

비례제어 솔레노이드 액추에이터의 응답성 향상 연구 A Study on Response Improvement of a Proportional Solenoid Actuator

윤소남^{1,2*} · 함영복^{1,2} · 박중호^{1,2}

So Nam Yun, Young Bog Ham and Jung Ho Park

Received: 26 Jul 2016, Revised: 24 Aug 2016, Accepted: 31 Aug 2016

Key Words : Duty Ratio(듀티비), PWM Signal(펄스폭 변조 신호), Proportional Control Valve(비례제어밸브), Solenoid Actuator(솔레노이드 액추에이터)

Abstract: This paper presents a control method for the performance improvement of a proportional solenoid actuator using a Pulse Width Modulation (PWM) signal. It is very difficult to obtain excellent response performance from a proportional solenoid actuator using a simple proportional controller with no PWM signal or dither because the mass and structure of a proportional solenoid actuator changes according to the application target, friction force in the proportional solenoid tube, operating force and displacement range.

To solve the above problems, first, a controller with a PWM function for experimenting with attraction force characteristics was designed and manufactured. Secondly, an experimental setup for solenoid performance measurement with a force sensor and a displacement sensor was also manufactured. The attraction force characteristics according to the frequency and duty ratio variations of a PWM signal were tested and the relationships among the frequency, duty ratio, plunger mass and friction characteristics were analyzed.

Finally, response characteristics improvements for proportional solenoid actuators are discussed.

1. 서 론

산업계에 널리 사용되고 있는 비례제어밸브에 있어, 비례솔레노이드 액추에이터는 가동자(Plunger) 변위의 임의 구간 내에서 언제나 일정한 흡인력을 낼 수 있도록 하기 위하여 일반 솔레노이드 액추에이터의 구조와는 다른 독특한 구조를 하고 있으며¹⁾⁻²⁾, 비례솔레노이드 액추에이터의 동특성 향상을 위한 연구들이 많은 연구자들에 의하여 수행되고 있다. 많

은 문헌에 소개되고 있는 바와 같이, 가동자는 비례 솔레노이드 액추에이터의 응용 대상, 작동력 및 작동 변위에 따라서 구조나 질량이 달라지고, 동시에 튜브와의 마찰력도 달라지기 때문에 단순한 제어기를 이용하여서는 우수한 응답 특성을 얻는데 많은 어려움이 있다. 따라서, 응답 성능 향상을 위하여 PWM(Pulse Width Modulation) 신호 주파수를 가변하거나 PWM 신호 듀티비(Duty ratio)를 가변하는 방식들이 많이 사용되고 있다. 또한, 최근에는 PWM 신호에 디더(Dither)를 추가하여 보다 더 우수한 응답성을 얻으려는 연구들이 이루어지고 있다³⁾⁻⁵⁾.

일반적으로 디더를 포함한 PWM 신호 입력의 목적은 히스테리시스, 응답성 및 분해능 향상에 있으며, PWM 주파수는 33[Hz]에서 400[Hz] 범위 혹은 시스템 고유진동수의 2배에서 4배까지를 적정 범위로 추천하고 있다. 또한, 듀티비는 15[%]에서 85[%]까지 사용하도록 권장하고 있다⁶⁾⁻⁷⁾. 그러나, 밸브 혹은 비례솔레노이드 액추에이터를 설계하는 입장에서 보면,

* Corresponding author: ysn688@kimm.re.kr

1 Extreme Mechanical Engineering Research Division, Korea Institute of Machinery & Materials, Daejeon 34103, Korea

2 Plant system and Machinery, Korea University of Science and Technology

Copyright © 2016, 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.

이론적으로 가동자의 마찰 특성을 예측하기가 매우 어렵고, 심지어는 가동자 전단에 있는 스프링 혹은 포핏(Poppet)의 형상과 사용 유체 및 온도 변화에 따라서 달라지는 밸브 시스템의 고유진동수를 정확히 예측하기가 어렵기 때문에 이론적인 결과만을 적용하는 데는 한계가 있다⁸⁾⁻⁹⁾.

본 연구는 전술한 문제점들을 해결하기 위한 기초 연구로, 고정 구동전압에서 단순히 구동 PWM 신호 주파수 및 PWM 신호 듀티비를 가변하면서 비례제어용 솔레노이드 액추에이터를 구동하여 흡인력 특성 및 동특성에 미치는 결과를 조사하고, PWM 신호가 비례솔레노이드에 미치는 경향을 분석하기로 한다. 이를 위하여 PWM 회로를 설계/제작하고, 비례제어용 솔레노이드 액추에이터 성능 측정용 장치도 제작하는 것으로 한다. 실험은 가동자 변위를 고정하고, 주파수만을 가변하는 경우와 듀티비만을 가변하는 경우에 대해서 수행하며, 가동자의 변위는 각각 1[mm], 2[mm], 3[mm]일 때를 기준으로 하여 수행하는 것으로 한다.

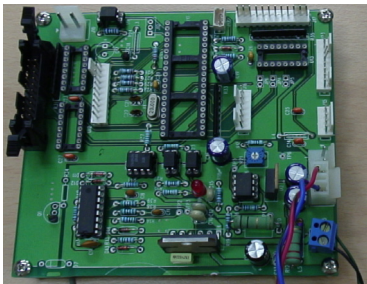
2. 실험장치 설계 및 제작

2.1 PWM 신호 발생장치

Fig. 1의 a)는 실험대상 비례솔레노이드 액추에이터를 보이는 것이고, b)는 PWM 신호 발생장치를 나



a) Proportional solenoid actuator



b) PWM signal generator

Fig. 1 Proportional solenoid actuator and PWM signal generator

타내는 것이다. Fig. 1의 b)에서, 24[V] 전원을 PWM 신호 발생장치에 연결시키고, 함수발생기를 이용하여 0~5[V]의 PWM 신호를 장치에 입력하면 PWM 신호 발생장치에 의하여 $\pm 24[V]$ 의 전압이 비례솔레노이드 액추에이터로 공급되어 솔레노이드가 작동되는 구조이다.

2.2 비례솔레노이드 특성 실험장치

Fig. 2는 비례제어용 솔레노이드 액추에이터의 특성을 실험하기 위하여 설계, 제작된 장치를 보이는 것이다.

실험대상 비례솔레노이드 액추에이터에는 흡인력 측정을 위하여 로드셀(Load cell)을 설치하였으며, 레이지 변위센서 및 다이얼 게이지 형식의 변위 측정장치가 구비되어 있다. 또한, 가동자의 변위, PWM 신호 주파수 및 듀티비 변화에 따른 각각의 주파수 응답 선도(보드선도)를 그리기 위하여 동특성 분석장치를 사용하였다. 실험에 사용된 비례솔레노이드의 사양은 Table 1과 같다.

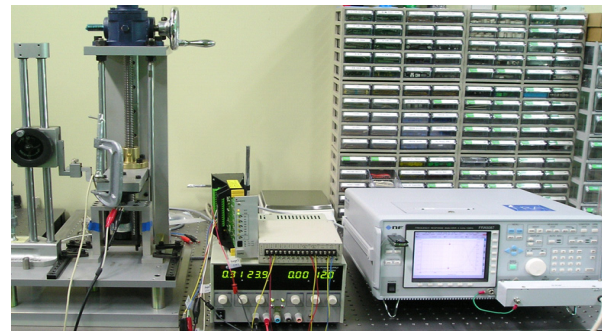


Fig. 2 Experimental setup for proportional solenoid actuator

Table 1 Specification of proportional solenoid actuator

Plunger dimension	$\phi 17.82 \times 41L$	Rated current	1[A]
Stroke	3.2[mm]	Rated resistant	10.8[Ω]
Coil turns	1180	Plunger mass	107.6[g]

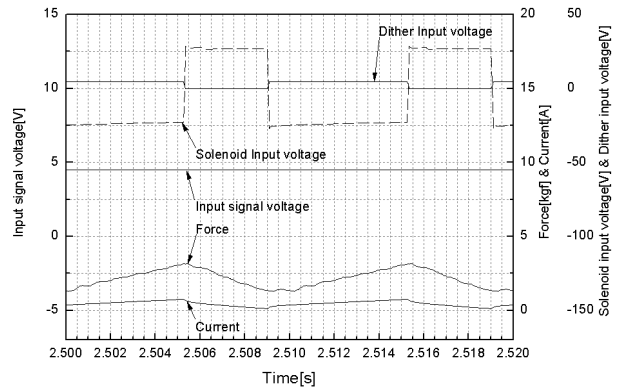
3. 실험 결과 및 고찰

본 연구에서는 변위를 각각 1[mm], 2[mm], 3[mm], PWM 주파수를 각각 100[Hz], 200[Hz], 300[Hz], 듀티비를 각각 35[%], 50[%], 75[%]인 상태에서 스텝응답

을 20[kHz]의 샘플링 주파수로 계측한 후에 흡인력의 응답성, 정상상태에서의 흡인력 크기를 비교하여 고찰을 수행하였다.

Fig. 3은 플런저 변위가 3[mm], PWM 주파수 100[Hz], 듀티비 35[%]일 때의 스텝응답 결과와 정상상태에서의 흡인력 및 소비전류 변동율을 나타낸 것이다.

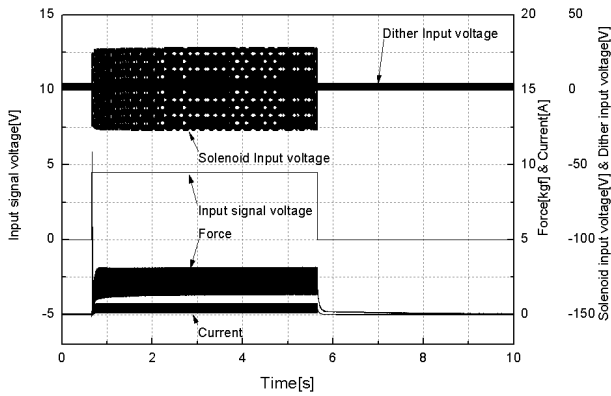
그림으로부터 가동자는 PWM 주파수의 영향으로 미세하게 진동하고 있음을 알 수 있으며, 응답성 향상에 기여하고 있음을 예측할 수 있다.



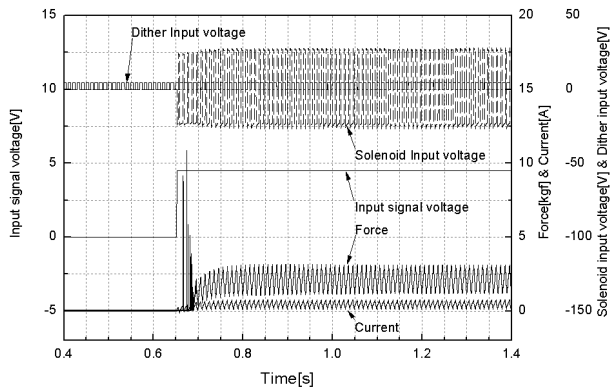
d) Attraction force and consumption current characteristics at steady state

Fig. 3 Step response characteristics

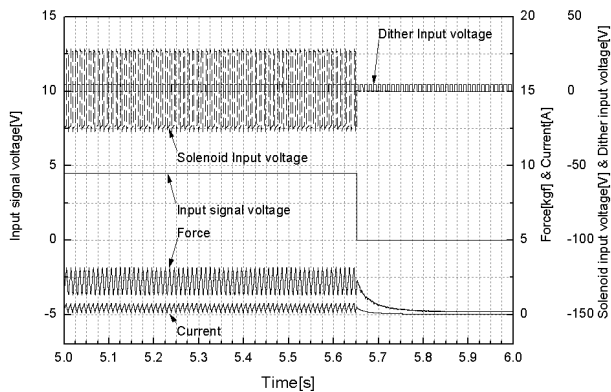
(plunger displacement: 3[mm], PWM frequency: 100[Hz], duty ratio: 35[%])



a) On-off characteristics



b) Rising curve at start point of input signal

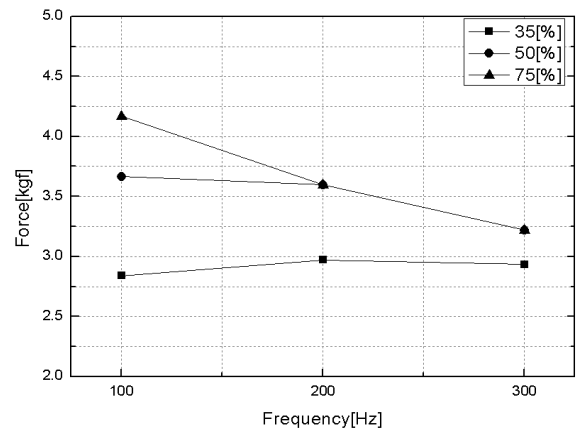


c) Downward curve at end point of input signal

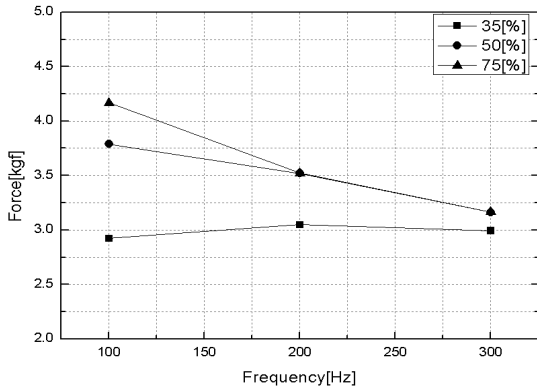
3.1 PWM 신호 주파수 및 듀티비 변화에 따른 특성

Fig. 4는 플런저 변위를 고정하고, 각각 PWM 신호 주파수와 듀티비를 변화시켰을 때의 흡인력 변동 특성을 나타낸 것이다. Fig. 4의 a)는 플런저 변위 1[mm], b)는 2[mm], c)는 3[mm] 일 때의 특성을 보이는 것으로 듀티비가 클수록, PWM 신호 주파수가 낮을수록 흡인력이 상승하는 결과를 얻을 수 있었다. 듀티비가 35[%]인 경우에 있어서는 반대로 주파수가 낮을수록 낮은 흡인력 특성이 나타났으며, 듀티비가 커짐에 따라 낮은 주파수일 때가 흡인력이 커지는 경향이 두드러졌다.

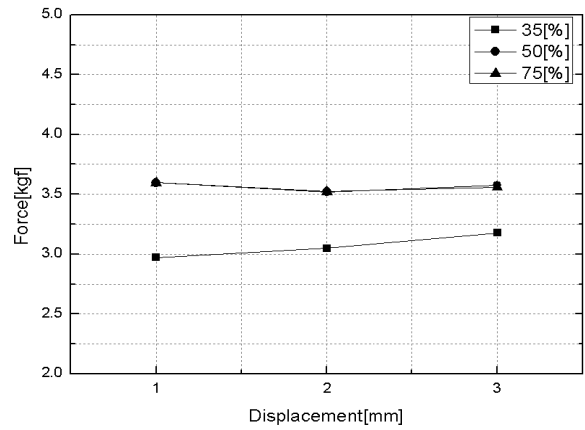
또한 주파수가 낮을수록 듀티비 변화에 따른 흡인력 변화가 비례적으로 일어나고 있음을 알 수 있으며, 실험대상 비례솔레노이드는 100[Hz] 부근의 영역에서 높은 흡인력과 동시에 듀티비에 비례하는 흡인력을 얻을 수 있음을 예측할 수 있다.



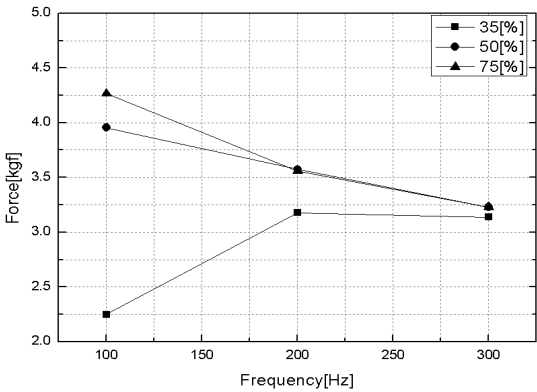
a) Plunger displacement of 1[mm]



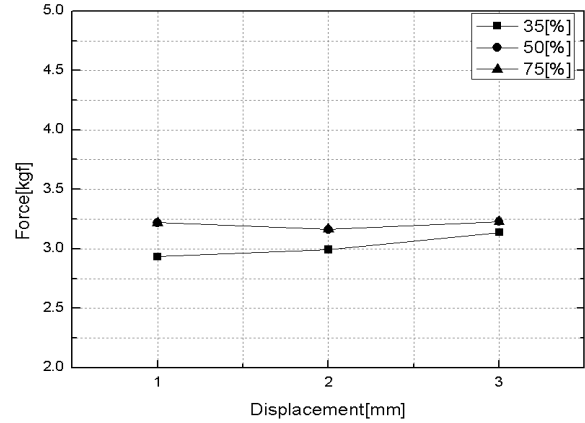
b) Plunger displacement of 2[mm]



b) PWM frequency of 200[Hz]



c) Plunger displacement of 3[mm]



c) PWM frequency of 300[Hz]

Fig. 4 Attraction force characteristics by variation of PWM frequency and duty ratio

Fig. 5 Attraction force characteristics by plunger displacement variation

3.2 가동자 변위에 따른 특성

Fig. 5는 가동자 변위에 따른 흡인력 특성 실험치를 정리한 것이다.

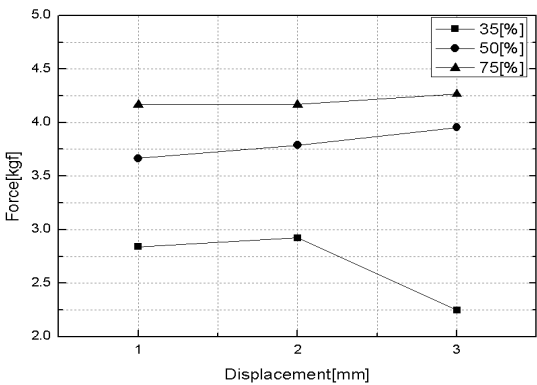
전형적인 비례솔레노이드와 같이 가동자의 변위에 관계없이 동일한 듀티비에서 거의 동일한 흡인력이 얻어지는 것을 확인할 수 있다. 또한, 3.1절에서 서술한 바와 같이 PWM 주파수가 200[Hz], 300[Hz]일 경우에는 듀티비가 50[%] 및 75[%]에서 동일한 흡인력

이 계측되었으며, 이 결과로부터 실험대상 비례솔레노이드는 100[Hz]보다 큰 주파수에서는 사용하기에 부적절하다는 것을 알 수 있다. 또한 이 비례솔레노이드는 비례적인 제어를 위해서는 가동자 변위가 최대 2[mm]를 넘지 못하도록 구속하는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있다.

3.3 스텝응답 특성 비교

Fig. 6은 PWM 주파수 100[Hz], 가동자 변위 1[mm] 일 때의 스텝응답 특성 곡선을 보이는 것이다. 비례솔레노이드에 스텝으로 입력 신호를 주고나서 흡인력이 일어나는 시간은 듀티비가 35[%], 50[%], 75[%] 일 때, 각각 30.95[ms], 25.90[ms], 18.65[ms]로 확인되었다.

Fig. 7은 PWM 주파수 200[Hz], 가동자 변위 1[mm] 일 때의 스텝응답 특성 곡선으로, 입력 신호에 대한 흡인력 응답시간은 듀티비가 35[%], 50[%], 75[%]일 때, 각각 32.45[ms], 23.45[ms], 17.05[ms]로 확인되었다.



a) PWM frequency of 100[Hz]

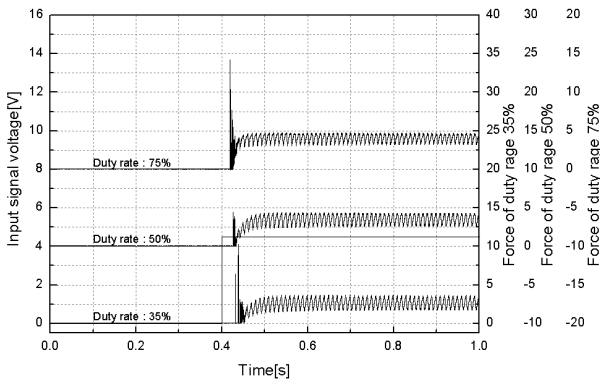


Fig. 6 Step response characteristics(PWM frequency: 100[Hz], plunger displacement: 1[mm])

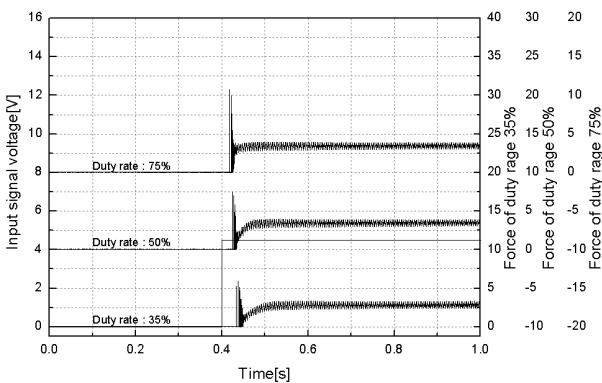


Fig. 7 Step response characteristics(PWM frequency: 200[Hz], plunger displacement: 1[mm])

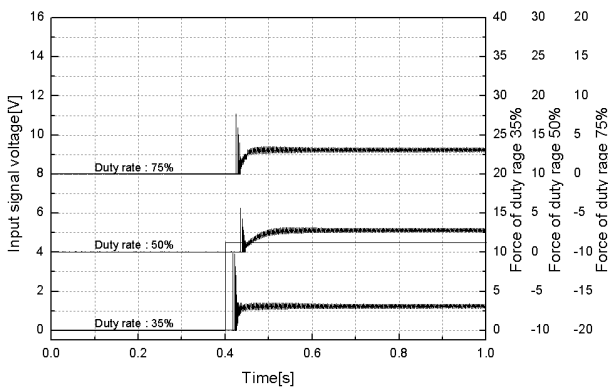


Fig. 8 Step response characteristics(PWM frequency: 300[Hz], plunger displacement: 1[mm])

Fig. 8은 PWM 주파수 300[Hz], 가동자 변위 1[mm] 일 때의 스텝응답 특성 곡선으로, 입력 신호에 대한 흡인력 응답시간은 듀티비가 35[%], 50[%], 75[%]일 때, 각각 17.05[ms], 33.40[ms], 24.30[ms]로 확인되었다.

Table 2는 가동자 변위가 각각 1[mm], 2[mm], 3[mm]이고, PWM 주파수가 각각 100[Hz], 200[Hz], 300[Hz], 듀티비가 35[%], 50[%], 75[%]일 때의 응답 지연 특성실험 결과를 정리한 것이다. 가동자 변위 1[mm]일 때를 비교하면, 100[Hz]와 200[Hz] 영역에서는 듀티비가 클수록 응답지연이 줄어들었는데 반해, 300[Hz]에서는 듀티비가 35[%]일 때 17.05[ms]에서 33.40[ms]/50[%], 24.30[ms]/75[%]로 예측되어 정량적인 해석에 어려움이 있었다.

이러한 현상은 가동자 변위 2[mm] 때는 PWM 주파수 200[Hz], 듀티비 50[%]일 때 나타났으며, PWM 주파수 300[Hz] 일때는 변위 1[mm]와 2[mm] 영역에서 모두 일어났다. 주파수 100[Hz]인 경우에는 가동자 변위 3[mm]일 때 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

이 결과만을 정리하면 ‘3.2절’의 결과와 매우 유사한 것으로, 디더 역할을 하는 주파수는 100[Hz], 가동자 사용 변위는 2[mm] 이내가 적당하다는 것을 예측할 수 있는 예측결과라 할 수 있다. 또한, 보다 정확한 분석을 위해서는 모델링을 통한 이론해석과 PWM 주파수와 듀티비 및 가동자 변위를 세밀하게 하여 많은 실험을 할 필요가 있다고 사료된다.

3.4 상용 제어기 특성

Fig. 9는 Bosch-Rexroth의 방향제어 밸브 제어용으로 사용되는 제어기(VT-VSPA2-1)를 이용하여 실험대상 비례솔레노이드의 스텝응답 특성을 계측한 것으로, 이 제어기는 비례-적분 기능을 가지고 있다¹⁰⁾.

제어기 PWM 주파수는 180[Hz], 최대소비전류 2.5[A]이며, 실험은 가동자 변위 3[mm], 기준입력전압 1.5[V]를 스텝상으로 인가하여 수행하였다. 실험 결과 이 제어기는 전원 입력시에 이미 매우 적은

Table 2 Response time characteristics by PWM frequency, duty ratio and plunger displacement variation(Unit of dead time: ms)

Disp.	100[Hz]			200[Hz]			300[Hz]		
	35[%]	50[%]	75[%]	35[%]	50[%]	75[%]	35[%]	50[%]	75[%]
1[mm]	30.95	25.90	18.65	32.45	23.45	17.05	17.05	33.40	24.30
2[mm]	16.55	14.55	10.85	11.45	20.35	15.10	11.35	21.20	15.15
3[mm]	6.15	13.45	7.40	10.50	8.90	7.70	10.30	8.45	7.00

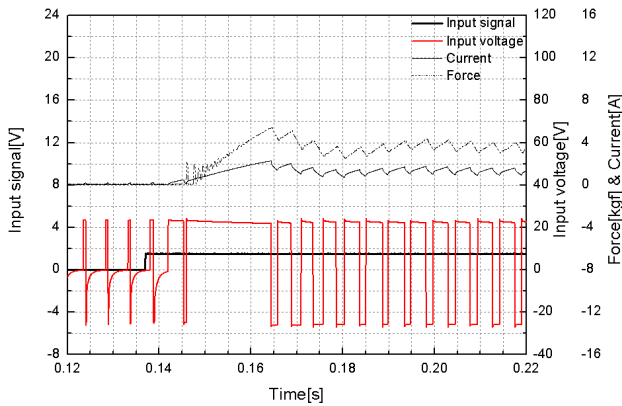


Fig. 9 Experimental results using commercial electrical amplifier(PWM frequency: 180[Hz], plunger displacement: 3[mm])

PWM 신호로 비례솔레노이드를 구동준비 시키는 역할을 하고, 듀티비의 최고값이 100%임이 확인되었다.

4. 결 론

이 논문에서는 비례제어용 솔레노이드의 개발을 위한 기초 연구로, 설계·제작한 비례솔레노이드를 대상으로 PWM 주파수, 듀티비 및 가동자 변위에 따른 동특성과 정상상태에서의 변위와 흡인력특성을 실험하여 각각의 입력 변수에 따르는 성능 특성들의 분석을 수행하였으며, 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) PWM 신호 주파수 변화, 듀티비 변화 및 가동자의 변위 범위에 따라서 비례적인 흡인력 특성이 얻어지지 않는 영역이 존재하며, 밸브 개발시는 최적의 듀티비 범위 선정을 위하여 실험을 통하여 조사할 필요가 있다.

2) 실험대상 비례솔레노이드는 PWM 주파수가 100[Hz], 가동자 변위 범위가 2[mm] 이내에서 입력전류에 비례하는 흡인력 특성을 얻을 수 있음이 실험을 통하여 확인되었다.

3) 보다 정확한 분석을 위해서는 모델링을 통한 이론해석과 PWM 신호 주파수와 듀티비 및 가동자 변위를 세밀하게 하여 많은 실험을 할 필요가 있다고 사료되며, 압력 혹은 유량 제어 시스템에 장착하여 제어 특성을 조사하여, 비례솔레노이드 자체의 성능 실험 결과의 타당성을 확인할 필요가 있다.

감사의 글

이 논문의 결과는 산업핵심기술개발사업(과제번호:

10063469)으로 이루어졌음을 밝힙니다.

References

- 1) Vickers, "Industrial hydraulics manual", Vickers, pp. 14-1~14-10, 1989.
- 2) Achim greis, "Electromagnetic actuators", Thomas magnete GMBH, pp. 39~47, 2000.
- 3) S. N. Yun, D. W. Yun, "Performance improvement strategy of solenoid valve and magnetic material technique", Journal of the KFPS, Vol. 6, No. 3, pp. 28~34, 2009.
- 4) N. Ye, S. Scavarda, M. Betemps, A. Jutard, "Models of a pneumatic PWM solenoid valve for engineering applications", Transactions of ASME, Vol. 114, pp. 680~688. 1992.
- 5) J. Badertscher, K. A. Cunefare, A. A. Ferri, "Braking impact normal dither signals", Journal of vibration and acoustics, Vol. 129, pp. 17~23, 1991.
- 6) Gert G. Roeker, "A digital switching hydraulic control valve with pulse-modulated control", Proceedings of the 45th national conference on fluid power, pp. 195~205, 1992.
- 7) Jack L Johnson, "Design of electrohydraulic systems for industrial motion control", Milwaukee school of engineering, pp. 82~83, 1995.
- 8) Parker, "Introduction to Electro-hydraulic Proportional and Servo Valves", <http://insidepenton.com/machinedesign/BruceBesch-IntroElectrohydraulic.pdf>, 2016.
- 9) R. B. Walters, "Hydraulic and electro-hydraulic control systems", Elsevier applied science, London, pp. 173~178, 1991.
- 10) Rexroth Bosch Group, "Valve amplifier for proportional directional valves and proportional pressure valves" <https://dc-kr.resource.bosch.com/>, 2016
- 11) Y.H. Jeong and T. J. Park, "THD analysis of a hydraulic servo valve using CFD", Journal of the Korean Society for Fluid Power and Construction Equipment, Vol. 11, No.1, pp.8~13, 2014.
- 12) D. M. Kim et al., "Development and Verification of Analytical Model of the Main Control Valve", Journal of Drive and Control, Vol.12, No.2, pp.39~48, 2015