

영구자석 여자 횡축형 선형 전동기(TFLM)를 이용한 가진기 제어

林太潤*, 姜道鉉, 金鍾武, 金東熙

A Control of Vibrator Using PM Excited Transverse Flux Linear Motor

Tae-yun Lim, Do-hyun Kang, Jong-moo Kim, and Dong-hee Kim

요약

본 논문은 영구자석 여자 횡축형 선형 전동기(TFLM)를 이용한 가진기 제어 시스템을 구현하고자 한다. 제안된 가진기는 대상 물체에 정격 전류에서 최대 700[N]의 가진력과 넓은 변위 및 주파수 운전 범위를 갖는 진동운동을 제공한다. 또한 가진기에 적용된 TFLM은 구조적으로 높은 추력비(전동기 추력/전동기 중량=N/Kg)를 가지므로 전체 시스템의 부피가 감소된다. 따라서 기존의 유압식 가진기를 제안한 가진기로 대체할 경우 효율 및 유지, 관리면에서 많은 장점이 있다. 가진 제어를 위한 제어기의 입력은 가진 주파수와 변위이며 제어량은 이동자의 순시 위치와 속도이고 출력은 가진기에 인가되는 전류이다. 이 전류는 전압형 PWM 컨버터로 제어된다. 우선 가진기 제어 시스템의 제어 알고리즘과 운전 특성을 고찰하고 해석하기 위해 동적 시뮬레이션을 수행한 후 DSP 제어기와 IGBT PWM 컨버터를 구현하여 실제 실험 결과와 비교, 검토하였다.

ABSTRACT

This paper has realized a control system of a vibrator using PM excited Transverse Flux Linear Motor(TFLM). Proposed vibrator can supply a vibration force up to 700[N] at rated current, wide operation range of vibration displacement and high frequency for a tested structure. Also, volume of a vibrator system can be decreased because of a high trust force ratio(a thrust force per weight=N/Kg). A proposed vibrator instead of a hydraulic vibrator can improve efficiency and have many advantages of maintenance and management. A desired value command is a vibration frequency and displacement in a controller for a vibrator system and a controlled values are a instant position and velocity of a mover. Output value of the controller is phase current controlled by PWM converter. In this research, Dynamic simulation has been executed for analysis of a control algorithm and dynamic characteristics and is compared with experimental result.

Key Words : Vibrator, PM excited Transverse Flux Linear Motor(TFLM), vibration force

1. 서론

가진기는 물체에 기계적인 동력인 가진력을 제공하

는 장치로써 건축물 및 기계 구조물의 동특성 해석을 위한 진동 시험과 압축기(compressor)등의 산업용과 더불어 가상 시뮬레이터와 같은 다양한 분야에 이용되고 있다. 가진기는 가진력의 발생기구에 따라 기계식, 전자식, 유압식, 전동식, 압전식 등으로 나눌수 있으며 주로 전동식과 유압식이 많이 사용되고 있으나 거의 수입에 의존하고 있는 실정이다. 고풍력이 요구되는 분야에서는 대부분 유압식 가진기를 많이 사용한다. 그러나 유압식은 전동식에 비해 발생 가진력과 가진폭

*한국전기연구원 Mechatronics연구그룹 위촉연구원
E-mail : imty@choffian.net

접수일자 : 2002. 1. 2 1차심사요청일 : 2002. 1. 4
2차심사요청일 : 2002. 2.20 3차심사요청일 : 2002. 4.10
심사완료일 : 2002. 5.24

을 크게 할 수 있는 반면, 부피와 체적이 크며 유지보수가 어렵고 높은 진동 주파수에서 제어성이 떨어지는 단점이 있다.

영구 자석 여자 횡축형 선형 전동기(TFLM)는 릴럭턴스형 전동기로서 자속의 발생 방향과 이동자의 이동 방향이 횡방향이며, 이러한 구조적인 특성으로 인해 중량대비 발생 추력(N/Kg)이 기존의 종축형에 비해 3 배이상 높다.

따라서, 본 논문은 TFLM을 적용한 고출력 가진기 및 제어 시스템을 제안하여 가진기 시스템의 국산화와 더불어 유압식의 큰 추력과 진동식의 제어성 및 관리면에서의 용이함을 동시에 만족하는 고성능화를 이루고자 한다.

가진 동작을 위한 제어기는 목표치가 가진 주파수와 변위가 되며, 순시 위치와 속도를 제어하여 지령값을 추종한다. 제어기의 출력은 TFLM의 코일에 인가되어지는 전류이며 이로 인하여 추력이 발생한다. 전류는 PWM power 컨버터로 제어되어진다. 제어기의 성능과 동특성을 해석하고 검증하기 위해 시뮬레이션을 수행하였으며, 전동기의 비선형을 모델링하기 위해 위치와 전류에 따른 전동기의 자속은 FEM으로 해석한 값을, 추력은 실제 측정값을 사용하였다. 실험은 TI사의 F2407A DSP를 이용한 디지털 제어기와 IGBT를 이용한 PWM 컨버터를 드라이브로 구현하여 수행하였으며 이를 시뮬레이션 결과와 비교 검토하였다.

2. 영구자석 여자 횡축형 선형 전동기 (Transverse Flux Linear Motor: TFLM)

영구자석 여자 TFLM은 기본적으로 릴럭턴스형 전동기로서 그림 1과 같은 구조를 가지며, 이동자의 이동 방향을 기준으로 하면 코일에 인가되어지는 기자력, 즉 전류의 방향과는 같고 자속의 방향과는 횡방향 이 된다. 이러한 구조의 장점은 전기 회로와 자기회로가 분리 되므로 단위 체적당 높은 출력과 효율을 발생시킬 수 있어 소형 및 경량화가 가능하다는 것이다.

이동자에 포함된 영구자석에서 발생된 자계는 공극에서의 자계를 집중시키므로 높은 공극 자속 밀도를 얻을 수 있어 출력 밀도를 더욱 증가시킨다. 2상 TFLM의 경우, 한 상의 고정자의 철심과 이동자의 영구자석의 극배치는 자속을 일정한 방향으로 발생시키도록 그림 2와 같은 구조로 설치되고 일정한 방향의 힘을 연속적으로 발생하기 위해 각 상의 고정자는 $\tau_p/2$ 만큼 엇갈리게 배치한다.

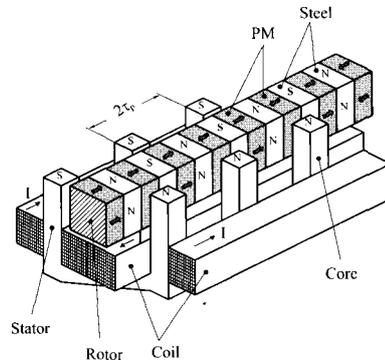


그림 1 영구자석 여자 TFLM의 기본 구조
Fig. 1 A basic structure of the PM excited TFLM

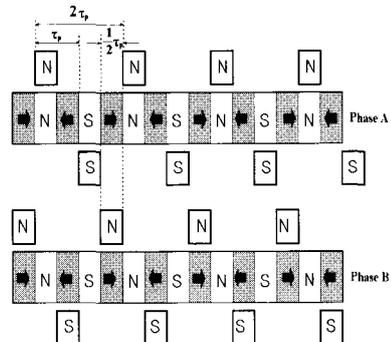


그림 2 2상 영구자석형 TFLM의 상배치도
Fig. 2 An arrangement of the core and PM for the two phases TFLM

그림 3은 이동자의 위치에 따른 기자력과 발생 추력과 합성 추력을 나타낸다. 즉 이동자가 일정한 방향으로 움직이기 위해서는 그림 2와 같이 2상 이상의 구조 이어야 하며 각 상의 $0 \leq x \leq \tau_p$ 구간에서는 고정자의 자속이 영구자석의 자속방향과 같은 방향이 되도록 전류를 인가하고, $\tau_p \leq x \leq 2\tau_p$ 구간에서는 반대방향의 전류를 인가하여야 한다.

그림 4는 TFLM에서 발생하는 추진력 F_x 와 추력 밀도 F_{xd} 를 계산하기 위한 한 상의 간이등가모델로서 누설자속이 무시되었다. 이것은 고정자 철심 중간 부분을 절단하여 펼친 형태로 권선에 전류가 인가되었을 때의 기자력 θ_a 가 공극 자기저항과 영구자석의 자기저항에 집중된다고 가정된다.

여기에서 B_{o1} , B_{o2} 은 전기자 전류가 흐르지 않는 무부하일 때 공극에서의 자속밀도를, B_{m1} , B_{m2} 은 영구자석에서의 자속밀도를 나타낸다. 그림 4의 모델로부터 계산되어진 발생 추력과 추력밀도는 식 (1)과 (2)와 같이 유도되어진다^{[1][2]}.

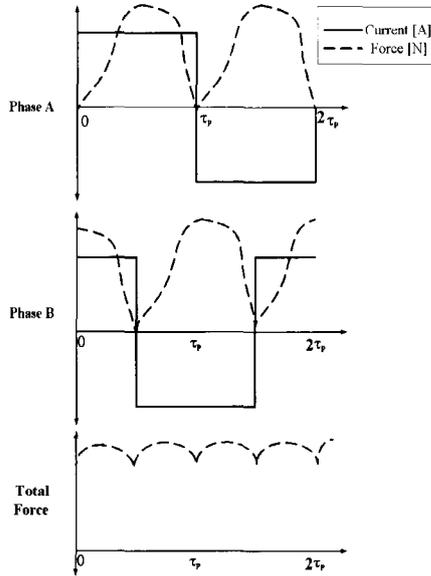


그림 3 2상 여자시 인가 전류와 발생 추력
 Fig. 3 An excited currents and thrust force of two phases TFLM

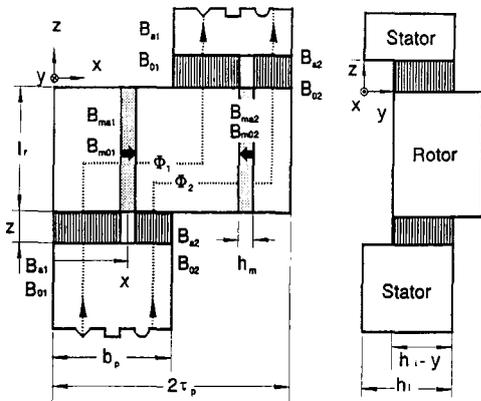


그림 4 TFLM의 간이 해석 모델
 Fig. 4 An equivalent analysis model for TFLM

$$F_x[N] = -\frac{\partial W_m}{\partial x} \tag{1}$$

$$= \frac{-4zB_aB_0}{\mu_0}(h_i - y)$$

$$F_{xd}[N/m^2] = B_o \frac{\Theta_a}{2\tau_p} \frac{(h_i - y)}{h_i} \tag{2}$$

단, 여기에서 W_m 은 자기 에너지를, B_a 는 전류에 의한 자속 밀도를, B_o 는 무부하에서 영구자석에 의한 공극에서의 자속밀도를 나타낸다.

3. 가진기 제어 시스템 모델링

그림 5는 제안한 가진기의 기본 개념도를 나타낸다. 가진기의 동특성 해석을 위한 기계적 요소의 모델링을 위한 기기 방정식과 전기적 요소의 모델링을 위한 전압-전류 방정식은 다음 식 (3)과 (4)와 같이 나타낼 수 있다^{[3][4]}.

$$F_x = M \frac{dv}{dt} + Cv + k_s x \tag{3}$$

k_s : 스프링상수 [N/m], M : 질량 [Kg]
 C : 점성마찰계수 [$Kg \cdot m/s$], v : 속도 [m/s]

식 (4)의 모델링에서 TFLM은 릴럭턴스 형태의 전동기로서 전류와 위치에 따라 자속이 변하는 비선형성을 나타낸다.

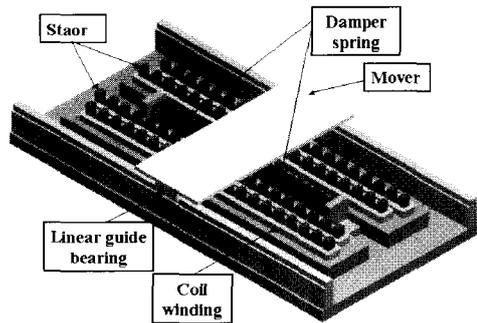


그림 5 PM-type TFLM을 이용한 가진기의 개념도
 Fig. 5 A Structure of vibrator using PM excited TFLM

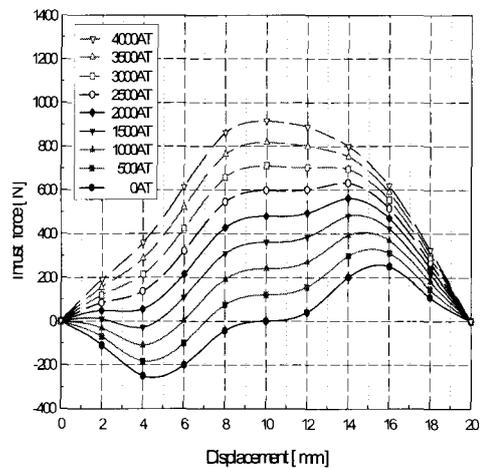


그림 6 전류와 변위에 따른 발생 추력
 Fig. 6 The thrust force upon a current and displacement

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{N \frac{\partial \Phi}{\partial i}} \left(V - R \cdot i - N \frac{\partial \Phi}{\partial x} v \right) \quad (4)$$

i : 전류[A], V : 전압[V], R : 권선의 저항[Ω]

Φ : 쇠교자속[wb], N : 턴수

따라서 인덕턴스와 추력도 비선형성을 가진다. 동특성 해석을 위해 요구되는 파라미터인 자속과 발생추력은 좀 더 정확한 해석을 위해 표 1의 실제 동특성 및 시험 대상의 TFLM의 설계사양을 조건으로 수행한 FEM 해석값을 사용하였다. 해석과 실제 사용된 영구자석은 NdFeB이며 자속밀도는 1.2[T]이다.

그림 6과 7은 FEM 해석을 통한 전류와 위치에 따른 발생 추력과 자속을 나타낸다. 따라서, 비선형 파라미터인 전류의 변화에 따른 자속의 변화분인 인덕턴스와 속도에 따른 역기전력항은 그림 6의 자속과 그림 8의 전류 i - 자속 Φ 의 그래프로 부터 식 (5), (6)과 같이 계산되어진다.

표 1 TFLM의 설계사양
Table 1 The characteristics of the TFLM

항 목	Dimension
τ_p [mm]	20
h_m [mm]	10
b_p [mm]	14
δ [mm]	1

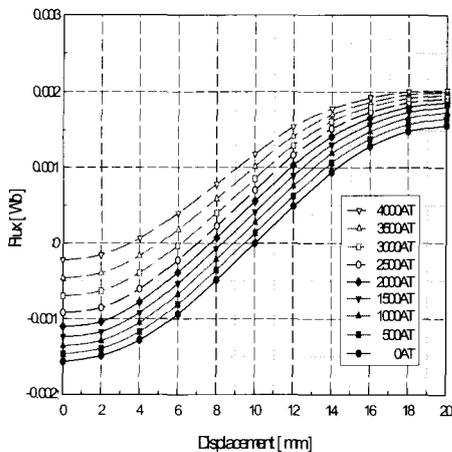


그림 7 전류와 변위에 따른 자속
Fig. 7 The flux upon a current and displacement

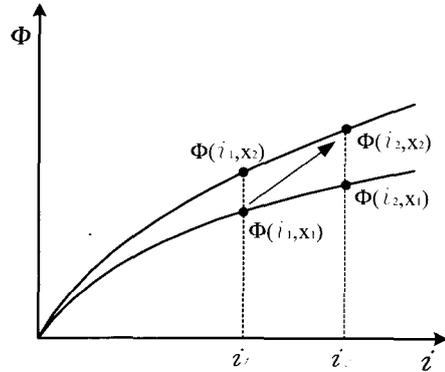


그림 8 전류와 자속 곡선
Fig. 8 The flux upon a variation of the current

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi}{\partial i} &= \frac{\Phi(i_2, x) - \Phi(i_1, x)}{\Delta i} \\ &= \frac{\Phi(i_2, x_2) - \Phi(i_1, x_2)}{i_2 - i_1} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi}{\partial x} &= \frac{\Phi(i, x) - \Phi(i, x - \Delta x)}{\Delta x} \\ &= \frac{\Phi(i_2, x_2) - \Phi(i_2, x_1)}{x_2 - x_1} \end{aligned} \quad (6)$$

가진기의 제어기 입력은 주파수를 갖는 가진 변위로서 변위 D 를 최대값으로 갖고 가진 주파수를 각속도로 갖는 식 (7)의 사인 형태의 신호이다. 그리고 제어기의 실제 제어량은 식 (7)의 순시 위치와 식 (8)의 순시 속도이며 최종 출력은 식 (9)의 실제 추력을 발생하기 위해 TFLM의 코일에 인가되는 전류가 된다.

$$x^* = D \sin \omega t \quad [m] \quad (7)$$

$$v^* = D \omega \cos \omega t \quad [m/s] \quad (8)$$

$$F_x^* = -MD\omega^2 \cos \omega t \quad [N] \quad (9)$$

단, 여기에서 D 는 변위의 최대값, $\omega = 2\pi f$ 는 각속도, 그리고 M 은 가진 대상물의 질량을 나타낸다.

그림 9는 가진기의 전체 제어 시스템의 블록도를 나타낸다. 앞서 언급했듯이 제어기의 입력 x^* 는 식 (7)이 되며 이는 위치 제어기를 통해 식 (8)의 속도 지령값을 출력하며, 또한 이는 PI 속도 제어기를 통해 식 (9) 추력을 발생하기 위한 전류 지령을 출력한다. 전류 제어는 응답특성이 빠른 히스테리시스 제어기로 구현하였으며 그림 10의 전압형 PWM 컨버터로 가진기에 실제 전류가 공급되어진다^[5].

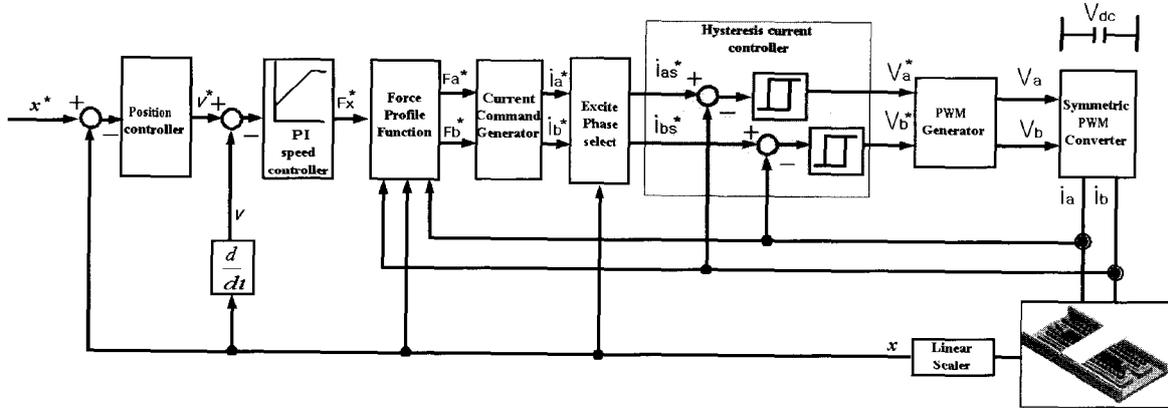


그림 9 가진기 제어시스템 블록도
Fig. 9 A control block diagram for vibrator

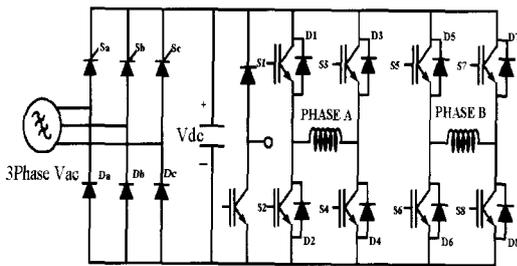


그림 10 가진기 구동을 위한 대칭형 PWM 컨버터
Fig. 10 A symmetrical PWM converter for the vibrator drive

4. 가진기의 동특성 시뮬레이션

3절에서 모델링 된 제어시스템을 대상으로 동적 시뮬레이션을 수행하여 동특성 해석을 수행하였다. 표 2는 시뮬레이션에 사용된 가진기의 기계적 전기적 파라미터가 된다. 단, 스프링은 고려하지 않았다.

표 2와 같이 58[Kg]의 이동자를 1[Hz]로 변위가 p-p 200[mm]로 가진시키기 위하여 필요한 속도와 가진력 F_x 는 식 (7), (8), (9)에 의하여 최대 약 0.68[m/s]와 230[N]이 된다. 그림 11과 12는 이때의 위치 제어기를 통한 가진변위와 속도의 과도 상태 및 정상상태의 응답 특성을 나타낸다. 그림을 통해 지령값을 잘 추종함을 알 수 있다.

가진 변위와 속도는 $\pi/2$ 의 위상차를 가지며 정현적인 운동을 한다. 따라서 위치에 대한 속도의 응답은 그림 13과 같이 정상상태에서 원형태로 나타내어지며 이 그림에서는 과도상태를 포함시켰다.

표 2 동특성 해석을 위한 가진기 시스템 파라미터
Table 2 The system parameter for dynamic simulation

기계적 사양		전기적 사양	
가진 주파수	1 [Hz]	한 상의 권선 저항(R)	1.6 [Ω]
스프링 상수(k)	0 [N/m]	정격 기자력	20 × 156 [AT]
감쇠비	0.066	V_{dc}	297 [V]
변위(D)	100[mm]	정격 출력	4 [Kw]
질량(M)	58 [Kg]		

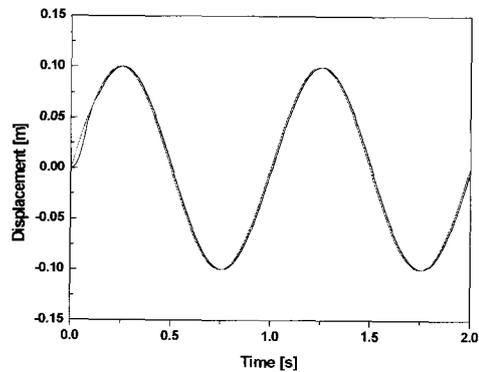


그림 11 위치 제어기 응답 특성
Fig. 11 The characteristics for the vibration displacement

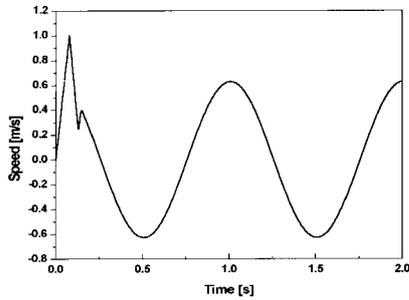


그림 12 가진기의 속도 응답 특성
Fig. 12 The characteristics of the speed response

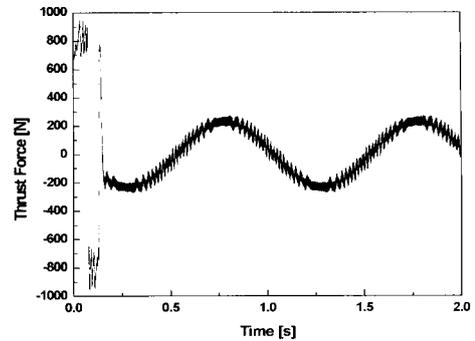


그림 15 가진기의 발생 추력
Fig. 15 The vibration thrust force

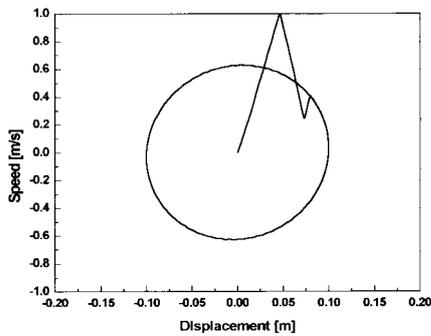


그림 13 위치에 따른 속도 응답 특성
Fig. 13 The speed response upon a displacement

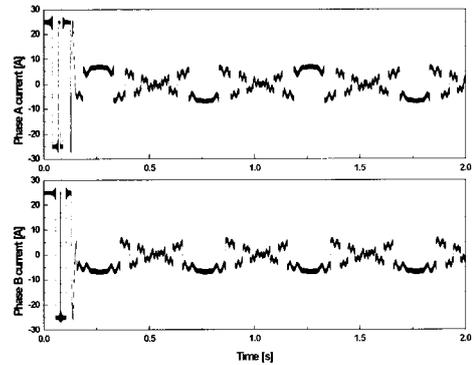


그림 16 A와 B상의 전류 응답
Fig. 16 The current responses of phase A and B

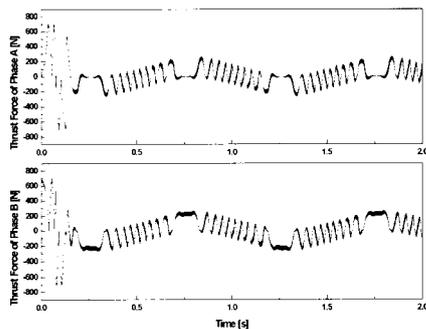


그림 14 A, B 상의 발생 추력
Fig. 14 The thrust forces of phase A and B

그림 14, 15는 이때의 가진기의 각 A, B상 및 전체의 발생 추력을 나타낸다. 이로써 전체 발생 추력 이식 (9)와 같은 정현 형태를 나타낼 수 있다.

그림 14와 15의 발생 추력은 가진기에 인가되어지는 기차력, 즉 전류에 의해 발생되어진다. 가진기의 역추에이터인 TFLM이 릴럭턴스 형태이고 정현적인 추력을 발생시켜야 하므로 각 상에 인가되는 전류는 그림

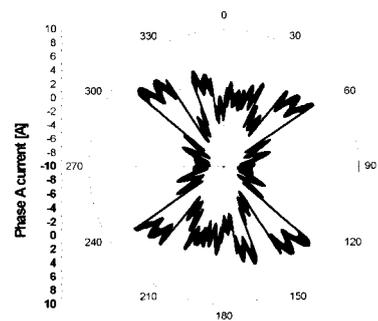


그림 17 가진 변위에 대한 A상 전류 특성
Fig. 17 The Phase A current upon displacement

16과 같이 주파수와 크기가 정현적으로 변하는 형태로 나타남을 알 수 있다. 정현 운동을 위한 전류 형태의 해석을 위해 가진 운동의 주기동안의 변위를 0~360°로 변환하여 이를 기준으로 각 상의 전류를 나타내면 다음 그림 17과 18과 같이 나타낼 수 있다.

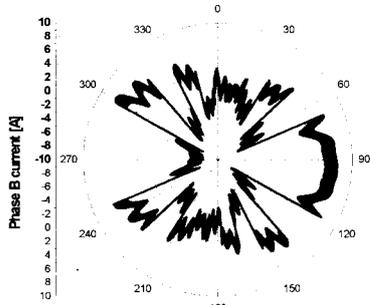


그림 18 가진변위에 대한 B상의 전류 응답 특성
Fig. 18 The Phase B current upon displacement

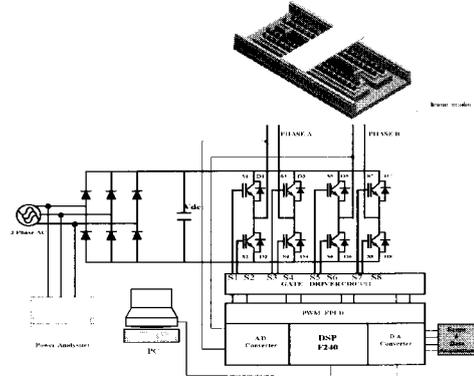


그림 20 가진기 제어 시스템 구성도
Fig. 20 The control system configuration for experimental

5. 실험

그림 19는 현재 가진기의 동특성 실험을 위해 시제작된 영구자석 여자 TFLM을 이용한 가진기이다. 실험은 시뮬레이션 결과와 비교, 검토하기 위해 표 2와 같이 동일한 조건으로 수행되었다. 본 실험에 있어 시제품의 높은 주파수와 큰 부하질량을 갖는 운전은 지지 구조물의 재설계가 필요한 상태이므로 우선 1[Hz]와 부하질량 58[Kg]에서 가진 특성을 검토하였다.

가진기 제어 시스템은 F2407PGEA DSP를 이용한 디지털 제어기와 대칭형 IGBT PWM 컨버터를 이용한 구동 드라이브로 그림 20과 같이 구현하였다.

그림 21은 실험 결과로써 가진 속도 V , 변위 X 그리고 각 상의 전류 ia, ib 를 나타낸다. 시뮬레이션 결과와 비교할 때, 전류의 최대값이 시뮬레이션 결과보다 약 20%의 오차를 가지나 응답 특성은 거의 유사함을 알 수 있었다.

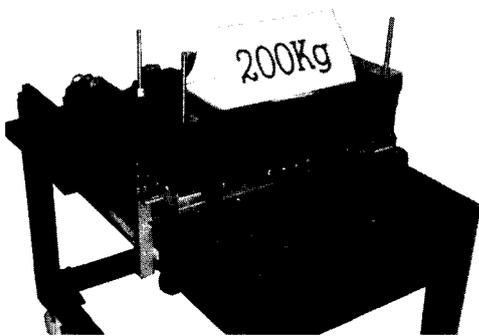


그림 19 영구자석형 TFLM가진기 시제품
Fig. 19 The vibrator prototype using TFLM

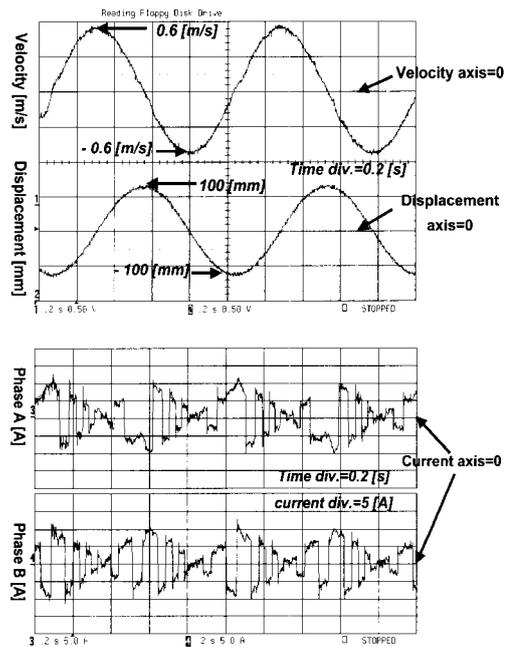


그림 21 가진 속도, 변위와 상 전류의 실험 파형
Fig. 21 The experimental results of the proposed vibrator(Speed, Displacement, Currents)

6. 결론

본 논문에서는 PM Excited TFLM을 이용한 고효율 전동식 가진기를 제안하였다. 제안한 가진기는 기존의 전동식이 갖는 넓은 주파수 운전 영역과 유압식의 큰 가진변위 및 고효율의 특성을 모두 만족하는 새로운

개념의 가진기이다. 따라서 큰 가진력이 요구되는 분야에 유압식을 대체하여 제안한 가진기를 적용하면 전체 시스템의 부피 감소와 유지 및 보수가 용이해지며 제어성이 우수해지므로 고성능화를 이룰 수 있다. 이는 시뮬레이션과 DSP와 IGBT PWM 컨버터로 구현된 제어기로의 실험을 통해 성능을 입증하였으며 앞으로 가진기의 지지 구조물의 재설계를 통해 고주파수와 큰 가진질량에서의 운전 성능을 확인할 것이다.

본 연구는 한국 과학 재단 목적기초연구 (1999-2-30200-008-3) 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] 강도현, Herbert Weh, "철도 차량용 고출력 횡축형 전동기 설계에 관한 연구", 대한전기학회 논문지 B, 제48권, 제6호, pp. 301~308, 1999.
- [2] 임태운, 김종무, 강도현, 김동희, "횡자속 선형 전동기를 이용한 가진기 구동시스템 구현", 대한전기학회 학술대회, July 2001.
- [3] M. Watada, Y. Fukuya, and D. Ebihara, "A Study on Kinetic Characteristics of a Cylindrical Moving Coil Linear DC Motor for a Vibrator", IEEE Transactions of Magnetics, vol. 31, No. 6, 1995.
- [4] Y. Perriard, B. Richard, and M. Jufer, "Linear Reluctant Transducer for Vibrator Application", IEEE Trans. of Magnetics, Vol. 31, No. 3, 1995.
- [5] Ion Boldea and S.A. Nasar, "ELECTRIC DRIVES", CRC Press, 1999.

저 자 소 개



임태운(林太潤)

1973년 6월 10일생. 1998년 삼척대 제어계측공학과 졸업. 1998년~1999 영남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년~2002 동 대학원 전기공학과 박사 수료. 현재 한국전기연구원 Mechatronics연구그룹 위촉연구원.



강도현(姜道鉉)

1958년 9월 21일생. 1981년 한양대 전기공학과 졸업. 1987년~1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년~1996년 독일 Braunschweig대 졸업(박사). 1989년~현재 한국전기연구원 Mechatronics연구그룹장.



김종무(金鍾武)

1970년 1월 4일생. 1992년 영남대 전기공학과 졸업. 1992년~1993 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년~현재 동 대학원 박사과정. 1994년~현재 한국전기연구원 Mechatronics연구그룹 선임연구원.



김동희(金東熙)

1950년 11월 20일생. 1973년 영남대 전기공학과 졸업. 1975년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 Kobe대학 졸업(박사). 1987년~1989년 한국전기연구원 전력전자 연구부장. 현재 영남대 전기전자공학부 교수. 당 학회 경상지부장.