KIPS Trans. Softw. and Data Eng.
Vol.10, No.2 pp.45~56
ISSN: 2287-5905 (Print), ISSN: 2734-0503 (Online)

https://doi.org/10.3745/KTSDE.2021.10.2.45

VENTOS-Based Platoon Driving Simulations Considering Variability

Youngjae Kim† · Jang-Eui Hong††

ABSTRACT

In platoon driving, several autonomous vehicles communicate to exchange information with each other and drive in a single cluster. The platooning technology has various advantages such as increasing road traffic, reducing energy consumption and pollutant emission by driving in short distance between vehicles. However, the short distance makes it more difficult to cope with an emergency accident, and accordingly, it is difficult to ensure the safety of platoon driving, which must be secured. In particular, the unexpected situation, i.e., variability that may appear during driving can adversely affect the safety of platoon driving. Because such variability is difficult to predict and reproduce, preparing safety guards to prevent risks arising from variability is a challenging work. In this paper, we studied a simulation method to avoid the risk due to the variability that may occur while platoon driving. In order to simulate safe platoon driving, we develop diverse scenarios considering the variability, design and apply safety guards to handle the variability, and extends the detail functions of VENTOS, an open source platooning simulator. Based on the simulation results, we have confirmed that the risks caused form the variability can be removed, and safe platoon driving is possible. We believe that our simulation approach will contribute to research and development to ensure safety in platoon driving.

Keywords : Platoon Driving, Autonomous Driving, Variability, Simulation, VENTOS

가변성을 고려하는 VENTOS 기반 군집 자율주행 시뮬레이션

김 영 재† · 홍 장 의††

요 약

군집주행은 여러 대의 자율 주행 차량이 통신을 사용하여 서로 정보를 교환하며 하나의 군집을 이루어 주행하는 것이다. 이러한 군집주행 기술은 더 좁은 차량 간 간격을 유지하며 주행함으로써 도로의 통행량 증대, 에너지 소비 및 오염물질 배출 감소 등의 다양한 장점을 가진다. 그러나 군집주행의 좁은 차량 간 간격은 긴급한 사고 발생 시 대처를 더 어렵게 만들며, 이에 따라 필수적으로 확보되어야 할 군집주행의 안전성을 보장하는데 어려움을 주고 있다. 특히 주행 중 나타날 수 있는 가변성은 군집주행의 안전에 악영향을 미칠 수 있다. 이러한 가변성은 발생 예측이 어렵고, 재현이 어려운 특성으로 인해 가변성으로부터 발생하는 위험 요소를 방지하는 안전대책 마련에 어려움이 있다. 본 논문에서는 군집주행 중에 생겨날 수 있는 가변성에 따른 위험을 회피하기 위한 시뮬레이션 방법을 연구하였다. 이를 위해 가변성을 고려하는 다양한 시나리오를 개발하고, 가변성을 핸들링할 수 있는 안전 대책을 고안, 적용하였으며, 또한 오픈소스 군집주행 시뮬레이터인 VENTOS를 확장하여 시나리오 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 가변성으로 인한 군집주행의 위험성을 제거하여 안전한 군집주행이 가능함을 확인하였다. 제시하는 가변성 대응 시나리오 시뮬레이션은 군집주행에서의 안전성을 확보하기 위한 연구 개발에 기여할 것으로 판단한다.

키워드 : 군집주행, 자율주행, 가변성, 시뮬레이션, VENTOS

1. 서 론

자율주행 차량은 운전자의 조작 없이 복수의 카메라, 라이다(Lidar), 레이더(Radar) 등의 여러 가지 센서를 사용하여 주변의 상황을 인지하여 주행하는 차량을 의미한다. 탑승자는 운전으로 인한 피로나 졸음운전과 같은 위험의 걱정 없이 더 편안하고 안전하게 목적지까지 이동할 수 있다. 이 분야를 선도하고 있는 테슬라(Tesla) 자동차를 비롯해 여러 국가에서는 자율주행 차량의 개발을 위해 많은 연구와 기술 개발을 수행하고 있다.

이러한 새로운 도로 교통의 패러다임은 군집주행(Platoon driving)으로 발전하고 있다. 군집 주행은 여러 대의 자율주행 차량이 하나의 군집을 형성하여 주행하는 기술이다[1,2,3]. 군집주행은 V2V (Vehicle to Vehicle) 통신을 통해 주행 정보를 교환함으로써 더 좁은 차량 간 간격을 형성하여 주행하는

※ 이 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 연구재단 기술개발사업의 지원 (2017M3C4A7066479, 2020R1A2C1007571)을 받아 연구되었음.
† 준 회 원 : 충북대학교 컴퓨터과학과 석사과정
†† 종신회원 : 충북대학교 소프트웨어학과 교수
Manuscript Received : October 14, 2020
Accepted : October 22, 2020
* Corresponding Author : Jang-Eui Hong(jehong@chungbuk.ac.kr)

※ 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.

것을 가능하게 한다. 이러한 군집주행은 도로의 통행 처리량 증대, 에너지 소비 및 오염물질 배출 감소 등 다양한 장점을 갖는다.

군집주행 기술은 안전 필수(Safety-critical) 시스템의 대표적인 적용 사례로서, 안전성을 확보하기 위하여 도로 주행 상황 중 생겨날 수 있는 여러 돌발 상황에 대한 많은 고려와 대비가 필요하다. 특히 다양한 상황에서 차량의 인지와 행동에 적용되어야하는 가변성(Variability)은 안전한 군집주행을 위하여 반드시 고려되어야 할 요소이다[4]. 이러한 안전 필수 시스템을 개발하는데 있어서 시뮬레이션 또한 필수 불가결한 기술이다. 시뮬레이션은 적은 비용으로도 모델의 실효성을 검증하고 미처 예상하지 못했던 결함을 발견할 수 있게 해준다[5]. 시뮬레이션은 특히 군집주행과 같이 실 테스트에 많은 시간과 비용이 필요한 경우에 더욱 효과를 발휘할 수 있다. 또한 가변성은 재현이 어렵고, 위험을 일으킬 수 있는 상황까지 도달할 가능성이 높아 실제로 개발된 시스템을 통해 테스트하기가 어렵다.

본 논문에서는 이러한 군집주행 상황에서 고려되어야 할 가변성이 적용된 시뮬레이션을 수행하는 방법에 대하여 연구하였다. 군집주행과 관련된 기술을 분석하고, 다양한 가변성으로부터 발생할 수 있는 위험들을 충분히 허용 가능한 수준으로 축소시킬 수 있는 방안을 제시하였다. 이로부터 군집주행의 안전성을 확보할 수 있음을 시나리오를 통해 시뮬레이션 하였다.

본 연구의 목적을 위하여 오픈소스 군집주행 시뮬레이터인 VENTOS (VEhicular NeTwork Open Simulator)[6]를 사용하였다. VENTOS에 가변성으로부터 발생하는 위험 시나리오를 시뮬레이션 하였고, 이러한 위험으로부터 안전한 주행을 달성하기 위해 요구되는 안전대책을 고안하였다. 고안된 안전대책을 VENTOS에 구현하여 시뮬레이션 함으로써 적용된 안전대책의 유용성을 검증하는 연구를 수행하였다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 관련 연구들을 살펴보고, 3장에서는 군집 자율주행 기술에 대하여, 4장에서는 시뮬레이션을 위한 VENTOS 기능과 이의 확장방법을 설명하고, 5장에서는 가변성을 포함하는 군집주행 시나리오를, 6장에서는 시뮬레이션 결과를 제시하였다. 결론과 향후 연구 방향을 7장에 제시하였다.

2. 관련 연구

2.1 문헌 연구

군집 주행의 연구가 본격화되면서 군집주행을 구성하는 차량들의 움직임, 효율성, 통신 성능, 상호작용, 도로 교통 상황에 미치는 영향 등을 분석하기 위한 노력이 뒤따르고 있다.

이를 위해 M. Amoozadeh는 군집주행에 필요한 합류, 분리, 이탈 등의 전략을 수행할 수 있는 프로토콜[7]과 차량간 통신을 위한 V2X 통신 안전성에 대한 연구[8]도 수행하였다. 이러한 프로토콜을 구현한 시뮬레이터인 VENTOS를 개발하였으며, 이를 이용하여 시뮬레이션 시나리오를 분석함으로써 적절한 군집 주행의 상황을 연구하였다. 그러나 주행 중 발생할 수 있는 위험 상황은 고려되지 않았다.

J. Erdmann은 자율주행차량의 차선 변경 모델링[9]을 연구하였다. 이 연구는 기존의 차선 변경 모델의 문제점을 새로운 디자인을 통하여 해결하고자 하였다. 연구된 모델은 VENTOS 시뮬레이터의 확장에 적용되었다. Y. Jo 등은 화물차량들의 군집 주행에서 최적 군집 사이즈에 대한 분석[10]을 하였으며, Levente Alekszejenko 등은 시내 교통 환경에서의 군집 주행 시뮬레이션[11]을 연구하였다.

자율주행 차량과 수동운전 차량이 공존하는 기간 동안의 도로 교통에 대한 연구도 활발하게 진행되고 있다. J. Mena-Oreja 등은 자율주행 차량과 수동운전 차량이 상호간에 미치는 영향[12]을 연구하였다. Z. Yang 등은 이러한 두 이기종 운행 형태간의 충돌방지 알고리즘[13]에 대하여 연구하였다.

또한, 사이버 물리 시스템(Cyber-Physical Systems)의 대표적인 사례로 군집주행을 연구를 수행한 N. Ali 등은 다수의 사이버 물리 시스템의 동작에서 가변성이 어떠한 영향을 미치는 지에 대한 연구[14]를 수행하였다. 군집주행에서 안전과 관련된 연구도 수행되고 있다. M. Aki 등은 군집 주행 중인 차량에 적용될 수 있는 향상된 제동 시스템[15]을 연구하였다.

이러한 연구이외에도 군집주행과 관련된 차선변경에 대한 연구[16], TTA (Telecommunications Technology Association) 표준 기반 통신 시스템 성능에 대한 연구[17] 등이 있다.

2.2 군집 주행 프로젝트

군집주행 분야는 자율 주행차의 기술을 한 단계 발전시키는 영역으로써, 다양한 프로젝트를 유럽과 미국 등을 중심으로 수행되고 있다.

군집 주행에 대한 최초의 실용적인 연구 프로젝트는 2009년 유럽에서 시작되었다. SARTRE (SAfe Road Trains for the Environment) 프로젝트[18]는 영국의 Ricarido UK 유한 회사를 중심으로 Volvo 자동차그룹 등 4개국 7개 업체가 협력하여 3년간 진행된 군집 주행 연구 프로젝트이다. 2011년 1월, 트럭과 승용차의 첫 군집주행을 성공하였으며, 2012년 1월에는 트럭 세 대의 완전한 자율 군집 주행을 고속도로에서 수행하였다. 이후 군집 주행 기술은 주로 고속도로에서의 장거리 주행이 많은 트럭을 중심으로 연구[19]되어졌으며, 2016년에는 DAF, Daimler, Iveco, MAN, Scania, Volvo 등 유명 상용차 제조사들이 각각 자사의 트럭들로 군집을 구성해 네덜란드의 로테르담까지 향하는 European Truck Platooning Challenge [20]를 성공리에 마쳤다.

일본에서도 소프트웨어 업체와 상용차 업체가 협력하여 군집 주행에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 2018년에 일본에서는 CACC(Cooperative Adaptive Cruise Control)를 탑재한 각기 다른 모델의 트럭들이 고속도로에서의 군집 주

행을 성공적으로 수행[21]하였으며, 2019년에는 IT 기업인 소프트뱅크가 5G 통신망을 사용한 트럭의 군집 주행에 성공[22]하였다.

국내의 경우, 현대자동차가 트럭의 군집 주행에 대한 연구를 수행하고 있다. 정부에서도 2007년 스마트 하이웨이 사업을 통해 교통 정보 제공 시스템[23]을 구축하여 군집 주행의 토대를 준비하였고, 2020년 6월, 자율 주행 및 군집 주행의 테스트 베드 구축 사업 추진과 2022년까지 전국의 모든 고속도로에 자율 및 군집주행을 위한 RSU (Road Side Unit)를 설치하는 계획을 추진하고 있다.

3. 군집 자율 주행

3.1 군집 주행 제어 기술

군집 주행 기술은 자율 주행 차량보다 더 진일보한 기술로서, 군집의 각 차량들은 VANET (Vehicle Ad Hoc Network) 기반의 통신 기술[24]을 사용하여 서로 간의 정보를 교환한다. 이는 주행 환경에 대하여 신속하게 인식과 대응을 가능하게 한다. 또한 도로 곳곳에 설치되어 교통 상황 정보를 제공해주는 RSU의 도움을 받아 합리적이고 효율적인 의사결정이 가능하다.

군집 주행을 위하여 CACC는 필수적으로 요구되는 기능[25,26]이다. 기존 차량 간 거리를 유지하는 기술인 ACC (Adaptive Cruise Control)[26]은 다른 차량의 정보를 센서를 통해 제한적으로 획득하기 때문에 행동 예측이 어렵다. 그러나 CACC 기술은 센서가 아닌 통신 기술을 이용함으로써, 다른 차량의 정보를 즉시 전달받고, 거리의 제한성도 제거되었다.

그러나 현재까지의 연구는 자율 주행 기술이 아직 완벽하지 않은 관계로 선두 차량은 사람이 운전을 하고, 후속 차량들이 선두 차량을 자동적으로 쫓아 주행하는 수준에 머무르고 있다. 또한 이러한 군집 주행 기술은 아직 주행 중에 일어날 수 있는 다양한 변수를 고려하지 못하며, 실제 상황이 아닌 통제된 도로 상황에서만 테스트되고 있다.

3.2 군집 주행 전략

미국에서 제시된 AHS (Automated Highway System)은 미래 고속도로 체계[27]에 대한 연구 결과로써, 자율주행 차량과 수동운전 차량이 혼재되는 시기 동안 고속도로에 자율주행 및 군집주행 차량 전용 차선을 설정할 것을 제시하였다. 이러한 차선은 수동운전 차량의 간섭을 제한할 수 있다.

VENTOS의 군집 전략 프로토콜[7]은 이러한 AHS의 자율주행 및 군집주행 전용 차선에서의 주행을 전제로 설계되었다. 군집 주행을 위해서는 주행 중인 두 군집의 합류, 두 군집으로의 분리, 군집 구성 차량의 군집 이탈과 같은 다양한 군집 전략을 필요로 한다. 군집을 구성하는 차량의 수가 너무 적을 때에는 군집 주행의 장점이 퇴색되고, 차량의 수가 너무 많을 때에는 군집의 길이가 길어짐에 따라 주행 안정성이 떨어진다. 이러한 점들을 고려한 각 군집 전략에 대한 설명은 다음과 같다.

1) 군집 합류 전략

자율주행 및 군집주행 전용 차선에서 주행 중인 군집의 리더 차량은 자신의 전방으로부터 다른 군집의 통신 신호를 수신할 수 있다. 다른 군집의 통신 신호를 수신할 경우, 자신의 전방 통신 도달 거리 내에 다른 군집이 있음을 알게 된다. 이때 자신의 군집 구성 차량의 수가 적정 군집 차량의 수보다 작다면 전방 군집에 합류를 시도하고, 자신의 군집 구성 차량의 수를 담고 있는 합류 요청 메시지를 발송한다. 합류 요청을 받은 전방 군집의 리더 차량은 군집 합류로 인한 적정 군집 차량 수를 확인하고, 합류 요청에 대응한다. 합류 요청이 수락된 경우, 후방의 군집은 속력을 증가시켜 전방 군집과 합류한 후, 제어 권한을 전방 군집의 리더 차량에게 이양한다.

2) 군집 분리 전략

적정한 군집 구성 차량의 수는 주행 상황에 따라 달라질 수 있다. 주행 중, 자신의 군집 구성 차량의 수가 적정 군집 구성 차량의 수보다 더 클 경우, 리더 차량은 군집을 분리하기 위한 전략을 시작한다. 군집의 리더 차량은 분리될 군집의 리더가 될 차량에게 분리 요청 메시지를 보낸다. 새롭게 리더가 될 군집 구성 차량은 분리 요청을 수락하고 자신에게 할당된 차량들로 새로운 군집을 구성하여 군집을 분리한 뒤, 기존 군집과의 안전거리를 확보하기 위하여 감속한다.

3) 군집 이탈 전략

군집의 주행 경로와 군집 소속 차량의 경로가 서로 달라지는 시점이 되며, 차량은 군집을 이탈해야 한다. 보통 목적지에 가까워진 경우, 서로 경로가 달라지는 경우가 많아진다. 이탈 전략은 이탈하고자 하는 차량이 군집의 리더 차량인 경우, 군집의 중간 차량인 경우, 군집의 가장 뒤쪽 차량인 경우로 나누어 다른 방식으로 수행된다.

- 리더 차량이 이탈하는 경우 : 자신의 군집 구성 차량들에게 이를 알리고 군집 구성 차량들 중에서 새 리더를 선정한다. 이어서 군집의 제어 권한을 새 리더에게 이양한 후, 이탈 차량은 전용 차선을 바꿔 자율 주행한다.
- 중간 차량이 이탈하는 경우 : 자신이 속한 군집의 리더 차량에게 이탈을 요청 한다. 이탈 요청이 수락되면 군집은 이탈 요청을 한 차량의 바로 뒷 차량을 리더로 하는 새 군집을 임시로 만들어 분리 전략을 수행한다. 두 군집 사이에 안전거리가 확보되면 이탈 요청을 한 차량을 군집으로부터 해제한다. 이탈 요청 차량이 전용 차선을 벗어나면 분리되었던 두 군집은 다시 합류한다.
- 가장 뒤쪽 차량이 이탈하는 경우 : 자신이 속한 군집의 리더 차량에게 이탈 요청을 한다. 이탈 요청이 수락되면 군집의 리더 차량은 이탈 요청을 한 차량을 군집으로부터 해제한다.

4) 차선 변경 전략

군집주행에서의 차선 변경은 차량의 제어 권한을 넘겨받은 운전자가 수동운전을 통해 직접 수행하는 것으로 간주된다. AHS에서는 자율주행 차량이 전용 차선만을 주행하므로 차선의 변경은 고려되지 않았다.

4. VENTOS 시뮬레이터

4.1 VENTOS 아키텍처

VENTOS는 UC Davis 대학의 Rubinet 연구소에서 개발된 군집주행을 지원하기 위한 오픈소스 시뮬레이터[8]이다. VENTOS는 다양한 군집주행 전략을 도로 교통 시뮬레이터인 SUMO (Simulation of Urban Mobility)[28]와 네트워크 시뮬레이터인 OMNET++(Objective Modular Network Testbed in C++)[29]를 결합하여 구현하였다. 이를 통하여 차량, 자전거, 보행자, RSU 등의 여러 상호작용을 V2X 통신 환경 속에서 시뮬레이션 한다. Fig. 1은 VENTOS 시뮬레이션의 실행 장면에 대한 예시이다.

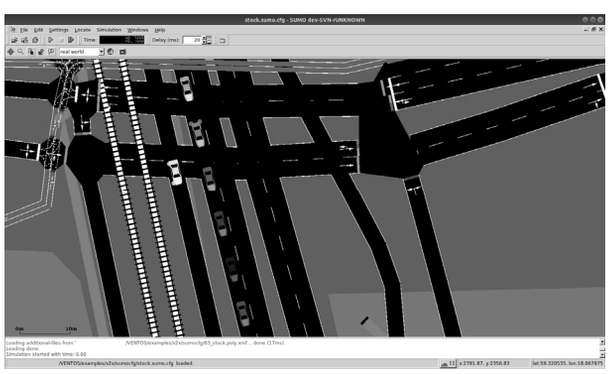

Fig. 1. Simulation Environment in VENTOS

SUMO는 2001년 독일의 항공 우주센터에서 개발된 오픈소스 도로 교통 시뮬레이터로써, 주정차 차량, 신호등 체계, 철도, 대기오염물질 배출 등을 포함한 실제 세계와 가까운 종합적인 도로 교통 모델링을 지원한다. 특히 TraCI (Traffic Control Interface) 인터페이스를 통해 외부 어플리케이션과 SUMO 시뮬레이터를 연결하여 시뮬레이션을 컨트롤할 수 있게 한다.

OMNET++는 여러 통신 규격들을 지원하는 오픈소스 네트워크 시뮬레이터이다. 다양한 통신 계층을 갖는 현실적인 네트워크를 모델링할 수 있다. 특히 IEEE 802.11p 물리 계층을 모델링한 MiXiM (MiXed siMulator) 프레임워크와 IEEE 1609.4 표준을 구현한 Veins (Vehicles in Network Simulation) 프레임워크는 SUMO 시뮬레이터의 각 객체들을 OMNET++ 시뮬레이터를 통하여 서로 V2X 통신을 가능하게 한다. 또한 Veins 프레임워크는 각 V2X통신의 전송 출력, 도달 거리, 전송 실패율 등의 설정으로 다양한 통신 환경에서의 시뮬레이션도 지원한다. 이렇게 통신을 통해 전달된 정보는 TraCI를 통해 SUMO 시뮬레이션에 반영된다.

VENTOS는 이와 같은 Veins 프레임워크에 다양한 군집주행 전략과 이를 지원하기 위한 모듈들을 추가하였다. VENTOS의 아키텍처는 Fig. 2에서 볼 수 있다. 아키텍처에 나타난 VENTOS의 주요 모듈들에 대한 기능 설명은 VENTOS의 웹사이트인 https://maniam.github.io/VENTOS/에서 참고할 수 있다.

4.2 시뮬레이션 실행 설정

VENTOS는 미리 정의된 시뮬레이션 실행에 필요한 여러 파일들을 읽고, 주어진 시뮬레이션을 실행한다. 실행에 필요한 주요 파일들에 대한 설명은 다음과 같다.

- net.xml : 지도 정보가 들어있는 파일로, 교차로(Node)와 이를 연결하는 도로(Edge)의 조합으로 생성된다.

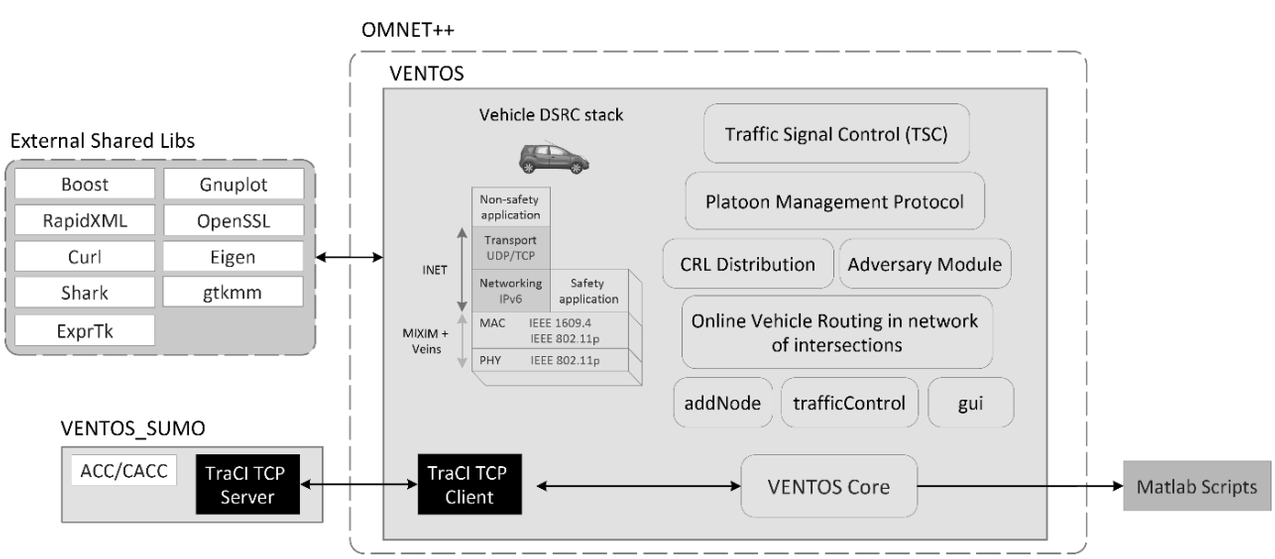

Fig. 2. Architecture of VENTOS

- rou.xml : 차량의 타입과 경로를 설정한다.
- sumo.cfg : SUMO 시뮬레이터의 설정 정보 파일로, 시뮬레이션의 시작과 종료 시간, 시간 단계(Time step) 등의 정보를 포함하며, 실행할 net.xml 파일과 rou.xml 파일의 경로를 가지고 있다.
- addNode.xml : 시뮬레이션에 개별 차량, 군집, RSU 등을 추가한다.
- trafficControl.xml : 속도 변화, 군집전략 수행 등 각 차량 객체의 움직임을 사전에 설정할 수 있다.
- omnetpp.ini : OMNET++ 시뮬레이터의 설정 정보 파일로, 각 모듈의 실행여부, 로그 파일의 생성여부, 각 객체의 V2X 통신 기능의 사용여부 등의 정보를 포함하며, 실행할 sumo.cfg 파일의 경로를 가지고 있다.

4.3 시뮬레이션의 기능 확장

VENTOS는 다양한 군집전략을 수행하여 군집을 구성하는 차량들과 주변 차량들의 상호작용을 시뮬레이션 하지만, 군집주행 상황에서 생겨날 수 있는 위험 상황에 대처하기 위한 방법은 고려하지 못했다. 따라서 본 연구의 목적을 위해서 다음과 같은 기능들을 VENTOS의 소스코드를 수정하여 구현하였다.

1) Impl. 1 : 빙판길의 모델링

특정 도로를 결빙된 도로로 간주하고, 차량에게 주어지는 가감속의 절반 정도를 상실하여 제동성능이 하락되는 도로를 구현하였다. 특히, 10 m/s 이상의 비교적 빠른 속도로 주행하다가 급제동을 하는 경우, 슬립(Slip)이 발생하여 제동 성능이 크게 하락하도록 구현하였다.

2) Impl. 2 : 빠른 제동 타이밍 결정

차량은 자신의 제동 성능을 정확히 알고 최대한 늦은 타이밍에 제동을 시작한다. 이는 도달 시간을 단축시키지만 탑승객에게 불안감을 가져다주고, 빙판길과 같이 제동력이 상실되는 구간에서는 충분한 제동을 하지 못하게 한다. 따라서 자신의 제동 성능을 실제보다 1/4 낮게 간주하여 필요한 안전거리를 더 길게 계산하게 함으로써 제동 타이밍을 보다 빠르게 결정하게 하였다.

3) Impl. 3 : 통신 기반 동시 감속

군집주행에서 각 자율주행차량은 통신을 통해 전달받은 값을 통하여 다른 차량들의 상태를 파악하고, 자신의 가속 또는 감속 값을 결정한다. 특히 이 과정에서 앞 차량의 정보는 매우 중요하다. 이때, 미리 지정된 전방 시간 간격(Time gap)에 따라 차량은 목표 안전거리를 확보하고자 한다. 목표 안전거리를 계산하는 방정식은 Equation (1)과 같다.

$$G_{dest} = Tg \times v + g_m \tag{1}$$

Equation (1)에서 G_{dest}은 목표 차량 간격 (m), Tg는 시간 간격(초), v는 현재 속도(m/s), g_m은 최소 전방 차량 간격(m)을 의미한다. 차량은 속력이 빠를 때에는 좀 더 큰 안전거리를, 속력이 느릴 때에는 좀 더 작은 안전거리를 갖게 된다. 하지만 가변성이 발생하는 위험 상황에서 군집의 차량 간 간격을 좁히는 행동은 또 다른 사고의 위험을 부를 수 있다.

단체로 군집의 모든 차량이 동시에 동일한 속력으로 감속을 한다면 차량 간 간격을 그대로 유지하면서 이상적인 군집 전체의 감속을 할 수 있다. 이러한 단체감속 군집 행동을 V2X 통신을 통해 전달받은 앞 차량의 속력을 추종하도록 하여 구현하였다. 3 m/s 이하의 충분히 느린 속도로 달릴 때에만 앞 차량의 속도를 추종하지 않고, 원래의 CACC 알고리즘에 따라 유동적인 차량 간 간격을 가지고 주행하도록 변경하였다.

4) Impl. 4 : 전방 차량 간격에 따른 최대속력 제한

자율주행차량은 일반적인 상황에서는 자신의 제동성능과 현재 속력을 토대로 필요한 제동거리를 정확히 계산할 수 있다. 하지만 위험 상황에서 계산된 제동거리에 맞춰 제동을 시작하는 것은 예기치 못한 사고를 유발할 수 있고, 탑승자에게 불안감을 안겨줄 수 있다. 따라서 전방 차량과의 간격이 가까워질수록 적당히 속도를 감속시키는 알고리즘을 생성하였다. 전방 차량 간격이 120 m 이하일 때부터 적용을 받으며, 전방 차량 간격이 30m가 될 때까지는 5 m/s의 속력을 갖도록 감속하고, 그 이후로는 Equation (2)에 따라 최대 속력을 제한하도록 하였다.

$$v_M = \frac{2}{15}g + 1 \tag{2}$$

여기서, v_M은 최대 제한 속도 (m/s), 그리고 g는 전방 차량 간격(m)을 의미한다.

5) Impl. 5 : 빙판길에서 최소 안전거리를 5배로 유지

VENTOS에서 설정한 최소 차량 간 간격의 기본 값은 2 m이다. 정상적인 주행 상황에서는 이 값을 침범하지 않지만, 위급 상황에서는 이 최소 차량 간 간격이 충돌을 방지할 수 있는 완충 역할을 해줄 수 있다. 빙판길에서는 이 값을 5배로 설정하여, 앞 차량과의 최소 차량 간격을 10 m를 지향하며 주행하게끔 하였다.

6) Impl. 6 : 끼어들기 차량에 따른 동적 시간 간격 변화

군집 주변에서 주행하던 수동 운전 차량은 군집임을 인지하지 못하고 군집의 가운데에 끼어들 수 있다. 이는 집단 주행을 통해 효율성을 추구하는 군집주행의 장점을 상실시키며 안정성을 저하시킨다. 실제로 현대자동차의 군집 주행 시연에서는 이와 같은 Cut-in 상황이 발생했을 때, 뒷 차량은 이를 인지하고 차간 거리를 늘려서 군집 주행을 지속하다가 끼

어든 차량이 다시 빠져나가면 다시 거리를 좁혀 원상태의 군집을 형성하는 것을 볼 수 있다. 본 연구에서는 끼어든 차량의 바로 뒷 차량은 자신의 앞 차량이 자신의 군집 구성 차량이 아니면 안전을 위하여 시간 간격을 2초로 증가시켜 더 많은 거리를 확보하고, 다시 자신의 앞 차량이 자신의 군집 구성 차량일 경우에는 시간 간격을 원래의 값으로 되돌리게끔 구현하였다.

7) Impl. 7 : 간격 일정이상 벌어지면 군집 분리

주행 중인 군집의 가운데에 수동 운전 차량이 끼어드는 경우 등, 주행 중인 군집의 일부 간격이 벌어질 수 있다. 하지만 안정적인 통신이 어려울 정도로 간격이 벌어지게 된다면, 군집주행의 의미를 상실하게 된다. 따라서 간격이 벌어진 곳을 기준으로 기존 군집을 두 개의 작은 군집으로 분리하는 것이 군집주행의 안정성을 보장할 수 있는 방법이 될 수 있다.

VENTOS에서의 군집 분리는 오직 군집의 리더 차량만이 착수한다. 그러나 위와 같은 상황에서는 군집의 안전성을 위하여 군집에 속한 차량이 군집의 분리를 요청할 수 있어야 한다. 이에 따라, 본 연구에서는 VENTOS의 군집 분리 알고리즘을 기반으로 군집을 구성하는 차량의 군집 분리 요청 프로토콜을 고안하였다. Fig. 3은 군집 구성 차량의 요청에 의한 군집 분리 과정을 상태기계(State machine)로 나타낸 것이다.

Fig. 3에서와 같이 Platoon follower가 분리를 위해 “split”을 시작하면, y1 상태에서 분리를 위한 메시지 “SPLITbyF_REQ”를 리더에게 전송하고 응답 수신을 위해 타이머를 셋한다. 상태 y1에서 군집 분리를 위한 메시지 “CHANGE_PL”를 수신하게 되면, follower는 군집 크기 ”1“ (즉, PinSize = 1)로 분리된다(상태 y2). 상태 y4에서는 새로운 군집의 목록을 생성하고, Follower는 Platoon leader가 되며, 이때, 후속의 멤버들에게 군집의 리더가 변경되었음을 알리는 일련의 과정(상태 y5, y6, y7)이 진행된다.

군집 사이의 간격을 획득하는 것은 여러 가지 방법이 있다. 다만 전방에 끼어든 수동 운전 차량이 있을 때에는 카메라, 레이더, 라이다 등을 이용해 군집 앞 차량과의 간격을 알아내는 것이 어려울 수 있다. 이럴 때에는 군집 차량으로부터 수신되는 전파의 세기를 측정하는 것이 유용할 수 있다. 전파 간섭이 심하거나, 건물 등으로 전파 도달이 약해질 때에는 더 짧은 거리에서 전파 세기가 약해질 수 있다. 이는 전파의 세기를 근거로 군집 리더와의 통신이 약해지기 전에 군집 전략을 수행한다는 의미에서 합리적인 판단이다. VENTOS의 네트워크 시뮬레이터인 OMNET++에서는 기본적으로 자유공간 전파 전달 모델을 사용한다.

기본 값으로 설정된 전파의 송신 출력은 20 mW이고, 수신 가능한 전파 세기의 최소 값은 10e-8.9 mW이다. 이는 약 510.5 m의 최대 도달 거리를 가진다. 자유 공간에서 거리에 따라 수신되는 전파의 세기 는 Equation (3)과 같다.

$$p = \frac{p_{\max} \times c^2}{16\pi^2 f^2 d^2} \tag{3}$$

식 (3)에서 $p_{\max}$은 송신 전파의 세기(mW), c는 광속, f는 통신 주파수(Hz), 그리고 d는 송신원과의 거리(m)를 의미한다. 군집 분리의 기준은 자신의 바로 앞의 군집 구성 차량으로부터 수신된 전파 세기를 측정하여 전파 세기가 일정 수준 이하로 감소하는 경우로 삼았다. 본 논문에서는 송신원과의 거리가 약 161 m 떨어졌을 때, 군집 분리 요청을 하였다. 이는 전파 세기가 -79 dBm 이하일 때를 의미한다.

8) Impl. 8 : RSU를 통한 사고 정보의 전달

RSU는 도로의 교통 상황에 대한 여러 가지 정보를 차량에

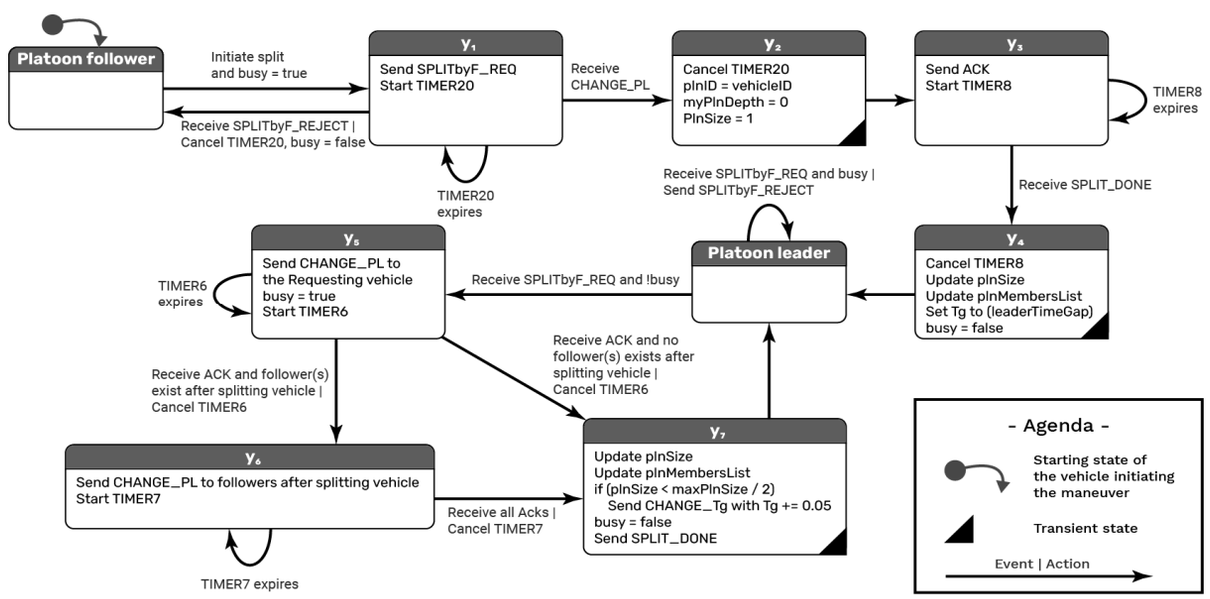

Fig. 3. Finite State Machine: Platooning Split Maneuver by Follower

제공할 수 있다. 교통 사고가 발생하면 사고 차량은 자신의 사고 사실과 그 심각성을 평가하여 V2X 통신을 통해 주변에 전파한다. RSU는 수신된 심각성 정보를 바탕으로 해당 도로의 예상 사고 처리 시간을 계산하여 주변에 사고 사실과 함께 전파한다. 사고 정보를 원거리에서 수신 가능함으로써 각 차량이 적절한 안전대책을 수행할 수 있게 하였다.

9) Impl. 9 : 사고 정보를 수신한 군집의 경로 재설정

RSU로부터 사고 정보를 수신한 군집의 리더 차량은 수신된 예상 통과 시간을 반영하여 경로를 재탐색하도록 변경하였다. 우회로가 사고가 발생한 경로를 통과하는 것보다 더 원활하다면, 우회로를 선택한다. 변경된 경로는 군집 메시지를 통하여 자신의 군집 구성 차량들에게 전달하고, 전달받은 군집 구성 차량들은 자신의 주행 경로를 업데이트 하도록 확장 하였다.

5. 군집 주행 시나리오

4.3절에서 설명한 확장된 VENTOS를 사용하여 군집주행 중 가변성에 의해 일어날 수 있는 위험 상황의 해결 방법을 검증하고자 다음과 같은 시나리오를 정의하였다. 모든 시나리오에서는 6대의 동일한 자율주행차량으로 구성된 군집을 구성하였다. 군집의 구성은 Table 1과 같다.

5.1 시나리오 정의

군집 주행에서 직면하는 가변 상황, 그리고 이에 대한 안전대응 방법을 확인하기 위하여 시뮬레이션을 Table 2와 같이 선정하였다.

시나리오 S1은 6대의 차량으로 구성된 군집이 결빙 도로를 진입하는 경우에 해당되며, 선두 차량의 슬립(Slip) 현상 감지에 의해 군집의 속도 감속을 진행하고, 이로부터 전방 차량과 추돌 없이 정차하는 경우의 시나리오 이다. S2는 군집 주행

Table 1. Platoon Configuration

Vehicle ID	PV.0	PV.1	PV.2	PV.3	PV.4	PV.5
Depth	0	1	2	3	4	5
Role	Leader			Followers		
Color	Red	Deep blue				Light blue

Table 2. Scenarios Design for Variability Simulation

Scenario type	Hazardous Scenarios	Safety Guards	Safe Scenarios
S1: Weather	Collision by icy road	Speed reduction	Stop without collision
S2: Drivers	Sudden breaking after cut in	Inc. distance between cars	Platoon separation
S3: Traffics	Congestion due to accident	Receive RSU info.	Change driving route

Table 3. Simulation Runs for Defined Scenarios Using VENTOS

Scenario Type	Simulation Instances
S1	s11 – Normal scenario of platoon driving s12 – Hazardous scenario by icy road s13 – Safe scenario with low deceleration rate s14 – Group deceleration scenario according to the front vehicle s15 – Front vehicle tracking scenario considering speed
S2	s21 – Hazardous scenario with sudden breaking of cut-in vehicle s22 – Normal scenario for cut-in and exit of a vehicle s23 – Platoon separation scenario with low-speed driving s24 – Accident avoidance scenario for sudden breaking
S3	s31 – Congestion scenario due to accident s32 – Avoiding traffic congestion by detour

대열로 일반 차량이 끼어들어 급제동하는 경우로써, 발생 가능한 사고를 대비하기 위하여 차간 거리를 확대하여 주행하는 시나리오이다. S3은 전방의 사고로 인하여 장시간 정체되는 경우로써, 긴급 차량(예: 앰블런스 군집)의 경우 RSU로부터 수신한 정보를 기반으로 사고지점을 우회하는 시나리오이다.

5.2 시나리오 시뮬레이션

본 논문에서는 이러한 발생 가능한 다양한 시나리오에 대하여 Table 3과 같이 총 11가지의 사례를 시뮬레이션 하였으며, 그 중에서 시나리오 유형 S2에 해당되는 시뮬레이션 결과에 대하여 설명한다. 다른 시나리오에 대한 시뮬레이션 결과도 유사한 형태로 나타난다.

6. 시뮬레이션 결과 및 분석

6.1 시뮬레이션 s11 : 정상 군집주행

군집주행 차량들의 움직임을 비교하기 위해 아무런 가변성이 존재하지 않는 일반적인 상황에서의 주행을 시뮬레이션 하였다. 주행하던 군집은 전방에 고장으로 멈춰선 차량을 인식하고 제동한다. 이때, 전통적인 Gipps 모델[30]에 의하여 군집의 리더 차량은 전방의 멈춰 있는 차량에 대하여 Equation (4)에 의해 계산된 안전거리, g_{safe}를 침범하는 순간 제동을 시작한다.

$$g_{safe} = S2D(v) + \frac{v^2}{D_M} + g_m \quad (4)$$

Equation (4)에서 안전 거리는 m 단위이며, $S2D$는 일시적 예상 주행 거리(m), v는 속력(m/s), D_M은 최대 감속 성능

Fig. 4. VENTOS Scenes of Simulation s11

(m/s²), 그리고 g_m은 최소 차량간 간격(m)을 의미한다.

초속 25 m/s로 달리고 있는 차량의 계산된 g_{safe}값은 67 m이다. 실제 시뮬레이션 결과, 선두 차량은 42.4초에서 감속을 시작하며, 고장으로 정지한 차량의 64.81 m 전방에 해당한다. 이때 시뮬레이션 s11의 시나리오 스텝은 Fig. 4와 같으며, 그 설명은 다음과 같다.

- s11 (a) : Simulation time 40.7초 - 여섯 대의 자율주행 차량이 안정적으로 군집주행을 하고 있다.
- s11 (b) : Simulation time 42.0초 - 전방에 고장으로 정지한 차량을 발견하였다.
- s11 (c) : Simulation time 46.0초 - 자신이 필요로 하는 제동거리를 계산하여 필요한 순간부터 제동을 한다.
- s11 (d) : Simulation time 50.3초 - 모든 군집 구성 차량이 안전하게 정지하였다.

또한 시뮬레이션 s11의 각 차량 속도와 전방 차량 간격 그래프는 Fig. 5와 같다.

상단의 속도 그래프에서 42.4초부터 선두 차량이 감속을 시작하며, 이어서 후속 차량들이 선두차량을 따라 감속을 하여 정지한 것을 볼 수 있다. 또한 하단의 전방 차량 간격 그래프에서 선두 차량은 고장 차량과의 거리가 가까워짐에 따라 거리가 지속적으로 감소하고, 추종 차량은 감속 후 최저 차량 간 간격 2 m를 유지하며 정지한 것을 볼 수 있다.

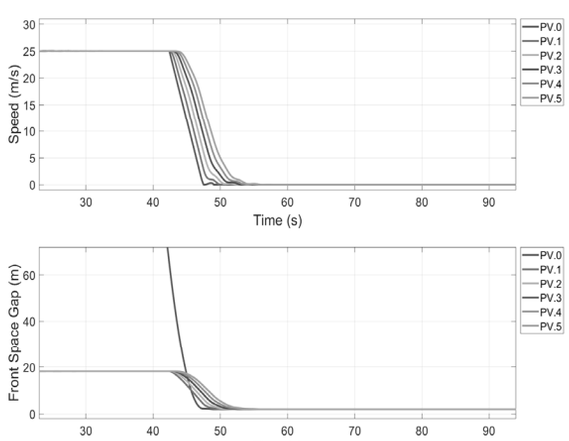

Fig. 5. Speed and Front Space Gap Graphs of Simulation s11

6.2 시뮬레이션 s21 : 끼어들기 차량의 급제동 사고

위험 시나리오에서는 수동 운전 차량이 끼어든 상황에서도 바로 뒷 차량은 수동 운전 차량임을 인지하지 못해 계속 좁은 시간 간격을 유지한다. 군집 주행에서 각 차량은 앞 차의 감속 성능을 통신을 통하여 제공받으나, 군집 구성 차량이 아닌 차량의 급제동에 대해서는 빠른 반응을 하지 못하고 좁은 차간 거리로 인해 추돌 사고가 발생을 했다.

시뮬레이션 s21에 대한 시나리오 스텝은 Fig. 6과 같다. Fig. 6에 나타난 것과 같이 26.3초에 차량 MV가 끼어들었다. 끼어든 차량의 뒷 차량인 PV.2는 순간 안전거리 확보를 위하여 멈추지만 여전히 군집주행일 때와 마찬가지의 차량 간격을 유지하며 주행을 하고 있다. 45초에 수동 운전 차량이 급정거를 하는데 미처 멈추지 못하고 추돌을 일으킨다. 이어 후속 차량도 급정거를 하는데 차량 PV.3은 불과 20 cm의 간격을 남겨두고 간신히 정지에 성공하였다. 한편, 차량 PV.1과의 간격이 벌어짐에 따라 통신 안전성이 약화되어 군집 주행의 안전성을 해치게 된다.

- s21 (a) : S. time 20.9초 - 차량 MV가 깜빡이 켜고 군집 사이에 끼어들기 위하여 접근을 하고 있다.
- s21 (b) : S. time 26.2초 - 차량 MV가 끼어들기 직전의 모습이다.
- s21 (c) : S. time 26.4초 - 차량 MV가 차량 PV.2의 앞으로 위험하게 끼어들었다.

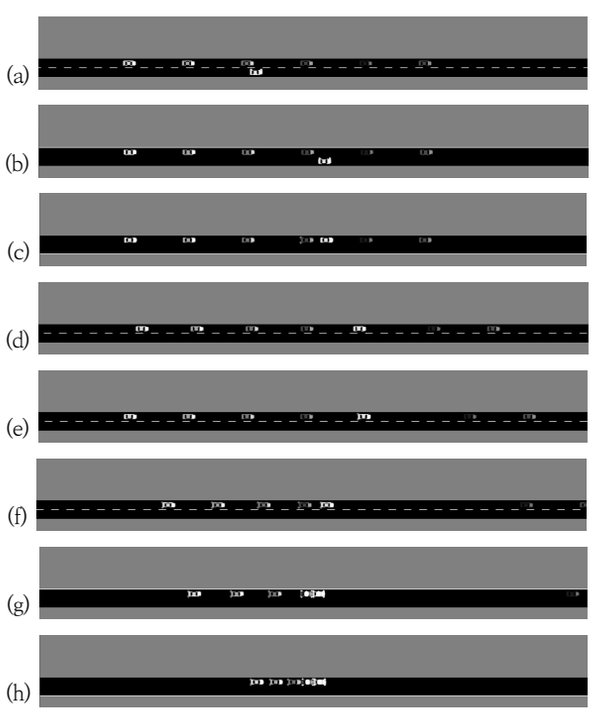

Fig. 6. VENTOS Scenes of Simulation s21

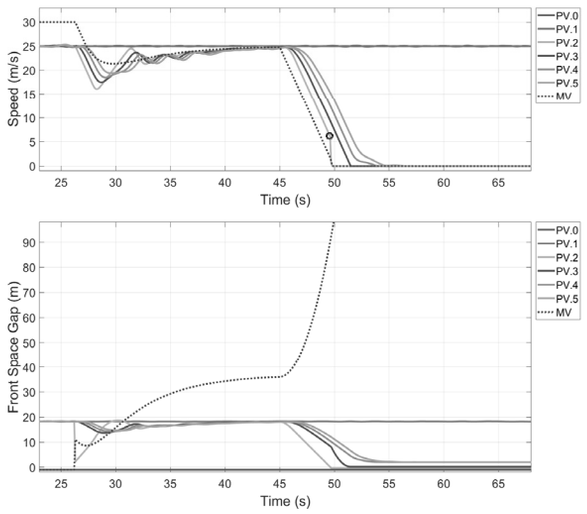

Fig. 7. Speed and Front Space Gap Graph of Simulation s21

- s21 (d) : S. time 32.6초 - 약간의 속도 조정을 거친 후, 군집 주행 때와 동일한 일정한 간격을 유지하고 있다.
- s21 (e) : S. time 45.4초 - 차량 MV가 급정거를 시작한다.
- s21 (f) : S. time 48.8초 - 차량 PV.2가 사고를 회피하기 위해 급제동을 하지만 충분한 안전거리가 확보되지 않아 멈추지 못한다.
- s21 (g) : S. time 49.8초 - 차량 MV가 차량 PV.2가 충돌하였다.
- s21 (h) : S. time 53.9초 - 차량 PV.2의 뒷 차량들은 간신히 제동에 성공하였다.

또한 시뮬레이션 의 각 차량 속도와 전방 차량 간격 그래프는 Fig. 7과 같다.

상단의 속도 그래프로부터 27초부터 32초 사이에서 끼어든 차량으로 인해 뒷 차량들이 감속을 하였다가 다시 속도를 회복하는 것을 볼 수 있다. 45초부터 시작된 수동운전 차량이 감속을 하였고, 차량 PV.2는 충돌이 일어났음을 검은색 원을 통해 확인할 수 있다. 하단의 전방 차량 간격 그래프에서는 26.3초에 차량 PV.2의 전방 차량 간격이 차량 MV의 끼어들기로 인해 급격히 감소한 것을 확인할 수 있다.

6.3 시뮬레이션 s23 : 저속 군집주행 분리

군집 주행의 내부로 끼어든 수동운전 차량이 45초부터 10 m/s의 저속으로 주행하게 하였다. 하지만 군집의 앞부분은 계속 25 m/s의 고속으로 주행하므로, 군집 사이의 간격이 계속 벌어지게 된다. 차량 PV.2는 Impl. 7에 적용된 군집 분리 요청을 통해 새 군집의 리더가 된다. 군집 분리 요청 메시지를 발송하는 53.0초에서의 두 차량 사이의 간격은 159.31m이다. 또한 본 시뮬레이션에는 Impl. 6도 동시에 적용하였다. 시뮬레이션 s23에 대한 시나리오 스텝은 Fig. 8과 같다.

Fig. 8. VENTOS Scenes of Simulation s23

- s23 (a) : S. time 26.3초 - 차량 MV가 끼어든다.
- s23 (b) : S. time 35.2초 - 차량 PV.2는 충분한 안전거리를 확보한다.
- s23 (c) : S. time 46.8초 - 차량 MV는 저속으로 감속하여 주행한다. 차량 PV.2는 충돌을 피하기 위해 감속한다.
- s23 (d) : S. time 53.0초 - 속력이 줄어들었으므로 차량 간 간격이 같이 감소한 것을 확인할 수 있다.
- s23 (e) : S. time 53.2초 - 군집 분리 요청에 따른 군집 분리 전략을 완료하고 차량 PV.2가 새로운 군집의 리더가 되었다.
- s23 (f) : S. time 67.0초 - 군집 선두 차량의 기본 시간 간격 값을 사용, 전방 차량 간격을 더 확보한다.

또한 시뮬레이션 의 각 차량 속도와 전방 차량 간격 그래프는 Fig. 9와 같다.

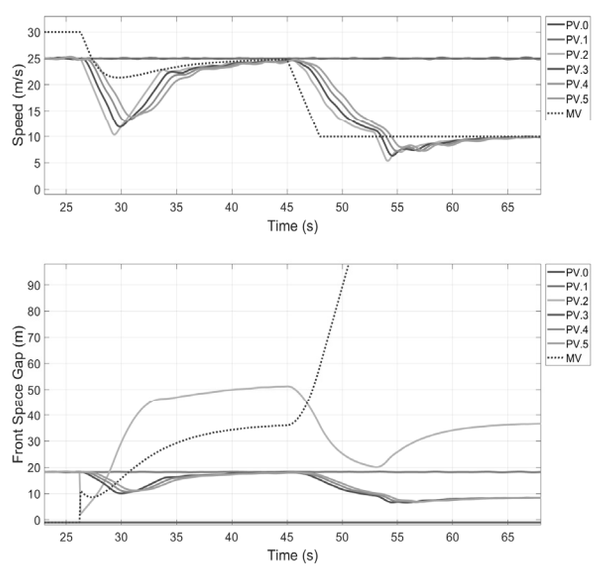

Fig. 9. Speed and Front Space Gap Graph of Simulation s23

상단의 속도 그래프로부터 45초에서 차량 MV는 10 m/s의 저속으로 감속한 것을 확인할 수 있다. 하단의 전방 차량 간격 그래프로부터 53.1초에서 차량 PV.2가 새로운 군집의 리더가 되어 차량 간격을 더 확보하는 것을 확인할 수 있다.

6.4 시뮬레이션 결과 분석

본 논문에서는 VENTOS를 이용한 군집주행에 대한 다양한 시나리오를 시뮬레이션 하였다. 특히, 군집 주행 과정에서 발생할 수 있는 예상하지 못한 상황 가변 상황과 이들에 대응하기 위한 방법을 제안하고 이를 시뮬레이션 하였으며, 이를 위해 VENTOS가 제공하는 기능을 확장하였다. 본 연구에서 수행한 시나리오 기반 시뮬레이션에 대한 분석은 다음과 같다.

1) 군집 주행원의 크기

일반적으로 군집 주행의 장점을 얻기 위해서는 8대에서 12대 정도의 규모가 적당한 것으로 인지되고 있다. 본 연구에서는 VENTOS의 시뮬레이션 환경을 고려하여 6대를 이용한 시뮬레이션을 수행하였다. 이는 시뮬레이션 동작에 대한 가시적(그래픽 관점)인 인지도를 높이기 위함이다. VENTOS에서 10대 정도의 군집 주행을 수행하는 경우, 한 화면에 차량의 세부 행동을 살펴보기가 난해한 부분이 있다.

2) 군집 주행에서의 차간 간격

VENTOS 시뮬레이션에서의 정상적인 군집주행에서 안전한 주행을 위하여 차간 간격을 16.25m (속도는 25m/sec)로 정의하여 시뮬레이션 한다. 본 연구에서는 이러한 VENTOS의 차량 간격을 그대로 유지하여 시뮬레이션 하였으며, 주행 중 발생할 수 있는 가변사항에 대처하기 위한 안전 대응으로 차량 간격을 넓이고, 복귀하는 동적인 간격 변화를 시뮬레이션 하였다. 일반적으로 사고의 발생이나 외부의 간섭이 없는 정상 군집주행에서 차간 거리는 평균 8m로 설정되어야 군집주행의 장점을 최대한 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다.

3) 사고 발생률

본 연구에서 제시한 6대 차량의 군집주행에서 위험 시나리오에 대한 시뮬레이션은 s12, s21, s31에 해당된다. 이들 각 시뮬레이션에서 전방의 차량과 추돌이 발생하는 비율을 살펴보면, s12 시뮬레이션에서는 2/6 (33.3%), s21 시뮬레이션에서는 2/6 (33.3%), s31에서는 1/6 (16.7%)로 나타났다. 이러한 시뮬레이션 결과는 일반적인 유럽의 프로젝트 등에서도 비슷한 수치를 보이고 있다. 그러나 이러한 사고 발생률은 차량간 거리나 속도에 따라 달라질 수 있다.

4) 단위 시뮬레이션의 실행 시간 적합성

VENTOS를 이용하여 시뮬레이션을 수행할 때, 각 시나리오에 대한 시뮬레이션의 수행 시간은 Fig. 10과 같다.

시나리오 시뮬레이션 s12와 s15의 경우, 빙판길로 인하여 모든 군집 차량의 속도 감속 후에, 전방의 사고 차량 탐지로 인한 추가 감속이 진행되었다. 이로 인하여 상대적으로 시뮬레이션의 시간이 증가하였다. 대체적인 모든 시나리오의 경우 대략 1분(60초) 이내에 시뮬레이션이 종료된다. 이는 실제 상황에서도 사고의 발생과 회피가 대략 1분 이내에 이루어진다는 것을 의미한다.

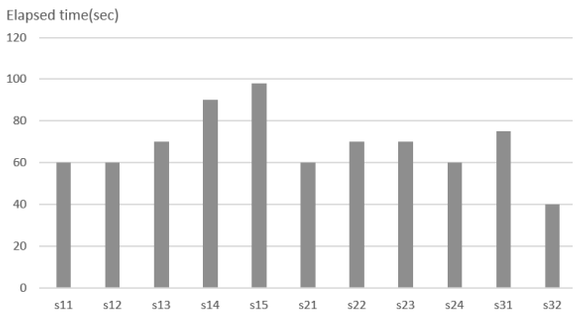

Fig. 10. Elapsed Time for Scenarios Simulation

7. 결론 및 향후 연구

본 연구에서 VENTOS 시뮬레이터를 이용하여 주행 상황에서만 이루어지는 기본 군집 전략 뿐 아니라 다양한 가변성을 고려한 안전 필수 기능을 시뮬레이션 하였다. 다양한 가변성에 의하여 발생할 수 있는 위험 요소에 대한 대책을 VENTOS 시뮬레이터의 소스 코드를 수정하여 구현하였고, 다양한 시나리오를 통해 해당 안전대책의 실효성을 검증하였다. 이 과정에서 안전대책의 결함을 발견하고, 원인을 분석하여 개선함으로써 군집주행에 더 향상된 안전대책을 적용할 수 있게 하였다. 이는 실제 테스트보다 비용과 시간을 크게 절약할 수 있는 시뮬레이션의 유용성을 입증하는 일이기도 하다. 이러한 본 연구 결과는 향후 군집 주행 상황에서 일어날 수 있는 여러 위험한 상황에서 강구될 수 있는 안전 대책에 대한 결과와 영향을 시뮬레이션을 통해 평가하고, 실제 차량을 이용한 테스트를 준비하는데 여러 도움이 될 수 있을 것이다.

향후의 연구로는 군집 주행에서 안전을 고려하기 위하여 필요한 다양한, 기능적, 비기능적 요소를 시뮬레이터에 추가하고자 한다. 이를 위하여 군집 전체의 유연한 차선 변경 모델의 확립이 필요하다. 또한 실제 개발되고 있는 군집 주행 도로의 시스템을 어떻게 시뮬레이터에 적절하게 이식을 하여 실제 환경과 유사한 시뮬레이션 환경을 모델링할 수 있을 것인지에 대한 연구를 진행하여 좀 더 효과적이고 실질적인 시뮬레이션 기법을 발전시키고자 한다.

References

[1] C. Bergenhem, S. Shladover, E. Coelingh, C. Englund, and S. Tsugawa, “Overview of platooning systems,” In *Proceedings of the 19th ITS World Congress*, Vienna, EU-00336, 2012.

[2] E. Larsson, G. Sennton, and J. Larson, "The vehicle platooning problem: Computational complexity and heuristics," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.60, pp.258-277, 2015.

[3] A. Davila, E. del Pozo, E. Aramburu, and A. Freixas, "Environmental benefits of vehicle platooning," SAE Technical Paper, No.2013-26-0142, 2013.

[4] N. Ali and J. Hong, "Variability-Considered Hazards Analysis Technique in Collaboration Environments of Multiple Cyber-Physical Systems," *Journal of Korean Institute of Information Scientists and Engineers*, Vol.47, No.9, pp.820-834, 2020.

[5] Q. Deng, "A general simulation framework for modeling and analysis of heavy-duty vehicle platooning," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol.17, No.11, pp.3252-3262, 2016.

[6] VENTOS [Internet], https://maniam.github.io/VENTOS/ at Jul. 2020.

[7] M. Amoozadeh, H. Deng, C. N. Chuah, H. M. Zhang, and D. Ghosal, "Platoon management with cooperative adaptive cruise control enabled by VANET," *Vehicular Communications*, Vol.2, No.2, pp.110-123, 2015.

[8] M. Amoozadeh, A. Raghuramu, C. N. Chuah, D. Ghosal, H. M. Zhang, J. Rowe, and K. Levitt, "Security vulnerabilities of connected vehicle streams and their impact on cooperative driving," *IEEE Communications Magazine*, Vol.53, No.6, pp.126-132, 2015.

[9] J. Erdmann, "Lane-changing model in SUMO," in *Proceedings of the SUMO2014 Modeling Mobility with open Data*, Berlin, pp.105-123, 2014.

[10] Y. Jo, S. Lee, and C. Oh, "Impacts of Truck Platooning in Mixed-traffic Conditions on Freeway Capacity," *Journal of Korean Society of Transportation*, Vol.36, No.5, pp.331-345, 2018.

[11] L. Alekszejenkó and T. P. Dobrowiecki, "SUMO Based Platform for Cooperative Intelligent Automotive Agents," in *Proceedings of the SUMO User Conference 2019*, Berlin, pp.107-123, 2019.

[12] J. Mena-Oreja, and J. Gozalvez. "Permit-a SUMO simulator for platooning maneuvers in mixed traffic scenarios," in *Proceedings of the 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Maui, 2018, pp.3445-3450.

[13] Z. Yang, X. Wang, X. Pei, S. Feng, D. Wang, J. Wang, and S. C. Wong, "Longitudinal safety analysis for heterogeneous platoon of automated and human vehicles," in *Proceedings of the 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Maui, pp.3300-3305, 2018.

[14] N. Ali, H. Manzoor, and J. Hong, "Analyzing Safety of Collaborative Cyber-Physical Systems Considering Variability," *IEEE Access*, Vol.8, pp.162701-162713, 2020.

[15] M. Aki, R. Zheng, K. Nakano, S. Yamabe, S. Y. Lee, Y. Suda, Y. Suzuki, and H. Ishizaka, "Evaluation of safety of automatic platoon-driving with improved brake system," in *Proceedings of the 19th ITS World CongressERTICO-ITS EuropeEuropean CommissionITS AmericaITS Asia-Pacific*, Vienna, AP-00336, 2012.

[16] S. Y. Lee and C. Oh, "Lane Change Behavior of Manual Vehicles in Automated Vehicle Platooning Environments," *Journal of Korean Society of Transportation*, Vol.35, No.4, pp.332-347, 2017.

[17] Y. Song, and H. K. Choi, "WAVE System Performance for Platooning Vehicle Service Requirements Under Highway Environments," *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, Vol.16, No.1, pp.147-156, 2017.

[18] E. Chan, "Overview of the sartre platooning project: technology leadership brief," SAE Technical Paper, No. 2012-01-9019, 2012.

[19] S. Ellwanger and E. Wohlfarth, "Truck platooning application," In *Proceedings of the 2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Redondo Beach, pp.966-971, 2017.

[20] L. Aarts and G. Feddes, "European truck platooning challenge," In *Proceedings of the In HVTT14: International Symposium on Heavy Vehicle Transport Technology*, Rotorua, 2016.

[21] Nikkei Asia, Japan launches test of self-driving truck convoys [Internet], https://asia.nikkei.com/Editor-s-Picks/Japan-Update/Japan-launches-test-of-self-driving-truck-convoys at June 2020.

[22] K. Serizawa, M. Mikami, K. Moto, and H. Yoshino, "Field trial activities on 5G NR V2V direct communication towards application to truck platooning," In *Proceedings of the 2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall)*, Honolulu, pp.1-5, 2019.

[23] G. Jun, S. Kim, S. Lee, C. Kim, J. Park, "A Study on the Operational Results of SMART Highway Test-bed," *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, Vol.14, No.4, pp.27-39, 2015.

[24] H. Hartenstein and K. Laberteaux, "VANET: Vehicular applications and inter-networking technologies (Vol.1)," John Wiley & Sons, 2009.

[25] L. Xiao, M. Wang, and B. van Arem, "Realistic Car-Following Models for Microscopic Simulation of Adaptive and Cooperative Adaptive Cruise Control Vehicles," *Transportation Research Record: Journal of the Trans. Research Board*, Vol.2623, No.1, pp.1-9, 2017.

[26] L. Xiao, M. Wang, W. Schakel, and B. van Arem, "Unravelling effects of cooperative adaptive cruise control deactivation on traffic flow characteristics at merging bottlenecks," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.96, pp.380-397, 2018.

[27] S. Cheon, "An Overview of Automated Highway Systems (AHS) and the Social and Institutional Challenges They Face," UC Berkeley: University of California Transportation Center, 2003.

[28] SUMO [Internet], https://www.eclipse.org/sumo/at Jun. 2020.

[29] OMNET++ [Internet], https://omnetpp.org/ at Jun. 2020.

[30] P. G. Gipps, "A behavioural car-following model for computer simulation," *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.15, No.2, pp.105-111, 1981.

김 영 재

https://orcid.org/0000-0002-0011-1216
e-mail : youngjae@cbnu.ac.kr
2014년 청주대학교 수학교육과(이학사)
2018년 고려사이버대학교 전기전자공학과 (공학사)
2020년 ~ 현 재 충북대학교 컴퓨터과학과 석사과정
관심분야 : Platooning, Autonomous vehicle, Software Safety, Simulation, Cyber physical system.

홍 장 의

https://orcid.org/0000-0001-9786-7732
e-mail : jehong@chungbuk.ac.kr
2001년 KAIST 전산학과(박사)
2002년 국방과학연구소 선임연구원
2004년 ㈜솔루션링크 기술연구소장
2004년 ~ 현 재 충북대학교 소프트웨어학과 교수
관심분야 : Model-Based Software Engineering, Software Quality, Cyber-Physical Systems