

〈응용 논문〉

## 타이어 힘 정보를 이용한 차량 파라미터 추정에 대한 연구

이 종 영<sup>1)</sup> · 유 승 한<sup>1,2)</sup> · 조 재 성<sup>3)</sup> · 성 대 운<sup>3)</sup> · 조 완 기<sup>\*2)</sup>한국기술교육대학교 기계공학과 미래융합공학전공<sup>1)</sup> · 한국기술교육대학교 기계공학부<sup>2)</sup> · 현대자동차<sup>3)</sup>

## A Study on Vehicle Parameter Estimation Using Tire Force Information

Jongyoung Lee<sup>1)</sup> · Seung-Han You<sup>1,2)</sup> · Jae Sung Jo<sup>3)</sup> · Dae-Un Sung<sup>3)</sup> · Wanki Cho<sup>\*2)</sup><sup>1)</sup>Future Convergence Engineering, Korea University of Technology and Education, Chungnam 31253, Korea<sup>2)</sup>School of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education, Chungnam 31253, Korea<sup>3)</sup>Hyundai Motor Group, 150 Hyundaiyeonguso-ro, Namyang-eup, Hwaseong-si, Gyeonggi 18280, Korea

(Received 6 March 2025 / Revised 31 March 2025 / Accepted 1 April 2025)

**Abstract :** Tire force information is an important parameter for improving vehicle driving stability, and various previous studies have focused on estimating tire forces for this purpose. Recently, the development of sensor-equipped tires, commonly referred to as smart tires, has enabled the collection of tire-related data, such as tire forces and wear depth. This study proposes an algorithm to estimate vehicle mass, center of gravity, and yaw moment of inertia using the longitudinal, lateral, and vertical force information of each tire measured by smart tires. The proposed algorithm estimates vehicle mass by using the vertical force data obtained from the smart tire sensor and road slope/bank angles estimated through the IMU sensor, while the vehicle is in a stationary state. The center of gravity is determined by using the estimated mass, IMU sensor data, and vertical tire force. Finally, the yaw moment of inertia is estimated by applying the Adaptation Law method, using the estimated mass, center of gravity, and the lateral tire force while the vehicle undergoes lateral motion. To verify that using smart tires can improve vehicle lateral stability, the accuracy of the bicycle model for a vehicle with extra load was evaluated. The development and validation of the algorithm were conducted using Carsim and MATLAB/Simulink. The results confirmed that using smart tires improves the accuracy of the bicycle model.

**Key words :** Smart tire(스마트 타이어), Parameter estimation(파라미터 추정), Mass estimation(질량 추정), C.G estimation(무게 중심 추정), Yaw moment of inertia estimation(요 관성 모멘트 추정), Lateral stability(횡 안정성)

## Nomenclature

|          |  |                 |  |
|----------|--|-----------------|--|
| $F_x$    | : longitudinal tire force, N             | $a_x$           | : longitudinal vehicle acceleration, $m/s^2$ |
| $F_y$    | : lateral tire force, N                  | $a_y$           | : lateral vehicle acceleration, $m/s^2$      |
| $F_z$    | : vertical tire force, N                 | $a_z$           | : vertical vehicle acceleration, $m/s^2$     |
| $m$      | : vehicle mass, kg                       | $C_f$           | : cornering stiffness at front tire, N/rad   |
| $m_s$    | : sprung mass, kg                        | $C_r$           | : cornering stiffness at rear tire, N/rad    |
| $m_{us}$ | : unsprung mass, kg                      | $\theta_{road}$ | : road slope angle, deg                      |
| $I_{zz}$ | : yaw moment of inertia, $kg \cdot m^2$  | $\phi_{road}$   | : road bank angle, deg                       |
| $l$      | : wheel base, m                          | $\beta$         | : side slip angle in vehicle body, rad       |
| $l_f$    | : distance from the C.G to front axle, m | $\gamma$        | : yaw rate in vehicle body, rad/s            |
| $l_r$    | : distance from the C.G to rear axle, m  | $\delta_f$      | : front wheel steering angle input, rad      |
|          |  | $V_x$           | : longitudinal vehicle speed, m/s            |

\*Corresponding author, E-mail: wkcho@koreatech.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

### 1. 서론

차량의 질량, 무게 중심, 요 관성 모멘트는 탑승 인원의 수, 화물의 무게와 적재 위치 등 주행 조건과 환경에 따라 크게 변하며, 이는 주행 안정성과 제어 성능에 직접적인 영향을 미친다. 특히 횡 거동 제어에서는 Bicycle model을 활용하여 목표 요 레이트를 설정하고 조향각 및 요 모멘트를 결정하는 방식이 사용된다.<sup>1-3)</sup> 이러한 제어 방법이 효과적으로 작동하려면 차량의 질량과 무게 중심, 요 관성 모멘트를 정확히 파악하는 것이 중요하다. 이를 위해 추정된 타이어 힘을 기반으로 차량의 파라미터를 추정하는 다양한 연구가 수행되었다. 종 방향 힘과 노면 중 경사 추정을 통해 RLS(Recursive Least Square) 알고리즘을 이용하여 질량을 실시간으로 추정하는 연구가 진행되었으며,<sup>4)</sup> 타이어 수직 방향 힘 추정값을 기반으로 이중 UKF(Unscented Kalman Filter)을 활용하여 질량과 요 관성 모멘트, 무게 중심을 동시에 추정하는 연구가 이루어졌다.<sup>5)</sup> 또한 타이어 수직 방향 힘 추정값이나 타이어 종 · 횡 방향 힘을 추정하여 노면 마찰계수를 추정하는 연구나,<sup>6,7)</sup> 차량 종 방향 동역학 모델을 기반으로 Adaptation law나 RLS를 적용하여 차량의 질량을 추정하는 연구도 제안되었다.<sup>8,9)</sup>

그러나 기존의 연구들은 차량 내부 센서를 활용하여 타이어 힘을 간접적으로 추정하는 방식에 의존해왔다. 이러한 방식은 노면의 상태나 차량의 하중 변화에 따라 추정된 힘과 실제 타이어 힘 간에 차이가 발생할 수 있으며, 이는 차량 파라미터 추정의 정확도를 저하시킬 수 있다. 따라서 타이어에서 발생하는 힘을 직접 측정할 수 있다면, 차량의 파라미터 추정 정확도가 향상될 수 있다.

이를 실현할 수 있는 기술이 바로 스마트 타이어이다. 스마트 타이어는 주행 중 타이어에 가해지는 힘과 변형을 직접 측정할 수 있는 기술로, 타이어에 센서를 부착함으로써 다양한 동적 데이터를 실시간으로 제공한다. 이를 위해 스트레인 게이지, SAW(Surface Acoustic Wave) 센서, 그리고 가속도 센서와 공기압 센서를 활용한 스마트 타이어 기술이 개발되었다.<sup>10-12)</sup> 또한 스마트 타이어에서 취득한 정보를 바탕으로 차량 무게 중심 위치를 정확히 추정할 수 있음을 보여주었다.<sup>13)</sup> 이러한 연구들은 타이어에 센서를 장착함으로써 기존의 차량 센서 기반 간접 추정 방식의 한계를 극복하고 이를 활용하여 차량 파라미터 추정 정확도를 향상시킬 수 있음을 보여주었다.

본 연구에서는 스마트 타이어에서 종 · 횡 · 수직 방향 타이어 힘 정보를 취득할 수 있다고 가정하고, 이를 활용하여 차량의 파라미터를 추정하는 방법을 제안한다. 먼저 정차 상태에서 가속도계를 활용하여 노면의 경사각

을 추정한 후, 추정한 노면 경사각과 타이어 수직 방향 힘 정보를 활용하여 질량을 추정한다. 이후 추정한 질량과 각 타이어의 수직 방향 힘, 가속도계 정보를 이용하여 무게 중심을 추정한다. 주행 상황에서는 무게 중심 추정값과 타이어 횡 방향 힘을 기반으로 요 관성 모멘트를 추정한다. 마지막으로, 타이어 힘 정보를 이용하여 추정한 파라미터들을 Dynamic 차량 모델인 Bicycle model에 적용하였을 때, 모델 정확도가 향상됨을 확인한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 노면의 경사각과 차량의 질량, 무게 중심, 요 관성 모멘트의 추정 방법을 제시하고 시뮬레이션을 통해 추정 성능을 검증한다. 3장에서는 추정된 파라미터를 활용하여 Bicycle model의 정확도가 개선됨을 검증한다. 마지막으로 4장에서 연구의 결론과 향후 연구 방향을 제시한다.

### 2. 추정 로직 및 시뮬레이션 환경

본 연구에서는 스마트 타이어와 6-DOF 센서를 이용하여 차량의 질량과 무게 중심, 요 관성 모멘트를 추정한다. 스마트 타이어에서는 각 타이어에서 발생하는 종 방향 힘( $F_{x,ij}$ ), 횡 방향 힘( $F_{y,ij}$ ), 수직 방향 힘( $F_{z,ij}$ ) 정보를 취득하며, 6-DOF 센서에서는 종 · 횡 · 수직 방향 가속도( $a_x, a_y, a_z$ )와 롤, 피치, 요 레이트( $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ ) 정보를 취득할 수 있다고 가정한다.

Fig. 1은 스마트 타이어를 활용한 차량 파라미터 추정 로직의 기능 아키텍처를 나타낸다. 본 추정 로직은 노면 경사각 추정 모듈, 질량 추정 모듈, 무게 중심 추정 모듈, 요 관성 모멘트 추정 모듈로 구성된다.

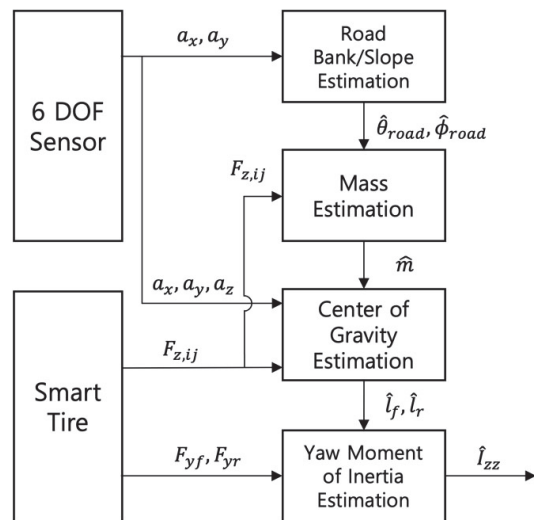


Fig. 1 Architecture of vehicle parameter estimation logic

노면 경사각과 차량의 질량, 무게 중심은 정차 상태에서만 추정하도록 설계하였다. 이는 차량의 질량과 무게 중심은 주로 승객 탑승이나 화물 적재로 인해 정차 중에 변화하며, 주행 중에는 거의 변동이 없기 때문이다. 요 관성 모멘트 또한 주행 중에 거의 변동이 없는 파라미터 이나, 요 모멘트 방정식을 기반으로 요 관성 모멘트를 추정하기 때문에 요 모멘트가 발생하는 주행 상황에서 추정이 이루어지도록 한다.

본 연구는 Carsim과 MATLAB/Simulink를 이용하여 로직을 검증하였다. 차량은 Carsim에서 제공하는 D-Class Sedan을 사용하였으며, 해당 차량의 제원은 Table 1에 나타내었다. 무게 변동에 따른 파라미터 추정 성능을 검증하기 위해 차량의 트렁크에 추가 하중을 싣는 시나리오를 구성하였다. 200 kg의 추가 하중을 전륜 차축으로부터 3 m 떨어진 위치에 추가하였으며 하중 추가 위치는 Fig. 2에 나타내었다.

Table 1 Vehicle specification

| Parameter                       | Value  | Unit                |
|---------------------------------|--------|---------------------|
| Mass                            | 1572.3 | kg                  |
| Moment inertia about z-axis     | 2315.3 | kg · m <sup>2</sup> |
| Distance from C.G to front axle | 1.110  | m                   |
| Distance from C.G to rear axle  | 1.756  | m                   |
| C.G height                      | 0.520  | m                   |
| Front & rear track width        | 1.550  | m                   |

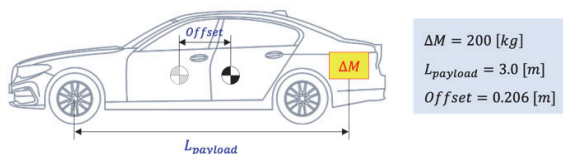


Fig. 2 Schematic for payload

### 2.1 Road Slope/Bank Estimation

본 연구에서는 차량이 정차한 상태에서 타이어의 수직 방향 힘을 이용하여 차량의 질량을 추정한다. 그러나 노면에 경사가 존재하는 경우 질량에 의해 발생하는 타



Fig. 3 Load distribution due to slope and bank angle

이어 수직 방향 힘이 경사각에 따라 분산되어 정확한 질량 추정이 어렵다. 따라서 질량을 정확히 추정하기 위해 선 노면의 경사각을 추정할 필요가 있다.

정차한 상태에서는 가속도 센서가 노면 경사로 인해 발생하는 가속도 성분만을 측정하게 되므로, 이를 활용하면 노면의 경사각을 추정할 수 있다. 본 연구에서는 질량 추정을 위한 필수 과정으로서 노면 경사각을 보정하고자 하며, 이를 위해 차량의 종, 횡, 수직 방향에 대한 Kinematic 식을 이용하였다.

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_x \\ \dot{v}_y \\ \dot{v}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_z & -\omega_y \\ -\omega_z & 0 & \omega_x \\ \omega_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$-g \begin{bmatrix} -\sin\theta \\ \cos\theta\sin\phi \\ \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix}$$

이때 차량이 정차 상태에서는 속도와 속도 미분치를 무시할 수 있으므로, 정차 상태에서 식 (1)은 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = g \begin{bmatrix} -\sin\theta \\ \cos\theta\sin\phi \\ \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 (2)는 차량이 정차 상태에서 가속도 센서를 통해 측정되는 중력 가속도 성분을 나타낸다. 식 (2)를 노면의 종 경사( $\theta_{road}$ )와 횡 경사( $\phi_{road}$ )에 대해 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

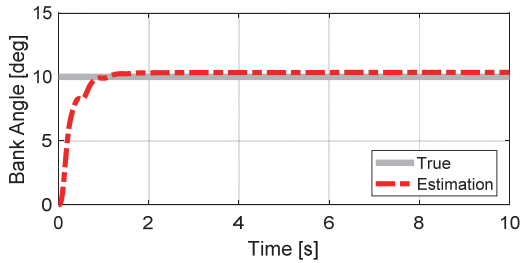
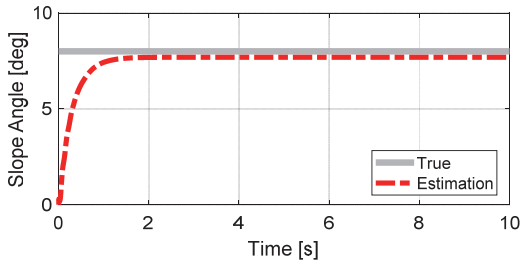
$$\hat{\theta}_{road} = \sin^{-1} \left( -\frac{a_x}{g} \right) \quad (3)$$

$$\hat{\phi}_{road} = \sin^{-1} \left( \frac{a_y}{g \cos \hat{\theta}_{road}} \right) \quad (4)$$

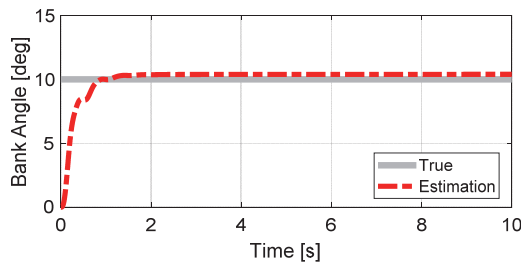
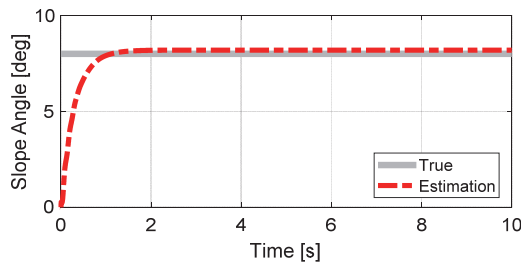
식 (3)과 (4)를 검증하기 위해 종 경사(8 deg)와 횡 경사(10 deg)가 복합적으로 존재하는 노면 환경을 구성하였으며, Table 2와 Fig. 4에 노면 경사 추정 결과를 나타내었다. 이를 통해 종 · 횡 경사가 동시에 존재하는 노면에서도 정확히 노면 경사각을 추정하는 모습을 확인할 수 있다. Fig. 4에서 초반에 과도 상태가 발생하는 이유는 가속도 센서의 초기 노이즈에 의한 추정 오차를 줄이기 위해 초기값이 0인 Low pass filter를 적용하였기 때문이다.

Table 2 Road slope and bank angle estimation results

| Scenario    | Parameter | True (deg) | Estimation (deg) | Error (%) |
|-------------|-----------|------------|------------------|-----------|
| w/o payload | Slope     | 8          | 7.70             | 3.75      |
|             | Bank      | 10         | 10.35            | 3.38      |
| w/ payload  | Slope     | 8          | 8.20             | 2.50      |
|             | Bank      | 10         | 10.40            | 4.00      |



(a) Road slope & bank estimation without payload



(b) Road slope & bank estimation with 200 kg payload

Fig. 4 Road slope & bank estimation results

2.2 Mass Estimation

차량의 질량은 2.1 절에서 추정된 노면의 경사각과 타이어 수직 방향 힘을 이용하여 추정한다. 질량 역시 정차 상황에서 추정하므로 타이어에 가해지는 수직 방향 힘

은 중력 가속도와 노면 경사에 의한 성분만 남게 된다. 이를 고려한 수직 방향 힘 관계식은 다음과 같다.

$$\sum_{ij=FL...RR} F_{z,ij} = mg \cos \hat{\theta}_{road} \cos \hat{\phi}_{road} \tag{5}$$

식 (5)를 변형하면 차량의 질량은 다음과 같이 계산할 수 있다.

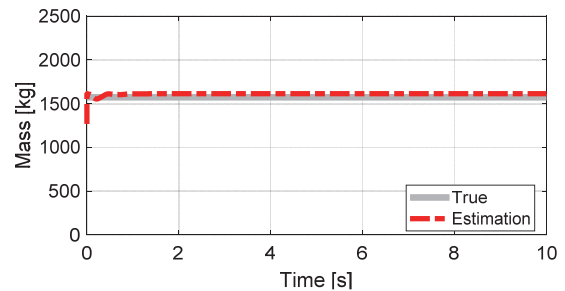
$$\hat{m} = \frac{\sum_{ij=FL...RR} F_{z,ij}}{g \cos \hat{\theta}_{road} \cos \hat{\phi}_{road}} \tag{6}$$

질량 추정 로직을 검증하기 위해 중 경사(10 deg)와 횡 경사가(8 deg) 동시에 있는 노면을 구성하였다. 추가 질량이 없는 상태와 Fig. 2에 나타난 위치에 하중을 추가한 상태 두 가지 경우를 비교하여 변화된 차량의 질량을 정확히 추정할 수 있는지 검증하였다.

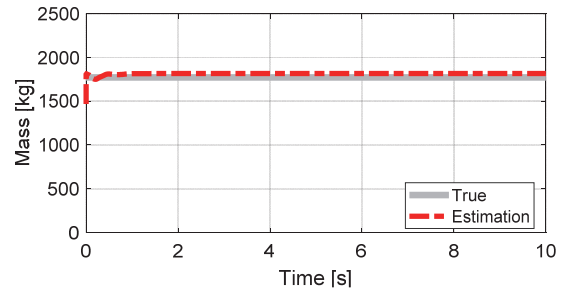
Table 3과 Fig. 5는 정차 상황에서 추가 하중 유무에 따른 질량 추정 결과이다. 두 시나리오 모두 변동된 질량을 잘 추정하는 것을 확인할 수 있다.

Table 3 Mass estimation results

| Scenario    | True (kg) | Estimation (kg) | Error (%) |
|-------------|-----------|-----------------|-----------|
| w/o payload | 1572.3    | 1614.2          | 2.60      |
| w/ payload  | 1772.3    | 1816.8          | 2.45      |



(a) Mass estimation without payload



(b) Mass estimation with 200 kg payload

Fig. 5 Mass estimation results

### 2.3 Center of Gravity(C.G) Estimation

기존 연구에서는 차량의 질량, 무게 중심 위치 및 가속도 정보를 활용하여 타이어 수직 방향 힘을 추정하는 방법이 제안되었다.<sup>14-16)</sup> 해당 연구들은 차량 전체 질량을 하나로 고려하여 타이어 수직 방향 힘을 계산하는 방식을 사용하였으나, 이 경우 Sprung mass가 변할 때 타이어 수직 방향 힘 변화를 정확히 반영하기 어렵다는 문제점이 있다. 본 연구에서는 이를 보완하여 전·후륜의 unsprung mass( $m_{usf}, m_{usr}$ )와 sprung mass( $m_s$ )를 구분하여 타이어 수직 방향 힘을 추정하는 관계식을 아래와 같이 구성하였다.

$$\begin{aligned} F_{zFL} &= \frac{1}{2} a_z \left( \frac{l_r}{l} m_s + m_{usf} \right) - \frac{1}{2} \hat{m} \frac{h}{l} a_x - \hat{m} \frac{l_r h}{T_{r,l}} a_y \\ F_{zFR} &= \frac{1}{2} a_z \left( \frac{l_r}{l} m_s + m_{usf} \right) - \frac{1}{2} \hat{m} \frac{h}{l} a_x + \hat{m} \frac{l_r h}{T_{r,l}} a_y \\ F_{zRL} &= \frac{1}{2} a_z \left( \frac{l_f}{l} m_s + m_{usr} \right) + \frac{1}{2} \hat{m} \frac{h}{l} a_x - \hat{m} \frac{l_f h}{T_{r,l}} a_y \\ F_{zRR} &= \frac{1}{2} a_z \left( \frac{l_f}{l} m_s + m_{usr} \right) + \frac{1}{2} \hat{m} \frac{h}{l} a_x + \hat{m} \frac{l_f h}{T_{r,l}} a_y \end{aligned} \quad (7)$$

$l$  은 차량의 휠 베이스 길이,  $h$ 는 지면으로부터 무게 중심 높이이며  $T_f$ 와  $T_r$ 은 윤거 전과 윤거 후이다. 이 때 횡 방향 무게 중심의 위치는 중앙에 있다고 가정한다.  $\hat{m}$  은 2.2절에서 추정된 차량의 총 질량이며  $\hat{m}$ 에 대한 관계식은 식 (8)과 같다. 이 때, 전·후륜의 unsprung mass의 질량은 고정값이며 차량 기본 제원 값을 사용한다.

$$\hat{m} = m_s + m_{usf} + m_{usr} \quad (8)$$

스마트 타이어를 이용하여 타이어 수직 방향 힘에 대한 정보를 취득할 경우, 식 (7)을 활용하여 무게 중심을 추정할 수 있다. 식 (7)을 무게 중심  $l_f$ 에 대해 정리하면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} l_{fFL} &= l - \frac{F_{zFL} + \frac{1}{2} \hat{m} \frac{h}{l} a_x - \frac{1}{2} m_{usf} a_z}{\frac{m_s a_z - \hat{m} \frac{h}{l} a_y}{2l}} \\ l_{fFR} &= l - \frac{F_{zFR} + \frac{1}{2} \hat{m} \frac{h}{l} a_x - \frac{1}{2} m_{usf} a_z}{\frac{m_s a_z + \hat{m} \frac{h}{l} a_y}{2l}} \\ l_{fRL} &= \frac{F_{zRL} - \frac{1}{2} \hat{m} \frac{h}{l} a_x - \frac{1}{2} m_{usr} a_z}{\frac{m_s a_z - \hat{m} \frac{h}{l} a_y}{2l}} \\ l_{fRR} &= \frac{F_{zRL} - \frac{1}{2} \hat{m} \frac{h}{l} a_x - \frac{1}{2} m_{usr} a_z}{\frac{m_s a_z + \hat{m} \frac{h}{l} a_y}{2l}} \end{aligned} \quad (9)$$

식 (9)에서는 4개의 무게 중심 좌표 ( $l_{fFL}, l_{fFR}, l_{fRL}, l_{fRR}$ )가 계산된다. 이는 각 타이어의 수직 방향 힘을 기반으로 개별적으로 추정된 값이지만, 모두 동일한 차량의 무게 중심을 추정하는 과정에서 얻어진 값들이다. 따라서, 최종적인

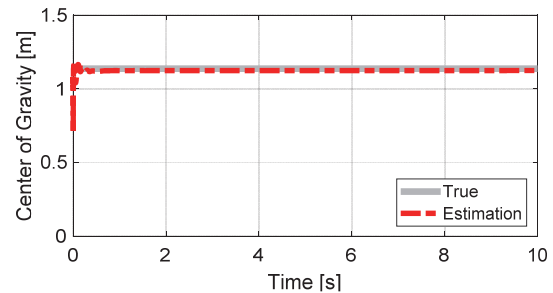
무게 중심 값은 이 4개의 추정값을 평균하여 계산한다.

무게 중심 추정 로직은 질량 추정과 동일한 환경에서 시뮬레이션을 진행하였다. 종 경사(10 deg)와 횡 경사(8 deg)가 동시에 있는 노면을 구성한 후 차량에 200 kg의 하중을 추가하여 무게 중심의 변화에 따른 추정 결과를 확인하였다.

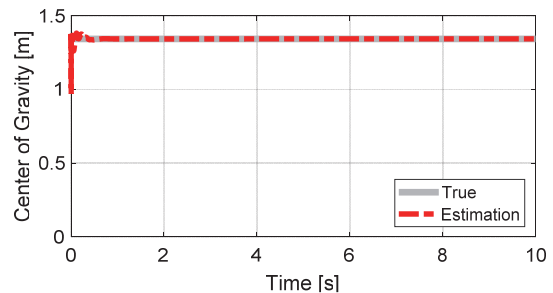
Table 4와 Fig. 6은 종 경사와 횡 경사가 존재하는 노면에서의 무게 중심 추정 결과이다. 노면 경사각이 존재함에도 노면 경사각을 보상함으로써 정확한 무게 중심 추정이 이루어졌음을 확인할 수 있다.

Table 4 Center of Gravity (C.G) estimation results

| Scenario    | True (m) | Estimation (m) | Error (%) |
|-------------|----------|----------------|-----------|
| w/o payload | 1.047    | 1.021          | 2.48      |
| w/ payload  | 1.279    | 1.276          | 0.23      |



(a) Center of gravity estimation without payload



(b) Center of gravity estimation with 200 kg payload

Fig. 6 Center of gravity(C.G) estimation results

### 2.4 $I_{zz}$ Estimation

차량의 요 관성 모멘트는 요 모멘트 방정식인 식 (10)을 기반으로 Adaptation law를 이용하여 추정한다. 요 관성 모멘트는 횡 가속도가 0.3 g 이내인 일반적인 주행 상황에서만(ESC와 같은 제/구동 제어가 작동되지 않는 상황) 추정할 것이기 때문에 타이어 횡 방향 힘만을 고려한 요 모멘트 방정식을 사용하였다. 요 모멘트 방정식에서 사용되는 무게 중심  $l_f$ 와  $l_r$ 은 2.3절에서 추정된 값을 사

용하며 전·후륜 타이어의 횡 방향 힘  $F_{yf}$ 와  $F_{yr}$ 은 스마트 타이어를 이용하여 측정된 값이다.

$$I_{zz}\dot{\gamma} = \hat{l}_f F_{yf} - \hat{l}_r F_{yr} \quad (10)$$

Adaptation Law를 적용하기 위해 식 (11)와 같이 Lyapunov 함수를 정의하였다. Lyapunov 함수  $V$ 는 시스템의 안정성을 평가하는 기준으로, 출력 오차  $\varepsilon = I_{zz} - \hat{I}_{zz}$ 를 이용하여 설정하였다.

$$V = \frac{1}{2} \varepsilon^2 = \frac{1}{2} (I_{zz} - \hat{I}_{zz})^2 \quad (11)$$

Lyapunov 함수의 안정성을 보장하기 위해선 시간 변화율  $\dot{V}$ 이 항상 음수여야 한다. 이를 만족하는 Lyapunov 조건을 아래와 같이 설정하였다.

$$\dot{V} = -K\dot{\gamma}^2 (I_{zz} - \hat{I}_{zz})^2, \quad K > 0 \quad (12)$$

위 조건을 만족하면 튜닝 변수  $K$ 가 양수일 때, 시간이 지남에 따라 Lyapunov 함수  $V$ 가 0으로 수렴하므로 시스템의 안정성이 보장된다.

식 (11)의 시간 변화율과 Lyapunov 함수 조건인 식 (12)의 관계를 이용하면  $I_{zz}$ 를 추정하는 식을 아래와 같이 도출할 수 있다.

$$\hat{I}_{zz} = K\dot{\gamma}^2 (I_{zz} - \hat{I}_{zz}) \quad (13)$$

식 (13)의  $I_{zz}$ 는 직접 취득할 수 없는 값이므로 식 (10)을 이용하면 아래와 같은 수식으로 정리할 수 있으며, 해당 수식을 시간에 대해 적분함으로써  $I_{zz}$ 를 추정할 수 있다.

$$\hat{I}_{zz} = K\dot{\gamma} \left( (\hat{l}_f F_{yf} - \hat{l}_r F_{yr}) - \hat{I}_{zz}\dot{\gamma} \right) \quad (14)$$

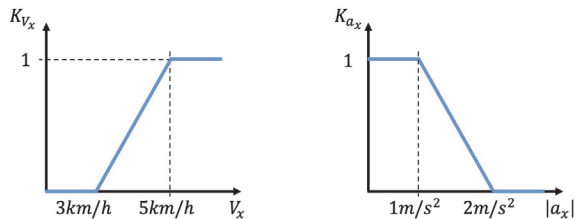


Fig. 7 Tuning map K

정확하고 안정적인 추정을 위해 튜닝 변수  $K$ 를 주행 상황에 따라 변화도록 종 속도와 종 가속도에 대한 튜닝 맵을 Fig. 7과 같이 구성하였다. 튜닝 변수  $K$ 는 각 튜닝 변수의 곱을 이용하여 아래와 같이 계산된다.

$$K = K_{const} \cdot K_{V_x} \cdot K_{a_x} \quad (15)$$

$K_{const}$ 는 수렴 속도를 조절하는 기본 튜닝 변수로, 15로 설정하였다.  $K_{V_x}$ 는 종 속도대 튜닝 변수로, 주행 상황에서만 추정이 이루어지도록 설정하는 튜닝 변수이다.  $K_{a_x}$ 는 종 방향 가속도에 대한 튜닝 변수로, 가감속이 큰 상황에서 선회를 하게 될 경우 요 모멘트 방정식에 오차가 생길 수 있으므로 종 가속도가 작은 상황에서만 추정이 이루어지도록 하였다. 2개의 튜닝 Map을 구성함으로써 안정적인 주행 상황에서만 요 관성 모멘트 추정이 진행되도록 하였다.

요 관성 모멘트 추정 검증을 위해 Fig. 2에서 설명한 위치에 200 kg의 하중을 추가하여 요 관성 모멘트를 변동시켰다. 변동된 요 관성 모멘트의 참값은 평행축 정리를 이용하여 계산하였으며, 해당 수식은 아래와 같다.

$$I_{zz, payload} = I_{zz} + \Delta M \cdot L_{payload}^2 \quad (16)$$

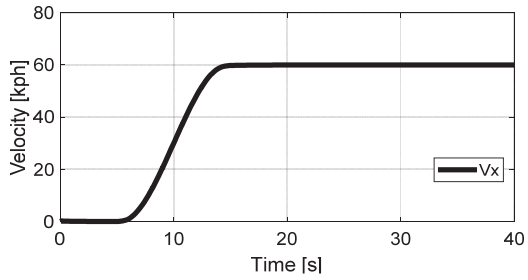
주행 시나리오는 횡 거동 시나리오를 이용하여 요 관성 모멘트 추정 정확도를 확인하였다. Case 1은 평지에서 0.2 g의 횡 가속도를 가지는 DLC(Double Lane Change) 주행이며 Case 2는 0.3 g의 횡 가속도를 가지는 S-Turn 시나리오이다. 두 시나리오 모두 처음에 5초간 정차한 후 가속하여 각각 60 kph와 40 kph로 정속 주행한다. 이 때 정차하는 5초 동안 질량과 무게 중심을 추정한다.

Table 5 Driving scenarios for estimating yaw moment of inertia

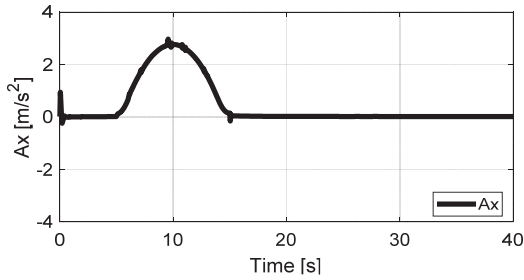
| Case 1 | Dual lane change | Payload 200 kg |
|--------|------------------|----------------|
| Case 2 | S-Turns          | Payload 200 kg |

Fig. 8은 DLC 정속 주행 시나리오인 Case 1에 대한 시뮬레이션 결과이다. 요 관성 모멘트 추정값의 초기값은 추가 하중이 없는 요 관성 모멘트 값이며 횡 방향 타이어 힘이 작용하면서 추가 하중이 있는 요 관성 모멘트로 수렴하는 모습을 확인할 수 있었다.

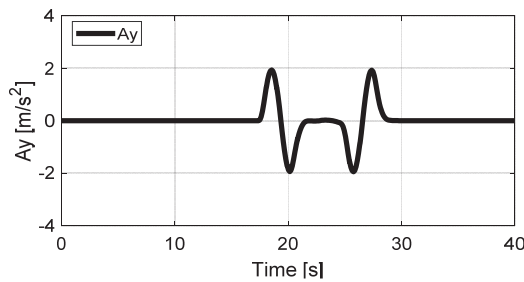
Fig. 9는 S-Turn 정속 주행 시나리오인 Case 2에 대한 시뮬레이션 결과이다. Case 2 역시 변동된 요 모멘트 값으로 수렴하는 모습을 확인하였다. 두 가지 주행 시나리오에 대한 추정 결과와 오차는 Table 6에 나타내었다.



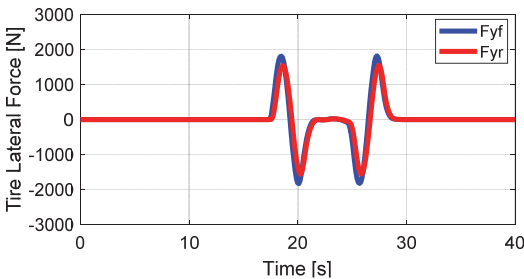
(a) Vehicle velocity



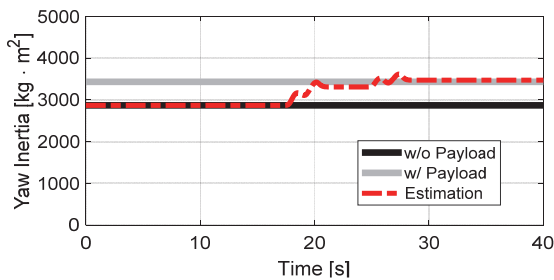
(b) Longitudinal acceleration



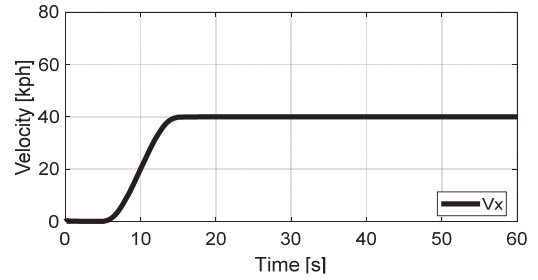
(c) Lateral acceleration



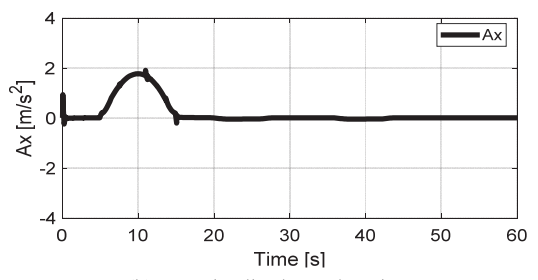
(d) Tire lateral force



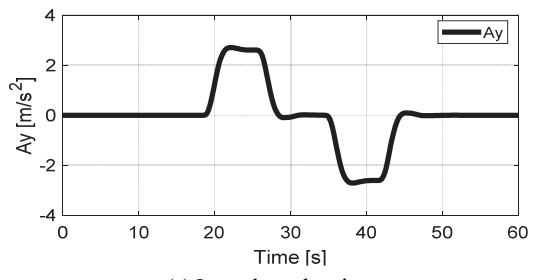
(e) Yaw moment of inertia estimation



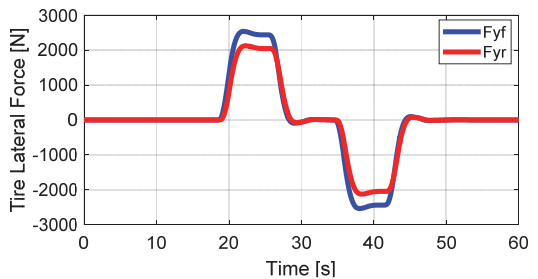
(a) Vehicle velocity



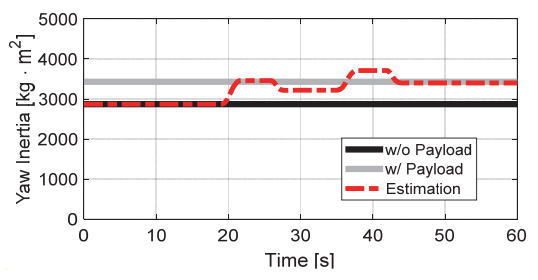
(b) Longitudinal acceleration



(c) Lateral acceleration



(d) Tire lateral force



(e) Yaw moment of inertia estimation

Fig. 8 Simulation results for Case 1

Fig. 9 Simulation results for Case 2

Table 6 Yaw moment of inertia estimation results

| Scenario | True (kg · m <sup>2</sup> ) | Estimation (kg · m <sup>2</sup> ) | Error (%) |
|----------|-----------------------------|-----------------------------------|-----------|
| Case 1   | 3,431                       | 3,473                             | 1.22      |
| Case 2   | 3,431                       | 3,401                             | 0.87      |

### 3. Dynamic 차량 모델 성능 검증

본 장에서는 2장에서 추정된 질량, 무게 중심, 요 관성 모멘트를 이용하였을 때 Dynamic 차량 모델인 Bicycle model의 정확도 향상을 검증한다.

본 연구에서 사용한 Bicycle model의 수식은 아래와 같다.

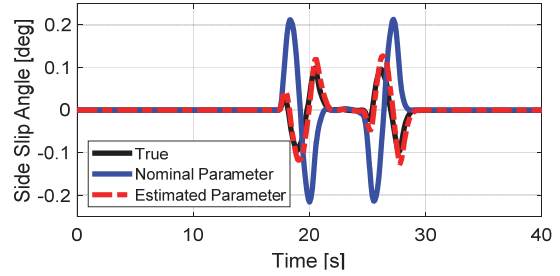
$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{C_f + C_r}{\hat{m}V_x} & -\frac{\hat{l}_f C_f - \hat{l}_r C_r}{\hat{m}V_x^2} - 1 \\ -\frac{\hat{l}_f C_f - \hat{l}_r C_r}{\hat{l}_{zz}} & -\frac{\hat{l}_f^2 C_f + \hat{l}_r^2 C_r}{\hat{l}_{zz} V_x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ \gamma \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_f \\ \hat{l}_f C_f \end{bmatrix} \delta_f \quad (17)$$

이때 Bicycle model에서 사용하는 질량( $\hat{m}$ )과 무게 중심( $\hat{l}_f, \hat{l}_r$ ), 요 관성 모멘트( $\hat{l}_{zz}$ )는 3장에서 추정된 추정값들을 이용하였다. 전·후륜 타이어의 코너링 강성( $C_f, C_r$ )은 하중이 추가된 차량에 대해 실험적으로 구하였으며,  $C_f = 145,000 \text{ N/rad}$ ,  $C_r = 142,000 \text{ N/rad}$ 로 설정하였다.

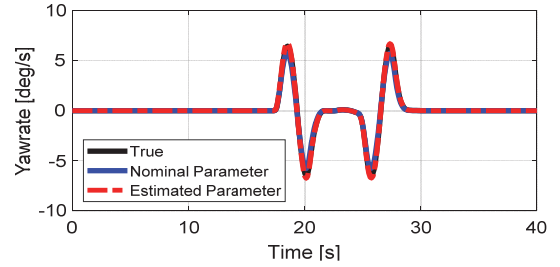
검증 시나리오는 Table 2에 제시된 두 가지 시나리오를 사용하였다. 모든 시나리오에는 Fig. 2와 같이 차량 트렁크에 200 kg의 하중을 추가하여 변동된 차량 파라미터에 따른 Bicycle model 정확도를 비교하였다.

Fig. 10은 DLC 정속 주행 시나리오인 Case1에 대한 횡슬립각과 요 레이트 추정 결과이며, Fig. 11은 S-Turns 정속 주행 시나리오인 Case 2에 대한 횡슬립각과 요 레이트 추정 결과이다. Nominal parameter 그래프는 Table 1에 제시한 차량 기본 파라미터를 사용한 결과이며, Estimated parameter는 스마트 타이어를 이용하여 추정된 파라미터를 사용한 결과이다.

두 시나리오 모두 차량 기본 제원을 사용하여 추정하였을 때 보다 스마트 타이어를 활용하여 추정된 파라미터를 사용한 경우 모델 정확도가 향상됨을 확인하였다. Case 1의 경우 RMS(Root Mean Square)로 계산한 횡슬립각의 추정 오차가 8.17 %에서 1.32 %로 감소하였으며, Case 2는 추정 오차가 22.85 %에서 1.42 %로 감소하였다. 이를 통해 스마트 타이어를 활용하여 차량의 파라미터를 추정한다면, 차량 횡 안정성 제어 성능이 향상됨을 기대할 수 있다.

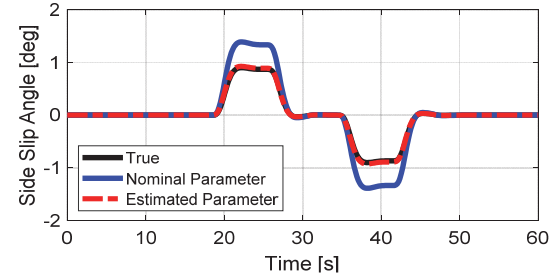


(a) Side slip angle estimation

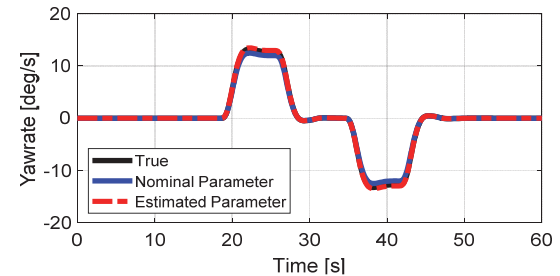


(b) Yawrate estimation

Fig. 10 Bicycle model results for Case 1



(a) Side slip angle estimation



(b) Yawrate estimation

Fig. 11 Bicycle model results for Case 2

### 4. 결론

본 연구에서는 스마트 타이어를 활용하여 차량의 질량과 무게 중심, 요 관성 모멘트를 추정하는 방법을 제안하였다. 기존 연구들이 차량 내 센서를 활용하여 간접적

으로 타이어 힘을 추정하는 방식에 의존한 반면, 본 연구에서는 스마트 타이어에서 직접 취득한 타이어 힘 정보를 이용하여 변동된 차량의 파라미터를 추정하였다. 정차 상황에서 수직 방향 타이어 힘을 이용한 질량 추정과 이를 기반으로 한 무게 중심 추정, 그리고 주행 상황에서 횡 방향 타이어 힘을 활용한 요 관성 모멘트 추정을 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 이러한 추정된 파라미터를 Bicycle model에 적용하였을 때 모델의 정확도가 향상됨을 확인하였으며, 차량 횡안정성 제어 성능 개선에도 기여할 수 있음을 확인하였다.

본 연구는 스마트 타이어를 활용한 차량 파라미터 추정 기법을 시뮬레이션 환경에서만 검증하였다. 아직 스마트 타이어 기술이 상용화되지 않아, 본 연구에서 개발한 로직이 실차 환경에서 정확하게 구현될 수 있을지에 대한 검증이 어려운 상황이다. 향후 스마트 타이어 기술이 상용화된다면 본 연구에서 제안한 기법의 실차 적용 가능성을 평가하고, 다양한 주행 조건에서의 성능 평가를 수행할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 2024년도 현대자동차 차량 고장예측 PHM 기술 공동 연구실의 지원을 받아 수행된 연구임. 본 연구는 2024학년도 한국기술교육대학교 교육연구진흥과제 지원을 받아 수행된 연구임. 본 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(‘20024837’).

## References

- 1) B. Park, S. Lee, J. Suh, W. Cho, S. H. You, “Development of Vehicle Motion Control Logic for Ride Comfort Optimization Based on Passenger Seating Position,” *IEEE Access*, Vol.13, pp.27743–27753, 2025.
- 2) J. Park, K. Huh, “Rear Wheel Steering Control Algorithm for Improving Vehicle Yaw Response in High Driving Speed,” *Transactions of KSAE*, Vol.28, No.7, pp.453–461, 2020.
- 3) W. Cho, S. You, “Development of Integrated Chassis Control to Improve Lateral Vehicle Stability,” *Transactions of KSAE*, Vol.27, No.8, pp.619–626, 2019.
- 4) S. Kim, K. Shin, C. Yoo, and K. Huh, “Development of Algorithms for Commercial Vehicle Mass and Road Grade Estimation,” *Int. J. Automotive Technology*, Vol.18, No.6, pp.1077–1083, 2017.
- 5) S. Hong, C. Lee, F. Borrelli, and J. K. Hedrick, “A Novel Approach for Vehicle Inertial Parameter Identification Using a Dual Kalman Filter,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol.16, No.1, pp.151–161, 2015.
- 6) W. Cho, J. Yoon, K. Yi, “Estimation of Tire Forces and Tire-Road Friction Coefficient for Application to a Unified Chassis Control,” *KSAE Fall Conference Proceedings*, pp.619–623, 2009.
- 7) S. Kim, B. Pyun, H. Choi, G. Choi, “Road Surface Friction Coefficient Estimation and Actual Vehicle Verification Using Recursive Least Square Method,” *Transactions of KSAE*, Vol.32, No.1, pp.49–57, 2024.
- 8) S. Ha, S. H. You, and W. Cho, “A Study on Vehicle Mass Estimation Robust to Road Slope,” *Transactions of KSAE*, Vol.32, No.1, pp.109–117, 2024.
- 9) M. Kim, D. Jung, D. Kim, and T. Yoon, “Development of RLS Based Mass Estimation Algorithm for Improving Vehicle Driving Safety,” *Transactions of KSAE*, Vol.32, No.2, pp.185–192, 2024.
- 10) Y. G. Seo, S. W. Kwak, J. C. Lee, H. S. Lee, H. Liu, H. J. Jo, S. Park, and E. J. Lee, “Vehicle Load Measurement Using Tire Deformation Values,” *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, Vol.28, No.2, pp.170–179, 2018.
- 11) J. Lee, “A Study of Performance Improvement for Collision Avoidance System Using Intelligent Tire Technology,” Ph. D. Dissertation, Kookmin University, Graduate School of Automotive Engineering, 2014.
- 12) S. J. Kim, K. -S. Kim, and Y. -S. Yoon, “Development of a Tire Model Based on an Analysis of Tire Strain Obtained by an Intelligent Tire System,” *Int. J. Automotive Technology*, Vol.16, No.5, pp.865–875, 2015.
- 13) D. Jeong, S. Kim, J. Lee, S. B. Choi, M. Kim, and H. Lee, “Estimation of Tire Load and Vehicle Parameters Using Intelligent Tires Combined with Vehicle Dynamics,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.70, Paper No.9502712, 2021.
- 14) S. Hwang, J. I. Park, S. Kim, S. Lee, S. Kim, W. Kim, “Development of Optimal Control of Tire Force Based on Driving Motor for Improvement of xEV Handling Performance(E-Handling),” *Transactions of KSAE*, Vol.30, No.11, pp.923–929, 2022.
- 15) K. Choi, J. Kim, W. Cho, and S. H. You, “Tire Force Estimation Based on Vehicle Motion and Its Experimental Validation,” *Transactions of KSAE*, Vol.31, No.5, pp.323–331, 2023.

- 16) M. Doumiati, A. Victorino, D. Lechner, G. Baffet, and A. Charara, "Observers for Vehicle Tyre/Road Forces Estimation: Experimental Validation," *Vehicle System Dynamics*, Vol.48, No.11, pp.1345–1378, 2010.