

# 직접구동 인 휠 모터를 장착한 1인승 전기자동차의 선회안정성제어

## Cornering Stability Control of a Personal Electric Vehicle with Direct-Drive In-Wheel Motors

남 강 현\*, 엄 상 준  
(Kanghyun Nam<sup>1,\*</sup> and Sangjune Eum<sup>1</sup>)

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Yeungnam University

**Abstract:** This paper proposes a robust control design method for improving the cornering stability of a personal electric vehicle equipped with in-wheel motors. In general, vehicles undergo severe parameter variations and unpredictable disturbances with respect to a wide range of driving conditions (e.g., road surface conditions and vehicle velocity conditions). For this reason, robust control design techniques are required to guarantee consistent driving performances and robustness against various driving conditions. In this paper, an adaptive sliding mode control method is employed to enhance cornering stability by controlling the direct-drive in-wheel motors independently. Additionally, in order to confirm the effectiveness of a proposed control method, real driving tests with an experimental personal electric vehicle are performed.

**Keywords:** cornering stability control, sliding mode control, personal electric vehicle

### I. 서론

인 휠 모터를 장착한 전기자동차의 동역학제어에 관한 연구는 종 방향 주행성능 향상을 목적으로 하는 Traction 제어와 선회 시 차량의 안정성 향상을 목적으로 하는 요 안정성 제어를 중심으로 활발히 진행되어 오고 있다[1-3]. 직접구동 인 휠 모터를 탑재한 전기자동차는 차체에 전기 모터가 장착되어 있는 기존 전기자동차와 비교하면 다음의 특징들을 가진다[3,4].

1) 동력전달장치 (감속기어, 차동기어, 구동력 전달 축 등)가 불필요하기 때문에 기존 전기자동차에 비하여 빠른 동적 응답성을 보인다.

2) 각 바퀴가 독립적으로 제어 가능하기 때문에 선회 시 각 바퀴의 독립적인 제동력 제어 없이 구동력 제어만으로 선회안정성 제어가 가능하다.

위의 두 가지 장점을 활용한 다양한 모션제어기법들이 연구되고 있다[4,5]. 인 휠 모터 전기자동차의 모션제어 분야에서 활발한 연구를 수행중인 일본의 Yoichi Hori & Hiroshi Fujimoto 연구그룹은 선회 시 차량의 안정성 향상을 목적으로 요 모멘트 관측기법을 적용하여 제어시스템의 강인성을 확보하였다[5]. 또한, 직접구동 인 휠 모터의 전/후륜 독립제어를 통하여 주행거리를 연장하는 새로운 제어기법을 소개하였다.

차량 모션제어의 주된 목적은 운전자가 의도하지 않은 차량의 거동을 미리 감지하고 능동제어를 통하여 운전자의 안전을 보장하기 위함이다. 모션제어 시스템들 중에서 선회 시 운전자의 안전성 확보와 직접적으로 관련이 있는 제어 시스템은 요 안정성 제어시스템이다. 보상 요 모멘트를 실시간으로 생성하고 각 바퀴에 분배함으로써 운전자가 원하는 방향으로 차량이 움직이게 된다. 보상 요 모멘트는 선회 시 차량의 횡 방향 미끄러짐 각 피드백제어를 통하여 생성할 수도 있고, 차량의 요율 피드백제어를 통하여 생성할 수 있다[7,8]. 본 논문에서는 차량의 요율 측정을 통한 피드백 제어를 통하여 원하는 보상 모멘트를 생성하는 방법을 제시한다. 차량은 다양한 노면조건에서 주행하고, 다양한 속도 조건에서 주행하기 때문에 차량시스템은 시변모델로 표현된다. 이러한 시변모델을 기반으로 한 비선형 제어기법들 (sliding mode 제어기법, backstepping 제어기법)이 요율 피드백제어에 적용되기도 하였다[6,7]. 기존 연구에서는, sliding mode 제어기법의 적용을 통하여 생성한 보상 요 모멘트 식은 여전히 시변 파라미터를 포함하고 있고, 시변 파라미터의 변동범위를 예측할 수 있다는 전제하에 큰 채터링 모멘트를 보상 요 모멘트 식에 추가함으로써 제어강인성을 확보하였다. 하지만 큰 채터링 모멘트에 의해 불필요한 차량의 횡 방향 진동이 발생한다.

본 연구에서는 채터링 모멘트를 최소화하면서 제어강인성을 확보하기 위하여 보상 요 모멘트 식에 보이는 시변 파라미터를 실시간으로 적응추정하는 알고리즘을 통합한 적응형 sliding mode 제어기법을 제안하였고, 실험용 1인승 전기자동차에 적용하여 제어성능을 검증하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 인 휠 모터 전기자동차 시스템모

\* Corresponding Author

Manuscript received April 18, 2016 / revised September 22, 2016 / accepted October 10, 2016

남강현, 엄상준: 영남대학교 기계공학부

(khnams@yu.ac.kr/power1823@naver.com)

\* 이 논문은 2016 제 31회 제어로봇시스템학회 학술대회에 초안이 발표되었음[10].

델팅에 관하여 소개하고, III장에서는 제안한 제어 알고리즘을 소개하고, IV장에서는 실험결과를 제시하고 마지막으로 V장에서는 본 연구의 결론과 앞으로의 계획을 제시한다.

II. 시스템 모델링

그림 1에 본 연구에서 사용된 차량모델을 도시하였다. 직접구동 인 휠 모터 전기자동차의 요 평면 운동을 도시하기 위하여 4바퀴 모델을 2바퀴 모델인 자전거모델로 단순화하여 나타내었다. 그림 1로부터 요 평면에 대한 운동방정식은 다음과 같이 표현된다[3].

$$\begin{aligned} m a_y &= m v_x (\beta + \gamma) = F_{y,f} \cos \delta_f + F_{y,r} \\ I_z \dot{\gamma} &= l_f F_{y,f} \cos \delta_f - l_r F_{y,r} + M_{yaw} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $m$ 은 차량의 질량,  $a_y$ 는 차량의 질량중심에서 횡 방향 가속도,  $v_x$ 는 차량의 질량중심에서의 종 방향속도,  $\beta$ 는 차량의 횡 방향 미끄럼 각,  $\gamma$ 는 요율,  $\delta_f$ 는 전륜 조향각,  $F_{y,f}$ 와  $F_{y,r}$ 는 전륜, 후륜에 작용하는 횡 방향 타이어힘,  $I_z$ 는 요 관성모멘트,  $l_f$ 와  $l_r$ 는 질량중심에서 전륜과 후륜 차축까지의 거리이고  $M_{yaw}$ 는 보상 요 모멘트이다. 보상 요 모멘트  $M_{yaw}$ 와 인 휠 모터가 발생시키는 구동력과의 관계식은 다음과 같다.

$$M_{yaw} = \frac{d}{2} (F_{x,fr} - F_{x,fl}) \cos \delta_f \quad (2)$$

여기서,  $d$ 는 전륜의 윤거,  $F_{x,fl}$ 와  $F_{x,fr}$ 는 전륜의 좌/우 바퀴에 발생하는 구동력이고, 구동력 관측기를 통하여 추정가능하다[4].

차량의 요 평면운동을 기술하기 위하여 복잡한 비선형 타이어모델을 사용하는 대신에 선형 타이어 모델을 사용하여 (1) 식을 정리할 수 있다. 전/후륜에 발생하는 미끄럼 각이 작을 경우에 횡 방향 타이어힘  $F_{y,f}$ 와  $F_{y,r}$ 는 각각 다음 식과 같이 표현될 수 있다[4,5].

$$\begin{aligned} F_{y,f} &= -2C_f \alpha_f = -2C_f \left( \beta + \frac{l_f \gamma}{v_x} - \delta_f \right) \\ F_{y,r} &= -2C_r \alpha_r = -2C_r \left( \beta - \frac{l_r \gamma}{v_x} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $C_f$ 와  $C_r$ 는 전/후륜 코너링 강성이고,  $\alpha_f$ 와  $\alpha_r$ 는 전/후륜 타이어의 미끄럼 각이다.

식 (1), (2), (3) 으로부터 요 평면에 대한 운동방정식은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$I_z \dot{\gamma} = -\frac{2l_f^2 C_f + 2l_r^2 C_r}{v_x} \gamma + 2\beta (l_r C_r - l_f C_f) + 2l_f C_f \delta_f + M_{yaw} \quad (4)$$

위 식은 다음과 같이 2개의 입력 ( $\delta_f, M_{yaw}$ )과 1개의 출력 ( $\gamma$ )을 갖는 시변방정식으로 표현될 수 있다.

$$I_z \dot{\gamma} = -B\gamma + 2l_f C_f \delta_f + M_{yaw} + \tilde{d} \quad (5)$$

여기서,  $B$ 는 요 댐핑계수 (코너링 강성과 차 속도의 함수로 표현 됨)로 정의되고,  $\tilde{d}(=2\beta(l_r C_r - l_f C_f))$ 는 등가외란

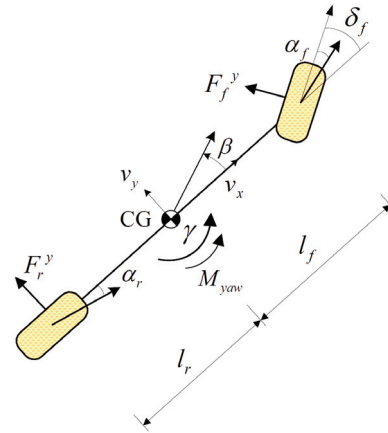


그림 1. 차량의 요 평면 모델 (자전거모델).  
Fig. 1. Vehicle yaw plane model (Bicycle model).

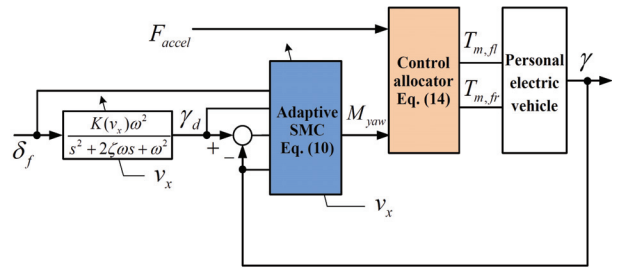


그림 2. 제안한 제어 알고리즘 구성도.  
Fig. 2. Configuration of a proposed control algorithm.

으로 정의되고, 다음의 조건을 만족한다고 가정한다.

$$\| \tilde{d} \| \leq E \quad (E: \text{등가외란의 최대 값}) \quad (6)$$

III. 제어 알고리즘 설계

1. 제어 알고리즘 구성

제어 알고리즘의 전체 구성도는 그림 2에 도시되어 있다. 운전자의 조향각 정보와 가속 페달력이 입력으로 들어가고, 조향각과 차량의 속도정보로부터 식 (7)과 같은 기준 요율을 생성한다.

$$\gamma_d = \frac{K(v_x)\omega^2}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2} \delta_f \quad (7)$$

여기서,  $\zeta$ 와  $\omega$ 는 기준 요율 필터 계수,  $\delta_f$ 는 운전자의 조향각 입력이고,  $K(v_x)$ 와  $k_{us}$ 는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} K(v_x) &= \frac{1}{1 + k_{us} v_x^2} \frac{v_x}{l_f + l_r}, \\ k_{us} &= \frac{m(l_r C_r - l_f C_f)}{2(l_f + l_r)^2 C_f C_r} \end{aligned}$$

기준 요율을 목표지령으로 하는 피드백제어는 적응형 sliding mode제어 알고리즘이 담당을 하고, 그림 2에 나타나는 바와 같이, 생성된 보상 요 모멘트는 control allocator를 통과하면서 전륜의 좌/우 인 휠 모터 제어를 위한 토크지령을 생성하게 된다.

2. 적응형 sliding mode 제어 알고리즘 설계

Sliding mode 제어기법은 불확실한 모델을 갖는 시스템이나 비선형 시스템을 안정화하는 목적으로 많이 사용되는 방법이다[9]. Sliding mode 제어기법은 빠른 제어응답성, 모델 불확실성에 대한 강인성과 구현에 있어서의 용이함 등의 이유로 차량제어시스템에 많이 적용되어 왔다[6,9]. 본 연구에서 제안하는 모션제어 알고리즘의 주된 목적은 차량의 실제 요율이 기준 요율을 빠르게 추종하는 것이다. 따라서, 슬라이딩 평면  $S(t)$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$S(t) = \gamma - \gamma_d \tag{8}$$

요율 추종오차를 최소화 하기위해 (9) 식의 도달조건을 만족하도록 제어입력 (즉, 보상 요 모멘트)을 설계하는 것이 중요하다[9].

$$\dot{S} = -KS - K_s \text{sgn}(S) \tag{9}$$

여기서,  $K$ 는 요율 추종오차의 0으로의 수렴속도를 결정하는 제어변수이고,  $K_s$ 는 식 (6)에 정의된 등가의외란의 크기에 따라서 결정되는 제어변수이다.

요율에 대한 시변방정식 (5), (8) 식과 (9) 식으로부터 다음과 같은 보상 요 모멘트 입력식을 유도할 수 있다.

$$M_{yaw} = I_z \dot{\gamma}_d + \frac{2\hat{B}}{v_x} \gamma - 2l_f \hat{C}_f \delta_f - KI_z S - K_s I_z \text{sgn}(S) \tag{10}$$

식 (5)에 보이는 요 댐핑계수  $B$ 와 전륜 코너링 강성  $C_f$ 는 식 (11)의 동역학 식으로부터 제어주기마다 그 값이 갱신된다.

$$\begin{aligned} \hat{B} &= -\frac{2\rho_1}{I_z v_x} \gamma S - \rho_1 \rho_2 \tilde{B} \\ \hat{C}_f &= -\frac{2l_f \sigma_1}{I_z} \delta_f S - \sigma_1 \sigma_2 \tilde{C}_f \end{aligned} \tag{11}$$

여기서,  $\rho_1, \rho_2, \sigma_1, \sigma_2$ 는 파라미터 갱신속도를 결정하는 상수이고,  $\tilde{B}$ 과  $\tilde{C}_f$ 는 파라미터 추종오차, 즉,  $\tilde{B} = \hat{B} - B, \tilde{C}_f = \hat{C}_f - C_f$ 이다.

식 (10)을 제어입력으로 갖는 폐 루프시스템의 안정성은 다음과 같이 증명될 수 있다. 양한정의 Lyapunov 함수를 식 (12)와 같이 정의하고, 양 변을 시간에 대하여 미분하고 (11) 식을 대입하여 정리하면 식 (13)과 같이 표현된다.

$$V(S,t) = \frac{1}{2} S^2 + \frac{1}{2\rho_1} \tilde{B}^2 + \frac{1}{2\sigma_1} \tilde{C}_f^2. \tag{12}$$

$$\begin{aligned} \dot{V}(S,t) &= \dot{S}S + \frac{1}{\rho_1} \tilde{B}\dot{\tilde{B}} + \frac{1}{\sigma_1} \tilde{C}_f \dot{\tilde{C}_f} \\ &\leq -KS^2 - K_s |S| - \rho_2 \tilde{B}^2 - \sigma_2 \tilde{C}_f^2 < 0 \end{aligned} \tag{13}$$

위 식으로부터 요율 추종오차  $S(t)$ 가 점근적으로 0으로 수렴하는 것을 알 수 있고, 폐 루프시스템의 안정성이 보장된다는 것을 확인할 수 있다.

식 (10)에 의해 생성된 보상 요 모멘트는 식 (14)에 의하여 전륜의 좌/우 인 휠 모터의 토크지령으로 분배되게 된다.

$$\begin{bmatrix} T_{m,fl} \\ T_{m,fr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{d \cos \delta_f}{2r} & \frac{d \cos \delta_f}{2r} \\ \frac{1}{r} & \frac{1}{r} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} M_{yaw} \\ F_{accel} \end{bmatrix} \tag{14}$$

여기서,  $r$ 은 타이어 반경이고,  $T_{m,fl}$ 과  $T_{m,fr}$  전륜 좌/우 인 휠 모터의 토크지령이다.

IV. 시뮬레이션 및 실험적 검증

1. 시뮬레이션 검증

CarSim S/W 이용한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제안한 적응형 sliding mode 제어기법의 성능을 검증하였다.

정속 주행 ( $v_x = 60\text{km/h}$ )에서 스텝조향 (휠의 조향각,  $\delta_f = 6^\circ$ )을 30초 동안 인가하는 모의시험을 실시하였고, 외

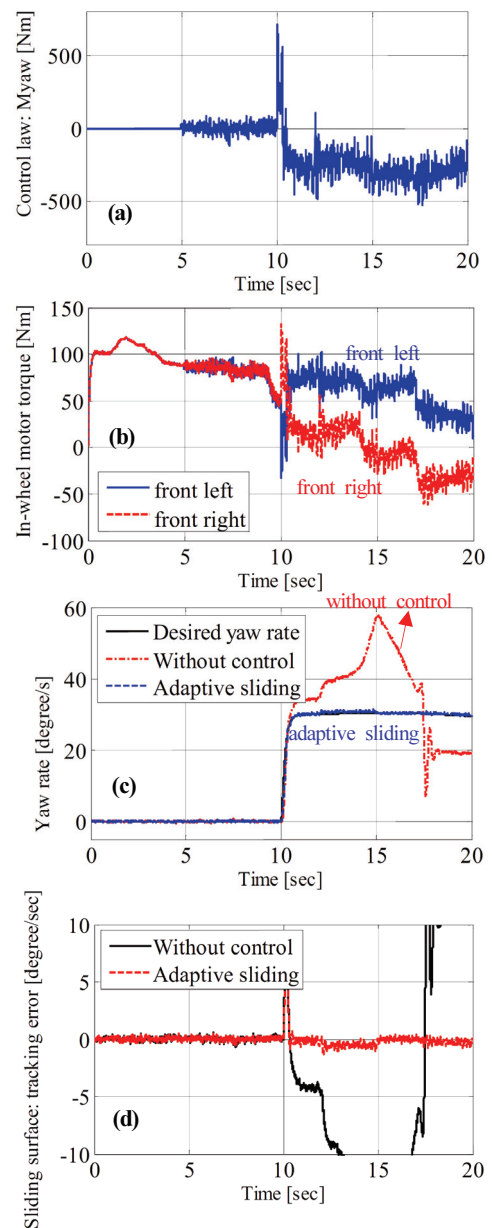


그림 3. 아스팔트 노면에서 스텝조향 시뮬레이션 결과.  
Fig. 3. Simulation results for step steering on asphalt.

표 1. 실험용 인 휠 모터 전기자동차 주요 제원.

Table 1. Specification of an experimental in-wheel-motor electric vehicle.

Parameters	Values
$m$	890 kg
$I_z$	620 kgm <sup>2</sup>
$l_f$	1.0 m
$l_r$	0.7 m
$d$	1.3 m
$C_f$	12500 N/rad
$C_r$	28500 N/rad
$r$	0.3 m

란에 대한 강인한 제어성능을 확인하기 위하여  $t=12$ sec에서 300Nm 크기의 외란 모멘트를 의도적으로 인가하였다. 그림 3은 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림 3(a)는 제안한 적응형 sliding mode 제어가 생성한 보상 요 모멘트 입력을 나타내고, (b)는 보상 요 모멘트가 분배 알고리즘을 통과하여 생성된 좌/우 인 휠 모터의 토크 값이다. 좌/우 모터의 독립적인 제어로 보상 요 모멘트를 정확하게 생성하는 것을 확인할 수 있다. (c)는 외란모멘트가 인가된 상황에서 적응형 sliding mode 제어가 적용되었을 경우와 그렇지 못한 경우의 결과를 보여준다. 제어가 동작하지 않았을 경우에는 외란이 인가되는 시점에서 차량이 비 정상적인 주행 즉, spin-out 현상을 보이면서 차량이 운전자가 원하는 주행궤적을 완전히 벗어나게 된다. 반면, 제안한 제어 알고리즘이 적용된 경우에는 외란모멘트가 작용함에도 불구하고, 기준 요율을 잘 추종해 나가는 것을 확인할 수 있다. 그림 3(c)와 (d) 결과를 통하여 제안한 적응형 sliding mode 제어 알고리즘의 외란에 대한 강인성과 목표 값 추종 제어 능력을 동시에 확인할 수 있다.

시뮬레이션에 사용된 차량의 주요제원은 실험용 인 휠 모터 전기자동차의 제원과 동일하고 표 1에 자세히 기술되어 있다.

2. 실험적 검증

본 연구에서 제안한 적응형 sliding mode 제어 알고리즘을 도쿄대 Hori/Fujimoto 연구그룹에서 개발한 실험용 인 휠 모터 전기자동차 (그림 4, 5)에 적용하여 제어성능을 검증하였다. 실차시험은 정속 주행 ( $v_x = 20$  km/h)에서 스텝조향을 인가하고, 제어가 동작스위치를 작동함으로써 제안한 알고리즘이 적용되는 원리로 진행되었다. 그림 6은 실차주행시험 결과이다. 결과 (a)에 보이는 보상 요 모멘트는 전륜 좌/우 모터의 입력으로 분배되어, 차량의 실제 요율이 기준 요율을 추종하는데 사용된다. 그림 6(c)에 보이는 바와 같이 제어가 동작스위치가 ON 일 때, 차량의 실제 요율이 기준 요율과 잘 매칭되는 결과를 확인할 수 있다. 이는 제안한 적응형 sliding mode 제어가 정상적으로 동작함을 의미하고, 운전자의 의도대로 차량이 움직인다고 할 수 있다. 또한, 제어구간에서 요율의 퍼센트 추종오차는 3% 이내에서 존재함을 확인할 수 있다. 기존 능동 제동력제어를 통한 요율 퍼센트 추종오차가 대략 5%~7% 사이에서 존재



그림 4. 실험용 인 휠 모터 전기자동차[4].

Fig. 4. Experimental in-wheel-motor electric vehicle [4].

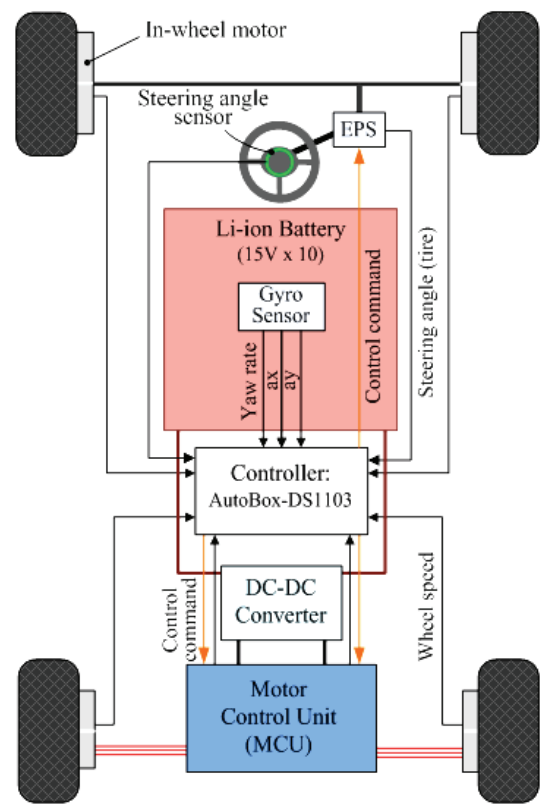


그림 5. 실험용 전기자동차 제어시스템 구성도[4].

Fig. 5. Configuration of the control system of an experimental electric vehicle [4].

한다는 점을 감안할 때, 직접구동 인 휠 모터 전기자동차의 모션제어 관점에서의 장점은 요율 추종제어결과를 통하여 분명히 입증된다. 그림 6(c)의 adaptive sliding이라고 표시된 실험결과를 제어 알고리즘이 동작할 때와 동작하지 않을 때 구분하여 분석하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 제어가 되지 않을 경우 (즉, control off 영역)에는 노면으로부터의 일정하지 않은 외란이 차량으로 전달되고, 이는 측정된 실제 요율에 그대로 반영되어 불규칙한 진동현상으로 나타난다.

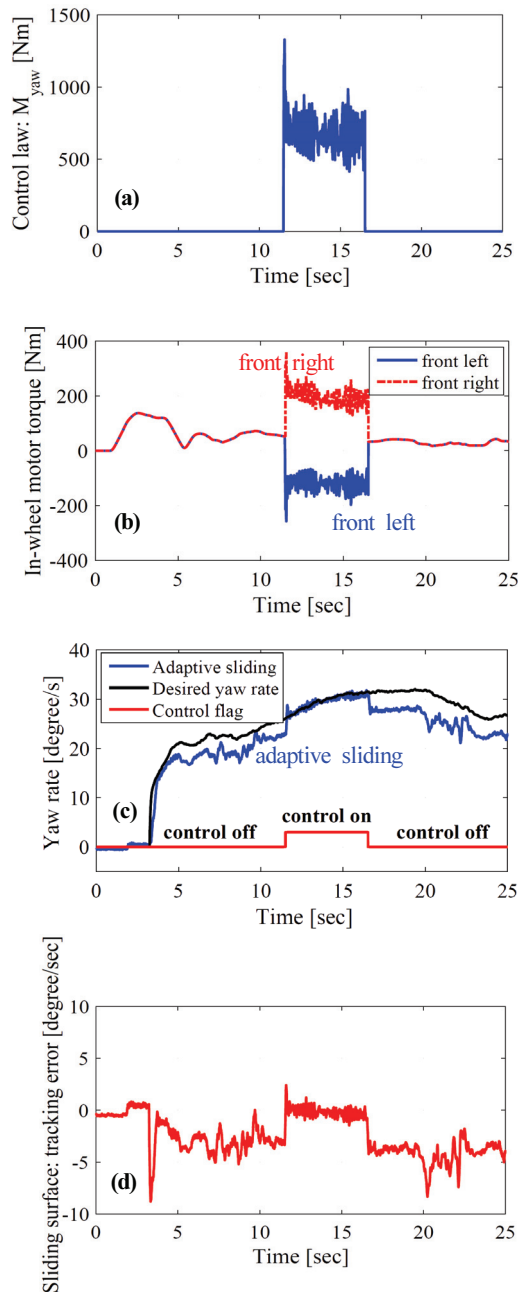


그림 6. 아스팔트 노면에서 스텝조향 실험결과.

Fig. 6. Experimental results for step steering on asphalt.

- 제어가 되고 있을 경우 (즉, control on 영역)에는 노면으로부터 외란이 발생하더라도 제안한 제어 알고리즘에 의해서 정상적으로 억제되어서 측정된 실제 요율 값에는 불규칙한 진동성분이 존재하지 않게 된다. 이를 통하여 본 논문에서 제안한 적응형 sliding mode 제어 알고리즘의 외란에 대한 강인성을 확인할 수 있다.

## V. 결론

본 논문에서는 감속기가 없는 직접구동 인 휠 모터 전기자동차의 코너링 안정성 향상을 위한 제어방법을 제안하였다. 적응형 sliding mode 제어기법을 적용함으로써 불필요한 체터링 모멘트성분을 최소화하고, 동시에 기준 요율 추종성

능을 확보하였다. 또한, 직접구동 인 휠 모터의 빠른 응답 특성을 최대한 활용하여 기준 요율 추종오차를 최소화할 수 있었다. CarSim S/W를 활용한 컴퓨터 시뮬레이션과 실차시험을 동시에 진행함으로써 제안한 제어 알고리즘의 외란에의 강인함과 목표 값 추종성능을 확인할 수 있었다. 향후 본 논문에서 제안한 적응형 sliding mode 제어기는 독립구동 퍼스널 모빌리티 시스템에도 확대 적용할 예정이며, 구동력 직접피드백제어 방법을 추가로 적용하여 제어성능을 개선하고자 한다.

## REFERENCES

- [1] Y. Hori, "Future vehicle driven by electricity and control-research on four-wheel-motored "UOT Electric March II," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 51, no. 5, pp. 654-962, Oct. 2004.
- [2] S. Sakai, H. Sado, and Y. Hori, "Motion control in an electric vehicle with four independently driven in-wheel motors," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 4, no. 1, pp. 9-16, Mar. 1999.
- [3] G. Cong, L. Mostefai, M. Denai, and Y. Hori, "Direct yaw-moment control of an in-wheel-motored electric vehicle based on body slip angle fuzzy observer," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 5, pp. 1411-1419, May 2009.
- [4] K. Nam, H. Fujimoto, and Y. Hori, "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*, vol. 61, no. 5, pp. 1972-1985, Jun. 2012.
- [5] H. Fujimoto, A. Tsumasaka, and T. Noguchi, "Direct yaw-moment control of electric vehicle based on cornering stiffness estimation," *Proc. of the 31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, Raleigh, NC, USA*, Nov. 2005.
- [6] M. Canale, L. Fagiano, A. Ferrara, and C. Vecchio, "Vehicle yaw control via second-order sliding mode control," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 11, pp. 3908-3916, Nov. 2008.
- [7] H. Zhou and Z. Liu, "Vehicle yaw stability-control system design based on sliding mode and backstepping control approach," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 7, pp. 3674-3678, Sep. 2010.
- [8] K. Kim, S. Hwang, and H. Kim, "Vehicle stability enhancement of four-wheel-drive hybrid electric vehicle using rear motor control," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 57, no. 2, pp. 727-735, Mar. 2008.
- [9] J. J. E. Slotine and W. Li, *Applied Nonlinear Control* Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1991.
- [10] K. Nam, "Cornering stability control of an in-wheel-motor-driven electric vehicle," *Prof. of the 31st ICROS*

*Annual Conference (in Korean)*, Seoul, pp. 267-268, 2016.



### 남강현

2007년 경북대학교 기계공학 학사.  
2009년 KAIST 기계공학 석사. 2012년  
도쿄대 전기전자공학 박사. 2012년~  
2015년 삼성전자 생산기술연구소 책임  
연구원. 2015년~현재 영남대학교 기계  
공학부 조교수. 관심분야는 차량동역

학 및 제어, 전기자동차 모션제어, 모션제어응용.



### 엄상준

2015년 영남대학교 기계공학부 졸업.  
2015년~현재 영남대학교 석사과정. 관  
심분야는 Roll-to-roll 시스템 장력제어,  
모션제어응용.