

논문

2차원 도시 도로 협곡의 지붕 고도에서의 오염물질 유입 및 유출에 대한 큰 에디 모의

김동휘, 한범순^{1),*}, 홍성호, 박경주, 백종진

서울대학교 지구환경과학부, ¹⁾인하대학교 환경공학과

Large-Eddy Simulations of the Entrainment and Detrainment of Pollutants at the Roof Level of Two-Dimensional Urban Street Canyons

Dong-Hwi Kim, Beom-Soon Han^{1),*}, Seong-Ho Hong, Kyeongjoo Park, 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 8월 5일

수정일 2024년 8월 22일

채택일 2024년 9월 4일

Received 5 August 2024

Revised 22 August 2024

Accepted 4 September 2024

*Corresponding author

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

E-mail : hanbs2001@inha.ac.kr

Abstract Air pollution in built-up urban areas is an important environmental problem. Many studies have examined pollutant dispersion in and above urban street canyons, but its mechanism needs to be further elucidated. In this study, we examine pollutant dispersion in and above street canyons, focusing on pollutant entrainment and detrainment in street canyons. For this, the PARallelized Large-eddy simulation Model (PALM) is employed and two 2-dimensional street canyons, one with pollutant emission from the street canyon (street canyon M) and the other without it (street canyon N), are considered. At the roof level of the street canyon M, the vertical turbulent pollutant flux is much larger than the vertical mean pollutant flux. On the other hand, at the roof level of the street canyon N, the vertical mean pollutant flux is comparable to the vertical turbulent pollutant flux. The quadrant analysis reveals that pollutant ejection and sweep events occur much more frequently than pollutant outward interaction and inward interaction events at the roof level of the street canyon M while these four events occur with similar frequencies at the roof level of the street canyon N. The similar occurrence frequencies of the four events at the roof level of the street canyon N are associated with the transport of pollutant emitted from the street canyon M into the street canyon N. The increase in the surface roughness of building roof increases turbulence intensity and thus decreases pollutant concentrations in both street canyon M and street canyon N.

Key words: Pollutant dispersion, Pollutant entrainment/detrainment, Urban street canyon, Large-eddy simulation, Quadrant analysis

1. 서론

도시에서의 인간 활동으로 인한 오염물질 배출은 대기 환경 문제를 야기한다(Sicard *et al.*, 2023). 도시 대기 환경 문제를 보다 잘 이해하고 이에 대처하기 위해 다양한 분야에서 많은 연구가 수행되었고, 그중 한 분야가 도시 도로 협곡과 그 위에서의 흐름 및 오염물질 분산(dispersion)이다(Park *et al.*, 2022; Duan

et al., 2019; Li *et al.*, 2016; Cai *et al.*, 2008; Letzel *et al.*, 2008; Cui *et al.*, 2004; Sini *et al.*, 1996).

오염물질은 도로 협곡의 최상단 고도(지붕 고도)를 통해서 도로 협곡 내외로 유입되고 유출된다. 지붕 고도와 그 근처에서의 흐름 및 오염물질 분산을 이해하기 위해 2차원 도로 협곡을 고려한 여러 수치 모의 연구가 수행되었다. Michioka *et al.* (2011)은 2차원 도로 협곡에서의 오염물질 유출을 조사하였다. 이

들은 도로 협곡 바로 위에 나타나는 조직화된 난류 구조 또는 풍상측 지붕 고도 근처의 작은 소용돌이가 도로 협곡에서의 오염물질 유출에 중요한 역할을 수행함을 보였다. 또한 이들은 지붕 고도 근처에 위치하지 않는 조직화된 난류 구조가 오염물질 유출에 큰 영향을 주지 않음을 보였다. Han *et al.* (2018)은 2차원 도로 협곡의 지붕 고도에서의 반응성 오염물질 교환을 연구하였고, 지붕 고도 근처의 작은 소용돌이와 지붕 고도 바로 위의 줄무늬(streak) 구조가 도로 협곡 내부와 외부의 오염물질 교환을 촉진시킴을 밝혔다. Cintolesi *et al.* (2021)은 2차원 도로 협곡의 풍상측 건물 지붕에 설치된 장애물이 도로 협곡에서의 흐름과 오염물질 분산에 미치는 영향을 조사하였다. 이들은 장애물에 의해 형성된 후류(wake flow)가 풍상측 지붕 고도 근처의 난류 운동을 강화하여 도로 협곡에서의 오염물질 유출을 증가시킴을 보였다. 지붕 고도를 통한 오염물질 유입 및 유출은 2차원 도로 협곡뿐 아니라 옆면을 통해 오염물질이 유입 및 유출될 수 있는 3차원 도로 협곡에서도 중요하다는 것이 알려져 있다(Sin *et al.*, 2024; Huang *et al.*, 2019).

도로 협곡에서의 오염물질 분산을 조사한 대부분의 선행 연구에서는 지표면으로부터 오염물질이 배출되는 도로 협곡만이 고려되었다. 외부로부터의 오염물질 유입이 도로 협곡 내 대기질에 중요한 영향을 미칠 수 있음을 고려할 때, 인접한 지역의 오염원으로부터 영향을 받는 도로 협곡에서의 오염물질 분산을 이해하는 것 역시 중요하다. Cheng and Liu (2011)는 지표면으로부터 오염물질이 배출되는 인접한 여러 도로 협곡을 고려하여 오염물질 유입 및 유출 특성을 조사하였다. 이들은 도로 협곡 간의 오염물질 유입량 및 유출량의 차이를 비교하여 인접한 도로 협곡으로부터의 오염물질 유입 영향을 정량적으로 제시하였다. Liu and Wong (2014)은 지표면으로부터 오염물질이 배출되는 도로 협곡과 오염물질이 배출되지 않는 도로 협곡에서의 오염물질 분산을 조사하였다. 이들은 평균 흐름에 의한 오염물질 유입이 오염물질이 배출되지 않는 도로 협곡의 오염물질 분산에

주요함을 보였다.

본 연구에서는 큰 에디 모의(large-eddy simulation) 모형을 이용하여 인접한 오염원으로부터 영향을 받는 2차원 도로 협곡의 지붕 고도에서의 오염물질 유입 및 유출을 더 깊이 이해하고자 한다. 또한 건물 지붕 거칠기의 증가가 지붕 고도에서의 오염물질 유입 및 유출에 미치는 영향을 탐구하고자 한다.

2. 연구 방법

본 연구에서는 큰 에디 모의 모형으로 PALM (Parallelized Large-eddy simulation Model) 6.0 버전 (Maronga *et al.*, 2020)을 이용한다. PALM의 지배방정식은 부시네스크 근사를 사용하는 여과된(filtered) 나비에-스톡스 방정식이고, 격자계는 엇갈린 아라카와 C 격자계이다. PALM은 아격자 규모의 난류를 모수화하기 위해 수정된 1.5차 난류 종결 방법을 이용한다. 또한 PALM은 건물 표면과 도로 표면의 운동량 속을 계산하기 위해 모닌-오브코프 상사 이론을 이용한다. PALM은 도시 흐름과 오염물질 분산 연구에 널리 사용되고 있다(Duan *et al.*, 2023; Biehl *et al.*, 2021; Gronemeier *et al.*, 2021; Han *et al.*, 2018; Lo and Ngan, 2015; Park *et al.*, 2012; Letzel *et al.*, 2008). PALM에 관한 더 자세한 설명은 Maronga *et al.* (2020)에 제시되어 있다.

본 연구에서는 건물 3개와 그 사이의 도로 2개로 구성된 2차원 도로 협곡 구조를 고려하였다(그림 1). 도로 협곡의 높이(H)와 너비는 모두 20 m로 설정하였다. 따라서 도로 협곡의 높이와 너비의 비로 정의되는 도로 협곡의 외관비는 1이다. 계산 영역의 크기는 x, y, z 방향으로 각각 80, 160, 122 m이며, x, y 방향의 격자 간격은 모두 0.5 m이다. z 방향의 격자 간격은 60 m 고도까지는 0.5 m로 일정하고 그보다 높은 고도에서는 격자 간격이 1 m에 도달할 때까지 1.08배씩 증가한다. 초기 풍속은 4 m s^{-1} 로 고도에 따라서 일정하고, 초기 풍향은 양의 x 방향이다. 코리올리 효

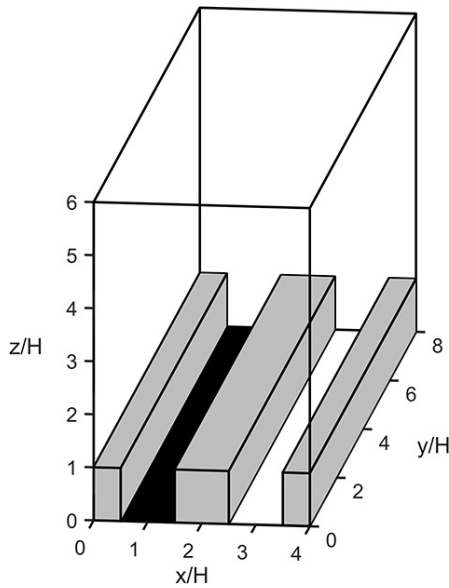


Fig. 1. Computational domain and building configuration. The source area from which pollutants are emitted is indicated by the black shaded area. H represents the building height.

과는 고려하지 않았다. 계산 영역 내 두 도로 협곡은 오염물질이 직접 배출되는 도로 협곡 M (eMission; $0.5 \leq x/H \leq 1.5$, $0 \leq y/H \leq 8$, $z/H \leq 1$)과 오염물질이 직접 배출되지 않고 유입되는 도로 협곡 N (eNtrainment; $2.5 \leq x/H \leq 3.5$, $0 \leq y/H \leq 8$, $z/H \leq 1$)으로 구분된다. PALM 모형을 총 3시간 적분하였고, 오염물질은 2시간이 지날 때부터 그림 1의 검은색 도로면의 모든 격자점에서 $1 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 일정하게 배출되었다. 건물 표면과 도로 표면의 거칠기 길이는 모두 0.01 m로 설정하였다. 속도 성분들에 대해서는 x , y 방향 경계에서 주기 경계 조건을 사용하였고, z 방향의 최상단 경계에서 노이만 경계 조건을 사용하였다. 오염물질 농도에 대해서는 x 방향의 좌측 경계와 우측 경계에서 각각 디리클레 경계 조건과 노이만 경계 조건을 사용하였고, y 방향 경계에서 주기 경계 조건을 사용하였다. 따라서 x 방향의 우측 경계를 통해 빠져나간 오염물질은 좌측 경계를 통해 재유입되지 않는다. z 방향의 최상단 경계에서는 노이만 경계 조건

을 사용하였다. 마지막 30분 (9000~10800초)의 모의 자료를 분석에 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 오염물질 유입 및 유출

도로 협곡 M에서 오염물질 배출이 시작된 후 도로 협곡 M의 평균 오염물질 농도는 시간에 따라 증가하며, 도로 협곡 M으로부터 배출된 오염물질이 도로 협곡 N으로 유입되면서 도로 협곡 N의 평균 오염물질 농도 또한 시간에 따라 증가한다(그림 S1). 이에 따라 두 도로 협곡에서 유출되는 오염물질의 양도 증가하여 분석 기간에는 도로 협곡 M과 N의 평균 오염물질 농도가 준정상 상태에 도달함을 확인하였다(그림 S1). 그림 2는 도로 협곡 M과 N 내부 및 외부의 시간 및 y 방향 평균 유선장과 오염물질 농도 분포를 보여준다. 본 연구에서 시간 평균은 분석 기간 동안의 평균을 의미한다. 그림 2(a)의 분홍색 파선은 시간 평균된 오염물질 농도로부터의 $0.5 \mu\text{g m}^{-3}$ 표준편차 등치선이다. 도로 협곡 M과 N 모두에서 시계 방향으로 회전하는 큰 소용돌이가 나타난다. 도로면에서 오염물질이 배출되는 도로 협곡 M에서는 오염물질 농도가 풍하측 건물 근처에서보다 풍상측 건물 근처에서 더 높다(그림 2(a)). 이는 이전 연구 결과와 일치한다(Duan *et al.*, 2019). 반면 외부에서 오염물질이 유입되는 도로 협곡 N에서는 풍상측 건물 근처에서보다 풍하측 건물 근처에서 더 높다(그림 2(b)). 도로 협곡 M에서는 양쪽 하단 모서리 근처에서 오염물질 농도의 큰 표준편차가 나타난다(그림 2(a)). 이는 양쪽 하단 모서리 근처에서 시간에 따라 변화하는 반시계 방향의 작은 소용돌이와 관련이 있다. 도로 협곡 M의 풍하측 지붕 고도에서도 오염물질 농도의 큰 표준편차가 나타난다. 이는 도로 협곡 내의 오염물질이 꾸준히 유출되는 풍상측과는 달리, 풍하측에서는 풍상측으로부터 유출된 오염물질이 도로 협곡 내로 재유입되고 외부의 비교적 깨끗한 공기 또한 유입되어 시

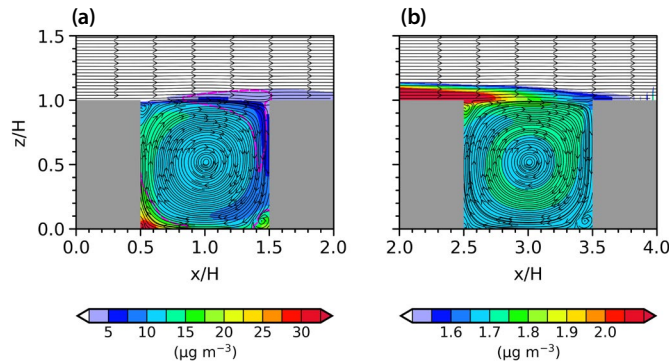


Fig. 2. Time- and spanwise-averaged streamlines and pollutant concentration fields in and above (a) the street canyon M and (b) the street canyon N. The pink dashed contour lines in (a) indicate the $0.5 \mu\text{g m}^{-3}$ standard deviation from the time-averaged pollutant concentration.

간에 따른 오염물질 농도의 변화가 크기 때문이다. 도로 협곡의 하단과 지붕 고도에서 오염물질 농도의 변동이 크게 나타남은 다른 연구에서도 보고된 바 있다(Liu and Wong, 2014; Cheng and Liu, 2011; Liu *et al.*, 2004). 도로 협곡 M으로부터 유출된 오염물질은 도로 협곡 N으로 유입된다(그림 2(b)). 풍상측(x/H , z/H) $\sim(2.5, 0.9)$ 근처에서 오염물질 농도가 높다. 이는 풍상측 건물 상단 모서리 근처에 형성된 반시계 방향의 작은 소용돌이와 관련이 있어 보인다. 도로 협곡 N의 평균 오염물질 농도($1.7 \mu\text{g m}^{-3}$)는 도로 협곡 M의 평균 오염물질 농도($12.3 \mu\text{g m}^{-3}$)의 13.8%이다.

지붕 고도에서의 오염물질 유입 및 유출을 정량화 하고 이에 대한 기작을 조사하기 위해, 시공간적으로 평균된 연직 운동량 플럭스 및 연직 오염물질 플럭스를 연직 평균(mean) 플럭스와 연직 난류(turbulent) 플럭스로 나누고 각 항을 계산하였다(그림 3).

$$\langle \overline{uw} \rangle = \langle \overline{u} \overline{w} \rangle + \langle \overline{u'w'} \rangle \quad (1)$$

$$\langle \overline{cw} \rangle = \langle \overline{c} \overline{w} \rangle + \langle \overline{c'w'} \rangle \quad (2)$$

여기서, u 는 x 방향 속도를, w 는 연직 속도를, c 는 오염물질 농도를 의미하고, 오버바($\overline{\cdot}$)는 시간 평균을, 작은따옴표(\cdot')는 시간 평균으로부터의 편차를, 꺾쇠 괄호($\langle \cdot \rangle$)는 주어진 고도에서의 공간 평균을 의미

한다. 본 연구에서는 시간 평균으로부터의 편차를 난류 성분으로 간주하였다(Kalmár-Nagy and Varga, 2019; Li *et al.*, 2015).

도로 협곡 M과 N 모두에서 하향 연직 평균 운동량 플럭스와 하향 연직 난류 운동량 플럭스가 나타난다(그림 3(a)). 이는 운동량이 도로 협곡 외부에서 내부로 전달됨을 의미한다. 또한 도로 협곡 M과 N 모두에서 난류에 의한 운동량 전달이 평균 흐름에 의한 운동량 전달보다 더 우세하다. 연직 평균 운동량 플럭스와 연직 난류 운동량 플럭스는 두 도로 협곡 간에 큰 차이를 보이지 않는데, 이는 두 도로 협곡 내에서의 흐름이 매우 유사하기 때문이다.

도로 협곡 M과 N 모두에서 하향 연직 평균 오염물질 플럭스와 상향 연직 난류 오염물질 플럭스가 나타난다(그림 3(b)). 이는 두 도로 협곡에서 평균 흐름에 의해 오염물질이 유입되고 난류에 의해 오염물질이 유출됨을 의미한다. 도로 협곡 M에서는 연직 평균 오염물질 플럭스와 연직 난류 오염물질 플럭스가 각각 $-0.0331, 0.6312 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 난류에 의한 오염물질 유출이 평균 흐름에 의한 오염물질 유입에 비해 매우 우세하다. 한편 도로 협곡 N에서는 연직 평균 오염물질 플럭스와 연직 난류 오염물질 플럭스가 각각 $-0.0034, 0.0054 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 난류에 의한 오염물질 유출이 평균 흐름에 의한 오염물질 유입보다 우세

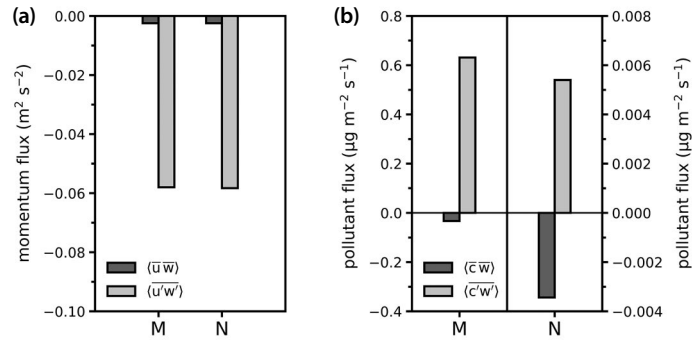


Fig. 3. Time- and area-averaged (a) vertical mean and turbulent momentum fluxes and (b) vertical mean and turbulent pollutant fluxes at $z/H = 1$ for the street canyon M and the street canyon N.

하지만 도로 협곡 M에서보다 평균 흐름에 의한 오염물질 유입이 상대적으로 더 중요하다.

그림 4는 지붕 고도에서 시간과 y 방향으로 평균한 연직 평균 오염물질 플럭스와 연직 난류 오염물질 플럭스의 x 방향 분포를 보여준다. 도로 협곡 M에서 중심 ($x/H = 1$)을 기준으로 풍상측에서는 대체로 상향 연직 평균 오염물질 플럭스가 나타나고 풍하측에서는 대체로 하향 연직 평균 오염물질 플럭스가 나타난다(그림 4). 이는 큰 소용돌이에 의해 풍상측과 풍하측에서 각각 상승류와 하강류가 나타나기 때문이다(그림 2(a)). 풍상측 건물 근처에서는 약한 하향 연직 평균 오염물질 플럭스가 나타나는데, 이는 풍상측 건물 상부 근처의 작은 소용돌이 때문이다. 풍하측 건물 근처에서는 뚜렷한 상향 연직 평균 오염물질 플럭스가 나타나는데, 이는 풍하측 건물 모서리에서의 흐름 충돌(flow impingement)과 관련된다(Liu and Wong, 2014). 한편 상향 연직 난류 오염물질 플럭스가 도로 협곡 M의 지붕 고도를 따라 뚜렷하게 나타난다. 이는 도로 협곡 M 내부의 오염물질 농도가 외부의 오염물질 농도보다 뚜렷하게 높아(그림 2(a)) 지붕 고도에서 난류에 의해 도로 협곡 내부의 오염물질이 외부로 유출($c' > 0$, $w' > 0$)되고 도로 협곡 외부의 비교적 깨끗한 공기가 내부로 유입($c' < 0$, $w' < 0$)되기 때문이다. 결과적으로 도로 협곡 M의 지붕 고도에서는 상향 연직 평균 오염물질 플럭스와 하향 연

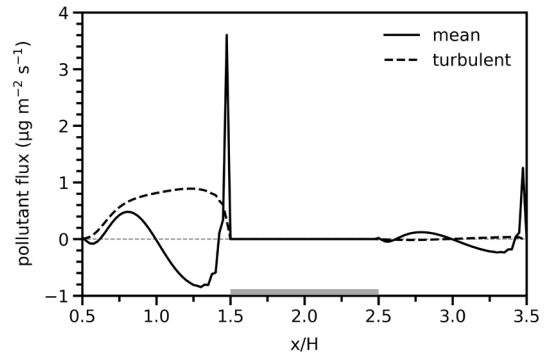


Fig. 4. Time- and spanwise-averaged mean (solid line) and turbulent (dashed line) vertical pollutant fluxes at $z/H = 1$ as a function of x/H . The building area is marked by the gray bar.

직 평균 오염물질 플럭스가 서로 상쇄되는 반면, 연직 난류 오염물질 플럭스는 지붕 고도를 따라 뚜렷하게 상향으로 나타나 난류에 의한 오염물질 교환이 평균 흐름에 의한 오염물질 교환에 비해 매우 우세하게 나타난다(그림 3(b)). 한편 도로 협곡 N에서는 도로 협곡 M에서보다 연직 평균 오염물질 플럭스와 연직 난류 오염물질 플럭스의 공간적인 변화폭이 더 작다(그림 4). 연직 평균 오염물질 플럭스의 경우 대체로 풍상측에서 상향, 풍하측에서 하향으로 나타나 도로 협곡 M에서와 유사하고, 연직 난류 오염물질 플럭스의 경우 대체로 풍상측에서 하향, 풍하측에서 상향으로 나타나 도로 협곡 M에서와 달리 서로 상쇄된다.

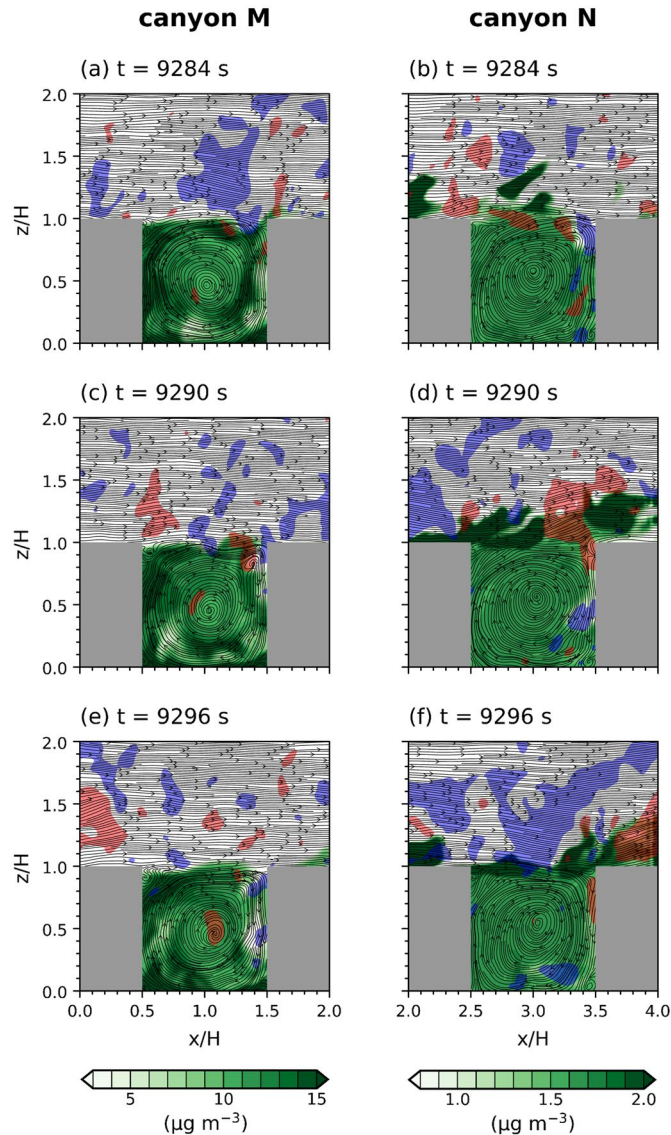


Fig. 5. Instantaneous streamlines and pollutant concentration fields in and above (a, c, e) the street canyon M and (b, d, f) the street canyon N at $y/H = 4$ at $t =$ (a, b) 9284, (c, d) 9290, and (e, f) 9296 s. The red and blue shaded areas indicate the regions where w' is larger than 0.3 m s^{-1} and smaller than -0.3 m s^{-1} , respectively.

그 결과 도로 협곡 N에서는 난류에 의한 오염물질 교환과 평균 흐름에 의한 오염물질 교환 간의 상대적 중요성의 차이가 도로 협곡 M에서보다 덜 두드러진다(그림 3(b)).

도로 협곡 M과 N의 지붕 고도 근처에서 시간에 따라 다르게 나타나는 난류 흐름 특성과 그에 따른 오

염물질 유입 및 유출 특성을 분석하였다. 그림 5는 $t = 9284, 9290, 9296$ 초일 때 $y/H = 4$ 인 x - z 단면에서의 유선장과 오염물질 농도 분포를 보여준다. 빨간색, 파란색으로 표시한 영역은 각각 w' 이 0.3 m s^{-1} 이상, -0.3 m s^{-1} 이하인 영역이다. $t = 9284$ 초일 때 $(x/H, z/H) \sim (1.4, 1.0)$ 근처에서 뚜렷한 하강 기류로 인해 외

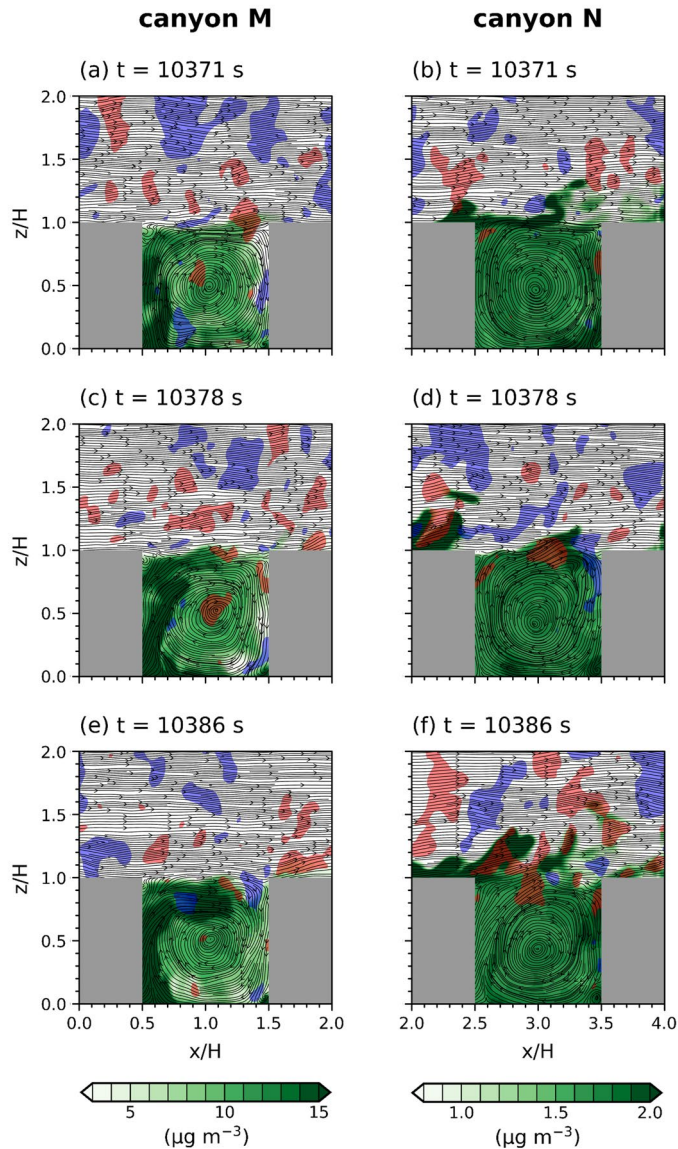


Fig. 6. Same as Fig. 5 except for $t =$ (a, b) 10371, (c, d) 10378, and (e, f) 10386 s.

부의 비교적 깨끗한 공기가 도로 협곡 M으로 유입된다(그림 5(a)). 동일한 시각에 $(x/H, z/H) \sim (2.1, 1.2)$ 근처에서 주변에 비해 오염물질 농도가 높다(그림 5(b)). $t = 9290$ 초일 때 $(x/H, z/H) \sim (1.3, 1.0)$ 근처에서 상승 기류로 인해 도로 협곡 M으로부터 오염물질이 유출된다(그림 5(c)). 한편 $t = 9284$ 초일 때 도로 협곡 M 바로 위에 위치했던 하강 기류는 배경 바람을 따

라 풍하측으로 이동하여 $t = 9290$ 초일 때 $(x/H, z/H) \sim (2.1, 1.2)$ 근처에 위치한다(그림 5(d)). $t = 9290$ 초일 때 도로 협곡 N의 풍상측에서 배경 바람에 의해 오염물질이 유입되고, 풍하측에서 상승 기류로 인해 오염물질이 유출된다. $t = 9296$ 초일 때 도로 협곡 M의 지붕 고도에서 $t = 9284, 9290$ 초일 때에 비해 상승 및 하강 기류가 뚜렷하지 않다(그림 5(e)). $t = 9290$ 초

일 때 $(x/H, z/H) \sim (2.1, 1.2)$ 근처에 위치했던 하강 기류는 $t=9296$ 초일 때 도로 협곡 N 바로 위에 위치한다(그림 5(f)). 이 하강 기류로 인해 $(x/H, z/H) \sim (3.1, 1.1)$ 근처에서는 외부의 비교적 깨끗한 공기가 도로 협곡 N으로 유입되고 $(x/H, z/H) \sim (2.9, 1.0)$ 근처에서는 오염물질이 도로 협곡 N으로 유입된다.

그림 6은 이후 $t=10371, 10378, 10386$ 초일 때의 유선장과 오염물질 농도 분포를 보여준다. $t=10371$ 초일 때 $(x/H, z/H) \sim (1.4, 1.0)$ 근처에서 $t=9290$ 초일 때와 유사하게 상승 기류에 의해 오염물질이 도로 협곡 M으로부터 유출된다(그림 6(a)). 동일한 시각에 $(x/H, z/H) \sim (2.6, 0.9)$ 근처에서 국소적으로 상승 기류가 나타난다(그림 6(b)). $t=10378$ 초일 때 도로 협곡 M의 지붕 고도에서 $t=10371$ 초일 때에 비해 상승 및 하강 기류가 뚜렷하지 않다(그림 6(c)). $t=10371$ 초일 때 $(x/H, z/H) \sim (1.4, 1.0)$ 근처에 위치했던 상승 기류는 배경 바람을 따라 풍하측으로 이동하여 $t=10378$ 초일 때 $(x/H, z/H) \sim (2.2, 1.2)$ 근처에 위치한다(그림 6(d)). 한편 $t=10371$ 초일 때 $(x/H, z/H) \sim (2.6, 0.9)$ 근처에 위치했던 상승 기류는 $t=10378$ 초일 때 $(x/H, z/H) \sim (3.1, 1.0)$ 에 위치한다. 이 상승 기류로 인해 도로 협곡 N으로부터 오염물질이 유출된다. 또한 $(x/H, z/H) \sim (2.6, 0.9)$ 근처에서 새로운 상승 기류가 나타난다. $t=10386$ 초일 때 $(x/H, z/H) \sim (1.4, 1.0)$ 근처에서 $t=9284$ 초일 때와 유사하게 하강 기류에 의해 외부의 비교적 깨끗한 공기가 유입된다(그림 6(e)). 한편 $t=10378$ 초일 때 $(x/H, z/H) \sim (2.2, 1.2)$ 근처에 위치했던 상승 기류는 $t=10386$ 초일 때 도로 협곡 N의 풍상측 바로 위에 위치해 지붕 고도 바로 위의 오염물질을 보다 위로 이동시킨다(그림 6(f)). $t=10378$ 초일 때 $(x/H, z/H) \sim (2.6, 0.9)$ 근처에서 새롭게 나타났던 상승 기류는 $t=10386$ 초일 때 $(x/H, z/H) \sim (3.0, 1.0)$ 근처에 위치한다(그림 6(f)). 이 상승 기류로 인해 도로 협곡 N으로부터 오염물질이 유출된다.

도로 협곡 M과 N의 지붕 고도에서 c' 와 w' 의 결합확률밀도함수에 대해 사분면 분석(quadrant analysis)

을 수행하여 각 사분면의 빈도, 강도, 기여도를 조사하였다(그림 7과 표 1). 이때 결합확률밀도함수는 도로 협곡 M(N)에서 c' 과 w' 을 각각 간격이 $0.6 \mu\text{g m}^{-3}$ ($0.06 \mu\text{g m}^{-3}$)와 0.06 m s^{-1} (0.06 m s^{-1})인 50개의 구간으로 나누어 계산하였다. 그림 7에서 연직 난류 오염물질 플럭스는 사분면의 위치에 따라 분출(ejection, 제1사분면), 외향 상호작용(outward interaction, 제2사분면), 쓸기(sweep, 제3사분면), 내향 상호작용(inward interaction, 제4사분면)으로 분류된다(Kim *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2016; Cheng and Liu, 2011). 표 1에 제시된 각 사분면의 기여도는 해당 사분면의 플럭스 총합을 모든 사분면의 플럭스 총합으로 나눈 분율이다.

도로 협곡 M에서 오염물질 분출과 쓸기의 빈도 및 강도는 오염물질 외향 상호작용과 내향 상호작용의 빈도 및 강도보다 크다(그림 7(a)). 이와 같은 특징은 다른 연구에서도 보고되었다(Park *et al.*, 2012; Cheng and Liu, 2011). 오염물질 분출과 쓸기의 빈도는 각각 36.9, 38.4%이고, 오염물질 외향 상호작용과 내향 상호작용의 빈도는 각각 14.1, 10.7%이다(표 1). 계산된 오염물질 분출과 쓸기의 기여도는 각각 0.504, 0.579로 오염물질 외향 상호작용의 기여도(-0.048) 및 오염물질 내향 상호작용의 기여도(-0.034)에 비해 매우 크다. c' 과 w' 의 결합확률밀도함수의 최빈값은 제3사분면(오염물질 쓸기)에서 나타난다. 반면 도로 협곡 N에서는 네 가지 사건(events) 간의 빈도 차이가 뚜렷하지 않다(그림 7(b)). 오염물질 분출, 외향 상호작용, 쓸기, 내향 상호작용의 빈도는 각각 21.5, 29.5, 25.6, 23.5%이다(표 1). 오염물질 쓸기와 내향 상호작용의 기여도는 각각 6.00, -4.57로 오염물질 분출의 기여도(1.80) 및 오염물질 외향 상호작용의 기여도(-2.23)보다 크다. c' 과 w' 의 결합확률밀도함수의 최빈값은 제2사분면(오염물질 외향 상호작용)에서 나타난다.

도로면으로부터 오염물질이 배출되어 도로 협곡 내부가 그 위보다 오염물질 농도가 꾸준히 높은 도로 협곡 M과 달리, 도로 협곡 N의 경우 외부의 비교적

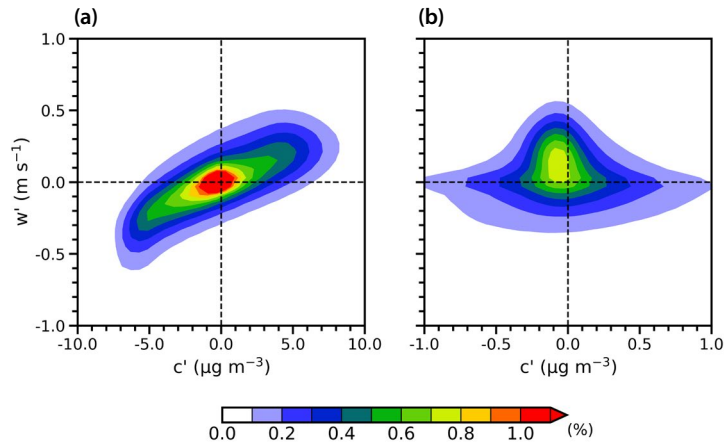


Fig. 7. Fields of joint probability density function of c' and w' at $z/H=1$ for (a) the street canyon M and (b) the street canyon N.

Table 1. Frequencies and contributions of the four quadrant events for $c'w'$ at $z/H=1$ for the street canyon M and the street canyon N.

		Ejection	Outward interaction	Sweep	Inward interaction
Street canyon M	Frequency (%)	36.9	14.1	38.4	10.7
	Contribution	0.504	-0.048	0.579	-0.034
Street canyon N	Frequency (%)	21.5	29.5	25.6	23.5
	Contribution	1.80	-2.23	6.00	-4.57

깨끗한 공기뿐만 아니라 도로 협곡 M으로부터 수송되는 오염물질에 의해 도로 협곡 내부보다 그 위에서 농도가 높거나 낮은 상황이 모두 나타난다. 이러한 두 도로 협곡 M과 N 간의 오염물질 농도 시공간적 분포 차이로 인해 각 사건의 빈도와 기여도가 두 도로 협곡 간에 큰 차이를 보일 수 있다.

3.2 건물 지붕 거칠기 길이 증가의 영향

건물 지붕 거칠기 길이의 증가가 지붕 고도의 오염물질 유입 및 유출에 미치는 영향을 조사하기 위해 건물 지붕의 거칠기 길이를 0.05 m로 증가시킨 추가 실험 (Increased Roughness, IR)을 수행하였다. 그림 8은 IR 실험에서 도로 협곡 M과 N 내부 및 외부의 시간과 y 방향으로 평균한 유선장과 기준 실험으로부터의 오염물질 농도 차이의 분포를 보여준다. 유선장은 기준 실험과 IR 실험에서 서로 비슷하며, 기준 실험

협에서 나타났던 큰 소용돌이와 작은 소용돌이들이 IR 실험에서도 확인된다. 도로 협곡 M과 N 내부의 오염물질 농도는 대체로 IR 실험에서 더 낮다. IR 실험에서 도로 협곡 M, N의 평균 오염물질 농도는 각각 11.7, $1.6 \mu\text{g m}^{-3}$ 로 기준 실험에 비해 각각 5.0, 5.9% 낮다. 하지만 협곡 외부의 오염물질 농도는 대체로 IR 실험에서 더 높다. 이는 거칠기 길이가 증가함에 따라 도로 협곡 M으로부터 유출되는 오염물질이 증가하며, 유출된 오염물질이 더 활발하게 연직 상방으로 확산되어 도로 협곡 N으로 유입되는 오염물질은 감소함을 의미한다.

그림 9(a)와 9(b)는 각각 IR 실험과 기준 실험에서 도로 협곡 N 내부와 그 위에서의 시간과 수평 방향 ($2.5 \leq x/H \leq 3.5$, $0 \leq y/H \leq 8$)으로 평균한 x 방향 속도와 난류 운동 에너지의 연직 분포를 보여준다. 도로 협곡 위에서 x 방향 흐름은 기준 실험에서보다 IR 실험

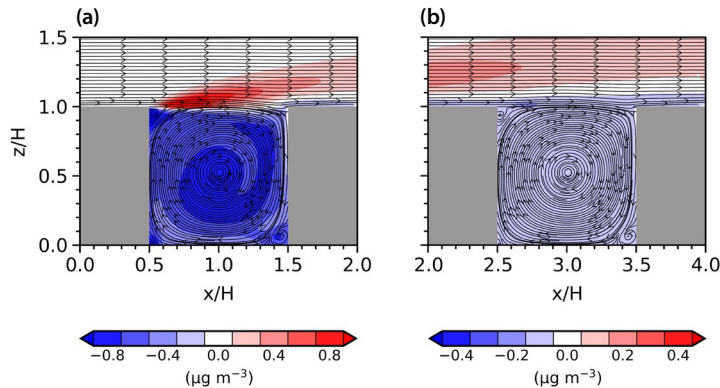


Fig. 8. Time- and spanwise-averaged pollutant concentration difference fields between the IR and control experiments (IR minus control) in and above (a) the street canyon M and (b) the street canyon N. Time- and spanwise-averaged streamlines in the IR experiment are also plotted.

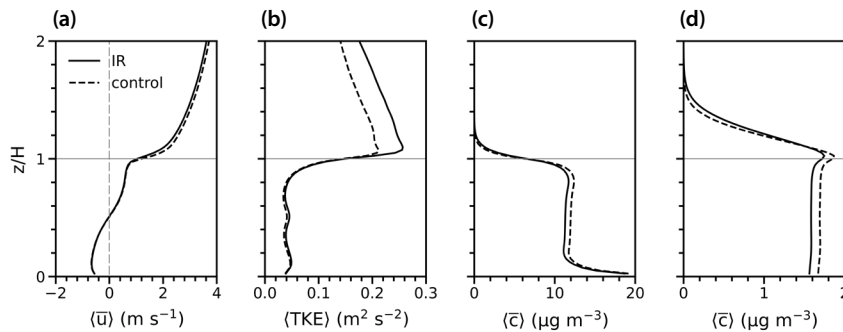


Fig. 9. Vertical profiles of time- and area-averaged (a) streamwise velocity and (b) resolved turbulent kinetic energy in and above the street canyon N in the IR (solid line) and control (dashed line) experiments. Vertical profiles of time- and area-averaged pollutant concentration in and above (c) the street canyon M and (d) the street canyon N in the IR (solid line) and control (dashed line) experiments. The gray horizontal solid line denotes the $z/H = 1$ level.

협에서 더 약하다(그림 9(a)). $z/H = 1$ 고도와 $z/H = 2$ 고도 사이에서 평균된 x 방향 속도는 IR 실험, 기준 실험에서 각각 $2.89, 3.01 \text{ m s}^{-1}$ 이다. 반면 도로 협곡 위에서 난류 운동 에너지는 기준 실험에서보다 IR 실험에서 뚜렷하게 더 크다(그림 9(b)). 이는 건물 지붕 거칠기 길이의 증가로 인해 평균 흐름은 약화된 반면 난류 강도는 증가함을 의미한다. $z/H = 1$ 고도와 $z/H = 2$ 고도 사이에서 난류 운동 에너지는 IR 실험, 기준 실험에서 각각 $0.217, 0.176 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ 이다. 한편 건물 지붕 거칠기 길이의 증가로 인해 도로 협곡 내부에서도 난류 운동 에너지가 약간 증가한다. 이러한

평균 흐름과 난류 강도의 변화는 도로 협곡 M 내부와 그 위에서도 매우 유사하게 나타난다.

그림 9(c)와 9(d)는 각각 두 실험에 대해 도로 협곡 M과 N의 내부 및 그 위에서의 시간과 수평 방향으로 평균한 오염물질 농도의 연직 분포를 보여준다. 그림 8에서 확인한 바와 같이, 도로 협곡 M과 N 내부의 오염물질 농도는 기준 실험에서보다 IR 실험에서 더 낮다(그림 9(c)와 9(d)). 도로 협곡 N의 경우 건물 지붕 거칠기 길이 증가에 의해 지붕 고도 바로 위에서의 오염물질 농도 또한 감소한다. 이러한 거칠기 길이 증가에 따른 도로 협곡 M과 N에서의 오염물질 농도

감소는 난류 강도의 증가와 관련이 있다(그림 9(b)). 도로 협곡 M의 지붕 고도에서 계산된 하향 연직 평균 오염물질 플럭스, 상향 연직 난류 오염물질 플럭스는 기준 실험 대비 IR 실험에서 각각 $-0.0031 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 감소, $0.6555 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 증가한다. 이는 도로 협곡 M의 지붕 고도에서 평균 흐름에 의한 오염물질 유입이 감소하고 난류에 의한 오염물질 유출이 증가함을 의미한다. 한편 도로 협곡 N의 지붕 고도에서 계산된 하향 연직 평균 오염물질 플럭스, 상향 연직 난류 오염물질 플럭스는 기준 실험 대비 IR 실험에서 각각 -0.0008 , $0.0018 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 감소한다. 이는 도로 협곡 N의 지붕 고도에서 평균 흐름에 의한 오염물질 유입과 난류에 의한 오염물질 유출이 감소함을 의미한다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 PALM 모형을 이용해 도로면에서 오염물질이 배출되는 도로 협곡(도로 협곡 M)과 오염물질이 직접 배출되지 않고 유입되는 도로 협곡(도로 협곡 N)의 지붕 고도에서의 오염물질 유입 및 유출을 조사하였다. 도로 협곡 M의 경우 지붕 고도에서의 연직 난류 오염물질 플럭스가 $0.6312 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 연직 평균 오염물질 플럭스가 $-0.0331 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 난류에 의한 오염물질 유출이 평균 흐름에 의한 오염물질 유입보다 매우 중요하였다. 반면 도로 협곡 N의 경우 지붕 고도에서의 연직 난류 오염물질 플럭스가 $0.0054 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 연직 평균 오염물질 플럭스가 $-0.0034 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 평균 흐름에 의한 오염물질 유입과 난류에 의한 오염물질 유출 모두 중요하였고, 도로 협곡 N의 평균 오염물질 농도가 도로 협곡 M의 평균 오염물질 농도의 13.8%였다. 도로 협곡 M의 지붕 고도에서의 오염물질 분출, 외향 상호작용, 쓸기, 내향 상호작용의 빈도는 각각 36.9, 14.1, 38.4, 10.7%였고, 도로 협곡 N의 지붕 고도에서는 각각 21.5, 29.5, 25.6, 23.5%였다. 도로 협곡 M과 달리 도로 협곡

N의 지붕 고도에서 네 사건의 빈도가 비슷한 것은 도로 협곡 M으로부터 배출된 오염물질이 도로 협곡 N으로 수송되는 것과 관련이 있다. 건물 지붕 거칠기의 증가는 난류 강도를 증가시켜 도로 협곡 M, N 내부의 오염물질 농도를 감소시켰다.

본 연구는 오염물질이 지표로부터 직접 배출되는 도로 협곡과 직접 배출되지 않고 외부로부터 유입되는 도로 협곡 간의 오염물질 유입 및 유출 특성의 차이를 밝혔다. 이는 외부로부터 유입되는 오염물질이 중요한 실제 도로 협곡에서의 오염물질 분산을 보다 잘 이해하는 데에 기여할 수 있다. 한편 본 연구는 중립대기 상태를 가정하고 외관비가 1인 2차원 도로 협곡을 고려하였다. 대기의 안정도, 도로 협곡의 외관비, 건물 높이의 변동성, 건물 배치 등의 변화가 도로 협곡에서의 오염물질 유입 및 유출 특성에 상당한 영향을 미칠 수 있음을 고려할 때 향후 이들의 영향에 대한 체계적인 조사가 필요하다. 또한 본 연구에서는 지붕 거칠기 길이가 증가할 때 도로 협곡 내부 및 외부에서 오염물질 분산이 어떻게 변화하는지를 밝혔다. 향후 지붕 및 도로 표면, 건물 벽면의 거칠기 길이의 변화가 오염물질 분산에 미치는 영향에 대해 보다 상세한 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(2021R1A2C1007044). 본 연구의 개선에 도움이 되는 의견을 제시해 주신 심사위원 두 분께 감사를 드립니다.

References

- Biehl, J.L., Paas, B., Klemm, O. (2021) Ventilation of a mid-size city under stable boundary layer conditions: a simulation using the LES model PALM, Atmosphere, 12(3), 401. <https://doi.org/10.3390/atmos12030401>

- Cai, X.-M., Barlow, J.F., Belcher, S.E. (2008) Dispersion and transfer of passive scalars in and above street canyons—large-eddy simulations, *Atmospheric Environment*, 42(23), 5885-5895. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.03.040>
- 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, Z., Cai, X., Baker, C.J. (2004) Large-eddy simulation of turbulent flow in a street canyon, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 130(599), 1373-1394. <https://doi.org/10.1256/qj.02.150>
- 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>
- Duan, G., Takemi, T., Ngan, K. (2023) Measuring pollutant exposure using large-eddy simulation and virtual walkers: analysis of tracer age statistics of idealised urban boundary-layer flows, *Sustainable Cities and Society*, 93, 104501. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104501>
- Gronemeier, T., Surm, K., Harms, F., Leitl, 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, 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>
- 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>
- 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 simulations, *Atmospheric Pollution Research*, 14(5), 101736. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.101736>
- Letzel, M.O., Krane, M., Raasch, S. (2008) High resolution urban large-eddy simulation studies from street canyon to neighbourhood scale, *Atmospheric Environment*, 42(38), 8770-8784. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.08.001>
- 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>
- 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>
- Liu, C.-H., Barth, M.C., Leung, D.Y.C. (2004) Large-eddy simulation of flow and pollutant transport in street canyons of different building-height-to-street-width ratios, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 43(10), 1410-1424. <https://doi.org/10.1175/JAM2143.1>
- 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*

- ment, 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>
- 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>
- Sicard, P., Agathokleous, E., Anenberg, S.C., De Marco, A., Paoletti, E., Calatayud, V. (2023) Trends in urban air pollution over the last two decades: a global perspective, *Science of The Total Environment*, 858(2), 160064. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160064>
- 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)

Authors Information

- 김동휘 (서울대학교 지구환경과학부 석사과정)
(bgd06026@snu.ac.kr)
- 한범순 (인하대학교 환경공학과 조교수)
(hanbs2001@inha.ac.kr)
- 홍성호 (서울대학교 지구환경과학부 박사과정)
(hsh4662@snu.ac.kr)
- 박경주 (서울대학교 지구환경과학부 박사과정)
(kjmon121@snu.ac.kr)
- 백종진 (서울대학교 지구환경과학부 교수)
(jjbaik@snu.ac.kr)

Supplementary Materials

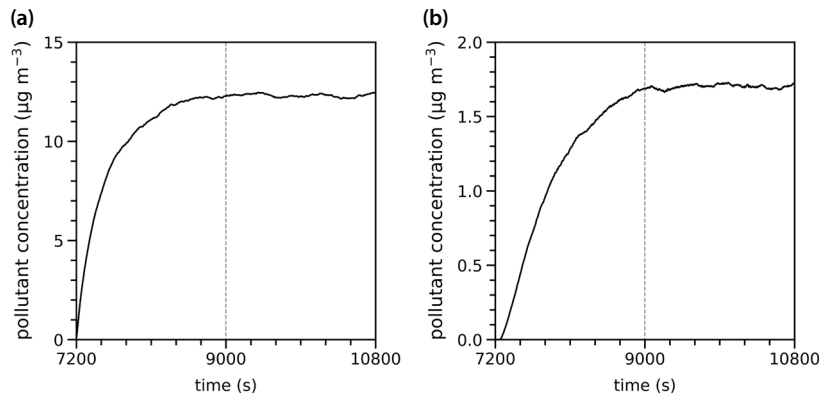


Fig. S1. Time series of pollutant concentration averaged over (a) the street canyon M and (b) the street canyon N. The gray vertical dashed line denotes 9000 s which is the start time of the analysis period.