

철근 콘크리트 전단벽 구조물의 고유주기

Fundamental Period Formulas for Concrete Shear Wall Buildings

강성훈¹⁾ · 홍성걸²⁾ · 박홍근³⁾ · 정 란⁴⁾

Kang, Sung Hun · Hong, Sung Gul · Park, Hong Gun · Chung, Lan

국문 요약 >> 이 연구에서는 평면, 입면 및 구조적 특성이 다양한 철근 콘크리트 고층 아파트 건물의 고유주기를 예측할 수 있는 새로운 식을 제안하였다. 제안식은 벽체의 진동이론과 지진시 계측된 건물들의 고유주기로부터 개발 되었으며, 평면에서 다양한 방향으로 설계된 전단벽의 구조적 특성을 적절히 반영할 수 있다. 제안식의 검증에 위해 신축 중인 국내 아파트 건물 10개동의 고유주기를 측정하였으며, 측정된 고유주기는 제안식 및 KBC 2009, ASCE 7-10과 같은 기준식들과 비교 하였다. 비교 결과, 제안식은 기준식에 비해 최근의 철근콘크리트 전단벽 건물 특성을 합리적으로 반영함으로써 고유주기를 보다 정확하게 예측하는 것으로 나타났다.

주요어 고유주기, 상시진동, 철근콘크리트 전단벽 구조 건물, 벽량

ABSTRACT >> A new formula is proposed for the fundamental period of high-rise residential concrete shear-wall (SW) buildings. This formula, developed on the basis of dynamics with the recorded fundamental period during the recent earthquakes, can consider the wall stiffness with respect to any direction. To verify the proposed formula, the fundamental period of 10 sample buildings, measured during construction, is compared with the predicted fundamental period. Furthermore, the empirical formulas presented in the building codes KBC 2009 and ASCE 7-10, are also compared with the proposed formula to show a rationality of the proposed formula. The comparison results show that the proposed formula not only can rationally consider the characteristics of each shear-wall, but that it also accurately predicts the fundamental period of the buildings.

Key words Fundamental period, Ambient vibration, Concrete shear wall buildings, Quantity of wall

1. 서론

현행 국내 구조설계 기준인 KBC 2009⁽¹⁾에서 제시하고 있는 고유주기 산정 기준식은 1971년에 발생한 산 페르난도(San Fernando) 지진시 계측된 건물들의 고유주기값을 근거로 결정되었다.⁽²⁾ 그러나 현재의 설계대상 건물들은 규모, 형태, 재료 및 구조 등이 변화하여 당시의 건물과는 다른 거동 특성을 나타낸다. 따라서 현행 고유주기 기준식의 현재 건물에서의 적용에 관한 검증과 개선이 필요하다.

국내 철근콘크리트 전단벽 구조의 상당수는 아파트 건물

이다. 이러한 아파트 건물은 과거의 중·저층의 판상형에서 최근에는 고층의 타워형으로 변화하는 추세이다. 특히, 비정형 평면이 다수인 타워형 아파트 건물은 다양한 방향의 전단벽과 더불어 기둥과 같은 골조 구조까지 혼합되는 등 기존의 판상형 건물과는 다른 구조적 특성을 나타낸다. 그러나 이러한 타워형 아파트 건물의 고유주기 계측 결과 및 동적거동 특성에 관한 연구는 현재 미흡한 실정이다. 이와 관련한 연구로는 국내 아파트 건물의 사용성 고유주기에 관한 연구^{(3),(4)}와, 최근에 발생한 여러 지진시 계측된 고유주기값을 근거로 철근콘크리트 전단벽 구조 건물의 고유주기식을 제안한 연구⁽²⁾ 등이 있지만, 이들 연구는 기본적으로 판상형 전단벽 구조 건물을 대상으로 진행되었다는 점에서 현재의 설계대상 건물에 모두 적용하기에는 한계가 있다.

따라서 이 연구에서는 이러한 철근콘크리트 전단벽 구조 건물에 적합한 고유주기 산정식의 개발을 목표로 하였다. 이를 위해 최근에 건설된 국내 아파트 10개동의 상시진동 고유주기가 측정되었으며, 측정된 고유주기는 본 연구에서

¹⁾ 정희원·서울대 대학원, 박사과정

²⁾ 정희원·서울대 건축학과, 교수
(교신저자: sgihong@snu.ac.kr)

³⁾ 정희원·서울대 건축학과, 교수

⁴⁾ 정희원·단국대 건축공학과, 교수

본 논문에 대한 토의를 2011년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2010. 9. 20 / 수정일 : 2010. 11. 12 / 게재확정일 : 2010. 11. 15)

벽체의 진동 이론으로부터 개발된 고유주기 산정 제안식의 검증에 사용되었다.

2. 연구현황

2.1 고유주기 산정 기준식

현행 구조 설계 기준인 KBC 2009⁽¹⁾와 ASCE 7-10⁽⁵⁾에서 제시하는 철근콘크리트 전단벽 구조의 고유주기 산정 기준식은 각각 식 (1) 및 식 (2)와 같으며, 두 기준에서 제시하는 모든 구조형식의 건물에 적용 가능한 고유주기 산정 기준식은 식 (3)과 같다.

$$T_a^{KBC} = 0.0743(H^{3/4})/\sqrt{A_c} \quad (1)$$

$$A_c = \sum A_e [0.2 + (D_e/h_n)^2]$$

$$D_e/h_n \leq 0.9$$

$$T_a^{ASCE} = 0.0019H/\sqrt{C_w} \quad (2)$$

$$C_w = \frac{100}{A_B} \sum_{i=1}^x \left(\frac{H}{H_i} \right)^2 \frac{A_i}{[1 + 0.83(H_i/D_i)^2]}$$

$$T_a^{etc} = 0.049H^{3/4} \quad (3)$$

여기서, H 는 건물의 높이, A_e, D_e 는 각각 1층에서 지진하중 방향에 평행한 전단벽의 단면적과 길이, A_B 는 건물의 바닥 면적, x 는 고려하는 방향으로의 횡력에 저항하는 전단벽 수, H_i, D_i, A_i 는 각각 i 번째 전단벽의 높이, 길이 및 웹부분 면적이다.

2.2 상시진동 고유주기 연구

이리형 등의 연구⁽³⁾에서는 철근콘크리트 전단벽 구조 건물의 고유주기 산정식을 개발하기 위해 1998년 3월부터 1999년 4월까지 국내 아파트 건물 50개동의 상시 미진동 고유주기를 측정하였다. 측정된 고유주기는 기준식들과 비교되었으며, 당시의 기준식들은 대상 건물의 고유주기를 적절히 예측하지 못하는 것으로 평가되었다. 이에 따라 연구에서는 높이와 벽량을 변수로 한 식 (1)을 철근콘크리트 전단벽 구조 건물의 고유주기 산정식으로 제안하였다.

$$T_a^{Lee} = 0.4H^{0.2}/\sqrt{L_w} - 0.5 \quad (4)$$

여기서, L_w 는 단위 면적당 고려하는 방향과 평행한 전단벽 길이로서 단위는 m/m^2 이다.

한편, 윤성원과 주영규의 연구⁽⁴⁾에서는 내진설계가 적용된 철근 콘크리트 장방형 아파트의 사용성 설계용 고유주기 산정식을 제안하였다. 이를 위해 1988년 이후에 건립된 서울시 소재의 민영아파트 22개동에 대한 상시 미진동 고유주기가 측정 되었으며, 측정 결과의 분석을 통해 단변과 장변에 대해 각각 높이에 비례하는 사용성 고유주기식인 식 (5), (6)을 제안하였다.

$$T_{a(Short)}^{Yoon} = 0.0193H \quad (5)$$

$$T_{a(Long)}^{Yoon} = 0.0185H \quad (6)$$

여기서, $T_{a(Short)}^{Yoon}, T_{a(Long)}^{Yoon}$ 은 각각 단변과 장변방향 사용성 고유주기이다.

2.3 지진계측 고유주기 연구

Goel and Chopra⁽²⁾는 1994년 노스리지(Northridge) 지진시의 고유주기 측정 결과를 중심으로, 산 페르난도 지진을 포함한 7개 지진 계측 결과를 종합하여 철근콘크리트 전단벽 구조 건물의 고유주기를 분석하였다. 특히, 현행 기준식인 식 (1)의 근거가 되는 ATC 3-06의 고유주기 기준식과 지진계측 고유주기의 비교를 통해 ATC 3-06의 고유주기 기준식이 건물의 고유주기를 매우 보수적으로 평가한다고 지적하였다.

이에 따라 연구⁽²⁾에서는 이론적으로 적합한 새로운 형태의 주기식을 개발하기 위해 벽체의 휨과 전단 거동에 대한 고유주기 식을 SRSS(Square Root of Sum of Squares) 조합하였으며, 조합한 이론식을 측정된 고유주기에 맞추어 식 (7), (8)과 같은 고유주기 하한과 상한 산정식을 제안하였다.

$$T_{a(L)}^{Goel, Chopra} = 0.0019H/\sqrt{C_w} \quad (7)$$

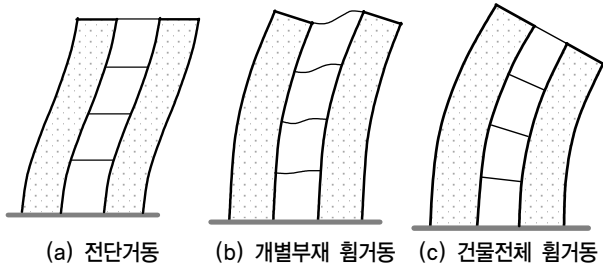
$$T_{a(U)}^{Goel, Chopra} = 0.0026H/\sqrt{C_w} \quad (8)$$

여기서, $T_{a(L)}^{Goel, Chopra}, T_{a(U)}^{Goel, Chopra}$ 는 각각 고유주기 하한 및 상한 산정식이며, C_w 는 식 (2)에 제시되어 있다.

식 (2)에서 확인할 수 있듯이, 연구에서 제안된 식 (7)은 ASCE 7-10에서 제시하는 철근콘크리트 전단벽 구조의 고유주기 기준식의 근거가 된다.

2.4 전단벽-골조 건물의 고유진동수 연구

Zalka⁽⁶⁾는 전단벽-골조 구조물(Wall-Frame Building)의 고유진동수에 관한 이론적 연구를 수행하였다. Goel and Chopra⁽²⁾의 전단벽 구조 이론과는 달리 수직부재에 대한 슬래브의 강성 크기에 따라 휨 거동을 두 가지로 구분하였다.



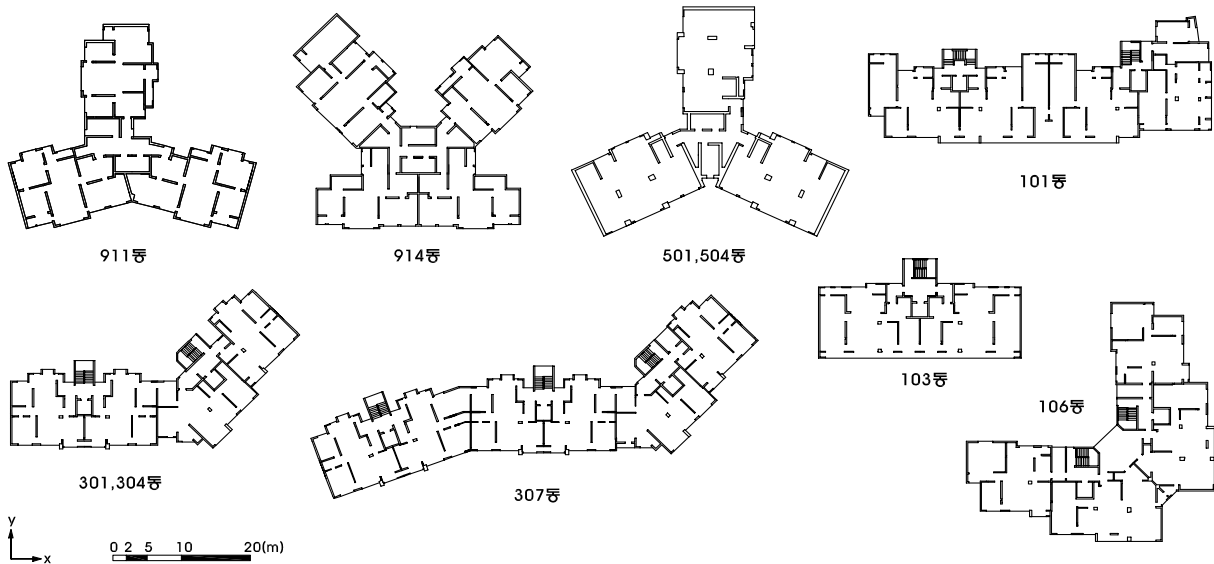
〈그림 1〉 전단벽-골조 건물의 거동 구분⁽⁶⁾

즉, 그림 1과 같이 건물의 거동을 크게 전단과 휨 거동으로 구분하였으며, 휨 거동의 경우 다시 슬래브의 커플링 정도에 따라 개별 부재의 휨 거동과 건물 전체의 휨 거동으로 구분하였다. 특히, 건물 전체의 휨 거동은 부재의 축 변형 효과까지 포함된 거동 특성을 나타낸다.

3. 상시진동 고유주기 측정

3.1 대상건물

고유주기 측정대상 건물은 성남 판교지구에 신축중인 아파트로 하였으며, 건물의 형태, 높이 및 구조형식을 고려하여 그림 2와 같이 10개동을 선정하였다⁽⁷⁾. 각 건물의 세부적인 정보는 표 1에 정리되어 있다.



〈그림 2〉 측정 대상건물 평면

〈표 1〉 측정 대상건물 정보 및 상시진동 고유주기

건물(동)	평면	높이(m)	층수	슬래브 두께(m)	벽량(m ²) [*]		상시진동 고유주기(sec)		특이사항
					강축(S)**	약축(W)**	강축(S)**	약축(W)**	
911	Y형 타워	104.3	33,35	0.21	0.174	0.172	1.319	1.610	504,510동의 평면과 유사함. 기둥은 없음
914	K형 타워	75.3	23,24,25	0.21	0.254	0.254	0.903	1.104	
504	Y형 타워	104.3	28,33,35	0.18	0.131	0.117	1.520	1.764	내부에 기둥을 포함하는 Y형 평면, 504동은 3개의 타워 층수가 각각 다름
510	Y형 타워	104.3	35	0.21	0.131	0.117	1.684	1.905	
301	굴절형	44.8	8,15	0.18	0.210	0.167	0.533	0.654	평면은 서로 동일, 301동은 304동에 비해 단 차이가 크며 건물 높이도 낮음.
304	굴절형	53.2	17,18	0.18	0.210	0.167	0.660	0.840	
307	이중굴절형	44.8	12,15	0.18	0.352	0.281	0.592	0.652	
101	일자형	44.8	14,15	0.18	0.206	0.116	0.585	0.662	
103	일자형	50.4	17	0.18	0.204	0.132	0.519	0.828	
106	L형	56	19	0.18	0.165	0.161	0.766	0.820	

벽량^{*} : 건물 바닥면적(m²)에 대한 고려하는 방향으로 횡력에 저항하는 전단벽 길이의 합(m).
 강축(S) / 약축(W)** 방향 고유주기 : 평면의 두 직교방향 고유주기 중 짧은 / 긴 방향 주기. (S), (W)는 각각 Strong Axis, Weak Axis의 약자임.
 건물의 벽량 셀에서 양방향 사선은 벽량이 많은 경우, 우측방향 사선은 벽량이 적은 경우, 좌측방향 사선은 골조의 참여로 벽량이 적은 경우임.

대상건물 중 특히, 504,510동은 911동과 평면, 높이가 유사하지만 전단벽으로만 구성된 911동과 달리 내부에 기둥을 배치하여 공간의 가변성 및 효율성을 극대화한 경우이다. 또한 307동은 평면이 한쪽 방향으로 특히 긴 특성을 나타내며, 101, 103동은 장방형의 판상형 평면을 나타낸다. 한편, 106동은 직교하는 두 방향으로의 평면 정보가 거의 동일한 건물이다.

3.2 측정방법

이 연구에서는 건물을 손상시키지 않으며 비교적 쉽게 데이터를 취득하기 위해 상시 미진동에 대한 고유주기를 측정 한 후, 인력을 이용하여 측정된 진폭의 공진여부를 판단하여 취득한 데이터가 건물의 고유 진동수임을 확인하는 방법으로 건물의 고유주기를 결정하였다.

3.3 측정결과 및 활용

각 건물의 고유주기는 그림 2의 대상건물 평면 정보에서 제시된 X와 Y, 두 방향으로 각각 측정되었으며, 측정된 두 방향의 고유주기 결과 중 작은 값을 강축방향 고유주기, 큰 값을 약축방향 고유주기로 결정하였다. 이러한 결과는 표 1에 정리되어 있다. 특히, 106동과 같이 두 방향으로의 평면 정보가 거의 유사한 건물의 경우 강축과 약축으로의 고유주기 역시 유사한 값으로 측정되었으며, 101, 307동과 같이 한쪽 방향의 평면 치수가 다른 방향보다 매우 긴 장방형 건물의 경우 전단벽이 주로 단변 방향으로 많이 배치되어 두 방향으로의 고유주기 값들은 큰 차이를 보이지 않았다. 한편, 504동의 경우 510동과 평면은 동일하지만 세 타워들의 층수가 각각 다른 이유로 각 방향별 고유주기가 510동에 비해 약 8-10% 짧게 측정 되었으며, 510동의 경우 높이와 평면이 911동과 유사함에도 불구하고 911동의 주기보다 약 18-27% 길게 측정되었다.

상시진동 고유주기는 실제 지진이 발생하는 건물의 구조 및 비구조 요소의 균열 및 파괴로 인한 강성감소 영향을 고려하지 않기 때문에 일반적으로 지진시 계측된 고유주기보다 작은 값을 나타낸다. 따라서 측정된 상시진동 고유주기를 설계용 고유주기 산정식의 개발에 활용하기 위해서는 상시진동 고유주기와 지진계측 고유주기와의 적절한 상관관계가 가정되어야 한다. 본 연구에서는 이러한 상관관계의 적용을 위해 Marshall의 연구결과⁽⁸⁾를 활용하였으며, Marshall의 연구결과에 따라 측정된 상시진동 고유주기의 125%를 실제 지진에 의한 건물의 고유주기로 결정하였다. 한편, Marshall

의 연구에서는 1989년 로마 프리에타(Loma Prieta) 지진시 계측된 건물의 고유주기와 상시 미진동에 의한 고유주기와 의 상관관계를 다루었으며, 연구에서의 주기 측정대상 건물이었던 California State University Administration Building (61m)과 Pacific Park Plaza Building(94m)은 철근콘크리트 골조와 전단벽이 혼합된 구조로서 높이와 구조형식이 본 연구에서의 대상건물과 유사하여 연구에서 제시한 상관관계를 활용하였다.

4. 기존 고유주기 산정식의 분석 및 검증

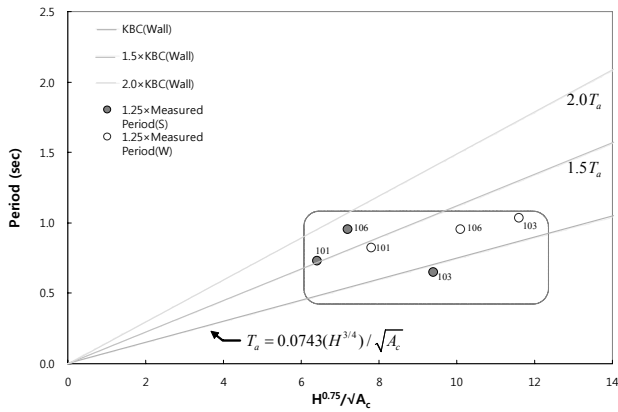
본 절에서는 2절에서 언급한 현행 기준 및 기존 연구의 고유주기 산정식인 식 (1)-(6)을 표 1에 제시된 고유주기 측정결과를 통해 분석 및 검증하였다. 식 (7),(8)은 ASCE 7-10의 기준식인 식 (2)에 포함 되었기에 검증대상에서 제외하였다. 한편, 상시 미진동에 의한 고유주기 산정식인 식 (4)-(6)은 본 연구에서 측정된 상시진동 고유주기와 직접 비교되었으며, 그 외 나머지 고유주기 산정식들은 3.3절에서 언급한 바와 같이 측정된 고유주기의 125%값과 비교 되었다.

4.1 현행 고유주기 산정 기준식

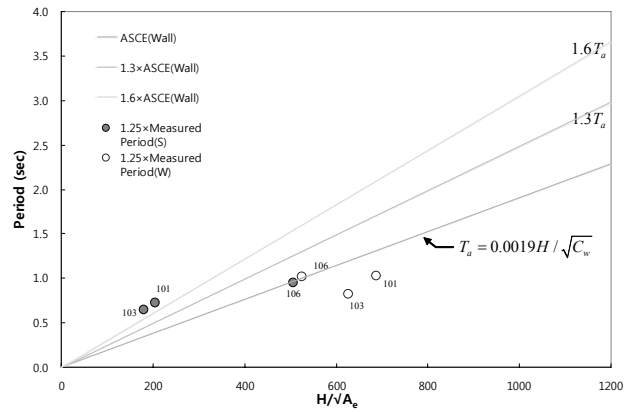
그림 3은 본 연구에서 측정된 고유주기에 대한 현행 기준식 및 기존 제안식의 비교 결과를 나타낸다. 그림 2에서 제시된 X와 Y 두 방향을 고려하면 총 20개의 고유주기 측정 값이 제시되어야 하지만, 그림 3의 (a)와 (b)에서는 6개의 데이터만 비교되었다. 이는 현행 기준에서 제안하는 전단벽 건물의 고유주기 기준식으로는 여러 방향으로 나열된 전단벽을 모두 고려할 수 없기 때문에 101, 103, 106동과 같이 전단벽이 직교 방향으로 나열된 건물들의 강축과 약축 방향 고유주기만이 산정된 결과이다.

제안식별로 살펴보면, 그림 3의 (a)에서 확인할 수 있듯이 KBC 2009의 기준식인 식 (1)은 고유주기를 과소평가 하는 경향을 나타낸다. 즉, 측정 고유주기는 식 (1)의 1.5에서 2배까지 근접할 만큼 식 (1)은 고유주기를 보수적으로 산정한다. 또한, 그림 3의 (b)와 같이 ASCE 7-10의 기준식인 식 (2)는 식 (1)과는 달리 고유주기를 전적으로 과소평가 하지는 않지만, 측정 고유주기를 적절히 예측하지는 못하는 것을 볼 수 있다. 식 (2)의 비교결과를 건물별로 살펴보면, 식 (2)는 106동의 강축, 약축 두 방향으로의 고유주기를 모두 정확하게 예측하는 반면, 101, 103동의 경우 강축, 약축 방향으로의 고유주기를 각각 과소 및 과대평가 하였다.

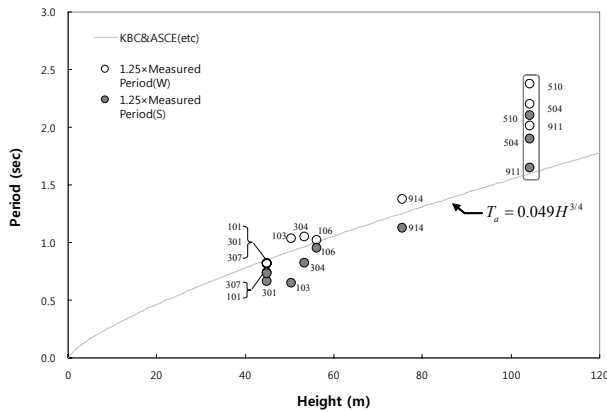
한편, 그림 3의 (c)에서 확인 할 수 있듯이 모든 건물에



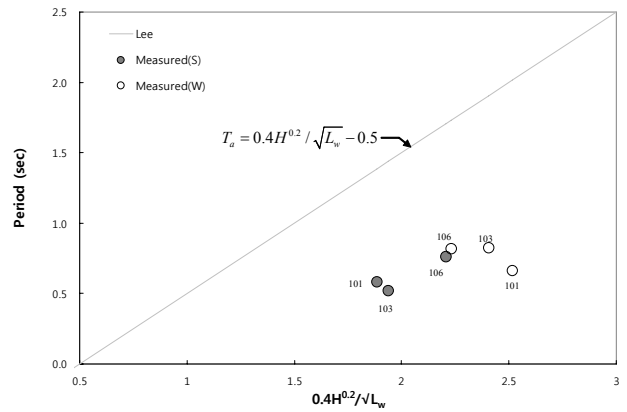
(a) KBC 2009⁽¹⁾의 전단벽 구조 고유주기 기준식



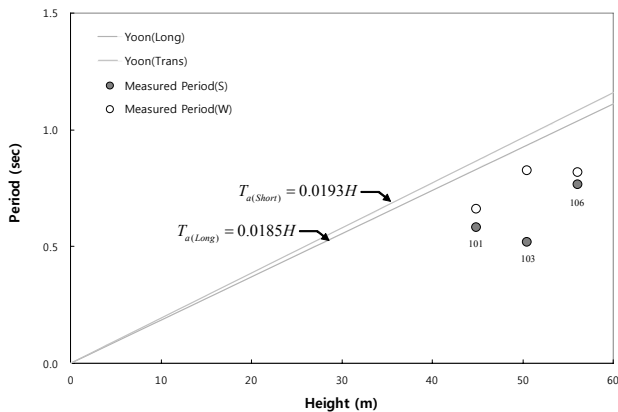
(b) ASCE 7-10⁽⁵⁾의 전단벽 구조 고유주기 기준식



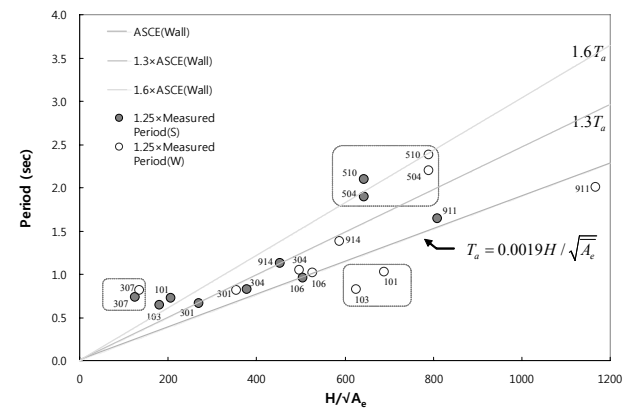
(c) KBC 2009⁽¹⁾, ASCE 7-10⁽⁵⁾의 그 외 모든 건물 고유주기 기준식



(d) 이리형 등⁽³⁾의 제안식



(e) 윤성원과 주영규⁽⁴⁾의 제안식



(f) ASCE 7-10의 수정 전단벽 구조 고유주기 산정식

〈그림 3〉 고유주기 산정식의 비교결과

적용 가능한 고유주기 기준식인 식 (3)은 75m 이하의 중·저층 건물의 고유주기를 비교적 정확히 예측 하였으나, 사각형 점선 안에 분포하는 데이터들과 같이 100m이상의 고층 건물의 고유주기는 적절히 예측하지 못하는 것으로 나타났다. 예측 범위를 벗어난 이들 건물은 높이가 모두 동일하기 때문에 식 (3)에 의하면 모두 동일한 고유주기로 산정 되지만, 측정에 의한 고유주기 값들은 다소 큰 차이들을 나타냈다. 따라서 전단벽 구조 건물의 고유주기를 높이만을 변수로 갖는 형태의 식으로서 예측하는 것은 다소 비합리적이

라고 할 수 있으며, 이러한 경향은 특히 고층 건물일수록 더욱 두드러지게 나타난다고 할 수 있다.

4.2 기존 고유주기 산정 제안식

상시 미진동에 의한 고유주기 제안식인 식 (4)-(6)도 역시 4.1절에 언급한 바와 같이 6개의 측정 결과만이 비교를 위해 활용되었다. 식 (4)-(6)과 측정 고유주기의 비교 결과, 식 (4)의 경우 그림 3의 (d)와 같이 측정 결과의 약 2.1에서 3

배로서 고유주기를 높게 평가 하였으며, 식 (5),(6) 역시 그림 3의 (e)와 같이 측정 결과의 약 1.17에서 1.79배로서 고유주기를 다소 높게 평가하였다.

종합하면, 그림 3의 (a)-(c) 및 (d),(e)와 같이 고유주기 산정 현행 기준식 및 기존 연구의 제안식들은 그림 2에 제시된 검증대상 건물들의 고유주기를 적절히 예측하지 못하는 것으로 나타났다. 항목별로 살펴보면, 현행 기준식들은 측정된 고유주기를 과소평가 하는 경향을, 기존 연구의 제안식들은 과대평가 하는 경향을 각각 나타냈다. 따라서 최근 아파트 건물의 고유주기를 보다 정확히 예측할 수 있는 산정식의 개발을 위해서는, 이러한 건물의 거동특성이 적절히 반영된 이론적 모델이 우선적으로 개발되어야 한다.

5. 고유주기 산정 이론 모델

5.1 벽체의 휨 및 전단거동 고유주기

벽체의 순수 전단과 휨 거동 고유주기는 동적 평형 방정식으로 부터 각각 식 (9)와 식 (10)과 같이 결정할 수 있다.

$$T_F = \frac{2\pi}{3.516} \sqrt{\frac{m}{EI}} H^2 \quad (9)$$

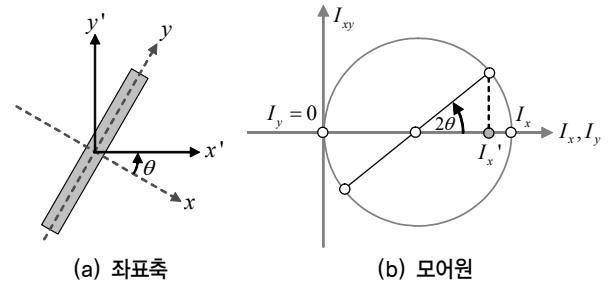
$$T_S = 4 \sqrt{\frac{m}{\kappa G}} H \quad (10)$$

여기서, T_F, T_S 는 각각 1차 모드 휨 및 전단거동 고유주기, m 은 단위 높이 당 질량, E 는 탄성계수, G 는 전단 탄성계수, κ 는 유효 전단면적으로 직사각 단면의 경우 5/6과 같다.

전단벽 구조 건물의 경우 벽체들이 세장 할수록 전체 거동은 주로 그림 1의 (b)와 같은 휨 거동이 지배하여 건물의 고유주기는 식 (9)에 의해 지배된다. 이러한 경향은 고층의 전단벽 구조 시스템에서 더욱 두드러지게 나타난다.

5.2 임의의 축에 대한 벽체의 강성

벽체의 길이 방향이 아닌 다른 임의의 방향으로의 강성은 면내 강성보다 작은 값을 나타낸다. 즉, 그림 4의 (a)와 같이 고유주기 산정 방향이 y' 방향인 경우(회전 중심축이 x' 인 경우) x 축에 대한 벽체의 강성은 y 방향으로의(x 축을 중심으로 한) 면내 강성이 아니라 고유주기 산정 방향인 y' 방향(x' 축)으로의 강성이 고려되어야 한다. 즉, 벽체의 길이 방향과 고유주기 산정 방향이 다른 경우 식 (9)와 같은 휨 거동의 고유주기식에서 강성 값은 면내 강성이 아닌 해당 방향에 대



〈그림 4〉 임의의 방향에서의 벽체 강성

한 값을 고려해야한다. 반면 식 (10)과 같이 전단 거동 고유주기 식은 이러한 방향성과 관계없이 동일한 값을 유지한다. 여기서 언급된 강성이라는 용어는 휨 강성(EI)을 의미하며, 탄성계수(E)가 부재 방향에 따라 변하는 성질이 아니므로 강성 값은 단순히 단면 2차모멘트(I)로서 설명할 수 있다. 한편, 벽체의 면 외 강성은 면 내 강성에 비해 매우 작은 값이므로 0으로 가정할 수 있다. 따라서 그림 4의 (b)와 같은 모어 원을 형성할 수 있으며, 이에 따라 식 (11)과 같은 임의의 축에 대한 벽체의 단면 2차모멘트(I')를 결정할 수 있다.

$$I'_x = I_x \cos^2 \theta \quad (11)$$

여기서, I_x 는 부재방향으로의 단면 2차모멘트, I'_x 는 고려하는 방향으로의 단면 2차모멘트, θ 는 부재방향과 고려하는 방향 사이의 각도이다.

5.3 단일 벽체의 고유주기

휨과 전단 거동이 조합된 단일 벽체의 고유주기 이론식은 식 (12)와 같이 식 (9)와 식 (10)을 SRSS 조합하여 결정된다.

$$T = \sqrt{T_F^2 + T_S^2} \quad (12)$$

식 (12)를 보다 간략한 형태로 정리하기 위해 식 (9)는 식 (13)과 같이 정리된다.

$$T_F = 4 \sqrt{\frac{mH^2}{GAD^2 \cos^2 \theta}} H \quad (13)$$

여기서, D, A 는 각각 벽체의 길이 및 면적이며, 식 (13)은 식 (9)에서 $I = AD^2 \cos^2 \theta / 12$, $E = 2.4G$, $\kappa = 5/6$ 를 적용한 결과이다.

식 (10)과 (13)을 식 (12)에 대입하여 정리하면 식 (14)와 같은 단일 벽체에 대한 고유주기 이론식을 얻을 수 있다.

$$T = 4\sqrt{\frac{m}{\kappa G}} \frac{1}{\sqrt{A_e}} H \quad (14)$$

여기서, A_e 는 단일 벽체의 유효 전단 면적으로서 식 (15)와 같다.

$$A_e = \frac{A}{1 + 0.83(H/D\cos\theta)^2} \quad (15)$$

5.4 전단벽 구조 건물의 고유주기 산정식

식 (15)와 같은 단일 벽체의 유효 전단 면적은 기존의 연구⁽²⁾ 결과에 따라 식 (16)과 같은 전단벽 구조 시스템에서의 유효 전단 면적으로 확장할 수 있다. 식 (16)은 그림 1의 (a),(b)와 같은 개별 벽체의 휨 및 전단 거동에 대한 조합의 결과이며, 높이가 각각 다른 개별 벽체가 건물의 고유주기에 미치는 영향까지 고려할 수 있다.

$$A_e = \sum_{i=1}^{NW} \left(\frac{H}{H_i} \right)^2 \frac{A_i}{1 + 0.83(H_i/D_i\cos\theta_i)^2} \quad (16)$$

여기서, NW 는 전단벽수, θ_i 는 i 번째 전단벽의 길이 방향과 주기산정 방향 사이의 각도이다.

한편, 식 (14)는 ρ 를 포함한 식 (17)과 같이 변경된다.

$$T = 40\sqrt{\frac{\rho}{\kappa G}} \frac{1}{\sqrt{A_e}} H \quad (17)$$

여기서, ρ 는 평균 밀도로서 단위 체적당 질량을 나타내며, A_e 는 바닥 면적에 대한 유효 전단면적의 비율로서 식 (17)과 같이 정의된다.

$$\overline{A_e} = 100 \frac{A_e}{A_B} \quad (18)$$

식 (17)에서 $40\sqrt{\rho/\kappa G}$ 를 상수로 가정하고 지진시 제측된 건물들의 고유주기 결과⁽²⁾에 맞추면, 식 (19)와 같은 고유주기 산정식을 얻을 수 있다.

$$T_a = 0.0019H/\sqrt{\overline{A_e}} \quad (19)$$

식 (19)는 ASCE 7-10의 고유주기 기준식인 식 (2)에서 전단벽의 방향성에 따른 휨 강성 변화를 포함한 주기식이다.

즉, 식 (2)의 C_w 값에서 벽체 길이에 대한 정사영 결과는 바로 식 (16)이며, 식 (16)에서 부재 방향과 주기 산정 방향이 동일한 경우는($\theta=0$) 식 (2)와 같게 된다. 따라서 식 (2)와 달리 식 (19)는 그림 2에 제시된 모든 건물들의 고유주기를 산정할 수 있게 한다. 이러한 식 (19)에 의한 고유주기 산정결과와 검증대상 건물의 주기 계측결과를 그림 3(f)에 나타내었다.

6. 고유주기 산정 방법의 제한

그림 3(f)에서 확인할 수 있듯이, ASCE 7-10의 고유주기 기준식에서 전단벽의 방향성이 고려된 식 (19)는 다른 산정식과 비교할 때 전체적으로 대상건물의 고유주기를 적절히 예측하는 결과를 보였다. 그러나 그림 3(f)의 사각형 점선안에 위치한 504,510동, 307동 및 101,103동(약축)의 고유주기는 식 (19)의 예측 범위를 다소 벗어났다. 이러한 건물들을 특징별로 살펴보면 우선, 504,510동의 경우 그림 2에 제시된 평면에서 확인할 수 있듯이, 순수한 전단벽으로 구성된 건물이 아니라 내부에 골조가 혼합된 건물이다. 그리고 307동의 경우 표 1의 벽량 정보에 나타나 있듯이 표에 제시된 10개의 건물 중 벽량이 가장 많은 경우이며, 101,103동의 약축 방향은 벽량이 가장 적은 경우이다. 504,510동 역시 벽량이 낮은 경우에 속하지만, 이는 건물 내부가 전단벽이 아닌 골조로 구성된 결과로서 101,103동의 약축 방향과는 다른 경우이다. 따라서 표 1의 벽량 정보와 그림 3(f)의 고유주기 비교 결과로부터 식 (19)에 관한 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 내부에 골조가 포함된 전단벽 구조 건물(504,510동) : 고유주기를 낮게 산정함.
- 벽량이 큰 전단벽 구조 건물(307동) : 고유주기를 낮게 산정함.
- 벽량이 작은 전단벽 구조 건물(101,103동 약축방향) : 고유주기를 높게 산정함.

6.1 기준식을 수정한 고유주기 산정식의 적용

ASCE 7-10의 고유주기 기준식을 수정한 식 (19)는 그림 3(f)에서 확인할 수 있듯이 사각형 점선안의 건물들을 제외한 다른 대상 건물들의 고유주기를 비교적 정확히 예측하는 것으로 나타났다. 식 (19)의 예측범위를 벗어난 건물들은 표 1에 제시된 바와 같이 다른 건물에 비해 벽량이 크거나 작은 경우인 것으로 나타났다. 이에 따라 식 (19)를 이용한 철근콘크리트 전단벽 구조 건물의 고유주기 예측은 식 (20)과

같은 벽량 범위에서 유효하다는 결론을 내릴 수 있다. 식 (20)은 건물의 평면 정보로서 결정이 가능하기 때문에 초기 설계단계에서 결정이 가능하다.

$$0.13 \leq L_w \leq 0.28 \tag{20}$$

여기서, L_w 는 단위 면적당 고려하는 방향으로의 전단벽 길이로 표현되며 단위는 m^2/m 이다.

6.2 골조가 포함된 전단벽 구조 건물의 고유주기 산정식

골조를 포함한 전단벽 구조 건물(504,510동)은 순수 전단벽 구조 시스템에 대한 접근법이 아닌 골조를 포함한 전단벽 구조 시스템에 대한 접근법이 필요하다. 이는 그림 5에서 확인 할 수 있듯이, 504,510동의 고유주기 측정값이 전단벽 구조에 대한 고유주기 제안식인 식 (19)와 모멘트 저항골조의 현행 기준식인 식 (21),(22)에 의한 산정값 사이에 위치함에 따라 내려진 결론이다.

$$T_a^{KBC-F} = 0.073H^{3/4} \tag{21}$$

$$T_a^{ASCE-F} = 0.0466H^{0.9} \tag{22}$$

여기서, $T_a^{KBC-F}, T_a^{ASCE-F}$ 는 KBC 2009⁽¹⁾ 및 ASCE 7-10⁽⁵⁾에서 제시하는 철근 콘크리트 모멘트 저항골조의 고유주기 기준식이다.

일반적인 건물에서 기둥에 대한 슬래브의 강성은 전단벽에 대한 강성보다 상대적으로 더 크다. 더욱이 전단벽에 비해 기둥의 축 방향 변형 효과는 매우 크기 때문에, 골조 시스템을 포함한 전단벽 구조 건물의 거동은 순수 전단벽으로만 구성된 건물에 비해 그림 1(c)와 같은 건물 전체에 대한 휨 거동의 참여가 많아지게 된다. 따라서 이러한 골조 시스템을 포함하는 전단벽 구조 건물의 이론적 고유주기는 축방

향 변형으로 인한 건물 전체의 휨 거동 고유주기가 조합된 식 (23)과 같은 형태로서 결정된다.

$$T = \sqrt{T_F^2 + T_S^2 + T_A^2} \tag{23}$$

여기서, T_A 는 건물 전체의 휨 거동 고유주기로서 식 (24)와 같다.

$$T_A = \frac{2\pi}{3.516} \sqrt{\frac{m}{EI_g}} H^2 \tag{24}$$

여기서, $I_g = At^2 \cos^2 \theta$ 로서 평면의 도심에 대한 개별 벽체의 단면 2차 모멘트를 나타내며, t 는 벽체의 두께이다.

식 (9),(10) 및 (23)을 식 (22)에 대입하고 식 (14)와 동일한 형태로 정리하면, 내부에 골조를 포함한 전단벽 구조 건물의 유효 전단면적(A_e)은 식 (25)와 같이 정리된다.

$$A_e = \frac{A}{1 + 0.83 \left\{ \left(\frac{H}{D \cos \theta} \right)^2 + \left(\frac{H}{t \cos \theta} \right)^2 / 12 \right\}} \tag{25}$$

따라서 이러한 건물의 고유주기 산정식을 식 (19)와 동일하게 나타낼 수 있으며, 식 (19)에서의 \bar{A}_e 역시 식 (18)과 동일하게 정리할 수 있다. 다만, 식 (18)에서의 A_e 는 식 (26)과 같이 변경된다.

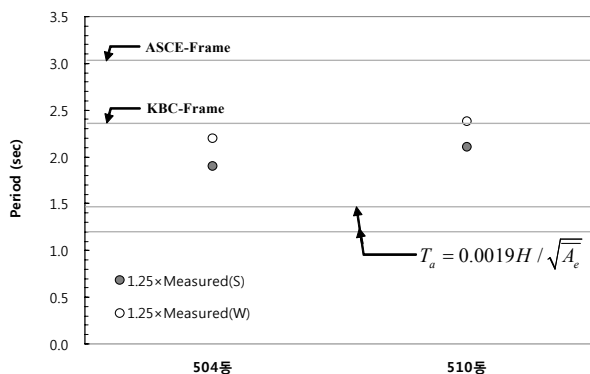
$$A_e = \sum_{i=1}^{NW} \frac{(H/H_i)^2 A_i}{1 + 0.83 \left\{ \left(\frac{H_i}{D_i \cos \theta_i} \right)^2 + \frac{1}{12} \left(\frac{H_i}{t_i \cos \theta_i} \right)^2 \right\}} \tag{26}$$

6.3 벽량이 큰 전단벽 구조의 고유주기 산정식

벽량이 큰 전단벽 구조 건물(307동), 즉 벽량범위가 식 (20)을 초과하는 건물은, 벽량 범위가 식 (20)을 만족하는 일반적인 전단벽 구조 건물과 비교할 때 전체 구조물의 거동에서 그림 1(b)와 같은 개별 벽체들의 휨 거동이 극대화되는 구조이다. 따라서 이러한 건물의 특성을 고려하면 이론적인 고유주기식은 식 (27)와 같이 높이의 제곱에 비례하는 휨 거동 고유주기식의 형태로서 표현된다.

$$T = T_F = \frac{2\pi}{3.516} \sqrt{\frac{m}{EI}} H^2 \tag{27}$$

식 (27)에서 건물의 탄성계수와 단위체적당 질량을 각각 $E = 21.4 \times 10^3 \text{MPa}$, $\rho = m H_i / A_B H = 240 \text{kg/m}^3$ 을 적용하고 개별 벽체에 대한 식을 조합하여 건물 전체에 대한 고유주



〈그림 5〉 504,510동의 고유주기 검토

기식으로 나타내면 식 (28)과 같은 벽량이 큰 전단벽 구조 건물에 대한 고유주기 산정식을 얻을 수 있다.

$$T_a = 0.0066 \frac{1}{\sqrt{\overline{A_q}}} H^2 \quad (28)$$

여기서, $\overline{A_q}$ 는 식 (29)와 같다.

$$\overline{A_q} = \frac{100}{A_B} \sum_{i=1}^{NW} \left(\frac{H}{H_i} \right) A_i (D_i \cos \theta_i)^2 \quad (29)$$

6.4 벽량이 작은 전단벽 구조의 고유주기 산정식

벽량이 작은 전단벽 구조 건물(101,103동의 약축방향)은 건물의 거동에서 그림 1의 (a)와 같은 전단 거동이 일반적인 전단벽 구조 건물 보다 크게 참여한다. 따라서 전단 거동이 두드러지게 나타나는 모멘트 저항 골조에 대한 고유 주기식 과 유사하게 높이를 변수로 갖는 형태의 고유 주기식을 적용할 수 있다. 한편, 식 (3)은 모멘트 저항골조 구조에 대한 고유주기 산정식의 형태를 나타내고 있으면서 모든 건물에 적용이 가능 하므로 벽량 범위가 식 (20)보다 작은 전단벽 구조 건물의 고유주기 산정으로서 적절하다고 볼 수 있다. 이는 그림 3의 (c)에 나타나 있듯이 식 (3)에 의한 고유 주기 산정결과와 101,103동의 약축 방향에서 측정된 고유 주기값이 거의 일치하는 결과를 통해서도 확인할 수 있다.

6.5 고유주기 산정식의 제안

앞에서 제시한 방법들을 종합하여 다음과 같은 철근콘크리트 전단벽 구조 건물의 고유주기 산정식을 제안한다.

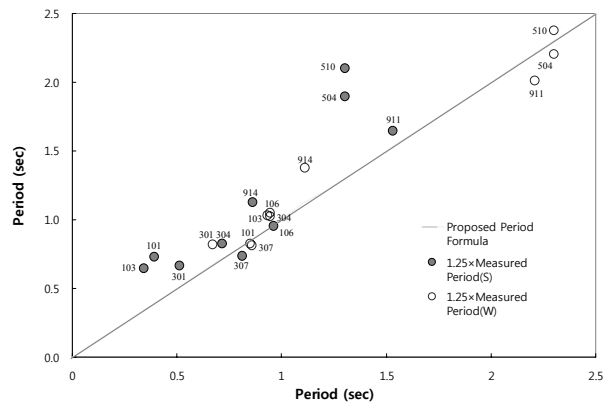
$$T_a = \begin{cases} 0.049H^{3/4} & (L_w < 0.13) \\ 0.0019H/\sqrt{\overline{A_c}} & (0.13 \leq L_w \leq 0.28) \\ 0.0066H^2/\sqrt{\overline{A_q}} & (0.28 < L_w) \end{cases} \quad (30)$$

여기서, L_w 는 단위 면적당 고려하는 방향으로의 전단벽 길이로서 단위는 m/m^2 이다. $\overline{A_c}$ 는 식 (18)과 같으며, 벽량 (L_w) 범위가 식 (20)을 만족하는 전단벽 구조 건물의 유효 전단면적을 나타낸다. $\overline{A_q}$ 는 식 (29)과 같으며, 벽량이 큰 ($L_w > 0.28$) 전단벽 구조 건물에 대한 고유주기 산정식을 높이의 제곱 형태로 나타냄에 따라 결정된 계수이다.

다만, 내부가 기둥으로 구성된 철근콘크리트 전단벽 구조 건물의 경우 식 (19)를 적용하되, 식 (19)에서의 $\overline{A_c}$ 및 A_c 는 각각 식 (18)과 식 (26)을 적용한다.

6.6 제안식의 비교 및 검증

본 연구에서 제안한 고유주기 산정식의 검증을 위해 표 2와 같이 고유주기 측정값에 대하여 제안식에 의한 예측 결과를 비교 하였다. 전체적인 일치성은 그림 6으로부터 확인할 수 있다. 표 2에 나타난 바와 같이 측정 결과에 대한 제안식의 오차는 평균 16.3%, 표준편차는 0.1467이며, 표 2에서 빗금친 경우와 같이 오차가 특히 큰 4가지 데이터를 제외하면 평균 오차율은 7.3%로서 제안식은 대체적으로 측정 주기를 보수적이면서도 정확히 예측하는 결과를 보였다. 다



〈그림 6〉 고유주기 제안식과 측정 고유주기의 비교

〈표 2〉 제안 주기식의 검증 결과

구 분	911동		914동		504동		510동		301동		304동		307동		101동		103동		106동	
	강축	약축	강축	약축	강축	약축	강축	약축	강축	약축	강축	약축	강축	약축	강축	약축	강축	약축	강축	약축
측정주기*	1.65	2.01	1.13	1.38	1.90	2.20	2.11	2.38	0.67	0.82	0.83	1.05	0.74	0.82	0.73	0.83	0.65	1.04	0.96	1.03
예측주기**	1.53	2.21	0.86	1.13	1.30	2.30	1.30	2.30	0.51	0.67	0.72	0.94	0.81	0.86	0.39	0.85	0.34	0.93	0.96	0.99
예측/측정	0.93	1.10	0.76	0.82	0.68	1.04	0.62	0.97	0.77	0.82	0.87	0.90	1.10	1.05	0.53	1.03	0.52	0.90	1.00	0.97
오차율(%)***	7	10	23	18	32	4	38	3	23	18	13	10	10	5	47	3	48	10	0	3

측정주기(sec)* : 표 1에 제시된 상시 진동주기의 1.25배

예측주기(sec)** : 식 (30)에 의해 산정된 주기

오차율*** : 평균 오차율은 16.3%, 오차율의 표준편차는 0.147 이며, 오차율이 다소 높은 빗금친 경우를 제외하면 평균 오차율은 7.3% 이다.

만, 오차가 다소 큰 4가지 경우에 관해서는 더 많은 고유주기 측정 실험을 통한 제안식의 검증이 추후 필요할 것으로 판단된다.

7. 결론

이 연구는 다양한 형태를 갖는 철근 콘크리트 전단벽 구조 건물의 고유주기를 합리적으로 예측하기 위해 수행되었으며, 연구에서 제안된 고유주기 산정식은 신축 중인 국내 아파트 건물의 고유주기 계측 결과를 통해 비교 및 검증되었다. 본 연구의 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. KBC 2009와 ASCE 7-10에서 제시하는 철근콘크리트 전단벽 구조의 고유주기 기준식은 측정된 대상 건물들의 고유주기를 낮게 평가하였으며, 모든 건물에 적용 가능한 고유주기 기준식은 높이만을 변수로서는 동일한 높이를 갖는 서로 다르게 측정된 대상건물의 고유주기 값을 적절히 예측하지 못하는 한계를 나타냈다. 한편, 상시 미진동 측정에 의한 기존 연구의 고유주기 제안식들은 검증 대상건물의 고유주기를 다소 높게 예측하였다. 더욱이, 공통적으로 현행 기준식 및 기존 연구의 제안식들은 타워형 아파트 건물과 같이 전단벽이 여러방향으로 건물의 고유주기는 산정할 수 없는 한계를 나타냈다.
2. ASCE 7-10에서 제시하는 철근콘크리트 전단벽 구조의 고유주기 기준식을 근거로 여러 방향으로 나열된 전단벽의 강성을 고려할 수 있는 주기 산정식을 제안하였다. 이 제안식은 벽량이 일정 범위내에 속하는 전단벽 구조 건물의 고유주기만을 정확히 예측하는 결과를 보였기에 제안식이 유효한 벽량 범위가 결정되었다. 이러한 벽량 범위를 벗어나는 건물의 고유 주기 산정식은 벽량이 큰 건물과 작은 건물로 구분하고 각각의 거동 특성을 고려하여 제안하였다. 또한, 내부가 기둥으로 구성된 전단벽 구조 건물은 특수한 전단벽 구조 건물로 구분하여 이에 적합한 기본 진동 주기식을 제안하였다. 제안된 식들은 최근의 철근콘크리트 전단벽 구조 건물의 구조적인 특성을

보다 합리적으로 반영할 수 있으며, 현행 기준식과 비교할 때 측정주기를 보다 정확히 예측하는 것으로 평가되었다.

감사의 글

이 연구는 대한주택공사가 주관하고 대한건축학회와 한국지진공학회에서 수행한 “지진저항 시스템 정의 및 진동주기 적용기준수립에 관한 연구”과제의 일부 결과이며, 연구자의 일부는 서울대학교 공학연구소의 논문게재료 지원사업의 지원을 받아 논문을 게재하였습니다. 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 대한건축학회, “건축구조기준”, 대한건축학회, 서울, 2009.
2. Goel, R.K., and Chopra, A.K., “Period Formula for Concrete Shear Wall Buildings,” *Journal of Structural Engineering*, Vol. 124, No. 4, 426-433, 1998.
3. Lee, L.H., Chang, K.K., and Chun, Y.S., “Experimental Formula for the Fundamental Period of RC Buildings with Shear-Wall Dominant Systems,” *The Structural Design of Tall Buildings*, Vol. 9, 295-307, 2000.
4. 윤성원, 주영규, “철근콘크리트조 아파트의 사용성 설계용 고유주기,” 대한건축학회 논문집 구조계, 제19권, 제6호, 3-10, 2003.
5. ASCE 7-10, *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, American Society of Civil Engineers, Virginia, 2009.
6. Zalka, K.A., “A Simplified Method for Calculation of the Natural Frequencies of Wall-Frame Buildings,” *Engineering Structures*, Vol. 23, 1544-1555, 2001.
7. 대한건축학회, 한국지진공학회, 지진저항 시스템 정의 및 진동주기 적용기준수립에 관한 연구, 대한주택공사, 서울, 2009.
8. Marshall, R.D., Phan, L.T., and Celebi, M., “Full Scale Measurement of Building Response to Ambient Vibration and the Loma Prieta Earthquake,” *Proceedings of 5th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Earthquake Awareness and Mitigation Across the Nation, Vol. 11, 661-670, 1994.