

CFD 시뮬레이션을 이용한 풍하중 산정 시 변동풍속 프로파일에 관한 연구

A Study on Fluctuating Wind Profile in CFD Simulation for Evaluating Wind Load

전 두 진*
Jeon, Doo-Jin

한 상 을**
Han, Sang-Eul

Abstract

In this paper, the effect of the turbulence intensity in across-wind direction on the wind load in CFD(Computational fluid dynamics) simulation was analyzed. 'Ansys fluent' software was used for CFD simulation. And the fluctuating wind speed applied to the simulation was generated according to Korean Design Standard and Von Karman wind turbulence model. The turbulence intensity in across-wind direction for simulation was applied from 0 to 100% of the turbulence intensity in along-wind direction. The analysis results showed that the turbulence intensity in across-wind direction had a particularly great effect on the wind load in across-wind direction.

Keywords : Computational fluid dynamics, Wind load, Fluctuating wind profile, Turbulence intensity

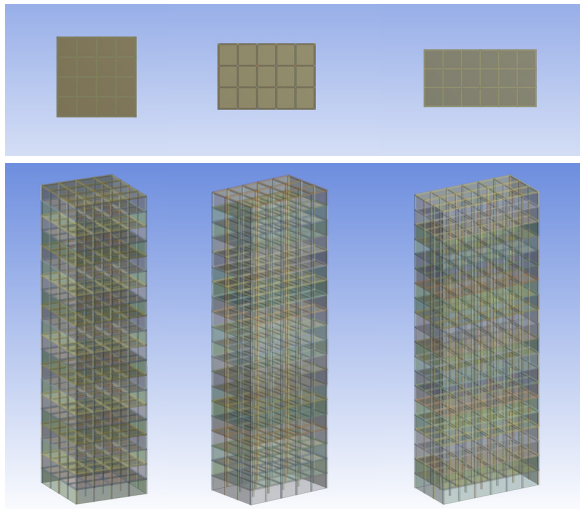
1. 서론

최근 아파트 및 주상복합 등 대부분의 건축물이 고층화가 이루어지는 추세이다. 풍하중은 고층 건축물의 설계 단계에서 매우 중요하게 다루어지는 하중이다. 고층 건축물에 대한 풍하중의 영향은 풍방향뿐만 아니라 풍직각방향까지 고려해야 한다. 풍직각방향의 풍하중은 주로 바람의 난류에 의해 발생한다. 난류는 바람의 세기, 건축물의 형태와 주변 지형 등 다양한 요인에 의해 변화하기 때문에 일반적인 방법으로는 쉽게 예측할 수 없다. 이러한 이유로 인해 풍하중을 예측하기 위한 방법으로 풍동실험이 주로 사용되며, 이와 더불어 전산유체역학(CFD, Computational fluid dynamics) 기법을 이용한 수치해석 방법이 연구되고 있다¹⁾. CFD 기법은 컴퓨터를 통해 모델링 및 시뮬레이션이 가능하여 실험에 앞서 다

양한 프로토타입에 적용하는데 효율적이라는 장점으로 인해 항공 및 기계, 화학공학 등 다양한 분야에서 실험과 병행하여 활용되고 있다²⁾. 건축 분야에서는 풍하중 산정, 설비 설계 등에서 활용될 수 있다^{3),4)}.

한편, 건축물에 풍하중으로 작용하는 바람은 위치와 시간에 따라 변동하는 풍속을 가지며, 이를 설계에 반영하기 위하여 건축구조기준(KDS 41 10 15)에서는 설계 풍속과 풍방향의 난류강도를 명시하고 있다. 이에 풍동 실험에서도 건축구조기준에 따라 변동 풍속과 난류를 모델링하여 실험을 수행한다. 그러나 실제 바람은 풍방향뿐만 아니라 풍직각방향으로도 변동 풍속을 가지고 있는 것에 반해, 건축구조기준에서는 풍직각방향의 난류강도는 제시하고 있지 않다. 조도블록과 스파이어 등으로 실제의 바람과 유사한 난류를 생성하는 풍동실험과 달리, CFD 시뮬레이션에서는 변동 풍속의 프로파일을 명확한 수치로 직접 입력해야 하므로 이는 매우 중요한 요소로 판단된다. 본 논문에서는 풍하중 산정을 위한 CFD 시뮬레이션 수행 시 변동 풍속 프로파일의 적용 방식과 풍직각방향 난류강도의 고려 여부에 따른 결과를 비교하고, 이에 대한 기준의 필요성을 고찰하고자 한다.

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



(a) D/B : 1.0 (b) D/B : 1.5 (c) D/B : 2.0
 〈Fig. 1〉 Models for simulation

2. 시뮬레이션 조건

2.1 해석 모델

시뮬레이션에서 사용된 해석 대상 모델은 $400m^2$ 의 일정한 단면적과 $80m$ 의 높이를 갖고, 0.5 및 0.7, 1.0, 1.5, 2.0의 변장비(D/B)를 갖는 5가지 가상의 건축물로 설정하였다. 변장비 0.5와 0.7의 모델은 각각 변장비 2.0과 1.5의 모델을 90° 회전한 것과 같다.

2.2 적용 풍속⁵⁾

일반적으로 바람은 시간에 따라 변동하는 풍속을 가진다. 높이와 시간에 따른 변동 풍속($V(z,t)$)은 평균 속도에 난류 속도를 더한 것으로 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$V(z,t) = V(z) + u(z,t) (m/s) \tag{1}$$

where, $V(z)$: 평균 풍속(m/s)
 $u(z,t)$: 난류 속도(m/s)

2.2.1 평균 풍속

평균 풍속은 구조설계기준(KDS 41 10 15)에 명시된 설계 풍속을 따라 생성하였다. 풍속은 인천의 지표면 조도구분 B인 지역의 풍속으로 가정하였다. 설계 풍속은

재현기간 100년풍속(V_H)을 사용하였으며, 구조설계기준에서는 이를 식 (2)와 같이 산정한다.

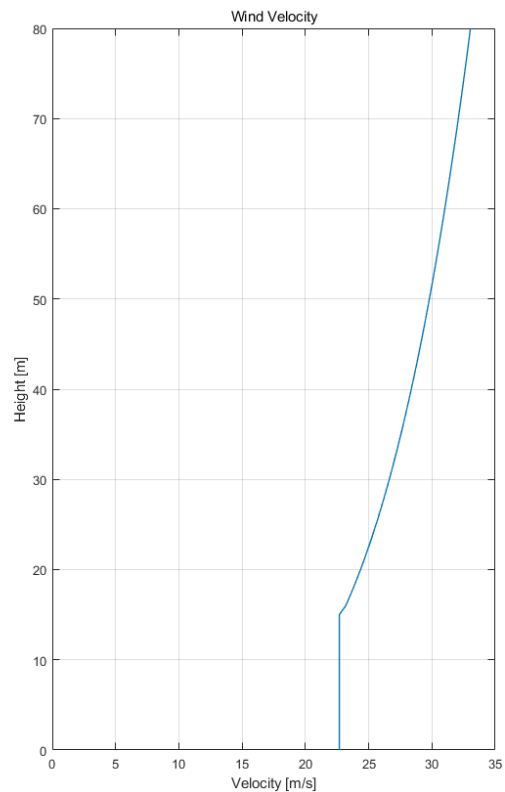
$$V_H = V_0 K_{zr} K_{zt} I_w (m/s) \tag{2}$$

where, V_0 : 기본풍속(m/s)
 K_{zr} : 풍속고도분포계수
 K_{zt} : 지형계수
 I_w : 중요도계수

본 논문에서 사용된 풍속 조건은 〈Table 1〉과 같다.

〈Table 1〉 Wind speed conditions

Location	Incheon
Basic wind speed (m/s)	28
Terrain category	B
Topographic factor	1.0
Importance factor	1.0
Wind speed for 100 year return period (m/s)	33.04



〈Fig. 2〉 Mean wind speed

2.2.2 변동 풍속

일반적으로 난류 속도($v(z,t)$)는 속도 스펙트럼을 이용하여 표현하며, Davenport 스펙트럼 및 Simiu 스펙트럼, Kaimal 스펙트럼, Von Karman 스펙트럼 등이 있다. 이 중 본 연구에서는 Von Karman 스펙트럼에 따라 난류 속도를 생성하였으며, Von Karman 스펙트럼 ($S(z,t)$)은 식 (3) 및 식 (4)로 표현된다.

$$\frac{nS(z,n)}{(\sigma(z))^2} = \frac{4.0n_L}{(1 + 70.8n_L^2)^{5/6}} \quad (3)$$

$$n_L = \frac{nL_u(z)}{V(z)} \quad (4)$$

where, n : 진동수(Hz)
 $\sigma(z)$: 난류 속도의 표준편차
 $L_u(z)$: 난류의 적분 스케일

이 때 난류 속도($u(z,t)$)는 평균이 0인 정상 확률과정(Stationary random process)이므로 코사인 함수의 합으로 나타낼 수 있다.

$$u(z,t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i2\pi nt} dS(z,n) \quad (5)$$

$$= \sum_{k=1}^N A_k \cos(2\pi n'_k t + \Phi_k)$$

$$A_k = \sqrt{2S(n_k)\Delta n} \quad (6)$$

$$n_k = n_1 + (k-1/2)\Delta n \quad (7)$$

$$n'_k = n_k + \delta n_k \quad (8)$$

$$\Delta n = (n_u - n_1)/N \quad n_1 < n < n_u \quad (9)$$

where, Φ_k : 0에서 2π 까지 구간의 일정한 분포를 갖는 위상각
 N : 중첩 횟수
 δn_k : $-\Delta n'/2$ 와 $\Delta n'/2$ 사이의 불특정 진동수

또한 국내의 건축구조기준에서는 난류의 적분 스케일 ($L_u(z)$) 및 난류 강도($I(z)$), 난류 속도의 표준편차 ($\sigma(z)$)를 다음과 같이 산정한다.

$$L_u(z) = 100 \left(\frac{z}{30} \right)^{0.5} \quad (10)$$

$$I(z) = 0.1 \left(\frac{z}{Z_g} \right)^{-\alpha - 0.05} \quad (11)$$

$$\sigma(z) = I(z)V(z) \quad (12)$$

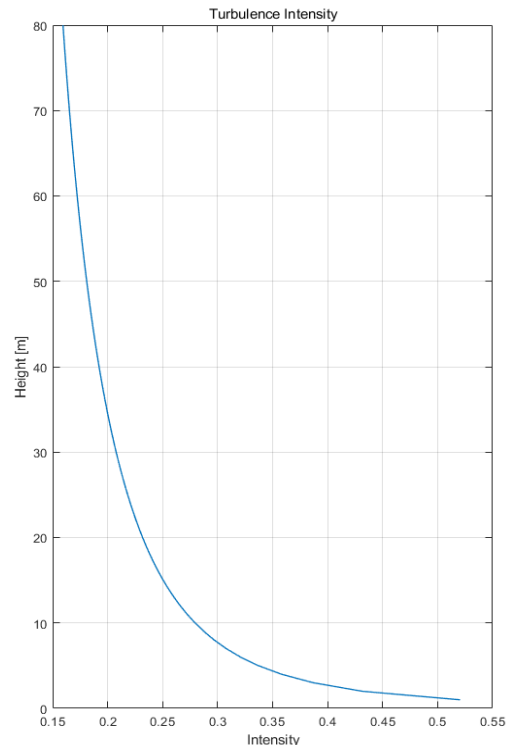
〈Fig. 3〉은 건축구조기준에 따라 계산된 난류강도이며, 〈Fig. 4〉는 Von Karman 스펙트럼에 따라 생성된 난류 속도의 예시 중 하나이다.

3. 풍하중 산정

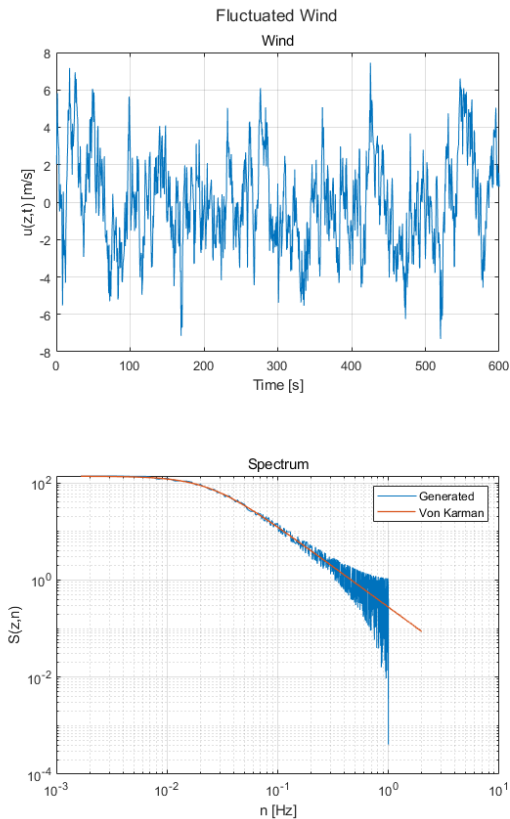
3.1 건축구조기준의 풍하중⁵⁾

건축구조기준(KDS 41 10 15)에서는 특정 조건을 만족하는 대상 건축물에 대하여 풍하중을 산정하는 계산식을 명시하고 있다. 대상 건축물의 조건은 다음과 같다.

- (1) 장방형평면 및 입면형상을 가진 일반적인 건축물
- (2) 아래의 조건을 만족하고 벽면에 수직으로 바람을 받는 건축물



〈Fig. 3〉 Turbulence intensity



〈Fig. 4〉 Profile and power spectrum of fluctuating wind speed

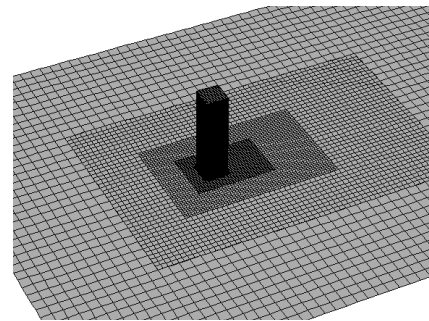
- 평면 형상이 사각형이고 높이 방향으로 일정
- $\frac{H}{\sqrt{BD}} \leq 6$
- $0.2 \leq \frac{D}{B} \leq 5$
- $\frac{V_H}{n_L \sqrt{BD}} \leq 10$

where, H : 건축물의 기준높이(m)
 B : 건축물의 대표폭(m)
 D : 건축물의 깊이(m)
 V_H : 설계풍속(m/s)
 n_L : 풍직각방향 1차고유진동수(Hz)

해석 대상으로 가정한 모든 건축물은 위의 조건을 만족하므로 건축구조기준의 산정식을 통해 풍하중을 계산할 수 있으며, 그에 따라 계산된 해석 모델의 최대 풍압계수는 〈Table 2〉와 같다. 여기서, 항력계수(Drag coefficient)는 풍방향 풍압계수이며, 양력계수(Lift

〈Table 2〉 Wind pressure coefficient (KDS)

D/B	Drag coefficient	Lift coefficient
0.5	1.8722	0.8937
0.7	1.8906	0.8360
1.0	1.9227	0.7377
1.5	1.8202	0.6126
2.0	1.7562	0.5115



〈Fig. 5〉 Mesh generation

coefficient)는 풍직각방향 풍압계수이다. 이 때 CFD 시뮬레이션의 결과로 도출되는 풍하중은 건축물의 공진효과가 고려되지 않은 풍하중이므로, 이와 비교하기 위하여 건축구조기준의 풍하중도 공진효과가 고려되지 않은 강제구조물일 때의 풍하중을 계산하였다.

3.2 CFD 시뮬레이션의 풍하중

풍하중 산정을 위한 CFD 시뮬레이션은 상용 프로그램인 ANSYS Fluent를 사용하였으며, 난류 모델은 LES(Large Eddy Simulation)모델을 사용하였다. LES 모델은 다른 난류 모델에 비하여 계산 비용은 크지만, 시간에 따라 변동하는 풍속과 그에 따른 난류 및 와류를 가장 잘 표현한다⁶⁾. 이 때 Subgrid-scale 모델은 WALE(Wall-Adapting Local Eddy-viscosity)를 사용하였다.

해석 모델의 격자(Mesh)는 난류 및 와류가 발생하는 건축물 주변에서는 매우 조밀하고 벽체와 거리가 멀어질수록 성기게 모델링하였다. 이를 통해 건축물 근처에서 해석의 정확성을 확보함과 동시에 해석의 효율성을 높이도록 하였다. 이 때 벽면에서 격자의 크기를 대표하여 표현하는 $Y+$ 값은 50 이하가 되도록 모델링하였으며, 벽면에서 난류의 거동을 잘 표현할 수 있도록 벽 함수(Wall function)를 사용하였다.

시간에 따라 변동하는 풍하중을 측정하기 위하여 총 시뮬레이션 시간은 600s로 하였으며, 시간증분(Time step)은 0.25s로 설정하였다.

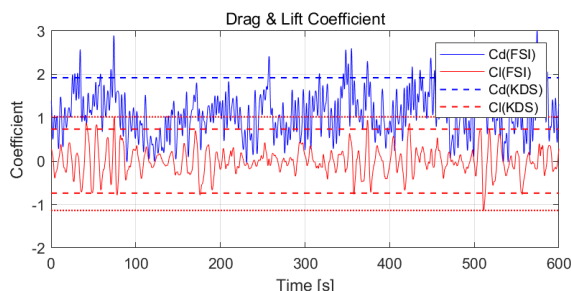
풍방향 및 풍직각방향 변동 풍속의 적용 방식에 따른 풍하중을 비교하기 위하여 총 4 Case의 CFD 시뮬레이션을 수행하였으며, 각 Case는 다음과 같다.

- Case 1: 모든 지점에서 동일한 변동 풍속 프로파일 적용
- Case 2: 모든 지점에서 각각 다른 변동 풍속 프로파일 적용, 풍직각방향 변동 풍속은 고려하지 않음
- Case 3: 모든 지점에서 각각 다른 변동 풍속 프로파일 적용, 풍직각방향의 난류강도는 풍방향의 50% 적용
- Case 4: 모든 지점에서 각각 다른 변동 풍속 프로파일 적용, 풍직각방향의 난류강도는 풍방향의 100% 적용

한국풍공학회에서 발행한 내풍공학에서는 풍직각방향의 난류강도를 풍방향의 50%로 고려할 것을 제시하고 있으나, 건축구조기준에서는 이를 명시하고 있지 않기 때문에 풍직각방향 난류강도의 영향을 고찰하기 위하여 임의로 가정하였다⁷⁾.

3.2.1 시뮬레이션 결과(Case 1)

Case 1은 모든 지점에서 동일한 변동 풍속 프로파일을 적용한 시뮬레이션이다. 변장비(D/B)가 1.0인 건축물의 시간에 따른 풍압계수는 <Fig. 6>과 같다. <Table 3>에는 이때의 최대 풍압계수를 정리하였으며, 괄호는 건축구조기준의 풍압계수와와의 차이이다.



<Fig. 6> Wind pressure coefficients (Case1)

<Table 3> Wind pressure coefficient (Case1)

D/B	Drag coefficient	Lift coefficient
1.0	3.0591 (59.10%)	1.1366 (54.07%)

모든 지점에서 단일의 변동 풍속 프로파일을 적용한 Case 1에서 풍방향 및 풍직각방향의 풍하중은 건축구조기준의 풍하중에 비하여 50% 이상 크게 발생하였다. 특히 풍방향 풍하중의 편차가 매우 크게 발생하는데, 이는 건축물의 모든 벽면에서 풍하중이 동시에 동일한 비율로 증가 및 감소하는 것이 반복되기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 CFD 시뮬레이션을 통해 풍하중을 산정할 때 단일의 풍속 프로파일을 사용하는 것은 풍하중을 과대평가하는 것으로 판단된다.

3.2.2 시뮬레이션 결과(Case 2)

Case 2는 모든 지점에서 각각 다른 풍속 프로파일을 적용하였으며, 풍직각방향의 변동 풍속은 고려하지 않았다. <Fig. 7>은 변장비 0.5~2.0의 5가지 단면의 건축물의 풍압계수이며, <Table 4>는 각각의 최대 풍압계수이다.

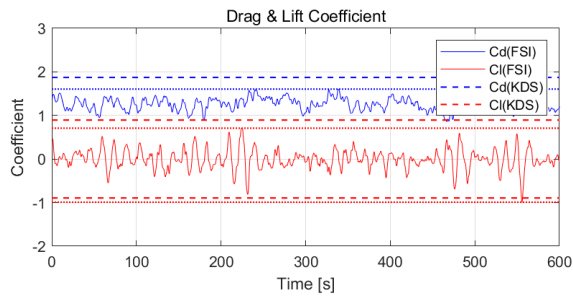
Case 2에서 풍방향 풍하중은 건축구조기준의 풍하중에 비하여 약 10~27% 작게 발생하였으며, 특히 변장비가 1.5 이상인 모델에서 차이가 크게 나타났다. 풍직각방향 풍하중은 약 -6~16%의 차이가 발생하였다.

3.2.3 시뮬레이션 결과(Case 3)

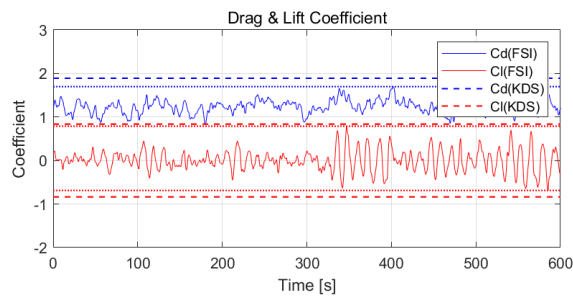
Case 3은 Case 2에 더하여 풍방향 난류강도의 50%를 풍직각방향의 난류강도로 적용하였다. <Fig. 8>은 변장비 0.5~2.0 건축물의 풍압계수이며, <Table 5>는 각각의 최대 풍압계수이다.

<Table 4> Wind pressure coefficient (Case2)

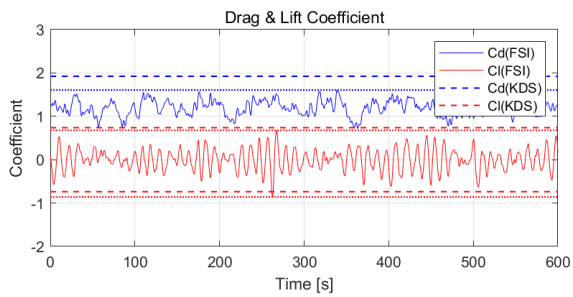
D/B	Drag coefficient	Lift coefficient
0.5	1.6049 (-14.28%)	0.9905 (10.83%)
0.7	1.6983 (-10.17%)	0.7886 (-5.68%)
1.0	1.6055 (-16.5%)	0.8590 (16.44%)
1.5	1.3943 (-23.40%)	0.5899 (-3.71%)
2.0	1.2870 (-26.71%)	0.4868 (-4.84%)



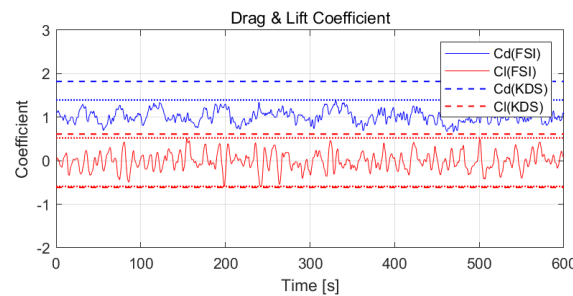
(a) $D/B : 0.5$



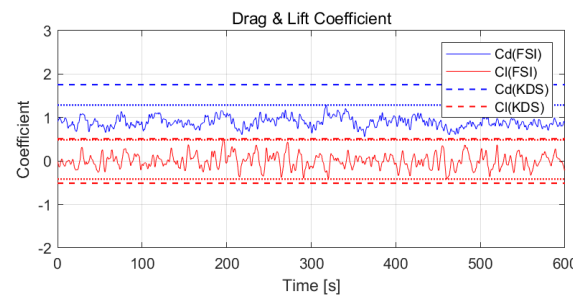
(b) $D/B : 0.7$



(c) $D/B : 1.0$

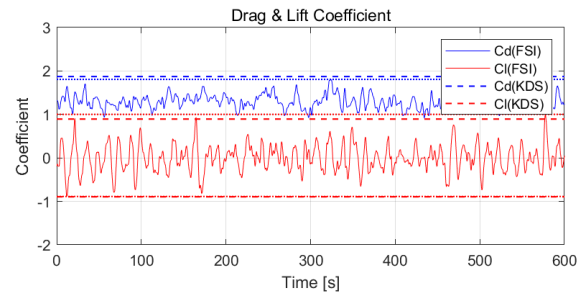


(d) $D/B : 1.5$

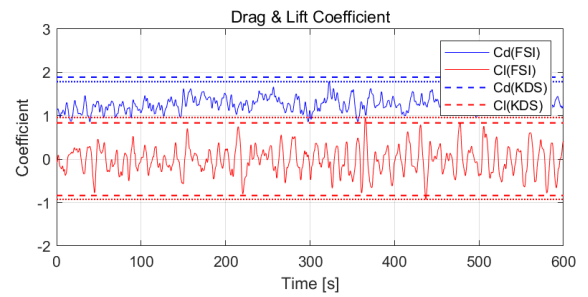


(e) $D/B : 2.0$

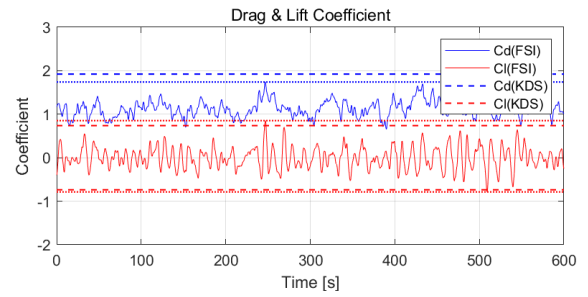
〈Fig. 7〉 Wind pressure coefficients (Case2)



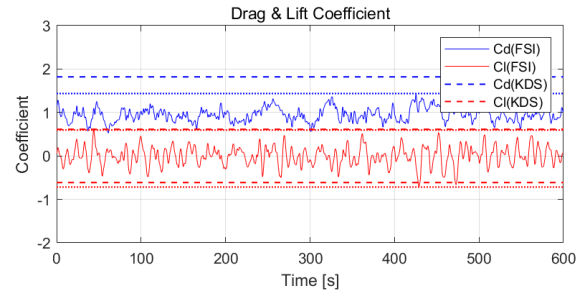
(a) $D/B : 0.5$



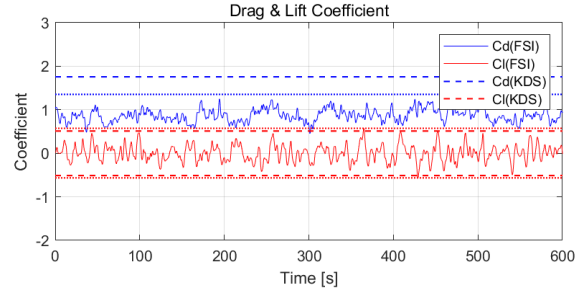
(b) $D/B : 0.7$



(c) $D/B : 1.0$



(d) $D/B : 1.5$



(e) $D/B : 2.0$

〈Fig. 8〉 Wind pressure coefficients (Case3)

〈Table 5〉 Wind pressure coefficient (Case3)

D/B	Drag coefficient	Lift coefficient
0.5	1.8073 (-3.47%)	1.0013 (12.04%)
0.7	1.7863 (-5.52%)	0.9606 (14.90%)
1.0	1.7406 (-9.47%)	0.8523 (15.53%)
1.5	1.4361 (-21.10%)	0.7168 (17.01%)
2.0	1.3538 (-22.91%)	0.5748 (12.37%)

Case 3의 풍방향 풍하중은 0.5~1.0까지의 작은 변장비 모델에서 건축구조기준의 값과 10% 이내의 차이로 매우 유사한 결과를 나타냈다. 그러나 1.5 이상의 큰 변장비에서 약 22%의 다소 큰 차이가 발생하였다. 풍직각방향의 풍하중은 약 12~17% 크게 발생하였다. Case 3의 풍하중은 Case 2보다 전체적으로 증가하였으며, 특히 풍직각방향 풍하중의 증가폭이 크게 나타났다.

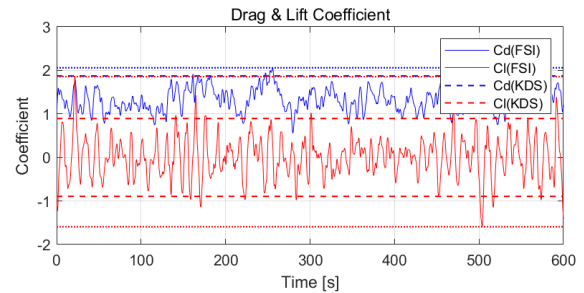
3.2.4 시뮬레이션 결과(Case 4)

Case 4는 풍직각방향 난류강도를 풍방향의 100%로 적용하였다. 〈Fig. 9〉는 변장비 0.5~2.0 건축물의 풍압계수이며, 〈Table 6〉은 각각의 최대 풍압계수이다.

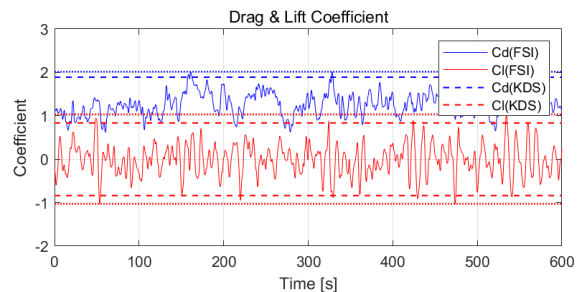
Case 4에서 풍방향 풍하중은 건축구조기준과 비교하여 약 -12~10%의 작은 차이로 유사한 결과를 보였다. 그러나 풍직각방향 풍하중은 24~108%로 매우 큰 차이가 발생하였다. Case 4 또한 Case 3에서와 같이 풍직각방향의 난류강도가 증가함에 따라 풍하중의 크기가 증

〈Table 6〉 Wind pressure coefficient (Case4)

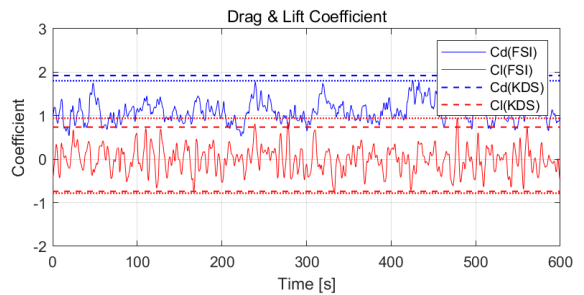
D/B	Drag coefficient	Lift coefficient
0.5	2.0590 (9.98%)	1.8553 (107.61%)
0.7	2.0167 (6.67%)	1.0377 (24.12%)
1.0	1.8023 (-6.26%)	0.9431 (27.85%)
1.5	1.6450 (-9.63%)	0.7584 (23.80%)
2.0	1.5341 (-12.64%)	0.9330 (82.41%)



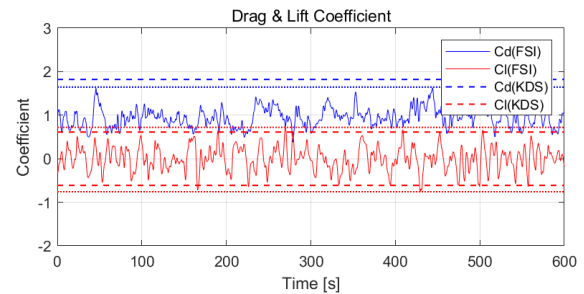
(a) $D/B : 0.5$



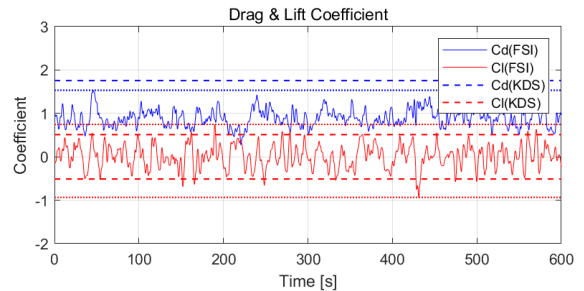
(b) $D/B : 0.7$



(c) $D/B : 1.0$



(d) $D/B : 1.5$



(e) $D/B : 2.0$

〈Fig. 9〉 Wind pressure coefficients (Case4)

가하였으며, 특히 변장비 0.5와 2.0 모델의 풍직각방향 풍하중이 매우 크게 증가하였다.

3.2.5 시뮬레이션 결과 분석

3.2.1절의 Case 1 시뮬레이션 결과에서 알 수 있듯이 단일의 변동 풍속 프로파일을 사용할 경우 모든 지점에서 풍속이 동일한 비율로 증가 및 감소하면서 풍하중의 편차가 매우 크게 발생하며 풍하중의 크기가 과대평가 된다. 따라서 CFD 시뮬레이션을 통하여 풍하중을 산정할 때 실제 현상과 같이 모든 지점에서 각각 다른 풍속 프로파일을 적용해야 할 것으로 판단된다.

이를 바탕으로 Case 2~4의 시뮬레이션에서는 모든 지점에서 각각 다른 풍속 프로파일을 사용하였으며, 풍직각방향의 난류강도에 따른 영향을 비교하기 위하여 각각 다른 크기의 풍직각방향 난류강도를 적용하였다. Case 2~4에서 적용된 풍직각방향의 난류강도는 각각 순서대로 풍방향 난류강도의 0%, 50%, 100%이다. 풍직각방향의 난류강도를 크게 고려할수록 풍방향 및 풍직각방향 풍하중의 크기도 증가하였다. 이는 각 풍속 벡터 성분의 합으로 인해 풍속 벡터의 크기가 증가하였기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 풍방향 풍하중의 증가는 평균 15.8%로 다소 작은 것에 비해 풍직각방향 풍하중은 평균 증가폭이 50.6%로 매우 크게 증가하였다. 이로 부터 풍직각방향 풍하중이 풍직각방향 난류강도의 크기에 매우 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

4. 결론

풍하중 산정을 위한 CFD 시뮬레이션 수행 시 변동 풍속의 적용 방식과 풍직각방향 난류강도의 고려 여부에 따른 영향을 파악하기 위해 4가지 Case의 변동 풍속 프로파일을 적용하여 차이를 비교하였다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 단일의 변동 풍속 프로파일을 사용하는 것은 풍하중의 과대평가를 초래하며, 실제의 바람 현상과 같이 모든 지점에서 각각 다른 풍속 프로파일을 적용하는 것이 바람직하다.

2) 풍직각방향의 난류강도가 증가함에 따라 풍하중의 크기도 증가하며, 특히 풍직각방향 풍하중이 매우 큰 영향을 받는다. 그러나 건축구조기준(KDS 41 10 15)에는

풍직각방향의 난류강도에 대한 지침이 명시되어 있지 않아 이에 대한 명확한 기준이 필요한 것으로 판단된다.

본 논문의 결과로 풍직각방향의 난류강도가 풍직각방향 풍하중에 큰 영향을 미치는 것은 파악할 수 있지만, 표본의 수가 적어 이들의 명확한 관계성을 파악하기에는 어려움이 있다. 따라서 후속 연구에서 풍동실험과 CFD 시뮬레이션을 병행하고, 난류강도의 크기 단계를 증가시켜 더욱 자세한 분석을 통해 관계성을 정리해야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축연구사업의 연구비지원(20AUDP-B100343-06)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Hong, I. P., Ki, H. S., Jung, E. Y., & Song, D. S., "A Study on Inlet Flow Profile in CFD Simulation for Predicting Wind Environment in Urban Area", Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design, Vol.28, No.1, pp.311~318, 2012, doi: 10.5659/JAIK_PD.2012.28.1.311
2. Ha, T. W., "Prediction of Non-Contact-Type Seal Leakage Using CFD", The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol.9, No.3, pp.14~21, 2006, doi: 10.5293/KFMA.2006.9.3.014
3. Cho, J. H., Yim, S. R., Lee, K. S., & Han, S. E., "A Study on the Evaluation of Wind Environment and Analytical Method Using CFD Analysis", Journal of the Architectural Institute of Korea, Structure and Construction Section, Vol.28 No.7, pp.99~106, 2012, doi: 10.5659/JAIK_SC.2012.28.7.99
4. Lee, J. C., Park, Y. H., Kim, B. S., & Lee, S. H., "A Case Study on the Analysis and Reform Measure of Indoor Ventilation in

- the Super High-Rise Apartment Housing with Using CFD”, Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol.25, No.7, pp.321~328, 2009
5. Korea Construction Standard Center, “Korea Design Standard 41 10 15”, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, pp.33~85, 2019.
 6. Sagaut, P., “Large Eddy Simulation for Incompressible Flows: An Introduction”, 3rd ed., Springer Science & Business Media, pp.XXIX~558, 2006.
 7. The Wind Engineering Institute of Korea, “Wind-Resistant Engineering”, 1st ed., Kimoondang, 2010.
- Received : December 01, 2020
 - Revised : December 22, 2020
 - Accepted : December 24, 2020