

도심 건축문화재 주변의 상세 바람흐름 분석*

Analysis of Wind Flow around Architectural Heritage in Urban Area

손민우 Son Minu**, 김도용 Kim Do-Yong***

Abstract

In this study, the wind environment around architectural heritage (Hwanggungwoo) located in urban area was numerically investigated using Computational Fluid Dynamics (CFD) model and Geographic Information System (GIS) data. In the four experimental cases of different inflow directions, the horizontal and vertical wind vector fields, and also the wind speeds around architectural heritage were analyzed to assess wind flow characteristics. As a result, the various phenomena such as flow separation and vortex was represented in the vector fields of horizontal and vertical flow, depending on the location and arrangement of high-rise buildings rather than the direction of inflow. The effect of wind was analyzed to be relatively significant at the southeast side of Hwanggungwoo in the case of northerly inflow for the height of 2m Above Ground Level(AGL), and also at the northeast side of Hwanggungwoo in the case of southerly inflow for the height of 10 m AGL. Thus, it was suggested that the effect of urbanization on architectural heritage should be assessed for wind environment.

Keywords: Architectural Heritage, Hwanggungwoo, Wind Environment, Urban Area, Computational Fluid Dynamics Model, Geographic Information System Data

I. 서론

현대사회에 다다르면서 전 세계적으로 일어난 산업화는 도시화를 심화하였고, 건물의 개체수 및 크기와 밀집도 등이 점차적으로 증가하는 추세를 보였다(김정호 2020). 또한 현대 도시의 무질서한 개발은 도시지역의 범위가 교외로 확장되는 것을 유도하고, 비점적인 환경오염을 유발하기도 하였다. 이러한 무분별한 도시개발을 규제하기 위한 여러 가지 방안을 도시계획

및 개발정책에 반영하였고, 이에 대한 방안 중 하나로 특정 영역에 대해 고밀도의 집약적 개발을 통한 압축도시를 선호하거나(이일희, 이주형 2012), 세부적으로는 건물의 형태 및 집합으로 이루어진 도시공간구조(Urban Spatial Structure)에 관한 내용을 포함하기도 한다(윤갑식, 이갑정 2013).

건물 외관비 및 건물군의 배치는 모양새에 따라 바람의 영향이 다양하게 발생되며, 역학적 외력의 작용은 바람의 흐름을 분리하거나 수렴하는 등의 양상을

* 이 연구는 2020년도 국립문화재연구소 연구사업 및 목포대학교 기후변화연구소의 지원을 받아 수행되었음.

** 국립목포대학교 환경공학과(건설환경공학협동과정) 박사수료(제1 저자) | Ph.D. Candidate, Dept. of Env. Eng., Mokpo National Univ. | Primary Author | smileby@mokpo.ac.kr

*** 국립목포대학교 환경공학과(기후변화연구소) 교수(교신저자) | Prof., Dept. of Env. Eng., Mokpo National Univ. | Corresponding Author | dykim1975@mokpo.ac.kr

나타내고(김재진 2007), 지형 및 지리적 특징과 인공 구조물의 건설에 따라 국지풍을 여러 형태로 변화시킨다(Oke 1988; 권아름, 김재진 2015; 김도용, 김재진 2016). 또한 건물의 다양한 외관비 및 초고층 건물의 형태와 크기, 그리고 기타 지역적 특성 등에 따라 주변에 위치한 건물들에 의해 발생하는 풍환경에도 영향을 미치면서, 복잡하고 다양한 기류의 형성 등 여러 국지기상 현상을 유발한다(정해연, 김문성, 이성희, 이규석 2012). 특히, 위의 현상 중에서 빌딩풍의 경우는 고층 건축물에 의한 소용돌이 형성 등 급격한 기류의 변화를 일으켜 건축물의 안정성 및 내구도에 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며, 기상조건에 따라 강한 풍속이 발생되었을 경우에는 외부환경의 위험성 증가로 건축물과 보행자에 대한 각종 피해를 유발하기도 한다(정창현, 류성룡 2013). 따라서, 도심 건물지형에서 형성되는 풍환경의 특성을 파악하기 위해, 도시지역의 상세 바람장 및 빌딩풍 등의 환경영향평가와 모니터링 등이 이루어지고 있다(Mikhailuta, Lezhenin, Pitt and Taseiko 2017; Mittal, Sharma and Gairola 2018).

옥외에 노출되어 있는 문화재의 경우에는 각종 오염물질이나 바람 및 강수 등의 복합적인 영향으로 인한 물리·화학적 풍화작용에 의해 손상될 수 있으며, 예를 들어 안성 청룡사 삼층석탑, 화순 운주사 석조불감, 이집트 피라미드 등의 풍화훼손 사례가 있다(박형동, 신기혜, Aboushook 2001; 이선명, 이명성, 조영훈, 이찬희 외 2007; 박성미, 이명성, 최석원, 이찬희 2008). 이러한 문화재의 풍화훼손도는 대기오염물질의 배출이 많고 복잡한 풍환경이 형성되며, 또한 각종 개발 행위가 이루어지는 도시지역에 위치한 경우에 심화될 수 있다. 도심지에 위치한 우리나라의 대표적인 건축문화재 중 하나인 숭례문의 경우에도 석재가 풍화 및 흑화 작용 등에 의해 훼손되거나, 박리 및 균열

등이 발생한 사례가 보고되었다(이상헌 2002). 그러나, 도심지 내에 위치해 있는 건축문화재를 대상으로 한 풍환경 영향평가에 대한 연구는 아직까지 매우 미흡한 실정이며, 이에 따라 도심 건축문화재의 보존을 고려함과 동시에 국토개발정책에 연계·활용될 수 있는 풍환경 수치모델링 기법 등 바람의 영향성에 대한 예측 및 평가를 위한 기반연구의 필요성이 대두된다.

문화재의 경우, 시대적 대표성을 띄면서 그 시대의 생활 및 문화, 양식 등을 반영하고 역사의 증거로서 높은 보존가치를 가진다(김성조, 김영태 2012). 따라서 점차적으로 심화되어가는 도시화 및 풍환경 변화에 대한 피해에 대응하고 건축문화재를 보호해야 할 필요성이 있다. 이에 본 논문에서는 도시의 압축화 현상으로 인해 더욱 복잡해져가는 도심지에 위치한 건축문화재를 대상으로 풍환경 평가를 위한 전산수치실험을 수행하였다. 또한, 대상영역에서 형성되는 미세 규모 바람장 등의 전반적인 흐름 양상과 주변 고층 건물들로 인한 영향, 그리고 국지적 풍속 분포 등에 대한 상세분석을 수행하였다.

II. 실험방법

1. 전산유체역학 모델

본 연구에서는 가상의 컴퓨터 공간에서 시뮬레이션을 통해 바람의 상세흐름 예측이 가능한 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics: CFD) 모델을 이용하였다. 이 모델은 1995년에 개발된 이래, 범세계적으로 수십여 년간 이용되면서 각종 수정·보완 등의 업데이트가 지속적으로 이루어졌으며, 실제 풍동실험과 비교한 실험 및 평가를 통한 검증을 통하여 신뢰성이 증명된 모델이다(Kim and Baik 2004; 김재진

2007; 김은령, 박록진, 이대근, 김재진 2015; 김도형, 홍선옥, 이대근, 이영곤 외 2016; 손민우, 김도용 2020a; 손민우, 김도용 2020b). 또한 국지적 대기의 흐름을 초고해상도로 해석할 수 있으며, 다양한 실험 조건하에서 시공간적인 제약을 극복한 수치실험이 가능하여 직접적인 풍동실험을 대신할 수 있다는 특징을 가지고 있다.

Reynolds Averaged Navier Stokes(RANS) 방정식계를 바탕으로 한 본 모델은 엇갈림 격자계 및 Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation(SIMPLE) 알고리즘을 유한체적법과 함께 적용되어 있다. 또한, 비점수 및 비압축의 대기흐름을 3차원으로 구성된 공간계에서 수치적으로 나타내며, 재규격화군 $k-\epsilon$ 난류종결법을 반영한 난류모수화와 벽면 경계 효과를 위한 벽면 함수를 적용하고 있다(Yakhot, Orszag, Thangam and Gatski et al. 1992; Castro and Apsley 1997; Kim and Baik 2004; Versteeg and Malalasekera 2007).

유입경계에 대한 초기조건의 경우는 바람 시어(Wind Sheer)를 0으로 가정하였고, 고도에 따른 풍속 변화(Power Law)를 기반으로 한 연직프로파일을 적용하였다. x, y, z 방향에 대한 바람속도성분(u, v, w), 난류 운동 에너지(k), 난류 운동 에너지의 소멸률(ϵ)에 해당하는 유입경계조건은 다음과 같다(<식 1~5> 참조).

$$u(z) = \frac{u_f}{x} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \cos \theta \quad <식 1>$$

$$v(z) = \frac{u_f}{x} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \sin \theta \quad <식 2>$$

$$w(z) = 0 \quad <식 3>$$

$$k(z) = \frac{u_f^2}{C_\mu^{1/2}} \left(1 - \frac{z}{\delta}\right)^2 \quad <식 4>$$

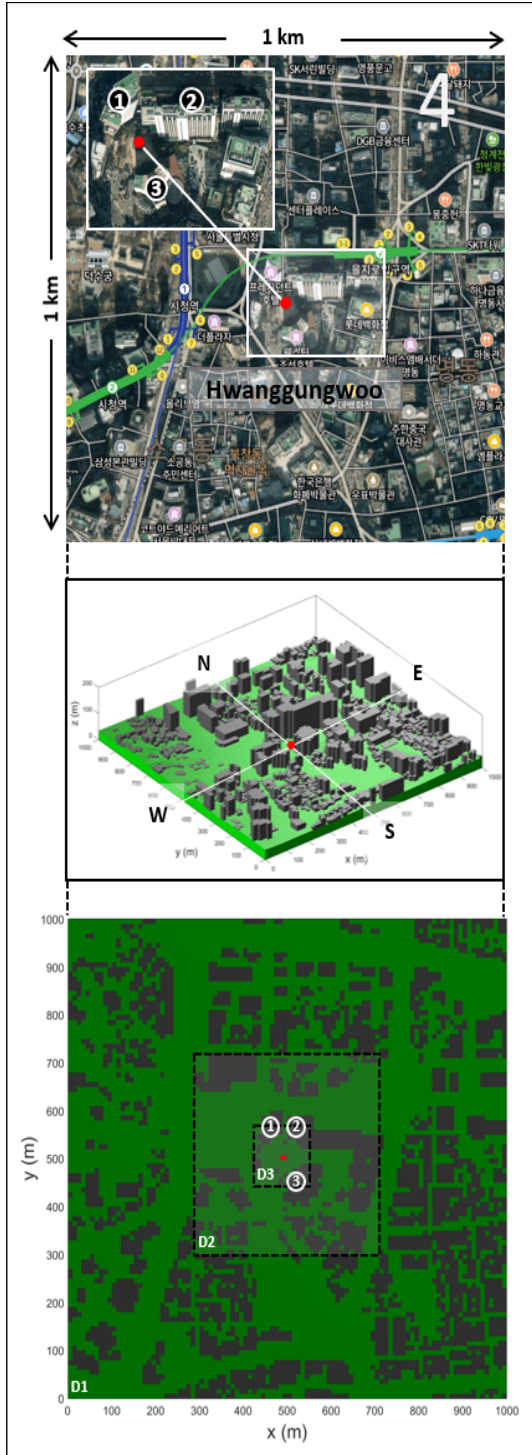
$$\epsilon(z) = \frac{C_\mu^{3/4} \cdot k^{3/2}}{x \cdot z} \quad <식 5>$$

상기에 제시된 식에서는 각각 마찰속도(u_f), 거칠기 길이($z_0 = 0.05$ m), von karman 상수($x = 0.4$), 경계 층 두께($\delta = 1,000$ m)를 나타내며, 난류 운동에너지 및 소멸률에서는 경험적 상수($C_\mu = 0.0845$)를 적용하였다(Yakhot, Orszag, Thangam and Gatski et al. 1992; Castro and Apsley 1997; 김재진, 백종진 2005; 박수진, 김재진 2014).

2. 대상지역 및 수치실험 설계

대상지역은 서울특별시 중구(37°33'54.9"N126°58'46.8"E) 도심지에 위치한 대표적인 건축문화재 중 하나로, 주변이 고층 건물로 둘러싸인 특징을 가진 환구단 영역을 선정하였다. 고종 때 조성된 환구단 내에는 1899년에 3층의 8각 목조건물인 황궁우가 건립되었으며, 해당 건물은 하단 기준 너비 약 13m로 균형을 이루고 있고, 지붕의 일부를 고려한 높이는 약 12m로 확인되고 있다. 환구단 주변에는 <Figure 1>에서 보인 바와 같이 ① 프레지던트호텔(최고 32층), ② 롯데호텔(최고 38층), ③ 웨스틴조선호텔(최고 20층) 등을 비롯한 각종 고층 건물들이 위치해 있어, 이로 인한 영향으로 대상 건축문화재인 황궁우 주변에 복잡한 기류의 양상이 형성될 것으로 예상된다. 수치모델의 지표면 경계조건은 지리정보시스템(Geographic Information System: GIS) 자료를 이용하여 대상영역에 포함되는 실제 지형 자료 및 건물정보를 적용하였으며, 이를 통해 대상지를 중심으로 한 주변의 바람장

Figure 1_Three-Dimensional Topography and Buildings for the Target Area



의 형성 및 발달양상을 효과적으로 수치모의하고자 하였다. 모델의 계산영역은 <Figure 1>에서 보인 바와 같이 황궁우를 중심으로 3차원 공간좌표계에서 $(x \times y \times z) = (1,000\text{m} \times 1,000\text{m} \times 200\text{m})$ 규모로 설정하였고, 격자 해상도의 경우는 수평(x 및 y) 방향에 대해서는 10m, 연직(z) 방향에 대해서는 4m의 균등격자를 적용하였다. 또한, 본 연구에서는 1,000m 기준에서 10m/s의 유입풍속을 부여하였으며, 대상지역 유입류(Wind Inflow)의 방향 조건에 대하여 동풍(IE), 서풍(IW), 남풍(IS), 북풍(IN)을 가정하여 각각의 경우에 대한 민감도 실험을 0.5초 간격으로 3,600초까지 수치적분하여 계산하였다.

수치실험의 결과는 전체 영역(D1), 중심영역(D2), 황궁우 영역(D3)의 순으로 상세 흐름장을 분석하였으며, 황궁우에 인접하여 위치한 3개의 주요 고층건물(①~③)의 영향을 중점적으로 해석하였다. 수평 바람장의 경우에는 지상고도(Above Ground Level: AGL)에 따라 비행자 높이(2m AGL)를 고려한 지표풍 및 황궁우의 상층높이(10m AGL)에 해당하는 x-y 단면에 대한 벡터장을 분석하였다. 연직 바람장의 경우에는 황궁우를 중심으로 한 W(서)-E(동) 라인 및 N(북)-S(남) 라인에 대한 연직 단면에서의 벡터장을 분석하였으며, 황궁우 인접 영역에 대해서는 주변 고층건물의 영향을 보다 상세히 고찰하기 위하여 3차원(3D) 벡터양상을 살펴보았다. 또한, 황궁우 주변(측면방위)에서의 풍속 및 풍향 분포를 연계 분석하여, 풍환경의 영향성을 예측·평가하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 수평 바람장

<Figures 2~5>는 대상 건축문화재인 황궁우를 중심으로 하여 D1~D3 영역에 대한 수평 벡터장을 유입류 풍향조건별로 나타낸 것으로, 2m AGL 및 10m AGL에서의 수치모의 결과이다. 먼저, 유입 동풍인 <Figure 2>의 경우, 유입 측면경계인 동쪽 방향에서는 동풍이 발달하지만(D1), 도로협곡 및 건물들에 의한 흐름의 분리와 회전 등으로 인해 중심영역에서는 북풍, 동풍, 남풍이 유입되는 양상을 보였고(D2), 황궁우는 건물 ②와 건물 ③ 사이의 통로에서 형성된 동풍의 영향을 주로 받는 것으로 나타났으며(D3), 2m

AGL 및 10m AGL에서의 흐름의 양상은 거의 유사하였다.

유입 서풍인 <Figure 3>의 경우, 유입 측면경계인 서쪽 방향에서는 서풍이 지배적으로 발달하였고(D1), 서쪽 방향의 비교적 낮은 건물 밀집도로 인해 중심영역도 유입 서풍의 영향을 받았으나, 황궁우의 북서쪽에 위치한 건물 ①의 서쪽 외곽에서는 흐름의 분리 및 풍향의 급변화 현상이 나타났으며, 특히 2m AGL의 경우에 블로킹(Blocking) 현상이 강하게 나타났다(D2). 황궁우 영역에서는 서풍계열 및 동풍계열의 흐름이 복잡하게 형성되었으며, 황궁우는 2m AGL의 경우에 건물 ② 및 건물 ③에 의해 형성된 북동풍 및 남동풍의 영향을 받았으나, 10m AGL의 경우에는 서쪽의 상대적으로 낮은 건물을 넘어오는 흐름의 영향

Figure 2_ The Wind Vectors at 2m and 10m AGL in the Case of Easterly Wind Inflow

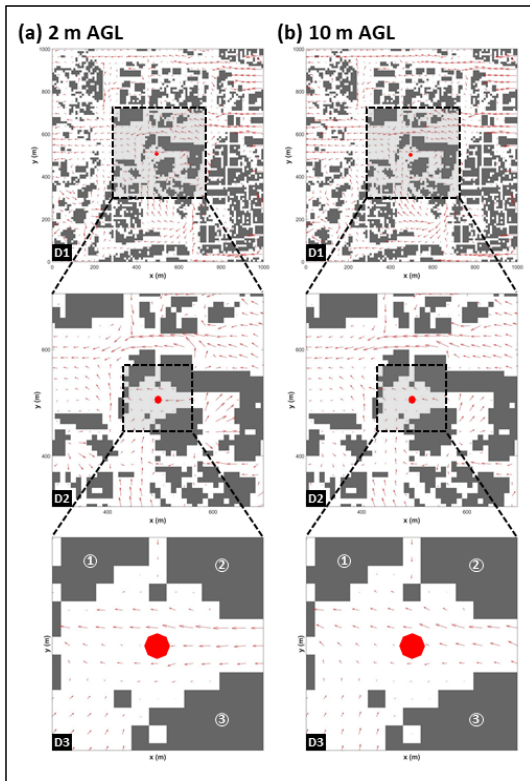


Figure 3_ The Wind Vectors at 2m and 10m AGL in the Case of Westerly Wind Inflow

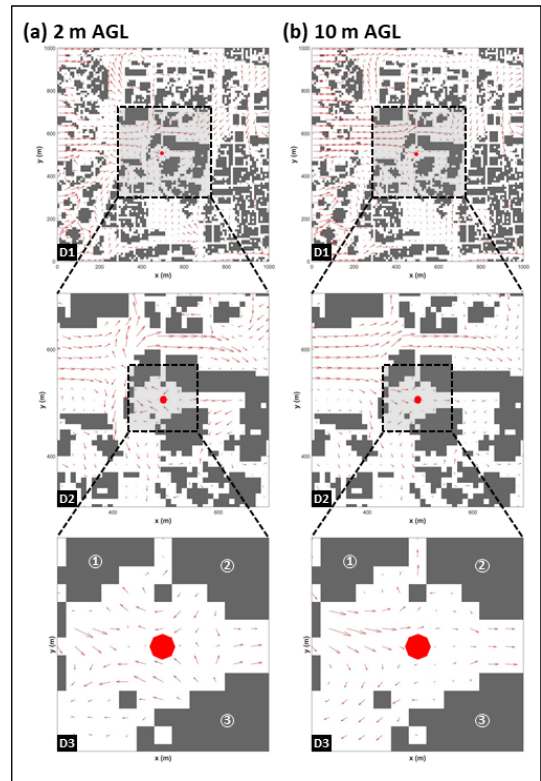


Figure 4 _The Wind Vectors at 2m and 10m AGL in the Case of Southerly Wind Inflow

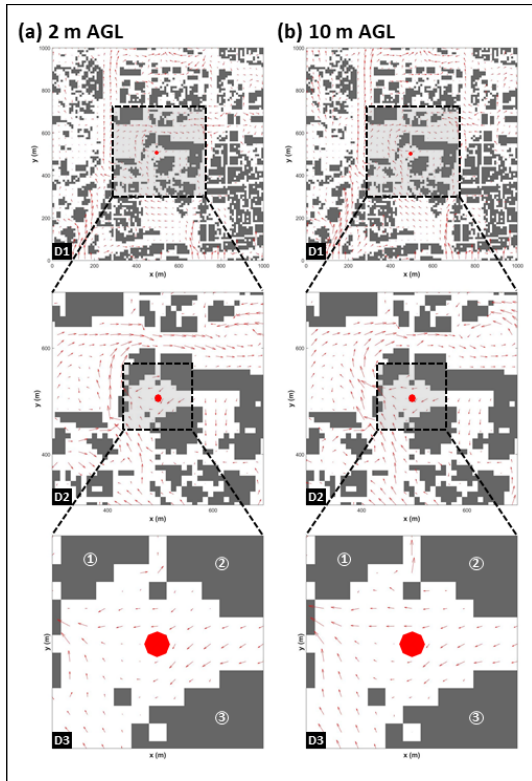
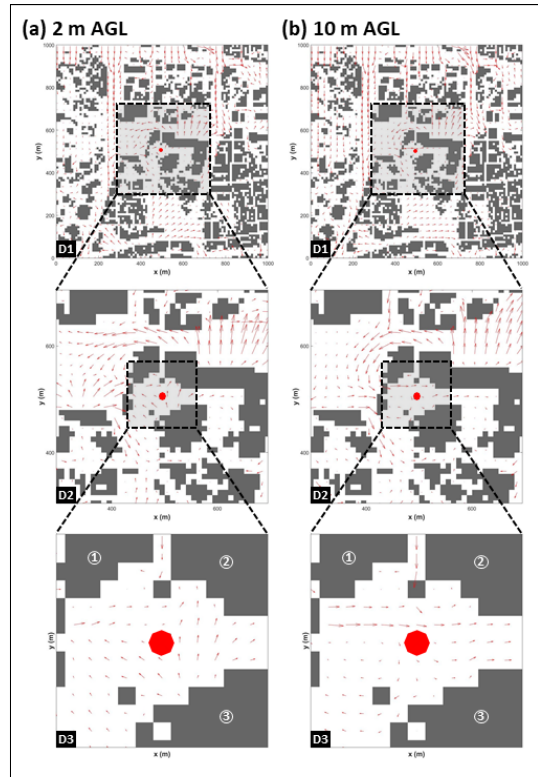


Figure 5 _The Wind Vectors at 2m and 10m AGL in the Case of Northerly Wind Inflow



으로 서풍의 영향권에 있는 것으로 분석되었다(D3).

유입 남풍인 <Figure 4>의 경우, 유입 측면경계인 남쪽으로부터 도로협곡을 타고 흐르는 남풍이 잘 발달하였고(D1), 이 영향으로 중심영역에서도 남풍의 유입이 두드러지게 나타났으며, 황궁우 영역의 외곽을 타고 회전하는 흐름이 발달하는 양상을 보였다(D2). 그러나 황궁우 영역에서는 남쪽으로부터의 유입 흐름과 함께 건물 ② 및 건물 ②와 건물 ③ 사이의 통로에서 형성된 동풍계열의 흐름이 공존하는 양상을 보였고, 황궁우는 주로 동풍계열의 영향권에 있었으며, 특히 북동풍의 영향을 받는 것으로 나타났다(D3). 이러한 양상은 2m AGL 및 10m AGL에서 거의 유사하였다.

유입 북풍인 <Figure 5>의 경우, 유입 측면경계인 북쪽으로부터 도로협곡을 타고 흐르는 북풍이 잘 발달하였으나(D1), 중심영역에서는 중앙부에 위치한 고층건물들의 영향으로 흐름의 분리 및 블로킹 현상이 강하게 나타났다(D2). 황궁우는 2m AGL의 경우에 건물 ③에 의해 형성된 남풍 및 남동풍의 영향을 주로 받는 것으로 나타났으나, 10m AGL의 경우에는 약한 북서풍의 영향권에 있는 것으로 분석되었다(D3).

2. 연직 바람장

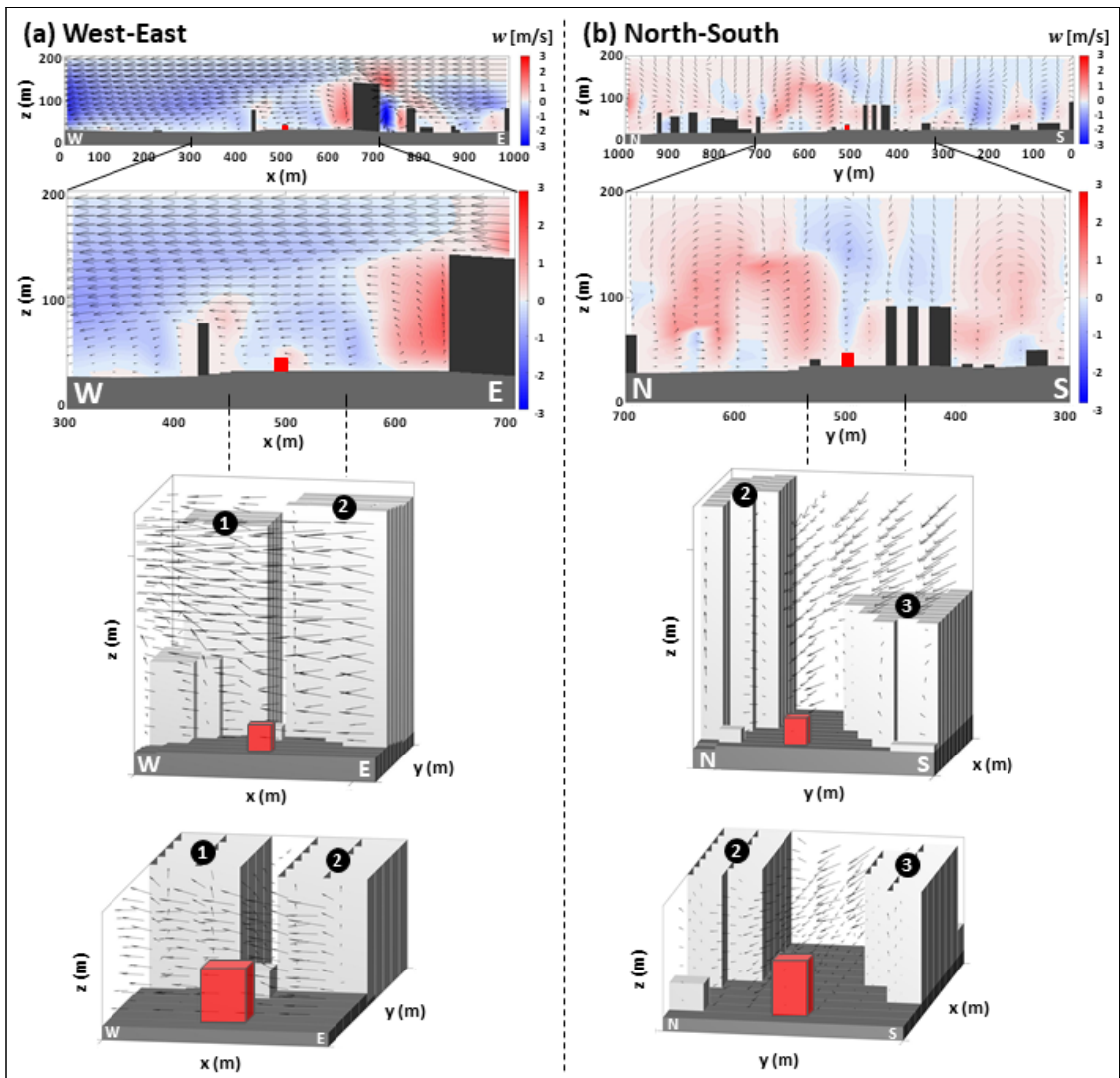
상승 및 하강 기류와 같은 바람의 연직흐름을 분석하기 위하여, <Figure 1>에서 보인 황궁우를 중심으로

하는 W-E 라인 및 N-S 라인에 대한 연직 단면 및 3D 벡터장을 살펴보았으며, 황궁우에 인접한 ①~③번 건물의 영향을 중심으로 유입류별 해석을 수행하였다.

먼저, 유입 동풍인 경우를 살펴보면(<Figure 6> 참조), 유입류의 영향으로 W-E 단면에서 동풍의 흐름이 뚜렷하게 나타났고, 황궁우의 동쪽 방면에 위치한 고층건물의 풍상 및 풍하 측면에서는 연직외류가 형성

되면서 하강기류(청색음영; $w < 0$) 및 상승기류(적색음영; $w > 0$)가 강하게 나타났다. 이 고층건물을 넘어오는 바람의 영향으로 황궁우의 상공에는 하강기류가 형성되지만, 황궁우의 풍상측면에서는 황궁우를 타고 넘는 지표부근의 흐름의 영향으로 약한 상승기류가 형성되는 양상을 보였다. 또한, 이러한 황궁우 주변에서의 흐름의 양상은 W-E방향의 3D 벡터장으로부터 상세히 확인할 수 있었고, 이는 건물 ②와 건물 ③ 사

Figure 6_ The Wind Vectors at (a) W-E Line and (b) N-S Line in the Case of Easterly Wind Inflow

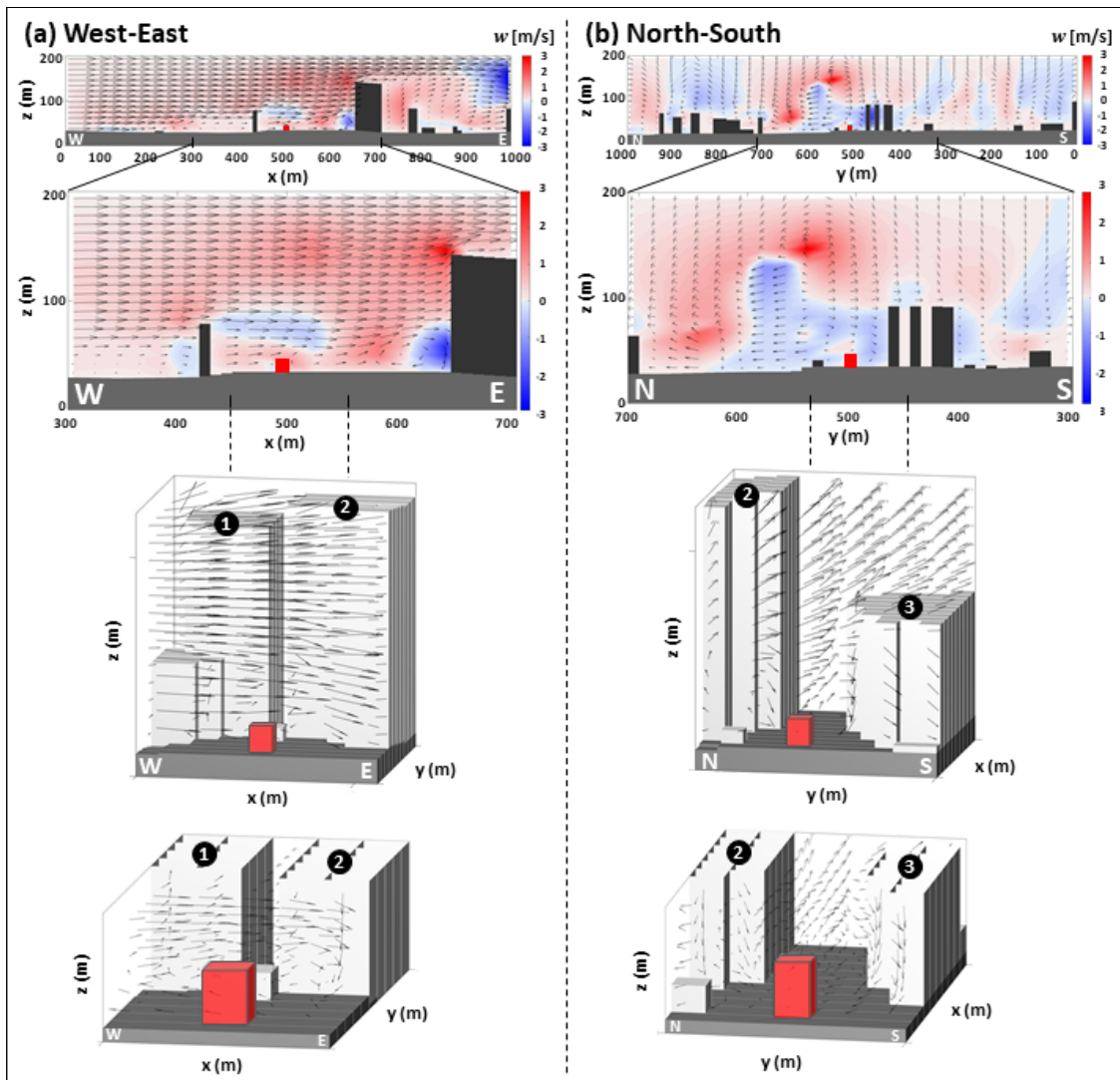


이에서 형성된 협곡흐름의 영향인 것으로 분석되었으며(N-S방향 3D 벡터장), 이로 인해 황궁우 동쪽 측면이 바람의 영향을 받을 것으로 평가되었다.

유입 서풍의 경우(<Figure 7> 참조), 대상영역의 서쪽 방면이 건물의 군집도 및 지형이 상대적으로 낮아 W-E 단면에서 전반적으로 상승하는 서풍의 흐름이 확인되었고, 황궁우의 서쪽 방면에 위치한 고층건물의 풍상 측면 및 풍하측 상층부에서는 하강기류가

발생하였다. 또한, 황궁우 동쪽 방면 고층건물의 풍상 측면 하단부에서는 연직와류에 의한 하강기류가 확인되었다. W-E 단면상의 황궁우 주변에서는 서쪽 고층건물을 넘어오는 바람에 의해 전반적으로 서풍이 지배적으로 발달하여, 황궁우도 서풍의 영향을 받는 것으로 나타났다. 그러나, W-E방향 및 N-S방향의 3D 벡터장을 확인한 결과, 황궁우 상부의 서풍의 흐름이 건물 ② 및 건물 ③에 부딪쳐 각각의 연직와류를 형성

Figure 7_ The Wind Vectors at (a) W-E Line and (b) N-S Line in the Case of Westerly Wind Inflow

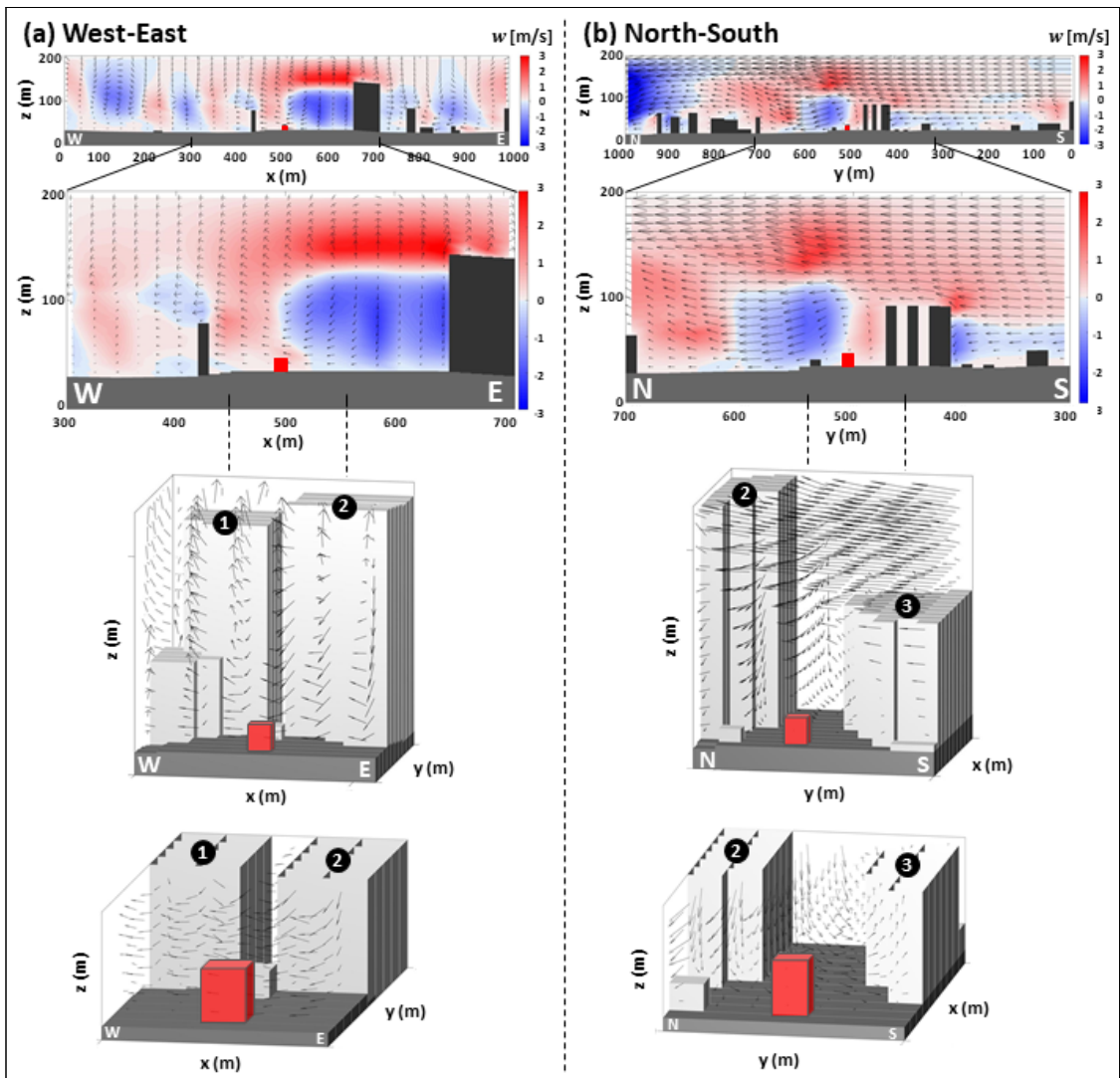


하였고, 황궁우의 하단부는 이 연직와류의 영향으로 동풍계열의 바람의 영향을 받는 것으로 나타났다. 결과적으로, 황궁우의 상단부는 서쪽 측면, 하단부는 북동 및 남동 측면이 바람의 영향을 받을 것으로 평가되었다.

유입 남풍의 경우(<Figure 8> 참조), 유입 방향을 고려하여 N-S 단면을 살펴보면, 황궁우 남쪽 방향의 고층건물 풍상 측면에서 바람의 블로킹 현상과 하강

기류가 나타났고, 상층부의 바람은 고층건물을 넘어가 황궁우 상공의 북쪽 방향에서 하강하는 양상을 보였다. 다만, 황궁우의 인접영역에서는 상승기류가 확인되는데, 이는 W-E방향 및 N-S방향의 3D 벡터장을 살펴보면, 건물 ② 및 건물 ③ 사이의 협곡에서 형성된 연직와류의 영향으로 판단되며, 이로 인해 황궁우의 북동 측면이 주로 바람의 영향을 받을 것으로 평가되었다.

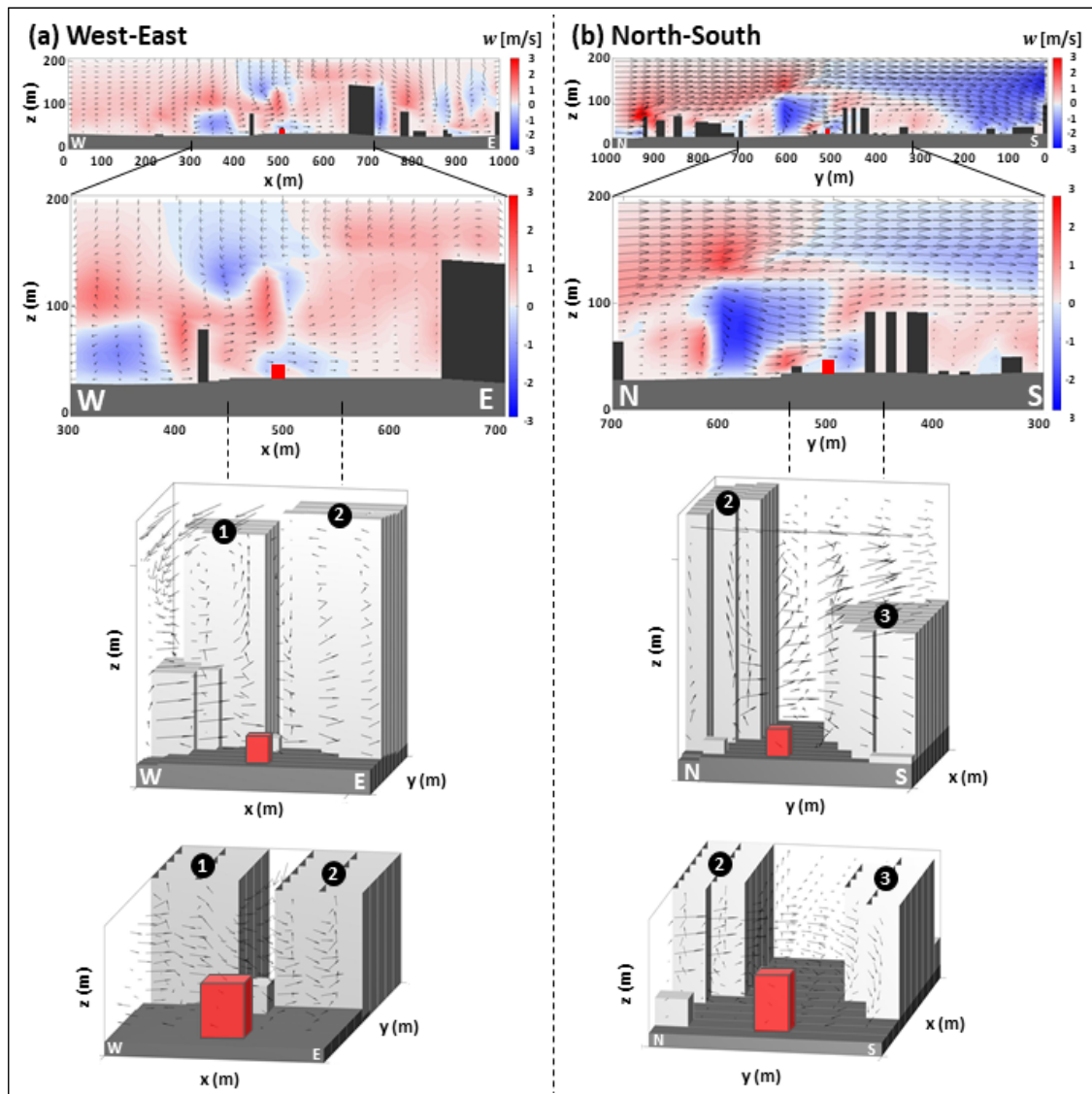
Figure 8_ The Wind Vectors at (a) W-E Line and (b) N-S Line in the Case of Southerly Wind Inflow



유입 북풍의 경우(<Figure 9> 참조), 유입류의 영향으로 N-S 단면에서 북풍의 흐름이 뚜렷하게 나타났고, 대상영역의 북쪽 방향의 상대적으로 낮은 지형과 높은 건물의 밀집도 등의 영향으로 상층부의 유입류는 상승하다가 남쪽 방향에서는 하강하는 양상을 보였다. 다만, N-S 단면의 중앙부에서 형성된 하강기류는 연직 단면상에서 확인되지 않는 주변 고층건물들의

의 영향으로 판단된다. 황궁우 인접영역의 경우에는 N-S방향의 3D 벡터장에서 북쪽으로부터 유입된 바람이 건물 ③에 부딪쳐 연직와류를 형성하는 양상이 확인되었고, 이로 인해 황궁우의 상단부는 북쪽 측면, 하단부는 남쪽 측면이 바람의 영향을 받을 것으로 평가되었다.

Figure 9_ The Wind Vectors at (a) W-E Line and (b) N-S Line in the Case of Northerly Wind Inflow



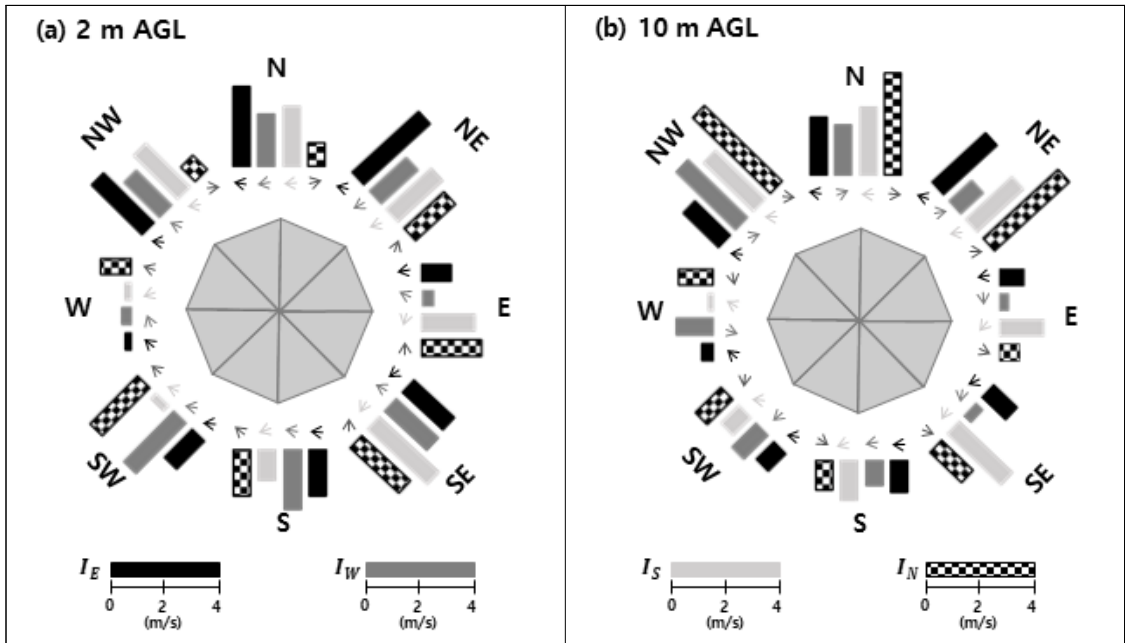
3. 풍속

본 논문에서는 앞선 수평 및 연직 바람장에서 분석된 황궁우 영역에서의 흐름 양상이 황궁우에 미치는 영향을 보다 상세히 평가하고자, 황궁우의 측면 8방위 격자에 대한 각 유입류별 풍속 분포를 살펴보았으며, 또한 황궁우 쪽을 향하는 풍향과 연계하여 해석하였다(<Figure 10> 참조). 먼저, 2m AGL의 경우, 유입류별 평균풍속은 유입 동풍의 조건에서 약 2.0m/s, 측면 방위별 평균풍속은 황궁우의 남동 측면에서 약 3.2m/s로 상대적으로 높은 값을 보였다. 개별 풍속으로는 황궁우의 북동 측면에서 유입 동풍일 때 약 3.4m/s로 가장 강한 풍속 분포를 보였다. 황궁우를 향하는 풍계의 형성을 살펴보면, 유입 동풍의 경우는 황궁우의 동쪽 측면, 유입 서풍의 경우는 동-남동-북동 측면, 유입 남풍의 경우는 북동 측면, 유입 북풍의 경우는

남동 측면으로 나타났다. 결과적으로, 유입 동풍의 경우에 황궁우의 북동 측면에서 형성된 상대적으로 강한 바람은 황궁우 쪽을 향하지 않는 흐름을 나타내어 황궁우에 대한 직접적인 영향은 적을 것으로 분석되었고, 유입 북풍의 조건에서 황궁우의 남동 측면이 상대적으로 바람의 영향을 크게 받을 것으로 평가되었다.

10m AGL의 경우, 유입류별 평균풍속은 유입 북풍의 조건에서 약 2.2m/s, 측면 방위별 평균풍속은 황궁우의 북서 측면에서 약 2.9m/s로 상대적으로 높은 값을 보였다. 개별 풍속으로는 황궁우의 북서 측면에서 유입 북풍일 때 약 4.1m/s로 가장 강한 풍속 분포를 보였다. 황궁우를 향하는 풍계의 형성을 살펴보면, 유입 동풍의 경우는 황궁우의 동쪽 측면, 유입 서풍의 경우는 서쪽 측면, 유입 남풍의 경우는 북동 측면으로 나타났으며, 유입 북풍의 경우는 황궁우를 향하는 풍

Figure 10_ The Wind Speeds and Directions around Hwangudan at (a) 2m AGL and (b) 10m AGL in the Cases of Inflow Directions



계가 형성되지 않았다. 결과적으로, 유입 북풍의 경우에 황궁우의 북서 측면에서 형성된 상대적으로 강한 바람은 황궁우 쪽을 향하지 않는 흐름을 나타내어 황궁우에 대한 직접적인 영향은 적을 것으로 분석되었고, 유입 남풍의 조건에서 황궁우의 북동 측면이 상대적으로 바람의 영향을 크게 받을 것으로 평가되었다.

IV. 요약 및 결론

본 논문에서는 고층 건물로 둘러싸인 도심지의 건축문화재 주변에서 형성되는 풍환경의 변화 및 특성을 평가하기 위하여, 황궁우를 대상으로 CFD 모델을 이용한 전산수치실험을 수행하였다. 또한, GIS 자료를 기반으로 구축한 지표경계조건을 반영하고, 유입류 풍향조건에 따른 벡터장과 풍속장 등의 상세흐름특성을 분석하였다.

대상영역의 유입 측면경계에서는 유입류의 방향성을 유지하였으나, 도심지 내부로 흐름이 유입되는 과정을 거쳐 황궁우 주변에서 형성된 지표풍은 유입류의 풍향보다는 주변 고층 건물들의 외관 및 배치 등의 구조적 특성에 대한 의존성이 높았다. 또한, 고층 건물에 의한 블로킹과 흐름의 분리 및 회전 등의 다양한 현상이 나타났으며, 특히 황궁우에 인접한 건물들에 의해 형성된 연직와류는 황궁우 주변의 급격한 풍향의 변화를 유발하였다. 황궁우의 측면 8방위 격자에 대한 풍속 분포의 경우, 지상 2m에서 유입류별 평균 풍속은 유입 동풍, 측면 방위별 평균풍속은 황궁우의 남동 측면에서 가장 높게 나타났고, 황궁우를 향하는 바람 중에서는 유입 북풍의 조건에서 황궁우의 남동 측면이 상대적으로 바람의 영향을 크게 받을 것으로 평가되었다. 지상 10m의 경우, 유입류별 평균풍속은 유입 북풍, 측면 방위별 평균풍속은 황궁우의 북서 측면에서 가장 높게 나타났지만, 유입 남풍의 조건에서

황궁우의 북동 측면이 상대적으로 바람의 영향이 클 것으로 평가되었다.

본 논문을 통하여, 도심지에 위치한 건축문화재는 고층 건물군 및 건물협곡에 의해 형성되는 빌딩풍 및 바람길 등의 영향을 받을 것으로 평가되었으며, 이는 건축문화재가 위치한 지역의 국토개발 시 건물과 같은 인공구조물의 형성과 배치 등에 따른 상세하고 정량적인 풍환경 평가의 필요성을 제시한 것이다. 또한, 수치해석에 기반한 상세 바람흐름 분석기법은 시공간적인 제약을 받지 않으므로, 특정 건축물에 국한되지 않고 다양한 시설물 및 개발/재개발 예정지 등에 대한 적용도 가능하며, 국토계획 및 정책에 따른 풍환경 영향평가에 있어서 유용한 수단이 될 수 있을 것으로 생각된다. 향후, 건축문화재 주변의 국토정책에 대한 실질적인 제안을 위해서는 국토계획에 따른 개발 전후 현황을 반영한 수치모델링, 현장관측을 통한 신뢰성 검증, 바람이 대상 건축문화재에 미치는 손상계수 산출 등의 추가적인 연구가 필요하겠다.

참고문헌 •••••

1. 권아름, 김재진. 2015. GIS 자료를 활용한 지상 바람 관측환경 분석. 대한원격탐사학회지 31권, 2호: 65-75.
Kwon Arum and Kim Jaejin. 2015. Analysis on the observation environment of surface wind using GIS data. *Korean Journal of Remote Sensing* 31, no.2: 65-75.
2. 김도용, 김재진. 2016. 인공적 지형변화가 국지풍에 미치는 영향. 대한원격탐사학회지 32권, 2호: 185-194.
Kim Doyong and Kim Jaejin. 2016. Effect of artificial changes in geographical features on local wind. *Korean Journal of Remote Sensing* 32, no.2: 185-194.
3. 김도형, 홍선옥, 이대근, 이영곤, 김백조. 2016. 인공 도로협곡 관측 자료를 활용한 전산유체역학모델 검증. 대기 26권, 3호: 423-433.
Kim Dohyoung, Hong Seonok, Lee Daegun, Lee Younggon

- and Kim Baekjo. 2016. Verification of computational fluid dynamics model using observation data in artificial street canyon. *Atmosphere* 26, no.3: 423-233.
4. 김성조, 김영태. 2012. 근대건축 문화유산의 보전가치 기준에 관한 연구. *대한건축학회연합논문집* 14권, 1호: 1-8.
Kim Sungjo and Kim Youngtae. 2012. A study on the criteria for conservation value of modern architecture as culture heritage. *Journal of the Regional Association of Architectural Institute of Korea* 14, no.1: 1-8.
 5. 김은령, 박록진, 이대근, 김재진. 2015. CFD 모델을 이용한 체승 도시협곡의 흐름과 반응성 대기오염물질 확산 특성 연구. *대기* 25권, 3호: 473-482.
Kim Eunryoung, Park Rokjin, Lee Daegeun and Kim Jaemin. A study on the characteristics of flow and reactive pollutants' dispersion in step-up street canyons using a CFD model. *Atmosphere* 25, no.3: 473-482.
 6. 김재진. 2007. 장애물 외관비가 주변 흐름에 미치는 영향. *대기* 17권, 4호: 381-391.
Kim Jaemin. 2007. The effects of obstacle aspect ratio on surrounding flows. *Atmosphere* 17, no.4: 381-391.
 7. 김재진, 백종진. 2005. CFD 모형을 이용한 도시 지역 흐름 및 스칼라 분산 연구. *한국기상학회지* 41권, 5호: 733-749.
Kim Jaemin and Baik Jongjin. 2005. An investigation of flow and scalar dispersion in an urban area using a CFD model. *Journal of the Korean Meteorological Society* 41, no.5: 733-749.
 8. 김정호. 2020. 우리나라 대도시의 도시화 단계별 대도시권 거버넌스의 유형 특성. *도시행정학보* 33권, 4호: 17-34.
Kim Jungho. 2020. Type characteristics of metropolitan governance by urbanization stage of metropolis in Korea. *Journal of the Korean Urban Management Association* 33, no.4: 17-34.
 9. 박성미, 이명성, 최석원, 이찬희. 2008. 화순 운주사 석조불감의 재질특성과 풍화훼손도 평가. *보존과학회지* 24권: 23-36.
Park Sungmi, Lee Myeongseong, Choi Seokwon and Lee Chanhee. 2008. Material characteristics and deterioration assessment of the stone buddhas and shrine in Unjusa temple, Hwasun, Korea. *Journal of Conservation Science* 24: 23-36.
 10. 박수진, 김재진. 2014. 도시 협곡에서 건물 지붕 냉각이 스칼라 물질 확산에 미치는 영향. *대기* 24권, 3호: 331-341
Park Soojin and Kim Jaemin. 2014. Effects of building-roof cooling on scalar dispersion in urban street canyons. *Atmosphere* 24, no.3: 331-341.
 11. 박형동, 신기혜, Aboushook, M. 2001. 고대 채석장 부지의 시료를 이용한 석조문화재 내구성 평가. *한국문화재보존과학회 창립 10주년 기념 및 제14회 학술대회 발표논문집* 14권: 19-24.
Park Hyeongdong, Shin Gihye and Aboushook, M. 2001. Assessment of durability of stone monument using specimens from old stone quarry. *Proceedings, the 10th Anniversary Conference and the 14th National Meeting of the Korean Society of Conservation Science for Cultural Properties* 14: 19-24.
 12. 손민우, 김도용. 2020a. 장애물 외관비에 따른 건물협곡에서의 수평대칭흐름에 관한 연구. *한국환경기술학회지* 21권, 2호: 117-122.
Son Minu and Kim Doyong. 2020a. A study on horizontal symmetry flow in building canyon by obstacle aspect ratios. *Journal of the Korean Society for Environmental Technology* 21, no.2: 117-122.
 13. 손민우, 김도용. 2020b. 지표흐름유형별 건물협곡 내에서의 상세흐름특성. *한국도시환경학회지* 20권, 1호: 9-16.
Son Minu and Kim Doyong. 2020b. Flow characteristics in building canyon by surface flow regimes. *Journal of the Korean Society of Urban Environment* 20, no.1: 9-16.
 14. 윤갑식, 이갑정. 2013. 인구밀도경사함수를 이용한 우리나라 도시공간구조의 지역별·규모별 변화특성 분석. *한국경제지리학회지* 16권, 3호: 445-457.
Yun Kapsik and Lee Gabjeong. 2013. Analysis of changes in the characteristics of urban spatial structure in Korea through the population gradient curve. *Journal of the Economic Geographical Society of Korea* 16, no.3: 445-457.
 15. 이상현. 2002. 승례문의 육축을 이루는 석재의 암상 특징과 박리, 박락 및 균열현상. *보존과학회지* 11권, 1호: 1-14.
Lee Sanghun. 2002. Characteristics of rock phase and phenomena of exfoliation, breakout and cracks developed on the rocks constituting the Soongryemoon. *Journal of Conservation Science* 11, no.1: 1-14.
 16. 이선명, 이명성, 조영훈, 이찬희, 전성원, 김주옥, 김선덕. 2007. 안성 청룡사삼층석탑의 풍화훼손도 진단과 보존처리. *자원환경지질* 40권, 5호: 661-673.
Lee Sunmyung, Lee Myeongseong, Jo Younghoon, Lee Chanhee, Jeon Seongwon, Kim Juok and Kim Sunduk. 2007. Deterioration diagnosis and conservation treatment of

- the three-storied stone pagoda in the Cheongryongsa temple, Anseong, Korea. *Economic and Environmental Geology* 40, no.5: 661-673.
17. 이일희, 이주형. 2012. 우리나라 광역시 도시압축성 평가에 관한 연구. *한국산학기술학회논문지* 13권, 7호: 3224-3231. Lee Ilhee and Lee Joohyung. 2012. A study on the urban compactness evaluation of Korean metropolises. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society* 13, no.7: 3224-3231.
18. 정창현, 류성룡. 2013. 조경 식재 방식에 따른 공동주택단지 보행구역의 빌딩풍 변화 분석. *대한건축학회논문집 계획계* 29권, 11호: 253-262. Cheong Changheon and Ryu Seongryong. 2013. An analysis on the building wind variation in the residential community pedestrian area by the planting method. *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning&Design* 29, no.11: 253-262.
19. 정해연, 김문성, 이성희, 이규석. 2012. 고층건물 도로협곡의 바람특성. *한국환경복원기술학회지* 15권, 2호: 9-18. Zheng Haiyan, Jin Wencheng, Lee Sunghee and Lee Kyooseock. 2012. Wind characteristics of urban street canyon at high rise building area. *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology* 15, no.2: 9-18.
20. Castro, I. P. and Apsley, D. D. 1997. Flow and dispersion over topography: A comparison between numerical and laboratory data for two-dimensional flows. *Atmospheric Environment* 31, no.6: 839-850.
21. Kim Jaejin and Baik Jongjin. 2004. A numerical study of the effects of ambient wind direction on flow and dispersion in urban street canyons using the RNG k-ε turbulence model. *Atmospheric Environment* 38, no.19: 3039-3048. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.02.047>
22. Mikhailuta, S. V., Lezhenin, A. A., Pitt, A. and Taseiko, O. V. 2017. Urban wind fields: Phenomena in transformation. *Urban Climate* 19: 122-140. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.12.005>
23. Mittal, H., Sharma, A. and Gairola, A. 2018. A review on the study of urban wind at the pedestrian level around buildings. *Journal of Building Engineerings* 18: 154-163. <https://doi.org/10.1016/j.job.2018.03.006>
24. Oke, T. R. 1988. Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Building* 11: 103-113.
25. Versteeg, H. K. and Malalasekera, W. 2007. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The finite Volume Method*. Second Edition. England: Pearson Education Limited.
26. Yakhot, V., Orszag S. A., Thangam S., Gatski T. B. and Speziale, C. G. 1992. Development of turbulence models for shear flow by a double expansion technique. *Physics of Fluids* 4, no.7: 1510-1520.

-
- 논문 접수일: 2021. 3. 30.
 - 심사 시작일: 2021. 4. 26.
 - 심사 완료일: 2021. 6. 18.

요약

주제어: 건축문화재, 황궁우, 풍환경, 도심지, 전산유체역학 모델, 지리정보시스템 자료

본 논문에서는 전산유체역학 모델 및 지리정보시스템 자료를 이용하여, 고층 건물로 둘러싸인 도심지 내 건축문화재(황궁우)를 대상으로 풍환경의 변화를 수치해석하였다. 또한 4방위 유입류에 대한 수평 및 연직 벡터장, 그리고 대상 건축문화재 주변의 풍속 분포 등을 통하여 상세흐름특성을 분석하였다. 그 결과, 수평 및 연직 흐름의 벡터장 양상에서는 유입류의 방향성보다 주변 고층 건물들의 위치와 배열에 따라 흐름의 분리 및 회전 등의 다양한 현상이 발생되었다. 대상 건축문화재의 인접격자에서 풍속 및 풍향

을 모두 고려한 분석에서는 지상 2m의 경우, 유입 북풍의 조건에서 황궁우의 남동 측면이 상대적으로 바람의 영향을 크게 받을 것으로 나타났으며, 지상 10m의 경우에는 유입 남풍의 조건에서 북동 측면이 가장 영향을 크게 받을 것으로 분석되었다. 본 연구를 통하여, 고층 건물군에 의해 형성된 바람길 및 빌딩풍 등이 도심 건축문화재 주변의 풍환경에 영향을 미칠 수 있음을 확인하였으며, 이에 대한 상세 영향 평가의 필요성이 제시되었다.

