특집 소형 정밀모터의 설계 및 제어기술 (Ⅲ)

영구자석기기의 설계 및 특성해석

강 규 홍*, 홍 정 표**
(*창원대 전기공학과 박사과정, **창원대 전기공학과 교수)

1. 서 론

최근 시스템자동화를 비롯한 산업기기의 발달은 전력전자 분야의 발달에 힘입어 전동기를 이용한 구동장치가 널리 보급되면서 급격히 진행되고 있다. 일반적으로 전동기는 기능 및 용도에 따라 시스템의 동력원으로 이용되는 파워용 기기와 서보용 소형 정밀기기로 분류되어진다. 시스템의 동력원으로 이용되는 파워용 전동기는 유압등의 기계적 장치에 비해 제어성 및 속응성이 우수하므로 자동화를 위한 기반으로서 연구가 활발히 진행되어 FA 및 추진장치에 주로 적용되고 있다. 전동기의 효율, 단위중량당 출력비 등을 중시하는 파워용 기기에 비해 기능을 중요시하는 소형 정밀기기의 적용 범위는 센서나 음향기기 등의 서보용으로 응용되고 있다. 각종 산업기기들의 다기능화와 고도화가 요구됨에 따라 서보용 전동기의 수요가 급격히 증가하고 있지만 아직 까지는 연구의 결과가 상대적으로 미약한 상태이다. 서보용 소형 정밀모터로는 스테핑 모터, 브레시레스 모터, 리니어 모터, AC서보 모터 등이 주류를 이루고 있으며 주로 고성능 영구자석을 이용하고있다. 최근, Nd계와 같은 고에너지밀도의 희토류자석의 개발은 소형 모터의 기능을 향상시켜 적용범위를 넓혔으며 용도에 부합하는 새로운 구조의 특수 기기의 출현을 앞당겼다. 이러한 소재의 발달과 더불어 소형 정밀모터의 개발을 위해서는 전동기의 설계 및 해석기술의 확보가 중요하다.

본 고에서는 근래에 들어 적용범위가 넓어지고 있는 리니어 DC 모터(LDM)를 대상으로 자기회로 해석 및 설계방법을 제시하여 이 분야에 관련한 연구개발들에게 다소나마 도움을 주고자한다.

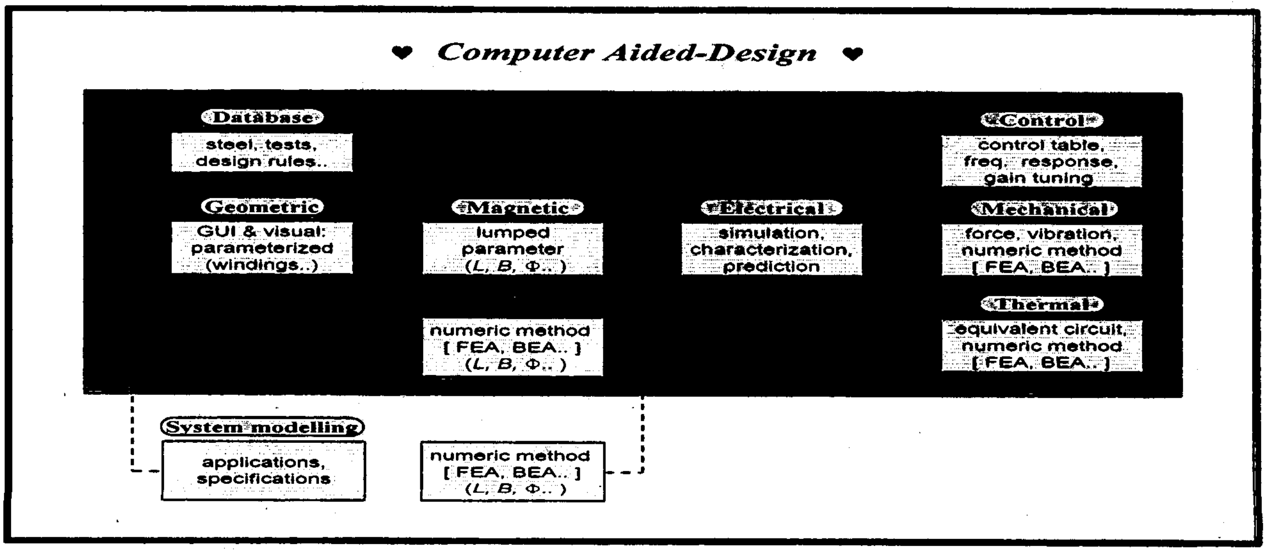


그림 1. 전기기기의 Computer Aided Design

2. CAD process

전자기적인 분포는 전기회로와 달리 매우 복잡한 양상을 띠고 있으나 대부분 이러한 분포특성을 집중정수회로를 이용하고 경험적인 요소를 바탕으로 설계가 진행되어왔다. 그러나, 근래에 들어 컴퓨터가 발달함에 따라 복잡한 전자기적인 분포특성을 현상 그대로 해석할 수 있는 수치해석기법을 설계에 적용하는 것이 가능해졌다.

저자가 나름대로 구상하고 있는 전기기기 설계의 CAD (Computer Aided Design) process를 그림 1에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 전기기기를 설계하기 위해서는 시스템모델링을 포함하여 기계적인 특성과 열적인 문제까지 분석하여 설계에 반영되어야 한다.

그림 1의 CAD processor를 간단히 설명하면 다음과 같다.

- **시스템 모델링**
  무엇보다도 먼저 검토되어야 하는 사항으로 적용시스템의 부하조건과 운전조건을 고려하여 구동원인 전동기의 용량, 기구적인 칫수등 설계사양을 결정한다.
- **Geometry 모델링**
  설계자의 편의를 위하여 GUI(Graphic User Interface) 기능을 제공한다.
- **자기회로설계**
  퍼미언스법과 같은 집중정수(lumped parameter)를 이용하여 기본적인 칫수를 결정하고, 수치해석기법을 이용하여 보다 정확한 회로정수를 산출하여 반복설계를 시행한다. 이러한 반복설계 과정은 컴퓨터 내부에서 자동으로 실행될 수 있는 구조를 갖추어야 한다.
- **특성계산**
  구동 전기회로에 필요한 회로정수(저항, 인덕턴스등)를 수치해석기법을 이용하여 구한 다음 정특성 및 동특성을 해석하여 시스템의 요구성능을 만족하는지 평가한다.
- **기계적 특성**
  전동기 운전조건을 고려한 온도특성을 분석하여 절연등급을 결정하고 진동과 같이 전동기가 시스템에 미치는 기계적인 영향을 분석한다.

본 고에서는 지면 관계상 XY 테이블 구동용 LDM의 자기회로 설계와 특성해석 과정에 제한하여 기술하였다.

3. 시스템 모델링 및 자기회로 설계

먼저 시스템 모델링을 통하여 구동용 전동기의 설계사양을 결정한다.

3.1 설계사양

구동용 LDM의 구조는 양측식으로 가동자석형이며, 3상 Bi-polar 구동방식으로 편측 만을 나타낸 개략적인 구조는 그림 2와 같으며,[1]

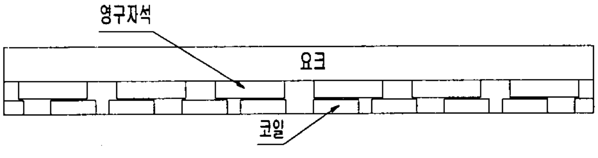


그림 2. 리니어 DC 모터

시스템의 요구사양은 다음과 같다.

- 전체 스트로크 : 650mm
- 유효 스트로크 : 600mm
- 부하 중량 (m) : 18kg
- 전원 사양 : 170Vmax.
- 운전패턴 : 그림 3
- 최대 가속도 : 5g
- 지지구조 : 리니어 가이드

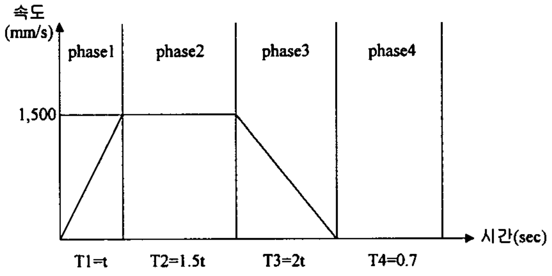


그림 3. 운전패턴

이상의 시스템 요구사양으로부터 가동자의 길이는 100mm로 결정하였으며, 가동자의 이동시간은 1.35[sec]가 된다. 이제 가동자의 추력을 결정하기 위하여 리니어 가이드의 마찰계수 D를 0.01, 가동자와 고정자 사이의 흡인력 F_{att}를 1000[N]이라고 가정하여 다음 수식들로 부터 전동기의 설계사양을 결정한다.

그림 3의 운전패턴에서 각 구간별 요구추력은 다음과 같다.

$$
\begin{aligned}
F_{T1} &= F_f + F_a \\
&= D\times(mg + F_{att}) + m\frac{v}{T1} \\
F_{T2} &= F_f \\
&= D\times(mg + F_{att}) \qquad (1) \\
F_{T3} &= F_f - F_a \\
&= D\times(mg + F_{att}) - m\frac{v}{T3}
\end{aligned}
$$

가동자의 정격추력 F는 식(2)로부터 구하게 된다.[2]

$$F = \sqrt{\frac{\sum F_i^2 T_i}{\sum T_i}} \qquad (2)$$

한편, 리니어 DC 모터의 정격출력 및 입력전류는 다음 식으로부터 결정할 수 있다.

$$출력 = F \times v \quad [W]$$

$$입력 = \frac{출력}{효율} \quad [W] \qquad (3)$$

$$정격\ 전류 = \frac{입력}{정격\ 전압} \quad [A]$$

이외에도 공극자속밀도, 요크 두께, 자극비등과 같은 기본적인 설계사양을 결정하여야 한다.

3.2 자기회로 설계

영구자석계자형 전기기기에서 자기회로설계에 가장 큰 영향을 미치는 것이 자기회로 상태에 따라 결정되는 영구자석 내부의 동작점이다. 먼저 사용하고자 하는 영구자석을 결정한 다음 퍼미언스법을 이용하여 기본 칫수를 초기설계한 다음 유한요소법과 같은 수치해석기법을 이용하여 반복설계 과정을 수행한다.

3.2.1 영구자석의 동작점(3)

영구자석 1극에 대한 자기회로의 구성을 간단한 형태의 등가회로로 나타내면 그림 4와 같다. 그림 좌측의 영구자석 기자력과 그 누설자로가 공극을 통해서 우측의 전기자와 전기자 누설자로로 연결되어 있다. 또한 동작시에 전기자 권선에 유기되는 역기전력에 의한 기자력이 작용하므로 그것을 등가전원으로 나타내고 있다. 즉 영구자석 자기회로의 해석은 π 형 등가회로를 대상으로 한다.

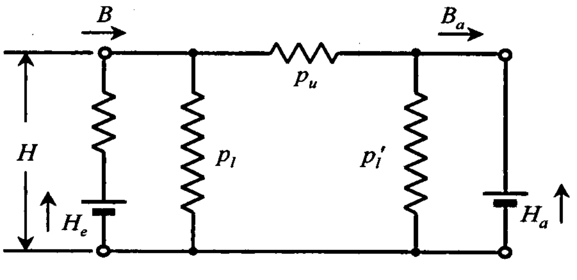


그림 4. 영구자석의 등가회로 (동작시)

그림 4의 등가회로에서 퍼미언스 계수들은 각각 유효 퍼미언스 계수 p_u 및 누설 퍼미언스계수 p_l , p_l'를 나타내며 구체적인 계산은 참고문헌을 참고하기 바란다.

영구자석의 동작은 일반적인 전기기기의 경우와 마찬가지로 출력단을 개방한 경우와 단락한 경우의 자기상태를 알면 결정이된다.

영구자석 내부에서의 자속은 입력단의 누설자기회로 때문에 전기자에 미치는 유효자속은 감소한다. 즉, 출력단의 유효자속 B_u는 입력측의 자속 B_m에 비해서 작아지게 되며 감소의 정도를 다음의 누설계수로 나타낸다.

$$\sigma = B_m / B_u \qquad (4)$$

출력단 개방시에는 영구자석 기자력과 전기자권선의 역기자력이 완전히 반대방향이기 때문에 출력단 자속은 없어지지만 출력단의 누설자로 때문에 양 기자력에 차가 발생하며, 이 차이를 기자력 손실계수로 나타내며

$$\lambda = H_m / H_u \qquad (5)$$

의 관계가 있다. H_u를 유효기자력이라고 부른다.

식(4)와 (5)를 유효 및 누설 퍼미언스계수를 이용해서 정리하면 다음과 같다.

$$\sigma = 1 + p_l / p_u \qquad (4')$$
$$\lambda = 1 + p_l' / p_u \qquad (5')$$

회전기의 경우와 같이 비교적 작은 기계적공극을 갖는 기기들에 대해서는 σ = 1.1~1.2, λ = 1.1~1.15 정도이며, LDM과 같이 공심코일의 경우에는 누설계수가 다소 커지게 된다.

2개의 자기적 상태에서는 출력단 단락시의 퍼미언스계수가 가장 크고 앞서 말한 것처럼 동작점을 결정하는 퍼미언스 계수는

$$\sigma p_u = p_u + p_l \qquad (6)$$

이며, 출력단 개방시의 퍼미언스계수는 회로도에서 쉽게 알 수 있듯이

$$p_L = p_l + \frac{p_u p_l'}{p_u + p_l'} = p_u(\sigma - \frac{1}{\lambda}) \qquad (7)$$

이다.

그림 5에 영구자석의 감자특성곡선을 나타내었으며, P 및 S 가 각각 출력단 단락시와 개방시의 동작점이다. 이러한 동작점에 있어서의 자속밀도 및 감자계는 각각

$$B_m = \frac{B_r \sigma p_u}{\mu_r + \sigma p_u}, \quad H_m = \frac{B_r}{\mu_r + p_L} \qquad (8)$$

로 주어진다.

따라서 영구자석 자속 중에서 전기자에 영향을 주는 유효자속과 유효기자력은 다음과 같다.

$$B_u = \frac{B_r p_u}{\mu_r + \sigma p_u},$$
$$H_u = \frac{B_r}{\lambda \mu_r + p_u(\lambda\sigma - 1)} \qquad (9)$$

그림 5의 동작상태를 살펴보면 다음과 같다. 출력단 단락시의 누설 퍼미언스 계수는 $p_l = p_u(\sigma - 1)$이다. 이 퍼

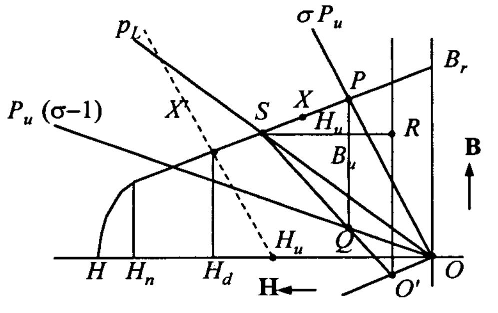


그림 5. 영구자석의 감자특성곡선

미언스선을 긋고, 원점 O 를 지나 직선감자특성에 평행인 직선을 긋는다. 그리고 동작점 P 에서 H 축에 그은 수선이 앞에서 말한 퍼미언스선과 만나는 점을 Q 로 하여 이 점과 동작점 S 를 잇는 직선 SQ가 앞서 말한 감자특성에 평행인 직선과의 교점을 O' 라고 하며 점 O' 를 지나 H축에 수직인 직선에 동직점 S 에서 그린 수선의 발을 R 이라 한다. 그림 5에서 유효자속 및 유효기자력은 각각 다음과 같다.

$$B_u = PQ, \quad H_u = RS$$

식(9)로 부터 계산된 유효자속과 유효기자력 이외에도 설계를 위해서는 기기의 운전온도를 고려한 온도특성과 영구자석의 불가역감자에 대한 검토가 반드시 필요하다.

3.2.2 전기자 권선설계

공극자속밀도가 결정한 다음 설계사양을 만족하는 상당 코일 턴수를 식(10)으로 부터 구할 수 있다.

$$t = \frac{F}{k_w\, k_0\, N_s\, B\, i\, L} \tag{10}$$

여기서 F는 정격 출력, B는 공극 자속밀도, i는 정격 전류, L은 유효도체 길이, N_s는 통전되는 도체변의 수를 나타낸다. 권선계수 k_w는 0.7로 설정하였으며, k_0는 합성 유기기전력의 평균치를 나타내는 계수로서 3상 바이폴러 구동방식에서는 1.65가 된다. 가동자의 평균 이동속도가 $v\,[m/\sec]$일 때 선간에 유기되는 유기기전력 E와 기전력 상수 k_f는 다음과 같다.

$$E = k_w\, k_0\, N_s\, t\, v\, B\, L \tag{11}$$

$$k_e = E/v \quad [v/\sec] \tag{12}$$

퍼미언스법을 이용하여 영구자석 계자와 전기자의 기본설계를 수행하여 전동기의 기본칫수를 결정한 다음 보다 정확한 설계를 위해서 유한요소법[4]과 같은 수치해석기법을 이용한 반복설계 과정을 거쳐 자기회로설계를 완료하게 된다.

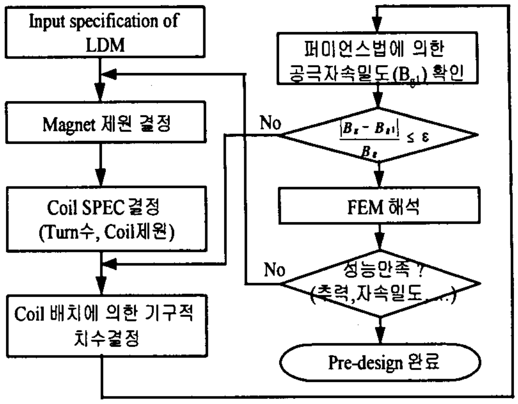


그림 6. LDM 설계 과정

표 1. 전동기의 설계 제원

항 목	수치(단위)	항 목	수치(단위)
입력전류	1.8[A]	공극 자속밀도	0.43 [T]
권선계수	0.7	요크두께	10 [mm]
자극비	0.7	정격추력	104 [N]
전류밀도	4.35	정격속도	1.5[m/sec]
턴수(한상)	302	최대속도	3.0[m/sec]
상 저항	3.92[Ω]	최대 공급전압	170[V]

그림 7에 양측식 LDM의 등포텐셜분포도를 나타내었다. 영구자석과 전기자권선의 상대적인 위치변화에 때른 추력특성을 해석하기 위하여 moving line technique을 적용하였다.[5]

그림 7. 등 포텐셜도 분포도

4. 동특성 해석

4.1 수학적 모델링

LDM의 과도상태에서의 동특성을 해석하기 위한 전압방정식과 기계적 운동방정식은 다음과 같다.

$$V = R\,i(t) + L\frac{di(t)}{dt} + k_e\,v(t) \tag{13}$$

$$F = k_f\,i(t) = M\frac{dv(t)}{dt} + D\,v(t) + F_l \tag{14}$$

여기서 k_f는 추력상수이고 M은 가동자 질량, D는 마찰계수, F_l은 부하를 나타낸다. 전압방정식을 구성하는 회로정수인 인덕턴스와 기전력상수는 설계단과정에서유한요소해석으로 산정하였고, End coil 부분은 Liwschitz에 의해

계산된 식을 사용하였으며 동특성 해석의 제원은 표 2에 나타내었다.

표 2. 동특성 해석을 위한 파라메터

V	108[v]	L	27.4[mH]	F_l	104[N]	D	0.01
R	7.82[Ω]	k_e	63	M	19[kg]	k_f	57.8

과도상태에서 전류는 속도의 함수가 된다. 즉, 속도 기전력 및 변압기 기전력에 따라 전류가 변하게되며 발생 추력도 변화한다. 속도에 대한 미분방정식의 해를 구해서 전류 및 전류의 변화로부터 속도 및 가속도, 추력 특성을 해석한다.

전압방정식과 기계적 운동방정식으로부터 전류의 순시치에 대한 수식은 식(15)와 같으며, 운동방정식은 식 (16)과 같다.

$$I = \frac{M}{k_f}\frac{dv(t)}{dt} + \frac{D}{k_f}v(t) + \frac{F_L}{k_f} \tag{15}$$

$$\frac{LM}{k_f}\frac{d^2v(t)}{dt^2} + \left[\frac{LD}{k_f} + \frac{MR}{k_f}\right]\frac{dv(t)}{dt} + \left[\frac{RD}{k_f} + k_e\right]v(t) + \frac{F_lR}{k_f} - V(t) = 0 \tag{16}$$

식(16)의 일반해는 다음과 같으며,

$$v(t) = v_c(t) + v_p(t)$$

$$v_c(t) = C_1 e^{\frac{-(\frac{D}{M}+\frac{R}{L})+\sqrt{(\frac{D}{M}+\frac{R}{L})^2-4(\frac{DR}{LM}+\frac{k_fk_e}{LM})}}{2}} + C_2 e^{\frac{-(\frac{D}{M}+\frac{R}{L})-\sqrt{(\frac{D}{M}+\frac{R}{L})^2-4(\frac{DR}{LM}+\frac{k_fk_e}{LM})}}{2}}$$

$v_p(t) = C$, $v_p'(t) = 0$, $v_p''(t) = 0$으로부터 $v_p(t)$는

$$v_p(t) = \frac{k_fV - F_lR}{DR + k_fk_e}$$

이 수식에 초기속도 '0'이라는 초기조건으로부터 미정계수를 결정하면 시간에 따른 속도 방정식은 다음과 같다.

$$\mathrm{A} = \frac{F_lR - K_fV}{DR + K_fK_e} \qquad \mathrm{B} = \sqrt{\mathrm{C}^2 - 4\mathrm{A}}$$

$$\mathrm{C} = -\left(\frac{D}{m} + \frac{R}{L}\right) \text{ 일 때}$$

$$\mathrm{m}_1 = \frac{-\mathrm{C} + \sqrt{\mathrm{C}^2 - 4\mathrm{A}}}{2}$$

$$\mathrm{m}_2 = \frac{-\mathrm{C} + \sqrt{\mathrm{C}^2 - 4\mathrm{A}}}{2}$$

$$v(t) = \frac{\mathrm{m}_2/\mathrm{m}_1}{(\mathrm{m}_2/\mathrm{m}_1 - 1)}\mathrm{A}e^{\mathrm{m}_1 t} + \frac{1}{(1 - \mathrm{m}_2/\mathrm{m}_1)}\mathrm{A}e^{\mathrm{m}_2 t} - \mathrm{A}$$

4.2 LDM의 동특성

정격전압과 최대공급전압에서 시간에 따른 추력의 특성을 그림 8에 나타내었다. 기동시에는 가속도의 증가에 의한 전류 및 추력의 변화가 급격하게 나타남을 알 수 있다.

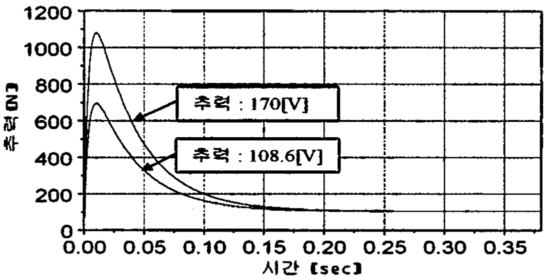


그림 8. 시간에 따른 추력 특성

시간에 따른 속도 및 가속도 특성을 그림 9에, 정격전압을 인가한 상태에서 중량 부하의 증가에 따른 정상상태 도달 시간을 그림 10에 나타내었다.

정격전압 인가 시 정상상태 속도는 1.45[m/sec]이고, 정상상태 도달시간은 0.128[sec]로서 충분한 가속력을 가짐을 알 수 있다.

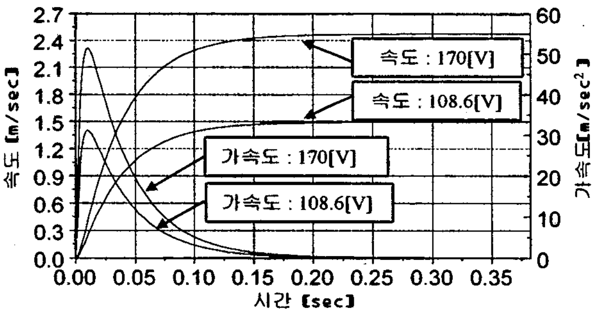


그림 9. 속도, 가속도 특성

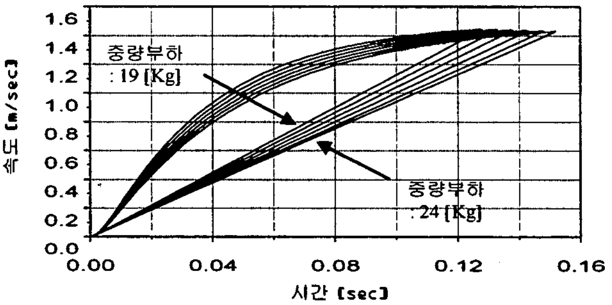


그림 10. 중량 부하에 따른 속도 특성

그림 11에 LDM은 정격전압 인가시 추력-속도, 추력-전류 특성을 나타내었다. 각 특성이 직선적으로 변화하고 있으며 전원 전압이 결정되면 정속 운전 가능한 범위를 알 수 있다.

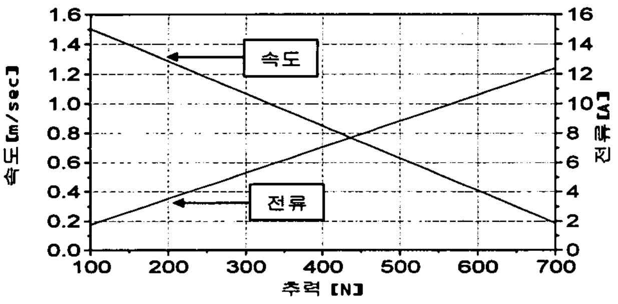


그림 11. 부하에 따른 속도 및 전류특성

5. 결 론

소형 정밀모터의 수요증가에 의한 양적 팽창과 더불어 기기의 설계 및 해석기술이 수반되어야 기술경쟁력을 가질 수 있을 것이다. 본 고에서는 소형 정밀모터의 주류를 이루는 영구자석기기의 자기회로 설계 및 특성해석에 관해서 다루었으며, 정밀 서보시스템용 리니어 DC 모터의 설계 및 동특성을 수행하였다. 설계 단계에서 설계의 신뢰성을 확보하기 위하여 수치해석 기법을 도입하였으며 설계의 타당성을 검증하기 위해서 동특성 해석을 수행한 결과 시스템에 필요한 운전특성을 만족하는 해석 결과를 도출하였다.

전기기기를 설계하는 방법에는 여러 가지 방법이 있을 수 있지만 그림 1에 제시한 CAD process가 앞으로는 보편화 될 것으로 판단된다. 끝으로, 이 분야에 관련한 연구개발자 들에게 조금이나마 도움이 되었으면 한다.

참고문헌

[1] BASAK, "PermanentMagnet DC Linear Motors", CLARENDON PRESS · OXFORD 1996

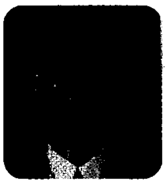
[2] 大川 光吉, "永久磁石磁氣の回路設計 · 特性計算法", 總合電子リサーチ, 1987

[3] J. F. Giewas, "Permanent Magnet Motor Technology", Marcel Dekker, Inc., 1997

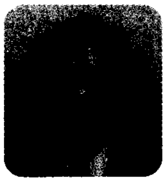
[4] 임달호, 電氣系의 有限要素法, 동명사, 1986

[5] Dal-Ho Im, Jung-Pyo Hong and Sang-Baeck Yoon, "A Study on the Optimum Design of Ladder Type LIM Considering Space Harmonics", Procd. of ISEM '95, pp.210-213, 1995

저 자 소 개



강규홍(姜圭洪)
1967년 11월 5일생. 1992년 창원대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년~1998년 LG전자(주) 주임연구원. 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정



홍정표(洪正杓)
1959년 4월 17일생. 1983년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년~1990년 LG정밀(주) 중앙연구소 주임연구원. 1990년~1992년 삼성전기(주) 종합연구소 선임연구원. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1995년 한양대학교 산업과학연구소 선임연구원. 1996년~ 창원대 공대 전기공학과 조교수