

고유치해석과 진동계측을 통한 벽식 공동주택의 고유주기 비교

Comparison of the Natural Period Obtained by Eigenvalue Analysis and Ambient Vibration Measurement in Bearing-Wall Type Apartment

윤 성 원* 정 석 창** 임 인 식***
Yoon, Sung-won Jeong, Sug-chang Lim, In-sik

Abstract

This paper is concerned with the natural periods of ambient vibration and eigenvalue analysis. Ambient vibration tests were conducted to four bearing-wall reinforced concrete buildings ranging from twelve to nineteen stories. The performance of modeling in eigenvalue analysis was investigated using consideration of rigidity out of the plane in the slab and the non-structural bearing wall. Measured natural period was also compared with the value by the KBC2005. Natural period of the short direction in eigenvalue analysis is well fitted with the measured one. In the other hand, Natural period of the long direction in eigenvalue analysis is slightly more overestimated than the measured one. Natural period of the long direction in eigenvalue analysis was found to be enhanced by considering the effect of the stiffness out of the plane of the slab and non-structural wall in the structural modeling.

Key-words : Natural Period, Ambient Vibration Measurement, Eigenvalue Analysis, Serviceability

1. 서 론

최근 노후 공동 아파트의 증가로 인하여 이러한 건물의 리모델링에 관한 논의가 활발히 진행되고 있다. 리모델링의 주요 관점은 평면의 확장과 주차장의 신규 건설 등이며 구조적인 관점에서는 새로이 리모델링된 건물이 신규 건물과 마찬가지로 현재의 구조기준에 적합한 성능을 확보해야 한다.

내진보강을 위해서는 구조물의 동적특성인 고유진동수와 같은 동적특성의 정확한 평가가 이루어져야 한다. 특히 고유주기의 경우 건물에 가해지는 지진하중의 산정에 중요한 변수이기 때문에 정확한 고유주기의 평가가 절실히 요구되는 시점이다.

1970년대 후반부터의 국내 벽식아파트의 평면형식은 단변에 대한 장변의 길이 비가 큰 장방향 평면이다. 그리고 구조형식의 대부분의 전단벽이 단변방

향으로 배치된 구조형식이다. 따라서 횡력에 대한 강성을 비교할 때 단변의 강성이 장변방향의 강성보다 훨씬 큰 독특한 구조형식을 가지고 있다.

국내 아파트의 고유주기식을 참조하기 위한 해외의 벽식구조에 대한 고유주기에 대한 연구는 Takeuchi²⁾, Arisas³⁾, Housner⁴⁾, Wallace⁵⁾ 등의 연구가 있다. 그러나 해외의 벽식구조 아파트는 단위면적당 벽체의 사용량(이하 벽량이라 한다)은 1%인 반면에 국내의 경우는 장변과 단변에서 각각 1~3%, 단변방향은 3~6%의 벽량이 채택되고 있다.⁶⁾

이러한 특징을 가지고 있는 국내 아파트를 고유치해석을 통하여 고유주기를 산정할 수 있지만, 비구조재의 모델링의 어려움으로 인하여 정확한 고유진동수의 예측이 쉽지 않은 실정이다. 또한 장변의 경우는 고유치해석과 계측치의 차이가 매우 심한 것으로 지적되고 있다.

본 논문에서는 벽식아파트의 고유주기를 분석하기 위하여 4동의 벽식 아파트를 대상으로 상시진동계측과 고유치해석의 비교를 통하여 고유치해석의 해석모델링 방법을 분석하고자 한다. 고유치해석의

* 정회원, 서울산업대 건축학부 부교수
Tel: 02-970-6587 E-mail:swyoon@duck.snut.ac.kr
** 부천대학, 건축과, 조교수
*** 한빛구조엔지니어링 소장

변수로서 슬래브의 변위강성을 고려한 고유주기와 조적벽의 강성을 고려한 해석을 통하여 벽식아파트의 고유주기의 변화추이를 평가하여 보다 정확한 벽식아파트 구조물의 고유주기 평가에 도움이 되고자 한다. 또한 계측된 고유주기와 KBC2005와의 비교를 통하여 국내 기준의 적용성도 아울러 검토하였다.

2. 진동계측

2.1 계측건물

대상건축물은 서울 소재의 장방형 벽식 철근콘크리트조 아파트이다. 평면 형태는 데이터의 일관성을 위하여 모든 층의 평면이 장방형인 건물만을 대상으로 하였다. 또한 내진설계된 동일한 조건의 건물을 선택하기 위하여 1988년도 이후에 건설된 아파트만을 대상으로 하였다⁷⁾.

<표 1>은 계측건물의 개요이다. 아파트의 소재는 서울에서 건설된 아파트를 대상으로 하였다. 층수는 12층~19층의 범위이고, 건물높이는 32.2m~50.8m, 변장비는 3.73~10.73, 그리고 벽율은 단변과 장변의 비율이 1.72~2.73의 범위에 있다.

2.2 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 15층까지는 건물의 단변과 장변방향 2채널씩 총 4채널로 실시하였다. 그러나 16층 이상의 아파트에서는 지붕의 형태가 평지붕이 아니라 박공지붕인 관계로 단변과 장변방향으로 1채널씩 총 2채널로 설치하였다.

2.3 상시진동계측

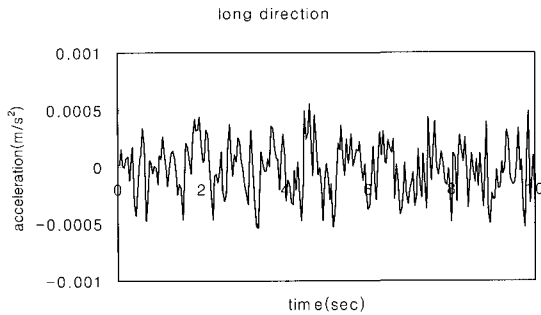
서보가속도계의 측정범위는 4동 대부분의 상시조건에서의 아파트건물의 진폭 범위가 0.3~1mm/s² 영역에 있기 때문에 최대측정범위를 0.1g로 설정하였다. 또한 최소 측정범위는 0.000001g (0.01mm/s²)의 분해능으로 설정하여 계측을 실시하였다. 센서의 위치는 옥상 정 중앙에 단변과 장변방향으로 각각 1개씩 설치하였고, 평지붕구조에 한하여 단부에도 단변과 장변방향으로 한 개씩 센서를 설치하여 총 4채널로 동시계측을 실시하였다. 상시진동계측은 각 건물에서 대부분 20회 반복계측을 실시하였다.

상시진동이 미소진동이므로, 측정대상건물의 내부에서 발생하는 엘리베이터 진동 등의 잡진동이 작은 경우에 되도록 계측을 실시하였다. 따라서 노이즈 외력이 상시진동 입력과정보다 큰 데이터는 제거하고 다시 계측을 실시하였다. 또한 전기적 신호의 노이즈 제거를 위하여 signal conditioner를 옥상의 철제난간 등에 접지하였다. 계측시의 low pass filter는 최소한 각 건물의 3차진동수 2배 이상으로 설정하였다⁷⁾.

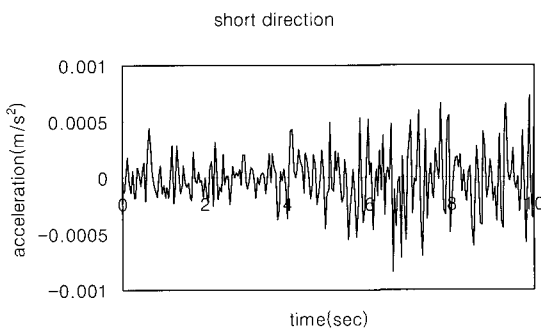
<그림 1-(a)>와 <1-(b)>는 상시진동계측의 장변과 단변의 시계열파형의 한 예로서 10초간의 파형을 확대한 것이다. <그림 1-(c)>와 <1-(d)>는 계측된 상시진동 시계열파형의 파워스펙트럼으로서 Matlab을 이용하여 해석하였다. 파워스펙트럼의 산정에 사용한 윈도우는 hanning window를 사용하였다.

<표 1> 계측건물의 개요

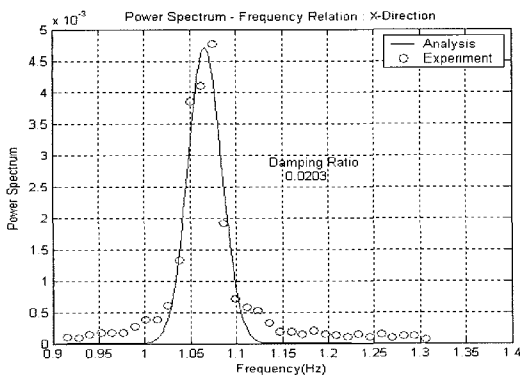
No	장변 (m)	단변 (m)	형상비	층수	높이 (m)	바닥면적당 벽체길이 비량			바닥면적당 벽체면적 비량		
						장변방향 (m/m ²)	단변방향 (m/m ²)	단변/장변 비율	장변방향 (m ² /m ²)	단변방향 (m ² /m ²)	단변/장변 비율
RC1	118	11	10.73	12	32.2	0.123	0.262	2.12	0.019	0.044	2.29
RC2	98.1	11.8	8.31	15	40	0.137	0.296	2.16	0.021	0.049	2.33
RC3	54	11	4.91	16	42.7	0.118	0.272	2.31	0.019	0.045	2.37
RC4	41	11	3.73	19	50.8	0.136	0.257	1.89	0.021	0.043	2.05



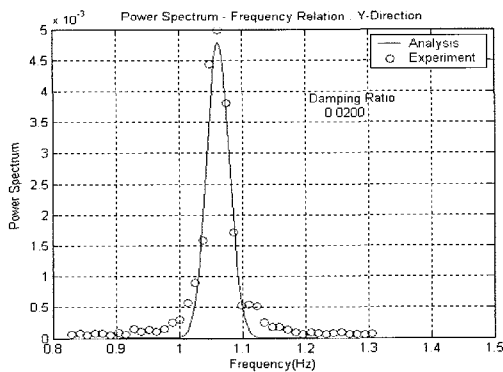
(a) 장변 시계열파형



(b) 단변 시계열파형



(c) 장변 파워스펙트럼



(d) 단변 파워스펙트럼

〈그림 1〉 상시진동계측 파형의 예

파워스펙트럼은 20회 평균파워스펙트럼을 사용하였다. 평균파워스펙트럼을 구하여 파워스펙트럼의 평활화를 도모한 후, 고유진동수를 구하였다.

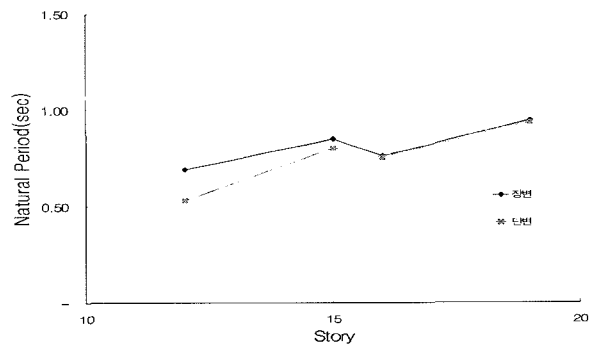
2.4 계측결과

측정대상 4개 아파트에 대한 단변, 장변 및 장단변 주기비를 <표 2>에 나타내었다. <그림 2>에서와 같이 일반적으로 층수가 높아지면 고유주기가 증가하는 결과를 나타내고 있다.

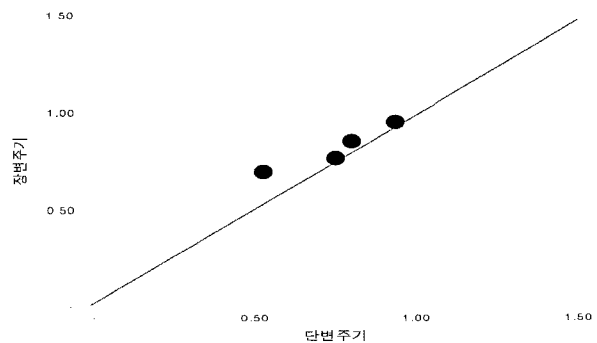
<그림 3>에 대상구조물의 장변과 단변의 주기를 비교하였다. <그림 3>에서와 같이 장변의 주기가 단변보다 조금 큰 결과를 주었고 거의 일치하는 경우도 있었다.

〈표 2〉 고유주기의 계측결과

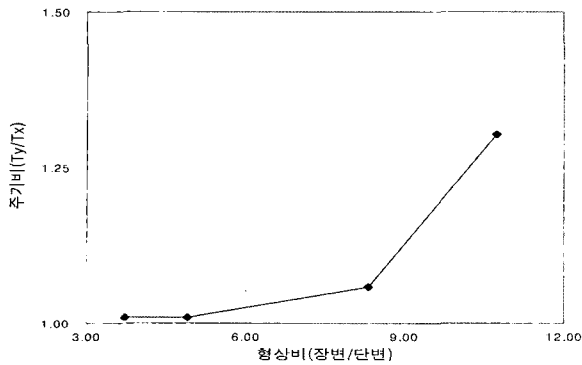
No	층 수	높이(m)	형상비	장변 (sec)	단변 (sec)	장/단변
RC1	12	32.2	10.73	0.69	0.53	1.30
RC2	15	40	8.31	0.85	0.80	1.06
RC3	16	42.7	4.91	0.76	0.75	1.01
RC4	19	50.8	3.73	0.94	0.93	1.01



〈그림 2〉 층수에 따른 주기 비교



〈그림 3〉 단변과 장변의 주기비교



〈그림 4〉 변장비와 고유주기비의 관계

〈그림 4〉는 평면의 단변에 대한 장변의 비인 형상비에 대하여 장변과 단변의 주기비를 나타내었다. 형상비가 증가할수록 고유주기의 비는 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 변장비가 증가할수록 건물의 단변방향으로 배치되는 전단벽과 장변방향의 전단벽의 양이 차이가 증가하여 단변방향이 상대적으로 강성이 증가하는 것으로 분석할 수 있다. 장변주기의 경우 그 크기가 크게 달라지지 않지만 단변의 경우 변장비의 증가에 따라 고유주기가 다소 감소하고 있음을 알 수 있다.

3. 고유치해석

3.1 면외강성과 조적벽체의 미고려

계측대상 아파트 구조물의 주기를 계산하기 위하여 MIDAS-ADS를 통하여 고유치해석을 실시하였다. 해석에 입력된 값은 <표 3>와 같이 슬래브 두께 135mm, 콘크리트강도는 6층이상 21Mpa, 6층바닥 슬래브 이하는 240Mpa로 입력하였고 세대내 벽체와 세대간벽은 층수에 따라서 각각 150mm와 180mm 그리고 코어, 계단, 측벽은 180mm로 입력하였다. 인방보의 경우 휨강성을 20%만 고려하여 해석을 수행하였다. 한편 슬래브의 면외강성의 영향을 고려하기 위하여 면외강성을 0%, 25%, 그리고 100% 고려하여 해석을 수행하였다. 또한 조적벽체의 영향을 고려하기 위하여 세대내 조적벽체의 길이와 그 면적을 조사하여 해석에 반영하였다. <표 4>의 해석 결과는 슬래브의 면외강성과 조적벽체를 고려하지 않았을 경우의 고유치해석 결과이다.

〈표 3〉 해석입력 자료

No	SLAB (mm)	벽체두께(mm)					fck(MPa)	
		코어, 계단	측벽	세대간벽	가로 벽체	세대내 벽체	최하층 ~6층 바닥	6층 이상
RC1	135	180	180	150	150	150	24	21
RC2	135	180	180	150	150	150		
RC3	135	180	180	150	150	150		
RC4	135	180	180	180	180	180		

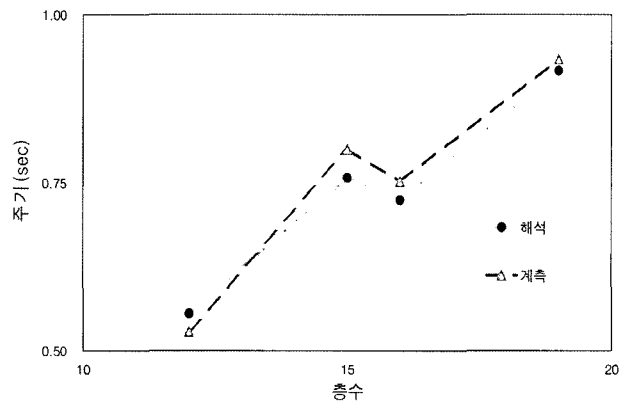
〈표 4〉 계측과 해석의 고유주기

No	계측(sec)		해석(sec)	
	장변	단변	장변	단변
RC1	0.69	0.53	0.78	0.56
RC2	0.85	0.80	1.41	0.76
RC3	0.76	0.75	1.05	0.72
RC4	0.94	0.93	1.61	0.92

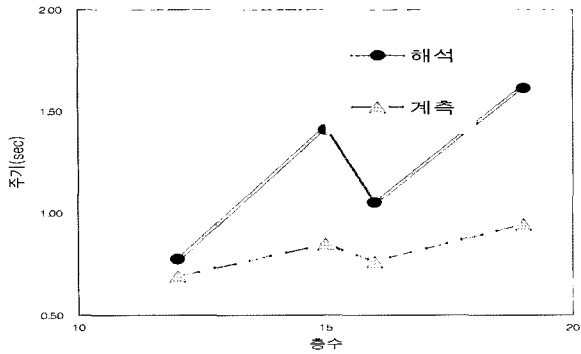
〈그림 5〉와 〈그림 6〉에 각각 단변과 장변에 대하여 고유주기의 계측과 해석결과를 비교하였다. 단변방향의 경우 <그림 5>에서와 같이 해석과 계측의 주기가 거의 유사한 경향을 보이고 있으며 그 크기도 비슷한 값을 나타내고 있어 계측대상구조물의 경우 고유치해석으로 단변방향의 주기를 잘 반영하고 있음을 알 수 있다.

그러나 장변방향의 경우 <그림 6>과 같이 해석과 계측의 값이 다소 차이를 보이고 있다. 고유주기의 계측치가 해석보다 작게 나타나고 있다. 이는 고유치해석이 실제 아파트 구조물의 장변방향의 강성을 과소평가하고 있음을 알 수 있다.

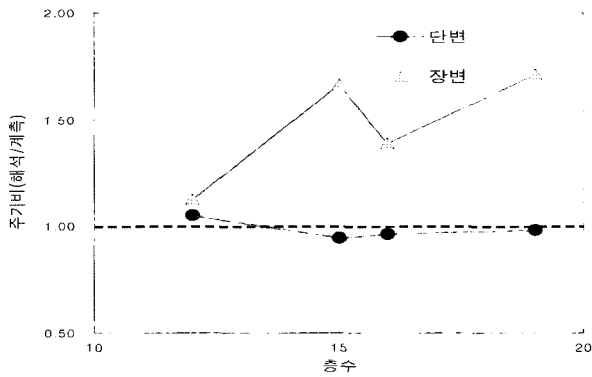
한편 장변과 단변에서 계측과 해석의 고유주기의



〈그림 5〉 해석과 계측의 주기비교(단변방향)



<그림 6> 해석과 계측 주기 비교(장변방향)



<그림 7> 해석과 계측의 주기비

비를 보면 <그림 7>에서와 같이 계측의 경우 장변과 단변의 주기비가 거의 1에 근접한 결과를 나타내고 있는 반면에 고유치해석의 경우 1보다 훨씬 큰 값을 나타내고 있고 대상아파트에 따라 다소 편차가 큰 값을 나타내고 있다. 이는 고유치해석이 장변방향의 고유주기를 적절히 평가하지 못한 결과이기 때문이라 알 수 있다.

3.2 슬래브의 면외 강성 고려

슬래브의 면외강성을 0%, 25%, 그리고 100% 고려하여 단변과 장변의 고유주기의 변화를 분석하였다. <그림 8>에서와 같이 단변방향의 경우 면외강성을 0%고려한 경우 해석과 계측이 유사한 고유주기값을 나타내었다. 그러나 면외강성을 25%, 100%로 증가시켜감에 따라 고유치해석의 강성이 증가하여, 계측시의 고유주기보다 해석시의 고유주기가 작은 값을 보임을 알 수 있다.

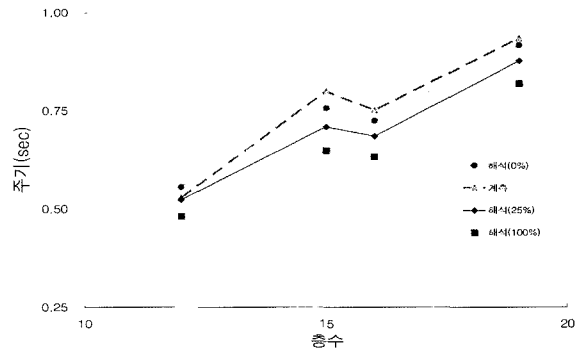
장변방향의 경우 면외강성을 고려하지 않은 Diaphragm 역할만 고려한 경우에는 계측과 해석의 결

과가 다소 차이를 보였지만 면외강성을 25%, 100% 고려함에 따라 <그림 9>와 같이 계측과 해석의 결과가 유사한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

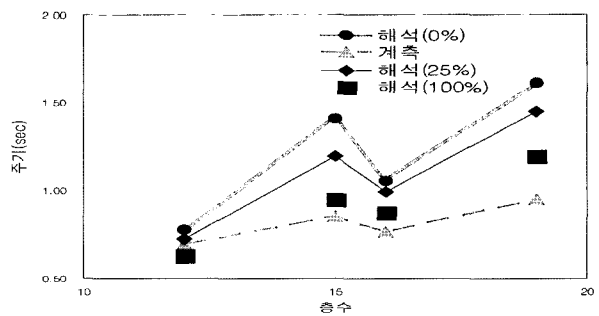
한편 주기비의 경우 <그림 10>의 경우와 같이 면외

<표 5> 슬래브의 면외강성을 고려한 고유주기(sec)

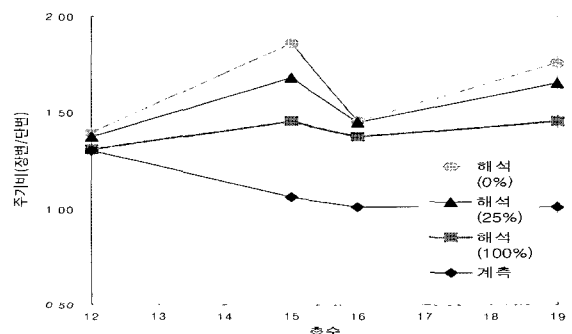
No	면외 강성(0%)		면외 강성(25%)		면외 강성(100%)	
	장변	단변	장변	단변	장변	단변
RC1	0.78	0.56	0.72	0.52	0.63	0.48
RC2	1.41	0.76	1.19	0.71	0.94	0.65
RC3	1.05	0.72	0.99	0.68	0.87	0.63
RC4	1.61	0.92	1.45	0.88	1.19	0.82



<그림 8> 면외강성에 따른 주기 변화(단변)



<그림 9> 면외강성에 따른 주기 변화(장변)



<그림 10> 슬래브강성에 따른 장단변 주기비 비교

강성을 고려하지 않은 경우보다 면외강성을 25%, 100% 고려한 경우가 훨씬 더 실제 계측결과와 유사한 값으로 근접하고 있음을 알 수 있다. 따라서 벽식 구조물의 고유치 해석시 장변의 경우, 슬래브의 면외강성을 고려하는 것이 실제 구조물의 거동을 더 잘 반영할 수 있음을 알 수 있었다.

3.2 조적벽의 강성 고려

조적벽의 강성을 고려하기 위하여 도면에서 표시된 조적벽의 치수를 기준으로 고유치해석에 포함하였다. <표 6>의 자료는 KBC 2005의 규정을 사용하였으며, 측정대상 구조물의 경우 상시진동상태에서 계측하였으므로 조적벽은 탄성상태에서 거동하는 것으로 볼 수 있고, 대변형에서 발생하는 압괴나 슬라이딩 모델은 사용하지 않아도 될 것으로 판단된다.

조적벽의 강성을 고려한 RC 3과 4에 대한 조적벽체의 벽량은 <표 7>과 같다. 해석대상 구조물의 경우 조적벽체의 경우 단변보다 장변의 벽량이 더 많은 것으로 조사되었다. <그림 11>과 <그림 12>에 조적벽의 강성을 고려할 대상구조물의 단위 세대당 조적벽체의 배치현황을 나타내었다.

조적벽량의 양은 해석결과에 그대로 반영되어 장변의 주기감소(강성증가)가 단변보다 크게 나타났다. 이러한 효과를 확인하기 위하여 <그림 13>에 조적벽체의 강성을 고려전후의 주기비와 계측값의 주기비를 나타내었다. 조적벽의 강성을 고려한 경우가 실제 계측된 주기비에 더 근접하는 결과를 나타내었다.

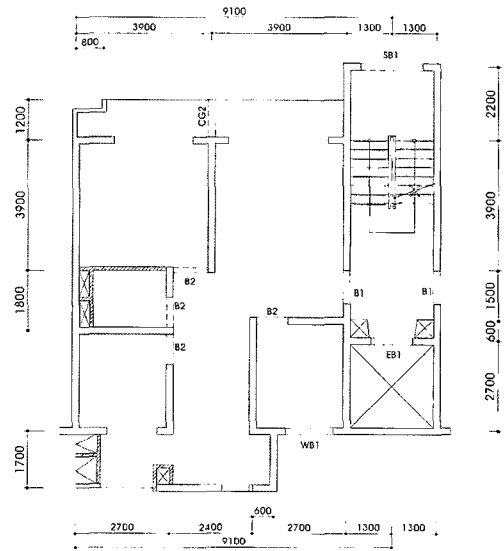
장변에서는 슬래브의 강성을 100% 고려하였을 경우에 조적벽체를 고려했을 때가 고려하지 않은

<표 6> 조적벽 강성 입력자료

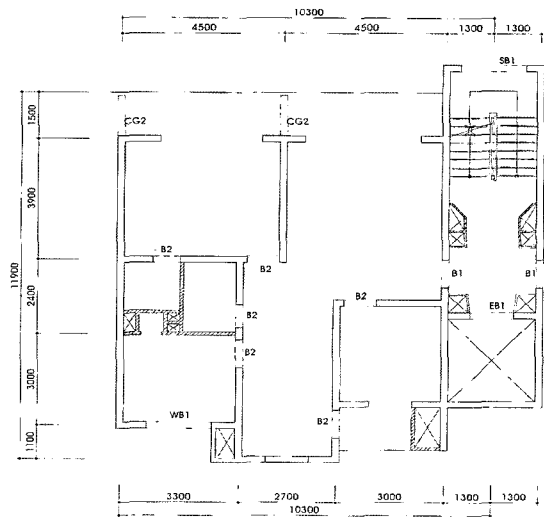
입력변수	입력값
탄성계수	$E_m = 750f_m' = 6201 \text{ N/mm}^2$
전단탄성계수	$G = 0.4E_m = 2480 \text{ N/mm}^2$
프와송비	$\nu = 0.75$

<표 7> 조적벽체의 벽량

No	바닥면적 (m ²)	바닥면적당 벽체길이			바닥면적당 벽체면적		
		장변 (m/m ²)	단변 (m/m ²)	단변/장변	장변 (m ² /m ²)	단변 (m ² /m ²)	단변/장변
RC3	607	0.034	0.032	0.941	0.0034	0.0032	0.941
RC4	466	0.061	0.040	0.655	0.0061	0.004	0.655



<그림 11> 조적벽체 분포현황(RC12)

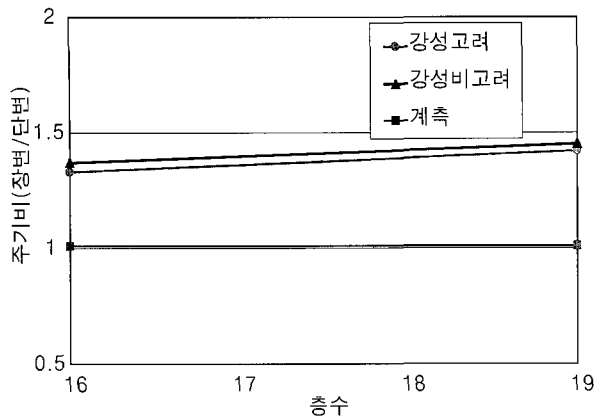


<그림 12> 조적벽체 분포 현황(RC16)

경우보다 계측치에 근사하였다. 그러나 단변의 경우는 슬래브의 강성을 고려하지 않았을 경우에 조적벽체를 고려했을 때가 계측치와 가장 근사하였다.

<표 8> 조적벽체의 강성 고려 전후의 주기 비교

No	계측		해석 주기(sec)					
			슬래브강성 (100%)		슬래브강성 (25%)		슬래브 강성 (0%)	
			장변	단변	장변	단변	장변	단변
RC3	0.76	0.75	0.87	0.63	0.99	0.68	1.05	0.72
			(0.78)	(0.58)	(0.90)	(0.63)	(1.00)	(0.66)
RC4	0.94	0.93	1.19	0.82	1.45	0.88	1.61	0.92
			(1.12)	(0.79)	(0.84)	(0.84)	(1.49)	(0.88)



〈그림 13〉 조적벽 강성 고려전후의 주기비

4. KBC 2005와 계측 결과의 비교

KBC 2005에서 제안하고 있는 기본진동주기의 약 산식은 다음과 같다.

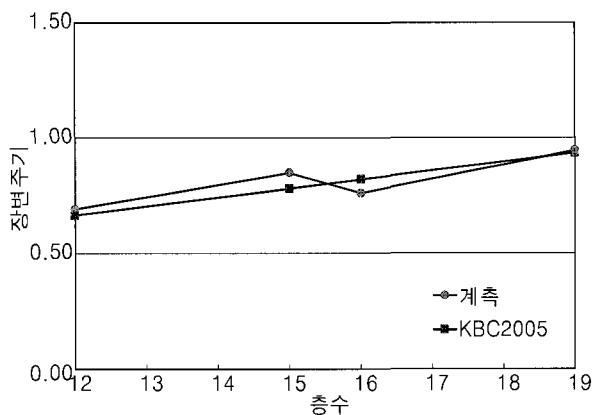
$$T_a = C_T h_n^{3/4} \quad (1)$$

여기서,

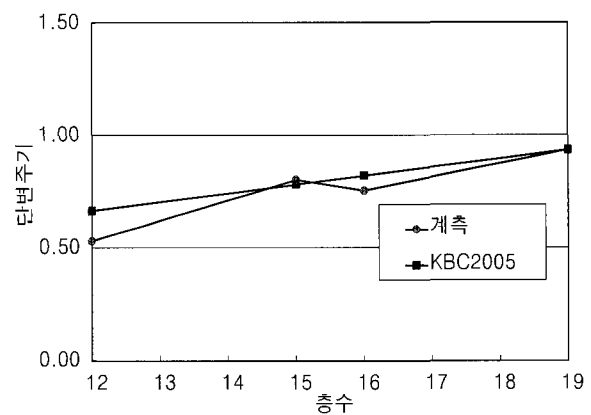
$$C_T = 0.085: \text{철골 모멘트 골조}$$

〈표 9〉 각 제안식의 주기비교

NO	계측		KBC2005	
	장변	단변	장변	단변
RC1	0.69	0.53	0.66	0.66
RC2	0.85	0.80	0.78	0.78
RC3	0.76	0.75	0.82	0.82
RC4	0.94	0.93	0.93	0.93



(a) 장변



(b) 단변

〈그림 14〉 계측과 KBC2005 비교

= 0.073: RC 모멘트 골조, 철골 편심가새골조

= 0.049: 그 외 다른 모든 건물

식 (1)을 이용하여 산정한 고유주기는 <표 9>과 같으며, 이를 그림으로 나타내면 <그림 14>와 같다. KBC2005에 의한 고유주기는 계측치와 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

4동의 벽식아파트의 상시진동계측을 실시하여 그 결과를 고유치해석 및 KBC2005와 비교한 결과는 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 아파트 구조물의 고유주기는 장변이 단변보다 전반적으로 큰 값을 나타내어 전단벽이 많이 배치된 단변방향의 강성이 더 크다는 것을 알 수 있었다. 또한 고유주기는 평면의 치수보다는 전단벽량에 따라 달라짐을 알 수 있었다.

2. 고유치해석의 결과가 단변에서는 해석치가 계측치보다 최대 1.06배 범위에서 계측치와 잘 일치하였다. 반면에 장변에서는 해석치가 계측치보다 최대 1.71배 큰 값을 나타내었다. 장변의 경우 슬래브의 면외강성을 고려하는 해석의 결과가 Diaphragm 거동만을 고려한 경우보다 계측치와 더욱 근접하는 결과를 나타내었다. 그러므로 슬래브의 유효강성을 고려하는 것이 장변의 경우 훨씬 더 실제 구조물의 거동을 잘 반영할 수 있음을 알 수 있었다.

3. 전단벽이외에도 세대내 조적벽의 영향을 고려하여 해석한 결과 장변의 경우 해석치가 계측치와 더욱 근접하는 결과를 얻을 수 있었다.

4. KBC 2005의 주기산정식은 계측결과와 장변과 단변에서 잘 일치하였다.

감사의 글

이 연구는 건설교통부 2005년도 건설핵심기술연구 개발사업(과제번호C 105A1050001-05A0505-00210)에 의한 연구 결과의 일부임.

참고문헌

1. 日本建築學會, 建築物の減衰, 丸善株式會社, 2000. 10
2. Takeuchi, M. and Nakagawa, K., Vibrational Characteristics of Buildings, Proceedings, 2nd World Conference on Earthquake Engineering, Vol II, Tokyo, Japan, 1960
3. Arisas, A. and Husid, R., Empirical Formula for the Computation of Natural Periods of Reinforced Concrete Building with Shear Walls, Reinsta del IDIEM Vol. 1, No. 1, University of Chile, Santiago, March, 1962
4. Housner, G.W. and Brady, A.G., Natural Periods of Vibration of Buildings, Journal of the Engineering Mechanics Division, Proceeding of ASCE, Vol. 89., No. EM4. August, 1963
5. Wallace, J. W. and Moehle, J. p., Ductility and Detailing Requirements of Bearing Wall Buildings, J of Structural Engineering, Vol. 118, No6, June, 1992
6. 천영수, 상시미진동 측정에 의한 벽식구조 아파트건물의 주기 특성, 한양대학교 박사학위논문, 1988.12
7. 윤성원, 주영규, 철근콘크리트조 아파트의 사용성 설계용 고유 주기, 대한건축학회 구조계논문집, 19권 6호, p.p. 3-10, 2003.6
8. (株)共和電業, 取扱説明書 서보형가속도변환기 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