

# 거시모형을 이용한 폐기물 차량 자율주행이 이산화탄소 배출량에 미치는 영향 분석

## Analysis of the Effect of Autonomous Driving of Waste Vehicles on CO<sub>2</sub> Emission using Macroscopic Model

윤병조<sup>1\*</sup> · 홍기만<sup>2</sup>Byoungjo Yoon<sup>1\*</sup>, Kiman Hong<sup>2</sup><sup>1</sup>Professor, College of Urban Science, Incheon National University, Incheon, Republic of Korea<sup>2</sup>Post-Doctoral Researcher, Department of Future Technology and Convergence Research Smart Mobility Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, Republic of Korea

\*Corresponding author: Byoungjo Yoon, bjyoon63@inu.ac.kr

### ABSTRACT

**Purpose:** The purpose of this study is to quantitatively present the carbon dioxide(CO<sub>2</sub>) emission change according to the application of autonomous driving technology at the network level for waste vehicles in the metropolitan area. **Method:** The target year was set to 2030, and the analysis method estimated the carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions for each road link through user equilibrium assignment when unapplied scenario. The application scenario performed traffic assignment using route data on the premise that the group was running in accordance with the application of autonomous driving technology to waste vehicles. In addition, the other means estimated the carbon dioxide emissions through user balance allocation by reflecting the results of the waste vehicle allocation. **Result:** As a result of the analysis, carbon dioxide(CO<sub>2</sub>) emissions were found to be reduced by about 56.9ton/day from the national network level, and the Seoul metropolitan area was analyzed to be reduced by about 54.7ton/day. **Conclusion:** This study quantitatively presented environmental impacts among various social effects that autonomous driving technology will bring, and in the future, development of various analytical methodologies and related studies should be continuously conducted.

**Keywords:** Autonomous driving, Carbon Dioxide(CO<sub>2</sub>) Emission, Platooning, Traffic Assignment, Waste Vehicle

### 요약

**연구목적:** 본 연구는 수도권 폐기물 차량을 대상으로 네트워크 차원에서의 자율주행기술 적용에 따른 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 배출량 변화를 정량적으로 제시하는데 목적이 있다. **연구방법:** 2030년을 목표연도로 분석 방법은 미시행시 사용자균형배정을 통해 도로 링크별 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 배출량을 추정하였다. 시행시는 폐기물 차량의 자율주행기술 적용에 따라 군집주행한다는 전제하는 노선배정을 수행하였으며, 그 외 수단은 노선배정 결과를 반영한 사용자균형배정으로 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 배출량을 추정하였다. **연구결과:** 분석 결과, 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 배출량은 전국단위의 네트워크에서 약 56.9톤/일이 감축되는 것으로 나타났으며, 수도권은 약 54.7톤/일이 감축되는 것으로 분석되었다. **결론:** 본 연구는 자율주행기술이 가져올 다양한 사회적 효과 중 환경적 측면에서의 영향을 정량적으로 제시하였으며, 향후 다양한 분석 방법론 개발과 관련 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것이다.

**핵심용어:** 자율주행, 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 배출량, 군집주행, 통행배정, 폐기물차량

Received | 8 February, 2021

Revised | 24 March, 2021

Accepted | 24 March, 2021

 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 anymedium, provided the original work is properly cited.

© Society of Disaster Information All rights reserved.

## 서론

최근 IT기술의 발전으로 전 세계적으로 자율주행에 대한 연구 및 기술개발이 지속적으로 수행되고 있으며, 현재 상용화를 위한 단계에 진입하고 있는 실정이다. 국내의 경우에도 자율주행차량 기술은 물론, 관련법과 지침, 정보제공 및 운영관리를 비롯한 교통 인프라에 대한 연구가 수행되고 있으며, 자율주행차량에 대한 준비 지수를 평가한 Autonomous Vehicles Readiness Index(2019, 이하 AVRI)에 따르면 우리나라는 25개 국가 중 13위로 평가되고 있다. AVRI에서 평가한 자율주행과 관련된 정책 및 법적제도, 기술부문, 기반시설, 소비자 수용성 등 총 4개의 항목 중 기술 부문과 기반시설 부문에서 우리나라는 각각 7위와 4위에 해당하는 것으로 나타났으며, 이는 국내 자율주행 관련 기술과 인프라에 대한 준비 정도가 높은 수준임을 의미한다.

자율주행에 대한 기술은 국내 외적인 이슈사항으로 도입시 나타나는 주요 효과에는 교통사고 및 교통 혼잡도, 연료사용량 등이 개선될 것으로 예상되고 있으며, 이와 더불어 온실가스 배출량에 대한 감소 효과도 기대되고 있는 실정이다. 이 중 온실가스 배출 부분은 국내에서도 사회적인 문제로 나타나고 있으며, 정부 및 지자체에서 추진하는 공공기관 차량2부제 운행, 서울시의 5등급 차량 운행제한 등의 환경 관련 정책과도 연관성이 있다. 이와 같이 자율주행기술에 대한 긍정적인 효과가 기대되는 가운데 자율주행차량의 도입에 따른 효과 연구를 살펴보면, 교통운영 및 도로운영, 연료효율 등과 같이 미시적 측면에서의 연구는 활발하게 수행되고 있는 반면 거시적 측면에서의 환경 영향에 대한 연구는 미미한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 수도권 폐기물차량을 대상으로 교통 네트워크 차원에서 자율주행기술 적용에 따라 군집주행시 나타나는 온실가스 배출량의 변화 정도를 정량적으로 제시하는데 목적이 있으며, 거시 모형에서의 군집주행은 특정 경로를 운행하는 노선 버스와 같이 폐기물 차량 노선을 구축하여 분석하고자 한다.

이를 위해 현재 도로·철도 사업에서 적용되고 있는 교통수요분석 방법을 적용하고자 하며, 자율주행차량이 보편화되는 시점에는 개별 차량의 경로 선택에 있어 모든 이용자가 균형상태에서 도달함에 따라 경로를 변경함으로써 더 이상 통행시간을 감소시키기 어려울 것으로 볼 수 있기 때문에 사용자 균형배정(User-Equilibrium Assignment)을 이용하고자 한다.

분석의 공간적 범위는 수도권을 대상으로 수행하되 수도권을 포함한 전국 네트워크 자료를 이용함에 따라 이산화탄소 배출량은 수도권과 전국을 구분하여 추정한다. 분석 대상은 수도권 서부에 위치한 수도권 매립지(인천광역시 서구)를 기점 또는 종점으로 운행하는 폐기물 차량으로 설정하였다. 분석 기초 자료는 국가교통DB센터(KTDB)의 O/D 및 네트워크 자료를 활용하며, 분석 과정에서 요구되는 재차인원 및 승용차 환산계수는 「교통수요 분석 기초자료 배포 설명자료」(The Korea Transport Institute, 2019)와 「도로·철도 부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 수정·보완 연구(제5판)」(Korea Development Institute, 2008(이하 예비타당성조사지침))에서 제시된 원단위를 적용한다.

본 연구의 분석 결과는 다른 차종에 비해 노후화가 심하고 온실가스 배출량이 큰 화물차량을 대상으로 노선운행 개념으로 접근하여 거시적인 측면에서 폐기물(화물)차량의 자율주행기술 도입이 온실가스에 미치는 영향을 정량화하여 효과를 분석함에 따라 향후, 환경 관련 정책 추진에 기초자료 활용과 분석 과정에서 제시하는 방법론을 통해 화물 자율주행차 도입에 대한 개략적인 환경 평가 방안 마련에 사전 연구로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

## 관련 연구 고찰

### 기존 연구 검토

Yook et al.(2018)는 자율주행차량 도입효과에 대하여 자율주행차량의 비율에 의한 용량 변화를 고려한 미시적 분석과 네트워크 차원에서의 효율성에 대한 거시적 분석을 수행하였으며, 분석 결과 고속도로에서 최대 용량이 약 190% 이상 개선되는 것을 제시하였다.

Lee et al.(2018)는 자율주행기반의 교통운영관리 방안에 대한 연구를 수행하였으며, 자율주행강도라는 개념 정의를 통해 교통류의 변화와 적정 자율주행강도를 도출하기 위한 방법론을 제시하였다. 또한, 이설영 외(2018)는 자율주행기술로 인한 군집주행의 장점을 언급하며, 교통운영 측면에서 고속도로 유입연결로 구간을 대상으로 안전성과 운영효율성을 극대화시키기 위한 화물차의 군집 운영 전략 수립 방안을 제시하였다.

Jo et al.(2018)는 자율주행 차량의 군집주행에 대하여 고속도로 화물 차량을 대상으로 군집주행 적용구간 선정에 관한 연구를 수행하였다. 주요 연구내용은 화물차 군집주행 적용구간 선정을 위한 평가항목을 선정과 각 항목별 중요도 평가를 위해 계층화 분석법을 적용한 결과 남해고속도로(사천IC~산인JC)구간에 화물차 군집주행 운영이 가장 적합하다는 결론을 도출하였다. 또한, Jo et al.(2018)는 VISSIM을 이용하여 고속도로 화물차 군집주행이 도로용량에 미치는 영향을 분석하였으며, 일반차량과 군집차량이 혼재된 상황 속에서 군집의 크기, 간격, 군집주행차량비율(MPR) 등을 파라미터로 다양한 형태의 시나리오를 수행한 결과, 군집크기 2대, 군집내 간격 10m, 군집간 간격 50m, MPR 10%인 경우 기존 용량 대비 약 17.8% 증대 효과를 얻는 것으로 분석되었다.

Lee(2016)은 자율주행 자동차의 국내외 동향 및 핵심기술 파악을 통해 환경적 파급효과에 대한 연구를 수행하였으며, 자율주행의 친환경적측면으로 혼잡완화, 에코 드라이빙, 군집주행, 차량 경량화 및 차량공유서비스 등에 의한 연료소비 절감을 제시하였다. 반면, 자율주행의 반환경적 측면으로 여행수요 증가, 주행속도 증가, 부가 기능 장착에 의한 차량 중량화 등을 제시하여 친환경적 측면을 극대화하고 반환경적 측면을 최소화 할 수 있는 정책이 필요할 것으로 제시하였다.

Galvert et al.(2019)는 미래의 기술 개발에 대한 불확실성으로 잠재적인 영향을 정량적으로 제시하기 어려운 점은 언급하면서 주어진 환경에서의 화물차량 군집주행이 교통류에 미치는 영향을 분석하였다. 분석 결과에 의하면, 화물차량의 군집운행은 특정 조건(고속도로 진입로)에서 전체 교통류에 일부 부정적인 영향을 미칠 수 있음을 제시하였다.

Grondys(2018)은 도시지역에서 발생하는 대기 오염에 가장 크게 영향을 미치는 요소 중 하나로 화물 운송을 제시하고 있으며, 운송 유형의 변화가 환경 및 사회적 측면에 미치는 부정적인 영향을 최소화 할 수 있다고 제시하였다.

Joanna et al.(2016)는 도시 지역 내 화물 운송이 미치는 영향에 대하여 1990년부터 2009년 까지 유럽연합의 운송과정에서 배출되는 대기오염을 분석하였으며, 대기오염 배출량이 감소하는 2006년부터 2013년까지 운송량(백만톤·km)과 온실가스 배출량의 상관관계 분석을 통해 2014년부터 2020년까지 온실가스 배출량을 예측하였다. 분석 결과, 2014년 이후 지속적으로 온실가스 배출량은 감소하는 것으로 추정되었으며, 운송시스템의 개선 및 운송 관리의 중요성을 언급하였다.

Sahayuki(2013)은 고속도로 화물차량의 군집운행에 따른 연료 소비량 테스트를 수행하였으며, 4대의 자율주행 화물 차량이 80km/h의 속도로 고속도로를 10m(공차량)와 4m(적재차량) 간격으로 주행하였을 때, 연료소비가 각각 14%와 15% 개선되는 결과를 도출하였다.

## 기존 연구와의 차별성

선행 연구 검토 결과, 국내 연구에서는 자율주행차량의 기술적 측면과 교통 및 도로운영 측면에서의 연구가 수행되고 있는 것으로 나타났다. 또한, 일부 연구에서 미래 자율주행차량의 상용화를 고려하여 환경적 측면에서 대응할 수 있는 법제도 및 정책 개발의 필요성에 대한 연구가 수행되었다.

국외의 경우, 국내 수행되고 있는 연구와 유사하게 자율주행차량의 근접운행 행태에 대한 효과 분석 및 운영 측면에서의 개선 방향 등에 대한 연구가 진행되고 있는 것으로 나타났다. 일부 국외 연구에서는 화물차량의 운송시스템이 대기오염에 미치는 영향 분석에 대한 연구가 수행되었으며, 현황 분석 등을 통해 운송체계를 개선함으로써 환경문제를 감소할 수 있다고 제시하고 있다.

즉, 국내외 연구에서 화물차량의 운송과정에서 나타나는 환경문제(대기오염)에 대한 분석을 통해 문제점 인식 및 개선 방향 제시에 대한 연구는 이루어지고 있으며 향후 도입되는 자율주행기술이 가져올 영향을 도로 및 교통운영 측면에서 보다 효율적인 운영에 대한 분석 사례는 존재하는 것으로 나타났다. 그러나 화물 차량의 자율주행기술이 공간적 범위의 거시적 네트워크에서 어떠한 효과를 나타내는지에 대한 분석은 수행된 바 없으며, 이는 국외사례에서 검토된 바와 같이 미래에 대한 불확실성으로 인한 정량화가 어렵기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 현재 주어진 분석 환경에서 화물 차량의 자율주행이 대기 오염 배출량에 미치는 영향을 수도권 폐기물 차량을 대상으로 거시적 관점에서 정량적인 분석을 수행하는데 차별성이 있다.

## 분석 방법론 설정

### 분석 지역 선정 및 현황 분석

본 연구의 분석대상 지역은 화물 통행량의 도착지가 명확한 수도권 매립지 지역의 인천광역시 서구로 설정하였다. 수도권 매립지는 수도권 지역에서 발생하는 일반 생활폐기물은 물론 건설폐기물을 포함한 사업장 폐기물을 처리하고 있으며, 서울시 25개 구, 인천시 9개 구군(옹진군 미반입), 경기도 30개 시군(연천군 미반입)의 총 64개 시군구에서 반입하고 있다.

최근 10년간 수도권의 폐기물 차량 반입대수를 살펴보면, 2009년부터 2013년까지 연도별로 증가와 감소가 혼재하였으나 2014년 이후 매년 반입대수가 증가하는 추세로 나타났다. 또한, 폐기물 반입량을 살펴보면, 반입대수와 유사한 추세로 2009년부터 2016년까지 연도별로 증가와 감소가 반복적으로 나타났으며, 최근 2년(2017년, 2018년) 동안은 폐기물 반입량이 증가하는 것으로 나타났다.

지역별로 살펴보면, 서울시의 경우, 폐기물 차량 반입대수는 2009년 132,673대/년에서 2018년 91,810대/년으로 연평균 약 4.0% 감소하는 것으로 나타났으며, 반입량은 2009년 약 1,946.5천톤에서 2018년 1,587.0천톤으로 연평균 약 2.2% 감소하였다.

인천시의 경우, 폐기물 차량 반입대수는 2009년 49,505대/년에서 2018년 45,586대/년으로 연평균 약 0.9% 증가하는 것으로 나타났으며, 반입량은 2009년 약 770.3천톤에서 2018년 690.7천톤으로 연평균 약 1.2% 감소하는 것으로 나타났다.

경기도의 경우, 폐기물 차량 반입대수는 2009년 120,891대/년에서 2018년 97,705대/년으로 연평균 2.3% 감소하는 것으로 나타났으며, 반입량은 2009년 약 1,727.8천톤에서 2018년 1,463.2천톤으로 연평균 약 1.8% 감소하는 것으로 나타났다.

수도권 지역의 연도별 폐기물 반입현황 및 변화는 아래의 Table 1과 같다.

**Table 1.** Status of incoming waste by regions (Unit : ton, vehicle)

Classification		Seoul	Incheon	Gyeonggi	Total
2009	waste	1,946,534	770,290	1,727,811	4,444,634
	Truck	132,673	49,505	120,891	303,069
2010	waste	1,886,718	641,676	1,514,035	4,042,429
	Truck	118,567	39,283	101,239	259,089
2011	waste	1,930,975	715,507	1,687,800	4,334,283
	Truck	120,233	41,918	114,244	276,395
2012	waste	1,552,625	561,988	1,156,341	3,270,953
	Truck	92,252	31,714	74,238	198,204
2013	waste	1,650,818	643,730	1,155,508	3,450,056
	Truck	95,749	36,353	71,478	203,580
2014	waste	1,614,517	609,864	1,138,757	3,363,138
	Truck	94,380	35,469	67,553	197,402
2015	waste	1,686,387	713,886	1,264,559	3,664,832
	Truck	98,240	42,117	76,658	217,015
2016	waste	1,624,477	743,358	1,235,917	3,603,752
	Truck	94,866	45,872	79,446	220,184
2017	waste	1,678,001	680,032	1,325,850	3,683,882
	Truck	97,751	44,561	86,351	228,663
2018	waste	1,587,028	690,704	1,463,225	3,740,957
	Truck	91,810	45,586	97,705	235,101
Compound Annual Growth Rate (%)	waste	-2.24	-1.20	-1.83	-1.90
	Truck	-4.01	-0.91	-2.34	-2.78

## 분석 방법론 설정

네트워크 정산(현행화)은 현재의 통행패턴이 장래에도 유지될 것이라는 전제하에 분석의 기준년도를 설정하고 분석영향을 대상으로 관측교통량과 모형에서 도출된 배경교통량과의 오차를 감소시킴으로써 현재의 통행패턴을 구현하기 위해 수행되어 진다.

본 연구의 경우, 분석 대상은 수도권에서 인천광역시 서구로 유입·유출되는 폐기물(화물) 차량으로 수도권 지역을 공간적 범위로 설정하였으며, 화물차량의 통행 특성과 분석 기초자료(전국권 자료)의 도로 네트워크 구축 수준을 고려하여 수도권 내 고속도로를 대상으로 네트워크 정산을 수행하였다.

또한, 분석의 기준년도는 관측교통량 자료 수집 시점을 고려하여 2018년으로 설정하였으며, 장래 분석년도는 앞서 검토된 자율주행자동차의 상용화 시점을 고려하여 2030년으로 설정하였다. 따라서 분석 기준년도의 통행량 자료는 2017년과 2020년 자료를 이용하여 보간법으로 구축하였으며, 네트워크 자료는 2017년을 기반으로 2018년에 신설·확장된 도로망을 반영하였다. 장래 분석년도(2030년)의 O/D 및 네트워크 자료는 KTDB에서 제공하는 전국권 자료를 이용하였다.

한편, 폐기물 차량의 경우, 「2018 수도권 매립지관리공사 통계연감」(SUDOKWON Landfill Site Management Corporation,



2019)에서 연도별 반입대수에 대한 자료 수집은 가능하나 1일 기준의 자료 수집에는 한계가 있어 연평균 자료를 반영하며, 수도권 각 시군구에서 인천시 서구로 유입되는 폐기물 차량은 폐기물 처리 완료 후 출발하였던 지역으로 다시 되돌아간다는 전제하에 기·종점간 폐기물 차량의 유입대수와 유출대수는 동일한 것으로 가정하였다. 또한, 폐기물 차량으로 반영되는 화물차량은 연도별 반입량과 반입대수를 이용하여 원단위를 산정한 결과, 약 14.7톤/대~약17.0톤/대로 나타남에 따라 대형화물차량으로 구분하였다.

미시행시 분석 방법은 교통수요분석에서 일반적으로 적용되고 있는 사용자 균형배정을 이용하며,시행시(폐기물 차량 노선 운행)는 기·종점간 최단경로를 탐색하여 노선데이터를 구축하고 본 연구에서 구축한 폐기물 차량의 통행량만큼 노선 배정을 수행하였다. 이 때 최단경로는 자유통행속도(시간)을 이용하여 유료도로 가중치를 포함한 각 기·종점간 통행비용(통행시간)이 최소화되는 경로를 탐색하였다. 또한, 시행시에서 폐기물 차량을 제외한 나머지 5개 수단(승용차, 버스, 화물소형, 화물중형, 화물대형)은 미시행시와 동일하게 사용자 균형배정 방법을 적용하였다.

수도권 매립지로 유입·유출되는 폐기물 차량의 통행량 자료는 수도권 내 각 존에서 인천시 서구로 유입되는 1일 평균 폐기물 차량 추정치는 가능하지만, 어느 지역에서 각각 몇 대의 차량이 유입되는지를 파악하기에는 자료 수집 한계가 발생한다. 따라서 KTDB의 화물 통행량 자료를 기반으로 수도권 내 각 중·중단위 지역(인천시 옹진군, 경기도 연천군 제외)에서 인천시 서구로 유입되는 대형화물 통행량에 비례하여 폐기물 차량 통행량 자료를 구축하였다.

이와 같이 구축된 자료를 이용하여 시나리오별 통행배정을 수행한 후 모형에서 도출된 개별 링크의 교통량과 통행시간, 그리고 링크 자료의 기본 속성인 거리 자료를 입력변수로 예비타당성조사지침에서 제시된 수단별/속도별 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 배출량 원단위를 적용하였으며, 분석의 흐름은 Fig. 1과 같다.

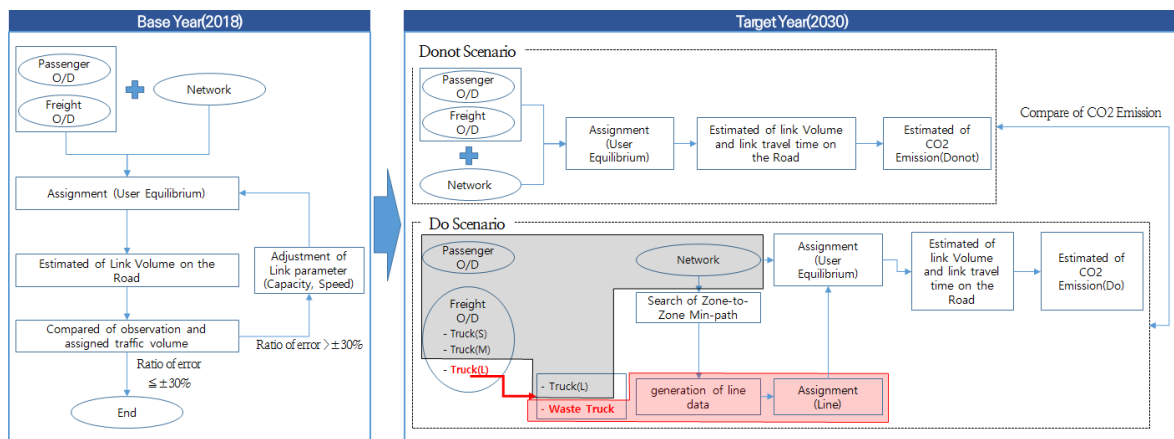


Fig. 1. Flow chart

## 분석 결과

### 네트워크 현황 정산 결과

도로부문 통행배정에 적용되는 재차인원은 「교통수요 분석 기초자료 배포 설명자료」(The Korea Transport Institute, 2019)에 제시되어 있는 시·군·구 기·종점간 수단별 재차인원을 적용하며, 승용차 환산계수는 예비타당성조사지침(Korea Develop-

ment Institute, 2008)에서 제시된 원단위를 적용하였다. 통행배정을 위한 기본단위 시간은 전일O/D를 이용하였으며, 버스와 화물차량의 통행배정은 다차종(multi-class) 통행배정방식을 원칙으로 수행하되, 사업 시행시 폐기물차량 통행량(화물 대형)은 노선배정을 수행하였다.

네트워크 현황 정산에 이용되는 관측교통량은 「교통량정보제공시스템」(국토교통부)에서 제시하는 2018년 교통량 조사 값을 기준으로 수행하며, 교통량 현황 정산지점은 총 133개로 선정하였다.

정산수행 결과, 110개 지점은 허용오차±20% 이내인 것으로 나타났으며, 이 외 나머지 지점은 허용오차±30% 이내로 전체 정산 지점의 상관관계를 분석한 상관계수(R-squared)는 약 0.912로 분석되었다. 여기서 상관계수의 경우, 예비타당성조사지침에서는 0.8을 초과하도록 제시되어 있으며, 본 연구의 상관계수는 0.912로 현재의 통행패턴을 충분히 구현한 것으로 판단할 수 있다. 인천시 주변 주요 노선별 오차율 범위를 살펴보면, 경인선 약 -14.1%~약 1.9%, 제2경인선 약 -23.5%~약 11.2%, 인천국제공항선 약 -27.6%~5.7%, 영동선 약 -28.1%~15.6%, 서울외곽순환선 약 -25.8%~15.4% 등으로 나타났으며, 이외에 경부선, 서해안선, 평택파주선, 수도권제2외곽순환선, 세종포천선, 중부선, 평택제천선, 광주원주선, 서울양양선, 평택시흥선, 용인서울선 등의 고속도로에서 ±30% 이내로 정산되었다.

### 폐기물 차량 통행량(O/D) 및 노선 데이터 구축 결과

장래 2030년 폐기물 반입 차량은 최근 자료(2018년) 수준을 유지할 것이라는 전제하에 서울시 91,810대/년, 인천시 45,586대/년, 경기도 97,705대/년 등 수도권에서 인천시 서구로 유입되는 총 폐기물 반입차량은 235,101대/년을 적용하였다. 이에 2030년의 1일 기준 반입 차량 대수 산정 결과, 약 645대/일로 산정되었으며, 이를 각 시·군·구별 반입 차량 대수로 산정한 결과는 Table 2와 같다.

폐기물차량의 노선 데이터 구축은 2030년 네트워크를 기반으로 기준년도(2018년) 정산 과정에서 조정된 속성값(용량, 속도)을 반영하여 수도권 내 기점(종점)에서 수도권 매립지가 위치한 인천시 서구를 종점(기점)으로 유료도로 가중치(통행요금)을 반영한 최단 경로를 탐색하였다.

### 온실가스 배출량 변화 비교 결과

온실가스 배출량 추정은 앞서 설명한 바와 같이 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)를 대상으로 예비타당성조사지침에서 제시된 차종별·속도별 원단위를 적용하였으며, 차종별·속도별 원단위는 Table 3과 같다.

각 차종별에 따라 10km/h 간격으로 제시된 원단위에서 중간값은 수단별·속도별 모형을 구축하여 배출량을 추정하였으며, 모형식 및 이산화탄소 배출량 산정식은 아래와 같다.

$$C_l^m = \alpha^m + \beta_1^m \times S_l + \beta_2^m \times S_l^2 + \beta_3^m \times S_l^3 \quad (1)$$

여기서,  $C_l^m$  = 수단별(m), 링크별(l) 대기오염배출량 원단위

$S_l$  = 링크별(l) 통행속도

$\alpha^m, \beta^m$  = 수단 m의 파라미터

**Table 2.** Regional waste inflow truck estimation results(Mid-Zone)

(Unit : vehicle/day)

Si-Do	Si-Gun-Gu	truck	Si-Do	Si-Gun-Gu	truck	Si-Do	Si-Gun-Gu	truck	
Seoul	Jongno	1.64	Incheon	Dong	13.49	Goyang	Ilsanseo	5.83	
	Jung	5.38		Michuhol	9.30	Gwacheon		0.25	
	Yongsan	4.98		Yeonsu	17.90	Guri		0.99	
	Seongdong	5.09		Namdong	11.57	Namyangju		4.06	
	Gwangjin	5.13		Bupyeong	12.03	Osan		1.27	
	Dongdaemun	5.20		Gyeyang	26.47	Siheung		9.44	
	Jungnang	6.63		Seo	12.50	Gunpo		4.14	
	Seongbuk	4.85		Ganghwa	6.41	Uiwang		1.03	
	Gangbuk	2.56		Jangan	1.44	Hanam		1.26	
	Dobong	2.58		Gwonseon	1.91	Cheoin		7.63	
	Nowon	5.09	Suwon	Paldal	2.06	Yongin	Giheung	5.01	
	Eunpyeong	11.08	Yeongtong	1.80	Gyeonggi	Suji	1.76		
	Seodaemun	10.45	Sujeong	0.91	Paju		29.52		
	Mapo	11.85	Seongnam	Jungwon	1.51	Icheon		4.49	
	Yangcheon	15.76	Bundang	2.18	Anseong		7.92		
	Gangseo	38.81	Uijeongbu	2.40	Gimpo		49.87		
	Guro	19.32	Gyeonggi	Manan	1.84	Hwaseong		19.82	
	Geumcheon	15.60	Anyang	Dongan	3.53	Gwangju		4.03	
	Yeongdeungpo	25.35	Bucheon	17.41	Yangju		4.99		
	Dongjak	4.08	Gwangmyeong	2.61	Pocheon		3.13		
	Gwanak	9.04	pyeongtaek	13.39	Yeoju		4.30		
	Seocho	16.38	Dongducheon	0.78	Gapyeong		0.54		
	Gangnam	9.13	Ansan	Sangnok	3.45	Yangpyeong		0.58	
	Songpa	10.94	Danwon	23.42					
	Gangdong	5.07	Goyang	Deogyang	8.05	Total : 645.00			
	Incheon	Jung	15.32	Goyang	Ilsandong	7.44			

**Table 3.** CO<sub>2</sub> Emission Factor

(Unit : g/km)

Mode	Speed									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Auto	380.437	257.480	204.913	174.262	153.682	138.685	127.152	117.940	110.371	104.012
Bus	504.710	388.390	297.090	230.810	189.550	173.310	182.090	215.890	274.710	358.550
Truck(S)	432.384	292.860	233.174	200.422	185.550	179.918	183.526	196.374	218.462	249.790
Truck(M)	659.820	541.320	443.400	366.060	309.300	273.120	257.520	262.500	288.060	334.200
Truck(L)	3,142.430	2,398.414	2,047.782	1,830.554	1,678.059	1,562.940	1,471.792	1,397.144	1,334.449	1,280.754



$$CO_2 \text{ Emission} = \sum_l \sum_{k=1}^3 (D_{lk} \times EU_k) \quad (2)$$

여기서,  $D_{lk}$  = 링크별(l), 차종별(k) 대-km

$EU_k$  = 차종별(k) 링크 통행속도의 km당 배출량 원단위

k = 차종 (1: 승용차, 2: 버스, 3: 화물차)

차종별·속도별 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 배출량에 대한 모형식 구축결과, 추정된 파라미터는 Table 4와 같으며, 이때의 조정된 상관계수(Adj. R)는 약 0.975~1.000으로 나타났다.

**Table 4.** Results of Regression Equation(CO<sub>2</sub> Emission)

Mode	Parameters				R-Square(adj)
	$\alpha$	$\beta 1$	$\beta 2$	$\beta 3$	
Auto	498.770	-14.874	0.203	-0.001	0.984
Bus	646.050	-15.385	0.125	0.000	1.000
Truck(S)	569.230	-17.111	0.231	-0.001	0.975
Truck(M)	798.900	-14.937	0.103	0.000	1.000
Truck(L)	3,877.077	-90.819	1.189	-0.005	0.989

위의 모형식을 이용하여 2030년 기준의 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 배출량 산정 결과, Table 5와 같이 전국적으로 미시행시 약 191,763.7톤/일에서 시행시 약 191,706.8톤/일로 약 56.9톤/일이 감소되는 것으로 나타났으며, 수도권의 경우, 미시행시에 약 68,544.2톤/일, 시행시(폐기물 차량의 노선 배정)에는 약 68,489.5톤/일로 나타나 약 54.7톤/일이 감축되는 것으로 분석되었다. 또한, 수도권 외 지역에서도 약 2.2톤/일이 감소되는 것으로 분석되었다.

이러한 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 배출량 감소의 원인으로는 폐기물 차량(화물대형)의 노선 운영을 위한 데이터 구축 방법에서 최적 경로를 자유통행시간(속도)을 기준으로 구축함에 따라 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 배출량 원단위가 다른 차종에 비해 큰 화물대형 수단에서의 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 배출량이 감소했기 때문인 것으로 분석되었다.

**Table 5.** Results of CO<sub>2</sub> Emission (Unit : ton/day)

-	The Whole Country	Seoul Metropolitan Area	Outside The Metropolitan Area
Unapplied(A)	191,763.7	68,544.2	123,219.51
Applied(B)	191,706.8	68,489.5	123,217.31
Gap(B-A)	-56.9	-54.7	-2.20

## 결론

본 연구는 장래 자율주행차 도입에 따른 환경 개선 효과를 거시적 관점에서 정량적으로 분석하는데 목적이 있으며, 자율주행차량의 기술 개발 수준 등을 고려하여 2030년을 목표연도로 설정하였다. 또한 다른 공로 수단에 비해 자율주행 도입이 빠를 것으로 예상되는 화물차량을 대상으로 분석 대상 지역은 수도권 매립지가 위치해 있는 인천시 서구로 설정하였다.

분석의 기초자료는 국가교통DB(KTDB)에서 제공하는 전국권 자료를 이용하였으며, 소형(2.5톤 미만), 중형(2.5톤 이상~8.5톤 이하), 대형(8.5톤 초과, 컨테이너/트레일러)으로 구분된 화물 차량 중 폐기물 차량으로 이용되는 대형화물 차량을 대상으로 분석을 수행하였다. 기존 연구에 대한 검토 결과 자율주행기술이 접목된 화물차량의 경우, 군집운행으로 다수의 차량이 특정 경로로 주행함에 따라 나타나는 효과를 운영측면에서 검토된 연구는 존재하였으나, 전체 교통망에 미치는 영향을 환경적 측면에서 검토된 사례는 미미한 것으로 나타났다.

따라서 본 연구에서는 화물 운행의 최적경로 운행 특성을 고려하여 최단경로 분석을 수행하였으며, 폐기물차량에 대한 노선배정을 수행한 결과, 교통부문의 온실가스 유발물질인 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 배출량은 전국적으로 약 56.9톤/일 감소하는 것으로 분석되었으며, 수도권의 경우, 약 54.7톤/일이 감축되는 효과가 나타났다. 이러한 감소효과는 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 배출량 추정식의 기종점간 통행거리 및 통행시간(속도)이 변화하였기 때문이다.

비록 기존 연구에서 제시된 바와 같이 미래에 대한 불확실성을 배제할 수는 없지만, 본 연구의 분석 결과는 앞으로 다가올 자율주행기술 도입에 의해 네트워크 측면에서 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 배출량이 감소됨을 분석하였으며, 향후에는 본 연구에서 고려되지 않은 화물차량 군집주행에 따른 연료효율 개선에 의한 환경적 영향을 결합시킬 필요가 있다. 이와 더불어 폐기물 차량과 같이 고정된 기종점을 운행하는 화물 차량에 대하여 환경적 측면을 고려한 최적 경로 탐색 연구가 지속적으로 수행되어야 할 필요가 있다.

## Acknowledgement

이 논문은 인천대학교 2020년도 자체연구비(국제공동연구비) 지원에 의하여 연구되었음.

## References

- [1] Galvert, S.C., Schakel, W.J., van Arem, B. (2019). "Evaluation and modelling of the traffic flow effects of truck platooning." *Transportation Research Part C*, Vol. 105, pp.1-22.
- [2] Grondys, K. (2018). "The impact of freight transport operations on the level of pollution in cities." *Transportation Research Procedia*, Vol. 39, pp. 84-91.
- [3] Jo, Y., Kwon, K.J., Oh, C. (2018). "Methodology for determining promising freeway segments for truck platooning." *Journal of Korean Society of Transportation*, Vol. 36, No. 2, pp. 98-111.
- [4] Jo, Y., Lee, S.Y., Oh, C. (2018). "Impacts of truck platooning in mixed-traffic conditions on freeway capacity." *Journal of Korean Society of Transportation*, Vol. 36, No. 5, pp. 331-345.
- [5] Joanna, N., Monika, S. (2016). "Problem of air pollution and road freight in European Union." *Transportation Research Procedia*, Vol. 16, pp. 418-424 .
- [6] Korea Development Institute (2008). *A Study on General Guidelines for Pre-feasibility Study(5th Edition)*.

- [7] KPMG International (2019). 2019 Autonomous Vehicles Readiness Index.
- [8] Lee, S. M. (2016). A Basic Study on the Eco-friendliness of Autonomous Vehicles. Korea Environment Institute, 2016-04, Korea.
- [9] Lee, S.Y., Oh, C. (2018). “A methodology to establish operational strategies for truck platooning on freeway on-ramp areas.” *Journal of Korean Society of Transportation*, Vol. 36, No. 2, pp. 67-85.
- [10] Lee, S.Y., Oh, M.S., Oh, C., Jeong, E.B. (2018). “Automated driving aggressiveness for traffic management in automated driving environments.” *Journal of Korean Society of Transportation*, Vol. 36, No. 1, pp. 38-50.
- [11] Sadayuki, T. (2013). “An overview on an automated truck platoon within the energy ITS project.” 7th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control The International Federation of Automatic Control, pp. 41-46.
- [12] SUDOKWON Landfill Site Management Corporation (2019). Year 2018 SUDOKWON Landfill Statistics Yearbook 2019. Vol. 17.
- [13] The Korea Transport Institute (2019). *Global Logistics Technology Trend*. Vol. 13, No. 614, pp. 1-4.
- [14] Yook, D.H., Lee, B.J., Park, J.T. (2018). “Exploring the impacts of autonomous vehicle implementation through microscopic and macroscopic approaches.” *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, Vol. 17, No. 5, pp. 14-28.