

자율주행차 환경에서 고속도로 공사구간의 동적합류제어에 대한 시뮬레이션 분석

김선호* · 이재현** · 김용주*** · 이청원****

Kim, Sunho*, Lee, Jaehyeon**, Kim, Yongju***, Lee, Chungwon****

Simulation-Based Analysis on Dynamic Merge Control at Freeway Work Zones in Automated Vehicle Environment

ABSTRACT

As the era of AVs (Automated Vehicles) comes to a close, many researches related to AVs have been conducted. Up until now, research on traffic flow impact of AVs has been the main topic, and research on traffic management for AVs is still in beginning stage. This study analyzed the effect of Dynamic Merge Control (DMC) in manual vehicle (MV) and AV environment at work zone. Dynamic Late Merge (DLM) and DLM with Dynamic Early Merge (DEM) are compared by simulation. Simulation results showed that DLM improves travel time and work zone throughput compared to no merge control case in both MV and AV environment. In the case of additional operation of DEM, the improvement effect was not observed in MV environment, but it was improved in AV environment. As a result, DMC operation in AV environment was as effective as the improvement in transition from MV to AV environment. Therefore congestion reduction at freeway work zone by DMC will be possible in future AV environment, and the improvement of DMC can be suggested.

Key words : Automated vehicle, Work zone, Traffic management, Dynamic merge control, Microscopic traffic simulation

초 록

자율주행차 시대가 가까워지면서 관련 연구가 활발히 진행되고 있다. 지금까지는 자율주행차의 교통류 영향 분석에 대한 연구가 주로 수행되었으며, 자율주행차에 대한 교통관리 연구는 아직 시작 단계이다. 본 연구는 공사구간에서 일반차와 자율주행차 환경에서의 동적합류제어 효과를 분석하였다. 동적지연합류와 동적조기합류에 동적조기합류까지 추가로 운영한 경우를 시뮬레이션을 통해 비교하였다. 시뮬레이션 결과에 따르면 동적지연합류는 일반차 환경과 자율주행차 환경 모두 운영하지 않은 경우와 비교했을 때 통행시간과 공사구간의 통과교통량을 개선시켰다. 동적조기합류까지 추가 운영한 경우는 일반차 환경에서 추가 개선효과를 확인할 수 없었으나, 자율주행차 환경에서는 추가 효과가 나타났다. 결과적으로 자율주행차 환경에서 동적합류제어 운영은 일반차 환경이 자율주행차 환경으로 변화시 개선되는 수준만큼 추가로 개선 효과가 있는 것으로 분석되었다. 따라서 향후 자율주행차 환경에서도 동적합류제어를 통한 고속도로 공사구간의 혼잡 개선이 일정부분 가능할 것으로 판단되며, 이를 통해 동적합류제어의 개선 방안을 제시할 수 있다.

검색어 : 자율주행차, 공사구간, 교통관리, 동적합류제어, 미시교통시뮬레이션

* 정회원 · 서울대학교 공과대학 건설환경공학부 박사과정 (Seoul National University · ohnus@snu.ac.kr)

** 준회원 · 서울대학교 공과대학 건설환경공학부 석사과정 (Seoul National University · jaehyeon@snu.ac.kr)

*** 서울대학교 공과대학 건설환경공학부 학사과정 (Seoul National University · yongju42@snu.ac.kr)

**** 정회원 · 교신저자 · 서울대학교 공과대학 건설환경공학부 부교수 (Corresponding Author · Seoul National University · chungwon@snu.ac.kr)

Received August 31, 2018/ revised September 12, 2018/ accepted September 21, 2018

1. 서론

최근 자율주행차(Automated Vehicle, AV)에 대한 관심이 높아지면서 관련 연구와 개발이 활발히 진행되고 있다. 자동차 제조사는 조향보조장치, 정보제공장치 등의 첨단 운전자 보조시스템(Advanced Driver Assistance System)을 오랜 기간에 걸쳐 개발하고 있으며, 여러 선진국들은 이 새로운 개념의 자동차에 대응 및 협력하기 위한 도로·교통시스템을 준비하고 있다. 특히 자율주행차량은 센서, 레이더와 같은 전자장비들을 통해 교통류 상황을 인식하여 능동적으로 대처할 수 있으나, 사고 및 공사 등의 돌발상황에서는 자율주행차의 장비로 대처하는데 한계가 있다. 따라서 자율주행차에 대한 교통 인프라 및 교통관리의 준비가 필요한 상황이다.

이에 따라 교통 상황과 돌발 상황에 대한 정보를 Vehicle-to-Infra (V2I)와 Infra-to-Vehicle (I2V) 통신을 통해 실시간 전달해 줄 수 있는 교통 인프라와 빠르고 규칙적인 반응이 가능한 자율주행차 간 협력 체계에 대해 많은 연구가 진행되고 있다. 미국 교통부는 Vehicle-to-Everything (V2X) 통신이 가능한 커넥티드카(Connected Vehicle, CV)에서 자율주행차로 발전하는 모습을 개념적으로 정의하며, 2030년을 목표로 Safety Pilot 프로젝트를 수행중이다. 유럽 연합의 Drive C2X 프로젝트는 네덜란드의 A270 도로 테스트베드를 운영하면서 GPS, ITS, 통합제어센터를 통한 자율주행차와의 협력 체계에 대한 효과 분석을 수행하고 있다.

대부분의 고속도로 공사는 도로 관리 및 개선을 목적으로 차로 폐쇄상태에서 진행되며, 1개 차선 혹은 복수 차로의 사용이 불가하게 됨에 따라 공사 중 도로 용량은 줄어들게 된다. 결과적으로 운전자는 차로변경 및 합류 조작을 해야 하고, 이로 인하여 사고 가능성이 증가하고 교통류 효율이 악화된다. 미국 Federal Highway Administration (FHWA)는 Smarter Work Zones를 운영하며 Work Zone Intelligent Transportation Systems Implementation Guide를 제시하고 있다. 해당 가이드는 공사구간에서 실시간 운전자 정보 제공, 대기열 경고, 동적합류제어, 사고관리, 가변속도제한 등 다양한 고속도로 내 교통관리를 제시한다(Mirshahi et al., 2014). Utah DOT (Department of Transportation)와 Minnesota DOT는 가변속도제한(Variable Speed Limit, VSL)을 검지기(Vehicle Detector System, VDS)와 가변정보표지판(Variable Message Sign, VMS)으로 구성하여 공사구간을 통과하는 차량에 제한속도정보를 전달한다. 이를 통해 대기열 도달 전에 감속을 유도한다. 이를 통해 대기열 부근의 후미충돌사고 가능성을 줄일 수 있으며, 속도의 균일화를 통해 정체, 통행시간 측면 개선이 가능하다.

기존 교통관리는 공사구간 상류부에서 속도제어와 합류제어를 함께 사용해왔으며, 속도제어 기법으로 가변속도제한을, 합류제어

기법은 정적(static) 혹은 동적(dynamic)인 방식으로 교통상황에 따라 운전자에게 조기합류(Early Merge, EM) 또는 지연합류(Late Merge, LM) 등이 주로 사용되었다. 조기합류는 최대한 미리 합류할 수 있도록 공사구간에 대한 정보 및 차로변경 유도 정보를 운전자에게 제공하는 것이다. 지연합류는 조기합류와 상반되는 개념으로 운전자들에게 합류지점까지 각자의 차선을 유지시키고, 최대한 공사구간 직전에서 합류시키는 것이다. 이를 통해 도로의 용량을 최대한 활용하게 되는데 여러 운영사례를 통해 대기열 감소와 통행시간 절감, 공사구간 내 통과교통량 증가의 효과를 확인하였다.

동적합류제어(Dynamic Merge Control, DMC)는 동적조기합류(Dynamic Early Merge, DEM)와 동적지연합류(Dynamic Late Merge, DLM)로 구성된다. 기존의 정적인 합류제어처럼 고정적으로 운영되는 것이 아닌 교통상황에 따라 능동적으로 운영되어 교통 변화에 실시간 대응이 가능하다. 동적조기합류는 미리 합류를 유도하는 합류지점을 교통상황이 반영되어 동적으로 운영되는 것이다. 이때 대기열 검지기나 공사구간 검지기를 통해 시간점유율 혹은 속도나 교통량을 산출하여 운영 기준에 따라 차로변경 안내표시판이 운영된다. 동적지연합류는 공사구간 직전의 합류지점까지 모든 차량들에게 비공사 차로와 공사구간 차로의 통행을 허용하여 도로 활용을 최대화하고, 공사구간의 상류부에서 합류를 최소화함에 따라 차량 간 간섭을 줄여준다. 동적지연합류 또한 공사구간 상류부의 검지기를 통해 시간점유율, 속도, 교통량 등의 운영 기준을 만족할 때 차선 유지의 정보를 이동식 정보표시판으로 전달한다.

본 연구는 많은 지역에서 운영되는 동적지연합류와 동적조기합류에 대하여 일반차 대비 빠른 반응속도와 통신이 가능한 자율주행차 환경에서 시뮬레이션 효과 분석을 수행하였다. 기존 고속도로 공사구간의 교통관리에 대한 문헌조사를 통해 합류제어전략이 어떻게 운영되고 있으며, 어떤 효과 분석 사례가 있는지 정리하였다. 이를 통해 실제 운영 기준에 맞춰 동적합류제어를 구성하고, 이를 미시교통시뮬레이션 중 하나인 VISSIM에 구현하였다. 자율주행차와 일반차에 대한 표현은 기존 VISSIM 내 기본 모형을 따른다고 가정하였으며 파라미터에 차이를 두어 이 둘을 표현하고, 차종과 합류제어전략이 반영된 6개의 시나리오에 대해 투입교통량별로 시뮬레이션을 수행하였다. 효과 분석으로 네트워크 통행시간과 공사구간 통과교통량을 산출하여 동적합류제어의 일반차 환경과 자율주행차 환경에서의 분석 결과를 비교하였다.

2. 문헌고찰

기존 자율주행차 연구들이 주로 자율주행차량으로 인한 운영성, 안정성, 안전성, 환경성 효과를 분석하였고(Mahmassani, 2016;

Shladover, 2017; Talebpour and Mahmassani, 2016), 교통류 모형 중 하나인 차량추종모형을 응용하여 자율주행차를 표현한 연구들이 많다(Khondaker and Kattan, 2015; Mahmassani, 2016; Talebpour and Mahmassani, 2016). 자율주행차에 대한 기존 교통관리의 효과연구나 자율주행차를 도입 및 활용한 연구는 아직 초기 단계이다. 전용차로, 가변속도제한을 자율주행차에 활용하여 자율주행차 도입을 통해 교통류 측면 용량 개선, 통행속도 증가, 사고 감소의 효과가 있다고 분석하였다(Ghiasi et al., 2017; Han et al., 2017; Khondaker and Kattan, 2015; Grumert et al., 2015; Qom et al., 2016; Sun et al., 2014; Talebpour et al., 2017; Talebpour et al., 2013).

공사구간에서 운전자의 합류행태는 공사구간 안내판이 있는 곳부터 공사구간까지 다양한 지점에서 이뤄지며, 이로 인한 차량 간 간섭으로 일시적인 복수의 병목지점이 발생하여 교통류 효율이 악화되고 사고 가능성도 커진다. 공사구간에서의 교통관리 연구는 교통류 운영성과 안전성을 목적으로 많은 연구가 진행되어왔다. 특히 공사구간 차로에 대한 합류제어 연구와 공사구간에서의 대기열 예방 및 전파 방지를 위한 가변속도제한 연구가 주로 수행되었다. 조기합류(Early Merge; 조기합류)는 미리 합류시킴으로써 매끄러운 합류가 가능하여 안전성 측면 효과가 있으며, 여러 운영사례를 통해 사고 가능성을 감소시키는 효과가 확인되었다(Ge et al., 2013; McCoy et al., 2001; Yang et al., 2009). Yang et al.(2009)는 결과적으로 차간 거리가 작을수록 운영 효과가 감소한다고 제시하였다. Indiana DOT는 Indiana Lane Merge System을 운영하여 비공사 차로의 교통류 균일화, 사고율 감소의 효과를 확인하였다. Michigan DOT는 2004년에 Kalamazoo의 US-131에서 2주간 동적조기합류를 운영하여 무리한 합류의 감소, 지체 감소의 효과를 제시하였다. 결과적으로 조기합류는 적거나 원활한 수준의 교통수준에서 효과가 있으며, 운전자가 얼마나 조기합류에 익숙한지, 얼마나 준수하는지에 따라 효과 정도가 달라진다.

지연합류는 도로의 용량을 최대한 활용하여 높은 교통 수준에서 대기열 길이를 최소화할 수 있다. 많은 연구 사례에서 공사구간에서의 지연합류 운영 시 통과교통량과 대기열 측면 효과를 제시하였다(Taavola et al., 2003; Walters et al., 2001). 미국 버지니아주에 실제 적용한 연구에서는 중차량 비율에 따라 운영 효과가 달라진다고 분석하였다(Beacher et al., 2004).

동적지연합류의 경우, 여러 연구에서 혼잡과 지체 감소가 주된 효과로 제시되었다(McCoy and Pesti, 2001; Meyer, 2004). Minnesota DOT는 공사구간 접근 차량의 속도와 교통량을 운영 기준으로 사용하여 Dynamic Late Lane Merge system이라는 동적지연합류를 운영하였으며, 대기열 길이, 차선 간 교통량 비율을 개선 효과로 제시하였다. FHWA는 동적합류제어를 통해 통과교통

량 증가, 용량 증대, 사고 감소, 운전행태와 속도의 균일화, 교통 흐름의 소음(noise) 감소, 그리고 환경 측면 개선의 효과가 있다고 제시한 바 있다(Mirshahi et al., 2007). 특히 교통수요가 변하는 교통상황에서는 동적합류제어가 지체, 위험운전행태, 안정성, 대기열 측면의 개선이 가능하다고 알려져 있다(Gerald Ullman et al., 2014). Kansas DOT는 Construction Area Late Merge라는 동적지연합류를 운영하였는데 공사구간 상류지점의 속도와 교통량을 운영 기준으로 활용하였다. Michigan DOT는 Zipper Merge라는 동적지연합류를 운영하여 공사구간 내 통과교통량 개선 및 대기열 감소를 결과로 제시하였으며, 상류부의 교통량과 통행속도를 운영 기준으로 사용하였다. Maryland DOT는 “All on-All off” 알고리즘을 적용한 동적지연합류를 운영하여 공사구간 내 통과교통량 개선 및 대기열 감소와 차로별 교통량 분포의 균일화를 결과로 제시하였으며, 상류부의 시간점유율을 운영 기준으로 사용하였다. 또한, Kang et al.(2006)에서는 Maryland DOT의 운영기준을 활용하여 US I-83에서 동적지연합류를 실제로 운영하였고, 통과교통량과 대기열 길이 개선 효과를 제시하였다. 이리하듯이 동적합류제어를 활용하여 미국 FHWA, America Traffic Safety Services Association (ATSSA), 많은 주의 미국 DOT는 공사구간에서 매끄러운 합류를 유도함에 따라 안전성 개선, 공사구간 내 통과교통량 증가, 구간통행시간 절감의 효과를 확인하였다(Kang et al., 2006; Meyer, 2004; Radwan et al., 2009).

운전자의 준수율(compliance rate)에 따라 일반차 환경에서 동적합류제어의 효과는 차이가 크다. 반면 자율주행차는 일반차 대비 반응속도가 빠르며 규칙적인 반응이 가능하고, 주변 자율주행차 및 교통 인프라와의 통신이 가능하므로 동적합류제어의 효과를 개선할 수 있다. Nanicha(2018)에서 공사구간 합류제어의 자율주행차에 대한 효과 분석을 수행했으나, 정적인 방식으로 합류제어를 운영하여 교통상황에 따른 실시간 대응을 반영하지 못한 한계가 존재한다. 본 연구는 대부분의 미국 DOT에서 사용되는 동적합류제어를 자율주행차 환경에서 분석하여 기존 연구의 한계를 극복하고, 고정된 교통수요와 변동하는 교통수요에 대한 시뮬레이션 분석을 수행하여 공사구간에서의 동적합류제어 개선 효과를 분석하였다.

3. 연구방법

3.1 동적합류제어(DMC)

본 연구에서 제시하는 동적지연합류와 동적조기합류는 공사구간의 상류부 검지기 데이터를 통해 교통상황을 판단하고 동적합류제어를 결정한다. 결정된 동적합류제어 정보를 자율주행차에는 V2I로, 일반차에는 VMS로 전달한다(Fig. 1 참고).

본 연구는 동적지연합류와 동적조기합류의 운영 방식으로 Maryland

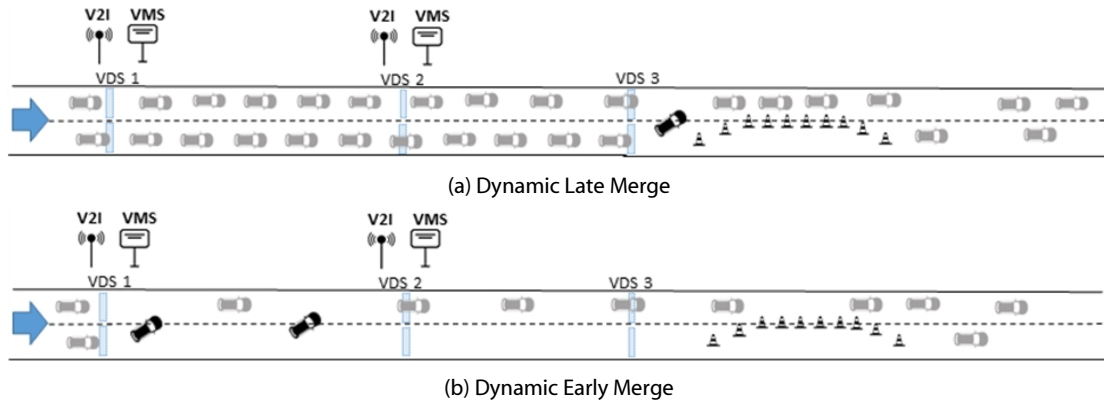


Fig. 1. Concepts of DMC

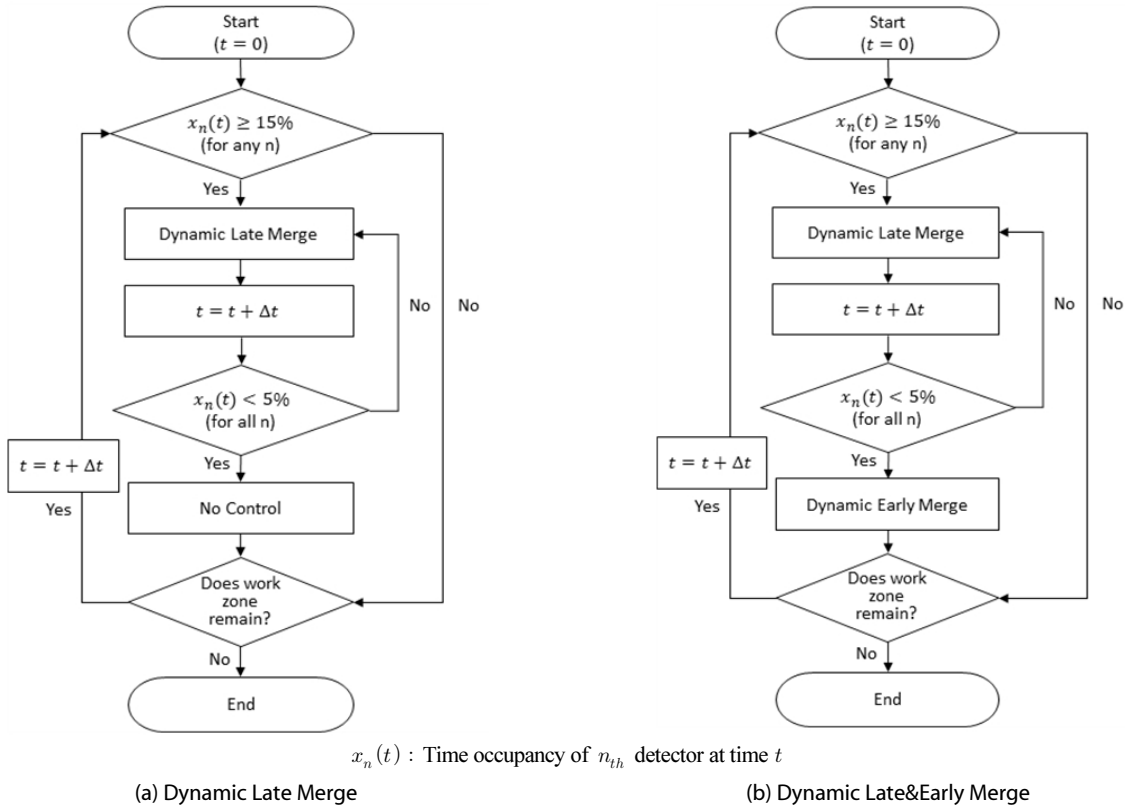


Fig. 2. DMC Algorithm

DOT 방식을 채택하였고, 75분의 시뮬레이션 중 Warm-up 시간(15분)을 제외한 60분을 분석 자료로 사용하였다. 동적합류제어의 운영 기준은 검지기의 시간점유율이며, 운영 알고리즘은 Fig. 2에 제시된 바와 같이 운영기준 값에 따라 동적합류제어 운영이 결정된다. $x_n(t)$ 는 n번째 검지기(n=1,2,3)의 5분(Δt)마다 측정된 시간 t의 평균 시간점유율을 의미한다. Fig. 2(a)는 동적지연합류의 알고리즘으로 공사구간 상류부에 위치한 세 개의 검지기의 시간점유율

이 하나의 검지기라도 15% 이상일 때 동적지연합류를 운영하고, 세 개의 검지기 모두 5% 미만으로 떨어지면 동적지연합류는 종료된다. Fig. 2(b)는 동적지연합류에 동적조기합류를 추가 운영하는 경우의 알고리즘으로 동적지연합류가 종료되는 시점에 동적조기합류가 운영되는 것이다. 본 연구는 동적지연합류만 운영하는 경우와 동적조기합류까지 추가로 운영하는 경우, 그리고 동적합류제어가 없는 경우를 시뮬레이션 결과를 통해 비교하였다.

3.2 자율주행 차량 표현

본 연구는 승용차 형태의 일반차와 자율주행차만을 투입 차종으로 설정하고, 동적합류제어에 대한 준수율을 100%로 가정하며, 자율주행차는 도로 인프라와의 V2I, I2V 통신이 가능하다고 가정하였다.

일반차와 자율주행차의 구현은 미시교통시뮬레이션 VISSIM의 차량추종모형과 차로변경모형을 활용하였다. 일반차에 대한 모형 파라미터는 VISSIM 기본값을 사용하고, 자율주행차는 ATKINS (2016) 연구에서 제시한 레벨4 수준의 자율주행차 모형 파라미터를 다음 Table 1과 같이 사용하였다.

4. 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션 시나리오

본 연구는 VISSIM상에 2차로의 10km 본선부를 구성하고,

2차선에 위치한 공사구간으로 인하여 차로 폐쇄가 발생하는 네트워크에서 동적합류제어의 시뮬레이션 분석을 수행하였다(Fig. 3 참고). Maryland DOT 방식에 따라 검지기 및 VMS의 위치를 설정하였고, 동적지연합류는 공사구간의 2.3km 상류지점부터 차선유지 유도 정보를 전달하고, 공사구간 직전 합류지점에서 2차선의 차량을 대상으로 1차선으로의 차로변경 유도 정보를 전달한다. 동적조기합류는 공사구간으로부터 2.3km 상류지점부터 1km지점 전까지 모든 차량에 1차선으로의 차로변경 유도 정보를 전달한다.

Table 2에 제시된 것과 같이 합류제어를 운영하지 않는 경우와 동적지연합류만 운영하는 경우 그리고 동적지연합류와 동적조기합류를 운영하는 경우를 6개의 시나리오로 구성하여 일반차와 자율주행차가 각각 시장보급률(Market Penetration Rate, MPR) 100%인 환경에서 시뮬레이션을 수행하였다. 시나리오 1과 4의 비교를 통해 일반차와 자율주행차의 비교가 가능하고, 시나리오 1과 2, 시나리오 4와 5를 통해 동적지연합류 효과 분석이 가능하다. 본

Table 1. Driving Parameter for Manual Vehicle and Level 4 Automated Vehicle

Driving Parameter		Manual Vehicle	Automated Vehicle
Longitudinal	Standstill distance (m)	1.5	0.5
	Headway time (sec)	0.9	0.6
	Oscillation acceleration (m/s ²)	0.25	0.40
	Standstill acceleration (m/s ²)	3.5	3.8
	Acceleration at 80Kph (m/s ²)	1.5	1.8
Lateral	Minimum headway (m)	0.5	0.2
	Safety distance reduction (%)	60	30
	[Priority rule] Minimum time gap (sec)	3.8	2.4
	[Priority rule] Minimum headway (m)	70	3.5

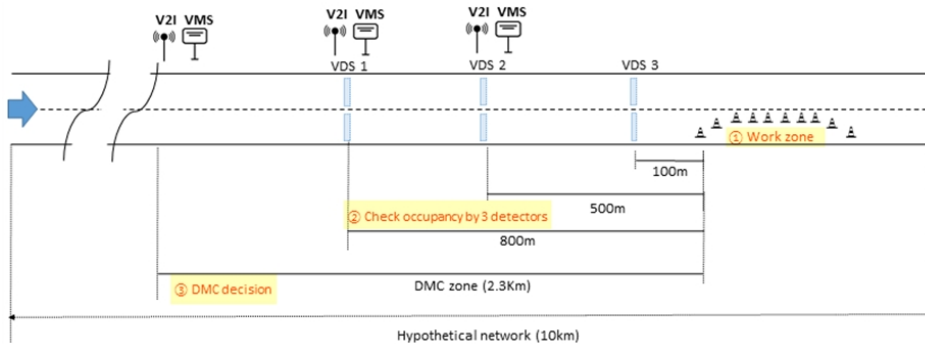


Fig. 3. DMC on Hypothetical Network

Table 2. Scenario Composition of Vehicle Types and DMC

Vehicle	No Control	Dynamic Late Merge	Dynamic Late Merge & Dynamic Early Merge
MV	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
AV	Scenario 4	Scenario 5	Scenario 6

연구는 기존 연구들에서 효과가 확인된 동적지연합류에 동적조기 합류까지 추가로 운영할 경우의 효과개선을 분석하기 위해 시나리오 2와 3, 시나리오 5와 6을 추가로 비교하였다. 차종별, 합류제어 전략별로 구성한 6개의 시나리오를 시뮬레이션으로 구현하였으며, 투입 교통량은 도로용량편람(국토교통부, 2013)에 제시된 LOS 수준별로 고정된 교통 수요와 시간에 따라 LOS A-C-E-C-A 순서로 변동되는 교통 수요로 구성하였다(Fig. 4 참고).

4.2 동적합류제어 운영 비율

시나리오 1~6에 대해 앞서 제시된 교통 수요별로 10회씩 시뮬레이션을 수행하여 분석시간 동안의 네트워크 통행시간에 대한 기초 통계량 결과를 다음 Table 3과 같이 얻었다. 본 연구의 동적합류제어 시뮬레이션 분석은 진출입로가 없는 2차선 분선부이고, 분석시간 또한 60분으로 VISSIM의 시뮬레이션 난수번호(random seed) 별 거시적인 결과 차이는 크지 않았다.

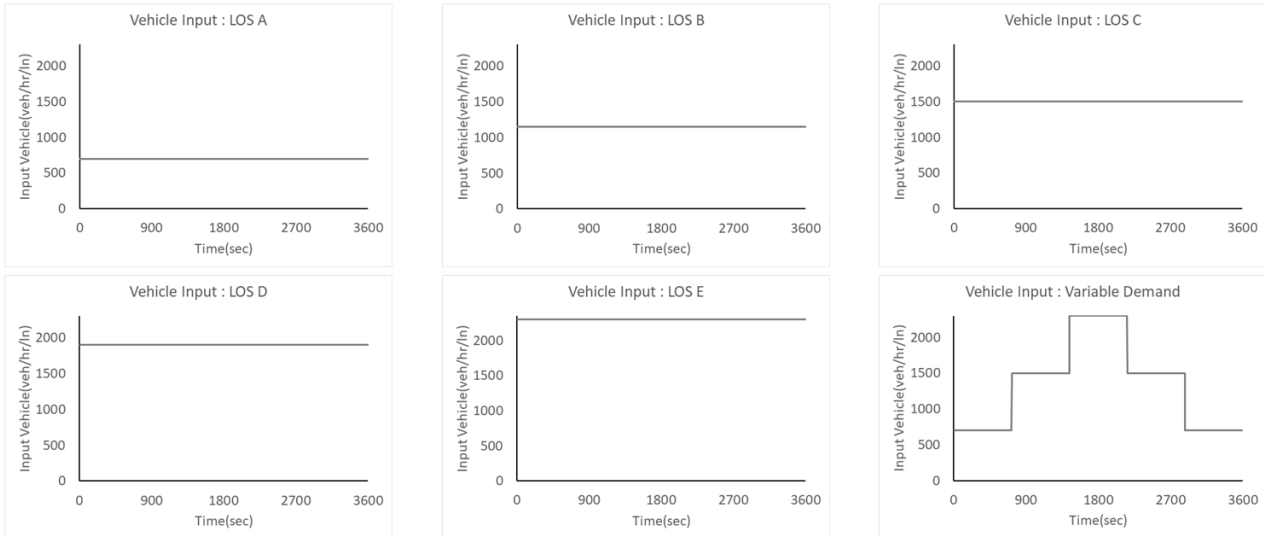


Fig. 4. Traffic Demands for Each Scenario

Table 3. Descriptive Statistics of Travel Time through the Network

Traffic demand	Scenario 1		Scenario 2		Scenario 3		Scenario 4		Scenario 5		Scenario 6	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
LOS A	400.5	0.9	406.1	0.8	407	1	391.5	0.8	392.2	0.9	393.2	1.6
LOS B	952	0.8	906.4	0.8	888	1.7	881.1	0.9	804.6	0.7	714.3	1
LOS C	1354	0.9	1257	0.4	1271	1.3	1204	0.3	1172	1	1131	1.3
LOS D	1632	0.7	1562	1	1562	1.3	1575	1.2	1470	0.8	1470	0.6
LOSE E	1715	0.7	1643	0.8	1642	0	1705	0.7	1651	0.5	1650	0.7
Variable	922.3	0.5	897.8	1	891.8	0.4	876	0.7	871.7	0.5	841.5	0.7

μ : Average value of all simulation results (sec), σ : Standard deviation of all simulation results

Table 4. DMC Operating Percentage of Time on Traffic Demand

Traffic demand	Scenario 2 (MV_DLM)	Scenario 3 (MV_DLM&DEM)	Scenario 5 (AV_DLM)	Scenario 6 (AV_DLM&DEM)
LOS A	33%	42%	33%	42%
LOS B	67%	67%	67%	75%
LOS C	59%	67%	67%	67%
LOS D	25%	33%	25%	33%
LOS E	16%	25%	25%	33%
Variable	67%	67%	67%	67%

다음으로 각 시나리오에 대해 교통 수요별로 동적합류제어의 운영 비율에 대하여 Table 4에서 비교하였다. 시뮬레이션 분석 시간(60분) 중 동적합류제어가 운영된 시간을 비율로 나타낸 것으로 정적으로 운영되는 합류제어는 운영시간 비율이 100%일 것이나, 본 연구에서 분석한 동적합류제어는 교통상황에 따라 실시간 운영되므로 정적합류제어와 운영 시간비율에서 큰 차이를 보였다. LOS B 수준의 투입교통량에서 시나리오 별 운영시간 비율이 67~75%로 가장 높게 나타났으며, LOS A와 D 수준에서는 동일한 합류제어전략에서 차종 별 운영시간 비율이 LOS A의 시나리오 2와 5는 33%, 시나리오 3과 6은 42%, LOS D의 시나리오 2와 5는 25%, 시나리오 3과 6은 33%로 차이가 없었다. 모든 시나리오에서 차종별 운영시간 비율은 큰 차이를 보이지 않았는데 이는 동적합류제어의 운영 기준이 차종별 혹은 투입 교통량별로 구분되지 않았기 때문으로 판단된다. 차종별 교통상황별 동적합류제어의 운영 기준을 다르게 설정하면 운영빈도와 그에 따른 합류제어전략의 결과가 다르게 나타날 것이다.

4.3 네트워크 평균 통행시간

Fig. 5는 동적합류제어가 없는 자율주행차 환경과 일반차 환경(시나리오1과 4)에서의 통행시간을 비교한 결과이며, 이를 기초로 하여 자율주행차 환경과 일반차 환경에서의 동적합류제어 효과를 확인하고자 하였다. LOS B~D 수준에서는 하류부의 공사구간으로 인해 발생하는 대기열에 대해 자율주행차는 미리 반응하고, 동일한 공간에 더 적극적으로 차로변경을 수행하여 차종에 따른 차이가 나타났으나, LOS A와 E에서는 차종과 관계없이 차량 간 간섭이 적거나 과도한 정체로 인해 차종 간 통행시간 차이가 작은 수준이다. 차종 간 차이가 가장 크게 나타난 것은 LOS C 수준이며, 자율주행차

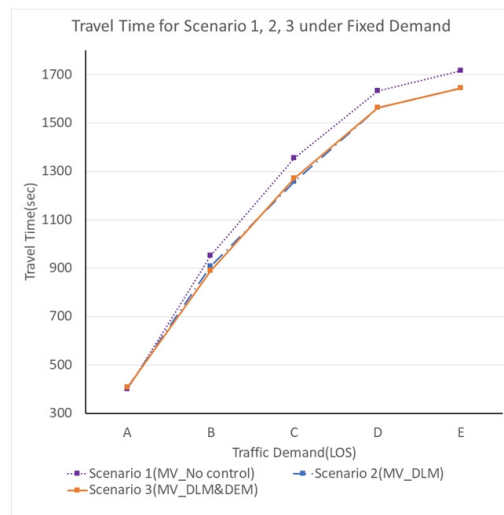


Fig. 5. Travel Time for No Control Cases under Fixed Demand

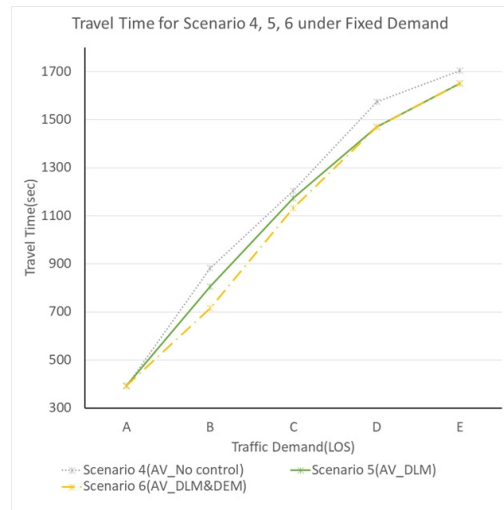
가 일반차보다 최대 11%에 준하는 150초의 평균 통행시간이 감소하였다.

Fig. 6은 일반차 환경과 자율주행차 환경에서 합류제어가 운영되지 않은 것과 동적합류제어를 운영한 것(시나리오 1, 2, 3과 시나리오 4, 5, 6)을 비교한 것이다. 결과에 따르면 LOS A를 제외한 모든 교통 수준에서 동적합류제어 운영으로 인한 통행시간 감소 효과가 나타났다.

동적지연합류 운영을 통해 일반차 환경에서 최대 7% 수준의 97초, 자율주행차 환경에서 최대 77초인 9%의 평균 통행시간이 감소되었다. 동적지연합류에 동적조기합류를 추가로 운영한 경우는 일반차 환경에서 최대 7% 수준의 64초, 자율주행차 환경에서 최대 167초로써 19%의 평균 통행시간이 감소되었다. 동적조기합류



(a) MV Scenarios



(b) AV Scenarios

Fig. 6. Travel Time under Fixed Demand

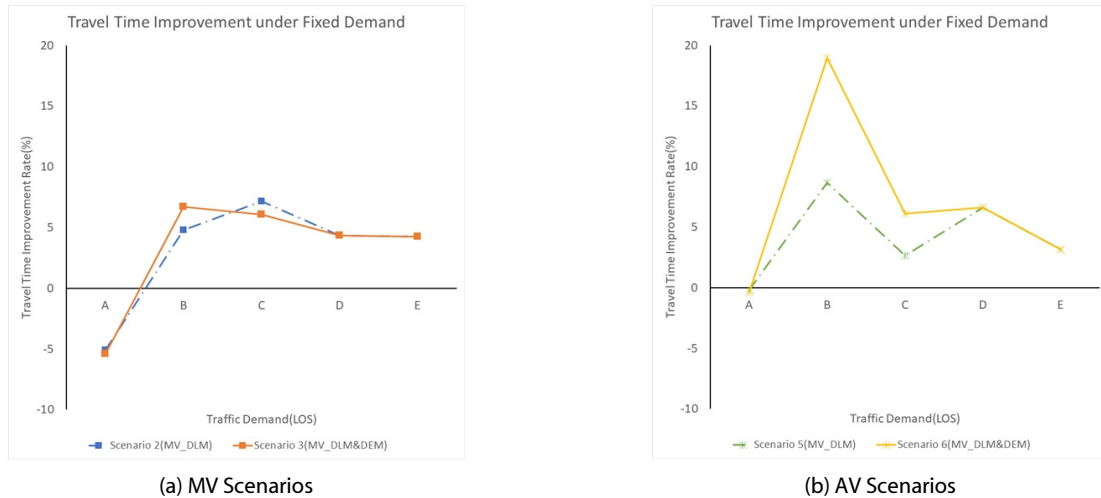


Fig. 7. Travel Time Improvement Rate Compared to No Control under Fixed Demand

Table 5. Travel Time Improvement of DMC Scenarios for AV Compared to Scenario 1 (No Control for MV)

Traffic Demand	Scenario 1 (MV_No control)	Scenario 4 (AV_No control)	Scenario 5 (AV_DLM)	Scenario 6 (AV_DLM&DEM)
LOS A	400 sec	392 sec (2%)	392 sec (2%)	393 sec (2%)
LOS B	952 sec	881 sec (7%)	805 sec (15%)	714 sec (25%)
LOS C	1354 sec	1205 sec (11%)	1173 sec (13%)	1131 sec (16%)
LOS D	1633 sec	1575 sec (4%)	1470 sec (10%)	1470 sec (10%)
LOS E	1716 sec	1705 sec (1%)	1651 sec (4%)	1650 sec (4%)

류로 인한 추가 개선 효과는 자율주행차 환경의 LOS B와 C에서만 나타났다.

Fig. 7은 동적합류제어의 통행시간 개선 효과를 차종별로 정리한 것이다. Fig. 7(a)를 통해 동적지연합류 운영 효과가 일반차 환경에서는 -5~7%, Fig. 7(b)를 통해 자율주행차 환경에서는 0~9%의 개선율을 보이는 것으로 나타났다. LOS A의 교통수준일 때 동적지연합류를 일반차 환경(시나리오 2)에서 운영시 합류제어를 하지 않는 것(시나리오 1)보다 통행시간이 5% 커지는 것이 관측되었다. 자율주행차 환경(시나리오 5)에서는 개선효과는 없으나, 통행시간을 유지하는 결과가 나타났다. 이를 통해 LOS A 수준의 교통상황에서 동적지연합류 운영의 필요성이 없다는 기존 연구결과들과 유사한 결론이 도출되었다. LOS B에서 시나리오 2와 4의 개선율이 각각 6%와 8%로 자율주행차 환경에서의 동적지연합류 효과가 큰 것으로 나타났다. 반면 LOS C에서는 시나리오 2와 4의 개선율이 각각 5%, 2%로 일반차 환경의 동적지연합류 효과가 큰 것으로 나타났다. LOS D와 E에서는 시나리오 2와 4가 모두 개선율 5%를 보이며, 차종 간 동적지연합류 효과 차이가 없었다. 결과적으로 동적지연합류 운영을 통해 LOS B-E 수준의 일반차 환경과 자율주행차 환경에서 평균 통행시간 개선 효과를 확인할 수 있었다.

동적조기합류까지 추가 운영한 경우는 일반차 환경에서 -5~7%, 자율주행차 환경에서 0~19%의 개선율을 보이는 것으로 나타났다. LOS A에서 시나리오 3과 6이 각각 -5%와 0%의 개선율을 보이며, LOS B에서 시나리오 3과 6의 개선율이 각각 6%와 19%로 자율주행차 환경에서 동적합류제어 운영 효과가 일반차 환경보다 크게 나타났다. 반면, LOS C에서는 시나리오 3과 6이 모두 5%의 개선율을 보이며, 차종 간 차이가 나타나지 않았다.

LOS A와 E 수준에서 동일 차종 내 동적합류제어 간 평균 통행시간 차이(시나리오 2와 3, 시나리오 5와 6)가 없는 것으로 나타났다. 이는 일반차 환경 및 자율주행차 환경 모두 LOS A와 E 수준에서 동적합류제어 운영 기준에 부합하지 못해 운영 빈도가 매우 낮았기 때문으로 판단된다. 결과적으로 동적조기합류의 추가 운영으로 인한 개선 효과는 자율주행차 환경의 LOS B와 C 수준에서만 확인됐으며, 일반차 환경에서는 동적조기합류의 추가 운영 효과가 확인되지 않았다.

앞선 결과를 정리하면 동적합류제어가 운영되지 않은 시나리오 1과 4의 비교를 통해 일반차 환경 대비 자율주행차 환경의 통행시간은 LOS B에서 7%, LOS C에서 11%의 개선 효과가 나타났다. 시나리오 2와 5의 비교를 통해 동적지연합류의 통행시간 개선

효과는 일반차 환경에서 LOS B는 5%, LOS C는 7%로 나타났고, 자율주행차 환경에서 LOS B는 9%, LOS C는 3%로 나타났다. 동적지연합류에 동적조기합류까지 운영된 시나리오 3과 6의 비교를 통해 일반차 환경에서 LOS B는 7%, LOS C는 6%로 나타났고, 자율주행차 환경에서 LOS B는 19%, LOS C는 6%의 개선 효과를 확인하였다.

Table 5는 일반차 환경에서 합류제어전략이 운영되지 않는 시나리오 1 대비 자율주행차 환경의 동적합류제어 시나리오 결과를 비교한 것이다. 특히 LOS B 수준에서 자율주행차의 통행시간 개선 효과는 7%이고, 동적지연합류 운영을 통해 15%, 동적조기합류의 추가 운영을 통해 25%가 개선되었다. 결과적으로 자율주행차 도입의 효과만큼 동적합류제어의 효과가 높음을 알 수 있었으며,

이를 통해 향후 자율주행차 환경에서도 교통관리 연구의 필요성이 높을 것으로 추정된다.

다음으로 LOS A-C-E-C-A 순서로 변동되는 교통 수요의 시뮬레이션에서 네트워크와 동적합류제어 운영구간의 평균통행시간을 비교하였다(Fig. 8 참고). Fig. 8(a)는 시나리오1과 4를 비교한 것으로 자율주행차와 일반차에 따른 차이가 나타나는데 이는 공사 구간으로 인한 대기열에 대해 자율주행차는 미리 반응하고, 동일한 공간에 더 적극적으로 차로변경을 수행하기 때문이다.

Fig. 8(b)와 (c)는 시나리오 1, 2, 3과 시나리오 4, 5, 6을 비교한 것으로 각각 일반차 환경과 자율주행차 환경에서 동적합류제어를 운영하지 않은 경우와 운영한 경우를 비교한 것이다. 일반차 환경과 자율주행차 환경에서 동적합류제어 운영으로 인한 네트워크 및

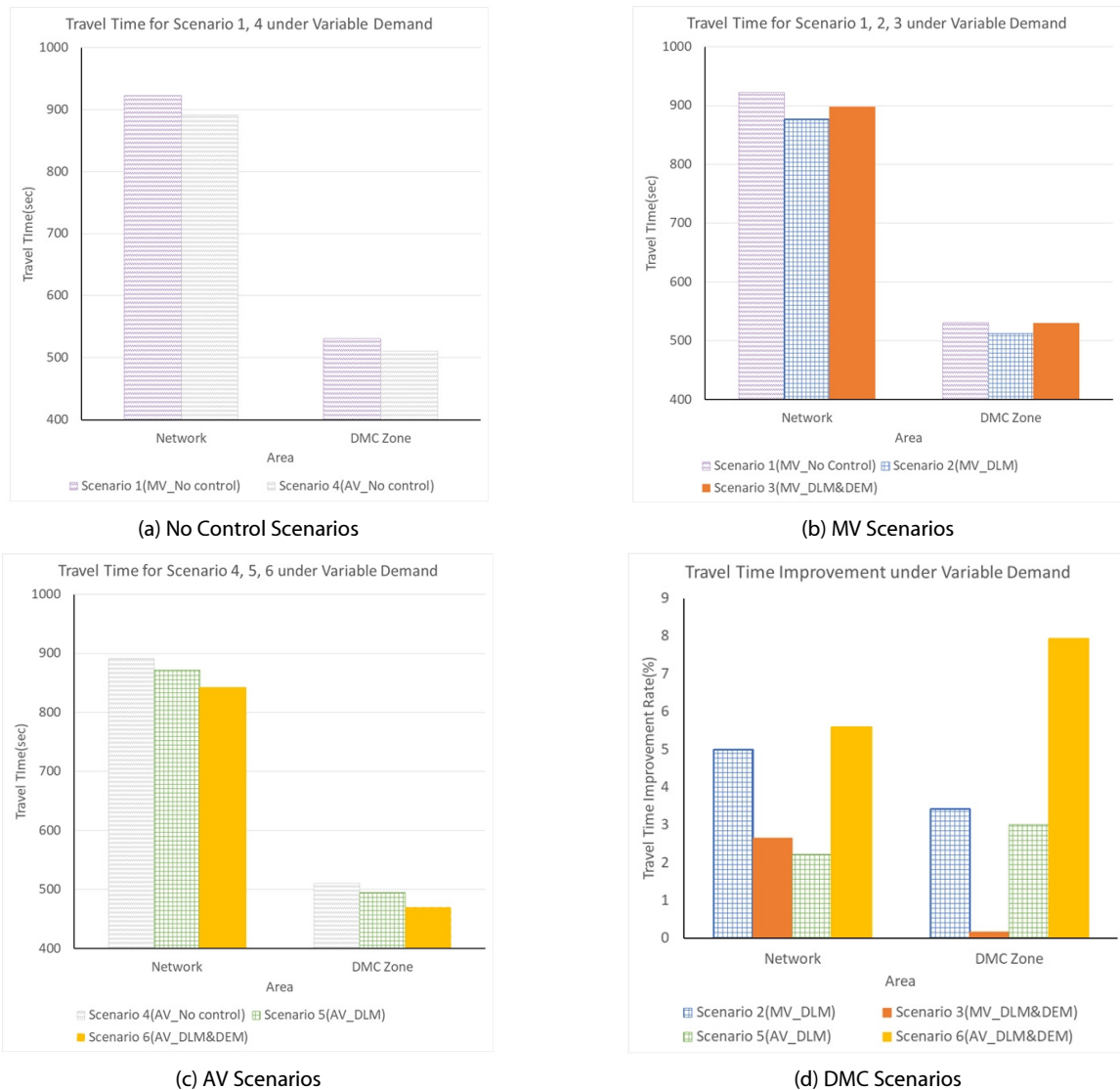


Fig. 8. Travel Time and Improvement for DMC Cases Compared to No Control under Variable Demand

동적합류제어 운영구간에서 통행시간 감소 효과를 확인하였다. 동적조기합류가 추가된 경우는 일반차 환경과 자율주행차 환경의 개선율이 차이를 보였으며, 특히 일반차 환경의 시나리오 3은 시나리오 2보다 평균 통행시간이 크게 나타나 일반차 환경에서의 동적지연합류 운영 대비 동적조기합류 추가 운영으로 인한 추가 개선을 확인할 수 없었다. 자율주행차 환경의 시나리오 6은 동적지연합류만 운영된 시나리오 5보다 통행시간이 더 작게 나타났으며, 이는 변동하는 교통 수요의 시나리오 2, 3, 5, 6 중에서 가장 좋은 개선 효과를 보인 것이다.

Fig. 8(d)는 동적합류제어 운영으로 인한 평균 통행시간 개선을 비교하였으며, 동적지연합류 운영은 일반차 환경에서 3.5~5%, 자율주행차 환경에서 0.1~3%의 개선을 보였다. 동적조기합류가 추가된 경우에는 고정 교통수요 결과와 동일하게 일반차 환경에서는 추가 개선이 없었으나, 자율주행차 환경에서는 추가 효과가 나타났다.

4.4 공사구간 누적통과교통량

앞서 시나리오 2, 3, 5, 6을 통해 LOS A와 E 수준을 제외하면 동적지연합류 운영 대비 동적조기합류 추가 운영 시 평균 통행시간의 개선을 알 수 있었으며, 추가적으로 공사구간 통과교통량의 개선 효과를 확인하기 위해 LOS 수준별 누적통과교통량을 비교하였다(Table 6 참고). 시나리오 2와 3의 누적통과교통량은 평균 통행시간 결과와 마찬가지로 일반차는 동적지연합류 운영 대비 동적조기합류 추가 운영 시 미미한 개선 효과를 보였고, 오히려 LOS C 수준에서는 동적조기합류 추가 운영 시 3.7% 낮은 누적통과교통량을 보였다.

자율주행차 환경의 시나리오 5와 6의 비교를 통해서 동적조기합류의 추가 운영에 따른 누적통과교통량 개선이 있었으며 최대 14%의 증가율을 보였다. LOS B, C, D에서 자율주행차 환경일 때의 개선율은 일반차 환경일 때의 개선율보다 평균 12% 높게 나타났지만, LOS A와 E 수준에서는 평균 통행시간 결과와 동일하게 동적조기합류의 추가 운영으로 인한 개선 효과가 나타나지 않았다.

결과적으로 LOS A-C-E-C-A의 변동하는 교통수요의 시뮬레이션에서 자율주행차 환경에서의 동적조기합류 추가 운영은 동적지연합류만 운영된 경우보다 3.6%의 공사구간 통과교통량을 개선시켰으나, 일반차 환경에서는 동적조기합류의 추가 운영 효과를 확인할 수 없었다.

5. 결론

최근 자율주행차에 대한 관심이 높아지면서 관련 연구와 개발이 활발히 진행되고 있으며, 본 연구는 많은 지역에서 운영되는 동적지연합류와 동적조기합류를 일반차 대비 빠른 반응속도와 통신이 가능한 자율주행차 환경에서 효과 분석하였다. 실제 운영기준에 맞춰 동적합류제어를 구성하고 차종과 합류제어전략이 반영된 6개의 시나리오에 대해 투입교통량별로 시뮬레이션을 수행하였다. 분석결과로 네트워크 통행시간과 공사구간 통과교통량을 산출하여 동적합류제어의 일반차 환경과 자율주행차 환경에서의 분석 결과를 비교하였다.

시뮬레이션 결과에 따르면 일반차 환경과 자율주행차 환경에서 동적지연합류 운영은 동적합류제어를 운영하지 않는 경우보다 네트워크 평균 통행시간과 공사구간 통과교통량을 개선시켰다. 그러나 동적지연합류에 동적조기합류를 추가 운영하는 경우 일반차 환경에서는 효과 개선이 나타나지 않았고, 자율주행차 환경에서는 평균 통행시간 및 공사구간 통과교통량 개선 효과를 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 고정된 교통수요와 변동하는 교통수요에서 모두 나타났다. 이는 일반차 대비 자율주행차가 상대적으로 빠르고 일정한 반응이 가능하며, 교통 인프라와의 통신(V2I, I2V)을 통해 하류부의 교통상황 및 대응 정보를 선제적으로 받을 수 있으므로 동적합류제어 운영 시 개선 효과를 보인 것으로 판단된다. 특히 본 연구는 일반차의 동적합류제어에 대한 준수율을 100%로 가정했는데 실제 운전자의 준수율을 적용한다면 일반차의 동적합류제어 효과가 감소하여 자율주행차 환경에서의 동적합류제어 효과와 더 큰 차이가 나타날 것이다.

자율주행차 환경에서의 동적합류제어 운영 효과는 일반차 환경에

Table 6. Comparison of Cumulative Throughput at Work Zone

Traffic demand	LOS A	LOS B	LOS C	LOS D	LOS E	Variable
Scenario 2 (Veh)	1,334	1,895	1,931	1,925	1,992	1,780
Scenario 3 (Veh)	1,334	1,918	1,860	1,960	1,992	1,780
Increment	0%	1.2%	-3.7%	1.8%	0%	0%
Scenario 5 (Veh)	1,383	2,036	2,047	1,916	2,209	1,779
Scenario 6 (Veh)	1,383	2,319	2,286	2,103	2,209	1,843
Increment	0%	13.9%	11.7%	9.8%	0%	3.6%

서 자율주행차 환경으로 변화될 때 개선되는 수준만큼 추가적인 효과를 보였다. 따라서 최적화된 동적합류제어는 자율주행차 환경에서도 매우 중요한 공사구간 혼잡관리의 하나가 될 것으로 판단된다.

본 연구 결과를 통해 동적합류제어의 개선 방안을 제시할 수 있다. 동적합류제어는 운전자의 준수율 뿐 아니라 준수에 따른 합류행태 또한 다양하기 때문에 이를 반영하기 위하여 동적합류제어 운영 구간을 다소 길게 운영한다. 준수율이 100%인 자율주행차는 동적합류제어에 대해 빠르고 일정한 합류행태가 가능하므로 기존 동적합류제어의 운영 구간을 줄일 수 있을 것으로 기대된다. 또한 기존 동적합류제어는 운전자에게 시각적으로 정보 전달을 위해 PCMS (Portable Changeable Message Signs)를 일정 거리마다 설치해야 했으나, 자율주행차 환경에서는 PCMS를 I2V 통신으로 대체할 수 있다. 이러한 개선 방안은 PCMS의 물리적 설치 제약을 벗어날 수 있으며, 공사구간 교통관리의 운영 효율을 높일 수 있을 것이다.

향후 연구로는 자율주행차와 일반차의 혼합류(mixed flow) 상황에서 다양한 자율주행차 시장보급률에 대한 효과 분석 및 다양한 기하구조에서의 효과 분석이 수행되어야한다. 또한, 기존 동적합류제어의 운영 기준은 자율주행차 환경에서의 최적 운영을 위해 변경될 가능성이 높으므로 이를 고려한 운영 기준값 도출 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토교통물류연구사업 ‘자율협력주행을 위한 LDM 및 V2X 기반 도로시스템 개발’의 연구비지원(code: 18TLRP-B101406-04)과 서울대학교 건설환경종합연구소의 지원에 의해 수행되었음.

References

ATKINS (2016). *Research on the Impacts of Connected and Autonomous Vehicles(CAVs) on Traffic Flow*, Report of Department for Transport, United Kingdom.

Ge, Q. and Menendez, M. (2013). “A simulation study for the static early merge and late merge controls at freeway work zones.” *Swiss Transport Research Conference*, Monte Verita/Ascona, Switzerland.

Ghiassi, A., Ma, J., Zhou, F. and Li, X. (2017). “Speed harmonization algorithm using connected autonomous vehicles.” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2565.

Grumert, E., Ma, X. and Tapani, A. (2015). “Analysis of a cooperative variable speed limit system using microscopic traffic simulation.” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*,

Vol. 52, pp. 173-186.

Han, Y., Chen, D. and Ahn, S. (2017). “Variable speed limit control at fixed freeway bottlenecks using connected vehicles.” *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 98, pp. 113-134.

Kang, K. P., Chang, G. L. and Paracha, J. (2006). “Dynamic late merge control at highway work zones: evaluation, observations, and suggestions.” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1948, pp. 86-95.

Khondaker, B. and Kattan, L. (2015). “Variable speed limit: A microscopic analysis in a connected vehicle environment.” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 58, pp. 146-159.

Mahmassani, H. S. (2016). “50th anniversary invited article—autonomous vehicles and connected vehicle systems: flow and operations considerations.” *Transportation Science*, Vol. 50, No. 4, pp. 1140-1162.

Mccoy, P. and Pesti, G. (2001). “Dynamic late merge control concept for work zones on rural interstate highways.” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1745, pp. 20-26.

Meyer, E. (2004). *Construction Area Late Merge (CALM) System*, Report of Kansas Department of Transportation, Meyer ITS, Lawrence, Kansas.

Mirshahi, M., Obenberger, J., Fuhs, C. A., Howard, C. E., Krammes, R. A., Kuhn, B. T., Mayhew, R. M., Moore, M. A., Sahebjam, K., Stone, C. J. and Yung, J. L. (2007). *Active Traffic Management: The Next Step in Congestion Management*, Report of Federal Highway Administration, American Trade Initiatives, Alexandria, Virginia.

Qom, S. F., Xiao, Y. and Hadi, M. (2016). “Evaluation of cooperative adaptive cruise control (CACC) vehicles on managed lanes utilizing macroscopic and mesoscopic simulation.” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2565.

Radwan, E., Harb, R. and Ramasamy, S. (2009). *Evaluation of Safety and Operational Effectiveness of Dynamic Lane Merge System in Florida*, Report of Florida Department of Transportation, Center for Advanced Transportation Systems Simulation, University of Central Florida, Orlando, Florida.

Shladover, S. E. (2017). “Connected and automated vehicle systems: introduction and overview.” *Journal of Intelligent Transportation Systems*, Vol. 22, No. 3, pp. 190-200.

Subhanka, N. (2018). *Impact of Level 3 Automated Vehicle Merging on 2-To-1 Lane Freeway*, Master Thesis, University of Wisconsin-Madison, Madison, Wisconsin, USA.

Sun, R., Hu, J., Xie, X. and Zhang, Z. (2014). “Variable speed limit design to relieve traffic congestion based on cooperative vehicle infrastructure system.” *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, Vol. 138, pp. 427-438.

Taavola, D., Jackels, J. and Swenson, T. (2003). “Dynamic late merge system evaluation: initial deployment on US route 10 summer 2003.” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 976036.

- Talebpour, A. and Mahmassani, H. S. (2016). "Influence of connected and autonomous vehicles on traffic flow stability and throughput." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 71, pp. 143-163.
- Talebpour, A., Mahmassani, H. S. and Elfar, A. (2017). "Investigating the effects of reserved lanes for autonomous vehicles on congestion and travel time reliability." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2622, pp. 1-12.
- Talebpour, A., Mahmassani, H. S. and Hamdar, S. H. (2013). "Speed harmonization evaluation of effectiveness under congested conditions." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2391, No. 1, pp. 69-79.
- Ullman, G., Schroeder, J. and Gopalakrishna, D. (2014). *Use of Technology and Data for Effective WorkZone Management: WorkZone ITS Implement Guide*, Report of Federal Highway Administration, Battelle, Columbus, Ohio, Texas A&M Transportation Institute, The Texas A&M University System, College Station, Texas
- Yang, N., Chang, G. L. and Kang, K. P. (2009). "Simulation-based study on a lane-based signal system for merge control at freeway work zones." *Journal of Transportation Engineering, ASCE*, Vol. 135, No. 1, pp. 9-17.