

고속 플런저형 솔레노이드의 동특성 해석

論文
2~1~3

Analysis of Dynamic Characteristics for High speed Plunger-type Solenoid

白童基, 成世鎭
(Tong-Ki Paek, Se-Jin Sung)

요 약

본 논문에서는, 자동차나 항공기에서 많이 사용되고 있는 고속 솔레노이드 밸브의 플런저형 솔레노이드에 대한 설계기술을 확보하기 위하여, 수치해석을 통해 플런저의 이동시간에 대해 설계 파라메타들이 미치는 영향 및 솔레노이드의 동작특성을 검토하였다. 솔레노이드의 형상이 원통형이므로 축대칭원통좌표계를 이용하였고, 특히 전자기적 부분의 이론 해석시 와전류에 의한 영향을 고려하였으며, 가정자료법에 의해 퍼미언스를 계산하여 해석에 활용하였다. 구해진 파라메타의 해석 결과를 참고로 하여, 파라메타 값을 약간씩 변화시켜서 시간에 따른 플런저의 변위, 전류, 흡인력과의 관계등 동특성을 재해석하는 과정을 반복하여 최적치를 도출하였다. 도출된 최적치를 사용한 모의실험결과 플런저 이동시간은 1.8[ms]정도의 고속이 됨을 알 수 있었다.

Abstract - In this paper, numerical analysis of dynamic characteristics for the plunger-type solenoid was used for a high speed solenoid valve with fast switching is discussed. The theoretic analysis of the electromagnetic field including eddy currents in the solenoid is studied by using permeance. The optimum value of design parameters which are a mass and an area of the plunger, a source voltage, a elastic modulus of the spring, a stroke, a number of turns, are obtained by the results of the investigation on effect of a parameter on others. And dynamic characteristics of acting solenoid that is the variation of magnetic force, displacement, solenoid current are investigated.

Keyword : plunger-type solenoid, permeance, eddy current, dynamic characteristics

1. 서 론

최근, 유공압기구에 사용되는 플런저형 솔레노이드는 소형 고성능화 되고 있으며, 특히 자동차나 항공기에 사용되는 장치에는 개폐속도가 66~100 [Hz], 주기 10~15[msec]정도인 고속동작과 빠른 응답속도등이 요구된다. 이를 위해서는 전류나 전자기 특성을 비롯한 동특성을 충분히 검토할 필요가 있다.[1][2] 실험적 검토는 대량의 자속에 착안한 자기회로법에 따라 행하고 있다. 그러나, 이 방법은 미세한 거동을 규명하지 못하여 국부적인 자기포화나 와전류에 의한 반작용 자계의 영향을 정확히 고려하지 못하는 어려움이 있다. 근래, 계산기의 발달과 계산방법의 연구성과에 의해 자기응용기기의 특성에 대한 해석기술은 상당히 진보되어 왔으나, 이러한 해석법은 상당히 정확한 반면

계산시간이 오래 걸리는 단점이 있어, 계속하여 파라메타를 변화시켜서 반복계산해야 하는 설계단계에서 외면하는 경우가 많다. 따라서, 간이적인 전자계의 해석법이 연구되어 왔으며, Bruno Lequesene는 축대칭 플런저형 전자석의 전자계에서, 철심부분을 1차원으로 간략화하여 그 부분은 차분법을 이용하여 표시하고 다른 부분은 집중화한 해석법을 제안하였다. 이 방법에 의하면, 계산은 어느 정도 간략하게 되지만, 이것도 PC급 컴퓨터를 이용하는 경우 계산시간이 꽤 걸리게 되고, 자성재료의 자화특성을 제대로 고려해 주지 않으면 해석이 이루어지지 않는다.[3][4][5]

외국의 경우, 공압 구동장치용의 고속·소형 솔레노이드는 요구조건이 만족되면 기성품을 구입하여 사용하고 있으나, 대부분의 경우는 주문 제작에 의해 전문업체나 구동장치 제작업체에서 요구조건

에 맞게 직접 설계하여 제작하고 있다. 그러나, 국내에서는 고속·소형 솔레노이드의 제조기술은 특수한 업체에서 어느 정도 확보되어 있으나, 기본 단계인 설계기술은 미흡한 편으로 이에 대한 기술 확보가 시급한 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 고속·소형 솔레노이드의 설계기술확보를 위해, 와전류에 의한 영향을 고려하여 전자기적 부분의 이론 해석을 통해 각 파라메타들이 미치는 영향을 조사했으며, 플런저의 중량, 인가전압, 단성계수, 플런저 단면적, 스트로크, 코일권수등 설계 파라메타와 플런저 이동시간과의 관계에서 설계적지치를 도출하였다. 또, 도출된 설계치를 이용하여 시간에 따른 플런저의 변위, 전류, 흡인력과 관계등 동특성을 고찰하였다. 솔레노이드의 모양이 원통형이므로 축대칭원통좌표계를 이용하여 수치해석을 행하였으며, 가정자료법을 이용하여 퍼미언스를 계산하여 솔레노이드의 고속 동작특성을 해석하였다.[6][7]

2. 가정자료와 수식모델

해석에 사용한 솔레노이드 벨브의 구조는 그림 1과 같고, 전압이 인가되면 자속을 발생하는 코일과 자속이 이동하는 자로로 구성되며, 자로는 고정부인 요크와 이동부인 플런저로 이루어져 있다.[8] 요크와 플런저의 재질은 라디오 메탈(Radio Metal)을 사용하였다. 평상시 플런저는 스프링력에 의하여 밀려 있다가 솔레노이드가 여자되면 플런저의 전자력에 의해 스프링의 반발력을 누르고 이동하게 되며, 전원을 제거해주면 스프링의 복원력에 의해 원위치로 돌아가게 된다. 그림 1에서와 같이 요크와 플런저의 모양이 원통형이므로 축대칭원통좌표계를 이용하여 수치해석을 행하였다.

솔레노이드의 여자에는 구형파형의 직류전원을 이용하였으며, 전원으로 직류전압을 인가할지라도 자로를 포함하여 솔레노이드 내부의 자속분포는 누설자속, 와전류, 포화상태의 영향때문에 매우 복잡하며 비선형적이라 해석은 매우 난해하다. 따라서 솔레노이드의 고속동작특성을 해석하기 위하여 가정자료법을 이용한 퍼미언스를 도입하였다.[3][4][6] 그림 1에서 퍼미언스 P_1 은 주공극부에서의 퍼미언스를 나타내며 모든 퍼미언스중에서 가장 큰 값을 가지고 전체를 대표한다. 또 P_2 는 공극에 인접한 부분의 퍼미언스를, P_3 는 코어와 플런저사이드동근고리부분의 퍼미언스를, P_4 는 코어와 플런저간 공간의 퍼미언스를, P_5 는 코일의 축방향 공간의 퍼미언스를 각각 나타낸다.

1) 해석을 위한 가정 및 수식

다음과 같은 가정을 도입하여 수식모델을 작성하였다.

- ① 솔레노이드는 축대칭이며, 여자 권선에는 구형파의 직류전압을 인가한다.
- ② 자속은 코일과 자성체의 경계면에 평행한 방향 및 내측방향으로 전파된다. 공극 근처나 요크부분에서 대부분의 자속은 경계면에 평행하며, 또 내측전파 자속은 전 자로에서 본다면 매우 적다. 자성체에서 자속분포는, 와전류에 의해 영향을 받지만 경계면에서의 깊이에 의해 결정된다. 따라서 솔레노이드 내부의 자속은 코일과 자성체의 경계면에 대해 평행한 방향으로 분포하고 자속밀도는 경계면에서의 깊이에 의존한다.
- ③ 플런저와 스톱퍼부에서, 자성체표면에서 자화영역 δ 까지 부분에서 자속이 통과하고 그보다 내측으로는 자속은 침투하지 않는다.
- ④ 요크 부분의 퍼미언스는 플런저 부분에 비해 충분히 커서 무시한다. 따라서 플런저부와 스톱퍼부를 합한 퍼미언스로 자성체부의 퍼미언스를 대표한다.
- ⑤ 자성체 부분의 퍼미언스는 공극부의 것보다 매우 크므로, 자로에서 공극의 퍼미언스를 하나로 집약하고 공극부의 퍼미언스는 가정자료법에 의해 구한다.
- ⑥ 플런저 이동시 점성저항계수가 아주 적으므로 마찰저항력은 무시하며, 와전류에 의한 반발력을 고려한다.

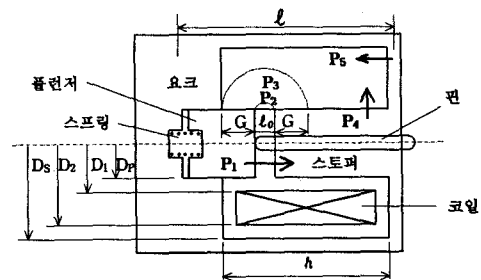


그림 1. 솔레노이드의 구조와 가정자료
Fig. 1 The structure of solenoid and flux flows

해석에 사용된 수식은 다음과 같다.

$$\text{(공극의 길이)} \quad l_g = l_{\max} - x \quad (1)$$

$$\text{(자화영역)} \quad \frac{d\delta}{dt} = \frac{1}{2} \cdot a_1 \cdot e^{-a_1 t} \cdot D_p \quad (2)$$

$$\text{단, } a_1 = \frac{\pi^2}{2 \sigma \mu_0 \mu_s D_p^2}$$

$$\text{(자화면적)} S_{PS} = \pi \cdot (D_p - \delta) \cdot \delta \quad (3)$$

$$\text{(자기회로)} P_1 = \mu_0 \cdot S_p / l_g$$

$$P_2 = 0.829 \cdot \mu_0 \cdot (D_p + \frac{l_g}{2})$$

$$P_3 = \mu_0 \cdot D_p \cdot \log_e(1 + 2 \frac{T}{l_g})$$

$$P_4 = \frac{\mu_0 \cdot \pi \cdot (D_s + D_p) \cdot (h - 2 \cdot T - l_g)^2}{(D_s - D_p) \cdot 2h}$$

$$P_5 = \frac{\mu_0 \cdot \pi}{4h} \cdot \left\{ (D_2 - D_1) \cdot \frac{(D_2 + 2 \cdot D_1)}{3} + (D_1^2 - D_p^2) \right\}$$

$$P_P = \mu_0 \cdot \mu_s \cdot S_{PS} / l \quad (4)$$

$$P_g = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \quad (5)$$

$$P_{Pt}^{-1} = P_P^{-1} + P_g^{-1} \quad (6)$$

$$P_t = P_{Pt} + P_5 \quad (7)$$

또, 암페어 주회적분법칙에 의한 코일과 자성체의 관계에서

$$N \cdot I = \int_{air\ gap} H \cdot dx + \int_{core} H \cdot dx$$

$$\int_{air\ gap} H \cdot dx = \frac{\phi_p}{P_g}$$

$$\int_{core} H \cdot dx = H_p \cdot l$$

$$N \cdot i = \frac{\phi_p}{P_g} + H_p \cdot l \quad (8)$$

$$\phi_p = B_p S_{ps} \quad (9)$$

$$\mu_s = \frac{B_p}{\mu_0 H_p} \quad (10)$$

$$\text{(전기회로)} E = R \cdot i + \frac{d}{dt}(Li) \quad (11)$$

$$\text{(와전류)} \text{rot } i = -\sigma \frac{\partial B_p}{\partial t} \quad (12)$$

$$V = \int (v \times B_p) \cdot da \quad (13)$$

$$\text{(와전류에 의한 반발력)} F_e = I_e \times B_p \quad (14)$$

$$\text{(전자력)} F_t = \frac{B_g^2 \cdot S_p}{\mu_0 \cdot 2} \quad (15)$$

$$\text{(운동 방정식)} F_t = F_f + F_e \quad (16)$$

$$F_t = M \dot{x}, F_f = kx$$

여기서, 사용한 기호의 설명은 다음과 같다.

l_g : 공극의 길이[m], l_{max} : 플런저의 스트로크[m]

x : 플런저의 변위[m], t : 시간[sec]

D_p : 플런저의 직경[mm], σ : 도전률[S/m]

μ_0 : 공기의 투자율[H/m], μ_s : 비투자율

S_{PS} : 자화부의 단면적[m²], E : 인가전압[V]

R : 회로저항[Ω], L : 인덕턴스[H]

N : 코일의 권수, P_p : 자성체부의 퍼미언스[Wb/A]

$P_g, P_1, P_2, P_3, P_4, P_5$: 공극부의 퍼미언스[Wb/A]

ϕ_p : 공극부의 자속[Wb], H_p : 플런저부의 자계[A/m]

B_p : 플런저부의 자속밀도[T]

B_g : 공극부 자속밀도[T], v : 플런저 이동속도[%]

a : 플런저와 요크의 접촉길이[m]

V : flux-cutting emf[V]

F_e : 와전류에 의한 반발력[N], I_e : 와전류[A]

M : 플런저의 질량[kg], F_t : 전자력[N]

F_f : 스프링의 반발력[N], \dot{x} : 플런저의 가속도[%]

k : 스프링의 탄성계수[kgf/m]

2) 알고리즘

직류전압의 인가에 의하여 플런저가 움직이기 시작하면 다시 그 값에 대한 계산을 반복해 플런저가 스톱퍼에 도달할 때까지 플런저부와 자로에 영향을 미칠 수 있는 각 파라메타를 변화시키면서 계산하게 된다. 이때 플런저의 변위에 따라 달라지는 각 파라메타의 변화와 동작완료까지의 시간을 비교하여 그래프로 도시하도록 한다.

수치해석은 각 부분에 대한 투자도의 비교, 인덕턴스에 따르는 전류의 윤곽, 측면의 자속에 의한 와전류, 그리고 공극부의 자속밀도에 대한 전자력을 계산하는 것을 요점으로 한다. 이것을 흐름도로 나타내면 그림 2와 같이 된다.

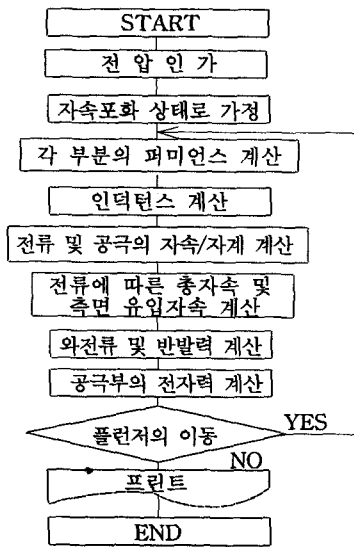


그림 2. 수치해석 흐름도

Fig 2. Flow chart of numerical analysis

3. 시뮬레이션 결과와 검토

솔레노이드의 동작특성을 검토하기 위하여 PC 586을 이용하여 시뮬레이션을 행하였으며, MATLAB을 사용하여 프로그램을 개발하였다. 플러저가 고속으로 운동할 때의 영향을 정량적으로 파악하기 위하여 각 파라메타를 변화시켜 반복계산을 하였으며, 플러저가 스트로프에 닿을 때까지의

표 1. 해석에 사용한 솔레노이드의 상수
Table 1. Parameters of a solenoid

내 용	값	사용단위
작동유체	GN ₂	
작동압력	468	psi
유동 (468psi inlet, 300psi outlet)	0.02	kg/sec
응답속도 (30VDC)	< 10	msec
인가전압	18-30	VDC
전류 (30 VDC)	1.5	A
비투자율의 초기값 (Radio Metal):t=0	6,000	
비투자율의 최대값 (Radio Metal)	40,000	
도전율	2.22	S/m
코일의 저항	28	Ω
용수철의 초기압축거리	2.532 × 10 ⁻³	m

동작완료시간을 비교하여 그래프로 도시한다. 또 자성체의 종류에 의해서도 플러저의 동작완료시간이 영향을 받게 되고, 자성체는 강자성체 일수록 좋으며, 여기에서는 강자성체의 일종인 라디오텔(Radio Metal)을 사용한다. 표 1에 수치해석할 때 사용한 솔레노이드의 상수를 나타낸다.

그림 3은 플러저의 중량과 플러저 이동시간과의 관계를 나타낸다. 플러저의 중량이 적으면 적을수록 이동시간이 큰 폭으로 짧아짐을 알 수 있으나, 실제로 중량이 적어지면 솔레노이드 크기도 적게 되고, 따라서 전자력도 적어지게 되어 이동시간은 그림 3과 같이 적어지지 않는다. 그림 4는 전압과 이동시간과의 관계를 나타낸다. 인가전압을 올리면 이동시간은 큰 폭으로 짧아지나, 30[V] 이상에서는 인가전압 상승에 의한 효과가 적어지게 된다. 그림 5는 스프링의 탄성계수와 이동시간과의 관계를 나타낸다. 탄성계수가 적어지면 운동시간도 짧아지나, 너무 적으면 플러저의 원위치 복원력 및 시간에 문제가 발생하게 된다. 그림 6은 플러저 단면적과 이동시간과의 관계를 나타낸 것으로 자성체 자화영역의 자속밀도가 전압이 인가된 직후에 포화됨을 나타낸다. 이것은 포화자속밀도가 높은 자성재료가 솔레노이드의 고속화에 적합하다는 것을 암시한다. 또, 자성체의 표면이 포화되면 이 부분의 투자율이 적어지므로 히스테리시스에 의한 자화가 빨라져 고속화에 유리하다. 그림 7은 스트로크와 이동시간과의 관계를 나타낸다. 스트로크는 이동시간에 크게 영향을 받아 스트로크가 적으면 이동시간이 적어지지만, 그보다 외부 조건에 더 많은 영향을 받게되므로 솔레노이드의 용도를 고려하여 결정하여야 한다. 그림 8은 인가전압을 30[V]로 하였을 때 코일 권선수와 이동시간과의 관계를 나타낸다. 권수가 적으면 인덕턴스도 적어 전류응답이 양호하게 되어 이동시간이 짧아지게 되나, 이에 비례하여 전자력이 줄어들어 흡인력은 약하게 된다. 반면에 권수가 최적치보다 많으면 흡인력은 세어지나 전류응답이 나빠져 이동시간은 느려진다.

표 1에 주어진 솔레노이드의 성능요구조건을 만족하면서 최소 동작완료시간을 고려한 파라메타의 최적치를 결정한다. 그림 3, 그림 6, 그림 7과 같이 동작완료시간에 대한 플러저의 중량, 플러저의 단면적, 스트로크 등은 솔레노이드의 크기 및 용도에 직접 영향을 미치고, 그림 3, 그림 4, 그림 5, 그림 6, 그림 8과 같이 동작완료시간에 대한 플러저의 중량, 전압, 스프링의 탄성계수, 플러저의 단면적, 코일의 권선수 등은 작동압력에 관계있는 전자력에 직접 영향을 미친다. 특히 그림 5의 스프링

의 탄성계수는 유압, 유동 및 플런저의 복원력에 직접 영향을 미친다. 이와 같이 각 파라메타들을 서로 슬레노이드의 성능요구조건에 영향을 미치므로, 먼저 각 그림에서 동작완료시간이 짧은 값들을 선정해서 해석 프로그램에 대입하여 계산하고, 변위, 전류, 전자력등의 해석결과가 성능요구조건에 부합되는지를 검토한다. 성능요구조건에 부합된 해석결과가 도출될 때까지, 파라메타 값을 약간씩 변화시켜서 재해석하는 과정을 반복하여 행한다.

그림 9 ~ 그림 11은 파라메타의 최적치를 적용시켰을 때의 실시간에 의한 해석 결과그림으로, 시간에 따른 변위, 시간에 따른 전류, 그리고 시간에 따른 흡인력의 파형을 나타내고 있다. 여기서 사용한 최적치는 스트로크 $0.168 \times 10^{-3} [m]$, 코일 권수 450 [turn], 인가전압 30[V], 가동부 질량 $1.937 \times 10^{-6} [kg]$, 용수철의 탄성계수는 571 [kgf/m], 용수철의 초기압축거리는 2.532[mm], 비투자율의 최대값은 40,000 등이다. 최적치를 사용한 시뮬레이션 결과 플런저 이동시간은 1.8[ms]정도의 고속이 됨을 알 수 있다.

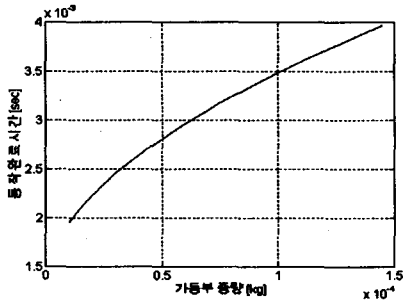


그림 3. 플런저 중량과 이동시간과의 관계
Fig. 3 Variation of moving-time on plunger mass

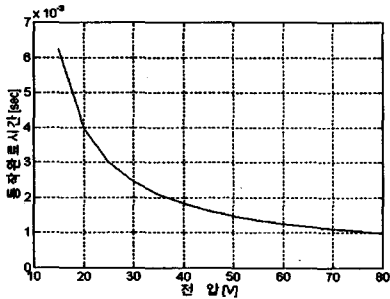


그림 4. 인가전압과 이동시간과의 관계
Fig. 4 Variation of moving-time on source voltage

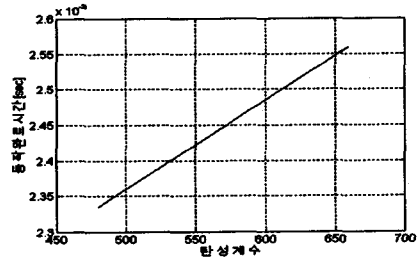


그림 5. 탄성계수와 이동시간과의 관계
Fig. 5 Variation of moving-time on spring constant

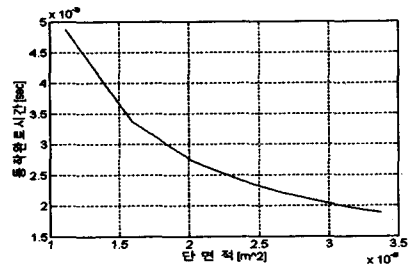


그림 6. 플런저 단면적과 이동시간과의 관계
Fig. 6 Variation of moving-time on plunger area

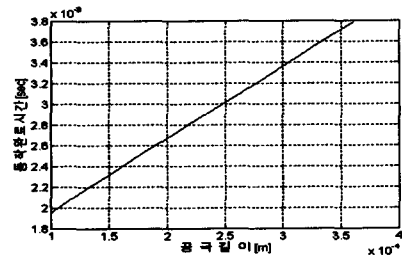


그림 7. 스트로크와 이동시간과의 관계
Fig. 7 Variation of moving-time on stroke

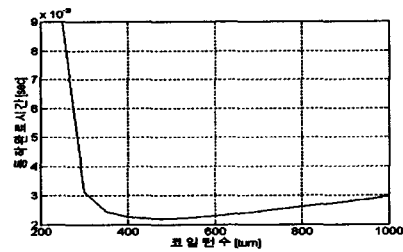


그림 8. 코일 권수와 이동시간과의 관계
Fig. 8 Variation of moving-time on number of turns

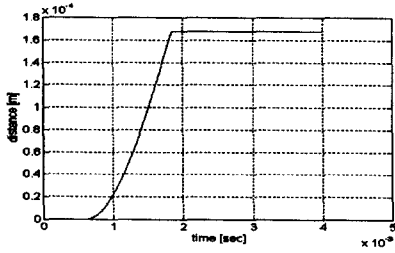


그림 9 최적치를 이용한 시간에 따른 변위 곡선
 Fig. 9 Displacement curve on moving-time using optimum value of design parameters

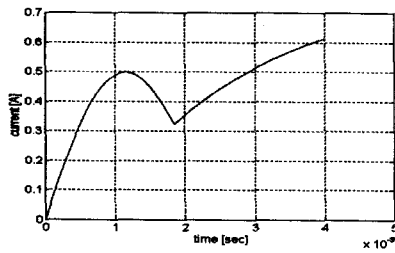


그림 10. 최적치를 이용한 시간에 따른 전류 곡선
 Fig. 10 Current curve on moving-time using optimum value of design parameters

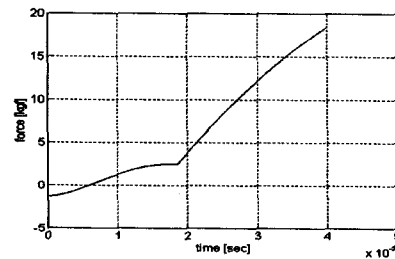


그림 11 최적치를 이용한 시간에 따른 전자기력 곡선
 Fig. 11 Magnetic force curve on moving-time using optimum value of design parameters

4. 결론

전자기적 부분의 이론 해석을 통해 각 파라메타들이 상호간에 미치는 영향을 조사하였다. 해석에는 가정자료법을 이용하였고, 재질로는 강자성체를 사용하였으며 와전류의 영향도 고려하였다.

설계 파라메타와 플러저 이동시간과의 관계에서 설계 최적치를 도출하였으며, 설계 최적치를 사

용하여 시간에 따른 플러저의 변위, 전류, 전자기력 등의 동특성을 검토하였다.

플러저형 솔레노이드의 고속 동작특성 해석에서 나타난 결론은 다음과 같다.

(1) 플러저의 중량, 스트로크 및 스프링의 탄성계수는 적을수록, 전압과 단면적은 클수록 동작완료시간은 짧아지지만, 상호간의 관계 및 외부조건 등을 고려하여 최적치를 선정하여야 한다.

(2) 코일의 권수가 적정치를 가지지 않으면 동작완료시간이 짧아지거나 길어지게 되므로 전자기력의 관계를 고려하여 결정한다.

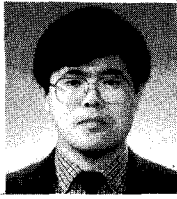
고속 플러저형 솔레노이드의 실제기술확보를 위해 제안된 알고리즘에 의한 최적 설계치 도출과 타당성 검토, 실증 실험을 반복하여 솔레노이드 설계 프로그램의 완성도를 높여나가야 할 것이다.

또, 유한 요소법을 통해 솔레노이드의 각 중요 부위에 대한 설계를 시도하여, 솔레노이드 설계에 필요한 각종 측정 및 설계에 드는 비용을 절감할 수 있도록 고안된 설계 툴을 개발할 예정이다.

참고문헌

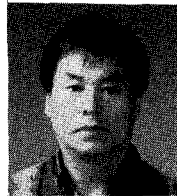
- [1] 진 정환, 권 중혁, 백 동기, 성 세진, "고속 소형 솔레노이드 밸브의 최적 설계에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집A, pp. 534-536, 1996
- [2] 河瀬順洋, 大立泰治, "自動車用電磁弁の動作特性の有限要素解析", 日本電氣學會研究資料, SA-90-39(RM-90-51), 1990
- [3] 河瀬順洋, 村井由宏, "プランジャ型電磁石の過渡動作特性の數値解析", 日本電子情報通信學會論文誌 C, Vol. J71-C, No. 1, pp25-31, 1988
- [4] BRUNO LEQUESNE, "Dynamic Model of Solenoids Under Impact Excitation, Including Motion and Eddy Current", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 26, No. 2, pp1107-1116, March, 1990
- [5] 鹿窩宗, "電磁石の動特性の解析", 日本電氣學會研究資料, SA-93-28(RM-93-66), 1993
- [6] 鹿窩宗, 河村吉久, "高速電磁弁の開発-ソレノイドについての考察-", 日本電氣學會論文誌 D, 114 卷, 7/8号, 1994
- [7] 이 윤종의 1인, *최신전자기기학*, 문운당, pp258, 1989
- [8] 電氣學會, *リニアモータとその應用*, 日本電氣學

會, pp27-33, 5, 1983



백 동 기 (白 童 基)

1957년 9월 3일생. 1984년 전북대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 충남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 박사과정 수료. 1984년~1986년 LG전자 근무. 1986년~1993년 한국기계연구원 근무. 1993년~현재 주성전문대학 전기과 조교수. 연구분야 : SMPS, 인버터



성 세 진 (成 世 鎭)

1948년 7월 15일생. 1973년 서울대 공대 공업교육과 졸업. 1975년 동 대학원 졸업(석사). 1988년 일본 동경공업대 대학원 졸업(공학박사). 현재 충남대 공대 전기공학과 교수. 연구분야 : SMPS, 인버터, UPS, 전력계통연계