

# 저소비 전력형 ISO 솔레노이드 밸브 특성 해석

전용식<sup>†</sup>, 주민진\*, 오영철\*, 김동수\*\*

## Characteristic Analysis of Low Consumption Power ISO Solenoid Valve

Y. S. JEON<sup>†</sup>, M. J. JU\*, Y. C. OH\*, D. S. KIM\*\*

**Key Words:** Solenoid (솔레노이드), Poppet (포핏), Magnetic Field(자기장), Flow Field (유동장), Finite Element Method(유한요소법), Stroke(스트로크)

### Abstract

In this study, A special quality analysis and experiment for low power consumption type pneumatic ISO Solenoid valve was performed. And flow characteristics of the ISO Solenoid valve by stroke change was numerically investigated. As a result, it is shown that magnetic force(2.4N) is exerted enough to move poppet with 0.3mm stroke with 0.01 seconds of response time, and that there is no magnetic force emitted by yoke.

### 1. 서론

#### 기호설명

- $\Phi$  : 자속(Magnetic flux)
- $R$  : 코일 저항(Resistance)
- $N$  : 권선수(number of turns)
- $U$  : 전원 전압(source voltage)
- $F_m$  : 자기력(magnetic force)
- $x_1, x_2, x_3, x_4$  : 상태 변수(변위, 속도, 자속)
- $g$  : 공극(air gap)
- $K_s$  : 스프링 상수
- $A$  : 자로의 면적
- $m$  : 밸브 및 아마추어 질량
- $u$  : upper

ISO Solenoid Valve는 최근 컴퓨터나 각종 제어 기술의 발달에 따라 정밀제어가 가능하며 반도체 칩 마운터, 전자제품 생산라인, 베어링 자동이송 라인, 사출성형기, 피로 및 진동시험기 등 그 응용범위를 넓혀가고 있다. 특히 최근에 반도체산업 등 기술 집약적인 공정의 개발에 있어서 핵심 기술로 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 ISO Solenoid Valve 밸브의 수치 해석적 방법인 등가자기회로법을 유한소법적인 설계를 통해 최적 설계를 도모하고자, 상용 해석 프로그램인 Maxwell을 이용하여 Solenoid를 Modeling 및 동특성, 정특성 해석을 통해 최적 설계의 타당성을 증명하였다.

또한, 개발한 ISO Solenoid Valve에 에너지 절약을 위해 0.35Watt ISO Solenoid Valve에 절전회로를 부착하여, 소비전력을 0.1Watt로 낮출 수 있는 회로를 설계하였다.

---

<sup>†</sup> †(주) 팜 코 기술연구소

E-mail : ys757@naver.com

TEL : (054)745-7102 FAX : (054)745-7104

\* (주) 팜 코 기술연구소

\*\* 한국기계연구원 나노기계연구본부

## 2. ISO Solenoid Valve 구조 및 작동원리

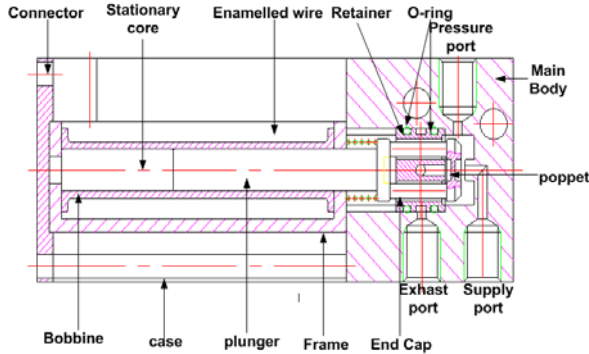


Fig. 1 Schematic Diagram of ISO Solenoid valve

Fig. 1은 ISO Solenoid Valve의 구성도를 나타내며, ISO Solenoid Valve의 주요구성 요소는, 압축 공기의 방향을 제어하는 Poppet, Plunger, Stationary Core와 Spring, 누설을 차단하게 해주는 O-ring 및 gasket 등이 있다.

ISO Solenoid Valve의 동작원리는, Solenoid의 통전 시에는 전자석의 힘에 의해 Poppet을 전진하게 되면, Supply Port를 통해 Pressure Port로 압축 공기가 흐르게 된다. Solenoid 비통전 시에는 Spring Force으로 Poppet을 후진시켜 Supply Port가 닫히게 되고 Exhaust Port로 배기되어 고속으로 왕복 운동하게 된다.

설계된 ISO Solenoid Valve의 설계사양 및 성능 제원을 Table. I에 나타낸다.

Table I Design Specification

Item	Value	Unit
Supply Pressure	3	bar
Supply Voltage	24	V
Electric Power	0.35	W
Port	3	mm
Stroke	0.3	mm
Coil Turn Number	6,500	turn
Coil Diameter	0.04	mm
Coil Resistance	1.5	kΩ
Response Time	2	ms
Temperature Rise Value	50	°C
Magnetic Force	4.3	N
Spring Constant	0.015	N/mm

## 3. ISO Solenoid Valve 이론 및 해석

### 3.1 ISO Solenoid Valve 설계이론

ISO Solenoid Valve의 핵심기술은 Solenoid와 Poppet으로 분류되며, Solenoid의 경우 자장해석이 중요하다, Solenoid에 의해 발생하는 흡인력  $F$ 는 식(1)과 같다. [2]~ [3]

$$F = \frac{B_g^2 S}{2\mu_0} = \frac{10^7}{8\pi} B_g^2 S [N] \quad (1)$$

여기서,  $B_g$  는 영구자석에 의한 공극자속밀도,  $\mu_0$  는 투자율이다.

식(1)로부터 가동자 단면적  $S$ 를 구하면 식(2)와 같다.

$$s = \frac{8\pi \times 10^7 \cdot F}{B_g^2} \quad [m^2] \quad (2)$$

가동자의 반경  $r_1 = \sqrt{(2\mu_0 F) / \pi B_g^2}$  이며, 기자력  $U$ 는 식 (3)과 같다

$$U = NI = \frac{B_g l_g}{\mu_0} + \sum H_i l_i \quad [A] \quad (3)$$

코일 공간을 결정하는 치수  $h$  와  $T$  온도 상승치  $\theta_f$  을  $\theta_{fi}$  로 나타내는 식(4)에 의해서 결정된다.

$$\theta_f = (I^2 R) / (2\lambda l_m h) \quad [^\circ C]$$

$$\theta_{fi} = (qp / 2\lambda\xi T) \cdot (NI / h)^2 \quad [^\circ C] \quad (4)$$

여기서,  $\theta_f$  는 최종온도 상승치 이고, 는 연속 특정온도 상승치 이고, 는 코일 폭(  $h/\beta$  )이다. 식(4)로부터 코일의 높이  $h$  는 식(5)와 같다.

$$h = 3 \sqrt{\frac{q\beta p U^2}{2\lambda\xi\theta_f}} \quad (5)$$

여기서,  $q$  는 시간정격 이고,  $P$  는 동선저

항률 이고,  $\lambda$  는 코일 열 방산계수 이고,  $\xi$  는 권선의 점적율 이다.

코일의 내 외경으로  $r_1$ ,  $r_2$  을 결정해야 한다. 코일 내경  $r_1$  은 가동자 외경 + 코일의 유극 + Bobbin의 두께에 의해서 결정되며  $r_2 = r_1 + T$ , 전압식  $V=IR$ 로부터 식(6)으로 유도된다. [5]

$$V = \frac{4p(r_1 + r_2)NI}{d^2} \quad [V] \quad (6)$$

그러므로 코일선경 는 식(7)과 같이 구할 수 있다.

$$d = \sqrt{4p(r_1 + r_2) \cdot \frac{NI}{V}} \quad [mm] \quad (7)$$

따라서 코일의 층수  $m=T/d$  이며, 권선수  $N = ((h/d) - 1)m$  으로 결정된다.

온도상승을 위해서는 먼저 여자전류  $I_h$  를 구해야 한다. 코일의 평균길이  $l_m$  과 전장  $l_t$  은 식(8)과 같다.

$$l_m = \pi(2r_1 + T) \quad , \quad l_t = NI_m \quad (8)$$

코일의 저항(20°C) =  $l_t \times$  저항계수, 코일의 저항(100°C) =  $1.314 \times R_c$ , 여자전류  $I_h = V/R_h$ , 기자력  $U = NI_h$  이다. 따라서 온도상승은  $\theta_f$  에 의해서 결정된다.

### 3.2 ISO Solenoid Modeling 해석 결과

ISO Solenoid Valve의 Solenoid 부분을 해석하기 위하여 Fig. 2와 같이 Modeling하였으며, Solenoid에 의한 ISO Solenoid Valve의 정특성 및 동특성의 해석결과를 Figs. 3 ~ 6에 나타내었다.

Fig. 3은 시간-흡인력의 변화 곡선을 보이고 있다. 플런저의 이동이 완료된 시점에서 발생하는 흡인력은 약 1N 이며, 정상상태에서는 약 5 N까지 증가함을 보이고 있다. 따라서 플런저에 발생하는 흡인력이 스프링의 힘보다 충분히 크게 발

생됨을 알 수 있다.

Fig. 4는 ISO Solenoid Valve에 DC 24V의 전원이 공급된 후에 플런저의 변위를 보이고 있다. 플런저는 약 0.5ms의 delay 후에 이동을 시작했으며, 2 ms 후에 이동을 완료하였다.

Fig. 5는 시간에 따른 플런저의 속도를 나타내고 있다. 최대 속도는 약 0.55 mm/s 임을 알 수 있다.

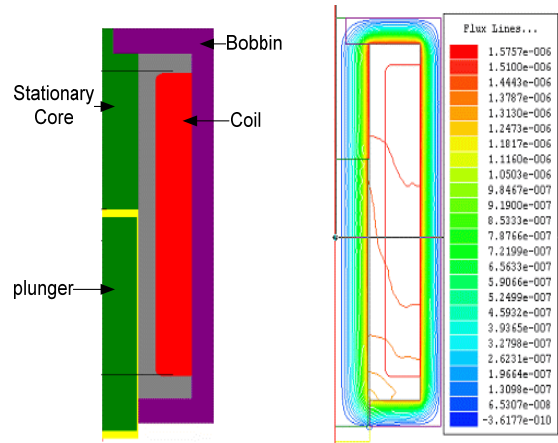


Fig. 2 Modeling of Solenoid

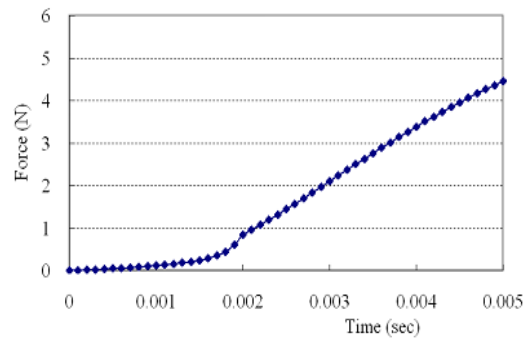


Fig. 3 Force vs. Time

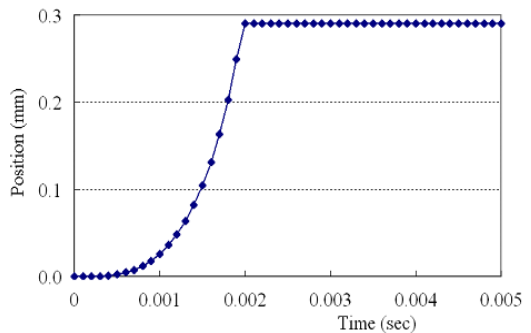


Fig. 4 Position vs. Time

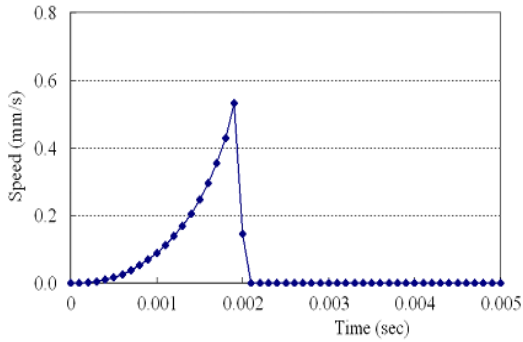


Fig. 5 Speed vs. Time

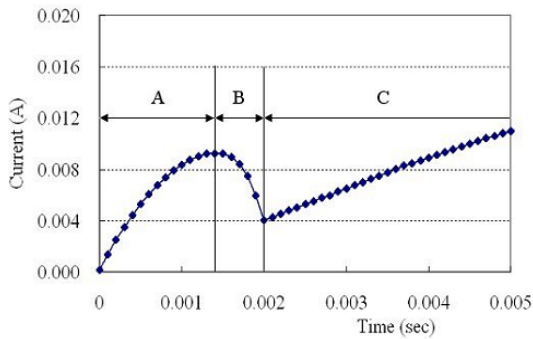


Fig. 6 Branch Current

전체적인 전류의 변화는 Fig. 6 에 표시한 바와 같이 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 있다.

#### 4. 절전회로 부착형 ISO Solenoid Valve

##### 4.1 절전회로 설계

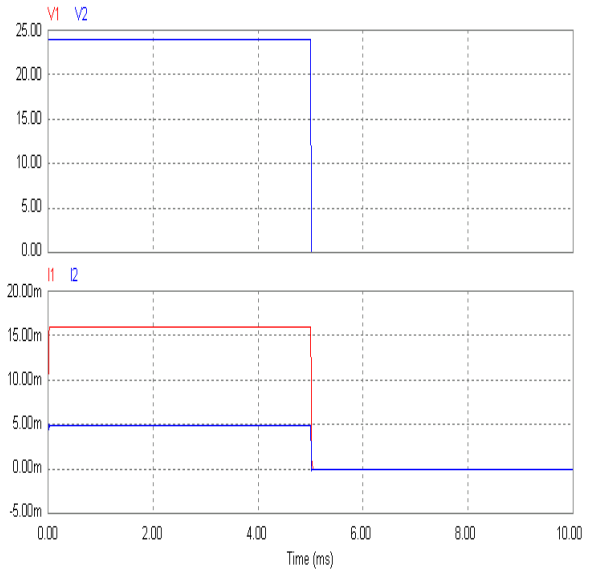
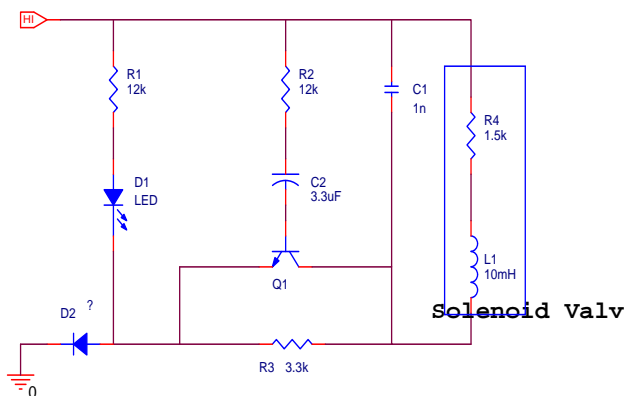


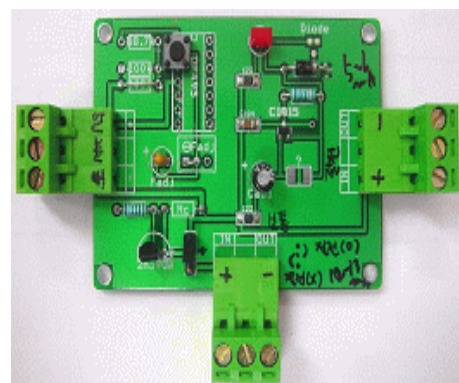
Fig. 7 절전회로도

절전회로는 현재 개발품인 0.35Watt ISO Solenoid Valve에 부착하여 소비전력을 0.1Watt로 낮출 수 있는 기술이다.

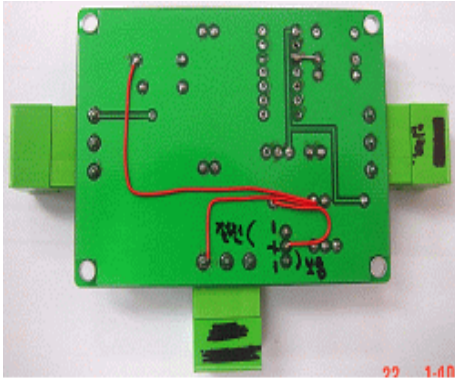
Plunger와 Core의 초기 Stroke 0.3mm에서 발생해야 할 흡인력은 매우 크지만 Plunger와 Core가 붙었을 때(즉, Stroke 0mm)의 흡인력은 초기 Stroke 0.3mm일 때 보다 수 뉴턴(N) 작아도 기능을 발휘 하므로 흡인력에 관계가 큰 전류의 소모를 줄여도 안정적으로 동작한다. 이를 기반으로 절전회로를 설계하였다.

절전회로가 없는 경우 (V1, I1)에 24V 입력, 15mA의 전류가 코일에 흐르고, 절전회로가 있는 경우 (V2, I2)에 약 5mA의 전류가 코일에 흐르며, 소자 값을 변화시켜 전류를 제어할 수 있다.

##### 4.2 절전회로 절전 기능 시험



(a) 절전회로 앞면



(b) 절전회로 뒷면

**Fig. 8** 절전회로

**Table III** 절전회로 부착 ISO Solenoid Valve 비교

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

아래 표는 전원을 공급하고 Plunger와 Core가 붙었을 때의 전류를 측정하여 소비전력을 계산하였다. 0.345Watt에서 0.103Watt로 소비전력이 감소하는 것을 확인 할 수 있다

## 5. 결론

본 연구에서는 저소비 전력형 ISO Solenoid Valve의 특성해석과 실험을 통하여 Valve의 성능을 평가하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 등가자기회로법을 이용하여 ISO Solenoid Valve설계하였고 설계 Program을 통해 설계된 Data와 제작된 ISO Solenoid Valve의 결과를 비교하여 최적 설계의 타당성을 검증하였다. 설계 결과와 개발한 ISO Solenoid Valve을 비교한 결과 크게 오차가 발생하지 않았다

2. ISO Solenoid Valve의 Poppet이 고응답의 반응속도 (3ms)로 Stroke(0.3mm)를 발휘되도록 Solenoid에 충분한 전자력의 힘(3N)이 작용하며, yoke로 인하여 외부로 방출되는 자기력이 없음을 확인 하였다.

3. 개발한 ISO Solenoid Valve(0.35Watt)에 절전회로를 부착하여 전원을 공급하고, Plunger와 Core가 붙었을 때(즉, Stroke 0mm)의 전류를 측정하여 소비전력을 계산하였다. 0.345Watt에서 0.103Watt로 소비전력이 감소하는 것을 확인 할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부와 에너지관리공단이 지원하는 에너지지원기술개발 사업 “고성능 On/Off Actuator 개발” 과제지원으로 연구되었으며, 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

## 참고문헌

- (1) W. L. Green, 1970, "The Poppet Valve-Flow Force Compensation," Proceedings of Fluid Power International conference, pp. S1~S6.
- (2) 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.
- (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.