

# 미끄럼 방지 제동장치용 솔레노이드 밸브의 모델링에 관한 연구

송창섭, \* 양해정 \*\*

## A Study on the Modeling of Solenoid Valve for Anti - lock Brake System

Chang-Seop Song \*, Hae-Jeong Yang\*\*

### ABSTRACT

Anti-lock Brake System has been developed to reduce tendency for wheel lock and improve vehicle control during sudden braking on slippery road surfaces. This is achieved by controlling the braking pressure, avoiding wheel lock, while retaining handling and brake performance. This paper is concerned about characteristics of a solenoid valve in hydraulic modulator for controlling brake pressure. First, it was modeling the electromagnet by the permeance method. Second, it was modeling the commercial Maxwell package program. And then, a experiment was performed in order to justify modeling. The result of modeling coincided with the result of experiment and commercial package program. As a result, these modelings will be able to use in analysis of dynamic characteristics of the solenoid valve for braking.

**Key Words :** electromagnet(전자석), Finite element method(유한요소법), PWM control(펄스폭 변조 제어), Permeance method(가정자로법), Flux(자속), Duty ratio(듀티율), Current probe amplifier(전류계)

### 1. 서 론

승용차 기술의 발전과 더불어 제동 시스템도 꾸준히 발전하여, 급제동의 경우가 아니면 최적의 제동력을 발생시켜, 균일한 노면조건에서는 yaw motion 이 없이 안정된 제동을 할 수 있게 되었다. 그러나, 차륜의 잠김 현상을 초래할 정도로 급제동의 경우 차량은 조향성

을 잃어버리고, 불안정한 운동을 하게 되며 제동거리도 길어지게 된다. 이런 결점을 보완하기 위해 개발된 것이 Anti-lock Brake System (ABS) 이며, 제동시 차량 각 바퀴의 슬립률을 최적으로 유지하여 차량 안정성을 유지하는 시스템으로써 ECU, Hydraulic Modulator, Speed sensor 로 구성되며 이중, 모듈레이터는 ECU 의 신호에 따라 각 바퀴의 제동압력을 증감시키

\* 한양 대학교 공과대학 정밀기계공학과 (정회원)

\*\* 한양 대학교 대학원 정밀기계공학과

는 기능을 하는 중요한 구성부품이다.<sup>(1)</sup>

모듈레이터의 작동은 차륜슬립이 제어되지 않는 통상 제동상태, 차륜 슬립이 과도할 때 제동압을 낮추기 위한 감압상태 및 제동압을 회복시키는 재증압상태로 구분되며, 이때 솔레노이드 밸브는 압력을 제어하기위해 적절한 듀티율(duty ratio)과 주파수를 갖는 펄스폭 변조(Pulse Width Modurate)방식으로 on - off 동작을 거듭하게 된다. 따라서, 솔레노이드 밸브를 사용한 유압 모듈레이터의 동적 과도 특성을 해석하기 위해서는 먼저 솔레노이드 밸브의 입력 전압에 따른 전자기력, 변위, 전류 특성에 대한 연구가 필요하다.

본 연구는, 기존의 3 위치 (Position) 솔레노이드 밸브 방식 ABS 를 크기와 비용을 줄여 혁신적으로 개선한 "2 Position type with FCV"<sup>(2)</sup> ABS 의 솔레노이드 밸브 특성을 유한요소법을 적용하는 상용 Maxwell 패키지 와 가정자로법 (Permeance법)을 이용하여 밸브의 정특성 및 동특성을 해석하였으며, 솔레노이드의 각종 변수 변화에 따른 밸브 특성 변화를 용이하게 규명하여 솔레노이드 밸브의 성능 분석 및 제동장치 유압시스템의 동적 특성에 대한 연구가 최적으로 진행되도록 하기 위한 밑바탕이 되는데 그 목적이 있다.

## 2. 미끄럼 방지 제동장치용 솔레노이드 밸브의 모델링

### 2.1 구조

Fig. 1 에 2 위치 PWM 솔레노이드 밸브의 내부 구조가 도시되어 있다. 가동철심(plunger) 과 고정철

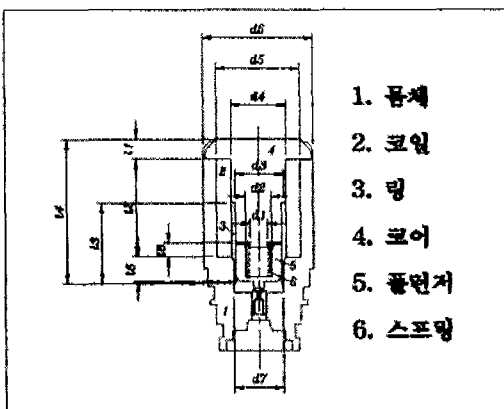


Fig. 1 Detail view of solenoid valve

심(core), 몸체(body), 링(ring), 스프링(spring) 및 이들을 감싸고 있는 코일(coil) 로 구성되어 있다.

가동철심, 고정철심, 몸체의 재질은 쾌삭강으로써 B-H 곡선은 Fig.2 와 같다.

밸브는 솔레노이드의 전자기력과 리턴 스프링(return spring)력에 따라 밸브 코일에 전류가 인가되면 전자기력이 작용하여 플런저는 y 축 방향으로 이동되어 on 상태가 되어서 관로내의 오일(oil) 은 출구 포트(port) 로 빠져나가게 되어 유압이 감소하게 된다. 반대로, 전류가 단속되면 리턴 스프링력에 의해 밸브는 off 되고 플런저는 입구 포트를 막게 되어 관로내의 유압은 공급 오일에 의해 압력이 증가된다.

### 2.2 PERMEANCE 법에 의한 모델링

자속(flux)  $\phi$  가 단면적 A인 매질을 통과하는 경우 자속밀도(magnetic flux density) B는 식 (1)로 표현된다.<sup>(3)</sup>

$$B = \frac{\phi}{A} \quad (1)$$

자속밀도 B와 자계강도(magnetic intensity) H와 의 관계는 다음과 같다.

$$B = \mu H = \mu_0 \left(1 + \frac{\lambda}{\mu_0}\right) H \quad (2)$$

여기서,  $\lambda / \mu_0$  : 자화율

자속  $\phi$  가 매질을 통과하면서 소모하는 기자력  $U_1$  은 자계강도 H에 자속통과길이 L [l]을 곱한 값이 된다.

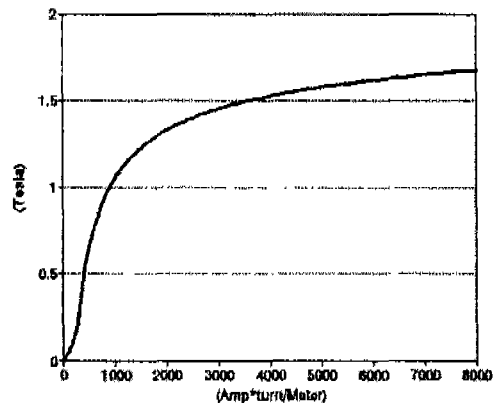


Fig. 2 B-H curve of free cutting steel

$$U_1 = H \cdot L[i] \quad (3)$$

퍼미언스 값은 자속이 매질을 얼마나 잘 흐르는가 하는 정도를 나타내며, 투자율 및 자속이 흐르는 단면적에 비례하고 자속의 길이에 반비례한다.

$$P = \frac{\mu A}{L[i]} \quad (4)$$

전자석 부분을 해석하기 위해서는 다음과 같은 가정이 필요하다.

- 1) 작동유의 투자율은 공기의 투자율  $\mu_0$ 와 같다.
- 2) 코일을 둘러싼 모든 절연 물질은 공기의 투자율  $\mu_0$ 와 같다.
- 3) 자속은 전체 자기 저항이 최소가 되도록 분포한다.
- 4) 전자석의 모든 부분은 축대칭이다.
- 5) 물질의 히스테리시스 영향은 무시한다.

공극의 퍼미언스는 플런저와 몸체, 플런저와 코어 사이의 공간에 형성되어 있으며, 플런저 변위에 따른 퍼미언스 분포는 Fig. 3과 같으며 그 값은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$P[1] = \mu_0 \frac{\pi}{4} (d_3^2 - d_2^2) / (gap1 - z)$$

$$P[2] = 1.63 \mu_0 \left( \frac{d_3 - d_2}{2} + \frac{z}{4} \right)$$

$$P[3] = \mu_0 \frac{\pi}{2 gap2} (d_3 + d_7) (l_5 - z)$$

$$P[4] = 1.65 \mu_0 (d_3 + gap2)$$

$$P[5] = 4 \mu_0 \left( \frac{d_4}{2} + \sqrt{gap2(l_6 - gap1 + z)} \right) \ln \frac{(l_6 - gap1 + z)}{gap2}$$

$$P[6] = 1.65 \mu_0 (d_7 - gap2)$$

공급자력은 코일의 권선수 N과 전류 I의 곱으로 표시되며, 소모기력은 매질을 철심과 공기 두부분으로 나누면 다음과 같이 표현된다.

$$NI = U_1 + U_2 = \sum H[i]L[i] + \frac{\phi_0}{P[i]} \quad (5)$$

여기서 L[i]는 자속의 통과길이이며 Fig. 4와 같이

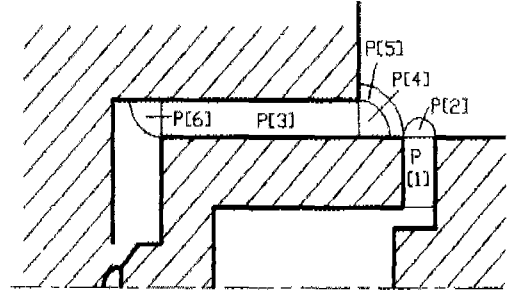


Fig. 3 Permacne of air gap in solenoid valve

자료가 형성된다고 가정하고 자료길이는 다음과 같이 구한다.

$$L[1] = \frac{l_3}{2} + l_2 + \frac{l_1}{2}$$

$$L[2] = \frac{(d_5 - d_4)}{2} + \frac{(d_6 - d_5)}{4}$$

$$L[3] = \frac{(d_4 - d_2)}{2}$$

$$L[4] = \frac{(d_3 - d_2)}{2}$$

$$L[5] = l_4 - \frac{l_1}{2} - l_3$$

$$L[6] = l_3 - (l_5 + l_6 + 0.00004)$$

$$L[7] = \frac{l_5}{2} + l_6 + (gap1 + 0.0001 - z)$$

$$L[8] = \frac{(d_3 - d_2)}{2}$$

$$L[9] = \frac{(d_5 - d_7)}{2} + \frac{(d_6 - d_5)}{4} + gap2$$

또한, 각 경로에서의 자속밀도를 계산하면, 다음과 같다.

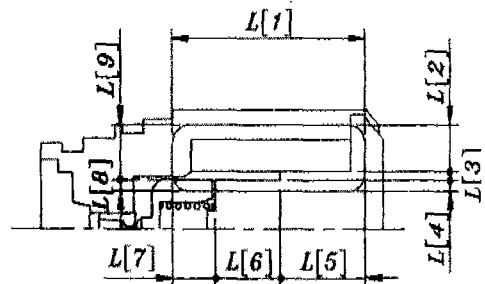


Fig. 4 Magnetic flux line in solenoid valve

$$B[1] = \frac{4\phi_0}{\pi(d_6^2 - d_5^2)}$$

$$B[2] = \frac{4L[2]\phi_0}{\pi(d_5^2 - d_4^2)l_1}$$

$$B[3] = \frac{4L[3]\phi_0}{\pi(d_4^2 - d_3^2)l_1}$$

$$B[4] = \frac{4L[4]\phi_0}{\pi d_4^2 l_1}$$

$$B[5] = \frac{4\phi_0}{\pi d_4^2}$$

$$B[6] = \frac{4\phi_0}{\pi d_3^2}$$

$$B[7] = \frac{4\phi_0}{\pi(d_3^2 - d_2^2)}$$

$$B[8] = \frac{4L[8]\phi_0}{\pi(d_3^2 - d_2^2)(l_5 + l_6 - 0.0025)}$$

$$B[9] = \frac{4L[9]\phi_0}{\pi(d_5^2 - d_7^2)l_5}$$

전자력을 계산하기 위해서는 플런저의 각 위치에서의 퍼미언스와 그 미분치를 계산하고 주어진 외부 공급기 자력과 일치하는 자속  $\phi_0$ 를 컴퓨터를 이용해서 시행오차법으로 구한다.

$$F_{mag} = -\frac{1}{2}\phi_0^2 \left( \frac{1}{P[i]^2} \sum \frac{dP[i]}{dz} \right) \quad (6)$$

직선운동하는 플런저의 변위는 전자석에 의한 자기력과 밸브내에 장착되어 있는 스프링에 의한 복원력에 영향을 받게 되므로, 플런저의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{mag} - k(z_0 + z) = m \frac{d^2z}{dt^2} \quad (7)$$

여기서, m : 플런저의 질량  
 $z_0$  : 스프링의 초기 압축길이

전자석에 주기 2a인 구형과 입력을 가했을 때 발생하는 전류는 코일의 저항과 인덕턴스 변화에 영향을 받게 되어 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$V = iR + \frac{d}{dt}(Li) = iR + L \frac{di}{dt} \quad (8)$$

$$i = \frac{V}{R}(1 - e^{-\frac{t}{k}}) \quad (t < a) \quad (9)$$

$$i = -\frac{V}{R}e^{-\frac{t}{k}}(1 - e^{-\frac{a}{k}}) \quad (a < t < 2a) \quad (10)$$

여기서  $k = \frac{L}{R}$  (시정수, seconds)

식 (9)로부터  $i$ 의 최대값은  $\frac{V}{R}$ 이며, 한번의 시정

수가 지난 후에는 0.632i, 두번의 시정수가 지난 후에는 0.865i, 다섯번의 시정수 즉, 5k가 지났을 때 0.993i 값을 나타낸다.<sup>(4)</sup>

### 2.3 F E M 에 의한 모델링

정자장을 고찰하는데 기초가 되는 편미분 방정식은 다음의 맥스웰 방정식으로 간략하게 표현될 수 있다.<sup>(5)~(7)</sup>

$$\text{rot } H = J \quad (11)$$

$$\text{div } B = 0 \quad (12)$$

또한, 자기 벡터 포텐셜 A로 표현되는 지배방정식으로 나타내면

$$\text{rot}\left(\frac{1}{\mu} \text{rot}A\right) - J = 0 \quad (13)$$

와 같이 되고 식 (13)을 각 축방향 성분별로 전개하여 2 차원 정자장으로 취급하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu_y} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu_x} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_z \quad (14)$$

2 차원 장에서 임의요소 내의 한 점의 좌표를 (x,y)라 하고 벡터 포텐셜 A를 x,y 의 1 차 근사식으로 나타내면,

$$A^{(e)} = \sum_{i=1}^3 N_{ie}(x,y)A_{ie} \quad (15)$$

여기서,  $N_{ie}(x,y)$  : 요소 형상 함수

와 같이 되며 변분원리에 의한 유한요소법의 정식화 과정에서 범함수를 최소화 하는 조건식으로부터 전계절점 방정식을 얻게 되며, 범함수의 최소화 조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial x}{\partial \{A\}} = \sum_{e=1}^n \frac{\partial x^{(e)}}{\partial \{A\}} = \{0\} \quad (16)$$

여기서,  $x$  : 범함수

또한, 자속밀도와 전자석의 흡인력은 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$B_x^{(e)} = \frac{\partial A^{(e)}}{\partial y} \quad B_y^{(e)} = -\frac{\partial A^{(e)}}{\partial x} \quad (17)$$

$$F = \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{1}{2} \int_V \left[ \int_0^H B \cdot dH \right] dV \right] \quad (18)$$

FEM 해석을 위해 솔레노이드 밸브를 축 대칭으로 모델링하고 자기특성을 2차원으로 해석하였다. 삼각형 요소를 사용하여 해석영역을 분할한 MESH 선도는 Fig. 5와 같으며, 엘리먼트수는 약 2400 개 이고 대칭성을 고려하여 1/2 영역만을 해석영역으로 하였다.<sup>(8)</sup>

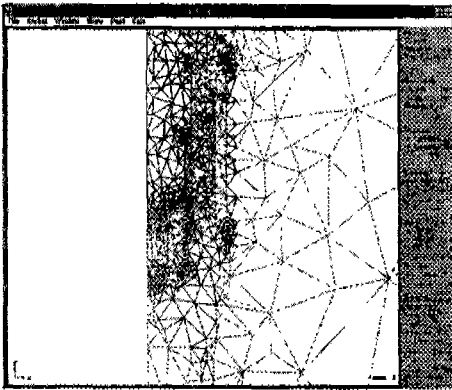


Fig. 5 Meshes for numerical analysis

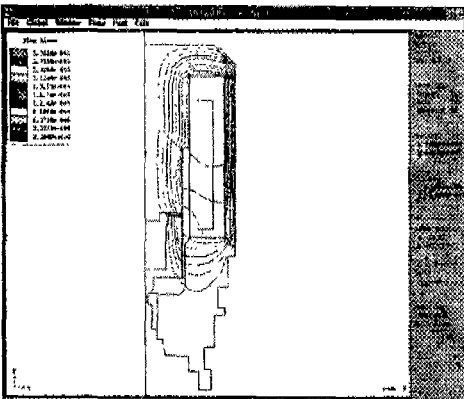


Fig. 6 Flux lines by plunger displacement

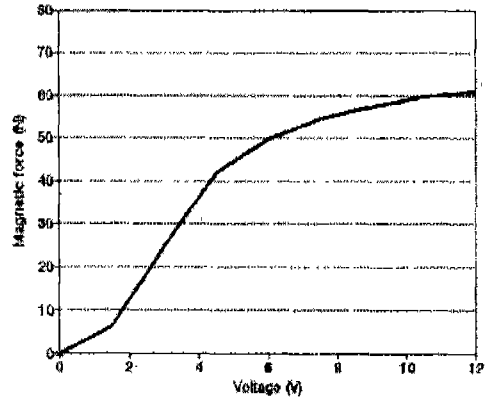


Fig. 7 Static magnetic force BY FEM

Fig. 6은 12 V의 전압을 인가하였을 때의 플런저 변위에 따른 자속의 흐름을 나타낸 것으로써 최단 자료를 통하여 자속이 흐르고 있음을 잘 알 수 있으며 이는 퍼미언스법에서 가정한 자료의 길이와도 일치함을 나타낸다.

Fig. 7은 FEM으로 구한 구동전압에 따른 전자력의 정특성을 나타낸 것이다.

### 3. 실험장치 및 방법

실험장치는 Table 1과 같이 구성하였다.

Table 1 Specification of experimental sets

실험장비	제품명 및 특성	
1. 고정도 변위계	controller	LS-500-4
	검출 Head	HA-141S
	측정 범위	0 - 3.5 mm
	분해능	± 1 %
2. LOAD CELL	BONGSHIN 20-DBBP	
3. Current Probe Amplifier	Tektronix AM-503A	
4. Digital Oscilloscope	Lecroy 7200A	
5. Duty Controller Driving units.	직접 제작 (Fig. 10)	
6. Auto balancing signal conditioner	KYOWA CDV-230C	
7. Bipolar power supply/amplifier	Hewlett.Packard 6826A	

Fig. 8 은 플런저 변위(0.25 mm) 와 공급전압에 따른 coil 의 전류 특성을 측정 한 실험장치로써 변위는 변위 센서(gap sensor)로 측정하고, 전류 특성은 솔레노이드 입력 밸브단에 전류계(current probe amplifier)를 사용하여 듀티율과 주파수를 변화시켜가면서 디지털 오실로스코프에서 2 채널로 동시에 입력받아 출력시킨 후 저장된 데이터를 캘리브레이션하여 변위 및 전류로 환산하였다.

Fig. 9는 전자력 측정 실험 장치로서, 솔레노이드 밸브내의 플런저에 황동편을 압입하고 로드셀과의 사이에 초기장력을 가진 스프링을 삽입하여 플런저 변위에 따른 전자력이 스프링을 통해 로드셀로 전달되게끔 하였다. 듀티율과 주파수 변화에 따른 공급전압이 구형파 형태로 솔레노이드 밸브에 인가되고 로드셀에서 측정된 출력값은 로드셀 증폭기(balancing signal conditioner)를 통해 디지털 오실로스코프에서 출력받은 후 저장된 데이터를 캘리브레이션하여 전자력으로 환산한다. 실험에 사용된 듀티 콘트롤러의 구동 회로도 는 Fig. 10과 같으며, 작동방법은 컴퓨터에서 소프트웨어 적으로 주파수와 듀티비를 조정하고 이 on, off 신호가 프린터 포트를 통해 가변형 Power supply 에서 증폭된 후 Opto isolator 를 거쳐 파워 트랜지스터로 전달되어 on, off 로 솔레노이드를 구동시키게 된다. 이때의 솔레노이드 구동 전압은 외부 전압을 사용하였으며 다이오드를 밸브 양단에 설치하여 역기전력을 방지하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

실험결과를 살펴보면, Fig 11, 12, 13 에서 알 수 있듯이 입력 주파수가 100 Hz까지는 플런저의 변위가 제대로 추종되지만 150 Hz 부터는 추종하지 못함을 보여 준다. 따라서 본 실험에 사용된 2위차 솔레노이드 밸브의 최소 (on + off) 유지 시간은 측정결과 약 10msec (100Hz 기준) 로써 그 이하가 되면 사실상 추종이 불가능함을 나타내며, 시뮬레이션 결과와도 상당히 일치함을 나타낸다. 또한, 파워 트랜지스터로 들어가는 입력 전압 (5V) 에 의한 변위 응답 지연시간을 살펴보면 약 4msec 정도임을 알 수 있다.

Fig. 14 의 전류 특성 실험에서도 밸브의 응답 지연 시간을 알 수 있는데, 밸브가 on 될 때 에는 밸브의 속도 변화에 따른 역 기전력의 변화에 의해 전류 파형에

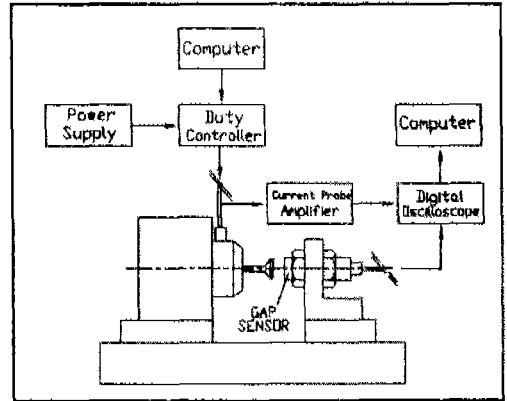


Fig. 8 Experimental apparatus for measuring displacement and current

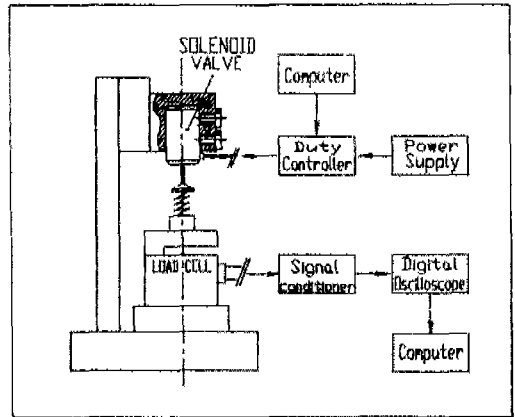


Fig. 9 Experimental apparatus for measuring electromagnetic force

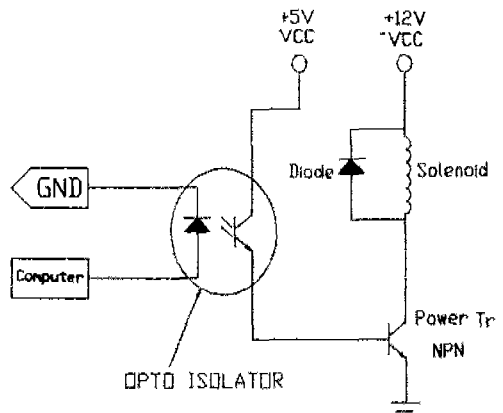


Fig. 10 Driving circuit of duty controller

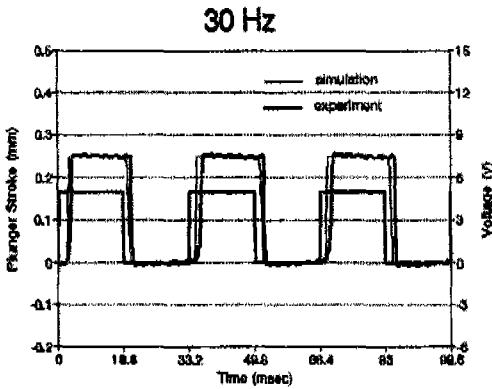


Fig. 11 Comparison of simulated results with experimental results at frequency 30 Hz

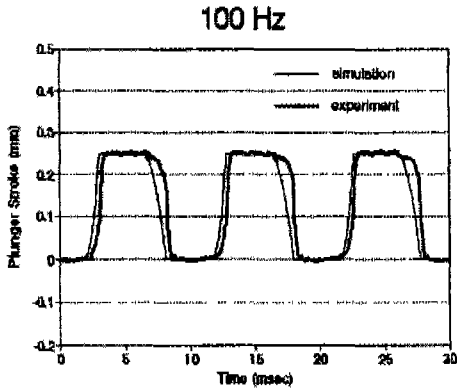


Fig. 12 Comparison of simulated results with experimental results at frequency 100 Hz

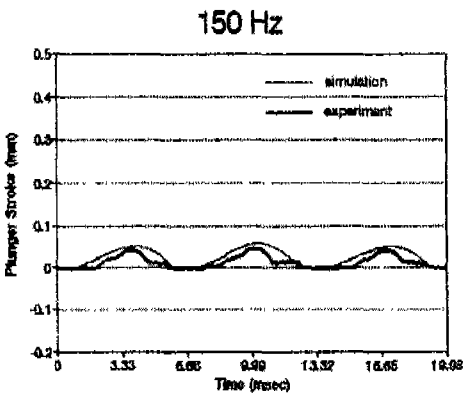


Fig. 13 Comparison of simulated results with experimental results at frequency 150 Hz

변곡점이 나타나며 그때 까지의 시간이 밸브의 응답 시간이 된다. (9)-(10)

변위 실험 결과와 마찬가지로 약 4msec 의 응답 지연 시간을 보인다.

Fig. 15, 16은 주파수 30Hz 에서 듀티율을 변화시켰을 때의 변위 실험치와 시뮬레이션 값을 비교한 것으로써 잘 일치함을 보여준다.

전자력 특성 실험 결과는 솔레노이드 구동 전압에 따른 최대 전자력은 약 60N으로써, 퍼미언스법으로 구한 시뮬레이션 결과와 거의 일치할 뿐만 아니라 스프링 초기 압축력 (약 18N)의 약 3 배 정도의 힘을 나타낸다.

솔레노이드 밸브 설계시에 고려되어야 할 요소들은 구동전압, 코일의 인덕턴스, 권선수, 저항값 및 스프링

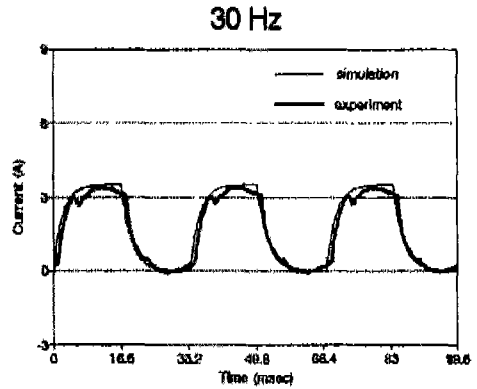


Fig. 14 Current characteristics of solenoid at frequency 30 Hz

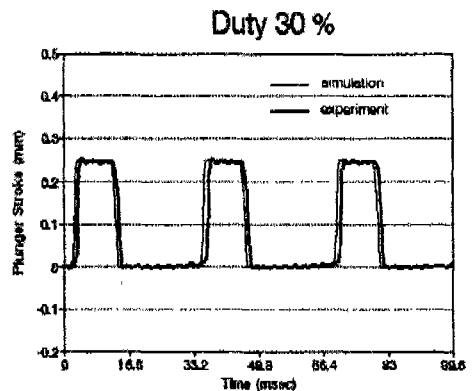


Fig. 15 Comparison of simulated results with experimental results at duty 30 %

의 탄성계수, 초기 압축길이, 플런저 질량, 공극의 크기등이 있다. 그러나, 이러한 요소들은 서로 연관되어 있고 상호 관련이 있으므로 이들이 밸브의 응답성 및 전자력 특성에 어떠한 영향을 미치는 지를 시뮬레이션 해 보았다.

Fig. 18은 코일의 권선수를 50회(turn) 씩 증감하였을 때의 전자력의 변화를 나타낸 것으로써 현재의 300회 보다 권선수를 증가시켜도 자속의 포화 현상으로 인해 전자력의 크기는 그다지 변함이 없다.

Fig. 19는 코일의 인덕턴스 L 값을 현재의 8 [mH] 에서 3 [mH] 씩 증감시켰을 때 전류의 응답특성을 나타낸 것으로써, 인덕턴스 L 값은 권선수  $N^2$  에 비례하므로 전자력의 크기에 그다지 영향을 미치지 않는 범위 내에서 코일의 권선수를 줄여, 인덕턴스 L 값을 작게

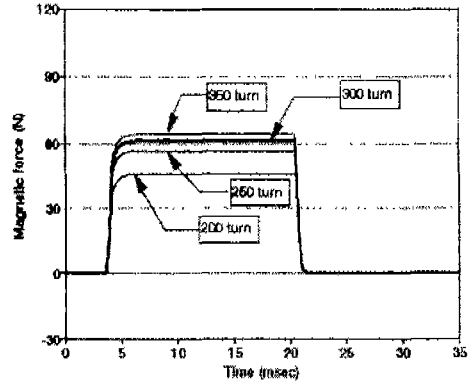


Fig. 18 Electromagnetic force variation due to coil turn

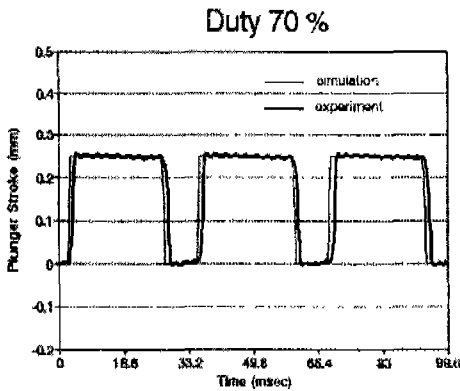


Fig. 16 Comparison of simulated results with experimental results at duty 70 %

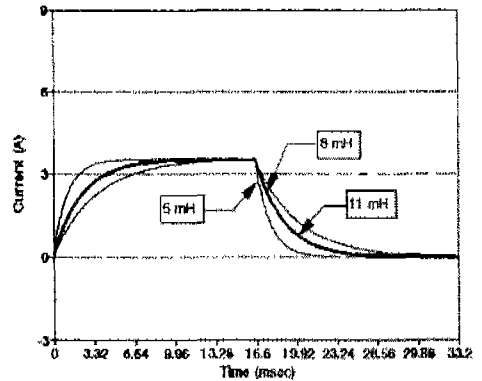


Fig. 19 Current variation due to coil inductance

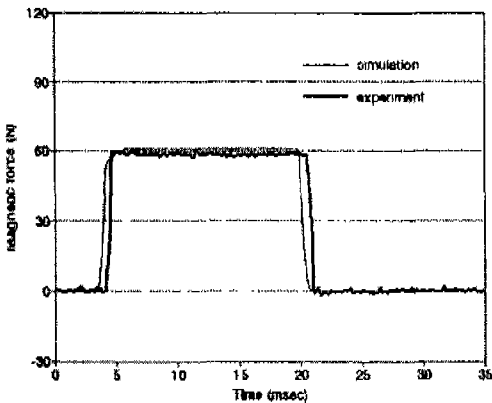


Fig. 17 Comparison of simulated results with experimental results about magnetic force

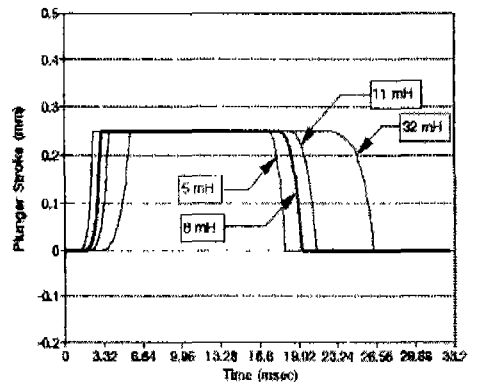


Fig. 20 Plunger displacement variation due to coil inductance



하면 전류의 응답성이 빨라지게 되고 이로 인해 슬레노이드 밸브의 플런저 변위 특성을 향상시킬 수 있다.

Fig. 20은 코일 인덕턴스 증감에 따른 플런저 변위 특성을 나타낸 것으로써 권선수를 250회로 하여 인덕턴스를 약 5[mH]로 줄인다면, 플런저의 변위 응답성은 약 3msec로 향상되고 추종 가능 주파수 범위도 약 150 Hz까지 증가될 수 있을 것으로 여겨진다.

Fig. 21은 밸브내의 스프링 상수가 플런저 변위 특성에 미치는 영향을 시뮬레이션한 것으로써 스프링 상수가 커지게 되면 플런저가 ON시에 응답성이 조금 떨어지는 것에 비해 OFF시에는 오히려 응답성이 상당히 향상됨을 보여주고 있는데 이것은 전자력이 스프링력에 비해 충분히 크기 때문에 ON보다 OFF시에 반응속도가 증가됨을 보여주고 있다.

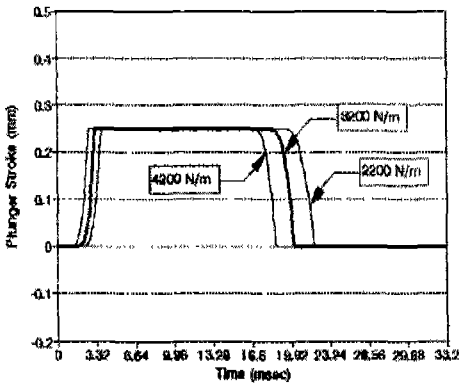


Fig. 21 Plunger displacement variation due to spring constant

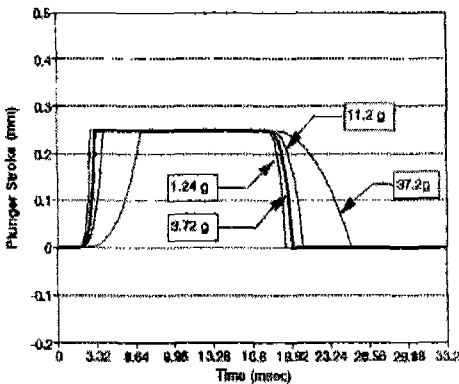


Fig. 22 Plunger displacement variation due to plunger mass

Fig. 22는 플런저 질량을 현재의 3.72 g보다 1/3배, 3배, 10배로 증감시켰을 때로써 플런저의 질량이 줄어들게 되면 밸브의 초기 on시 응답성이 빨라질 뿐만 아니라 off시에도 응답성이 빨라짐을 볼 수 있다. 따라서, 밸브 설계시에는 플런저의 질량을 최소화할 수 있는 방안을 적극 검토해야 한다.

Fig. 23은 구동전압을 현재의 12 V에서 3 V씩 감소시켰을 때의 결과로써 전압의 크기가 감소될수록 플런저의 on, off 응답성은 떨어지게 되고 4 V 이하의 구동전압에서는 입력 듀티율에 제대로 추종하지 못함을 나타낸다.

Fig. 24는 플런저와 코어 사이의 공극을 현재의 0.25 mm에서 0.1 mm씩 증감하였을 때로써 공극이 작아질수록 전자력의 증가로 인해 플런저의 on, off 시

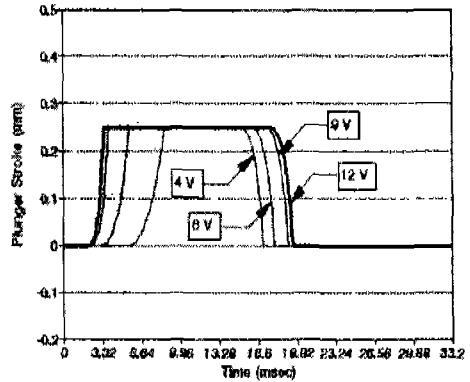


Fig. 23 Plunger displacement variation due to input voltage

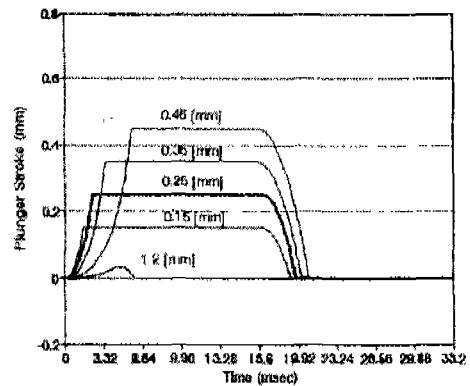


Fig. 24 Plunger displacement variation due to gap size

응답성은 향상되지만 플런저의 스트로크가 작게되어 플런저가 on 시에 빠져나가는 유량의 감소를 초래하므로 유압특성은 오히려 떨어지게 된다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 제동장치용 솔레노이드 밸브의 모델링에 관한 연구에 중점을 두었으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

① 본 논문에서 퍼미언스법으로 구한 전자력은 실험 결과와 상용 MAXWELL FEM PROGRAM 의 결과와도 일치할 뿐만 아니라, 변위도 입력 주파수와 듀티율에 따른 특성이 실험결과와 잘 일치한다.

② 변위 실험 결과 입력전압에 의한 플런저의 응답 지연 시간은 약 4msec 로서 이는, 전류 특성 실험에서 밸브가 동작을 완료하는 순간에 역기전력에 의한 전류 변화에 의해서도 잘 입증된다.

③ 시뮬레이션 결과, 코일의 권선수를 현재의 약 300 회 보다 증가시켜도 자속의 포화현상으로써 전자력의 크기는 그다지 증가하지 않음을 알 수 있다.

④ 현 솔레노이드 밸브의 추종 가능 주파수는 약 100Hz 로서 응답 주파수를 높이기 위해서는 권선수를 약 250회로 줄여 (전자력은 약 3N 감소) 인덕턴스의 영향을 줄인다면 시뮬레이션 결과 약 150Hz 까지 추종이 가능할 것으로 여겨진다.

⑤ 구동전압에 의한 플런저의 응답성은 상당히 민감하게 반응하며 최소 6[V] 이상으로 전압이 가해져야만 입력 듀티율에 따라 제대로 추종하게 된다. 또한, 공극의 크기가 1.2[mm] 를 넘게 되면 전자력이 초기 스프링력을 이기지 못해 플런저가 작동하지 못함을 알 수 있었다.

⑥ 전기적 요소중에서 중요한 인자들은 입력 전압, 저항, 인덕턴스 등이고 기계적 요소 중에서 중요한 인

자들은 밸브의 재질, 플런저와 코어의 치수, 스프링 상수, 공극의 크기 등인데 이들 값은 전자력 및 변위 특성에 큰 영향을 미치므로 설계시의 중요한 인자가 됨을 알 수 있었다.

## 참고문헌

1. "자동차용 ABS 설계및 제조기술 개발에 관한 연구", (주) 기아정기 부설 기술 연구소, 1993.
2. "Compact 4 CH-ABS Hydraulic Unit", SAE 910697.
3. Herbert C. Roters, "Electromagnetic devices", Jone Wiley and Sons, Inc. , pp 84-150 , 1947.
4. Robert L. Boylestad , "회로이론", 동일출판사, pp. 427-439, 1993.
5. 임달호, "전자계의 유한요소법", 동명사, pp. 65-77 , 1992.
6. 石黒敏郎 , 坪島茂彦 外 共著 "交直 マグネットの設計と應用", オーム 社 pp.1-38, 1969.
7. "A/T 용 솔레노이드 밸브의 동특성 해석을 위한 Simulation Package 개발", 한양대학교 산업과학 연구소, 1994
8. Maxwell , "Maxwell User's Reference", Ansoft , 1994.
9. Hirohisa Tanaka, "高速 電磁 弁 に 關 する 研究". 日本 機械學會論文集, 50 卷, 457 호, pp 1594-1601, 昭和 59年 9月.
10. Takayoshi Moto, Hironao Yamada and Yoshikazu Suematsu "PWM-Digital Control of Hydraulic Actuator Utilizing 2-Way Solenoid Valves", 油壓 と 空氣壓, pp. 564-571, 昭和 63年 11月