

FSI 해석에 의한 비정형 초고층 빌딩의 풍응답 특성에 관한 연구

박 성 철¹ · 김 호 진¹ · 한 상 을^{1*}

¹인하대학교 건축공학과

A Study on the Wind-Induced Response Characteristics of Freeform Shaped Tall Building using FSI Analysis

Sung Chul Park¹, Hyo Jin Kim¹ and Sang Eul Han^{1*}

¹Architectural Engineering, Inha Univ., Incheon 402-751, Korea

Abstract

In this paper, the wind-induced response characteristics of freeform shaped tall building is studied by using FSI analysis. The analytical models are twist shaped ones at representing type of atypical tall building, and this study focused on the relationship between twist angle and wind acceleration. Firstly, 1-way FSI analysis is performed, so maximum lateral displacement of the analytical model for 100 years return period wind speed is calculated, then the elastic modulus of a structure that satisfies the constraints condition is evaluated. And 2-way FSI analysis is carried out. so acceleration of the analytical model for the evaluated modulus of elasticity and arbitrary density is predicted through time history analysis. The basic model is a set of a square shape, height is 400m, slenderness ratio is 8, and twist model is rotated at square model from 0 to 90 degrees at intervals of 15 degrees and from 90 to 360 degrees at intervals of 90 degrees. According to the result of predicting wind acceleration by the shape of each model, the wind vibration effect of square shape model is confirmed to be sensitive more than a twist shape ones.

Keywords : FSI(Fluid-Structure Interaction), freeform shaped tall building, evaluation of acceleration

1. 서 론

최근 국가 또는 도시를 대표하는 랜드마크로써 초고층 건축물은 건물의 높이를 상승시키고 형상의 비정형화를 통해 그 존재감을 드러내고 있다. 이러한 건축물의 형상 비정형화는 공학적 측면에서 중요한 설계요소 중 하나인 풍하중 산정에 대한 예측과 기존 설계기준에 따라 설계를 어렵게 한다.

초고층 빌딩의 풍응답 특성에 영향을 미치는 요소로 풍속의 변동성과 주변 대기상황, 구조물의 동적 및 공기역학적 특성이 있다. 이 중 건축물의 초기설계 단계에서 풍하중 저감에 최적인자를 선택하여 구조물의 동적 및 공기역학적 특성에 대한 최적안을 도출할 수 있다.

초고층 빌딩의 설계에서 형상은 최적설계에 가장 중요한 인자 중 하나이다. 형상의 변화는 1차적으로 풍압과 풍력의

변화를 발생시키며, 2차적으로는 건축물의 풍상측 모서리에서 박리에 의해 발생하는 와류(Vortex) 및 풍하측의 후류(Wake) 등의 주변 기류에 영향을 미쳐 초고층 빌딩의 풍진동 응답 특성을 예측할 수 없게 된다.

이러한 풍하중의 영향이 크게 작용하는 초고층 건축물의 구조적 안전성과 거주자의 사용성 평가는 계획단계에서 중요한 설계요소로 인식되고 있다. 거주자의 사용성 문제는 풍하중에 의한 초고층 건축물의 가속도 응답에 따라 좌우된다. 구조적 안전성이 확보된 건축물이더라도 사람이 지각하는 어느 일정 가속도 이상이 되면 거주자는 심한 불편함, 현기증을 느끼게 되어 건축물의 기능성을 상실하게 된다. 따라서 설계변경이 어려운 초고층 건축물은 계획단계에서부터 풍하중에 의한 구조적 안전성 및 거주자의 사용성에 대한 충분한 검토가 이루어져야 한다.

* Corresponding author:

Tel: +82-70-8269-3656; E-mail: hsang@inha.ac.kr

Received July 4 2014; Revised July 17 2014

Accepted July 30 2014

©2014 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

일반적으로 초고층 빌딩의 풍하중 산정은 실험적 방법인 풍동실험을 통하여 이루어지고 있는 실정이다. 또한, 풍하중에 의한 건축물의 동적응답 특성에 관한 다수의 연구도 풍동실험을 중심으로 진행되고 있다(Jo and Lee, 2009; Tamura *et al.*, 2010).

바람에 의한 건축 구조물의 풍영향 특성을 파악하는 수치해석적 방법으로는 CFD(Computational Fluid Dynamics) 해석이 있으며, 이를 통하여 풍환경 평가 및 풍압 분포를 파악하여 외장재 설계에 적용하는 방법으로 국한되어 구조물의 동적 특성을 파악하는데 한계가 있다.

하지만, 유체와 구조체의 상호작용을 수치해석적으로 접근하는 FSI(Fluid Structure Interaction)해석을 통하여 풍하중에 의한 구조체의 동적 특성을 파악할 수 있다. 수치해석적 방법은 비교적 실험적 방법에 비하여 결과를 산출하는 시간을 단축할 수 있고, 단시간 내에 다양한 대안에 대하여 검토가 가능하여 계획설계 단계에서 풍하중에 대한 최적의 형상을 결정할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 최근 3T(Twist, Tapered, Tilted)로 대표되는 비정형 초고층 건축물 중 일반적으로 풍진동 저감형으로 가장 적합하다고 알려진 Fig. 1과 같은 Twist 형태 초고층 빌딩의 각도에 따른 진동 특성을 해석하고, 형상에 따른 가속도 응답 비교와 풍하중에 대한 초고층 건축물의 가속도 평가에 있어 FSI 해석의 적용성을 보임으로써 풍하중에 대한 FSI 해석연구의 기초자료가 되고자 한다(Jo and Lee, 2009).



Fig. 1 Freeform shaped tall building

2. 본 론

2.1 FSI 해석의 개요

FSI 해석이란, 유체-구조체의 상호작용을 해석하는 수치해석적 방법이다. 유체는 일반적으로 압력, 온도, 하중을 전달하며 이로 인한 구조체 변형에 대한 정보가 다시 유동장에 전달되어 이에 따른 유체의 해석결과에 영향을 받으면서 양방향 연성해석이 가능한 수치해석이다. 지배방정식은 식 (1), (2)와 같다. [R]은 유체-구조 인터페이스의 각 절점과 관련된 유

효표면적을 나타내는 결합행렬(coupling matrix)이며, 법선 벡터의 방향을 고려한다. 유체-구조 인터페이스에 생성된 유체와 구조물의 하중은 절점자유도가 미지수인 함수이다.

$$[M_s]\{\ddot{U}\} + [F_s]\{U\} = \{F_s\} + [R]\{P\} \quad (1)$$

$$[M_f]\{\ddot{P}\} + [K_f]\{P\} = \{F_f\} - \rho_0[R]^T\{U\} \quad (2)$$

건축분야에서는 아직 생소한 수치해석기법이나 기계, 항공, 선박의 경우와 같이 유체와 밀접한 관계를 갖는 구조체의 해석에 많이 적용되고 있다. FSI 해석은 시스템 내에서 유체와 구조체, 두 가지 해석이 가능하며 구조체의 물질적 특성을 고려하여 해석함으로써 유체에 의한 구조체의 거동을 보다 정확하게 파악할 수 있다. 따라서 풍하중에 의한 초고층 건축물의 거동을 분석하기에 매우 유용한 수치해석기법이라고 사료된다. Fig. 2는 FSI 해석의 개념적 특성을 나타내고 있다.

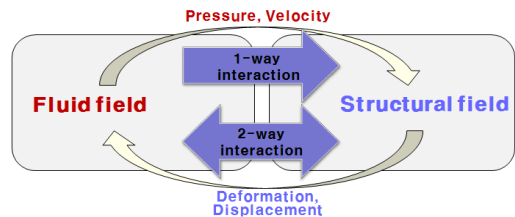


Fig. 2 Concept of FSI Analysis

본 논문에서 활용한 프로그램은 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS이며, 여러 산업분야에서 설계하는 다양한 제품들에 요구되는 성능과 기준을 검증하기 위해 각 분야에 적합한 해석환경을 갖추고 있다. 구조, 진동, 열전달, 전자장, 압전, 음향, 열유체, 충돌낙하까지의 넓은 해석기능을 전처리, 솔버, 후처리 일체형으로 제공하고 있으며, 자장-구조, 정전장-구조, 전류-전열, 유체-구조, 전열-구조, 자장-전열 등의 서로 다른 물리계의 상호작용을 고려하는 다양한 연성해석도 같은 환경 내에서 실행 가능하다. 이 중 바람인 유체와 건물인 구조의 상호작용을 고려한 연성해석을 도입하였다.

FSI 해석은 해석방식에 따라 다시 단방향 연성해석과 양방향 연성해석으로 나뉜다. 단방향 연성해석은 유동결과에 의한 구조물의 변형률이 크지 않아 구조물의 변형이 유동에 별 영향을 주지 않을 경우 사용되며, 양방향 연성해석은 유체로 인한 구조 변형으로 인하여 유체의 결과 자체가 다시 영향을 받게 되는 경우 적용된다.

따라서 풍하중에 의한 초고층 건축물의 응답해석에서는 단방향 연성해석을 통하여 최대 횡 변위, 밀면 전단력, 전도 모멘트와 같은 결과를 산출할 수 있으며, 양방향 연성해석을

통해 풍가속도를 예측할 수 있게 된다.

2.2 연구수행 절차

초고층 빌딩의 경우에는 풍하중에 대하여 구조적 안전성 및 사용성의 두 가지 측면을 모두 만족해야 한다. 본 연구에서는 사용성 평가의 측도인 가속도 예측 해석으로써 구조적 안전성이 확보되었다는 조건하에 연구가 진행되어야 한다.

본 연구의 수행절차의 흐름은 Fig. 3과 같다. 우선 100년 재현주기 풍속에 대한 해석모델의 최대 횡 변위에 대해 1-way FSI 해석을 수행하여, 이러한 제한조건을 만족하는 구조체의 탄성계수를 탐색하여야 한다. 다음은 앞서 탐색된 탄성계수와 임의의 밀도를 가지는 해석모델의 풍가속도를 2-way FSI 해석을 통하여 예측하게 된다. 또한, 모드해석을 통하여 해석모델의 1차 고유 주기를 출력할 수 있다.

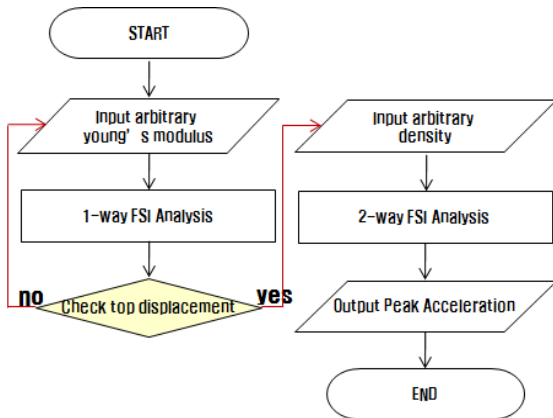


Fig. 3 Flow chart of FSI analysis

3. FSI 해석 시뮬레이션

3.1 FSI 해석모델 및 경계조건

기본모델은 Square 형상으로 높이 400m, 변장비 1:1, 세장비 8이 적용된 해석모델이다. 뒤틀림 형태의 해석모델은 Fig. 4와 같이 0도에서 90도 범위 내에서는 회전 각도를 15도 간격으로 적용하였고, 90도에서 360도까지 90도 간격으로 회전시켰다(Tamura *et al.*, 2010).

해석모델은 물리적 특성이 균일한 Solid 연성 구조체로 규정하며, 바닥면은 고정된 상태이다. 해석영역의 경계조건은 입구경계에서 설계풍속의 입력조건을, 출구경계에서는 특별한 경계조건을 적용하지 않도록 하였다. 또한 유체영역과 해석모델의 경계면 및 바닥면은 점착조건(Non Slip Wall), 윗면 및 양 옆면에는 비점착조건(Slip Wall)을 적용하였다. 전체 도메인(Domain) 크기는 1500×1500×800(m³)이다.

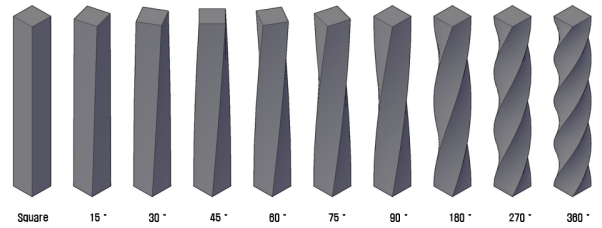


Fig. 4 The analytical model of twisted shape

3.2 설계풍속

구조설계에 적용되는 기준으로 '건축구조설계기준'에 따라 건축물의 구조적 안전성 차원에서 100년 재현주기에 대한 풍 변위 제한을 H/500로 하였다.

또한 일반적으로 건축물의 사용성 평가기준이 되는 국제기준인 ISO, NBCC, AIJ를 살펴보면 풍속의 재현주기는 1, 5, 10년을 주로 사용하고 평가시간은 10분 또는 1시간으로 선정하고 있다. 이는 사용성 평가는 일상생활에 빈번하게 발생하는 바람에 의한 사용성능을 검토하는 것으로 수십 또는 백년에 한 번 발생하는 바람에 대한 검토는 적절하지 않기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 100년 재현주기 풍속을 30m/s로 적용하여 최대 횡 변위를 H/500로 제한하고, 사용성 평가를 위한 1년 재현주기 풍속의 평가시간은 10분으로 선정하였다.

가속도 산정시 이용하는 재현기간 R년의 풍속은 연 최대 풍속의 분포가 Gumbel 분포형에 따른다는 조건으로 하여 식 (5), (6)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 식 (5)는 재현주기 1년에 해당하는 풍속이며, 식 (6)은 재현주기 R년에 해당하는 풍속이다. 이를 이용하여 10m 높이에서의 재현기 대풍속을 산출할 수 있다(Kim and Ha, 2004).

본 연구에서는 평균풍속(\bar{V})은 16.32m/s, 풍속의 표준편차(σ)는 3.53m/s로 가정하여 1년 재현주기 풍속을 산정하였다.

$$U_{10}(R) = \bar{V} + (\ln(R) - 0.577) \times 0.78\sigma \quad (5)$$

$$U_{10}(R) = -\frac{1}{a} \ln \left[\ln \left(\frac{R}{R-1} \right) \right] + b \quad (6)$$

따라서 본 연구에서 해석에 적용하는 설계풍속 조건은 건축구조설계기준(KBC2009)을 기준으로 Table 1과 같다.

Table 1 Wind load design condition

Basic wind(1year return period)	14.73m/s
Surface roughness	B
Turbulence model	DES
Evaluation time(Time Step)	600s(0.5s)

풍향각은 풍방향과 기본모델의 풍상면이 직각을 이루는 풍직 각방향에 대하여 해석을 수행하였다.

3.3 난류모델 : DES

유체에 대한 수치해석에서는 난류모델 선정이 해석의 신뢰성에서 가장 중요한 요소이다. 또한 본 연구는 초고층 빌딩의 동적 특성을 분석하는 것으로 비정상류(unsteady flow) 해석이 필요하다.

최근에는 물체주위의 유동을 기존 난류모델보다 정확성을 개선한 LES(Large Eddy Simulation), DES(Detached Eddy Simulation) 모델과 같이 비정상유동을 고려한 난류 모델들이 개발되었다.

본 연구에서 적용한 난류모델은 현재 가장 널리 사용되는 RANS(Reynolds Average Navier-Stokes Simulation)에 적용되는 난류모델의 장점과 LES 기법의 장점을 혼합하여 계산속도와 해의 정확성을 향상시킨 DES 모델이다.

먼저, DES 모델은 Spalart와 Squires 등이 벽 근처에서는 RANS 모형을 사용하고, 박리유동과 같이 와류동이 활발한 영역에서는 LES 기법을 사용하는 혼합된 방법으로 제안되었다(Spalart, 2004; Squires *et al.*, 2001). 이에 반해 Strelets와 Travin 등은 RANS 계산 시에는 $k-\omega$ 모델을 기반으로 만들어진 SST(Shear Stress Transport) 모델을 사용하고, 벽면으로부터 멀리 떨어진 유동장의 중심부에서는 LES 기법으로 연동되는 DES 모델을 제시하였다. 본 연구에서 적용한 난류모델은 SST 모델을 기반으로 한 DES 모델이다(Strelets, 2001; Travin, *et al.*, 2000).

3.4 해석모델의 물리적 특성

본 연구에서 사용되는 해석모델은 동일한 물리적 성질을 지닌 Solid 연성 구조체로 규정한다. 앞서 언급한 거와 같이 초고층 빌딩은 풍하중에 대한 구조적 안전성이 확보되어야 한다. 이러한 최대 횡 변위 검토는 1-way FSI 해석을 통하여 가능하다. 조건을 만족하는 해석모델의 탄성계수는 먼저 임의로 선정된 탄성계수에서의 최대 횡 변위를 검토하고, 탄성계수와 변위의 반비례 관계를 이용하여 선정된 최대 횡 변위의 탄성계수를 역으로 추적한다.

1-way FSI 해석에서 적용한 난류모델은 $k-\epsilon$ 모델이다. 이 모델은 박리현상이 발생하는 유동의 경우, 해석결과와 실제 유동현상 사이에 차이가 발생한다. 그러나 풍상면에서 발생하는 정압해석의 경우에는 차이가 발생하지 않고 계산시간도 짧으며 수렴성이 높기 때문에 선정하였다(Jung *et al.*, 2011).

Table 2는 풍변위 제한기준을 만족하는 해석모델의 물리적 특성을 나타내며, Fig. 5를 통하여 해석모델의 100년 재현주기 풍속에 대한 최대 횡 변위를 나타내고 있다.

Table 2 Physical properties of the analytical model

Physical properties	Apply factor
Young's Modulus	613.68MPa
Poisson's Ratio	0.3
Bulk Modulus	511.39MPa
Shear Modulus	236.03MPa

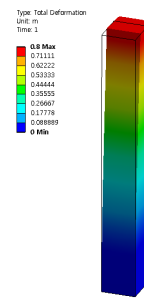


Fig. 5 Displacement of wind

해석모델의 단위체적중량은 $100\text{kg}/\text{m}^3$ 으로 선정하였고, 기본모델의 자유감쇠운동을 통하여 감쇠비가 1.5%를 만족하도록 설정하였다. Fig. 6은 자유진동곡선을 그래프로 나타낸 것이다.

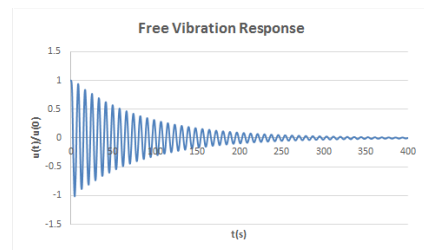


Fig. 6 Free Vibration Response

4. 수치해석결과 및 분석

4.1 해석모델의 모드해석

초고층 빌딩에 있어 진동 거동 특성은 구조물의 1차 모드가 지배적으로 작용한다. 앞서 선정된 해석모델의 물리적 성질에 따른 모드해석을 통하여 각 모델의 1차 고유주기를 알 수 있다. 뒤틀림각이 0도인 Square 모델의 경우 0.124Hz이며 90도 또는 180도의 경우에는 각각 0.124Hz, 0.123Hz으로 1차 모드의 고유주기는 큰 차이가 발생하지 않는 것을 알 수 있다.

4.2 가속도 측정 기준점

초고층 빌딩의 가속도는 일반적으로 건물에서 사람이 거주하거나 생활하는 최상층의 중심축으로부터 최대한 떨어진 지점에서 측정하게 된다. 그 이유는 진동에 있어 가장 불리한 조건에서 평가하기 위함이다. 따라서 본 연구에서는 바닥면으로부터 390m의 높이에서 중심축에서 20m 떨어진 지점을 선정하였다.

4.3 수치해석결과

위에 제시한 해석조건을 토대로 해석모델의 뒤틀림 각도 변화에 따른 진동 특성을 알아보기 위해 2-way FSI 해석을 수행하여 가속도 응답을 측정해 보았다.

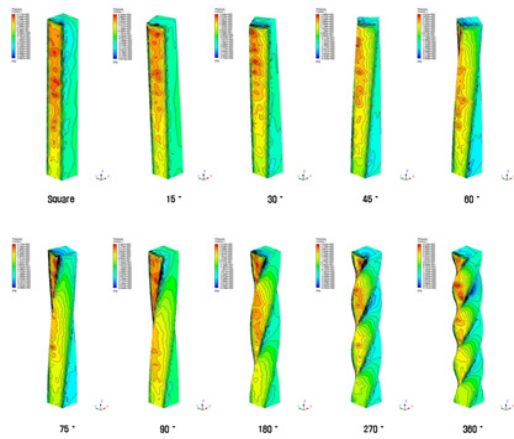


Fig. 7 Wind pressure distribution

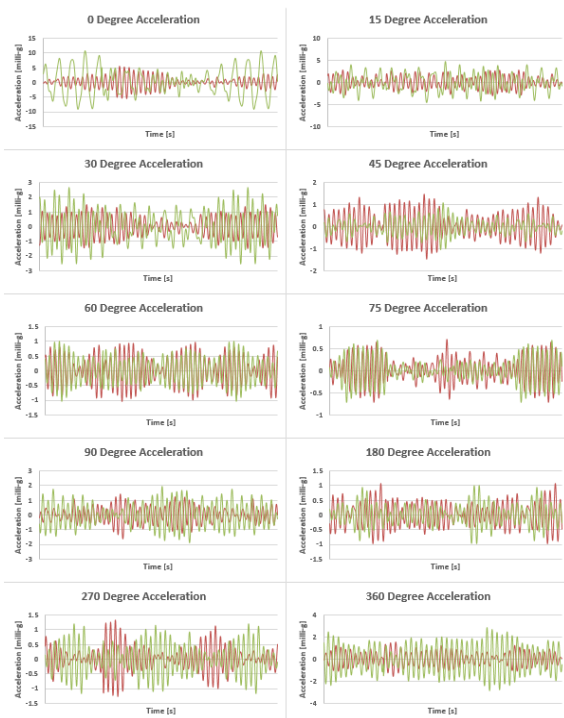


Fig. 8 Wind acceleration response

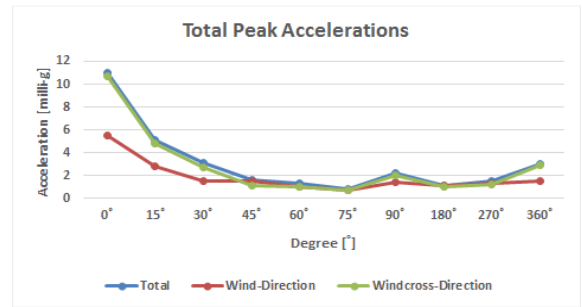


Fig. 9 Maximum wind acceleration by angle

Fig. 7은 시간이력에 따른 해석모델의 풍압 분포를 나타낸 것이다. Time step의 변화에 따라 등고선 형태의 풍압 분포가 변하게 되며, 뒤틀림 각도에 의하여 같은 위치에 수압면의 풍압 분포도 다르게 나타났다. Fig. 8은 시간이력 해석을 통해 건물의 풍방향 및 풍직각방향의 가속도 응답을 나타낸 그래프이다. 산출된 데이터를 분석해 보면 뒤틀림 각도 변화에 따라 풍진동이 감소하는 경향성이 있다. Fig. 9는 그 그래프를 통하여 해석모델의 각도별 최대 풍가속도의 변화를 나타낸 것이다.

5. FSI 해석의 초고층 빌딩에 대한 적용사례

5.1 적용대상 및 해석모델

FSI 해석을 통해 풍가속도를 예측할 실제 초고층 빌딩은 몽골 울란바토르에 위치한 Hyatt Regency MAK Tower (이하 MAK Tower)이다. 이 건축물은 오피스 및 호텔로 활용될 예정이며, 울란바토르를 상징하는 랜드마크로서 계획되었다. 또한, MAK Tower의 경우에는 앞서 언급한 최근 비정형 초고층 빌딩의 풍진동 저감의 대표적인 타입인 Twist 형상이다.

5.2 해석조건

5.2.1 해석모델 및 해석영역

본 해석모델의 경우도 앞서 해석한 모델과 마찬가지로 물리적 특성이 균일한 Solid 연성 구조체로 규정한다. 실제 구조물의 경우에는 각 시스템과 구조재료가 높이 및 특정 부분에서 다르기 때문에 물리적 특성이 균일하다고 할 수 없다.

구조물의 동적 특성은 1차 모드가 지배적이기 때문에 물리적 특성이 균일하다고 규정한 해석모델의 경우 실제 구조물과 1차 모드를 일치시켜야 해석의 신뢰도를 확보할 수 있다. 따라서 물리적 특성이 균일한 해석모델의 1차 모드를 실제 구조물의 1차 모드와 동일하도록 물리적 특성을 정의해야 한다.



Fig. 10 Bird's-eye view

식 (7)은 실제 구조물의 운동방정식, 식 (8)은 해석모델의 운동방정식이다. 해석모델의 운동방정식에서 각각 질량, 감쇠, 강성 항들은 실제 구조물과 유사한 동적 특성을 가지게 하는 등가항의 개념이다.

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = P(t) \quad (7)$$

$$m_{eq}\ddot{u}_{eq}(t) + c_{eq}\dot{u}_{eq}(t) + k_{eq}u_{eq}(t) = P(t) \quad (8)$$

도메인 크기는 1000×1000×500(m³)이며, 구조체의 Node 수는 약 0.4만개와 Element수는 1.9만개, 유동장의 Node 수는 2.7만개와 Element수는 14.5만개를 사용하여 해석을 수행했다. 해석영역의 경계조건은 Fig. 11과 같다.

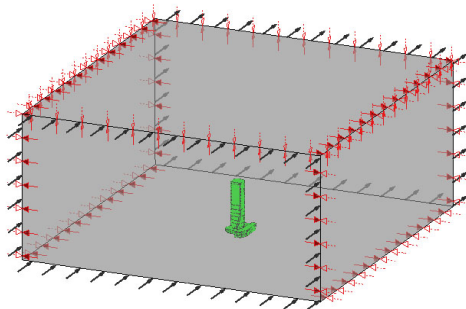


Fig. 11 Analytical space domain

5.2.2 등가강성 탐색

좌표축에 대한 정의는 Fig. 12와 같다. 또한, MAK Tower의 구조설계는 100년 재현주기 풍속(33m/s)에 대한 최상층에서의 횡 변위비는 X방향 풍하중에 대해 H/1988이고, Y방향 풍하중에 대해 H/908로 설계제한 사항인 H/500을 모두 만족하고 있다.

등가모델의 등가강성을 탐색하기 위하여 실제실험 및 설계

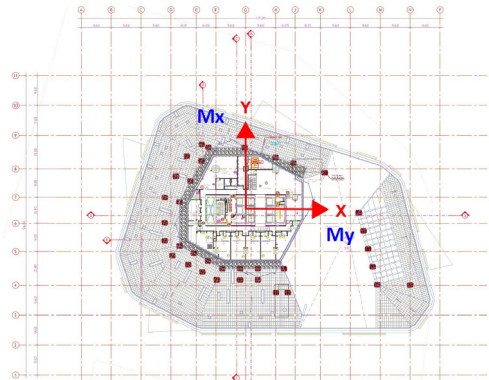


Fig. 12 Definition of the coordinate axes

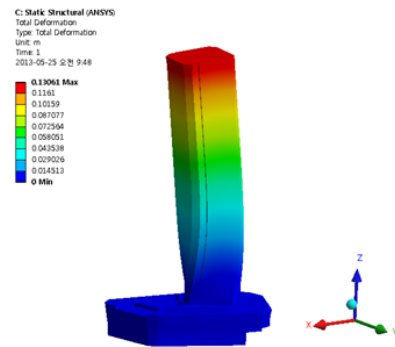


Fig. 13 The lateral displacement of the X-axis dir.

와 같이 동일한 100년 재현주기 풍속에 대하여 X, Y방향의 최상층 횡 변위를 일치시키게 하는 각 축방향의 등가탄성계수(E_{eq})를 탐색한다.

Fig. 13은 100년 재현주기 풍속에 대하여 각 X축 방향의 등가탄성계수를 도입한 등가모델의 최대 횡 변위이다. 1-way FSI 해석을 통한 X축 방향의 등가탄성계수는 705.46MPa이며, Y축 방향의 등가탄성계수는 269.97MPa이다. 등가모델에 적용하는 최종 등가탄성계수는 각 축방향의 등가탄성계수의 평균값을 적용하였다.

5.2.3 등가질량 및 등가감쇠 탐색

앞서 선정한 등가강성, 등가탄성계수를 알기 때문에 식 (9)를 만족하는 등가질량을 탐색하도록 한다. MAK Tower의 1차 모드 진동수는 0.17Hz로 주어졌으며, 주로 X축 방향의 거동을 보인다.

$$T_{real} = \frac{2\pi}{\sqrt{k_{eq}/m_{eq}}} , \left(T_{real} = \frac{1}{0.17} = 5.9s \right) \quad (9)$$

Modal 해석을 통하여 1차 모드의 주기가 5.9초를 만족하는 등가단위 체적중량이 601.12kg/m³인 것을 탐색하였다.

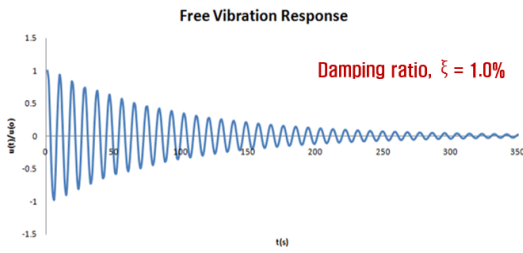


Fig. 14 Free vibration response

감쇠의 경우에는 해석프로그램의 Numerical Damping 상수를 조절하여 등가해석모델의 감쇠비가 1.0%를 만족하도록 하였다. Fig. 14는 등가해석모델의 자유감쇠운동곡선이다.

5.2.4 설계풍속 및 가속도 추정 기준점

풍동실험의 경우 가속도 평가는 재현주기의 경우 1, 5, 10년의 재현주기에 대하여 실험을 수행한다. 또한, 좁은 풍향각의 각도로 모든 풍향각에 대한 고려가 가능하다. 이에 반하여 해석의 경우에는 컴퓨터 시스템의 제한으로 풍동실험과 같이 모든 경우에 대한 해석을 수행할 경우 많은 시스템의 지원이 필요로 하다. 따라서 실제 프로젝트에서 수치해석 시뮬레이션을 적용할 경우에는 대표적인 풍향각을 선정하여 효율적인 해석수행이 필요로 하다.

본 연구에는 대상 건축물이 비대칭이므로 Fig. 15와 같이 90도 간격으로 총 4방위의 풍향에 대하여 고려하도록 하였다. 편의상 Direction 1부터 시계방향으로 Direction 2, 3, 4로 지정하였으며, 1년 재현주기의 풍속에 대하여 해석을 수행하였다.

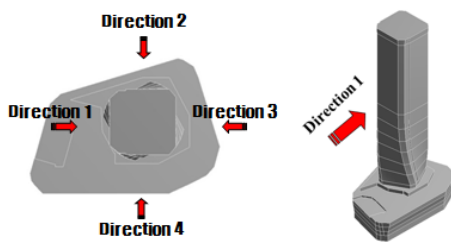


Fig. 15 Wind load case

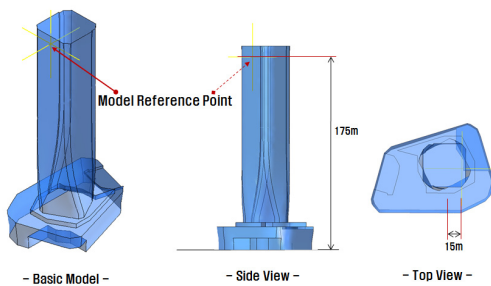


Fig. 16 Reference point

Table 3 Wind load design condition

Basic wind(1year return period)	25m/s
Surface roughness	C
Turbulence model	DES
Evaluation time(Time Step)	600s(0.5s)

Fig. 16과 같이 가속도 추정 기준점은 지상으로부터 175m 높이에서 중심축으로부터 15m 떨어진 지점이다. 설계풍속에 대한 조건은 Table 3과 같다. 설계풍속은 몽골 울란바토르의 기상정보를 참고로 하였다.

5.3 FSI 해석결과 분석

본 해석은 대풍을 고려하지 않고, 1년 재현주기의 감쇠비가 1.0%일 때의 풍동실험 결과와 비교하고자 하였다. Fig. 17은 시간이력해석에 따른 건물의 풍방향과 풍직각방향의 최대 가속도를 나타내었다. 또한 Table 4는 풍동실험과 FSI 해석을 통한 결과를 비교한 것이다.

동일한 추정기준으로 풍동실험결과와 비교했을 때, 풍방향 및 풍직각방향의 최대 가속도 값이 비슷하게 산출되었다. 이 결과는 초고층 빌딩의 풍진동 측정에 대한 FSI 해석의 적용성을 나타내는 것으로, 앞서 수행한 Twist 모델의 풍응답 특성 연구에 대한 신뢰성을 확보할 수 있었다.

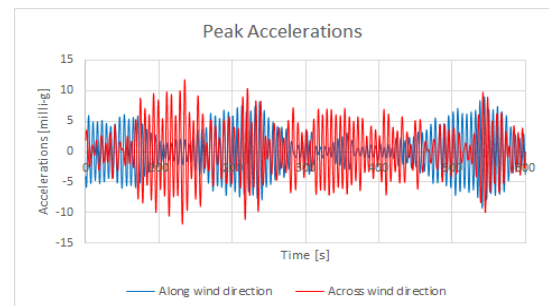


Fig. 17 Peak accelerations of wind direction

Table 4 Comparison of wind tunnel & FSI analysis

Wind direction	Peak total acceleration(milli-g)	
	Wind tunnel test	FSI analysis
Along wind	5.3	9.04
Across wind	7.38	11.85

6. 결 론

본 연구에서는 FSI 해석을 이용하여 비정형 초고층 빌딩의 풍응답 특성을 연구하였다. 비정형 초고층의 대표적인 유형 중 하나인 Twist 형상을 적용하여 뒤틀림 각도와 풍가속도의 상관관계에 대하여 알아보는 것을 목표로 하였다.

본 연구의 결과는 다음과 같다.

형상에 따른 풍가속도 예측결과, 정방형 모델이 뒤틀림 모델보다 가속도가 크게 산출되었다. Twist 모델의 경우에는 뒤틀림 각도와 풍가속도가 반비례하여, 각도가 증가할 때마다 풍진동이 감소하는 경향을 보였다. 다만 뒤틀림 각도가 45도 이상에서는 가속도 응답 차이가 미소하고, 45도 이하에서 가장 효율적으로 풍진동을 감소시키며 건물의 사용성 측면에서 우수한 결과를 나타냈다.

또한 실제 초고층 빌딩에 대하여 FSI 해석을 적용해 보았다. 대상 건물은 비정형 초고층 빌딩의 풍진동 저감 대표 형상인 Twist 형상의 MAK Tower이다. 풍동실험과 비교분석해 본 결과, 건물의 풍방향 및 풍직각방향의 최대 가속도가 비슷하게 산출되었다. 이 결과를 통해 초고층 빌딩의 풍응답 특성 연구에 대한 FSI 해석의 적용성과 Twist 모델에 대한 풍진동 저감의 연구에 대해 신뢰성을 확보할 수 있었다.

해석의 신뢰성을 더욱 향상시키기 위해서는 전산해석기술의 발달과 더불어 수렴성과 정확성이 높은 격자의 품질 향상 및 경계층에서 발생하는 복잡한 형상의 유동현상을 정확히 예측할 수 있는 난류모델의 연구가 필요하다고 판단된다.

본 연구를 통하여 수치해석기법을 통한 구조물의 동적해석의 기초연구에 도움이 되고자 하며, 본 연구를 발전시켜 FSI 해석을 통한 초고층 빌딩의 사용성 평가에 기여할 수 있으리라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2014년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단(No.2012R1A2A2A01043088)과 인하대학교의 지원을 받아 수행되었습니다.

Reference

- Cho, K.P., Lee, O.J.** (2009) Wind-Excited Motions of Tall Buildings with Geometrical Shapes, *Journal of Architecture Institute of Korea*, 24(6), pp.21~32.
- Jeong, S.Y., Lee, K.S., Han, S.E.** (2011) A Numerical Study on Wind Pressure Characteristics of Super-tall Prototype Model Considering the Effect of Turbulence Intensity, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, 23(6), pp.1~8.
- Kim, D.W., Ha, Y.C.** (2004) Estimation of Wind Speeds for Return Period in the Major Cities Reflecting the Recent Meteorological Data, *Journal of the Wind Engineering Institute of Korea*, 8(2), pp.147~154.
- Spalart, P.R.** (2004) Topics in Detached Eddy Simulation, Int.Conf.on Computational Fluid Dynamics.
- Squires, K.D., Forsythe, J.R., Spalart, P.R.** (2001) Detached Eddy Simulation of the Separated Flow Around a Fore Body Cross-Section, Direct and Large-Eddy Simulation IV, pp.481~500.
- Strelets, M.** (2001) Detached Eddy Simulation of Massively Separated Flows, AIAA Paper 2001-0879, 39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV.
- Tamura, Y., Tanaka, H., Ohtake, K., Nakai, M., Kim, Y.C.** (2010) Aerodynamic Characteristics of Tall Building Models with Various Unconventional Configurations, Structures Congress, ASCE, pp. 3104~3113.
- Travin, A., Shur, M., Strelets, M. and Spalart, P.R.** (2000) Detached-Eddy Simulations Past a Circular Cylinder. *Flow, Turbulence and Combustion*, 63(1), pp.293~313.

요 지

본 논문에서는 FSI 해석을 이용하여 비정형 초고층 빌딩의 풍응답 특성을 연구하였다. 해석모델은 Twist 모델이며, 뒤틀림 각도와 풍가속도의 상관관계에 대해 연구 중점을 두었다. 먼저 단방향 해석을 수행하여 100년 재현주기 풍속에 대한 최대 횡 변위를 구하고, 제한조건을 만족하는 탄성계수를 산출한다. 그리고 양방향 해석을 수행, 시간이력해석을 통해 산출된 탄성계수와 임의의 밀도를 가지는 풍가속도를 예측하게 된다. 정방형 모델은 높이 400m, 변장비 1:1, 세장비 8로 설정, 뒤틀림 모델은 0도에서 90도까지 15도 간격으로, 90도에서 360도까지 90도 간격으로 비틀어 회전시켰다. 형상에 따른 풍가속도 예측 결과, 정방형 모델이 뒤틀림 모델보다 크게 산출되어 풍진동 영향에 더 민감한 것을 검증하였다.

핵심용어 : FSI 해석, 비정형 초고층, 가속도 평가