

定電流 인버터로 구동되는 리니어 BLDC 모터의 特性 研究

백수현* 맹인재** 김용** 김필수***
 * 동국대 전기공학과 ** 대림전문대학 제어계측과 *** 충청전문대학 전기과

-Characteristics of Linear BLDC Motor driven by Constant Current Inverter-

S. H. Baek* I. J. Maeng* Y. Kim** P. S. Kim***
 * Dong-Guk Univ. ** Dea-Rim Jr. College *** Chung-Cheong College

제 1 장 서 론

리니어 브러시리스 DC 모터(Linear Brushless DC Motor, Linear BLDC Motor)는 브러시 및 정류자 등의 기계적 접촉부를 전자회로로 치환한 제어용 모터로서 소형, 경량화를 이룰 수 있고, 기계적 소음이 없으며 수명이 긴 특징을 가지고 있다. 또한 BLDC 모터는 추력-입력전류, 추력-속도의 직선성, 급격한 가속 등 일반적으로 제어용 모터에서 요구되는 성능을 겸비한 우수한 모터라 할 수 있으며, 그 결과 고정밀 위치제어나 속도제어를 필요로 하는 로봇, 기록계, X-Y 구동장치나 정밀조립기계등에 이용되고 있다.

한편, BLDC 모터를 효율적으로 이용하기 위해서는 기본적으로 자기회로에 대한 정확한 특성해석이 필요하게 되며, 특히 BLDC 모터의 설계시 고추력화를 이루기 위해서는 극피치/공극 길이(τ/g)의 비가 매우 중요한 요소로 작용하게 된다.[1]-[5]

본 논문에서는 리니어 BLDC 모터의 특성해석 및 설계의 기준이 되는 추력특성을 해석하기 위해서 정전류 인버터로 구동되는 리니어 BLDC 모터를 대상으로 등가 자기회로망법 및 퍼미언스법을 이용하여 해석함으로써 추력에 실질적으로 영향을 미치는 공극에서의 자속밀도를 계산하고자 한다.[5]

또한 τ/g 의 변화에 따른 공극에서의 퍼미언스 및 자속밀도를 구하고, 이를 이용하여 추력특성의 변화를 분석함으로써 BLDC 모터의 합리적인 설계방안을 제시하고자 한다.

제 2 장 리니어 BLDC 모터의 특성 해석

2-1 퍼미언스법에 의한 자기회로 해석

본 연구에서는 가동자의 변위에 따른 공극 퍼미언스 계산을 위해 일종의 가상자로법인 퍼미언스법을 이용하여 그림 2.1과 같은 직선과 원호 및 타원 형태의 자로를 구성하여 해석하였으며, 이들 자로의 구성은 가동자의 변위 x 에 따라 그림 2.2와 같은 형태의 자로구성으로 나누어 생각할 수 있다.

한편, 그림에서 p_1 은 공극부에서의 유효퍼미언스, $p_2 \sim p_5$ 는 공극부에서의 누설퍼미언스를 나타내며, 각 부분에서의 퍼미언스 $p_1 \sim p_5$ 를 계산하여 합성함으로써 변위 x 에 대한 전체 퍼미언스를 구할 수 있다.

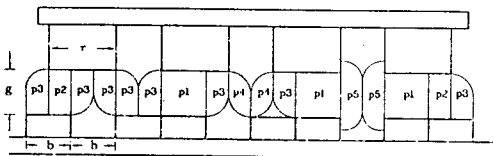


그림 2.1 BLDC 모터의 기본 공극자로
 Fig. 2.1 Basic Flux Path of Linear BLDC Motor

일반적으로 자기저항의 역수인 퍼미언스는 다음과 같이 표현된다.

$$p = \mu_0 \mu_r \frac{A_g}{l_g} \quad (2-1)$$

여기서, μ_0 : 진공중의 투자율 μ_r : 비투자율

A_g : 공극의 단면적 l_g : 공극의 길이

따라서 가동자의 변위 x 를 그림 2.1에서 3가지 형태로 분류하여 식(2-1)를 이용함으로써 공극자로에서의 퍼미언스는 다음과 같이 구할 수 있다.

1) $0 \leq x < b/2$ 인 경우, 그림 2.1의 공극자로를 이용하면

$$p = (3p_1 + 2p_2 + 8p_3 + 2p_4 + 2p_5) \\ = \frac{2\mu_0 c}{\pi} \left(4\pi \frac{b}{g} + 8 \ln \left(1 + \frac{\pi}{2} (\tau - b) \right) + 2 \ln \left(1 + \frac{\pi}{2} (\tau - x) \right) + 2 \ln (m + \sqrt{m^2 - 1}) \right) \quad (2-2)$$

2) $b/2 < x \leq 2b$ 인 경우,

$$p = (2p_1 + 3p_2 + 9p_3 + p_4 + p_5) \\ = \frac{2\mu_0 c}{\pi} \left(2\pi \frac{b}{g} + 3\pi \frac{b}{2g} + 9 \ln \left(1 + \frac{\pi}{2} (\tau - b) \right) + \ln \left(1 + \frac{\pi}{2} (\tau - x) \right) + \ln (m + \sqrt{m^2 - 1}) \right) \quad (2-3)$$

3) $2b < x \leq 3b$ 인 경우,

$$p = (3p_1 + p_2 + 4p_3 + 3p_4 + 2p_5) \\ = \frac{2\mu_0 c}{\pi} \left(3\pi \frac{b}{g} + \pi \frac{b}{2g} + 4 \ln \left(1 + \frac{\pi}{2} (\tau - b) \right) + 3 \ln \left(1 + \frac{\pi}{2} (\tau - x) \right) + 2 \ln (m + \sqrt{m^2 - 1}) \right) \quad (2-4)$$

여기서, τ : 자석폭, b : 코일폭, c : 자석의 길이

g : 공극의 길이, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$, $m = 1 + \frac{b}{g}$

과 같이 계산될 수 있으며, 이들 각 식들을 합성하면 가동자의 위치변화에 대한 전체 퍼미언스를 얻을 수 있게 된다.

그림 2.2는 공극의 퍼미언스 $p(x)$ 가 변위 x 및 τ/g 의 변화에 따라 변하는 형태를 나타낸다.

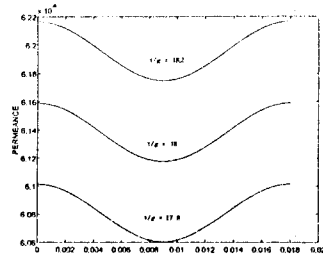


그림 2.2 공극에서의 퍼미언스
 Fig. 2.2 Permeance at Air Gap

2-2 공극 자속밀도의 계산

본 논문에서는 영구자석을 포함한 자기회로를 해석하기 위해 일반적인 전기회로에서 이용하고 있는 그림 2.3과 같은 4단자 회로망의 π 형 등가 자기회로를 구성하여 공극에서의 유효자속밀도를 계산하였다.

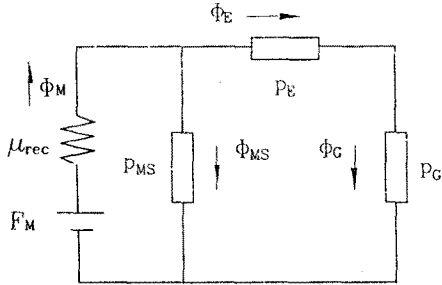


그림 2.3 영구자석 1상에 대한 π 형 등가 자기회로
Fig. 2.3 π Type Equivalent Magnetic Circuit

그림 2.3의 등가 자기회로로부터

$$\phi_E = \phi_G \quad (2-6)$$

$$\phi_M = \phi_{MS} + \phi_E \quad (2-7)$$

$$\frac{\phi_{MS}}{\rho_{MS}} = \frac{\phi_E}{\rho_{PE}} + \frac{\phi_G}{\rho_{PG}} \quad (2-8)$$

$$F_M = \frac{\phi_{MS}}{\rho_{MS}} + \frac{\phi_M}{\rho_M} \quad (2-9)$$

여기서, ϕ_E, ρ_E : 공극에서의 유효자속 및 퍼미언스
 ϕ_G, ρ_G : 전기자 코일의 누설자속 및 퍼미언스
 ϕ_{MS}, ρ_{MS} : 영구자석에서의 누설자속 및 퍼미언스
 ϕ_M, ρ_M : 영구자석 내부자속 및 퍼미언스

임을 알 수 있으며, $F_M \rho_M = B_r A_M$ 이므로 $\phi_E = B_E A_M$ 이라면, 공극에서의 유효자속밀도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B_E = \frac{B_r}{\left[\left(\frac{1}{\rho_E} + \frac{1}{\rho_G} \right) (\rho_M + \rho_{MS}) \right] + 1} \\ = \frac{B_r}{\left[\frac{1}{\rho} \mu_{rec} \right] + 1} \quad (2-10)$$

여기서, μ_{rec} : 영구자석의 리코일 투자율

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_E} + \frac{1}{\rho_G}$$

따라서 식(2-11)으로부터 공극에서의 유효자속밀도는 공극의 퍼미언스값에 의존함을 알 수 있다.

2-3 추력 특성

본 논문의 해석대상인 영구자석 계자형 3상 BLDC 모터의 경우, 계자자속은 일정하다고 볼 수 있으며, 전기자 코일이 각각 동일한 직렬권회수로 구성되어 있고, 전기각 $2\pi/3$ 의 위상차를 갖도록 배치되어 있다. 또한 3상 120° 전전류 인버터 구동방식의 리니어 BLDC 모터의 경우 각 상의 코일에 흐르는 전류는 일정하므로 각 상의 쇄교 자속밀도는 식(2.12)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_a = Z \sin \frac{2\pi}{\tau} x$$

$$Z_b = Z \sin \left(\frac{2\pi}{\tau} x - \frac{2}{3} \pi \right) \quad (2-12)$$

$$Z_c = Z \sin \left(\frac{2\pi}{\tau} x - \frac{4}{3} \pi \right)$$

여기서, Z_a, Z_b, Z_c : 각 상의 쇄교자속밀도

$$Z = \frac{K_w \omega}{\pi} : \text{최대자속밀도}$$

K_w : 권선 계수

ω : 권선 턴수

τ : 극피치

$$\frac{2\pi}{\tau} x : \text{가동자의 변위각}$$

한편, 영구자석 계자에 의한 공극에서의 자속밀도분포도 정현적인 분포로 되므로 식(2-13)으로 표현된다.

$$B_E = B_m \cos \left\{ \frac{2\pi}{\tau} (x - \beta) \right\} \quad (2-13)$$

여기서, B_m : 자속밀도의 최대치

β : 고정자의 기준점으로 부터의 가동자의 변위 거리

로 나타낼 수 있다.

따라서, 전기자 코일에 I_r ($r = a, b, c$)의 전류가 흐를 때 미소변위각 $d\left(\frac{2\pi}{\tau} x\right)$ 에서 발생하는 미소추력 dF 는 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$dF = B_E l I_r Z_r d\left(\frac{2\pi}{\tau} x\right) \\ = l Z B_m I_r \cos \left\{ -\frac{2\pi}{\tau} (x - \beta) \right\} \sin \left\{ \frac{2\pi}{\tau} x - \left(\frac{2\pi}{3} \right) (r-1) \right\} \\ = \frac{l Z B_m}{2} I_r \left[\sin \left\{ \frac{2\pi}{\tau} \beta - \frac{2\pi}{3} (r-1) \right\} \right. \\ \left. + \sin \left\{ \frac{4\pi}{\tau} x - \left(\frac{2\pi}{3} \beta + \frac{2\pi}{3} (r-1) \right) \right\} \right] d\left(\frac{2\pi}{\tau} x\right) \quad (2-14)$$

여기서, I_r : 각 상의 전류

l : 유효도체길이

또한, $k = l Z B_m$ 라 놓고, 이 식을 $x = 0$ 에서 2π 까지 적분하면 식(2-15)를 얻을 수 있다.

$$F = \pi k I_r \sin \left(\frac{2\pi}{\tau} \beta - \frac{2}{3} \pi (r-1) \right) \quad (2-15)$$

한편, $k = l Z B_m = \frac{2}{\tau} B_m \frac{\tau}{2} l \frac{K_w \omega}{\pi}$ 이며,

$$B_{mean} = \frac{2}{\tau} B_m \text{라 하면, } k = B_{mean} \tau l K_w \omega / 2\pi =$$

$K_w \omega \phi_E / 2\pi$ 로 다시 쓸 수 있다.

여기서, $\phi_E = B_{mean} \tau l$ 로서 영구자석 1극당 유효자속을 나타낸다.

따라서 발생추력은 식(2-16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = K_f I \phi_E [N] \quad (2-16)$$

여기서, K_f 는 전기자코일과 자기회로의 구성에 의해 결정되는 추력상수이다.

식(2-16)으로부터 발생추력은 전류와 공극에서의 자속밀도와와의 비례식으로 표현되고, 따라서 식(2-16)을 이용하여 추력을 계산할 수 있으며, 추력을 계산하기 위해서는 공극에서의 유효자속 ϕ_E 를 결정해야 한다는 것을 알 수 있다.

제 3 장 FEM에 의한 공극자속밀도 해석

3-1 FEM에 의한 자체해석

본 논문에서는 퍼미언스법과 더불어 리니어 BLDC 모터의 공극 자기회로의 해석을 위해 FEM 응용 패키지인 MAXWELL 2-D FIELD SIMULATOR를 이용하여 해석대상에 대해 공극자속의 분포 및 발생추력의 특성을 해석하였다.

그림 3.2는 공극에서의 자속분포를 나타낸 것이다.

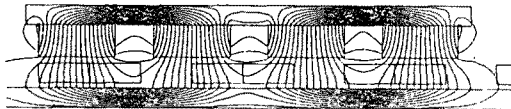


그림 3.1 FEM에 의한 자계해석
Fig. 3.1 Flux Distribution by FEM

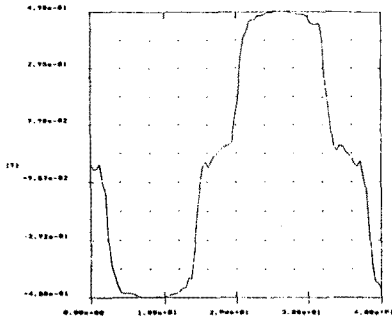


그림 3.2 공극에서의 자속밀도분포
Fig.3.2 Flux Density Distribution at Air Gap

리니어 BLDC 모터에는 공극이 존재하며, 리니어 BLDC 모터에서 발생하는 추력은 계자극의 위치함수로 되므로 공극 및 극피치에 따라 발생된 추력에는 맥동이 포함되게 된다. 그결과 최적의 추력을 얻기 위한 리니어 BLDC 모터 설계시 극피치에 대한 공극의 길이는 매우 중요한 요소가 된다.

따라서 리니어 모터의 설계시에는 우선 주어진 모터의 사양 및 제원에 따라 먼저 추력을 결정하고, 추력이 결정되면 원하는 추력을 효과적으로 얻기 위해 극피치에 대한 최적의 공극의 길이를 결정하고, 이를 통해 공극 자기회로에서 퍼미언스 및 자속밀도를 구해야 한다.

제 4 장 이론 결과와 실험 결과의 비교 및 검토

그림 4.1은 본 논문의 해석대상인 리니어 BLDC 모터에 대해 여자전류 변화에 대한 발생추력을 계산치와 실측치를 비교한 것이며, 그림 4.2는 퍼미언스법에 의해 공극에서의 자속밀도를 계산한 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

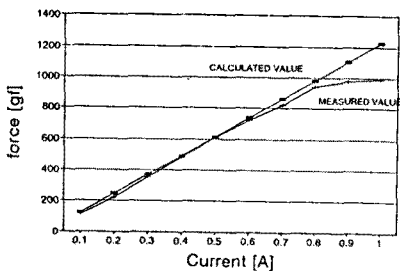


그림4.1 여자전류 변화에 대한 발생추력
Fig. 4.1 Thrust Force according to Exciting Current

한편, τ/g 의 비를 증가시키에 따라 고추력을 얻을 수는 있으나 가동자와 고정자사이에 작용하는 수직력으로 인하여 리니어 BLDC 모터를 정상적으로 동작시킬 수 없음을 알 수 있었다. 따라서 최적의 추력을 얻기 위해서는 최적의 τ/g 비를 결정하여야 하며, 지지기구에 대한 보완이 함께 이루어져야 함을 알 수 있었다.

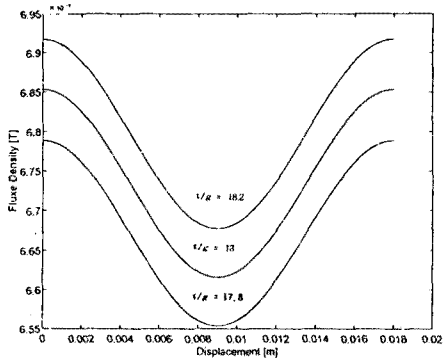


그림 4.2 퍼미언스법에 의한 공극에서의 자속밀도
Fig. 4.2 Flux Density at Air Gap by Permeance Method

제 5 장 결 론

본 논문에서는 기존에 제작된 리니어 BLDC 모터의 특성해석 및 설계의 기준이 되는 추력특성을 해석하기 위해 추력에 실질적으로 영향을 미치는 공극에서의 자속밀도를 증가 자기회로방법 및 퍼미언스법을 이용하여 해석함으로써 공극에서의 자속밀도를 계산하였으며, 자계해석 패키지인 MAXWELL 2-D FIELD SIMULATOR를 이용하여 고정자와 가동자의 위치변화에 따른 추력특성 및 여자전류 변화에 대한 리니어 BLDC 모터의 추력특성을 분석하였으며, 또한, τ/g 비의 변화에 대한 공극에서의 퍼미언스 및 자속밀도를 구하고 이를 이용하여 추력특성의 변화를 분석함에 따라 주어진 제한 및 사양에 대해 고추력 및 최적 추력의 발생을 위해서는 τ/g 비가 매우 중요한 요소로 작용함을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] 白木 學, 官尾 修美, "圖解 리니어-모터-시스템設計", 總合電子出版社, 1985
- [2] 任泰彬, "扁平形 브러시리스 直流電動機의 特性改善을 위한 設計 製作 研究", 漢陽大學校 大學院 博士學位論文, 1990
- [3] 金學鍊, "長 스토르크 可動磁石形 LDM의 設計 및 解析에 관한 研究", 漢陽大學校 大學院 博士學位論文, 1993 Motors"
- [4] F. J. Anayi and A. Basak, "Brushless NdFeB Permanent Magnet DC Linear Motors", Conf. Publ., No. 310, pp 71-75, Sep. 1989
- [5] "永久磁石 回轉機", 總合電子出版社