

연속체 모델에 기초한 SSI 동적해석 시 지진파 탁월주기가 초고층 건물에 미치는 영향

Influence of Predominant Periods of Seismic Waves on a High-rise Building in SSI Dynamic Analyses with the Complete System Model

유 광 호[†] · 김 주 형¹⁾ · 김 승 진²⁾

Kwangho You · Juhyong Kim · Seungjin Kim

Received: September 3rd, 2019; Revised: September 27th, 2019; Accepted: November 28th, 2019

ABSTRACT : Recently in Korea, researches on seismic analyses for high-rise buildings in a large city have been increasing because earthquakes have occurred. However, the ground conditions are not included in most of seismic researches and analyses on a high-rise building. Also the influence of the predominant period of a seismic wave is not considered in reality. Therefore, in this study, the influence of the predominant period of a seismic wave on the dynamic behavior of high-rise buildings was analyzed based on the complete system model which can consider the grounds. For this purpose, 2D dynamic analyses based on a linear time history analysis were performed using MIDAS GTS NX, a finite-element based program. Dynamic behavior was analyzed in terms of horizontal displacements, drift ratios, bending stresses, and building weak zones. As a result, in overall, the dynamic response of a high-rise building become bigger as the predominant period of a seismic wave become longer. It was also found that the predominant period had a greater influence than other parameters, ground conditions and peak ground acceleration.

Keywords : High-rise building, Predominant period, Dynamic behavior, SSI

요 지 : 최근 우리나라에서 지진이 발생하여 대도시의 초고층 건물의 내진연구가 증가하고 있다. 하지만 대부분의 초고층 건물의 내진연구 및 해석은 지반을 간접적으로 고려하고 있다. 또한 지진파 탁월주기의 영향이 거의 고려되고 있지 않는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 지진파 탁월주기가 초고층 건물 동적거동에 미치는 영향이 지반을 고려하는 연속체 모델을 적용하여 분석되었다. 이를 위해 유한요소기반의 수치해석 프로그램인 MIDAS GTS NX를 사용하여 선형시간이력해석을 적용한 2D 동적해석을 수행하였다. 또한 동적거동 분석을 위해 수평변위, 층간변위비, 휨응력 및 건물 취약부를 이용하였다. 연구 결과, 전반적으로 초고층 건물은 지진파 탁월주기가 길어질수록 더 큰 동적반응이 발생하였다. 또한 지진파 탁월주기가 다른 파라미터인 지반조건, 지진파 크기보다 더 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

주요어 : 초고층 건물, 탁월주기, 동적거동, SSI

1. 서 론

2011년 동일본대지진에서는 진원지로부터 400km 이상 떨어져 있는 대도시인 도쿄의 초고층 건물에서 큰 진동이 관측되었다. 지진으로 인하여 건물의 구조부재에 피해는 발생하지 않았지만 내·외장재, 설비시설 등의 비구조 부재에 피해가 발생하였다. 이는 진원으로부터 거리가 멀어질수록 전달된 지진파가 장주기화되는 경향을 보이기 때문인 것으로 판단되었다(백중훈과 오상훈, 2014). 한편 지진에 안전하다고 알려진 우리나라의 경우 최근 경주 및 포항에서 규모 5.8의 지진이 발생하여 건물 내진설계에 관한 연구가 활

발히 진행되었다.

초고층 건물을 대상으로 유광호와 김승진(2018)은 MIDAS GEN(MIDAS Information Technology Co., 2009) 및 MIDAS GTS NX(MIDAS Information Technology Co., 2016) 프로그램을 이용하여 지반-구조물 상호작용(Soil-Structure-Interaction, SSI)을 고려한 동적해석의 타당 성을 검증하였다. 이를 위해 건물 자체만 고려된 지하구조물 고정단 모델(PEER, 2017) 과 건물과 지반을 함께 고려하는 연속체 모델의 초고층 건물의 동적거동을 비교·분석하였다. 그 결과 지반을 고려하는 연속체 모델을 사용하여 SSI를 고려하는 것이 타당하다고 주장하였다. 하지만 지진파의 탁월주기가 건물의 동적거

† Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Suwon (Corresponding Author : khyou@suwon.ac.kr)

1) Research Fellow, Ph.D., Multi-Disaster Mitigation Research Group, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

2) Graduate student, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Suwon

동에 미치는 영향에 관한 연구는 미흡한 실정이다.

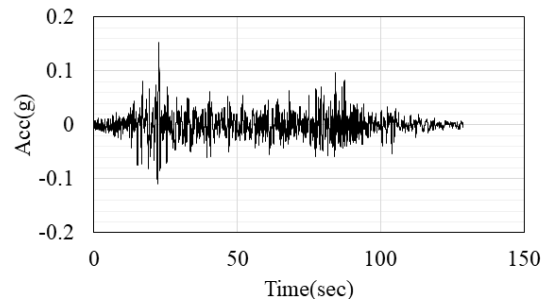
따라서 본 연구에서는 초고층 건물을 대상으로 최대 가속도가 일정한 탁월주기를 갖는 계측지진파를 이용하여 건물의 동적거동에 미치는 영향을 비교·분석하고자 하였다. 이를 위해 국내 OO 초고층 건물(Univ. of Suwon, 2017)을 대상으로 지반을 고려하는 연속체 모델이 적용되었다. 건물은 지상 62층, 지하 5층으로 기반암 위에 시공되고 지하부 주위에는 표층이 존재하는 것으로 가정하였다. 이후 기반암 하단에 지진파를 입력하고 유한요소 수치해석 프로그램인 MIDAS GTS NX를 이용하여 동적해석 중 선형시간이력해석을 실시하였다. 그 후 지반조건, 지진파 탁월주기, 지진파 크기를 기준으로 민감도 분석을 실시하였다.

한편 지진파 탁월주기를 파라미터로 선정하기 위해 동일한 가속도를 유지하면서 4가지의 다른 탁월주기를 갖는 지진파를 생성하였다. 지반조건은 경우 극경암, 경암, 연암 3가지를 선정하였다. 또한 지진파 크기는 재현주기 1,000년과 2,400년에 해당되는 최대 지반가속도인 0.154g와 0.22g 2가지를 산정하였다. 선형시간이력해석을 수행하기 위해 건물과 지반 전체 시스템에 대한 고유치 해석을 통하여 탁월주기를 구하였다. 동적해석 수행 후 발생하는 수평변위, 층간변위비, 휨응력, 건물 취약부 위치 및 범위를 분석하였다.

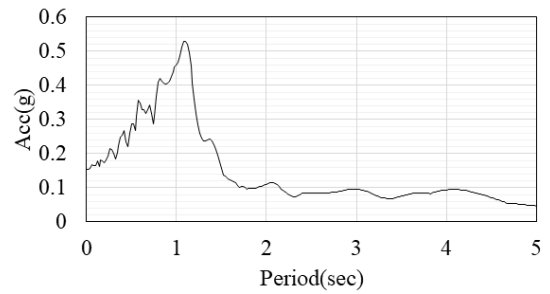
2. 지진파 가속도 이력 생성

본 연구에서는 지진파 탁월주기가 초고층 건물 동적거동에 미치는 영향을 분석하고자 최대 가속도는 일정하지만 탁월주기가 다른 지진파들이 필요하다. 하지만 인공지진파의 생성을 통해서 원하는 지진파들을 얻기가 어렵다. 대신 하나의 실제 계측된 지진파를 사용하고 측정 시간간격을 조절하면 가능하다.

이를 위해 1985년에 멕시코에서 발생한 Mexico-VILE를 입력지진파로 선정하였다. 당초 계측된 지진파는 총 지속시간은 128초이고 측정시간간격은 0.01초, 탁월주기는 1.0초, 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration, PGA)는 0.12g로 기록되었다. 지진파 크기의 영향을 고려하기 위해 재현주기 1,000년 및 2,400년(국토교통부, 2018)에 해당되는 PGA 0.154g 및 0.22g로 스케일을 맞춰 지진파를 생성하였다. Fig. 1은 0.154g의 가속도 시간이력 및 푸리에 스펙트럼을 나타낸 것이다. 이후 시간간격을 0.005, 0.015, 0.018초로 수정하면 Fig. 2와 같이 지속시간이 각각 64초, 193초, 230초인 탁월주기 0.5초, 1.5초, 2.0초 지진파를 생성할 수 있다. Fig.

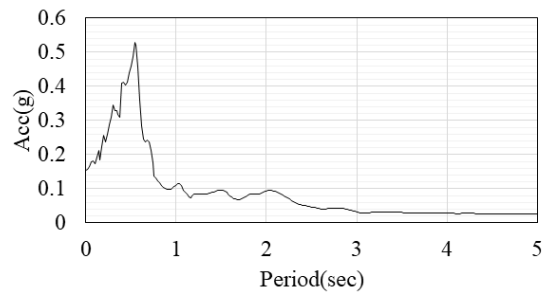


(a) Time history

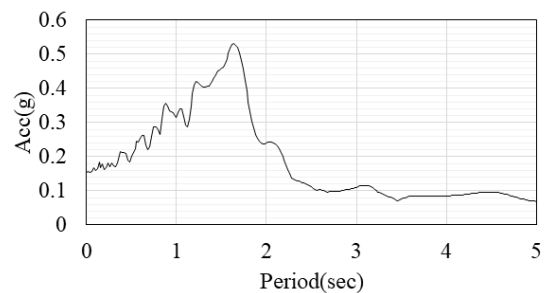


(b) Acceleration response spectrum (predominant period 1.0 sec)

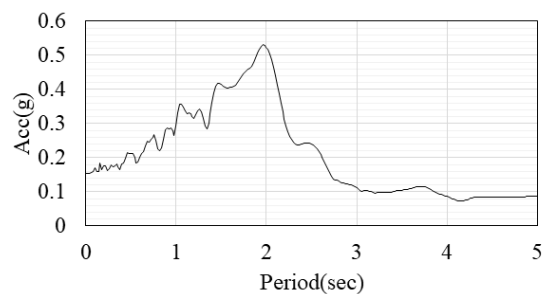
Fig. 1. Mexico-VILE input seismic wave



(a) Predominant period 0.5 sec



(b) Predominant period 1.5 sec



(c) Predominant period 2.0 sec

Fig. 2. Mexico-VILE response spectrum by predominant period

2에서 보듯이 지진파는 탁월주기와 관계없이 동일한 진폭인 약 0.5g의 최대 가속도를 가지게 된다.

3. 2D 해석을 위한 수치 모델링

3.1 부재 단면 크기 산정

본 연구는 지진파 탁월주기가 초고층 건물 동적거동에 미치는 영향을 분석하기 위해 2D 동적해석을 수행하고자 하였다. 이를 위해 Fig. 3과 같이 실제 시공된 국내 OO 건물의 3D 해석단면을 이용하였다. 고유치해석을 실시한 결과 고유주기는 약 5.6초로 산정되어 건물 층수를 이용한 고유주기 약산식(국토교통부, 2016a)으로 산출된 6.7초와 유사하게 나타났다. 반면 3D 해석 단면의 부재 크기를 단순히 2D 해석에 그대로 적용하고 고유치해석을 실시하게 되면 고유주기가 약 17.9초로 산출되어 동적해석의 결과를 신뢰할 수 없다(하익수, 2011).

또한 2D 해석의 경우 건물의 z축 방향을 기준으로 평면 변형률 조건이 적용되어 3D 및 2D 동적해석의 차이가 발생한다. 따라서 2D 해석단면 크기를 재산정하는 과정이 필요하다. 이를 위해 부재단면 크기를 변화시켜가며 고유주기가 같아지도록 역해석을 수행한 결과, 보(Beam)와 기둥(Column)의 높이(H) 및 폭(B)이 Table 1과 같이 결정되었다.

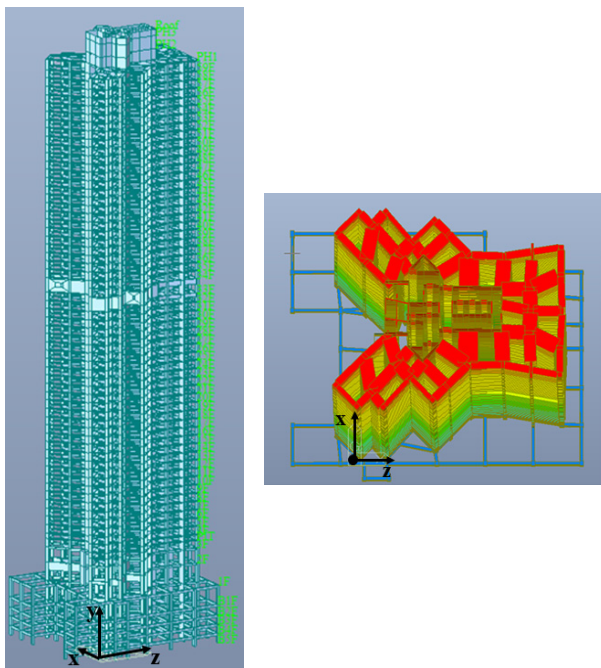
Table 1. The calculation of member size for predominant period in 2D analysis

Original 3D section			Converted 2D section		
Beam (mm)	Column (mm)	Predominant period (sec)	Beam (mm)	Column (mm)	Predominant period (sec)
H: 2,150 B: 500	H: 1,500 B: 800	17.9	H: 2,000 B: 500	H: 3,000 B: 500	6.67

3.2 요소망 생성 및 해석 영역 결정

본 연구에서는 지반 범용 해석 프로그램인 MIDAS GTS NX를 이용하여 2D 해석 시 연속체 모델을 고려한 초고층 건물의 동적거동을 지진파 탁월주기에 따라 비교·분석하고자 하였다. 이를 위해 Fig. 4와 같이 62층 초고층 건물은 지표면으로부터 22m 깊이의 풍화토층에 건물 지하부가 있는 것으로 하였다. 초고층 건물의 지상부 높이는 코어부 11.7m를 더한 212.5m로 하였으며 층고는 1~2층 7.2m, 2~3층 5.8m, 그 외의 경우 3.2m로, 건물 지하부 폭(width, W)은 총 51m로 적용하였다.

지반을 고려하는 SSI 연속체 모델을 적용하기 위해 해석 영역은 지진파가 요소망 좌·우측 및 바닥에서 반사되어 건물에 미치지 않도록 건물 좌·우측 벽체로 건물 폭의 4배, 건물 지하 바닥을 기준으로 3배만큼 적용하였다(김재민 등, 2009).



(a) 3D analysis mesh (b) Sectional view

Fig. 3. 3D Modeling for a OO high-rise building

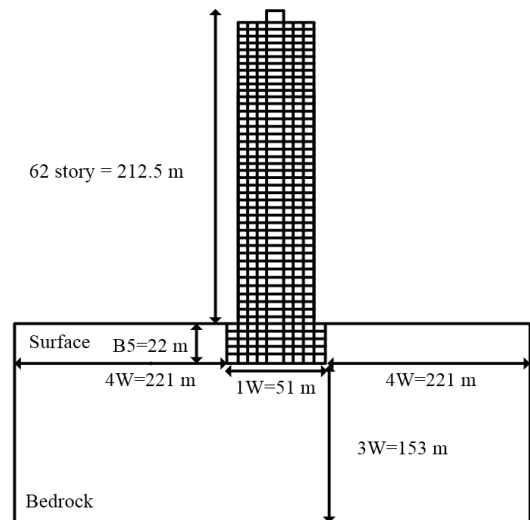


Fig. 4. The analysis section of the 62 story high-rise building

3.3 적용 물성치 및 해석 조건

본 연구에서는 지진파 규모, 지진파 탁월주기, 지반조건에 대한 민감도 분석을 실시하고 2D 해석 초고층 건물에 대해 동적거동을 파악하고자 하였다. 이를 위해 지진파 탁

월주기(predominant period) (0.5, 1.0, 1.5, 2.0초) (4 가지) × 지진파 크기(PGA) (0.154g, 0.22g) (2 가지) × 지반조건(극경암(extremely hard rock, E.H.R.), 경암(hard rock, H.R.), 연암(soft rock, S.R.)) (3 가지) 총 24 경우를 선정하였다.

본 해석에 적용한 표층과 기반암은 서울특별시(2006)에서 제공한 자료를 참고하여 각각 풍화도와 극경암, 경암, 연암을 적용하였다. 종합적으로 본 연구에 사용된 지반 물성치는 Table 2와 같다. 그리고 축압계수는 표층과 기반암 모두 1.0을 적용하였으며, Mohr-Coulomb 파괴기준을 적용하였다. 또한 지반, 건물 모두 Rayleigh 감쇠를 기준으로 0.05의 감쇠비를 적용하였다. 한편, 본 연구에서는 지반과 건물이 일체로 거동하는 것으로 가정하기 위해 접촉을 모사하는 경계요소(interface element)를 고려하지 않았다. 동적해석에 적용된 초고층 건물은 동일한 beam 요소를 사용하여 슬래브, 벽체 그리고 기둥으로 모사되었다. 부재의 물성치는 Table 3과 같이 적용하고 지상, 지하부 관계없이 동일하게 적용하였다.

또한 건물의 자중을 고려하기 위해 철근콘크리트의 단위중량을 23.54kN/m³으로 적용하였으며 그 외의 활하중 및 사하중은 각각 66kN/m² 및 146kN/m²으로 가하였다. 초고층 건물은 RC 건물로 가정하였기 때문에 콘크리트 표준시방서(국토교통부, 2016b)에서 제시한 고강도 콘크리트의 설계기준강도(σ_{ck})를 40.0MPa로 가정하였다. 따라서 최대 허용 휨압축 및 인장응력을 각각 24.0 및 -4.0MPa로 적용하였다(유광호 등, 2005).

Table 2. Ground properties

Ground type	Extremely hard rock	Hard rock	Soft rock	Weathered soil (surface)
Unit weight (kN/m ³)	27	26	24	19
Cohesion (MPa)	6	2	1	0.05
Friction angle (°)	45	40	37	28
Elastic modulus (GPa)	14	4	1	0.03
Poisson's ratio	0.2	0.2	0.25	0.32
Shear wave velocity (m/s)	1,500	800	404	77

Table 3. Properties of building structural members

Member	Beam	Column
Unit weight (kN/m ³)	23.5	
Elastic modulus (GPa)	31.2	
Moment of inertia (m ⁴)	1.1	0.3
Section of area (m ²)	1	1.5

4. 고유치해석

동적해석을 수행하기 위해서는 1, 2차 고유모드에 대한 고유주기가 필요하다(김중성 등, 2017). 따라서 지반을 고려한 건물-지반 전체 시스템에 대해 고유치해석을 수행하였다. 이를 위해 기반암과 표층 좌·우측 및 바닥면에 지반 반력계수를 구하고 해당 부분에 탄성경계를 적용하여 고유치해석을 수행한 결과, Table 4와 같이 정리되었다.

Table 4. The results of eigenvalue analyses

Ground type	Mode shape	Mass participation factor (%)	Predominant period (sec)
Extremely hard rock	1	24.1	9.2
	2	7.9	2.3
Hard rock	1	25.7	10.5
	2	14.1	0.5
Soft rock	1	29.3	12.8
	3	19.5	2.1

지반이 연약할수록 질량참여율은 약 34.4% 증가하였고 1차 모드의 경우 탁월주기는 18% 증가하는 경향을 보였다. 이는 지반이 연약할수록 단위중량은 작아지고 이로 인해 전체 진동에서의 참여하는 비율인 질량참여율은 감소하게 되지만 반대로 건물의 경우 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 각 1, 2차 모드는 극경암, 경암 지반조건일 때 1, 2차 형상을 나타냈으나 연암 조건일 때 1, 3차 형상이 나타나 지반이 연약해질수록 모드형상은 증가하는 것으로 판단된다.

5. 탁월주기에 따른 동적거동 분석

지반-구조물 상호작용을 고려한 초고층 건물의 동적거동을 파악하기 위하여 지진파 크기, 지반조건, 지진파 종류별로 비교·분석하였다. 층간변위비 및 휨응력은 최대 수평변위 발생 가진시간 때에서 계산되었다.

5.1 변위 발생 분석

초고층 건물의 변위 발생 양상을 최대 수평변위와 층간 변위비(drift ratio)를 사용하여 살펴보았다. 이 때 변위는 지하 바닥면과 접하고 있는 지반의 수평변위를 제외한 건물의 순수 수평변위(이하 ‘최대 수평변위’)를 이용하였다. 최대 수평변위가 발생하는 가진시간은 지진파 탁월주기가 0.5초 일 때 지반조건 (극경암/경암/연암)별로 각각 12.0/10.0/17.0

초, 1.0초인 경우 29.0/30.0/28.0초, 1.5초는 44.0/102.0/46.0초, 2.0초일 때 61.0/42.0/53.0초로 발생하였다. 따라서 지진파 탁월주기가 증가할수록 최대 수평변위의 발생 가진시간은 증가하는 경향을 보였다. 또한 최대 수평변위 및 층간변위비는 Table 5와 같이 정리되었다.

Table 5로부터 탁월주기 0.5초이고 PGA 0.22g일 때 지반이 극경암에서 경암으로 연약해질수록 최대 수평변위 및 층간변위비는 각각 32.5→50.1, 0.19→0.32로 증가하여, 각각 54% 및 68% 증가하였다. 탁월주기 4가지 및 PGA 2가지의 총 8 경우에 대해 각각 23.6% 및 20.3% 증가하였다. 마찬가지로 경암에서 연암으로 연약해질수록 각각 39.2% 및 34.0% 증가하였다. 전체적으로 지반조건이 연약해질수록 각각 31.4% 및 23.8% 증가하였다.

지진파 탁월주기가 0.5초이고, 경암 지반조건에서 지진파 크기가 증가할 때 최대 수평변위 및 층간변위비는 각각 35.0→50.1, 0.22→0.32로 43.1% 및 45.5% 증가하였다. 탁월주기 4가지 및 지반조건 3가지의 총 12 경우에 대해 각각 43.0% 및 42.9% 증가하였다. 마찬가지로 극경암 및 연암에서는 최대 수평변위/층간변위비는 각각 43.0%/40.2% 및 42.3%/42.1%로 증가하였다. 지진파 크기가 커질수록 각각 전체 평균 42.8% 및 43.4%의 증가율을 보였다. 한편 PGA 0.22g이고 극경암 지반에서 탁월주기가 0.5초에서 1.0초로

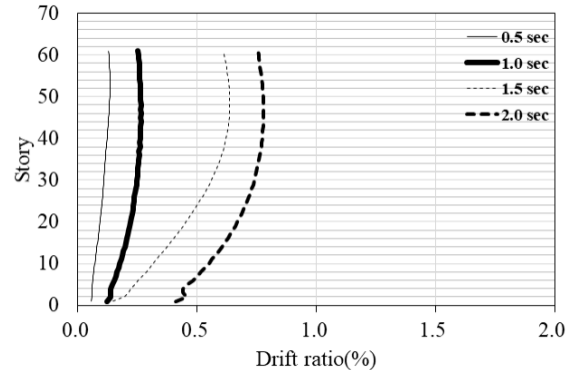
증가할 때 최대 수평변위 및 층간변위비는 각각 32.5→84.6, 0.19→0.38로 증가하여, 각각 160% 및 100% 증가하였다. 지반조건 3가지 및 지진파 크기 2가지의 총 6가지 경우에 대해 각각 101.6% 및 77.5% 증가하였다. 마찬가지로 1.0초에서 1.5초 및 1.5초에서 2.0초로 증가하는 경우 최대 수평변위/층간 변위비는 각각 87.0%/97.9% 및 23.9%/4.5%로 나타났다. 전체 경우에 대해 평균을 구하면 최대 수평변위 및 층간변위비는 각각 70.8% 및 57.0%로 증가하였다.

종합적으로 판단할 때, 탁월주기가 증가할 때 건물 탁월주기와 근접해지면 공진가능성이 증가되기 때문에 최대 수평변위 및 층간변위비의 증가율은 다른 파라미터보다 크게 발생하여 더 영향을 주는 것으로 나타났다.

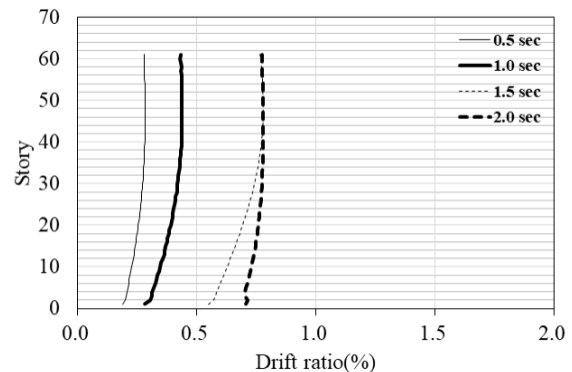
지진파 탁월주기별 초고층 건물의 취약층 발생 경향을 분석하고자 하였다. Fig. 5와 같이 지반조건이 극경암 및 연암일 때, PGA 0.154g의 경우를 예시로 각 층별로 층간변위비 분포를 도시하였다. 이때 층간변위비 분포가 (-)부호를 나타내게 되면 (+)부호로 바꾸어 표기하였다. 전반적으로 건물 변형 형상은 모든 경우에서 2차 거동을 보였다. Fig. 5(a)에서 보듯이, 지진파 탁월주기가 1.5초인 경우 25층 이상에서 '즉시거주(IO)' 0.5%를 초과하였다. 반면 2.0초일 때 5층 이상에서 초과하여 지진파 탁월주기가 증가할수록

Table 5. The comparison of the building displacement analysis by predominant periods

Predominant period (sec)	Maximum values	PGA (g)	Ground type		
			Extremely hard rock	Hard rock	Soft rock
0.5	Horizontal displacement (cm)	0.154	22.6	35.0	64.0
		0.22	32.5	50.1	90.1
	Drift ratio (%)	0.154	0.14	0.22	0.28
		0.22	0.19	0.32	0.40
1.0	Horizontal displacement (cm)	0.154	59.3	71.0	89.5
		0.22	84.6	101.5	127.8
	Drift ratio (%)	0.154	0.27	0.40	0.44
		0.22	0.38	0.57	0.62
1.5	Horizontal displacement (cm)	0.154	120.0	118.9	171.1
		0.22	171.3	169.9	244.4
	Drift ratio (%)	0.154	0.64	0.46	0.78
		0.22	0.91	0.65	1.11
2.0	Horizontal displacement (cm)	0.154	143.0	173.0	182.9
		0.22	204.3	247.6	261.2
	Drift ratio (%)	0.154	0.78	0.71	0.78
		0.22	1.11	1.01	1.11



(a) Extremely hard rock

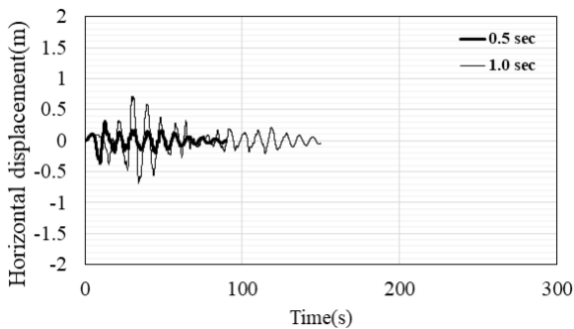


(b) Soft rock

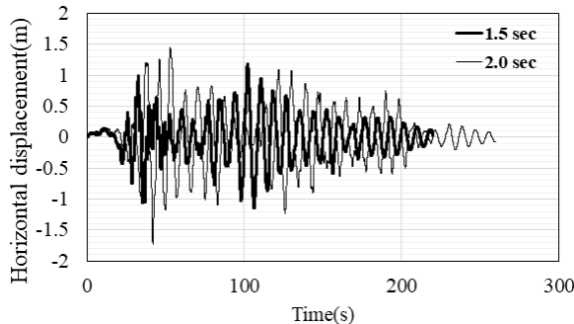
Fig. 5. The distributions of drift ratios by ground types (PGA=0.154g)

취약한 층이 늘어났다. 또한 Fig. 5(b)와 같이 지진파 탁월 주기가 1.5초 및 2.0초일 때 모든 층에서 층간변위비는 허용 기준을 초과하였다. 한편 지반조건이 극경암에서 연암으로 연약해질수록 허용 기준을 초과되는 층이 저층부로 확대되었다. 이는 지반이 연약할수록 수평변위가 증가하고 수평변위로 계산된 층간변위비도 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 취약층은 40~50층인 상층부에서 발생하여 다른 층에 비해 취약한 것으로 나타났다. 종합적으로 분석하면 층간변위비 분포는 지진파 탁월주기가 장주기일수록, 지반이 연약할수록 허용 기준을 초과하는 층이 증가하였고 취약한 부분은 건물 상층부인 것으로 나타났다.

Fig. 6과 같이 초고층 건물을 대상으로 경암 지반조건 및 PGA 0.154g일 때 건물 최상단 좌측 벽체의 순수 수평변위 이력을 지진파 탁월주기별로 도시하였다. Fig. 6(a)에서 초고층 건물의 탁월주기가 0.5초 및 1.0초인 지진파가 가해지는 경우 각각 가진시간 10초와 12초일 때, 최대 수평변위는 35cm와 71cm가 발생하였다. 또한 1.5초 및 2.0초의 경우 각각 가진시간 30초 및 102초일 때 최대 수평변위는 119cm와 173cm로 나타났다. 따라서 Table 5에서 분석된 결과와 같이 지진파 탁월주기가 증가하면 최대 수평변위도 증가함을 알 수 있다. 한편 지진파의 탁월주기가 증가할수록 수평변위의 감쇠는 상대적으로 빠르게 진행되었다. 이는 지진파의 탁월주기가 건물의 고유주기와 근접해지면서 수평변위



(a) Predominant period 0.5 and 1.0 sec



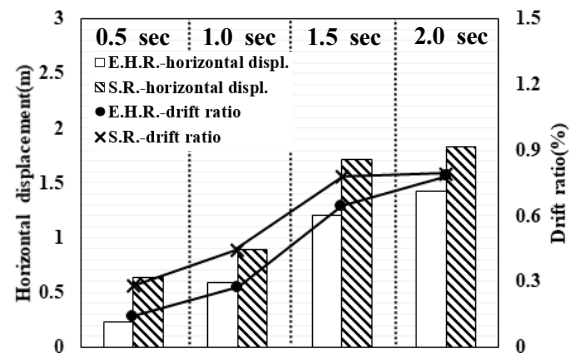
(b) Predominant period 1.5 and 2.0 sec

Fig. 6. The horizontal displacements history at the top of left building (hard rock, PGA=0.154g)

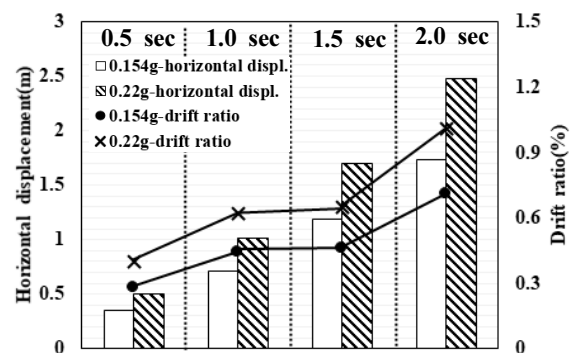
가 증가하고 이로 인해 건물이 다시 원래위치로 복원되는 현상이 빠르게 발생되기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 지진파 탁월주기가 증가할수록 수평변위는 상대적으로 짧은 시간에 감쇠가 발생하였다.

건물에 최상단 좌측 벽체의 최대 수평변위 및 층간변위비를 지반조건, PGA별로 비교하고자 Fig. 7과 같이 나타내었다. 최대 수평변위는 막대그래프로, 최대 층간변위비는 꺾은선그래프로 표시하였다. Fig. 7(a)에서 최대 층간변위비는 극경암(●), 연암(x)으로, Fig. 7(b)의 경우 PGA 0.154g(●), 0.22g(x)으로 구분하였다.

Fig. 7(a)에서 보듯이 PGA가 0.154g이고 탁월주기가 0.5초에서 1.0초로 증가할 때 연암 지반조건인 최대 수평변위 및 층간변위비는 각각 약 40% 및 57% 증가하였다. 탁월주기가 1.0초에서 1.5초로 증가할 때 약 91% 및 77%의 증가율을 보여 0.5초에서 1.0초 및 1.5초에서 2.0초의 경우보다 더 최대 수평변위 및 층간변위비에 더 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 한편 Fig. 7(b)에서 PGA 0.22g이고 경암 지반조건일 때 탁월주기가 1.0초에서 1.5초로 증가하는 경우 최대 수평변위 및 층간변위비는 약 67% 및 5% 증가하였다. 한편 지진파의 탁월주기가 1.5초에서 2.0초보다 약 46% 및 55% 증가하였다. 최대 층간변위비는 극경암조건에서 탁월주기가 1.5초에서 2.0초로 증가할 때 영향을 더 받는 것으



(a) PGA 0.154 g



(b) Hard rock

Fig. 7. Comparison of maximum horizontal displacements and drift ratios by predominant periods

로 나타났다. 따라서 최대 수평변위 및 층간변위비는 지진과 탁월주기가 1.0초에서 1.5초로 증가할 때 0.5초에서 1.0초 및 1.5초에서 2.0초로 증가하는 경우보다 영향을 더 받는 것으로 나타났다. 특히 경암조건일 때 탁월주기가 1.5초에서 2.0초로 증가하는 경우 최대 층간변위비는 더 영향을 받는 것으로 확인되었다.

5.2 가속도 응답스펙트럼

초고층 건물 최대 응답 가속도를 조사하고자 건물 최상단 좌측 벽체에서의 가속도 시간이력을 구하였다. 이후 고속 푸리에변환(Fast Fourier Transformation, FFT)을 이용하여 얻은 가속도 응답스펙트럼을 가지고 최대 응답 가속도를 Table 6과 같이 산출하였다.

모든 경우에서 최대 응답 가속도의 최대값은 0.66g로 지진과 탁월주기가 2.0초, PGA 0.22g, 연암지반조건에서 발생하였다. Table 5에서 분석된 최대 수평변위 및 층간변위비의 증가를 계산과 마찬가지로 지진과 탁월주기가 증가할수록 최대 응답 가속도는 전체적으로 평균 약 57% 상승하였고 지반이 연약해질수록 평균 약 62%의 증가율을 보였다. 즉, 지반이 연약할 때 건물의 응답 가속도의 증가율은 탁월주기가 증가하는 경우보다 더 높게 발생하였다.

Fig. 8은 건물 최대 응답 가속도를 지진과 탁월주기별로

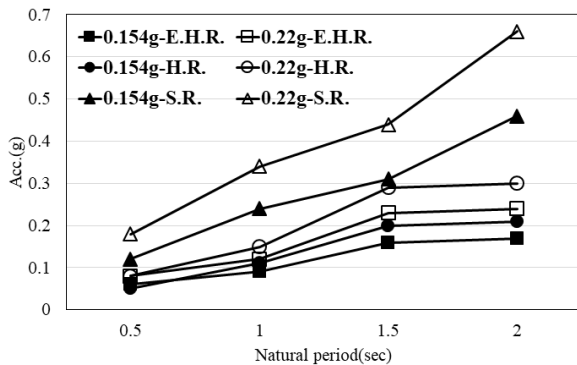


Fig. 8. The maximum acceleration response of the high-rise building by predominant periods

Table 6. The maximum acceleration response of the high-rise building (unit: g)

Predominant period (sec)	Ground type					
	Extremely hard rock		Hard rock		Soft rock	
	0.154 g	0.22 g	0.154 g	0.22 g	0.154 g	0.22 g
0.5	0.06	0.08	0.05	0.08	0.12	0.18
1.0	0.09	0.12	0.11	0.15	0.15	0.34
1.5	0.16	0.23	0.20	0.29	0.22	0.43
2.0	0.17	0.24	0.21	0.30	0.44	0.66

나타낸 것이다. 지반조건이 극경암 및 경암일 때 지진과 탁월주기가 1.5초에서 2.0초로 증가하면 최대 응답 가속도는 3.4%~6.3% 범위 내에서 미세하게 증가하였다. 반면 연암조건일 때 평균 약 50%의 증가율이 발생하여 지반조건이 연약할수록 최대 응답 가속도는 증가하는 경향이 나타났다. 따라서 지진과 탁월주기가 장주기일수록, 지반조건에 따라 최대 응답 가속도는 비례적으로 높게 산출되었다.

건물 가속도 응답스펙트럼을 비교·분석하고자 Fig. 9와 같이 지진과 크기가 0.154g이고 연암 지반조건을 예시로 건물 최상단 좌측 벽체의 가속도 응답스펙트럼을 도시하였다. 지진과 탁월주기가 0.5초/1.0초일 때 상대적으로 단주기성인 지진파에 공진 가능성이 낮기 때문에 탁월한 응답 가속도 및 주기를 보이지 않았고 침두점이 1차/2차로 구분되어 발생하였다. 반면 지진과 탁월주기가 1.5초/2.0초일 때 최대 응답 가속도는 장주기에 의해 공진가능성이 높아지기 때문에 하나의 탁월한 침두점이 명확하게 나타났다. 따라서 지진과 탁월주기가 장주기일수록 응답 가속도 침두점이 발생된 주기는 점진적으로 입력 지진파의 탁월주기로 수렴하는 경향을 보였다.

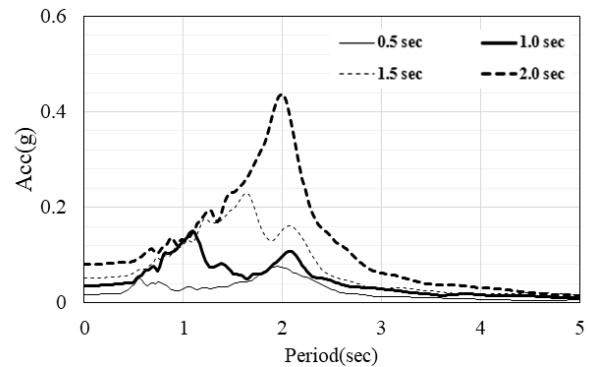


Fig. 9. The acceleration response spectrum of the high-rise building (soft rock, PGA=0.154g)

5.3 최대 휨응력 및 취약부 판정

한편 건물의 부재에서 발생한 휨응력을 분석하고자 Table 7과 같이 압축과 인장 응력별로 24가지 경우에 대해 최대 휨응력을 정리하였다.

분석 결과 탁월주기 2.0초의 모든 경우, 1.5초의 PGA 0.22 g, 주기 1.0초의 극경암 PGA 0.22g에서 허용 휨압축응력 24MPa 이상 발생하여 압축에 대한 취약부재가 나타났다. 또한 모든 부재의 경우 허용 휨인장응력 -4MPa를 초과하여 건물은 압축보다 인장에 대해 더 취약한 것으로 나타났다.

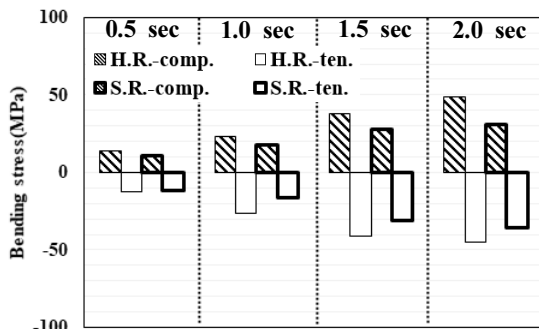
Table 5에서 분석된 증가율 계산을 동일하게 하였을 경우 전체 평균 지진과 탁월주기, PGA가 증가할 때 최대 휨

Table 7. Bending compression/tension stresses of the building when the maximum horizontal displacement occurs (unit: MPa)

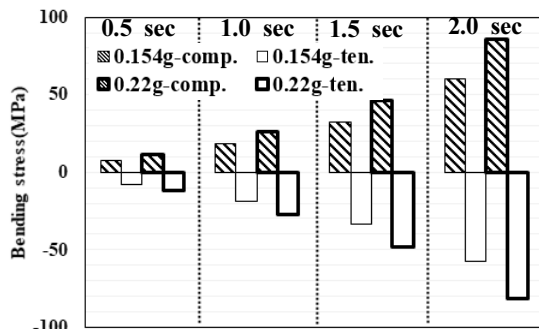
Predominant period (sec)	Ground type	PGA (g)	
		0.154	0.22
0.5	Extremely hard rock	7.8/-8.2	11.2/-11.8
	Hard rock	9.7/-9.0	13.9/-12.8
	Soft rock	7.3/-8.2	10.5/-11.7
1.0	Extremely hard rock	18.1/-19.1	25.9/-27.3
	Hard rock	16.4/-18.3	23.4/-26.2
	Soft rock	12.6/-11.4	18.0/-16.3
1.5	Extremely hard rock	32.6/-33.6	46.6/-48.0
	Hard rock	26.4/-28.6	37.7/-40.9
	Soft rock	19.4/-21.9	27.8/-31.3
2.0	Extremely hard rock	60.1/-57.2	85.9/-81.7
	Hard rock	47.7/-43.1	48.6/-45.1
	Soft rock	21.7/-25.1	31.0/-35.8

응력의 증가율은 각각 평균 68.5% 및 43.3%로 산출되었다. 반면 지반조건이 극경암에서 연암으로 연약해질수록 최대 휨응력은 평균 18.9% 감소하였다. 이는 지반이 연약해질수록 변위는 증가하고 이에 휨응력은 감소하기 때문인 것으로 판단된다.

지진파 탁월주기의 영향을 좀 더 분석하고자 Fig. 10과 같이 초고층 건물의 최대 수평변위가 발생된 가진시간 때 최대 휨응력을 나타내었다. 그림에서 ‘comp.’은 압축(com-



(a) PGA 0.22 g

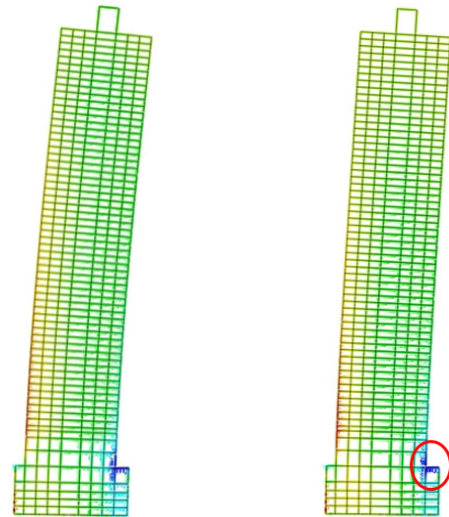


(b) Extremely hard rock

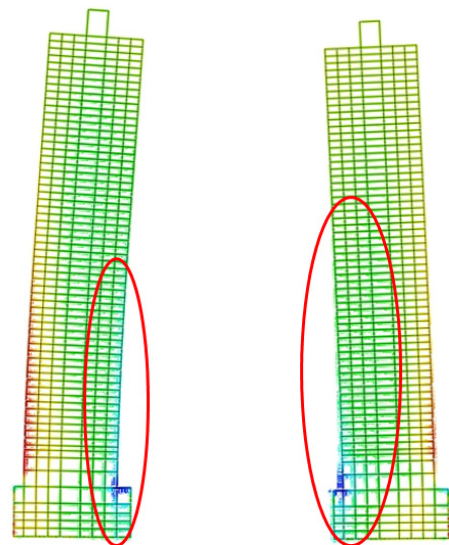
Fig. 10. The comparison of the building maximum bending stresses by predominant periods

pression)을 ‘ten.’은 인장(tension)을 의미한다. Fig. 10(a)와 같이 지진파 크기가 0.22g이고 경암 지반조건보다 연암지반의 최대 휨응력은 평균 25% 감소하였다. 이는 Table 7과 동일하게 지반조건이 연약해지면 수평변위가 증가하고 휨응력은 감소하였기 때문인 것으로 판단된다. 또한 탁월주기가 장주기화 될수록 지반조건이 연약해짐에 따라 발생된 최대 휨응력의 증가율은 점점 상승하는 것을 알 수 있다.

Fig. 10(b)의 경우 극경암 지반조건일 때 탁월주기가 0.5초에서 1.0초로 장주기화될수록 지진파 크기가 증가할 때의 최대 휨응력의 증가율은 약 77% 증가하였다. 마찬가지로 1.0초에서 1.5초 및 1.5초에서 2.0초의 경우를 구하게 되면 약 78% 및 132%로 증가하는 것으로 나타나 지진파



(a) Predominant period 0.5 sec (b) Predominant period 1.0 sec



(c) Predominant period 1.5 sec (d) Predominant period 2.0 sec

Fig. 11. The distributions of compressive bending stresses in the high-rise building by predominant periods (extremely hard rock, PGA 0.22g)

탁월주기가 증가할수록 최대 휨응력의 증가율은 점점 상승하였다. 따라서 지진파 탁월주기가 건물의 고유주기와 근접하여 공진가능성이 커지기 때문에 건물 최대 휨응력에 지진파 크기, 지반조건보다 더 영향을 주는 것으로 나타났다.

한편 최대 수평변위가 발생하는 가진 시간 때 허용 휨응력을 초과한 건물의 취약부재를 파악하고자 PGA 0.22g, 극경암 지반조건에서 부재의 휨압축응력 분포를 Fig. 11에 도시하였다. 건물의 취약부를 구분하기 위하여 지상부 기둥은 좌·우측으로부터 1, 2번 기둥으로, 코어부는 좌·우측으로 나누었다. 지하부 기둥은 좌·우측으로부터 1, 2, 3번 기둥으로, 코어부는 좌·우측만으로 구분하였다. 취약부의 범위는 타원으로 표시하였고 휨압축 및 인장응력의 범례(legend)는 분석 편의상 생략하였다.

분석 결과 탁월주기가 0.5초 일 때 취약부재는 발생하지 않았다. 하지만 1.0초 일 때 지상 1층 우측 벽체, 지하 1층 우측 천정부에서 취약부가 발생하였다. 또한 탁월주기가 증가할수록 지하 5층에서 지상 37층 좌·우측 벽체 1~3번 기둥까지 취약부 범위가 확대되었다. 이는 입력지진파의 탁월주기가 증가할수록 건물의 고유주기와 근접하여 공진가능성이 높아지기 때문인 것으로 판단된다. 또한 모드 형상의 경우 탁월주기에 관계없이 모든 경우에서 1차 형상을 보였다. 참고로 경, 연암, PGA 0.22g 및 휨인장응력 분포에서도 동일한 경향을 보였다.

6. 결 론

본 연구에서는 지진동 시 가해진 지진파의 탁월주기를 달리하여 초고층 건물의 동적해석을 수행하였다. 이후 동적 거동인 변위, 가속도, 층간변위비, 휨응력 및 취약부를 분석하여 건물에 대한 탁월주기의 영향을 분석하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 지진파 탁월주기가 장주기일수록 수평변위가 빠르게 감소되고 건물의 공진 가능성이 높아지기 때문에 최대 수평변위, 층간변위비 및 휨응력의 증가율이 지반조건 및 지진파 크기보다 상대적으로 크게 발생하여 건물의 동적거동에 더 영향을 주는 것으로 나타났다.
- (2) 층간변위비 분포의 경우 취약층은 40~50층인 상층부에서 발생하여 다른 층에 비해 취약한 것으로 나타났다. 또한 지반이 연약할수록 수평변위가 증가하였기 때문에 지반조건이 극경암에서 연암으로 연약해질수록 허

용 기준을 초과되는 층이 확대되었다.

- (3) 지진파 탁월주기가 상대적으로 장주기성일수록 공진가능성은 높아지게 되어 최대 응답 가속도 스펙트럼은 특정 주기에 반응하지 않고, 근접한 하나의 첨두값을 갖는 것으로 나타났다.
- (4) 허용 휨응력을 초과하는 취약부 범위는 탁월주기가 증가할수록 건물 공진가능성이 높아지기 때문에 지하부에서 지상 중간부로 좌·우측 벽체 및 첫 번째~세 번째 기둥으로 확대되었다.

종합적으로 판단하였을 때 지진 시 초고층 건물에서 발생된 동적거동에 의해 지진파 종류가 지반조건, 지진파 크기보다 주요 파라미터인 것으로 확인되었다. 향후 연구 시 최대 가속도와 탁월주기가 다른 실제측 지진파를 사용하면 좀 더 실제적인 건물의 동적거동 및 안정성을 파악할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

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

References

1. 국토교통부 (2016a), 건축구조기준, 937p.
2. 국토교통부 (2016b), 콘크리트 표준시방서, 384p.
3. 국토교통부 (2018), 내진설계 일반, 26p.
4. 김재민, 정우정, 김진원, 김동아 (2009), “지중구조물의 동적해석법”, 한국전산구조공학회지, 제 23권, 제 3호, pp. 41~53.
5. 김종성, 이석현, 권형도, 오창영 (2017), “동적 시간이력 탄소성 지진 해석을 위한 레일레이 감쇠계수 결정방법 고찰”, 한국압력기기공학회 논문집, 제 13권, 제 2호, pp. 38~43.
6. 백종훈, 오상훈 (2014), “지진파의 고유주기에 따른 국내 고층건축물의 가속도 응답특성”, 한국구조물진단유지관리공학회 2014년 봄 학술발표회 논문집, pp. 677~678.
7. 서울특별시 (2006), 지반조사편람, 141p.
8. 유광호, 박연준, 김재권, 홍근영, 이현구 (2005), “지보재 파괴를 고려한 터널의 안전율의 수치 해석적 산정연구”, 한국터널지하공간학회 논문집, 제 7권, 제 1호, pp. 37~49.
9. 유광호, 김승진 (2018), “연속체 모델과 지하구조물 고정단 모델의 비교를 통한 SSI 해석의 타당성 연구”, 한국터널지하공간학회 논문집, 제 20호, 제 5권, pp. 757~772.
10. 하익수 (2011), “미소지진 계측기록을 활용한 국내 사력댐 고유주기 산정방법”, 한국지반환경공학회 논문집, 제 12권, 제 6호, pp. 53~60.
11. FEMA (2000), Pre-standard and commentary for the seismic

- rehabilitation of buildings, ASCE, Washington, D.C., 518p.
12. MIDAS Information Technology Co. (2009), Analysis reference, MIDAS Information Technology Co., Korea, 519p.
 13. MIDAS Information Technology Co. (2016), MIDAS GTS NX user manual, MIDAS Information Technology Co., Korea, 445p.
 14. PEER (2017), Tall building initiative guidelines for performance-based seismic design of tall buildings, University of California, Berkeley, 147p.
 15. 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, 130p.