

유한요소법을 이용한 선형 초음파 모터의 동작 특성 해석 및 뉴럴 네트워크를 이용한 선형 초음파 모터의 정밀 위치 제어

주현우, 이창환, 노종석, 정현교
서울대학교 전기역학연구소

Analysis of Linear Ultrasonic Motor by Finite Element Method and Precise Position Control of Linear Ultrasonic Motor by Neural Network

Hyun-Woo Joo, Chang-Hwan Lee, Jong-Seok Rho, and Hyun-Kyo Jung
School of Electrical Engineering, Seoul National University

Abstract - 본 논문에서는 유한 요소법을 압전체에 적용하여 계산한 임피던스 파형을 실험적으로 검증하였으며 이를 선형 초음파 모터에 적용하여 선형 초음파 모터의 공진 특성을 해석하였다. 또한 선형 초음파 모터의 동작 특성 및 공진 모드의 타당성을 검증된 유한 요소법을 이용하여 검증하였으며 인가 전압 및 주파수에 따른 선형 초음파 모터의 속도 특성을 뉴럴 네트워크를 이용한 제어법을 통해 검증하였다. 선형 초음파 모터의 정밀 위치 제어의 가능성을 뉴럴 네트워크를 통한 제어법을 통해 검증하였다.

유한 요소법을 이용하여 얻은 해석 결과의 타당성을 검증하였다[2]. 이를 통해 뉴럴 네트워크를 이용한 선형 초음파 모터의 정밀 위치 제어를 실현하였다.

2. 유한 요소 정식화

행렬식 (1)은 압전체에서 기계적인 물리량과 전기적인 물리량의 상관관계를 표현하는 식으로 압전체의 유한 요소 정식화의 기본이 되는 식이다[3].

$$\begin{aligned} T &= c^E S - e^t E \\ D &= eS + \epsilon^t E \end{aligned} \quad (1)$$

- T : 응력 벡터
- S : 변형 벡터
- E : 전계 벡터
- D : 유전 변위 벡터
- C^E : 기계 계수 행렬식 ($E = 상수$)
- ϵ^S : 유전상수 ($S = 상수$)
- e : 압전상수

해밀턴의 변분법을 압전체에 적용하면 아래와 같은 유한 요소법을 이용하여 압전체를 해석하기 위한 선형 차분 방정식을 얻을 수 있다[3].

$$\begin{aligned} -\omega^2 M + j\omega D_{uu}u + K_{uu}u + K_{u\phi}\phi \\ = F_B + F_S + F_P \\ K_{\phi\phi}\phi + K_{\phi u}u = Q_S + Q_P \end{aligned} \quad (2)$$

- K_{uu} : 기계 계수 행렬식
- D_{uu} : 기계 감쇄 행렬식
- $K_{u\phi}$: 압전 결합 행렬식
- $K_{\phi\phi}$: 유전 계수 행렬식
- M : 질량 행렬식
- F_B : 기계적인 체적 힘
- F_S : 기계적인 면적 힘
- F_P : 기계적인 point 힘
- Q_S : 면전하
- Q_P : 점전하
- u : 기계적인변위
- ϕ : 전위

1. 서 론

높은 토크 밀도, 저속도 운전시 높은 효율 및 소형화가 가능한 초음파 모터는 작은 파워가 요구되는 산업분야에서 널리 이용되고 있다. 특히 높은 추력 특성을 가지는 선형 초음파 모터는 주사형 현미경, 반도체 검사 장비 및 MEMS등 높은 정밀도의 구동이 요구되는 산업 분야에 널리 적용되고 있다. 선형 초음파 모터는 높은 기계적인 마찰력을 이용하며 또한 부가적인 제동 장치가 필요하지 않는 특성을 가지기 때문에 정밀 위치 제어용 구동자로써의 적용이 용이하며 정밀 위치 제어를 위한 제어법이 요구된다. 선형 초음파 모터의 유용성에도 불구하고 선형 초음파 모터의 제어는 선형 초음파 모터의 온도 상승 및 부하 변동에 따른 속도의 비선형성에 의해 정밀 제어에 어려움을 겪고 있다.

선형 초음파 모터는 속도가 큰 self-moving형과 추력이 높은 non self-moving형으로 구분될 수 있다[1]. 그림 1은 multi-mode 진동을 이용한 선형 초음파 모터를 나타낸다. 즉, B_4 mode의 flexural 진동을 이용한 수직 방향의 운동 및 L_1 mode의 longitudinal 진동을 이용한 수평 방향의 운동의 위상차를 조정함으로써 이동자와 고정자의 접촉점에서 이동자 접촉점에서의 타원 운동을 이용함으로써 그림 1과 같은 방향으로 선형 운동하는 것을 알 수 있다.

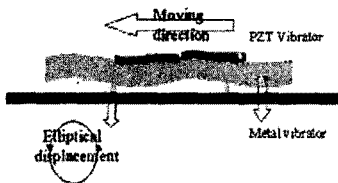


그림 1 선형 초음파 모터의 구조

본 논문에서는 유한 요소법을 이용하여 선형 초음파 모터의 공진 특성을 해석하였으며 이를 이용하여 인가 전압 및 주파수의 변화에 따른 속도 특성 변화를 해석하였다. 또한 PI 제어 및 퍼지 제어에 비해 선형 초음파 모터의 제어로의 적용이 용이한 뉴럴 네트워크를 이용하여

3. 유한 요소 해석

3.1 압전체의 임피던스 해석

압전체의 전기적인 임피던스는 임피던스 analyzer를 통해 실험적으로 쉽게 검증될 수 있는 물리량이며 또한 압전체의 임피던스 해석을 통해 압전체의 공진 특성 즉 공진 주파수와 반공진 주파수를 알 수 있다. 유한 요소법을 통한 임피던스 해석은 (3)과 같이 전극에서의 외부 전하량과 전위와의 비를 이용하여 계산된다[3].

$$Z(\omega) = \frac{\Phi(\omega)}{j\omega Q} \quad (3)$$

그림 1은 유한 요소법을 통해 구한 압전체의 전기적인 임피던스 파형과 실험에 의한 임피던스 파형의 비교를 나타낸다. 또한 임피던스 파형 해석을 통해 그림 2의 시험 모델에 대한 공진 주파수와 반공진 주파수를 구할 수 있다. 유한 요소법을 이용한 해석 결과와 참고 문헌 [3]에서 인용된 실험 결과와 유사한 경향을 나타내므로 그림 1의 임피던스 파형은 본 논문에서의 유한 요소법 과정의 타당함을 보여준다.

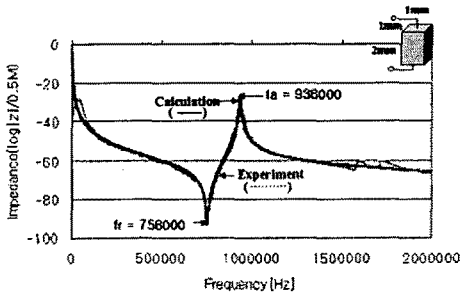
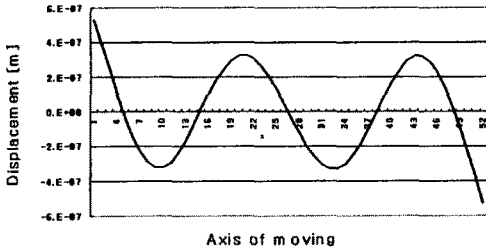


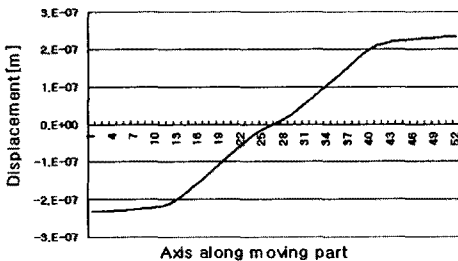
그림 2 압전체의 임피던스 해석

3.2 선형 초음파 모터의 유한 요소 해석

그림 3은 선형 초음파 모터의 flexural 진동에 의한 수직 방향 및 longitudinal 진동에 의한 수평 방향으로의 운동을 나타내는 것이다. 그림 3은 각각 B_4 mode 및 L_1 mode 진동을 나타내는 것으로 이 결과를 통해 이동자 치의 위치를 결정할 수 있다.



(a) B_4 mode



(b) L_1 mode

그림 3. 선형 초음파 모터의 공진 모드

그림 4는 선형 초음파 모터의 이동자 접촉점에서의 타원 운동을 나타낸다. 선형 초음파 모터의 접촉점에서

의 수직 방향 및 수평 방향 운동의 크기 및 위상차가 그림 2.에서의 B_4 및 L_1 모드에 의해 타원 운동 할 때 이동자와 고정자의 마찰에 의해 이동자가 선형 운동을 하게 됨을 알 수 있다.

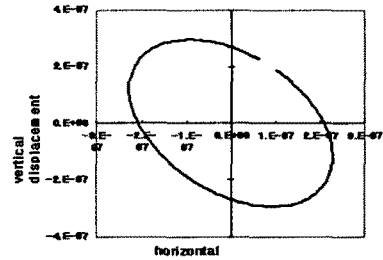


그림 4. 이동자 접촉점에서의 타원 운동

3. 뉴럴 네트워크를 이용한 선형 초음파 모터의 제어

그림 5는 인공 뉴럴 네트워크를 이용한 선형 초음파 모터의 정밀 위치 제어를 위한 제어 diagram을 나타낸다. $y_m(k)$, $y(k)$, $e(k)$, 그리고 $u(k)$ 는 각각 요구되는 위치, 현재 위치, 위치차, 그리고 구동 주파수의 제어 입력을 나타내며 u^* 는 35.8[kHz]의 바이어스 구동 주파수를 나타낸다. $e(k)$, $y_m(k)$, $u(k)$ 는 네트워크에서의 포화를 피하기 위해 normalization된 값이다. I 번 neuron에 대한 입력 I_i 는 (4)와 같다[2].

$$I_i = \sum_{j=1}^n w_{ij} y_j \quad (4)$$

여기서 w_{ij} 는 j 번 neuron에서 i 번 neuron까지의 가중치를 y_j 는 j 번 neuron의 출력을 나타낸다.

또한 i 번 neuron은 출력 y_i 를 나타내므로 y_i 는 (5)와 같다.

$$y_i = f(I_i) \quad (5)$$

여기서 $f(x)$ 는 sigmoid 함수로써 (6)과 같다.

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (6)$$

갱신되는 가중치는 (7)과 같다.

$$w_{ij}(k) = \alpha w_{ij}(k-1) + \Delta w_{ij} \quad (7)$$

여기서 $\Delta w_{ij} = \beta E f(I_i)$ 이며 $\alpha (0 < \alpha \leq 1)$ 는 overlearning을 막기 위한 forgetting factor 이며 $\beta (0 < \beta \leq 1)$ 는 연결된 가중치의 갱신 속도를 결정하기 위한 learning factor이다. 본 논문에서는 $\alpha = 0.09$ 그리고 $\beta = 0.3$ 으로 결정하였다. 또한 E 는 각각의 layer에서의 오차를 나타내며 (8)과 같다.

$$E^{output} = e(k) = y_m(k) - y(k) \quad (8)$$

$$E^{middle} = \frac{df(I_i^{middle})}{dI} \sum_{i=1}^n [w_{ij} E^{output}]$$

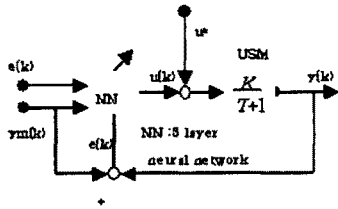


그림 5 뉴럴 네트워크의 diagram

그림.6은 주파수의 변화에 따른 속도 특성을 나타낸다. 그림 .6에서 나타난 것과 같이 선형 초음파 모터의 주파수에 따른 속도 특성은 주파수에 일정하지 않고 선형 초음파 모터의 비선형성에 의해 변하는 것을 알 수 있다.

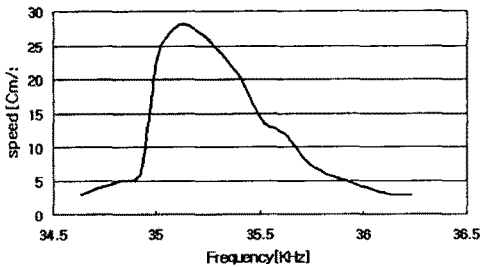


그림 6 주파수 변화에 따른 속도 특성

그림 7.은 인가 전압의 변화에 따른 무 부하시 선형 초음파 모터의 계산된 속도 및 측정된 속도를 나타낸다. 그림 7.에서 나타난 것과 같이 계산된 속도는 측정된 속도와 유사한 값을 가지는 것을 알 수 있다.

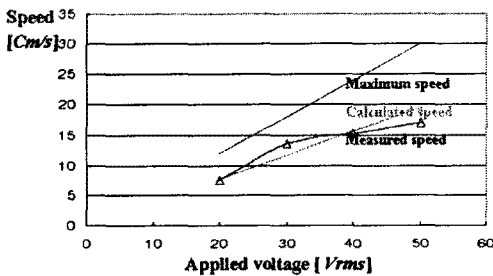


그림 7 인가 전압의 변화에 따른 속도 특성 비교

그림 .8은 선형 초음파 모터의 요구되는 위치 및 뉴럴 네트워크에 의해 제어된 위치를 나타낸다. 그림 .8에 나타난 것과 같이 두 결과는 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

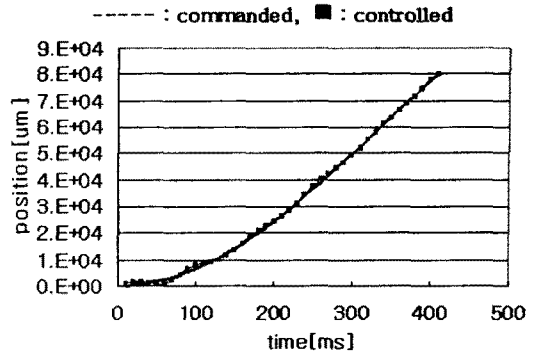


그림 8 요구되는 위치 및 제어된 위치의 비교

3. 결 론

본 논문에서는 유한 요소법을 압전체에 적용하여 계산한 임피던스 파형을 실험적으로 검증하였으며 이를 선형 초음파 모터에 적용하여 선형 초음파 모터의 공진 특성을 해석하였다. 또한 multi-mode 진동을 이용한 선형 초음파 모터의 수직 방향 및 수평 방향의 공진 모드의 타당성을 검증하였으며 이용하여 이동자 접촉점에서의 타원 운동에 의한 선형 초음파 모터의 동작을 유한 요소법을 통해 검증하였다. 선형 초음파 모터의 정밀 위치 제어를 뉴럴 네트워크를 이용한 제어법을 이용하였으며 이를 통해 인가 전압 및 주파수 변화에 따른 선형 초음파 모터의 속도 특성을 유한 요소법에 의한 해석 결과와 비교 및 검증하였다. 요구되는 위치와 뉴럴 네트워크를 이용하여 얻은 제어된 위치의 비교를 통해 제안된 선형 초음파 모터의 제어법의 타당성을 검증하였다.

(참 고 문 헌)

- [1]Toshiiku Sashida, Takashi Kenjo, An Introduction to Ultrasonic Motors, (Clarendon Press, Oxford 1993)
- [2]T. Kamano, T. Xuzuki, and T. Kuzuhara, Position T. Senjyu, H. Miyazato, S. Yokoda, K. Uezato, Speed Control of Ultrasonic Motors Using Neural Network, IEEE Trans. On power electronics, Vol. 13 No. 3, pp.381-386 May 1998
- [3]Reinhard Lerch, "Simulation of Piezoelectric Devices by Two- and Three-DimensionaI Finite Elements," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, vol. 37, pp. 233-247, May 1990