

전륜 인휠모터 후륜구동 차량의 선회 특성 변형을 위한 요모멘트 제어

차현수* · 좌은혁** · 박관우*** · 이경수****,† · 박재용*****

Yaw Moment Control for Modification of Steering Characteristic in Rear-driven Vehicle with Front In-wheel Motors

Hyunsoo Cha*, Eunhyek Joa**, Kwanwoo Park***, Kyongsu Yi****,†, Jaeyong Park*****

Key Words: In-wheel motor(인휠모터), Open-loop control(개루프 제어), Yaw moment control(요모멘트 제어), Vehicle Dynamics(차량 동역학)

ABSTRACT

This paper presents yaw moment control for modification of steering characteristic in rear-driven vehicle with front in-wheel motors (IWMs). The proposed control algorithm is designed to modify yaw rate response of the test vehicle. General approach for modification of steering characteristic is to define the desired yaw rate and track the yaw rate. This yaw rate tracking method can cause the chattering problem because of the IWM actuator response. Large overshoot and settling time in IWM torque response can amplify the oscillation in control input and yaw rate. To resolve these problems, open-loop IWM controller for cornering agility was designed to modify the understeer gradient of the vehicle. The proposed algorithm has been investigated via the computer simulations and the vehicle tests. The performance evaluation has been conducted on dry asphalt using E-segment test vehicle. The performance of the proposed algorithm has been compared to general yaw rate tracking algorithm in the vehicle tests. It has been shown that the proposed control law improved the cornering agility without chattering problem.

기호설명

V_x : 차량의 종방향 속도
 γ : 무게중심에 대한 회전속도

β : 차량의 횡 방향 슬립앵글
 l_f : 차량 무게중심과 앞 바퀴사이 거리
 l_r : 차량 무게중심과 뒷 바퀴사이 거리
 L_z : 차량 중심에 대한 요 회전 관성
 t_{wf} : 앞 두 바퀴 사이의 거리
 t_{wr} : 뒷 두 바퀴 사이의 거리
 C_f : 앞 바퀴 코너링 강성
 C_r : 뒷 바퀴 코너링 강성
 r_{eff} : 타이어의 effective radius
 K_{us} : 차량의 Understeer gradient
 M_z : 요모멘트

* 서울대학교 기계항공공학부, 박사과정
 ** 서울대학교 기계항공공학부, 석사연구원
 *** 서울대학교 기계항공공학부, 박사과정
 **** 서울대학교 기계항공공학부, 교수
 ***** 현대자동차 연구개발본부, 책임연구원
 †교신저자: kyi@snu.ac.kr
 E-mail: chahs2@snu.ac.kr

- $M_{z,des}$: 목표 요모멘트
- $M_{z,ss}$: 정상상태 요모멘트 입력
- $M_{z,tr}$: 과도응답상태 요모멘트 입력
- τ : 조향각에 대한 요레이트 반응의 1차 시상수
- η : 과도응답상태 조정을 위한 설계 변수
- T_{fl} / T_{fr} : 전륜 좌/우륜의 토크 입력

1. 서론

고성능 차량은 우수한 가속 성능과 선회 성능을 위해 설계된 차량이다. 이러한 고성능차량은 일반 차량에 비해 상위 수준의 파워트레인 계통을 사용하기 때문에 선회 안정성을 유지하기 어렵다. 직진 가속력이 커질수록 타이어 마찰력의 횡방향 힘을 확보하기 어렵기 때문에 선회 성능을 확보하기 어려워지기 때문이다.⁽¹⁾

이러한 문제를 해결하기 위해 기존의 차량에 추가적인 액츄에이터를 장착하여 선회 성능을 개선시킬 수 있다. 본 논문에서는 후륜구동 차량의 전륜에 인휠모터를 장착하여 선회 안정성과 선회 조종성을 개선하기 위한 제어를 설계하였다.

인휠모터는 액츄에이터 반응이 매우 빠르고, 회생제동을 통해 제동성능을 개선시킬 수 있기 때문에 토크벡터링 제어에 활용하기에 유리하다.⁽²⁾ 그러나 차량의 언스프링 매스(unsprung mass)를 증가시키고 액츄에이터 특성에 의해 휠속이 높아질 경우 인가 가능한 토크량이 감소하므로 고속 주행 시에는 토크 제어량이 감소한다는 단점이 있다.⁽²⁾

이러한 인휠모터를 제어하기 위해 가장 많이 사용되어 온 요모멘트(yaw moment) 제어 방식은, 조향각을 이용해서 목표 요레이트를 만들고 이를 추종하기 위해 요모멘트를 생성하는 방식이었다.^(2,3,4) Kang, K.은 bicycle model을 기반으로 차체 슬립각과 요레이트를 측정 가능한 차량 플랫폼에서 피드백, 피드포워드 방식으로 횡방향 안정성을 확보하는 연구를 하였다.⁽³⁾ Sakai, S. I. 또한 Simulation 환경에서 피드백 제어를 이용하여 선회 안정성을 확보하였다. De Novellis는 PID제어와 sliding mode 제어를 이용하여 인휠 모터 토크벡터링 로직을 시뮬레이션 환경에서 검증하였다.

하지만 이러한 요레이트 피드백 방식은 인휠모터 토크 채터링 문제를 야기하기 쉽고, 이를 해결하기 위해 필터를 적용하게 되면 액츄에이터 딜레이가 발생하므로 실차 환경에서 검증하기 어렵다. 본 연구에서는 실차 환경에서 구현가능한 토크벡터링 로직을 설계하기 위해 차량에 내

재된 센서신호만을 이용하여 인휠모터 토크 채터링이 발생하지 않는 실차적용 로직을 제안하였다.

본 연구에서 주로 기여한 점은 다음과 같다.

- 1) 본 논문에서는 요레이트 추종방식을 사용하지 않고 차량의 선회 성능을 개선시키기 위한 새로운 제어 전략을 제안하였다.
- 2) 본 논문에서는 차량의 언더스티어 경향성을 변형시키고 횡방향 안정성을 개선하기 위한 제어기 설계 방식을 제안하였다.
- 3) 본 논문에서는 차량에 기본적으로 내장된 센서만을 이용해서 실제 차량에서 알고리즘을 구현하였다.

2. 인휠차량의 구성 및 액츄에이터 특성

2.1. 인휠차량의 구성

본 연구에서 대상으로 하는 차량의 구성은 Fig. 1과 같이 표현할 수 있다. 내연기관 에너지 전달과정(ICE energy flow)에서 볼 수 있듯이, 후륜구동 차량에서는 엔진의 출력이 트랜스미션과 샤프트를 지나서 후륜에 좌우에 동일한 비율로 분배된다. 본 연구에 사용하는 인휠 차량에서는 엔진과 트랜스미션 사이에 전기동력 생산장치(HSG, hybrid starter generator)를 추가적으로 설치하여 인휠 모터의 동력을 공급한다. HSG에서 생산된 동력은 고전압 배터리에 충전된 후에 LDC(low voltage dc converter)를 통해서 MCU(motor control unit)에서 명령하는 토크 커맨드를 인가한다.

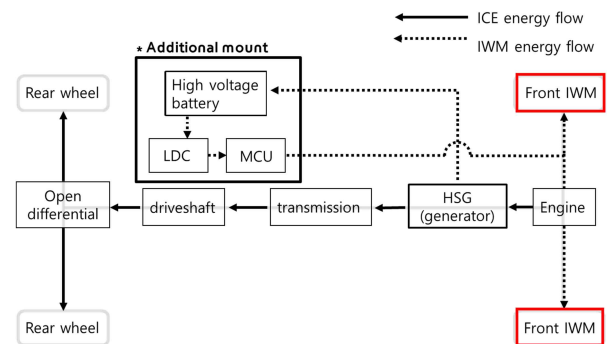


Fig. 1 Energy flow diagram of rear-driven vehicle with front in-wheel motors

2.2. 인휠모터의 액츄에이터 특성

전륜에 설치되는 인휠모터는 MCU를 통해서 좌우 독

립적으로 토크를 인가해 줄 수 있다. 하지만 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 휠속에 따라서 액츄에이터 한계가 존재한다. 휠의 기저속도(base speed)에 따라서 토크 일정영역과 출력 일정영역으로 구분할 수 있다. 토크 일정영역에서는 최대 휠토크가 일정하지만, 휠속이 기저속도보다 커지게 되면서 최대 토크가 감소하게 된다. 즉, 고속영역에서는 인가할 수 있는 휠토크량이 감소하게 된다.⁽²⁾

그러므로 시뮬레이션 검증 및 실차검증 과정에서 로직을 구현하기 위해서는 이러한 액츄에이터 한계를 아는 것이 중요하다. 본 연구에서는 이러한 한계를 알기위해 액츄에이터 실험을 통해서 인휠모터의 최대 토크, 기저속도, 최대 출력에 대한 정보를 취득하였다. 인휠 모터의 사양은 Table 1에서 차량 파라미터와 함께 제시되었다.

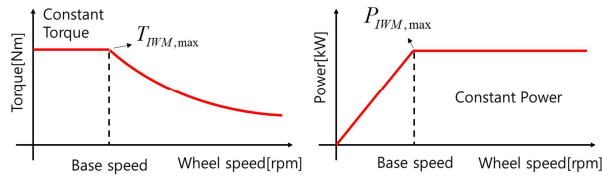


Fig. 2 In-wheel motor actuator characteristic (TN curve and PN curve)

3. 요모멘트 제어 알고리즘

전체적인 제어기 구조는 Fig. 3에서와 같이, 세 가지 파트로 구성되어 있다. Supervisor 단계에서는 센서를 통해 얻은 차량 상태 정보를 이용해서 원하는 목표 모션을 선정한다. Upper-level 제어기에서는 목표 모션을 만들어주기 위한 목표 요모멘트를 설정하고, 마지막으로 Lower-level 제어기에서는 목표 요모멘트를 만들어주기 위한 휠토크를 전문인휠모터에 좌우 독립적으로 인가하는 역할을 한다.

3.1. 요레이트 추종 방식 요모멘트 제어의 문제점

이전연구에서 차량의 조향 특성을 변형시키기 위한 일반적인 방법은 PID 제어, 피드백 제어, 슬라이딩 모드 제어 등의 방법을 이용한 요레이트 추종 방식이었다.^(2,3,4) 이러한 방법은 차량의 조향각 센서 정보를 이용해서 목표 요레이트를 설정한 후, bicycle model을 기반으로 해당 목표 요레이트를 추종하는 방식이다.^(2,3,4,6) 그러나 이러한 방법은 실제 차량에 적용되는 인휠모터 액츄에이터에 적용하기에 적합한 방식이 아니다.

Fig. 4에서의 토크 반응은 실험 차량에 장착되어 있는 인휠모터의 토크 반응이다. 차량에 장착되는 인휠모터에서는 높은 단가때문에 토크 센서를 장착하기 어렵기 때문에 모터 전류 개루프 제어를 통해서 토크를 인가하게 된다. 이러한 액츄에이터 환경에서는 Fig. 4에서 볼 수 있듯이, 모터 토크 입력을 스텝 입력으로 주었을 때 초기에 과도한 토크 오버슈트와 과도하게 큰 settling time이 발생한다.

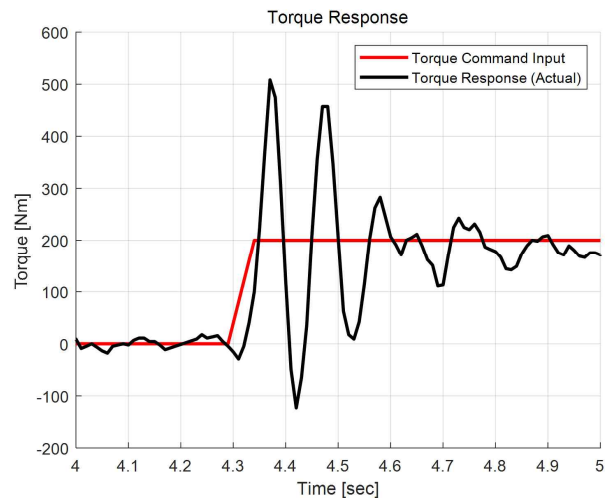


Fig. 4 Torque response of IWM actuator

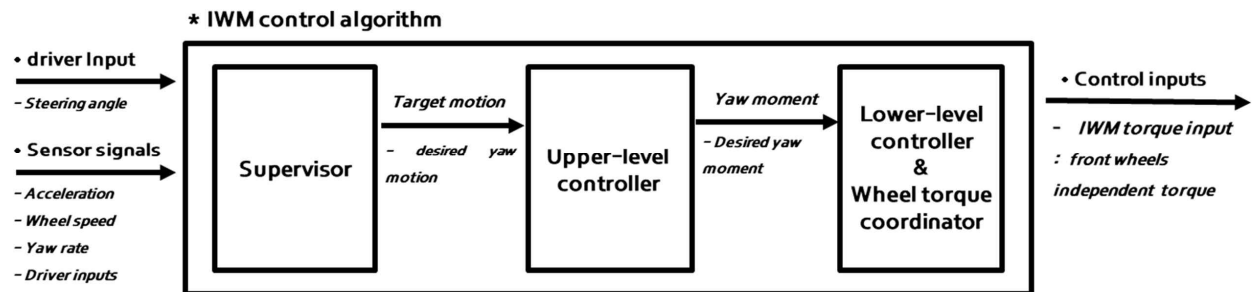


Fig. 3 Block diagram of the proposed IWM control algorithm

위와 같은 과도한 토크 오버슛은 요레이트 추종 방식으로 요모멘트를 제어할 때에 토크 채터링의 원인이 되고, 실험 차량 내에서 운전자에게 과도한 이질감을 야기한다. 요레이트 추종 방식 제어 시 80km/h 이중차선변경 테스트를 진행할 실험 결과는 Fig. 6과 같다. 위 결과에서 볼 수 있듯이, 요레이트 추종 방식은 과도한 토크 채터링을 유발한다. Fig. 4와 같은 제어 초기의 토크 오버슛은 순간적으로 요레이트 진동을 발생시킨다. 요레이트 진동은 요레이트 에러를 진동시키기 때문에, 요레이트 추종 방식을 사용할 경우 토크 입력에 진동을 발생시킨다. 이러한 악순환이 반복될 경우 요레이트 진동과 토크 채터링이 지속적으로 발생해서 운전자에게 과도한 이질감을 야기한다. 이러한 악순환을 도식화하면 Fig. 5와 같다.

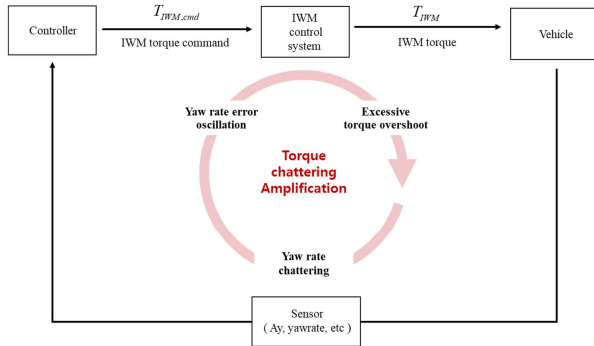


Fig. 5 Concept diagram of torque chattering amplification

3.2. 요모멘트 제어를 위한 open-loop 상위 제어기의 제어법칙(Control law)

본 논문에서 제안하는 요모멘트 제어는 차량의 선회

민첩성과 선회 안정성을 개선하기 위해 설계되었다. 제안된 제어 법칙(Control law)는 kinematic model과 bicycle model을 같이 사용하여 설계되었으며, 피드백을 사용하지 않는 open-loop 제어를 사용하여 인휠 토크 채터링을 방지하면서 차량 선회 성능을 개선하기 위해 설계되었다.

Kinematic model과 bicycle model을 같이 사용하기 위해서는 동일한 가정을 설정해야한다. 식 (1)과 같은 bicycle model에서 sideslip angle이 발생하지 않고, 정상 상태에 도달했다고 가정을 했을 경우 $\dot{\beta} = \dot{\gamma} = \beta = 0$ 라는 조건을 이용한다. 이 조건을 이용해서 식 (2)의 kinematic model에서 요모멘트에 의한 수식을 추가할 경우 식 (3)과 같이 정리할 수 있다. 조향각과 차속이 동일한 경우에 대해 요모멘트가 가해질 경우 식 (3)과 같이 요레이트와 Kus가 변함을 알 수 있다. 식 (3)을 통해 정상상태 요모멘트 제어량을 유도하면 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\beta} &= a_{11}\beta + a_{12}\gamma + b_1\delta_f \\ \dot{\gamma} &= a_{21}\beta + a_{22}\gamma + b_2\delta_f + M_z / I_z \end{aligned}$$

where $a_{11} = -\frac{2(C_f + C_r)}{mv_x}$, $a_{12} = -\frac{2(C_f l_f - C_r l_r)}{mv_x^2} - 1$

$$a_{21} = -\frac{2(C_f l_f - C_r l_r)}{I_z}$$

$$a_{22} = -\frac{2(C_f l_f^2 + C_r l_r^2)}{I_z v_x}$$

$$b_1 = \frac{2C_f}{mv_x}, b_2 = \frac{2C_f l_f}{I_z}$$

$$\delta_f = \left(\frac{L}{v_x} + K_{us,base} v_x \right) \gamma_{base}$$

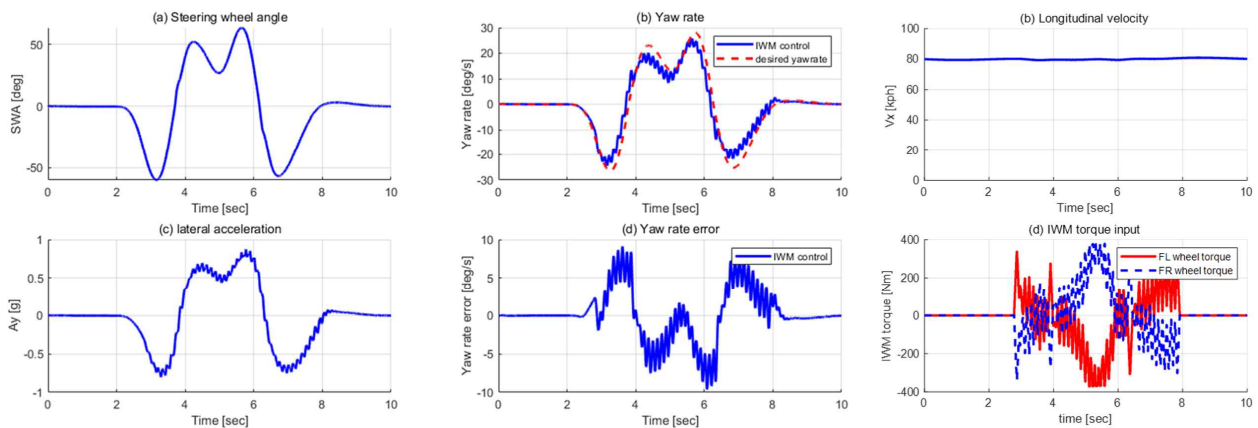


Fig. 6 Result of yaw rate tracking approach for in-wheel motor control - 80km/h Double lane change at dry asphalt

$$\delta_f = \left(\frac{L}{v_x} + K_{us,des} v_x \right) \gamma_{IWM} - \frac{1}{A} M_z$$

where $A = \frac{2C_f C_r L}{C_f + C_r}$ (3)

$$M_{z,ss} = A \cdot \underbrace{[K_{us,base} - K_{us,des}]}_{=\Delta K_{us}} \cdot a_y$$

where $A = \frac{2C_f C_r L}{C_f + C_r}$ (4)

정상상태 요모멘트 인가량이 정해진 상태에서 조향각에 대한 요레이트 반응의 과도 응답 반응을 조정하기 위한 제어기를 설계할 수 있다. 식 (1)의 차체슬립각에 대한 식을 식 (5)에 대입하면 식 (6)과 같은 식을 얻을 수 있다. 식 (6)에 라플라스 변환을 한 후에 식을 정리하면 식 (7)과 같은 형태로 정리할 수 있다. 이 식에서 튜닝 파라미터 η 와 정상상태 요모멘트 $M_{z,ss}$ 을 도입해서 식을 변형하면 식 (8)과 같이 유도된다. 식 (7)을 식 (8)로 나누어서 정리하면 식 (9)와 같이 정리된다. 이를 정리하면 최종적인 control law는 식 (10)과 같이 유도된다.

$$a_y = v_x \cdot (\dot{\beta} + \gamma) \quad (5)$$

$$\frac{a_y}{v_x} = a_{11}\beta + (a_{12} + 1) \cdot \gamma + b_1 \delta_f \quad (6)$$

$$\frac{\gamma}{\delta_f}(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \cdot \left[\frac{v_x}{L} \left(1 + \frac{1}{A} \cdot \frac{M_z}{\delta_f}(s) \right) - \frac{K_{us} v_x}{L} \cdot \frac{a_y}{\delta_f}(s) \right]$$

where $\tau = \frac{v_x I_z}{L} \cdot \frac{1}{A}$ and $A = \frac{2C_f C_r L}{C_f + C_r}$ (7)

$$\frac{\gamma}{\delta_f}(s) = \frac{1}{\eta \cdot \tau s + 1} \cdot \left[\frac{v_x}{L} \left(1 + \frac{1}{A} \cdot \frac{M_{z,ss}}{\delta_f}(s) \right) - \frac{K_{us} v_x}{L} \cdot \frac{a_y}{\delta_f}(s) \right] \quad (8)$$

$$\frac{M_z}{\delta_f}(s) = A \cdot \left[\left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) + \frac{1}{\eta A} \cdot \frac{M_{z,ss}}{\delta_f}(s) + K_{us} \left(1 - \frac{1}{\eta} \right) \frac{a_y}{\delta_f}(s) + \frac{L}{v_x} \left(1 - \frac{1}{\eta} \right) \frac{\gamma}{\delta_f}(s) \right] \quad (9)$$

$$M_z = A \cdot \begin{bmatrix} \left(1 - \frac{1}{\eta} \right) \delta_f + \left[K_{us,des} \left(1 - \frac{1}{\eta} \right) + \frac{1}{\eta} \Delta K_{us} \right] a_y \\ + \frac{L}{v_x} \cdot \left(1 - \frac{1}{\eta} \right) \gamma \end{bmatrix}$$

where $A = \frac{2C_f C_r L}{C_f + C_r}$ & $\Delta K_{us} = K_{us,base} - K_{us,des}$ (10)

3.3. 목표 요모멘트 생성을 위한 하위 제어기

하위 제어기는 목표 요모멘트를 만들기 위한 휠토크를 전륜 인휠모터에 좌우 독립적으로 인가하는 역할을 한다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이, 하위 제어기에서는 목표 요모멘트와 인휠모터의 토크 한계를 고려하여 전륜에 휠토크를 인가하게 된다. 인휠모터의 토크 한계는 전륜 휠속을 실시간으로 측정하여 TN 커브 내에서의 한계 토크를 결정하게 된다.

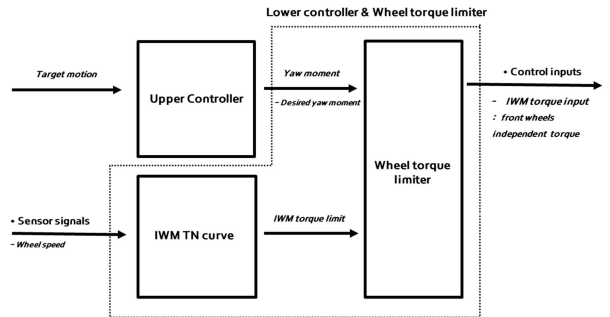


Fig. 7 Concept diagram of lower controller structure

본 연구에서는 운전자가 가감속 시의 주행 이질감을 느끼지 않게 하기 위해 전륜 휠토크를 같은 절대값으로 들어가도록 설계하였다. 그러므로 목표 요모멘트를 만들어주기 위해 휠토크 제어량은 식 (11)과 같다.

$$T_{fr} = M_{z,des} \cdot \frac{r_{eff}}{t_{wf}}$$

$$T_{fl} = -T_{fr} = -M_{z,des} \cdot \frac{r_{eff}}{t_{wf}} \quad (11)$$

3.4. 제안된 제어기에 대한 동역학적 분석

본 장에서는 제안된 제어기가 차량에 어떤 영향을 미치는 지에 대한 동역학적 분석이 시행되었다. Bicycle

model에 제안된 제어기가 적용되었을 때의 조향각에 대한 요레이트 반응을 Laplace transform을 이용하여 분석하였다.

식 (1)에서의 bicycle model을 s-domain 상에서 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} s\beta(s) &= a_{11}\beta(s) + a_{12}\gamma(s) + b_1\delta_f(s) \\ s\gamma(s) &= a_{21}\beta(s) + a_{22}\gamma(s) + b_2\delta_f(s) + M_z(s)/I_z \end{aligned} \quad (12)$$

또한, 식 (10)에서의 요모멘트 제어 입력을 s-domain 상에서 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} M_z(s) &= \left[A \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) + b_1 T \right] \delta_f(s) + a_{11} T \beta(s) \\ &\quad + \left[A \frac{L}{v_x} \left(1 - \frac{1}{\eta} \right) + (a_{12} - 1) T \right] \gamma(s) \\ \text{where } T &= \left[AK_{us} \left(1 - \frac{1}{\eta} \right) + \frac{1}{\eta} A \Delta K_{us} \right] v_x \\ \text{and } A &= \frac{2C_f C_r L}{C_f + C_r} \end{aligned} \quad (13)$$

식 (12)와 식 (13)을 이용하여 다음과 같은 2차 전달 함수를 만들 수 있다.

$$\frac{\gamma}{\delta_f}(s) = \frac{w_n^2}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2} \cdot (T_r s + 1) \cdot G_\delta^y(0) \quad (14)$$

여기서 ζ 는 댐핑 계수, w_n 는 고유 진동수, $G_\delta^y(0)$ 와 T_r 는 각각 dc gain과 derivative gain이다. 식 (14)에서의 차량의 정상상태 요레이트에 해당하는 $G_\delta^y(0)$ 와 과도응답상태에서의 댐핑계수에 해당하는 ζ 는 아래와 같다.

$$G_\delta^y(0) = \frac{v_x}{L + (K_{us} - \Delta K_{us})v_x^2} \quad (15)$$

$$\zeta = \frac{- \left[a_{11} + a_{22} + \frac{1}{I_z} (a_{12} + 1) T + \frac{1}{I_z} \left\{ A \frac{L}{v_x} \left(1 - \frac{1}{\eta} \right) \right\} \right]}{2 \sqrt{\frac{4C_f C_r L}{m v_x^2 I_z} \cdot \frac{1}{\eta} \left[L + (K_{us} - \Delta K_{us}) v_x^2 \right]}} \quad (16)$$

식 (15)와 (16)에서 볼 수 있듯이, 차량의 Understeer gradient를 변형하는 것은 결과적으로 차량의 정상상태 요레이트와 과도응답상태에서의 댐핑 계수를 변형하는 결과를 만든다.

그러므로 제안된 제어기는 정상상태와 과도응답상태에서의 요레이트 반응을 개선할 수 있지만, 목표 요레이트를 추종하는 것과는 설계 관점에서 차이가 있다. 목표 요레이트를 추종하는 것은 조향각이 높은 주파수로 바뀌는 상황에서 요레이트 채터링 문제를 야기할 수 있다. 그러나 제안된 제어기는 개루프 형식의 제어기이기 때문에 이러한 채터링 문제없이도 차량의 요레이트 반응을 개선할 수 있다.

4. 요모멘트 제어 알고리즘 실차 검증

3장에서 제안된 제어 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 실차 검증을 실시하였다. 차량 시험 시나리오는 R50 선회 가속 시험과 80km/h 이중차선변경 시험을 시행하였다. 실험 차량의 구성은 Fig. 8과 같고, 실험 차량에 적용된 제어기의 차량 파라미터는 Table 1과 같다. 본 연구에서 제안된 제어기는 목표 요레이트를 추종하는 것은 아니므로 목표 요레이트는 같이 그려지지 않았다.

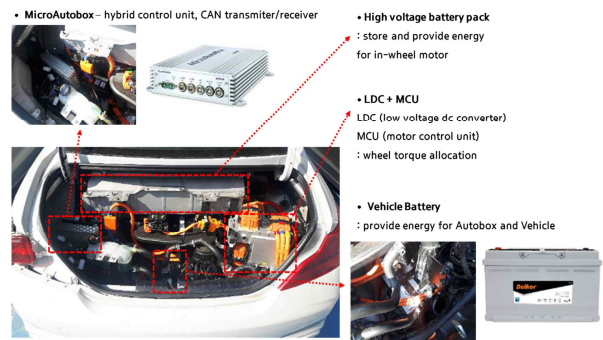


Fig. 8 Test vehicle platform for in-wheel motor control

Table 1 Vehicle Parameter for proposed IWM controller

Parameter	Value	Parameter	value
m	2055 (kg)	l	3.01 (m)
l_f	1.48 (m)	l_r	1.53 (m)
I_z	4550 (kg·m ²)	C_f	60000 (N/rad)
C_r	60000 (N/rad)	$T_{IWM,max}$	650 (Nm)
$P_{IWM,max}$	30 (kW)	$\omega_{IWM,base}$	440 (rpm)

4.1. 드라이 아스팔트 노면에서의 R50 선회가속시험

정상상태 조향특성 변형을 평가하기 위해 R50 가속 선회시험을 시행하였다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이, R50 궤도를 유지하면서 후륜 타이어 포화(오버스티어)가 일어나지 않을 정도로 천천히 가속시켜주면 궤도를 유지시켜주기 위한 조향각이 증가하게 된다. 이 때, 횡가속도 증가량에 대한 조향각의 증가비를 Understeer Gradient (Kus)로 볼 수 있다. 실험 차량의 선회 민첩성을 개선하기 위해서 횡가속도가 증가하면서 요구 조향각을 감소시키기 위해 목표 요모멘트가 증가하게 된다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이, 제어 전에는 Kus가 0.360rad/g 이지만 제어 후에는 0.214rad/g로 줄었음을 알 수 있다.

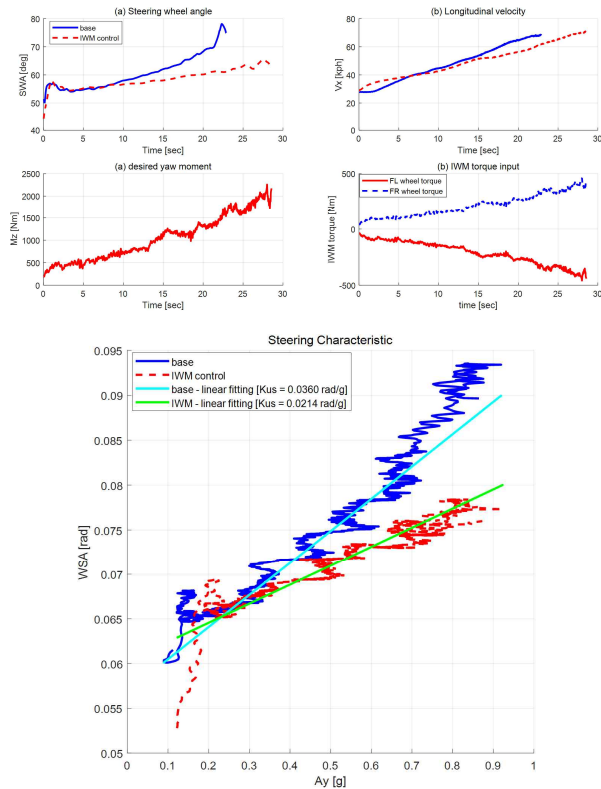


Fig. 9 R50 circular turn test (acceleration in a turn)

4.2. 드라이 아스팔트 노면에서의 80km/h 이중차선변경

과도 상태 조향특성(transient response)을 평가하기 위해 진입 속도 80km/h 이중차선변경 시험을 시행하였다. Fig. 10에서 볼 수 있듯이, 요레이트 추종 방식과는 다르게 이중차선변경에서 요레이트 진동과 토크 채터링없이 인휠토크 제어가 인가되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 10

에서의 목표 요레이트는 목표 Kus를 이용하여 역산한 결과이다. Fig. 6에서의 결과와 다르게 요레이트 에러의 진동이 없어지고, 요레이트 에러의 크기도 작아진 것을 확인할 수 있다.

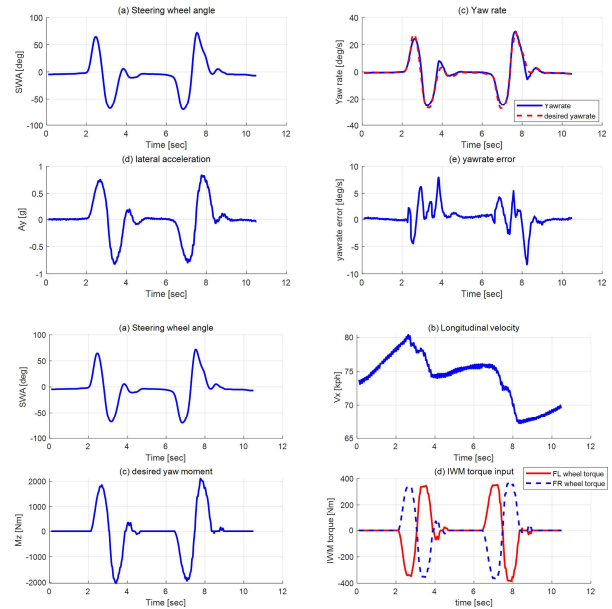


Fig. 10 80km/h Double Lane Change (ISO 3888-1)

하지만 요레이트 피크 구간에서는 인휠 토크 인가량이 액츄에이터 한계에 의해 제한되므로 목표 요레이트는 충분히 추종하지 못한다. 그러므로 극한 주행 상황에서는 액츄에이터 한계에 의해 목표 성능을 구현하기에는 어려움이 있다.

5. 결론

위 논문에서는 후륜구동차량의 전륜에 인휠모터를 장착하여 시험 시나리오 환경에서 실차 검증을 시행하였다. 제안된 알고리즘은 요레이트 추종 방식의 제어와는 다르게 인휠모터 토크 채터링 현상없이 차량의 선회 민첩성을 향상시켰다. 하지만 과도 선회 구간에서의 차량 안정성을 개선시키지는 못했다. 그러므로 선회 조종성을 개선시키고 동시에 과도 선회 구간에서의 선회 안정성을 개선시킬 수 있는 알고리즘이 추후에 연구되어야 할 것이다.

후기

본 연구는 국토교통부 도심도로 자율협력주행 안전·인프라

라 연구 사업의 연구비지원(과제번호 19PQOW-B152473-01)에 의해 수행되었다.

참고문헌

- (1) Milliken, W. F., & Milliken, D. L., 1995, "Race car vehicle dynamics", Warrendale: Society of Automotive Engineers.
- (2) Murata, S., 2012, Innovation by in-wheel-motor drive unit. *Vehicle System Dynamics*, 50(6), 807~830.
- (3) Nam, K., 2012, Lateral stability control of in-wheel-motor-driven electric vehicles based on sideslip angle estimation using lateral tire force sensors. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 61(5), 1972~1985.
- (4) Sakai, S. I., 1999, Motion Control in an Electric Vehicle with Four Independently Driven In-Wheel Motors. *IEEE/ASME Transactions on mechatronics*, 4(1), 9~16.
- (5) De Novellis, 2014, Comparison of feedback control techniques for torque-vectoring control of fully electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 63(8), 3612~3623.
- (6) Rajamani, R., 2011, "Vehicle dynamics and control", Springer Science & Business Media.