

연속체 모델과 지하구조물 고정단 모델의 비교를 통한 SSI 해석의 타당성 연구

유광호^{1*} · 김승진²

¹정회원, 수원대학교 건설환경공학과 교수

²비회원, 수원대학교 건설환경공학과 석사과정

A validity study on SSI analysis by comparing the complete system model and the underground structure fixed-end model

Kwang-Ho You^{1*} · Seung-Jin Kim²

¹Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Suwon

²Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Suwon

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

Abstract

Recently, earthquakes have occurred in large cities such as Gyeongju and Pohang, and seismic analysis studies have been actively conducted in various fields. However, since most of the previous seismic analyses have dealt with ground structures and the ground separately, there is a lack of a study on the complete soil-structure dynamic interaction. Therefore, in this study, a sensitivity analysis is conducted with MIDAS GEN and MIDAS GTS NX to apply the underground structure fixed-end model considering only the building and the complete system model considering both the building and the ground, respectively and the validity of dynamic analysis considering SSI is examined. As a result of the study, in most conditions it is found that the maximum horizontal displacement of the tall building in case of the underground structure fixed-end model is estimated to be smaller, the bending stress is larger, and the range of the weak part is smaller than that of the complete system model. Therefore, it is expected to be more reasonable to use the complete system model considering soil-structure interaction in seismic analysis.

Keywords: Complete system model, Underground structure fixed-end model, SSI, Tall building

초 록

최근 경주 포항 등 대도시에서 지진이 발생하고 이에 각 분야에서의 내진해석 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 대부분의 기존 내진해석은 지상구조물과 지반을 따로 다루었기 때문에 지반과 구조물의 완전한 상호 동적거동에 대한 연구가 부족한 실정이다. 따

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
20(5)757-772(2018)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2018.20.5.757>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received June 11, 2018

Revised July 26, 2018

Accepted August 2, 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

www.kci.go.kr

라서 본 연구에서는 건물만 고려하는 지하구조물 고정단 모델과 건물과 지반을 함께 고려하는 연속체 모델을 각각 적용하기 위해 MIDAS GEN 및 MIDAS GTS NX를 이용하여 민감도 분석을 수행하고 SSI를 고려한 동적해석의 타당성을 살펴보았다. 연구 결과, 대부분의 조건에서 지하구조물 고정단 모델이 연속체 모델보다 초고층 건물의 최대 순수 수평변위를 더 작게, 휨응력을 더 크게, 또한, 취약부의 범위는 더 작게 산출하는 것으로 나타났다. 따라서 내진해석 시 지반-구조물 상호작용을 고려한 연속체 모델을 사용하는 것이 보다 타당할 것으로 판단된다.

주요어: 연속체 모델, 지하구조물 고정단 모델, 지반-구조물 상호작용, 초고층 건물

1. 서론

최근 지진에 대한 사회적 관심이 증가하고 이에 건축 및 모든 분야에서 많은 내진연구 및 해석이 수행되어 왔다. 일반적으로 지진 시 지반 저면에서부터 발생한 지진파에 의해 지반이 진동하게 되고 지상구조물이 반응하게 되지만 현재까지 건축에서 수행되는 내진해석은 지상구조물만 해석하는 모델을 사용하여 지반에 의해 구조물이 받는 영향을 고려하지 않기 때문에 정확한 구조물 거동을 예측할 수 없다. 따라서 내진해석 시 지반을 고려하여 보다 정확하게 지반-구조물의 상호작용(Soil-Structure Interaction, SSI)을 해석할 필요가 있다.

Kim (2016)은 비정형 철골조 초고층건물의 탄성 내진성능 평가절차를 소개하고자 초고층 내진설계 지침서를 기준으로 비틀림 비정형 초고층 건물을 대상으로 내진성능을 분석하였다. 분석 결과, 43년 재현주기를 갖는 지진 재해 수준에 대해서는 ‘즉시거주’의 수준으로서, 초고층 내진설계 지침서의 소요 내진성능 수준을 만족시키고, 2,475년 재현주기를 갖는 지진재해 수준에 대해서는 비틀림 각 1°를 갖는 비정형 초고층 건물만이 ‘인명안전’ 수준으로 지침서에서 요구하는 내진성능 수준을 만족시키고 있다. 그러나 초고층 건물에 한정하여 해석을 수행하고 지반을 고려하지 않았기 때문에 지반-구조물 상호작용을 효과적으로 파악하지 못한 것으로 나타났다.

초고층 건물과 인접한 지하구조물이 초고층 건물에 미치는 영향을 분석하고자 You and Kim (2018)은 구조물 높이, 인접지하구조물의 유·무, 지진파 크기(PGA)를 파라미터로 하여 SSI를 고려한 동적해석을 실시하고 각 파라미터에 대해 민감도분석을 수행하였다. 그 결과, PGA, 구조물의 높이, 인접지하구조물 유·무에 관계없이 초고층 건물의 층간변위비는 ‘즉시기준’ 수준 이내로 발생하였으나 초고층 건물 지하부 3층 좌·우측 벽체의 휨인장응력은 허용 휨인장응력을 초과하여 취약부인 것으로 나타났다. 따라서 초고층 건물의 동적안정성 평가 시 인접지하구조물의 영향을 고려하는 것이 필요하다고 주장하였다.

따라서 본 연구는 건축에서 수행하는 지하구조물 고정단 모델과 지반을 고려하는 연속체 모델에 대해 수평변위, 휨응력, 취약부를 분석하여 초고층 건물의 내진 안정성 및 SSI (Soil-Structure Interaction)를 고려한 동적해석의 타당성을 비교·검증하고자 하였다. 대상구조물은 초고층 건물로 높이 212.5 m, 62 층, 22.1 m, 29.1 m 지하 5층, 7층으로 구성되는 것으로 하였다. 입력지진파로는 재현주기 1,000년과 2,400년에 해당하는 최대 지반가속도인 0.154 g와 0.22 g의 터키에서 1999년에 발생한 Kocali 지진파를 사용하여 동적해석(선형시간이력해석)을

수행하고, 초고층 건물의 수평변위, 층간변위비, 구조부재에 작용하는 휨응력, 취약부 위치를 지하구조물 고정단 모델과 연속체 모델의 결과를 비교·분석하였다.

2. 내진해석 모델

건축 구조물의 내진해석 모델로서 Fig. 1과 같이 Hanyang University (2017, pp. 3~5)에서는 4가지 모델이 사용될 수 있다고 제시하였다. Fig. 1(a)의 지상구조물 고정단 모델은 지상층만을 모델링하며 지상층의 하부는 지표면에 고정된 모델이고, Fig. 1(b)의 지하구조물 고정단 모델은 지하구조물은 모사하되, 기초면이 지반에 고정된 경우로 기능수행 수준의 지진에 사용해야 된다. Fig. 1(c)의 모델은 초고층 빌딩의 지하부가 강체 박스에 스프링으로 연결된 모델이며, Fig. 1(d)의 연속체 모델은 하부지반을 연속체로 모사하며 지반과 벽체에 인터페이스를 사용할 수 있는 모델이다.

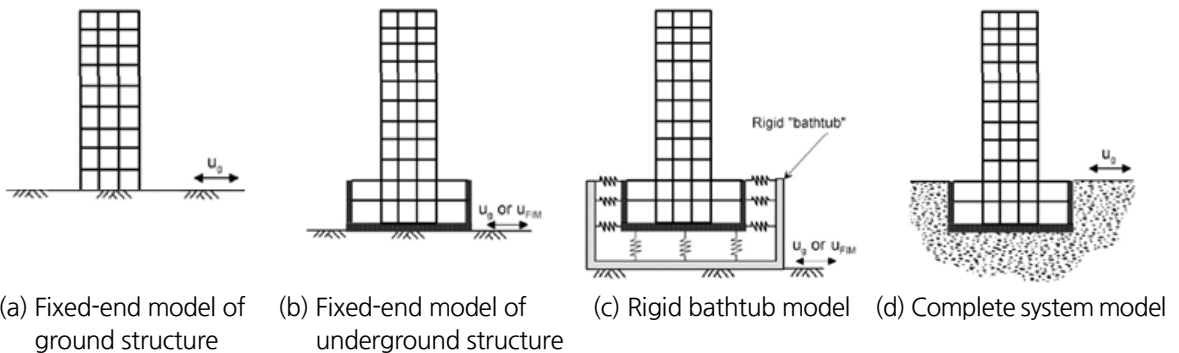


Fig. 1. The models of underground structures for SSI analysis (Hanyang University, 2017)

PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2017, pp. 66~67)에서 지하구조물 고정단 모델 (fixed-end model)은 건축에서 사용하는 모델이고 현실성을 반영한 모델이지만, SSI를 고려하지 않고 수평방향의 지반이 모사되지 않으므로 지하 벽체의 지진 거동에 대해 평가하기 어려워 지진 거동을 과대 또는 과소 예측할 수 있다고 설명한다. 이러한 이유로 설계자는 SSI 영향을 고려한 연속체 모델을 고려할 것을 권장한다고 하였다. 한편, 연속체 모델(complete system)은 정확한 해석이 가능하지만 해석이 어렵고, 구조설계에서 주로 사용되는 프레임 해석에서는 수행할 수 없다고 하였다.

3. 동적해석을 위한 주기 및 경계조건

3.1 고유치 해석을 통한 고유주기 산정

고유치해석(eigenvalue analysis)이란 구조물의 고유주기를 구하는 해석으로 지반 및 구조물 고유의 동적 특성

(모드형상, 고유주기, 질량참여율)을 분석하는 데 사용된다. 모드형상이란 Fig. 2(a)와 같이 균일 단면을 가진 외팔보의 자유진동 상태에서 물체 고유의 진동형태를 말하는데, 파장이 긴 사인파로 변형하는 형태는 저차 모드형상, 고차로 갈수록 파장이 짧은 여러 개의 사인파 형태로 진동하는 형상이 나타난다. 고유주기는 Fig. 2(b)와 같이 해당 모드형상으로 1회 진동하는 데 소요되는 시간을 의미하고, 질량참여율은 복합적인 모드형상으로 구조물이 진동되고 있을 때 각 모드형상별로 구조물 전체의 질량 중 몇 %가 그 구조물의 진동에 참여하고 있는지를 나타내는 지수이다. 구조물의 경우 질량참여율의 합이 90% 이상 산출되지만, 지반의 재료물성은 상대적으로 작기 때문에 고유치해석에서 질량참여율은 90%가 넘지 않는다. 일반적으로 질량참여율이 높은 1, 2차 모드의 고유주기를 산정하여 동적해석을 수행하게 된다(MIDAS Information Technology Co., 2016).

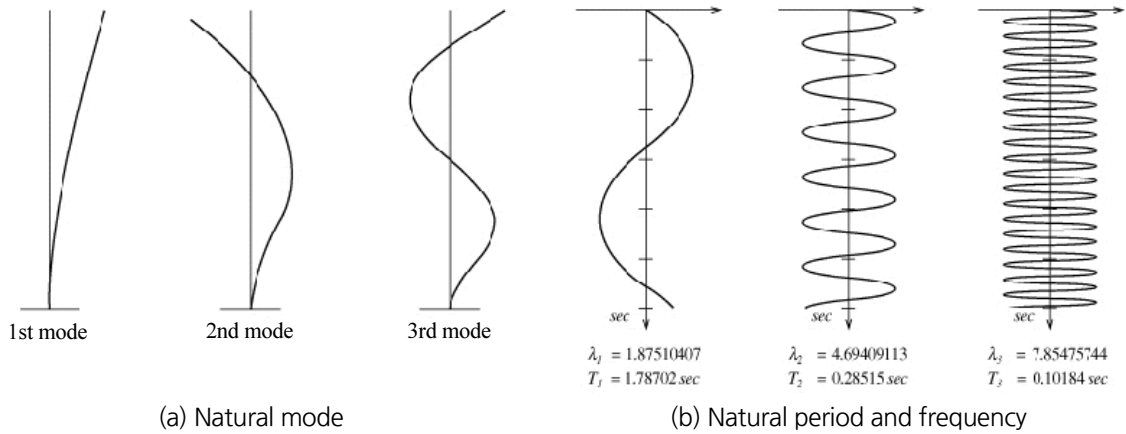


Fig. 2. Eigenvalue analysis of a cantilever beam with a uniform section

3.2 지반 경계조건

고유치 해석 및 동적해석을 수행하기 위해서는 지반의 경계조건으로 탄성스프링(탄성경계, 점성경계)을 해석 모델링 경계에 적용해야 한다. 탄성경계는 식 (1)과 같이 계산되어 연직방향 지반반력계수(K_v)를 구할 수 있다. 수평방향의 경우도 식 (1)과 같이 구할 수 있으며, α 는 상시에는 1, 지진 시는 2로 적용한다. 적용 면적(A_v)는 해당 경계면의 면적으로 구한다.

$$\begin{aligned}
 K_v &= K_{v0} \times (B_v/0.3)^{-3/4} \text{ (kN/m}^3\text{)} \\
 K_{v0} &= \alpha \times E_0/0.3 \text{ (kN/m}^3\text{)}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서, E_0 = 탄성계수(kN/m²), B_v = $\sqrt{A_v}$ (m)이다.

Lysmer and Kuhlemeyer (1969)와 Newmark (1959)가 제안한 경계조건으로 경계에 일정한 각도를 갖는 물질 파를 흡수한다. 단면 좌·우측과 바닥면에 각각 식 (2)와 식 (3)을 적용하여 점성경계계수(C_p , C_s)를 구하고 점성 경계조건을 적용하게 된다(MIDAS Information Technology Co., 2016).

$$C_p = \rho \sqrt{(\lambda + 2G)} / \rho \quad (2)$$

$$C_s = \rho \sqrt{G} / \rho \quad (3)$$

여기서, $\lambda = \mu E(1 + \mu)(1 - 2\mu)$, $G = E/2(1 + \mu)$, $\rho =$ 밀도(kg/m^3)이다.

4. 수치해석 모델링

본 연구에서는 SSI를 고려한 동적해석의 타당성을 비교·검증하기 위하여 Fig. 3(a), 3(b)와 같이 지하구조물 고정단 모델과 비교대상인 연속체 모델에 대해 2D 단면인 층수 62층(지하 5층, 지하 7층) 초고층 건물을 대상으로 동적해석을 실시하였다. Fig. 3(b)의 62층 지하 5층의 경우 해석 영역은 지진파가 반사되어 해석에 영향을 미치지 않도록 건물 좌·우측 벽체를 기준으로 건물 폭(W)의 4배, 건물 지하 바닥을 기준으로 건물 폭의 3배 만큼 해석영역으로 선정하였다. 경계조건으로 탄성경계와 점성경계는 각각 기반암 바닥과 좌·우측, 표층 좌우측에 적용하여 지진파의 측면 반사영향을 최소화시켰다. 한편 요소망의 요소크기는 지상 62층 지하 5층 및 7층의 경우

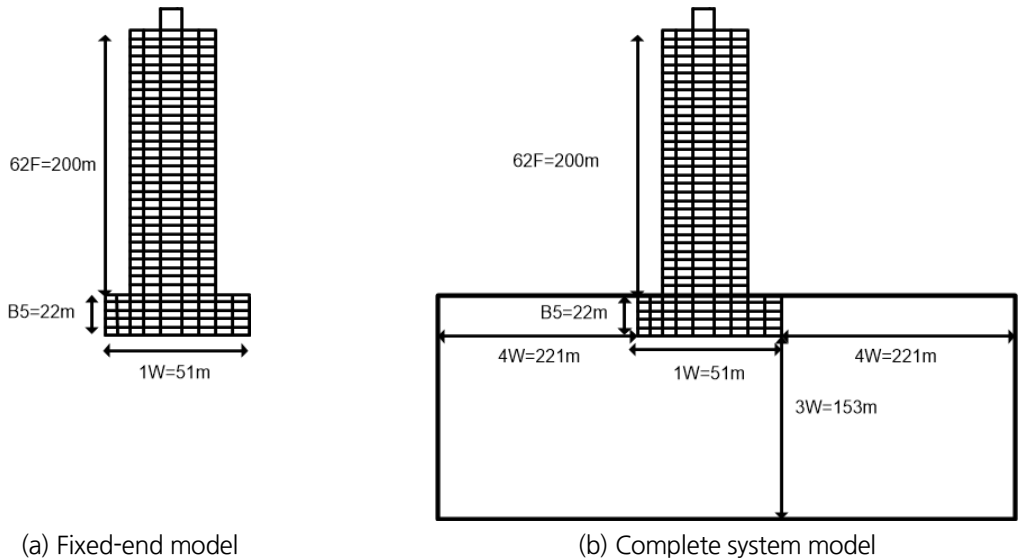


Fig. 3. The analysis section of 62 floor high-rise building with 5 underground stories

모두 2 m × 2 m였고, 요소개수는 각각 22,104개 및 29,831개였다. Fig. 3(a)의 경우 지하구조물 고정단 모델 (fixed-end model)로 MIDAS GEN 프로그램을 사용하고 Fig. 3(b)의 경우 또한, 지반을 고려한 연속체 모델 (complete system model)로 MIDAS GTS NX 프로그램을 사용하여 해석을 수행하였다.

본 연구에서는 Table 1과 같이 건물의 종류, 지진파 규모, 지진파 종류, 지반조건에 대한 민감도 분석을 실시하고 지하구조물 고정단 모델과 비교·분석하여 SSI 해석의 타당성을 검증하고자 하였다. 민감도 분석을 수행하기 위해 건물 지상 62층(지하 5, 7층) (2가지) × 지진파 종류(단주기, 장주기) (2가지) × 지진파 크기(PGA 0.154 g, 0.22 g) (2가지) × 지반조건(극경암, 경암) (2가지) 총 16 경우를 선정하였다. 한편, 지하구조물 고정단 모델의 경우는 지반을 고려할 필요가 없으므로 지반조건 2가지를 제외한 8가지 경우를 선정하여 민감도 분석을 수행하고 비교·분석하였다.

Table 1. Parameters applied to dynamic analysis

Type of building	Magnitude of earthquake	Type of earthquake	Ground Type
62F-B5	0.154 g	Short wave (SW)	Extremely hard rock (Sb1)
62F-B7	0.22 g	Long wave (LW)	Hard rock (Sb2)

본 해석에 적용한 표층과 기반암의 물성치는 Seoul Metropolitan Government (2006)에서 제공한 자료를 참고하여 각각 풍화토와 극경암, 경암을 적용하였으며, 최종적으로 본 연구에 사용된 지반물성치는 Table 2와 같다. 그리고 축압계수는 표층과 기반암 모두 1.0을 적용하였으며, Mohr-Coulomb 파괴기준을 구성모델로 적용하였다.

Table 2. Ground properties

Ground type	Unit weight γ_t (kN/m ³)	Cohesion c (MPa)	Friction angle (°)	Elastic modulus (GPa)	Poisson's ratio	Shear wave velocity (m/s)	Ground rating
Granite (bed rock, Sb1)	27	6	45	14	0.2	1,500	S_B
Granite (bed rock, Sb2)	26	2	40	4	0.2	800	
Weathered soil (surface)	19	0.05	28	0.03	0.32	77	

본 해석에 적용된 초고층 건물은 beam, column 요소를 사용하여 보와 기둥으로 모사되었으며, University of Suwon (2017, pp. 90~91)에서 제시한 물성치를 참고하여 Table 3과 같이 선정하였다. 철근콘크리트의 단위중량을 23.54 kN/m³으로 적용하였으며 사하중 및 활하중은 각각 슬래브에 146 kN/m, 66 kN/m 하중을 가하였다.

Table 3. Properties of building structural members

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

본 연구에서는 초고층건물이 RC 구조물로 시공되었다고 가정하였다. 따라서 콘크리트 표준시방서(Ministry of Land, 2016)에서 제시한 고강도 콘크리트의 설계기준강도(σ_{ck})가 40.0 MPa인 것을 참고하여 최대 허용휨압축 및 인장응력을 각각 24.0, 4.0 MPa로 적용하였다(You et al., 2005).

입력지진파로는 터키에서 1999년에 발생한 Kocaeli 지진파를 입력지진파로 사용하였다. Kocaeli_arc000 및 Kocaeli_dzc180 지진파를 각각 단주기파(Short Wave, SW)와 장주기파(Long Wave, LW)로 사용하였다. Fig. 4(a)와 4(b)는 단주기파를 예시로 최대 지반가속도(PGA)가 0.22 g로 스케일된 가진 시간이 60초인 가속도이력과 가속도 응답스펙트럼을 보여준다. Fig. 4(b)로부터 탁월주기가 약 0.2초에서 하나만 존재하는 단주기파임을 알 수 있다. 지하구조물 고정단 모델은 건물 하부에 지반을 고려하지 않고 지진파를 입력하였고 연속체 모델은 건물 하부가 아닌 지반 바닥에 지진파를 입력하여 지반에 의한 영향을 고려하였다.

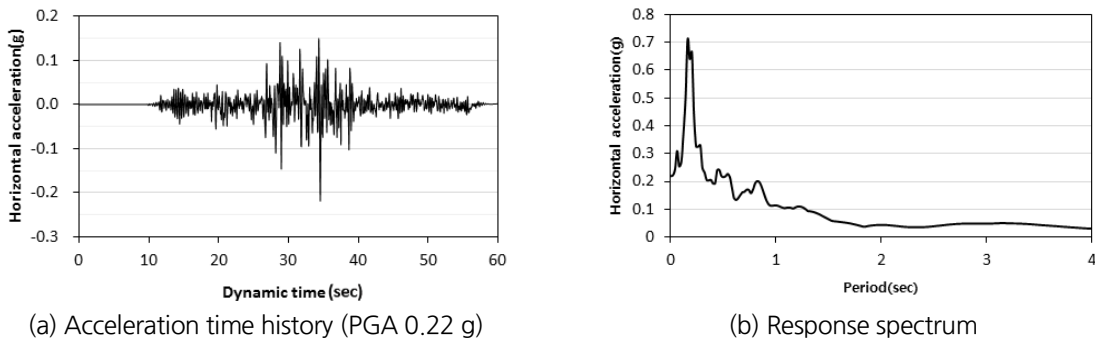


Fig. 4. Kocaeli_arc000 earthquake wave (short wave)

5. 고유치해석 및 경계조건

동적해석 수행 시 감쇠비, 1, 2차 고유모드에 대한 고유주기가 필요하기 때문에 연속체 모델은 구조물뿐만 아니라 지반까지 함께 해석 모델링을 하여 고유치해석을 수행하였다. 이를 위해 기반압과 표층 좌·우측에 지반반력 계수를 구하고 기반압과 풍화도 좌·우측에 탄성경계를 적용하여 고유치해석을 수행하였는데, 해석결과는 Table 4와 같이 나타났다. 지하구조물 고정단 모델의 경우 지반을 고려하지 않았기 때문에 6.6~6.9의 고유주기가 산출된 반면, 연속체 모델의 경우 지반을 동시에 고려하기 때문에 고유주기는 약 9.2~9.5초가 산출되었다. 또한, 지반이 연약해질수록 고유주기는 1.3초 늘어나게 나타나 지반 물성치는 고유치해석에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Table 4. The results of eigenvalue analyses by the applied model

Type of building	Size of member (mm)		Period (sec)					
	Beam (mm)	Column (mm)	Fixed-end model	Complete system model				
				Extremely hard rock		Hard rock		
			Mode shape					
1st	1st	2nd	1st	2nd				
62F-B5	H: 2,000	H: 3,000	6.7	9.2	2.3	10.5	0.5	
62F-B7	B: 500	B: 500	6.9	9.5	2.4	10.8	2.5	

경계조건의 경우 기반암과 풍화토 좌·우측에 탄성경계와 기반암과 풍화토 좌·우측 및 기반암 바닥면에 점성 경계를 적용하고 기반암 바닥면을 고정·구속하였다. 이를 위해 Table 5와 같이 경계에 작용되는 값(boundary values)으로 탄성경계를 위한 수평방향 지반반력계수(K_x)는 식 (1), 점성경계를 위한 점성경계계수(C_p, C_s)는 각각 식 (2)와 식 (3)에 의해서, 지상 62층 지하 5, 7층의 초고층 건물(62F-B5, 62F-B7)의 경우에 대해 각각 지반 조건 및 지층별로 계산되었다. 또한, 감쇠비의 경우 모드감쇠에 따라 구조물의 모드형상을 고려하여 감쇠되도록 설정하였고 지반 건물 모두 0.05를 적용하였다.

Table 5. The estimation of boundary values by analysis conditions

Modulus of subgrade reaction K_x , (kN/m)	62F-B5		62F-B7		
	Extremely hard rock	Hard rock	Extremely hard rock	Hard rock	
Bed rock	5,704,805.8	1,629,944.5	5,704,805.8	1,629,944.5	
Surface layer	25,393.5		22,845.2		
Coefficient of viscosity boundary (kN/m)	62F-B5		62F-B7		
	Extremely hard rock	Hard rock	Extremely hard rock	Hard rock	
Surface rock	C_p	91.2			
	C_s	46.9			
Bed rock	C_p	2097.4	1121.1	2097.4	1121.1
	C_s	1256.7	671.7	1256.7	671.7

6. 수치해석 결과 분석

6.1 모델별 수평변위 및 가속도 스펙트럼

지반-구조물 상호작용을 고려한 동적해석의 타당성을 검증하기 위하여 건축 내진해석에서 일반적으로 사용되는 지반을 고려하지 않는 지하구조물 고정단 모델과 지반을 고려하는 연속체 모델의 수평변위를 파라미터별로 비교·분석하고자하였다. 연속체 모델의 경우 건물이 지반과 같이 거동하므로 지하구조물 고정단 모델과 비교를

위하여 건물 최상단 수평변위에서 건물 지하 바닥면과 접하고 있는 지반의 수평변위를 제외한 순수 수평변위를 구하였다. 지상 62층 지하 5층의 초고층 건물(62F-B5)을 대상으로 단주기 지진파가 가해질 경우, 적용 모델별로 지진파 크기에 따라 Fig. 5와 같이 건물 최상단 좌측 벽체의 순수 수평변위이력을 도시하였다. 지진파 크기와 관계없이 지하구조물 고정단 모델과 연속체 모델의 순수 수평변위이력 양상은 유사하게 산출되었다. 또한, 지진파 크기가 0.154 g에서 0.22 g로 증가할 때, 두 모델의 경우 순수 수평변위 최대값이 약 30 cm 더 크게 산출되었다. 한편 연속체 모델의 경우 동일한 지진파 크기가 가해질 때 지반이 연약해질수록 최대 수평변위 값이 약 15 cm 더 크게 나타났다.

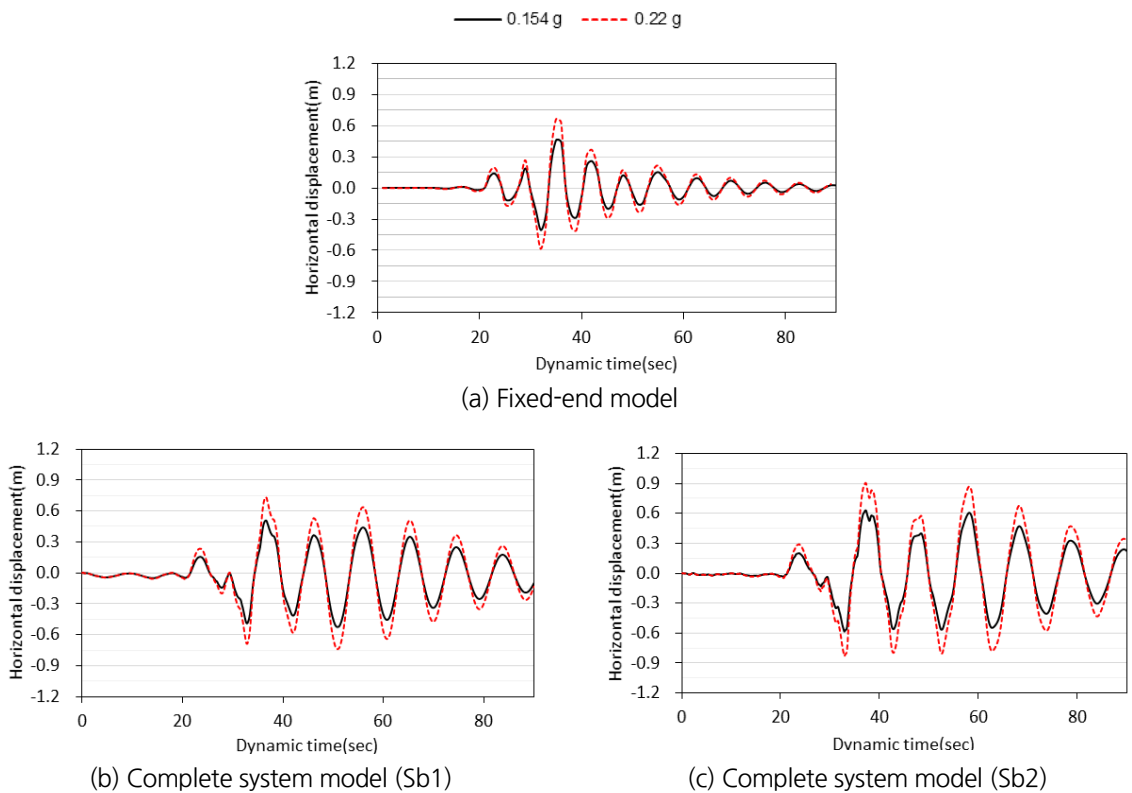


Fig. 5. Comparison of pure horizontal displacements at the left wall of building top (62F-B5, SW)

한편, 수평변위와 가속도 스펙트럼 비교를 위해 Fig. 6과 같이 지상 62층 지하 7층의 초고층 건물(62F-B7)에 최대 지반가속도(PGA) 0.22 g가 작용하는 경우를 대표단면으로 해석에 사용된 모델과 입력파의 종류별로 건물 최상단 좌측 벽체의 가속도 응답스펙트럼을 도시하였다. 지하구조물 고정단 모델은 지반을 고려하지 않기 때문에 가진 시간 60초 이후에 바로 감쇠가 일어난 반면, 지반을 고려하는 연속체 모델의 경우는 감쇠가 더 천천히 발생함을 알 수 있다.

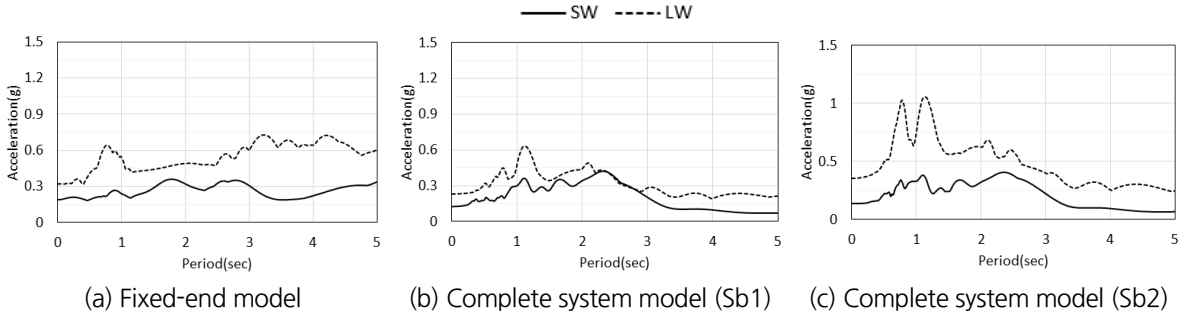


Fig. 6. Acceleration response spectrum at the left wall of building top (62F-B7, 0.22 g)

또한, 이러한 현상은 지반이 연약할수록 즉, 경암 조건의 경우가 극경암 조건에 비해 더 크게 나타났다. 이는 지반이 상대적으로 연약한 경암(Sb2)에서 Fig. 6(c)와 같이 지진파가 증폭되어 건물의 최대 수평변위가 극경암 조건에 비해 증가하고 감쇠가 천천히 발생한 것으로 판단된다. 지하구조물 고정단 모델은 연속체 모델보다 최대 수평변위 값이 적게 산출되어 모델 별 수평변위 비교 시 지반을 고려하여 내진해석을 수행하는 것이 타당하다고 판단된다.

6.2 층간변위비

앞서 분석한 구조물 최상단 좌측벽체의 수평변위를 이용하여 지하구조물 고정단 모델과 연속체 모델을 비교하기 위해 PGA 0.154 g, 단주기 지진파일 때, 해석 모델에 따른 층간변위비를 Fig. 7과 같이 도시하였다. Fig. 7에서 MIDAS GEN의 결과는 굵은 실선, MIDAS GTS NX는 Sb1, Sb2는 각각 얇은 점선과 굵은 점선으로 구분하여 표시하였다. 지하구조물 고정단 모델과 연속체 모델 모두 층간변위비가 일반적인 RC구조물의 ‘즉시거주’ 수준의 층간변위비(National Disaster Management Research Institute, 2012) 0.5 % 이내로 발생하여 PGA 0.154 g의 단주기 지진파는 초고층 건물은 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

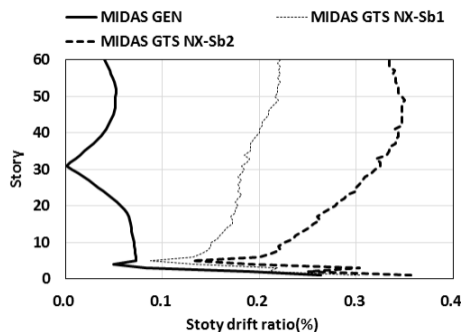


Fig. 7. The story drift of tall building (62F-B7, SW, 0.154 g)

한편, 지상부 1~5층 사이가 다른 층보다 층간변위비가 크게 나타나 지진 시 취약한 부분임을 확인할 수 있었다. 수평변위와 마찬가지로 MIDAS GEN의 경우 층간변위비도 과소 예측되는 것으로 나타나 지상 및 지하구조물 내 진해석 시 지반을 고려하는 연속체 모델을 적용하는 것이 타당하다고 판단된다.

6.3 구조물의 휨응력

지하구조물 고정단 모델과 연속체 모델을 각각 적용한 MIDAS GEN 및 MIDAS GTS NX의 해석결과를 Fig. 8과 같이 지진파 종류별로 PGA 0.154 g일 경우 지상 62층 지하 5층 및 지상 62층 지하 7층 건물의 최대 휨압축응력을 도시하고 비교하였다. 참고로 각각 최대 수평변위가 발생하는 가진 시간 35 및 37초 때의 결과이다.

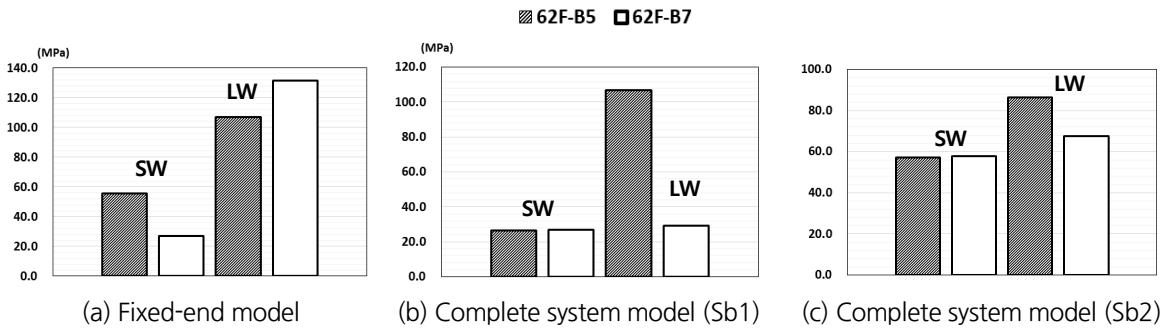


Fig. 8. Maximum bending compressive stress of structural members (PGA 0.154 g, dytime 35, 37 sec)

Fig. 8에서 보는 바와 같이 지하구조물 고정단 모델(MIDAS GEN)과 연속체 모델(MIDAS GTS NX)의 모든 경우 최대 휨압축응력은 허용 휨압축응력인 24 MPa를 초과하여 취약부가 존재하는 것으로 나타났다. 참고로 최대 휨인장응력도 마찬가지로 허용 휨인장응력 -4 MPa를 초과하여 취약부가 존재하는 것으로 나타났다. 단주기 지진파가 작용할 때 지하구조물 고정단 모델의 최대 휨압축응력은 연속체 모델의 극경암 조건(Sb1)에 비해 62층 지하 5층/7층 각각 2배/1.1배 증가하였고, 경암조건(Sb2)에 비해 0.9배/0.5배 감소하였다. 또한, 장주기 지진파가 작용할 때 1.2배/4.6배, 1.3배/1.9배 증가하였다. 이는 모델별 같은 강성을 가진 지상 구조물에 대해 연속체 모델은 입력지진파가 지반을 통하여 증폭되어 전달되고 이로 인하여 앞선 수평변위 서술과 마찬가지로 구조물에 큰 수평변위를 발생시키고, 그에 따라 휨응력이 작게 산출된다. 하지만 지하구조물 고정단 모델은 증폭되지 않는 입력지진파가 바로 구조물에 전달되어 수평변위가 작게 산출되었고, 그에 따라 휨응력이 크게 발생하였기 때문에 이러한 현상이 나타난 것으로 판단된다. 결과적으로 지하구조물 고정단 모델이 연속체 모델보다 휨압축응력을 약 1.6배 크게 산출하여 과대예측하는 것으로 나타났다.

한편, PGA 0.154 g가 작용할 경우 지상 62층 지하 5층 초고층 건물을 대상으로 지진파 종류 및 적용 모델에 따른 가진 시간 35초에서의 구조물 부재의 최대 휨압축 및 인장응력을 Fig. 9와 같이 도시하였다. 지하구조물 고정

단 모델의 최대 휨압축응력은 Fig. 8과 마찬가지로 단주기(SW), 장주기 지진파(LW)일 때 연속체 모델의 극경압 조건 보다 2배 증가, 경압 조건(Sb2)보다 0.9배 감소한 것으로 나타났다. 한편, 인장응력의 경우 지하구조물 고정 단 모델은 단주기 지진파가 작용할 때 연속체 모델의 극경압 조건 보다 1.3배 증가, 경압 조건은 0.7배 감소하였고 장주기 지진파의 경우 2.6배, 3.7배 정도 증가하여 지하구조물 고정단 모델이 연속체 모델보다 최대 휨인장응력 도 압축응력의 경우와 마찬가지로 크게 산출하는 것으로 나타났다.

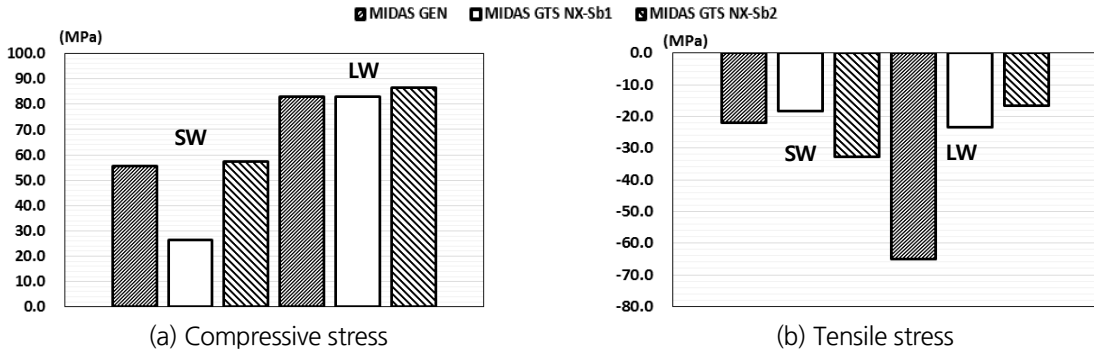
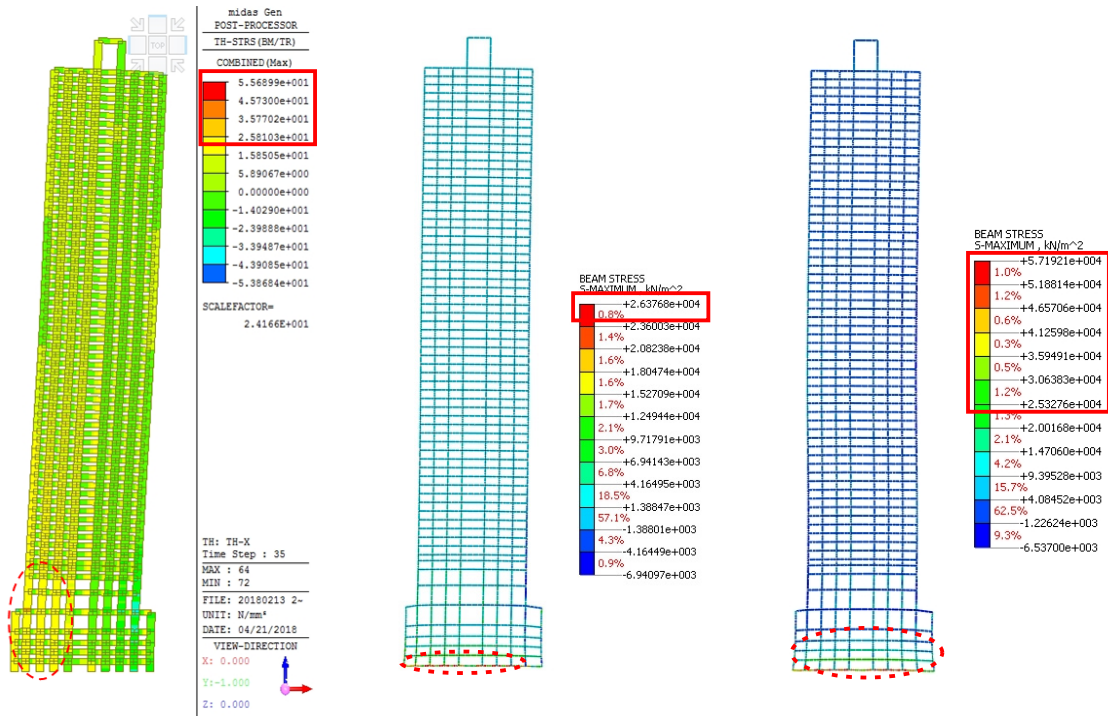


Fig. 9. Maximum bending stress of structural member according to seismic wave type (62F-B5, PGA 0.154 g, dytime 35 sec)

6.4 구조물의 취약부 분포도

구조물의 취약부를 분석하기 위하여 Fig. 10과 같이 PGA가 0.154 g의 단주기 지진파가 가해진 후 구조물의 최대 수평변위가 발생하는 35초 때, 지상 62층 지하 5층의 초고층 건물(62F-B5)을 대표단면으로 부재의 휨압축응력 분포도를 지하구조물 고정단 모델(MIDAS GEN)과 연속체 모델(MIDAS GTS NX Sb1, Sb2)을 사용하여 도시하였다. 허용 휨압축응력을 초과하는 휨압축응력 부분을 타원으로, 범례의 범위를 사각형으로 각각 표시하였다.

서술의 편의상 지상부 기둥은 좌·우측으로 나누어 외각으로부터 1, 2번 기둥으로, 지하부 기둥은 마찬가지로 좌·우측으로부터 1, 2, 3 번 기둥으로 구분하였다. 코어부는 지상, 지하 동일하게 좌·우측으로 구분하였다. 두 적용 모델 모두 1차 모드형상으로 거동하는 것으로 나타나 지하부가 취약한 것으로 판단된다. 구체적으로 지하구조물 고정단 모델의 취약부는 지하 1~5층의 1~3번 좌측 기둥 및 벽체, 지상은 1, 2층의 1~3번 좌측 기둥 및 벽체에서 지상 1, 2층 및 지하부 좌측 부분에 한정하여 발생하였다. 반면, 연속체 모델 적용 시 극경압 (Sb1)의 경우는 지하 5층 좌측 모든 기둥 및 코어, 우측 2, 3번 기둥과 그 주변 슬래브에서 발생하였고, 경압 (Sb2)의 경우는 지하 2~5층의 모든 기둥과 그 주변 슬래브에서 발생하여 극경압 조건에 비해 취약부가 지하부 전체로 확대되는 것으로 나타났다. 따라서 연속체 모델의 취약부는 지하구조물 고정단 모델에 비해 지하부 좌·우측 전반에 걸쳐서 발생하는 경향을 보였고, 지반조건이 약할수록 취약부의 범위가 지하부 위층으로 확대되는 것을 알 수 있었다.



(a) Fixed-end model (b) Complete system model (Sb1) (c) Complete system model (Sb2)

Fig. 10. Bending compressive stress distribution of building (62F-B5, SW, 0.154 g, dytime 35 sec)

지하구조물 고정단 모델(MIDAS GEN)과 연속체 모델(MIDAS GTS NX Sb1, Sb2)의 지상 62층 지하 7층의 초고층 건물이 PGA가 0.154 g의 단주기 지진파가 가해질 때, 구조물에 최대 수평변위가 발생하는 가진 시간 37 초 때의 건물 부재의 휨인장응력 분포를 Fig. 11에 도시하였다. 이 때 휨인장응력이 취약한 부분을 타원으로 표시하였다. Fig. 11에서와 같이, 두 적용 모델의 취약부가 다르게 나타났는데, 이는 지하구조물 고정단 모델은 2차 모드형상을 보이는 반면, 연속체 모델은 1차 모드형상을 보이기 때문인 것으로 판단된다. 지하구조물 고정단 모델의 취약부는 지하 1~5층의 우측 벽체와 우측 1~3번 기둥, 지상 1, 2층의 우측 1, 2번 기둥 및 벽체에서 발생하였다. 반면, 연속체 모델 적용 시 극경암(Sb1)의 경우는 지상 1~15층의 우측 벽체, 지하 3층의 우측 1~3번 기둥에서 발생하였다. 또한, 연속체 모델 적용 시 경암 조건(Sb2)의 경우는 지하 5층~지상 29층 우측 벽체와 우측 1~3번 기둥에서 취약부가 발생하였다. Fig. 10의 휨압축응력 결과와 달리 지하구조물 고정단 모델에 비해 연속체 모델의 경우 취약부가 지상부로 확대되었다. 연속체 모델의 경우 지반이 연약할수록 취약부의 수가 늘고 범위도 확대됨을 알 수 있었다.

한편, 두 적용 모델의 모든 해석 경우에 있어서, 장주기 지진파가 가해질 때는 구조물의 취약부가 단주기 지진파의 경우와 동일한 위치에서 발생하였지만, 범위는 다소 확대되어 나타남을 확인할 수 있었다.

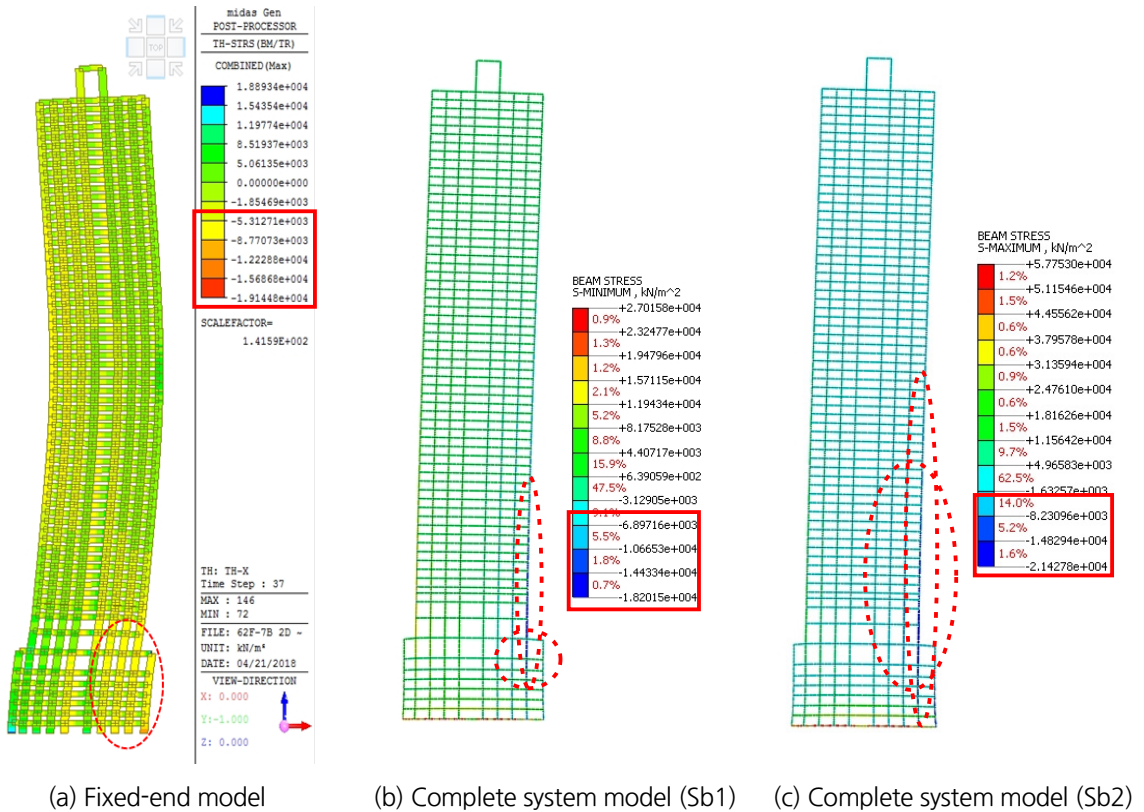


Fig. 11. Bending tensile stress distribution of building (62F-B7, SW, 0.154 g, dytime 37 sec)

7. 결론

본 연구에서는 내진해석 수행 시 건물만 고려하는 지하구조물 고정단 모델과 건물과 지반을 함께 고려하는 연속체 모델에 대한 파라미터별로 민감도 분석을 수행하고 SSI를 고려한 동적해석의 타당성을 비교·검증하였다.

1. 연속체 모델이 지하구조물 고정단 모델보다 고유주기가 더 크게 산출되고, 지반 수평변위를 제외한 건물 최상층의 순수 수평변위도 크게 나타났다. 또한 동일한 지진파와 크기가 가해질 때 지하구조물 고정단 모델이 연속체 모델보다 횡압축 및 인장응력을 크게 산출하여 과대평가하는 것으로 나타났다. 따라서 내진해석 시 SSI를 고려한 연속체 모델(MIDAS GTS NX)이 지하구조물 고정단 모델(MIDAS GEN) 보다 경제적인 것으로 판단된다.
2. 한편 지진파 크기 및 종류에 관계없이 연속체 모델의 취약부는 지반이 연약할수록 범위가 확대되어 나타났다. 또한 지하구조물 고정단 모델은 국부적으로 취약부가 발생한 반면, 연속체 모델은 지상과 지하부에 전반적으로 분포하여 발생하였다.

종합적으로 판단할 때, 지반을 고려하는 연속체 모델을 사용하여 SSI를 고려하는 것이 타당한 것으로 판단된다. 하지만, 본 연구는 외국의 특정 지진파를 사용하여 초고층 건물만을 대상으로 제한적인 파라미터에 대한 민감도 분석을 토대로 수행되었습니다. 향후 국내 계측 지진파를 사용하고, 저층건물을 포함한 다양한 건물 종류와 파라미터에 대해 면밀한 민감도 분석을 수행하여 두 모델의 타당성이 비교·검증되어야 할 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. Hanyang University (2017), Development of artificial intelligence algorithm for real time damage detection based on acceleration sensor arrangement, The 2016 Commission Research Report of Multi Disaster Countermeasures Organization, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, pp. 51.
2. Kim, S.Y. (2016), "Economic and seismic performance evaluation of irregular tall steel buildings", Journal of the Korean Society of Steel Construction, Vol. 28, No. 3, pp. 23-27.
3. Lysmer, J., Kuhlemeyer, R.L. (1969), "Finite dynamic model for infinite media", Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 95, No. 4, pp. 859-878.
4. MIDAS Information Technology Co. (2016), MIDAS GTS NX user manual, MIDAS Information Technology Co., Korea, pp. 445.
5. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2016), Concrete standard specification, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea, pp. 358.
6. 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. 253.
7. Newmark, N.M. (1959), "A method of computation for structural dynamics", Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 85, No. 3, pp. 67-94.
8. Pacific Earthquake Engineering Research Center (2017), Tall building initiative guidelines for performance-based seismic design of tall buildings, University of California, Berkeley, pp. 147.
9. Seoul Metropolitan Government (2006), Ground investigation manual, Seoul Metropolitan Government, pp. 130.
10. 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.

11. You, K.H., Kim, Y.J. (2018), “A preliminary numerical analysis study on the seismic stability of a building and underground structure by using SSI”, *Journal of Korean Tunneling and Underground Space Association*, Vol. 20, No. 1, pp. 23-38.
12. You, K.H., Park, Y.J., Hong, K.Y., Kim, J.K. (2005), “Numerical estimation for safety factors of tunnels considering the failure of supports”, *Journal of Korean Tunneling and Underground Space Association*, Vol. 7, No. 1, pp. 37-49.