

자율주행시스템의 위험 최소화 기동에 대한 운행 안전성 평가 방법에 관한 연구

이 명 수¹⁾ · 정 경 환¹⁾ · 김 봉 섭¹⁾ · 임 태 호¹⁾ · 윤 경 수¹⁾ · 한 동 석²⁾

지능형자동차부품진흥원¹⁾ · 경북대학교 전자전기공학부²⁾

A Study on Driving Safety Evaluation Methods for Minimal Risk Maneuver of Automated Driving System

Myungsu Lee¹⁾ · Kyunghwan Jeong¹⁾ · Bongsoob Kim¹⁾ · Taeho Lim¹⁾ · Kyungsu Yun¹⁾ · Dongseog Han^{*2)}

¹⁾Korea Intelligent Automotive Parts Promotion Institute, 201 Gukgasandanse-ro, Guji-myeon, Dalseong-gun, Daegu 43011 Korea

²⁾School of Electronics and Electrical Engineering, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

(Received 18 October 2024 / Revised 1 November 2024 / Accepted 7 November 2024)

Abstract : This paper proposes a framework for evaluating operational safety in DDT fallback situations that may occur during autonomous driving. A safety assessment algorithm for MRM is also presented. The framework outlines the evaluation requirements for DDT fallback, scenario design, experimental methods, and analysis techniques. The safety assessment algorithm for MRM validates vehicle safety rates and proposes evaluation metrics for collision risks in both front and rear of the vehicle, based on predicted collision time and intensity. Simulations are conducted to differentiate use when stopping within the lane and stopping in a safe zone under unified DDT fallback conditions, with each MRM timing evaluated. The difference in front collision risk for stopping within the lane at various MRM timings was found to be approximately 17 %, while the rear collision safety rate was approximately 99.2 %. When stopping in a safe zone, the difference in front vehicle collision risk due to lane change attempts was approximately 65 %, with a rear collision safety rate of about 98 %. This confirms the validity of the proposed algorithm. Future research will focus on enhancing operational safety evaluation methods by establishing the criteria for assessing failures in autonomous driving systems and combinations of conditions leading to deviations from ODD.

Key words : Automated driving system(자율주행시스템), DDT fallback(동적운전작업 폴백), Minimal risk maneuver(위험 최소화 기동), Minimal risk condition(위험 최소화 상태), Safety evaluation(안전성 평가)

Nomenclature

TTC : time to collision, s

$D_{x,sv}$: subject vehicle deceleration, m/s²

$D_{x,tv}$: target vehicle deceleration, m/s²

Subscripts

ADS : automated driving system

DDT : dynamic driving task

MRM : minimal risk maneuver

MRC : minimal risk condition

ODD : operational design domain

COD : current operational domain

OEDR : object and event detection and response

BTN : braking threat number

STN : steering threat number

DTC : diagnostic trouble code

ASM : automotive simulation model

UNECE : united nations economic commission for europe

JAMA : Japan automobile manufacturers association

*Corresponding author, dshan@knu.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.

1. 서론

최근 자율주행 기술은 도로 내 인프라와 인공지능 기술 융합을 통해 자율주행 서비스 확대와 상용화를 목표로 하고 있으며, 기술의 신뢰성과 안전성 향상을 목표로 연구가 활발히 진행되고 있다.^{1,2)} 주요 연구 주제로는 도로 인프라와 V2X 통신 융합을 통한 자율주행 차량 센서의 공간 및 물리적 한계와 강화학습을 통한 인지, 판단, 제어 알고리즘의 성능 향상 등이 있다.^{3,4)} 이 외에도 교통약자를 위한 이동 서비스와 교통 사고 예방 및 개선 등 사회적 편의 제공과 문제 해결을 위한 기술로 주목받고 있다.⁵⁾

자율주행 기술의 정의는 SAE의 J3016 표준에 따라 설명된다.⁶⁾ 자율주행 기술은 Lv.0부터 Lv.5까지 총 6단계로 분류되며 Lv.3부터는 Lv.5까지는 ADS로 지칭된다. ADS는 특정 ODD와 관계없이 전체 DDT를 지속적으로 수행할 수 있는 하드웨어 및 소프트웨어를 포함한다. Lv.3과 Lv.4 ADS는 제한된 ODD 내에서 DDT를 수행하며 DDT fallback 상황에서 운전자의 개입 요청을 할 수 있다. Lv.3은 운전자 개입 요청에 운전자의 대응이 필요하지만 Lv.4의 경우 운전자 대응이 없을 경우 시스템이 MRC를 달성해야 한다. 그리고 Lv.5의 ADS는 ODD 제한되지 않고 DDT를 수행하며, DDT fallback 상황에서도 ADS가 MRC를 달성해야 한다. DDT는 실 도로 환경에서 운행되므로 시간과 공간의 특성에 따라 교통사고, 공사 구간 등 돌발 상황과 도로 구조물, 날씨 등 가변적인 ODD의 특성으로 인한 잠재적 위험에 노출된다. 따라서 ODD Exit와 System failure로 인한 DDT fallback 상황에서의 안전성을 확보하기 위한 MRC 달성 과정에 대한 평가 체계와 제도적 방안이 중요하다.⁷⁾

DDT fallback 관련 선행 연구로는 Fallback 안전성 평가를 위한 테스트 시나리오 생성 요구사항 및 MRC 대응 방안에 관한 연구,⁸⁾ Lv.4 이상 Fallback 전략 구조와 Fallback 상황 시나리오 제안을 통한 시뮬레이션 타당성 검증 연구,^{9,11)} ADS의 고장으로 인한 DDT fallback 상황에서의 MRC 달성을 위한 안전 제약 모델과 예측 제어 모델 제안 연구,¹²⁾ Event sequence diagram 기반 DDT fallback 상황 기반 MRC 프로세스 제안을 통한 원격 모니터링 역할 연구¹³⁾ 등이 있으며 이들 연구는 DDT fallback 상황에서 MRC 달성을 위한 전략을 특징으로 제어 기법과 평가 시나리오 설계 방법에 중점을 두고 있으며, MRC 달성 과정에 대한 평가 지표는 부족하였다.

다음 DDT fallback 및 ADS 평가와 관련된 표준에 대해서는 ISO TC 22과 204에서 담당 및 제정을 진행하고 있다. 도로 차량 운전 자동화 시스템의 분류와 DDT

fallback과 MRC 등 용어 정의 관련 표준으로는 ISO/SAE PAS 22736이 있으며 ADS의 기능안전과 검증 관련 표준으로는 ISO 26262, ISO 21448, ISO 4804 표준이 있다. 그리고 DDT fallback과 관련된 표준으로는 MRC 달성을 위한 MRM 분류 프레임워크 관련 ISO 23793-1과 저속 자율주행 운행 요구사항 관련 ISO 22737이 있다. 더 나아가 ISO 34501부터 34505까지 자율주행 평가 프레임워크 관련 표준이 제정 및 개발 진행되고 있다. DDT fallback 관련 표준들은 DDT fallback 상황과 MRC 달성에 대한 구체적인 정의와 평가 방법 및 운행 안전성을 검증하기 위한 기준이 보완될 필요가 있다.

따라서 본 논문에서는 DDT fallback 상황에서 MRC 달성을 위한 안전성 평가 프레임워크와 MRM 시점의 운행 안전성 평가 방법을 제안하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 1장의 서론에 이어 2장 배경 및 관련 연구에서는 자율주행 평가 프레임워크와 DDT fallback을 설명한다. 다음 3장 본문에서 DDT fallback과 MRC 과정에 대한 운행 안전성 평가 프레임워크와 MRM 시점에 대한 안전성 평가 방법을 제안한다. 그리고 4장 실험에서는 DDT fallback 평가 시나리오를 시뮬레이션하여 제안된 MRM 시점에 대한 안전성을 분석한다. 마지막으로 5장에서는 결론 및 향후 연구를 소개한다.

2. 배경 및 관련 연구

2.1 자율주행 평가 프레임워크 개요

자율주행 서비스 상용화에 있어 기술의 신뢰성과 안전성에 대한 평가가 중요하다. 이에 국가별로 차량 및 시스템 안전성 확보를 위해 형식승인과 자기인증 제도를 채택하여 안전기준의 적합성을 인증하고 ISO 표준과 UN규정을 준용하여 자율주행시스템 관련 평가 지침과 정책을 개발하고 있다.¹⁴⁾

2018년 NHTSA의 ADS 평가 관련 프레임워크의 경우 교통의 안전성과 이동성을 향상시킬 수 있는 ADS의 예비 평가를 목적으로 ADS 기능, ODD, OEDR에 대한 정의와 세분화, ADS 기능 실패와 고장 영향에 대한 전략 분석 방법, ADS 평가 시나리오 구성요소와 설계 방법, ADS 평가 기준과 절차에 대한 종합적인 프레임워크를 제안하고 있다.¹⁵⁾

2021년 일본 JAMA의 ADS 평가 프레임워크의 경우 ADS 개발 단계에 따른 안전성을 검증할 때 안전성과 개발 효율 향상을 목적으로 ADS 안전 논증 구조, 시나리오 기반 안전 보증 프로세스, 시나리오 구조, 데이터베이스로 구분하여 제안하고 있다. 종합적으로 ADS의 위험 요

인과 시나리오 구성요소에 대한 체계와 상세 분류 및 안전성 판정에 대한 가이드라인을 개발하여 제시하고 있다. 무한히 많은 운행 환경과 교통 상황에 있어 ADS의 인지, 판단, 제어 별 물리적인 변수를 논리적으로 분해하고 시나리오 구조화 방법을 제안한다.¹⁶⁾

2022년 시나리오 기반 안전 평가 프레임워크 관련 ISO 34502 표준에서는 평가 대상의 안전 시험 목표를 기반으로 평가 공간을 분석하여 시나리오를 도출하며 이를 통한 시험과 결과를 확인하는 단계로 구성되어 있다. 더 나아가, 자율주행 평가 대상은 자율주행과 관련된 기능과 성능 및 서비스에 따라 평가 대상을 선정할 수 있으며 안전 시험 목표는 ADS 관련 규정과 표준, 명세서 등을 참고하여 시험 시나리오의 합격과 시험 종료 기준과 같은 안전 특성에 대한 종합적인 시험 목표를 명세화할 수 있다. 그리고 평가 공간과 시나리오 도출은 평가 시나리오의 공간 분석을 통해 위험 요소를 식별하고 시나리오를 구조화하는 과정을 규정하고 있다. 이를 통해 시뮬레이션과 주행시험장 및 실 도로와 같이 현실과 가상 시험 환경을 통해 시험을 진행하고 안전 시험 목표 달성 여부를 확인할 수 있다.¹⁷⁾

2.2 DDT Fallback 개요

2021년 발표된 ISO/SAE PAS 22736 표준에 따르면 DDT fallback 정의는 ADS 전술적 기능과 운행 기능을 포함한 DDT의 성능 관련 System failure 또는 ODD exit 시 DDT를 수행하거나 MRC 상태로 도달하기 위한 사용자 또는 ADS의 대응으로 정의하고 있다.

MRC 상태는 주어진 여행을 계속할 수 없거나, 또는 계속하지 않아야 할 경우 충돌 위험을 줄이기 위해 사용자 또는 ADS가 DDT fallback 수행을 통하여 달성 가능한

차량의 안정적이고 정지된 상태로 정의하고 있다.¹⁸⁾ 더 나아가, 2024년 발표된 MRM 프레임워크 관련 ISO 23793-1 표준에서는 MRM 상태 다이어그램과 중·횡방향 제어 성능에 따른 MRM 타입을 Traffic lane stop과 Road shoulder stop으로 하고 있다.¹⁹⁾

자율주행 평가 프레임워크와 DDT fallback에 대한 표준과 규정을 요약하면 평가 프레임워크 구성요소는 ADS 기능 및 ODD와 위험 요인 분석을 기반으로 평가 시나리오를 설계하고 실험을 통해 평가의 타당성을 검증하는 절차로 진행되고 있다. 또한, DDT fallback 상황은 DDT 성능 관련 시스템 고장과 ODD exit 조건의 조합에 따라 발생하며 ADS 성능 능력과 가변적인 도로 교통 상황을 기반으로 운행 안전성이 확보된 MRM 기동을 통해 MRC를 달성하도록 권고하고 있다.

현재 DDT fallback 대응 기술의 경우 MRM과 MRC에 대한 개념 수준이며 상세한 평가 프레임워크와 평가 기준이 보완될 필요성이 있다. 따라서 3장 본문에서 관련 안전성 평가 프레임워크와 MRM 시점에서의 안전성 평가 방법을 제안한다.

3. 본 론

3.1 DDT Fallback 평가 프레임워크

DDT fallback 평가 프레임워크는 ISO 26262와 ISO 34502 표준을 참고하여 Fig. 1과 같이 구성된다.

첫 번째 DDT fallback 평가 관리 단계에서는 평가 대상과 범위를 선정하고 위험 식별, 평가 방법 및 절차 설계 등 평가와 관련된 요구사항을 분석한다. 본 논문에서의 평가 대상과 범위는 Lv.4 DDT fallback 상황에서 MRC 달성까지 자율주행시스템의 운행 안전성 대응 능력으로 설정하였으며 Fig. 2와 같이 ADS 사양서 및 표준과 규정

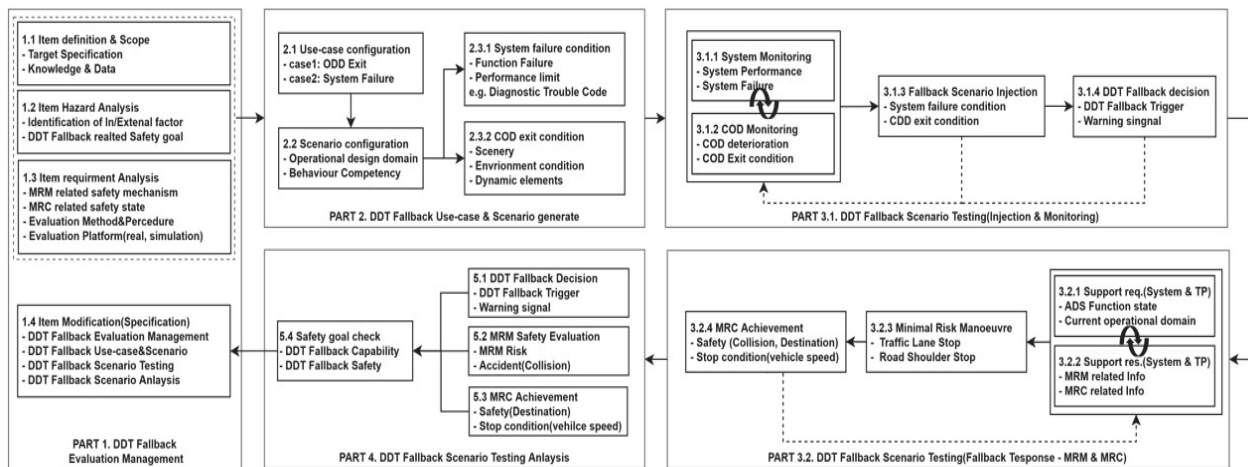


Fig. 1 Framework of DDT fallback evaluation

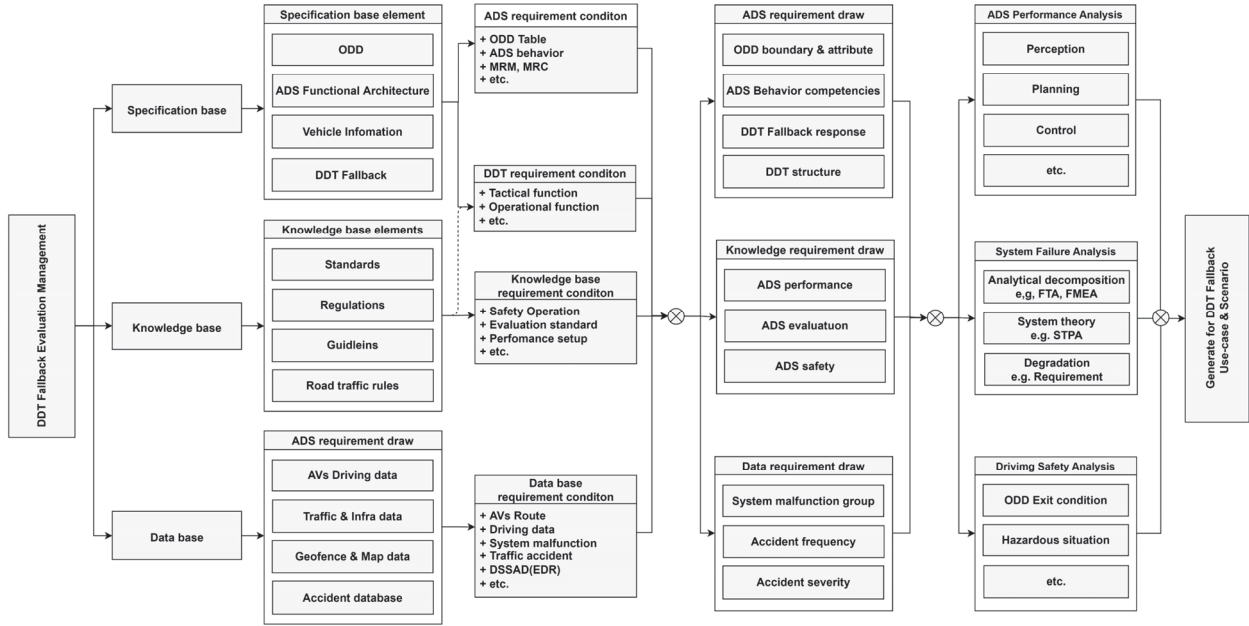


Fig. 2 Requirements of scenario based on framework

등 지식기반과 교통사고 통계 및 자율주행 운행 정보와 같은 데이터를 통해 세부적으로 설정하여 분석할 수 있다. 그리고 평가를 위한 위험 식별은 DDT 성능 관련 System failure와 ODD exit와 같이 ADS의 내·외부 위험 요인 식별을 통해 DDT fallback에 대한 안전 목표를 정의할 수 있다.

이를 기반으로 요구사항 분석 단계에서는 MRM과 MRC에 대한 안전기준과 구체적인 평가 방법 및 절차 설계를 통해 적합한 시험 플랫폼을 선정할 수 있으며 더 나아가 실험 결과와 데이터를 피드백 받을 수 있다.

두 번째 DDT fallback 시나리오 생성 단계에서는 DDT fallback 상황 조건의 유즈케이스로 구분하여 평가 시나리오를 설계한다. 시나리오 설계 방법은 ISO 34503 표준을 준용하여 ODD와 ADS의 행동 역량을 바탕으로 일반적인 자율주행 평가 시나리오를 생성한 다음 DDT fallback 상황 조건의 유즈케이스에 따라 Functional, Abstract, Logical, Concrete 시나리오 세분화 과정을 통해 평가 시나리오를 설계하였다.

DDT fallback 조건에 있어 System failure는 DDT 성능 관련 시스템 고장으로 기능 고장과 성능 한계에 대한 DTC로 설정하였다. 그리고 ODD exit는 COD의 Scenery와 기 설계된 ODD의 Environment condition의 Exit 조건과 Dynamic elements의 돌발 행동과 같은 비정상적인 행위의 조합으로 설계하였다.

세 번째 DDT fallback 시나리오 평가 단계에서는 시험 환경 기반 시나리오를 주입하고 DDT fallback과 MRC 달

성 과정을 평가하는 단계이며 시험 환경은 실 도로, 주행 시험장, 시뮬레이션으로 구분할 수 있으며 시나리오 재현을 및 위험도를 기반으로 시험 환경을 선택할 수 있다. 그리고 시나리오 평가 요소는 DDT fallback 상황 판단, MRM 판단 및 기동, MRC 여부로 구분하였다. 구체적으로 DDT fallback 상황 확인은 DDT 성능 관련 시스템 고장과 성능 요소와 COD의 Exit 조건과 악화에 대한 모니터링을 통하여 DDT fallback 시나리오 주입 시점에 따른 DDT fallback 상황 확인과 경고 신호 표출 여부를 확인한다. 다음 MRM 판단 및 기동 과정은 DDT 성능 관련 ADS 상태와 COD에 대한 정보를 자차 판단 시스템으로 전달하여 MRM과 MRC에 대한 정보를 제공받아 MRM을 판단하고 기동한다. 추가로 DDT fallback 상황 대응이 가능한 관계와 같이 제 3자의 대응 요청을 포함한다. 그리고 MRM과 MRC에 대한 정보는 ADS 능력과 운행 상황에 따라 유동적인 특성을 가지며 MRC 여부는 MRM을 통해 차량의 안전한 상태로 안전지대와 같은 목적지 도착 또는 정차 상태로 확인한다.

네 번째 DDT fallback 시나리오 결과 분석 단계는 시나리오 평가 과정의 데이터를 통해 DDT fallback 판단, MRM 안전성 평가, MRC 기준을 종합하여 운행 안전성을 분석하는 단계이다. DDT fallback 판단은 DDT fallback 주입 시점과 대상 자율주행시스템이 DDT fallback을 판단하는 시점 간 차이로 안전 대응 능력을 평가 지표이다. 다음 MRC 달성 기준은 DDT fallback 발생 후 MRM을 통한 MRC 예상 시간과 실제 MRC 시간의 차이

를 통해 DDT fallback 대응 능력을 평가하는 지표이다. 더 나아가 DDT fallback 판단과 MRC 기준은 자율주행시스템의 성능적인 측면이며 본 논문에서는 MRM 안전성 평가 방법에 있어 MRM 기동 시점에서 운행 안전성을 평가 알고리즘을 제안한다.

3.2 자율주행 MRM 안전성 평가 알고리즘

본 논문에서의 MRM 안전성 평가 알고리즘은 대상 자율주행 차량 기준으로 객체의 거리와 속도를 기반충돌 예상 시간 지표와 강도를 기반으로 설계된 충돌 위험도 판단 알고리즘이다. 대표적인 시간 기반 충돌 위험도 판단 알고리즘은 TTC 방식이 있으며 잠재적 충돌 근접성을 나타내는 지표이며 차량 충돌까지의 소요 시간을 나타낸다. TTC는 객체 간 등속도 운동을 유지한다고 가정을 하며 정밀한 동역학 특성 반영이 어려운 단점이 있으나 임계치 기준 등을 조정하여 NCAP(New Car Assessment Program)과 ADAS(Advanced Driver Assistance System) 평가에 널리 사용된다.²⁰⁾ 다음으로 강도 기반 지표는 차량 가속도, 제동력, 조향력 등 차량 동작 강도를 기준으로 위험 상황의 심각성을 정량적으로 평가한다. 대표적인 강도 기반 충돌 위험도 판단 알고리즘은 BTN과 STN이 있다.^{21,22)} 두 알고리즘은 식 (3)과 식 (4)와 같이 운행 차로의 전방 객체를 대상으로 판단되기에 인접 차로와 후방 차량에 대한 고려가 필요하다. 따라서 본 논문에서 제안하는 알고리즘은 기존 TTC, STN, BTN 알고리즘을 기반으로 자율주행 차량의 운행 차로와 인접 차로의 전·후방에 대한 충돌 위험도 판단 알고리즘을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 운행 안전성 평가 알고리즘은 식 (1)과 같이 DDT fallback 발생 후 MRM 기동 시점에서의 β 와 ϵ 의 조합에 따라 4가지 범주로 구성되어 있다. β 는 차로 변경 시 인접 차로 후방 차량의 종방향 운동 상태를 고려하여 대상 차량과의 충돌 여부를 나타내는 지표이다.²³⁾ ϵ 는 동일 차로 내 대상 차량과 전방 차량의 TTC를 기준으로 차로 유지의 안전도를 확인하는 지표로 식 (2)와 같다.

α 는 평가 대상 차량 기준으로 차로 변경의 방향을 나타내는 요소이며 γ 는 동일 차로 내 대상 차량과 전방 차량 간 BTN 1인 지점까지 거리와 대상 차량과 후방 차량 간 TTC 기준 환산된 추가 안전거리 비를 이용한 MRM 수행 시점에서의 후방 안전율이다.

$$\delta = \begin{cases} \min[(BTN+\gamma), (STN+BTN_\alpha)], & \text{for } \beta = 0 \text{ and } \epsilon = 0 \\ (BTN+\gamma), & \text{for } \beta = 1 \text{ and } \epsilon = 0 \\ (STN+BTN_\alpha), & \text{for } \beta = 0 \text{ and } \epsilon = 1 \\ Mitigation\ strategy, & \text{for } \beta = 1 \text{ and } \epsilon = 1 \end{cases} \quad (1)$$

$$\alpha = \begin{cases} left \\ right \end{cases}$$

$$\beta = \begin{cases} 1, & d_x < d_{crit} \quad i.e. \text{ collision} \\ 0, & otherwise \end{cases}$$

$$d_{crit} = \frac{v_{tv}^2}{2D_{tv,max}} - \frac{v_{sv}^2}{2D_{sv,max}} \quad (2)$$

$$\epsilon = \begin{cases} 1, & \text{for } TTC_f \leq TTC_{f,limit} \\ 0, & otherwise \end{cases}$$

$$TTC_f = -\frac{x_{rel}}{v_{rel}} = \frac{x_{tv,front} - x_{sv}}{-(v_{x,tv,front} - v_{x,sv})}$$

$$\gamma = \frac{dTTC}{dBTN}, \quad 0 \leq \gamma$$

$$dTTC = \begin{cases} d_{limit} - d_x, & \text{for } d_{TTC} \geq 0 \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (3)$$

$$d_{limit} = v_{rel}TTC_{r,limit} = (v_{x,sv} - v_{x,tv,rear})TTC_{r,limit}$$

$$BTN = \begin{cases} BTN \geq 1, & i.e. \text{ collision} \\ BTN < 1, & i.e. \text{ avoidance} \end{cases}$$

$$BTN = \frac{D_{x,req}}{D_{sv,max}} \quad (4)$$

$$D_{x,req} = D_{x,tv} + D_{x,sv}$$

$$= D_{x,tv} + \frac{v_{x,rel}|v_{x,rel}|}{2d_x}, \quad D_{x,req}, D_{x,tv} \leq 0$$

$$STN = \begin{cases} STN \geq 1, & i.e. \text{ collision} \\ STN < 1, & i.e. \text{ avoidance} \end{cases}$$

$$STN = \frac{A_{y,req}}{A_{y,max}}$$

$$A_{y,req} = \frac{2y_{eva}}{TTC_f^2} \quad (5)$$

$$y_{eva} = \begin{cases} \frac{w_{sv} + w_{tv}}{2} + d_y & \text{for right turn} \\ \frac{w_{sv} + w_{tv}}{2} - d_y & \text{for left turn} \end{cases}$$

식 (2) β 에 대한 d_x 는 대상 차량과 타겟 차량 간 종방향 상대 거리이며, d_{crit} 의 경우 대상 차량과 타겟 차량의 현재 속도 및 최대 감속능력을 고려한 충돌 거리이다. v_{tv} 와 v_{sv} 는 타겟 차량과 대상 차량의 종방향 속도이며 $D_{sv,max}$ 와 $D_{tv,max}$ 는 대상 차량과 타겟 차량 최대 감속도로 제동 성능을 의미한다. ϵ 에 대한 TTC_f 는 타겟 차량

이 대상 차량의 전방 상황에서의 TTC 이다. x_{tv} 는 대상 차량의 종방향 좌표이며 $x_{tv,front}$ 와 $v_{x,tv,front}$ 는 대상 차량 전방의 타겟 차량이 위치할 때의 종방향 좌표와 속도다. $TTC_{f,limit}$ 는 대상 차량의 전방 차량과 대상 차량 간 TTC_f 의 안전 임계값으로 본 연구에서 2 s로 설정하였다.

식 (3) γ 에 대한 d_{TTC} 는 후방 차량과 대상 차량에 요구되는 필요 안전거리 d_{limit} 가 현재 상대거리 d_x 를 침범한 만큼의 거리이며 d_{limit} 은 TTC_r 기준으로 환산된 대상 차량과 타겟 차량 간 필요 안전거리이다. 그리고 $TTC_{r,limit}$ 은 대상 차량과 후방 차량 간 TTC_r 의 안전 임계값이다. 다음으로 $d_{BTN} = v_{x,rel} |v_{x,rel}| / 2D_{x,req}$ 은 전방 타겟 차량과 대상 차량의 상대속도, 회피를 위한 필요 감속도 기반한 BTN 1인 시점까지 거리이다.

식 (4)의 BTN은 동 차로의 대상 차량과 타겟 차량 감속도에 대한 제동력 기반 충돌 회피 난이도이다. $D_{x,req}$ 는 대상 차량과 타겟 차량의 상대 거리와 상대 속도 그리고 타겟 차량의 감속도를 기반으로 충돌을 피하기 위해 요구되는 감속도 값이다. $D_{x,tv}$ 는 타겟 차량의 감속도이며 $v_{x,rel}$ 는 전방 차량과 후방 차량 간 상대 속도이다.

식 (5)의 STN의 경우 동 차로 내 대상 차량과 타겟 차량의 최대 횡가속도 기반 조향 능력을 기반한 충돌 회피 난이도이다. $A_{y,req}$ 는 대상 차량의 횡방향 이동 거리 및 전방 차량과의 TTC를 기반으로 충돌을 회피하기 위해 요구되는 횡가속도 값이다. y_{eva} 는 충돌을 회피하기 위해 요구되는 최소 횡방향 이동 거리이며 w_{tv} , w_{sv} 는 타겟 차량과 대상 차량의 차량 너비이다. 그리고 d_y 는 타겟 차량의 중심선과 대상 차량 중심선의 수직거리로 표현되는 횡방향 간격이다.

4. 실험

4장에서는 MRM 운행 안전성 평가 알고리즘을 기반으로 DDT fallback 시나리오 설계 및 시뮬레이션을 통해 제안 알고리즘의 타당성을 분석한다. 본 실험에 사용된 시뮬레이션은 dSPACE 社의 VEOS 플랫폼과 ASM 및 ModelDesk Tool을 사용하였다. VEOS는 가상 전자제어 장치 및 네트워크 기반 시뮬레이션 플랫폼이며 ASM은 차량 동역학과 센서 및 교통 환경 Tool이다. ModelDesk Tool은 모델 매개 변수화와 시뮬레이션을 위한 그래픽 사용자 인터페이스로 시나리오 편집기와 도로 생성기 등을 지원한다. 이를 기반으로 시나리오 구성요소를 설계하였으며 대상 차량과 목표 차량의 제원은 전장 4.9 m, 전고 2.01 m로 동일시켰으며 최대 종방향 감속도와 최대 횡방향 가속도는 -6.64 m/s^2 , 5.9 m/s^2 로 설정하였다.

4.1 실험 시나리오

본 논문에서 실험한 시나리오는 동일한 DDT fallback 조건으로 MRC 달성을 위한 MRM 기동 시점 차이에 따른 운행 안전성 평가 목적으로 설계하였다. 실험 시나리오의 유즈 케이스는 MRM 분류에 따라 Traffic lane stop 과 Road shoulder stop으로 구분하였으며 Fig. 3과 Fig. 4와 같으며 각 시나리오 그림은 DDT fallback trigger에 대한 장면으로 MRM 수행 시점은 그림 하단과 같이 MRM active timing #1과 #2로 표시하였다. 그림 내 SV는 대상 차량이며 TV는 주변 타겟 차량이다.

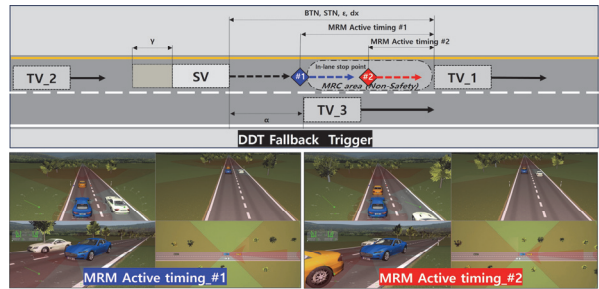


Fig. 3 Traffic lane stop scenario

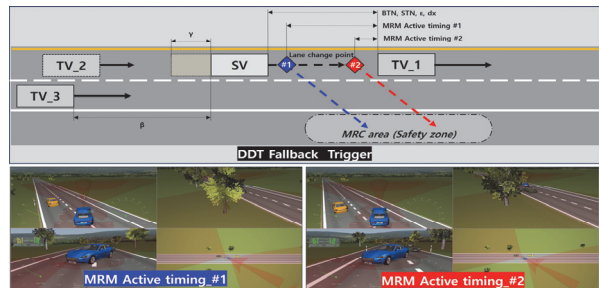


Fig. 4 Road shoulder stop scenario

4.2 실험 결과

Traffic lane stop 시나리오 실험 결과는 Fig. 5와 Fig. 6과 같다. 본 논문에서 제안하는 운행 안전성 평가 알고리즘에 따라 식 (1)과 같이 DDT fallback 발생 후 MRM 기동 시점에서의 β 값은 1과 ϵ 값 0으로 MRM active timing #1과 #2 시점에서의 BTN 값은 약 0.08과 0.25로 17% 충돌 위험성의 차이가 있으며 동 차로 내 후방 차량과 충돌 안전율은 약 99.4%와 99%로 산출되었다. 두 시나리오는 차로 내 정차를 통해 MRC 달성이 가능하였으나 실제로 운행 환경 조건과 시스템 성능을 고려할 시 MRM active timing #2 시점에서 전방 차량의 충돌 위험성이 높아질 것으로 해석된다. Road shoulder stop 시나리오 실험 결과는 Fig. 7과 Fig. 8과 같다. 식 (1)과 같이 DDT fallback

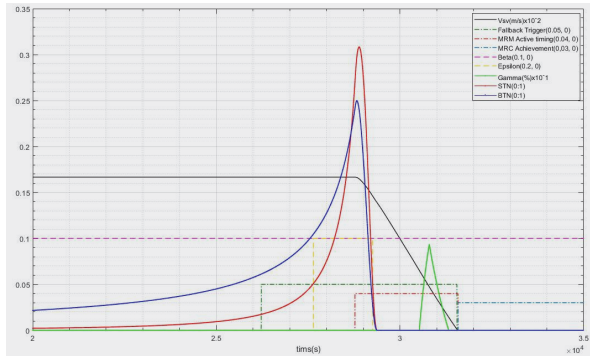


Fig. 5 Traffic lane stop scenario result (#1)

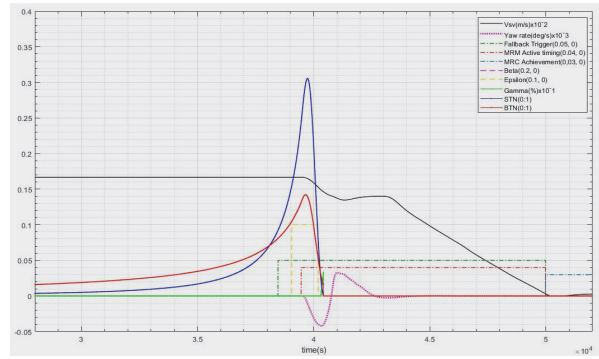


Fig. 7 Road shoulder stop scenario result (#1)

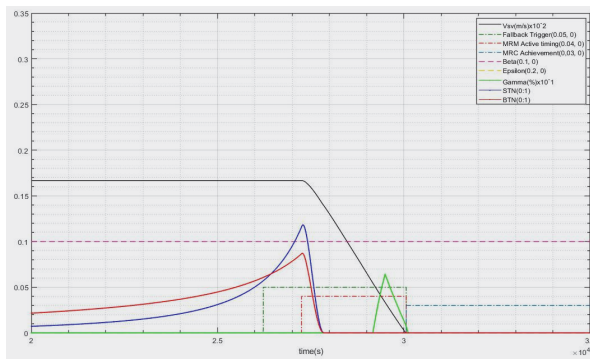


Fig. 6 Traffic lane stop scenario result (#2)

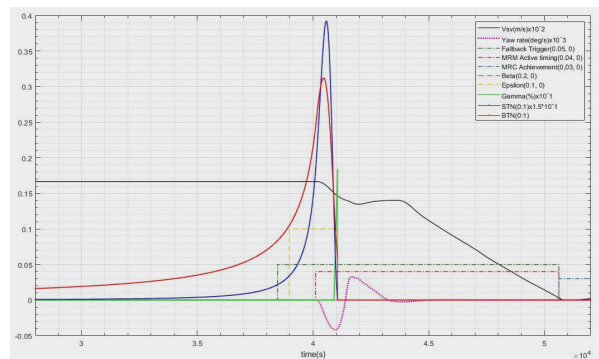


Fig. 8 Road shoulder stop scenario result (#2)

발생 후 MRM 기동 시점에서의 β 값은 0과 ϵ 값 1로 MRM active timing #1과 #2 시점에서 STN 값은 약 0.25, 0.9로 65% 충돌 위험성의 차이가 있으며 차로 변경에 따른 후방 충돌 안전율은 약 99.7%와 98.1%로 산출되었다. 두 시나리오 모두 안전지대까지 차로 변경을 통해 MRC 달성이 가능하였으나 실 도로 운행 환경과 시스템 성능을 고려할 시 #2 시점에서는 전방 차량 충돌 위험성이 매우 높을 것으로 판단된다.

실험 결과를 정리하면 DDT fallback 발생에 따라 MRM 기동 시점에서 β 와 ϵ 의 조합에 통해 MRM 운행 안전성 평가 지표를 기반으로 차량의 충돌 위험성을 판단하여 알고리즘의 타당성을 확인하였으며 DDT fallback 상황의 MRC 달성 과정에 있어 MRM 시점에서 운행 안전성이 낮을 경우 실제 운행 조건과 상태에 따라 기 설계된 MRM 능력의 한계가 발생할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 DDT fallback 상황에서 MRC 달성을 위한 MRM 안전성 평가 방법에 대하여 DDT fallback 기반 자율주행 운행 안전성 평가 프레임워크와 MRM 평가 알고리즘을 제안하였다. 그리고 DDT fallback 평가 시나리

오를 시뮬레이션하여 제안된 알고리즘에 대한 자율주행 운행 안전성의 타당성을 확인하였다.

Traffic lane stop 시나리오 평가 결과는 MRM 시점 별 전방 충돌 위험성이 약 17%, 후방 충돌 안전율이 약 0.4% 차이를 가졌으며 Road shoulder stop 시나리오 평가 결과는 MRM 시점 별 전방 충돌 위험성이 약 65%, 후방 충돌 안전율이 약 1.6% 차이를 가졌다. 더 나아가 MRM 시점에 대한 운행 안전성을 고도화하기 위해서 System failure와 ODD exit의 명확한 기준과 발생 조건의 조합에 따라 평가 시나리오의 위험도를 구분하여 체계적인 평가 프로세스가 필요하다. 향후 연구 주제로 Vehicle in the loop 시스템을 통해 다양한 DDT fallback 상황에서의 자율주행 안전성 평가 연구를 진행하고자 한다.

후 기

본 논문은 정보통신기획평가원 자율주행기술개발혁신사업(과제번호 2021-0-00697)의 지원을 받아 수행된 연구임(과제명: 옛지 기반 자율주행 기능의 Fallback MRC에 따른 운영권 SW 안전성 및 대응방안 검증 기술 개발).

References

- 1) L. Hobert, A. Festag, I. Llatser, L. Altomare, F. Visintainer and A. Kovacs, "Enhancements of V2X Communication in Support of Cooperative Autonomous Driving," *IEEE Communications Magazine*, Vol.53, No.12, pp.64-70, 2015.
- 2) N. Decarli, A. Guerra, C. Giovannetti, F. Guidi and B. M. Masini, "V2X Sidelink Localization of Connected Automated Vehicles," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.42, No.1, pp.120-133, 2024.
- 3) B. R. Kiran, I. Sobh and V. Talpaert, "Deep Reinforcement Learning for Autonomous Driving: A Survey," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol.23, No.6, pp.4909-4926, 2022.
- 4) Đ. Petrović, R. M. Mijailović and D. Pešić, "Persons with Physical Disabilities and Autonomous Vehicles: The Perspective of the Driving Status," *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol.164, pp.98-110, 2022.
- 5) Ó. Silva, R. Cordera, E. González-González and S. Nogués, "Environmental Impacts of Autonomous Vehicles: A Review of the Scientific Literature," *Science of The Total Environment*, Vol.830, 2022.
- 6) On-road Automated Driving(ORAD) Committee, "Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems," *SAE Standard J3016*, pp.1-16, 2014.
- 7) B. Coll-Perales, J. Schulte-Tiggles, M. Rondinone, J. Gozalvez, M. Reke and D. Matheis, "Prototyping and Evaluation of Infrastructure-Assisted Transition of Control for Cooperative Automated Vehicles," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol.23, No.7, pp.6720-6736, 2022.
- 8) S. Lee and H. Yun, "A Study for Fallback MRC of Autonomous Vehicles," *KSAE Fall Conference Proceedings*, pp.384-386, 2021.
- 9) S. K. Lee and H. J. Yun, "A Study of Fallback MRC Driving Strategy for Autonomous Vehicles," *KSAE Spring Conference Proceedings*, pp.446-447, 2024.
- 10) S. K. Lee and H. J. Yun, "Design of Edge-Based Fallback MRC Interface for Autonomous Vehicles," *KSAE Annual Conference Proceedings*, pp.541-542, 2023.
- 11) H. Yu and F. Luo, "Fallback Strategy for Level 4+ Automated Driving System," *Proceedings of the IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, pp.156-162, Auckland, New Zealand, 2019.
- 12) W. Xue, B. Yang, T. Kaizuka and K. Nakano, "A Fallback Approach for an Automated Vehicle Encountering Sensor Failure in Monitoring Environment," *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp.1807-1812, 2018.
- 13) M. A. Ramos, C. Correa Jullian, J. McCullough, J. Ma and A. Mosleh, "Automated Driving Systems Operating as Mobility as a Service: Operational Risks and SAE J3016 Standard," *Annual Reliability and Maintainability Symposium(RAMS)*, pp.1-6, 2023.
- 14) S. Kwon, *The Improvement of Automotive Cybersecurity Certification System*, Master's Thesis, Dankook University, 2023. <https://www.riss.kr/link?id=T16837022>
- 15) E. Thorn, S. Kimmel and M. Chaka, *A Framework for Automated Driving System Testable Cases and Scenarios*, U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, 2018.
- 16) Japan Automobile Manufacturers Association, *Automated Driving Safety Evaluation Framework Ver.2.0*, Retrieved Oct. 11, 2024, from https://www.jama.or.jp/english/reports/docs/Automated_Driving_Safety_Evaluation_Framework_Ver2.0.pdf
- 17) ISO/TC22/SC33, *Road Vehicles: Test Scenarios for Automated Driving Systems-Scenario Based Safety Evaluation Framework(ISO 34502)*, International Organization for Standardization, 2022.
- 18) C. Lee, K. Ok, S. Shin and S. Hong, "Edge-Based Fallback Mechanism for Autonomous Vehicles at Autonomous Driving Level 4+," *Korean Institute of Communications and Information Sciences Fall Conference Proceedings*, pp.805-806, Jeonnam, Korea, 2021.
- 19) ISO/TC204, *Minimal Risk Maneuver(MRM) for Automated Driving-Part 1: Framework, Straight-Stop and In-Lane Stop(ISO 23793-1)*, International Organization for Standardization, 2024.
- 20) D. Åsljung, J. Nilsson and J. Fredriksson, "Comparing Collision Threat Measures for Verification of Autonomous Vehicles Using Extreme Value Theory," *IFAC-PapersOnLine*, Vol.49, pp.57-62, 2016.
- 21) A. Andersson, *Multi-Target Threat Assessment for Autonomous Emergency Braking*, Master's Thesis, Chalmers University of Technology, 2016.
- 22) S. Hosseini, N. Murgovski, G. R. de Campos and J. Sjoberg, "Adaptive Forward Collision Warning Algorithm for Automotive Applications," *American*

Control Conference(ACC), Vol.105, pp.5982-5987, 2016.

- 23) C. Wang, C. Popp and H. Winner, "Acceleration-Based Collision Criticality Metric for Holistic Online Safety Assessment in Automated Driving," IEEE Access, Vol.10, pp.70662-70674, 2022.