

# 비틀어진 형상(Twisted) 고층 구조물의 평면 회전 각도별 동적 응답 분석

## Dynamic Response Analysis of Twisted High-Rise Structures by Plane Rotation Angle

이 다 혜\*  
Lee, Da-Hye

김 현 수\*\*  
Kim, Hyun-Su

강 주 원\*\*\*  
Kang, Joo-Won

### Abstract

In this paper, the dynamic response was analyzed by performing linear dynamic analysis using historic earthquake loads on twisted-shaped structures and fixed structure among free-form high-rise structures with atypical elevation shape following prior studies. In addition, the dynamic characteristics of the analysis models according to the plane rotation angle of the twisted structure were compared and analyzed. As a result of the analysis, as the plane rotation angle of the twisted structure increased, the interlayer deformation rate increased in the high-rise part of 50th floors or more. The story shear force and the story absolute acceleration were similar in the entire structure. In the case of the story shear force, the response of the twisted shape model was rather reduced in the middle part. As a result of analyzing the dynamic response, the vulnerable layer where the response amplification of the twisted structure occurs was found to be 31st story.

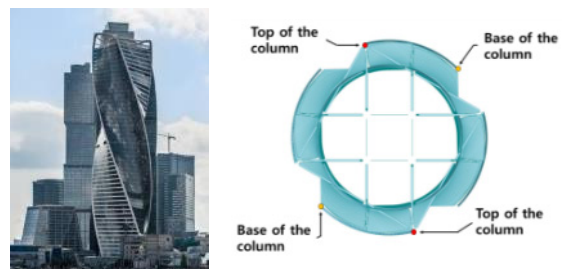
**Keywords :** Atypical structure, High-rise building, Twisted shaped, Torsional angle, Dynamic response analysis

### 1. 서론

최근 세계 여러 주요 도시에 제안되거나 건설되고 있는 초고층건축물은 단순한 직각 형태의 정형프레임 구조에서 벗어나 비정형 및 자유 형상(Free-form)과 같은 다양한 형태를 통해 조형미와 차별성을 강조하고 있다<sup>1)</sup>. 국내의 경우도 ‘포스코타워-송도’ 및 ‘롯데월드타워’와 같이 자유로운 형태의 초고층 구조물이 건설되어 세계 주요 도시들처럼 새로운 랜드마크 설계의 패러다임 전환을 전개하며 경제적·사회문화적 중요한 역할을 하고 있다. 자유 형상 구조물은 매우 다양하지만 크게 3T(Twisted, Tilted, Tapered)로 분류할 수 있다<sup>2)</sup>. 그 중 Twisted 형상 구조물이란 일반적으로 평면의 중심에 위치한 축을 중심으로 바닥이 수평으로 회전하는 건물

을 말한다. <Fig. 1>과 같이 외곽부의 기둥과 같은 구조 부재나 멀리언(Mullion) 등 구조물의 외형은 모두 회전 축을 중심으로 원을 그리듯 나선 형태로 올라가는 비직교(Non-orthogonal) 구조이다<sup>3)</sup>.

Twisted 형상 구조물은 풍하중에 취약한 전형적인 초고층건물과 달리 평면 중심축을 기준으로 평면의 회전 각도가 일정한 각도로 증분되는 형상적 특징으로 바람의 흐름을 제어할 수 있는 공기역학적인 입면 형태이다. 이에 따라 전 세계적으로 비정형 및 자유 형상 초고층 건물의 구조 계획 시 비틀어진 형상(Twisted shape)을 가질 수 있도록 평면 계획을 하였으나, 비틀어진 평면으로 건물의 중량이 급격히 변하거나 중력하중의 흐



<Fig. 1> Twisted shape and sloping columns

\* 학생회원, 영남대학교 일반대학원 건축학과, 석사과정  
Department of Architecture, Yeungnam University  
\*\* 정회원, 선문대학교 건축학부 교수, 공학박사  
School 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

름이 크게 변하는 부분에 연결된 구조 부재로 인해 지진 하중과 같은 횡 하중에 취약할 수 있다. 이처럼 기하학적 비정형성을 가지는 구조물의 구조적 거동을 직관적으로 예측하기 어렵다. 따라서 초기 설계단계에서 내진 성능에 큰 영향을 미치는 핵심 설계 변수를 고려하여 복잡한 구조해석 모델링 및 구조적인 안정성을 검토하는 과정을 거쳐야한다<sup>4)</sup>.

특히 Twisted 형상 구조물에서 비틀어진 평면과 연결된 경사진 기둥은 <Fig. 2 (a)>와 같이 상부층 바닥중에 의해 전달되는 부재의 축 하중만으로도 각 층에서 수평분력을 유발하며 평면을 회전시키는 방향으로 힘이 발생되어 비틀림 모멘트를 형성한다<sup>5),6)</sup>. 이는 각 층의 수평부재에 영향을 줄 수 있으며, Twisted 형상 구조물 전체에 편심과 상당한 전도모멘트를 발생시켜 구조물 전체의 변형을 유발한다<sup>7)</sup>. 또한 구조물의 평면 회전 각도가 증가할수록 경사진 기둥의 경사 각도가 커져 기둥의 횡 강성 감소로 인한 구조물의 횡 변위가 증가할 수 있으며, 구조물의 규모가 커질수록 응답이 증가한다<sup>8)</sup>. 그러므로 수평 전단은 구조시스템을 구성하는 콘크리트 전단벽, 모멘트-저항 골조 혹은 가새 중 하나가 함께 저항하여야 한다. 그러나 콘크리트 전단벽과 모멘트-저항 골조는 단면의 크기 및 철근량의 증가를 통해 저항 능력을 향상시킴에 있어 중력하중과 물량의 증가를 야기하므로 경제성을 고려한다면 가새 시스템을 적용하는 것이 오히려 효율적이다.

이를 보완하는 구조시스템 중 외주 기둥이 코어에 연결되어 일체로 거동하여 횡 하중에 저항하는 아웃리거

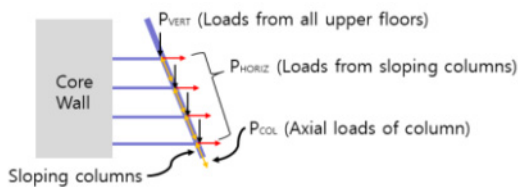
시스템(Outrigger system)<sup>9)</sup>과 <Fig. 2 (b)>와 같이 트러스 요소의 가새를 통해 수직 및 수평분력으로 중력하중을 분산시킬 수 있는 다이어그리드 시스템(Diagonal grid system), 브레이스튜브 시스템(Brace tube system)과 같은 가새 시스템을 적용하여 경사진 기둥 부재의 경사면에 발생하는 힘의 균형을 유지함으로써 안전성을 증가시킬 수 있다<sup>10-12)</sup>. 이에 따라 Twisted 형상 구조물의 내진성능 향상을 위한 횡력저항시스템 설계 시 초기설계단계에서 여러 사례에 대한 Twisted 형상 구조물의 거동과 취약한 위치를 분석할 필요가 있다. 선행 연구<sup>13)</sup>에서는 정형 고층 구조물과 비틀림 형상 고층 구조물의 평면 비틀림 각도를 설계 변수로 두어 내진설계기준에 따른 등가정적 지진하중(Equivalent earthquake load)을 이용하여 정적하중조합을 통해 구조해석을 수행하고, 해석 모델의 역학적 특성을 비교·분석하였다.

본 연구에서는 선행 연구<sup>13)</sup>에 이어 비정형 입면 형태를 지닌 자유 형상 구조물 중 Twisted 형상 구조물과 정형 구조물에 대하여 역사지진하중을 사용하여 선형동적해석방법인 시간이력해석으로 동적응답을 분석하였다. 또한 Twisted 형상 구조물의 평면 회전 각도에 따른 해석 모델들의 동적특성을 비교·분석하여 비정형 고층 건물의 초기 구조설계에 적용할 수 있는 핵심 설계 변수 선정을 위한 기초자료로 제시하는데 목적을 두고자한다.

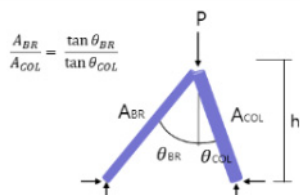
## 2. 해석 모델

### 2.1 해석 모델 개요

본 연구에서는 정형 구조물과 층당 평면 비틀림 각도별 Twisted 형상 구조물의 동적 응답 특성을 비교하기 위해 상용 해석 프로그램인 Midas Gen ver 896.을 사용하여 해석 모델을 모델링하였다. 사용된 해석 모델은 선행 연구<sup>13)</sup>과 동일한 스펙 36m, 부재경간 12m의 정사각형 평면에 코어 면적률 11.11%를 가진 60층 규모의 높이 243m 구조물이다. 기준층부터 최상층까지 동일한 평면 형상을 가지는 정형 구조물과 중앙부에 코어벽체를 두고 외곽부에 기울어진 기둥 및 보를 연결한 Twisted 형상의 구조물을 해석 모델로 선정하였다. 해석 모델은 <Fig. 3>과 같으며, 각 해석 모델의 명칭은



(a) Horizontal force generated by sloping columns



(b) Balanced diagrid of columns and braces<sup>12)</sup>  
 <Fig. 2> Sloping column mechanism

정형 구조물의 경우 'SQ-Fixed', 평면 회전 각도가 1°, 2°, 3° 씩 회전하는 Twisted 형상의 해석 모델은 각각 'SQ-1DEG', 'SQ-2DEG', 'SQ-3DEG'로 명명하였다. SQ-Fixed 모델의 일반사항은 <Table 1>과 같다. Twisted 형상 모델도 SQ-Fixed 모델의 일반사항과 동일하게 적용하여 층당 평면 회전 각도만 달리하였다.

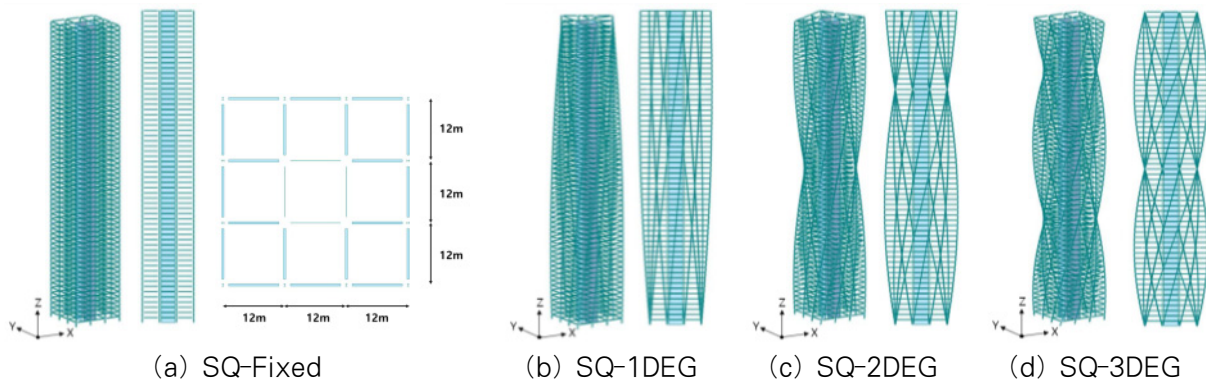
### 2.2 해석 방법

선형동적해석인 시간이력해석법을 통해 SQ-Fixed 모델과 평면 회전 각도를 가지는 Twisted 형상 해석 모델의 층별 연직부재 전단력과 층 절대가속도를 분석하였다. 층 전단력과 층 절대가속도는 각 층 동적응답의 최대값을 선정하여 분석하였으며, 모드별 감쇠비 5%에 모드중첩법을 적용하였다.

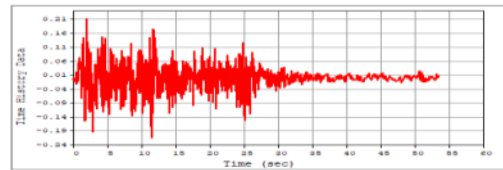
해석 모델의 동적응답을 분석하기 위하여 역사지진과 중 장주기 지진파를 선정하여 X, Y축 양방향으로 가력하였다. 입력 지진파는 엘센트로 지진(EI Centro, 1940), 노스리지 지진(Northridge, 1994), 멕시코 지진(Mexico

<Table 1> Specification of analytical model

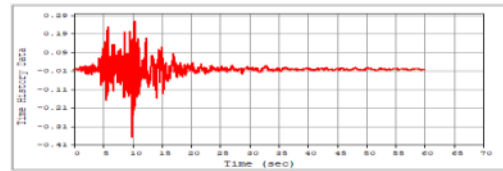
Variable	Specification
Height	3.9m X 60 story = 234m
Main plane	36m X 36m
Main axis	XYZ
Material	Beam SS275
	Column
	Wall C24
Section	Beam H - 400 X 400 X 13/21
	Column H - 458 X 417 X 30/50
	Wall 400mm
Slenderness ratio	1 : 6.5



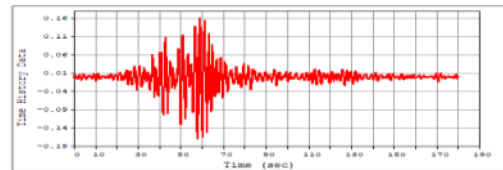
<Fig. 3> Analytical model



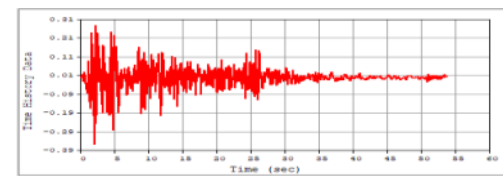
(a) El Centro earthquake



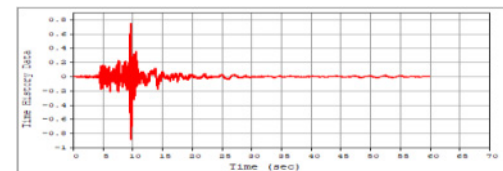
(b) Northridge, Santa Monica earthquake



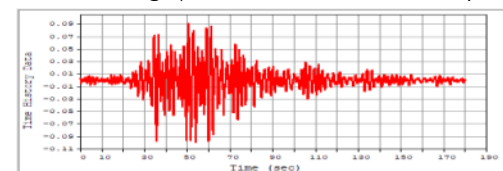
(c) Mexico City earthquake  
<Fig. 4> Ground acceleration DX



(a) El Centro earthquake DY



(b) Northridge, Santa Monica earthquake



(c) Mexico City earthquake  
<Fig. 5> Ground acceleration DY

city, 1985)이다. <Fig. 4>와 <Fig. 5>는 각 지진과의 X, Y방향 가속도 시간이력 그래프이다.

층당 한 평면의 고정하중(Dead Load, DL)은 720kN이다. SQ-Fixed 모델의 정형 평면 및 Twisted 형상 구조물의 기준층 평면과 동일한 평면으로 총 평면 회전 각도가 90°, 180°인 SQ-2DEG 모델의 46층, SQ-3DEG 모델의 61층과 Roof층의 16개 절점에 45kN, 이를 제외한 모든 모델 층의 24개 절점에 30kN을 재하하였다.

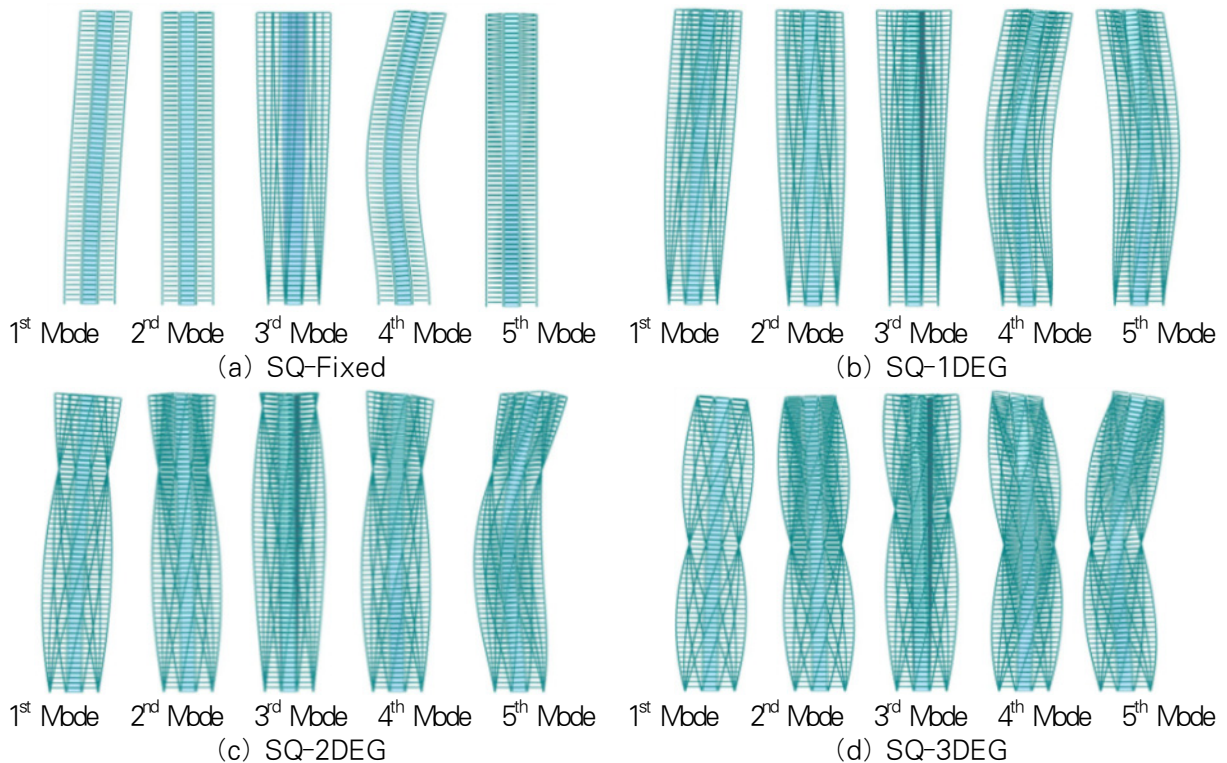
### 2.3 해석 모델의 동적특성

SQ-Fixed 모델과 Twisted 형상 모델의 고유치 해석을 수행하기 위하여 삼중대각행렬(Tri-diagonal Matrix)을 사용하는 Lanczos 고유벡터를 사용하여 10차 모드까지의 고유치해석을 수행하였다. 고유치 해석 결과, <Table 2>와 같이 모든 해석 모델의 X, Y방향 질량참여율이 5차 모드에서 80%를 초과한 것을 확인하였고, 6차 이상 고차모드의 영향은 크지 않았다. <Fig. 6>은 질량참여율이 80%를 초과한 정형구체 구조물과 Twisted 형상 구조물의 1차 모드에서 5차 모드까지의 진동 모드형상(Vibration mode shape)을 나타내었다. <Table 3>에서

<Table 2> Modal participation masses of analysis model

Model	Mode	Tran-X		Tran-Y	
		Mass (%)	Sum (%)	Mass (%)	Sum (%)
SQ-Fixed	1 <sup>st</sup>	63.4543	63.4543	0	0
	2 <sup>nd</sup>	0	63.4543	63.4656	63.4656
	3 <sup>rd</sup>	0	63.4543	0	63.4656
	4 <sup>th</sup>	18.1155	81.5698	0	63.4656
	5 <sup>th</sup>	0	81.5698	18.1066	81.5722
SQ-1DEG	1 <sup>st</sup>	59.4513	59.4513	3.3443	3.3443
	2 <sup>nd</sup>	3.3564	62.8077	59.4757	62.82
	3 <sup>rd</sup>	0	62.8077	0	62.82
	4 <sup>th</sup>	11.1994	74.0071	7.5103	70.3302
	5 <sup>th</sup>	7.494	81.5011	11.167	81.4973
SQ-2DEG	1 <sup>st</sup>	50.1351	50.1351	12.4482	12.4482
	2 <sup>nd</sup>	12.4823	62.6174	50.1219	62.5701
	3 <sup>rd</sup>	0	62.6174	0	62.5701
	4 <sup>th</sup>	0.2959	62.9133	18.7478	81.3179
	5 <sup>th</sup>	18.7067	81.62	0.2882	81.6061
SQ-3DEG	1 <sup>st</sup>	38.1279	38.1279	23.9158	23.9158
	2 <sup>nd</sup>	23.9567	62.0846	38.0883	62.0041
	3 <sup>rd</sup>	0	62.0846	0	62.0041
	4 <sup>th</sup>	4.7897	66.8743	14.3872	76.3913
	5 <sup>th</sup>	14.3372	81.2115	4.8306	81.2219

$T_1 \sim T_5$ 는 각 해석 모델의 1차 모드에서 5차 모드까지의 진동주기를 나타내었다. 정형구조물의 1차 모드 고유



<Fig. 6> Mode shape of analytical model

진동주기는 6.3847초이지만 Twisted 형상 구조물의 평면 회전 각도가 1~3° 씩 증가할수록 함께 증가하는 것을 확인할 수 있다. 모드 형상의 경우 정형구조물과 Twisted 형상 구조물 중 SQ-1DEG 모델과 SQ-2DEG는 1차 모드에서 X축 방향으로 주요 거동이 나타났고, 2차 및 3차 모드에서는 각각 Y축 방향, 비틀린 형태로 거동이 나타났다. SQ-3DEG 모델의 1차 및 2차 모드의 경우 X, Y축과 평행하지 않는 방향으로의 주요 거동이 나타났으나 그 양상은 다른 모델들과 동일하였다.

### 3. 해석 결과

#### 3.1 최대 층간변형률

〈Fig. 7〉은 해석 모델의 층별 층간변형률을 X방향, Y방향으로 나타낸 그래프이다. SQ-Fixed 모델과 Twisted 형상 해석 모델의 층간변형률은 엘센트로 지진,

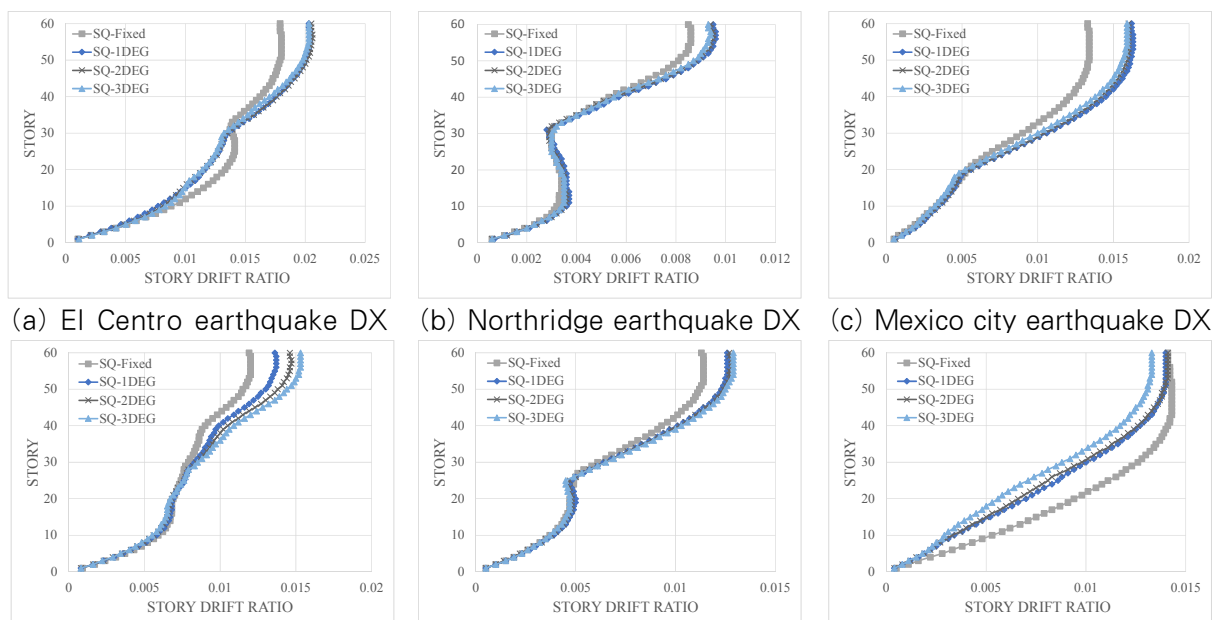
〈Table 3〉 Mode period of analysis model (T, sec)

Mode	SQ-Fixed	SQ-1DEG	SQ-2DEG	SQ-3DEG
$T_1$	6.3847	7.0526	7.1105	7.2661
$T_2$	6.3742	7.0089	7.0725	7.2355
$T_3$	1.3591	1.3916	1.3105	1.3565
$T_4$	1.2509	1.2866	1.2674	1.2583
$T_5$	1.2501	1.2842	1.2648	1.2549

노스리지 지진 및 멕시코 지진 3가지의 역사지진하중을 통한 시간이력하중 조건인 절대치 최대값으로 산정된 층간변위에 변위증폭계수( $C_d$ )와 중요도계수( $I_E$ )를 적용하여 산출하였다. 허용 층간변형률은 내진설계기준(KDS 41 17 00 : 2019)<sup>14)</sup>에 따라 0.015로 제한하였다.

세 지진파에 대한 시간이력해석 결과, 정형구조물의 경우 X방향 엘센트로 지진파에 의한 층간변형률을 제외한 양방향에 대한 모든 지진파에서 허용 층간변형률인 0.015 미만으로 만족하였다. Twisted 형상 구조물의 경우 노스리지 지진파를 제외한 X방향 엘센트로 지진파 및 멕시코 지진에서 허용층간변위를 초과하였다. Y방향의 엘센트로 지진파에서는 SQ-3DEG 모델을 제외한 모든 모델들이 허용층간변위인 0.015를 만족하였다. 세 지진파에 의한 층간변형률의 전체적인 양상은 멕시코 지진파에 의한 Y방향 층간변형률을 제외하고 Twisted 형상 구조물이 정형 예제구조물에 비하여 엘센트로 지진파에서 30층, 노스리지 지진파에서 40층, 멕시코 지진파 X방향에서 20층 이상인 중·고층부로 올라갈수록 커지는 것으로 나타났다. 선행 연구<sup>13)</sup>의 결과와 같이 Twisted 형상 구조물의 층별 평면 회전 각도가 증가할수록 층간변형률이 증가할 것으로 예상했으나 회전 각도별 차이는 크게 나타나지 않았다.

〈Fig. 8〉은 현행 건축물 내진설계기준(KDS : 41 17



〈Fig. 7〉 Story drift ratio of analytical model

00)<sup>14)</sup>을 참고하여 세 지진파에 대한 X, Y방향 최대 층간변형률을 구하고 제곱합제곱근법(SRSS : Square Root of Sum of Square)을 적용한 후 정형구조물의 기준으로 Twisted 형상 구조물의 평면 회전 각도별 층간변형률의 비를 나타낸 그래프이다. 선행 연구<sup>13)</sup> 결과인 등가정적지진하중을 조합한 하중조합에서의 층간변형률 양상과 같이 Twisted 형상 구조물의 평면 회전 각도가 증가할수록 횡 강성이 감소하여 층이 높아질수록 Twisted 형상 구조물의 층간변형률이 높아질 것으로 예상하였다. 그러나 세 역사지진파 하에서는 46층 이상의 층에서 평면 회전 각도가 커질수록 층간변형률이 커지는 양상이 나타났다.

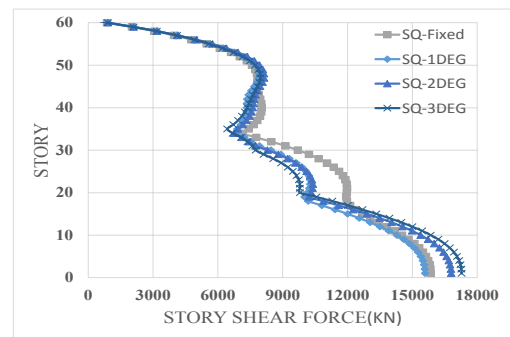
### 3.2 최대 층 전단력

SQ-Fixed 모델과 Twisted 형상 모델의 평면 회전 각도별 각 역사지진파 하에서의 최대 층 전단력을 분석하기 위하여 X, Y방향의 층 전단력 최대값을 산출하였다. 그 다음 현행 건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00:2019)<sup>14)</sup>에 따라 3개의 지반운동에 대한 층 전단력 응답 중 최대 응답을 <Fig. 9>와 같이 X, Y방향 그래프로 나타내었다. 또한 동적응답의 양상을 분석하기 위하여 저층부(1~20F), 중층부(21~40F), 고층부(41F~Roof)로 구분하여 서술하였다.

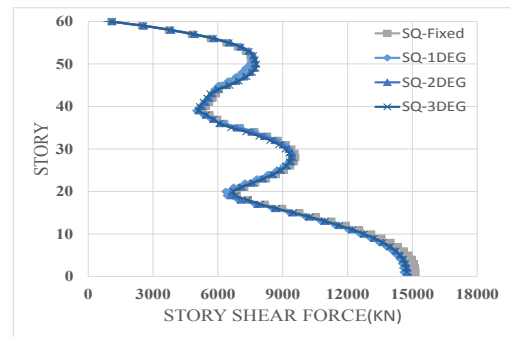
X방향 층 전단력의 최대값은 정형 예제구조물과 Twisted 형상 구조물의 전체적인 양상이 유사하다. 그러나 SQ-Fixed 모델은 43층에서 중층부를 포함한 18층까지 SQ-1DEG, SQ-2DEG 및 SQ-3DEG 모델의 층 전단력에 비해 각 모델별로 최대 19.35%, 17.89%, 25.75% 큰 응답이 나타났다. 또한 Twisted 형상 구조물

의 층 전단력 응답 차이는 고층부에서는 미소하였다. 반면 중층부에서는 SQ-1DEG 모델과 SQ-2DEG 모델이 SQ-3DEG 모델에 비해 층 전단력이 증가하고, 저층부에서는 평면 회전 각도가 커질수록 응답이 증가하는 양상이 나타났다. Y방향의 최대 층 전단력은 전체 해석 모델의 양상이 유사했다. 이는 각 층에 대한 질량중심점과 질량의 차이가 크지 않고, 모드형상에 따른 동적특성이 유사하기 때문인 것으로 사료된다.

<Fig. 10>은 세 지진파에 대한 X, Y방향 최대 층 전단력을 제곱합제곱근법(SRSS)으로 산출하여 SQ-Fixed 모델을 기준으로 Twisted 형상 구조물의 평면 회전 각

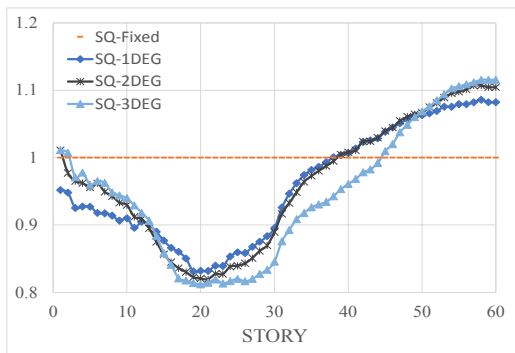


(a) Story shear force DX

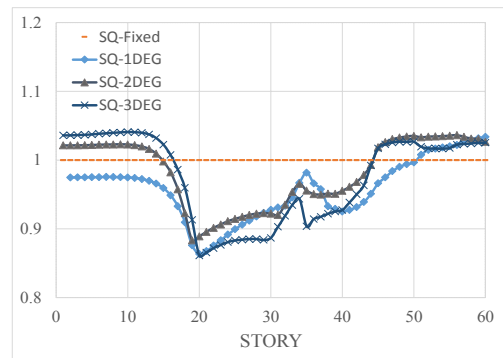


(b) Story shear force DY

<Fig. 9> Maximum story shear force of all earthquake



<Fig. 8> Story drift ratio (SRSS) of all earthquake based on SQ-Fixed



<Fig. 10> Story shear force ratio (SRSS) of all earthquake based on SQ-Fixed

도별 최대 층 전단력의 비를 나타낸 그래프이다. Twisted 형상 구조물의 층 전단력은 50층 이하의 중·고층부에서 정형 해석 모델보다 낮은 양상이 나타났다. 저층부에서 Twisted 형상 구조물의 평면 회전 각도가 증가할수록 기둥의 경사 각도가 증가하여 층 전단력 응답이 증가하는 양상이 나타났으나 SQ-1DEG 모델의 경우 오히려 정형 구조물보다 낮게 나타났다.

### 3.3 층 절대가속도

SQ-Fixed 모델과 Twisted 형상 모델의 역사지진파에 의한 층 절대가속도를 분석하기 위하여 X, Y방향의 층 절대가속도를 분석하였다. 그 다음 층 전단력 분석과 동일하게 3개의 지반운동에 대한 절대가속도 응답 중 최대 응답을 (Fig. 11)과 같이 X, Y방향 그래프로 나타내었다. 정형 구조물과 Twisted 형상 구조물의 층 절대가속도 양상은 유사하다. X방향에서는 모든 모델의 최대 가속도 응답의 차가 미소하나 그 중 SQ-3DEG 모델이

최상부층에서 가속도 응답이 최대로 나타났다. Y방향에서는 최하부층인 기준층에서 모든 해석 모델의 최대 가속도 응답이 동일하게 나타났다.

## 4. 결론

본 연구에서는 정형 구조물과 평면이 일정 각도로 회전하는 Twisted 형상 구조물을 모델링하여 역사지진파인 엘센트로 지진, 노스리지 지진, 멕시코 지진파를 입력하여 층당 비틀림 각도별 모델들의 동적 응답을 분석하였다.

1) 세 지진파에 의한 정형 예제 구조물과 Twisted 형상 구조물의 층간변형률을 비교한 결과, 평면 회전 각도가 증가할수록 층간변형률이 증가하는 정적해석 결과와 달리 Twisted 형상 구조물의 평면 회전 각도가 클수록 증가하는 양상은 나타나지 않았다. 이는 정형구조물과 Twisted 형상 구조물 각 층 평면의 질량중심점 차이가 크지 않으며, 모드형상에 따른 동적 특성이 유사하기 때문인 것으로 판단된다.

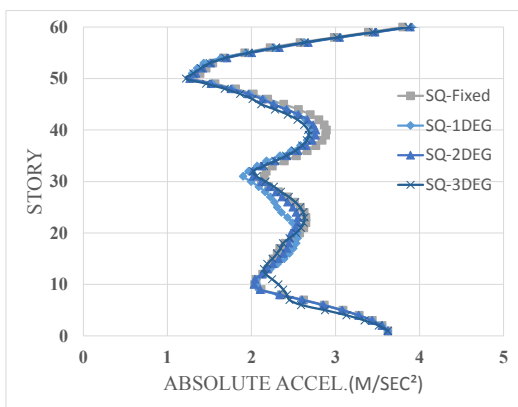
2) 각 층에 대한 층 전단력과 가속도의 최대값에 대한 양상은 정형구조물과 Twisted 형상 구조물이 유사하였지만, X방향 층 전단력의 경우 중층부(21~40F)에서는 Twisted 형상 해석 모델이 오히려 낮게 나타났다.

3) 세 역사지진파에 의한 층간변형률, 층 전단력 및 층 가속도를 분석한 결과, Twisted 형상 구조물의 응답 증폭이 일어나는 중층부인 31층이 취약층으로 나타났으며, 고층부인 50층부터 최상층까지 Twisted 형상 구조물의 평면 회전 각도가 증가할수록 응답이 커지는 양상이 나타났다.

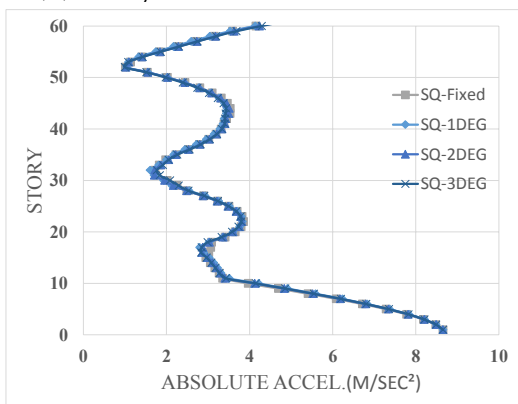
추후에는 정사각형 뿐만 아니라 직사각형, 삼각형, 다각형 등의 다양한 평면 형상을 가진 여러 가지 해석 모델로 역학적 거동을 분석하여 평면 형상과 평면 회전 각도를 설계 변수로 한 연구를 진행할 예정이다.

## 감사의 글

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



(a) Story absolute acceleration DX



(b) Story absolute acceleration DY

(Fig. 11) Maximum story acceleration of all earthquake

## References

1. Lee, J. C., "Complex Shape and Structural System of High-Rise Buildings", Architectural Institute of Korea, Vol.54, No.10, pp.14~17, 2010
2. Kim, H. S., & Kang, J. W., "Vibration Control Performance Evaluation of Smart TMD for a Tilted Diagrid Tall Building", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.11, No.4, pp.79~88, 2011, doi: 10.9712/KASS.2011.11.4.079
3. Akkoyunlu, T. (2018). Parametric BIM Façade Module Development For Diagrid Twisted Structures. Proceedings of the 35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Germany, pp.1073~1078, doi: 10.22260/ISARC2018/0149
4. Tanaka, H., Tamura, Y., Ohtake, K., Nakai, M., Kim, Y. C., & Bandi, E. K., "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, Retrieved from <https://global.ctbuh.org/resources/papers/download/2287-aerodynamic-and-flow-characteristics-of-tall-buildings-with-various-unconventional-configurations.pdf>
5. Son, S. H., & Lee, S. G., "Structural and Construction Technologies with New Design Trend of High-rise Building", Journal of the Korean Society of Steel Construction, Vol.19, No.2, pp.14~22, 2007
6. Chung, K. R., "Structure System for Irregular Shaped Tall Buildings", Architectural Institute of Korea, Vol.52, No.4, pp.59~62, 2008
7. Lee, S. G., "Structural Technologies for Free Form Tall Building Structure", Architecture Institute of Korea, Vol.52, No.4, pp.55~58, 2008
8. Golasz-Szolomicka, H., & Szolomicki, J. (2018). Architectural and Structural Analysis of Selected Twisted Tall Buildings. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Czech Republic, Vol.471, doi: 10.1088/1757-899X/471/5/052050
9. Lee, D. H., Kim, E. S., Kang, D. E., & Kim, T. (2012). Seismic Performance Evaluation of Twisted Outrigger System. Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering 2012, Portugal, Vol.13, pp.10340~10347, Retrieved from [https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012\\_1757.pdf](https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_1757.pdf)
10. Moon, K. S., "Studies on various structural system design options for twisted tall buildings and their performances", The Structural Design of Tall and Special Buildings, Vol.23, No.5, pp.319~333, 2014, doi: 10.1002/tal.1038
11. Moon, K. S., "Structural Design and Construction of Complex-Shaped Tall Buildings", International Journal of Engineering and Technology, Vol.7, No.1, pp.30~35, 2015, doi:10.7763/IJET.2015.V7.761
12. Krolicki, J., Collins, J., & Ko, E. (2010). Dubai Towers, Dubai—Engineering the World's Tallest Sculpture. Proceedings of the Structures Congress 2010, USA, pp.3021~3034, doi: 10.1061/41130(369)272
13. Lee, D. H., Kim, H. S., & Kang, J. W., "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, doi: 10.9712/KASS.2020.20.4.93
14. Architectural Institute of Korea, Seismic Building Design Code (KDS 41 17 00), 2019.
  - Received : March 09, 2021
  - Revised : March 12, 2021
  - Accepted : March 12, 2021