

회전형 초음파 모터의 Contact Mechanism을 고려한 해석 및 설계

이경표, 노종석, 정현교
서울대학교 전기,컴퓨터공학부

Analysis and Design of a Rotary Ultrasonic Motor Considering Contact Mechanism

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

Abstract - 최근의 소형화 추세에 따라 소형 액추에이터에 대한 수요가 늘고 있다. 여러 가지 액추에이터 중 특히 초음파 모터(USM)는 소형화하기에 용이한 특성을 가지고 있다. 지금까지 USM의 contact mechanism에 대한 수많은 연구가 있었지만, 아직 확립된 해석방법이 존재하지 않는다. 본 논문에서는 수치적 방법과 해석적 방법을 결합하여 지름 9[mm]의 링타입 회전형 초음파 모터(RUSM)를 분석하였다. 이 방법을 사용함으로써 모터의 특성을 쉽고 빠르고 정확하게 분석할 수 있다. 분석된 결과는 실험 결과와 비교함으로써 검증하였다.

1. 서 론

19세기부터 다양한 종류의 USM이 연구되어 왔고, 저속도에서의 높은 토크, 작은 크기와 가벼운 무게, 파워소비 없이 발생하는 정지토크, 무소음 등의 장점 때문에 주목을 받게 되었다[1]. 특히 산업에서의 소형화 추세에 따라 소형 액추에이터에 대한 수요가 늘고 있는 지금, 소형화에 용이한 특성을 가지고 있는 USM은 그 연구가치가 더욱 높아지고 있다. 이에 따라 본 논문에서는 진행과를 이용하는 지름 9[mm]의 링타입 RUSM에 대해 연구하였다.

지난 수십 년간 USM에 대한 많은 연구가 이루어졌지만, USM의 contact mechanism에 대한 해석방법은 아직 확립되지 않았고, 이 때문에 USM 특성에 대한 정확하고 효율적인 해석이 불가능하다. 이 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 수치적 방법과 해석적 방법을 결합한 9[mm] 링타입 RUSM에 대한 해석방법을 제시하고, 그 결과를 실험값과 비교하여 검증하였다. 이 해석방법은 같은 작동원리를 가지는 다른 RUSM에도 적용될 수 있을 것이다.

2. 본 론

2.1 RUSM의 특성해석과 설계를 위한 3D-FEM 프로그램

RUSM의 정상상태 해석에는 FEM이 사용되었으며 지배방정식은 다음과 같다[2][3].

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

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

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 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

위 지배방정식을 이용하여 3D-FEM 프로그램을 만들었다.

2.2 3D-FEM을 이용한 임피던스 해석

임피던스의 계산에는 다음과 같은 식 (3)이 사용된다.

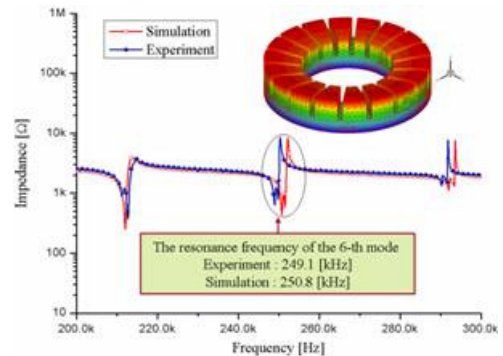
$$Z(w) = \frac{\Phi(w)}{jwQ_0} \quad (3)$$

여기서, w : 각주파수

$\Phi(w)$: 전극의 전위

Q_0 : 전하

임피던스 해석에는 3D-FEM을 사용하였다. 그림 1은 해석에 사용된 모델의 임피던스 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 나타내고 있다.



<그림 1> 9[mm] RUSM의 임피던스 시뮬레이션 결과와 실험 결과

그림 1에서 알 수 있듯이 시뮬레이션 결과와 실험 결과는 거의 일치하고 있다. 시뮬레이션의 경우 250.8[kHz]에서, 실험의 경우 240.1[kHz]에서 우리가 사용하고자 하는 6-th 모드의 주파수를 찾을 수 있었다.

2.3 3D-FEM을 이용한 타원운동 해석

고정자와 회전자의 접촉면에서 입자의 타원운동은 RUSM의 동작과 직결된다[1]. 따라서 RUSM의 해석에는 타원운동 해석이 필수적이다. 타원운동은 식 (4)-(6)에 의해 그려질 수 있다.

$$x_i = |x_{com}| \times \sin\left[\frac{2\pi}{n} \times i + \text{rad}(x_{com})\right] \quad (4)$$

$$y_i = |y_{com}| \times \sin\left[\frac{2\pi}{n} \times i + \text{rad}(y_{com})\right] \quad (5)$$

$$z_i = |z_{com}| \times \sin\left[\frac{2\pi}{n} \times i + \text{rad}(z_{com})\right] \quad (6)$$

여기서, x_i, y_i, z_i : x, y, z 방향의 i번째 스텝의 변위

$x_{com}, y_{com}, z_{com}$: x, y, z 방향 변위의 복소수

n : 타원 운동을 그리는데 사용된 점의 수

i : 0부터 n

$\text{rad}(k)$: 복소수 k 의 라디안

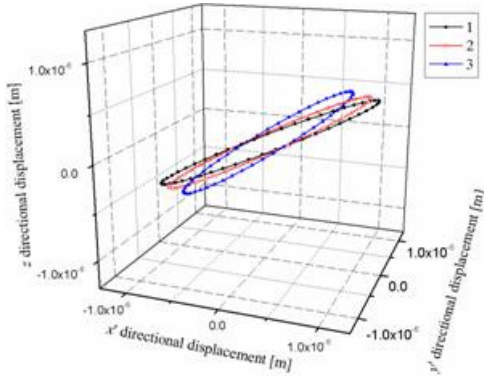
회전자의 회전속도는 타원운동 중 특히 접선방향의 변위와 크게 관계가 있다. 따라서 해석을 위해 타원의 축을 좌표축과 일치시킬 필요가 있다. 좌표축 전환에는 식 (7)-(9)이 사용된다.

$$x'_i = \sin(\theta)x_i - \cos(\theta)y_i \quad (7)$$

$$y'_i = \cos(\theta)x_i + \sin(\theta)y_i \quad (8)$$

$$z'_i = z_i \quad (9)$$

그림 2은 $14.14 [V_{rms}]/250.8[\text{kHz}]$ 의 입력에 대한 3개의 접촉점의 타원운동을 그린 것이다.



〈그림 2〉 14.14 [V_{rms}]/250.8[kHz]의 입력에 대한 3개의 접촉점의 타원운동

2.4 3D-FEM과 해석적 방법을 이용한 RUSM 특성해석

접촉면에서의 타원운동에 의한 RUSM의 동작은 복잡한 접촉 메커니즘을 야기하여 해석을 어렵게 한다[1][2]. 본 논문에서는 USM의 동작속도를 해석하기 위한 방법으로 Cutting Method(CM)을 제시한다.

USM에서 한 파장에 j개의 teeth가 있을 경우, 그림 3처럼 타원운동의 상단 1/j만큼만 접촉하게 된다. 회전자의 속도는 타원운동의 접선방향 속도에 의해 정해진다. 따라서 USM의 속도를 구하기 위해서는 앞에서 좌표축 전환을 시킨 타원운동에 대해서 접촉시간을 고려한 접선방향 속도를 구할 필요가 있다.

$$(v_{x'})_{contact} = \frac{\Delta x'}{contacting\ time} = \frac{\Delta x'}{\left(\frac{DN}{f \times n}\right)} \quad (10)$$

여기서, $(v_{x'})_{contact}$: 접촉시간을 고려한 접선방향 속도

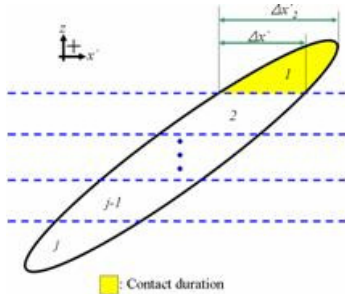
$\Delta x'$: 접선방향 변위

DN : 접촉하는 부분의 점의 수

f : 주파수

n : 타원 운동을 그리는데 사용된 점의 수

여기서 $\Delta x'$ 가 그림 4상의 $\Delta x_2'$ 가 아니라는 것을 주의해야 한다.



〈그림 3〉 contact mechanism을 고려한 Cutting Method

회전자의 초당 회전수 f_M [Hz]와 RPM_M 은 식 (11)-(12)로 구해질 수 있다.

$$f_M = \frac{(v_{x'})_{contact}}{2\pi \times r} \quad (11)$$

여기서, r : 모터의 중심과 샘플 사이의 거리[m]

$$RPM_M = \frac{\sum_{k=1}^3 (RPM_M)_k}{3} = \frac{\sum_{k=1}^3 (f_M)_k \times 60}{3} \quad (12)$$

여기서 k : k번째 접촉점

토크는 마찰력 F_f 로부터 구할 수 있다.

$$T = -|F_f| \times r_{eff} = -sign[f_M] \times |\mu_d \times F_{mpf}| \times r_{eff} \quad (13)$$

여기서, r_{eff} : 접촉한 teeth의 모터 중심까지의 유효반경

μ_d : 동적 마찰 계수

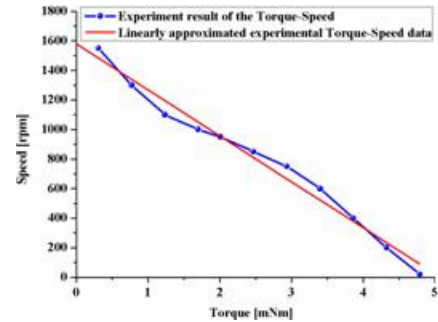
F_{mpf} : 회전자무게와 회전자에 가해지는 수직힘의 합

따라서 이로부터 출력과 효율을 식 (14)-(15)로 구할 수 있다.

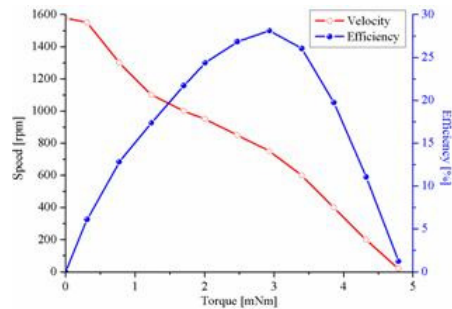
$$P_{out} = w_M \times T = \frac{2\pi}{60} RPM_M \times T \quad (14)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (15)$$

그림 4는 실험으로 얻어진 토크-속도 곡선이다. 이 곡선에 대해 선형 추세선을 그려 구한 무부하 속도는 1579.3[rpm]이다. 3D-FEM 시뮬레이션 결과와 위에서 설명한 해석적 방법을 결합하여 무부하 속도를 계산해하였을 때, 그 결과는 1602.2[rpm]이었다. 시뮬레이션 결과의 오차는 1.45%로 실험결과와 거의 일치하고 있다. 그림 5는 14.14[V_{rms}]를 입력으로 썼을 때 토크의 변화에 따른 속도와 효율이다. 이 결과들로부터 제시된 특성 해석방법이 합리적임을 알 수 있다.



〈그림 4〉 토크-속도 실험결과 및 선형 추세선



〈그림 5〉 토크의 변화에 따른 속도와 효율

3. 결 론

본 논문에서는 지름 9[mm]의 RUSM에 대하여 수치적 방법과 해석적 방법을 결합하여 contact mechanism을 고려한 해석방법을 제시하였고, 실험결과와의 비교를 통하여 검증하였다. 이 방법은 다른 종류의 USM에도 응용될 수 있으며, 쉽고 빠르고 정확하게 USM의 특성을 해석할 수 있다. 하지만 열 발생과 기계적 압력에 따른 USM의 비선형성이 고려되지 않아 보다 정확한 결과를 얻기 위해서 향후 연구가 계속되어야 할 것이다.

[참 고 문 헌]

[1] S. Ueha, Y. Tomikawa, M. Kurosawa, and N. Nakamura, "Ultrasonic Motors: Theory and Applications," Clarendon Press, Oxford, 1993.
 [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*, Vol.52, pp.2054 - 2064, 112005.
 [3] Reinhard Lerch, "Simulation of Piezoelectric Devices by Two- and Three Dimensional Finite Elements," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. 37, pp. 233-247, May 1990.