

논문

진폭 변조 방법을 이용한 복사 강제 조건의 건물 배열 위에서 큰 규모 난류와 작은 규모 변동 사이의 상관성 분석: 주·야간 차이와 오염물질 수송 특성

Analysis of Correlations between Large-Scale Turbulence and Small-Scale Fluctuations over a Radiatively Forced Building Array Using Amplitude Modulation Method: Daytime and Nighttime Differences and Pollutant Transport Characteristics

김동휘¹⁾, 한범순^{1),2),*}

¹⁾수도권 미세먼지연구·관리센터, ²⁾인하대학교 환경공학과

Dong-Hwi Kim¹⁾, Beom-Soon Han^{1),2),*}

¹⁾Particle Pollution Research and Management Center, Inha University, Incheon, Republic of Korea

²⁾Department of Environmental Engineering, Inha University, Incheon, Republic of Korea

접수일 2026년 8월 3일

수정일 2026년 8월 21일

채택일 2026년 9월 3일

Received 3 August 2026

Revised 21 August 2026

Accepted 3 September 2026

*Corresponding author

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

E-mail : hanbs2001@inha.ac.kr

Abstract Turbulent motions of different scales and their interactions play important roles in pollutant dispersion over urban surfaces. However, their daytime and nighttime differences under radiative forcing remain insufficiently understood. This study investigates correlations between large-scale turbulence and small-scale fluctuations and the associated pollutant transport over a cubical building array using the PARallelized Large-eddy simulation Model (PALM) coupled with radiative transfer models. Power spectral analysis, single- and two-point amplitude modulation analyses, and conditional averaging are conducted. The amplitude modulation method quantifies how the amplitude of small-scale fluctuations varies with large-scale turbulence. The single- and two-point amplitude modulation methods evaluate the correlations at the same height and across different heights, respectively. Radiative heating strengthens turbulence, upward heat transport, and large-scale vertical motions during daytime, whereas radiative cooling produces a near-surface potential temperature inversion, downward heat transport, and a shallow stable boundary layer during nighttime. Amplitude modulation analysis reveals that radiative forcing alters the coupling between large-scale turbulence and small-scale fluctuations. During daytime, large-scale upward heat transport is positively correlated with the magnitudes of small-scale potential temperature and pollutant concentration fluctuation. By contrast, during nighttime, these relationships weaken or reverse and are confined to the shallow stable boundary layer. Conditional averaging further shows that these relationships are reflected in pollutant transport. When large-scale vertical turbulent heat flux deviation during daytime is positive and large, vertically extensive upward pollutant transport tends to appear. When large-scale vertical turbulent heat flux deviation during nighttime is negative and large, upward pollutant transport tends to be enhanced locally. These results emphasize the importance of radiatively induced atmospheric stability differences in interpreting daytime and nighttime changes in multiscale turbulent interactions and pollutant transport over urban surfaces.

Key words: Amplitude modulation, Pollutant transport, Radiative forcing, Urban boundary layer, Large-eddy simulation

1. 서론

도시 지표면 부근에서는 건물에 의한 공기역학적 거칠기와 지표면과 대기 사이의 열 교환으로 인해 개별 건물 규모부터 대기 경계층 규모까지 다양한 난류 운동이 나타난다(Barlow, 2014; Roth, 2000). 건물 지붕과 모서리 부근에서 형성된 전단층과 와류는 하류 건물과 상호작용하며 도시 캐노피층 내부의 복잡한 재순환 흐름에 기여한다(Cocea et al., 2007). 또한 건물 위에서는 흐름 방향으로 길게 발달한 저속 영역을 포함하는 조직적 난류 구조가 나타난다(Inagaki and Kanda, 2010; Kanda, 2006). 도시 대기에서 열적 안정도와 시간대에 따른 난류 및 오염물질 수송의 차이는 관측과 수치 연구를 통해 분석되어 왔다. Finn et al. (2010)은 도시 플룸 관측에서 야간에 주간보다 정규화된 지표 농도가 높고 연직 혼합이 억제되는 경향을 보고하였다. Boppana et al. (2014)은 지표 가열이 건물 배열 상부 난류의 연직 적분 길이 규모와 분출 사건의 강도를 증가시키는 반면, 지표 냉각은 흐름 방향과 연직 방향의 적분 길이 규모를 감소시킴을 보였다. Cheng and Liu (2011)은 중립 성층과 비교하여 불안정 성층에서 평균 흐름과 난류가 강화되어 도로 협곡의 오염물질 제거가 증가하는 반면, 안정 성층에서는 지표 부근의 온도 역전으로 흐름과 난류가 억제되고 높은 오염물질 농도가 도로 부근의 얇은 층에 유지됨을 보였다. Kim et al. (2026a)은 복사 가열이 주간의 난류와 상향 오염물질 수송을 강화하는 반면, 복사 냉각은 야간의 연직 혼합과 오염물질 수송 범위를 얇은 하층으로 제한함을 보였다.

그러나 평균장이나 단일 난류 통계량만으로는 주·야간의 난류 및 오염물질 수송 차이를 난류 운동의 규모별 구조와 수송 기여로 구분하여 파악하기 어렵다. 이에 따라 도시 난류의 규모별 특성과 난류 구조를 분석하기 위해 파워 스펙트럼 분석(power spectral analysis)을 이용한 연구(Wang et al., 2024; Roth et al., 2015), 경험적 모드 분해(empirical mode decomposition)를 적용한 연구(Liu et al., 2023a), 적합 직교 분

해(proper orthogonal decomposition)와 동적 모드 분해(dynamic mode decomposition)를 결합한 연구(Fu et al., 2023), 그리고 스펙트럼 적합 직교 분해(spectral proper orthogonal decomposition)를 적용한 연구(Kim et al., 2026b; Zhang et al., 2022a, 2022b) 등 다양한 스펙트럼 및 모드 분해 기법을 활용한 연구가 수행되었다. 특히 스펙트럼 적합 직교 분해는 각 주파수에서 에너지 기여도에 따라 시공간적으로 일관된 구조를 추출할 수 있다(Towne et al., 2018). Zhang et al. (2022a)은 스펙트럼 적합 직교 분해를 사용해도 협곡에서 외부의 큰 규모 구조와 Kelvin-Helmholtz 불안정에 의해 형성된 작은 규모 구조가 모두 지붕 고도의 분출(ejection) 및 쓸기(sweep) 사건을 유발하여 오염물질 제거에 기여함을 보였다. 후속 연구에서는 큰 규모 구조에 수반된 강한 고운동량 유체에서 작은 규모 구조의 진폭이 평균 13% 증가하고, 강한 저운동량 유체에서는 평균 16% 감소하여 오염물질 제거가 간접적으로 강화되거나 약화될 수 있음을 제시하였다(Zhang et al., 2022b). Kim et al. (2026b)도 스펙트럼 적합 직교 분해를 사용해 지표면 가열이 건물 배열 위의 큰 규모 조직적 난류 구조를 강화하고, 지붕 고도의 난류 운동 에너지와 연직 난류 오염물질 플럭스에 대한 큰 규모 구조의 상대적 기여를 증가시킴을 보였다. 이러한 스펙트럼 및 모드 분해 기법은 각 규모에 분포한 난류 에너지와 수송 기여를 식별할 수 있지만, 큰 규모 운동의 변화와 함께 작은 규모 속도, 온도 및 오염물질 농도 변동의 진폭이 체계적으로 증가하거나 감소하는 관계는 직접 나타내지 못한다. 이러한 규모 간 연관성을 정량화하면 큰 규모 난류 변동에 따라 작은 규모 변동의 진폭이 어떻게 달라지는지를 파악할 수 있다.

진폭 변조(amplitude modulation) 분석은 큰 규모 신호와 작은 규모 변동의 진폭 사이의 통계적 연관성을 정량화한다. 이를 위해 큰 규모 신호와 작은 규모 변동의 포락선(envelope)에 포함된 큰 규모 성분 사이의 상관계수를 계산하여 두 신호 간 연관성의 부호와 강도를 평가한다(Mathis et al., 2009). 이후 진폭

변조 연구는 규모 간 변조의 통계적 특성을 규명하고 적용 대상을 확장하는 방향으로 발전하였다. Marusic *et al.* (2010)과 Mathis *et al.* (2011a)은 로그 영역(logarithmic region)에서 측정한 큰 규모 속도 변동을 이용하여 벽면 부근 영역의 흐름 방향 속도 통계를 예측하는 모형을 제안하고 확장하였으며, Mathis *et al.* (2011b)은 속도 왜도(skewness)의 레이놀즈 수 의존성이 진폭 변조와 밀접하게 관련됨을 보였다. Talluru *et al.* (2014)은 작은 규모의 횡 방향 및 연직 방향 속도 변동과 순간 레이놀즈 전단 응력도 큰 규모 흐름 방향 속도에 의해 진폭 변조됨을 확인하였다. Anderson (2016)은 외층(outer layer)의 큰 규모 운동이 거칠기 아층(roughness sublayer)의 흐름 방향 속도 변동을 진폭 변조함을 보였으며, Salesky and Anderson (2018)은 대류 불안정도가 증가함에 따라 조직적 난류 구조의 형태와 벽면 부근 난류에 대한 변조 특성이 달라짐을 확인하였다. 이후 진폭 변조 분석 연구는 실제 도시 형상을 고려한 대기 흐름(Liu *et al.*, 2023b), 중립 상태에서 자유 대류 상태에 이르는 도시 대류 경계층(Zhou *et al.*, 2024), 그리고 실제 도시 형상을 축소한 풍동 실험(Li *et al.*, 2025)으로 확대되었다. Kim *et al.* (2026b)은 지표면 가열이 건물 지붕 위에서 큰 규모 조직적 난류 구조에 의한 작은 규모 운동량 및 오염물질 플럭스의 변조를 강화하며, 이러한 강화가 주로 큰 규모 상승 운동의 발달에서 기인함을 보였다.

이처럼 기존 연구에서는 열적 안정도에 따른 도시 난류 및 오염물질 수송 특성과 도시 난류의 규모 간 진폭 변조를 각각 분석해 왔다. 그러나 복사 가열과 냉각으로 형성된 서로 다른 열적 안정도 조건에서 큰 규모 난류 변동과 작은 규모 변동의 진폭 사이의 통계적 연관성이 어떻게 달라지고, 이러한 차이가 오염물질 농도 변동과 연직 수송에 어떻게 연결되는지를 함께 분석한 연구는 제한적이다. 따라서 본 연구에서는 복사 강제가 적용된 도시 대기 경계층에서 주간과 야간의 규모별 난류 특성과 큰 규모 난류 구조의 공간 분포를 비교하고, 속도, 온위 및 오염물질 농도에

대해 동일 고도와 서로 다른 고도 사이의 진폭 변조를 정량화하여 복사 가열 및 냉각 조건에서 규모 간 연관성과 그 연직 분포가 어떻게 달라지는지를 조사한다. 또한 큰 규모 연직 난류 열 플럭스의 강도와 부호에 따른 조건부 평균 오염물질 농도장과 연직 난류 오염물질 플럭스장을 분석하여, 진폭 변조 분석에서 확인한 규모 간 통계적 연관성이 실제 오염물질 농도 분포와 연직 수송에 어떻게 나타나는지를 확인한다.

2. 연구 방법

2.1 수치 모형 및 실험 설계

본 연구에서는 Kim *et al.* (2026a)의 큰 에디 모의 자료를 이용하였다. Kim *et al.* (2026a)은 복사 강제에 따른 도시 지표면의 가열과 냉각이 난류 구조와 오염물질 분산에 미치는 영향을 분석하였고, 본 연구는 동일한 자료를 이용하여 난류의 규모 간 통계적 연관성과 이에 수반되는 오염물질 수송의 주·야간 차이를 조사하였다.

큰 에디 모의에는 PALM (PARallelized Large-eddy simulation Model) 6.0을 이용하였다(Maronga *et al.*, 2020). PALM은 부시네스크 근사를 적용한 여과된(filtered) 비정수 나비에-스톡스 방정식을 계산하며, 아격자 규모 난류는 수정된 1.5차 디어도르프 난류 종결 방법으로 모수화한다(Saiki *et al.*, 2000; Moeng and Wyngaard, 1988; Deardorff, 1980). 공간 차분에는 Wicker and Skamarock (2002)의 5차 풍상 차분법을, 시간 적분에는 3차 룽게-쿠타 방법을 사용한다. 계산 격자에는 엇갈린 아라카와 C 격자제를 적용하며, 건물과 지표면에서의 운동량 및 열 플럭스는 모닌-오브코프 상사 이론에 따라 계산한다. 속도, 온위 및 오염물질 농도를 포함한 모든 에단 변수에 대해 수평 방향에는 주기 경계 조건을, 계산 영역 상단에는 노이만 경계 조건을 사용하였다.

계산 영역에는 10×10개의 정육면체 건물을 규칙적으로 배치하였다(그림 1). 각 건물의 높이와 너비

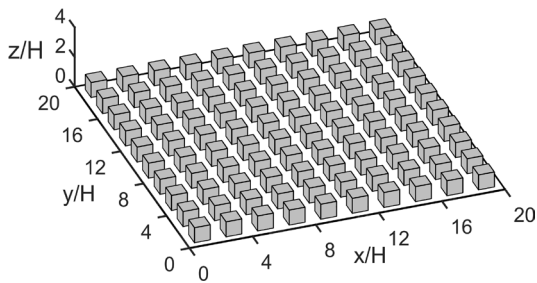


Fig. 1. Schematic of the building array used in this study. The building height is denoted by H . Adapted from Fig. 1 of Kim *et al.* (2026a).

는 모두 32 m이며, 건물 높이를 H 로 정의하였다. 인접한 건물 사이의 간격도 H 로 설정하였다. 계산 영역의 크기는 수평 방향으로 $640\text{ m} \times 640\text{ m}$, 연직 방향으로 3064 m 이다. 수평 격자 간격은 2 m이며, 연직 격자 간격은 고도 200 m 이하에서 2 m로 일정하다. 고도 200~424 m에서는 인접한 격자의 간격이 1.08배씩 증가하고, 고도 424 m 이상에서는 20 m로 일정하다. 건물의 높이와 너비 및 건물 사이의 간격을 모두 32 m로 설정함으로써, 2 m 격자에서 각 길이를 16개의 격자로 표현하였다. Xie and Castro (2006)의 LES 검증 결과를 바탕으로 Maronga *et al.* (2020)은 도시 캐노피 내 주요 난류 구조를 적절하게 나타내기 위해 일반적인 건물 길이에 대해 최소 약 15~20개의 격자점이 필요하다고 제시한 바 있다.

도시 표면은 아스팔트와 콘크리트가 혼합된 표면으로 가정하며, 알베도와 체적 열용량은 각각 0.17과 $2.0\text{ MJ m}^{-3}\text{ K}^{-1}$ 로 설정하였다. 도시 지표면의 복사 수지를 모의하기 위해 RRTMG (Rapid Radiative Transfer Model for General Circulation Models)와 3차원 RTM (Radiative Transfer Model)을 연계하여 사용한다(Krč *et al.*, 2021; Clough *et al.*, 2005). RRTMG는 각 수평 위치의 연직 대기 기둥에 대해 1차원 복사 전달을 계산하며, PALM 전체 계산 영역에서 대기과 복사의 상호작용을 고려한다. 본 연구의 계산 영역보다 높은 대기층은 표준 대기 연직 프로파일을 이용하여 대기 상단까지 연장하여 복사를 계산한다(Maronga *et*

al., 2020). RRTMG에서 계산한 단파 및 장파 복사 플럭스는 RTM의 상부 경계 조건으로 사용된다. RTM은 건물에 의한 차폐와 도시 협곡 내부의 다중 반사를 고려하여 지붕, 벽면 및 지표면 사이의 3차원 복사 교환을 계산하고, 각 표면의 복사 플럭스와 순복사량을 산출한다(Krč *et al.*, 2021). 순복사량은 각 표면의 에너지 수지에 사용되며, 이에 따라 계산된 표면 온도와 대기의 온도 차이는 현열 플럭스를 변화시킨다. 이 과정에서 주간 복사 가열은 상향 현열 수송과 불안정 성층의 발달에, 야간의 복사 냉각은 하향 현열 수송과 안정 성층의 형성에 기여한다. 모의 지점의 위도는 서울에 해당하는 37.49°N 으로 설정하였으며, 모의 시작 시점은 8월 15일 00:00 LST이다.

모의에서는 코리올리 효과를 고려하였다. 초기 풍속 U_0 는 계산 영역 전체에서 10 m s^{-1} 로 설정하였으며, 초기 풍향은 양의 x 방향을 기준으로 시계 방향으로 45° 기울어지도록 복사풍으로 설정하였다. 이는 코리올리 효과에 따른 풍향 변화를 고려하였을 때 수치 모의의 초기 조정 기간이 지난 후 지붕 고도 부근의 평균 풍향이 대체로 양의 x 방향이 되도록 하여 난류 구조와 오염물질 수송의 분석을 용이하게 하기 위함이다. 초기 온위는 고도 700 m 이하에서 293 K로 일정하고, 그보다 높은 고도에서는 0.01 K m^{-1} 의 비율로 증가하도록 설정하였다. RRTMG에서 수증기에 의한 장파 복사의 흡수와 방출을 고려하기 위해 초기 수증기 혼합비의 지표면에서 3.0 g kg^{-1} 이며, 고도에 따라 $8.0 \times 10^{-4}\text{ g kg}^{-1}\text{ m}^{-1}$ 의 비율로 감소한다. 초기 오염물질 농도는 계산 영역 전체에서 $0\text{ }\mu\text{g m}^{-3}$ 이며, 건물 사이의 모든 지표면 격자점에 $1\text{ }\mu\text{g m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ 의 일정한 배출 플럭스를 적용하였다. 오염물질로는 건물 배열 내·외부의 난류 수송 분석에 초점을 맞추기 위해 이상화된 수동 스칼라(passive scalar)를 고려하였다. 주간과 야간에 동일한 배출 플럭스를 적용하여 배출량 변화의 영향을 배제하고, 복사 가열과 냉각에 따른 난류 및 대기 안정도 변화가 오염물질 수송에 미치는 영향을 분리하였다.

수치 적분은 모의 시작 시점부터 총 30시간 동안 수행하였다. 주간과 야간의 평균장과 난류 통계량을 비교하기 위해 각각 8월 15일 14:00~14:30 LST와 8월 16일 02:00~02:30 LST의 자료를, 주간과 야간의 스펙트럼, 진폭 변조 및 조건부 평균 분석을 위해 각각 8월 15일 14:00~15:00 LST와 8월 16일 02:00~03:00 LST의 자료를 분석에 이용하였다. 분석에 사용한 자료의 시간 간격은 2초이다.

2.2 스펙트럼 분석 및 규모 분리

주간과 야간에 나타나는 난류 운동의 규모별 에너지 분포를 조사하기 위해 x 방향 속도 편차 u' 와 연직 속도 편차 w' 의 파워 스펙트럼 밀도(power spectral density)를 계산하였다. 이때 u 와 w 는 각각 x 방향 속도와 연직 속도를, 작은따옴표($\cdot'$)는 시간 평균으로부터의 편차를 의미한다. 스펙트럼은 각 건물 중심에 대응하는 10×10 개의 수평 지점에서 고도별로 계산한 후, 총 100개 지점에서 얻은 결과를 평균하였다. 파워 스펙트럼 밀도는 Welch 방법으로 추정하였다(Welch, 1967). 각 부분 구간은 512개 시점에 해당하는 1024초의 자료로 구성하였으며, 인접한 부분 구간에는 50%의 중첩률을 적용하여 각 1시간 자료에서 총 6개의 부분 구간을 사용하였다.

규모별 에너지 분포는 주파수 가중 파워 스펙트럼 밀도인 $f_{sa}(z, f)$ 로 나타낸다. 여기서 S_{aa} 는 a' 의 파워 스펙트럼 밀도이며, a 는 u 또는 w 를 나타낸다. 주파수 f 는 Taylor (1938)의 동결 난류 가설을 적용하여 x 방향의 등가 파장 λ_x 로 환산한다.

$$\lambda_x(z, f) = \frac{U_c(z)}{f} \quad (1)$$

여기서 $U_c(z)$ 는 각 분석 시간대의 x 방향 속도를 시간 및 수평 방향으로 평균한 값이다. 규모 분리에 사용하는 차단 파장 λ_c 는 주파수 가중 파워 스펙트럼 밀도에 나타난 규모별 에너지 분포를 바탕으로 결정한다. 시간 신호에 이 파장 기준을 적용하기 위한 고도별 차단 주파수 f_c 는 다음과 같이 계산한다.

$$f_c(z) = \frac{U_c(z)}{\lambda_c} \quad (2)$$

이와 같이 계산한 고도별 차단 주파수 f_c 를 기준으로 임의의 변수 a 에 대해 $\lambda_x \geq \lambda_c$ 인 성분은 큰 규모 성분 a_L 로, $\lambda_x < \lambda_c$ 인 성분은 작은 규모 성분 a_S 로 구분한다. 동일 차단 파장 λ_c 는 식(2)에 따라 고도별로 서로 다른 차단 주파수에 대응하므로, 평균 풍속의 연직 변화를 고려하면서 모든 고도에서 동일한 공간 규모를 기준으로 난류 변동을 분리할 수 있다.

2.3 진폭 변조 분석

큰 규모 난류 변동과 작은 규모 변동의 진폭 사이의 연관성을 정량화하기 위해 진폭 변조 분석을 수행하였다(Mathis *et al.*, 2009). 임의의 변수 b 의 시간 평균으로부터의 편차 b' 에 2.2절에서 제시한 규모 분리 방법을 적용하여 작은 규모 성분 b_S 를 계산하였다. 각 지점에서 b_S 의 포락선은 시간 방향의 힐베르트 변환(Hilbert transform)을 이용하여 다음과 같이 계산한다.

$$E[b_S(\mathbf{x}, t)] = |b_S(\mathbf{x}, t) + iH[b_S(\mathbf{x}, t)]| \quad (3)$$

여기서 H 는 힐베르트 변환 연산자를, i 는 허수 단위를 의미한다. 포락선 $E[b_S]$ 에 2.2절에서 제시한 차단 파장을 기준으로 규모 분리를 다시 적용하여 포락선의 큰 규모 성분 $E_L[b_S]$ 를 계산하였다. 이때 $E[b_S]$ 는 작은 규모 변동의 순간 진폭을 나타내며, $E_L[b_S]$ 는 이 진폭에 포함된 큰 규모 성분을 나타낸다.

고도 z_L 에서의 큰 규모 성분 a_L 과 고도 z_S 에서의 작은 규모 성분 b_S 의 포락선의 큰 규모 성분 $E_L[b_S]$ 사이의 진폭 변조 계수는 다음과 같이 계산한다.

$$R(a_L(z_L), E_L[b_S(z_S)]) = \frac{\text{cov}[a_L(z_L), E_L[b_S(z_S)]]}{\sigma_{a_L(z_L)} \sigma_{E_L[b_S(z_S)]}} \quad (4)$$

여기서 cov 와 σ 는 각각 분석 기간에 대해 계산한 시간 공분산과 표준편차를 나타낸다. 양의 진폭 변조 계수는 한 변동이 클 때 다른 변동의 값도 크고, 작을

때 함께 작은 경향을 나타낸다. 음의 계수는 한 변동의 값이 클 때 다른 변동은 작고, 한 변동의 값이 작을 때 다른 변동의 값은 큰 경향을 나타낸다. 진폭 변조 계수는 규모 간 통계적 연관성을 나타내며, 비선형 에너지 전달이나 인과관계를 직접 나타내는 지표로 해석하지 않는다(Cui and Jacobi, 2025).

단일 지점 분석에서는 같은 수평 위치와 고도 ($z_L = z_S$)에서 a_L 과 $E_L[b_S]$ 사이의 진폭 변조 계수를 계산하였다. 두 지점 분석에서는 같은 수평 위치에서 z_L 과 z_S 를 독립적으로 변화시켜 모든 고도 조합의 계수를 계산하였다(Bernardini and Pirozzoli, 2011). 따라서 $z_L - z_S$ 평면의 대각선은 동일 고도에서의 단일 지점 진폭 변조 계수를, 비대각 영역은 서로 다른 고도에 위치한 큰 규모 변동과 작은 규모 변동의 진폭 사이의 연관성을 나타낸다. 단일 지점 분석은 동일 고도에서 큰 규모 성분과 작은 규모 변동의 진폭 사이의 국지적인 연관성이 고도에 따라 어떻게 달라지는지를 나타낸다. 두 지점 분석은 큰 규모 성분의 고도와 작은 규모 변동의 고도를 독립적으로 변화시켜 이러한 연관성이 동일 고도에 제한되는지 또는 인접하거나 떨어진 고도까지 확장되는지를 평가한다. 따라서 두 분석을 함께 적용하면 진폭 변조의 국지성과 연직 확장을 구분하고, 규모 간 연관성이 도시 캐노피 내부와 대기 경계층에서 어떻게 분포하는지를 평가할 수 있다.

각 계수는 건물 중심에 대응하는 100개 수평 지점에서 개별적으로 계산한 후 평균하였다. 두 지점 진폭 변조 계수의 통계적 유의성은 작은 규모 성분의 포락선에 포함된 큰 규모 성분을 시간축에서 원형 이동하여 생성한 대리 자료로부터 계산한 양측 유의확률을 이용하여 평가하였다. 다수의 고도 조합을 동시에 검정함에 따라 발생하는 거짓 양성을 제어하기 위해 Benjamini-Hochberg 거짓 발견율(false discovery rate) 보정을 적용하였으며(Benjamini and Hochberg, 1995), $q < 0.05$ 인 고도 조합을 통계적으로 유의한 것으로 판정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 주·야간 평균 난류 특성

그림 2는 주간과 야간의 평균 수평 풍속, 난류 운동 에너지, 연직 난류 열 플럭스 및 연직 난류 오염물질 플럭스의 연직 분포를 나타낸다. 이때 θ 는 온위를, c 는 오염물질 농도를, 오버바($\overline{\cdot}$)와 꺾쇠괄호($\langle \cdot \rangle$)는 각 분석 시간대에 대한 시간 평균과 해당 고도에서의 수평 평균을 의미한다. 지붕 고도 부근에서는 주간 수평 풍속이 야간보다 빠르지만, 지붕 고도 위에서는 야간 수평 풍속이 급격히 증가하여 주간을 상회한다(그림 2(a)). 야간 수평 풍속은 $z/H = 10.15$ 에서 최댓값인 $1.56U_0$ 로 나타나며, 이후 고도에 따라 감소한다. Nakanishi *et al.* (2014)도 큰 에디 모의를 통해 Wangara 사례의 저녁 전이 과정에서 지표 열 플럭스의 감소와 함께 관성 진동이 시작되고 약 200 m 고도에 저층 제트가 형성됨을 보였다. 이에 비해 주간 수평 풍속은 고도에 따라 상대적으로 완만하게 변한다. 주간 난류 운동 에너지는 지붕 고도 부근에서 크게 나타난 후 고도에 따라 감소하지만, 지붕 고도 위의 넓은 고도 범위에서 야간보다 큰 값을 유지한다(그림 2(b)). 주간과 야간의 최대 난류 운동 에너지는 각각 2.60과 $0.51 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ 이다. 이러한 풍속과 난류 운동 에너지의 연직 분포는 복사 가열이 이루어지는 주간에는 연직 혼합이 강화되어 풍속의 연직 변화가 완화되는 반면, 복사 냉각이 이루어지는 야간에는 난류가 상대적으로 약화됨을 보여준다.

주·야간 난류 혼합의 차이는 연직 난류 열 플럭스의 분포에서도 뚜렷하게 나타난다(그림 2(c)). 주간에는 양의 열 플럭스가 $z/H = 38.48$ 까지 유지되어 지표 부근의 열이 상층으로 수송되며, 대기 경계층 상단에서는 유입(entrainment)에 따른 음의 열 플럭스가 나타난다. 반면 야간에는 지표 부근에서 음의 열 플럭스가 나타나지만, 그 크기는 고도에 따라 빠르게 감소하여 $z/H = 9.71$ 부근에서는 0에 근접한다. 이러한 차이를 대기 경계층의 깊이 측면에서 정량적으로 비교하기 위해 대기 경계층의 고도를 산정하였다. 주

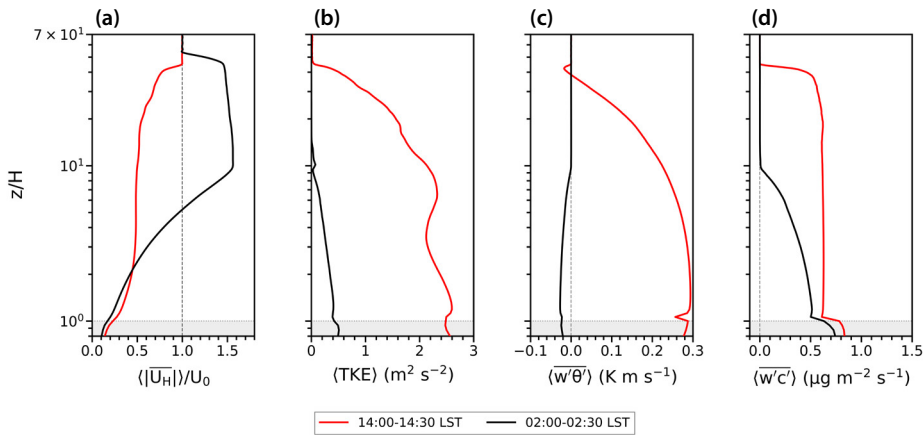


Fig. 2. Vertical profiles of temporally and horizontally averaged (a) horizontal wind speed normalized by the initial wind speed, (b) resolved turbulent kinetic energy, (c) resolved vertical turbulent heat flux, and (d) resolved vertical turbulent pollutant flux during 14:00~14:30 LST (red) and 02:00~02:30 LST (black). Adapted from Fig. 5 of Kim *et al.* (2026a).

간의 경우 대기 경계층 고도를 최대 하향 열 플럭스가 나타나는 고도로 산정하였다(Sullivan *et al.*, 1998). 한편 야간 대기 경계층 고도는 Couvreux *et al.* (2020)의 응력 기반 정의를 도시 캐노피에 맞게 수정하여, 총 난류 응력이 지붕 고도 바로 위 값의 5%로 감소하는 고도로부터 응력이 0이 되는 고도를 선형 외삽하여 산정하였다. 그 결과 주간과 야간의 대기 경계층 고도는 각각 $z/H = 46.22$ 와 9.71 로 나타났다. 이는 주간에는 복사 가열에 의해 깊은 대류 경계층이 발달하는 반면, 야간에는 복사 냉각으로 인해 난류 혼합이 비교적 얇은 안정 경계층에 제한됨을 보여준다. 이러한 혼합 깊이의 차이는 오염물질의 연직 수송 범위에도 반영된다. 연직 난류 오염물질 플럭스는 주간과 야간 모두 지붕 고도 부근에서 양의 값을 보이며, 최댓값은 각각 0.83 과 $0.74 \mu g m^{-2} s^{-1}$ 로 나타난다(그림 2(d)). 그러나 주간에는 양의 오염물질 플럭스가 대기 경계층 내부의 넓은 고도 범위에서 유지되는 반면, 야간에는 안정 성층으로 연직 혼합이 억제되어 지붕 고도 위에서 빠르게 감소하고 $z/H = 9.71$ 이상에서는 거의 나타나지 않는다.

3.2 규모별 난류 에너지 분포

주·야간 x 방향 속도 변동에 기여하는 난류 운동의

규모와 고도 분포를 확인하기 위해 u' 의 주파수 가중 파워 스펙트럼 밀도를 분석하였다(그림 3). 주간에는 지붕 고도 부근과 그보다 높은 대기 경계층 내부에서 u' 에너지가 크게 나타난다(그림 3(a)). 지붕 고도 부근에서는 에너지가 $\lambda_x/H = 10$ 의 양쪽에 걸친 넓은 파장 범위에 분포하는 반면, 고도가 증가할수록 주요 에너지는 $\lambda_x/H > 10$ 에 집중된다. Liu *et al.* (2023c)은 실제 도시 형상을 고려한 큰 에디 모의에 웨이블릿 분석을 적용하여, 흐름 방향 속도 변동 에너지가 집중되는 길이 규모가 거칠기 아층에서 관성 아층(inertial sublayer)으로 고도가 증가할수록 커진다고 보고하였다. 야간에는 u' 에너지가 지붕 고도 부근의 $\lambda_x/H < 10$ 범위에서 가장 크게 나타나며, 고도가 증가함에 따라 빠르게 감소한다(그림 3(b)). 주간에는 $\lambda_x/H > 10$ 의 장파장 에너지가 대기 경계층 내부의 넓은 고도 범위에 분포하는 반면, 야간에는 에너지 분포가 주로 하층의 $\lambda_x/H < 10$ 의 단파장 영역에 제한된다. 한편 주·야간에는 모두 대기 경계층 고도 이상에서 전파장대의 에너지가 매우 약하게 나타난다.

그림 4는 주·야간 w' 의 주파수 가중 파워 스펙트럼 밀도를 나타낸다. 주간에는 w' 에너지가 지붕 고도 부근보다 그 상부의 대기 경계층 내부에서 크게 나타나며, 주요 에너지는 $\lambda_x/H > 10$ 에 분포한다(그림

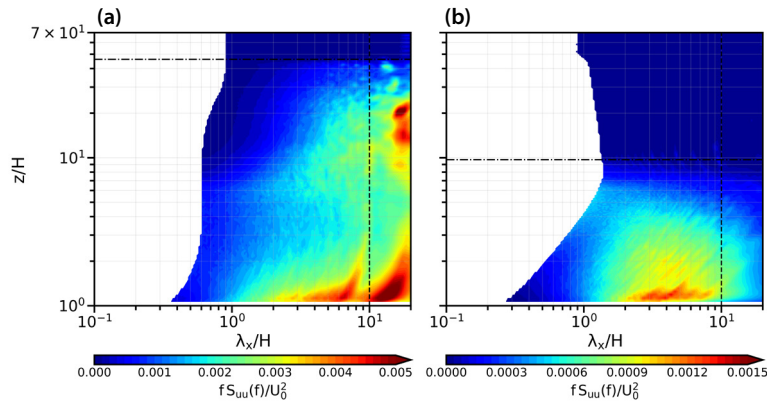


Fig. 3. Premultiplied power spectral densities of x-directional velocity fluctuations during (a) 14:00~15:00 LST and (b) 02:00~03:00 LST. The spectra are averaged over 100 vertical lines located at the building centers and normalized by the square of the initial wind speed, U_0 . The vertical dashed line indicates $\lambda_x/H = 10$, while the horizontal dash-dotted lines indicate the time-averaged boundary layer heights. Note the different color scales used for the daytime and nighttime subfigures.

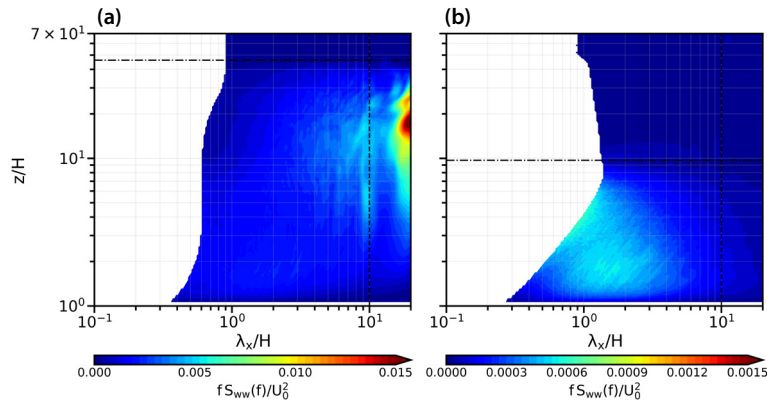


Fig. 4. Same as Fig. 3 except for the vertical velocity fluctuations.

4(a)). 불안정 대기 경계층을 대상으로 한 Salesky and Anderson (2018)은 불안정도가 증가함에 따라 u' 와 w' 스펙트럼의 외층 피크가 변화하며, 유동 구조가 흐름 방향으로 길게 발달한 형태에서 연직 운동이 지배적인 형태로 전환된다고 보고하였다. 이와 유사하게 주간 w' 에너지가 대기 경계층 내부의 큰 규모에 집중된 것은 복사 가열에 의해 발달한 상승 및 하강 운동의 기여를 반영한다. 반면 야간에는 주요 w' 에너지가 $\lambda_x/H < 10$ 에 분포하며, 지붕 고도 부근보다 야간 대기 경계층의 중·하부에서 크게 나타나며, 이보다 높은 고도에서는 w' 에너지가 빠르게 감소한다(그

림 4(b)). 이는 복사 냉각에 의해 안정화된 야간 대기 경계층에서 연직 운동이 비교적 작은 규모와 제한된 고도 범위에 집중되어 있음을 보여준다.

공통 차단 파장을 결정하기 위해 주간과 야간에서 우세한 에너지 범위를 비교하였다. 주간 대기 경계층 내부에서는 u' 와 w' 의 주요 에너지가 대체로 $\lambda_x/H = 15 \sim 20$ 에 집중되는 반면, 야간 하층에서는 두 성분의 에너지가 주로 $\lambda_x/H = 2 \sim 8$ 에 분포하고 10H보다 긴 파장에서 약화된다(그림 3과 4). 이에 본 연구에서는 주간 대기 경계층 내부에서 우세한 장파장 운동과 야간 하층에서 우세한 상대적인 단파장 운동의 주요

에너지 범위를 각각 유지하면서, 동일한 물리적 규모를 기준으로 주·야간 차이를 비교하기 위해 $\lambda_c/H=10$ 을 공통 차단 파장으로 설정한다. 서로 다른 차단 파장($\lambda_c/H=8, 10, 12$)을 적용한 민감도 분석에서도 진폭 변조 계수의 전반적인 연직 분포와 주요 주·야간 대비는 유지되었다(그림 생략). 본 연구에서 적용한 차단 파장은 320 m이다. 이 값은 건물 및 도시 캐노피의 영향을 상대적으로 크게 받는 짧은 규모의 운동과 여러 건물에 걸쳐 발달하는 상대적으로 긴 규모의 운동을 구분하기 위한 기준이다.

3.3 큰 규모 난류 구조의 공간 분포

그림 3과 4에서 적용한 차단 파장 $\lambda_c/H=10$ 을 기준으로 $\lambda_x/H \geq 10$ 인 성분으로 계산한 큰 규모 x 방향 속도 u_L 과 연직 속도 w_L 의 공간 구조를 조사하기 위해, 주·야간 분석 구간의 시작 시각인 14:00 LST와 02:00 LST의 순간장을 비교하였다(그림 5와 6). 수평 단면 분석에서는 주간과 야간의 대기 경계층 내부에서 유사한 상대 고도의 큰 규모 속도 구조를 비교하기 위해, 지붕 고도 근처의 $z/H=1.5$ 와 함께 각 경계층 고도의 약 0.5배에 해당하는 $z/H=23.1$ 과 4.9의 순간장을 각각 분석하였다(그림 5). 그림 5와 6의 u_L 은 모두 동일한 색상 범위를 적용하여 절대적 크기를 비교하였다. w_L 등치선은 14:00 LST에 그림 5와 6에서 각각 ± 0.50 과 $\pm 0.75 \text{ m s}^{-1}$ 로, 02:00 LST에는 두 그림 모두 $\pm 0.20 \text{ m s}^{-1}$ 로 나타났다.

14:00 LST의 $z/H=1.5$ 에서 수평 바람의 평균 풍향은 양의 x 방향과 거의 일치한다. 양과 음의 u_L 영역은 여러 건물에 걸쳐 x 방향으로 길게 이어지고 y 방향으로 비교적 좁은 띠 형태를 이루며, 큰 규모의 고속 및 저속 줄무늬 구조를 형성한다(그림 5(a)). 대체로 강한 양의 u_L 영역은 음의 w_L 등치선과, 강한 음의 u_L 영역은 양의 w_L 등치선과 중첩된다. 이는 각각 고속 공기의 하강에 해당하는 쓸기와 저속 공기의 상승에 해당하는 분출을 나타내며, 두 경우 모두 $u_L w_L < 0$ 인 하향 x 방향 운동량 수송에 기여한다. 이러한 분포는 규칙적인 건물 배열 위에서 흐름 방향으로 길

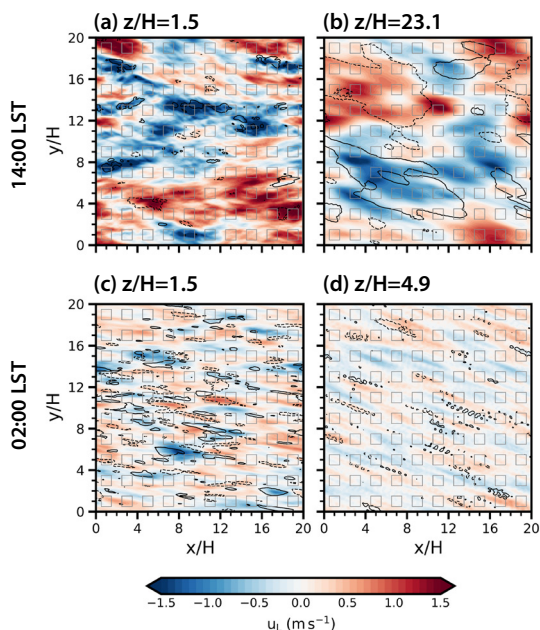


Fig. 5. Instantaneous fields of the large-scale x-directional velocity (shaded) at $z/H=(a, c) 1.5$, $(b) 23.1$, and $(d) 4.9$ at (a, b) 14:00 LST and (c, d) 02:00 LST. The solid and dashed contours indicate the large-scale vertical velocities of 0.5 and -0.5 m s^{-1} , respectively, at 14:00 LST, and of 0.2 and -0.2 m s^{-1} , respectively, at 02:00 LST.

게 발달한 조직적 난류 구조가 나타난다고 보고한 선행 연구와 같은 경향을 보인다(Inagaki and Kanda, 2010; Kanda, 2006). 14:00 LST의 $z/H=23.1$ 에서 평균 풍향은 양의 x 방향에서 시계 방향으로 약 14.81° 기울어져 있다. 이 고도에서는 양과 음의 u_L 영역이 지붕 고도 부근의 줄무늬 구조보다 흐름 방향으로 짧은 그와 수직인 방향으로 긴 세포 형태로 분포한다(그림 5(b)). 양의 u_L 영역에는 음의 w_L 등치선이, 음의 u_L 영역에는 양의 w_L 등치선이 동반되는 경향이 있으며 중·상층에서도 $u_L w_L < 0$ 인 하향 x 방향 운동량 수송이 나타난다. 특히 세포 형태의 하강 영역과 상승 영역은 서로 인접하여 분포한다. 이러한 공간 배치는 열적 대류 세포의 하강부와 상승부에서 나타나는 큰 규모 운동과 유사하다. 따라서 지붕 고도 부근에서는 길고 좁은 줄무늬 구조가 우세한 반면, $z/H=23.1$ 에서는 큰 규모 상승 및 하강 운동이 서로 인

접하여 세포 형태의 대류성 구조를 이룬다.

02:00 LST의 $z/H=1.5$ 에서도 평균 풍향은 양의 x 방향과 거의 일치한다. 일부 u_L 영역이 x 방향으로 연장되어 있지만 주간보다 길이가 짧고 불연속적으로 분포하며, u_L 영역의 절대적 크기도 작다(그림 5(c)). 또한 주간보다 낮은 w_L 등치선 기준을 적용했음에도 등치선 영역의 평균적인 크기가 감소하였다. 이는 야간 하층에서 큰 규모 저속 및 고속 줄무늬 구조와 이에 동반된 상승·하강 운동의 공간적 조직성이 주간보다 약함을 보여준다. 02:00 LST의 $z/H=4.9$ 에서는 평균 수평 풍속이 9.50 m s^{-1} 으로 14:00 LST의 $z/H=23.1$ 의 평균 수평 풍속인 5.76 m s^{-1} 보다 빠르게 나타나지만, u_L 변동과 w_L 등치선이 주간에 비해 뚜렷하게 나타나지 않는다(그림 5(d)). 이는 복사 냉각으로 형성된 얇은 안정 경계층에서 하층의 큰 규모 운동이 상층까지 발달하지 못함을 보여준다.

큰 규모 속도 구조의 연직 분포에서도 뚜렷한 주·야간 차이가 나타난다(그림 6). 14:00 LST의 $x/H=4$ 단면에서는 w_L 등치선이 연직적으로 발달한다(그림 6(a)). $z/H=5$ 이상에서는 상대적으로 큰 연직 규모의 상승·하강 운동과 u_L 영역이 나타난다. 이는 큰 규모 연직 운동이 더 넓은 연직 범위에 걸쳐 나타남을 보여준다. 14:00 LST의 $x/H=6$ 단면에서도 $z/H=5$ 이상에서 연직 규모가 큰 u_L 영역 및 w_L 등치선 구조가 나타난다(그림 6(b)). 양의 u_L 영역에는 음의 w_L 등치선이, 음의 u_L 영역에는 양의 w_L 등치선이 동반되는 경향이 있으며, 이러한 하강 영역과 상승 영역은 서로 인접하여 분포한다. 이와 같은 부호 관계와 공간 배치는 그림 5(b)의 $z/H=23.1$ 수평면에서도 확인된다. 수평면과 연직 단면에서 공통적으로 나타나는 넓은 상승·하강 구조는 주간 대류 경계층에서 나타나는 큰 규모의 대류성 상승·하강 구조와 정성적으로 유사하다.

02:00 LST의 $x/H=4$ 단면에서는 u_L 변동과 w_L 등치선이 주로 $z/H=9.71$ 이하에 분포하며, 특히 $z/H=5$ 아래에서 상대적으로 뚜렷하다(그림 6(c)). $x/H=6$ 단면에서도 큰 규모 속도 변동은 하층에 집중

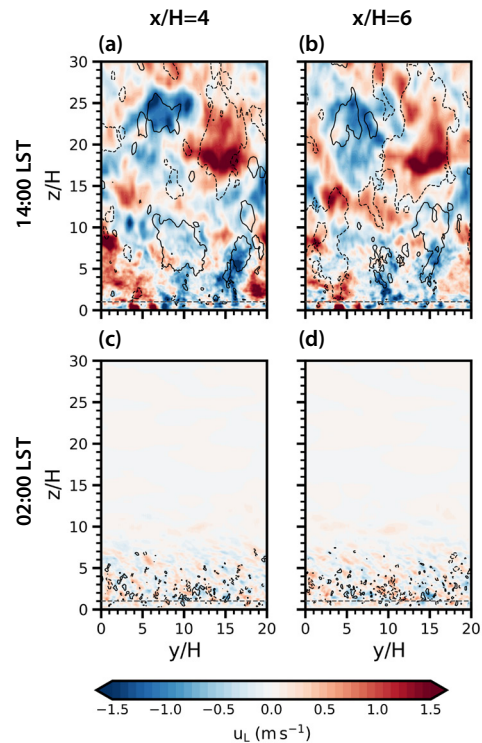


Fig. 6. Same as Fig. 5 except for vertical cross sections at (a, c) $x/H=4$ and at (b, d) $x/H=6$. The solid and dashed contours indicate the large-scale vertical velocities of 0.75 and -0.75 m s^{-1} , respectively, at $14:00 \text{ LST}$, and of 0.2 and -0.2 m s^{-1} , respectively, at $02:00 \text{ LST}$. The gray dashed horizontal line indicates the building height.

되고, $z/H=9.71$ 이상에서는 u_L 과 w_L 이 모두 현저히 약화된다(그림 6(d)). 이러한 연직 범위는 야간 대기 경계층 고도와 대체로 일치하며, 야간의 큰 규모 운동이 얇은 안정 경계층 내부에 제한됨을 보여준다.

그림 3과 4는 1시간 동안의 규모별 에너지 분포를 나타내며, 그림 5와 6은 동일한 규모 분리 기준으로 산출한 순간적인 공간 구조를 보여준다. 두 분석을 종합하면, 주간에는 복사 가열에 의해 큰 규모 상승 및 하강 운동이 대기 경계층 내부의 깊은 층까지 발달한다. 지붕 고도 부근에서는 x 방향으로 길고 좁게 발달한 저속 및 고속 줄무늬 구조가 우세한 반면, 중·상층에서는 양의 u_L 이 동반된 하강 영역과 음의 u_L 이 동반된 상승 영역이 넓은 수평 및 연직 규모 구조로

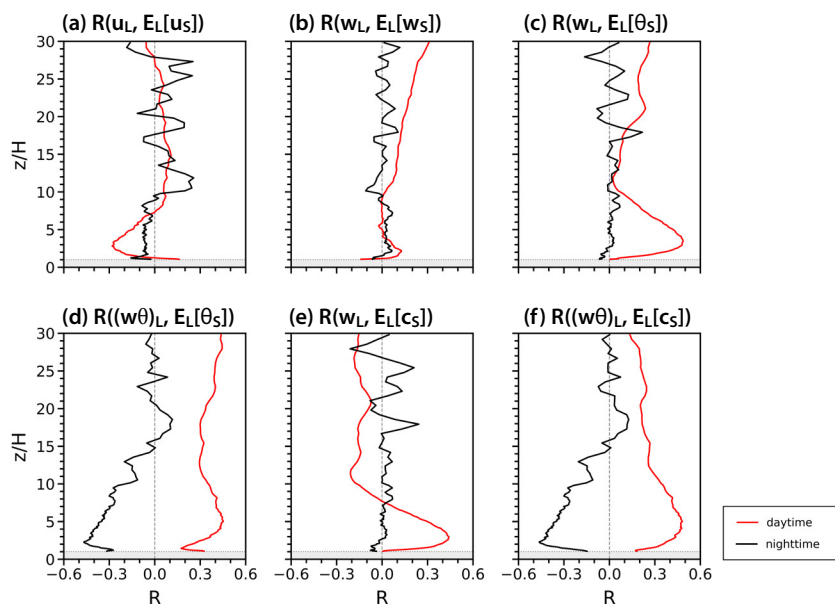


Fig. 7. Vertical profiles of ensemble-averaged single-point amplitude modulation coefficients of (a) large-scale x-directional velocity with small-scale x-directional velocity, (b) large-scale vertical velocity with small-scale vertical velocity, (c) large-scale vertical velocity with small-scale potential temperature, (d) large-scale vertical turbulent heat flux with small-scale potential temperature, (e) large-scale vertical velocity with small-scale pollutant concentration, and (f) large-scale vertical turbulent heat flux with small-scale pollutant concentration during 14:00~15:00 LST (red) and 02:00~03:00 LST (black). The ensemble average is taken over the 100 vertical lines used in Fig. 3.

조직되어 대류 세포와 유사한 구조를 형성한다. 이러한 구조는 중·상층에서의 하향 x 방향 운동량 수송에 기여한다. 반면 야간에는 큰 규모 속도 구조와 연직 운동이 얇은 대기 경계층 하부에 집중되며, 대기 경계층 상부에서는 강한 평균류가 존재하더라도 큰 규모 난류 변동이 현저히 약화된다.

3.4 단일 지점 및 두 지점 진폭 변조 특성

동일 고도에서 큰 규모 성분과 작은 규모 변동의 진폭 사이의 연관성이 고도와 주·야간 조건에 따라 어떻게 달라지는지 조사하기 위해 단일 지점 진폭 변조 계수의 연직 분포를 비교한다(그림 7). 그림 7은 그림 3의 스펙트럼 분석에서 사용한 각 건물 중심과 동일한 10×10 개 수평 지점에서 계산한 단일 지점 진폭 변조 계수의 평균 연직 분포를 나타낸다. 단일 지점 분석에서는 동일 고도에서 큰 규모 x 방향 속도 u_L 와 작은 규모 x 방향 속도 u_s , 큰 규모 연직 속도 w_L 과

작은 규모 연직 속도 w_s , 작은 규모 온도 θ_s 및 작은 규모 오염물질 농도 c_s , 그리고 큰 규모 연직 난류 열 플럭스 $(w\theta)_L$ 와 작은 규모 온도 및 작은 규모 오염물질 농도 사이의 연관성을 분석하였다. 진폭 변조 계수가 양수이면 큰 규모 성분이 증가할 때 작은 규모 변동의 진폭도 증가하고, 큰 규모 성분이 감소할 때 함께 감소하는 경향을 나타낸다. 반면 음수이면 큰 규모 성분이 증가할 때 작은 규모 변동의 진폭은 감소하고, 큰 규모 성분이 감소할 때 작은 규모 변동의 진폭은 증가하는 경향을 나타낸다. 예를 들어, 큰 규모 연직 속도 w_L 과 작은 규모 변동 사이의 진폭 변조 계수를 계산한 경우, 양의 계수는 w_L 이 증가해 큰 규모 상승 운동이 강해질 때 작은 규모 변동의 진폭이, 음의 계수는 w_L 이 감소하여 큰 규모 하강 운동이 강해질 때 작은 규모 변동의 진폭이 증가하는 경향을 의미한다. 큰 규모 연직 난류 열 플럭스 $(w\theta)_L$ 은 큰 규모 연직 속도 w_L 과 큰 규모 온도 θ_L 의 곱인 $w_L\theta_L$ 이

아닌 난류 열 플럭스의 큰 규모 성분으로 정의한다. 또한 계수의 부호는 연직 난류 플럭스의 방향이나 두 변동 사이의 인과관계를 직접 의미하지 않는다.

주간의 $R(u_L, E_L[u_S])$ 은 $z/H \leq 5$ 의 하층에서 음의 값을 보인 후 상층에서 양수로 전환된다(그림 7(a)). 이는 u_S 의 진폭이 하층에서는 큰 규모 저속 상태에서, 상층에서는 고속 상태에서 상대적으로 크게 나타남을 의미한다. 따라서 계수의 부호 전환은 단순한 연직 분포의 변화가 아니라, 작은 규모 난류 활동과 관련되는 큰 규모 속도 상태가 고도에 따라 달라짐을 보여준다. Mathis *et al.* (2009)도 u_L 기반 진폭 변조 계수의 부호 변화를 큰 규모 고·저속 상태와 작은 규모 난류 활동 사이의 관계가 연직적으로 변화하는 특징으로 해석하였다. 한편 주간의 $R(w_L, E_L[w_S])$ 은 대부분의 고도에서 양수이고 중·상층에서 증가한다(그림 7(b)). 이는 작은 규모 연직 속도 변동이 큰 규모 하강 운동보다 상승 운동에서 상대적으로 크며, 이러한 규모 간 연관성이 중·상층에서 더욱 뚜렷하게 나타남을 의미한다. 반면 야간에는 두 속도 기반 계수가 대부분 0에 가까워, 큰 규모 속도 변동의 상태에 따라 작은 규모 속도 변동의 진폭이 체계적으로 달라지는 관계가 약하다. 이러한 주·야간 차이는 복사 가열 조건에서는 큰 규모 연직 운동과 작은 규모 연직 속도 변동이 조직적으로 연관되는 반면, 안정한 야간 대기 경계층에서는 이러한 연직 방향의 규모 간 연관성이 제한됨을 보여준다(Greene and Salesky, 2024; Salesky and Anderson, 2018).

온위와 오염물질 농도 변동에서는 큰 규모 연직 난류 열 플럭스와 관계에 뚜렷한 주·야간 차이가 나타난다. 주간에는 $(w\theta)_L$ 과 작은 규모 온위 및 오염물질 농도 변동의 진폭 사이에 주로 양의 관계가 나타나므로, 두 작은 규모 변동은 큰 규모 연직 난류 열 플럭스가 시간 평균으로부터 양의 편차를 보이는 상태에서 상대적으로 크게 나타난다(그림 7(c)~7(f)). 반면 야간에는 w_L 에 기반한 계수가 대부분 0에 가까운 반면, $(w\theta)_L$ 에 기반한 계수는 대기 경계층 내부에서 음수이다. 이는 야간의 작은 규모 온위 및 오염물질

농도 변동이 단순한 큰 규모 상승·하강 운동과는 뚜렷한 관계를 보이지 않지만, 큰 규모 연직 난류 열 플럭스가 시간 평균으로부터 음의 편차를 보이는 상태에서는 상대적으로 큰 진폭을 갖는 경향을 의미한다. 따라서 주·야간 차이는 진폭 변조 계수의 크기뿐 아니라, 작은 규모 온위 및 농도 변동과 가장 뚜렷하게 관련되는 큰 규모 변동의 종류와 관계의 부호에서도 나타난다.

그림 7에서 확인한 큰 규모 연직 속도 및 큰 규모 연직 난류 열 플럭스와 작은 규모 온위 및 오염물질 농도 변동 사이 동일 고도의 관계가 연직 방향으로 얼마나 확장되는지를 조사하기 위해 두 지점 진폭 변조 계수를 분석하였다(그림 8). 주간에는 통계적으로 유의한 관계가 야간보다 넓은 고도 범위에 나타나지만, 절댓값이 큰 계수는 주로 대각선과 그 주변에 집중된다(그림 8(a), 8(c), 8(e), 8(g)). 이는 큰 규모 연직 운동 및 열 플럭스와 작은 규모 온위 및 오염물질 농도 변동 사이의 관계가 여러 고도에서 확인되더라도, 강한 규모 간 연관성은 주로 동일하거나 인접한 고도 사이에서 형성됨을 의미한다. 즉, 주간의 큰 규모 연직 속도 및 큰 규모 연직 난류 열 플럭스가 대기 경계층 전체의 작은 규모 변동과 일률적으로 연관되기보다, 각 고도 부근의 작은 규모 변동과 주로 국지적으로 연관된다. 야간에는 w_L 에 기반한 연관성이 대부분 약하고, $(w\theta)_L$ 에 기반한 음의 관계도 얇은 대기 경계층 내부의 동일하거나 인접한 고도에 집중된다(그림 8(b), 8(d), 8(f), 8(h)). 따라서 안정한 야간 조건에서는 규모 간 연관성의 강도뿐 아니라 연직 범위도 감소하여, 서로 멀리 떨어진 고도 사이의 연관성이 제한됨을 보여준다.

3.5 큰 규모 연직 난류 열 플럭스에 따른 오염물질 분포와 수송

그림 7과 8에서 확인한 큰 규모 연직 난류 열 플럭스와 작은 규모 오염물질 농도 변동의 진폭 사이의 통계적 연관성이 오염물질의 공간 분포와 연직 수송에 어떻게 나타나는지 조사하기 위해, $z/H=3$ 에서의

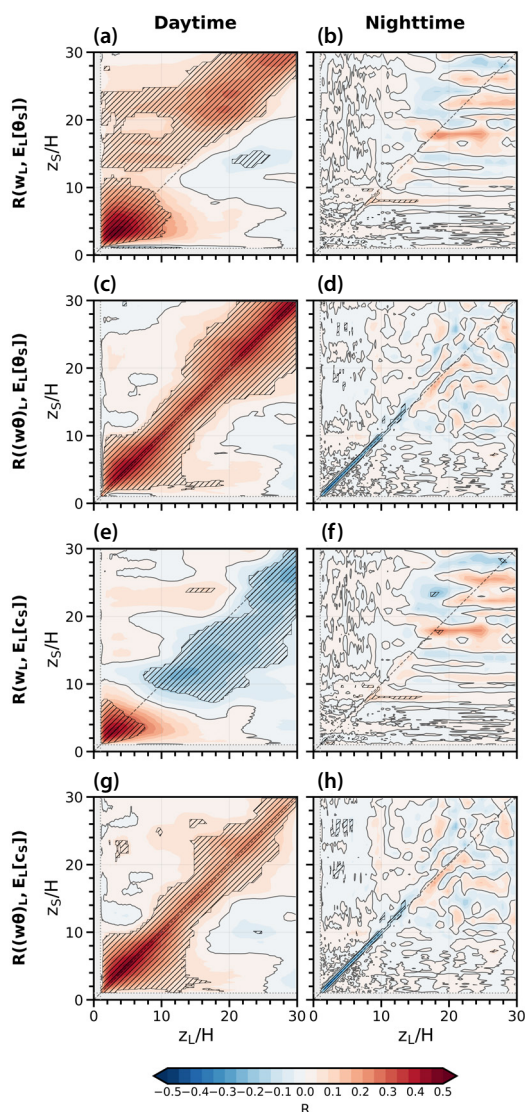


Fig. 8. Fields of ensemble-averaged two-point amplitude modulation coefficients of (a, b) large-scale vertical velocity with small-scale potential temperature, (c, d) large-scale vertical turbulent heat flux with small-scale potential temperature, (e, f) large-scale vertical velocity with small-scale pollutant concentration, and (g, h) large-scale vertical turbulent heat flux with small-scale pollutant concentration during (a, c, e, g) 14:00~15:00 LST and (b, d, f, h) 02:00~03:00 LST. The ensemble average is taken over the 100 vertical lines used in Fig. 3. The dashed diagonal line denotes $z_L = z_s$ and thus corresponds to the single-point amplitude modulation coefficients. The gray contours denote $R=0$. The hatched areas indicate height pairs that remain statistically significant after the Benjamini-Hochberg false discovery rate correction at $q < 0.05$.

큰 규모 연직 난류 열 플럭스 $(w\theta)_L$ 를 기준으로 조건부 평균 분석을 수행하였다. $z/H=3$ 은 그림 7(d)와 7(f)에서 $(w\theta)_L$ 과 작은 규모 온도 및 오염물질 농도 변동의 진폭 사이의 단일 지점 진폭 변조 계수가 주간과 야간 모두 뚜렷하게 나타나는 하층 고도에 해당한다. 조건부 분석을 위해 x 방향으로 나란히 배열된 건물들의 중심을 통과하는 x-z 단면을 선정하였다. 각 단면을 x 방향 길이가 10H인 두 구간으로 나누어 총 20개의 공간 단위를 구성하였으며, 각 공간 단위에 포함된 건물 중 경계를 제외한 중앙의 네 건물 중심에서 $z/H=3$ 의 $(w\theta)_L$ 을 평균하여 조건화 시계열을 계산하였다. 여기서 x"은 각 10H 공간 단위의 시작점을 원점으로 정의한 국지 x 좌표이다. 각 공간 단위에서 조건에 해당하는 사건의 조건부 평균장을 산출한 후, 건물 위치를 일치시킨 20개 공간 단위에 대해 추가적으로 평균하였다. 각 공간 단위에서 $(w\theta)_L$ 의 시간 평균을 제거한 후 해당 표준편차로 표준화(standardization)하였으며, 표준화된 값이 1 이상인 경우를 강한 양의 편차 조건, 0보다 크고 0.5 이하인 경우를 약한 양의 편차 조건, -0.5 이상 0 미만인 경우를 약한 음의 편차 조건, -1 이하인 경우를 강한 음의 편차 조건으로 구분하였다. 이때 표준화된 값의 절댓값이 0.5보다 크고 1보다 작은 중간 강도의 시점은 네 조건에서 제외하였다. 강한/약한 및 양/음의 편차 조건은 $z/H=3$ 의 큰 규모 연직 난류 열 플럭스가 각 공간 단위의 1시간 평균으로부터 벗어난 정도와 그 편차의 부호를 나타내는 구분이며, 전체 난류 강도나 오염물질의 연직 농도 차 또는 절대적인 열 수송 방향을 기준으로 한 것이 아니다. 각 조건에 대해 오염물질 농도와 연직 난류 오염물질 플럭스의 조건부 평균장을 분석하였다(그림 9와 10). 주간에는 강한 양의, 약한 양의, 약한 음의 편차 조건 및 강한 음의 편차 조건에서 각각 142개, 376개, 467개 및 109개의 공간 단위별 사건 표본을 사용하였으며, 야간에는 각각 458개, 706개, 692개 및 418개의 표본을 사용하였다.

주간의 강한 양의 편차 조건에서는 캐노피 내부의 고농도 영역이 캐노피 상부의 $z/H=5$ 부근까지 확장

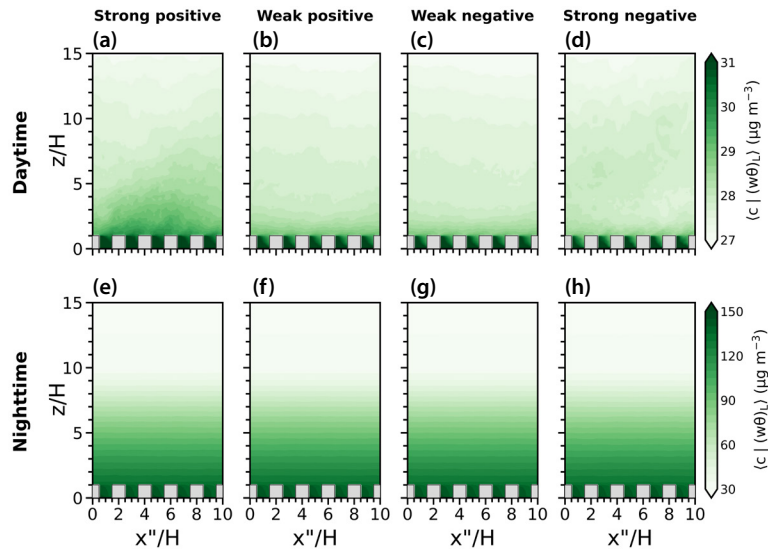


Fig. 9. Fields of ensemble-averaged pollutant concentration for the (a, e) strong positive, (b, f) weak positive, (c, g) weak negative, and (d, h) strong negative deviation conditions of the large-scale vertical turbulent heat flux at $z/H=3$ during (a~d) 14:00~15:00 LST and (e~h) 02:00~03:00 LST. Note the different color scales used for the daytime and nighttime rows.

된다(그림 9(a)). 약한 양의 편차 조건, 약한 음의 편차 조건 및 강한 음의 편차 조건에서는 높은 농도가 주로 캐노피 내부와 지붕 고도 부근에 집중되고 강한 양의 편차 조건과 같은 연직 확장은 나타나지 않으며, 세 조건 사이의 농도 차이도 비교적 작다(그림 9(b), 9(c), 9(d)). 야간에는 모든 조건 하에서 오염물질 농도가 지표면 부근에서 가장 높고 고도에 따라 감소하며 수평 방향으로 비교적 균질한 층상 분포를 보이고 조건 사이의 차이도 작다(그림 9(e)~9(h)). 이는 야간에 오염물질이 얇은 대기 경계층 하부에 주로 분포하지만, 조건부 평균 농도 분포는 큰 규모 연직 난류 열 플럭스 편차의 순간적인 부호와 크기에 따라 크게 달라지지 않음을 나타낸다.

주간에 강한 양의 편차 조건에서는 $z/H=2\sim5$ 를 중심으로 큰 양의 연직 난류 오염물질 플럭스 영역이 나타난다(그림 10(a)). 이는 캐노피 내부의 오염물질이 상부로 수송되면서 그림 9(a)의 고농도 영역이 다른 편차 조건에 비해 위로 확장되는 과정을 보여준다. 약한 양의 편차 조건과 약한 음의 편차 조건에서는 양의 플럭스가 전반적으로 약하고 연속적인 상향

수송 영역도 형성되지 않으며(그림 10(b), 10(c)), 강한 음의 편차 조건에서는 조건화 고도인 $z/H=3$ 부근에서 음의 플럭스가 국지적으로 나타난다(그림 10(d)). 주간 평균 연직 난류 열 플럭스가 양수인 점을 고려하면, 이는 평균보다 큰 양의 열 플럭스 편차가 나타나는 사건에서 캐노피 내부 오염물질의 상층 수송이 강화되는 반면, 강한 음의 편차가 나타나는 사건에서는 조건화 고도 부근의 상향 수송이 약화되거나 하향 수송으로 전환됨을 보여준다. 야간의 강한 양의 편차 조건, 약한 양의 편차 조건 및 약한 음의 편차 조건에서는 약한 양의 플럭스가 주로 도시 캐노피와 그 직상부에 나타나고 고도에 따라 빠르게 감소한다(그림 10(e), 10(f), 10(g)). 강한 음의 편차 조건에서는 조건화 고도인 $z/H=3$ 부근에서 양의 연직 난류 오염물질 플럭스가 상대적으로 크게 나타난다(그림 10(h)). 야간 하층에서 평균 온위는 고도에 따라 증가하고 평균 오염물질 농도는 감소하므로, 상대적으로 저온이고 고농도인 공기의 상승과 고온이고 저농도인 공기의 하강은 모두 음의 열 플럭스와 양의 오염물질 플럭스를 형성한다. 따라서 야간의 강한 음의

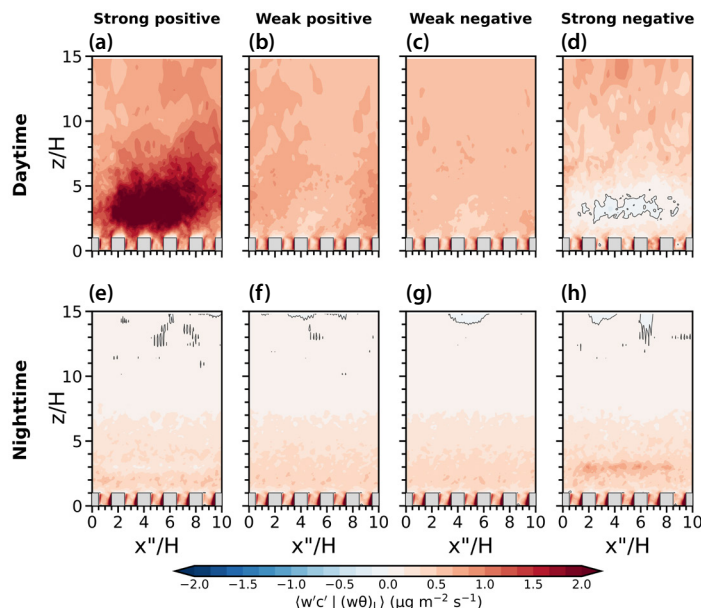


Fig. 10. Fields of ensemble-averaged resolved vertical turbulent pollutant flux for the same large-scale vertical turbulent heat flux deviation conditions as in Fig. 9. The gray contours denote $\langle w'c' | (w\theta)' \rangle = 0$.

편차 조건에서는 더 강한 하향 열 수송과 조건화 고도 부근의 국지적인 상향 오염물질 수송이 함께 나타나며, 그 연직 범위는 얇은 대기 경계층 내부에 제한된다. 이는 앞서 설명한 큰 규모 연직 난류 열 플럭스와 작은 규모 오염물질 농도 변동의 진폭 사이의 음의 연관성이 조건부 수송장에도 나타남을 보여준다.

그림 10에 나타난 두 플럭스 사이의 조건부 연관성은 연직 난류 열 플럭스가 오염물질 플럭스를 직접 변화시킴을 의미하지 않는다. 두 플럭스는 공통으로 연직 속도 변동을 포함하므로, 플럭스 간의 조건부 연관성은 공통된 난류 운동이 온위와 오염물질 농도 변동을 동시에 일으키기 때문에 발생하는 것으로 해석할 수 있다. 따라서 조건부 평균 결과는 실제 도시 대기에서 나타나는 주간의 캐노피 환기와 야간 안정층 내부의 난류가 국지적인 열과 오염물질 재분배에 미치는 영향을 이해하기 위한 근거를 제공할 수 있다. 주간에는 지표 가열에 의해 발생한 강한 상승 운동으로 큰 규모 상향 열 수송이 평균보다 강화되는 시점에 지상에서 배출된 오염물질의 고농도 영역이

캐노피 상부로 확장되고, 양의 연직 난류 오염물질 플럭스도 넓은 고도 범위에서 나타난다. 이는 주간의 열적 불안정이 캐노피 내부 오염물질을 지붕 고도 위의 대기로 수송하는 환기 과정과 연결됨을 보여준다. 반면 야간에는 안정 성층으로 대기의 연직 운동이 주간에 비해 약화되면서 오염물질의 연직 분포와 수송 범위가 얇은 대기 경계층 내부에 제한되지만, 큰 규모 연직 난류 열 플럭스가 음의 편차를 보일 때 조건화 고도 부근의 양의 오염물질 플럭스가 상대적으로 증가한다. 이는 야간의 안정한 도시 대기에서도 하층 오염물질을 국지적으로 상향 재분배하는 연직 교환이 나타날 수 있으나, 이러한 교환이 대기 경계층의 깊은 층까지 확장되지는 않음을 의미한다. 또한 야간 하층에서는 평균 온위와 오염물질 농도의 연직 경도가 반대이므로, 동일한 연직 운동에 의해 음의 열 플럭스와 양의 오염물질 플럭스가 함께 나타날 수 있다. 따라서 열 플럭스와 오염물질 플럭스의 부호를 동일한 수송 방향으로 해석해서는 안 된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 복사 전달 과정이 결합된 PALM의 큰 에디 모의 자료를 이용하여 건물 배열 위에서 나타나는 규모별 난류 특성, 진폭 변조 및 오염물질 수송의 주·야간 차이를 조사하였다. 주간에는 복사 가열로 난류 운동과 양의 연직 난류 열 수송이 강화되었으며, u' 와 w' 의 에너지가 주로 $\lambda_x/H > 10$ 의 장파장 범위에 분포하고 큰 규모 상승·하강 운동이 깊은 대류 경계층 내부까지 발달하였다. 지붕 고도 부근에서는 건물 배열의 영향을 받은 길고 좁은 x 방향 줄무늬 구조가 우세한 반면, 중·상층에서는 큰 규모의 대류성 상승·하강 구조가 나타났다. 주간에는 큰 규모 연직 속도와 작은 규모 연직 속도 변동의 진폭 사이의 양의 상관성이 중·상층에서 강화되었으며, 큰 규모 연직 난류 열 플럭스와 작은 규모 온위 및 오염물질 농도 변동의 진폭 사이에도 동일하거나 인접한 고도 범위에서 양의 진폭 변조 계수가 나타났다. 큰 규모 연직 속도와 작은 규모 오염물질 농도 변동의 진폭 사이의 상관성은 하층에서 양의 값을 보인 후 중·상층에서 약한 음의 값으로 전환되었다. 야간에는 복사 냉각으로 u' 와 w' 의 에너지가 $\lambda_x/H < 10$ 의 비교적 단파장 범위와 얇은 안정 경계층 하부에 집중되었으며, 연직 속도에 기초한 진폭 변조는 전반적으로 약한 반면 큰 규모 연직 난류 열 플럭스와 작은 규모 온위 및 오염물질 농도 변동의 진폭 사이에는 하층에서 음의 진폭 변조 계수가 나타났다. 두 지점 분석에서 비교적 강한 상관성은 주·야간 모두 주로 동일하거나 인접한 고도 범위에 집중되었다. 다만 야간에는 그 고도 범위가 주간보다 좁게 나타났다. 조건부 분석에서는 주간의 강한 양의 열 플럭스 편차 조건에서 고농도 영역이 캐노피 상부로 확장되고 상향 오염물질 수송이 넓은 고도 범위에서 강화된 반면, 야간에는 열 플럭스 조건에 따른 농도장 차이가 작고 강한 음의 열 플럭스 편차 조건에서 조건화 고도 부근의 상향 오염물질 수송이 상대적으로 증가하였다. 두 분석 결과를 함께 고려하면, 주간의 양의 규모 간 상관성은 큰 규모 상향 열 수송의 강화 및 작은 규모 농도 변동

진폭의 증가가 캐노피 상부로의 오염물질 수송과 함께 나타나는 상태를 보여준다. 반면 야간의 음의 규모 간 연관성에 대응하는 수송 변화는 평균 농도장의 광범위한 변화보다 조건화 고도 부근에 제한된 상향 오염물질 플럭스의 증가로 나타났다. 이상의 결과는 복사 가열과 냉각에 따른 열적 안정도 변화가 난류 운동의 규모별 분포와 연직 발달, 규모 간 진폭 변조 및 오염물질의 연직 수송을 함께 변화시킴을 보여준다.

본 연구는 동일한 높이의 정육면체 건물이 규칙적으로 배열된 이상적인 도시 지표면과 특정한 복사 및 기상 조건에서 선정된 주·야간 자료를 대상으로 하였다. 또한 조건부 평균 분석은 단일 고도에서 정의한 큰 규모 연직 난류 열 플럭스 편차 조건을 기준으로 수행하였으므로, 조건화 고도와 사건 분류 기준에 따른 결과의 변화를 추가로 검토할 필요가 있다. 본 연구의 수평 계산 영역은 $640 \text{ m} \times 640 \text{ m}$ 이므로, 계산 영역보다 큰 수평 규모를 갖는 대류 경계층의 대류 구조는 충분히 재현되지 못할 수 있다. 향후 더 넓은 수평 계산 영역을 이용하여 대류 경계층의 대규모 구조가 건물 배열 위의 규모 간 진폭 변조와 오염물질 수송에 미치는 영향을 조사할 필요가 있다. 나아가 건물의 높이와 배열, 표면 열적 특성 및 열적 안정도가 다양한 조건으로 분석을 확장하고, 일몰과 일출 전후의 전이 과정에서 난류의 규모별 구조와 진폭 변조가 어떻게 변화하는지 조사할 필요가 있다. 이와 함께 서로 다른 조건화 고도와 시간 지연을 고려한 분석을 수행하면 큰 규모 운동과 작은 규모 변동 사이의 연직 및 시간적 상관성을 보다 구체적으로 규명할 수 있다. 실제 도시 형태와 반응성 오염물질을 고려한 수치 모의는 복사 강제에 따른 큰 규모 난류 변동과 작은 규모 변동 사이의 상관성이 도시 대기질에 미치는 영향을 평가하는 데 기여할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 지원(RS-2025-00562 044)과 기후에너지환경부의 재원으로 국립환경과학

원의 지원(NIER-2024-03-03-002)을 받아 수행되었습니다.

References

- Anderson, W. (2016) Amplitude modulation of streamwise velocity fluctuations in the roughness sublayer: evidence from large-eddy simulations, *Journal of Fluid Mechanics*, 789, 567-588. <https://doi.org/10.1017/jfm.2015.744>
- Barlow, J.F. (2014) Progress in observing and modelling the urban boundary layer, *Urban Climate*, 10, 216-240. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.03.011>
- Benjamini, Y., Hochberg, Y. (1995) Controlling the false discovery rate: a practical and powerful approach to multiple testing, *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 57(1), 289-300. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1995.tb02031.x>
- Bernardini, M., Pirozzoli, S. (2011) Inner/outer layer interactions in turbulent boundary layers: a refined measure for the large-scale amplitude modulation mechanism, *Physics of Fluids*, 23(6), 061701. <https://doi.org/10.1063/1.3589345>
- Boppana, V.B.L., Xie, Z.-T., Castro, I.P. (2014) Thermal stratification effects on flow over a generic urban canopy, *Boundary-Layer Meteorology*, 153(1), 141-162. <https://doi.org/10.1007/s10546-014-9935-1>
- Cheng, W.C., Liu, C.-H. (2011) Large-eddy simulation of turbulent transports in urban street canyons in different thermal stabilities, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 99(4), 434-442. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2010.12.009>
- Clough, S.A., Shephard, M.W., Mlawer, E.J., Delamere, J.S., Iacono, M.J., Cady-Pereira, K., Boukabara, S., Brown, P.D. (2005) Atmospheric radiative transfer modeling: a summary of the AER codes, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 91(2), 233-244. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2004.05.058>
- Coceal, O., Dobre, A., Thomas, T.G. (2007) Unsteady dynamics and organized structures from DNS over an idealized building canopy, *International Journal of Climatology*, 27(14), 1943-1953. <https://doi.org/10.1002/joc.1549>
- Couvreur, F., Bazile, E., Rodier, Q., Maronga, B., Matheou, G., Chinita, M.J., Edwards, J., van Stratum, B.J.H., van Heerwaarden, C.C., Huang, J., Moene, A.F., Cheng, A., Fuka, V., Basu, S., Bou-Zeid, E., Canut, G., Vignon, E. (2020) Intercomparison of large-eddy simulations of the Antarctic boundary layer for very stable stratification, *Boundary-Layer Meteorology*, 176(3), 369-400. <https://doi.org/10.1007/s10546-020-00539-4>
- Cui, G., Jacobi, I. (2025) Interpretation of the amplitude modulation coefficient and a new transport-based coefficient, *Journal of Fluid Mechanics*, 1002, A35. <https://doi.org/10.1017/jfm.2024.1203>
- Deardorff, J.W. (1980) Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three-dimensional model, *Boundary-Layer Meteorology*, 18(4), 495-527. <https://doi.org/10.1007/BF00119502>
- Finn, D., Clawson, K.L., Carter, R.G., Rich, J.D., Biltoft, C., Leach, M. (2010) Analysis of urban atmosphere plume concentration fluctuations, *Boundary-Layer Meteorology*, 136(3), 431-456. <https://doi.org/10.1007/s10546-010-9510-3>
- Fu, Y., Lin, X., Li, L., Chu, Q., Liu, H., Zheng, X., Liu, C.-H., Chen, Z., Lin, C., Tse, T.K.T., Li, C.Y. (2023) A POD-DMD augmented procedure to isolating dominant flow field features in a street canyon, *Physics of Fluids*, 35(2), 025112. <https://doi.org/10.1063/5.0133375>
- Greene, B.R., Salesky, S.T. (2024) Coherent structures in stably stratified wall-bounded turbulent flows, *Journal of Fluid Mechanics*, 989, A19. <https://doi.org/10.1017/jfm.2024.494>
- Inagaki, A., Kanda, M. (2010) Organized structure of active turbulence over an array of cubes within the logarithmic layer of atmospheric flow, *Boundary-Layer Meteorology*, 135(2), 209-228. <https://doi.org/10.1007/s10546-010-9477-0>
- Kanda, M. (2006) Large-eddy simulations on the effects of surface geometry of building arrays on turbulent organized structures, *Boundary-Layer Meteorology*, 118(1), 151-168. <https://doi.org/10.1007/s10546-005-5294-2>
- Kim, D.-H., Han, B.-S., Hong, S.-H., Park, K., Baik, J.-J. (2026a) Investigation into turbulent coherent structures and pollutant dispersion over radiatively heated/cooled urban surfaces using large-eddy simulation, *Atmospheric Research*, 340, 109089. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2026.109089>
- Kim, D.-H., Han, B.-S., Hong, S.-H., Park, K., Baik, J.-J. (2026b) Scale-dependent turbulent coherent structures and pollutant fluxes over heated urban surfaces: spectral proper orthogonal decomposition and amplitude modulation analysis, *Environmental Fluid Mechanics*, 26(3), 24. <https://doi.org/10.1007/s10652-026-10085-1>

- Krč, P., Resler, J., Sühling, M., Schubert, S., Salim, M.H., Fuka, V. (2021) Radiative transfer model 3.0 integrated into the PALM model system 6.0, *Geoscientific Model Development*, 14(5), 3095-3120. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-3095-2021>
- Li, F., Wang, R., Chen, G., Mo, Z., Ikegaya, N., Liu, C.-H. (2025) Turbulence scale and strength analysis in the roughness and inertial sublayers over urban areas: a wind tunnel study, *Building and Environment*, 267, 112193. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112193>
- Liu, Y., Liu, C.-H., Brasseur, G.P., Chao, C.Y.H. (2023a) Empirical mode decomposition of the atmospheric flows and pollutant transport over real urban morphology, *Environmental Pollution*, 331, 121858. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121858>
- Liu, Y., Liu, C.-H., Brasseur, G.P., Chao, C.Y.H. (2023b) Amplitude modulation of velocity fluctuations in the atmospheric flows over real urban morphology, *Physics of Fluids*, 35(2), 025116. <https://doi.org/10.1063/5.0135475>
- Liu, Y., Liu, C.-H., Brasseur, G.P., Chao, C.Y.H. (2023c) Wavelet analysis of the atmospheric flows over real urban morphology, *Science of the Total Environment*, 859, 160209. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160209>
- 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-Sühling, 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., Sühling, 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>
- Marusic, I., Mathis, R., Hutchins, N. (2010) Predictive model for wall-bounded turbulent flow, *Science*, 329(5988), 193-196. <https://doi.org/10.1126/science.1188765>
- Mathis, R., Hutchins, N., Marusic, I. (2009) Large-scale amplitude modulation of the small-scale structures in turbulent boundary layers, *Journal of Fluid Mechanics*, 628, 311-337. <https://doi.org/10.1017/S00221120090006946>
- Mathis, R., Hutchins, N., Marusic, I. (2011a) A predictive inner-outer model for streamwise turbulence statistics in wall-bounded flows, *Journal of Fluid Mechanics*, 681, 537-566. <https://doi.org/10.1017/jfm.2011.216>
- Mathis, R., Marusic, I., Hutchins, N., Sreenivasan, K.R. (2011b) The relationship between the velocity skewness and the amplitude modulation of the small scale by the large scale in turbulent boundary layers, *Physics of Fluids*, 23(12), 121702. <https://doi.org/10.1063/1.3671738>
- 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)
- Nakanishi, M., Shibuya, R., Ito, J., Niino, H. (2014) Large-eddy simulation of a residual layer: low-level jet, convective rolls, and Kelvin-Helmholtz instability, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 71(12), 4473-4491. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-13-0402.1>
- Roth, M. (2000) Review of atmospheric turbulence over cities, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 126(564), 941-990. <https://doi.org/10.1002/qj.49712656409>
- Roth, M., Inagaki, A., Sugawara, H., Kanda, M. (2015) Small-scale spatial variability of turbulence statistics, (co)spectra and turbulent kinetic energy measured over a regular array of cube roughness, *Environmental Fluid Mechanics*, 15(2), 329-348. <https://doi.org/10.1007/s10652-013-9322-3>
- 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), 1-30. <https://doi.org/10.1023/A:1002428223156>
- Salesky, S.T., Anderson, W. (2018) Buoyancy effects on large-scale motions in convective atmospheric boundary layers: implications for modulation of near-wall processes, *Journal of Fluid Mechanics*, 856, 135-168. <https://doi.org/10.1017/jfm.2018.711>
- Sullivan, P.P., Moeng, C.-H., Stevens, B., Lenschow, D.H., Mayor, S.D. (1998) Structure of the entrainment zone capping the convective atmospheric boundary layer, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 55(19), 3042-3064. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1998\)055%3C3042:SOTEZC%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1998)055%3C3042:SOTEZC%3E2.0.CO;2)
- Talluru, K.M., Baidya, R., Hutchins, N., Marusic, I. (2014) Amplitude modulation of all three velocity components in turbulent boundary layers, *Journal of Fluid Mechanics*, 746, R1. <https://doi.org/10.1017/jfm.2014.132>
- Taylor, G.I. (1938) The spectrum of turbulence, *Proceedings of the Royal Society A*, 164(919), 476-490. <https://doi.org/10.1098/rspa.1938.0032>
- Towne, A., Schmidt, O.T., Colonius, T. (2018) Spectral proper

- orthogonal decomposition and its relationship to dynamic mode decomposition and resolvent analysis, *Journal of Fluid Mechanics*, 847, 821-867. <https://doi.org/10.1017/jfm.2018.283>
- Wang, R., Liu, C.-H., Li, F., Mo, Z. (2024) Turbulent transport mechanism in the roughness sublayers over idealized urban areas and its implication to street-level ventilation, *Sustainable Cities and Society*, 100, 105030. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105030>
- Welch, P.D. (1967) The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms, *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, 15(2), 70-73. <https://doi.org/10.1109/TAU.1967.1161901>
- Wicker, L.J., Skamarock, W.C. (2002) Time-splitting methods for elastic models using forward time schemes, *Monthly Weather Review*, 130(8), 2088-2097. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2002\)130%3C2088:TSMFEM%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2002)130%3C2088:TSMFEM%3E2.0.CO;2)
- Xie, Z., Castro, I.P. (2006) LES and RANS for turbulent flow over arrays of wall-mounted obstacles, *Flow, Turbulence and Combustion*, 76(3), 291-312. <https://doi.org/10.1007/s10494-006-9018-6>
- Zhang, B., Ooka, R., Kikumoto, H. (2022a) Spectral proper orthogonal decomposition analysis of turbulent flow in a two-dimensional street canyon and its role in pollutant removal, *Boundary-Layer Meteorology*, 183(1), 97-123. <https://doi.org/10.1007/s10546-021-00676-4>
- Zhang, B., Ooka, R., Kikumoto, H. (2022b) Spatiotemporal spectral analysis of turbulent structures and pollutant removal in two-dimensional street canyon, *Boundary-Layer Meteorology*, 185(1), 63-91. <https://doi.org/10.1007/s10546-022-00724-7>
- Zhou, K., Liu, C.-H., Mei, D., Wu, B., Wan, M. (2024) Amplitude modulation of turbulence intensities and fluxes in urban convective boundary layers, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 229, 125706. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125706>

Authors Information & Contributions

김동휘 (수도권 미세먼지연구·관리센터 상근연구원, donghwi.kim@inha.ac.kr) Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Investigation, Methodology, Visualization, Writing - original draft

한범순 (인하대학교 환경공학과 조교수, hanbs2001@inha.ac.kr) Writing - review & editing, Supervision, Project administration, Funding acquisition