

풍하중을 받는 초고층건물의 FSI 해석을 위한 코어 삽입 등가 강성 모델링 기법에 관한 연구

A Study on the Core Equivalent Stiffness Modeling Technique for FSI Analysis of High-Rise Buildings Under Wind Load

오 강 환*
Oh, Kang-Hwan

전 두 진**
Jeon, Doo-jin

한 상 을***
Han, Sang-Eul

Abstract

Recently, the trend is emerging a variety of irregular tall buildings. It is important to design the building for lateral load according to this trend. Fluid Structure Interaction(FSI) simulation can be performed to understand the vibrations of the structure against dynamic wind loads. In order to make the physical characteristics of the actual structure and the analytical model the same, we studied core inserting equivalent stiffness modeling method. As a result of this analysis, the stiffness of the structure can be set similar to that of the two axes of the structure, and turbulence can be reproduced through the acceleration tendency.

Keywords : FSI analysis, High-rise building, Wind load, Core inserting equivalent stiffness modeling method

1. 서론

1.1 연구 배경

최근에 다양한 비정형 초고층건물들이 생겨나는 추세이다. <Fig. 1>은 국내에 세워졌거나, 세워질 예정인 구조물들이다. 이러한 추세에 따른 횡 하중에 대한 건물의 설계가 중요하다. 특히 초고층건물은 풍하중에 대해 취약할 수 있기 때문에 풍력뿐만 아니라 풍진동에 대한 고려가 필요하다¹⁾. 특히 동적 풍하중을 고려한 풍진동을 파악하기 위해서는 크게 2가지 방법이 있다²⁾. 첫째는 풍동실험이다³⁾. 풍동실험은 건축구조기준(KBC-2016)에 있는 보편적인 방법이지만, 시간적 경제적인 소비가 크기 때문에 비효율적인 방법이다.



<Fig. 1> Domestic high-rise buildings

둘째는 수치해석 방법이다⁴⁾⁵⁾. 동적 풍하중에 의한 구조물의 거동을 파악하기 위해서는 유체-구조체 상호작용 해석(Fluid Structure Interaction)을 이용할 수 있다⁶⁾⁷⁾. 수치해석은 시간적, 경제적으로 효율적이지만 엔지니어의 능력에 따른 결과가 크게 달라지는 단점이 있다. FSI 해석법은 기계 및 항공 분야에서는 많은 연구가 이뤄진 반면에 건설 분야에서는 아직 연구가 많이 이뤄지지 않았기 때문에 더욱 연구가 필요한 시점이다.

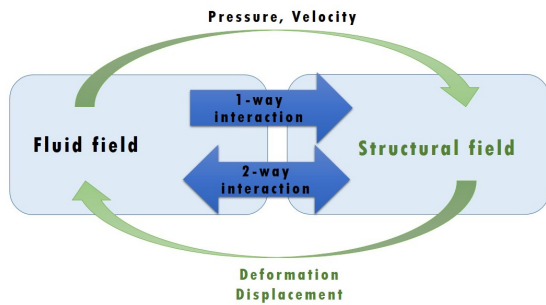
* 주저자, 학생회원, 인하대학교 건축공학과 석사과정
Dept. of Architectural Engineering, Inha University

** 학생회원, 인하대학교 건축공학과 박사과정
Dept. of Architectural Engineering, Inha University

*** 교신저자, 정회원, 인하대학교 건축공학과 교수, 공학박사
Dept. of Architectural Engineering, Inha University
Tel: 070-8269-3656 Fax: 032-866-4624
E-mail: hsang@inha.ac.kr

1.2 연구의 방법 및 절차

수치해석방법 중 FSI 해석 방법은 유체해석과 구조해석이 함께 이뤄진다. 아래 <Fig. 2>와 같이 유체해석을 통해 산출된 풍압 및 풍속으로부터 구조해석이 된 구조물의 변위와 변형이 유체영역에 영향을 미치는 상호작용해석이다.



<Fig. 2> FSI analysis concept

FSI 해석법은 크게 2가지 방법으로 나뉜다. 첫째는 1-way interaction이고 유체의 압력이 외력으로 구조물의 변형 및 변위를 알 수 있다. 주로 구조물의 변형이 크지 않을 때 사용하는 방법이다. 둘째는 2-way interaction이고 유체의 풍속과 풍압이 구조물의 변형 및 변위를 형성하고 생성된 변형이나 변위가 다시 유체에 영향을 미치는 커플링 해석이다. 2-way interaction에서는 구조물의 가속도를 확인할 수 있다.

선행연구 중 조정훈(2013)⁸⁾은 풍하중을 받는 건물의 FSI 해석을 통한 거동 특성에 대해 연구하였다. 본 연구는 FSI 해석을 위한 실제 구조물과 해석 모델의 물리적 특성 중 두 축의 최대변위를 일치시킬 수 있는 강성 모델링 기법을 제안하였으며⁹⁾, 두 축의 최대변위의 오차 5% 이내를 만족하는 강성 모델링 기법을 정립하는 것이 목표다.

2. 이론적 배경

2.1 유체-구조체 상호작용 해석(FSI)

FSI 해석은 유체의 지배방정식으로 나온 압력 및 속도가 구조체에 대한 외력으로 발생한다. FSI 해석의 지배방정식은 식 (1)과 같고 유체 및 구조 영역

의 노드들은 No-slip이라는 조건으로 가정한다. [R]은 유체와 구조체의 각 절점에서 유효표면적을 나타내는 결합행렬이다.

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

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

여기서

R : 결합행렬

U : 변위벡터

P : 압력

ρ_0 : 유체의 밀도

K_s, M_s : 구조요소의 강성, 질량 행렬

K_f, M_f : 유체요소의 강성, 질량 행렬

F_s : 구조체의 표면력

F_f : 유체의 표면력

실제 건물은 위치마다 재료와 부재에 따라 물리적 특성이 달라지기 때문에 유사한 거동을 하는 균일한 물리적 특성을 지닌 구조체, 즉 등가구조물로 가정한다. 본 연구는 등가항 중에 등가 강성 모델링 기법에 대한 연구이다. 식 (2)는 실제 구조물의 운동 방정식이고 식 (3)은 균일한 물리적 특성을 지닌 구조체의 운동 방정식이다.

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = P(t) \quad (2)$$

$$m_{eq}\ddot{u}_{eq}(t) + c_{eq}\dot{u}_{eq}(t) + k_{eq}u_{eq}(t) = P(t) \quad (3)$$

여기서

m_{eq} : 등가질량

c_{eq} : 등가감쇠

k_{eq} : 등가강성

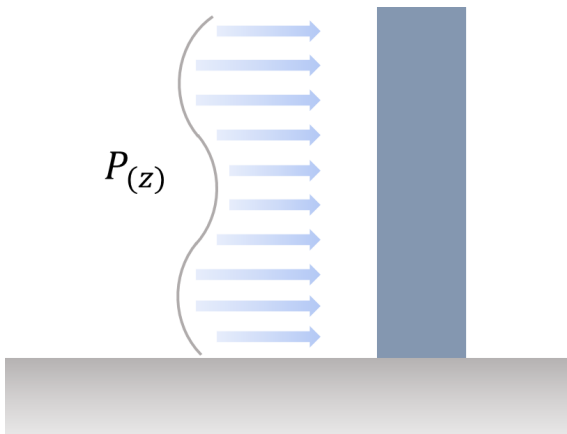
2.2 등가 강성 모델링 기법

2.2.1 등가 강성 모델링 기법 개요

FSI 해석은 유체와 구조체의 커플링 시스템을 형성하여 양방향의 반복적인 시간이력해석이 수행되어지므로 건물의 다양한 부재와 물성을 반영치를 직접 입력한 해석수행은 비효율적이다. 이에 따라 등가구조물의 가정이 필수적이며, 조정훈(2013)⁸⁾은

풍하중에 대한 두 축의 최대변위를 만족하는 각각의 탄성계수의 산술평균을 등가구조물의 등가탄성계수로 설정하였다. 본 연구는 해석 모델 내부에 코어를 삽입하여 실제 구조물의 두 축의 정적 최대변위를 만족시키는 등가탄성계수를 탐색하였다.

2.2.2 코어 삽입 등가 강성 모델링 기법



〈Fig. 3〉 Cantilever beam subjected to arbitrary distributed load $P(z)$

풍하중을 받는 건물은 〈Fig. 3〉과 같이 분포하중을 받는 캔틸레버 보와 같이 가정할 수 있다. 높이에 따른 임의하중 $P(z)$ 가 작용할 때 캔틸레버 보의 처짐은 식 (4)와 같다.

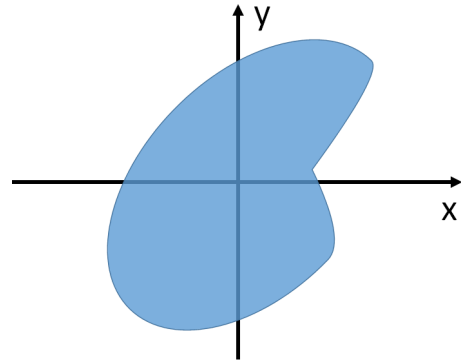
$$\Delta = \frac{f}{EI} \quad (4)$$

$$f = f(P(z), H) \quad (5)$$

식 (5)에서 f 는 하중 $P(z)$ 와 높이 H 로 이루어진 함수이며 E 는 탄성계수, 그리고 I 는 단면2차모멘트이다.

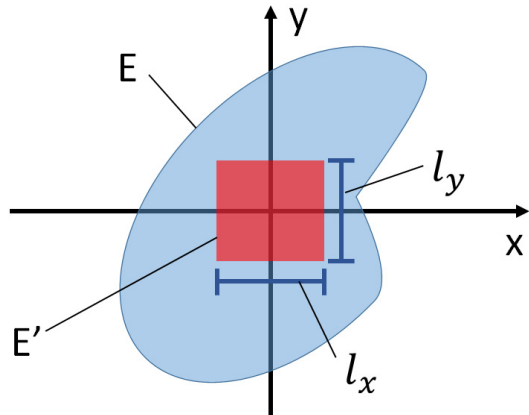
〈Fig. 4〉와 같은 임의의 단면의 캔틸레버 보가 있을 때 x 축 방향에 대한 처짐은 다음 식 (6)과 같다.

$$\Delta_x = \frac{f_x}{EI_y} \quad (6)$$



〈Fig. 4〉 Arbitrary cross section

구조해석을 통해 주어진 단면(I_y), 높이(H), 하중($P(z)$)과 임의의 탄성계수(E)에 대해 변위(Δ_x)를 구할 수 있다.



〈Fig. 5〉 Any cross section including core

임의의 단면에 〈Fig. 5〉와 같이 강성이 다른 코어를 삽입하였을 때 캔틸레버 보의 x 축 방향에 대한 처짐은 다음 식 (7)과 같다.

$$\Delta'_x = \frac{f_x}{EI_y + (E' - E)I'_y} = \frac{f_x}{EI_y + (E' - E) \times \frac{l_x^3 l_y}{12}} \quad (7)$$

E' 은 코어의 탄성계수이며, l_x 와 l_y 는 코어의 x 축과 y 축 방향의 변의 길이이다. 구조해석을 통해 코어 삽입 캔틸레버 보의 변위(Δ'_x)를 알 수 있고 코어가 없는 단면의 변위(Δ_x)도 알 수 있다. 이 때 식 (6)

과 식 (7)을 통해 f_x, I_y 를 구할 수 있다. y축 방향으로도 동일한 과정을 거쳐 f_y, I_x 도 구할 수 있다. 이러한 방법을 통해 탄성계수를 조절하여 두 축의 변위를 조절할 수 있다.

그렇다면 코어가 없을 때 임의의 탄성계수(E)를 갖는 단일강성 구조물의 변위(Δ)가 실제 구조물의 구조해석을 통한 변위(Δ'')보다 크다고 가정한다면, E'' 은 해석 모델의 코어의 탄성계수이며 식 (6)과 식 (7)을 통해 아래와 같은 식 (8)과 식 (9)를 도출할 수 있다. 여기서 변위(Δ'')는 코어 삽입 캔틸레버 보의 처짐이며 실제 구조물의 변위이며 해석 모델의 변위이다.

$$\Delta_x EI_y = \Delta_x'' EI_y + \Delta_x'' (E' - E) \times \frac{l_x^3 l_y}{12} \quad (8)$$

$$\Delta_y EI_x = \Delta_y'' EI_x + \Delta_y'' (E' - E) \times \frac{l_y^3 l_x}{12} \quad (9)$$

식 (8)과 식 (9)를 l_x 와 l_y 에 대해 정리하고 연립시키면 식 (10)과 같이 코어의 길이 비에 대한 식을 구할 수 있다.

$$\frac{l_x}{l_y} = \sqrt{\frac{\Delta_y'' (\Delta_x - \Delta_x'') EI_y}{\Delta_x'' (\Delta_y - \Delta_y'') EI_x}} \quad (10)$$

단, 코어의 길이는 주어진 구조물의 단면에 포함될 수 있도록 조절해야 한다. 길이 비를 통해 코어의 크기를 설정하면, 식 (7)에 l_x 와 l_y 를 대입하여 코어의 탄성계수(E'')를 구할 수 있다.

3. 실제 구조물의 FSI 해석 수행

3.1 FSI 해석 프로세스

코어 삽입 등가 강성 모델링 기법을 검증하기 위해 실제 건축물에 대해 구조해석을 수행한다. FSI 해석은 <Fig. 6>과 같은 프로세스로 수행한다. 실제 구조물의 구조해석을 통한 최대 횡 변위를 산출하고, 역으로 구조물의 탄성계수를 산출한다. Case A는 앞서 이론식을 통한 코어 삽입 등가 강성 모델링

기법을 적용하여 강성을 설정한다. Case B는 구조물의 최대 횡 변위를 만족시키는 탄성계수(E_x, E_y)를 산출하고 탄성계수의 산술 평균을 등가 탄성계수(E_{eq})로 설정한다.

일반적인 구조물의 1차 모드만 고려하여 설계하므로 실제 구조물과 등가 구조물의 동적 특성을 유사하게 설정하기 위해서 1차 모드의 고유주기를 일치시킨다. 고유주기와 강성, 질량은 다음 식 (11)과 같은 관계를 만족한다.

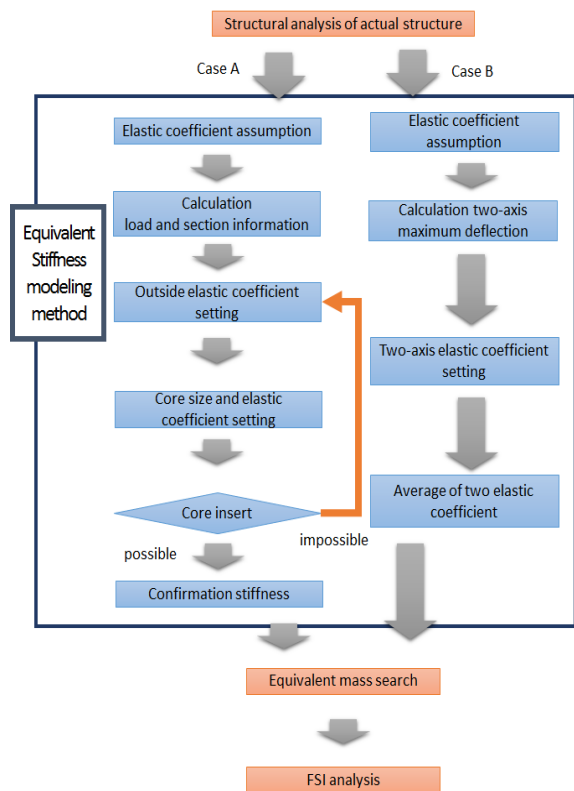
$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{k/m}} \quad (11)$$

여기서

T : 물체의 고유주기(s)

k : 물체의 강성

m : 물체의 질량



<Fig. 6> FSI analysis flowchart

목표변위를 만족하는 강성을 설정하였으며 질량을 변화시켜 1차 모드의 고유주기를 찾을 수 있다. 실제 구조물과 유사한 강성과 질량을 설정하면 FSI 해석을 수행하고 결과를 분석한다.

3.2 대상 건축물의 개요

대상 건축물은 <Fig. 7>과 같은 모습이며 인천광역시 연수구에 위치한 동북아무역센터(North-East Asia Trade Tower)이다.



<Fig. 7> View of the NEATT (North-East Asia Trade Tower)

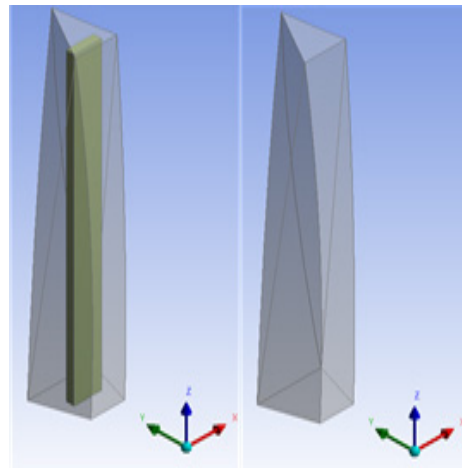
비정형 초고층빌딩의 대표적 건축물이며 설계 개요는 <Table 1>과 같다.

<Table 1> Design overview of target building

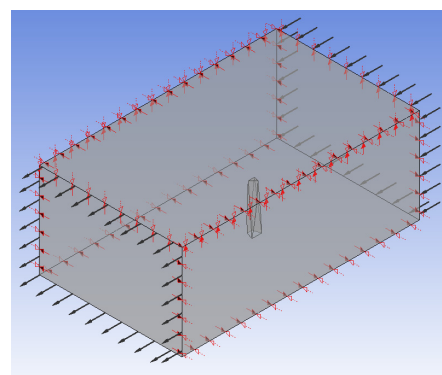
Location	Yeonsu-gu, Incheon
Area	138,316(m ²)
Usage	Office/Hotel
Scale	68 above ground floors(305m), 3 under ground floors
Structural system	Core+Outrigger+Column

3.3 해석 모델의 개요

FSI 해석 수행을 위한 해석 모델은 대상구조물을 Case에 따른 등가 강성 모델링 기법을 적용하였다. 실제 구조물의 크기는 약 61m×56m×305m이다. Case A는 해석 모델 내부에 직사각형 단면의 코어를 삽입하는 등가 강성 모델링 기법을 적용하였으며 <Fig. 8 (a)>와 같다. Case B는 단일 등가 강성 모델링 기법을 적용하였고 <Fig. 8 (b)>와 같다. 유체영역은 <Fig. 9>와 같으며, 크기는 1500m×900m×600m이다.



(a) Case A (b) Case B
<Fig. 8> Analysis model



<Fig. 9> Analytic space

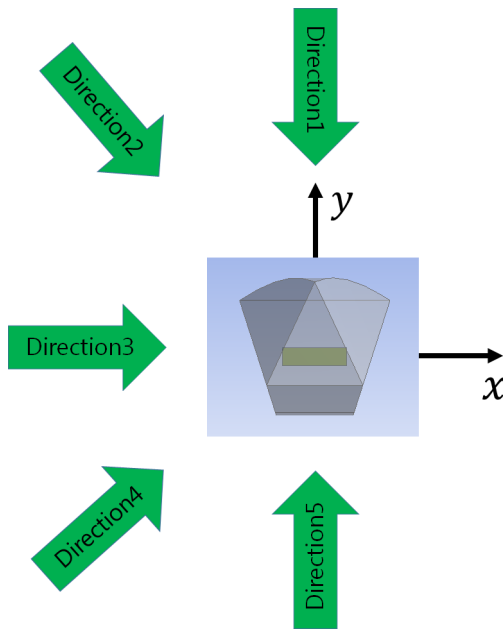
3.4 해석 조건

3.4.1 설계풍속

설계 풍속은 NEATT 설계 당시의 건축구조기준 KBC-2005와 전성규(2005)¹⁰⁾를 참고하여 기본풍속

25.8m/s, 노풍도 D 그리고 지형계수와 중요도 계수는 1로 설정하였다.

난류모델은 LES를 사용하였으며 해석시간은 300s이다¹¹⁾. Case A와 Case B의 풍 방향은 동일하며 대칭성을 고려하여 총 5가지로 설정했고, <Fig. 10>과 같다.



<Fig. 10> Wind direction setting (Case A and B)

3.4.2 해석 모델의 물리적 특성

초고층빌딩은 구조적으로 최대 횡 변위는 일반적으로 H/500(H: 건축물높이)으로 설정되고 있다. <Table 2>는 대상구조물의 구조해석 결과 실제 최대 횡 변위와 고유주기이다.

<Table 2> Actual physical characteristics of NEATT

x-axis maximum displacement	H/755(0.404m)
y-axis maximum displacement	H/988(0.309m)
Natural frequency	5.8s

이론식을 통해 Case A는 해석 모델의 단면에 삽입 가능한 코어의 길이 비(l_x/l_y)는 3.5이며, 코어의 x축 길이(l_x)는 26m이고 y축 길이(l_y)는 7.44m이다.

아래 <Table 3>과 같이 최대 횡 변위에 맞는 등가 탄성계수를 도출하였으며, 해석 시뮬레이션을 통한 두 축의 최대 횡 변위와 비교하였다.

<Table 3> Equivalent elastic modulus setting and displacement error

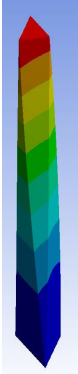
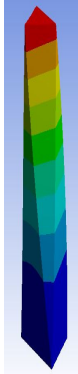
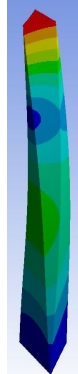


	Equivalent elastic modulus(MPa)	x-axis maximum displacement (error)	y-axis maximum displacement (error)
Case A	Core 1901.8	0.424m (4.8%)	0.299m (3.2%)
	Outside 418		
Case B	x-axis (E_x) 557.2	0.41m (1.4%)	0.259m (16.2%)
	y-axis (E_y) 435.3		
	Average (E_{eq}) 496.2		

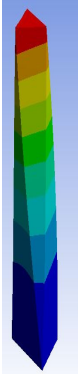
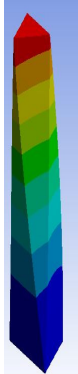
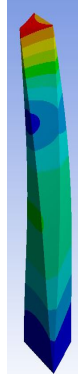
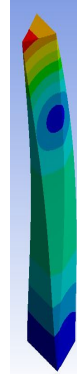

Case A의 두 축 최대 횡 변위의 오차는 5% 이내이며, 오차의 원인은 비정형 구조물이기 때문에 높이에 따른 단면 변화가 있다. 코어의 높이 제한이 발생하며 주요 원인이라고 판단되어진다.

Case B는 <Table 3>과 같이 두 축의 최대 횡 변위를 만족시키는 탄성계수(E_x, E_y)의 산술평균을 등가 탄성계수(E_{eq})로 설정하였고, 해석 시뮬레이션을 통한 두 축의 최대 횡 변위와 비교하였다. Case B의 최대 변위의 오차는 17%이내였다. 또한 Case A가 Case B보다 최대 오차가 낮아졌기 때문에 Case A는 대상 구조물과 유사한 물리적 특성을 갖는다고 판단되어진다.

등가 강성을 설정한 해석 모델은 식 (11)을 통해 Modal 해석 시뮬레이션 결과 <Table 4>와 같이 5차 모드까지 형태와 고유진동수를 나타내었다. 또한 대상 구조물의 1차 모드의 고유주기를 일치시키는 등가 단위질량을 설정하였다. Case A의 등가 단위질량은 $171.18kg/m^3$, Case B는 $190.9kg/m^3$ 이다.

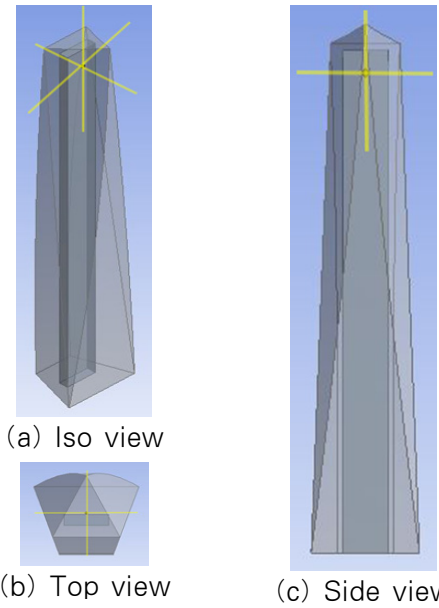
<Table 4> Modal analysis results

	1st mode	2nd mode	3rd mode	4th mode	5th mode
Case A					
	0.172 Hz	0.175 Hz	0.807 Hz	0.856 Hz	0.991 Hz

Case B					
	0.172 Hz	0.175 Hz	0.774 Hz	0.864 Hz	1.002 Hz

3.4.3 가속도 측정위치

구조물의 동적응답을 파악하기 위해서 가속도는 중요한 척도이다. 가장 불리한 조건에서 평가하기 위해서 최상층의 중심부에서 가장 먼 곳에서 가속도를 측정했다. 측정위치는 지상 276.8m에서 외곽으로 4.9m 떨어진 곳이며, <Fig. 11>과 같이 위치해 있다.

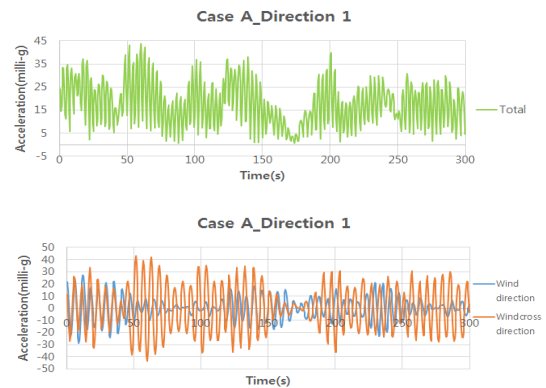


<Fig. 11> Acceleration measurement position

3.5 FSI 해석 결과

3.5.1 가속도 경향

각 풍향별로 해석 모델의 측정위치에서 <Fig. 12>와 같이 가속도를 도출하였으며, 토탈 가속도, 풍방향 가속도, 풍직각방향 가속도로 나누어 경향을 파악하였다. 지속적인 풍하중에 의해 난류가 형성되면 풍하중방향의 정압보다는 구조물의 측면에 걸리는 부압이 더 커지며 구조물의 거동을 지배하게 된다. 이에 따라 해석 결과를 통해 풍방향 가속도보다 풍직각방향의 가속도가 큰 것을 확인할 수 있었다.



<Fig. 12> Example of acceleration along wind direction

3.5.2 풍방향별 최대가속도 해석결과

풍 방향에 따른 최대가속도를 Case A, Case B 로 나눠서 <Table 5>와 같이 나타내었다.

<Table 5> Maximum acceleration according to wind direction(unit: milli-g)

	Case A			Case B		
	Total	Wind-dir.	Wind cross-dir.	Total	Wind-dir.	Wind cross-dir.
Dir.1	43.7	28.7	43.6	40.2	21.6	40.2
Dir.2	30.2	18.5	26.4	48.1	32.5	48.0
Dir.3	27.2	11.2	24.9	21.2	16.1	17.9
Dir.4	40.1	22.6	35.4	46.9	28.0	46.7
Dir.5	41.1	19.0	38.6	36.5	22.2	35.7

Case A의 최대 토탈 가속도는 Direction 1 풍향일 때 43.7milli-g이며, Case B의 Direction 2 풍향일 때 최대 토탈 가속도보다 약 10% 정도 작다. 그러나 풍향이 Direction 1일 때 Case A의 토탈 가속도는 같은 풍향의 Case B보다 약 8% 커졌다. 이는 강성의 변화에 따른 가속도가 달라진 것으로 판단되어진다.

4. 결론

본 연구에서는 풍하중을 받는 구조물의 FSI 해석을 위한 코어 삽입 등가 강성 모델링 기법에 대한 연구를 수행했다.

1) 코어 삽입 등가 강성 모델링 기법은 구조물의 구조해석결과를 통해 해석 모델 내부에 길이 비를 충족하는 코어 단면과 두 축의 최대 횡 변위를 만족시키는 강성 탐색이 가능하다.

2) 실제 구조물에 코어 삽입 등가 강성 모델링 기법을 적용한 FSI 해석 결과는 구조물의 풍직각방향의 가속도가 지배적인 것을 확인하였다.

3) 실제 구조물에 코어를 삽입한 등가 강성 모델링 기법은 해석 시물레이션을 통해서 두 축의 최대 횡 변위 결과 값의 최대 오차는 4.8%이며, 단일 등가 강성 모델링 기법보다 약 11.4%만큼 줄었다.

4) 최근 비정형의 초고층건물이 늘어나며 이러한 건물들은 풍진동에 대한 고려는 필수적이기 때문에

실제 구조물과 동일한 해석 모델이 중요하다. 따라서 다양한 형태의 등가 강성 모델링 기법에 대한 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축연구사업의 연구비 지원(07CHUD-C043048-03)에 의해 수행되었습니다.

References

1. K.P. Cho, O.J. Lee, "Wind-Excited Motions of Tall Buildings with Geometrical Shapes", Journal of Architectural Institute of Korea, Vol.25, no.6, June 2009, pp.21-32
2. Korea Wind Engineering Association, Wind Engineering for Engineer, Gimundang, 2010
3. Smagorinsky, J., "General circulation experiments with the primitive equation", Mon. Wea. Rev., vol.91, Mar. 1963, pp.99-164
4. K.S. Lee, S.E. Han, "CFD Analysis for Complex-Shaped Tall Buildings", computation structural engineering, Vol.22, No.5, 2009, pp.15-22
5. S.Y. Jeong, "A Numerical Study on Wind Pressure Characteristics of Super-tall Prototype Model considering the Effect of Turbulence Intensity", Proceedings of KSSC Journal, Vol.23, No.6, 2013, pp.659-667
6. S.R. Yim, "The Shape Optimization on Free Form High-rise Buildings Under Wind Load by Numerical Method", Proceedings of KSSC Journal : Structure, Vol.28, No.11, 2012, pp.47-54
7. S.R. Yim, "The Shape Optimization of Free Form High-Rise Buildings under Wind Load Reduction Based on the 1-way FSI Analysis", Proceedings of KSSC Journal : Structure, Vol.31, No.1, 2015, pp.3-10

8. J.H. Cho, "A Study on The Numerical Analysis for The Dynamic Response Characteristics of Tall Building to Wind Loads Using FSI Analysis", Master, Inha University Graduate School, 2013, p.64
 9. B.H. Park, "A Basic Study on the Equivalent Modeling Method for FSI Analysis of High-rise Building Under Wind Load", Proceedings of KASS 2017 Spring Conference, Vol.13, No.1, May 2017, pp.93-94
 10. S.G. Jeon, Structural Design of North-East Asia Trade Tower, Feature Article, Korean Society of Steel Construction, Vol.20 No.4, 2008, pp.7-13
 11. Germano, M., A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model, Phys. Fluid A, Vol.3 No.7, July 1991, pp.1760-1765
- Received : July 28, 2017
 - Revised : August 28, 2017
 - Accepted : August 31, 2017