

전자밸브를 이용한 ABS 슬립율 제어에 관한 연구

최종환* · 김승수** · 양순용*** · 박성태*** · 이진걸****

A Study of ABS Slip Ratio Control using Solenoid Valve

Jong-Hwan Choi, Sung-Su Kim, Soon-Yong Yang, Sung-Tae Park and Jin-Kul Lee

Key Words: ABS (Anti-lock Braking System), Sol-Sol Type(솔레노이드-솔레노이드 방식), Slip Ratio (슬립율), PWM (펄스폭 변조), Solenoid Valve(전자밸브)

Abstract

ABS is a safety device, which adds hydraulic system to the existing brake system to prevent wheel from locking, so we can obtain maximum braking force on driving. The hydraulic system to control braking pressure consists of sol-flow type using solenoid valve, flow control valve or consists of sol-sol type using two solenoid valve.

In this paper, the hydraulic system in ABS is composed of sol type using a 3port-2position solenoid valve, and vehicle system is composed of 1/4 vehicle model. And slip ratio is controlled using PWM (Pulse-Width-Modulation) control algorithm. Braking friction coefficient and tracking friction coefficient which are described by slip ratio's function have maximum value when slip ratio has its value from 0.1 to 0.3. And slip ratio is controlled constantly in this boundary value even in the variation of road's condition in some boundary.

1. 서론

자동차 보급의 증가와 더불어 자동차 사고로 인하여 인명피해도 증가하고 있다. ABS(Anti-lock Braking System)는 도로면이 빗길과 같이 미끄러운 상태에서 운전자의 급브레이크에 의하여 자동차의 바퀴가 잠기지 않도록 제동토크를 자동으로 제어하여 자동차의 조향성능을 증가시키고 주행 안정성을 확보하는 안전장치이다.

ABS는 1970년대말 Bosch사에서 4륜 제어방식으로 개발된 이래 급속한 기술발전과 더불어 보급이 확대되어 가고 있다. 또한 신개발차량에는

ABS 장착이 일반화되어 가고 있는 실정이다^[1]

ABS의 구성요소는 휠속도 센서, ECU(Electronic Control Unit), 유압 모듈레이터 등이다. 유압 모듈레이터는 전기모터와 펌프가 내장되어 있어 ECU의 전기신호에 의하여 브레이크 압력을 증감시키는 장치로써 제어밸브의 구성에 따라 sol-flow 방식과 sol-sol 방식이 있다.

본 연구는 유압 모듈레이터를 one-sol 방식으로 구성하고 자동차의 급제동시 발생하는 슬립율을 전자밸브에 PID를 이용한 PWM 제어 알고리즘을 적용하여 제어하고자 한다. 그리고 주행 중 도로면의 상태는 빗길과 건조한 도로면 등이 반복적으로 발생되므로 이러한 도로면의 상태가 사인파 형태로 변동할 때 슬립율의 특성에 대해서도 고찰한다. 자동차의 차체는 1/4에 대하여 고찰하고, 모든 실험은 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 실시하여 결과를 고찰한다.

* 부산대학교 지능기계공학과

** 울산대학교 RRC 전임연구원

*** 울산대학교 자동차공학부

**** 부산대학교 기계공학부

2. ABS의 모델링

2.1 시스템의 구성

ABS의 유압 모듈레이터는 급제동시 바퀴와 도로면 사이에 미끄러짐이 발생했을 때 동작한다. 기존의 유압 모듈레이터는 제어밸브의 구성에 따라 sol-flow 방식과 sol-sol 방식이 있다. 사용되는 전자밸브의 구조는 2포트-2위치로써 sol-flow 방식은 각 채널당 각각 1개의 전자밸브와 유량제어밸브를 사용하여 바퀴실린더의 압력을 제어한다. 바퀴와 도로면 사이에 슬립이 발생하면 전자밸브의 작동으로 바퀴실린더의 압력을 감소시킨다. 유량제어밸브는 마스터실린더로부터 바퀴실린더로 유입되는 유량을 일정하게 유지시키는 역할을 담당하지만 완전히 차단시키지는 못한다. 따라서 바퀴실린더의 압력은 증압-감압의 2가지 제어모드를 가진다. sol-sol 방식은 각 채널당 2개의 전자밸브를 사용하여 바퀴실린더의 압력을 제어한다. 전자밸브의 독립적인 작동으로 바퀴실린더의 압력은 증압-유지-감압의 3가지 제어모드를 가진다.^[2]

본 논문에서는 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 각 채널에 하나의 전자밸브를 사용한 one-sol 방식의 유압 모듈레이터를 제안한다. 3포트-2위치의 전자밸브를 사용하는 one-sol 방식의 경우 기존의 sol-sol 방식과 비교하여 밸브의 사용을 줄일 수 있고 소형화 및 저가격의 가능성이 있다. one-sol 방식을 사용한 1/4 자동차에 대한 제어대상은 Fig. 2에 나타낸 것과 같다.

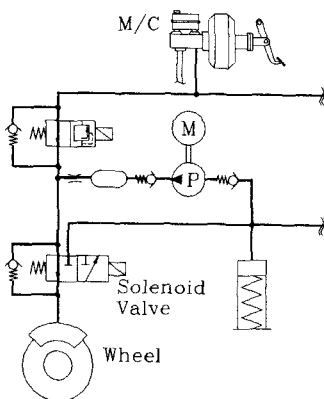


Fig. 1 Proposed hydraulic circuit of modulator using one-sol type

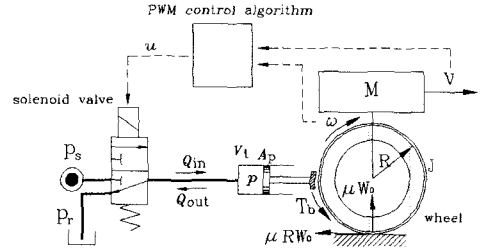


Fig. 2 Schematic diagram of modulator and vehicle system in ABS

2.2 유압 모듈레이터의 모델링

전자밸브의 관로 개폐는 포핏부로 구성된다. 제어입력에 대한 포핏부의 변위는 전달지연 요소와 1차지연 요소의 조합으로 근사하여 식(2-1)과 같고, 포핏부의 개구면적은 식(2-2)와 같다.^[3]

$$Y(s) = e^{-T_1 s} \frac{K_v}{T_2 s + 1} U(s) \quad (2-1)$$

$$A(t) = \pi y(t) \sin \theta \{ d - y(t) \sin \theta \cos \theta \} \approx \pi d \sin \theta y(t) \quad (2-2)$$

I. 밸브 온(ON) ;

밸브에 제어입력을 가하여 전자밸브의 관로를 개방하여 마스터실린더로부터 바퀴실린더로 유입되는 유량은 오리피스 유량방정식으로부터 식(2-3)과 같고, 바퀴실린더의 압력 변화는 연속방정식으로부터 식(2-4)와 같다. 이때 바퀴실린더의 변위는 무시한다.

$$Q(t)_{in} = C_d A(t) \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_s - P(t))} \quad (2-3)$$

$$Q(t)_{in} = \frac{V_t}{K_m} \frac{dP(t)}{dt} \quad (2-4)$$

II. 밸브 오프(OFF) ;

밸브의 제어입력을 차단시키면 바퀴실린더에서 유출되는 유량과 바퀴실린더의 압력 변화는 오리피스 유량방정식과 연속방정식으로부터 각각 식(2-5), 식(2-6)과 같다.

$$Q(t)_{out} = C_d A(t) \sqrt{\frac{2}{\rho} (P(t) - P_r)} \quad (2-5)$$

$$Q(t)_{out} = -\frac{V_i}{K_m} \frac{dP(t)}{dt} \quad (2-6)$$

제동시 바퀴실린더로부터 바퀴에 작용하는 제동토크는 식(2-7)과 같다.

$$T_b(t) = C_b A_p \frac{r}{R} \mu_b P(t) \quad (2-7)$$

여기서 r 은 제동토크가 작용하는 반경, μ_b 는 브레이크 패드의 마찰계수, C_b 는 브레이크 계수를 각각 나타낸다.^[4]

2.3 1/4 자동차시스템의 모델링

1/4 자동차시스템에 대한 운동방정식은 식(2-8)과 같다.

$$\begin{aligned} J \frac{d\omega(t)}{dt} &= -\mu R W_0 - T_b(t) \\ M \frac{dV(t)}{dt} &= -\mu W_0 \\ \lambda(t) &= \frac{V(t) - R\omega(t)}{V(t)} \end{aligned} \quad (2-8)$$

여기서 λ 는 자동차의 속도와 바퀴의 각속도의 비를 나타내는 슬립율을 의미한다. 바퀴와 도로면 사이의 제동마찰계수 μ 는 슬립율에 대한 함수로 표현되며, 도로면의 상태에 따른 제동마찰계수와 슬립율의 관계는 Fig. 3에 나타난 것과 같다. 그래프 ①, ②, ③, ④는 각각 건조한 콘크리트 도로, 젖은 아스팔트 길, 눈길, 빙판 길을 나타낸다.^[5]

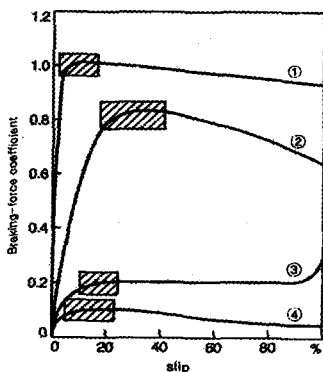


Fig. 3 Schematic plot of braking force coefficient as a function of slip

슬립율은 바퀴의 각속도 ω 와 차체의 속도 V 의 비선형 함수이므로 선형화가 필요하다. 평형점 부근에서 ω , V , T_b , μ 를 선형화하면 식(2-9)와 같다.^[6]

$$\begin{aligned} \omega(t) &= \omega^* + \Delta\omega(t) \\ V(t) &= V^* + \Delta V(t) \\ \mu(\lambda) &= \mu^* + \Delta\mu(\lambda) \\ &= \mu^* + \frac{d\mu}{d\lambda} \cdot \Delta\lambda(\omega(t), V(t)) \\ &= \mu^* + \frac{d\mu}{d\lambda} \cdot \left\{ \frac{\lambda}{\omega} \Delta\omega(t) + \frac{\lambda}{V} \Delta V(t) \right\} \\ &= \mu^* + \frac{d\mu}{d\lambda} \cdot \left\{ -\frac{R}{V^*} \Delta\omega(t) + \frac{1-\lambda^*}{V^*} \Delta V(t) \right\} \end{aligned} \quad (2-9)$$

식(2-9)를 이용하여 식(2-8)을 선형화된 방정식으로 나타내면 식(2-10)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{d\omega(t)}{dt} &= K_1 \omega(t) + K_2 V(t) - \frac{1}{J} T_b(t) \\ \frac{dV(t)}{dt} &= K_3 \omega(t) + K_4 V(t) \\ \lambda(t) &= -\frac{R}{V^*} \omega(t) + \left\{ \frac{1-\lambda^*}{V^*} \right\} V(t) \end{aligned} \quad (2-10)$$

여기서 첨자*은 평형점을 나타내고, K_1 , K_2 , K_3 , K_4 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} K_1 &= -\frac{R^2}{J} \cdot \frac{d\mu}{d\lambda} \cdot \frac{W_0}{V^*}, \\ K_2 &= \frac{R}{J} \cdot \frac{d\mu}{d\lambda} \cdot \frac{W_0}{V^*} \cdot (1-\lambda^*), \\ K_3 &= \frac{R}{M} \cdot \frac{d\mu}{d\lambda} \cdot \frac{W_0}{V^*}, \\ K_4 &= -\frac{1}{M} \cdot \frac{d\mu}{d\lambda} \cdot \frac{W_0}{V^*} \cdot (1-\lambda^*) \end{aligned}$$

2.3 ABS의 슬립을 제어

자동차의 제동에 관계하는 변수는 유압 모듈레이터에 의한 제동토크와 바퀴와 도로면 사이의 제동마찰계수이다. 또한 커브길에서 핸들을 돌려 구동시켜 방향안정성을 유지시키는 변수는 구동마찰계수이다. Fig. 4는 핸들각도에 대한 마찰계수와 슬립율과의 관계를 나타내고 있다.^[5]

제동마찰계수 μ 와 구동마찰계수 μ_s 는 핸들각도 α 에 따라 각각 다른 값을 가진다. 그러나 각각의 마찰계수의 경향은 거의 일정하다. 각 마찰계수가 최대의 값을 가지는 슬립율의 범위는 0.1~0.3이다. 따라서 자동차의 급제동시 바퀴와 도

로면 사이에 미끄러짐이 발생하지 않고 최대의 제동력과 방향안정성을 유지하기 위해서는 슬립율을 이 범위 안에서 일정하게 제어하도록 한다.

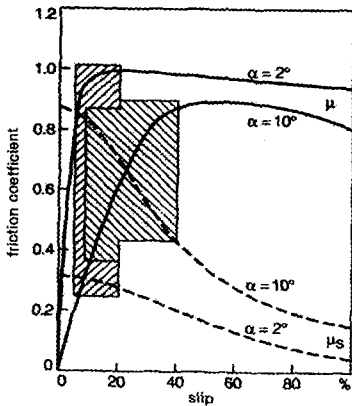


Fig. 4 Schematic plot of braking force coefficient as a function of slip

3. 컴퓨터 시뮬레이션 및 결과 고찰

3.1 컴퓨터 시뮬레이션

컴퓨터 시뮬레이션에 사용한 프로그램은 MatLab 5.3과 Simulink를 사용하고, 사용된 파라미터값들은 Table 1에 나타낸 것과 같다.

본 논문에서 사용된 3포트-2위치 전자밸브는 온-오프형 밸브로써 PWM 방식으로 제어한다. 이 경우 전자밸브를 통한 유량의 의한 슬립을 제어는 밸브가 열려 있는 시간의 폭을 조절하는 PWM 제어 알고리즘에 의하여 결정된다.

Table 1 Parameters of modulator and vehicle system

Hydraulic System		1/4 Vehicle System	
Parameters	Value	Parameters	Value
T_1	0.002 sec	M	350 kg
T_2	0.0063 sec	W_0	350 kgf
K_v	0.024	J	31.5 kgm ²
d	0.57 cm	R	0.3 m
θ	0.785 rad	r	0.09 m
P_s	150 bar	μ_s	0.3
A_p	23 cm ²	C_b	14
V_t	200 cm ³		

PWM 방식은 임의로 선정된 반송파의 주기에 대하여 PWM 변환기에 입력되는 오차량에 비례하여 출력되는 펄스의 폭을 변조하는 방식이다.^[7] 제어 알고리즘은 제어기 설계가 간단한 PID 제어기를 적용한다. PWM의 반송파 주기는 10Hz, 게인은 1로 선정하고, PID 제어기의 게인은 안정한 계에 기초한 Ziegler-Nichols 조정 방법을 이용하여 비례게인 K_P 는 210, 적분게인 K_I 는 9, 미분게인 K_D 는 11로 선정한다. 자동차의 초기 속도는 50km/h로 선정하고, 도로면의 상태는 물에 젖은 아스팔트 도로로 설정하여 최대 제동마찰계수와 구동마찰계수를 얻기 위해 목표로 하는 슬립율은 0.25로 설정한다. 기준입력과 피드백 신호의 오차에 대해 전자밸브의 단순한 온-오프 동작의 결과와 PWM 제어 알고리즘의 적용 결과를 시뮬레이션으로 실행한다. 또한 자동차 주행시 도로면의 상태가 항상 일정하지 않으므로, 도로면의 상태를 사인파 형태로 변화시키면서 동일한 방법으로 시뮬레이션을 실행한다.

3.2 결과 고찰

Fig. 5~Fig. 8은 기준입력과 피드백 신호의 오차에 대해 전자밸브를 단순히 온-오프 동작시켰을 때와 PWM 제어 알고리즘을 적용시켰을 때의 시뮬레이션 결과 그래프이다. 선도 A는 단순한 온-오프 동작시켰을 때의 결과를 나타내고, 선도 B는 PWM 제어 알고리즘을 적용시켰을 때의 결과를 나타낸다.

Fig. 5에 나타난 것과 같이 PWM 제어 알고리즘을 적용했을 때 슬립율의 시간 응답 특성이 매우 양호함을 알 수 있다. Fig. 6은 바퀴실린더에 작용하는 제동압력의 시간 응답 특성을 나타내고 있다. 단순한 온-오프시 전자밸브의 작동으로 인하여 압력 맥동이 심하게 발생되고 이로 인하여 Fig. 5에 나타난 것과 같이 슬립율도 진동이 발생된다. 그러나 PWM 제어 알고리즘을 적용한 경우 압력 맥동은 현저히 감소되고 있음을 알 수 있다. Fig. 7~Fig. 8은 각각의 경우에 대하여 자동차의 차체속도와 바퀴의 각속도를 나타내고 있다. Fig. 9~Fig. 12는 바퀴와 도로면 사이의 마찰계수를 사인파 형태로 변화시켰을 때의 결과 그래프이다. Fig. 9와 Fig. 10은 사인파의 주파수를 8Hz로 고정하고 크기를 1과 2로 변화시켰을 때의 슬립율의 시간 응답을 나타내고, Fig. 11과 Fig.

12는 사인파의 주파수를 10Hz로 고정하고 크기를 1과 2로 변화시켰을 때의 슬립율의 응답을 나타내고 있다. 도로면의 상태가 사인파 형태로 변한다 하더라도 PWM 제어 알고리즘을 적용한 경우 대체로 안정된 슬립율을 나타내고 있다. 그러나 사인파의 주기가 그대로 반영되고 있다.

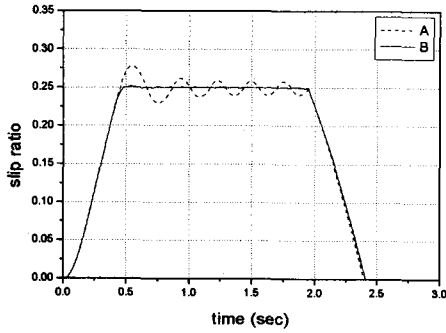


Fig. 5 Simulation result of slip ratio

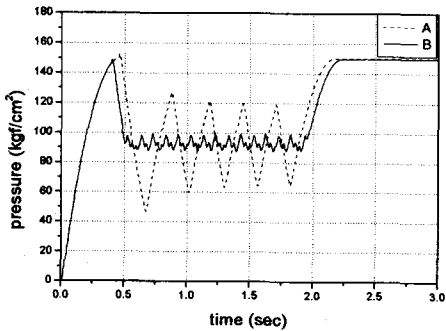


Fig. 6 Simulation results of braking pressure

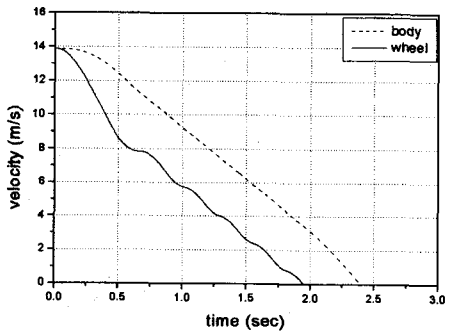


Fig. 7 Simulation results of vehicle & wheel velocity (operating ON-OFF)

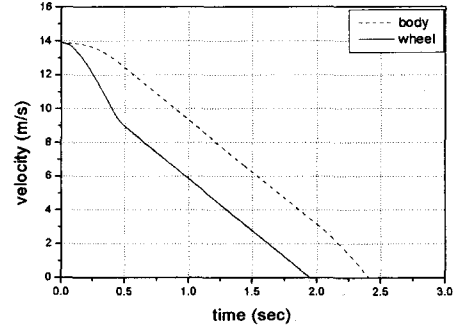


Fig. 8 Simulation results of vehicle & wheel velocity (applied PWM algorithm)

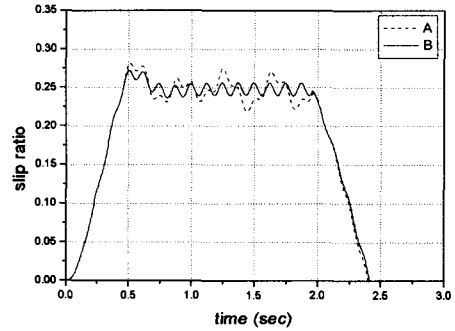


Fig. 9 Responses of slip ratio (sine wave : 8Hz, Amp. 1)

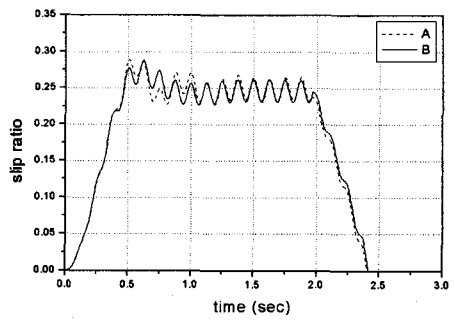


Fig. 10 Responses result of slip ratio (sine wave : 8Hz, Amp. 2)

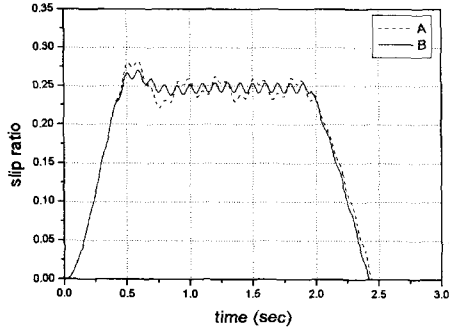


Fig. 11 Responses of slip ratio
(sine wave : 10Hz, Amp. 1)

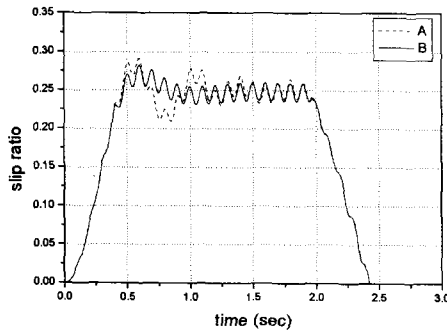


Fig. 12 Responses of slip ratio
(sine wave : 10Hz, Amp. 2)

4. 결 론

본 논문에서는 제안된 3포트-2위치 전자밸브 1개를 사용한 one-sol 방식을 사용하여 ABS의 유압 모듈레이터를 구성하고, PID 제어기를 이용한 PWM 제어 알고리즘을 적용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 실행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 기존의 sol-sol 방식에 대체한 one-sol 방식의 3포트-2위치 전자밸브 1개의 사용으로 유압 모듈레이터의 구성 가능성을 확인하였다.

- 절환특성을 가지는 전자밸브에 단순히 오차에 의해 온-오프 동작하는 경우보다 PID에 기초한 PWM을 적용하여 양호한 슬립율을 얻었다.

- 도로면의 상태가 사인파의 특성을 가지며 변화하더라도 대체로 안정된 슬립율을 얻을 수 있었다.

후 기

본 연구는 울산대학교 RRC의 연구지원에 의해 이루어졌습니다.

참고문헌

- (1) William K. Lennon and Kevin M. Passino, " Intelligent Contro for Brake Systems," IEEE Trans. Contr. Syst. Technol., Vol. 7, NO. 2, p. 188, 1999.
- (2) 서명원, 김석민, 정재현, 석창성, 김영진, 이선일, 이재천, "ABS를 위한 HIL 시뮬레이션 개발," 한국자동차공학회논문집, 제6권, 제2호, pp. 157-158, 1998.
- (3) Muto, T., Yamada, H. and Sucmatsu, Y., "PWM-Digital Control of Hydraulic Actuator Utilizing 2-way Solenoid Valves," Jour. Jpn. Hydraulic & Pneumatics Soc., Vol. 19, No. 7, p. 565, 1988.
- (4) 지경택, "자동차제동장치의 설계입문," 자동차기술학회집, Vol. 4, No. 1, pp. 5-7, 1982.
- (5) BOSCH, AUTOMOTIVE BRAKE SYSTEM, p. 39, 1995.
- (6) 荒木道樹, 單輪モデルにおけるABS, 大阪大學 工科部, pp. 2-5, 1993.
- (7) 박성환, 고속전자밸브를 이용한 전기·유압 서보시스템의 제어에 관한 연구, 부산대학교, 박사학위논문, pp. 149-150, 1996.