

고속도로 유입연결로 구간 화물차 군집운영전략 수립 방안 연구

이설영 · 오철*

한양대학교 교통·물류공학과

A Methodology to Establish Operational Strategies for Truck Platooning on Freeway On-ramp Areas

LEE, Seolyoung  · OH, Cheol* 

Transportation and Logistics Engineering, Hanyang University, Gyeonggi 15588, Korea

*Corresponding author: cheolo@hanyang.ac.kr

Abstract

Vehicle platooning through wireless communication and automated driving technology has become realized. Platooning is a technique in which several vehicles travel at regular intervals while maintaining a minimum safety distance. Truck platooning is of keen interest because it contributes to preventing truck crashes and reducing vehicle emissions, in addition to the increase in truck flow capacity. However, it should be noted that interactions between vehicle platoons and adjacent manually-driven vehicles (MV) significantly give an impact on the performance of traffic flow. In particular, when vehicles entering from on-ramp attempt to merge into the mainstream of freeway, proper interactions by adjusting platoon size and inter-platoon spacing are required to maximize traffic performance. This study developed a methodology for establishing operational strategies for truck platooning on freeway on-ramp areas. Average speed and conflict rate were used as measure of effectiveness (MOE) to evaluate operational efficiency and safety. Microscopic traffic simulation experiments using VISSIM were conducted to evaluate the effectiveness of various platooning scenarios. A decision making process for selecting better platoon operations to satisfy operations and safety requirements was proposed. It was revealed that a platoon operating scenario with 50m inter-platoon spacing and the platoon consisting of 6 vehicles outperformed other scenarios. The proposed methodology would effectively support the realization of novel traffic management concepts in the era of automated driving environments.

Keywords: automated vehicle platooning, cooperative automated driving, heavy vehicle, micro traffic simulation, operation strategy

초록

차량의 자율주행기술과 차량간 무선통신을 통한 정보공유 군집주행 서비스가 실현되고 있다. 군집주행이란 여러대의 차량이 최소한의 안전거리만 유지한 채 일정한 간격을 두고 주행하는 기술이다. 이러한 군집주행은 도로의 용량을 증대시키고, 안전성을 향상시키며, 연료소비를 줄일 수 있는 잠재력을 가지고 있어 교통류 운영효율성, 안전성, 환경성 문제를 해결할 수 대안으로 주목받고 있다. 그러나 군집주행차량과 주변의 일반차량간의 적절한 상호작용이 가능할 때

J. Korean Soc. Transp.
Vol.36, No.2, pp.67-85, April 2018
<https://doi.org/10.7470/jkst.2018.36.2.067>

pISSN : 1229-1366
eISSN : 2234-4217

ARTICLE HISTORY

Received: 26 September 2017

Revised: 11 November 2017

Accepted: 14 February 2018

Copyright ©
Korean Society of Transportation

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

교통류의 성능은 최적화 될 수 있다. 특히 교통운영 관리자는 화물차가 군집주행을 할 경우 유입연결로에서 비자율차가 안전하게 진입할 수 있도록 군집간간격과 군집크기와 같은 군집주행 파라미터를 조정하여 안전성과 운영효율성을 극대화시킬 수 있어야 한다. 본 연구에서는 고속도로 유입연결로 구간에서 교통류 퍼포먼스를 극대화시킬 수 있는 화물차 군집 운영전략을 수립할 수 있는 방안을 제시하였다. 운영효율성을 평가하기 위한 지표는 주행속도로 설정하였으며, 안전성 평가를 위해서 비자율차의 차량추종 관계 대비 상충상황에 노출되는 빈도를 나타내는 비자율차 상충률의 개념을 정의하여 적용하였다. 또한 분석결과를 이용하여 최적 군집운영 조건을 판단하는 방법론을 제시하였으며, 군집간간격이 50m이고 군집크기가 6대인 운영시나리오가 최적의 성능을 유도할 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서 제시한 운영전략 수립 방안에 따라 운영효율성과 안전성을 고려한 교통상황별 적정 군집주행 파라미터를 도출할 수 있으며, 이는 군집운영 전략을 지원할 수 있는 자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

주요어: 군집주행, 미시교통시물레이션, 운영전략, 자율협력주행, 화물차

서론

현재 첨단안전장치가 장착된 차량이 확대되고 있으며, 개정된 자동차 및 자동차부품의 성능과 기준에 관한 규칙에 따르면 대형 상용차에 대해 차로이탈경고장치(Lane departure warning system, LDWS)와 자동비상제동장치(Advanced emergency braking system, AEB)가 의무화되었다. 최근 버스와 화물차의 잇따른 사고에 따라 상용차의 첨단화 확대의 필요성이 제기되고 있다. 상용차의 경우 사고발생시 승용차보다 차량의 중량이 크기 때문에 교통사고 발생 시 심각도가 높게 나타날 수 있으며, 장거리 주행으로 피로가 누적되는 사업적 특성으로 인해 졸음과 같은 인적요인으로 인한 사고가 많이 발생한다는 특징을 가지고 있다(Choi et al., 2013). 특히 화물차의 경우 고속도로에서 심야 또는 장거리 운행이 빈번하기 때문에 자율주행을 통한 군집주행이 도입될 경우 운전자의 피로도 누적으로 인해 발생하는 사고의 감소와 차량간간격의 감소로 인한 운영효율성 증대 효과도 기대할 수 있다.

군집주행(Platooning)은 여러대의 차량들이 최소한의 안전거리만을 유지한 채 도로위의 기차처럼 일정한 간격으로 두고 주행하는 방식을 의미하며, 이는 교통운영효율성과 안전성을 향상시킬 수 있는 잠재력을 가지고 있는 것으로 기대되는 방식이다(Segata et al., 2014; Zheong et al., 2016). 자율주행자동차가 군집주행하기 위해서는 인접차량과 적정 거리를 유지할 수 있어야 한다. 전방의 차량을 인지할 수 있는 자율주행 기술로는 ACC (Adaptive cruise control)와 CACC (Cooperative adaptive cruise control)가 있다. ACC는 차량내 센서를 이용하여 주변의 차량을 감지하고 거리를 조절하게 된다. CACC 시스템의 경우 ACC기술에 차량 간 통신(V2V)을 접목시켜 주변차량의 정보와 인접하지 않은 차량의 정보를 수집하여 전방의 위험상황에 보다 능동적으로 대응할 수 있다. 따라서 CACC차량이 군집주행을 할 경우 차간 간격을 좁힐 수 있으며, 이에 따라 운영효율성과 안전성이 높아질 것으로 기대된다.

그러나 화물차가 군집주행하는 상황에서 비자율차와 혼재하는 경우, 군집으로 인해 비자율차량이 영향을 받을 수 있다(Lee et al., 2017; Suh et al., 2017). 특히 유입연결로에서 진입하는 비자율차량이 안전하고 원활하게 본선으로 진입하도록 유도하여 교통류의 운영효율성이 저하되지 않도록 군집을 관리할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 고속도로 유입연결로 구간에서 운영효율성과 안전성을 고려하여 화물차 군집운영전략을 수립하는 방안을 제시하였다. 이러한 군집 운영관리 전략을 수립하기 위해서는 군집주행 파라미터에 따른 영향을 파악해야 한다. 그러나 완전자율주행이 가능한 자율주행자동차가 실제로 보급되지 않았으며, 안전성이 보장되지 않은 상태에서의 실차 실험은 어려운 상황이다. 이러한 한계점을 극복하기 위해 교통시물레이션을 이용할 수 있으며, 다양한 시나리오를 구현하여 상황별 자율주행자동차에 따른 영향을 분석할 수 있다(Davis, 2004). 본 연구에서는 미시적 교통류 시물레이션 프로그램인 VISSIM을 이용하여 군집주행이 교통류에 미치는 영향을 다양하게 분석하였다. 화물차의 군집주행은 VISSIM의 Driving Behavior 파라미터를 조정하여 구현하였으며, 분석시나리오는 군집유무, 본선교통량, 진출입교통량, 화물차비율, 군집크기, 군집간간격을 고려하여 설정하였다. 또한 분석결과를 활용하

여 최적 군집운영 조건을 결정하는 군집운영전략 수립 방안을 제시하였다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 자율주행과 군집주행에 대한 기존 연구동향을 파악하였으며, 기존 연구와의 차별성을 제시하였다. 3장에서는 시나리오 환경구현, 군집주행 구현방법, 시나리오 평가 지표를 분석방법론에 제시하였다. 4장에서는 시뮬레이션 수행방안과 운영효율성과 안전성 측면의 분석결과를 각각 제시하였다. 5장에서는 군집 운영조건 판단 알고리즘 및 이를 활용한 군집운영전략 수립 방안 및 새로운 군집운영전략을 제시하였다. 마지막으로 6장에서는 결론 및 향후연구를 제시하였다.

기존 문헌 고찰

본 연구의 문헌 검토는 체계적인 시뮬레이션 시나리오 수립과 분석결과의 활용성을 도출하기 위해 자율주행 관련 연구와 군집주행 관련 연구를 중심으로 수행하였으며, 기존 연구와의 차별성을 제시하였다.

1. 자율주행 관련 연구

자율주행자동차가 실제 도로에서 주행하는 실험을 진행하는 것은 법적인 측면과 안전성 보장에 있어 한계가 있으므로 이에 대한 연구는 시뮬레이션을 통해 진행할 수 있다(Davis, 2004). 많은 연구들이 교통시뮬레이션을 이용하여 자율주행 관련 연구를 진행하고 있으며, 안전성, 운영효율성, 환경성 관점에서 자율차가 교통류에 미치는 영향을 분석하였다. Van Arem et al.(2006)는 CACC가 교통류 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 분석결과 자율주행차량의 MPR (market penetration rate)이 60% 이상일 경우는 운영효율성에 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다. Aria et al.(2016)은 교통시뮬레이션인 VISSIM의 내부 파라미터를 조정하여 자율차 및 자율주행 환경을 구현하였으며, 모든 차량이 자율차인 상황에서 교통류 운영효율성이 증대되고 서비스 수준이 낮은 혼잡한 상황일수록 운영효율성 증대에 더욱 효과적인 것으로 나타났다. Zhong et al.(2017)은 CACC에 대한 관리차로 전략 3가지를 운영효율성 측면에서 분석하였으며, 첫번째는 CACC 혼재상황(mixed-traffic), 두번째는 CACC 제한 차로(restricted CACC lane), 마지막으로는 CACC 전용차로(dedicated CACC lane)이었다. 분석결과, CACC 전용차로는 MPR이 일정 수준이 되지 않을 경우 운영효율성 측면에서 부정적인 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 반면 다른 전략의 경우 운영효율성을 증대시키는 것으로 나타났으며, MPR에 따라 정지체시간을 5-25% 감소시키는 것으로 분석되었다. Kesting et al.(2008)은 운영효율성과 안전성 측면에서의 ACC의 효과를 분석하였으며, 정체가 발생하는 시간대의 On-ramp를 분석 대상구간을 설정하였다. 분석결과, 자율차가 증가함에 따라 교통안정성이 증대되며, MPR이 25% 이상인 상황에서 정체가 해소되는 것으로 나타났다. Shladover et al.(2012)는 MPR에 따라 ACC와 CACC가 고속도로 운영효율성에 미치는 영향에 대한 분석을 수행하였으며, ACC 차량의 도입은 운영효율성에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으나 CACC는 보급률이 높을수록 용량을 증가시키는 것으로 분석되었다. 또한 커넥티드카(connected car)와 자율차에 대한 연구도 수행되고 있다(Jeong et al., 2014, Talebpour et al., 2016).

2. 군집주행 관련 연구

Zhao et al.(2013)은 무선통신과 지능형 정보 기술의 발달이 자율주행자동차 군집주행의 가능성을 높이고 있으며, 군집주행이 교통류에 미치는 영향 및 효과가 주목받고 있음을 밝혔다. 특히 CACC 시스템의 경우 ACC와 달리 차량 간 통신(V2V)을 이용하여 주변차량의 정보를 수집하여 차량간간격을 좁혀 교통류 운영효율성의 증진을 유도한다. 그러나 군집주행은 통신을 원활하게 하는 인프라나 전용 차선이 존재할 때 효과가 극대화될 것으로 판단되며, 자율차의 시스템 보급률도 교통류 성능에 영향을 미친다(Jeong et al., 2017; Vanderwerf et al., 2001). Amoozadeh et al.(2015)는 CACC 차량의 군집관리를 위한 군집주행 전용차로, 군집형성, 군집해체전략 등을 제시하였으며, 군집 크기가 커짐에 따라 네트워크의 통과교통량이 증가하는 것으로 나타났다. Talebpour et al.(2016)은 첨단기술 차량

의 효과를 분석하고자 비자율차, 자율차, 커넥티드카를 분석 대상으로 설정하였다. 분석결과 군집의 크기가 줄어들고 MPR이 증가함에 따라 안전성이 증대되었으며, 자율차는 같은 MPR수준에서 커넥티드카보다 통과교통량이 많은 것으로 분석되어 운영효율성이 증대되는 것으로 나타났다. Su et al.(2016)은 비콘 메시지 교환을 통한 군집형성 방법을 제안하였으며, 분석결과 평균 8대의 군집크기일 때 운영효율성이 극대화되는 것으로 나타났다. Park et al.(2015)는 행위자기반모형을 활용하여 고속도로 교통시스템을 하나의 복잡계로 보고 CACC시스템과 군집주행, 차선유지 보조시스템을 결합한 자율차의 효과를 분석하였다. 분석결과, MPR이 높아짐에 따라 시간 및 공간평균속도가 감소하는 것으로 나타났으며, 도로의 용량은 증대하는 것으로 분석되었다. 또한 군집주행 관련 연구로 통신환경과 통신알고리즘에 따른 군집주행의 행태변화에 대한 연구가 진행되어 왔으며, 운영효율성과 개별차량의 안전성 측면의 효과를 분석하였다(Fernandes et al., 2012; Saeednia et al., 2017; Santini et al., 2017). Larsson et al.(2015)는 화물차 군집주행의 필요성을 제시하며, 연료소모를 최소화하는 화물차 군집의 이동노선에 대한 연구를 진행하였다.

기존 연구에서 분석대상으로 설정한 군집주행 관련 파라미터는 군집크기(Platoon size), 군집내간격(Intra-platoon spacing), 군집간격(Inter-platoon spacing)으로 정리할 수 있다. 군집크기는 군집내 차량의 대수를 의미하며, 군집내간격은 한 군집내의 존재하는 여러대의 개별 차량간의 간격이다. 또한 군집간격은 두 군집사이의 간격이다. Figure 1에는 이러한 군집주행 파라미터의 개념을 도식화하였다. 또한 기존연구에서 분석한 군집 파라미터의 값을 Table 1에 제시하였다.



Figure 1. Parameters for platoon operations

Table 1. Platooning parameters of literature reviews

Author	Contents	Platooning parameters			
		Platoon size	Intra-platoon spacing	Inter-platoon spacing	Speed
Gouy et al.(2014)	Influence of heavy vehicle platoon movement on adjacent vehicles	4	7.5m/35m	55m	89.99km/h
Amoozadeh et al. (2015)	CACC platooning strategy	7	11m	70m	Maximum: 108km/h Maintenance: 72km/h
di Bernardo et al. (2015)	Analysis of platooning behavior	8	22.16m	-	Initial speed: 99.72km/h
Tuchner et al. (2015)	Platooning behavior using interpolation	-	3-30m	-	Minimum: 0 Maximum: 61.2km/h Maintenance: 54km/h limited speed: 110km/h
Park et al.(2015)	CACC platooning	-	6m	-	Initial speed: 72km/h
Lei et al.(2011)	String stability strategy of platooning	10	Time headway: 2s, 1.5s, 1.0s, 0.9s, 0.8s, 0.7s, 0.6s, 0.5s	-	
Santini et al. (2017)	Change in platooning behavior while forming platoons	8,16	Time headway: 0.8s	-	80km/h

3. 기존 연구와의 차별성

자율주행 관련 연구에서는 시뮬레이션을 이용하여 ACC, CACC, 커넥티드카의 운영효율성 측면의 효과를 분석하는 논문이 대다수였으며, 자율차의 안전성과 환경성을 다루는 기존의 연구들이 일부 존재하였다. 또한 군집주행의 기대효과에 따라 군집주행과 관련된 연구도 점차 활발해지고 있다. 기존에 진행된 군집주행 관련 연구에서는 군

집주행 적용에 따른 교통류 운영효율성의 변화와 군집주행차량의 개별적인 안전성을 분석하는 연구가 대부분이었다. 그러나 다양한 교통상황을 고려한 군집주행 파라미터의 조절을 통한 교통류의 성능을 최적화하고자 하는 군집 운영전략에 대한 연구는 부족하였다. 한편 상용화물차의 경우 법제도상 지정된 차로에서만 주행할 수 있으며, 승용차에 비해 군집의 길이가 길기 때문에 주변 차량이 영향을 많이 받을 수 있다. 그러나 주변 비자율차의 안전성에 대한 연구가 부재한 상황이었다. 따라서 교통운영관리 측면에서 교통류의 운영효율성과 안전성을 높이기 위해 군집주행 파라미터에 따른 영향을 파악하는 분석이 필요하며, 이를 통해 군집운영전략을 수립할 수 있는 방안에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 본 연구는 차로변경이 잦은 유입연결로에서 화물차 군집주행 시 군집크기, 군집간간격 그리고 교통상황에 따른 변화를 파악하고, 군집주행 운영 관리전략 수립 방안을 위한 기반을 마련한다는 점에서 기존연구와 차별성을 가진다. 화물차 군집주행에 대한 개념도는 Figure 2에 제시하였다.

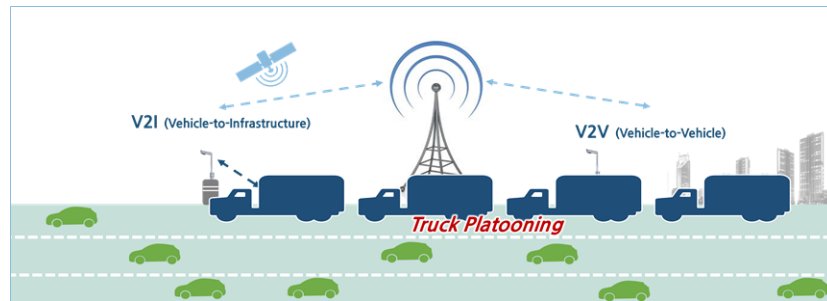


Figure 2. Heavy vehicle platooning

분석방법론

분석방법론에서는 분석 시나리오와 시뮬레이션 환경 설정 및 군집주행 구현 방안을 제시하였으며, 운영효율성과 안전성 지표를 산출하는 방법을 제시하였다. 분석방법론을 포함한 연구의 흐름도는 Figure 3에 나타났다.

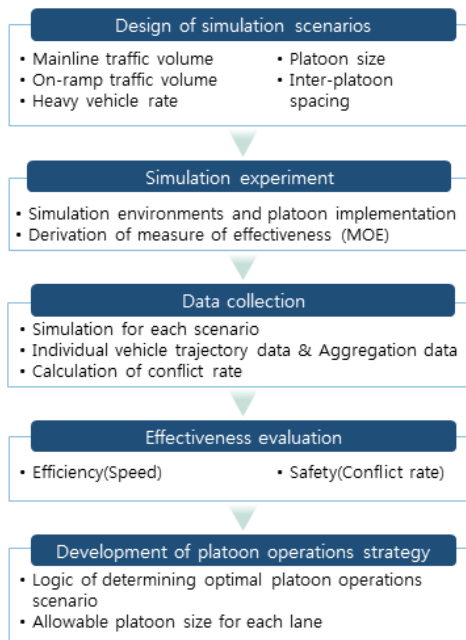


Figure 3. Study flow

1. 시뮬레이션 환경 구현

1) 네트워크 설정

분석네트워크는 총 2.5km로 유입연결로가 포함된 가상의 고속도로로 설정하였다. 정산은 수행하지 않았으나 다양한 교통상황을 고려한 시나리오를 설정하였다. 모든 구간은 직선이며 유입연결로를 제외하고 기하구조의 변경이 없는 구간이다. 네트워크 설정 시 도로교통법 시행규칙 제39조 “고속도로에서의 차로에 따른 통행구분”에 따라 차로별 적정 군집크기에 대한 분석이 가능한 편도 3차로로 설정하였으며, 화물차는 3차로로 주행해야하는 것으로 제한하였다. 또한 도로의 구조·시설기준에 관한 규칙해설(2013)의 연결로 접속부 합류구간 기준에 따라 도로기하구조 조건을 적용하였으며, 구배는 없는 것으로 가정하였다. 유입연결로는 1차로이며, 진입하는 차량은 모두 승용차로 초기속도는 60km/h이다.

2) 시나리오 구성 및 화물차 군집 설정

시뮬레이션 시나리오는 군집유무, 본선교통량, 진입교통량, 화물차비율, 군집크기, 군집간간격을 고려한 총 720개의 시나리오이다. 본선교통량과 진입교통량 모두 서비스수준 A-D까지 경우의 수가 각각 4가지이며, 도로용량편람(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2013)에서 제시하는 고속도로의 서비스 수준별 교통량을 적용하였다. 불안정한 교통류인 LOS E, F상황은 군집에 따른 영향보다 교통량에 따른 영향이 클 것으로 판단하여 분석 시나리오에서 제외하였다. 교통량은 중차량 비율에 따라 중차량 보정계수를 반영하였으며, 화물차비율은 교통량 정보 제공 시스템에서 제시하는 2016년 화물차 평균 구성비 25.1% 이하의 값인 5%, 10%, 15%, 20%, 25%을 설정하였다. 군집주행이 도입된 경우의 시나리오는 군집주행 파라미터를 시나리오에 반영하였다. 검토한 대부분의 기존 문헌에서 설정한 군집크기가 10대 이하임을 고려하여, 본 연구에서는 군집크기를 4대, 6대, 8대, 10대로 적용하였다. 군집간간격은 기존문헌의 범위와 100km/h로 주행할 때의 안전거리인 100m를 참고하여 50m와 100m로 설정하였다. 이때 모든 화물차의 크기와 군집내 간격은 동일한 것으로 가정하였다. 화물차의 크기는 현대 엑시언트 10x4 카고의 크기인 12.8m를 이용하였으며, 군집내간격은 European Truck Platooning Challenge 2016에 참가한 차량 제조사 MAN의 군집간간격인 10m를 이용하였다(Eckhardt, 2016). 앞서 언급한 화물차 군집설정 파라미터에 따라 계산한 군집크기별 군집길이는 Figure 4에 제시하였으며, 시뮬레이션 세부항목은 Table 2에 제시하였다.

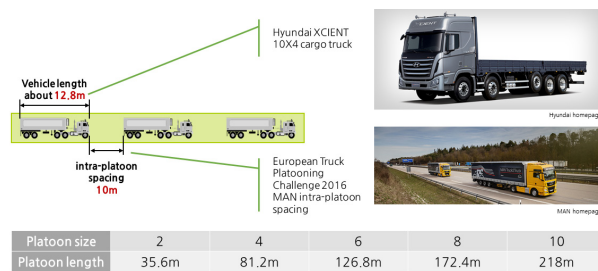


Figure 4. Specification of heavy vehicle platoon

Table 2. Details of simulation scenario

		Separation	Number of cases	Details
Without platoon	Mainline volume (LOS)		4 cases	A, B, C, D
	On-ramp volume (LOS)		4 cases	A, B, C, D
	Percentage of heavy vehicles in traffic stream		5 cases	5%, 10%, 15%, 20%, 25%
With platoon	Mainline volume (LOS)		4 cases	A, B, C, D
	On-ramp volume (LOS)		4 cases	A, B, C, D
	Percentage of heavy vehicles in traffic stream		5 cases	5%, 10%, 15%, 20%, 25%
	Platoon size		4 cases	4, 6, 8, 10 vehicles
	Inter-platoon spacing		2 cases	50m, 100m

2. 군집주행 구현

네트워크상의 자율주행자동차는 기존문헌에서 제시한 VISSIM 자체 파라미터 값을 조정하여 구현하였다(UK Department of Transportation, 2016). 미국자동차공학회(SAE)에서 정의한 자율주행단계 중 level 4에 해당하는 차량에 해당하는 값을 이용하였으며, VISSIM에서 조정한 파라미터 값은 Table 3에 제시하였다. 군집주행의 경우 군집내간격은 일정한 간격으로 설정하여 군집차량군을 한 차종으로 설정하고 차량 모델을 새롭게 형성하여 구현하였다. 군집의 차량행태 파라미터는 자율차와 동일하게 설정하였으며, 군집간간격을 유지하기 위해 VISSIM Wiedemann 99 model의 파라미터를 이용하여 군집간간격을 설정하였다. 화물차의 경우 모두 자율차이며 군집주행을 하는 것으로 가정하였으며, 군집형성 및 해체는 고려하지 않았다. 본 연구에서 설정하는 군집간간격인 50m와 100m를 구현하기 위해 Equation 1을 이용하였다. VISSIM에서 차량간의 간격은 car following model의 거리관련 파라미터를 이용하여 구현되며, Equation 1은 간격을 유지하기 위한 정지거리(CC0)와 차두시간(CC1)의 관계를 나타낸다.

$$\text{Inter-platoon spacing} = CC0 + CC1 * \frac{100}{3.6} \quad (1)$$

Table 3. Platooning implementation parameters

Division	Code	Definition	VISSIM default	Automated vehicle (SAE level 4)	Platoon
Spacing	Standstill distance (CC0)	The desired distance between stopped vehicles	1.50m	0.5m	10m
	Headway time (CC1)	Headway (in seconds)	0.90s	0.6s	1.4s/3.2s
	Following variation (CC2)	The distance in addition to the allowed safety distance that is permissible before the vehicle-drive unit moves closer to the preceding vehicle	4.00m	0m	0m
Speed	Threshold for entering following (CC3)	Seconds before reaching the safety distance the driver starts to decelerate	-8.00s	0s	0s
	Negative following threshold (CC4)	The maximum allowable speed difference when following vehicle is slower than preceding vehicle	0.41km/h	0km/h	0km/h
	Positive following threshold (CC5)	The maximum allowable speed difference when following vehicle is faster than preceding vehicle	0.41km/h	0km/h	0km/h
Acceleration	Speed dependency of oscillation (CC6)	Influence of distance on speed oscillation	11.44	0	0
	Oscillation acceleration (CC7)	Influence of vehicle acceleration during car following oscillation	0.25m/s ²	0.4m/s ²	0.4m/s ²
	Standstill acceleration (CC8)	Desired acceleration when starting from standstill	3.50m/s ²	3.8m/s ²	3.8m/s ²
Others	Acceleration with 80km/h (CC9)	Desired acceleration at 80km/h	1.50m/s ²	1.8m/s ²	1.8m/s ²
	Lookahead distance observed vehicles	Number of vehicles that can vehicle can see forward on the link	2vehicles	10vehicles	10vehicles
	Smooth closeup behavior	Vehicles slow down more evenly when approaching a standing obstacle	No	Yes	Yes

3. 시나리오 평가 지표

운영효율성을 나타내는 지표로는 분석 네트워크를 주행하는 동안의 평균 주행속도(kph)를 이용하였다. 평균주행속도는 도로구간의 흐름 상태를 나타내고 평가할 수 있는 지표로서 사용될 수 있다(Joo et al., 2016). 안전성을 나타내는 지표로는 상충률(Conflict rate, CR)을 정의하였으며, 기존의 연구에서 사용되는 상충건수를 활용하여 본 연구에서 새롭게 제시한 지표이다. 상충률은 시간당 차량추종 건수 대비 후미추돌 상충건수를 의미한다(후미추돌 상충건수/차량추종건수/시). 즉, 두 차량의 차량추종 관계 대비 상충으로 판단되는 횟수를 의미하므로 비율의 개념으로 볼 수 있다. 이 때 차량추종은 대상차량이 전방차량을 추종하는 관계를 의미한다. 후미추돌 상충건수는 시뮬레이션에서 도출되는 SD (safety distance)와 FD (follow distance)를 이용하여 계산할 수 있으며, 상충은 SD가 FD보다 클 경우를 의미한다. 즉 차량추종 시 최소안전거리가 실제 측정된 두 차량 간 간격보다 긴 경우이며, 상충판단 방법은 Equation 2에 제시하였다. 본 연구에서는 안전성을 나타내는 지표로 비자율차의 상충률을 이용하였으며, 자율차는 위험상황을 자동으로 인지하고 기계적으로 위험상황을 회피하므로 상충분석대상에서 제외하였다. 상충건수(C)를 계산하는 수식은 Equation 3에 제시하였으며, 모든 분석시간(t)동안 모든 차량(N)에 대한 상충건수를 계산하였다. 분석 시, 각 time step은 i 로 개별 비자율차는 j 로 정의하였다. 차량추종 건수(F)는 Equation 4에 제시하였으며, 추종하는 이벤트(*following*)를 분석시간(t) 모든 차량(N)에 대하여 계산하였다. 비자율차의 상충률(CR)은 대상차량이 비자율차일 때를 기준으로 전방차량이 자율차(AV)일 때 또는 비자율차량(MV)일 때의 상황에 대한 상충률을 계산하였다. 상충률의 산출방법은 Equation 5에 제시하였으며, 수식에서 대상차량은 위 첨자로 전방차량은 아래첨자로 표현하였다.

$$Conflict\ determination = \begin{cases} Conflict & , SD > FD \\ Not\ conflict & , SD \leq FD \end{cases} \quad (2)$$

$$C = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^N \quad (3)$$

$$F = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^N \quad (4)$$

$$CR^{MV} = \left(\frac{C_{AV}^{MV}}{F_{AV}^{MV}} + \frac{C_{MV}^{MV}}{F_{MV}^{MV}} \right) * \frac{3600}{t} \quad (5)$$

where,

SD : Safety distance

FD : Follow distance

C : # of conflicts

i : Simulation time

j : # of MVs

t : Analysis time(sec)

N : Total # of vehicles

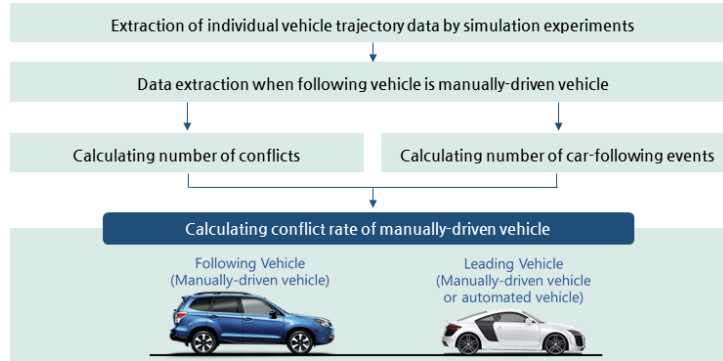


Figure 5. Procedure for calculating conflict rate

시뮬레이션 분석 및 평가

본 연구에서는 VISSIM을 이용하여 시뮬레이션 실험을 진행하였으며, 720개의 시나리오에 대한 분석을 수행하였다. 시뮬레이션의 신뢰성을 높이기 위해서 Random seed(난수)를 다르게 적용하여 각 시나리오를 5회 수행한 후 분석결과는 5회 수행결과의 평균값을 제시하였다. 시뮬레이션 분석시간은 1800초(30분)으로 설정하였으며, Warm-up은 400초로 설정하였다. 이는 분석 네트워크 전체에 교통량이 고르게 분포된 이후에 분석을 수행하기 위함이다. 분석결과는 시나리오 구성요소에 따른 주행속도와 비자율차 상충률 패턴을 비교하였으며, 이를 통해 교통조건별 운영효율성 및 안전성을 평가하였다.

1. 군집주행 도입 전후 비교

군집주행 파라미터에 따른 교통 퍼포먼스 분석에 앞서 군집주행 도입 전후의 운영효율성과 안전성을 비교하였다. 군집주행 유무에 따른 모든 시나리오의 평균과 표준편차를 Table 4에 제시하였으며, 분석결과, 군집주행 도입 시 운영효율성과 안전성이 다소 저하되는 것으로 나타났다. 운영효율성의 경우 군집유무의 평균주행속도의 차이가 0.81km/h인 것으로 나타났으며, 안전성의 경우 상충률의 차이가 0.09인 것으로 분석되었다. 이러한 분석결과는 유입연결로로 진입하는 비자율차의 영향으로 나타난 결과인 것으로 판단된다. 그러나 군집주행 상황에서 운영전략의 연속성을 유지하기 위해서는 유입연결로에서의 군집 운영 및 관리도 필요하다. 이에 따라 군집주행 파라미터에 따른 교통 퍼포먼스 변화를 추가적으로 분석하였다.

Table 4. Comparison of without platoon / with platoon

	Efficiency		Safety	
Average	Without platoon	With platoon	Without platoon	With platoon
Standard deviation	102.99	102.19	0.22	0.31
	2.02	3.48	0.10	0.13

2. 군집주행 상황에서의 운영효율성 분석

서비스 수준에 따른 운영효율성을 분석하기 위해, 본선의 서비스수준과 유입연결로 서비스수준에 따른 평균 주행속도를 군집간격과 군집크기별로 분석하였다. 분석결과, 군집간격에 따른 패턴의 차이는 뚜렷하지 않은 것으로 나타났으며, 본선교통량과 진입교통량이 증가할수록 평균 주행속도가 감소하는 경향을 나타냈다. 본선의 서비스 수준에 따른 군집크기별 평균주행속도의 패턴은 Figure 6에 제시하였으며, 이에 대한 통계적인 차이를 검증하기 위한 분산분석 수행결과는 Table 5에 제시하였다. 분석결과, 군집크기는 95% 신뢰수준에서 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다. 군집크기의 구체적인 차이를 확인하기 위하여 사후검정을 수행하였으며, 모든 교통상황에서 군집크기가 6대 이상인 경우에는 운영효율성의 차이가 크지 않은 것으로 분석되었다.

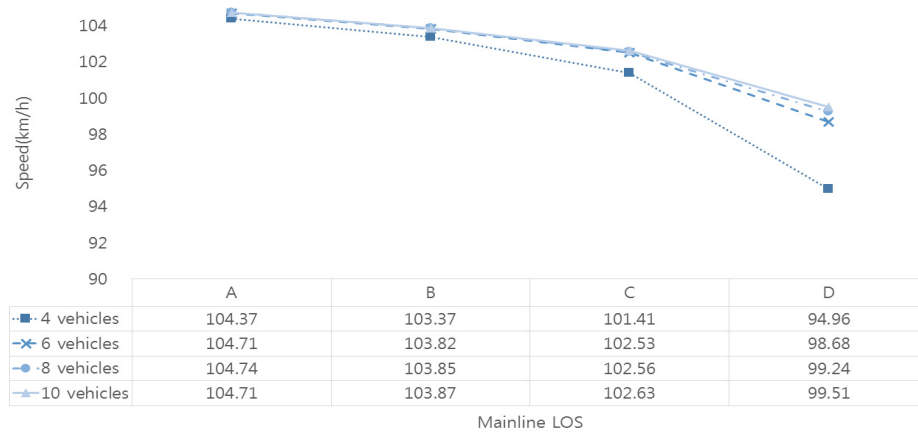


Figure 6. Average speed by mainline LOS

Table 5. Efficiency results of ANOVA (platoon size)

ANOVA					
	Sum of squares	d.f	Mean square	F	Sig.
Between groups	290.916	3	96.972	8.286	0.000
Within groups	7443.192	636	11.703		
Total	7734.108	639			

Post-Hoc test					
Section	N	Subset for alpha = 0.05		Sig.	
		1	2		
Scheffe	4	160	101.03		
	6	160		102.44	
	8	160		102.60	
	10	160		102.68	
	Sig.		1.000	0.937	

본선의 교통량 중 화물차의 비율에 따른 운영효율성을 파악하기 위하여, 화물차비율과 군집크기에 따른 평균 주행속도의 패턴을 Figure 7에 제시하였다. 또한 화물차 비율에 따른 평균 주행속도의 분산분석 결과는 Table 6에 제시하였다. 분석결과, 모든 군집크기에서 화물차 비율이 높아질수록 평균 주행속도가 다소 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 화물차가 5%인 경우와 25%인 경우의 평균 주행속도의 차이가 약 1km/h정도로 운영효율성 측면에서 화물차 비율의 영향이 크지 않은 것으로 나타났으며, 통계적으로도 차이가 없는 것으로 분석되었다. 화물차의 경우 도로기하구조와 화물차 무게가 주행속도에 많은 영향을 미치지만, 본 연구에서 설정한 분석대상구간은 평지인 직선 도로이기 때문에 화물차 비율에 따른 영향이 미비한 것으로 판단된다.

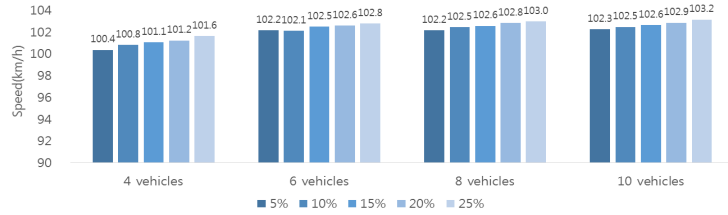


Figure 7. Average speed by heavy vehicle rates

Table 6. Efficiency results of ANOVA (heavy vehicle rates)

ANOVA					
	Sum of squares	d.f	Mean square	F	Sig.
Between groups	62.447	4	15.612	1.292	0.272
Within groups	7671.660	635	12.081		
Total	7734.108	639			

3. 군집주행 상황에서의 안전성 분석

교통안전성을 분석하기 위해 비자율차의 상충률을 분석하였다. 분석결과 On-ramp의 서비스 수준에 대한 영향보다 본선 서비스 수준의 영향이 큰 것으로 나타났으며, 운영효율성 지표와는 다르게 군집간간격에 따른 패턴의 차이가 있는 것으로 나타났다. 따라서 본선의 서비스 수준에 따른 군집크기별 상충률은 군집간간격에 따라 각각 제시하였으며, 이에 대한 분산분석 결과는 Table 7과 Table 8에 제시하였다. 분석결과, 두 군집간간격 모두 군집크기에 따른 상충률의 차이가 통계적으로 유의한 것으로 분석되었다.

Table 7. Safety results of ANOVA (platoon size at 50m inter-platoon spacing)

ANOVA					
	Sum of squares	d.f	Mean square	F	Sig.
Between groups	0.165	3	0.055	3.615	0.014
Within groups	4.811	316	0.015		
Total	4.976	319			

Post-Hoc test					
Section	N	Subset for alpha = 0.05			
		1		2	
Scheffe	6	80	0.266		
	8	80	0.282		0.282
	10	80	0.306		0.306
	4	80			0.325
Sig.			0.238		0.177

Table 8. Safety results of ANOVA (platoon size at 100m inter-platoon spacing)

ANOVA					
	Sum of squares	d.f	Mean square	F	Sig.
Between groups	0.131	3	0.044	2.700	0.046
Within groups	5.129	316	0.016		
Total	5.260	319			

Post-Hoc test					
Section	N	Subset for alpha = 0.05			
		1		2	
Scheffe	4	80	0.308		
	6	80	0.330		0.330
	8	80	0.331		0.331
	10	80			0.364
Sig.			0.710		0.394

군집간간격이 50m인 경우는 Figure 8에 제시하였으며, 모든 서비스 수준에서 군집크기가 6대, 8대일 때의 상충률이 비교적 낮은 것으로 분석되었다. 군집의 크기가 4대일 때는 전반적으로 상충률이 높은 것으로 나타났으며, 교통량이 많아질수록 다른 군집크기와의 상충률의 차이가 커지는 것으로 나타났다. 반면 군집간간격이 100m인 경우는 군집크기가 4대일 때 상충률이 가장 낮은 것으로 분석되었으며, 이러한 결과는 Figure 9를 통해 확인할 수 있다. 군집간간격에 따른 차이를 비교해볼 때 대체적으로 군집간간격이 100m인 경우보다 50m인 상황에서 안전성이 높은 것으로 확인되었다. 이는 군집간간격이 50m일 경우 군집간간격 사이로 차로변경이 어렵기 때문에 유입하는 비자율차는 군집이 지나가지 않거나 비자율차량들이 지나갈 때 차로변경을 하게 되고, 이에 따라 상충이 비교적 적게 발생하는 것으로 보인다.

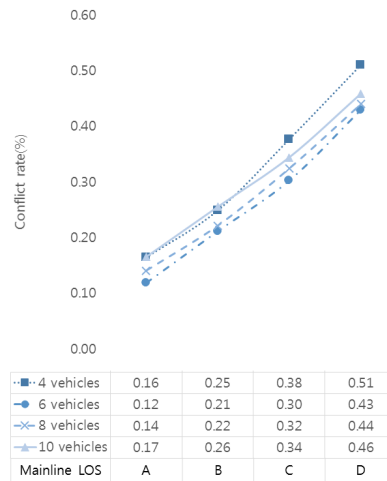


Figure 8. Conflict rate by mainline LOS (Inter-platoon spacing: 50m)

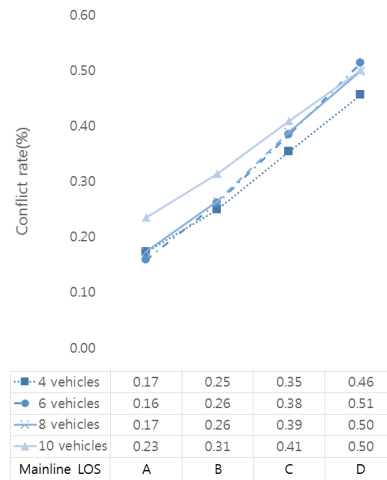


Figure 9. Conflict rate by mainline LOS (Inter-platoon spacing: 100m)

화물차 비율에 따른 상충률의 변화를 분석한 결과를 Figure 10에 제시하였으며, 이에 대한 차이를 통계적으로 나타내는 분산분석 결과는 Table 9에 제시하였다. 분석결과, 화물차 비율에 따른 상충률의 차이는 통계적으로 유의한 것으로 분석되었으며, 화물차 비율이 높아짐에 따라 상충률이 감소하는 것으로 나타났다. 또한 군집의 크기가 4대일 때 화물차 5%와 25%차이가 가장 작은 것으로 분석되었다. 이는 군집4대의 총길이가 짧기 때문에 진입하는 차량의 차로변경이 비교적 원활해 화물차 비율의 영향이 적은 것으로 판단된다.

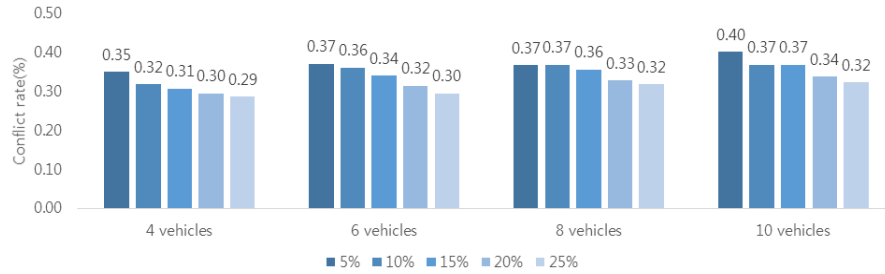


Figure 10. Conflict rate by heavy vehicle rates

Table 9. Safety results of ANOVA (heavy vehicle rates)

ANOVA					
	Sum of squares	d.f	Mean square	F	Sig.
Between groups	0.350	4	0.087	5.486	0.000
Within groups	10.127	635	0.016		
Total	10.477	639			

Post-Hoc test					
Section	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	
Scheffe	25%	128	0.280		
	20%	128	0.295	0.295	
	15%	128	0.320	0.320	0.320
	10%	128		0.330	0.330
	5%	128			0.345
Sig.			0.175	0.312	0.646

화물차 군집운영전략 수립 방안

본 연구에서는 고속도로 유입연결로 구간에서의 화물차 군집주행에 따른 교통류의 운영효율성과 안전성 분석을 통해 적정 군집주행 파라미터의 도출이 필요함을 확인하였다. 이러한 분석결과를 활용하여 화물차 최적 군집운영조건을 판단하는 방법론 및 미래 자율협력주행 환경에서의 교통 운영·관리전략을 제시하였다.

1. 화물차 최적 군집운영조건 판단 방법론

군집 운영 및 관리를 위해서는 운영효율성과 안전성을 모두 고려한 적정 군집크기를 판단할 필요가 있다. 그러나 군집간간격과 본선의 서비스수준에 따라 군집크기의 영향이 다른 것으로 분석되었으며, 일부 교통상황에서는 운영 효율성을 판단하는 평균 주행속도가 가장 작은 시나리오와 안전성을 나타내는 상충률이 최소가 되는 시나리오가 차이가 있는 것으로 나타났다. 이는 교통상황별 최적의 군집운영조건을 결정할 필요가 있음을 의미한다. 화물차 최적 군집운영조건을 판단하는 알고리즘은 Figure 11에 제시하였다.

최적 군집운영조건은 알고리즘에서 제시하는 운영효율성과 안전성의 성능감소 허용범위를 모두 만족해야한다. 이 때 성능감소 허용범위는 최적의 성능을 내는 시나리오와 동일한 성능을 보이는 것으로 간주할 수 있는 범위이다. 우선적으로 판단에 필요한 지표인 분석구간의 평균주행속도와 주행궤적 자료를 이용하여 비자율차 상충률을 각 시나리오별로 산출한다. 또한 분석결과에서 제시한 바와 같이 교통류 퍼포먼스 패턴에 영향을 미치는 요인을 도출해야한다. 본 연구에서는 시뮬레이션 분석결과를 바탕으로 본선의 교통량을 나타내는 서비스수준과 군집의 운영조건을 나타내는 군집크기와 군집간간격을 교통류에 영향을 미치는 요인으로 설정하였다.

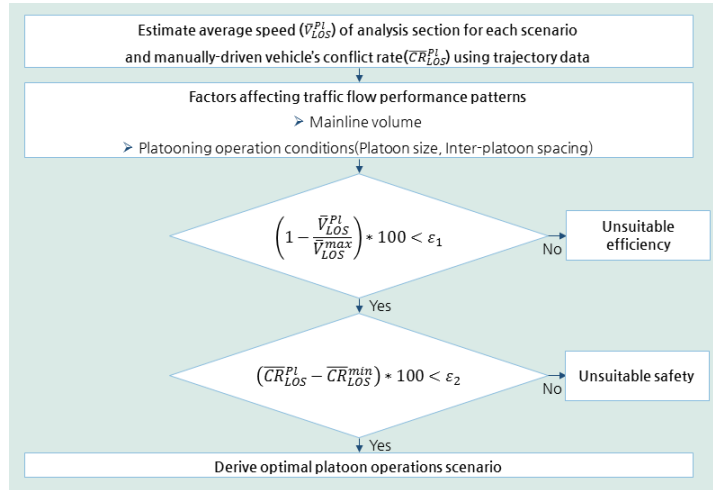


Figure 11. Algorithm for determining optimum platooning operation conditions

다음단계로 운영효율성 측면의 퍼포먼스가 적절한지 판단하기 위해 성능감소 허용범위를 설정하였다. 각 본선 서비스수준(LOS)별 최대 평균 주행속도(\bar{V}_{LOS}^{max})와 ϵ_1 이내의 차이가 발생하는 군집주행 파라미터 조합(P)별 시나리오(\bar{V}_{LOS}^P)는 최대 효율을 유도하는 시나리오와 성능의 차이가 없는 것으로 판단하고 운영효율성 측면의 적정 시나리오로 판단하였다. 적절한 운영효율성을 보이는지 판단하는 조건식은 Equation 6에 제시하였다. 운영효율성 측면에서 적합하다고 판단된 시나리오를 대상으로 안전성을 평가하게 된다. 안전성의 지표는 비자율차의 상충률로서, 상충률 자체가 비율의 의미를 포함하고 있기 때문에 Equation 7에 이를 반영한 조건식을 제시하였다. 군집주행 파라미터 조합별 각 시나리오의 상충률 값(\overline{CR}_{LOS}^P)을 서비스수준별 최소 상충률($\overline{CR}_{LOS}^{min}$)과 비교하여 ϵ_2 의 차이는 성능의 차이가 없는 것으로 판단하였다. 이러한 과정을 거쳐 판단된 최적 군집운영조건은 군집주행 파라미터인 군집크기와 군집간간격의 조합으로 나타낼 수 있다.

$$Efficiency\ determination = \begin{cases} Acceptable & ,\ if\ (1 - \frac{\bar{V}_{LOS}^P}{\bar{V}_{LOS}^{max}}) * 100 < \epsilon_1 \\ Unacceptable & ,\ if\ (1 - \frac{\bar{V}_{LOS}^P}{\bar{V}_{LOS}^{max}}) * 100 \geq \epsilon_1 \end{cases} \quad (6)$$

$$Safety\ determination = \begin{cases} Acceptable & ,\ if\ (\overline{CR}_{LOS}^P - \overline{CR}_{LOS}^{min}) * 100 < \epsilon_2 \\ Unacceptable & ,\ if\ (\overline{CR}_{LOS}^P - \overline{CR}_{LOS}^{min}) * 100 \geq \epsilon_2 \end{cases} \quad (7)$$

where,

\bar{V} : Average speed

\overline{CR} : Average conflict rate

LOS : Level of service

P : Platoon operation condition (platoon size, inter-spacing)

ϵ_1 : Tolerance of efficiency performance reduction (=1%)

ϵ_2 : Tolerance of safety performance reduction (=1% or 5%)

이러한 최적 군집운영조건 판단 방법론을 통해 적정 군집크기와 군집간간격을 찾을 수 있으며, 군집운영전략 수립 시 의사 결정을 지원할 수 있다. 또한 의사결정자의 판단에 따라 운영효율성과 안전성의 성능감소 허용범위를 결정할 수 있으며, 최적의 운영조건이 포함된 시나리오 중에서 군집의 파라미터를 선택하여 군집 운영 시 이용할 수 있다. 성능감소 허용범위는 교통운영전략을 수립함에 있어 목표로 설정한 교통류의 성능 수준을 판단할 때 이용될 수 있으며, 본 연구에서는 안전성의 성능감소 허용범위를 1%와 5%로 설정하여 분석을 진행하였다. 성능감소 허용범위가 1%인 경우의 분석결과는 Table 10에 제시하였으며, 성능감소 허용범위가 5%인 경우의 분석결과는 Table 11에 제시하였다. 서비스수준별 최소 상충률과의 차이가 1%인 경우, 군집간간격을 100m로 설정하는 것은 부적합한 것으로 분석되었다. 그러나 군집간간격이 50m이며 군집크기가 6대인 경우, 본선 서비스수준 A-D인 상황에서 운영효율성, 안전성 모두 적절한 것으로 판단되었다. 또한 본선 서비스수준이 B, D인 경우는 군집크기가 8대인 상황에서도 적합한 것으로 확인되었다. LOS C에서 군집간간격이 50m이고 군집크기가 8대인 경우는 적합하지 않은 것으로 판단되었다. 이는 운영효율성과 안전성 지표가 LOS B, D일 때와 큰 차이는 없으나 성능감소 허용범위에 따라 다른 결과가 나올 수 있음을 보여주는 단적인 사례가 될 수 있으며, 성능감소 허용범위를 적절하게 설정하는 것도 중요한 부분이다.

최소 상충률과의 차이가 5%인 경우, 군집간간격이 50m이고 서비스 수준이 비교적 낮은 C, D상황에서는 군집크기가 4대일 때 적합하지 않은 것으로 분석되었다. 반면 이를 제외한 군집간간격 50m인 상황에서는 모두 적합한 것으로 나타났다. 군집간간격이 100m인 경우에는 서비스수준이 A일 때는 군집크기가 4대이고, 서비스수준이 B일 때는 군집크기가 4,6대로 설정할 경우 운영효율성과 안전성 모두 적합한 성능을 보이는 것으로 분석되었다.

Table 10. Optimal scenarios (Tolerance of efficiency performance reduction:1%, Tolerance of safety performance reduction:1%)

		Platoon operation condition							
Inter-spacing		50m				100m			
Platoon size		4	6	8	10	4	6	8	10
LOS (main line)	A	x	○	x	x	x	x	x	x
	B	x	○	○	x	x	x	x	x
	C	x	○	x	x	x	x	x	x
	D	x	○	○	x	x	x	x	x

Table 11. Optimal scenarios (Tolerance of efficiency performance reduction:1%, Tolerance of safety performance reduction:5%)

		Platoon operation condition							
Inter-spacing		50m				100m			
Platoon size		4	6	8	10	4	6	8	10
LOS (main line)	A	○	○	○	○	○	x	x	x
	B	○	○	○	○	○	○	x	x
	C	x	○	○	○	x	x	x	x
	D	x	○	○	○	x	x	x	x

군집을 운영하기 위해서는 교통류 퍼포먼스를 높일 수 있는 전략을 구사할 필요가 있으며, 교통상황에 따라 최적의 군집운영조건을 파악하는 것이 중요하다. 운영효율성과 안전성을 각각 분석한 경우, 운영효율성 측면에서는 군집의 크기를 늘려 차량의 간격을 줄이는 것이 효과적이지만 안전성 측면에서는 군집내 차량의 대수가 증가할수록 유입연결로를 통해 진입하는 비자율차의 차로변경이 어려워져 상충률이 높아지는 것으로 나타났다. 그러나 운영효율성과 안전성의 성능감소 허용범위를 설정하고 최적의 화물차 군집운영조건을 파악하였을 경우, 적정 수준의 군집간간격과 군집크기가 존재하는 것으로 분석되었다. 군집간간격은 자율차의 안전거리와 기술에 따라 달라질 수 있으며, 군집운영전략을 수립하는 의사결정자는 이에 따른 적정 군집크기를 파악하고 적용하여 교통류의 퍼포먼스를 극대화시키는 노력이 필요할 것이다.

2. 활용방안: 차로별 허용 군집크기

화물차의 군집주행을 포함하여 자율차의 군집주행 가능하게 된다면 이에 따른 군집주행 운영전략이 필요할 것이며, 군집허용 구간의 교통 및 도로조건을 반영한 최적의 군집운영전략 또한 수립해야한다. 특히 비자율차량이나 차로 변경을 하고자하는 개별자율차가 군집주행 차량들과 혼재되어 있는 상황에서는 군집의 크기가 차로변경, 유입, 유출에 제약 및 영향을 주기 때문에 적절한 군집 운영 방안의 수립이 필요할 것으로 판단된다. 이러한 교통환경에서의 새로운 군집주행 운영전략으로 차로별 허용 군집크기를 들 수 있다. 본 연구에서는 화물차가 지정차로에서 주행하는 상황을 대상으로 군집주행에 대한 효과분석을 수행하였으나, 이러한 분석을 차로별 허용군집 크기 검토 연구로 확대할 수 있다. 차로별 허용 가능한 군집크기의 임계값이 있으며, 군집은 각 차로 최대 군집내 차량의 대수인 임계값을 초과하지 않는 것이다. 이에 대한 개념도와 예시를 Figure 12에 제시하였다. 예를 들어, 편도 3차로의 도로에서 차로별 임계값이 4대, 8대일 때, 1차로에서는 모든 군집의 크기가 허용되며, 3차로에서는 4대 미만의 군집만 주행할 수 있는 것이다. 이러한 교통운영전략은 미래 자율주행시대에 적용할 수 있는 새로운 차로관리 운영전략으로 의의가 있으며, V2X를 통해 적정 군집 파라미터 정보를 자율차에 제공할 수 있다. 또한 이러한 교통운영관점에서의 군집크기 제어가 군집의 생성 해체, 크기조정, 기하구조 및 구간 특성과 함께 고려된다면 더욱 효과적일 것으로 기대된다.

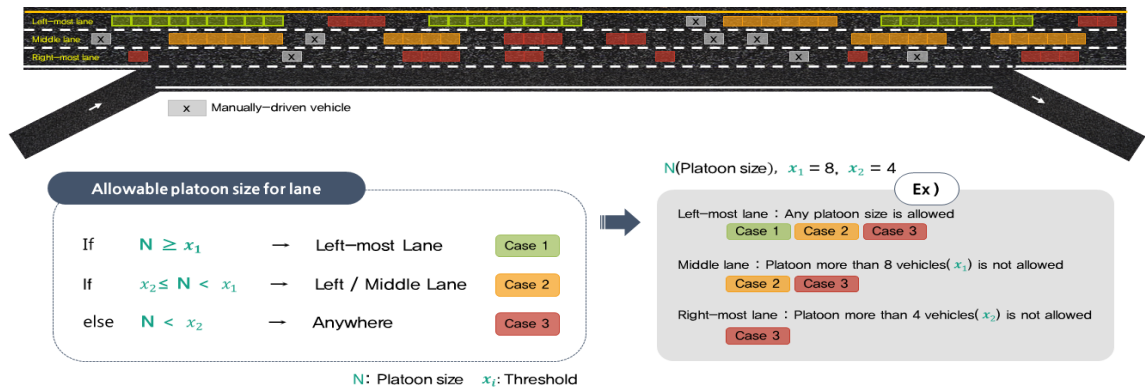


Figure 12. Application example (allowable platoon size for lane)

결론

미래 교통 패러다임을 변화시킬 기술로써 자율주행자동차가 대두되고 있으며, 자율주행자동차와 인프라의 정보 제공을 통해 V2X가 가능한 자율협력주행 시스템이 함께 발전하고 있다. 이에 따라 안전성과 운영효율성을 향상시킬 것으로 기대되는 군집주행이 이슈가 되고 있다. 군집주행 전용차로 도입 시 그 효과가 더욱 증대할 것으로 기대되고 있으며, 교통운영관리 입장에서 네트워크 퍼포먼스를 극대화시킬 수 있는 군집운영전략을 수립할 경우 운영효율성 및 안전성이 개선될 것으로 판단된다. 또한 군집주행 적용 시 화물차에 우선적으로 적용할 경우 사고빈도 및 심각도 감소를 비롯하여, 물류수송력의 증대효과도 기대된다. 특히 유입연결로의 경우 진입하는 비자율차는 본선으로 합류하기 위해 강제적인 차로변경을 하게 되며, 이 때 비자율차가 안정적으로 차로변경을 할 수 있도록 교통 운영전략을 통해 관리해야한다.

이에 따라 본 연구는 고속도로 유입연결로 구간에서의 화물차 군집운영전략 수립 방안에 대한 연구를 수행하였으며, 교통상황과 군집주행 파라미터 조합에 따른 교통류 퍼포먼스를 분석하였다. 연구의 범위는 유입연결로가 있는 3차로 도로에서 화물차는 지정차로인 3차로에서 군집을 이루어 주행하며, 화물차는 전부 군집주행을 하는 자율차로 정의하였다. 시뮬레이션 시나리오 구성요소는 6가지로 군집유무, 본선교통량, 유입교통량, 화물차비율, 군집크기, 군집간격이며, 시나리오는 총 720개이다. 미시 교통 시뮬레이션인 VISSIM을 이용하였으며, 기존문헌에서 제시

한 VISSIM 자체 파라미터를 이용하여 자율차를 구현하는 방법론을 활용하였다. 교통상황에 따른 적정 군집크기를 분석하기 위해 운영효율성과 안전성 측면의 네트워크 퍼포먼스를 비교하였다. 운영효율성을 평가하는 지표로서 평균 주행속도를 이용하였으며, 분석결과 군집크기가 클수록 평균 주행속도가 높아지는 패턴을 보이는 것으로 나타났다. 또한 모든 시나리오에서 군집크기가 6대 이상일 경우는 성능감소 허용범위 내에 동일한 운영효율성을 가지는 것으로 분석되었다. 안전성의 경우 차량간의 상호작용과 상충건수를 이용한 상충률 개념을 정의하였으며, 분석결과 군집간간격과 본선의 서비스수준을 고려할 때 상충률이 다른 패턴을 보이는 것으로 나타났다. 군집간간격이 50m일 때는 최적 군집크기가 6대인 것으로 도출되었으나, 군집간간격이 100m인 경우에는 군집크기가 4대일 때 가장 상충률이 낮은 것으로 분석되어 운영효율성과 상반되는 결과를 보이는 것으로 분석되었다.

자율주행은 자율주행자동차 뿐만 아니라 도로교통시스템의 스마트한 발전과 교통류 성능을 극대화 할 수 있는 교통운영관리전략이 어우러질 때 효과가 극대화 될 수 있다. 이러한 자율협력주행 시대에 대비하여 교통운영관리전략을 사전에 준비할 필요가 있으며, 교통운영관리 최적화를 위한 연구들이 더불어 진행되어야한다. 자율주행의 기술로서 교통류의 성능을 증대시킬 수 있을 것으로 기대되는 군집주행 역시 다양한 상황과 교통운영관리전략을 고려한 연구가 진행되어야한다. 본 연구에서 제시하는 군집 운영조건 판단 알고리즘은 군집주행 운영전략 수립 시 운영효율성 및 안전성을 극대화할 수 있는 군집주행 파라미터를 도출하는 방법론으로서 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한 군집주행기술 자체에 대한 연구가 아닌 비자율차가 혼재되어 있는 상황에서 교통류 전체 및 교통운영관리 측면에서 연구를 진행하였다는 점에서 의의를 가진다.

본 연구를 발전시키기 위해서는 다음과 같은 추가 연구가 진행되어야한다. 첫째, 현재 분석된 결과는 3차로의 고속도로 유입연결로를 분석 대상 구간으로 설정하였다. 그러나 구체적인 군집주행 운영·관리 전략을 수립하기 위해서는 유출연결로, 기본구간, 차로수 변화 등 다양한 도로기하구조적 조건에 따른 연구가 진행되어야하며, 진입 및 본선 차종을 현실적으로 구현할 필요가 있다. 둘째, 본 연구에서는 군집이 형성된 이후 주변의 비자율차 운전자가 차로변경할 때 심리적으로 영향을 많이 받을 것으로 판단되는 군집주행 파라미터를 우선적으로 연구하였으나, 군집의 형성과 해체에 따른 파라미터, 군집의 가감속도 등의 군집주행 파라미터를 고려할 수 있다. 또한 본 연구에서 설정한 파라미터를 다양하게 고려하여 각 교통상황에 따른 최적의 파라미터를 도출 할 수 있을 것으로 판단된다. 예를 들어 본 연구에서는 군집간간격을 50m와 100m로 설정하였으나, 군집운영 초기에는 안전성을 확보하기 위해 보다 긴 군집간간격을 설정할 수 있다. 이러한 다양한 시나리오 구성 및 조건에 따라 분석결과가 달라질 수 있으며, 분석결과에 따른 적절한 운영전략을 수립해야한다. 셋째, 본 연구에서는 VISSIM 자체 파라미터를 이용하여 자율차의 군집주행을 구현하였다. 그러나 이에 대한 검증이 필요할 것으로 판단되며, 군집주행 구현 방법에 대한 연구가 추가적으로 이루어져야할 것으로 판단된다. 마지막으로 군집 형성 및 해체에 대한 방법론을 검토하고, 이에 대한 영향을 파악하여 적절한 군집 형성 및 해체 구간에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한 연결로에서의 차량 추종 및 간격수락 조건을 반영한 능동적인 군집운영전략에 대한 연구를 통해 실질적으로 적용 가능한 교통운영관리전략이 되도록 발전시켜야한다.


Funding

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIP; Ministry of Science, ICT & Future Planning) (No. NRF-2017R1A2B4005835).

알림

본 논문은 한국ITS학회 2017년도 추계학술대회(2017.10.21)에서 발표된 내용을 수정·보완하여 작성된 것입니다.

ORCID

LEE, Seolyoung  <http://orcid.org/0000-0002-4822-8739>

OH, Cheol  <http://orcid.org/0000-0002-1431-9480>

References

- Amoozadeh M., Deng H., Chuah C. N., Zhang H. M., Ghosal D. (2015), Platoon Management With Cooperative Adaptive Cruise Control Enabled by VANET, *Vehicular Communications*, 2(2), 110-123.
- Aria E., Olstam J., Schwietering C. (2016), Investigation of Automated Vehicle Effects on Driver's Behavior and Traffic Performance, *Transp. Res. Procedia*, 15, 761-770.
- Choi S., Kim M., Oh C., Lee K. (2013), Effects of Weather and Traffic Conditions on Truck Accident Severity on Freeways, *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, 33(3), Korean Society of Civil Engineering, 180-185.
- Davis L. C. (2004), Effect of Adaptive Cruise Control Systems on Traffic Flow, *Physical Review E*, 69(6), 066110.
- Di Bernardo M., Salvi A., Santini S., Valente A. S. (2015), Third-order Consensus in Vehicles Platoon With Heterogeneous Time-varying Delays, *IFAC-PapersOnLine*, 48(12), 358-363.
- Eckhardt J. (2016), European Truck Platooning Challenge 2016, The Hague, Delta3.
- Fernandes P., Nunes U. (2012), Platooning With IVC-enabled Autonomous Vehicles: Strategies to Mitigate Communication Delays, Improve Safety and Traffic Flow, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13(1), 91-106.
- Gouy M., Wiedemann K., Stevens A., Brunett G., Reed N. (2014), Driving Next to Automated Vehicle Platoons: How Do Short Time Headways Influence Non-platoon Drivers' Longitudinal Control?, *Transp. Res. Part F: Traffic Psychol. Behav.*, 27, 264-273.
- Hyundai, <http://www.hyundai.com/kr/showroom.do?carCd1=TR003>, 2017.07.27.
- Impacts of Connected and Autonomous Vehicles on Traffic Flow Technical Report (2016), UK Department of Transportation.
- Jeong E., Oh C., Lee G., Cho H. (2014), Safety Impacts of Intervehicle Warning Information Systems for Moving Hazards in Connected Vehicle Environments, *Transp. Res. Rec.: J. Transp. Res. Board*, 2424, 11-19.
- Joo S. H., Oh C. (2016), An Integrated Simulation Approach for Evaluating Speed Management Strategies Considering Public Health, *J. Korean Soc. Transp.*, 34(6), Korean Society of Transportation, 548-559.
- Kesting A., Treiber M., Schönhof M., Helbing D. (2008), Adaptive Cruise Control Design for Active Congestion Avoidance, *Transp. Res. Part C: Emerg. Technol.*, 16(6), 668-683.
- Larsson E., Semnton G., Larson J. (2015), The Vehicle Platooning Problem: Computational Complexity and Heuristics, *Transp. Res. Part C: Emerg. Technol.*, 60, 258-277.
- Lee S. Y., Oh C. (2017), Lane Change Behavior of Manual Vehicles in Automated Vehicle Platooning Environments, *J. Korean Soc. Transp.*, 35(4), Korean Society of Transportation, 332-347.
- Lei C., Van Eenennaam E. M., Wolterink W. K., Karagiannis G., Heijenk G., Ploeg J. (2011), Impact of Packet Loss on CACC String Stability Performance, In *ITS Telecommunications (ITST)*, 2011 11th International C.

- Lou Y., Li P., Hong X. (2016), A Distributed Framework for Network-wide Traffic Monitoring and Platoon Information Aggregation Using V2V Communications, *Transp. Res. Part C: Emerg. Technol.*, 69, 356-374.
- MAN Truck Yemen, <https://www.truck.man.eu/ye/en/man-world/man-in-yemen/press-and-media/European-Truck-Platooning-Challenge-2016-289793.html>, 2017.07.25.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2013), Korea Highway capacity manual.
- Moon S., Moon I., Yi K. (2009), Design, Tuning, and Evaluation of a Full-range Adaptive Cruise Control System With Collision Avoidance, *Control Engineering Practice*, 17(4), 442-455.
- Park I., Lee J., Lee J., Hwang K. (2015), Impacts of Automated Vehicles on Freeway Traffic-flow- Focused on Seoul-Singal Basic Sections of GyeongBu Freeway, *J. Korea Inst. Intell. Transp. Syst.* 14(6), Korea Institute of Intelligent Transport Systems, 21-36.
- Santini S., Salvi A., Valente A. S., Pescapé A., Segata M., Cigno R. L. (2017), A Consensus-Based Approach for Platooning With Intervehicular Communications and Its Validation in Realistic Scenarios, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66(3), 1985-1999.
- Segata M., Bloessl B., Joerer S., Sommer C., Gerla M., Cigno R. L. et al. (2014), Towards Inter-vehicle Communication Strategies for Platooning Support, In *Communication Technologies for Vehicles*.
- Shladover S., Su D., Lu X. Y. (2012), Impacts of Cooperative Adaptive Cruise Control on Freeway Traffic Flow, *Transp. Res. Rec.: J. Transp. Res. Board*, 2324, 63-70.
- Su D., Ahn S. (2016), An Adaptive Vehicle Platoon Formation Mechanism for Road Capacity Improvement, *KIPS Tr. Comp. and Comm. Sys.*, 5(10), Korea Information Processing Society, 327-330.
- Suh S., Lee S., Oh C., Choi S. (2017), Impacts of Automated Vehicle Platoons on Car-following Behavior of Manually-Driven Vehicles, *J. Korea Inst. Intell. Transp. Syst.* 16(4), Korea Institute of Intelligent Transport Systems, 107-121.
- Traffic Monitoring System, http://www.road.re.kr/analysis/analysis_01.asp, 2017.09.14.
- Treiber M., Hennecke A., Helbing D. (2000), Congested Traffic States in Empirical Observations and Microscopic Simulations, *Physical review E*, 62(2), 1805.
- Tuchner A., Haddad J. (2015), Vehicle Platoon Formation Using Interpolating Control, *IFAC-PapersOnLine*, 48(14), 414-419.
- Van Arem B., Van Driel C.J.G., Visser R. (2006), The Impact of Cooperative Adaptive Cruise Control on Traffic-flow Characteristics, *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, 7, 429-436.
- VanderWerf J., Shladover S., Kourjanskaia N., Miller M., Krishnan H. (2001), Modeling the Effects of Driver Control Assistance Systems on Traffic, *Transportation Research Record* 1748, 167-174.
- Zhao L., Sun J. (2013), Simulation Framework for Vehicle Platooning and Car-following Behaviors Under Connected-vehicle Environment, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 96, 914-924.
- Zheng Y., Li S. E., Wang J., Cao D., Li K. (2016), Stability and Scalability of Homogeneous Vehicular Platoon: Study on the Influence of Information Flow Topologies, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 17(1), 14-26.
- Zhong Z., Lee J., Zhao L. (2017), Evaluations of Managed Lane Strategies for Arterial Deployment of Cooperative Adaptive Cruise Control, *Transportation Research Board 96th Annual Meeting*.