

도로변 난류특성과 교통량에 따른 차량유발 난류강도 정량화: 도로변 풍상/풍하 측에서의 3차원 풍속 동시 측정에 기반

박용미¹⁾ · 한수빈¹⁾ · 송한결¹⁾ · 이승복²⁾ · 곽경환³⁾ · 김창혁⁴⁾ · 최원식^{1)*}

¹⁾부경대학교 지구환경시스템과학부 환경대기과학전공, ²⁾한국과학기술연구원 지속가능환경연구단,
³⁾강원대학교 환경융합학부, ⁴⁾부산대학교 환경공학과

(접수일: 2023년 5월 9일, 수정일: 2023년 6월 16일, 게재확정일: 2023년 7월 4일)

Quantification of Turbulence Characteristics on the Concentration Distributions of Traffic-related Pollutants Near Roadways

Yongmi Park¹⁾, Subin Han¹⁾, HanGyeol Song¹⁾, Seung-Bok Lee²⁾, Kyung-Hwan Kwak³⁾,
Changhyuk Kim⁴⁾, and Wonsik Choi^{1)*}

¹⁾Division of Earth and Environmental System Sciences, Pukyong National University, Busan, Korea

²⁾Center for Sustainable Environment Research, Korea Institute of Science and Technology, Seoul, Korea

³⁾School of Natural Resources and Environmental Science, Kangwon National University, Gangwon-do, Korea

⁴⁾School of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University, Busan, Korea

(Manuscript received 9 May 2023; revised 16 June 2023; accepted 4 July 2023)

Abstract Turbulence produced on roadways is one of the major factors determining the dilution rates at the initial stage of traffic emissions of air pollutants and, thus, the distribution of air pollutants near the roadways. Field experiments were conducted on Gyeongbu Highway, one of the busiest highways in Korea, for 4~7 days in winter, spring, and summer. Two three-dimensional ultrasonic anemometers were installed on both sides of the highway to estimate turbulence intensities (vertical wind fluctuation and kinetic turbulence energy) induced by the roadway. Roadway-induced turbulence consists of three components: structural road-induced turbulence (S-RIT), thermal road-induced turbulence (T-RIT), and vehicle-induced turbulence (VIT). The contribution of T-RIT to the total RIT was insignificant (less than 10%), and the majority of RIT was S-RIT (by the highway embankment) and VIT. In this study, we propose the empirical relationships of VIT as a function of traffic density and wind speed under free-flow traffic conditions. Although this empirical relationship appears to underestimate the VIT, it can be applied to the air quality models easily because the relationship is simple and only needs readily obtainable input variables (wind speed and traffic information).

Key words: Highway, Turbulence, Structural Road-Induced Turbulence (S-RIT), Vehicle-Induced Turbulence (VIT)

*Corresponding Author: Wonsik Choi, Division of Earth and Environmental System Sciences, Pukyong National University, 45, Yongso-ro, Nam-gu, Busan 48513, Korea.
Phone: +82-51-629-6640, Fax: +82-51-629-6638
E-mail: wschoi@pknu.ac.kr

1. 서 론

복잡한 건축 환경과 밀집한 도로망을 가지는 도심에서 도로이동오염원에 의한 배출은 대기오염물질 농도의 수준과 분포를 결정하는 주요한 요인으로 도심 대기질에 큰 영향을 미친다. 차량 배출로 인한 대기오염물질의 농도는 공간적, 시간적 편차가 크며 도심 캐노피 이하에서는 주변 건축환경에 의해 변형된 국지 기상의 영향과 비균질적인 교통특성에 기인한 배출 변동성으로 인하여 국지적으로 고농도의 Hotspot이 형성될 수 있다(Kim et al., 2014). Hagler et al. (2009)는 아침 출근 시간에 도로에서 20 m 떨어진 풍하 지점에서 공기역학적 입경이 100 nm 보다 작은 나노미세먼지(Ultrafine particles, UFP)의 농도가 풍상 지점보다 5배가 높았음을 관측했고, 이를 도로 위 차량 배출에 기인하였음을 제시하였다. 또한, Choi et al. (2012)는 대기의 난류가 강하고 확산이 잘 일어나는 낮시간에는 도로에서 생성되는 배출의 영향이 300 m 내외지만, 대기가 안정한 조건일 때는 도로 플룸이 2 km까지 도달함을 보였다. 따라서 도로 주변 오염물질의 공간적 농도 변동을 이해하는 것은 도로배출에 대한 인간의 노출과 위해성 평가에서 중요한 요소이다.

도로 근처에서 대기오염물질 농도의 변동은 주로 희석과 난류확산에 의해 이루어진다(Kumar et al., 2011). Zhang and Wexler (2004)는 도로 주변에서 자동차 배기가스에서 배출되는 물질은 두단계의 희석 과정을 거치는 것으로 제시하였다. 첫째 단계는 자동차 배기구에서 배출된 직후에 대기 조건과 상관없이 차량에 의해 발생하는 난류에 의해 약 1~3초 이내의 시간 규모로 주변 공기와 1000:1의 비율로 희석되는 과정이며, 두 번째 단계는 도로 플룸이 도로로부터 이동하면서 대기 난류에 의해 확산되면서 희석되는 과정으로 약 3~10분 이상의 시간 규모로 주변 공기와 10:1 비율로 희석된다(Zhang and Wexler, 2004). 희석은 도로 주변의 난류에 의한 혼합으로 발생하며 도로 위에서 난류 강도에 영향을 미치는 3가지 요인은 지표면 가열로 발생한 부력에 의한 난류 생성(Xie et al., 2005); 도로 위의 중앙분리대나 도로 가장자리 둑 또는 방음벽과 같은 도로 구조물에 의해 물리적으로 발생하는 난류생성(Baldauf et al., 2008) 그리고 도로를 통행하는 차량에 의해 발생하는 난류를 포함한다. 이중 지표면 가열로 생성된 난류를 Thermal Road-Induced Turbulence (T-RIT), 도로 주변 구조물에 의해 생성된 난류를 Structural Road-Induced Turbulence (S-RIT)라고 하며(Wang and Zhang, 2009), 차량 흐름에 의해 발생한 난류를 Vehicle-Induced Turbulence (VIT)로 정의한다(Wang and Zhang, 2009). 차량의 흐름에 의해 발생하는 난류는 비행기 후류의 난류와 유사할 수 있

으나, 많은 차량이 양방향으로 함께 이동하는 도로환경의 특성상 개별 차량이 생성하는 난류가 주변의 다른 많은 차량이 생성한 난류들과 상호작용을 통해 매우 복잡적으로 작용할 수 있고, 다양한 크기의 차량이 다양한 속도로 이동함으로써 단위 개체의 영향만을 고려하기 어렵다.

도로 위에서 발생하는 난류의 정량적 평가는 전산 유체역학 모형과 같은 모델링을 통한 계산적 방법이 나(Wang et al., 2011; Huertas et al., 2020) 풍동 실험과 같은 실험실 모의 실험(Kastner-Klein et al., 2000)을 통해 수행되어져 왔으나, 실제 도로와 교통 환경에서 측정에 기반한 평가는 매우 제한적으로 이루어졌다(Rao et al., 1979; Kalthoff et al. 2005; Gordon et al., 2012; Miller et al., 2019). 선행 연구 결과에 의하면 VIT는 차량의 종류와 속도와 관계가 있고, 특히 도로 근처의 소규모 환경에서 상당한 영향을 미치는 것으로 알려졌다(Bäumer et al., 2005; Kalthoff et al. 2005). Kalthoff et al. (2005)는 고속도로 옆에 3차원 풍향풍속계를 설치하여 난류를 측정하였고, 그 결과 도로에서 3 m 떨어진 풍하 지점의 난류운동에너지(Turbulence Kinetic Energy, TKE)는 풍상 지점에 비해 70% 증가하였고, 수직풍속의 변동 강도(σ_w)는 50% 증가하였음을 보였다. Gordon et al. (2012)은 고속도로에서 모바일 플랫폼을 이용하여 차량을 추적하면서 난류를 측정하였고, 그 결과 난류운동에너지 파워 스펙트럼에서 0.015 Hz 이상의 고주파수 영역에서 차량의 통행에 의한 강도 증가가 발생하였음을 보였다. 그러나 측정에 기반한 선행 연구는 대부분 특정 환경에서의 정성적인 특성 분석에 초점을 맞추었고 실제 도로환경에서 교통량과 교통조성에 따른 차량유발 난류의 정량화를 목적으로 한 연구는 찾아보기 어렵다.

본 연구에서는 차량에 의해 유발되는 난류 특성을 파악하기 위해 주변 건물의 영향이 거의 없고, 지형이 복잡하지 않으며 교통 흐름 외 다른 난류 발생원이 없는 교외지역의 고속도로 양편에 3차원 풍속계를 설치하여 교통량에 따른 차량유발 난류(VIT)의 강도와 특성을 분석하고 정량화 하고자 한다.

2. 측정 방법

2.1 측정 사이트

도로에서 유발된 난류 강도를 측정하기 위해 주변에 공기의 흐름을 변형시킬 수 있는 구조물이 적고 도로를 통행하는 교통량이 요일에 따라 일정하게 많은 조건에 부합하는 경부고속도로의 안성시 구간을 측정지로 선택하였다. 측정 위치는 경부고속도로의 중간 경유지인 경기도 안성에서 복천안 구간 내 안성천교가 위치한 부근이었다. 2020년 교통량 통계 기준으

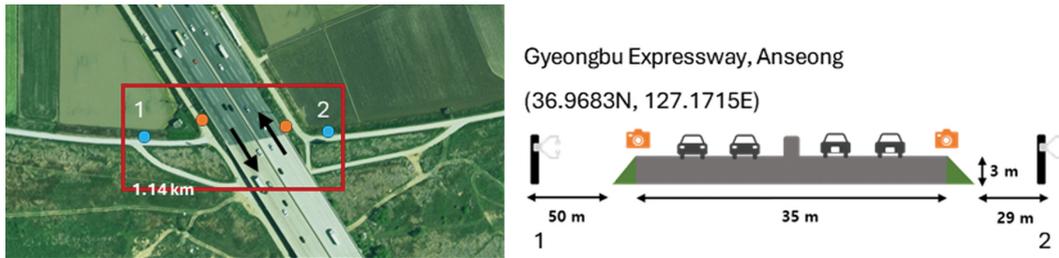


Fig. 1. Satellite image of measurement site (36.9683N, 127.17115E) (left) and the schematic of instrument installation (right). The orange and blue circles (left figure) represent the locations of video cameras and 3D-sonic anemometers, respectively.

로 전국고속도로 32개구간 중 측정 구간은 5번째로 많은 교통량을 기록한 구간이다(Korea Expressway Corporation, 2022). 일평균 166,219대의 차량이 통행하고 주말보다 평일에 차량 통행량이 상대적으로 많은 지점이다. 고속도로는 너비 약 35 m의 왕복 8차선 도로이며, 도로 중앙에 높이 1.27 m 정도의 중앙분리대가 있다. 고속도로는 주변 지면보다 약 3 m 정도 높은 독 위에 놓여 있으며 도로 주변은 모두 논과 밭으로 구성된 평평한 단순지형으로 구성되어 있다(Fig. 1).

2.2 측정 항목 및 기간

도로에서 유발되는 난류를 측정하기 위해 고속도로 변 양쪽의 지상 약 3 m 높이에 두 대의 3차원 초음파 풍속계(CSAT3, Campbell Scientific)를 설치하였다(Fig. 1). 서쪽의 풍속계는 도로로부터 약 50 m 떨어져 있어 기상조건이 풍상인 조건에서 배경 대기 난류의 특성을 파악하는데 사용되었다. 풍속계는 10 Hz의 시간해상도로 3차원 풍속(u, v, w)과 온도(T)를 측정하였고, 측정 자료를 사용하여 난류 운동에너지(TKE), 수직 난류 강도(σ_w), 수직 열속(Heat Flux, HF)을 계산하였다(식 1-3).

$$\sigma_w = \sqrt{\overline{w'^2}} \tag{1}$$

$$TKE = 0.5(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \tag{2}$$

$$HF = \rho C_p \overline{w'T'} \tag{3}$$

여기서 u', v', w', T' 은 각각 along-wind, cross-wind, vertical wind 및 온도의 순간적인 fluctuation 값을 나

타내고(예, $u' = u - \bar{u}$), 수평 막대 기호(overbar)는 특정 기간의 평균을 나타낸다(본 연구에서는 30분의 기간을 사용). ρ 와 C_p 는 각각 공기의 밀도와 비열을 의미한다. 이와 같은 난류 파라미터를 계산하기 전에 원 측정자료는 이중회전 좌표변환(double-rotation coordinate conversion)을 이용하여 항상 u 방향을 바람이 진행하는 방향(streamwise)으로 하였다. 또한 시공간적 균질성을 가정하여 난류 파라미터 계산 전 linear detrend 방법을 사용하여 30분 이상의 시간 변동성을 제거하였다. 보다 자세한 난류 계산을 위한 원자료의 전처리 과정은 Stull (1988)과 Choi et al. (2011)에 기술되어 있다. 난류 강도는 설정하는 시간 기간에 따라 그리고 바람의 방향에 따라 축을 회전하는 방법에 따라 결과가 달라질 수 있는데, 본 연구에서 사용한 방법은 보성타워에서 측정된 자료를 바탕으로 eddy dissipation rate을 평가한 선행연구와 근본적으로 동일하다(Kim et al., 2021).

교통량과 차량 조성이 차량유발 난류 생성에 미치는 영향을 분석하기 위해 고속도로변 양측에 비디오 카메라를 설치하였다. 교통량과 차량 조성은 측정 후에 녹화된 영상을 분석하여 획득하였다. 영상 분석을 위해 매 30분 간의 영상에 대해 각 차종에 대한 통행 차량 대수를 기록하여 30분 간격의 교통 자료를 추출하였다. 차종은 경차, 승용차, SUV, 소형-, 중형-, 대형-트럭, 버스로 분류하였다. 그러나 야간에는 녹화 영상 자료가 없기 때문에 24시간에 대한 자료는 고속도로공공데이터 포털에서 제공하는 측정 위치 인근의 전체 교통량(15분)과 속도(1시간) 자료를 이용하였다(Korea Expressway Corporation, 2022).

Table 1. Measurement periods and deployed instruments.

Season	Period	Precipitation	Instrument
Winter	2021.02.28-03.05	02.28	3D Sonic Anemometers (2 sets) and
Spring	2021.05.22-05.28	05.24, 05.26	Video cameras (2 sets)
Summer	2021.08.29-09.01	08.29, 09.01	3D Sonic Anemometers (2 sets)

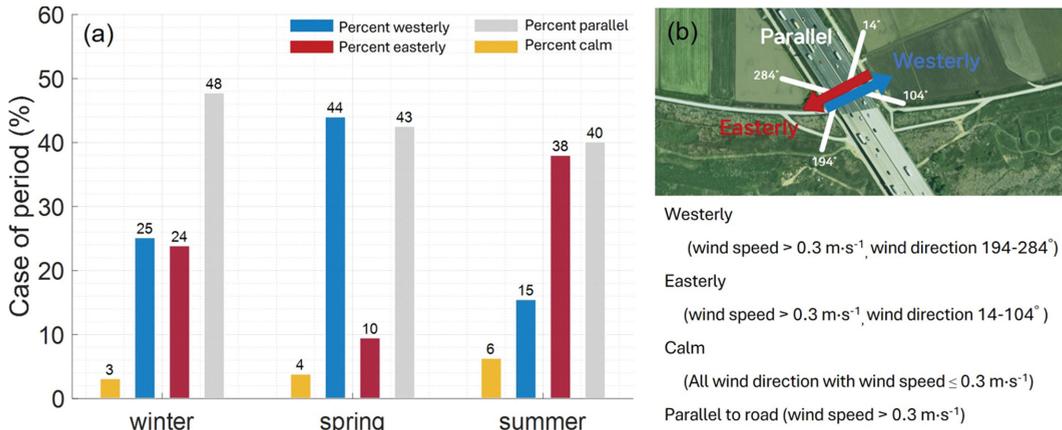


Fig. 2. (a) Wind direction distributions (%) during the measurement periods. Yellow bars represent calm conditions (wind speed ≤ 0.3 m s⁻¹). Gray bars denote wind conditions parallel to the highway, and blue and red bars westerly and easterly conditions, respectively. (b) Graphical depiction of wind conditions classified.

측정은 2021년의 겨울과 봄에는 7일간, 여름에는 4일간 수행되었다. 그러나 봄에는 도로에서 서쪽에 위치한 3차원 초음파 풍속계의 결함으로 23일과 28일 자료만 존재하였다. 여름에는 많은 강우가 발생하여 측정 일수가 적었으며, COVID-19의 확산에 따른 사회적 거리두기 시행으로 인해 교통량 측정은 수행되지 못하였다(Table 1).

2.3 기상조건 분류

측정 대상 고속도로는 북쪽을 기준으로 북서-남동방향으로 31° 기울어져 있다. 따라서 도로로부터 이동해 온 공기괴의 난류 특성을 고려하기 위해 측정 기간의 풍향을 다음과 같이 도로를 기준으로 3방위로 분류하였다(Fig. 2): 도로 수직방향 ±45° 이내의 서풍 계열(Westerly; 풍향 194°~284°); 도로 수직방향 ±45° 이내의 동풍 계열(Easterly; 풍향 14°~104°); 도로방향에 ±45° 이내로 평행한 남풍 또는 북풍 계열(Parallel; 기타 풍향); 무풍(Calm; 풍향과 상관없이 풍속 < 0.3 m s⁻¹).

무풍 조건은 겨울 측정자료의 3%, 봄 측정자료의 4%, 여름 측정자료의 6%를 차지하였다. 겨울에는 전체 측정자료 중 고속도로에 수직한 풍향이 49%를 차지하였고(서풍계열과 동풍계열이 각각 25%와 24%), 봄에는 서풍계열의 풍향이 대부분을 차지하였으며(44%), 여름에는 동풍계열 풍향의 비율이 높았다(38%).

3. 결과 및 토의

3.1 교통량 및 차량조성

측정기간의 평균 시간당 교통량은(vehicles h⁻¹)은 출근 시간(6시) 부터 퇴근 시간(17시)까지 증가하는 경

향을 보이며, 새벽시간 대에 감소하는 단봉 분포를 보였다(Fig. 2a). 오전 시간(7~12시)의 상행선(북쪽 방향) 교통량은 하행선(남쪽 방향)의 교통량보다 1.4배 많았고, 이러한 차이는 주중과 주말이 유사하였다. 그 외의 시간에는 상행선과 하행선의 교통량 차이가 180 vehicles h⁻¹ 이내로 큰 차이가 없었다. 측정 기간의 평균 통행 속도는 100.6 km h⁻¹였고, 7-8시에 105 km h⁻¹로 가장 빨랐으나 평균 속도와 큰 차이는 없었다(Fig. 2b). 전반적으로 측정 기간의 양방향 평균 교통량은 약 140,000 vehicles h⁻¹이었고, 시간대별 평균 통행 속도가 90 km h⁻¹ 이상을 유지하였기 때문에 차량 흐름이 원활한 교통 환경이었다.

이러한 일정한 자유흐름의 교통 환경에서는 차속이 차량유발 난류에 미치는 영향은 일정하였을 것으로 판단된다. 따라서 차량유발 난류는 단위시간당 통행하는 차량이 많을수록(다차선 도로에서는 단위 면적을 통과하는 차량 밀도가 클수록) 더 강하게 발생할 것으로 예상된다. 이에 본 연구에서는 시간당 교통량을 차량 속도와 도로 너비로 나눔으로써 단위면적당 차량 수(vehicles km⁻²)를 추정하였다(식 4). 단위면적당 차량 수는 교통 속도가 일정하게 유지되었기 때문에 시간당 교통량의 변동성과 유사한 분포를 보였다(Fig. 2c). 퇴근 시간 대 (16~18시) 양방향 평균 차량 대수는 2,428 vehicles km⁻²로 가장 조밀하였고, 새벽 시간(1~4시)의 평균 양방향 차량 대수는 354 vehicles km⁻²로 최소값을 나타내었다.

$$\begin{aligned} & \text{단위면적당 차량 수(vehicles km}^{-2}\text{)} \\ &= \frac{\text{시간당 교통량 (vehicles h}^{-1}\text{)}}{\text{차량속도(km h}^{-1}\text{)} \times \text{도로 너비(km)}} \end{aligned} \quad (4)$$

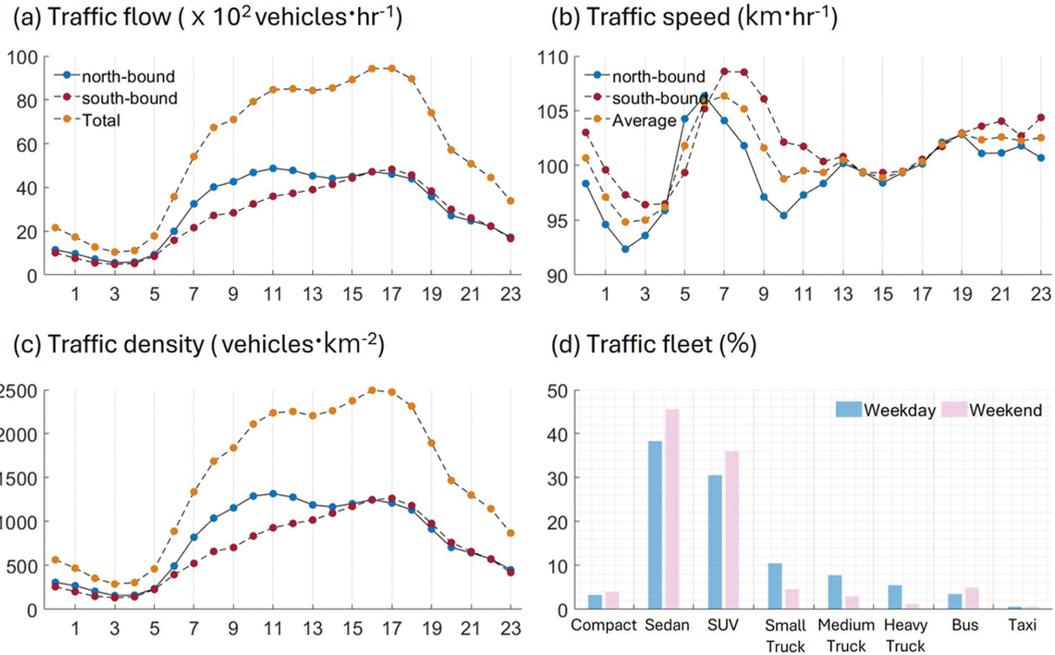


Fig. 3. Diurnal variations of traffic parameters. (a) Hourly traffic flow rate, (b) hourly traffic speed, and (c) traffic density (flow rate divided by speed and road width). Blue, red, and orange lines with circles represent northbound, southbound, and the total traffic, respectively. (d) Composition of traffic fleet (blue: weekdays and pink: weekends).

차량조성에 따라서 주중, 주말의 교통 특성을 살펴 보았다(Fig. 3d). 주중의 차량 조성은 세단 38.3%, SUV 30.6%, 트럭 23.8%, 버스 3.5%, 경차 3.3%였다. 주말의 차량 조성은 세단 45.6%, SUV 36.0%, 트럭 8.8%, 버스 5.0%, 경차 4.0%로 주중의 트럭비율은 주말에 비해 약 3배가량 높았다. 주말의 트럭 비율이 감소하면서 승용차(세단, SUV, 경차) 비율이 상대적으로 증가하여 주말 차량 조성의 85.6%를 차지했다. 주중 하루 평균 양방향 교통량(약 140,000 vehicles day⁻¹)은 주말의 120,000 vehicles day⁻¹에 비해 약 20,000 vehicles day⁻¹ 높았는데, 이는 트럭의 통행량 차이에 기인한 것으로 보인다(주중 트럭 평균 대수 33,320 vehicles day⁻¹ vs. 주말 트럭 평균 대수 10,560 vehicles day⁻¹).

3.2 고속도로 양쪽에서의 난류 분포 차이

겨울(2월)과 봄(5월) 측정에서는 서풍 계열, 여름(8월) 측정에서는 동풍 계열의 바람이 우세하였다. 주변 건물이 없는 단순 지형이므로 도로 기준으로 양쪽의 풍향 분포는 유사하였지만, 주풍 방향(along-wind)의 풍속은 경부고속도로를 통과하면서 감소하였다. 풍속의 감소 원인은 도로 구조에 의한 영향도 있지만, 차량 흐름이 끊이지 않고 차체가 중·대형 트럭이 많이 지나는 고속도로의 특성상 차량 난류에 의한 영향도

한 있었을 것으로 생각된다(즉, 수평바람의 일부가 수직바람으로 변환). 실제로 측정된 수직 바람의 난류강도 σ_w 는 고속도로를 통과한 후 뚜렷하게 증가하여 이를 뒷받침한다(Fig. 4a).

앞절에서 분류한 기상 조건에 따라 두 측정 지점에서의 난류 강도 분포가 차이를 나타내었다(Fig. 4). 겨울의 평균 풍속은 1.4 m s⁻¹로 봄(1.1 m s⁻¹)과 여름(1.0 m s⁻¹)에 비해 약간 강하였다. 겨울철 σ_w 는 도로에 수직인 서풍계열의 바람 조건(Fig. 2b의 Westerly)에서 풍하 측인 고속도로의 동쪽이 풍상 측인 서쪽에 비해 130% 더 강한 분포를 나타내었다. 반대로 도로에 수직인 동풍계열의 바람 조건(Fig. 2b의 Easterly)에서는 풍하 측인 고속도로 서쪽에서 풍상 측인 고속도로 동쪽보다 132% 더 강한 σ_w 가 발생하였다(Table 2). 겨울에 비해 상대적으로 풍속이 약했던 여름에는 겨울에 비해 뚜렷하지는 않지만, 타 계절과 유사하게 풍향에 따라 차이를 보였다(서풍계열 바람 조건의 풍하 측에서 53%, 동풍계열 바람 조건의 풍하 측에서 풍상 측에 비해 42% 더 강한 σ_w). 이러한 결과는 바람이 풍상 측에서 풍하 측으로 고속도로를 가로지르며 수직 난류 강도가 일관적으로 증가했음을 지시하며, 수직 난류 강도를 증가시키는 외부 변수는 고속도로 구조물, 고속도로를 통행하는 차량, 고속도로 지표면

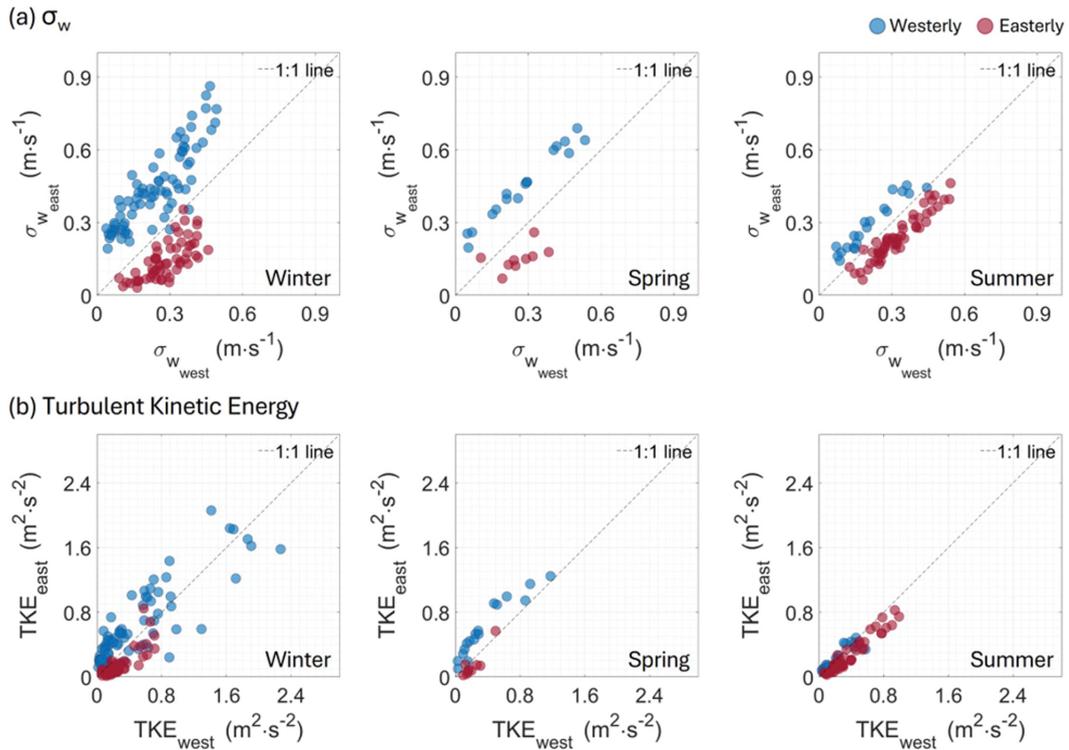


Fig. 4. Scatter plots of (a) vertical turbulence intensity (σ_w) and (b) TKE (turbulence kinetic energy) between monitoring locations (subscripts east and west in axis title denote the east side of highway and west side of the highway, respectively) in winter (left), spring (middle), and summer (right panel). Blue and red colors denote Westward and Eastward period, respectively, as classified in Fig. 2b).

Table 2. Mean enhancement ratio in turbulence intensities between downwind and upwind locations relative to those of upwind ($\frac{\text{downwind} - \text{upwind}}{\text{upwind}}$) under classified meteorological conditions (Westward vs Eastward period in Fig. 2b). Numbers in parentheses denote the standard deviation.

Season	Vertical turbulence intensity (σ_w)		TKE (turbulence kinetic energy)	
	Westerly	Easterly	Westerly	Easterly
Winter	1.30 (1.1)	1.32 (1.0)	1.42 (1.8)	1.56 (1.5)
Spring	1.07 (1.1)	0.80 (0.6)	1.31 (1.3)	1.30 (1.2)
Summer	0.53 (0.4)	0.42 (0.3)	0.30 (0.4)	0.65 (0.5)

가열로 인한 부력을 고려할 수 있다.

난류운동에너지(TKE) 역시 기상 조건에 따라 풍하 측 지점의 강도가 풍상 측 지점보다 강한 경향성을 보였으나 수직 난류 강도인 σ_w 보다는 그 차이가 크지 않았다(Fig. 4b; Table 2). 기상 조건에 따라 주요 도로의 풍하 측에서 더 강한 σ_w 와 TKE가 발생한 것은 선행 연구인 Kalthoff et al. (2005)의 결과와 일치한다. 난류운동에너지보다 수직 난류 강도의 차이가 큰 것은 수평바람 성분의 증가보다 수직바람 성분의 증가

가 더 뚜렷하게 나타났거나, 수평바람 성분의 일부가 수직바람 성분으로 변환되었기 때문인 것으로 보인다. 측정 지역의 풍상과 풍하 측의 환경적 차이는 고속도로가 유일하기 때문에 이러한 난류 생성과 바람 성분의 변환은 고속도로 독과 같은 구조물이나 고속도로 위의 차량 통행에 의해 발생한 것으로 판단된다.

3.3 도로 지면 가열에 의해 생성된 난류(T-RIT)

도로에서 유발되는 난류는 도로 지면 가열로 생성

된 난류(Thermal Road-Induced Turbulence, T-RIT), 도로 주변 구조물에 의해 생성된 난류(Structural Road-Induced Turbulence, S-RIT), 차량 흐름에 의해 발생한 난류(Vehicle-Induced Turbulence, VIT)가 있으며 본 절에서는 측정 자료에 기반하여 각각의 항목에 대한 정량화를 시도하였다.

본 측정지역은 고속도로 주변이 논으로 둘러싸인 지형으로, 도로 지면은 낮 기간에 주변 논 지형보다 더 높은 흡수율과 낮은 열용량을 가지고 있어 많은 양의 복사 에너지를 흡수한다(Anandakumar, 1999; Bäumer et al., 2005). 이로 인해 논 지형보다 더 적은 잠열 플럭스와 증가된 현열 플럭스로 인해 난류가 발생하기 때문에 앞절에서 관측된 도로 양측의 난류 강도 차이가 T-RIT에 의해 야기되었을 가능성이 있다. 이를 확인하기 위해 선행연구에서 제시한 수직 열속과 σ_w^2 의 관계식을 이용하여(식 5; Kaimal et al., 1976; Gordon et al., 2012) 도로 양측에서 지면 가열에 의해 발생한 σ_w^2 를 비교하였다.

$$\text{Estimated } \sigma_w^2(z) = 1.8 \left(\frac{z g \overline{wT'}}{T} \right)^{2/3} \quad (5)$$

여기서 z 는 높이, g 는 중력가속도, T 는 온도를 의미한다. 수직 열속 $\overline{wT'}$ 는 낮시간에 지면에서 대기로의 상향 열속이 강화되었다가 밤에는 대기에서 지면으로의 약한 하향 열속이 나타나는 전형적인 일중 분포(diurnal variation)를 나타내었다(Fig. 5). 본 측정에서는 예상과 달리 낮시간 여름의 수직 열속이 약하였는데 이는 측정기간의 초반과 후반에 강하고 지속적인 강우가 발생하였고, 전반적으로 흐린 기상 조건이 지속되었기 때문이다.

측정된 수직 열속에 기반하여 지면 가열에 의해 발생한 $\sigma_w^2(z)$ 추정치인 Estimated $\sigma_w^2(z)$ 은(식 5) 관측된 $\sigma_w^2(z)$ 값에 비해 매우 작았다(모든 계절에 대해 약 3~8%; Table 3). 또한, 고속도로 도로변 풍상지역에 대한 풍상지역의 Estimated $\sigma_{w, T-RIT}^2(z)$ 차이(풍하 값 - 풍상 값)는 양측에서의 $\sigma_{w, T-RIT}^2(z)$ 측정값의 차이에 비해

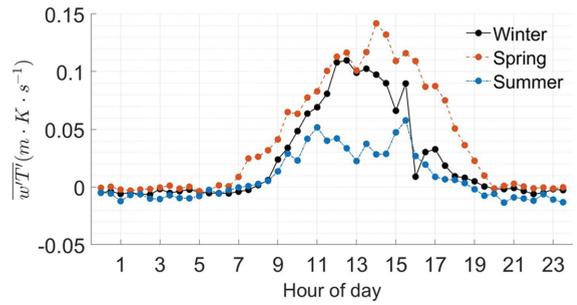


Fig. 5. Mean diurnal variations of observed vertical heat flux (time interval 30 min). Black, orange, and blue lines with circles represent values for winter, spring, and summer, respectively.

서도 매우 작았다(겨울 2%, 봄 5%, 여름 8%; Table 3). 이 비교는 전체 기간에 대한 것으로 밤에는 지면가열의 효과가 없고, 혹시 있다고 하더라도 뜨거운 배기가스 배출에 의해 발생한 열적 난류만 존재하기 때문에 지면 가열에 의한 T-RIT의 효과를 과소평가하였을 가능성이 있다. 따라서 가장 수직 열속이 강한 11~14시 기간에 대해 풍상지역에 대한 풍하지역의 Estimated $\sigma_{w, T-RIT}^2(z)$ 차이 측정값과 비교한 결과, 겨울과 여름에는 전체 기간에 비해 오히려 기여도가 감소하였다(각각 2%와 3%)(Table 3). 봄에는 사례수가 한 개에 불과하여 대푯값으로 볼 수 없어 여기에 제시하지 않는다. 결론적으로 고속도로에서 발생하는 난류에 대한 T-RIT의 기여도는 10% 이내로 매우 작았고, 대부분 물리적인(차량, 구조물 등) 영향으로 판단된다.

3.4 물리적으로 생성된 도로유발 난류(S-RIT와 VIT)

난류는 국지적으로는 차량이나 도로구조물에 의해 생성되기도 하지만 가장 강한 난류에너지를 가지는 구간은 지면과 그 영향이 미치는 대기경계층 내에서 발생하는 윈드시어(wind shear)와 지면 가열에 의한 부력에 의해 자연적으로 생성되는 구간이며, 풍속이

Table 3. Comparison of estimated $\sigma_w^2(z)$ for T-RIT (differences in estimated $\sigma_{w, T-RIT}^2(z)$ between downwind and upwind side of the highway) vs. differences of observed $\sigma_{w, T-RIT}^2(z)$. Values in parentheses are standard deviations.

Season	Period	Estimated $\Delta\sigma_{w, T-RIT}^2(z)$ ($m^2 s^{-2}$)	Observed $\Delta\sigma_{w, T-RIT}^2(z)$ ($m^2 s^{-2}$)
Winter	Overall period	0.009 (0.02)	0.111 (0.10)
	11:00-14:00	0.002 (0.02)	0.129 (0.13)
Spring	Overall period	0.003 (0.01)	0.099 (0.06)
	11:00-14:00	0.008 (0.0)	0.038 (0.0)
Summer	Overall period	0.003 (0.01)	0.046 (0.03)
	11:00-14:00	0.003 (0.01)	0.063 (0.03)

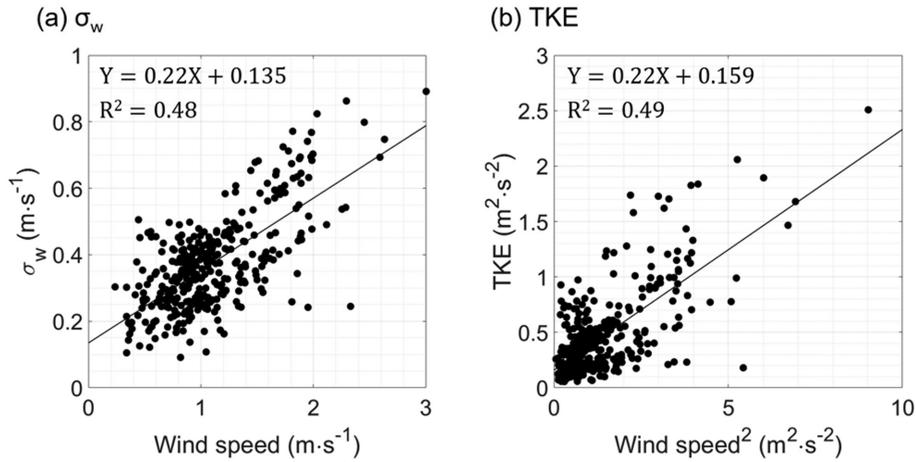


Fig. 6. Scatter plot of vertical wind fluctuation (σ_w) and turbulence kinetic energy (TKE) vs. wind speed for the overall measurement periods at the downwind location of the highway. Black solid line denotes a linear fit.

강할수록 윈드시어가 증가하여 난류 강도 역시 증가한다(Stull, 1988; Fig. 6). 따라서, 교통 흐름과 도로구조물에 의해 유발된 난류를 정량화하기 위해서는 풍속의 증가에 의해 자연적으로 증가한 난류 강도를 고려해야 한다. 모든 측정 기간에 대해 σ_w 와 TKE 모두 풍속과 좋은 양의 상관성을 나타내어 윈드시어가 주요한 대기 난류의 발생원인을 보여주었고, 본 측정지역인 논으로 구성된 평평한 지형에서 σ_w 의 강도는 풍속의 22% 정도를 나타내었다(Fig. 6a). 이 값은 중립 대기의 surface layer similarity theory에서 제시된 관계(12~19%)와 규모상으로 유사하였다(Stull, 1988)의 similarity theory 관계식으로부터 계산; 식 6와 7).

$$\sigma_w^2 = \delta u_*^2, \quad (\delta = 1, 1.7, 2.5) \quad (6)$$

$$\bar{U} = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (7)$$

여기서 u_* 는 마찰속도, \bar{U} 는 풍속, k 는 von Karman 상수(0.4), z_0 는 거칠기 길이(농지 약 0.1 m; Stull, 1988).

앞절에서 도로면 가열(뜨거운 배기가스 배출효과 포함)에 의한 열적 난류(T-RIT)의 영향이 미미함을 제시하였기 때문에 측정된 난류를 구성하는 요소를 배경 대기 난류와 도로구조물에 의해 생성된 난류(S-RIT) 및 차량흐름에 의해 생성된 난류(VIT)로 정의하였다(식 8과 9).

$$\sigma_{w, obs}^2 = \sigma_{w, bknd}^2 + \sigma_{w, VIT}^2 + \sigma_{w, SRIT}^2 \quad (8)$$

$$TKE_{obs} = TKE_{bknd} + TKE_{VIT} + TKE_{SRIT} \quad (9)$$

본 연구에서는 윈드시어에 의해 생성된 난류효과를 고려하기 위해 풍속으로 정규화한 난류강도를 교통변

수와 비교하였다(Kalthoff et al., 2005; Fig. 7). 교통 변수는 속도와 교통량을 모두 고려하고 동일지점을 동시에 통과하는 차량 수를 대표할 수 있는 단위면적당 차량 수를 사용하였다(3.1절 참조). 풍속으로 정규화한 난류 parameter를 식 10와 11으로 표현하였다.

$$\sigma_{w, obs}^2 \cdot \bar{U}^{-1} = \sigma_{w, bknd}^2 \cdot \bar{U}^{-1} + \sigma_{w, VIT}^2 \cdot \bar{U}^{-1} + \sigma_{w, SRIT}^2 \cdot \bar{U}^{-1} \quad (10)$$

$$TKE_{obs} \cdot \bar{U}^{-1} = TKE_{bknd} \cdot \bar{U}^{-1} + TKE_{VIT} \cdot \bar{U}^{-1} + TKE_{SRIT} \cdot \bar{U}^{-1} \quad (11)$$

여기서 *obs*는 측정값, *bknd*는 대기 배경 난류, *VIT*는 차량유발 난류, *SRIT*는 도로구조물 유발 난류를 의미하고, \bar{U} 는 평균 풍속을 나타낸다.

풍속에 의해 정규화된 $\sigma_w^2 \bar{U}^{-1}$ 와 $TKE \bar{U}^{-1}$ 는 고속도로 위를 주행하는 차량밀도가 증가할수록 증가하는 경향을 나타내어 차량에 의해 발생된 난류가 교통량과 비례함을 제시한다(Fig. 7; Kalthoff et al., 2005). 풍상 지역과 풍하 지역에서 각각 최소자승법을 이용하여 차량 밀도에 대한 $\sigma_w^2 \bar{U}^{-1}$ 와 $TKE \bar{U}^{-1}$ 의 선형 관계식을 획득하였다(Fig. 7의 직선). 풍상과 풍하 지역에 대한 직선의 y-절편(차량밀도 = 0) 차이는 고속도로 구조물과 둑(3 m)에 의해 발생하는 난류(S-RIT)로 추정할 수 있다(Kalthoff et al., 2005; Gordon et al., 2012). 따라서 측정기간 추정된 S-RIT의 평균 수직 난류 강도는 $\sigma_{w, SRIT} = \sqrt{0.06 \cdot \bar{U}}$ 로 난류운동에너지는 $TKE_{SRIT} = 0.13 \cdot \bar{U}$ 로 표현된다(Fig. 7; Table 4).

풍상지역의 정규화한 난류 특성에 S-RIT에 의해 생성된 수직 난류와 난류운동에너지를 각각 더해주어

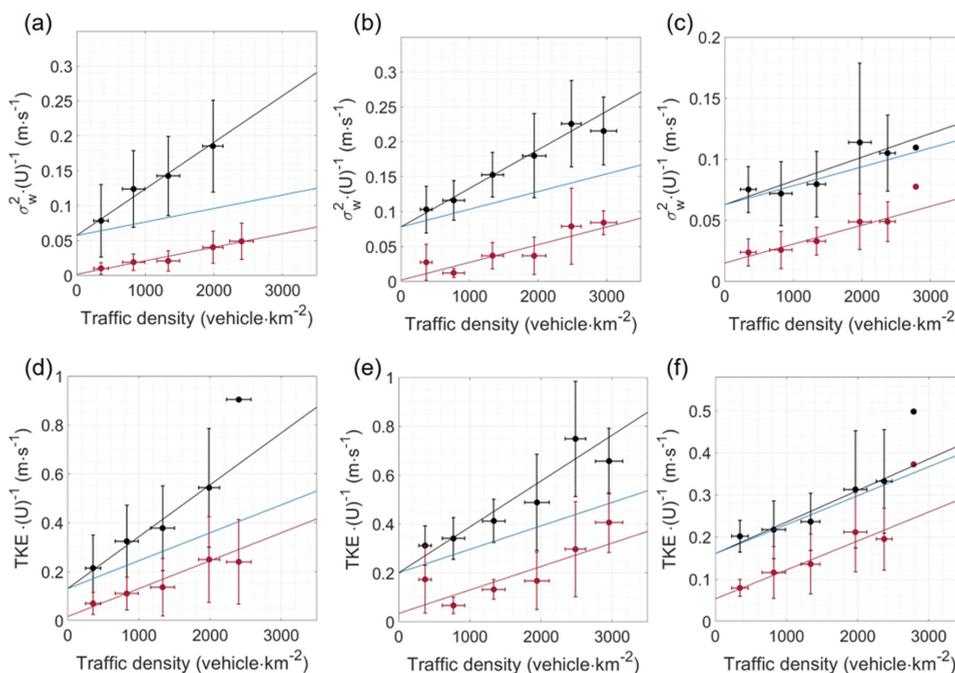


Fig. 7. Correlation between traffic density vs. (a)-(c) $\sigma_w^2 \bar{U}^{-1}$ and (d)-(f) $TKE \bar{U}^{-1}$ in the downwind (black dots) and upwind side (red dots) of the highway. Black and red lines are linear fitting lines for downwind and upside side, respectively. The Blue line denotes the upwind fit plus S-RIT (the difference of y-intercepts between downwind and upwind). (a), (d) Winter; (b), (e) Spring; (c), (f) Summer.

Table 4. Linear regression results summary between normalized turbulence parameters ($\sigma_w^2 \bar{U}^{-1}$ and $TKE \bar{U}^{-1}$) and traffic density.

Parameter	Regression coefficients	Season	Measurement location	
			Downwind	Upwind
$\sigma_w^2 \bar{U}^{-1}$ ($m s^{-1}$)	Slope ($\times 10^{-3}$)	Winter	0.07	0.02
		Spring	0.06	0.03
		Summer	0.02	0.02
	y-intercept	Winter	0.057	0.002
		Spring	0.078	0.002
		Summer	0.063	0.015
	R^2	Winter	0.37	0.43
		Spring	0.53	0.32
		Summer	0.15	0.39
$TKE \bar{U}^{-1}$ ($m s^{-1}$)	Slope ($\times 10^{-3}$)	Winter	0.21	0.11
		Spring	0.19	0.10
		Summer	0.07	0.07
	y-intercept	Winter	0.131	0.017
		Spring	0.201	0.034
		Summer	0.161	0.054
	R^2	Winter	0.39	0.33
		Spring	0.50	0.29
		Summer	0.27	0.40

S-RIT를 보정하였다. 이후, 풍하지역의 $\sigma_w^2 \bar{U}^{-1}$ 와 $TKE \bar{U}^{-1}$ 에서 S-RIT가 고려된 풍상지역의 수치를 뺀 값은 교통흐름에 의해 생성된 난류 강도(VIT)로 정의할 수 있고(이제 두 지역의 유일한 환경적 차이는 교통흐름임) 이는 식 10와 11에서 각각 $\sigma_{w,VIT}^2 \bar{U}^{-1}$ 와 $TKE_{VIT} \bar{U}^{-1}$ 로 표현되었다(Fig. 7의 파란색 실선). 풍하지역과 풍상지역 환경의 유일한 차이점은 고속도로의 유무이기 때문에 대기 배경 난류 강도는 양측이 동일하다고 가정할 수 있다. 따라서 풍하지역에서 측정된 난류강도에서 풍상지역 난류강도를 빼면(각각 $\Delta\sigma_w^2 \bar{U}^{-1}$ 와 $\Delta TKE \bar{U}^{-1}$), 식 10와 11에서 배경 난류강도 요소는 사라지고 S-RIT와 VIT의 항목만 남는다(풍상지역의 VIT와 S-RIT는 0으로 가정; 식 12과 13). 앞에서 평균 $\sigma_{w,SRIT}^2 \bar{U}^{-1} = 0.06$ 과 평균 $TKE_{SRIT} \bar{U}^{-1} = 0.13$ 였음을 제시하였다. 또한, Fig. 7의 파란색 실선($\sigma_{w,VIT}^2 \bar{U}^{-1}$ 와 $TKE_{VIT} \bar{U}^{-1}$)을 교통밀도에 대한 선형회귀식을 구함으로써 결과적으로 자유흐름(free flow)의 교통환경에서 차량유발 난류강도를 교통밀도의 함수로 모수화할 수 있다(Fig. 8). 봄, 여름, 겨울을 포함한 모든 측정기간에 대해 평균적인 차량유발 난류강도는 식 14과 식 15에 제시하였다.

$$\Delta\sigma_{w,obs}^2 \bar{U}^{-1} = \sigma_{w,VIT}^2 \bar{U}^{-1} + \sigma_{w,SRIT}^2 \bar{U}^{-1} \quad (12)$$

$$\Delta TKE_{obs} \bar{U}^{-1} = TKE_{VIT} \bar{U}^{-1} + TKE_{SRIT} \bar{U}^{-1} \quad (13)$$

$$\sigma_{w,VIT}^2 \bar{U}^{-1} \text{ (m s}^{-1}\text{)} = 0.03 \times 10^{-3} \cdot TD \quad (14)$$

$$TKE_{VIT} \bar{U}^{-1} \text{ (m s}^{-1}\text{)} = 0.07 \times 10^{-3} \cdot TD \quad (15)$$

여기서 TD 는 차량밀도(vehicles km⁻²)를 나타낸다. Kalthoff et al. (2005)는 풍하지역에서 측정된 차량

유발 TKE는 경차보다 대형차량의 영향이 1.7배 크다고 보고했다. 또한 Song et al. (2023)은 터널 내에서 난류강도가 전체 차량의 교통량보다 대형트럭의 교통량에 더 좋은 양의 선형 상관성을 가짐을 보였다. 본 측정의 대상인 경부고속도로는 대형트럭과 고속버스의 통행량과 차량속도가 도심도로보다는 크기 때문에 VIT의 강도가 도심도로보다는 큰 환경으로 예상된다. 따라서 본 연구에서 획득한 모수화는 일반 도심 도로에서 보다는 과대평가되었을 가능성이 있다. 그러나 도로에서 생성된 차량유발 난류에디의 크기가 작기 때문에(Rao et al., 1979; Kalthoff et al., 2005; Gordon et al., 2012) 도로 plume이 도로로부터 이동하면서 dissipation에 의해 약해져 결국 소멸하는 것으로 알려져 있는데, 본 연구에서의 측정은 고속도로로부터 약 29 m 떨어져 수행되었기 때문에 실제 도로에서 발생한 강도에 비해 약한 난류를 측정하였다. 이러한 실험의 한계는 본 연구의 결과가 과소평가되었을 가능성을 제시하며, 이것이 일반 도심 도로에 비해 과대평가되었을 가능성과 일부 상쇄될 것으로 보인다. 또한, 여름 측정에는 측정기간 4일 중 2일간 지속적인 강우가 발생하였고 수직 열속 결과에서 보여지듯 겨울에 비해서도 매우 약한 열속을 나타내어 일반적이지 않은 기상조건을 나타내었다(Fig. 5). 또한 전반적으로 풍속과 난류강도가 타 계절에 비해 약하여 분석 시간 간격 동안 풍향의 변동성이 상대적으로 심하였을 가능성이 있고(Mahrt, 2011) 풍향의 변화가 큰 경우 풍상과 풍하 지역의 차이가 상대적으로 적을 가능성을 내포한다. 이러한 이상 기상이 측정에 영향을 주었을 가능성이 있어 타 계절과는 다르게 여름철 VIT가 약한 경향성을 나타내었다(Fig. 8). 따라서, 평균 모수화 결과 역시 과소모의되었을 가능성이 있다. 그럼

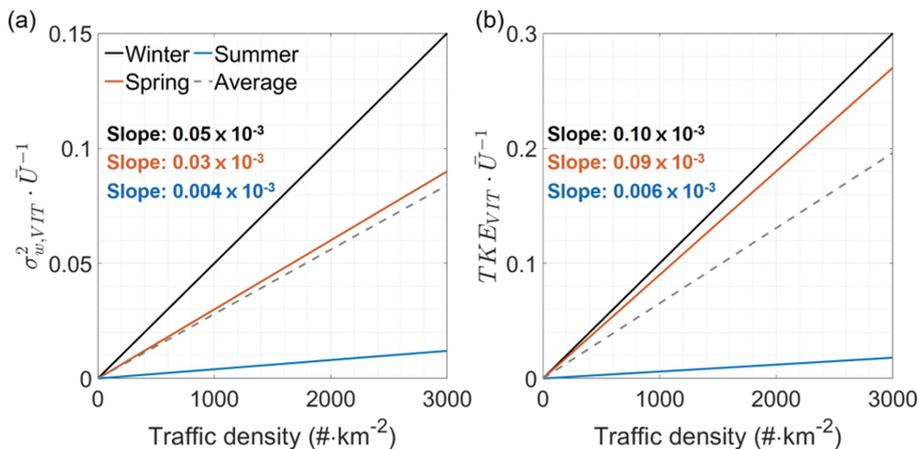


Fig. 8. Vehicle-induced turbulence (VIT) according to traffic density (black: winter, blue: spring, green: summer, gray: average line). (a) $\sigma_{w,VIT}^2 \bar{U}^{-1}$ and (b) $TKE_{VIT} \bar{U}^{-1}$.

에도 불구하고 본 연구는 한국에서 교통 흐름에 의해 야기된 차량유발 난류 강도를 교통변수를 이용하여 모수화하였다는 점에서 의의를 가진다. 그러나 도심에 위치한 고속도로는 방음벽이나 주변 건물 등 다양한 요인들로 인한 복잡한 메커니즘에 의해 난류가 생성된다. 따라서, 이러한 요소들을 고려하기 위해 주변 토지 유형이나 방음벽 높이 등을 고려한 추가적인 측정을 통해 보다 정확한 결과를 도출할 필요성이 제기된다.

4. 결 론

자연적으로 생성된 난류뿐만 아니라 도로 위의 여러 요인(차량 흐름, 지면가열, 도로 구조물 등)에 의해 생성된 추가적인 난류(즉, VIT, T-RIT, S-RIT)는 도로에서의 차량 배출로 인한 풍하 측의 대기오염물질 농도의 분포에 직접적인 영향을 미친다. 이러한 도로유발 난류의 정량화는 전산 유체역학 모형(Computational Fluid Dynamics, CFD)과 같은 상세 공간규모의 대기질 예측 뿐만 아니라(Wang and Zhang, 2009) 지역적 규모의 대기질 예측 모형의 정확도를 향상시키는데도 중요한 요소임이 제시되었다(Makar et al., 2021). 따라서, 밀접한 도로망을 가진 도심지역에서 교통 관련 대기오염물질의 농도를 정확하게 예측하고 차량 배출이 대기질에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 도로 위에서 발생하는 난류의 정량화가 요구되어진다.

이에 본 연구에서는 차량유발 난류와 도로 구조물에 의해 발생하는 난류의 정량화를 시도하였다. 이를 위해 논으로 둘러싸인 단순지형에 위치한 고속도로의 양측에서 3차원 초음파풍속계를 이용하여 난류를 동시 측정하였고, 모든 측정 기간 풍상지역에 비해 풍하지역에서 더 강한 난류 강도가 관측되었다. 이러한 난류 강도의 증가는 VIT, T-RIT, S-RIT에 기인한 것으로 판단되며, 이를 이용하여 도로에서 발생하는 난류 강도를 기본적인 교통 변수 및 기상 자료(교통량, 차속, 풍속)를 이용하여 모수화한 경험식을 제시하였다. 본 경험식은 비록 과소모의의 경향이 있는 것으로 예상되지만, 쉽게 획득할 수 있는 변수인 풍속과 교통 정보(시간당 교통량과 정보)만으로 간단하게 차량유발 난류 강도와 난류운동에너지를 예측하여 대기질 모델에 쉽게 적용할 수 있다는 점에서 장점을 가진다.

Kalthoff et al. (2005)과 Song et al. (2023)에 의하면 VIT에 의한 TKE 증가는 경차보다 대형차량과 더 좋은 상관성을 보였다. 또한 고속도로에서 차량의 속도는 일정하였지만 도심의 차량 속도는 일중 분포가 뚜렷하다. Alonso-Estébanez (2012)에 의하면 난류운동에너지는 차량의 크기와 속도에 비례한다고 보고하였다. 따라서 후속연구를 통해 차량 속도, 차량조성

등의 다양한 도로 요인들을 가지는 환경에서 추가적인 측정 자료가 축적된다면 다양한 교통환경에 대한 도로유발 난류 강도의 모수화를 통해 도심지역에서 도로 주위의 대기흐름과 교통 관련 대기오염물질 농도의 예측 정확도 향상에 도움을 줄 것으로 예상된다.

감사의 글

본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 심사위원께 감사사를 드립니다. 이 연구는 기후변화대응 기술개발 사업(NRF-2019M1A2A2 103954)의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

- Alonso-Estébanez, A., P. Pascual-Muñoz, C. Yagüe, R. Laina and D. Castro-Fresno, 2012: Field experimental study of traffic-induced turbulence on highways, *Atmos. Environ.*, **61**, 189-196, doi:10.1016/j.atmosenv.2012.07.032.
- Anandakumar, K., 1999: A study on the partition of net radiation into heat fluxes on a dry asphalt surface. *Atmos. Environ.*, **33**, 3911-3918, doi:10.1016/S1352-2310(99)00133-8.
- Baldauf, R., E. Thoma, A. Khlystov, V. Isakov, G. Bowker, T. Long, and R. Snow, 2008: Impacts of noise barriers on near-road air quality, *Atmos. Environ.*, **42**, 7502-7507, doi:10.1016/j.atmosenv.2008.05.051.
- Bäumer, D., B. Vogel, and F. Fiedler, 2005: A new parameterisation of motorway-induced turbulence and its application in a numerical model. *Atmos. Environ.*, **39**, 5750-5759, doi:10.1016/j.atmosenv.2004.10.046.
- Choi, W., I. C. Faloona, M. McKay, A. H. Goldstein, and B. Baker, 2011: Estimating the atmospheric boundary layer height over sloped, forested terrain from surface spectral analysis during BEARPEX. *Atmos. Chem. Phys.*, **11**, 6837-6853, doi:10.5194/acp-11-6837-2011.
- _____, M. He, V. Barbesant, K. H. Kozawa, S. Mara, A. M. Winer, and S. E. Paulson, 2012: Prevalence of wide area impacts downwind of freeways under pre-sunrise stable atmospheric conditions. *Atmos. Environ.*, **62**, 318-327, doi:10.1016/j.atmosenv.2012.07.084.
- Gordon, M., R. M. Staebler, J. Liggio, P. Makar, S.-M. Li, J. Wentzell, G. Lu, P. Lee, and J. R. Brook, 2012: Measurements of enhanced turbulent mixing near highways. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **51**, 1618-1632, doi:10.1175/JAMC-D-11-0190.1.
- Hagler, G. S. W., R. W. Baldauf, E. D. Thoma, T. R. Long,

- R. F. Snow, J. S. Kinsey, L. Oudejans, and B. K. Gullett, 2009: Ultrafine particles near a major roadway in Raleigh, North Carolina: Downwind attenuation and correlation with traffic-related pollutants. *Atmos. Environ.*, **43**, 1229-1234, doi:10.1016/j.atmosenv.2008.11.024.
- Huertas, J. I., and D. F. Prato, 2020: CFD Modeling of Near-Roadway Air Pollution. *Environ. Model Assess.*, **25**, 129-145, doi:10.1007/s10666-019-09666-w.
- Kaimal, J. C., J. C. Wyngaard, D. A. Haugen, O. R. Coté, Y. Izumi, S. J. Caughey, and C. J. Readings, 1976: Turbulence structure in the convective boundary layer. *J. Atmos. Sci.*, **33**, 2152-2169, doi:10.1175/1520-0469(1976)033<2152:TSITCB>2.0.CO;2.
- Kalthoff, N., D. Bäumer, U. Corsmeier, M. Kohler, and B. Vogel, 2005: Vehicle-induced turbulence near a motorway. *Atmos. Environ.*, **39**, 5737-5749, doi:10.1016/j.atmosenv.2004.06.048.
- Kastner-Klein, P., R. Berkowicz, and E. J. Plate, 2000: Modelling of vehicle-induced turbulence in air pollution studies for streets. *Int. J. Environ. Pollut.*, **14**, 496-507, doi:10.1504/IJEP.2000.000573.
- Kim, J., J.-H. Kim, and R. D. Sharman, 2021: Characteristics of Energy Dissipation Rate observed from the High-Frequency Sonic Anemometer at Boseong, South Korea. *MDPI Atmosphere.*, **12**, 837, doi:10.3390/atmos12070837.
- Kim, K. H., S.-B. Lee, S. H. Woo, and G.-N. Bae, 2014: NOx profile around a signalized intersection of busy roadway. *Atmos. Environ.*, **97**, 144-154, doi:10.1016/j.atmosenv.2014.08.012.
- Korea Expressway Corporation, 2022: Highway traffic statistics for 2021. [Available online at http://data.ex.co.kr/dataset/datasetList/list?pn=1&CATEGORY=TR&GROUP_TR=TRAF_VDS].
- Kumar, P., M. Ketzel, S. Vardoulakis, L. Pirjola, and R. Britter, 2011: Dynamics and dispersion modelling of nanoparticles from road traffic in the urban atmospheric environment-A review. *J. Aerosol. Sci.*, **42**, 580-603, doi:10.1016/j.jaerosci.2011.06.001.
- Mahrt, L., 2011: Surface wind direction variability. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **50**, 144-152, doi:10.1175/2010JAMC2560.1.
- Makar, P. A., C. Stroud, A. Akingunola, J. Zhang, S. Ren, P. Cheung, and Q. Zhang, 2021: Vehicle-induced turbulence and atmospheric pollution. *Atmos. Chem. Phys.*, **21**, 12291-12316, doi:10.5194/acp-21-12291-2021.
- Miller, S. J., M. Gordon, R. M. Staebler, and P. A. Taylor, 2019: A Study of the Spatial Variation of Vehicle-Induced Turbulence on Highways Using Measurements from a Mobile Platform. *Bound.-Layer Meteorol.*, **171**, 1-29, doi:10.1007/s10546-018-0416-9.
- Rao, S. T., L. Sedefian, and U. H. Czapski, 1979: Characteristics of turbulence and dispersion of pollutants near major highways. *J. Appl. Meteorol.*, **18**, 283-293, doi:10.1175/1520-0450(1979)018<0283:COTADO>2.0.CO;2.
- Song, H. G., and Coauthors, 2023: Estimating vehicular emission factors and vehicle-induced turbulence: Application of an air quality sensor array for continuous multipoint monitoring in a tunnel. *Atmos. Pollut. Res.*, **14**, 101799, doi:10.1016/j.apr.2023.101799.
- Stull, R. B., 1988: *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers., 670 pp doi:10.1007/978-94-009-3027-8.
- Wang, Y. J., and K. M. Zhang, 2009: Modeling near-road air quality using a computational fluid dynamics model, CFD-VIT-RIT. *Environ. Sci. Technol.*, **43**, 7778-7783, doi:10.1021/es9014844.
- _____, A. DenBleyker, E. McDonald-Buller, D. Allen, and K. M. Zhang, 2011: Modeling the chemical evolution of nitrogen oxides near roadways. *Atmos. Environ.*, **45**, 43-52, doi:10.1016/j.atmosenv.2010.09.050.
- Xie, X., Z. Huang, J. Wang, and Z. Xie, 2005: The impact of solar radiation and street layout on pollutant dispersion in street canyon. *Build. Environ.*, **40**, 201-212, doi:10.1016/j.buildenv.2004.07.013.
- Zhang, K. M., and A. S. Wexler, 2004: Evolution of particle number distribution near roadways-Part I: analysis of aerosol dynamics and its implications for engine emission measurement. *Atmos. Environ.*, **38**, 6643-6653, doi:10.1016/j.atmosenv.2004.06.043.