

## 뉴로-퍼지이론을 이용한 리니어 펄스 모터의 새로운 저진동 정밀제어 알고리즘

배동관\*, 박경빈\*, 이양규\*, 김광현\*, 박현수\*\*  
\*전남대학교 전기공학과, \*\*(주)넥스타테크놀로지

### New Low Vibration Control Algorithm of Linear Pulse Motor Using Neuro-Fuzzy Theory

Dong-Kwan Bae\*, Kyung-Bin Park\*, Yang-Guy Lee\*,  
Kwang-Heon Kim\*, Hyun-Soo Park\*\*

\*Dept. of Electrical Engineering and RRC/HECS, Chonnam National University  
\*\*Nexstar Technology Co., LTD.

#### ABSTRACT

This paper describes the method of vibration suppression on a control algorithm using Neuro-Fuzzy Theory in Linear Pulse Motor (LPM). The total thrust force is distorted by magnetic and coil flux, and we classify the harmonic parts of it. A modulated current from harmonic components of static thrust characteristics of LPM compensates with reference current to total thrust force. Low vibration is obtained by the method of current compensation using ANFIS.

#### 1. 서 론

초소형, 고정도화 제품 제조에 필요한 고정밀기와 고부가가치의 공장자동화, 사무 자동화기기에 대한 연구가 요구되고 있는데, 이에 부합한 직선 왕복운동의 공간이동이 필요한 정밀위치 메카니즘의 구동장치로서, 초 저속에서 고속 운전까지 속도 범위가 넓고, 정추력 특성을 갖는 리니어 펄스 모터(Linear Pulse Motor, LPM)는 운동변환 기구없이 입력신호에 따라 선형적인 변위를 갖는다. 위치제어나 속도제어에 있어서 궤환이 필요없는 개루프 제어가 가능하고, 구동시 오차누적이 없으며, 다른 리니어모터에 비해서 미세한 변위를 갖는 특징이 있으며, 구조도 간단하여 정확한 위치제어가 가능하여 제어회로도 간단히 할 수 있고, 신뢰도가 높을 뿐만 아니라, 단위체적당 고출력을 얻을 수 있다. 그러나, 구동시 구조적으로 큰 진동이 발생됨으로써 추력이 급격히 떨어질 때가 있으며, 최악의 경우에는 역전이나 탈조현상이 발생하고 소음의 원인이 되기 때문에 응용에 있어서 많은 제약이 있

다.<sup>[1],[2]</sup>

따라서, 본 연구에서는 고정도 위치제어 방법인 정현파 기준전류로 마이크로스텝방식으로 구동할 때, 정현파의 정추력을 얻으면 위치오차 정도나 진동이 거의 없어지지만, 실제로는 고조파 성분이 포함되어 있어 진동과 변위오차가 발생하여 이를 저감시키기 위한 방법으로 가동자와 고정자의 위치별 공극 퍼미언스법으로 계산된 추력결과를 퍼지 룩-업 테이블로 작성해둔다. Neuro-Fuzzy제어시에 정현파형과 여현파형의 여자전류를 각 상에 기준으로 이용하고, 고조파가 함유된 추력을 FFT로 해석하여 차수별 고조파 여자전류를 추가로 보상한 새로운 변조된 여자전류를 발생시켜 일정추력을 얻을 수 있게 하여, 구조적인 한계를 극복한 위치오차나 진동을 저감하는 방법을 제안한다.

#### 2. LPM의 구조 및 자기등가회로

그림 1은 본 연구에서 적용한 모터의 기본구조를 나타낸다. 가동자에는 두 개의 전자석(A상, B상)과 영구자석, 치로 구성되어 있으며, 전자석은 각각

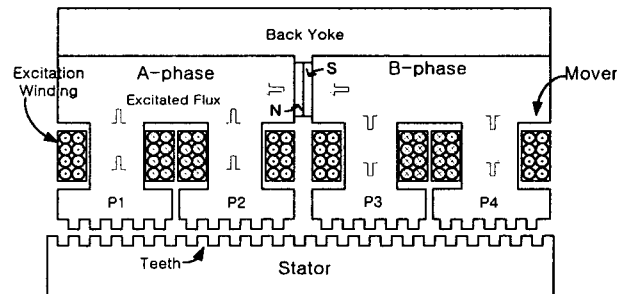


그림 1 2상 4극 HB형 LPM의 기본구조  
Fig. 1 Basic construction of LPM with 2 phase 4 poles HB type prototype

두개의 극을 가지고, 각 극은 고정자와 같은 수의 치를 가진다. A상 두 극은 1/2 치 피치, A-B상간 가동자 극은 1/4 치 피치의 거리를 갖는다.

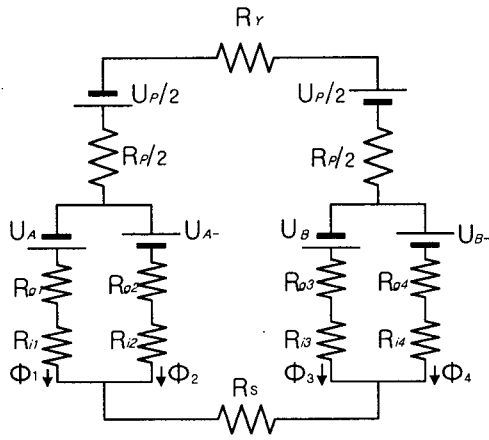


그림 2 LPM의 자기 등가회로  
Fig. 2 Magnetic equivalent circuit of LPM

- $U_P$  : 영구자석에 의해 생성된 기자력(mmf)
- $U_A, U_B$  : 전류  $I_A, I_B$ 에 의해 생성된 기자력(mmf)
- $R_{gn}$  : 공극 자기저항,  $R_{in}$  : 코어 각 지로자기저항
- $R_P$  : 영구자석에서의 자기저항
- $R_Y$  : 요크에서의 자기저항
- $R_S$  : 고정자에서의 자기저항
- $\Phi_i$  : 극에서의 자속

그림 2는 2상 4극 구조의 LPM의 일반적인 자기 등가회로를 나타내며, 여자전류에 따라 극 자속은 영구자석과 각 상의 전자석에 의해, 식 (1)과 같이 근사적으로 발생되며, 각 극에서는 영구자석 및 상 여자전류에 의해 생성된 자속의 평균값과  $n$ 차 고조파 자속성분을 참고문헌<sup>[4]~[5]</sup>에서처럼 식 (2)로 나타내고 있다.

$$\Phi_i = \Phi_{iP} + \Phi_{iA[n]} \quad (1)$$

$$\Phi_{iP} = \Phi_P + \sum \Phi_{P(n)} \cos \frac{2\pi}{T_P} nx \quad (2)$$

$$\Phi_{iA} = \Phi_A + \sum \Phi_{A(n)} \cos \frac{2\pi}{T_P} nx$$

### 3. 공극 퍼미언스법에 의한 추력해석

진동저감 및 추력 일정제어를 위해 마이크로스텝 전류 제어법을 사용하는데, 위치정밀도는 기계적인 공극의 퍼미언스 분포에 따라 큰 영향을 받게 된다. 공극 퍼미언스법에 의한 추력 계산은 코일 권선수가  $N$ 일 때 여자전

류  $i[A]$ 에 대해 발생하는 추력으로 식 (3)과 같이 나타내며, 뉴턴-랩슨법에 의한 것도 있다.<sup>[3]</sup>

$$F = \frac{1}{2} (N \cdot i)^2 \cdot \frac{\partial P}{\partial \theta} [N \cdot m] \quad (3)$$

여기서,  $P$  = 퍼어미언스 [ $H$ ],  $\theta$  = 각변위 [ $rad$ ]  
공극 자기저항은 식 (4)와 같이 퍼미언스법으로 근사화하여 구할 수 있다.

$$P = \frac{\mu_0 \cdot S}{l} = \frac{1}{R} [Wb/A] \quad (4)$$

여기서,  $\mu$  : 공극의 투자율 ( $4\pi \times 10^{-7} [H/m]$ )

$l$  : 자로의 길이 [ $m$ ]

$S$  : 자로에 수직인 미소 단면적 [ $m^2$ ]이다.

A상이 여자될 때, 자기수반에너지는 상 내에 자속변화의 차에 의해서 주어지며,  $x$ 를 변위라고 할때, 자기수반 에너지  $W_{mcA}$ 는 식 (5)와 같이 주어지며, B상도 동일하게 구해진다.

$$\begin{aligned} W_{mcA} &= \int_0^{I_A} \Psi dI_A \\ &= N_A \int_0^{I_A} \Phi_1 dI_A - N_A \int_0^{I_A} \Phi_2 dI_A \\ &= \frac{1}{2N_A} I_A (\Phi_1 - \Phi_2) \quad (5) \end{aligned}$$

여기서,  $N_A I_A [AT]$ 는 극당 기자력이다.

상 A, 상 B의 추력은 식 (6), 식 (7)과 같이 자기회로의 공극에 저장된 자기에너지의 위치변위에 대해 미분하면 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_A &= \frac{dW_{mcA}}{dx} = -\frac{4\pi N_A \Phi_{P(1)}}{\tau} I_A \sin \frac{2\pi}{\tau} x \\ &= -K_f I_A \sin \frac{2\pi}{\tau} x \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_B &= \frac{dW_{mcB}}{dx} = -\frac{4\pi N_B \Phi_{P(1)}}{\tau} I_B \sin \frac{2\pi}{\tau} x \\ &= -K_f I_B \cos \frac{2\pi}{\tau} x \quad (7) \end{aligned}$$

전체 추력  $F$ 는 다음과 같이 요약된다.

$$F = F_A + F_B \quad (8)$$

구형 치의 구조를 갖는 LPM에 대해 Tooth Pitch의  $1[P \cdot U]$  변위에 따라 P1~P28로 구분하여 공극 퍼미언스식을 각각 도출하여 계산하고, 그림 3의 퍼미언스 분포가 정현파에 가까움을 알게 되었다. 그러나, 그림 4와 나타난 바와 같이 자석과 코일에 따라 발생한 추력을 합성하면 전체 합성발생추력은 그림 5와 같이 왜형이 발생하여 고조파가 존재하게 된다. 또한 정추력은 1 step 치 구간에 추력 측정시스템을 통해 실질적인 합성발생추력 데이터와 계산된 데이터와의 비교분석하고, 추력곡선을 푸리에 변환법을 통해서 왜형을 일으키는 고조파성분을 분류하여 식 (9)의 전류성분으로 변환한다.

$$I = I_0 - (I_2 + I_3 + I_4 + \dots + I_n) \quad (9)$$

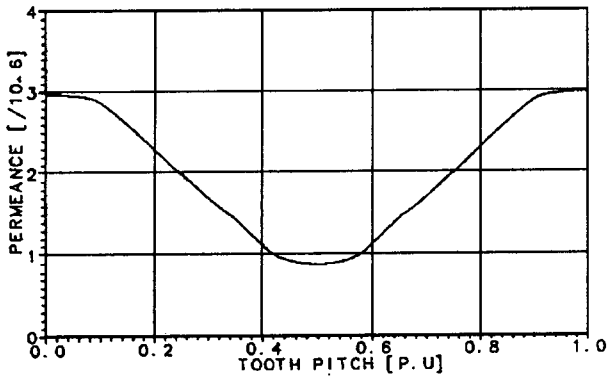


그림 3 공극퍼미언스 분포  
Fig. 3 Permeance of air gap

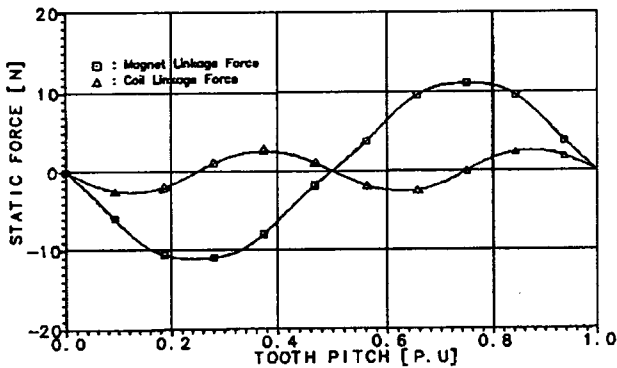


그림 4 자석 및 코일 발생 추력  
Fig. 4 Excited thrust force of magnetic & coil

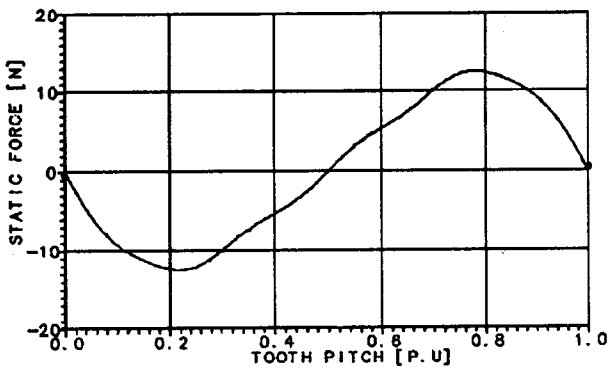


그림 5 합성 발생 추력  
Fig. 5 Total excited thrust force

#### 4. 시스템 구성 및 뉴로-퍼지 제어

추력리플 저감 및 정밀 위치제어에 주로 마이크로시스템 여자방식을 이용하고 있으며, 본 논문에서는 정현파형과 여현파형의 여자전류를 각상의 기준으로 사용하고, 동작상태의 각 상 전류를 제어기에 제환하여 오차를 향

상 추종하여 보정된 제어신호를 발생한다. 이때 제어전류신호는 항상 정현파형이 아니고, 추력의 고조파 발생 성분에 해당하는 전류파형을 추가하여 뉴로-퍼지제어기에서 추종하도록 하고 있다. 그림 6은 시스템 구성을 나타내고 있으며, 전류센싱 이외의 신호처리는 DSP에서 디지털적으로 모두 프로그램화하여 제어회로를 단순화시켰다. 그림 7은 뉴로-퍼지제어기를 이용하여 퍼지 룩-업 테이블에서 고조파 왜형성분에 해당하는 전류와 현재의 위치를 입력으로 한다. 제어기를 새로운 제어전류와 주파수를 출력으로 모터를 구동한다. 그림 8은 제어흐름도를 나타내며, 모터의 길이가 유한하기 때문에, 기동시와 방향전환시의 목표 위치에 도달하기까지 가감속의 속도 프로파일을 제어모드별로 지정한 다음, 운전되도록 하여 충돌에 의한 모터 파손으로부터 보호하였고, 저속에서 고속 범위까지 서보운전이 되도록 구성하였다.

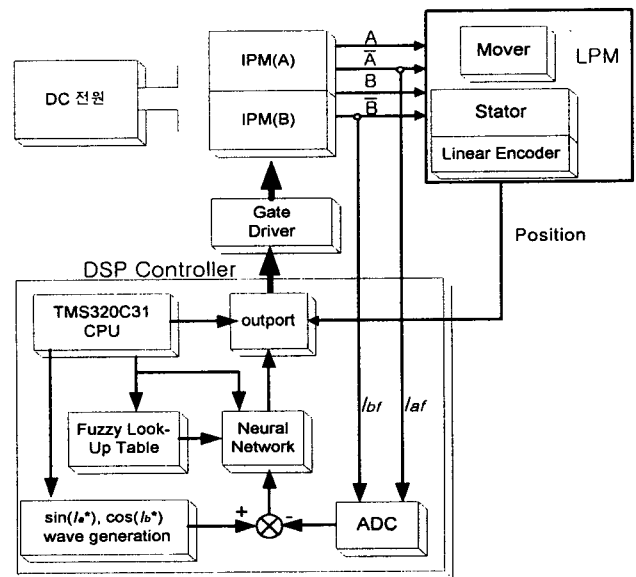


그림 6 LPM 시스템 구성도  
Fig. 6 System block diagram of LPM drive

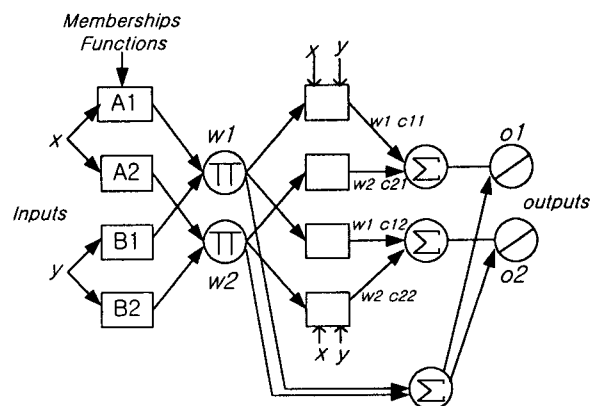


그림 7 뉴로-퍼지 제어기 구성도  
Fig. 7 The structure of Neuro-Fuzzy controller

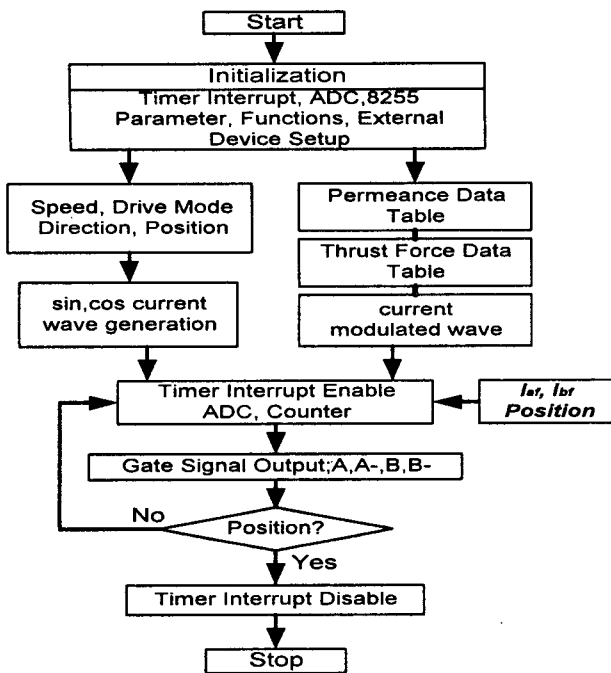


그림 8 LPM 제어 흐름도  
Fig. 8 Flow chart for LPM drive

## 5. 실험결과 및 검토

이 논문에서의 추력 측정시스템은 추력을 얻기 위한 Load Cell과 변위를 표시하기 위한 Linear Potentiometer로 구성하고, 이를 계측하여 NI사의 LabView로 가시적으로 나타내었다. 그림 9는 정추력을 1 치 피치[P.U] 구간에 측정한 그래프로 왜곡 성분이 존재하며 그림 5와 유사함을 알 수 있었고, 그림 10에 나타나 있는 그래프는 운전시 시간에 따라 가동자의 변위를 측정하는 것으로, 변위의 리플 성분이 거의 무시할 정도로 되어, 이로 인한 진동이 개선됨을 보여주고 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 진동을 발생시키는 추력의 고조파 성분을 제거하기 위하여 퍼미언스법을 이용하여 변위에 따른 정추력을 구하였고, 왜형성분을 고조파 차수별로 분류하여, 이에 해당하는 전류를 제어전류에 보상하도록 합성하여 정현파형의 추력곡선을 얻었다. 이를 토대로 뉴로-퍼지제어 알고리즘으로 운전하여 위치오차를 측정하였으며, 오차가 수  $\mu\text{m}$  이내에 제어되는 우수한 특성을 얻었다. 또한 속도 프로파일에 대해서도 탈조나 큰 진동없이 운전되는 특성으로 제어알고리즘에 신뢰성이 있음을 알 수 있었다.

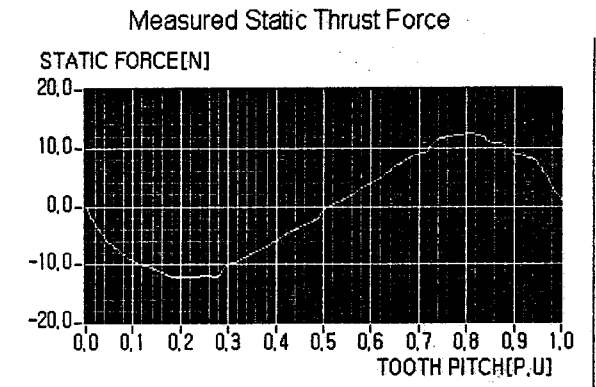


그림 9 측정된 합성발생 추력 LabVIEW GUI  
Fig. 9 LabVIEW GUI of measured total thrust force

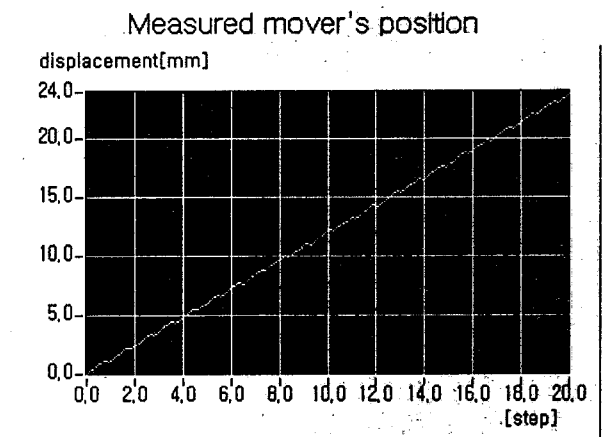


그림 10 20 치 구간에 따른 가동자 변위  
Fig. 10 Displacement of mover through 20 tooth pithchs

이 논문은 한국과학재단 지정 전남대학교 고품질 전기전자부품 및 시스템 연구센터의 연구비 지원에 의해 연구되었음.

## 참 고 문 헌

- [1] 김성현, 이은용, "2상 8극 HB형 LPM의 구동방식에 따른 추력의 고조파 해석," '96 대한전기학회학술대회, pp. 228~231, July. 22-24, 1996.
- [2] 김성현, 이은용, "2상 8극 HB형 리니어 펄스 모터의 정밀 위치 제어를 위한 미세스텝 구동," 대한전기학회논문지 48B권, 12호, pp. 671~678, 1999.
- [3] 조운현, 이광호. "선형 펄스 전동기의 특성 해석," 대한전기학회, 48B권 5호, pp. 249~256, 1999.
- [4] 이상호, 김동희, "2相 Linear Stepping Motor의 진동특성에 관한 연구," 전력전자학술대회, pp. 159 ~162, 21-24 July, 1999.
- [5] 이상호, 노채균, "Linear Stepping Motor의 동특성 개선에 관한 연구," 전력전자학술대회, pp. 295~298, 2-4 July, 1999.