

# 영상검지자료를 활용한 신호교차로 접근차량의 탄소배출량 추정

## Predicting Carbon Dioxide Emissions of Incoming Traffic Flow at Signalized Intersections by Using Image Detector Data

한 태 경\* · 고 준 호\*\* · 김 대 진\*\*\* · 박 종 한\*\*\*\*

\* 주저자 : 한양대학교 도시공학과 학부과정  
 \*\* 교신저자 : 한양대학교 도시대학원 도시·지역개발경영학과 교수  
 \*\*\* 공저자 : 강릉원주대학교 도시계획·부동산학과 교수  
 \*\*\*\* 공저자 : 한양대학교 도시대학원 도시·지역개발경영학과 박사수료

Taekyung Han\* · Joonho Ko\*\* · Daejin Kim\*\*\* · Jonghan Park\*\*\*\*

\* Dept. of Urban Planning & Eng., Hanyang Univ.  
 \*\* Graduate School of Urban Studies, Hanyang Univ.  
 \*\*\* Dept. of Urban Planning & Real Estate, Gangneung-Wonju National Univ.  
 \*\*\*\* Graduate School of Urban Studies, Hanyang Univ.

† Corresponding author : Joonho Ko, jko@hanyang.ac.kr

Vol. 21 No.6(2022)  
 December, 2022  
 pp.115~131

pISSN 1738-0774  
 eISSN 2384-1729  
<https://doi.org/10.12815/kits.2022.21.6.115>

Received 23 September 2022  
 Revised 4 October 2022  
 Accepted 24 October 2022

© 2022. The Korea Institute of Intelligent Transport Systems. All rights reserved.

### 요 약

대한민국에서 수송으로 인해 발생하는 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 배출량은 전체의 16.5%이며, 이중 도로교통 부문이 96.5%를 차지한다. 따라서 도로교통 부문에서 발생하는 CO<sub>2</sub> 배출량을 줄이기 위한 노력이 계속되고 있다. 최근 스마트 교차로의 확대에 따라 교차로를 통과하는 개별차량에 대한 모니터링 기회가 점차 늘어나고 있으며, 장래 자율주행차 보급 확산에 따라 개별차량주행 자료 수집 가능성 또한 커지고 있다. 이에 맞춰 강남구 소재 5개 교차로에 설치된 영상검지기를 통해 얻은 차량의 차종, 교통량, 속도, 가속도와 같은 실제 데이터를 활용해 신호교차로에 접근하는 차량에 대한 CO<sub>2</sub> 배출 현황 조사를 실시했다. 이렇게 수집된 데이터를 초당 데이터를 분석하도록 개량된 MOVES-Matrix 모형에 대입해 2개 대형교차로와 3개 소형교차로에서 하루 동안 발생하는 CO<sub>2</sub> 배출량은 평균 3.1톤임을 확인했다. 본 연구는 실제 개별차량 데이터와 개량된 모형을 활용한 CO<sub>2</sub> 배출량 분석의 새로운 가능성을 보여주는 한편, CO<sub>2</sub> 배출량을 보다 더 정확히 조사해야 하는 필요성을 제시한다.

핵심어 : 신호교차로, 이산화탄소 배출, 영상검지자료, MOVES-Matrix

### ABSTRACT

Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions from the transportation sector in South Korea accounts for 16.5% of all CO<sub>2</sub> emissions, and road transportation accounts for 96.5% of this sector's emissions in South Korea. Hence, constant research is being carried out on methods to reduce CO<sub>2</sub> emissions from this sector. With the emerging use of smart crossings, attempts to monitor individual vehicles are increasing. Moreover, the potential commercial deployment of autonomous vehicles increases the possibility of obtaining individual vehicle data. As such, CO<sub>2</sub> emission research was conducted at five signalized intersections in the Gangnam District, Seoul, using

data such as vehicle type, speed, acceleration, etc., obtained from image detectors located at each intersection. The collected data were then applied to the MOtor Vehicle Emission Simulator (MOVES)-Matrix model—which was developed to obtain second-by-second vehicle activity data and analyze daily CO<sub>2</sub> emissions from the studied intersections. After analyzing two large and three small intersections, the results indicated that 3.1 metric tons of CO<sub>2</sub> were emitted per day at each intersection. This study reveals a new possibility of analyzing CO<sub>2</sub> emissions using actual individual vehicle data using an improved analysis model. This study also emphasizes the importance of more accurate CO<sub>2</sub> emission analyses.

Key words : Signalized intersection, Carbon dioxide emission, Image detector data, MOVES-Matrix

## I. 서 론

최근 기후변화가 초래할 심각성에 대한 인식과 이를 해결하려는 방안의 중요성이 늘어남에 따라, 각국에서 온실가스 배출량을 효과적으로 줄이기 위한 정책을 도입하고 있다(IPCC, 2022). 대한민국 정부는 파리협정과 UN 기후정상회의를 통해 2050년까지 탄소중립을 달성하기 위한 중·장기적인 목표를 제시했다(Government of the Republic of Korea, 2020). 한편, 한국에서 2019년 에너지 분야의 CO<sub>2</sub> 배출량에서 수송 부문이 전체의 16.5%를 차지했으며, 이 가운데 도로교통 부문이 수송 부문의 96.5%에 해당했다(Greenhouse Gas Inventory and Research Center, 2022). 2020년 한 해 동안 서울특별시 교통물류부문 온실가스 배출량은 약 1108만톤 CO<sub>2</sub> eq을 기록했으며, 이 가운데 송파구와 강남구의 연간 온실가스 배출량이 각각 836,570톤 CO<sub>2</sub> eq과 763,100톤 CO<sub>2</sub> eq을 차지함으로써 자치구 중 가장 많은 수치를 보였다(KOTEMS, 2022). 이는 대한민국 교통부문에서의 CO<sub>2</sub> 배출량이 상당한 비중을 차지하며, 이를 줄이기 위한 노력이 필요함을 시사한다.

한편, 신호교차로에서의 CO<sub>2</sub> 배출량에 관한 연구는 다수이나(Afrotoy et al., 2013; Ahn et al., 2002; Han et al., 2011; Lee and Lee; 2011, Li et al., 2009), 주로 시뮬레이션 등을 활용한 CO<sub>2</sub> 배출 모델 구축에 중점을 두었으며, 실제 데이터를 이용해 배출량을 검증한 사례는 많지 않다. 따라서 신호교차로의 실제 데이터를 활용해 CO<sub>2</sub> 배출량을 정밀 분석할 필요성이 대두된다. 차량 주행 데이터 수집의 경우, 이전에는 신호교차로를 주행하는 차량의 데이터를 루프검지기를 많이 활용했다(Datondji et al., 2016). 그러나 최근 급격한 기술수준 향상이 이루어지고 있는 자율주행차의 장래 보급 확산과 스마트교차로 확대에 힘입어 개별차량주행 자료 수집이 용이해질 것으로 전망된다(Shirazi and Morris, 2017). 이에 따라 신호교차로의 실제 차량 주행 데이터를 바탕으로 CO<sub>2</sub> 배출량을 조사해 이전 연구가 지닌 한계점을 보완할 기회가 제공될 것으로 보인다.

도로교통에서 발생하는 CO<sub>2</sub> 배출량을 분석하는 다양한 모형이 개발됐으나, MOVES는 그중 거시적 교통류뿐만 아니라 링크 단위 조사까지 할 수 있다는 장점을 갖는다. 그러나 링크 단위 조사는 특정 링크를 지나 는 차량들의 통행패턴을 모두 같다고 가정한 후에 분석이 가능하므로 정밀한 예측을 하는 데 어려움이 있다. 그렇기 때문에 보다 자세한 예측을 할 수 있도록 기존 CO<sub>2</sub> 배출량 분석 모형의 단점을 개선해야 할 필요가 있다. 이에 맞춰 2016년 조지아공과대학 연구팀은 기존 MOVES에 개별차량의 데이터를 CSV 파일 형태로 분석할 수 있는 MOVES-Matrix 모형을 개발했다(Guensler et al., 2016). 따라서 MOVES-Matrix 모형을 활용함으로써 개별 차량의 통행패턴을 활용해 CO<sub>2</sub> 배출량을 손쉽게 측정할 수 있다.

이러한 배경을 바탕으로 본 연구는 강남구 소재 5개 신호교차로에 설치된 영상검지기를 통해 얻은 데이터를 활용해 CO<sub>2</sub> 배출량 분석을 진행했다. 해당 영상검지기를 활용해 신호교차로에 접근하는 방향별 차량의 개별 통행정보를 수집한 후, 해당 개별차량정보를 MOVES-Matrix에 대입해 차량별 CO<sub>2</sub> 배출량을 분석했다.

그리고 이러한 개별 차량의 CO<sub>2</sub> 배출량을 바탕으로 조사 대상 교차로 전체에 대한 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정했다. 이 연구는 개별차량 데이터와 이에 적합한 CO<sub>2</sub> 배출 분석 모형을 이용해 분석한 새로운 시도이다. 이에 따라 개별차량의 통행행태에 기반한 CO<sub>2</sub> 배출량 추정을 통해 환경적 측면에서의 합리적인 교통관리 전략을 모색할 수 있는 기회가 제공될 수 있을 것이다.

## II. 선행연구 고찰

### 1. 신호교차로의 CO<sub>2</sub> 배출량에 관한 연구

신호교차로의 CO<sub>2</sub> 배출량은 주로 주행 시험 또는 시뮬레이션 구축을 통한 CO<sub>2</sub> 배출 모형을 이용해 산정된다(Liao and Machemehl, 1998). 초기 연구 단계에서 개발된 MOBILE 모형은 차량별로 도출된 CO<sub>2</sub> 배출 행태에 링크별 통행속도를 대입해 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정했으나(USEPA, 1993), 이 방법은 교통 신호 제어로 인한 지체와 CO<sub>2</sub> 배출량 사이의 관계를 충분히 반영하지 못하는 한계점이 있었다(Unal et al., 2003; Coelho et al., 2005). Ahn et al.(2002)은 이 문제를 해결하기 위해 순간속도와 가속도를 설명변수로 삼아 주행 시험을 통해 얻은 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정하는 수학적 모형을 구축했으며, 해당 모형이 ITS나 연동 신호 체계 하에서의 배출 절감 효과를 분석하는 데 유용함을 보였다.

이와 더불어 다른 연구에서는 주행 시험으로 구축한 CO<sub>2</sub> 배출 모형을 시뮬레이션 구축을 통해 해당 모형을 검증하는 과정을 거쳤다. Han et al.(2011)은 Webster의 균일지체 모형과 도로용량편람의 지체모형을 기반으로 CO<sub>2</sub> 배출량 산정 모형식을 구축했으며, 승용차의 가속·감속·정지·순항 상태에 따른 CO<sub>2</sub> 배출량 실험을 통해 해당 모형식의 계수를 구함으로써 신호교차로의 이산화탄소 배출량을 측정했다. 또한 Lee and Lee(2011)는 신호교차로에서 회전교차로로의 변환 후 CO<sub>2</sub> 배출량 차이 분석에서 Tier 3 방법을 이용한 VISSIM 시뮬레이션을 구축해 차량별 통행행태에 따른 CO<sub>2</sub> 배출량을 분석했다. 이와 함께 Li et al.(2009)은 기존 신호교차로에 교통신호 상태(Traffic signal status, TSS)와 첨단 운전자 경고 시스템(Advanced driving alert system, ADAS)을 도입할 때 절감되는 CO<sub>2</sub> 배출량을 CMEM을 이용해 PARAMICS 시뮬레이션으로 분석했다.

### 2. MOVES 모형과 신호교차로의 CO<sub>2</sub> 배출 현황 조사

신호교차로의 CO<sub>2</sub> 배출량 모형 구축을 위해 차량의 행동특성을 고려한 MOBILE, COPERT, EMFAC 모형 등이 개발됐지만, 해당 모형들은 거시적 관점에서 바라보기 때문에 정밀한 예측을 하는 데 어려움이 있다 (Coelho et al., 2005). MOVES 모형은 미국 환경 보호국에서 개발한 차량 오염물질 배출량 분석 모형으로, 다른 모형과는 달리 거시적 관점뿐만 아니라 주차장 또는 링크 단위 조사까지 진행할 수 있으므로 더 정밀한 조사가 가능하다는 장점이 있다(USEPA, 2021). 또한 MOVES 모형과 함께 초당 차량별 데이터나 VISSIM과 같은 미시적 시뮬레이션을 함께 활용하면 정밀 조사 효과를 극대화할 수 있다(Abou-Senna, 2013). 이 장점을 활용해 Chen et al.(2014)은 신호교차로에서 에코 드라이빙 효과로 인한 오염물질 배출 변화량을 알아보기 위해 MOVES 모형을 이용해 질소산화물(NOx) 배출 변화량을 추정했다. 또한 Lin et al.(2019)은 바이두와 디디의 GPS 데이터를 MOVES 모형에 대입해 중국 창춘시 신호교차로의 CO<sub>2</sub> 배출량을 측정했으며, 차량당 CO<sub>2</sub> 배출량이 49.7g임을 확인했다. Wu et al.(2014)은 커넥티드 카(connected car)의 신호교차로에서의 적용을 통해 CO<sub>2</sub> 배출량을 효과적으로 줄일 방법을 MOVES 모형을 이용해 고안했다.

### 3. MOVES-Matrix 모형

초당 차량별 데이터 또는 미시적 시뮬레이션 데이터에 기반한 MOVES 분석은 일반적으로 링크 단위 분석(MOVES의 가장 정밀한 분석 단위)에 적용된다. 즉, 개별 링크별로 대표 drive schedule을 설정해 해당 링크를 통행하는 모든 차량이 해당 drive schedule로 통행하는 것을 가정한다. 따라서 MOVES의 링크 단위 분석은 개별 차량의 운행행태를 적극적으로 고려하지 못한다는 한계가 있다. 이와 같은 한계를 극복하기 위해, 최근 조지아공과대학 연구팀에서는 MOVES-Matrix를 개발했으며, 이를 통해 개별 차량의 초 단위 CO<sub>2</sub> 배출량 분석을 가능하게 했다(Guensler et al., 2016; Guensler et al., 2017; Liu et al., 2019). MOVES-Matrix란 분석 가능한 모든 시나리오에 대해서 MOVES 시뮬레이션을 선제적으로 수행해 MOVES 배출량 값을 CSV 파일 형태로 데이터베이스화한 형태이다. 따라서 MOVES-Matrix 이용자는 분석 시나리오에 해당하는 MOVES 배출량 값을 MOVES-Matrix 데이터베이스에서 단순히 추출해 CO<sub>2</sub> 배출량 분석을 수행할 수 있어, 분석이 용이하고 분석시간을 대폭 절감할 수 있다(MOVES 분석시간 대비 MOVES-Matrix의 분석시간은 약 200배 빠른 속도를 보이는 것으로 나타남)(Guensler et al., 2016). 특히 MOVES는 네트워크 사이즈가 커지거나 분석의 정밀성(개별 차량의 초 단위 분석 등)이 요구될 때 상당한 분석시간이 요구된다는 단점이 제기되어 왔으며, 최근 여러 연구에서는 광범위한 네트워크에서 정밀한 차량 오염물질 배출량 산정을 위해 MOVES-Matrix의 이용을 적극적으로 고려하고 있다(Xu et al., 2016; Liu and Kim, 2019; Kim et al., 2019).

### 4. 스마트 교차로와 자율주행차를 활용한 개별차량 모니터링

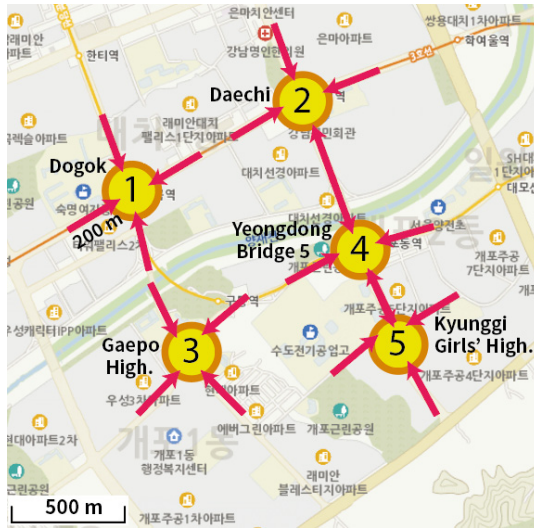
신호교차로를 통행하는 차량의 정보를 확인하기 위해 기존에는 루프 검지기를 많이 활용했으나, 최근에는 교통정보 수집의 편리성을 함께 갖춘 영상 검지기가 이를 대체하는 추세이다(Datondji et al., 2016). 그러나 영상 검지기는 차량끼리의 교차, 외관상의 유사성, 갑작스러운 움직임에 따라 인식 결과가 현저히 달라진다는 문제점이 있다(Datondji et al., 2016). 그렇지만 기상 조건, 차로폭에 따른 포화교통류율을 영상 검지기를 이용해 이전보다 정확히 분석할 수 있다는 장점도 동시에 지닌다(Wang et al., 2018).

이와 더불어 자율주행차를 활용한 데이터 수집을 통해 차량의 통행행태를 분석한 연구도 진행되고 있다. Yudin et al.(2019)는 자율주행차의 교차로에서의 강화학습을 통해 경로 설정과 차량 동선을 계획했고, 이를 심층 신경망(Deep neural network, DNN)을 활용한 이미지 인식을 통해 주변 차량의 통행특성 등을 파악했다. 또한 Na et al.(2021)은 서울특별시 강남구 소재 교차로의 영상 검지기로부터 얻은 정보를 바탕으로 심층학습을 실시했으며, 이를 바탕으로 해당 신호교차로의 대기행렬길이를 측정했다.

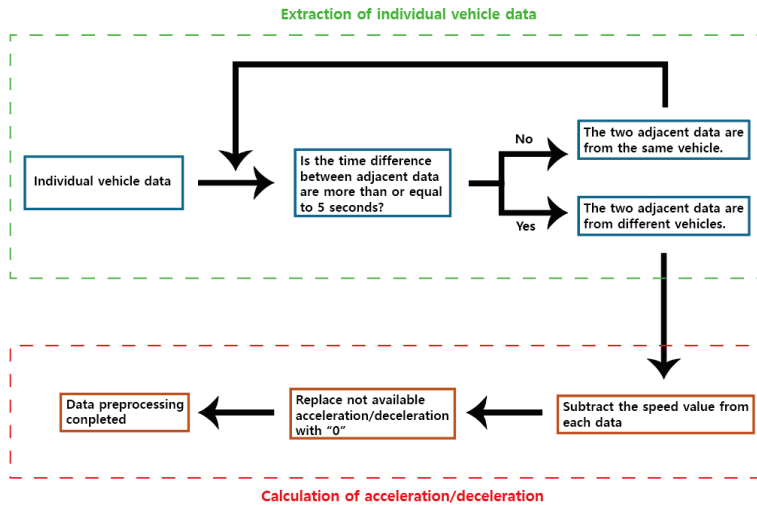
### 5. 기존 연구와의 차별성

이전의 연구는 주행 시험 또는 배출 시험으로 모형을 구축한 다음 시뮬레이션을 통해 CO<sub>2</sub> 배출량을 확인했다. 시뮬레이션은 해당 신호교차로를 통과하는 차량의 평균 통행패턴을 고려해 CO<sub>2</sub> 배출량을 쉽게 얻을 수 있으나, 개별차량의 실제 데이터를 활용하지 않으면 시뮬레이션을 통해 예측한 CO<sub>2</sub> 배출량과 실제 CO<sub>2</sub> 배출량 사이에 차이가 발생한다. 따라서 본 연구는 신호교차로에 설치된 영상검지기로부터 얻은 개별차량의 차종, 속도, 감·가속도 등의 데이터를 활용했다. 이후 해당 데이터를 차량 오염물질 배출 분석 모형인 MOVES를 초 단위로 분석할 수 있도록 개량한 MOVES-Matrix에 적용해 조사 교차로에서 발생하는 CO<sub>2</sub> 배출량을 구했다. 본 연구는 개별차량의 실제 데이터와 이를 분석하기에 적합한 CO<sub>2</sub> 배출 분석 모형을 활용한

새로운 시도로서, 향후 정밀한 CO<sub>2</sub> 배출량 분석에 기여할 수 있을 것이다.



<Fig. 1> Overview of traffic analysis site



<Fig. 2> Data extraction process

### Ⅲ. 분석 과정

#### 1. 조사의 배경

본 연구는 <Fig. 1>과 같이 서울특별시 강남구에 있는 5개 교차로를 지나는 차량을 대상으로 개별차량정보를 분석했다. 조사 대상 교차로는 교통량에 따른 CO<sub>2</sub> 배출량 및 배출패턴을 확인하고, 이를 바탕으로 신호 교차로에서 발생하는 CO<sub>2</sub> 배출량 및 배출패턴을 지역 규모의 거시적인 관점에서 파악하기 위해 일일 교통

량 200,000veh/day 이상인 두 곳(도곡역교차로, 대치역사거리), 50,000~60,000veh/day인 두 곳(개포고교 교차로, 영동5교 사거리), 30,000~40,000veh/day인 한 곳(경기여고 사거리)을 선정했다. (MOVES는 CO<sub>2</sub> 배출량 또는 CO<sub>2</sub> 배출을 포함한 온실가스 총배출량 CO<sub>2</sub> eq를 별도로 분석 가능하며, 본 연구에서는 차량에서 배출되는 온실가스 총배출량 CO<sub>2</sub> eq를 추정하였다. 단, 기술의 편의상 이후 내용에서 온실가스 배출량은 CO<sub>2</sub>로 표현하였다.) 각 교차로의 방향별 접근차로에 영상검지기가 설치돼 있으며, 각 영상검지기는 200m 이내의 범위에서 접근하는 차량의 정보를 1초 단위로 수집할 수 있다. 본 조사는 2021년 11월 9일(화) 전일(00:00~23:59)에 걸쳐 각 교차로로부터 200m 이내의 접근 구간에서 검지된 차량의 데이터를 대상으로 분석을 진행했다. 해당 영상검지기는 조사 차량의 검지 시각·속도·차종·주행차로·교차로로부터의 거리 정보를 수집할 수 있으며, 이와 함께 해당 교차로의 신호 현시마다 통과 교통량·대기행렬을 구성하는 교통량, 그리고 이에 따른 포화교통량을 측정할 수 있다.

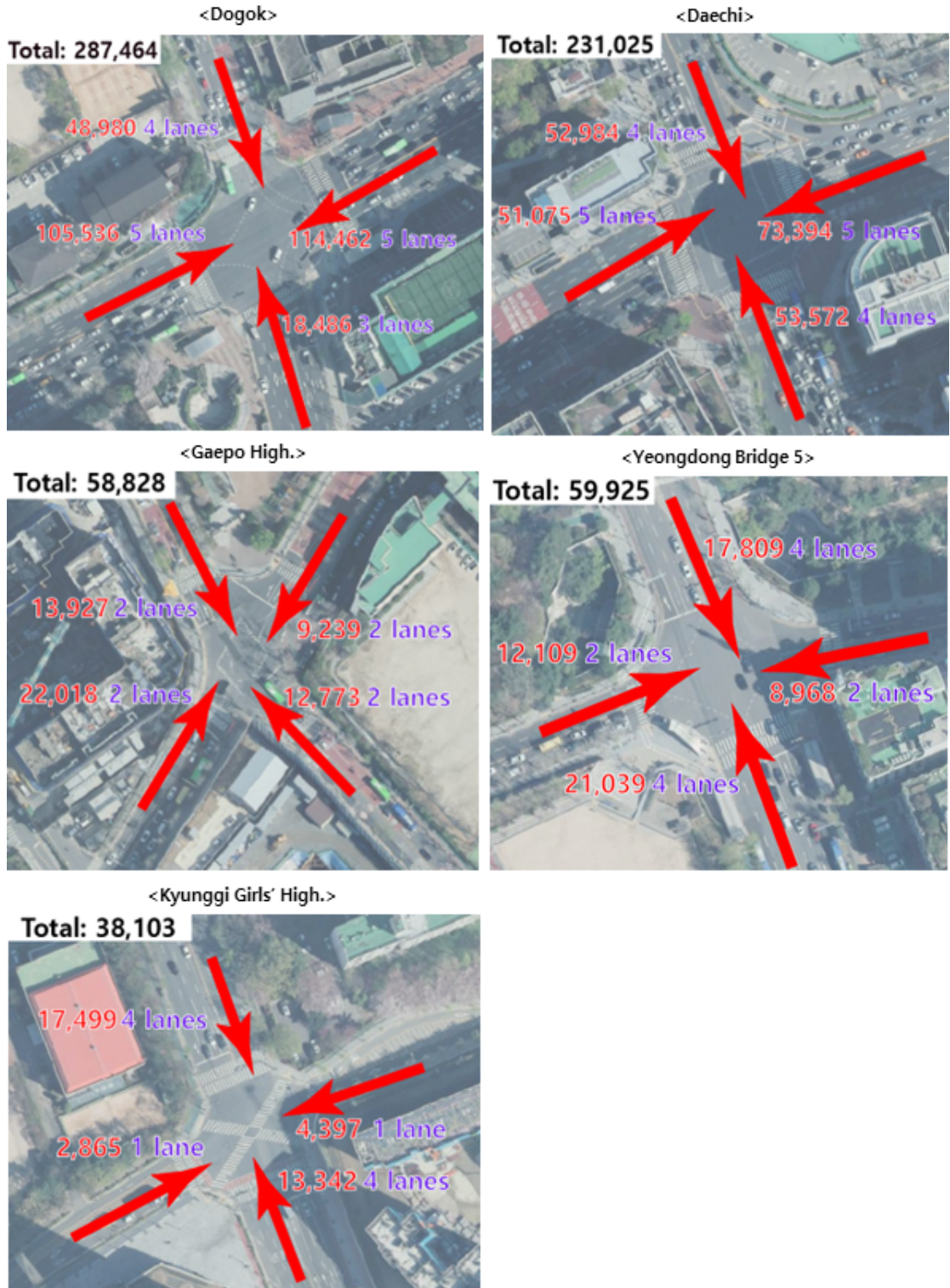
<Table 1> Total detected vehicles and vehicles detected for 1 second

Intersections Vehicles	Dogok	Daechi	Gaepo High.	Yeongdong Bridge 5	Kyunggi Girls' High.
Total detected vehicles (veh/day)	287,464	231,025	58,828	59,925	38,103
1-second detected vehicles (veh/day)	111,240	69,344	6,821	3,934	1,866
Average velocity (km/h)	15.7	17.3	11.2	20.1	19.5
Average acceleration (km/h/s)	4.26	4.64	2.99	5.72	5.94
Average deceleration (km/h/s)	-3.46	-4.43	-1.59	-3.37	-2.43
Vehicle composition (%)	Car: 89.8 Bus: 6.61 Truck: 3.48	Car: 82.6 Bus: 11.6 Truck: 5.48	Car: 78.5 Bus: 9.25 Truck: 5.33	Car: 79.5 Bus: 7.64 Truck: 6.70	Car: 80.7 Bus: 8.36 Truck: 8.25
Percentage of 1-second detected vehicles (%)	38.7	30.0	11.6	6.56	4.90

## 2. 교통정보 추출

주어진 데이터는 1~999까지의 숫자를 지닌 id를 부여해 개별차량을 구분하지만, 차량 1,000대 이상 관측 시 id를 중복으로 부여해 서로 다른 차량임에도 같은 차량으로 인식되는 문제가 발생한다. 또한 영상검지기가 접근 차량 정보를 대부분 1초 단위로 수집하지만, 때에 따라 2초 이상의 간격으로 수집해 같은 차량의 정보임에도 불구하고 서로 다른 차량으로 인식하는 경우도 있는 것으로 판단됐다. 따라서 검지되는 자료를 서로 다른 차량의 정보로 나누기 위해 <Fig. 2>에 제시된 과정을 통해 이에 대한 기준을 마련했다. 이 과정을 통해 5개 교차로를 하루 동안 통행한 교통량에 대한 정보는 <Fig. 3>과 같다. 이렇게 차량별로 구분한 자료를 통해 기존 데이터에는 없던 각 차량의 시간에 따른 감·가속도를 backward 방식으로 계산했다.

본 연구에 사용된 영상 검지 데이터는 통행량·차종 분류·진행 방향별 정확도에 대한 품질 확인을 한국산업기술시험원(KTL)에서 정확도 90% 이상에 대한 공인성적서를 발급받은 데이터이다. 시험 방법은 주·야간 각각 30분의 영상데이터를 통해 추출한 영상 검지 데이터와 실제 측정된 차량을 비교해 정확도를 산출한다.



<Fig. 3> Lanes and detected one-day traffic at designated intersections

다만 정확도 측정은 정지선을 지나는 차량을 기준으로 해 본 연구에서 이용한 교차로 200m 구간의 전체 데이터에서는 다소 오차가 발생할 수 있다. 이에 교차로 구간의 데이터 정확도를 측정된 결과, 교통량 및 통행 속도 측정값의 정확도는 높으나, 데이터를 개별차량별로 분류할 때 오차가 다소 있다는 사실을 확인했다. <Table 1>은 교차로별로 조사 일자동안 검지된 차량의 전체 대수와 1초 동안만 관측된 차량의 대수를 나타낸 표이다. 1초 동안만 관측된 차량 수와 검지된 차량의 전체 수의 비율은 조사 교차로에 따라 4.90~38.7%까지 다양하나, 1초 동안만 관측된 차량이 높은 비율을 차지한다. 이는 Datondji et al.(2016)에서 제시한 영상검지기의 측정 오차 사례와 유사한 원인에서 비롯되는 것으로 해석된다. 즉, 개별 차량 여러 대가 특정 시점에 한 곳에 몰려있는 경우, 검지기가 이를 한 대의 개별차량으로 인식하다가 해당 차량군이 교차로에 가까워질 때 비로소 차량이 여러 대임을 인식하는 현상이다. 따라서 현재 영상검지기가 가지고 있는 인식 불안정 문제를 개선해야 할 필요성을 드러낸다.

<Table 2> Prerequisites used in MOVES-Matrix model

Categories	Prerequisites
Spatial & Environmental	<ul style="list-style-type: none"> <li>• MOVES-Matrix database for Fulton County in U.S. is used for calculating vehicle emissions in Seoul</li> <li>• Weather is set as that of Seoul at Nov. 9, 2021</li> </ul>
Vehicular	<ul style="list-style-type: none"> <li>• All vehicles are composed of “year 0” (new) vehicles</li> <li>• Freight trucks: “Light commercial truck”</li> <li>• Buses: “Transit bus”</li> </ul>
Road	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inclination: “0”</li> </ul>

### 3. MOVES-Matrix 모형

추출한 교통정보를 토대로 MOVES-Matrix 모형을 활용하여 개별 차량의 초 단위 CO<sub>2</sub> 배출량을 추정했다. 본 연구는 분석을 위해 자동화된 Python 프로그램을 개발했으며, 본 프로그램은 먼저 개별 차량의 차중/연식 및 초 단위 속도/감·가속을 고려해 개별 차량의 초 단위 VSP(vehicle specific power)를 계산했다. VSP는 MOVES 배출량 계산을 위해 사용되는 개념으로 차량 무게, 주행저항(공기, 구름, 경사) 및 감·가속을 고려해 차량 엔진에 부하되는 에너지를 추정하는 식이다(USEPA, 2005). 본 연구에서는 앞서 영상검지기를 통해 수집된 개별 차량별 초 단위 속도 자료 및 차중 정보를 바탕으로 VSP를 계산했다. VSP 식에 고려되는 파라미터 값(A, B, C, m, M)은 <Table 2>의 정보와 함께 MOVES의 기본값을 적용했다(예를 들어, 승용차의 경우, A=0.156461, B=0.00200193, C=0.000492646, m=1.4788, M=1.4788)(USEPA, 2015). MOVES는 차종을 14가지로 구분하고 있으나, 본 연구의 영상검지기로부터 구분되는 차종은 3가지로(승용차, 버스, 트럭), MOVES 분석을 위해 미국과 국내의 차종 특성을 고려해 국내의 승용차·버스·트럭은 각각 MOVES의 passenger car·transit bus·light commercial truck으로 가정했다.

$$VSP = \left(\frac{A}{M}\right)v + \left(\frac{B}{M}\right)v^2 + \left(\frac{C}{M}\right)v^3 + \left(\frac{m}{M}\right)(a + g \times \sin\theta)v \dots\dots\dots (1)$$

여기서,

- A: 구름 저항 계수(kW·s/m)
- B: 회전 저항 계수(kW·s<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>)
- C: 공기역학적 항력 계수(kW·s<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)
- m: 개별 차량의 질량(metric tonnes)



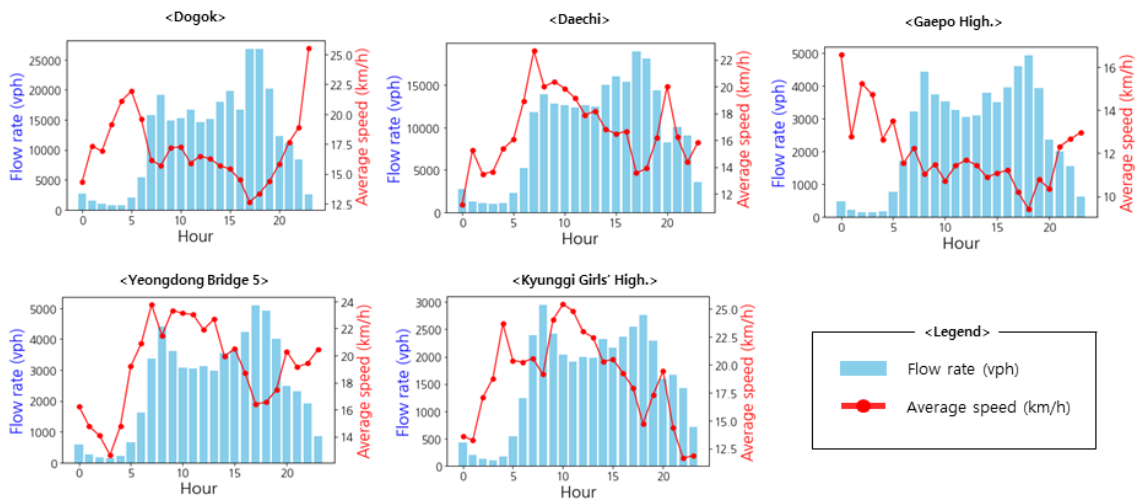
- M: 고정 질량 인자(metric tonnes)
- v: 시간 t일 때 차량의 순간속도(m/s)
- a: 차량의 순간 가속도(m/s<sup>2</sup>)
- g: 중력 가속도(9.8m/s<sup>2</sup>)
- θ: 도로 경사도(%)

<Table 3> CO<sub>2</sub> emission rates by operating conditions in MOVES (unit: CO<sub>2</sub> eq grams per second)

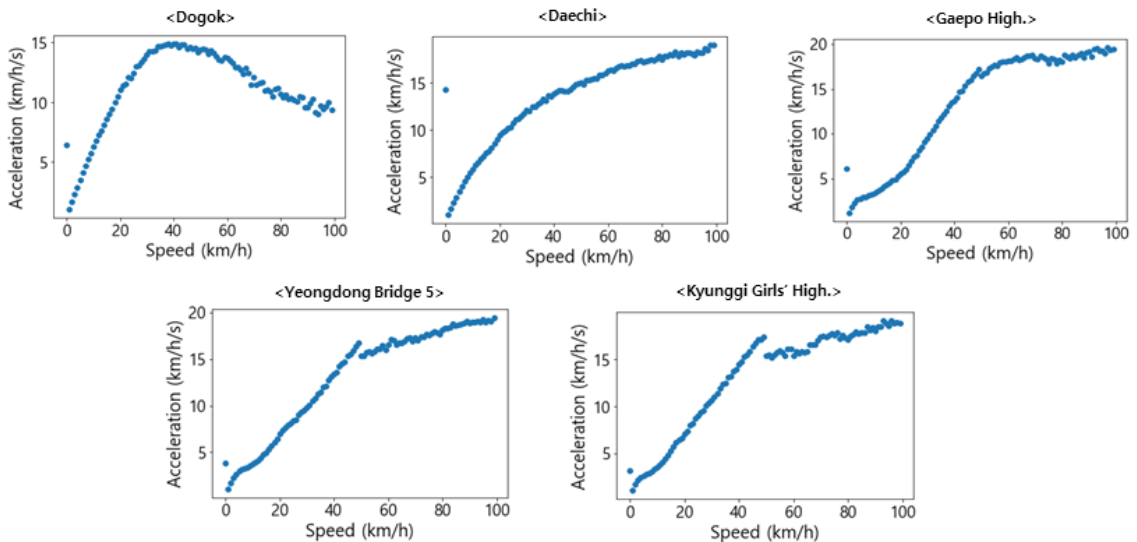
Operating mode bin	Operating conditions	Passenger car	Light commercial truck	Transit bus
0	Braking	0.686	1.102	3.807
1	Idling	0.634	0.853	1.997
11	Low Speed Coasting; VSP< 0; 1<=Speed(mph)<25	0.998	1.370	2.698
12	Cruise/Acceleration; 0<=VSP< 3; 1<=Speed(mph)<25	1.378	1.717	7.576
13	Cruise/Acceleration; 3<=VSP< 6; 1<=Speed(mph)<25	1.914	2.485	15.015
14	Cruise/Acceleration; 6<=VSP< 9; 1<=Speed(mph)<25	2.419	3.161	22.544
15	Cruise/Acceleration; 9<=VSP<12; 1<=Speed(mph)<25	2.885	3.822	29.197
16	Cruise/Acceleration; 12<=VSP; 1<=Speed(mph)<25	3.484	4.792	40.538
21	Moderate Speed Coasting; VSP< 0; 25<=Speed(mph)<50	1.357	1.831	2.399
22	Cruise/Acceleration; 0<=VSP< 3; 25<=Speed(mph)<50	1.545	1.974	9.613
23	Cruise/Acceleration; 3<=VSP< 6; 25<=Speed(mph)<50	1.882	2.454	17.111
24	Cruise/Acceleration; 6<=VSP< 9; 25<=Speed(mph)<50	2.414	3.190	23.952
25	Cruise/Acceleration; 9<=VSP<12; 25<=Speed(mph)<50	3.221	4.095	31.233
27	Cruise/Acceleration; 12<=VSP<18; 25<=Speed(mph)<50	4.247	5.643	43.393
28	Cruise/Acceleration; 18<=VSP<24; 25<=Speed(mph)<50	5.727	7.526	60.747
29	Cruise/Acceleration; 24<=VSP<30; 25<=Speed(mph)<50	7.847	10.301	78.103
30	Cruise/Acceleration; 30<=VSP; 25<=Speed(mph)<50	9.856	12.084	95.459
33	Cruise/Acceleration; VSP< 6; 50<=Speed(mph)	1.934	2.668	9.409
35	Cruise/Acceleration; 6<=VSP<12; 50<=Speed(mph)	3.101	4.080	26.801
37	Cruise/Acceleration; 12<=VSP<18; 50<=Speed(mph)	4.039	5.412	42.349
38	Cruise/Acceleration; 18<=VSP<24; 50<=Speed(mph)	5.268	7.011	59.285
39	Cruise/Acceleration; 24<=VSP<30; 50<=Speed(mph)	7.017	9.155	76.224
40	Cruise/Acceleration; 30<=VSP; 50<=Speed(mph)	8.946	12.100	93.162

추정된 개별 차량의 초 단위 VSP는 MOVES의 operating mode bin에 매칭되며, 매칭된 operating mode bin은 MOVES-Matrix 데이터베이스에서 CO<sub>2</sub> 배출량을 추출하는 데 활용된다. MOVES의 operating mode bin은 차량의 운행상태를 정의하기 위해 사용되는 개념으로, 차량의 운행상태를 23가지로 구분한다(예를 들어, operating mode bin 값 0은 감속상태, 1은 idle, 11~16은 저속주행, 21~30은 중속주행, 33~40은 고속주행 상태). <Table 3>에서와 같이 기본적으로 MOVES는 미국 차량을 기준으로 CO<sub>2</sub> 배출량 값을 제시하며, CO<sub>2</sub> 배출량 값은 미국 카운티 별로 제공된다(카운티별 연료구성, 차량 배출 기준, 기온, 습도 고려). 따라서 국내에서 MOVES 모형 적용 시, 분석지역의 특성에 상응하는 미국 카운티를 선정해야 하며, 본 연구에서는 서울특별시 시의 연중 기상 현황(기온, 습도)을 고려해 미국 조지아주 애틀랜타 지역 Fulton County의 MOVES-Matrix 데

이터베이스를 CO<sub>2</sub> 배출량 분석에 활용했다(미국 Fulton County는 국내 서울시 BRT의 환경영향평가 분석에 활용된 사례가 있음)(Kim et al., 2019). (단, 국내와 미국의 차종/연료구성비는 상이하므로, Fulton County의 MOVES-Matrix 데이터베이스 기반 추정배출량은 국내 차종/연료구성비 기준 실 배출량과는 다소 차이가 있을 수 있다. 다만, 본 연구는 차량 운행상태별 세분화된 온실가스 배출 특성 파악에 중점을 두고자 MOVES-Matrix를 분석에 활용하기로 결정하였다. 추후 연구를 통해 국내 차종/연료구성비를 고려하는 MOVES-Matrix 데이터베이스 구축이 필요할 것으로 사료된다.) MOVES의 CO<sub>2</sub> 배출량은 차량 연식별로 제공되나(분석년도를 기준으로 0~30년식), 영상검지기를 통해서 차량의 연식을 식별하기 어려워, 본 연구에서는 0년식(신차)을 가정해 MOVES 분석을 수행했다.



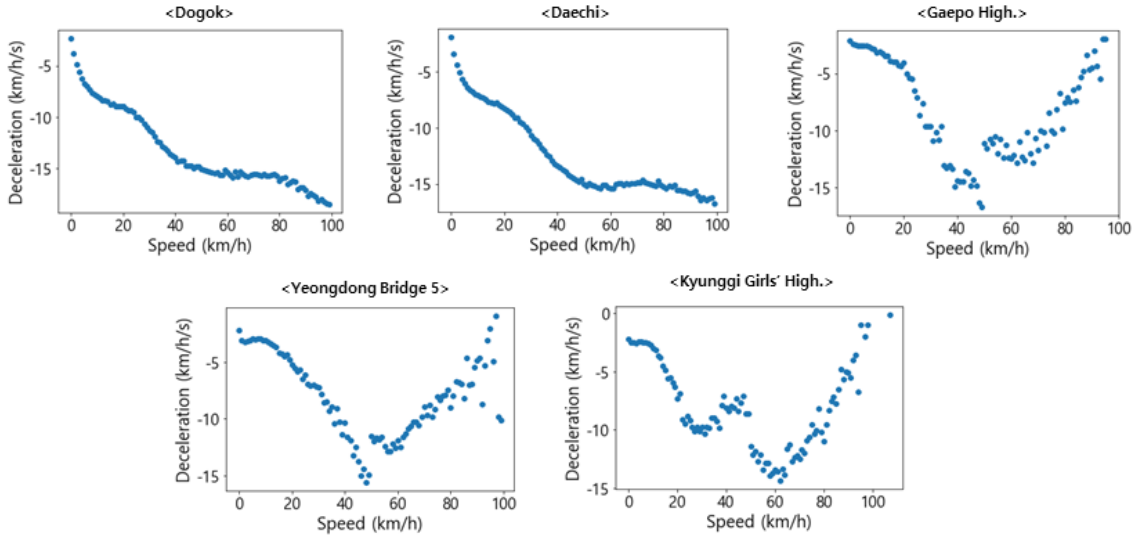
<Fig. 4> Traffic flow rate and average travel speed by each hours at each intersection



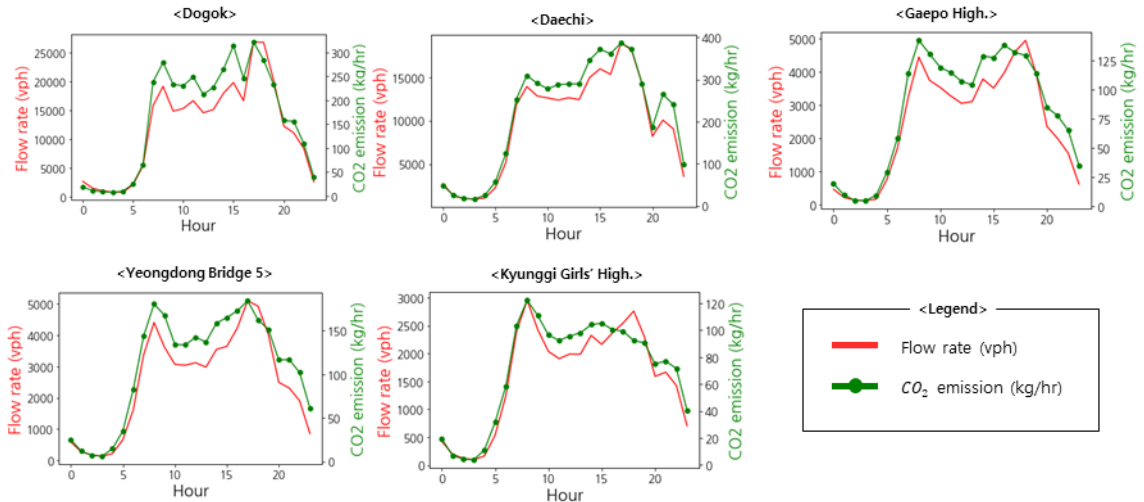
<Fig. 5> Average acceleration in terms of average speed at each intersection

## IV. 분석 결과

### 1. 교차로별 교통패턴 특성



<Fig. 6> Average deceleration in terms of average speed at each intersection



<Fig. 7> Traffic flow rate and total CO<sub>2</sub> emission by each hours at each intersection

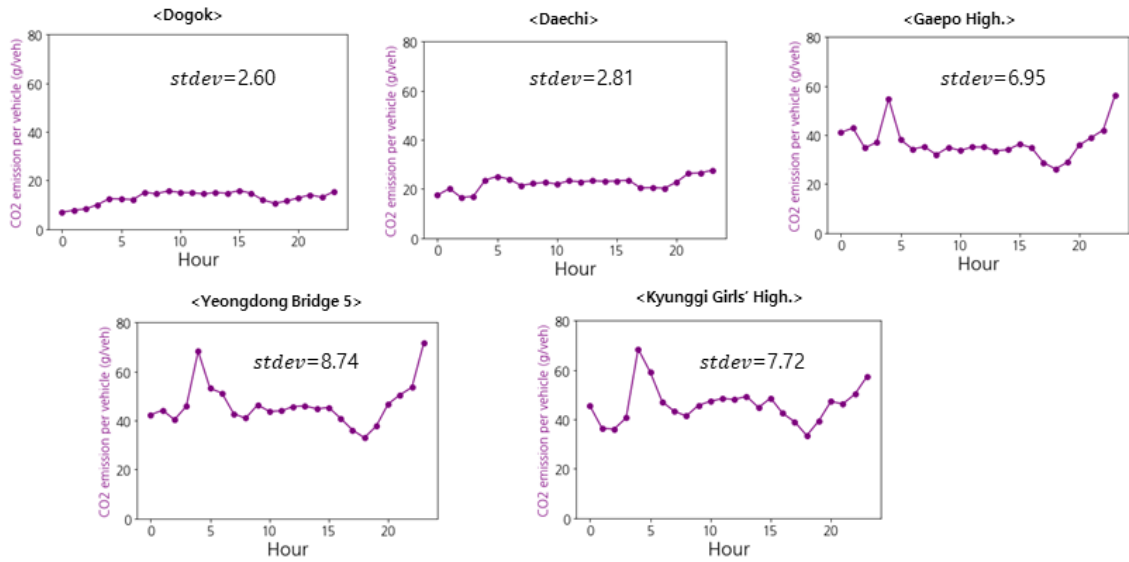
영상검지기로부터 얻은 각 교차로의 시간대별 교통량과 속도를 구했다. 시간대별 교통량을 처음 구할 때에는 차종별로 나누어 구했으나, 시간대별 차종 구성비가 <Table 1>에 나온 결과와 일정한 수준을 유지하며, 승용차의 비율이 월등히 높은 것으로 확인했다. 이에 따라 상대적으로 큰 승용차 비율과 시간대별로 일정한 차종구성비를 고려해 차종구성이 시간대별 CO<sub>2</sub> 배출량 변화에 큰 영향을 주지 않는다고 판단했으며, 따라서 <Fig. 1>과 같이 그래프의 시인성을 향상하기 위해 전체 교통량만 표시했다. 조사 결과 교차로의 규모에 따

라 다소 차이가 나는 통행행태를 보였다. 통행량이 100,000veh/day 미만인 개포고교 교차로·영동5교 사거리·경기여고(이하 소규모 교차로)에서는 오전 침두시(07:00~09:00)와 오후 침두시(17:00~19:00)의 교통량에 큰 차이가 없었다. 반면 통행량이 200,000veh/day 이상인 도곡역교차로와 대치역사거리(이하 대규모 교차로)에서는 오후 침두시의 교통량이 오전 침두시에 비해 많았으며, 오전 침두시 교통량은 평시의 교통량과 비슷한 수준이었다. 한편, 검지된 차량의 통행속도는 평균 12~25km/h를 보였지만 시간대별로 교차로마다 상이한 분포를 나타냈다. 대치역사거리와 경기여고는 야간(특히 22:00~익일 00:00)에 낮은 통행속도와 오전·오후 침두시에 높은 통행속도를 보인 반면, 도곡역교차로 및 개포고교 교차로는 이와 상반되는 결과가 나왔으며, 영동5교 사거리는 20:00~23:00까지는 높은 속도를 유지하다가 다음 날 04:00경에 통행속도가 급격히 낮아지는 패턴을 보였다. 이렇듯 교차로마다 시간대별 통행속도 분포에 다소 차이가 있으나, 오후 침두시(17:00~19:00)에 낮은 통행속도를 띠는 공통점을 지닌다. 시간대별 통행속도는 운전자의 공간지각력 및 도로의 안전 상태 등에 따라 달라지며, 실제로 야간 동안의 차선 및 그 밖의 교통안전 표지의 현시성에 따라 야간에서의 통행속도가 주간에 비해 낮아지거나 높아질 수 있다(Monash University Accident Research Centre, 2009). 그러나 교차로별로 시간에 따른 통행속도가 변하는 원인은 신호 연동체계 변화 등과 같은 추가적인 요소가 영향을 줄 가능성이 있는 것으로 판단된다.

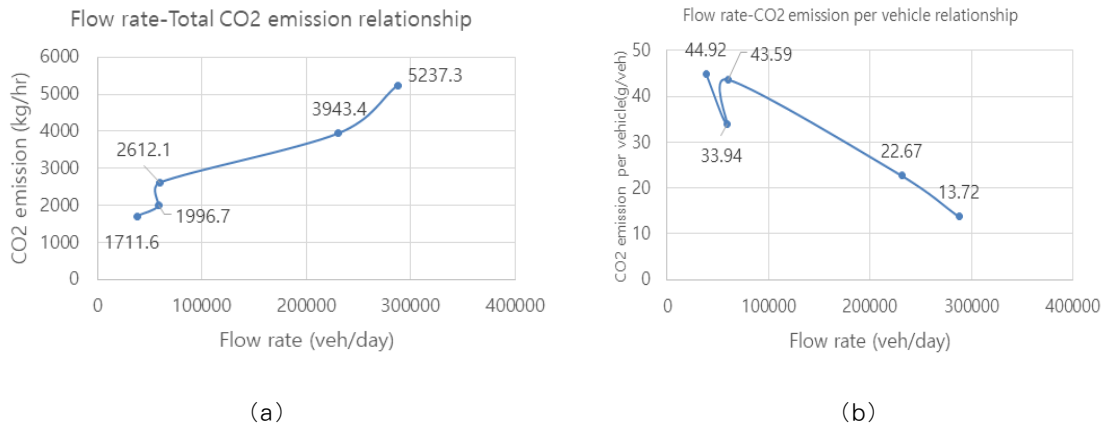
<Fig. 5>에 제시한 평균통행속도에 따른 교차로별 가속도는 평균속도 0km/h 근방에서 0km/h/s로 시작하다가 평균속도 관측의 한계치인 100km/h에 도달할 때는 15~20km/h/s까지 지속적으로 증가한다. 비록 도곡역 교차로의 경우는 40km/h를 정점으로 가속도가 다시 감소하는 추세이고 최대 가속도가 15km/h/s에 미치지 못하는 다른 양상을 보였으나, 다른 교차로와 마찬가지로 평균통행속도와 가속도 사이에는 양의 상관관계가 있음을 확인했다. 반면에 <Fig. 6>에 나타난 감속도의 경우 대규모 교차로는 평균통행속도가 100km/h까지 증가할수록 감속도의 크기 또한 15km/h/s 이상으로 커지는 경향을 보였으나, 이와 반대로 소규모 교차로에서는 약 50km/h를 전후로 감속도가 -15km/h/s 안팎까지 도달하다가 이후 증감 형태가 달라진다는 사실을 확인했다. 이렇게 속도가 증가함에 따라 감·가속도와 크기가 커지는 현상은 통행속도가 증가함에 따라 가속소음(Acceleration noise)이 증가하는 데에서 비롯되는 것으로 판단된다(Jones and Potts, 1962).

## 2. 교차로별 CO<sub>2</sub> 배출량

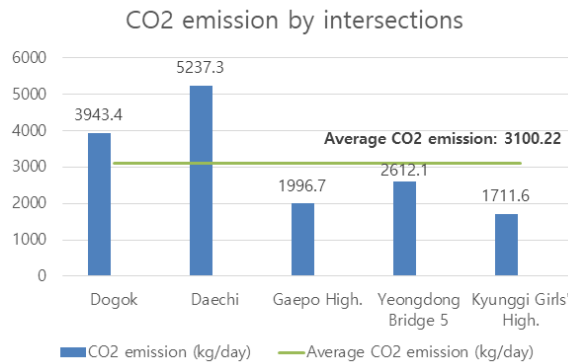
<Fig. 7>은 <Fig. 4>에 나타난 시간대별 교통량 자료와 MOVES 모형으로 구한 시간대별 CO<sub>2</sub> 배출량을 함께 나타낸 그래프이다. 해당 그래프를 통해 교통량이 많은 시간대에 CO<sub>2</sub> 배출량 또한 많다는 사실을 확인할 수 있다. 그러나 <Fig. 8>에 제시된 것처럼 시간대별로 차량당 CO<sub>2</sub> 배출량을 비교하면 다소 차이가 나는 형태를 보인다. 교차로마다 차량당 CO<sub>2</sub> 배출량 패턴은 다르나, 주로 03:00~04:00 경에 차량당 CO<sub>2</sub> 배출량이 최대이며, 18:00에 최소인 형태를 띤다. 이와 더불어 교통량이 많은 대규모 교차로의 시간대별로 비교한 차량당 CO<sub>2</sub> 배출량 분포는 표준편차가 3 미만으로, 표준편차가 6을 넘는 소규모교차로에 비해 시간대별 차이가 크게 나지 않는다는 사실을 확인했다. 교차로별로 분석한 CO<sub>2</sub> 배출량을 비교한 결과, <Fig. 9> (a)와 <Fig.10>을 토대로 보면 교통량이 많은 대규모 교차로가 소규모 교차로보다 CO<sub>2</sub> 배출량 자체는 더 많았으나, <Fig. 9> (b)에 제시된 것과 같이 차량당 CO<sub>2</sub> 배출량은 소규모 교차로에서 더 많이 발생했다. 이러한 현상은 소규모 교차로의 낮은 교통량과 함께 큰 속도로 진입하는 차량이 유발하는 큰 가속소음으로 인해 차량당 CO<sub>2</sub> 배출량이 많다고 해석할 수 있으나, 평균통행속도 및 교통량의 시간대별 분포가 차량당 CO<sub>2</sub> 분포와 항상 일치하지 않는다. 따라서 이 밖에도 다른 신호교차로와의 연동, V/C비, 평균제어지체 등의 요인이 복합적으로 작용하는 것으로 판단된다.



<Fig. 8> Average CO<sub>2</sub> emission per vehicle by each hours at each intersection



<Fig. 9> (a) Relationship between daily flow rate and (per vehicle (b)) CO<sub>2</sub> emission



<Fig. 10> CO<sub>2</sub> emission by intersections

## V. 결 론

본 연구는 CO<sub>2</sub> 배출량 확인을 기존에는 사용되지 않았던 영상검지기를 활용한 방법을 통해 신호교차로에서 발생하는 CO<sub>2</sub> 배출량을 구했다. 영상검지기에서 얻은 데이터를 바탕으로 신호교차로를 지나는 교통량, 차량의 속도, 가·감속도 등과 같은 차량의 통행패턴을 구했으며, 교차로마다 다소 차이는 있지만 시간대별 속도 외에 다른 지표는 비슷한 행태를 보인다는 사실을 확인했다. 이러한 통행패턴을 바탕으로 구한 시간대별 CO<sub>2</sub> 배출량 행태는 주로 오전에 차량당 CO<sub>2</sub> 배출량이 많음을 확인했으며, 소규모 교차로일수록 차량당 CO<sub>2</sub> 배출량이 많다는 사실도 확인했다. 이로써 대규모 교차로 2곳과 소규모 교차로 3곳의 하루 동안 진입교통량이 유발하는 CO<sub>2</sub> 배출량은 평균적으로 3.1톤이고(<Fig. 10> 참조), 차량당 CO<sub>2</sub> 배출량은 21.67g임을 확인했다. 한편, Lin et al.(2019)이 바이두와 디디의 GPS 데이터를 이용해 MOVES 모형으로부터 구한 침두시간대 차량당 CO<sub>2</sub> 배출량은 49.7g이었다. 차량당 CO<sub>2</sub> 배출량을 비교했을 때는 창춘시 신호교차로에서의 CO<sub>2</sub> 배출량이 서울 강남구의 경우보다 2배 이상 많으나, 본 연구는 신호교차로에 진입하는 교통량을 대상으로만 분석을 했기 때문에 진출하는 교통량을 포함한다면 차량당 CO<sub>2</sub> 배출량이 21.67g보다 커질 것으로 판단된다. 향후 스마트교차로가 구축되면 교차로 수준에서 탄소배출량 모니터링이 가능할 것으로 보인다.

한편, 본 연구에서 적용한 방법 중 개선해야 할 점 또한 있다. 우선, 이 연구에서 사용한 영상검지 데이터는 교차로에 접근하는 차량에 대한 정보만 제공한다. 이에 따라 교차로를 떠나는 차량의 정확한 통행패턴을 확인할 수 없다. 따라서 교차로를 통과할 때의 통행패턴도 고려해 신호교차로에서의 CO<sub>2</sub> 배출량을 더 정확히 조사해 선행연구의 결과와 비교·분석할 필요가 있다. 또한 <Table 1>의 결과와 같이 영상검지기에 1초 동안만 관측되는 차량이 높은 비중을 차지하기 때문에 다수 차량이 영상검지기에 1초만 관측되는 현상의 원인을 규명해야 하며, 이와 함께 영상검지기의 식별 정확도를 향상할 필요가 있다. Li et al.(2021)이 제시한 시·공간적 검지 특성(Spatio-temporal counting feature, STCF)을 활용한 양방향 교통정보 측정 방법을 이용하면 교차로 진출차량에 관한 정보와 영상검지 데이터 수집의 정확성 향상을 동시에 도모할 수 있는 것으로 보인다. 따라서 해당 검지 방법을 영상검지기에 도입하면 기존에 안고 있던 인식 오차 등의 문제를 해결할 수 있을 것이다. 본 연구의 결과를 바탕으로 CO<sub>2</sub> 배출량과 통행속도 간의 관계성을 확인하는 후속 연구를 진행할 수 있다. 일반적으로는 침두시에 평균통행속도가 낮은 패턴을 보이고, 평균통행속도가 작을수록 CO<sub>2</sub> 배출량은 크게 나타나는 경향을 띤다(Zhang et al., 2014). 그러나 본 연구에서는 모든 교차로가 이러한 패턴을 보이지는 않는다는 사실을 확인했다. 시간대별 평균통행속도와 차량당 CO<sub>2</sub> 배출량은 교차로별로 상당한 차이를 보이며, 또한 시간대별 평균통행속도의 분포와 교통량의 분포가 항상 일치한다고 보기 어렵다. 따라서 시간대별 가속도의 분포 및 신호연동 등을 고려한 교차로에 따른 시간대별 평균통행속도 이질성의 원인을 조사하는 동시에 평균통행속도가 CO<sub>2</sub> 배출량과 어떠한 연관성이 있는지 확인할 필요가 있다.

## ACKNOWLEDGEMENTS

이 논문은 2022년도 정부(경찰청)의 재원으로 과학치안진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임(No.092021C28S01000, 자율주행 혼재 시 도로교통 통합관제시스템 및 운영기술 개발)

## REFERENCES

- Abou-Senna, H., Radwan, E., Westerlund, K. and Cooper, C. D.(2013), “Using a traffic simulation modek (VISSIM) with an emissions model (MOVES) to predict emissions from vehicles on a limited-access highway”, *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 63, no. 7, pp.819-831.
- Afrotey, B., Sattler, M., Mattingly, S. P. and Chen, V. C.(2013), “Statistical model for estimating carbon dioxide emission from a light-duty gasoline vehicle”, *Journal of Environmental Protection*, vol. 04, no. 08, pp.8-15.
- Ahn, K., Rakha, H., Trani, A. and Van Aerde, M.(2002), “Estimating vehicle fuel consumption and emissions based on instantaneous speed and acceleration levels”, *Journal of Transportation Engineering*, vol. 128, no. 2, pp.182-190.
- Chen, Z., Zhang, Y., Lv, J. and Zou, Y.(2014), “Model for optimization of Exodriving at signalized intersections”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2427, no. 1, pp.54-62.
- Coelho, M. C., Farias, T. L. and Roupail, N. M.(2005), “Impact of speed control traffic signals on pollutant emissions”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 10, no. 4, pp.323-340.
- Datondji, S. R., Dupuis, Y., Subirats, P. and Vasseur, P.(2016), “A survey of vision-based traffic monitoring of road intersections”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 17, no. 10, pp.2681-2698.
- Government of the Republic of Korea(2020), *Driving Strategies for 2050 Carbon Neutralization*, p.1.
- Greenhouse Gas Inventory and Research Center(2022), *2021 National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea*, p.132.
- Guensler, R., Liu, H., Xu, X., Xu, Y. and Rodgers, M. O.(2016), “MOVES-Matrix: Setup, Implementation, and Application (No.16-6362)”, *Presented at 95th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C.
- Guensler, R., Liu, H., Xu, Y., Akanser, A., Kim, D., Hunter, M. P. and Rodgers, M. O.(2017), “Energy consumption and emissions modeling of individual vehicles”, *Transportation Research Record*, vol. 2627, no. 1, pp.93-102.
- Han, D., Lee, Y. and Chang, H.(2011), “A Study of Calculation Methodology of Vehicle Emissions based on Driver Speed and Acceleration Behavior”, *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 29, no. 5, pp.107-120.
- IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)(2022), *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*, p.252.
- Jones, T. R. and Potts, R. B.(1962), “The Measurement of Acceleration Noise-A Traffic Parameter”, *Operations Research*, vol. 10, no. 6, pp.745-763.
- Kim, D., Ko, J., Xu, X., Liu, H., Rodgers, M. O. and Guensler, R.(2019), “Evaluating the environmental benefits of median bus lanes: Microscopic simulation approach”, *Transportation Research Record*, vol. 2673, no. 4, pp.663-673.
- KOTEMS(Korea Transport Emission Management System), <https://www.kotems.or.kr/app/kotems/>

- forward?pageUrl=kotems/ptl/Localgov/Co2/KotemsPtlLocalgovCo2Localgovco2AreaVw&topmenu1=03&topmenu2=03&topmenu3=01&PARENT\_AREA\_CODE=02, 2022.08.10.
- Lee, J. and Lee, S.(2011), “Analysis of the Effect of Carbon Dioxide Reduction by Changing from Signalized Intersection to Roundabout using Tier 3 Method”, *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 10, no. 5, pp.105-112.
- Li, M., Boriboonsomsin, K., Wu, G., Zhang, W. and Barth, M.(2009), “Traffic Energy and Emission Reductions at Signalized Intersections: A Study of the Benefits of Advanced Driver Information”, *International Journal of ITS Research*, vol. 7, no. 1, pp.49-58.
- Li, S., Chang, F. and Liu, C.(2021), “Bi-Directional Dense Traffic Counting Based on Spatio-Temporal Counting Feature and Counting-LSTM Network”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 22, no. 12, pp.7395-7407.
- Liao, T. Y. and Machemehl, R. B.(1998), “Development of an Aggregate Fuel Consumption Model for Signalized Intersections”, *Transportation Research Record*, vol. 1641, no. 1, pp.9-18.
- Lin, C., Zhou, X., Wu, D. and Gong, B.(2019), “Estimation of emissions at signalized intersections using an improved MOVES model with GPS data”, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 16, no. 19, p.3647.
- Liu, H. and Kim, D.(2019). “Simulating the uncertain environmental impact of freight truck shifting programs”, *Atmospheric Environment*, vol. 214, p.116847.
- Liu, H., Guensler, R., Lu, H., Xu, Y., Xu, X. and Rodgers, M. O.(2019), “MOVES-Matrix for High-performance On-road Energy and Running Emission Rate Modeling Applications”, *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 69, no. 12, pp.1415-1428.
- Monash University Accident Research Centre(2009), *Road Design Factors and their Interactions with Speed and Speed Limits*, p.17.
- Na, D., Lee, S., Cho, K. and Kim, H.(2021), “Predicting a Queue Length Using a Deep Learning Model at Signalized Intersections”, *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 20, no. 6, pp.26-36.
- Shirazi, M. S. and Morris, B. T.(2017), “Looking at intersections: A survey of intersection monitoring, behavior and safety analysis of recent studies”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 18, no. 1, pp.4-24.
- Unal, A., Roupail, N. M. and Frey, H. C.(2003), “Effect of arterial Signalization and level of service on measured vehicle emissions”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1842, no. 1, pp.47-56.
- USEPA(United States Environmental Protection Agency)(1993), *User’s Guide to MOBILE5 (MOBILE source emission factor model)*, p.13.
- USEPA(United States Environmental Protection Agency)(2005), *MOVES2004 Energy and Emission Inputs*, EPA420-P-05-003.
- USEPA(United States Environmental Protection Agency)(2015), *Population and Activity of On-road Vehicles in MOVES2014*, EPA-420-R-16-003a.
- USEPA(United States Environmental Protection Agency)(2021), *Overview of EPA’s MOTO Vehicle Emission Simulator (MOVES3)*, p.6.
- Wang, L., Wang, Y. and Bie, Y.(2018), “Automatic estimation method for intersection saturation flow



- rate based on video detector data”, *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2018, pp.1-9.
- Wu, G., Boriboonsomsin, K., Xia, H. and Barth, M.(2014), “Supplementary benefits from partial automation in an Exoapproach and departure application at signalized intersections”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2424, no. 1, pp.65-75.
- Xu, X., Liu, H., Anderson, J. M., Xu, Y., Hunter, M. P., Rodgers, M. O. and Guensler, R. L.(2016), “Estimating project-level vehicle emissions with Vissim and MOVES-matrix”, *Transportation Research Record*, vol. 2570, no. 1, pp.107-117.
- Yudin, D. A., Skrynnik, A., Krishtopik, A., Belkin, I. and Panov, A. I.(2019), “Object Detection with Deep Neural Networks for Reinforcement Learning in the Task of Autonomous Vehicles Path Planning at the Intersection”, *Optical Memory and Neural Networks*, vol. 28, pp.283-295.
- Zhang, S., Wu, Y., Liu, H., Huang, R., Un, P., Zhou, Y. and Fu, L.(2014), “Real-world fuel consumption and CO<sub>2</sub> (carbon dioxide) emissions by driving conditions for light-duty passenger vehicles in China”, *Energy*, vol. 69, pp.247-257.