

자율주행기반 교통운영관리를 위한 ADA 개념 정립 및 적용 기법 개발

이설영¹ · 오민수¹ · 오철^{1*} · 정은비²

¹한양대학교 교통·물류공학과, ²한국철도기술연구원 미래교통정책본부

Automated Driving Aggressiveness for Traffic Management in Automated Driving Environments

LEE, Seolyoung¹ · OH, Minsoo¹ · OH, Cheol^{1*} · JEONG, Eunbi²

¹Transportation and Logistics Engineering, Hanyang University, Ansan 15588, Korea

²Future Transport Policy Research Division, Korea Railroad Research Institute, Uiwang 16105, Korea

*Corresponding author: cheolo@hanyang.ac.kr

Abstract

Emerging automated driving environments will lead to a mixed traffic flow depending on the interaction between automated vehicles (AVs) and manually driven vehicles (MVs) because the market penetration rate (MPR) of AVs will gradually increase over time. Understanding the characteristics of mixed traffic conditions, and developing a method to control both AV and MV maneuverings smoothly is a backbone of the traffic management in the era of automated driving. To facilitate smooth vehicle interactions, the maneuvering of AVs should be properly determined by various traffic and road conditions, which motivates this study. This study investigated whether the aggressiveness of AV maneuvering, defined as automated driving aggressiveness (ADA), affect the performance of mixed traffic flow. VISSIM microscopic simulation experiments were conducted to derive proper ADAs for satisfying both the traffic safety and the operational efficiency. Traffic conflict rates and average travel speeds were used as indicators for the performance of safety and operations. While conducting simulations, level of service(LOS) and market penetration rate(MPR) of AVs were also taken into considerations. Results implies that an effective guideline to manage the ADA under various traffic and road conditions needs to be developed from the perspective of traffic operations to optimize traffic performances.

Keywords: automated driving aggressiveness, automated vehicle, conflict rate, micro traffic simulation, traffic operation and management

초록

자율주행자동차는 속도제어를 통해 교통류의 용량을 증대시키고, 위험 상황 발생 시 차량을 제어함으로써 인적요인으로 인한 사고를 감소시키는 첨단기술로 대두되고 있다. 그러나 자율차와 비자율차가 혼재되어 있는 상황에서 개별자율차의 주행행태가 인근 비자율차에 영향을 미쳐 교통류의 성능이 저하될 것이라는 기존 연구결과들이 꾸준히 발표되고 있다. 이러한 연구 결과는 자율주행환경에서 도로교통시스템의 운영효율성과 안전성을 증대시키기 위한 교통운영관리의 필요성을 나타내며, 본 연구에서는 자율주행기반의 교통운영 관리를 위한 새로운 개념을 제안하고 이를 통한 교통운영관리 방안을 제시하고자 한다. 본 연구에서는 개별자율차의 주행특성을

J. Korean Soc. Transp.
Vol.36, No.1, pp.38-50, February 2018
<https://doi.org/10.7470/jkst.2018.36.1.038>

pISSN : 1229-1366
eISSN : 2234-4217

Received: 22 November 2017

Revised: 23 December 2017

Accepted: 15 January 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.

반영한 자율주행강도라는 새로운 개념을 정의하였으며, 시뮬레이션 분석을 통해 자율주행강도에 따른 교통류의 변화와 적정 자율주행강도를 도출하는 방법론을 제시하였다. 분석 시나리오 설정 시 자율주행강도, 서비스수준, 시스템보급률, 사고유무를 고려하였으며, 운영효율성과 안전성 평가를 위해 주행속도와 상충진수를 평가지표로 활용하였다. 분석결과 시나리오 구성요소와 자율주행강도간의 관계를 파악하였으며, 운영효율성과 안전성 지표간의 패턴을 분석하였다. 통행자유도가 낮은 경우, 자율차의 주행 적극성이 높아질수록 안전성이 저하되는 것으로 나타났으며 소극적인 자율주행강도가 적정함을 확인하였다. 본 연구에서 제안한 자율주행강도는 자율주행시대의 새로운 교통운영관리 기법 및 전략 수립의 기반이 되어 보다 안전하고 효율적인 자율주행환경 구현에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어: 교통운영관리, 미시교통시뮬레이션, 자율주행자동차, 자율주행적극성, 상충률

서론

자율주행차의 도입으로 인해 자율차와 비자율차간의 상호작용에 대한 이해의 필요성이 대두되었으며, 이러한 자율주행 기반의 도로교통시스템 성능을 최적화하기 위해서는 효과적인 교통운영관리 전략의 개발 및 자율주행시대를 대비한 교통운영관리 전략의 진화가 절실히 요구되고 있다. 교통운영관리 전략이란 도로상에 발생하는 혼잡을 최소화시키기 위해 필요한 관리기법을 시스템 운영방안으로 정의하는 것이다(Kim et al., 2016). 지금까지 국내외적으로 도로의 혼잡을 최소화시키고 운전자의 안전한 주행을 위해 많은 교통운영관리 연구들이 지속되어왔다(Antoniou et al., 2016; Jung et al., 2015; Lee et al., 2006; Park et al., 2016; Song et al., 2011; Wang et al., 2017). 이와 같이 교통류의 운영효율성과 안전성을 극대화시키기 위해서는 도로에서 발생하는 다양한 상황에 대해 예측하고 판단하여 적절한 관리전략을 수립할 필요가 있다.

일부 연구들에서는 자율주행시대의 교통운영관리의 일환으로 통신기술을 통해 개별자율차를 관리하는 방안이나 기존의 교통운영관리에서 사용되는 차로관리와 같은 전략을 변형한 방안을 제시하였다(Guériau et al., 2016; Talebpour et al., 2017). 또한 개별자율차가 내부알고리즘에 따라 주행하는 것보다 교통류 전체의 운영효율성과 안전성을 극대화시키기 위한 주행을 할 경우 전반적인 교통류의 성능이 증대하며, 이를 통해 자율주행시대에 적절한 교통운영관리의 필요성을 제기하였다(Jeong et al., 2017a; Jeong et al., 2017b). 그러나 단일 자율차가 아닌 교통류 전체의 운영효율성과 안전성을 증대할 수 있도록 중앙관리자 입장에서의 교통운영관리 전략에 대한 연구가 미비하였으며, 특히 개별 자율차와 비자율차가 혼재되어있는 혼합교통류 상황에서는 개별자율차의 주행행태 파악하고 관리할 필요가 있을 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 자율주행시대 교통운영관리를 위한 새로운 개념으로 자율주행적극성을 정의하였으며, 자율주행적극성을 조절하여 교통류의 성능을 증대시킬 수 있는 방안을 제시하였다. 자율주행적극성은 개별 자율차 주행행태의 적극성을 나타낼 수 있는 지표로서 이를 다양한 교통상황에 적용하여 자율주행적극성에 따른 운영효율성과 안전성을 분석하였다. 미시교통시뮬레이션인 VISSIM의 기본 파라미터를 이용하여 자율주행적극성별 자율차의 거동을 구현하였으며, 자율주행적극성, 사고유무, 서비스수준(Level of service, LOS), 시스템 보급률(Market penetration rate, MPR)을 고려한 시나리오를 구성하여 분석을 수행하였다. 교통 운영효율성 지표로는 평균 주행속도를 설정하였으며, 안전성 지표는 상충진수를 활용한 대리안전척도(Surrogate safety measure, SSM)를 정의하였다. 또한 두 지표를 표준화하여, 자율주행적극성에 따른 운영효율성과 안전성 관계 패턴과 각 교통상황별 적정 자율주행적극성을 제시하였다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 자율주행적극성을 정의하였으며, 적정 자율주행적극성을 도출하는 방법과 이를 활용할 수 있는 교통운영관리 서비스 시나리오를 제시하였다. 3장에서는 교통시뮬레이션환경과 분석시나리오를 설명하고, 자율협력차를 구현하는 방법과 평가지표를 서술하였다. 4장에서는 시뮬레이션 분석결과를 제시하고 적정 자율주행적극성을 도출하였다. 마지막장에서는 결론과 향후 연구과제를 제시하였다.

자율주행적극성(Automated driving aggressiveness, ADA)

1. 자율주행적극성 정의

본 연구에서는 자율주행자동차의 주행특성을 반영할 수 있는 자율주행적극성(Automated driving aggressiveness, ADA)을 정의하였다. 자율주행적극성은 자율협력차의 주행 적극성을 나타내는 수준으로, 적극적인 자율주행 행태를 보이는 자율협력차의 거동은 비자율차량보다 차두거리와 차로변경을 위한 수락간격이 짧은 행태를 보인다. 반면 소극적인 자율협력차의 거동은 비자율차량보다 차두거리와 차로변경을 위한 수락간격이 긴 행태를 나타낸다. 자율주행적극성별 자율협력차의 행태를 비교한 예시를 Figure 1에 제시하였다.

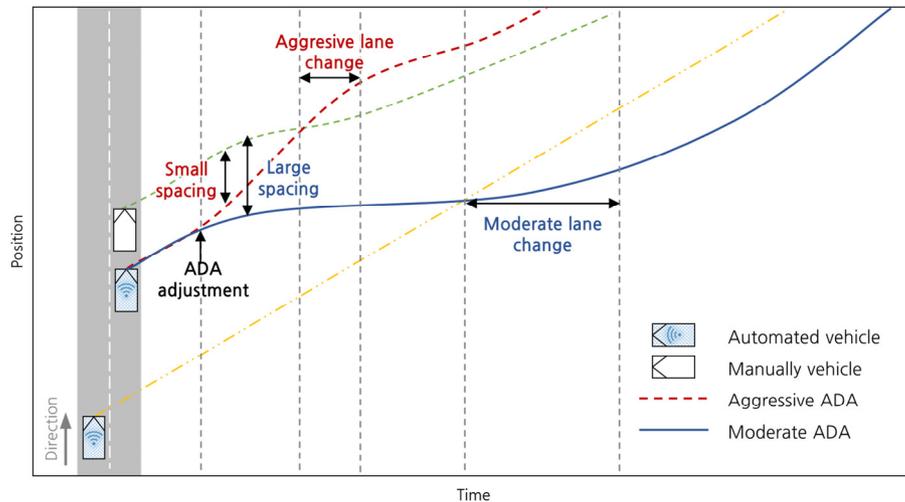


Figure 1. Comparison of driving behavior by different ADAs

본 연구에서는 자율주행적극성을 9수준으로 정의하였으며, 이는 실제 자율차의 주행 특성에 따라 조정될 수 있다. 이 때 ADA 1은 가장 소극적인 자율주행을 의미하며, ADA가 높아질수록 적극적인 주행행태를 보이게 된다. 본 연구에서 정의한 자율주행적극성은 기존의 NHTSA 또는 SAE에서 제시하는 자율주행 관련 기술관점에서 구분한 자율주행단계와는 다른 개념이다. 기존에 제시된 자율주행단계는 운전자 또는 이용자의 편리성과 서비스 관점에서 자율차가 자율화된 정도를 반영한 단계이다. 그러나 자율주행적극성은 자율차의 기술적 수준이나 자율화 정도와 관계없이 자율차가 보이는 거동행태의 적극성을 반영한 수준을 나타내는 것으로, 자율주행 강도에 따라 자율차의 움직임이 달라지기 때문에 교통시스템의 성능에 직접적인 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 자율차와 비자율차가 혼재된 혼합교통류 상황에서 운영효율성과 안전성을 고려한 최적의 ADA를 도출하고, 이를 통해 자율차의 거동을 제어하는 것을 자율주행시대에 적용 가능한 신개념의 교통운영관리 전략으로 정의하였다.

2. 서비스 시나리오 구상

본 연구에서 제안하는 자율주행적극성은 자율주행시대 교통운영관리를 위한 새로운 서비스의 개념이며, 이러한 자율주행적극성을 조절하는 것은 V2X를 통한 교통운영관리센터(Traffic management center, TMC)의 운영관리 전략으로서 활용될 수 있다. TMC는 교통류의 운영효율성과 안전성을 효과적으로 관리하기 위해 자율차를 포함한 도로이용자에게 효과적인 정보를 제공해야한다. 예를 들어, 유출입연결로, 사고다발구간과 같은 집중관리구간, 돌발 및 사고상황에서는 차량들의 거동행태가 변하게 되며, 이러한 구간은 자율차와 비자율차가 혼재되어 있는 자율

주행환경에서도 관리가 필요할 것으로 판단된다. 따라서 TMC에서는 교통류를 효과적으로 관리할 수 있도록 도로 교통특성에 따른 적정 자율주행적극성과 군집주행 파라미터 등을 조절할 필요가 있다.

이러한 자율주행적극성을 이용한 교통운영관리를 위한 서비스 시나리오의 개념을 Figure 2에 제시하였다. 우선적으로 TMC는 기존의 교통 모니터링 시스템을 발전시켜 실시간 정보를 모니터링 및 관리해야한다. 현재 TMC에서는 VDS, DSRC, WAVE 등의 방식을 통해 교통정보를 수집하고 있다. 다양한 정보수집원을 통해 수집된 자료는 실시간으로 관리되어야하며, 실시간 교통상황을 반영하여 LOS, MPR, 사고상황 등을 파악하고, 자율차와 비자율차가 혼재된 혼합교통류 상황의 교통정보를 취득할 수 있어야 한다.

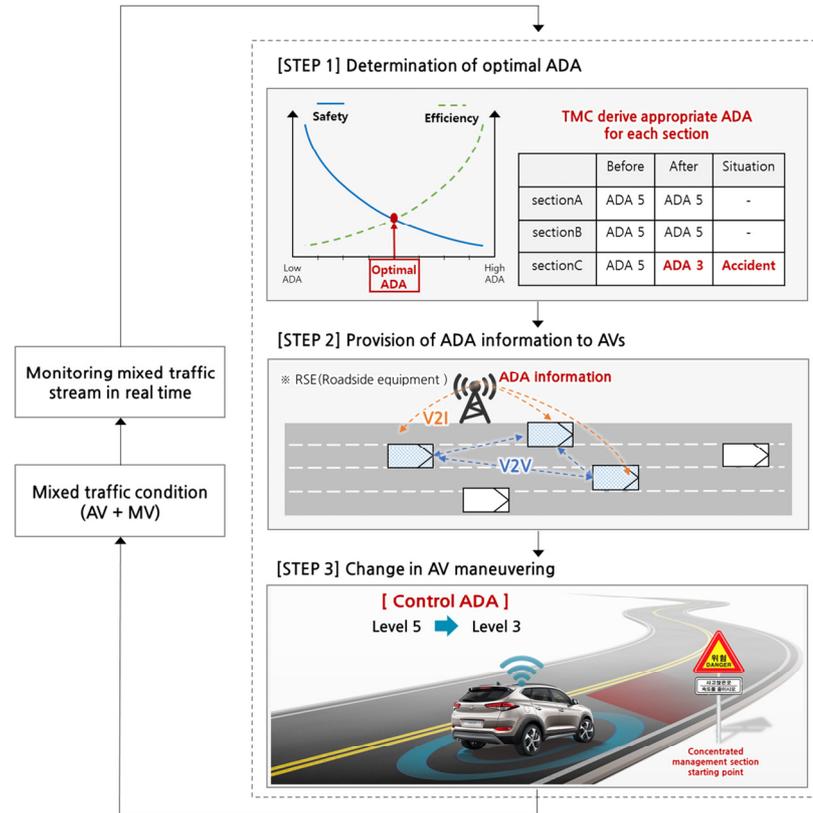


Figure 2. Illustrative example of service scenario for traffic management strategy by controlling ADAs

1단계는 TMC에서 파악한 실시간 교통상황을 반영한 적정 ADA를 도출하는 단계이다. 적정 ADA는 교통상황에 따라 변화하기 때문에 시·공간에 따라 실시간으로 판단되어야한다. 2단계는 TMC에서 수집 및 가공한 적정 ADA 정보를 각 구간의 RSE(Roadside equipment)를 통해 자율차에게 전달하는 과정을 포함한다. 또한 V2V (Vehicle-to-vehicle)통신을 통해 주변 자율차와 적정 ADA 정보를 공유할 수 있다. 3단계에서는 자율차의 거동행태가 적정 ADA에 따라 변화한다. 예를 들어 사고다발구간과 같은 집중관리구간이나 전방에 사고가 발생한 경우, 자율차는 사고를 미리 인지하고 사고상황을 회피하기 위해 ADA를 낮출 것이다. 이에 따라 자율차의 거동이 변화하게 되며, 자율차의 거동 변화에 따라 혼합교통류 특성이 변하게 될 것이다. 변화된 교통류의 정보는 다시 TMC를 통해 수집되어 새로운 교통상황이 반영된 교통운영관리가 가능한 환경을 구현할 수 있다. 이러한 ADA 조절을 통한 교통운영관리 서비스는 자율차와 비자율차가 혼재된 혼합교통류의 정보가 순환하고 새로운 ADA 정보로 공급되는 일련의 과정으로, 자율주행시대의 새로운 교통운영관리 전략에 수립에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

3. 적정 ADA 도출 방법론

교통운영효율성과 안전성을 고려한 적정 ADA 도출 과정을 Figure 3에 제시하였다. 우선 시뮬레이션을 통해 Network data와 개별 주행궤적자료를 수집하고, 연구에서 설정한 운영효율성 지표와 안전성 지표를 산출 후 지표를 표준화하여 적정 ADA를 도출하는 과정을 거친다.

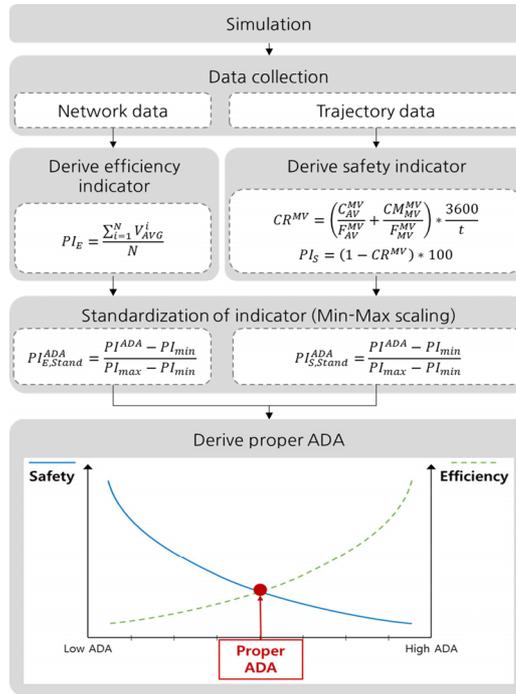


Figure 3. Procedure for deriving proper ADA

운영효율성 지표(PI_E)는 네트워크 전체에서 주행하는 모든 차량들(N)의 평균주행속도(V_{AVG}^i)의 평균으로 설정하였으며, Equation 1에 수식을 제시하였다.

$$PI_E = \frac{\sum_{i=1}^N V_{AVG}^i}{N} \tag{1}$$

여기서, PI_E : Performance indicator for operational efficiency

i : Vehicle ID

N : # of vehicles

V_{AVG}^i : Average speed of vehicle i

안전성 지표를 설정하기 위하여 주행궤적자료를 통해 산출한 대리안전척도인 상충건수를 이용하여 비자율차의 상충률(Collision rate, CR)의 개념을 정의하였다. 상충률은 두 차량의 차량추종 관계 대비 후미추돌 상충건수를 의미하며(후미추돌 상충건수/차량추종건수/시), 본 연구에서는 비자율차의 상충률을 하여 안전성 지표로 활용하였다. 비자율차의 상충률은 분석 대상차량이 비자율차이며, 전방차량이 자율차 또는 비자율차인 상황에서 발생하는

상충의 비율이다. 자율차의 경우 자율주행로직에 의해 위험상황을 회피할 수 있다고 가정하여 분석대상에서는 비자율차만을 고려하였다. 안전성 지표를 산출하는 과정은 3단계로 나타낼 수 있다.

- Step 1: 상충판단
- Step 2: 비자율차 상충률 산출
- Step 3: 안전성 지표 환산

1단계인 상충판단 과정에서는 시뮬레이션 결과로 도출되는 개별차량의 SD (safety distance)와 FD (follow distance)를 이용하여 판단할 수 있다. 이때, SD는 최소안전거리이며, FD는 두 차량간의 실제 간격이다. 상충은 물리적인 충돌은 발생하지 않았으나 사고발생 개연성이 높은 상황으로, 본 연구에서는 SD가 FD보다 큰 경우를 상충으로 정의하였다. 이는 실제 두 차량 간의 간격이 최소안전거리보다 짧은 상황을 의미하며, 상충판단에 대한 방법은 Equation 2에 제시하였다.

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

여기서, SD : Safety distance

FD : Follow distance

2단계는 비자율차의 상충률을 산출하는 단계로, 상충건수와 차량추종건수를 이용하여 상충률을 산출하였다. Equation 3을 통해 상충건수(C)를 계산하였으며, 모든 분석시간(t)동안 모든 차량(N)에 대한 상충건수를 파악하였다. 분석 시, 각 time step은 k , 개별 비자율차는 j 로 정의 하였다. 차량추종 건수(F)는 Equation 4에 제시하였으며, 추종하는 이벤트(f)를 분석시간(t) 내 모든 차량(N)에 대하여 계산하였다. 비자율차의 상충률(CR)은 대상차량이 비자율차일 때를 기준으로 전방차량이 자율차(AV) 또는 비자율차량(MV)일 때의 발생하는 상충을 대상으로 계산하였다. 상충률의 산출식은 Equation 5에 제시하였으며, 수식에서 대상차량은 위 첨자로, 전방차량은 아래첨자로 표현하였다.

$$C = \sum_{k=1}^t \sum_{j=1}^N m(SD_{kj} > FD_{kj}) \quad (3)$$

$$F = \sum_{k=1}^t \sum_{j=1}^N m(f_{kj}) \quad (4)$$

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

여기서, C : # of conflict

t : Analysis period(sec)

f : Following event

AV : Automated vehicle

k : Simulation time

N : Total # of vehicles

F : # of interactions

MV : Manual vehicle

j : # of MVs

m : Count

CR : Conflict rate

3단계에서는 2단계에서 도출된 상충률을 안전성 지표로 환산한다. 2단계에서 계산한 상충률의 경우 0-1까지의 수치를 가지며 상충률이 1일 경우 모든 추종상황에서 상충이 발생한 것으로 안전성이 매우 좋지 않은 상황을 의미한다. 이러한 상충률을 운영효율성 지표인 평균 주행속도와 같이 지표의 수치가 증가함에 따라 교통류에 긍정적인 영향을 미치는 지표로 환산하여 이해가 용이하도록 하였다. 안전성 지표(PI_s)를 환산한 수식은 Equation 6에 제시하였으며, 1과 비자율차 상충률(CR^{MV})의 차를 산출 후 100을 곱한 값을 최종 지표로 정의하였다.

$$PI_s = (1 - CR^{MV}) * 100 \quad (6)$$

여기서, PI_s : Performance indicator for safety

CR : Conflict rate

MV : Manual vehicle

산출된 운영효율성 지표와 안전성 지표를 이용하여 적정 ADA를 도출하기 위해 지표를 표준화는 방법을 제시하였다. 표준화방법은 Jain et al.(2011)에서 제시한 Min-Max Scaling 수식을 이용하였으며, 운영효율성과 안전성 지표를 0과 1사이의 값으로 표준화하였다. 표준화 수식은 Equation 7에 제시하였으며, 사고유무, LOS, MPR이 동일한 시나리오 중 최대값(max)과 최소값(min)을 이용하여 표준화된 지표($Stand$)를 산출하였다. 이러한 산출과정을 통해 모든 시나리오에 대하여 운영효율성과 안전성에 대한 표준화 지표(PI)를 산출하였다.

$$PI_{Stand} = \frac{PI^{ADA} - PI_{min}}{PI_{max} - PI_{min}} \quad (7)$$

여기서, PI : Performance indicator (Efficiency or safety)

$Stand$: Standardization

ADA : Automated driving aggressiveness

min: Minimum value of indicator in a given condition

max: Maximum value of indicator in a given condition

표준화된 지표를 이용하여 적정 ADA 도출시, 자율주행적극성의 변화에 따라 안전성과 운영효율성이 함께 증대될 수도 있지만 교통량과 자율차의 MPR에 따라 안전성과 운영효율성의 증감이 상반되게 나타날 수 있다. 예를 들면, 안전성과 운영효율성이 함께 증가하는 패턴을 보이는 경우, 자율주행적극성이 가장 높은 ADA 9을 적정 ADA로 간주할 수 있다. 반면 안전성과 운영효율성이 상반된 패턴을 보이는 경우 교통상황에 따라 교통류 성능을 극대화시킬 수 있는 적정 ADA를 찾는 것이 중요하다. 이때 안전성과 운영효율성이 교차하는 지점을 찾을 수 있으며, 이 지점을 안전성과 운영효율성의 trade-off를 고려한 최적의 ADA 수준으로 판단할 수 있다.

시뮬레이션 방법론

시뮬레이션 방법론에는 분석 네트워크를 포함한 시뮬레이션 환경과 분석 시나리오를 제시하였으며, 자율협력차의 거동을 추상화하여 미시교통시뮬레이션에서 구현하는 방법을 서술하였다.

1. 시뮬레이션 환경 및 시나리오

본 연구에서는 다양한 교통상황에 대한 ADA 분석을 수행하기 위하여 사고가 발생한 차로차단 상황과 사고가 발생하지 않은 상황으로 구분하여 분석을 진행하였다. 분석네트워크는 총 4 km의 연속류 직선도로이며, 사고상황의 경우 1950 m 지점부터 우측 2개 차로의 100 m를 차단하였다. 네트워크의 Desired speed는 80-120 km/h로 설정하였고, Warm-up time 600초와 분석시간 3600초를 합산한 4200초의 시뮬레이션 시간동안 수집된 자료를 분석하였다.

분석시나리오는 사고 유무, 서비스수준 A-E, ADA 1-9, 자율협력차의 MPR 10-90% (10%단위로 증가)의 조합으로 구성하였으며, 총 810개 시나리오에 대해 Random seed(난수)를 다르게 적용하여 각각 5회의 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 자율협력차 구현

본 연구에서는 시뮬레이션 환경에서 자율차의 거동을 추상화하여 실험을 수행하였다. 추상화란 시스템과 기술의 핵심적인 개념을 명확하게 간추려 단순화 시키는 것이다. 실제 자율주행자동차는 많은 센서들과 통신기능을 통해 상황을 인지하고 판단하는 과정을 거치게 된다. 그러나 이러한 모든 과정을 시뮬레이션을 통해 구현할 경우 과도한 계산부하가 요구되며, 효과적인 교통운영관리 전략 수립 시 부정적인 결과를 초래할 수 있다. 따라서 차량의 거동을 적정 수준으로 추상화하여 구현할 필요가 있다.

실제 자율주행을 위한 기반기술로는 ACC, CACC, AEBS 등의 종방향 차량제어 시스템이 존재하며, 본 연구에서는 이러한 시스템이 구동되었을 때의 차량의 거동을 추상화하기 위하여 VISSIM의 주행행태 파라미터를 조절하여 추상화된 자율차의 거동을 구현하고자 하였다. 자율협력차의 거동을 추상화하는 개념도를 Figure 4에 제시하였으며, VISSIM 주행행태 파라미터 조절을 통해 자율주행적극성을 반영하여 자율차의 거동을 구현함으로써 혼합교통류 상황에 대한 다양한 분석이 가능하다.

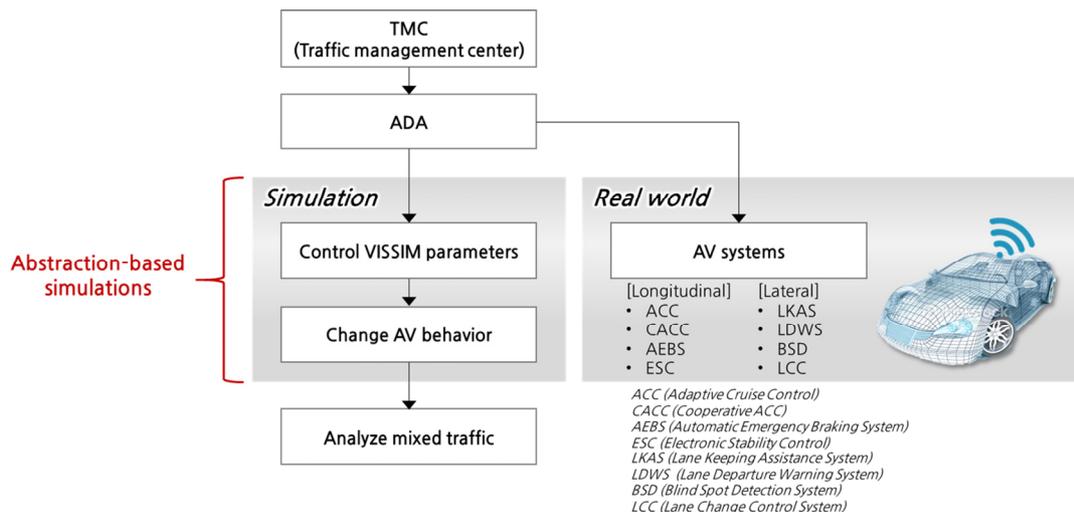


Figure 4. Simulation framework for AV maneuvering abstraction

본 연구에서는 추상화된 자율협력차의 거동을 VISSIM 시뮬레이션 파라미터를 조절하여 구현하였다. 또한 자율협력차의 자율주행적극성을 조정하기 위해 VISSIM내의 Driving Behaviors의 파라미터를 조정하였으며, 자율주행적극성을 9단계로 구분하고자 관련 파라미터값을 등간격으로 설정하였다. 등간격의 범위와 자율차를 구현하기 위한 VISSIM 자체 파라미터 값은 기존문헌에서 제안한 파라미터값을 이용하여 구현하였다(UK Department of

Transportation, 2016). VISSIM에서 변경한 ADA별 Driving Behaviors 파라미터 값은 Table 1에 제시하였으며, VISSIM 매뉴얼을 통해 각 파라미터의 정의를 확인할 수 있다(PTV Group, 2016).

Table 1. VISSIM parameter setting for ADA implementation

Division	Code	ADA								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Spacing	CC0 (m)	2.5	2.5	2	2	1.5	1	1	0.5	0.5
	CC1 (s)	2.1	1.8	1.5	1.2	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
	CC2 (m)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Speed	CC3 (s)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	CC4 (m/s)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	CC5 (m/s)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Acceleration	CC6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	CC7 (m/s ²)	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45
	CC8 (m/s ²)	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9
Lane change	Min headway (m)	0.8	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.2
	Safety distance reduction factor	0.9	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3
Priority rule	Min time gap (s)	3.8	3.6	3.4	3.2	3	2.8	2.6	2.4	2.2
	Min headway (m)	7	6.5	6	5.5	5	4.5	4	3.5	3
Others	CC9 (m/s ²)	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9
	Lookahead distance observed vehicles (# of vehicles)	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	Smooth closeup behavior	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes

분석 및 평가

시뮬레이션 분석결과를 이용하여 운영효율성과 안전성 측면에서의 교통류 성능을 분석하였으며, 각 시나리오의 결과는 Random seed를 달리하여 도출된 결과를 동일 시나리오 별로 평균값을 산출하여 제시하였다. MPR, ADA, LOS, 사고유무가 운영효율성과 안전성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 영향요인에 따른 패턴분석을 수행하였으며, 운영효율성과 안전성을 고려한 교통상황별 적정 ADA를 제시하였다.

1. 영향요인에 따른 패턴 비교

운영효율성과 안전성에 미치는 영향요인(LOS, MPR, 사고유무)의 패턴을 파악하기 위하여 가장 적극적인 주행 행태인 ADA 9와 가장 소극적인 주행행태인 ADA 1을 비교하였다. LOS에 따른 패턴은 Table 2에 제시하였으며, 운영효율성의 경우 예측할 수 있는 결과와 동일하게 LOS에 따라 평균 속도가 감소하는 패턴을 보이는 것으로 나타났다. LOS가 A인 교통상황에서는 ADA와 사고유무에 따른 영향이 운영효율성 측면에서 미비한 것으로 나타났다. 그러나 사고가 발생한 상황이나 ADA 1인 경우, 운영효율성이 저하되는 것으로 분석되었다. 안전성 측면에서는 사고가 발생하여 차로가 차단된 경우 비자율차의 상충률이 낮은 것으로 분석되었으며, 이는 평균 주행속도가 낮기 때문인 것으로 판단된다. ADA 9이고 사고가 발생하지 않은 상황에서는 교통량이 많을수록 안전성이 증대되는 것으로 분석되었으나, 이외의 시나리오에서는 교통량, ADA, 사고유무에 따라 다른 패턴을 보이는 것으로 분석되었다.

MPR에 따른 운영효율성과 안전성의 패턴은 Table 3에 제시하였으며, MPR에 따른 차이를 명확하게 비교하기 위하여 MPR 10%, 50%, 90%를 대표적으로 분석하였다. 운영효율성 분석결과, ADA 1인 상황에서는 MPR이 증가할수록 운영효율성이 저하되는 반면 ADA 9에서는 MPR이 증가할수록 운영효율성이 증대하는 것으로 분석되었다. 사고가 발생한 경우의 안전성 패턴을 분석해보면, ADA와 상관없이 자율차의 비율이 높아질수록 안전성이 증대되는 것으로 나타났다. 사고가 발생하지 않은 상황에서는 대체적으로 안전성이 낮은 것으로 나타났으며, ADA 9인 경우에는 MPR이 증가할수록 안전성이 다소 저하하는 패턴을 보였다.

Table 2. Change in performance by LOS, ADA and accident

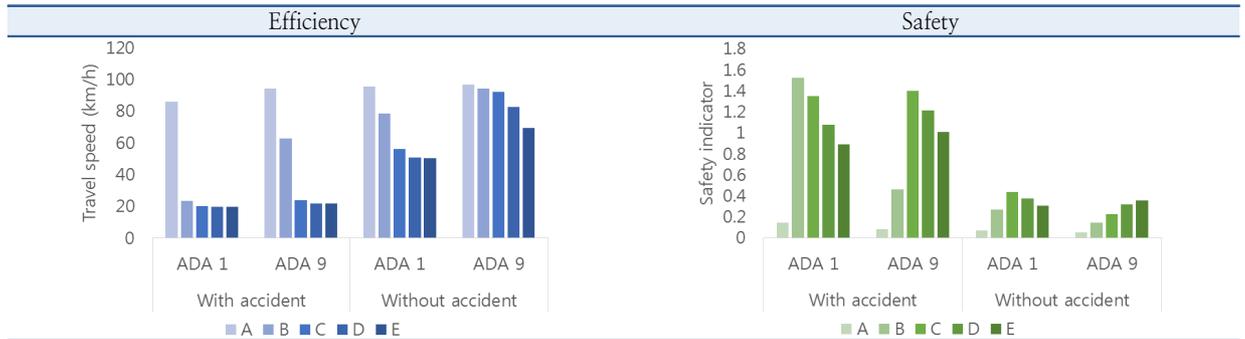
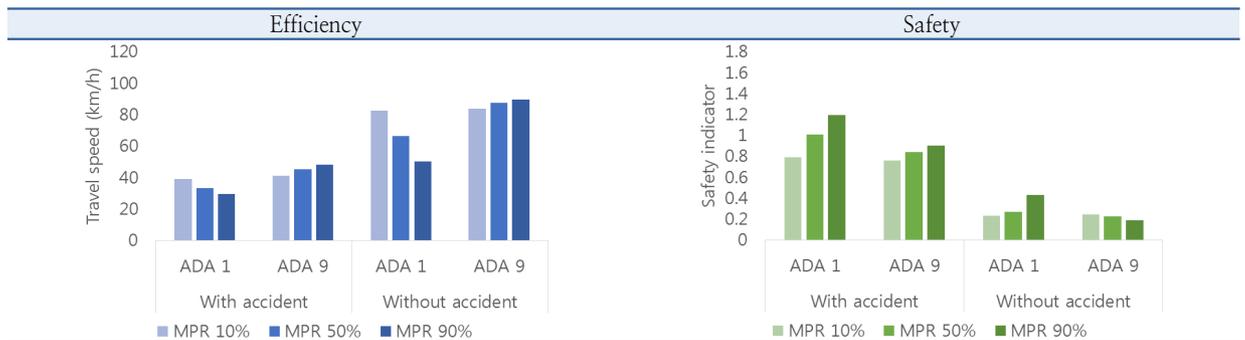


Table 3. Change in performance by MPR, ADA and accident

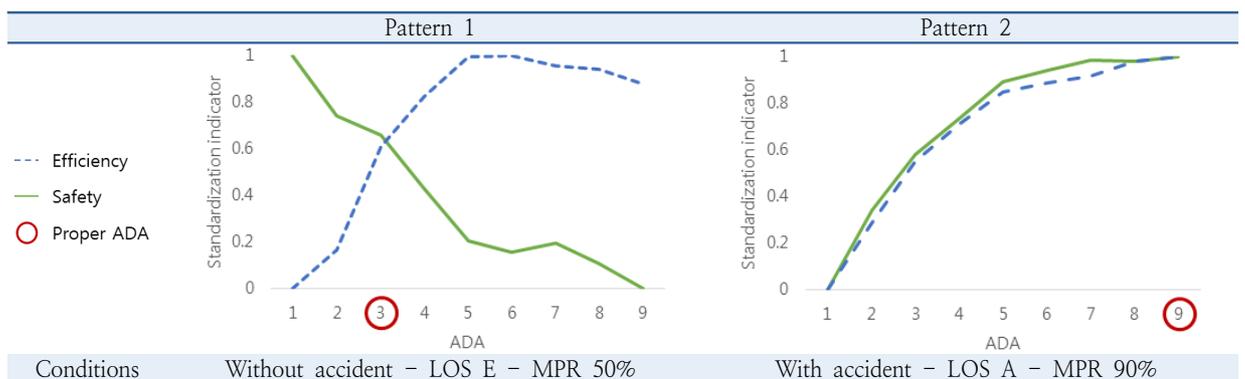


3. 적정 ADA 도출

적정 ADA를 도출하기 위하여 운영효율성 지표와 안전성 지표를 표준화한 결과, ADA가 증가할수록 운영효율성 지표는 증가하는 것으로 분석되었다. 그러나 안전성 지표는 사고유무, LOS, MPR 조건에 따라 두 가지 패턴을 보이는 것으로 분석되었으며, Table 4에 운영효율성과 안전성 표준화 지표의 대표적인 패턴에 대한 예시를 제시하였다. 패턴1은 ADA가 증가할수록 안전성이 감소하는 패턴이며, 패턴2는 ADA와 안전성지표가 비례하는 패턴이다.

패턴2의 경우 ADA에 따른 운영효율성과 안전성 지표의 패턴이 동일한 것으로 분석되었으며, ADA 9가 교통류 퍼포먼스를 극대화 시키는 것으로 해석할 수 있다. 반면 패턴1의 경우는 운영효율성 그래프와 안전성 그래프가 교차하는 지점이 발생하며, 해당 지점의 ADA를 적정 ADA로 판단할 수 있다. 따라서 Table 4에서 제시한 예시에서 패턴 1인 LOS E, MPR 50% 그리고 사고가 없는 상황의 적정 자율주행적극성은 ADA 3정도의 수준으로 판단할 수 있다.

Table 4. Representative example of patterns for standardized indicators



본 연구에서 분석한 모든 시나리오에 대해 위와 같은 방법으로 운영효율성과 안전성의 패턴을 파악하여 적정 ADA를 도출한 결과를 Table 5에 제시하였다. 분석결과, 사고가 발생하지 않은 상황에서는 LOS A-C까지는 모두 패턴2인 것으로 나타났으며, LOS D인 경우는 MPR에 따라 패턴이 나누어지는 것으로 나타났다. LOS D이며 MPR 60% 이상에서는 패턴2인 것으로 분석되었으나, MPR이 50% 이하인 경우에는 패턴1을 보이는 것으로 분석되었다. LOS E인 상황에서도 패턴1로 분석되었으며, 패턴1인 경우는 적정 ADA가 3-4수준인 것으로 나타났다. 사고가 발생한 상황에서는 LOS A,B에서는 모두 패턴2로 ADA 9가 가장 적절한 것으로 분석된 반면, LOS가 C이하인 경우는 패턴1의 패턴을 보이며 ADA 3-4가 적정 ADA로 분석되었다. 전반적으로 교통량이 적고 통행자유도가 높은 교통상황인 경우 ADA가 증가할수록 교통류 성능이 증대하는 것으로 분석되었으나, 통행자유도가 낮은 경우는 운영효율성과 안전성의 관계가 패턴1로 나타나 ADA 3-4가 적절한 자율주행적극성인 것으로 나타났다.

Table 5. Derived ADAs for traffic management

MPR (%)	Without accident									With accident									Proper ADA
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
A																			Pattern 2
B																			(ADA 9)
C																			Pattern 1
D																			(ADA 3-4)
E																			

결론

교통류의 운영효율성과 도로이용자의 안전성을 극대화하기 위해서는 적절한 교통운영관리가 필요하며, 자율주행시대에서는 기존의 교통운영전략 뿐만 아니라 새로운 개념의 교통운영관리 전략이 필요할 것으로 판단된다. 특히, 도로상의 모든 차량이 자율주행자동차인 상황 이전의 과도기에는 비자율차와 자율차가 혼재되어있는 상황이 불가피하게 발생할 것이며, 이를 대비하여 전반적인 교통류의 흐름과 안전성이 저하되지 않도록 교통운영관리를 해야 한다. 이에 따라 본 연구에서는 자율주행시대의 새로운 교통운영관리 개념으로 자율주행적극성을 정의하고 이를 활용한 ADA 조절 기법을 제시하였다.

본 연구에서 제시한 자율주행적극성은 자율협력차의 주행 적극성을 나타내는 지표로 ADA 1부터 9수준으로 정의하였다. ADA가 클수록 자율차의 주행행태가 적극적이며, 전방차량과의 간격이 좁고 차로변경 시 급격한 차로변경 행태를 보인다. 이러한 자율주행적극성 개념을 이용하여 다양한 교통상황에 따른 시뮬레이션 분석을 수행하였으며, ADA, LOS, MPR, 사고유무에 따른 시나리오를 설정하였다. 교통 운영효율성을 분석하기 위한 지표로 평균 통행속도를 이용하였으며, 교통 안전성 지표는 상충률의 개념을 정의하여 비자율차의 상충률로 설정하였다.

분석요인에 따른 패턴비교 결과, 사고발생에 따라 차로가 차단될 경우 운영효율성이 저하되지만, 통행속도가 감소함으로써 안전성이 증대되는 것으로 분석되었다. 자율주행적극성이 높은 ADA 9인 경우, ADA 1인 경우에 비해 운영효율성이 증대되는 것으로 분석되었으나, 안전성은 다소 저하되는 것으로 나타났다. 안전성의 경우 대부분 MPR이 증가함에 따라 교통류 퍼포먼스가 증대되는 패턴을 보이는 것으로 분석되었으나, 교통량에 따른 영향은 ADA와 사고유무에 따라 다른 패턴을 보이는 것으로 나타났다.

시뮬레이션 분석을 통해 교통상황별로 ADA에 따른 영향이 다른 것을 확인하였으며, 운영효율성과 안전성 지표를 표준화하여 적정 ADA를 도출하는 방법을 제시하였다. 운영효율성과 안전성 표준화 지표의 패턴은 안전성을 기준으로 2가지 패턴을 보이는 것으로 나타났다. 분석결과, 교통량이 적고 통행자유도가 높은 경우 ADA와 표준화 지표가 비례하는 패턴2의 그래프 형태를 보였다. 반면 통행자유도가 낮은 경우는 ADA가 증가함에 따라 안전성 표준화 지표가 감소하는 패턴1의 형태를 보이며, ADA 3-4가 적절한 ADA로 도출되었다.

본 연구에서 제시한 자율주행시대의 새로운 교통운영관리 개념을 발전시키고, 실제 교통시스템에 적용하기 위해서는 다음과 같은 추가연구가 필요하다. 첫째, 본 연구에서는 시뮬레이션의 기본 파라미터를 활용하여 자율차의 자율주행적극성을 구현하였다. 그러나 자율차를 구현하기 위한 시뮬레이션 상의 파라미터가 적정한지 검토할 필요가 있으며, 실제 자율차의 주행행태를 파악하여 시뮬레이션에 구현한다면 좀 더 현실적인 분석이 가능할 것으로 판단된다. 둘째, 기존문헌에서 제시한 자율차 파라미터 조정 범위에 따라 ADA를 9수준으로 구분하였다. 그러나 효과적인 교통운영관리를 위해 자율주행적극성 수준 개수를 적절하게 조정할 필요가 있으며, 자율차 제작사에서 개발하는 자율차의 주행행태를 반영하여 ADA 수준을 구분할 필요가 있다. 마지막으로 본 연구에서는 사고유무, LOS, MPR에 따른 ADA를 분석하고, 적정 ADA를 도출하는 방법을 제시하였다. 그러나 도로의 기하구조 특성, 집중관리구간 등 ADA 조절 구간의 특성에 따라 적정 ADA를 분석하고 조절하는 자율주행적극성 연구를 추가적으로 진행하여 실질적으로 적용 가능한 교통운영관리 전략 수립 방안 연구를 수행할 필요가 있다.

본 연구는 자율차의 주행행태를 고려한 자율주행시대의 새로운 교통운영관리 개념을 제시하였다는데 의의가 있다. 또한 향후 다가올 자율주행시대의 교통운영관리 측면에서, 본 연구의 연구결과를 활용하여 자율주행적극성을 조절함으로써 교통 운영효율성과 안전성을 극대화시킬 수 있는 최적의 교통운영관리 전략을 수립할 수 있을 것으로 판단된다.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by a grant (18TLRP-B101406-04) from Technology Business Innovation Program (TBIP) funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korean government.

REFERENCES

- Antoniou C., Celikoglu H. B., Geroliminis N. (2016), Special Issue on Advanced Network Traffic Management: From Dynamic State Estimation to Traffic Control, *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, 66(EPFL-ARTICLE-219722), 1-2.
- Guérliau M., Billot R., El Faouzi N. E., Monteil J., Armetta F., Hassas S. (2016), How to Assess the Benefits of Connected Vehicles? A Simulation Framework for the Design of Cooperative Traffic Management Strategies, *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, 67, 266-279.
- Jain Y. K., Bhandare S. K. (2011), Min Max Normalization Based Data Perturbation Method for Privacy Protection, *Int. J. Eng. Res. Appl.*, 2(8), 45-50.
- Jeong E, Oh C., Kim Y. (2015), Development of a Mid-/Long-term Prediction Algorithm for Traffic Speed Under Foggy Weather Conditions, *J. Korean Soc. Transp.*, 33(3), Korean Society of Transportation, 256-267.
- Jeong E., Oh C. (2017), Evaluating the Effectiveness of Active Vehicle Safety Systems, *Accid. Anal. Prev.*, 100, 85-96.
- Jeong E., Oh C., Lee S. (2017), Is Vehicle Automation Enough to Prevent Crashes? Role of Traffic Operations in Automated Driving Environments for Traffic Safety, *Accid. Anal. Prev.*, 104, 115-124.
- Kim S. H., Kim J. H., Do M. S., Shin E. K., Youn Y. H. (2016), Road Traffic ITS Theory and Design, Cheongmongak, Republic of Korea (도로교통 ITS 이론과 설계).
- Lee C., Jeong J. (2006), A Study on Providing Real-Time Route Guidance Information by Variable Message Signs with Driver Behavior, *J. Korean Soc. Transp.*, 24(7), Korean Society of Transportation, 65-79.

- Park H., Yoon S., Oh C. (2016), Development of an Algorithm for Dynamic Traffic Operations of Freeway Climbing Lane Toward Traffic Safety, *J. Korean Soc. Transp.*, 34(1), Korean Society of Transportation, 68-80.
- PTV Group (2016), PTV Vissim 9.0 User Manual, PTV AG, Karlsruhe, Germany.
- Song T. J., Oh C. (2011), Agent-based Speed Management Strategy for Freeway Traffic Safety (Methodology and Evaluation), *J. Korean Soc. Transp.*, 29(4), Korean Society of Transportation, 17-28.
- Talebpour A., Mahmassani H. S., Elfar A. (2017), Investigating the Effects of Reserved Lanes for Autonomous Vehicles on Congestion and Travel Time Reliability, *J. Transp. Res. Board*, 2622, Transportation Research Record, 1-12.
- UK Department of Transportation (2016), Impacts of Connected and Autonomous Vehicles on Traffic Flow Technical Report.
- Wang L., Abdel-Aty M., Lee J. (2017), Implementation of Active Traffic Management Strategies for Safety on Congested Expressway Weaving Segments, *J. Transp. Res. Board*, 2635, Transportation Research Record, 28-35.