SSI 해석을 고려한 초고층 및 저층 건물 동적거동 비교 연구

유광호[1*] · 김승진[2]

[1]정회원, 수원대학교 건설환경공학과 교수
[2]학생회원, 수원대학교 건설환경공학과 석사과정

A comparative study on dynamic behavior of high-rise building and low-rise building considering SSI analysis

Kwang-Ho You[1*] · Seung-Jin Kim[2]

[1]Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Suwon
[2]Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Suwon

***Corresponding Author :** Kwang-Ho You, khyou@suwon.ac.kr

Abstract

Most of the previous seismic analyses have been carried out by separating the ground and structures, and there is a lack of comparative study on the dynamic behavior of high-rise and low-rise buildings. Therefore, in this study, the sensitivity analysis was performed with selected parameters by using a finite element analysis program in order to grasp the dynamic behavior of high-rise and low-rise buildings. As a result, it was turned out that the horizontal displacement, the interstory drift ratio, and the bending stress of a high-rise building were more affected by a long seismic wave than a low-rise buildings. Also, the weak parts of a high-rise and low-rise building were more affected by type of seismic wave than the ground conditions. Therefore, it is inferred that it will be helpful for seismic designs to consider the influence of ground conditions and seismic wave type on buildings.

Keywords: High-rise building, Interstory drift ratio, Soil-structure interaction, Dynamic behavior

초 록

대부분의 기존 내진해석은 지반과 구조물을 각각 구분하여 수행되었고, 초고층 건물과 저층 건물에 대한 동적거동 비교 연구가 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 초고층 건물과 저층 건물의 동적거동을 파악하기 위하여 유한요소해석 프로그램을 이용하여 선정된 파라미터별로 민감도 분석을 실시하였다. 연구 결과, 초고층 건물의 수평변위, 층간변위비, 휨응력은 지반조건이 연약할수록, 저층 건물보다 장주기 지진파의 영향을

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
20(6)973-987(2018)
https://doi.org/10.9711/KTAJ.2018.20.6.973

eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

Received August 22, 2018
Revised October 11, 2018
Accepted October 17, 2018

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright ⓒ2018, Korean Tunnelling and Underground Space Association

더 받는 것으로 나타났다. 또한 초고층과 저층 건물의 취약부는 지반조건보다는 지진파의 종류의 영향이 더 큰 것으로 나타났다. 따라서 지반조건 및 지진파 종류가 건물에 미치는 영향을 참고하면 건물의 내진설계에 도움이 될 것으로 판단된다.

주요어: 초고층 건물, 층간변위비, 지반-구조물 상호작용, 동적거동

1. 서 론

2016년 9월 12일 경주에서 규모 5.8에 해당하는 지진이 발생하고 사망자는 없었으나 저층 및 비내진건물의 비구조적 피해가 주를 이루었다. 이에 내진연구에 대한 사회적 관심이 증가하고 건축 및 토목 분야에서 지질학적, 지반공학적 및 지진공학적 관점에서 많은 내진연구 및 해석이 수행되고 있다. 또한 건물의 내진해석 평가법에 대한 연구 및 현행 내진설계 문제점과 개선점을 제시하여 공공기관 및 사회기관에서 지진 피해를 줄이기 위하여 대책을 마련하고 있다.

일반적으로 건물 중 저층 건물은 전단파괴형 부재로 이루어져있어 지진 시 건물의 수평저항능력이 급속히 저하되어 건물 전체가 파괴될 가능성이 높다. 이에 Jung et al. (2017)은 저층 건물의 내진피해도 간편 평가법을 제시하기 위하여 학교 건물 현장데이터를 취합하여 저층 건물을 대상으로 비선형 내진해석을 수행하고 두 데이터를 비교·분석하였다. 경주지진을 대상으로 Sun (2016)은 지질학 및 지구물리학 관점으로 지반의 부지 응답을 파악하였다. 그 결과 단주기(고진동수) 특성을 보이는 지반인 경우 경주지진의 고진동수 성분들이 더 크게 증폭된 것으로 나타났다. 그러나 기존 내진해석 시 지반과 저층 건물에 대해 개별적으로 내진해석을 수행하고 건물의 동적거동 연구는 수행하지 않았기 때문에 지반과 구조물을 함께 고려한 내진해석이 필요하다.

한편, 초고층 건물을 대상으로 You and Kim (2018)은 MIDAS GEN 및 MIDAS GTS NX 프로그램을 이용하여 선정된 파라미터별로 민감도 분석을 수행하고 지반-구조물 상호작용(Soil-Structure Interaction, SSI)을 고려한 동적해석의 타당성을 비교·검증하였다. 이를 위해 건축에서 수행하는 건물 자체만 고려하는 경우와 토목에서 수행하는 건물과 지반을 함께 고려하는 경우의 초고층 건물의 동적거동을 비교·분석하였다. 그 결과, 지반을 함께 고려한 경우가 건물 자체만 고려하는 경우보다 고유주기가 더 크게 산출되고, 건물 최상층의 건물만의 수평변위도 크게 나타내었고, 건축에서 사용하는 건물만 고려하는 경우가 지반과 건물을 함께 고려하는 경우보다 휨압축 및 인장응력을 크게 산출하여 과대평가하는 것으로 나타났다. 따라서 지반을 고려하는 연속체 모델을 사용하여 SSI를 고려하는 것이 타당하다고 주장하였다. 그러나 지진 시 취약한 저층 건물의 동적거동이 고려되지 못하였다.

따라서 본 연구는 유한요소법에 근거한 지반 범용 프로그램인 MIDAS GTS NX를 이용하여 지반을 고려한 초고층 건물은 물론 저층 건물에 대해 내진해석 시 동적거동을 파악하고자 하였다. 대상 건물은 초고층 건물과 저층 건물로 각각 높이 200.8 m, 62층, 층고 3.2 m, 지하 5층, 22.1 m로, 높이 43.9 m, 층고 3.2 m, 지하 2층으로 구성되는 것으로 하였다. 입력지진파로는 재현주기 1,000년, 2,400년에 해당하는 최대 지반가속도(Peak Ground

Acceleration, PGA)인 0.154 g, 0.22 g의 1999년 터키에서 발생한 Kocaeli 지진파를 사용하여 동적해석(선형시간이력해석)을 수행하고, 초고층 건물과 저층 건물의 동적거동인 수평변위, 층간변위비, 구조부재에 작용하는 휨응력, 허용 휨응력을 초과하는 부재의 취약부 위치를 비교·분석하였다.

2. 건물의 고유주기

고유주기는 건물이 자유진동상태에서 거동할 때 특정 모드형상으로 1회 진동하는 데 소요되는 시간을 의미한다. 그러므로 각 건물마다 고유주기는 다르게 되고 특히 건물 층수에 따라 모드형상과 고유주기는 다르다. 국내 건축구조기준(Architectural Institute of Korea, 2009)에서는 건물의 고유주기를 구할 수 있는 식 (1)을 제안하여 건물 특성에 따라 고유주기를 쉽게 구할 수 있도록 제시하였다.

$$T_a = C_T h_n^{3/4} \tag{1}$$

여기서, C_T는 건물 종류에 따른 상수(철골모멘트골조: 0.085, 철근콘크리트모멘트골조, 철골편심가재골조: 0.073, 그 외 다른 모든 건축물: 0.049), h_n은 건축물의 밑면으로부터 최상층까지의 전체 높이(m)이다.

다만, 철근콘크리트와 철골모멘트저항골조에서 층의 최소높이가 3 m 이상일 때에는 근사고유주기(T_a)를 건물 층수로 구할 수 있는 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$T_a = 0.1N \tag{2}$$

여기서, N은 건물 층수이다.

3. 동적해석 경계조건

동적해석을 수행하기 위해서는 지반 모델링 좌·우측 및 바닥면에 경계조건을 설정하여 해석 시 지반 강성을 모사하고 지진파가 모델링 경계면에서 반사되어 해석에 영향을 미치지 않도록 해야 한다. 지반-구조물 상호작용을 고려한 동적해석 시 적용되는 경계조건으로는 탄성경계, 점성경계, 전달경계 등이 있다.

탄성경계는 모델의 경계부분에 위치한 인접구조물 또는 지반 등의 강성을 고려할 때, 자유도가 부족한 요소(트러스, 평면응력, 판 요소 등)가 상호 접합될 경우 접합절점에서 발생할 수 있는 특이성 오류(singular error)를 피하는 데 주로 사용된다. 프로그램에 따라서 탄성경계요소의 입력방법은 다른데, 탄성경계지점이 필요한 절점에 스프링과 같은 요소를 추가로 모델링하고 그 요소의 끝점을 경계조건으로 구속시키는 방법과 MIDAS GTS NX 프로그램 등에서 사용하는 것과 같이 절점에 바로 스프링 상수 값을 입력하여 구속시키는 방법이 있다. 지반을 모델

링할 때는 식 (3)과 같이 지반반력계수(modulus of subgrade reaction)에 해당절점의 유효면적(tributary area)을 곱한 값이 사용된다(MIDAS Information Technology Co., 2012).

$$K_v = K_{v0} \times (B_v/0.3)^{-3/4} \text{ (kN/m}^3\text{)}$$
$$K_{v0} = \alpha \times E_0/0.3 \text{ (kN/m}^3\text{)} \tag{3}$$

여기서, E_0 = 탄성계수(kN/m^2), $B_v = \sqrt{A_v}$ (m), A_v는 적용 면적이다.

유한요소해석과 비선형 해석 등에 지진파가 해석 경계면에서 흡수되어 반사되는 현상을 방지하는 것에 적합한 점성경계(viscous boundary)는 가상 경계를 고려하는 가장 일반적 방법 중에 하나이다. 일반적으로 널리 사용되는 Lysmer and Kuhlemeyer (1969)가 제시한 표준 점성경계(standard viscous boundary)에 의하면 가상 경계면에서 반사파에 의해 발생하는 지반 입자 운동(particle motion)에 의해 수직응력 및 전단응력이 계산되고 이로 인하여 점성경계계수(C_p, C_s)를 식 (4), (5)로 구할 수 있다(Kim, 2013).

$$C_p = \rho A \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} \tag{4}$$

$$C_s = \rho A \sqrt{\frac{G}{\rho}} \tag{5}$$

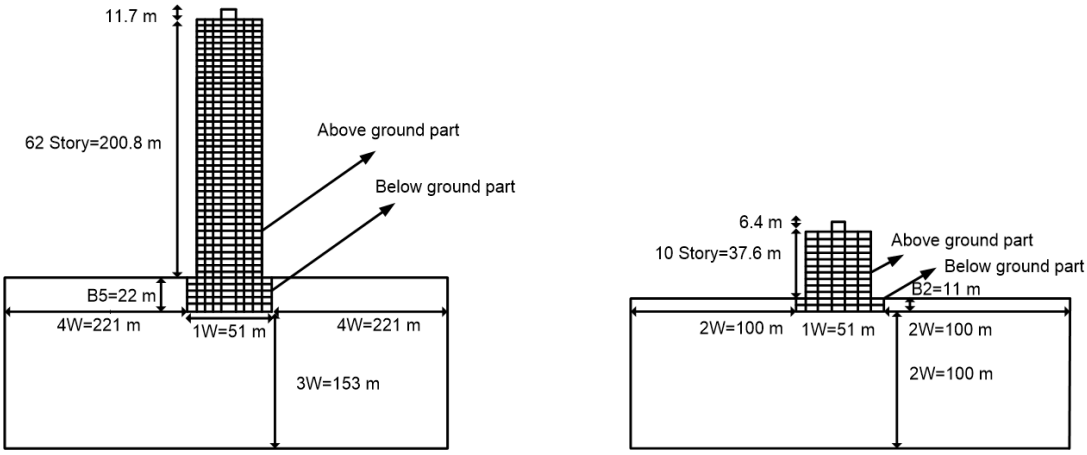
여기서, λ는 $\mu \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)}$, G는 $\frac{E}{2(1+\mu)}$, ρ는 밀도, A는 적용 면적이다.

전달경계(transmitting boundary)는 지반-구조물 상호작용 프로그램인 FLUSH (Lysmer et al., 1975)와 SASSI (Lysmer et al., 1981)에 적용되었으며, 수평방향으로 전파하는 표면파를 반해석적(semi-analytical) 방법으로 고려한다. 강체 암반 위에 놓인 층상지반에 연직 방향으로 가상 경계면을 설정하고, 원역지반으로 전파하는 표면파를 고려한다. 반무한 지층을 근사하기 위해 수평 층상 지반의 깊이를 충분히 깊게 가정하여야 하고, 실체파를 고려하기 위해 점성경계 등을 추가적으로 사용하여야 한다(Kim, 2013).

4. 대상 건물 동적해석 모델링

본 연구에서는 지반 범용 프로그램인 MIDAS GTS NX를 이용하여 Fig. 1과 같이 SSI를 고려한 초고층 건물(62층, 지하 5층), 저층 건물(10층, 지하 2층)을 대상으로 동적해석을 수행하였다. 각 건물은 기반암인 화강암 위에 설치되어 있는 것으로 하고, 지표면으로부터 초고층 건물 22 m, 11 m 깊이로 풍화토층이 존재하고 건물의 지하부가 이 층에 묻혀있는 것으로 하였다. 초고층 건물과 저층 건물의 지상부 높이는 코어부 11.7 m, 6.4 m를 더한

각각 212.5 m와 44 m로 하였으며 참고로 대부분의 층고는 3.2 m으로 적용하였다. 건물 지하부 폭은 총 51 m로 내부 기둥은 5.4 m 간격으로 4개를, 코어부 기둥은 9 m 간격으로, 좌·우 지하벽체로부터 지상부와 연결된 지하부 기둥은 좌측 4.3 m, 우측 6.1 m 간격으로 설치하였다. 또한 지하부의 층고는 초고층 건물의 경우 지하 1층부터 각각 7.3, 4.1, 3.5, 3.5, 3.7 m로, 저층 건물의 경우 각각 7.3 m와 4.1 m로 적용하였다. 초고층 건물과 저층 건물의 해석영역은 좌·우측 지하벽체를 기준으로 좌·우로 각각 221 m와 100 m, 지하부 바닥면을 기준으로부터 하부로 153 m와 100 m 만큼 해석영역으로 설정하였다.



(a) 62 story bldg. with 5 story basement (b) 10 story bldg. with 2 story basement

Fig. 1. The analysis sections of interest structures

본 연구에서는 Table 1과 같이 건물의 종류, 지진파 규모, 지진파 종류, 지반조건에 대한 민감도 분석을 실시하여 초고층 건물과 저층 건물의 동적거동을 비교·분석하였다. 민감도 분석을 수행하기 위해 건물 지상 62층(지하 5층, 62F-B5), 10층(지하 2층, 10F-B2) (2가지) × 지진파 종류(단주기, 장주기) (2가지) × 지진파 크기(PGA 0.154 g, 0.22 g) (2가지) × 지반조건(극경암, 경암) (2가지) 총 16 가지를 선정하였다.

Table 1. Parameters applied to dynamic analysis

Type of building	Magnitude of seismic wave	Type of seismic wave	Ground type
62 story	0.154 g	Short wave (SW)	Extremely hard rock (Sb1)
10 story	0.22 g	Long wave (LW)	Hard rock (Sb2)

본 해석에 적용한 표층과 기반암은 Seoul Metropolitan Government (2006)에서 제공한 자료를 참고하여 각각 풍화토와 극경암(Sb1), 경암(Sb2)을 적용하였으며, 최종적으로 본 연구에 사용된 지반 물성치는 Table 2와 같다. 그리고 측압계수는 표층과 기반암 모두 1.0을 적용하였으며, Mohr-Coulomb 파괴기준을 적용하였다. 한편, 동일

한 재료나 서로 다른 재료간의 접촉을 모사하기 위해 경계요소(interface element)를 사용하면 보다 자세하게 동적거동을 파악할 수 있으나, 본 연구에서는 Kim et al. (2011)과 같이 단순히 지반과 건물이 일체로 거동하는 것으로 가정하였다.

Table 2. Ground properties

Ground type	Unit weight (kN/m^3)	Elastic modulus (GPa)	Poisson's ratio	Friction angle (°)	Cohesion (MPa)
Weathered soil (surface)	19	0.03	0.3	28	0.05
Granite (bed rock-Sb1)	27	4	0.2	45	2
Granite (bed rock-Sb2)	26	14	0.2	40	6

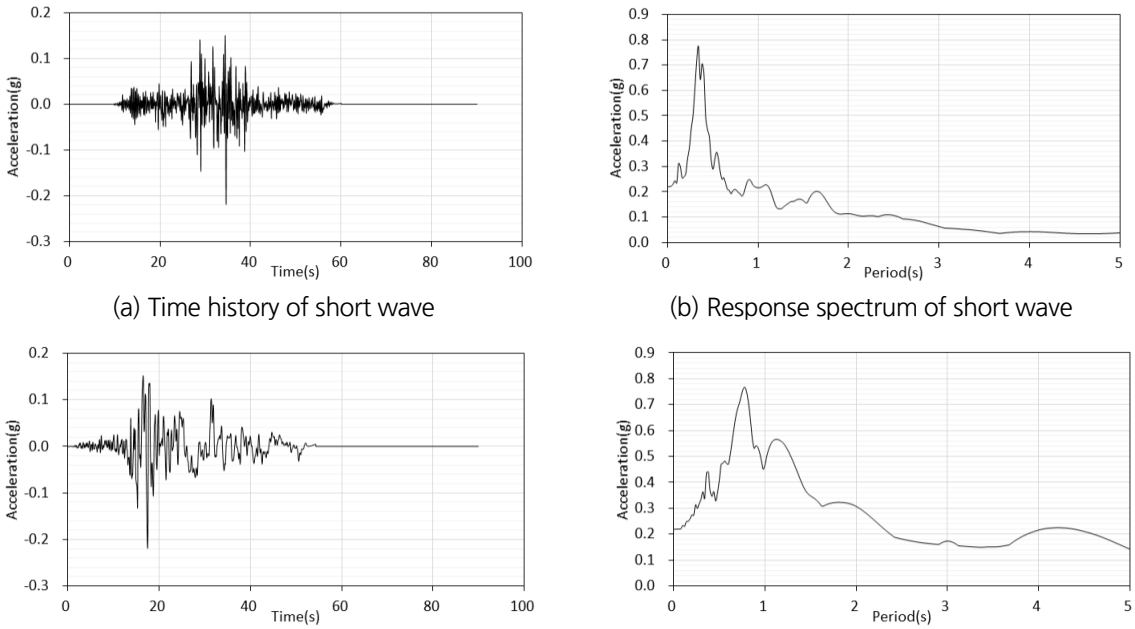
동적해석에 적용된 초고층 건물과 저층 건물은 동일한 beam 요소를 사용하여 슬래브, 벽체 그리고 기둥으로 모사되었다. 초고층 건물의 경우 하중을 더 많이 받는 하층부가 상층부보다 단면이 크게 설계되나 본 연구에서는 해석의 편의 상 부재 단면의 크기는 같다고 가정하고, Univ. of Suwon (2017)에서 제시한 물성치 및 부재 단면 크기를 참고하여 Table 3과 같이 적용하였다. 단, 부재 높이는 건물의 고유주기가 6.2초 정도가 나오도록 고유치해석을 통해 조정된 값이다.

Table 3. Properties of building structural members

Bldg.	Member	Unit weight (kN/m^3)	Elastic modulus (GPa)	Moment of inertia (m^4)	Section of area (m^2)	Height (m)	Width (m)
10F-B2	Beam	23.5	31.2	0.11	0.7	1,400	500
	Column			0.17	0.8	1,600	500
62F-B5	Beam			0.33	1	2,000	500
	Column			1.12	1.5	3,000	500

또한 건물의 자중을 고려하기 위해 철근콘크리트의 단위중량을 23.54 kN/m^3으로 적용하였으며 그 외의 활하중 및 사하중은 각각 66 kN/m^2, 146 kN/m^2으로 재하 하였다. 본 연구에서는 초고층 건물과 저층 건물이 RC 건물로 시공되었다고 가정하였다. 따라서 콘크리트 표준시방서(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2016)에서 제시한 고강도 콘크리트의 설계기준강도(σ_{ck})가 40.0 MPa인 것을 참고하여 허용 휨압축 및 인장응력을 각각 24.0, 4.0 MPa로 적용하였다(You et al., 2005).

Fig. 2는 PGA 0.22 g의 단주기와 장주기의 입력지진파로 사용된 가진 시간이 60초인 Kocaeli 파를 보여준다. 특히 Fig. 2(a), 2(c)는 각각 단, 장주기파의 가속도 이력을 보여주고, Fig. 2(b), 2(d)는 푸리에변환(Fast Fourier Transformation)을 통해 얻은 단, 장주기의 입력가속도 스펙트럼으로 탁월주기는 각각 0.3초, 0.8초임을 알 수 있다.



(a) Time history of short wave (b) Response spectrum of short wave

(c) Time history of long wave (d) Response spectrum of long wave

Fig. 2. Input seismic wave with PGA 0.22 g (Kocaeli earthquake wave)

고유치해석을 수행하기 위해 식 (3)을 적용하여 지반반력계수(K_v)를 구하고 기반암, 표층 좌·우측에 산정된 지반반력계수를 입력하고, 탄성경계를 적용하여 지반 강성이 해석 모델링에 적용되도록 하였다. 또한 지진파가 경계에 흡수되기 위하여 점성경계를 기반암 바닥, 기반암과 표층 좌·우측에 각각 식 (4)와 식 (5)를 이용하여 점성경계계수(C_p, C_s)를 적용하였다. 또한 기반면의 하부에 지진파를 입력시키기 위해 요소망 하부의 수직, 수평 방향의 변위를 구속하였다. 지반반력계수와 점성경계계수는 초고층 건물과 저층 건물에 대해 각각 지반조건 및 지층별로 산출되어 Table 4와 같이 적용하였다. 또한 감쇠비의 경우 지반, 건물 모두 0.05를 적용하였다.

Table 4. The estimation results of modulus of subgrade reaction and coefficient of viscosity boundary

Modulus of subgrade reaction K_x, (kN/m)		Low-rise building		High-rise building	
		Hard rock	Extremely hard rock	Hard rock	Extremely hard rock
Bed rock		1,922,249.1	8,148,375	1,629,944.5	5,704,805.8
Surface layer		32,548.5		25,393.5	
Coefficient of viscosity boundary (kN/m)		Hard rock	Extremely hard rock	Hard rock	Extremely hard rock
Surface layer	Cp	91.2			
	Cs	46.9			
Bed rock	Cp	1121.1	2097.4	1121.1	2097.4
	Cs	671.7	1256.7	671.7	1256.7

5. 수치해석 결과

5.1 고유치 해석

MIDAS GTS NX의 동적해석 수행 시 고유치 해석을 통하여 해석 시스템의 고유주기를 산정해야하는데, 초고층 건물과 저층 건물의 경우 Table 5와 같이 산출되었다. 초고층 건물의 경우 지반조건이 극경암(Sb1)일 때 1, 2차 모드의 고유주기는 9.2초와 2.3초이고, 경암(Sb2)일 때 10.5초와 0.5초로 산출되었다. 마찬가지로 저층 건물의 경우는 극경암(Sb1)일 때 1, 2차 모드의 고유주기는 1.5초와 0.5초이고, 경암(Sb2)일 때 1.7초와 0.3초로 산출되었다. 따라서 지반조건에 관계없이 초고층 건물의 1차 모드 고유주기와는 많이 떨어져 있지만, 2차 모드의 고유주기와는 근접하게 나타났다. 반면 저층 건물의 경우 1, 2차 고유주기는 모두 입력 가속도의 탁월주기와 가깝게 존재하는 것으로 나타났다. 참고로 건물 자체만의 고유주기를 근사적으로 구하는 식 (2)에 의해 초고층 건물과 저층 건물의 고유주기는 각각 6.2초, 1.0초로 계산되어 고유치해석으로 구한 값과 조금 작게 산출되었다. 이는 고유치 해석 시 건물과 지반을 함께 고려하였기 때문으로 판단된다.

Table 5. Building's eigenvalue period

Eigenvalue period						
Bldg. / Ground type	High-rise building (sec)		Low-rise building (sec)		Wave type	Input wave acc. (sec)
	1st mode	2nd mode	1st mode	2nd mode		
Extremely hard rock (Sb1)	9.2	2.3	1.5	0.5	SW	0.3
Hard rock (Sb2)	10.5	0.5	1.7	0.3	LW	0.8

5.2 수평변위

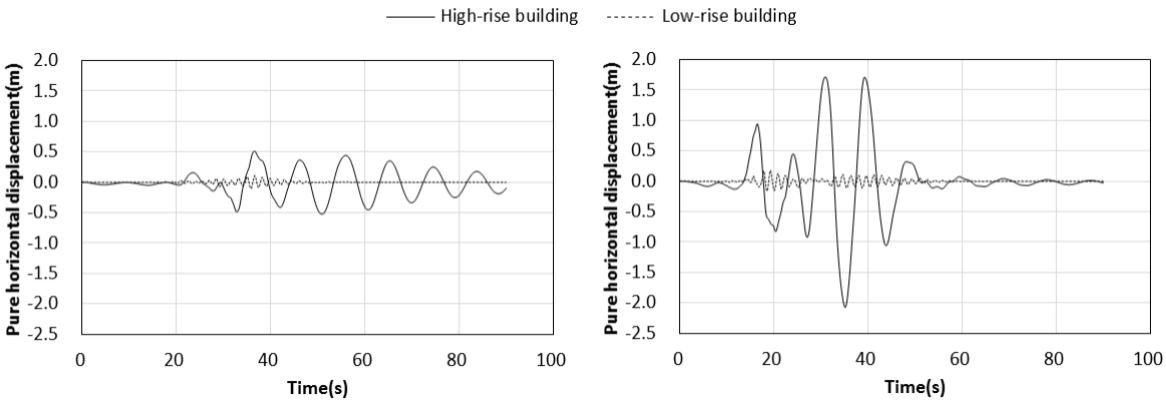
초고층 건물과 저층 건물에 대한 동적해석 시 좌측 벽체를 기준으로 건물의 수평변위를 산출하여 동적거동을 비교·분석하였다. 본 해석에서는 지반을 고려하여 해석을 수행하였기 때문에 지반 수평변위를 제외한 건물의 순수 수평변위를 Table 6과 같이 산출하고 건물 층수, 지반조건, 지진파 종류 및 크기별로 도시하였다.

Table 6. The comparison of maximum pure horizontal displacement depending on type of building

Type of building and wave	Extremely hard rock (Sb1) (cm)		Hard rock (Sb2) (cm)	
	0.154 g	0.22 g	0.154 g	0.22 g
62 story-SW	51	73	63	91
62 story-LW	171	246	182	259
10 story-SW	11	16	12	17
10 story-LW	17	25	20	29

최대 수평변위는 초고층 건물 및 저층 건물 각각 가진시간(dytime) 35, 36초일 때 발생하였고, 초고층 건물의 경우 최대 수평변위는 건물 최상단에서 259.0 cm, 저층 건물은 29.0 cm가 발생하였다. 보다 정확한 분석을 위하여 각 건물의 높이로 정규화한 최대 수평변위/m을 구하고 이를 토대로 파라미터인 건물 층수, 지반조건, 지진파 종류별로 분석하였다. 동일한 지반조건(Sb1) 및 지진파 크기(0.22 g)가 작용하고 지진파 종류가 단주기 지진파에서 장주기 지진파로 변할 때 초고층 건물의 최대 수평변위/m는 0.003에서 0.011로 약 260% 증가하였다. 또한 저층 건물은 0.004에서 0.006로 약 50% 증가하여 초고층 건물보다 증가 폭이 작은 것을 알 수 있다. 또한 지반이 연약할수록 초고층 건물과 저층 건물 최대 수평변위는 각각 43%와 45% 증가하여 지반조건보다 지진파 종류가 건물 수평변위에 더 큰 영향을 준 것으로 판단된다. 한편, PGA가 증가할수록 건물 최상단 최대 수평변위 값도 증가하는 경향을 보였다.

Fig. 3은 지진파 종류에 따른 최대 지반가속도 0.154 g가 작용할 경우 초고층 건물 및 저층 건물의 좌측 벽체를 기준으로 순수 수평변위 이력분포를 나타낸 것이다. Fig. 3(a)와 같이 단주기 지진파가 가해질 경우 순수 수평변위가 약 51 cm가 발생하였고, Fig. 3(b)와 같이 장주기 지진파가 가해질 경우 171 cm 정도 발생하였다. 저층 건물의 경우 Fig. 3(a)와 같이 단주기 지진파가 가해질 때, 건물 최상단 최대 순수 수평변위가 약 11 cm가 발생한 반면, 장주기 지진파가 가해질 경우 최대 순수 수평변위가 약 17 cm 발생하였다. 건물의 높이로 정규화한 단/장주기의 최대 수평변위 차이값/m을 구하면 초고층 건물의 경우 0.006이 산출되었다. 또한 저층 건물은 0.001이 산출되어 초고층 건물이 저층 건물 보다 지진파 종류의 영향을 더 받는 것으로 나타났다. 이는 초고층 건물의 극경암 지반인 경우 1, 2차 모드 고유주기가 9.2, 2.3초이므로 장주기 성격을 띠게 되는데, 입력 지진파의 탁월주기가 0.8초이므로 단주기 탁월주기의 0.3초보다 공진가능성이 높았기 때문이라고 판단된다.

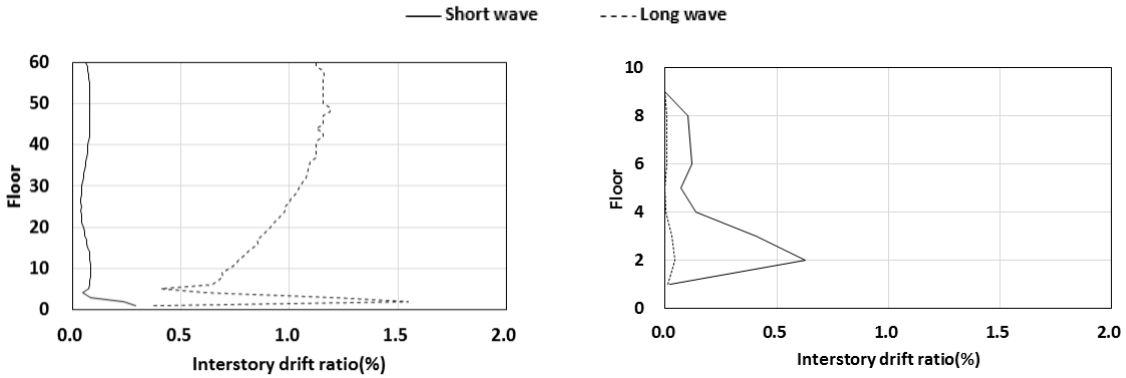


(a) Short wave (b) Long wave

Fig. 3. The comparison of pure horizontal displacement history distribution according to type of seismic wave (PGA 0.154 g, Sb1)

5.3 층간변위비

초고층 건물 및 저층 건물 지상부 좌측 벽체에서 1층 단위로 최대 수평변위가 발생하는 가진 시간 35, 36초일 때의 층간변위비 분포도를 Fig. 4에 도시하였다. Fig. 4(a)에서 보이는 바와 같이 초고층 건물의 경우, 앞서 설명한 입력지진파의 탁월주기에 의한 수평변위 발생 양상과 마찬가지로 단주기 지진파가 가해질 때 층간변위비는 최댓값이 0.3%로 발생하였지만, 장주기 지진파의 경우 1.6% 발생하여 건물에 더 영향을 주는 것으로 나타났다. 또한 단주기, 장주기 지진파 모두 최대 층간변위비가 발생한 위치는 0~5층에서 발생하여 저층부에서 취약한 것으로 나타났다. Fig. 4(b)에서 볼 수 있듯이, 저층 건물의 경우 초고층 건물과 마찬가지로 0~5층에서 최대 층간변위비가 0.6% 발생하여 취약한 것으로 나타났다. 또한 저층 건물의 층간변위비는 장주기 지진파보다 단주기 지진파의 경우 더 크게 나타났다. 따라서 단주기 지진파가 장주기 지진파보다 저층 건물에 더 영향을 주는 것을 알 수 있었다.



(a) High-rise building (b) Low-rise building

Fig. 4. The distribution of interstory drift ratio of buildings (PGA 0.154 g, Sb1)

층간변위비 분포의 경우 안정하나 초고층 건물의 경우 최대 층간변위비가 1.6% 발생하여 National Disaster Management Research Institute (2012)에서 규정한 '인명안전' 수준을 초과하여 부재의 파괴가 발생할 수 있을 것으로 판단된다. 한편, 초고층 건물 중·상부인 25~60층에서 '즉시거주' 수준 1.0%를 초과하는 것으로 나타났다.

5.4 휨응력 및 취약부

지진동 시 최대 수평변위가 발생하는 가진 시간 35, 36초에서 초고층 건물과 저층 건물의 최대 휨응력을 Table 7과 같이 산출하여 비교하였다. 두 건물의 휨응력을 분석한 결과 저층 건물의 장주기 조건(10 story-LW)의 휨압축응력을 제외한 모든 조건에서 최대 휨응력(압축, 인장)은 허용 휨응력(24 MPa, -4 MPa)을 초과하여 균열 및 파괴 발생 가능성이 큰 것으로 나타났다. 참고로 PGA가 증가할수록 휨압축 및 인장응력은 증가하는 경향을 보여 예상된 결과와 일치하는 것으로 나타났다.

Table 7. The maximum bending stress of buildings (dytime at 35, 36 seconds)

High-rise building (62 story)	Maximum bending stress (MPa)		Low-rise building (10 story)	Maximum bending stress (MPa)	
	Compression (SW/LW)	Tension (SW/LW)		Compression (SW/LW)	Tension (SW/LW)
62 story-0.154 g-Sb1	26.4 / 106.9	-22.1 / -126.4	10 story-0.154 g-Sb1	29.9 / 15.2	-32.7 / -16.6
62 story-0.154 g-Sb2	57.2 / 86.5	-42.0 / -111.1	10 story-0.154 g-Sb2	40.6 / 19.0	-61.0 / -12.1
62 story-0.22 g-Sb1	28.3 / 156.3	-28.0 / -177.4	10 story-0.22 g-Sb1	42.2 / 21.4	-45.7 / -22.7
62 story-0.22 g-Sb2	57.1 / 114.4	-43.0 / -150.6	10 story-0.22 g-Sb2	54.1 / 19.3	-61.0 / -12.1

PGA 0.154 g가 작용할 경우 초고층 건물(62 story)과 저층 건물(10 story)을 대상으로 지반조건에 따른 가진 시간 35초, 36초에서의 건물 부재의 최대 휨압축응력을 Fig. 5와 같이 도시하였다. 극경암 지반조건(Sb1)에 크기가 0.154 g인 지진파가 단주기에서 장주기로 변할 때 초고층 건물의 최대 휨압축응력은 26.4 MPa에서 106.9 MPa로 약 304.0% 증가하였다. 반면 저층 건물은 29.9 MPa에서 15.2 MPa로 약 49.0% 감소하고 초고층 건물보다 증감폭이 작은 것을 알 수 있다. 따라서 초고층 건물의 최대 휨압축응력이 단주기 지진파보다 장주기 지진파의 영향을 더 받고, 저층 건물은 그 반대인 것으로 나타났다. 또한 지반이 연약할수록 초고층 건물과 저층 건물 최대 휨압축응력은 각각 116.6%와 35.7% 증가하여 지반조건보다 지진파 종류가 건물 최대 휨압축응력에 더 큰 영향을 준 것으로 판단된다.

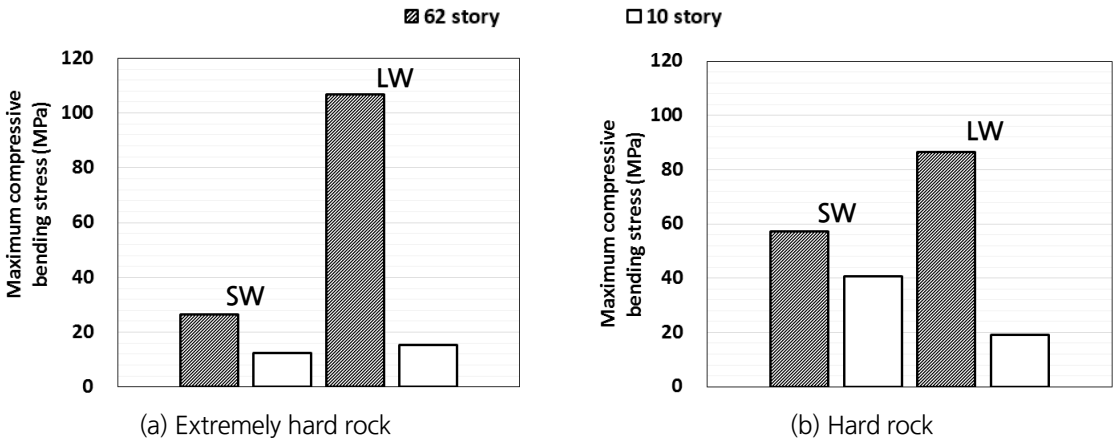


Fig. 5. Maximum compressive bending stress of structural member according to ground type (PGA 0.154 g, dytime 35, 36 sec)

한편, 초고층 건물과 저층 건물을 대상으로 지진파 종류에 따른 가진 시간 35, 36초에서의 건물 부재의 최대 휨인장응력을 Fig. 6과 같이 도시하였다. PGA가 0.154 g이고 단주기 지진파(SW)가 작용하고 지반조건이 극경암(Sb1)에서 경암(Sb2)으로 변할 때 초고층 건물의 최대 휨인장응력은 -22.1 MPa에서 -42.0 MPa로 약 90.0% 증가

하였다. 또한 저층 건물도 -32.7 MPa에서 -61.0 MPa로 약 86.5% 증가하였다. 따라서 건물의 종류에 무관하게 지반이 연약할수록 건물의 최대 휨인장응력이 증가한 것으로 나타났다. 또한 지진파가 단주기에서 장주기로 변할 때 초고층 건물의 최대 휨인장응력은 471.9% 증가하였고, 반면 저층 건물은 96.9% 감소하였다. 따라서 지반조건보다 지진파 종류가 건물 최대 휨인장응력에 더 큰 영향을 준 것으로 판단된다. 한편 초고층 건물의 경우는 장주기 지진파가, 저층 건물은 단주기 지진파가 최대 휨인장응력에 더 영향을 주는 것으로 나타났다. 참고로 PGA가 0.22 g일 경우도 휨응력값이 0.154 g의 경우와 동일한 결론이 도출되었다. 다만 휨응력값이 0.154 g의 경우에 비해 유사하거나 다소 증가하였다.

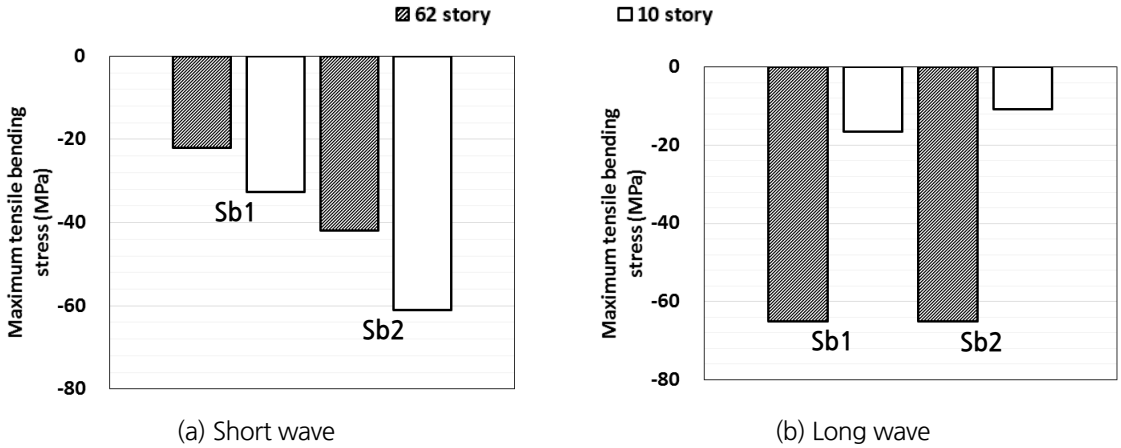
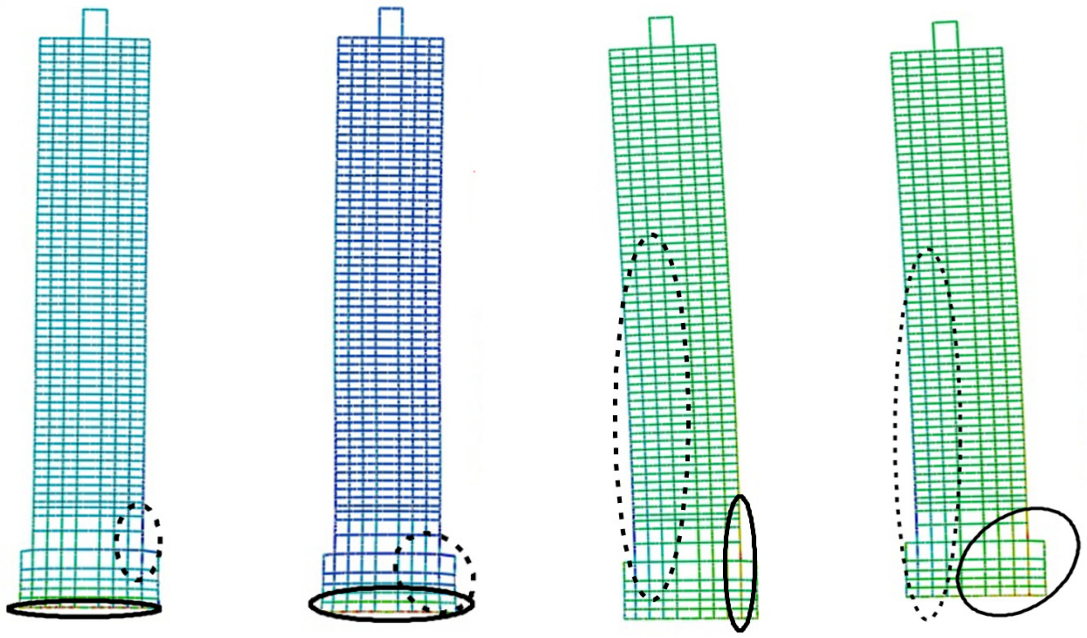


Fig. 6. Maximum tensile bending stress of structural member according to seismic wave type (PGA 0.154 g, dytime 35, 36 sec)

Fig. 7과 같이 최대 지반가속도가 0.154 g이고, 가진 시간 35초일 때 지진파 종류 및 지반조건별로 초고층 건물의 휨압축응력 분포도를 도시하였다. 또한 허용값(압축 24 MPa, 인장 -4 MPa)을 넘는 휨압축응력의 취약부는 검은색 실선 타원으로, 휨인장응력의 취약부는 검은색 점선 타원으로 표시하였다. Fig. 7(a)에서 보는 바와 같이 극경암(Sb1) 지반에 단주기 지진파(SW)가 작용할 경우, 압축 및 인장응력에 대한 취약부는 각각 지하 5층 슬래브와 지상 우측 벽체에서 발생하였다. Fig. 7(b)에서와 같이 단주기 지진파가 작용하고 지반조건이 경암(Sb2)으로 상대적으로 연약해질 때, 휨압축응력의 취약부는 지하부 5층 슬래브에서 지하 4, 5층 슬래브로 확대되고, 휨인장응력은 우측 지상 저층 벽체에서 지하부 우측 벽체 및 기둥으로 확대되어 나타났다. 한편 지진파가 단주기에서 장주기로 변할 때 휨압축응력은 우측 지하부에서 지상 저층부로, 휨인장응력은 좌측 지하부에서 지상 중·상층까지 확대되었다.

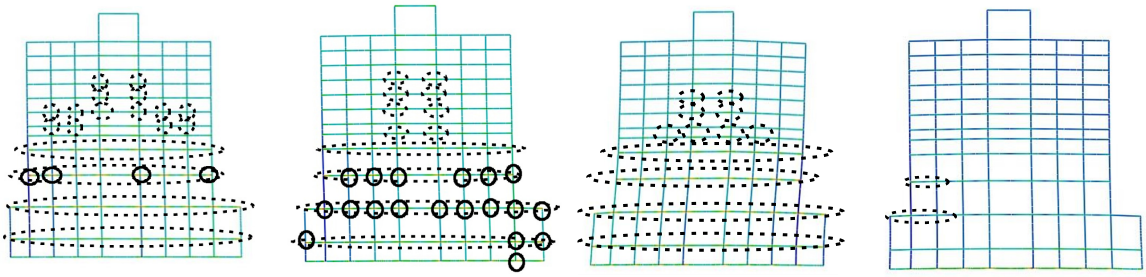
따라서 초고층 건물의 취약부는 지반조건이 연약할수록, 장주기파가 작용할수록 확대되어 단주기파보다 영향을 더 받는 것으로 나타났다. 또한 지반조건보다는 지진파의 종류가 취약부에 미치는 영향이 상대적으로 더 큰 것을 알 수 있었다.



(a) Short wave, Sb1 (b) Short wave, Sb2 (c) Long wave, Sb1 (d) Long wave, Sb2

Fig. 7. Bending stress distributions of high-rise building (dytime 35 sec, PGA 0.154 g)

Fig. 8은 최대 지반가속도가 0.154 g이고 가진 시간이 36초일 때 지진파 종류 및 지반조건에 따라 저층 건물의 휨압축응력 분포도를 나타낸 것이다. Fig. 8(a)와 같이 단주기 지진파가 작용하고 지반조건이 극경암(Sb1)일 때 휨압축응력의 취약부는 지상부 1층 기둥과 슬래브 접속부에서, 휨인장응력은 지하부와 지상 저층부의 슬래브에서 발생하였다. Fig. 8(b)에서와 같이 단주기 지진파가 작용하고 지반조건이 경암(Sb2)으로 변할 때 휨인장응력은 확대되지 않고 유사하게 발생한 반면, 휨압축응력의 취약부는 지상 1층 슬래브와 기둥 및 벽체의 접속부에서 지하 1층 슬래브와 기둥의 접속부로 확대되었다. 한편, Fig. 8(c)에서와 같이 극경암 지반조건에서 지진파가 장주기로 변할 때 휨압축응력의 취약부는 발생하지 않았고 휨인장응력의 취약부는 지하부와 지상 중간부의 슬래브에서 발생하였다. 또한 Fig. 8(d)에서 보는 바와 같이 경암 지반조건에서 장주기 지진파가 작용할 때 휨압축응력의 취약부는 발생하지 않은 반면, 휨인장응력의 취약부는 단주기 지진파가 작용하는 경우에 비해 지상 좌측 1, 2층 슬래브로 축소되었다. 결과적으로 지반조건이 상대적으로 극경암에서 경암 조건으로 연약해졌음에도 불구하고 취약부의 범위가 주는 것으로 나타났다. 이는 저층건물의 경우 건물높이가 높지 않아 지반이 연약할수록 완충작용으로 인해 건물의 휨응력이 오히려 작게 발생한 것으로 판단된다. 전체적으로 볼 때 저층건물의 취약부는 장주기 지진파보다 단주기 지진파의 영향을 더 받는 것을 알 수 있었다.



(a) Short wave, Sb1 (b) Short wave, Sb2 (c) Long wave Sb1 (d) Long wave Sb2

Fig. 8. Bending stress distributions of low-rise building (dytime 36 sec, PGA 0.154 g)

6. 결 론

본 연구에서는 지반 범용 프로그램인 MIDAS GTS NX를 이용하여 초고층 건물 및 저층 건물의 동적거동을 비교·분석하기 위하여 지반과 건물을 함께 고려하는 SSI를 고려한 동적해석을 수행하고 파라미터별로 민감도 분석을 실시하였다.

1. 건물의 수평변위는 지반이 연약할수록 증가하고, 지반조건보다 지진파 종류에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 특히, 초고층 건물의 수평변위는 저층 건물의 경우보다 장주기 지진파의 영향을 더 받는 것으로 나타났다.
2. 층간변위비를 기준으로 볼 때, 초고층 건물의 경우 장주기 지진파가 단주기 지진파보다 건물에 더 영향을 주는 반면, 저층 건물의 경우는 단주기 지진파가 더 영향을 주는 것으로 나타났다. 또한 단주기 및 장주기 지진파 모두 0~5층의 저층부에서 최대 층간변위비가 발생하여 취약한 것으로 나타났다.
3. 지진파 크기에 상관없이 초고층 건물의 최대 휨응력이 단주기 지진파보다 장주기 지진파의 영향을 더 받고, 저층 건물은 그 반대인 것으로 나타났다. 최대 휨압축응력은 지반조건보다 지진파의 종류에 영향을 더 받는 반면, 최대 휨인장응력은 그 반대인 것으로 나타났다.
4. 초고층 건물의 취약부는 단주기 지진파보다 장주기 지진파의 영향을 더 받는 것으로 나타났다. 반면 저층건물의 취약부는 장주기 지진파보다 단주기 지진파의 영향을 더 받는 것을 알 수 있었다. 한편 지반조건보다는 지진파의 종류가 취약부에 미치는 영향이 상대적으로 더 큰 것을 알 수 있었다.

종합적으로 판단할 때, 초고층 건물의 경우는 장주기 지진파에, 저층 건물의 경우는 단주기 지진파에 더 취약한 것을 알 수 있었다. 따라서 지반조건 및 지진파 종류의 건물에 미치는 영향을 참조하면 건물의 내진설계에 도움이 될 것으로 판단된다. 다만 내진보강을 위한 부재의 전단벽체를 고려하지 않고 단순히 보와 슬래브로 이루어진 RC 구조물로 한정하였기 때문에, 향후 SSI 동적해석 시 지반조건과 지진파 종류뿐만 아니라 부재의 내진보강도 함께 고려하여 연구를 수행하면 보다 현실적인 해석이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2016년 정부(미래창조과학부)의 재원으로 국가과학기술연구회 융합연구단 사업(No. CRC-16-02-KICT)의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

1. Architectural Institute of Korea (2009), Korea building code, pp. 527.
2. Jung, H.C., Jung, J.S., Kim, S.G., Lee, B.G., Lee, K.S. (2017), "Middle · low layer RC school building by the Gyeongju earthquake damage analysis", Proceedings of the 2017 Spring Conference of the Architectural Institute of Korea, JeJu,, Vol. 37, No. 1, pp. 627-628.
3. Kim, D.G. (2013), Dynamics of structures, Goomibook, Seoul, pp. 779.
4. Kim, Y.M., Jeong, S.S., Kim, K.Y., Lee, Y.H. (2011), "A study on the dynamic behavior of vertical shaft in multi-layered soil", Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 31, No. 4, pp. 109-116.
5. Lysmer, J., Kuhlemeyer, R.L. (1969), "Finite dynamic model for infinite media", Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 95, No. 4, pp. 859-877.
6. Lysmer, J., Udaka, T., Tsai, C., Seed, H.B. (1975), FLUSH: A computer program for approximate 3-D analysis of soil-structure interaction problems, Rep. No. EERC 75-30, University of California, Berkeley, California, pp. 276.
7. Lysmer, J., Tabatabaie-Raissi, R., Tajirian, F., Vahdani, S., Ostadan, F. (1981), SASSI: A system for analysis of soil-structure interaction, Rep. No. UBC/GT/81-02, University of California, Berkeley, California, pp. 54.
8. MIDAS Information Technology Co. (2012), MIDAS civil user manual, MIDAS Information Technology Co., Korea, pp. 551.
9. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2016), Concrete standard specification, pp. 358.
10. National Disaster Management Research Institute (2012), Development of the public buildings emergency integrity assessment technology using seismic acceleration response signal, National Disaster Management Research Institute, pp. 304.
11. Seoul Metropolitan Government (2006), Ground investigation manual, Seoul Metropolitan Government, pp. 130.
12. Sun, C.G. (2017), "Seismological and geotechnical characteristics of the 12 september 2016 Gyeongju earthquake", The Magazine of The KSCE, Vol. 65, No. 4, pp. 14-19.
13. University of Suwon (2017), Development of a behavior prediction model by interaction of underground complex facilities for ground vibration, The 2016 Commission Research Report of Multi-Disaster Countermeasures Organization, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, pp. 133.
14. You, K.H., Kim, S.J. (2018), "A validity study on SSI analysis by comparing the complete system model and the underground structure fixed-end model", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 20, No. 5, pp. 757-772.
15. You, K.H., Park, Y.J., Hong, K.Y., Lee, H.K., Kim, J.K. (2005), "Numerical estimation for safety factors of tunnels considering the failure of supports", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 7, No. 1, pp. 37-49.