



망각인자 회기 최소 자승법 및 저역필터를 이용한 차량 질량 추정 알고리즘

김민수¹⁾·최규재^{*2)}·홍명기³⁾

군산대학교 기술혁신센터¹⁾ · 군산대학교 기계자동차공학부²⁾ · 전북자동차융합기술원 진동소음연구센터³⁾

Vehicle Mass Estimation Algorithm Using Recursive Least Squares Method with Forgetting and Lowpass Filter

Minsu Kim¹⁾ · Gyoojae Choi^{*2)} · Myeonggi Hong³⁾

¹⁾Kunsan Advanced Technology Innovation Center, Kunsan National University, Jeonbuk 54150, Korea

²⁾School of Mechanical and Automotive Engineering, Kunsan National University, Jeonbuk 54150, Korea

³⁾Vibration & Noise Research Center, Jeonbuk Institute of Automotive Convergence Technology, 6 Dongjagsan 2-gil, Gunsan-si, Jeonbuk 54158, Korea

(Received 27 March 2019 / Revised 3 May 2019 / Accepted 7 August 2019)

Abstract : The development of vehicle control systems, such as the electronic stability control(ESC) system, requires an accurate estimation of a commercial vehicle's mass. In particular, the total mass of commercial vehicles(e.g., heavy truck and bus) varies widely according to loading and unloading conditions. This paper presents a real-time vehicle mass estimation algorithm by using the recursive least squares method with forgetting and low-pass filter. Based on the vehicle longitudinal dynamics model, a 4x2 truck was modeled by using the TruckSim software and the estimated vehicle mass was calculated by using the recursive least squares method with forgetting. Low-pass filter is used to reduce the noise of real vehicle sensors signal. The proposed vehicle mass estimation algorithm was verified through several vehicle simulations.

Key words : Electronic stability control(ESC) system(전자식 주행 안정성 제어 시스템), Commercial vehicle(상용차량), Vehicle mass(차량 질량), Recursive least square(RLS) method(회기 최소 자승기법), Recursive least squares(RLS) with forgetting method(망각인자 회기 최소 자승기법)

Nomenclature

T_e	: engine torque, Nm
N_t	: numerical ratio of the transmission
N_f	: numerical ratio of the final drive
η	: driveline efficiency
r	: tire radius, m
m_r	: equivalent mass, kg
a_x	: longitudinal acceleration, m/s ²

1. 서론

자동차의 주행 안정성을 확보할 수 있는 ESC 시스템은 차량의 자세를 제어하는 전자제어 장치로 주행 차량의 미끄러짐 또는 전복 경향을 방지할 수 있는 시스템이

다. 특히, 상용차는 사고 발생 시 대형 사고로 이어지는 문제점으로 인하여 ESC 장착을 강제하기 위한 규제도 도입되고 있으며, 향후 대형 상용차량에도 ESC 장착의 무효화가 확대될 것으로 전망되고 있다.

이러한 제어 시스템 성능은 차량의 관성 파라미터, 특히 차량의 질량과 무게 중심의 높이에 민감한데 차의 관성 파라미터는 승객의 인원수나 탑재된 하중의 무게 위치에 따라 달라진다.¹⁾

이에 따라 시스템 제어 성능을 향상시키고 차량의 주행 안정성을 확보하기 위해서는 주행 중인 차량의 질량을 실시간으로 정확하게 추정하는 것이 필요하다.

차량 질량에 대한 추정은 GPS나 중력 센서를 활용한 센서 융합의 방법도 제시되었으나 이는 비용의 문제로 양산 차량에 적용하기에는 어려움이 있다.²⁾ 또한 비선형 동역

*Corresponding author, E-mail: gjchoi@kunsan.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.

학 모델로부터 확장된 칼만 필터를 이용하여 차량의 질량을 추정하는 방법이 제시되었다. 그러나 칼만 필터를 사용하는 경우 상대적으로 많은 양의 연산이 필요해지기 때문에 실시간으로 차량 질량을 추정하기에는 어렵게 된다.³⁾

본 연구에서는 차급별 구분없이 실시간으로 차량 질량을 추정하고 실시간 차량 센서 신호에서 발생하는 잡음(Noise)의 영향도를 제거하기 위하여 망각인자 회기최소자승법 및 저역필터를 사용하여 차량 질량 추정 알고리즘을 개발하였다.

2. 차량 질량 추정 알고리즘

2.1 종방향 차량 운동 모델

차량의 질량을 추정하기 위해 기본적인 종방향 동역학 모델은 Fig. 1과 같다. Fig. 1에 도시한 차량의 주행 저항이 포함된 운동 방정식은 다음과 같이 표현된다.⁴⁾

$$ma_x = F_x - F_{aero} - F_{rolling} \quad (1)$$

여기서,

- m = 차량 질량(kg)
- a_x = 종방향 가속도(m/s^2)
- F_x = 구동력(N)
- F_{aero} = 공기저항(N)
- $F_{rolling}$ = 구름저항(N)

을 나타낸다. 공기저항과 구름저항은 식 (2), (3)과 같다.

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \rho C_d A_f V^2 \quad (2)$$

여기서,

- F_{aero} = 공기저항(N)
- ρ = 공기밀도(kg/m^3)
- C_d = 공기저항계수(-)
- A_f = 차량 전방면적(m^2)
- V = 차량속도(m/s)

을 나타낸다.

$$F_{rolling} = u_r m g \cos(\beta) \quad (3)$$

여기서, u_r 은 롤링 저항 계수, m 은 차량의 질량, g 와 β 는 각각 중력가속도와 도로의 등판각도를 나타낸다.

구동력은 엔진토크, 구동 효율, 타이어 반경 등으로 구성되며 식 (4)와 같다.

$$F_x = \frac{T_e N_{tf} \eta}{r} - m_r a_x \quad (4)$$

여기서,

- T_e = 엔진 토크($N \cdot m$)
- N_{tf} = 변속장치와 최종 구동장치의 비율
- η = 변속장치와 최종 구동장치의 효율

- r = 타이어 반경(m)
- m_r = 회전부품 등가 질량(kg)
- a_x = 종방향 가속도(m/s^2)

을 나타낸다.

식 (1)에 식 (2), (3), (4)을 대입한 후 차량 질량을 구하면 다음과 같다.

$$m = \frac{\frac{T_e N_{tf} \eta}{r} - \frac{1}{2} \rho C_d A_f V^2}{(M_f - 1)a_x + u_r g \cos(\beta) + a_x} \quad (5)$$

여기서, m_r 은 회전부품의 등가질량으로 $m_r = (M_f - 1)m$ 이며 $M_f = 1 + 0.04 + 0.0025 N_{tf}$ 으로 나타낼 수 있다.⁵⁾

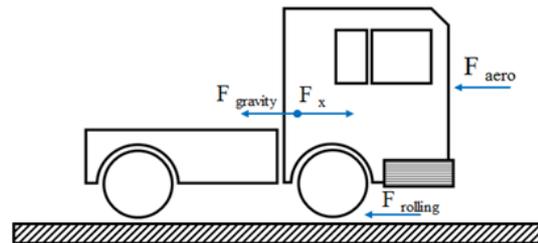


Fig. 1 Longitudinal vehicle dynamic model

2.2 망각인자 회기 최소 자승기법

회귀 최소 자승법(RLS)은 추정하고자 하는 값을 정확하게 측정할 수 없는 경우에 유용하게 사용될 수 있으며 관측값과 추정값 차이의 제곱의 합이 최소화 할 수 있도록 하는 방법이다. 벡터 파라미터가 포함된 과거 데이터를 사용하여 각 샘플링 시간에 미지의 매개 변수 벡터를 반복적으로 업데이트하면서 추정 성능을 높인다.

미지의 매개 변수가 일정하게 유지될 것으로 예상된다면 표준 RLS 방법을 사용할 수 있지만 매개 변수가 시간에 따라 변하는 경우 표준 RLS 방법은 적합하지 않다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 RLS 방법에 망각인자(Forgetting)를 도입하는데 망각인자는 불필요한 데이터를 제거하는 특징을 가지고 있으며 망각인자를 포함한 회귀 최소 자승법은 다음과 같다.

$$V(\hat{\theta}, k) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \lambda^{k-i} (y(i) - \psi^T(i) \hat{\theta})^2 \quad (6)$$

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \lambda^{k-i} (y(i) - \psi^T(i) \hat{\theta})^2 = 0^{6-7} \quad (7)$$

여기서,

$y(i)$ = 입력신호

λ 는 망각 인자로서 만일 $\lambda < 1$ 이면 일반적인 RLS 알고리즘을 유도할 수 있다. 그러나 $\lambda < 1$ 의 경우, $k-i$ 의 크기가 크면 클수록 손실할 $y(i) - \psi^T(i) \hat{\theta}(i)$ 의 크기

는 $V(\hat{\theta}, k)$ 에 영향을 미치지 못하게 된다. 이때 초기 손실항의 크기는 무시되며 알고리즘이 어느정도 진행된 다음부터의 손실항의 크기에 따라 파라미터 추정이 효과적으로 이루어지게 된다. 따라서, 망각인자의 도입은 추정된 파라미터가 불안정한 초기상태의 영향을 가급적 적게 받도록하여 보다 올바른 추정이 가능하도록 하는데 목적이 있으나 망각인자의 적절한 크기 선정이 어렵다. 망각인자는 보통 1보다 작은 $0 < \lambda < 1$ 사이의 값을 가지며 일반적으로 고정 망각인자는 0.95~0.99 사이의 값을 가진다.⁸⁾

실시간 매개 변수 추정을 위하여 회귀 처리 형태로 변환하면 다음과 같다.

$$\hat{\theta} = \hat{\theta}(k-1) + L(k)(y(k) - \psi^T(k)\hat{\theta}(k-1)) \quad (8)$$

여기에서 이득벡터 $L(k)$ 와 공분산 $P(k)$ 는 다음과 같다.^{6,7)}

$$L(k) = P(k)\psi(k) \quad (9)$$

$$P(k) = (I - L(k)\psi^T(k))P(k-1)\frac{1}{\lambda} \quad (10)$$

질량 추정을 위하여 식 (5)를 이용하여 각 변수를 다음과 같이 정의한다.

$$y = \frac{T_e N_{tf} \eta_{tf}}{r} - \frac{1}{2} \rho C_d A V^2 \quad (11)$$

$$\psi^T = [(M_f - 1)a_x + u_r g \cos(\beta) + a_x] \quad (12)$$

$$\theta = m \quad (13)$$

2.3 질량 추정 알고리즘 구성

차량의 질량을 추정하기 위해서 TruckSim⁹⁾과 Matlab¹⁰⁾을 연동하여 Fig. 2와 같이 구성하였다. 질량 추정에 필요한 차량 신호는 TruckSim에서 엔진토크, 기어비, 기어단수, 속도 및 가속도 정보를 받아 Simulink에 입력되며 망각인자 회기 최소자승법을 이용하여 차량 질량을 계산하게 된다.

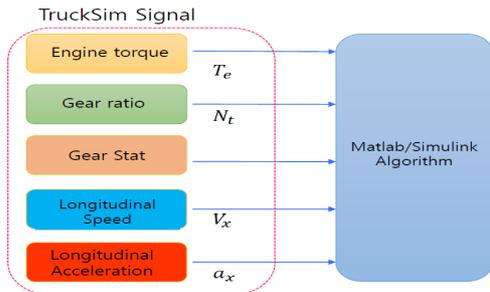


Fig. 2 TruckSim signal and simulink diagram

2.3.1 차량 모델

본 연구에서 사용한 차량은 4x2 트럭으로 형상은 Fig. 3에 도시하였다. 차량 재원은 Table 1에 기술하였으며 27 자유도를 가지고 있다.



Fig. 3 4x2 Truck

Table 1 Vehicle specification

Component	Specification
Vehicle weight	5760 kg
Tire radius	510 mm
Vehicle length	3900 mm
Vehicle width	2438 mm

차량은 TruckSim으로 모델링하였으며 차량 주행 시물레이션에 따라 TruckSim에서 출력되는 엔진토크, 속도, 가속도, 기어비 신호를 Fig. 4에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 차량 출발 후 기어 단수 변화에 따라 속도가 증가하면서 주행이 이루어지고 있음을 알 수 있다.

2.3.2 망각인자 회기최소자승법을 이용한 질량추정 알고리즘

질량 추정 식을 Matlab/Simulink로 구성하였으며 Fig. 5에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 TruckSim에서 출력되는 차량 신호를 기반으로 차량 질량을 추정하는 알고리즘을 구성하였다. 이와 함께 회기 최소 자승법을 적용하기 위해서는 질량 추정식을 회기 형태로 변환시킨 다음에 계산을 해야 한다. Matlab/Simulink를 이용한 회기 자승법 필터는 Fig. 6에 도시하였으며 입력, 출력에 대한 내용은 Table 2에 기술하였다.

Table 2 Parameter descriptions of RLS filter

Parameter	Variable
Input	$(M_f - 1)a_x + u_r g \cos(\beta) + a_x$
Desired	Estimation mass
Output	$F_x - F_{aero}$
Error	Error
Wts	Filtering mass
Lambda	Forgetting

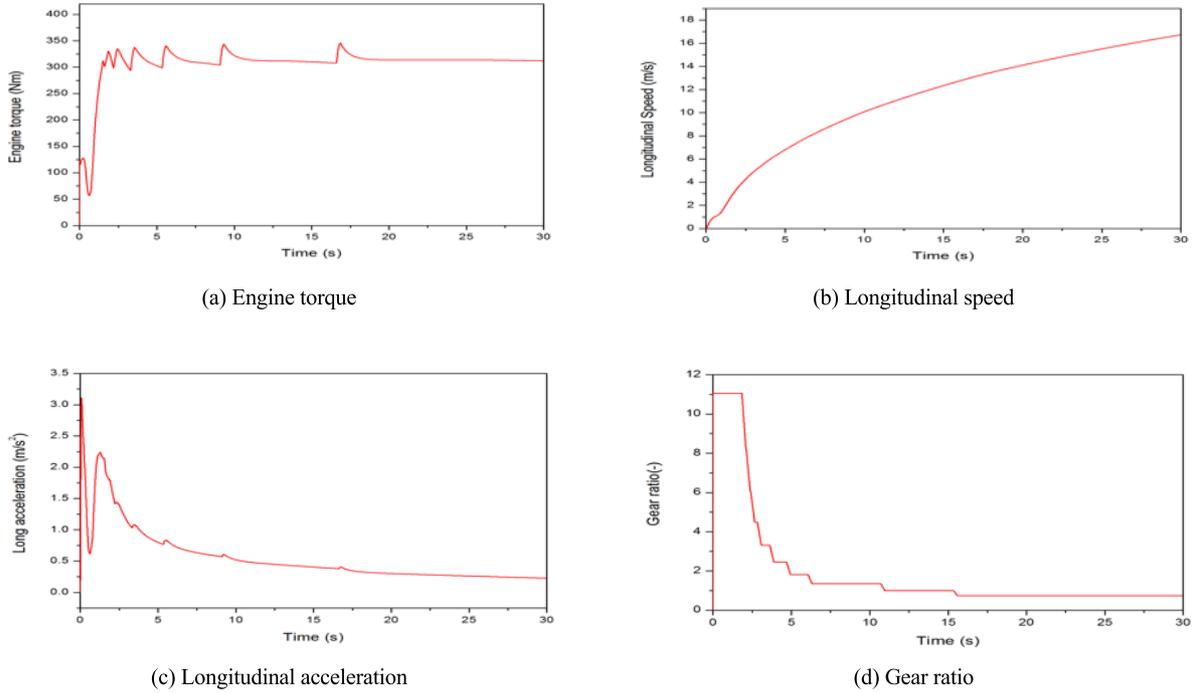
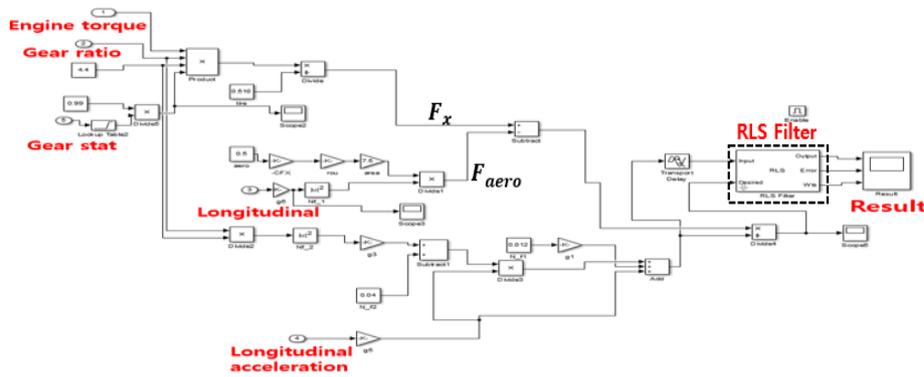
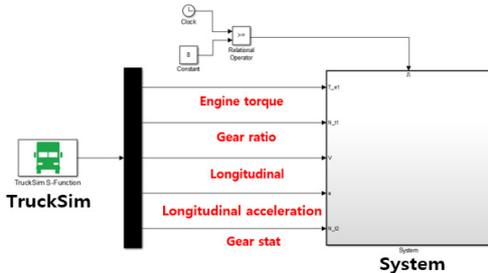


Fig. 4 TruckSim sensor signals



(a) Vehicle mass estimation module



(b) Overall scheme of algorithm

Fig. 5 Vehicle mass estimation diagram

망각인자 회기 최소 자승법을 이용하여 질량을 추정하는 경우 망각인자(Forgetting factor)를 어떻게 설정하는지에 따라서 추정값의 차이가 발생할 수 있다.

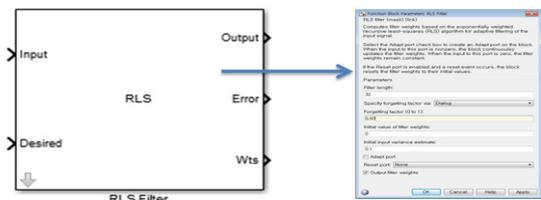
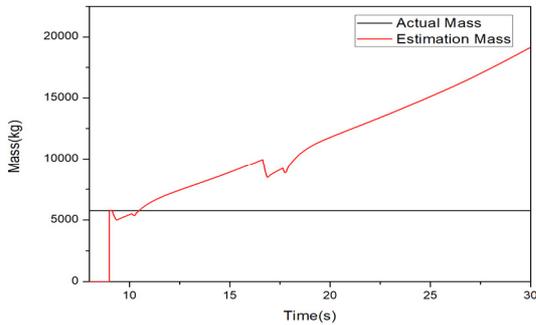


Fig. 6 RLS filter

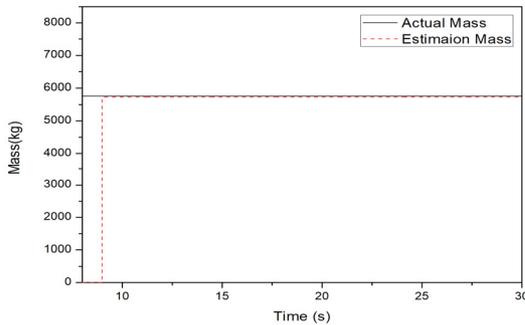
망각인자의 설정값에 따른 질량 추정 결과를 Table 3 과 Fig. 7에 나타내었다. 표와 그림에서 보는 바와 같이 $\lambda = 0.99$ 인 경우 질량 추정이 제대로 되지 않음을 알 수 있으며 $\lambda = 0.97$ 인 경우 정확하게 질량을 추정함을 알 수 있다. 본 연구에서는 망각인자를 0.97로 설정하였다.

Table 3 Vehicle mass estimation results according to forgetting factor

Forgetting factor	Times (sec)		
	15	20	30
0.99	8883.5	11775.2	19153.0
0.97	5723.9	5723.9	5723.9



(a) $\lambda = 0.99$



(b) $\lambda = 0.97$

Fig. 7 Vehicle mass estimation plots according to forgetting factor

3. 질량 추정 시뮬레이션

3.1 다양한 주행상황에 따른 질량 추정

본 연구에서는 TruckSim을 이용한 범프 통과와 주행 중 제동 등의 주행상황을 설정하여 시뮬레이션 실시하면서 질량을 추정하였다.

Table 4는 질량 추정 결과를 나타낸 것이며 두 가지 주행 상황에 대해 실제 질량값과 추정된 질량 사이의 대한 오차는 0.63 %이다.

Table 4 Vehicle mass estimation results according to test scenario

Test scenario		Time (sec)			Error (%)
		15	20	30	
Bump (kg)	Real mass	5760	5760	5760	-0.63
	Estimation mass	5723.92	5723.91	5723.91	
Braking (kg)	Real mass	5760	5760	5760	-0.63
	Estimation mass	5723.92	5723.91	5723.91	

3.2 잡음 추가 후 질량 추정

실제 차량에서 측정되는 신호에는 다양한 잡음이 포함되어 있으며 이와 같은 잡음이 포함된 경우에도 정확하게 질량을 추정할 수 있어야 한다.

본 연구에서는 실제 차량에서 발생하는 상황을 반영하기 위해 기존의 신호에 랜덤 잡음신호를 추가한 후 개발한 알고리즘을 이용하여 질량 추정 성능을 평가하였다.

TruckSim에서 측정되는 엔진 토크에 잡음을 추가하였으며 Fig. 8에 기존 잡음이 없는 신호와 잡음이 포함된 신호를 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 기존 잡음이 없는 신호(Original signal)에 랜덤 잡음 신호를 추가하여 생성한 신호(Noise signal)에는 잡음이 심하게 발생하고 있음을 알 수 있다.

이와 같은 잡음 문제를 해결하기 위해서 저역통과필터(LPF, low pass filter)를 추가하였으며 전체 구성도를 Fig. 9에 도시하였다.

차량 주행 시뮬레이션 결과 잡음이 추가된 상태에서 LPF를 사용하지 않고 질량을 추정하였을 경우 약 140 kg, 2.33 %의 오차가 발생하였다. 그러나 오차를 줄이기 위해 LPF를 사용하여 엔진토크의 잡음을 제거함으로써 추정된 질량의 오차는 0.38 %로 줄었으며 Fig. 10에 시간에

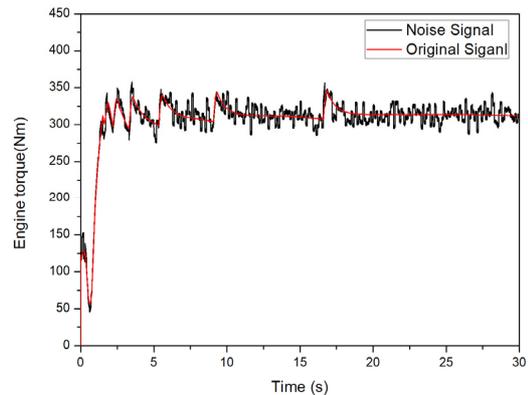


Fig. 8 Comparisons of engine torque signals

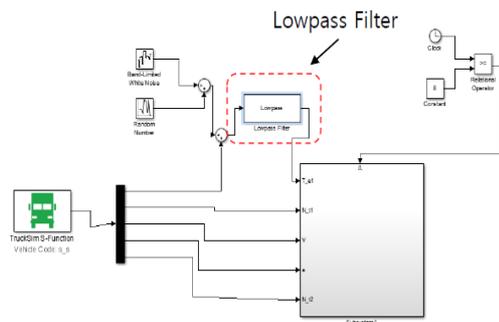


Fig. 9 Simulink block diagram with lowpass filter

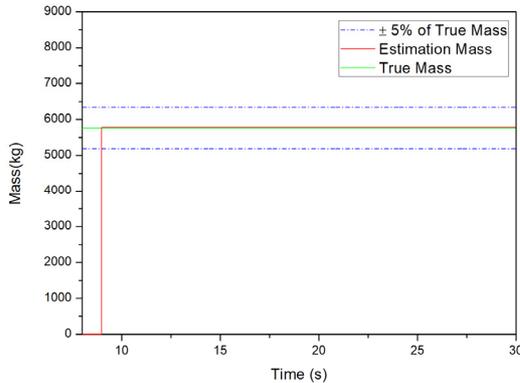


Fig. 10 Vehicle mass estimation results using lowpass filter

따른 질량 추정 결과를 도시하였다.

이와 같이 실제 차량 신호에서 발생하는 다양한 잡음이 포함된 경우에도 주행 중 질량이 정확하게 추정할 수 있음을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 트럭, 버스 등 차량 질량 변동성이 큰 상용차량의 ESC 시스템 개발에 활용하기 위한 실시간 질량 추정 알고리즘 개발을 수행하였으며 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 종방향 차량운동 모델을 기반으로 TruckSim을 이용하여 4×2 트럭을 모델링하고 Matlab/ Simulink와 연동하여 시뮬레이션 환경을 구성하였다.
- 2) 질량 추정식을 회기형태로 변환하여 망각인자 회기 최소자승법 알고리즘을 구성하였으며 두 가지의 주행 시뮬레이션을 통하여 실제 차량 질량과 0.63 % 이내에서 질량 추정이 가능하여 알고리즘의 정확도를 확인하였다.
- 3) 실제 차량과 비슷한 환경을 고려해 주기 위해서 센서 신호에서 발생하는 잡음을 고려한 질량 추정을 실시하였으며 저역통과필터를 사용하여 질량 추정 오차를 감소시켰다.

본 연구에서 제시한 질량추정 알고리즘은 상용차용 ESC시스템 성능 개선에 잘 활용될 수 있을 것이며 향후 실제 차량에 적용하기 위하여 차량 센서, CAN 신호를 추가하여 검증을 실시할 계획이다.

후 기

본 연구는 한국산업기술평가관리원에서 주관하는 자동차산업핵심기술개발사업 “안전 규제 대응 및 사고 방지를 위한 상용차용 공압식 차량 안정성 제어 시스템 개발”과제의 성과물로서 관계자 여러분께 감사드립니다.

(과제번호 : 10070168).

References

- 1) S. H. Lim, J. C. Jung, D. G. Hong, S. O. Han, K. S. Huh, H. Y. Cho and J. M. Yoon, “Development of a Vehicle Mass Estimation Algorithm for an Adaptive Roll Stability Control,” KSAE Fall Conference Proceedings, pp.745-751, 2006.
- 2) Y. S. Yoon, Y. J. Park and H. J. Kim “Study on Online Estimation of Vehicle Mass and Road Grade using a Recursive Least Squares Method with Multiple Forgetting Factors,” KSAE Annual Conference Proceedings, pp.1816-1819, 2010.
- 3) K. G. Han, I. K. Kim, S. K. Kim and K. S. Huh “Real-Time Vehicle Mass Estimation for Active Rollover Prevention System,” Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol.36, No.6, pp.673-679, 2012.
- 4) S. S. Kim, S. T. Park, T. W. Park, B. W. Park, D. Y. Lee and D. P. Hong, Vehicle Dynamics, JinSem Media, Seoul, p.29, 2002.
- 5) P. Erik and A. Linnea, Vehicle Mass and Road Grade Estimation using Recursive Least Squares, M. S. Thesis, Lund University, Sweden, Lund, 2016.
- 6) G. Tejas, Estimation of Vehicle Mass and Road Grade, M. S. Thesis, Clemson University, United States of America, Clemson, 2008.
- 7) A. Vahidi, M. Druzhinina, A. Stefanopoulou and H. Peng, “Simultaneous Mass and Time-Varying Grade Estimation for Heavy-Duty Vehicles,” Proceedings of American Control Conference, Denver, Colorado, United States of America, 2003.
- 8) J. W. Seok, K. S. Choi, J. S. Lee and S. W. Cho “An Improved New RLS Algorithm with Forgetting Factor of Erlang Function for System Identification,” Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol.5, No.4, pp.394-402, 1999.
- 9) TruckSim User’s Manual, <https://www.carsim.com/>, 2018.
- 10) MATLAB/SIMULINK User’s Manual, <http://www.mathwork.com>, 2018.
- 11) M. S. Kim and G. J. Choi, “Development of Mass Estimation Algorithm for Real-time Commercial Vehicle,” KSAE Fall Conferene Proceedings, pp.422-423, 2017.