

ISC 밸브용 테이퍼 플런저형 비례전자석에 관한 연구

송 창 섭*, 이 태 형**, 윤 장 상***

A Study on the Taper Plunger Type Proportional Electromagnet for ISC Valve

Chang-Seop Song*, Tae-Hyeong Lee**, Jang-Sang Yun***

ABSTRACT

On this study, magnetic force versus input currents is analyzed by modeling taper plunger type proportional electromagnet of ISC valve using the permeance method. And, the reliability of simulation is verified by comparing the experimental values with the calculated magnetic force. From the result of this study, it is found that the taper angles at plunger and core, the length of air gap between plunger and yoke are the primary factors in designing taper plunger type proportional electromagnet. Magnetic force is decreased as a whole according to increasing the air gap between plunger and yoke, and vice versa. But, the magnetic force is not proportional to current, when the air gap is very small. In case of decreasing the taper angle of plunger, the stroke range of plunger where magnetic force is proportional to current becomes farther from core.

Key Words : Proportional electromagnet(비례전자석), Magnetic flux(자속), Permeance(퍼미언스), Electromagnetic force(전자력), Duty rate(듀티율)

I. 서 론

자동차 엔진 제어시 엔진 각 부분의 센서들에서 나오는 신호는 ECU(Engine control unit)에서 처리되어 각 상태에 알맞은 제어를 하게 된다.

공회전(Idleing)시에는 엔진의 시동이 지속되는 한도내에서 연료의 소모가 가장 적을 필요가 있다. 현재 대부분의 자동차는 공회전시 드로틀(Throttle) 밸브의 각도를 조절함으로써 흡입공기량을 제어하고 있다. 이러한 제어방법은 정밀도가 떨어져 필요 이상의 공기를 연소실로 흘러 보내 연료 소모가 많았다.

이러한 문제점을 개선하기 위해서 드로틀 밸브의 양단에 바이패스 통로를 만들어 ISC 밸브(Idle speed control valve)를 장착하고, 공회전시에는 드로틀 밸브를 닫고 ISC 밸브로 공기량을 제어하며, 자동차 운행중에는 드로틀 밸브 쪽으로 공기를 흐르게 하는 제어방법이 사용된다. 이처럼 자동차의 흡기조절을 운전중과 공회전시로 나누어 제어하여 연비를 높이려는 노력이 선진 자동차 업체들 가운데 활발히 이루어지고 있다. 국내 자동차 업체의 대외 경쟁력 향상을 위해서 이러한 역할을 수행하는 ISC 밸브의 개발에 대한 연구가 필요하다. 본 연구는 ISC 밸브를 구성하는 듀티(Duty) 제어식

* 한양대학교 공과대학 정밀기계공학과(정회원)

** 한양대학교 정밀기계공학과 대학원

*** 서울산업대학 기계설계학과(정회원)

비례전자석을 해석하고, 테이퍼 플런저형 비례전자석의 해석시에 중요시되는 요소인 코어(Core)와 플런저(Plunger)의 테이퍼 각도, 플런저와 요크(Yoke) 사이의 공극의 변화에 대한 자기력의 변화를 해석하는데 그 목적이 있다.

II. 이론적 해석

2.1. 비례전자석의 해석

2.1.1 비례전자석의 구조와 작동원리

비례전자석은 입력 전류에 비례하고, 작동범위 내에서 플런저의 변위에 관계없이 일정한 자기력(Magnetic force)을 발생시킨다.

전자석은 전류를 가하면 자속이 발생하여 자속이 코어에서 플런저로 흘러 코어와 플런저, 플런저와 요크(Yoke) 사이의 공극(Air gap)에 자기 에너지가 축적된다. 솔레노이드에 가해진 전기 에너지는 Shell, 요크, 코어, 플런저가 형성하는 공극을 자화시키는 자기 에너지로 변환되고, 플런저의 변위에 따라 공극에 축적된 자기에너지가 변화된다.

플런저의 변위에 따른 이 자기에너지의 변화가 자기력으로 나타나는 것이다.

2.1.2 전자석의 해석

자속밀도(Magnetic flux density)를 B, 전류밀도(True current density)를 J_M , 자화 전류밀도(Magnetization current density)를 J이라하면 다음 관계식이 성립한다. (1, 2)

$$\text{div } B = 0 \quad \dots\dots (1)$$

$$\text{curl } B = \mu_0 (J + J_M) = \mu J \quad \dots\dots (2)$$

여기서, μ 는 매질의 투자율(Permeability)이며, μ_0 는 진공 또는 공기중의 투자율로서 그 값은 $4\pi \times 10^{-7} [\text{Wb/}$

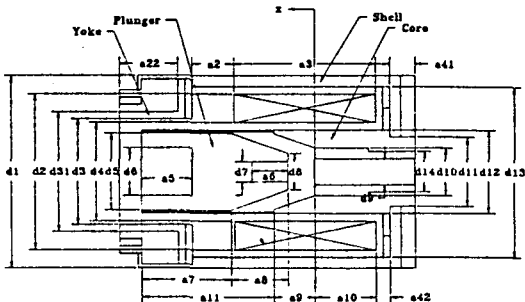


Fig. 2-1 Cross section of solenoid

AT · m)이다.

자속 밀도 B와 자기장의 세기(Magnetic density) H 사이에는 $B = \mu H$ 의 관계가 성립하므로 식(2)의 양변을 μ 로 나누고 Stoke's theorem을 적용하면 식(3)을 얻게 된다.

$$\int_C H \cdot dl = \iint_S \text{curl } H \cdot ds = \iint_S J \cdot ds = N I$$

그런데, 자속밀도 B는 자속(Magnetic flux) ϕ 를 자속이 통과하는 면적 S로 나눈 값이므로 식(3)은 다음과 같이 변형될 수 있다.

$$\phi \int \frac{dl}{\mu S} = N I = \phi R_I \quad \dots\dots (4)$$

식(4)에서 R_I 는 자기저항이며, 그 역수인 $1/R_I$ 를 자기퍼미언스(Magnetic permeance)라 정의하고 P로 표시한다. 따라서, 퍼미언스 P는 다음과 같다.

$$P = \frac{1}{\int \frac{dl}{\mu S}} = \frac{\mu S}{l} \quad \dots\dots (5)$$

Fig. 2-1의 전자석은 Fig. 2-2와 같이 자로가 형성된다고 생각하고, 아래와 같은 가정하에 자기력을 구하고 전류의 크기 및 플런저의 변위가 자기력에 미치는 영향을 규명한다.

- (1) 자속은 코어에 설치된 비자성체인 황동 베어링과 비자성체인 금속인 Rod를 통과하지 못한다.
- (2) 황동 플런저 Guide는 두께가 얇으므로 공기 투자율 μ_0 와 같다.
- (3) 코일(Coil)을 둘러싼 모든 절연물질은 공기 투자율 μ_0 와 같다.
- (4) 자속은 전체의 자기저항이 최소로 되도록 분포한다.
- (5) 전자석의 모든 부분은 축대칭이다.

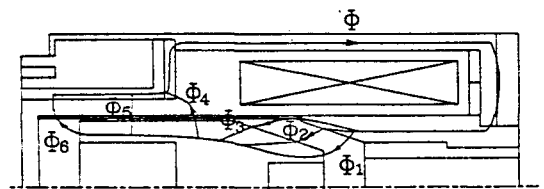


Fig. 2-2 Magnetic flux path through the electromagnet

공극에서 소모되는 기자력이 일정한 경우, 플런저의 변위에 따른 공극에서의 자기에너지의 변화량 dW 는 식(6)과 같이 표시된다.

$$dW = \frac{1}{2} U_a \cdot d\phi \quad \dots\dots\dots (6)$$

여기서, U_a 는 공극에서 소모되는 기자력, $d\phi$ 는 플런저 변위에 따른 자속의 변화량이다.

공극에서의 자기에너지의 변화량은 플런저의 변위에 따라 자기력으로 나타나므로 dW 는 식(7)로 나타낼 수 있다.

$$dW = F_{mag} \times (-dx) \quad \dots\dots\dots (7)$$

공극에서 $U_a = \phi/P$ 이므로 식(8)로 나타낸다.

$$d\phi = U_a \cdot dP \quad \dots\dots\dots (8)$$

식(7)과 식(8)을 식(6)에 대입 정리하면 플런저와 공극에서 발생하는 자기력은 식(9)와 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{mag} &= -\frac{1}{2} U_a \frac{d\phi}{dx} \\ &= -\frac{1}{2} (U_a)^2 \frac{dP}{dx} \quad \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

자기회로에서 공극이 n 개 존재하는 경우 식(9)는 다음과 같이 변형된다.

$$F_{mag} = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (U_{a_i})^2 \frac{dP_i}{dx} \quad \dots\dots\dots (10)$$

2.1.3 퍼미언스의 계산

Fig. 2-1의 제원을 갖는 전자석에서 공극에서의 퍼미언스는 Fig. 2-3과 같이 플런저의 위치에 대한 함수로 구해진다. (3, 4)

$$\begin{aligned} P[1] &= 4\mu_0 \times \left\{ \frac{d8-d7}{2} + gap \right. \\ &\quad \left. - \sqrt{gap \times \left[\frac{d8-d7}{2} + gap \right]} \right\} \\ &\quad \times \log \left[\frac{d8-d7}{2 gap} + 1 \right] \\ P[2] &= 1.65\mu_0 \times (d8 + 2x \sin \theta \cos \theta \\ &\quad - g1 \times \sin \theta) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P[3] &= 2\pi\mu_0 \times \frac{d8/2+(a9-x) \times \tan \theta / 2}{(a8-a9+x) \times \sin \theta + g1} \\ &\quad \times \left[\frac{a9}{\cos \theta} - (a8-a9+x) \times \cos \theta \right] \end{aligned}$$

$$P[4] = 1.65\mu_0 \times (d11 + x \sin \theta \cos \theta - g1 \times \sin \theta)$$

$$\begin{aligned} P[5] &= 4\mu_0 \times \left\{ \frac{d8+(a9-x) \times \tan \theta}{2} \right. \\ &\quad \left. + \sqrt{gap \times \left[\frac{d13-d12}{2} + gap \right]} \right\} \\ &\quad \times \log \left[\frac{d13-d12}{2 gap} + 1 \right] \end{aligned}$$

$$P[6] = 1.65\mu_0 \times (d3 - g2)$$

$$P[7] = \pi\mu_0 \times \left[d5 + \frac{g2}{2} \right] \left[\frac{Lin + x}{g2} \right]$$

$$P[8] = 1.65\mu_0 \times (d3 - g2)$$

$$\begin{aligned} P[9] &= 4\mu_0 \times \left\{ \frac{d3}{2} \right. \\ &\quad \left. - \sqrt{g2 \times \left[\frac{d3 - d6}{\pi} \right]} \right\} \\ &\quad \times \log \left[\frac{d3 - d6}{\pi g2} \right] \end{aligned}$$

여기서, $\theta = \tan^{-1} \left[\frac{d11-d10}{2a9} \right]$,

$$g1 = \frac{d10-d8}{2} \cos \theta, \quad g2 = \frac{d3-d5}{2},$$

$gap = g1 + x \cos \theta$ 이다.

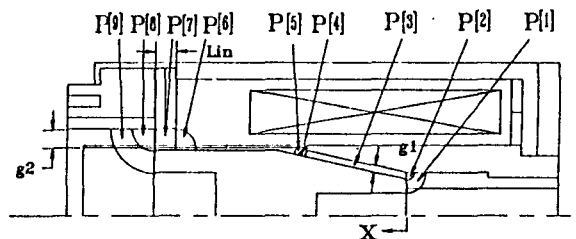


Fig. 2-3 Permeances in air gaps

Fig. 2-3에서 자기회로는 철심에서는 직렬, 공극에서는 병렬 연결되므로 P[1], P[2], P[3], P[4], P[5]의 합성값을 pA 표시한다. 한편, p[6], P[7], P[8], P[9]는 서로 병렬 연결되어 있으므로 합성치를 pB로 나타낸다.

전체적으로 pA와 pB가 직렬로 연결되어 전체 퍼미언스 pS를 구성한다.

$$pA = P[1] + P[2] + P[3] + P[4] + P[5] \dots\dots\dots (11)$$

$$pB = P[6] + P[7] + P[8] + P[9] \dots\dots\dots (12)$$

$$pS = \frac{pA + pB}{pA \times pB} \dots\dots\dots (13)$$

2.1.4 철심에서의 소모기자력

공극이 있는 자기회로에서, 외부에서 가해진 기자력(Magnetomotive force)은 철심을 자화시키고 공극내에서 자장(Magnetic field)을 만드는데 쓰인다.

그러므로, 전체의 자속을 ϕ 라 하면 자기회로의 기자력 방정식은 다음의 식(14)로 표시할 수 있다.

$$NI = \sum H[i] \times L[i] + \frac{\phi}{\sum P} = U_s + U_a \dots\dots\dots (14)$$

윗식에서 첫번째 항은 철심의 단면을 자화시키는데 필요한 기자력이고, 둘째항은 공극을 자화시키는데 필요한 기자력이다.

철심으로 소모되는 기자력은 철심 각 부분을 자속이 통과하는 길이 L(i)에 자기장의 세기 H(i)를 곱한 값을 합한 값이다. 자속밀도 B는 자속 ϕ 를 철심의 단면적 S로 나눈 값으로 Fig. 2-4에서 공극 각부분을 흐르는 자속을 ϕ_{ai} 라 할 때 자속 ϕ_j 와 철심 각부분의 자속밀도 B(i)는 다음과 같이 구할 수 있다.

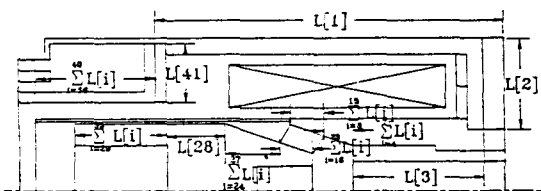


Fig. 2-4 Cross section of an electromagnet

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \phi_{a1} + \phi_{a2} , \quad \phi_2 = \phi_{a3} \\ \phi_3 &= \phi_{a4} + \phi_{a5} , \quad \phi_4 = \phi_{a6} \\ \phi_5 &= \phi_{a7} , \quad \phi_6 = \phi_{a8} + \phi_{a9} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } \phi &= \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 \\ &= \phi_4 + \phi_5 + \phi_6 \end{aligned}$$

$$B[1] = \frac{\phi}{\pi (d1^2 - d2^2) / 4}$$

$$B[2] = \frac{\phi}{a41 \times \pi \times (d1+d13+d4+d2) / 4}$$

$$B[3] = \frac{\phi}{\pi (d12^2 - d14^2) / 4}$$

$$B[i+3] = \frac{i \times \phi_1 / 4}{\pi [d12^2 - (d10 + x \sin \theta + \phi_2 + \phi_3 \times (2 \cdot i - 1) / 8)^2] / 4} , \quad (1 \leq i \leq 4)$$

$$B[i+7] = \frac{(9 - i)}{\pi [d12^2 - (d10 + x \sin \theta \times \phi_2 / 8 + \phi_3 + (a9 - x) \sin \theta (2 \cdot i - 1) / 16)^2] / 4} , \quad (1 \leq i \leq 8)$$

$$B[i+15] = \frac{\phi_1 + i}{\pi [(d8 + (a9 - x) \sin \theta \times \phi_2 / 8 \times (2 \cdot i - 1) / 16)^2 - d7^2] / 4} , \quad (1 \leq i \leq 8)$$

$$B[i+23] = \frac{\phi_1 + \phi_2}{\pi [d8 + (a9 - x) \sin \theta + i \times \phi_3 / 4 \times (d5 - (d8 + (a9 - x) \sin \theta) \times i / 8)^2 / 4} , \quad (1 \leq i \leq 4)$$

$$B[28] = \frac{\phi}{\pi d5^2 / 4}$$

$$B[29] = \frac{\phi}{\pi (d5^2 - d6^2) / 4}$$

$$B[i+29] = \frac{(6 - i) \times \phi_5 / 5 + \phi_6}{\pi (d5^2 - d6^2) / 4} , \quad (1 \leq i \leq 5)$$

$$B[35] = \frac{\phi_6}{\pi (d3^2 - d31^2) / 4}$$

$$B[i+35] = \frac{i \times \phi_5 / 5 + \phi_6}{\pi (d3^2 - d31^2) / 4} ,$$

$$(1 \leq i \leq 5)$$

$$B[41] = \frac{\phi}{a21 \times \pi \times (d1+d13+d4+d12)/4}$$

철심 각 부분의 자속밀도 B[i]에 대한 자기장의 세기 H[i]값은 Fig. 2-5의 자화곡선(Magnetization curve)에서 얻을 수 있다.

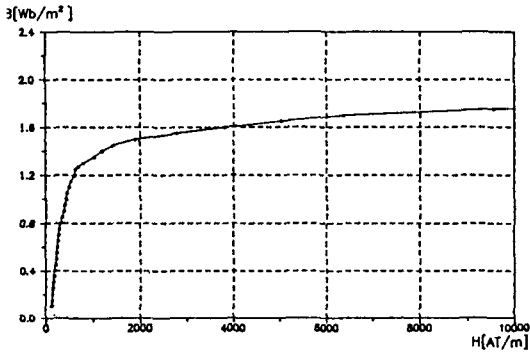


Fig. 2-5 Magnetization curve of cold drawn carbon steel annealed

철심에서 소모되는 기자력은 아래 식(15)와 같이 구할 수 있다.

$$U_s = \sum_{i=1}^{41} H[i] \times L[i] \dots \dots \dots (15)$$

- L[1] = (a1+a2+a3+a4)/4 ,
- L[2] = (d1+d13-d4-d12)/4
- L[3] = a4 + a41/2 + a10 ,
- L[i] = x/4 , (4 ≤ i ≤ 7)
- L[i] = (a9 - x)/8 , (8 ≤ i ≤ 23)
- L[i] = (a8 - a9 + x)/4 , (24 ≤ i ≤ 27)
- L[28] = a7 - a5 ,
- L[29] = a5 - Lin - x
- L[i] = (Lin + x)/5 , (30 ≤ i ≤ 34)
- L[35] = a22 + a21 - (Lin + x)
- L[i] = (Lin + x)/5 , (36 ≤ i ≤ 40)
- L[41] = (d1 + d13 - 2 × d3)/4

2.1.5 자기력의 계산

Fig. 2-3에서 공극 1, 2, 3, 4, 5는 서로 병렬 연결되어 있으므로, 각 공극을 통과하는 자속 ϕ_{ai} 는 퍼미언스 크기에 비례하고, 기자력 U_{ai} 는 모두 같다. (5, 6)

$$\phi_{ai} = \frac{P[i]}{pA} \phi , U_{ai} = \frac{\phi}{pA} ,$$

$$(1 \leq i \leq 5) \dots \dots \dots (16)$$

공극 6, 7, 8, 9에서도 같은 방법으로 ϕ_{ai} 와 U_{ai} 를 구할 수 있다.

$$\phi_{ai} = \frac{P[i]}{pB} \phi , U_{ai} = \frac{\phi}{pB} , (6 \leq i \leq 9) \dots \dots \dots (17)$$

식(16)과 식(17)을 식(10)에 대입하면 아래의 식(18)을 얻을 수 있다.

$$F_{mag} = - \frac{1}{2} \phi^2 \left[\frac{1}{pA^2} \sum_{i=1}^5 \frac{dP[i]}{dx} + \frac{1}{pB^2} \sum_{i=6}^9 \frac{dP[i]}{dx} \right] \dots \dots (18)$$

식(18)에서 F_{mag} 는 플런저의 변위에 대한 퍼미언스와 그 미분값을 계산하고 공급 기자력에 대한 자속 ϕ 를 구하면 계산할 수 있다. 이때 자속 ϕ 는 시행오차법을 통하여 구한다.

III. 실험 및 시뮬레이션 결과 고찰

3.1 비례전자석의 성능실험 및 결과

본 실험은 ISC 밸브의 자기력을 해석하기 위한 실험으로서, 가정 자료법에 의한 전자석의 퍼미언스 해석과, 이 실험 결과를 이용하여 ISC 밸브내의 플런저 작동 특성을 규명하는데 의의를 두고 있다.

이 실험의 주요 목적은, 플런저의 위치를 임의로 선정하였을 때 그 순간마다 정적인 힘을 검출하여 컴퓨터 시뮬레이션과 비교하고, 자기력의 주요결정 요소인 자기 퍼미언스의 이론적 해석의 타당성을 검증하는 것에 있다.

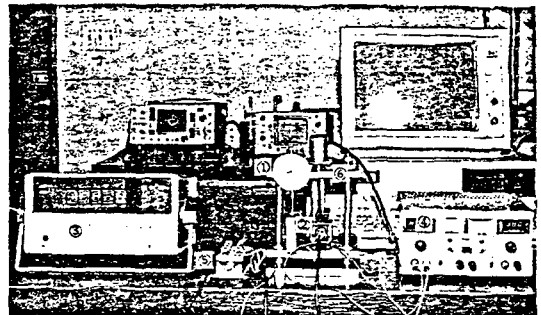


Fig. 3-1 Overview of a experimental equipment

Table 3-1과 같은 제원을 갖는 비례전자석을 Fig. 3-1의 실험장치를 이용하여 자기력 특성 실험을 행한 결과는 Fig. 3-2와 같다.

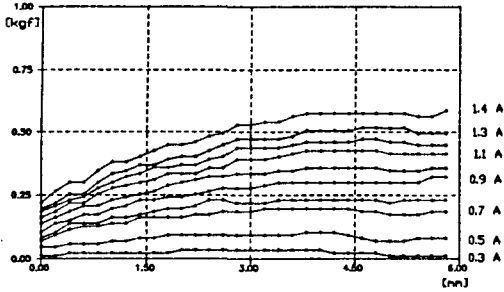


Fig. 3-2 Experimental results of solenoid force

Table 3-1. Parameters of linear solenoid

N	895 turn	θ	11.3°
R	9.6 Ω	L	17.5 mH
g1	25.0 mm	g2	1.4 mm
Lin	3.3 mm	a1	36.3 mm
d1	30.0 mm	a2	2.5 mm
d2	25.0 mm	a21	3.1 mm
d3, d4	14.5 mm	a22	6.8 mm
d31	16.5 mm	a3	24.5 mm
d5	11.7 mm	a4	1.6 mm
d6	7.0 mm	a41	4.5 mm
d7	4.5 mm	a5	10.0 mm
d8	7.3 mm	a6	6.5 mm
d9	4.5 mm	a7	13.0 mm
d10	8.0 mm	a8	12.0 mm
d11	11.0 mm	a9	7.5 mm
d12	12.5 mm	a10	4.5 mm
d13	27.0 mm	a11	24.0 mm
d14	7.0 mm	a42	3.0 mm

3.2 시뮬레이션 결과

3.2.1 전류에 따른 자기력의 변화

Table 3-1의 제원을 갖는 비례전자석을 입력 전류 0.3A에서 1.4A까지, 플런저의 변위를 0.0mm에서 5.8mm까지 변화시키면서, '플런저의 위치에 따라 전자석에서 발생하는 자기력의 시뮬레이션 결과는 Fig. 3-3과 같다.

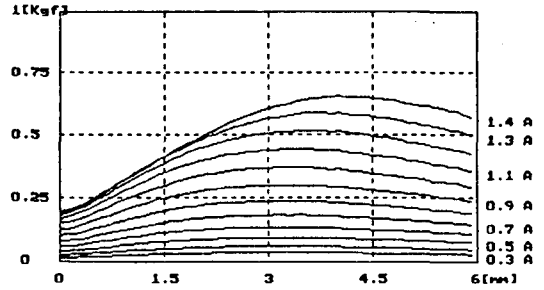


Fig. 3-3 Relation of electromagnetic force vs. current

시뮬레이션 결과, 전류에 비례하여 자기력 F_{mag} 가 증가하고, 플런저의 변위가 1.5mm에 4.5mm의 범위에서 좋은 비례직선성을 가진다.

플런저의 위치를 코어에서 3mm로 고정시켰을 때 전류에 대한 자기력의 시뮬레이션 결과와 실험치는 Fig. 3-4와 같다.

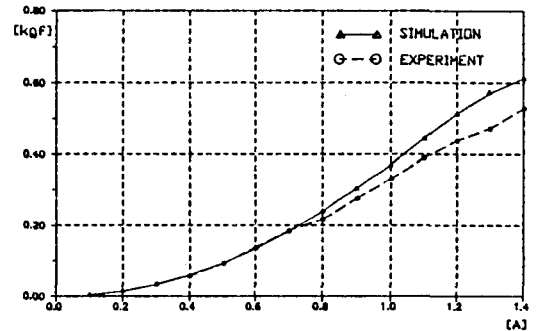


Fig. 3-4 Relation of electromagnetic force vs. current at $x=3\text{mm}$

3.2.2 듀티율에 따른 플런저의 변위

Fig. 3-4의 전류에 대한 자기력의 그래프를 기초로 하여 입력 듀티율(14.5 V, 160 Hz)에 대한 플런저 변위의 시뮬레이션 결과는 Fig. 3-5와 같다.

시뮬레이션 결과 입력 듀티율 20%에서 플런저의 변위가 변하고, 듀티율 20%와 90% 사이에서 입력 듀티율 대 플런저의 변위가 비례직선성을 가짐을 알 수 있었다. 듀티율 20% 이하에서는 입력 듀티율에 대한 자기력 F_{mag} 가 발생하나 밸브내의 스프링의 초기압축에 의한 힘보다 작으므로 플런저의 변위는 변하지 않는다. 듀티율 90% 이상이 되면 전자석이 포화되어 전류에 비례한 자속의 변화를 얻을 수 없으므로 플런저 변위의 변화가 감소하였다.

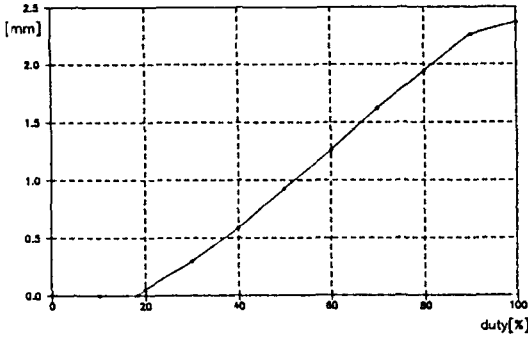


Fig. 3-5 Relation of displacement of plunger vs. duty rate

3.3 이론치와 실험치의 비교

시뮬레이션 결과를 실험치와 비교하면, 전류가 0.8A 이하에서 자기력은 1.5mm와 4.5mm 구간에서 실험치와 시뮬레이션 값이 일치하고, 0.8A 이상에서는 시뮬레이션 값이 실험치보다 약 10% 정도 크게 발생했다. 이는 전자석 해석시에 세운 가정이 실제의 값과 약간 차이가 있기 때문에 0.8A 이상의 전류가 흐를 때에는 이론적인 자속이 실제의 자속보다 커지는데 기인한다고 사료된다.

3.4 중요 변수에 대한 고찰

비례 전자석의 중요 설계변수로는 플런저의 테이퍼 각도 θ , 그리고 플런저와 요크 사이의 공극의 간격 g_2 등을 생각할 수 있다.

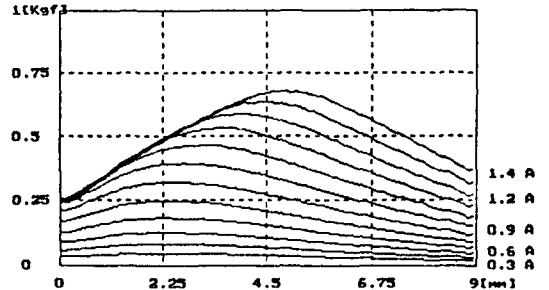
플런저와 요크사이의 공극 g_2 의 영향을 고려하기 위하여 설계된 공극의 간격 1.4mm에서 0.5mm 정도를 증감하여 시뮬레이션을 행한 결과는 Fig. 3-6과 같다.

시뮬레이션 결과에서 공극이 감소하면 자기력이 커지나 비례적인 힘을 발생하는 전류와 플런저의 스트로크 구간이 줄어들고, 공극이 커지면 발생하는 자기력의 크기는 작아지나 넓은 범위의 전류와 플런저의 스트로크의 영역에서 비례적인 자기력이 발생함을 알 수 있다.

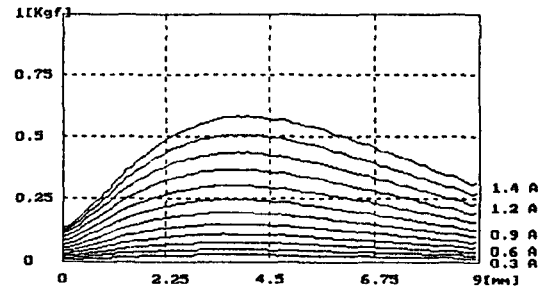
플런저의 테이퍼 각도의 영향을 고려하기 위해 플런저의 테이퍼 각도 θ 를 11.3°를 기준으로 하여 2°정도 증감해 9.3°와 13.3°에서 공극 g_2 의 변화에 따른 자기력의 시뮬레이션 결과는 Fig. 3-7과 같다.

Fig. 3-7의 (a), (b)에서 보듯이 테이퍼의 각도 θ 를 9.3°로 감소시켰을 경우, 플런저의 변위가 코어로부터 먼곳에서 비례적인 자기력이 발생하는 것을 알 수 있었

다. 그림 (a)와 (b)를 비교하면 공극 g_2 의 크기는 (b)에서 더 크므로 발생하는 자기력은 (a)보다 작고 넓은 범위의 전류와 플런저의 스트로크구간에서 비례적인 특성을 나타내고 있다. 반대로 테이퍼 각도 θ 가 13.5°인 경우, (c)와 (d)에서 보듯이 플런저의 변위가 코어에 가까운 위치에서 비례적인 자기력이 발생함을 알 수 있었다.

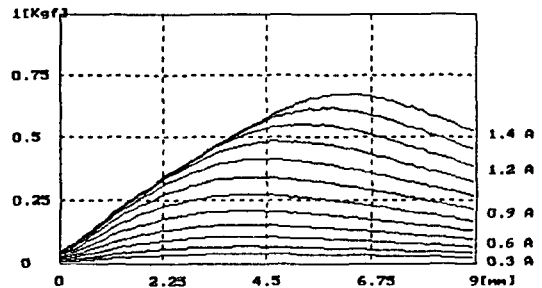


(a) $g_2=0.9\text{mm}$ 일 때
($d_3=13.5\text{mm}$, $d_{31}=15.5\text{mm}$)



(b) $g_2=1.9\text{mm}$ 일 때
($d_3=15.5\text{mm}$, $d_{31}=17.5\text{mm}$)

Fig. 3-6. Relation of electromagnetic force vs. air gap, g_2
($\theta=11.3^\circ$, $N=895$ turns)



(a) $\theta=9.3^\circ$, $g_2=0.9\text{mm}$ 일 때
($a_9=9.16\text{mm}$, $a_8=14.5\text{mm}$, $a_7=10.65\text{mm}$,
 $d_3=13.5\text{mm}$, $d_{31}=15.5\text{mm}$)

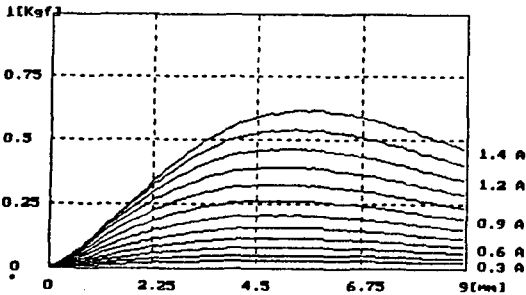
IV. 결 론

실험결과와 시뮬레이션 결과가 일치하므로 이 결과를 가지고 요구되는 사양을 만족시킬 수 있는 ISC 밸브용 테이퍼 플런저형 비례전자석을 설계할 수 있으며, 비례 전자석 해석으로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

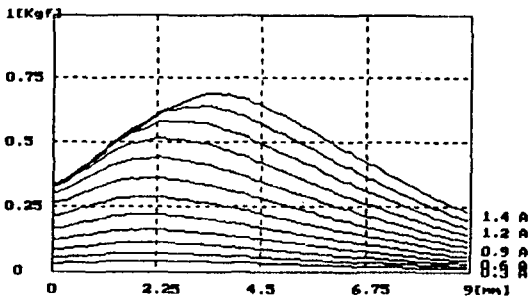
1. 전자석의 치수를 변경하여 시뮬레이션한 결과, 자기력에 중요한 영향을 주는 변수는 플런저와 요크사이의 공극의 크기와 플런저의 테이퍼 각도이다.
2. 플런저와 요크 사이의 공극을 크게하면, 전반적으로 자기력이 감소하고 공극의 크기가 작은 경우에는, 자기력은 증가하지만 전류에 비례적인 자기력이 발생하지 않는다. 따라서, 적당한 공극의 크기가 필요하다.
3. 플런저의 테이퍼 각도를 감소시키면, 입력 전류에 비례하고 플런저의 변위에 관계없이 일정한 자기력을 나타내는 플런저의 스트로크 구간이 코아로부터 멀리 위치하는 경향이 있다. 반대로 테이퍼 각도를 증가시키면, 코아로부터 가까운 구간에서 비례적인 자기력을 발생시키는 경향이 있다.

참고문헌

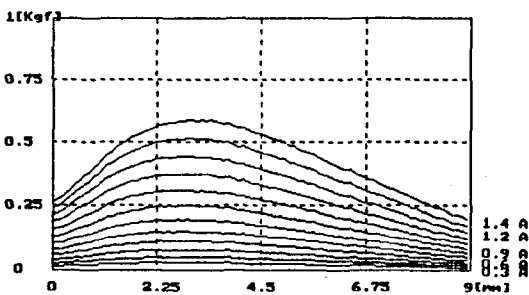
1. 송창섭, "전자석 유압 비례 복합 밸브에 관한 연구", KAIST 박사학위 논문, pp.1~21, 1980
2. 이대길, "비례복합밸브내의 솔레노이드의 특성에 관한 연구", KAIST 석사학위 논문, pp.1~70, 1977
3. Herbert C. Roters, "Electro magnetic devices" Jone Wiley and Sons, Inc., pp.196~335, 6th ed. 1941
4. 石黒敏郎, 坪島茂彦, 宮川澄夫 共著, "交直マグネットの設計と應用", pp.1~38, 1969
5. 김대환, "고속전자밸브의 해석에 관한 연구", 한양대학교 석사학위 논문, pp.8~13, 1990
6. 서종범, "비례전자석 유량제어밸브의 해석에 관한 연구", 한양대학교 석사학위 논문, pp.1~28, 1992



(b) $\theta=9.3^\circ$, $g_2=1.9\text{mm}$ 일 때
 ($a_9=9.16\text{mm}$, $a_8=14.5\text{mm}$, $a_7=10.65\text{mm}$,
 $d_3=15.5\text{mm}$, $d_{31}=17.5\text{mm}$)



(c) $\theta=13.3^\circ$, $g_2=0.9\text{mm}$ 일 때
 ($a_9=6.35\text{mm}$, $a_8=9.94\text{mm}$, $a_7=15.06\text{mm}$,
 $d_3=13.5\text{mm}$, $d_{31}=15.5\text{mm}$)



(d) $\theta=13.3^\circ$, $g_2=1.9\text{mm}$ 일 때
 ($a_9=6.35\text{mm}$, $a_8=9.94\text{mm}$, $a_7=15.06\text{mm}$,
 $d_3=15.5\text{mm}$, $d_{31}=17.5\text{mm}$)

Fig.3-7 Relation of electromagnetic force vs. plunger taper angle, θ