

## 자율주행 안전성 평가 시나리오 개발 및 검증

채흥석\* · 정용환\* · 이명수\*\* · 신재곤\*\* · 이경수\*

### Development and Validation of Safety Performance Evaluation Scenarios of Autonomous Vehicle

Heungseok Chae\*, Yonghwan Jeong\*, Myungsu Lee\*\*,  
Jaekon Shin\*\*, Kyongsu Yi\*

*Key Words* : Automated vehicle(자율주행 자동차), Evaluation scenarios(평가 시나리오), Extraordinary service permission (임시운행 허가), Safety evaluation factors(안전성 평가 항목)

#### ABSTRACT

Regulation for the testing and operation of automated vehicles on public roadways has been recently developed all over the world. For example, the licensing standards and the evaluation technology for automated vehicles have been proposed in California, Nevada and EU. But specific safety evaluation scenarios for automated vehicles have not been proposed yet. This paper presents safety evaluation scenarios for extraordinary service permission of automated vehicles on highways. A total of seven scenarios are selected in consideration of safety priority and real traffic situation. Six scenarios are relevant with lane keeping and one scenario is relevant with lane change. All scenarios are developed based on existing ADAS evaluation scenarios and repeated simulation of automated vehicle algorithm. Safety evaluation factors as well as scenarios are developed. The safety factors are based on existing ADAS ISO requirements, ADAS safety factors and current traffic regulations. For the scenarios, a hunter vehicle is needed in addition to automated vehicle evaluated. The hunter vehicle performs multiple roles like preceding vehicle, cut-in vehicle and so on. The hunter vehicle is also automated vehicle equipped with high performance GPS, radar and Lidar. All the scenarios can be implemented by driving a lap on a KATRI ITS test track. These scenarios and safety evaluation factors are investigated via both a computer simulation and an experimental vehicle test on the test track. The experimental vehicle test was conducted with two automated vehicles, which are the evaluated vehicle and the hunter vehicle.

#### 1. 서론

자동차는 인구의 증가와 함께 보유량과 밀도가 기하급수적으로 증가하여, 우리나라를 기준으로 1가구 당 1

대 이상의 자동차를 보유하게 되었다. 이로 인해

도로 정체 및 교통사고 발생 빈도가 급격히 증가하게 되었으며, 이는 인적, 물적 자원의 손실 및 사회적 비용 지출의 증가를 야기하였다.

자동차 사고의 90%는 운전자의 주행부담으로 인한 부주의에 기인한다. 센서나 통신을 이용해 운전자의 인지 범위 이상의 주행 환경을 사전에 판단하여 운전자의 반응시

\* 서울대학교 기계항공공학부

\*\* 교통안전공단 자동차안전연구원

E-mail : gmdtjr@snu.ac.kr

간을 향상시키거나 차량이 운전자 대신 능동적인 운전을 한다면 이러한 사고를 경감시킬 수 있을 것이다. 이에 따라 전 세계 차량 제작 업체들은 운전자와 보행자의 안전 확보를 위한 다양한 운전자 지원 제어 시스템(Advanced Driver Assistance System)들이 개발되고 양산되기 시작하였다. 또한 개별 운전자 지원 제어 시스템의 통합 제어 시스템 개발과 더 나아가 자동차 기술의 궁극적인 목표인 자율 주행 차량 개발에 힘쓰고 있다.<sup>(1),(2)</sup>

세계 곳곳에서 자율주행 자동차의 시범 주행 및 법규를 개발하고 있다. 최근에 구글, 폭스바겐, 아우디, BMW, 다임러-벤츠 등이 일반 도로 상에서의 자율주행 자동차 시험 주행을 실시하고 있으며, 캘리포니아 주나 네바다 주와 같은 일부 지역에서는 자율주행 자동차 시험 운행 면허를 공식적으로 발급하고 있다.<sup>(3),(4)</sup> EU에서는 2014년부터 Adaptive라는 자율주행 평가 기술 프로젝트를 개발을 시작하였다. 그러나 현재 자율주행 자동차 시험 운행 면허 발급 기준은 실 도로 상에서 주행하게 될 자율주행 자동차 안전성 검증에 대한 부분은 미비하다.<sup>(5)</sup> 따라서 자율주행 자동차가 실 도로를 주행함에 있어서 발생할 수 있는 여러 상황에 대한 안전성 확보 여부를 확인 할 수 있는 평가 방안이 요구되는 상황이다.

본 논문은 자율주행 자동차의 임시운행 허가를 위한 안전성 평가 시나리오와 평가 항목을 제시하려고 한다. 자율주행 자동차가 자동차 전용 도로에서 안전하게 운행하기 위한 최소한의 요건을 확인하는 시나리오를 제안한다. 또한 시나리오에서 평가해야 할 요구 사항을 구체적으로 제시하여 현실적인 안전 성능 평가방안을 구성하였다.

## 2. 개별 요소 기술 규정

본 논문의 대상인 자동차 전용도로에서의 자율주행 자동차는 개별 ADAS 요소 기술인 ACC, AEB, 그리고 LKAS의 통합 시스템이다. 따라서 자율주행 평가시나리오 개발에 앞서 개별기술인 ADAS 시스템의 기존 성능 평가 규정을 조사했다.

### 2.1. 적응형 순항 제어 장치 (ACC)

ISO에서 규정하고 있는 ACC 성능 평가는 직선로 인지 거리 성능, 선행 차량 식별 성능, 그리고 곡선로 선행 차량 식별 성능으로 구성되어 있다. 직선로 인지 거리 성능 평가는 2초 이내에 인지 가능한 최대 거리를 평가한다. 선행 차량 식별 성능 평가는 직선로에서 자차선과 옆

차선에 존재하는 각각의 선행 차량의 인지여부를 평가한다. 이는 복수의 선행차량이 존재하는 경우, 다른 차선의 차량을 오인식 하지 않고 정상 추종하는지 검증하는 테스트이다. 곡선로 선행 차량 식별 성능 평가는 곡선로에서 전방 선행차량에 대한 정상적 인지 여부를 평가한다. 또한 곡선로에서 선행 차량이 감속했을 때 자차량의 거동도 평가대상이다.<sup>(6)</sup>

### 2.2. 자동 긴급 제동 시스템(AEBS)

Euro NCAP에서 규정하고 있는 AEBS 성능 평가는 City와 Inter-Urban 두 가지 경우로 나누어진다. City 시나리오의 경우, 자차량 속도 10~50km/h 영역에 대해 정지 타겟에 대한 AEBS 성능 평가를 다루고 있다. Inter-Urban 시나리오의 경우, 자차량 속도 30~80km/h 영역에 대해 정지 타겟, 이동 타겟, 감속 타겟에 대한 AEBS 성능 평가를 다루고 있다.<sup>(7)</sup> ISO에서 규정하고 있는 AEBS 성능 평가는 2가지 테스트 시나리오가 있다. 하나는 정지 전방차량에 대한 고속 접근으로 선행차량의 속도가 0km/h이고 자차량 초기 속도가 80km/h, 선행차량과의 초기 차간거리가 120m인 경우이다. 두 번째는 정지 저속차량에 대한 고속 접근으로 선행차량 속도는 30km/h, 자차량 초기속도는 80km/h, 선행차량과의 초기 차간거리는 120m인 경우이다. 테스트 시나리오에서 평가하는 기준안은 다음과 같다. 자동긴급제동 1.4초 이전에 1개 이상의 경고를 제공, 0.8초 이전에 2개 이상의 경고를 제공, 충돌시점에서 10km/h이상의 속도감소, TTC 3초 이전에 긴급제동이 발생하지 않을 것. 이 조건들의 만족여부를 평가한다.

### 2.3. 차선 유지 보조 시스템(LKAS)

ISO에서 규정한 LKAS 성능 평가는 반경 800m의 곡선 구간에서 72km/h~108km/h의 속도 범위 내에서 가속도, LKAS 작동 범위 등을 평가한다. NHTSA에서 규정한 시나리오의 경우 72km/h에서 진행하는 차량에 대해 0.6m/s 이상의 횡방향 속도에서부터 차선 이탈 방지 성능이 유지되는 최대 속도까지 성능 테스트를 실시한다.<sup>(8)</sup>

## 3. 차선 유지 시나리오 및 안전성 평가항목

자율주행 차량의 주행은 크게 차선 유지, 차선 변경으로 이루어져 있다. 차선 유지가 대부분의 비율을 차지하므로 차선 유지의 성능을 평가하는 시나리오를 총 5가지

로 아래와 같이 개발하였다. 시나리오뿐만 아니라 시나리오에서 평가할 안전성 평가요소도 개발하였다. 평가요소를 통해 임시운행 허가의 기준요소로 정할 수 있다. 시나리오 및 평가요소 개발은 앞에서 조사한 개별 ADAS 요소 기술 규정 및 자율주행 시뮬레이션에 기반한다.<sup>(9),(10)</sup>

### 3.1. 자차선 단독주행

자차선 단독주행은 Fig. 1과 같은 직선-곡선 변화도로에서 종방향 제어와 횡방향 제어가 통합적으로 이루어지면서 차선 유지 여부를 평가하는 시나리오이다. 안전성 평가항목은 차선 유지, 속도, 횡방향 가속도, 종방향 가속도이다.

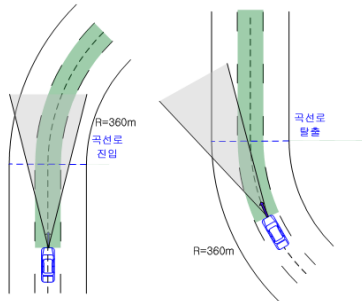


Fig. 1 Test scenario No. 3.1

### 3.2. 자차선 정체주행

선행차량 정체주행은 혼잡구간 주행지원 시스템(TJA) 기능을 평가하는 시나리오이다. Fig. 2와 같이 정지, 출발을 반복하는 앞 차량을 추종하면서 자동차 전용도로에서 빈번하게 발생하는 정체상황을 대응하는지 평가한다. 안전성 평가항목은 차선 유지, 횡방향 가속도, 속도, 차간 거리이다.

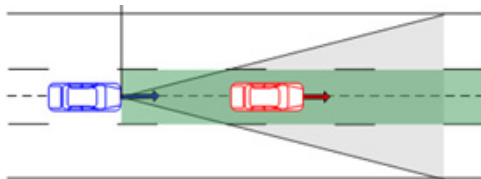


Fig. 2 Test scenario No. 3.2

### 3.3. 선행차량 추종주행

선행차량 추종주행은 앞의 3.1 시나리오에서 선행차량이 추가된 경우이다. 따라서 차선 유지뿐 아니라 선행

차량과의 안전도 유지를 평가하는 시나리오이다. 안전성 평가항목은 차선 유지, 횡방향 가속도, 종방향 가속도, 차간 거리이다.

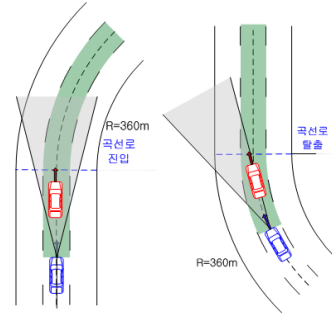


Fig. 3 Test scenario No. 3.3

### 3.4. Cut-out차량 대응주행

Cut-out차량 대응주행은 선행 차량이 옆 차선으로 차선 변경할 때 대응을 평가하는 시나리오이다. 선행 차량을 추종하다 선행 차량이 빠질 경우, 자율주행 차량이 기존의 단독 주행 상태로 회복하는지 평가한다. 안전성 평가항목은 차선 유지, 속도, 횡방향 가속도, 차간 거리이다.

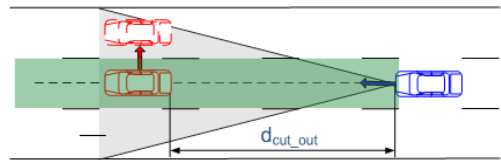


Fig. 4 Test scenario No. 3.4

### 3.5. Cut-in차량 대응주행

Cut-in차량 대응주행은 앞의 차량이 끼어드는 상황을 평가하는 시나리오이다. 자율주행 차량이 Cut-in차량에 대응해서 안전하게 반응하는지 평가한다. 안전성 평가항목은 차선 유지, 종방향 가속도, 차간 거리이다.

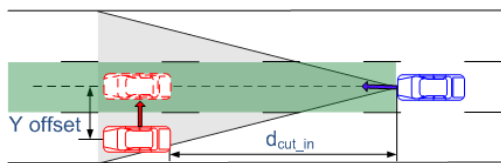


Fig. 5 Test scenario No. 3.5

### 3.6. 차선 유지 시나리오의 안전성 평가요소

총 5개의 차선유지 시나리오에는 각각 평가해야 하는 안전성 평가항목이 존재한다. Table 1에 안전성 평가 요소와 근거가 있다. 차선 유지는 모든 시나리오에서 평가하는 항목으로 차선과의 횡방향 offset을 근거로 차선 유지를 평가한다. 속도 항목은 고속도로로 규정속도를 지키는지 평가한다. 횡방향 가속도, 종방향 가속도는 ISO기준을 근거로 한다. 선행차량과 유지해야 하는 최소 차간 거리는 150명의 운전자 데이터를 기반으로 선정하였다.<sup>(11)</sup>

Table 1 Design specifications omars 12000

평가항목	평가내용	근거
차선유지	횡방향 offset 차선 유지	차선 내 유지
속도	$50km/h < Vx < 110km/h$	고속도로 주행속도
종방향 가속도	$-3m/s^2 < Ax < 2m/s^2$	ISO 기준(ACC)
횡방향 가속도	$ Ay  < 3m/s^2$	ISO 기준(LKAS)
차간거리	$C < 2m$	운전자 Data

## 4. 차선 변경 시나리오 및 안전성 평가요소

본 장에서는 앞 장에서 개발한 차선 유지 시나리오 외에 차선 변경을 평가하는 시나리오 및 평가요소를 개발하였다.

### 4.1. 차선 변경 시나리오

본 논문에서 개발한 자율주행 자동차 차선 변경 평가 시나리오는 Fig. 6과 같다. 파란색의 차량은 자율주행 차량으로써 평가를 받는 대상차량이다. 빨간색의 차량은 헌터 차량으로서 차선 변경 시나리오를 도와주면서 자율주행 차량을 평가하는 차량이다. 헌터 차량은 기본적으로 자율주행 차량으로 적응형 순항 제어 장치(ACC)와 자동 긴급 제동 시스템(AEB)이 장착되어 있다. 초록색의 차량은 정지되어 있는 차량으로 사고로 인해 정지된 차량 혹은 공사 중인 상황을 나타낸다. 자율주행 차량이 전방의

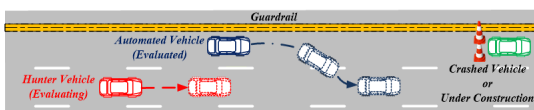


Fig. 6 Test scenario No. 4.1

정지 물체에 대한 위험을 인지하고 차선 변경을 할 때 측 후방 차량의 거동에 미치는 영향으로부터 차선 변경 안전도를 평가한다.<sup>(12)</sup>

### 4.2. 차선 변경 시나리오의 안전성 평가요소

#### 4.2.1. AEB 작동여부

본 연구에 사용된 충돌경보지수 기반 AEB 알고리즘의 작동 여부는 자율주행 차량의 차선 변경의 안전도를 판단하는 주요 항목이 된다. 차선 변경 시 측 후방 차량의 반응은 차선 변경 안전에 중요 지표임으로 타겟 차량의 AEB 작동 여부는 차선 변경 안전성 평가항목이 될 수 있다. AEB가 작동하면 자율주행 차량의 차선 변경 기능이 문제가 있다고 판단할 수 있다. 자율주행 차량이 차선 변경 시 헌터 차량의 AEB가 작동되지 않으면 통과이고 AEB가 작동되면 통과 실패다.



Fig. 7 AEB activation or inactivation

#### 4.2.2. 정지차량으로부터 거리

정지 차량으로부터 거리는 자율주행 차량이 전방의 정지 차량과의 충돌을 판단하고 차선 변경을 결정하는 시점을 나타내는 안전성 평가항목이다. 너무 늦게 차선 변경을 시도하면 전방의 정지차량과 충돌위험이 있으므로 적당한 거리의 여유를 두고 차선 변경이 필요하다.

자율주행 차량이 차선 변경을 할 때, 차선 변경 시작 시점이 중요 지점이다. 정지 차량과 충돌 위험이 있을 때, 조향 조작으로 피할 수 있는 최소한의 거리는 식 (1)에 근거한다. 이 최소한의 거리보다 먼 거리에서 차선 변경을 진행하는지 평가한다.

$$\begin{aligned}
 d_s &= \sqrt{\frac{2s_y}{a_y}} \cdot v_{rel} \text{ (Last point to steer)} \\
 s_y &= 1.9m \text{ (vehicle width)} \\
 a_y &= 2m/s^2 \text{ (emergency lateral acceleration)} \\
 v_{rel} &= v_{ego} - v_{stop} \text{ (relative velocity)}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

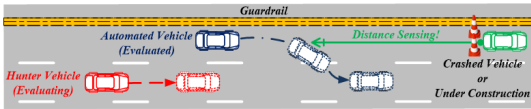


Fig. 8 Distance from stopped vehicle

## 5. 시나리오 구현 및 검증

### 5.1. 고속주회로 기반 시나리오 구현

본 논문에서 개발한 자율주행 안전성 평가 시나리오는 차선 유지 5개, 차선 변경 1개로 총 6개이다. 자율주행 입시운행 허가를 위한 시나리오로써 평가의 반복성 및 간편성을 위해서 6개의 시나리오를 통합 구현하였다. 원형 트랙인 교통안전공단 고속주회로를 이용해서 Fig. 10과 같이 6개의 시나리오를 통합하였다. 원형 트랙에 6개의 순서를 배치하였다. 순서는 평가 받는 자율주행 차량과 평가를 도와주는 헌터 차량의 각 시나리오 별 차선 위치, 역할 등을 고려하였다. 따라서 1번의 원형 트랙 왕복 주회로 6개의 자율주행 안전성 평가 시나리오를 수행할 수 있다. 시나리오 구현에는 평가 받는 자율주행 차량과 평가를 도와주고 시나리오를 구현하는 헌터 차량, 총 2대의 자율주행 차량이 사용된다.

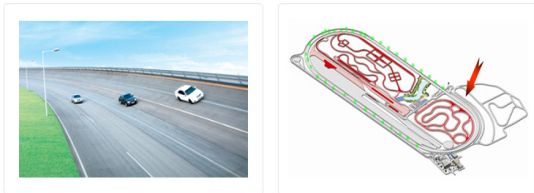


Fig. 9 High speed circuit in KATRI

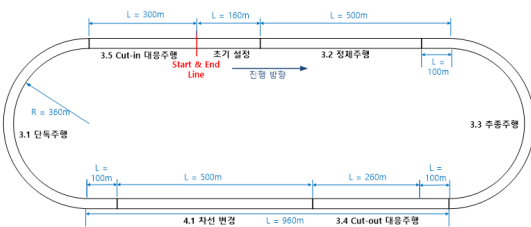


Fig. 10 High speed circuit based implementation scenarios

### 5.2. 헌터 자율주행 차량

본 논문에서 개발한 자율주행 안전성 평가 시나리오들

은 기본적으로 평가 받는 자율주행 차량 외에 평가를 도와주고 시나리오를 구현하는 헌터 차량 한대가 더 필요하다. 실제 개발한 시나리오의 정확하고 간편한 구현을 위해서 헌터 차량에 자율주행 차량을 사용하였다. 사용된 자율주행 차량은 Fig. 11과 같다. 주변 환경 인지를 위해 카메라, Radar, Lidar가 사용되었다. 카메라는 차선 인지, Radar는 차량 인지, Lidar는 장애물을 인지한다. 인지된 정보를 바탕으로 컴퓨터 및 Autobox를 이용해서 판단 및 요구 제어값을 결정하고 조향, 가감속 제어를 통해 자율주행을 한다. 헌터 차량에는 고속주회로 기반 시나리오 구현을 위해 미리 알고리즘에 요구 행동이 정해져 있다.

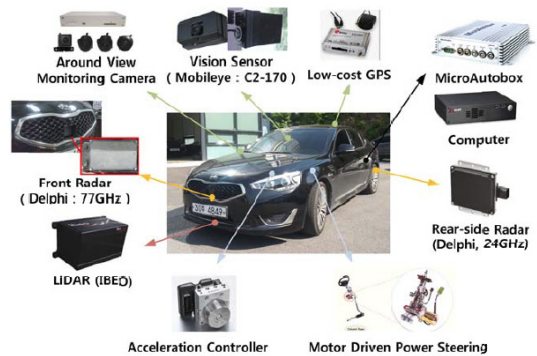


Fig. 11 Configuration of hunter vehicle (evaluating vehicle)

### 5.3. 실차 실험 기반 시나리오 검증

본 논문에서 개발한 시나리오의 적정성을 평가하기 위해 실제 고속주회로에서 실차 실험을 진행하였다. 평가 받는 평가 자율주행 차량과 평가를 도와주는 헌터 자율주행 차량을 이용해서 진행하였다. 모든 시나리오는 성공적으로 수행되었고 3.2, 3.5시나리오의 실차 결과를 다음과 같이 제시하였다.

Fig. 12는 3.2 정체주행 시나리오 실차 데이터이다. (a)를 보면 헌터 차량의 속도에 맞게 평가 차량이 가감속을 하는 것을 볼 수 있다. (b), (c)를 통해 안전성 평가 요소에 부합하게 종방향 가속도, 차간 거리가 유지되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 13은 3.5 Cut-in차량 대응주행 시나리오 실차 데이터이다. (a)를 보면 헌터 차량이 60~80초에 Cut-in을 하는 것을 알 수 있고 이에 따라 (b)를 통해 평가 차량이 감속하는 것을 볼 수 있다. (c), (d)를 통해 안전성 평가 요소에 부합하게 종방향 가속도, 차간 거리가 유지되는 것을 볼 수 있다.

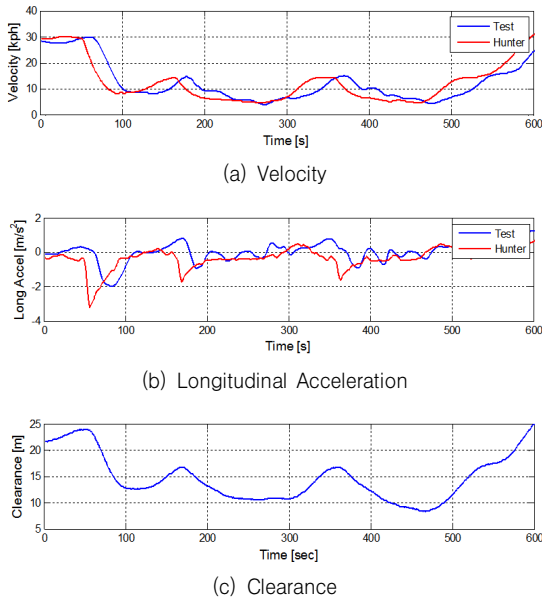


Fig. 12 Vehicle test results of 3.2 Scenario

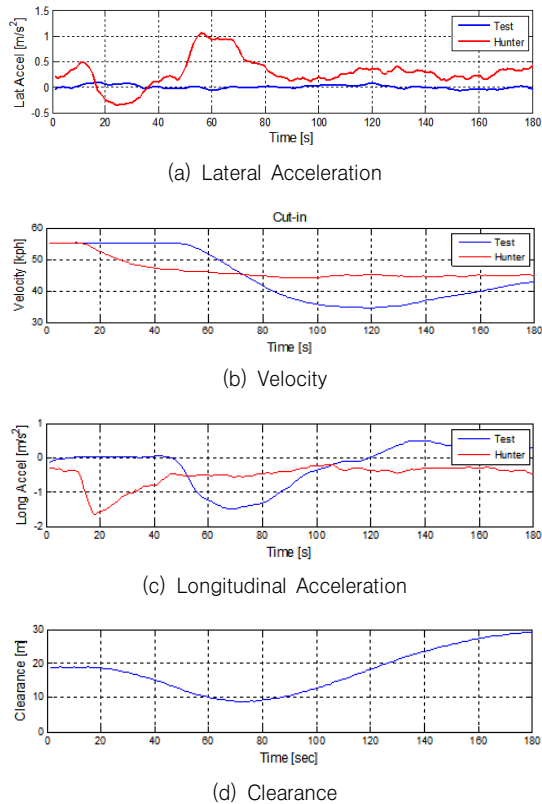


Fig. 13 Vehicle test results of 3.5 Scenario

## 6. 결론

본 연구에서는 자율주행 차량의 임시운행 허가를 위한 평가 시나리오를 개발하였다. 평가 시나리오는 크게 차선 유지 및 차선 변경 시나리오로 구성된다. 차선 유지 5개, 차선 변경 1개로 총 6개의 시나리오를 개발하였고 각 시나리오 별 안전성 평가항목을 개발하였다. 평가항목의 달성 여부를 통해 시나리오의 합격 여부를 정한다. 개발한 시나리오 및 평가항목은 자율주행의 개별 요소 기술인 ADAS의 기술 규정 및 자율주행 차량 시뮬레이션에 기반한다.

본 논문에서 개발한 자율주행 안전성 평가 시나리오는 평가의 반복성 및 간편성을 위해서 6개의 시나리오를 통합 구현하였다. 원형 트랙인 교통안전공단 고속주회로를 이용해서 6개의 시나리오 순서를 배치하였다. 순서는 평가 받는 자율주행 차량과 평가를 도와주는 헌터 차량의 각 시나리오 별 차선 위치, 역할 등을 고려하였다. 시나리오 구현에는 평가 받는 자율주행 차량과 평가를 도와주고 시나리오를 구현하는 헌터 차량, 총 2대의 자율주행 차량이 사용된다. 개발한 자율주행 안전성 평가 시나리오 및 평가항목의 적정성을 검증하기 위해 고속주회로에서 실차 실험을 진행하였다.

본 연구의 기대효과는 추후에 개발된 여러 자율주행 차량의 평가를 위해 사용될 수 있다. 자율주행 차량이 실제 도로에서 주행하기 전에 충분한 사전 안전성 평가가 필요하다. 자율주행 차량의 임시운행 허가나 상용화 단계에 큰 기대효과를 얻을 수 있다. 본 연구의 향후 연구로 더 다양한 도로 상황의 시나리오 개발이 필요하다. 추월하는 시나리오, 고속도로의 합류점, 분기점, 톨게이트, 도심 환경의 교차로 등의 좀 더 복잡한 도로 상황의 시나리오가 필요하다.

## 후 기

본 연구는 국토교통부 및 국토교통과학기술진흥원의 연구비지원(16PTSI-C054118-08)과 2016년 BK21플러스 사업과 the Institute of Advanced Machines and Design (IAMD), Seoul National University에 의하여 수행된 연구임.

## 참고문헌

- (1) Kyong-Su Yi, 2014, "Vehicle Dynamics Control Applications to Automobiles: Survey and Some

- New Trends”, Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol. 20, No. 3, pp. 298~312.
- (2) Bengler, K., Dietmayer, K., Farber, B., Maurer, M., Stiller, C., and Winner, H., 2014, “Three decades of driver assistance systems: review and future perspectives”, IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, Vol. 6, No. 4, pp. 6~22.
  - (3) California Department of Motor Vehicles, Adopted Regulations for Testing of Autonomous Vehicles by Manufacturers, 2014.
  - (4) Nevada Department of Motor Vehicles, Autonomous Vehicle Testing License, 2013.
  - (5) Felix Fahrenkrog, 2014, “Evaluation of automated driving functions”, ITS Europe.
  - (6) ISO, ISO 15622 Intelligent transport systems – adaptive cruise systems – performance requirements and test procedures, 2010.
  - (7) Euro NCAP, Euro NCAP AEB Test Protocol, 2013.
  - (8) ISO, ISO 11270 Intelligent transport systems – lane keeping assistance systems – performance requirements and test procedures, 2014.
  - (9) Yonghwan Jeong, 2015, An evaluation scenario of safety performance for extraordinary service permission of autonomous vehicle, KASA Spring Conference Proceedings.
  - (10) Moon, Seungwuk, and Kyongsu Yi, “Human driving data-based design of a vehicle adaptive cruise control algorithm”, Vehicle System Dynamics 46.8 (2008): 661–690.
  - (11) 채홍석, et al., “자율주행 자동차 임시운행 허가를 위한 안전 성능 평가 시나리오”, 한국자동차공학회 논문집 24.5 (2016): 495–503.
  - (12) 채홍석, et al., 2015, “자율주행 차량 차선 변경 평가 시나리오 개발”, 대한기계학회 창립 70주년 기념 학술대회.