

유압 브레이크 내 밸브의 거동이 적용된 휠 압력의 추정에 관한 연구

박기서 · 한경석 · 최세범
한국과학기술원 기계공학과

Estimation of wheel pressure applied to behavior of valve in hydraulic brake system

Giseo Park¹⁾ · Kyungseok Han²⁾ · Seibum Choi³⁾

Department of Mechanical Engineering, KAIST, 373-1 Guseong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-701, Korea

Abstract : For chassis control of vehicle such as ABS, TCS and ESP, It is important to feedback exact braking torque which is proportional to wheel pressure. However, using wheel pressure sensor requires extra cost and has difficulty in installation. Therefore estimation of wheel pressure using observer algorithm which has compensation for error between measurement and estimated data is proposed in this paper. Braking situation includes conventional brake and brake with valve control. According to each braking situation, wheel pressure observer is operated actively with variable observer gain. This brake based on hydraulic system is possible to execute ABS algorithm. Also, on-off control valves which are economical and robust are used mainly. The simulation has been performed by using CARSIM which is well known as a vehicle dynamic simulator. Then, the result of comparing estimated wheel pressure with actual wheel pressure has been shown.

Key words : wheel pressure(휠 압력), observer(관측기), hydraulic system(유압 시스템), on-off control Valve(온 오프 제어 밸브), ABS(미끄럼 방지 시스템), conventional brake (일반적인 제동 과정)

Nomenclature

P_w : wheel cylinder pressure
 P_{MC} : master cylinder pressure
 V : fluid volume
 Q : flow rate
 C_d : coefficient of orifice
 ρ : density of liquid
 V_w : volume of wheel cylinder
 v_{cmd} : command of valve
 P_{atm} : atmospheric pressure
 T_M : motor drive torque
 w_m : motor angular velocity
 A_o : area of valve orifice
 β : bulk modulus

a_{car} : deceleration of car

Subscripts

ABS : anti lock brake system
ESP : electronic stability program

1. 서론

최근에는 자동차의 주행 능력과 안정성 향상을 위한 다양한 기능들이 등장하여 출시되는 차량에 탑재되고 있다. 대표적으로 자동차 휠이 주행 시에 잠기는 현상을 방지하는 ABS와 차량의 자세를 제어하여 under & over steering을 방지하는 ESP 등이 있다. 이러한 여러 안전시스템에서는 기본적으로

* 박기서, E-mail: Giseo123@kaist.ac.kr

각각의 바퀴에 실시간으로 작용되는 구동토크와 제동토크의 값을 feedback하는 과정이 필요하다. 이 중 제동토크의 경우 휠 압력 값을 통해 바로 구할 수 있지만 이 값을 측정하는 센서는 판매되는 대부분의 차량에서 따로 존재하지 않는다. 기존에는 Conventional brake 상태에서의 휠 압력으로 직접 측정이 가능한 마스터 실린더의 압력 값을 그대로 사용하였지만, 실제로는 복잡한 유압장치들을 거치면서 정확하게 일치하지 않게 된다. 또한 ABS가 작동하게 되면 휠 압력은 마스터 실린더 압력 값과 크게 달라지므로 reference 값으로 사용할 수 없게 된다.

본 연구에서는 유압 시스템으로 이루어진 브레이크 구조에서 휠 압력, 즉 휠 실린더의 압력 값을 추정하는 방법에 대하여 제안한다. 특히 밸브의 거동이 적용되어 ABS 기능을 보유한 유압 브레이크 시스템을 다룬다. 제안된 방법의 검증은 위해서는 브레이크의 하위 유압 라인까지 모델링한 MATLAB simulink 파일을 CARSIM 프로그램에 적용시켜 실행한다. CARSIM은 실제 차량 실험과 비교하여도 유사한 결과를 가지는 프로그램으로 알려져 있다.

2장에서는 유압 브레이크 시스템의 구조와 함께 ABS 적용 시의 밸브의 거동에 대한 내용을 다룬다. 3장에서는 휠 압력을 추정하는 방법과 함께, 추정된 휠 압력과 CARSIM으로 측정한 실제 휠 압력을 비교한 결과를 보이며 얼마나 정확하게 추정이 가능한지를 알아볼 것이다.

2. Hydraulic Brake Modeling

2.1 유압 브레이크 시스템

운전자가 페달에 힘을 가하면 페달 압력이 발생하며 이는 부스터를 거쳐 일정 비율로 배력된다. 이 배력된 힘은 마스터 실린더의 피스톤을 이동시키며 마스터 실린더 내의 압력을 상승시킨다. 가압이 된 푸쉬로드(스프링으로 연결된 2차 피스톤을 누르게 된다. 내부에는 브레이크액과 피스톤이 들어 있어 발생된 유압을 브레이크 파이프를 통하여 휠 실린더에 전달하게 된다. 마스터 실린더에 챔버가 2개인 이유는 한 쪽의 챔버

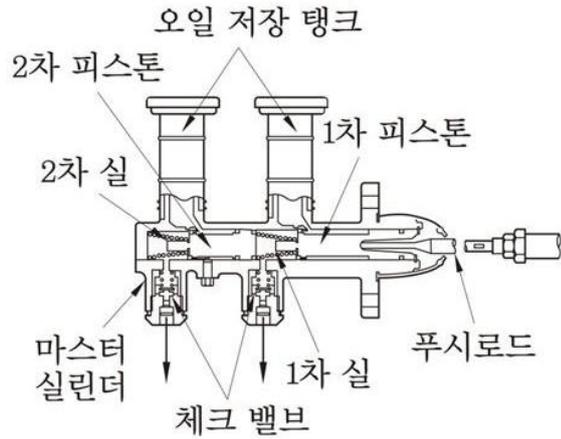


Fig. 1 마스터 실린더의 구조

쪽에 이상이 있을 경우 다른 쪽 챔버로 압력을 발생시키기 위해서이다. 휠 실린더에 들어온 유량의 변화로 압력이 상승하게 되고, 패드를 밀어 주어 디스크와 접촉시키면서 휠에 제동력을 가하게 된다.

2.2 Anti lock Brake System

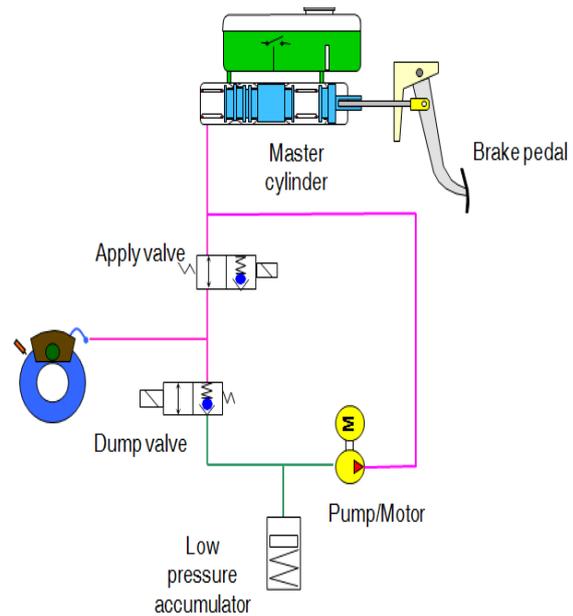


Fig. 2 ABS system diagram

Fig 2는 ABS 기능을 보유한 유압 브레이크 시스템의 구조를 보여주고 있다. ABS란 급제동 시 혹은 휠의 slip ratio가 커질 때 휠의 잠김 (locked)을 방지하기 위한 제어 시스템이다. Apply valve는 normally open valve로서 ABS가 작동하지 않는 일반적인 브레이크 상황에서는 항상 열려 있다. 반대로 Dump valve의 경우 normally closed valve로서 일반적인 브레이크 상황에서는 항상 닫혀 있다. 두 밸브는 ECU로부터 100Hz PWM 신호를 보내어 제어할 수 있다. 휠이 lock이 되면 휠 실린더의 압력을 감압하기 위해 밸브들은 통전이 되어 apply valve는 닫히게 되고 dump valve는 열리게 된다. Dump valve에서 나오는 유량은 low pressure accumulator에 축적된다. 이후 dump valve는 다시 닫히면서 휠 실린더의 유압은 그대로 유지가 되고 ECU에서는 다음의 제어 모드를 판단한다. 다시 휠 실린더 압력을 가압하기 위해 motor를 통해 pump가 작동하면서 open된 apply valve를 통해 휠 실린더로 유압이 전달되게 된다.

3. 휠 압력 추정

3.1 휠 압력 관측기 설계

Conventional brake, 즉 일반적인 제동 상황에서 wheel cylinder의 압력(휠 압력)은 master cylinder의 압력과 유사하다. 이 때의 휠 압력은 차량의 감속도와 거의 선형적으로 비례하게 된다.

$$P_w \approx ka_{car} \quad (k : \text{constant}) \quad (1)$$

감속도는 차량의 무게 중심 근처에 설치하는 기존의 IMU 센서를 통해 값을 얻을 수 있다. 따라서 휠 압력을 추정하는 observer를 모델링하면 다음과 같은 식이 된다.

$$\dot{P}_w = \dot{P}_{MC} + L(ka_{car} - P_{MC}) \quad (2)$$

L은 observer gain으로서 실제 값과의 비교를 통해 적절한 큰 값을 지정해준다. 휠에 lock이 걸리면서 ABS 상황이 발생하게 되면 휠의 압력은 마스터 실린더의 압력을 따르지 않게 된다. 이를 위해 먼저 체적 탄성 계수 β 의 정의를 살펴 본다.

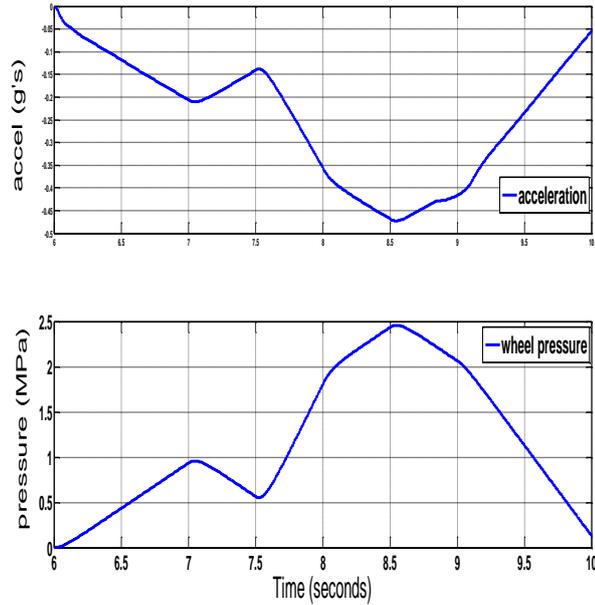


Fig.3 deceleration of x axis and wheel pressure

$$\beta = \Delta PV_0 / \Delta V \quad (3)$$

(3)을 휠 실린더 내부의 압력과 부피에 대하여 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{P}_w &= \beta * (Q - \dot{V}_w) / V_w \\ Q &\approx \text{sgn}(P_{MC}, P_w) C_d \sqrt{2/\rho \Delta P} A_o \end{aligned} \quad (4)$$

$\dot{V}_w \approx 0$ 이므로 V_w 는 거의 일정한 값을 유지한다. (4) 식을 Apply valve에 적용시키면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{P}_w &= k_1 \sqrt{(P_s - P_w)} A_o \\ k_1 &= (C_d \beta \sqrt{2/\rho}) / V_w \end{aligned} \quad (5)$$

On/off control valve의 경우 밸브가 완전히 열리거나 완전히 닫히는 상황만 발생하므로 A_o 는 밸브가 받는 voltage signal v_{cmd} 로 바꾸어 표현 가능하다. P_s 는 모터의 회전을 통해 pump로부터 나오는 유량의 압력을 의미한다.

$$T_M = J dw_M/dt + Bw_M + T_{Load} \quad (6)$$

모터에 voltage signal이 PWM 방식으로 입력되면 모

터가 회전 운동을 하면서 유압 펌프 플런저의 왕복 직선 운동을 발생시킨다. 이 때 모터의 회전축은 베어링에 의해 편심된 상태로 장착되어 있다.

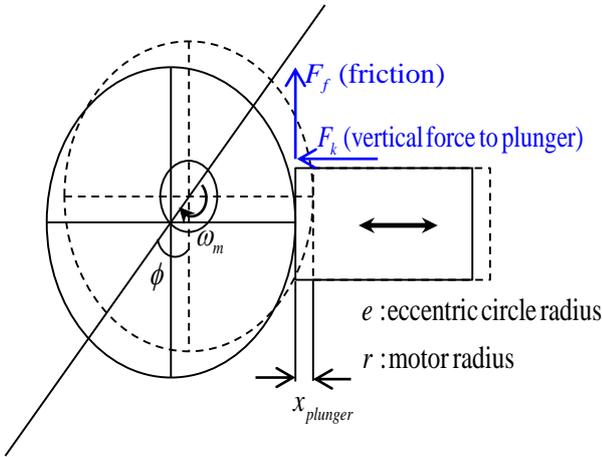


Fig. 4 Piston pump

$$\begin{aligned} T_M - F_k e \cos\phi - (r - e \sin\phi)\mu F_k &= 0 \\ F_k &= T_M / (e \cos\phi + (r - e \sin\phi)\mu) \end{aligned} \quad (7)$$

(7)을 통해 pump의 vertical force인 F_k 는 모터의 토크 T_M 과 선형 비례함을 알 수 있다. F_k 는 압력 값 P_s 와 선형 비례하기 때문에 결과적으로 측정이 가능한 모터 속도의 수렴값 w_f 을 통해 (5)에 나오는 P_s 값을 구할 수 있게 된다.

Apply 상황에서 모터의 속도가 최대값 w_f 에 도달할 때 펌프 플런저의 변위와 펌프에서 발생하는 압력 P_s 의 값은 Fig 5와 같이 나타남을 볼 수 있다. 결과적으로 apply 상황에서의 휠 압력을 추정하는 observer는 다음과 같다.

$$\dot{\hat{P}}_w = k_1 \sqrt{(P_s - \hat{P}_w) v_{cmd}} + L(k a_{car} - \hat{P}_w) \quad (8)$$

Valve의 거동이 적용된 상황에서는 observer gain 값 L은 0에 근접하는 작은 값으로 지정해준다. ABS 상황, 즉 valve control이 적용되면 휠의 구동과 제동은 운전자의 의지와 상관없이 자동적으로 제어되기 때문에 휠 압력과 a_{car} 의 선형 비례 관계가 사라지게 된다.

(4)를 dump valve에 적용시키면 다음과 같다.

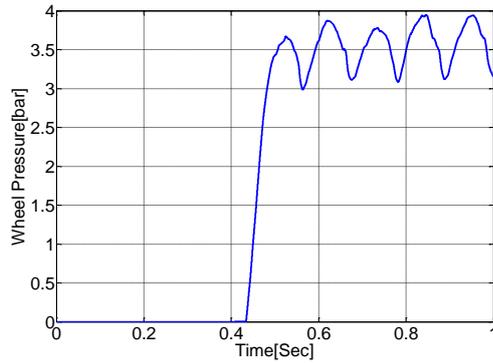
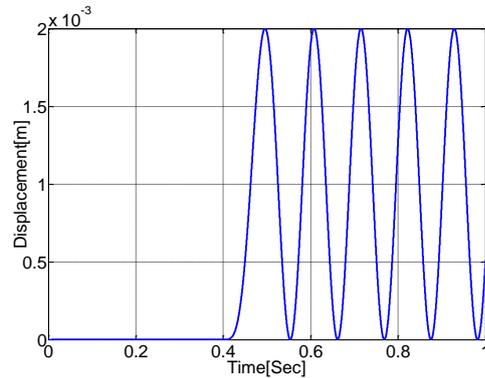
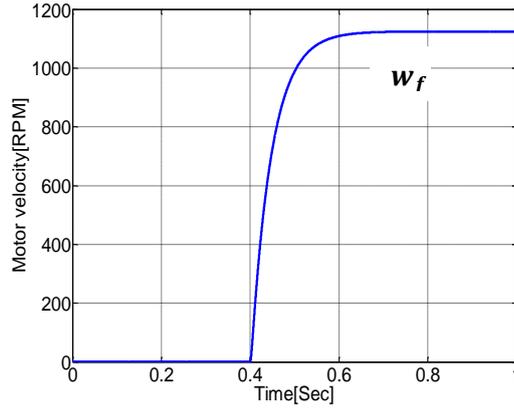


Fig. 5 펌프 압력의 시뮬레이션 결과

$$\begin{aligned} \dot{P}_w &= k_1 \sqrt{(P_w - P_{atm})} A_0 \\ P_w - P_{atm} &\approx P_w \\ \dot{P}_w &= k_1 \sqrt{P_w} v_{cmd} \end{aligned} \quad (9)$$

(8)과 유사한 방식으로서 dump 상황에서의 휠 압력 추정 observer는 다음과 같다.

$$\dot{\hat{P}}_w = k_1 \sqrt{\hat{P}_w} v_{cmd} + L(k a_{car} - \hat{P}_w) \quad (10)$$

3.2 simulation 결과

Table 1 simulation conditions

ρ	850kg/m ³
C_d	0.65
β	1.7×10^9
V_w	1.6956×10^{-5} m ³
A_o	3.959×10^{-7} m ²
J	0.00252 g*m ²
r	0.005m
e	0.001m
μ	0.2
B	0

Simulation에 이용되는 수치들은 table 1에 표현하였다. B-class의 hatchback 차량 모델을 이용하며 tire의 effective rolling radius는 304mm로 설정하였다.

전륜 구동 방식을 가지며 이번 simulation에서는 left-front wheel의 압력을 추정하였다. 먼저 70km/h의 일정한 속도로 달리던 차량이 마찰계수 0.85의 직선 구간에서 정지하는 conventional brake 상황을 살펴보았다. Fig 6과 같이 추정된 휠 압력은 실제 휠 압력 값과 거의 정확하게 일치함을 볼 수 있다.

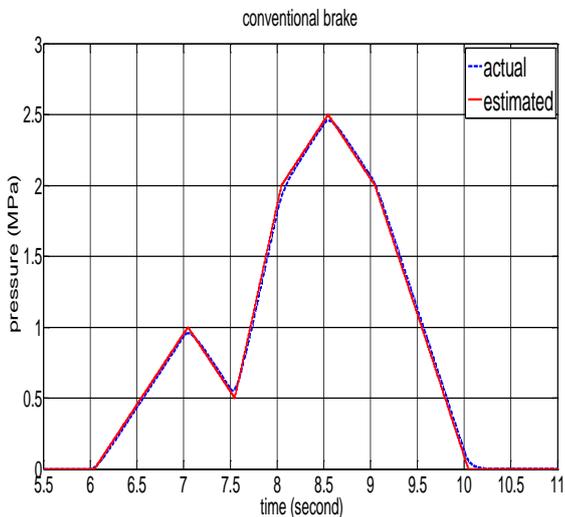


Fig. 6 conventional brake

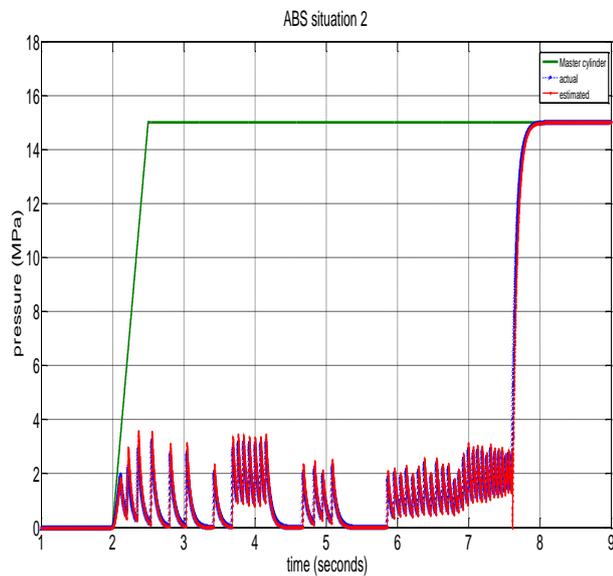
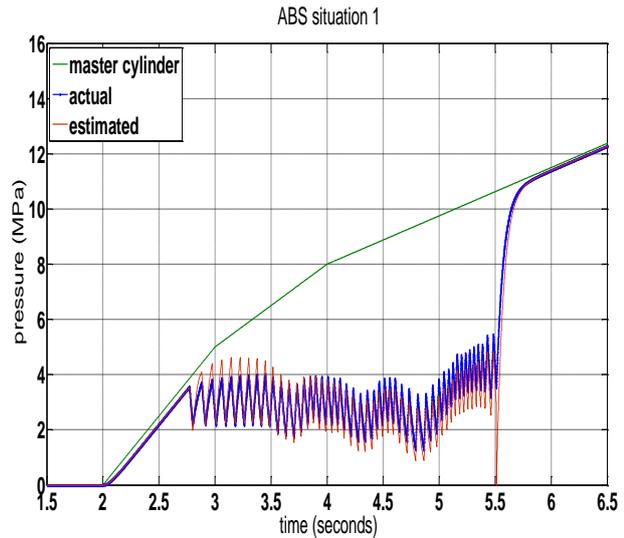


Fig. 7 ABS situation 1 and situation 2

다음에는 ABS가 작동하는 상황에서의 휠 압력 값을 추정해보았다. Fig 7의 situation 1은 마찰계수가 0.2인 직선구간에서 70km/h의 일정속도로 달리던 차량의 brake 과정을 나타낸다.

Situation 2는 split mu(왼쪽 : 0.2, 오른쪽 : 0.5) 마찰계수인 직선 구간에서 70km/h로 달리던 차량의 brake 과정을 나타낸다. Situation 2에서는 운전자가 full braking을 하며 master cylinder의 압력의 최대값 15MPa를 유지하면서 정지하고 있다. 따라서 휠압력을 추정할 때 ABS 상황으로 명확하게 판단되어 실제 값과 거의 일치하게 나타났다.

하지만 situation 1과 같이 master cylinder에 full braking이 걸리지 않는 상태에서는 motor와 pump 부분에서 나오는 supply 압력 값이 실제 값과 달라지면서 전체적인 추정의 정확도가 조금 떨어짐을 볼 수 있다. 일반적으로 ABS 상황에서 운전자는 차량의 정지를 목적으로 하기 때문에 브레이크 페달을 최대한으로 밟아주게 된다. 이 때 pump에서 발생하는 유량은 master cylinder 방향보다 apply valve 방향으로 대부분이 흘러가기 때문에 더 높은 apply 압력을 만들어 낼 수 있다. 따라서 실제 차량의 ABS 상황에서는 situation 2와 같이 발생하는 경우가 대부분일 것으로 예상된다.

4. 결 론

오늘날 대부분의 자동차에 포함된 유압 브레이크 시스템은 복잡한 구조와 모델을 가지고 있다. 특히 실린더와 밸브 등 각종 장치들 사이를 이어주는 유압 파이프 라인을 수없이 거치기 때문에 기존에 정의된 마스터 실린더 압력이 휠 실린더 압력과 일치한다는 점을 그대로 사용하기에는 정확도가 다소 떨어지게 된다.

본 연구에서는 새로 모델링한 observer를 통한 보정 과정을 거쳐 더욱 정확하게 휠 압력을 추정하였다. 또한 현재 대부분의 차량에 의무적으로 보유된 ABS control을 고려하여 각 밸브에서의 거동까지 적용시킨 observer를 만들었다. 이를 통해 높은 정확도를 가지며 일반적인 상황, ABS 상황 모두에서 연속적으로 휠 압력을 추정할 수 있음을 시뮬레이션 상으로 보여 주었다. 추후에는 현재 많이 이용되는 TCS control에 이용되는 TC valve가 포함된 시스템의 휠 압력 추정도 다룰 수 있을 것으로 예상된다.

5. 후 기

본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 IT융합 고급인력과정 지원사업의 연구결과로 수행되었음(NIPA-2014-H0401-14-1001)

References

- 1) S.B. Choi, Sensorless adaptive speed control of a permanent-magnet DC motor for Anti-Lock brake Systems, IJAT, Vol.12, No.2, pp.207-212, 2011
- 2) Antilock brake system with a continuous wheel slip control to maximize the braking performance and the ride quality, IEEE transaction on control systems technology, Vol.16, No.5, 2008
- 3) K.H. Cho, S.B. Choi and C.K. Kim, Design of an ABS control algorithm using wheel dynamics, KSAE annual conference, pp.1756-1761, 2010.
- 4) Kevin O' Dea, Anti-lock braking performance and hydraulic brake pressure estimation, SAE 2005-01-1061, 2005