

횡자속 선형 진동기를 이용한  
가진기 구동 시스템 구현

임태윤 · 김종무 · 강도현 · 김동희 · 양보석  
영남대학교 · 한국전기연구원 · 부경대학교 기계공학부

Realization of Vibrator driving system  
Using Transverse Flux Linear Motor

Lim Tae Yun · Kim Jong Moo · Kang Do Hyun · Kim Dong Hee · B.S.Yang  
Yeungnam Univ. · KERI · School of Mechanical engineering Pukyong national Univ.

**Abstract** - 본 논문에서는 공진을 이용한 일정 진폭과 일정 주파수용 가진기 구동 시스템의 구현을 위한 제어기와 시스템에 대한 동적 해석을 수행하였다. 제안된 가진기 시스템의 액츄에이터는 영구자석형 횡자속 선형 진동기(TFLM)가 적용되었고, 가진기의 이동자에는 공진용 스프링을 장착하였다. 이로써 TFLM의 구조적인 장점인 고효율과 공진을 통한 에너지의 고효율의 장점을 갖는 전동식 가진기 시스템을 구현할 수 있게 되었다.

1. 서 론

기계 구조물의 설계에 있어 동적 특성을 규명하고 이의 설계 과정으로의 재적용은 매우 중요시 되고 있다. 이러한 동적 특성을 실험적으로 파악하기 위하여 대상기계 구조물에 진동을 일으키는 힘, 즉 가진력을 발생시키는 것이 바로 가진기(Vibrator)이다. 가진기는 가진력의 발생기구에 따라 기계식, 전자식, 유압식, 전동식, 압전식 등으로 나눌수 있다. 대형 기계구조물에는 주로 전동식과 유압식 가진기가 주로 사용되고 있다. 전동식 가진기의 특징은 수 Hz ~ 수 KHz의 넓은 가진주파수 대역과 가진력의 조절이 용이한 반면, 전 주파수 범위에 걸쳐 정격 가진폭을 발생하기가 어려우며, 유압식 가진기는 비교적 큰 가진폭과 큰 가진력을 갖는 반면, 고주파에서의 가진 동작의 성능이 저하되는 단점이 있다.

본 논문에서 제안한 공진을 이용한 TFLM 가진기는 가진 주파수가 일정한 특수 목적형 가진기로서 내진 설비의 검증작업 또는 작동주파수가 일정한 다량 생산품의 시험등에 적용이 가능하며, 공진효과로 인해 감쇠력에 의해 소산되는 에너지량 만큼의 가진력만을 요구하는 것으로 최소의 소비전력으로 일정진폭의 왕복운동이 가능한 고효율, 고효율 가진기라 할 수 있다. 다음 본문에서는 이 가진기 시스템의 이론과 동특성 해석을 통한 가진기의 성능 검증을 위하여 Matlab/simulink를 사용하여 dynamic simulation을 행하고 결론에서 그 결과와 타당성을 서술하였다.

2. 본 론

2.1 TFLM의 이론

그림 1은 영구자석형 TFLM의 기본 구조를 나타낸다. 이동자에 포함된 영구자석에서 발생된 자계는 공극에서의 자계를 집중시키므로 높은 공극 자속 밀도를 얻을 수 있어 출력밀도를 증가시킨다. 이동자의 영구자석의 극배치는 자속을 일정한 방향으로 발생시키도록 교대로 설치되며, 일정한 방향으로 추진력을 얻기 위해 권선이 있는 고정자 철심은 양측 극면에서  $\tau_p$  만큼 엇갈리게 설계되었다. 그림 2는 이동자의 위치에 따른 기자력과 발생 추력을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 이동자가 일정한 방향으로 움직이기 위해서는 일정한 방향의 힘이 연속적으로 발생되어야 하므로,  $0 \leq x \leq \tau_p$  구간에서는 고정자의 자속이 영구자석의 자속방향과 같은 방향이 되도록 전류

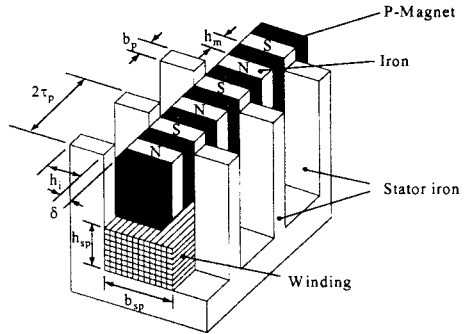


그림 1 TFLM의 기본 구조

를 인가하고,  $\tau_p \leq x \leq 2\tau_p$  구간에서는 반대방향의 전류를 인가하여야 한다.<sup>1)</sup>

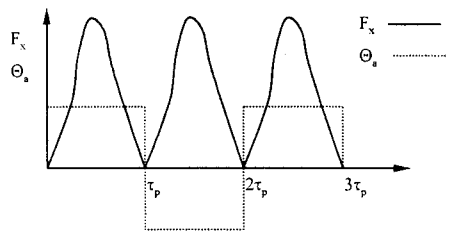


그림 2 TFLM의 이동자의 위치에 따른 기자력( $\theta_a$ )과 발생 추력( $F_x$ )

그림 2에서 발생가능한 추력 밀도  $F_{xd}$ 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{xd} = B_o \frac{\theta_a}{2\tau_p} \quad (1)$$

단, 여기에서  $B_o$ 는 무부하 공극 자속밀도를 나타낸다.

2.2 공진 시스템 설계

정형 진동을 갖는 1자유도 감쇠계의 운동 방정식은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_o \cos \omega t \quad (2)$$

단,  $m$ 은 운동물의 질량,  $c$ 는 마찰 계수,  $k$ 는 스프링 상수이다. 식 (2)의 양변을 질량  $m$ 으로 나누면, 식 (3)과 같이 나타내어진다.

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2 x = f_o \cos \omega t \quad (3)$$

여기에서,

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{:비감쇠 고유 공진주파수}$$

$$\zeta = \frac{c}{2m\omega} \quad \text{:감쇠비}$$

$$f_0 = \frac{F_0}{m}$$

이다. 식 (3)의 운동방정식의 정상상태 응답은 다음과 같다.

$$x_p(t) = A_0 \cos(\omega t - \phi) \quad (4)$$

$$A_0 = \frac{f_0}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta\omega_n\omega)^2}} \quad (5)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{2\zeta\omega_n\omega}{\omega_n^2 - \omega^2} \quad (6)$$

위의 진폭  $A_0$ 를 정적인 진폭 ( $F_0/k$ )로 나누어 정규화하면 식 (7)와 같이 감쇠비  $\zeta$ 와 주파수비  $\gamma$ 로써 나타낼 수 있다. 그림 3은 감쇠비  $\zeta$ 에 따라서 식 (7)을 그래프로 나타낸 것이다.

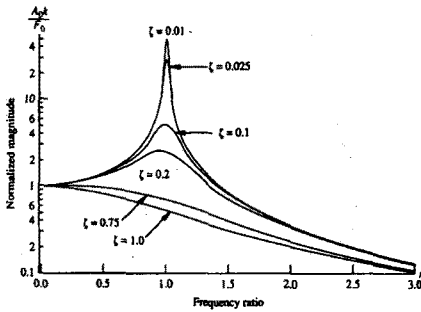


그림 3 주파수비에 대한 정상상태응답의 진폭

$$\gamma = \frac{\omega}{\omega_n} \quad \text{:진동수비}$$

$$\frac{A_0 k}{F_0} = \frac{A_0 \omega_n^2}{f_0} = \frac{1}{\sqrt{(1-\gamma^2)^2 + (2\zeta\gamma)^2}} \quad (7)$$

그림 3에서 나타나듯이 주파수비  $\gamma$ 이 1인 경우, 즉 공진 주파수일 경우에 힘에 대한 발생 진폭의 크기가 최대임을 알 수 있다. 만일 감쇠비  $\zeta$ 가 0이면 진폭의 크기는 무한대가 된다. 이로써 일정 진폭에 필요한 가진력은 공진주파수에서 최소가 되며 이는 감쇠비에 크게 좌우되므로 감쇠비의 정확한 측정과 평가가 요구된다.

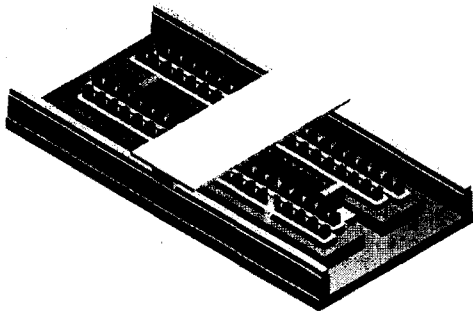


그림 4 공진을 이용한 가진기의 형상

### 2.3 공진 효과를 이용한 가진기 시뮬레이션

그림 4는 공진 효과를 이용한 가진기의 기본 형상을 나타낸다. 본 시뮬레이션의 TFLM에 가진력을 제공하는 전력변환장치는 4상한 동작이 가능하며 각 상이 독립적인 구조로 되어 있어 제어성이 뛰어난 2상 대칭형 컨버터로 하였고 각 상의 전류제어는 응답 특성이 좋은 Hysteresis PWM 제어로 하였다. 그림 5는 전체 가진기 시스템의 제어 블록도를 나타낸다.

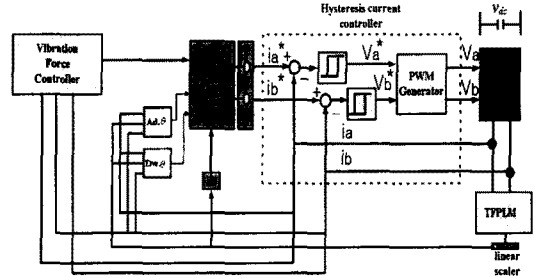


그림 5 가진기 제어 시스템의 제어 블록도

그림 5의 제어 알고리즘으로 동적 시뮬레이션을 수행할 대상의 가진기와 제어 시스템의 사양은 다음 표 1과 같다.

기계적 사양	전기적 사양		
가진 주파수	5.94 [Hz]	권선 저항(R)	1.6 [ $\Omega$ ]
스프링 상수(k)	15328 [N/m]	정격 기차력	20×76(AT)
감쇠비( $\zeta$ )	0.066	Vdc	297 [V]
질량(m)	11 (Kg)	정격 출력	76

표 1 가진기 시스템 파라미터

시뮬레이션을 위한 기계적 모델링은 식 (3)의 진동 방정식을 사용하였고, 가진력의 발생을 위한 TFLM의 전류-전압 모델링은 다음 상태방정식 (8)을 사용하였다<sup>[2]</sup>.

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{N \frac{\partial \Phi}{\partial i}} (V - R \cdot i - N \frac{\partial \Phi}{\partial x} v) \quad (8)$$

$i$  : 전류[A],  $V$  : 전압[V],  
 $\Phi$  : 쇄교자속[wb],  $N$  : 턴수  
 $R$  : 권선의저항[ $\Omega$ ],  $x$  : 이동자의변위

쇄교 자속은 전류  $i$ 와 이동자의 변위  $x$ 의 함수이며, 식 (8)에서 자속의 전류의 변화에 대한 유기기전력의 값이 인덕턴스가 된다. TFLM이 연속적으로 움직이기 위해서는 2상 이상이어야 한다. 본 시스템은 2상을 적용하여 시뮬레이션을 행하였다. 2상 TFLM의 구조적 특성 상 위치에 따라 여자 전류의 방향이 결정되며,  $\tau_p$ 의 위상차가 존재한다. 따라서 각 상의 위치에 따른 여자각 제어 알고리즘을 그림 5에서의  $Ad \theta$ (선행 스위칭각)와  $Dw \theta$ (스위칭 유지각) 발생 부분에서 구현하였다. 이러한 스위칭각 제어를 통해 인덕턴스의 크기에 따른 시정수의 영향을 제어할 수 있다. 시뮬레이션을 위한 simulink 모델링은 그림 6과 같다. 시뮬레이션에 사용된 TFLM의 전류와 위치에 따른 쇄교 자속과 추력은 FEM 해석값을 사용하였다.

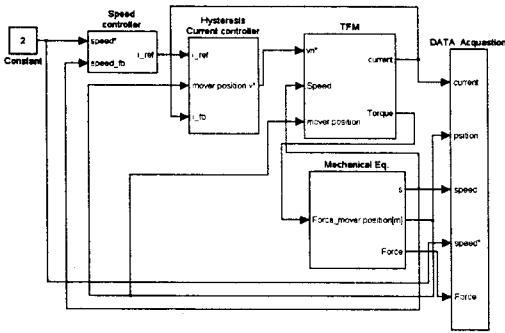


그림 6 시뮬레이션을 위한 Simulink 모델링

목표로 하는 가진 주파수는 표 1과 같이 5.94(Hz)이며 이는 시스템의 공진주파수이다. 공진 주파수에서 가진할 경우 가진폭은 식 (7)에 의하여 p-p 100(mm)가 된다. 이 경우에 101(N)의 에너지가 필요로 된다. 그림 7은 5.94(Hz)의 주파수로 TFLM에 인가되는 101(N)의 크기를 갖는 정현형태의 가진력을 나타내며, 이때의 가진 변위는 p-p 100(mm)임을 그림 8에서 나타내고 있다.

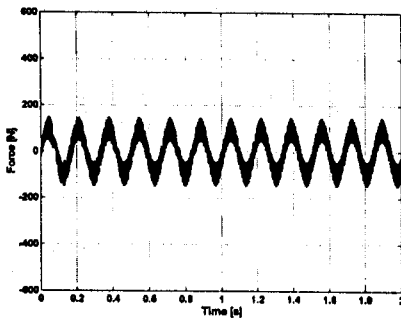


그림 7 공진에서의 정현 가진력

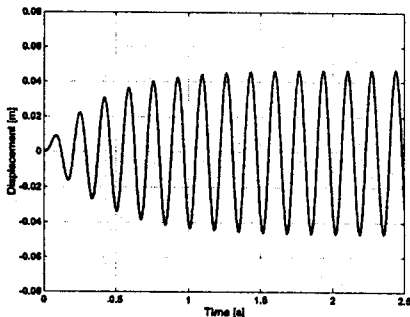


그림 8 공진에서의 가진 변위

그림 9는 가진폭은 p-p 100(mm)로 동일하고 주파수를 공진주파수보다 낮은 3.97(Hz) 구동시의 TFLM이 필요로 하는 정현 가진력으로 공진 주파수구동시의 가진력의 크기의 약 4배정도인 약 430(N)이 필요로 됨을 알 수 있다. 그림 10은 이때의 가진기의 변위를 나타내는 것으로 정상상태에 이르면 진폭이 그림 8의 정상상태와 동일한 p-p 100(mm)가 됨을 알 수 있다.

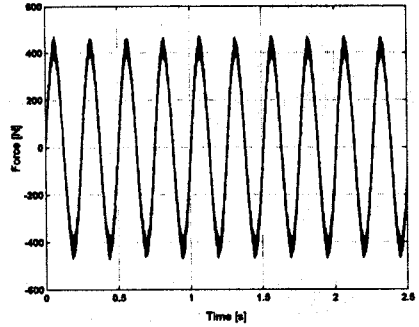


그림 9 3.97(Hz)에서의 정현 가진력

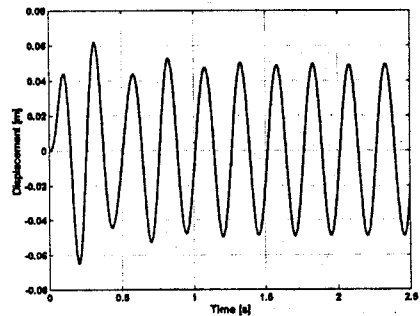


그림 10 3.97(Hz)에서의 가진 변위

### 3. 결 론

본 시뮬레이션을 통한 동적해석의 결과 일정한 주파수와 일정한 진폭의 가진을 요구하는 시스템에 있어 가진 주파수와 가진 변위를 고려하여 공진용 스프링을 설계, 장착하고 이의 공진 효과를 이용하면 최소의 에너지로 원하는 주파수의 가진력을 발생하는 가진기 시스템을 구현할 수 있음이 입증되었다. TFLM의 구조적인 이유로 발생하는 가진시 추력의 리플감소와 제어를 위한 알고리즘의 연구가 향후의 연구과제라 여겨진다.

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

### [참 고 문 헌]

- [1] 강도현, 정연호, "고출력 횡축형 선형전동기의 원리와 응용" Proceeding of KIEE. Vol. 43, No. 10, oct. 1999.
- [2] Ion Boldea, S.A.Nasar, "ELECTRIC DRIVES" CRC Press, 1999.