한국정밀공학회지 제 25 권 제 3 호 (2008 년 3 월)
Journal of the Korean Society for Precision Engineering Vol. 25, No. 3, March 2008

제동장치에서 고주파수 PWM 제어에 의한 맥동특성 연구

김병우#

Study on the Characteristics of Surge Pressure by High Frequency PWM Control in Braking System

Byeong Woo Kim#

ABSTRACT

The solenoid valve of ABS hydraulic modulator is a two directional on-off valve and is controlled by around 100Hz on-off control. When the on-off valve is switched from open state to closed state, there are braking force deterioration, noise and vibration due to surge pressure in the wheel cylinder. In this study, identifies surge pressure in the braking process of ABS, and investigates the way to reduce the phenomenon. To reduce the surge pressure, PWM(Pulse Width Modulation) control with high frequency of 20kHz was attempted. In conclusion, by using the results of this study for the pressure surge prediction, we could expect enhancement of braking performance in ABS.

Key Words : Braking system (제동장치), Anti-lock braking system (미끄럼방지장치), PWM (펄스폭변조) Solenoid valve (솔레노이드 밸브), Surge pressure (맥동 압력)

기호설명

Ua = loss of electromagnetic force at air gap
Us = loss of electromagnetic force at steel
P = permeance
Φ = magnetic flux
F = magnetic force
Z = air gap
I = supply current
H = magnetic field intensity
N = turn number
F_{mag} = magnetic force
W = electric power
L = magnetic length

1. 서론

자동차 사고로 인한 인명 피해가 급증하면서 자동차 미끄럼방지장치(ABS) 장착에 대한 중요성이 급증하고 있다. ABS 장치에서 유압 제어는 고속 솔레노이드 밸브를 이용하여 실시하는데, 구동 방식에 따라서 solenoid-solenoid 방식, solenoid-floow 방

☞ 접수일: 2007년 4월 16일; 게재승인일: 2007년 12월 18일
교신저자 : 울산대학교 전기전자정보시스템공학부
E-mail bywokim@ulsan.ac.kr Tel. (052) 259-1287

식으로 대별할 수 있다.[1,2] ABS 장치에 적용되고 있는 솔레노이드 밸브는 가격적인 측면의 경제성 때문에 on-off 방식의 2 방향성 솔레노이드 밸브가 가장 많이 적용되고 있다. 본 솔레노이드 밸브는 단순하게 작동되는 두 방향으로의 방향 전환 시에 유압 배관과 차륜 실린더에서 급격한 맥동 압력이 발생하게 된다. 이 맥동 압력은 ABS 장치의 제동 성능을 악화시킬 뿐만 아니라 제동 소음을 유발하기도 한다.

기존 연구에서는 발생 맥동을 전제 조건으로 하여 유압 제어 모드를 최적화할 수 있는 제어 측면의 연구가 활발하였다.[3-5] 또한, 유압 배관 재질, 형상 등의 하드웨어 변화를 통하여 맥동을 저감시키고자 하는 연구도 일부 추진되었다. 이 같은 기존 연구에서는 맥동을 제한적으로 저감시킬 수 있는 방안을 제시하였으나 이를 획기적으로 저감시킬 수 있는 방안은 제시하지 못하였다.[6]

물론, 비례제어 밸브를 이용하여 맥동 저감을 통한 ABS 제동 성능 향상에 관한 연구를 통하여 근본적인 문제 해결 방안을 제시하였다. 그러나 비례제어 밸브는 신뢰성 확보와 경제성 측면에서 문제점을 앉고 있기 때문에 대중화에 실패하였다. 따라서 기존 양방향성 솔레노이드 밸브를 활용하여 비례제어 밸브에 상응할 수 있는 새로운 제어 기술 연구가 필요한 실정이다.

이를 위하여, 본 연구에서는 기존의 100Hz 내외의 저속 PWM 제어를 탈피하여 20kHz의 고속 PWM 제어를 실시하였다. 솔레노이드 밸브의 가동자 변환 속도를 제어할 수 있는 고속 PWM 조건을 제시하고 작용 유압에 대한 영향도 분석하고자 한다. 또한, 맥동 저감이 가능한 고속 PWM 제어 방법을 실차에 적용하여 맥동이 제동 소음에 미치는 영향을 분석함으로써 ABS 제동 성능 향상 방안을 제시하고자 한다.

2. 맥동 해석 및 제어 방법

2.1 가정자로법을 이용한 솔레노이드 밸브 해석

ABS용 솔레노이드 밸브의 동특성을 수학적으로 해석하기 위하여 가정자로법을 이용하였다. 솔레노이드에 전류가 공급되어 발생되는 기자력은 코일의 감은 횟수 N과 공급 전류 I의 곱으로 표현할 수 있다. 공급 기자력은 식 (1)과 같이 철심과 공극에서 소모되는 기자력과 동일하여야 한다.

또한, 공극에서 자기 에너지 변화량은 가동자 변위에 따른 자기력으로 나타낼 수 있다.

$$\text{공급기자력} = NI = \sum HL \text{ 철심소모기자력} + \frac{\Phi}{P} \text{ 공극소모기자력} = U_s + U_a \quad (1)$$

$$dW = F_{Mag}(dz) \quad (2)$$

$$d\Phi = U_a \times dP \quad (3)$$

솔레노이드 밸브를 구성하고 있는 가동자, 고정자, 솔레노이드부에 존재하는 공극의 전자력은 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$F_{Mag} = -\frac{1}{2} U_a \frac{d\Phi}{dz} = -\frac{1}{2} U_a^2 \frac{dP}{dz} = -\frac{1}{2} \left(\frac{\Phi}{P}\right)^2 \frac{dP}{dz} \quad (4)$$

자기회로 내부에서 공극이 다수인 경우, 공극에서 발생되는 전자력은 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$F_{Mag} = \frac{1}{2} \Sigma U_a^2 \frac{dP}{dz} \quad (5)$$

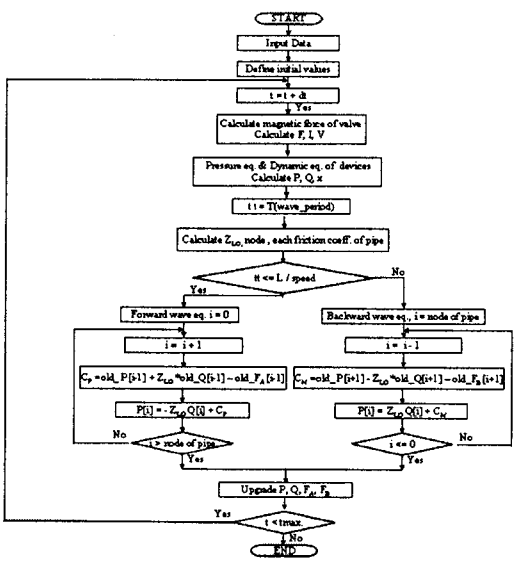

Fig. 1 Flow chart for simulation of surge pressure

Fig. 1은 유압 모듈레이터에서 발생되는 밸브의 전자력과 작용 압력을 계산하고 맥동해석을 위하여 특성 곡선법을 이용하여 차륜 실린더와 파이프 라인에서 발생되는 파동주기를 계산하였다.

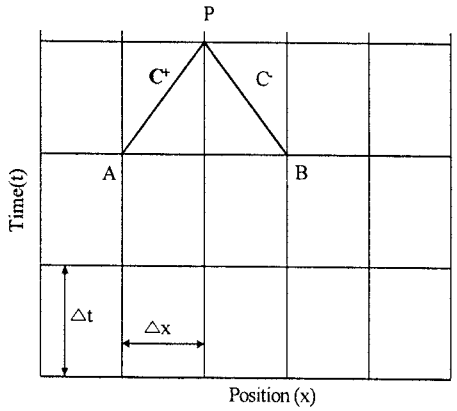

Fig. 2 Characteristic lines in the x, t plane

파동주기를 계산하기 위하여 폐쇄된 공간에서 발생되는 전. 후진 파동의 상태방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_{\frac{1}{2}} = +\sqrt{E_{ol}\rho} \qquad (C^{+}\text{곡선})$$

$$\frac{dP}{dt} + Z_{lo}\frac{dQ}{dt} + v\sqrt{E_{ol}\rho}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\partial^2 v}{\partial r^2}\right) = 0 \qquad (6)$$

$$\lambda_{\frac{1}{2}} = -\sqrt{E_{ol}\rho} \qquad (C^{-}\text{곡선})$$

$$\frac{dP}{dt} - Z_{lo}\frac{dQ}{dt} - v\sqrt{E_{ol}\rho}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\partial^2 v}{\partial r^2}\right) = 0 \qquad (7)$$

식 (6)은 정 방향으로 진행하는 파동의 시간, 위치의 관계를 나타낸 것이고 식 (7)은 역 방향으로 진행하는 파동의 시간, 위치와의 관계를 나타낸다. 다음 단계에서는 파동 방정식에서 사용하는 각 상수 및 변수 값을 계산하고 파이프의 해석점(node) 개수 결정과 각 해석 점에서 압력과 유량을 계산하였다.

파동의 주기가 배관 길이/파동 속도보다 작으면 전진파, 크게 되면 후진파로 나누어 각 경우의 방정식을 적용하였다. 전진파의 경우, 파이프의 첫 번째 해석 점으로 부터 마지막 해석 점까지 각 해석 점의 압력과 유량을 계산하였다. 또한, 후진파의 경우에는 마지막 해석 점으로부터 첫 번째 해석 점의 순서로 순차적으로 각 해석 점의 압력과 유량을 계산하였다. 기 결정된 압력과 유량을 저장하면서 지정된 시간동안 시뮬레이션을 수행하였다.

2.2 맥동 제어를 위한 고속 PWM 제어

기존 ABS 장치에 적용되고 있는 100Hz 내외의 PWM 제어를 실시하면 일정 전류 값 이상에서 돌입 전류가 발생되어 밸브 가동자가 급격하게 변환되기 때문에 이로 인한 커다란 맥동 압력이 발생된다.

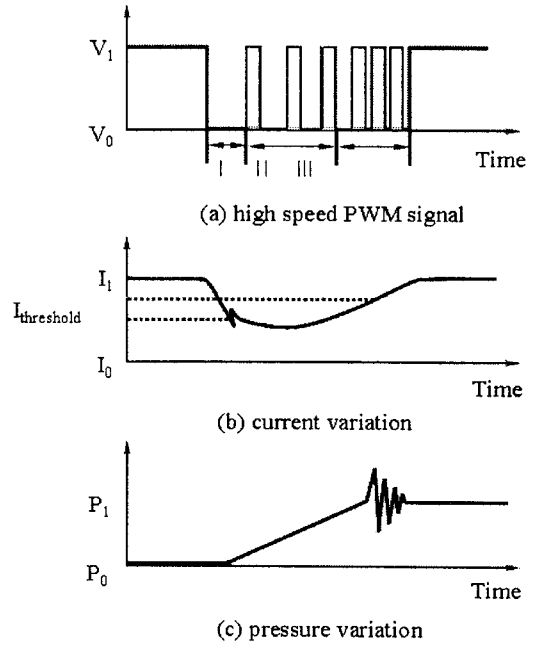

Fig. 3 Concept of high speed PWM control of ABS hydraulic modulator

이 같은 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 기존 솔레노이드 밸브를 이용하면서 가동자의 위치 변환속도를 제어 할 수 있는 다음과 같은 3 단계의 고속 PWM 제어를 실시하였다.

가. I 단계 : 인가 전압(V_1)에서 기저 전압(V_0)으로 일정 시간($t_1 \sim t_2$) 동안, 고속 PWM(20kHz) 조건

에서 듀티 비율을 0%로 유지시킨다. 이 구간에서 밸브 가동자는 닫힘에서 열림 상태로 변환되는 단계이다.

나. Ⅱ 단계 : 밸브 가동자가 열림 상태로 일정 시간(t_2 ~ t_3) 동안, 전류 변곡점 부근의 전류를 유지하기 위하여 고속 PWM 조건에서 일정한 듀티 비율을 적용하는 단계이다. 이 구간은 마스터 실린더에서 차륜 실린더로 유량이 증가하여 증압이 시작되는 단계이다.

다. Ⅲ 단계 : 고속 PWM 제어의 듀티 비율을 일정 시간(t_4 ~ t_5) 동안, Ⅱ 단계에 비하여 상대적으로 높은 듀티 비율을 적용하는 단계이다. 이 구간에서 차륜 실린더는 증압에서 감압으로 전환되는 단계이다.

특히, Ⅲ 단계는 일정 시간(t_4 ~ t_5) 동안에 비례제어 밸브에서 나타나는 선형적인 전류 변화를 얻을 수 있는 고속 PWM 제어 구간이다. 일반 PWM 제어인 경우, 밸브 가동자의 급격한 변위에 의해서 전류 변곡점($I_{threshold}$)이 발생되나 고속 PWM 제어에서는 전류 변화가 완만하게 발생되기 때문에 가동자의 급격한 위치 변환을 예방할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 주파수 변화에 의한 밸브 기본 특성

Fig. 4는 기존 ABS 장치에 적용되고 있는 100Hz 내외의 일반적인 PWM 제어와 본 연구에서 제안한 20kHz 내외의 고속 PWM 제어를 실시할 때, 발생되는 전류 및 가동자 변위 상태를 나타낸 것이다. 일반 PWM 제어의 경우, 밸브 가동자가 하강하는 과정에서 전류 변곡점이 크게 발생되어 가동자가 순간적으로 변화되나 고속 PWM 제어에서는 전류 변화가 선형적이기 때문에 선형적인 변위 변화를 확인할 수 있다. 이를 통하여, 기존 ABS 장치에 가장 보편적으로 채용되고 있는 일반 on-off 솔레노이드 밸브를 이용하여 고속 PWM 제어를 통한 연속적인 압력 가능성을 확인할 수 있었다.

Fig. 4, 5에서 알 수 있듯이, on-off 솔레노이드 밸브의 선형적인 전류 변화를 얻기 위해서는 아래와 같은 3 단계의 고속 PWM 제어가 필요하다.

제 Ⅰ 단계에서는 pulse off 상태를 3msec 내외로 유지하여 일반 PWM 제어에서 발생되는 전류 변곡점 부근에 일치시킨다.

제 Ⅱ 단계에서는 밸브 가동자가 일정한 열림 시간을 확보하도록 250mA 내외로 2msec 동안 유지시킨다.

제 Ⅲ 단계는 2msec 단위로 10msec 동안에 완만한 전류 증가를 발생시키는 단계로서 제어의 다양성 확보가 요구된다.

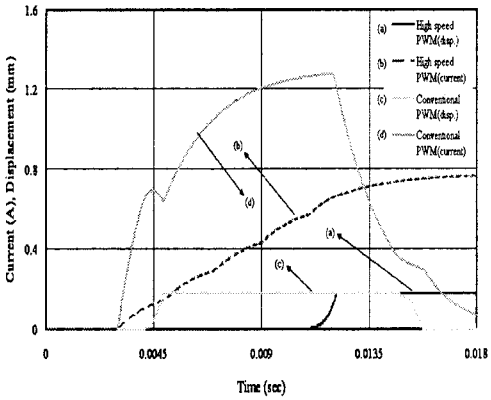

Fig. 4 Current and stroke characteristics at various PWM control modes

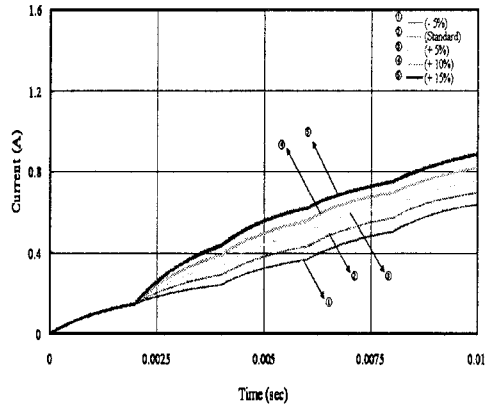

Fig. 5 Current variation due to duty cycles at 20kHz

Fig. 4는 일반 PWM과 고속 PWM 제어를 실시할 때, 발생되는 솔레노이드 밸브의 전류 값 변화와 특정 전류 임계 값 이상에서 발생되는 가동자 변위를 나타낸 대표적인 사례이다. 일반 PWM 제어에서는 4msec에서 0.7A 대역의 큰 변곡점을 갖는 전류 값 변화와 동시에 가동자가 200 μm 변위가 발생되었다. 반면, 고속 PWM 제어에서는 10msec에서 전류 값의 변곡점이 없이 0.8A 내외 대역까지 선형적인 전류 변화를 확인하였다.

ABS 유압 제어에서 요구되는 최소 미세 증압량은 15bar 내외이기 때문에 이를 만족시킬 수 있는 PWM 제어 조건이 필요하다. 미세 증압 조건을 구현하기 위해서는 발생 전류 600 ~ 700 mA 내외, 가동자 열림 시간 4 ~ 10 msec 동안에 가동자 변위 시간을 적절하게 제어할 수 있는 고속 PWM 제어 방법이 요구된다. 기본 주파수 20kHz, 듀티 가변의 고속 PWM 제어인 경우, 600 ~ 700mA 대역에서 전류 변곡점이 발생하지 않았다. 이 같은 현상은 밸브 가동자 변환에 필요한 최소의 발생 전류를 기점으로 듀티 비율 가변시키는 고속 PWM 제어에 기인한다.

위의 발생 전류와 가동자 열림 시간을 만족시키기 위해서는 20kHz에서 듀티 비율 가변에 따른 발생 전류 기울기가 최소 $\Theta=34^0$, 최대 $\Theta=43^0$ 대역이 포함되도록 하여야 한다.

따라서, 위의 듀티 비율의 범위를 이용하여 밸브 가동자의 급격한 변위 예방이 가능하였는바, ABS 유압 장치에서 발생되는 맥동 저감 가능성을 확인할 수 있었다.

3.2 동작 주파수 변화에 의한 맥동 저감

100Hz의 일반 및 고속 PWM 제어를 적용했을 때, 발생되는 맥동을 실험과 이론해석을 병행하여 Fig. 7, 8, 9에 나타냈다.

이론해석의 타당성 검증을 위하여 Fig. 6과 같이 1,800CC 승용차에 적용되는 유압 모듈에이토, 마스터 실린더, 전용 PWM 제어기, 차륜 디스크, 유압 배관 등으로 구성된 전용 ABS 테스트베드를 제작하였다. 유압 배관은 마스터 실린더에서 차륜 실린더로 압력이 균일하게 공급되도록 하기 위하여 교차형을 적용하였다. 유압 모듈레이터와 차륜 실린더 사이에서 발생되는 맥동 현상을 정확하게 검지하기 위하여 압력센서를 유압 모듈레이터와 가장 근접한 400mm 위치에 설치하였다. 또한, 고압 상태에서 발생되는 급격한 압력 변동을 정확하게 측정하기 위한 목적이다.

100Hz로 대표되는 일반 PWM 제어를 실시할 경우, 초기 맥동 압력이 40bar 내외가 발생되었다.

일반 PWM 제어를 실시하면 밸브 가동자가 열림에서 닫힘으로 고속으로 변환되어 마스터 실린더에서 차륜 실린더로 공급되는 유량이 급속히 차단되기 때문에 커다란 맥동이 발생된다. 그러나, 20kHz로 제어하는 고속 PWM 제어에서는 맥동 압

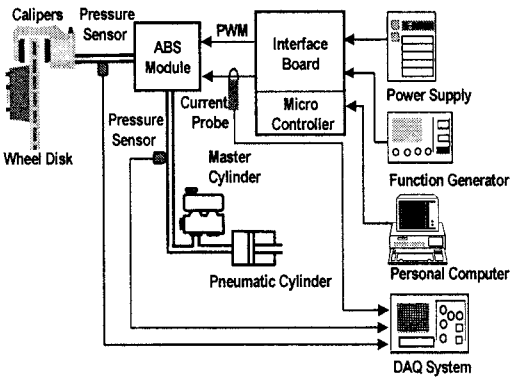

Fig. 6 Schematic diagram of experimental apparatus

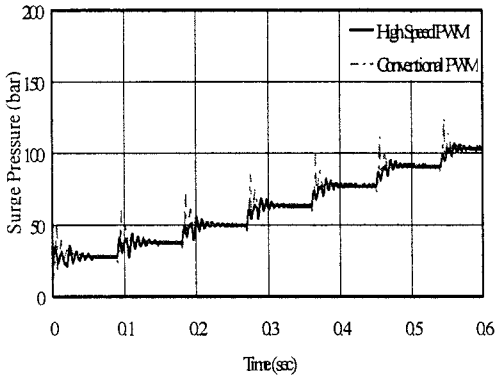

Fig. 7 Comparison of conventional and high speed PWM control

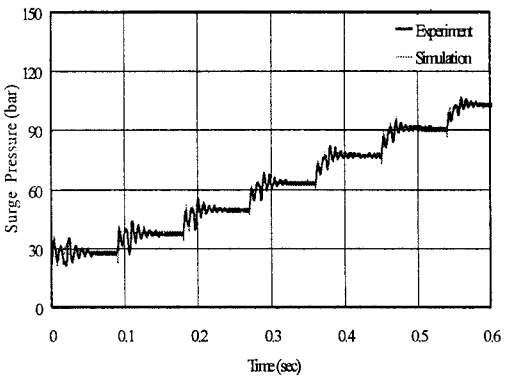

Fig. 8 Comparison of simulated and experimental results of surge in wheel cylinder(contiguous pulse)

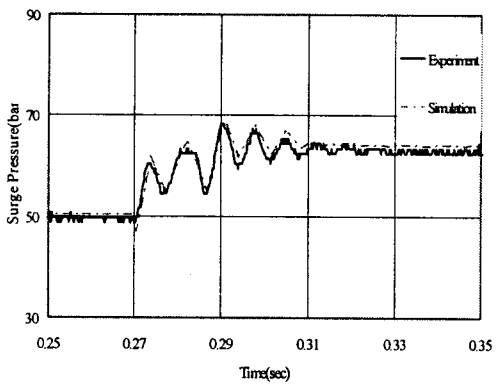

Fig. 9 Comparison of simulated and experimental results of surge in wheel cylinder (single pulse)

력이 20bar 내외로서 차륜 실린더에서 발생되는 맥동 압력 저감에 큰 효과를 나타냈다.

고속 PWM 제어를 실시하였을 때, 맥동 파형은 일반 PWM 제어 방법에 비하여 맥동 크기가 50% 저감되고 증압에서 유지로 전환되는 천이 단계에서 압력 변화가 완만하게 발생되었다. 고속 PWM 제어를 실시하게 되면 밸브 가동자의 위치 변환 속도를 제어할 수 있기 때문에 가동자의 급격한 위치 변환을 방지할 수 있게 된다. 위의 실험 및 수치 해석을 통하여 차륜 실린더에서 발생되는 맥동 저감에 고속 PWM 제어가 유효함을 확인할 수 있었다. 또한, 특성곡선법과 고속 PWM 제어를 통하여 폐쇄계로 구성된 ABS 유압 장치에서 발생되는 맥동을 정량적으로 해석하고 저감시킬 수 있는 방법을 제시할 수 있었다.

따라서, 고속 PWM 제어 방법을 적용하게 되면 ABS 장치의 제어 다양성 확보는 물론이고 일반 산업 분야로의 on off 솔레노이드 밸브 응용 범위를 확대시킬 수 있을 것이다.

4. 결론

본 논문에서는 기존 자동차 ABS 장치에 일반적으로 적용되고 있는 on off 솔레노이드 밸브에 대한 가정자로법, 특성곡선법과 작용 유압을 고려한 시뮬레이션 해석을 실시하고 이를 실험 해석과 비교 평가하였다. 본 연구는 기존 연구에서 추진하였던 자기장 및 유압 해석은 물론이고 파동방정식에 기초한 특성곡선법(CCM)을 이용하여 밀폐계로 구성된 ABS 유압 라인에서 발생되는 맥동 현상을 실제와 근접하게 해석할 수 있었다.

또한, 기존 ABS 제어법을 탈피한 고속 PWM 제어법을 도입하여 발생 맥동을 기존대비 1/2로 저감시킬 수 있는 방안을 제시하였다. 기존 on off 솔레노이드 밸브는 유압 작동시 40bar 내외의 커다란 맥동이 발생되는 반면에 고속 PWM 제어법을 적용한 on off 솔레노이드 밸브는 20bar로 1/2 저감 가능함을 확인할 수 있었다.

이 같은 맥동압력 저감을 위해서는 on off 솔레노이드 밸브의 가동자가 선형적인 변위가 발생되어야 하는데, 본 연구에서는 기본 주파수 20kHz, 듀티 가변의 고속 PWM 제어, 발생전류 600에서 700mA 대역임을 확인할 수 있었다.

향후 연구에서는 주파수 대역을 다양화하거나 적용 고속 PWM 주파수(20kHz) 대역에서 발생되는 ABS 스위칭 모듈의 전자파간섭(EMI)에 대한 영향 파악 및 대비 설계가 가능하다면 제동성능을 높이고 경제성을 갖는 고성능 ABS 개발에 기여할 것이다.

참고문헌

1. Naito, T., Takeuchi, H. and Kuromitsu, H., "Development of four Solenoid ABS," SAE Paper No. 960958, pp. 198-199, 1996.
2. Imoto, Y.,"High-efficiency Brake Pressure Controls in ABS," SAE Paper No. 983427, pp. 655-660, 1998.
3. Brown, H. K., "ASME Part D," ASME, pp. 547 -548, 1962.
4. Wylie, B. G., "Fluid transient," McGraw-Hill, pp. 23-30, 1978.
5. Wiggert, D. C. and Sundquist, M. J., "The Effect Gaseous Cavitation on Fluid Transients," Journal of Fluids Engineering, Vol. 101, No. 10, pp. 79-86, 1979.
6. Kim, K. H., Choi, M. J. and Lee, K. W., "A Study on the Reduction in Pressure Ripples for a Bent-axis Piston Pump by a Phase Interference," Jornal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 21, No. 9, pp. 103-110, 2004.