

선형 초음파모터의 Contact Mechanism을 고려한 특성 해석

이경표, 노종석, 정현교
 서울대학교 전기,컴퓨터공학부

Analysis of a Linear Ultrasonic Motor Considering Contact Mechanism

Kyung-Pyo Yi, Jong-Seok Rho, Hyun-Kyo Jung
 Seoul National University

Abstract - 본 논문에서는 contact mechanism을 고려한 선형 초음파 모터에 대한 특성 해석방법을 제안하였다. 이 방법은 수치적 방법과 해석적 방법을 결합하여, 시간에 따른 접촉면적과 표면의 운동속도의 변화를 반영하였다. 제안된 해석방법은 시뮬레이션 결과와 실험결과를 비교함으로써 검증되었다.

1. 서 론

초음파 모터는 저속에서도 높은 토크를 내고, 크기가 작으며, 파워소비 없이 홀딩토크를 가진다. 또한 저소음에 전자파에 영향을 받지 않는 등 많은 이점을 가지고 있다[1]-[4]. 이 때문에 지난 수십 년간 초음파 모터에 관한 많은 연구가 이루어졌지만, 아직 초음파 모터의 디자인과 최적화는 어렵다. 이는 초음파 모터가 매우 복잡한 동적 메커니즘을 가지기 때문이며, 이 중에서도 특히 고정자와 가동자 사이의 contact mechanism은 아직도 풀리지 않은 문제이다[3].

본 논문에서는 원고리형 플레이트를 이용한 소형 선형 초음파 모터에 대한 해석방법을 제시한다. 이 방법은 contact mechanism을 고려하여 수치적 방법과 해석적 방법을 결합한 것이며, 시뮬레이션 결과와 실험결과를 비교함으로써 검증하였다.

2. 본 론

2.1 동작원리

해석 대상의 선형 초음파 모터는 멀티모드 원고리형 플레이트를 사용한다. Radial (R,1) 과 nonaxysymmetric ((1,1)) 진동 모드가 같은 주파수에서 발생하고, 이때 그림 1에서와 같이 두 개의 사인파형 전기신호를 90도의 위상차로 인가하면 점 A와 A'에 타원운동이 생성된다. 이때 그림 2와 같이 슬라이더를 점 A나 A'에 접촉시킴으로써 선형운동을 얻을 수 있게 된다[2].

2.2 고정자 설계 및 해석

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

ϕ : 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 용력 행렬

$K_{u\phi}$: 압전 결합 행렬

$K_{\phi\phi}$: 유전 강성 행렬

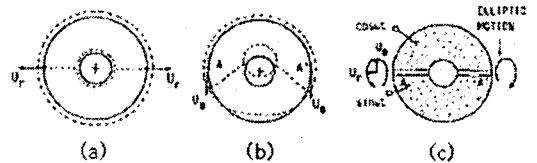


그림 1. 고정자의 동작원리 (a) (R,1) 모드 (b) ((1,1)) 모드 (c) 타원운동의 생성

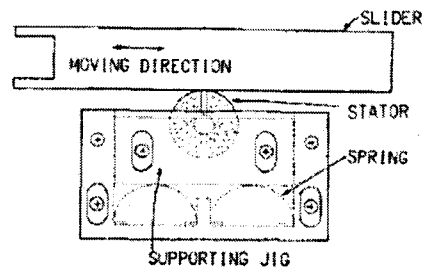


그림 2. 원고리형 플레이트를 이용한 소형 초음파모터의 구조

F_B, F_S, F_P : 몸체(Body), 표면(Surface), 점(point) 힘
 Q_S, Q_P : 표면(Surface), 점(point) 전하

고리형 플레이트의 외경은 10.00mm이고 두께는 1.00mm이다. 내경은 멀티모드 조건을 만족하기 위해 조절해야하는데, (R,1)모드와 ((1,1))모드가 발생하는 주파수는 다음과 같은 식으로 구해진다[2].

$$f_{(R,1)} = \frac{\alpha_m}{2\pi a} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \quad (3)$$

$$f_{((1,1))} = \frac{\alpha_{n,m}}{2\pi a} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \quad (4)$$

여기에서 E, ν, ρ 는 고정자의 탄성계수, 푸아송 비, 밀도이고, a 는 고정자의 외경이며, α 는 frequency constant이다. 식 (3), (4)에서 알 수 있듯이 두 모드의 주파수가 같으려면 α 가 같아야한다. 고정자의 내경 b 를 바꾸면서 3-D FEM 프로그램을 수행할 결과, b/a 와 α 사이에는 그림 3과 같은 관계가 있었다. 이 결과로부터 내경이 2.72mm일 때 멀티모드 조건이 만족되는 것을 확인하였고, 멀티모드가 발생하는 주파수는 180.45kHz이었다.

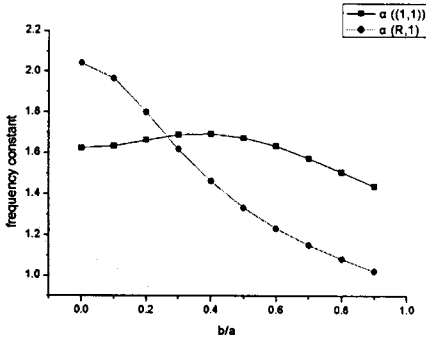


그림 3. 고정자 내경과 외경의 비와 frequency constant의 관계 그래프

점 A'에서의 변위는 3D-FEM으로 구했으며, 이 점의 타원운동 궤적은 다음 식에 의해 각 타임스텝에서의 점의 위치를 구함으로써 그려낼 수 있다[3].

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

$$y_i = |y_{com}| \times \sin \left| \frac{2\pi}{n} \times i + \text{rad}(y_{com}) \right| \quad (6)$$

$$z_i = |z_{com}| \times \sin \left| \frac{2\pi}{n} \times i + \text{rad}(z_{com}) \right| \quad (7)$$

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 슬라이더의 운동방향이 x 축 방향인 것을 생각할 때, 바람직한 결과이다.

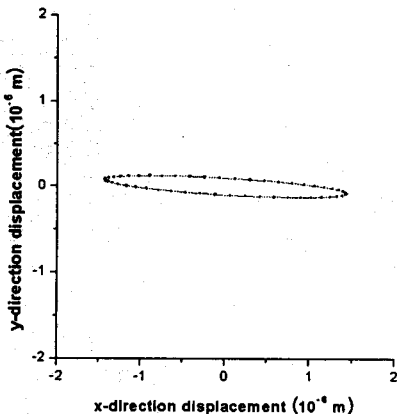


그림 4. 접촉 노드의 타원운동 궤적

2.3 모터 특성 해석

contact mechanism에 대한 연구는 초음파 모터의 특성 해석에 매우 중요한 부분을 차지한다. 접촉 문제를 해결하기 위해서는 우선적으로 접촉면적을 계산하여야 한다. 접촉면적 계산에는 Hertzian 접촉 모델이 사용되었다[4]. 고정자와 슬라이더가 접촉했을 때, 고정자의 탄성계수는 슬라이더에 비해 매우 높기 때문에 거의 모든

변형은 그림 5와 같이 슬라이더에서 일어난다고 가정한다. 이때, 접촉면의 폭은 고정자 두께인 1mm이고, 접촉 길이 $2L$ 은 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$2L = 1.6 \sqrt{F_{N-unit} D C_E} \quad (8)$$

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

$$C_E = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (9)$$

여기서 E_1, E_2 는 고정자와 슬라이더의 탄성계수이고, ν_1, ν_2 는 고정자와 슬라이더의 푸아송 비이다[4].

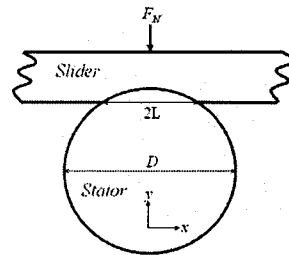


그림 5. 고정자와 슬라이더 간의 접촉면적

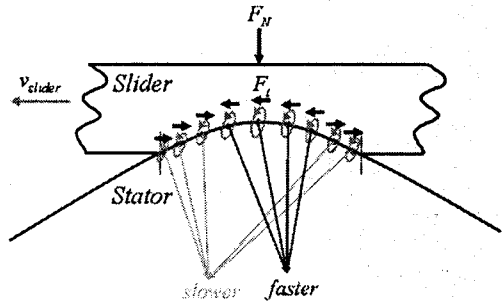


그림 6. 접촉면 점들의 운동과 힘의 방향

접촉면의 각 점들은 각기 다른 타원운동을 하며, 당연히 수평방향 속도 또한 다르다. 따라서 슬라이더가 일정한 속도 v_{slider} 로 움직이고 있을 때, 그림 6에서와 같이 이 점들 중 일부는 슬라이더보다 빠르게 움직이고, 나머지는 느리게 움직인다. 슬라이더보다 빠르게 움직이고 있는 점들은 슬라이더에 정방향 힘을 가함으로써 슬라이더의 운동을 도울 것이고, 느리게 움직이고 있는 점들은 반대로 역방향 힘을 가함으로써 운동을 방해할 것이다. 선형모터의 힘은 각 점들의 힘을 합산함으로써 구해질 수 있다. 이 방법은 Flynn A. M.[4]에 의해 제안되었으나, 오직 진행파에 대해서만 사용되었다. 진행파의 경우 접촉면적과 점들의 속도가 시간에 따라 변하지 않는다. 하지만 본 논문의 선형 초음파모터는 진행파를 사용하지 않기 때문에, 접촉면적과 점들의 속도가 시간에 따라 끊임없이 변하게 된다. 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.

$$F_{t,i} = \mu h \int_{-L}^L \text{sign}[v_{\text{stator},i}(x) - v_{\text{slider}}] p(x) dx \quad (10)$$

여기에서 μ 는 마찰계수, h 는 고정자의 두께, $v_{\text{stator},i}(x)$ 는 위치 x 에 있는 점의 타임스텝 i 에서의 수평속도, v_{slider} 는 슬라이더의 속도, $p(x)$ 는 위치 x 에 가해지는 압력이다. 한 주기 동안의 힘의 평균값은 다음과 같다.

$$F_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_{t,i} \quad (11)$$

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

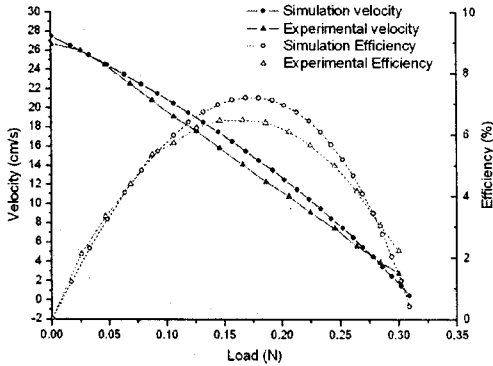


그림 7. 선형 초음파 모터의 힘-속도, 힘-효율 특성

3. 결 론

본 논문에서는 contact mechanism을 고려한 선형 초음파 모터에 대한 특성 해석방법을 제안하였다. 이 방법은 수치적 방법과 해석적 방법을 결합하여, 시간에 따른 접촉면적과 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" Carendon Press, Oxford, 1993.
- [2] 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.
- [3] 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, Vol.52, pp.2054-2064, 11 2005.
- [4] Flynn A M, "Piezoelectric ultrasonic micromotors" PhD Thesis, Department of Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts Institute of Technology, 1995.