

## PWM 제어형 고속 전자석의 특성 해석

성백주 이은웅\*  
한국기계연구원 \*충남대학교

## Characteristic Analysis of PWM Controlled High-Speed Magnet

Baek-Ju, Sung Eun-Woong, Lee\*  
Korea Institute of Machinery&Materials \*Chung Nam National University

**Abstract** - The operating speed of PWM controlled high speed magnet is affected by mass of plunger magnetic motive force inductance and return spring. It is impossible to change the value of them for the purpose of increasing the speed because these factors are related with each other. This paper introduces a speed increasing method using a non magnetic ring which is welded in the middle of magnetic guide tube and also presents the characteristic equations results of FEM analysis for magnetic flux distribution and computer simulation results for the dynamic characteristics of plunger motion. And we proved the effect of non magnetic ring by experiments using a prototype.

## 1. 서 롤

종래부터 널리 사용되고 있는 서보밸브나 비례제어밸브는 아날로그 전류값으로 제어되므로, 부득이 D/A 변환기와 증폭기를 사용하여야 함으로 제어회로가 복잡해지면서 고가화되는 문제가 있고, 또한 기기 자체가 작동유의 오염과 같은 내환경성에 취약한 단점이 있다. 이에따라 최근에는 단순 펄스열을 입력 신호로 사용하면서도 기존 밸브의 단점을 극복하고 우수한 세어 성능을 나타낼 수 있는 PWM 전자밸브가 각광을 받고 있으며, 구동 액츄에이터를 더욱 고속화하여 밸브 전체의 작동속도를 저감시키려는 연구가 활발히 진행 중이다<sup>[1][2]</sup>.

고속 전자석의 플런저 속도는 플런저 질량, 기자력, 인덕턴스, 복원 스프링 등에 의하여 영향을 받는데, 속도를 증가시키기 위해서는 기자력을 크게하고, 플런저 질량, 인덕턴스, 복원 스프링 상수를 작게해야 한다. 그러나, 술레노이드 액츄에이터의 이들 상수들은 설계목표치에 부합되게 고정되고, 서로 독립적인 관계가 아닌 상호 연관성을 가지고 있기 때문에, 특정 상수값을 변경하면 다른 값도 연계해서 변하게 되어 이들 값을 변경하여 플런저 속도를 산출시키는 것은 사실상 불가능하다<sup>[3]</sup>.

본 연구에서는 고속 전자석의 작동속도 향상을 위한 방법으로 비자성체 링을 사용한 PWM 벨브 구동용 고속 전자석에 대한 해석을 수행하였다. 동특성 방정식을 유도하고 이를 사용하여 플런저의 동작특성 시뮬레이션을 실시하였으며, 특히 비자성체 링의 효과를 정밀하게 분석하기 위한 방법으로 유한요소법(FEM)을 사용하여, 자로(Magnetic Path)에 대한 자속분포와 자속밀도 해석을 실시하였다.

그리고 시작기를 사용한 실험을 통하여 동특성 방정식, 시뮬레이션 결과, 그리고 FEM 해석의 타당성을 입증하였다.

## 2. 고속 전자석의 특성 해석

### 2.1 투성 방정식

그림1은 본 연구에서 사용한 고속 전자석의 모델이다. 고속 전자석은 전기적으로 직류저항  $R_s$ , 인덕턴스 (Inductance)  $L$ , 인가전압  $V_s$ 로 나타낼 수 있고, 기계적으로는 플런저 질량  $M$ , 마찰저항  $R_w$ , 스프링 상수  $k$ 로 나타낼 수 있으므로 그 등가회로는 그림2와 같다<sup>[3][4]</sup>.

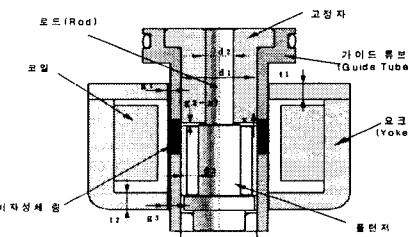


그림 1. 고속 전자석 모델



그림 2. 등가회로

그림1에서,  $g_1$ 은 고정자 측에서의 요크와 가이드 튜브 사이의 공극,  $g_2$ 는 고정자와 플런저 사이의 공극,  $g_3$ 는 플런저 측에서의 요크와 가이드 튜브 사이의 공극을 각각 나타낸다. 이를 공극에서의 릴럭턴스를 각각  $Re_1$ ,  $Re_2$ ,  $Re_3$ 라 하면, 전 릴럭턴스  $Re$ 는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_e = R_{e1} + R_{e2} + R_{e3}$$

$$= \frac{g_1 t_2 (d_1^2 - d_2^2 - 4 d_3^2) + 4 (g_2 - x) d_1 t_1 t_2 + g_3 t_1 (d_1^2 - d_2^2 - 4 d_3^2)}{c_1 c_2 c_3} \quad (1)$$

$$L = \frac{N^2}{R_e}$$

$$= \frac{\mu_0 \pi d_1 t_1 t_2 (d_2^2 - d_3^2 - 4 d_5^2) N^2}{g_1 t_1 (d_1^2 - d_2^2 - 4 d_3^2 + 4(g_2 - x)d_4 t_1 t_2 + g_3 t_1 (d_2^2 - d_3^2 - 4 d_5^2))} \quad (2)$$

코일내에 유도되는 기전력  $e$ 는 식(3)과 같이 된다.

$$e = \frac{d}{dt} (L \cdot i) = L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dx} \frac{dx}{dt} \quad (3)$$

시간에 따른 전압의 변화 특성은 식(4)와 같다.

$$V(t) = iR + L(x) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(x)}{dx} \frac{dx}{dt} \quad (4)$$

그리고 솔레노이드 액츄에이터 변위에 따른 동적인 힘의 변화는 식(5)로 나타내어진다.

$$F_{fd} = \frac{\partial W_{fd}(i, x)}{\partial x} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dx} \quad (5)$$

여기서,

$$\frac{dL}{dx} = \frac{\mu_0 \pi d_1 t_1 t_2 (d_1^2 - d_2^2 - 4d_3^2) \cdot 4 d_1 t_1 t_2 N^2}{[g_1 t_2 (d_1^2 - d_2^2 - 4d_3^2) + 4(g_2 - x) d_1 t_1 t_2 + g_3 t_1 (d_1^2 - d_2^2 - 4d_3^2)]^2}$$

그림 2를 참조로 하면, 솔레노이드 액츄에이터의 동 특성은 1차 비선형 미분 방정식 (6),(7),(8)로 모델링 이 가능하다<sup>[1][5]</sup>.

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (6)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{M} [ (F_m - (R_v \cdot x_2) - (k \cdot x_1)) \quad (7)$$

$$\dot{x}_3 = \frac{1}{L(x_1)} [ (V(t) - x_3 \cdot R - x_3 \cdot \frac{dL(x_1)}{dx_1} \cdot x_2) ] \quad (8)$$

여기서,

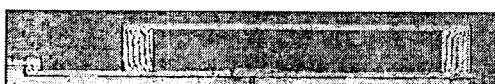
$x_1$ : 플런저 위치,  $x_2$ : 플런저 속도

$x_3$ : 솔레노이드 전류,  $F_m$ : 흡인력

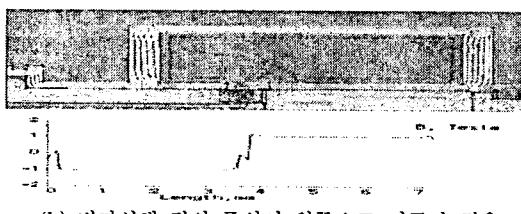
## 2.2 전자장의 FEM 해석

고속 전자석에 대한 전자장 해석은 가이드 튜브 중간에 삽입한, 비자성체 링의 설치 위치와 길이에 따른 자가적 특성을 분석하기 위해서 실시하였다. 솔레노이드 액츄에이터의 형상이 축대칭이란 점을 고려하여 축방향 1/4 단면을 가정하여 해석하였다.

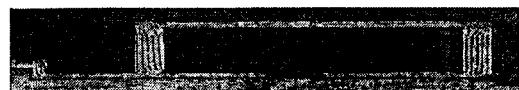
비자성체 링과 주공극의 길방향 중심이 일치한 경우와 비자성체 링의 중심이 주공극의 중심과 왼쪽 또는 오른쪽으로 어긋났을 경우의 해석 결과를 그림 3에 나타내었다. 이때 플런저는 최대 스트로크인 1mm를 유지하고 있는 상태이다.



(a) 길이방향 중심이 일치하는 경우



(b) 비자성체 링의 중심이 왼쪽으로 어긋난 경우

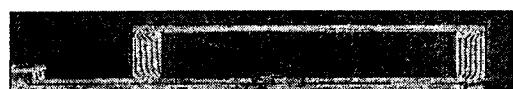


(c) 비자성체 링의 중심이 오른쪽으로 어긋난 경우

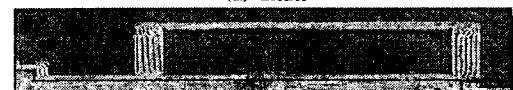
그림 3. 비자성체 링의 위치변화에 따른 자속분포 및 밀도

그림 3에서 두 중심이 서로 일치한 경우의 자속밀도는 1.25~1.5[T]이고 두 중심이 서로 어긋난 경우의 자속밀도는 1~1.25[T]임을 알 수 있다.

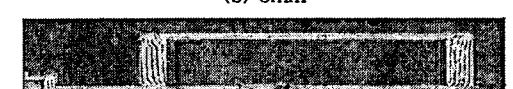
그림 4는 비자성체 링의 길이 변화에 따른 FEM 해석 결과를 나타낸다.



(a) 2mm



(b) 3mm



(c) 5mm

그림 4. 비자성체 링의 길이 변화에 따른 자속분포 및 밀도

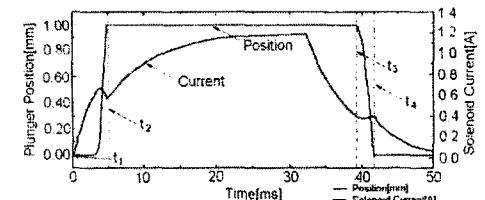
그림 4에서, 비자성체 링의 길이 변화에 따른 자속밀도는 1.2~1.5[T]로서 그림 3(a)의 두 중심이 일치한 경우와 매우 유사한 값을 나타냄을 알 수 있다.

## 2.3 동작특성 시뮬레이션

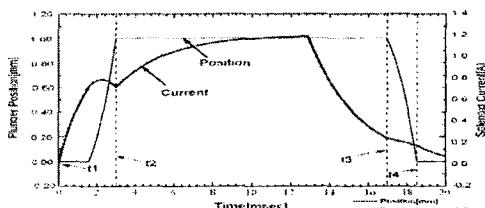
식 (7)과(8) 그리고 표1의 사양을 이용한 전자석의 전류와 플런저 위치특성 시뮬레이션 결과를 그림 5에 나타내었다.

표 1. 솔레노이드 액츄에이터의 사양

항 목	사 양
코일저항 R	20(Ω)
입력전압 V	DC24(V)
플런저 질량 M	6.15(g)
스트로크 x	0.25(mm)
고정공극 g <sub>f</sub>	0.05(mm)
복원스프링 상수 k	387(g/mm)



(a) 비자성체 링이 없는 경우



(b) 비자성체 링이 있는 경우

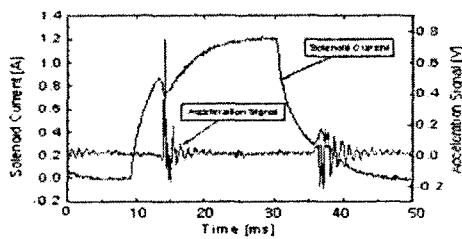
그림5. 솔레노이드 전류와 플런저 위치(시뮬레이션)

그림 5에서  $t_1 \sim t_2$  구간은 플런저가 고정자에 흡착하기 까지의 시간이고,  $t_3 \sim t_4$  구간은 플런저가 고정자에서 떨어져 복원 스프링의 초기 압축상태로 되돌아 오는데 까지의 시간이다. 이 시뮬레이션 그래프에서 비자성체 링이 없는 경우의 흡인 시간은 4.8ms, 비자성체 링이 있는 경우의 흡인시간은 3.2ms임을 알 수 있다.

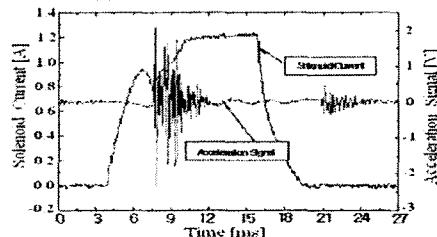
### 3. 동작 특성 실험

#### 3.1 작동시간 측정

비자성체 링의 유무에 따른 플런저 작동시간을 비교하기 위해서, 솔레노이드의 전류와 가속도 센서 출력 신호를 동시에 측정한 실험을 실시하였다. 그림6에 그 측정 결과를 나타내었다.



(a) 비자성체 링이 없는 경우



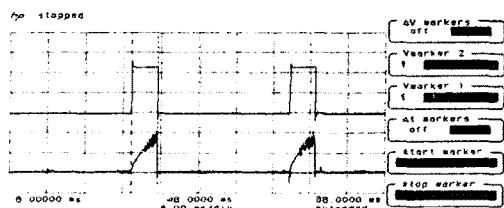
(b) 비자성체 링이 있는 경우

그림 6. 작동시간 측정 결과

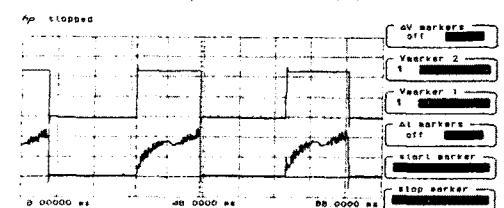
비자성체 링이 없는 경우의 작동시간은 5.5ms, 비자성체 링이 있는 경우는 3.8ms로서, 비자성체 링의 효과로 인하여 작동시간이 1.7ms 단축되었음을 알 수 있다.

#### 3.2 작동 주파수 측정

실험결과 본 연구에서의 고속 전자석은 최소 작동 PWM 변조율이 17%이고 작동 주파수는 30Hz로서, 유압 PWM 벨브 구동을 위한 액추에이터로서의 작동조건을 대체로 잘 만족시킬 수 있었다. 그럼 7은 PWM 변조율과 주파수를 추종하는 고속 전자석의 전류 파형을 나타낸다.



(a) 변조율 17%, 주파수 30Hz에서의 전류파형



(b) 변조율 45%, 주파수 30Hz에서의 전류파형

그림 7. 변조율에 따른 전자석의 전류 파형

### 4. 결 론

본 연구에서는 전자석을 고속화 하기 위한 중요 변수인 비자성체 링의 위치와 길이에 대한 자속밀도 분포를 유한요소법으로 해석하였고, 전자석의 동특성을 시뮬레이션과 실험으로 비교하여,

- (1) 비자성체 링의 위치는 가동자와 고정자의 중심에 일치되도록 설치하는 것이 적절함을 확인하였고,
- (2) 작동속도는 비자성체 링의 길이 보다는 설치 위치에 더 큰 영향을 받는다는 것을 규명하였고,
- (3) 시뮬레이션 해석과 실험결과가 비교적 잘 일치함을 확인하였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] B.J. Sung, E.W. Lee, H.E.Kim, "Characteristics of Non-Magnetic Ring For High-Speed Solenoid Actuator", CEFC2004, pp342, June 6-9, 2004, Seoul, Korea.
- [2] K. Hameyer and M. Nierhaus, "Electromagnetic Actuator-CURRENT Developments and Examples", Actuator 2002 - 8th International Conference on New Actuators, pp.170~175, 2002. 6
- [3] 강보식, 윤소남, 성백주, 김형의, "PWM 제어용 고속전자석의 특성에 관한 연구", 한국기계연구원 연구논문집, 제 27집, pp141~151, 1997. 12
- [4] Takashi Kajima, "Dynamic Model of the Plunger Type Solenoid at Deenergizing State", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.31, No.3, pp2315~2323, May 1995
- [5] Takashi Kajima, Shuichi SATOH, Ryuichi SAGA WA, 高速電磁弁の開発, 日本電気學會論文集(C編) 60권 576호, pp254~261, 1994. 8