

4WD 전기 차량의 선회 성능 및 횡방향 안정성 향상을 위한 주행 제어 알고리즘 개발

서종상* · 이경수* · 강주용**

Development of Driving Control Algorithm for Vehicle Maneuverability Performance and Lateral Stability of 4WD Electric Vehicle

Jongsang Seo*, Kyongsu Yi*, Juyong Kang**

Key Words : Electric Vehicle(전기 차량), Maneuverability(선회성), Side-slip Angle(횡방향 미끄러짐 각), Recursive Least Square(재귀 최소 자승법), Cornering Stiffness(코너링 강성), Driving Control(주행제어)

ABSTRACT

This paper describes development of 4 Wheel Drive (4WD) Electric Vehicle (EV) based driving control algorithm for severe driving situation such as icy road or disturbance. The proposed control algorithm consists three parts : a supervisory controller, an upper-level controller and optimal torque vectoring controller. The supervisory controller determines desired dynamics with cornering stiffness estimator using recursive least square. The upper-level controller determines longitudinal force and yaw moment using sliding mode control. The yaw moment, particularly, is calculated by integration of a side-slip angle and yaw rate for the performance and robustness benefits. The optimal torque vectoring controller determines the optimal torques each wheel using control allocation method. The numerical simulation studies have been conducted to evaluated the proposed driving control algorithm. It has been shown from simulation studies that vehicle maneuverability and lateral stability performance can be significantly improved by the proposed driving controller in severe driving situations.

1. 서론

최근 몇 년간, 전기 자동차에 대한 연구 개발은 전 세계적으로 매우 활발히 진행되고 있다. 전기 자동차는 모터를 이용하여 그 반응속도가 매우 빠르기 때문에 주행 및 제동 제어가 매우 용이하다^{1), 2)}. 또한 인휠 모터를 사용하는 경우 좌우 휠의 구동을 통해 요모멘트 생성이 가능하고, 이는 차량의 선회 성능과 안정성을 향상시킬 수 있다^{3), 4)}.

본 연구에서는 일반 도로 및 험로에서의 주행 성능, 횡방향 안정성을 향상시키기 위한 주행 제어 알고리즘을 개발하였다. 시뮬레이션을 통하여 주행 제어 알고리즘의 성능 검증을 실시하였다.

2. 차량 모델

본 논문의 대상 차량은 Fig. 1과 같이 전륜 인라인 모터와 후륜 인휠 모터 및 각 휠의 제동장치로 구성되어 있다. 4WD EV의 주행 제어는 항상 운전자의 주행에 의존한다. 따라서 본 연구에서 제안하는 주행 제어 알고리즘은 시뮬레이션 검증을 위해 운전자 모델을 구성하였다.

* 서울대학교 기계항공공학부

** 현대기아 자동차

E-mail : azuresky@snu.ac.kr

4WD 전기 차량의 선회 성능 및 횡방향 안정성 향상을 위한 주행 제어 알고리즘 개발

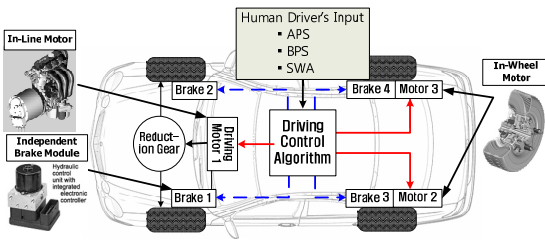


Fig. 1 4WD EV with independently driven front in-line motor and rear in-wheel motors

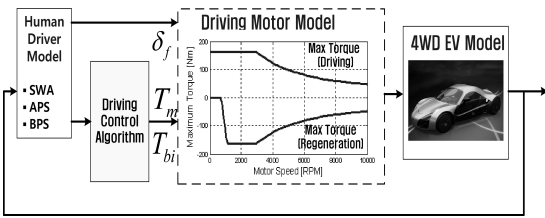


Fig. 2 Closed-loop driving controller system

Fig. 2는 운전자입력인 조향신호(SWA), 가속페달 신호(APS), 제동페달 신호(BPS)를 결정하기 위한 운전자 모델³⁾과 4WD EV 모델은 Carsim 시뮬레이션 틀

을 이용하여 구성된 시스템을 나타낸다. Carsim 모델은 차량의 전체 거동을 표현할 수 있도록 구성되었으며, 전기 차량의 주행제어 알고리즘 성능 검증을 위해 사용되었다. 이는 Matlab/Simulink를 통하여 제어기와 Carsim 모델을 연동하였다.

차량 모델에서 사용된 모터 모델은 1차 전달함수를 사용하였다. Fig. 3은 모터의 최대 토크와 RPM의 시뮬레이션 결과이다. 또한, 제동 제어 모듈은 2차 전달함수를 사용하였다. 최대 제동 압력은 20MPa, 정착 시간과 시정수는 각각 0.3초, 0.06초로 지정하였다.

시뮬레이션 검증을 위한 주요 파라미터는 Table 1과 같다.

Table 1 Parameters of the dynamic vehicle model

Vehicle Parameters	value	Vehicle Parameters	value
Sprungmass	1400[kg]	Yaw moment inertia	4192[kgm ²]
Unsprungmass	80[kg]	Track width	1.545[m]
Wheelbase	2.85[m]	Tire radius	0.346[m]

3. 주행 안정성 제어 알고리즘

주행 안정성 제어 알고리즘은 노면 상황에 관계 없이 안정성을 확보하기 위해 차량의 상태를 정확하게 추정하고 목표 속도 및 요 속도를 정의하여 구동 및 제동 입력을 결정한다. Fig. 4는 주행 안정성 제어 알고리즘의 블록 다이어그램을 나타낸다. 주행 통제 제어기는 운전자가 의도하는 목표된 조향 및 가속도를 차량의 상태에 따라 안정성 확보를 위한 값을 다시 결정한다. 차량이 안정한 상황 하에서는 운전자의 의도를 그대로 반영하지만, 위험 상황에서는 운전자가 잘못된 입력을 전달할 경우 이를 제한하여 차량이 안정하게 유지되도록 하는 목표 속도와 요 속도를 결정한다. 상위 제어기는 목표 속도와 요 속도를 추종하기 위해 차량에게 필요한 종방향 힘과 요 모멘트를 계산한다. 하위 제어기에서는 상위 제어기에서 결정된 종방향 힘과 요 모멘트를 차량의 각 휠에 적절히 분배되도록 제어 입력을 결정한다.

3.1 주행 통제 제어기

주행 통제 제어기는 노면 상태와 차량 상태에 따라

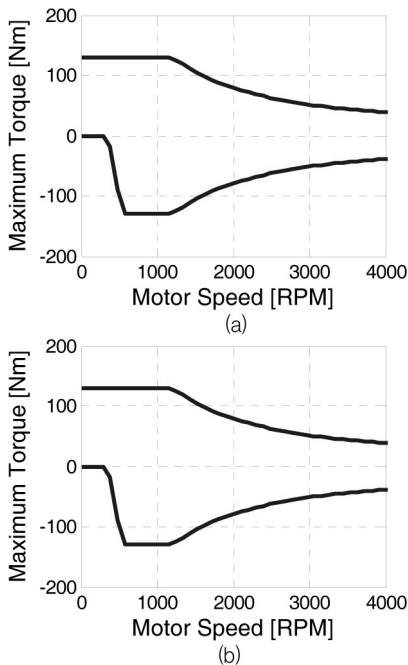


Fig. 3 Maximum torque/wheel speed curve (a) Front in-line motor and (b) Rear in-wheel motor

서 적절한 코너링 강성을 추정하고, 자전거 모델을 이용하여 과도한 횡방향 가속도가 발생하지 않도록 종방향 속력과 요 속도를 결정한다. 횡방향 가속도는 롤전복 계수와 횡방향 마찰을 고려하여 최대 가속도를 제한한다.

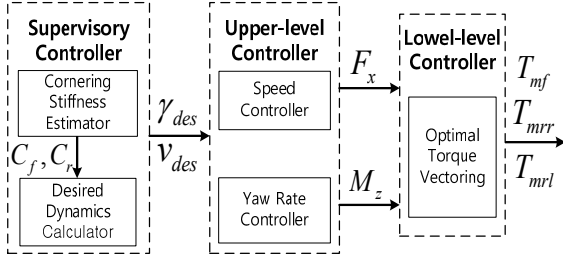


Fig. 4 Schematic diagram of the driving controller algorithm

차량 주행 시 코너링 강성 값은 슬립 각과 횡방향 힘으로 결정되므로 계속 변하게 되는데, 슬립 각이 작을 경우 선형화할 수 있다. 그러나 일반적으로 노면 상태가 고르지 않거나, 눈길 등에서는 슬립 각이 증가하기 때문에 코너링 강성 값이 변화하게 된다. 따라서 이를 정확히 추정해서 차량 상태에 맞는 목표 속력과 요 속도 계산이 가능하다.

상황에 맞는 코너링 강성을 추정하기 위해 재귀 최소 자승법을 사용하였다. 재귀 최소 자승법은 측정값과 비용함수를 고려하고, 이를 최소로 하는 파라미터를 구하는 방식이다. 코너링 강성이 포함된 식은 다음과 같이 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 ma_y &= C_{af}\alpha_f + C_{ar}\alpha_r \\
 &= C_{af}\left(\delta - \frac{v_y + l_f\gamma}{v_x}\right) + C_{ar}\left(-\frac{v_y - l_r\gamma}{v_x}\right) \quad (1)
 \end{aligned}$$

a_y 는 횡방향 가속도, α_f, α_r 는 차량 앞과 뒤 슬립 각, δ 는 스티어링 각, l_f, l_r 은 무게중심에서 각각 앞과 뒤 차축까지의 거리, v_x 는 종방향 속도, v_y 는 횡방향 속도, C_f, C_r 는 코너링 강성이다.

식 (2)는 적절한 코너링 강성을 추정하기 위한 재귀 최소 자승법의 비용함수를 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 &V(\hat{C}_{af}(i), \hat{C}_{ar}(i), k) \\
 &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \left\{ \begin{aligned} &\lambda_1^{k-i} \begin{pmatrix} ma_y(i) - \alpha_f(i) \cdot \hat{C}_{af}(i) \\ -\alpha_r(i) \cdot \hat{C}_{ar}(i) \end{pmatrix} \\ &+ \lambda_2^{k-i} \begin{pmatrix} ma_y(i) - \alpha_f(i) \cdot C_{af}(i) \\ -\alpha_r(i) \cdot \hat{C}_{ar}(i) \end{pmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (2)
 \end{aligned}$$

λ_1, λ_2 는 각각 C_f, C_r 에 대한 forgetting factor이고, $\alpha_f = \delta - \frac{v_y + l_f\gamma}{v_x}$, $\alpha_r = -\frac{v_y - l_r\gamma}{v_x}$ 이다.

식 (3)은 비용함수를 최소화하는 코너링 강성에 대한 추정 식이다.

$$\begin{aligned}
 \hat{C}_{af,i}(k) &= \begin{pmatrix} \hat{C}_{af,i}(k-1) + P_{1,2}(k)\phi_{1,2}(k) \\ ma_y(k) \\ -\phi_{1,2}(k) \cdot \hat{C}_{af,r}(k-1) - \phi_{2,1}(k) \cdot C_{ar,r}(k) \end{pmatrix} \\
 P_{1,2}(k) &= \begin{pmatrix} P_{1,2}(k-1) - P_{1,2}(k-1)\phi_{1,2}(k) \\ (\lambda_{1,2} + P_{1,2}(k-1)\phi_{1,2}^2(k))\phi_{1,2}(k)P_{1,2}(k-1) \end{pmatrix} \quad (3)
 \end{aligned}$$

추정된 코너링 강성 값을 이용하여 목표 종방향 속력과 요 속도를 계산할 수 있다.

3.2 상위 제어기

상위제어기는 안정성 판단 알고리즘에서 결정된 목표 dynamics를 차량에 반영하기 위한 종방향 힘 F_{x_des} 과 요 모멘트 입력 M_{z_des} 를 결정한다. 상위 제어기는 목표 종방향 속도를 추정하기 위한 속도 제어기와 목표 요 속도를 추정하기 위한 요 속도 제어기로 구성하였다. 상위 제어기는 Fig. 5에 나타난 Planar Model을 기반으로 설계하였다.

3.2.1 속도 제어기

속도 제어기는 sliding mode control 기법을 기반으로 목표 속도 추종을 위한 종방향 힘을 결정하기 위해 설계하였다. Sliding mode control 기법의 제어기 설계를 위한 sliding surface와 sliding condition은 식(4)와 같다.

$$s_1 = v_x - v_{x_des}$$

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} s_1^2 = s_1 \cdot \dot{s}_1 = -K_1 |s_1| \quad (4)$$

식 (4)로부터 목표 속도 추종을 위한 종방향 힘은 다음과 같이 결정할 수 있다.

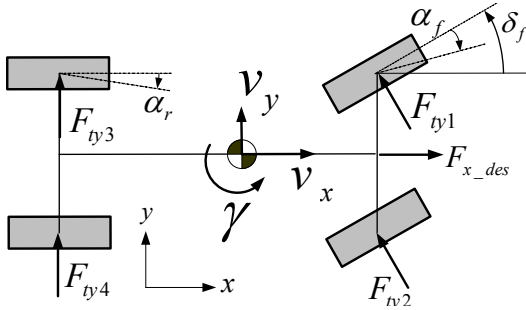


Fig. 5 Planar model including the desired traction force

$$F_{x_des} = F_{x_eq} - m \cdot K_1 \cdot \text{sgn}(s_1)$$

$$= -\sum_{i=1}^2 \hat{F}_{tyi} \sin \delta_f + \sum_{i=1}^2 \hat{F}_{txi} \cos \delta_f + \sum_{i=3}^4 \hat{F}_{txi}$$

$$- m \cdot \left(v_y \cdot \gamma + K_1 \cdot \text{sat} \left(\frac{v_x - v_{x_des}}{\Phi_1} \right) \right) \quad (5)$$

여기서 K_1 은 sliding control gain을 나타내며, Φ_1 은 sliding boundary를 나타낸다.

3.2.2 요 속도 제어기

요 속도 제어기는 목표 요 속도와 차량 요 속도 사이의 오차를 줄이기 위한 요 모멘트 입력을 계산한다. 최종 요 모멘트를 결정하기 전에 노면 상황에 따라서 차량의 과도한 횡 슬립이 발생할 경우 이를 감소시키기 위한 고려가 필요하다. 따라서 요 속도 추종과 횡 슬립을 감소하기 위한 sliding mode control을 기반으로 제어기를 설계하였다. 이는 식(6)과 같다.

$$s_2 = \gamma - \gamma_{des} + \eta\beta$$

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} s_2^2 = s_2 \cdot \dot{s}_2 = -K_2 |s_2| \quad (6)$$

식 (6)에서 횡 슬립의 경우 목표값은 0이기 때문에

식에 고려되지 않았다. 목표 요 속도 추종을 위한 요 모멘트 입력은 Planar model을 기반으로 식 (7)과 같이 결정되었다.

$$M_{z_des}$$

$$= -l_f \sum_{i=1}^2 (\hat{F}_{tyi} \cos \delta_f + \hat{F}_{txi} \sin \delta_f) + l_r \sum_{i=3}^4 \hat{F}_{tyi}$$

$$+ t_w (F_{rx1} - F_{rx2}) \cos \delta_f + I_z \eta \left(\frac{F_{yf} + F_{yr}}{m v_x} - \gamma \right) \quad (7)$$

$$- I_z \cdot K_2 \cdot \text{sat} \left(\frac{\gamma - \gamma_{des} + \eta\beta}{\Phi_2} \right)$$

K_2 는 sliding mode gain을 나타내며, Φ_2 는 sliding boundary를 나타낸다.

3.3 하위 제어기

이전 상위 제어기에서 목표 속도와 요 속도를 추종하기 위한 종방향 힘과 요 모멘트를 결정하였다. 하위 제어기는 torque vectoring 알고리즘을 기반으로 설계되었다. 전륜의 인라인 모터, 후륜의 인휠 모터 및 각 휠의 제동장치의 일곱 가지의 제어 입력으로 종방향 힘과 요 모멘트의 차량 거동을 구현한다. Fig. 6은 하위 제어기의 개요를 나타낸다.

Fig. 6에서 차량의 거동을 결정하기 위한 종방향 힘 및 요 모멘트와 제어 입력 사이의 관계는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} F_{x_des} \\ M_{z_des} \end{bmatrix}_{v[k \times 1]} = \underbrace{B_1}_{B_1[k \times m]} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} T_{mf} & T_{mrl} & T_{mrr} & T_{b1} & T_{b2} & T_{b3} & T_{b4} \end{bmatrix}^T}_{u[m \times 1]}$$

$$v(t) = B_1 \cdot u(t) \quad (7)$$

where,

$$B = \begin{bmatrix} \chi_f \cdot \frac{\cos \delta_f}{r} & \frac{\chi_r}{r} & \frac{\chi_r}{r} & \frac{\cos \delta_f}{r} & \frac{\cos \delta_f}{r} & \frac{1}{r} & \frac{1}{r} \\ \chi_f \cdot \frac{l_f \cdot \sin \delta_f}{r} & \frac{\chi_r \cdot l_w}{r} & \frac{\chi_r \cdot l_w}{r} & \frac{-l_w \cos \delta_f + l_f \sin \delta_f}{r} & \frac{l_w \cos \delta_f + l_f \sin \delta_f}{r} & \frac{l_w}{r} & \frac{l_w}{r} \end{bmatrix}$$

여기서, χ_f 와 χ_r 는 각각 전륜과 후륜 모터의 감속 기어비이다. $v(t) \in \mathbb{R}^k$ 는 상위 제어기에서 결정된 값이고, $u(t) \in \mathbb{R}^m$ 는 실제 액츄에이터 제어 입력 값이다. 각 휠에 분배할 제어 입력 값을 결정하기 위해 allocation

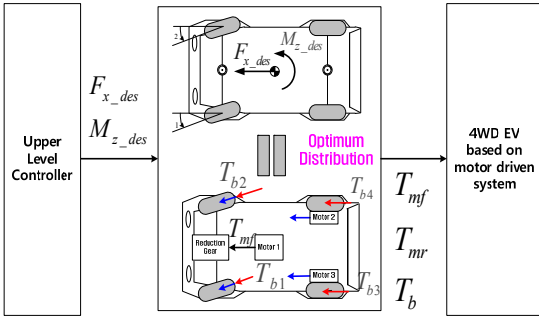
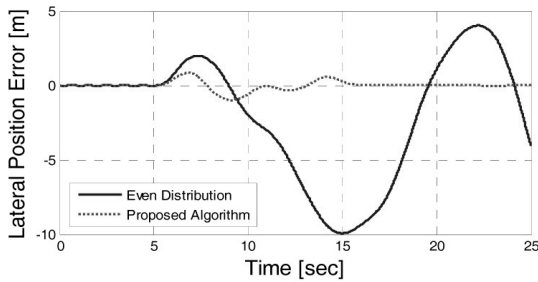
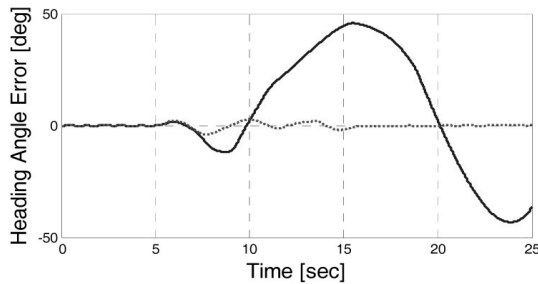


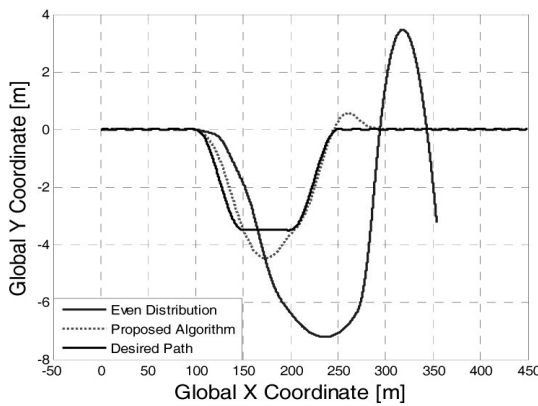
Fig. 6 Schematic diagram of the lower-level controller



(a)



(b)



(c)

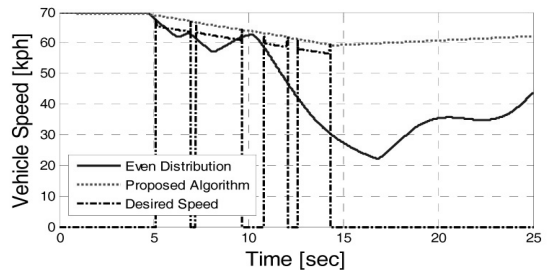
Fig. 7 (a) Lateral position error, (b) heading angle error and (c) vehicle trajectory

오차인 $\|B_1 \cdot u(t) - v(t)\|$ 를 최소화 하도록 설계하였다⁶⁾.

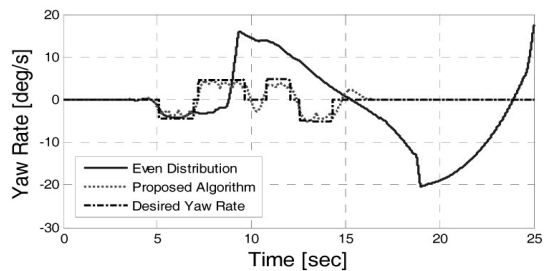
4. 시뮬레이션 결과

본 연구에서 설계한 4WD 전기 차량의 주행 안정성 제어 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 Fig. 7-(c)와 같이 폭 3.5m의 도로에서 double lane change를 수행하는 시뮬레이션을 수행하였다. 이 때 차량의 속도는 70kph 였으며, 조향 입력은 실제 운전자의 조향 특성을 갖는 운전자 조향모델을 이용하였다. 지면 마찰계수는 0.15 정도의 미끄러운 도로를 가정하였다. 개발된 주행 제어 알고리즘의 검증을 위해 주행 제어 알고리즘이 작동한 경우와 토크의 균등 분배시의 결과를 비교하였다. 시뮬레이션은 Carsim 플랫폼을 기반으로 수행하였다. Fig. 7-(a)와 (b)는 동일한 운전자 조향 모델을 이용한 목표 궤도 추종 성능을 나타낸다. Fig. 7-(c)는 차량의 궤적을 나타낸다. Fig. 8은 차량 거동에 대한 정보를 나타낸다.

Fig. 8-(a)에서 주행제어 알고리즘은 속도 제어를 통해 차량이 차선 변경을 할 때 차량이 안정성을 유지할 수 있도록 적절한 시점에 속도를 제어한다. 반대로 균등 토크 분배 차량의 경우 노면 상태가 매우 미끄럽기 때문에 속력을 유지할 수 없게 된다. Fig. 8-(b)는 차량의 요 속도 추종 성능을 보여준다.



(a)



(b)

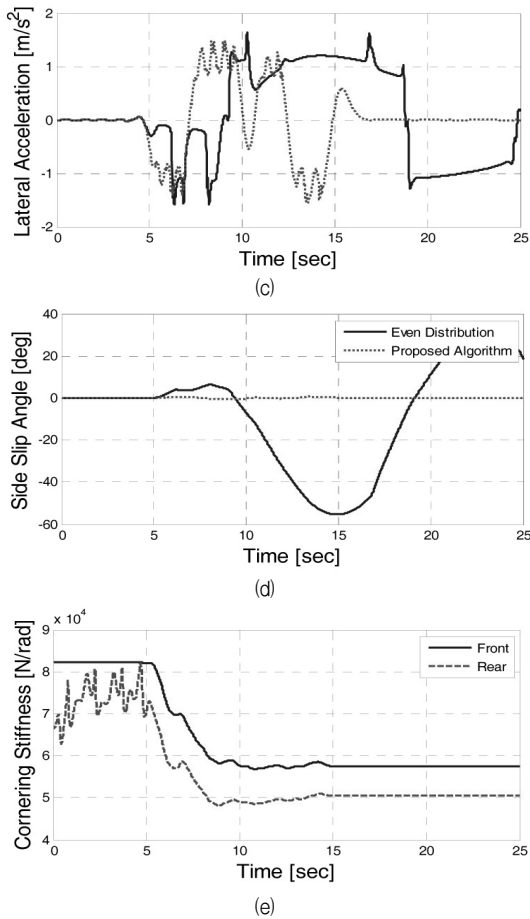


Fig. 8 Simulation result of (a) vehicle speed, (b) yaw rate, (c) lateral acceleration, (d) side slip angle and (e) cornering stiffness

주행제어 알고리즘을 적용한 차량의 경우 횡방향 안정성을 고려해 계산된 요 속도를 균등 토크 분배 차량에 비해 상대적으로 오차가 발생하지 않았다. Fig. 8-(c)와 (d)에 나타난 차량의 횡방향 안정성과 관련된 차량의 횡방향 가속도와 횡 슬립각에서 차량에 주행 제어 입력이 작용한 경우에 차량의 횡방향 안정성 및 선회 성능이 향상됨을 알 수 있다. Fig. 8-(e)는 주행 상황에 따른 코너링 강성의 변화로 노면과 차량의 상황에 따라 가장 적절한 값을 계산한다.

5. 결론

4WD 전기 차량을 기반으로 한 모터와 제동장치의 구동력 및 제동력 제어를 이용한 주행 안정성 제어 알

고리즘에 대한 연구에 대하여 논하였다. 주행 안정성 제어 알고리즘은 노면의 상태에 강건하게 차량의 선회 성능과 안정성을 위해 설계되었다. 특히, 차량의 과도한 횡방향 미끄러짐을 방지하기 위해 설계되었다. 주행제어 알고리즘은 차량의 상태를 파악하여 적절한 코너링 강성을 추정하고, 목표 dynamics를 결정하기 위한 주행 통제 제어기와 주행 통제 제어기에서 결정된 목표 dynamics를 따르기 위한 종방향 힘과 요 모멘트를 결정하기 위한 상위 제어기, 종방향 힘과 요 모멘트를 액추에이터에 적절한 토크로 분배하기 위한 하위 제어기로 구성되어 있다.

개발된 주행 제어 알고리즘은 CARSIM을 기반으로 한 시뮬레이션을 통해 검증되었으며, 시뮬레이션 결과로 본 연구에서 진행된 주행 제어 알고리즘은 차량의 선회 성능 및 횡방향 안정성을 향상시킬 수 있다.

참고문헌

- (1) H. Shimizu, J. Harada, C. Bland, K. Kawakami, and L. Chan, 1997, "Advanced concepts in electric vehicle design", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 44, no. 1, pp. 14-18.
- (2) Y. Hori, 2004 "Future Vehicle Driven by Electricity and Control - Research on Four-Wheel-Motored "UOT Electric March II", IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 51, No. 5 pp.954-962.
- (3) N. Mutoh and H. Yahagi, 2005, "Control Methods Suitable for Electric Vehicles with Independently Driven Front and Rear Wheel Structures", 2005 Vehicle Power And Propulsion Conference-(VPPC 2005) CD-ROM, September 7-9.
- (4) D H Kim, J M Kim, S H Hwang, et al., 2007, "Optimal brake torque distribution for a four-wheel-drive hybrid electric vehicle stability enhancement", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D-Journal of Automobile Engineering, 221 (D11): pp. 1357-1366.
- (5) T. Lee, J. Kang, K. Yi, K. Noh, and K. Lee, 2010, "Integrated of longitudinal and lateral human driver models for Evaluation of the Vehicle Active Safety Systems", SAE 2010 World

- Congress, 2010-01-0062.
- (6) Ola Haarkegard, 2002, "Efficient Active Set Algorithms for Solving Constrained Least Squares Problems in Aircraft Control Allocation", Technical report LiTH-ISY-R-2426, Linkopings Univ., Sweden.
 - (7) C. Sierra, E. Tseng, A. Jain, H. Peng, 2013, "Cornering stiffness estimation based on vehicle lateral dynamics", *Vehicle System Dynamics*, Vol. 44, pp. 24-38.
 - (8) J. Kang, K. Yi, 2011, "Driving control algorithm for maneuverability, lateral stability and rollover prevention of 4WD electric vehicles with independently driven front and rear wheels", *IEEE Vehicular Technology*, Vol. 60, pp. 2987-3001.
 - (9) Ola Harkegard, S. Torkel Glad, 2004, "Resolving actuator redundancy - optimal control vs. control allocation", *Automatica*, Vol. 41, pp. 137-144.