

코어형태에 따른 비구조요소 내진설계를 위한 증가속도 평가

기 호 석^{1†} · 홍 기 섭²

¹홍익대학교 건축학과 석사과정, ²홍익대학교 건축학과 교수

Evaluation of Floor Acceleration for the Seismic Design of Non-Structural Elements according to the Core Shape

Ho-Seok Ki^{1†} and Gi-Suop Hong²

¹Master's Course, Department of Architecture, Hongik University, Seoul, 04066, Korea

²Professor, Department of Architecture, Hongik University, Seoul, 04066, Korea

Abstract

In this paper, the floor acceleration for the seismic design of non-structural elements was evaluated using the core shape as a planar variable. Linear time history analysis using 20 models with 5 different planes and 4 different floors on each plane depending on the change in the shape (position and specific gravity) of the core in the square biaxially symmetric plane was performed. The analysis confirmed that the torsional amplification of the floor acceleration was up to 1.7 times in the plane subjected to eccentricity depending on the position of the core, and the effect of torsion was the greatest in the middle floor of the structure. In a plane where only the specific gravity of the core was changed without eccentricity, when the period was less than 0.4694 s, the maximum floor acceleration decreased in the lower floors and increased in the upper floors as the period increased. Conversely, when the period was 0.4694 s or more, it was confirmed that the floor acceleration increased in the lower part and decreased in the upper part as the period increased.

Keywords : non-structural elements, seismic design, floor acceleration, core, torsional amplification

1. 서론

2016년 9월 경주에서 5.8규모의 지진, 2017년 11월 포항에서 5.4 규모의 지진이 국내에서 발생하면서 사회 전반적으로 지진의 안전성문제에 대해 관심이 늘어나고 있다. 지진이 발생하면 구조물의 뼈대를 구성하는 구조체의 손상으로 인한 인명 및 재산 피해가 치명적일 수 있지만 현대 사회에서는 건축물의 구조체이외의 건축 마감이나 설비시설과 같은 비구조요소가 차지하는 비중이 크기 때문에 이에 따른 비구조요소의 피해사례도 증가하고 있다.

Kim(2004) 연구에 따르면 비보강 조적조 난간 및 외벽으로부터 떨어지는 파편들에 의하여 건물 밖에서 다치거나 생명을 잃은 사람들이 건물 내에서 다치거나 사망하는 사람들과 비슷하다고 말하고 있다. 또한 Whittaker과 Soong(2003)에서는 비

구조요소는 구조물의 피해가 없는 낮은 강도의 지진에서도 구조적 손상이 발생하기 때문에 구조물의 손상으로 인한 경제적 손실보다 비구조요소로 인한 손실피해가 더 크다고 말하고 있다.

1988년 국내에 처음으로 건축물에 대한 내진설계기준이 규정되고 현재 성능기반설계법까지 오면서 많은 변화를 거치며 발전해 왔다. 하지만, 비구조요소의 내진설계기준은 이후 17년이 지난 2005년 KBC2005에서 처음 적용되면서 구조물에 비해 미미한 연구진행과 설계 및 시공단계에서 내진설계 중요성의 대한 인식이 부족한 것으로 생각된다.

현재 비구조요소의 내진설계에 대해 Akhlaghi와 Moghadam (2008), Fathali와 Lizundia(2011), Lepage 등(2012)에 의해 연구가 수행되었으며, 이들 모두 현행 기준인 ASCE/SEI 7은 구조물의 동적특성을 고려하지 않고 있기 때문에 적절하지 않다고 평가하며 새로운 제안식을 제안하고 있다. 하지만 이들의 연구는

[†]Corresponding author:

Tel: +82-2-2008-1745; E-mail: munaily@naver.com

Received November 8 2021; Revised December 6 2021;

Accepted December 6 2021

© 2022 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

비구조요소를 지지하는 구조물의 시스템적요소와 수직적 요소를 변수로 한 실험으로 평면적 요소의 변화에 대해서는 고려가 부족한 상태이다.

따라서 본 논문에서는 평면적요소가 비구조요소 증가속도에 미치는 영향을 분석하기 위해 동일한 크기의 평면 조건안에서 횡력저항에 영향을 미치고 평면에 변화를 줄 수 있는 코어를 평면적요소로 선택하였다. 코어의 형태변화를 통해 편심에 따른 비틀림 영향 및 횡력저항 능력에 따른 비구조요소 증가속도에 미치는 영향을 ASCE /SEI7을 채택한 국내 현행기준 KDS 41의 등가정적해석법과 비교하여 평가하였다.

2. 해석모델선정

2.1 구조물 개요

본 연구에서는 철근콘크리트구조의 전단벽이 있는 건물골조시스템으로 Midas Gen을 통해 선형이력해석을 수행하였다.

해석에는 X, Y방향의 정사각 평면을 가진 구조물에서 코어 형태(위치 및 비중)에 따른 서로 다른 5개의 평면과 각 평면마다 5층, 10층, 15층, 20층의 구조물로 총 20개의 모델로 구성하였다. 또한, 동일한 조건에서 코어형태에 따른 증가속도값을 비교할 수 있도록 동일층수의 구조물은 X방향 1차모드의 주기를 일치시켰다. 평면에 따른 주기는 Table 1에 정리하였다.

2.2 설계지진과 선정

본 연구의 시간이력해석을 위해 PEER ground motion database를 이용하여 KDS 41기준에 따라 서로 직교하는 2방향(x, y)이 한 쌍으로 이뤄진 지진규모 6~7사이와 전단파속도 180m/s이상의 지반가속도 7개를 선정하여 응답스펙트럼에 부합되도록

Table 2 Ground motion records

No.	Earthquake	Year	Magnitude	Vs(m/s)
RSN161	Imperial Valley-06	1979	6.53	208
RSN757	Loma Prieta	1989	6.93	238
RSN1115	Kobe, Japan	1995	6.90	256
RSN3276	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	6.30	212
RSN4883	Chuetsu-oki, Japan	2007	6.80	254
RSN5798	Iwate, Japan	2008	6.90	217
RSN6912	Darfield, New Zealand	2011	7.00	206

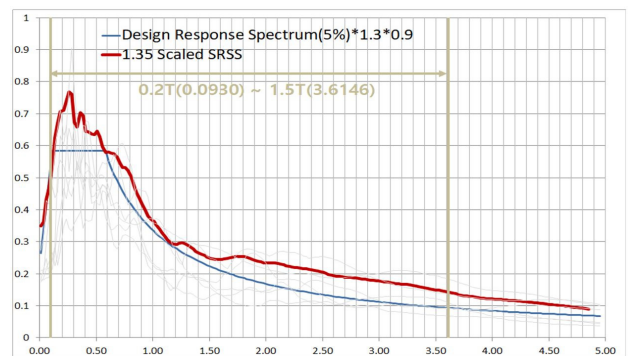


Fig. 1 Response spectra

보정하여 최대지반가속도 PGA(peak ground acceleration)를 0.2333g로 설정하였다. 선정된 지진파와 이에 부합하는 설계 응답스펙트럼은 Table 2와 Fig. 1에서 확인할 수 있다.

3. 증가속도 분석

3.1 KDS 41의 증가속도

KDS 41에서 제시하는 비구조요소 내진설계를 위한 식은 다음과 같다.

Table 1 Building plans and natural period

No.	1-2S1		1-1S1		1-1S2		3-2S1		5-2S1	
Plan										
Eccentric dis.	0mm		4,122mm		8,239mm		0mm		0mm	
Mode	X-dir	Y-dir	X-dir	Y-dir	X-dir	Y-dir	X-dir	Y-dir	X-dir	Y-dir
5F	0.4652s	0.4652s	0.4652s	0.3498	0.4652s	0.3266	0.4652s	0.2413	0.4652s	0.1700
10F	0.9497s	0.9497s	0.9497s	0.8753	0.9497s	0.8362	0.9497s	0.5416	0.9497s	0.3723
15F	1.6293s	1.6293s	1.6293s	1.5903	1.6293s	1.5488	1.6293s	1.0187	1.6293s	0.7138
20F	2.4096s	2.4096s	2.4096s	2.3927	2.4096s	2.3533	2.4096s	1.6155	2.4096s	1.1589

$$F_p = \frac{0.4a_p S_{DS}}{\frac{R_p}{I_p}} \left(1 + 2\frac{z}{h}\right) W_p \quad (1)$$

$$0.3S_{DS}I_p W_p \leq F_p \leq 1.6S_{DS}I_p W_p \quad (2)$$

식 (2)는 식 (1)의 최댓값, 최솟값의 범위이다. 여기서, a_p 는 비구조요소의 증폭계수, R_p 는 비구조요소의 반응수정계수, I_p 는 비구조요소의 중요도계수, W_p 는 비구조요소의 무게, z 는 비구조요소의 설치높이, h 는 구조물의 설치높이, $0.4S_{DS}$ 는 PGA를 나타내고 $(1+2z/h)$ 는 PFA/PGA를 나타낸다. $(1+2z/h)$ 에서 확인할 수 있듯이 KDS 41에서는 층가속도는 지반가속도를 최소 1에서 최대 3까지 증폭시키는데 이는 동적특성에 대한 고려가 없이 단지 비구조요소의 설치높이에 따라 결정한다는 것을 알 수 있다.

3.2 코어위치에 따른 층가속도

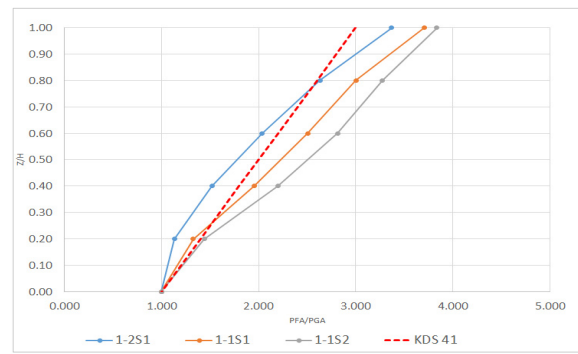
3.2.1 주기의 영향

Fig. 2는 각 동일주기의 5층 구조물($T=0.4652\text{sec}$), 10층 구조물($T=0.9497\text{sec}$), 15층 구조물($T=1.6293\text{sec}$), 20층 구조물($T=2.4096\text{sec}$)별로 묶어 비구조요소 설치위치에 따른 최대 층가속도를 현행기준 KDS 41의 등가정적해석법과 선형시간이력해석법의 결과값을 보여주고 있다. 그래프의 X축은 최대 층가속도(PFA)를 최대 지반가속도(PGA)로 나눠 절대적인 수치값을 비교할 수 있도록 하였고, Y축은 비구조요소 설치높이(Z)를 건축물의 높이(H)로 나눠 다른 층을 가진 모델들이 같은 0~1사이에 비율을 가지도록 하였다.

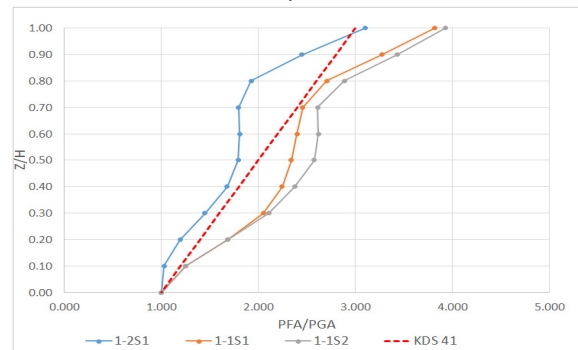
1-2S1을 보면 이전 연구들에서 확인되었듯이 층가속도는 건축물의 주기에 영향을 받으며 현행기준은 장주기 구조물에서는 과대평가되었다는 것을 알 수 있다. 고유주기가 증가하면 PFA는 감소하게 되고 설치높이에 따른 PFA 증가 양상 또한 다르게 나타난다. 5층 구조물의 경우 설치높이가 높아짐에 따라 로그함수 형태를 그리며 KDS41과 근접한 값을 보여주지만 층수가 증가하면서 고층부의 PFA값이 급격히 감소하여 S자형 곡선형태를 그리며 KDS 41과 점점 차이가 벌어지는 것을 확인할 수 있다.

3.2.2 비틀림의 영향

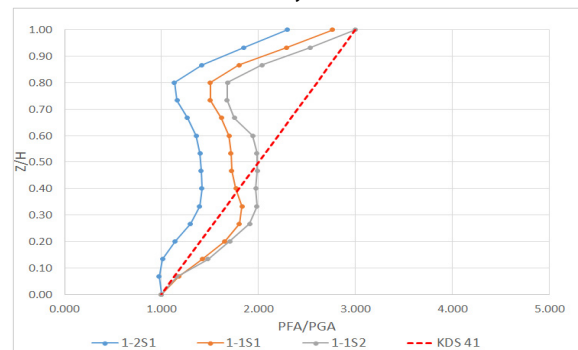
1-1S1, 1-1S2에서는 1-2S1과 비슷한 양상을 그리지만 PFA값이 모든 설치높이에서 항상 크다는 것을 확인할 수 있다. 이는 편심에 의한 비틀림 영향으로 판단된다. 비틀림이 없는 1-2S1보다 1-1S1의 PFA값이 더 크고 1-1S1보다 비틀림 영향을 더 많이 받는 1-1S2가 PFA값이 큰 것을 통해 비틀림은 층가



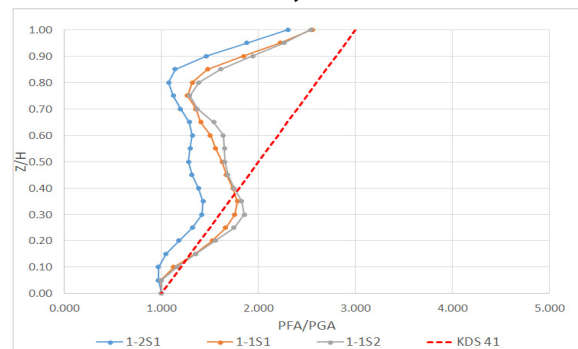
(a) 5-Story structure



(b) 10-Story structure



(c) 15-Story structure



(d) 20-Story structure

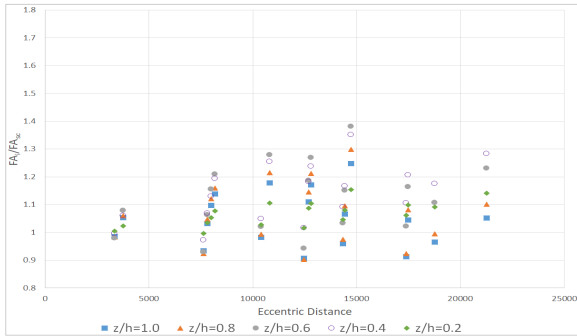
Fig. 2 Effects of PFA according to core position

속도를 증폭시킨다는 것을 알 수 있다. 1-1S1, 1-1S2에서 비틀림이 발생하면서 설치높이가 높아짐에 따라 비틀림을 받지 않는 1-2S1과 PFA값의 차이가 저층부에서 크게 벌어지고 중층부에서 큰 변화 없이 차이가 일정하다가 고층부에서 차이가 조

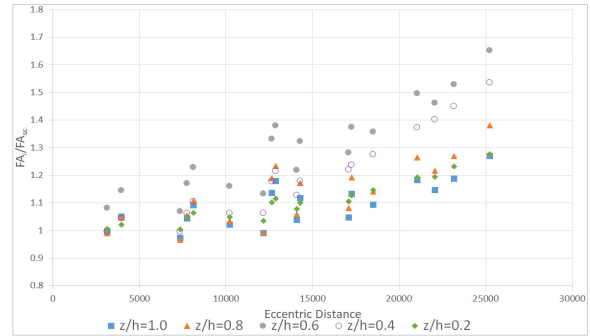
금 줄어드는 것을 확인할 수 있는데 이는 중층부에서 비틀림 영향을 가장 많이 받고 있다는 것을 알 수 있으며 모든 주기에서 비슷한 양상이 나타났다.

Fig. 3, Fig. 4는 비틀림을 받는 1-IS1, 1-IS2에 대해 동일 설치높

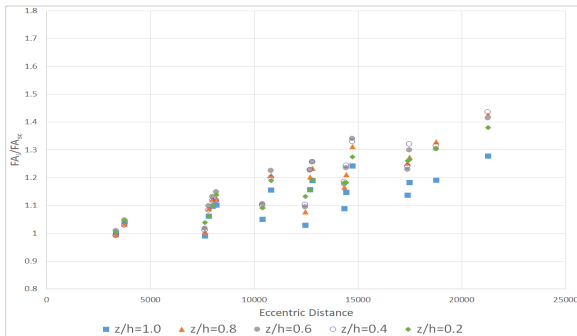
이에서 강성중심으로부터 떨어진 거리에 따라 비틀림이 증가속도에 어떤 영향을주는지 확인하기 위해 수치해석한 결과이다. X축은 편심거리 값이며, Y축은 해당 편심거리에서의 증가속도(FA_i)를 전단중심에서의 증가속도(FA_{sc})로 나눈 값을 나타낸다.



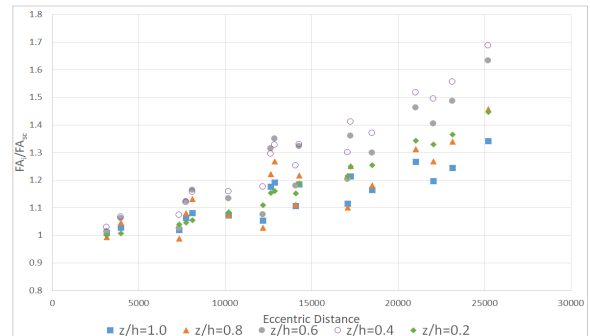
(a) 5-Story structure



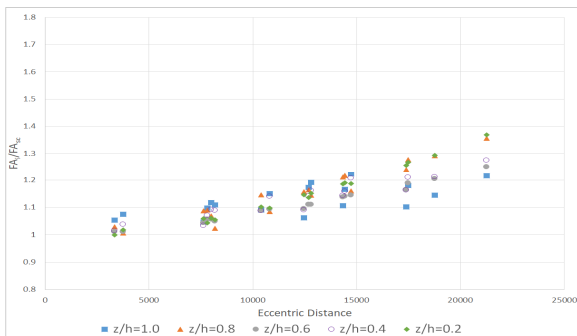
(a) 5-Story structure



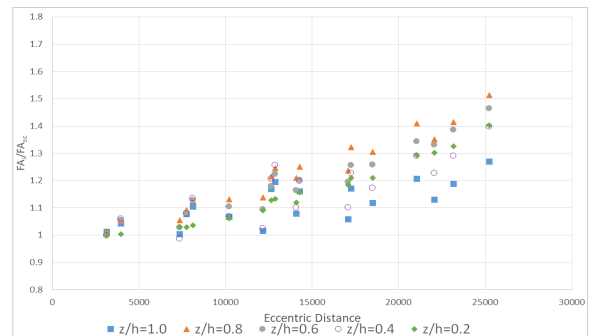
(b) 10-Story structure



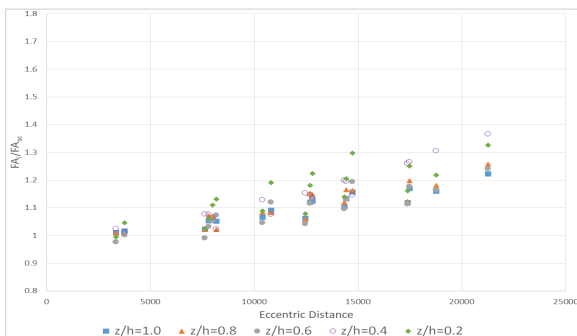
(b) 10-Story structure



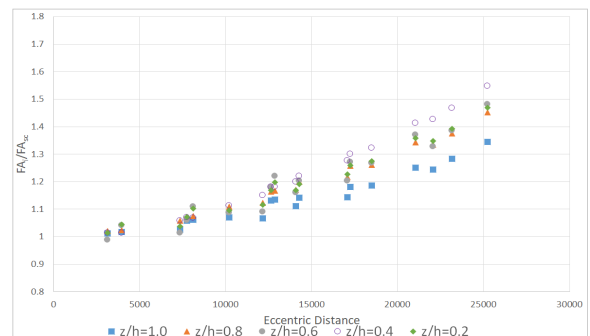
(c) 15-Story structure



(c) 15-Story structure



(d) 20-Story structure



(d) 20-Story structure

Fig. 3 Effects of PFA according to eccentric distance(1-1S1)

Fig. 4 Effects of PFA according to eccentric distance(1-1S2)

1-1S1의 5층 구조물에서는 편심거리와 설치높이에 상관없이 분포되어 산발적인 형태로 편심거리에 따른 비틀림의 영향이 적다는 것을 보여주고 있다. 하지만, 주기가 증가하면서 점점 고른 분포를 나타내며 편심거리에 따라 일정하게 증가하여 최대 1.45배 정도의 비틀림 증폭이 나타난다. 이러한 모습은 편심이 더 큰 1-1S2에서 좀 더 명확히 보여지며 최대 1.7배 정도의 비틀림 증폭을 일으킨다. 또한, 각 그림마다 편심거리가 가장 큰 곳을 확인해 보면 중층부($z/h=0.4$, $z/h=0.6$, $z/h=0.8$)에서 비틀림 증폭이 가장 크고 다음은 저층부($z/h=0.2$), 가장 작은 증폭은 고층부($z/h=1.0$)인 것을 확인할 수 있다. 중층부의 비틀림 증폭은 고층부($z/h=1.0$) 비해 1-1S1은 1.15배 정도 비틀림 증폭이 되며, 1-1S2는 1.3배 정도의 비틀림 증폭이 발생하였다. 앞에서 설명하였듯이 중층부에서 비틀림 영향이 크고 고층부에서 비틀림 영향이 작다는 것을 편심거리에 따른 증가속도 변화를 통해서도 확인할 수 있었다.

3.3 코어비중에 따른 증가속도

Table 3은 편심이 작용하지 않는 2축대칭의 1-2S1, 3-2S1, 5-2S1 평면의 구조물에 대해서 X,Y방향을 구분하여 층수와 관계없이 주기를 낮은 것부터 내림차순으로 정렬한 표이고 이를 토대로 Fig. 5는 주기가 증가함에 따라 PFA의 증가곡선의 변화를 나타낸 그래프이다. 설치높이 0.5를 기준으로 상하부로 나눠 분석하였을 때, 주기 0.4652초(5-2S1, 10F)를 기점으로 주기가 그 이하면 저층부에서는 주기가 증가할수록 PFA가 감소하면서 반비례관계를 가지고 고층부에서는 반대로 주기가 증가하면서 PFA 또한 증가하여 둘이 비례관계를 가지는 것을 확인할 수 있다. 하지만 주기 0.4652초(5-2S1, 10F) 이상에서는 완전히 반대의 양상이 그려진다. 저층부에서는 주기가 증

Table 3 Array in the order of the natural period

No.	Natural Period	Plan Name, Story(Direction)
1	0.1700	5-2S1, 5F(Y-dir)
2	0.2413	3-2S1, 5F(Y-dir)
3	0.3723	1-2S1, 5F(X,Y-dir)
4	0.4652	5-2S1, 10F(Y-dir)
5	0.5416	3-2S1, 10F(Y-dir)
6	0.7138	5-2S1, 15F(Y-dir)
7	0.9497	1-2S1, 10F(X,Y-dir)
8	1.0187	3-2S1, 15F(Y-dir)
9	1.1538	5-2S1, 20F(Y-dir)
10	1.6155	3-2S1, 20F(Y-dir)
11	1.6293	1-2S1, 15F(X,Y-dir)
12	2.4096	1-2S1, 20F(X,Y-dir)

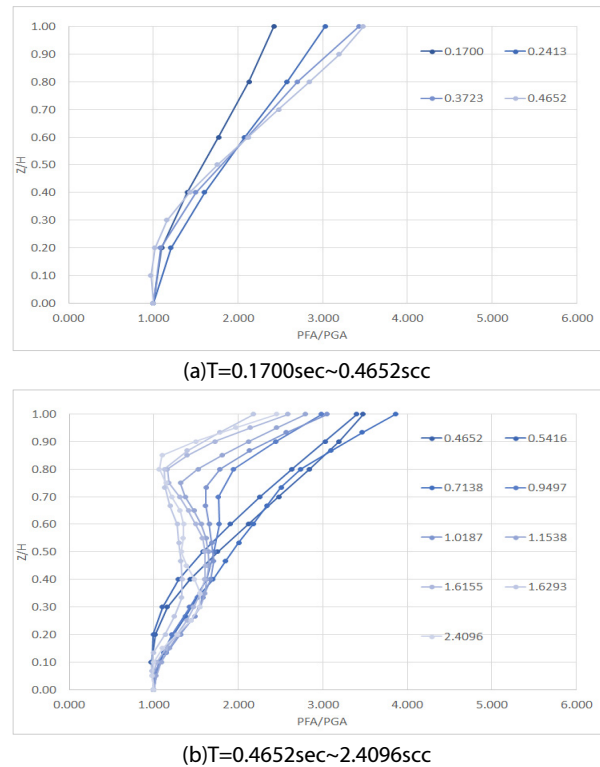


Fig. 5 Effects of PFA according to natural period

가할수록 PFA가 증가하다 주기가 1.0187초(3-2S1, 15F) 부터는 거의 비슷한 값을 가지게 되고 고층부에서는 주기가 증가할수록 PFA가 감소하는 것을 알 수 있다.

그래프 형태로 분석하면, 주기 0.1700초(5-2S1, 5F), 0.2413초(3-2S1, 5F)는 일정한 변화를 가진 직선형태를 그리고 주기 0.3723(1-2S1, 5F)부터는 저층부에서 변화가 거의 없다가 중층부부터 변화가 생기며 로그함수형태를 그리기 시작한다. 주기 0.7138초(5-2S1, 15F)에서는 다시 직선형태로 증가하다 주기 0.9497초(1-2S1, 10F)부터는 고층부로 갈수록 PFA값이 감소하게 되어 S자형 곡선을 나타내게 된다.

주기 0.9497초(1-2S1, 10F)와 주기 0.7138초(5-2S1, 15F), 주기 1.1538(5-2S1, 20F)와 주기 1.6293(1-2S1, 15F)는 주기와 층수(높이)가 반비례관계이지만 높이 차이에 따른 변화가 없는 것으로 보아 높이는 PFA값에 영향을 주지 못하는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 횡력저항에 많은 부분을 차지하는 코어가 비구조요소 내진설계를 위한 최대증가속도에 어떠한 영향을 미치는지 파악하기 위해 20개의 서로 다른 샘플을 구성하였다. 평면에서는 코어의 위치 및 비중의 차이를 주었고, 단면에서는 5층, 10층, 15층, 20층의 높이변화를 주어 서로 다른 주기를

가지도록 하였다. 동일한 높이를 가진 구조물에서는 서로 다른 평면이지만 강성조절을 통해 동일한 1차주기를 가지도록 계획하여 총 20개의 샘플을 선형시간이력해석으로 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 이전 연구들에서 확인되었듯이 증가속도는 건축물의 주기에 영향을 받으며 현행기준 KDS 41은 장주기 구조물에서는 과대평가되었다는 것을 알 수 있다. 고유주기가 증가하면 PFA는 감소하게 되고 설치높이에 따른 PFA 증가 양상 또한 로그함수 형태에서 S자형태로 변화되며 KDS 41과의 차이도 벌어지는 것을 확인할 수 있다.
- 2) 각각의 샘플의 동일 설치높이에서 편심거리에 따른 비틀림 증폭을 해석한 결과, 편심거리 4,122mm의 1-1S1 평면은 10층에서 최대 1.45배의 비틀림 증폭이 발생하였고, 편심거리 8,239mm의 1-1S2 평면 또한 동일한 주기의 10층에서 최대 1.7배의 비틀림 증폭이 발생하였다. 최대 비틀림 증폭은 층수마다 조금씩 다르지만 10층에서 가장 큰 증폭을 보이며 층수가 증가할수록 줄어든다. 또한, 비틀림의 영향을 가장 많이 받는 층은 중층부로 비틀림 영향이 가장 작은 최상층에 비해 1-1S1은 1.15배 정도 비틀림 증폭이 되며, 1-1S2는 1.3배 정도의 비틀림 증폭이 발생하였다.
- 3) 편심이 작용하지 않는 3개 평면의 X방향과 Y방향의 주기를 내림차순으로 정렬하여 비교분석한 결과, 주기가 같으면 설치높이마다 거의 비슷한 PFA를 가진다는 것을 확인할 수 있었으며, 주기가 서로 다른 12개의 샘플은 특정 주기 구간에 따라 일정하게 변화하는 것을 확인할 수 있었다. 주기 0.4694초를 기점으로 주기가 그 이하면 저층부에서는 주기가 증가할수록 PFA가 감소하여 반비

례관계를 가지고 고층부에서는 반대로 주기가 증가하면서 PFA 또한 증가하여 둘이 비례관계를 가지는 것을 확인할 수 있다. 하지만 주기 0.4694초 이상에서는 저층부에서 주기가 증가할수록 PFA가 증가하다 주기가 1.0187초부터는 거의 비슷한 값을 가지게 되고 고층부에서는 주기가 증가할수록 PFA가 감소하는 것을 알 수 있다.

- 4) 또한, 주기와 층수(높이)가 반비례관계를 가지는 경우도 있지만 높이 차이에 따른 변화가 없는 것으로 보아 높이는 PFA값에 큰 영향을 주지 못하는 것으로 판단된다.

References

- Akhlaghi, H., Moghadam, A.S.** (2008) Height-Wise Distribution of Peak Horizontal Floor Acceleration (PHFA), *14th World Conf. Earthq. Eng.*, Beijing, China, pp.12~17.
- Fathali, S., Lizundia, B.** (2011) Evaluation of Current Seismic Design Equations for Nonstructural Components in Tall Buildings using Strong Motion Records, *Struct. Des. Tall & Spec. Build.*, 20(S1), pp.30~46.
- Kim, J.H.** (2004) Seismic Resistant Design of Non-Structural Components, *Rev. Arch. & Build. Sci.*, 48(8), pp.53~56.
- Lepage, A., Shoemaker, J.M., Memari, A.M.** (2012) Accelerations of Non-Structural Components during Nonlinear Seismic Response of Multistory Structures, *J. Archit. Eng.*, 18(4), pp.285~297.
- Whittaker, A.S., Soong, T.T.** (2003) An Overview of Non-structural Research at Three U.S. Earthquake Engineering Research Centers, *Proc., ATC Seminar on Seismic Design, Performance & Retrofit of Nonstructural Components in Critical Facilities*, pp.271~280.

요 지

최근 비구조요소의 피해사례가 증가하면서 비구조요소 내진설계에 관한 많은 연구가 진행되고 있다. 하지만 대부분의 연구는 평면적 요소보다는 수직적 요소나 시스템적 요소를 변수로 증가속도를 평가하고 있다. 때문에 본 논문에서는 횡력저항에 많은 부분을 차지하는 코어를 평면적 변수로 사용하여 비구조요소 내진설계를 위한 증가속도에 대해 평가하였다. 정사각형의 2축대칭의 평면에서 코어의 형태(위치 및 비중)변화에 따라 서로 다른 5개의 평면과 각 평면마다 5층, 10층, 15층, 20층의 층수를 가진 총 20개의 모델로 선형시간이력해석을 수행하였다. 분석 결과 코어 위치에 따라 편심을 받는 평면에서는 증가속도가 최대 1.7배의 비틀림 증폭이 발생하였고 구조물의 중층부에서 비틀림의 영향이 가장 큰 것을 확인할 수 있었다. 편심이 없이 코어의 비중만 변화한 평면에서는 주기 0.4694초를 기준으로 이하일 때는 주기가 증가할수록 증가속도가 저층부에서는 감소하고 고층부에는 증가하며, 반대로 주기 0.4694초 이상일 때는 주기가 증가할수록 증가속도가 저층부에서는 증가하고 고층부에는 감소한다는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 구조물의 층수는 최대증가속도에 영향을 주지 못하는 것을 확인하였다.

핵심용어 : 비구조요소, 내진설계, 증가속도, 코어, 비틀림증폭