz~4.16Hz로 나타낼 수 있다.

### 3. 상시진동계측

상시진동의 경우 외부하중을 계측할 수 없기 때문에 계측 결과를 바탕으로 고유진동수, 감쇠비, 모드형상을 식별하기 위해 Output-only SI(System Identification) 기법이 필요하다. 본 연구에서는 추계론적 부공간 규명법(Stochastic Subspace Identification, SSI, Peeters 등, 1999)을 이용하여 수행하였다. SSI기법은 입력하중을 규정하여 Input과 Output 관계로부터 시스템식별 결과를 얻을 수 있으며, 상시진동계측과 같이 입력하중을 정의할 수 없는 상황에서도 시스템식별이 가능한 장점이 있다. 또한, 데이터를 주파수 영역으로 변환하지 않고 직접 시계열 데이터로부터 상태방정식을 구한 후 이로부터 동특성을 추출하기 때문에 데이터분석에 많은 계산이 필요하기는 하지만 계측시간이 짧아도 안정적인 식별결과를 얻을 수 있는 장점이 있다(김지영 외, 2009).

계측된 가속도는 시스템식별 계산과정에서 데이터의 수를 줄이기 위해 10Hz로 샘플링하였으며, 상태방정식의 차수에 따른 식별된 모드의 특이치와 급격한 차이 등을 구분하기 위하여 안정화 도표(Stabilization Chart)를 통해 결과를 비교하였다. 시스템식별은 Matlab의 N4SID 명령어를 이용하여 수행하였으며, 이 때 입력하중에 대한 값을 0으로 하여 수행하였다. 이 경우 입력하중은 백색잡음으로 가정된다.

#### 3.1 층별 양방향 계측

고유진동수 만을 구하기 위해서는 최상층에 설치된 1개 또는 2개의 센서만으로 충분하지만 고유진동수가 어떠한 모드에 해당하는지 파악하기 위해서는 각 고유진동수에 해당하는 모드형상이 필요하다. 건물 전체의 모드형상을 분석하기 위해서는 모든 층에 가속도계를 설치하여 계측하는 것이 요구 되어진다(김지영, 2007). 또한 바닥 슬라브의 강막(rigid diaphragm)을 가정하더라도  $x$ 축 방향과  $y$ 축 방향의 병진

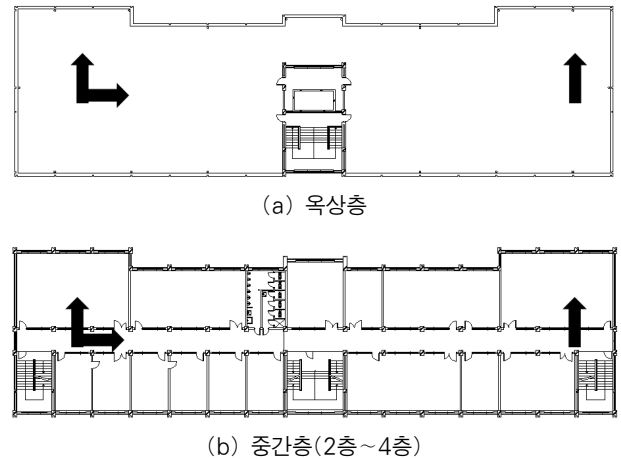


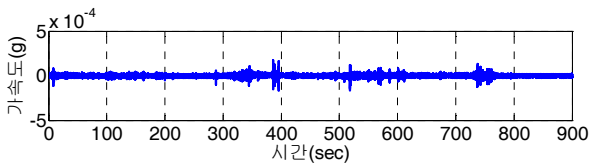
그림 3 건물 1 옥상층 및 중간층 가속도계 설치 위치 및 방향

운동 및  $z$ 축을 중심으로 한 회전운동을 계측하기 위해서는 층별 최소 3개의 가속도가 필요하다. 따라서 4층 건물의 경우 건물 전체의 모드형상을 분석하기 위해 최소 12개의 가속도를 동시에 설치하여 계측을 수행하여야만 한다.

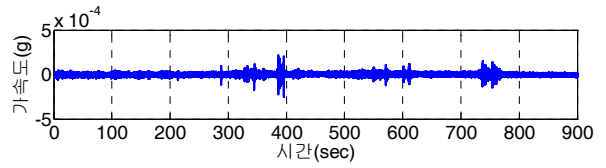
하지만 본 연구에 사용된 가속도계가 6개로 부족하여 건물의 전 층에 가속도계를 설치하여 실험하는 것이 불가능하므로 본 연구에서는 모드형상의 파악을 위해 2개 층을 동시에 계측하되 그 중 한 층(옥상층)에 설치된 가속도계를 기준으로 고정시키고 나머지 센서의 계측위치는 순차적으로 변화시키면서 계측을 수행한 후 시스템식별 결과를 조합하여 모드형상을 구하는 방법을 사용하였다. 즉, 4층 건물의 경우 3개의 가속도계를 옥상층에 고정시킨 후 나머지 3개의 가속도계를 4층, 3층, 2층에 순차적으로 이동시켜 건물의 상시진동을 계측하는 방법으로 양방향 상시진동을 계측하였다. 그림 3은 건물 1의 양방향 상시진동계측을 위해 옥상층과 중간층(2층~4층)에 설치한 가속도계의 위치와 가속도계 방향을 나타낸다.

상시진동계측은 층별로 15분간 가속도 응답 데이터를 수집하였으며 계측된 결과 중 건물 1의 옥상층과 4층의 장방향과 단방향에 대한 가속도 계측결과 값을 그림 4에 나타내었다. 양방향 계측의 경우 그림 3과 같이 장방향은 2개의 가속도계를 이용하여 계측하고 단방향은 1개의 가속도계를 이용하였기 때문에 그림 4에서 장방향 가속도 시간이력은 층별 2개씩 나타내었다. 그림 4로부터 상시진동에 의한 건물의 가속도 응답은  $1 \times 10^{-4}g$  정도의 작은 값을 갖는 것을 알 수 있다.

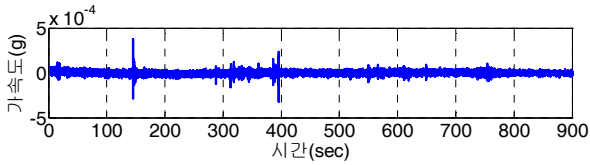
상시진동계측 데이터로부터 SSI기법을 이용하여 시스템식별을 수행하여 구한 파워스펙트럼밀도(Power Spectrum Density, PSD)와 안정화도표를 그림 5와 6에 나타내었다. 그림 5에서 가속도 계측값의 파워스펙트럼밀도는 옥상층의 장방향 가속도계 2개로부터 계측된 값의 평균값이고 그림 6은 옥상층의 단



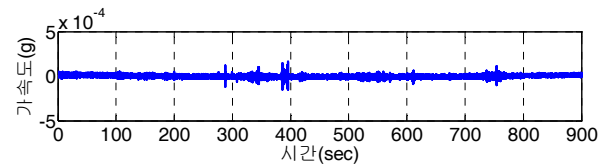
(a) 옥상층 장방향 가속도 시간이력-1



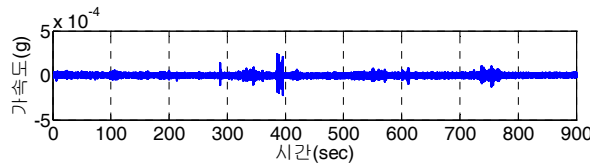
(b) 옥상층 장방향 가속도 시간이력-2



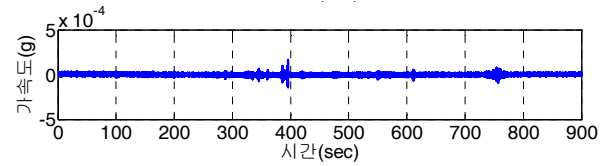
(c) 옥상층 단방향 가속도 시간이력



(d) 4층 장방향 가속도 시간이력-1



(e) 4층 장방향 가속도 시간이력-2



(f) 4층 단방향 가속도 시간이력

그림 4 건물 1 상시진동계측 시간응답 데이터

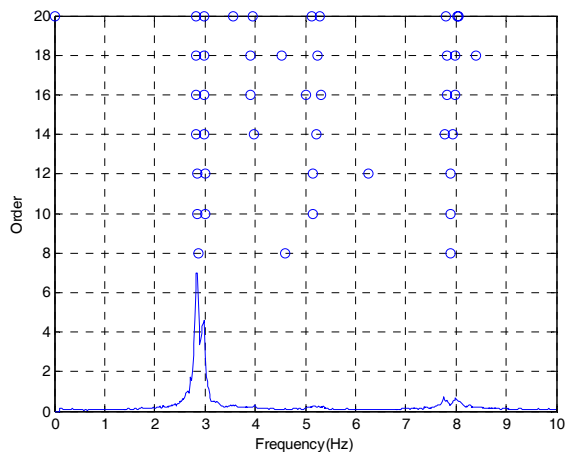


그림 5 건물 1 장방향 상시진동 가속도 PSD 및 안정화도표

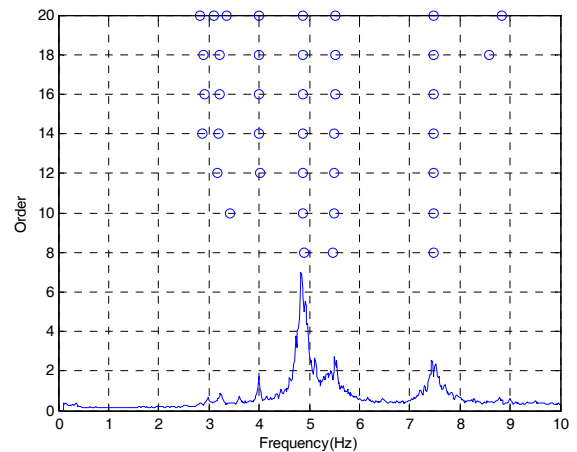


그림 6 건물 1 단방향 상시진동 가속도 PSD 및 안정화도표

방향 가속도계 1개로부터 계측된 값의 파워스펙트럼밀도이다. 건물의 층수가 4층임을 고려하여 시스템식별에 사용된 상태방정식의 차수는 8부터 20까지이며 상태방정식의 차수를 2씩 증가시키며 수행하였다. 그림 5와 6로부터 건물 1의 장방향 1차 모드 고유진동수는 2.83Hz, 단방향 1차 모드 고유진동수는 4.92Hz임을 구할 수 있다.

시스템식별을 통해 구한 4개 건물 각각의 1차 모드 고유진동수, 감쇠비를 표 2에 정리하였다. 표 2로부터 건물 1~3의 경우 장방향 1차 모드의 고유진동수가 단방향 1차 모드의 고유진동수보다 작은 것을 알 수 있다. 건물 1~3의 경우 장방향이 단방향에 대해 건물의 길이가 3배 이상 길어 장방향의 강성이 단방향에 비해 상대적으로 커서 단방향 1차 모드 고유진동수가 장방향 1차 모드 고유진동수보다 작을 것으로 예상되었지만, 계측 결과 장방향 1차 모드 고유진동수가 작은 것으

표 2 상시진동 양방향 계측에 의한 고유진동수와 감쇠비

	1차 모드 고유진동수			감쇠비	
	단방향(A)	장방향(B)	A/B	단방향	장방향
건물 1	4.92Hz	2.83Hz	1.74	1.14%	1.00%
건물 2	3.61Hz	2.55Hz	1.41	0.97%	0.83%
건물 3	4.48Hz	3.19Hz	1.40	1.38%	1.85%
건물 4	3.67Hz	4.47Hz	0.82	1.11%	1.16%

로 나타났다. 이는 주로 건물의 단방향으로 설치된 내부 칸막이 조적조와 같은 비구조제가 단방향에 대한 강성을 높여 단방향 1차 모드 고유진동수가 커진 것으로 판단이 된다.

이와 달리 건물 4의 경우 장방향 1차 모드 고유진동수가 단방향 1차 모드 고유진동수보다 크게 나타났는데, 이는 표 1에서 보듯이 건물 4가 다른 건물에 비해 장방향과 단방향의 비가 5.24로 상대적으로 크기 때문인 것으로 판단된다. 하지만 단방향으로 설치된 내부 조적조의 강성에 대한 영향으로

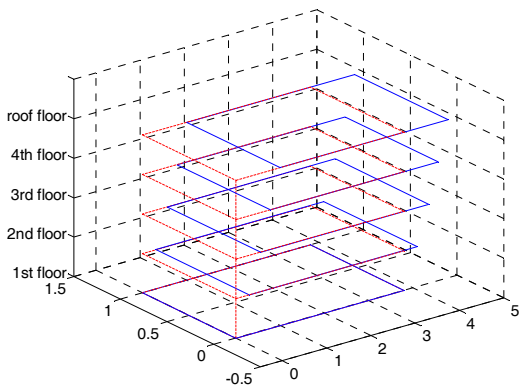


그림 7 건물 1 장방향 1차모드 모드형상(2.83Hz)

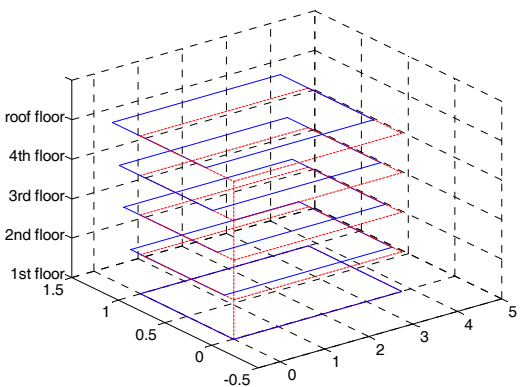


그림 8 건물 1 단방향 1차모드 모드형상(4.92Hz)

인해 장방향 1차모드 고유진동수와 단방향 1차모드 고유진동수의 차이가 적은 것을 확인할 수 있다.

각 건물의 층별 모드형상은 층별로 순차적으로 측정한 가속도계의 응답데이터를 이용하여 구한 모드형상을 옥상층에 대해 정규화하는 방법으로 구하였다. 그림 7과 8은 건물 1의 옥상층과 층별 측정한 값으로부터 구한 장방향, 단방향 1차 모드형상이다. 그림에서 점선의 사각형이 기준 형상을 실선의 사각형이 모드 변위를 나타내며, 건물의 단변의 길이는 1.0, 장변의 길이는 3.8로 상대적인 비율만 나타내었고, 모드 변위의 장변 방향으로는 최대값을 1로 하여 시각적으로 구분하기 쉽도록 하였다. 그림 7과 8로부터 건물 1의 경우 각 방향 1차모드의 경우 x축 방향과 y축 방향의 병진운동이 주로 나타나고 z축을 중심으로 한 회전운동은 거의 나타나지 않는 것을 알 수 있다.

그림 9는 각 건물의 1차모드 형상을 정리한 것이다. 표 2에서 건물 1~3은 장방향으로 1차모드가 발생하고 건물 4는 단방향으로 1차모드가 발생하기 때문에 그림 9의 1차모드 형상은 건물 1~3은 장방향 모드 변위형상을, 건물 4는 단방향 모드변위형상을 나타낸다.

### 3.2 전층 일방향 동시 계측

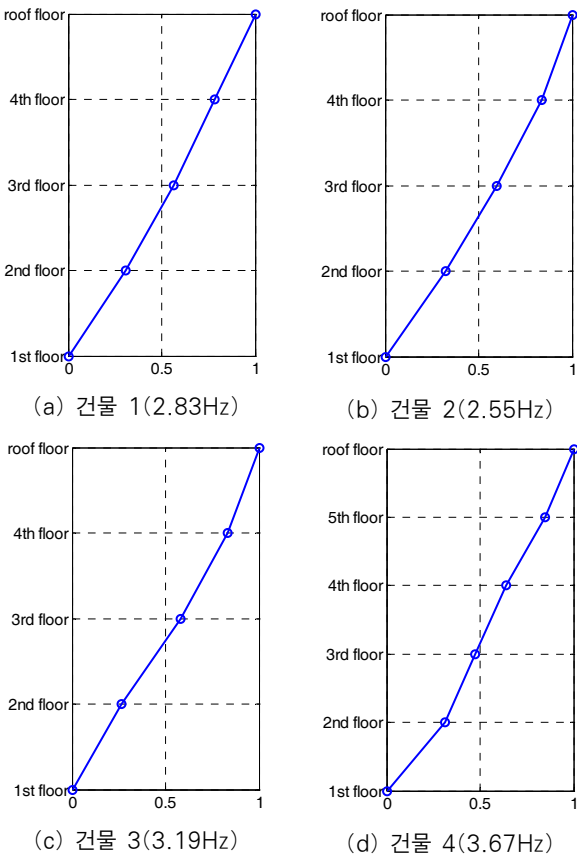


그림 9 양방향 계측 1차모드 모드형상

양방향 계측에서와 같이 건물의 회전에 대한 시스템 식별이 가능하기 위해서는 가속도계를 층별 3개씩 설치하여 계측하여야 한다. 하지만 건물의 평면이 정형적이어서 회전에 의한 영향이 적은 건물에 대해 한정된 개수의 가속도계를 이용하여 동특성을 산정하고자 하는 경우 가속도계를 일방향으로만 설치하여 상시진동을 계측하는 방법이 유효한 경우가 있다.

전층 일방향 계측은 양방향 계측보다 가속도계의 필요 개수는 1/3정도로 적은 수의 가속도계를 가지고 동특성을 산정할 수 있는 방법이다. 전층 일방향 동시계측을 위해 그림 10과 같이 가속도계를 건물의 전층에 일방향으로 동시에 설치하여 상시진동 계측값을 구한다. 이 때, 만일 가속도계의 개수가 층의 개수보다 작을 경우에는 앞의 양방향 계측에서와 같이 2개 층을 동시에 계측하되 그 중 한 층(옥상층)에 설치된 가속도계를 기준으로 고정시키고 나머지 센서의 계측위치는 순차적으로 변화시키면서 계측을 수행하는 방법으로 1방향 계측을 수행할 수도 있다. 이 경우 필요한 가속도계의 개수를 2개로 최소화할 수 있다.

본 연구에서는 사용된 가속도계의 개수가 6개로 모든 건물의 층수보다 많기 때문에 전층을 동시에 계측하였다. 계측된 결과를 SSI기법을 이용하여 시스템 식별을 수행하였으며 산정된 각 건물의 고유진동수 및 감쇠비는 표 3에 정리하였



으며, 1차모드 모드형상은 그림 11에 나타내었다.

표 3의 전층 일방향 동시계측 응답을 이용하여 산정한 고유진동수는 표 2의 양방향 상시진동 계측으로부터 구한 고유진동수와 건물 3을 제외하고는 1%이내의 차이를 보인다. 또한 감쇠비 또한 양방향 계측으로부터 구한 결과와 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

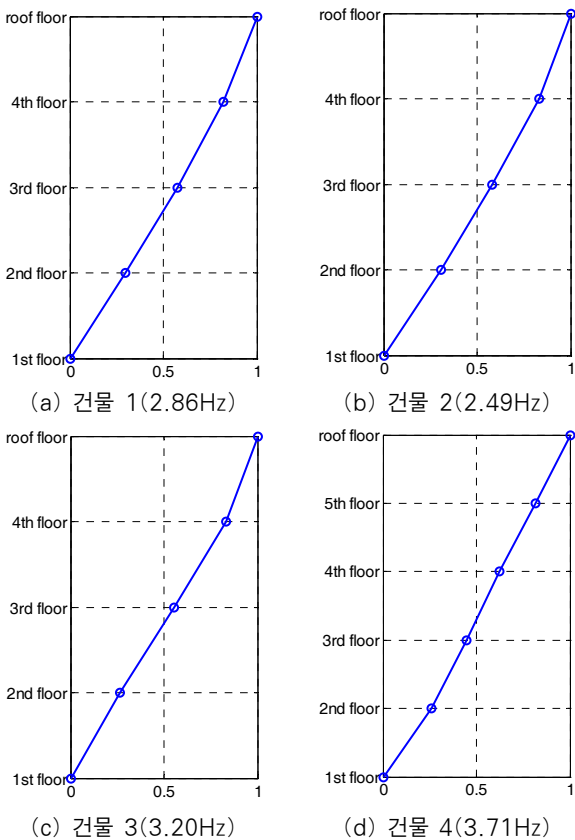
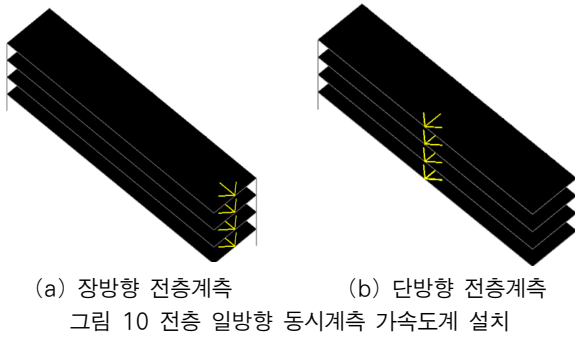


그림 11 전층 일방향 계측 1차모드 모드형상

표 3 상시진동 일방향 계측에 의한 고유진동수와 감쇠비

	1차모드 고유진동수			감쇠비	
	단방향(A)	장방향(B)	A/B	단방향	장방향
건물 1	4.89Hz	2.86Hz	1.71	0.94%	1.49%
건물 2	3.40Hz	2.49Hz	1.37	1.04%	1.28%
건물 3	4.45Hz	3.20Hz	1.39	1.27%	1.28%
건물 4	3.71Hz	4.47Hz	0.83	1.09%	0.84%

#### 4. 인력가진계측

인력가진계측은 공진현상을 이용하여 자유진동파형을 얻어 건물의 동특성을 확인하기 위한 진동계측 방법이다(윤성원, 2008). 인력가진실험은 건물의 고유진동수를 먼저 산정한 후 같은 진동수로 인력에 의해 가진하는 방법으로 수행하며, 건물의 고유진동수에 정확히 동조하기 위해 메트로놈을 사용한다. 건물의 고유진동수에 동조시켜 인력가진을 수행하면 공진효과에 의해 충분히 진동의 진폭을 증가시킬 수 있으며, 진동이 충분히 커진 후 정지하면 건물의 자유진동파형을 만들 수 있다.

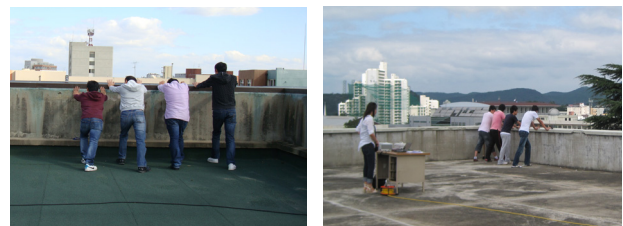
상시진동 응답을 이용한 시스템식별의 경우 입력하중을 백색잡음으로 가정하여 수행하였는데 반해 인력가진실험의 경우 이러한 가정을 적용하는 것이 어렵다. 또한 인력가진의 입력하중 값을 정확히 계측하는 것 또한 현실적으로 불가능하기 때문에 상시진동계측에서 사용된 SSI기법을 사용하여 시스템식별을 하는 것이 현실적이지 못하다.

따라서 본 연구에서는 감쇠비를 산정하기 위해 대수감소법(Chopra, 2007)을 사용하였으며 모드형상을 식별하기 위해서는 POD(Proper Orthogonal Decomposition, 함희정 등, 2009) 기법을 사용하였다. POD 기법은 일련의 시간응답을 바탕으로 시간응답과 상관관계가 큰 직교기저(Orthogonal Basis)를 찾아내는 기법으로, 입력하중의 계측이 불가능한 자유진동파형과 같은 응답만으로 구조물이 동적특성을 파악하는데 사용된다(김호근 등, 2009).

인력가진실험은 그림 12와 같이 구조물의 모든 층에 영향을 줄 수 있는 옥상층에서 실험을 실시하였으며 3~4명 학생이 메트로놈의 신호에 따라 실험을 실시하였다. 상시진동계측으로부터 산정한 2차모드 이상의 고유진동수는 인력으로 정확하

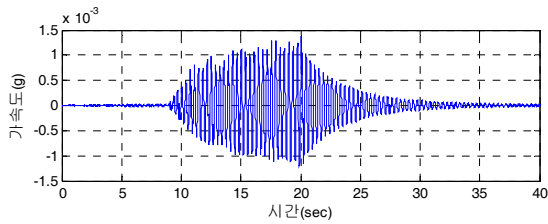


(a) 건물 1(장방향, 2.83Hz) (b) 건물 2(장방향, 2.55Hz)

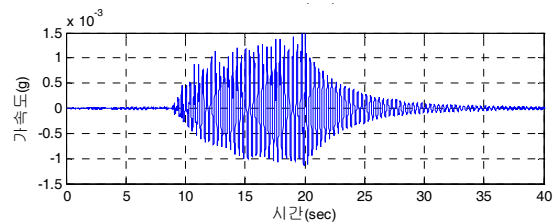


(c) 건물 3(장방향, 3.19Hz) (d) 건물 4(단방향, 3.67Hz)

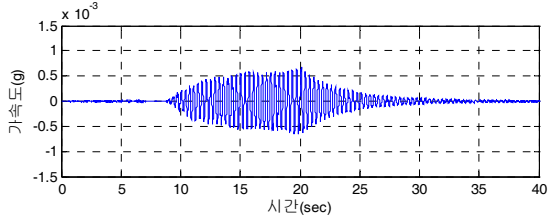
그림 12 건물별 인력가진실험



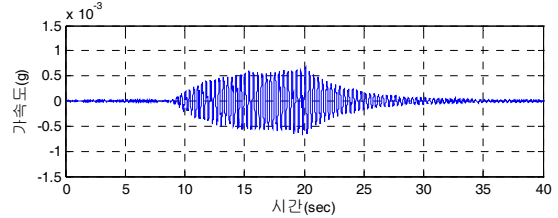
(a) 옥상층 가속도 시간이력



(b) 4층 가속도 시간이력



(c) 3층 가속도 시간이력



(d) 2층 가속도 시간이력

그림 13 건물 1 인력가진계측 가속도 시간이력

표 4 건물별 가진 진동수

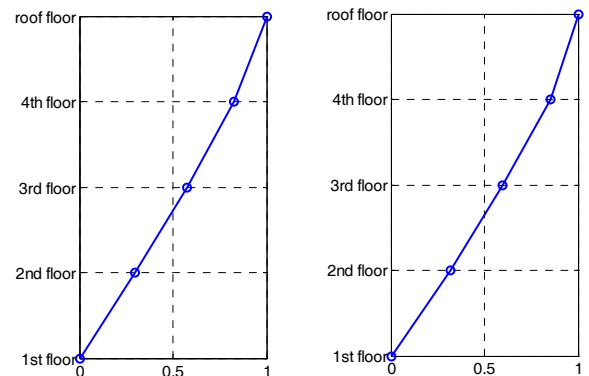
구분	고유진동수	가진 진동수	가진 오차
건물 1	2.83Hz	2.83Hz	0.1%
건물 2	2.55Hz	2.55Hz	0.0%
건물 3	3.19Hz	3.19Hz	0.3%
건물 4	3.67Hz	3.67Hz	0.1%

게 가진하기 힘들고, 메트로놈의 진동수범위를 넘어가는 경우가 발생하기 때문에 본 연구에서의 인력가진계측은 상시진동계측으로부터 산정한 1차모드에 대해서만 수행하였다.

인력가진실험을 위한 가진 진동수는 상시진동계측을 통해 구한 고유진동수와 일치하는 것이 원칙이지만 메트로놈의 분해능에 의해 1% 내외의 오차가 발생하였다. 표 4에서 각 건물의 고유진동수와 인력가진 가진 진동수를 비교하였다.

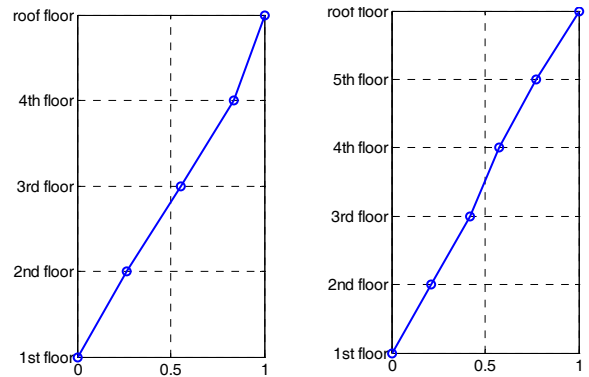
인력가진실험을 통해 계측된 건물 1의 각 층별 가속도 시간이력은 그림 13과 같다. 그림 13에서 인력가진이 시작된 약 9초 이전의 값은 아직 인력가진이 시작되기 이전의 상시진동 계측값으로 그림 4의 결과와 거의 동일하다. 그림 13으로부터 인력가진에 의한 건물의 가속도 응답이 상시진동에 의한 응답에 비해 고층부의 경우 약 50배 이상 커진 것을 확인할 수 있고 저층부에서도 20배 이상 상시진동 가속도 응답 진폭보다 커짐을 알 수 있다. 또한 인력가진을 멈춘 약 20초 이후의 응답으로부터 인력가진 실험에 의해 건물의 자유진동 파형이 확연하게 구해짐을 알 수 있다.

POD 기법을 이용하여 산정한 각 건물의 1차모드 모드형상은 그림 14와 같으며, 대수감소법을 이용하여 산정한 감쇠비는 표 5에 정리하였다. 감쇠비 산정은 옥상층 자유진동 파형으로부터 산정한다. 표 5의 인력가진 실험을 통해 구해진 감쇠비는 표 2와 표 3의 상시진동계측을 통해 구한 감쇠비에 비해 최대 88% 이상 큰 것을 알 수 있다. 이는 감쇠비가 진동의 진폭에 의존적이며 진폭이 커질수록 감쇠비가 커지는



(a) 건물 1(2.83Hz)

(b) 건물 2(2.55Hz)



(c) 건물 3(3.19Hz)

(d) 건물 4(3.67Hz)

그림 14 인력가진계측 1차모드 고유진동수 모드형상

표 5 인력가진계측 건물별 감쇠비

건물	가진방향	감쇠비
건물 1	장방향	1.54%
건물 2	장방향	1.56%
건물 3	장방향	1.83%
건물 4	단방향	1.14%

때문으로 판단된다(윤성원, 2008).

양방향 상시진동계측과 전층 일방향 상시진동 동시계측,

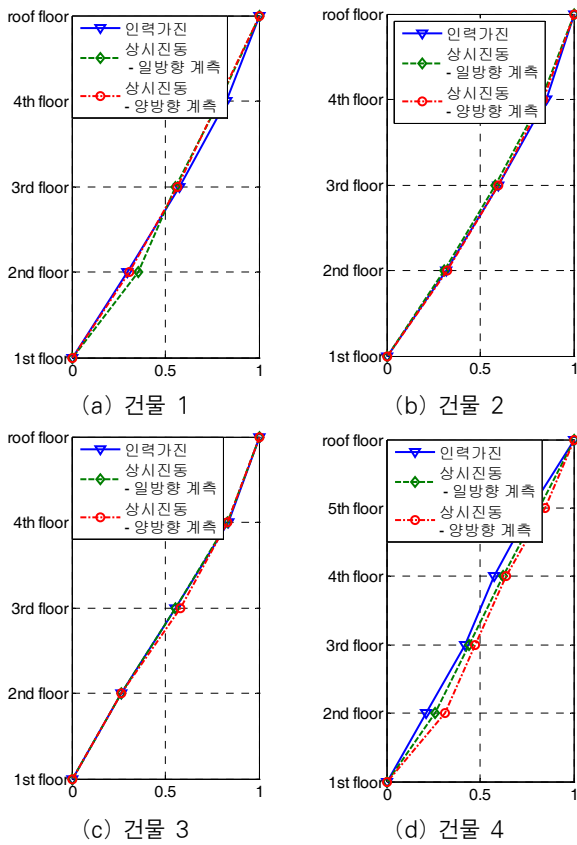


그림 15 건물별 모드형상 비교

그리고 인력가진계측을 통한 3가지 방법을 통해 산정한 모드형상을 그림 15에 비교하였다. 그림 15로부터 계측방법에 따른 모드형상은 거의 차이가 없는 것을 알 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 건물의 동특성을 확인하기 위해 진동계측 방법 중 추가적인 외력이 없는 상태에서 계측하는 상시진동 계측방법과 강제진동 실험인 인력가진계측 방법으로 실험을 실시하였다. 시스템 식별결과 상시진동계측을 통해 산정한 감쇠비는 0.80%~1.30%로 나타났으며 인력가진계측을 통해 산정한 감쇠비는 1.14%~1.83%로 나타나 인력가진의 경우에서 더 큰 감쇠비를 산정하는 것을 확인할 수 있었으며, 계측방법과 상관없이 모드형상은 거의 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 장방향 건물의 경우 장방향의 강성이 커서 단방향으로 1차모드가 나타날 것으로 예측되었으나, 내

부 칸막이벽이 조적조인 경우 조적에 의한 강성기여분이 상당히 커서 장방향으로 1차모드가 나타났다.

## 감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2010-0015221).

## 참 고 문 헌

- 김지영, 김주연, 김미진, 유은종, 김대영 (2009) 실측 및 해석모델에 의한 철근콘크리트조 주상복합건물의 모드특성, 한국전산구조공학회 논문집, 22(3), pp.289~296.
- 김호근, 유은종, 김지영 (2009) 개선된 POD기법을 이용한 구조물의 모드식별, 한국전산구조공학회 학술대회.
- 윤성원 (2003) 교차 인력가진에 의한 저층건물의 감쇠율 산정, 대한건축학회 논문집, 19(12), pp.113~120.
- 윤성원 (2008) 하프파워법과 인력가진법에 의한 감쇠율 비교, 한국공간구조 학회지, 8(2), pp.95~103.
- 조순호 (2004) FDD 및 SSI 모달관별에 의한 건물의 동특성 추정, 대한건축학회 학술발표 논문집, 24, pp.293~296.
- 한종석 (1998) Random Decrement 기법을 이용한 구조물의 Modal Identification (I), 대림기술정보, pp.15~20.
- 함희정, 김형기 (2009) POD 기법과 풍진동 데이터를 이용한 고층구조물의 모드식별, 대한건축학회 논문집, 25(4), pp.43~50.
- Chopra, A.K. (2007) Dynamics of Structure: Theory and Application to Earthquake Engineering, Prentice Hall.
- Peeters, B., De Roeck, G., (1999) Reference-Based Stochastic Subspace Identification for Output-Only Modal Analysis, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 13(6), pp.855~878.
- 논문접수일 2010년 10월 29일
  - 논문심사일 2010년 10월 30일
  - 게재확정일 2011년 4월 19일