전산유체역학 모델을 이용한 승례문 주변의 풍환경 수치해석

Numerical Analysis of Wind Environment around Sungnyemun Gate Using a Computational Fluid Dynamics Model

손민우, 김도용*

목포대학교 환경공학과(기후변화연구소)

Minu Son, Do-Yong Kim*

Department of Environmental Engineering(Institute of Climate Change), Mokpo National University, Muan 58554, Korea

Received March 30, 2021

Revised April 22, 2021

Accepted May 3, 2021

*Corresponding author

E-mail: dykim1975@mokpo.ac.kr

Phone: +82-61-450-2484

Journal of Conservation Science
2021;37(3):209-219

<https://doi.org/10.12654/JCS.2021.37.3.02>

pISSN: 1225-5459, eISSN: 2287-9781

© The Korean Society of
Conservation Science for Cultural
Heritage

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.

초 록 본 연구에서는 도심지에 위치한 승례문을 중심으로 유입류 풍향 조건에 따라 변화되는 풍환경을 수치해석하였다. 이를 위해 지리정보시스템 자료와 전산유체역학 모델을 이용하여 대상영역의 상세 바람장을 수치모의하였으며, 벡터장, 3차원 바람속도성분, 풍속장 등에 대한 흐름특성을 분석하였다. 대상영역에서는 건물협곡을 따라 흐르는 바람길의 형성과 건물에 의한 바람의 회전 및 와류 등 급격한 풍향의 변화가 모의되었으며, 그 영향으로 승례문 주변에서는 유입류의 풍향에 의존하지 않는 복잡한 흐름의 양상이 나타났다. 승례문 지점에서의 풍속은 지표풍(지상 2 m)과 비교하여 상층마루 높이(지상 14 m)에서 평균 3배 이상 강하게 형성되었고, 유입류가 동풍인 경우에 전반적으로 높게 나타났으며, 승례문의 남동 측면이 상대적으로 바람에 의한 영향이 클 것으로 예측되었다. 본 연구를 통하여, 고층건물 및 고밀도 건물군 등 인공구조물에 의한 바람길 및 빌딩풍 등의 형성이 도심지에 위치한 건축문화재에 미치는 영향을 파악하고 대책을 마련하기 위한 상세 풍환경 평가의 필요성이 제시되었다.

중심어 승례문, 건축문화재, 전산유체역학 모델, 풍환경, 수치해석

ABSTRACT In this study, the wind environment in an urban area near Sungnyemun gate was numerically investigated in the cases of inflow directions. The wind fields for the target area were simulated using Geographic Information System data and Computational Fluid Dynamics model. Results, including vector fields, three-dimensional wind velocity components, and wind speeds, were analyzed to examine flow characteristics. Wind direction variability affected by buildings was shown in the target area. The complex flows around Sungnyemun did not depend on the inflow direction as a boundary condition. The wind speed around Sungnyemun was generally 3 times stronger at 14 m above ground level (AGL) compared to the surface wind at 2 m AGL and relatively high in the case of easterly inflow. The effect of wind was also analyzed to be relatively significant at the southeast side of Sungnyemun. Thus, it was suggested that the assessment of wind environment affected by high-rise and high-density buildings should be necessary for the architectural heritage in urban areas.

Key Words Sungnyemun gate, Architectural heritage, Computational fluid dynamics model, Wind environment, Numerical analysis

1. 서론

인류는 사회·경제 체제의 급격한 변화에 따라 산업시설 및 생활기반시설 등의 토목·건축물을 확충시켜 왔고, 집약적인 토지이용과 개발사업은 도시화 현상의 가속화를 야기하였다. 도시지역으로의 인구유입의 증가는 인간 활동 및 교통량의 상승으로 이어졌는데, 이로 인한 대기 오염물질의 배출량 증가는 도시대기환경에 부정적인 영향을 주었으며, 대기상태에 따라 광화학 대기오염 및 미세먼지 등의 농도를 더욱 악화시키기도 한다(Kwak *et al.*, 2013; Wenju *et al.*, 2017). 또한, 고밀도 건물군 및 복잡한 도시형곡의 형성 등 도심지의 물리적 구조의 변화는 도시의 열환경 및 미기상(微氣象)에 영향을 미치며, 도시열섬과 함께 강수 및 바람 등 국지기상의 급격한 변화를 야기하여 각종 피해를 유발하기도 한다(Cheong and Ryu, 2013; Son and Kim, 2018).

물리적 및 화학적 풍화작용에 의한 문화유산의 피해 사례로는 이집트의 피라미드 및 �핑크스, 캄보디아 바이온 양식 관음보살상, 화순 운주사 석조불감, 안성 청룡사 삼층석탑 등이 있으며, 강수(물), 바람, 오염물질 등의 영향이 복합적으로 작용하고 있는 것으로 알려져 있다(Park *et al.*, 2001; Lee *et al.*, 2007; Park *et al.*, 2008; Choie *et al.*, 2018). 더욱이 도시지역에 위치해 있는 건축문화재의 경우에는 대기오염물질 및 빌딩풍 등의 영향을 크게 받을 수 있으며, 이에 대한 대책마련으로 도심지 내에 위치한 국가 주요문화재를 대상으로 한 고층건물 밀집 지역에서의 환경영향평가 및 모니터링 등의 제도 개선을 위한 연구가 수행된 바가 있고, 계측 장비를 활용한 측정 및 영향평가를 통해 정책제언을 실시하는 등의 사례가 있다(Hong, 2016; Roh, 2016; Mikhailuta *et al.*, 2017; Mittal *et al.*, 2018). 그러나, 도시영역의 확장에 따른 도심 속 건축문화재의 증가 추이를 고려했을 때, 도심지에서의 건축문화재에 대한 바람길 및 빌딩풍 등의 각종 풍환경 관련 연구는 미흡한 실정이다.

문화재는 각 국가 경쟁력의 일부로 볼 수 있으며, 새로운 문화 창출은 대부분 기존의 전통문화를 바탕으로 계승하기 때문에 보존과 보호가 필수적이다(Han, 2008). 따라서 점진적인 대도시화와 기후변화 등의 추세에 맞춰 문화재를 보존하기 위한 대응 및 대책에 관한 다양하고 지속적인 노력이 요구되고 있다(Kim, 2016). 본 연구에서는 도심지에 위치한 건축문화재 영역의 풍환경 영향평가를 위한 노력의 일환으로, 대상 건축문화재 주변의 바람장 및 풍속장 등 상세흐름특성에 대해 전산수치실험을 수행하였으며, 도시지역에 형성된 건물협곡에서 바람의 유입방

향에 따라 변화되는 미세규모 바람장의 전반적인 흐름상을 분석하였다. 또한, 이에 기초하여 대상지역 및 건축문화재 주변에서 형성되는 풍환경의 국지적 특징에 대해 평가하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1. 수치모델

본 연구에서 사용한 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 모델은 Kim and Kim(2016) 및 Son and Kim(2020a, 2020b) 등의 것과 동일한 것으로, 1995년 미국 아르곤 국립연구소에서 개발된 초기 버전을 기초로 지난 수십 여 년 동안 국내외에서 지속적으로 개선이 이루어진 모델이다. 이 모델은 도시규모에서의 국지적 대기흐름을 초고해상도로 해석할 수 있으며, 컴퓨터 전산수치실험(시뮬레이션)에 기반하기 때문에 풍동실험이 갖는 시·공간적 제약이 존재하지 않고, 대기와 관련된 각종 요인을 반영하여 풍환경에 대한 민감도 실험이 가능한 매우 경제적이고 유용한 수치실험 도구이다. 이러한 이점으로 인해 과거부터 현재까지 CFD 모델을 이용한 지역·도시규모의 수치해석 등 수많은 연구가 수행되어져 왔으며, 검증 및 신뢰성을 인정받은 모델이다(Kim and Baik, 2004; Kim, 2007; Kwak *et al.*, 2013; Kim and Kim, 2016; Son and Kim, 2020a, 2020b).

CFD 모델은 Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) 방정식계를 바탕으로 엇갈림 격자계에서 Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation (SIMPLE) 알고리즘을 유한체적법과 함께 적용하고 있으며, 3차원의 공간계에서 비정수 및 비압축의 대기흐름을 수치적으로 나타낼 수 있다. 난류모수화의 경우에는 재규격화군 k-ε 난류종결법을 반영하고 있으며, 벽면 경계 효과를 보이기 위해 벽면 함수(wall function)를 적용하고 있다(Kim and Baik, 2004; Versteeg and Malalasekera, 2007). 추가적으로 모델의 지배방정식계 및 적용된 알고리즘 등 수치과정에 관한 사항들은 상기에 제시된 기존 연구논문들에 자세히 기술되어 있다.

2.2. 대상지역 및 수치실험 설계

대상 건축문화재는 우리나라 전통 건축물의 대표성을 띠고 서울의 중심지에 위치해 있어 도시지역에서 형성되는 풍환경의 영향을 크게 받을 것으로 예상되는 숭례문을 선정하였다. 숭례문은 대한민국 국보 제1호로 1398년 조선시대에 준공되었으나, 2008년에 발생한 방화사건으로

인해 2013년에 재건된 이력이 있다. 참고로 승례문은 재건 이전에 자연적인 풍화 및 인위적 요인 등에 의한 균열, 박리, 박락 현상 등 여러 훼손 현상이 보고된 바 있다(Lee, 2002). 승례문 외관의 크기는 기준에 따라 다소 상이하지만, 일반적으로 전면 길이 약 23 m, 측면 길이 약 8 m, 우진각 지붕을 고려한 높이 약 18 m로 확인되고 있고, 위치적으로는 허브(Hub) 영역으로서 주변에 10차로의 넓은 도로가 포함되어 있다.

수치모델의 지표면 경계조건은 대상지역에서의 바람장 형성 및 발달 양상을 효과적으로 모사하고자 지리정보시스템(Geographic Information System, GIS) 자료를 이용하여 실제 지형 및 건물정보를 반영하였다. 모델의 계산영역은 승례문을 중심으로 3차원 공간좌표계에서 ($x \times y \times z$) = (1000 m $\times$ 1000 m $\times$ 200 m) 규모로 설정하였고(Figure 1), 격자 해상도의 경우는 수평(x 및 y) 방향에 대해서 10 m와 연직(z) 방향에 대해서 4 m의 균등격자를 적용하였다. 바람의 경계조건에 대해서는 측면 및 유출 경계에서의 경도와 상층 경계 등에 대한 바람 시어(wind shear)를 0로 가정한 상태에서 고도에 따른 풍속 변화(power law)를 부여하는 이론적 연직프로파일을 적용하였다(Spera and Richards, 1979; Kim and Baik, 2004; Kim, 2007). 또한, 본 연구에서는 대상지역의 풍환경에 대한 민감도 실험조건으로써, 유입류에 대하여 4방위[동풍(E), 서풍(W), 남풍(S), 북풍(N)] 풍향을 설정하였고, 각각의 경우에 대한 수치실험을 수행하였다.

수평 바람장의 경우에는 x - y 단면에 대한 벡터장과 x 방향의 바람속도성분(u) 및 y 방향의 바람속도성분(v)을 분석하여, 각 유입류 풍향 조건에 따른 지표풍(지상 2 m)의 흐름의 양상 및 방향성 등을 살펴보았다. 연직 바람장

의 경우에는 Figure 1의 우측에 보인 바와 같이 승례문 지점을 기준으로 동서(E-W) 라인의 연직단면(x - z 단면) 및 남북(S-N) 라인의 연직단면(y - z 단면)에 대한 벡터장과 z 방향의 바람속도성분(w)을 대상으로, 고도에 따른 바람의 변화 양상과 상승 및 하강기류의 변화추이 등을 분석하였다. 또한, 대상영역에 대한 풍속장의 수평 공간분포를 분석하고, 추가적으로 승례문 지점에 인접한 8방위 격자에 대하여 보행자 높이를 고려한 지표풍(지상 2 m) 및 승례문 상층마루(지상 14 m) 높이에서의 풍속 크기의 변동성을 분석하여, 유입류 풍향 조건에 따른 바람의 영향성에 관해 고찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 수평 바람장

Figure 2는 앞서 정의한 승례문을 중심으로 한 대상영역에서 유입류 풍향(4방위) 조건에 따른 지표풍(지상 2 m)의 벡터장 민감도 수치실험 결과로서, 각각의 수평흐름장에 대해 x - y 단면으로 나타내고 있다. 유입 동풍(E)의 경우에는 상대적으로 건물의 밀집도가 높은 동쪽 건물군의 영향으로 유입류가 건물들에 의해 형성된 바람길로 집중되는 현상이 나타났으나, 승례문이 위치한 중심영역에서는 건물배치에 따른 원활한 흐름의 양상을 보였다(Figure 2A). 유입 서풍(W)의 경우에는 대상영역에서 건물 군집이 가장 낮은 서쪽 측면경계로부터 바람의 유입을 가정한 것으로, 서쪽의 유입경계면 및 건물 개체군 주변에서 강한 흐름을 보였으며, 승례문 주변 허브영역의 남동 방면에서는 건물에 의한 영향으로 풍향이 급반전하여 승례문 쪽으로

Figure 1. Three-dimensional topography and buildings for the target area.

향하는 흐름이 형성되었다(Figure 2B). 유입 남풍(Si)의 경우에는 대상영역의 남쪽 측면경계에서 장애물의 방해가 없는 유입공간영역이 넓어 강한 유입류의 흐름을 보였으며, 건물에 의한 흐름의 분리 및 회전 등의 영향으로 대상영역 내부에서는 다양한 풍향 변화를 확인할 수 있었고, 승례문이 위치한 중심영역에서는 남쪽으로부터 중심부로 향하는 강한 유입류의 영향에 의해 전반적으로 북쪽으로의 흐름 양상을 보였(Figure 2C). 유입 북풍(Ni)의 경

우에는 유입경계면인 북쪽 측면경계에 건물들이 넓게 분포되어 있어 대상영역의 북쪽 방면에서 복잡한 형태의 바람길이 생성되었으며, 승례문 주변 허브영역의 남-남동 방면에서는 유입 서풍의 경우와 유사한 양상으로 건물에 의한 풍향의 급반전 양상이 나타나 승례문 쪽으로 향하는 흐름이 형성되었다(Figure 2D).

Figure 3과 Figure 4는 대상영역에서 수치모의된 지표 풍(지상 2 m)을 대상으로 각각 x 및 y 방향의 바람속도성

Figure 2. The surface wind vectors at 2 m AGL in the cases of inflow directions. AGL, above ground level.

Figure 3. The horizontal wind velocity (u) of x-direction at 2 m AGL in the cases of inflow directions. AGL, above ground level.

분의 수평공간분포를 나타낸 것으로, 각 기준(x축 및 y축)에 대하여 수치적 양의 값과 음의 값의 구분을 통한 바람의 방향적 변화 강도를 나타내고 있다. 먼저, Figure 3의 경우에는 x 방향의 바람속도성분(u)으로 양의 값인 서풍(우측으로의 흐름) 계열의 바람 및 음의 값인 동풍(좌측으로의 흐름) 계열의 바람을 표출한 것이다. 유입 동풍(Ei)의 경우, 동쪽 방면에서는 유입류의 영향으로 건물협곡을 따라 흐르는 강한 동풍 계열의 흐름을 볼 수 있었으며, 이는 승레문이 위치한 중심영역에서도 영향을 받아 전반적으로 동풍의 기류가 지배적으로 발달하는 양상이 확인되었으나, 건물영역 및 승레문 인접 남서쪽에서는 풍향의 역전현상으로 서풍 계열의 흐름이 형성되기도 하였다(Figure 3A). 유입 서풍(Wi)의 결과에서는 서쪽 방면에 장애물이 적어 유입경계면 전체에서 전반적으로 강한 서풍의 경향을 보였으나, 승레문이 위치한 중심영역에서는 주변 건물들의 영향으로 동풍 계열의 흐름이 지배적으로 발달하면서 유입류의 풍향에 의존하지 않는 흐름의 양상을 보였고, 특히 승레문 인접 남동쪽에서 풍향의 급반전 현상이 강하게 나타났다(Figure 3B). 유입 남풍(Si) 및 유입 북풍(Ni)의 경우는 유입류의 풍향이 y 방향에 해당하므로 유입 측면경계 부근에서의 x 방향의 바람속도성분은 전반적으로 매우 약하지만, 승레문이 위치한 중심영역에서는 건물협곡 및 도로를 따라 흐르는 유입 경로 및 주변 건물들에 의한 풍향 변화 등의 영향으로 유입 남풍(Si)의 경우에는 양의 값이 지배적이었고(Figure 3C), 유입 북풍(Ni)의 경우에는 음의 값이 지배적인 양상을 보였다(Figure 3D).

Figure 4는 y 방향의 바람속도성분(v)을 나타낸 것으로, 앞선 설명과 동일한 원리로 양의 값인 남풍(상단으로의 흐름) 계열의 바람 및 음의 값인 북풍(하단으로의 흐름) 계열의 바람을 표출한 것이다. 유입 동풍(Ei) 및 유입 서풍(Wi)의 경우에는 유입류의 풍향이 x 방향에 해당하므로 유입 측면경계 부근에서의 y 방향의 바람속도성분은 상대적으로 매우 약하게 나타났고, 승레문이 위치한 중심영역에서는 각각 북풍(Figure 4A) 및 남풍(Figure 4B) 계열이 지배적으로 발달하였는데, 이는 대상지역에서 중심지로 향하는 도로의 배치 각도 및 방향에서 기인한 것으로 판단되며, 바람이 상대적으로 더 발달하여 바람길의 역할을 하는 도로영역이 중심영역을 기준으로 대각선 방향으로 위치해 있어 발생하는 현상으로 볼 수 있다. 유입 남풍(Si)의 경우에는 유입경계면인 남쪽에서부터 중심지를 통한 북쪽으로의 이동과정에서 남풍 계열의 흐름이 유지되는 양상을 보였으나, 승레문이 위치한 중심영역에서 흐름이 약해지는 모습이 관찰되었으며, 이는 중심영역의 북서 방면에서 건물에 의해 형성된 북풍의 영향으로 바람의 방향성 강도가 일부 상실된 것으로 판단된다(Figure 4C). 유입 북풍(Ni)의 경우, 대상영역의 북쪽에서는 유입류 풍향의 영향으로 북풍 계열의 흐름이 강하게 발달하였고, 중심영역에서는 남동쪽 건물군에 의해 풍향이 전환되면서 승레문 주변에서는 남풍 계열의 흐름이 발달하는 것을 확인할 수 있었다(Figure 4D).

결과적으로 승레문 주변에서 형성되는 지표풍(지상 2 m)의 흐름은 유입 동풍(Ei)의 경우에 북풍-동풍 계열, 유입

Figure 4. The horizontal wind velocity (v) of y -direction at 2 m AGL in the cases of inflow directions. AGL, above ground level.

서풍(Wi)의 경우에 남풍-동풍 계열, 유입 남풍(Si)의 경우에 남풍-서풍 계열, 유입 북풍(Ni)의 경우에 남풍-동풍 계열이 우세한 양상을 보였다. 이는 도심지의 경우에는 대상영역 내에 존재하는 도로 및 건물의 구조적 배치 및 밀집도 등의 영향으로 유입류의 풍향 조건을 따르지 않는 복잡하고 다양한 풍환경이 형성될 수 있음을 의미한다 (Kim and Baik, 2004; Lee and Kim, 2011).

3.2. 연직 바람장

Figure 5와 Figure 6은 앞서 Figure 1에서 설명한 바와 같이 송례문의 위치를 중심으로 한 동-서(E-W) 라인 및 남-북(S-N) 라인에 대한 벡터장의 연직분포를 나타낸 것이다. 먼저, Figure 5는 E-W 라인에 대한 x-z 단면의 벡터장을 보인 것으로, 각 유입류 풍향 조건에 따른 변화를 x축을 기준으로 하여 좌측은 서(W), 우측은 동(E)의 방향을 나타내고 있다. 유입 동풍(Ei)의 경우, 연직 단면상에서 바람의 좌측 흐름인 동풍이 전반적으로 발달하였으며, 송례문을 타고 넘어가는 흐름에 의해 송례문의 동쪽 측면에서는 상승기류가 관찰되었고 반대쪽에서는 하강기류가 확인되었다(Figure 5A). 유입 서풍(Wi)에서는 바람의 우측 흐름인 서풍이 주로 확인되었고, 송례문의 서쪽 및 동쪽 측면에서는 와류가 형성되어 지표부근에서 풍향이 역전

되는 양상을 보였다(Figure 5B). 유입 남풍(Si) 및 유입 북풍(Ni)의 경우는 유입류가 남-북 방향의 흐름이기 때문에 x-z 단면에서의 상승의 동-서 흐름이 매우 약하고 명확하지 않았으나, 하층에서는 지표건물들의 영향으로 풍향의 변화가 야기되어 송례문 주변에서는 유입 남풍(Si)의 경우에 서풍(Figure 5C) 및 유입 북풍(Ni)의 경우에 동풍이 발달하는 양상을 보였다(Figure 5D).

Figure 6은 S-N 라인에 대한 y-z 단면의 벡터장을 보인 것으로, 각 유입류 풍향 조건에 따라 y축을 기준으로 좌측은 남(S), 우측은 북(N)의 방향을 나타내고 있다. 유입 동풍(Ei) 및 유입 서풍(Wi)의 경우는 유입류가 동-서 방향의 흐름이기 때문에 y-z 단면에서의 상승의 남-북 흐름이 매우 약하고 명확하지 않았으나, 송례문의 남쪽 및 북쪽에 위치한 고층건물들에 의해 형성되는 상승 및 하강기류의 영향으로 하층에서는 남-북 흐름이 강화되는 양상을 보였고, 이로 인해 송례문 주변에서는 유입 동풍(Ei)의 경우에 북풍(Figure 6A) 및 유입 서풍(Wi)의 경우에 남풍이 발달하는 양상을 보였다(Figure 6B). 유입 남풍(Si) 및 유입 북풍(Ni)의 경우, 상층에서는 유입류 풍향의 영향으로 각각 남풍 및 북풍의 흐름이 지배적이었으며, 하층 송례문 주변에서는 유입 남풍(Si)의 경우에 지표건물들의 영향으로 남풍의 흐름이 약화되었고(Figure 6C), 유입 북풍(Ni)의 경

Figure 5. The wind vectors at x-z section (E-W line shown in Figure 1) in the cases of inflow directions.

우에 승레문의 북쪽 측면에서는 약화된 북풍의 흐름을 보였지만 남쪽 측면에서는 승레문과 건물들 사이에서 형성되는 연직 와류의 영향으로 남풍이 발달하는 양상을 보였다(Figure 6D).

Figure 7은 지상 2 m 높이에서의 지표풍에 대한 z 방향의 바람속도성분(w)의 수평공간분포를 나타낸 것으로, 양의 값인 상승기류와 음의 값인 하강기류를 표출한 것이다. 유입 동풍(Ei)의 경우, 유입경계면과 인접한 건물들 주

Figure 6. The wind vectors at y-z section (S-N line shown in Figure 1) in the cases of inflow directions.

Figure 7. The vertical wind velocity (w) of z-direction at 2 m AGL in the cases of inflow directions. AGL, above ground level.

변에서 상승기류가 상대적으로 높게 나타났으며, 승례문이 위치한 중심영역에서도 약한 상승기류가 지배적이었는데 바람이 부딪히는 주변 건물들의 풍상측면에서는 하강기류가 형성되는 양상을 보였다(Figure 7A). 유입 서풍(Wi)의 경우에도 바람이 불어 들어오는 대상영역의 서쪽 경계면에서 상승기류가 전반적으로 나타났고, 승례문 주변의 서쪽 영역에서도 상승기류가 지배적이었지만, 승례문에 인접한 동쪽(특히 남동쪽) 영역에서는 앞선 벡터장의 연직 단면에서 확인된 건물에 의해 형성되는 연직 와류의 영향으로 하강기류가 발달하였다(Figure 7B). 유입 남풍(Si)의 경우, 유입경계면 부근에서는 장애물이 상대적으로 적어 수평바람이 잘 발달할 수 있는 조건으로 인해 전반적으로 약한 연직기류의 특징을 보였고, 승례문이 위치한 중심영역에서는 남서쪽의 바람통로를 따라 형성된 상승기류와 주변 건물들의 남측(풍상측)면에서 형성된 하강기류가 확인되었다(Figure 7C). 유입 북풍(Ni)의 경우, 유입경계면 부근에서는 상승기류가 전반적으로 우세하였고, 승례문이 위치한 중심영역에서는 북서 방향의 상승기류와 남쪽 방향의 하강기류가 분포하였으며, 승례문 주변으로는 약한 하강기류가 지배적으로 나타났(Figure 7D).

결과적으로 모든 유입조건에 대해 대상영역 내에서 형성되는 연직기류는 지표건물들의 영향으로 매우 복잡한 양상을 보였는데, 지표풍의 경우 전반적으로 유입경계 부근에서는 상승기류가 지배적이었고 건물들의 풍상측면에서는 연직 와류의 영향으로 대체로 하강기류가 강하게 형성되는 양상을 보였으며, 이는 지표풍의 풍향 변화에도 직

접적으로 연계되는 사항이다(Son and Kim, 2018; 2020b).

3.3. 풍속장

Figure 8에서는 대상영역에서 형성되는 바람세기의 변화 양상을 살펴보기 위하여, 유입류 풍향 조건에 따른 지표풍(지상 2 m)에 대한 x-y 단면에서의 풍속장을 나타내었다. 유입 동풍(Ei)의 경우, 바람이 유입되는 대상영역의 동쪽 방향의 건물 밀집영역에서 좁은 바람길을 통해 풍속이 강화되는 현상을 볼 수 있었으며, 중심영역에서는 주 도로를 따라 풍속이 강하게 발달하였고 승례문 주변에서도 전반적으로 높게 나타났(Figure 8A). 유입 서풍(Wi)의 경우에는 유입경계인 대상영역의 서쪽으로부터의 강한 바람이 건물군에 의한 장애물 효과로 인해 중심영역에서는 다소 약화되는 양상을 보였지만, 승례문 주변의 남동쪽 부근에서는 풍속장이 상대적으로 높게 나타났으며, 이는 앞선 결과들로부터 분석된 해당 건물들에 의한 와류의 형성 및 지표풍의 풍향 역전으로 인해 승례문 쪽으로 수렴하는 바람의 발달에 따른 풍속 강화 현상으로 보인다(Figure 8B). 유입 남풍(Si)의 경우는 남쪽으로부터의 바람이 상대적으로 건물이 적은 대상영역의 남서쪽-서쪽 방향에서 강한 풍속분포를 보였고, 승례문 주변에서는 전반적으로 풍속이 약화되는 양상을 보였지만, 중심영역으로 진입하는 북쪽 방향의 주도로부에서는 풍속장이 상대적으로 높게 나타났(Figure 8C). 유입 북풍(Ni)의 경우에는 바람이 유입되는 대상영역의 북쪽 방향에서 강한 바람길이

Figure 8. The surface wind speeds at 2 m AGL in the cases of inflow directions. AGL, above ground level.

형성되는 양상을 보였으나 중심영역에서는 매우 약화되었고, 유입 서풍(W_i)의 경우와 유사하게 송례문 주변의 남동쪽에서 풍속이 다소 강화되는 양상을 보였다(Figure 8D). 따라서 도시지역의 경우에는 밀집된 건물군들에 의한 흐름 장애, 건물협곡 및 도로에 의한 바람길 형성, 국지적 풍속 급강화 및 급약화 등의 현상이 다양하게 나타나며, 송례문 주변의 풍환경도 이러한 복합적인 요소들의 영향을 받는 것으로 보인다.

본 연구에서는 대상 건축문화재인 송례문에 대한 주변 풍환경의 영향을 보다 상세히 평가하고자, 송례문 지점의 8방위 측면에 대하여 지표풍에 해당하는 지상 2 m 높이 및 송례문의 상층마루 높이에 해당하는 지상 14 m 높이에서의 유입류 풍향 조건별 풍속분포를 분석하였다(Figure 9). 먼저, 고도에 따른 풍속 차이를 살펴보면, 지상 14 m 높이에서의 풍속이 지상 2 m 높이에서의 풍속보다 평균 약

3.0배 이상(최대 약 8.6배) 강하게 나타나, 송례문의 하단부를 구성하는 석조 벽면보다 상층부를 구성하고 있는 마루 및 지붕에 대한 영향이 더 클 것으로 평가되었다. 다만, 송례문의 남동(SE) 측면에서는 유입 서풍(W_i) 및 유입 북풍(E_i)의 경우에 예외적으로 지표풍이 더 강하게 발달하였으며, 이는 앞선 결과분석에서 서술하였듯이 해당 유입류의 경우는 송례문의 남동쪽 방면에서 건물들에 의한 연직 와류의 형성과 풍향 변화가 송례문 쪽으로의 지표풍의 수렴흐름을 야기하여 발생된 현상으로 해석할 수 있다. 유입류 풍향 조건에 따른 지상 2 m 높이에서의 풍속 차이를 살펴보면, 송례문의 서(W), 북서(NW), 북(N), 북동(NE) 측면에서는 유입 동풍(E_i)의 경우가 우세하였고, 동(E), 남동(SE), 남(S), 남서(SW) 측면에서는 유입 서풍(W_i)의 경우가 우세하였지만, 지상 14 m 높이에서의 풍속은 송례문 지점의 모든 측면 방위에서 유입 동풍(E_i)의 경우가 가장

Figure 9. The wind speeds around Sungnyemun Gate in the cases of inflow directions. AGL, above ground level.

높은 풍속을 나타냈으며, 이를 종합적으로 고려하면 승례문은 전반적으로 유입 동풍(E)일 경우에 바람의 영향이 클 것으로 평가되었다. 또한, 승례문 지점의 8방위 측면에 대한 풍속 차이를 살펴보면, 유입류 풍향 조건 및 고도에 따라 다소 상이하기는 하지만, 승례문 지점의 남동(SE) 측면이 다른 방위에 비해 상대적으로 바람의 영향이 클 것으로 평가되었으며, 특히 유입 동풍(E) 및 유입 서풍(W)의 경우에 지표풍 및 상층마루 높이에서의 풍속이 상대적으로 높게 나타났다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 우리나라의 대표적인 전통건축물인 승례문을 대상으로 도시지역에 위치한 건축문화재의 주변에서 형성되는 국지적 풍환경의 특징을 평가하기 위하여, GIS 자료를 기반으로 도시지표의 구조적 특성을 반영한 CFD 모델링을 수행하였다. 유입류 풍향 조건에 따라 대상영역에서 형성되는 상세 바람장에 대한 민감도 전산수치실험을 기반으로, 벡터장, 3차원 바람속도성분, 풍속장 등에 대한 흐름특성을 분석하였다.

대상영역에서 형성되는 지표풍은 대체로 유입경계 부근에서 유입류의 풍향에 대한 의존성이 높았지만, 도심지 내부로 흐름이 유입되는 과정에서 도로 및 건물의 구조적 배치 및 밀집도 등의 영향으로 유입류의 풍향 조건을 따르지 않는 복잡하고 다양한 풍환경이 형성되었으며, 이로 인해 승례문 주변에서는 유입 동풍의 경우에 북풍-동풍 계열, 유입 서풍의 경우에 남풍-동풍 계열, 유입 남풍의 경우에 남풍-서풍 계열, 유입 북풍의 경우에 남풍-동풍 계열이 우세하게 발달하는 양상을 보였다. 연직기류의 경우에도 지표건물들의 영향으로 매우 복잡한 양상을 보였으며, 유입경계 부근에서는 전반적으로 상승기류가 지배적이었으나, 건물들의 풍상측면에서는 연직 와류가 형성되면서 대체로 하강기류가 강하게 발달하였고, 이는 건물의 상부와 하부 간의 풍향 역전과 승례문 쪽으로의 지표풍의 수렴흐름 등을 야기하는 원인으로 분석되었다. 대상영역의 풍속장의 경우는 복잡하고 다양한 도시지표의 구조적 특성의 영향으로 인해 밀집된 건물군들에 의한 흐름장애 및 국지적 풍속의 급격한 변화 등이 발생하는 것으로 확인되었다. 승례문 지점을 대상으로 한 지표풍(지상 2 m)과 상층마루 높이(지상 14 m)에서의 풍속 차이의 비교·분석으로부터는 승례문의 하단부보다 상단부가 평균 3배 이상 크게 영향을 받을 것으로 예측되었으며, 특히 승례문은 전반적으로 유입류의 풍향 조건이 동풍일 경우에 바람의 영향이 가장 클 것으로 분석되었다. 또한, 지표풍 및

상층마루 높이에서의 강한 풍속(유입 동풍 및 유입 서풍)과 승례문 쪽으로 수렴하는 지표풍의 발달(유입 서풍 및 유입 북풍) 등을 종합적으로 고려하면, 승례문의 남동 측면이 상대적으로 바람에 의한 영향이 클 것으로 평가되었다.

본 연구를 통하여, 도심지에 위치한 건축문화재의 경우는 고층건물, 고밀도 건물군, 도로협곡 등에 의해 형성되는 바람길 및 빌딩풍 등과 같은 도시지역 특유의 다변성 풍환경의 조건 하에 있으므로, 이로 인해 발생할 수 있는 장기적 외력 작용에 따른 물리적 풍화 및 돌발성 강풍에 의한 연약 부위 훼손 등의 풍해 영향 최소화 및 보존 대책 마련 등을 위한 상세 풍환경 평가의 필요성을 확인하였다. 향후, 건축문화재 주변 풍환경 영향평가에 있어서, 유입 방위의 세분화에 따른 상세 수치해석, 관측자료 기반의 현실적 유입류 반영, 3차원 시각적 자료에 근거한 입체적 분석 등 보다 심도 깊은 연구가 필요할 것으로 생각된다.

사 사

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

REFERENCES

- Cheong, C.H. and Ryu, S.R., 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(11), 253-262. (in Korean with English abstract)
- Choi, M.J., Lee, M.S., Yoo, J.H., Chun, Y.G., Sothin, K., Sovann, I. and Sineth, O., 2018, Weathering characteristics and condition assessment conservation treatment for Bayon Style Avalokitesvara, Cambodia. Journal of Conservation Science, 34(3), 167-177. (in Korean with English abstract)
- Han, B.D., 2008, Improvement of cultural heritage disaster management: The case of Sungnyemun's collapse in fire. The Journal of the Korea Contents Association, 8(10), 189-197. (in Korean with English abstract)
- Hong, J.W., 2016, A basic study on the seismic capacity evaluation and repair reinforcement in cultural assets: Focused on wooden structure cultural assets in Korea and Japan. Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, 17(12), 488-495. (in Korean with English abstract)
- Kim, D.Y. and Kim, J.J., 2016, Evaluation of atmospheric environment for construction of bridge in Island. Journal

- of Korean Society Environmental Technology, 17(4), 353-361. (in Korean with English abstract)
- Kim, J., 2016, Climate change impact on Korean Stone Heritage: Research trends and prospect. Journal of Conservation Science, 32(3), 437-448. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.J., 2007, The effects of obstacle aspect ratio on surrounding flows. Atmosphere, 17(4), 381-391. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.J. and Baik, J.J., 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(19), 3039-3048.
- Kwak, K.H., Baik, J.J. and Lee, K.Y., 2013, Dispersion and photochemical evolution of reactive pollutants in street canyons. Atmospheric Environment, 70, 98-107.
- Lee, S.H., 2002, Characteristics of rock phase and phenomena of exfoliation, breakout and cracks developed on the rocks constituting the Soongryemoon. Journal of Conservation Science, 11(1), 1-14. (in Korean with English abstract)
- Lee, S.M., Lee, M.S., Jo, Y.H., Lee, C.H., Jeon, S.W., Kim, J.O. and Kim, S.D., 2007, Deterioration diagnosis and conservation treatment of the three-storied Stone Pagoda in the Cheongryongsa Temple, Anseong, Korea. Economic and Environmental Geology, 40(5), 661-673. (in Korean with English abstract)
- Lee, Y.S. and Kim, J.J., 2011, Effects of an apartment complex on flow and dispersion in an urban area. Atmosphere, 21(1), 95-108. (in Korean with English abstract)
- Mikhailuta, S.V., Lezhenin, A.A., Pitt, A. and Taseiko, O.V., 2017, Urban wind fields: Phenomena in transformation. Urban Climate, 19, 122-140.
- 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 Engineering, 18, 154-163.
- Park, H.D., Shin, G.H. and Aboushook, M., 2001, Assessment of durability of stone monument using specimens from old stone quarry. Proceeding, the 10th Anniversary Conference and the 14th National Meeting of the Korean Society of Conservation Science for Cultural Properties, Seoul, November 9, 19-24. (in Korean with English abstract)
- Park, S.M., Lee, M.S., Choi, S.W. and Lee, C.H., 2008, Material characteristics and deterioration assessment of the Stone Buddhas and Shrine in Unjusa Temple, Hwasun, Korea. Journal of Conservation Science, 24, 23-36. (in Korean with English abstract)
- Roh, J.H., 2016, Future perspective and significance of Korean wooden architecture - Focused on the current status and examples of Japanese wooden architecture. Journal of North-East Asian Cultures, 47, 399-414. (in Korean with English abstract)
- Son, M. and Kim, D.Y., 2018, A study on development of the secondary reverse vortex in building canyon. Journal of the Korean Society Environmental Technology, 19(6), 528-535. (in Korean with English abstract)
- Son, M. and Kim, D.Y., 2020a, A study on horizontal symmetry flow in building canyon by obstacle aspect ratios. Journal of the Korean Society Environmental Technology, 21(2), 117-122. (in Korean with English abstract)
- Son, M. and Kim, D.Y., 2020b, Flow characteristics in building canyon by surface flow regimes. Journal of the Korean Society Urban Environment, 20(1), 9-16. (in Korean with English abstract)
- Spera, D.A. and Richards, T.R., 1979, Modified power law equations for vertical wind profiles. Proceedings of the Conference and Workshop on Wind Energy Characteristics and Wind Energy Siting, Portland, Oregon, USA, June 19-21, 1-10.
- Versteeg, H.K. and Malalasekera, W., 2007, An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method. Second Edition, Pearson Education Limited, England, 66-98.
- Wenju, C., Ke, L. and Hong, L., 2017, Weather conditions conducive to Beijing severe haze more frequent under climate change. Nature Climate Change, 7, 257-262.