

SBW 시스템을 위한 조향반력 시뮬레이터의 제어기 구현

박원용¹⁾, 유춘영¹⁾, 김일현²⁾, 허승진²⁾, 안현식¹⁾
 국민대학교 임베디드제어 실험실¹⁾ · 국민대학교 차량구조안전 실험실²⁾

Implementation of a Controller in a Steering Feel Simulator for SBW systems

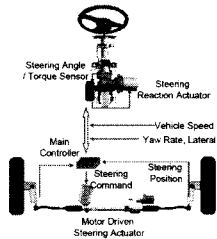
Won-Yong Park¹⁾, Choon-Young You¹⁾, Il-Hwan Kim²⁾, Seung-Jin Heo²⁾ and Hyun-Sik Ahn¹⁾
 Embedded Control Systems Lab. Kookmin University¹⁾ · Automotive Structure and Safety Lab. Kookmin University²⁾

Abstract - In this paper, a steering feel simulator is designed and implemented using a steering wheel with a rotation angle sensor, torque sensor, and an ac motor for the generation of the required torque. The controller in the simulator consists of a 16-bit micro-controller, a D/A converter and A/D converters. The main objective of the controller is to perform torque control where the reference torque is calculated from the torque map for both the vehicle velocity and the wheel sensor output. It is shown via the experimentation using the proposed simulator that the simulator output performance can be easily understood for the variation of vehicle parameters or controller parameters.

1. 서론

자동차용 조향 시스템은 운전자의 편의를 위하여 유압식 파워 스티어링이 적용된 이후, 고속에서의 안정성과 조향 감각의 개선을 위하여 차속 감응형 파워 스티어링으로 발전되어 왔다. 유압 파워 스티어링은 부스트 펌프를 사용함으로써 차량의 에너지 효율을 떨어뜨리며 엔진 공간 확보의 어려움이 있다. 이를 보완하기 위해 EPS가 개발 되었으나 기계적으로 연결되어 있는 스티어링 컬럼은 차량의 정면충돌 시 컬럼으로 인한 운전자의 심각한 피해가 발생할 수 있다.[1][2]

이를 보완하기 위해 Steer-By-Wire(SBW) 시스템이 등장하게 되었다. SBW 시스템은 기존 파워 스티어링 시스템에 비해 여러 가지 장점을 가지고 있다. 기계적 연결 및 유압부품의 제거가 가능하므로 부품 수를 대폭 축소할 수 있어 경량화를 이룰 수 있고, 엔진 동력의 손실을 줄일 수 있어 연비를 대폭 향상시킬 수 있다. 또한 설계 자유도, 운전자 편의성 및 충돌안전성이 크게 향상될 것으로 기대된다.[3]

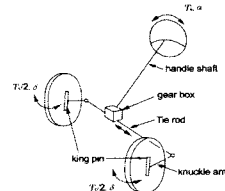


<그림 1> Steer-by-Wire system

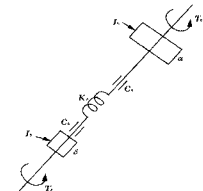
<그림 1>은 SBW 시스템의 전체적인 구성을 나타내고 있다.[2] 본 논문에서는 위와 같은 SBW 시스템을 구축하는데 있어서 가장 중요한 부분 중 하나인 조향 반력 재현 시스템을 구축하고 제어기를 설계하고자 한다. 조향 반력 재현 시스템은 스티어링 컬럼으로 연결된 기존의 스티어링 시스템에서와 같은 조향 감을 발생시켜야 한다. 따라서 노면의 상태와 주행 상황에 따라 알맞은 조향 반력을 재현하는 SBW를 위한 Steering Feel Simulator를 설계하고 제작하고자 한다.

2. 조향 반력 재현 시스템 모델링

일반적인 차량의 조향 계는 <그림 2>와 같이 구성되어 있다. 아래 조향 계의 운동을 모든 킹핀 돌래의 회전운동으로 환산하여 고려하면 <그림 3>과 같은 조향 계의 등가역학모형을 가정할 수 있다. 킹핀 돌래로 환산된 핸들에 상당하는 관성 모멘트 I_h 를 가진 회전체가 핸들샤프트, 기어박스의 부차 등을 고려한 조향 계의 킹핀 돌래의 등가탄성계수 K_s 를 가진 회전축을 끼워 넣어 킹핀 돌래의 전륜의 관성 모멘트 I_s 에 상당하는 회전체와 결합되어 있다. 이때 핸들 샤프트 및 킹핀에 등가점성 마찰계수가 존재하는 것을 고려하여 점성마찰계수를 각각 C_h , C_s 라 한다. 핸들의 킹핀 돌래로 환산된 회전각을 α , 전륜 실조향각을 δ 라 하면 조향 계는 등가적인 α 와 δ 에 관한 2자유도의 위어감은 진동계를 구성하는 것이다. 지금 I_s , C_s 는 좌우륜의 합계를 나타낸다.

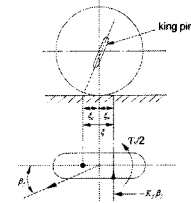


<그림 2> 차량 조향계



<그림 3> 조향계 등가역학 모델

핸들에는 사람에게 의하여 주어지는 토크 T_h 가 외력으로 작용한다. 한편, 주행 중의 차량의 핸들에는 어느 각도를 주면, 그 핸들이 원래로 복원하는 토크가 작용한다. 이것은 차량의 전륜에 작용하는 코너링포스가 킹핀 돌래로 모멘트로 작용되기 때문이다. 전륜의 접지 면에 작용하는 코너링포스의 작용점은 접지면의 중심보다 조금 후방에 있다. 또, 전륜의 킹핀 축 방향의 언장과 접지면의 만나는 점은 접지면 중심보다 전방에 있는 것이 보통이다. <그림 4>에서와 같이 전륜에 반시계 방향의 옆미끄럼각 β_f 가 발생하므로, 코너링포스는 킹핀 돌래로 반시계방향의 모멘트로 하여 작용한다.



<그림 4> 전륜 모델

전륜의 타이어 코너링포스를 K_f 라 하면, 타이어에 작용하는 킹핀 돌래 모멘트는 식(1)과 같다. 이때 ξ_n 는 뉴메트릭트레일(pneumatic trail), ξ_c 는 캐스터트레일(caster trail)이다. 그리고 $2\xi K_f$ 는 조향 계의 복원 모멘트 계수이다. 따라서 β_f 를 차량의 운동을 기술하는 변수를 사용하여 표시하면, 식(3)과 같이 표현할 수 있다. 이 모멘트가 조향 계에서 볼 때에 핸들에 작용하는 조향 반력이라고 볼 수 있다. 식(3)을 바탕으로 킹핀 돌래로 환산한 핸들의 회전운동과 킹핀 돌래의 전륜의 회전운동을 수식으로 나타내면 식(4), (5)와 같다. 지금까지의 조향모형을 간단히 하기 위해서 <그림3>의 조향 계를 하나의 강체로 가정하면 식(6)을 사용할 수 있다.

$$\frac{T_s}{2} = (\xi_n + \xi_c) K_f \beta_f = \xi K_f \beta_f \quad (1)$$

$$\xi = \xi_n + \xi_c \quad (2)$$

$$T_s = 2\xi K_f (\beta + \frac{l_f}{V} r - \delta) \quad (3)$$

$$I_h \frac{d^2\alpha}{dt^2} + C_h \frac{d\alpha}{dt} + K_s (\alpha - \delta) = T_h \quad (4)$$

$$I_h \frac{d^2\delta}{dt^2} + C_s \frac{d\delta}{dt} + K_s (\delta - \alpha) = 2\xi K_f (\beta + \frac{l_f}{V} r - \delta) \quad (5)$$

$$T_h = T_s = 2\xi K_f (\beta + \frac{l_f}{V} r - \delta) \quad (6)$$

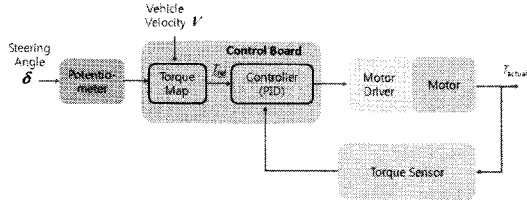
조향반력 시뮬레이터를 구현하기 위해서는 기준이 되는 모델이 요구되며, 본 논문에서 기준이 되는 모델로 차량의 횡 방향 모델을 가장 간단히 표현할 수 있는 2자유도 모델을 선택하였다. 식(7), (8)는 2자유도 모델의 수평면내의 운동을 기술하는 기본적인 운동방정식이다.

$$mV \frac{d\beta}{dt} + 2(K_f + K_r) \beta + \left\{ mV + \frac{2}{V} (l_f K_f - l_r K_r) \right\} r = 2K_f \delta \quad (7)$$

$$2(l_f K_f - l_r K_r) \beta + I \frac{dr}{dt} + \frac{2(l_f^2 K_f + l_r^2 K_r)}{V} r = 2l_r K_f \delta \quad (8)$$

3. 제어기의 구성

<그림 5>는 조향 반력 시스템을 도식화 하여 나타낸 것이다. 시스템의 입력으로는 운전자로부터 차속(V)과 조향 각(δ)이 주어진다. 차속(V)과 조향 각(δ)은 2자유도 차량 모델에 입력되어 식(7), (8)에 따라 차체 선회 속도(γ)와 차체 미끄럼 각(β)로 출력되고, 식(1)~(6)의 조향 계 모델에서는 γ , β , δ , V 를 이용하여 킥된 모멘트를 계산하게 된다.[4] 이 킥된 모멘트를 이용하여 운전자가 느끼게 되는 조향반력을 추정하게 되고 계산된 최종 조향반력 값은 Look-up Table로 제어기에 저장되어 있다.

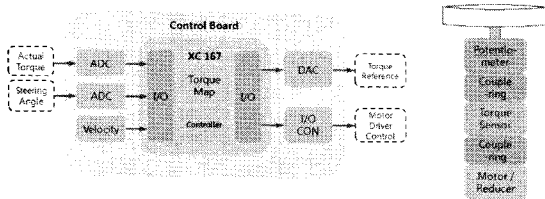


<그림 5> 조향반력 재현 시스템 제어 흐름도

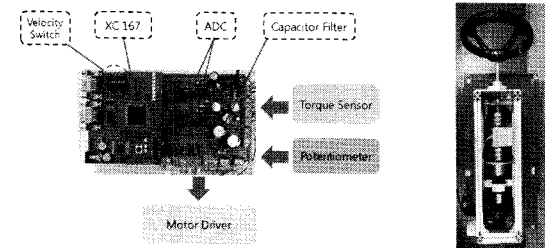
4. 실험환경 구성 및 결과

4.1 실험환경 구성

조향 반력 재현 시스템의 제어기와 하드웨어 구성은 <그림 6>과 같으며, 실제 ECU와 하드웨어의 사진은 <그림 7>과 같다.



<그림 6> 조향반력 재현 시스템 구성도



<그림 7> 실험 환경

실험 환경 구성으로는 크게 조향 반력 재현 시스템과 이 시스템을 제어하기 위한 ECU로 구성된다. 조향 반력 재현 시스템에는 조향반력을 발생시키기 위해서 충분한 토크를 낼 수 있는 미쓰비시의 HC-KFS43B 모터를 선정하였고, 스티어링이 신속하게 회전 할 수 있도록 감속비 10:1의 감속기를 장착하였다. 또한 과도한 토크에 대해 모터와 토크센서를 보호하기 위한 전자 브레이크를 장착하였고 구동토크와 스티어링 휠의 절대 각을 측정할 수 있는 토크센서와 포텐서미터를 장착하였다. 그리고 본 시스템에 사용하는 미쓰비시 HC-KFS43B를 제어하기 위해 MR-J2S-40A(1) 서보앰프를 사용하였으며, MR-J2S-40A(1)는 고성능, 고기능화된 AC 서보로써 위치제어, 속도제어, 토크제어의 제어모드를 갖고 있다.[7]

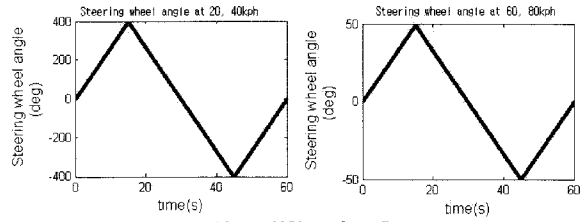
하드웨어를 제어하기 위한 ECU로는 인피니언사의 XC167CI 마이크로 컨트롤러 보드를 사용하였다. XC67CI 보드는 높은 성능을 가진 16Bit 마이크로컨트롤러를 탑재하고 있으며 5개의 파이프라인과 MAC유닛 을 탑재하고 있다.[8] 또한 포텐서미터로 부터 조향 각으로 나오는 -10V ~ 10V의 입력을 받기 위해 별도의 ADC를 장착하였으며, 마이크로컨트롤러로의 기준속도 값을 모터 드라이브에 아날로그 값으로 입력하기 위하여 DAC를 장착하였다.

4.2 실험 결과

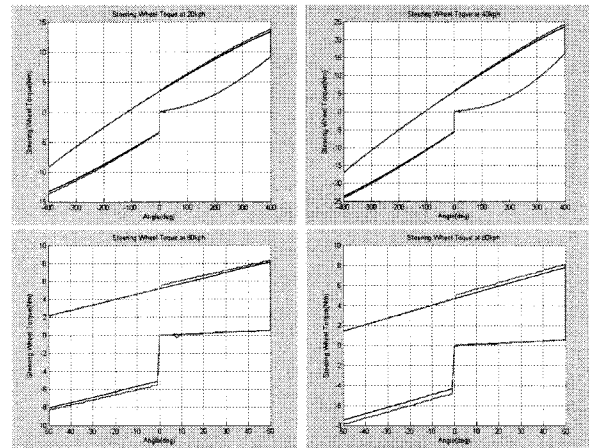
본 논문에서 구현한 제어기의 성능을 확인하기 위하여 적절한 주행상황에서의 실험 결과를 측정하였다. 시스템의 입력으로 들어가는 차속과, 조향 각의 변화에 따른 출력 토크를 측정하였으며, 이 출력토크가 운전자가 느끼는 조향반력이 된다. 저속과 고속으로 나누어 조향각의 변화량을 결정하였고 차량의 속도에 따른 최대 조향 각은 <표1>과 같다. 시뮬레이션에 사용한 Data는 <그림8>에 나타내었다. 본 논문에서 제안한 ECU 테스트에서 조향입력은 스티어링 휠을 통해 직접 입력하도록 한다. 정확한 데이터를 얻기는 어려울 수 있으나 시스템의 특성상 운전자가 직접 조향 감을 느껴야 하기 때문에 직접 입력 하도록 하였다.

$V(\text{km/h})$	$\delta(\text{deg})$
20, 40	$-400^\circ \sim 400^\circ$
60, 80	$-50^\circ \sim 50^\circ$

<표 1> 차량의 속도에 따른 최대 조향 각



<그림 8> 실험 조건 그래프



<그림 9> 20, 40, 60, 80kph에서의 스티어링 휠 토크 그래프

<그림9>는 차속과 조향각의 변화에 따른 토크의 변화를 나타낸 것이다. 그래프를 살펴보면 토크가 비슷한 경향을 보이는 것을 알 수 있고 실제 발생하는 조향토크가 Look-up Table에서 출력되는 기준 토크를 잘 추종함을 볼 수 있다. 하지만 스티어링이 조작되기 시작하는 0°부분에서 노이즈로 인해 오차가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한 실차모델과 비슷한 7자유도 모델을 사용하지 않고 2자유도 모델을 사용하였기 때문에 실제 느끼는 조향감은 실차와 다소 차이가 발생할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 Steer-by-Wire 시스템 적용을 위한 조향반력 재현 시뮬레이터를 구축하고 마이크로컨트롤러를 사용하여 실시간 제어를 설계 하였다. 2자유도 모델로부터 차속과 조향각에 따른 기준 토크를 구하였으며, 실제 조향 반력 토크가 기준 토크를 잘 추종함을 확인할 수 있었다.

향후 실제 조향 계 시스템을 제작해서 기존 조향반력 시스템의 테스트뿐만 아니라 조향시스템 제어 ECU설계도 가능할 수 있을 것이다. 그리고 조향 계 시스템을 추가 할 경우 X-by-Wire 시스템에서 가장 중요한 사항인 Fail-Safe에 관한 연구도 필요 하다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김창준, "Steer-by-Wire 시스템을 위한 조향감 향상", 한국자동차공학회 2006년 춘계학술대회논문집, p723~727, 2006
- [2] 차항병, "조향 전자 제어 시스템", 오토저널, 제29권 3호, p34~38, 2007
- [3] 박수보, "좌우륜 독립제어 Steer-by-Wire 시스템 개발", 한국자동차공학회 2006년 춘계학술대회논문집, p1435~1440, 2006
- [4] 박보용, 허승진, "Vehicle Dynamics an Introduction", 2001
- [5] Thomas D. Gillespie, "Fundamentals of Vehicle Dynamics", SAE International, 1992
- [6] Julien Coudon, "A New Reference Model for Steer-By-Wire Applications with Embedded Vehicle Dynamics"
- [7] 미쓰비시 MELSERVO-J2-Super 시리즈 서보앰프 기술자료집
- [8] XC167 User's Manual v1.1, Infineon Technologies AG, 2005