

논문

건물 지붕, 건물 벽, 도로의 표면 거칠기 길이 증가가 도시 도로 협곡의 오염물질 분산에 미치는 영향: 큰 에디 모의

Effects of Increase in Surface Roughness Length of Building Roof, Building Wall, and Road on Pollutant Dispersion in Urban Street Canyons: Large-Eddy Simulations

김동휘, 한범순^{1)*}, 박경주, 홍성호, 백종진

서울대학교 지구환경과학부, ¹⁾인하대학교 환경공학과

Dong-Hwi Kim, Beom-Soon Han^{1)*}, Kyeongjoo Park, Seong-Ho Hong, Jong-Jin Baik

School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea

¹⁾Department of Environmental Engineering, Inha University, Incheon, Republic of Korea

접수일 2024년 10월 16일

수정일 2024년 11월 14일

채택일 2024년 11월 20일

Received 16 October 2024

Revised 14 November 2024

Accepted 20 November 2024

*Corresponding author

Tel : +82-(0)32-860-7503

E-mail : hanbs2001@inha.ac.kr

Abstract Understanding flow and pollutant dispersion in urban areas is important to well cope with urban air pollution. The roughness of urban surface influences urban flow and pollutant dispersion, which necessitates further understanding. This study examines how the increase in roughness length of each of building roofs, building walls, and roads affects flow and pollutant dispersion in urban street canyons using the PARallelized Large-eddy simulation Model (PALM). A simulation in which all the roughness lengths are 0.01 m and three additional simulations in which the roughness length of each of building roofs (ROOF), building walls (WALL), and roads (ROAD) is increased to 0.05 m are performed. The street canyon-averaged (pedestrian level-averaged) pollutant concentration is 0.8% (0.7%) lower (higher) in the ROOF simulation, 1.6% (12.5%) higher in the WALL simulation, and 9.6% (18.0%) higher in the ROAD simulation, than that in the control simulation of $12.5 \mu\text{g m}^{-3}$ ($14.4 \mu\text{g m}^{-3}$). The magnitude of vertical mean pollutant flux within the street canyon is smaller in the ROOF, WALL, and ROAD simulations than in the control simulation. Compared with the control simulation, the upward vertical turbulent pollutant fluxes in the ROOF and WALL simulations are noticeably larger near the roof level and within the street canyon, respectively. Quadrant analysis at the roof level shows that the frequency of pollutant ejection (sweep) event in the ROOF simulation is 1.4%p (2.0%p) higher (lower) than that in the control simulation, while that in the WALL simulation is 0.9%p (1.6%p) lower (higher). These frequency changes largely occur in the central part of the street canyon rather than in the upwind and downwind parts. Meanwhile, the frequency of each turbulent event in the ROAD simulation is similar to that in the control simulation. This study gives further insights into the effects of increased roughness on pollutant dispersion.

Key words: Roughness length, Pollutant dispersion, Urban street canyon, Large-eddy simulation

1. 서론

도시 도로 협곡은 도로 양옆에 위치한 건물 사이의 공간이다(Gerdes and Olivari, 1999). 도로 협곡에서는 건물에 의해 흐름이 저해되고 배출된 오염물질이 축적되어 도시 거주민의 건강에 악영향을 끼친다(Zheng and Yang, 2021; O'Neill *et al.*, 2016). 건물이

밀집된 도심 지역에서의 대기 오염 문제를 이해하기 위해서는 도로 협곡에서의 흐름 및 오염물질 분산(dispersion)에 관해 잘 이해하는 것이 중요하며, 이와 관련하여 활발히 연구가 수행되어 왔다(Park *et al.*, 2022; Han *et al.*, 2018; Liu and Wong, 2014; Cheng and Liu, 2011; Michioka *et al.*, 2011).

도로 협곡에서의 오염물질 분산 특성은 도로의 너

비에 대한 건물의 높이 비로 정의되는 외관비(Niroobakhsh *et al.*, 2021; Di Bernardino *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2005; Baik and Kim, 1999), 건물 높이의 변동성 (Jon *et al.*, 2023; Kim *et al.*, 2023; Cui *et al.*, 2021; Huang *et al.*, 2000), 건물 및 도로 표면의 가열(Chen *et al.*, 2020; Park *et al.*, 2012; Kim and Baik, 1999; Sini *et al.*, 1996), 주변 바람의 세기 및 방향(Huang *et al.*, 2019; Gromke and Ruck, 2012; Nakamura and Oke, 1988; Wedding *et al.*, 1977) 등 여러 가지 요인에 따라 달라질 수 있다. 또한 발코니, 옥상정원, 굴뚝 등의 설치하는 거칠기를 변화시켜 도로 협곡 내 흐름과 오염물질 분산 특성을 변화시킬 수 있다. Salizzoni *et al.* (2008)은 풍동 실험을 통해 건물 지붕에 거칠기 요소가 추가된 경우 도로 협곡 내부 및 외부에서의 흐름이 어떻게 변화하는지를 조사하였다. 이들은 외관비가 1 이상인 도로 협곡에서 지붕 거칠기 증가가 지붕 고도 이상에서의 난류 강도와 연직 난류 운동량 플럭스를 증가시킴을 보였다. Cui *et al.* (2024)은 야외 실험을 통해 외관비가 2인 도로 협곡에서 건물 벽면에 발코니가 추가되었을 때 도로 협곡 내 보행자 고도에 서 오염물질 농도가 뚜렷하게 증가함을 보였다.

Kim *et al.* (2024)은 큰 에디 모의(large-eddy simulation) 모형을 이용하여 오염물질이 각각 배출되고 배출되지 않는 두 2차원 도로 협곡에서 건물 지붕의 거칠기 길이 증가가 지붕 고도에서의 오염물질 유입 및 유출에 미치는 영향을 조사하였다. 이들은 건물 지붕의 거칠기 길이 증가가 지붕 고도 바로 위에서 난류 강도를 증가시키고 오염물질이 배출되는 도로 협곡의 지붕 고도에서 난류에 의한 오염물질 유출을 증가시킴을 보였다. 한편 건물 지붕 외에도 건물 벽과 도로의 거칠기 변화 또한 도로 협곡 내 흐름에 직접적으로 영향을 미칠 수 있고 이에 따라 오염물질 분산이 변화할 수 있다.

본 연구에서는 Kim *et al.* (2024)의 연구를 확장하여 건물 지붕, 건물 벽, 도로의 거칠기 길이를 각각 증가시켰을 때 도로 협곡 내 흐름 및 오염물질 분산이 어떻게 변화하는지를 보다 상세히 조사하고자 한다.

본 연구에서는 Kim *et al.* (2024)에서보다 많은 수의 2차원 도로 협곡을 고려하여 도로 협곡과 그 주변에서의 흐름 및 오염물질 분산을 더 정확하게 모의하고자 한다. 또한 거칠기 길이 증가에 따라 도로 협곡의 풍상측, 중심부, 풍하측에서 난류에 의한 오염물질 분산이 각각 어떻게 달라지는지를 분석하여 건물 지붕, 건물 벽, 도로 각각의 거칠기 변화가 오염물질 분산에 미치는 영향을 더 깊이 이해하고자 한다.

2. 수치 모형 및 실험 설계

본 연구에 사용된 PALM (PARallelized Large-eddy simulation Model) 6.0 버전(Maronga *et al.*, 2020)은 대기 경계층을 모의할 수 있는 큰 에디 모의 모형이다. PALM은 부시네스크 근사를 적용하는 비정수, 여과된(filtered) 나비에-스톡스 방정식을 사용한다. PALM은 아라카와 C 격자계를 사용하고, 공간에 대해서는 5차 풍상차분법을, 시간에 대해서는 3차 룽게-쿠타 방법을 사용한다. 수정된 1.5차 디어도르프 난류 종결 방법을 사용하여 아격자 규모의 난류를 모수화한다(Saiki *et al.*, 2000; Moeng and Wyngaard, 1988; Deardorff, 1980). PALM은 도로 협곡에서의 흐름과 오염물질 분산 연구에서 활발히 사용되고 있고(Kim *et al.*, 2024; Park *et al.*, 2022; Niroobakhsh *et al.*, 2021; Lo and Ngan, 2015), PALM이 모의한 결과의 유효성은 관측 및 풍동 자료와 비교하여 충분히 검증된 바 있다(Moayedi and Hassanzadeh, 2022; Gronemeier *et al.*, 2021; Resler *et al.*, 2021; Duan *et al.*, 2019). PALM에 관한 상세한 정보는 Maronga *et al.* (2020)에 기술되어 있다.

본 연구에서는 x 방향으로 9개의 나란한 도로 협곡을 고려하였다(그림 1). 계산 영역 내에 더 많은 수의 도로 협곡을 고려할수록 도로 협곡 위에서 발달하는 고유 구조(coherent structure)를 더 잘 모의할 수 있다(Michioka *et al.*, 2011; Kanda *et al.*, 2004). 계산 영역의 크기는 x, y, z 방향으로 각각 360, 80, 106 m이다.

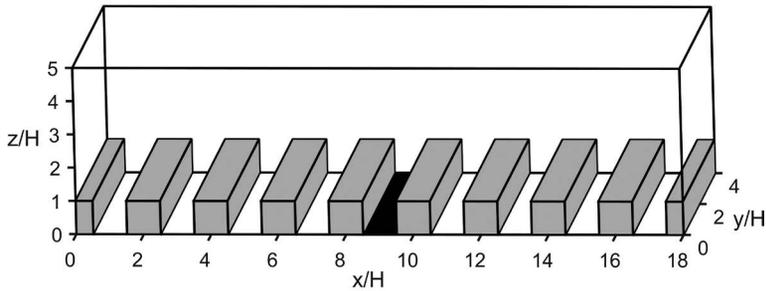


Fig. 1. Computational domain and building geometries. The black shaded area indicates the area source of pollutants, and H denotes the height of buildings.

수평 격자 간격은 0.5 m로 설정하였다. z 방향의 격자 간격은 고도 60 m 이하에서는 0.5 m, 고도 71 m 이상에서는 1.0 m로 일정하고, 그 사이에서는 1.08배씩 점진적으로 증가한다. 도로 협곡의 너비, 건물 높이(H)는 모두 20 m로, 도로 협곡의 외관비는 1이다. 건물 너비 또한 20 m로 설정되었다. 고도에 따라 일정한 4 m s^{-1} 풍속의 초기 바람을 고려하였으며, 초기 바람의 방향은 양의 x 방향이다. 총 적분 시간은 3시간이다. 오염물질은 도로 협곡 내 흐름이 준정상 상태에 도달한 2시간부터 계산 영역의 정중앙에 위치한 도로의 모든 격자점에서 배출되었으며, 배출 플럭스는 $1 \mu\text{g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 로 일정하다. x 방향 경계에서 속도 성분들에 대해서는 주기 경계 조건을 사용하였다. 오염물질 농도에 대해서는 유입 경계와 유출 경계에서 각각 디리클레 경계 조건과 노이만 경계 조건을 사용하였고, 이는 x 방향 유출 경계를 통해 유출된 오염물질이 x 방향 유입 경계를 통해 재유입되지 않도록 한다. y 방향과 z 방향 최상단 경계에서는 속도 성분들과 오염물질 농도 모두에 대해 각각 주기 경계 조건, 노이만 경계 조건을 사용하였다. 본 연구에서는 건물 지붕, 건물 벽, 도로의 거칠기 길이 증가가 도로 협곡의 오염물질 분산에 미치는 영향을 조사하기 위해 총 네 가지 실험을 수행하였다. 먼저 기준(CTRL) 실험에서는 건물 지붕, 건물 벽, 도로의 거칠기 길이를 0.01 m로 설정하였다(Park *et al.*, 2022; Kirkil and Lin, 2020; Kanda, 2006). 실제 건물 및 도로 표면에 존재할 수 있는 다양한 거칠기 요소를 고려하기 위해 이상적인

표면에서의 거칠기 길이보다 거칠기 길이 값이 크게 설정하였다. 나머지 세 실험에서는 건물 지붕, 건물 벽, 도로의 거칠기 길이를 각각 0.05 m로 증가시켰으며, 각각 ROOF 실험, WALL 실험, ROAD 실험으로 명명하였다. PALM에서 거칠기 길이는 마찰 속도 계산에 이용되며, 계산된 마찰 속도는 수평, 연직 바람 성분 예단에 필요한 운동량속 계산에 이용된다. 마찰 속도와 운동량속 계산에는 모닝-오브코프 상사 이론이 사용된다. 모든 분석에는 마지막 30분의 모의 자료만을 활용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 흐름 및 오염물질 농도

그림 2(a)는 CTRL 실험에서 시간 및 y 방향에 대해 평균한 도로 협곡 내부 및 외부의 오염물질 농도 분포와 유선장이다. 도로 협곡에서 시계 방향으로 회전하는 큰 소용돌이가 나타나고 풍상측 건물의 상단 모서리 근처와 풍하측 건물의 하단 모서리 근처에서 반시계 방향의 작은 소용돌이가 나타나며, 이는 이전 연구들에서의 결과와 일치한다(Kim *et al.*, 2024; Park *et al.*, 2022). CTRL 실험에서 도로 협곡 내 평균 풍속은 0.81 m s^{-1} , 평균 오염물질 농도는 $12.5 \mu\text{g m}^{-3}$ 이다. 도로 협곡 내 보행자 고도(1.5 m)에서 평균 오염물질 농도는 $14.4 \mu\text{g m}^{-3}$ 이다. 도로 협곡의 양쪽 하단 모서리 근처에서 오염물질 농도가 높은 영역이 나타난다.

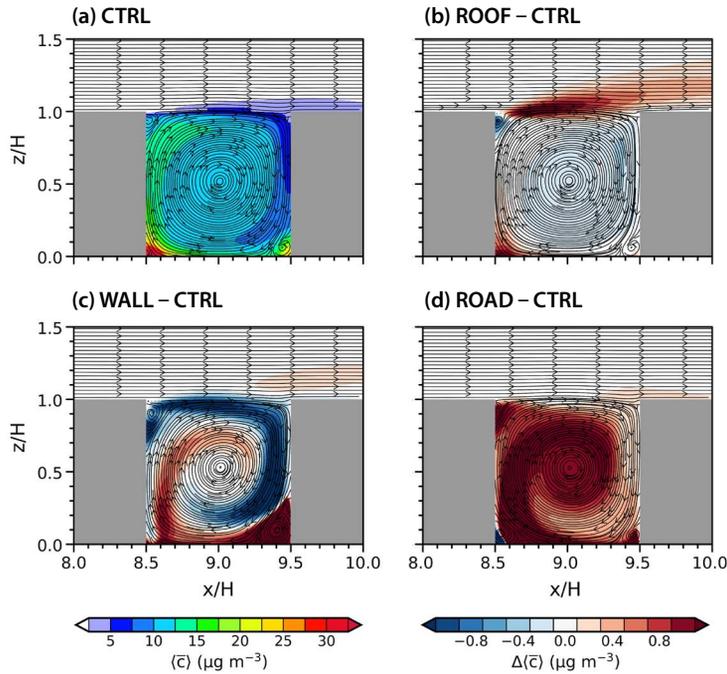


Fig. 2. (a) Temporally and spanwise averaged pollutant concentration field in and above the target canyon in the CTRL simulation. Temporally and spanwise averaged pollutant concentration difference (each minus CTRL) fields in and above the target canyon in the (b) ROOF, (c) WALL, and (d) ROAD simulations. Temporally and spanwise averaged streamlines in each simulation are displayed. In $\langle \bar{c} \rangle$, the overbar denotes the temporal average and the angle bracket denotes the spanwise average.

배출된 오염물질은 큰 소용돌이에 의해 도로면 근처에서 풍상측으로 수송되고, 풍하측 건물 근처의 지붕 고도에서는 외부의 비교적 깨끗한 공기가 유입된다. 이로 인해 오염물질 농도는 풍하측 건물 근처에서보다 풍상측 건물 근처에서 대체로 더 높다. 한편 풍상측 건물의 상단 모서리에 나타난 작은 소용돌이는 외부의 깨끗한 공기를 도로 협곡 내부로 유입시킨다.

그림 2(b), 2(c)와 2(d)는 ROOF, WALL, ROAD 실험 각각에 대해 도로 협곡 내부 및 외부의 CTRL 실험으로부터의 오염물질 농도 차이의 분포를 보여준다. 각 실험에서 시간과 y 방향에 대해 평균한 유선장 또한 제시되어 있다. ROOF 실험에서는 CTRL 실험에서와 달리 시계 방향의 큰 소용돌이가 지붕 고도 바로 위까지 확장되어 있다(그림 2(b)). 지붕 고도 바로 위에서와 그 풍하측에서의 오염물질 농도는 CTRL 실험에서보다 ROOF 실험에서 대체로 더 높으

며, 도로 협곡 내부에서의 오염물질 농도는 ROOF 실험에서 대체로 더 낮다. 이러한 결과는 Kim *et al.* (2024)에서 나타난 바와 일치한다. ROOF 실험에서 도로 협곡 내 평균 풍속은 0.76 m s^{-1} , 평균 오염물질 농도는 $12.4 \mu\text{g m}^{-3}$ 로 CTRL 실험에서보다 각각 6.2, 0.8% 더 낮다. 도로 협곡 내 보행자 고도에서 평균 오염물질 농도는 $14.5 \mu\text{g m}^{-3}$ 로, CTRL 실험 대비 0.7% 더 높다. 이는 풍상측 건물 하단 모서리 근처에서 오염물질 농도가 CTRL 실험에서에 비해 ROOF 실험에서 더 높은 것과 관련이 있다. WALL 실험에서는 CTRL 실험에서보다 도로 협곡 내부의 풍속이 뚜렷하게 더 낮다(그림 S1). 이는 양쪽 건물 벽면의 거칠기 길이 증가에 의해 마찰이 증가하는 것과 관련이 있다. 풍상측 건물 상단 모서리 근처와 풍하측 건물 하단 모서리 근처에 나타난 소용돌이의 크기는 CTRL 실험에서보다 WALL 실험에서 뚜렷하게 더 크

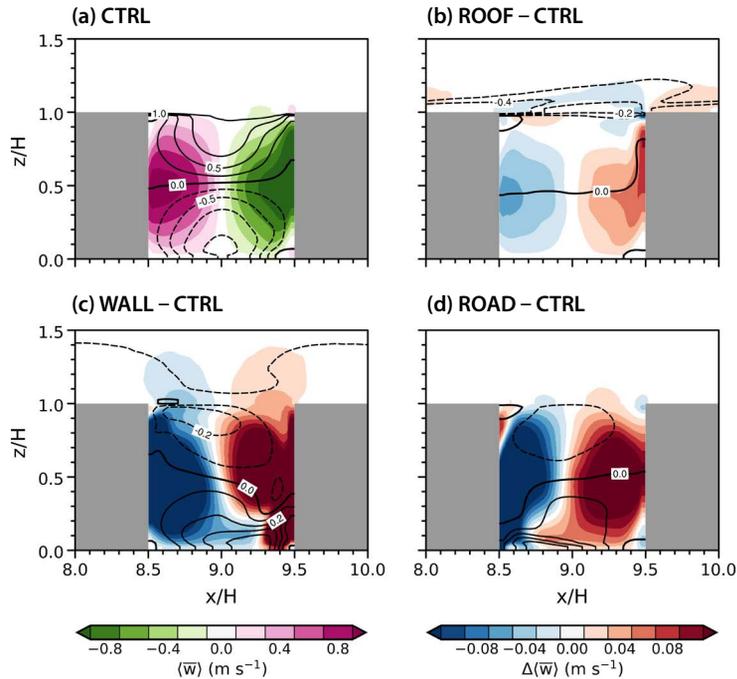


Fig. 3. (a) Temporally and spanwise averaged streamwise (contour) and vertical (shaded) velocity fields in and above the target canyon in the CTRL simulation. Temporally and spanwise averaged streamwise (contour) and vertical (shaded) velocity difference (each minus CTRL) fields in and above the target canyon in the (b) ROOF, (c) WALL, and (d) ROAD simulations. The contour intervals in (a) and (b, c, d) are 0.25 and 0.1 m s^{-1} , respectively.

다(그림 2(c)). WALL 실험에서 오염물질 농도는 CTRL 실험에서보다 도로면 근처와 풍상측 건물 주변에서 대체로 더 높은 반면 지붕 고도 근처와 풍하측 건물 주변에서 대체로 더 낮다. WALL 실험에서 도로 협곡 내 평균 풍속은 0.63 m s^{-1} , 평균 오염물질 농도는 $12.7 \mu\text{g m}^{-3}$ 로 CTRL 실험에서보다 평균 풍속은 22.2% 더 낮고 평균 오염물질 농도는 1.6% 더 높다. 보행자 고도에서의 평균 오염물질 농도는 $16.2 \mu\text{g m}^{-3}$ 로, 이는 CTRL 실험에서보다 12.5% 더 큰 수치이다. ROAD 실험에서는 CTRL 실험에서보다 도로 협곡에서의 풍속이 대체로 더 낮으며, 풍상측 건물 하단 모서리 근처에 나타난 소용돌이의 크기가 뚜렷하게 더 크다(그림 2(d)). 이는 도로 거칠기 길이가 증가에 의한 마찰 증가와 관련이 있다. ROAD 실험에서 오염물질 농도는 CTRL 실험에서보다 도로 협곡 내 대부분의 위치에서 더 높다. ROAD 실험에서 도로 협

곡 내 평균 풍속은 0.68 m s^{-1} , 평균 오염물질 농도는 $13.7 \mu\text{g m}^{-3}$ 로 CTRL 실험에서보다 평균 풍속은 16.0% 더 낮고 평균 오염물질 농도는 9.6% 더 높다. 보행자 고도에서의 평균 오염물질 농도는 $17.0 \mu\text{g m}^{-3}$ 로, CTRL 실험에서보다 18.0% 더 높다.

그림 3(a)는 CTRL 실험에서 시간 및 y 방향에 대해 평균한 도로 협곡 내부 및 외부의 x 방향 속도 및 연직 속도 분포이다. CTRL 실험에서 도로 협곡 내에 나타나는 시계 방향의 큰 소용돌이(그림 2(a))로 인해, 도로 협곡의 상부와 하부에서는 각각 양의 x 방향 속도와 음의 x 방향 속도가 우세하고 풍상측과 풍하측에서는 각각 상승류와 하강류가 우세하다(그림 3(a)). 또한 풍상측 건물 상단 모서리 근처와 풍하측 건물 하단 모서리 근처에서 나타나는 반시계 방향의 작은 소용돌이에 의해 각각 약한 음의 x 방향 속도와 양의 x 방향 속도가 나타난다. 풍하측 건물 상단 모서

리 근처에서 나타나는 상승류는 풍하측 건물 벽면에서 나타나는 흐름 충돌(flow impingement)과 관련이 있다(Liu and Wong, 2014; Li *et al.*, 2010).

그림 3(b), 3(c)와 3(d)는 ROOF, WALL, ROAD 실험 각각에 대해 CTRL 실험으로부터의 x 방향 속도 차이 및 연직 속도 차이의 분포를 보여준다. ROOF 실험에서는 CTRL 실험에서에 비해 도로 협곡 내의 전반적인 흐름이 약화되나 WALL, ROAD 실험에서에 비해 그 변화가 상대적으로 작다(그림 3(b)). 반면 지붕 고도 근처에서는 양의 x 방향 속도가 뚜렷하게 감소하는데, 이는 지붕 거칠기 길이 증가로 인한 마찰 증가로 인해 지붕 고도 근처에서 x 방향 바람이 약화된 것과 관련이 있다. WALL 실험에서는 CTRL 실험에서보다 도로 협곡 내에 나타나는 시계 방향의 큰 소용돌이가 뚜렷하게 더 약하다(그림 3(c)). 풍상측과 풍하측에서 각각 나타나는 상승류와 하강류의 약화는 지붕 고도 이상에서도 나타난다. 도로 협곡 내 수평 흐름의 약화는 도로면 근처에서는 풍하측에서, 지붕 고도 근처에서는 풍상측에서 뚜렷하다. 이는 WALL 실험에서 CTRL 실험에서에 비해 풍하측 건물 하단 모서리와 풍상측 건물 상단 모서리 근처의 소용돌이의 크기가 증가한 것과 관련이 있다(그림 2(c)). ROAD 실험에서도 CTRL 실험에서에 비해 도로 협곡 내의 큰 소용돌이가 약화되나, WALL 실험에서에 비해 그 변화가 상대적으로 더 작다(그림 3(d)). ROAD 실험에서는 도로면 근처에서 수평 흐름 약화가 풍상측에서 뚜렷한데, 이는 ROAD 실험에서 CTRL 실험에서에 비해 풍상측 건물 하단 모서리 근처의 소용돌이의 크기가 증가한 것과 관련이 있다(그림 2(d)).

3.2 오염물질 플럭스

건물 지붕, 건물 벽, 도로의 거칠기 길이를 각각 증가시켰을 때 도로 협곡 내 오염물질 분산 특성의 변화를 보다 상세히 조사하고자 시간 및 y 방향으로 평균 연직 오염물질 플럭스를 연직 평균 오염물질 플럭스와 연직 난류 오염물질 플럭스로 나누어 분석하

였다. 본 연구에서는 난류 성분을 시간 평균으로부터의 편차로 정의하였다(Kim *et al.*, 2024; Kalmár-Nagy and Varga, 2019; Li *et al.*, 2015). 그림 4(a)는 CTRL 실험에서 시간 및 y 방향에 대해 평균한 도로 협곡 내부 및 외부의 연직 평균 오염물질 플럭스 분포를 보여준다. CTRL 실험에서 도로 협곡 내에 나타나는 시계 방향의 큰 소용돌이로 인해 연직 평균 오염물질 플럭스가 풍상측에서는 상향으로, 풍하측에서는 하향으로 나타난다. 플럭스의 최대 크기는 풍상측, 풍하측에서 각각 $z/H=0.43, 0.50$ 에서 나타나며 각각 $15.95, 12.25 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 이다.

그림 4(b), 4(c)와 4(d)는 ROOF, WALL, ROAD 실험 각각에 대해 CTRL 실험으로부터의 연직 평균 오염물질 플럭스 차이의 분포를 보여준다. ROOF 실험에서는 CTRL 실험에서에 비해 도로 협곡 내의 전반적인 흐름이 약화되면서(그림 3(b)) 도로 협곡 내 풍상측 및 풍하측에서 상향 및 하향 연직 평균 오염물질 플럭스의 크기가 대체로 감소한다(그림 4(b)). CTRL 실험 대비 ROOF 실험에서 상향 및 하향 연직 오염물질 플럭스 차이의 최대 크기는 각각 $0.88, 0.96 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 이다. 지붕 고도 근처의 경우 ROOF 실험에서 CTRL 실험에서에 비해 풍상측에서의 상향 연직 평균 오염물질 플럭스의 크기와 풍하측에서의 하향 연직 평균 오염물질 플럭스의 크기 모두 대체로 증가한다. 이는 ROOF 실험에서 건물 지붕의 거칠기 길이가 증가하면서 도로 협곡 내의 큰 소용돌이가 지붕 고도 바로 위까지 확장되는 것과 관련이 있다(그림 2(b)). WALL 실험에서는 CTRL 실험에서에 비해 도로 협곡 내의 전반적인 흐름이 뚜렷하게 약화되면서(그림 3(c)) 풍상측에서의 상향 연직 평균 오염물질 플럭스의 크기와 풍하측에서의 하향 연직 평균 오염물질 플럭스의 크기 모두 뚜렷하게 감소한다(그림 4(c)). CTRL 실험 대비 WALL 실험에서 상향 및 하향 연직 평균 오염물질 플럭스 차이의 최대 크기는 각각 $6.65, 6.96 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 이다. 풍상측 도로면 근처에서 나타나는 음의 연직 평균 오염물질 플럭스 차이는 풍하측에서도 나타나는데, 이는 연직 속도 차이의 분포와

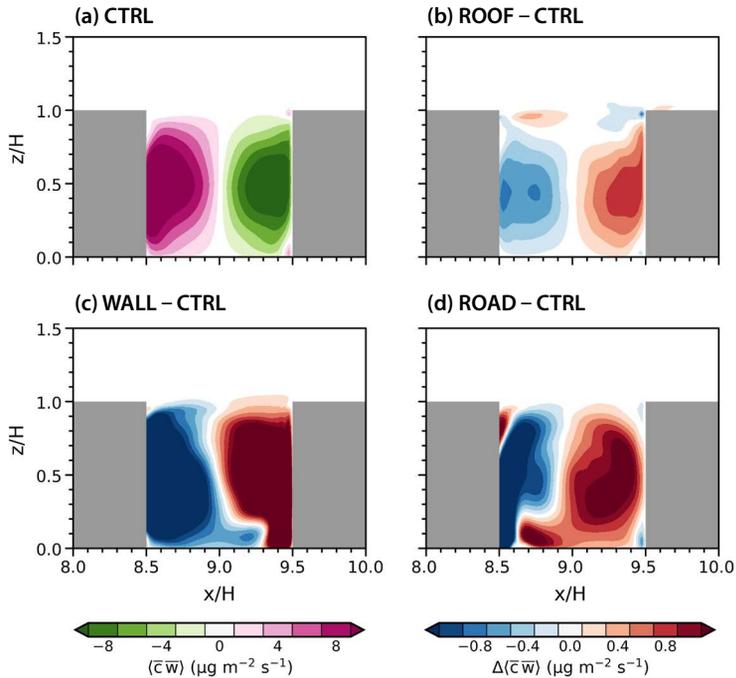


Fig. 4. (a) Temporally and spanwise averaged vertical mean pollutant flux fields in and above the target canyon in the CTRL simulation. Temporally and spanwise averaged vertical mean pollutant flux difference (each minus CTRL) fields in and above the target canyon in the (b) ROOF, (c) WALL, and (d) ROAD simulations.

거의 일치한다(그림 3(c)). ROAD 실험에서도 CTRL 실험에서와 비교 도로 협곡 내의 전반적인 흐름이 약화되면서(그림 3(d)) 풍상측에서의 상향 연직 오염물질 플럭스의 크기와 풍하측에서의 하향 연직 평균 오염물질 플럭스의 크기 모두 감소한다(그림 4(d)). CTRL 실험 대비 ROAD 실험에서 상향 및 하향 연직 오염물질 플럭스 차이의 최대 크기는 각각 1.56, 7.50 $\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 이다. 연직 속도 차이 분포(그림 3(d))에서 나타난 것과 마찬가지로 풍하측 도로면 근처에서 나타나는 양의 연직 평균 오염물질 플럭스 차이는 풍상측에서도 나타난다.

그림 5(a)는 CTRL 실험에서 시간 및 y 방향에 대해 평균한 도로 협곡 내부 및 외부의 연직 난류 오염물질 플럭스 분포를 보여준다. CTRL 실험에서 상향 연직 난류 오염물질 플럭스가 하향 연직 난류 오염물질 플럭스보다 매우 우세하다(그림 5(a)). 상향 연직 난류 오염물질 플럭스는 난류 운동 에너지가 큰 지붕

고도 근처와 풍하측 건물 벽면 근처에서 크며, 이는 Cintolesi *et al.* (2021)과 유사하다. 상향 연직 난류 오염물질 플럭스의 최대값은 $(x/H, z/H) = (9.23, 0.98)$ 에서 $0.93 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 이다. 그림 5(b), 5(c)와 5(d)는 ROOF, WALL, ROAD 실험 각각에 대해 CTRL 실험으로부터의 연직 난류 오염물질 플럭스 차이의 분포를 보여준다. ROOF 실험에서는 CTRL 실험에서와 비교 도로 협곡 내에서 연직 난류 오염물질 플럭스 차이가 대체로 뚜렷하지 않다(그림 5(b)). 반면 지붕 고도 바로 위와 그 풍하측에서는 상향 연직 난류 오염물질 플럭스가 뚜렷하게 증가한다. 이는 ROOF 실험에서 CTRL 실험에서와 비교 건물 지붕의 거칠기 길이가 증가하면서 지붕 고도 이상에서 난류 운동 에너지가 전반적으로 증가하는 것과 관련이 있다(Cintolesi *et al.*, 2021). CTRL 실험에서와 달리 ROOF 실험에서 지붕 고도 바로 위까지 확장된 큰 소용돌이로 인해 지붕 고도 근처에서 오염물질 교환이 증가하는

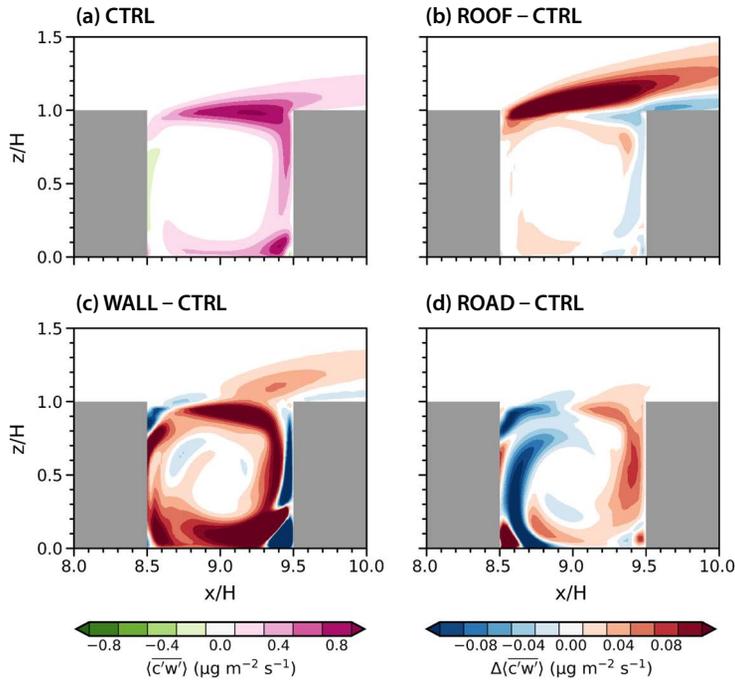


Fig. 5. Same as Fig. 4 except for the vertical turbulent pollutant flux.

것 또한 이와 관련이 있다. CTRL 실험 대비 ROOF 실험에서 상향 연직 난류 오염물질 플럭스 차이의 최대 크기는 $(x/H, z/H) = (8.80, 1.03)$ 에서 $0.26 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 이다. WALL 실험에서는 CTRL 실험 대비 도로 협곡 내에서 대체로 양의 연직 난류 오염물질 플럭스 차이가 뚜렷하다(그림 5(c)). 이는 WALL 실험에서 CTRL 실험에서에 비해 건물 벽면의 거칠기 길이가 증가하면서 오염물질 농도 편차의 크기가 도로 협곡 내에서 전반적으로 증가하기 때문이다. CTRL 실험 대비 WALL 실험에서 연직 난류 오염물질 플럭스 차이의 최대 크기는 $(x/H, z/H) = (9.35, 0.15)$ 에서 $0.82 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 이다. 한편 ROAD 실험에서는 CTRL 실험에서에 비해 풍상측에서는 음의 연직 난류 오염물질 플럭스 차이가, 풍하측에서는 양의 연직 난류 오염물질 플럭스 차이가 나타난다(그림 5(d)). CTRL 실험 대비 ROAD 실험에서 연직 난류 오염물질 플럭스 차이의 최대 크기는 풍상측에서 $0.38 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 풍하측에서 $0.33 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 이다.

풍상측 건물 벽면의 거칠기 길이 증가와 풍하측 건물 벽면의 거칠기 길이 증가가 도로 협곡 내 오염물질 분산에 미치는 영향이 서로 다를 수 있다(Sin *et al.*, 2024; Zheng *et al.*, 2022; Karkoulias *et al.*, 2020). 풍상측 및 풍하측 건물 벽면의 거칠기 길이 증가가 각각 오염물질 분산에 미치는 영향을 상세히 이해하고자 풍상측 건물 벽면의 거칠기 길이만을 증가시킨 실험(U-WALL)과 풍하측 건물 벽면의 거칠기 길이만을 증가시킨 실험(D-WALL)을 추가적으로 수행하였다. 그림 6은 U-WALL 실험과 D-WALL 실험 각각에 대해 CTRL 실험으로부터의 오염물질 농도 차이, 연직 평균 오염물질 플럭스 차이, 연직 난류 오염물질 플럭스 차이의 분포를 보여준다. U-WALL 실험과 D-WALL 실험에서 시간과 y 방향에 대해 평균한 유선장 또한 그림 6(a)와 6(b)에 각각 제시되어 있다. WALL 실험에서와 유사하게 U-WALL 실험에서와 D-WALL 실험에서 모두 CTRL 실험에서에 비해 도로 협곡 내의 전반적인 흐름이 약화되나 그 정도가

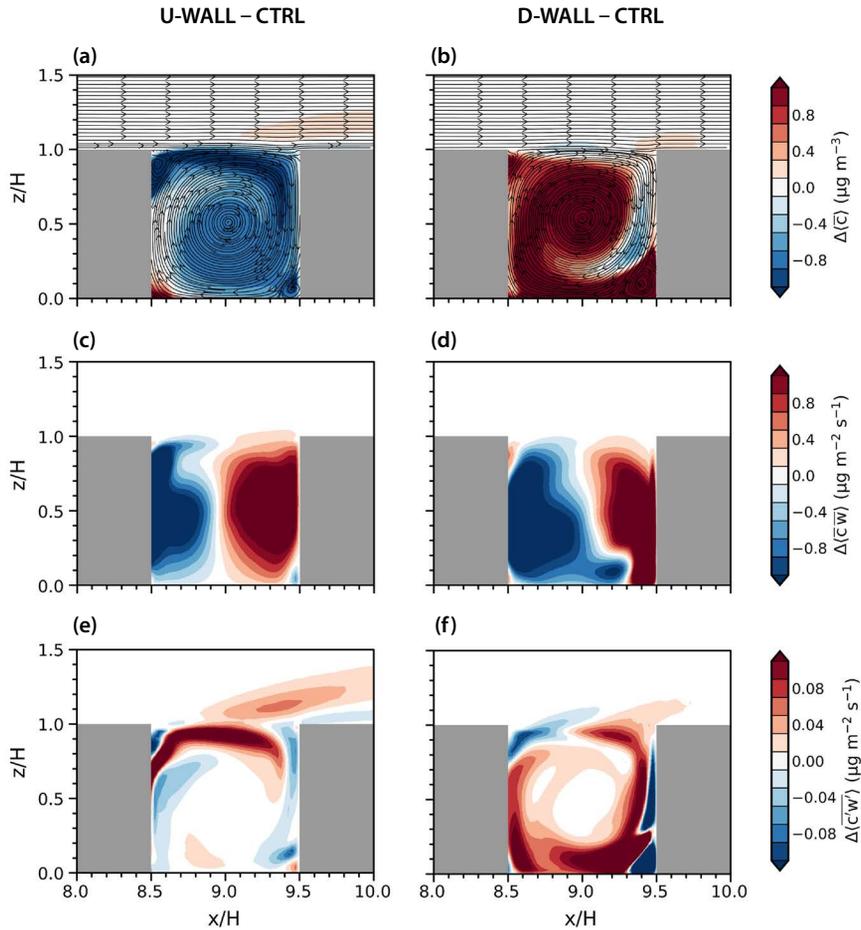


Fig. 6. Temporally and spanwise averaged (a, b) pollutant concentration difference (each minus CTRL) fields, (c, d) vertical mean pollutant flux difference fields, and (e, f) vertical turbulent pollutant flux difference fields in and above the target canyon in the (a, c, e) U-WALL and (b, d, f) D-WALL simulations.

WALL 실험에서에 비해 상대적으로 작다(그림 6(a)와 6(b)). CTRL 실험에서에 비해 U-WALL 실험에서는 풍상측 건물의 상단 모서리 근처에 나타난 소용돌이의 크기가 증가하고(그림 6(a)), D-WALL 실험에서는 풍하측 건물의 하단 모서리 근처에 나타난 소용돌이의 크기가 증가한다(그림 6(b)). U-WALL 실험에서는 CTRL 실험에서에 비해 도로 협곡 내 오염물질 농도가 전반적으로 감소한 반면, D-WALL 실험에서는 도로 협곡 내 오염물질 농도가 전반적으로 증가한다. 이는 풍상측과 풍하측 건물 벽면의 거칠기 길이 증가가 도로 협곡 내 오염물질 농도에 미치는 영향이

상반됨을 보여준다. U-WALL 실험에서 도로 협곡 내 평균 풍속은 0.74 m s^{-1} , 평균 오염물질 농도는 $11.8 \mu\text{g m}^{-3}$ 이고, D-WALL 실험에서 도로 협곡 내 평균 풍속은 0.65 m s^{-1} , 평균 오염물질 농도는 $13.7 \mu\text{g m}^{-3}$ 이다. 도로 협곡 내 보행자 고도에서의 평균 오염물질 농도는 U-WALL 실험에서와 D-WALL 실험에서 각각 $14.0, 17.1 \mu\text{g m}^{-3}$ 이다.

U-WALL 실험에서와 D-WALL 실험에서 모두 CTRL 실험에서에 비해 도로 협곡 내의 전반적인 흐름이 약화되면서 도로 협곡 내 풍상측 및 풍하측에서 상향 및 하향 연직 평균 오염물질 플럭스의 크기가

감소하나 WALL 실험에서에 비해 그 변화가 상대적으로 작다(그림 6(c)와 6(d)). CTRL 실험 대비 상향 및 하향 연직 평균 오염물질 플럭스 차이의 최대 크기는 U-WALL 실험에서는 각각 $6.94, 2.84 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 이고, D-WALL 실험에서는 각각 $1.95, 7.04 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 이다. CTRL 실험 대비 연직 평균 오염물질 플럭스 차이의 최대 크기는 U-WALL 실험에서는 풍상측 건물 근처, D-WALL 실험에서는 풍하측 건물 근처에서 뚜렷하게 증가한다. 이는 U-WALL 실험에서는 풍상측 건물 벽면의 마찰 증가로 인해 풍상측 건물 근처에서 연직 속도의 크기가 감소하고, D-WALL 실험에서는 풍하측 건물 벽면의 마찰 증가로 인해 풍하측 건물 근처에서 연직 속도의 크기가 감소하기 때문이다. U-WALL 실험에서와 달리 D-WALL 실험에서는 풍상측 도로면 근처에서 나타나는 음의 연직 평균 오염물질 플럭스 차이가 풍하측에서도 나타난다. 이는 CTRL 실험 대비 WALL 실험에서 도로면 근처에서의 연직 평균 오염물질 플럭스 차이(그림 4(c))가 풍하측 건물 벽면의 거칠기 길이 증가와 관련이 있음을 시사한다. U-WALL 실험에서는 CTRL 실험에서에 비해 양의 연직 난류 오염물질 플럭스 차이가 지붕 고도 근처에서 뚜렷하고(그림 6(e)), D-WALL 실험에서는 도로면 근처와 건물 벽면 근처에서 뚜렷하다(그림 6(f)). 이는 WALL 실험에서 지붕 고도 근처에서 나타나는 양의 연직 난류 오염물질 플럭스 차이(그림 5(c))는 풍상측 건물 벽면의 거칠기 길이 증가와, 도로면 근처와 건물 벽면 근처에 나타나는 양의 연직 난류 오염물질 플럭스 차이(그림 5(c))는 풍하측 건물 벽면의 거칠기 길이 증가와 관련이 있음을 시사한다. CTRL 실험 대비 U-WALL 실험에서 양의 연직 난류 오염물질 플럭스 차이의 최대 크기는 $(x/H, z/H) = (8.58, 0.75)$ 에서 $0.30 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 이고, D-WALL 실험에서 양의 연직 난류 오염물질 플럭스 차이의 최대 크기는 $(x/H, z/H) = (9.35, 0.15)$ 에서 $0.88 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 이다. 추가적으로 인자 분리 방법(Stein and Alpert, 1993)을 이용하여 풍상측 벽면의 거칠기 길이 증가와 풍하측 벽면의 거칠기 길이 증가의 상호작용에

의한 효과를 조사하였다. 분석 결과, 상호작용에 의한 효과는 개별적인 효과에 비해 상대적으로 작은 것으로 나타났다.

건물 지붕, 건물 벽, 도로의 거칠기 길이 증가가 지붕 고도에서 난류에 의한 오염물질 분산에 미치는 영향을 상세히 조사하고자 CTRL, ROOF, WALL, ROAD 실험 각각에 대해 지붕 고도에서 오염물질 농도 편차와 연직 속도 편차의 결합확률밀도함수에 대한 사분면 분석(quadrant analysis)을 수행하였다. 분석에는 오염물질이 직접 배출되는 도로 협곡의 지붕 고도($8.5 \leq x/H \leq 9.5, 0 \leq y/H \leq 4, z/H = 1$) 자료를 사용하였다. Kim *et al.* (2024)을 따라 오염물질 농도 편차와 연직 속도 편차를 각각 $0.6 \mu\text{g m}^{-3}, 0.06 \text{ m s}^{-1}$ 간격의 50개의 구간으로 나누어 결합확률밀도함수를 계산하였다. 그림 7은 CTRL, ROOF, WALL, ROAD 실험 각각에 대해 지붕 고도에서 오염물질 농도 편차(c)와 연직 속도 편차(w)의 결합확률밀도함수 분포를 보여준다. 제1사분면은 오염물질 분출(ejection), 제2사분면은 오염물질 외향 상호작용(outward interaction), 제3사분면은 오염물질 쓸기(sweep), 제4사분면은 오염물질 내향 상호작용(inward interaction)으로 분류된다(Kim *et al.*, 2024; Li *et al.*, 2016). CTRL 실험에서 오염물질 분출, 쓸기의 빈도(36.8, 38.3%)는 오염물질 외향 상호작용, 내향 상호작용의 빈도(14.1, 10.7%)보다 뚜렷하게 높으며(그림 7(a)), 이는 선행 연구의 결과와도 일치한다(Kim *et al.*, 2024; Cheng and Liu, 2011).

ROOF 실험에서는 CTRL 실험에서에 비해 오염물질 분출의 빈도(38.2%)가 증가한 반면 오염물질 쓸기의 빈도(36.3%)는 감소한다(그림 7(b)). 이는 ROOF 실험에서 CTRL 실험에서에 비해 난류에 의한 오염물질 유출은 더 빈번해지고 상대적으로 깨끗한 공기의 유입은 덜 발생함을 의미한다. ROOF 실험에서 지붕 고도 바로 위까지 확장된 큰 소용돌이(그림 2(b))가 지붕 고도 근처로의 오염물질 수송을 증가시키고, 이로 인한 지붕 고도에서 난류에 의한 오염물질 유출 증가가 오염물질 분출의 빈도 증가와 관련이

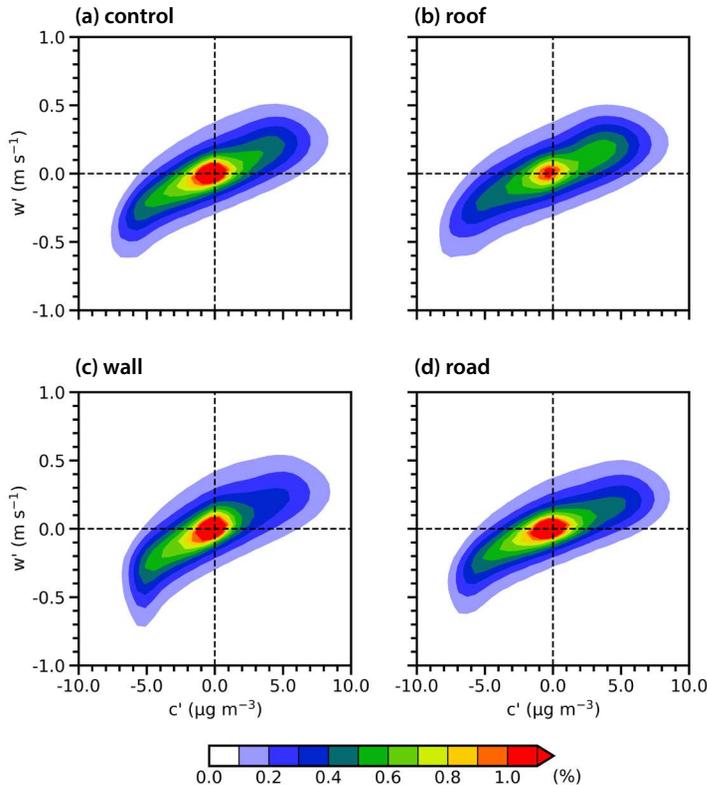


Fig. 7. Fields of the joint probability density function of c' and w' in $8.5 \leq x/H \leq 9.5$ at the roof level in the (a) CTRL, (b) ROOF, (c) WALL, and (d) ROAD simulations.

있다. WALL 실험에서는 CTRL 실험에서에 비해 오염물질 분출의 빈도(35.9%)는 감소한 반면 오염물질 쓸기의 빈도(39.9%)는 증가한다(그림 7(c)). 이는 ROOF 실험에서와는 반대로 WALL 실험에서는 CTRL 실험에서에 비해 난류에 의한 오염물질 유출은 덜 발생하고 상대적으로 깨끗한 공기의 유입은 더 빈번해짐을 의미한다. CTRL 실험 대비 WALL 실험에서 지붕 고도 근처에서의 오염물질 농도가 감소(그림 2(c))하면서 지붕 고도에서 난류에 의한 오염물질 유출이 감소할 수 있다. ROAD 실험에서는 CTRL 실험에서에 비해 각 사분면의 빈도의 변화가 뚜렷하지 않다(그림 7(d)). CTRL 실험에서에 비해 ROAD 실험에서는 풍상측 지붕 고도에서 상향 연직 난류 오염물질 플럭스가 감소, 풍하측 지붕 고도에서 상향 연직 난류 오염물질 플럭스가 비슷한 크기로 증

가(그림 5(d))하면서 각 사분면의 빈도가 크게 변화하지 않은 것으로 보인다.

표면 거칠기 길이 증가가 지붕 고도에서의 난류에 의한 오염물질 분산에 미치는 영향은 도로 협곡의 풍상측, 중심부, 풍하측에서 크게 다를 수 있다. 각 실험에서 나타난 지붕 고도에서의 난류에 의한 오염물질 분산 특성을 더 잘 이해하기 위하여 CTRL, ROOF, WALL, ROAD 실험에 대해 지붕 고도에서 풍상측 건물 벽면 근처($8.5 \leq x/H \leq 8.7$), 도로 협곡 중심부($8.9 \leq x/H \leq 9.1$), 풍하측 건물 벽면 근처($9.3 \leq x/H \leq 9.5$) 각각에 대한 추가적인 사분면 분석을 수행하였다(그림 8). CTRL 실험의 경우, 풍상측 건물 벽면 근처에서는 오염물질 분출, 쓸기의 빈도(29.4, 36.5%)가 오염물질 내향 상호작용, 외향 상호작용의 빈도(20.0, 14.1%)보다 크고 c' 과 w' 이 원점 주위에 좁

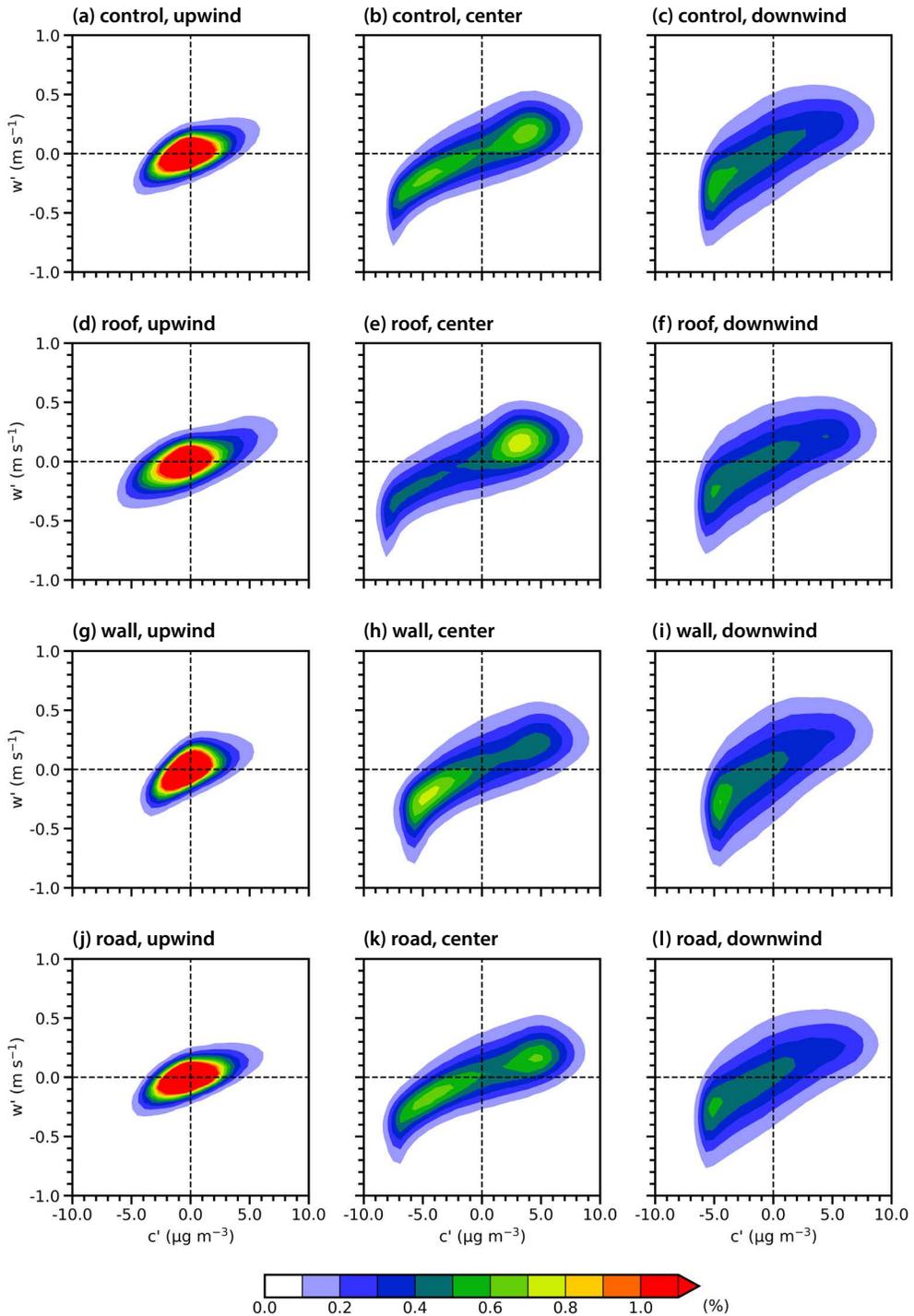


Fig. 8. Fields of the joint probability density function of c' and w' in (a, d, g, j) the upwind ($8.5 \leq x/H \leq 8.7$), (b, e, h, k) central ($8.9 \leq x/H \leq 9.1$), and (c, f, i, l) downwind ($9.3 \leq x/H \leq 9.5$) parts at the roof level in the (a, b, c) CTRL, (d, e, f) ROOF, (g, h, i) WALL, and (j, k, l) ROAD simulations.

게 분포해 있다(그림 8(a)). 한편 도로 협곡 중심부에서는 오염물질 분출, 쓸기의 빈도(40.7, 37.9%)와 오염물질 내향 상호작용, 외향 상호작용의 빈도(11.1, 10.3%) 간의 차이가 풍상측 건물 벽면 근처에 비해 두드러진다(그림 8(b)). 또한 풍상측 건물 벽면 근처에서보다 c' 와 w' 이 더 넓게 분포해있으며 최대 빈도(0.67%)는 제1사분면에서 나타난다. 풍하측 건물 벽면 근처에서는 도로 협곡 중심부에서와 유사하게 오염물질 분출, 쓸기의 빈도(36.5, 38.1%)가 오염물질 내향 상호작용, 외향 상호작용의 빈도(15.3, 10.2%)보다 뚜렷하게 높고 c' 와 w' 이 넓게 분포해있으나 제3사분면에서 최대 빈도(0.59%)가 나타난다(그림 8(c)). 풍하측 벽면 근처에서 오염물질 쓸기의 빈도가 높은 것은 큰 소용돌이를 따라 깨끗한 공기의 유입이 일어나기 때문이다(Li *et al.*, 2016).

ROOF, WALL, ROAD 실험의 경우, 풍상측 벽면 근처에서는 대체로 오염물질 분출과 쓸기의 빈도가 증가하고 오염물질 내향 상호작용과 외향 상호작용의 빈도가 감소하지만 각 사분면의 상대적인 중요도는 CTRL 실험 대비 거의 변화하지 않는다(그림 8(d), 8(g)와 8(j)). 한편 도로 협곡 중심부에서는 CTRL 실험 대비 ROOF, WALL, ROAD 실험에서 나타나는 c' 와 w' 의 결합확률밀도함수 분포의 변화가 상이하다(그림 8(e), 8(h)와 8(k)). ROOF 실험의 경우, CTRL 실험에서에 비해 오염물질 분출의 빈도(42.6%)는 증가하는 반면 오염물질 쓸기의 빈도(34.7%)는 감소한다(그림 8(e)). 이는 ROOF 실험에서 나타난 오염물질 분출의 빈도 증가와 오염물질 쓸기의 빈도 감소(그림 7(b))가 도로 협곡 중심부에서 주로 나타남을 의미한다. ROOF 실험에서 최대 빈도(0.78%)는 CTRL 실험에서와 마찬가지로 제1사분면에 나타난다. WALL 실험의 경우, CTRL 실험에서에 비해 오염물질 분출의 빈도(38.7%)가 감소하고 오염물질 쓸기의 빈도(40.7%)가 증가한다. 이는 WALL 실험에서 나타난 오염물질 분출의 빈도 감소와 오염물질 쓸기의 빈도 증가(그림 7(c)) 역시 도로 협곡 중심부에서 주로 나타남을 의미한다. WALL 실험에서 최대 빈도

(0.75%)는 CTRL 실험에서와 달리 제3사분면에 나타난다. ROAD 실험의 경우, 도로 협곡 중심부에서 CTRL 실험 대비 각 사분면의 빈도 변화가 뚜렷하지 않으나 최대 빈도(0.66%)는 CTRL 실험에서와 달리 제3사분면에 나타난다(그림 8(k)). 풍하측 건물 벽면 근처에서는 ROOF, ROAD, WALL 실험에서 모두 CTRL 실험 대비 오염물질 분출의 빈도는 감소하고 오염물질 외향 상호작용의 빈도는 증가한다(그림 8(f), 8(i)와 8(l)). ROOF 실험의 경우 CTRL 실험 대비 오염물질 쓸기의 빈도는 감소하고 오염물질 내향 상호작용의 빈도는 증가하며(그림 8(f)), WALL 실험의 경우 오염물질 쓸기의 빈도는 증가하고 오염물질 내향 상호작용의 빈도는 감소한다(그림 8(i)). ROAD 실험의 경우 CTRL 실험 대비 오염물질 쓸기와 오염물질 내향 상호작용의 빈도가 거의 변화하지 않는다(그림 8(l)). 풍상측 건물 벽면 근처에서와 유사하게 풍하측 건물 벽면 근처에서도 ROOF, WALL, ROAD 실험에서 각 사분면의 상대적인 중요도는 CTRL 실험 대비 거의 변화하지 않는다.

거칠기 길이 변화에 따른 도로 협곡 내 평균 흐름의 변화는 WALL 실험에서, 도로 협곡 내 및 보행자 고도에서의 평균 오염물질 농도 변화는 ROAD 실험에서 가장 뚜렷하다. 거칠기 길이 변화에 따른 도로 협곡 내 연직 오염물질 플럭스의 변화는 WALL 실험에서 가장 뚜렷하고, 지붕 고도에서 난류 사건 빈도의 변화는 ROOF 실험과 WALL 실험에서 뚜렷하다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 큰 에디 모의 모형인 PALM을 이용해 건물 지붕, 건물 벽, 도로 각각의 거칠기 길이 증가가 도로 협곡 내 흐름 및 오염물질 분산에 미치는 영향을 조사하였다. 건물 지붕, 건물 벽, 도로 각각의 거칠기 길이 증가는 모두 도로 협곡 내의 흐름을 약화시켰으며, 건물 지붕의 거칠기 길이를 증가시킨 실험(ROOF)에서 도로 협곡 내 평균 오염물질 농도는 규

준 실험 대비 $0.1 \mu\text{g m}^{-3}$ (0.8%) 감소하였고, 건물 벽, 도로의 거칠기 길이를 각각 증가시킨 실험 (WALL, ROAD)에서 도로 협곡 내 평균 오염물질 농도는 기준 실험 대비 각각 $0.2, 1.2 \mu\text{g m}^{-3}$ (1.6, 9.6%) 증가하였다. 도로 협곡 내 보행자 고도에서의 평균 오염물질 농도의 경우 기준 실험 대비 ROOF, WALL, ROAD 실험에서 각각 $0.1, 1.8, 2.6 \mu\text{g m}^{-3}$ (0.7, 12.5, 18.0%) 증가하였다. ROOF, WALL, ROAD 실험에서 모두 도로 협곡 내의 연직 평균 오염물질 플럭스의 크기는 기준 실험 대비 감소하였고, 이는 도로 협곡 내의 평균 흐름 약화 때문이다. ROOF 실험에서는 상향 연직 난류 오염물질 플럭스가 지붕 고도 근처에서 기준 실험 대비 최대 $0.26 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 증가하였고, WALL 실험에서는 상향 연직 난류 오염물질 플럭스가 도로 협곡 내에서 기준 실험 대비 최대 $0.82 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 증가하였다. ROAD 실험에서는 기준 실험 대비 풍상측에서 음의 연직 난류 오염물질 플럭스 차이가, 풍하측에서 양의 연직 난류 오염물질 플럭스 차이가 나타났다. ROOF 실험의 경우 지붕 고도에서 오염물질 분출, 쓸기의 빈도가 기준 실험 대비 각각 증가, 감소하였고, WALL 실험의 경우 지붕 고도에서 오염물질 분출, 쓸기의 빈도가 기준 실험 대비 각각 감소, 증가하였다. 이러한 변화는 건물 벽면 근처에서보다 도로 협곡 중심부에서 뚜렷하였다. ROAD 실험의 경우 지붕 고도에서 오염물질 분출, 외향 상호작용, 쓸기, 내향 상호작용의 상대적인 중요도가 기준 실험 대비 거의 변화하지 않았다.

본 연구는 건물 지붕, 건물 벽, 도로 각각의 거칠기 길이가 증가할 때 나타나는 도로 협곡 내 흐름 및 오염물질 분산의 변화가 서로 어떻게 다른지 상세히 비교하였다. 본 연구의 결과는 지붕 녹화, 태양광 패널 설치, 에어컨 실외기 설치, 도로 조경화 등으로 인한 건물 지붕, 건물 벽, 또는 도로의 거칠기 길이 증가가 오염물질 분산 및 대기질에 미치는 영향을 이해하는데 활용될 수 있다. 표면 거칠기 길이 증가가 오염물질 분산에 미치는 효과는 도로 협곡의 외관비, 건물 및 도로 표면의 복사 가열 등에 따라 달라질 수 있다.

향후 연구에서는 이러한 요소들을 포함하여 실제 도시 지역에서 표면 거칠기 길이 증가가 오염물질 분산에 어떠한 영향을 미치는지에 대해 상세한 조사가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다 (2021R1A2C1007044). 본 연구를 위해 좋은 의견을 제시해 주신 심사위원 두 분께 감사드립니다.

References

- Baik, J.-J., Kim, J.-J. (1999) A numerical study of flow and pollutant dispersion characteristics in urban street canyons, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 38(11), 1576-1589. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1999\)038%3C1576:ANSOFA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1999)038%3C1576:ANSOFA%3E2.0.CO;2)
- Chen, G., Yang, X., Yang, H., Hang, J., Lin, Y., Wang, X., Wang, Q., Liu, Y. (2020) The influence of aspect ratios and solar heating on flow and ventilation in 2D street canyons by scaled outdoor experiments, *Building and Environment*, 185, 107159. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107159>
- Cheng, W.C., Liu, C.-H. (2011) Large-eddy simulation of flow and pollutant transports in and above two-dimensional idealized street canyons, *Boundary-Layer Meteorology*, 139, 411-437. <https://doi.org/10.1007/s10546-010-9584-y>
- Cintolesi, C., Pulvirenti, B., Di Sabatino, S. (2021) Large-eddy simulations of pollutant removal enhancement from urban canyons, *Boundary-Layer Meteorology*, 180, 79-104. <https://doi.org/10.1007/s10546-021-00610-8>
- Cui, D., Li, X., Liu, J., Yuan, L., Mak, C.M., Fan, Y., Kwok, K. (2021) Effects of building layouts and envelope features on wind flow and pollutant exposure in height-asymmetric street canyons, *Building and Environment*, 205, 108177. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108177>
- Cui, D., Liang, G., Hang, J., Li, X., Mak, C.M. (2024) Effects of

- envelope features on pollutant exposure in 2D street canyons, *Building and Environment*, 252, 111215. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111215>
- Deardorff, J.W. (1980) Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three-dimensional model, *Boundary-Layer Meteorology*, 18, 495-527. <https://doi.org/10.1007/BF00119502>
- Di Bernardino, A., Monti, P., Leuzzi, G., Querzoli, G. (2018) Pollutant fluxes in two-dimensional street canyons, *Urban Climate*, 24, 80-93. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.02.002>
- Duan, G., Jackson, J.G., Ngan, K. (2019) Scalar mixing in an urban canyon, *Environmental Fluid Mechanics*, 19(4), 911-939. <https://doi.org/10.1007/s10652-019-09690-0>
- Gerdes, F., Olivari, D. (1999) Analysis of pollutant dispersion in an urban street canyon, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 82(1-3), 105-124. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(98\)00216-5](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(98)00216-5)
- Gromke, C., Ruck, B. (2012) Pollutant concentrations in street canyons of different aspect ratio with avenues of trees for various wind directions, *Boundary-Layer Meteorology*, 144, 41-64. <https://doi.org/10.1007/s10546-012-9703-z>
- Gronemeier, T., Surm, K., Harms, F., Leiti, B., Maronga, B., Raasch, S. (2021) Evaluation of the dynamic core of the PALM model system 6.0 in a neutrally stratified urban environment: comparison between LES and wind-tunnel experiments, *Geoscientific Model Development*, 14(6), 3317-3333. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-3317-2021>
- Han, B.-S., Baik, J.-J., Kwak, K.-H., Park, S.-B. (2018) Large-eddy simulation of reactive pollutant exchange at the top of a street canyon, *Atmospheric Environment*, 187, 381-389. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.06.012>
- Huang, H., Akutsu, Y., Arai, M., Tamura, M. (2000) A two-dimensional air quality model in an urban street canyon: evaluation and sensitivity analysis, *Atmospheric Environment*, 34(5), 689-698. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00333-7](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00333-7)
- Huang, Y.-D., Hou, R.-W., Liu, Z.-Y., Song, Y., Cui, P.-Y., Kim, C.-N. (2019) Effects of wind direction on the airflow and pollutant dispersion inside a long street canyon, *Aerosol and Air Quality Research*, 19(5), 1152-1171. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.09.0344>
- Jon, K.S., Huang, Y.-d., Sin, C.H., Cui, P.-y., Luo, Y. (2023) Influence of wind direction on the ventilation and pollutant dispersion in different 3D street canyon configurations: numerical simulation and wind-tunnel experiment, *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 31647-31675. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24212-0>
- Kalmár-Nagy, T., Varga, Á. (2019) Complexity analysis of turbulent flow around a street canyon, *Chaos, Solitons and Fractals*, 119, 102-117. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2018.12.010>
- Kanda, M. (2006) Large-eddy simulations on the effects of surface geometry of building arrays on turbulent organized structures, *Boundary-Layer Meteorology*, 118, 151-168. <https://doi.org/10.1007/s10546-005-5294-2>
- Kanda, M., Moriawaki, R., Kasamatsu, F. (2004) Large-eddy simulation of turbulent organized structures within and above explicitly resolved cube arrays, *Boundary-Layer Meteorology*, 112, 343-368. <https://doi.org/10.1023/B:BOUN.0000027909.40439.7c>
- Karkoulas, V.A., Marazioti, P.E., Georgiou, D.P., Maraziotis, E.A. (2020) Computational fluid dynamics modeling of the trace elements dispersion and comparison with measurements in a street canyon with balconies in the city of Patras, Greece, *Atmospheric Environment*, 223, 117210. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117210>
- Kim, D.-H., Han, B.-S., Hong, S.-H., Park, K., Baik, J.-J. (2024) Large-eddy simulations of the entrainment and detrainment of pollutants at the roof level of two-dimensional urban street canyons, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 40(5), 514-527, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2024.40.5.514>
- Kim, J.-J., Baik, J.-J. (1999) A numerical study of thermal effects on flow and pollutant dispersion in urban street canyons, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 38(9), 1249-1261. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1999\)038%3C1249:ANSOTE%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1999)038%3C1249:ANSOTE%3E2.0.CO;2)
- Kim, J.-W., Baik, J.-J., Park, S.-B., Han, B.-S. (2023) Impacts of building-height variability on turbulent coherent structures and pollutant dispersion: large-eddy simulation, *Atmospheric Pollution Research*, 14(5), 101736. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.101736>
- Kirkil, G., Lin, C.-L. (2020) Large eddy simulation of wind flow over a realistic urban area, *Computation*, 8(2), 47. <https://doi.org/10.3390/computation8020047>
- Li, X.-X., Britter, R.E., Koh, T.Y., Norford, L.K., Liu, C.-H., Entekhabi, D., Leung, D.Y.C. (2010) Large-eddy simulation of flow and pollutant transport in urban street can-

- yons with ground heating, *Boundary-Layer Meteorology*, 137, 187-204. <https://doi.org/10.1007/s10546-010-9534-8>
- Li, X.-X., Britter, R.E., Norford, L.K. (2015) Transport processes in and above two-dimensional urban street canyons under different stratification conditions: results from numerical simulation, *Environmental Fluid Mechanics*, 15(2), 399-417. <https://doi.org/10.1007/s10652-014-9347-2>
- Li, X.-X., Britter, R., Norford, L.K. (2016) Effect of stable stratification on dispersion within urban street canyons: a large-eddy simulation, *Atmospheric Environment*, 144, 47-59. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.08.069>
- Liu, C.-H., Leung, D.Y.C., Barth, M.C. (2005) On the prediction of air and pollutant exchange rates in street canyons of different aspect ratios using large-eddy simulation, *Atmospheric Environment*, 39(9), 1567-1574. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.08.036>
- Liu, C.-H., Wong, C.C.C. (2014) On the pollutant removal, dispersion, and entrainment over two-dimensional idealized street canyons, *Atmospheric Research*, 135-136, 128-142. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.08.006>
- Lo, K.W., Ngan, K. (2015) Characterising the pollutant ventilation characteristics of street canyons using the tracer age and age spectrum, *Atmospheric Environment*, 122, 611-621. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.10.023>
- Maronga, B., Banzhaf, S., Burmeister, C., Esch, T., Forkel, R., Fröhlich, D., Fuka, V., Gehrke, K.F., Geletič, J., Giersch, S., Gronemeier, T., Groß, G., Heldens, W., Hellsten, A., Hoffmann, F., Inagaki, A., Kadasch, E., Kanani-Sühring, F., Ketelsen, K., Khan, B.A., Knigge, C., Knoop, H., Krč, P., Kurppa, M., Maamari, H., Matzarakis, A., Mauder, M., Pallasch, M., Pavlik, D., Pfafferoth, J., Resler, J., Rissmann, S., Russo, E., Salim, M., Schrempf, M., Schwenkel, J., Seckmeyer, G., Schubert, S., Sühring, M., von Tils, R., Vollmer, L., Ward, S., Witha, B., Wurps, H., Zeidler, J., Raasch, S. (2020) Overview of the PALM model system 6.0, *Geoscientific Model Development*, 13(3), 1335-1372. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-1335-2020>
- Michioka, T., Sato, A., Takimoto, H., Kanda, M. (2011) Large-eddy simulation for the mechanism of pollutant removal from a two-dimensional street canyon, *Boundary-Layer Meteorology*, 138, 195-213. <https://doi.org/10.1007/s10546-010-9556-2>
- Moayedi, S.H., Hassanzadeh, S. (2022) An LES study of aerodynamic effect of trees on traffic pollutant dispersion in an ideal street canyon, *The European Physical Journal Plus*, 137, 797. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-022-03004-y>
- Moeng, C.-H., Wyngaard, J.C. (1988) Spectral analysis of large-eddy simulations of the convective boundary layer, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 45(23), 3573-3587. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1988\)045%3C3573:SAOLES%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1988)045%3C3573:SAOLES%3E2.0.CO;2)
- Nakamura, Y., Oke, T.R. (1988) Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon, *Atmospheric Environment*, 22(12), 2691-2700. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(88\)90437-4](https://doi.org/10.1016/0004-6981(88)90437-4)
- Niroobakhsh, A., Hassanzadeh, S., Hoseinibalam, F. (2021) Flow and pollution concentration large-eddy simulation and transition conditions for different street canyons and wind speeds: environmental pollution reduction approach, *Urban Climate*, 35, 100731. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100731>
- O'Neill, J.J., Cai, X.-M., Kinnersley, R. (2016) Stochastic backscatter modelling for the prediction of pollutant removal from an urban street canyon: a large-eddy simulation, *Atmospheric Environment*, 142, 9-18. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.07.024>
- Park, S.-B., Baik, J.-J., Han, B.-S. (2022) Coherent flow structures and pollutant dispersion in a street canyon, *Boundary-Layer Meteorology*, 182, 363-378. <https://doi.org/10.1007/s10546-021-00669-3>
- Park, S.-B., Baik, J.-J., Raasch, S., Letzel, M.O. (2012) A large-eddy simulation study of thermal effects on turbulent flow and dispersion in and above a street canyon, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(5), 829-841. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0180.1>
- Resler, J., Eben, K., Geletič, J., Krč, P., Rosecký, M., Sühring, M., Belda, M., Fuka, V., Halenka, T., Huszár, P., Karlický, J., Benešová, N., Ďoubalová, J., Honzáková, K., Keder, J., Nápravníková, Š., Vlček, O. (2021) Validation of the PALM model system 6.0 in a real urban environment: a case study in Dejvice, Prague, the Czech Republic, *Geoscientific Model Development*, 14(8), 4797-4842. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-4797-2021>
- Saiki, E.M., Moeng, C.-H., Sullivan, P.P. (2000) Large-eddy simulation of the stably stratified planetary boundary layer, *Boundary-Layer Meteorology*, 95, 1-30. <https://doi.org/10.1023/A:1002428223156>
- Salizzoni, P., Soulhac, L., Mejean, P., Perkins, R.J. (2008) Influence of a two-scale surface roughness on a neutral

- turbulent boundary layer, *Boundary-Layer Meteorology*, 127, 97-110. <https://doi.org/10.1007/s10546-007-9256-8>
- Sin, C.H., Cui, P.-Y., Jon, K.S., Luo, Y., Huang, Y.-d. (2024) Effects of building envelope features on airflow and pollutant dispersion within a symmetric street canyon, *Environmental Science and Pollution Research*, 31(22), 31818-31842. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33343-5>
- Sini, J.-F., Anquetin, S., Mestayer, P.G. (1996) Pollutant dispersion and thermal effects in urban street canyons, *Atmospheric Environment*, 30(15), 2659-2677. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(95\)00321-5](https://doi.org/10.1016/1352-2310(95)00321-5)
- Stein, U., Alpert, P. (1993) Factor separation in numerical simulations, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 50(14), 2107-2115. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1993\)050%3C2107:FSINS%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1993)050%3C2107:FSINS%3E2.0.CO;2)
- Wedding, J.B., Lombardi, D.J., Cermak, J.E. (1977) A wind tunnel study of gaseous pollutants in city street canyons, *Journal of the Air Pollution Control Association*, 27(6), 557-566. <https://doi.org/10.1080/00022470.1977.10470456>
- Zheng, X., Montazeri, H., Blocken, B. (2022) Impact of building façade geometrical details on pollutant dispersion in street canyons, *Building and Environment*, 212, 108746. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108746>
- Zheng, X., Yang, J. (2021) CFD simulations of wind flow and pollutant dispersion in a street canyon with traffic flow: comparison between RANS and LES, *Sustainable Cities and Society*, 75, 103307. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103307>

Authors Information

김동휘 (서울대학교 지구환경과학부 석사과정)
(bgd06026@snu.ac.kr)

한범순 (인하대학교 환경공학과 조교수)
(hanbs2001@inha.ac.kr)

박경주 (서울대학교 지구환경과학부 박사과정)
(kjmon121@snu.ac.kr)

홍성호 (서울대학교 지구환경과학부 박사과정)
(hsh4662@snu.ac.kr)

백종진 (서울대학교 지구환경과학부 교수)
(jjbaik@snu.ac.kr)

Supplementary Materials

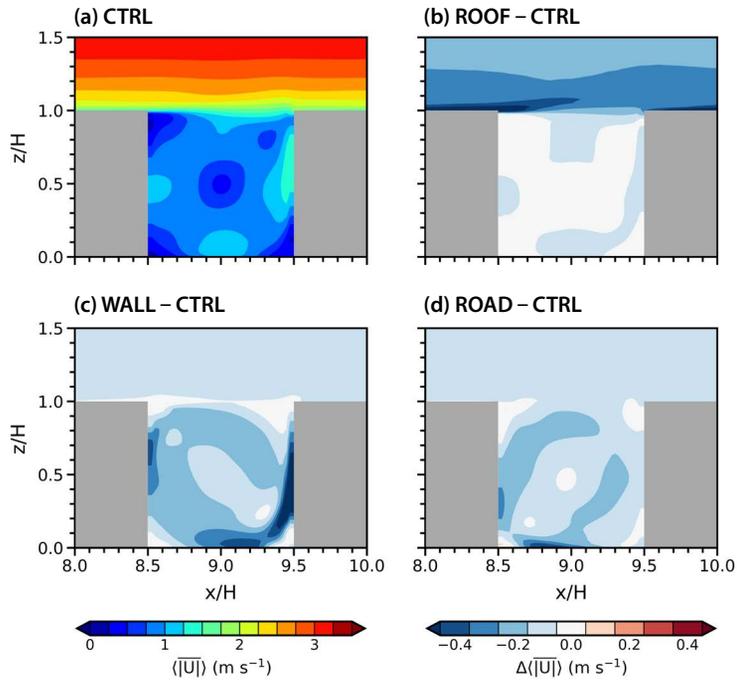


Fig. S1. (a) Temporally and spanwise averaged wind speed field in and above the target canyon in the CTRL simulation. Temporally and spanwise averaged wind speed difference (each minus CTRL) fields in and above the target canyon in the (b) ROOF, (c) WALL, and (d) ROAD simulations.