

자율주행 차량의 도로 평면선형 기반 차로이탈 허용 범위 산정

Estimating a Range of Lane Departure Allowance based on Road Alignment in an Autonomous Driving Vehicle

김 영 민*

(Youngmin Kim)

(Korea Institute of Civil engineering
and building Technology)

김 형 수**

(Hyungsoo Kim)

(Korea Institute of Civil engineering
and building Technology)

요 약

자율주행 차량은 변화하는 도로환경에 스스로 대응 가능하여야 하며, 인간 운전자 수준의 도로환경 인지성능을 확보하여야 한다. 자율주행 차량의 센서 중 영상센서는 주행방향 결정 및 차로이탈 방지 등 조향제어 수행을 위하여 차선인식 기능을 수행한다.

현재 제시된 영상센서의 차선인식 성능기준은 ADAS(Advanced Driver Assistance System)과 관련된 ‘운전자 보조’ 관점의 성능기준으로서, 자율주행 차량의 ‘주체적 인지’를 위한 성능조건과 상이할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 자율주행 시 차선인식이 비정상적으로 지속되어, 직선구간에서 곡선구간으로 진입하는 차량이 조향실패에 따라 차로를 이탈하는 상황을 가정하였다. 차량 이동궤적을 기반으로 차로이탈 상황을 모형화하고, 차로이탈 허용 수준에 따른 자율주행 차량 영상센서 성능수준을 제시하였다. 분석 결과 승용차 조건에서 차선인식 기능이 1초 이상 연속적인 오작동을 일으킨다면 차로이탈에 의한 위험한 상황에 놓일 수 있으며, 자율주행 차량을 위하여 현재 ADAS 영상센서 성능평가 방법에서의 차로이탈조건보다 심각한 차로이탈상황을 고려한 영상센서 성능평가 방안이 필요할 것으로 판단된다.

핵심어 : 자율주행, 차선인식, 차로이탈, 영상센서, 도로 평면선형

ABSTRACT

As an autonomous driving vehicle (AV) need to cope with external road conditions by itself, its perception performance for road environment should be better than that of a human driver. A vision sensor, one of AV sensors, performs lane detection function to percept road environment for performing safe vehicle steering, which relates to define vehicle heading and lane departure prevention. Performance standards for a vision sensor in an ADAS(Advanced Driver Assistance System) focus on the function of ‘driver assistance’, not on the perception of ‘independent situation’. So the performance requirements for a vision sensor in AV may different from those in an ADAS. In assuming that an AV keep previous steering due to lane detection failure, this study calculated lane departure distances between the AV location following curved road alignment and the other one driving to the straight in a curved section. We analysed lane departure distance and time with respect to the allowance of lane detection malfunction of an AV vision sensor. With the results, we found that an AV would encounter a critical lane departure situation if a vision sensor loses lane detection over 1 second. Therefore, it is concluded that the performance standards for an AV should contain more severe lane departure situations than those of an ADAS.

Key words : Autonomous driving, Lane detection, Lane departure, Vision sensor, Road alignment

† 본 연구는 국토교통과학기술진흥원 교통물류연구사업 “스마트 자율협력주행 도로시스템 개발” 과제의 지원으로 수행하였습니다.

‡ 본 논문은 2016년 한국ITS학회 춘계학술대회에 발표되었던 논문을 수정·보완하여 작성하였습니다.

* 주저자 및 교신저자 : 한국건설기술연구원 도로연구소 전임연구원

** 공저자 : 한국건설기술연구원 도로연구소 연구위원

† Corresponding author : Youngmin Kim(Korea Institute of Civil engineering and building Technology), E-mail ymkim1007@kict.re.kr

‡ Received 30 May 2016; reviewed 6 July 2016; Accepted 9 August 2016

I. 서 론

최근 자율주행(Autonomous Driving)에 대한 사회 전반적인 관심이 높아지고 있다. 자율주행 차량은 운전자의 인지 및 제어기능을 자동화한 차량으로서, 2000년대 후반 이후 미국 구글사 등 IT 기업 및 전통적 자동차 제작사들이 자율주행 차량의 개발을 위해 다수의 연구개발을 수행하고 있다. 산업계에서의 투자가 활성화됨에 따라, 사회 전반적으로도 자율주행 차량의 보급에 따른 사회 변화가 예상된다. 특히 교통안전 향상과 관련하여, 자율주행 차량의 등장에 따라 운전자 과실에 의한 교통사고 저감을 통한 교통안전 향상에 대한 기대감이 높아지고 있다.

자율주행 차량은 운전자의 인지 기능을 대체함에 있어, 다양한 차량센서를 활용한다. 자율주행 차량은 차량센서를 통해 수집한 다양한 유형의 데이터를 바탕으로 상황을 판단하고, 상황에 가장 적절한 전략에 따라 주행한다. 따라서 차량센서의 인지 성능은 자율주행의 안전성을 결정짓는 가장 중요한 요인 중 하나가 된다.

자율주행 차량에 어떠한 유형의 센서를 어떻게 활용할 수 있을 것인가의 방법론에 대해서는 현재 많은 연구가 이뤄지고 있다. 하지만 다양한 자율주행 차량 개발 선행 연구사례에서 공통적으로 적용된 센서군이 존재하는데, 이는 자율주행 기술개발 전략이 ADAS(Advanced Driver Assistance System)기능의 고도화라는 관점으로 상당부분 수립되어 있기 때문이다. ADAS에서는 차량 단독 및 차량 간 발생 가능한 교통사고 유형을 정의하고, 사고를 회피하기 위해 위험 상황을 센서를 통해 감지하여 상황 회피를 위한 알람 혹은 제어 메시지를 발생한다. ADAS에 활용되는 센서 중 핵심을 이루는 센서가 레이더(Radar) 및 영상센서(Vision sensor)이다.

영상센서는 인간의 눈과 유사한 역할을 수행하는 센서로서, 외부 환경의 영상을 취득, 이를 분석하여 차량 제어에 필요한 정보를 추출하는 센서를

의미한다. ADAS에서 영상센서는 차선인식(Lane detection) 및 표지판인식 기능을 담당한다. 특히 차선인식 기능은 차로이탈경고시스템(LDWS : Lane Departure Warning System) 및 차로유지지원시스템(LKAS : Lane Keeping Assistance System)에 활용되어 차량의 횡방향 제어(조향)에 직·간접적 영향을 미친다. 영상센서를 활용한 차선인식 기능은 자율주행에도 매우 유사하게 적용될 것으로 예상되는데, 이는 ‘차량은 차로영역 내의 공간에서 주행하여야 한다’라는 기본 원칙이 유지되기 때문이다. 차로변경과 같은 특수한 상황이 아니라면 차량은 항상 차로영역 내에 위치하여야 하는데, 이를 수행하기 위해서는 영상센서를 통한 차선에 대한 판별이 필요하다. 따라서 자율주행 차량의 영상센서는 차선을 연속적으로 감지할 수 있어야 하며, 주행 과정에서 변화하는 도로 여건에도 실시간으로 대응할 수 있어야 한다.

ADAS에서 차선인식 성능 수준에 대한 조건은 인간이 차량을 조작함에 따라 발생하는 차로이탈 상황을 영상센서가 감지하여 적절한 경고 혹은 제어조작을 수행할 수 있는가에 대한 기준만 제시되어 있다. 하지만 영상센서가 실시간으로 변화하는 도로환경을 어느 정도 수준까지 정확히 탐지하여야 안전을 확보할 수 있는가에 대한 기준은 제시되어 있지 않다. 즉 자율주행 차량 관점에서 차선인식 오류에 따른 차로이탈이 발생하였을 때 ‘어느 수준까지’라는 기준에 대한 검토가 필요하다.

본 연구의 목적은 자율주행 차량의 차선인식 실패시 도로의 평면선형을 기반으로 허용 가능한 차로이탈 범위를 산정하는 것이다. 도로의 평면선형 조건은 도로의 곡률 및 차로의 폭원에 영향을 미치며, 이는 차량이 도로를 안전하게 주행하기 위한 조건과 연계된다. 본 연구에서는 도로의 설계속도별 곡률 및 차로폭원 조건에 따라 직선 구간에서 곡선

1) ‘Lane detection’ 기능은 입력영상에서 차선을 검색하여 차로영역을 식별하는 기능으로서, 본 연구에서는 차선 검색 단계에 초점을 맞춰 ‘차선인식’으로 용어를 통일하고자 함

구간으로 차량이 진입하였을 때 차선인식 기능 실패로 직선 구간의 조향을 유지 시 곡선구간에서 차량의 횡방향 이탈거리를 산정하였다. 이를 활용하여 특정한 도로 평면선형 조건에서 자율주행 차량의 차선인식 성능 오류에 따른 차로이탈이 어느 정도 범위까지 허용될 것인가를 검토하였다.

본 연구는 다음과 같은 순서로 진행되었다. 다음장에서 차선인식 기능 관련 ADAS 성능 기준 및 관련 선행연구를 검토하였다. 3장에서는 시나리오 설정 및 횡방향 차로 이탈거리 산정 방법을 제안하였다. 4장에서는 횡방향 차로 이탈거리에 대한 자율주행 차량 차로유지 성능 요구사항을 도출하고, 이를 자율주행 차량의 영상센서 기준에서 검토하였다. 마지막으로 본 연구의 결과에 대한 해석과 결론을 정리하였다. 본 연구는 자동차 중심의 자율주행 평가 기준에 대하여 도로 조건을 고려하여 검토한 것으로 향후 관련 기술의 평가 기준 산정 시 공헌할 것으로 기대한다.

II. 관련 기준 및 선행연구 고찰

차로이탈 발생 성능시험 조건은 차선인식을 기반하는 ADAS(LDWS, LKAS 등) 관련 표준 및 규정에서 다루고 있다. 현재 국내에는 국토교통부의 ‘자동차안전도평가지험 등에 관한 규정’에서 LDWS 관련 성능 시험방법이 제시되어 있으며[1], 한국산업표준(KS) R 1172호 ‘승용차용 차선이탈 경고장치 성능시험’ 항목에서 도로 환경조건 정의 및 시험방법이 제시되어 있다[2]. 국제적으로는 ISO(국제표준화기구)의 ISO 17361에서 LDWS 표준 시험절차가 제시되어 있으며[3], 미국 NHTSA(National Highway Traffic Safety Administration)의 ‘Lane departure warning system confirmation test and lane keeping support performance documentation’에서 LDWS 및 LKAS에 대한 성능시험방법 및 성능요구조건을 제시하였다[4]. 국내외 관련 규정에서 제시하는 시험 방법론 및 성능 기준을 정리하면 다음 <Table 1>과 같다.

(Table 3) Vision sensor for lane detection performance requirement and test procedure in several ADAS test standards

standard	MOLIT (2015)	KS R 1172 (2012)	ISO 17361 (2007)	NHTSA (2013)
Road Align-ment	Straight section	Road curvature I ≥ 500m II ≥ 250m	Straight section Road curvature I ≥ 500m II ≥ 250m (Within ± 10%)	Straight section above 300m
Lane width	Not specified ²⁾	Not specified	Follow nation's standard 2.75~3.5m (Korea)	3.7~4.3m
Land condition	Fine condition	Not specified	Fine condition	'Very good' in MUTCD
Environmental condition	Fine day, Daytime	Fine, Rain, Snow, Foggy, Tunnel	Dry surface Temperature 10±30℃ Visibility above 1km	0~38℃ Fine day Visibility above 5km
Vehicle speed	65km/h	I ≥ 100k m/h II ≥ 60 km/h	I ≥ 20 m/s II ≥ 17 m/s	45mph (72km/h)
Lateral velocity	0.1~0.8 m/s (1st, 3rd) 0.1~0.4m/s (2nd, 4th) 0.5~0.8m/s)	Not specified Real road condition)	0~0.8m/s (1st) 0~0.4m/s (2nd) 0.4~0.8 m/s)	(LDWS) Within 0.1~0.6 m/s (LKAS) Same as LDWS
Accepted departure	within 0.3m		(car) : Within 0.3m (truck, bus) Within 1m	(LDWS) Within 0.75m (LKAS) Not specified

시험 방법론 및 성능 기준을 검토하였을 때, LDWS 및 LKAS 성능검증을 위해 시험주로 환경에

2) '도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙'을 따름 명시

서 인위적으로 횡방향 차로이탈을 발생시켜 평가를 수행하고 있다(횡방향 이탈속도 발생 관련 조건 존재). 평가를 위한 도로조건 중 곡선구간에 대한 검토는 ISO 17361에서 다루어지고 있으며, 시험주요 환경에서 차로폭은 해당 국가의 도로여건에 따라 제시되고 있음을 확인할 수 있다. 성능실험 수행 환경에 대해서는 대부분 양호한 환경(맑은날, 충분한 가시거리가 확보된 환경)에서의 검증을 원칙으로 하나, KS R 1172에서는 실 도로에서 나타날 수 있는 다양한 환경조건에 대한 성능검증이 이뤄져야 함을 명시하고 있다.

2013년 국내 자동차안전도평가(KNCAP)에 LDWS 항목이 추가되고, 올해 시행을 목표로 LKAS에 대한 기준 수립이 진행 중임에 따라[5], 국내 관련 연구 사례가 증가하고 있다. Cho et al.(2012)[6]은 실 도로 환경에서의 LDWS 성능평가 방법론 개발을 위하여, 해외 관련 기준 동향을 상호 비교하고 국내 차선 도색기준을 적용한 LDWS 시험장 및 평가시스템을 구축하여 유럽의 시험방법을 기준으로 하여 실차시험을 실시하고 결과를 분석하였다. 해당 연구 성과는 현재 국내에서 적용되는 성능기준[1]의 근간이 되는 연구로 파악된다. Kim et al.(2013)[7]은 LDWS 오작동 주행평가를 ISO 17361 기준을 기반으로 DGPS(Differential Global Positioning System)와 영상정보를 활용하여 수행하는 방법론을 개발하였다. 700m 직선주요에 이탈경계선을 표시하고, 경고 평균속도 72km/h로 주행한 후 LDWS 기능이 정상적인 조건에서 작동하였는지를 DGPS 기반 평가방법 및 영상 기반 평가방법으로 검증하여, 고가의 동역학 시뮬레이션 장비 없이 신뢰성있는 평가방법론 개발이 가능함을 확인하였다. 우현구 등은 승용자동차의 LKAS 주행 성능평가 방법론 개발을 위하여, 국내·외 LDWS 및 LKAS 관련 기준을 검토하였다[8]. 특히 해당 연구에서는 차로의 폭원 및 도로 곡선반경 등에 대한 국내 기준인 ‘도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙’[9]을 기반하여 LKAS 평가 기준 결정인자를 검토하였으며, LKAS 시험도로 조건을 제시하고 평가시스템을 구축하여 실차 기반 성능수행을 시행하였다.

전술한 연구사례에서 LDWS 및 LKAS에 대한 성

능기준은 기능 작동 여부에만 초점이 맞춰져, 영상 인식 실패 환경에 대해서는 검토가 이뤄지지 않은 것으로 판단된다. 이는 해외 기준에서 LDWS 및 LKAS에 대한 성능기준을 ‘양호한 기상환경 및 차선도색상태’를 기준으로 수행하는 것을 권고하기 때문으로 해석된다[1, 3]. 기상환경 혹은 차선도색 상태가 열악하다면 차선인식 성능이 저하되나, 양호한 환경을 가정한다면 환경적 요인에 따른 차선 인식 성능 저하 발생 가능성이 낮기 때문에 LDWS 및 LKAS 수행 과정에서 차선 인식실패에 따른 오류 발생을 배제하는 것으로 판단된다. 하지만 실도로 환경에서의 LDWS 및 LKAS 수행을 위해서는, 차선인식 실패시 도로선형에 따른 이탈을 고려할 필요가 있다. 이는 영상센서 기반 차선인식 성능이 직선구간보다는 곡선구간에서 떨어지기 때문으로서[10], 차선인식에 실패하면 관련 기능의 동작 자체가 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 도로 선형이 차선인식 기능에 영향을 준다는 가정 하에 연구를 진행하고자 한다.

Ⅲ. 횡방향 차로 이탈 허용범위 산정 방법

차선인식 관련 ADAS 성능기준 및 연구사례는 모두 ‘차량이 운전조작을 통해 차로를 이탈하는 경우’에 대한 검토사례이다. 이는 유사한 자율주행 차량에 적용되었을 때, 안전도를 평가할 수 있는 기준의 근간으로 활용 가능하다. 다만, 전술한 성능기준 및 연구사례에는 ‘횡방향 이탈속도를 인간이 제어할 수 있다’라는 가정이 존재한다. 자율주행 차량에서 횡방향 이탈속도는 도로 평면선형을 기반으로 한 차선도색 선형에 따라 달라지게 된다. 따라서 자율주행 차량은 도로 환경에 따라 제공되는 횡방향 이탈속도 조건에 적응하여 차선인식 및 연관 기능을 수행할 수 있어야 한다.

자율주행 차량 주행 메커니즘에서, 차선인식 기능이 실패하였을 경우에는 타 시설물(예 : 연석)을 참조하여 조향을 수행하거나, 정밀도로지도에 입력된 3차원 도로 선형정보를 활용하는 것이 가능한

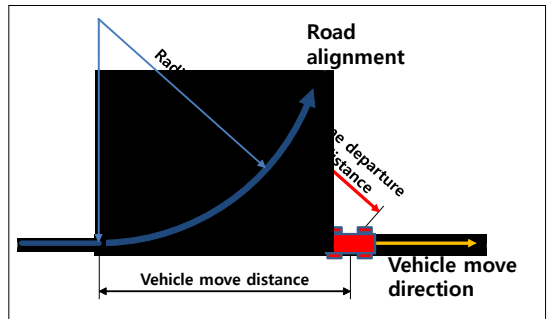
것으로 알려져 있다[11]. 이는 실차 환경에서 의도적으로 기능적 중복성(Redundancy)을 확보하여 특정 기능이 실패하더라도 다른 기능을 적용하여 문제를 해결할 수 있는 구조(Fail safety, 고장안전)를 확보하고자 하기 때문이다. 다만, 본 연구에서 가정하고자 하는 상황은 ‘타 유형의 참조정보 없이 차선인식 정보만으로 도로 선형을 추정하여 조향을 수행하여야 하는 상황’으로서, 현장에서 발생할 수 있는 최악의 상황을 가정하고자 한다.

차량의 고장안전 관점에서 차량이 보유한 도로 선형정보가 잘못되었을 때 선형을 참조할 수 있는 별도의 시설물이 존재하지 않는다면, 차량의 조향은 차선인식 기능에 의존하여야 한다. 차선인식 기능에 의존하여 조향을 수행하는 상황에서 차선인식까지 실패한다면, 차량은 조향 방향을 결정할 수 없게 된다. 이와 같은 상황은 정상적인 자율주행이 불가능한 최악의 상황으로서, 자율주행 차량은 운전자에게 제어권을 이양(Hand over)하고자 할 것이다. 다만 제어권 이양에 소요되는 시간만큼은 불완전한 자율주행이 지속될 것이며, 이 때 자율주행 차량의 종방향 거동이 문제가 될 수 있다.

위급상황 시 자율주행 차량이 어떠한 주행전략을 채택할 것인가에 대한 판단 역시 다양한 경우가 존재할 수 있을 것으로 생각되나, 본 연구에서는 자율주행 차량이 ‘차선인식의 마지막 성공 시 조향방향을 유지하며 주행한다’라는 가정을 수립한다. 이러한 주행전략을 채택하였을 때, 동일한 도로 평면선형조건 구간 내에서는 차선인식 실패에 따른 차로이탈 발생 가능성이 크게 줄어들게 된다. 반면 도로의 평면선형조건이 달라지는 구간에서는 차선인식 실패에 따른 차로이탈 발생 가능성이 존재하며, 일정 시간 내에 차선인식에 다시 성공하여 횡방향 이탈에 대응하거나, 운전자에게 제어권이 완전히 이양되지 못한다면 차량은 차로 영역 바깥으로 벗어나게 된다.

실 도로 환경에서, 도로 평면선형의 변화 상황은 크게 다음과 같이 세가지로 정리할 수 있다: 첫째 직선구간 → 곡선구간, 둘째 곡선구간 → 직선구간, 셋째 곡선구간 → 곡선구간(배향곡선구간). 본 연구

에서는 이 중 자율주행 차량이 직선구간에서 곡선구간으로 선형이 변화하는 과정에서 차선인식에 실패하는 상황을 가정하였다. 이것은 차선인식 알고리즘의 성능이 직선구간 보다는 곡선구간에서 떨어지므로[10], 곡선에서 직선으로 전이되는 구간보다 직선에서 곡선으로 전이되는 구간에서 일시적 차선인식 오류가 발생할 가능성이 상대적으로 크기 때문이다. <Fig. 1>은 직선에서 곡선으로 전이되는 구간에서 차량이 차선인식 실패에 의거하여 직진 상태의 조향을 유지하며 차로이탈이 발생하는 모습을 그림으로 설명하고 있다.



<Fig. 1> Lane departure distance calculation method due to steering malfunction

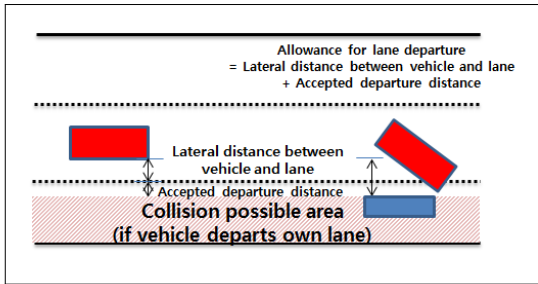
이 때, 횡방향 차로 이탈량을 다음 수식과 같이 산정할 수 있다. 차량의 횡방향 차로 이탈량은 차량 주행속도와 조향 실패 후 주행 지속시간에 영향을 받는다.

횡방향 차로 이탈량

$$= \sqrt{(\text{차량속도} \times \text{시간})^2 + (\text{곡선반경})^2} - \text{곡선반경} \dots (1)$$

자율주행 차량이 차로 이탈에 따라 인접 차로를 침범할 때, 인접차로 이탈 허용량을 검토할 수 있다. 이는 LDWS 및 LKAS 관련 기준에서 ‘이탈 허용 수준’을 제시한 것과 동일한 맥락으로, 차량의 차로이탈이 발생하더라도 차로를 침범당한 영역을 주행하는 차량에 측방여유가 존재하여 두 차량간 상충이 발생하지 않다는 점에서 착안한 것이다[1, 3, 4]. 인접차로 이탈허용량을 고려하였을 때, 차선

인식 실패에 따른 조향 오류로 발생하는 차로이탈 허용량은 다음과 같다.



<Fig. 2> Calculation method for allowance for lane departure

차로이탈허용량
 = 단방향 측방여유 + 인접차로이탈허용량

$$= \frac{(\text{차로폭원} - \text{차량폭원})}{2} + \text{인접차로이탈허용량} \dots (2)$$

횡방향 차로 이탈량과 차로 이탈 허용량이 같아지는 차로이탈 시간을 ‘차로 이탈 허용시간’으로 정의하며, 본 연구에서는 차로 이탈 허용시간을 자율주행 차량 영상센서의 차선인식 성능 오류 최대 허용시간으로 간주한다.

IV. 자율주행 차량 차로유지 성능 요구사항 도출

본 연구에서는 ‘도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙’에서 제시한 도로 설계기준을 적용하여, 3장에서 제시한 평면선형 전이 구간에서의 횡방향 차로이탈 허용범위 산정 방법으로 자율주행 차량의 차로유지 성능 요구사항을 도출하였다.

1. 성능 기준 도출을 위한 차량 주행 환경

국내 도로 설계기준에서, 평면선형에 대한 기준은 설계속도(Design Speed)를 기반으로 이루진다. ‘도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙’에는 도로의 설계속도에 따른 곡선반경 및 차로 폭원에 대한 조건이 제시되어 있다. 한편 ‘도로의 구조·시설 기준

에 관한 규칙’에는 도로를 설계하기 위한 기준자동차에 대한 정의가 내려져 있다. 본 연구에서는 다음 <Table 2>와 같은 차량 주행 환경 가정 하에 차선인식 성능 기준을 도출하고자 한다.

<Table 6> Assumption for vehicle running environment

Design speed	Expressway : 100km/h Multi-lane road : 80km/h 2-lane road : 60km/h
Regulation speed and Running speed	Same as design speed
Standard vehicle	Passenger car (Width 1.7m) Semi-trailer (Width 2.5m)

차선인식 성능 기준 도출을 위한 기준자동차 규격은 ‘도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙’의 설계 기준자동차 규격 중 승용자동차(폭원 1.7m) 및 세미트레일러(폭원 2.5m)를 가정하는데, 이는 장래 자율주행 기술의 주요 적용 대상은 승용차임을 고려하고, 조향 실패에 따른 차로이탈 상황을 상정하였을 때 차량의 폭원이 가장 넓어 조향 오류에 의한 차로이탈이 가장 쉽게 일어날 수 있는 유형인 세미트레일러의 경우를 모두 검토해보기 위함이다. 도로 구조에 대한 조건은 다음 <Table 3>과 같이 정의하였다.

<Table 7> Assumption for road alignment

Lane width	Expressway(4-lane) : 3.5m Multi-lane road & 2-lane road (rural) : 3.25m Multi-lane road & 2-lane road (urban) : 3m
Superelevation	8%
Radius (for road centerline)	Expressway(4-lane) : 630m Multi-lane road(4-lane) : 250m 2-lane road : 130m
Radius (for lane centerline of most innermost lane)	Expressway(4-lane) : 623.25m Multi-lane road(rural) : 244.125m Multi-lane road(urban) : 244.5m 2-lane road (rural) : 125.125m 2-lane road (urban) : 125.5m

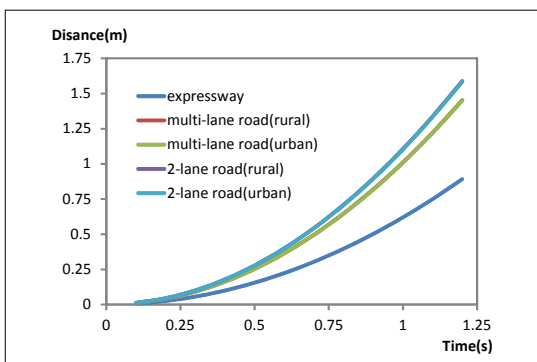
도로의 곡선반경은 편경사와 관련되는데, 본 연구에서는 설계속도에 따른 최소 곡선반경 상황을 검토하고자 편경사량을 최대로 가정하였다. 한편 ‘도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙’에 제시된 곡선반경 기준은 도로중심선 기준의 곡선반경으로서, 차량의 주행 궤적을 추정하기 위한 곡선반지름으로 환산하기 위해서는 도로의 폭원을 고려할 필요가 있다. 본 연구에서는 도로의 표준적 종단선형 조건(고속도로 및 다차로 도로에 중앙분리대 영역 존재)을 고려하여, 최 내측차로 차로중심선 기준 곡선반경을 연산에 활용하였다. 본 연구에서 고속도로 및 다차로도로는 4차로를 가정하며, 이 때 차로이탈 발생 차량은 최 내측차로를 주행하는 것으로 가정하였다.

2. 성능 기준 도출 분석결과

지금까지 제시된 수식과 차량 및 도로 관련 가정을 바탕으로 차로이탈 시간과 거리를 산정하였다. 인접차로 이탈 허용량은 LDWS 및 LKAS 관련 기준 중 가장 엄격한 MOLIT(2015)의 기준[1]을 적용, 0.3 m로 가정하였다.

1) 차로 이탈 시간과 거리

도로의 설계속도별 곡률 및 차로폭원 조건에 따라 직선 구간에서 곡선 구간으로 차량이 진입하였을 때 곡선구간에서 차량의 횡방향 차로 이탈량을 산정하였다. <Fig. 3>은 주행시간에 따른 횡방향 차로 이탈량을 표현한 것이다.



<Fig. 3> Lateral lane departure distance versus lane departure time along to road alignment condition

<Fig. 3>에 의하면 ‘지방부’와 ‘도시부’ 도로에 대한 차이는 거의 없어 선이 겹쳐진 것처럼 나타났다. 이것은 차로폭원의 크기가 곡선반경 크기보다 매우 작기 때문에 주행시간과 횡방향 차로 이탈량 간의 관계에 큰 영향을 미치지 않기 때문이다. 반면 고속도로와 다차로도로, 2차로도로의 곡선반경 크기 차이에 의한 횡방향 차로 이탈량 관계의 차이는 명확히 나타남을 확인할 수 있다. 이는 선형이 불량한 구간에서 불안정한 자율주행에 따른 횡방향 차로이탈 영향이 보다 크게 나타남을 의미한다.

2) 차로 이탈 허용시간

자율주행 차량이 차로 이탈에 따라 인접 차로를 침범할 때, 차로 이탈 허용량을 고려하여 허용시간을 산정하였다. 차로 이탈 허용량은 수식 (2)에서 제시한 것과 같이, 차량과 차로 간의 횡방향 측방여유(차로 전체에 대한 측방여유의 1/2)와 인접차로에서 이탈이 허용된 범위(인접차로 이탈 허용량)의 합으로 나타낼 수 있다. 전술한 바와 같이 인접차로 이탈 허용량은 0.3m로 가정하였으며, 횡방향 측방여유의 값은 <Table 2>의 기준자동차 규격 및 <Table 3>의 도로 유형별 차로폭 기준을 적용하여 <Table 4>와 같이 산정하였다.

<Table 4> Calculation for Allowance for lane departure(m)

Remark	Express way (4-lane)	Multi-lane road (rural)	Multi-lane road (urban)	2-lane road (rural)	2-lane road (urban)
Passenger car	1.2	1.075	0.95	1.075	0.95
Semi-trailer	0.8	0.675	0.55	0.675	0.55

차로 이탈 허용시간은 앞서 횡방향 차로 이탈량과 차로 이탈 허용량이 같아지는 시간으로 정의하였다. 다음 <Table 5>는 도로 유형별 차로 이탈 허용량 및 주행시간에 따른 횡방향 차로이탈량 관계를 활용하여 산출한 차로 이탈 허용시간이다.

<Table 5> Lane departure maximum acceptance time for different road alignment (sec)

Remark	Express way (4-lane)	Multi-lane road (rural)	Multi-lane road (urban)	2-lane road (rural)	2-lane road (urban)
Passenger car	1.39	1.03	0.97	0.98	0.92
Semi-trailer	1.13	0.81	0.73	0.78	0.70

<Table 5>에서 차로폭원이 허용시간에 영향을 미침을 확인할 수 있는데, 이는 차로폭원이 차로 이탈 허용량에 큰 영향을 미치지 때문이다. 분석 결과, 영상센서 차선인식 오류 발생 시 0.7초 이내에 신규로 영상센서에서 영상 프레임을 획득, 이를 활용하여 차선인식을 수행할 수 있어야 한다. 다만, 현재 LDWS, LKAS 기술 적용 사례가 많은 승용차의 경우에 영상센서의 성능 기준치는 0.92초로 완화되며, 도로 조건을 고려하였을 때 대략적으로 1초 이내의 차선 재인식 시간을 확보한다면 국내 도로 환경에서의 활용에 큰 무리가 없을 것으로 판단한다.

3) 횡방향 이탈속도

횡방향 이탈속도는 주행시간과 차로 이탈량의 관계에 따라 다음과 같이 유도 가능하다.

$$\text{횡방향이탈속도} = \frac{\text{주행속도}^2 \times \text{주행시간}}{\text{곡선반경} + \text{이탈량}} \dots\dots (3)$$

도로 평면선형 조건에 따라 차로이탈이 발생하였을 때의 최대 횡방향 이탈속도는 다음 <Table 6>와 같이 산출된다. 이 때 산식에 적용한 차로이탈량은 앞서 ‘차로 이탈 허용시간’을 산정하였을 때 적용한 차로 이탈 허용량이 아닌, 단방향 측방여유만을 고려하였다. 이는 실질적으로 차로이탈이 발생한 순간의 횡방향 이탈속도를 산출한다는 측면에서 적절할 것으로 판단한다.

<Table 6> Maximum lateral velocity while lane departure according to road alignment(m/s)

Remark	Expressway (4-lane)	Multi-lane road (rural)	Multi-lane road (urban)	2-lane road (rural)	2-lane road (urban)
Passenger car	1.49	1.77	1.62	1.85	1.69
Semi-trailer	1.11	1.23	1.00	1.29	1.05

<Table 6>의 결과를 ADAS 성능기준 평가 방법론과 비교하였을 때, ADAS에서 횡방향 이탈속도에 대한 성능기준은 최대 0.8 m/s 수준까지 평가를 하는 것으로 제시되어 있다. 하지만 자율주행 차량이 실 도로상황에서 극복하여야 하는 횡방향 이탈속도는 최대 1.85 m/s까지 나타나는 것으로 확인되어, 차로의 급격한 횡방향 이동에 따른 차선인식 오류 발생 가능성을 고려한 평가 방법론이 적용되어야 할 것으로 판단한다.

V. 결론

본 연구에서는 도로 평면선형 조건을 기반으로 자율주행 차량의 곡선 구간 차로이탈 허용 기준에 따른 영상센서 기반 성능 요구기준을 검토하는 연구를 수행하였다. 분석 결과 영상센서의 차선인식 기능은 승용차 조건에서 최소 0.92초, 세미트레일러 조건에서 최소 0.7초 이상 오작동을 일으킨다면 차량이 차로이탈 상황에 놓일 수 있다. 한편 현재 LDWS, LKAS의 적용이 활발히 이뤄지고 있는 승용차 조건을 고려하였을 때, 자율주행 차량영상센서의 차선인식 기능이 대략적으로 1초 이상 오작동이 연속적으로 발생하여 적절한 조향 방향을 확보하지 못한다면 차량이 차로이탈 상황에 놓일 수 있음을 확인할 수 있다. 한편 도로 선형과 차량 진행방향의 불일치로 인하여 발생하는 횡방향 이탈속도를 ADAS 성능평가방안에서 제시하고 있는 기준값과 비교하였을 때, 자율주행 조건에서는 보다 큰 횡방향 이탈속도 발생 상황에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구는 자율주행 차량의 차선인식 기능과 관련한 평가 방법론에 대하여, 자율주행 차량 관점에서 성능 요구기준을 도출하는 방법론을 개발하였다는 점에서 의의가 존재하나 실 도로 환경에서 적용 가능한 평가지표를 개발하기 위해서는 보다 정밀한 방법론의 적용이 필요할 것으로 판단된다. 특히 배향곡선 구간 및 곡선구간 내에서의 차량 거동에 대한 보다 면밀한 모형화가 필요하며, 이를 위해 차량 동역학 관련 모형의 적용이 가능할 것으로 판단된다. 한편 자율주행 차량의 도로선형 추종방법에 대한 검토가 필요하며, 조향 정보 미 획득 시 차량 조향방향 설정에 대한 전략 수립 또한 검토하여야 할 것으로 판단한다. 한편 곡선부 주행 환경을 모형화하고, 차로이탈 허용 범위를 산정함에 있어 ‘공간적’인 범위가 아닌 ‘시간적’인 범위, 즉 차량의 주행 속도와 곡선구간의 곡선반경, 차로폭원 등을 고려한 임계 시간에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다. 이를 위하여 실 도로상 곡선구간의 차로폭원 선정 방법론에 대한 면밀한 검토 및 곡선구간 주행속도 결정방법에 대한 검토가 필요하다.

본 방법론에서 제시한 차로이탈 허용시간 기준을 적용하여 자율주행 차량 운행구간의 차선 정비 기준 수립에 활용 가능할 것으로 판단한다.

REFERENCES

- [1] MOLIT(2015), *Standards for automotive safety evaluation tests*.
- [2] Korea Standards Association(2012), *Test method of lane departure warning system for passenger car-Road and ambient test conditions and test method*, KS R 1172.
- [3] International Organization for Standardization(2007), *Intelligent transport systems-Lane departure warning systems-Performance requirements and test procedures*, ISO 17361.
- [4] NHTSA(2013), *Lane departure warning system confirmation test and lane keeping support performance documentation*, NHTSA-2015-0119-0033.
- [5] Choi I. S. and Cho S. W.(2014), “Active safety area of KNCAP,” *Auto Journal*, vol. 36, no. 2, pp.26-31.
- [6] Cho S. S., Lim J. H., Cho S. W., Kim K. H. and Kim S. S.(2012), “A study on the performance test method of LDWS in a real road condition,” *KSAE Division General Conference 2012.5*, pp.1060-1065.
- [7] Kim M. W., Moon S. C., Joo D. N., Lee J. K., Kim B. S. and Lee S. G.(2013), “Evaluation on performance of LDWS malfunction using DGPS by vision camera,” *KSAE Division General Conference 2013.5*, pp.929-933.
- [8] Woo H. G., Yong B. J., Kim K. J. and Lim J. H.(2016), “Road test scenario and performance assessments of lane keeping assistance system for passenger vehicles,” *Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers*, vol. 24, no. 2, pp.255-263.
- [9] MOLIT(2013), *Handbook for Rules about the Road Structure & Facilities Standards*.
- [10] Seo W. I. and Kim S. W.(2012), “Vision based real-time curve land detection algorithms for ADAS,” *IEEK Fall Conference 2012.11*, pp.947-949.
- [11] Chun C. M., Suh S. B., Lee S. H., Roh C. W., Kang S. C. and Kang Y. S.(2010), “Autonomous navigation of KUBE(KIST Unmanned Vehicle Electric),” *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 16, no. 7, pp.617-624.

저자소개



김 영 민(Kim, Young-min)

2016년 3월~현재 : 서울대학교 건설환경공학부 박사과정(교통공학전공)

2011년 6월~현재 : 한국건설기술연구원 도로연구소 전임연구원

2008년 3월~2011년 2월 : 서울대학교 건설환경공학부 공학석사(교통공학전공)

e-mail : ymkim1007@kict.re.kr



김 형 수(Kim, Hyung-soo)

2007년 매릴랜드대학교 박사 졸업(교통전공)

1995년 연세대학교 석사 졸업(교통전공)

2008년 3월~현재 : 한국건설기술연구원 연구위원

1995년 1월~1999년 11월 : 한국건설기술연구원 연구원

e-mail : hsookim@kict.re.kr