

횡풍하의 차량 외란 추정을 이용한 차선 유지 조향 보조 제어기 설계

임형호* · 좌은혁** · 이경수*[†]

Design of Lane Keeping Steering Assist Controller Using Vehicle Lateral Disturbance Estimation under Cross Wind

Hyeongho Lim*, Eunhyek Joa**, Kyongsu Yi*[†]

Key Words : ADAS(첨단 운전자 지원 시스템), Lane Keeping Assist System(차선 유지 보조 시스템), Crosswind(횡풍), Kalman Filter(칼만 필터), EPS(전동식 파워 스티어링), Sliding mode control(슬라이드 모드 제어)

ABSTRACT

This paper presents steering controller for unintended lane departure avoidance under crosswind using vehicle lateral disturbance estimation. Vehicles exposed to crosswind are more likely to deviate from lane, which can lead to accidents. To prevent this, a lateral disturbance estimator and steering controller for compensating disturbance have been proposed. The disturbance affecting lateral motion of the vehicle is estimated using Kalman filter, which is on the basis of the 2-DOF bicycle model and Electric Power Steering (EPS) module. A sliding mode controller is designed to avoid unintended the lane departure using the estimated disturbance. The controller is based on the 2-DOF bicycle model and the vision-based error dynamic model. A torque controller is used to provide appropriate assist torque to driver. The performance of proposed estimator and controller is evaluated via computer simulation using Matlab/Simulink.

기호설명

V_x : 차량의 종방향 속도 (m/s)

V_y : 차량의 횡방향 속도 (m/s)

F_y : 차량의 횡방향 힘 (N)

M_z : 차량의 수직방향 모멘트 (Nm)

V_w : 횡풍의 속도 (m/s)

γ : 무게중심에 대한 회전속도 (rad/s)

β : 차량의 횡 방향 슬립앵글 (rad)

l_f : 차량 무게중심과 앞 바퀴사이 거리 (m)

l_r : 차량 무게중심과 뒷 바퀴사이 거리 (m)

I_z : 차량 중심에 대한 요 회전 관성 ($kg \cdot m^2$)

F_{yf} : 앞 바퀴 횡방향 힘 (Nm)

F_{yr} : 뒷 바퀴 횡방향 힘 (Nm)

C_f : 앞 바퀴 코너링 강성 (N/rad)

C_r : 뒷 바퀴 코너링 강성 (N/rad)

δ_f : 앞 바퀴 조향각 변화량 (rad)

δ_{des} : 목표 앞 바퀴 조향각 변화량 (rad)

e_y : 중앙차선과 차량 무게중심사이의 거리 (m)

e_ψ : 차량이 차선 기준으로 기울어진 각도 (rad)

e_L : 주시 거리(L_p) 앞의 e_y (m)

R : 도로 곡률 반경 (m)

* 서울대학교 기계항공공학부, 박사과정

** 서울대학교 정밀기계연구소, 연구원

*** 서울대학교 기계항공공학부, 교수

[†]교신저자 : kyi@snu.ac.kr

E-mail : gudgh30@snu.ac.kr

- T_{sw} : 운전자 조향 토크 (Nm)
- $T_{overlay}$: 조향 오버레이 토크 (Nm)
- T_{mot} : 모터 조향 토크 (Nm)
- F_d : 외란으로 인한 횡방향 외력 (N)
- M_d : 외란으로 인한 수직 모멘트 (Nm)
- K_{sw} : EPS 시스템 운전자 토크 비례 상수
- K_{mot} : EPS 시스템 모터 토크 비례 상수
- J_{equ} : EPS 시스템 inertia ($Nm \cdot s^2$)
- B_{equ} : EPS 시스템 damping coefficient ($Nm \cdot s$)
- T_{fric} : EPS 시스템 마찰 토크 (Nm)
- T_{align} : 셀프 얼라이닝 토크 (Nm)
- A : 차량의 앞 면적 (m^2)
- C_{F_y} : 횡풍의 횡방향 외력 계수
- C_{m_z} : 횡풍의 수직모멘트 계수
- ρ : 공기 밀도 (kg/m^3)
- l_{ref} : 횡풍 모멘트 기준 거리 (m)
- ξ : 공압 트레일 (m)

1. 서론

최근 몇 년간, 차량 운행 관련 안전성, 편리성에 대한 요구들로 인하여 다양한 운전자 지원 제어 시스템(Advanced Driver Assistance system)이 개발되었다. 운전자 지원 제어 시스템은 운전 중 발생할 수 있는 수많은 상황에서 일부를 차량 스스로 인지하고 상황을 판단하여 차량을 제어하는 기술이다.

운전자 지원 제어 시스템은 자동 긴급제동 시스템(Autonomous Emergency Braking), 차선 이탈 경고 시스템(Lane Departure Warning System), 차선 유지 보조 시스템(Lane Keeping Assist System)을 포함하여 여러 시스템을 포함한다. National Highway Traffic Safety Administration의 기록에 따르면 미국의 자동차 충돌 사망사고의 37.5%가 의도치 않은 차선 이탈에 기인한다고 한다.⁽¹⁾ 이러한 교통사고를 예방하기 위하여 차량에 카메라를 설치하여 차선을 인식하고 의도치 않은 차선 이탈 상황에서 경보를 울리는 시스템인 차선 이탈 경고 시스템(LDWS)이 개발되었다. 하지만 이 시스템은 경고만 해줄 뿐 차량의 작동에 영향을 미치지 않는다. 차선 유지 보조 시스템(LKAS)은 차선 이탈 경고 시스템에서 한 단계 진화된 기술로, 경보를 울릴 뿐만이 아니라 카메라 정보와 차량 정보를 이용하여 차량의 조향을 제어하여 차선 이탈 방지

를 막아 차선 중앙으로 차량을 다시 돌려 보내준다.⁽²⁾

차량의 의도치 않은 차선 이탈을 야기하는 것은 운전자의 부주의 또는 횡방향 외란에 기인한다. 횡풍에 의한 외란은 차량이 저속으로 주행하거나 풍속이 낮을 때에는 그 영향이 무시할 만 하지만, 상대적으로 바람의 속도가 높은 해안 근처의 다리를 고속으로 주행하는 경우에는 차선 유지를 하는데 있어 유의미한 영향을 끼친다. 높은 풍속에서의 속도 제한 및 통행 제한 기준에 대한 연구가 진행 된 바 있다.⁽³⁾ 횡풍을 실시간으로 측정하는 것이 매우 어렵기 때문에, 비전센서를 통해 차선기준으로 차량의 횡방향 이탈거리나, 상대적 경로각을 이용하여 횡풍으로 인한 횡방향 외력과 수직방향 모멘트를 추정하는 연구가 수행되었다.⁽⁴⁾ 하지만 비전센서는 날씨, 차선의 상태에 영향을 받는 단점이 있어, 이를 대체하기 위해 전동식 파워 스티어링(EPS)센서 신호와 사시 신호 정보를 활용하여 횡풍으로 인한 외란을 추정하는 방식도 연구가 진행되었는데,⁽⁵⁾ 해당 시나리오는 지속적인 횡풍이 가해지는 상황을 가정하였고 차선 이탈에 관한 위험도가 반영되지 않았다. 본 연구에서는 전동식 파워 스티어링 센서 신호와 요레이트 센서 신호를 활용하여 위험도가 반영된 시나리오에서 강풍으로 인한 횡방향 외란을 추정한 후, 슬라이드 모드 제어를 통하여 이를 보상하는 알고리즘을 제안하였다.

2. 시스템 모델

시스템 모델은 횡방향 외란 모델, 외란이 반영된 2자유도 차량 모델과, EPS 조향 모델, 얼라이닝 토크 모델, 카메라 모델로 구성된다.

2.1. 횡방향 외란 모델

차량이 횡풍으로부터 받는 횡방향 외력과 수직방향 모멘트 값은 식 (1)과 식 (2)와 같다.

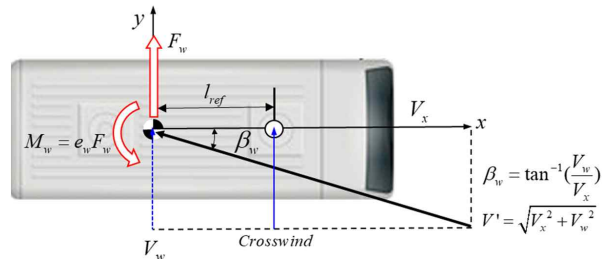


Fig. 1 Crosswind model

$$\sum F_d = \frac{1}{2} \rho C_{F_y} A (V_x^2 + V_w^2) \quad (1)$$

$$\sum M_d = \frac{1}{2} \rho C_{M_z} l_{ref} A (V_x^2 + V_w^2) \quad (2)$$

2.2. 차량 모델

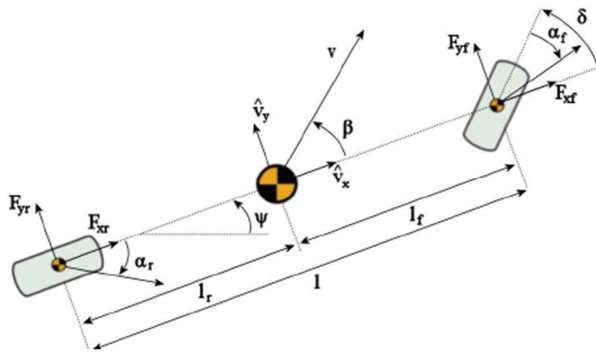


Fig. 2 Vehicle Dynamic model

Fig. 2는 차량의 비선형으로 표현되는 횡방향 거동을 선형적으로 표현할 때 많이 쓰이는 바이시클 모델이다. 상태 벡터를 $x = [\beta \ \gamma]^T$ 로 두고 운동 방정식을 세우면 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + Cw \\ A &= \begin{bmatrix} -\frac{2C_f + 2C_r}{mV_x} & -\frac{2C_f l_f - 2C_r l_r}{mV_x^2} & -1 \\ -\frac{2C_f l_f - 2C_r l_r}{I_z} & -\frac{2C_f l_f^2 + 2C_r l_r^2}{I_z V_x} & 0 \end{bmatrix} \\ B &= \begin{bmatrix} \frac{2C_f}{mV_x} \\ \frac{2C_f l_f}{I_z} \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} \frac{1}{mV_x} \\ \frac{1}{I_z} \end{bmatrix} \quad w = \begin{bmatrix} F_d \\ M_d \end{bmatrix} \\ u &= \delta_f \end{aligned} \quad (3)$$

횡풍으로 인한 횡방향 외력 F_d 과 수직모멘트 M_d 가 외란으로 반영되었다. 시뮬레이션 데이터를 식 (7)에 적용하면 β 는 γ 값에 비해 매우 작은 값이다. 또한 운전자는 횡풍 외란에 의해 발생된 횡력 F_d 에 대해 쉽게 대처할 수 있지만, 수직모멘트 M_d 는 매우 위험한 상황을 초래할 수 있다.⁽⁶⁾ 그리하여 뒤에 서술될 횡풍으로 인한 외란 추정 시에 단순화된 모델을 위해 $\beta=0$ 으로 가정하고, M_d 을 추정하여 위험 지표로 삼는다.

2.3. 전동식 파워 스티어링(EPS) 모델

Fig. 3 시스템에 대한 자세한 dynamics는 ⁽⁷⁾에 정리 되어있다. 모터가 EPS 시스템의 rack에 붙어 조향을 보조하는 역할을 한다.

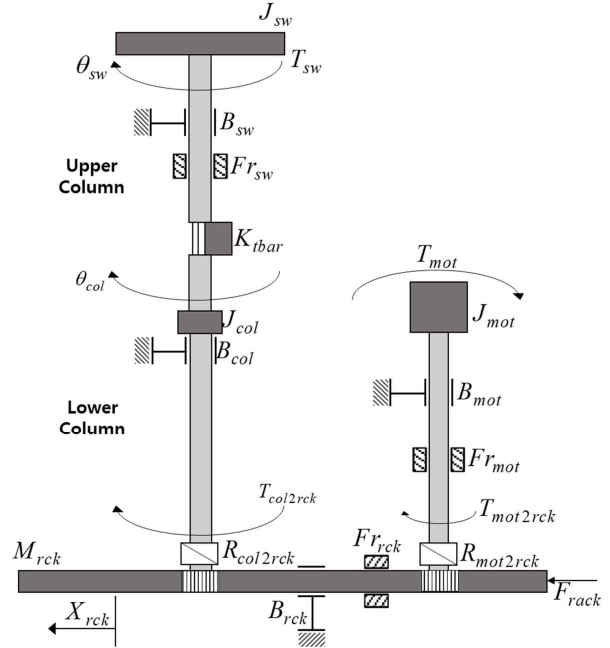


Fig. 3 Structure of Electric power steering system

컬럼, 모터, 랙을 하나의 시스템으로 보고 앞바퀴 조향 각 δ_f 에 관한 식으로 정리하면 식 (4)와 같다.

$$J_{equ} \ddot{\delta}_f + B_{equ} \dot{\delta}_f = K_{sw} T_{sw} + K_{mot} T_{mot} + T_{fric} - T_{align} \quad (4)$$

2.4. 얼라이닝 토크

운전자 토크와 모터토크는 MDPS 모듈에서 제공하는 센서로 측정이 가능하며, 직진주행과 같은 조향 가속도나 조향 속도가 크지 않을 때, 조향 관성 및 마찰에 의한 반력 토크는 무시할 수 있다. 얼라이닝 토크는 다음과 같이 근사할 수 있다.⁽⁵⁾

$$T_{align} \approx K_{sw} T_{sw} + K_{mot} T_{mot} \quad (5)$$

K_{sw} 와 K_{mot} 의 값은 기어 비를 이용하여 계산된다.

식 (5)의 근사를 검증하기 위해 횡풍이 수직방향으로 2초에서 4초까지 15m/s로 가해지는 시뮬레이션 상황에서

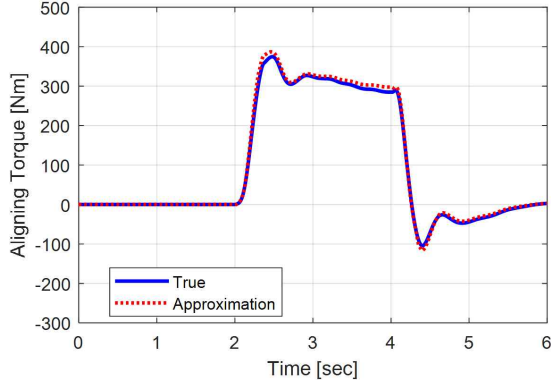


Fig. 4 Validation of aligning torque approximation

서 얼라이닝 토크 값을 비교해보았다. Fig. 4를 보면 가정이 타당함을 알 수 있다. 또한 얼라이닝 토크는 식 (6)처럼 표현할 수 있다.

$$T_{align} = 2\xi C_f \left(\delta_f - \beta - \frac{l_f}{V_x} \gamma \right) \quad (6)$$

2.5. 카메라(Vision) 모델

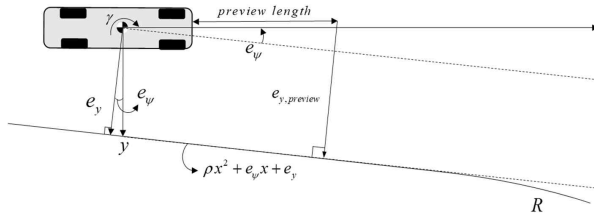


Fig. 5 Vision model

비전 모델은 Fig. 5와 같다. 차선 중앙선 기준 자동차의 위치를 e_y, e_{ψ} 로 정의한다.

3. 횡풍에 의한 외란 추정

3.1. 외란 추정을 위한 상태 방정식과 관측 방정식

추정을 위한 상태 벡터를 $x = [\gamma \ M_d]^T$ 로 두면 상태 방정식은 식 (7)과 같다.

$$\frac{d}{dt}x = Ax + B\delta_f + w$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{2C_f l_f^2 + 2C_r l_r^2}{I_z V_x} & \frac{1}{I_z} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \frac{2l_f C_f}{I_z} \\ 0 \end{bmatrix} \quad w = \begin{bmatrix} 0 \\ w_{M_d} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$M_d(k+1|k) = M_d(k|k) + w_{M_d}(k) \quad (8)$$

횡풍에 의한 수직모멘트 M_d 는 식 (8)에서 보듯, random-walk model로 가정한다. 출력값에 쓰이는 측정값은 식 (9)처럼 $y = [\gamma \ T_{align}]^T$ 가 사용된다.

$$y = Hx + D\delta_f + v$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2\xi C_f}{V_x} & 0 \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} 0 \\ 2\xi C_f \end{bmatrix} \quad v = \begin{bmatrix} v_{\gamma} \\ v_{T_{align}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

얼라이닝 토크는 식 (5)의 근사값을 이용한다.

$$x(t + \Delta t) = (I + A\Delta t) \cdot x(t) + B\Delta t \cdot u(t) + C\Delta t \cdot W(t)$$

$$= \Phi \cdot x(t) + G \cdot u(t) + \Gamma \cdot W(t) \quad (10)$$

$$P_k^- = \Phi_{k-1} P_{k-1}^+ \Phi_{k-1}^T + \Gamma Q_{k-1} \Gamma^T$$

$$\hat{x}_k^- = \Phi_{k-1} \hat{x}_{k-1}^+ + G_{k-1} u_{k-1} \quad (11)$$

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R_k)^{-1}$$

$$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K_k (y_k - H_k \hat{x}_k^- - D u_k)$$

$$P_k^+ = P_k^- - K_k H_k P_k^- \quad (12)$$

식 (10)의 이산화 과정을 거치고 식 (11)의 예측단계, 식 (12)의 관측값 업데이트 단계를 거치며 횡풍에 의한 수직모멘트 값을 추정한다.

3.2. 외란 추정 시뮬레이션

횡풍에 의해 발생하는 차량의 횡방향 이탈에 대한 위험 지수는 식 (13)과 같이 정의된다.⁽⁹⁾

$$Risk\ index = \sqrt{\frac{1}{1 - 2Y_{t=0.8}/Y_{allow}}} - 1 \quad (13)$$

선행 연구에서 시뮬레이션에 사용된 버스와 같은 대형 차량과 같은 경우에 90kph 이상으로 주행할 때 횡속이 15m/s 이상이면 위험하다고 판단한다. 그리하여 시뮬레이션은 90kph차량으로 수직으로 15m/s의 횡풍을 2초부터 4초까지 총 2초간 가하는 시나리오를 진행하였다.

Fig. 6을 보면 횡풍으로 인한 수직모멘트 값의 추정이 0.3초 이내로 실제값에 수렴하는 것을 볼 수 있다. 추정기는 실제 값의 10% 미만의 오차를 보이며 좋은 성능을

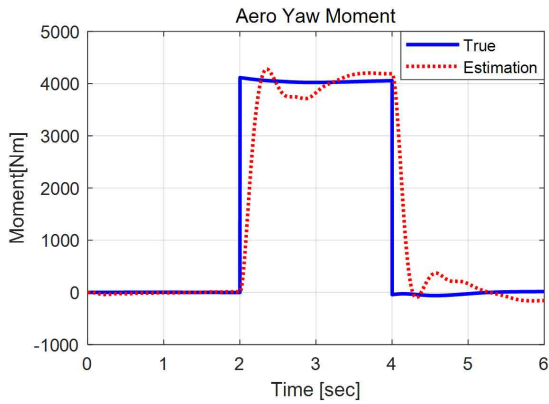


Fig. 6 Aero yaw moment estimation

보였고, 횡풍이 사라진 뒤에도 0.3초 이내에 실제 값으로 복귀하는 것을 볼 수 있다.

4. 횡풍에 의한 외란 보상

Fig. 8에 외란 추정에 대한 전체적인 구조가 그려져있

다. 외란 추정값을 슬라이딩 모드 제어의 외란 항에 추가해서 그것을 보상하는 조향각을 계산 후, 토크 제어기를 통해 오버레이토크를 계산하여 운전자의 조향을 보조한다. 토크 제어기는 PI제어기를 사용한다,

4.1. 차선 유지 조향 보조 시스템 작동조건

기존의 차선유지보조시스템(LKAS) 작동조건은 앞바퀴와 차량과 가까운 차선까지의 거리(DLC)를 기준으로 삼았다. Fig. 7에서 보듯 DLC가 일정 값 이하로 작아지면 LKAS가 작동하고 중앙선으로 수렴하면 LKAS 작동이 종료된다. 하지만 횡풍으로 인한 차선이탈 위험도 지수가 기존에 정해진 값보다 높아지는 풍속, 차속에서는 추정값을 작동조건에 추가할 수 있다.

4.2. 슬라이딩 모드 제어

슬라이딩 모드 제어를 위하여 상태 방정식을 세우면

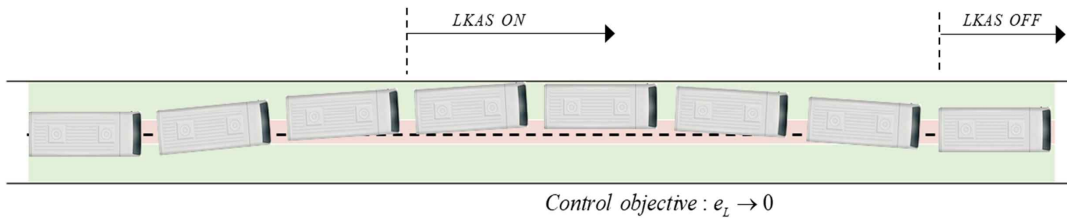


Fig. 7 Lane keeping assist system

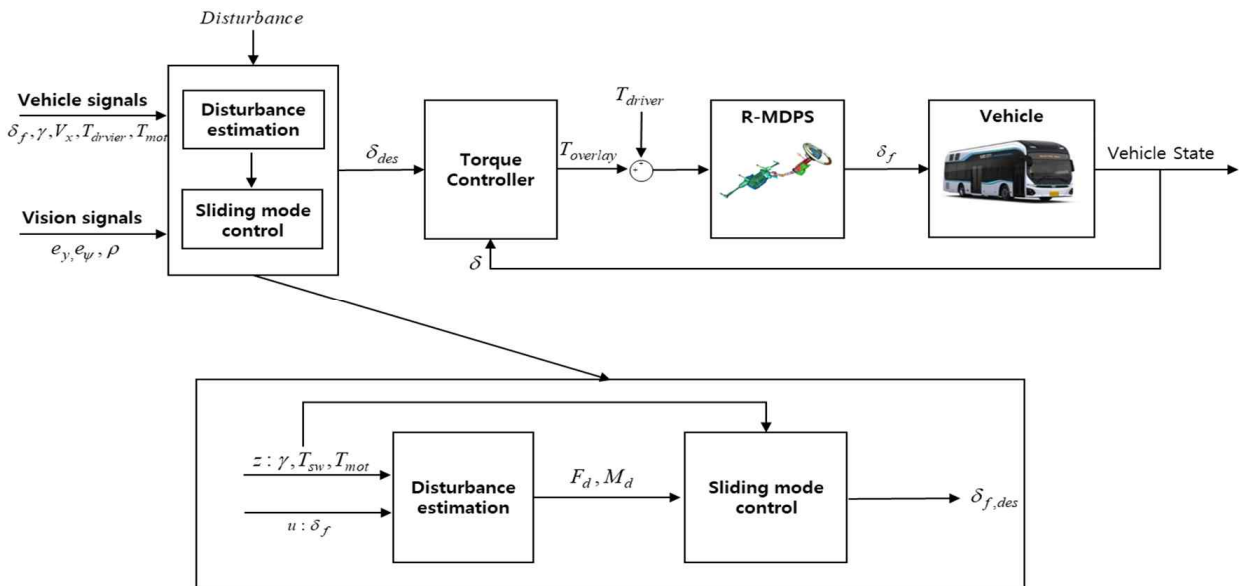


Fig. 8 Overall structure of Lateral disturbance estimation & compensation

식 (14)와 같다. 이 식을 이용하여 슬라이딩면을 식 (15)와 같이 정하고, 식 (16)에서 보듯 지수적인 도달법칙을 이용한다.

$$x = [\gamma \ e_y \ e_\psi]^T$$

$$\frac{d}{dt}x = Ax + B\delta_f + Cw$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{C_f l_f^2 + C_r l_r^2}{I_z V_x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & V_x \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \frac{C_f l_f}{I_z} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} \frac{1}{I_z} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -V_x \end{bmatrix} \quad w = \begin{bmatrix} M_d \\ \frac{1}{R} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$s = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right) e_L = e_L + \lambda e_L \quad (\lambda > 0) \quad (15)$$

$$s = -\eta \text{sgn}(s) - \sigma s$$

$$= e_L + \lambda e_L$$

$$= k_1 \cdot e_y + k_2 \cdot e_\psi + k_3 \cdot u (= \delta) + d \quad (16)$$

$$u = -\frac{1}{k_3} (k_1 \cdot e_y + k_2 \cdot e_\psi + D \text{sgn}(s) + \eta \text{sgn}(s) + \sigma s)$$

$$k_1 = \lambda \quad k_2 = L_p \left(-\frac{C_f l_f^2 + C_r l_r^2}{I_z V_x} + \lambda \right) \quad k_3 = L_p \frac{C_f l_f}{I_z}$$

$$d = L_p \left(\frac{1}{I_z} M_d + A \gamma_{des} \right) \quad (|d| \leq D) \quad (17)$$

식 (16)을 이용하여 제어 입력을 계산하면 식 (17)과 같다. 슬라이딩 조건을 만족하는지 확인하기 위해 식 (18)에서 보듯 리아푸노프 함수를 이용한다. 전체적인 횡방향 외란 추정 및 보상의 구조는 Fig. 8과 같다.

$$V = ss = s \{ -\eta \text{sgn}(s) - \sigma s + d - D \text{sgn}(s) \}$$

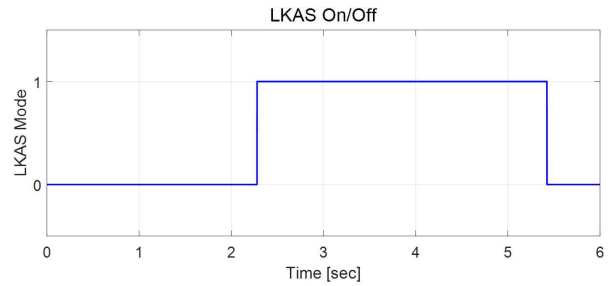
$$= -\eta |s| - \sigma s^2 + ds - D |s|$$

$$\leq -\eta |s| - \sigma s^2 + d |s| - D |s|$$

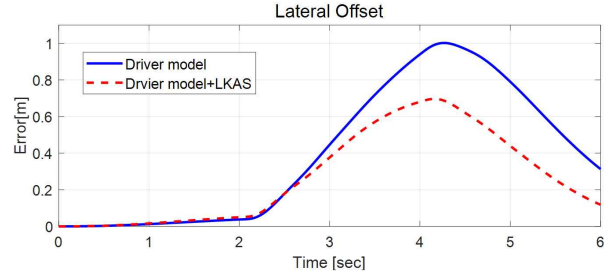
$$\leq -\eta |s| \quad (18)$$

5. 시뮬레이션 결과

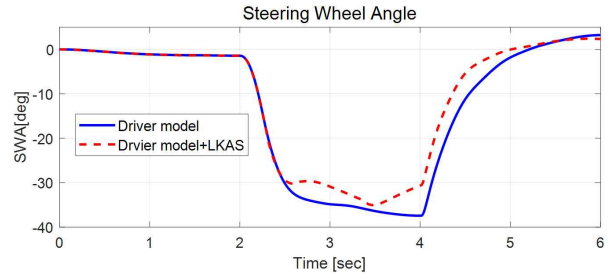
시나리오는 Fig. 6에서 보듯 2초 조금 지나서 15m/s의 수직 방향 횡풍이 가해진다. 시뮬레이션 차량 모델은 EPS가 장착된 버스이다. 3.2에서 사용된 시나리오를 기반으로, 90kph에서 15m/s의 횡풍을 가하였다. Fig. 6에서 보듯 횡풍으로 인한 수직 모멘트를 추정은 0.3초 이내에 이루어졌고, Fig. 9의 (a)는 LKAS 작동 또한 동시에



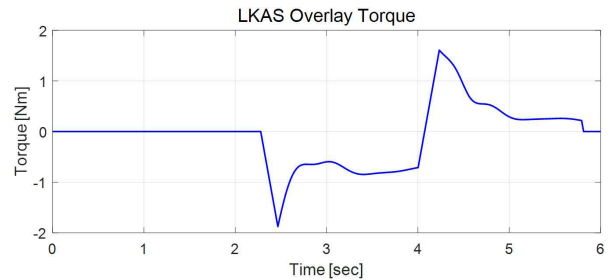
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 9 Simulation result

이루어진 것을 보여준다. Fig. 9의 (b)에서 기존의 운전자 모델이 시스템의 개입없이 횡풍에 대응했을 때 보다 차선 이탈을 줄일 수 있는 것을 볼 수 있었고 Fig. 9(c)에서 더 적은 조향 입력이 가해진 것을 볼 수 있었다. 외란 보상에 사용된 오버레이 토크는 Fig. 9의 (d)와 같다.

6. 결 론

본 연구는 EPS 센서 모듈과 샤시 센서를 이용하여 횡풍으로 인한 외력을 추정하고, 이를 기존의 차선유지보조 시스템(LKAS)에 적용한 연구이다. 슬라이딩 모드 제어기를 활용하여, 횡풍으로 인한 외란을 보상하고, 차선 유지하는데 필요한 조향을 계산하였다. 추정을 통해 LKAS를 빠르게 작동시켜 기존의 운전자 모델보다 차선이탈을 줄일 수 있었다.

후 기

본 연구는 국토교통부 도심도로 자율협력주행 안전·인프라 연구 사업의 연구비지원(과제번호 19PQOW-B152473-01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Barickman, F. S., Smith, L., and Jones, R., 2007, "Lane departure warning system research and test development", 20th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV).
- (2) Hyungu Woo, Boojoong Yong, 2016, "Road Test Scenario and Performance assessments of Lane Keeping Assistance System for Passenger Vehicle", Vol. 24, pp. 255~263.
- (3) 권순덕, 정운용, 박태규, 2003, "횡풍을 받는 차량의 주행 안정성 확보를 위한 안전기준의 제안", 대한토목학회 정기학술대회, pp. 805~809.
- (4) Sebastien Glaser, Said Mammar, and Djamil Dakhllallah, 2008, "Lateral wind force and torque estimation for a driving assistance, IFAC, pp. 5688~5693.
- (5) Kyuwon Kim, Kyongsu Yi, Seybok Lee, Chansikpark, 2011, "Estimation of Lateral Force due to Lateral Disturbance for Application to an MDPS-based Driving Assistant System", SAE.
- (6) 신동호, 2011, "차선유지시스템 및 횡풍 하의 횡방향 안정 시스템을 위한 조향제어기 설계에 관한 연구", 한국로봇학회, pp. 27~35.
- (7) Lee, D., Jang, B., Yi, K., Chang, S. et al., 2016, "A Novel Electric-Power-Steering (EPS) Control Algorithm for the Reference Steering Feel Tracking", SAE.