

<학술논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2017.41.7.575>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

고속도로 합류점 주행을 위한 강건 모델 예측 기법 기반 자율주행 차선 변경 알고리즘 개발[§]

채흥석* · 정용환* · 민경찬** · 이명수** · 이경수*†

* 서울대학교 기계항공공학부, ** 교통안전공단 자동차안전연구원

Automated Driving Lane Change Algorithm Based on Robust Model Predictive Control for Merge Situations on Highway Intersections

Heongseok Chae^{*}, Yonghwan Jeong^{*}, Kyongchan Min^{**}, Myungsu Lee^{**}
and Kyongsu Yi^{*†}

^{*} School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul Nat'l Univ.,

^{**} Korea Automobile Testing & Research Institute, Korea Transportation Safety Authority.

(Received July 28, 2016 ; Revised February 8, 2017 ; Accepted March 15, 2017)

Key Words: Highway Automated Driving(고속도로 자율주행), Merge Situation on Highway(고속도로 합류 상황), Automated Driving Control Algorithm(자율주행 알고리즘), Merge Mode Decision(합류 모드 결정), Safe Driving Envelope Decision(안전 주행 영역), Model Predictive Control(모델 예측 기법)

초록: 본 논문에서는 고속도로의 합류지점 상황에서 자율주행을 위한 운전 모드 결정 알고리즘의 개발 및 평가를 진행하였다. 합류 상황을 위한 자율주행 알고리즘 개발에 있어 적절하게 합류를 결정하는 운전 모드 결정이 필수적이다. 운전자 모드는 총 2가지로 차선 유지, 차선 변경(합류)이다. 합류 모드 결정은 주변 차량의 정보 및 합류 차선에 남은 거리를 기반으로 결정된다. 합류 모드 결정 알고리즘에서는 합류 가능 여부를 판단하고 합류가 가능할 때, 안전하고 빠르게 합류하기 위한 최적의 위치를 찾는다. 안전 주행 영역은 주변 차량의 정보 및 주행 모드를 기반으로 정의된다. 안전 주행 영역으로 자율주행 차량을 유지하기 위한 조향각과 종방향 가속도를 얻기 위해 여러 제한 조건이 더해진 강건 모델 예측 기법이 사용되었다. 본 논문에서 제안된 알고리즘은 컴퓨터 시뮬레이션을 이용해 검증되었다.

Abstract: This paper describes the design and evaluation of a driving mode decision algorithm for automated driving for merge situations on highways. For the development of a highly automated driving control algorithm for merge situations, the driving mode decision is crucial for merging appropriately. There are two driving modes: lane keeping and lane changing (merging). The merge mode decision is determined based on the state of the surrounding vehicles and the remaining length of the merge lane. In the merge mode decision algorithm, merge possibility and the desired merge position are decided to change the lane safely and quickly. A safety driving envelope is defined based on the desired driving mode using the information on the surrounding vehicles' behaviors. To obtain the desired steering angle and longitudinal acceleration for maintaining the subject vehicle in the safe driving envelope, a motion planning controller is designed using model predictive control (MPC), with constraints that are decided considering the vehicle dynamics, safe driving envelope, and actuator limit. The proposed control algorithm has been evaluated via computer simulation studies.

1. 서론

자동차는 인구의 증가와 함께 보유량과 밀도가 기하급수적으로 증가하여, 우리나라를 기준으로도 1가구 당 1대 이상의 자동차를 보유하게 되었다.

[§] 이 논문은 대한기계학회 IT융합부문 2016년도 춘계학술대회(2016.5.19.-20., 서울시립대학교) 발표논문임.

[†] Corresponding Author, kyi@snu.ac.kr

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers



Fig. 1 Merge situation on highway intersection

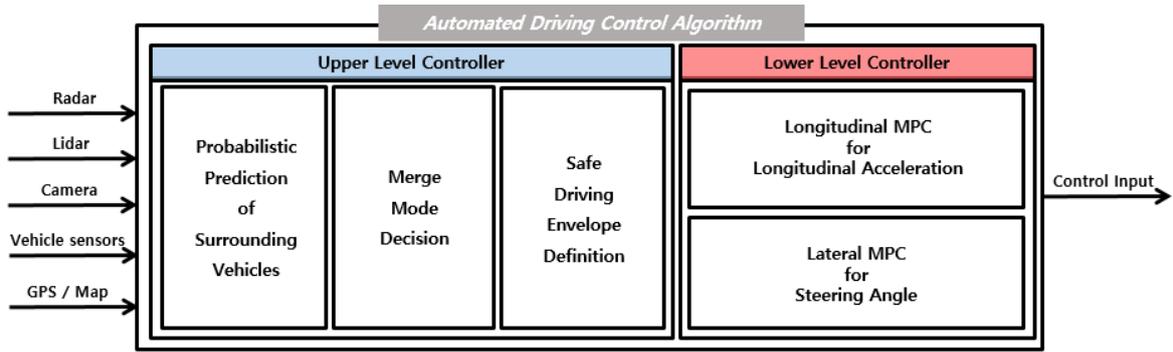


Fig. 2 System overview of the proposed automated driving system for merge situation

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.^(1,2)

이에 따라 최근 자율주행 자동차의 연구가 활발히 증가하고 있다. 특히, 고속도로에서의 자율주행 기술의 연구가 많이 진행되어 오고 있고 상용화에 가장 가깝다. 이는 고속도로 주행 상황이 자동차 환경 중에 가장 단순한 교통 흐름이기 때문이다. 고속도로 상황에는 일반 주행 상황뿐만 아니라 톨게이트나 합류점, 분기점 같은 특수한 상황도 존재한다.

고속도로 합류점에서는 일반 주행과는 다른 접근이 필요하다. 고속도로 합류점에서는 Fig. 1과 같이 합류점에서는 합류 차선과 메인 차선이 존재한다. 합류 차선에 차량은 메인 차선에 차량의 정보와 남은 합류 차선을 고려해서 안전하고 빠르게

차선 변경을 하는 것에 초점을 맞추어야 한다. 본 논문은 이러한 고속도로 합류점 상황에 적합한 자율주행 알고리즘을 개발하였다.

2. 자율주행 알고리즘 구조

본 논문에서 개발한 자율주행 알고리즘의 전반적인 구조는 Fig. 2와 같다. 상위 제어기는 주변 차량 거동 확률 예측, 합류 모드 결정, 안전 주행 영역 설정으로 구성되어 있다. 적절한 주위 환경 인지를 위해서 자율주행 차량에서 많이 사용되는 Radar, Lidar, Vision이 사용되었다. 위의 환경 인지 센서들을 통해 주변 차량 거동 파악, 장애물 및 차선을 인지한다. 차량 센서는 자율주행 차량 자신의 정보를 얻기 위해 사용한다. 주변 차량과 자 차량의 현재 정보를 바탕으로 주변 차량의 거동 확률을 예측한다. 여기서 예측된 정보를 바탕으로 차선 변경(합류) 가능 여부 판단 및 적절한 차선 변경을 위한 합류 모드, 목표 거동을 결정한다. 그리고 결정된 모드와 주변 차량의 거동 예측 정보를 기반으로 주행 가능한 안전 영역을 결정한다. 앞의 모든 정보를 종합해서 최종 차량의 요구 거동을 결정하고 이를 달성하기 위해 강건 모델 예측 기법을 이용해서 제어 값을 결정한다.

3. 거동 계획 알고리즘 개발

3.1 주변 차량 거동 확률 예측

미래의 주행 환경을 예측하는 것은 자율주행 시스템 개발에 있어 매우 중요하고 따라서 다양하게

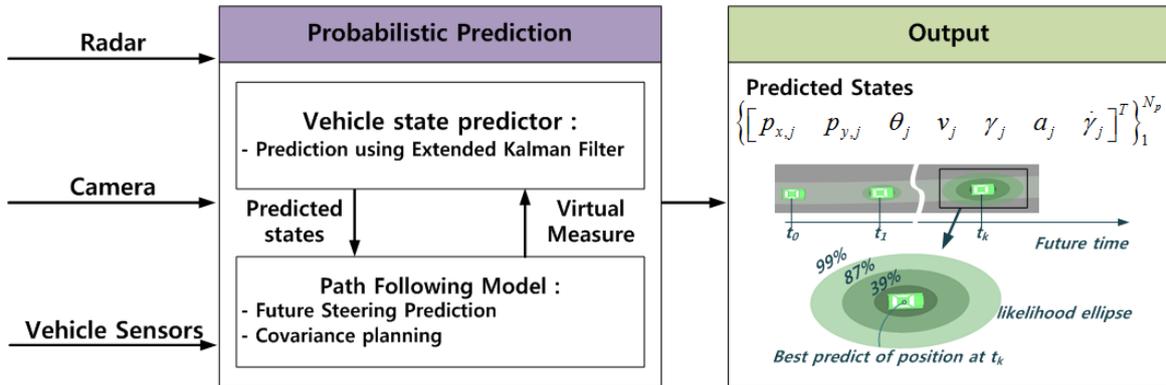


Fig. 3 Overall architecture of probabilistic prediction of surrounding vehicle's behavior⁽³⁾

연구되고 있다. 주행 환경 예측을 위해 전통적으로 결정론적(deterministic) 접근법을 사용한다. 이는 자차량 및 주변 차량이 현재 상태를 일정 시간 유지한다고 가정한다. 그러나, 이러한 정보는 가까운 미래 주행 상황의 부정확한 해석을 야기한다. 이러한 단점을 극복하기 위해 Kim은 주변 차량의 가능한 행동을 예측하는 주변 차량 거동 확률 모델⁽³⁾을 개발하였다.

주변 차량의 합리적이고 현실적인 예측을 위해, 차량간의 상호 작용 및 도로 형상 같은 제약 조건을 고려해야 한다. 이를 위해, 주변 차량의 운전자들이 차선 유지, 중앙선 침범 금지 등의 교통 규칙을 따른다고 가정한다.

주변 차량의 미래 상태의 합리적 범위를 정하기 위해, 테스트 트랙 및 실제 도로의 운전자 데이터를 수집하였고 이를 이용해서 차량의 확률적 거동 특성을 분석하였다. 주변 차량 거동 알고리즘은 크게 2파트로 나뉜다. 처음 파트는 추정 부분으로 현재 차량의 상태를 추정하는 차량 필터와 도로 형상을 근사화하는 도로 형상 필터로 구성된다. 두 번째 파트는 예측 부분으로 차선 유지 모델을 이용한다. 차선 유지모델은 가정한 교통 규칙을 기반으로 요구 요 레이트를 계산하고 예측 과정의 한 사이클 동안 차량 상태 예측기와 상호작용한다. 차량 상태 예측기에서 차량의 합리적 위치 및 오차 공분산이 EKF에 의해 예측된다. EKF에서는 차선 유지 모델에 의해 얻어진 요구 요 레이트를 가상 측정치로써 사용한다.

Fig. 3은 주변 차량 거동 확률 예측 모델의 전체 구조를 나타낸다. 차량 센서, 레이더, 카메라로부터 얻어진 정보를 사용해서 상응하는 불확실성과 함께 예측된 상태의 범위는 Fig. 3의 Output과 같이 결정된다. 주변 차량의 위치를 예측할 때, 주변 차량의 크기는 자차량과 동일하다고 가정된다.

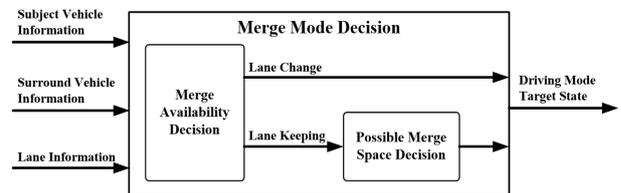


Fig. 4 Overall architecture of merge mode decision

3.2 합류 모드 결정

합류점에서 자율주행 차량은 주변 차량의 예측된 정보를 바탕으로 차선 변경(합류)를 진행할지 차선 유지를 진행할지 결정해야 한다. 합류점에서는 최대한 빠르고 안전하게 차선 변경을 진행해야 한다. 따라서 일반적인 주행 상황과는 다른 접근이 필요하다. 본 알고리즘의 합류 모드 결정은 Fig. 4와 같다.

먼저 자차량이 합류점에 진입하면 메인 차선에 위치한 차량 정보를 바탕으로 합류가 가능한지 불가능한지 판단한다. 만약 메인 차선에 차량이 없으면 바로 차선 변경을 진행한다. 만약 메인 차선 차량이 존재하면 그 차량과의 안전도를 판단해야 한다. 이를 위해 안전거리 개념을 도입하였다.

안전 거리는 자동차의 감속 과정 및 추종 과정 분석에 기반해서 결정된다. 안전 거리는 앞 차량과 뒤 차량의 속도 및 가속도에 따라 결정된다. 안전거리 식은 아래와 같다.

$$c_{safe}(t, j) = \begin{cases} \text{if Front safety distance} \\ \max\{v_{sub}(t) - v_{side}(t, j), 0\} \cdot \tau_h + c_{th, front} \\ \text{else Rear safety distance} \\ \max\{v_{side}(t, j) - v_{sub}(t), 0\} \cdot \tau_h + c_{th, rear} \end{cases} \quad (1)$$

여기서, c_{safe} 는 안전거리를 나타낸다. v_{sub} 는 합류 차선 위의 자차량의 속도를 나타낸다. v_{side} 는 메

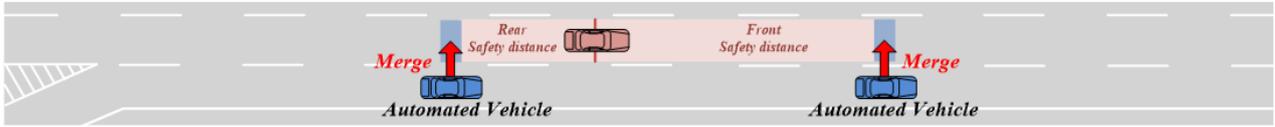


Fig. 5 Merge availability decision according to safety distance of surrounding vehicle

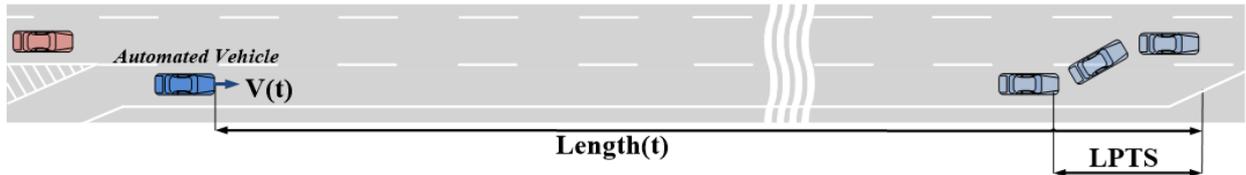


Fig. 6 Preview time that the rest time is reached to merge lane end

인 차선에 위치한 차량의 속도를 나타낸다. t 는 시간에 대한 인덱스를 나타낸다. j 는 메인 차선에 위치한 차량의 인덱스를 나타낸다. τ_h 는 time gap (TG)를 나타낸다. TG은 앞 차량과의 남은 거리를 자차량 속도로 나눈 값으로 차량 간의 안전도를 고려할 때 많이 사용된다. 본 알고리즘의 τ_h 은 0.8sec이다. $c_{th, front}$ 는 옆 차량의 앞 쪽으로 합류할 때, 최소 거리를 나타내고 8m로 정하였다. $c_{th, rear}$ 은 옆 차량의 뒤 쪽으로 합류할 때, 최소 거리를 나타내고 3m로 정하였다. $c_{th, front}$ 가 $c_{th, rear}$ 보다 큰 이유는 기본적으로 차량의 앞 쪽으로 차선 변경을 할 때, 더 거리를 두기 때문이다. 여기서 τ_h , $c_{th, front}$, $c_{th, rear}$ 은 튜닝 파라미터로써 차선 변경의 적극성 및 최소 안전 보장의 정도에 따라 변경 가능하다.

합류 가능성 결정 부분에서 메인 차선에 모든 차량이 안전거리보다 멀리 존재하면 차선 변경을 진행한다. 이는 Fig. 5에서와 같다. 만약 그렇지 않다면 자율주행 차량은 차선 유지를 진행해야 하고 가장 최적의 합류 지점을 찾아야 한다. 이를 위해 Preview 시간이란 개념을 도입했다. Preview 시간(t_p)은 합류 차선에 끝에 도달하는데 남은 시간을 나타내고 아래 식 (2)와 같다. 합류 차선에 남은 거리, 자차량의 속도와 조향으로 피할 수 있는 남은 거리(Last point to steer)를 고려한다. 여기서 자차량 속도에 10km/h를 더한 것은 안전 margin이다 (Fig. 6 참고).

$$t_p(t) = (Length(t) - LPTS) / (V(t) + 10 / 3.6) \quad (2)$$

$$LPTS = \sqrt{\frac{2 \cdot s_y}{a_{y, Normal}}} V(t) [m], s_y = 3.6m, a_{y, normal} = 2m/s^2$$

$$Length(t) = Remain \text{ ramp length } [m] \quad (3)$$

$V(t)$: Subject vehicle velocity [m/s]

Preview 시간이 결정되었으면 Preview시간 안에 가장 최적으로 도달할 수 있는 합류 지점을 찾는다. Fig. 7(a)와 같이 각 메인 차선 차량은 안전거리에 따라 각 차량마다 2가지 합류 가능 지점을 갖는다. Fig. 7(a)의 여러 합류 가능 지점 중에 Preview 시간 안에서 자율주행차량과 메인 차선 차량들의 위치 예측을 진행한다. 예측을 위해 자율주행 차량은 $2m/s^2$, $-2m/s^2$ 로 등가속도 운동하는 경우를 가정하고 메인 차선 차량은 현재 상태의 위치, 속도, 가속도 정보를 바탕으로 등가속도 운동을 한다고 가정한다. Preview시간 안에 예측된 정보를 바탕으로 가장 빨리 도달할 수 있는 합류 가능 지점을 찾는다. 그리고 가장 빨리 도달할 수 있는 지점을 요구 지점으로 정한다. 요구 지점에 도달할 때까지 차선 유지를 진행하고 요구 지점에 도달하면 합류 가능성 결정 부분에 의해 차선 변경을 진행한다.

만약 Fig. 7(b)와 같이 합류 가능 지점들이 서로 겹친다면 메인 차량들에 대한 안전성이 보장되지 못하는 지점이기 때문에 합류 불가능 지점으로 여겨진다. 합류 불가능 지점은 Preview 시간 안의 도달 가능한 지점에서 제외한다.

만약 Fig. 7(c)와 같이 메인 차선에 차량들이 좁게 있는 경우, 합류 가능 지점이 존재하지 않을 수 있다. 이러한 경우, Preview time 안에 도달 가능한 지점이 없다고 계산되고 합류 불가능이라 판단한다. 따라서 모든 공간이 합류 불가능이라고 판단하고 자율주행 차량은 합류 차선 끝에 서서히 정지하는 것을 목표 거동으로 잡는다.

결론적으로 합류모드 결정 부분에서는 합류 모드와 그에 따른 종방향 또는 횡방향 목표 거동이 결정된다. 정해진 목표 거동은 모델 예측 기법을 통해 풀어져서 최종 요구 조향각 또는 종방향 가속도가 나오고 이는 뒤에 자세히 설명된다.

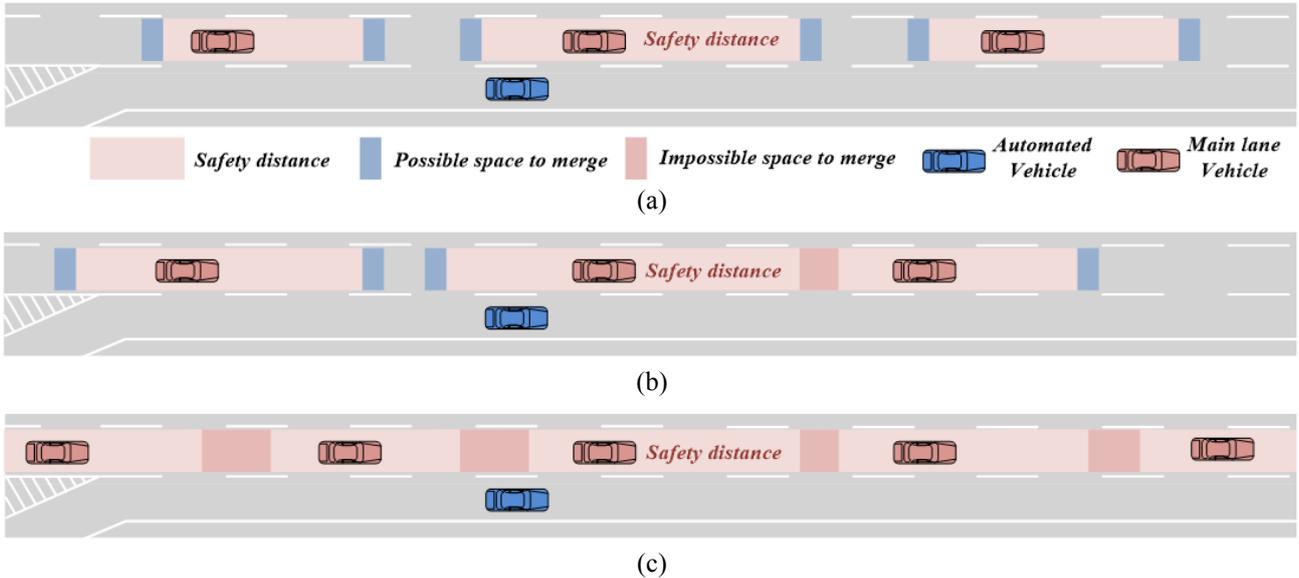


Fig. 7 Possible / Impossible space to merge according to safety distance of surrounding vehicles

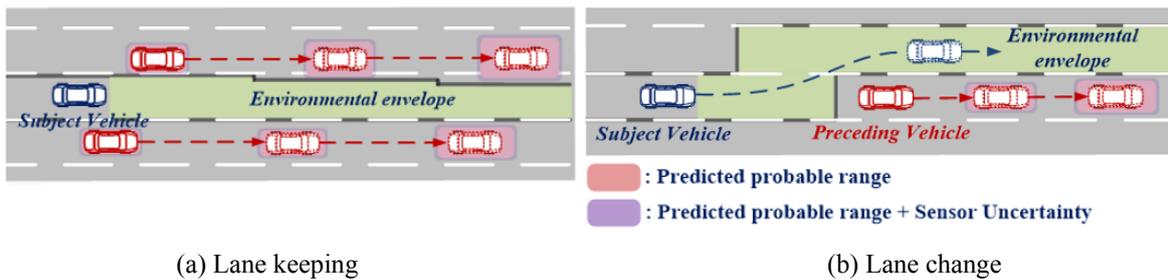


Fig. 8 Environmental envelope decided on consideration of driving mode and surrounding vehicle

3.3 안전 주행 영역 설정

앞의 합류 모드 결정 부분에서 주행 모드(차선 유지 혹은 차선 변경)를 결정한 후, 자율차량은 주변 차량과 안전하게 주행하기 위해서 제한 조건이 필요하다. 만약 주행 모드가 차선 유지로 결정되었다면, 자차량은 선행 차량 및 Cut-in해서 들어오는 차량에 대해 안전 거리 및 안전 속도를 가져야 한다. 그렇지 않고 차선 변경 모드가 결정되었다면, 자차량은 주변 차량과 어떠한 충돌 없이 차선을 변경할 필요가 있다.

차선 유지 모드에서 안전 주행 영역은 아래와 같이 결정된다. 만약 인접한 옆 차선에 차량이 없다면, 자차량은 크루즈 컨트롤 같이 선행 차량을 추정하거나 선행 차량이 없을 경우, 미리 지정된 속도를 따라 주행한다. 그러나 인접한 차선에 차량이 존재한다면, 안전 주행 영역은 자차선 차량의 정보뿐만 아니라 주변 차량의 정보를 고려해서 결정되어야 한다. 특히, Fig. 8(a)의 자차량 왼쪽 차선 차량같이 자차량의 차선에 접근하는 경우에는

차선 침범의 불확실성 때문에 이를 고려한 조향이 필요하다. 이러한 주변 차량과의 안전도를 고려한 차선 유지 모드에서의 안전 주행 영역은 Fig. 8(a)에 나타난다. 이는 주변 차량과의 안전 거리, 안전 속도를 기반으로 결정된 영역으로 (4)와 같다. 여기서, ω_{LK} 는 선행 차량과 차선 침범 가능성이 있는 의미 있는 차량들의 TTC를 고려해서 결정된다.⁽⁴⁾

$$\begin{bmatrix} C_x(t) \\ v_x(t) \end{bmatrix} = \omega_{LK} \cdot \begin{bmatrix} C_{x, \text{meaningful}}(j|t) \\ v_{x, \text{meaningful}}(j|t) \end{bmatrix} + (1 - \omega_{LK}) \cdot \begin{bmatrix} C_{x, \text{inlane}}(t) \\ v_{x, \text{inlane}}(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

차선변경 모드가 발동되면, 안전 주행 영역은 옆 차선으로 확장되어야 한다. 주변 차량의 다양한 상황을 고려한 주행 가능 영역 결정이 필요하다. 자차량은 항상 주행 가능 영역을 유지해야 한다. 비록 주변 차량이 자차량의 본래 차선에 접근할지라도, 안전 주행 영역은 다른 차량의 움직임에 따라 변화한다. 차선 변경 모드에서의 안전 주

행 영역은 Fig. 8(b)에 나타난다. 이는 주변 차량과의 안전 거리, 안전 속도를 기반으로 결정된 영역으로 (5)와 같다. 여기서, ω_{LC} 는 자차량의 횡방향 위치에 따라 결정된다.⁽⁴⁾

$$\begin{bmatrix} C_x(t) \\ v_x(t) \end{bmatrix} = \omega_{LC} \cdot \begin{bmatrix} C_{x, \text{sidelane}}(j|t) \\ v_{x, \text{sidelane}}(j|t) \end{bmatrix} + (1 - \omega_{LC}) \cdot \begin{bmatrix} C_{x, \text{inlane}}(t) \\ v_{x, \text{inlane}}(t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

4. 모델 예측 기법 기반 하위 제어기

본 알고리즘에서는 계산 부하를 줄이기 위해 횡방향과 종방향 제어가 분리된 제어기 구조를 채택하였다. 본 연구에서, 샘플링 타임은 0.1초이고 예측 범위의 길이는 15 샘플로 결정되었다. 샘플링 타임과 예측 범위의 길이는 실제 차량 환경에서 실시간으로 돌아가는 여부와 필요 안전 예측 범위를 고려해서 정하였다. MATLAB에서 모델 예측 기법⁽⁴⁻⁶⁾을 풀기 위하여 MATLAB에 활용 가능하도록 개발된 FORCES를 solver로 사용하였다. 횡방향, 종방향 제어기의 제한 조건들은 차량의 거동 특성 및 안전성⁽⁷⁾을 고려하여 설계되었다.

4.1 횡방향 제어기

안전 주행 영역으로 차량을 유지하기 위한 요구 조향각을 결정하기 위해서 횡방향 모델 예측 기법(MPC) 문제를 설계하였다. 아래의 MPC 문제가 제어를 위해 사용되었다.

$$\min J_{lat} = \sum_{k=1}^{N_p-1} \left[\bar{x}_{lat}(k|t)^T W_{\text{cost}, lat} \bar{x}_{lat}(k|t) + R_{lat, \Delta u} \sum_{k=0}^{N_p-2} \|\bar{u}_{lat}(k+1|t) - \bar{u}_{lat}(k|t)\|_2 \right] \quad (6a)$$

$$+ (H_{lat} \bar{x}_{lat}(N_p|t) - y_{des})^T W_{N_p} (H_{lat} \bar{x}_{lat}(N_p|t) - y_{des}) + R_{lat} \sum_{k=0}^{N_p-1} \|\bar{u}_{lat}(k|t)\|_2$$

$$\text{subject to } x_{lat}(k+1|t) = f(x_{lat}(k|t), u_{lat}(k|t), d(k|t)) \quad (6b)$$

$$\|u_{lat}(k|t)\| \leq u_{lat, \text{max}} \quad (6c)$$

$$\|u_{lat}(k+1|t) - u_{lat}(k|t)\|_{\infty} \leq S_{lat} \quad (6d)$$

$$|H_{lat} \cdot x_{lat}(k|t)| \leq G_{lat} \quad (6e)$$

여기서, $W_{\text{cost}, lat}$ 는 상태들의 크기를 다르게 하기 위한 미리 지정된 가중치 행렬이다. W_{N_p} 는 요구 상태와 유한한 예측 범위의 마지막 상태 사이의 차이를 감소시키기 위한 미리 정해진 가중치 행렬이다. R_{lat} 과 R_{lat} 은 각각 조향각과 조향각 변화율의 제어 시퀀스 크기를 줄이기 위한 미리 지정된

가중치 행렬이다. H_{lat} 는 횡방향 변화 상태를 결정하기 위해 정의되었다. $u_{lat, \text{max}}$ 은 조향각의 최대 크기(30deg)이다. S_{lat} 은 조향각 입력의 최대 슬루레이트이다. G_{lat} 은 안전 주행 영역의 횡방향 경계이다. 횡방향 변화의 요구 값은 아래 식 (7)과 같이 정의된다.

$$y_{des} = [0 \quad W_{road}]^T : \text{Left Lane Change} \quad (7)$$

$$y_{des} = [0 \quad -W_{road}]^T : \text{Right Lane Change}$$

등제한 조건 (6b)는 수정된 bicycle 모델과 오차 동역학으로 구성된 횡방향 동역학 모델이다. 횡방향 상태는 (8)과 같다.

$$x_{lat} = [\beta \quad \gamma \quad e_{\psi} \quad e_y]^T \quad (8)$$

여기서 β 는 횡활각, γ 는 요레이트, e_{ψ} 은 헤딩각도 오차를 나타낸다.

4.2 종방향 제어기

안전 주행 영역으로 차량을 유지하기 위해 요구 종방향 가속도를 결정하기 위해서 종방향 MPC 문제를 설계하였다. 아래의 MPC 문제가 제어를 위해서 사용되었다.

$$\min J_{longi} = \sum_{k=1}^{N_p} \bar{x}_{longi}(k|t)^T W_{\text{cost}, longi} \bar{x}_{longi}(k|t) \quad (9a)$$

$$+ R_{longi} \sum_{k=0}^{N_p-1} \|\bar{u}_{longi}(k|t)\|_2 + R_{longi, \Delta u} \sum_{k=0}^{N_p-2} \|\bar{u}_{longi}(k+1|t) - \bar{u}_{longi}(k|t)\|_2$$

$$\text{subject to } x_{longi}(k+1|t) = f(x_{longi}(k|t), u_{longi}(k|t)) \quad (9b)$$

$$\bar{u}_{longi, \text{min}} \leq \bar{u}_{longi}(k|t) \leq \bar{u}_{longi, \text{max}} \quad (9c)$$

$$\|u_{longi}(k+1) - u_{longi}(k)\|_{\infty} \leq S_{longi} \quad (9d)$$

$$|H_{longi} \cdot x_{longi}(k|t)| \leq G_{longi} \quad (9e)$$

여기서, $W_{\text{cost}, longi}$ 은 상태들과 0과의 차이를 최소화하기 위한 미리 지정된 가중치 행렬이다. R_{longi} 은 종방향 가속도 시퀀스의 크기를 감소시키기 위해 미리 지정된 행렬이다. $R_{longi, \Delta u}$ 은 종방향 가속도 시퀀스의 급격한 변화를 방지하기 위해 미리 지정된 행렬이다. $u_{longi, \text{min}}$ 와 $u_{longi, \text{max}}$ 은 각각 종방향 가속도 입력의 최대($3m/s^2$) 및 최소($-5m/s^2$) 크기를 나타낸다. S_{longi} 는 종방향 가속도의 최대 슬루 레

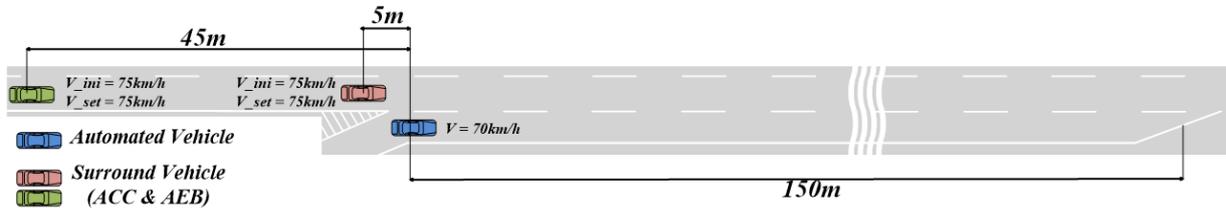


Fig. 9 Merge situation on highway intersection

이트(50m)이다. G_{long} 는 안전 주행 영역의 종방향 경계이다. 등제한 조건 (9b)은 종방향 동역학 모델이다.

합류 상황과 합류를 마친 일반 주행 상황에서의 상태들은 다르다. 합류 상황에서의 상태들은 (10)와 같이 정의되었다. 합류 상황에서는 자차량과 주변 차량의 안전 합류에 요구되는 거리를 만족시키는 요구 위치가 가장 중요한 상태이다. 합류 상황에서는 제한된 거리 및 시간 안에 빠르고 안전하게 들어가는 것이 우선 목표로 아래와 같다.

$$x_{long,merge} = [\Delta d \quad a_x]^T \quad (10a)$$

$$\Delta d = C_x - C_{merge} \quad (10b)$$

자차량이 고속도로 본 차선으로 합류를 한 후, 상태들은 일반 주행 상황에 적합하게 (11)와 같이 변화한다. 이때는 요구 속도 및 선행 차량 추종을 위한 속도에 관한 상태가 추가된다.

$$x_{long} = [\Delta d \quad \Delta v_x \quad a_x]^T \quad (11a)$$

$$\begin{aligned} \Delta d &= C_x - C_{x,des} \\ C_{x,des} &= \tau_h \cdot v_x + C_{x,safe} \\ \Delta v_x &= v_{x,target} - v_x \end{aligned} \quad (11b)$$

5. 시뮬레이션 검증

5.1 시뮬레이션 환경

본 논문에서 개발한 자율주행 알고리즘의 효과를 검증하기 위해 시뮬레이션이 진행되었다. 본 논문의 MPC 문제는 MATLAB/Simulink와 FOCES를 사용하여 각 시간 스텝에 따라 풀었다. 자차량의 모델은 차량 동역학 해석 프로그램 CARSIM의 E-class 세단 모델은 사용하였다.

시뮬레이션 상황에서 모든 주변 차량은 적응형 크루즈 컨트롤 시스템(ACC)과 자동 긴급 비상 제동장치(AEB)를 탑재했다. 주변 차량에 사용된 ACC, AEB 알고리즘은 실제 운전자 거동을 반영한 모델^(8,9)이다. 실제 운전자 거동을 고려해서 선행

차량의 차선 변경 의도, 충돌 위험 판단, 안전도 유지 및 가속도 사용을 판단하는 고도화된 ACC 및 AEB 알고리즘임으로 실제 고속도로 주행 상황을 잘 모사할 수 있다. 특히, 주변 차량 앞에서 자율주행 차량이 차선 변경을 할 때, 차선 변경 안전도를 평가하기 위해서는 주변 차량에 실제 운전자와 같은 판단 및 거동이 필요하다. 위에서 언급한 상황에서 ACC & AEB가 탑재된 주변 차량에서 AEB가 작동할 시에는 자율주행 차량이 측 후방 차량에게 위험을 가하는 차선 변경을 했으므로 안전하지 않은 차선 변경임을 알 수 있다.

본 연구에서 진행한 시뮬레이션 상황은 Fig. 9와 같다. 합류지점 차선에 자율주행 차량이 있고 고속도로 주 차선에 2대의 주변 차량이 존재한다. 합류점에 들어선 자차량의 속도는 70km/h이고 주변 차량들의 초기 속도 및 Set 속도는 75km/h이다. 하나의 주변 차량은 자율주행 차량의 5m 뒤에 위치하고 다른 주변 차량은 40m 뒤에 위치한다. 본 시뮬레이션 상황은 실제 고속도로 합류점에서 취득한 데이터를 기반으로 발생 가능한 상황으로 결정되었다.

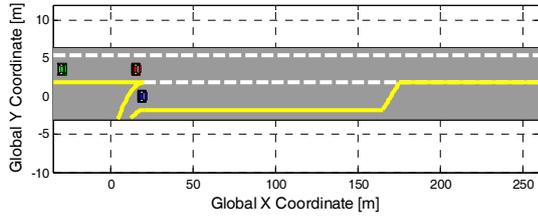
5.2 시뮬레이션 결과

컴퓨터 시뮬레이션에 의한 결과는 Fig. 10과 Fig. 11에 나타난다. 먼저 Fig. 10에는 각 시간 스텝마다 주행 상황을 나타내었다.

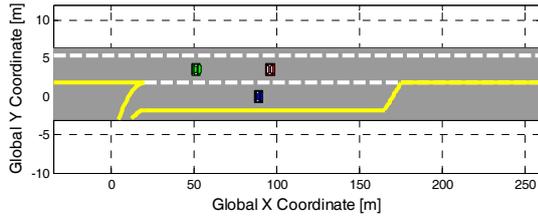
먼저 0초에는 모든 차량이 시뮬레이션 환경에서 정의한 상황에 맞게 위치한 것을 볼 수 있다. 4초일 때, 자율주행 차량은 합류를 위한 최적 지점에 도달하기 위해 감속을 진행한다. 8초일 때, 자율주행 차량은 합류 가능한 지점에 도달해서 차선 변경을 진행하고 있다. 12초일 때, 자율주행 차량은 메인 차선에 적절하게 합류를 끝내고 주행하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 11에는 자율주행 차량 및 주변 차량의 상태를 나타낸다.

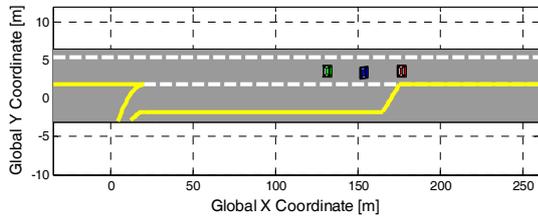
먼저 Fig. 11(a)를 보면 자율주행 차량이 대략 3.8초에 합류 가능을 결정하고 모드가 1로 바뀌는 것을 볼 수 있다. 모드 1은 차선 변경을 나타낸다.



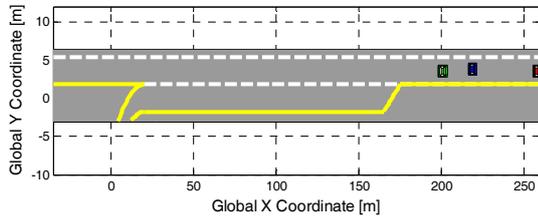
(a) T=0sec



(b) T=4sec



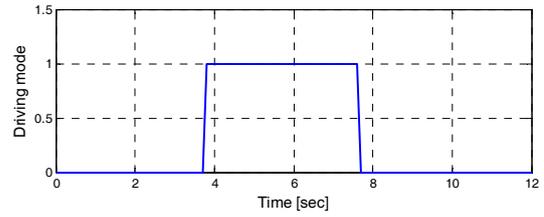
(c) T=8sec



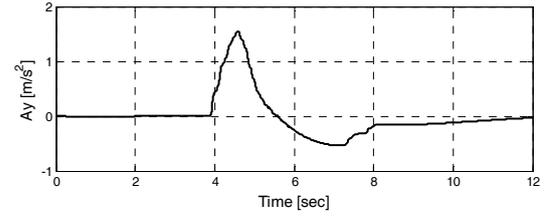
(d) T=12sec

Fig. 10 Driving Situations of each time step in computer simulation

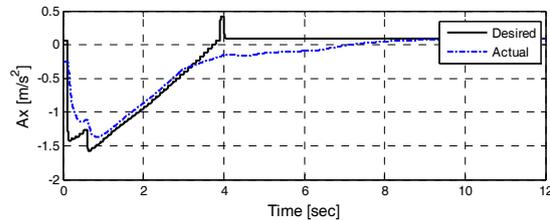
Fig. 11(b)를 보면 결정된 모드에 맞추어 차선 변경을 위한 적절한 횡방향 가속도를 볼 수 있다. Fig. 11(c)를 보면 차선 변경 전에 적절한 합류 위치로 가기 위한 종방향 가속도를 볼 수 있다. 메인 차선에 차량들 중에 빨간색 차량 후방으로 들어가는 것이 가장 빠르고 안전하다고 알고리즘은 판단했기 때문에 감속을 진행한다. 마지막으로 Fig. 11(d)를 보면 모든 차량의 속도를 볼 수 있다. 자율주행 차량은 속도를 낮추어 차선 변경을 진행하였고 이에 따라 초록색 차량도 ACC가 작동해 자율주행 차량에 맞게 속도가 낮아지는 것을 볼 수 있다. 초록색 차량은 AEB가 작동되어 급격한 감속을 하지 않고 ACC만 작동하였으므로 자율주행 차량의 차선 변경은 측 후방 차량에게 큰 위험을 주지 않은 것을 알 수 있다.



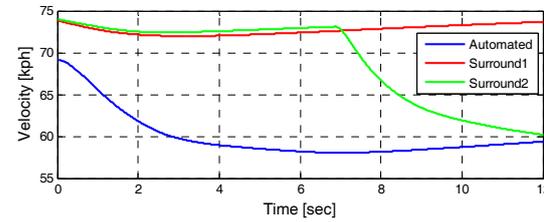
(a) Driving mode decision



(b) Lateral acceleration



(c) Logitudinal acceleration



(d) Velocity of all vehicles

Fig. 11 Simulation results

6. 결 론

본 연구에서는 합류점 상황의 자율주행을 위한 주행 모드 결정 알고리즘을 개발하였다. 합류상황에서는 고속도로 일반 상황과 달리 합류 차선을 최대한 빠르고 안전하게 빠져나가는 것이 핵심이다. 이를 위해 주변 차량의 미래 거동 정보 예측을 진행하였다. 이를 바탕으로 주변 차량 정보 및 남은 합류 차선 거리를 기반으로 합류 가능 여부와 합류를 위한 최적 위치를 찾는 알고리즘을 개발하였다. 다른 차량과 충돌 안전을 보장하기 위해 안전 주행 영역이 정의되었다. 안전 주행 영역 내부의 주행, 주행 모드 및 요구 상태들을 바탕으로 모델 예측 기법을 이용해서 조향각과 종방향 가속도를 구했다. 마지막으로 알고리즘의 적정성을 판단하기 위해 실제 운전자 거동을 나타내는

주변 차량을 바탕으로 고속도로 합류점 상황 컴퓨터 시뮬레이션을 진행하였다.

본 연구의 개선 필요사항은 더 어려운 합류 환경에 대처하는 것이다. 만약 메인 차선에 차량들이 비좁게 있는 경우, 최적의 합류점을 찾을 수 없다. 이러한 경우, 차선에 불거나 방향 지시등을 이용해서 옆 차선 차량에 차선 변경 의도 전달이 필요하다. 그리고 합류 차선 위에 차량이 있는 경우도 고려해야 한다. 이와 같은 더 어려운 합류 환경을 해결하는 것이 추후 연구 진행 사항이다. 그리고 시뮬레이션 이외에 실제 차량 실험을 통해서 알고리즘 검증이 필요하다.

후 기

본 연구는 국토교통부 및 국토교통과학기술진흥원의 연구비지원(16PTSI-C054118-08)과 2016년 BK21플러스 사업과 the Institute of Advanced Machines and Design (IAMD), Seoul National University에 의하여 수행된 연구임.

참고문헌 (References)

(1) Jeong, Y., 2015, "An Evaluation Scenario of Safety Performance for Extraordinary Service Permission of Autonomous Vehicle," *KASA Spring Conference*

Proceedings.
 (2) Bishop, R., 2000, "A Survey of Intelligent Vehicle Applications Worldwide," *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*.
 (3) Kim, B., Yi, K., Jeong, C. and Kim, J., 2013, "Probabilistic States Prediction Algorithm using Multi-sensor Fusion and Application to Smart Cruise Control Systems," *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*.
 (4) Seo, J. and Yi, K., 2015, "Robust Mode Predictive Control for Lane Change of Automated Driving Vehicles," *SAE Technical Paper*, No. 2015-01-0317.
 (5) Mayne, D., Seron, M. and Rakovic, S., 2005, "Robust Model Predictive Control of Constrained Linear Systems with Bounded Disturbances," *Automatica*, 41:219-224.
 (6) Li, S., Li, K., Rajamani, R. and Wang, J., 2011, "Model Predictive Multi-Objective Vehicular Adaptive Cruise Control," *IEEE Transactions on Control System Technology*, 19(3).
 (7) Rajamani, R., 2006, *Vehicle Dynamics and Control*, New York, Springer.
 (8) Moon, S. and Yi, K., 2009, "Design, Tuning, and Evaluation of a Full-range Adaptive Cruise Control System with Collision Avoidance," *Control Engineering Practice*, Vol. 17, No. 4, pp. 442~455.
 (9) Kim, D., Yoon, J. and Yi, K., 2013, "Steering and Cruise Control for Autonomous Driving in Stop-and-Go Traffic Situations," *KSME Spring Conference Proceedings*.