

도시부 도로 호송주행(Convoy Driving) 서비스 개발 및 효과분석

A Study on the Development of Urban Roads Convoy Driving Service and Effect Analysis

손 승 녀* · 이 지 연** · 조 용 성*** · 박 지 혁**** · 소 재 현*****

* 주저자 : 한국지능형교통체계협회 R&BD센터 실장

** 교신저자 : 한국지능형교통체계협회 R&BD센터 선임연구원

*** 공저자 : 한국지능형교통체계협회 R&BD센터 센터장

**** 공저자 : 아주대학교 교통시스템공학과 석사과정

***** 공저자 : 아주대학교 교통시스템공학과 조교수

Seung-neo Son* · Ji-yeon Lee* · Yong-sung Cho* · Ji-hyeok Park** · Jae-hyun(Jason) So**

* R&BD Center, ITS Korea

** Department of Transportation Engineering, Ajou University

† Corresponding author : Ji-yeon Lee, olwldus2@itskorea.kr

Vol. 21 No.1(2022)
February, 2022
pp.51~63

pISSN 1738-0774
eISSN 2384-1729
<https://doi.org/10.12815/kits.2022.21.1.51>

Received 20 December 2021
Revised 27 December 2021
Accepted 17 January 2022

© 2022. The Korea Institute of Intelligent Transport Systems. All rights reserved.

요 약

호송주행(convoy driving)은 군집주행(Platoon)과 함께 다중차량 협력주행 (Multi-vehicle cooperation) 기술 중 하나로써 국외에서는 호송주행시 차량의 대형유지를 위한 차량제어 메커니즘 연구가 활발히 진행되고 있으며, 유럽의 Autonet 2030연구에서는 고속도로를 대상으로 호송주행 서비스를 개발하고 실증한 바 있으나 국내에서는 아직까지 호송주행에 대한 개념정립조차 미흡한 실정이다. 이에 본 연구에서는 호송주행의 서비스 개념을 정립하고 도시부 도로에서의 서비스 적용을 위한 시나리오 및 통신 메시지 등을 개발하여 시뮬레이션 분석을 통해 그 실효성을 검증하고자 하였다. 도시부 도로의 대표적인 V2I 협력주행 서비스인 사각지대 운행지원 서비스 및 딜레마존 안전주행 서비스를 대상으로 개별차량 협력주행 시와 호송주행 시를 비교 분석한 결과 교통안전성 지표인 상충횟수와 교통효율성 지표인 지체시간 및 정지수가 개별차량 협력주행 시보다 호송주행 시 크게 개선되는 것을 알 수 있었다.

핵심어 : 자율협력주행, 다중차량 협력주행, 호송주행, 다차로 군집주행, 도시부 도로

ABSTRACT

Convoy driving is one of the technologies of multi-vehicle cooperation driving along with platoon driving. All over the world, research on vehicle control mechanisms to maintain vehicle formation during convoy driving has been actively conducted and in Europe's Autonet 2030 project has developed and demonstrated convoy driving services for highways. But, even the concept of convoy driving is still insufficient in Korea. Therefore, in this study, the concept of convoy driving service was established and scenarios and communication messages for service application on urban roads were developed. And its effectiveness was verified through simulation analysis. As a result of comparing and analyzing individual vehicle cooperative driving and convoy driving for the blind spot support service and dilemma zone safety support service, which are representative V2I cooperative

driving services on urban roads, the number of conflicts(indicator of traffic safety) and delays and stops(indicator of traffic efficiency) are significantly improved in convoy driving compared to individual vehicle cooperative driving.

Key words : Cooperative autonomous driving, Multi-vehicle cooperative driving, Convoy driving, Multi-lane platoon, Urban road

I. 서론

자율주행 차량의 주행 형태 중 차량 간 통신(vehicle to vehicle, V2V)으로 연결된 다중차량 협력주행(Multi-vehicle cooperation)기술은 도로교통 흐름과 안전을 개선하고 CO₂ 배출량을 줄이며, 운전 편의성 향상을 목표로 하는 자동차 산업의 주요 목표를 달성하는 수단 중 하나이다. (Marjovi et al., 2015).

다중차량 협력주행 기술의 대표적인 사례로는 단일차로에서 지정된 선두차량에 의해 차량 간격 등이 조정되는 군집주행(Platoon)과 다차로(Multi-lane) 내에서 동일한 방향으로 주행하는 차량들이 협력주행 그룹을 형성하고 차량 간격과 속도 등을 조정하며 서로 호위하듯 주행하는 호송주행(Convoy Driving)이 있다.

군집주행 기술이 자율주행 Lv.3 수준에서 행해지는 대표적인 서비스라면 호송주행은 자율주행 Lv.4 이상에서 이루어질 수 있는 서비스로써 두 기술은 다중차량 협력주행 기술의 범주 안에서 서로 다른 수준의 기술로 분류된다.

군집주행은 단일차로 내에서 군집으로 형성된 모든 차량의 차량간격과 속도를 선두차량과 일치시키는 반응성 제어전략에 의한 주행기술(Marjovi et al., 2015)로써 차로 내에서의 교통 안전성 및 효율성 향상은 가능하나 다차로로 운영되는 도로 전반의 안전성 및 효율성을 향상하는 데는 한계가 있다.

자율주행 차량이 차선을 변경하기 위해서는 변경하고자 하는 차로의 수락간격(Gap Acceptance)을 탐색하여 차로를 변경한다. 이때 대향차로에 주행 중인 차량으로 인해 끼어들기에 필요한 공간이 확보되지 않을 경우는 차량간 경로 협상을 시도하고 대향차로에 주행 중인 차량의 가감속 등을 유도하여 차로를 변경할 수 있다. 그러나 정체 등으로 인해 V2V간 협상해야 하는 차량이 무수히 많아 당사자끼리의 협상이 사실상 불가능해지는 경우 이에 따른 지체 및 상충 위험은 더 증가할 것이다.

이처럼 주변차로의 차량과도 협력하고 조정하여 원활하고 안전한 교통류 확보를 위해서는 다차로 다중차량 협력주행을 위한 호송주행 기술이 필요하다.

국외에서는 호송주행을 위한 차량의 대형유지 기술인 분산형 차량제어 메커니즘 연구가 활발히 진행되고 있으며, 유럽의 Autonet 2030연구에서는 고속도로를 대상으로 호송주행 서비스를 개발하고 실증한 바 있으나 국내에서는 호송주행 관련 기초적인 개념 정립조차 미흡한 실정이다.

이에 본 연구에서는 호송주행 기술 도입을 위해 도시부 도로에서의 호송주행 시나리오를 개발하고 시뮬레이션을 통한 효과분석을 실시하여 서비스 효과를 검증하고자 한다.

II. 관련연구 고찰

1. 기존 문헌 고찰

Kato et al.(2002)은 고속도로에서 자율협력주행 차량의 안전 수준을 높이기 위해 다차로 군집주행의 개념

을 도입하였다. Kato가 제안한 다차로 군집주행은 그룹된 차량의 수가 5대로 고정되어 있고 첫 번째 차량이 리더 역할을 하는 형태로써 차량군의 사이즈를 확장하지 못한다는 한계를 지녔다.

이후 Goyal et al.(2010)은 다차로 군집주행을 위해 리더가 없는 그래프 기반 제어를 제안하였다. 그래프 기반 제어는 개별 차량이 임의의 형태로 주행할 수 있는 형태의 군집주행 방식으로 그 결과 전체 그룹이 결국 원하는 대형으로 수렴되는 결과를 얻었다. 그러나 Goyal et al.(2010)가 제안한 그래프 기반 군집제어방식은 단순히 선형적으로 정의된 형태로 진행되어 그룹에 포함된 차량이 그룹을 이탈하거나 합류하는 형태의 시나리오 연구는 진행되지 않았다. 또한 군집주행시 동적장애물에 대한 고려도 반영되지 않았다는 단점을 지녔다.

Marjovi et al.(2015)는 분산 그래프 기반으로 고속도로 호송주행 대열형성 제어를 위한 알고리즘을 개발하여 자율차량이 차선을 유지하고 장애물을 회피하면서 자체적으로 대형제어를 수행할 수 있는 알고리즘을 제안하였다.

Li et al.(2019)는 분산그래프 기반으로 장애물 회피 능력과 안정성을 향상시킨 호송주행을 제안하였다. 호송주행 과정에서 각 차량의 궤적과 속도를 계산할 수 있는 알고리즘을 개발하였으며, 4개의 시나리오 1. Convoy 형성(3차로, 자율주행차량 7대), 2. 장애물 회피를 위한 차로 변경, 3.전방 저속 차량 회피를 위한 감속, 4. Convoy 형태 전환(2차로 대형→3차로 대형)를 시뮬레이션으로 검증한 결과 제안된 호송주행 알고리즘으로 시나리오에서 대형이동을 완료할 수 있음을 확인하였다.

Llatser et al.(2016)은 호송주행 차량 제어 알고리즘을 위한 호송주행 통신의 신뢰성, 대기 시간 및 데이터 수명을 정량화하는 성능 매트릭스를 정의하였다. 호송주행 통신 성능을 정량화하기 위해 차량 시뮬레이터 Webots와 네트워크 시뮬레이터 ns-3을 활용하여, 4가지 통신 매트릭스(Node Coverage Ratio, 통신 지연, 전역 전송 속도, Convoy메시지의 데이터 수명)을 평가하였다. 그 결과, 호송대 내 차량의 수가 증가함에 따라 호송대 내(NCR, 통신 지연)에서 IVC(Inter-Vehicle Communication)의 성능이 점차 저하되었으나, 메시지 빈도를 줄임으로써 IVC 성능을 개선할 수 있음을 확인하였다. 하지만, 메시지 전송 빈도를 줄이는 것은 호송주행 시 주변 차량의 정보가 실시간으로 업데이트되지 않을 수도 있다. 따라서, 자율주행과 IVC의 결합은 자율주행차가 협력하여 주행할 수 있도록 함으로써 안전성과 교통 효율성을 크게 향상시키는 것을 확인하였으나, 호송주행 알고리즘 설계자가 요구되는 통신 성능과 호송주행 크기에 따라 메시지 주파수에 대한 최적값을 도출해야 한다는 점을 시사하였다.

Hang Liu et al.(2017)는 다중차량 협력에 대한 제어 및 통신측면의 포괄적 조사를 수행하기 위해 일반적인 다중차량 협력 시나리오를 정립하고, 협력 제어를 위한 통신유형, 통신요구사항 등을 소개하고, 시뮬레이션 분석을 통해 평균대기길이, 분당 통과차량수 등으로 다중차량 협력시나리오를 평가하고 차량 제어에 필요한 통신 리소스 할당 방안을 제시하였다.

2. 기존 연구와의 차별성

앞서 제시한 것처럼 기존 연구는 대체로 차량 관점에서 호송주행을 위한 대열형성 방안 및 통신 요구사항에 대한 연구 중심으로 수행되어왔다.

또한 대체로 호송주행에 대한 연구는 고속도로 위주로 진행되어 다양한 동적 장애물이 포함된 도시부도로에서의 호송주행 효과를 분석한 연구는 미흡한 실정이다.

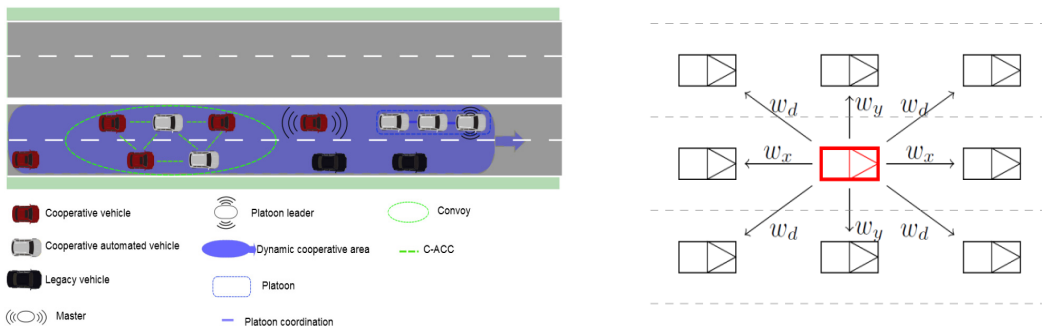
이에 본 연구에서는 대열형성 방식 및 차량의 호송주행 알고리즘은 기존 연구를 기반으로 정립하고, 해당 기술을 도시부 도로에 적용하기 위한 시나리오를 개발하여 그 효과를 분석하는 것에 중점을 두고자 하였다.

기존 연구는 고속도로에 국한하여 호송주행 서비스를 개발 및 검증한 반면, 본 연구에서는 교통 특성상 고속도로보다 지체 및 돌발상황으로 인해 차량간 협상에 의한 진로 결정에 제약이 많을 것으로 예상되는 도시부 도로를 대상으로 효과를 검증함으로써 도시부 도로 내 호송주행 서비스의 필요성을 입증하고자 한다.

Ⅲ. 호송주행(Convoy Driving) 시나리오 개발

1. 호송주행(Convoy Driving) 개념 정립

호송대(Convoy)는 다차로의 다중차량간 협력주행을 하는 차량 그룹을 말하며, 호송주행(Convoy Driving)이란 동일구간을 주행하는 차량끼리 V2V 통신을 통해 호송대를 형성하고 안전성 및 주행쾌적성, 도로 가용성, 에너지 효율을 극대화할 수 있는 최적 속도 및 차간 간격을 유지하며 주행하는 것을 의미한다.



<Fig. 1> Concept of local cooperative area and convoy driving¹⁾ <Fig. 2> Dynamic graph-based formation control

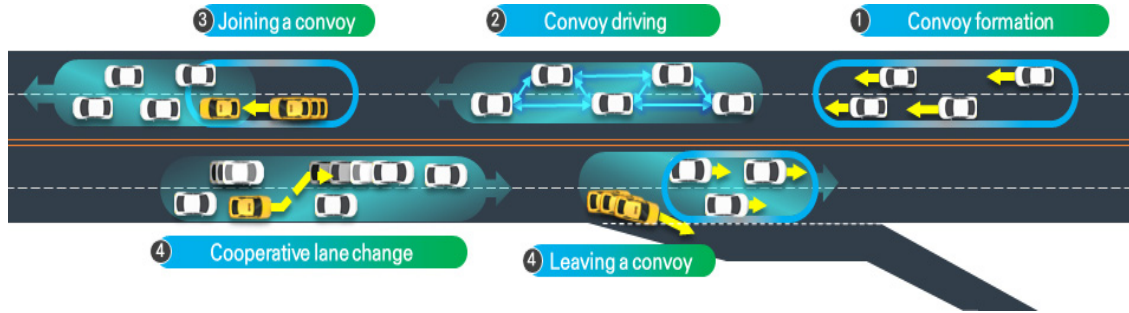
호송주행은 군집주행과 달리 중앙 센터에서 관리하는 선두차량이 존재하지 않으며, 호송대를 형성하더라도 센터 등에 의한 통제를 받지 않는 분산제어 방식에 의해 주행한다.

Autonet 2030 프로젝트에서는 호송주행을 위한 차량의 대열을 <Fig. 2>와 같이 상대적 차량 위치에 따른 동적 그래프를 기반으로 형성하였다. 이에 본 연구에서도 호송주행의 대열은 Autonet 2030의 방식을 따르는 것으로 가정하고, 호송대 형성 조건 및 호송주행 전제 조건을 다음과 같이 설정하였다.

2. 호송주행 시나리오 설정

호송주행은 ①호송대 형성, ②호송대 내 적응주행, ③호송대 합류, ④호송대 내 차로변경, ⑤호송대 이탈 등의 Use-case로 이루어진다.

1) source: Arnaud de et al.(2014)



<Fig. 3> Convoy driving use-case

1) 호송대(Convoy) 생성, 합류, 이탈

본 연구에서는 호송주행 서비스를 개발하고 실도로 적용을 위해 다음과 같은 전제 조건을 설정하였다.

모든 차량은 자율협력주행 차량(CAV)으로 구성되어 있으며, V2X 통신을 통해 주변 차량의 경로 및 위치를 인식할 수 있고 인프라(RSU, 교통신호제어기(TSC))와 통신하여 신호정보 및 사각지대 관련 안전정보를 수신하고 차량제어에 활용하여 안전주행한다.

호송대는 동적협력주행 범위(Dynamic cooperative area) 내 2대 이상의 차량이 존재하고, 기 생성된 호송대가 존재하지 않을 경우 생성할 수 있다. 호송대 생성 조건이 충족되면 동적협력주행 범위 내 선행 차량이 후미 차량에 호송대 생성을 요청하고, 요청받은 후미 차량이 호송대 생성을 수락하는 절차를 거쳐 호송대 생성이 가능하다.

만약 Ego.V(Ego Vehicle)의 동적 협력주행 범위 내 기 생성된 호송대가 존재하는 경우 Ego.V는 별도의 호송대를 생성할 수 없으며, 기존 호송대에 합류하여야 한다. 수신된 메시지 내 호송대가 존재하는 경우 Ego.V는 호송대의 주행조건에 적합하도록 차량을 제어한 후 송신 메시지에 호송대 상대 정보를 추가하고 주변 차량에 송신함으로써 호송주행에 합류할 수 있다.

단, 위의 경우라도 Ego.V와 후방 차량의 heading 값이 30도 이상 차이 나는 경우와 Ego.V의 차량 결함 및 성능 미달 등에 의해 주변 차량과 전·후·좌·우 일정한 차간 간격을 유지할 수 없는 경우에는 호송대를 생성할 수 없다.

호송주행 하는 경우라도 Ego.V의 heading 값이 주변차량의 heading값과 30도 이상 차이 나는 경우 Ego.V는 경로가 다르다고 판단하여 호송대에서 자동 이탈된다.

또한 앞 차량과의 차간간격(headway)이 3초 이상(예: 교차로 통과 시 신호에 의해 대열이 단절되는 경우)이거나, 동적협력주행 범위를 벗어날 경우 후방 차량은 호송대에서 자동 이탈된다.

본 연구에서는 동적협력주행 범위를 Ego.V의 주행경로 기준 전·후방 50m(총 100m)로 설정하였다.

2) 호송주행(Convoy Driving) 조건

호송주행시 차량은 주변 차량과 최소한의 안전거리를 유지하여 적용주행 하여야 하며, 이때 호송대의 속도는 맨 앞 선두차량의 영향을 많이 받는다. 호송주행은 일반적인 군집주행과 달리 중앙에서 관리하는 선두 차량은 존재하지는 않으나, 주행 특성상 맨 앞에서 주행하는 선행 차량이 존재하며, 이러한 선행 차량은 언제 어디서나 변경될 수 있다.

선행 차량이 변경되는 경우는 인접 차로의 차량이 선행 차량보다 속도를 높여 주행함으로써 선두를 차지

하거나, 후방 차량이 선행 차량을 추월하는 경우 등 다양하게 존재한다. 그러나 호송주행이 주변 차량의 속도에 맞춰 적응 주행하는 서비스임을 감안하여 빈번한 추월 및 과속 등을 방지하기 위한 선두차량의 주행조건 설정이 필요하다

본 연구가 이상적인 도로환경 조건에서 이루어 짐을 감안하여 선두차량은 대상 도로구간 제한속도의 95% 속도로 주행하여야 하고, 호송대의 속도는 선두차량에 의해 결정되며, 후미 차량은 선두차량이 호송주행 속도 조건을 만족하지 못하여 호송대에서 이탈하지 않는 한 추월하지 않는 것으로 설정하였다.

선두차량이 호송주행 속도 조건을 만족하지 못하는 경우, 선두차량은 호송대에서 자동 이탈되며 해당 호송대는 차순위 차량이 선두차량 자격을 승계하고 선행 저속차량을 추월하여 주행한다.

단, 선두차량은 신호 준수를 위해 감속하는 경우, 전방 돌발상황 발생으로 감속(서행)하는 경우, 긴급차량 주행경로 확보를 위해 서행하는 경우, 기타 도로교통 상황에 의거 서행하는 경우 선두차량 주행 속도 조건을 충족하지 않을 수 있다.

3) 호송대 내 차로변경

호송대 내 차로를 변경하고자 하는 경우 Ego.V은 변경하고자 하는 차로의 후방 차량에 차로 변경 요청 메시지(차로변경 요청, 차로변경에 필요한 headway 등)를 송신한다. 요청받은 차량은 차로변경 요청에 대한 응답과 함께 요청받은 수락 간격(headway) 확보를 위해 전방 차량과의 차간거리를 조정한다. 수락 간격이 확보되면 차로변경 준비 완료 메시지를 생성하여 요청 차량에 송신하고 Ego.V은 차로를 변경하고, 차로 변경 완료 통지 정보를 송신함으로써 안전하게 차로를 변경할 수 있다.

3. 호송주행을 위한 메시지 구성

호송주행시 각각의 Use-case는 차량간 V2V 메시지를 통해 이루어지며, 호송주행 차량은 주기적으로 주변 차량에 <Table 1>과 같은 호송주행 메시지(Convoy message)를 전송하여야 한다.

<Table 1> Contents of convoy message

vehicle ID	Clock	Position	Speed
Heading	lane number	headway	vehicle state

차량 간 협력주행을 위한 V2V 메시지인 SAE J2735의 BSM 메시지 내에는 위에서 제시한 호송주행에 필요한 차량 상태 및 거동 관련 데이터가 포함되어 있는 반면, 호송대 형성 여부 등을 판별할 수 있는 데이터 항목은 부재하다.

이에 본 연구에서는 BSM 메시지를 확장하여 Regional Extension 영역에 호송 주행에 필요한 다음의 메시지를 추가하였다.

<Table 2> Data frame of convoy message (BSM Msg extension)

BSM_Data frame		Data element	Explanation	etc.		
Regional Extension	CFM	Convoystatus	Convoystatus	convoy status	0 : not Convoy [ITIS]9239:Convoys	
		TemporaryID	ConvoyID	Sending of ConvoyJoinRequest Vehicle temporary ID		
		ConvoyJoinRequest	convoyjoinrequest	convoy formation(joining) Request	0 : n/a 1:Convoy formation(joining) Request	
		ConvoyAcceptResponse	Response	response	response to convoy formation(joining) request	0 : n/a 1: accept convoy formation(joining)
			MsgCount	msgCnt	ConvoyJoinRequest Msg sequence number	
			Temporary ID	ConJoinReqVehicle ID	Sending of ConvoyJoinRequest Vehicle temporary ID	
		ConvoyleaveNotice	convoyleavenotice	convoy spilt notice	0 : n/a 1:Convoy spilt	
		ConvoyMergeNotice	convoymergenotice	convoy merging notice	0 : n/a 1:Convoymerging	
Regional Extension	CSM	Convoystatus	convoystatus	convoy status	0 : not Convoy [ITIS]9239:Convoys	
		TemporaryID	ConvoyID	ConvoyJoinRequest Vehicle temporary ID sending		
	CLCM	Convoystatus	Convoystatus	convoy status	0 : not Convoy [ITIS]9239:Convoys	
		LaneChangeRequest	lanechangerequest	Lane change request	0 : n/a 1: Lane change request	
		PresentLane	presentlane	present lane		
		ChangingLane	changinglane	changing lane		
		Headway	headway	headway value for lane change		
		LaneChange Response	Response	response	response for for lane change request	0 : n/a 1:lane change accep
			MsgCount	msgCnt	ConvoyJoinRequest Msg. sequence number	
			TemporaryID	TemporaryID	ConvoyJoinRequest Vehicle temporary ID sending	
		LaneChange Ready	ReadyNotice	readynotice	Lane change ready notice	0 : n/a 1:lane change ready
			MsgCount	msgCnt	LaneChangeRequest Msg. sequence number	
			lanechangereq vehicleID	TemporaryID	LaneChangeRequest Vehicle temporary ID sending	
		LaneChangeNotice	lanechangenotice	Lane change notice	0 : n/a 1:changing lane 2: lane change notice	

IV. 효과분석

1. 시뮬레이션 수행을 위한 자료수집

호송주행 효과분석을 위한 공간적 범위는 경기도 화성시 새솔동 수노을 중앙로 약 (2.0km)로 설정하고 시

물레이션 환경 구축을 위한 현황자료를 수집하였다.

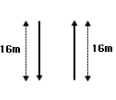
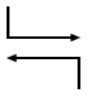
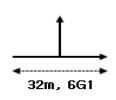
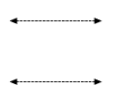

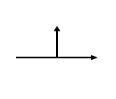
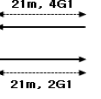
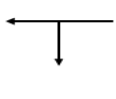
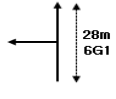
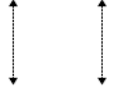
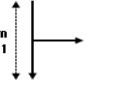
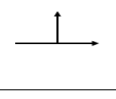

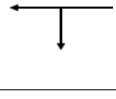
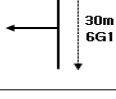
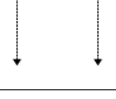
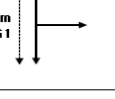
대상구간 내에는 교차로 3개소와 보행자 횡단보도 1개소, 버스정류장 6개소 등이 포함되어 있다. 2020.02.20.~ 02.24 오전 11시부터 오후 4시까지의 3개 교차로 (Intersection 1.금강펜테리움 센트럴파크 아파트 앞, Intersection 2.대방노블랜드 1차 아파트 앞, Intersection 3. 대방노블랜드 6차 아파트 앞)교통량을 조사하고 각 시간대별 평균 교통량을 활용하였으며, 조사된 교통량 현황은 <Table 3>과 같다.

<Table 3> Traffic volume status

Intersection	Time	Total	Traffic volume (veh/h)					
			Passenger vehicle	Van	Taxi	Bus	Cargo vehicle	Two-wheeled vehicle
Intersection 1	11:00~11:30	135	94	15	4	3	17	2
	13:00~13:30	120	93	12	3	-	10	2
	14:00~14:30	127	91	21	2	-	10	3
	15:00~15:30	145	104	23	2	1	11	
Intersection 2	11:00~11:30	126	99	12	1	1	13	-
	13:00~13:30	95	78	10	-	-	5	2
	14:00~14:30	116	87	15	2	-	12	-
	15:00~15:30	126	94	16	3	-	13	-
Intersection 3	11:00~11:30	117	86	8	1	-	21	1
	13:00~13:30	149	120	14	2	2	10	1
	14:00~14:30	152	114	16	4	1	16	1
	15:00~15:30	156	112	17	3	1	20	3

교통 신호현시는 <Table 4>와 같고 황색신호는 4초로 적용하였다.

<Table 4> Traffic signal status

Contents	PHASE1	PHASE2	PHASE3	PHASE4	PHASE5	PHASE6
Intersection 1						
	71(4)	21(4)	22(4)	10(4)	26(4)	
Intersection 2						
	26(4)	34(4)	16(4)	31(4)	1(4)	38(4)
Intersection 3						
	31(4)	54(4)	11(4)	16(4)	14(4)	20(4)

2. 시뮬레이션 구축

1) 네트워크 환경 구축

효과분석을 위해 PTV VISSIM 소프트웨어를 활용하여 대상구간 교통네트워크를 구축하였다. 대상구간의 교차로 1과 2의 이격거리는 약 500m, 교차로 2와 3은 약 400m이며 대상지 도로구간의 차로는 왕복 6~8차로이다. 위성사진을 이용하여 실제 도로와 유사하게 VISSIM 내에 도로를 구현하였고, 직접 조사한 교통량을 입력해 현실과 최대한 유사한 시뮬레이션 환경을 구축하였다.

2) 일반차량 주행행태 모델링

일반차량의 주행행태 모델은 주로 도시부 도로 주행모델로 사용되는 Wiedemann 74 모델을 사용하였으며, 주행행태 모델의 파라미터로는 Average standstill distance, Additive part of safety distance, Multiplicative part of safety distance를 사용하였다.

<Table 5> Driving behavior parameters for normal vehicle

Parameter		Value for Normal vehicle
Wiedemann74	Average standstill distance	2.0m
	Additive part of safety distance	2.0m
	Multiplicative part of safety distance	3.0m

3) 자율주행자동차 행태 모델링

본 연구에서는 자율주행차량의 종방향 제어 로직으로 IDM(Intelligent Driver Model)을 활용하였으며 IDM은 숙련된 운전자의 행동을 근사화하고 반응을 통합한 추종 모델로서, 안정적인 가감속 행태 기반 안전거리 유지 기능 구현이 가능하다. 또한, VISSIM 소프트웨어 내에서 제공하는 횡방향 제어 파라미터를 이용하여 자율주행 자동차의 횡방향 제어를 반영하였다. 자율주행 자동차의 종방향, 횡방향 파라미터는 IDM을 이용하여 자율주행차 시장점유율 변화를 연구한 논문 Ko et al.(2021)을 참고하여 작성하였다. IDM에서 가속도의 계산식은 Treiber and Kesting(2013)를 참고하여 사용하였으며 계산식은 다음 식(1)과 같다.

$$\frac{dv}{dt} = a \left[1 - \left(\frac{v}{v_0} \right)^\delta - \left(\frac{s^*(v, \Delta v)}{s} \right)^2 \right], \quad s^*(v, \Delta v) = s_0 + \max \left[0, vT + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}} \right] \dots\dots\dots \text{식(1)}$$

- 여기서, v: 실제 속도
- a: 최대 가속도
- v₀: 설계 속도
- δ: 가속도지수 (설계속도에 근접 시 값이 클수록 늦게 감속)
- s*: 설계 동적(dynamical) 거리
- Δv: 전방차량과의 상대속도
- s₀: 최소 차간거리
- T: 설계 차두시간
- b: 최대 감속도

<Table 6> Self-driving car parameters

	Parameter	Value for autonomous vehicle
Longitudinal control (IDM)	Maximum acceleration a	$1.4m/s^2$
	Maximum deceleration b	$2.0m/s^2$
	Desired speed v_0	50kph
	Acceleration exponent δ	4
	Minimum gap s_0	2m
	Desired time headway T	0.6s
Lateral control	Waiting time before diffusion	30s
	Min. headway	0.3m
	Safety distance reduction factor	0.6
	Maximum deceleration for cooperative braking	$-3m/s^2$

4) 호송주행 행태 모델링

다차로 호송주행 행태의 묘사를 위해 C# 기반의 VISSIM COM Interface를 통한 개별차량들의 행태모델을 새롭게 적용하였다. 먼저 VISSIM COM Interface 기반 차량 제어를 위해 차량의 속도, 가속도, 차선(Lane), 차량위치, 목표 속도 정보를 실시간으로 수집하고 차량의 ID 정보와 각 ID의 현재 차량위치 정보를 기준으로 호송대를 형성토록 구현하였다.

호송대가 형성되면 호송대 내 차량들은 선두차량의 속도에 맞게 목표속도를 변경하여 다차로 군집주행을 구현하였다. 또한, 호송대 내 선두차량의 차선변경 요청상황 구현을 위해 VISSIM 내 Changing Vehicles 파라미터 내 변수 값을 조정하고 호송주행 그룹 내 차량들의 차선변경 속성을 일괄적으로 변경하여 호송대 내 차선변경 행태를 구현하였다. 다만 호송주행을 위한 호송대의 사이즈는 최대 6대 이내로만 수행되도록 제한 조건(constraint)을 설정해 시뮬레이션을 구현하였다.

3. 시뮬레이션 분석 시나리오 설정

호송주행 효과분석을 위해 총 3가지 시나리오를 설정하였다. Scenario 1은 자율주행 자동차가 존재하지 않는 네트워크 상태이고, Scenario 2는 자율주행 자동차의 점유율이 100%이나 독립 자율주행 상태이며, Scenario 3은 자율주행 자동차의 점유율이 100%이고 호송 주행이 가능한 상태이다.

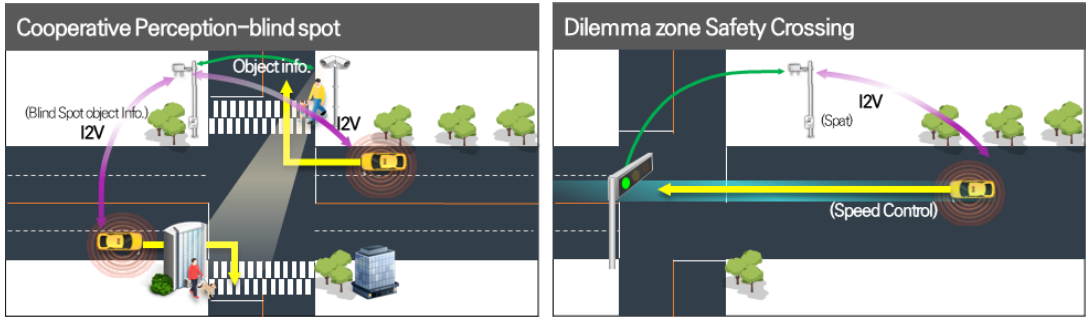
시나리오별 시뮬레이션 평가는 빈 네트워크 내에 차량을 채우는 데까지 걸리는 초기 대기시간(warm-up time) 900초와 평가 수행시간 1800초로 구성하여 총 2700초(총 45분) 동안 수행되었다.

각 시나리오별 결과값은 Com interface를 통해 5회 수행한 결과를 평균하여 추출하였다.

도시부 도로 내에서의 호송주행 효과 검증을 위해 앞서 설명한 기본적인 호송주행 시나리오 외에도 도시부 도로에서의 일반적인 자율협력주행 상황과 호송주행 상황의 비교검증을 위해 도시부 도로내 안전성 및 효율성을 향상할 수 있는 V2I 협력주행 서비스를 추가하였다.

첫 번째 서비스는 “사각지대 운행지원”이며, 사각지대의 위험상황(무단횡단 보행자 등)을 인프라가 인지하여 I2V통신을 통해 차량에 제공함으로써 사고를 미연에 방지하는 서비스이다.

두 번째 서비스는 “딜레마존 안전주행”이며, 차량에 전방의 신호현시 정보를 제공하여 신호 교차로 부근의 딜레마존에서의 과속 및 급정거를 예방하는 서비스이다.



<Fig. 4> Concept of urban road cooperative driving service

4. 평가지표 선정

호송 주행은 개별주행 단점인 불필요한 가감속을 최소화하여 안전성 및 주행쾌적성, 도로 가용성을 극대화하는 효과가 있을 것으로 추측되는바, 효과검증을 위한 평가지표는 <Table 7>과 같이 설정하였다.

교통 안전성 평가지표는 상충횟수로 선정하였고, 교통효율성 평가지표는 평균지체, 평균 정지수로 선정하였다.

<Table 7> Selection of measure of effectiveness

Type	Effectiveness assessment index	Note
Traffic safety	Conflicts	VISSIM COM Interface
Traffic operation efficiency	Average delay	Vissim's own output value
	Stops	

V. 연구 결과 분석

차량의 주행상태(S1. 일반차량 100%, S2. 자율주행차량 100%, S3. 자율주행차량100%+호송주행)별 도시부 도로 협력주행 시나리오별 효과분석을 실시하였다.

사각지대 안전지원 서비스에 대한 분석결과 S1에 비해 S2, S3 모두 안전성이 향상된 것을 확인할 수 있었다. 동일한 자율협력주행 차량이라도 개별 주행시와 호송주행 시를 비교한 결과 S2의 차량간 상충횟수는 84 회인데 반해 S3의 차량간 상충횟수는 62.7회로써, S3이 S2에 비해 안전성이 25%이상 개선되는 것을 알 수 있었다.

사각지대 안전지원 서비스에 대한 이동효율성 측면의 효과분석 결과 차량지체의 경우 S1은 56.6초, S2는 24.7초, S3는 14.53초로 나타났으며, 정지수의 경우도 S1은 6.0회, S2는 1.5회, S3는 0.82회로 나타났다. 이는 일반차량 주행시보다 자율협력 주행시 현저하게 지체가 감소되는 것을 시사하고 있으며 개별 차량 자율협력 주행시보다 호송주행시 전체적인 효율성이 무려 40%이상 개선되는 것으로 분석되었다.

딜레마존 안전 주행 서비스의 경우에도 상충횟수는 S1이 3396회, S2는 2894회, S3는 2417회로 나타나 호송주행시(S3) 개별차량 자율협력 주행시보다(S2) 안전성이 16.5% 개선되는 것으로 나타났으며, 교통 효율성 측면에서도 S2가 S3에 비해 지체시간은 4.8%, 정지수는 10% 개선되는 것으로 나타났다.

<Table 8> Results of Cooperative Perception-blind spot

Measure		Cooperative Perception-blind spot service			Dilemma zone Safety Crossing service		
		S1 (MPR 0%)	S2 (MPR 100%)	S3 (Convoy)	S1 (MPR 0%)	S2 (MPR 100%)	S3 (Convoy)
Traffic safety	Conflicts between vehicles and pedestrians (rate of change)*	52.0	0.0 (-100.0)	0 (-100.0)	-	-	-
	Conflicts between vehicles (rate of change)	109.0	84.0 (-22.9)	62.7 (-42.5)	3396.0	2894.0 (-14.8)	2417 (-28.8)
Traffic operation efficiency	Delay (rate of change)	56.6	24.7 (-56.4)	14.53 (-86.7)	127.6	61.6 (-51.7)	58.66 (-54.1)
	Stops (rate of change)	6.0	1.5 (-74.3)	0.82 (-86.3)	4.4	1.9 (-55.7)	1.71 (-61.1)

*S2 rate of change: [(S2 - S1) / abs(S1)]×100, S3 rate of change: [(S3 - S1) / abs(S1)]×100

VI. 결 론

본 연구에서는 해외에서는 활발히 연구되고 있으나 국내에서는 관련 연구가 미흡한 다중차량 협력주행 기술 중 하나인 호송 주행의 서비스 개념을 정립하고 도시부 도로에서의 서비스 적용을 위한 시나리오 및 통신 메시지 등을 개발하고 시뮬레이션 분석을 통해 그 실효성을 검증하고자 하였다.

이에 도시부 도로의 대표적인 V2I 협력주행 서비스인 사각지대 운행지원 서비스 및 딜레마존 안전주행 서비스를 대상으로 개별차량 협력주행 시와 다중차량 협력주행을 적용한 호송주행 시를 비교 분석하였다.

그 결과 교통안전성 지표인 상충횟수와 교통효율성 지표인 지체시간 및 정지수가 개별차량 협력주행 시보다 호송주행 시 크게 개선되는 것을 알 수 있었다.

사각지대 운행지원 서비스는 돌발상황을 보다 유연하게 대처하기 위한 V2I 협력주행 서비스이나, 호송주행 상태에서는 돌발상황에 직접적인 영향을 받는 차량과 인접차량이 유기적으로 연계되어 속도를 제어함으로써 불필요한 가감속을 최소화하고 상충을 줄여줌으로써 안전성과 효율성 모두 크게 향상시키는 것으로 분석되었다.

딜레마존 안전주행 서비스의 경우는 주행하는 모든 차량에 신호정보를 제공하여 안전속도로 제어하는 서비스로써 신호 정보는 모든 차량에 영향을 미치는바 사각지대 운행지원 서비스와는 그 결이 다르다. 이 경우에도 호송주행 시가 개별차량 협력주행 시보다 교통안전성 및 효율성이 향상되는 것으로 나타났으나, 사각지대 운행지원 서비스처럼 특정 차량에 영향을 미치는 서비스의 경우보다 그 효과가 미미한 것으로 나타났다.

이러한 결과를 통해 호송주행 서비스는 특정 차량의 영향이 주변 차량에까지 영향을 미치는 이벤트 발생 시 충격과를 최소화함으로써 교통류의 상태를 안정적으로 유지할 수 있도록 해준다는 것을 유추할 수 있으며, 이를 통해 호송대의 생성, 합류, 이탈이 빈번한 도시부 도로 적용 시에도 그 실효성이 높을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 효과 검증을 위해 교통류 분석 모델인 VISSM을 적용하고, 실도로에서의 주행 환경 모사를 위해 화성시 새솔동의 3연속 교차로를 대상으로 환경을 구축하였다. 그러나 자율주행 차량의 주행 모델은

선행 연구 등에서 제시한 차량주행 모델을 반영함으로써 실제 개발된 차량제어 알고리즘을 반영하지 못한 한계점을 지닌다. 이에 향후에는 호송주행 차량제어 알고리즘에 기반한 차량주행 모델 반영을 통해 보다 명확한 효과 검증 연구가 필요할 것으로 사료된다.

본 연구는 도시부 도로에서의 대표적인 협력주행 서비스인 사각지대 안전지원 서비스와 텔레마존 안전주행 서비스를 대상으로 호송주행시와 일반적인 개별차량 자율협력 주행시에 대한 효과 비교만을 수행하였다. 향후 다양한 자율협력 주행 서비스의 Use-case를 바탕으로 호송주행 효과분석을 수행함으로써 보다 효과성 높은 협력주행 Use-case 개발이 필요할 것으로 여겨진다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 국토교통부 도심도로 자율협력주행 안전·인프라 연구개발사업(과제번호 : 21PQOW-B152473-03)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- De La Fortelle, A., Qian, X., Diemer, S., Grégoire, J., Moutarde, F., Bonnabel, S., Marjovi, A., Martinoli, A., Llatser, I., Festag, A. and Katrin, S.(2014), *Network of automated vehicles: The AutoNet 2030 vision*, HAL Open Science.
- Falconi, R., Goyal, S. and Martinoli, A.(2010), “Graph based distributed control of non-holonomic vehicles endowed with local positioning information engaged in escorting missions”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, AL, USA, pp.3207-3214.
- Goyal, S., Falconi, R. and Martinoli, A.(2010), “Local graph-based distributed control for safe highway platooning”, *In IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems*, pp.6070-6076.
- Hang, L., Haojun, Y., Kan, Z. and Lei, L.(2017), “Resource allocation schemes in multi-vehicle cooperation systems”, *Journal of Communications and Information Networks*, vol. 2, no. 2, pp.113-125.
- Kato, S., Tsugawa, S., Tokuda, K., Matsui, T. and Fujii, H.(2002), “Vehicle control algorithms for cooperative driving with automated vehicles and intervehicle communications”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 3, no. 3, pp.155-161.
- Ko, W., Park, S., So, J. and Yun, I.(2021), “Analysis of Effects of Autonomous Vehicle Market Share Changes on Expressway Traffic Flow Using IDM”, *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 20, no. 4, pp.13-27.
- Llatser, I., Festag, A. and Fettweis, G.(2016), “Vehicular communication performance in convoys of automated vehicles”, *2016 IEEE International Conference on Communications*, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Marjovi, A., Vasic, M., Lemaitre, J. and Martinoli, A.(2015), “Distributed graph-based convoy control for networked intelligent vehicles”, *2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Seoul, Korea.
- Treiber, M. and Kesting, A.(2013), *Traffic Flow Dynamics*, Springer.