

논문

등록지-운행지 불일치에 따른 도로교통 배출의 공간적 전이 구조 분석 Spatial Transfer of Road Traffic Emissions Driven by the Mismatch between Vehicle Registration and Operating Locations

이규진*

아주대학교 TOD기반 지속가능도시교통연구센터

Kyu-Jin Lee*

TOD-based Sustainable Urban/Transportation Research Center, Ajou University,
Gyeonggi-do, Republic of Korea

접수일 2026년 6월 10일
수정일 2026년 6월 26일
채택일 2026년 7월 21일

Received 10 June 2026
Revised 26 June 2026
Accepted 21 July 2026

*Corresponding author
Tel : +82-(0)31-219-2541
E-mail : transjin2970@gmail.com

Abstract This study empirically analyzes the spatial transfer structure of road traffic emissions resulting from the mismatch between vehicle registration and operating areas. Using operating-based vehicle kilometers traveled (VKT) estimated from real-world traffic data via the Urban Transportation Emission Assessment System (UTEAS), the analysis proceeds in two stages. First, a log-log stepwise regression identifies the determinants of operating-based VKT. Second, at the municipal level, trips are categorized into internal, inbound/outbound, and through types to quantify the emission contribution of through traffic. Ordinary least squares (OLS) and multiscale geographically weighted regression (MGWR) are then applied to estimate the spatial heterogeneity of emission determinants. The results show that operating-based VKT is influenced not only by the scale of registered vehicles but also by the expressway network structure and external inbound demand. Through traffic accounts for approximately 35~45% of operating-based emissions, with the highest share in $PM_{2.5}$ emissions and in inland provinces where national arterial networks are concentrated. MGWR significantly improves explanatory power (R^2 : 0.81~0.82) compared to OLS (R^2 : 0.46) and eliminates residual spatial autocorrelation. Notably, through traffic exhibits a small bandwidth, indicating that although it is generated through wide-area networks, its emission burden is concentrated in specific pass-through regions. These findings demonstrate that the locations generating travel demand and those bearing the environmental burden do not necessarily coincide, implying that registration-based management alone is insufficient and should be extended to a wide-area framework encompassing national transport networks and logistics flows.

Key words: Operating-based VKT, Through traffic, Spatial transfer, MGWR (Multiscale Geographically Weighted Regression), Road mobile-source emissions

1. 서론

1.1 연구 배경 및 목적

도로교통은 현대 사회의 경제활동과 물류체계를 위한 핵심 인프라인 동시에, 기후변화와 대기오염을 유발하는 주요 배출원이다. 국내 수송 부문은 최종에너지 소비의 약 20%와 온실가스 총배출량의 약 14%를

차지하며, 도로이동오염원은 국가 질소산화물(NO_x) 배출의 약 30%를 차지하는 대표적인 오염원으로 알려져 있다. 특히 NO_x 는 초미세먼지($PM_{2.5}$)의 주요 전구물질로 작용하여 도시지역 대기질과 국민 건강에 직접적인 영향을 미친다는 점에서 그 관리의 중요성이 지속적으로 강조되고 있다.

그러나 도로교통 배출은 고정오염원과 달리 차량의

이동 과정에서 발생한다는 점에서 본질적으로 공간적 이동성을 내포한다. 차량은 등록된 지역에 머무르지 않고 행정 경계를 넘어 광역적으로 운행하며, 배출 역시 실제 주행이 이루어지는 공간에서 발생하기 때문이다. 그럼에도 현재 실측 교통량이 조사되는 구간은 전국 총 주행거리 (Vehicle Kilometers Traveled, 이하 VKT)의 약 55% 수준에 불과하여, 나머지 구간의 배출량은 도로 연장이나 등록 대수 등으로 배분하고 있다. 이에 따라 교통 활동의 이동성과 배출 발생의 공간적 특성이 배출 산정 및 관리체계에 충분히 반영되지 못하는 한계가 존재한다.

이러한 한계는 특히 통과교통(through traffic)에서 더욱 두드러진다. 통과교통은 통행의 기·종점이 모두 해당 지역 외부에 위치함에도 특정 지역을 통과하면서 배출을 발생시키는 통행으로, 지역의 차량 등록 규모나 자체 교통수요와 무관하게 환경부담을 유발한다. 따라서 통과교통의 규모가 큰 지역에서는 실제 배출과 행정적 관리 주체가 불일치할 수 있으며, 이는 지자체 단위의 배출량 평가와 감축 정책의 실효성을 제약할 수 있다. 그럼에도 기존 연구는 지역 전체의 교통 활동과 배출량에 초점을 두어 왔으며, 통과교통이 지역 간 배출의 공간적 전이에 미치는 영향은 충분

히 규명되지 못하였다.

본 연구는 이러한 문제의식에 따라 운행지 관점에서 도로교통 배출의 공간적 전이 구조를 분석하고, 특히 통과교통이 지역별 배출량 형성에 미치는 영향을 실증적으로 규명하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 지역의 교통 활동을 내부 통행, 발생·유입 통행, 통과 통행으로 구분하여 각 통행 특성이 배출량에 미치는 영향을 분석하고, 운행지 기반 배출의 공간적 특성을 규명하였다. 이를 통해 등록지 중심 배출관리체계의 한계를 검토하고, 통과교통을 고려한 운행지 기반 배출관리의 필요성과 정책적 시사점을 제시하고자 한다.

1.2 연구 내용 및 방법

본 연구는 운행지 교통 활동의 형성과 배출의 공간적 특성을 규명하기 위해 두 단계의 분석을 수행한다. 두 분석은 모두 실주행 교통 활동도 기반의 VKT 및 배출량을 산정하는 UTEAS (Urban Transportation Emission Assessment System) 모형에 기반한다.

첫째, 운행지 VKT의 영향요인을 분석한다. 시도×차종×연료 단위 자료에 로그-로그 회귀모형을 적용하여, 지역의 교통 활동이 차량 보유 규모뿐 아니라 간선 도로망의 구조와 관광 등 외부 유입 수요의 영향

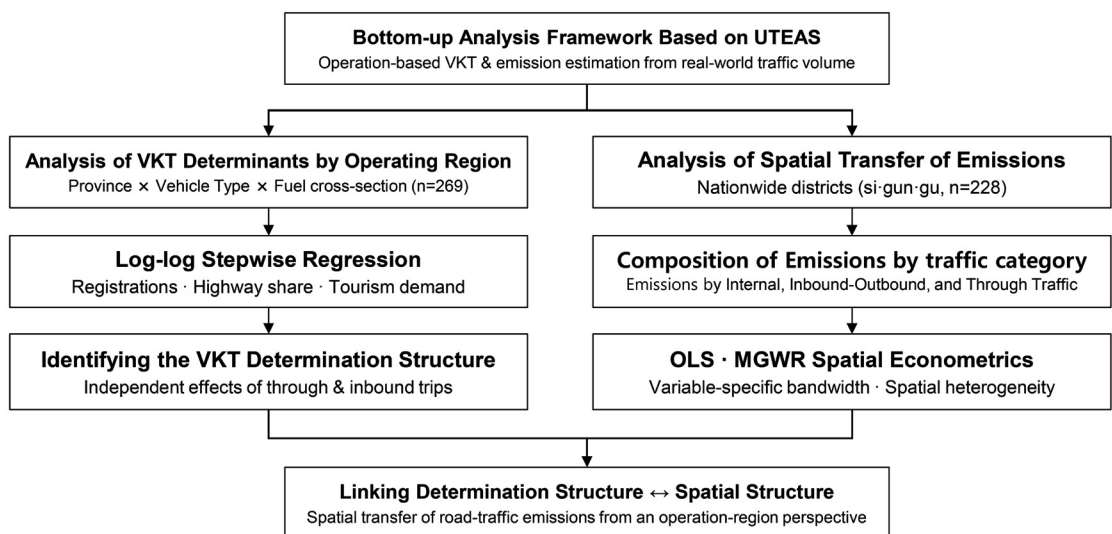


Fig. 1. Analytical framework of this study.

을 받아 형성되는지를 분석한다.

둘째, 시군구 단위에서 배출의 공간적 특성을 분석한다. 통행을 내부·유출입·통과 유형으로 구분하여 통과교통의 배출 기여도를 정량화하고, Moran's I를 통해 공간 자기상관을 진단한 후 일반최소제곱회귀(OLS)와 다중스케일 지리가중회귀(MGWR)를 적용하여 배출량 영향요인의 공간적 이질성을 분석한다.

이와 같은 분석 방법에 따른 본 연구의 분석체계는 그림 1과 같다.

2. 선행 연구 검토 및 차별성

2.1 운행지 기반 배출량 산정 및 공간적 전이 연구

기존 연구는 배출량 산정의 정확도를 제고하기 위해 운행지 기반 상향식 접근을 발전시켜 왔다. 교통수요모형과 GIS를 결합한 VKT 기반 산정(Choi *et al.*, 2009), O/D 기반 통행거리와 주행 특성을 반영한 확장(Lee *et al.*, 2012), 그리고 고해상도 활동도 자료 활용(Xie *et al.*, 2026; Lee, 2025a)은 모두 실제 교통 활동을 반영하려는 시도이다. 또한 Lee and Choi (2025)는 UTEAS 모형을 통해 기존 산정체계가 교통 외부비용을 구조적으로 과소평가해 왔음을 실증하였으며, Lee (2025b)는 도로 환경의 기하학적·운영적 특성이 연비와 배출에 미치는 영향을 정량적으로 규명함으로써 상향식 접근의 현실성과 정밀성을 고도화하였다.

그러나 이러한 연구는 주로 배출량 산정의 정확도 향상에 초점을 두고 있으며, 운행지 교통 활동의 형성 구조와 그것이 지역 간 배출의 공간적 전이로 이어지는 과정에 대한 분석은 제한적이다. 특히 통과교통에 의해 유발되는 배출이 지역 간 어떻게 배분되는지에 대한 체계적 실증은 부족했다. 일부 연구는 이러한 전이를 부분적으로 접근하였다. Yang *et al.* (2019)은 외부 유입 화물차의 배출 기여가 기존 인벤토리에서 과소 반영됨을 지적하였으며, De Borger and Proost (2013)는 통과교통이 존재할 경우 지역 단위 규제가 비효율을 초래할 수 있음을 이론적으로 제시하였다. 또한

Cubells *et al.* (2024)은 특정 계층의 통행 배출이 취약 지역의 대기오염 노출로 전가되는 환경정의 문제를 지적하였다. 다만 이들 연구는 특정 도시나 이론적 분석에 머물러, 통과교통 배출의 지역 간 분포를 심층적으로 다루지는 못하였다.

2.2 공간 특성을 고려한 교통환경 영향 연구

교통 활동과 배출은 공간적 의존성과 이질성을 동시에 지닌다. 그러나 전역 회귀모형은 이러한 특성을 충분히 반영하지 못하며, 지리가중회귀(GWR) 또한 모든 변수가 동일한 공간 스케일에서 작동한다고 가정한다는 한계를 가진다(Brunsdon *et al.*, 1996). 이에 MGWR는 변수별로 상이한 대역폭(bandwidth)을 추정함으로써 각 요인이 작동하는 공간적 범위를 구분할 수 있는 방법론으로 제시되었다(Fotheringham *et al.*, 2017). 최근 연구는 교통 및 환경 변수의 영향이 서로 다른 공간 스케일에서 작동함을 실증적으로 보여주고 있으며(Omrani *et al.*, 2025; Xu *et al.*, 2019), Zheng *et al.* (2024)은 이를 통해 오염물질 간 상호작용과 외부 유입에 따른 공간적 파급효과의 존재를 확인하였다. 그러나 이러한 접근은 주로 도로 링크나 특정 도시권에 적용되어, 시군구 단위에서 통과교통의 공간적 영향을 규명한 사례는 드물다.

2.3 본 연구의 차별성

이상의 선행 연구는 크게 두 가지 측면에서 한계를 지닌다. 배출량 산정 연구는 활동도 기반 접근을 통해 추정의 정확도를 향상시키는 데 기여하였으나, 운행지 교통 활동이 어떠한 요인에 의해 형성되고 그것이 지역별 배출 구조와 어떠한 관계를 갖는지에 대해서는 충분히 설명하지 못하였다. 또한 공간계량 연구는 단일 도시 또는 링크 단위 분석에 주로 집중되어, 다수 지역에 걸친 통과교통의 영향과 배출의 공간적 특성을 종합적으로 규명하는 데 한계가 있었다.

본 연구의 차별성은 운행지 교통 활동의 형성과 그 결과로 나타나는 배출의 공간적 영향을 하나의 분석 틀에서 연계하여 해석한다는 데 있다. 기존 연구가 배

출량 산정의 정밀화 또는 공간적 영향요인의 규명에 각각 초점을 두었다면, 본 연구는 교통 활동의 공간적 이동성이 지역 간 배출 구조와 환경부담의 차이로 이어지는 과정을 실증적으로 분석함으로써, 도로교통 배출의 공간적 전이 메커니즘을 규명한다는 점에서 차별성을 갖는다.

3. 운행지 VKT의 영향요인 분석

3.1 변수 설정

운행지 VKT는 도로 연장이나 차량 등록지 기준으로 활동도를 배분하는 방식과 달리, 실제 주행이 이루어진 공간적 특성을 반영한다. 이는 BPR 함수(Bureau of Public Roads function)에 기반한 4단계 교통수요예측모형 등을 활용하여 공간 단위 교통량을 추정하고, 실측 교통량 자료로 검증된 모델 자료이다. 또한 추정된 운행지 VKT는 국가 VKT 통계와의 차종별 전수화 과정을 통해 전국 단위의 대표성을 확보하고 있다. 자료 구성의 경우, 전국 228개 시군구를 공간 단위로 하고 도로 유형(5개)과 세부 차종(480개)을 결합한 약 54.7만 개 유형으로 구성된다. 세부 차종은 차종, 규모, 연료 및 연식을 기준으로 구분하였다.

설명변수 중 내부 요인은 지역의 차량 보유 규모를 나타내는 등록 대수, 외부 요인은 지역 외부에서 유입되는 교통수요와 도로망 구조를 대변하는 변수를 포함하여 총 28개 지표로 구성하였다(표 1). 특히, 장거리 및 통과 통행이 집중되는 도로망 특성을 반영할 수 있는 ‘고속도로 비중’ 변수, 외부 유입 통행수요 특성을 반영할 수 있는 ‘관광객 수’ 변수를 반영하였다. 이상의 분석 자료는 2022년 기준으로 구축하였다.

분석 모형에 반영할 최종 변수는 28개 변수 간 다중공선성을 고려하여 선정하였다. 먼저 변수들을 경제·인구·도로·면적·자동차·관광의 6개 범주로 구분하고, 각 변수와 $\ln(\text{VKT})$ 간 상관관계를 통해 범주별 대표변수를 선정하였다. 분석 결과, 인구 규모, 경제 규모, 도로 연장, 자동차 등록 대수 등 절대 규모를 나타

Table 1. Candidate variables for driving-based VKT.

Category	No	Variable
Economy	1	No. of businesses
	2	No. of employees
	3	GRDP
	4	GRDP per capita
Population	5	Population
	6	No. of households
	7	Urban population
Road (Length)	8	Total
	9	Expressway
	10	National highway
	11	Metropolitan road
	12	Local road
	13	Municipal road
Tourism	14	No. of tourist sites
Land use (Area)	15	Total
	16	Lot
	17	Road
	18	Urban
	19	Housing
	20	Commercial
	21	Industrial
	22	Green
Vehicle (Registration)	23	Total
	24	Passenger car
	25	Van
	26	Truck
	27	Special vehicle
Tourism	28	No. of visitors

Table 2. Descriptive statistics of key variables.

Variable	N	Mean	S.D.	Min	Max
VKT ($10^3 \text{ veh} \cdot \text{km/day}$)	269	3,418	7,894	0	73,961
Registered vehicles (10^3)	269	95	270	0	3,097
Expressway ratio	269	0.038	0.018	0	0.061
No. of visitors (10^3)	269	23,836	18,172	1,654	64,335

내는 변수 간 높은 상관관계가 확인되었으며, 일부 변수의 VIF (Variance Inflation Factor)는 2,000을 초과하는 것으로 나타났다. 이에 단계적 변수 제거 과정을 거쳐 등록 대수, 고속도로 비중, 관광객 수 변수를 최종 변수로 설정하였다. 지역·차종의 유효한 샘플 수

인 269개 대상으로 최종 선정된 변수의 기초통계량은 표 2와 같다.

3.2 모형 구축 및 해석

운행지 VKT의 영향요인을 규명하기 위해 로그-로그 단계적 회귀분석을 수행하였으며, 로그 변환의 경우 변수 간 비례 관계를 선형화하고 분포의 비대칭성을 완화하는 동시에, 추정 계수를 탄력성으로 해석할 수 있는 장점을 고려하였다.

분석 결과(표 3), 등록 대수만을 설명변수로 포함한 기본모형(M1)의 설명력(R^2)은 0.903으로 나타났으며, 차종 더미변수를 추가한 M2에서는 설명력이 소폭 향상되었다. 다음으로 고속도로 비중을 포함한 M3에서는 R^2 가 0.914로 증가하고 AIC(Akaike Information Criterion)가 700에서 688로 감소하여 모형 적합도가 뚜렷하게 개선되었다. 이는 지역의 도로망 구조가 등록 대수만으로 설명되지 않는 운행지 교통 활동의 차이를 설명하는 중요한 요인임을 시사한다. 특히 고속도로 비중은 통과교통과 외부 유입 통행이 집중되는 공간적 특성을 반영하는 변수로 해석될 수 있다. 관광객 수를 추가한 M4 모형은 R^2 0.915, 수정 R^2 0.914, AIC 687로 가장 우수한 적합도를 나타냈다.

결과적으로 운행지 VKT의 최종모형(M4)은 차량 보유 규모, 간선 도로망 구조와 외부 유입 수요를 함께 고려하는 형태로 도출되었다(식 1). 통계모형을 살펴보면, 고속도로 비중이 1% 증가할 경우 운행지

VKT는 약 9.1% ($\exp(8.713 \times 0.01) - 1$) 증가하며, 관광객 수가 1% 증가할 경우는 약 0.105% 증가하는 것으로 해석된다. 이는 운행지 교통 활동이 지역 내부 요인뿐 아니라 광역 교통망과 외부 통행수요의 영향을 받으며 결정됨을 의미한다.

$$\begin{aligned} \ln(\text{VKT}) = & 3.196 + 0.851 \times \ln(\text{등록 대수}) \\ & - 0.221 \times D_{\text{승합}} + 0.347 \times D_{\text{화물}} \\ & + 8.713 \times (\text{고속도로 비중}) + 0.105 \times \ln(\text{관광객 수}) \end{aligned} \quad (1)$$

본 연구 결과를 보다 직관적으로 해석하기 위해, 시도별 등록지 대비 운행지 VKT 비율을 비교하였다(표 4, 그림 2). 비율이 1보다 크면 등록 차량 규모보다 실제 운행 규모가 큰 유입·통과형 구조를, 1보다 작으면 등록 차량 규모에 비해 실제 지역 내 운행 규모가 작은 유출형 구조로 이해할 수 있다.

분석 결과, 서울·부산·인천·대전 등 대도시권은 상대적으로 유출형 특성을 보인 반면, 세종·충북·충남 등 중부 내륙 지역은 유입·통과형 구조로 나타났다. 이는 국토 중앙부에 위치한 지리적 특성과 고속도로 중심의 국가 간선교통망이 집중된 공간구조를 반영하는 결과로 해석된다.

차종별 분석에서는 더욱 뚜렷한 지역적 특성이 확인되었다. 여객 부문에서는 강원도의 등록지 대비 운행지 VKT 비율이 가장 높게 나타났으며, 관광·휴양 목적의 외부 유입 통행이 집중되는 지역 특성과 관련된 것으로 판단된다. 반면 화물 부문에서는 충북의 비율이 가장 높게 나타났는데, 이는 수도권과 영호남을

Table 3. Stepwise regression results for driving-based VKT.

Variable	M1	M2	M3	M4 (Final)
Constant	5.322***	5.182***	4.753***	3.196***
ln(vehicles)	0.851***	0.859***	0.859***	0.851***
Van dummy	-	-0.190	-0.183	-0.221
Truck dummy	-	0.389**	0.384**	0.347**
Expressway ratio	-	-	11.197***	8.713***
ln(visitors)	-	-	-	0.105*
R^2	0.903	0.910	0.914	0.915
Adj. R^2	0.902	0.909	0.913	0.914
AIC	716.0	700.0	688.1	687.0

*** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.10$.
Reference vehicle type is passenger car.

Table 4. Operating-to-registered VKT ratio.

Province	Passenger	Freight	Province	Passenger	Freight
Seoul	0.9	0.8	Gyeonggi	0.9	1.0
Busan	0.6	0.7	Gangwon	1.4	1.0
Daegu	1.1	1.0	Chungbuk	1.3	1.4
Incheon	0.9	0.8	Chungnam	1.3	1.1
Gwangju	1.0	0.8	Jeonbuk	1.1	1.0
Daejeon	0.8	0.8	Jeonnam	1.0	1.0
Ulsan	1.2	1.1	Gyeongbuk	1.2	1.2
Sejong	1.2	1.1	Gyeongnam	0.9	1.2



Fig. 2. Operating-to-registered VKT ratio (left: passenger, right: freight).

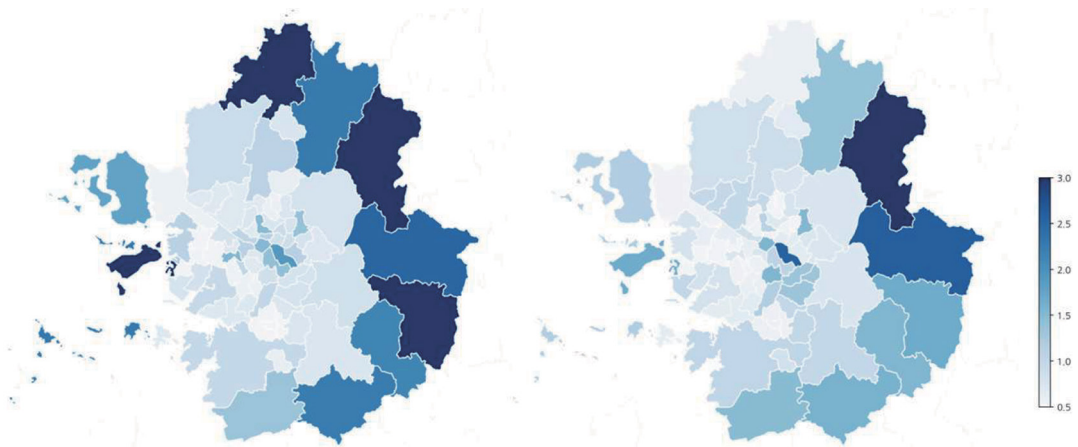


Fig. 3. Operating-to-registered VKT ratio in the Capital region (left: passenger, right: freight).

연결하는 국가 물류축의 중심에 위치하여 광역 화물 통행이 집중되는 지역적 특성을 반영한 결과로 해석된다.

권역별 시군구 수준에서도 등록지 대비 운행지 VKT 비율은 지리적 위상과 교통망 기능에 따라 뚜렷한 차이를 보였다(그림 3~7). 인구가 밀집한 대도시와 국토 외곽 지역은 대체로 유출형 특성을 보인 반면, 관광지와 국가 간선교통망이 통과하는 내륙 거점 지역은 유입·통과형 구조를 나타냈다. 대표적으로 고밀 시

가지인 부천시(여객 0.26)와 부산 수영구(화물 0.33), 국토 외곽 지역인 목포시(여객 0.24), 신안군(여객 0.14)은 낮은 비율을 보였으며, 관광 및 교통거점인 여주시(여객 4.28), 양양군(여객 5.27), 단양군(여객 5.15)과 국가 간선망이 통과하는 함양군(화물 5.39), 무주군(여객 4.59)은 높은 비율을 나타냈다. 이는 지역의 교통 기능과 공간적 입지가 운행지 기반 교통 활동의 공간적 분포를 결정하는 주요 요인임을 시사한다.

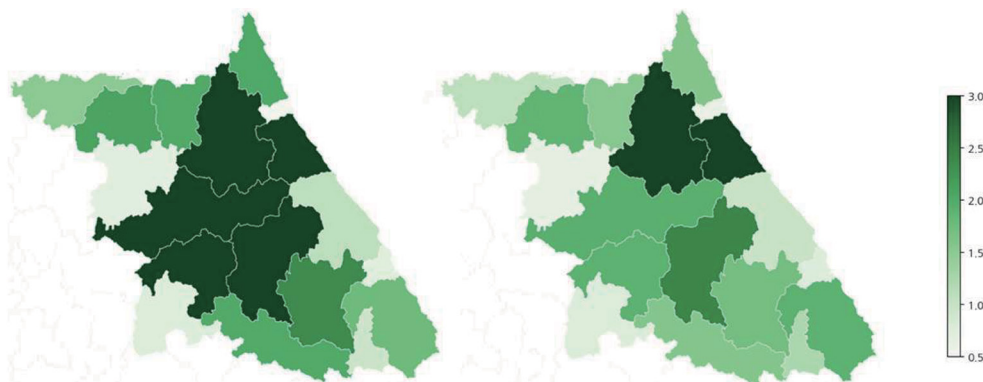


Fig. 4. Operating-to-registered VKT ratio in the Gangwon region (left: passenger, right: freight).

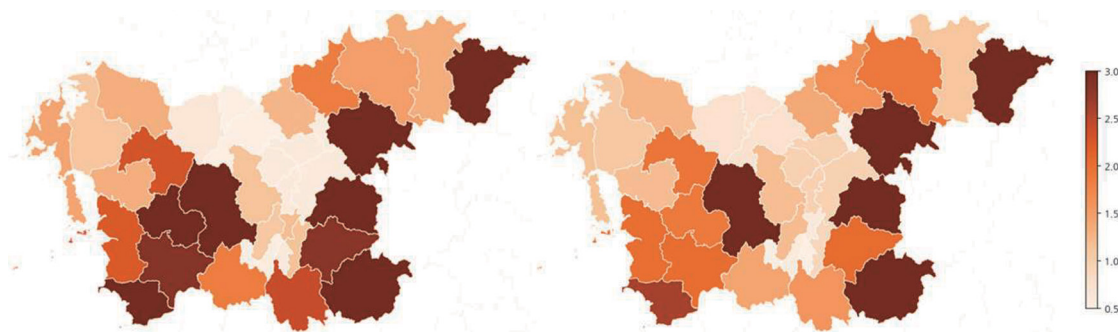


Fig. 5. Operating-to-registered VKT ratio in the Chungcheong region (left: passenger, right: freight).

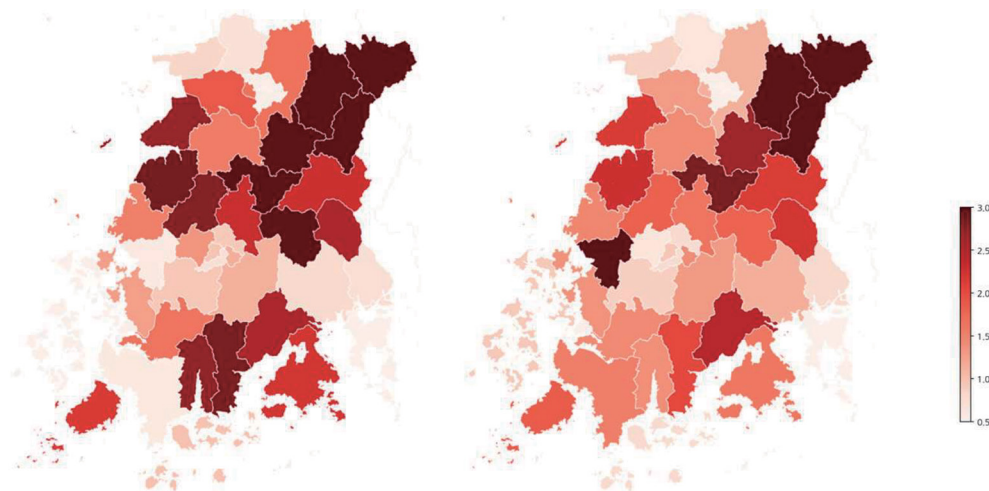


Fig. 6. Operating-to-registered VKT ratio in the Jeolla region (left: passenger, right: freight).

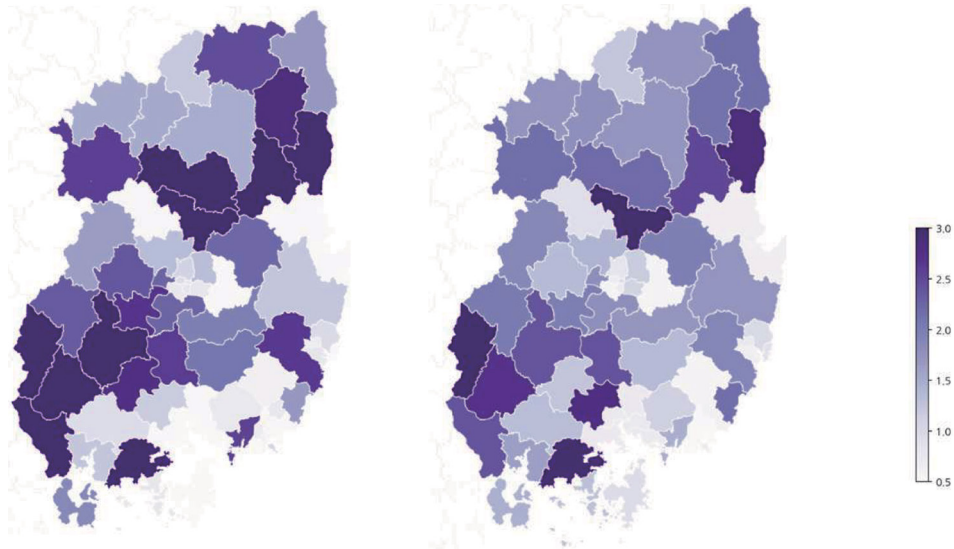


Fig. 7. Operating-to-registered VKT ratio in the Gyeongsang region (left: passenger, right: freight).

4. 통행유형별 배출 구조 및 공간적 영향요인 분석

4.1 모형 구축 및 변수 설정

3장에서는 운행지 VKT의 영향요인 분석을 통해 외부 통행이 유의미한 지표임을 확인하였다. 그러나 이러한 외부 통행이 실제 배출량에 미치는 영향 및 지역별 차이를 확인하기 위해서는 추가적인 분석이 필요하다. 이에 본 장에서는 통행유형별 정량적인 배출 기여도를 분석하고, 도로교통 배출의 공간적 전이 구조를 실증적으로 규명하였다.

종속변수는 UTEAS 모델로 분석된 시군구 단위 운행지 배출량($PM_{2.5}$, NO_x , CO_2)으로 설정하였다. UTEAS는 2009년부터 아주대학교 지속가능교통연구센터에서 구축한 도로교통 기후대기 통합평가모델로, 교통량정보제공시스템(TMS)과 교통수요모형(TDM) 등을 이용하여 추정된 운행지 VKT와 네비게이션 차속 기반 배출계수를 결합하여 도로교통의 온실가스 및 대기오염물질 배출량을 고해상도 단위로 분석한다(UTEAS, 2026; Lee and Jeon, 2025). 해당 모델은 재정경제부와 국토교통부의 교통사업 타당성평가 등 정책

의사결정에도 활용되고 있다(MLIT, 2026).

설명변수는 1) 내부 및 유출입 통행량, 2) 평균 차속, 3) 통과교통량으로 구성하였다. 내부 및 유출입 통행량은 KTDB 기종점(O-D) 자료를 이용하여 지역 내부 통행과 해당 지역을 기점으로 하는 발생량을 집계하였고, 평균 차속은 네비게이션 기반 실주행 자료를 활용하여 구축하였다. 통과교통량은 KTDB 기종점(O-D) 자료와 전국 도로망 자료를 바탕으로 사용자 균형(User Equilibrium) 기반 경로 배정을 통해 산정하였다. 각 기종점 통행에 대한 최적 경로를 도출한 후, 경로별 시군구 통과 거리를 추출한 후 통행량과 연계하여 지역별 통과 교통량(대·km/일)을 산정하였다(식 2).

$$X(\text{through}, i) = \sum (O, D) VOD \times d(OD, i),$$

단 $O \neq D, O \neq i, D \neq i$ (2)

여기서, $X(\text{through}, i)$: 시군구 i 에 배분된 통과교통량
 VOD : 출발지 O 에서 도착지 D 로 이동하는 통행량
 $d(OD, i)$: 해당 경로 중 시군구 i 의 행정 경계 내부 구간의 길이

배출량의 공간적 영향요인 분석을 위해 공간계량모형을 적용하였으며, 우선 배출량과 설명변수의 공간적 분포를 Moran's I로 진단하였다. 그 결과, 배출량과 주요 설명변수 모두에서 유의한 양(+)의 공간자기상관이 확인되었다(표 5). 이는 유사한 특성을 가진 지역들이 공간적으로 군집하는 경향이 존재함을 의미하며, 모든 지역에 동일한 계수를 적용하는 전역 회귀모형만으로는 배출량의 공간적 이질성을 충분히 설명하기 어려움을 확인할 수 있다.

이에 본 연구는 전역적 평균 관계를 추정하는 OLS와 지역별 관계의 공간적 변이를 반영하는 MGWR을 함께 적용하였다(식 3). MGWR은 설명변수별로 상이한 대역폭을 추정함으로써 각 요인이 작동하는 공간적 범위를 식별할 수 있는 모형으로, 본 연구에서는 이를 통해 통과교통의 영향이 전국적으로 균질하게 나타나는지, 또는 특정 지역에 집중되는지를 규명하고자 하였다. 대역폭이 작을수록 국지적 특성을, 클수록 광역적 특성을 의미한다. 모형은 이중 제곱 커널과 적응형 대역폭을 적용하였으며, 최적 대역폭은 수정 AICc를 최소화하는 기준으로 결정하였다.

$$\ln(y_i) = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_k \beta_{bwk}(u_i, v_i) \times x_{ki} + \varepsilon_i \quad (3)$$

여기서 y_i : 시군구 i 의 배출량

u_i, v_i : 시군구 i 의 행정구역 중심점 좌표(EPSG:5179)

x_{ki} : k 번째 독립변수

bwk : k 번째 변수에 대해 개별적으로 추정되는 최적 대역폭

$\beta_k(u_i, v_i)$: 위치에 따라 달라지는 국지적 회귀계수

ε_i : 오차항

Table 5. Diagnosis of spatial autocorrelation (Moran's I) for key variables.

Variable	Moran's I	E [I]	z-score	p-value
ln(NOx)	0.152	-0.004	4.08	< 0.001
ln(PM _{2.5})	0.154	-0.004	4.12	< 0.001
ln(CO ₂)	0.168	-0.004	4.49	< 0.001
Self-generated volume	0.067	-0.004	1.87	0.062
Speed	0.548	-0.004	14.40	< 0.001
Through traffic	0.292	-0.004	7.72	< 0.001

4.2 분석 결과 및 해석

4.2.1 통행유형별 배출 구조 분석

배출의 공간적 전이 구조를 규명하기 위해, 통행의 기종점 위치를 기준으로 ① 내부 통행(기·종점이 모두 해당 지역 내부), ② 발생 통행(기·종점 중 하나가 해당 지역), ③ 통과 통행(기·종점이 모두 외부이나 해당 지역을 경유하는 통행)으로 구분하여 통행 구분별 배출 기여도를 분석하였다(표 6).

분석 결과, 전국 기준 통과 통행의 배출 기여율은 NOx 34.8%, PM_{2.5} 44.7%, CO₂ 34.5%로 나타났다. 특히 PM_{2.5}에서 통과 통행의 기여율이 가장 높게 나타났는데, 이는 광역 물류 수송을 담당하는 디젤 화물차가 장거리 간선축을 중심으로 운행하는 특성과 밀접한 관련이 있는 것으로 판단된다.

통과 통행의 배출 기여도는 지역별로 뚜렷한 차이를 보였다(그림 8). NOx 기준 통과 통행 기여율은 충북(50.6%), 전북(45.5%), 세종(44.1%) 등 국토 내륙의 주요 간선축 지역에서 높게 나타났으며, 이들 지역에서는 통과 통행이 전체 배출량의 절반 내외를 차지하는 것으로 분석되었다. 반면 인천(17.6%), 광주(20.9%), 강원(21.6%) 등 국토 종단부에 위치하거나 유출입 통행 특성이 큰 지역에서는 상대적으로 낮은 수준을 보였다.

이와 같은 지역 간 차이는 각 지역의 교통망 기능과 밀접하게 관련된다. 통행유형별 배출 구조를 종합적으로 살펴보면, 지역의 교통 기능에 따라 배출 특성이 뚜렷하게 구분되는 것으로 나타났다(표 7). PM_{2.5}를 기준으로 인천(발생 통행 61.4%)과 부산(발생 통행 47.9%)은 항만·공항 중심으로 유출입 통행의 비중이

Table 6. Composition of national operating-based emissions by traffic category.

Pollutant	Internal traffic (%)	I/O traffic (%)	Through traffic (%)	Total emissions (ton/yr)
NOx	32.8	32.4	34.8	343,079
PM _{2.5}	25.3	30.0	44.7	4,486
CO ₂	33.5	32.0	34.5	106,216 ($\times 10^3$)

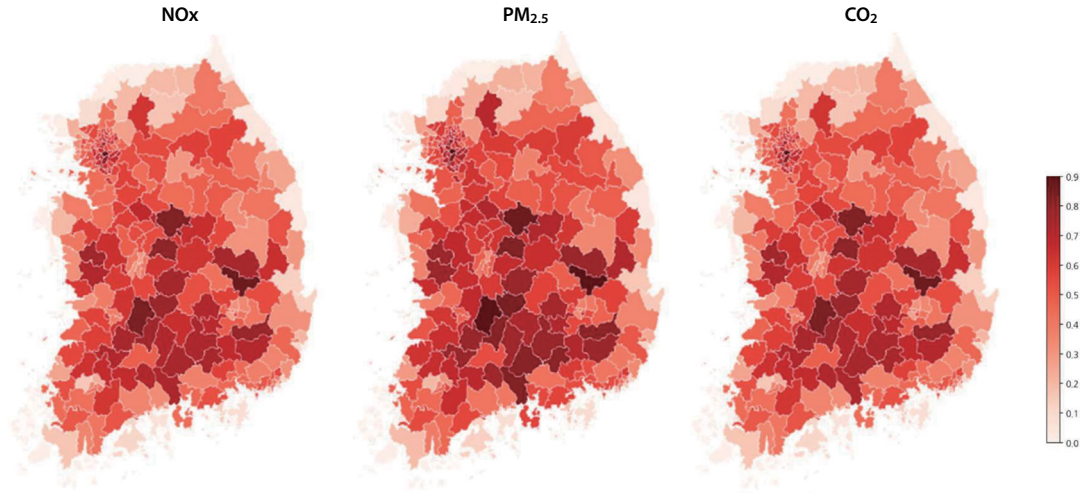


Fig. 8. Emission shares attributable to through traffic by pollutant.

Table 7. Composition of PM_{2.5} emissions by trip traffic category across provinces.

Category	Internal traffic (%)	I/O traffic (%)	Through traffic (%)	This study (ton/yr)	Reference (CAPSS, ton/yr)
Seoul	12.3	32.6	55.1	366.7	212.3
Busan	16.2	47.9	36.0	272.5	102.5
Daegu	27.2	38.9	33.9	255.9	106.6
Incheon	17.1	61.4	21.6	218.1	138.2
Gwangju	34.8	39.7	25.5	118.5	51.1
Daejeon	27.6	39.5	32.9	101.3	60.8
Ulsan	27.6	38.4	33.9	126.9	55.7
Sejong	15.7	26.1	58.2	22.4	18.5
Gyeonggi	23.7	30.3	46.0	737.3	766.9
Gangwon	41.8	29.0	29.1	180.5	130.5
Chungbuk	16.0	21.2	62.8	252.0	182.5
Chungnam	23.6	22.9	53.5	281.8	221.7
Jeonbuk	22.4	17.0	60.7	225.4	148.4
Jeonnam	38.2	25.6	36.1	300.8	164.4
Gyeongbuk	22.7	23.6	53.6	486.4	320.4
Gyeongnam	22.5	21.4	56.1	432.3	255.2
Jeju	95.4	4.6	0.0	107.5	57.2
National	25.3	30.0	44.7	4,486	2,993

높은 관문형 지역으로 분류할 수 있다. 반면 충북(통과 통행 62.8%)과 전북은 국가 간선교통망을 경유하는 통과 통행의 비중이 높은 간선 통과형 지역의 특성을 보였다. 제주(내부 통행 95.4%)와 강원(내부 통행 41.8%)은 내부 통행이 배출의 대부분을 차지하는 내

부 수요 중심형 지역으로 구분되었다.

한편, 본 연구의 PM_{2.5} 배출량은 국가 통계 대비 약 1.5배 높은 수준을 보였다. 이는 운행지 기반 교통량뿐 아니라 내비게이션 차속을 반영한 배출계수를 적용하여 실제 교통 활동도(교통량, 차속)를 반영한 결과로 판단된다. 특히 부산(2.7배), 대구(2.4배) 등 대도시권에서는 교통량이 집중되는 혼잡구간에 저속 주행의 높은 배출계수가 중첩적으로 반영되면서 그 차이가 더욱 크게 나타난 것으로 해석된다. 이러한 차이는 배출 총량뿐 아니라 통행유형별 배출 구조에도 영향을 미치며, 실제 교통 활동도가 충분히 반영되지 않을 경우 발생·유출입·통과 통행의 기여도 역시 왜곡될 수 있다. 본 연구가 통과교통의 배출 기여를 정량적으로 규명할 수 있는 것도 운행지 기반 교통량 및 차속의 활동도를 적용하였기 때문으로, 이는 이동오염원의 공간적 배출 특성을 반영한 배출평가체계의 필요성을 시사한다.

4.2.2 통과교통의 공간적 배출 영향 분석

앞선 기여도 분석을 통해 통과교통이 지역 배출량에서 차지하는 비중을 확인하였다. 이어 통과교통이 다른 요인을 통제한 이후에도 지역 배출량에 유의한 영향을 미치는지를 통계적으로 검증하기 위해, 내부

및 유출입 통행량, 평균 차속, 통과교통량을 설명변수로 하는 회귀분석을 수행하였다. OLS 분석 결과(표 8), 내부 및 유출입 통행량과 통과교통량은 모든 오염물질에서 유의한 양(+)의 영향이 있는 것으로 나타났다. 통과교통량의 계수는 0.109~0.118 범위로 추정되어, 외부에서 유입되는 교통 활동이 지역 배출량 증가에 실질적으로 기여함을 확인하였다. 그러나 모형의 설명력은 R^2 0.46~0.47 수준에 머물렀으며, 잔차의 Moran's I 역시 유의하게 나타나 공간적 의존성이 충분히 제거되지 않은 것으로 분석되었다. 이는 모든 지역에 동일한 계수를 적용하는 전역 단일계수 모형이 배출량 결정요인의 공간적 이질성을 적절히 반영하지 못함을 시사한다.

이에 따라 MGWR 분석을 수행하였고, 모든 오염물질에서 R^2 0.81~0.82 수준의 높은 설명력을 나타내었다(표 9). 이는 배출량 결정요인의 영향이 지역에 따라 상이하게 작용하며, 배출 구조에 공간적 이질성이 내재되어 있음을 의미한다. 변수별 대역폭의 경우, 통과교통량과 내부 발생량은 상대적으로 작은 대역폭(42~

44)을 보여 국지적 특성을 보였고, 차속은 보다 큰 대역폭(63~65)을 나타내어 비교적 넓은 공간 범위에서 유사한 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

이는 통과교통량이 광역 교통망을 통해 형성되는 현상임에도, 그에 따른 배출 영향은 특정 통과 지역에 집중될 수 있음을 시사한다. 다시 말해, 이동 수요가 발생하는 지역과 실제 배출이 발생하는 지역이 일치하지 않으며, 도로교통 배출은 행정 경계를 넘어 공간적으로 전이되는 특성을 지닌다. 이러한 결과는 수송 부문의 에너지 효율 향상과 물류체계 최적화가 지역 단위 규제보다 더 큰 배출 저감 효과를 가져올 수 있음을 제시한 Huang and Kahn (2023)의 논의와도 맥락을 같이한다. 또한 등복지 중심의 배출 관리체계만으로는 지역별 배출 특성과 환경부담을 충분히 반영하기 어렵다는 점을 보여준다. 따라서 통과교통에 따른 배출 문제는 개별 지자체 차원의 교통수요관리만으로 대응하는 데 한계가 있으며, 국가 교통망과 물류체계를 포괄하는 광역적 관리체계가 요구된다.

Table 8. OLS regression results (dependent variable: log of total emissions).

Variable	NOx	PM _{2.5}	CO ₂
Constant	3.987*	-0.752*	9.076*
Self-generated volume (ln)	0.150*	0.147*	0.152*
Speed	-0.009*	0.003	0.001
Through traffic (ln)	0.117*	0.109*	0.118*
Through traffic variable	Truck	Truck	Passenger
R ²	0.455	0.465	0.469

*p<0.01.

Table 9. MGWR bandwidth and model fit by variable.

Variable	NOx	PM _{2.5}	CO ₂
Self-generated volume bandwidth	42	42	42
Speed bandwidth	65	65	63
Through traffic bandwidth	44	44	42
MGWR R ²	0.814	0.821	0.812
MGWR AICc	368.4	362.9	375.1
OLS residual Moran's I	0.187	0.214	0.189
MGWR residual Moran's I	-0.031	-0.026	0.007

5. 결론 및 향후 연구 과제

본 연구는 등복지와 운행지 간 활동도 차이에 따른 도로교통 배출의 공간적 전이 구조를 운행지 관점에서 실증적으로 분석하였다. 운행지 VKT의 영향요인과 통행유형별 배출 기여도 등을 분석한 결과, 다음과 같은 주요 결론을 도출하였다.

첫째, 운행지 VKT는 차량 보유 규모에 의해 기본적으로 설명되지만, 고속도로 중심의 도로망 구조와 외부 유입 수요를 추가 고려하면 설명력이 유의하게 향상되는 것으로 나타났다. 이를 통해 지역의 교통 활동이 내부 수요뿐 아니라 광역 교통의 영향을 함께 받으며 형성됨을 실증하였다.

둘째, 통행유형별 배출 기여도 분석 결과, 운행지 배출량의 약 35~45%가 통과교통에 의해 발생하는 것으로 분석되었다. 특히 PM_{2.5}에서 통과교통의 기여도가 가장 높게 나타났으며, 충북·세종·전북 등 국가 간선

교통망이 집중된 지역에서 통과교통의 배출 비중이 크게 나타났다. 이는 지역별 배출 구조가 차량 보유 규모만으로 설명되지 않으며, 국가 교통망 내에서의 교통 기능에 의해 달라질 수 있음을 시사한다.

셋째, 공간계량분석 결과 통과교통은 $PM_{2.5}$, NO_x 및 CO_2 배출량에 공통적으로 유의한 영향을 미치는 요인으로 확인되었으며, MGWR 분석에서는 비교적 작은 대역폭을 보여 그 영향이 특정 지역에 집중되는 국지적 특성을 나타냈다. 이는 광역적으로 형성된 이동 수요가 일부 경우 지역에 환경부담을 집중시키는 공간적 전이 구조가 존재함을 시사한다.

이상의 결과는 도로교통 배출이 행정 경계를 넘어 형성되는 이동성을 가지며, 배출의 원인이 되는 교통 활동과 실제 환경부담이 발생하는 공간이 반드시 일치하지 않음을 보여준다. 따라서 지자체 단위의 등록 차량 관리체계만으로는 실질적인 배출 저감에 한계가 있으며, 도로이동오염원 관리는 통행 경로와 물류 특성을 고려한 국가 교통망 차원의 광역적 관리체계로 확장될 필요가 있다.

한편 본 연구는 단일 연도 자료를 기반으로 접근되었으며, 통과교통량 또한 경로 배정 결과에 기반한 추정치라는 한계를 가진다. 향후에는 다년도 자료와 고해상도 이동자료를 활용하여 통과교통의 시공간적 변화를 보다 정밀하게 분석하고, 지역 간 환경부담의 분담 및 광역적 배출관리 방안에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었습니다(과제번호 RS-2023-00245871).

References

- Brunsdon, C., Fotheringham, A.S., Charlton, M.E. (1996) Geographically Weighted Regression: A Method for Exploring Spatial Nonstationarity, *Geographical Analysis*, 28(4), 281-298. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1996.tb00936.x>
- Choi, K.J., Lee, K.J., Ahn, S.C. (2009) An Improvement of Bottom Up Approach for Estimating the Mobile Emission Level, *Journal of Korean Society of Transportation*, 27(4), 183-193, (in Korean with English abstract).
- Cubells, J., Miralles-Guasch, C., Marquet, O. (2024) Traffic Pollution as a Privilege: An Intersectional Approach to Environmental Justice and Transport Emissions, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 126, 104032. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.104032>
- De Borger, B., Proost, S. (2013) Traffic Externalities in Cities: The Economics of Speed Bumps, Low Emission Zones and City Bypasses, *Journal of Urban Economics*, 76, 53-70. <https://doi.org/10.1016/j.jue.2013.02.004>
- Fotheringham, A.S., Yang, W., Kang, W. (2017) Multiscale Geographically Weighted Regression (MGWR), *Annals of the American Association of Geographers*, 107(6), 1247-1265. <https://doi.org/10.1080/24694452.2017.1352480>
- Huang, R., Kahn, M.E. (2023) An Economic Analysis of U.S. Public Transit Carbon Emissions Dynamics, *NBER Working Paper Series*, No. 29900. <https://doi.org/10.3386/w29900>
- Lee, K.J. (2025a) Quantitative Evaluation of the Climate and Air Quality Benefits of Eco-Driving Using Real-World Driving Data, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 41(6), 887-898, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2025.41.6.887>
- Lee, K.J. (2025b) Development of a Fuel Efficiency Prediction Model for Autonomous Eco-Driving and Analysis of Road Environment Effects, *Journal of Korean Society of Transportation*, 43(6), 732-742, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.7470/jkst.2025.43.6.732>
- Lee, K.J., Choi, K.J., Ryu, S.G., Baek, S.G. (2012) Development of O/D Based Mobile Emission Estimation Model, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 32(2D), 167-175, (in Korean with English abstract). <https://koreascience.or.kr/article/JAKO201201660927202.page>
- Lee, K.J., Choi, Y.H. (2025) An Integrated Assessment Framework for Energy, Climate, and Air Costs in Road Transportation, *Journal of Korean Society of Transportation*, 43(6), 775-788, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.7470/jkst.2025.43.6.775>
- Lee, K.J., Jeon, G.S. (2025) Decoupling Urban Development and Transport Carbon Emissions: A Hierarchical Regres-

- sion of the TOD 7D Framework in the Seoul Metropolitan Area, *Sustainability*, 17(23), 10511. <https://doi.org/10.3390/su172310511>
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MLIT) (2026) Investment Evaluation Guidelines for Public Transportation Infrastructure Development Projects (8th Revision). <https://www.law.go.kr/admRulLsInfoP.do?admRulId=32331&efYd=0> (accessed on May. 1, 2026).
- Omrani, F., Shad, R., Ziaee, S.A. (2025) A Multiscale Geographically Weighted Regression Approach to Emphasize the Effects of Traffic Characteristics on Vehicular Emissions, *Atmospheric Environment: X*, 25, 100315. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2025.100315>
- Urban Transportation Emission Assessment System (UTEAS) (2026) Introduction to Urban Transportation Emission Assessment System, <http://uteas.kr/> (accessed on May. 1, 2026).
- Xie, R., Fu, Y., Yang, Z., Song, Y., Wang, X., Meng, X., Xian, A., Qiu, Z., Wang, R., Xie, W., Chen, Z., Liu, K., Wu, X., Xing, Q. (2026) Representativeness of Generalized Vehicle Activity Assumptions in Urban Emission Inventories and Policy Evaluation: Evidence from Haikou, China, *Atmosphere*, 17(6), 529. <https://doi.org/10.3390/atmos17060529>
- Xu, C., Zhao, J., Liu, P. (2019) A Geographically Weighted Regression Approach to Investigate the Effects of Traffic Conditions and Road Characteristics on Air Pollutant Emissions, *Journal of Cleaner Production*, 239, 118084. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118084>
- Yang, D., Zhang, S., Niu, T., Wang, Y., Xu, H., Zhang, K.M., Wu, Y. (2019) High-Resolution Mapping of Vehicle Emissions of Atmospheric Pollutants Based on Large-Scale, Real-World Traffic Datasets, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(13), 8831-8843. <https://doi.org/10.5194/acp-19-8831-2019>
- Zheng, J., Wang, Q., Li, S., Zhang, B., Zhang, F., Zhao, T., Qiao, J., Zhao, M. (2024) Synergistic Reduction Effect of PM_{2.5} and CO₂ Emissions and Its Influencing Factors in China: Based on the Multiscale Geographically Weighted Regression (MGWR) Model, *Journal of Environmental Management*, 368, 122485. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122485>

Author Information & Contribution

이규진 (아주대학교 TOD기반 지속가능도시교통연구센터 연구교수, transjin2970@gmail.com) Conceptualization, Formal analysis, Investigation, Methodology, Visualization, Writing - original draft, Writing - review & editing