

3차원 유한요소법을 이용한 Micro positioning actuator의 설계 및 해석

오광일, 노종석, 정현교
서울대학교

Design and Analysis of Micro-positioning Actuator using Three Dimensional Finite Element Method

Kwang-il Oh, Jong-seok Rho, Hyun-kyo Jung
Seoul National University.

Abstract - 본 논문에서는 압전체의 타원 운동을 이용한 선형 Micro-Positioning Actuator(MPA)에 대한 설계 및 해석 기법을 제안하였다. 또한 MPA의 해석을 위해 3차원 압전체의 유한요소의 정식화를 통한 유한요소 해석기법의 검증은 수행하였다. 검증된 3차원 유한요소 해석을 이용하여 MPA의 공진 특성 즉 impedance, 모드, 그리고 타원운동 해석을 하였다. 마지막으로 제안된 해석기법을 이용하여 기계 시스템을 고려한 MPA의 최종 설계를 하였다.

1. 서 론

압전현상을 이용한 초음파모터(USM)는 기존의 모터와는 달리 자계에 의한 영향을 받지 않고 작은 크기로 제작이 가능하면서 토크밀도와 효율이 높은 반면 저속으로 동작하며 매우 조용하다. 또한 추가적인 breaking system을 필요로 하지 않고 정밀한 제어가 가능하다. 선형 초음파 모터는 회전형의 초음파 모터에 비해 설계의 자유도가 크고 추력이 높으며 작은 사이즈로 제작이 가능하다는 장점을 갖추고 있다.[1][2]

선형 초음파 모터 중 MPA는 L1B4와 같은 다른 선형 초음파 모터에 비해 그 기계적인 구조가 단순하여 설계가 용이하다. 또, 압전체의 전극면 중 한쪽에만 전압을 가하여도 추력을 발생한다. 즉, 다른 초음파 모터가 일정한 위상차를 가진 두 개의 전압원을 필요로 하는데 반해 MPA는 하나의 전압원만을 사용하기 때문에 전압원의 위상차를 고려치 않아도 된다는 장점을 가지고 있다.

한편 USM이 가진 수많은 장점으로 인하여 연구자들은 수십 년간 폭넓은 연구를 해왔다. 그러나 최근 압전체의 형상 및 동작 특성이 복잡해짐에 따라 전기-기계 결합 및 공진 특성 등 압전 시스템의 분석과 설계에 어려움을 겪고 있다. 특히 현재까지 초음파 모터에 대한 해석과 설계는 복잡한 contact mechanism에 대한 숙고 없이 조잡한 해석기법이나 상용프로그램에 의존하는 경우가 대부분이었다. 따라서 수치해석기법이 도입되었으며 이 논문에서는 MPA의 해석과 설계에 대해 3-D FEM이라는 수치해석방법을 제시하였다.[2][3]

본 연구에서는 3차원 FEM을 이용하여 초음파를 이용한 선형 MPA를 설계하였다. 본 논문에서 적용된 3차원 유한 요소법의 타당성은 압전 트랜스듀서의 임피던스 파형을 실험 결과와의 비교를 통해 검증하였다. 실험적으로 검증된 3차원 유한 요소법을 선형 MPA에 적용하여 Impedance와 mode, elliptical 등의 MPA의 공진 특성을 해석하였다. 또한 선형 운동을 위한 MPA의 시뮬레이션 전체 기계적 시스템을 설계하였다.

2. 본 론

2.1 MPA의 기본 구조 및 동작원리

그림 1은 MPA의 구동부인 압전체를 보여준다. 압전체는 $L \times 0.5L \times W$ (X, Y, Z) 크기에 Z방향으로 분극되어 있다. 압전체의 윗면과 아랫면은 전극으로 덮여있다. 윗면의 절반으로 나누는 두 개의 전극이 exciter의 역할을 하며 아랫면의 단일 전극면이 common drain이 된다. 윗면 중앙에는 aluminum oxide 재질의 teeth가 있으며 teeth가 guider 옆면을 미는 추력에 의해 MPA는 선형 운동을 한다.

압전체 윗면에 덮인 두 개의 전극 중 한쪽에 sine 파형의 전압이 공급되면 비대칭 형태의 진동이 발생한다. 이 때 다른 전극면은 floating 상태이며 이 면의 전위는 actuator의 공진주파수와 excitation 주파수를 맞추는 부가된 신호로 사용된다.[4]

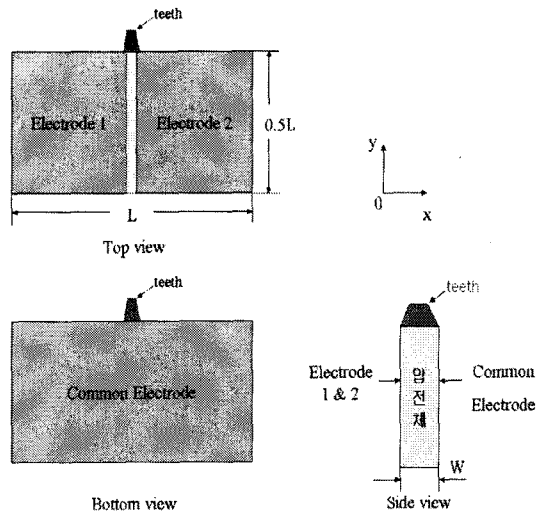


그림 1. MPA용 압전체의 기본 구조

그림 2는 압전체 및 압전체의 선형 운동을 위한 기계 시스템을 고려하여 설계한 MPA의 기본 설계 모형이다.

LM guider의 우측면에 구동부의 teeth가 접촉하고 있으며 압전체에서 발생한 teeth 위치에서의 타원 운동은 teeth에 전달되어 추력을 발생시킨다. 추력의 방향은 타원의 장축의 기울기에 의해 결정된다. 즉, LM guider 면과 45°(반대방향으로 이동할 시에는 135°)의 각을 이루는 압전체 teeth 위치에서의 타원 운동에 의해 MPA는 LM guider면을 따라 직선운동을 하게 된다. 이때 선형 운동방향의 전환은 그림 1에 나타난 윗면 전극 중 다른 하나의 전극에 전압을 인가하는 것에 의해 구현된다. 이는 teeth의 추력이 90° 위상변화를 일으켜 반대방향으로 움직이는 것을 의미한다.

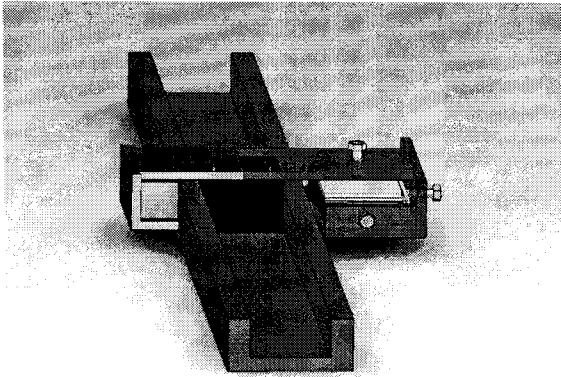


그림 2. 압전체를 이용한 MPA의 기본설계

2.2 MPA의 설계 및 해석 결과

2.2.1 유한요소 정식화

MPA의 동작 특성을 3차원 유한 요소법에 의해 해석을 하였다. 그 지배방정식은 기계 및 전기적 특성을 갖는 압전 세라믹 방정식이며 다음과 같다.

행렬 방정식 (1)은 3차원 유한 요소 공식 유도 of 기본이며, 압전 물질의 기계 및 전기적 특성과 관련된 식이다.[5]

$$T = c^E S - e^T E$$

$$D = eS + \epsilon^S E \quad (1)$$

T: 기계적 응력 벡터
S: 기계적 변형률 벡터
E: 전기 벡터
D: 유전 변위 벡터
해밀턴의 변분법으로부터, 행렬 방정식 (2)와 (3)을 얻을 수 있다.

$$-\omega^2 M u + j\omega D_{uu} u + K_{uu} u + K_{u\Phi} \Phi = F_{total} \quad (2)$$

$$K'_{u\Phi} u + K_{\Phi\Phi} \Phi = Q_s + Q_p \quad (3)$$

K_{uu} : 기계적 강성 행렬
 D_{uu} : 기계적 감쇠 행렬
 $K_{u\Phi}$: 압전 커플링 행렬
 $K_{\Phi\Phi}$: 유전 강성 행렬
 M : 질량 행렬
 F_{total} : 기계적 힘
 Q_s : 유전 표전 전하
 Q_p : 유전 점전하

2.2.2 압전 트랜스듀서를 이용한 유한요소 해석기법의 검증

유도된 3차원 유한요소법의 검증을 위하여 압전 트랜스듀서를 이용하였다. 그림 3은 검증에 사용된 압전 트랜스듀서의 형태 및 실험을 통해 얻은 측정값과 유한요소법을 이용한 해석값의 비교 그래프이다. 그림 3에 나타난 것과 같이, 3차원 유한 요소법을 이용한 압전체의 임피던스 해석 결과는 실험 결과 거의 일치함을 확인할 수 있으며, 이를 통해 제안된 3차원 유한요소법의 타당성을 검증하였다.

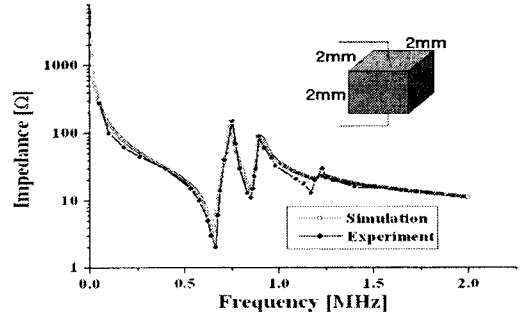


그림 3. 압전 트랜스듀서의 해석 및 실험 결과.

2.2.3 MPA용 압전체의 설계 및 특성해석

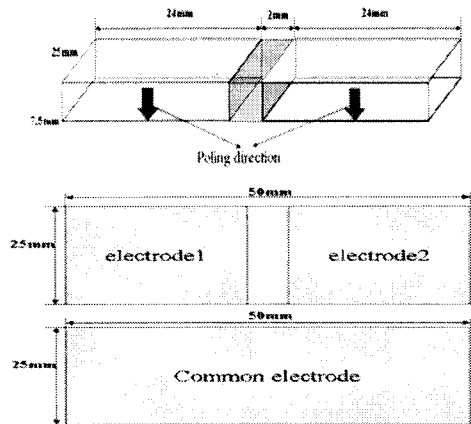


그림 4. MPA의 압전체 설계도

그림 4는 MPA의 동작원리에 기초하여 설계한 MPA의 구동부인 압전체의 설계도이며 그림 5는 요소 분할된 압전체의 형상을 보여준다.

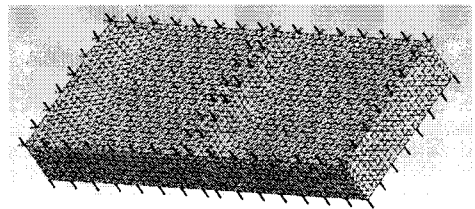


그림 5. 요소분할된 압전체의 형상

그림 6은 그림 3에 나타난 것과 같이 실험적으로 검증된 3차원 유한요소 해석기법을 이용하여, MPA용 압전체를 해석한 임피던스 결과를 나타낸다. 이 결과에서 나타난 것과 같이 압전체는 여러개의 동작 모드를 가짐을 알 수 있는데 압전체의 타원 운동을 얻기 위해서는 각각의 공진 주파수에서의 압전체의 동작 모드를 확인하는 것이 요구된다.

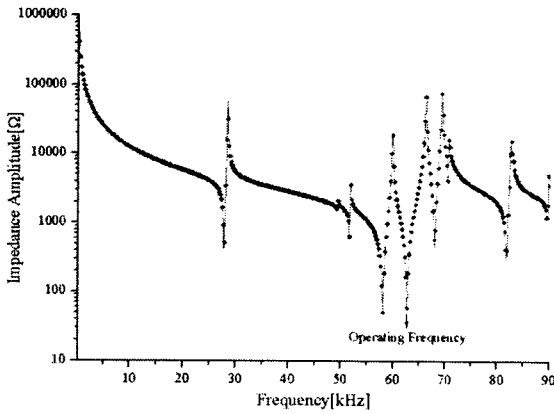


그림 6. 압전체의 frequency-impedance 그래프

그림 7은 그림 6에서 나타난 것과 같이 약 64kHz의 입력 주파수를 압전체에 인가했을 때의 동작 모드를 나타낸다. 앞에서 언급했던 것과 같이 압전체는 좌우 비대칭 형태로 진동하는 것을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 64kHz를 동작 주파수로 MPA용 압전체에 인가하였다.

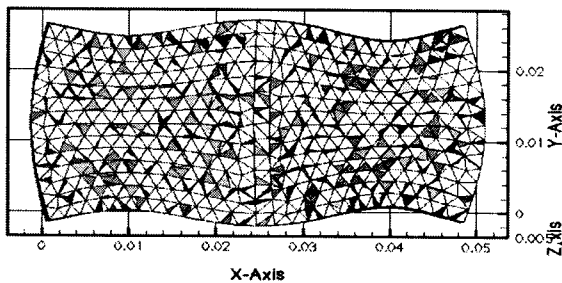


그림 7. 동작주파수에서의 압전체 mode 해석

그림 7의 mode 해석결과를 토대로 압전체의 윗면 중앙(x=25mm, y=25mm)에 teeth가 자리한다고 가정하고 해당 위치에 대한 x, y 방향의 변위를 해석하였다. 그 결과는 그림 8의 그래프로 표현할 수 있으며 그래프에서 볼 수 있듯이 x 방향의 변위가 비대칭 형태를 이루고 있다. 즉, x방향에 대해 비대칭 운동을 하고 있음을 알 수 있다.

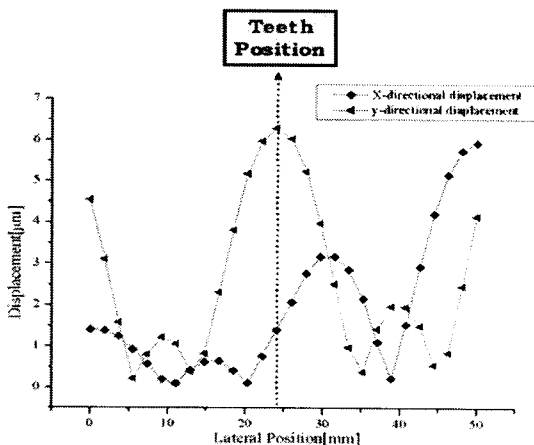


그림 8. 압전체에서 Teeth 위치에 대한 x, y 방향 변위 해석결과

Teeth부분의 x변위와 y변위의 관계를 분석한 결과 teeth 부분이 그림 9와 같은 타원운동을 한다는 것을 확인할 수 있다.

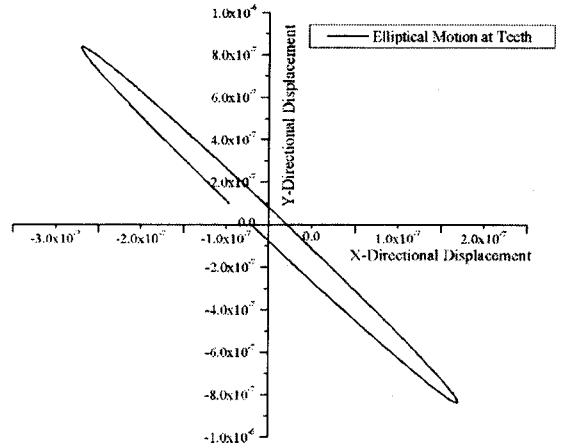


그림 9. Teeth에서의 타원운동 해석모드

3. 결 론

기존의 선형 초음파 모터에 비해 구동 및 제작 면에서 많은 장점을 가지고 있는 제안된 MPA용 압전체의 해석 및 선형 운동을 위한 전체 기계 시스템 설계를 수행하였다. 이러한 설계를 위해서 본 논문에서는 압전 트랜스듀서의 임피던스 해석 결과를 실험적으로 검증하여 사용된 3차원 유한 요소법의 타당성을 검증하였다. 또한 검증된 해석 기법을 이용하여 MPA용 압전체의 임피던스 해석, 모드 해석을 수행하였다. 특히 모드 해석을 통해 추력 발생을 위한 teeth 위치를 설계하였으며 teeth 위치에서의 타원 운동을 해석적으로 검증하였고 선형 운동을 위한 전체 기계시스템을 설계하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Toshiiku Sashida and Takashi Kenjo, "An Introduction to Ultrasonic Motors", pp. 17-23. 1993. Clarendon Press · Oxford.
- [2] Jong-Seok Rho, Byung-Jai Kim, Chang-Hwan Lee, Hyun-Woo Joo and Hyun-Kyo Jung, "Design and Characteristic Analysis of L1B4 Ultrasonic Motor Considering Contact Mechanism," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control., to be published.
- [3] Chang-Hwan Lee, Suk-Hee Lee, Hyun-Kyo Jung, Jung-Kun Lee and Kug-Sun Hong, "Analytic and numerical approaches for characteristic analysis of linear ultrasonic motor," in *Electric Machines and Drives*, International Conference IEMD '99, pp. 619-621, 1999. ,
- [4] W. Wischnewski, S. Kovalev, and O. Vyshnevskyy, "New Ultrasonic Piezoelectric Actuator for Nanopositioning", 9th International Conference on New Actuators & 3rd International Exhibition on Smart Actuators and Drive Systems, pp. 118-119, 14-16 June 2004
- [5] Reinhard Lerch, "Simulation of Piezoelectric Devices by Two- and ThreeDimensional Finite Elements," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, vol. 37, pp. 233-247, May 1990. Y. Jin, C.F. Foo, and W.G. Zhu, "THREE-DIMENSIONAL SIMULATION OF PIEZOELECTRIC TRANSFORMER FOR THE SWITCHING POWER SUPPLY," Industrial Electronics Society, 1999. IECON '99 Proceedings. The 25th Annual Conference of the IEEE, Volume:1, 1999 Page(s): 295-299 vol.1.