

하프파워법과 인력가진법에 의한 감쇠율 비교

Comparison of Damping Ratios by Half Power Bandwidth Method and Synchronized Human Excitation

윤성원*
Yoon, Sung-Won

요약

주파수영역과 시간영역의 두가지 방법을 통하여 감쇠율을 분석하였다. 11층~19층 범위의 철근콘크리트 건물에 대하여 주파수 영역에서의 해석을 위한 상시진동과 시간영역에서의 해석을 위한 인력가진을 실시하였다. 하프파워법의 적용성을 검토하기 위하여 1024, 2048, 4096 세가지 양상블 샘플사이즈에 대하여 분석하였다. 인력가진법에 의한 장변과 단변의 감쇠율은 각각 1.05%~1.22%과 1.16%~1.50%이다. 하프파워법은 감쇠율을 약간 과대평가할 수 있지만, 계측데이터의 길이를 가능한 길게 하여 bandwidth를 작게 하면 감쇠율 평가의 정밀도를 향상할 수 있었다.

Abstract

This paper is concerned with the damping ratios of two methods, which are frequency domain and time domain approach. Ambient vibrations and synchronized human excitation test were conducted to three reinforced concrete buildings ranging from eleven to nineteen stories. The performance of the half power bandwidth method was investigated using three kinds of sample size, 1024, 2048, and 4096. The damping ratio by synchronized human excitation ranges from 1.05% to 1.22% in the long direction and from 1.16% to 1.50% in short direction. Damping by half power bandwidth method is slightly more overestimated than the synchronized human excitation due to insufficient record length. Damping evaluation by half power bandwidth method was found to be enhanced by using the narrower bandwidth with long recorded data.

키워드 : 감쇠율, 하프파워법, 상시진동, 인력가진, 사용성

Keywords : damping ratio, half power bandwidth method, ambient vibration, synchronized human excitation, serviceability

1. 서론

건물의 강풍에 대한 사용성 평가를 위해서는 건물 최상층에서 가속도응답에 대한 정확한 예측이 필요하다. 응답가속도는 감쇠율 평방근의 역수에 비례하므로, 풍동실험이나 해외기준을 이용하여 응답가속도를 산정하기 위해서는 설계대상 건물에 적합한 감쇠율의 예측이 매우 중요하다. 또한 강풍으로 인한 진동이나 리모델링을 위한 제진장치를 설계할 경우에도 정확한 감쇠율의 계측이 필수 조건이다¹⁾.

건물의 감쇠율을 이론적으로 정확히 예측하는 것

은 지금까지 존재하지 않으며, 주로 진동계측에 의존해왔다. 그러나 감쇠율은 진동진폭이 커지면 상시진동 때의 감쇠율보다 커지는 경향이 있으며, 진동계측법이나 해석방법 등에 따라서도 크게 차이가 나는 것으로 알려져 있다. Haveland²⁾는 감쇠율의 변동계수(coefficient of variation)는 42%~87%로 지적하고 있고, Davenport와 Hill-Carroll³⁾은 감쇠율의 변동계수를 33%~78%로 지적하고 있다.

감쇠율의 실험방법은 상시진동계측, 강제진동실험 등이 있다. 상시진동계측에 의한 감쇠율의 평가는 일반적으로 편차가 심한 것으로 알려져 있다. 반면에 인력가진법이나 가진기와 같은 강제진동실험에 의한 감쇠율의 평가는 상시진동과 비교하여 편차가 작은 것으로 알려져 있다. 또한 감쇠율의 평가방법은 상시진

* 정회원 · 서울산업대학교 건축학부 부교수, 공학박사
Tel : 02-970-6587 Fax : 02-979-6587
E-mail : swyoon@duck.snut.ac.kr

동 시간과형의 스펙트럼해석과 인력가진이나 가진기에 의한 급정지에 의한 자유진동과형과 가진기를 이용한 공진곡선 등이 주로 사용되고 있다¹⁾.

일반적으로 스펙트럼 해석을 이용하는 경우는 Jeary⁴⁾에 의하면 FFT(Fast Fourier Transform)의 주파수 분해능(frequency resolution)을 0.01Hz로 할 경우 감쇠율을 20% 과대평가 할 수 있다고 지적하고 있다. 정확한 감쇠율을 얻기 위해서 0.001Hz의 주파수 분해능을 권장하고 있지만, 실제 건물을 진동계측 할 때 이러한 분해능을 적용하는 것은 현실적인 어려움이 있다. 따라서 자유진동과형에 의한 해석이 권장되고 있다¹⁾.

본 논문에서는 감쇠율의 진동계측법과 해석법에 따른 변동성을 분석하고 각 실험법의 적용성을 검토하기 위하여, 국내 철근콘크리트조 아파트 3동을 대상으로 미소진폭 범위인 상시진동계측과 인력가진실험을 실시하였다. 상시진동계측 데이터의 시계열과형에서 파워스펙트럼을 이용한 하프파워법(Half Power Bandwidth Method)을 사용하였다. 이때의 변수는 앙상블 데이터 수를 1024, 2048, 4096으로 변화시키면서 감쇠율의 변화 경향을 분석하여 하프파워법의 적용성을 분석하였다. 또한 비교적 신뢰성이 높은 인력가진법을 통한 자유진동과형을 이용한 감쇠율 평가를 통하여 미소진폭 범위에서의 국내 철근콘크리트조 아파트의 감쇠율을 평가하였다.

2. 감쇠율의 실험법과 해석법에 따른 변환

2.1 진동계측의 감쇠율 평가법

<표 1>은 국내의 여건을 고려하여 건물의 진동계

<표 1> 감쇠율 실험법 및 해석법 비교

실험법	장단점	해석법
인력가진법	<ul style="list-style-type: none"> ■ 가진원의 설치가 불필요 ■ 고유진동수의 예측이 필요 ■ 바람 등의 영향이 포함됨 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 대수감소법(시간영역)
가진기	<ul style="list-style-type: none"> ■ 정상가진과 자유진동 가능 ■ 실적과 신뢰도가 높음 ■ 설치준비가 필요 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 하프파워법(주파수영역) ■ 대수감소법(시간영역)
상시진동계측	<ul style="list-style-type: none"> ■ 장시간계측으로 신뢰도향상 ■ 바람 등의 영향이 포함됨 ■ 데이터해석에 주의 요함 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 하프파워법(주파수영역) ■ RD법(시간영역)
풍응답계측	<ul style="list-style-type: none"> ■ 대진폭의 감쇠율평가 가능 ■ 강풍시 감쇠평가 가능 ■ 공력감쇠의 영향이 포함 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 하프파워법(주파수영역) ■ RD법(시간영역)

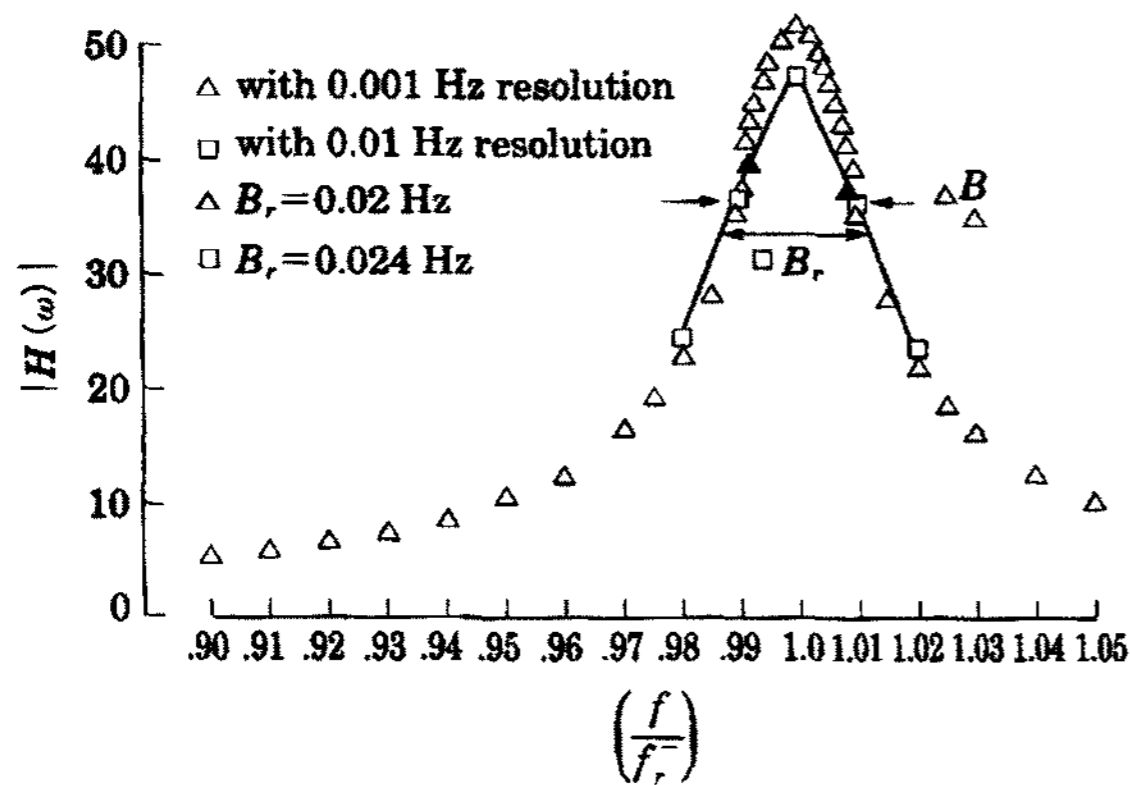
측에 일반적으로 활용할 수 있는 진동계측법과 해석법을 요약한 것이다. 실험법은 크게 4가지로서 인력가진법, 가진기, 상시진동계측, 풍응답계측이 있다. 각 실험법의 장단점과 해석법을 주파수영역과 시간영역으로 구분하여 정리하였다¹⁾.

2.2 감쇠율 해석법 비교

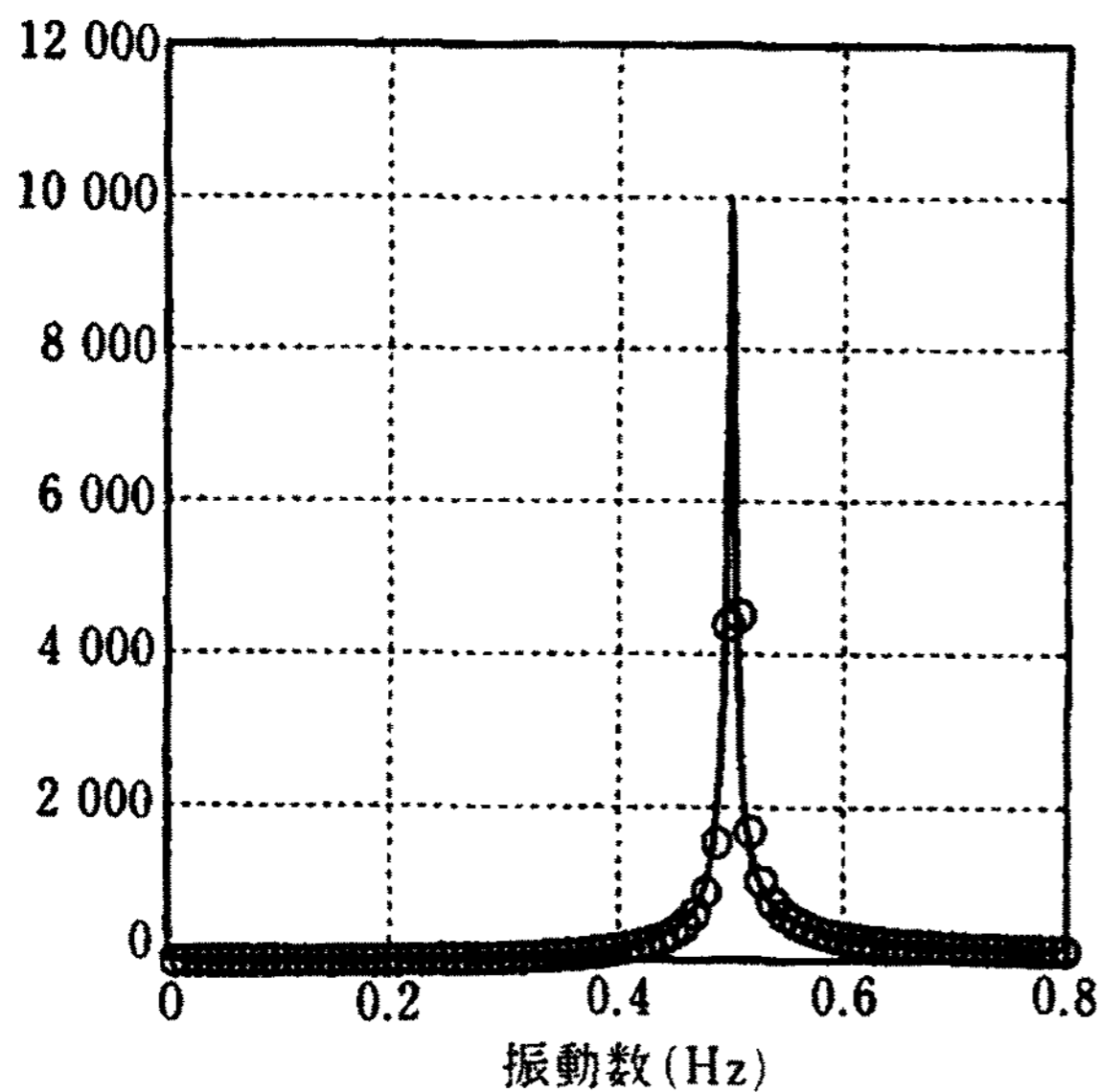
일본건축학회¹⁾의 연구에서는 2% 감쇠율의 모형을 이용하여 하프파워법과 자유진동과형을 이용하여 감쇠율을 분석하였다. 하프파워법은 2.11%, 자유진동과형은 1.93%~2.02% 범위로서 하프파워법 보다는 자유진동과형을 이용한 감쇠율이 실제의 값에 근접함을 보여주고 있다. 田村⁵⁾ 등은 5층 실험모형을 이용하여 감쇠율 평가방법을 비교하였다. 하프파워법 등의 주파수 응답데이터를 이용한 감쇠율 평가법에서 앙상블 데이터 수를 1024에서 65356까지 증가해 가면서, FFT 진동수 분해능(frequency resolution)의 간격을 충분히 세밀하게 하면 자유진동과형에 구한 감쇠율과 근접한 결과를 얻을 수 있다고 지적하고 있다.

일본건축학회¹⁾에서는 건물의 진동계측을 이용하여 인력가진법, 가진기실험, 상시진동계측의 세가지를 비교하였다. 감쇠율의 편차는 상시진동계측이 세가지 방법 중에서 가장 크다. 또한 감쇠율의 크기는 인력가진법과 상시진동계측은 비슷한 값을 보인 반면, 가진기실험은 큰 감쇠율을 보이고 있다. 이 이유는 가진기실험의 경우 공진주파수를 고유진동수와 정확히 일치시키기 어려운 관계로 주파수의 bandwidth가 크게 평가되어, 감쇠율도 과대평가됨을 알 수 있다.

하프파워법 등의 공진곡선을 사용하는 경우 감쇠율의 과대평가에 대하여 Jeary⁴⁾는 고유진동수 1Hz의 모형을 이용하여 하프파워법 등의 공진곡선을 이용하는 경우 FFT 진동수의 간격을 0.01Hz로 하는 경우 추정오차가 20%이고, 더욱 정밀한 값을 얻기 위해서는 주파수간격을 0.001Hz를 제안하고 있다. <그림 1>은 이러한 하프파워법의 오차를 설명하는 그림이다. 주파수분해능이 증가함에 따라서 고유진동수의 피크가 높아지고 이로 인하여 bandwidth가 감소하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 주파수의 분해능이 충분하지 않으면 실제보다 bandwidth를 과대평가하여 감쇠율도 증가함을 알 수 있다. 이러한



〈그림 1〉 하프파워법 오차



〈그림 2〉 전달함수 예

요인 외에 <그림 2>와 같이 공진주파수가 고유진동수와 일치하지 않는 것도 감쇠율을 과대평가하는 요인으로 지적하고 있다. Bandat⁶⁾ 등에 의하면 하프파워법의 오차를 2% 이내로 하기 위해서는 공진 곡선의 bandwidth 사이에 스펙트럼 포인트가 최소 6개 이상일 것을 제시하고 있다.

3. 진동계측

3.1 계측건물

대상건축물은 서울 소재의 장방형 벽식 철근콘크리트조 아파트이다. 평면 형태는 데이터의 일관성을 위하여 모든 층의 평면이 장방형인 건물만을 대상

〈표 2〉 계측건축물 개요

건물번호	층수	높이 (m)	평면 길이(m)		변장비	평형
			단변	장변		
건물 A	19	50.8	11.0	41.0	3.73	32
건물 B	12	32.2	10.0	57.0	5.70	33
건물 C	11	28.5	12.0	70.0	5.83	26/31

으로 하였다. 또한 내진설계된 동일한 조건의 건물을 선택하기 위하여 1988년도 이후에 건설된 아파트만을 대상으로 하였다.

<표 2>는 계측건물의 개요이다. 아파트의 소재는 서울에서 건설된 아파트를 대상으로 하였다. 층수는 11층~19층의 범위이고, 건물높이는 28.5m~50.8m 범위이다⁷⁾.

3.2 계측장치

계측장비는 서보 가속도계⁸⁾ 센서를 사용하였으며, 데이터의 기록과 FFT분석을 위하여 네덜란드의 Difa Measuring 시스템⁹⁾의 4채널용 APB200 보드를 노트북PC에 연결하였다. signal conditioner는 DPM-700 Series¹⁰⁾를 이용하였다. 데이터 처리과정은 서보가속도계의 센서→signal conditioner→FFT분석기→PC로 처리하였다.

계측은 건물의 옥상바닥에서 실시하였다. 가속도계 센서는 건물 B, C에서는 건물의 단변과 장변방향 2채널씩 총 4채널로 실시하였다. 그러나 건물 A에서는 지붕의 형태가 평지붕이 아니라 박공지붕인 관계로 단변과 장변방향으로 1채널씩 총 2채널로 설치하였다.

〈표 3〉 계측기기 주요제원

계측기기	모델명	주요규격
서보 가속도계	ASQ CA (kyowa)	· 용량 : 1g
signal conditioner	VAQ 700A (kyowa)	· 채널수 : 5 ch. · 출력: 가속도, 속도, 변위
Aquisition system	DIFA200 (LMS)	· 4ch. APB board 탑재형

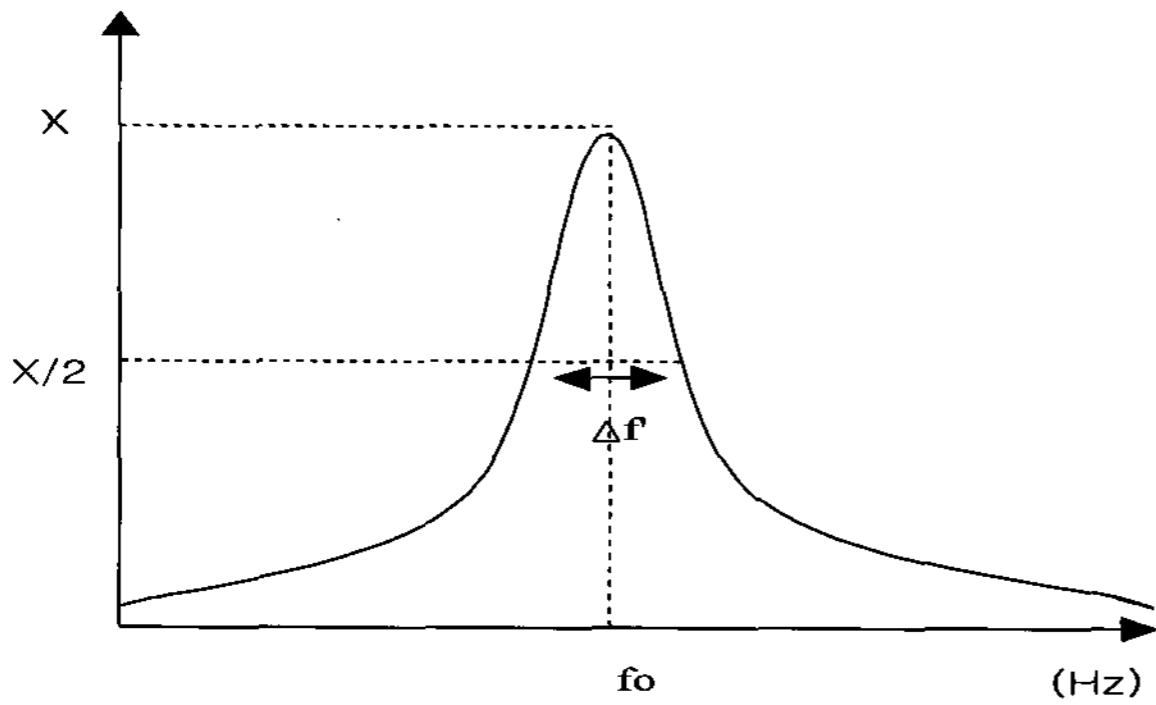
3.3 진동계측방법

3.3.1 상시진동계측

상시진동계측은 건물의 장변과 단변을 동시에 시계열 파형으로 계측하였다. 고유진동수와 감쇠율을

<표 4> 계측 조건

건물 번호	층수	해석데이터			
		샘플수/양상블	sampling rate(sec)	양상블 수	주파수 분해능(Hz)
건물 A	19	4096	0.04	10	0.00625
건물 B	12	4096	0.04	32	0.00625
건물 C	11	4096	0.04	10	0.00625

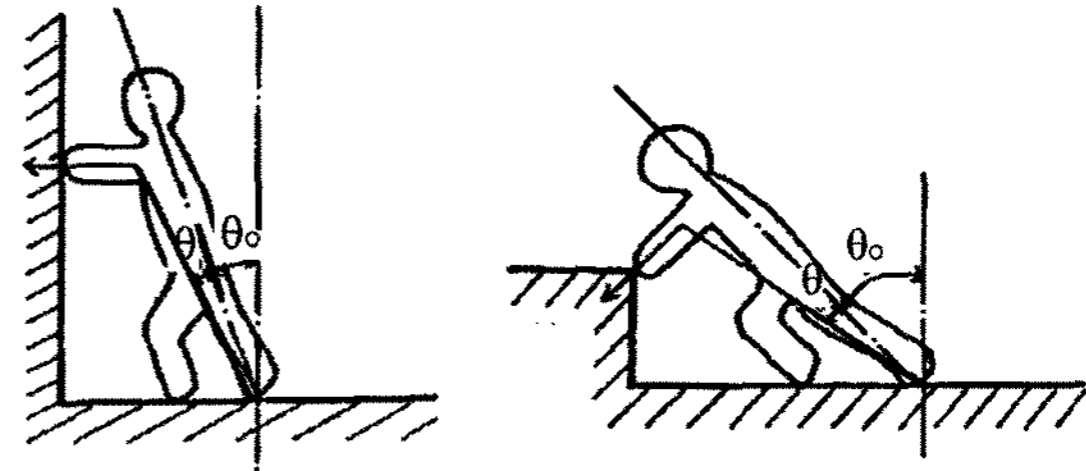


<그림 3> 하프파워법에 의한 감쇠율

산정하기 위하여 시계열파형에서 평균 파워스펙트럼을 구하였다. 평균파워스펙트럼을 사용한 이유는 1회 파워스펙트럼으로 파워스펙트럼의 근사식을 구하면 계측점과 근사곡선의 상관성이 낮기 때문이다. 평균파워스펙트럼을 구하여 파워스펙트럼의 평활화를 도모한 후, <그림 3>과 식 (1)의 하프파워법을 이용하여 감쇠율을 구하였다. 파워스펙트럼 산정시에는 hanning window를 사용하였다.

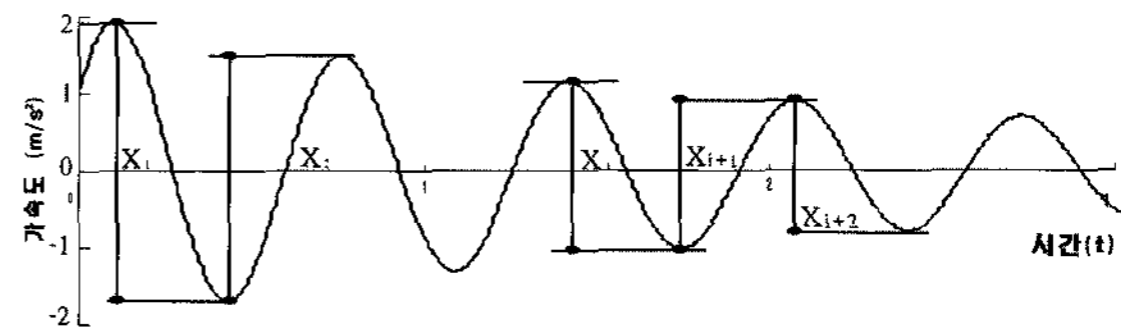
3.3.2 인력가진실험

상시진동계측을 통하여 얻은 건물의 고유진동수에 동조시켜서, 어떤 방법으로 반복 가진을 하면, 건물의 응답 진폭은 공진 현상에 따라 서서히 커진다. 이러한 공진 현상을 이용한 가진법 중에, 가진력으로서 사람을 이용한 인력가진법을 이용하였다. 이 방법은 건물을 미는 힘으로서 사람의 체중이동에 따른 관성력을 이용하였다. <그림 4>는 인력가진의 방법이다. 인력가진 방법은 <그림 4(a)>의 수평가진 방법을 적용하였다¹⁾. 가력위치는 중앙 코어 부나 벽체부분을 가력하였다. 공진현상에 따라 진폭이 충분히 성장한 시점에서 인력가진을 정지하고, 이후의 자유진동파형을 측정하였다. 인력가진의 횟수는 충분히 공진이 발생할 수 있도록 20회 전후로 하였다. 건물의 옥상에서 건물의 고유진동수에 따라



$\theta_0 = 30^\circ, \theta = 15^\circ$ $\theta_0 = 45^\circ, \theta = 15^\circ$
(a) 수평가진 (b) 경사가진

<그림 4> 인력가진의 종류



$$\zeta_n = \frac{1}{2\pi n} \ln\left(\frac{X_i}{X_{i+2n}}\right) \times 100$$

<그림 5> 대수감소법에 의한 평가 방법

올리는 펄스음을 들으면서 3인이 단변과 장변 각각 2회 정도 인력가진 실험을 하였다.

$$\zeta = \frac{\Delta f'}{2f_0} \times 100 \tag{1}$$

여기서 ζ : 감쇠율(%)

$\Delta f'$: bandwidth (Hz)

f_0 : 고유진동수(Hz)

인력가진법에 의한 데이터의 처리는 <그림 5>와 같이 대수감소법을 이용하여 감쇠율을 산정하였다. 대수감소법에서 n 은 파형의 사이클수를 의미한다. 가속도진폭을 읽는 방법은 계측데이터의 영점이 완벽하지 않은 구간이 있으므로 양진폭을 사용하였다^{7,11)}.

4. 진동계측 데이터 및 해석

4.1 건물 A

하프파워법의 적용성을 분석하기 위하여 양상블의 데이터 수를 1024, 2048, 4096로 증가시키면서 감쇠율의 변화추이를 분석하였다. 양상블 데이터 수가 1024와 2048의 경우는 20회 평균 파워스펙트럼을 이용하였고, 4096의 경우는 각각 10회 평균 파워

〈표 5〉 하프파워법 근사식의 상수 a, b, c

		하프파워법					
		장변의 데이터 수			단변의 데이터 수		
		1024	2048	4096	1024	2048	4096
건물 A	a	0.0021	0.0047	332333	0.0021	0.0047	394375
	b	1.0696	1.0660	-620248	1.0637	1.0622	-746241
	c	-0.0191	0.0183	289488	-0.0205	-0.0180	352994
건물 B	a	0.0045	0.0086	348804	0.0028	0.0059	0.0120
	b	1.6982	1.6963	-410846	1.6973	1.6950	1.6975
	c	-0.0191	-0.0205	121001	-0.0227	0.0229	0.0223
건물 C	a	0.0078	81092	242533	0.0016	0.0036	358887
	b	2.2258	-737092	-218276	2.0531	2.0534	-349451
	c	-0.0213	165864	49114.8	-0.0421	-0.0386	85096

스펙트럼을 이용하여 감쇠율을 산정하였다.

〈그림 6〉은 파워스펙트럼의 예로서 하프파워법으로 감쇠율을 구하기 위하여 matlab을 이용하여 계측점의 근사식을 구하였다. 근사식을 구할 때에는 matlab에서 제공하는 모든 함수 중에서 근사식의 상관계수가 가장 높은 식 (2)와 식 (3)을 선정하였다. 식 (2)는 양상블 데이터 수가 1024, 2048인 경우에 사용하였고, 식 (3)은 양상블데이터 수가 4096인 경우에 사용하였다. 식 (2)와 식 (3)에서의 상수, a, b, c는 표 5와 같다.

$$y = ae^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}} \quad (2)$$

$$y = \frac{1}{a + bx + cx^2} \quad (3)$$

여기서, a, b, c : 상수

식 (2)와 식 (3) 근사식의 상관계수는 양상블 데이터 수가 1024, 2048, 4096인 경우에 장변은 0.983, 0.979, 0.852이다. 양상블의 데이터 수가 4096인 경우에 상관계수가 상대적으로 작은 이유는 20회가 아닌 10회 평균파워스펙트럼이기 때문이다. 단변에서의 근사식의 상관계수는 0.987, 0.977, 0.889로서 장변에서와 같이 양상블의 데이터가 4096인 경우 상관계수가 상대적으로 작은 값을 보이고 있다. 〈그림 6(a)〉~〈그림 6(d)〉에 의하면 계측점의 근사식 상에 양상블의 데이터가 1024인 경우에는 계측점이 4점 전후가 있으며, 양상블의 데이터가 2048인 경우에는 8점 전후의 계측점이 근사식곡선 상에 있어서 더욱 정확한 곡선을 구할 수 있었다. 〈그림 6(e)〉와

〈그림 6-(f)〉와 같이 양상블의 데이터가 4096인 경우는 스펙트럼의 피크가 증가하여 정확한 감쇠율을 산정할 수 있는 여건은 되지만 10회 평균파워스펙트럼인 관계로 계측점이 근사식 상에 편차가 크게 분포함을 알 수 있다.

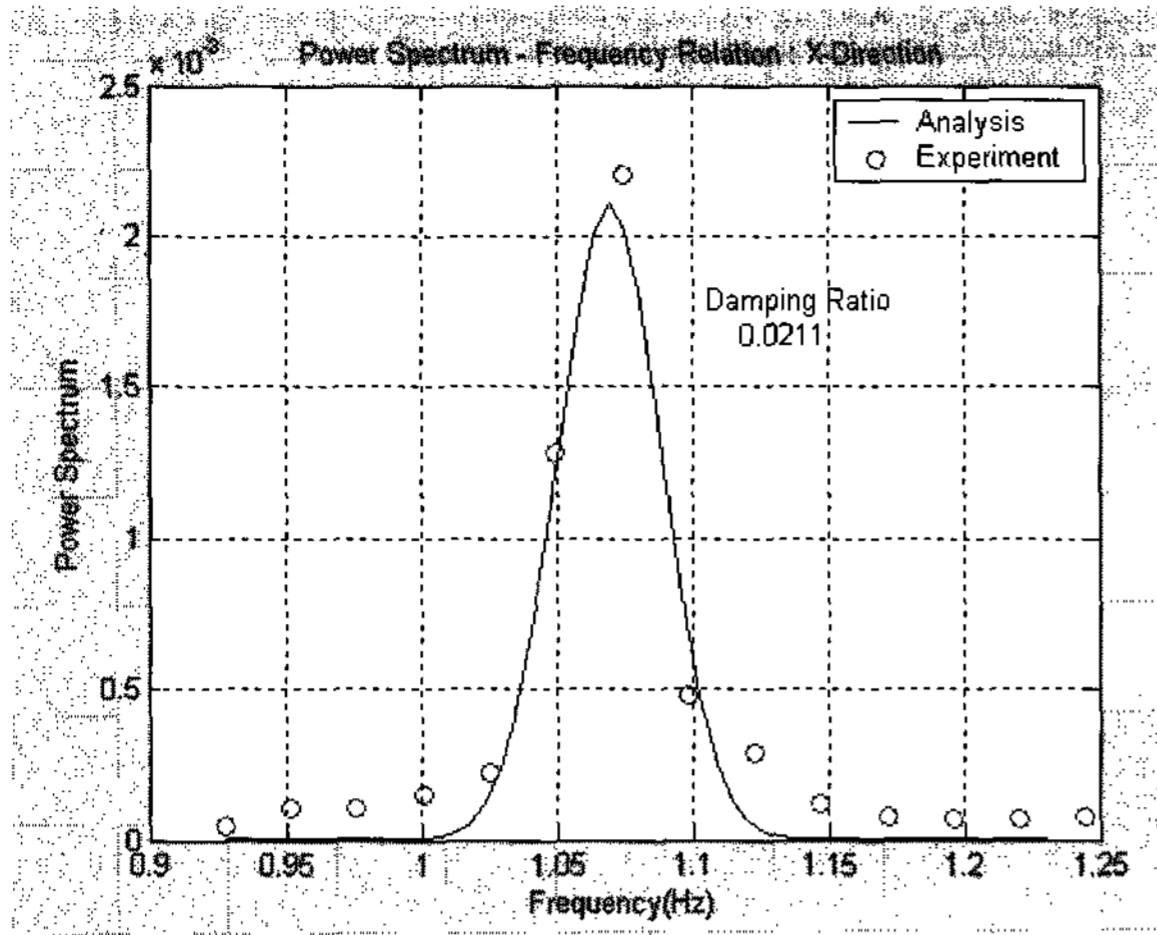
양상블의 데이터가 1024, 2048, 4096으로 증가함에 따라서 감쇠율은 표 8과 같이 장변에서 2.11%, 2.03%, 1.76%로 각각 감소하는 경향을 확인 할 수 있었다. 단변에서도 양상블의 증가에 따라 감쇠율이 2.28%, 2.00%, 1.49%로 감소하였다. 감쇠율은 건물의 고유진동수와 bandwidth에 따라 달라지므로 양상블의 데이터 수가 변화에 따른 고유진동수와 bandwidth의 변화를 분석하였다. 〈그림 7〉은 스펙트럼의 비교로서, 양상블 데이터 수가 1024에서 4096으로 증가함에 따라서 스펙트럼 피크가 커지는 것을 알 수 있고, 이로 인하여 양상블의 데이터 수가 증가함에 따라서 스펙트럼 band width는 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 영향으로 감쇠율도 양상블이 증가함에 따라서 장변과 단변에서 감소하는 것을 확인할 수 있다. 〈그림 8〉에서 양상블 데이터 수가 1024에서 4096으로 증가함에 따라서 bandwidth는 감소하지만, 반면에 고유진동수는 거의 변화가 없는 것을 알 수 있다. 〈표 6〉과 〈표 7〉은 양상블 데이터 수에 따른 bandwidth와 고유진동수의 변화 경향이다. 따라서 양상블 데이터 수가 1024에서 4096으로 증가함에 따른 감쇠율의 감소는 bandwidth의 감소 때문 인 것을 알 수 있다.

〈표 6〉 진동수의 bandwidth 비교 (단위:0.01HZ)

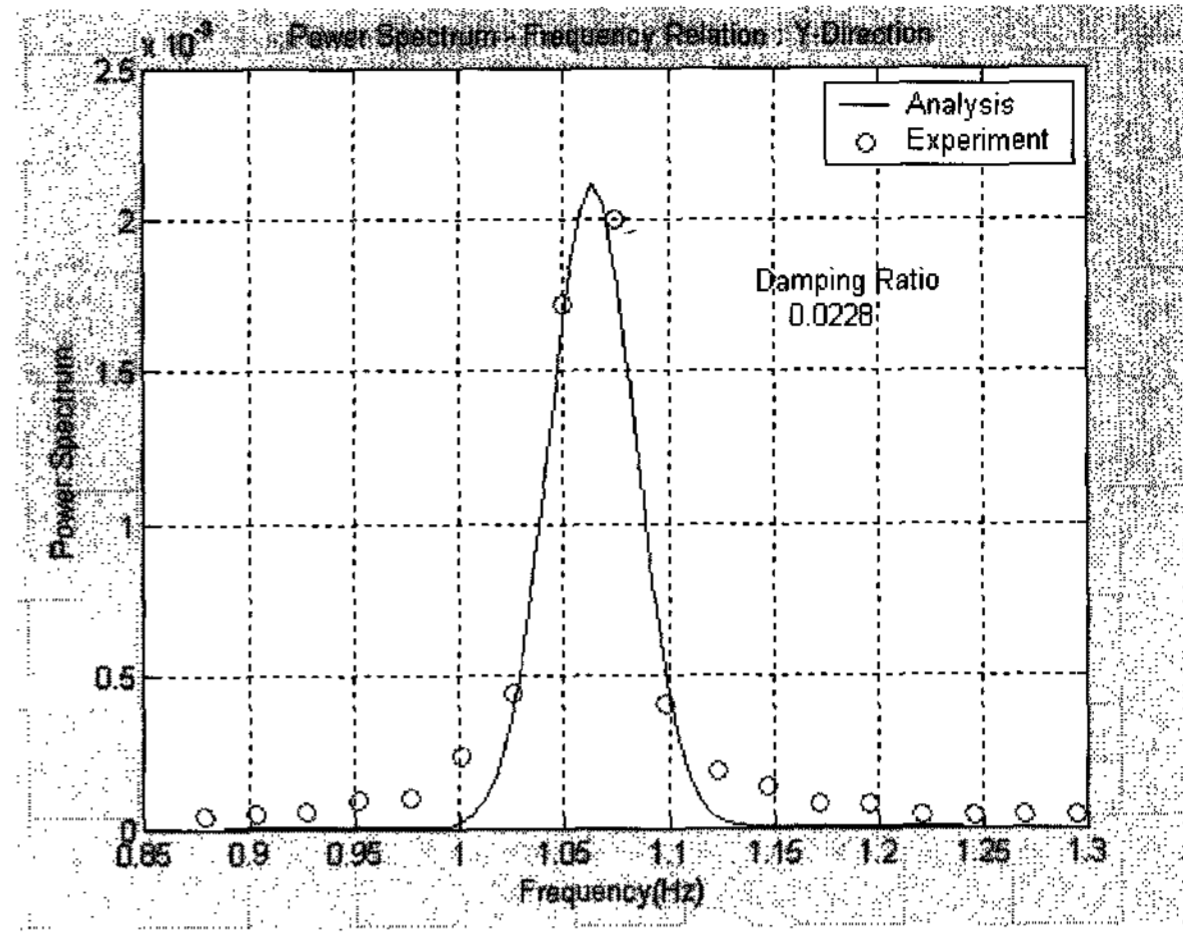
	하프파워법					
	장변(데이터 수)			단변(데이터 수)		
	1024	2048	4096	1024	2048	4096
건물 A	4.511	4.340	3.763	4.847	4.252	3.168
건물 B	4.514	4.853	4.378	5.396	5.430	5.226
건물 C	3.869	2.918	2.952	8.213	7.534	6.414

〈표 7〉 고유진동수의 비교 (단위:Hz)

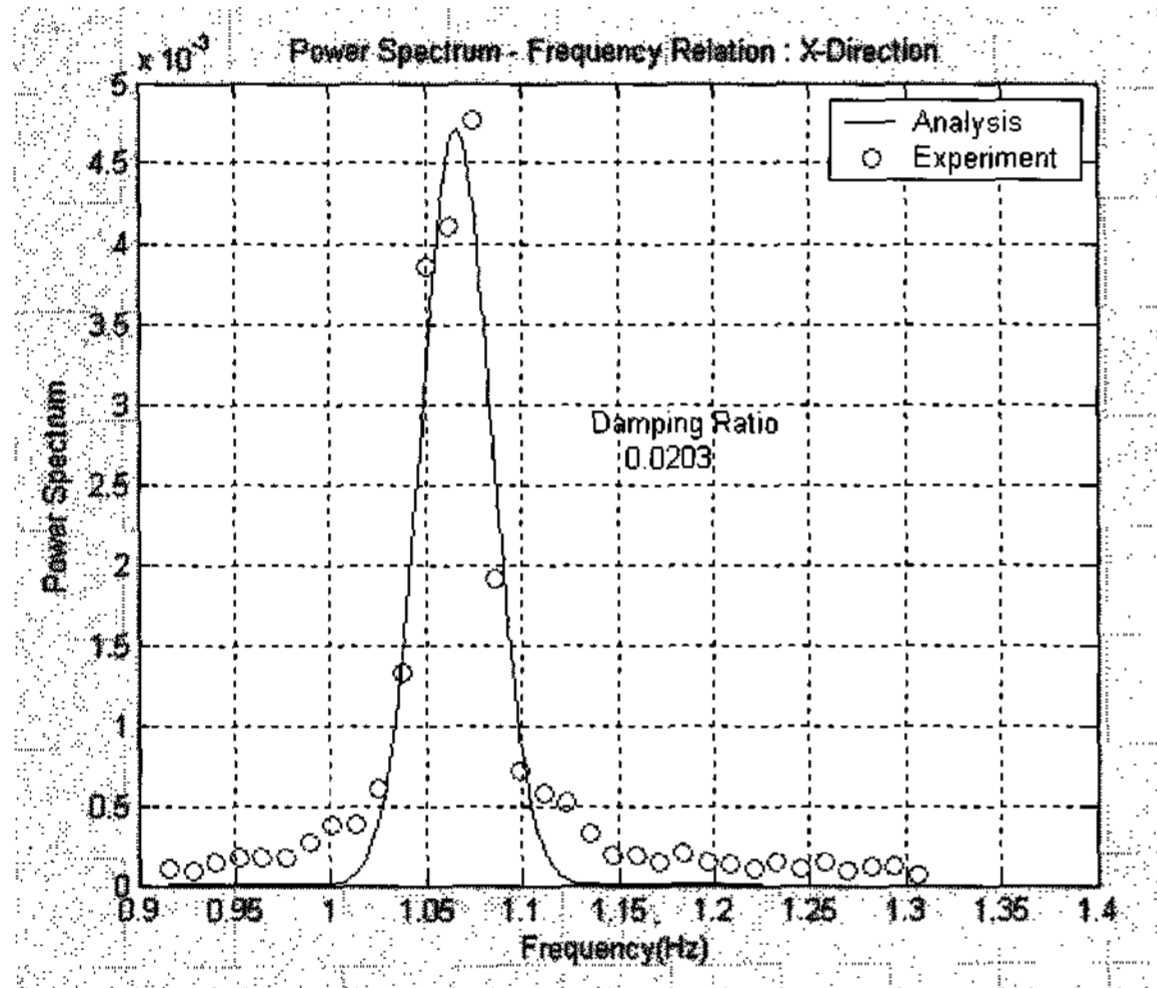
	하프파워법						인력가진법	
	장변(데이터 수)			단변(데이터 수)			장변	단변
	1024	2048	4096	1024	2048	4096		
건물 A	1.069	1.069	1.069	1.063	1.063	1.063	1.057	1.008
건물 B	1.697	1.696	1.698	1.694	1.670	1.698	1.686	1.672
건물 C	2.228	2.221	2.222	2.052	2.053	2.052	2.232	2.040



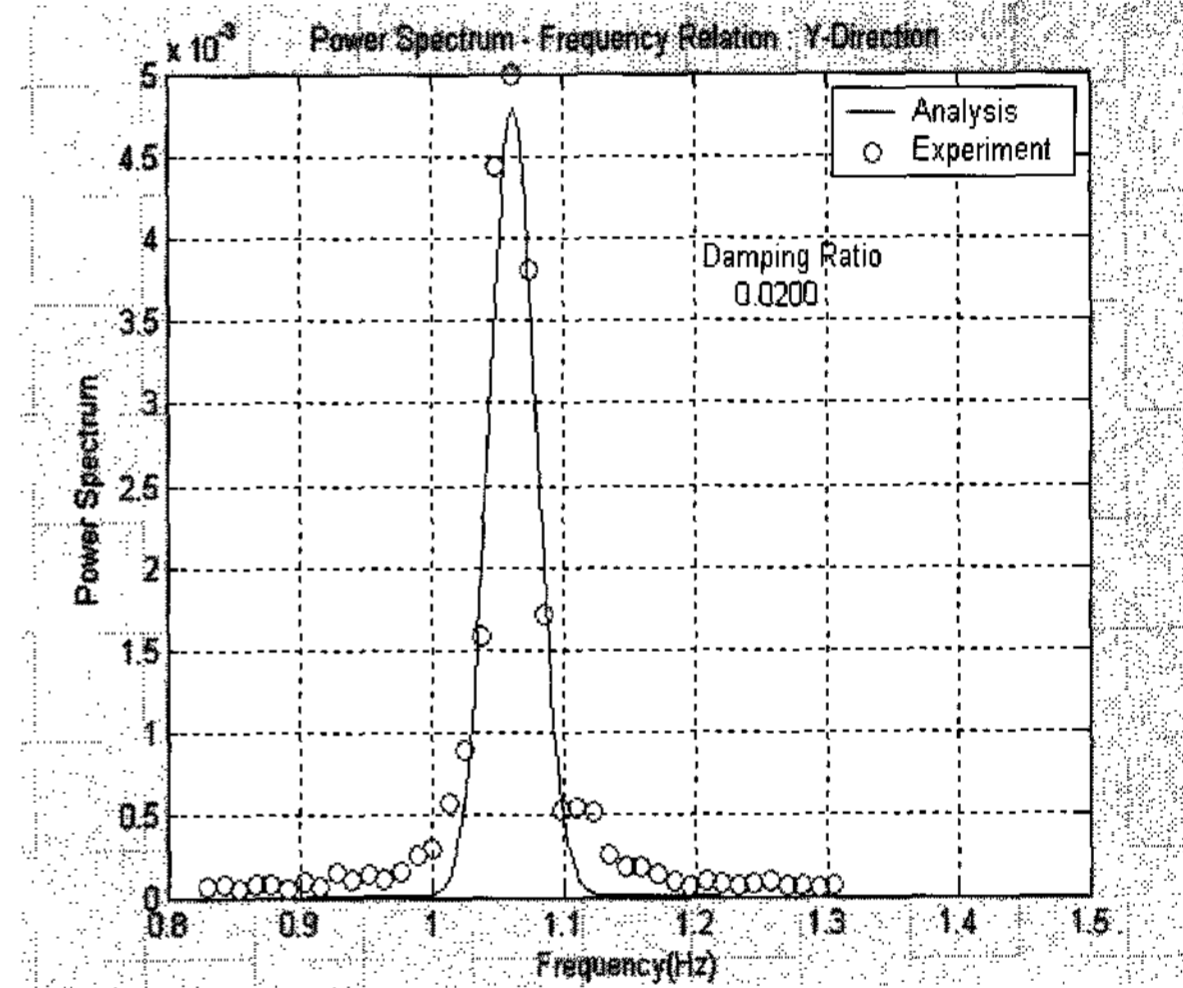
(a) 장변(양상블:1024)



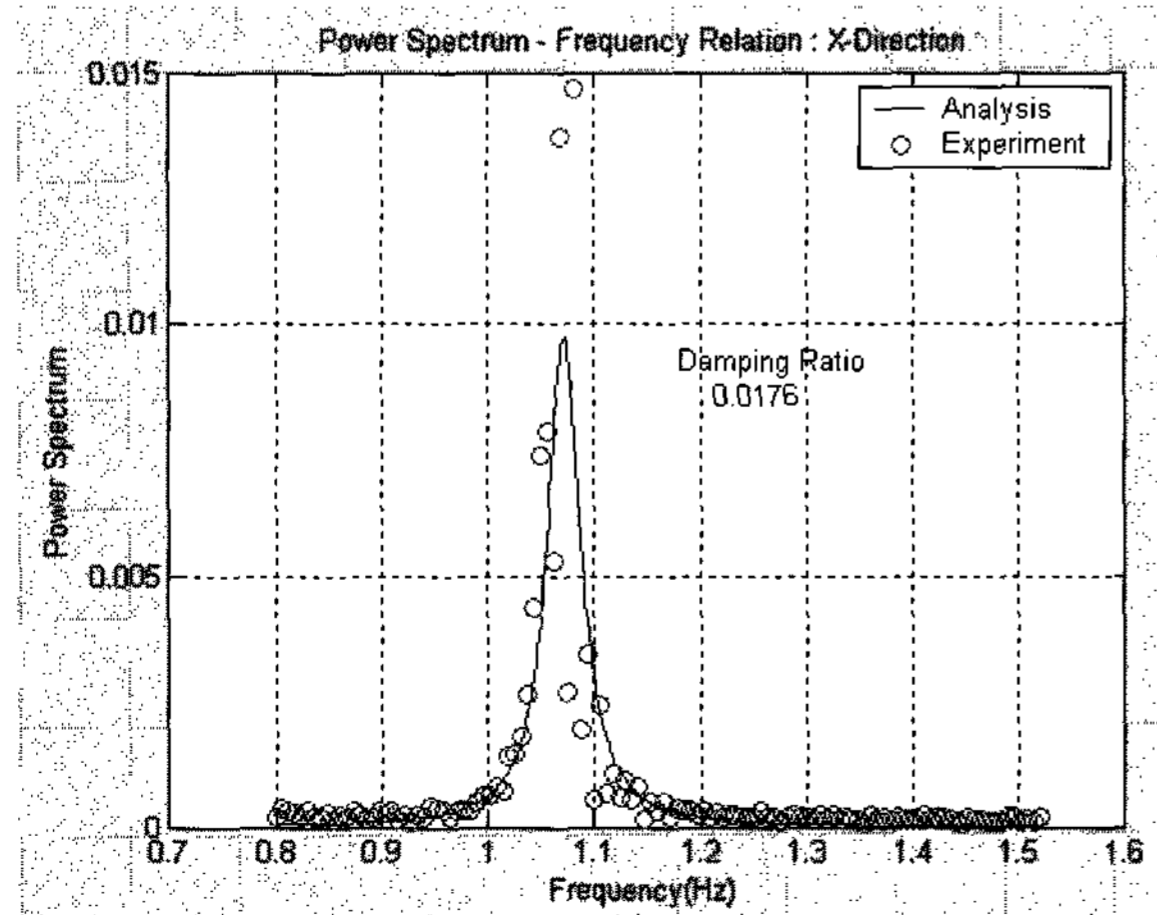
(b) 단변(양상블:1024)



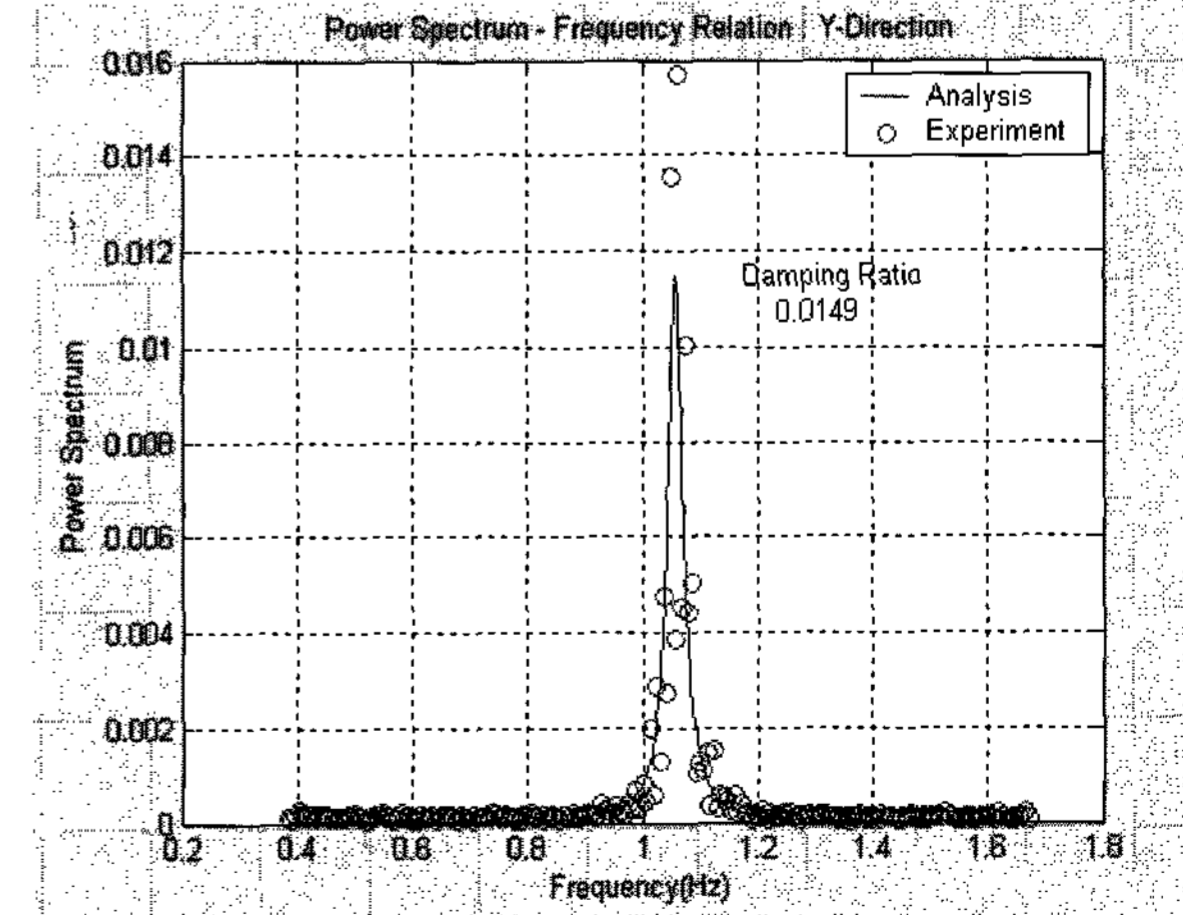
(c) 장변(양상블:2048)



(d) 단변(양상블:2048)

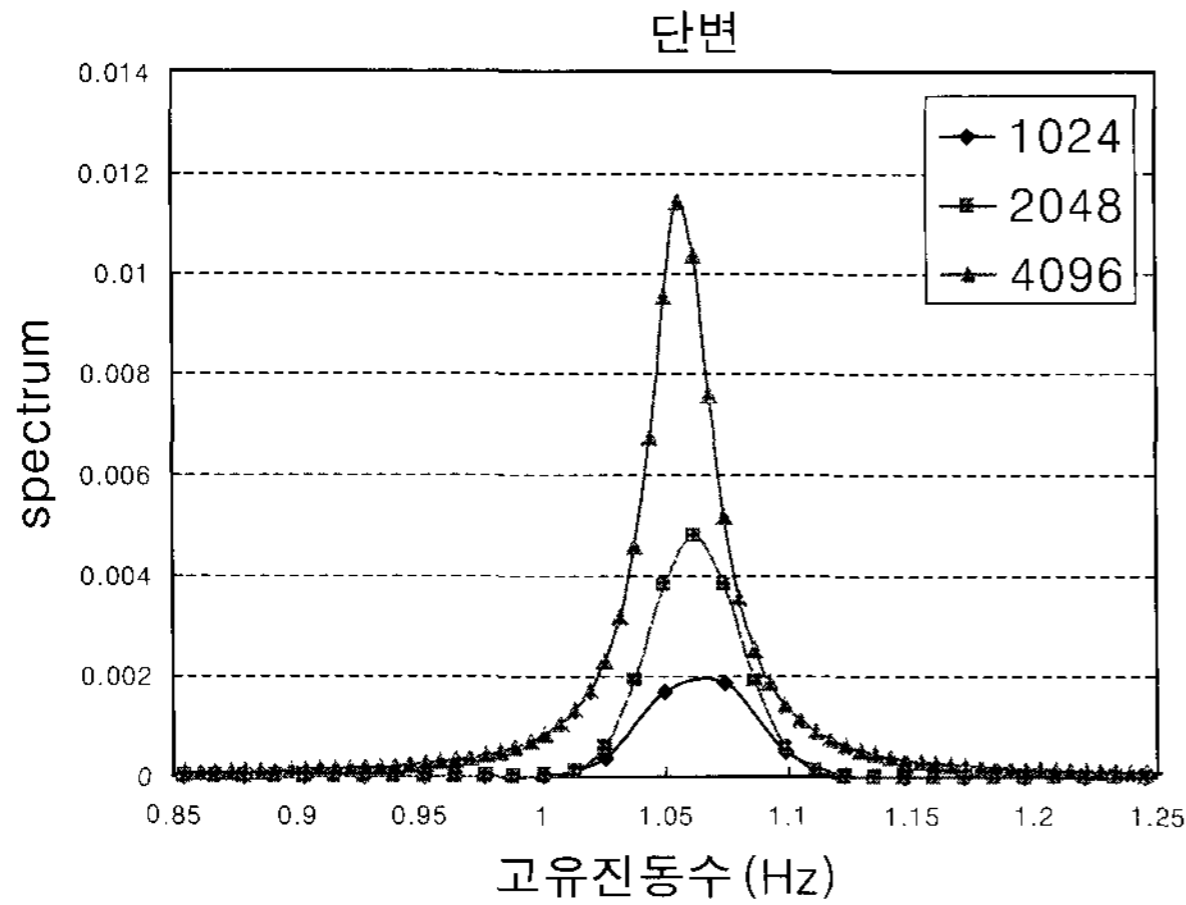


(e) 장변(양상블:4096)

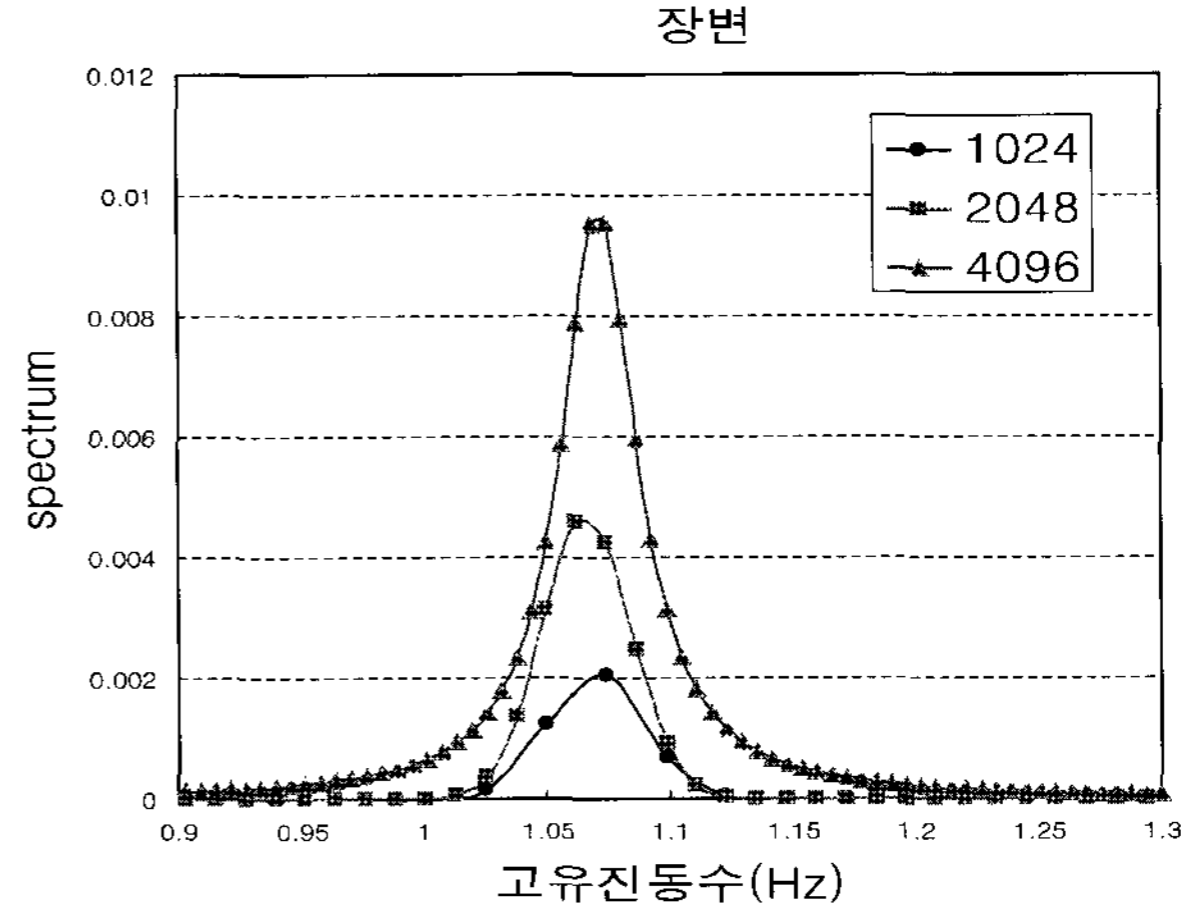


(f) 단변(양상블:4096)

〈그림 6〉 건물 A의 파워스펙트럼

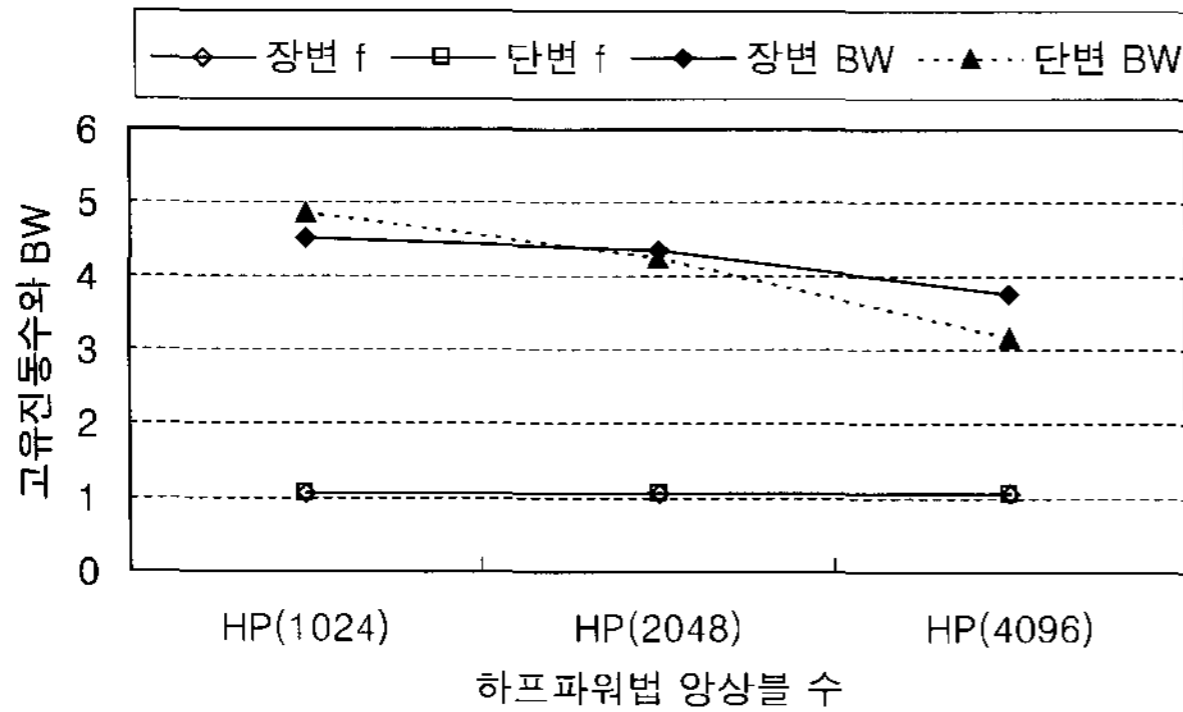


(a) 단변



(b) 장변

<그림 7> 건물 A의 스펙트럼 피크 비교

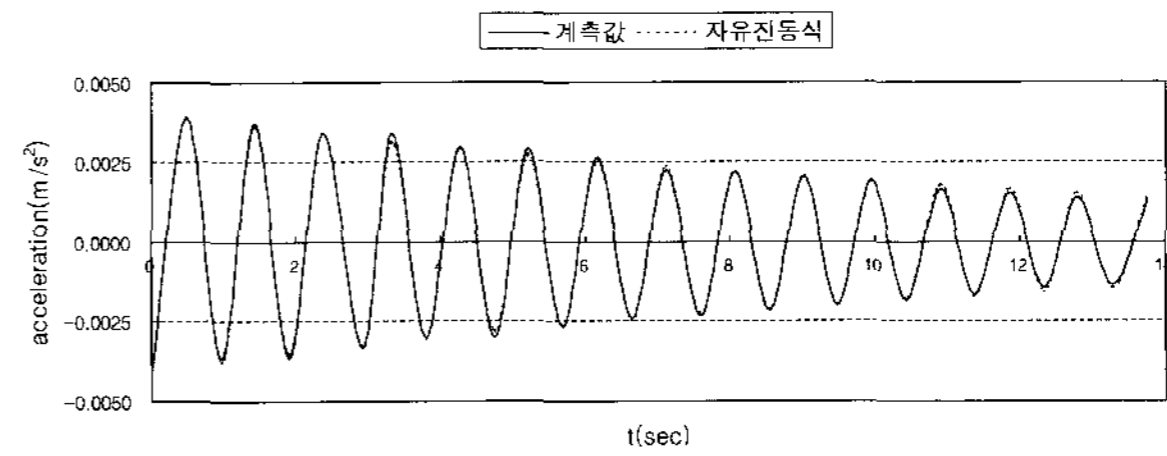


<그림 8> 고유진동수와 bandwidth의 변화
(고유진동수:Hz, bandwidth:0.01Hz)

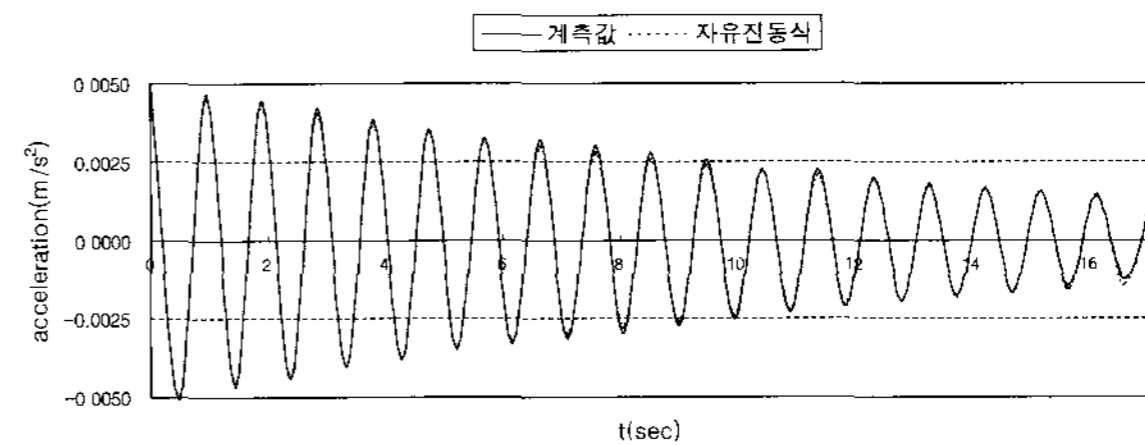
<표 8> 감쇠율의 비교 (단위:%)

	하프파워법						인력가진법			
	장변(데이터 수)			단변(데이터 수)			감쇠율		peak No	
	1024	2048	4096	1024	2048	4096	장 변	단 변	장 변	단 변
건물 A	2.11	2.03	1.76	2.28	2.00	1.49	1.15	1.16	14	18
건물 B	1.33	1.43	1.29	1.58	1.60	1.54	1.22	1.43	18	25
건물 C	1.14	0.86	0.87	2.42	2.33	1.89	1.05	1.50	25	21

하프파워법에 의한 감쇠율을 인력가진법에 의한 감쇠율과 비교하였다. <그림 9>의 실선은 건물 A의 인력가진에 의한 자유진동파형으로서 <그림 5>의 대수 감소법으로 감쇠율을 산정하면 장변과 단변에서 각각 1.15%, 1.16%이다. 감쇠율을 산정할 때 사용한 피크 수는 <표 8>에서와 같이 장변과 단변에서 각각 14개



(a) 장변



(b) 단변

<그림 9> 인력가진과 자유진동식의 비교

와 18개이다. <그림 9>의 점선은 인력가진법에서 산정된 고유진동수와 감쇠율을 이용한 자유진동식으로서, 두개의 곡선이 잘 일치함을 알 수 있다. 하프파워법의 앙상블의 데이터 수가 4096에서의 장변과 단변의 감쇠율이 각각 1.76%, 1.49%로서 하프파워법에 의한 감쇠율이 인력가진에 의한 감쇠율보다는 큰 경향이 있지만, 앙상블의 증가에 따라서 인력가진법에 의한 감쇠율 값에 근접해 감을 알 수 있다. 따라서 하프파워법도 장기간 계측을 통하여 양질의 데이터를 확보하면 신뢰성 높은 감쇠율을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

4.2 건물 B

하프파워법으로 감쇠율을 구하기 위하여 matlab을 이용하여 식 (2), 식 (3)의 파워스펙트럼 근사식을 구하였다. 근사식을 구할 때에는 matlab에서 제공하는 모든 함수 중에서 근사식의 상관계수가 가장 높은 식 (2)와 식 (3)을 선정하였다. 식 (2)는 앙상블 데이터 수가 1024, 2048인 경우에 사용하였고, 식 (3)은 앙상블 데이터 수가 4096인 경우에 사용하였다. 식 (2)와 식 (3)에서의 상수, a, b, c는 <표 5>와 같다. 하프파워법으로 감쇠율을 구하기 위한 matlab 근사식의 상관계수는 앙상블의 데이터가 1024, 2048, 4096인 경우에 장변은 0.980, 0.957, 0.919이다. 단변에서의 근사식의 상관계수는 0.983, 0.976, 0.902로서 전반적으로 높은 상관계수를 보이고 있다. 근사식 상에 앙상블이 1024인 경우에는 계측점이 4점 전후가 있으며, 앙상블이 2048인 경우에는 8점 전후의 계측점이 근사식곡선 상에 있어서 더욱 정확한 곡선을 구할 수 있었다. 앙상블의 데이터가 4096인 경우는 스펙트럼의 피크가 증가하고, 근사식 상의 계측점의 개수도 16점 전후로 증가하여 정확한 감쇠율을 산정할 수 있음을 알 수 있다.

앙상블의 데이터 수가 1024, 2048, 4096으로 증가함에 따라서 감쇠율은 장변에서 1.33%, 1.43%, 1.29%로 각각 감소하는 경향을 확인 할 수 있었다. 단변에서도 앙상블 데이터 수의 증가에 따라 감쇠율이 1.59%, 1.60%, 1.54%로 감소하였다. 앙상블 데이터 수가 1024에서 4096으로 증가함에 따라서 bandwidth는 감소하지만, 반면에 고유진동수는 거의 변화가 없는 것을 알 수 있다. 이러한 영향으로 감쇠율도 앙상블의 데이터 수가 증가함에 따라서 장변과 단변에서 감소하는 것을 확인할 수 있다.

주파수영역의 하프파워법에 의한 감쇠율을 인력가진법에 의한 감쇠율과 비교하였다. <표 8>에서 건물 B의 인력가진에 의한 감쇠율은 장변과 단변에서 각각 1.22%, 1.43%이다. 인력가진에 의한 감쇠율을 산정할 때 사용한 피크 수는 <표 8>에서와 같이 장변과 단변에서 각각 18과 25개이다. 하프파워법의 앙상블의 데이터 수가 4096일때 장변과 단변의 감쇠율이 각각 1.29%, 1.54%로서 하프파워법에 의한 감쇠율이 인력가진에 의한 감쇠율보다는 다소 큰 경향이 있지만, 앙상블의 증가에 따라서 인력가진법

에 의한 값에 근접해 감을 알 수 있다.

4.3 건물 C

matlab에 의한 파워스펙트럼의 근사식을 구할 때에는 matlab에서 제공하는 모든 함수 중에서 근사식의 상관계수가 가장 높은 식 (2)와 식 (3)을 선정하였다. 식 (2)는 앙상블 데이터 수가 1024인 경우와 2048의 단변에 사용하였다. 반면에 식 (3)은 앙상블 데이터 수가 4096인 경우와 데이터 수 2048의 장변에 사용하였다. 식 (2)와 식 (3)에서의 상수, a, b, c는 <표 5>와 같다. 이 근사식의 상관계수는 앙상블의 데이터가 1024, 2048, 4096인 경우에 장변은 0.991, 980, 0.971이다. 단변에서의 근사식의 상관계수는 0.964, 0.950, 0.942로서 전반적으로 높은 상관계수를 보이고 있다. 근사식 상에 앙상블이 1024인 경우에는 계측점이 4점 전후가 있으며, 앙상블이 2048인 경우에는 8점 전후의 계측점이 근사식곡선 상에 있어서 더욱 정확한 곡선을 구할 수 있었다. 앙상블이 4096인 경우는 스펙트럼의 피크가 증가하고, 근사식 상의 계측점의 개수도 16점 전후로 증가하여 정확한 감쇠율을 산정할 수 있음을 알 수 있다.

앙상블의 데이터가 1024, 2048, 4096으로 증가함에 따라서 감쇠율은 장변에서 1.14%, 0.86%, 0.87%로 각각 감소하는 경향을 확인 할 수 있었다. 단변에서도 앙상블 데이터의 증가에 따라 감쇠율이 2.42%, 2.22%, 1.89%로 감소하였다. 앙상블의 증가에 따른 감쇠율 감소의 원인은 앙상블의 증가로 인하여 <표 6>에서와 같이 band width의 감소를 확인할 수 있다. 이러한 영향으로 감쇠율도 앙상블이 증가함에 따라서 장변과 단변에서 감소하는 것을 확인할 수 있다.

하프파워법에 의한 감쇠율을 인력가진법에 의한 감쇠율과 비교하였다. 인력가진에 의한 감쇠율을 산정할 때 사용한 피크 수는 <표 8>에서와 같이 장변과 단변에서 각각 25개와 21개이다. <표 8>에서 건물 C의 감쇠율이 장변과 단변에서 각각 1.05%, 1.50%인 것을 알 수 있다. 하프파워법의 앙상블의 데이터 수가 4096에서의 장변과 단변의 감쇠율이 각각 0.87%, 1.89%로서 앙상블의 증가에 따라서 인력가진법에 의한 감쇠율 값에 근접해 감을 알 수 있다.

5. 결 론

건물의 높이 28.5m-50.8m, 고유진동수 1.07Hz-2.22Hz 범위의 철근콘크리트조 벽식 아파트 3동의 상시진동계측과 인력가진실험에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 아파트 3동의 미소진폭 범위인 인력가진법에 의한 자유진동파형에서 구한 감쇠율의 값은 장변에서 1.05%~1.22%, 단변에서 1.16%~1.50% 범위에 분포하였다. 반면에 상시진동계측 데이터의 하프파워법에서 산정한 감쇠율은 장변에서 0.87%~1.76%, 단변에서 1.49%~1.89% 범위에 분포하면서, 인력가진법에서의 감쇠율보다 크고 편차가 심한 것을 알 수 있었다. 이 이유는 하프파워법의 앙상블의 수가 최소 20회 이상을 사용해야 하지만 데이터 수 부족으로 5회 평균 앙상블을 사용했기 때문이다.
- 2) 하프파워법에 대한 감쇠율은 일반적으로 인력가진법에 의한 감쇠율보다 다소 크지만, 하프파워법의 앙상블 데이터 수를 충분히 크게 하면 인력가진법에 더욱 근접하는 정확한 감쇠율을 얻을 수 있으리라 기대된다.
- 3) 상시진동계측 데이터에서 하프파워법을 통한 감쇠율은 앙상블의 데이터 수를 1024에서 4096으로 증가함에 따라서 감소하면서 일정한 값으로 수렴함을 확인하였다. 이 이유는 고유진동수의 피크값이 증가하면서 파워스펙트럼의 주파수 bandwidth의 감소때문인 것으로 확인하였다.

참고문헌

1. 日本建築學會, 建築物の減衰, 丸善株式會社, 2000.10
2. Haviland, R., "a Study of the Uncertainties in the Fundamental Translational Periods

- and Damping Values for Real Buildings," MIT, Research Report No. 5, Publication No. R76-12, Department of Civil Engineering., Cambridge, Mass., 1976
3. Davenport, A.G. and Hill-Carroll, P., "Damping in Tall-Buildings; Its variability and Treatment in Design," Building Motion in Wind, Proceedings of a Session, ASCE Convention, Seattle, Washington, 1986
4. Jeary, "Damping in Tall Buildings- Mechanism and a Predictor", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 14, pp. 733-750, 1986
5. 吉田昭仁, 田村幸雄, 構造物の動特性の同定手法に關する基礎的研究, 日本建築學會大會學術講演便概集, pp. 823-824, 2004.8
6. Bandit, Piersol, "Random Data"; Analysis and Measurement Procedure, Wiley-interscience, 1971
7. 윤성원, 주영규, "철근콘크리트조 아파트의 사용성 설계용 고유주기", 대한건축학회 구조계 논문집, 19권 6호, pp. 3-10, 2003.6
8. (株)共和電業, "取扱説明書 서보형가속도 변환기" ASQ-CA·CB 1996, pp. 1-7
9. Difa Measuring System, "APB200 Manual", 1995
10. (株)共和電業, "取扱説明書 VAQ-700A", 1996, pp. 5-28
11. 日本建築學會, "建築構造物の振動實驗", pp. 36-38, 1978
12. 比上典文 외 2인, "超高層建物の常時振動測定と人力加振實驗", 日本建築學會大會學術講演便概集, pp. 993-994, 1996
13. 윤성원, "교차인력가진에 의한 저층건물의 감쇠율 산정", 대한건축학회 구조계논문집, 19권 6호, pp. 3-10, 2003.6