

2相 Linear Stepping Motor의 진동특성에 관한 연구

이상호* 김동희** 정도영* 김춘삼* 오홍석***
 삼척대학교* 영남대학교** (주)이맥스하이테크***

A Study on the Vibration Characteristics of 2-phase Linear Stepping Motor

S.H. Lee* D.H. Kim** D.Y. Jung** C.S. Kim** H.S. Oh***
 Samchok Nat'l Univ.* Yeungnam Univ.** Emacs H.T. Co., Ltd.***

Abstract

In this paper, a vibration suppression method using an energy stored in winding inductance and an induced voltage of the Linear Stepping Motor(LSM) is shown, and it is applied to a new one-phase excitation method. And a magnetic equivalent circuit is based on the structure of the LSM, and then the electric equivalent circuit of the LSM is derived by solving equations for the magnetic equivalent circuit. Several dynamic characteristics of the LSM are analyzed by the ACSL with the voltage equations, the force equations and the kinetic equation, and are measured by experimental system.

LSM의 유도전압을 이용한 새로운 1상 여자방식에 의한 진동억제 방법을 보여주며, 또한 LSM의 구조를 기초로 자기등가회로를 구성하였으며, 자기등가회로에 대한 방정식을 이용하여 LSM의 전기적인 등가회로를 유도하였다.^[1] 그리고, LSM의 새로운 1상 여자방식에 의한 진동특성을 전압방정식과 추력방정식 및 운동방정식을 사용하여 ACSL에 의하여 시뮬레이션 하였으며, 레이저 간섭법의 측정 시스템에 의한 측정 결과와 비교하였다.

1. 서론

리니어 스텝핑 모터(Linear Stepping Motor : 이하 LSM이라 한다)는 회전형 스텝핑 모터 (Rotary Stepping Motor)와 같이 개루프 제어(Open loop control)로도 정확한 위치제어가 가능하다. 특히, 운동 변환 기구 없이 입력신호에 따라 선형적인 변위를 발생시키는 다이렉트 드라이브(Direct Drive)방식의 진동기이다. 따라서 LSM은 자동반송장치, 의료기기, OA, FA 응용 등에 다양하게 사용될 것으로 사료된다.^{[1]-[3]} 그러나, LSM은 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.^{[1][2]}

본 논문에서는 권선 인덕턴스에 저장된 에너지와

2. LSM의 구조

그림1은 LSM의 구조를 나타내고 있다.

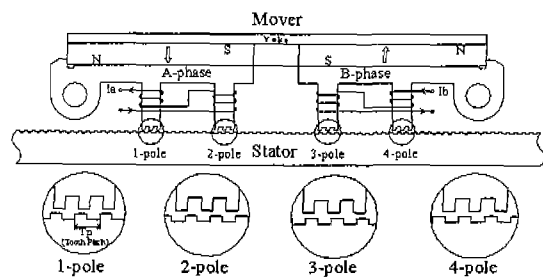
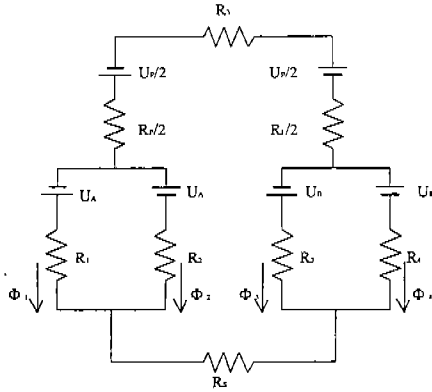


그림1. LSM의 구조

그림1에서 가동자는 A상과 B상의 전자석이 이동 방향의 전후로 배치되어 있으며 A상의 코일은 자극1과 자극2의 극성이 서로 반대가 되도록 감겨져 있고, B상의 코일은 자극3과 자극4의 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.

3. LSM의 자기등가회로

그림2는 LSM의 자기등가회로를 나타낸다.



- U_P : 영구자석에 의해 생성된 기자력(mmf)
- U_A, U_B : 전류 I_A 및 I_B 에 의해 생성된 기자력(mmf)
- R_i : 공극에서의 자기저항 (i : 극수)
- R_P : 영구자석에서의 자기저항
- R_Y : 요크에서의 자기저항
- R_S : 고정자에서의 자기저항
- ϕ_i : 극에서의 자속

그림2. LSM의 자기등가회로

여기서, 여자전류와 자속사이에는 히스테리시스 없는 선형 관계라고 가정하고, 극에서의 자속을 근사적으로 보면 다음과 같다.

$$\phi_i = \phi_{iP} + \phi_{iA} \quad [Wb] \quad \text{----- (1)}$$

여기서,

$$\begin{aligned} \phi_{1P} &= \phi_P + \sum_{n=0}^{\infty} \phi_{P(n)} \cos \frac{2\pi}{T_p} nx \\ \phi_{2P} &= \phi_P + \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \phi_{P(n)} \cos \frac{2\pi}{T_p} nx \\ \phi_{3P} &= -\phi_P - \sum_{n=0}^{\infty} \phi_{P(n)} \cos \frac{2\pi}{T_p} n(x - \frac{T_p}{4}) \\ \phi_{4P} &= -\phi_P - \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \phi_{P(n)} \cos \frac{2\pi}{T_p} n(x - \frac{T_p}{4}) \\ \phi_{1A} &= \phi_A + \sum_{n=0}^{\infty} \phi_{A(n)} \cos \frac{2\pi}{T_p} nx \\ \phi_{2A} &= -\phi_A - \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \phi_{A(n)} \cos \frac{2\pi}{T_p} nx \\ \phi_{3B} &= \phi_B + \sum_{n=0}^{\infty} \phi_{B(n)} \cos \frac{2\pi}{T_p} n(x - \frac{T_p}{4}) \\ \phi_{4B} &= -\phi_B - \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \phi_{B(n)} \cos \frac{2\pi}{T_p} n(x - \frac{T_p}{4}) \end{aligned}$$

여기서, ϕ_P 와 $\phi_{P(n)}$ 은 각각 영구자석에 의해 생성된 자속의 평균값과 n 차 고조파 자속의 크기를 나타낸다. ϕ_A 와 ϕ_B 는 각각 전류 I_A 와 I_B 에 의해서 생성된 자속의 평균값이다. 또한, $\phi_{A(n)}$ 와 $\phi_{B(n)}$ 은 n ·고조파 자속의 크기를 나타낸다.

A상이 여자될 때 추력 F_A 는 자기수반 에너지의 변화에 의해서 주어지며, 자기수반 에너지를 W_{mcA} 라고 하고 x 를 변위라고 할 때 자기수반 에너지 W_{mcA} 는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} W_{mcA} &= \int_0^{I_A} \psi dI_A = N_A \int_0^{I_A} \phi_1 dI_A - N_A \int_0^{I_A} \phi_2 dI_A \\ &= \frac{1}{2} N_A I_A (\phi_1 - \phi_2) \quad \text{---- (2)} \end{aligned}$$

여기서 $N_A I_A$ [AT] 는 극당 기자력을 나타낸다.

따라서, 추력 F_A 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F_A &= \frac{dW_{mcA}}{dx} = -\frac{4\pi N_A \phi_{P(1)}}{T_p} I_A \sin \frac{2\pi}{T_p} x \\ &= -K_f I_A \sin \frac{2\pi}{T_p} x \quad \text{---- (3)} \end{aligned}$$

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

위와 같은 방법으로 B상이 여자될 때 추력 F_B 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F_B &= \frac{dW_{mcB}}{dx} = -\frac{4\pi N_B \phi_{P(1)}}{T_p} I_B \cos \frac{2\pi}{T_p} x \\ &= -K_f I_B \cos \frac{2\pi}{T_p} x \quad \text{---- (4)} \end{aligned}$$

전체 추력 F 는 다음과 같다.

$$F = F_A + F_B \quad \text{---- (5)}$$

4. LSM의 전기등가회로

그림3은 LSM의 전기등가회로를 나타낸다.

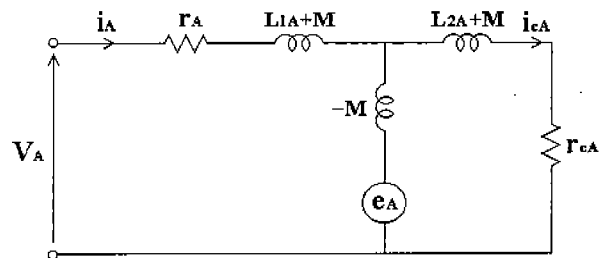


그림3. LSM의 전기등가회로(A상)

그림3에 나타낸 A상에 대한 LSM의 전기등가회로에 키르호프의 전압법칙을 적용하여 전압방정식을 도출하면 다음과 같다.

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

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

여기서, r_{cA} 는 철손에 해당하는 등가저항이다.

같은 방법으로 B상에 대하여 전압방정식을 도출하면 다음과 같다.

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

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

여기서, r_{cB} 는 철손에 해당하는 등가저항이다.

또한, 역기전력에 해당하는 A상의 유도전압 e_A 와 B상의 유도전압 e_B 를 상기의 식을 사용하여 나타내면 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} e_A &= 2N\frac{dx}{dt}\Phi_{P(1)}\frac{2\pi}{T_p}\sin\frac{2\pi}{T_p}x \\ &= K_1\frac{dx}{dt}\sin\frac{2\pi}{T_p}x \quad (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} e_B &= 2N\frac{dx}{dt}\Phi_{P(1)}\frac{2\pi}{T_p}\cos\frac{2\pi}{T_p}x \\ &= K_1\frac{dx}{dt}\cos\frac{2\pi}{T_p}x \quad (11) \end{aligned}$$

여기서, K_1 는 역기전력 상수 [V/m/s] 이다.

다음으로 LSM의 동특성 해석에 있어서 중요한 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} F_A + F_B &= (M' + m)\frac{d^2x}{dt^2} \\ &+ 2(M' + m)\zeta_n\omega_n\frac{dx}{dt} \quad (12) \end{aligned}$$

여기서 M' 는 부하의 질량이며, m 은 가동자의 질량이고, ζ_n 과 ω_n 은 각각 감쇄비와 고유진동수이다.

5. 진동억제의 원리

그림4는 가동자 권선 인덕턴스에 저장된 에너지와 유도전압을 이용한 진동억제의 원리를 나타낸다. 기존에는 S_2 와 S_3 가 동시에 턴 온(turn-on), 턴 오프(turn-off)하였으나, 새로운 1상 여자방식에서는 S_3 의 턴 오프(turn-off)시간을 S_2 보다 지연시킴으로써, 권선 인덕턴스에 저장된 에너지는 S_3 와 다이오드 D_4 를 통하여 프리휠링(free wheeling)되고 가동자 진동에 의한 유도전압은 짧아진다. 이와 같은 프리휠링 전류와 유도전압은 LSM의 진동억제를 위한 제동력으로 작용하게 될 것으로 사료된다.

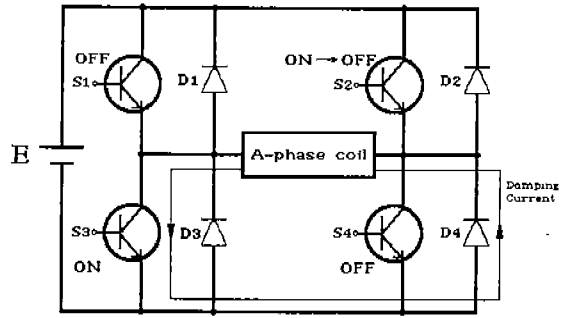


그림4. 진동 억제의 원리

그림5는 본 연구에서 사용한 기존의 1상 여자 및 새로운 1상 여자 바이폴라 초퍼 정전류 구동회로를 나타낸다.

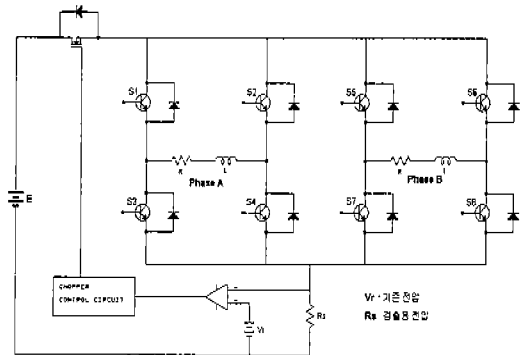


그림5. 바이폴라 초퍼 정전류 구동회로

표1은 기존의 1상 여자 구동양식과 새로운 1상 여자 구동양식을 종합하여 비교한 것이다.

표1. 기존의 1상과 새로운 1상 여자시의 비교
P:기존의 1상 여자방식 N:새로운 1상 여자방식

Mode	Mode 1		Mode 2		Mode 3		Mode 4	
	P	N	P	N	P	N	P	N
S1	ON	ON						
S2					ON	ON		
S3					ON	ON		ON
S4	ON	ON		ON				
S5			ON	ON				
S6							ON	ON
S7		ON					ON	ON
S8			ON	ON		ON		
강자속	P1		P4		P2		P3	
$\phi_m = \phi_c$	P2		P3		P1		P4	
자기력 balance	P3,4		P1,2		P3,4		P1,2	
안정위치	P1		P4		P2		P3	
자계방향	P1	P2,P3	P4		P1	P2	P3	P4
	↓	↑	↑		↓	↓	↑	↑

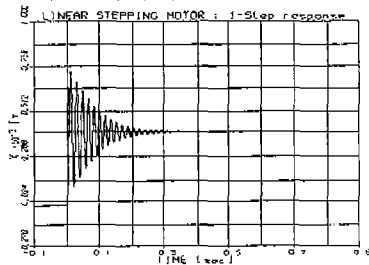
6. 시뮬레이션 및 실험결과

표2는 실험에 사용한 LSM의 제원을 나타낸다.

표2. LSM의 제원

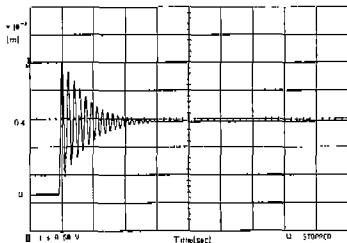
항 목	수 치[단위]
구동전압	DC 24 [v]
구동전류	1.0 [A/상]
직류저항	4.2[Ω]/상
인덕턴스	10.7[mH]/상
분해능	0.4 [mm/펄스]

본 논문에서는 ACSL을 사용하여 시뮬레이션하였으며, 레이저 간섭계를 이용하여 진동특성을 측정하였다. 그림6(a)와 그림6(b)는 각각 기존의 1상 여자 방식의 1-step 응답에 대한 시뮬레이션 결과와 측정 결과를 나타내고 있다.



최대 오버슈트	0.330[mm]
언드슈트	0.275[mm]
정정시간	220[ms]

(a) 시뮬레이션 결과

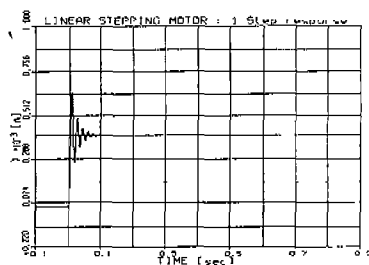


최대 오버슈트	0.336[mm]
언드슈트	0.310[mm]
정정시간	233[ms]

(b) 측정 결과 (320 μm/V)

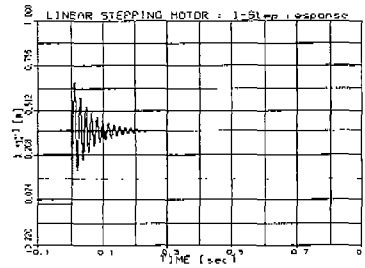
그림6. 기존의 1상 여자방식의 1-step 응답

그림7(a)와 그림7(b)는 각각 새로운 1상 여자방식의 1-step 응답에 대한 시뮬레이션 결과와 측정 결과를 나타내고 있다.



최대 오버슈트	0.244[mm]
언드슈트	0.126[mm]
정정시간	82[ms]

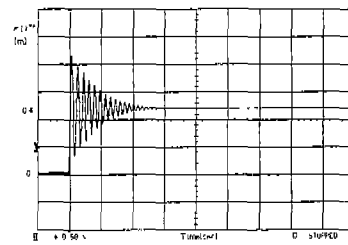
(a-1) Diode의 전압강하를 고려하지않은 경우



최대 오버슈트	0.261[mm]
언드슈트	0.211[mm]
정정시간	144[ms]

(a-2) Diode의 전압강하를 고려한 경우

(a) 시뮬레이션 결과



최대 오버슈트	0.307[mm]
언드슈트	0.272[mm]
정정시간	192[ms]

(b) 측정 결과 (320 μm/V)

그림7. 새로운 1상 여자방식의 1-step 응답

7. 결론

본 논문에서는 LSM의 진동특성을 해석에 적용하기 위하여 자기동가회로와 전기동가회로 및 운동방정식을 유도하였고 ACSL을 사용하여 시뮬레이션 하였으며, 진동억제를 위한 새로운 1상 여자방식에 적용하였다. 또한, 레이저 간섭법에 의한 측정 시스템을 구성하여 LSM의 진동특성을 측정한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. ACSL을 통한 시뮬레이션 결과와 측정결과가 잘 일치 함으로서 LSM의 진동특성 해석의 기초를 마련 하였다.

2. 또한, 새로운 1상 여자방식이 기존의 1상 여자방식에 비해, 다이오드의 전압강하를 줄일 수 있다면, 진동특성이 훨씬 개선될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] Muneaki Ishida, etc., "Equivalent Circuit of Linear Pulse Motor", T.IEE Japan, Vol.110-D, No.12, pp. 1257-1265, 1990.
- [2] 이상호, 김동희, 오홍석, etc., "Linear Stepping Motor의 동특성 개선에 관한 연구", 전력전자학술대회 논문집, pp. 295-298, 1998.7.
- [3] Ding Zhi-Gang, "A Novel Electromagnetic Spiral Linear Step Motor", IEEE IAS, Vol.1, pp.329-336, 1994.