

SWT Linear Stepping Motor의 추력특성에 관한 연구

이상호 오홍석 이영미
삼척대학교 삼척대학교 강원관광대학

A Study on the Thrust Force of SWT Linear Stepping Motor

Sang-Ho Lee Hong-Ho Oh Young-Mee Lee
Samchok Univ. Samchok Univ. Kangwon Tourism College

Abstract - In this paper, we have developed the sandwich type digital actuator in order to improve the thrust of automatic moving device.

Also it was analyzed by Finite Element Analysis(FEA) and Virtual Work Method.

As a result of this paper, it was confirmed that the thrust characteristics of sandwich type digital actuator was improved considerably.

1. 서 론

최근 일본, 미국을 비롯한 선진 각국에서 개발된 리니어 스텝핑 모터(Linear Stepping Motor:이하 LSM이라 한다.)는 운동 변환기구 없이 입력 신호에 따라 직선적인 변위를 발생시키는 다이렉트 드라이브(Direct Drive) 방식의 전동기기기 때문에 백래쉬(Backlash) 및 기타 기계적인 마찰에 의한 고장도 피할수 있고, 효율이 우수하며, 저소음화 및 소형 경량화 되어 경제적인 측면에서 회전형 전동기(Rotary Stepping Motor)에 비해 훨씬 유리한 장점을 가지고 있다.[1]-[5]

그러나, 기존의 LSM은 추력이 매우 부족함으로서 FA와 의료기기(인공심장) 산업에 응용이 매우 어려운 실정이다.[6]-[7]

여기에 대응하기 위하여, 본 논문에서는 고추력이 기대되는 Sandwich(SWT)형 LSM의 개발을 위한 기초 자료조사와 설계 Program을 작성하고, 작성된 Program을 사용하여 SWT 디지털 액츄에이터의 설계 Parameter를 도출하며, 그리고 도출된 설계 Parameter를 이용하여 2차원 유한요소해석(FEA)을 통한 최적 설계를 하고자 한다.

2. 본 론

2.1 SWT LSM의 구조

그림1은 본 논문에서 새롭게 개발한 고추력 SWT LSM의 구조를 나타내고 있다. 그림1에서 화살표 방향은 영구자석에서 발생하는 자속의 방향을 나타내며, 가동자는 전자석 EMA와 EMB 및 EMC와 EMD가 이동 방향의 전후 및 상하로 배치되고, 각각의 전자석에는 두 개의 자극으로 되어 있다.

인접한 치 사이의 거리를 치 피치(Tooth pitch : T_p)라고 부르며, (자극1u,1d)과 (자극2u,2d) 및 (자극3u,3d)과 (자극4u,4d)는 각각 $(n+1/2)T_p$ 만큼 엇갈리고, (자극1u,1d)과 (자극3u,3d) 및 (자극2u,2d)와 (자극4u,4d)는 서로 $(n\pm 1/4)T_p$ 만큼 엇갈려 배치되어 있다. 그림1에서 가동자 철심 EMA와 EMC의 (자극1u,1d)과 (자극2u,2d)에 감긴 여자권선은 극성이 서로 반대가 되도록 감겨져 있다. EMB와 EMD의 (자극3u,3d)과 (자극4u,4d)에 감긴 여자권선도 극성이 서로 반대가 되도록 감겨져 있다.

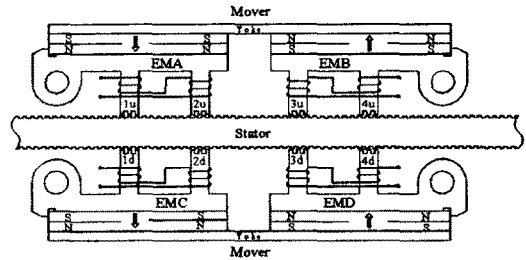


그림 1. 고추력 SWT LSM의 구조

2.2 SWT LSM의 자기회로해석

본 논문에서는 유한요소해석 FEA(Flux2d)을 이용하여 고추력 SWT LSM의 자기회로를 해석하였으며, 아래와 같은 가정을 하였다.

- 1) 벡터포텐셜은 축방향 성분인 A_z 만 존재하며, 따라서 전류밀도도 Z성분만 존재한다.
- 2) 전류밀도는 도체내에서 일정하다.
- 3) 철심은 등방성이고 자화의 특성은 비선형이다.
- 4) 히스테리시스 손실과 와전류손은 무시한다.

그림 2는 본 논문에서 설계한 고추력 SWT LSM의 2차원 유한요소해석을 위한 모델을 나타내고 있다.

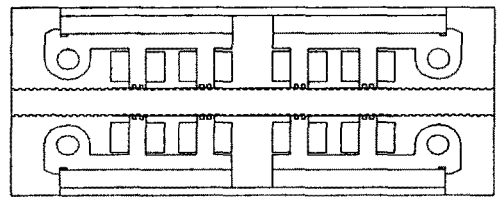


그림 2. 고추력 SWT LSM의 2차원 유한요소 해석 모델

2.2.1 지배방정식의 도출

변위전류를 무시할 수 있는 준 정상상태에서 전류밀도 J 와 자계의 세기 H 와의 사이에는 Ampere의 법칙으로부터

$$\nabla \times H = J \quad [A/m^2] \quad (1)$$

인 관계가 있으며, 자계의 세기 H 와 자속밀도 B 와의 사이에는

$$H = \nu B = \frac{1}{\mu} B \quad (2)$$

가 성립한다. 여기서 μ 는 투자율이며, ν 는 투자율의 역수 즉 자기저항률(reluctivity)이다. 또한 자속밀도는 연속적 성질을 가졌으므로

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3)$$

임을 알 수 있다.

임의의 벡터 A 에 대한 벡터 공식에서

$$\nabla \cdot (\nabla \times A) = 0 \quad (4)$$

의 관계가 있음을 이용하여

$$B = \nabla \times A \quad [wb/m^2] \quad (5)$$

를 얻을 수 있다.

식(5)로 정의되는 벡터 A 를 벡터포텐셜이라고 한다. 한편, 미소 전류소로부터 거리 R_i 만큼 떨어진 점의 자기 벡터포텐셜 A 는 Biot-savart의 법칙으로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$A = \frac{\mu}{4\pi} \int_v \frac{J}{R_i} dv \quad [A/m] \quad (6)$$

여기서, dv 는 전류밀도 J 가 갖는 미소의 체적이다.

식(6)에서 알 수 있듯이 벡터포텐셜 A 의 방향과 전류밀도 J 의 방향이 같으므로 벡터포텐셜 A 와 전류밀도 J 는 가정에 의해 Z 방향의 성분만 갖는다. 한편, 임의의 공간내의 임의의 점에서 자기 벡터포텐셜 A 가 일의적인 값을 가지려면 벡터포텐셜 A 의 회전과 발산 및 경계조건이 정의되어야 하는데 벡터포텐셜 A 의 발산을 정의 하는 방법에는 Lorentz 조건과 Coulomb gauge 조건이 있으나 에너지 변환의 측면에서 전자에너지 변환 기기의 제반특성을 해석할 경우에는 일반적으로 벡터포텐셜 A 의 발산을 영으로 취급하는 식(7)과 같은 Coulomb gauge 조건을 이용하고 있다.

$$\nabla \cdot A = 0 \quad (7)$$

그러므로 식(2), 식(5), 식(7)을 식(1)에 대입하고 벡터항등식(Vector Identity)을 이용하여 정리하면 식(8)과 같은 정자장에서의 자기 벡터포텐셜 A 에 의한 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = J \quad (8)$$

2차원장으로 취급할 때는 A 및 J 의 z 축 성분만을 고려하여, $A_x = A_y = 0$, $J_x = J_y = 0$ 이라 놓고, A_z 성분이 z 방향으로 일정하다고 하면 식(9)와 같은 Poisson방정식이 된다. 이것이 2차원 정자장의 지배방정식이다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_y} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_x} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_z \quad (9)$$

2차원장의 정자계를 해석하기 위해서 변분원리에 의한 유한요소해석(FEA)을 적용하는 경우, 우선 그 장에 성립하는 범함수를 구해야 한다. 2차원 영역 S 에서는 정자계 energy의 증가량과 외부 에너지 감소량의 차

식(10)으로 주어진다.

$$x = \int_s \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{\mu_y} \left(\frac{\partial A_z}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{\mu_x} \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} \right)^2 \right\} dx dy - \int_s J_z A_z dx dy \quad (10)$$

식(10)의 범함수를 최소로 하는 조건인

$$\frac{\partial x}{\partial A_{ze}} = \sum \frac{\partial x^{(e)}}{\partial A_{ze}} = 0 \quad (11)$$

으로부터 미지의 자기 벡터포텐셜이 구해진다.

각 요소에서의 자속밀도 $B^{(e)}$ 는 식(5)에 의하여 다음 식으로 주어진다.

$$B^{(e)} = \frac{\partial A^{(e)}}{\partial y} \hat{a}_x - \frac{\partial A^{(e)}}{\partial x} \hat{a}_y \quad (12)$$

$$B^{(e)} = B_x^{(e)} \hat{a}_x + B_y^{(e)} \hat{a}_y \quad (13)$$

따라서, 자속밀도의 x 성분과 y 성분은 각 요소에서의 근사화된 자기벡터포텐셜 $A^{(e)}$ 를 식(12)에 대입하면

$$B_x^{(e)} = \sum_{i=1}^3 \frac{c_i}{2\Delta^{(e)}} A_{ie}^{(e)} \quad (14)$$

$$B_y^{(e)} = - \sum_{i=1}^3 \frac{b_i}{2\Delta^{(e)}} A_{ie}^{(e)} \quad (15)$$

이 된다. 따라서, 요소내의 자속밀도는

$$B^{(e)} = \sqrt{(B_x^{(e)})^2 + (B_y^{(e)})^2} \quad (16)$$

으로부터 구할 수 있다.

2.2.2 추력 계산

본 논문에서는 추력 특성을 해석하기 위하여 유한요소해석(FEA)과 가상변위법을 이용하였다. 그림 3은 자기 포화 곡선을 나타내며, 전체자기수반 에너지는 식(17)과 같다.

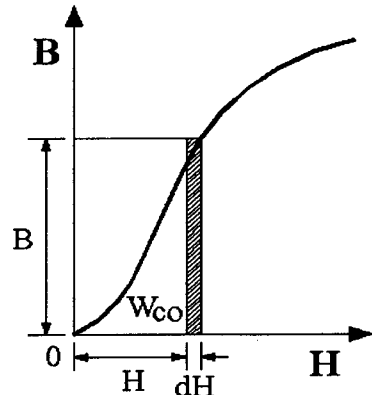


그림 3. 자기 포화곡선

전체 자기 수반에너지는 그림3의 자기 포화곡선으로부터 식(17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_{co} = \int_v \left(\int_0^H B dH \right) dv = \int_v \frac{1}{2} B \cdot H dv \quad (17)$$

식(17)에서 해석 영역을 2차원으로 제한하고 식(2)를 이용하면 식(18)과 같이 된다.

$$W_{co} = \int_s \frac{1}{2\mu} B^2 ds \quad (18)$$

따라서, 힘 F 는 자기수반에너지 W_{co} 의 변화량으로 주어지므로 식(19)로 주어진다.

$$F = \frac{\partial W_{co}}{\partial x} \quad (19)$$

2.3 컴퓨터 시뮬레이션

그림 4는 고추력 Sandwich Type(SWT) 디지털 액츄에이터의 2차원 유한요소 해석 (FEA)결과인 자속선을 나타내고 있으며, 그림 4에서 알 수 있듯이 자극(1u,2d)와 자극(3u,3d)가 여자 되었다.

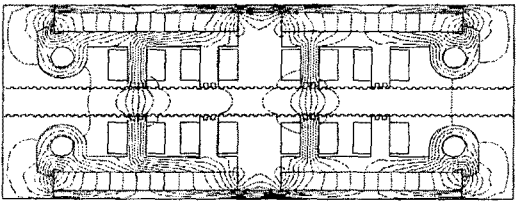


그림 4. 고추력 SWT LSM의 자속선

그림 5는 고추력 SWT LSM의 2차원 유한요소 해석 결과인 자속밀도분포를 나타내고 있다.

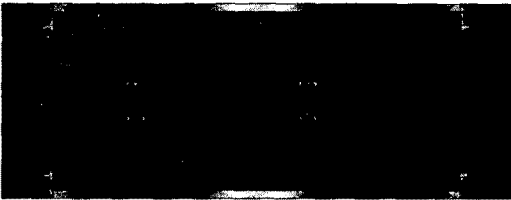


그림 5. 고추력 SWT LSM의 자속밀도

그림 6은 고추력 SWT의 2차원 유한요소 해석 (FEA)결과인 자계의 방향과 크기를 나타내고 있다. 그림 6에서 알 수 있듯이 자극(1u,2d)와 자극(3u,3d)에서 자계의 크기가 가장 크기 때문에 이 부분에서 추력이 발생될 것으로 사료된다.

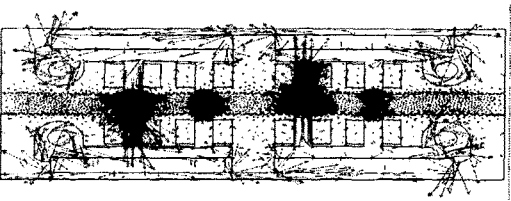


그림 6. 고추력 SWT LSM의 자계방향과 크기

그림 7은 고추력 SWT LSM의 유한요소 해석에 의한 정추력을 나타내고 있다.

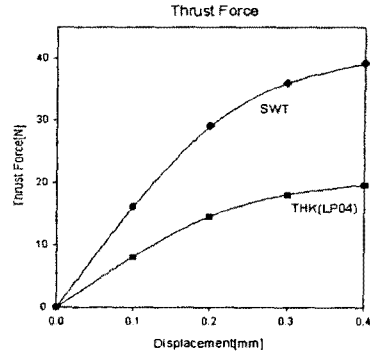


그림 7. 고추력 SWT의 정추력

3. 결 론

본 논문에서는 고추력 SWT LSM 설계 프로그램 개발을 위한 이론적인 수식을 상세히 검토하였으며, 고추력 SWT LSM 설계 프로그램의 Flow Chart를 기초로 프로그램을 작성하였고, 또한 작성한 프로그램을 사용하여 고추력 SWT LSM을 설계하였다. 설계한 각 고추력 SWT LSM의 수치를 이용하여 2차원 자계해석 (Flux2d)을 하였으며, 가동자와 고정자 및 공극에서의 자속밀도를 통하여 추력을 계산한 결과 기존 일본 제품 (THK)에 비해 약 2배 정도 증가함으로서, 향후 FA와 의료기기 산업에 더욱더 다양하게 응용될 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] TAKASHI KENJO and AKIRA SUGAWARA, "Stepping MOTORS AND THEIR MICROPROCESSOR CONTROLS", SECOND EDITION, OXFORD SCIENCE PUB., pp.49-58, 1994.
- [2] Leenhouts, A. C., "Higher frequency step motor switching cuts eddy current losses and RFI, Protects drive circuit", PCIM, vol.12, pp. 52-55, 1986.
- [3] M. Marinescu and N. Marinescu, "Numerical Computation of Torques in Permanent Magnet Motors by Maxwell Stress and Energy Method", IEEE Trans. on MAG, Vol.24, No.1, pp 463-466, 1988.
- [4] T. Tarnhuvud and K. Reichert, "Accuracy Problems of Force and Torque Calculation in PE-Systems", IEEE Trans. on MAG, Vol.24, No.1, pp 443-446, 1988.
- [5] Yokozuka, Baba, "Force-displacement characteristics of linear stepping motors", IEE proceeding-B, Vol.139, No.1, pp. 37-43, 1992.
- [6] Yamaguchi, Yamada, "Reliability Evaluation of a Linear Pulse Motor for a Total Artificial Heart Driving", T. IEE Japan, pp 94-100, 1994.
- [7] Yamaguchi, Kano, Kobayashi, Yamada, "Design Investigation of Linear Motor for Artificial Heart Driving", T. IEE Japan, pp 603-608, 1997.