

## 자율주행 차량 차선 변경 평가 시나리오 개발

Lane Change Evaluation Scenario Development of Automated Vehicles

---

저자 (Authors)	채흥석, 정용환, 이명수, 민경찬, 이경수 Heongseok Chae, Yonghwan Jeong, Myungsu Lee, Kyongchan Min, Kyongsu Yi
출처 (Source)	<a href="#">대한기계학회 춘추학술대회</a> , 2015.11, 1778-1783(6 pages)
발행처 (Publisher)	<a href="#">대한기계학회</a> The Korean Society of Mechanical Engineers
URL	<a href="http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE06575960">http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE06575960</a>
APA Style	채흥석, 정용환, 이명수, 민경찬, 이경수 (2015). 자율주행 차량 차선 변경 평가 시나리오 개발. 대한기계학회 춘추학술대회, 1778-1783
이용정보 (Accessed)	한양대학교 166.***.167.63 2020/05/25 15:57 (KST)

---

### 저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

### Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

## 자율주행 차량 차선 변경 평가 시나리오 개발

채흥석<sup>\*†</sup> · 정용환<sup>\*</sup> · 이명수<sup>\*\*</sup> · 민경찬<sup>\*\*</sup> · 이경수<sup>\*</sup>

## Lane Change Evaluation Scenario Development of Automated Vehicles

Heongseok Chae<sup>\*†</sup>, Yonghwan Jeong<sup>\*</sup>, Myungsu Lee<sup>\*\*</sup>, Kyongchan Min<sup>\*\*</sup> and Kyongsu Yi<sup>\*</sup>**Key Words:** Automated vehicle(자율주행 자동차), Evaluation scenario(평가 시나리오), Lane change(차선 변경), Safety evaluation factors(안전성 평가항목)

## 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 for autonomous vehicles have been proposed in California and Nevada. However, safety performance evaluation scenarios for automated vehicles have not been proposed yet. It is important to comprehensively evaluate the safety performance of automated vehicles before they are produced and deployed. This paper presents lane change evaluation scenario of automated vehicles. Because lane change is frequently happened in driving situation, lane change evaluation is crucial. The scenario evaluates safety of automated vehicles changing lane, utilizing target vehicle placed on rear-side (next lane) of automated vehicles. The target vehicle is equipped with adaptive cruise control and auto emergency braking based on human driver data. Safety evaluation factors in lane change situation are also developed. This scenario is investigated via computer simulation.

## 1. 서 론

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

세계 곳곳에서 자율주행 차량의 시범 주행 및 법규를 개발하고 있다. 최근에 구글, 폭스바겐, 아우디, BMW, 다임러-벤츠 등이 일반 도로 상에서의 자율주행 차량 시험 주행을 실시하고 있으며, 캘리포니아 주나 네바다 주와 같은 일부 지역에서는 자율주행 차량 시험 운행 면허를 공식적으로 발급하고 있다. 그러나 현행 자율주행 차량 시험 운행 면허 발급 기준은 실 도로 상에서 주행하게 될 자율주행 차량 안전성 검증에 대한 부분은 미비하다. 특히 운전 중 빈번하게 발생하게 되는 차선 변경 상황에 대한 평가 방안은 구체적으로 제시되지 않았다.

본 논문은 차선 변경 상황에서 자율주행 차량에 대한 안전성 평가 시나리오와 평가 항목을 제시하려고 한다. 적응형 순항 제어 장치 (ACC), 자동 긴급 제동 시스템 (AEB)가 장착된 평가 차량을 이용해서 자율주행 차량이 차선 변경을 안전하게 하는지 평가한다.

†채흥석, 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : gmdtjr@snu.ac.kr

TEL : (02)880-1942 FAX : (02)

\* 서울대학교 기계항공공학부

\*\* 교통안전공단 자동차안전연구원

## 2. 자율주행 자동차 차선 변경 평가 시나리오 및 평가 차량

### 2.1 차선 변경 시나리오

본 논문에서 개발한 자율주행 자동차 차선 변경 평가 시나리오는 Fig 1과 같다. 파란색의 차량은 자율주행 차량으로써 평가를 받는 대상차량이다. 빨간색의 차량은 타겟 차량으로써 자율주행 차량을 평가하는 차량이다. 타겟 차량에는 적응형 순항 제어 장치 (ACC)와 자동 긴급 제동 시스템 (AEB)가 장착되어 있다. 초록색의 차량은 정지되어 있는 차량으로 사고로 인해 정지된 차량 혹은 공사 중인 상황을 나타낸다. 자율주행 차량이 전방의 정지 물체에 대한 위험을 인지하고 차선 변경을 할 때 측 후방 차량의 거동에 미치는 영향으로부터 차선 변경 안전도를 평가한다. 구체적인 차선 변경 평가 상황은 아래 Table 1과 같다. 평가 차량의 초기 위치가 자율주행 차량의 24m 후방인 이유는 ISO 권장 속도 간 차간거리의 75%로 정한 값이다. 60km/h의 설정 이유는 고속도로 제한 최저 속도를 기준으로 잡았기 때문이다.

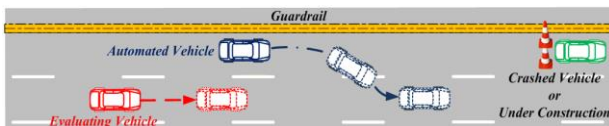


Fig 1 Lane change evaluation scenario

Table 1 Conditions in lane change evaluation scenario

Vehicle	Initial position	Velocity
Automated vehicle (Blue)	0m, first lane	60km/h
Evaluating vehicle (Red)	-24m, second lane	60km/h
Crashed vehicle (Green)	150m, first lane	Stop

### 2.2 ACC, AEB가 탑재된 평가 차량

위의 차선 변경 시나리오에서 자율주행 차량을 평가하는 평가 차량은 ACC, AEB가 탑재되어 있다. Fig 2와처럼 상위 제어기로 ACC, AEB가 탑재되어서 상황에 따른 Desired acceleration을 계산한다. 하위 제어기로는 자유 모델 순항 제어 (MFCC)가 탑재되어 Desired acceleration를 내기 위한 가속 페달량, 브레이크 페달량을 결정한다.

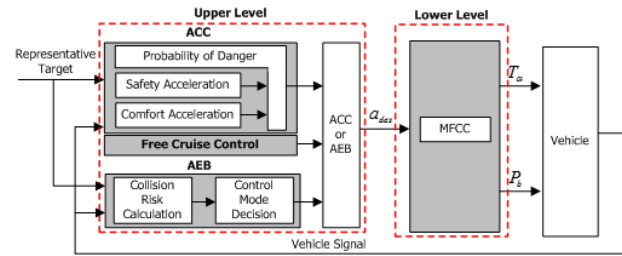


Fig 2 Target vehicle algorithm (ACC+AEB)

#### 2.2.1 적응형 순항 제어 장치 (ACC) 알고리즘

본 연구에 사용된 ACC 알고리즘은 정확히 차선 변경 차량의 위험도에 대응하기 위해 실제 사람의 주행 데이터를 반영하였다. 운전자가 선행차량을 추종하는 상황에 대한 125명의 주행데이터를 수집하고 분석하였다. 따라서 Fig 3 같은 차간거리 특성, 가속도 사용범위 등을 분석하고 분석된 특성을 사용하여 운전자와 유사한 거동을 보이는 ACC 제어시스템을 설계하였다.

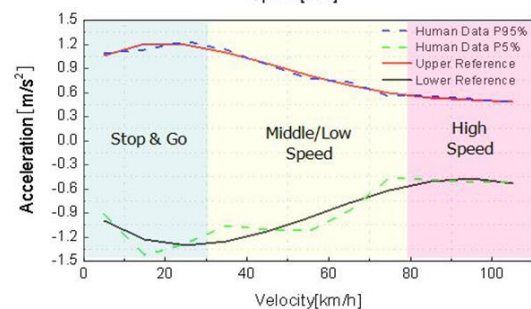
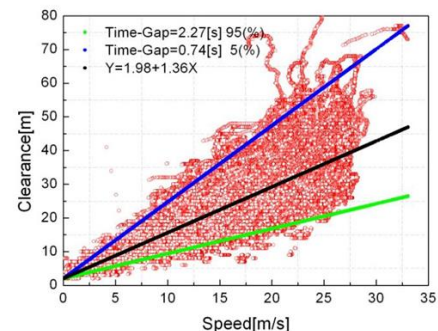


Fig 3 Following data collected from 125 humans

본 연구에 사용된 ACC 알고리즘은 자율주행 차량의 Cut-in을 정확하게 인지하는 것이 중요하다. 따라서 ACC 차량의 주변 감지 차량 중 자차선 주행차량 선정이 중요하다. 자차선 주행차량을 선정하기 위해서는 전방차량의 위치와 차선 폭, 도로의 곡률이 필요하다. 현재 주행중인 도로의 곡률은 자차량의 요속도와 주행속도를

이용하여 추정한다. 추정된 곡률을 이용해서 Fig4같이 자차선 주행차량을 판단할 수 있다.

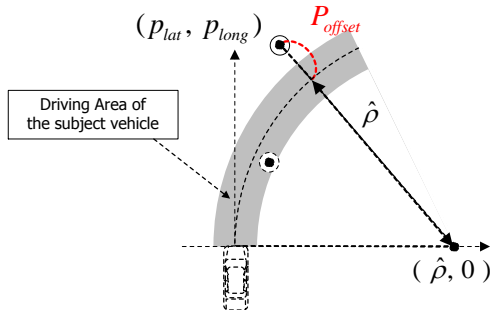


Fig 4 Driving area of the subject vehicle

본 연구에 사용된 ACC 알고리즘은 선행 차량의 Cut-in을 판별하기 위해 선행 차량이 자차선에 Cut-in할 가능성도 추정한다. Table 2와 같이 Cut-in에 사용되는 운전자 횡방향 속도를 분석하고 Fuzzy rule을 사용해서 옆 차선 선행차량의 차선 변경 의지를 결정한다. 이를 통하여 ACC 차량이 실제 운전자 주행에 좀 더 부합할 수 있다.

Table 2 Lateral velocity by human in cut-in situation

Percentile (%)	5	25	Mean	75	95
Relative lateral velocity [m/s]	0.20	0.45	0.57	0.68	1.01

### 2.2.2 자동 긴급 제동 시스템 (AEB) 알고리즘

본 연구에서 사용한 AEB 알고리즘은 정확히 차선 변경 차량의 위험도에 대응하기 위해 앞의 ACC와 마찬가지로 실제 사람의 주행 데이터를 반영하였다.

보통 AEB 알고리즘에 많이 사용하는 Safety Index로는 TTC, 충돌경보지수 (x), 차간 거리 등이 있다. TTC는 상대 속도가 낮은 경우 부적합하므로 개발한 차선 변경 시나리오에 맞지 않는다. 따라서 본 연구에서 사용한 AEB 알고리즘에서는

충돌경보지수를 Index로 사용하였다. 충돌경보지수 (x)는 차량과 전방 장애물간의 거리 및 속도, 정지에 필요한 거리 및 위험거리를 기반으로 차량의 물리적인 충돌 위험도를 정량화한 수치로 식 (1)과 같이 정의된다.

$$x = \frac{c - d_{br}}{d_w - d_{br}}$$

$$d_{br} = v_{rel} \cdot t_{brake} - \frac{v_{rel}^2}{2a_{x,max}}$$

$$d_w = v_{rel} \cdot t_{thinking} + v_{rel} \cdot t_{brake} - \frac{v_{rel}^2}{2a_{x,max}} \quad (1)$$

충돌경보지수는 정의에 따라 주행상태가 안전할수록 큰 값을 나타내며, 충돌경보지수의 값이 작을수록 차량의 주행상태가 위험해지고 있음을 의미한다.

### 2.3 평가차량 활용 차선변경 시나리오 구현

앞의 2.1에서 개발한 차선 변경 시나리오를 구현하기 위해서 초기 위치 및 속도를 Table 1로 맞추어야 한다. 이를 위해 ACC, AEB가 탑재된 평가 차량을 이용한다. 구현을 위해 Fig 5 같이 3단계가 필요하다. 1단계는 정지상태의 자율주행 차량, 평가 차량이 출발해서 20m 간격, 70km/h 속도로 Steady Following하는 상황을 구현한다. 이때 자율주행 차량이 전방, 평가 차량이 후방에 위치한다. 2단계는 평가 차량이 1차선에서 2차선으로 차선 변경을 한다. 이때 Table 1과 같이 24m 간격을 유지한다. 3단계는 평가 상황으로 Table 1의 상황이 되었을 때 평가를 진행한다. 위의 3단계를 통하여 2.1에서 개발한 차선 변경 시나리오를 정지 상태의 자율주행 차량, 평가 차량으로 구현이 가능하다.

## 3. 차선 변경 안전성 평가항목

차선 변경 시나리오를 통해 자율주행 차량의 안전성을 구체적으로 평가하기 위해 안전성

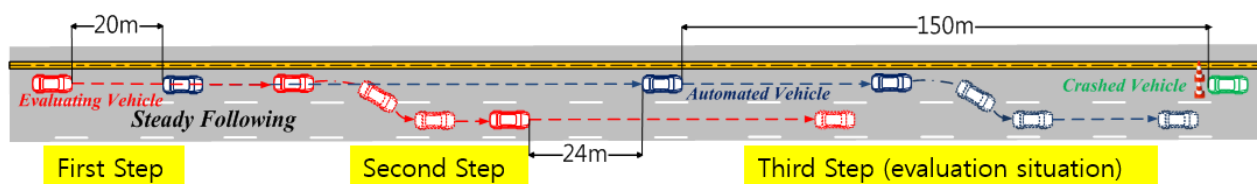


Fig 5 Implementation of lane change evaluation scenario

**Table 3** Safety evaluation factors

Safety evaluation factors	Situation	Pass criteria
AEB activation or inactivation	Lane change	AEB inactivation
Distance from cashed vehicle	Lane change	Lane change point from crashed vehicle > 23m
	Lane keeping	Stop point from crashed vehicle > 2m

평가항목을 개발하였다. 평가 항목은 평가의 공정성을 위해 평가 받는 자율주행 차량의 데이터를 활용하지 않는다. 또한 평가의 반복성을 위해 최소한의 평가항목을 개발하였다. 개발한 차선 변경 시나리오의 안전성 평가항목은 AEB 작동 여부, 정지 차량으로부터 거리이다. 구체적인 평가항목의 기준 값을 제시해서 자율주행 차량의 차선 변경 시나리오 통과 여부를 결정할 수 있다. 평가항목은 Table 3과 같고 자세한 설명은 뒤의 3.1, 3.2에 있다.

### 3.1 AEB 작동 여부

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.

평가 항목 기준 값은 AEB의 작동 여부이다. 자율주행 차량이 차선 변경 시 AEB가 작동되지 않으면 통과이고 AEB가 작동되면 통과 실패다. 본 연구의 AEB는 충돌경보지수 기반으로 충돌경보지수가 1보다 크면 작동하지 않고 충돌경보지수가 1보다 작아지면  $-4m/s^2$ 의 감속도로 작동한다. 충돌경보지수의 값이 1인 경우, 물리적 제동거리와 차간거리가 동일한 상황이므로 1을 기준 값으로 정했다. 따라서 차선 변경 시 자율주행 차량과 평가 차량의 충돌경보지수가 중요 기준 값이다.



**Fig 6** AEB activation or inactivation

### 3.2 정지 차량으로부터 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.

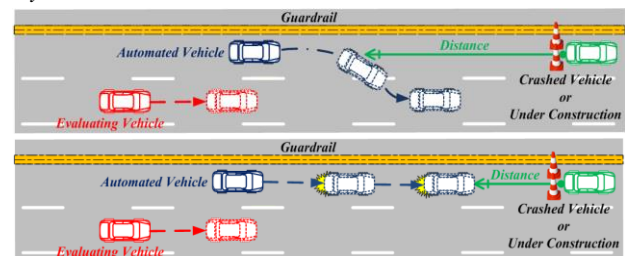
평가 항목의 기준 값은 2가지 상황에 따라 각각 다르다. 먼저 자율주행 차량이 차선 변경을 할 때, 차선 변경 시작 시점이 중요 지점이다. 정지 차량과 충돌 위험이 있을 때, 조향 조작으로 피할 수 있는 최소한의 거리는 식 (2)와 같다. 차선 변경 시나리오 조건에 따라 차선변경 시작거리는 정지차량으로부터 최소 23m이다.

두 번째 상황은 자율주행 차량이 차선 변경을 하지 않는 경우이다. 자율주행 차량이 정지차량과의 충돌위험을 감지하고 차선 변경을 시도할 때, 옆 차선 후방평가차량과의 충돌 위험 때문에 정지를 하는 차선 변경에 소극적인 자율주행 알고리즘도 존재할 수 있다. 이때 정지 차량과의 거리는 2m보다 떨어져야 한다. 여기서 2m는 ACC ISO기준에 최소 차간 거리 조건을 참고하였다.

$$d_s = \sqrt{\frac{2s_y}{a_y}} \cdot v_{rel} \text{ (Last point to steer)}$$

$$s_y = 1.9m \text{ (vehicle width)}$$

$$a_y = 2m / s^2 \text{ (emergency lateral acceleration)}$$
(2)



**Fig 7** Distance from cashed vehicle (above: lane Change, bottom: lane keeping)

## 4. 시뮬레이션 결과

### 4.1 자율주행 알고리즘

앞서 제안한 차선 변경 시나리오에 대한 시뮬레이션을 진행하기 위해서는 자율주행 알고리즘이 필요하다. 본 논문에서는 자율주행을 위해 모델 예측 제어 기법을 이용한 종/횡방향 통합 제어 알고리즘을 이용하였다. 본 알고리즘은 전 방향 주변 차량의 현재 상태에서부터 미래의 잠재적인 거동을 예측하고 예측된 잠재적 주행 환경에 대하여서도 안전을 확보할 수 있는 안전 주행 영역을 생성한다. 이를 바탕으로 주행 영역 내에서 차량이 거동되도록 제어하는 자율 주행 알고리즘이다.

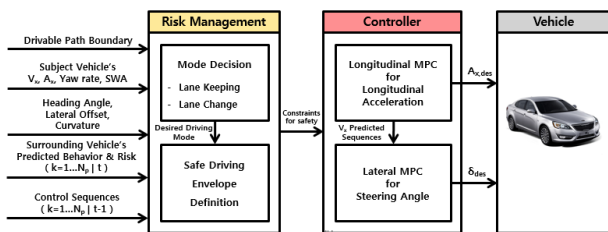


Fig 8 Automated vehicle algorithm

### 4.2 차선 변경 시뮬레이션

본 연구에서 차선 변경 시나리오 및 안전성 평가항목의 적정성을 확인하기 위해 MATLAB/Simulink와 Carsim을 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션은 2가지 Case의 자율주행 차량으로 진행하였다. Case 1은 4.1에서 설명한 자율주행 알고리즘으로 차선 변경에 적합하게

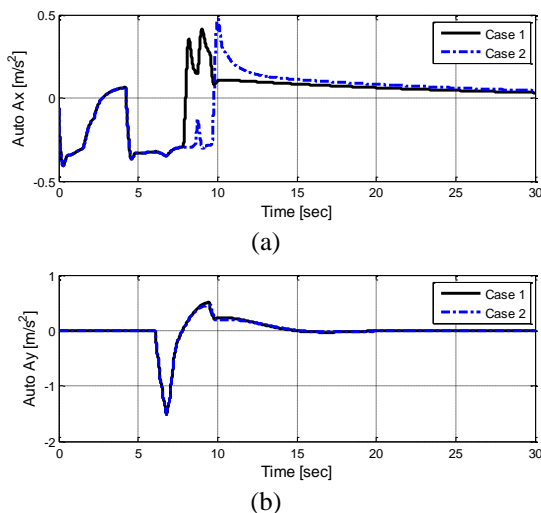


Fig 9 (a) Longitudinal acceleration of automated vehicle, (b) Lateral acceleration of automated vehicle

개발된 알고리즘이다. Case 2는 Case 1의 알고리즘을 수정해서 강제적으로 차선 변경 성능이 떨어지게 만든 자율주행 차량이다. 차선 변경 시 과도한 감속으로 측후방 차량에게 위험을 줄 수 있는 자율주행 차량이다. 다시 말해 Case 1이 Case 2보다 더 차선변경에 적합한 자율주행 차량이다.

Fig 9에서 두 가지 경우의 자율주행 차량 차선 변경 특성을 볼 수 있다. 횡방향 가속도를 보면 Case 1, 2가 거의 같다. 같은 시점, 같은 횡방향 가속도를 가지고 차선 변경을 하는 것을 볼 수 있다. 종방향 가속도의 경우, 상대적으로 우수한 자율주행 차량인 Case 1이 차선 변경을 위한 감속 후 더 빠르게 가속을 하는 것을 볼 수 있다. Case 2는 차선 변경을 위한 감속이 Case 1에 비해 오래 지속되어서 옆 차선 측후방 차량에게 위험을 줄

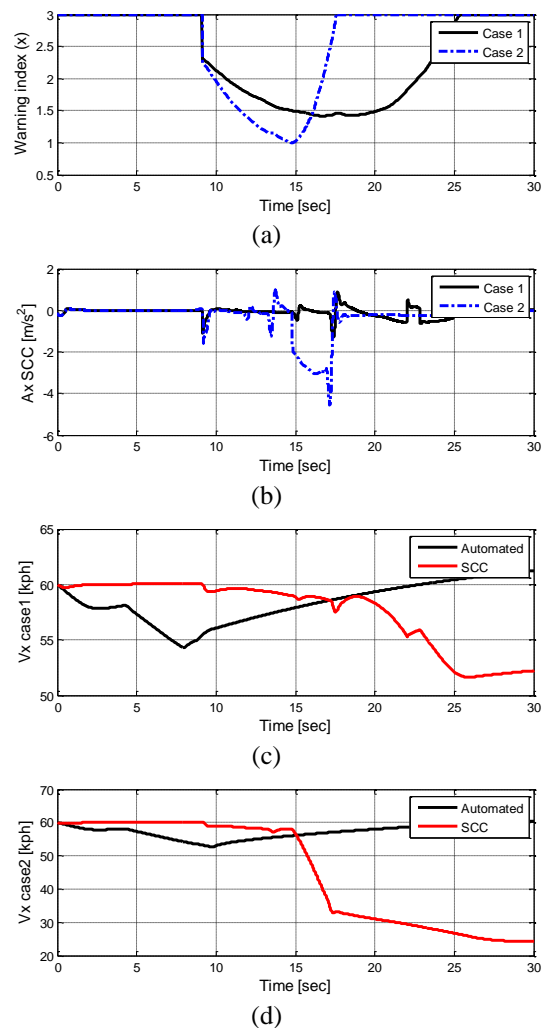


Fig 10 (a) Warning index, (b) Longitudinal acceleration of evaluating vehicle, (c) Velocity of vehicles in case 1, (d) Velocity of vehicles in case 2



수 있다.

Fig 10을 보면 측후방의 평가 차량에 거동을 볼 수 있다. Fig 10 (a) 충돌경보지수를 보면 Case 1이 Case 2보다 높은 값을 가진다. 따라서 Case 1일 때, 자율주행 차량과 평가 차량의 위험도가 더 낮다. Case 2의 충돌경보지수 값은 1보다 낮은 값을 가진다. 따라서 Case 2는 평가 차량에 AEB를 작동시킨다. Fig 10 (b) 평가 차량 종방향 가속도를 비교하면 Case 1에서는 보통 SCC의 가속도인 약  $-1\text{m/s}^2$ 를 최대 감속도 가진다. Case 2에서는 평가 차량의 AEB가 작동하기 때문에  $-4\text{m/s}^2$ 로 감속한다. 따라서 Case 1, 2에 따른 자율주행 차량 및 평가 차량의 속도가 Fig 10 (c), (d)와 같이 나타난다.

따라서 Case 1의 자율주행 차량은 본 연구에서 개발한 차선 변경 시나리오를 통과할 수 있는 반면에 Case 2의 자율주행 차량은 통과를 할 수 없다. 본 연구의 Case 1, 2의 시뮬레이션을 통하여 3.1에서 개발한 AEB 작동여부 안전성 평가항목이 적합함을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 자율주행 차량의 차선 변경 성능 평가 시나리오를 개발하였다. 자율주행 차량의 빠른 개발에 따라 평가 시나리오가 필요하다. 특히 운전 중 빈번하게 발생하게 되는 차선 변경 상황에 대한 평가 방안은 구체적으로 제시되지 않았기 때문에 본 연구를 진행했다.

본 연구의 차선 변경 시나리오는 ACC, AEB를 탑재한 평가 차량을 이용한다. 1차선에서 주행하는 자율주행 차량이 전방의 정지 차량 혹은 물체를 감지하고 차선 변경을 시행한다. 자율주행 차량이 2차선으로 차선 변경 시, 2차선 후방에서 주행하는 평가 차량에 대한 안전 영향을 평가한다. 평가 차량은 실제 운전자를 묘사하기 위해 실제 운전자 데이터를 사용한 ACC, AEB를 이용한다.

본 연구에서는 자율주행 차선 변경 안전성 평가항목을 개발하였다. 평가 받는 자율주행 차량이 안전성 평가항목을 충족하는지 확인을 통하여 차선 변경 시나리오 통과여부를 확인한다. 차선 변경에 적합, 부적합한 두 가지 자율주행 차량의 시뮬레이션을 통하여 개발한 차선 변경 시나리오 및 안전성 평가항목의 타당성을 확인하였다.

#### 후 기

본 연구는 국토교통부 및 국토교통과학기술진흥원의 연구비 지원(15PTSI-C054118-07)으로 수행된 연구임.

#### 참고문헌

- (1) Junyung Lee, 2015, "Robust Model Predictive Control based Automated Driving Control Algorithm for Improvement of Safety and Ride Comfort", *Ph. D. Dissertation, Seoul National University, Seoul*.
- (2) Seungwuk Moon, 2011, "Adaptive Cruise Control with Collision Avoidance for Multi-Vehicle Traffics", *Ph. D. Dissertation, Seoul National University, Seoul*.
- (3) Taeyoung Lee, 2015, "Robust Autonomous Emergency Braking Algorithm using the Tire-road Friction Estimation and the Sensor Uncertainties", *Ph. D. Dissertation, Seoul National University, Seoul*.
- (4) Yonghwan Jeong, Kyongsu Yi, 2015, "An evaluation scenario of safety performance for extraordinary service permission of autonomous vehicle", *KASA Spring Conference Proceedings*.
- (5) 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.
- (6) D. Zhao, H. Peng, S. Bao, K. Nobukawa, D. J. LeBlanc, C. S. Pan, 2015, "Accelerated evaluation of automated vehicles using extracted naturalistic driving data", *IVASD*.
- (7) Hakgu Kim, Kyongsu Yi, 2012, "Design of a model reference cruise control algorithm", *SAE International Journal of Passenger Cars-Electronic and Electrical Systems*.
- (8) Ioannou, P., Stefanovic, M., 2003, "Evaluation of the ACC Vehicles in Mixed Traffic: Lane Change Effects and Sensitivity Analysis", *California Partners for Advanced Transit and Highways (PATH)*.