

주행데이터 기반 자율주행 안전성 평가 시나리오 개발 및 검증

임형호* · 채흥석* · 이명수** · 이경수*

Development and Validation of Safety Performance Evaluation Scenarios of Autonomous Vehicle based on Driving Data

Hyeongho Lim*, Heungseok Chae*, Myungsu Lee**, Kyongsu Lee*

Key Words : Autonomous vehicle(자율주행 자동차), Evaluation scenario(평가 시나리오), Driving data(주행 데이터), safety evaluation factors(안전성 평가 항목)

ABSTRACT

As automotive industry develops, the demand for increasing traffic safety is growing. Lots of researches about vehicle convenience and safety technology have been implemented. Now, the autonomous driving test is being conducted all over the world, and the autonomous driving regulations are also being developed. Autonomous vehicles are being commercialized, but autonomous vehicle safety has not been guaranteed yet. This paper presents scenarios that assess the safety of autonomous vehicles by identifying the minimum requirements to ensure safety for a variety of situations on highway. In assessing driving safety, seven scenarios were totally selected. Seven scenarios were related to lane keeping and lane change performance in certain situations. These scenarios were verified by analyzing the driving data acquired through actual vehicle driving. Data analysis was implemented via computer simulation. These scenarios are developed based on existing ADAS evaluation and simulation of autonomous vehicle algorithm. Also Safety evaluation factors are developed based on ISO requirements, other papers and the current traffic regulations.

1. 서론

자동차가 대중화 되면서, 자동차 안전과 편의에 대한 필요성은 꾸준히 증가 해왔다. 그 과정에서 수 많은 기술이 개발 되었고, 계속 개선 되어 오던 상황이다. 하지만 각종 차량 사고들은 끊임 없이 발생하고 있다.⁽¹⁾

이러한 사고들은 전 세계적으로 주된 사회 문제 중 하나로 대두되고 있다. 특히, 충돌사고는 대부분 사람의 실수에 기인한다는 점을 감안할 때,⁽²⁾ 센서나 통신을 이용하여 운전자의 인지 범위 이상의 주행 환경을 사전

에 판단하여 운전자를 보조 해준다면, 이러한 사고들을 줄일 수 있을 것이다. 이에 따라 전 세계 차량 제작 업체들은 운전자의 안전과 편의를 위해 운전자 지원 제어 시스템(Advanced Driver Assistance system)을 개발 하고 양산해왔다. 나아가 다양한 지원 시스템을 통합하는 통합 제어 시스템 개발과 함께 단순한 운전자 지원을 넘어 자율주행 차량의 개발에도 힘 쓰고 있다.

자율 주행 자동차는 '첨단의 컴퓨터, 통신, 측정기술 등을 이용하여 자동으로 운행할 수 있는 차량'을 말한다.⁽³⁾ 즉, 운전자의 개입 없이 주변 환경을 인식하고, 주변 상황을 판단하며, 차량을 제어함으로써 스스로 주어진 목적지까지 주행하는 자동차를 말한다.

자율주행 자동차 연구는 첨단 IT기업인 미국의 구글

* 서울대학교 기계항공공학부

** 교통안전공단 자동차안전연구원

E-mail : gudgh30@snu.ac.kr

을 비롯하여 벤츠, 포르, 토요타, 현대기아자동차 등이 개발 중에 있으며 자율 주행에 필요한 부분적 기술 개발을 완료 및 진행 중에 있다.⁽⁴⁾ 현재 자율주행 관련 연구는 국가 단위로 기업, 대학이 공동으로 참여하고 진행하고 있다. 이러한 연구들을 함에 있어서, 기술 개발뿐만이 아니라 자율주행 자동차 시험 주행을 실시하고 있으며, 캘리포니아 주나 네바다 주와 같은 일부 지역에서는 자율주행 자동차 시험 운행 면허를 공식적으로 발급하고 있다. 그러나 현행 자율주행 자동차가 실 도로를 주행함에 있어서 발생 할 수 있는 여러 가지 위험한 상황에 대하여 안전성을 확보할 수 있는가에 대한 검증은 미비하다.⁽⁵⁾ 따라서 자율주행 자동차가 실 도로를 주행함에 있어서 발생 할 수 있는 여러 상황에 대한 안전성 확보 여부를 확인 할 수 있는 평가 방안이 요구된다.

본 논문은 자율주행 자동차의 임시운행 허가를 위한 안전성 평가 시나리오와 평가항목을 제시하려고 한다.⁽⁷⁾ 자율주행 자동차가 도로에서 안전하게 운행하기 위한 최소한의 요건을 확인하고, 각 시나리오 별로 평가해야 할 사항을 구체적으로 제시하여 현실적인 안전 성능평가를 실시할 수 있도록 한다. 그리고 마지막으로 실제 주행을 통하여 얻은 주행 데이터를 이용하여 평가 시나리오를 검증 하였다.

2. 차선 유지 및 변경 통합 시나리오 및 안전성 평가항목

고속주회로 기반으로 자율주행 차선 유지 시나리오와 차선 변경 시나리오를 모두 구현할 수 있도록 다음과 같이 시나리오 순서를 배치했다. 본 고속주회로 기반 차선 유지, 차선 변경 자율주행 시나리오 통합에는 2대의 차량이 필요하다. 먼저 평가 받는 자율주행 차량과 평가를 도와주는 헌터 차량이다. 헌터 차량의 역할은 앞에서 선행차량, Cut-in, Cut-out을 해주는 차량, 차선 변경 시나리오에 도움을 주는 역할이다. 따라서 2대의 차량의 움직임을 고려해서 Fig.1과 같이 시나리오 순서를 배치했다. 고속주회로는 총4차선이 존재한다. 1,2차선은 매우 빠른 차량이 달리는 구간으로 곡선구간에 큰 뱅크가 존재한다. 따라서 1,2 차로는 사용하지 않고 3,4차로를 사용한다.

시나리오 뿐만 아니라 시나리오에서 평가할 안전성 평가 요소도 개발하였다. 평가 요소를 통해 임시운행 허가의 기준요소로 정할 수 있다. 시나리오 및 평가요

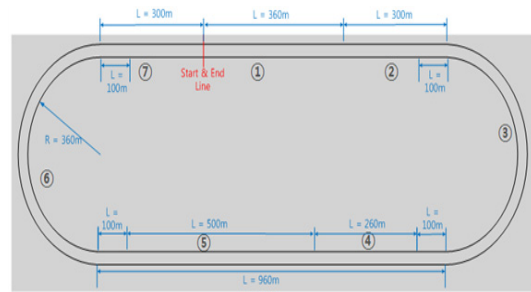


Fig. 1 고속주회로 기반 차선 유지, 차선 변경 자율주행 시나리오

Table 1 modified Assessment Factor

	순서	시나리오
차선유지	①	초기설정
	②	자차선 정체 주행
	③	곡선구간 선행차량 추종 주행
	④	Cut-out 차량 대응 주행
	⑥	곡선구간 자차선 단독주행
		직선구간 자차선 단독주행
	⑦	Cut-in 차량 대응 주행
차선변경	⑤	차선 변경 주행

소 개발은 앞에서 조사한 개별 ADAS 요소기술 규정 및 자율 주행 시뮬레이션에 기반한다.

2.1. 차선 유지 시나리오 및 안전성 평가 항목

자율주행 차량의 주행은 크게 차선유지, 차선 변경으로 이루어져 있다. 차선유지가 그 중에서 많은 비중을 차지하므로 7가지 시나리오는 6개의 차선 유지 시나리오와 1개의 차선 변경 시나리오로 이루어져 있다.

2.1.1. 자차선 정체주행

자차선 정체주행은 혼잡구간 주행지원 시스템(TJA) 기능을 평가하는 시나리오이다. 이 구간은 앞의 헌터 차량이 정체 상황을 구현하고 뒤에 자율주행 차량이 이에 대해 잘 대응하는지 평가하는 시나리오이다. 안전성 평가항목은 차선유지, 횡방향 가속도, 속도, 차간거리이다. 상황은 Fig. 2와 같다.

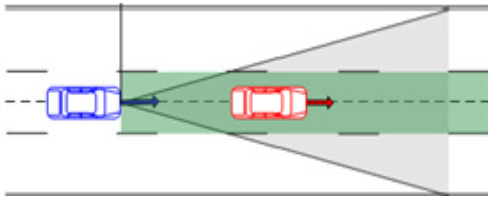


Fig. 2 자차선 정체주행(scenario 1)

2.1.2. 곡선구간 선행 차량 추종 주행

곡선구간 선행 차량 추종 주행은 차선 유지 뿐만 아니라 선행차량과의 안전도 유지를 평가하는 시나리오이다. 안전성 평가항목은 차선 유지, 횡방향 가속도, 종방향 가속도, 차간 거리이다. 상황은 Fig.3과 같다

2.1.3. Cut-out 차량 대응 주행

Cut-out차량 대응주행은 Fig. 4 처럼 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, 종방향 가

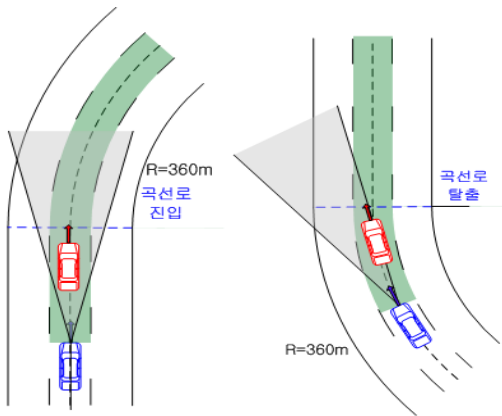


Fig. 3 곡선구간 선행 차량 추종주행(scenario 2)

속도, 차간 거리이다.

2.1.4. 곡선, 직선 구간 자차선 단독 주행

직선-곡선 변화도로에서 종방향 제어와 횡방향 제어가 통합적으로 이루어지면서 차선 유지 여부를 평가하는 시나리오이다. 안전성 평가 항목은 차선 유지, 속도, 횡방향 가속도, 종방향 가속도이다. 상황은 Fig.5 와 같다.

2.1.5. Cut-in 차량 대응 주행

Cut-in차량 대응주행은 Fig.6처럼 앞의 차량이 끼어드는 상황을 평가하는 시나리오이다. 자율주행 차량이 Cut-in차량에 대응해서 안전하게 반응하는지 평가한다. 안전성 평가 항목은 차선 유지, 종방향 가속도, 종방향 속도, 차간 거리이다.

2.1.6. 차선 유지 시나리오 안전성 평가요소

Table 1에 6개의 차선 유지 시나리오에서 평가 해야 하는 항목의 기준에 대한 구체적인 수치가 존재한다. 차선 유지는 모든 시나리오에서 평가하는 항목으로 차

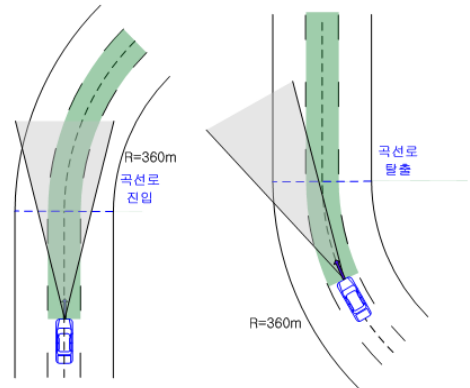


Fig. 5 자차선 단독주행(scenario 5,6)

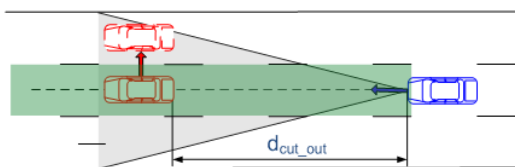


Fig. 4 Cut-out차량 대응 주행(scenario 3)

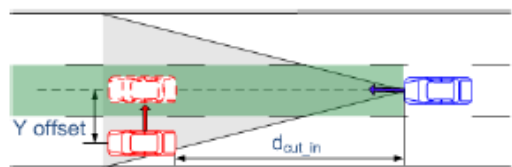


Fig. 6 Cut-in 차량 대응 주행(scenario 7)

Table 1 Safety Assessment Factor

평가항목	평가내용	근거
차선유지	횡방향 offset 차선 유지	차선 내 유지
속도	50km/h < Vx < 110km/h	고속도로 주행속도
종방향 가속도	-3.5m/s² < Ax < 2m/s²	ISO 기준 (LKAS)
횡방향 가속도	-3m/s² < Ay < 3m/s²	ISO 기준 (ACC)
차간 거리	Clearance	운전자 Data

선과의 횡방향 offset을 근거로 차선 유지를 평가한다. 속도 항목의 수치는 고속도로의 규정속도를 기준으로 설정하였다. 횡방향 가속도, 종방향 가속도는 ISO 기준을 근거로 설정하였다. 선행 차량과 유지해야 하는 최소 차간 거리는 운전자 데이터를 기반으로 선정 해야 한다.

2.2. 차선 변경 시나리오 및 안전성 평가 항목

7개의 시나리오 중에 6개의 차선유지를 제외한 차선 변경 시나리오 이다. 차선 변경 시나리오 또한 위의 평가항목에서 설정한 기준을 유지하고, 그 외의 추가 적인 차선 변경 안전성 평가요소가 존재한다.

2.2.1. 차선 변경 시나리오

차선 변경 시나리오는 Fig. 7과 같다. 파란색 차량은 자율주행 차량이고, 붉은색 차량은 차선 변경 시나리오를 도와주는 헌터 차량이다. 초록색 차량은 사고로 인해 정지한 차량 혹은 공사 중인 상황을 나타낸다. 실험 차량이 전방의 물체에 의한 위험을 인지하고 차선 변경을 할 때 헌터 차량의 거동에 미치는 영향으로부터 차선 변경 안전도를 평가한다.⁽⁶⁾



Fig. 7 차선 변경 주행(scenario 4)

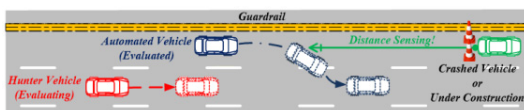


Fig. 8 차량 조작으로 피할 수 있는 거리

2.2.2. 차선 변경 시나리오 안전성 평가 요소

차선 변경 시나리오에서 안전성 평가요소는 두 가지이다. 첫 번째 평가요소는 헌터 차량의 AEB 작동 여부이다. 이것은 자율주행 차량의 차선 변경의 안전도를 판단 하는 잣대가 될 수 있다. 헌터 차량의 AEB가 작동했다는 것은 차선 변경이 안전하게 이루어 지지 않았다 는 지표가 될 수 있기 때문이다.

두 번째 평가요소는 정지 차량으로부터의 거리이다. Fig.8에서 보듯 차선 변경을 정지 차량으로부터의 충돌을 피하기 전에 해야 한다. 정지 차량을 조향 조작으로 피할 수 있는 최소한의 거리는 식 (1)에 근거한다.

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

$$S_y = 1.9m \text{ (Vehicle width)}$$

$$a_y = 2m / s^2 \text{ (Emergency lateral acceleration)}$$
(1)

식(1) 유도 과정은 ⁽⁸⁾에 언급 되어있다.

3. 시나리오 검증

차선 유지 및 변경을 통합할 수 있는 7가지의 시나리오를 개발 하였고 실차 실험을 기반으로 데이터를 수집 하여 분석한 후 각 시나리오 별 평가 항목검증을 하였다.

3.1. 단독 주행 안전성 평가 검증

실차 실험을 통하여 단독 주행 종방향 가속도(Ax)를 찾고, ISO기준에 부합 하는 지 확인 하였다. Fig. 9

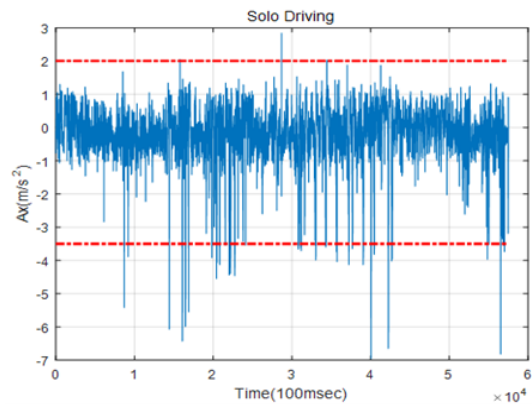


Fig. 9 단독 주행 종방향 가속도

를 보면 종방향 가속도는 전체적으로 ISO(LKAS) 에서 제시한 $-3.5m/s^2 < Ax < 2.0m/s^2$ 기준에 부합 한다고 볼 수 있다.

횡방향 가속도 또한 Fig.10에서 보듯 ISO 안전 기준인 $-3m/s^2 < Ax < 3m/s^2$ 에 부합 하는 것을 볼 수 있다.

3.2. 선행 차량 추종 주행 안전성 평가 검증

선행 차량과의 clearance는 차량의 radar sensor, lidar sensor를 통해 측정된 값을 당시의 자차량 속도에 따라 plot하였다. Time gap은 clearance를 자차량 속도로 나눈 값(sec)을 의미한다. 자차량 속도에 대한 안전 parameter라고 볼 수 있다. 선행 차량 추종 주행 종방향 가속도 또한 Fig.11에서 보듯 ISO에 제시한 기준인 $-3.5m/s^2 < Ax < 2.0m/s^2$ 에 안정적으로 수렴한다고 볼 수 있다. 그러므로 ISO에서 제시한 기준은

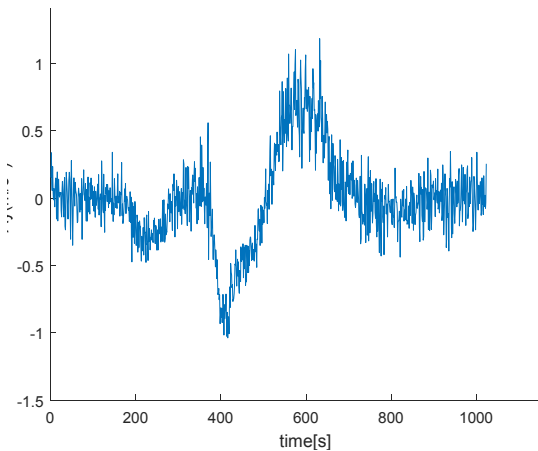


Fig. 10 단독 주행 횡방향 가속도

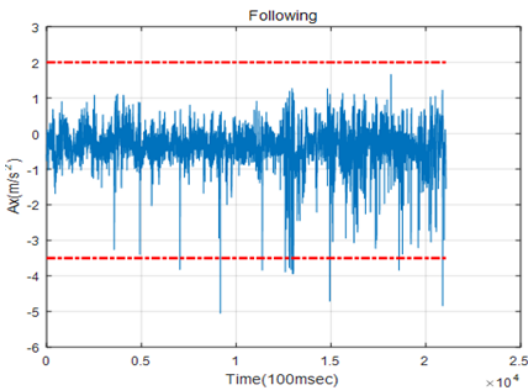


Fig. 11 선행 차량 추종 주행 종방향 가속도

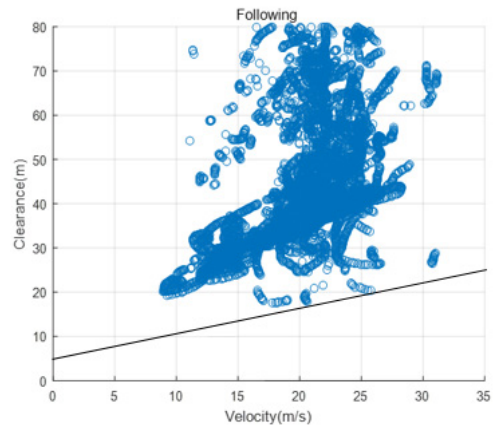


Fig. 12 선행 차량 추종 주행 자차량 속도와 차간 거리의 관계 합리적이라고 볼 수 있다. 또한, Fig.12을 보면, 자차량의 속도와 선행 차량과의 간격을 확인 할 수가 있는데, 기울기는 0.6 이므로 최소 time gap은 0.6이라 판단 할 수 있다. 추종 차량에서 0.6초 이상의 time gap 이면 자차량 속도에 대한 안전성을 확보할 수 있다고 볼 수 있다. 최소 차간거리는 5m로 확인된다.

3.3. Cut-in 차량 대응 주행 평가 검증

Fig. 13을 보면 Cut-in 차량 대응 상황에서, (b)에서 보듯 헌터 차량이 cut-in을 하는 중에, (a)에서 보듯 차량 간격을 안전 평가 기준에 맞춰 점점 증가시키는 것을 볼 수 있다. 종 방향 가속도 또한 ISO 안전 기준을 만족 시키는 것을 볼 수 있다.

3.4. 차선 변경 상황 주행 평가 검증

Fig. 14는 헌터 차량 뒤로 차선 변경을 하는 상황이다. Lateral clearance가 줄어들수록, 즉 차선 변경을 하는 상황에서 자율 주행 차량이 헌터 차량에 가까워질수록 자차량의 속도가 줄어 들어서 차간 거리가 늘어났다는 것을 확인 할 수 있다. 종 방향 거리도 점점 더 증가 하면서 안전성이 보장 되는 것을 볼 수 있다. 종 방향 가속도 또한 ISO LKAS기준을 만족 시키는 것을 볼 수 있다.

4. 수정된 안전 평가 기준

Table 2는 6가지 차선 유지 시나리오와, 1가지 차선 변경 시나리오를 활용하여 구한 각 시나리오 별 안전

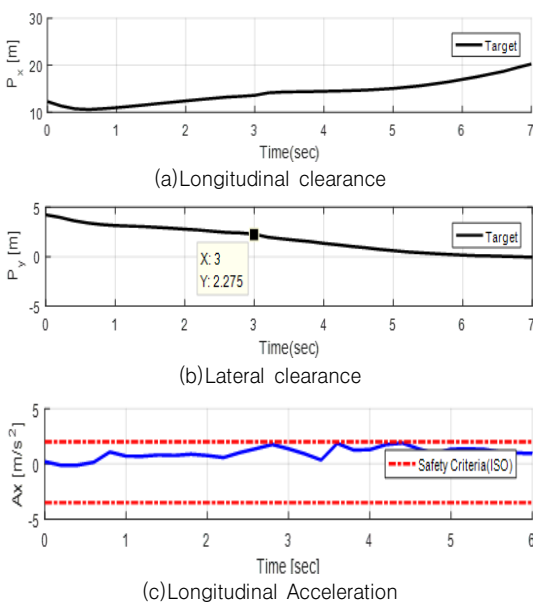


Fig. 13 Cut-in차량 대응 상황

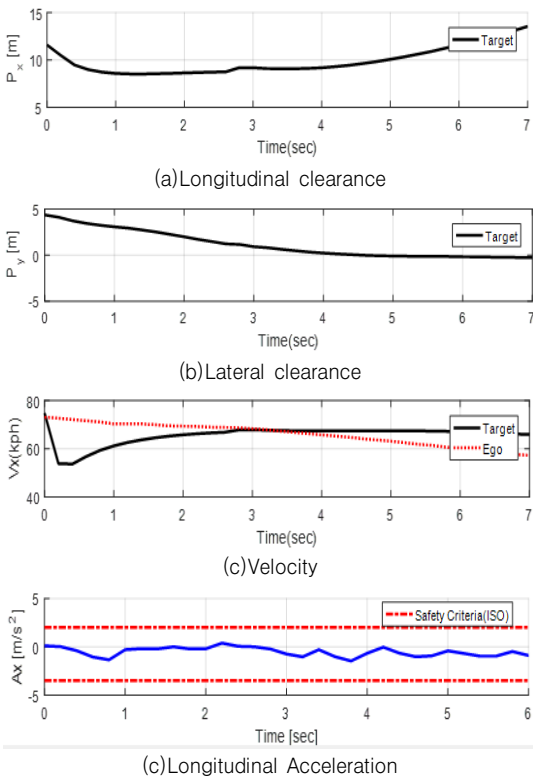


Fig. 14 차선 변경 차량 대응 상황

Table 2 modified Assessment Factor

평가항목	평가내용	근거
차선유지	횡방향 offset 차선 유지	차선 내 유지
속도	50km/h < Vx < 110km/h	고속도로로 주행속도
종방향 가속도	-3.5m/s² < Ax < 2m/s²	ISO 기준 (LKAS)
횡방향 가속도	-3m/s² < Ay < 3m/s²	ISO 기준 (ACC)
차간 거리	Clearance > 5m	운전자 Data
Time gap	Time gap > 0.6	운전자 Data

평가 기준과 그 근거들을 제시 하였다. 실차 주행 데이터를 기반으로 각 평가 기준을 Table 1과 비교하여 확인한 결과 대부분의 평가 기준들이 기존에 존재하던 기준들에 부합 하는것을 알 수 있었고, 차간거리와 Time gap 항이 추가 되었다.

그리고 Time gap의 항목이 추가 되었는데, 실차 실험 주행데이터를 바탕으로 확인한 결과 최소 time gap은 0.6sec로 확인 할 수 있었다. Time gap이 0.6sec 이상이면 안전하다고 확인 할 수 있다. 최소 차간 거리는 운전자 데이터 분석 결과 5m로 확인된다.

5. 결론

본 연구에서는 자율 주행 자동차의 임시 운행 허가를 위한 안전성 평가 시나리오와 평가항목을 제시하였다. ADAS 기술 규정 과 자율주행 차량 알고리즘 시뮬레이션을 통하여 7개의 시나리오를 구성하였다. 그 중 6개는 차선유지에 관한 시나리오이고, 나머지 하나는 차선 변경 주행 시나리오이다. 헌터 차량을 이용하여 자율 주행 차량이 추종 주행이나 차선 변경 혹은 Cut-in 같은 상황을 연출 할 수 있도록 하였다.

각 시나리오 별로 평가해야 할 사항을 구체적으로 제시하여 현실적인 안전 성능평가를 실시 할 수 있도록 하였다. 안전 평가 기준은 ISO 표준 기준과 운전자 데이터, 현존하는 교통 법규를 참조 하였다. 개발한 자율 주행 안전성 평가 시나리오 및 평가 항목을 검증하기 위하여 고속주회로에서 실차 실험을 진행 하였고, 실차 실험을 통하여 얻은 데이터를 이용하여 평가 항목들을 검증하였다. 검증 결과 평가 기준들은 합리적이라고 볼 수 있었다.

후 기

본 연구는 국토교통부 및 국토교통과학기술진흥원의 연구비지원(17TLRP-B117133-02)과 2017년 BK21 플러스 사업, 서울대학교 정밀기계설계공동연구소(SNU-IAMD)의 연구비 지원으로 수행된 연구임.

참고문헌

- (1) 장승주, 2016, "자율 주행 자동차 관련 SW기술 동향," 한국통신학회.
- (2) 윤복중, 김정하, 2012, "첨단 자동차 연구개발의 동향," 제어로봇시스템학회지.
- (3) Moon, Seungwuk, and Kyongsu Yi, 2008, "Human driving data-based design of a vehicle adaptive cruise control algorithm," *Vehicle System Dynamics* Vol. 46, No.8, pp. 661~690.
- (4) Yonghwan Jeong, 2015, "An evaluation scenario of safety performance for extraordinary service permission of autonomous vehicle, KASA Spring Conference Proceedings.
- (5) Felix Fahrenkrog, 2014, "Evaluation of auto-mated driving functions," ITS Europe.
- (6) 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.
- (7) 채홍석 et al., 2016, "자율주행 자동차 임시운행 허가를 위한 안전 성능 평가 시나리오," 한국자동차공학회논문집, Vol. 24, No.5, pp. 495~503.
- (8) Dr. Peter E. Rieth, "Emergency steer & brake assist - A systematic approach for system integration of two complementary driver assistance systems," Continental AG Germany Paper, Number, 11-0111
- (9) ISO 11270: 2014(en)Intelligent transport systems — Lane keeping assistance systems (LKAS) — Performance requirements and test procedures