

PWM 방식 고속 전자석에 관한 연구

송 창 섭*, 양 해 정**, 송 성 배**

A study on the PWM Type High Speed Electromagnet

Chang-Seop Song*, Hae-Jeong Yang**, Sung-Bae Song**

ABSTRACT

This paper is concerned about a high speed electromagnet of Pressure control solenoid valve. Solenoid valve is controlled by means of Pulse width modulation. The magnetostatic field problem on a solenoid is numerically solved by the 2-D axisymmetric finite element method. And permeance method is adopted for analysing the static and dynamic property of solenoid part theoretically. In addition, in this study, experiments on solenoid part were performed in order to measure the magnetic force and plunger displacement. The numerical results coincided with the experimental results. As a result, the magnetic force has the linear relation with displacement of plunger and the primary factors on the performance of PWM type high speed electromagnet are coil resistance, plunger mass, and the length of air gap between plunger and core.

Key word : high speed electromagnet(고속 전자석), Finite element method(유한요소법), PWM control(펄스폭 변조제어), Permeance method(가정자로법), Pressure control solenoid valve(압력 제어 솔레노이드 밸브)

I. 서 론

운전의 용이성을 지향함에 있어서 변속 감도를 좋게 하기 위해서는 변속용 클러치 및 브레이크의 작동유압이 회전속도의 변화율에 따라서 항상 최적의 상태로 제어되어야 한다. 이 작동유압은 입력 듀티율에 따라 압력 제어 솔레노이드 밸브에 의해 제어되므로, 구동장치

로부터 사용되는 솔레노이드의 작동 특성을 규명해야 한다. 이 밸브는 펄스폭 변조 방식으로 유압을 제어하게 되는데 이러한 디지털 제어 방식은 자동차용 유압 제어 시스템이 급속히 전자제어화 되어감에 따라 전자 신호를 입력으로 하여 고속으로 밸브의 개폐 및 듀티 사이클이라고 불리는 밸브 개폐 구간의 비율을 변화시키므로서 출력압을 제어하는 방법이다. 이러한 제어 방

* 한양 대학교 공과대학 정밀기계공학과(정회원)

** 한양 대학교 대학원 정밀기계공학과(정회원)

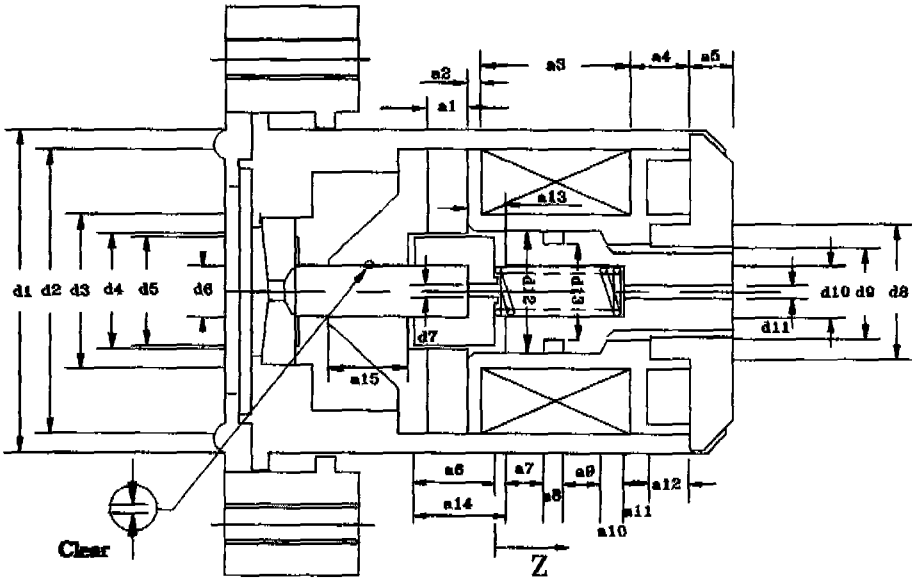


Fig. 1 Cross sectional view of solenoid valve

Table 1 Parameters of solenoid valve

N(coil turn)	303	turn	d13	0.007	m
R(coil)	2.9	Ω	a1	0.00296	m
plunger mass	0.00336	kg	a2	0.001	m
freq	35	Hz	a3	0.0103	m
K	1671.8	N/m	a4	0.00454	m
z_0 (pre_com)	0.0026	m	a5	0.00305	m
d1	0.025	m	a6	0.00553	m
d2	0.0224	m	a7	0.0025	m
d3	0.012	m	a8	0.002	m
d4	0.00897	m	a9	0.0032	m
d5	0.00861	m	a10	0.00065	m
d6	0.004	m	a11	0.002	m
d7	0.00115	m	a12	0.00312	m
d8	0.0114	m	a13	0.00239	m
d9	0.0074	m	a14	0.00583	m
d10	0.0044	m	a15	0.0075	m
d11	0.00118	m	gap1(Stroke)	0.0003	m
d12	0.0092	m	gap2	(d4-d5)/2m	
R cont	8.5	Ω	clear	0.0000005m	

식의 장점은 전자 펄스에 대응하는 빠른 작동을 하여 가능한 한 적은 전력으로 큰 유압 출력을 얻을 수 있으며, 비용이 저렴하고, 마이크로 컴퓨터와 잘 호환되며, 오염에 강한 것이다.^[1]

본 연구는 유한요소법을 적용하는 상용 ANSYS 패키지를 사용한 밸브의 정특성과 가정자료법(Permeance)을 이용한 밸브의 정특성 및 동특성을 해석하였으며, 솔레노이드의 각종 변수 변화에 따른 밸브 특성 변화를 용이하게 규명하여 각종 솔레노이드 밸브의 성능 분석 및 설계시 참고 자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

Fig. 1은 솔레노이드 밸브의 특성 해석을 위한 각 부분의 치수를 나타낸 것이며, Table 1은 솔레노이드 밸브의 제원을 나타낸 것이다.

II. 이론 해석

2-1 유한요소법에 의한 해석

2-1-1 지배 방정식

정자계 해석시 맥스웰 방정식으로부터 다음과 같이 2차원 축대칭 정자장의 지배 방정식을 구할 수 있다.^{[2][3]}

$$\frac{\partial}{\partial x} [v(B) \frac{\partial A}{\partial x} + v(B) \frac{A}{x}] + \frac{\partial}{\partial y} [v(B) \frac{\partial A}{\partial y}] = -J_s \quad (1)$$

2-1-2 벡터 포텐셜 방법의 적용.

지배 방정식의 해를 구하는 문제는 대단히 복잡하고 어렵기 때문에 포텐셜에너지 이론^[2]에 근거를 두어 다음과 같이 범함수(汎函數)를 구성한다.

$$x(A) = \int_{\Omega} [\int_0^B v(B) B \cdot dB] d\Omega - \int_{\Omega} A \cdot J_s d\Omega \quad (2)$$

이때의 경계 조건은 다음과 같다.

$$A_x = A_y = 0, J_x = J_y = 0, A_z = A_z(x, y) \quad (3)$$

해석영역인 Ω 를 유한요소로 나누고, 각 요소에 場(Field)문제의 근사적인 해를 포텐셜 함수 A의 Nodal value항으로 규정한다.^[6]

$$A(x, y) = N^T A_e \quad (4)$$

여기서, N:형상 함수(Shape function), A_e :Element nodal potential vector
식 (2)에 식 (4)을 대입, 변분원리에 의한 유한요소

법의 정식화 과정에서 범함수를 최소로 하는 전개 절점 방정식을 구한다.^[2] 이때 강자체체의 포화현상을 고려하므로 Newton-Raphson Method를 사용, 수렴해를^[3] 구하며 와전류(eddy current)의 영향은 무시한다.

2-1-3 흡인력(힘)의 계산

전 체적이 v 인 물체에 작용하는 전자력은 다음과 같다.

$$F_x = \frac{1}{\mu_0} \int_v \begin{bmatrix} T_{11} \\ T_{12} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} ds, F_y = \frac{1}{\mu_0} \int_v \begin{bmatrix} T_{21} \\ T_{22} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} ds \quad (5)$$

여기서,

$$T_{11} = B_x^2 - \frac{1}{2}|B|^2, T_{12} = B_x B_y,$$

$$T_{21} = B_x B_y, T_{22} = B_y^2 - \frac{1}{2}|B|^2$$

2-1-4 해석 방법

슬레노이드 부분의 축대칭 한 면을 165개의 영역으로 나누고 이를 다시 870개의 유한요소(Element)로

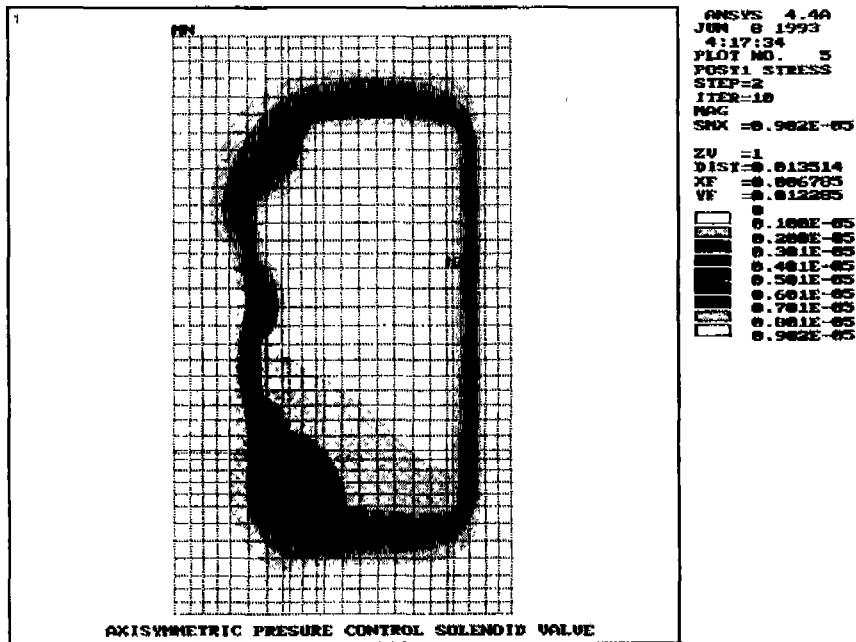


Fig. 2 Flux lines at stroke length of 0.3mm

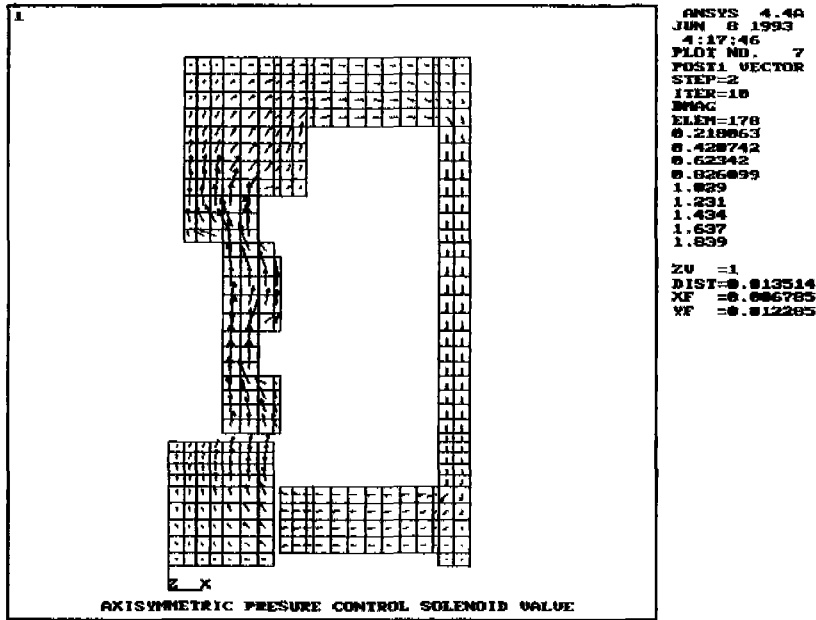


Fig. 3 Flux density in core and plunger at stroke length of 0.3mm

분할하여 상용 ANSYS 패키지를 사용 해석하였다. 이때 재질은 Cold drawn carbon steel, annealed의 B-H 데이터를 입력시켰다. 밸브 코일에 가해 주는 전류는 0.2[A]-1.2[A]까지, 플런저의 스트로크는 0.05-0.3[mm]까지로 하였다.

입력 전류가 1.2[A] 일 때 해석 결과는 다음과 같이 그래픽 처리할 수 있다.

Fig. 2는 밸브의 축대칭 한 면에서 자속의 크기가 같은 부분을 등고선 형식으로 표현한 것이며 오른쪽의 수치는 각 부분에서의 자속의 값이다. 코어, 플런저, shell에서의 자속밀도 크기를 Fig. 3에서는 벡터형식으로 표현한 것이며 자속의 흐름을 잘 알 수 있다.

2-2 가정자로법(permeance법)에 의한 해석.

2-2-1 전자기학적 해석

자기저항의 역수를 자기 퍼미언스(Magnetic permeance, p)라고 정의한다.^{[5], [6]}

$$P = \frac{1}{R} = \frac{\mu S}{l} \quad (6)$$

공급기자력은 코일의 권선수 N과 전류 I의 곱으로 표시되며, 소모기자력은 매질을 철심과 공기 두부분으

로 나누면 다음과 같이 표현된다.

$$NI = HL + \frac{\Phi_0}{P} = U_s + U_a \quad (7)$$

여기서, U_s : 철심에서의 소모 기자력, U_a : 공극에서의 소모기자력

(1) 공극의 퍼미언스 분포

플런저의 각 위치에 따른 퍼미언스는 Fig. 4와 같이 기하학적으로 구할 수 있다. 전체 퍼미언스 pS는 자기 회로와 전기회로의 상관 관계를 고려하면 식(10)과 같다.^{[5], [6]}

$$pA = p[1] + p[2] + p[3] + p[4] \quad (8)$$

$$pB = p[5] + p[6] + p[7] + p[8] + p[9] \quad (9)$$

$$pS = \frac{pA \times pB}{pA + pB} \quad (10)$$

(2) 철심의 소모기자력

철심의 전체 소모기자력은 식(11)과 같고 각 자속밀도값에 대한 자계강도의 값은 재료의 자화곡선(Magnetization curve)으로 부터 구할 수 있으며 Fig. 5

와 같이 자료가 형성된다고 가정하고 자속길이 $L[i]$ 를 계산한다.

$$U_s = \sum_{i=1}^{11} H[i]L[i] \quad (11)$$

2-2-2 자기 회로 방정식
전체 자기 회로 방정식은 다음과 같다.

$$NI = \sum H[i]L[i] + \frac{\phi_0}{\mu S} \quad (12)$$

철심과 공극에서의 소모기자력은 모두 자속 ϕ_0 의 함수이므로 외부 공급기자력과 일치하는 자속 ϕ_0 를 결정할 수 있고 이를 이용하여 전자력을 구하는 식을 유도할 수 있다.^[7]

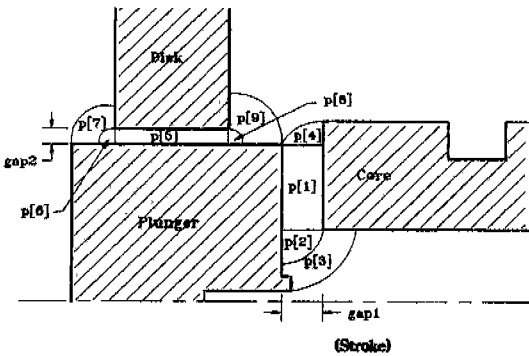


Fig. 4 Modeling of permeance in air gap

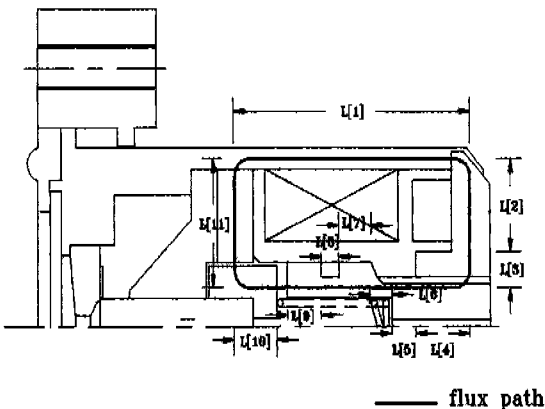


Fig. 5 Magnetic flux in electromagnet

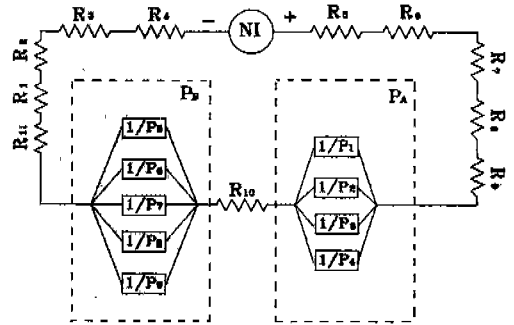


Fig. 6 An equivalent magnetic circuit for the electromagnet

$$F_{mag} = -\frac{1}{2} \phi_0^2 \left(\frac{1}{P_A^2} \sum \frac{dpi}{dz} + \frac{1}{P_B^2} \sum \frac{dpi}{dz} \right) \quad (13)$$

입력 신호에 따른 전자력 및 플런저 변위를 계산하려면 전자석의 코일 저항과 인덕턴스로 인한 전류를 계산하고, 운동 방정식에 의한 플런저의 변위와 서로 연결시켜 풀어야 한다.

Fig. 7은 입력 듀티 전압에 따른 솔레노이드 밸브의 전자력 및 플런저 변위를 구하는 순서도(Flow chart)이며, 제어장치(TCU)에서 나오는 듀티 신호는 고정된 전압과 주파수(ON 시간 중 초기 3.5[ms] 동안은 12[Volt], 그 이외에는 3.5[Volt], OFF시는 0[Volt]와 35[Hz]의 구동 주파수)를 갖게 되며 ON-OFF 간격을 조절하므로써 전자석의 전류를 제어하게 된다.

III. 실험 및 시뮬레이션 결과의 고찰

본 연구에서는 시뮬레이션 결과의 타당성을 검증하기 위해 전자력 측정 실험과 플런저 변위 측정 실험을 하였다. 또한 해석 결과를 토대로 전자석 구성인자들의 변화에 따른 밸브의 특성 변화를 살펴보았다.

3-1 전자력 및 변위 측정 실험

Fig. 8은 전자력 측정 실험 장치로서, 공급 전압에 의한 전자력이 로드셀로 전달되며 출력값을 스트레인 앰프와 A/D 컨버터를 통해 컴퓨터에 저장되며, 저장된 데이터를 캘리브레이션하여 전자력으로 환산한다.

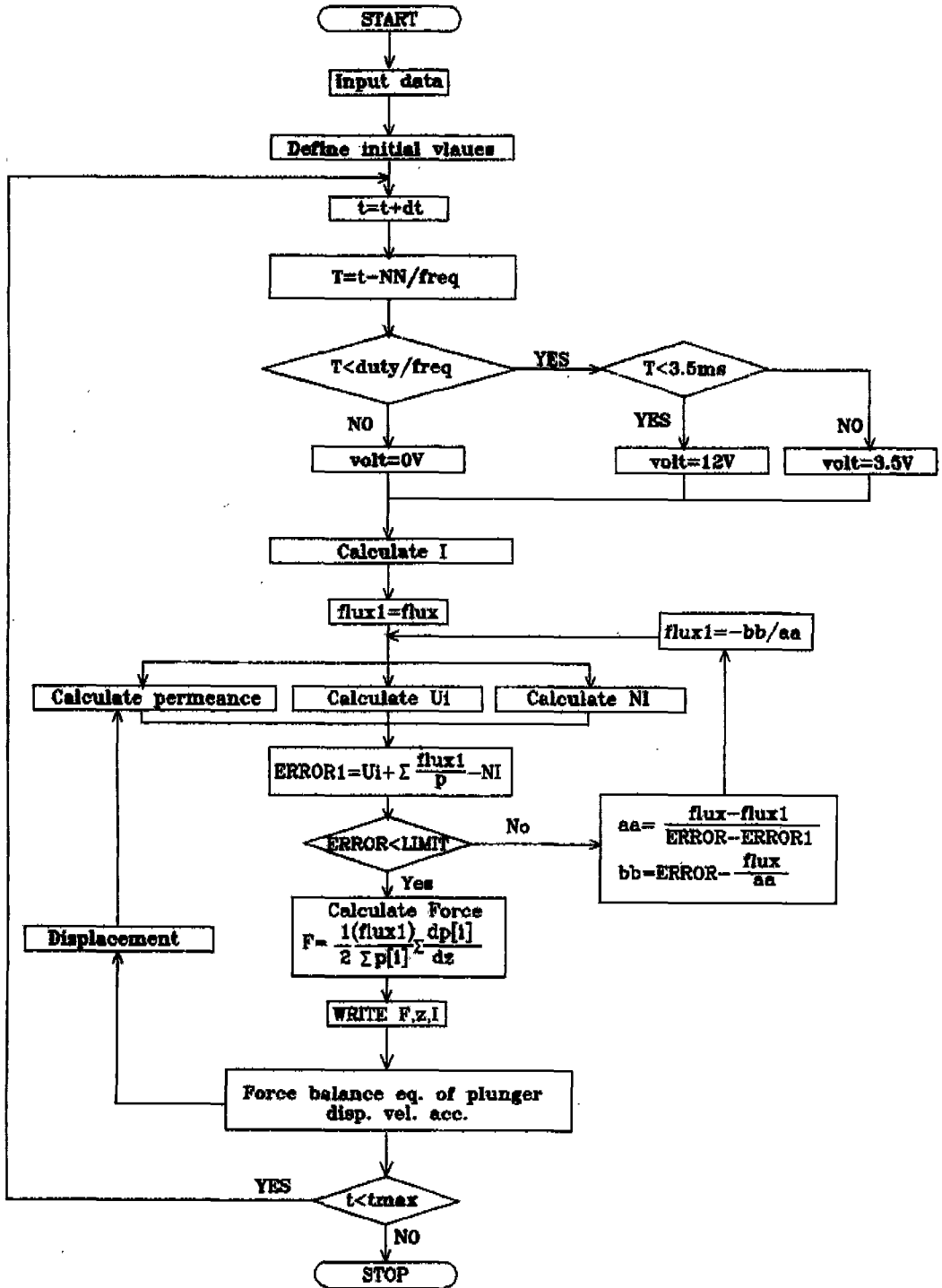


Fig. 7 A flow chart for calculation of electromagnetic force

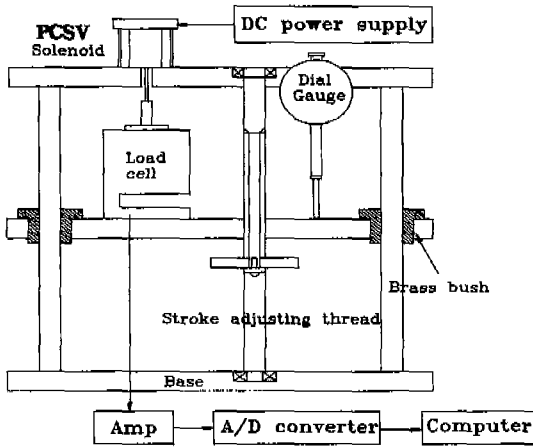


Fig. 8 Experimental apparatus for measuring electromagnetic force

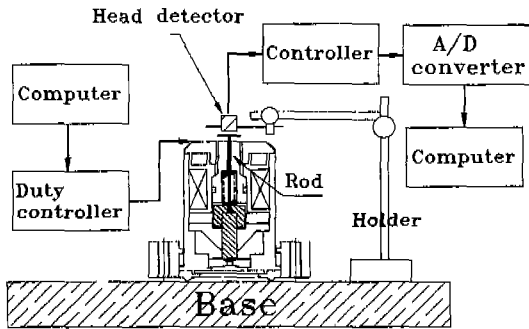


Fig. 9 Experimental apparatus for measuring valve stroke

Fig. 9는 플런저 변위 측정 실험 장치로서, 플런저에 연결된 황동로드와 변위계 검출 헤드를 약 1mm정도 띄운후 전자석에 듀티신호를 가한다.

이때 검출헤드에서 컨트롤러를 통한 전압 변화를 A/D 컨버터를 통해 데이터로 저장하고 이 값들을 캘리브레이션하여 변위로 환산한다.

3-2 실험 결과 및 시뮬레이션 결과의 고찰

Fig. 10은 스트로크가 0.3[mm]일 때 전자기력 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교한 것으로 잘 일치함을 볼 수 있다. Fig. 11은 듀티50[%]인 경우 시간에 따른 변위 측정 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다. 실험 결과에서 플런저가 OFF시 Seat와의 충돌력

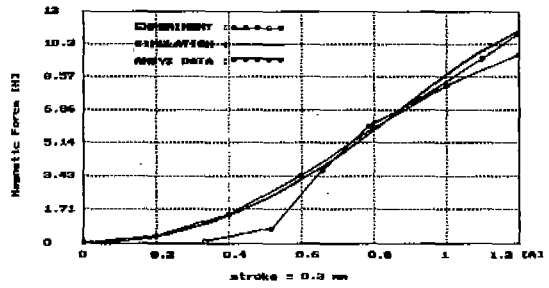


Fig. 10 Comparison of simulated results with experimental results at stroke, $z=0.3$ [mm]

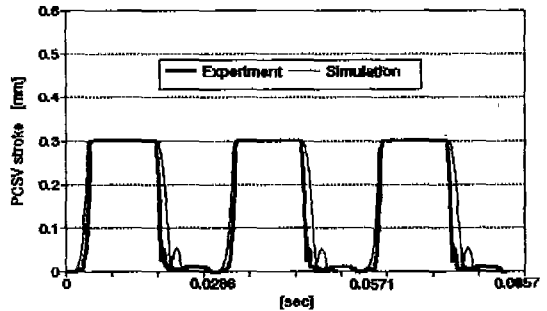


Fig. 11 Comparison of simulated results with experimental results at 50% duty rate

으로 인하여 미소변위가 되는 현상을 보이는데 시뮬레이션시에는 강체사이의 반발계수를 0.3으로 계산하였다.

Fig. 12는 입력전류를 0.2[A]에서 1.4[A]까지 0.2[A]씩 증가시켜 가면서 플런저의 위치에 따른 유한요소법과 가정자료법의 정자장 해석 결과의 비교로 전자기력 분포가 거의 일치함을 볼 수 있다. 전류가 증가함에 따라 생기는 차이는 두가지 해석 방법에서의 모델링 오차로 생각된다.

Fig. 13은 코일저항(2.9Ω)과 콘트롤러저항 및 도선저항(8.5Ω)을 포함한 전체 저항을 각각 11.4[Ω]에서 17.4[Ω]으로 2[Ω]씩 증가하였을 경우로 전기저항이 커지면 밸브의 응답성도 늦고, 공급전압이 일정하므로 전류량의 상대적 감소로 인하여 플런저의 ON 시간도 줄어든다는 것을 알 수 있다.

Fig. 14는 솔레노이드 밸브내의 플런저 질량을 각각 원래 3.36[g]보다 2배, 3배, 4배로 증가시켰을 경우의

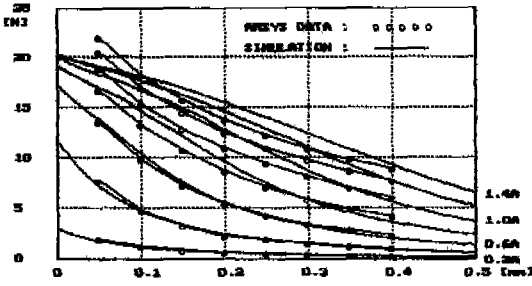


Fig. 12 Comparison of permeance method with finite element method for static magnetic field analysis

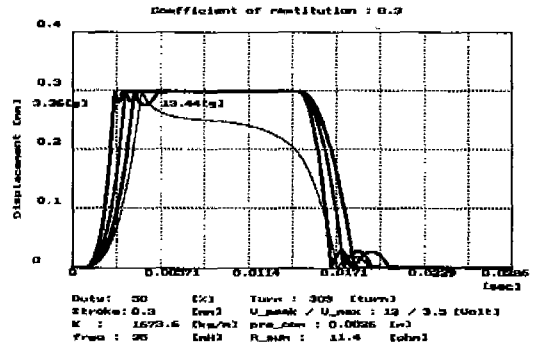


Fig. 14 Plunger displacement variation due to plunger mass

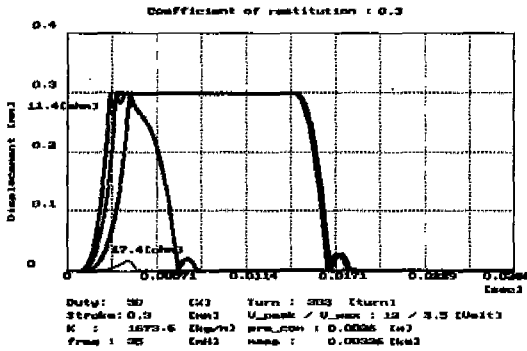


Fig. 13 Plunger displacement variation due to coil resistance

결과로 플런저의 질량이 증가할수록 밸브의 초기 ON 시 응답성이 늦어진다는 것을 알 수 있으며, 또한 밸브 질량이 원래보다 4배 이상이 될 경우 입력듀티에 따라 플런저의 ON-OFF가 비례적으로 움직이지 못함을 알 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 솔레노이드 밸브의 전자석 부분에 대한 자장 해석을 유한요소법과 가정자로법으로 수행하였고, 전자력 측정 및 플런저 변위 실험을 통하여 해석 결과의 타당성을 검토하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

① 유한요소법에 의한 정자장 해석 결과와 가정자로법에 의한 정자장 해석 결과가 잘 일치함을 알 수 있었다.

② 정자장 해석 결과를 살펴볼 때 플런저와 코어사이의 공극은 전자석의 전자력에 큰 영향을 미친다. 즉, 일정 전류에서는 공극이 클수록 전자력은 감소하며 공극이 일정한 경우에는 전류에 비례하여 전자력이 증가함을 알 수 있었다.

③ 밸브 플런저의 ON-OFF 동작은 입력 듀티율에 따라 잘 추종함을 알 수 있었다.

④ 전자석은 전기, 자기, 기계 시스템의 조합으로 성능에 영향을 미치는 인자들은 매우 많으나, 특히 고속 전자석을 사용한 밸브의 응답성에 영향을 미치는 인자는 플런저 무게와 스트로크, 스프링 상수, 코일의 저항을 줄일수록 향상됨을 알 수 있었다.

⑤ 고속 전자석의 특성에 영향을 미치는 여러 파라메타를 변화시켜 가면서 시뮬레이션 할 수 있으므로 각종 솔레노이드 성능 분석 및 설계에의 응용이 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Y. Okada, K. Matsuda, B. Nagai, "Application of a high speed solenoid actuator to linear hydraulic servo-mechanism"
2. 임달호, "전자계의 유한요소법", 동명사, pp.65-147, 1987.
3. "Magnetics Seminar Notes ANSYS, Rev4.3.", Swanson Analysis System, Inc.
4. "Magnetics for static field. Vol II.", Swanson Analysis System, Inc.

5. Herbert C. Roters, "Electromagnetic devices", Jone Wiley and Sons, Inc., pp. 196-335, 6th ed. 1941.
6. 石黒敏郎, 坪島茂彦外 共著 "交直 マグネットの設計の應用", pp.1-38, 1969.
7. 송창섭, "전자식 유압 비례 복합 밸브에 관한 연구" KAIST 박사 학위 논문, pp.1-21, 1980.
8. J.E van Oss Moog Inc "Magnetic analysis of solenoid", ANSYS conference., 1990
9. 최인호 외 3명, "솔레노이드 액츄에이터 전자기 시스템의 유한요소해석" 전기학회 논문집 40권 11호, 1991
10. 山本行雄 監修, "電磁界 解析のための 有限要素法", pp.1-23, 1986