

## 고속도로 화물차 군집주행 적용구간 선정 연구

조영 · 권경주 · 오철\*

한양대학교 교통·물류공학과

### Methodology for Determining Promising Freeway Segments for Truck Platooning

JO, Young<sup>1b</sup> · KWON, Kyeongjoo<sup>1b</sup> · OH, Cheol\*<sup>1b</sup>

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

\*Corresponding author: cheolo@hanyang.ac.kr

#### Abstract

Truck platooning, which is a cluster of trucks in support of vehicle-to-vehicle communication and automated longitudinal vehicle control, is a promising method to both operational efficiency and prevent traffic crashes. Although a variety of studies have been conducted to identify the effects of vehicle platooning on traffic stream, we are not aware of any study attempting to identify promising road segments for vehicle platooning. This study aims to develop a methodology for determining the priority of freeway segments that would potentially lead to maximize the effectiveness of truck platooning. Evaluation measures derived in this study includes truck crash rates, the percentage of truck traffic, segment length, and the number of entry and exit points. Weighting values obtained from an analytical hierarchical process (AHP) method were applied to compute the proposed priority score to determine better freeway segment for truck platooning. Results suggested that a 46.9km freeway segment, from Sacheon IC to Sanin JC, was the most promising segment for maximizing the effectiveness of truck platooning. It is expected that the outcome of this study would be effectively used as a fundamental to establish operational strategies for truck platooning.

**Keywords:** AHP, freeway, priority, promising segment, truck platooning

#### 초록

자율주행 차량의 주행형태 중 군집주행은 차량간 통신으로 연결된 2-5대 차량이 최소한의 안전거리만을 유지한 채 일정한 간격을 두고 주행하는 방식으로, 교통 운영효율성과 안전성을 향상시킬 수 있는 잠재력을 가지고 있다. 그러나 자율주행 및 군집주행이 교통류에 미치는 효과와 관련된 연구는 다수 수행된 바 있지만, 군집주행 도입 시 효과가 극대화될 수 있는 도로구간의 선정에 대한 연구는 미흡한 상황이다. 본 연구의 목적은 화물차 군집주행이 가능한 최적의 고속도로 구간을 선정하는데 초점을 맞추어 그 효과가 가장 클 것으로 예상되는 구간의 우선순위를 도출하는 것이다. 화물차 군집주행 적용구간 선정 평가항목으로는 화물차 사고율, 화물차 비율, 구간길이, 진출입 지점 수로 설정하였다. 각 평가항목의 중요도를 평가하기 위해 계층화 분석법을 적용하였다. 분석결과, 남해고속도로 사천IC-산인JC 46.9km 구간에 화물차 군집주행을 운영하는 것이 가장 적합한 것으로 나타났다. 본 연구에서 도출된 결과는 향후 화물차 군집주행 시범 운영을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

J. Korean Soc. Transp.  
Vol.36, No.2, pp.98-111, April 2018  
<https://doi.org/10.7470/jkst.2018.36.2.098>

pISSN: 1229-1366  
eISSN: 2234-4217

#### ARTICLE HISTORY

Received: 2 November 2017

Revised: 3 January 2018

Accepted: 2 March 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.

**주요어:** 계층화분석법, 고속도로, 우선순위, 구간 선정, 화물차 군집주행

## 서론

자율주행 차량의 주행형태 중 군집주행은 차량간 통신(vehicle to vehicle, V2V)으로 연결된 2-5대의 차량이 줄지어 주행하는 방식으로, 가장 큰 장점은 연료소비효율과 안전성의 증대이다(Tsugawa et al., 2011). 교통 환경성 측면에서 군집주행은 선두차량이 후미차량 간 차두간격을 일정하게 유지함으로써 공기저항을 줄일 수 있고, 이로 인해 연료소비효율이 증가하여 차량의 배출가스 발생량을 줄인다. 또한 교통 안전성 측면에서 후미차량의 제동장치는 선두차량과 동시에 작동하여 후미추돌 사고의 발생가능성을 혁신적으로 감소시킨다. 특히, 화물차로 인한 사고는 승용차보다 훨씬 심각하며, 군집주행으로 사고가 감소될 경우 안전성이 크게 향상될 것으로 예상된다. 화물차 군집주행은 승용차 군집주행보다 에너지 절약 효과가 크며, 승용차 운전자 보다 장거리를 운전하는 트럭 운전자의 작업 부하를 감소시켜 사업용 차량의 안전성 증대에 기여할 수 있다. 이와 같은 효과는 공공성 측면에서 군집주행의 도입 과정 또는 도입 후 교통체계 전반에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

자율주행 및 군집주행이 미치는 긍정적인 효과와 관련된 연구는 수행된 바 있지만 군집주행 도입 시 도로구간의 선정에 대한 연구는 미흡한 상황이다. 본 연구의 목적은 화물차 군집주행이 가능한 고속도로 구간을 선정하는데 초점을 맞추어 그 효과가 가장 클 것으로 예상되는 구간의 우선순위를 도출하는 것이다. 화물차 군집주행 적용구간 선정 시 요구되는 평가항목을 공공성 측면에서 제시함과 동시에 구간 선정을 위한 평가체계를 구축하였다. 평가항목은 화물차 사고율, 화물차 비율, 구간길이, 진출입 지점 수로 설정하였고, 각 평가항목의 중요도를 평가하기 위해 계층화분석법(Analytical Hierarchical Process, AHP)을 적용하였다. AHP를 통해 도출된 평가항목의 가중치는 표준화된 값과 결합하여 최종적으로 구간의 우선순위를 도출하는데 사용되었다. 본 연구의 결과물은 국내 고속도로를 대상으로 화물차 군집주행 적용구간의 우선순위를 도출함으로써 향후 화물차 군집주행 시범운영 구간 선정을 위한 기초자료로 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 국내외 화물차 군집주행이 교통에 미치는 효과 관련 연구와 AHP를 적용한 가중치 산출 관련 문헌을 검토하였다. 3장에서는 화물차 군집주행 구간 선정을 위한 평가항목과 평가체계를 제시하였다. 4장에서는 화물차 군집주행 평가항목에 따른 적용결과를 제시하였으며 마지막 장에서는 본 연구의 연구 결과를 요약하고, 연구의 활용방안 및 향후 연구과제에 대해 서술하였다.

## 관련문헌 고찰

### 1. 국내외 화물자동차 교통 및 통행환경 현황

화물차 군집주행은 고속도로 물류수송 여건에 상당한 영향을 줄 수 있기 때문에 국내외 물류계획 측면에서 화물자동차의 교통 및 통행환경에 대한 고려가 필요하다. 도로교통량통계연보(2016)에 따르면 전체 차종에 대한 고속도로 일평균교통량은 50,098대/일로 나타났으며, 이 중 화물차 일평균교통량은 13,211대/일로 26.4%를 차지한다. 국내 물류정책은 국가물류기본계획을 중심으로 물류산업 효율화 정책을 시행하고 있으며, 화물자동차의 연료절감 관련 연구를 추진하고 있다. 해외의 경우, 미국 DOT (Department of Transportation)는 Transportation for a New Generation(2013)을 통해 운송차량에 대한 최소 안전성 기준을 개발하겠다고 보고하였다. 또한 유럽의 CEF (Connecting Europe Facility, 2014) 운송 프로그램은 화물차량에 대한 안전을 확보하고, 교통인프라 및 차량간 상호연결을 통해 운송서비스의 효율성을 향상시킬 수 있다고 제시하였다. 일본은 지난 2013년도에 종합물류 시책 추진프로그램을 통해 화물자동차의 에너지 효율성을 높이고 이산화탄소 저감을 위한 계획을 설정한 바가 있다.

## 2. 화물차 군집주행 효과 관련 연구

군집주행 기술을 활용한 차량의 군집주행 서비스는 크게 종 방향 제어 시스템(Longitudinal control system)과 횡 방향 제어 시스템(Lateral control system)의 지원으로 실현 가능하다. 종 방향 제어 시스템은 군집간 또는 군집내 차량의 속도를 조절하여 일정한 간격을 유지시킴으로써 충돌을 방지한다. 횡 방향 제어 시스템은 차선을 유지함으로써 주변 차량과의 충돌을 예방한다. 이와 같은 군집주행 서비스가 구현될 경우 안전성 확보, 도로 용량의 증가, 에너지 효율의 증대와 같은 효과를 기대할 수 있다. Tsugawa et al.(2011)은 군집주행 시 차량간격과 속도를 일정하게 유지함으로써 도로의 용량이 증가한다고 제시하였다. 현장실험을 통해 25톤 화물차 3대의 차량이 군집내 간격을 10m로 유지하여 주행할 경우, 안전성이 증가함과 동시에 연비효율이 평균 13.8% 증가하여 에너지가 절감에 기여한다고 분석하였다. 또한 시뮬레이션을 이용하여 군집 비율이 40%일 경우, 군집내 간격을 10m에서 4m로 점차 줄여가며 주행할 경우에는  $CO_2$  감소량이 2.1%에서 4.8%로 나타나 군집내 간격이 짧을수록 더욱 감소하는 것으로 분석되었다. 군집내 간격 뿐만 아니라 군집간 간격을 조절함으로써 나타나는 긍정적인 효과에 관한 연구도 수행되었다(Amoozadeh et al., 2015). 군집주행 차량은 짧은 차두간격을 유지하며 주행하기 때문에 속도의 분산이 감소하여 안전성이 향상되고 동시에 통과교통량이 증가하는 것을 시뮬레이션 실험 결과를 분석하여 제시하였다. 군집간 간격이 5초에서 2초로 짧아질수록 통과교통량은 최대 1.5배 증가하는 것으로 보고하였다. 군집주행은 안전성을 향상시키는 것 뿐만 아니라 운영효율성을 증가시키기 때문에 긍정적인 효과를 나타낼 수 있다고 서술하였다. 국내 연구의 경우, 메타분석을 적용하여 군집주행의 효과를 분석한 연구가 수행되었다(Youn et al., 2016). 메타분석은 기존연구를 분석하는 방법 중 하나로 두 개 이상의 개별적인 연구결과를 통합하는 방법이다. 군집주행과 관련된 총 17건의 논문과 11건의 보고서를 수집하여 교통 운영효율성 및 환경성 측면에서 나타나는 효과를 제시하였다. 메타분석 결과, 교통 운영효율성 측면에서 군집주행 시 도로 용량이 24% 증가하는 것으로 도출되었다. 교통 환경성 측면에서는 군집 주행 시 연료 절감율이 23% 증가하는 것으로 분석되었다.

## 3. AHP 기법을 적용한 교통운영관리 연구

본 연구에서는 고속도로의 교통운영관리를 위한 우선순위 결정 연구에 대한 기존 연구를 검토하였다. 교통시스템의 원활한 도입을 위해 도입 기준을 수립하고 대상지점을 선정하기 위하여 다면적 평가기준을 통한 의사결정지원 방법인 AHP를 활용한 분석이 수행되었다. Choi et al.(2009)는 고속도로에서 램프미터링을 적용하기 위한 지점을 선정하는 연구를 수행하였으며, 도입 지점의 우선순위는 AHP를 통해 도출하였다. 도입 기준을 마련하기 위해 국내 여건을 반영하였으며, 각각의 기준을 만족하는 지점을 도입 대상지점으로 선정하였다. 또한 고속도로 공사구간에 가변제한속도를 구현하는 교통류 제어전략을 구성하기 위해 교통소통, 교통안전, 환경을 대표하는 척도를 동시에 고려할 수 있는 평가방법론을 정립한 연구가 수행되었다(Park et al., 2013). 여러 효과척도를 복합적으로 고려한 교통류관리전략 평가방법을 통해 최적의 대안을 도출하였다. AHP 기법은 교통안전에 영향을 미치는 주요요인의 가중치를 도출함으로써 여러 가지 대안들에 대한 평가가 가능하다. Yun et al.(2013)는 고속도로에서 톨게이트의 하이패스 설치 및 운영의 편리성에 대한 가중치를 구성하여 하이패스 차로 설치 대안들에 대한 평가방법론을 개발하였다.

## 4. 시사점

국내외 화물자동차 물류운송산업에 대한 계획은 화물차 군집주행 도입을 위한 발판을 마련할 것으로 기대된다. 문헌 고찰 결과, 대부분의 연구에서는 군집주행의 기능 및 기술, 교통시스템 성능에 미치는 긍정적인 효과에 대한 분석이 수행되었다. 그러나 군집주행 도입에 따른 구간을 선정하기 위한 정량적 평가방법에 대한 연구는 미비하였다. 새로운 교통시스템의 도입을 위하여 국내 실정을 반영한 우선순위 결정 연구에서는 AHP 분석법을 활용한 연구가

보고되었다. 따라서 고속도로에 화물차 군집주행 도입 시 구간 선정에 위한 포괄적이고 분석적인 연구가 필요함을 인지하고, 이를 위하여 우선순위 결정 방안을 제시하였다.

### 분석방법론

본 연구에서는 화물차 군집주행 적용구간을 선정하기 위한 평가항목을 제시하고 평가체계를 구축하였다. 전문가 설문조사를 통해 평가항목의 가중치를 도출하고 적용하였으며, 최종적으로 화물차 군집주행 서비스가 실현될 경우 효과가 극대화될 수 있는 구간을 제시하였다. 본 연구의 수행과정은 Figure 1과 같다.

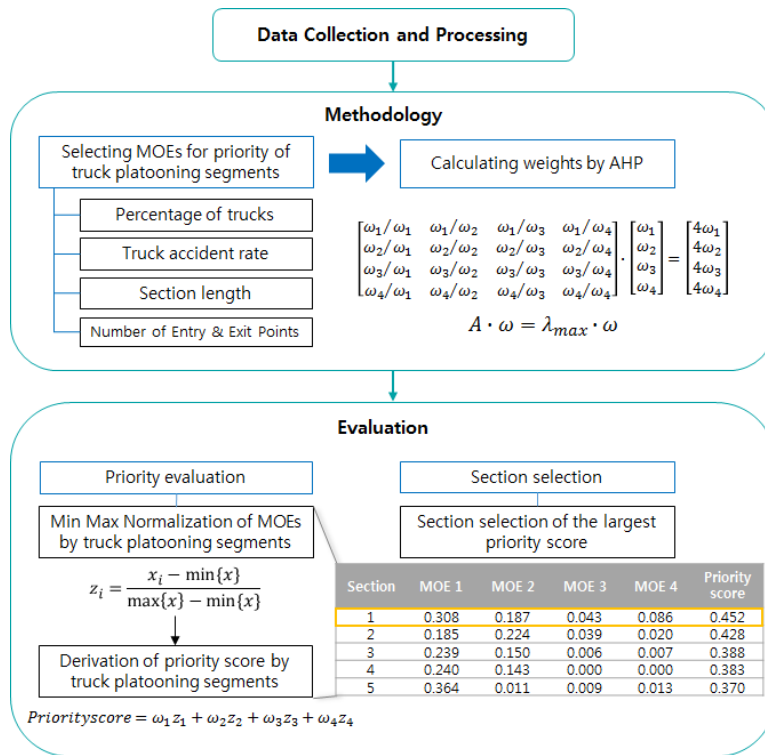


Figure 1. Overall Research Procedure

분석대상 노선의 경우 전국 고속도로를 대상으로 차종별 교통량이 수집 가능한 노선을 선정하였다. 선정 결과, 국내 25개 고속도로가 대상노선으로 선정되었으며 분석기간은 2013-2015년으로 설정하였다. 고속도로는 IC/JC-IC/JC 구간별로 구분하였다. 한편, 군집주행 기능을 탑재한 화물자동차는 connected and automated vehicle로 SAE 자율주행기술 수준에 따라 0-5 level 중 상위 수준을 나타낸다. SAE level 4는 특정 도로조건과 환경에서 자율주행이 가능한 단계로 운전자의 조작 없이 차량의 제어기능을 자동화한 단계이며, level 5는 모든 기능이 완전 자동화된 단계이다(SAE, 2014). 본 연구에서는 고속도로에 화물차 군집주행을 도입하기 위하여 공공성 측면에서 교통안전특성, 교통운영특성, 기하구조특성을 고려하였으며 이에 해당하는 자료를 수집하였다. 교통안전특성을 고려하기 위하여 교통사고자료를 수집하였으며, 고속도로 구간별 발생한 사고 중 화물 또는 트레일러로 인한 사고는 화물차 사고로 통합하여 화물차 사고율을 산정하였다. 또한, 도로교통량통계연보 자료를 이용하여 구간별 전체 차종을 대상으로 한 AADT (Annual Average Daily Traffic)와 화물차 AADT를 수집하였으며 이를 통해 화물차비율을 산정하였다. 마지막으로, 기하구조특성을 나타내는 고속도로 구간별 차로 수, 진출입 지점 수, 구간길이를 수집하였다. 진출입 지점 수는 IC, JC 그리고 휴게소를 포함한다.



## 1. 분석 개요

도로교통법 시행규칙 제39조 ‘고속도로에서의 차로에 따른 통행구분’에 의하면, 편도 3차로 이상의 고속도로의 경우 적재중량이 1.5톤을 초과하는 화물자동차, 특수자동차 및 건설기계는 최 우측 차로에서 통행되어야 한다고 명시되어 있다. 외국의 경우 국내와 마찬가지로 차량이 도로를 통행함에 있어 우측차로 통행원칙을 기본으로 하고 있으며, 대형화물자동차의 경우 가장 바깥쪽 차로 통행원칙을 적용하고 있다. 미국의 경우 Vehicle Code, California Law의 21655조항에 따라 편도 3차로 이상의 고속도로에서 3축이상의 트럭, 견인차량 등에 대해서는 최 우측차로를 주행하도록 규정하고 있다. 또한, 네덜란드의 Road Traffic Signs and Regulations 43조항에 편도 3차로 이상의 고속도로에서는 총길이 7m 이상 또는 화물차량은 우측차로로 통행하는 것을 원칙으로 하고 있다. 좌측차로 통행인 나라는 대표적으로 영국이 있으며 The Highway Code 265조항에 따라 편도 3차로 이상 고속도로에서 트레일러를 결합한 모든 차량, 총중량 7.5톤 초과 화물자동차는 가장 안쪽차로를 이용해서는 안된다고 명시되어 있다. 국내외 모두 편도 3차로 이상의 고속도로에서 중형 또는 대형 화물자동차에 대해 가장 바깥차로를 주행하도록 제한하고 있다.

한편, 자동차 및 자동차부품의 성능과 기준에 관한 규칙 제14조의2 ‘차로이탈경고장치’와 제15조의3 ‘비상자동제동장치’에 의하면 길이 11미터를 초과하는 승합자동차와 차량총중량 20톤을 초과하는 화물·특수자동차에는 차로이탈경고장치와 비상자동제동장치를 설치하여야 한다고 명시되어 있다. 이와 같은 첨단운전자지원시스템(Advanced Driver Assistance System, ADAS)은 보다 안전한 운행 환경을 가능하게 함으로써, V2X 통신 기반의 군집주행을 적극 지원할 것으로 판단된다. 반면 ADAS가 장착되지 않은 군집주행 차량은 주변 환경이나 위치를 인지하는 인지기술, 경로와 거동에 대해 의사결정을 하는 판단기술, 가·감속, 조향 및 기어 등을 제어하는 제어기술 등의 구현이 어려울 것으로 예상된다(Bin and Kim, 2016). 즉, 첨단 도로인프라(Vehicle-to-Infra, V2I)나 다른 차량(Vehicle-to-Vehicle, V2V)과 연계되어 자율주행 및 군집주행을 수행하는 차량은 ADAS 지원이 적극적으로 필요하다. 이에 근거하여 고속도로의 최 우측 차로에서 첨단안전장치의 장착 의무화가 적용된 20톤 이상의 화물차에 대해 우선적으로 군집주행을 적용하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 도로교통조사 12종 차종분류표를 기준으로 6-12종에 해당하는 중·대형화물차에 대해 분석을 수행하였다.

## 2. 평가항목 설정

고속도로에 화물차 군집주행을 도입하기 위해서는 교통안전특성, 교통운영특성, 기하구조특성이 고려되어야 할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 각각의 특성을 고려하기 위하여 교통사고자료, 도로교통량자료, 기하구조자료를 수집하였다. 수집된 자료를 기반으로 화물차 군집주행 적용구간을 선정하기 위한 평가항목을 설정하였다. 교통안전 특성에는 화물차 사고율, 교통운영특성에는 화물차 비율을 평가항목으로 설정하였다. 화물차 사고율과 화물차 비율은 AADT 대비 비율로 설정하여 절대적인 화물차 교통량의 영향을 고려하지 않았다. 예를 들어, 어느 두 구간에 군집주행을 하는 화물차량의 수는 동일하나 비군집차량이 더 많은 구간은 오히려 운영효율성이 저하될 가능성이 높다고 판단된다. 절대적인 화물차 교통량의 규모도 중요하나, 비군집차량에 대한 교통량을 동시에 고려해야 할 것으로 판단되어 각 평가항목은 비율로 산정하였다. 또한 기하구조특성에 속하는 평가항목으로 구간길이, 진출입 지점 수를 선정하였다. 한편, 화물차 사고율과 화물차 비율, 구간길이와 진출입 지점 수는 상관성이 높은 평가항목으로 예상되었으나 상관분석결과 유의확률이 각각 0.241, 0.702( $p>0.05$ )로 나타나 변수간 상관관계가 없는 것으로 분석되었다.

### 1) 화물차 사고율

2013-2015년도 고속도로 사고자료를 분석한 결과, 화물차 사고의 주 사고원인 중 운전자요인으로 인해 발생한 사고는 71.2%로 나타났다. 주 사고원인별 화물차 사고건수는 Table 1에 제시하였다. 군집주행 도입 시 운전자요인으로 인한 과속, 졸음, 주시태만과 같은 사고 예방이 가능할 것으로 판단된다. 군집주행은 운전자의 조작 없이 차량의

제어기능을 자동화함으로써 동일한 속도를 유지하고, 속도의 변동이 작아 안전성이 향상되기 때문이다(Amoozadeh et al., 2015). 따라서 화물차로 인한 사고발생이 잦은 구간일수록 화물차 군집주행 시행 시 사고예방의 가능성이 증대될 것으로 판단되어 화물차 사고율을 평가항목으로 선정하였다.

**Table 1. Major causes leading to truck crashes by year** (unit: number of accidents)

Major cause of accident	Year		
	In 2013	In 2014	In 2015
Driver factor	1738	1384	801
Vehicle factor	398	323	207
Others factor	281	251	127

### 2) 화물차 비율

선행연구 논문에 따르면 군집주행으로 인해 도로의 용량이 증가되어 에너지 절감에 기여하는 것으로 나타났다(Tsugawa et al., 2011). 고속도로와 시험도로에서 화물차 군집주행을 수행한 결과, 차량의 단위 연료 당 주행거리 비율이 14%까지 증가한 것으로 분석되었다. 연료소비효율의 증가는 일반적으로 차량 배출가스 발생량을 감소시킨다. 이에 따라 전체 교통량 대비 화물차 교통량이 많을수록 화물차 군집주행 도입 시 운영효율성 뿐만 아니라 환경성 증대 효과를 기대할 수 있다.

### 3) 구간 길이

고속도로 노선별 IC/JC-IC/JC 구간으로 나누어 각 구간의 길이를 수집하였다. 군집주행 구간의 길이가 짧을 경우, 군집주행의 효과를 기대하기 어려울 것으로 판단된다. 예를 들어, 군집차량의 속도가 80km/h이고 구간의 길이가 5km일 경우, 대략 4분간 군집주행을 하게 된다. 이에 따라, 구간의 길이가 짧을수록 군집주행을 시행하는 시간도 짧아지기 때문에 긍정적인 효과를 기대하기 어려울 뿐만 아니라 비군집차량의 혼란을 야기할 수 있다. 따라서 기존 연구에서 제시한 군집주행의 안전성, 운영효율성, 그리고 환경성 측면에 효과를 나타내기 위하여 구간의 길이가 고려되어야 한다.

### 4) 진출입 지점 수

고속도로에서 IC, JC 또는 휴게소와 같은 진출입 지점은 합류 또는 분류 차량과의 상호작용이 빈번하게 발생한다. 다시 말하면, 진출입 지점 수가 많을수록 군집차량은 해체 또는 형성을 수행하는 빈도가 증가하고, 진출입 차량은 군집 차량군으로 인해 심리적인 부담감을 느낀다(Lee and Oh, 2017). 따라서 진출입 지점 수가 많을수록 운영효율성이 저하될 개연성이 상승하므로 진출입 지점 수를 고려해야 한다.

## 3. 평가체계 구축

화물차 군집주행 적용구간을 선정하기 위하여 평가항목을 적용한 분석절차를 구축하였다. 분석절차에 의해 도출된 결과는 구간별 화물차 군집주행 가능 여부를 나타낸다. 한편, 군집주행 가능 구간이 연속적으로 선정되는 경우, 연속된 구간을 한 개의 구간으로 통합하였다. 선정된 구간의 우선순위를 도출하기 위하여 AHP 기법을 적용한 평가항목별 가중치를 산정하였다. 산정된 가중치는 각 평가항목별 표준화된 값과 결합하고, 최종적으로 화물차 군집주행 구간의 우선순위를 제시하였다. 화물차 군집주행 가능구간을 선정하고 우선순위를 도출하는 분석절차는 Figure 2와 같다.

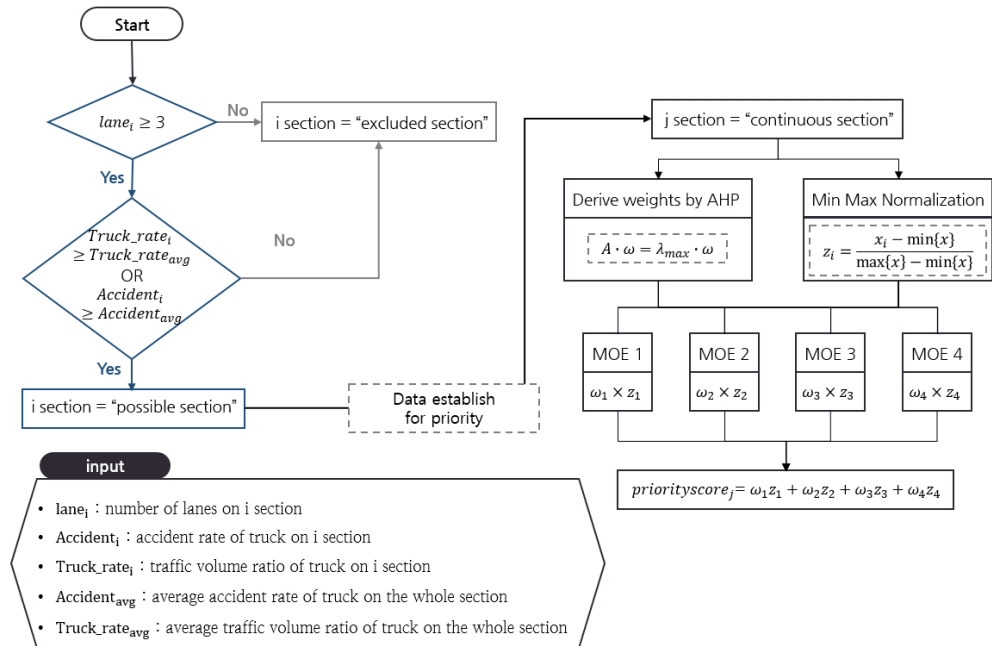


Figure 2. Overall methodology for selecting possible section and priority of truck platooning

### 1) 화물차 군집주행 가능구간 선정

본 연구는 국내 25개의 고속도로를 중심으로 IC/JC-IC/JC로 구분하여 각 구간별 차로 수를 수집하고, 화물차 사고율과 화물차 비율을 산정하였다. 화물차 군집주행 가능 구간을 선정하기 위하여 2단계를 순차적으로 수행하였다. 우선, 구간별 차로 수가 편도 3차로 이상인 구간을 고려하였다. 도로교통법 시행규칙 제39조 ‘고속도로에서의 차로에 따른 통행구분’에 따르면 편도 2차로 고속도로의 경우, 2차로는 모든 자동차의 주행차로로 1차로는 앞지르기 차로이다. 만약 2차로에 화물차 군집주행을 시행할 경우, 앞지르기 차로의 기능이 상실하고 비군집 차량의 차로 변경이 어려울 것으로 예상된다. 이에 따라, 군집주행 차로인 2차로를 제외한 1차로의 서비스 수준은 크게 저하되기 때문에 차로수가 편도 3차로 이상인 구간을 우선적으로 고려하였다. 다음으로, 구간별 화물차 비율이 전체 구간의 평균 화물차 비율 이상인 구간을 선정하였다. 화물차 비율은 Equation 1과 같이 산정한다.

$$\text{화물차비율}(\%) = \frac{\text{화물차} AADT}{\text{전체} AADT} \times 100 \tag{1}$$

화물차 사고율도 화물차 비율과 마찬가지로 전체 구간의 평균 화물차 비율 이상인 구간을 고려하였다. 화물차 사고율은 Equation 2와 같이 산정한다.

$$AR = \frac{1 \times A}{365 \times T \times \text{화물차} AADT \times L} \quad (A: \text{화물차 사고건수}, T: \text{분석기간(년)}, L: \text{구간길이(km)}) \tag{2}$$

각 구간별 화물차 비율이 평균 화물차 비율보다 작더라도 화물차 사고율이 평균 화물차 사고율보다 클 경우 군집주행 가능구간으로 선정하였으며, 마찬가지로 화물차 사고율도 평균 화물차 사고율보다 작더라도 화물차 비율이 평균 화물차 비율보다 클 경우 군집주행 가능구간으로 선정하였다.

## 2) AHP를 이용한 가중치 도출

본 연구에서는 평가항목의 가중치를 산출하기 위하여 AHP에서 사용되는 쌍대 비교를 통한 설문조사 방법을 수행하였다(Saaty et al., 1979). AHP 기법은 평가기준이 다수이며 복합적인 경우, 이를 계층화하여 중요요인과 세부요인으로 분해하여 쌍대비교를 통해 중요도를 산출한다. 각 속성의 중요도를 파악함으로써 최적의 대안을 선정하는 기법으로 정의 가능하며 타 모델에 비해 계량적 및 비계량적 척도를 동시에 고려 가능하고, 이용이 편리하여 다기준 의사결정 문제에 쉽게 적용 가능하다는 장점이 있다.

한 계층 내에서 비교 대상이 되는  $n$ 개 요소의 상대적인 중요도를  $w_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 라 하면, 가중치를 산출하기 위한 쌍대비교행렬  $A$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A = \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{bmatrix}$$

행렬  $A$ 에 평가항목의 상대적 중요도를 나타내는 가중치인 열벡터  $w$ 를 곱하게 되면 Equation 3의 관계를 갖는다.

$$\begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} nw_1 \\ nw_2 \\ \vdots \\ nw_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

이러한 관계는 Equation 4를 만족시키는 행렬  $A$ 의 최대고유치를 구하는 특성방정식을 푸는 과정이다.

$$A \cdot w = \lambda_{\max} \cdot w \quad (\lambda_{\max} : \text{행렬 } A \text{의 최대 고유치}) \quad (4)$$

$$w = [w_1, w_2, \dots, w_n]$$

AHP에서는 설문 수행자가 얼마만큼의 일관성을 가지고 설문을 수행했는지 확인하는 지표로 일관성지수(CI; Consistency index)를 사용한다. 응답에 있어서 논리적인 모순을 잡아내며, 논리적 모순이 발생하게 되면 일관성 지수가 증가한다. 다시 말해, 일관성 지수의 값이 높을 수록 결과의 신뢰성이 떨어진다고 할 수 있다. 일반적으로 일관성지수가 0.1 이하인 경우 응답자의 답변을 신뢰하며 Equation 5를 통해 산출할 수 있다.

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (n : \text{평가항목의 개수}) \quad (5)$$

## 분석 결과

### 1. 화물차 군집주행 가능구간 선정

본 연구에서는 고속도로에서 화물차 군집주행이 가능한 구간을 선정하기 위하여 차로 수, 화물차 비율, 화물차 사고율을 고려하였다. 분석대상으로 선정된 25개 노선 중 고창담양선, 남해제1지선, 남해제2지선, 대전남부순환선, 서천공주선, 순천완주선, 중부내륙선, 중앙선, 통영대전선, 그리고 호남선의지선은 편도 2차로인 고속도로로 본 연구에서 제외하였다. 또한 논산천안선은 데이터 이상으로, 총 11개의 노선이 제외되어 14개의 노선을 고려하였다. Table 2에 14개 고속도로에 대해 연장, AADT, 화물차 AADT, 화물차 사고건수를 제시하였다.



**Table 2.** Analysis scope of this study by expressway from 2013 to 2015

Expressway	Length (km)	AADT	AADT of trucks	Number of truck accidents
Gyeongbu	416.1	14,209,508	939,562	283
Namhae	166.4	5,422,165	598,352	215
Gwangju Daegu	176.2	623,372	31,273	16
Seohaean	340.8	6,342,286	337,908	152
Ulsan	14.3	300,287	30,937	15
Yeongdong	234.4	8,652,825	233,726	120
Jungbu	117.23	4,770,122	138,249	108
Pyeongtaek Jechen	126.9	1,473,378	466,640	37
Donghae	85.1	361,681	15,958	7
Gyeongin	23.9	2,778,909	77,593	13
Second Gyeongin	25.4	2,503,954	113,676	12
a beltway around Seoul	127.9	16,392,146	421,007	45
Branch line of Jungbu Naeryuk	30.0	1,021,591	58,245	20
Branch line of Jungang	17.4	767,051	80,983	12

분석기간인 2013-2015년 동안 14개 고속도로에 대해 평균 화물차 비율은 5.94%, 평균 화물차 사고율은 4.63%로 도출되었다. 각 고속도로는 IC/JC-IC/JC로 구분하여 구간별 차로수가 편도 3차로 이상이고, 화물차 사고율 또는 화물차 비율이 평균보다 클 경우, 화물차 군집주행 가능 구간으로 선정하였다. 이 때, 선정된 구간이 연속적일 경우, 연속된 구간을 한 개의 구간으로 통합하였다. 각 고속도로에 대해 화물차 군집주행이 가능한 구간은 Table 3에 제시하였다.

**Table 3.** Characteristics of selected freeway segments for analysis

Expressway	Section	Length (km)
Gyeongbu	Yangsang JC - EonyangJC	27.3
	Yeongcheon IC - Youngdong IC	136
	Ochon IC - Shintanjin IC	22.3
	SouthCheongjuIC - Cheongju JC	3.5
	Nami JC - NorthCheonanIC	48.1
	Anseong IC - Giheung IC	27.1
	Shingal JC - Pangyo JC	13.0
Namhae	Sacheon IC - Sanin JC	46.9
	Changwon JC - Busan	36.9
Gwangju Daegu	Goseo JC - Damyang JC	3.0
	EastGoryeong IC - Goryeong JC	1.5
Yeongdong	Seochang JC - NorthSuwonIC	30.8
	Shingal JC - Maseong IC	6.6
	Hobeop JC - Yeosu JC	15.1
A beltway around Seoul	Toegyewon IC - Byeollae IC	2.0
	Songchu IC - Tongil-ro IC	8.9
	Ilsan IC - Jayu-ro JC	2.2
	Kimpo IC - Noji JC	3.7
	Jangsu IC - Ahnhyun JC	6.9
	Hagui JC - Pangyo JC	8.8
Ulsan	Ulsan JC - Terminal	2.5
Jungbu	Sangok JC - Hanam IC	5.2
Seohaean	Dangjin JC - Balan IC	44.4
	Ansan JC - Chonam JC	2.9
	Mokgam IC - KwangmyungIC	1.2
Pyeongtaek Jechen	WestPyeongtaekJC - WestAnseongIC	25.7



비율의 가중치는 0.364로 4가지의 평가항목 중 가장 크게 도출되었다. 다시 말하면, 고속도로에서 화물차 군집주행 적용 구간을 선정할 때 화물차 비율이 가장 우선시 되어야 하며, 화물차 교통량이 많을수록 군집주행 시행 시 운영효율성의 증대 효과를 기대할 수 있다고 판단된다. Table 4에 평가항목의 가중치 산출 결과를 제시하였다.

각 평가항목은 기준이 다르기 때문에, 가중치를 적용하기 이전에 평가항목에 대해 점수 표준화가 필요하다. Min-Max Scale 공식을 이용하여 각 항목의 점수를 0-1사이로 표준화 할 수 있으며 Equation 6와 같다(Jain and Bhandare, 2011). 만약 어느 한 값이 최소인 경우, 점수표준화에 의해 0으로 도출될 수 있다.

$$z_i = \frac{x_i - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \tag{6}$$

( $z_i$  : 평가항목 i의 표준화 점수,  $x_i$  : 평가항목 i의 점수,  $\min(x)$  : 점수의 최소값,  $\max(x)$  : 점수의 최대값)

**Table 4. Result of weighting value calculation**

MOE	Percentage of trucks	Truck accident rate	Section length	Number of entry & exit points
Weights	0.364	0.233	0.197	0.206

평가항목별 표준화된 점수에 가중치를 적용하여 우선순위 점수를 산출하며, 값이 클수록 구간의 우선순위는 높아진다. 즉, 화물차 군집주행 가능구간으로 선정된 구간의 화물차 교통량이 많고, 화물차 사고가 빈번하게 발생하며 구간의 길이가 길수록 우선순위가 높아진다. 반면에 진출입 지점 수는 적을수록 우선순위가 높아진다. 각 구간별 우선순위 점수를 산출하는 방법은 Equation 7과 같고, Table 5에 10개 구간에 대해 우선순위를 제시하였다. 분석결과, 남해선 사천IC-산인JC 구간의 우선순위 점수가 0.452로 가장 크게 도출되었으며, 서해안선 당진JC-발안IC는 0.428로 2순위, 평택제천선 서평택JC-서안성IC가 0.388로 3순위로 나타났다. 이를 지역 간 통행으로 고려하면 경남 진주시-경남 함안군, 충남 당진시-경기도 화성시, 경기도 평택시-경기도 안성시에 대해 화물차 군집주행 우선순위가 높을 것으로 판단된다. 1-3순위에 해당하는 구간의 기하구조특성을 Table 6에 정리하였다.

$$priority\ score_j = 0.364 \times Truckrate_j + 0.233 \times Accident_j + 0.197 \times Length_j - 0.206 \times Ramp_j \tag{7}$$

( $Truckrate_j$  : j 구간 화물차비율,  $Accident_j$  : 화물차사고율,  $Length_j$  : 연장,  $Ramp_j$  : 진출입 지점 수)

**Table 5. Result of truck platooning section priority by using weights and min-max normalization**

Expressway	section	Percentage of trucks	Truck accident rate	Section length	Number of entry & exit points	Priority score
Gyeongbu	Yangsan JC - Eonyang JC	0.364	0.011	0.009	0.013	0.370
	Yeongcheon IC - Youngdong IC	0.280	0.000*	0.197	0.206	0.271
	Ochon IC - Shintanjin IC	0.240	0.143	0.000*	0.000*	0.383
	Nami JC - NorthCheonan IC	0.136	0.002	0.045	0.040	0.143
	Anseong IC - Giheung IC	0.000*	0.233	0.008	0.007	0.235
Namhae	Sacheon IC - Sanin JC	0.308	0.187	0.043	0.086	0.452
	Changwon JC - Busan	0.241	0.128	0.026	0.047	0.349
Yeongdong	Seochang JC - North Suwon IC	0.160	0.193	0.015	0.060	0.308
Seohaean	Dangjin JC - Balan IC	0.185	0.224	0.039	0.020	0.428
Pyeongtaek	West Pyeongtaek JC - West Anseong IC	0.239	0.150	0.006	0.007	0.388

\*If a value is minimum, it is calculated as 0 by a min-max normalization method

**Table 6.** Result of geometric characteristics of the sections (rank 1-3)

Expressway	section	Section length (km)	Number of entry & exit points (two-way)		Number of lanes (two-way)
			IC/JC	rest area	
Namhae	Sacheon IC - Sanin JC	46.9	8	4	8
Seohaean	Dangjin JC - Balan IC	44.4	4	2	6
Pyeongtaek Jechen	West Pyeongtaek JC - West Anseong IC	25.7	4	0	6

## 결론 및 향후 연구과제

자율주행 차량의 주행형태 중 군집주행은 차량간 통신으로 연결된 2-5대 차량이 최소한의 안전거리만을 유지한 채 일정한 간격을 두고 주행하는 방식으로, 교통 운영효율성과 안전성을 향상시킬 수 있는 잠재력을 가지고 있다. 화물차 군집주행은 장거리를 운전하는 사업용 차량 운전자의 작업부하를 감소시킬 뿐만 아니라 후미추돌 사고의 발생 가능성을 혁신적으로 감소시켜 안전성 증대에 기여할 수 있다. 본 연구에서는 화물차 군집주행이 가능한 최적의 고속도로 구간을 선정하는데 초점을 맞추어 그 효과가 가장 클 것으로 예상되는 구간의 우선순위를 도출하는 연구를 수행하였다.

전국 고속도로를 대상으로 차종별 교통량이 수집 가능한 노선을 선정하였다. 선정 결과, 국내 25개 고속도로가 대상노선으로 선정되었으며 분석기간은 2013-2015년으로 설정하였다. 분석범위에 해당하는 도로 교통자료, 교통사고자료, 그리고 도로 기하구조자료를 수집하였다. 수집된 자료를 이용하여 IC/JC 구간별 화물차 사고율과 화물차 비율을 산정하였다. 화물차 군집주행 가능 구간을 선정하기 위하여 교통안전특성, 교통운영특성, 기하구조특성과 같은 3개의 평가영역과 이에 속하는 화물차 사고율, 화물차 비율, 구간길이, 진출입 지점 수를 평가항목으로 설정하였다. 우선, 편도 3차로 이상인 구간을 대상으로 화물차 사고율 또는 화물차 비율이 평균 이상일 경우, 화물차 군집주행 가능 구간으로 선정하는 분석절차를 구축하였다. 다음으로, AHP를 적용하여 평가항목별 가중치를 도출하고, 평가항목의 표준화된 값과 결합하여 선정된 구간의 우선순위를 도출하였다.

화물차 군집주행 가능구간으로 선정된 구간의 최소길이는 1.2km, 최대길이는 136km로 나타났으며 평균은 17.3km로 분석되었다. 본 연구에서는 군집주행 구간의 길이가 짧을 경우, 군집주행의 효과를 기대하기 어려울 것으로 판단되어 평균보다 길이가 긴 총 10개의 구간을 화물차 군집주행 적용구간 우선순위로 선정하였다. 각 평가항목별 가중치는 화물차 비율이 0.364로 가장 높은 중요도를 가지는 것으로 나타났으며, 화물차 사고율은 0.233, 진출입 지점 수는 0.206, 구간길이는 0.197의 가중치를 가지는 것으로 도출되었다. 가중치 산정 결과에 따르면 화물차 군집주행 적용구간 선정 시 화물차 비율이 영향을 많이 주는 것으로 분석되었다. 각 구간별 평가항목의 가중치를 적용한 결과, 남해선 사천IC-산인JC 구간의 우선순위 점수가 0.452로 가장 크게 도출되었다. 따라서 화물차 군집주행 적용구간으로 남해선 사천-산인 46.9km 구간이 선정되었으며, 화물차 군집주행 도입 시 효과가 가장 극대화 될 것으로 기대된다.

본 연구에서 제시한 평가체계에 대한 신뢰도를 높이기 위해서는 다음과 같은 추가적인 연구가 필요하다. 첫째, 평가항목에 대하여 군집주행을 위해 충족되어야 할 최소요구조건을 마련해야 한다. 예를 들어, 오르막구간에서 화물차 군집주행이 불가능할 경우 종단선형 특징은 평가체계 구축 시 추가적으로 고려되어야 할 것이다. 구간길이에 대한 평가항목은 군집주행이 가능한 최소길이를 도출해야 할 것이며, 또한 진출입 지점수가 적더라도 진출입 교통량이 많을 경우 오히려 군집주행의 효과가 저하될 것으로 판단되어 이와 같은 기준을 마련해야 할 필요성이 있다. 둘째, 군집주행 차로를 제외한 이웃한 차로의 서비스수준을 고려하여 군집주행 운영시간을 고려해야 할 필요성이 있다. 화물차 군집주행 적용구간으로 선정된 남해선 사천-산인 구간의 실제 화물차 교통량을 처리할 수 있는 군집운영방안이 제시되어야 하며, 비군집차량의 교통류에 영향을 미치지 않는 범위 내에서 운영되어야 한다. 셋째, 본 연구에

서는 수집된 자료의 특성상 단거리 구간에 대하여 분석을 수행하였으나, 고속도로에서의 화물통행이 대부분 장거리 통행임을 고려한다면 지역 간 통행을 대상으로 분석을 수행할 필요가 있다. 이를 위하여 화물자동차의 O/D(Origin and Destination)를 추정하고 장거리 지역 간 통행을 대상으로 구간을 선정하여 우선순위를 제시해야 할 것이다. 마지막으로, 본 연구에서 제시한 평가항목은 군집주행의 주체가 되는 운송실무자의 평가관점과 차이가 있을 것으로 판단된다. 물류운송업체는 군집주행을 수행함으로써 경제적으로 수익성을 보장받거나 증대할 수 있는 구간을 필요로 할 것이다. 따라서 군집주행의 필요성을 상업성 측면에서 고려하여 운송실무자의 관점에서 평가항목을 재설정하고, 군집주행 구간을 도출할 필요가 있다. 공공의 입장에서 선정된 군집주행 적용구간과 물류운송업체 입장에서 도출된 구간을 비교하여 결과를 제시해야 할 것이다. 물류운송업체가 선호하는 노선에 대한 문제는 OR(Operation Research)과 교통환경과 같은 제약조건에 대한 검토가 수행되어야 한다.

본 연구에서 제시한 평가항목과 평가체계는 화물차 군집주행 적용구간을 선정함으로써 평가항목간의 중요도와 수집된 자료의 특성을 모두 고려하여 분석의 신뢰도를 향상시킬 것으로 판단된다. 또한 향후 화물차 군집주행 시범 운영 구간을 선정하기 위한 기초연구자료로 활용 가능할 것으로 기대된다. 본 연구의 결과는 군집주행의 효과가 가장 극대화 될 수 있는 구간을 선정하기 위한 근거를 마련하는데 의의가 있다. 앞서 언급한 향후 연구내용에 대한 체계적인 분석을 통해 보다 신뢰성 있고 일반화 될 수 있는 결과도출을 위한 다각적인 노력이 필요할 것이다.

## Funding


This work was supported by the National Research Foundation of Korea grant funded by the Korea Government (MSIP) (NRF-2017R1A2B4005835).

## 알림

본 논문은 대한교통학회 제78회 학술발표회(2018.03.09)에서 발표된 내용을 수정·보완하여 작성된 것입니다.

## ORCID

JO, Young  <http://orcid.org/0000-0001-9834-8520>

KWON, Kyeongjoo  <http://orcid.org/0000-0003-4650-8793>

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.
- Bin M. Y., Kim Y. D. (2017), Prospect of Autonomous Vehicle Introduction and Change of Environment for Traffic Use, *Issue&Analysis*, 300, 1-25.
- Choi K. C., Shim S. W., Lee E. E., Kim I. S. (2009), Selection of Expressway Ramp Metering Sites and Priority Making, *Journal of The Korean Society of Civil Engineers* D, 29(5D), 579-585.
- Connecting Eroup Facility, <http://inea.ec.europa.eu/en/cef/>, 2018.01.15.
- Jain Y. K., Bhandare S. K. (2011), Min Max Normalization Based Data Perturbation Method for Privacy Protection, *International Journal of Computer & Communication Technology*, 2(8), 45-50.



- 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.
- Park J. Y., Oh C., Chang M. S. (2013), A Study on Variable Speed Limit Strategies in Freeway Work Zone Using Multi-criteria Decision Making Process, J. Korean Soc. Transp., 31(5), Korean Society of Transportation, 3-15.
- Saaty T. L., Erdener E. R. E. N. (1979), A New Approach to Performance Measurement the Analytic Hierarchy Process, Design Methods and Theories, 13(2), 62-68.
- SAE (2014), Automated Driving-What Comes First: Cars or Standards.
- Tsugawa S., Kato S., Aoki K. (2011), An Automated Truck Platoon for Energy Saving, In Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE, 4109-4114.
- U.S. Department of Transportation (2013), Transportation for a New Generation, 7-9.
- Youn S. M., Oh C., Joo S. H., Jung E. B. (2016), Effectiveness Evaluation of Core Technologies for Automated Vehicle-highway Systems Based on a Meta-analysis, Transportation Technology and Policy, 13(4), Korean Society of Transportation, 30-41.
- Yun I. S., Han E., Lee C. K., Rho J. H., Lee S. J., Kim S. B. (2013), Mobility and Safety Evaluation Methodology for the Locations of Hi-PASS Lanes Using a Microscopic Traffic Simulation Tool, The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems, 12(1), 98-108.