

세 가지 평면 형상에 따른 비틀림 비정형 빌딩구조물의 지진응답 분석

Seismic Response Analysis of Twisted Buildings with Three Planar Shapes

이 다 혜*
Lee, Da-Hye

김 현 수**
Kim, Hyun-Su

강 주 원****
Kang, Joo-Won

Abstract

In this paper, a twisted shape structure with an elevation form favorable to the resistance of vibration caused by wind loads is selected from among the forms of high-rise buildings. The analytical model is a square, triangular, and hexagonal plane with a plane rotation angle of one degree from 0 to 3 degrees per each story. As a result of the analysis, as the twist angle increased, story drift ratio is increased. Responses with different eccentricity rates were shown by analytical models. Therefore planar shapes designed symmetrically to the horizontal axis of X and Y are considered advantageous for eccentricity and torsion deformation. In the case of the bending moment of the column, the response was amplified in the column supporting the base floor, the roof floor, the floor in which the cross-section of the vertical member changes, and the floor having the same number of nodes as the base floor. Finally, the axial force response of the column is determined to be absolutely affected by the gravity load compared to the lateral load.

Keywords : Atypical structure, High-rise building, Twisted, Planar shape, Twist angle, Seismic response

1. 서론

전 세계적으로 선진 기술력의 출현에 따라 건설 시장에서의 물리적 한계가 점차 사라져가고 있다. 건축 재료의 강도 증가에 따른 기둥의 소요 단면적이 감소하여 건축물이 경량화가 되면서 건축물의 고층화와 대형화가 가능해졌다. 현대의 고층 건축물은 도시의 인구 과밀화 현상을 해결함과 동시에 단순히 높이만 높아지는 것이 아닌 다양한 입단면 형태를 가짐으로써 랜드마크의 역할을 하고 있다.

자유형상(Free-form) 혹은 비정형(Atypical)이라 불리는 다양한 형태의 고층 건축물은 대표적으로 건물의 평면이 일정한 각도로 회전된 형태를 가

진 비틀림(Twisted) 형상, 입면의 형상이 경사를 가진 기울어진(Tilted) 형상, 그리고 건물의 단면 또는 평면의 크기가 높이에 따라 감소하는 변단면(Tapered) 형상 등으로 구분할 수 있다.

구조물의 높이가 증가함에 따라 인구 밀집 현상에 따른 도시 문제가 해결되고 있지만, 고층화에 따른 풍하중 및 지진 하중과 같은 횡 하중에 취약한 구조적 거동이 나타난다. 또한 비정형 고층 구조물은 다양한 입단면 형상으로 인해 정형 프레임을 가진 구조물에 비하여 자중 자체만으로도 불리한 거동 양상이 나타나며, 횡 하중에 의한 구조적 거동은 예측하기 어려우므로 복잡한 구조해석 및 구조적인 안정성을 검토하여야 한다. 그러나 자유형상 구조물 중 풍하중에 의한 진동 저항에 유리한 입면형태의 구조물인 비틀림 형상 구조물은 입면에 나선형의 곡률(Curvatures)을 지닌 공기역학적으로 설계된 형태이다. 대표적으로 산티아고 칼라트라바의 Turning Torso를 시작으로 비틀림 형상 구조물의 건설이 증가하고 있다. 그러나 구조물의 높이에 따라 일정각도로 증가하는 평면으로 인하여 구조물이 비틀림 형상

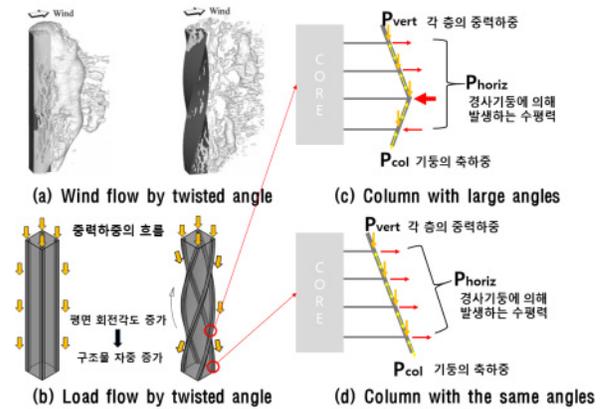
* 학생회원, 영남대학교 일반대학원 건축학과, 석사과정
Dept. of Architecture, Yeungnam University
** 정회원, 선문대학교 건축학부 교수, 공학박사
Division of Architecture, Sunmoon University
*** 교신저자, 정회원, 영남대학교 건축학부 교수, 공학박사
School of Architecture, Yeungnam University
Tel: 053-810-2429 Fax: 053-810-4625
E-mail: kangj@ynu.ac.kr

을 가지며 비틀림 형상 구조물의 평면 회전 각도가 증가함에 따라 횡 변위가 증가하므로 구조물의 횡 강성이 작아진다.¹⁾ 또한 지진하중에 의한 비틀림 형상 구조물의 거동을 예측하기 위해서는 평면 회전각도, 평면 형상, 세장비 등과 같은 다양한 설계 변수에 따라 설계된 해석 모델의 역학적 거동의 특성 분석이 필수적이다.

따라서 본 연구에서는 정사각형 평면을 가진 60층 규모의 정형 구조물과 평면 회전 각도를 설계 변수로 등가 정적 지진하중 조합에 의한 정적응답 분석에 관한 선행 연구²⁾를 바탕으로 세 가지 평면형상을 가진 비틀림 형상 구조물을 모델링하였다. 또한, 각 평면 형상별 정형구조물과 일정한 각도의 평면 회전 각도를 설계변수로 한 해석 모델을 등가정적 하중을 이용한 하중조합에 따른 정역학적 해석을 통해 정적응답을 비교·분석하였다. 이를 통해, 비정형성을 가진 자유형상 구조물 중 비틀림 형상 구조물의 초기 설계 시 내진구조 시스템의 적용을 위한 세분된 설계 변수 선정하기 위한 기초자료를 제시하는 데 목적을 둔다.

2. 선행 연구 동향

일반적인 사각 형태의 평면 형상을 가진 초고층 구조물의 경우, 바람의 난류 성분에 의한 풍방향 진동과 구조물의 풍상 측 모서리에서 박리현상에 의해 형성되는 와류에 의한 풍직각방향 진동 등 풍하중에 대해 복잡한 양상이 나타난다.³⁾ 건축물의 고층화로 인하여 구조물이 세장해질수록 지진하중보다 풍하중에 의해 생성된 진동의 영향이 커지며, 또한 고층 구조물은 자중이 커질수록 건물에 미치는 지진하중의 영향은 증가하지만, 풍하중에 대한 안정성은 증가한다. 공기역학적 입면형상을 가진 비틀림 형상 초고층 건축물의 경우 풍하중에 대하여 유리할 수 있으나 국내의 경우 지진의 발생 빈도 및 규모 증가와 더불어 고유진동주기가 장주기인 지진의 발생 가능성이 존재함에 따라 지진하중에 대한 구조물의 거동과 평면이 크게 비틀린 평면에 연결된 구조부재의 취약 위치를 분석하는 것이 중요하다. <Fig. 1>에 정형구조물과 비틀림 형상 구조물에 작용하는 풍하중의 하중흐름도와 자중 자체만으로 경사진 기동에 발생하는 하중의 흐름을 나타내었다.



<Fig. 1> Load mechanism³⁾

Ali & Moon(2007)⁴⁾은 공기 역학적 형태인 비틀림 형상 구조물은 정적 응답 측면에서 유리하지 않으나 사각 평면의 관성모멘트는 비틀림 각도에 관계없이 동일하여 굽힘으로 인한 변위도 동일하다는 것을 확인하였다.

Moon(2011)은 비틀림 형상 구조물에 다이어그리드 시스템⁵⁾과 아웃리저 시스템⁶⁾을 적용하여 풍하중에 대한 정적 응답을 비교하였다. 그 결과, 평면 비틀림 각도가 증가함에 따라 각 구조 시스템의 횡 강성이 줄어든다 와류 형성을 방해하여 바람에 의한 진동을 완화할 수 있기 때문에 일반적으로 평면이 일정한 구조물보다 풍하중에 대한 진동 저항 능력이 향상함을 확인하였다.

Lee et al.(2012)⁷⁾은 60층짜리 비틀림 아웃리저 시스템의 내진 성능을 탄성 및 비선형 분석을 통해 구조물의 비틀림 각도 증가에 따라 구조물의 강성이 감소하여 최대 변위 및 층간 변위가 증가하고 고유주기가 증가함을 확인하였다.

Kim & Lee(2013)⁸⁾는 철골 대각 가새 골조로 이루어진 비틀림 형상 구조물의 경제성 분석 및 내진 성능 평가를 수행하였다. 이와 같이 국내에서는 이미 국외에서 제시된 프로토타입 모델로 내진 및 내풍성능 검토에 관한 연구가 이루어졌으나 국내의 독자적인 설계프로세스 개발을 위한 연구는 부족한 실정이다.

3. 해석 모델

3.1 해석 모델 개요

본 연구에서는 기본 평면 형태인 정사각형 평면, 정삼각형 평면, 그리고 정육각형 평면을 가진 해석 모델의 정형 구조물과 비틀림 형상 구조물의 평면 형상과 평면 회전각도 별 정역학적 구조 거동의 비교를 위해 상용 해석 프로그램인 Midas Gen Ver. 905를 사용하여 해석 모델을 모델링 하였다. 해석 모델의 평면 형상은 국외 비틀림 형상 고층 구조물의 사례를 기준으로 선정하였으며, 각 평면 형상에 따른 해석 모델의 비교를 위하여 최대 수평거리를 36m, 코어 면적률을 11% 내외로 설계 하였다. XYZ축을 주축으로 각 층의 평면 형상이 동일한 정형 구조물과 한 층당 1.0°, 2.0°, 3.0°의 평면 회전 각도를 가지는 비틀림 형상 구조물을 60층 규모로 모델링 하였다. 각 해석 모델의 명칭은 평면 형상별로 정사각형 평면 해석 모델을 ‘SQ-Model’, 정삼각형 평면 해석 모델을 ‘TRI-Model’, 그리고 정육각형 평면 해석 모델을 ‘HEX-Model’로 표기하였다. 또한 정형 구조물의 경우 ‘Fixed’, 비틀림 형상 구조물의 경우 층당 평면 회전각도 1.0°, 2.0°, 3.0°에 맞춰 각각 ‘1.0Deg’, ‘2.0Deg’, ‘3.0Deg’로 명명하였으며 해석 모델은 <Fig. 2>

와 같다. 이에 따른 해석 모델의 일반사항은 <Table 1> 및 <Table 2>와 같다.

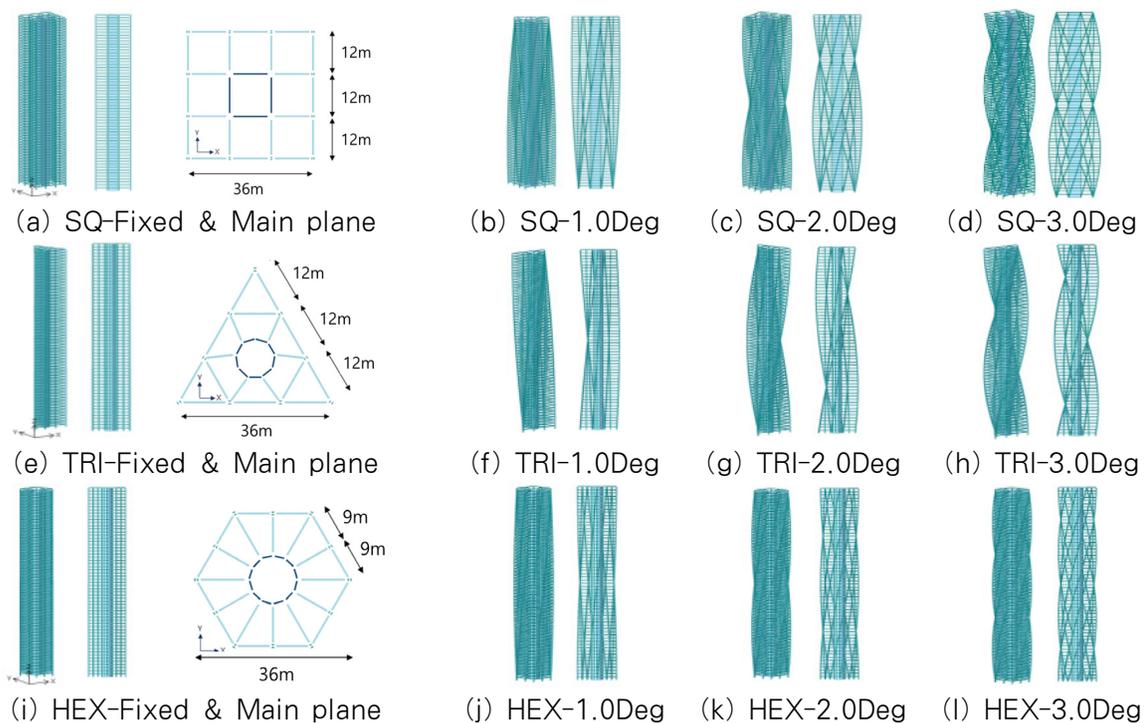
<Table 1> Specification of analytical model

Variable	Analytical model	
Height	3.9mX60story = 234m	
Maximum horizontal distance	36m	
Material	Beam	
	Column	SM275
	Wall	C24
Slenderness ratio	1 : 6.5	
Total mass of structure	SQ-Model	43.200 × 10 ⁵ kgf
	TRI-Model	19.449 × 10 ⁵ kgf
	HEX-Model	28.080 × 10 ⁵ kgf

3.2 해석 방법

평면 형상에 따른 정형 구조물과 평면 회전각도 별 비틀림 형상 해석 모델의 정적해석을 통해 최대 층간변형률, 층별 연직부재의 축력의 합과 기둥의 휨 모멘트, 그리고 편심률(Eccentricity ratio)을 분석하였으며 해석 모델의 휨 모멘트 값은 각 층별 최대로 모멘트를 부담하는 기둥을 선정하여 분석하였다.

이에 적용된 하중조합은 다음 <Table 3>과 같으며 건축구조기준(KDS 41 10 15 : 2019)⁹⁾의 강도설계법에 의한 하중조합을 참고하였다.



<Fig. 2> Analytical model of twisted-shaped building by twist angle

<Table 2> Material section of analytical model

Section	Story	SQ-Model	TRI-Model	Story	HEX-Model
Column	01F~20F	H - 700×700×45/70	H - 800×800×60/90	01F~15F	H - 800×800×60/90
	21F~40F	H - 600×600×30/50	H - 700×700×45/70	16F~30F	H - 700×700×45/70
	41F~60F	H - 500×500×18/28	H - 600×600×30/50	31F~45F	H - 600×600×30/50
				46F~60F	H - 500×500×18/28
Beam	H - 700×300×13/24		H - 800×300×14/26		
Wall	01F~15F	600mm	550mm		600mm
	16F~30F	500mm	450mm		500mm
	31F~45F	400mm	350mm		400mm
	46F~60F	300mm	250mm		300mm

<Table 3> Load combination case

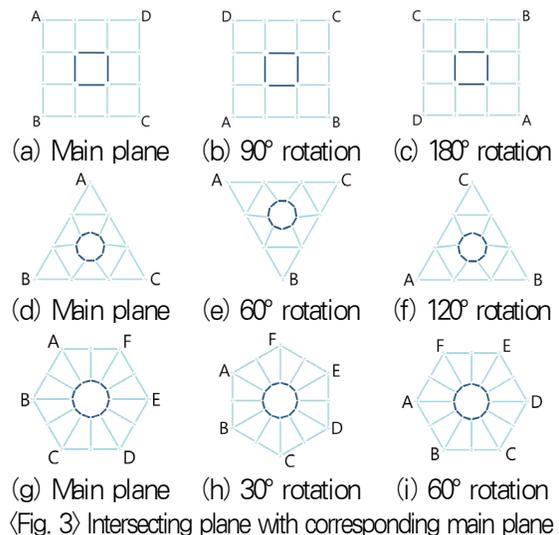
Load Case	Description
Case 1	Ex GL : Gravity load Ex, Ey : Equivalent static
Case 2	1.2GL + 1.0 seismic load in X, Y direction (1.0Ex+0.3Ey)

하중조합 'Case 1'은 X방향 등가정적 지진하중만 고려한 하중이며 'Case 2'는 120%의 중력하중과 X방향 등가정적 지진하중의 100%와 직각 방향의 하중의 30%에 대한 하중 효과의 절댓값 합을 이용하여 하중 방향과 직각 방향의 하중을 동시에 고려할 수 있도록 100:30법을 적용하여 조합하였다. 중력 하중은 중력 하중과 활하중 및 적설하중을 고려하여 산정하였으며 정사각형, 정삼각형, 정육각형 평면 해석 모델의 각 층당 720kN, 324kN, 468kN을 절점 하중으로 재하 하였다.

평면 형상에 따른 해석 모델의 총 평면 회전각도는 <Fig. 3>와 같이 SQ-Model의 경우 90° 마다, TRI-Model은 60°, 그리고 HEX-Model은 30° 마다 기준층 평면과 동일한 절점 수를 가진다. 이에 따라 정사각형 평면 해석 모델의 경우 SQ-2.0Deg 모델의 46층, SQ-3.0Deg 모델의 31층과 Roof층의 16개 절점에 45kN, 그리고 이를 제외한 평면의 24개 절점에 30kN을 재하 하였다. 정삼각형 평면 해석 모델의 경우 TRI-1.0Deg 모델의 Roof층, TRI-2.0Deg 모델의 31층과 Roof층, TRI-3.0Deg 모델의 21층, 41층과 Roof층의 18개 절점에 18kN, 그리고 이를 제외한 평면의 27개 절점에 12kN을 재하 하였다. 마지막으로 정육각형 평면 해석 모델의 경우 TRI-1.0Deg 모델의 31층과 Roof층, TRI-2.0Deg 모델의 16층, 31층, 46층과 Roof층, TRI-3.0Deg 모델의 11층, 21층, 31층, 41층, 51층과

Roof층의 24개 절점에 19.5kN, 그리고 이를 제외한 평면의 36개 절점에 13kN을 재하 하였다.

세 가지 평면형상의 해석 모델에 적용된 등가정적 지진하중(Equivalent Static Seismic Load)은 내진설계 기준(KDS 41 17 00 : 2019)⁹⁾을 적용하여 지진구역 I에 해당하는 중요도(1)의 건축물을 기준으로 <Table 4>와 같이 지진하중을 산정하였다.



<Table 4> Seismic load factors

Contents	Value
Seismic Zone	1
Zone factor (S)	0.22
Site class	S3
Importance factor	1.2
Approximate period (sec)	5.69
Response modification factor (R)	4.5

지진의 건물 수직축에 대한 회전성분, 실제와 계산상의 오차, 건물저면의 변화로 지반운동이 상이하게 작용하여 발생한 비틀림 등을 고려하기 위해 각 해석 모델의 편심은 각 층의 질량중심점에 평면치수의 5%를 가산하여 우발편심을 적용하였다.

4. 해석 결과

4.1 최대 층간변형률

모든 해석 모델의 층간 변형률은 하중조합 Case1과 Case2를 적용하여 산정된 층간 변위에 구조물의 특성에 맞춰 변위 증폭 계수(C_d)와 중요도 계수(I_E)를 적용하여 산출하였다. 현행 건축물 내진설계 기준(KDS 41 17 00 : 2019)⁹⁾에 따라 허용 층간 변형률을 '0.015'로 제한하였다. 다음 <Table 5>는 해석 모델의 층별 최대 층간 변형률을 나타낸 표이다.

각 평면 형상에 따른 비틀림 형상 해석 모델은 정형 해석 모델에 비해 평면 회전각도가 증가할수록 층간 변형률이 증가하는 양상이 나타났다. 또한 하중조합 Case 1에서 TRI-3.0Deg 모델을 제외한 해석 모델은 허용 층간 변형률인 0.015를 만족하였으며, 중력하중이 포함된 하중조합 Case 2에서는 TRI-3.0Deg 모델과 HEX-3.0Deg 모델을 제외한 해석 모델 모두 허용 층간 변형률인 0.015를 만족하였다. 이는 평면 회전각도 증가에 따른 기둥의 경사각도 증가에 의해 횡 강성이 감소된 것으로 판단된다.

4.2 편심률 분석

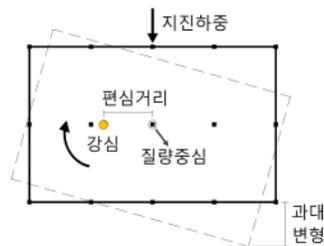
<Fig. 4>와 같이 구조물에 지진하중 발생 시 구조물의 질량중심(Center of gravity)에 지진하중이 작용하면, 기둥, 내력벽, 브레이스와 같은 내진 요소의 강도가 강심(Center of rigidity)을 통해 저항하며 이를 중심으로 구조물이 회전한다. 질량중심과 강심 사이의 거리인 편심 거리가 긴 구조물은 강심으로부터 거리가 먼 부재에 과대한 변형이 발생하여 각 층 내력을 저하되고 지진하중이 집중된다.

따라서 본 연구에서는 각 평면 형상별 비틀림 형상 해석 모델의 강심과 질량중심을 산정하여 수평방향인 X 방향에 대한 편심률을 산출하여 <Fig. 5>에 그래프로 나타내었다. 해석 결과, 정사각형 평면 해석 모델의 경우 Roof층과 2층에서 편심률이 크게 나타났다. 또한 SQ-1.0Deg 모델의 각 층에 대한 편심률이 가장 크게 나타났으며 가장 낮게 나타난 SQ-Fixed 모델에 비하여 최대 편심률이 약 1.38배 크게 나타났다. 정삼각형 평면 해석 모델의 경우 2층에서 큰 응답이 나타났으나 그 이

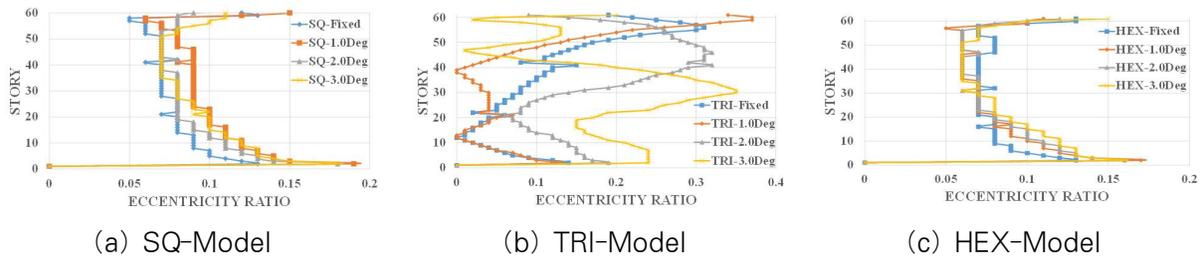
외의 층의 편심률은 응답은 상이하게 나타났다. TRI-Fixed 모델과 TRI-1.0Deg 모델은 40층 이상인 고층부에서 편심률이 증폭하는 양상이 나타났으며, TRI-2.0 Deg 모델과 TRI-3.0Deg 모델은 총 평면 회전 각도가 90°가 되는 층에서 최대 편심률이 나타났다. 정육각형 평면 해석 모델의 경우 30층 이하에서는 평면 회전각도가 클수록 편심률이 증가하는 양상이 나타났으나 그 이상의 층에서는 HEX-Fixed 모델에 비하여 비틀림 형상 해석 모델의 응답이 유사하게 나타났다. 또한 해석 모델 모두 Roof층과 2층에서 큰 응답이 나타났으며 HEX-1.0Deg 모델에서 HEX-Fixed 모델에 비해 최대 편심률이 약 1.30배 크게 나타났다. 각 평면 형상에 따른 해석 모델의 편심률이 크게 나타난 층의 기둥에서 과대 변형과 수평방향의 전단력에 따른 모멘트가 크게 발생할 것으로 판단된다. 또한 해석 모델의 평면 형상에 따라 편심률 양상이 상이한 응답이 나타난 것으로 보이는 수평축인 X, Y축에 대칭으로 설계된 평면 형상이 편심과 비틀림 변형에 대하여 유리할 것으로 판단된다.

<Table 5> Maximum story drift ratio

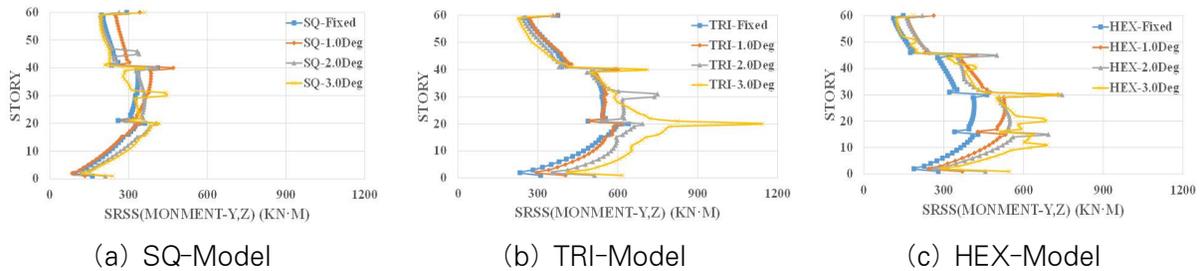
Load	Twist angle	Plane shape		
		SQ	TRI	HEX
Case 1	Fixed	0.0081	0.008	0.0066
	1.0Deg	0.0109	0.0099	0.0089
	2.0Deg	0.0117	0.0121	0.0108
	3.0Deg	0.0133	0.0161	0.0138
Case 2	Fixed	0.008	0.008034	0.006581
	1.0Deg	0.011333	0.010342	0.009402
	2.0Deg	0.012333	0.013419	0.011795
	3.0Deg	0.014	0.017863	0.015214



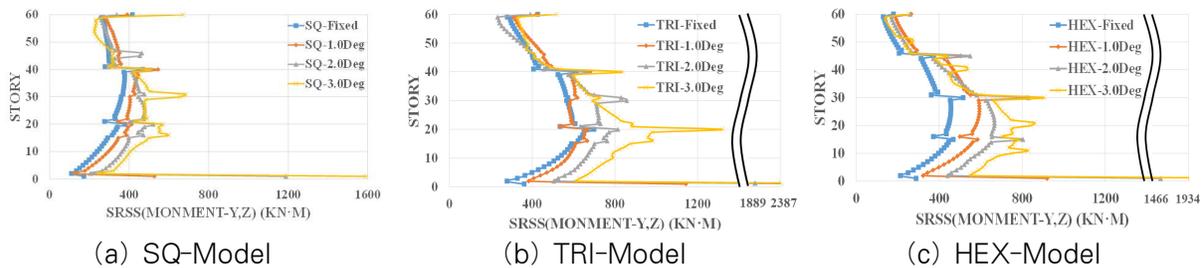
<Fig. 4> Structure deformation by eccentricity



〈Fig. 5〉 Eccentricity ratio



〈Fig. 6〉 SRSS (Moment-y,z) in Case 1



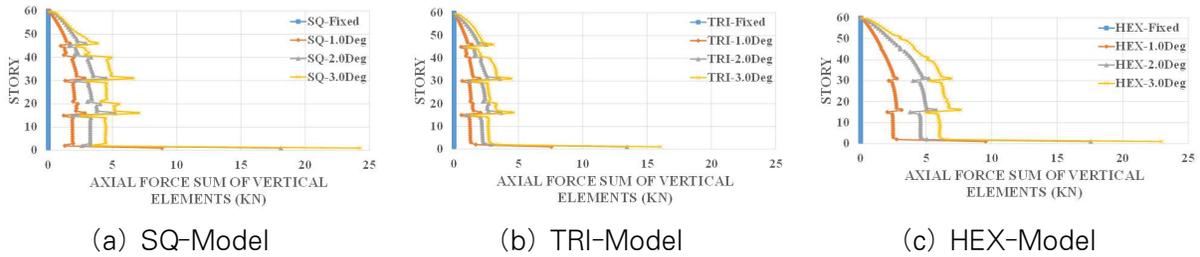
〈Fig. 7〉 SRSS (Moment-y,z) in Case 2

4.3 기둥의 휨 모멘트

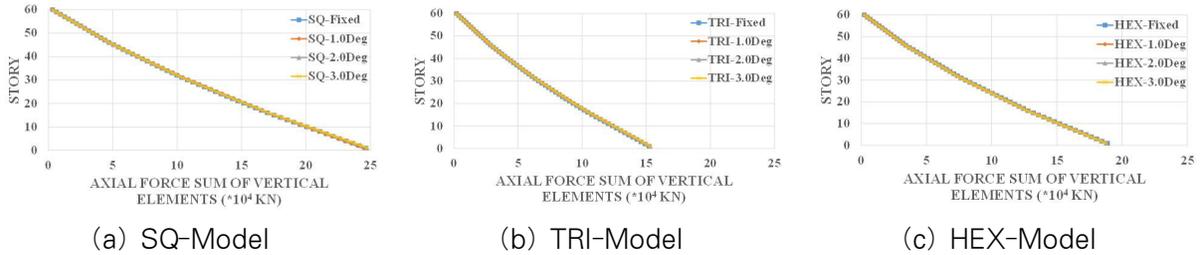
비틀림 형상 구조물의 기둥은 회전하는 평면을 따라 기울어져 이에 연결된 부재가 휨 하중에 취약하므로 이를 저항하기 위한 보강이 필요하다. 본 절에서는 기둥의 부재력을 확인하기 위하여 하중조합 Case 1과 Case 2에 대하여 등가정적해석법을 적용하여 기둥의 휨 모멘트를 검토하였다. 해석 방법은 해석 모델의 최대 휨 모멘트를 부담하는 기둥 부재의 로컬 좌표계(Local axis)인 Z방향 휨 모멘트(M_z)와 Y방향 휨 모멘트(M_y)를 각 층별로 선정하였으며 이를 제곱합제곱근법(SRSS : Square Root of Sum of Square)을 적용하여 두 축에 대한 모멘트를 보정하여 각 층별로 〈Fig. 6〉와 〈Fig. 7〉와 같이 나타내었다. 해석 결과 정사각형 평면 해석 모델의 Case 1에 따른 기둥의 휨 모멘트를 제외한 해석 모델 모두 두 하중조합에서 평면 형상과 관계없이 중·저층부(01F~40F)에서는 비틀림 형상 해석 모델의 평면 회전각도가 증가할수록 해당 층의 기둥부재가 부담하는 부재력이 증가하는 양상이 나타났다. 또한, 고층부(41F~60F)에서는 해

석 모델의 평면 형상에 관계없이 평면 회전각도가 증가할수록 정형 해석 모델이 부담하는 휨 모멘트와의 차가 미소하거나 Fixed모델에 비해 부재력이 줄어드는 양상이 나타났으며, 모든 해석 모델에서 Roof층을 지지하는 하부 기둥에서 휨 모멘트가 증가함을 확인하였다.

또한, 두 하중조합에서 모두 평면 형상별 휨 모멘트는 각 해석 모델의 부재 단면이 변화하는 층과 기준층과 동일한 절점 수를 가지는 층에서 부담하는 휨 모멘트가 증폭하는 양상이 나타났다. 그러나 중력 하중이 포함된 Case 2에서는 비틀림 형상 해석 모델의 평면 회전각도가 증가할수록 기준층에서 부담하는 기둥의 휨 모멘트가 증폭하는 양상이 나타났다. 이는 기준층과 동일한 평면을 가지는 층과 부재 단면의 변화층의 기둥 휨 강성이 다른 층에 비해 상대적으로 크므로 휨 모멘트가 집중된 것으로 판단된다. 특히, 기준층과 Roof층, 부재 단면 변화층과 기준층 평면과 동일한 절점수를 가진 층이 중첩되면 해당 층을 지지하는 기둥의 상부와 하부기둥의 휨 모멘트 증폭 및 감소 현상이 현저함을 확인하였다.



(a) SQ-Model (b) TRI-Model (c) HEX-Model
 <Fig. 8> Axial force sum of Vertical elements in Case 1



(a) SQ-Model (b) TRI-Model (c) HEX-Model
 <Fig. 9> Axial force sum of Vertical elements in Case 2

4.4 연직부재의 축력의 합

본 절에서는 평면 형상에 따른 비틀림 형상 해석 모델의 하중조합별 연직부재가 받는 축력을 분석하기 위해 <Fig. 8> 및 <Fig. 9>와 같이 각 하중조합에 대한 그래프를 나타내었다. 하중조합 Case 2에 의한 연직부재의 축력의 합은 모두 압축력에 의한 (-)방향의 값으로 도출되었으나 명시적 편의를 위하여 절댓값으로 나타내었다.

하중조합 Case 1의 경우 각 평면 형상에 대한 정형 해석 모델은 한 방향 지진하중에 대하여 평면이 회전하지 않고 각 부재가 대칭이므로 각 층의 연직부재가 부담하는 축력의 합은 (+)방향의 축력을 받는 연직부재와 (-)방향 축력이 발생하는 기둥과 코어부재가 서로 상쇄되어 연직부재의 축력의 합이 모든 층에서 0에 수렴하는 것으로 나타났다. 또한 비틀림 형상 해석 모델은 기둥의 휨 모멘트와 같이 단면 부재의 크기가 변하는 층에서 부담하는 부재력이 크게 나타났다. 또한, 평면 회전각도가 증가할수록 기둥의 부재력이 증가하는 양상이 나타났으며 이는 평면 회전각도가 증가함에 따라 기울어진 기둥으로 휨 하중에 의한 수직 분력이 발생한 것으로 판단된다.

하중조합 Case 2의 경우 평면 회전각도가 증가할수록 층별 연직부재의 축력의 합이 증가하였으나 정형 해석 모델과의 값의 차는 미소하였다. 이는 비틀림 형상 해석 모델의 연직부재의 축력이 휨 하중에 의해 발생하는 수직 분력보다 중력 하중에 의한 영향이 지배적이므로 이와 같은 양상이 나타난 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 3가지 기본 평면 형상을 선정하여 평면 회전각도를 변수로 한 정형 구조물과 비틀림 형상 구조물에 중력 하중과 등가정적 지진하중의 하중 조합을 해석 모델에 재하하여 정역학적 구조 거동의 특성을 확인한 후 비교·분석하였으며, 결론은 다음과 같다.

- 1) 하중조합에 따른 각 평면 형상별 층간 변형률은 평면 회전각도가 증가할수록 층간 변형률이 증가하는 양상이 나타났다. 이는 평면 회전각도가 클수록 기둥이 기울어진 각도가 증가하여 휨 강성이 감소한 것으로 판단된다.
- 2) 평면 형상에 따라 편심률을 분석한 결과, 편심률의 양상이 해석 모델 별로 상이한 응답이 나타났다. 이는 수평축인 X, Y축에 대칭으로 설계된 평면 형상이 편심과 비틀림 변형에 대하여 유리할 것으로 판단된다. 또한 편심률이 크게 나타난 층에서의 연직부재에 과도한 변형과 수평 방향의 전단력에 따른 모멘트가 크게 발생될 것으로 판단된다.
- 3) 평면 형상별 기둥의 휨 모멘트를 SRSS법으로 비교·분석한 결과, 두 하중조합에서 모두 기준층의 기둥과 Roof 층을 지지하는 하부 기둥, 그리고 연직부재의 단면이 변하는 층과 기준층과 동일한 절점을 가진 층을 지지하는 하부 기둥에서 기둥의 휨 모멘트 응답이 증폭되었다. 또한 중력 하중을 포함하는 Case 2에서는 기준층에서 부담하는 기둥의 휨 모멘트가 평면 회전각도가 증가함에 따라 증폭되는 양상이 나타났다.

4) 두 하중조합에 따른 기둥의 휨 모멘트 분석 결과 비틀림 형상 해석 모델의 평면 회전각도가 증가함에 따라 위에서 제시한 네 가지 변수 중 두 가지 이상 중첩되는 층에서 기둥의 휨 모멘트 응답이 현저히 증가되는 양상이 나타났다.

5) 해석 모델의 평면 회전 각도별 연직부재의 축력의 합을 비교·분석한 결과 하중조합 Case 1에서 평면 회전 각도가 증가할수록 기둥의 경사각도가 증가하여 휨 하중에 따른 수직 분력의 증가로 기둥의 축력이 증가하는 것을 확인하였다. 그러나 하중조합 Case 2를 통해 휨 하중에 비해 중력 하중의 영향이 절대적으로 연직부재에 작용하는 것으로 판단된다.

추후에는 본 연구를 바탕으로 다양한 하중조합에 대한 구조물 응답 양상을 분석할 필요가 있으며, 비틀림 형상 구조물의 설계 변수 변화에 따른 내진 성능 및 구조성능을 분석하는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (NRF-2020R1A2B5B01002117)

References

1. H. S. Kim & J. W. Kang, "Evaluation of Structural behavior of Complex-Shaped Diagrid Structural System", Proceeding of KASS Symposium - Spring, Vol.8, No.1, pp.107~110, 2011
2. D. H. Lee, H. S. Kim & J. W. Kang, "Analysis of the Static Characteristics of High-Rise Structures With Twisted Shape", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.20, No.4, pp.93~100, 2020
3. K. P. Cho & O. J. Lee, "Wind-Excited Motions of Tall Buildings with Geometrical Shapes", Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol.25, No.6, pp.21~32 2009
4. H. Tanaka, Y. Tamura, K. Ohtake, M. Nakai,

- Y. C. Kim & E. K. Bandi, "Aerodynamic and Flow Characteristics of Tall Buildings with Various Unconventional Configurations", International Journal of High-Rise Buildings Vol.2, No.3, pp.213~228 2013
5. Mir M Ali & K. S. Moon, "Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects", Architectural Science Review, Vol.50, No.3, pp.205~223, 2007
6. K. S. Moon, "Diagrid Structures for Complex-Shaped Tall Buildings", Procedia Engineering, Vol.14, pp.1343~1350, 2011
7. K. S. Moon, "Outrigger Structures for Twisted Tall Buildings", Advanced Material Research, Vol.255~260, pp.737~741, 2011
8. D. H. Lee, E. S. Kim, D. E. Kang & T. Kim, "Seismic Performance Evaluation of Twisted Outrigger System", 15th World Conference on Earthquake Engineering, Vol.13, pp.10340~10347, 2012
9. Architectural Institute of Korea, Korean Design Standard (KDS 41), 2019

- Received : August 04, 2021
- Revised : August 13, 2021
- Accepted : August 13, 2021