

Steer-by-Wire Failover 기능을 위한 편 제동 기반 조향각 추정 방법

류 정 환¹⁾ · 이 규 백¹⁾ · 김 진 수^{*1)} · 조 영 은¹⁾ · 고 상 진¹⁾

¹⁾HL만도 SW Campus

Method for Steering Angle Estimation according to Differential Braking for Steer-by-Wire Failover System

Jeonghwan Ryu¹⁾ · Gyubaek Lee¹⁾ · Jinsoo Kim^{*1)} · Youngeun Cho¹⁾ · Sangjin Ko¹⁾

¹⁾HL MANDO SW Campus

Key words : Steer-by-Wire, Differential braking, Wheel angel estimation, Least square regression, Scrub radius

E-mail: jeonghwan.ryu@hlcompany.com, jinsoo4.kim@hlcompany.com, sangjin.ko@hlcompany.com

최근 by-Wire 방식의 차량 세시 시스템 효율성이 대두됨에 따라 자동차 업계에서는 Steer-by-Wire (SbW) 제품들을 활발히 개발 중이다. 이 시스템은 운전자의 steering wheel 조작과 rack actuator 동작은 중간에 물리적인 연결없이 전기적 모터 신호로 이루어져있어, 통신 장애와 같은 고장이 발생하게 되면 운전자의 물리적 조작으로 대처가 전혀 불가능하고, 심각한 교통사고를 야기한다. 그리하여 근래에 SbW 고장시 차량의 조향성을 확보하기 위한 기능 개발이 활발히 진행되고 있고, 그 중 편 제동을 활용한 Steer-by Brake (SbB) 시스템 [“Steer-by-Wire redundancy 확보를 위한 Steer-by-Brake 시스템 개발”, 2022 한국자동차공학회 추계학술대회 및 저널지]이 대표적이다.

SbW 시스템에 고장이 발생하면 전륜은 free-rolling 상태가 되어 편 제동이 인가 시 타이어와 지면 사이의 scrub radius 영향으로 전륜 조향각이 자연스럽게 생성된다. 이 조향각은 실시간 계측에 한계가 있고, 차량 거동 제어에 크게 작용하는 요소이므로 이 상태를 추정하는 것은 SbB 제어시 중요하다. 편 제동으로 인한 조향각을 추정하는 방법은 실험적, 물리적 모형 등 다양하게 설계할 수 있고, 본 연구에서는 편 제동력에 따른 전륜 조향각 변화를 2차 시스템 모형으로 표현하고, 차량 시험 데이터 기반으로 그 모형의 계수를 추정하는 방법을 제시한다.

$$J_{\delta}\ddot{\delta}_f + b_{\delta}\dot{\delta}_f + k_{\delta}\delta_f = \frac{w}{2}(F_b^{FL} - F_b^{FR})$$

본 연구의 목적은 편 제동에 따른 다양한 시험 데이터를 기반으로 J_{δ} , b_{δ} , k_{δ} 계수를 추정하는 것이다. 이를 추정하기 위해 Least square regression 방법론을 적용하였다. 이 방법론은 전체 데이터 n 개에 대해 $\sum_{i=0}^n (b_i - W_i x)^2$ 를 최소화하는 파라미터 x vector를 구하는 방식으로 선형 회귀 문제의 계수를 추정하기에 적합한 방법이다. 위 모형을 Least square regression을 위한 시험 데이터 기반 모형으로 정리하면 아래와 같다.

$$\begin{matrix} W & x & b \\ \begin{bmatrix} \ddot{\delta}_{f1} & \dot{\delta}_{f1} & \delta_{f1} \\ \ddot{\delta}_{f2} & \dot{\delta}_{f2} & \delta_{f2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \ddot{\delta}_{fn} & \dot{\delta}_{fn} & \delta_{fn} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} J_{\delta} \\ b_{\delta} \\ k_{\delta} \end{bmatrix} & = \begin{bmatrix} \frac{w}{2}(F_b^{FL} - F_b^{FR})_1 \\ \frac{w}{2}(F_b^{FL} - F_b^{FR})_2 \\ \vdots \\ \frac{w}{2}(F_b^{FL} - F_b^{FR})_n \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Least square regression 방법론을 적용하기 위해서는 다양한 조건에서 편 제동에 따른 전륜 조향각 시험 데이터가 요구된다. 우선 편 제동 입력 F_b^{FL} , F_b^{FR} 과 출력 $\ddot{\delta}_f$, $\dot{\delta}_f$, δ_f 데이터를 기반으로, W

matrix와 $\mathbf{b}$ vector를 정리하고, $\mathbf{x} = (\mathbf{W}^T \mathbf{W})^{-1} \mathbf{W}^T \mathbf{b}$ 와 같이 Least square regression 방법론을 통해 적용하여 최종 계수 $\mathbf{x}$ vector를 추정한다. 여기서, F_b^{FL}, F_b^{FR} 는 해당하는 휠에 인가한 제동 압력을 effective radius에 따른 토크factor를 기반으로 산정하였고, δ_f 는 δ_f 를 미분한 후 11 size의 moving window를 취한 이동평균값으로, $\dot{\delta}_f$ 는 계산된 δ_f 를 기반으로 동일하게 취득하였다.

데이터 취득을 위한 시험은 Genesis g80 EV 세단으로 자동차안전연구원 종합 시험로에서 동일한 조건하에 수행되었다. 편 제동 입력 로직은 D-space사의 microAutoboxII 다운로드 하였으며, 차량 상태 정보(속도, 조향각) 와 제어 입력(제동 토크)을 IDB(Integrated Dynamic Brake) ECU와 CANFD 통신을 통해 실시간으로 송수신하도록 구축하였다.

본 연구의 시험 조건은 다음과 같다. 우선 속도 구간을 10kph 단위로 나누어 해당 속도를 유지하도록 cruise control로 고정하여 편 제동을 입력하고, 차량에 별도로 장착한 조향각 센서를 통해 δ_f , $\dot{\delta}_f$, $\ddot{\delta}_f$ 값을 0.01초 단위로 추출하였다. 편 제동 입력은 운전자의 조작을 제한하고 아래 그림(a)와 같이 Sine 파형을 기반으로 반복 시험하였다. 전, 후륜 최대 제동 압력은 슬립이 생기지 않는 수준인 약 60bar까지로 고정하였고, 이를 토크로 환산하면 전륜 2520Nm, 후륜 1272Nm 정도이다. 각 속도 구간마다 편 제동 인가 시작 방향 (좌, 우)마다 4초, 8초 주기의 네 가지 시험을 2회씩 수행하였고, 한번의 시험마다 최소 2~3 cycle로 수행하였다. 앞서 설명한 바와 같이 편 제동 시 전륜 조향각은 scrub radius 설정에 매우 종속적이므로, 본 연구에서는 양과 음의 scrub radius 구조로 나누어 시험이 수행하였고, 양의 설정을 위해 전륜 휠에 35mm spacer를 추가 장착하였다.

대표적으로 70kph 속도 구간, 선 우측 편 제동인가, 8초 주기 설정에서의 음과 양의 scrub radius에서의 시험 데이터를 정리하면 아래 그림과 같다. 위에 언급한 조건의 모든 시험 데이터를 기반으로 추정된 70kph 구간의 J_δ , b_δ , k_δ 계수는 양의 scrub radius에서는 각각 54750, 7087, 377981 이며, 음의 scrub radius에서는 각각 -46698, -89501, -396572이다. 동일한 방식으로 각 속도 구간에 수행하여 추정된 각 계수들은 합리적인 값으로 추정되었음을 확인하였다. 또한 본 연구에서는 생략하였지만 조향각 추정 모형을 SbB 제어기에 적용하였을 때 제어기의 성능이 우수한 것을 확인하였다. 본 연구에서 제시한 방법론을 초석으로 또 다른 SbW 시스템 failover 기능인 Steer-by-Rear wheel steering (SbR) 시스템에서 rear wheel steer 작동에 따른 free-rolling 전륜 조향각 추정 모형이 현재 연구 중에 있다.

