

전자식 차체 자세제어 장치 실시간 시뮬레이션을 위한 유압 모델 개발 Development of Hydraulic Simulation Model for ESP Real Time Simulation

천세영¹ · 최성웅² · 양순용^{3*}

Se Young Cheon, Seong Woong Choi and Soon Yong Yang

Received: 02 Apr. 2019, Accepted: 13 May 2019

Key Words : SIL(루프 시뮬레이션), ESP(전자식 자세제어 장치), RT Simulation(실시간 시뮬레이터), Electric Brake(전자브레이크), CAE(Computer Aided Engineering)

Abstract: The ESP (Electronic Stability Program) is an active control system that controls the posture of the vehicle by sensing the unstable state of the vehicle during braking, driving, or turning. The system works if the vehicle becomes unstable and it is very dangerous to develop it in the actual vehicle. For this reason, many studies have been carried out on the method of developing with simulation such as SIL / EIL. Some advanced companies have already applied it to the product development process. In this study, ESP hydraulic system and braking device model were constructed using SimulationX to build ESP SIL / EIL model. The hydraulic system model was constructed using the actual design parameters and the performance of the hydraulic model was verified by comparing with the actual vehicle test.

기호 설명

β : Bulk modulus
 A : Open Area
 α : Seat angle
 K : Check valve fluid coefficient
 e : Eccentricity
 N : Revolution speed
 k : Spring coefficient
 ρ : Fluid Density

v : Fluid velocity
 C_d : flow coefficient
 A_p : Piston Area
 η_p : Pump efficient

1. 서 론

ESP(Electronic Stability Program)는 차량의 주행안전 장치로 차량의 제동, 주행, 선회시 차량의 불안정한 상태를 감지하여 차량의 자세를 제어하는 능동 제어 시스템이다. ABS(Anti-lock brake system) 시스템¹⁾은 차량 제동 시 각 휠의 Slip을 감지하여 휠 잠김 현상을 방지하여 제동시 선회 안정성의 확보가 목적이였다면, ESP 시스템은 ABS기능과 더불어 차량 주행 시 발생하는 휠 스핀 현상을 방지하는 TCS 기능과 차량 선회시 횡방향 안정성을 확보하는 ESP 기능이 추가된 것이다. ESP는 1995년 Mercedes benz에서 상용화되기 시작했고, 현재 ABS, TCS, ESP 기능 외에도 각 휠을 개별 제동할 수 있는 특징 및 엔진 토크 제어에 개입할 수 있는 기능을 이용하여

* Corresponding author: soonyy@ulsan.ac.kr
 1 Brake Control Engineering Team, Hyundai Mobis, Yongin-si, Gyeonggi-do 16891, Korea
 2 Department of Construction Machinery Engineering, University of Ulsan, Nam-gu, Ulsan 44610, Korea
 3 Department of Mechanical Engineering, University of Ulsan, Nam-gu, Ulsan 44610, Korea
 Copyright © 2019, KSFC
 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.

EDC(Engine Drag Control), AVH(Auto Vehicle Hold), HSA(Hill Start Assist), ARP(Active Rollover Protection) 등 많은 부가 기능들이 개발되었고 최근에도 추가로 신규 부가 기능들이 개발되고 있다. 하나의 시스템에 많은 기능의 추가는 SW, HW의 복잡성이 증가하고, 오작동 확률도 높아지게 되어 더욱 철저한 검증이 필요하고, SIL/EIL을 이용하여 효과적으로 대상을 검증 할 수 있다.²⁻⁷⁾ SIL은 개발 대상이 되는 시스템을 제작 전 제어 소프트웨어와 하드웨어를 시뮬레이션 모델로 구축하여 시스템을 검증하는 방법이고 EIL은 제어 소프트웨어와 전자 하드웨어를 실제 제품을 사용하고 이를 제외한 유압 시스템 등을 시뮬레이션 모델로 구축하여 검증하는 방법이다. 2009년 말 ECE-R13H에서 ESP 검증에서 CAE를 이용하는 것을 허용하여 많은 ESP 개발 업체들이 제품 개발 및 검증에 CAE를 이용하고 있다.⁸⁾ 최근 시뮬레이션 기술 및 환경의 발전으로 유압 시스템을 모두 하드웨어로 구성하여 시뮬레이션을 수행하는 HIL⁹⁾ 보다 접근성 및 해석 시간이 빠른 SIL/EIL¹⁰⁾에 대한 연구가 많이 진행 되고 있고, 기존 제품 단품에 대한 시뮬레이션에서 서로 다른 제품의 시뮬레이션 모델을 통합하여 시스템을 검증하는 FMI(Function Mock-up Interface)로 시뮬레이션 기술이 발전하고 있다.

본 논문은 SIL/EIL에서 사용되는 ESP 유압 시스템 및 제동장치 모델을 실제 설계 파라미터를 이용하여 구축하고 실제 차량과 비교하여 실제 제품과 정합성이 높은 제동 유압시스템 모델을 개발하는 방법에 대해 연구 하였다. 정합성이 높은 ESP 유압 모델은 테스트 환경에 대한 제약을 없애 실제 제품 제작 전 제어 SW 개발과 HW 설계 파라미터 변경에 따른 제품 성능의 변화를 빠르게 확인 할 수 있어 제품 개발 시간을 많이 줄일 수 있다.

2. 시스템구성

ESP 시스템은 제동 유압 조절하는 유압 시스템(Hydraulic System) 유압 모듈을 작동시키는 ECU(Electric Control Unit) 그리고 차량 제동 및 자세를 제어하는 제어 SW로 Fig. 1과 같이 구성된다.

ESP 는 기존 CBS(Conventional Brake System)에서 마스터 실린더와 캘리퍼 사이에 장착되어 운전자가 조작하는 제동력을 조절하거나 차량의 거동이 불안정해지면 스스로 캘리퍼 압력으로 조정하여 차량의

거동을 안정화 시킨다. ESP 유압 시스템의 회로는 Fig. 2와 같다.

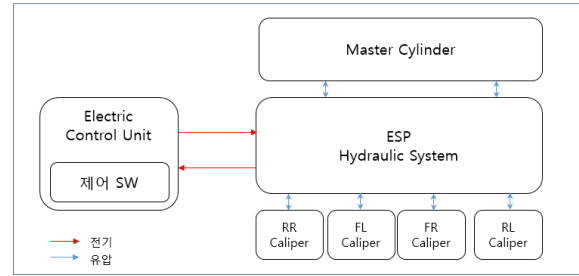


Fig. 1 Configuration of the ESP system

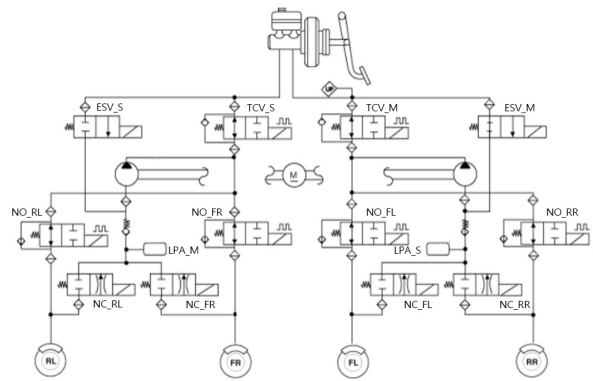


Fig. 2 ESP hydraulic circuit

ESP 유압 시스템은 일반적으로 12개의 밸브, 2개의 펌프, 1개의 모터, 그리고 2개의 어큐뮬레이터로 구성된다. 마스터 실린더는 제동 안전을 위해 2개의 분리된 유압 입력 포트가 구성되며 ESP 또한 좌우 2개의 유압 회로가 분리 되어 있다.

일반 제동 상태에서는 운전자가 공급하는 제동력은 마스터 실린더에서 유압으로 변경되어 ESP에 전달되고 ESP는 각 휠 캘리퍼에 압력을 전달하여 차량의 제동력을 발생시킨다. 12개의 밸브 중 Normally open 밸브와 Normally close 밸브로 2가지 종류의 밸브가 사용되며 TCV와 IV 밸브는 Normally open 밸브이고, ESV, OV 밸브는 Normally close 밸브이다.¹⁰⁾ Fig. 3은 Normally open 밸브와 Normally close 밸브의 단면도이다.

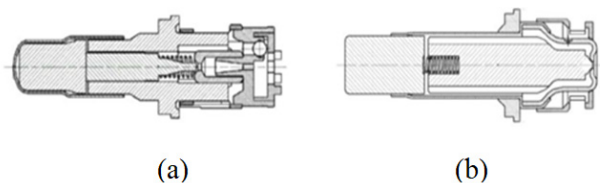


Fig. 3 (a) Normally open valve (b) Normally close valve

Normally open 밸브인 TCV밸브는 ESP와 캘리퍼의 유압을 유지 혹은 마스터 실린더와 ESP 입력 유압 포트를 분리시키는데 사용한다. IV 밸브는 운전자 제동 시 ABS 기능을 수행하는 밸브로 캘리퍼의 제동 압을 유지하거나 캘리퍼 압력을 해제 혹은 증가를 시키는 데 사용된다.

Normally close 밸브인 ESV 밸브는 모터 펌프에 의해 제동력을 발생시키는 경우 펌프 입력부에 유체를 제공하는 경우 사용된다. OV 밸브는 휠에 걸린 압력을 해제시킬 경우 사용된다.

Normally open 밸브의 경우 제동 압력 제어를 정밀하게 수행하기 위해 PWM 제어하고, Normally close 밸브는 압력 제어유체의 흐름에 관여하기 때문에 On/Off 타입으로 밸브를 제어한다.¹¹⁾

모터 펌프 시스템은 ABS 기능과 같이 운전자 제동 조작에 의해 발생하는 제어에서는 휠 압력 해제로 인해 발생하는 유체를 마스터 실린더로 회수시키는 역할을 수행하고, 운전자의 제동장치 조작과 관련 없는 TCS, ESP 제어 등에서는 제동 압력을 생성시키는데 사용한다.

휠에서 해제되는 유체가 펌프의 흡입량 성능 보다 많아지는 경우 휠 압력 해제 지연이 발생하게 된다. 이를 방지하기 위해 OV 밸브와 모터 흡입부 사이에 어큐뮬레이터를 설치하여 순간적으로 많은 유체가 해제되었을 때 일시적으로 유체를 저장하여 휠 압력 해제 지연을 방지하는 역할 수행한다.

3. 유압 시스템 모델링

3.1 유압 컴포넌트 모델링

ESP 유압 모델의 제동 유체특성은 basf 사의 오일 사양을 이용하여 모델링 했다. 오일 특성은 압력 발생에 따른 밀도와 체적탄성계수(β)의 변화이다. β 는 초기 체적으로부터의 체적 변화량에 대한 압력 변화량으로 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\beta = - \frac{\Delta p}{(\Delta V / V_0)} \quad (1)$$

Normally open 밸브인 TCV와 IV 밸브는 유압 밸브 고장 시에도 재래식 브레이크를 수행할 수 있도록 체크밸브를 가지고 있다. 상시개방형 밸브는 ECU에서 인가되는 전류에 의해 발생하는 플런저의 힘과 밸브 입출력에 걸리는 압력 차이에 의해 발생하는

힘의 차이에 의해 밸브가 개폐되어 각 휠의 압력을 제어한다.

Normally open 밸브의 플런저의 운동방정식은 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} F_{sol} &= F_p + F_{sp} - F_{flow} \quad (2) \\ &= A\Delta P + ky - \rho Qvcos(\phi) \\ &= A\Delta P + ky - C_d\pi Dy(\Delta P)\sin(\phi) \end{aligned}$$

여기서 k는 스프링계수, D는 밸브 시트 지름, y는 플런저 이동거리, ϕ 는 플런저 원주각의 1/2이다. F_{sol} 는 ECU 전류에 의해 발생하는 힘이고, F_p 는 플런저 양단 유압차에 의해 발생하는 힘이다. F_{flow} 는 밸브가 개방되었을 때 발생하는 유체력으로 밸브를 닫는 방향으로 작용한다. Normally open 밸브의 유량 방정식은 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} P_i > P_o, Q &= C_d A \sqrt{\frac{\rho}{2}(P_i - P_o)} \quad (3) \\ P_i < P_o, Q &= -C_d A \sqrt{\frac{\rho}{2}(P_o - P_i)} - K(P_o - P_i) \end{aligned}$$

K는 체크밸브의 유량계수(Fluid coefficient)이다. Normally open 밸브는 입력측 압력이 출력측 압력보다 큰 경우 일반적인 유량 방정식 구조를 갖지만, 반대의 경우 체크밸브가 작동되기 때문에 체크밸브에 의한 유량을 추가해야한다. 이를 바탕으로 모델링 하면 Fig. 4와 같다.

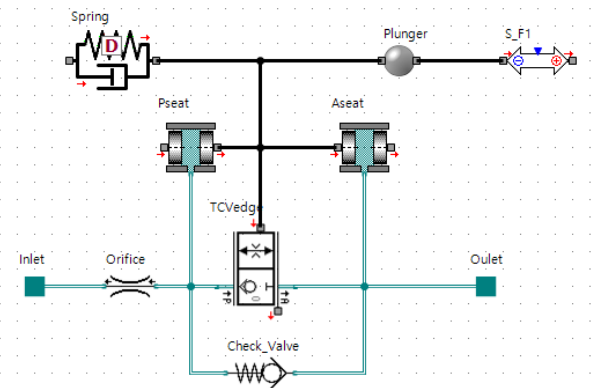


Fig. 4 Model of normally open valve

Normally close 밸브인 ESV, OV 밸브는 고장시에 재래식 브레이크에 영향을 미치지 않기 때문에 별도의 체크밸브를 가지고 있지 않다. Normally close 밸브는 ECU에서 인가되는 전류에 의해 발생하는 플런저의 힘과 밸브 입력에 걸리는 압력에 의한 힘의 차

이에 의해 밸브가 작동하여 각 휠의 압력을 해제한다. Normally close 밸브 플런저의 운동방정식은 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} F_{sol} &= F_p - F_{sp} - F_{flow} \\ &= AP_i - ky - \rho Qvcos(\phi) \\ &= AP_i - ky - C_d AP_i cos(\phi) \end{aligned} \quad (4)$$

Normally close 밸브의 유량 방정식은 식 (5)와 같다.

$$Q = C_d A \sqrt{\frac{\rho}{2}(P_i - P_o)} \quad (5)$$

이를 바탕으로 Normally close 밸브를 모델링 하면 Fig. 5와 같다.

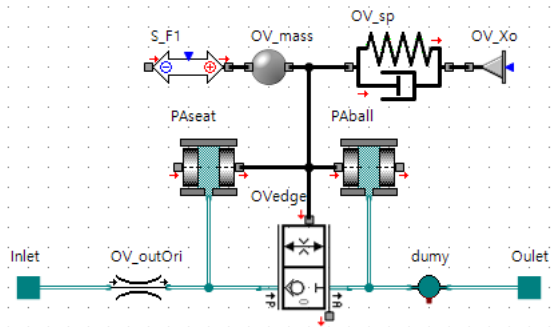


Fig. 5 Model of normally close valve

모터와 펌프는 운전자 의지와 상관없이 차량 안정성을 제동장치로 확보하는 경우와 ABS 상황에서 압력이 해제(Dump)되는 유체를 회수 하는데 사용된다. 펌프의 토출 속도는 식 (6)과 같이 계산된다.

$$v_p = e \sin(\theta) \times \frac{N\pi}{60} \quad (6)$$

여기서 e 는 모터 펌프 간에 편심량이다. 이때 펌프의 유량은 식 (7)과 같다.

$$Q = A_p \times v_p \times \eta_p \quad (7)$$

펌프 부하에 작용하는 힘은 식 (8)과 같다.

$$F_{load} = A_p (\Delta P + P_o) \quad (8)$$

$$A_p = \pi \frac{(d_p)^2}{4}, \quad \Delta P = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{Q}{C_d A_p} \right)^2$$

모터에 인가되는 토크는 식 (9)와 같이 계산된다.

$$T_{Mot} = F_{load} \times (e \sin \theta) \quad (9)$$

식 (9)는 식 (6)~(8)에 의해 다음 식 (10)과 같이 된다.

$$T_{Mot} = P_o A_p e \sin(\theta) + \frac{\rho}{2} \left(\frac{N\pi\eta}{60 C_d A_o} \right)^2 (A_p e \sin(\theta))^3 \quad (10)$$

식 (10)을 이용하여 모델링 하면 Fig. 6과 같다.

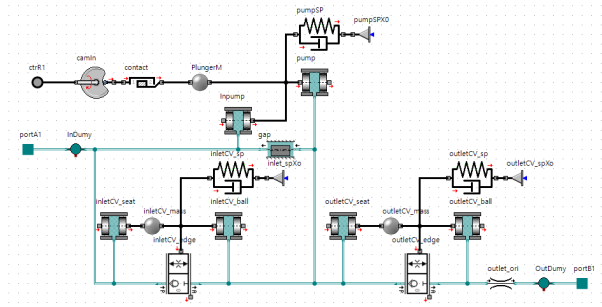


Fig. 6 Model of motor pump

어큐물레이터는 휠 압력 해제 시 발생하는 압력 해제 지연을 방지하는 역할을 한다. 어큐물레이터에 유입되는 유량과 내부 압력과의 상관 관계식과 운동 방정식은 식 (11), (12)와 같다.

$$P_{LPA} = \frac{\beta}{V_{LPA}} (Q_i - Q_o - V_{LPA} \dot{P}_{LPA}) \quad (11)$$

$$PA = m\ddot{x} + c\dot{x} + k(x + x_0) \quad (12)$$

이를 바탕으로 어큐물레이터를 모델링 하면 Fig. 7과 같이 표현 된다.

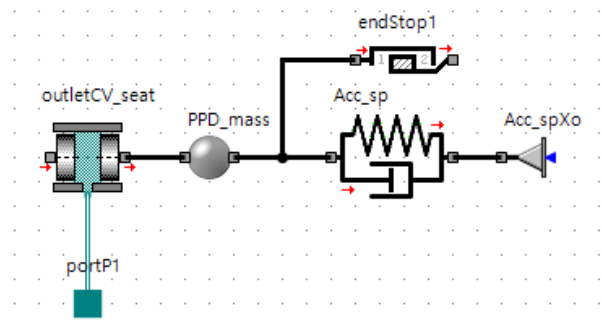


Fig. 7 Accumulator model

캘리퍼 모델은 시험에 의해 측정된 소요액량 값을 Fig. 8과 같이 구성하여 사용했다. 캘리퍼 모델은 유체특성, 마찰재, 캘리퍼 강성 등 비선형적 요소를 많

이 포함 하고 있어 실시간 모델로 구축하기 매우 어렵다. 캘리퍼 모델은 실제 캘리퍼에 인가 압력에 따른 소요 액량 시험 결과를 록업 테이블(Lookup Table) 형태로 모델링 했다. Fig. 8은 캘리퍼 전륜 소요액량 시험 결과를 Table 형태로 유압 모델에 사용 했다.

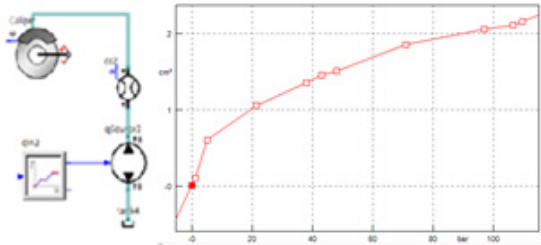


Fig. 8 Calliper model and required fluid level

3.2 유압 시스템 모델링

Fig. 9는 3.1 절에서 구성한 ESP 컴포넌트 모델을 이용하여 SimulationX로 구축된 ESP 유압 모델이다.

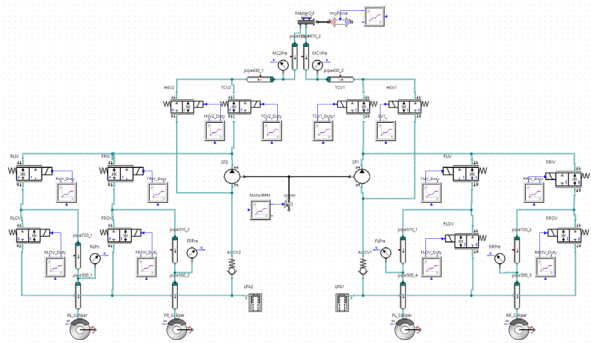


Fig. 9 Hydraulic modeling of ESP by SimulationX

ESP를 구성하는 유압 컴포넌트들을 Fig. 1과 같은 형태로 연결하였고, 마스터 실린더에서 ESP로 연결되는 파이프와 각 휠에 연결되는 유체 파이프의 길이 및 면적도 실제 차량과 동일하게 모델링 하였다. 구축한 유압 모델의 신뢰성을 확인하기 위해 밸브 기본시험, 압력 상승 시험 등을 실차 시험 결과와 비교하여 모델 검증을 수행했다.

4. 시험 및 결과

Fig. 10는 CBS 성능을 실차 시험과 시뮬레이션을 비교하여 CBS 적합성을 검증한 결과이다.

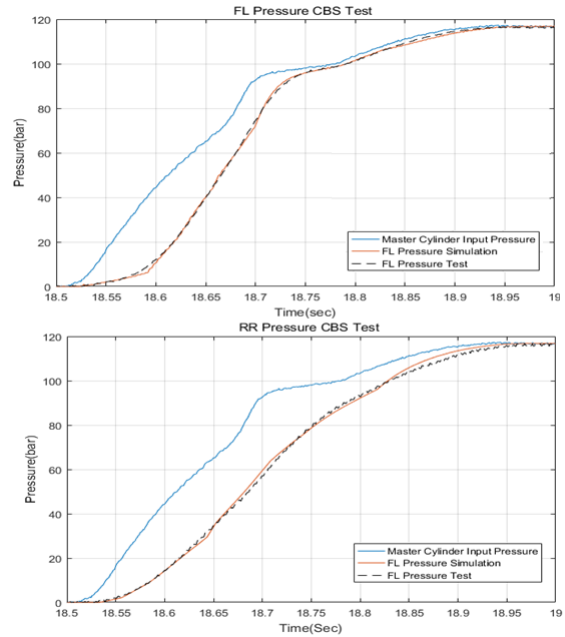


Fig. 10 Results of CBS test FL (above), RR (below) calliper

실차 CBS 제동 시험 결과의 운전자 제동 입력인 마스터 실린더 압력을 입력으로 시뮬레이션에 동일하게 인가했을 때 좌측 전륜(Front Left) 휠과 우측 후륜(Rear Right) 휠 압력을 실차 시험과 시뮬레이션을 비교한 결과 Fig. 11과 같이 시험과 시뮬레이션 모델과의 오차는 ± 3 bar 정도 발생하였다.

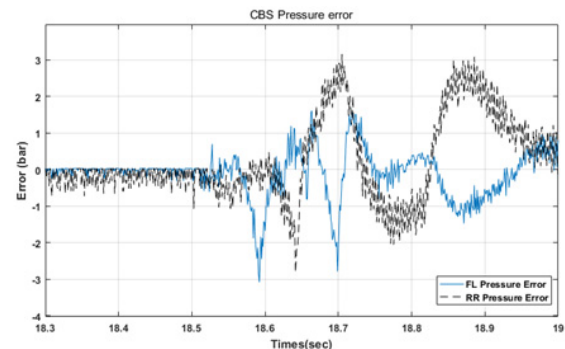


Fig. 11 Error result of wheel in CBS test

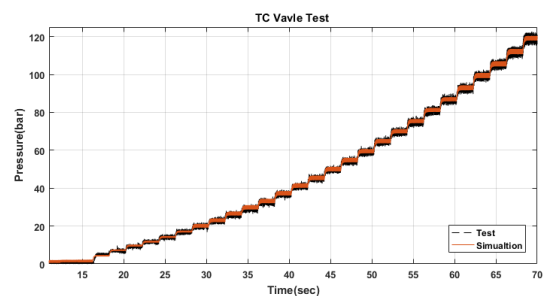


Fig. 12 Hold pressure according to TCV applied current

Fig. 12은 TCV 밸브의 인가된 전류별 ESP 압력 형성하여 밸브의 성능을 시험과 시뮬레이션을 비교한 결과이다.

TCV 밸브에 전류를 스텝으로 증가 시키고 모터 펌프를 이용하여 ESP 내부 압력을 발생 시키면 밸브에 인가된 전류에 의한 힘과 평형을 이루는 곳에서 압력을 유지하게 된다. Fig. 13(위)은 인가 전류별 밸브 홀드(Hold) 압력 그래프이고, Fig. 13(아래)은 시험과 시뮬레이션의 오차 이다.

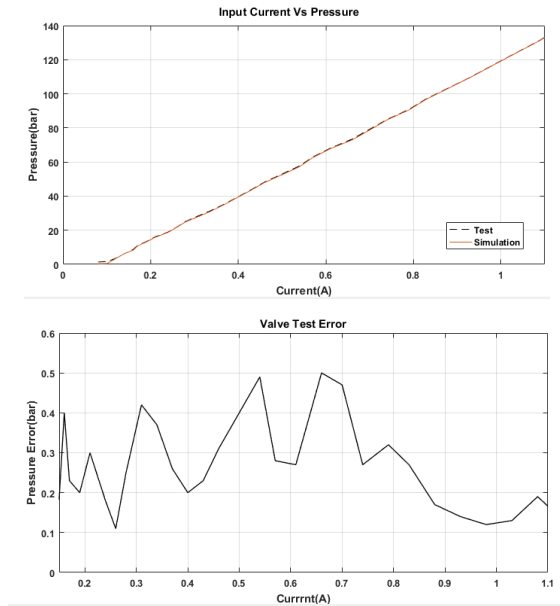


Fig. 13 Hold pressure (above) and error (below)

밸브 인가 전류별 홀드 압력 측정 결과 전류별 오차는 Max 0.5 bar 정도 발생하였고 실제 시험과 시뮬레이션 간에 정합성이 높은 것으로 나타났다.

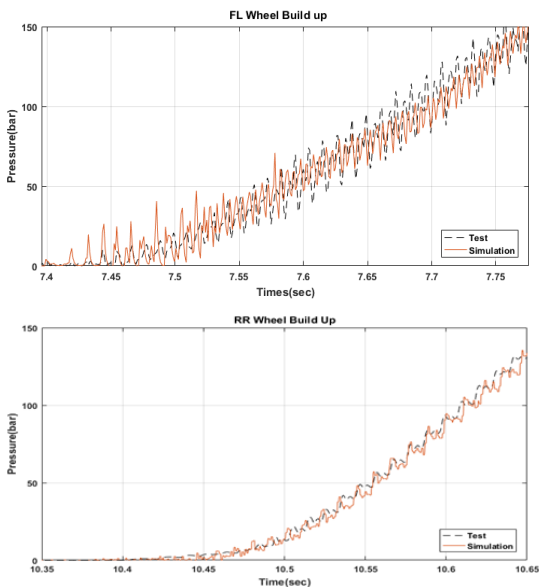


Fig. 14 1 Wheel boost test FL (above), RR (below)

Fig. 14는 모터 펌프를 이용하여 1개 휠에 최대로 증압 시켜 모터 펌프 성능을 실차 시험과 시뮬레이션 모델을 비교한 결과 이다.

1 휠 증압 시험 결과 압력의 진폭의 차이는 초반에 크게 나오지만 압력이 증가하는 부분에서는 10bar 내외로 발생했다. 전륜 기준으로 대상 high mu 노면에서 휠이 잠기는 압력인 약 80bar의 이탈시간차이는 시험과 시뮬레이션 차이는 5ms 이내로 나왔다.

Fig. 15는 Fig. 14와 같이 모터 펌프를 이용하여 4개 휠에 최대로 증압 시킨 결과이다.

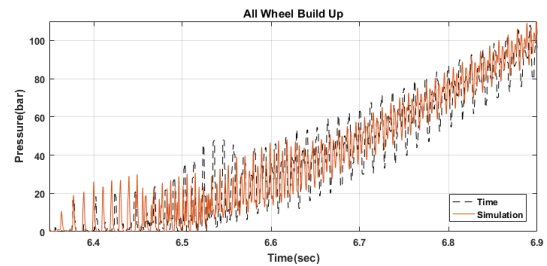


Fig. 15 4 Wheel pressure test

4 휠 증압 시험은 1 휠 증압 시험보다 보다 더 많은 유량이 필요하기 때문에 증압 기울기가 1 휠 증압 시험보다 느리게 된다. Fig. 15의 결과와 같이 진폭의 차이는 압력이 증가하는 부분에서는 1 휠 증압 시험과 비슷하게 10bar 내외로 발생했다.

전륜 기준으로 대상 high mu 노면에서 휠이 잠기는 압력인 80bar의 이탈시간의 차는 10ms 이내로 차이가 나왔다.

5. 결 론

본 논문에서는 전자식 차체 자세제어 장치 실시간 시뮬레이션을 위한 유압 모델을 개발했다. 유압 시뮬레이션 모델은 실제 설계치를 이용하여 구축했고, 실제 시험 결과와 비교하여 모델을 검증했다.

검증 결과 CBS 제동 오차는 ± 3 bar 정도 발생하여 일반 제동에서의 유압 모델 신뢰성을 확인했다.

추후 캘리퍼 소요액량 시험을 더 세분화하여 데이터를 확보하면 개선될 것으로 생각된다. 밸브 모델의 경우 일부 구간에서 차이는 보였지만 오차가 0.5bar 내에서 발생하는 것으로 나와 실제 시험 결과와 매우 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 모터 펌프를 이용한 증압 시험 결과 캘리퍼의 소요 유량에 따라 증압 성능을 확인하였고, 모터 펌프 모델의 성능을 하였다. 증압 시험에서 맥동의 진폭 차이가 발생한 이유

는 유체의 흐름에서 발생하는 마찰 및 난류 등에 의해 발생한 것으로 추정된다.

본 연구에서 전자식 차체 자세제어 실시간 시뮬레이션 모델을 구축하고 실차 시험과 비교하여 정확성을 확보 했다. 구축 결과 시험과 시뮬레이션과 높은 정확성을 확인했고, 실시간 시뮬레이션에서의 사용과 더불어 제품 제작 전 설계 검증을 빠르게 확인할 수 있음을 확인했다. 추후 실시간 OS에서 구동 될 수 있도록 각 컴포넌트를 단순화하고, 전체 시스템의 유압 구조를 최적화 할 예정이다.

References

- 1) J. H. Choi et al., "A study on the Braking Characteristic of Control Methods for ABS Mounted Vehicle" Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol.19, No.8, pp.203~211, 2002.
- 2) J. G. Hur, I. H. Oh and K. U. Yang, "A Study on Pressure Characteristic in Various Inner Structure of valves", Journal of the Korea Society For Power System Engineering, Vol.14, No.3, pp. 77-82, 2010.
- 3) C. H. Park et al., "Autonomous Vehicle Driving Control Considering Tire Slip and Steering Actuator Performance", Journal of Drive and Control, Vol.12, No.3, pp.36~43, 2015.
- 4) K. T. Kim, B. J. Yoon and J. M. Joo, "Theoretical Model Optimization of Hydraulic Breaker Using AMESim", Proceedings of 2016 Autumn Conference on Drive and Control, pp.182-183, 2016.
- 5) C. N. Kang et al., "Dynamic Characteristics of Electro-hydraulic Proportional valve for an Independent Metering valve of Excavator", Journal of Drive and Control, Vol.15, No.2, pp.46-51, 2018.
- 6) G. H. Jung, "Static Analysis of Dedicated Proportional Flow Control valve for IMV", Journal of Drive and Control, Vol.15, No.4, pp.39-47, 2018.
- 7) S. Y. Cheon, S. W. Choi and S. Y. Yang, "Development of Real-time Simulator for Vehicle Electric Brake System", Journal of Drive and Control, Vol.16, No.1, pp.22~28, 2019.
- 8) L. Ohra-aho, J. Chan and W. My, "Increasing Electronic Stability Controller Application Efficiency Using CAE", SAE Technical Paper 2015-01-0021, 2015.
- 9) Y. H. Yoon and K. W. Lee, "Development of SIL, HILS Environment for Electronic Control System," Journal of Drive and Control, Vol.5, No.1, pp.17~21, 2008.
- 10) Y. H. Yoon et al., "Analysis Model Development for Hydraulic Component and System Design", Proceedings of KSAE 2011 Annual Autumn Conference of Pusan, Ulsan and Kyongnam Branch, pp.33~41, 2011.
- 11) B. W. Kim and H. Park, "Hydraulic Control Characteristic of the ABS for an Automotive", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.8, No.1, pp.10-17, 2007.