

# 엣지 인프라 기반 자율주행시스템의 MRC 검증을 위한 시뮬레이션 환경 구축 연구

박종기\*, 신성근, 예창민, 박종우, 이혁기

한국자동차연구원

\*jkpark@katech.re.kr, sgshin@katech.re.kr, cmye@katech.re.kr, jwpark2@katech.re.kr, hlee@katech.re.kr

## A Study on Verifying Minimum Risk Condition in Edge Infrastructure-based Autonomous Driving Systems Using Scenario-based Simulation

Park Jong Ki\*, Shin Seong Geun, YeCahng Min, Park Jong Woo, Lee Hyuck Kee

Korea Automotive Technology Institute (KATECH)

### 요약

최근 자율주행 기술의 발전으로 인해 레벨 4 수준의 완전 자율주행 시스템 개발이 가속화되고 있다. 그러나 상용화를 위해서는 시스템의 안전성과 신뢰성을 철저히 검증하는 과정이 필수적이다. 이에 따라 엣지 컴퓨팅 기술을 자율주행에 접목하여 지연 시간을 감소시키고 신뢰성을 향상시키려는 시도가 이루어지고 있다. MRC(Minimum Risk Condition)는 자율주행 차량의 안전을 확보하기 위한 필수 기능이다. 본 논문에서는 환경 센서와 엣지 인프라를 대상으로 기능을 정의하고 오작동 및 위험 원인을 분석하였다. 이를 기반으로 주요 오작동 시나리오를 정의하고, 오류 주입 시나리오를 도출하여 MRC를 검증할 수 있는 시뮬레이션 환경을 구축하였다. 구축된 시뮬레이션 환경을 통해 엣지 인프라 기반 자율주행시스템의 오류 상황에서 MRC 수행을 검증할 수 있었다.

### I. 서론

최근 자율주행 기술의 급속한 발전으로 레벨 4 수준의 완전 자율주행 시스템 개발이 가속화되고 있다. 레벨 4 자율주행은 특정 운전 환경에서 운전자의 개입 없이 차량 스스로 주행이 가능한 고도화된 기술이다. 그러나 이러한 자율주행 시스템이 상용화되기 위해서는 시스템의 안전성과 신뢰성을 철저히 검증하는 과정이 필수적이다.

이에 따라 엣지 컴퓨팅 기술을 자율주행에 접목하여 새로운 인프라 환경을 구축하려는 시도가 활발히 이루어지고 있다. 엣지 인프라 기반 자율주행은 차량 내부 및 V2X(Vehicle-to-Everything) 통신 단말기 등에서 센서 데이터를 실시간으로 처리하고, 도로 상황 및 교통 정보를 제공하는 인프라를 활용한다. 이를 통해 기존의 중앙 집중식 클라우드 구조에 비해 데이터 처리 지연시간을 크게 감소시킬 수 있으며, 신뢰성 또한 향상된다. 결과적으로 보다 안전하고 효율적인 자율주행 서비스가 가능해진다.

이러한 엣지 인프라 환경에서 MRC(Minimum Risk Condition)는 자율주행 차량의 안전을 확보하기 위한 필수 기능이다. MRC는 레벨 4 자율주행의 DDT(Dynamic Driving Task) Fallback 상황에서 작동한다. DDT Fallback 상황이란 시스템 오작동, 센서 고장, 악천후 등으로 인해 자율주행 시스템이 더 이상 주행 태스크를 수행할 수 없는 상황을 말한다.[1] 이때 MRC는 MRM(Minimum Risk Maneuver)을 수행하여 차량을 긴급정지 시키거나 도로 갓길 등의 안전지대로 이동시킨다.

그러나 MRC 기능의 중요성에도 불구하고, 실제 주행환경에서 모든 시나리오를 테스트하기에는 한계가 있다. 따라서 엣지 인프라 환경을 고려한 시뮬레이션 환경에서 다양한 시나리오를 기반으로 반복적인 시험을 통해 MRC를 체계적으로 검증할 필요가 있다.

본 논문에서는 센서와 엣지 인프라를 대상으로 기능을 정의하고, 오작동 및 위험 원인을 분석하였다. 이를 기반으로 주요 오작동으로 발생할 수 있는 위험 시나리오를 정의하였으며 오류에 따른 자율주행 차량의 MRC 달성 검증을 위한 오류 주입 시나리오를 도출하였고 MRC를 검증하기 위한 시뮬레이션 환경을 구성하였다. 도출된 오류 주입 시나리오 시뮬레이션을 통해 MRC를 검증할 수 있는 시뮬레이션 환경을 제시하였다.

### II. 본론

엣지 인프라 기반 자율주행시스템의 주행 시나리오를 도출하기 위해 환경 센서의 기능을 표 1.과 같이 정의하였으며 V2X 통신에서 사용되는 차량 통신 메시지 셋의 정의를 정의하고 있는 SAE J2735, 차량 환경에서의 통신 보안 서비스를 정의하고 있는 IEEE 1609.2, 교차로 관련 V2I/I2V 통신의 응용을 제시하는 ISO/TS 19091:2019, 차량 내 정보 데이터 구조를 정의하는 ISO/TS 19321:2020을 참고하여 V2X 통신의 메시지 셋을 분석하였고 이를 기반으로 센서 고장 상황에도 엣지 기반 자율주행을 수행할 수 있도록 표 2.와 같이 기능을 정의하였다.

표 1. 환경 센서의 기능 정의

Sensor	Description
Camera	객체(크기, 종류) 정보 제공
	차선(종류) 정보 제공
Radar	객체(크기) 정보 제공
	차량(속도, 가속도) 정보 제공

표 2. 엣지 인프라의 기능 정의

Message Set	Description
BSM (Basic Safety Message)	주변 차량의 기본적인 안전(위치, 속도 등) 정보 제공
MAP (Map Data)	정밀지도(도로 정보) 정보 제공
SPAT (Signal Phase and Timing)	교통신호(현시, 주기) 정보 제공
RSM (Roadside Safety Message)	전방 도로 상황(사고, 공사 등) 정보 제공
PVD (Probe Vehicle Data)	차량의 주행 이력 및 도로 상태 정보 제공

차량의 환경 센서를 기반으로 주행하는 자율주행시스템에서 센서의 고장으로 인해 엣지 인프라에서 제공하는 정보를 바탕으로 자율주행시스템

에서 판단 및 제어가 수행되는 자율주행시스템 아키텍처를 그림 1.과 같이 구성하였다.

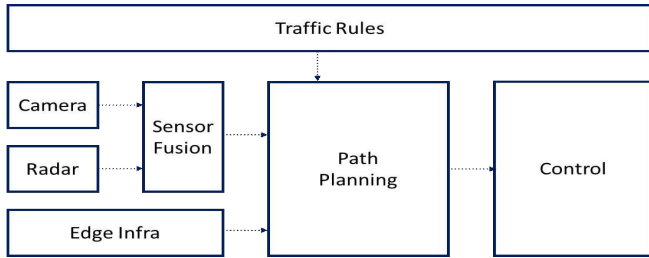


그림 1. 자율주행시스템의 엣지 인프라 활용 구성도

센서와 엣지 인프라의 고장의 원인은 다양하나 ISO 26262 Part 5, 6에서 자율주행시스템의 원인을 HW(Hardware) 고장과 SW(Software)의 고장 크게 두 가지로 구분하고 있으며[4] 이를 참조하여 표3과 같이 센서와 엣지 인프라의 고장 원인을 분류하였다.

표 3. 센서 및 엣지 인프라의 고장 유형

Failure Type		Description
HW	결합	제조 결합, 노화
	손상	외부 충격, 환경적 요인(열, 습기)
	전원 공급	전원 공급 불량
	배선 고장	단선, 단락, 간섭
SW	통신 오류	데이터 손실, 지연, 오염
	논리 오류	센서 처리, 보정, 융합 등 알고리즘 오류

정의된 고장 유형과 기능을 기반으로 HAZOP(Hazard And Operability) 분석을 통해 오작동을 도출한 결과는 표 4.와 같다. HAZOP 이란 No, Less, More 등과 같은 Guide Word를 기반으로 시스템의 설계 의도를 벗어난 편차를 식별하는 개념이다.[5]

표 4. 센서 및 엣지 인프라의 오작동 및 고장 원인

Fault	Malfunction	Causal Factor
Sensor Fusion	객체 정보 미/오제공	HW 고장 또는 논리 오류
	차선 정보 미/오제공	
	차량 정보 미/오제공	
BSM	주변 차량 정보 미/오제공	HW 고장 또는 통신 오류
MAP	정밀 지도 정보 미/오제공	
SPAT	교통신호 정보 미/오제공	
RSM	전방 도로 상황 미/오제공	
PVD	주행 이력 및 도로 상태 미/오제공	

본 논문에서는 자율주행시스템 관련 표준 문서를 기반으로 시스템 고장 유형별 목표 MRC 설정을 위한 분석을 수행하였다. 자율주행시스템과 관련된 다양한 용어와 정의를 제공하는 SAE J3016 표준에서는 고장 유형별 구체적인 MRC 달성 방법은 직접적으로 규정하고 있지는 않으나 센서 고장 시 대체가능 센서를 통해 인지 범위를 확보하여 감속 주행 등을 수행하는 것을 제시한다.[2] 자율주행시스템의 안전성에 관련한 기술보고서인 ISO/TR 4804 표준에서도 주행시스템 고장별 달성 해야 할 MRC 상태를 제시하는데 센서 고장 시 대체가능 센서를 통해 감속 주행 등을 수행하고 대체가능 센서 고장 시 비상 정지를 통한 MRC 달성을 제시한다.[3] 이러한 MRC 달성의 과정을 표 5.와 같이 정의하였다.

표 5. MRC 달성 단계 정의

Causal Factor	MRC Status
센서 고장	엣지 인프라 기반 감속 주행 (성능저하모드)
엣지 인프라 고장	비상 정지

오작동으로 인해 발생 될 수 있는 위험 시나리오 중 객체 정보 오류를

선정하였으며 센서의 객체 정보 미제공 오류 주입 후 MRC를 수행하는 오류 주입 시나리오를 1건, 엣지 인프라에 오류가 주입되는 시나리오 1건 총 2건의 시나리오를 1건으로 구성하였다.

오류 주입 시나리오의 형식은 일본 자동차공업협회인 JAMA(Japan Automobile Manufacturers Association, Inc)의 자율주행시스템 안전성 평가를 위한 구체적인 지침을 제시하는 Automated Driving Safety Evaluation Framework\_V3.0을 기반으로 오류 주입 시나리오를 도출하였다.

MRC 검증을 위한 시뮬레이션 환경은 dSPACE 사의 ASM(Automotive Simulation Models)이다. 차량 동역학 모델, 센서 모델 등 자동차 시스템 및 환경이 모델링 되어 있으며 Matlab/Simulink 환경을 기반으로 실행된다.

표 6. 센서 고장 오류 주입 시나리오

시나리오 No.1			
시나리오 카테고리/라벨	DDT Fallback / Sensor Failure		
구분	속성	세부 속성	속성값
시험 조건	도로	자동차 전용	제한속도 80
		차로 수	2개
		차로 넓이	3.5m
	날씨	낮-맑음	2000 Lux 이상
시작위치	시작위치	SV	2차로 (x=5, y=5.25)
		TV	2차로 (x=50, y=5.25)
DDT Fallback 요인	시스템 고장	고장 유형	1. 센서 고장 2. 엣지 인프라 고장
		영향	객체 정보 미제공
안전 관련 매개변수	TV	유형	세단
		색깔	파란색
	Fallback Trigger	속도	1. 80km/h 2. 50km/h
		속도	80km/h
		1.상대 위치	$D_x = 45m$
		2.차차 속도	$V_x = 50km/h$
장면1			
장면2			

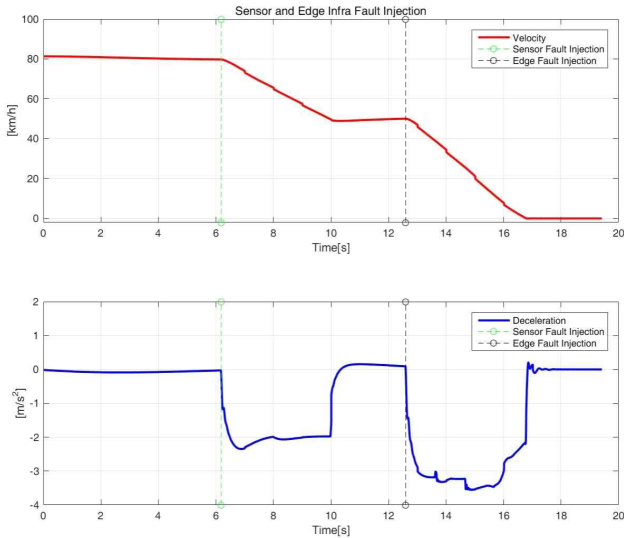


그림 2 센서 및 엣지 인프라 오류 주입 시나리오 결과

그림2는 센서 및 엣지 인프라 오류 주입 시나리오의 결과를 보여준다. 해당 시나리오에는 주행 중 약 6초에 센서의 고장을 주입하여 객체 정보가 미제공 되지만 엣지 인프라의 정보를 받아 감속 주행 중 3초 후 엣지 인프라의 오류를 주입하여 비상 정지를 수행하는 모습을 보여주며 MRC를 달성하는 결과를 보여준다.

### III. 결론

본 논문에서는 엣지 기반 자율주행시스템의 MRC 평가를 위한 시뮬레이션 환경을 구축하였다. 자율주행차량의 센서 및 엣지 인프라의 기능을 정의하고 오작동 분석 및 오류 주입 시나리오를 정의하여 시뮬레이션 환경을 테스트하였다. 시뮬레이션 환경 구축을 통해 엣지 인프라 기반 자율주행시스템의 오류 상황에서 MRC 수행을 검증할 수 있었고 이러한 결과는 다양한 시나리오에서 차량을 검증할 수 있는 시뮬레이션 환경이 구축되었음을 보여준다.

향후 HILS(Hardware In the Loop Simulation) 환경에서 오류 주입 시나리오와 엣지 기반 자율주행시스템의 Fallback MRC 검증을 진행할 수 있도록 시뮬레이션 환경을 구축할 예정이다.

### ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 정보통신기획평가원 자율주행 기술개발 혁신 사업(과제 번호 : 2021-0-00697)의 지원을 받아 수행된 연구임(과제명 : 엣지 기반 자율주행 기능의 Fallback MRC에 따른 운영권 SW 안전성 및 대응방안 검증 기술 개발)

### 참 고 문 헌

- [1] Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles, SAE Standard J3016, pp. 15-16, Rev. Jun. 2018.
- [2] Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles, SAE Standard J3016, Sect. 5.4, p. 30, Rev. Jun. 2018.
- [3] Road Vehicles - Safety and Cybersecurity for Automated Driving

Systems - Design, Verification and Validation, ISO/TR 4804:2020, Sect. 6.3, p. 15, 2020.

- [4] Road vehicles - Functional safety, ISO 26262-5:2018, 2018.
- [5] T. Dunj6, V. Fthenakis, J. A. Vilchez, and J. Arnaldos, "Hazard and operability (HAZOP) analysis. A literature review," J. Hazard. Mater., vol. 173, no. 1-3, pp. 19-32, Jan. 2010.