

교통류에 영향을 주는 화물차 군집주행 운영 조건 분석

Analysis of Truck Platooning Operation Conditions Affecting Traffic Flow

정 하 립* · 이 영 택** · 박 상 민*** · 조 현 배**** · 윤 일 수*****

* 주저자 : 아주대학교 교통시스템공학과 박사과정
 ** 공저자 : 아주대학교 교통시스템공학과 석사과정
 *** 공저자 : 아주대학교 교통시스템공학과 연구교수
 **** 교신저자 : 한국도로공사 스마트도로연구단 차장
 ***** 공저자 : 아주대학교 교통시스템공학과 교수

Harim Jung* · Young-taek Lee* · Sangmin Park* · Hyunbae Cho** · Ilsoo Yun*

* Dept. of Transportation Eng., Univ. of Ajou
 ** Smart-Highway R&D Center, Korea Expressway Cooperation

† Corresponding author : Hyunbae Cho, chb@ex.co.kr

Vol.20 No.4(2021)

August, 2021
 pp.106~117

pISSN 1738-0774
 eISSN 2384-1729
<https://doi.org/10.12815/kits.2021.20.4.106>

Received 26 May 2021
 Revised 23 June 2021
 Accepted 25 August 2021

© 2021. The Korea Institute of
 Intelligent Transport Systems. All
 rights reserved.

요 약

우리나라는 대부분의 화물 운송이 도로를 이용하여 이루어지기 때문에 화물차 군집주행에 관한 관심이 증가하고 있다. 화물차 군집주행은 연속된 두 대 이상의 화물차들이 하나의 군집을 구성해 주행하는 것으로 도로 용량의 증가와 연비를 개선할 수 있다. 본 연구에서는 화물차 군집주행이 교통류에 미치는 영향을 분석하기 위해 교통 조건, 화물차 군집주행 운영 조건에 따른 시나리오를 생성하였다. 화물차 군집주행 운영 조건의 영향이 미치는 영향을 파악하고자 평균통행속도, 차로변경방해건수, 진출입구간방해건수와 상관분석을 실시하여 결과를 도출하였다. 군집 내 화물차 수, 군집 내 화물차 간격, 군집 간 간격은 평균통행속도와 차로변경방해건수에 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 군집주행 화물차 비율이 LOS와 무관하게 평균통행속도와 차로변경방해건수에 강한 연관성을 가지는 것으로 나타났다.

핵심어 : 화물차 군집주행, 운영 조건, 미시교통시뮬레이션 모형, 교통류, 차로변경방해

ABSTRACT

In Korea, interest in truck platooning is increasing because most cargo transportation is done by road. Truck platooning is the operation of two or more trucks in a row to form one platoon, which can increase road capacity and improve fuel efficiency. In this study, to analyze the effect of truck platooning on traffic flow, scenarios were created according to traffic conditions and truck platooning operating conditions. In order to understand the effect of the truck platooning operating conditions, correlation analysis was conducted with the average travel speed, the number of lane change disturbance, and the number of disturbance in the entry/exit section. As a result, the number of trucks in the platoon, the spacing of trucks in the platoon, and the spacing between platoons were found to have an effect on the average speed and the number of lane change disturbance. In addition, the truck platooning ratio was found to have a strong correlation with the average travel speed and the number of lane change disturbance regardless of the LOS.

Key words : Truck platooning, Operation conditions, Microscopic simulation model, Traffic flow, Lane change disturbance

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

현재 자율주행(autonomous driving 또는 automated driving)에 관한 다양한 연구가 전세계적으로 활발하게 진행되고 있다. 특히, 승용차 자율주행에 관한 연구는 약 60년 전부터 진행되어왔다. 하지만, 화물차 군집주행(truck platooning)의 연구는 1990년대 중반부터 시작되어 상대적으로 적은 연구가 진행이 되었다(Tsugawa et al., 2016). 그러나 유럽과 미국에서 화물 운송 수요가 증가함에 따라 자율주행 기술 중 화물차 군집주행에 관련하여 많은 연구와 분석이 늘어나고 있는 추세이다. 2011년, 유럽 위원회(European Commission, 2011)는 2050년까지 탄소 배출량을 80%에서 90%까지 줄이겠다는 목표를 발표하였고, 우리나라 또한 2020년에 탄소 중립 계획을 발표하고 탄소 배출을 줄이기 위한 연구를 진행하면서 화물차 군집주행에 관한 관심이 증가하고 있다. 우리나라의 경우 2018년 기준 전체 화물 수송량은 20억 4천만 톤으로, 이 중 약 18억 9천만 톤이 도로를 이용한 화물 운송으로 이루어지고 있으며 전체 수송 분담률의 92.6%를 차지하고 있다(Korea Transport DataBase, 2020).

화물차 군집주행은 연속된 두 대 이상의 화물차들이 차량간 통신(vehicle to vehicle, V2V)을 기반으로 차간 간격 제어를 통해 하나의 군집을 구성해 주행하는 것으로 자율주행과 다르게 전방 차량을 추종하는 것이 주목적이다. 이러한 화물차 군집주행 기술이 도입됨에 따라 도로 용량 증가, 연비 개선, 운전자 편의성 향상 등의 효과를 기대할 수 있다(Lee and Oh, 2018). 또한, 대부분의 화물 운송이 도로를 이용하여 이루어지기 때문에 화물차 군집주행이 에너지 효율이 크고, 사업용 차량의 안전성 증대에 기여할 수 있어 화물차 군집주행의 도입은 교통체계에 큰 영향을 미칠 것으로 생각된다(Jo et al., 2018).

이러한 화물차 군집주행의 장점은 실제 도로의 교통상황, 화물차 군집을 운영하는 조건 등에 따라 달라질 것으로 모든 상황에서 항상 긍정적인 효과가 나타나지 않을 수도 있다. 예를 들어, 교통이 혼잡한 고속도로에서 화물차들이 군집을 형성하여 도로의 가장 바깥쪽 차로를 주행하는 상황을 가정했을 때, 진출입로를 이용하려는 일반차량들의 차로 변경에 직접적인 영향을 미칠 수 있으며, 이로 인해 전체 네트워크에 대한 부정적인 영향이 발생할 수 있을 것으로 보인다. 따라서, 교통류에 영향을 줄 수 있는 화물차 군집주행의 운영 조건들에 대하여 보다 상세한 분석이 필요한 시점이다.

본 연구의 목적은 미시교통시물레이션 모형을 통해 가상의 고속도로 직선구간을 구축하여 도로용량편람의 LOS(level of service, LOS) 경계값을 사용한 교통량을 설정한 시나리오를 통해 교통상황에 따라 교통류에 영향을 주는 화물차 군집주행 운영 조건을 도출하는 것이다. 이를 위해 본 연구에서는 화물차 군집주행 운영 조건을 군집 내 화물차 수, 군집 내 화물차 간격, 군집 간 간격, 군집주행 화물차 비율(market penetration rate, MPR)으로 설정하였다. 이를 통해 다양한 교통상황에 따라 화물차 군집주행 운영 조건이 교통류의 평균통행 속도, 차로변경방해건수, 진출입구간방해건수에 미치는 영향을 파악하고자 상관분석을 수행하였다. 또한 고속도로 진출입로에서 발생하는 거동과 화물차 군집주행으로 인해 발생할 수 있는 교통상황별 차로변경방해를 중심으로 진행함으로써 향후 수행될 화물차 군집주행의 효과 분석 관련 연구에 도움이 되고자 하였다.

2. 연구의 범위 및 절차

본 연구에서는 VISSIM을 통해 실제 네트워크가 아닌 가상의 고속도로를 구축하였다. 구축한 네트워크의 경우 전체 10km 고속도로 직선 3차로 구간으로 이루어져 있으며, 양 끝으로부터 2km 지점에 진출입로가 존

재하는 형태를 가진다.

본 연구를 수행하기 위해 2장에서는 화물차 군집주행 및 상관계수 관련 이론과 관련 연구를 고찰하였다. 3장에서는 미시교통시뮬레이션 모형을 이용해 네트워크를 구축하고, 시나리오를 생성하기 위한 변수들을 설정하였다. 4장에서는 시나리오를 수행하여 도출된 결과 데이터의 상관분석을 통해 교통상황별 화물차 군집주행 운영 조건이 교통상황에 따라 교통류에 미치는 영향을 파악하였다. 마지막으로 결론 및 향후 연구과제를 도출하였다.

II. 관련 이론 및 선행 연구 고찰

1. 관련 이론 고찰

1) 화물차 군집주행

화물차 군집주행(Truck platooning) 기술은 두 대 이상의 화물차가 V2V(vehicle to vehicle, V2V) 통신을 이용하여 하나로 연결된 군집을 구성해 일정한 간격을 유지하면서 주행하는 기술이다. 화물차 군집주행은 교통류 운영 효율을 높일 수 있고, 연료 소비의 감소와 안전성 증대를 할 수 있는 장점이 있다(Segata et al., 2014). 선두차량은 적응형 순항 제어(adaptive cruise control, ACC)시스템을 사용하여 안정적인 주행을 하고, 선두차량을 제외한 차량들은 협동 적응형 순항 제어(cooperative adaptive cruise control, CACC)시스템을 통해 무인으로 제어된다. CACC 시스템은 V2V 통신 기능이 추가된 ACC 시스템으로 자동 차량 추종 기능이 강화되어 선두차량의 속도 변화에 빠르게 반응할 수 있으며, 이는 교통류 운영 및 연료 소비를 개선할 수 있다(Ramezani et al., 2018).

이러한 군집주행은 자율주행기술과 동일하게 인지, 판단, 제어의 3단계에 따라 주행하게 되지만 주행 중인 도로 환경을 전반적으로 파악하는 자율주행과 달리 전방 차량을 추종하는 것이 주목적이라는 차이점이 존재한다. 이에 따라 화물차 단독의 독립제어가 아닌 연동제어를 통해 군집의 대열 안전성을 유지하는 것이 중요하다. 유럽의 European Road Transport Research Advisory Council(ERTRAC)은 군집주행 기술 단계를 미국 자동차공학회(SAE International)의 자율주행 기술 단계와 유사하게 기술 수준에 따라 <Table 1>과 같이 정의하고 있다.

<Table 1> Truck platooning technology levels

Truck platooning technology levels	Features	Remark
1: CACC truck platooning	Longitudinal control automation	Drivers required for each truck
2: Automated truck platooning	Longitudinal, lateral control automation	Drivers required for each truck
3: Highway pilot truck platooning	Longitudinal, lateral control automation Change lane, overtaking automation	Unattended driving of a follow-up truck only on a specific road

2) 상관분석

상관계수(Correlation coefficient)는 두 변수 간의 관계를 분석하는 통계 기법으로 피어슨 상관계수(Pearson correlation coefficient), 스피어만 순위 상관계수(Spearman's rank correlation coefficient) 등이 있다. 상관관계의 크기는 두 변수 간의 상관성 정도를 나타내는 값인 상관계수의 산출을 통해 확인할 수 있지만, 상관성은 인

과관계를 설명하는 것이 아니며 두 변수의 경향성을 나타내는 것으로 해석해야 한다.

본 연구에서는 다양한 상관계수 중에서 스피어만 순위 상관계수를 이용한다. 스피어만 순위 상관계수는 두 변수가 정규성을 만족하지 않을 경우 피어슨 상관계수 대신 이용하는 방법이며 자료의 값에 순위를 매겨 상관계수 값을 측정하는 방법이다. 두 변수 간의 관계가 선형 또는 비선형인 경우 모두 사용이 가능하고, 스피어만 순위 상관계수는 -1에서 1 사이의 값을 가지며 두 변수의 순위가 완전히 일치할 때 1, 그 반대의 경우 -1의 값을 가지게 된다. 값이 0인 경우 연관성이 없다고 해석하며, 상관계수 절댓값이 0.01에서 0.09까지 범위는 무시할 수 있는 연관성을 가지고 있다. 0.10부터 0.29 사이의 값을 가지면 낮은 연관성을 가지고, 0.30에서 0.59까지의 범위에선 보통의 연관성을 가진다고 해석한다. 0.60부터 0.74의 범위에선 강한 연관성을 가지고 0.75에서 0.99까지의 값을 가지면 매우 강한 연관성을 가진다. 마지막으로 1.00의 값은 완벽한 연관성을 가지는 것을 의미한다(Rea and Parker, 2014). 아래 식의 d_i 은 두 변수의 순위 차이를 뜻한다(Kim, 2007).

$$\rho = 1 - \frac{\sigma \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \dots\dots\dots (1)$$

2. 선행 연구 고찰

Calvert et al.(2019)은 화물차 군집주행을 레이더, 영상, 그리고 V2V 통신을 통해 차선 내 두 대 이상의 화물차간 좁은 차간 간격을 형성하고 유지하는 기술로 정의했다. 이 연구에서는 화물차 군집주행이 CACC 시스템에 의존하며 주요 장점으로 탄소 배출과 에너지의 감소가 있으나, 교통류에 대한 부정적인 영향이 있다고 판단하여 Lane change Model with Relaxation and Synchronisation(LMRS)을 기본 모형으로 IDM+ 차량 추종 모형을 조합하여 오전, 오후, 새벽 시간대의 시나리오로 구분하여 미시교통시물레이션 모형을 구축하였다. 구축한 미시교통시물레이션 모형을 이용해 화물차 군집주행이 교통류 성능에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 그 결과 화물차 군집주행이 전체 교통류 성능에 부정적인 영향을 미칠 수 있다는 결과를 도출하였고, 특히 CACC 시스템이 장착된 군집주행 화물차 비율이 증가함에 따라 전체 교통류 지연이 증가하였다. 또한 오전 시나리오의 전체 교통류 지연시간은 10~90%의 증가율을 보였으며 오후 시나리오에서 지연이 가장 크게 나타났다. 교통류 지연은 화물차 군집주행을 도입함에 따라 전체 교통류의 지체(delay)가 증가하는 것을 의미한다. 본 연구에서는 VISSIM에서 도출하는 MOE인 total delay time을 사용하여 교통류의 지연 정도를 계량화하였다.

Jo et al.(2018)은 화물차 군집주행을 차량간 통신으로 2대에서 5대의 화물차를 연결시켜 최소한의 안전거리만을 유지한 채 주행하는 기술로 정의하였다. 연구진들은 미시교통시물레이션 모형을 이용하여 고속도로에 화물차 군집주행 도입이 도로 용량에 미치는 영향 분석을 수행하고, 용량 증대 효과가 큰 군집 운영전략을 찾아가 하였다. 일반차량과 화물차 군집주행이 혼재되어 있는 네트워크를 구축하여 고속도로 차로별 용량 분석을 수행하였으며, 화물차 군집주행 운영 파라미터는 군집 내 화물차 수, 군집 내 간격, 군집 간 간격, 군집주행 화물차 비율로 설정하였다. 그 결과 군집 내 화물차 수가 2대, 군집 내 화물차 간격이 10m, 군집 간 간격이 50m, 군집주행 화물차 비율이 10%인 경우에 차로별 용량이 화물차 군집주행 미시행 시 용량에 비해 약 17.8% 증가하는 결과를 도출하였다.

Lee and Oh(2018)은 화물차 군집주행을 여러 대의 화물차가 최소한의 안전거리를 유지한 채 일정한 차간 간격을 두고 주행하는 방식으로 정의하였다. 이 연구에서는 고속도로 유입연결로 구간에서 운영 효율성과 안전성을 고려한 화물차 군집주행 운영전략을 수립하고자 하였다. VISSIM을 이용하여 화물차 군집주행이

교통류에 미치는 영향을 다양하게 분석하기 위해 VISSIM의 Driving Behavior 변수를 조정하여 구현하였고, 분석 시나리오는 군집 유무, 본선 교통량, 진출입 교통량, 화물차 비율, 군집 내 화물차 수, 군집 간 간격을 고려하여 설정하였다. 운영 효율성을 평가하는 지표로서 평균 주행속도를 이용하였는데, 분석 결과 군집 내 화물차 수가 많을수록 평균 주행속도가 높아지는 패턴을 보였다. 안전성의 경우 차량 간의 상호작용과 상충 건수를 이용한 상충률 개념을 정의하였고, 분석 결과 군집 간 간격이 50m일 때 최적 군집 내 화물차 수가 6대인 것으로 도출되었으나 군집 간 간격이 100m인 경우에 군집 내 화물차 수가 4대일 때 가장 상충률이 낮은 것으로 분석되어 운영 효율성과 상반되는 결과를 보였다.

Wang et al.(2019)은 차량 군집주행의 하위 등급으로 화물차 군집주행을 분류했으며 차량 군집주행을 커넥티드 자동화 차량(connected automated vehicle) 여러 대가 짧은 간격을 유지하는 기술로 정의하였다. 이 연구의 목적은 화물차 군집주행이 엇갈림 구간에서 고속도로 운영에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 다양한 교통상황, 군집주행 화물차 비율, 군집 내 간격, 군집 내 화물차 수로 실험을 수행하였고 유입 교통량을 수용하기 위해 화물차 군집에 관한 대안 전략을 제시하였다. 그 결과, 화물차 군집주행은 자유 흐름 조건에서 최대 유출과 전체 소모된 시간에서 교통류에 영향을 미치지 않았지만, 혼잡한 교통상황에서 평균 도로 교통 용량이 2%에서 19%까지 증가할 수 있는 결과를 도출하였다.

3. 시사점 및 연구의 차별성 도출

화물차 군집주행과 관련하여 대부분의 연구들은 가장 우선적으로 기술이 도입될 것으로 예상되는 고속도로를 대상으로 하는 것으로 나타났다. 또한 화물차 군집주행이 도입될 경우 발생하는 운영 효율성 평가와 이러한 효율성이 커지는 조건에 관한 연구가 다수 수행되었다. 기존 연구들은 화물차 군집주행이 교통류에 미치는 영향을 살펴보기 위해서 평균통행속도, 상충률, 도로 용량 등의 효과적도만을 사용하였다. 하지만 그러한 효과적도들만으로는 많은 운전자들이 염려하는 화물차 군집주행 대열로 인한 차로변경의 어려움을 고려하지 못하였다. 하지만, 본 연구에서는 고속도로 진출입로에서 발생하는 거동과 화물차 군집주행으로 인해 발생할 수 있는 교통상황별 차로변경방해에 중점을 두고 있다는 차별성이 있다. 또한, 본 연구에서는 VISSIM 최신 버전에서 제공하는 군집주행 모듈을 이용함으로써 화물차 군집주행을 보다 정밀하게 구현하였다는 차별성이 존재한다.

Ⅲ. 미시교통시물레이션 모형 구축 및 수행

1. 미시교통시물레이션 모형 구축

교통상황, 화물차 군집주행 운영 조건에 따라 화물차 군집주행이 교통류에 미치는 영향을 분석하기 위한 미시교통시물레이션 모형 시나리오를 생성하였다. 본 연구에서는 VISSIM 2020을 이용하였으며 VISSIM 2020부터는 파라미터 조정을 통해 CACC 시스템의 특징이 나타나는 화물차 군집주행 시물레이션 모형 수행이 가능하다. 시물레이션 모형의 변수는 화물차 군집주행 운영 조건과 교통 조건으로 구분하였다. 화물차 군집주행 운영 조건으로는 ‘군집 내 화물차 수(platoon size)’, ‘군집 내 화물차 간격(intra-platoon spacing)’, ‘군집 간 간격(inter-platoon spacing)’, ‘군집주행 화물차 비율(MPR)’의 총 네 가지로 구성하였다. 이때, 군집 내 화물차 간격의 경우 거리 간격이 아닌 시간 간격(time headway)으로 속도에 따라 간격을 결정하였다. 군집주행 화

물차 비율은 전체 화물차 중 군집주행을 하는 화물차의 비율을 의미하며, V2V 통신을 사용하는 화물차의 비율을 뜻한다. 군집 내 화물차 수는 VISSIM 자체 파라미터인 Autonomous driving에서 Max. number of vehicles와 COM-interface를 통해 구현하였으며 군집 내 화물차 간격은 Gap time을 통해 설정하였다. 군집 간 간격의 경우 Wiedemann 99 model 파라미터를 사용하여 간격 유지를 위한 정지거리(CC0)와 시간차로 표현한 차량 간 간격(CC1)의 관계로 나타냈다(Lee and Oh, 2018).

$$Inter-platoon\ spacing = CC0 + CC1 * \frac{V}{3.6} \dots\dots\dots (2)$$

교통 조건의 경우 ‘교통량’, ‘램프 진출입 비율’, ‘화물차 비율’, ‘속도’의 총 네 가지로 구성하였다. 이 중 램프 진출입 비율의 경우 20%로 고정하였으며, 화물차 비율의 경우 2019년 교통량정보제공시스템을 참고하여 국내 고속도로 화물차 평균 구성비인 27.7%를 적용하였다. 시뮬레이션 모형의 변수와 관련하여 자세한 사항은 다음 <Table 2>와 같다.

<Table 2> Microscopic simulation model conditions ranges

Conditions		Ranges					
		1	2	3	4	5	6
Truck Platooning	Platoon size	2	3	4	5	-	-
	Intra-platoon spacing	0.09s (2m)	0.18s (4m)	0.27s (6m)	0.36s (8m)	0.45s (10m)	0.5s (12.5m)
	Inter-platoon spacing	50m	100m	-	-	-	-
	MPR	0%	25%	50%	75%	100%	-
Road & Traffic	Volume	LOS A	LOS B	LOS C	LOS D	LOS E	LOS F
	Ratio of ramp	20%					
	Ratio of trucks	27.7%					
	Speed	Vehicles : 100km/h , Trucks : 80km/h					

위의 시뮬레이션 모형 변수들을 조합하면 총 1,440개의 시나리오가 존재한다. 하지만, 모든 시나리오에 대한 시뮬레이션 모형을 수행하는 것은 어려움이 있어 라틴 하이퍼 큐브 샘플링 방법(Latin Hyper cube sampling method)을 통해 300개의 시나리오를 선정하였다(Mease and Bingham, 2006). 선정된 시나리오의 분포는 <Table 3>과 같으며 <Table 3>의 각 셀에 있는 값은 <Table 2>에서 설정된 화물차 군집주행 운영 조건 및 교통 조건의 범위가 선정된 빈도를 의미한다. 즉, 300개의 시나리오 중 군집 내 화물차 수는 각 75개의 시나리오로 분포되며 군집 내 화물차 간격은 50개씩 시나리오에 해당한다. 군집 간 간격의 경우 각 150개로 나뉘고 군집주행 화물차 비율은 60개씩, 교통량은 군집 내 화물차 간격과 동일하게 50개씩 시나리오에 분포된다.

다음으로 미시교통시뮬레이션 모형의 멀티 런(multi-run) 횟수를 결정하고자 하였다. 단순한 10km의 직선 구간으로 이루어진 토이네트워크인 특성에 따라 멀티 런의 효과가 크게 없을 것으로 예상되어 LOS C, 군집주행 화물차 비율 0%의 조건으로 시뮬레이션 모형을 총 35회 수행한 결과 중 20가지를 임의 추출하여 조합을 만든 후 단일 표본 t-검정을 수행하였다. 그 결과 모든 조합들의 유의확률이 0.05 이상의 값을 가져 멀티 런 횟수의 차이로 인한 평균통행속도 값이 통계적인 차이가 없는 것으로 나타났다. 따라서 본 미시교통시뮬

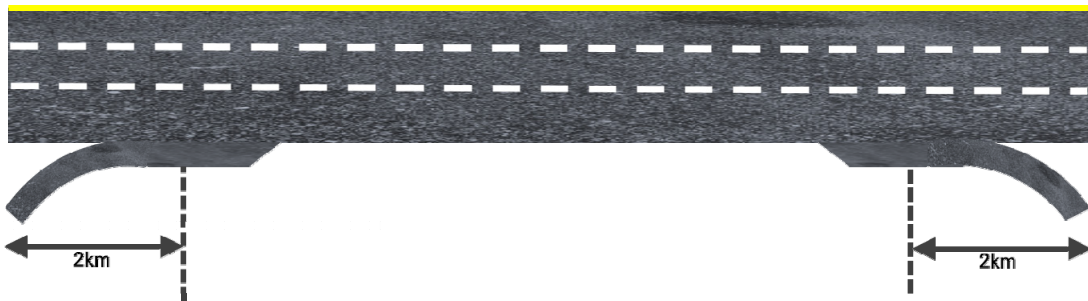
레이션 모형 분석에서는 단일 시행을 통해 분석하는 것으로 결정하였다.

<Table 3> Scenario distribution

Conditions	Ranges						Sum
	1	2	3	4	5	6	
Platoon size	75	75	75	75	-	-	300
Intra-platoon spacing	50	50	50	50	50	50	300
Inter-platoon spacing	150	150	-	-	-	-	300
MPR	60	60	60	60	60	-	300
Volume	50	50	50	50	50	50	300

2. 미시교통시물레이션 모형 수행

본 연구에서는 VISSIM을 이용하여 네트워크를 구축하였다. 앞서 말한 바와 같이 네트워크는 전체 10km 고속도로 직선 구간으로 양 끝 지점으로부터 2km 지점에 진출입로가 존재하는 형태이다. 또한 전체 3차로 구간으로 『도로교통법 시행규칙』 제 39조 “고속도로에서의 차로에 따른 통행구분”에 따라 군집주행 화물차는 3차로만을 주행하도록 설정하였다. 미시교통시물레이션 모형 분석 시간은 총 4,500초로 설정하였으며 warm-up time을 900초로 설정하여 데이터는 900초부터 4,500초까지 3,600초 동안 수집하도록 하였다. 전체 네트워크는 다음 <Fig. 1>과 같다.



<Fig. 1> Network layout

3. 미시교통시물레이션 모형 평가지표

화물차 군집주행의 운영이 교통류에 미치는 영향을 평가하기 위한 지표로 네트워크 평균통행속도를 사용하였다. 평균통행속도를 통해 도로의 상태를 판단할 수 있어 평가지표로 적합한 것으로 판단하였다(Joo and Oh, 2016). 또한, 본 연구는 차로변경방해를 화물차 군집주행으로 인해 일반차량의 차로변경이 지연되는 것으로 정의하였다. VISSIM은 시물레이션 모형 수행 중 초당 차량의 위치 및 상태 등에 대한 정보 수집이 가능하며 차량 운행 상태(driving state)의 경우 ‘차로변경 대기 중’(wants to change lane), ‘차로변경 중’(changing lane), ‘군집주행 중’(in platoon) 등의 차량 상태를 나타낸다. 미시교통시물레이션 모형의 데이터에서 네트워

크 내에 존재하는 시간별 각 차량들 위치, 운행 상태, 주행 중인 차로 등을 수집하여 일반차량이 차로변경을 하려고 군집주행 중인 화물차로 인해 대기 중일 때를 산출하였다. 이때, 0.1초 간격으로 차로변경하려는 일반차량이 변경하고자 하는 차로에 ‘군집주행 중’인 화물차가 존재하여 ‘차로변경 대기 중’에서 ‘차로변경 중’으로 변한 경우를 한 건의 차로변경방해건수로 정의하였다. 또한 이러한 차로변경방해가 진출입구간에서 발생한 경우, 차로변경방해건수를 진출입구간방해건수로 정의하여 산출하였다. 여기서 진출입구간은 진입연결로와 진출연결로를 의미하며, 도로용량편람에 따라 진출입구간 영향권에서 발생한 차로변경방해 진입연결로 영향권은 연결로 접속부의 100m 상류 지점부터 하류 지점까지의 본선 구간을 말한다. 진출연결로 영향권은 연결로 접속부의 400m 상류 지점부터 100m 하류 지점까지로 정의하였다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2013).

IV. 미시교통시물레이션 모형 결과 분석

1. 기초 통계분석 결과

VISSIM을 통해 도출된 데이터를 살펴보기 위해 기초 통계분석을 수행하였다. 기초 통계분석은 LOS별로 평균통행속도(mean speed), 차로변경방해건수(lane change disturbance), 진출입구간방해건수(weaving area disturbance)의 평균값, 표준편차, 최솟값, 최댓값을 확인하였다.

평균통행속도의 경우 예상한 바와 같이 LOS가 나빠질수록 평균값은 감소하고 표준편차는 증가하는 경향이 나타났으며, 차로변경방해건수의 경우 LOS가 악화할수록 많이 발생한 것으로 나타났다.

진출입구간방해건수의 경우 평균통행속도와 마찬가지로 LOS가 나빠질수록 평균값이 증가함을 보였다. 또한 진출입구간방해건수는 차로변경방해건수를 통해 산출되는 지표이기에 차로변경방해건수와 마찬가지로 LOS C가 LOS D, E보다 낮은 평균값을 가지지만 더 높은 최댓값이 나타났다. 진출입구간방해건수는 10.12건으로 상당히 높은 평균값을 가지는 것으로 나타났다.

다음 <Table 4>는 미시교통시물레이션 모형 평가지표의 기초 통계분석 결과이다.

<Table 4> Results of basic statistics analysis

Conditions		LOS A	LOS B	LOS C	LOS D	LOS E	LOS F
Mean speed	Mean	96.70	94.40	87.46	80.35	75.18	67.86
	Stdev	1.1617	1.5890	12.7212	16.5991	16.7348	17.3828
	Min	94.61	92.06	44.47	37.51	34.16	28.76
	Max	102.41	101.52	99.14	95.42	91.28	83.72
Lane change disturbance	Mean	66.5	142.86	247.3	291.1	343.02	482
	Stdev	63.8446	105.4408	218.0934	214.5171	227.2068	265.958
	Min	0	0	0	0	0	0
	Max	325	414	859	623	753	921
Weaving area disturbance	Mean	0.32	0.84	3.52	3.9	6.38	10.12
	Stdev	1.1328	1.6081	5.7187	4.3106	6.0706	9.7240

	Min	0	0	0	0	0	0
	Max	6	7	32	14	24	39

2. 상관분석 결과

앞의 과정을 통해 총 300가지 시나리오의 미시교통시물레이션 모형을 통해 도출된 결과를 이용하여 교통 상황별 평균통행속도, 차로변경방해건수, 진출입구간방해건수와 화물차 군집주행 운영 조건들 사이의 상관 분석을 실시하였다. 화물차 군집주행 운영 조건과 교통량이 LOS로 구분이 되는 연속형이 아닌 범주형임에 따라 스피어만 순위 상관계수가 적합하다고 판단되어 스피어만 순위 상관계수를 산출하였다. 그 결과는 다음 <Table 5>와 같으며 스피어만 순위 상관계수를 산출하기 위해 Python 3.8의 scipy 패키지의 stats 모듈을 사용하였다.

<Table 5> Results of Spearman's rank correlation coefficient

Traffic volume	Platooning conditions	Mean speed	Lane change disturbance	Weaving area disturbance
LOS A	Platoon size	-0.12	-0.17	0.14
	Intra-platoon spacing	0.07	-0.02	0.03
	Inter-platoon spacing	-0.05	-0.12	0.1
	MPR	-0.44	0.75	-0.02
LOS B	Platoon size	0.12	-0.19	0.23
	Intra-platoon spacing	-0.2	-0.03	-0.17
	Inter-platoon spacing	-0.05	-0.21	0.08
	MPR	-0.25	0.78	0.09
LOS C	Platoon size	0.59	-0.19	0.26
	Intra-platoon spacing	-0.14	-0.04	-0.06
	Inter-platoon spacing	-0.36	0.09	0.00
	MPR	-0.4	0.82	0.47
LOS D	Platoon size	0.38	-0.27	0.11
	Intra-platoon spacing	-0.20	0.1	-0.08
	Inter-platoon spacing	-0.14	-0.28	-0.21
	MPR	-0.39	0.86	0.43
LOS E	Platoon size	0.38	0.04	0.01
	Intra-platoon spacing	-0.06	0.43	0.42
	Inter-platoon spacing	-0.35	0.17	0.06
	MPR	-0.49	0.75	0.60
LOS F	Platoon size	-0.01	0.08	0.29
	Intra-platoon spacing	-0.25	0.17	0.21
	Inter-platoon spacing	-0.08	-0.28	-0.26
	MPR	-0.87	0.58	0.47

교통상황별 화물차 군집주행 운영 조건에 따른 평균통행속도와 차로변경방해건수, 진출입구간방해건수의 스피어만 순위 상관계수를 산출한 결과는 다음과 같다.

군집 내 화물차 수의 경우 LOS C, D, E에서 상관계수 값이 0.59, 0.38, 0.38로 평균통행속도와 보통의 연관성을 가진다. 그러나 LOS A, B, F일 때 -0.12, 0.12, -0.01로 연관성이 약하거나 매우 떨어지는 것으로 나타

나 교통상황이 원활 혹은 정체가 심해지는 상황에서 상대적으로 연관성이 낮은 것으로 나타났다. 차로변경 방해건수의 경우 LOS A에서 F까지 모든 상황에서 낮은 상관성을 가지는 것으로 나타났다.

군집 내 화물차 간격의 경우 평균통행속도는 LOS A부터 F까지 모두 괄목할 만큼 높은 상관성은 가지지 않는 것으로 나타났다. 차로변경방해건수와의 관계를 살펴보면 LOS E와 F를 제외한 나머지 상황의 경우 낮은 상관성을 가지는 것으로 나타났다.

군집 간 간격의 경우 LOS B부터 D까지 평균통행속도와의 상관계수 값이 $-0.14 \sim -0.36$ 의 값을 가지는 것으로 나타나 낮은 상관관계가 나타났으나, 나머지의 경우 상관성이 존재하지 않는 것으로 판단된다. 차로변경방해건수의 경우 모든 상황에서 특별한 상관관계가 나타나지 않았다.

군집주행 화물차 비율의 경우 LOS F에서 평균통행속도와의 상관계수가 -0.87 로 나타나 강한 상관관계가 나타났다. 차로변경방해건수의 경우 군집주행 화물차 비율의 증가에 따라 함께 증가하는 형태로 예상했던 상관관계가 나타났다.

3. 소결

화물차 군집주행 운영조건과 평균통행속도, 차로변경방해건수, 진출입구간방해건수와의 상관분석 결과를 통해 군집 내 화물차 수의 경우 LOS C, D, E의 조건에서 평균통행속도와 연관성이 있는 것으로 나타났다. 반면, LOS A, B, F의 조건에서 평균통행속도와 상관관계가 약한 것으로 나타났다. 이는 교통량이 현저히 적거나 과도하게 많은 교통상황일 경우 군집 내 화물차 수의 증감이 평균통행속도와 연관성이 낮음을 의미한다. 차로변경방해건수의 경우 LOS A에서 D까지 약한 상관관계가 존재하는 것으로 나타났으며, LOS E와 F의 경우 상관관계가 거의 없다는 것을 알 수 있다. 이는 차로변경방해건수 발생 빈도와 함께 살펴볼 경우 교통상황이 혼잡한 상황에서 군집 내 화물차 수에 관계없이 차로변경 방해가 많이 발생하는 것으로 볼 수 있다.

군집 내 화물차 간격의 경우 LOS A부터 F까지 모든 상황에서 평균통행속도와 뚜렷한 상관관계가 나타나지 않아 차간 간격의 크고작음이 평균통행속도에 큰 영향을 미치지 않음을 추측할 수 있다. 차로변경방해건수와의 관계는 LOS A부터 D에 비해 LOS E, F와 상관성이 있는 것으로 나타났으며, 이를 통해 교통상황이 원활한 경우 차간 간격이 차로변경 방해에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 볼 수 있다.

군집주행 화물차 비율의 경우 모든 교통상황에서 평균통행속도와 음의 상관관계를 가져 군집주행 화물차 비율이 증가할수록 평균통행속도가 감소하는 관계가 있다. 하지만 LOS F의 경우 특히 이러한 상관관계가 강하게 나타났다. 이는 기존에 존재하지 않던 새로운 패턴의 형태로 운행되는 화물차와 기존 일반 차량들과의 혼재로 인해 발생한 것으로 판단되며, 교통상황에 따라 군집주행 화물차 비율을 적절하게 변경시키는 최적화된 운영 방법의 개발이 필요함을 의미한다.

V. 결론 및 향후 연구과제

1. 결론

본 연구는 고속도로에 화물차 군집주행이 도입될 경우 교통상황에 따라 교통류에 영향을 줄 수 있는 화물차 군집주행 운영 조건을 분석하고자 하였다. 이를 위해 미시교통시뮬레이션 모형을 통해 수집한 평균통행속도, 차로변경방해건수, 진출입구간방해건수와 화물차 군집주행 운영 조건들 간 상관분석을 수행하였다. 그 결과 대부분의 화물차 군집주행 운영 조건들은 교통류와 큰 상관관계가 나타나지 않았으나 군집주행 화물차

비율의 경우 교통상황이 악화됨에 따라 강한 음의 상관관계를 보였다. 이를 통해 실제 고속도로에 화물차 군집주행을 운영할 경우 무조건적으로 군집주행을 하는 화물차를 증가시키는 것이 효율적인 것이 아닐 수 있음을 확인하였다.

2. 향후 연구과제

하지만 본 연구의 경우 미시교통시물레이션 모형이라는 것과 실제 네트워크가 아닌 토이네트워크를 사용했다는 한계가 존재한다. 또한 VISSIM에서 구현한 군집주행 화물차의 경우 화물차 사이에 일반차량이 접근할 경우 군집의 간격을 벌렸다가 다시 좁히는 등의 현재 개발 중인 실제 군집주행 화물차들의 특성을 구현하지 못하는 한계가 존재한다. 따라서 이러한 문제점을 개선하고 본 연구를 기반으로 의미 있는 결과를 도출하기 위해 다음과 같은 연구가 필요하다고 생각한다.

첫 번째로 실제 네트워크 구현 및 실험을 통한 효과 평가가 필요하다. 실제 도로의 경우 선형, 경사도 등 다양한 조건을 가지고 있으며, 이러한 조건들을 고려한 실제 네트워크에서의 실험을 통해 실제와 가까운 화물차 군집주행의 효과를 도출할 수 있을 것으로 예상된다.

두 번째로 차량 시물레이션 모형 등과 연동의 고려가 필요하다. VISSIM의 경우 화물차 군집주행 운영에 대한 교통류적인 평가가 가능하다는 장점이 있지만, 실제 개발되는 차량들의 성능 및 차량 다이내믹스 등의 세부적인 조건들을 모두 구현하기에는 한계가 있을 것으로 보여진다. 또한, 도로 기하구조에 따른 차량 다이내믹스 등의 변화를 반영하지 못하는 것으로 알려져있다. 미시교통시물레이션 모형을 통해 도출된 결과 데이터를 살펴보면 차로변경방해건수의 경우 LOS C 조건에서 최댓값이 LOS D, E보다 높게 나온 것은 VISSIM 화물차 군집주행 운영 조건이 교통류에 미치는 영향을 제대로 반영하지 못했을 가능성이 존재한다고 생각된다. 따라서 차량을 현실적으로 표현할 수 있는 차량 시물레이션 모형과 미시교통시물레이션 모형의 연동을 통해서 보다 현실적인 실험이 가능할 것으로 판단된다.

세 번째로 추가적인 실험을 진행하여 선형 및 비선형 회귀모형과 같은 고급통계분석을 통해 교통류에 미치는 군집주행 운영 조건에 대한 분석이 필요하다. 본 연구의 경우 화물차 군집주행 운영 조건과 교통 조건과의 상관성을 본질적으로 확인하고자 상관분석을 수행하였다. 이를 통해, 화물차 군집주행 운영 조건과 교통 조건과의 연관성은 확인하였지만 상관분석만으로 조건들간의 영향을 판단하기에 부족함이 있어 향후 연구에서 선형 및 비선형회귀모형 등 다양한 방법을 사용하여 분석될 필요가 있다.

마지막으로 화물차 군집주행 운영 기술에 관한 추가적인 연구가 필요하다. 본 연구를 통해 교통상황이 혼잡할 경우 화물차 군집주행이 오히려 교통류에 악영향을 끼칠 가능성을 확인하였으며, 이러한 가능성을 앞에서 말한 것보다 현실적인 방법들을 통해 검증한 후 긍정적인 효과가 극대화될 수 있도록 하는 화물차 군집주행 운영 기술에 관한 연구가 뒷받침된다면 화물차 군집주행의 도입 및 운영 효율 증진에 도움이 될 것으로 생각한다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 국토교통부 교통물류연구사업의 연구비지원(과제번호 21TLRP-B1437674-04)에 의해 수행되었습니다. 본 논문은 2021년의 한국ITS학회 춘계학술대회에서 발표되었던 논문을 수정·보완하여 작성하였습니다.

REFERENCES

- Calvert S. C., Schakel W. J. and Van Arem B.(2019), "Evaluation and modelling of the traffic flow effects of truck platooning," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 105, pp.1-22.
- European Commission(2011), A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050, p.3.
- Jo Y., Kwon K. J. 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.
- Jo Y., Lee S. Y. and 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.
- Joo S. H. and Oh C.(2016), "An Integrated Simulation Approach for Evaluating Speed Management Strategies Considering Public Health," *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 34, no. 6, pp.554-555.
- Kim S. W.(2007), *Fundamentals of Statistics*, Hakjisa, p.127.
- Lee S. Y. 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.
- Mease D. and Bingham D.(2006), "Latin Hyper rectangle Sampling for Computer Experiments," *Technometrics*, vol. 48, no. 4, pp.467-477.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2013), *Highway Capacity Manual*, p.115.
- Ramezani H., Shladover S. E., Xiao Y. L. 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.
- Rea L. M. and Parker R. A.(2014), *Designing and Conducting Survey Research: A Comprehensive Guide*, Jossey-Bass, San Francisco, United States, p.229.
- Segata M., Bloessl B., Joerer S., Sommer C., Gerla M., Cigno R. and Dressler F.(2014), "Towards Inter-vehicle Communication Strategies for Platooning Support," *7th International Workshop on Communication Technologies for Vehicles*, pp.1-6.
- The Korean Transport Institute, <https://www.ktdb.go.kr>, 2021.03.28.
- Tsugawa S., Jeschke S. and Shladovers S. E.(2016), "A Review of Truck Platooning Projects for Energy Savings," *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, vol. 1, no. 1, pp.68-77.
- Wang M., Maarseveen S., Happee R., Tool O. and Van Arem B.(2019), "Benefits and Risks of Truck Platooning on Freeway Operations Near Entrance Ramp," *Transportation Research Record*, vol. 2673, no. 8, pp.588-602.
- Willesmsen D.(2019), *Requirements Review from EU projects*, European Commission, p.85.