

# 안전 영역 기반 자율주행 차량용 주행 경로 생성 및 추종 알고리즘 성능평가 연구

유진수\* · 강경표\*\* · 이경수\*,†

## Performance Evaluation of Safety Envelop Based Path Generation and Tracking Algorithm for Autonomous Vehicle

Jinsoo Yoo\*, Kyeongpyo Kang\*\*, Kyongsu Yi\*,†

**Key Words** : Autonomous vehicle(자율주행 자동차), Safety envelope(주행 안전 영역), Path generation(주행 경로 생성), Path tracking(주행 경로 추종)

### ABSTRACT

This paper describes the tracking algorithm performance evaluation for autonomous vehicle using a safety envelope based path. As the level of autonomous vehicle technologies evolves along with the development of relevant supporting modules including sensors, more advanced methodologies for path generation and tracking are needed. A safety envelope zone, designated as the obstacle free regions between the roadway edges, would be introduced and refined for further application with more detailed specifications. In this paper, the performance of the path tracking algorithm based on the generated path would be evaluated under safety envelop environment. In this process, static obstacle map for safety envelope was created using Lidar based vehicle information such as current vehicle location, speed and yaw rate that were collected under various driving setups at Seoul National University roadways. A level of safety was evaluated through CarSim simulation based on paths generated with two different references: a safety envelope based path and a GPS data based one. A better performance was observed for tracking with the safety envelop based path than that with the GPS based one.

### 1. 서론

레이더, 카메라, 레이저 같은 인지 센서들의 발달과 더불어 특히 DARPA Grand Challenge나 Urban Challenge 같은 자율 주행 경연대회가 활발히 진행되면서 자율주행 연구에 대한 관심은 전 세계적으로 퍼져나가고 가장

흥미로운 연구 주제들 중 하나가 되었다.<sup>(1-3)</sup> 자율 주행은 사람 대신 운전을 할 수 있는 편의성 이외에도 도로의 안전, 효율적인 교통 흐름과 연료 소모 감소의 장점을 가진다.<sup>(4)</sup>

현재 자율주행 자동차에는 이미 많은 편의 기능 및 안전 기능들이 적용 및 탑재되어 상용화되어 이미 사람들이 접하고 있다. 차선 유지 보조 시스템(Lane Keeping Assistant System), 차선 이탈 방지 시스템(Lane Departure Prevention System), 적응식 정속 주행 시스템(Adaptive Cruise Control) 등이 대표적인 예이다.<sup>(5)</sup> 그러나 이러한 자율 주행 보조 시스템들은 능동적이지 못하

\* 서울대학교 기계항공공학부 차량 동역학 및 제어 연구실

\*\* 한국교통연구원

†교신 저자

E-mail : mjsyoo@snu.ac.kr

고 수동적, 제한적이며 자율 주행의 극히 일부분에만 해당한다.

자율 주행을 구현하는 핵심시스템은 크게 인지, 판단, 제어 총 3가지 모듈로 분류된다.<sup>(2)</sup> 각 모듈이 적절히 상호 작용 하면 주변 환경에서 동적이고 정적인 사물을 인지하고 가장 안전한 경로를 판단하고 자동차를 제어하여 탑승자가 충돌 및 사고 없이 목적지에 도착하게 할 수 있다.<sup>(6)</sup> 특히 판단 부분에서 최적의 경로를 찾아 제공해 주는 연구가 자율주행 자동차가 조금 더 능동적이고 정밀 “자율 주행”이라는 의미를 갖을 수 있도록 가장 중시되고 활발히 이루어 지고 있다.<sup>(2,7,8)</sup>

본 연구에서는 GPS 기반으로 생성된 경로보다 안전 영역(Safety Envelop)을 기반으로 생성된 경로를 추종하였을 때 얼마나 안전하지에 대한 여부를 안전성을 기반으로 평가하였다. 안전 여유(Safety Margin)를 자체적으로 설정하여, 안전 영역 기반 생성 경로 추종 시 GPS 기반 생성 경로 추종과 다르게 안전 여유를 침범하지 않고 안전하게 경로 추종하는 것을 확인하였다.

## 2. 사용 장비

### 2.1. 차량 및 센서 정보

주행 데이터 수집에 사용된 차량과 인지 모듈은 Fig. 1과 같이 구성되어 있다. 현대자동차의 IONIQ EV 차량을 이용하였으며 전방 범퍼에 3개의 라이다(LiDAR)와 후방 범퍼에 3개의 라이다를 장착 하였다. 주행 중 자차의 위치 정보 수집을 위해 고성능 GPS 센서를 장착하였고, 샤시(Chassis) 정보를 차량 내부에 설치되어 있는 오

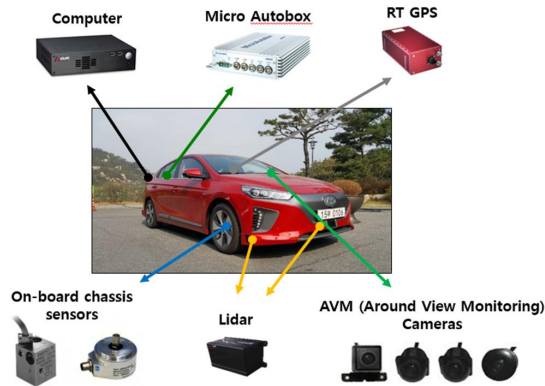


Fig. 1 Vehicle and sensors configuration

토박스(Autobox)를 이용하여 수집하였다. 그리고 전방향 모니터링 카메라(Around View Monitoring, AVM)와 전방(Vision) 카메라를 사용하여 주행 중 실시간 주변 환경 정보 및 차선 정보를 습득하였다. 데이터 수집 센서들의 정보는 Table 1에 표시되어있고, 라이다와 전방 카메라의 인지 범위는 Fig. 2와 같다.

Table 1 Sensor specifications for a test car

Components/Model	Specification
GPS/RT3002	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Update rate: 100Hz</li> <li>- Position accuracy: 1.5m</li> <li>- Velocity accuracy: 0.1km/h</li> </ul>
Camera/S-Cam3	<ul style="list-style-type: none"> <li>- View field: 40° X 30°</li> <li>- Detection range: 80m</li> </ul>
AVM Camera/360 Omni View	<ul style="list-style-type: none"> <li>- View angle: 185°</li> <li>- Resolution: 800*480</li> </ul>
LiDAR/ibeo LUX LIDAR	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 4 scanning layers</li> <li>- Horizontal field of view:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>2 layers: 110°(50° to -60°)</li> <li>4 layers: 85°(35° to -50°)</li> </ul> </li> <li>- Vertical field of view: 3.2°</li> <li>- Data rate: 12.5~50.0 Hz</li> <li>- Accuracy: 10cm</li> </ul>

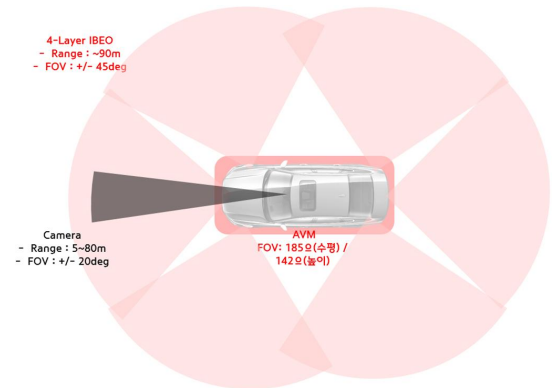


Fig. 2 Sensor detection range and FOV

## 3. 주행 경로 생성 및 추종 알고리즘

### 3.1. 주행 경로 생성

#### 3.1.1. 안전 주행 영역 기반 경로 생성

주행 중 수집되는 라이다 데이터 중에서 주변에 주행하는 차량이 아닌 데이터를 주려내어 현재 차 차의 위치,

속도, 요 각속도(yaw rate)의 정보를 이용하여 정적 장애물 지도(Static obstacle map)를 생성 한다. 정적 장애물 지도와 차선 정보를 이용하여 좌우 경계선을 결정한다. 차선의 중심 라인을 기준으로 정적 장애물 지도와 차선 중 가까운 위치를 경계로 설정하여 안전 주행 영역(Safe Driving Envelop)을 생성한다.

Fig. 3에서 차량에 장착된 6개의 라이다 센서로부터 데이터를 획득하여 파란색 점으로 층별로 표시가 된 것을 확인 할 수 있고 데이터의 효율적인 처리를 위해 차량이나 경사로 인하여 인지된 지면부를 제외한 점들을 적색으로 표시하였다. 다음 단계에서는 자 차를 중심으로 한 좌표계에서 x방향으로 0.5m, y방향으로 0.1m 단위로 그리드화하여 정적 장애물 지도를 생성, 차선 정보 또는 생성된 정적 장애물 지도를 기반으로 예상 주행 경로를 만들고, 차선과 도로 폭 정보를 기초로 하여 좌/우 안전 주행 영역 초기값을 생성하였다(Fig. 4). 또한 예상 주행 경로를

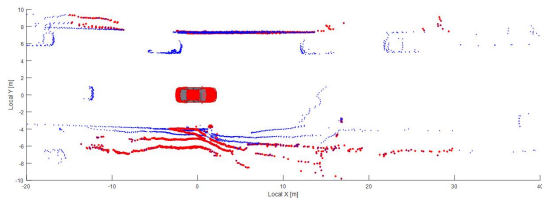


Fig. 3 LiDAR data acquisition and point detection excluding ground and vehicles

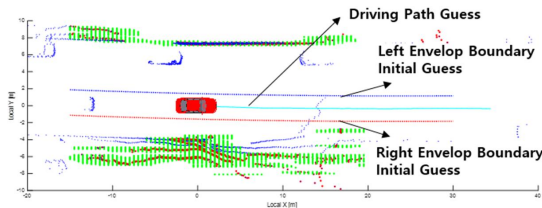


Fig. 4 Grid based static obstacle map and initial safety envelop generation

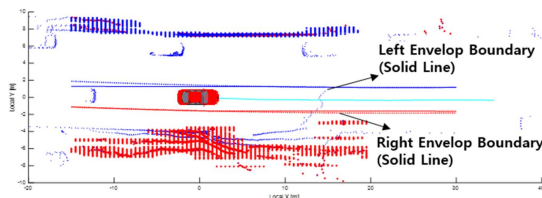


Fig. 5 Safety envelop generation and local path generation based on safety envelop

를 기반으로 정적 장애물 지도의 좌우를 구분하고, 주행 영역 초기값과 차선 정보, 그리고 정적 장애물 지도 중 예상 주행 경로와 가장 가까운 정보를 안전 주행 영역으로 설정하였다(Fig. 5). 최종적으로 안전 주행 영역의 좌/우 경계선을 이용하여 중심선을 사용하여 목표 경로를 지정해 주었다.

### 3.1.2. 고성능 GPS 주행 경로 생성

IONIQ EV 차량을 이용하여 서울대학교 관악캠퍼스 교내를 주행하며 고성능 GPS 센서로부터 차선의 위치정보를 수집하였다. 고성능 GPS의 경우 위성 신호와 지상에 있는 기지국을 이용하여 자차 위치의 오차를 0.2m이 내로 제공한다. 수집한 차선의 위치 정보를 바탕으로 목표하고자 하는 주행 경로를 설정한다. GPS를 이용한 경로 생성의 경우 안정 주행 영역 기반 경로와 다르게 주변 장애물을 고려하지 않고 GPS 정보를 바탕으로 측정된 차선의 중앙을 목표 경로로 우선시 설정한다.

## 3.2. 주행 경로 추종 알고리즘

### 3.2.1. 횡방향 제어 이론

주행 경로 추종 알고리즘에서 요 각속도와 요 각속도 계인(yaw rate gain)이 횡방향 차량 제어의 핵심이다. 횡방향 차량 제어는 차량동역학의 기본인 바이시클 모델을 기반으로 하여 계산을 수행하지만 상태 공간 방정식(State space equation)을 유도하였을 때, 차량의 매개변수들을 입력해야 한다. 이러한 차량 매개변수들 없이 요 각속도 계인을 고려한 변형된 횡방향 차량 동역학 모델이 소개된다. 변형된 횡방향 차량 동역학으로부터 계산되는 요 각속도는 다음과 같다.

$$\gamma = \frac{\lambda_{y.g}}{\tau_s + 1} \delta_f + \frac{\lambda_{L.g}}{\tau_s + 1} v_y \quad (1)$$

식 (1)에서  $\lambda_{y.g}$ 와  $\lambda_{L.g}$ 는 각각 요 각속도 계인과 횡방향 속도 계인(lateral velocity gain)을 나타내고,  $\delta_f$ 와  $v_y$ 는 조향각과 횡방향 속도를 의미한다.  $\tau_s$ 는 요 각속도 시상수(yaw rate time constant)를 의미한다. 요 각속도 계인은 정상 상태에서의 조향각과 요 각속도의 비율로 정의되기 때문에 식 (2)와 같이 정리될 수 있다.

$$\lambda_{y.g} = \frac{\gamma}{\delta_f} = \frac{v_x}{l + \frac{K_{us} v_x^2 \pi}{180g}} \quad (2)$$

식 (2)에서  $K_{us}$ 는 언더스티어 구배(understeer gradient)를 의미하며 식 (3)과 같이 정의된다.

$$K_{us} = \frac{\partial \delta_f}{\partial a_y} \quad (3)$$

변형된 횡방향 동역학 모델은 식 (4)와 같이 표현될 수 있다.

$$\dot{\gamma}(t) = \frac{1}{\tau} (-\gamma(t) + \lambda_{y.g}(t) \delta_{fsw}(t)) + w(t) \quad (4)$$

식 (4)에서  $w(t)$ 는 횡방향 속도와 횡방향 속도 계인에 관한 함수이다. 위 식을 바탕으로 yaw rate gain-adaptive steering control law가 식 (5)와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \delta_{fsw}(t) &= \frac{1}{\lambda_{y.g}} (\gamma_{des}(t) + \tau \dot{\gamma}_{des}(t)) \\ \frac{d\hat{\lambda}_{y.g}(t)}{dt} &= -k_1 \delta_f(t) (\gamma_{des}(t) - \gamma(t)) \end{aligned} \quad (5)$$

위에서 계산된 식을 바탕으로 조향 제어부에서, 차량의 매개 변수들을 이용하지 않고 요 각속도 계인 적응(yaw rate gain adaptation)을 이용해 목표 요 각속도 값을 추정해 낼 수 있다.

### 3.2.1. 주행 경로 추종

횡방향 제어에서 계산된 목표 요 각속도를 바탕으로 주행 경로 추종이 진행된다. 목표 요 각속도를 계산하기 위해서 기하학적경로추종법(geometric path tracking method)을 가장 많이 사용하며 이는 차와 경로의 기하학적 관계(geometric relationship)을 이용하는 방법이다. 목표 요 각속도는 식 (6)과 같이 계산된다.

$$\gamma_{des}(t) = \frac{v_x(t)}{R_{des}(t)} = v_x(t) \kappa_{des}(t) \quad (6)$$

식 (6)에서  $R_{des}$ 와  $\kappa_{des}$ 는 각각 현재 목표 경로의 반지

름과 목표 곡률이다.

주행 경로 추종에 있어서의 핵심은 Fig. 6에 표시되어 있는 차 차로부터 최적의 전망 좌표(preview point,  $P_k$ )를 찾는 것이다.

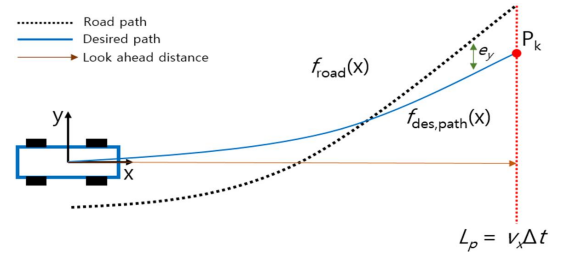


Fig. 6 Viewpoint of the host vehicle

최적의 전망 좌표를 찾기 위한 비용함수(cost function)은 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} J &= \min \int_0^L w(x) e_y(x)^2 dx \\ &= \min \int_0^L w(x) [f_{road}(x) - f_{des,path}(x)]^2 dx \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)에서  $e_y$ 는 목표 경로와 길의 횡방향 오차를 나타내며  $w(t)$ , 가중치함수(weight function)는 식 (8)로 정의된다.

$$w(x) = L_p(t) - x \quad (8)$$

길의 경로와 목표 경로는 식 (9)와 같이 2차 다항식으로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} f_{road}(x) &= a_{road}(t)x^2 + b_{road}(t)x + c_{road}(t) \\ f_{des,path}(x) &= a_{des}(t)x^2 + b_{des}(t)x + c_{des}(t) \end{aligned} \quad (9)$$

식 (7)로부터 식 (8), (9)를 이용하여 비용함수를 식 (10)과 같이 다시 표현될 수 있다.

$$J = \int_0^L (L_p(t) - x) [a_{des}(t)x^2 - (a_{road}(t)x^2 + b_{road}(t)x + c_{road}(t))]^2 dx \quad (10)$$

비용함수를 이용하여 목표 가속도가 식 (11)과 같이 계산될 수 있다.

$$a_{des}(t) = a_{road}(t) + \frac{3}{2} \frac{b_{road}(t)}{L_p(t)} + \frac{5}{2} \frac{c_{road}(t)}{L_p(t)^2} \quad (11)$$

식 (6)으로부터, 목표 요 각속도가 식 (12)와 같이 얻어질 수 있다.

$$\begin{aligned} \gamma_{des}(t) &= \frac{v_x(t)}{R_{des}(t)} \\ &= v_x(t) \kappa_{des}(t) \\ &= v_x(t) \frac{f_{des}''(x)}{\{1 + f_{des}'(x)^2\}^{\frac{3}{2}}} \\ &= 2v_x(t) a_{des}(t) \end{aligned} \quad (12)$$

위의 식 들로부터 얻어진 목표 요 각속도와 요 각속도 계인들을 이용하여 Fig. 7에 나와있듯이 요각도 적응제어 이득 알고리즘과 피드백 루프를 이용하여 실시간으로 전방 조향각을 계산해내 목표 경로를 추종해 낼 수 있다.

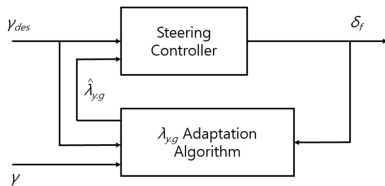


Fig. 7 Schematic diagram of front steering angle estimation

## 4. 데이터 시뮬레이션 분석 및 결과

### 4.1. 데이터 시뮬레이션 방법

CarSim 프로그램을 이용하여 서울대학교 관악캠퍼스 교내 도로를 배경으로 안전 주행 영역 기반 경로와 GPS 기반 경로 추종 시뮬레이션을 진행하였다. 서울대학교 관

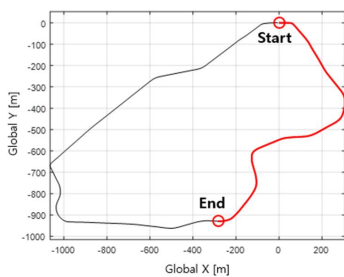


Fig. 8 Road map of Seoul National University

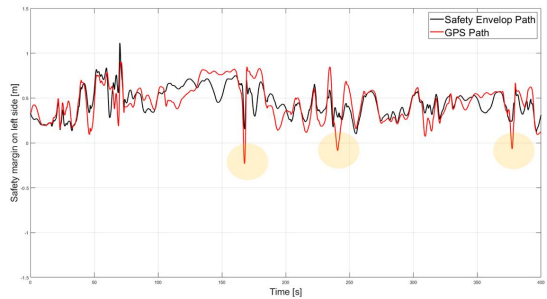
악캠퍼스 교내 도로 시뮬레이션 구간은 Fig. 8과 같이 시뮬레이션 상에서 주행 시간은 400초이다. 차속의 경우 종방향 제어 없이 20km/h의 고정 차속을 적용시켜 CarSim에서 시뮬레이션을 진행하였다.

### 4.2. 데이터 시뮬레이션 결과

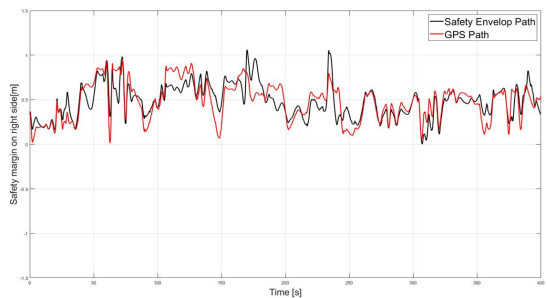
Fig. 9에서와 같이 교내 구간을 주행하는 동안 차 중심으로부터 각각 좌측과 우측의 안전 경계선 간의 거리 데이터를 수집하였다. 수집된 자차 중심으로부터 안전 경계선 간의 거리에서 차폭의 반인 0.9m를 제외하여 안전 여유(Safety margin)을 확인 하였다. 안전 여유가 0에 가까울수록, 차 중심으로부터 안전 경계선까지의 거리가 가까워진다. 0에 가까워지거나 0보다 작은 경우 차가 안전 경계선을 밟거나 넘어가 충돌 위험이 있다는 의미이다.

시뮬레이션 결과, Fig. 9(a)에서 자동차가 GPS로 생성된 목표 경로를 따라가는 경우 좌측 편 안전 여유가 0보다 작아지는 횟수가 3번 발생하는 것을 확인하여 3번의 충돌 위험을 예측할 수 있다. 자동차가 안전 주행 영역 기반 목표 경로를 따라가는 경우 좌측 편 안전 여유가 0보다 작아지는 경우가 없는 것을 확인하였다.

Fig. 9(b)에서 자동차가 GPS 로 생성된 목표 경로를



(a)



(b)

Fig. 9 Safety margin (a) on left side (b) on right side

따라가거나 안전 주행 영역 기반 목표 경로를 따라가는 두가지 경우 모두 우측 편 안전 여유가 0 보다 작아지는 경우가 없는 것을 확인하였다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 서울대학교 교내 캠퍼스에서 안전 주행 영역 기반 주행 경로 생성과 추종 알고리즘 성능 평가를 진행하였다. 안전 주행 영역을 기반으로 생성된 경로와 GPS로 생성된 경로 두가지 경우에서 경로 추종을 시뮬레이션을 진행하여 경로 추종 동안에 안전 여유의 수치 변화를 확인하여 충돌 위험성을 확인하였다. 시뮬레이션 결과, 안전 주행 영역 기반 경로를 추종하는 경우 좌우측 모두 안전 여유 수치가 0 이상 인 것을 확인하였고, GPS 기반 경로를 추종하는 경우 좌측에서 안전 여유 수치가 0보다 작아지는 횟수를 3회 확인하였다.

자율주행 차량으로 수집된 정보를 기반으로 진행된 off-line 시뮬레이션에서 장애물이 없는 상황에서의 운전자가 차선 중앙을 주행하여 취득한 GPS 경로를 추종하면 주변 장애물과 환경을 고려하여 생성한 안전 경계선을 이탈하여 장애물을 회피하지 못하고 충돌 위험이 발생한다. 이와 같은 이유로 Fig. 9(a) 시뮬레이션 결과를 통해 GPS 경로 추종 경우, 곡선 구간에서 주차선에 맞게 주차되지 않은 차량과 2회, 직선 구간에서 불법 주차 차량과 1회로 총 3회 충돌 위험을 확인하였다. 안전 주행 영역 기반 경로 추종 경우, 주변 장애물들을 사전에 차단하며 충돌 여유 공간을 제공하여 경로를 생성해 충돌 위험을 벗어나 안전하게 주행하는 것을 확인 할 수 있다.

본 연구의 경우, 2-D 라이다와 전방 카메라 센서 정보만으로 주변을 인지해 알고리즘을 개발하여 정보 수집 및 경로 생성과 추종에 한계를 가지고 주변 사물에 대한 인지의 가능성이 있다. 향후 3-D 라이다 센서와 레이더(RADAR)를 접목하여 이러한 문제점을 보완하고 인지 성능을 향상시켜 더욱 안전하고 최적의 경로 생성 및 추종 알고리즘 개발 연구가 필요하다.

## 후 기

본 연구는 국토교통부 및 국토교통과학기술진흥원의 2018년 교통물류연구사업(18TLRP-B146733-01, 자율주행기반 대중교통시스템 실증 연구)의 지원과 과학기술정보통신부의 재원(NRF-2016R1E1A1A01943543)의 지원을 받아 수행하였습니다.

## 참고문헌

- (1) Kala, R. and Warwick, K., 2013, "Motion planning of autonomous vehicles in a non-autonomous vehicle environment without speed lanes", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol 26, pp. 1588~1601.
- (2) Hu, X., Chen, L., Tang, B., Cao, B. and He, H., 2015, "Dynamic path planning for autonomous driving on various roads with avoidance static and moving obstacles", *Mechanical systems and signal processing*, Vol 100, pp. 482~500.
- (3) Ertien, S. M., Fujita, S. and Gerdes, J. C., 2015, "Shared steering control using safe envelopes for obstacle avoidance and vehicle stability", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation System*.
- (4) Katrakazas, C., Quddus, m., Chen, W. H. and Deka, L., 2015, "Real-time motion planning methods for autonomous on-road driving: state-of-the-art and future research directions", *Transportation Research Part C*, Vol. 60, pp. 416~442.
- (5) Zhou, Y., Xu, R., Hu, X. and Ye, Q., 2006, "A robust lane detection and tracking method based on computer vision", *Measurement Science and Technology*, Vol. 17, pp. 736~745.
- (6) Gu, Y., Hashimoto, Y., Hsu, L. T., Iryo-Asano, M. and Kamijo, S., 2016, "Human-like motion planning model for driving in signalized intersections", *IATSS Research*, Vol. 41, pp. 129~139.
- (7) Choi, J. W., Curry, R. and Elkaim, G., 2008, "Path Planning based on Bezier Curve for Autonomous Ground Vehicles", *Advances in Electrical and Electronics Engineering 0 IAENG Special Edition of the World Congress on Engineering and Computer Science 2008*.
- (8) Li, X., Sun, Z., Cao, D., Liu, D. and He, H., 2015, "Development of a new integrated local trajectory planning and tracking control framework for autonomous ground vehicles", *Mechanical systems and signal processing*, Vol. 87, pp. 118~137.
- (9) 박종철, 채홍석, 이경수, 2017, "실도로 주행데이터 기반 차선변경 주행 특성 분석", 2017한국자동차안전학회 추계학술대회.
- (10) Jung, C. H., 2015, "Design of Adaptive Steering Controller for Application to Automated Driving Vehicle", Seoul National University, Seoul, Korea.