

〈 응용 논문 〉

제어 입력 기반 예측된 종방향 속도를 이용하는 자율주행 자동차의
차선 변경을 위한 모델 예측 조향 제어 알고리즘

오 광 석* · 오 세 찬

한경대학교 ICT로봇기계공학부

Model Predictive Steering Control Algorithm for Lane Change of Autonomous
Vehicles Using Control Input Based Predicted Longitudinal Velocity

Kwangseok Oh* · Sechan Oh

School of ICT, Robotics and Mechanical Engineering, Hankyong National University, Gyeonggi 17579, Korea
(Received 15 January 2021 / Revised 10 March 2021 / Accepted 1 April 2021)

Abstract : Steering control when changing lanes involving autonomous vehicles is the most important task of autonomous driving for driving strategy and safety. This paper presents a model predictive steering control algorithm for changing lanes among autonomous vehicles by using a control input that is based on predicted velocity. Two model predictive control algorithms have been designed for longitudinal and lateral autonomous driving with physical constraints. The model predictive longitudinal controller computes optimal longitudinal accelerations that use relative information between subject and preceding vehicles. Based on the optimal accelerations from the longitudinal controller, longitudinal velocities have been predicted, and the predicted velocities have been used to compute the optimal steering angle for changing lanes through a model predictive controller. The proposed model predictive control algorithms for lane change behavior have been constructed in a Matlab/Simulink environment. A performance evaluation has been conducted by using a commercial software(CarMaker) to ensure reasonable evaluation under variable lane change conditions of the subject vehicle.

Key words : Model predictive control(모델 예측 제어), Lane change(차선 변경), Predicted longitudinal velocity(예측된 종방향 속도), Multiple constraints(다중 제약 조건), Steering control(조향 제어)

Nomenclature

e_1	: clearance error, m	a_p	: longitudinal acceleration(preceding vehicle), m/s^2
e_2	: relative velocity, m/s	$a_{s,opt}$: optimal longitudinal acceleration, m/s^2
e_y	: lateral error, m	N_p	: prediction step
e_ψ	: yaw angle error, rad	A	: system matrix
v_s	: longitudinal velocity, m/s	B	: input matrix
$v_{s,p}$: predicted longitudinal velocity, m/s	F	: disturbance matrix
L	: distance between front and rear axles, m	C	: weighting matrix
y	: output error	ψ_{des}	: desired yaw rate, rad/s
u	: control input	w	: disturbance
u_{max}	: maximum control input	Δt	: discretized time, sec
a_s	: longitudinal acceleration(subject vehicle), m/s^2	J	: objective function
		D	: difference matrix

*Corresponding author, E-mail: oks@hknu.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

1. 서론

자율주행 자동차는 운전자를 대신해 조향 입력과 가속 및 감속 제어 입력을 생성하면서 자율적으로 주행할 수 있는 시스템이다. 차량의 자율주행을 위해서는 운전자의 역할을 대신할 수 있는 인지, 판단, 경로 생성, 제어 기술이 필요하다. 인지 단계에서는 관성 측정 장치, 라이다, 레이더, 카메라 등 다양한 내부 및 외부 센서들을 이용해 차량의 상태와 외부 환경 정보를 획득하고, 획득된 정보들을 이용해 차량의 상태 및 외부 환경 요소의 상태를 추정한다. 획득된 차량과 외부 환경 정보를 기반으로 판단 단계에서는 주행 안전도 등 다양한 관점에서의 단계를 구분한다. 경로 생성 단계에서는 일반 주행 및 충돌 회피 등을 위한 차량의 주행경로를 생성한다. 마지막 제어 단계에서는 판단된 단계에 따라 또는 생성된 주행 경로를 추종할 수 있는 차량의 제어 입력을 생성한다. 앞서 언급된 기능적 흐름을 기반으로 자율주행 자동차는 정속 주행, 선행차 추종, 차선 변경, 추월 등 다양한 기능들과 함께 주행한다. 이 때 차선 변경과 같이 횡방향 제어가 필요한 기능의 경우 자차로의 차량과 변경 대상 차로의 차량을 동시에 고려한 안전 차선 변경 기술을 필요로 한다. 주변 차량들을 동시에 고려하지 않고 차선 변경을 시도한다면 치명적 사고가 발생할 수 있기 때문에 자율주행 자동차의 차선 변경을 위한 다양한 연구가 국내외 우수 대학에서 진행되고 있다.

Abbas 등¹⁾은 자율 주행 차량의 실시간 장애물 회피 거동을 생성하기 위해 비선형 모델 예측 제어 알고리즘 기반 장애물 회피 방법을 제안하였다. Ji 등²⁾은 장애물 회피를 위해 장애물의 정보 기반 Potential field 기반 다중 제약 조건을 이용하는 모델 예측 제어 알고리즘을 개발하였다. Wang 등³⁾은 자율 주행 차량의 차선 변경을 위해 3차 다항식을 이용한 주행 경로를 형성하고 이를 추종하는 Nonholonomic 제약조건 기반 모델 예측 제어 알고리즘을 제안하였다. Zhang과 Ioannou⁴⁾은 고속도로 주행 상황에서 자율주행 차량의 차선 변경을 위해 가변 속도 기반 제어 알고리즘을 제안하였다. Arefnezhad 등⁵⁾은 차선 변경을 위한 보조 시스템 개발을 위해 이중 차선 변경 거동 기반 차량의 횡방향 거동 모델링 방법을 제시하였다. Kang 등⁶⁾은 고속도로에서의 자율 차선 변경 시스템 개발을 위해 비전 기반 횡방향 제어 알고리즘을 제안하였다.

Hatipoglu 등⁷⁾은 고속도로 자율주행 상황에서 부드러운 차선 변경을 가능도록 하는 제어 이론을 개발하였고, 센싱 시스템 기반 이산적인 예견 데이터를 이용하였다. 제안하는 제어 이론은 주행 속도를 고려한 최적 차선 변

경 소요 시간을 고려하였다. Liu 등⁸⁾은 자율주행 자동차의 차선 변경을 위해 차선 변경 요소 분석 기반 Support vector machine을 이용하는 판단 모델을 제안하였다. Zeng 등⁹⁾은 자율주행 자동차의 차선 변경을 위한 새로운 경로 생성 방법론을 제안하였다. 주변 차량의 거동을 실시간으로 모니터링하고 예측하는 것은 어렵기 때문에 동시에 차선 변경 경로 생성 및 모니터링 전략을 수행하는 전략을 제안하였다. Wu 등¹⁰⁾은 직진 도로에서 자율주행 자동차가 안전하고 안락한 차선 변경을 할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 이를 위해 단순화된 Gray prediction model 기반 주변 차량의 거동을 추정하였고, 시변 안전 여유를 정의함으로써 안전 차선 변경을 위한 경로를 생성하였다. Gao 등¹¹⁾은 자율주행 자동차의 차선 변경 시 발생할 수 있는 충돌 위험 및 선행 차량 추종 성능에 영향을 줄 수 있는 문제들을 해결하기 위해 머신 러닝 기반 차선 변경 의도 예측 및 실시간 자율주행 자동차 제어 방법론을 제안하였다. 이를 위해 서포트 벡터 머신과 인공 포텐셜 필드 방법론이 적용되었다. Chen 등¹²⁾은 선행 차량과의 충돌 회피가 가능한 차량 속도 예측, 거동 계획, 경로 추종 제어 기반 차선 변경 전략을 제안하였다. Winstead¹³⁾은 자율주행 차량의 차선 변경을 위해 단순화된 차량 역학 및 차선 변경을 위한 역학 모델을 기반으로 모델 예측 제어 알고리즘을 설계하고 차량의 위치, 속도, 가속도에 대한 물리적 제약 조건을 적용하였다. Naranjo 등¹⁴⁾은 자율주행 차량의 추월 기술 개발을 위해 퍼지 이론을 이용하여 조향 제어 모드를 구분하고 차선 변경 및 추월을 위한 퍼지 조향 제어 알고리즘을 개발하였다. Yu 등¹⁵⁾은 차선 변경 전략을 수립하고 주변 차량 및 운전자의 주행 특성에 대응하면서 차선 변경을 수행하는 게임 이론 기반 제어 알고리즘을 제안하였다. 시나리오 기반 속도 예측 알고리즘을 제시하였고, 예측된 속도 기반 거동 계획 알고리즘과 개선된 비선형 피드백 제어 알고리즘을 개발하였다.

기존 연구들을 살펴보면 자율주행 자동차의 차선 변경 및 추월과 같은 주행 기능을 위해 일반적으로 주변 차량들을 고려한 경로 계획법 및 생성된 경로를 강건히 추종하는 제어 방법론에 관한 연구가 지배적임을 확인할 수 있다. 제어 방법론의 경우 슬라이딩 모드 제어기 및 모델 예측 제어기 등 다양한 제어 방법론을 이용하는 연구들이 있었지만 차선 변경을 위해 주변 차량과의 종방향 제어에 따른 제어 입력을 동시에 고려하는 조향 제어 연구는 미흡한 것을 확인할 수 있었다. 그러므로 본 연구에서는 자율주행 자동차가 차선 변경 시 주변 차량과의 상대 거동을 고려하는 종방향 제어 입력 기반 모델 예측 조향 제어 알고리즘을 제시한다. 본 논문에서 제안하는

주요 연구 내용은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 1) 차선 변경 대상 차로 내 차량과의 종방향 모델 예측 제어 알고리즘 개발 및 제어 입력 기반 속도 예측
- 2) 예측된 종방향 속도를 고려한 모델 예측 조향 제어 알고리즘 개발 및 다양한 시나리오 기반 성능평가

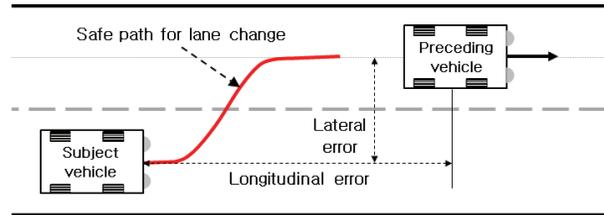
종방향 모델 예측 제어 알고리즘 개발을 위해 선행차량과의 상대거리와 상대속도 기반 기구학 모델이 사용되었으며 횡방향 모델 예측 제어 알고리즘 개발을 위해 차속을 이용하는 아커먼(Ackermann) 기반 모델이 사용되었다. 이산화된 모델들을 이용해 예측 출력을 도출하고, 예측 출력을 이용해 정의된 비용함수의 최적해를 도출함으로써 모델 예측 제어기의 최적해를 도출하였다. 종방향 제어기의 목표 값은 차두 시간을 이용한 목표 거리와 상대속도가 적용되었으며 횡방향 제어기의 목표 값은 차선 변경 대상 차량의 중심 차선이 적용되었다. 종방향 최적 제어 입력은 자차량의 종방향 속도를 예측하기 위해 이용되었고, 예측된 종방향 속도는 횡방향 모델 예측 제어기의 합리적 제어 성능 확보를 위해 사용되었다. 본 연구에서 제안하는 차선 변경 제어 알고리즘의 합리적 성능평가를 위해 Matlab/Simlink와 차량 성능평가를 위한 상용 소프트웨어인 CarMaker 사용하였으며 다양한 차선 변경 시나리오가 적용되었다.

본 논문의 나머지 부분은 다음과 같이 구성되었다. 2장에서는 제안하는 모델 예측 조향 제어 알고리즘의 개념을 설명하고, 3장에서는 차선 변경을 위해 설계된 모델 예측 제어 알고리즘을 구체적으로 기술한다. 4장에서는 성능평가 결과를 보여주고, 마지막 5장에서는 결론 및 한계점 분석과 향후 계획에 대해 기술한다.

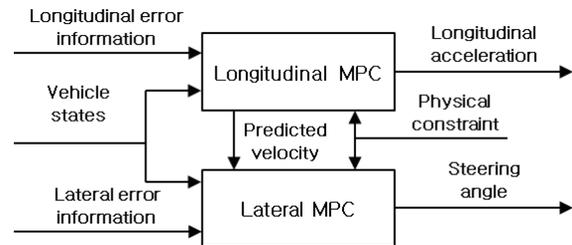
2. 모델 예측 조향 제어 개념

Fig. 1은 본 연구에서 제안하는 차선 변경 제어가 필요한 주행 상황과 모델 예측 종방향 및 횡방향 제어 알고리즘의 개념도를 나타낸다.

차선 변경 시 변경 대상 차로에 존재하는 선행 차량과의 종방향 제어 입력(종방향 가속도)은 모델 예측 제어기(Model Predictive Control, MPC)에 의해 도출되고, 도출된 최적 제어 입력을 기반으로 자차량의 속도가 예측된다. 횡방향 모델 예측 제어기는 종방향 제어기에서 도출된 예측 속도를 이용해 모델 예측 단계에서 예측 속도를 반영함으로써 최적 조향각을 도출한다. 개별 제어기에 인가되는 종방향 및 횡방향 오차들은 각각 선행차량 및 차선 변경 대상 차량의 가상 중심선과 자차량의 상대 물리량을 나타내며 최적해들은 차량의 물리적 제약 조건을 반영해



(a) Lane change situation



(b) Concept of model predictive control for lane change

Fig. 1 Model schematics for integral action based model predictive control algorithm

도출되도록 알고리즘이 설계되었다. 본 연구는 차선 변경 시점이 판단된 후 변경 대상 차로 내 선행차량과 종방향 제어를 수행한다는 조건하에 연구가 수행되었다. 다음 장에서는 설계된 모델 예측 종방향 및 횡방향 제어 알고리즘에 대해 기술한다.

3. 차선 변경을 위한 모델 예측 제어 알고리즘

Fig. 2는 본 연구에서 제안하는 차선 변경을 위한 종방향 및 횡방향 모델 예측 제어 알고리즘의 구체적인 모델 개략도를 나타낸다.

Fig. 2의 Predictive output 블록에서는 제어 오차 정보를 이용해 선형 모델 기반 N 스텝 예측 오차를 벡터 형태로 도출하고, Quadratic programming 블록에서는 예측된 오차 정보를 이용해 설계된 목적함수 기반 물리적 제약 조건을 고려하는 최적해를 도출한다.

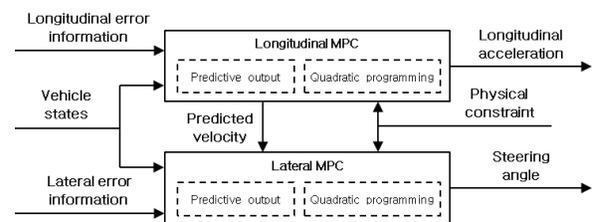


Fig. 2 Detailed model schematics of model predictive controllers

3.1 모델 예측 제어 알고리즘

Fig. 3은 자차량의 선행차량 및 목표 중심 차선에 대한 종방향 및 횡방향 오차 정보들을 나타낸다.

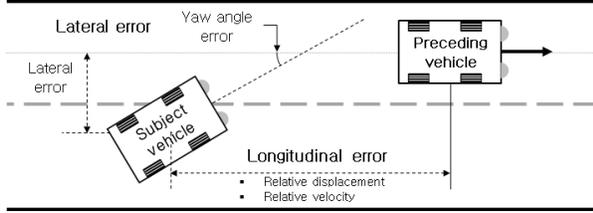


Fig. 3 Longitudinal and lateral errors

제어 알고리즘 설계를 위해 사용된 차량의 3자유도 기구학 모델은 식 (1)~(3)과 같으며 이를 기반으로 도출된 종/횡방향 오차 모델은 식 (4)~(5)와 같다.

$$v_x = \text{constant} \quad (1)$$

$$\dot{v}_y = -v_x \dot{\psi} \quad (2)$$

$$\dot{\psi} = (v_x/L)\delta \quad (3)$$

$$\dot{e}_L = A_L e_L + B_L a_s + F_L a_p \quad (4)$$

$$\dot{e}_{Lat} = A_{Lat} e_{Lat} + B_{Lat} \delta + F_{Lat} \dot{\psi}_{des} \quad (5)$$

종방향 제어 입력은 자차량의 종방향 가속도이고, 횡방향 제어 입력은 최적 중심 전륜 조향각으로 정의되었다. 성능평가를 위해 도출된 조향 제어 입력은 맵 기반 개별 휠의 랙 변위 입력으로 변환되어 제어 입력으로 적용되었다. 식 (4)와 식 (5)의 e_L 과 e_{Lat} 는 각각 종방향 및 횡방향 오차이며 벡터 $[e_1 \ e_2]^T$ 과 $[e_y \ e_\psi]^T$ 로 정의된다. 행렬 $A_L, B_L, F_L, A_{Lat}, B_{Lat}$ 는 다음과 같이 정의되었다.

$$A_L = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B_L = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix}, F_L = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$A_{Lat} = \begin{bmatrix} 0 & v_s \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B_{Lat} = \begin{bmatrix} 0 \\ v_s/L \end{bmatrix}, F_{Lat} = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

정의된 식 (4)와 (5)의 이산화된 식 기반 모델 예측 제어를 설계하였으며 크게 예측 출력 도출과 정의된 목적함수 기반 최적해 도출 과정으로 구분될 수 있다. 설계 과정은 종방향 및 횡방향 제어기에 동일 적용될 수 있으며 예측 출력을 위해 정의된 출력은 다음과 같다.

$$y_k = C\hat{e}_k \quad (8)$$

이산화된 식 (4)와 식 (5)를 기반으로 예측 출력을 도출하면 아래와 같이 벡터 형태로 표현이 가능하다.

$$Y = Ge_k + HU + Lu_k + MW + Kw_k \quad (9)$$

$$G = [CA_{k+1} \ CA_{k+1}A_{k+2} \ \dots \ CA_{k+1} \ \dots \ A_{k+N_p}]^T \quad (10)$$

$$H = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ CB_{k+1} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA_{k+1} \dots A_{k+N_p-2}B_{k+1} & CA_{k+1} \dots A_{k+N_p-3}B_{k+1} & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$U = [u_{k+1} \ u_{k+2} \ \dots \ u_{k+N_p}]^T \quad (12)$$

$$L = [CB_{k+1} \ CAB_{k+2} \ \dots \ CA_{k+1} \ \dots \ A_{k+N_p-1}B_{k+N_p}]^T \quad (13)$$

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ CF_{k+1} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA_{k+1} \dots A_{k+N_p-2}F_{k+1} & CA_{k+1} \dots A_{k+N_p-3}F_{k+1} & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$W = [w_{k+1} \ w_{k+2} \ \dots \ w_{k+N_p}]^T \quad (15)$$

$$F = [CF_{k+1} \ CAF_{k+2} \ \dots \ CA_{k+1} \ \dots \ A_{k+N_p-1}F_{k+N_p}]^T \quad (16)$$

식 (10)~(16)에서 사용된 행렬 A, B, F 는 각각 식 (4)와 식 (5)에서 정의된 종방향 및 횡방향 오차 모델의 시스템, 입력, 외란 행렬을 나타낸다. W 는 오차 모델의 외란항으로 구성된 벡터이며 일정하다고 가정하였다. 최적해 도출을 위한 목적함수는 예측 출력 및 차이 행렬 D 를 이용해 설계되었으며 다음 수식과 같다.

$$J = \frac{1}{2} U^T Q U + f^T U \quad (17)$$

$$Q = rD^T D + H^T H \quad (18)$$

$$f = H^T (Ge_k + Lu_k + MW + Kw_k) \quad (19)$$

식 (17)에의 목적함수를 최소화할 수 있는 최적해를 도출하기 위해 Quadratic programming 기법을 이용하였으며 도출된 최적해들 중 첫 번째 해를 다음 스텝에서의 최적해로 적용하였다. 본 연구에서는 현실적 제어 입력 도출을 위해 차량의 가감속 및 조향각에 대한 한계와 변화 제약 조건을 적용하였고 다음 절에서 설명한다.

3.2 물리적 제약 조건

모델 예측 제어 입력 도출 시 적용된 제약 조건은 가속 및 감속 한계와 변화율 그리고 조향각의 한계 및 변화율의 물리적 제약 조건이 반영되었다. 한계 제약 조건의 경우 경계 제약 조건의 형태로 반영되었고, 변화율 제약 조건의 경우 부등호 제약 조건으로 반영되었다. 각 적용된 제약 조건의 수학적 형태는 다음과 같다.

- 한계 적용을 위한 제약 조건: $U_{\min} \leq U \leq U_{\max}$

$$U_{\min} = [u_{\min} \cdots u_{\min}]^T, U_{\max} = [u_{\max} \cdots u_{\max}]^T \quad (20)$$

- 변화율 제한 적용을 위한 제약 조건: $A_c U \leq B_c$

$$A_c = [A_{c,1} \ A_{c,2}]^T, B_c = [B_{c,1} \ B_{c,2}]^T \quad (21)$$

$$A_{c,1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & \cdots \\ 0 & 0 & 1 & \ddots & \ddots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, A_{c,2} = -A_{c,1} \quad (22)$$

$$B_{c,1} = \begin{bmatrix} u_k + |\dot{u}_{\max}| \Delta t \\ |\dot{u}_{\max}| \Delta t \\ \vdots \end{bmatrix}, B_{c,2} = \begin{bmatrix} -u_k + |\dot{u}_{\max}| \Delta t \\ |\dot{u}_{\max}| \Delta t \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (23)$$

u_{\max} , u_{\min} , \dot{u}_{\max} 는 각각 제어 입력의 최대, 최소, 최대 변화율에 대한 물리적 제약 값들을 의미하고, Δt 는 모델 예측 제어기의 예측 단계에서 예측하는 시간 간격을 나타낸다. 앞서 정의된 물리적 제약 조건 기반 종방향 가속도와 조향각이 도출될 수 있도록 제어 알고리즘이 설계되었으며 다음 절에서는 도출된 최적 제어 입력 기반 자차량의 속도 예측 과정 및 횡방향 제어 도출을 위한 반영 알고리즘에 대해 기술한다.

3.3 최적해 기반 자차량 속도 예측

자율주행 자동차의 차선 변경을 위한 모델 예측 최적 조향 제어 입력 도출을 위해서는 식 (7)에서 확인할 수 있듯이 차량의 예측된 종방향 속도가 필요하다. 본 연구에서는 자율주행 자동차의 차선 변경을 위해 대상 차로 내 존재하는 선행 차량을 고려하는 종방향 모델 예측 제어 알고리즘이 적용되었기 때문에 최적 가속도 제어 입력을 이용해 속도를 예측하였다. 제어 입력 기반 예측된 속도는 차선 변경을 위한 모델 예측 조향 제어 입력 도출을 위해 사용되었고, 최적 제어 입력 기반 예측 속도는 다음 식 (24)를 기반으로 계산될 수 있다.

$$v_{s,p,i} = v_{s,k} + \sum_{j=1}^i (a_{s,opt,j} \Delta t), \quad i=1,2,\dots,N_p \quad (24)$$

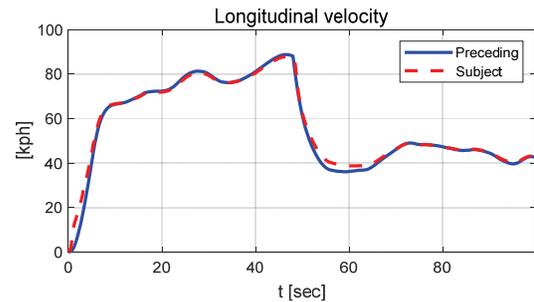
$v_{s,k}$ 와 $v_{s,p}$ 는 각각 자차량의 종방향 속도와 예측된 속도를 의미하고, $a_{s,opt}$ 는 설계된 종방향 모델 예측 제어기에서 도출된 종방향 가속도 제어 입력을 의미한다. 최적 제어 입력을 이용해 예측된 자차량의 종방향 속도는 식 (7) 기반 조향 제어 입력을 도출하기 위해 사용되었고, 예측 단계에서의 시스템 및 입력 행렬들은 다음과 같다.

$$A_{Lat,1} = \begin{bmatrix} 0 & v_{s,p,1} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, A_{Lat,2} = \begin{bmatrix} 0 & v_{s,p,2} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \dots, A_{Lat,N_p} = \begin{bmatrix} 0 & v_{s,p,N_p} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

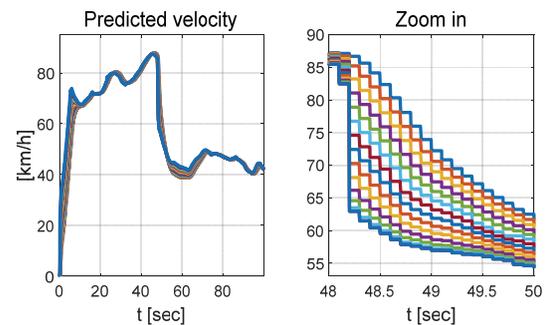
$$B_{Lat,1} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{v_{s,p,1}}{L} \end{bmatrix}, B_{Lat,2} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{v_{s,p,2}}{L} \end{bmatrix}, \dots, B_{Lat,N_p} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{v_{s,p,N_p}}{L} \end{bmatrix} \quad (26)$$

Fig. 4는 설계된 종방향 모델 예측 제어 기반 선행차량을 추종하는 자차량의 속도와 최적 종방향 가속도 입력 기반 매 시간 예측된 속도를 보여준다.

Fig. 4(a)에서 확인할 수 있듯이 48초 이후 선행차량의 감속에 의한 자차량의 모델 예측 제어 기반 감속 제어가 수행되는 것을 확인할 수 있다. 이 때 본 연구에서 설계된 종방향 모델 예측 제어 알고리즘은 감속을 위한 N_p 개의 최적 종방향 가속도를 도출하고, 도출된 최적 가속



(a) Velocity: preceding and subject vehicles



(b) Predicted velocity: total and zoom in(48 ~ 50 sec)

Fig. 4 Current and predicted velocities

도와 식 (24)를 기반으로 예측된 속도를 Fig. 4(b)에서 구체적으로 확인할 수 있다. 다음 장에서는 종방향 및 횡방향 모델 예측 제어 알고리즘 기반 자율주행 자동차의 차선 변경 성능평가 결과에 대해 기술한다.

4. 성능평가

Fig. 5는 상용 소프트웨어 기반 성능평가를 위해 본 연구에서 구성한 구체적 모델 개략도를 보여준다. Fig. 5의 블록들은 성능평가를 위해 구성된 Matlab/Simulink 기반 알고리즘의 기능적 블록들이다.

본 연구에서는 합리적 성능평가를 위해 상용 소프트웨어(CarMaker)를 이용하였으며 자동차의 전방에 위치하는 선행차량은 없고, 차선 변경을 목적으로 주변 차로의 선행차량을 인지 후 추종 제어를 수행하는 상황을 적용하였다. 평가를 위해 차선 변경 대상 차로에 존재하는 선행차량이 감속하는 동안 자동차가 다양한 특성으로 차선 변경을 수행하는 시나리오가 적용되었다. 종방향 제어를 위한 목표 상대 거리는 특정 차두 시간과 자동차 속도의 곱으로 정의되었고, 횡방향 제어를 위한 목표 횡 변위는 차선 변경을 위한 횡 변위로 정의되었다. Table 1은 성능평가를 위해 적용된 시나리오를 보여준다.

차선 변경의 경우 선행차량이 약 90 km/h에서 약 40 km/h로 감속하는 동안의 48.2초 일 때 차선 변경이 시작 되도록 성능평가 과정을 설계하였다. 시나리오 [1]의 경

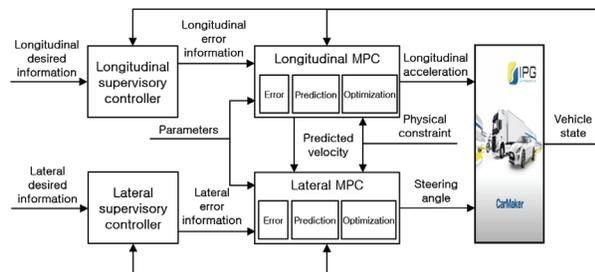


Fig. 5 Detailed model schematics for performance evaluation

Table 1 Performance evaluation scenarios

Division	Velocity	Weighting, C
Scenario [1]	Preceding vehicle - deceleration	$C_{1,2} = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 100 + 200 e_y & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix}$
Scenario [2]		
Scenario [3]	90 km/h → 40 km/h	$C_2 = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix}$
Lane change start time	Time 48.2 sec	

우 종방향 제어기로 LQR(Linear Quadratic Regulator) 제어가 적용되었으며 시나리오 [2]와 [3]은 논문에서 설계된 MPC 제어가 적용되었다. 다양한 차선 변경 특성 기반 평가를 위해 시나리오 [3]의 경우 시나리오 [2]에 비해 상대적으로 급격한 차선 변경을 수행하도록 가중치가 설계되었다. 이를 위해 시나리오 [2]는 고정된 가중치 행렬이 적용되었고, 시나리오 [3]의 경우 횡 오차에 대한 가중치가 횡 오차 기반 선형식으로 적용되도록 가중치 행렬이 설계되었다. 성능평가는 자동차의 속도를 등속으로 예측한 경우와 제어 입력 기반 예측한 평가 결과를 비교 하였다. 평가를 위해 사용된 차량의 파라미터(관성, 크기 등) 및 추정된 코너링 강성 그리고 적용된 종방향 및 횡방향 모델 예측 제어 파라미터들은 Table 2와 Table 3에서 확인할 수 있다.

Fig. 6부터 Fig. 12는 시나리오 [1]에 대한 자동차의 차선 변경 성능평가 결과들을 보여준다.

종방향 제어 알고리즘으로 LQR 제어 알고리즘이 적용된 경우 합리적으로 차선 변경이 수행된 것을 확인할

Table 2 Vehicle parameters (from CarMaker vehicle model)

Description	Values	Remarks	
Vehicle mass	1,600 kg	-	
Moment of inertia	2,333.6 kgm ²	z-axis	
Track tread	1.630 m	-	
Distance between front axis and mass center	1.744 m	-	
Distance between rear axis and mass center	1.231 m	-	
Tire specification	Front	255/55 R17	Estimated
	Rear	255/55 R17	
Cornering stiffness	Front	73,653 N/rad	Estimated
	Rear	140,740 N/rad	

Table 3 Control parameters and constraints

Division	Description	Values	
Longitudinal control	Time headway	1.5 sec	
	Updating period	0.1 sec	
Model predictive control	Discrete time	0.1 sec	
	Prediction step	15 step	
	Weighting factor	5×10^8	
	Constraints acceleration	Boundary	$-6 \sim 5 \text{ m/s}^2$
		Rate limit	15 m/s^3
	Constraints steering	Boundary	$\pm 40 \text{ deg}$
Rate limit		$2 \times \pi / 17 \text{ deg/s}$	

수 있었다. Fig. 10에서 볼 수 있듯이 적용된 가중치 행렬에 따라 횡방향 최대 조향각은 각각 약 0.5도 및 1도를 출력하는 것을 확인할 수 있었다.

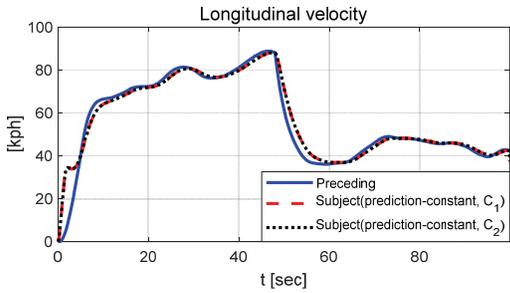


Fig. 6 Results: longitudinal velocities (Scenario [1])

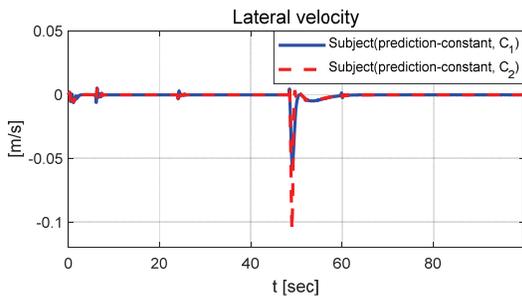
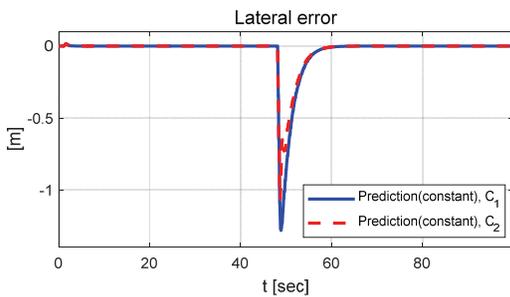
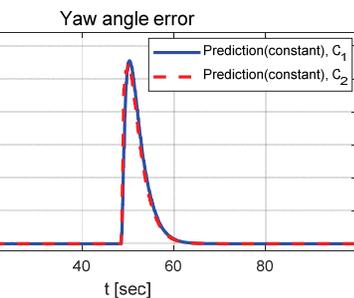


Fig. 7 Results: lateral velocities (Scenario [1])



(a) Lateral error



(b) Yaw angle error

Fig. 8 Results: errors (lateral and yaw angle errors) (Scenario [1])

Fig. 13부터 Fig. 20은 시나리오 [2]에 대한 등속 예측 및 종방향 제어 입력 기반 속도 예측 차량의 차선 변경 성능평가 결과들을 보여준다. Fig. 13에서 확인할 수 있

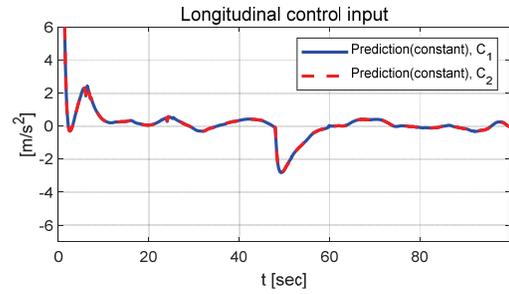


Fig. 9 Results: control inputs (longitudinal LQR) (Scenario [1])

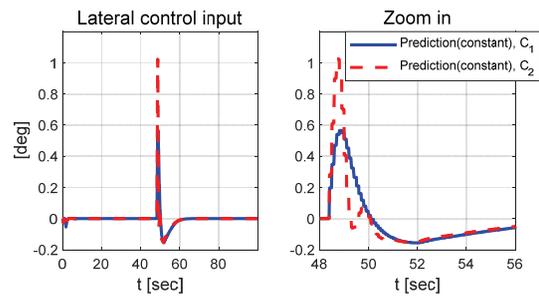
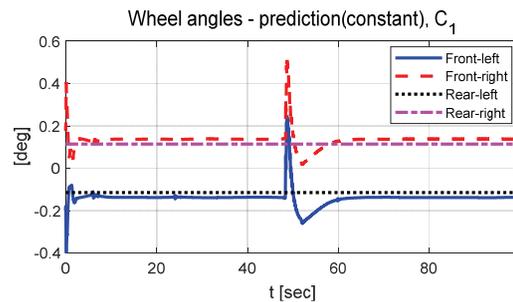
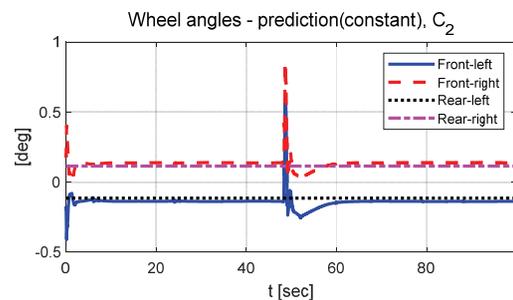


Fig. 10 Results: control inputs (lateral MPC) (Scenario [1])



(a) Wheel angle - prediction(constant), C₁



(b) Wheel angle - prediction(constant), C₂

Fig. 11 Results: wheel angle (Scenario [1])

듯이 선행차량은 약 45초 이후 감속을 시작하고, 자차량은 설계된 종방향 모델 예측 제어 기반 감속 주행하며 선행차량을 추종하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 14에서는 속도를 등속으로 예측한 경우에 대한 횡방향 속도와 제어 입력 기반 예측한 결과를 비교하였다. 감속하는 동안 제어 입력 기반 예측한 속도를 이용한 결과가 등속 예측 결과 대비 상대적으로 큰 조향각을 사용하기 때문에 높은 슬립 현상을 확인할 수 있었다.

Fig. 16에서 선행차량이 감속하는 동안 자차량은 약 -6 m/s^2 의 가속도 사용을 확인할 수 있었고, 예측된 속도는 Fig. 17에서 확인할 수 있다. Fig. 18은 횡방향 모델 예

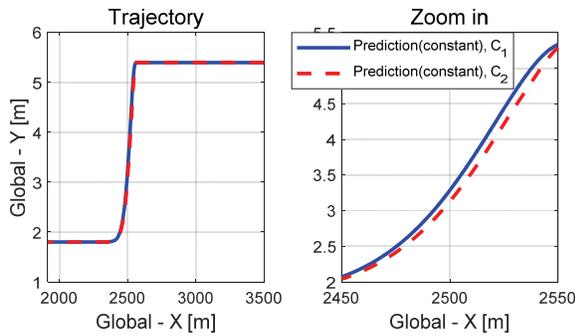


Fig. 12 Results: trajectories (Scenario [1])

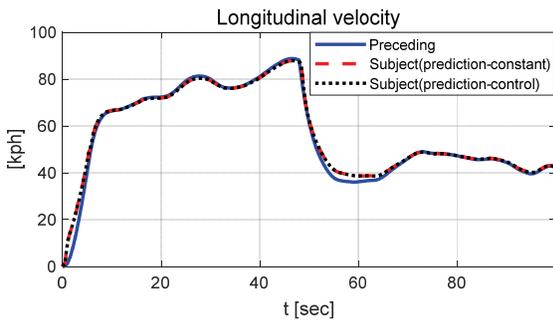


Fig. 13 Results: longitudinal velocities (Scenario [2])

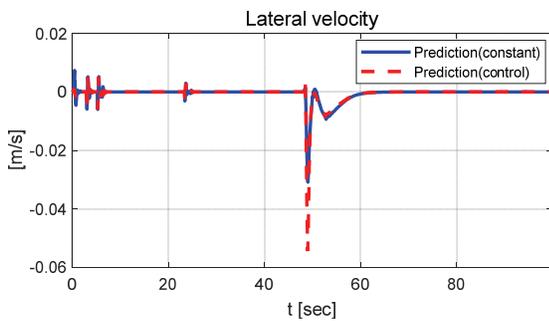
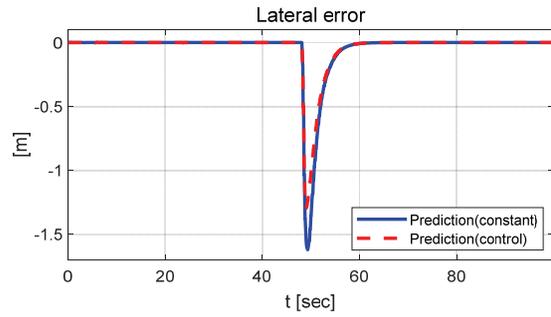
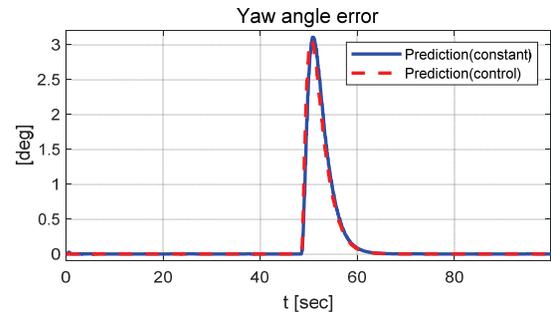


Fig. 14 Results: lateral velocities (Scenario [2])



(a) Lateral error



(b) Yaw angle error

Fig. 15 Results: errors (lateral and yaw angle errors) (Scenario [2])

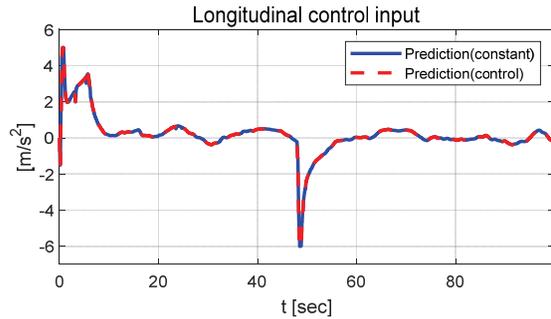


Fig. 16 Results: control inputs (longitudinal MPC) (Scenario [2])

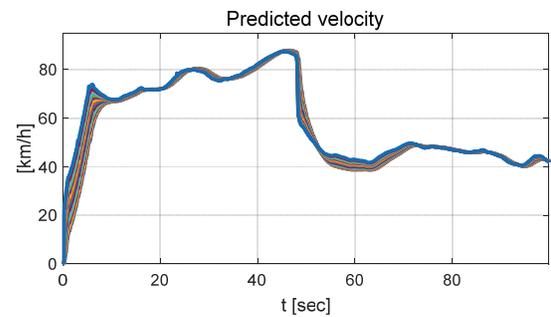


Fig. 17 Results: predicted velocities (Scenario [2])

측 제어기에서 도출된 최적 조향각을 보여준다. 확대된 그래프를 확인해 보면 제어 입력 기반 예측 속도를 이용하는 경우 감속 예측을 하면서 등속 예측 대비 큰 조향각이 도출되는 것을 확인할 수 있다. 도출된 최적 조향각은 맵 기반 랙 변위 입력으로 변환되어 차량의 조향 입력으로 적용되었다. Fig. 16부터 Fig. 28은 시나리오 [3]에 대한 자차량의 성능평가 결과를 보여준다. 시나리오 [3]의 경우 시나리오 [2]에 비해 상대적으로 급격한 차선변경 상황이 적용되었지만 종방향 제어 결과의 경우 시나리오 [2] 대비 큰 차이가 없음을 Fig. 21에서 확인할 수 있다. 하지만 급격한 차선 변경으로 인해 시나리오 [2] 대비 큰 횡 속도 거동을 보임을 Fig. 22에서 확인할 수 있다.

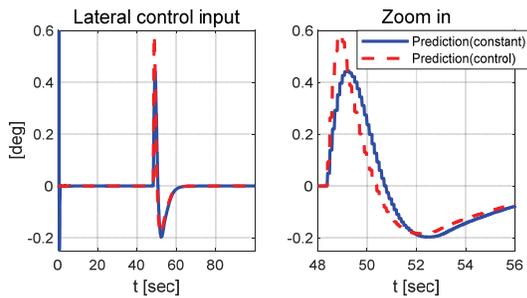


Fig. 18 Results: control inputs (lateral MPC) (Scenario [2])

Fig. 23은 횡 오차 및 요 각도 오차를 보여준다. 시나리오 [2]에 비해 횡 오차는 상대적 급격한 차선 변경이 이뤄지는 시나리오 [3]의 경우 작은 횡 오차를 확인할 수 있지만 요 각도 오차의 경우 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다. 상대적으로 급격한 조향각이 인가된 시나리오 [3]의 경우 등속 예측 경우와 제어 입력 기반 속도 예측 경우의 오차는 큰 차이는 없음을 확인할 수 있다.

Fig. 25에서 예측된 속도는 시나리오 [2]와 시나리오 [3]에서 큰 차이가 없음을 확인하였고, Fig. 26에서 확인할 수 있듯이 등속 예측 결과 대비 제어 입력 기반 예측 속도를 이용하는 경우 상대적으로 큰 조향각을 사용하는 것으로 확인하였다. 또한 급격한 조향으로 인해 약 49초 이후 진동 현상이 있음을 확인할 수 있었다.

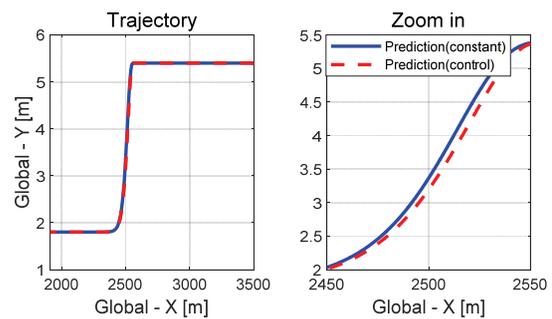
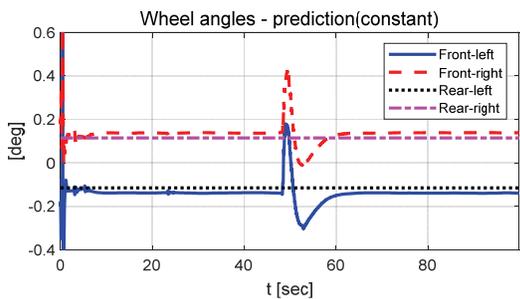
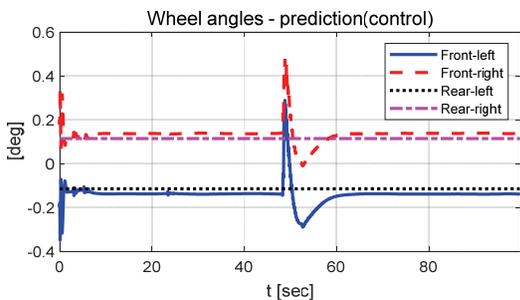


Fig. 20 Results: trajectories (Scenario [2])



(a) Wheel angle - prediction(constant)



(b) Wheel angle - prediction(control)

Fig. 19 Results: wheel angle (Scenario [2])

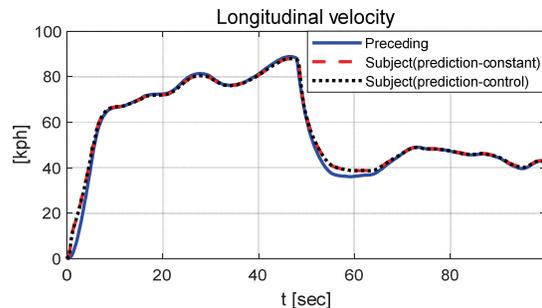


Fig. 21 Results: longitudinal velocities (Scenario [3])

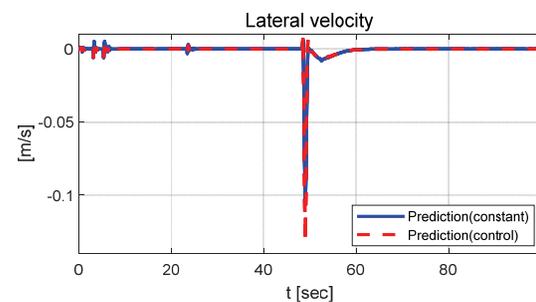
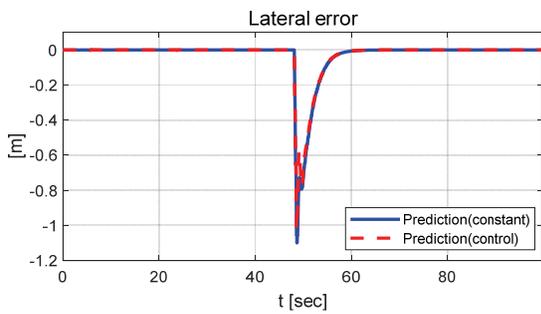
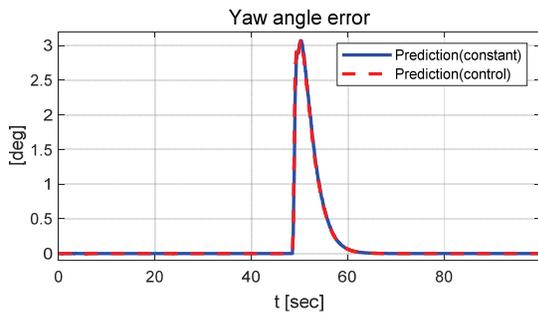


Fig. 22 Results: lateral velocities (Scenario [3])

Fig. 20과 28은 시나리오 [2]와 시나리오 [3]의 차선 변경 주행 궤적을 각각 보여주고 있으며 등속 예측 경우와 제어 입력 기반 속도 예측의 경우 큰 궤적의 큰 차이는 없는 것을 확인할 수 있다. 하지만 제어 입력 기반 예측 속도를 이용하는 차선 변경의 경우 상대적 큰 조향각을 사용하면서 큰 슬립 현상을 확인할 수 있었다. 모든 시나리오에서 종방향 제어 입력 기반 예측된 속도를 이용하는 경우 등속 예측을 이용하는 경우에 비해 큰 조향입력을 사용하는 것을 확인할 수 있었으며 각 시나리오와 종방향 속도 예측 방법에 대한 조향각 변화의 정량적 분석 결과는 다음 Table 4에서 확인할 수 있다.



(a) Lateral error



(b) Yaw angle error

Fig. 23 Results: errors (lateral and yaw angle errors) (Scenario [3])

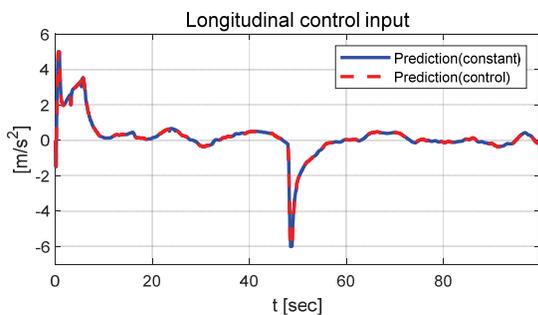


Fig. 24 Results: control inputs (longitudinal MPC) (Scenario [3])

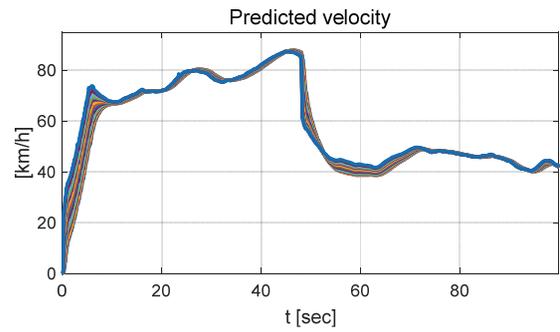


Fig. 25 Results: predicted velocities (Scenario [3])

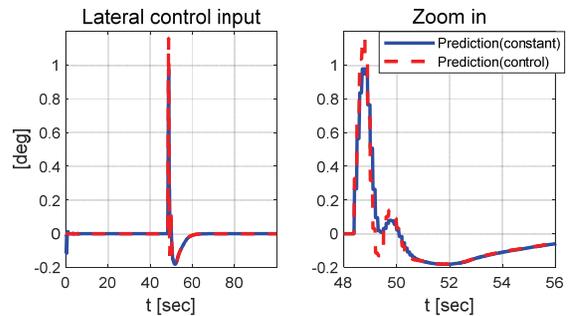
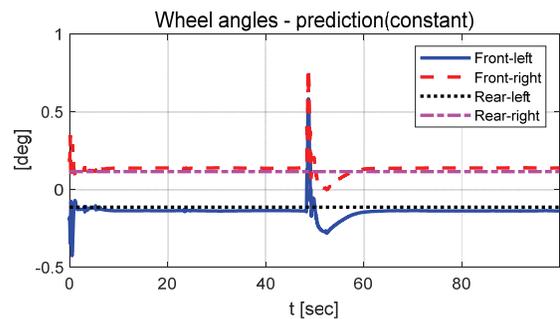
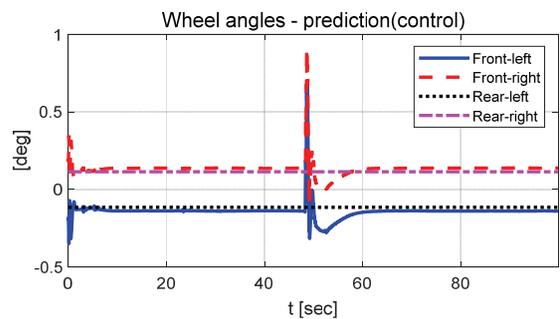


Fig. 26 Results: control inputs (lateral MPC) (Scenario [3])



(a) Wheel angle - prediction (constant)



(b) Wheel angle - prediction (control)

Fig. 27 Results: wheel angle (Scenario [3])

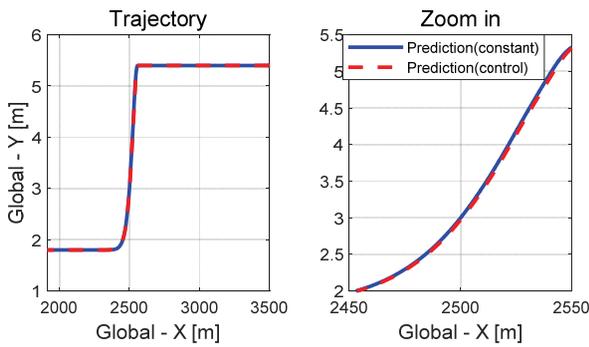


Fig. 28 Results: trajectories (Scenario [2])

Table 4 Analysis of steering angles

Division	Steering angle (max)		Change rate [%]
	Prediction (constant)	Prediction (control)	
Scenario [2]	0.44 deg	0.58 deg	31.82 % ↑
Scenario [3]	0.98 deg	1.16 deg	18.37 % ↑

Table 5 Analysis of lateral tracking control error

Division		Error (max)		Change rate [%]
		Prediction (constant)	Prediction (control)	
Scenario [2]	Lateral	1.62 m	1.30 m	-19.75 %
	Yaw angle	3.10 deg	3.06 deg	-1.29 %
Scenario [3]	Lateral	1.10 m	1.02 m	-7.27 %
	Yaw angle	3.07 deg	3.07 deg	[-]

Table 5는 횡방향 추종 제어 오차의 정량적 분석 결과를 보여주며 시나리오 [2]와 [3] 모두 본 연구에서 제안한 속도 예측 방법을 적용한 경우가 오차의 최대 절대값이 등속 예측 제어 결과 대비 작은 값을 갖는 것을 확인할 수 있다. 시나리오 [2]의 경우 등속 예측 경우 대비 제어 입력 기반 예측의 경우가 최대 조향각 기준 약 31.82% 증가한 것으로 확인되었다. 시나리오 [3]의 경우 등속 예측 경우 대비 제어 입력 기반 예측의 경우가 최대 조향각 기준 약 18.37% 증가한 것으로 확인되었다. 다음 장에서는 앞서 기술된 연구 내용의 요약과 결론 그리고 한계점 분석에 따른 향후 계획을 기술한다.

5. 결론

본 연구에서는 자율주행 자동차의 차선 변경을 위한 예측된 종방향 속도를 이용하는 모델 예측 조향 제어 알고리즘을 제안하였다. 차선 변경을 위해 차선 변경 대상

차로 내 위치하는 선행 차량과의 종방향 모델 예측 제어 알고리즘이 설계되었고, 설계된 종방향 모델 예측 제어기에서 도출된 최적 종방향 가속도를 기반으로 자차량의 종방향 속도를 예측하였다. 예측된 종방향 속도는 차선 변경을 위한 최적 조향 제어 입력 도출을 위한 모델 예측 제어기의 예측 단계에 사용되었다. 차선 변경 대상 차로 내 위치하는 선행차량이 감속하는 동안 다양한 특성으로 차선 변경을 수행하는 시나리오 기반 성능평가가 수행되었으며 합리적 평가를 위해 상용 소프트웨어를 이용하였다. 평가 결과 본 연구에서 제안하는 제어 입력 기반 예측 속도를 이용하는 조향 제어 알고리즘은 등속 예측 속도를 이용하는 경우 대비 상대적으로 큰 조향 입력을 사용하는 것을 확인하였다. 제안하는 알고리즘은 종방향 제어 입력을 고려한 합리적 조향각 도출 알고리즘이지만 사용된 수학적 오차 모델의 불확실성에 따른 예측 속도 및 제어 오차가 존재한다. 그러므로 향후 제어 성능 고도화를 위한 적응형 모델 예측 제어 알고리즘 개발과 함께 속도 예측 알고리즘의 고도화를 계획하고 있다. 또한 현 주행 차로와 차선 변경 대상 차로 내 존재하는 차량을 동시에 고려하는 차선 변경 시점 판단 및 조향 제어 알고리즘의 개발을 계획하고 있다. 본 연구에서 제안하는 종방향 및 횡방향 모델 예측 제어 알고리즘은 추후 한계점 극복 및 단계별 연구를 통해 자율주행 차량의 차선 변경을 포함하는 기본 조향 제어 알고리즘으로써 확대 적용 가능할 것으로 기대한다.

References

- 1) M. A. Abbas, R. Milman and J. M. Eklund, "Obstacle Avoidance in Real Time with Nonlinear Model Predictive Control of Autonomous Vehicles," Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, Vol.40, No.1, pp.12-22, 2017.
- 2) J. Ji, A. Khajepour, W. W. Melek and Y. Huang, "Path Planning and Tracking for Vehicle Collision Avoidance Based on Model Predictive Control with Multiconstraints," IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol 66, No.2, pp.952-964, 2016.
- 3) Z. Wang, W. Deng, S. Zhang and J. Shi, "Vehicle Automatic Lane Change Based on Model Predictive Control," SAE International Journal of Passenger Cars-Electronic and Electrical Systems, Vol.9, No.1, pp.231-236, 2016.
- 4) Y. Zhang and P. A. Ioannou, "Combined Variable Speed Limit and Lane Change Control for Highway Traffic," IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol.18, No.7, pp.1812-1823, 2016.

- 5) S. Arefnezhad, A. Ghaffari, A. Khodayari and S. Nosoudi, "Modelling of Double Lane Change Maneuver of Vehicles," *Int. J. Automotive Technology*, Vol.19, No.2, pp.271-279, 2018.
- 6) C. M. Kang, Y. S. Gu, S. J. Jeon, Y. S. Son, W. Kim, S. H. Lee and C. C. Chung, "Lateral Control System for Autonomous Lane Change System on Highways," *SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems*, Vol.9, No.2, pp.877-884, 2016.
- 7) C. Gatipoglu, U. Ozguner and K. A. Redmill, "Automated Lane Change Controller Design," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol.4, No.1, pp.13-22, 2003.
- 8) Y. Liu, X. Wang, L. Li, S. Cheng and Z. Chen, "A Novel Lane Change Decision-making Model of Autonomous Vehicle Based on Support Vector Machine," *IEEE Access*, Vol.7, pp.26543-26550, 2019.
- 9) D. Zeng, Z. Yu, L. Xiong, J. Zhao, P. Zhang, Z. Li, Z. Fu, J. Yao and Y. Zhou, "A Novel Robust Lane Change Trajectory Planning Method for Autonomous Vehicle," *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp.486-493, 2019.
- 10) X. Wu, B. Qiao and C. Su, "Trajectory Planning with Time-Variant Safety Margin for Autonomous Vehicle Lane Change," *Applied Sciences*, Vol.10, No.5, Paper No.1626, 2020.
- 11) K. Gao, D. Yan, F. Yang, J. Xie, L. Liu, R. Du and N. Xiong, "Conditional Artificial Potential Field-Based Autonomous Vehicle Safety Control with Interference of Lane Changing in Mixed Traffic Scenario," *Sensors*, Vol.19, No.19, Paper No.4199, 2019.
- 12) Y. Chen, C. Hu and J. Wang, "Motion Planning with Velocity Prediction and Composite Nonlinear Feedback Tracking Control for Lane-change Strategy of Autonomous Vehicles," *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, Vol.5, No.1, pp.63-74, 2019.
- 13) V. Winstead, "Autonomous Lane Changing Using Model Predictive Control," *SAE Transactions*, Vol.114, No.6, pp.1846-1852, 2005.
- 14) J. E. Naranjo, C. Gonzalez, R. Garcia and T. de Pedro, "Lane-change Fuzzy Control in Autonomous Vehicles for the Overtaking Maneuver," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol.9, No.3, pp.438-450, 2008.
- 15) H. Yu, H. E. Tseng and R. Langari, "A Human-like Game Theory-based Controller for Automatic Lane Changing," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.88, pp.140-158, 2018.