

인천광역시 간선도로의 이산화탄소 배출 특성 연구

Research on CO2 Emission Characteristics of Arterial Roads in Incheon Metropolitan City

윤병조¹ · 이승준^{2*} · 황효식³Byoung-Jo Yoon¹, Seung-Jun Lee^{2*}, Hyo-Sik Hwang³¹Professor, College of Urban Science, Incheon National University, Incheon, Republic of Korea²Researcher, College of Urban Science, Incheon National University, Incheon, Republic of Korea³Researcher, College of Urban Science, Incheon National University, Incheon, Republic of Korea

*Corresponding author: Seung-Jun Lee, lsj08100@naver.com

ABSTRACT

Purpose: The purpose of this study is to identify the characteristics of CO2 emissions by road before establishing a policy to reduce greenhouse gas emissions. **Method:** As for the analysis method, the traffic volume and speed of the road were estimated using the traffic Assignment model targeting 27 arterial road axes in Incheon Metropolitan City. And, after estimating CO2 emissions by road axis by applying this, the characteristics of each group were analyzed through cluster analysis. **Result:** As a result of cluster analysis using total CO2 emissions, CO2 emissions by truck vehicles, and the ratio of truck vehicle emissions to total carbon dioxide emissions, four clusters were classified. When examining the characteristics of each road included in each group, it was analyzed that the characteristics of each group appeared according to the level of impact by CO2 emissions and truck vehicles. **Conclusion:** It is judged that it is necessary to establish a plan in consideration of CO2 emission characteristics for road CO2 management for greenhouse gas reduction.

Keywords: Greenhouse Gases, Co2 Emissions, Assignment, Traffic Volume/Speed Calibration, Cluster Analysis

요약

연구목적: 본 연구는 온실가스 감축 정책 수립에 앞서 도로별 이산화탄소 배출 특성을 파악하는데 목적이 있다. **연구방법:** 분석 방법은 인천광역시의 27개 간선도로축을 대상으로 통행배정모형을 이용한 교통량 및 속도 추정과 이를 적용한 도로축별 이산화탄소 배출량을 산정한 후, 군집분석을 통해 그룹별 특성을 분석하였다. **연구결과:** 이산화탄소 총배출량, 화물차량에 의한 이산화탄소 배출량, 이산화탄소 총 배출량 대비 화물차량 배출량 비율을 이용한 군집분석 결과, 4개의 군집으로 구분되었다. 각 군집에 포함된 도로별 특성 분석 결과, 이산화탄소 배출량 및 화물차량에 의한 영향 수준에 따라 그룹별 특성이 나타나는 것으로 분석되었다. **결론:** 온실가스 저감을 위한 도로의 이산화탄소 관리에 이산화탄소 배출 특성을 고려한 방안 수립이 필요할 것으로 판단된다.

핵심용어: 온실가스, 이산화탄소 배출량, 통행배정, 교통량/속도 정산, 군집분석

Received | 8 February, 2023

Revised | 3 March, 2023

Accepted | 3 March, 2023

 OPEN ACCESS

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

탄소 배출에 의한 환경문제는 Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC, 2006)의 보고서에 따르면 온실가스 즉, 지구온난화에 큰 영향을 미치고 있다. 또한, 세계적으로 2019년 이후 발생한 코로나 19로 인해 기후변화의 심각성에 대한 인식이 확대되어 세계 여러 국가에서는 탄소 중립을 선언하고 있다.

우리나라의 경우에도 기획재정부(Press Release, 2020)에 따르면 2020년 12월 탄소중립사회 전환을 위해 「2050 탄소중립 추진전략」(2020)을 발표하였으며, 주요 추진 전략에는 수송 부문 중 탄소배출량이 높은 도로 부문에서 개인교통수단의 이용수요 억제와 더불어 대중교통 활성화 방안을 포함하고 있다. 또한, 관계부처 합동으로 수행된 「2030년 국가 온실가스 감축 목표 달성을 위한 기본 로드맵 수정본」(2018)에서는 2030년까지 BAU(Business As Usual)대비 37% 감축 목표를 수립하였다. 이 중 수송부문은 2030년 약 105.2백만톤Co2e로 전망하고 있으며, 감축량 목표는 약 30.8백만톤Co2e(29.3%)로 이러한 감축을 위해 도로교통부문에서는 친환경차 보급 및 대중교통운영 확대, 승용차 운행억제 등을 제시하고 있다.

이와 같이 국가적으로 온실가스의 주범인 탄소 배출량 감축을 위해 다양한 정책을 수립하고 있으며, 전국 지자체에서도 이러한 중앙정부의 정책 방향에 맞춰 탄소 중립을 선언하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구는 수송부문 중 도로교통부문에서 각 지자체의 관리가 가능한 주요 도로망에 대하여 이산화탄소 배출 특성을 분석하는데 목적이 있으며, 연구의 공간적 범위는 인천광역시 구간선도로를 대상으로 선정하였다. 분석 방법은 통행배정모형을 이용하여 도로 구간의 교통량과 통행속도를 추정하고 이를 이용한 이산화탄소 배출량을 산정하였으며, 이후 클러스터 분석을 통해 각 그룹별 특성을 파악하였다. 본 연구의 분석 결과는 도로 구간의 이산화탄소 배출량 관리 전략 및 관리 방안 수립의 기초자료로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

관련 연구 검토

이산화탄소 배출량 산출 방법

온실가스의 종류에는 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 염화불화탄소(CFCs), 아산화질소(N₂O), 사염화탄소(CCl₄), 수화불화탄소(HFCs), 수화염화불화탄소(HCFCs), 과불화탄소(PFCs), 육불화황(SF₆) 등이 있다(Choi, 2019). 이중 이산화탄소는 전체 온실가스 배출량의 약 80%이상을 차지하고 있다(Han, 2013). 또한 이산화탄소의 경우, 교통부문의 온실가스 중 도로부문에서 주로 배출되고 있는 실정이다.

Baek(2013)과 Cheon(2010)의 내용을 인용하면, 이산화탄소 배출량 산정 방법은 IPCC에서 제시된 Tier1, Tier2, Tier3를 적용하고 있다. 우선 Tier1은 연료별 총사용량 자료를 이용하여 연료 배출계수를 이용한 배출량 산정 방법으로 자료 활용 및 통계 구축이 용이하고 에너지 소비량을 이용함에 따라 국가차원의 배출량 산정에는 적합한 반면, 교통특성을 반영하지 못한다는 한계가 있다. Tier2는 연료소비량, 자동차 대수, 운행거리 등을 반영한 방법으로 교통특성의 영향이 고려된 배출량 산정이 가능하나, 연평균 자동차 주행거리 및 등록대수를 사용함에 따라 실제 차량의 운행특성을 반영하는데 한계가 있다. Tier3은 도로구간의 교통량, 주행거리, 주행속도가 반영됨에 따라 Tier2의 방법에 비해 구체적인 교통특성 반영이 가능하나 차량의 가감속에 의한 영향을 고려하지 못한다는 한계가 있다.

이외에 도로 및 교통부문 타당성 조사 지침연구(KRILA, 2015) 및 교통부문사업 편익산정 방법론 연구(KDI, 2017)에서는 차종별 오염물질 배출계수를 이용하여 차종별·속도별 온실가스 배출계수를 제시하고 있으며, 이를 통해 대기오염비용을 산정하고 있다.

선행 연구 검토

Kim et al.(2020)은 온실가스 전망과 감축 잠재량 분석시 일관성을 갖지 못하는 한계를 제시하고 도로교통부문을 대상으로 감축 잠재량 산정의 주요 변수인 자동차 등록대수, 연료별·차종별 신차점유율, 연비 자료를 이용한 온실가스 배출량을 전망하였다. 또한, 자동차 등록대수 및 대당 주행거리는 인구, 국내총생산, 유가 전망치 등을 변수로 회귀모형식을 구축하였으며, 이러한 변수를 활용하여 도로교통부문의 CO2 배출량을 전망한 결과, 2030년 기준 BAU하의 CO2 배출량 대비 약 23.2% 감축이 가능한 것으로 추정하였다. Park(2010)는 교통사업의 환경성 평가를 위해 대기측정망 자료가 없는 지역에서도 적용 가능한 모형식을 구축하였으며, 대기오염물질인 SO₂, CO, O₃, NO_x, PM₁₀을 종속변수로, 차종별 교통량, 풍속, 온도자료, 강우자료를 독립변수로 설정한 다중회귀분석을 수행하였다. 모형식 구축 결과, 교통량 변수와는 양의 관계, 기상요인 변수와는 음의 관계를 보이는 것으로 나타났으며, 구축된 모형식 중 CO의 모형 적합도가 가장 높은 것으로 나타났다. Kim et al.(2014)은 도로교통부문의 이산화탄소 배출량 관리를 위해 경기도를 대상으로 기종점 통행과 통과 통행을 구분한 지자체별 배출량 산정 방법을 제시하였다. 분석 결과, 경기 남부 지역에서는 통과교통량에 의한 이산화탄소 배출량이 높은 반면, 경기 북부 지역은 지역 배출량이 높은 것으로 나타났으며, 이러한 통행 구분에 따라 지자체 관리와 국가 차원의 관리에 대한 구분이 필요하다고 제시하였다. Tayarani et al.(2018)은 대중교통의 노선 변화, 배차간격 조정 등과 같은 대중교통계획, 도로의 차로수 변화를 통한 자전거 시설 및 BRT 차선 개선 등의 도로용량 감소 등 다양한 시나리오 분석에서 운송부문의 온실가스 저감이 가능하다는 것을 제시하였다. Giannakos et al.(2017)은 동적 시뮬레이션과 동적 시뮬레이션을 이용한 교통관리 방안 평가에서 교통수요 변화에 따른 환경 영향을 분석하였으며, 속도 감소에 따라 연료 소비 및 CO₂배출량이 증가와 교통수요 감소로 인한 환경 개선의 결과를 도출하였다. Seo(2011)는 도로교통부문의 이산화탄소 배출량 변화에 대한 교통정책 평가 모형 개발을 수행한 결과, 개인운전자에게 탄소세를 부과하는 경우, 탄소배출량은 약 5.2% 감소하는 효과를 제시하였다. Yoo et al. (2020)는 Tier3방법의 자동차주행거리 자료와 통행배정모형을 이용한 도로부문의 온실가스 배출량 추정 방법에서 지역별 배출량 비교, 통행유형에 따른 배출량 규모, 도로 위계별 배출량 등에 따른 정책방향이 필요성을 제시하였다. Lee et al.(2017)은 교통부문의 온실가스 감축목표 설정과 이행계획 수립을 위한 정량적인 효과분석 방법론 연구에서 실제 교통 및 배출 자료를 기반으로 교통수단별 온실가스 배출 원단위 추정 모형을 제시하였으며, 에코드라이브 활성화 정책이 높은 온실가스 감축효과가 발생한다는 결과를 도출하였다. Panis et al.(2006)는 미시적 시뮬레이션 모델을 이용하여 속도관리에 따른 환경 영향 분석을 수행한 결과, 속도 관리가 교통의 평균 속도를 감소시키는데 효과적인 반면, 오염물질 배출에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. Lee(2012)는 대구광역시를 대상으로 Tier3 방법의 이산화탄소 배출량 산정을 위한 연구에서 공간통계기법을 이용한 교통량 예측과 이를 활용한 도시 내 주요 도로의 이산화탄소 배출의 분포특성을 파악하였다. Cheon(2010)은 국내 수송부문의 이산화탄소 배출량 산정은 연료 판매량 데이터를 대상으로 산정됨에 따라 총량 개념에서는 정확하지만 실제 교통량의 미반영으로 공간적인 배출량 산정에는 한계가 있음을 제시하였으며, 이를 극복하기 위해 서울시를 대상으로 교통량자료를 활용한 이산화탄소 배출량 산정 방법을 제시하였다. Han(2013)은 통행배정모형을 이용한 자동차 이산화탄소 배출량 산정 방안을 제시하였으며, 통행배정모형에서 산정이 어려운 내부통행에 의한 배출량은 수도권 가 구통행실태조사 및 KT 속도 자료를 이용하였다. 분석 결과, 전체 수단 중 승용차를 제외한 이산화탄소 배출량은 화물차량, 버스, 택시 등의 순으로 높은 것으로 나타났으며, 대중교통이 활성화된 서울의 경우, 버스, 택시의 배출량이 높은 반면, 경기도는 화물차량에 의한 이산화탄소 배출량이 높은 것으로 나타났다. Choi(2019)은 DSRC(Dedicated Short Range Communications) 경로 자료를 이용하여 도로의 이동오염원별 온실가스 배출량을 산정하였으며, 개별 차량의 속도 자료를 이용

할 경우, 기존의 산정 방법에서 나타나는 평균 속도 적용시 발생하는 한계(속도가 낮은 차량의 높은 배출 원단위, 속도가 임계점 이상 높을 경우 높은 배출원단위 적용 등)를 해결할 수 있다는 결과를 제시하였다.

선행 연구 검토 결과, 연구의 내용적 측면에서 전반적으로 도로교통부문의 이산화탄소 배출량 산정 방법의 정확성을 향상시키기 위한 연구가 수행된 것으로 나타났으며, 방법론적 측면에서는 통계분석(회귀분석 등), 통행배정모형, 실측 자료 등을 활용한 것으로 나타났다. 그러나 본 연구의 경우, 기존 연구에서 수행된 공간적 범위에서의 이산화탄소 배출량 추정 및 관리가 아닌 보다 미시적 관점에서 지자체별 관리가 가능한 도로축을 대상으로 이산화탄소 배출량을 통해 이산화탄소 배출 특성을 파악하는데 차별성이 있다.

분석 결과

기초자료 및 네트워크 현행화

선행연구(Baek, 2013)에서 언급된 바와 같이 Tier3의 방법론은 교통특성이 반영됨에 따라 도로교통부문의 이산화탄소 배출량 산정에 적합한 방법으로 볼 수 있다. 또한, 도로 및 교통부문 타당성 조사 지침연구(KRILA, 2015) 및 교통부문사업 편익 산정 방법론 연구(KDI, 2017)의 대기오염절감편익 산정 방법은 차종별 교통량, 통행거리, 통행속도가 반영되었다는 점에서 Tier3 방법과 유사하나 산정 방식 및 적용성이 보다 간편하다는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 위의 연구에서 적용하고 있는 방법론을 통해 이산화탄소 배출량을 추정하였다. 또한, 모든 도로의 교통량 실측에 한계가 있기 때문에 기존 연구에서 적용한 통행배정모형의 추정 결과를 활용하였으며, 분석을 위한 기초자료는 한국교통연구원 국가교통DB센터에서 제공하는 수도권 O/D 및 네트워크 자료를 이용하였다. 분석의 기준년도는 2020년으로 분석 범위는 인천광역시 내 주요 간선도로를 대상으로 선정하였으며, 주요 간선도로의 기준은 「2020 도시교통 기초조사」(Incheon Metropolitan City, 2021)에서 제시된 도로구간을 적용하였다. 주요 간선도로의 구간별 평균 속도를 살펴보면, Table 2와 같이 시험차량운행을 통해 조사된 평균속도 자료 외에 인천광역시의 ITS 속도자료에 대한 결과를 같이 제공하고 있으며, 수집된 자료에 따라 구간별 평균속도에 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 또한, 일부 구간에 대해서는 검지 종류에 따른 평균속도 자료가 없는 것으로 나타났다.

본 연구의 분석 기준년도는 관측자료(교통량, 속도)를 고려하여 2020년으로 설정하였으며, Fig. 1은 교통량 정산 및 통행 속도 정산 구간을 도식화한 것이다. 네트워크 현행화 결과, 교통량 정산은 총 51개 지점에 대하여 오차율 $\pm 30\%$ 이내로 수행하였으며, 전체 정산지점에 대한 상관관계에서 R-squared 0.90으로 나타났다. 속도 정산의 경우, 교통량 정산과는 달리 수집 방법에 따라 편차가 존재하여 최대값과 최소값 범위내에서 수행하였다. 총 27개 축에 대한 속도 정산결과는 Table 3과 같이 3개 축을 제외한 24개 축에서 최대값과 최소값 범위를 만족하였다. 해당 범위를 만족하지 못하는 3개 축은 구월로, 길주로, 벌말로로 구월로와 길주로의 경우, 최대 평균속도에 비해 약 0.6km/h 높게 나타났으며, 벌말로는 최소 평균속도에 비해 약 7.4km/h 낮게 추정되었다.

이산화탄소 배출량 관리 구간 선정

본 연구의 이산화탄소 배출량 산정을 위한 배출계수 원단위는 Table 4와 같이 차종별 10km/h 간격의 배출계수를 적용하였다. 여기서 차종의 구분을 살펴보면, 승용차, 버스(소형, 중형, 대형), 트럭(소형, 중형, 대형)으로 구분되어 있으며, 통행배정모형에서 적용된 수단은 승용차, 택시, 노선버스, 비노선버스, 트럭(소형, 중형, 대형)으로 구분된다. 따라서 동일 수단에

Table 2. Average travel speed of arterial roads(Incheon)

도로명	시점	종점	평균속도(km/h)			
			시험차량운행	UTIS	BMS	VDS
경명대로	장도삼거리	박촌교입구	38.3	40.1	31.2	46.4
경원대로	굴다리오거리	솔청공원사거리	24.7	45.1	30.4	50.6
경인로	승의로터리	경인로시계	26.0	35.7	24.7	44.2
계양대로	계산삼거리	부평IC삼거리	23.0	37.4	26.2	-
구월로	석바위사거리	만수주공사거리	19.6	30.1	22.4	-
길주로	길주로중점삼거리	부개공원사거리	-	34.7	27.2	-
남동대로	간석오거리	송도4교사거리	24.5	48.7	34.8	47.5
무네미로	구산사거리	서창JC	41.7	53.6	41.8	39.6
백범로	인천환경공단앞	장수사거리	25.3	41.8	29.2	45.5
별말로	하야교삼거리	동호주유소삼거리	45.6	-	42.4	-
봉수대로	신동마을	송림삼거리	27.6	43.7	28.2	53.3
봉오대로	중봉사거리	계양재활용센터	22.3	32.6	30.4	40.7
부평대로	부평IC사거리	부평역사거리	23.0	37.3	26.8	-
비류대로	옹암서거리	주적골삼거리	28.3	49.2	31.4	-
서곶로	완정사거리	서달산길삼거리	24.1	41.5	29.0	56.9
소래로	만수사거리	소래포구사거리	29.2	40.5	35.7	-
수인로	장수사거리	수인로시계	25.3	39.4	35.5	-
아나지로	효성교사거리	서운산단삼거리	23.7	30.9	23.0	-
아암대로	능안삼거리	소래대교	33.6	49.0	37.0	-
원당대로	검단일반산업단지	유현사거리	31.8	41.1	-	58.2
인주대로	능안삼거리	치야고개삼거리	23.5	40.0	24.8	47.2
인중로	승의로터리	송림고가교	26.0	35.5	24.0	-
장제로	유현사거리	동수지하차도	22.4	38.4	25.6	38.9
중봉대로	경서삼거리	송현사거리	40.7	53.9	40.8	-
참외전로	송월사거리	송의삼거리	22.9	37.7	25.2	-
축항대로	연안여객터미널	능해IC	31.2	37.9	40.0	-
호구포로	동수사거리	송도5교사거리	35.2	34.7	27.2	44.4

자료 : 인천광역시(2021), 2020 도시교통 기초조사

대해서는 Table 4의 원단위 적용이 가능하나 택시 수단과 버스 수단을 적용하기에는 한계가 있다.

이에 본 연구에서는 택시수단의 경우, Table 5와 같이 국립환경과학원에서 제시하고 있는 배출계수 산출식¹⁾을 적용하였으며, 택시의 중형과 대형 구성비는 전국택시운송사업조합연합회의 ‘택시대수 및 운전자 현황(2020. 12월)’ 자료를 이용하여 산정하였다. 또한, 버스 수단 중 노선버스는 시내/시외버스의 개념으로 대형버스²⁾ 기준의 배출계수 원단위를 적용하였으며, 비노선버스는 전세버스 개념으로 대형트럭의 배출계수를 적용하였다.

1) Baek(2013)의 논문에서 제시된 식을 재인용함

2) KRILA(2015) 및 KDI(2017)에 언급된 내용을 살펴보면, 대형버스는 시내버스를 의미하며, 시내버스 이외의 대형버스는 대형트럭 배출계수를 적용한다고 제시되어 있음.

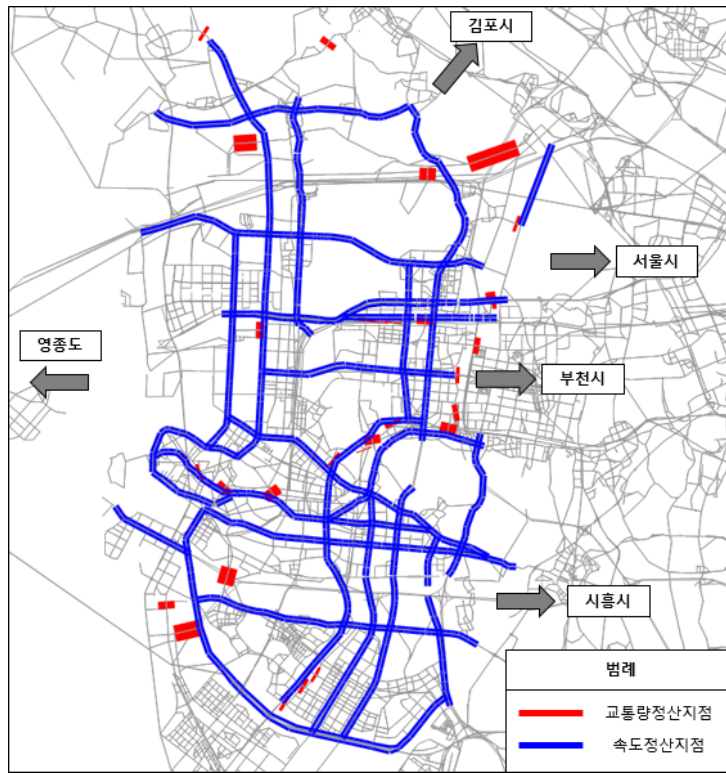


Fig. 1. Calibration point of Traffic volume and travel speed

Table 3. Results of travel speed calibration

일련번호	도로명	관측속도(km/h)		배정속도(km/h, C)	속도편차(km/h)		일련번호	도로명	관측속도(km/h)		배정속도(km/h, C)	속도편차(km/h)	
		최소값(A)	최대값(B)		C-A	C-B			최소값(A)	최대값(B)		C-A	C-B
1	경명대로	31.2	46.4	45.7	14.5	-0.7	15	서곶로	24.1	56.9	38.7	14.6	-18.2
2	경원대로	24.7	50.6	32.2	7.5	-18.4	16	소래로	29.2	40.5	35.0	5.8	-5.5
3	경인로	24.7	44.2	32.1	7.4	-12.1	17	수인로	25.3	39.4	38.5	13.2	-0.9
4	계양대로	23.0	37.4	36.7	13.7	-0.7	18	아나지로	23.0	30.9	29.4	6.4	-1.5
5	구월로	19.6	30.1	30.7	11.1	0.6	19	아암대로	33.6	49.0	45.9	12.3	-3.1
6	길주로	27.2	34.7	35.3	8.1	0.6	20	원당대로	31.8	58.2	48.2	16.4	-10.0
7	남동대로	24.5	48.7	36.2	11.7	-12.5	21	인주대로	23.5	47.2	34.4	10.9	-12.8
8	무네미로	39.6	53.6	40.2	0.6	-13.4	22	인증로	24.0	35.5	35.3	11.3	-0.2
9	백범로	25.3	45.5	31.6	6.3	-13.9	23	장계로	22.4	38.9	34.5	12.1	-4.4
10	별말로	42.4	45.6	35.0	-7.4	-10.6	24	중봉대로	40.7	53.9	46.5	5.8	-7.4
11	봉수대로	27.6	53.3	41.7	14.1	-11.6	25	참외전로	22.9	37.7	34.9	12.0	-2.8
12	봉오대로	22.3	40.7	37.0	14.7	-3.7	26	축항대로	31.2	40.0	35.3	4.1	-4.7
13	부평대로	23.0	37.3	34.7	11.7	-2.6	27	호구포로	27.2	44.4	38.5	11.3	-5.9
14	비류대로	28.3	49.2	38.7	10.4	-10.5				-			

Table 4. Basic unit of carbon dioxide emission

구분	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
승용차	347.39	232.04	183.25	154.99	136.10	122.40	118.44	120.94	127.93	139.42
대형버스	2,014.00	1,478.22	1,202.38	1,039.37	936.51	870.56	829.99	808.93	804.63	816.56
소형트럭	501.20	376.26	318.16	282.46	257.56	238.85	245.29	263.65	299.81	353.76
중형트럭	1,095.77	742.04	593.40	519.39	483.57	473.22	485.23	523.24	600.97	757.96
대형트럭	1,955.34	1,479.76	1,234.62	1,094.15	1,012.40	969.58	957.12	972.73	1,019.28	1,106.25

Table 5. Calculation formula of carbon dioxide emission factor for taxi

구분	구성비(수도권 기준 ³⁾ , %)	차속구분	배출계수 산출식
중형	97.33	65.4km/h 미만	$y = 1447.3x^{-0.5933}$
		65.4km/h 이상	$y = 23.2385x^{0.3980}$
대형	2.67	65.4km/h 미만	$y = 1709.4x^{-0.6232}$
		65.4km/h 이상	$y = 41.3400x^{0.2737}$

위의 산정식 및 원단위를 적용한 인천광역시 간선도로축의 이산화탄소 배출량 산정 결과는 Table 6과 같다. 우선 이산화탄소 총 배출량 측면에서는 봉수대로, 경원대로, 경명대로 순으로 이산화탄소 배출량이 많은 것으로 분석되었다. 반면, 아나지로, 축항대로, 참외전로, 수인로, 별말도 등에서는 다른 도로축에 비해 이산화탄소 배출량이 적은 것으로 분석되었다.

한편, 인천광역시의 경우 항만시설이 위치하고 있어 다른 지역에 비해 화물차에 의한 영향이 클 것으로 판단됨에 따라 화물차량(트럭)의 배출량을 분석하였다. 분석 결과, 봉수대로, 경명대로, 백범로, 아암대로, 무네미로 순으로 화물차량에 의한 이산화탄소 배출량이 높은 것으로 나타났으며, 아나지로, 구월로, 참외전로, 부평대로, 수인로 등에서는 낮은 것으로 분석되었다. 간선도로축별 이산화탄소 총 배출량 대비 화물차량에 의한 배출량 비율을 살펴보면, 양적으로 후순위에 있는 축항대로의 경우 화물차량에 의한 이산화탄소 배출량 비율이 40% 이상으로 가장 높은 것으로 나타났다. 다음으로 총배출량 및 화물차량 배출량에서 높은 순위에 있는 경명대로로 나타났으며, 이외 아암대로, 백범로 등에서도 화물차량에 의한 배출량 비율이 약 30% 수준을 차지하는 것으로 분석되었다. 반면, 구월로와 부평대로, 경인로에서는 이산화탄소 총 배출량 중 화물차량이 차지하는 비율은 10%미만으로 나타나 화물차량을 제외한 승용차 및 택시 등에 의한 이산화탄소 배출량이 대부분을 차지하는 것으로 분석되었다. Fig. 2는 도로축별 이산화탄소 총배출량(a)과 총배출량 대비 화물차량의 배출량 비율(b)을 도식화한 것으로 총배출량이 많은 봉수대로와 경원대로의 경우, 화물차량의 배출량 비율은 높지 않은 반면, 총배출량이 낮은 축항대로는 화물차량의 배출량 비율이 높은 것을 알 수 있다.

여기서, 도로별 이산화탄소 배출량은 각 간선도로의 구간별 교통량, 통행속도, 연장에 의해 산정된다. 즉, 차로수가 많아 교통량이 많은 도로 또는 도로의 연장이 긴 간선도로축의 경우, 상대적으로 그렇지 않은 도로축에 비해 높은 이산화탄소 배출량이 산정될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Table 7과 같이 도로축별 연장과 차로수를 고려한 km당 차로당 평균 이산화탄소 배출량 원단위를 산정하였다. 분석 결과 총 이산화탄소 배출량 원단위에서는 계양대로, 백범로, 경인로, 무네미로, 경원대로 순으로 많은 것으로 나타났으며, 화물차량에 의한 배출량 원단위의 경우 백범로, 무네미로, 경명대로, 봉수대로, 중봉대로

3) 일반택시 및 개인택시의 중형 이외의 차량은 대형으로 포함하였음

Table 6. Results of CO2 emission calculation

도로명	총 배출량 (g)	화물차량 배출량 (g)	화물차량의 배출량 비율(%)	도로명	총 배출량 (g)	화물차량 배출량 (g)	화물차량의 배출량 비율(%)
봉수대로	227,583,655	60,167,398	26.4	봉오대로	103,215,937	11,436,164	11.1
경원대로	216,260,764	25,936,566	12.0	소래로	83,709,173	18,002,166	21.5
경명대로	192,877,789	58,280,450	30.2	길주로	55,430,611	7,020,664	12.7
백범로	185,452,571	54,515,183	29.4	부평대로	51,022,864	3,499,201	6.9
경인로	173,492,250	15,842,925	9.1	계양대로	50,233,925	6,340,883	12.6
장제로	168,659,730	17,320,510	10.3	원당대로	46,202,734	12,042,538	26.1
인주대로	161,682,405	19,019,530	11.8	구월로	30,819,848	1,966,813	6.4
남동대로	143,689,223	21,674,041	15.1	인중로	30,792,675	6,676,151	21.7
비류대로	137,760,707	26,633,252	19.3	벌말로	27,440,347	4,283,858	15.6
무네미로	123,596,168	32,258,625	26.1	수인로	26,603,985	3,813,771	14.3
아암대로	110,078,998	33,248,204	30.2	참외전로	25,925,198	2,886,012	11.1
서곶로	108,996,621	19,091,757	17.5	축항대로	16,781,266	7,291,400	43.4
중봉대로	107,351,538	28,855,070	26.9	아나지로	7,091,014	740,058	10.4
호구포로	105,700,374	15,990,810	15.1			-	

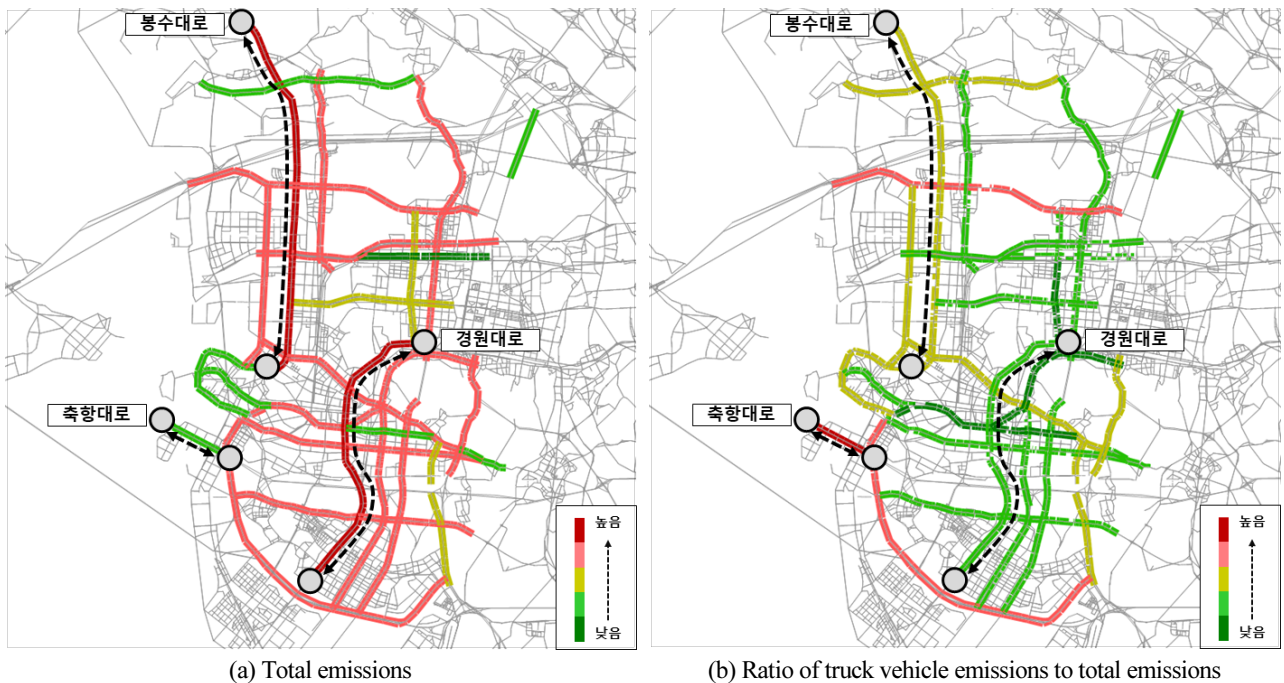


Fig. 2. CO2 emission by roads

순으로 나타났다. 이산화탄소 총 배출량 원단위 중 화물차량 배출량 원단위 비율이 높은 도로는 축항대로, 경명대로, 아암대로, 백범로, 중봉대로 등으로 나타나 전반적으로 Table 6의 결과와 유사한 것으로 나타났다.

Table 7. Basic unit of carbon dioxide emission per lane per km

도로명	총 배출량 (g/km/lane)	화물차량 배출량 (g/km/lane)	화물차량의 배출량 비율(%)	도로명	총 배출량 (g/km/lane)	화물차량 배출량 (g/km/lane)	화물차량의 배출량 비율(%)
계양대로	7,552,855	953,375	12.6	비류대로	3,593,785	706,424	19.7
백범로	6,413,592	1,906,705	29.7	호구포로	3,554,473	553,154	15.6
경인로	6,042,038	562,891	9.3	수인로	3,536,705	495,255	14.0
무네미로	5,681,791	1,471,823	25.9	참외전로	3,459,276	385,089	11.1
경원대로	5,162,990	605,163	11.7	중봉대로	3,426,815	984,484	28.7
인주대로	5,012,658	573,564	11.4	봉오대로	3,148,396	347,519	11.0
남동대로	4,755,102	724,077	15.2	길주로	2,664,187	332,950	12.5
장제로	4,746,411	497,865	10.5	구월로	2,581,994	163,548	6.3
부평대로	4,722,385	323,866	6.9	아암대로	2,173,238	659,919	30.4
봉수대로	4,194,353	1,114,361	26.6	인중로	1,634,493	331,453	20.3
소래로	4,186,462	880,939	21.0	원당대로	1,599,586	458,920	28.7
별말로	4,056,123	633,223	15.6	축항대로	1,383,592	607,271	43.9
경명대로	4,046,274	1,244,035	30.7	아나지로	506,626	51,171	10.1
서곶로	3,958,306	695,743	17.6			-	

도로축별 이산화탄소 배출량의 특성을 파악하기 위해 Table 7의 결과를 기반으로 도로별 이산화탄소 총배출량과 화물차량의 이산화탄소 배출량, 총배출량 대비 화물차량 배출량 비율을 이용한 군집분석을 수행하였으며, 분석에 앞서 특정 단위의 차이를 고려하여 변수를 표준화 하였다. 표준화된 변수를 적용하여 k-mean 군집분석을 수행한 결과, 4개의 군집으로 구분하였으며 유의성 검증 결과 Table 8과 같이 유의한 것으로 나타났다.

Table 8. Results of ANOVA

	군집		오차		F	유의확률
	평균제곱	자유도	평균제곱	자유도		
이산화탄소 총 배출량	5.248	3	0.446	23	11.771	0.000
화물차량의 이산화탄소 배출량	6.631	3	0.265	23	24.981	0.000
총 배출량 대비 화물차량 배출량 비율	6.737	3	0.252	23	26.767	0.000

Table 9와 같이 구분된 군집별 특성을 살펴보면, 첫 번째 군집은 이산화탄소 총 배출량이 많은 반면, 화물차량에 의한 배출량 및 이산화탄소 총 배출량 대비 화물차량 배출량의 비율은 다소 적은 그룹으로 분석되었다. 두 번째 군집은 화물차량에 의한 이산화탄소 배출량은 적은 그룹으로 이산화탄소 총 배출량 및 이산화탄소 총 배출량 대비 화물차량 배출량의 비율 또한 다소 적은 것으로 나타났다. 세 번째 그룹은 이산화탄소 총 배출량은 적은 반면, 이산화탄소 총 배출량 대비 화물차량 배출량의 비율이 높은 그룹으로 분석되었다. 마지막으로 네 번째 군집은 화물차량에 의한 이산화탄소 배출량이 매우 많은 그룹으로 이산화탄소 총 배출량 및 이산화탄소 총 배출량 대비 화물차량 배출량의 비율 또한 많은 특성을 가지는 것으로 분석되었으며, 군집분석 수행 결과에 따른 각 군집별 간선도로축은 Table 10과 같다.

Table 9. Centroid of cluster

	군집			
	1	2	3	4
이산화탄소 총 배출량	0.64488	-0.74528	-1.04744	0.76457
화물차량의 이산화탄소 배출량	-0.06389	-0.85092	0.00291	1.87463
총 배출량 대비 화물차량 배출량 비율	-0.50044	-0.62572	1.56756	1.06007

Table 10. Results of cluster analysis

구분	도로명(축)	케이스 수
군집 1	경원대로, 경인로, 장제로, 인주대로, 남동대로, 비류대로, 서곶로, 소래로, 부평대로, 계양대로, 별말로	11
군집 2	호구포로, 봉오대로, 길주로, 구월로, 인중로, 수인로, 참외전로, 아나지로	8
군집 3	아암대로, 중봉대로, 원당대로, 축항대로	4
군집 4	봉수대로, 경명대로, 백범로, 무네미로	4

결론

본 연구는 인천광역시의 주간선도로를 대상으로 온실가스의 주요 요인인 이산화탄소 배출량 관리를 위해 도로별 배출 특성을 파악하였다. 분석 방법은 선행 연구 검토를 통해 통행배정모형을 이용한 교통량 및 통행속도를 추정하였으며, 이를 이용하여 도로축별 이산화탄소 배출량을 추정하였다. 분석 결과, 전반적으로 이산화탄소 총 배출량이 많은 도로, 화물차량에 의한 이산화탄소 배출량이 많은 도로, 이산화탄소 총 배출량 대비 화물차량에 의한 배출량 비율이 높은 도로 등으로 구분되었으나, 거리 및 차로수를 고려할 경우, 도로축별로 이산화탄소 배출량의 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 특성을 고려하여 K-mean 군집분석을 수행한 결과, 4개의 군집으로 분류되었으며, 군집별 특성을 살펴보면 첫 번째 군집은 이산화탄소 총 배출량이 많고 화물차량 배출량은 다소 적은 것으로 분석되었다. 두 번째 군집은 전반적으로 이산화탄소 총배출량, 화물차량 배출량, 이산화탄소 총 배출량 대비 화물차량 배출량의 비율이 다소 적은 그룹으로 나타났다. 세 번째 군집은 이산화탄소 총 배출량 대비 화물차량 배출량의 비율이 높은 그룹으로 분류되었으며, 네 번째 군집은 전반적으로 이산화탄소 총배출량, 화물차량 배출량, 이산화탄소 총 배출량 대비 화물차량 배출량의 비율이 높은 그룹으로 두 번째 군집과는 반대의 특성을 가지는 것으로 분석되었다.

본 연구의 분석 결과는 향후 인천광역시의 도로부문 이산화탄소 배출량 관리 방안 수립시 도로별 특성을 반영한 대안 마련이 가능할 것으로 보이며, 단계별 계획에서 이산화탄소 배출량 관리 도로축의 우선 순위 선정 등에 대한 근거 자료 활용이 가능할 것으로 판단된다.

다만, 본 연구는 통행배정모형을 이용한 이산화탄소 배출량 산정시 내부 통행에 의한 영향(Han, 2013) 및 통행배정모형에서 네트워크의 구조적 문제(존 크기, 존 커넥터 연결 등)로 인한 zero 교통량 구간 발생 등을 고려하지 못했다는 한계를 지니고 있다. 따라서 향후에는 이러한 부분을 반영하여 주간선도로 외에 주간선도로와 밀접한 연계성을 갖는 보조간선도로 등에 대한 검토가 필요할 것으로 보인다.

Acknowledgement

인천대학교 2021년도 자체연구비(국제공동연구비) 지원에 의하여 연구되었음.

References

- [1] Baek, B.R. (2013). A Methodology to Estimate Vehicle CO₂ Pure Emission by Regional Groups. Masters Dissertation, Myongji University.
- [2] Cheon, S.M. (2010). A Study on the Generated Carbon Dioxide amount Estimation from Road Transportation Part in Seoul. Masters Dissertation, University of Seoul.
- [3] Choi, S.H. (2019). Set the Appropriate Distance for Calculating the GHG Emissions by Individual Vehicle Speed. Masters Dissertation, Seoul National University.
- [4] Giannakos, L., Mintsis, E., Basbas, S., Mintsis, G., Taxiltaris, C. (2017). "Simulating traffic and environmental effects of pedestrianization and traffic management. A comparison between static and dynamic traffic assignment." *Transportation Research Procedia*, Vol. 24, pp. 313-320.
- [5] Han, S.W. (2013). A Methodology to Estimate Vehicle CO₂ Emissions using Traffic Assignment Technique. Masters Dissertation, Myongji University.
- [6] Incheon Metropolitan City (2021). 2020 Urban Transport Basic Survey.
- [7] IPCC (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- [8] KDI (2017). Research on the Methodology for Calculating the Benefits of the Transportation Sector.
- [9] Kim, H., Ahn, Y.H., Yoo, T.J., Yoo, S.J. (2020). "Research of national greenhouse gases policies and technologies: Methodology for CO₂ emission projection and reduction potentials in road transport sector of Korea." *Journal of Korea Technology Innovation Society*, Vol. 23, No. 2, pp. 324-339.
- [10] Kim, T.G., Hong, K.M., Baek, B.R., Woo, W.H., Hong, Y.S., Cho, J.R. (2014). "A methodology for Co₂ emissions estimation with through-traffic." *Journal of Korean Society of Transportation*, Vol. 32, No. 4, pp. 303-314.
- [11] KRILA (2015). Research on the Road and Transportation Sector Feasibility Study Guideline.
- [12] Lee, K.J., Yi, Y.J., Choi, K.C. (2017). "A methodology for evaluating the effects of transportation policies related to greenhouse gas reduction." *Journal of Korean Society of Transportation*, Vol. 36, No. 1, pp. 1-12.
- [13] Lee, S.W. (2012). A Study on the Distribution Characteristics of Transportation Carbon Dioxide Emissions through Traffic Forecasts and Factor Analysis. Masters Dissertation, Kyungpook National University.
- [14] Panis, L.I., Broekx, S., Liu, R. (2006). "Modelling instantaneous traffic emission and the influence of traffic speed limits." *Science of the Total Environment*, Vol. 371, pp. 270-285.
- [15] Park, J.S. (2010). Analysis on the Relationship between Observational Traffic Volumes and Air Pollution. Masters Dissertation, University of Seoul.
- [16] Press Release (2020). Ministry of Economy and Finance(URL: https://www.moef.go.kr/nw/nes/detailNesDtaView.do?menuNo=4010100&searchNttId1=MOSF_000000000052647&searchBbsId1=MOSFBBS_000000000028)
- [17] Seo, E.C. (2011). Development of A System Dynamics Model for Evaluating Transportation Carbon Emission. Masters Dissertation, Korea Aerospace University.
- [18] Tayarani, M., Poorfakhraei, A., Nadafianshahamabadi, R., Rowangould, G. (2018). "Can regional transportation and land use planning achieve deep reductions in GHG emissions from vehicles?." *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 63, pp. 222-235.
- [19] Yoo, H. S., Kim I. K., Lee, T. H., Kim, J. H. (2020). Estimating Vehicle Emissions based on Traffic Assignment Analysis Combined with Vehicle Inspection Data on Vehicle Kilometers Traveled, *Journal of Transport Research*, Vol. 27, No. 3, pp. 95-113.