

차량동특성 및 도로경사도 추정에 관한 연구

A Study on the Vehicle Dynamics and Road Slope Estimation

김문식^{1*}

Moon-Sik Kim^{1*}

〈Abstract〉

Advanced driving assist system can support safety of driver and passengers which may require vehicle dynamics states as well as road geometry. It is essential to have in real-time estimation of related variables and parameters. Among the road geometry parameters, road slope angle which can not be measured is essential parameter in pose estimation, adaptive cruise control and others on sag road. In this paper, Kalman filter based method for the estimation of the vehicle dynamics and road slope angle using a nonlinear vehicle model is proposed. It uses a combination of Kalman filter as Cascade Extended Kalman Filter. CEKF uses measured vehicle states such as yaw rate, longitudinal/lateral acceleration and velocity. Unknown vehicle parameters such as center of gravity and inertia are obtained by 2 D.O.F lateral model and experimentally. Simulation and Experimental tests conducted with commercialized vehicle dynamics model and real-car.

Keywords : vehicle dynamics, road slope angle, vehicle parameter estimation, cascade Kalman filter

^{1*} 주저자, 교신저자, 정회원 자동차부품연구원
자율주행연구센터
E-mail: mskim@katech.re.kr

^{1*} Automated Driving Systems R&D Center, Korea
Automotive Technology Institute

1. 서론

최근 자율주행자동차는 카메라, 레이더와 같은 환경센서중심의 자율주행차(AV : Autonomous Vehicle)에서 협조형자율주행차(CAV : Connected Automated Vehicle)로 발전하고 있다. 환경센서는 주변차량, 보행자와 같은 장애물을 인식하는데 사용되고 있지만, 주행도로의 종단경사, 횡단경사와 같은 도로특성을 파악하기에는 어려움이 따르기 때문에, CAV에서는 이러한 정보를 디지털맵이나 실시간 통신을 통해 차량에 제공하고 있다. 특히, 도로의 종단경사정보는 차량의 필요동력을 예측 가능하게 하여 연비개선효과와 더불어 고속도로 구배도로구간에서 ACC(Adaptive Cruise Control) 시스템의 성능 및 승차감 향상효과를 기대할 수 있다[1]. 또한, 차량의 종/횡방향 가속도, 타이어 반력 등과 같은 차량의 동특성에도 영향을 미치기 때문에, 도로종단경사 정보를 추정을 통해 ABS(Anti-Lock Brake System), ESC(Electronic Stability Control)와 같은 차량의 안전장치의 성능향상에 기여할 수 있다. 기존연구는 타이어모델을 포함하는 차량동역학 모델 기반의 연구가 수행되어 왔으나, 계산량이 많고 타이어 모델 파라미터를 확보해야 하는 어려움이 있고, 추가 센서를 활용하는 방법도 있으나 차량에 추가센서를 장착해야 하는 부담이 있다[2][3].

본 연구에서는 전륜구동형 3자유도 차량모델을 제안하고 연속형 칼만필터(CEKF : Cascade Extended Kalman Filter)를 활용하여 차량동특성과 도로의 종단경사도를 동시에 추정한다. 3자유도 차량모델은 동특성 추정에 활용하며 차량에 기 탑재되어 있는 요레이트, 가속도, 차속정보를 사용하여 시뮬레이션과 실차실험으로 추정유효성을 검증하였다.

2. 차량모델

차량의 종/횡방향 병진운동 및 요방향 회전운동을 포함하는 3자유도 차량동역학 모델에서 전륜구동 차량을 대상으로 하여 후륜타이어의 종방향힘은 없는 것으로 가정하여 추정변수의 수를 최소화하였다[4][5]. 차량모델중 종방향 모델은 도로종단경사에 의한 중력가속도를 반영하였으며 2차 칼만필터에서 한번 더 활용된다. 차량 동특성은 차량과 노면에 작용하는 타이어 외력에 의해 영향을 받으며, 이를 3자유도 차량모델과 경사노면에서의 역학관계로 표현할 수 있으며, 그림 1에는 3자유도 차량모델, 그림 2에는 경사로에서의 차량모델을 나타내었다.

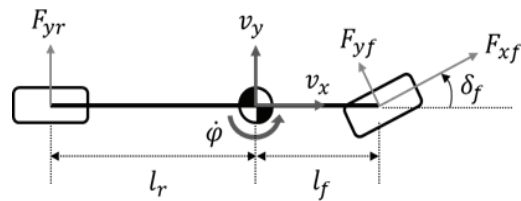


Fig. 1 3 D.O.F. vehicle model

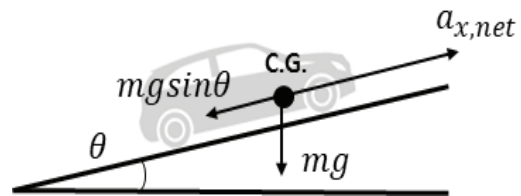


Fig. 2 Vehicle model in slope road

도로 종단경사를 포함하는 3자유도 차량모델의 운동방정식은 식 (1)~(3)과 같다. 여기서 θ 는 도로의 종단경사이며, m 은 차량의 질량, v_x , v_y 는 각각 차량의 x, y축 주행속도, ψ 는 요레이트, δ_f 는 전륜조향각, l_f , l_r 은 각각 차량무게중심에서의

전륜, 후륜까지의 거리, F_{xf} , F_{yf} , F_{yr} 은 각각 전륜타이어의 x, y축 방향의 힘, 후륜타이어의 y축 힘을 나타낸다.

$$\sum F_x = m(\dot{v}_x - \dot{\psi}v_y + g\sin\theta) = F_{xf}\cos\delta_f - F_{yf}\sin\delta_f \quad (1)$$

$$\sum F_y = m(\dot{v}_y + \dot{\psi}v_x) = F_{xf}\sin\delta_f + F_{yf}\cos\delta_f + F_{yr} \quad (2)$$

$$\sum M_z = I_z\ddot{\psi} = l_f F_{xf}\sin\delta_f + l_f F_{yf}\cos\delta_f - l_r F_{yr} \quad (3)$$

차량의 센서에서 측정된 측정가속도 $a_{x,mea}$ 과 도로종단경사에 의한 중력가속도가 반영되지 않은 동체의 순수 가속도 $a_{x,net}$ 은 다음과 같은 수식으로 정리할 수 있다. 또한, 도로경사로 인한 중력가속도와 종방향가속도의 상관관계는 식(4)를 사용한다.

$$a_{x,mea} = a_{x,net} + mg\sin\theta \begin{cases} \text{if downhill, } \theta \geq 0 \\ \text{if uphill, } \theta < 0 \end{cases} \quad (4)$$

3. 칼만필터 설계

3자유도 차량모델이 비선형모델이므로 확장 칼만필터(EKF : Extended Kalman Filter)를 사용하였으며, 선형화를 위해 Jacobian 기반 편미분 선

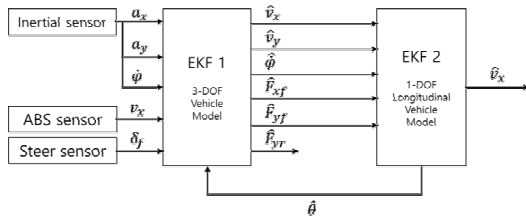


Fig. 3 Block diagram of CEKF

형화 기법을 적용하였다. 또한, 하나의 칼만필터를 적용하면 가관측성(observability)을 위반하므로, 차량동특성 추정 칼만필터와 도로종단경사 칼만필터를 분리하여 연속적으로 적용한 연속형 확장칼만필터인 CEKF를 적용하였다.

3.1 차량동특성 추정

차량의 거동상태를 추정하기 위해 첫 번째 칼만필터의 모델식은 6개의 상태변수를 포함하는 상태공간식의 형태로 표현하였다.

$$\mathbf{x} = [v_x \quad v_y \quad \dot{\psi} \quad F_{xf} \quad F_{yf} \quad F_{yr}]^T \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_x \\ \dot{v}_y \\ \dot{\psi} \\ \dot{F}_{xf} \\ \dot{F}_{yf} \\ \dot{F}_{yr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\psi} + \frac{1}{m}(F_{xf}\cos\delta_f - F_{yf}\sin\delta_f - mg\sin\theta) \\ -\dot{\psi}v_x + \frac{1}{m}(F_{xf}\sin\delta_f + F_{yf}\cos\delta_f + F_{yr}) \\ \frac{1}{I_z}(l_f F_{xf}\sin\delta_f + l_f F_{yf}\cos\delta_f - l_r F_{yr}) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

칼만필터 측정모델의 경우 차량에서 측정가능한 변수인 차량속도, 조향각도, 종방향가속도, 횡방향가속도, 요레이트 측정 변수로 사용하였으며, 상태공간 모델은 식(6)과 같이 표현할 수 있으며, 종방향가속도의 경우 실제 계측값인인 $a_{x,mea}$ 로 나타낸다.

$$z = [v_x \quad \dot{\psi} \quad a_{x,mea} \quad a_y] \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} v_x \\ \dot{\psi} \\ a_{x,mea} \\ a_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x \\ \dot{\psi} \\ F_{xf}\cos\delta_f - F_{yf}\sin\delta_f \\ F_{xf}\sin\delta_f + F_{yf}\cos\delta_f + F_{yr} \end{bmatrix}$$

첫 번째 칼만필터의 가관측성 검증을 위해 rank 계산을 수행하며 시스템모델과 측정모델은 식(7)로 표현할 수 있다.

$$x(k+1) = A_J x(k) \quad (7)$$

$$y(k) = C_J x(k)$$

여기서, A_J 와 C_J 는 각각 자코비안 기반의 선형화된 시스템모델과 측정모델을 나타낸다.

이들 모델의 rank 는 식(8)로 계산할 수 있으며, 계산결과 가관측성 행렬인 M_{obs} 의 rank 값이 6으로 설정한 상태변수와 같으므로 가관측성이 확보됨을 검증하였다.

$$M_{obs} = \begin{bmatrix} C_J \\ C_J A_J \\ \vdots \\ C_J A_J^{n-1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

3.2 도로종단경사 추정

도로종단경사 각도 θ 를 포함하는 1자유도 중방항모델과 첫 번째 칼만필터의 추정결과값을 사용하여 다음과 같이 표현할 수 있으며, 역시 가관측성이 확보됨을 알 수 있다.

$$x = [v_x \ \theta]^T \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_x \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi v_y + \frac{1}{m}(F_{x_f} \cos \delta_f - F_{y_f} \sin \delta_f - mg \sin \theta) \\ 0 \end{bmatrix}$$

4. 시뮬레이션

설계된 칼만필터를 시뮬레이션으로 검증하기 위

해 모델식에 사용되는 차량모델을 추정하고, 차량 동역학 소프트웨어인 Carsim을 사용하여 1차 검증을 수행하였다.

4.1 차량모델 추정

대상차종은 현대자동차의 그랜저HG를 사용하였으며 차량의 질량, 질량중심, 회전관성모멘트를 추정하기 위해 식(10)과 같이 차량의 2자유도 횡방향 모델을 정의하고 실차실험을 통해 데이터를 취득하여 Matlab/Simulink 의 System Identification Toolbox를 통해 해당 파라미터의 값을 다음과 같이 추정하였다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ a_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{C_r l_r^2 + C_f l_f^2}{I_z a_y} & \frac{C_r l_r + C_f l_f}{I_z a_y} \\ -a_y + \frac{C_r l_r + C_f l_f}{m a_y} & -\frac{C_f + C_r}{m a_y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi \\ a_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{C_f l_f}{I_z} \\ \frac{C_f}{m} \end{bmatrix} \delta_f$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ v & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi \\ a_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Yaw \ rate \\ lateral \ acceleration \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서, C_f, C_r 은 각각 전륜, 후륜타이어의 코너링 강성 파라미터를 나타낸다.

그림 4는 2자유도 횡방향 모델 추정을 위해 개발한 Simulink 프로그램이며, 그림 5~7은 각각 슬

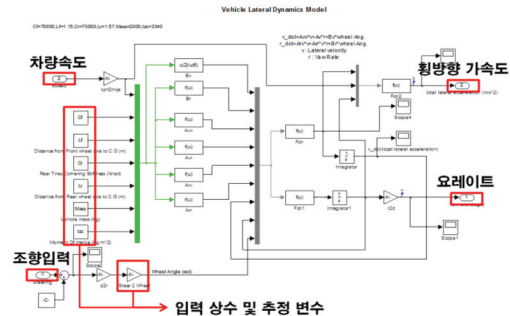


Fig. 4 Vehicle parameter estimation

라룸, 좌회전, 우회전 실험을 통해 추정된 차량모델과 실제 차량의 횡방향 가속도를 비교하여 나타낸 것으로 추정된 모델이 실제와 유사함을 알 수 있다.

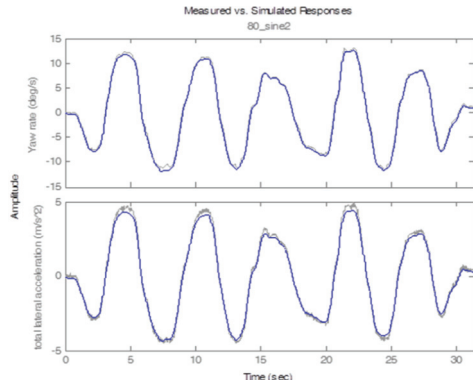


Fig. 5 Slalom driving

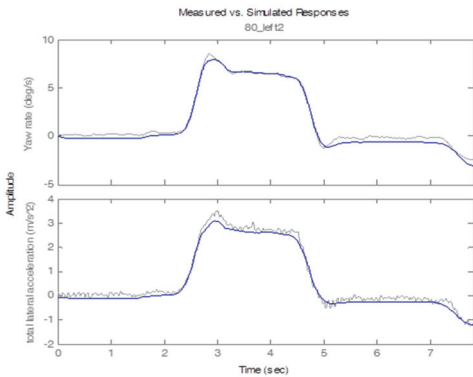


Fig. 6 Left-turn driving

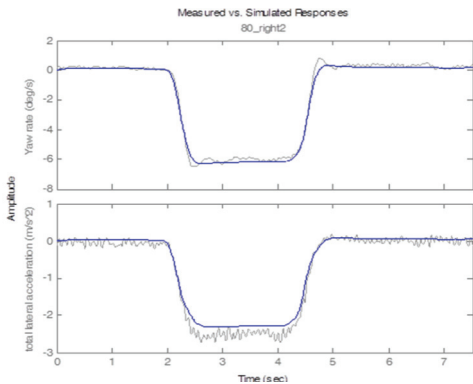


Fig. 7 Right-turn driving

표 1은 추정된 차량의 파라미터를 나타내며 엔진이 전방에 탑재된 전륜차량의 경우 무게중심이 차량 앞쪽에 있어 l_f 가 l_r 보다 작은값이 나오므로 유효한 결과로 생각할 수 있다. 또한, 실험차종의 제원상 축거가 2.845m 로 l_f 를 구하면 l_r 은 자연스레 계산할 수 있다.

Table 1. Results of vehicle parameters estimation

$m[kg]$	$l_f[m]$	$l_r[m]$	$I_z[kg \cdot m^2]$
1999.1	0.54122	2.30378	2573.4

4.2 Carsim 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 알고리즘의 유효성을 검증하기 위해 차량동역학 해석틀인 Carsim을 사용하여 최대속도 50KPH 로 평지에서 경사도 15deg 도로를 주행하는 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 8은 차량의 속도를 나타내며, 그림 9는 종방향가속도인데 a_{mea} 과 a_{net} 의 차이가 도로의종단 경사임을 알 수 있다. 그림 10은 최종적으로 추정된 도로종단경사인데 대체로 잘 추정을 하고 있으나, 기어 변속지점인 8초 부근에서 차량의 피치운동으로 인해 오차가 발생함을 알 수 있다.

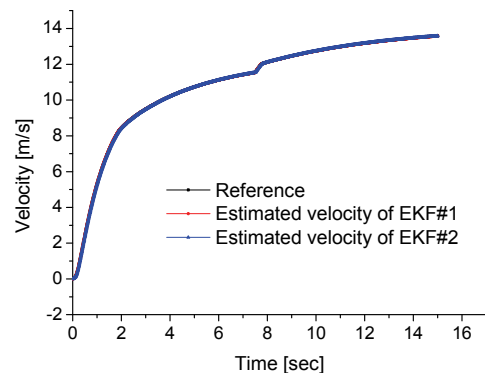


Fig. 8 Estimated vehicle velocity

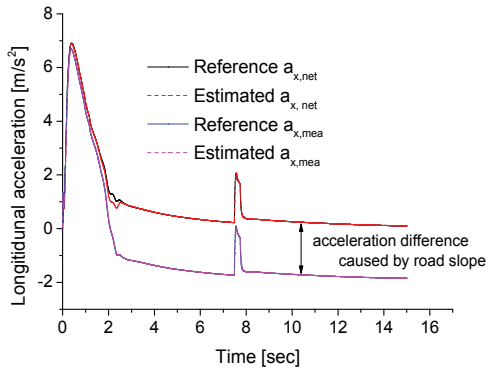


Fig. 9 Estimated longitudinal acceleration

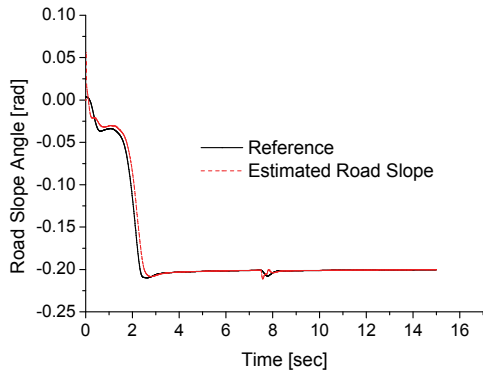


Fig. 10 Estimated road slope angle

5. 실차실험

실차실험은 평지도로에서 차량의 동특성 추정 성능을 경사로에서 종단경사도 추정성능을 검증하는 순으로 진행하였다. 차량의 파라미터는 앞선 차량 모델추정에서 도출하였으며, 차량의 속도, 가속도, 요레이트 등은 차량의 In-Vehicle Network에 DAQ 장비를 탑재하여 수집하였다. 평지에서의 슬라롬 주행시 실험 결과를 그림 11~14에 표현하였다. 초기 주행 급가속, 100초 부근은 급감속 구간으로 그림 14의 전륜타이어의 종방향 힘이 실제차량의 거동과 유사하게 추정됨을 알 수 있

다. 그림 15의 도로 경사도 추정값은 급가감속에 따른 차량 피치모션이 반영되어 $\pm 0.1\text{rad}$ 내에서 노이즈처럼 나타남을 알 수 있다. 그림 16~18은 경사로 주행 실험결과를 보여준다. 해당도로 경사도의 기준 값을 얻기 위해 Xbow 사의 고정밀 IMU 장치를 기준값으로 측정하여 비교하였다. 주행후 30초 부근은 과속 방지턱을 통과하는 지점으로 그림 22를 보면 IMU의 각도 계측값은 많은 진동노이즈를 가지고 있는 반면, 추정값은 노이즈가 제거되었음을 알 수 있다. 또한, 주행후 2초 50초 부근은 가속, 감속 구간으로 차량의 피치 모션의 영향이 복합적으로 반영되어 도로경사도 추정 오차가 커짐을 알 수 있다.

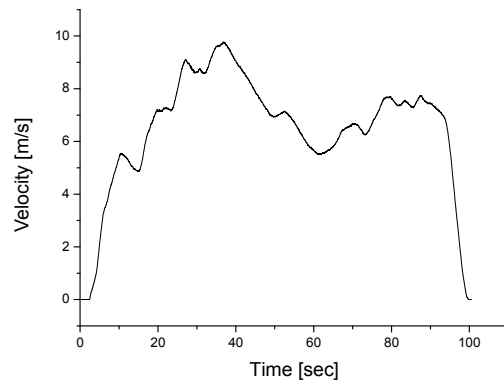


Fig. 11 vehicle velocity (slalom-flat road)

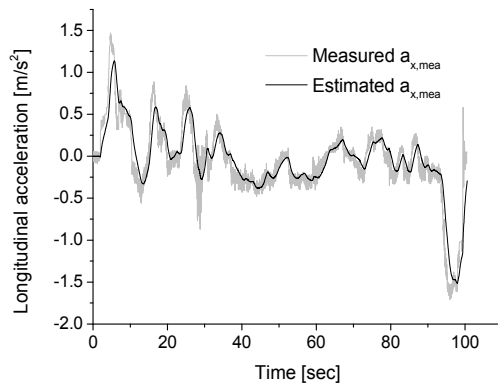


Fig. 12 Estimated longitudinal acceleration (slalom-flat road)

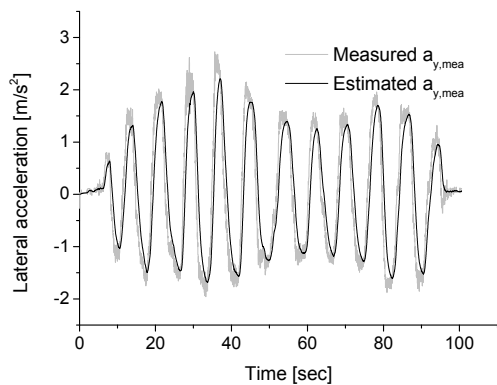


Fig. 13 Estimated lateral acceleration (slalom-flat road)

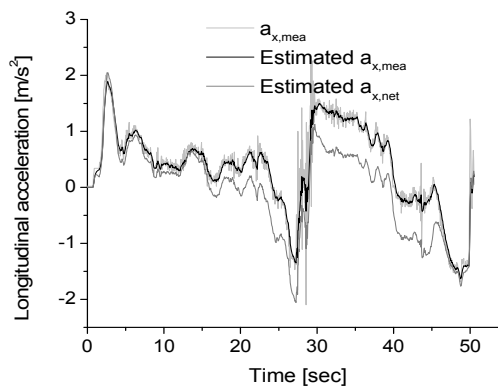


Fig. 16 Estimated longitudinal acceleration (slope road)

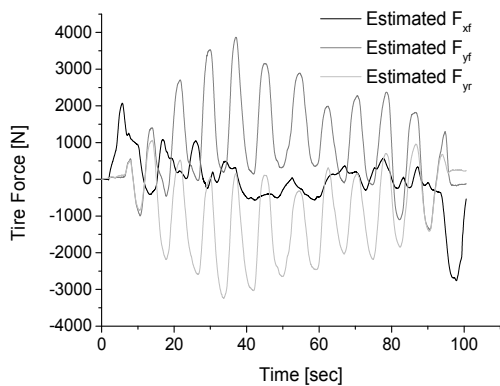


Fig. 14 Estimated tire force (slalom-flat road)

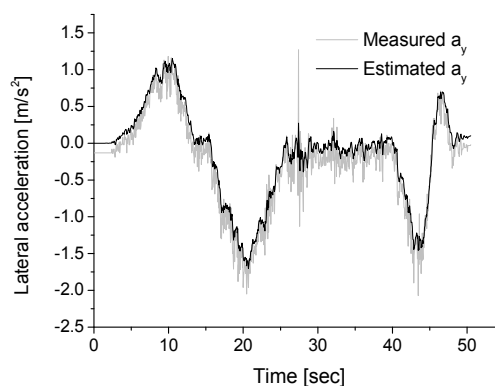


Fig. 17 Estimated lateral acceleration (slope road)

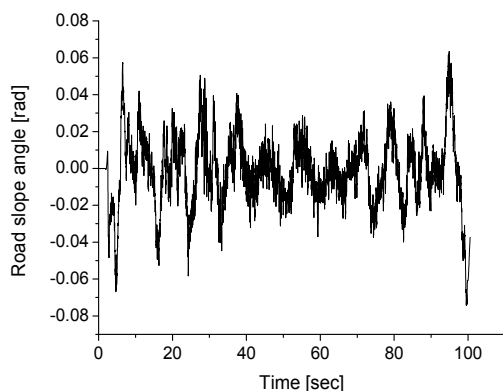


Fig. 15 Estimated road slope angle (slalom-flat road)

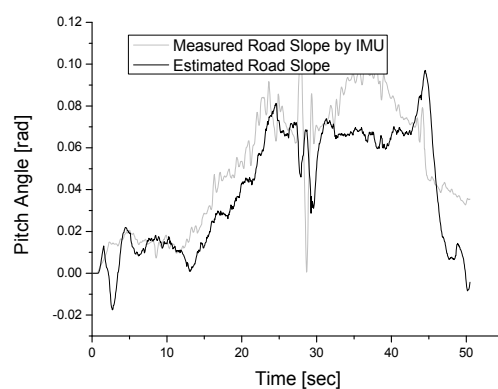


Fig. 18 Estimated road slope angle (slope road)

6. 결 론

본 논문에서는 추가 센서 장착없이 차량의 동특성과 도로종단경사를 추정할 수 있는 알고리즘을 제시하고, 차량모델 추정 및 시뮬레이션과 실차 실험을 통해 그 타당성을 검증하였다. 개선된 3자유도 차량모델과 Cascade EKF를 이용하여 차량의 동특성과 도로종단경사를 추정하였으며, 추가 센서장착없이 차량에서 기본적으로 제공되는 주행속도, 요레이트, 종/횡방향가속도 등을 측정변수로 사용하여, 평지 및 경사로에서의 실험결과를 제시하였다.

하지만, 급가속, 급감속에 의해 차량 서스펜션에 의한 피치 운동이 발생하는 구간에서는 도로경사에 의한 영향과 차량 피치모션이 복합적으로 발생하여 강인한 결과를 얻기 어려웠다. 향후 차량의 서스펜션 모델을 적용하여 도로경사와 차량의 피치모션을 구분 추정하는 연구가 수행되어야 할 것이다.

후 기

본 논문은 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술평가관리원(과제번호:20003044)의 지원을 받아 수행된 결과임.

참고문헌

- [1] Y. G. Kim, J. S. Lee, H. S. Wi, J. I. Park and J. H. Lee, "Real-time measurement of the tilt road on vehicle," KSAE research field synthesize Conf., pp. 727-729, Korea, (2012).
- [2] Y. Sebsadji, S. Glaser, S. Mammam and J. Dakhallah, "Road Slope and Vehicle Dynamics Estimation," American Control Conf., FrB09.5, Washington, USA, (2008).
- [3] J. Y. Kim, J. H. Lee, J. M. Byun and S. H. Kim, "Localization Performance Improvement for Mobile Robot using Mutiple Sensors in Slope Road," Journal of IEIE, Vol. 47, no. 1, pp. 67-75, (2010).
- [4] S. Y. Lee, E. G. Kim, D. H. Lee and G. S. Huh, "Vehicle longitudinal velocity estimation on inclined road," Transactions of KSAE, Vol. 20, no. 1, pp. 14-19, (2012).
- [5] H. G. Byun, E. G. Kim, H. G. Kim and G. S. Huh, "Climbing angle estimation in yawing motion," KSAE research field synthesize Conf., pp. 731-733, Korea, May, (2013).

(접수: 2019.06.07. 수정: 2019.09.02. 게재확정: 2019.09.09.)