

차량 메카트로닉스 시스템 개발 및 시험을 위한 조향 HILS 시스템의 성능평가 방법론

A Performance Evaluation Method of a Steering HILS System for Vehicle Mechatronic System Development and Test

김 희 수*, 류 제 하**, 임 재 우**
Heesoo Kim, Jeha Ryu, Jaewoo Yim

ABSTRACT

Various HILS systems for developing and testing vehicle mechatronic systems have been proposed and constructed during the last few years. However, performance of those systems have not been evaluated in a systematic way. Based on the transfer function approach, this paper presents a method for evaluating performance such as stable dynamic simulation range of a proposed steering HILS system. In the evaluation, we have investigated effects of time delays that exist in the real-time dynamic simulation, additional actuators, and data transmission on the stable dynamic simulation range, simulation frequency range, and steering feel. This evaluation methodology may be useful to help engineers develop a HILS system for their own purposes.

주요기술용어 : Hardware-In-the-Loop-Simulation(조향 HILS), 성능평가, 차량동역학

Nomenclature

J_h : 핸들부(조향휠, 칼럼) 관성모멘트
 B_h : 핸들부의 마찰계수
 d : 운전자 입력토크
 r_p : 피니언에 걸리는 토크

T_{d1}, T_{d2} : 구동기의 영차 및 일차 시간지연
 T_{dz} : 차량동역학 모델 계산시에 발생하는 영차 시간지연상수
 R_p : 랙-피니언의 치차율
 X_r : 랙의 변위
 M_r : 랙바의 질량
 B_r : 랙바의 점성 마찰계수
 F_r : 랙에 실제로 작용하는 힘
 F_{rd} : 차량동역학 모델에서 계산되어진 힘

* 회원, 금호타이어 (주)

** 회원, 광주과학기술원 기전공학과

1. 서론

자동차 메카트로닉스 부품의 개발과정은 설계 및 제작, 제작된 시작품의 성능시험, 시험결과 피드백을 통한 재설계로 이루어진다. 이 경우 부품의 일부 성능 검증은 많은 시간과 경비가 소요되는 실차 시험을 통해 이루어지므로 성능시험을 효율적으로 할 수 있다면 제품 개발 기간을 단축하여 많은 경비를 절약할 수 있다. 또한, 실차 환경에서는 차량동력학의 복잡성과 비선형적 요소들에 의해 시험과정에서 측정하기 어려운 부분이 있으며 반복적인 시험이 불가능할 수 있다.

이러한 문제점들을 일부 해결하기 위한 대안으로 지난 수년간 많은 연구자들이 Hardware-In-the-Loop Simulation(HILS)^{1, 2)} 시스템을 제안하고 연구개발, 시험에 실제 사용하고 있다. 이 시스템에서는 기본적으로 성능시험의 대상이 되는 부분(ECU, ABS, EPAS, Suspension, Engine등)을 실제 하드웨어로 놓고 그 외의 나머지 부분은 수학적으로 모델링하여 매우 빠른 계산 능력을 가진 DSP 혹은 PC를 사용하여 실시간 시뮬레이션을 하고 이 두 부분을 인터페이스 장치(ABS HILS 시스템처럼 단순한 전기적 신호연결이나 혹은 Steering HILS 경우처럼 실제 차량에는 없는 부가적인 구동기)를 이용해 연결함으로써 폐회로를 구성하여 여러 시험상황에서 모의 시험을 수행하는 것이다. 따라서, HILS 시스템은 실차 시험의 실제성과 모의 시험의 안전성, 반복성, 경제성의 장점을 동시에 취할 수 있어 시간적, 경제적으로 절약된 시험을 가능하게 한다. 이러한 목적으로 다양한 HILS 시스템들이 ABS, ECU, EPS 조향장치, 반응동 현가장치, 엔진, 동력전달계등의 개발 및 시험을 위하여 대학, 연구소, 산업체에서 제작되었고³⁻⁷⁾ 이러한 시스템을 사용하여 자동차의 안전성을 향상시키기 위한 여러 첨단 제어알고리즘들이 시험 평가되고 있다.⁸⁻⁹⁾

그러나 현재 구성되어 있는 몇몇 HILS 시스템

의 시뮬레이션 시험결과에 대한 신뢰도는 아직 충분히 검증되어 있지 아니며 그 주된 이유로는 첫째, 실시간 동력학 시뮬레이션 모델의 정확성 부족, 둘째, Hardware로의 입력 신호의 실제성 부족, 그리고 셋째로 현가장치 HILS 시스템이나 본 연구의 고려 대상인 조향 HILS 시스템의 경우에 필요한 부가적인 구동기 및 동력학 시뮬레이션에서의 시간지연효과에 의한 시뮬레이션의 안정성 부족 등을 들 수 있다. 이 중에서 시뮬레이션 모델의 정확성은 실차 거동과의 비교를 통해 향상시키고 입력신호의 실제성 문제는 실제와 비슷한 신호를 만들어 낼 수 있는 신호발생기¹⁰⁾를 사용하여 어느 정도 시뮬레이션의 신뢰성을 높일 수 있으나 부가적인 구동기나 동력학 시뮬레이션에 의한 시간지연 효과는 안정적으로 시뮬레이션 가능한 동적범위나 조향감 등에 직접 영향을 미친다. 따라서 어떤 목적의 HILS 시스템을 구성하면 그 구성된 HILS 시스템이 안정적으로 구현할 수 있는 시뮬레이션 동적 범위를 갖는지와 조향감 등을 평가하고 이 범위 안에서의 결과관을 신뢰할 수 있는 결과로 여겨야 할 것이다.

본 연구에서는 기 개발된 전동식 동력 조향 장치(Electric Power Assist Steering System, EPS)의 시험을 위한 HILS 시스템을 평가하는 방법론을 제시하였고 여러 시간지연효과가 HILS 시스템의 성능에 미치는 영향을 조사 분석 하였다. 마지막으로 이 영향들을 근거로 HILS 시스템의 설계 지침을 제시하였다.

2. 조향 HILS 장치의 구성

(Fig.1)은 본 실험실에서 구성한 EPS 시험용 조향 HILS 시스템의 블록그림을 보여준다. 본 연구에서는 시험 대상인 조향휠, 조향 칼럼, 랙, 모터는 하드웨어로 시뮬레이션 루프에 포함시키고 차량의 나머지 부분(타이로드, 스티어링 링크지, 새시 및 타이어 등)은 소프트웨어로 모델링하고 이 두 부분을 변위 센서와 공압 액츄에이터로 연결하였다. 운전자의 토크입력(τ_d)과 조향반력

(τ_{re})의 차이만큼의 토크(τ_h)가 조향기구부에 전달되고, 전달된 토크에 의해 랙의 변위(x_r)가 발생하고 이 값은 LVDT 센서에 의해 측정되어서 차량 조향동력학 모델의 입력으로 이용된다⁵⁾. 차량 조향동력학 모델을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션에서 계산된 랙의 요구 반력은 부가적인 액츄에이터를 이용하여 랙 반력으로 구현되며 이 힘은 조향 기구부를 통하여 운전자에게 전달되게 된다. 이러한 HILS 시스템에서는 실차에서는 존재하지 않았던 부가 구동기가 있으며 또한 실차 동력학 반응 시간과는 다른 동력학 시뮬레이션 시간이 존재함으로써 실차 상황과는 다른 거동을 보일 수 있으며 따라서 이러한 HILS시스템의 시뮬레이션의 신뢰도를 평가할 필요가 있다.

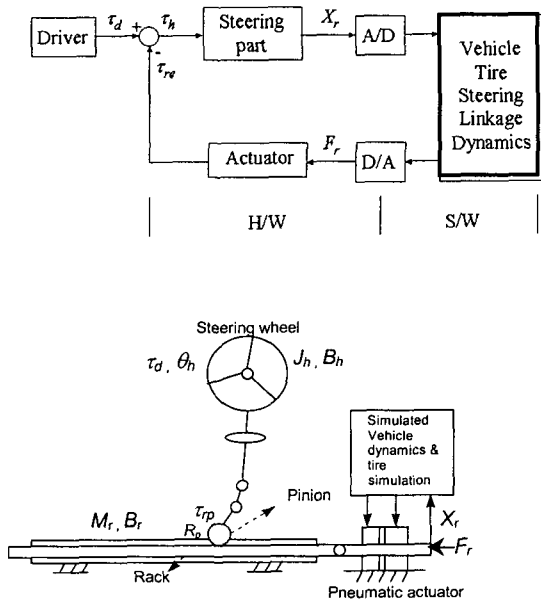


Fig. 1 HILS Configuration for electric steering system

3. 조향 HILS 시스템 성능 평가

3.1 성능평가 사항

소프트웨어로 시뮬레이션되는 차량 조향동력학 모델이 실차의 거동을 상당히 정확히 반영하고 H/W 입력신호의 실제성이 좋다면, 실차상황

과 HILS 상황간의 가장 큰 차이는 HILS 시스템에 존재하는 시간지연에 의해 발생하는 영향 때문에 주로 기인한다. (Fig. 1)의 조향 HILS 시스템에서 발생할 수 있는 시간지연(time delay) 요소는 아래의 세가지를 들 수 있다.

1) Computation delay

PC 혹은 DSP에서 차량동력학 모델을 계산할 때 발생하는 시간지연요소. 일반적으로, 좀더 정확한 차량의 거동을 알아보기 위해 자유도가 높은 차량동력학 모델을 사용하게 되는데, 차량동력학 모델의 자유도가 높아질수록 복잡해지는 계산 때문에 computation delay가 증가하게 된다.

2) Actuator time delay

동력학모델에 의해 계산된 랙반력과 실제 액츄에이터에 의해 구현되는 실제 반력 사이에는 구동기의 영차시간지연(pure time delay) 및 일차 시간지연(1st order delay)이 존재한다.

3) Transmission delay

H/W와 S/W의 연결을 위해 필요한 컨버터(A/D,D/A) 및 전송시간으로 발생하는 시간지연.

본 장에서는 이러한 시간지연 요소가 조향 HILS 시스템 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해 조향각 입력과 조향반력 사이의 전달함수를 구하고 현재 실험실에 구축해 놓은 조향 HILS 시스템에 대해서 첫째, 안정적으로 시뮬레이션 할 수 있는 동적범위, 둘째, 주파수 영역해석을 통해 시간지연으로 인해 제한되는 전체시스템의 시뮬레이션 대역폭을 알아보고, 셋째, 시간지연으로 인한 운전자가 느끼는 조향감의 변화에 대해서 언급할 것이며, 마지막으로 앞의 분석을 기초로 하는 조향HILS 시스템 구성에 대한 설계지침을 제시하였다.

3.2 조향 HILS 시스템 성능평가

3.2.1 차량 조향 동력학 동적범위

먼저 설계된 조향 HILS시스템이 안정적으로 구현해야 할 차량 조향동력학 동적범위를 구한다. 이 동적범위는 차량 조향동력학 시스템의 임

피던스 변수들로 표시될 수 있으며 여러 주행상황마다 다른 범위가 존재한다. 본 논문에서 제안된 조향 HILS 시스템의 경우 조향휠(wheel)부터 랙(rack)까지는 실제 하드웨어로 존재하고 있고 이 랙에 연결된 타이로드(tie rod)부터의 모든 하드웨어는 랙 변위를 입력으로 하고 요구되는 랙 반력을 출력으로 하는 차량 조향동역학 모델 소프트웨어로 대체되어 있다. 따라서 이 차량 조향동역학 모델이 실제 차량의 대응부분의 조향동역학 거동을 충분히 반영하여야 한다.

운전자의 랙 변위 입력 (X_r)과 요구되는 랙 반력 (F_{rd})의 관계는 근사적으로 조향휠부터 랙까지의 하드웨어를 제외한 차량 조향동역학 시스템의 등가관성 (j), 등가댐핑 (b), 그리고 등가강성 (k)이 고려된 다음과 같은 2차식으로 모델링 될 수 있다.

$$F_{rd}(s) = (js^2 + bs + k)X_r(s) \quad (1)$$

식 (1)에서 저속 조향시 전체 임피던스에서 영향이 별로 크지 않은 관성효과를 무시하고 단순화된 1차 식으로 표현하면,

$$G_t(s) = \frac{F_{rd}(s)}{X_r(s)} = G_t(T_t s + 1) = bs + k \quad (2)$$

여기서

G_t : Reaction force gain, [Nm/rad];

T_t : Reaction force time constant, [sec];

실제 차량에서 발생하는 랙 반력은 차선변경 또는 급조향등 여러 주행상황 및 차량종류, 도로 환경에 따라 비선형적으로 다르게 나타날 것이다. 따라서 실제 차량에서 발생하는 랙 반력의 b , k 향으로 나타낸 정확한 동적범위는 여러 주행상황의 시험을 통해 구하거나, 실차 시험과 잘맞는 차량 조향동역학모델을 시뮬레이션함으로써 구할 수 있을 것이다. 그러나 본 연구에서는 실차 시험의 어려움 때문에 현재 구현된 차량 조향동역학 모델이 실차의 거동을 대체로 반영한다는 가정하에 식(2)에 나타낸 랙 반력의 선형화된 근사적인

동적범위를 구하였다. 식(2)에서 k 와 b 는 랙 반력 계인 G_t 와 시간상수 T_t 로 표현되므로 조향 HILS 시스템의 차량 조향동역학 모델을 이용해 여러가지 주행상황을 시뮬레이션 해보고 이때 발생하는 랙 변위와 랙 반력의 비 G_t 와 시간상수 T_t 의 최대 및 최소 범위를 구하여 다음 예와 같이 근사적인 랙 반력의 동적범위를 구하였다.

$$G_{t_min}=1[N/m] < G_t < G_{t_max}=10[N/m]$$

$$T_{t_min}=0.02[sec] < T_t < T_{t_max}=0.1[sec]$$

a) (G_{t_min}, T_{t_min}) $\rightarrow k=1, b=0.02$

b) (G_{t_min}, T_{t_max}) $\rightarrow k=1, b=0.1$

c) (G_{t_max}, T_{t_min}) $\rightarrow k=10, b=0.2$

d) (G_{t_max}, T_{t_max}) $\rightarrow k=10, b=1$

위의 극점들을 b, k 평면에서 연결하면 (Fig. 2)와 같이 나타낼 수 있는 데 차량 조향동역학의 요구되는 동적 범위는 사각형의 안쪽영역으로 근사할 수 있다. 이렇게 근사적으로 구한 동적범위는 본 논문에서 제안하는 성능평가 방법론을 보여주기 위한 하나의 예이며 실제 동적범위는 비선형성을 고려할 때 반드시 이렇게 나타나지는 않을 것이나 G_t, T_t 를 구할 때 최대, 최소값을 고려했으므로 실제 동적범위를 내포하는 매우 보수적인 동적범위라 생각할 수 있다.

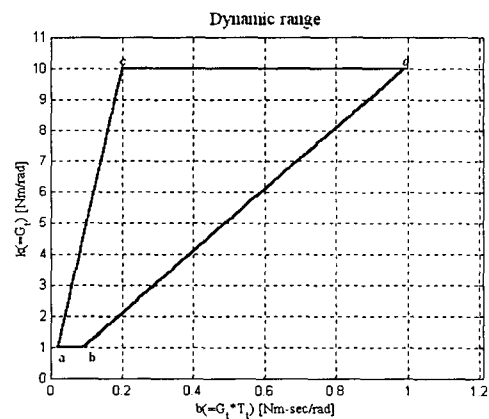


Fig. 2 Vehicle dynamic range of the steering system

3.2.2. 조향 HILS 시스템 모델링

다음으로 앞 절에서 나타낸 차량조향동역학 동적범위를 구현하기 위해 제작된 조향 HILS 시스템의 구현 가능한 동적범위를 구하기 위하여 아래와 같이 시스템 모델링을 수행한다. 조향핸들부(steering wheel & column)에 관한 식은 다음과 같이 단순화된 2차 시스템 Laplace 식으로 고려한다.(Fig. 1 참조)

$$\tau_d(s) = (J_h s^2 + B_h s)\theta_h + \tau_{re} \quad (3)$$

그리고 랙에 걸리는 반력에 관한 식은 역시 단순화할 경우 아래식과 같이 쓸 수 있다.

$$\tau_{rp} \frac{1}{R_p} = (M_r s^2 + B_r s)X_r + F_r \quad (4)$$

식(4)에서 M_r 및 B_r 은 부가구동기의 질량 및 감쇠(Damping)을 포함한다. 또한 차량 조향동역학 모델에서 계산된 구현해야 할 랙 반력(F_{rd})과 실제 액추에이터에 의해 구현되는 랙 반력(F_r)을 간단한 영차(T_{d1}) 및 일차 시간지연(T_1)항으로 나타내면 다음과 같다.

$$F_r = \frac{e^{-sT_{d1}}}{1 + T_1 s} F_{rd} \quad (5)$$

또한 컴퓨터에서 랙 변위를 입력으로 하고 랙 반력을 출력으로 하는 차량 조향동역학 시뮬레이션에 걸리는 시간 T_{d2} 를 고려하면,

$$F_{rd} = \frac{(k + bs)e^{-sT_{d2}}}{R_p^2} X_r(s) \quad (6)$$

$X_r = R_p \theta_h$ 인 관계식을 이용하여 식 (3)-(6)을 정리하면,

$$\tau_d = (J_{eq} s^2 + B_{eq} s)\theta_h + \tau_{re} \quad (7)$$

여 기 서
 $J_{eq} = J_h + R_p^2 M_r$, $B_{eq} = B_h + R_p^2 B_r$, $\tau_{re} = R_p F_r$
 이고, J_{eq} , B_{eq} 는 조향장치(조향 휠, 랙-피니언)와 공압액추에이터로 구성된 하드웨어부분의 등가 관성모멘트와 등가 감쇠계수를 나타낸다.

Fig.3은 위식들을 이용하여 표현한 조향 HILS 시스템을 블록 선도로 표현한 그림이다.

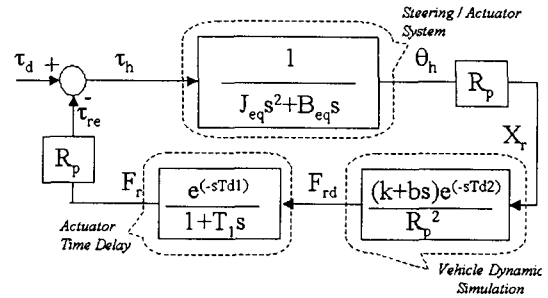


Fig. 3 Block diagram of the steering HILS system

3.2.3. 안정한 동적 시뮬레이션 범위평가

실제 차량시스템과 조향 HILS시스템의 차이는 하드웨어로 구성된 조향장치를 제외한 나머지 부분이 소프트웨어적으로 모델링 되어 있다는 점과 조향반력을 구현하기 위해 부가적인 액추에이터가 추가되었다는 것이다. 조향HILS 시스템에서는 소프트웨어적으로 모델링된 부분의 계산량에 비례하여 계산시간은 증가할 것이고, 운전자에게 전달되는 조향반력과 액추에이터에 지령된 값에는 부가적인 액추에이터에 의한 시간지연이 존재하기 마련이다. 따라서 이러한 시간지연항들이 조향HILS 시스템의 안정도에 어떠한 영향을 미치는지와 안정적으로 구현할 수 있는 시뮬레이션 동적범위를 알아보려고 한다.

Fig. 3을 이용하여 τ_h 로부터 τ_{re} 까지의 시스템의 개루프 전달함수 $G(s)$ 를 구해보면 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{\tau_{re}}{\tau_h} = - \frac{(bs + k)e^{-sT_d}}{(J_{eq} s^2 + B_{eq} s)(1 + T_1 s)} \quad (8)$$

여기서 $T_d = T_{d1} + T_{d2}$

$s = j\omega$ 를 식(8)에 대입하면,

$$G(j\omega) = - \frac{(k + bj\omega)e^{-j\omega T_d}}{-(J_{eq} + B_{eq} T_1)\omega^2 + j(B_{eq}\omega - J_{eq} T_1 \omega^3)} \quad (9)$$

개루프 전달함수가 안정하기 위해서는 $|G(j\omega)| < 1$ at $\angle G(j\omega) = -\pi$ 이므로, 시간지연항이 존재할

때 조향 HILS 시스템의 안정도 경계치를 구해보면 다음 식(10),(11) 과 같다.

$$|G(j\omega)| = \frac{\sqrt{k^2 + b^2 \omega^2}}{\sqrt{(J_{eq} + B_{eq} T_1)^2 \omega^4 + (B_{eq} \omega - J_{eq} T_1 \omega^3)^2}} = 1 \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \angle G(j\omega) &= \angle(-1) + \angle(k + j b \omega) + \angle e^{-j \omega T_d} \\ &\quad - \angle((-J_{eq} - B_{eq} T_1) \omega^2 + j(B_{eq} \omega - J_{eq} T_1 \omega^3)) \\ &= -\pi \end{aligned}$$

$$\therefore k = \frac{b \omega (J_{eq} + B_{eq} T_1) + J_{eq} T_1 \omega \tan(\omega T_d)}{(J_{eq} + B_{eq} T_1) \tan \omega T_d + J_{eq} T_1 \omega} \quad (11)$$

위 식(10)과 (11)를 만족하는 ω 는 파라미터 ($J_{eq}, B_{eq}, T_1, T_d, k, b$)들의 값이 주어졌을 때 안정도를 만족시키는 최대 주파수를 나타낸다. 식(10)과 식(11)를 이용하여 조향 HILS 시스템의 안정한 영역을 알아보기 위해 Newton iteration을 이용하여 k, b, ω 값들을 구하고, x 축을 $b(= G_t \times T_1)$, y 축을 $k(= G_r)$ 로 하는 그래프를 그려보면 아래 그림들과 같다.

Fig. 4는 $J_{eq}=0.0075, B_{eq}=0.005, T_1=0.005[s]$ 일 때, 여러 T_d 값들에 대해 위 식을 만족하는 ω, k, b 에 관한 그래프이다. 이 그림으로부터 T_d 가 일정할 때 b 와 k 값이 커질수록 ω 값은 커짐을 알 수 있고, 이것은 조향HILS 시스템이 구현하려는 동적범위가 클수록 시뮬레이션을 안정하게 수행할 수 있는 주파수대역이 넓어져야 함을 의미한다.

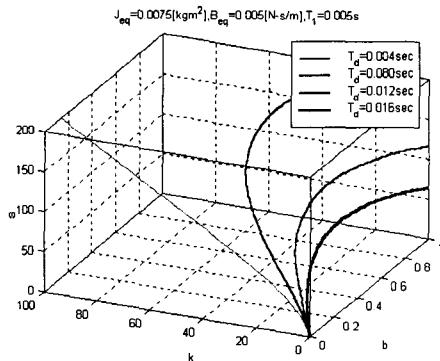


Fig. 4 Dynamic stability conditions w.r.t ω, k, b variations

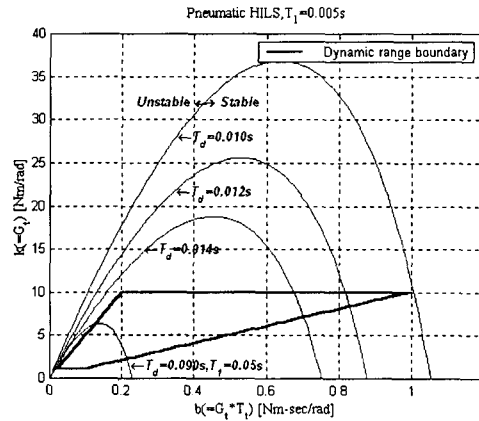


Fig. 5 Dynamic stability range of the steering HILS system

앞 3.2.1절에서 설명했듯이 차량 조향동력학 모델에서 실제 구현해야 할 조향반력의 동적범위는 사각형의 내부영역으로 표현되고, 제안된 조향HILS 시스템이 안정하게 구현할 수 있는 동적범위는 Fig. 5의 시간지연 T_d 의 변화에 따라 나타나는 선들의 아래쪽 영역이다. 따라서 본 연구에서 예로 든 차량의 요구되는 차량 조향동력학 동적범위를 전부 안정적으로 구현하기 위해서는 조향 HILS 시스템이 최대 0.01초 (10ms)이하의 시간지연만을 가져야 하며 이것은 부가구동기의 영차 시간지연 및 실시간 차량 조향동력학 모델이 컴퓨터에서 시뮬레이션 될 때 필요한 시간의 합이 0.01초를 넘어서지 않도록 부가구동기 및 컴퓨터가 선택되어야 함을 의미한다. 만약 시간지연 $T_d=0.014$ 일 때는, 조향 HILS 시스템이 안정적으로 구현할 수 있는 동적범위가 차량조향동력학 모델에서 계산되는 조향반력에 대한 동적범위의 일부를 포함하지 못하기 때문에 어느 특정구간(예: $k=9, b=0.8$)에서는 HILS 시스템이 불안정함을 의미한다. 즉 이 구간의 HILS 시스템 실험결과는 신뢰할 수 없다.

조향HILS 시스템을 구성하고자 할 때, 하드웨어부로 구성될 조향장치는 설계자의 의도에 따라 다르게 구성될 수 있다. 그러므로 설계자는 조향 HILS 시스템의 안정성을 확보하기 위해 관성의 영향을 고려하여 액추에이터를 선정해야 한다.

Fig. 6은 시스템에 존재하는 시간지연들이 $T_d=0.008\text{sec}$, $T_1=0.005\text{sec}$ 이고 액추에이터를 포함하는 전체 하드웨어부의 등가 댐핑 $B_{eq}=0.005\text{N-s/m}$ 일 때 J_{eq} 의 변화에 따른 HILS 시스템의 안정도 범위를 나타낸 것이다. 이 그림에서 HILS 시스템이 안정하기 위해서는 하드웨어부 (조향장치와 액추에이터)의 전체 관성모멘트 J_{eq} 가 0.006kgm^2 보다 커야 함을 나타낸다.

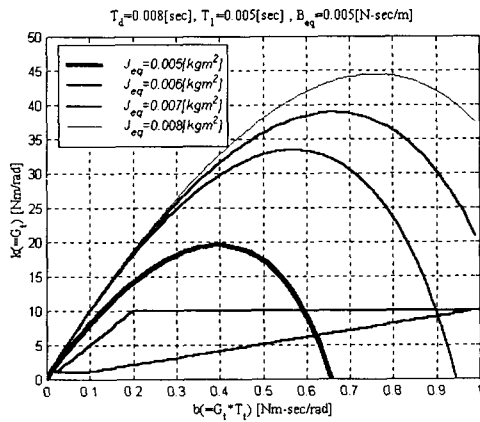


Fig. 6 Dynamic stability range w.r.t J_{eq}

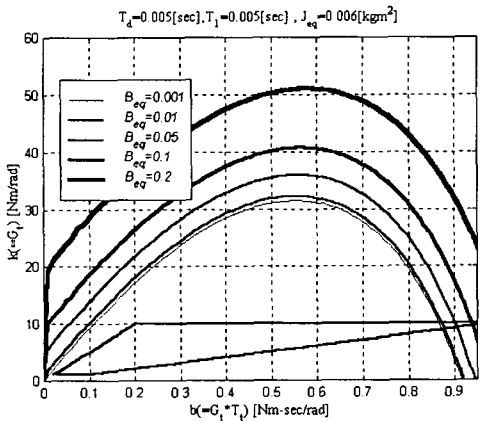


Fig. 7 Dynamic stability range w.r.t B_{eq}

Fig. 7은 $T_d=0.005\text{s}$, $T_1=0.005\text{s}$, $J_{eq}=0.006\text{N-s/m}$ 일 때 B_{eq} 의 변화에 따른 시스템의 안정도 범위를 나타낸 것이다. (Fig. 6)과 (Fig. 7)로부터 HILS 시스템 H/W부의 관성과 댐핑의 증가가 안정한 영역(실험가능한 동적범

위)을 증가시킴을 알 수 있다. 결론적으로 차량선 회동력학 모델로부터 계산되는(혹은 실제로 구현해야 할) 조향반력에 대한 동적범위는 그 범위를 알 수 있으므로 조향 HILS 시스템 설계자는 조향반력에 대한 동적범위를 포함하도록 시간지연 T_d 와 전체시스템의 관성모멘트와 댐핑등을 적절히 고려하여 설계하여야 할 것이다.

3.2.4 시뮬레이션 주파수 영역 평가

조향 HILS 시스템이 어느 주파수 범위까지 시뮬레이션이 가능한지를 알아보기 위해 시간지연 항이 존재할 때 운전자 토크입력에 대한 조향각 출력의 전달함수에 대해 $G_t=5.7$, $T_t=0.1$ ($V_x=80\text{km/h}$)일 때 Bode 크기 선도를 그려보면 Fig. 8과 같다.

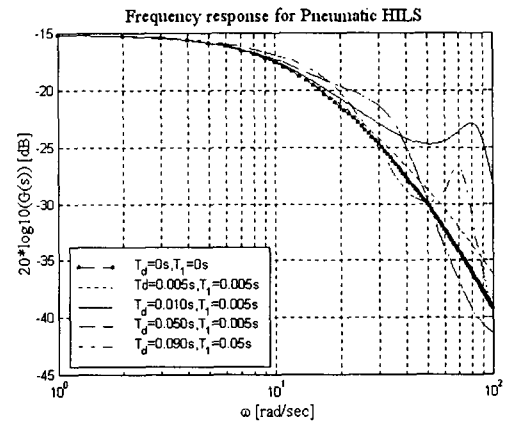


Fig. 8 Frequency response of the steering HILS system

Fig. 8로부터 $T_d=0.005\text{s}$, $T_1=0.005\text{s}$ 일 때의 그래프와 시간지연이 전혀 존재하지 않는 이상적인 경우 ($T_d=0\text{s}$, $T_1=0\text{s}$)의 그래프가 대략 $30[\text{rad/sec}]$ 까지 일치하므로, $T_d=0.005\text{s}$, $T_1=0.005\text{s}$ 의 시간지연이 존재하는 조향 HILS 시스템의 경우에는 대략 $30[\text{rad/sec}] (=5\text{Hz})$ 정도의 고주파 영역까지의 시뮬레이션이 가능함을 알 수 있다. 이것은 비상시에 발생하는 운전자의 최대 조향입력 주파수인 5Hz 까지의 시뮬레이션 결과를 신뢰할 수 있음을 의미하고, 시간지연 T_d

=0.05s, $T_1=0.005s$ 의 경우에는 10[rad/sec] (=1.6Hz)까지의 저주파 영역에서의 결과만을 신뢰할 수 있음을 보여주는 결과이다. 현재 꾸며진 조향 HILS 시스템은 $T_d=0.09s$, $T_1=0.05s$ 의 시간지연이 존재하므로 대략 7[rad/sec] (1.1Hz)까지의 실험이 가능하다고 말할 수 있을 것이다.

3.2.5 조향감 평가

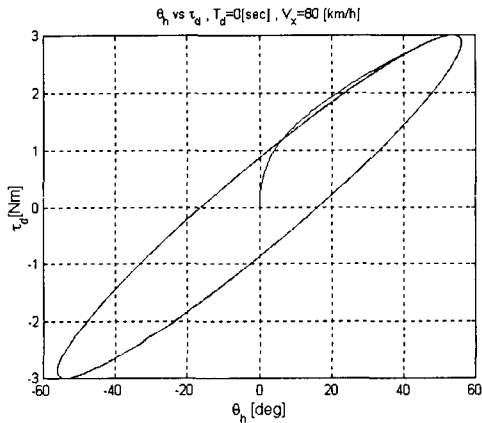


Fig. 9 Cross plot at $T_d = 0$

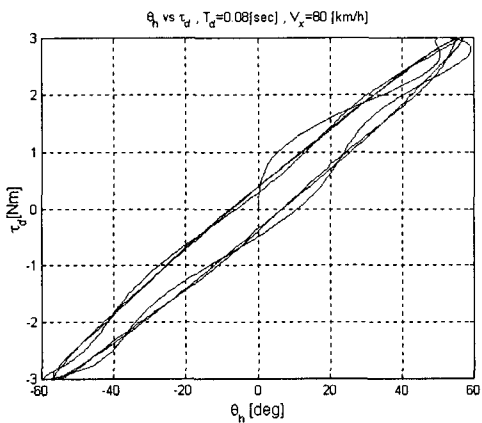


Fig. 10 Cross plot at $T_d = 0.08s$

Fig. 9와 Fig. 10은 $V_x=80[km/h]$ 일 때, 단일 차선변경상황을 시간지연항이 있을 때와 없을 때에 대해 시뮬레이션한 그림이다. Fig. 9는 시간지연항이 존재하지 않을 때 발생하는 조향력과 조

향각을 나타낸 것이고, Fig. 10은 시간지연 $T_d=0.08s$ 일 때를 시뮬레이션한 그림이다. Fig. 9에 비해 Fig. 10은 똑같은 조향각에 대해 발생하는 조향력이 일정하지 않음을 알 수 있다. 이는 운전자가 느끼는 조향감이 불안정함을 의미하고, 시간지연이 커질수록 조향력의 불안정함이 더 커짐을 확인할 수 있었다. 따라서 조향HILS 시스템의 안정도와 시스템 성능의 측면 뿐 아니라 운전자의 조향감을 위해서도 시간지연이 최소가 되도록 해야 할 것이다.

3.3 조향 HILS 시스템 설계지침

앞에서 제시한 성능평가 방법을 통해서 첫째, 영차 및 일차시간지연의 존재로 인해 조향HILS 시스템의 시뮬레이션 가능한 대역폭이 줄고, 둘째, 시스템의 불안정성을 유발시키며, 셋째, 운전자가 느끼는 조향감이 불안정해짐을 확인할 수 있었다. 또한 시간지연이 커질수록 조향 HILS 시스템을 구성하는 하드웨어부(조향장치와 액츄에이터)의 관성과 댐핑의 영향이 안정적인 HILS를 위해 중요해 짐을 알 수 있다. 이러한 사실들에 기초하여 조향 HILS 시스템 설계자는 다음의 지침 및 순서에 따라 시스템을 구성해 볼 수 있을 것이다.

- 1) 여러 시험주행상황(예 : 차선변경, 급조향)에 대한 실차시험 혹은 실차시험과 잘 맞는 차량 동역학 모델을 시뮬레이션 함으로써 Fig. 2 과 같이 요구되는 차량 조향동역학 동적범위를 결정한다.
- 2) 조향 HILS에 사용될 실시간 차량동역학 모델을 구성한다.
- 3) HILS 시스템에서 실험하고자 하는 대역폭을 결정한다.
- 4) 조향 HILS 시스템 구성 요소로부터 T_d , J_{eq} , B_{eq} 를 구한다.
- 5) 허용가능 T_d 를 참고하여 동역학모델의 시뮬레이션에 필요한 processor를 선정한다.
- 6) T_d , J_{eq} , B_{eq} 등을 기초로 안정도와 시스템

대역폭을 만족하도록 조향반력 구현을 위한 액츄에이터와 그 외 주변기기를 선정한다.

- 7) 안정도와 시스템 대역폭의 만족여부를 평가한다.
- 8) 안정도와 시뮬레이션하고자 하는 시스템의 대역폭을 모두 만족하면 HILS 시스템을 구성한다.

4. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 기존의 HILS 시스템의 성능을 평가하는 방법론을 제시하고 조향 HILS 시스템에 적용하여 안정적으로 구현할 수 있는 동적 시뮬레이션의 범위등을 구하였다. 이러한 연구는 다른 유형의 HILS 시스템에도 적용이 가능하므로 실제 시스템 구성 시 참고되어질 수 있다고 여겨진다. 향후 연구사항으로는 제안된 HILS 장치에 MDS(Microprocessor Development System)를 이용한 ECU 개발시스템을 추가하고 실차 시험과의 검증을 거쳐 동력학 시뮬레이션 모델의 신뢰도를 향상시키고 더욱 빨리 반응하는 구동기에 대한 연구를 수행할 방침이다.

참 고 문 헌

- 1) H. Hanselmann, "Hardware-in-the-Loop Simulation as a Standard Approach for Development, Customization, and Production Test", SAE 930207, 1993.
- 2) H. Hanselmann, "Hardware-in-the-Loop Simulation as a Standard Approach for Development, Customization, and Production Test of ECUs", SAE 931593, 1993.
- 3) L. Dragon, "FADYS Handling Simulations used in a real-time Hardware-in-the-Loop Application with the ESP-Controller", AVEC96, International Symposium on Advanced Vehicle Control, Aachen Univ. of Tech, pp.559-572, 1996.
- 4) 이지선, 류제하, "자동차 능동 브레이크 제어를 위한 HILS시스템 개발", 한국자동차공학회 추계학술대회, 고등기술연구원, pp.1103-1108, 1997.
- 5) 류제하, 노기한, 김종협, 김희수, "전동식 동력조향장치 시험을 위한 HILS시스템 개발", 한국자동차공학회 논문집, 제 7권, 제 8호, pp.105-111, 1999.
- 6) 이경수, 서지윤, "반능동 현가시스템 Hardware-in-the-Loop시뮬레이션 시스템 설계", 대한기계학회 추계학술대회, pp. 922-927, 1996.
- 7) R. E. Dorey and D. Maclay, "Rapid Prototyping for the Development of Powertrain Control Systems", Proceedings of the 1996 IEEE International Symposium on Computer-Aided Control System Design, Dearborn, MI, pp. 135-140, 1996.
- 8) 류제하, 김호수, "브레이크 HILS를 이용한 능동 요모멘트 제어알고리즘의 평가", 한국자동차공학회 논문집, 제 7권, 제 8호, pp.172-179, 1999.
- 9) 류제하, 김종협, "자율주행차량의 충돌회피 차선변경 제어알고리즘 개발과 HILS 시험", 한국자동차공학회 논문집, 제 7권, 제 5호, pp.240-248, 1999.
- 10) H. Hanselmann, "DSP-based Automotive Sensor Signal Generation for HILS", SAE world congress, 1994.