

## ACSL에 의한 2상 HB형 선형 STEPPING 전동기의 진동해석에 관한 연구

오홍석<sup>0</sup> 정의남\* 이상호\* 이봉섭\* 원규식\*\* 김중기\*\*\*  
(주)이맥스하이테크<sup>0</sup> 삼척대학교\* 대구기능대학\*\* 영남이공대학\*\*\*

### A Study on the vibration analysis of 2-phase HB type Linear Stepping Motor using ACSL

Oh H.S.<sup>0</sup> Jung E.N.\* Lee S.H.\* Lee B.S.\* Won K.S.\*\* Kim J.K.\*\*\*  
Emacs High-Tech Co., Ltd<sup>0</sup>, Samchok national university\*, Daegu polytechnic college\*\*  
Yeungnam college of science & technology\*\*\*

#### ABSTRACT

In this paper, the vibration characteristics of a 2-phase Hybrid type Linear Stepping Motor(HLSM) are analyzed using the ACSL. A magnetic equivalent circuit is based on the structure of the HLSM, and then the electric equivalent circuit of the HLSM is derived by solving equations for the magnetic equivalent circuit. A normal force is calculated using FEM(Flux2D). And the vibration characteristics of the HLSM are simulated by the ACSL with the voltage equations, the thrust equation, the normal force equation and the kinetic equation.

#### 1. 서론

2상 HB형 선형 STEPPING 전동기( 2-phase HB type Linear Stepping Motor : 이하 HLSM이라 한다)는 회전형 STEPPING 전동기(Rotary Stepping Motor)와 같이 개루프 제어(Open loop control)로도 정확한 위치제어가 가능하다.<sup>[1][2]</sup> 특히, 운동 변환 기구 없이 입력신호에 따라 선형적인 변위를 발생시키는 다이렉트 드라이브(Direct Drive)방식의 전동기이다. 따라서 HLSM은 자동반송장치, 의료기기, OA, FA 응용 등에 다양하게 사용될 것으로 사료된다.<sup>[3]</sup>

그러나, HLSM은 구동시 구조적으로 큰 진동이 발생됨으로서 추력이 급격히 떨어질 때가 있으며, 최악의 경우에는 역전이나 탈조현상이 발생하고, 또한 소음의 원인이 되기 때문에 응용에 있어서 많은 제약을 받고 있는 실정이다.<sup>[4][5][6]</sup>

따라서 본 논문에서는 가동자의 이동방향에 따른 진동과 고정자에 대하여 수직으로 작용하는 진동을 동시에 고려할 수 있는 이론을 제시함에 있어서, HLSM의 구조를 기초로 자기동가회로를 구성하였으며, 자기동가회로

에 대한 방정식을 이용하여 HLSM의 전기적인 등가회로를 유도하였다. 그리고, HLSM의 변위에 따른 수직력 분포를 유한요소법(Flux2D)으로 계산하였으며 이를 방정식으로 나타내었다. 최종적으로 1상 여자방식에 의한 가동자의 이동방향에 따른 진동과 고정자에 대하여 수직으로 작용하는 진동을 전압방정식, 추력 및 수직력 방정식, 운동방정식을 사용하여 ACSL에 의하여 시뮬레이션 하였다.

#### 2. 본론

##### 2.1 HLSM의 구조

그림 1은 HLSM의 구조를 나타내고 있다.

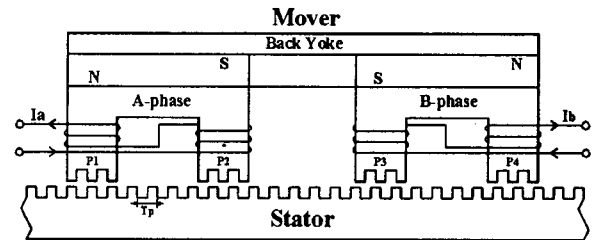


그림 1 HLSM의 구조  
Fig. 1 Construction of HLSM

그림 1에서 가동자는 A상과 B상의 전자석이 이동방향의 전후로 배치되어 있으며 A상의 코일은 자극1(P1)과 자극2(P2)의 극성이 서로 반대가 되도록 감겨져 있고, B상의 코일은 자극3(P3)과 자극4(P4)의 극성이 서로 반대가 되도록 감겨져 있다. 또한, 각각의 전자석에는 두 개의 자극으로 되어 있으며, 자극1과 자극2 및 자극3과 자극4는 각각  $(n + 1/2) T_p$ (치피치)만큼 엇갈리고, 자극1과 자극3 및 자극2와 자극4는 서로  $(n + 1/4) T_p$  또는  $(n + 3/4) T_p$ 만큼 엇갈려 배치되어 있다.

## 2.2 HLSM의 자기등가회로

그림 2는 HLSM의 자기등가회로를 나타낸다.

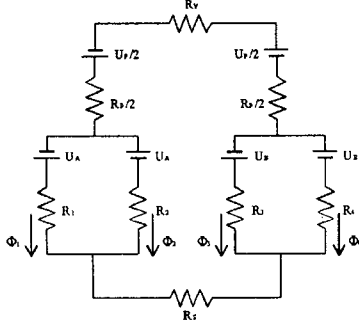


그림 2 HLSM의 자기등가회로  
Fig. 2 Magnetic equivalent circuit of HLSM

여기서,  $U_p$ 는 영구자석에 의해 생성된 기자력(mmf),  $U_A$ 와  $U_B$ 는 각각 전류  $I_A$  와  $I_B$ 에 의해 생성된 기자력(mmf),  $R_i$ 는 공극에서의 자기저항( $i$  : 극수)을 나타내고 있다. 또  $R_p$ 는 영구자석에서의 자기저항이며,  $R_V$ 와  $R_S$ 는 각각 요크에서의 자기저항과 고정자에서의 자기저항,  $\Phi_i$ 는 극에서의 자속을 나타내고 있다.

전자석 A상의 자기수반에너지를  $W_{mcA}$  라 할 때 자기수반 에너지  $W_{mcA}$  는 식 (1)과 같다. 여기서,  $N_A I_A$  [AT]는 극당 기자력을 나타낸다.

$$W_{mcA} = \int_0^{I_A} \Psi dI_A = N_A \int_0^{I_A} \Phi_1 dI_A - N_A \int_0^{I_A} \Phi_2 dI_A$$

$$= \frac{1}{2} N_A I_A (\Phi_1 - \Phi_2) \quad (1)$$

따라서, 추력  $F_A$  는 식 (2)와 같다.

$$F_A = \frac{dW_{mcA}}{dx} = -\frac{4\pi N_A \Phi_{P(1)}}{T_p} I_A \sin \frac{2\pi}{T_p} x$$

$$= -K_f I_A \sin \frac{2\pi}{T_p} x \quad (2)$$

여기서  $K_f$  는 추력상수[N/A]이고,  $\Phi_{P(1)}$  은 영구자석에 의해 생성된 기본파에 대한 자속의 크기를 나타낸다.

위와 같은 방법으로 전자석 B상이 여자될 때, 추력  $F_B$  는 식 (3)과 같다.

$$F_B = \frac{dW_{mcB}}{dx} = -\frac{4\pi N_B \Phi_{P(1)}}{T_p} I_B \cos \frac{2\pi}{T_p} x$$

$$= -K_f I_B \cos \frac{2\pi}{T_p} x \quad (3)$$

따라서, 전체 추력  $F$  는 식 (4)와 같다.

$$F = F_A + F_B \quad (4)$$

식 (4)로부터 HLSM의 고정자에 대한 가동자의 이동 방향에 따른 운동방정식은 식 (5)와 같다.

$$F_A + F_B = (M' + m) \frac{d^2 x}{dt^2}$$

$$+ 2(M' + m) \zeta_n \omega_n \frac{dx}{dt} \quad (5)$$

여기서,  $M'$  는 부하의 질량이며,  $m$  은 가동자의 질량이고,  $\zeta_n$  과  $\omega_n$  은 각각 감쇄비와 고유진동수이다.

## 2.3 HLSM의 전기등가회로

그림 3은 HLSM의 A상에 대한 전기적인 등가회로를 나타낸다.

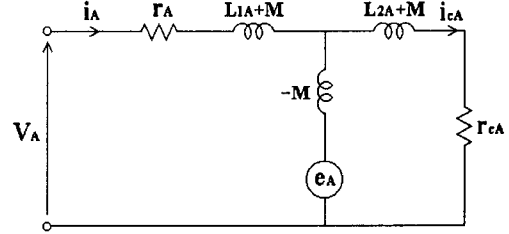


그림 3 HLSM의 전기적인 등가회로(A상)  
Fig. 3 Electrical equivalent circuit of HLSM(A-phase)

그림 3에 키르호프의 전압법칙을 적용하여 전압방정식을 도출하면 식 (6) 및 식 (7)과 같다.

여기서  $r_{cA}$ 는 철손에 해당하는 등가저항이다.

$$v_A = r_A i_A + L_{1A} \frac{di_A}{dt} + M \frac{di_{cA}}{dt} + e_A \quad (6)$$

$$0 = r_{cA} i_{cA} + L_{2A} \frac{di_{cA}}{dt} + M \frac{di_A}{dt} - e_A \quad (7)$$

같은 방법으로 B상에 대하여 전압방정식을 도출하면 식 (8) 및 식 (9)와 같다. 여기서,  $r_{cB}$ 는 철손에 해당하는 등가저항이다.

$$v_B = r_B i_B + L_{1B} \frac{di_B}{dt} + M \frac{di_{cB}}{dt} + e_B \quad (8)$$

$$0 = r_{cB} i_{cB} + L_{2B} \frac{di_{cB}}{dt} + M \frac{di_B}{dt} - e_B \quad (9)$$

또한, 속도기전력에 해당하는 A상의 유도전압  $e_A$ 와 B상의 유도전압  $e_B$  를 나타내면 식 (10) 및 식 (11)과 같다. 여기서,  $K_1$ 은 역기전력 상수 [V/m/s] 이다.

$$e_A = 2N \frac{dx}{dt} \Phi_{P(1)} \frac{2\pi}{T_p} \sin \frac{2\pi}{T_p} x$$

$$= K_1 \frac{dx}{dt} \sin \frac{2\pi}{T_p} x \quad (10)$$

$$e_B = 2N \frac{dx}{dt} \Phi_{P(1)} \frac{2\pi}{T_p} \cos \frac{2\pi}{T_p} x$$

$$= K_1 \frac{dx}{dt} \cos \frac{2\pi}{T_p} x \quad (11)$$

## 2.4 HLSM의 수직력 방정식

HLSM의 이동변위에 따른 수직력 분포는 2차원 유한요소해석(Flux2d)에 의하여 계산하였으며, 그림 4와 같다.

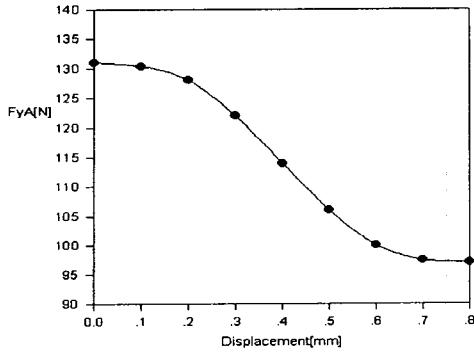


그림 4 HLSM의 수직력(A상)  
Fig. 4 Normal force of HLSM(A-phase)

그림 4의 수직력 분포를 바탕으로 가동자 변위에 따른 수직력을 근사적으로 나타내면 식 (12)와 같다. 같은 방법으로 B상에 대한 수직력을 나타내면 식 (13)과 같다.

$$F_{yA} = K_{yA} I_A \cos \frac{2\pi}{T_p} x + K_{LA} \quad (12)$$

$$F_{yB} = K_{yB} I_B \sin \frac{2\pi}{T_p} x + K_{LB} \quad (13)$$

여기서  $K_{yA}$  는 수직력 상수[N/A]이고,  $K_{LA}$  는 수직력의 평균값의 크기를 나타낸다.

또한, HLSM의 고정자에 대한 가동자의 수직방향의 운동방정식을 나타내면 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{yA} + F_{yB} = m \frac{d^2 y}{dt^2} + B_c \frac{dy}{dt} + K_c y \quad (14)$$

여기서  $m$ 은 가동자의 질량이며,  $B_c$  는 베어링의 저항력과 관련된 계수이고,  $K_c$  는 등가탄성계수를 나타낸다.

### 2.5 시뮬레이션에 의한 진동해석

본 논문에서는 상기에서 도출한 운동방정식과 전압방정식 및 속도기전력을 바탕으로 ACSL에 의하여 가동자의 이동방향에 따른 진동과 고정자에 대한 가동자의 수직방향의 진동을 동시에 해석하였다. 표1은 본 논문에서 사용한 HLSM의 제원을 나타내고 있다. 그림 5는 가동자의 이동방향에 따른 진동을 나타내고 있으며, 그림 6은 고정자에 대한 가동자의 수직방향에 따른 진동을 나타내고 있다.

표 1 HLSM의 제원  
Table 1 Specification of HLSM

항 목	수 치[단위]	비 고
구동전원	DC 24 [V], 1.0 [A/상]	
직류저항	4.2[Ω]/상	
인덕턴스	10.7[mH]/상	
분해능	0.4 [mm/펄스]	
홀딩력	2 [kgf]	
공극길이	50[μm]	

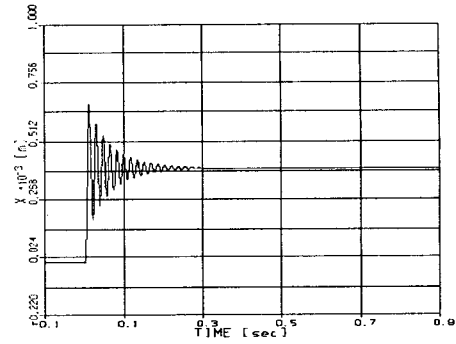


그림 5 이동방향에 대한 진동  
Fig. 5 Vibration for moving direction

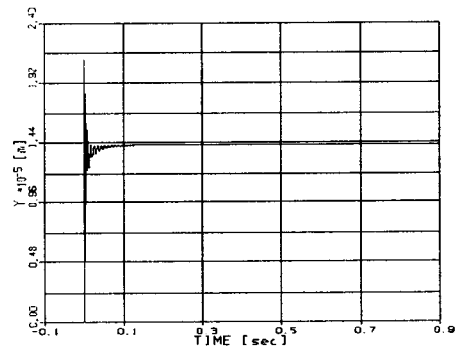


그림 6 수직방향에 대한 진동  
Fig. 6 Vibration for Normal direction

### 3. 결 론

본 논문에서는 HLSM의 진동해석의 이론적인 정립을 위하여 HLSM의 자기등가회로를 유도하였으며, 자기등가회로를 바탕으로 추력 방정식을 도출하였다. 그리고 HLSM의 기본구조를 바탕으로 이동방향에 따른 운동방정식과 전기등가회로를 유도하였으며 전기등가회로를 기초로 전압방정식을 도출하였다. 또한, 유한요소해석에 의한 이동변위에 따른 수직력 분포를 구한 후, 이를 기초로 수직력 방정식을 도출하였으며, HLSM의 고정자에 대한 가동자의 수직방향 운동방정식을 유도하였다. 상기에서 도출한 방정식들을 사용하여 ACSL을 통한 1상 여자방식에 대한 진동특성을 시뮬레이션 한 결과 이동방향에 대한 진동과 수직방향의 진동이 HLSM의 제원과 거의 일치하였다. 향후, 연구과제로서 레이저 측정시스템을 사용하여 HLSM의 진동특성을 측정함으로써 시뮬레이션 결과와의 비교·검토가 요구되어진다.

### 참 고 문 헌

- [1] Leenhouts, A. C., "The art and practice of step motor control", Intertec. Inc., pp. 41~46, 1987.
- [2] Kenjo T., Sugawara A., "Stepping motor and their

- microprocessor controls”, Oxford University Press, pp. 49~58, 1994.
- [3] Ding Zhi-Gang, “A Novel Electromagnetic Spiral Linear Step Motor”, IEEE Trans. on Industry Appl., vol. 1, pp. 329~336, 1994.
- [4] T. Taniguchi, K. Ohtsuka, K. Takasugi, “Rotor Oscillation Damping of a Stepping Motor by the Method of a Simple Switching Sequence”, T. IEE Japan, Vol. 111-D, No. 6, pp. 497~498, 1991.
- [5] Hong-Seok Oh, Dong-Hee Kim, Sang-Ho Lee, Long-Nam Han, “A Study on The Improvement of Characteristics in 2-phase Linear Stepping Motor”, ICEIC'98, pp. II-93~II-97, 1998.
- [6] 오홍석, 김동희, 이상호, 정도영, 김춘삼, “2상 Linear Stepping Motor의 진동특성에 관한 연구”, 전력전자학회 논문지, 제4권, 제6호 pp. 554~560, 1999.