

모델 통합을 이용한 강인한 차량 Side-Slip Angle 관측기 설계에 관한 연구

손 현 우*¹⁾·최 세 범²⁾
한국과학기술원 기계공학과 ¹⁾²⁾

A Study on Design of a Robust Vehicle Side-Slip Angle Observer using an Integration of Kinematic and Bicycle Model

Hyunwoo Son*¹⁾ · Seibum Choi²⁾

^{1) 2)} Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 335 Gwahangno, Yuseong-gu,
Daejeon 305-701, Korea

Abstract : This paper introduces the analysis of a well-known vehicle side-slip angle estimator which is based on kinematic and bicycle models and presents a new integrated model-based observer system strategy to guarantee robust performance. The proposed system also has compensation algorithm for biased inputs, which are lateral and longitudinal acceleration, by estimating roll and pitch angle. The system ensures reliable inputs for the kinematic based observer and also reliable output for the adjusted bicycle model-based observer. The proposed system consisting of each subsystem is decoupled for stability. The performance of the proposed system is verified and evaluated for a variety of situations and maneuvers by using CarSim and Matlab/Simulink.

Key words : Kinematics model(동적 모델), Bicycle model(자전거 모델), Time varying observer(시변 관측기), Luenberger observer(Luenberger 관측기), Lyapunov stability (Lyapunov 안정성), Side-Slip angle(차량 미끄럼 각), Roll angle(롤 각), Pitch angle(피치 각), Convex combination(convex 조합)

Nomenclature

C_f : front tire cornering stiffness, N/deg
 C_r : rear tire cornering stiffness, N/deg
 l_f : distance form C.G to front axle, m
 l_r : distance form C.G to rear axle, m
 L : wheel base, m
 δ_f : ground contact steering angle, deg
 m : sprung mass, kg
 β : side-slip angle, deg
 $r_{or} \dot{\phi}$: yaw rate, deg/s
 k_u : understeer coefficient, deg/g

Φ : bank angle + suspension roll angle, deg
 θ : pitch angle + suspension pitch angle, deg
 v_{xpm} : pseudo-measurement longitudinal velocity, m/s
 v_x : actual longitudinal velocity, m/s
 v_y : actual lateral velocity, m/s
 a_y : actual lateral acceleration, g
 a_{ym} : measured lateral acceleration, g
 a_x : longitudinal acceleration, g
 a_{xm} : measured longitudinal acceleration, g
 I_z : inertia of yaw moment, kg/m^2
 n_a : noise of the acceleration sensor, g
 n_r : noise of the yaw rate sensor, deg/s

* 손현우, E-mail: hyunwoos@kaist.ac.kr

1. 서론

최근 차량 부품의 전자화가 급속도로 이루어지면서 운전자의 안정성과 편의성을 보조해주는 차량 동역학 제어기에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이는 ACC, ABS, TCS와 같은 종방향 안정성 제어기와 ESP, VDC, ROC와 같은 횡방향 안정성 제어기로 크게 구분 되어진다. 하지만 이러한 시스템은 차량 모델을 구성하고 있는 tire와 suspension의 강한 비선형적 특성과 차량 노면과 tire의 최대 마찰계수의 한계와 비예측성 등의 요인들로 인해 차량 거동 특성을 정확히 알 수 없기 때문에 개발에 있어 많은 제약이 뒤따른다. 횡방향 동역학 제어기에서 yaw 속도와 더불어 차량 안정성에 대한 지표로 사용하는 side-slip angle은 특성상 비선형성에 굉장히 민감하므로 아직까지 정확한 관측기 개발이 이루어지지 않았으며 계속해서 많은 연구가 진행되고 있다. 이는 GPS, Optical 센서들을 이용하여 직, 간접적으로 측정⁸⁾이 가능하지만, 이 또한 공간, 기후변화에 민감하게 반응하기 때문에 신뢰성이 떨어지고 단가가 높다는 경제적인 측면에서도 단점이 있다. 이에 측정값의 오차를 분석하기 위한 fault diagnosis와 다양한 형태의 관측기 설계에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다.^{3) 5) 6) 7) 9)}

본 논문에서는 횡 속도와 side-slip angle을 동일한 물리적 의미를 가지므로 특별한 구분 없이 혼용하여 사용하도록 한다. 먼저 기존의 횡 속도 관측기에 대해서 분석한 뒤, 이에 대한 문제점들을 해결하기 위한 관측기 모델을 제시 하도록 한다. Fukada³⁾는 선형 tire 모델을 이용한 tire 횡력과 가속도로부터 직접 계산한 횡력을 조합하여 횡 속도를 추정하는 관측기를 제안하였다. 이는 도로 bank angle과 횡 속도가 서로 couple이 되어 정확도가 굉장히 민감하게 변하는 단점이 있으며, 또한 안정성에 대한 검증이 이루어지지 않았다. Farrelly⁵⁾은 kinematic 기반의 관측기를 제안하고, 오차에 대한 안정성을 검증하였지만 이는 센서 잡음과 모델의 불확실성을 염두에 두지 않은 한계가 있다. 특히 잡음과 불확실성에 대해서는 gain 튜닝을 통해 어느 정도 보상이 가능하지만 입력으로 사용되어 지는 가속도에 미치는 도로 bank angle과 elevation의 영향과 pitch/roll 모션에 의한

효과는 간과하였다. Kaminaga⁵⁾는 tire stiffness의 lyapunov 안정성을 만족시키는 파라미터 추정을 통한 관측기를 제안하였다. 이는 종/횡 하중 변화에 대해 성능을 어느 정도 만족시키지만 고주파수의 steering 입력에 대해서는 성능에 한계를 보였다.

본 논문에서는 기존 관측기에 대한 문제점을 해결하기 위해서 kinematic 기반의 관측기와 수정된 bicycle 모델 기반의 관측기의 적절한 조합을 제시하고 가속도 입력에 대한 기존 방법에 대한 문제점을 고찰 함과 동시에 제안된 알고리즘에 대한 성능을 CarSim과 Matlab/Simulink를 통해 검증하였다.

2. Kinematic 모델기반 관측기 설계

2.1 Kinematic 모델

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_x \\ \dot{v}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \dot{\phi}(t) \\ -\dot{\phi}(t) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_x \\ w_y \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} v_{x-w} \\ v_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} + s_x$$

Asymptotically stable한 시변 관측기 설계를 위해 frozen-time eigen value 방식으로 원하는 극점에 가상으로 위치시키고 Lyapunov 안정성 이론과 Lasalle' s invariance principle을 통해 안정성 검증을 하였다. 이장에서 구현하게 될 시변 관측기는 yaw 속도가 0일 경우에는 unobservable함을 유의해야 한다. 즉, bicycle 모델과의 적절한 협조를 통한 알고리즘 구현이 필요하다.

$$\dot{\hat{x}} = (A(t) - L(t)C)\hat{x} + Bu + L(t)y_m \quad (1)$$

$$L(t) = \begin{bmatrix} L_1 = 2\alpha|\dot{\phi}(t)| \\ L_2 = (\alpha^2 - 1)\dot{\phi}(t) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\alpha > 0 \iff (\lambda + \alpha|\dot{\phi}(t)|)^2$$

$$V(t, x) = \frac{\alpha^2 \tilde{v}_x^2 + \tilde{v}_y^2}{2} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{dV(t,x)}{dt} &= -2\alpha^3 |\dot{\phi}(t)| \tilde{v}_x^2 + (\alpha^2 w_x - 2\alpha^3 |\dot{\phi}(t)| s_x) \tilde{v}_x \\ &\quad + (w_y + (1-\alpha^2) \dot{\phi}(t) s_x) \tilde{v}_y \\ &\approx -2\alpha^3 |\dot{\phi}(t)| \tilde{v}_x^2 < 0, \\ \forall x &= [\tilde{v}_x, \tilde{v}_y] \in R^2 - [0,0] \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)에서 보여지듯이 일반적으로 센서 잡음과 모델의 불확실성은 시스템의 안정성에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 하지만 이와 같은 요소에 의한 영향은 적절한 gain 튜닝을 통해 성능을 만족시킬 수가 있다.

2.2 시뮬레이션을 통한 검증

Kinematic 모델 기반의 관측기는 차량 파라미터와 노면과의 상관관계측면에서는 굉장히 강인한 성능을 보이지만 센서 입력 값에 의해서는 민감한 성능변화(fig.1, fig. 2)를 보였다. 이에 대한 보완 방법으로 4장에서 나오는 bank/elevation angle 추정에 신뢰성을 확보할 수 있는 방안을 강구 할 필요가 있다.

본 논문에서의 구현 된 시뮬레이션은 Sampling time은 0.01sec로 정하고 안정성을 확보하기 위해서 backward approximation을 사용 하였다.

$$s = \frac{1 - Z^{-1}}{T_s} \quad (5)$$

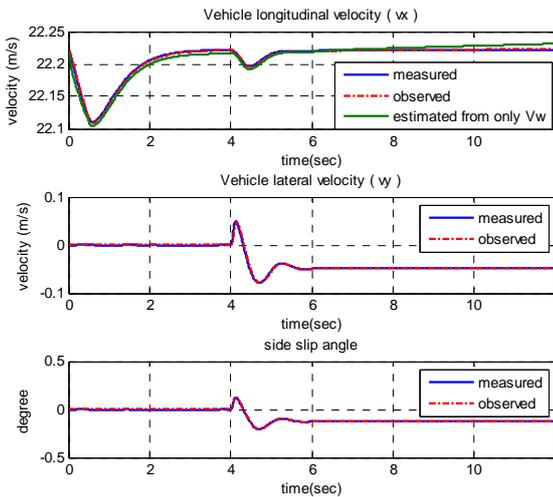


Fig. 1 High mu, step steer, 80kph using compensated $a_{x/y}$

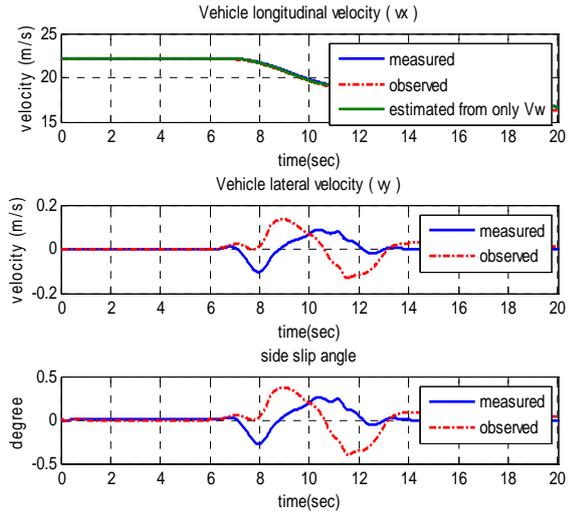


Fig. 2 High mu, DLC, 80kph using compensated $a_{x/y}$

3. Bicycle 모델기반 관측기 설계

기존의 논문들에서 사용되어 지는 bicycle 모델은 측정되어지는 출력 값을 오직 yaw 속도만을 사용하기 때문에 tire의 stiffness변화에 따라서 관측기의 성능이 항상 보장이 되지 못하는 경향이 있다. 그리고 선형tire 모델을 이용하고 차량 무게를 nominal 값으로 사용하기 때문에 파라미터 변화에 유연하게 반응하지 못하는 단점이 있다. 본 논문에서는 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 수정 된 bicycle 모델을 제안한다.

3.1 수정 된 Bicycle 모델

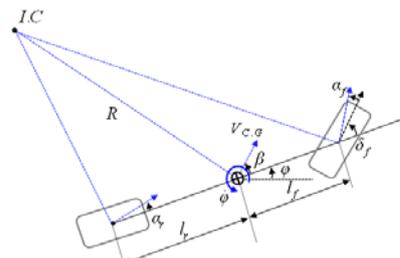


Fig. 3 Bicycle model

$$a_y = \dot{v}_y + r v_x \approx v_x (\dot{\beta} + r) \quad (5)$$

기존 bicycle 모델과 (5)의 식을 통해 횡 가속도를 새로운 출력 상태변수로 활용하면 다음과 같이 수정된 plant 모델을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du\end{aligned}$$

$$x = \begin{bmatrix} \beta \\ r \end{bmatrix}, y = \begin{bmatrix} r_m \\ a_{y_act} \end{bmatrix}, u = \delta_f$$

$$a_{y_act} = a_{ym} - \Delta a_y = a_y$$

$$A = \begin{bmatrix} -2(C_f + C_r)/mv_x & -2(l_f C_f - l_r C_r)/mv_x^2 - 1 \\ -2(l_f C_f - l_r C_r)/I_z & -2(l_f^2 C_f + l_r^2 C_r)/I_z v_x \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 2C_f/mv_x \\ 2l_f C_f/I_z \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 \\ 2C_f/m \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -2(C_f + C_r)/m & -2(l_f C_f - l_r C_r)/mv_x \end{bmatrix}$$

수정된 bicycle 모델을 이용하여 side-slip angle 에 대한 Luenberger 관측기를 설계하였다. 이 때 관측기의 gain 을 설정할 때 다음과 같이 시스템 파라미터의 변화와 불확실성에 대한 효과를 최소화 하도록 한다.

$$A_{ij_r} = A_{ij} + \zeta_a (\Delta C_{f/r}, \Delta v_{xpm}) \quad (6)$$

$$B_{i_r} = B_i + \zeta_b (\Delta C_{f/r}, \Delta v_{xpm}) \quad (7)$$

$$C_{f/r_r} = C_{f/r} + \Delta C_{f/r} \quad (8)$$

$$v_x = v_{xpm} + \Delta v_{xpm} \quad (9)$$

상기의 (6), (7), (8), (9)식은 실제 시스템과 선형 근사화 된 시스템의 관계를 나타내며 이를 이용해 구하고자 하는 side-slip angle 의 error dynamics 를 표현하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned}\dot{\beta} - \hat{\dot{\beta}} &= (A_{11_r} \beta - A_{11} \hat{\beta}) + (A_{12_r} r - A_{12} \hat{r}) \\ &+ (B_{1_r} - B_1) \delta_f - K_{11} (r - \hat{r}) - K_{12} (a_y - \hat{a}_y) \\ &= A_{11} (1 - K_{12} v_x) (\beta - \hat{\beta}) \\ &+ (1 - K_{12} v_x) (A_{11_r} - A_{11}) \beta \\ &+ (1 - K_{12} v_x) (A_{12_r} - A_{12}) r \\ &+ [A_{12} (1 - K_{12} v_x) - K_{11} - K_{12} v_x] (r - \hat{r}) \\ &+ (1 - K_{12} v_x) (B_{1_r} - B_1) \delta_f \\ &= -(1 + K_{11}) (r - \hat{r}) \Big|_{K_{12}=1/v_x} \quad (10)\end{aligned}$$

상기의 error dynamics 와 reverse design 을 통한 음의 극점배치를 통해 파라미터 변화에 강인하면서 동시에 asymptotical stability 를 만족하는 gain matrix (11)을 구할 수가 있다.

$$A_o = A - KC$$

$$\det(sI - A_o) = (s - p)^2 = 0, p = \text{real value} < 0$$

\therefore

$$K = \begin{bmatrix} \frac{I_z p^2}{2C_f C_r L^2} - 1 & \frac{1}{v_{xpm}} \\ -2p & \frac{m(l_f^2 C_f + l_r^2 C_r)}{I_z (l_f C_f - l_r C_r)} \end{bmatrix} \quad (11)$$

3.2 시뮬레이션을 통한 검증

수정된 bicycle 모델 기반의 성능은 CarSim을 통한 다양한 상황에서 검증하였다.

기존의 bicycle 모델의 한계점은 cornering stiffness와 같이 tire 모델의 파라미터가 모든 상황에서 상수가 아니며 그 변화 정도에 달려있다는 것은 잘 알려진 사실이다. 그러므로 수정된 관측기의 성능을 살펴 보기 위해서 동일한 상황을 설정하고 stiffness에 변화를 주는 방식으로 성능을 검증하였다.

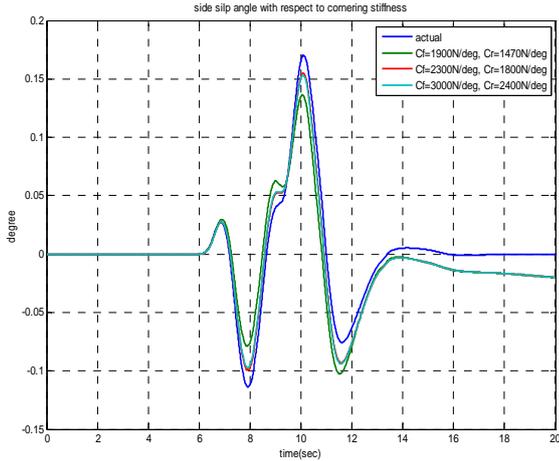


Fig. 4 High mu, DLC, 80kph

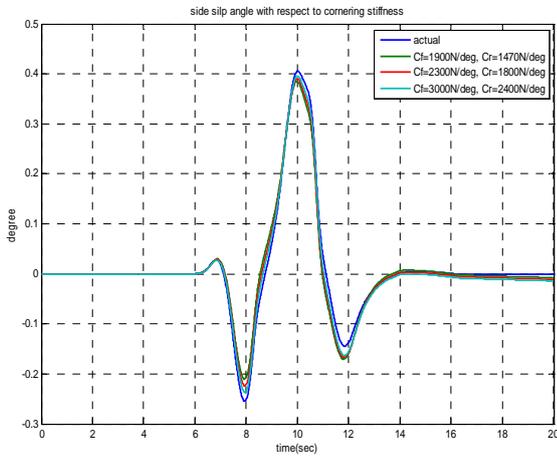


Fig. 5 Low mu, DLC, 80kph

Fig. 5의 결과를 살펴보면 빙판 위의 tire의 비선형적인 특성과 파라미터의 불일치, 즉 stiffness가 50% 가량 변함에도 불구하고 관측된 side-slip angle 강인한 성능을 확인할 수 있다.

4. Bank와 Roll, Pitch angle 추정

Kinematic 모델 기반의 관측기와 수정된 bicycle 모델 기반의 관측기는 측정된 가속도 신호에 민감한 특성을 보인다. 기존의 논문들에서는 도로

bank angle와 suspension의 roll모션에 의한 효과만을 의미 깊게 다루고 있지만 다양한 실험을 통해 도로의 elevation에 의한 영향 역시 간과할 수 없는 것을 알 수 있다.

4.1 Bank angle과 Roll 모션에 대한 고찰

이번 장에서는 Tseng¹⁾의 횡 방향 경사각 관측기에 대한 한계점과 이에 대한 새로운 대안 방안을 제시한다.

Tseng는 선형 bicycle 모델에서 유도한 전달함수와 단순한 센서 기구학을 통해 DFC라는 파라미터를 정의한다. 그리고 실시간 구현상의 용이를 위해 steady state gain을 이용하여 추정하는데, 이때의 문제점은 순수 차량의 roll 모션에 대한 영향을 간과해버리기 때문에 slalom(fig. 4) 테스트와 같이 횡 방향 운동이 dominant한 실험에서는 정확도가 상당히 떨어지는 한계점이 존재하였다.

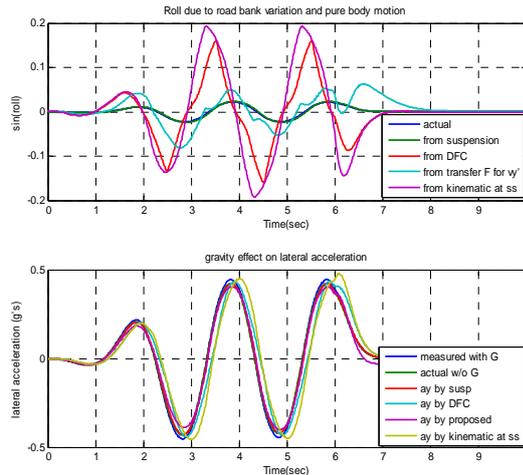


Fig. 6 Slalom test (14kph, 0.5Hz)

본 논문에서는 Tseng이 제시한 DFC의 유도과정에서 간과한 \dot{v}_y 와 DFC간의 직접적인 관계를 유추하여 그에 대해 보상을 시도 하였다.

$$\sin(\hat{\Phi}) = \sin(\hat{\Phi}_{ss}) \cdot \max[0, 1 - |DFC|] \quad (12)$$

$$\sin(\hat{\Phi}_{ss}) = (rv_{xpm} - a_{ym})/g \quad (13)$$

$$DFC \begin{vmatrix} H_{\phi_i \rightarrow r, a_y} \\ H_{\delta_f \rightarrow r, a_y} \end{vmatrix} = \frac{2v_{xpm}^2}{g(L + k_u v_{xpm}^2)} \cdot [k_u \cdot a_{ym} + \left(\frac{r}{v_{xpm}} \right) \cdot L - \delta_f] \quad (14)$$

상기의 DFC는 Tseng이 유도한 식을 나타내며, 아래의 식은 센서 기구학과 bicycle 모델을 이용한 전달함수를 통해 유도된 식이다. 첫 번째 항을 제외 한 나머지 두 항을 보면 DFC의 값이 센서의 잡음과 모델의 불확실성에 영향을 받을 수 있음을 확인할 수 있다. 이는 관측기 설계에 있어 gain 튜닝을 통해 보상이 가능하다.

$$\begin{aligned} DFC &= H_{\phi_i \rightarrow a_y} (\sin \hat{\Phi}_a - \sin \hat{\Phi}_{ss}) \\ &+ v_{xpm} \cdot H_{\phi_i \rightarrow r} (\sin \hat{\Phi}_r - \sin \hat{\Phi}_{ss}) \\ &\approx \frac{(k_u v_{xpm}^2 - L) \dot{v}_y}{L + k_u v_{xpm}^2} + \frac{2k_u v_{xpm}^2 (n_a + n_r v_{xpm})}{L + k_u v_{xpm}^2} \\ &+ 2v_{xpm} \Delta M (\delta_f, \Phi) \end{aligned} \quad (15)$$

n_a, n_r 은 횡 가속도와 yaw 속도 센서의 잡음을 의미하며, ΔM 은 시스템 불확실성을 의미한다.

$$\rho \frac{(k_u v_{xpm}^2 - L)}{L + k_u v_{xpm}^2} \quad (16)$$

식 (16)은 \dot{v}_y 을 추정하기 위한 알고리즘에서 gain으로 사용된다. ρ 은 튜닝 파라미터이다.

다음은 수정된 roll 모션 효과를 포함한 bank angle 관측기의 성능을 검증한 것이다.

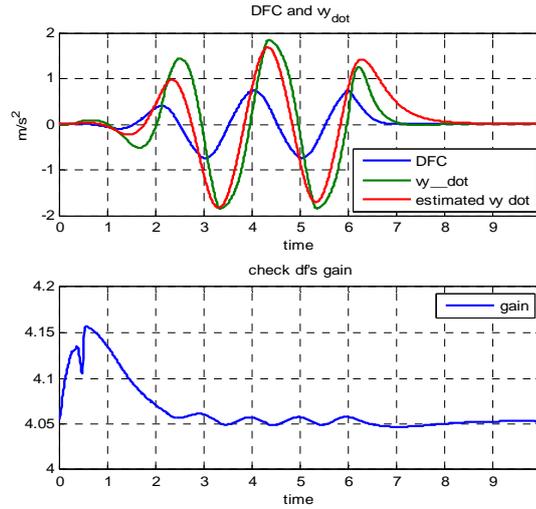


Fig 7. Slalom test (14kph, 0.5Hz)

Fig. 7를 통해 slalom 상황에서도 DFC를 이용해서 추정된 \dot{v}_y 가 굉장히 정확하다는 것 확인할 수 있다. 그리고 Fig. 9를 통해서 추정된 \dot{v}_y 를 통한 bank angle을 포함하면서 추정된 전체 roll 각의 정확도를 확인할 수 있다. 또한 Fig. 9에 대한 결과는 제안된 DFC가 steady state gain을 이용했기 때문에 특정 주파수 이상의 영역에서는 오차가 점점 커짐을 확인할 수 있었다.

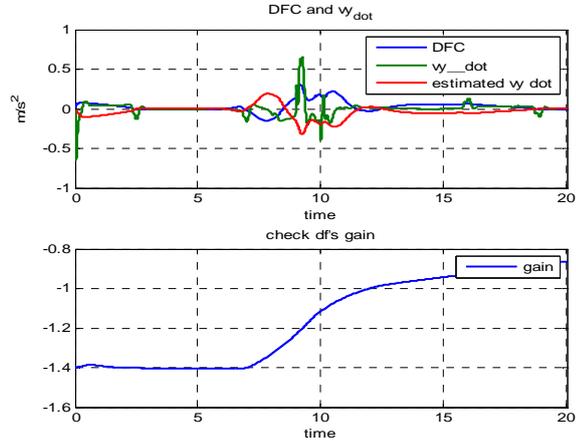


Fig 8. DLC with Bank variation (80kph)

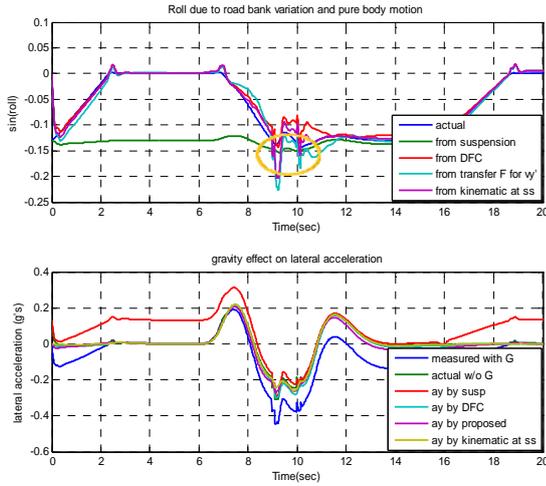


Fig. 9 DLC with Bank variation (80kph)

Fig. 7-9의 결과를 살펴보면 제안된 관측기의 성능이 다양한 상황에서 합리적으로 동작함을 알 수가 있다. 하지만 근원적으로 전달 함수의 steady state gain을 이용하므로 고주파수의 입력에 대한 응답에 있어 다소 쫓아가지 못하는 경향이 있다.

4.2 Elevation과 pitch 모션에 대한 고찰

도로의 중 방향 경사각을 추정 할 경우, 쉽게 구현 가능한 센서 기구학을 일반적으로 이용하며 이는 error의 그 크기가 특정 변수에 의한 함수로 표현되어지고, bound되어 지는 특징을 확인 할 수가 있었다.

$$\begin{aligned}
 a_{xm} + g \sin(\theta) &= \dot{v}_x - r v_y \\
 \Rightarrow \sin(\theta) &= (\dot{v}_x - a_{xm} - r v_y) / g \\
 \sin(\hat{\theta}) &= (\dot{v}_{xpm} - a_{xm} - r \hat{v}_y) / g
 \end{aligned} \tag{17}$$

$$\begin{aligned}
 e_\theta &\triangleq |\theta - \theta_p| \approx |\sin(\theta) - \sin(\hat{\theta})| \\
 &\leq \left| -\Delta \dot{v}_{xpm} / g \right| + \left| (\Delta v_y / v_{xpm}) \hat{a}_y / g \right| \\
 &\Leftrightarrow \hat{a}_y \ll g \\
 &\leq \left| -\Delta \dot{v}_{xpm} / g \right| + \left| (\Delta v_y / v_{xpm}) \right| = \zeta \mapsto 0
 \end{aligned} \tag{18}$$

식 (18)에서 보면 pitch 각은 휠 스피드를 통해 추정된 $\Delta \dot{v}_{xpm}$ 와 Δv_y 에 의해 영향을 받게 되지만 그 크기는 무시할 만큼의 영향을 끼칠 것이라고 예상 되어진다. 실제로도 그에 대한 결과를 다음과 같이 확인 함으로써 관측기의 강인한 성능을 검증하였다.

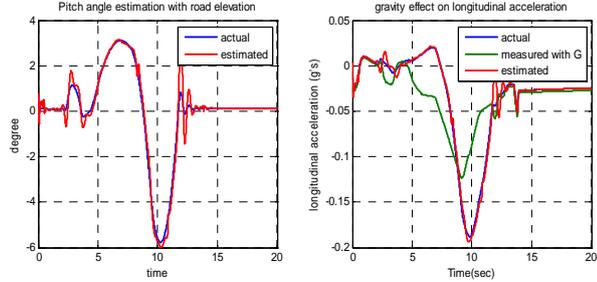


Fig. 10 DLC with road elevation (80kph)

5. 결론

본 논문에서는 선형 근사화 된 기존 2자유도 bicycle 모델의 수정 된 형태와 kinematic 모델 기반의 관측기의 성능을 분석하고 이 2개의 관측기의 상호보완 성능을 가지는 통합 된 형태의 알고리즘을 방안을 제안하였으며 결론은 다음과 같다. steady state gain을 이용하므로 실시간 알고리즘 구현에는 용이 하지만 고주파수의 입력에 대한 응답이 다소 불만족스러웠다. 이는 향후 DFC와 더불어 yaw 속도와 yaw 속도 변화량의 함수를 flag로 사용하여 suspension의 roll motion과의 조합을 이용하게 되면 더 나은 결과를 보일 것을 예상 된다. 현재 Flag를 설정을 위한 fuzzy rule based 기반의 알고리즘에 대한 연구를 진행 중에 있으며, 이는 또한 동일한 flag를 이용하여 bicycle 모델과 kinematic 모델 기반의 관측기의 안정성을 보장해주는 convex combination을 유도할 수 있을 것으로 기대된다.

- 1) 파라미터의 변화와 모델의 불확실성에 대해 강인한 성능을 가진 수정된 bicycle 모델 기반의 관측기를 제안하였고 다양한 상황에서의 성

능을 검증하였다.

- 2) 기존의 도로 횡 경사각 관측 시스템의 transient 상황에서의 특징과 한계점을 분석하고 그에 따른 보완책을 제시하였다.
- 3) 간단한 센서 기구학을 통한 종 방향 경사각과 pitch모션에 대한 관측기를 제안하였고 횡속도와 종 방향 속도의 오차가 존재할 때도 강한 성능을 검증하였다.
- 4) 각 서브시스템간의 decouple 된 전체 알고리즘을 통해 시스템의 안정성을 확보하였고, 본 논문에서 검증단계를 거치지 못하였지만, 두 모델간의 최적 조합을 위한 방법을 제안하면서 앞으로의 해결해야 할 사항을 확인하였다.
- 8) Jihan Ryu, J. Christian Gerdes, "Estimation of Vehicle Roll and Road Bank Angle", American Control Conference, Vp. 3, pp2110~2115, 2004
- 9) Byunghak Kwak, Youngjin Park, Dongshin Kim, "Design of Observer for Vehicle Stability Control", Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress.
- 10) 유승환, 유승진, 한진오, 이교일, "차량 횡 속도 및 도로 횡 경사각의 실시간 추정", 한국자동차 공학회 추계학술대회 논문집 2호, pp. 829~835. 2005.

References

- 1) H.E. Tseng, "Dynamic Estimation of Road Bank angle", Vehicle System Dynamics, Vol. 36, No. 4~5, pp. 307~328, 2001.
- 2) Li Xu, H.E. Tseng, "Robust Model-Based Fault Detection for a Roll Stability Control System", IEEE Trans. on Control Systems Technology, Vol. 15, No. 3, May 2007.
- 3) Y. Fukada, "Slip-angle Estimation for Vehicle Stability Control", Vehicle System Dynamics, Vol. 32, pp. 375~388, 1999.
- 4) H.E. Tseng, Li Xu, Davor Hrovat, "Estimation of land vehicle roll and pitch angles", Vehicle System Dynamics, Vol. 45, No. 5, pp. 433~443, May 2007.
- 5) Jim Farrelly, Peter Wellstead, "Estimation of Vehicle Lateral Velocity", Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Control Applications, Dearborn, MI, 1996, pp. 552~557.
- 6) Ungoren, Ali Y., Peng, H., H.E. Tseng, "A study on lateral speed estimation methods", Int. J. Vehicle Autonomous Systems, Vol. 2, pp. 126~144, 2004.
- 7) Kaminaga, M., Natio, G., "Vehicle Body Slip Angle Estimation using an Adaptive Observer.", Proceeding of the Int. Symposium on Advanced Vehicle Control, 9836635, pp207~212.