

# CFD를 이용한 복합건물 주위의 풍환경 연구 Study on Wind Environment around Complex Building using CFD

박재현\* · 이연원\*\*†  
Jae-Hyeon Park\* and Yeon-Won Lee\*\*†

(Received 16 October 2022, Revision received 01 November 2022, Accepted 03 November 2022)

**Abstract :** Recently, the problem of the building wind has emerged due to high-rise buildings in narrow spaces. Building wind is an increase of the wind velocity locally because of the structure and arrangement of the building, which can damage the building, deteriorate the walking environment and even cause casualties. In this study, the wind environment of the Pukyong National University Daeyeon Campus Engineering building was investigated using CFD. Also, the ceiling panel collapse, which is one of the cases of damage from the building wind, was analyzed. The average and maximum wind velocity of summer and winter seasons were given to an inlet condition with a wind profile. In pedestrian height, both summer and winter average wind velocities were 3.3 m/s, but the wind velocity increased to 5.7 m/s in summer and 5.5 m/s in winter. The maximum velocity in summer season was observed at 14.6 m/s, but it is increased to 33 m/s around the building. Similarly, the maximum velocity in winter was 13.9 m/s and it is increased to 27 m/s around the building. The maximum force acting on the pedestrian was calculated into 15.5 N in average velocity and 275.5 N in maximum velocity. The strong southwest wind is extremely dangerous to a pedestrian on a narrow pathway between the buildings. Within the area where the ceiling panels collapse occurred, the inlet side wind velocity is slower than the free flow, and the velocity is rapidly increased due to the influence of the structure at the rear part of the outlet side. Accordingly, it seems that negative pressure is formed in the rear portion of the outlet side, and the ceiling panels are collapsed by downward force.

**Key Words :** Building Wind, Wind Environment, CFD, Wind Profile Power Law, Ceiling Panel Collapse

## — 기 호 설 명 —

$U_i$  : 평균속도 [m/s]

$u_i'$  : 변동속도 [m/s]

$x_i$  : 데카르트 좌표계 [m]

\*\*† 이연원(<https://orcid.org/0000-0002-3749-8119>) : 교수, 부경대학교 기계공학부

E-mail : ywlee@pknu.ac.kr Tel : 051-629-6162

\*박재현(<http://orcid.org/0000-00014-5942-7680>) : 대학원생, 부경대학교 대학원 기계설계공학과

\*\*† Yeon-Won Lee(<https://orcid.org/0000-0002-3749-8119>) : Professor, School of Mechanical Engineering, Pukyong National University.

E-mail : ywlee@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-7730

\*Jae-Hyeon Park(<http://orcid.org/0000-00014-5942-7680>) :

Graduate student, Department of Mechanical Design Engineering, Graduate School of Pukyong National University.

$p$	: 압력 [Pa]
$\nu$	: 동점성 계수 [ $m^2/s$ ]
$k$	: 난류 운동에너지 [ $m^2/s^2$ ]
$\epsilon$	: 난류 운동에너지 소산율 [ $m^2/s^3$ ]
$\mu_t$	: 난류점성계수 [ $kg/m.s$ ]
$S_{ij}$	: 변형률 [ $1/s$ ]
$U$	: 입구영역의 Z 높이에서의 풍속 [ $m/s$ ]
$U_r$	: AWS 측정 풍속 [ $m/s$ ]
$Z$	: 입구영역의 높이 [ $m$ ]
$Z_r$	: AWS 풍속 측정 높이 [ $m$ ]
$\alpha$	: 지표면 조도에 따른 지수계수
$F$	: 보행자에게 가해지는 힘 [ $N$ ]
$A$	: 원기둥의 넓이 [ $m^2$ ]
$\rho$	: 밀도 [ $kg/m^3$ ]
$C_p$	: 압력계수

## 1. 서 론

최근 도시는 도시인구집중현상과 건축기술의 발달을 통해 집적화와 고층화되고 있는 추세이다. 이러한 도시화 형태는 한정된 공간에 많은 인구를 수용할 수 있다는 점에서 효율적이지만 부작용도 적지 않다. 특히, 빌딩풍은 건물의 파손, 보행환경의 악화, 심지어는 건물 외장재 이탈로 인하여 인명사고로 이어질 수 있는 새로운 형태의 재난으로 급부상하고 있다. 특히, 부산지역의 경우, 해안가를 따라 초고층 건물이 나란히 배치되어 있어 매년 빌딩풍에 의한 피해가 꾸준히 증가하고 있다. 이에 따라, 도심의 빌딩풍에 관련한 연구의 필요성이 증대되고 있다. 또한 도시계획 때에 이러한 빌딩풍을 예측하고 저감 방법을 모색할 필요성이 있다.

전산유체역학(CFD; Computational Fluid Dynamics)을 이용한 풍속 예측은 도심의 풍환경 평가의 한 방법으로 알려져 있다. CFD는 컴퓨터 성능의 향상과 함께 매우 큰 스케일의 풍환경을 평가할 수 있다는 점에서 장점을 가진다.<sup>1)</sup> CFD를 이용한 수치해석 실험의 경우에는 Boundary Condition,

Domain size, Grid density 그리고 Turbulence model에 따라 크게 의존적인 것으로 알려져 있다.<sup>2)</sup> 특히, 입구경계조건에서 적용하는 수직속도 분포에 따라 그 결과가 크게 달라진다. 국내에서도 구조설계기준 KBC 2009를 통해 지표면의 조도에 따라 지수를 정하고 있으며, 해외의 경우에도 지표면의 상태에 따라 분류하고 있다.<sup>2,3)</sup>

본 연구에서 대상이 되는 복합 건물인 부경대학교 대연캠퍼스 공학관의 경우에는 한정된 공간에서 많은 학생을 수용하기 위하여 140 m 주위에 15층 이상의 고층건물이 4동이 있다. 이로 인하여, 약간의 외부바람에서도 건물 사이에서 보행이 어려운 정도의 풍환경이 조성된다. 또한 건물 사이에 1~2층을 개방하였으며, 이 공간에서 반복적으로 천장 마감재 이탈로 인한 피해를 입었다. 본 연구에서는 CFD를 이용하여 여름철 그리고 겨울철 평균풍속과 최대풍속 하에서의 부경대학교 공학관의 풍환경을 조사하고 보행자에게 미치는 영향을 알아보았다. 또한 반복적으로 발생하였던 천장 마감재 이탈 현상의 원인을 분석하였다.

## 2. 해석모델

### 2.1 건물배치 및 격자생성

Fig. 1의 (A)는 부경대학교 공학관과 그 중심으로 140 m 이내에 있는 건물 3동을 3차원 모델링한 것이다. 건물에 유동이 도달하기 전 속도 분포가 충분히 발달할 것을 고려하여 직경 600 m의 반구(hemisphere)형태의 domain을 형성하였다. 각 건물의 위치와 명칭은 (B), (C)와 같다. 공학 1관과 2관 사이에는 2층 높이(10 m)의 개방공간이 존재하며, 천장마감재 이탈현상이 반복적으로 발생하였다. (Fig. 1 (D)) 건물의 전방부에는 최저 높이 2.2 m 그리고 최대 높이 5 m의 아치형태 태양광 패널이 44 m 길이로 존재한다. 일반적으로 태양광 패널은 건물로 취급하지 않지만, 천장 마감재 이탈 영역의 국부적인 현상을 상세히 살펴보기 위해서 추가하였다.

격자의 경우에는 건축물의 복잡도를 고려하여 사면체(Tetrahedron)격자를 주로 사용하였다. 지표

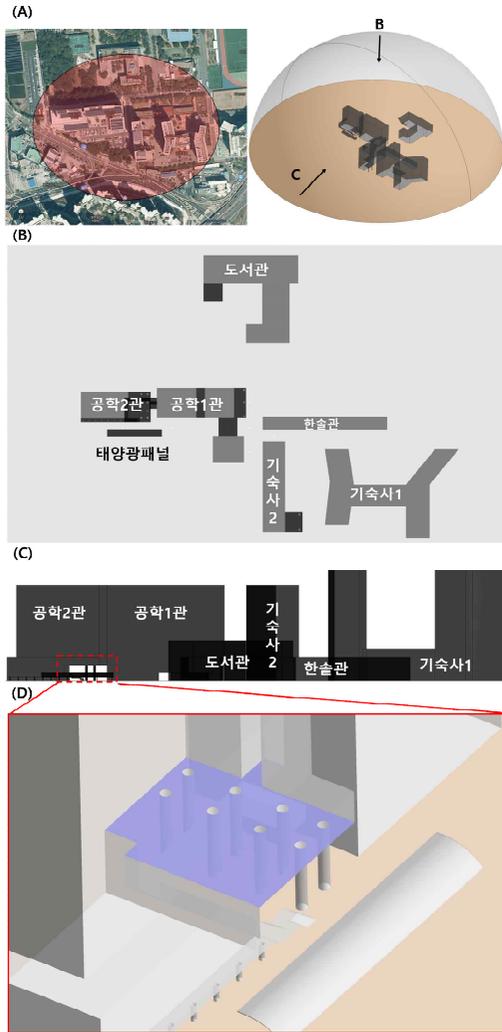


Fig. 1 Computational domain ; (A) 3D modeling of Pukyong National University engineering building with surrounding buildings, (B) & (C) Location of buildings and building names, (D) Position of ceiling panels collapsed

면으로부터 5m 내에서는 높이에 따른 속도 구배가 크며, 보행자 높이에서의 풍환경을 조사하기 위하여 지표면으로부터 2 m 내에는 4개 이상의 격자가 적용될 수 있도록 설정하였다.<sup>4,8)</sup> 해석에 있어서 약 1,500만 개의 Elements를 생성하였다.

## 2.2 지배방정식, 난류모델 및 경계조건

유동장의 수치해석을 위해 3차원, 비압축성, 정상상태의 난류유동으로 가정하였다. 해석에 있어 연속방정식과 Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) equation을 이용하였으며, 식 (1) 및 식 (2)와 같다. RANS 방정식은 일반적인 운동량 보존방정식의 속도성분( $u_i$ )을 시간평균값( $U_i$ )과 변동 성분( $u_i'$ )으로 분리하여 시간평균화를 한 것이며, 이 과정에 있어 레이놀즈 응력(Reynolds Stress)을 모델링하기 위해 난류점성계수(Turbulent viscosity)를 정의하였으며 식 (3)과 같다.<sup>12,13)</sup>

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u_i u_j} \right] \quad (2)$$

$$- \overline{\rho u_i u_j} = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

난류모델로는 RANS의 Standard k- $\epsilon$  모델을 사용하여 해석하였다. Standard k- $\epsilon$  모델은 평균 유동에 미치는 난류 영향에 대한 2개의 추가적인 방정식이 개입된 난류 모델이다. 난류운동에너지(k)와 점성소산율( $\epsilon$ )에 대한 방정식이며, 식 (4), (5)와 같다. 이에 따른 난류 점성계수는 식 (6)과 같이 계산 가능하다.<sup>5,6)</sup>

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k u) = \text{div} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad}(k) \right] + 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - \rho \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial (\rho \epsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \epsilon u) = \text{div} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \text{grad}(\epsilon) \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (6)$$

여기서, 각 상수는  $C_\mu = 0.09$ ,  $\sigma_k = 1.00$ ,  $\sigma_\epsilon = 1.30$ ,  $C_{1\epsilon} = 1.44$  그리고  $C_{2\epsilon} = 1.92$  으로 정한다.<sup>5)</sup>

경계조건에 있어서 입구 영역의 경우에는 고도에 따른 풍속 변화를 지수법칙을 기반으로 한 연직 프로파일을 적용하였으며 식 (7)과 같다.<sup>2,3)</sup>

$$U = U_r (Z/Z_r)^\alpha \quad (7)$$

입구영역의 풍속은 기상청 AWS(Automatic Weather System)에 기록된 2021년 4월부터 2022년 4월까지의 데이터를 기반으로 하였다.<sup>7)</sup> 하지만 천장 마감재 이탈피해 당시 해당 지역의 풍속이 15.8 m/s이었기에 그 값을 입구영역의 풍속을 정하였다. 측정 위치가 지표면으로부터 7 m이므로 식 (7)에서  $Z_r$  값을 7 m로 결정된다. 지수함수에서 지수( $\alpha$ )의 경우, 지표면의 조도에 따라 결정된다. 국내 구조설계기준 KBC 2009는 풍속 프로파일에 사용되는 지수계수의 값을 4가지로 분류하고 있다. 특히, 대도시 중심부에서 10층 이상의 대규모 고층건축물이 밀집해 있는 지역의 경우, 그 값을 0.33으로 정하였다.<sup>2,3)</sup> 추가적인 경계조건으로는 출구영역은 Pressure-outlet 그리고 건물과 지표면은 No-Slip condition을 적용하였다.

상용 CFD 프로그램인 Ansys Fluent 2020 R2를 사용하여 계산하였다.

### 3. 해석결과

#### 3.1 평균풍속 하에서의 풍환경

연구대상이 속한 지역의 AWS에 따르면, 여름철과 겨울철 평균 측정 풍속은 3.3 m/s로 동일하였다. 다만, 여름철에는 50°(동풍) 그리고 겨울철에는 280°(서풍)로 풍향의 차이는 있다. 보행자 높이에서의 입구영역 속도는 2.2 m/s로 보행환경에 영향이 미치지 않는 속도이다.

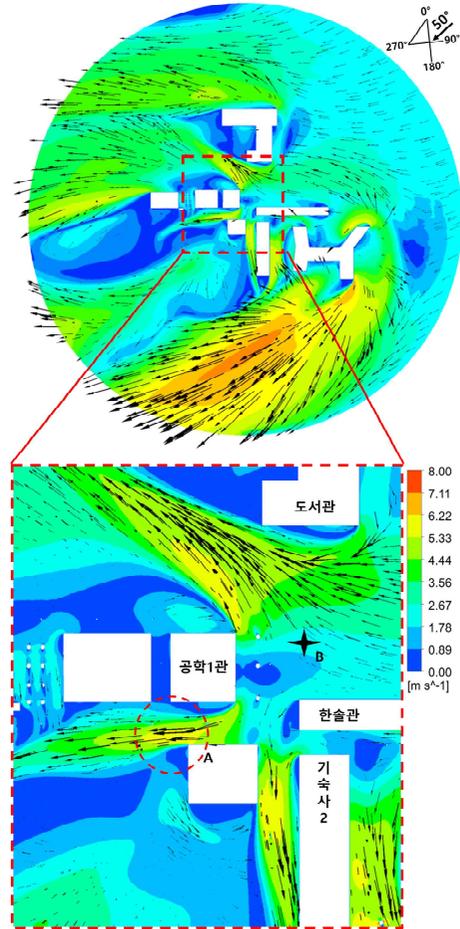


Fig. 2 Horizontal flow field at pedestrian height in case of summer average wind speed (3.3 m/s, 50°)

Fig. 2는 여름철 평균풍속 하에서 보행자 높이에서의 수평 유동장을 나타낸 것이다. B 지점을 기준으로 유동은 풍향이 130°, 270° 그리고 180° 나뉘지면서 풍속이 급격히 빨라진다. 공학 1관과 도서관 사이는 비교적 공간이 넓지만, 공학 1관의 건물 모서리에서 발생한 유동박리로 인해 실제 유동이 흐를 수 있는 공간은 제한적이기에 풍속이 빨라졌다. 여름철에는 공학 1관 건물 남쪽의 A영역에서 풍속이 5.7 m/s로 가장 빠를 것으로 예측된다.

겨울철 보행자 높이의 수평 유동장은 Fig. 3이다. 풍속은 공학 1관과 도서관 사이의 B 지점을

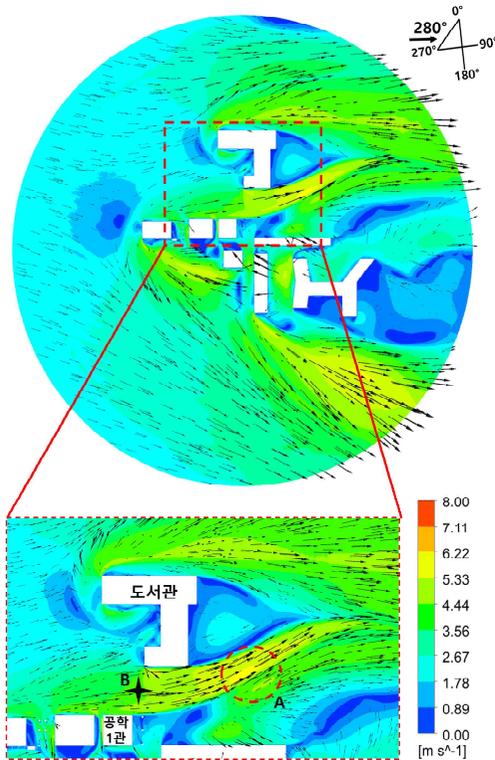


Fig. 3 Horizontal flow field at pedestrian height in case of winter average wind speed (3.3 m/s, 280°)

기준으로 급격히 빨라지며, A 영역에서 풍속이 5.5 m/s까지 높아진다. 여름철과 겨울철 모두 건물 사이에서 풍속이 2배 이상 높아지며, 보행환경이 급격히 나빠질 것으로 예상할 수 있다. 또한 대체로 풍속은 여름철에 더 빠르며 유로가 복잡한 여름철에 보행환경이 더 나쁠 것으로 판단된다.

### 3.2 최대풍속 하에서의 풍환경

AWS 측정값에 따르면, 여름철 최대풍속은 14.6 m/s(230°, 남서풍) 그리고 겨울철 최대풍속은 13.9 m/s(50°, 동풍)이다. Fig. 4, 5는 최대풍속 하에서 여름철과 겨울철 보행자 높이의 수평 유동장을 나타낸 것이다. 여름철의 경우에는 남서풍이 다른 간섭 없이 건물에 도달하며, 건물 사이의 좁은 영역에서 유속이 급격히 빨라짐을 관찰할 수 있다. 특히, Fig. 4의 A 위치에서는 국부적으로 속도가

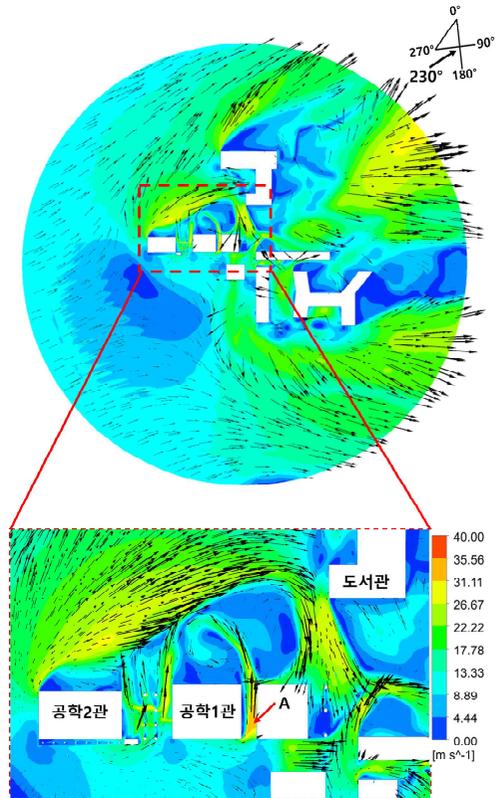


Fig. 4 Horizontal flow field at pedestrian height in case of summer maximum wind speed (14.6 m/s, 230°)

30 m/s 이상으로 높아졌다. 이는 일반적으로 Beaufort 풍력계급<sup>9)</sup> 상에서 사람이 넘어지고 건물의 파손과 인명피해가 우려되는 풍속이다.

겨울철 최대풍속의 경우, Fig. 5와 같이 공학 1관의 동쪽 B 지점에서 세 갈래로 유동이 나뉘는 것을 확인할 수 있다. 이는 동일 풍향의 여름철 평균 풍속의 풍환경과 같다. 또한 최대풍속의 위치도 공학 1관의 남쪽 A 영역에서 풍속이 23 m/s까지 높아진다. 이 풍속은 보행자의 전진을 방해하고 균형을 잡기 어려운 풍속이다.<sup>9)</sup>

### 3.3 풍환경 내 보행자에게 가해지는 영향

유동장 내에 보행자를 대체할 직경 0.5 m 그리고 높이 1.8 m의 원기둥을 Fig. 6과 같이 배치하였다. 풍환경에 따라 보행자에게 가해지는 영향을

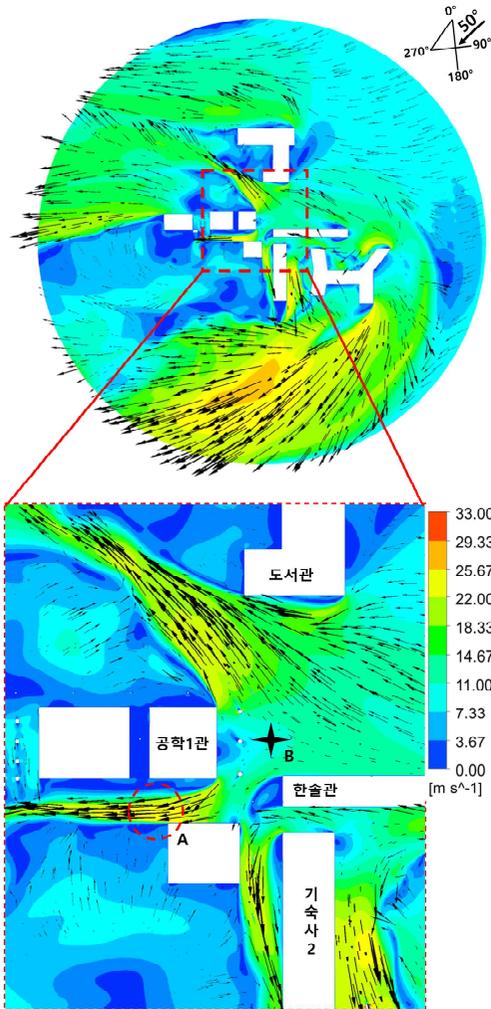


Fig. 5 Horizontal flow field at pedestrian height in case of winter maximum wind speed (13.9m/s, 50°)

알아보기 위해 원기둥에 가해지는 합력을 계산하였으며 Table 1과 같다. 계산한 합력은 원기둥에 작용하는 압력을 표면(면적)에 대해 적분한 것으로 식 (8)과 같다.

$$F = \int p dA \quad (8)$$

11곳의 보행자 위치에서 공통적으로 보행자에

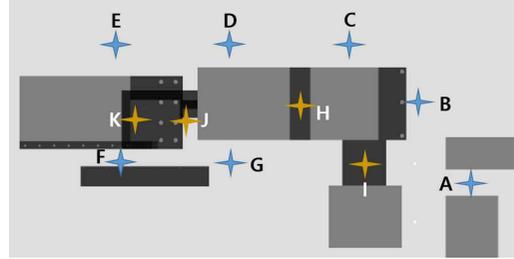


Fig. 6 Location of pedestrian from A to K

Table 1 The force applied to pedestrian by the wind [Unit : N]

Location	Wind speed and direction			
	3.3 m/s 50°	3.3 m/s 270°	14.6 m/s 230°	13.9 m/s 50°
A	3.11	1.19	135.3	69.5
B	2.63	2.44	79.0	43.4
C	3.76	6.92	108.6	25.3
D	0.82	3.50	37.4	35.6
E	1.77	3.01	69.5	28.6
F	1.08	4.13	67.5	12.9
G	5.46	0.60	53.7	111.9
H	1.19	2.55	275.5	23.7
I	15.5	0.04	149.2	206.6
J	1.42	1.42	97.7	28.4
K	5.14	0.21	197.2	76.6

게 가해지는 힘이 높은 곳은 유동장에서 풍속이 가장 빠른 곳임을 알 수 있다. 여름철 평균풍속 (3.3 m/s, 50°)과 겨울철 최대풍속 (13.9 m/s, 50°)에서는 동풍이 좁은 건물 사이로 들어오는 I 영역에서 15.5 N과 206.6 N으로 가장 높았으며, 겨울철 평균풍속(3.3 m/s, 270°)에서도 공학 1관과 도서관 사이의 C 영역에서 6.92 N으로 가장 높았다. 특히, 여름철 최대풍속(14.6 m/s, 230°)에서는 구조물의 영향을 받지 않은 강한 자유류가 곧바로 건물 사이의 좁은 공간으로 들어오면서 33 m/s의 풍속이 예측된 H 영역에서 275.5 N의 힘이 보행자에게 작용한다.

#### 4. 천장마감재 이탈현상의 분석

연구대상의 건물에서 반복해서 천장마감재가

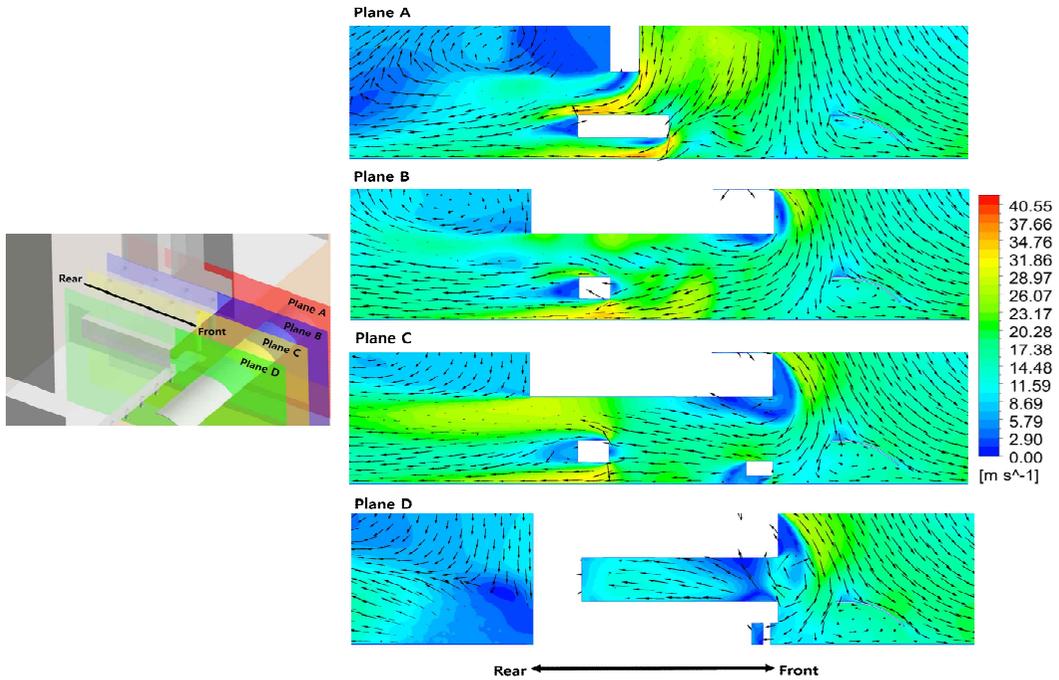


Fig. 8 Location of Planes A to D and vertical flow field of each plane

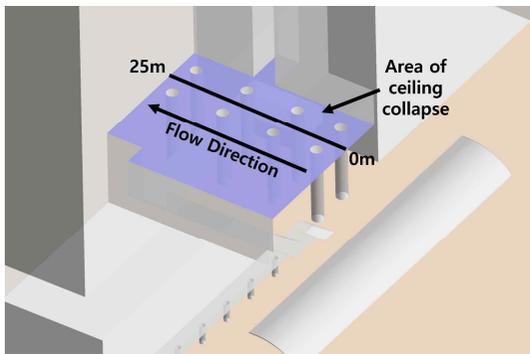


Fig. 7 Position of ceiling panels collapsed and flow direction

이탈되었던 영역은 공학 1관, 2관 사이의 2층 규모의 열린 공간으로 Fig. 7에 나타나 있다. 천장 마감재가 이탈되었을 때의 측정 풍속은 15.8 m/s로 이를 입구 경계조건으로 이용하였다. 바람은 태양광 패널에서 건물의 후방으로 빠져나가며 천장부의 전방에서 후방까지의 총 길이는 25 m이다.

Fig. 8은 관심영역의 수직 유동장을 나타낸 것

으로 수직 평면은 8 m의 간격을 가진다. 15.8 m/s의 자유류는 건물과 부딪힌 후 수직으로 하강하며, 저층부의 개방공간으로 유입된다. 바람이 유입되는 입구방향의 천장부에는 재순환 영역이 형성되는 것을 Plane A~D에서 공통적으로 확인할 수 있다. Plane A의 경우, 천장부의 길이가 좁아서 유동이 박리된 이후 재부착되지 못하고 후방부로 빠져나간다. 순환영역의 영향으로 인해 유속이 더 좁아져 다른 영역보다 속도가 35 m/s로 더 빠르다. Plane B와 C의 경우, 건물의 모서리 부분에서 유동박리가 일어난 후에 유동이 천장부에 재부착된다. 재부착된 유동은 공간 내의 구조물에 의해 유속이 29.3 m/s까지 높아지며, 후방부로 바람이 빠져나갈 때까지 그 속도가 유지된다. Plane D의 경우, 후방부의 끝이 막혀 있어 유동이 빨라지지 못하고 자유류 속도인 15.8 m/s보다 낮은 것을 확인할 수 있다.

유체의 속도는 압력과 반비례한다는 점을 고려할 때, Plane B와 C에서 재순환 영역이 형성된 천장 전방부의 경우에는 대기압보다 높은 압력이

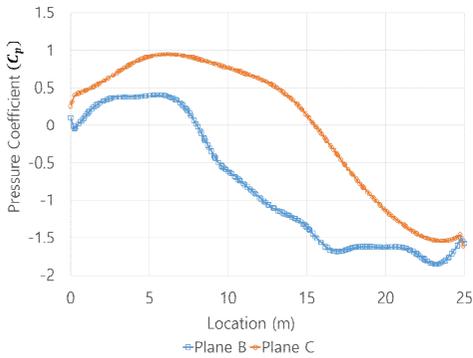


Fig. 9 Pressure coefficient at Plane B and C along the ceiling panel collapsed

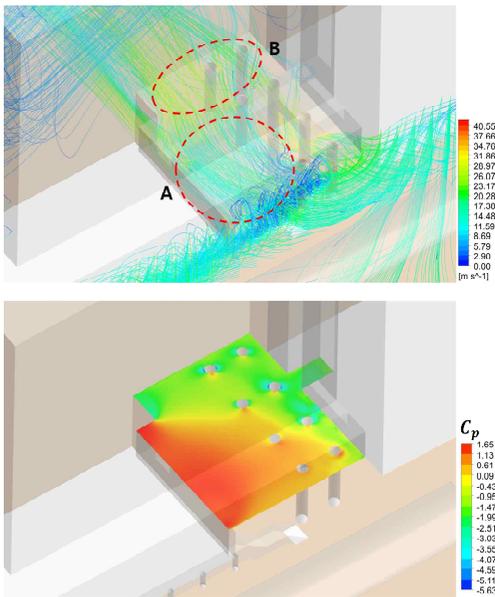


Fig. 10 Streamline at the ceiling panel collapsed (Top) and Pressure coefficient distribution along ceiling panel (below)

작용할 것이다. 반면에 속도가 빨라진 천장 후방부의 경우에는 대기압보다 낮은 압력이 작용할 것이다. 천장마감재 내부의 압력이 대기압임을 고려했을 때, 음압(Negative Pressure)이 형성된 아랫 방향으로 힘이 작용하여 천장마감재가 이탈될 것으로 판단된다. 반면에 Plane D의 경우에는 전체 영역에서 속도가 자유류보다 느리기에 대기압보

다 높은 압력이 천장부에 작용할 것이다.

Fig. 9는 Plane B와 C에서 천장부의 압력계수를 나타낸 것이다. 압력계수의 정의는 식 (9)와 같다. 압력계수가 음수를 가진다는 뜻은 기준압인 대기압보다 낮다는 것을 의미하며, 풍속이 높아진 천장 후방에서 압력계수가 가장 낮은 수치를 가졌다.<sup>10)</sup> Fig. 10은 유선과 압력계수를 함께 비교한 것으로, A 영역은 속도가 상대적으로 낮은 곳으로 압력계수가 양의 값을 확인할 수 있다. 반대로 B 영역의 경우, 속도가 급격하게 빨라지는 곳으로 압력계수가 음의 값을 가진다. 이에 따라, 천장부 전 영역에서 속도가 자유류 속도보다 빠른 곳에서 음압이 형성됨을 확인하였으며, 천장 후방부 영역에서 천장 마감재가 이탈될 가능성이 높은 것으로 판단된다.

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho u_\infty^2} \quad (9)$$

## 5. 결론

본 연구에서는 복합건물인 부경대학교 대연캠퍼스 공학관 주위의 풍환경 평가를 CFD를 이용하여 실시하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 평균 풍속 조건에서, 보행자 높이에서 여름철의 경우, 5.7 m/s 그리고 겨울철은 5.5 m/s로 자유류 풍속에 비해 약 2.6배 높아짐을 확인하였다. 최대풍속 발생 지점은 여름철의 경우, 공학 1관의 남쪽, 겨울철은 공학 1관과 도서관 사이에서 최대 풍속이 관측되었다.

2) 최대풍속 하에서 건물 사이의 통로에서 풍속은 여름철의 경우, 최대 33 m/s 그리고 겨울철은 23 m/s까지 높아졌다. 특히, 강한 남서풍의 자유류는 보행자의 안전에 큰 위험이 됨을 확인하였다.

3) 공학 1관과 2관 사이의 저층 1~2층의 개방공간에서 천장마감재 이탈현상은 건물과 부딪힌 바람이 수직방향으로 내려와 이탈영역으로 유입되며, 전방부에서는 건물의 모서리에서 발생한 유동 박리로 인하여 순환 영역이 형성되고, 풍속이 자

유류보다 빠른 구간에서 천장부의 압력은 음압이 형성되며, 이로 인하여 천장 마감재가 이탈되었을 것으로 예상된다.

## 후 기

이 논문은 2022년도 한국동력기계공학회 춘계 학술대회에서 발표된 학술대회 논문을 기반으로 작성됨.

## Author contributions

J. H. Park; Conceptualization & Writing-original draft, Data curation, Investigation, Formal analysis. Y. W. Lee; Writing-review & editing and Supervision.

## References

1. MOILT, 2021, "Policy research report to prepare measures to reduce building wind damage", MOLIT.
2. C. H. Hu and F. Wang, 2005, "Using CFD approach for the study of street-level winds in a built-up area", *Building and Environment*, Vol. 40, No. 5, pp. 617-631. (<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.08.016>)
3. KBC 2009 Structural Design Criteria.
4. I. P. Hong, H. S. Ki, E. Y. Jung and D. S. Song, 2012, "A Study on Inlet Flow Profile in CFD simulation for predicting Wind Environment in Urban Area", *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 28, No. 1, pp. 311-318. ([https://doi.org/10.5659/JAIK\\_PD.2012.28.1.311](https://doi.org/10.5659/JAIK_PD.2012.28.1.311))
5. ANSYS FLUENT-Solver Theory Guide, 2020, ANSYS FLUENT 2020R1, ANSYS Inc. USA.
6. M. Shirzadi, P. A. Mirzaei, and M. Naghashzadegan, 2017, "Improvement of k-epsilon turbulence model for CFD simulation of atmospheric boundary layer around a high-rise building using stochastic optimization and Monte Carlo Sampling technique", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 171, pp. 366-379. (<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.10.005>)
7. AWS([https://www.weather.go.kr/weather/observation/aws\\_table\\_popup.jsp](https://www.weather.go.kr/weather/observation/aws_table_popup.jsp)).
8. J. H. Cho, S. R. Yim, K. S. Lee and S. E. Han, 2012, "A study on the Evaluation of Wind Environment and Analytical Method Using CFD Analysis", *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 28, No. 7, pp. 99-106. ([https://doi.org/10.5659/JAIK\\_SC.2012.28.7.99](https://doi.org/10.5659/JAIK_SC.2012.28.7.99))
9. A. D. Penwarden, 1973, "Acceptable wind speeds in towns", *Building Science*, Vol. 8, No. 3, pp. 259-267. ([https://doi.org/10.1016/0007-3628\(73\)90008-X](https://doi.org/10.1016/0007-3628(73)90008-X))
10. Y. B. Chung and S. U. Na, 2001, "Computational Analysis and an Application of Wind Environmental Effects for High-rise Buildings", *Korean Society for Computational Fluid Engineering Conference proceedings*, pp. 70-75.
11. <https://map.naver.com/v5/search/%EB%B6%80%EA%B2%BD%EB%8C%80%ED%95%99%EA%B5%90?c=14371732.4732529,4181969.4075940,17,0,2,dh>.
12. Y. W. Lee, 1998, "Numerical Simulation of a Conical Diffuser Using the k-ε Turbulence Model ", *Journal of Power System Engineering*, Vol. 2, No. 1, pp. 31-38.
13. K. H. Kim, Y. W. Lee, N. J. Chun, S. Y. Ha, S. B. Jae and Y. H. Choi, 2020, "Analysis on Heat Transfer Characteristics and Structural Stability of LNG Sub-cooler and N<sub>2</sub>Pre-Cooler for Re-liquefaction of LNG Storage Tanks", *Journal of Power System Engineering*, Vol. 24, No. 6, pp. 98-107. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2020.24.6.098>)