

일점 접촉 문제를 고려한 선형 초음파모터 해석

이경표\*, 노종석\*\*, 정현교\*  
 서울대학교 전기,컴퓨터공학부\*, 삼성전자\*\*

Analysis of a Linear Ultrasonic Motor Considering One Point Contact Mechanism

Kyung-Pyo Yi\*, Jong-Seok Rho\*\*, Hyun-Kyo Jung\*  
 Seoul National University\*, Samsung Electronics\*\*

**Abstract** - 본 논문에서는 고리모양 판의 멀티모드를 이용하여 동작하는 선형 초음파모터에 대한 해석방법을 제시하였다. 고정자의 변위는 3D 유한요소법을 이용하여 해석하였으며, 시간에 따른 접촉 면적과 접촉표면의 운동속도의 변화를 반영한 해석적 방법을 이용하여 고정자와 이동자 사이의 접촉을 해석하였다. 해석방법 검증을 위하여 외경 10.00mm, 두께 1.00mm인 선형 초음파모터 모델에 대한 해석결과를 실험결과와 비교하였다.

1. 서 론

초음파모터는 저속에서의 높은 토크, 소형화의 용이성, 파워소비 없는 홀딩토크, 저소음 등 많은 장점을 가지고 있다[1]-[6]. 이 때문에 초음파에 모터에 관한 많은 연구가 이루어졌고, 여러 가지 종류의 초음파모터가 개발되었다[1]-[2]. 하지만 이와 동시에 비교적 낮은 초음파모터의 효율 때문에 최적화가 중요시되어, 정확하고 빠른 해석방법이 요구되기 시작하였다. 그럼에도 불구하고 초음파모터의 해석방법은 아직 연구단계에 있는데, 이는 초음파모터가 매우 복잡한 동적 메커니즘을 가지기 때문이며, 이 중에서도 특히 고정자와 이동자 사이의 접촉 문제는 아직 풀리지 않고 있다[3].

본 논문에서는 고리모양 판을 이용한 소형 선형 초음파모터에 대한 해석방법을 제시하였다. 이 방법은 접촉 문제를 고려하여 수치적 방법과 해석적 방법을 결합한 것이며, 시뮬레이션 결과와 실험결과를 비교함으로써 검증하였다.

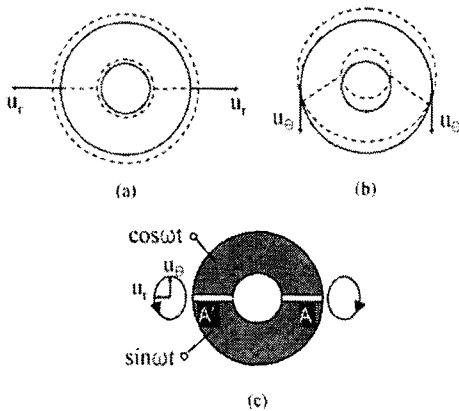


그림 1. 고정자의 동작원리 (a) (R,1) 모드 (b) ((1,1)) 모드 (c) 타원운동의 생성

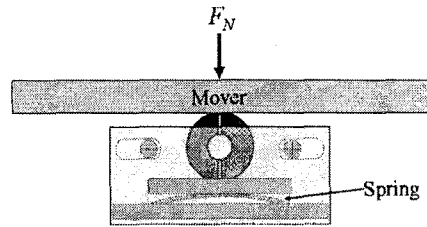


그림 2. 고리모양 판을 이용한 소형 초음파모터의 구조

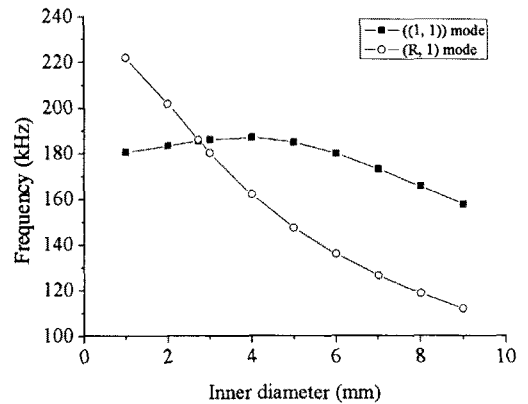


그림 3. 고정자 내경의 변화에 따른 모드 주파수

2. 본 론

2.1 동작원리

해석 대상인 선형 초음파모터는 고리모양 판의 멀티모드를 사용한다. 보통 radial (R,1) 진동모드와 nonaxysymmetric ((1,1)) 진동 모드는 서로 다른 주파수에서 발생한다. 하지만 적절한 고정자 설계에 의해 이 두 진동모드가 같은 주파수에서 발생할 수 있고, 이때 그림 1에서와 같이 두 개의 사인파형 전기신호를 90도의 위상차로 인가하면 두 진동모드가 합쳐져 점 A와 A'에 타원운동이 생성되게 된다. 이때 그림 2와 같이 이동자를 점 A나 A'에 접촉시킴으로써 선형운동을 얻을 수 있게 된다[7].

2.2 고정자 설계 및 해석

두 진동모드의 주파수는 고정자의 외경과 내경의 비로 조절할 수 있다. 따라서 고정자의 외경과 두께를 각각

10.00mm, 1.00mm로 고정시킨다면, 내경을 변화시킴으로써 멀티모드 조건을 만족시킬 수 있다. 내경을 변화시키면서 3D 유한요소법을 통해 모드 주파수를 찾았고, 그 결과는 그림 3과 같다. 내경이 2.72mm일 때, ((1, 1,)) 모드 주파수는 185.29Hz이고, (R, 1) 모드 주파수는 185.82Hz로 거의 같아, 멀티모드 조건을 만족하였다. 동작 주파수는 이 두 주파수의 평균값인 185.56Hz로 정하였다.

고정자의 해석에는 아래와 같은 지배방정식을 사용하여 만들어진 3-D FEM 프로그램이 사용되었다.

$$-\omega^2(M+M_m)u + j\omega D_{uu}u + K_{uu}u + K_{u\phi}\phi = F_B + F_S + F_P \quad (1)$$

$$K_{u\phi}^t u + K_{\phi\phi}\phi = Q_S + Q_P \quad (2)$$

여기서,  $u$  : 기계적 변위

$\phi$  : 전위

$M, M_m$  : 압전체, 금속체의 질량 벡터

$D_{uu}, D_{uu-m}$  : 압전체, 금속체의 기계적 댐핑 행렬

$K_{uu}, K_{uu-m}$  : 압전체, 금속체의 기계적 응력 행렬

$K_{u\phi}$  : 압전 결합 행렬

$K_{\phi\phi}$  : 유전 강성 행렬

$F_B, F_S, F_P$  : 몸체(Body), 표면(Surface), 점(point) 힘

$Q_S, Q_P$  : 표면(Surface), 점(point) 전하

다음 해석 단계에 넘겨주어야 할 정보는 이동자와 접촉하는 부분의 타원운동의 궤적이다. 이는 다음 식처럼 각 타임스텝에서의 점의 위치를 구함으로써 그려낼 수 있다.

$$x_i = |x_{com}| \times \sin \left| \frac{2\pi}{n} \times i + \text{rad}(x_{com}) \right| \quad (3)$$

$$y_i = |y_{com}| \times \sin \left| \frac{2\pi}{n} \times i + \text{rad}(y_{com}) \right| \quad (4)$$

$$z_i = |z_{com}| \times \sin \left| \frac{2\pi}{n} \times i + \text{rad}(z_{com}) \right| \quad (5)$$

여기에서  $n$ 은 한 주기의 타임스텝 수이며,  $i$ 는 0부터  $n$ 까지의 정수이다. 모터의 특성은  $x-y$  평면에서의 변위에 의해서만 영향을 받는다. 시뮬레이션 결과로부터 계산된 타원운동의 궤적은 그림 4와 같다. 그림 4로부터 타원의  $x$ 축 방향이  $y$ 축 방향에 비해 훨씬 긴 것을 알 수 있고, 이것은 이동자의 운동방향이  $x$ 축 방향인 것을 생각할 때, 바람직한 결과이다.

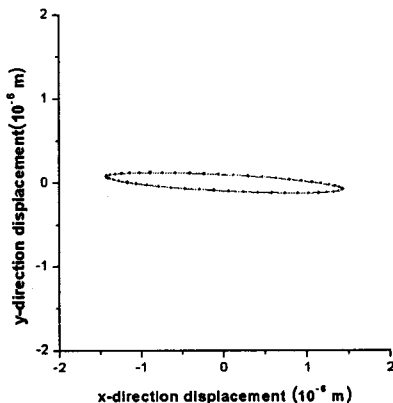


그림 4. 접촉 노드의 타원운동 궤적

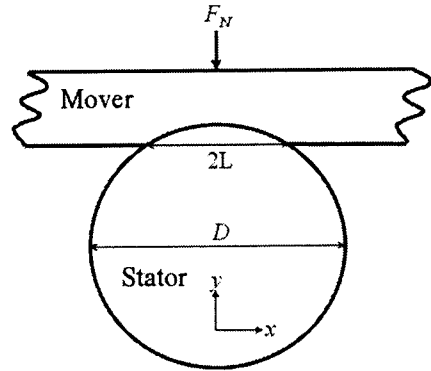


그림 5. 고정자와 이동자 간의 접촉 면적

### 2.3 모터 특성 해석

접촉 문제에 대한 연구는 초음파모터의 특성 해석에서 매우 중요한 부분을 차지한다. 접촉 문제를 해결하기 위해서는 우선적으로 접촉 면적을 계산하여야 한다. 접촉 면적 계산에는 Hertzian 접촉 모델이 사용되었다. 고정자와 이동자가 접촉했을 때, 고정자의 탄성계수가 이동자에 비해 매우 높기 때문에 거의 모든 변형은 그림 5와 같이 이동자에서 일어난다고 가정할 수 있다. 이때, 접촉면의 폭은 고정자 두께인 1mm이고, 접촉 길이  $2L$ 은 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$2L = 1.6 \sqrt{F_{N-unit} D C_E} \quad (6)$$

여기에서  $F_{N-unit}$ 은 이동자에 가해진 단위길이 당 수직 힘이고,  $D$ 는 변형된 후의 고정자의 지름이다. 또한  $C_E$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$C_E = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (7)$$

여기서  $E_1, E_2$ 는 고정자와 이동자의 탄성계수이고,  $\nu_1, \nu_2$ 는 고정자와 이동자의 푸아송 비이다. Hertzian 접촉 모델을 초음파모터 해석에 처음 사용한 것은 Anita M. Flynn이다[8]. Flynn은 진행과 회전형 초음파모터에 이 접촉 모델을 적용하였고, 이 경우 접촉 면적은 시간에 따라 변하지 않는다. 그러나 본 논문의 선형 초음파모터의 경우  $F_{N-unit}$ 과  $C_E$ 는 고정되어 있지만  $D$ 는 시간에 따라 변하고, 이는 접촉 길이 또한 시간에 따라 변한다는 것을 뜻한다.

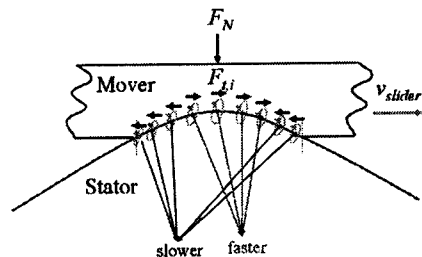


그림 6. 접촉면 점들의 운동과 힘의 방향

### 3. 결 론

접촉면의 각 점들은 각기 다른 타원운동을 하며, 당연히 수평방향 속도 또한 다르다. 따라서 이동자가 일정한 속도  $v_{slider}$ 로 움직이고 있을 때, 그림 6에서와 같이 이 점들 중 일부는 이동자보다 빠르게 움직이고, 나머지는 느리게 움직일 것이다. 이동자보다 빠르게 움직이고 있는 점들은 이동자에 정방향 힘을 가함으로써 이동자의 운동을 도울 것이고, 느리게 움직이고 있는 점들은 반대로 역방향 힘을 가함으로써 운동을 방해할 것이다. 선형 모터의 힘은 각 점들의 힘을 합산함으로써 구해질 수 있다. 속도의 분포는 끊임없이 변하기 때문에 이 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 한 주기를 타임스텝  $n$ 으로 나누고, 각 타임스텝에 대하여 계산을 수행하는 방법을 사용하였다. 타임스텝  $i$ 에서의 힘은 다음과 같이 계산된다.

$$F_{t,i} = \mu h \int_{-L_i}^{L_i} \text{sign}[v_{stator,i}(x) - v_{slider}] p_i(x) dx \quad (8)$$

여기서  $\mu$ 는 마찰계수,  $h$ 는 고정자의 두께,  $L_i$ 는 타임스텝  $i$ 에서의 접촉 길이,  $v_{stator,i}(x)$ 는 위치  $x$ 에 있는 점의 타임스텝  $i$ 에서의 수평속도,  $v_{slider}$ 는 이동자의 속도,  $p(x)$ 는 위치  $x$ 에 가해지는 압력이다. 한 주기 동안의 힘의 평균값은 다음과 같다.

$$F_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_{t,i} \quad (9)$$

각기 다른 이동자 속도  $v_{slider}$ 에 관해 위 힘을 계산하면, 힘-속도 곡선을 얻을 수 있다. 그림 7은 시뮬레이션 결과와 실험결과의 비교이다. 이 결과로부터 제안된 해석 방법이 합리적임을 알 수 있다.

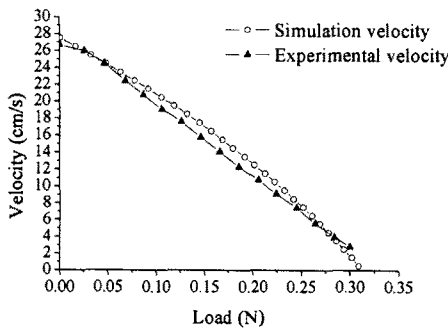


그림 7. 선형 초음파모터의 힘-속도 특성

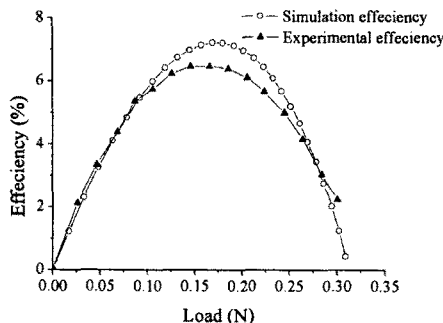


그림 8. 선형 초음파모터의 힘-효율 특성

본 논문에서는 contact mechanism을 고려한 선형 초음파모터에 대한 특성 해석방법을 제안하였다. 이 방법은 수치적 방법과 해석적 방법을 결합하여, 시간에 따른 접촉 면적과 표면의 운동속도의 변화를 반영하였다.

제안된 해석방법은 시뮬레이션 결과와 실험결과를 비교함으로써 검증되었다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] S. Ueha, Y. Tomikawa, M. Kurosawa, and N. Nakamura, "Ultrasonic Motors: Theory and Applications," Clarendon Press, Oxford, 1993.
- [2] T. Sashida and T. Kenjo, "An Introduction to Ultrasonic Motors," Clarendon Press, Oxford, 1993.
- [3] J.S. Rho, B.J. Kim, C.H. Lee, H.W. Joo and H.K. Jung, "Design and Characteristic Analysis of LIB4 Ultrasonic Motor Considering Contact Mechanism," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. 52, pp.2054-2064, Nov. 2005.
- [4] K. Uchino, "Piezoelectric actuators/ultrasonic motors-their developments and markets," *Proceedings of the Ninth IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics*, pp.319-324, Aug. 1994.
- [5] B.J. Kim, J.S. Rho, H.K. Jung, "Optimal Design of Piezoelectric Cantilever Fan by Three-Dimensional Finite Element Analysis," *KIEE International Transactions on Electrical Machinery and Energy Conversion Systems*, vol. 5-B, no. 1, pp.90-94, 2005.
- [6] K.J. Lim, S.H. Park, Y.J. Yun, K.Y. Lee, S.H. Kang, J.S. Lee, S.H. Jeong, "Characteristics of Disk-type Linear Ultrasonic Motor for Application to x-y stage," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 1, no. 1, pp.101-105, March 2006.
- [7] T. Takano, Y. Enoki, S. Kitashima, and Y. Tomikawa, "Small-Sized Ultrasonic Linear Motor Using Radial and Nonaxisymmetric Vibration Modes of an Annular Plate," *IEEE Ultrasonics Symposium*, pp.675-678, 1992.
- [8] A. M. Flynn, "Piezoelectric ultrasonic micromotors," *PhD Thesis*, Department of Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts Institute of Technology, 1995.