에너지 절약형 공압 시스템 개발

Development of Energy Saving Pneumatic System

*#김명섭[1], 김동수[1]

*#M. S. Kim(joseph@kimm.re.kr)[1], D. S. Kim[1]

[1] 한국기계연구원 나노기계연구본부 롤투롤인쇄전자공정장비팀

Key words : Pressure Regulator, Energy Saving, Sandwich Type, Optimal Design

1. 서론

Micro Valve는 최근 컴퓨터나 각종 제어기술의 발달에 따라 정밀제어가 가능하며 반도체 칩 마운터, 전자제품 생산라인, 베어링 자동이송라인, 사출성형기, 피로 및 진동시험기 등 그 응용범위를 넓혀가고 있다. 특히 최근에 반도체산업 등 기술집약적인 공정의 개발에 있어서 핵심기술로 자리 잡고 있으며, 고성능, 저가격, 장수명, 고 신뢰성, 인간공학적 측면에서의 향상 및 주변 환경과의 결합에 기본 설계 요건을 두고 연구 되고 있다[1]. 본 연구에서는 Solenoid Valve 밸브의 설계를 위해 상용해석 프로그램인 Maxwell을 이용하여 Solenoid를 Modeling및, 해석하였으며, 실제 Micro Valve를 제작하여 Simulation Data와 이를 바탕으로 개발된 Micro Valve의 Data를 비교하여 최적 설계의 타당성을 증명하였다. 또한, 개발한 Micro Valve에 에너지 절약을 위해 0.35Watt Micro Valve에 절전회로를 부착하여, 소비전력을 0.1Watt로 낮출 수 있는 회로를 설계하였다

2. 구조 및 작동원리

Fig. 1은 Micro Valve의 구성도를 나타내며, Micro Valve의 주요구성 요소는, 압축공기의 방향을 제어하는 Poppet, Plunger, Stationary Core와 Spring, 누설을 차단하게 해주는 O-ring 및 gasket 등이 있다. Micro Valve의 동작원리는, Solenoid의 통전 시에는 전자석의 힘에 의해 Poppet을 전진하게 되면, Supply Port를 통해 Pressure Port로 압축공기가 흐르게 된다. Solenoid 비 통전 시에는 Spring Force으로 Poppet을 후진시켜 Supply Port가 닫히게 되고 Exhaust Port로 배기되어 고속으로 왕복 운동 하게 된다.

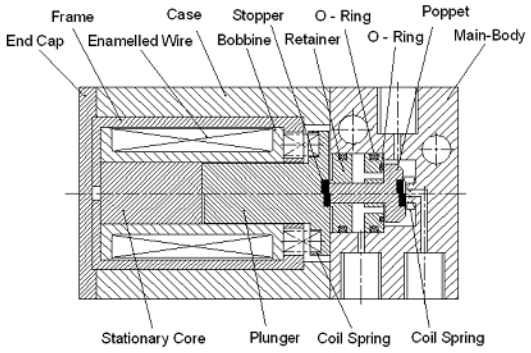

Fig. 1 Schematic Diagram of micro valve

3. 설계이론 및 자장해석

3.1. 설계이론

먼저 전압 변동을 고려하여 최소 흡입력(F_{min})을 충분히 크게 산정한다. 주어진 흡입력을 발생시키기 위해 공극자속밀도를 결정한다[2~3]. 본 논문에서는 Index-number를 이용하여 공극자속밀도(B_g)를 산정하였다.

$$\text{Index-Number} = \sqrt{F_{min}}/l_g \quad (1)$$

$$B_g = 0.4927[\log(IndexNumber) - 2]v \quad (2)$$

산정된 자속밀도를 공급하기 위한 기자력(U)을 계산한다. 플런저(Plunger), 코어(Core), 프레임(Frame) 에서 소요되는 기자력을 산정할 수 없기 때문에 공극에서 소요되는 기자력에 적당한 계수(ζ)를 곱하여 전체 기자력을 산정한다.

$$U = \frac{\zeta B_g l_g}{\mu_o} \quad (3)$$

코일에서 발생된 열의 방출 면으로 코일의 외면만을 고려하는 경우, 온도상승식은 다음과 같다.

$$\Theta_f = \frac{W}{\lambda S_{out}} = \frac{W}{\lambda(l_m + 4T)h} \quad (4)$$

식(4)로부터 권선의 높이(h)와 폭(T)의 비율 $\beta = h/T$ 를 적절히 가정하면, 주어진 설계사양으로부터, 권선의 높이와 폭을 구할 수 있다.

코일의 선경은 다음 식으로부터 결정된다.

$$d = \sqrt{\frac{4\rho_h l_m \ni}{\pi V}} \quad (5)$$

3.2. Solenoid부 모델링 및 해석결과

Micro Valve의 Solenoid 부분을 해석하기 위하여 Fig. 2와 같이 Modeling하였으며, 해석결과를 Fig. 2에 함께 나타내었다. 해석결과를 보면 전체적인 전류의 변화는 크게 A, B 및 C의 3구간으로 나누어 그 특성을 설명할 수 있다. A구간은 Plunger의 움직임이 미소한 상태에서 전류가 증가하는 구간, B구간은 Plunger의 속도가 증가하면서 전류가 감소하는 구간, 구간 C에서는 Plunger의 이동이 끝난 상태를 나타내고 있으며, 2ms에서 동작됨을 알 수 있다.

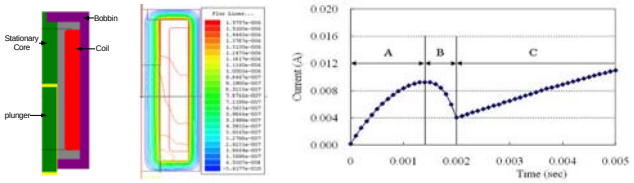

Fig. 2 Modeling & Analysis of Solenoid

4. 제작 및 시험

4.1. 밸브의 개발 및 성능테스트

Micro Valve의 Solenoid 부분의 해석 결과를 기초로 하여 Fig. 3과 같이 Micro Valve를 제작하였으며, Micro Valve의 성능을 측정하기 위하여, Fig. 4와 같은 Micro Valve 성능 측정기를 개발하였다. 실험결과에서 알 수 있듯이 개발된 Micro Valve는 Maxwell을 이용하여 해석한 결과 값과 유사한 형태로 나타나고 있음을 Table 1에서 비교할 수 있다.

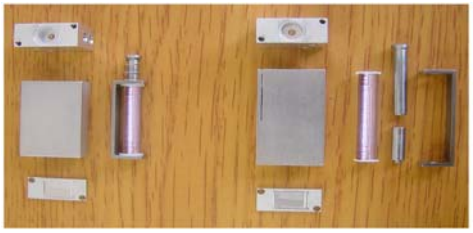

Fig. 3 Micro Valve Parts

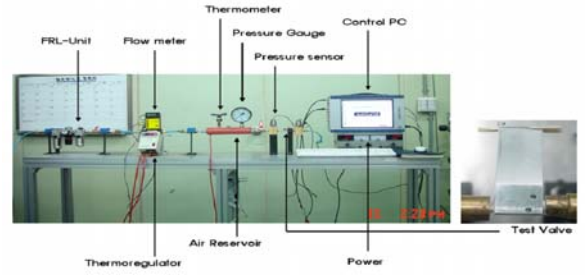

Fig. 4 Performance Test Device

Table 1 Result of Capacity Test

Item	Value	Unit
Supply Pressure	3	bar
Supply Voltage	23	V
Electric Power	0.345	W
Port	3	㎜
Stroke	0.3	㎜
Coil Turn Number	6,700	turn
Coil Diameter	0.04	㎜
Coil Resistance	1.6	kΩ
Response Time	3	㎳
Temperature Rise Value	50	℃
Magnetic Force	3	N
Spring Constant	0.015	N/㎜

4.2 신뢰성 시험

Fig. 5는 Surge current test 및 Magnetic Force Test 결과이다. 전압, 전력 등이 서로 다른 형태를 갖는 부하에 의해 영향을 받아 과도전류가 발생되며, 이러한 기계적인 특성 때문에 여닫는 동작이 몇 번 반복되어 진다면 ON/OFF의 반복 시 동일 현상이 중첩되어 나타난다[4]. Solenoid에 DC24V 전원을 인가한 뒤 Plunger를 이동 시켜 Plunger에 가해지는 힘을 Load Cell로 측정한다. 실험결과 3N정도의 흡입력이 발생되었음을 알 수 있다. Fig. 6은 Dynamic Response 측정 그래프 및 Flow Capability Test를 수행하기 위해 사용압력을 3kg_f/cm^2으로 설정한 상태에서 시험밸브를 Open 하여 시험한 결과이다. Valve를 Open하여 하단에 걸리는 압력이 3bar의 80%까지 올라가는데 걸리는 시간은 3ms로 빠른 Dynamic Response을 나타낸다. 그림은 11.4(s)일 때 3(bar)에서 20.16(s)일 때 0.62(bar)로 압력이 떨어지는 구간을 측정한 그래프다. 3(bar)의 20%인 0.62(bar)까지 압력이 떨어지는 시간은 8.76(s)이며 유효단면적 S는 0.1mm^2 이며, Cv치는 0.0059이다.

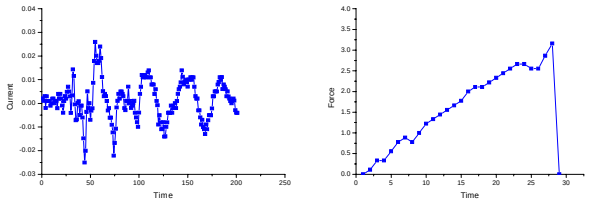

Fig. 5 surge current & Magnetic Force Test

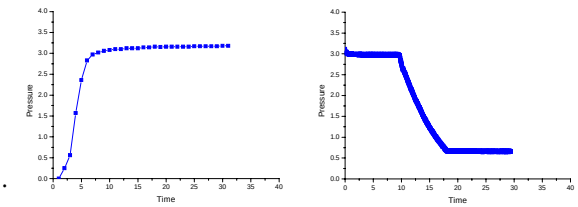

Fig. 6 Dynamic Response Test & Flow Capability Test

5. 절전회로 설계 및 시험

절전회로는 현재 개발품인 0.35Watt Micro Valve에 부착하여 소비전력을 0.1Watt로 낮출 수 있는 기술이다. Plunger와 Core의 초기 Stroke 0.3mm에서 발생해야 할 흡인력은 매우 크지만 Plunger와 Core가 붙었을 때(즉, Stroke 0mm)의 흡인력은 초기 Stroke 0.3mm일 때 보다 수 뉴턴(N) 작아도 기능을 발휘 하므로 흡인력에 관계가 큰 전류의 소모를 줄여도 안정적으로 동작한다. 이를 기반으로 절전회로를 설계하였다. 절전회로가 없는 경우 (V1, I1)에 24V 입력, 15mA의 전류가 코일에 흐르고, 절전회로가 있는 경우 (V2, I2)에 약 5mA의 전류가 코일에 흐르며, 소자값을 변화시켜 전류를 제어할 수 있다. Table 2는 전원을 공급하고 Plunger와 Core가 붙었을 때의 전류를 측정하여 소비전력을 계산한 것이며 0.345Watt에서 0.103Watt로 소비전력이 감소하는 것을 확인 할 수 있다.

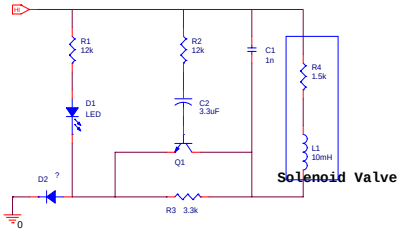

Fig. 7 Diagram of Power Saving Circuit

Table 2 Capacity of Power Saving Circuit

Case	전원(V)	전류(A)	소비전력(Watt)
24V	23	0.015	0.345
24V 절전회로 부착	23	0.0045	0.1035

6. 결론

본 연구에서는 절전형 공기압 Micro Valve의 특성해석과 실험을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 등가자기회로법을 이용하여 Micro Valve를 설계하였다.
2. Micro Valve의 Poppet이 고응답의 반응 속도 (3ms)로 Stroke 움직이도록 Solenoid에 충분한 전자력의 힘(3N)이 작용하며, yoke로 인하여 외부로 방출되는 자기력이 없음을 확인 하였다.
3. 개발한 Micro Valve(0.35Watt)에 절전회로를 부착하여 전원을 공급하고, Plunger와 Core가 붙었을 때(즉, Stroke 0mm)의 전류를 측정하여 소비전력을 계산하였고, 0.345Watt에서 0.103Watt로 소비전력이 감소하는 것을 확인 할 수 있었다.

후기

본 연구는 지식경제부 에너지절약과제인 “IT기반 첨단 공압제어밸브/실린더 시스템 개발” 과제 지원으로 연구되었으며 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참고문헌

1. B. W. Andersen, 1967, "The Analysis and Design of Pneumatic Systems", John Wiley & Son Inc., pp. 48~61.
2. W. L. Green, 1970, "The Poppet Valve-Flow Force Compensation," Proceedings of Fluid Power International conference, pp. S1~S6.
3. K. Kakano, H. Watanabe and G. Mao-ving, 2000, "Experimental Study for the Compensation of Axial Flow Force in a Spool Valve", Journal of the Japan Fluid Power System Society, Vol. 18, No. 6, pp. 475~482.
4. Herbert C. Roters, Electromagnetic Devices, John Wiley & Sons, USA, 1995