

# 측후방 충돌 회피를 위한 조향 보조 토크 및 차등 제동 분배 제어 알고리즘 개발

이준영\* · 김동욱\* · 이경수\* · 유현재\*\* · 정혁진\*\* · 고봉철\*\*

Development of a coordinated control algorithm using steering torque overlay and differential braking for rear-side collision avoidance

Junyoung Lee\*, Dongwook Kim\*, Kyongsu Yi\*, Hyunjae Yoo\*\*,  
Hyokjin Chong\*\*, Bongchul Ko\*\*

*Key Words* : Driver support system(운전자 지원 시스템), Intelligent safety vehicle(지능형 안전 차량), Risk management system(위험 관리 시스템), Rear-side collision avoidance(측후방 충돌 방지), Active lane change assistance(능동 차선 변경 보조)

## ABSTRACT

This paper describes a coordinated control algorithm for rear-side collision avoidance. In order to assist driver actively and increase driver's safety, the proposed coordinated control algorithm is designed to combine lateral control using a steering torque overlay by Motor Driven Power Steering (MDPS) and differential braking by Vehicle Stability Control (VSC). The main objective of a combined control strategy is twofold. The one is to prevent the collision between the subject vehicle and approaching vehicle in the adjacent lanes. The other is to limit actuator's control inputs and vehicle dynamics to safe values for the assurance of the driver's comfort. In order to achieve these goals, the Lyapunov theory and LMI optimization methods has been employed. The proposed coordinated control algorithm for rear-side collision avoidance has been evaluated via simulation using CarSim and MATLAB/Simulink.

## 1. 서론

자동차 사고의 90%는 운전자의 부주의나 주행 부담으로 인한 순간적인 운전자의 졸음 등 인적 과오에 기인한다.<sup>1)</sup> 또한 충돌 사고 발생시 대부분의 경우 운전자는 충돌 위험을 인지하지 못한 상태에서 충돌 회피

를 위한 주행 거동을 보이지 않는 것으로 조사되었다.<sup>2)</sup> 이러한 충돌 사고가운데 차선 변경 도중 발생하는 횡방향 충돌 사고의 비율은 12~13%가량 되는 것으로 미국 및 독일에서 조사되었다.<sup>3,4)</sup> 일반적으로 운전자들은 차선 변경을 하기 위해서 차량을 종방향 및 횡방향으로 동시에 조작해야 하기 때문에 높은 스트레스를 받는다고 조사되었다.<sup>5)</sup> 따라서 운전자의 차선 변경을 지원하기 위한 차선 변경 보조 시스템 (LCA)에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 자차량의 차선 이탈이 예상될 때 자차량과 측후방 접근 차량간의 충돌 예상 시간이 작을수록 전동식 조향 보조 장치

\* School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

\*\* Intelligent Vehicle Safety System Development Team, Hyundai Motor Company, Hwaseong, Korea  
E-mail : wnsdud85@snu.ac.kr

(MDPS)를 통해 큰 조향 보조 토크를 제공하여 차차량의 차선 이탈을 방지하도록 하는 연구가 진행되었다.<sup>6)</sup> 하지만 조향 토크를 보조하는 방식의 제어 알고리즘을 설계할 때 조향 보조 토크의 양은 운전자와의 상호 작용을 고려하여 제한되어야 한다. 제어기에 의해 가해지는 조향 보조 토크는 운전자에게 조향 이질감을 느끼도록 할 수 있다. 또한 운전자의 조향 토크는 제어기에 외란으로 작용할 수 있다. 이러한 점 때문에 Direct Yaw Moment Control (DYC) 방법을 통해 측후방 접근 차량과의 충돌을 방지하는 제어 알고리즘에 대한 연구가 진행되었다.<sup>7)</sup> 차등 제동입력을 차량 안정성 제어 장치 (VSC) 모듈에 인가하면 운전자의 조향 거동에 높은 호환성을 유지하면서 차량을 제어할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 VSC의 제어 개입을 통해 차량의 속도가 감소하고 자차량 주변 교통 상황에 영향을 줄 수 있다. 또한 차등 제동을 통해 발생시킬 수 있는 최대 요속도는 2~2.5 deg/sec 이고 이는 측후방 접근 차량과의 충돌을 방지하기에는 불충분할 수 있다. 본 연구에서는 MDPS와 VSC를 함께 사용하여 조향 보조 토크 및 차등 제동 제어를 통해 차선 변경 시 측후방 접근 차량과 자차량간의 충돌을 방지하는 제어 알고리즘을 개발하였다. 각 액츄에이터의 제어 입력은 액츄에이터의 제어 한계 및 차량의 안정성을 고려하여 Linear Matrix Inequality (LMI)를 기반으로 한 강건 모델 예측 제어 방법을 통해 결정되었다.

## 2. 차량 동역학 모델

본 연구에서는 차량의 횡방향 거동에 대한 제어를 통해 차선 변경 중에 발생할 수 있는 측후방 접근 차량과 자차량 간의 충돌을 방지하는데 초점을 두었기 때문에 2자유도 Bicycle 모델을 기반으로 액츄에이터 모델 및 차량-도로간의 상대오차 모델을 추가 구성한 횡방향 동역학 모델을 사용하였다.<sup>14)</sup> 액츄에이터로는

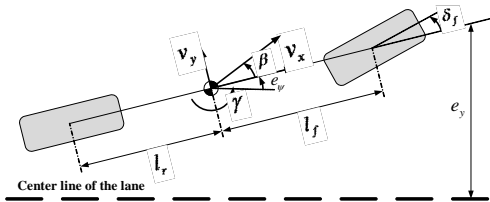


Fig. 1 Lateral dynamics

MDPS와 VSC 를 사용하였기에 MDPS를 통해 제어 가능한 조향 보조 토크 제어 입력과 VSC를 통해 제어 가능한 요모멘트 제어 입력이 동역학 모델에 추가되었다. 본 연구에서 사용한 차량-도로간의 상대오차 모델은 Fig. 1과 같이 차선의 중심선을 기준 궤적으로 하고 차량 중심선과 차량 중심의 상대 오차 거리  $e_y$  및 상대 오차 각  $e_\psi$  으로 표현하였다.

2 자유도 Bicycle 모델, 액츄에이터 모델 및 차량-도로간의 상대오차 모델을 통합한 횡방향 동역학 모델은 아래와 같은 수식으로 표현할 수 있다.

$$x = [\beta \quad \gamma \quad e_\psi \quad e_y \quad \delta_f \quad \dot{\delta}_f]^T \quad (1)$$

$$\dot{x} = A \cdot x + B \cdot u + F_h \cdot T_h + F_\rho \cdot \rho_{ref} \quad (2)$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & a_{15} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 & a_{25} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_{61} & a_{62} & 0 & 0 & a_{65} & a_{66} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ b_{21} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & b_{62} \end{bmatrix}, \quad F_h = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad F_\rho = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ f_{\rho,3} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} a_{11} &= -\frac{2C_f + 2C_r}{mv_x}, a_{12} = -1 + \frac{-2C_f l_f + 2C_r l_r}{mv_x^2}, a_{15} = \frac{2C_f}{mv_x}, \\ a_{21} &= \frac{-2C_f l_f + 2C_r l_r}{I_z}, a_{22} = -\frac{2C_f l_f^2 + 2C_r l_r^2}{I_z v_x}, a_{25} = \frac{2C_f l_f}{I_z}, \\ a_{41} &= v_x, a_{42} = l_s, a_{43} = v_x, a_{61} = \frac{2C_f \xi}{J_s}, a_{62} = \frac{2C_f \xi l_f}{v_x J_s}, \\ a_{65} &= -\frac{2C_f \xi}{J_s}, a_{66} = -\frac{b_s}{J_s}, b_{21} = \frac{1}{I_z}, b_{62} = \frac{N_g}{J_s}, f_{h,6} = \frac{N_g}{J_s}, \\ f_{\rho,3} &= -v_x \end{aligned} \quad (4)$$

위의 식에서  $\beta$  는 횡방향 미끌림각,  $\gamma$  는 요속도,  $T_h$  는 운전자의 조향 토크,  $\rho_{ref}$  는 도로 곡률을 의미한다. 제어 입력 변수  $u = [M_z \quad T_{overlay}]^T$  는 차등 제동을 통해 발생시킬 수 있는 요 모멘트  $M_z$  와 MDPS로 제

공하는 조향 보조 토크  $T_{overlay}$  로 구성한다.

### 3. 측후방 충돌 방지를 위한 제어 분배 알고리즘

본 연구에서는 제어 알고리즘을 설계할 때 측후방 접근 차량과 자차량간의 충돌을 방지하면서 동시에 액츄에이터 제어 한계 및 차량 안정성을 고려하여 각 액츄에이터에 제어 입력을 분배하는 것에 초점을 맞추었다. 이를 위해 본 연구에서는 앞서 언급한대로 LMI를 기반으로 한 강건 모델 예측 제어 방법을 이용하여 제어 알고리즘을 설계하였다.

연속 시간에 대해 얻어진 상태공간 방정식 (2)를 아래와 같이 샘플링 시간  $T_s$  에 대해 이산 시간 방정식으로 변환하였다.

$$x(k+1) = A_d x(k) + B_d u(k) + F_{h,d} T_h(k) + F_{\rho,d} \rho_{ref}(k) \quad (5)$$

$$A_d = e^{A T_s}, B_d = \left( \int_0^{T_s} e^{A \tau} d\tau \right) B, F_{h,d} = \left( \int_0^{T_s} e^{A \tau} d\tau \right) F_h, \quad (6)$$

$$F_{\rho,d} = \left( \int_0^{T_s} e^{A \tau} d\tau \right) F_{\rho}$$

차선 변경 중 충돌 사고의 경우 매우 짧은 시간 동안에 이루어지기에 도로 곡률에 대한 영향은 무시하였다. 또한 운전자가 차선 변경을 위해 사용하는 조향 토크가 클수록 충돌 위험이 크고 차등 제동으로 이용해 제공할 수 있는 최대 요 모멘트가 제한되므로<sup>8)</sup> 조향 보조 토크  $T_{overlay}$  를 이용하여 운전자의 조향 토크  $T_h$  를 상쇄하도록 제어 알고리즘을 설계하기로 한다. 따라서 식 (5)는 아래와 같이 간략히 정리할 수 있다.

$$x(k+1) = A_d x(k) + B_d u(k) \quad (7)$$

각 액츄에이터의 제어 입력은 VSC를 통한 요 모멘트 제어 입력 한계  $M_{z,max}$  와 MDPS 를 통한 조향 보조 토크 제어 입력 한계  $T_{overlay,limit}$  를 고려하여 아래 식 (8), (9)와 같이 제한되었다.

$$|M_z| \leq M_{z,max} \quad (8)$$

$$|T_{overlay}| \leq T_{actuator,limit} - abs(T_h(k)) = T_{overlay,max} \quad (9)$$

또한 제어 입력이 개입되는 동안 차량의 안정성을 보장하기 위해서 차량의 횡방향 미끌림 각  $\beta$  은 아래 식 (10)과 같이 제한하였다.<sup>9)</sup>

$$|\beta| \leq \beta_{max} = \tan^{-1}(0.02\mu g) \quad (10)$$

여기서  $\mu$  는 도로 노면과 타이어간의 마찰 계수이고,  $g$  는 중력가속도이다.

운전자 보조 시스템을 개발할 때 운전자의 승차감은 고려해야 하는 요소이다. 횡방향 가속도는 운전자의 승차감에 영향을 미치는 인자 중 하나이다. 따라서 제어 입력이 개입되는 동안의 횡방향 가속도를 제한하도록 제어 입력이 결정되어야 한다. 횡방향 가속도는 종방향 속도와 요속도의 곱으로 가정될 수 있고 이러한 가정을 바탕으로 운전자의 승차감을 만족시키기 위해 요속도를 아래 식 (11)과 같이 제한하였다.

$$|\gamma| \leq \frac{A_{y,max}}{v_x} \quad (11)$$

여기서  $A_{y,max}$  는 운전자 승차감을 위한 횡방향 가속도 한계 값이다.

만약 운전자가 측후방 접근 차량과의 충돌 위험을 인지하지 못한 상태로 차선 변경을 시도하면 측후방 접근 차량이 일찍 대처하지 않는 이상 충돌이 예상된다. 측후방 접근 차량과의 충돌을 방지하기 위한 자차량의 횡방향 거동은 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다. 아래의 Fig. 2에서 확인할 수 있듯이 횡방향 충돌 방지를 위해서 차량 중심선과 차량 중심의 상대 오차 거리  $e_y$  는 아래 식 (12)와 같이 제한되어야 한다.

$$|e_y(k+1)| \leq |e_y(k) + C_y(k) - C_{y,safety}| \quad (12)$$

여기서  $C_y(k)$  는 측후방 레이더 센서를 이용하여 측정된 측후방 접근차량과의 횡방향 간격이다. 고정밀

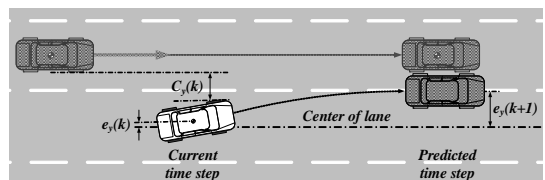


Fig. 2 Constraint of lateral offset for collision avoidance

상대 운동 측정 장비인 RT-Range를 이용하여 측후방 레이더 센서의 횡방향 거리 오차 범위를 측정된 결과 횡방향 거리 오차는 종방향 차간 거리 및 상대 속도에 따라 변하지만 최대 0.5m 이내인 것을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 측후방 레이더 센서 노이즈를 고려한 최소 안전 횡방향 여유 거리인  $C_{y,safety}$  를 0.5m로 설정했다.

본 연구에서는 위와 같은 제한 조건들을 만족하면서 식 (13)과 같은 Performance Index 를 최소화하도록 제어 알고리즘을 설계하였다.

$$J = \sum_{i=0}^{N_s} x(k+i)^T Wx(k+i) + \sum_{i=0}^{N_s} u(k+i)^T Ru(k+i) \quad (13)$$

제어 입력에 대한 가중치를 선언한  $R$  을 설계할 때 현재 운전자의 조향 토크  $T_h$  가 고려되었다. 만약 측후방 접근 차량과의 충돌이 예상되는데 운전자가 차선 변경을 위해 가하는 조향 토크가 작다면 차등 제동 혹은 적은 양의 조향 보조 토크로도 충돌을 회피할 수 있다. 이에 반해 운전자가 차선 변경을 위해 가하는 조향 토크가 클 경우, 앞서 언급한대로 차등 제동만으로는 발생시킬 수 있는 요소도만으로는 충돌 회피를 방지하는데 한계가 있다. 따라서 차선 변경 도중 발생하는 충돌을 방지하기 위해서는 운전자의 조향 토크가 커질수록 많은 조향 보조 토크가 필요하다. 이리하여 조향 보조 토크 제어 입력에 대한 가중치  $R_{22}$  는 아래와 같이 운전자의 조향 토크에 따라 변화도록 설계하였다.

$$R_{22} = \begin{cases} w_{T_{overlay}} & \text{if } |T_h(k)| < T_{h,threshold} \\ w_{T_{overlay}} \cdot \frac{T_{h,threshold}^2}{T_h(k)^2} & \text{else} \end{cases} \quad (14)$$

여기서  $w_{T_{overlay}}$  는 미리 정의된 상수이다.

유한 계획 기간 제어 기법 (finite horizon control method)은 유한 계획 기간내의 입력과 출력의 제한 조건을 만족시키면서 Performance Index를 최소화하는 최적 제어 입력을 결정하는 방법이다. 하지만 이러한 방법은 부정확한 차량 파라미터나 시간에 따라 변하는 파라미터들 혹은 외란 때문에 발생하는 모델 불일치로 인해 제어 성능에 영향을 받는다.<sup>10)</sup> 또한 이러한 유한 계획 기간 제어 기법은 제어 시스템의 안정성도 일반

적으로 낮다고 알려져 있다.<sup>11)</sup> 이에 반해 LMI 를 기반으로 한 무한 계획 기간 제어 기법 (Infinite horizon control method)은 제어 시스템의 안정성이 보장되어 있다.<sup>12)</sup> 이에 따라 본 연구에서는 모델 불일치나 불확실성에 대해 강건한 안정성을 보장하기 위해 LMI 를 기반으로 한 무한 계획 기간 제어 기법을 사용하여 제어 알고리즘을 설계하였다.

안정한 최적 제어 알고리즘 설계를 위해 아래와 같은 임의의 이차 함수를 선언하였다.

$$V(x(k|k)) = x(k|k)^T Px(k|k) \quad (15)$$

위에서 선언한 임의의 이차 함수가 아래와 같은 조건을 만족하면 제어 시스템의 강건한 안정성을 보장할 수 있다.

$$V(x(k+1|k)) - V(x(k|k)) \leq -x(k|k)^T Wx(k|k) - u(k|k)^T Ru(k|k) \quad (16)$$

제어 시스템이 안정하다면  $x(\infty|k)$  는 반드시 0으로 수렴하고 이에 따라  $V(x(\infty|k))$  도 0에 수렴한다.  $i=0$  부터  $\infty$ 까지 식 (16)을 더해나가면 아래 식 (17)을 도출할 수 있다.

$$J_{\infty}(k) = \sum_{i=0}^{\infty} (x(k+i)^T Qx(k+i) + u(k+i)^T Ru(k+i)) \leq V(x(k|k)) \quad (17)$$

즉 무한대의 시간에 대한 Performance Index의 최대값이 앞서 선언된 식 (15)의 현재 값보다 무조건 작아야만 제어 시스템의 강건한 안정성을 보장할 수 있다. 따라서 본 연구에서 설계된 제어 알고리즘은 무한대의 시간에 대한 Performance Index의 최대값을 최소화함으로써 제어 시스템의 강건한 안정성을 보장하고 동시에 앞서 선언된 제한 조건들을 만족하는 피드백 제어 입력  $u(k+i|k) = Kx(k+i|k)$  을 도출하는 것이 목적이다. 이에 따라 LMI 문제를 정의하면 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \min_{\gamma, Q, Y, X, N} & \gamma \\ \text{subject to} & \text{Eq.(19), (20), (21) and (22)} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & x(k|k)^T \\ x(k|k) & Q \end{bmatrix} \geq 0 \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} Q & QA^T + Y^T B^T & QW^{1/2} & Y^T R^{1/2} \\ AQ + BY & Q & 0 & 0 \\ W^{1/2}Q & 0 & \gamma I & 0 \\ R^{1/2}Y & 0 & 0 & \gamma I \end{bmatrix} \geq 0 \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} X & Y \\ Y^T & Q \end{bmatrix} \geq 0, X_{11} \leq M_{z,\max}^2, X_{22} \leq T_{overlay,\max}^2 \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} Q & (AQ + BY)^T C^T \\ C(AQ + BY) & N \end{bmatrix} \geq 0, N_{jj} \leq y_{j,\max}^2 \quad (22)$$

앞서 정의된 LMI 문제를 풀기 위해 MATLAB의 LMI control toolbox 를 사용하였다. 이를 통해 위의 식 (18)을 만족하면서 실현 가능한 제어 입력이 구해지면 각 액츄에이터의 제어 입력은 아래 식 (23), (24) 와 같이 분배되었다.

$$M_z(k) = K_1 \cdot x(k|k) \quad (23)$$

$$T_{overlay}(k) = K_2 \cdot x(k|k) - T_h(k) \quad (24)$$

여기서  $K_1 \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$  는  $K$  의 첫번째 행이고  $K_2 \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$  는  $K$  의 두번째 행이다.

식 (23)에서 계산된 요 모멘트를 발생하기 위해 각 바퀴에 제동 압력을 분배해야 한다. 각 바퀴에 제동 압력을 분배하기 위해서는 각 바퀴에 걸리는 수직 항력 정보를 알아야 한다. 본 연구에서는 각 바퀴에 걸리는 수직 항력 정보는 기존의 연구 결과를 바탕으로 추정기를 설계하여 사용하였다.<sup>13)</sup> 식 (23)에서 계산된 요 모멘트가 양수일 경우 제동 압력은 왼쪽 바퀴에 식 (25)처럼 분배되도록 하였다. 이에 반해 계산된 요 모

멘트가 음수일 경우 제동 압력은 오른쪽 바퀴에 식 (26)처럼 분배되도록 하였다.

$$P_{FL} = \frac{1}{K_{Bf}} \cdot \frac{\hat{F}_{z,FL}}{\hat{F}_{z,FL} + \hat{F}_{z,RL}} \cdot \frac{M_z}{t_f} \cdot r_{wheel}, P_{FR} = 0 \quad (25)$$

$$P_{RL} = \frac{1}{K_{Br}} \cdot \frac{\hat{F}_{z,RL}}{\hat{F}_{z,FL} + \hat{F}_{z,RL}} \cdot \frac{M_z}{t_f} \cdot r_{wheel}, P_{RR} = 0$$

$$P_{FL} = 0, P_{FR} = -\frac{1}{K_{Bf}} \cdot \frac{\hat{F}_{z,FR}}{\hat{F}_{z,FR} + \hat{F}_{z,RR}} \cdot \frac{M_z}{t_f} \cdot r_{wheel} \quad (26)$$

$$P_{RL} = 0, P_{RR} = -\frac{1}{K_{Br}} \cdot \frac{\hat{F}_{z,RR}}{\hat{F}_{z,FR} + \hat{F}_{z,RR}} \cdot \frac{M_z}{t_f} \cdot r_{wheel}$$

여기서  $r_{wheel}$  는 바퀴의 반경,  $K_{Bf}$  는 앞바퀴의 제동 이득,  $K_{Br}$  는 뒷바퀴의 제동 이득,  $\hat{F}_{z,*}$  는 추정기로부터 추정된 각 바퀴에 걸리는 수직 항력을 나타낸다.

#### 4. 시뮬레이션

본 연구에서 제안된 측후방 충돌 방지를 위한 MDPS와 VSC 통합 제어 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 MATLAB과 CarSim을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 운전자와 제어기, 차량 시스템의 페루프 시스템을 이용해 수행하였다. 본 연구에서 제안된 MDPS와 VSC 통합 제어 알고리즘의 성능의 유효성을 검증하기 위해 MDPS 및 VSC 단독 제어 알고리즘의 시뮬레이션 결과와 비교 분석을 진행하였다. MDPS 및 VSC 단독 제어 알고리즘은 각각 조향 보조 토크 및 요 모멘트 같은 단독 제어 입력에 대해 LMI를 기반으로 한 무한 계획 기간 제어 기법으로 설

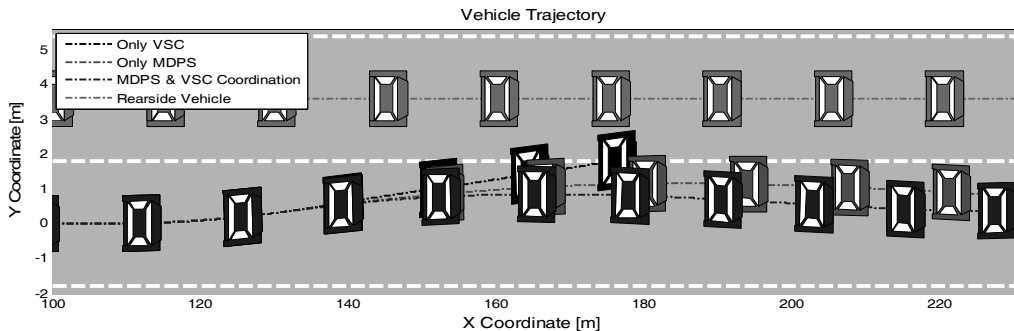


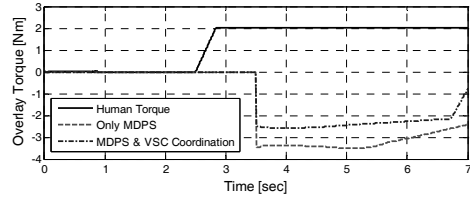
Fig. 3 Vehicle Trajectory

계하였다.

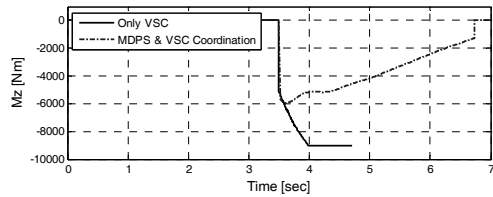
기존 연구를 참고하면 운전자가 일반적인 차선 변경 상황에서 나타내는 조향 토크 최대값은 2Nm 이상으로 가정할 수 있다.<sup>15)</sup> 운전자의 일반적인 차선 변경 조향 조작은 사인함수형태이지만 위험한 상황에서의 통합 제어 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 운전자는 차선 변경을 위해 일정한 조향 토크 2Nm을 유지하고 있다고 시뮬레이션 상황을 설정하였다. 이때 자차량의 초기 속도는 100kph, 측후방 접근 차량은 110kph의 일정한 속도로 주행하도록 하였다. 자차량과 측후방 접근 차량간의 초기 종방향 상대 간격은 15m 이다. 운전자의 종방향 승차감은 종방향 가속도 특성을 통해 살펴볼 수 있다. 일반적인 주행 상황에서 운전자가 유지하는 종방향 감가속도의 범위가  $2.5m/s^2$  이내라고 조사되었다.<sup>15)</sup> 제어 대상 차량 모델이 세단이라고 할 때, 차량의 질량 및 차량의 폭 등을 고려하여 운전자의 일반적인 종방향 감가속도 범위를 만족시킬 수 있도록 VSC를 통한 요 모멘트 제어 입력 한계  $M_{z,max}$ 를 9000Nm로 선정하였다. MDPS 를 통한 조향 보조 토크 제어 입력 한계  $T_{actuator,limit}$ 는 운전자와 제어기간의 편안한 조향 호환성을 위해 3.5Nm 으로 선정하였다.

아래 Fig. 3은 시뮬레이션 상황에 대한 MDPS, VSC 각각의 단독 제어 알고리즘과 MDPS와 VSC의 통합 제어 알고리즘으로 제어된 차량의 주행 궤적을 나타내고 Fig. 4는 시뮬레이션 결과를 나타낸다. Fig. 4(b)와 Fig. 4(c)에서 확인할 수 있듯이 VSC만을 이용하여 최대 요 모멘트를 발생시킨다고 해도 측후방 충돌 차량과의 최소 안전 횡방향 간격을 유지하는 것은 보장할 수 없다는 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 4(a)과 Fig. 4(c)에서 확인할 수 있듯이 MDPS와 VSC를 통합제어 할 경우 MDPS만을 이용하여 제어할 경우보다 측후방 접근 차량과의 횡방향 간격을 크게 유지하면서 적은 조향 보조 토크를 사용할 수 있다. MDPS만을 이용하여 제어할 경우 측후방 접근 차량과의 최소 안전 횡방향 간격을 유지하기 위해서 조향 보조 토크 제어량이 앞서 설정한 조향 보조 토크 제어 입력 한계치에 도달하는 것을 확인할 수 있다. 이는 통합 제어시 운전자의 조향 이질감을 줄일 수 있다는 것을 의미한다. Fig. 4(d)에서 확인할 수 있듯이 MDPS와 VSC를 통합 제어하는 것이 각 액츄에이터를 단독 제어하는 것보다 자차량의 차선 이탈 속도를 빠르게 감소시킬 수 있다. 또 Fig. 4(f)와 Fig. 4(g)에서

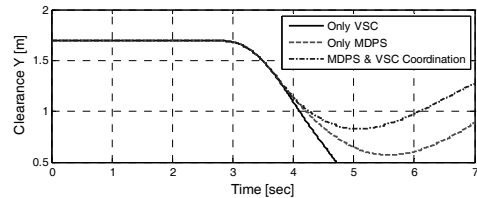
볼 수 있듯이 통합 제어시 운전자의 승차감 역시 만족시킬 수 있다. 이러한 결과를 종합해 봤을 때 본 연구에서 제안된 MDPS와 VSC 통합 제어 알고리즘이 운전자의 승차감을 최대한 만족시키면서 차선 변경 도중 발생할 수 있는 측후방 접근 차량과의 충돌을 방지할 수 있음을 확인할 수 있다.



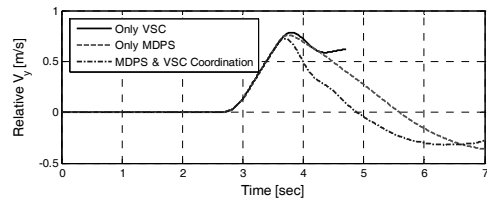
(a) Human torque & overlay torque



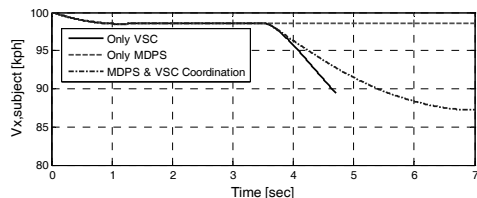
(b) Yaw moment



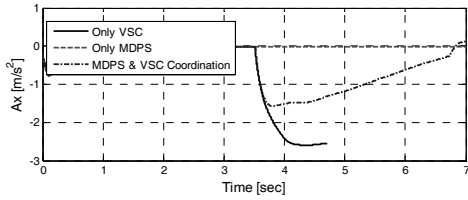
(c) Relative lateral clearance



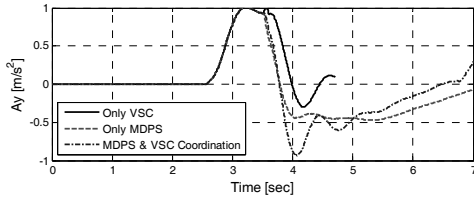
(d) Relative lateral velocity of the subject vehicle



(e) Longitudinal velocity of the subject vehicle



(f) Longitudinal acceleration of the subject vehicle



(g) Lateral acceleration of the subject vehicle

Fig. 4 Simulation results ( $T_h = 2N$ , 100kph)

## 5. 결론

본 연구에서는 차선 변경 도중 발생할 수 있는 측후방 접근 차량과의 충돌을 방지하기 위해 조향 보조 토크 및 차등 제동의 통합 제어 알고리즘을 개발하였다. 측후방 접근 차량과 차차량간의 충돌을 방지하면서 동시에 액츄에이터 제어 한계 및 차량 안정성을 고려하여 각 액츄에이터에 제어 입력을 분배하기 위해 본 연구에서는 LMI를 기반으로 한 강건 모델 예측 제어 방법을 이용하여 제어 알고리즘을 설계하였다. 제안된 통합 제어 알고리즘은 시뮬레이션상에서 단독 제어 알고리즘들과의 성능 비교를 통해 성능의 유효성을 검증하였다. 시뮬레이션 결과 단독 제어 알고리즘에 비해 통합 제어를 통해 운전자의 안전과 승차감을 동시에 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 현대 자동차, 서울대학교 정밀기계연구소, 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (2009-0083495)

## 참고문헌

(1) Huang, S., Ren, W., and Chan, S. C., 2000,

“Design and performance evaluation of mixed manual and automated control traffic”, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans, Vol. 30, No. 6, pp. 661~673

(2) Tideman, M., Voort, M. C., Arem, B., and Tillema, F., 2007, “A review of lateral driver support systems”, Intelligent Transportation Systems Conference, Seattle, USA, pp. 992~999

(3) Habenicht, S., Winner, H., Bone, S., Sasse, F., and Korzeniet, P., 2011, “A maneuver-based lane change assistance system”, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Germany, pp. 375~380

(4) National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), 2007, Available from: <http://www.nhtsa.gov>, “Pre-crash scenario typology for crash avoidance research”

(5) Mar, J., and Lin, H. T., 2005, “The car-following and lane-changing prevention system based on the cascaded fuzzy inference system”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 54, No. 3, pp. 910~924

(6) Eidehall, A., Pohl, J., and Gustafsson, F., 2005, “A new approach to lane guidance systems”, Intelligent Transportation Systems Conference, Austria, pp. 108~112

(7) Hayakawa, Y., Sato, K., and Kobayashi, M., 2011, “Development of Blind Spot Assistance System based on Lane-marker Detection and Blind Spot Vehicle Detection”, Fast-zero 2011, Tokyo, Japan

(8) Pilutti, T., Ulsoy, G., and Hrovat, D., 1995, “Vehicle steering intervention through differential braking”, Proceeding of the American Control Conference, USA, pp. 1667~1671

(9) Rajamani, R., 2005, Vehicle Dynamics and Control, New York: Springer-Verlag

(10) Li, S., Wang, J., Li, K., Zhang, D., 2009, “Study on robustness and feasibility of MPC based vehicular adaptive cruise control system”, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Xi'an, China, pp. 1297~1301

(11) Garia, C., and Prett, D., 1989, “Model Predictive Control: Theory and Practice-A Survey”, Auto-

- matica, Vol. 25, pp. 335~348
- (12) Muske, K., and Rawlings, J., 1993, "Model predictive control with linear models", AICHE J, Vol. 39, pp. 262~287
- (13) Cho, W., Yoon, J., Yim, S., Koo, B., and Yi, K., 2010, "Estimation of tire forces for application to vehicle stability control", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 59, No. 2, pp. 638~649
- (14) Minoiu, N., Netto, M., Mammar, S., and Lusetti, B., 2009, "Driver steering assistance for lane departure avoidance", Control Engineering Practice, Vol. 17, No. 6, pp. 642~651
- (15) Lee, T., Yi, K., and Jeong, C., 2011, "Integrated stochastic driver model for evaluation of the vehicle active safety systems", Fast-zero 2011, Tokyo, Japan