

< 응용 논문 >

차량 횡방향 모델 정확도 개선을 위한 타이어 조향각 추정

조 건 희<sup>1)</sup> · 나 호 용<sup>2)</sup> · 조 완 기<sup>3)</sup> · 유 승 한<sup>\*3)</sup>

한양대학교 전기공학과<sup>1)</sup> · 성균관대학교 기계공학과<sup>2)</sup> · 한국기술교육대학교 기계공학부<sup>3)</sup>

Estimation of Wheel Steer Angles for Improving Accuracy of Vehicle Lateral Model

Kunhee Cho<sup>1)</sup> · Hoyong Na<sup>2)</sup> · Wanki Cho<sup>3)</sup> · Seung-Han You<sup>\*3)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Electric Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Korea

<sup>2)</sup>Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Gyeonggi 16419, Korea

<sup>3)</sup>School of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education, Chungnam 31253, Korea

(Received 2 February 2021 / Revised 24 February 2021 / Accepted 25 February 2021)

**Abstract** : In this paper, new estimation methods for vehicle tire steering angles were proposed to improve the accuracy of a vehicle lateral model. There are several error factors in the conventional, single-track model as a result of certain assumptions in the derivation process. The front and rear steering angles can be considered influential input signals to a vehicle lateral model, as well as very large error factors. In conventional vehicle models, the steering angles are determined only by the driver's steering angle. However, in the real world, they are also affected by roll steer and compliance steer. Therefore, the proposed methods, in which roll and compliance are considered, were developed efficiently in the form of an open-loop model by using a lateral acceleration sensor measurement signal. The proposed steering angle estimation models are validated through CARSIM simulations and real-vehicle experiments under different driving conditions.

**Key words** : Wheel steer angle(휠 조향각), Vehicle lateral model(차량 횡방향 모델), Estimation(추정), Model accuracy(모델 정확도), Vehicle lateral control(차량 횡방향 제어)

1. 서론

최근 자동차 시장에서 ADAS(Advanced Driver Assistant System) 제어 기술, 자율 주행 기술이 발전함에 따라 차량 모션 제어의 중요성도 한층 높아지고 있다. 정확한 차량 거동 제어를 위해서는 차량 모델의 역할이 중요하며 보통 차량의 횡방향 거동과 연관된 제어기(Controller) 및 관측기(Observer) 설계 시 국내외에서 Fig. 1과 같은 2자유도 Single track model(다른 표현으로는 Bicycle model)이 기준 모델(Reference model)로 널리 사용되고 있다.<sup>1-3)</sup>

그런데, 기존의 일반적인 2자유도 Single track 모델은 선형 타이어 횡력 모델에 근거하며 다수의 가정 및 단순화로 인해 많은 오차 요인을 갖고 있으며 이로 인해 특별한 보완이나 대응책 수립 없이 그대로 모델을 사용할 경우 주행 상황에 따라 큰 오차를 발생하게 된다. 주로 마찰 한계 영역에서 주행을 하거나 고속 주행 시 그 오

차가 증가하며, 모델의 출력인 요레이트와 횡슬립각 중에서는 횡슬립각에 상대적으로 오차가 더 발생하는 경향이 있다. 실차 조건에서 조향각 오차에 의한 차량 모

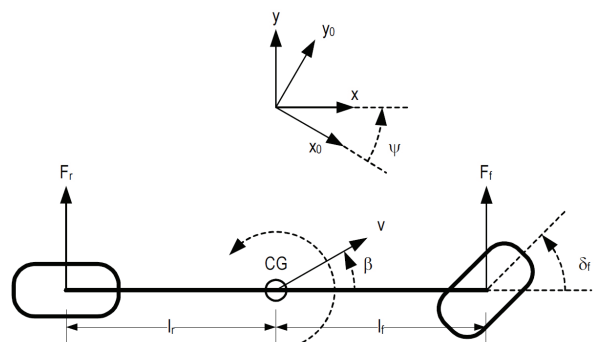


Fig. 1 Single track model

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

<sup>†</sup>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.

델 오차 영향도를 분석하고<sup>4)</sup> 여기서 확장하여 2자유도 Single track 모델에서의 조향각 및 코너링 강성 등 여러 오차 요인들을 분석하는<sup>5)</sup> 기존 연구에도 불구하고 본 논문에서와 같이 체계적으로 조향각 추정 모델을 수립하고 시뮬레이션과 실차 시험을 통해 모델을 검증하면서 동시에 차량 Single track 모델의 오차 개선도까지 연계 검증 하는 연구는 많지 않았다.

Single track 차량 모델에 입력되는 조향각( $\delta_f$ )은 타이어의 조향각(Road wheel steer angle)인데 일반 차량에서 계측 가능한 조향각은 운전자 조향각(Steering wheel angle)이다. 따라서 보통의 경우 운전자 조향각에 기계적인 기어비(Kinematic gear ratio)만을 고려해 타이어 조향각을 계산하지만, 실제 타이어 조향각은 운전자 조향각 뿐만 아니라 선회 시 내외륜 서스펜션의 인장/압축 스트로크에 의한 토크(Toe)변화로 발생하는 롤 스티어(Roll steer), 지면으로부터 전달되는 타이어 횡력에 의한 탄성 변형과 관계된 컴플라이언스 스티어(Compliance steer) 등이 복합적으로 작용되어 결정된다.<sup>6)</sup>

따라서 운전자의 조향각(Steering wheel angle)만을 고려하여 모델 입력 타이어 조향각을 계산하면 주행 상황에 따라 상당한 오차가 발생한다. 이러한 오차 요인을 보상하기 위해 본 연구에서는 횡방향 가속도 센서 계측치 기반으로 롤 스티어, 컴플라이언스 스티어를 함께 보상하여 전/후 타이어 조향각을 효율적으로 추정하는 방법을 제안하고자 한다. 한편, 타이어 조향각 정보는 모델의 정확도뿐만 아니라 최근 자율주행 안전 관점에서의 Redundancy 혹은 고성능 차량에서 핸들링 성능 관점에서 적용이 늘어가는 AFS(Active Front Steer), RWS(Rear Wheel Steer)와 같은 능동조향시스템에서의 정확한 조향각 제어 측면에서도 중요한 역할을 한다.

본 논문의 작성 구조는 다음과 같다. 2장에서 제안된 조향각 추정 로직의 컨셉, 상세 모델을 기술하고 3장에서 제안된 조향각 추정 알고리즘의 해석/실차 검증과 이를 Single track 차량 모델에 적용하였을 경우 개선된 모델 정확도를 다루며 4장에서 결론을 맺는 것으로 구성되어 있다.

## 2. 타이어 조향각 추정 모델 개발

제안 연구에서는 차량의 전륜(Front wheel)의 타이어 조향각은 운전자 조향각, 롤 스티어, 컴플라이언스 스티어의 합으로, 후륜(Rear wheel)의 타이어 조향각(Wheel steer angle)은 롤 스티어, 컴플라이언스 스티어의 합으로 각각 결정된다고 가정하였다. 참고로 대개의 경우 차량의 선회 안정성 확보를 위해 전륜의 롤 스티어, 컴플라이언스 스티어는 운전자 조향각의 반대 방향으로, 후륜의

경우에는 토인(Toe-in)방향으로 설정되도록 차량 서스펜션의 지오메트리(Geometry)가 설계되어 있다.

차량의 전륜 조향각의 경우 보통의(Conventional) 차량 횡방향 모델에서는 운전자 입력 조향각(Steering wheel angle)에 고정된 기어비를 곱하여 산출된 값이 사용된다. 따라서, 실제 존재하는 차량의 롤 거동에 의한 롤 스티어(Roll steer), 타이어 횡력에 의한 컴플라이언스 스티어(Compliance steer)를 반영하지 않은 만큼 오차가 발생한다. 후륜 조향각의 경우 일반적으로 보통의 횡방향 모델에서는 0으로 간주되지만 전륜 조향각과 마찬가지로 실제 차량에서는 Roll/compliance steer와 같은 부가적인 조향이 존재한다. 전/후륜의 롤 스티어, 컴플라이언스 스티어는 특히 횡방향 가속도가 큰 상황, 즉 롤각이 크게 발생하고 타이어 횡력이 큰 경우에 전체 조향각에서 차지하는 비중이 높아지게 되며 이를 정확히 예측하여 반영했을 때 차량 모델의 정확도가 크게 개선될 수 있다.

### 2.1 전륜 조향각 추정 모델

앞서 설명한 바와 같이 본 연구에서 전륜 조향각( $\delta_f$ )은 다음 식 (1)과 같이 표현이 가능하다.

$$\delta_f \cong \delta_{f,kinematic} + \delta_{f,roll} + \delta_{f,compliance} \quad (1)$$

$\delta_{f,kinematic}$ 은 운전자 조향각(Steering wheel angle)에 의한 기구학적 조향각,  $\delta_{f,roll}$ 은 롤 스티어에 의한 조향각,  $\delta_{f,compliance}$ 는 횡력 컴플라이언스에 의한 조향각을 각각 의미한다. 한편 기구학적 조향각은 조향시스템 설계 파라미터에 근거해서 정해지는 운전자 조향각과 타이어 조향각 사이의 비선형 록업테이블 형태로 산출이 가능하며 롤 스티어 조향각은 노면 기준 차량 롤각( $\phi$ )의 비례식으로 컴플라이언스 조향각은 타이어 횡력( $F_{y,f}$ )의 비례식으로 식 (2)와 같이 단순화가 가능하다. 비례 계인  $k_{roll,front}$ 와  $k_{comp,front}$ 는 각각 차량 서스펜션의 설계 파라미터에 근거하여 어느정도 결정이 가능하며 본 연구에서는 설계 파라미터를 토대로 조향각 추정 오차가 적어지는 방향으로 경험적인 방법에 의해 도출하였다.

$$\delta_f \cong \delta_{f,kinematic} + k_{roll,front} \cdot \phi + k_{comp,front} \cdot F_{y,f} \quad (2)$$

지면 기준 차량 롤각( $\phi$ )은 선회 시 관성력에 의해 생성되기 때문에 식 (3)과 같이 횡가속도 센서 계측치( $a_{y,sensor}$ )입력의 1차 동역학 모델로 모델링이 가능하며,<sup>7)</sup> 전륜의 횡력( $F_{y,f}$ )은 식 (4)와 같이 차량 횡방향 힘평형식, 요방향 모멘트평형식에서 대수적으로 산출이 가능하다.<sup>6)</sup> 한편, 식 (3), 식 (4)는 횡가속도 센서 계측치에

도로 횡경사각의 영향도 포함되어있기 때문에 횡경사각이 존재하는 노면에서도 그 유효성이 유지되는 것이 특징이다.<sup>6)</sup>

$$\phi = \frac{roll_{gain}}{\tau_{roll} s + 1} a_{y,sensor} \quad (3)$$

$$F_{y,f} = \frac{m l_f a_{y,sensor} + I_z \dot{r}}{l_f + l_r} \quad (4)$$

$roll_{gain}$ : 차량 1차 롤 모델 DC게인,  $\tau_{roll}$ : 차량 1차 롤 모델 시정수,  $m$ : 차량질량,  $I_z$ : 요방향 회전관성,  $\dot{r}$ : 요레이트 미분,  $l_f$ : 무게중심에서 앞바퀴까지 거리,  $l_r$ : 무게중심에서 뒷바퀴까지 거리. 최종적으로 식 (3)에서 롤 동역학에 의한 지연을 무시하고 식 (4)에서 요레이트 과도 성분을 배제하면 전륜 타이어 조향각은 식 (5)과 같이 운전자 조향각과 항상 고정된 관계에 있는 기구학적 조향각 ( $\delta_{f,kinematic}$ )과 횡가속도 신호의 비례식의 합으로 표현 가능하다. 따라서 본 연구에서는 연산 부하 및 단순성 등을 고려하여 롤 스티어/컴플라이언스 조향각을 하나의 횡가속도 비례식으로 통합하여 전륜 조향각을 추정하였다.

$$\delta_f \cong \delta_{f,kinematic} + k_{front} a_{y,sensor} \quad (5)$$

### 2.2 후륜 조향각 추정 모델

후륜 조향각( $\delta_r$ ) 추정 모델은 앞서 제안된 전륜 조향각 추정 모델과 유사한 과정을 거쳐 도출하였다. 운전자 입력에 의한 기구학적 조향각만 0으로 가정하고 나머지 롤 스티어/컴플라이언스 조향각을 반영하여 식 (6)과 같이 설계하였다.

$$\delta_r \cong 0 + \delta_{r,roll} + \delta_{r,compliance}$$

$$\delta_r \cong k_{roll,rear} \cdot \phi + k_{comp,rear} \cdot F_{y,r} \quad (6)$$

다만 후륜 조향각의 경우 개발 대상 차량의 특성일 수도 있지만 롤 스티어 조향각과 컴플라이언스 조향각 중 컴플라이언스 조향각의 영향도가 매우 낮아 후륜 조향각 산출 모델에서 식 (7)과 같이 롤각의 비례식으로 나타내었다. 비례 게인  $k_{roll,rear}$ 는 2.1에서와 같이 차량 롤스�티어 특성 곡선을 토대로 조향각 모델 오차가 적어지는 방향으로 경험적인 방법에 의해 도출하였다.

$$\delta_r \cong k_{roll,rear} \cdot \phi = k_{roll,rear} \frac{roll_{gain}}{\tau_{roll} s + 1} a_{y,sensor} \quad (7)$$

## 3. 시뮬레이션 및 실차 검증

개발된 타이어 조향각 추정 모델을 검증을 위해 시뮬레이션과 실차 시험을 수행하였다. 시뮬레이션의 경우 검증 대상 실차의 조향/현가 설계 파라미터들이 반영된 Carsim을 활용하였고 실차 시험의 경우 국내 대형 승용 차량을 활용하였다. 실차 시험에서 전/후 조향각의 경우 4륜에 Kistler社의 RV-4 시스템을 장착하여 계측하였고 각각 전륜, 후륜의 좌/우 조향각의 평균을 참값으로 간주하였다. 한편 실차 시험에서 조향 추정 모델에 사용되는 횡가속도 센서 계측치는 차량에 기본 장착되어 있는 IMU센서에서 CAN통신을 통해 확보하여 사용하였다.

### 3.1 시뮬레이션 검증

다양한 차속, 조향 시나리오에서 제안된 타이어 조향각 모델을 해석 검증하였다. 우선 Fig. 2에 고마찰노면 ( $\mu=0.9$ )에서 160 kph 속도로 이중차선변경(DLC: Double Lane Change, ISO 3888-1)하는 경우의 전륜 기구학적 조향각, 롤 스티어 조향각, 컴플라이언스 조향각의 참값을 각각 나타내었다. 예상대로 롤 스티어와 컴플라이언스 스티어는 운전자 조향에 해당하는 기구학적 조향각에 반대 방향으로 생성되었으며, 꽤 횡가속도가 큰 선회 조건이기 때문에 그 크기가 무시할 수 없는 수준임을 확인할 수 있다.

Fig. 3에서 식 (5)에서와 같이 롤 스티어, 컴플라이언스 스티어의 합을 하나의 횡가속도센서 계측치의 비례식으로 추정한 결과를 나타내었다. 횡가속도 신호 하나만으로 꽤 정확하게 각각 조향각의 합을 추정하는 것을 알 수 있다. Fig. 4에서 최종적인 제안된 추정 모델로 추정된 전륜 조향각의 정확도를 Carsim 참값, 기존의 방법인 운전자 조향각에 일정 감속비만 고려한 경우(Conventional)와

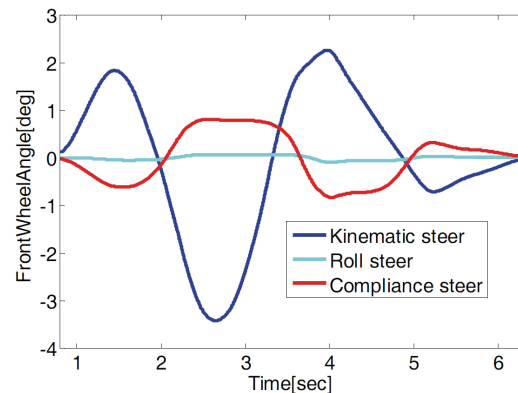


Fig. 2 Front tire steer angles in double lane change (160 kph,  $\mu=0.9$ )

비교하였다. 횡가속도가 큰 고속 선회 상황에서는 꽤 추정도가 개선되는 것을 확인할 수 있다.

한편, Fig. 5에서 고마찰노면( $\mu=0.9$ )에서 120 kph 속도로 J-turn(조향각 60 deg)하는 경우의 후륜 조향각 추정

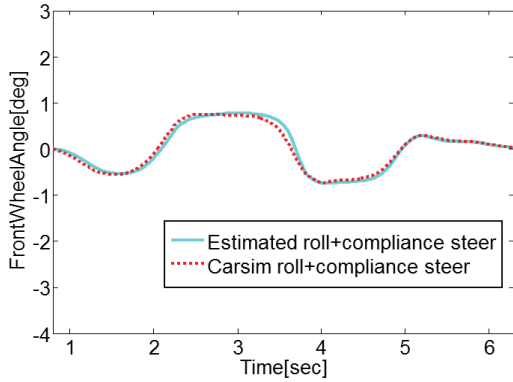


Fig. 3 Estimated roll/compliance steer angle (DLC, 160 kph,  $\mu=0.9$ )

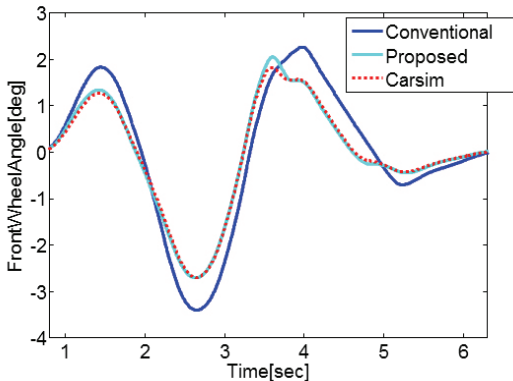


Fig. 4 Front tire steer angle estimation result (DLC, 160 kph,  $\mu=0.9$ )

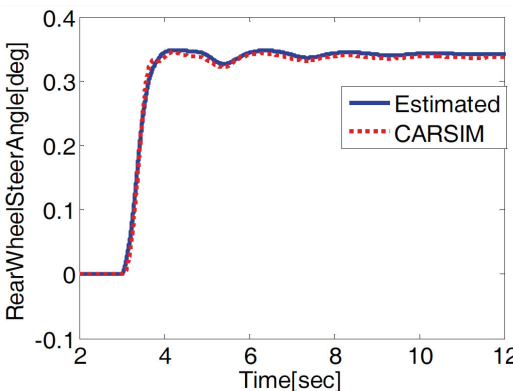


Fig. 5 Rear tire steer angle estimation result (Step(60 deg), 120 kph,  $\mu=0.9$ )

성능을 나타내었다. 제안 추정 모델에서 산출한 추정 후륜 조향각과 Carsim참값을 비교하였다. 참고로 후륜의 경우 조향륜이 아니기 때문에 기구학적 조향각은 0도이다. 따라서 기존 방법에서는 후륜 조향각 0도로 차량 모델에 입력되고 있어 실제 후륜 조향각 만큼 오차 요인이 되고 있는 것이다.

저마찰 노면에서도 검증을 실시하였는데 제안 조향각 추정 모델 형태(횡가속도 비례식)에서도 알 수 있듯이 제안 추정 모델에서 보상되는 롤각, 타이어 횡력에 의한 조향각 변경 부분이 노면 마찰계수와는 관계없기 때문에 모델 유효성이 유지되며 단지 저마찰 노면에서는 롤 모션, 횡력 모두 작기 때문에 제안 모델을 통해 개선되는 부분이 작기만 할 뿐이다.

### 3.2 실차 검증

Table 1과 같이 정의된 차속, 조향 실차 주행 시나리오에서 제안된 타이어 조향각 모델을 검증하였다. Case 1을 통해서 전/후륜 조향각 추정 모델의 추정치와 실차에서 계측된 조향각과의 비교를 통해 제안 모델의 정확도를 검증하고, 좀 더 가혹한 주행 상황인 Case 2를 통해서 제안 모델을 통해 추정된 전/후 타이어 조향각이 실제 차량 모델의 정확도를 얼마나 개선하는지를 확인하였다. 구체적으로 설명하면 2자유도 Single track 모델에 기존 방법에 의한 조향각 추정치와 제안 모델에 의한 조향각 추정치를 각각 입력하여 산출된 차량 횡슬립각과 요레이트들을 비교하여 제안 추정 모델에 의한 개선도를 확인하였으며, 여기서 기존 방법은 전륜 조향각에 운전자 조향각(Steering wheel angle)에 일정 감속비 반영하고, 후륜 조향각은 0도로 입력하는 것을 의미한다.

Figs. 6~7은 Case 1에 대한 전/후륜 조향각 추정 결과이다. Fig. 6에서 전륜 조향각 추정 결과를 보면 기존 방법(운전자 조향각에 일정 기어비만 고려)의 경우 실제 계측된 전륜 조향각과 차이가 2~3°정도 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다(절대값 기준으로 항상 크게 예측). 그러나 제안된 추정 모델을 적용하여 Roll/compliance steer를 보상하였을 경우 오차가 기존 방법 대비 대폭 개선됨을 확인할 수 있다. Fig. 7은 후륜 조향각 추정 결과이다. 후륜 조향각의 경우 운전자에 의한 조향 입력이 없고 Roll/compliance steer만 존재함을 2장에서 언급하였

Table 1 Driving scenarios for experimental tests

Case	Speed (kph)	Maneuver	$\mu$
1	60 kph	Slalom	0.9
2	100 kph	Slalom	0.9



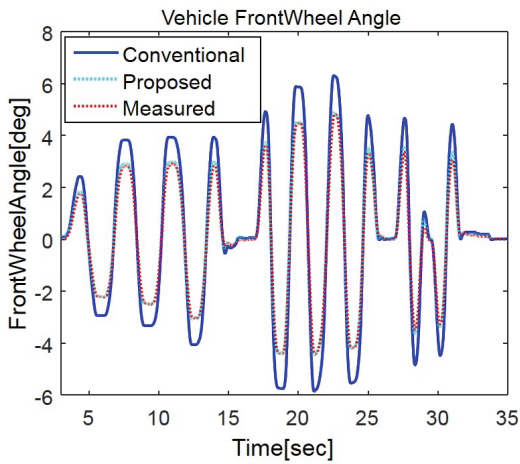


Fig. 6 Front wheel steer angle estimation result for case 1

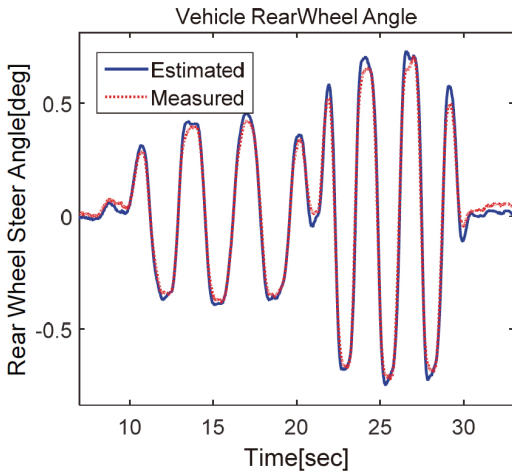


Fig. 7 Rear wheel steer angle estimation result for case 1

다. 따라서 제안 모델 추정치와 실제 계측값을 비교해 볼 때 전체  $\pm 0.5^\circ$  정도 조향각 범위(기존 방법의 경우 후륜 조향각은 0으로 간주하기 때문에 최대  $\pm 0.5^\circ$ 가 오차가 됨)에서 약  $\pm 0.1^\circ$  이내로 추정 조향각 모델의 오차가 크게 개선되는 것을 알 수 있다.

Figs. 8~9에서는 본 논문에서 제안(Proposed)된 전/후 조향각 모델이 차량 Single track 모델에 적용되었을 경우, 기존(Conventional) 조향각 모델 대비 차량 모델의 정확도를 얼마나 향상시키는지 확인해 보았다.

Fig. 8에서는 차량 횡슬립각(Sideslip angle) 추정 결과를 비교하였다. 기존 방식(운전자조향각에 일정 게인고려)으로 조향각을 입력한 차량모델의 횡슬립각 출력값의 경우 실제 계측값과의 오차가 0.5~1 deg 정도로 상대적으로 큰 것을 확인할 수 있다. 반면 제안된 추정 모델

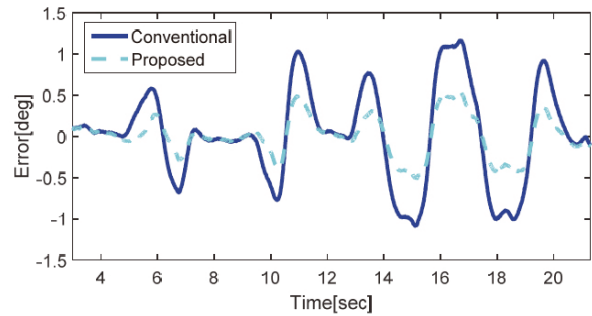
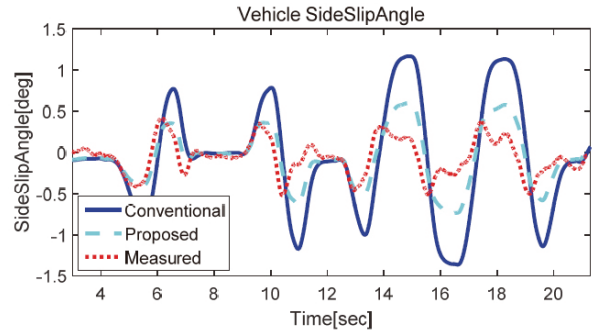


Fig. 8 Vehicle sideslip angle accuracy validation for case 2

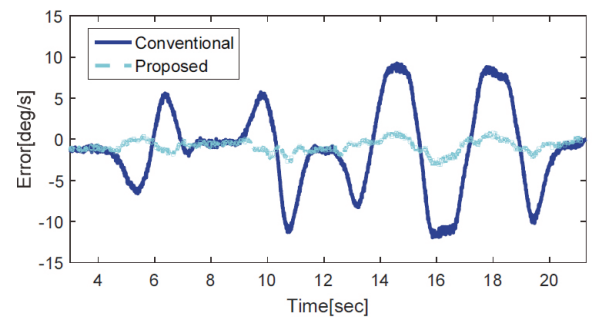
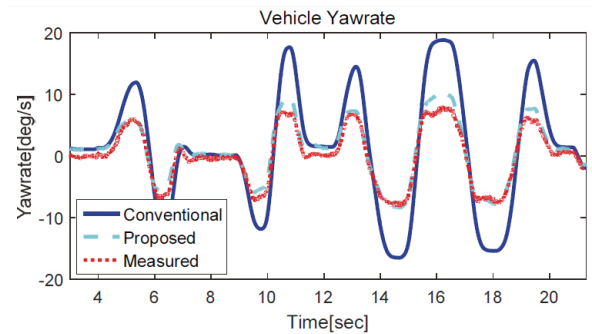


Fig. 9 Vehicle yawrate accuracy validation for case 2

기반의 조향각을 입력한 경우 횡슬립각 오차 정도가 상당부분 개선되는 것을 확인하였다.

Fig. 9에서는 차량 요레이트를 비교하였다. 제안된 조향각 모델을 적용한 차량 모델의 요레이트의 경우

RMS(Root Mean Square) 에러가 1.26 deg/s, 기존 방식의 조향각이 적용된 차량 모델의 요레이트의 경우 4.89 deg/s 정도로 계산되었다. 이러한 결과를 통해 제안된 조향각 추정 모델이 Single track 차량 모델의 정확도도 대폭 개선시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

한편 제안된 조향각 추정 모델이 적용된 차량 모델도 여전히 오차가 남아있는데 이는 본 연구의 Single track 차량 모델에서 사용되는 코너링 강성 파라미터가 타이어 비선형성을 고려할 수 있는 가변 형태가 아니라 일정한 Nominal value로 사용하였기 때문이다. 이는 추후 타이어 코너링 강성 파라미터를 적절한 방법을 통해 가변화할 경우 개선이 충분히 가능하다.<sup>8)</sup>

#### 4. 결론

본 논문에서는 차량 횡방향 Single track 모델의 정확도 향상을 위한 전/후 타이어 조향각 추정 모델을 제안하였다. 제안 조향각 추정 모델은 기존의 조향각 산출 시 배제된 롤 스티어, 컴플라이언스 스티어를 차량 횡가속도 센서 계측치를 통해 쉽게 보상할 수 있는 방법을 포함하고 있으며 이 두 요소의 영향도가 커지는 높은 횡가속도 주행 상황에서, 특히 기존 모델 대비 조향각 정확도 측면, 차량 모델 정확도 측면 모두 높은 개선도를 가져올 수 있다.

제안된 타이어 조향각 추정 모델은 Carsim 해석과 실차 시험을 통해 검증되었으며 다양한 주행 상황에서 견실하게 기존 조향각 모델 대비 정확도가 개선되는 것을 확인하였다. 또한 조향각의 개선도가 실제 차량 모델의 횡슬립각, 요레이트 정확도도 대폭 개선할 수 있음도 확인할 수 있었다.

결국 본 연구에서 제안된 타이어 조향각 추정 모델은 차량 모델의 정확도를 개선하고 AFS, RWS와 같은 능동 조향시스템 제어 시 정확한 조향각 제어를 가능하게 하는 측면에서 차량 제어 성능 개선 전반에 기여할 수 있기를 기대한다.

#### 후 기

이 성과는 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2017R1A1A1A05069503). 이 논문은 2021학년도 한국기술교육대학교 교육연구진흥과제 지원에 의하여 연구되었음.

#### References

- 1) P. Falcone, F. Borrelli, J. Asgari, H. E. Tseng and D. Hrovat, "Predictive Active Steering Control for Autonomous Vehicle Systems," IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.15, No.3, pp.566-580, 2007.
- 2) H. Zhang and J. Wang, "Vehicle Lateral Dynamics Control Through AFS/DYC and Robust Gain-Scheduling Approach," IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.65, No.1, pp.489-494, 2016.
- 3) K. Han and G. Park, "Lateral Motion Control of Electronic-Four-Wheel Drive Vehicles for Enhancement of Cornering Performance," Transactions of KSAE, Vol.28, No.9, pp.605-611, 2020.
- 4) K. Cho, H. Na and S. H. You, "Estimation of Vehicle Steering Angle for Improving Accuracy of Vehicle Lateral Single Track Model," KSAE 17-J0018, pp.91-95, 2017.
- 5) K. Cho, H. Na and S. H. You, "Accuracy Improvement of Vehicle Lateral Single-Track Model," Proceedings of the 14 International Symposium on Advanced Vehicle Control, 2018.
- 6) T. D. Gillespie, Fundamentals of Vehicle Dynamics, SAE International, 1992.
- 7) C. Jeon, H. Na and S. H. You, "Development of Vehicle Roll Model for Active Suspension Control System," Transactions of KSAE, Vol.28, No.2, pp.109-115, 2020.
- 8) S. H. You, J. O. Hahn and H. Lee, "New Adaptive Approaches to Real-time Estimation of Vehicle Sideslip Angle," Control Engineering Practice, Vol.17, No.12, pp.1367-1379, 2009.