◎ 논 문

자율주행 자동차 임시운행 허가를 위한 안전 성능 평가 시나리오

정용환* · 이경수* · 최인성** · 민경찬**

An evaluation scenario of safety performance for extraordinary service permission of autonomous vehicle

Yonghwan Jeong*, Kyongsu Yi*, In Seong Choi**, Kyong Chan Min**

Key Words : Autonomous vehicle(자율주행 자동차), Evaluation scenarios(평가 시나리오), Safety evaluation process (성능평가방법)

ABSTRACT

This paper presents an evaluation scenario of safety performance for extraordinary service permission of autonomous vehicle driving on a motorway. Based on advanced driver assistance system (ADAS) which is already mass-production, an autonomous vehicle driving on motorway is tested on the public roads and also getting close to mass-production. Before the autonomous vehicle tested, the safety of autonomous driving system should be evaluated based on a proper test scenario. Prior to develop the test scenario, this paper reviews the licensing standards for an autonomous vehicle in California and Nevada, and the international regulations of each ADAS. To develop the scenario, the driving conditions of motorway are categorized into five modes and fundamental evaluation requirements of elements of autonomous driving system are derived. An evaluation scenario, which represents the real driving conditions, has been developed to assess the safety of autonomous vehicle. This scenario has validated by computer simulation using model predictive control (MPC) based autonomous driving algorithm.

1. 서 론

자동차의 등장은 인류에게 이동의 자유를 보장함으로써 개인의 삶의 범위를 물리적으로 확장시켰을 뿐만 아니라 경제적, 사회적, 문화적 발달을 급속화시키는 촉매 역할을 하였다. 이동수단으로써 우리의 삶에 등장하였던 자동차는 이제 한 개인의 행복 추구를 위해 활용될 수 있는 여가수단이자 사회적 지위와도 깊게 연관되어 있는 존재가 되었다. 삶의 핵심 요소로써 자리잡은 자동차는 인구의 증가와 함께 보유량과 밀도가 기하급수적으로 증가하여, 우리나라를 기준으로도 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. 이처럼 자동차로 인해 발생하는 사회적 문제를 해결하기 위해 지능형 자동차 기술(Intelligent vehicle technology) 개발에 대한 요구가 크게 증가하였다. 이러한 사회적 요구에 부응하여 지능형 자동차 기술에 대한 연구가 학계 및 산업 전반에서 활발히 진행되었으며, 근래에는 운전자 및 탑승자의 안전을 향상시키기 위한 다양한 운전자 지원

* 서울대학교 기계항공공학부
** 교통안전공단 자동차안전연구원
E-mail : winqq1234@snu.ac.kr

제어 시스템(Driver assistance system)들이 개발되고 양산되기 시작하였다. 지능형 자동차 기술 개발의 궁극적 목표인 자율주행 자동차 개발이 세계 유수의 기관에서 진행되고 있다. 최근에는 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. 그러나 현행 자율주행 자동차 시험 운행 면허 발급 기준은 실 도로 상에서 주행하게 될 자율주행 자동차 안전성 검증에 대한 부분은 미비하다. 따라서 자율주행 자동차가 실 도로를 주행함에 있어서 발생할 수 있는 여러 상황에 대한 안전성 확보 여부를 확인 할 수 있는 평가 방안이 요구되는 상황이다.[1),(2),(3)]

본 논문에서는 적응형 순항 제어 장치(Adaptive cruise control, ACC)와 차선 유지 보조 시스템(Lane keeping assistance system, LKAS), 그리고 자동 긴급 제동 시스템 (Automatic emergency braking system, AEB)의 통합으로 구현되는 자동차 전용도로 자율주행 자동차를 대상으로 자율주행 안전 성능 평가 시나리오를 제안하였다. 이를 위해 현재 제정되어 있는 자율주행 자동차 임시운행 허가 기준 및 각 개별 기술에 대한 국제 규정을 분석하였으며, 자율주행 자동차 평가 시나리오에 고려되어야 할 핵심 사항들을 요약하였다. 이에 기반하여 자동차 전용도로 자율주행 자동차에 대한 안전성 평가 시나리오를 제시하였으며, 제시된 시나리오에 대해 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

2. 자율주행 자동차 임시운행 허가 기준 및 개별 요소 기술 규정

2.1. 자율주행 자동차 임시운행 허가 기준

자율주행 자동차의 실 도로 주행에 대한 임시운행 허가 기준의 경우 북미지역을 중심으로 2012년부터 본격적으로 제정되기 시작하였으며, 현재 네바다, 플로리다, 캘리포니아, 워싱턴 D.C.에 임시운행 허가 기준이 마련되었다. 그 중에서도 네바다 주와 캘리포니아 주는 실제 자율주행 자동차 임시운행 허가 면허가 발급되어 공공도로 상에서의 자율주행 자동차 시험 주행이 실시되고 있다. 네바다 주와 캘리포니아 주의 자율주행 자동차 임시운행 허가 기준을 요약하면 다음과 같다.

2.1.1. 캘리포니아 주

2012년 9월에 제정된 캘리포니아 주 자율주행 자동차 임시운행 허가 기준은 크게 자율주행 자동차 운전자와 운행 중 발생한 사고 대응에 대한 내용으로 구성되어 있다. 자율주행 자동차 운전자에 대해 캘리포니아 주는 자율주행 자동차의 한계를 명확히 인식하고 있으며 차량 제어 권한을 받을 수 있어야 하며, 캘리포니아 주가 마련한 훈련 프로그램을 받아야 한다고 규정하고 있다. 자율주행으로 인해 발생한 사고에 대해서는 캘리포니아 주 차량관리부에 보고해야 하며, 사고로 인해 발생한 인적, 물적 손실에 대해 보상해야 한다. 이러한 규정은 자율주행 자동차가 실 도로에서 운행될 수 있는 최소한의 조건은 제시하고 있다고 할 수 있으나, 자율주행 자동차가 공공도로 상에서 타 운전자들의 안전을 침해하지 않는다는 점을 보장한다고 보기에는 어려움이 있다.[4)]

2.1.2. 네바다 주

네바다 주 자율주행 임시운행 허가 기준의 경우 자율주행 자동차 운전자 및 자율주행 시험 운행 중 발생한 사고에 대한 부분은 캘리포니아 주와 유사한 기준을 제정하고 있다. 이러한 부분에 더하여 네바다 주는 1만마일 자율주행 시험운행 결과, 자율주행 시스템에 대한 설명 문서, 자율주행 시험 시 안전성 확보에 대한 계획, 그리고 자율주행 자동차 시연을 개발자에게 요구하고 있다. 임시운행 허가 면허 발급상에서 캘리포니아 주와 차별화 되는 점으로는 6개로 분류된 도로 조건과 5개로 분류된 환경 조건에 대해 개별적으로 면허가 발급된다는 점이다. 자율주행 자동차의 안전성에 대한 규정이 존재한다는 점은 캘리포니아 주 대비 개선된 사항이라고 생각할 수 있으나 여전히 안전성 평가 방안이 제시되지 않았다는 점은 개선되어야 할 점으로 생각된다.[5)]

2.2. 개별 요소 기술 국제 규정

본 논문의 대상이 되는 자동차 전용도로 자율주행 자동차의 요소 기술인 ACC와 AEB, 그리고 LKAS에 대한 성능평가 규정은 다음과 같다.

2.2.1. 적응형 순항 제어 장치 (ACC)

ISO에서 규정하고 있는 ACC 성능 평가는 2초 이내에 인지 가능한 최대 거리를 평가하는 직선로 인지 거리 성능 평가, 직선로에서 자 차선과 옆 차선에 존재하는 각각의 선행 차량을 정상적으로 구분하여 인지하는 지 평가하는 선행 차량 식별 성능 평가, 그리고 곡선로에서 전방 선행 차량을 정상적으로 인지하는 지 평가하는 곡선로 선행 차량 식별 성능 평가로 구성되어 있다.[6]

2.2.2. 자동 긴급 제동 시스템 (AEB)

Euro NCAP에서는 City와 Inter-Urban 두 가지 경우에 대해 AEB 성능 평가 시나리오를 규정하고 있다. City 시나리오의 경우 자차량 속도 10~50km/h 영역에 대해 정지 타겟에 대한 AEB 성능 평가를 다루고 있으며, Inter-Urban 시나리오의 경우 자차량 속도 30~80km/h 영역에 대해 정지 타겟, 이동 타겟, 감속 타겟에 대한 AEB 성능 평가를 다루고 있다.[7],[8]

2.2.3. 차선 유지 보조 시스템 (LKAS)

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.[9]

3. 자율주행 자동차 평가 시나리오 핵심 인자

자동차 전용도로상에서 구현되는 제한적 자율주행 시스템의 평가 시나리오 개발을 위해서는 대표적인 주행 상황과 자율주행 시스템 구성 요소 분석이 선행되어야 한다. 본 논문에서는 자동차 전용도로 상에서 발생하는 주행 환경에 대해 대표적인 주행 모드를 5가지로 구분하여 정리하였으며, 자율주행 시스템 구성 요소는 3가지로 구분하여 분석하였다.

3.1. 자동차 전용도로 대표 주행모드

자율주행 자동차는 실 도로상황에서 발생할 수 있는 여러 상황에서 충분한 수준의 성능이 확보되어야만 자 차량뿐만 아니라 주변차량의 안전을 보장할 수 있다. 특히 주변 차량 중 전방 차량의 거동이 자율 주행 자동차의 거동에 큰 영향을 끼친다. 이를 반영하여 전방 차량의 거동에 따른 자동차 전용도로 대표 주행모드를 요약하면 Fig. 1과 같다.

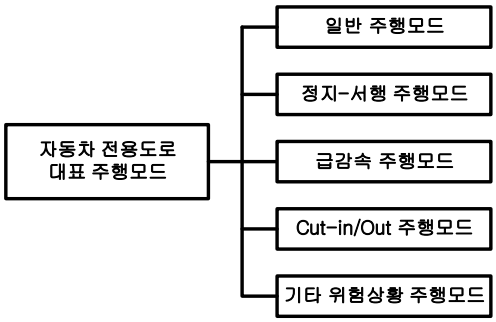

Fig. 1 Representative driving modes of motorway

일반 주행모드는 50~110km/h 속도 영역에서 원활한 교통 상황이 유지되는 상황을 의미한다. 따라서 선행 차량이 없거나 낮은 수준의 종방향 가속도를 사용하는 주행을 하는 경우를 포괄한다. 정지-서행 주행모드는 0~50km/h 속도 영역에서 교통 정체 상황이 발생한 상황을 의미한다. 급감속 주행모드는 다양한 속도 영역에서 전방 차량의 급감속으로 인해 자 차량의 긴급 제동이 요구되는 상황이다. Cut-in/out 주행 모드는 전방 차량의 Cut-in이나 Cut-out의 발생으로 인해 자율주행 자동차가 인지해야 할 대상이 변경되는 상황들을 포괄한다. 이러한 정지-서행, 급감속, Cut-in/out 주행모드는 자동차 전용도로 상의 차선증감, 합류지점, 분기점 등에서 발생하는 주행상황을 대표한다. 그 외 장애물이나 도로공사 구간, 터널, 요금소와 같은 돌발적인 상황에 대해서는 기타 위험상황 주행모드로 분류하였다.

3.2. 자율주행 시스템 구성 요소 분석

자율주행 시스템의 구성 요소는 Fig. 2에 표현된 것처럼 센서, 의사결정 및 제어, 액츄에이터 부분으로 분

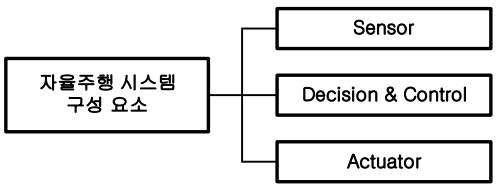

Fig. 2 Elements of autonomous driving system

류할 수 있다.

센서는 자율주행 상황에서의 주변 차량, 차선, 장애물 등을 인지하기 위해 사용되는 Lidar, Radar, Camera 등을 말한다. 자율주행 자동차의 개발 목적에 따라 다양한 센서 구성을 취할 수 있으나 센서 인지 범위, 주행환경 변화에 따른 인지성능 유지, 그리고 Multi target processing은 센서 구성 변화에 무관하게 충분한 수준의 성능을 유지해야 할 것으로 판단된다. 특히 공공도로 상의 수많은 주변 차량에 대응하기 위해서는 Multi target processing은 기본적으로 구현되어야 할 점으로 생각된다.

의사결정 및 제어는 센서를 통해 인지한 주변 환경 정보를 기반으로 자차량 주변 상황에 대해 판단하고, 그에 따라 적절한 자 차량 거동을 결정하여 차량에 가해주어야 할 제어 입력을 결정한다. 따라서 인지된 주변 차량의 거동에 대한 추정이 적절히 이루어져야 하며 인지 및 제어 한계 수준에 대한 고려를 통해 자율주행 불가능 상황을 판단할 수 있어야 한다. 또한 수동주행과 자율주행 전환 시 안정적인 거동을 유지해야 하며, 운전자가 다양한 방법으로 제어 권한을 획득할 수 있어야 한다.

이렇게 결정된 제어 입력을 실제 차량에 가하는 액츄에이터는 주행에서 발생할 수 있는 진동, 가감속, 환경변화 등에 대응하여 안정적인 성능을 유지하여 안전성을 확보해야 한다.

4. 자율주행 자동차 운행 기준 및 안전 성능 평가 시나리오

4.1. 자율주행 자동차 운행 기준

Table 1 A evaluation scenarios of autonomous vehicle

Test No.1 일반 주행 모드	Test No.2 정지-서행 주행모드	Test No.3 Cut-in/out 주행모드
Test No.1-1 자차선 단독주행 (직선-곡선로)	Test No.2-1 선행차량 정체주행 (직선로)	Test No.3-1 등속 Cut-in차량 (직선로)
Test No.1-2 옆차선 선행차량 (곡선로)		Test No.3-2 감속 Cut-in 차량 (직선로)
Test No.1-3 자차선/옆차선 선행차량 (곡선로)		Test No.3-3 Cut-out 차량 (직선로)

자율주행 자동차의 안전 성능을 평가하기 위한 시나리오를 제안하기에 앞서 우선적으로 자율주행 자동차의 운행을 위해서 만족되어야 최소한의 기준이 제시되어야 한다. 본 논문에서는 자율주행 자동차, 운전자, 그리고 사고 시 책임 소재 3가지로 기준을 제안하였다. 먼저 자율주행 자동차의 구조 안전성 확보를 위해서는 차량 상태 모니터링 및 고장 알림 기능, 비상정지 스위치, 운전자 오버라이드 기능, 주요 센서/액츄에이터 고장에 대한 진단, 기록 및 알림 기능, 사고 데이터 저장 장치, 그리고 주변 차량에 대한 자율주행 상태 알림 장치를 확보해야 할 것으로 생각된다. 이와 같은 기능이 확보되면 자율주행 시 발생할 수 있는 문제 상황들에 대해서 최소한의 안전성을 보장할 수 있을 것으로 보인다.[10]

자율주행 자동차 운전자의 경우 자율주행 시스템 개발에 관련되어 해당 시스템의 성능적 한계를 충분히 인지하고 있어야 한다. 또한 캘리포니아 주에서 시행하고 있는 것과 같이 자율주행 자동차 운전자를 위한 훈련 프로그램을 구성하여 실시하는 것이 적절하다고 생각된다. 그리고 사고 발생시 자율주행 시험 운행 주관 기관이 발생한 손실에 대한 보상해야 한다.

4.2. 자율주행 자동차 안전 성능 평가 시나리오

3장에서 언급한 자동차 전용대로 대표 주행모드와 자율주행 시스템 구성 요소 필수 요구사항 분석 결과를 바탕으로 정리한 자율주행 자동차 평가 시나리오는 Table 1과 같다. 여기서의 직선-곡선로는 직선도로에서 R=360m인 곡선도로로 곡률이 변화하는 도로를 의미하며, 직선로와 곡선로 각각은 직선도로와 R=360m인 곡선도로를 의미한다.[11),(12),(13)]

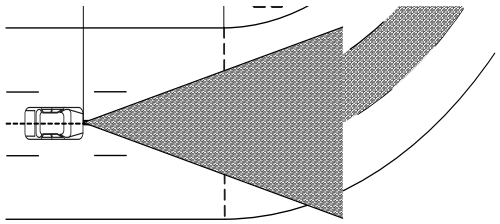

Fig. 3 Test No.1-1 scenario

Table 2 Test conditions of test No.1-1

초기 위치	초기속도	Set speed
곡선로 진입 80m 후방	100km/h	100km/h

본 시나리오의 경우 이미 양산단계에 이른 ACC, LKAS, AEB 개별 시스템 단독으로 구현이 가능한 시나리오는 모두 배제하였으며 날씨에 의한 영향은 고려하지 않았다. 자율주행 시스템의 경우 운전자의 거동과 유사한 주행을 하는 것이 목적이므로 AEB가 작동할 수준의 긴급 상황이 아닌 이상 낮은 수준의 종방향 및 횡방향 가속도를 사용하게 된다. 즉, 눈과 같은 극단적인 상황을 제외하고는 노면 마찰계수의 저하가 제어 성능에 끼치는 영향은 미미하므로 본 논문에서는 날씨를 고려하지 않았다.

Test No.1은 일반 주행모드에서 발생할 수 있는 상황 중 자율주행 자동차에 요구되는 기본적인 성능을 평가 할 수 있는 시나리오 3가지를 선정하였다. 자차선 단독주행 시나리오는 도로의 곡률이 변하는 상 황에서 종방향 제어와 횡방향 제어가 통합적으로 이뤄

지는 지 평가하며, 옆 차선 선행 차량과 자 차선/옆 차선 선행차량 시나리오는 곡선로에서 선행차량 인식 성능을 평가한다. Test No.2는 정체 상황에서 Traffic

Jam Assist(TJA) 기능을 평가한다. 마지막으로 Test No.3는 선행 차량의 Cut-in이나 Cut-out 상황에서 자율주행 자동차가 기본적인 종방향 및 횡방향 제어 성능을 발휘하는 지 평가한다.

본 논문에서는 위의 시나리오 중 자율주행 자동차의 자동차 전용도로 주행을 위해 가장 기본적으로 요구되는 종방향 및 횡방향 통합 제어 성능을 평가하는 Test No.1-1 자차선 단독주행 시나리오에 대해 논하였다. 자차선 단독주행 시나리오의 세부사항은 Fig. 3와 Table 2에 정리하였다.

위의 시나리오에 대해 Table 3에 정리된 기준을 만족하는 경우 자차선 단독주행에 필요한 기본 성능을 충족하였다고 볼 수 있다. 본 기준은 ISO, NHTSA, Euro NCAP등에서 제안한 평가 기준과 시뮬레이션 연구를 통해 얻은 결과를 바탕으로 선정되었다.

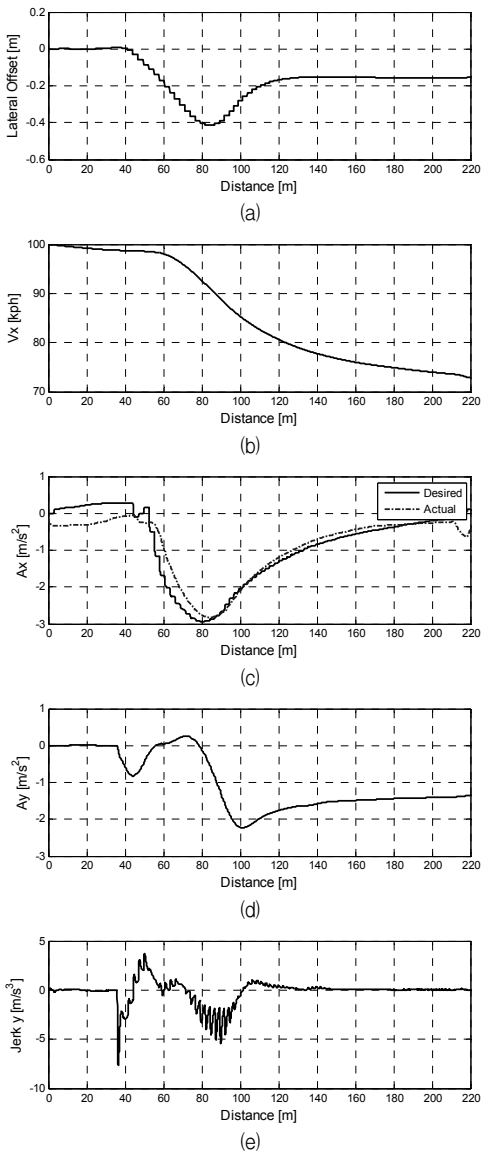

Fig. 4 (a) Lateral offset, (b) longitudinal velocity, (c) longitudinal acceleration, (d) lateral acceleration and (e) lateral jerk for simulation of test No.1-1.

5. 시뮬레이션 결과

5.1. 자율주행 알고리즘

앞서 제안한 시나리오에 대한 시뮬레이션을 진행하기 위해서는 자율주행 알고리즘이 필요하다. 본 논문에서는 모델 예측 제어 기법을 이용한 종/횡방향 분산 제어 자율주행 제어 알고리즘을 이용하였다.[14]

본 알고리즘은 주변 차량에 의한 잠재적 위험을 최소화하기 위하여 주변 차량의 거동에 대한 확률적 예측을 하였으며, 이를 바탕으로 안전 주행 영역을 생성하였다. 이를 바탕으로 유한한 예측 시간 영역에 대해 안전 주행 영역 내에 자차량이 유지될 수 있도록 요구 조향값 및 요구 종방향 가속도를 모델 예측 제어 기법을 이용하여 도출하였다.

5.2. 자차선 단독주행 시나리오 시뮬레이션 결과

제안된 시나리오의 타당성을 확인하기 위하여 Carsim과 MATLAB/Simulink를 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 본 논문에서는 자율주행 자동차의 기본 성능을 평가하는 Test No.1-1 자차선 단독주행 시나리오에 대해 앞서 언급한 자율주행 알고리즘을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과는 Fig. 4와 같다.

Fig. 4를 보면 곡선로 진입시점인80m에 도달하기 이전부터 자율주행 자동차가 도로 곡률의 변화를 인지하여 감속이 선행되는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 과도한 횡방향 가속도가 가해지는 것을 막을 수 있었으며, 종방향 가속도 역시 적절한 시기부터 감속이 이루어짐으로 인해 과도한 수준으로 발생하는 것을 막을 수 있었다. 다만 직선도로에서 곡률 R=360m인 도로로 급격히 변화하는 상황에서는 횡방향 오프셋의 경우 40cm 수준까지 발생하였는데 이는 극한 조건 설정을 위하여 의도적으로 실 도로와는 다르게 곡률이 급격하게 변하도록 설정하였기 때문에 나타난 결과이다. 앞서 제시한 기준을 바탕으로 살펴보면 본 시뮬레이션 결과는 Jerk y를 제외한 나머지 항목은 만족하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 실 도로에서 주행함에 있어서 충분한 수준의 성능을 확보하였음을 확인할 수 있다.

6. 결 론

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 현재 제정되어 있는 자율주행 자동차 임시운행 허가 기준과 ISO, Euro NCAP, NHTSA 등에서 규정하고 있는 ACC, LKAS, AEB에 대한 평가 시나리오에 대해 분석하였다.
2) 자동차 전용도로의 대표 주행모드와 자율주행 시스템 구성 요소에 대한 핵심 평가 요소를 정의하였으며 이를 바탕으로 자율주행 자동차 운행 기준과 자동차 전용도로 자율주행 자동차 평가 시나리오를 제안하였다. 제안한 시나리오 중 자차선 단독주행 시나리오에 대해 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 타당성을 검증하였다.

참고문헌

(1) 이경수, 이준영, 2014, “차량 제어 기술 및 선진 연구 동향,” 제어로봇시스템학회 논문지, 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) Markoff, J., 2013, “At high speed, on the road to a driverless future,” New York Times.
(4) California Department of Motor Vehicles, 2014, “Adopted Regulations for Testing of Autonomous Vehicles by Manufacturers.”
(5) Nevada Department of Motor Vehicles, 2013, “Autonomous Vehicle Testing License.”
(6) ISO, 2010, “ISO 15622 Intelligent transport systems - adaptive cruise control systems - performance requirements and test procedures.”
(7) Euro NCAP, 2013, “Euro NCAP AEB Test Protocol.”
(8) Thatcham, 2012, “AEB Test Procedures.”
(9) ISO, 2014, “ISO 11270 Intelligent transport systems - lane keeping assistance systems - performance requirements and test procedures.”
(10) NHTSA, 2013, “Preliminary Statement of Policy Concerning Automated Vehicles.”
(11) Ioannou, P. and Stefanovic, M., 2003, Evaluation of the ACC Vehicles in Mixed Traffic: Lane Change Effects and Sensitivity Analysis, UCB-ITS-PRR-2003-3.
(12) Ioannou, P., 1998, Development and Experimental Evaluation of Autonomous Vehicles for Roadway/Vehicle Cooperative Driving, UCB-ITS-PRR-98-9.
(13) Sun, Y., Xiong, G., Song, W., Gong, J., and Chen, H., 2014, “Test and Evaluation of Autonomous Ground Vehicles,” Advances in Mechanical Engineering, pp. 3~6.
(14) 이준영, 2015, “Robust Model Predictive Control based Automated Driving Control Algorithm for Improvement of Safety and Ride Comfort,” 서울대학교 기계항공공학부 박사 학위 논문.