

자율주행 버스의 종방향 제어를 위한 질량 및 종 경사 추정기 개발

조아라* · 정용환** · 임형호* · 이경수***,†

Vehicle Mass and Road Grade Estimation for Longitudinal Acceleration Controller of an Automated Bus

Ara Jo*, Yonghwan Jeong**, Hyungho Lim*, Kyongsu Yi***,†

Key Words : Automated Driving(자율주행), Longitudinal Acceleration Control(종 방향 가속도 제어), Discrete Kalman Filter(이산 칼만 필터), Recursive Least Square Estimator(순환최소자승법)

ABSTRACT

This paper presents a vehicle mass and road grade estimator for developing an automated bus. To consider the dynamic characteristics of a bus varying with the number of passengers, the longitudinal controller needs the estimation of the vehicle's mass and road grade in real-time and utilizes the information to adjust the control gains. Discrete Kalman filter is applied to estimate the time-varying road grade, and the recursive least squares algorithm is adopted to account for the constant mass estimation. After being implemented in MATLAB/Simulink, the estimators are evaluated with the dynamic model and experimental data of the target bus. The proposed estimators will be applied to complement the algorithm of the longitudinal controller and proceed with algorithm verification.

1. 서론

자율주행 기술은 운전자의 개입 없이 차량이 스스로 주행하는 기술로 기존의 운전자 보조 시스템(ADAS: Advanced Driver Assistance System)에서 진화한 차세대 기술이다. 버스는 일반 승용차에 비해 정해진 경로를 운행하므로 자율주행 기술을 적용하기 용이하여 국내외에서 자율주행 버스를 개발하는 연구를 진행 중이다.

자율주행 알고리즘은 기능 단위로 인지, 측위, 거동계획(motion planning) 및 제어로 분류할 수 있다. 이를 계층적

으로 도시하면 Fig. 1과 같이 상위 알고리즘 과 하위 알고리즘으로 구분할 수 있다.⁽¹⁾ 상위 알고리즘은 레이더, 라이다, 카메라 등의 센서 정보를 이용하여 주변 상황을 인지하고, 자 차량의 위치를 계산하며, 상황을 판단해 최적 경로를 계획한다. 하위 알고리즘은 횡 방향 제어기와 종 방향 제어기로 구성한다. 횡 방향 제어기는 상위 알고리즘에서 계획한 경로를 추종하기 위한 목표 조향 제어 입

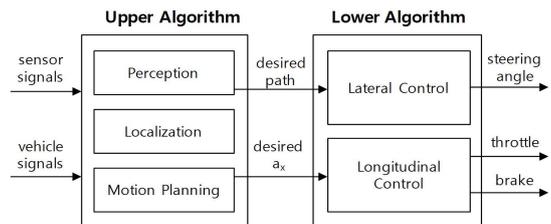


Fig. 1 Architecture of an automated vehicle

* 서울대학교 기계항공공학부, 학생
 ** 현대자동차, 대리
 *** 서울대학교 기계항공공학부, 교수
 †교신저자 : kyi@snu.ac.kr
 E-mail : arajo@snu.ac.kr

력, 종 방향 제어기는 계획한 종 방향 가속도 또는 속도를 추종하기 위한 목표 구동 및 제동 제어 입력을 계산한다.

상용차는 일반 승용차와 달리 질량 대비 구동 및 제동 계통의 토크가 상대적으로 작고, 총 중량 대비 건조 중량의 비율이 크다. 또한 중 경사의 변화가 차량의 종 방향 동특성에 미치는 영향이 크다. 따라서 상용차의 질량 및 중 경사각 추정을 위한 연구가 진행되어 왔다.^(2,3)

질량 및 중 경사각 추정기를 구현하는 방법은 차량의 다양한 센서와 종방향 차량 동역학 모델을 이용하여 개발되어 왔다.⁽⁴⁾ 질량의 경우 구동계 모델기반으로 엔진 토크, 차속, 기어비값을 측정하여 질량을 추정하는 방법이 개발되었는데, 중 경사각과 함께 차량의 종방향 모델을 기반으로 추정하거나⁽⁵⁾ 별도로 추정된 중경사도를 이용해 질량을 계산하는 방식으로 개발되었다.^(6,7) 중 경사각을 별도로 추정하는 경우 차량의 가속도계와 휠속력계, GPS를 이용하여 종 방향 차량 동역학 모델을 이용하지 않고 개발되었다.^(8,9)

자율주행 버스는 승객의 탑승 상황과 외란의 변화에도 승객의 승차감을 안정적으로 주행할 수 있도록 종 방향 제어 성능을 보장해 줄 수 있어야 한다. 그런데 자율주행 차량이 일반적으로 사용하는 정밀지도는 보통 2차원 좌표 정보로 구성되어 중 경사도 정보가 없다. 또한 버스는 탑승 인원의 변화에 따른 종 방향 동특성의 변화가 크다. 따라서 실시간으로 질량 및 중 경사도를 추정할 값을 제어기에 활용하면 비모형화된 동적 특성이 줄어들게 되어 제어 안정성을 보장할 수 있게 된다. 또한 중 경사도 추정값을 자율주행 차량의 연비 최적화 연구 및 측위 로직에도 활용할 수 있다.^(9,10)

본 연구에서는 자율주행 버스 개발을 위한 차량 질량 및 중 경사각 추정기를 개발하였다. 개발한 추정기는 차량 차체에 장착된 센서만을 사용하여 자율주행 시스템과 독립적으로 구동할 수 있도록 하였다. 또한, 버스의 질량은 승객의 승/하차가 이루어지는 중에만 변하고, 엔진 토크, 기어비값을 차량 CAN 통신으로 취득 가능한 상황에만 추정할 수 있으므로 상황에 따라 질량 추정기를 비활성화 할 수 있도록 두 추정기를 별도로 개발하는 방식을 선택하였다. 중 경사각 추정기는 실시간으로 변화하므로 이산 칼만 필터를 사용해 추정하고, 질량 추정기는 탑승 상황에 따라 변하지만 고정 값이므로 순환 최소 자승법을 이용하였다. 개발한 추정기는 MATLAB/Simulink로 구현하여, 차량에서 취득한 데이터와 차량 시뮬레이션 프로그램인 Carsim의 버스 해석 모델을 이용해 추정 성능을 검토하였다.

2. 차량의 중 경사각 및 질량 추정기 설계

2.1. 종 방향 선형 운동방정식

Fig. 2와 같이 경사로에서 주행하는 차량에 대해, 차량의 길이 방향을 x축으로 하는 고정 좌표계를 기준으로 종 방향 운동방정식을 기술하면 식 (1)과 같다.⁽¹¹⁾

$$ma_x = F_t - F_R \quad (1)$$

여기서, F_t 는 구동력, F_R 은 저항력이다. 차량에 작용하는 저항력 F_R 은 식 (2)와 같다.

$$F_R = -F_{aero} - F_r - F_{grade} \quad (2)$$

여기서 F_{aero} 는 공기 저항, F_r 은 구름 저항(rolling resistance force), F_{grade} 는 중력이 x축 방향으로 작용하는 힘이다.

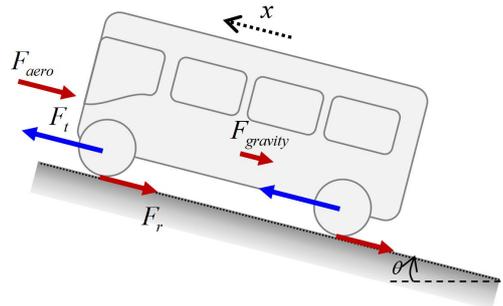


Fig. 2 Longitudinal external forces acting on a vehicle

2.2. 중 경사각 추정기 설계

차량에 장착된 센서로는 종 방향 가속도계와 휠 속력계가 있다. 종 방향 가속도계는 차량 종 방향 가속도와 중력으로 인한 가속도의 합을 측정한다. 종 방향 가속도는 휠 속력으로 추정할 수 있으므로, 차량 센서로 중 경사각을 식 (3)과 같이 계산할 수 있다.

$$\hat{\theta} = \sin^{-1} \left(\frac{a_{x,sensor} - \hat{a}_{x,w}}{g} \right) \quad (3)$$

여기서, $a_{x,sensor}$ 는 가속도계 측정값, $\hat{a}_{x,w}$ 은 종 방향 가

속도 추정값이다. 식 (3)을 이용해 종 경사각 추정기를 Fig. 3과 같이 종 방향 가속도 추정기와 종 경사각 추정기 (smoother)로 구성하였다. 추정기를 두 단계로 구성한 이유는 차량의 종 방향 가속도계의 잡음이 휠 속력계에 비해 크고, 차량의 피치 운동 등으로 인한 영향을 고려해 필터의 잡음 행렬을 선정하기 위해서이다.

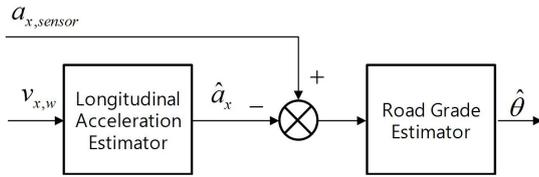


Fig. 3 Configuration of road grade estimator

종 방향 가속도 추정기는 이산 칼만 필터를 사용하여 식 (4)과 같이 구성하며, 상태 변수 x , 계측값 z 시스템 행렬 Φ_d 은 식 (5)와 같이 정의한다. 시스템 행렬은 Euler discretization approach를 이용해 고정 샘플링 타임(dt)값으로 이산화 하고 종 방향 가속도 변화량은 변하지 않는다고 가정하였다.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \Phi_d x(k) + \Gamma_d w(k) \\ z(k) &= Hx(k) + v(k) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} x(k) &= [v_{x,w}(k) \quad \dot{v}_{x,w}(k) \quad \ddot{v}_{x,w}(k)]^T \\ \Phi_d &= \begin{bmatrix} 1 & dt & dt^2/2 \\ 0 & 1 & dt \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \Gamma_d = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ z(k) &= v_{x,w}(k) \\ H &= [1 \quad 0 \quad 0] \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, w 는 시스템 잡음, Γ_d 는 잡음 행렬, H 는 계측 행렬, v 는 계측값의 잡음이다. w 와 v 는 각각 백색 잡음으로 가정한다. 추정기의 시스템 행렬은 차량 휠 가속도의 변화가 일정하다고 가정하여 설계하였다.

종 방향 가속도 추정값과 가속도계로 측정된 측정값을 식 (3)에 대입하여 종 경사각을 계산한 후, 이를 식 (6)의 이산 칼만 필터로 평활(smoothing)하여 최종 종 경사각을 추정한다.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \Phi_d x(k) + \Gamma_d w(k) \\ z(k) &= a_{x,sensor}(k) \\ &= Hx(k) + v(k) \\ x(k) &= [\theta(k) \quad \dot{\theta}(k)]^T \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Phi_d &= \begin{bmatrix} 1 & dt \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \Gamma_d = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ H &= [1 \quad 0] \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, 추정기의 시스템 행렬은 종 경사각의 변화가 일정하다고 가정하여 설계하였다.

2.3. 차량 질량 추정기 설계

차량의 질량 추정기는 엔진 토크 측정값, 종 방향 가속도 및 종 방향 경사각 추정값을 이용하도록 설계하였다. 차량 CAN통신으로 엔진 토크와 기어비가 출력된다고 가정하였으며, 제동 시에는 정확한 제동 토크를 측정하기 어려우므로 구동하는 경우만을 고려하였다. 엔진 토크, 종 방향 가속도, 종 경사각과 차량 질량과의 관계식을 유도하기 위해 차량 구동계에 대한 토크, 관성, 기어비 관계를 표현하면 Fig. 4와 같다.

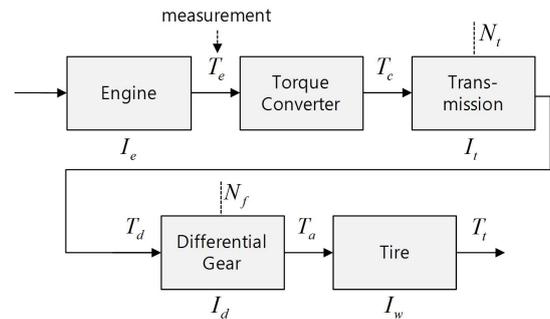


Fig. 4 Configuration of a vehicle powertrain

엔진의 출력 토크 T_e 는 트랜스미션(transmission)과 차동 기어(differential gear)를 통해 타이어에 전달 되는데, 이 때 전체 구동계를 회전하기 위한 관성력이 감쇄된다. 이를 구동력 F_t 에 대해 정리하면 식 (8)과 같다.⁽¹²⁾

$$F_t = \frac{T_e}{r_w} = \frac{T_e N_t N_f \eta_{gf}}{r_w} - m_r a_x \quad (8)$$

여기서, r_w 는 휠의 유효 반지름, N_t 는 트랜스미션 기어비, N_f 는 차동 기어의 기어비, η_{gf} 는 구동계 효율, m_r 은 구동계의 회전 관성에 대한 등가 질량이다.

식 (2)에서 저항력 F_R 을 구성하는 공기 저항 F_{aero} , 롤 저항 F_r , 중력 F_{grade} 을 대입해 종 방향 가속도에 의한 식으로 정리하면 식 (9)과 같다.

$$a_x + \frac{g \sin(\theta + \theta_r)}{M_{eff} \cos \theta_r} = \left\{ \left(\frac{T_e N_t N_f \eta_{gf}}{r_w} - F_{aero} \right) \frac{1}{M_{eff}} \right\} \cdot \frac{1}{m} \quad (9)$$

여기서, θ_r 은 롤 마찰계수를 각도로 치환한 값이다. M_{eff} 는 유효 질량으로 구동계의 등가 질량과 차량 질량과의 비율로 정의하며, 근사식을 이용하여 식 (10)과 같이 계산할 수 있다.⁽¹³⁾

$$M_{eff} = \frac{m + m_r}{m} = 1 + 0.04 + 0.0025 N_t^2 N_f^2 \quad (10)$$

식 (9)에서 종 방향 가속도 a_x 와 중 경사각 θ 는 중 경사각 추정기로 추정된 값을 사용하고, 엔진 출력 토크 T_e 를 예측하면 차량의 질량 m 을 추정할 수 있다. 이에 본 논문에서는 순환최소자승법을 이용하여 질량을 추정하였다. 순환최소자승법에서 최소화하고자 하는 목적 함수는 식 (11)과 같다.

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (y(i) - \Phi^T(i) \hat{a})^2 \quad (11)$$

여기서, J 는 목적 함수, $y(i)$ 는 계측값, Φ 은 계측값의 시스템 행렬, \hat{a} 는 추정값이다. 식 (11)을 최소화하는 추정값의 해는 식 (12)와 같으며, 이를 실시간으로 센서 계측 데이터를 이용해 계산하기 위해 재귀적 이산화 형태로 표현하면 식 (13)과 같다.⁽⁵⁾

$$\hat{a} = \left(\sum_{i=1}^n \Phi(i) \Phi^T(i) \right)^{-1} \left(\sum_{i=1}^n \Phi(i) y(i) \right) \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \hat{a}(k) &= \hat{a}(k-1) + L(k) (y(k) - \Phi^T(k) \hat{a}(k-1)) \\ L(k) &= P(k) \Phi(k) \\ &= P(k-1) \Phi(k) (1 + \Phi^T(k) P(k-1) \Phi(k))^{-1} \\ P(k) &= (I - L(k) \Phi^T(k)) P(k-1) \end{aligned} \quad (13)$$

식 (9)을 순환최소자승법을 이용하기 위해 식 (14)과 같이 일반화하여 정리한다.

$$y = \Phi^T a \quad (14)$$

여기서, 각 계수는 식 (15)와 같다.

$$\begin{aligned} y &= a_x + \frac{g \sin(\theta + \theta_r)}{M_{eff} \cos \theta_r} \\ \Phi^T &= \left\{ \left(\frac{T_e N_t N_f \eta_{gf}}{r_w} - F_{aero} \right) \frac{1}{M_{eff}} \right\} \\ a &= \frac{1}{m} \end{aligned} \quad (15)$$

식 (15)를 이용해 순환최소자승법을 적용할 때, 계측값 y 와 Φ 의 절댓값이 작으면 추정 성능이 저하될 수 있다. 또한, 기어 단이 변할 때 토크 출력이 순간적으로 변하고, 저단에서는 구동계 관성의 영향이 커 추정이 어렵다. 이에 본 논문에서는 질량 추정이 적합한 상황에서 추정기를 활성화 하도록 Table 1과 같이 활성화 조건을 설정하였다.

Table 1 On-off rules for the vehicle mass estimator

Engine torque	> 30 [%]
a_x	> 0.3 [m/sec ²]
Gear ratio	> 2 [-]
Gear ratio rate	< 1 [1/sec]

4. 버스 해석 모델의 중 경사각 및 질량 추정 시뮬레이션

4.1. 중 경사각 추정기 시뮬레이션

본 연구에서 제안한 중 경사각 추정기를 MATLAB/Simulink로 구현하고, 실제 차량에서 취득한 데이터로 시뮬레이션하여 성능을 분석하였다. 데이터 취득에 사용한 차량의 질량과 파워트레인 사양은 Table 2와 같다.

실제 차량에서 취득한 중 방향 가속도계 및 휠 속도계 정보를 사용하여 중 경사각을 추정하고, 이를 차량에 장착한 INS(Inertial Navigation Systems) 데이터와 비교하여 Fig. 5에 도시하였다. 취득한 데이터는 경사가 급하게 변하는 구간으로, 경사가 변하는 과도 구간에서 추정된 경사각에 진동이 발생하였다. 추정값의 평균 제곱근 오차는 1.5[deg]이다. 차량의 중 방향 가속도 추정기의 시간 지연 현상 때문에 가속도가 변할 때 경사각 추정값에 진동이 발생했고, 차량의 피치각 변화가 중 방향 가속도계에 잡음으로 작용하는 것이 오차의 주요 요인으로 보인다.

Table 2 Parameters of the mid-size bus model

Experiment	Sprung mass	4,000kg
	Powertrain	8-speed AT, 2WD, 120kW Diesel
Simulation	Sprung mass	2,100kg
	Powertrain	6-speed AT, 2WD, 175kW Diesel

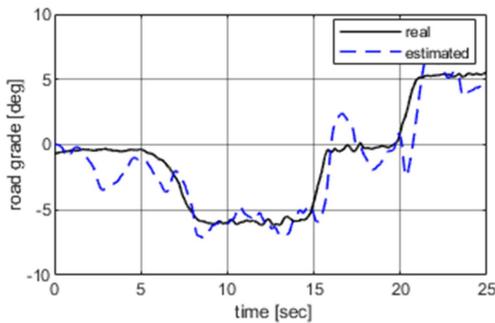


Fig. 5 Simulation result of the road grade estimator

4.2. 차량 질량 추정기 시뮬레이션

질량 추정기는 차량 시뮬레이션 프로그램인 Carsim의 버스 해석 모델과 연성 해석을 수행하여 질량 추정 성능

을 검토하였다. 시뮬레이션에 사용한 차량의 질량과 파워트레인 사양은 Table 2와 같다.

버스는 정차 상태에서 차량 질량이 변하므로 정차 후

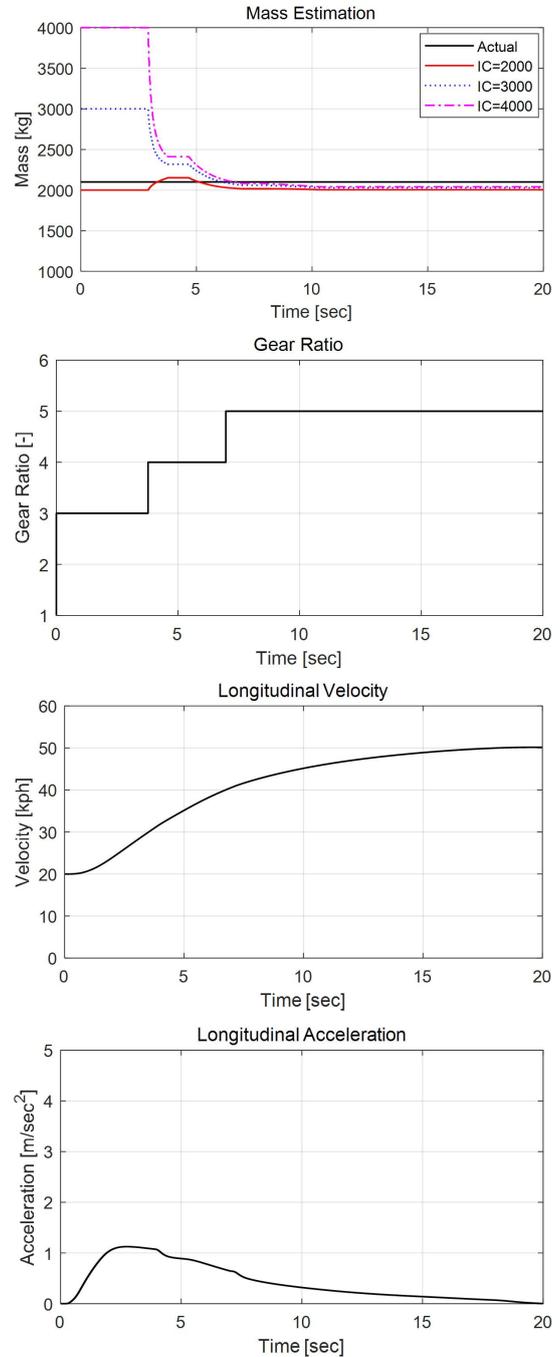


Fig. 6 Simulation result of the vehicle mass estimator

출발하면서 차량이 가속하는 동안에 질량을 추정하는 상황을 가정하였다. 질량 추정기의 초기값(Initial Condition)을 각각 2,000kg, 3,000kg, 4,000kg을 설정하여 시뮬레이션하고 그 결과를 Fig. 6에 정리하였다. 질량 추정기가 활성화된 후 4.7초 이내에 추정치가 1,954kg로 수렴하였고, 오차는 7% 수준이다. 또한 8초 이후에는 차량의 중방향 가속도가 Table 1에서 제시한 값보다 작아져 질량 추정기가 비활성화 되므로 추정값이 변하지 않는다. 오차의 원인은 차량의 질량 계수, 롤 저항 계수, 공기저항, 롤 저항을 계산할 때 추정식을 사용해 계산한 것이 원인으로 보인다.

5. 결 론

본 논문에서는 자율주행 버스의 중방향 제어기의 성능을 개선하기 위하여 버스의 중 경사각 및 질량 추정기를 개발하였다. 버스의 운용 특성을 고려하여 중 경사각 추정기와 질량 추정기를 별도로 구성하고, 질량 추정기에서 중 경사각 추정기의 추정값을 활용하도록 개발하였다. 개발한 추정기를 실차 계측 데이터와 차량 해석 프로그램인 Carsim을 이용해 시뮬레이션을 수행하여 추정기의 성능을 검토하였다.

추정기의 성능 검토 결과, 중 경사각 추정기의 실시간 추정 성능 오차와 진동 현상이 발생함을 확인하였다. 향후 연구에서는 중 경사각 추정기의 성능을 개선하고, 이를 중 방향 가속도 제어기에 활용하도록 제어기를 수정하여 차량 시뮬레이션 및 실제 차량 데이터를 활용해 수정한 제어기의 성능을 분석할 계획이다.

후 기

본 연구는 국토교통부 교통물류연구사업(19TLRP-B146733-02, 자율주행기반 대중교통시스템 실증 연구), 과학기술정보통신부의 재원(NRF - 2016R1E1A1A01943543)의 연구비 지원에 의해 수행되었음을 밝히며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Chae, H. S., Jeong, Y.H., Min, K. C., Lee, M. S., and Yi, K. S., 2017, "Automated Driving Lane Change Algorithm Based on Robust Model Predictive Control for Merge Situations on Highway Intersections", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 41, No. 7, pp. 575~583.
- (2) Bae, H. S., Ryu, J., and Gerdes, J. C., 2001, "Road Grade and Vehicle Parameter Estimation for Longitudinal Control Using GPS", Proceedings of the IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, pp. 25~29.
- (3) Wang, B., Wang, H., Wu, L., and Cai, L., 2020, "Truck Mass Estimation Method based on the On-board Sensor", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, pp. 1~15.
- (4) Kidambi, N., Pietron, G. M., Boesch, M., Fujii, Y., and Wang, K.W., 2017, "Accuracy and Robustness of Parallel Vehicle Mass and Road Grade Estimation", SAE International Journal of Vehicle Dynamics, Stability, and NVH, Vol. 8, No. 2, pp. 317~325.
- (5) Vahidi, A., Stefanopoulou, A. and Peng, H., 2005, "Recursive Least Squares with Forgetting for Online Estimation of Vehicle Mass and Road Grade", Vehicle System Dynamics, Vol. 43, No. 1, pp. 31~55.
- (6) McIntyre, M.L., Ghotikar, T.J., Vahidi, A., Song, X. and Dawson, D.M., 2009, "A Two-Stage Lyapunov-Based Estimator for Estimation of Vehicle Mass and Road Grade", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 58, No. 7, pp. 3177~3185.
- (7) Sun, Y., Li, L., Yan, B., Yang, C. and Tang, G., 2016, "A Hybrid Algorithm Combining EKF and RLS in Synchronous Estimation of Road Grade and Vehicle Mass for a Hybrid Electric Bus", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 86, No. 69, pp. 416~430
- (8) Jo, K., Kim, J. and Sunwoo, M., 2013, "Real-time Road-slope Estimation based on Integration of Onboard Sensors with GPS using an IMMPDA Filter", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 14, No. 4, pp. 1718~1732.
- (9) Jo, K., Lee, M., and Sunwoo, M., 2016, "Road Slope Aided Vehicle Position Estimation System Based on Sensor Fusion of GPS and Automotive

- Onboard Sensors”, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 17, No. 1, pp. 250~263.
- (10) Firoozi, R., Nazari, S., Guanetti, J., O’Gorman, R., and Borrelli, F, 2018, “Safe Adaptive Cruise Control with Road Grade Preview and V2V Communication”, Proceedings of the American Control Conference, pp. 4448~4453.
- (11) Rajamani, R., 2012, Vehicle Dynamics and Control, Springer, pp. 87~111.
- (12) Gillespie, T.D., 1992, Fundamentals of Vehicle Dynamics, Society of Automotive Engineers, pp. 21~32.
- (13) Jazar, R.N., 2008, Vehicle Dynamics: Theory and Application, Springer, pp. 119~122.