

고속도로 화물차의 군집주행이 교통류에 미치는 영향 및 전용차로 효과 연구

A Study on the Impacts of Truck Platooning on Freeway Traffic-Flow and the Effect of Dedicated Lane

김 주 혜* · 이 영 인**

* 주저자 : 서울대학교 환경대학원 환경계획학과 석사과정,
한국도로공사 스마트건설사업단 스마트플랫폼팀 차장

** 교신저자 : 서울대학교 환경대학원 환경계획학과 교수

KIM, Joohye* · Younglhn Lee**

* Dept. of Environmental Planning, Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University,
Center for Smart Construction Technology, Korea Expressway Corporation

** Dept. of Environmental Planning, Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University

† Corresponding author : Younglhn Lee, yilee@snu.ac.kr

Vol.19 No.5(2020)

October, 2020

pp.52~69

pISSN 1738-0774

eISSN 2384-1729

[https://doi.org/10.12815/kits.](https://doi.org/10.12815/kits.2020.19.5.52)

2020.19.5.52

Received 18 July 2020

Revised 18 August 2020

Accepted 27 August 2020

© 2020. The Korea Institute of
Intelligent Transport Systems. All
rights reserved.

요 약

화물차 군집주행이 화물교통량 증가에 따른 문제를 해결할 수 있는 대안으로 떠오르는 가운데, 화물차 군집주행이 교통류에 미치는 영향과 군집주행 전용차로 도입 효과를 분석하는 연구를 수행하였다. 연구결과, 교통량이 많고 화물차 혼입률이 높아질수록 화물차의 군집비율이 높아지고 최대 군집형성 규모가 증가함에 따라 군집주행으로 인한 평균속도 증가효과가 더 크게 나타났다. 하지만, 진출입 등으로 대기행렬이 발생한 경우에는 평균속도 증가효과는 기대하기 어려우며 오히려 처리량이 감소할 수 있는 것으로 분석되었으므로 접속부의 용량 확보 등 접속도로와 연계된 교통운영 전략이 필요하다는 점을 확인할 수 있었다. 군집 전용차로의 효과는 자율주행화물차 비율(MPR)이 100%가 되어 한 개 차로가 완전히 자율주행화물차만으로 운영될 경우에만 미 도입 시 보다 긍정적 효과를 얻을 수 있었다. 본 연구는 국내 도로·교통 조건을 시나리오에 반영하여 군집주행의 영향을 종합적으로 분석하였으므로 구간별, 시간대별로 군집주행 및 전용차로의 영향을 가늠해 볼 수 있으며, 이는 향후 화물차 군집주행을 고려한 도로 운영전략 수립이나 관리에 기초자료로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심어 : 화물차 군집주행, 자율주행, CACC, 전용차로, 고속도로

ABSTRACT

Considering the need for an infrastructure-level review, this study analyzed the impact of truck platooning on freeway traffic flow and the effect of dedicated lanes based on domestic road and traffic conditions. According to the study, the higher traffic volume and truck ratio, the higher ratio of platoons and the greater size of platoons are formed, which results in greater effect of increasing the average speed of the network. Therefore, the routes with heavy traffic and heavy cargo traffic could be positively considered for truck platooning. However, the analysis showed that the effect of increasing the average speed of the entire network is difficult to expect in the event of a queue due to entry and exit, and that the overall network's throughput could be reduced. Therefore, traffic operation strategies associated with the access road, such as securing capacity of the connection, are

needed to maximize the effect of truck platooning. When it comes to the effect of dedicated lane, it could have a positive effect only if one lane was fully operated by automated trucks under the condition of 100% MPR, which allowed positive effects in all aspects, such as higher average speed, throughput, and reduced conflict rates.

Key words : Truck Platooning, Automated Driving, CACC, Dedicated Lane, Freeway

I. 서 론

세계 경제성장과 더불어 화물 운송 수요는 지속적으로 증가되어 왔고 국가 간 무역 및 전자 상거래 활성화 등으로 이와 같은 추세는 계속될 것으로 예상된다. 우리나라의 경우에도 화물물동량은 2016년 기준 약 19억 7천만 톤으로, 이 중 도로가 가장 높은 수송분담률(91%)을 보이고 있으며 지난 15년 동안 도로부문의 국내 화물 물동량은 증가하는 추세를 보이고 있다(KTDB, 2018).

화물 교통량 증가와 더불어 도로혼잡 증가 및 사고 위험, 대기오염의 문제는 날로 심각해지고 있어 화물 운송의 효율성 증대와 지속가능성 확보는 정부, 도로 운영기관, 완성차업체, 물류업계의 공통된 관심사이다. 다행히도 차량 간(V2V) 통신을 활용한 군집주행이 이에 대한 해결책으로 기대되고 있다. 군집주행은 2대 이상의 차량이 최소한의 안전거리만을 유지한 채 일정 간격을 두고 주행하는 방식이다.

그러나 화물차가 군집주행하는 상황에서 비자율차와 혼재 시 예기치 못한 돌발상황으로 자율주행차량의 성능발휘가 어렵고 오히려 교통사고가 증가할 수 있는 문제점 등이 발생할 수 있다(Oh and Brief, 2017).

해외 선진국에서는 이미 화물차 군집주행에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있는 가운데 자율주행 사회로의 성공적인 전환을 위해서는 우리나라도 자동차 기술 뿐 아니라 도로 운영전략 등 인프라 차원에서의 검토가 함께 필요하며, 이를 위해서는 국내 도로·교통 조건을 고려하여 화물차 군집주행의 영향에 대한 분석이 선행되어야 한다. 국내의 경우, 차량의 특징으로는 화물차의 중량과 제동력이 유럽 및 미국과 차이가 있고, 제도적 특징으로는 도로교통법에 따라 화물차는 고속도로의 지정된 차로로 주행하도록 제한하고 있다. 운영적 특징으로는 시간대별, 구간별로 교통량과 화물차 혼입률의 차이가 큰 특징이 있다. 또한, 화물차 군집주행 도입 초기에는 안전 및 운영효율성 저하 문제를 이유로 군집주행 전용차로를 운영해야한다는 제안이 이루어질 수 있으므로 군집주행 전용차로 효과 연구도 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 자율주행화물차의 군집주행이 교통류에 미치는 영향과 전용차로 도입 시 효과를 연구하고자 한다. 국내의 도로·교통 여건을 시나리오에 반영하여 분석한다는 점과 고속도로 본선을 기본, 유입, 유출구간으로 각각 나누어 효과를 분석한다는 점에서 고속도로의 구간별, 시간대별 군집주행의 영향을 종합적으로 가늠해 볼 수 있으므로 향후 화물차 군집주행을 고려한 도로 운영전략 수립이나 관리에 기초자료로 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

II. 선행연구 고찰

1. 군집주행 기술

군집주행이란 여러 대의 차량이 하나의 개체처럼 근접한 거리로 주행하는 것을 의미한다. 즉, 군집에 속한

차량은 선두차량과의 일정 거리와 속도를 유지하며 주행한다. 짧은 차간거리는 도로 용량을 증가시킬 뿐 아니라 화물차의 경우 공기저항 감소로 연료절감 효과가 기대된다(Ramezani et al., 2018).

전방의 차량을 인지할 수 있는 자율주행 기술로는 ACC(Adaptive Cruise Control)와 CACC(Cooperative Adaptive Cruise Control)가 있다. ACC 기술은 차량에 부착된 레이더 및 센서로 선행차량의 상대속도 및 차간간격을 측정할 수 있다. CACC는 ACC에 차량 간(V2V) 무선통신을 추가하여 선행차량의 가·감속 정보까지 습득할 수 있어 차간간격을 더 좁게 유지하면서도 안전하게 유지할 수 있게 하므로 군집주행을 가능하게 한다.

2. 화물차 군집주행 효과 연구

1) 시험주행 연구

화물차 군집주행 시험주행은 <Table 1>과 같이 이루어졌으며, 공통적으로 연료절감 효과를 보고하였다. 화물차 군집주행은 아직 상용화되지 않은 기술로 현실에서 얼마나 효과가 있을지 어떤 조건에서 이를 가장 잘 수행할 수 있을지는 불확실하지만 에너지 절감을 통한 운송 효율 증가 및 대기오염 감소에 긍정적인 영향을 가져올 것으로 기대된다.

<Table 1> Truck Platooning Driving Test

Project	Test Site	Platoon Size	Gap	Fuel Savings	Reference
Chauffeur Project	Europe	3 Trucks	10m	-21%	Fritz.(2004)
SARTRE Project	Europe	2 Trucks + 3 Passenger cars	10m	-12%	Lee(2016), Robinson et al.(2010)
PATH	USA	2 Trucks	8~10m	-8%	Browand et al.(2004)
Energy ITS	Japan	4 Trucks	4~10m	-2.1~15%	Tsugawa(2014)
-	USA	3 Trucks	6~23m	-2.7~9.7%	Lammert et al.(2014)
-	Sweden	2 Trucks	21m	-3.9~8.6%	Alam et al.(2015)
HYUNDAI Motor Company	Korea	2 Trucks	16.7m	-	Press reports. - IT Chosun (2019.11.12.)

2) 시뮬레이션 연구

Jo et al.(2018)은 VISSIM을 이용하여 일반차량과 군집차량이 혼재된 상황에서 차로별 용량을 추정하였다. 용량 증대 효과가 가장 큰 최적의 시나리오는 군집크기가 2대, 군집 내 간격이 10m, 군집 간 간격이 50m, MPR이 10%인 경우로 기존 용량 대비 약 17.8%의 증대효과를 얻을 수 있다는 것을 분석하였다.

Jo et al.(2019)는 VISSIM을 이용하여 일반차량과 군집차량이 혼재된 상황에서 차로별 용량 변화를 살펴보고, 증대된 용량을 바탕으로 TransCAD를 이용하여 우리나라 고속도로 네트워크에 적용 시 통행시간 절감에 따른 편익을 추정하였다. 용량증대 효과가 가장 큰 시나리오는 MPR이 25%에서 군집크기가 2대, 군집 내 간격이 6m, 군집 간 간격이 50m인 경우였으며, 연간 통행시간 절감 편익은 2020년 기준 약 1,876억으로 추정하였다.

Jeong et al.(2020)은 국내 운영 중인 버스전용차로가 자율주행차량과 비자율주행 차량 간 마찰을 최소화하기 위한 전용차로로 운영될 가능성을 고려하여 자율주행버스의 보급률과 교통량, 진입 영향권의 길이에 따른 상충분석을 통해 안전한 진입 영향권의 길이를 제시하였다.

Lee and Oh(2018)은 고속도로 유입연결로 구간에서 교통류 퍼포먼스를 극대화시킬 수 있는 화물차 군집

운영전략 수립방안을 제시하였다. 분석결과 군집 간 간격이 50m이고 군집크기가 6대인 운영 시나리오가 최적의 성능을 유도할 수 있음을 확인하였다.

Ramezani et al.(2018)는 일반 승용차와 CACC 장착 트럭의 혼재 상황에서 교통 운영 효율성을 평가하기 위해 미시적 시뮬레이션 모델을 개발하였다. CACC, ACC 및 CC(Conventional cruise control) 장착 트럭의 실증 실험 결과 값으로부터 도출된 자율주행 트럭 추종모델로 시뮬레이션을 수행하였으며 자율주행 트럭 비율을 달리하여 시뮬레이션 한 결과 트럭 통행시간, 평균속도, 교통류율 모두 개선되었으며 일반 승용차 운영에 부정적 영향은 없는 것을 확인하였다.

Deng(2016)은 VISSIM에 COM 인터페이스를 이용하여 군집주행 모델을 구현하고 화물차 군집주행이 교통류에 미치는 영향과 군집 형성 시 미치는 영향을 시뮬레이션하였다. 그 결과, 군집주행 화물차가 증가할수록 일반 승용차의 안전은 확보되면서도 교통류 운영 효율성은 매우 개선되었다.

Müller(2012)는 VISSIM을 이용하여 진출입로가 없는 3차로 5km의 가상의 네트워크에서 CACC 기술 장착 트럭의 군집 주행 시 도로 용량이 5.5% 증가하고 승용차의 통행속도가 6.4% 증가하는 것을 확인하였다.

화물차 군집주행 외 ACC/CACC 기술을 장착한 자율주행차량이 교통류에 미치는 영향에 대해 시뮬레이션 한 연구는 <Table 2>와 같다. 2000년 이전부터 ACC와 관련한 연구는 진행되었으나, CACC와 관련된 연구는 2000년 이후부터 등장하므로 자료는 2000년 이후의 연구로만 구성하였다.

<Table 2> Studies on the ACC/CACC Effect through Simulation

Divide	Refefence	Findings
ACC/CACC Effects Analysis	Zhong et al.(2017)	Analysis of CACC effects according to the lane restriction. Dedicated lane had negative impacts when the CACC penetration was less than the capacity of one lane.
	Park et al.(2015)	Analysis of the traffic-flow changes of Gyeongbu freeway Seoul-Singal basic section according to the Agent-Based-Model. The introduction of automated vehicles achieves positive effect in more than LOS C.
	Arnaout and Arnaout(2014)	Better traffic flow performance and higher capacity in the case of CACC penetration compared to the scenario without CACC-embedded vehicles.
	Zhao and Sun(2013)	When CACC penetration added, the lane capacity increased significantly. Platoon size have little impact on traffic capacity.
	Shladover et al.(2012)	CACC is able to greatly increase capacity after its market penetration reaches moderate to high percentages while ACC is unlikely to change lane capacity significantly.
	Kesting et al.(2008)	Analysis of ACC impacts on a road section with an on-ramp bottleneck. ACC vehicles improve the traffic stability and the dynamic road capacity. Traffic congestion was eliminated when a proportion of 25% ACC vehicles.
	Van Arem et al.(2006)	Analysis of the impacts of CACC for a highway-merging scenario from four to three lanes. An improvement of traffic-flow stability and a slight increase in traffic-flow efficiency are found compared with the merging scenario without equipped vehicles.
	Vander Werf et al.(2002)	CACC can potentially double the capacity of a highway lane at a high-market penetration. If a special lane for CACC vehicles are introduced to a four-lane freeway, the overall capacity could be increased from 8,200pcu/h to 10,500pcu/h.
	VanderWerf et al.(2001)	A set of mathematical models is defined and developed simulation model to predict the effects of ACC/CACC on traffic flow dynamics and capacity.

3. 시사점

ACC/CACC 기술을 장착한 자율주행차량과 관련한 연구는 다수 진행되었으나 화물차 군집주행이 교통류에 미치는 영향에 대한 연구는 비교적 최근에서야 이루어지고 있다. 화물차의 경우 승용차에 비해 군집의 길이가 길고 가·감속 특성이 다르므로 현실에서 교통류에 어떠한 영향을 미칠지는 다양한 시뮬레이션을 통해 이를 추정할 필요가 있다. 본 연구는 국내의 도로·교통 여건을 현장 데이터로 분석하여 이를 시나리오에 반영하였고, 본선을 기본, 유입, 유출구간으로 각각 나누어 화물차 군집주행이 교통류에 미치는 영향과 군집 전용차로 운영 시 효과를 분석하였다. 따라서 교통량 및 자율주행화물차 비율에 따라 군집 크기나 군집주행 비율은 어떻게 변화하고 고속도로의 구간별, 시간대별로 군집주행의 영향은 어떠한지를 종합적으로 가늠해 볼 수 있다는 점에서 기존에 이루어졌던 연구와 차별성을 가진다. 이는 향후 화물차 군집주행을 고려한 도로 운영전략 수립이나 관리에 기초자료로 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

Ⅲ. 분석방법론

본 연구의 목표는 자율주행화물차의 군집주행이 고속도로 교통류에 미치는 영향과 전용차로 도입 효과를 분석하는 것으로, 효과 분석은 미시적 교통시뮬레이션 소프트웨어인 VISSIM을 통해 진행하였다. 공간적 범위는 진출입로가 포함된 연장 13KM, 편도 4차선 고속도로로써 가상의 네트워크를 대상으로 시뮬레이션 하고, 시뮬레이션에 필요한 파라미터 값과 시나리오는 2019년 8월 기준 경부고속도로의 교통량과 화물차 혼입률, 운행속도 데이터를 기반으로 하여 설정하였다. 설정한 파라미터의 적정성은 경부고속도로의 평균속도와 교통량으로 검증하여 현실의 교통류 특성을 반영하였다.

1. VISSIM 파라미터 설정

VISSIM에서는 인간의 운전 행동 무작위성과 차량특성이 확률분포로 반영된다. 그러나 자율주행차는 차량의 자동제어로 인해 확률적 값이 아닌 결정적 값이 사용된다고 가정한다. 이는 실제 CoEXist¹⁾에서 시행된 자율주행차의 실차실험 결과에서 나타난 특징과도 일치한다. 이러한 가정을 반영하기 위해서는 자율주행화물차의 파라미터 수정이 필요하다.

1) 속도 및 가·감속 파라미터

희망속도는 고속도로 공공데이터포털에서 제공하는 VDS(Vehicle Detection System) 자료를 통해 2019년 8월 평일 기준 경부고속도로의 시간별 방향별 구간 통행속도를 기반으로 설정하였다. 서비스수준이 양호한 곳에서 100kph 이상의 속도값이 관측되어 도로교통법 제17조의 최고속도 제한 기준의 상향값을 적용하여 승용차 및 버스는 평균 110kph, 화물차는 평균 90kph로 희망속도를 설정하고 최소값은 법정 최저기준인 50kph로 설정하였다. 도로교통법 시행령(별표8)에 따라 최고 범칙금액 및 벌점이 60kph 초과 시 부과되므로 최대값은 평균값에 60kph를 일괄적으로 더하여 산정하였다. 한편, 비자율차에 비해 자율주행차는 속도 제한 값을 지키려 하므로 자율주행화물차의 희망속도는 85kph에서 90kph로, 표준편차는 2.5kph로 설정하였다.

VISSIM에서 가속도는 속도의 함수로써, 유럽의 차종별 데이터를 적용한 값이 기본값으로 내장되어 있으

1) 자율주행차와 비자율차가 공존하는 전환 단계의 준비를 목표로 한 EU 프로젝트(2017.5~2020.4)

므로, 국내 여건에 맞도록 이를 조정하였다. 승용차는 국내와 유럽 간 큰 차이가 없고, 버스는 전체 교통량의 약 3% 내외로 큰 영향이 없을 것으로 판단하여 화물차와 관련한 파라미터만 수정하였다. Choe and Kim(2001)의 우리나라 자동차 등록현황 및 성능제원표를 참고하여 화물차의 중량(kg) 및 마력(kw)을 <Table 4>와 같이 수정하였고, 화물차의 견인력을 계산하여 산출된 희망가속도의 최대값 $2.0m/s^2$ 를 희망가속도 값으로 변경하였다. 희망감속도는 Park(2017)에서 화물차에 권장하는 기준이 $-2.2m/s^2$ 이하인데 VISSIM 기본값이 이보다 작은 $-1.5m/s^2$ 로 설정되어 있어 따로 수정하지 않고 VISSIM 기본값을 썼다.

<Table 3> Desired Speed Settings

[Unit : kph]

Type	Min	Max	Mean	s.d
Passenger Car	50	170	110	10.4
Bus	50	170	110	10.4
Truck	50	150	90	13.3
Automated Truck	85	90	87.5	2.5

<Table 4> Truck Weight & Power Settings

Divide	Type	Default Value		Setting Value	
		Min	Max	Min	Max
Weight (kg)	Truck	2,800(0)	40,000(1)	2,665(0.7)	38,890(1)
	Automated Truck	-	-	2,665(0.7)	38,890(1)
Power (kw)	Truck	55(0)	600(1)	41(0.7)	307(1)
	Automated Truck	-	-	41(0.7)	307(1)

* () 안의 값은 누적분포함수의 y축값

2) 차량추종 파라미터

운전자 행태(Driving Behavior)와 관련한 파라미터 중 차량의 기본적인 흐름을 제어하는 차량추종과 관련된 파라미터는 <Table 5>과 같이 수정하였다. 먼저 모형이 국내 고속도로의 전반적인 교통류를 어느 정도 반영하고 있는지를 확인하기 위해 비자율차 파라미터에 대해 설정된 기본값에 대해 검증을 실시하였다. 앞서 설정한 속도 및 가·감속 파라미터와 기본값으로 설정된 추종 파라미터로 경부고속도로 구간의 검지 속도 및 교통량과 비교해 본 결과, Yang and Son(2009)와 Ministry of Trade, Industry and Energy(2016)에서 제시하는 검증기준에 적합하여 비자율차에 대한 추종 파라미터는 수정 없이 사용하였다. 자율주행화물차는 세계자동차공학회(SAE)에서 정의하는 기술레벨 3 이하에 해당하는 차량으로 가정하여, 센서를 통해 전방의 자율주행 화물차를 인지하면 군집을 형성하고 CACC 기능이 활성화되어 선두차량과 동일한 속도 및 짧은 차간간격을 유지하며 주행한다. 비자율차가 전방에 있을 경우에는 CACC 기능은 활성화되지 않지만 ACC 기능을 통해 센서로 전방 차량의 속도와 거리를 측정할 수 있으므로 비자율차 간의 간격보다는 짧은 간격을 유지하며 주행할 수 있다. 자율주행화물차의 추종 파라미터는 이러한 로직을 고려하여 비자율차 추종 시와 동종차량 추종 시로 구분한 뒤 CoEXist 제안값(Peter Sukennik et al., 2018)을 참고하여 설정하였다.

<Table 5> Parameter Settings on Driving Behavior

Parameter	Reference				Setting Values		
	Default Values	Autonomous Car			Manual Car	Automated Truck	
		Recommended by CoEXist		Atkins ²⁾ (level4)		Following Manual Car	Following Automated Truck
		Normal	All knowing				
CC0	1.5	1.5	1	0.5	1.5	1.5	1.5
CC1	0.9	0.9	0.6	0.6	0.9	0.9	0.6
CC2	4	0	0	0	4	0	0
CC3	-8	-8	-6	0	-8	-8	-8
CC4	-0.35	-0.1	-0.1	0	-0.35	-0.1	-0.1
CC5	0.35	0.1	0.1	0	0.35	0.1	0.1
CC6	11.44	0	0	0	11.44	0	0
CC7	0.25	0.1	0.1	0.4	0.25	0.1	0.1
CC8	3.5	3.5	4	3.8	3.5	3.5	3.5
CC9	1.5	1.5	2	1.8	1.5	1.5	1.5
Increased acceleration	100%	100-110%	110%	-	100%	100%	100%

* CC0(Standstill distance) / CC1(Following distance) / CC2(Longitudinal oscillation) / CC3(Perception threshold for following) / CC4(Neg.speed difference) / CC5(Pos.speed difference) / CC6(Influence speed on oscillation) / CC7(Oscillation acceleration) / CC8(Acceleration starting from standstill) / CC9(Acceleration at 80km/h)

3) 군집주행 파라미터

군집주행을 하려면 도로에서 운전자들이 군집을 형성할 차량을 서로 찾을 수 있도록 협력전략이 필요하다. 본 연구에서는 자율주행화물차가 우연히 동종 차량을 추종하게 될 경우에만 앞차와 결합하여 군집을 형성하고, 선두차량은 진행방향 전방에 위치한 차량으로 결정된다는 가정 하에 진행되었다. 군집주행 시에는 속도에 따른 일정한 차간 간격을 유지하므로 가·감속은 제한되며, 군집 주행 중 차선변경은 하지 않는다. 군집조건이 유효하지 않을 시에는 선행차량과 후행차량과의 차간간격이 늘어나고 군집이 해체된다. 군집 규모는 5대 이상으로 형성하는 것이 도로용량 증대 등의 군집주행 편익을 극대화 할 수 있다는 선행연구가 있지만(Hall and Chin, 2005), 현재 시험주행의 대부분이 2~3대의 화물차로 이루어지고 있는 점, ACEA(European Automobile Manufacturers Association, 2017)의 화물차 군집주행 발전단계를 감안하여 최대 5대로 설정하였다. 군집 내 차간간격을 결정하는 Gap time은 <Table 1>과 같이 시험주행의 군집 간 간격 대부분이 10m 이상으로 진행되고 있으므로, 0.6s로 설정하였다. 0.6s의 경우 85~90kph 주행 시 약 16.2m~17m의 차간 간격을 유지한다고 이해 할 수 있다.

2. 시나리오 설계

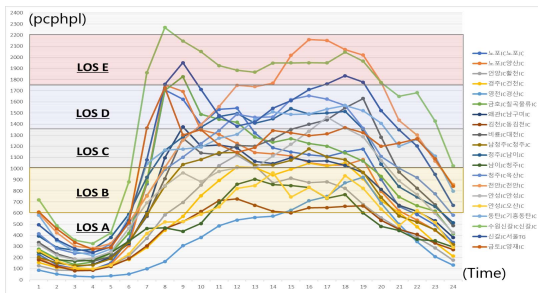
1) 경부고속도로 도로·교통조건 분석

실험계획 설계에 앞서 경부고속도로 도로·교통조건을 먼저 분석하였다. 국내 화물차 교통량이 가장 많은 뿐 아니라 구간별, 시간대별 서비스수준과 화물차 혼입률이 다양하게 나타나는 노선의 조건을 고려하여 화

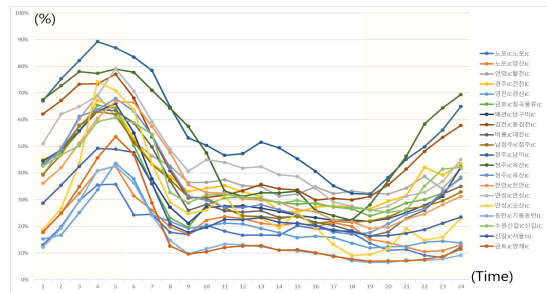
2) Atkins(2016)

물차 군집주행을 실험한다면 좀 더 현실에 부합하는 결과를 얻을 수 있을 것이라 판단했기 때문이다.

한국도로공사 공공데이터포털에서 제공하는 경부고속도로 AVC(Automatic Vehicle Classification) 자료 및 노선관리현황 등을 참고하여 수집구간의 시간대별 교통량 및 화물차 혼입률을 분석하였다. 2019.7.29. ~ 9.26의 평일 30일치 표본에서 0값 제거 후 99.9% 신뢰구간을 벗어난 자료를 제거하는 방법으로 이상치를 제거한 후 구간별, 시간대별 교통량을 산출하였다. 화물차는 12종의 분류 중 승용차인 1종과 버스인 2종을 제외한 3~12종을 대상으로 하였다. 서비스수준을 판단하기 위해 도로용량편람을 참고하여 환산 교통량을 산출하였는데, 승용차 환산계수 1.5, 차로폭 및 측방여유폭 보정계수는 1.0 값을 적용하였다. 첨두시간계수 PHF는 한국도로공사 공공데이터포털에서 제공하는 2018년 연평균 값을 구간별로 적용하였다. 구간별, 시간대별로 산출한 승용차 단위 첨두시간 환산 교통량은 <Fig. 1>과 같다. 서비스수준(LOS)은 고속도로 설계속도 100kph를 기준으로 판단하였다. 전체 교통량(vph) 중 3~12종의 화물차(vph) 비율로 산출한 화물차혼입율은 <Fig. 2>와 같다. 화물차 혼입율의 전체 평균은 34%이지만 시간대별, 구간별로 큰 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다.



<Fig. 1> Traffic volume by time and section on Gyeongbu expressway(to Seoul)



<Fig. 2> Truck ratio by time and section on Gyeongbu expressway(to Seoul)

2) 시나리오

경부고속도로의 도로·교통조건을 고려하여 시나리오는 서비스수준 A~E까지 5가지 경우에 해당하는 경제값(최대교통류율)을 입력값으로 실험하였다. 화물차 혼입률은 시간대 별로 큰 폭의 변동값을 보였지만, 혼입률이 20% 미만이거나 50%를 초과할 경우 한 차로만을 전용차로로 제한하는 것이 제도의 수용성 측면에서 불합리하게 판단될 수 있으므로 20%, 30%, 40%, 50% 4가지의 경우로 시나리오를 <Table 6>와 같이 구성하였다. 버스전용차로를 고려하지 않은 편도 4차로 도로를 대상으로 실험하고, 입력교통량은 VISSIM 입력단위(vph)로 변환하였다. 자율주행화물차 비율(MPR³)은 0%, 50%, 100%로 실험하고, 화물차를 제외한 승용차와 버스는 모두 비자율차로 가정하였다. 이로써 총 시나리오 수는 120개로 구성되었다.

<Table 6> Simulation Scenario

Independent Variables		Input Values	# of Cases	Note
Road	Number of lanes	4	1	0: Current / 1 : Introduced
	Dedicated lane	0/1	2	
Transportation	Traffic Volume	1,600(A), 2,667(B), 3,600(C), 4,667(D), 5,867(E)	5	Unit : vph
	Truck ratio	20%/30%/40%/50%	4	Ratio of 3-12 types among all
	MPR ³	0%/50%/100%	3	Ratio of automated ones among trucks
Number of Scenarios			1×2×5×4×3 = 120	

3) 평가지표

운영과 관련한 지표로는 도로이용자에게 교통류질의 평가기준이 되고 운영적인 편익에 대한 척도로 사용될 수 있는 평균속도를 첫 번째 평가지표로 사용한다. 여기서 평균속도는 공간평균속도를 의미한다.

두 번째 평가지표로는 시뮬레이션 시간 동안 각 구간을 통행한 총 차량수를 나타내는 처리량으로 한다. 전용차로 운영으로 인해 처리량이 감소한다면 용량 부족으로 운영적인 편익이 감소할 수 있다.

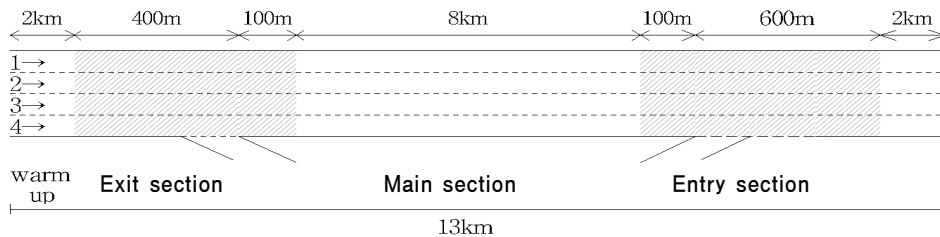
안전과 관련한 평가지표로는 비자율차의 상충률을 사용한다. 교통상충은 일반적으로 “둘 이상의 도로 이용자들이 현 상태를 유지할 때 충돌의 위험을 갖는 시공간 범위로 서로 접근하는 관찰 가능한 상황”으로 정의된다(Glauz and Migletz, 1980). Ha et al.(2002)은 선행차량의 갑작스런 운행행태 변화 시 추종차량의 안전거리와 인지반응시간 등이 불충분한 조건에 의해 후미추돌사고가 일어나므로, 선행차량의 자극에 대해 인지-정지반응시간에 따라 산출된 선행차량과의 안전거리보다 짧은 거리에서 추종차량이 회피행동을 보일 때를 상충 기준으로 보았다. 본 연구에서는 시나리오별 교통량이 상이하므로 상충건수 자체를 비교하는 것은 바람직하지 않다. 따라서 Lee and Oh(2018)를 참고하여 식 (1)과 같이 시간당 차량추종 건수 대비 후미추돌 상충건수로 정의한 상충률을 적용하였다. 자율차는 기계적 판단에 따라 설정한 안전거리를 유지하며 주행하므로 비자율차를 대상으로만 상충분석을 실시하였다. 상충건수는 시뮬레이션에서 도출되는 FD(follow distance)가 SD(safety distance) 미만일 횟수로, 비자율차(MV)가 자율차(AV) 또는 비자율차(MV) 추종 시 실제 측정된 두 차량 간 간격이 최소 안전거리 보다 짧은 경우를 산출하여 구하였다.

$$CR^{MV} = \frac{C_{AV}^{MV}}{F_{AV}^{MV}} + \frac{C_{MV}^{MV}}{F_{MV}^{MV}} \dots\dots\dots (1)$$

여기서,
 C : 상충건수
 F : 추종건수
 CR : 상충률

3. 네트워크 구축

실험을 위한 가상의 네트워크는 <Fig. 3>과 같이 도로 폭 3.5m의 편도 4차로, 13Km 연장으로 구축하였다. 기본구간은 고속도로 공공데이터 포털에서 제공하는 경부고속도로 콘존별 연장의 평균값을 고려하여 8km로 설정하였고, 연결로교통량(VDS)의 IC 진출입 평균값을 고려하여 진입 교통량은 본선 대비 8%, 진출은 6%로 설정하였다. 군집주행은 진입로와 진출로에서는 시행하지 않으며 본선 진입 후 가능하도록 하였다.





<Fig. 3> Network

3) Market Penetration Rate : 자율주행차의 시장점유율

도로교통법 시행규칙에 따라 차로에 따라 통행할 수 있는 차종 제한을 고려하여 자율주행화물차의 군집주행 효과는 2가지 경우로 나누어 분석하는데, 시나리오 중 특별한 운영전략을 시행하지 않은 채 현재의 도로 상황에 자율주행화물차가 군집주행을 자유롭게 실시할 경우를 CASE1로 설정하였다. 반면, 군집주행을 허용하는 전용차로를 지정하여 유출입 구간을 제외한 4차로 기본구간에서만 자율주행화물차의 군집주행을 허용할 경우는 CASE2로 설정하였다. 즉, 군집주행 전용차로 운영 시 4차로는 일반화물차와 자율주행화물차가 공유하며, 1,2차로는 승용차가, 3차로는 승용차와 버스, 일반화물차가 공유한다. 제한된 도로 용량 때문에 현실적으로 MPR 50% 미만에서는 자율주행화물차를 대상으로만 1개 차로를 운영하기에는 어려울 것이라 판단하여 전용차로는 비자율화물차와 자율주행화물차가 공유할 수 있게 설계하였다. MPR이 100%가 되면 4차로는 자율주행화물차만으로 운영된다. 모든 경우에서 위반율은 0%로 가정한다.

차선변경 등 차량 흐름을 자연스럽게 유도하기 위해 접속부 전·후 500~700m 구간은 전용차로를 설치하지 않으며, 차종별 통행도 제한하지 않는다. <Fig. 3>의 빗금친 부분은 도로용량편람의 ‘고속도로 구성 요소의 영향권’ 및 도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙 해설의 ‘전용차로가 설치된 고속도로의 인터체인지에서 발생하게 되는 엇갈림 구간 설치 기준’을 고려하여 설정한 것이다. 시뮬레이션 결과는 기본구간과 그림에 빗금 표시된 유출 및 유입구간을 각각 나누어 분석한다.

<Table 7> Allowed vehicles by lanes

CASE1		CASSE2	
	All types available		All types available but Platooning restricted
1 st lane	Passenger car	1 st lane	Passenger car
2 nd lane	Passenger car	2 nd lane	Passenger car
3 rd lane	Passenger car, Bus, Truck(Automated/Manual)	3 rd lane	Passenger car, Bus, Truck(Manual)
4 th lane	Passenger car, Bus, Truck(Automated/Manual)	4 th lane	Truck(Automated/Manual)

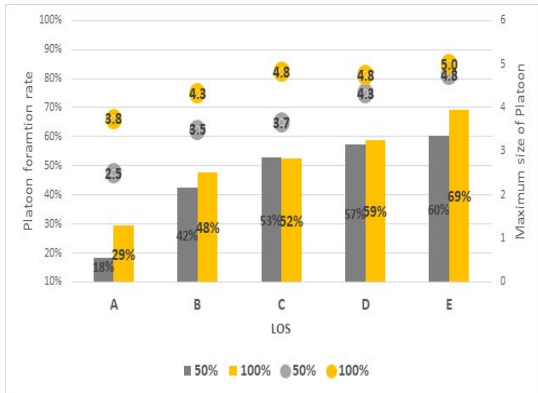
IV. 시뮬레이션 및 결과분석

총 시뮬레이션 시간은 2400초(40분)이고 이 중 처음 600초(10분)는 warm-up 시간으로 설정하여 효과적도 별 결과 값은 최종 1800초(30분) 동안의 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 랜덤시드(random seed)는 42~44로 각 시나리오별 3회씩 시뮬레이션 한 결과의 평균값이 효과분석에 사용되었다.

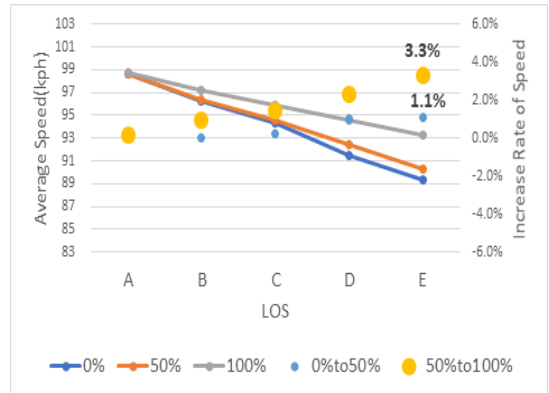
1. 평균속도

기본구간에 대한 분석 결과, 화물차 혼입률이 높아질수록, 서비스수준이 낮아질수록, 50%보다는 100% MPR에서 군집 크기 및 군집 발생비율(자율주행화물차 중 군집주행 차량 비율)이 증가함에 따라 평균속도의 증가폭이 커졌다. 하지만 MPR이 50%에서 100%로 증가할 때는 최대 평균 3.3%의 속도 증가폭을 나타냈지만 0%에서 50%로 증가할 때는 최대평균 1.1%로 속도의 증가폭이 크지 않았다. 개별 서비스수준 및 화물차혼입률 분석 결과에서는 화물차혼입률 50% 및 LOS E의 조건 시 MPR이 50%에서 100% 증가 시 최대 5.7%, 0%에서 50% 증가 시 최대 2.5%의 속도 증가폭을 나타내었다. 따라서 MPR 50% 이하에서는 화물차 군집주행으로 인한 속도 향상의 효과가 크게 나타나기 어려울 것으로 판단된다. 유출구간에서는 <Fig. 6>과 같이 서비

스수준 E일 때 평균속도가 40kph(개별 분석 시 최소 29kph) 이하로써 유출구간 상류부에 대기행렬이 매우 길게 형성되었다. 기본 및 유입구간에서는 서비스수준이 낮아질수록 자율주행화물차의 군집주행으로 인해 속도가 향상되는 효과가 나타났으나, 유출구간에서는 군집주행으로 인한 속도 향상 효과는 뚜렷하게 나타나지 않았고, 오히려 서비스수준 E에서는 MPR이 100%일 때 속도가 감소하는 경우도 나타났다.

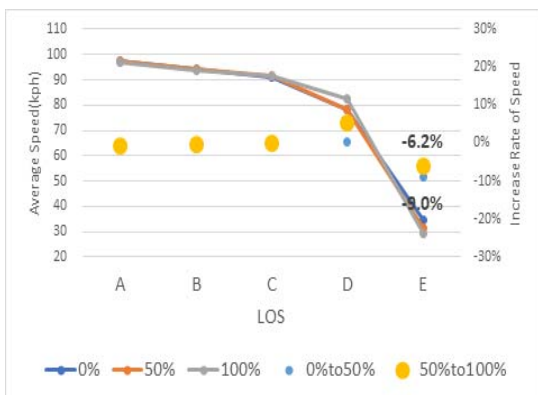


<Fig. 4> Platoon formation and maximum size of platoon by MPR(CASE1, Main section)

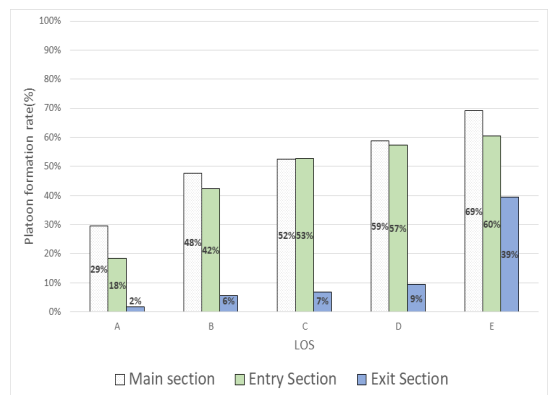


<Fig. 5> Changes in avg. speed by MPR (CASE1, Main section)

<Fig. 7>은 MPR 100%에서 기본, 유입, 유출구간의 평균 군집발생비율을 나타낸 것으로, 유입구간은 기본구간과 큰 차이를 보이지 않으나 유출구간은 기본구간에 비해 군집 발생 비율이 현저히 떨어지는 것을 확인할 수 있다. IC 진출 등으로 인해 차선 변경이 필요한 경우 군집이 해체되며, 군집을 이루려는 차량과의 사이에 비자율차가 있다면 군집이 형성되지 않기 때문이다. 진출차량의 경로변경으로 인해 앞차와의 군집 형성 확률이 줄어들 뿐 아니라 기존의 군집이 해체되는 과정에서 군집 내 간격이 늘어나며 속도가 감소할 수 있기 때문에 유출구간에서는 기본구간이나 유입구간처럼 군집주행으로 인한 속도 향상 효과는 기대할 수 없을 것으로 예상되며, <Fig. 6>의 LOS E 이하일 때 나타나는 것처럼 진출차량으로 혼잡이 발생하는 구간에서는 군집주행으로 인해 평균속도가 감소할 수도 있을 것으로 판단된다.



<Fig. 6> Changes in speed by MPR for Exit section (CASE1 under 40% of truck ratio)



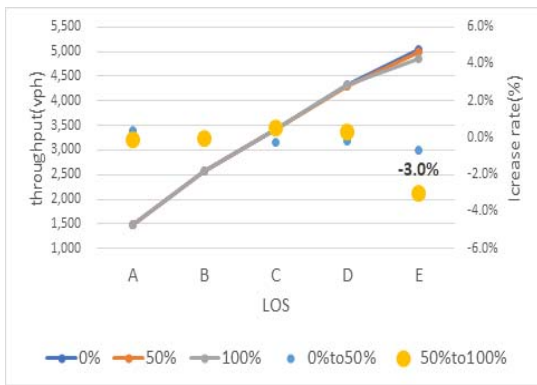
<Fig. 7> Avg. Platoon formation ratio by section (CASE1 under 100% MPR)

2. 처리량

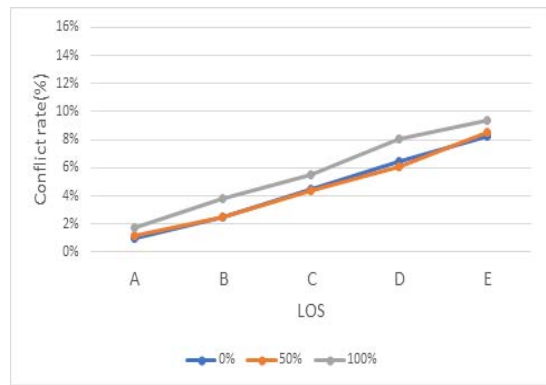
구간별 통과교통량인 처리량은 서비스수준 A~D에서는 MPR 그룹 간 차이가 없는 것으로 나타나 군집주행의 영향이 없을 것으로 판단된다. LOS E에서는 MPR이 50%에서 100% 증가 시 유출(평균 -2.7%), 기본(평균 -3%), 유입(평균 -3.2%) 구간 모두 처리량이 줄어드는 경향을 보였는데 이는 유출구간의 교통량이 용량에 근접하여 대기행렬이 발생하는 것에 기인한 것으로 판단된다.

3. 비자율차 상충률

<Fig. 9>를 보면 서비스수준이 낮은 곳에서 상충률이 높아지는 경향을 보인다. 자율주행화물차의 MPR이 0%에서 50% 증가 시 상충률의 변화는 크지 않지만 MPR이 100%일 때는 MPR이 0%일 때 보다 상충률이 높다. 즉, 자율주행화물차의 군집주행이 활발할수록 비자율차의 안전에는 부정적인 영향을 미칠 수 있다.



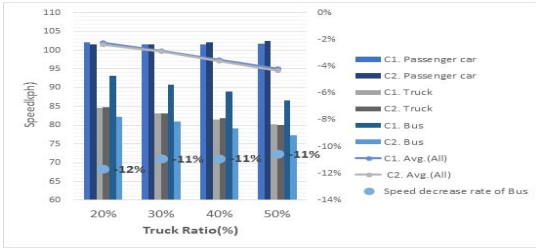
<Fig. 8> Changes in avg. throughput by MPR (CASE1, Main section)



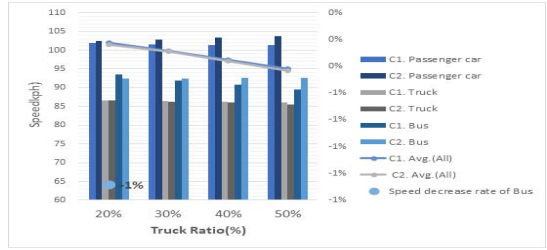
<Fig. 9> Changes in avg. conflict rate by MPR (CASE1, Main section)

4. 전용차로 효과

화물차 군집주행 전용차로의 효과 분석 결과, MPR이 100%가 되어 한 개 차로가 완전히 자율주행화물차만으로 운영될 경우에는 평균속도, 처리량, 비자율차 상충률 모두 긍정적 효과가 나타났으나, 비자율화물차와 자율주행화물차가 전용차로를 공유하는 50% MPR 시나리오에서는 일관된 효과를 보여주지 못했다. 특히, <Fig. 10>에서와 같이 MPR이 50%일 때 버스의 속도가 평균 -12% 까지도 감소하는 것으로 나타났는데, 기존 2개 차로(3,4차로)에서 1개 차로(3차로)만 사용하게 되고 상대적으로 속도가 느린 화물차와 차로를 공유하게 되어 속도가 줄어드는 것으로 판단된다. 버스 혼입률은 전체 차량의 3% 내외에 불과하여 전체 평균속도에는 큰 영향을 주지는 않았지만 군집주행 전용차로 운영 시 사용용량 감소로 버스의 속도에는 부정적인 영향을 주는 것을 알 수 있다. MPR이 100%가 되면 <Fig. 11>에서처럼 모든 화물차는 4차로를 이용함에 따라 3차로에 여유용량이 생기게 되어 버스의 속도가 회복됨을 알 수 있다. 또한, 모든 화물차가 4차로 한 차선만을 사용하는데도 군집주행으로 용량이 증가하여 CASE1 대비 화물차 속도는 줄어들지 않는다. 다만, 이 경우라도 접속부의 용량이 부족할 경우에는 평균속도가 크게 감소할 수 있는 결과가 나타났으므로 전용차로 설치 전 해당 구간의 접속부 용량에 대한 충분한 검토가 필요할 것이다.



<Fig. 10> Changes in avg. speed by vehicle type under 50% MPR



<Fig. 11> Changes in avg. speed by vehicle type under 100% MPR

5. 통계검정

시뮬레이션 결과값에 대해 자율주행화물차의 비율(MPR)이 통계적으로 중요한 차이가 있는지 알아보기 위해 SPSS 통계분석 프로그램을 이용하여 일원분산분석을 시행하였다. 설명변수는 자율주행화물차의 비율(MPR)이다. CASE1과 CASE2 결과 값 차이의 통계적 유의성은 독립표본 간 t-검정으로 확인하였다. 정의된 귀무가설은 각각 다음과 같다.

H_{01} : 서비스수준(LOS)과 화물차혼입률에 상관없이 MPR별 평균속도, 처리량 및 비자율차 상충률의 평균값은 동일하다($\mu_{0\%} = \mu_{50\%} = \mu_{100\%}$)

H_{02} : 서비스수준(LOS)과 화물차혼입률에 상관없이 CASE1과 CASE2의 평균속도, 처리량 및 비자율차의 상충률의 평균값은 동일하다. ($\mu_{case1} = \mu_{case2}$)

모든 통계 분석은 유의수준 5%에서 수행되었으며 p-value가 0.05 미만으로 귀무가설을 기각하는 시나리오는 Table 8에 음영으로 표시하였다. LOS A 이상에서는 가설(H_{01})을 수락하므로 자율주행화물차의 군집주행

<Table 8> P-values for CASE1

CASE1	Truck Ratio					
	20%			30%		
LOS	Avg. Speed	Throughput	Conflict rates	Avg. Speed	Throughput	Conflict rates
A	0.887	0.978	0.000	0.956	0.983	0.000
B	0.919	0.927	0.000	0.050	0.939	0.000
C	0.072	0.958	0.000	0.001	0.497	0.000
D	0.001	0.789	0.000	0.000	0.952	0.000
E	0.000	0.050	0.000	0.000	0.575	0.000
LOS	40%			50%		
A	0.796	0.978	0.000	0.138	0.952	0.000
B	0.000	0.951	0.000	0.000	0.972	0.000
C	0.000	0.801	0.000	0.000	0.959	0.000
D	0.000	0.983	0.000	0.000	0.989	0.000
E	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

이 평균속도에는 큰 영향을 미치지 않는다고 해석할 수 있다. 처리량은 서비스수준 A~D에서는 자율주행 화물차의 영향을 받지 않는다고 해석 할 수 있으며, 상충률은 모든 경우에서 MPR 간 분명한 차이가 있다고 해석할 수 있다. 분산분석에 대한 Scheffe 사후분석 결과, 평균속도는 <Table 9>에서처럼 LOS D 이하일 때 화물차혼입률에 따라 차이가 뚜렷하였고, MPR별 상충률 차이는 거의 모든 조건에서 통계적으로 유의하였다.

<Table 9> Post-hoc results on average speed

Truck Ratio		CASE1			
		20%	30%	40%	50%
LOS	A	1=2=3	1=2=3	1=2=3	1=2=3
	B	1=2=3	1=2=3	1=2	1=2
		1=2=3	1=2=3	2≠3	2≠3
		1=2=3	1=2=3	1≠3	1≠3
	C	1=2=3	1=2	1=2	1=2
		1=2=3	2≠3	2≠3	2≠3
		1=2=3	1≠3	1≠3	1≠3
	D	1=2	1≠2	1≠2	1≠2
		2=3	2≠3	2≠3	2≠3
		1≠3	1≠3	1≠3	1≠3
	E	1≠2	1≠2	1≠2	1≠2
		2≠3	2≠3	2≠3	2≠3
		1≠3	1≠3	1≠3	1≠3

1 : MPR 0% group speed 2 : MPR 50% group speed 3 : MPR 100% group speed

다음, 가설 H_{02} 검정 결과, 서비스수준과 화물차혼입률에 따라 평균속도에 대한 p-value값이 상이하다. 공통적으로 서비스 수준 A 이상에서는 가설을 수락하므로 LOS A 이상에서는 군집 전용차로의 운영 등 군집 주행 제한전략의 유무가 평균속도에 큰 영향을 미치지 않는다고 해석할 수 있다. 상충률은 대부분의 조건에서 p-value값이 0.05 미만으로 군집전용차로 운영으로 인한 상충률 차이는 통계적으로 유의했다.

<Table 10> P-values of T test on average speed for CASE1 and CASE2

Truck Ratio		20%			30%			40%			50%		
MPR		0%	50%	100%	0%	50%	100%	0%	50%	100%	0%	50%	100%
LOS	A	0.074	0.198	0.702	0.261	0.342	0.345	0.643	0.373	0.116	0.842	0.119	0.121
	B	0.000	0.004	0.209	0.023	0.213	0.007	0.356	0.896	0.000	0.873	0.033	0.000
	C	0.000	0.004	0.051	0.014	0.705	0.000	0.776	0.055	0.000	0.244	0.257	0.000
	D	0.000	0.000	0.000	0.007	0.128	0.000	0.272	0.473	0.000	0.002	0.023	0.000
	E	0.000	0.020	0.001	0.000	0.031	0.000	0.009	0.000	0.000	0.000	0.562	0.056

V. 결 론

자율주행 시대를 대비하기 위해서는 도로 운영전략 등 인프라 차원의 검토가 함께 필요하다는 점을 감안하여 본 연구에서는 국내 도로·교통 조건에서 화물차 군집주행이 교통류에 미치는 영향과 군집주행 전용차로 도입 시 그 효과를 분석하는 연구를 수행하였다.

먼저, 자율주행화물차의 군집주행이 교통류에 미치는 영향을 분석한 결과, 교통량이 많고 화물차혼입률이 높을수록 자율주행화물차의 군집비율이 높아지고 최대 군집형성 규모가 증가함에 따라 화물차 군집주행으로 인한 평균속도 증가효과가 더 크게 나타나는 것으로 분석되었다. 따라서, 교통량이 많고 화물 통행량이 많은 노선에서 화물차 군집주행은 긍정적으로 검토될 수 있을 것이다. 하지만, 진출입 등으로 대기행렬이 발생한 경우에는 군집주행으로 인한 평균속도 증가효과는 기대하기 어려우며 오히려 전체 네트워크의 처리량이 감소하는 결과를 가져올 수 있는 것으로 나타났으므로, 군집주행의 효과를 극대화하기 위해서는 접속부의 용량확보 등 접속도로와 연계된 교통운영 전략이 필요할 것이다.

다음, 군집 전용차로의 효과로는 자율주행화물차 비율(MPR)이 100%가 되어 한 개 차로가 완전히 자율주행화물차만으로 운영될 경우에만 전용차로 미 도입 시 보다 평균속도 및 처리량 증가, 비자율차 상충률 감소 등 모든 측면에서 긍정적인 효과를 얻을 수 있었다. 하지만, 이 경우에도 유출구간은 교통량 증가 시 속도가 -31%까지 감소하는 시나리오 분석결과도 나타났으므로 본선에 일괄적으로 전용차로를 도입하기에 앞서 고속도로 접속부 및 연결도로의 용량이나 속도, 교통량 등에 기반하여 구간별 운영전략 수립이 필요할 것으로 보인다. 또한, 현 도로 용량의 한계로 인해 1개 차로를 자율주행화물차만으로 운영하기 위해서는 자율주행화물차 비율(MPR)이 최소 50%를 초과한 어느 시점에서만 가능하므로, 전용차로를 도입해야 한다면 비자율차와 자율차 모두에게 동일한 편익을 가져올 수 있는 MPR에 대한 후속 연구가 이루어져야 할 것이다.

본 연구는 화물차의 위치에 따라 앞 차량이 선두차량이 되는 군집모델로 분석을 진행하였지만 화물차의 성능이나 제동력, 전폭 및 전고에 따라 군집을 형성할 수 있는 차량이 차종별로 상이하거나 군집 운행허가나 예약제 형태로 군집주행이 운영된다면 이를 알고리즘에 반영하여 군집모델을 수립해야하므로 이에 대한 추가연구가 이루어져야 할 것이다. 또한, 자율주행화물차가 네트워크에 새롭게 들어와도 비자율차의 운전행태(Driving Behavior)가 기존과 달라지지 않는다고 가정하였으나, 대규모 군집주행 시 비자율차의 회피행동이 나타나 네트워크의 평균속도나 처리량, 안전성 모두 감소할 수도 있으므로 향후 모의 주행실험 등을 통해 비자율차의 운전행태에 대해 연구할 필요가 있다. 더불어, 본 연구에서 안전 측 효과지표로 설정한 상충률 지표는 후미추돌 상충에 한한 것으로 진출입구간의 경우 차선변경으로 인한 측면충돌 상충 등 안전과 관련된 추가연구가 필요하다. 마지막으로, 시뮬레이션 실험이 현실을 모사함에도 불구하고 한계점은 분명히 존재하므로 향후 국내의 군집주행 시험주행 데이터가 축적되면 이와 연계한 후속 연구가 꼭 필요하다.

그럼에도 본 연구의 분석 결과는 향후 실 도로에서의 군집주행 실증실험이 필요할 때 기초자료로써 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 향후에는 실제 도로에서의 운영된 시험주행 데이터와 함께 실 도로 상에 나타나는 터널, 요금소가 위치한 고속도로 광장부, 종단경사 및 오르막차로 등의 기하구조적 조건이나 버스전용차로 운영 여부 등 특정 구간의 특징을 반영한 연구를 추가로 진행하여 자율차와 비자율차가 공존하면서도 좀 더 안전하고 효율적인 도로가 운영될 수 있도록 자율주행시대를 대비하는 것이 필요할 것이다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 논문은 저자의 석사학위논문의 일부를 수정·보완하여 작성하였습니다.

REFERENCES

- ACEA(2017), <https://www.acea.be/publications/article/infographic-eu-roadmap-for-truck-platooning>
- Alam A., Besselink B., Turri V., Martensson J. and Johansson K. H.(2015), "Heavy-duty vehicle platooning for sustainable freight transportation: A cooperative method to enhance safety and efficiency," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 35, no. 6, pp.34-56.
- Arnaut G. M. and Arnaut J. -P.(2014), "Exploring the effects of cooperative adaptive cruise control on highway traffic flow using microscopic traffic simulation," *Transportation Planning and Technology*, vol. 37, no. 2, pp.186-199.
- Atkins(2016), *Research on the Impacts of Connected and Autonomous Vehicles (CAVs) on Traffic Flow*.
- Browand F., McArthur J. and Radovich C.(2004), *Fuel saving achieved in the field test of two tandem trucks*.
- Choe J.-S. and Kim Y.-R.(2001), "Development of Truck Performance Curves for Upgrade on Highways," *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 19, pp.119-129.
- Deng Q.(2016), "A general simulation framework for modeling and analysis of heavy-duty vehicle platooning," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 17, no. 11, pp.3252-3262.
- Enforcement Decree of the Road Traffic Act(Enforcement date 2020. 2. 4.).
- Enforcement Rules of the Road Traffic Act(Enforcement date 2020. 3. 25).
- Explanation of Rules on the Structure and Facilities of Roads(2013), MOLIT.
- Fritz H., Gern A., Schiemenz H. and Bonnet C.(2004), "CHAUFFEUR Assistant: a driver assistance system for commercial vehicles based on fusion of advanced ACC and lane keeping," Paper presented at the *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*.
- Glauz W. D. and Migletz D. J.(1980), Application of traffic conflict analysis at intersections (0077-5614), Retrieved from <https://trid.trb.org/view/153539>
- Ha T.-J., Park J. J., Park H. K. and Park C. M.(2002) "Development and Evaluation of Traffic Conflict Criteria at an intersection," *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 20, pp.105-115.
- Hall R. and Chin C.(2005), "Vehicle sorting for platoon formation: Impacts on highway entry and throughput," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 13, no. 5-6, pp.405-420.
- IT Chosun, http://it.chosun.com/site/data/html_dir/2019/11/12/2019111201789.html/, 2019.11.12.
- Jeong J. H., Park J. Y. and Oh C.(2020), "Assessing the Safety Effects of Expressway Managed Lane for Autonomous Bus Using Traffic Simulation," *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 38, pp.58-67.
- Jo Y., Kim J., Oh C., Kim I. and Lee G.(2019), "Benefits of travel time savings by truck platooning in Korean freeway networks," *Transport Policy*, pp.83, 37-45.
- Jo Y., Kwon K. and 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.
- Kesting A., Treiber M., Schönhof M. and Helbing D.(2008), "Adaptive cruise control design for active

- congestion avoidance,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 16, no. 6, pp.668-683.
- Korea Expressway Corporation Public Data Portal(2020), <http://data.ex.co.kr/>.
- KTDB(2018), *Freight in Korea*.
- Lammert M. P., Duran A., Diez J., Burton K. and Nicholson A.(2014), “Effect of platooning on fuel consumption of class 8 vehicles over a range of speeds, following distances, and mass,” *SAE International Journal of Commercial Vehicles*, vol. 7(2014-01-2438), pp.626-639.
- Lee S. and 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.
- Lee S. M.(2016), “A Basic Study on the Eco-friendliness of Autonomous Vehicles,” *KEI Working Paper*, pp.1-36.
- Ministry of Trade, Industry and Energy(2016), *A study on the possibility of electric cars operating on bus-only lanes*.
- Müller I. S.(2012), “The Impact of Electronic Coupled Heavy Trucks on Traffic Flow,” *Gateways*, vol. 10, no. 7.
- Oh S., Brief Y. and KRIHS J.(2017), “A Study on the Smart Transportation Infrastructure Policy to Respond to of the Age of an Autonomous Vehicle,” *KRIHS Policy Brief*, no. 637, pp.1-6.
- Oh S., Park J. and Yoon T.(2017), *A Study on the Smart Transportation Infrastructure Policy to Respond to of the Age of an Autonomous Vehicle*, KRIHS.
- Park I.-S., Lee J.-D., Lee J.-Y. and Hwang K.-Y.(2015), “Impacts of Automated Vehicles on Freeway Traffic-flow - Focused on Seoul-Singal Basic Sections of Gyeongbu Freeway,” *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport System*, vol. 14, no. 6, pp.21-36, doi:10.12815/kits.2015.14.6.021.
- Park Y.(2017), “The Trend of Dangerous Driving Behaviour Criteria based on Digital Tachograph,” *Auto Journal*, vol. 39, no. 9, pp.38-42.
- Peter Sukennik L. K. and PTV Group(2018), D2.3-default-behavioural-parameter-sets for Automated Vehicles (AVs). Retrieved from <https://www.h2020-coexist.eu/resources/d2-3-default-behavioural-parameter-sets-for-automated-vehicles-avs/>
- Ramezani H., Shladover S. E., Lu X.-Y. and Altan O. D.(2018), “Micro-Simulation of Truck Platooning with Cooperative Adaptive Cruise Control: Model Development and a Case Study,” *Transportation Research Record*, vol. 2672, no. 19, pp.55-65.
- Road Capacity Manual(2013), MOLIT.
- Road Traffic Act(Enforcement date 2020. 3. 25).
- Robinson T., Chan E. and Coelingh E.(2010), “Operating platoons on public motorways: An introduction to the sartre platooning programme,” Paper presented at *the 17th world congress on intelligent transport systems*.
- Shladover S. E., Su D. and Lu X.-Y.(2012), “Impacts of cooperative adaptive cruise control on freeway traffic flow,” *Transportation Research Record*, vol. 2324, no. 1, pp.63-70.
- Tsugawa S.(2014), “Results and issues of an automated truck platoon within the energy ITS project,” Paper presented at *the 2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings*.

- Van Arem B., Van Driel C. J. and Visser R.(2006), “The impact of cooperative adaptive cruise control on traffic-flow characteristics,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 7, no. 4, pp.429-436.
- Vander Werf J., Shladover S. E., Miller M. A. and Kourjanskaia N.(2002), “Effects of adaptive cruise control systems on highway traffic flow capacity,” *Transportation Research Record*, vol. 1800, no. 1, pp.78-84.
- VanderWerf J., Shladover S., Kourjanskaia N., Miller M. and Krishnan H.(2001), “Modeling effects of driver control assistance systems on traffic,” *Transportation Research Record*, vol. 1748, no. 1, pp.167-174.
- Yang C. H. and Son Y. T.(2009), “Calibration of microscopic models of traffic flow,” *Transportation Technology and Policy*, vol. 6, no. 3, pp.229-237.
- Zhao L. and Sun J.(2013), “Simulation framework for vehicle platooning and car-following behaviors under connected-vehicle environment,” *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, vol. 96, pp.914-924.
- Zhong Z., Lee J. and Zhao L.(2017), “Evaluations of managed lane strategies for arterial deployment of cooperative adaptive cruise control,” Retrieved from <https://pdfs.semanticscholar.org/7b52/6c9d066f9b5094099b852c92baecbbaea8a0.pdf>