

# 플랜지형 벽체 효과를 고려한 철근 콘크리트 전단벽 구조물의 고유주기식

## Natural Period Formula of a Reinforced Concrete Shear Wall Structure Considering Flange Wall Effect

노지은<sup>1)</sup> · 김중호<sup>1)</sup> · 허무원<sup>1)</sup> · 박태원<sup>1)</sup> · 이상현<sup>1)\*</sup>

Roh, Ji Eun<sup>1)</sup> · Kim, Joong Ho<sup>1)</sup> · Hur, Moo-Won<sup>1)</sup> · Park, Tae Won<sup>1)</sup> · Lee, Sang Hyun<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>단국대학교 건축공학과

<sup>1)</sup>Department of Architectural Engineering, Dankook University

### / A B S T R A C T /

In this study, natural period formula is presented for a RC shear wall structure with H-, T-, and L-shaped wall sections. The natural period formula proposed by Goel and Chopra and adopted in ASCE 7-10 was modified by using the ratio of the flange and web wall area. The natural periods of structures with H-shaped wall were numerically obtained, the results indicated that the ASCE 7-10 could not consider the natural period variation according to the length of the flange wall, but the proposed formula could do. Especially, ASCE 7-10 estimated much longer periods than eigenvalue analysis, and this implies that conservative seismic design is difficult. The periods by eigenvalue analysis exist between the upper and lower bounds given by the proposed formula, and conservative design is possible by using the proposed lower bound value. In order to verify the effectiveness of the proposed method, actual residential buildings with various types of flange walls are considered. Ambient vibration tests, eigenvalue analyses, and nonlinear dynamic analyses were conducted and the periods were compared with the values by ASCE 7-10 and the proposed formula. The results showed that the proposed formula could estimate more accurately the periods than ASCE 7-10.

**Key words:** Natural period, Period formula, Shear wall, Flange wall, Ambient vibration tests, Eigenvalue analysis

## 1. 서론

고유주기는 구조물의 동적 거동특성을 결정짓는 가장 중요한 계수 중 하나이다. 고유주기에 따라 풍하중에 의한 변위응답의 크기나 지진하중에 의한 설계 밀면전단력의 크기가 크게 달라지며, 이에 따라 부재의 크기 등 횡력저항 구조시스템의 설계에도 큰 영향을 미친다. 주기를 정확하게 산정하는 것이 동하중에 대하여 안전하고 경제적인 구조물을 설계할 수 있는 가장 기본적인 출발점이 된다.

구조물의 횡방향 고유주기는 횡력저항에 기여하는 주요 구조재 및 비구조재의 유효강성과 참여질량의 비로 결정된다. Khan은 RC모멘트 프레임에 대한 해석모델을 사용하여, 비구조재 특히 조적 채움벽에 의한 강성증가

가 RC 모멘트 프레임의 주기에 미치는 영향을 확인하여 이를 보정하는 주기식을 제안하였다 [1].

또한, 구조물의 주기는 응답의 크기에 따라 그 값이 변하는 크기 의존적(Amplitude dependent)인 비선형 특성을 가진다. 강성과 감쇠에 영향을 주는 요소간의 마찰거동특성, 콘크리트 균열에 의한 강성저하 등은 모두 구조물의 응답의 크기에 따라 다른 효과를 가지며, 이에 따른 유효강성의 변화는 직접적으로 구조물의 주기에 영향을 미치게 된다. 실제로 지진 발생 시 예측된 주기는 상시미진동 시 측정된 주기보다 균열로 인해 훨씬 긴 경향을 가진다. Tamura는 바람하중에 대해서도 구조물의 사용성과 안전성 평가 시 사용되는 주기 값을 각각 다르게 사용할 것을 제안하였다 [2].

현재 국내 건축구조기준(KBC 2016)에서 사용하고 있는 전단벽 구조물의 고유주기 산정식은 미국 기준인 ATC 3-06 (1983)에 기초한 것으로 이는 San Fernando (1971) 지진 시 실제 계측된 자료를 바탕으로 결정된 식이다 [3, 4]. 그러나 이 식은 1970년대 저층 구조물을 주요한 계측대상으로 하였기 때문에 현재 지어진 고층건물에 적용할 경우 실제보다 주기를 매우 짧게 평가하는

\*Corresponding author: Lee, Sang Hyun

E-mail: lshyun00@dankook.ac.kr

(Received September 12, 2017; Revised January 24, 2018; Accepted February 2, 2018)

경향이 있다. Lee 등은 RC 전단벽 구조물의 주기 산정식이 실제보다 주기를 매우 짧게 평가하는 단점을 보완하여 벽량을 변수로 추가한 새로운 주기식을 제안하였고[5], Yoon과 Ju는 인력가진을 통한 주기 측정값을 근거로 새로운 주기식을 제안하였다[6].

Goel과 Chopra는 ATC 3-06 고유주기 산정식의 단점을 보완하기 위해 San Fernando (1971) 지진 이후 발생한 Northridge (1994) 및 Morgan Hill (1984), Loma Prieta (1989) 등의 지진 계측 자료를 통해 모멘트골조 및 전단벽 구조물에 대한 새로운 식을 제시하였고 [7, 8], 이 식은 ASCE 7-10에 반영되었다[9]. Kang 등은 평면 및 구조적 특성이 다양한 RC 전단벽 건물의 고유주기 예측을 위해 ASCE7-10식을 사용하되, 주기산정 방향 축과 벽체가 이루는 각도를 고려할 수 있는 주기식을 제안하였으며, 실제 공동주택 10동을 대상으로 예측식의 유효성을 평가하였다 [10].

ASCE7-10에서 사용하고 있는 Goel과 Chopra가 제시한 전단벽 구조물 고유주기 산정식은 2~17층(8~49 m) 높이의 16개의 건물을 대상으로 유효성이 평가된 것으로 대부분 일자형 벽체를 가진 전단벽 구조물이다. 그러나 일반적인 전단벽 구조물은 벽의 두께가 얇고 세장한 특성을 지니고 있으며, L형, T형, H형 등의 플랜지를 가지는 벽체가 많다. 플랜지는 벽체의 강성에 큰 영향을 주기 때문에 플랜지를 가지는 전단벽식 구조물에 적용하는 경우, 기존 주기 산정식의 적합성을 검토해 볼 필요가 있다.

본 연구에서는 플랜지형 벽체가 많은 철근콘크리트 전단벽 구조물의 주기 산정식 제안을 위한 연구를 수행하였다. Goel과 Chopra가 제안한 전단벽 구조물의 고유주기 산정식(ASCE 7-10)을 기본으로 웹과 플랜지 벽체의 면적의 비를 변수로 사용하는 주기식을 제안하였다. 단일 벽체모델(1형, H형)을 통해 플랜지벽과 웹벽체 면적의 비의 크기의 변화에 따라 고유치 해석을 통해 구한 주기와 제안된 식을 사용하여 구한 주기를 비교하여 제안식의 타당성을 1차적으로 검증하였다. 실제 지어진 철근 콘크리트 전단벽식 공동주택에 대하여 상시미진동 계측실험을 수행하여 주기를 측정하고, 벽체의 균열강성 고려 여부에 따른 고유치 해석주기, ASCE 7-10식 및 제안식에 의한 결과를 비교하여 실제 구조물 적용에 대한 타당성을 확인하였다. 최종적으로 벽체를 섬유요소(fiber element)를 사용하여 모델링한 경우의 지진 하중의 크기에 따른 주기의 변화를 조사하여, 제안식의 유효성을 검증하였다.

## 2. 국내·외 고유주기 산정식 연구현황

### 2.1 국내 고유주기 산정식

국내 건축구조기준(KBC 2016)에서 사용하는 구조물 고유주기 산정식은 식(1)과 같다[3].

$$T_{a, KBC} = C_T H_n^{3/4} \tag{1}$$

여기서,  $C_T$ 는 철골 모멘트골조의 경우 0.085, 철골콘크리트 모멘트골조 또는 철골 편심 가새골조의 경우 0.073, 그 외 다른 건물의 경우 0.049이며,  $H_n$ 는 건물의 전체 높이(m)이다.

철근콘크리트 전단벽 구조물의 경우에는 식(1)이나 식(2)를 사용할 수 있다.

$$T_{a, KBC} = 0.0743 H_n^{3/4} / \sqrt{A_c} \tag{2}$$

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

$$D_e / H_n \leq 0.9$$

여기서,  $A_e, D_e$ 는 지진하중 방향에 평행한 1층 전단벽의 면적( $m^2$ )과 길이(m)이다.

식(2)는 구조물의 형식과 높이만을 고려한 식(1)과 달리 추가적으로 전단벽의 유효면적을 고려하여 주기를 산정한다. 그러나 질량효과를 고려할 수 있는 건물의 평면 면적을 고려하지 않는다. 따라서, 벽체의 길이가 같다면 그 벽체가 지지하고 있는 유효면적의 크기가 차이가 나는 구조물, 즉 질량의 차이가 커서 주기가 달라질 가능성이 큰 구조물에 대하여도 주기를 동일하게 산정한다는 단점을 가진다.

### 2.2 국외 고유주기 산정식

Goel과 Chopra는 Northridge (1994) 지진 계측 자료를 바탕으로 새로운 모멘트골조 및 전단벽 구조물의 고유주기 산정식을 제안하였으며, 이 식은 ASCE 7-10에 채택되었다. ASCE 7-10에 명시되어 있는 모멘트골조 고유주기 산정식은 식(3~6)과 같다[7].

$$T_L^{RC} = 0.0466 H_n^{0.9} \tag{3}$$

$$T_U^{RC} = 0.0671 H_n^{0.9} \tag{4}$$

$$T_L^{Steel} = 0.0724 H_n^{0.8} \tag{5}$$

$$T_U^{Steel} = 0.1163 H_n^{0.8} \tag{6}$$

식(3), (4)는 각각 RC 모멘트골조의 주기의 하한 값과 상한 값, 식(5), (6)은 각각 철골 모멘트골조의 주기의 하한 값과 상한 값을 산정하는 식이다. 식(1)과 비교할 때 높이의 지수가 0.75에서 RC는 0.9로 철골은 0.8로 증가하였으며, 이는 높이가 증가함에 따라 주기를 길게 평가하는 효과를 가진다. 즉, 기존의 저층건물 계측결과와 곡선맞춤식인 식(1)이 고층건물의 주기를 지나치게 짧게 평가하는 것을 개선하기 위함이다.

Goel과 Chopra가 제안한 전단벽 구조물의 고유주기 산정식은 다음 식(7), (8)과 같다[8].

$$T_L^{SW} = 0.0062 H_n / \sqrt{C_w} \tag{7}$$

$$T_U^{SW} = 0.0085 H_n / \sqrt{C_w} \tag{8}$$

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

여기서,  $T_L, T_U$ 는 지반가속도가 0.15 g 이상인 계측결과를 바탕으로 회귀 분석한 주기식의 하한값과 상한값이다.  $A_B$ 는 건물의 전체면적( $m^2$ )이며  $A_i, D_i$ 는 지진하중 방향에 평행한 전단벽의 면적( $m^2$ )과 길이(m),  $NW$ 는

고려하는 방향에 해당하는 전단벽의 개수이다. 미국의 기준식을 국내 구조물에 적용하기 위해 (1ft=0.3048 m)로 단위를 환산하여 수식을 표현하였다.

전단벽식 구조물의 고유주기 산정식에서는 구조물의 전체면적( $A_B$ )을 활용하였으며, 식을 유도하는 과정에서 휨거동과 전단거동을 동시에 고려하여 고층건물에 더욱 적합한 형태가 되도록 개선하였다.

### 3. 단일 벽체 해석을 통한 플랜지형 벽체 주기식

#### 3.1 기존 전단벽 구조물의 주기 산정식

플랜지형 전단벽식 구조물에 대한 ASCE 7-10 주기식의 적합성을 검토하기 위해 Fig. 1과 같은 H형상을 가지는 벽체 모델을 사용하였다. 전단벽의 높이와 플랜지 벽체의 길이를 변수로 해석모델을 구성하였으며, 고유치해석을 이용한 해석모델의 주기와 주기 산정식에 따른 주기를 비교하였다.

해석모델의 벽체 길이는 4 m, 두께는 0.3 m이며 높이를 2.8 m (1층)~140 m (50층), 플랜지벽체의 길이를 1~4 m로 달리하여 모델링하였다. 단위면적당 고정하중은 슬래브두께 0.21 m를 고려하여  $6.4 \text{ kN/m}^2$ 를 적용하였다.

Fig. 2는 I, H형 벽체모델의 해석주기와 KBC2016 식 (1), (2), ASCE 7-10 식 (7), (8) 주기 산정식을 비교한 그림이다. KBC2016의 주기 산정식은 높이의 1/3제곱식으로 표현되어 고층으로 갈수록 보수적인 경향을 나타내며, 간략식인 식(1)이 철근콘크리트 전단벽 구조물 상세식인 식(2)보다 좀 더 짧은 주기를 산정한다. 식(2)는 약 80 m 이전 높이까지는 해석주기보다 상한 값을 제시하고 있으나 이후 높이부터는 보수적인 주기 결과를 나타낸다.

Fig. 3은 이후 본 논문에서 제안할 주기식과의 직관적인 비교를 위해 X축을  $H_n / \sqrt{C_w}$ 로 표현하였다. 일자형벽체의 경우 ASCE 7-10의 상한식에

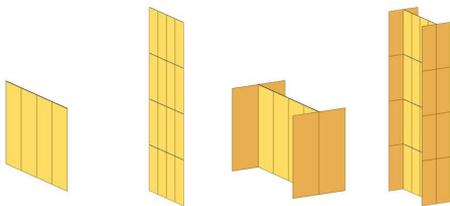


Fig. 1. Analysis model; I- and H-shaped walls

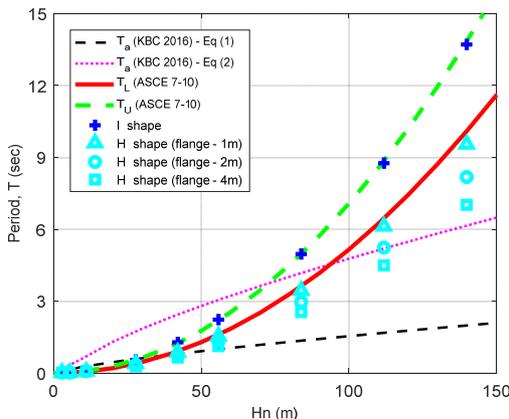


Fig. 2. Comparison between analytical and calculated periods by KBC2016, ASCE 7-10

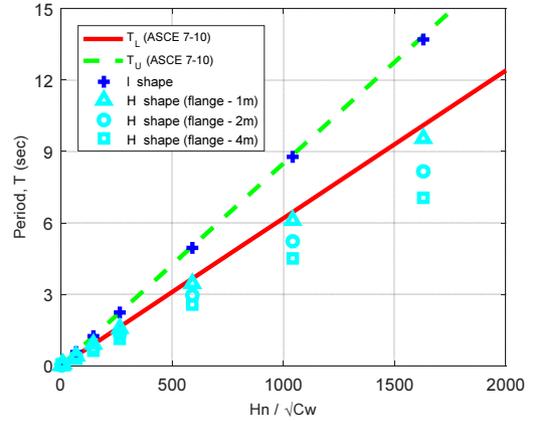


Fig. 3. Comparison between analytical and calculated periods by ASCE 7-10

매우 근접한 주기를 나타내는 반면, 플랜지를 가지는 H형 벽체의 경우 ASCE 7-10의 하한식보다도 더 짧은 주기를 나타낸다. 또한, 같은 높이의 H형 벽체라 할지라도 플랜지벽체의 길이가 길수록 주기가 짧아진다. 이는 플랜지벽체의 길이가 길어질수록 횡력에 저항하는 면외강성이 커지고, 전체 벽체의 강성증가로 이어져 주기를 짧게 평가한다고 판단된다.

위의 결과를 볼 때, 기존의 ASCE 7-10의 고유주기 산정식을 사용하여 플랜지형 벽체가 많은 전단벽식 구조물의 주기를 산정할 경우 주기를 과대평가할 가능성이 있으며, 이러한 결과는 내진설계 시 밀면전단력을 과소평가하게 되어 안전하지 못한 구조설계가 된다. 그러므로 플랜지형 벽체가 많은 전단벽식 구조물의 정확한 주기산정을 위해 기존 ASCE 7-10의 식에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

#### 3.2 플랜지형 벽체 효과를 고려한 전단벽 구조물의 주기 산정식

Goel과 Chopra는 ASCE 7-10의 전단벽 고유주기 산정식을 유도하는 과정에서 캔틸레버의 휨거동과 전단거동을 동시에 고려하여 실제 구조물의 거동에 더 적합한 주기식을 제시하였다. 순수 휨과 순수 전단거동에 대한 주기는 각각 식 (13), (14)와 같다.

$$T_f = \frac{2\pi}{3.516} \sqrt{\frac{m}{EI}} H^2 \tag{13}$$

$$T_s = 4\sqrt{\frac{m}{\kappa G}} \frac{1}{\sqrt{A}} H \tag{14}$$

휨거동과 전단거동을 동시에 고려하기 위해 식 (15)와 같이 Dunkerley 방법을 이용하여 조합된다.

$$T = \sqrt{T_f^2 + T_s^2} \tag{15}$$

본 연구에서는 Fig. 4와 같은 H형 단면 형상을 가지는 플랜지형 벽체의 강성증가 효과, 즉, 벽체의 길이방향과 수직으로 위치한 벽체가 플랜지 역할을 하여 인장-압축응력을 받아 부재의 단면 2차 모멘트가 증가하는 효과

를 고려하기 위해 ASCE 7-10의 주기식을 변형한 식을 제안하고자 한다.

식 (13), (14)를 통해 캔틸레버의 휨거동은 단면 2차 모멘트( $I$ )가, 전단 거동은 단면적( $A$ )이 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 플랜지형 벽체 효과를 반영하기 위해 휨거동에 작용하는 단면 2차 모멘트( $I$ )는 플랜지를 포함하여 산정하며, 전단거동에 작용하는 단면적은 웨브 역할 벽체( $A_w$ )만을 적용한다. 식 (16)은 플랜지를 포함한 H형 벽체의 단면 2차 모멘트( $I'$ )를 플랜지의 총면적( $A_f$ )과 웨브벽체 면적( $A_w$ )의 비로 표현하였다.

$$I' = \frac{bD^3}{12} + A_f \left(\frac{D}{2}\right)^2 = \left[1 + 3 \frac{A_f}{A_w}\right] \frac{bD^3}{12} = \alpha^2 \cdot \frac{bD^3}{12} \quad (16)$$

$$\alpha = \sqrt{1 + 3 \frac{A_f}{A_w}}$$

여기서,  $A_f$ 는 플랜지벽체의 총면적,  $A_w$ 는 웨브벽체의 면적이다.

이형벽체 효과가 고려된 식 (16)의  $I'$ 와  $A_w$ 를 각각 식 (13), (14)에 대입한 후 식 (15)를 이용하여 조합하면, 이형벽체 효과가 반영된 ASCE 7-10의 주기식에서 변형된  $\overline{C}_w$ 를 유도할 수 있으며 이는 식 (17)과 같다. 기존 주기식에서 사용하는  $C_w$  (식 (8) 참조)에서  $\alpha$ (플랜지와 웨브벽체 면적의 비에 관한 계수)가 추가된 형태이다.

$$\overline{C}_w = \frac{100}{A_B} \sum_{i=1}^{NH} \left(\frac{H_n}{H_i}\right)^2 \frac{A_i}{1 + 0.83(H_i/(\alpha \cdot D_i))^2} \quad (17)$$

플랜지형 벽체 효과를 고려한 변형식을 적용하여 산정한 주기와 해석주기를 비교하였다. 기존 산정식과 비교했던 Fig. 3과는 달리 Fig. 5는 이형벽체가 포함된 모든 해석모델의 주기가 변형된 고유주기 산정식의 상한선에

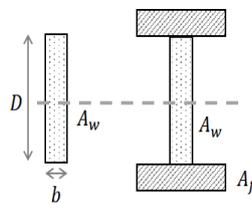


Fig. 4. Section shape of flange wall

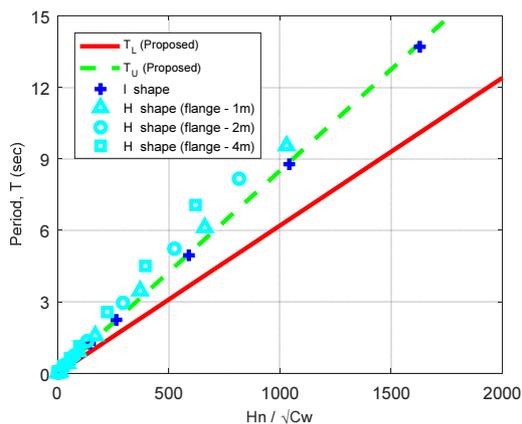


Fig. 5. Comparison between analytical and proposed periods

근접하는 것을 볼 수 있다. 플랜지형 벽체 효과를 반영한 고유주기 제안식은 고유치해석보다 주기를 짧게 평가하기 때문에 설계단계에 적용 시 보수적인 설계가 가능할 것으로 판단된다. 특히, 플랜지의 길이의 변화에 따른 주기 변화효과를 고려함으로써 기존식과 달리 주기식과 주기의 상관성이 크게 높아졌음을 알 수 있다.

## 4. 철근 콘크리트 전단벽 공동주택 해석

### 4.1 대상 구조물

대상 구조물은 2010년 준공된 성남 판교지구의 RC 전단벽 공동주택 2개동으로 Fig. 6과 같이 일자형 평면으로 구성되어 있으며, 구조물의 기본 정보는 Table 1에 정리하였다. 본 논문에서 제안한 주기식을 대상 구조물에 적용하여 ASCE 7-10의 기존 주기식 계산 결과, 상시미진동 계측을 통해 얻은 주기 및 고유치해석 주기와 비교하여 타당성을 평가하였다.

### 4.2 RC 전단벽 공동주택 해석 모델

구조해석 상용프로그램인 MIDAS Gen을 사용하여 고유치 해석을 수행하였다. 전술한 바와 같이 구조물의 주기는 응답의 크기에 따라 변화하는 특성을 가지고 있으며, 지진하중과 같이 구조물의 균열과 파괴를 발생시키는 경우 주기가 길어진다. 본 대상 구조물에 대한 상시미진동 계측 실험을 수행하였으며, 이때 얻어진 주기는 구조물에 균열이 발생하지 않아 내진설계 시

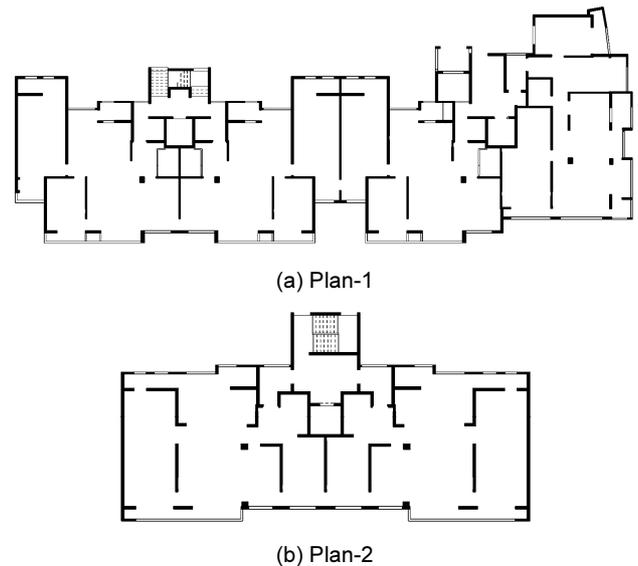


Fig. 6. Plan view of RC shear wall structure; (a) plan-1, (b) plan-2

Table 1. Basic information of RC shear wall structure

Structure	Height (m)	Number of stories	Slab thickness (mm)	Story height (m)	Measured period (sec)	
					X Dir.	Y Dir.
Plan-1	44.8	14, 15	180	2.8	0.66	0.59
Plan-2	50.4	17	180	2.8	0.83	0.52

사용될 주기보다 매우 짧은 특성을 가진다. 상시미진동 계측을 통해 얻은 주기와 해석 고유주기를 비교하기 위해 부재의 유효강성을 100% 사용한 경우와 지진하중 작용 시 발생하는 콘크리트 부재의 균열을 고려해 부재의 강성을 저감한 경우, 두 가지로 나누어 해석을 수행하였다. 부재의 유효강성은 보와 기둥은 균열이 있는 경우인 50%, 벽체는 축력비가 0.3이하인 경우로 50%를 적용하였다[11]. ASCE 7-10 기준 주기식을 활용한 해당 구조물의 주기를 산정하기 위해 각 지진하중방향에 해당하는 전단벽의 길이, 면적을 도면으로부터 산출하였다. 이형벽체 효과를 고려한 제안식을 구조물에 적용하기 위해선 추가적으로 횡력 방향에 수직인 플랜지벽의 면적( $A_f$ )이 함께 계산되어야 한다. Fig. 7은 I-2 구조물의 주기산정 시 지진하중방향에 따라 고려했던 플랜지벽을 표시한 그림이다.

### 4.3 고유치해석 및 상시미진동 계측결과와의 비교

Fig. 8은 ASCE 7-10 기준 주기식을 적용한 주기와 상시미진동 및 고유

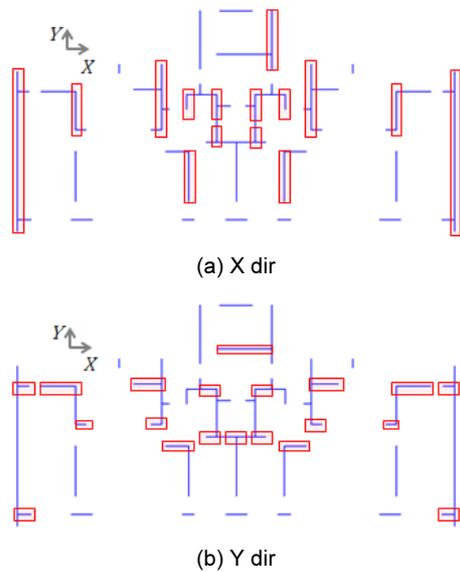


Fig. 7. Considered flange walls in period calculation; (a) X dir, (b) Y dir

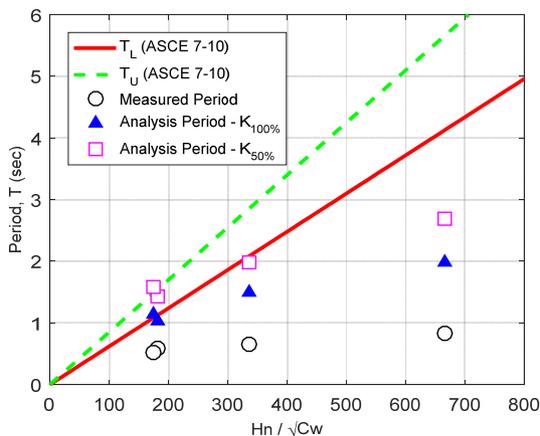


Fig. 8. Comparison between measured, analytical and calculated periods by ASCE 7-10

치해석 주기를 비교한 그림이며, Fig. 9는 본 논문에서 제안한 주기식을 활용했을 때의 비교 그림이다. 해당 모델에 대한 주기의 자세한 값은 Table 2에 명기되어 있다.

부재의 강성이 100%일 때의 고유치해석 주기는 상시미진동 주기보다 2배 정도 긴 것을 확인할 수 있다. 이는 모델링 과정에서 고려하지 않은 슬래브의 휨강성과 상시미진동시 강성에 영향을 줄 수 있는 비구조재 등의 효과를 고려하지 않았기 때문에, 해석모델의 강성이 실제 건물의 강성보다 작아 고유치해석 주기가 더 큰 것으로 판단된다.

유효강성을 100%로 본 두 평면의 Y방향 해석 주기는 ASCE 7-10의 상하한선 내부에 들어오거나, 하한선보다 약간 짧은 결과를 나타내지만, X방향 해석 주기는 ASCE 7-10의 하한선보다 훨씬 짧은 것을 확인할 수 있다 (Table 2 참고). 우리나라 공동주택의 경우, 평면상 세대 간 혹은 방을 구분하는 단변방향에 평행한 벽체가 많이 존재하는데, ASCE 7-10의 경우 지진하중방향에 평행한 전단벽 면적을 고려하여 주기를 산정하도록 제시되어 있다. 따라서 벽량이 많이 고려되는 Y방향의 주기는 ASCE 7-10과 비슷한 값을 가지지만, X방향의 경우 고려하는 벽체의 면적이 Y방향보다 현저히 작기 때문에 이와 같이 방향에 따라 산정식과 해석값의 차이가 발생하는 것으로 판단된다.

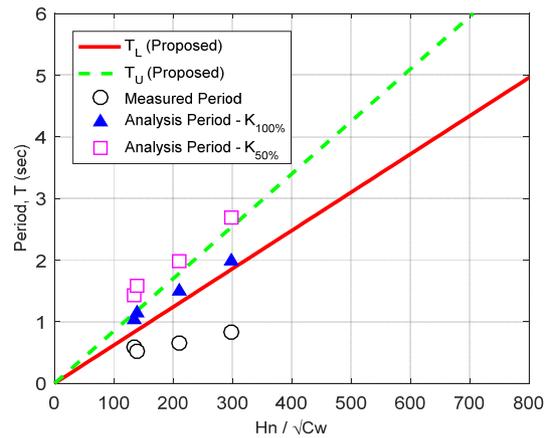


Fig. 9. Comparison between measured, analytical and proposed periods

Table 2. Comparison of existing and proposed formula

Period (sec)	Plan-1		Plan-2					
	X-dir.		Y-dir.		X-dir.		Y-dir.	
	$T_L$	$T_U$	$T_L$	$T_U$	$T_L$	$T_U$	$T_L$	$T_U$
ASCE 7-10 code	2.54	3.47	1.13	1.55	4.16	5.69	1.09	1.49
Proposed formula	1.30	1.78	0.83	1.14	1.87	2.56	0.87	1.19
Ambient vibration test	0.66		0.59		0.83		0.52	
Eigenvalue analysis (effective stiffness 100%)	1.49		1.04		1.99		1.15	
Eigenvalue analysis (effective stiffness 50%)	1.99		1.42		2.68		1.58	

Fig. 8에서 유효강성을 100%로 본 고유치해석 주기와 ASCE 7-10식에 의한 주기를 비교해보면, 대부분 주기가 주기식의 하한선( $T_L$ )보다 주기가 작은 것을 알 수 있다. 특히, 유효강성을 50%만 고려한 해석모델의 고유주기도 일부 하한 값보다 크게 작은 것을 알 수 있다. 이는 ASCE 7-10식에 의한 주기식을 사용하여 동적해석 없이 등가정적해석만 수행한다면 실제 구조물의 주기보다 매우 큰 주기에 근거하여 밀면전단력을 산정하기 때문에 지진시 발생할 실제 밀면전단력보다 전단력을 매우 작게 평가할 위험성을 가진다.

Fig. 9에서 제안식과 고유치 해석결과를 비교해 보면 모든 해석모델의 주기가 하한선( $T_L$ )보다 크다는 것을 알 수 있다. 특히, 유효강성을 고려한 모델의 고유치해석 주기는 강성저감에 의한 주기 증가로 제안식의 상한선( $T_U$ )보다 높은 주기를 가지기 때문에, 제안식의 하한 값을 전단벽 구조물 주기 산정식에 사용하여 설계한다면 충분히 안전하고, 보수적인 설계를 수행할 수 있다.

#### 4.4 RC 전단벽 공동주택 비선형 해석

4.3절의 선형해석에서는 지진하중이 작용할 때 구조물의 실제 비선형 거동을 고려하지 않고, 이론적으로 가정할 수 있는 부재의 강성저감효과만을 고려한 탄성해석을 수행하여 주기를 계산하였다. 그러나 탄성해석으로 강성저감효과만을 고려한 주기와 실제 지진하중이 작용할 때의 구조물의 비선형 거동을 고려한 주기는 다르기 때문에, plan-2 모델에 실제 지진파를 적용하여 비선형 해석을 수행하였다.

구조해석에는 상용프로그램인 Perform-3D를 사용하였으며, 지반조건(지진구역I, 지반등급Sc)을 반영한 3개의 지진파(EI Centro (1940), Taft (1952), Hachinohe (1968))를 사용하여 비선형 시간이력해석을 수행하였다. 구조물 주기의 응답의존적 특성을 확인하기 위해 해당 지진파를 각각 DBE (Design Based Earthquake)와 DBE의 10%, 50%, MCE (Maximum Considered Earthquake)에 해당하는 스케일로 조정하여 4가지 지진하중레벨에 대한 주기 변화를 확인하고자 하였다.

전단벽은 부재 응답 크기에 따른 균열효과가 자동으로 고려되는 파이버 요소로 모델링하여 부재의 유효강성이 자동으로 반영되도록 모델링하였으

며, 전단에 대해선 전단변형률이 1.0% 도달 시 전단 파괴되도록 극한 전단변형률을 1%로 입력하였다.

연결보와 기둥의 위치는 Fig. 10에 나타냈으며, 단면 크기는 기둥 450 × 500 mm, 연결보(세대 내부) 200 × 350 mm, 연결보(코어부) 200 × 1100 mm 이다. ASCE 41-13에 제시된 기둥과 연결보의 소성힌지 모델링 파라미터 기준을 근거로 하여 이력곡선을 정의한 후 집중힌지 요소로 모델링하였다 [12]. 연결보의 경우, 단면 높이가 작은 세대 내부 연결보는 휨지배, 코어부 연결보는 전단지배로 가정하여 비선형 파라미터를 산정하였으며, 연결보와 기둥의 유효강성은 둘 다 50%를 적용하였다.

Figs. 11, 12는 각 지진파 레벨에 따른 변위 그래프와 FFT (Fast Fourier Transform) 결과이며, FFT로 구해진 주기는 Table 3과 같다.

X, Y방향 모두 지진파의 세기가 증가할수록 강성저감 효과에 의해 주기가 증가하는 것으로 보아 구조물 주기의 응답의존적 특성을 확인할 수 있다. 또한, 앞서 유효강성을 고려했을 때의 고유치해석 주기는 비선형해석에서의 DBE와 MCE 레벨 사이 주기에 해당하는 것을 확인하였다.

현행 내진설계 규정에서 설계스펙트럼 가속도는 DBE 레벨의 (MCE의 2/3)의 지반가속도를 사용한다. DBE 레벨에 해당하는 비선형해석 주기는 모두 제안식에 의해 산정한 주기 상한선( $T_U$ ) 이상인 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구의 제안식은 플랜지형 벽체를 가지는 전단벽식 구조물의 내진설계를 위한 주기산정식으로 ASCE 7-10식보다 적절한 것으로 사료된다.

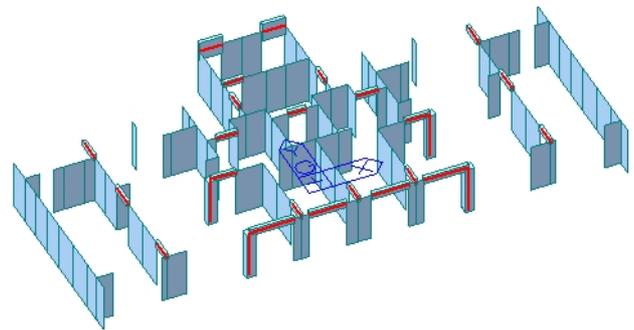


Fig. 10. Location of beam and column in plan-2

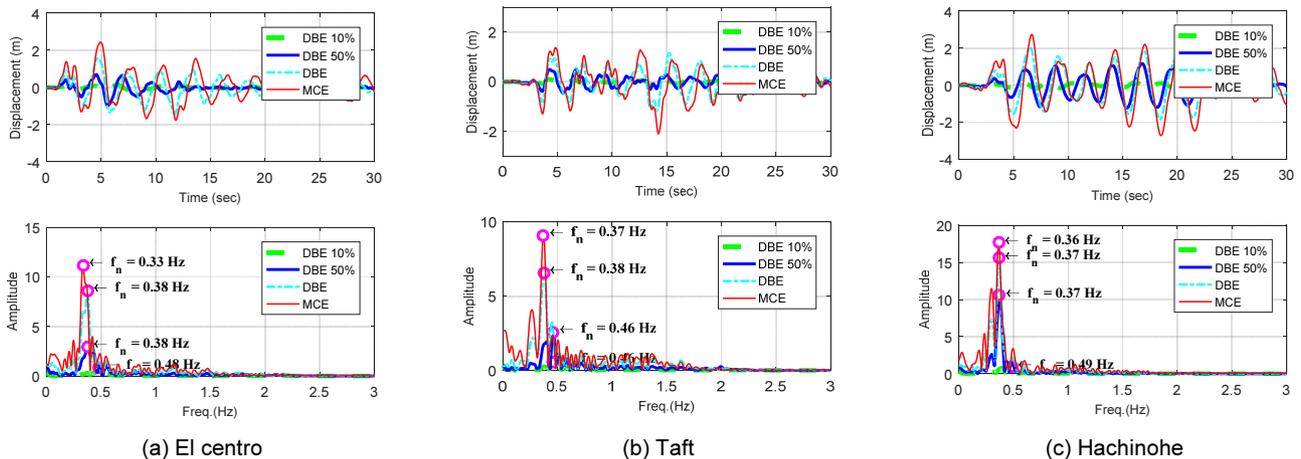


Fig. 11. Time and frequency responses of X-directional displacement (a) El Centro, (b) Taft, (c) Hachinohe

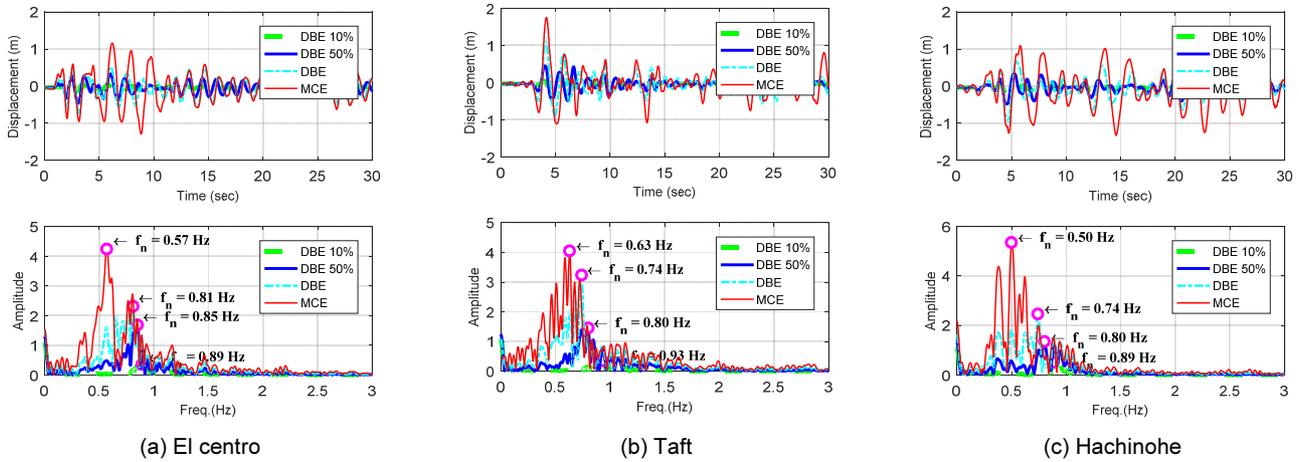


Fig. 12. Time and frequency responses of Y-directional displacement (a) El centro, (b) Taft, (c) Hachinohe

Table 3. Effective Period based on time and frequency responses of displacements obtained by nonlinear dynamic analysis

Earthquake		Seismic Level	DBE 10%	DBE 50%	DBE	MCE	ASCE 7-10 code		Proposed formula	
							$T_L$	$T_U$	$T_L$	$T_U$
X-dir	El centro		2.08	2.63	2.63	3.03	4.16	5.69	1.87	2.56
	Taft		2.17	2.17	2.63	2.70				
	Hachinohe		2.04	2.70	2.70	2.78				
Y-dir	El centro		1.12	1.18	1.23	1.75	1.09	1.49	0.87	1.19
	Taft		1.08	1.25	1.35	1.59				
	Hachinohe		1.12	1.25	1.35	2.0				

### 5. 결론

본 연구에서는 플랜지형 벽체를 포함한 전단벽 구조물의 주기에측을 위한 산정식을 제시하였으며, 단일 벽체모델과 실제 철근콘크리트 전단벽 공동주택에 적용하여 식의 타당성을 검증하였다. 본 연구의 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) Goel과Chopra가 제안한 전단벽 구조물의 고유주기 산정식(ASCE 7-10)은 일자형 벽체가 대부분인 전단벽 구조물을 기반으로 유도되었기 때문에 플랜지형 벽체가 다수를 이루고 있는 전단벽 구조물 주기는 정확히 산정하지 못하는 것을 확인하였다. 특히, 주기를 매우 크게 평가하기 때문에 보수적이지 않은 설계결과를 가져올 수 있다.
- 2) ASCE 7-10 기준식을 수정하여 플랜지벽과 웹벽체 면적의 비에 관한 계수를 도입한 주기식을 제시하였다. 단일 플랜지형 벽체모델과 실제 공동주택 구조물에 대한 고유치해석을 통해 얻은 주기를 기준식 및 제안식과 함께 비교한 결과, 기준식의 하한값은 고유치해석 주기보다 길게 평가하는 경우가 대부분인 반면, 제안식에 의한 하한값은 고유치해석 결과보다 짧게 평가함을 확인하였다. 또한, 실제 지진파를 사용한 비선형해석을 통해 구한 변위 응답을 푸리에 변환하여 구한 유효 주기도 제안식의 상한 값보다 크다는 결과로부터 제안식이 플랜지형 벽체를 가지는 구조물의 주기산정에 적절함을 확인하였다.
- 3) 본 연구에서 제안된 주기 산정식은 플랜지형 벽체의 효과를 고려하였지만, X 및 Y방향과 평행한 벽체의 효과만을 고려할 뿐 축방향이 회전된 벽체

의 효과는 고려하지 못한다. 공동주택이 점점 고층화되면서 평면형태 또한 일자형이 아닌 Y형, K형 등의 타워형이 주를 이루고 있다. 이러한 평면을 가지는 전단벽식 공동주택의 주기를 정확하게 예측하기 위해서는 축방향이 회전된 플랜지형 벽체의 단면 2차 모멘트를 고려할 수 있는 연구가 필요하다.

### / 감사의 글 /

본 연구는 한국연구재단 도약연구 지원 사업에 의해 수행되었음(2015 R1A2A1A10054506).

### / REFERENCES /

1. Amanat KM, Hoque E. A rationale for determining the natural period of RC building frames having infill, *Engineering Structures*, 2006; 28(4):495–502.
2. Tamura Y, Suganuma SY. Evaluation of amplitude-dependent damping and natural frequency of buildings during strong winds, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1996;59(2): 115–130.
3. Architectural Institute of Korea, Korea Building Design Code, c2016.
4. ATC 3-06. Applied Technology Council, c1983.
5. Lee LH, Chang KK, Chun YS. Experimental formula for the fundamental period of RC buildings with shear-wall dominant system,

- The Structural Design of Tall Building, 2000;9(4):295-307.
6. Yoon SW, Ju YK, Natural Period of reinforced concrete apartments for serviceability design, Journal of The Architectural Institute of Korea Structure & Construction, 2003;19(6):3-10.
  7. Goel RK, Chopra AK, Period formula for moment-resisting frame building, Journal of Structural Engineering, 1997;123(11):1454-1461.
  8. Goel RK, Chopra AK, Period formula for concrete shear wall buildings, Journal of Structural Engineering, 1998;124(4):426-433.
  9. ASCE 7-10, Minimum design loads for buildings and other structures, American Society of Civil Engineers, c2010.
  10. Kang SH, Hong SG, Park HG, Chung L, Fundamental period formulas for concrete shear wall buildings, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 2011;15(1):29-38.
  11. Guidelines for performance-based seismic design of residential buildings, Architectural Institute of Korea, c2016.
  12. ASCE 41-13, Seismic evaluation and retrofit of existing buildings, American Society of Civil Engineers, c2013.