

## 유한요소법을 사용한 소형 로터리 초음파 모터의 설계 및 해석

김홍석, 노종석, 주현우, 정현교  
서울대학교 전기컴퓨터공학부

### Design and Analysis of Small Size Rotary Ultrasonic Motor Using Finite Element Method

Hong-suk Kim, Jong-Seok Rho, Hyun-woo Joo and Hyun-kyo Jung  
Seoul National University

**Abstract** - 소형화 되어 가는 전기기기에 따른 소형 모터가 요구되고 있다. 소형 모터 중 높은 정지 토크 및 높은 효율 등의 장점을 가진 소형 로터리 초음파 모터는 여러 목적에 쓰이고 있다. 하지만 주로 경험적인 방법 또는 상용 해석틀이 소형 로터리 초음파 모터의 해석에 주로 사용되었다. 따라서 소형 로터리 초음파 모터의 체계적인 해석 방법이 필요하다.

본 논문에서는 우선 소형 로터리 초음파 모터의 동작 원리를 통해 진행파의 존재를 확인하였고, 유한요소법 해석법을 통해 과도 및 정상 상태의 소형 로터리 초음파 모터를 설계하고 해석하였다. 이 해석결과를 이용하여, 소형 로터리 초음파 모터의 동작 특성 또한 해석하였다.

## 1. 서 론

압전체를 이용한 초음파 모터는 현재 산업용, 고급 전자제품의 부품용 등으로 널리 활용되고 있다. 동시에 높은 토크 밀도, 높은 효율에서 저속도, 가벼운 무게에 대한 수요에 따라 많은 주목을 받아왔다. 그리고 초음파 모터는 높은 기계적 마찰력을 가진 채로 동작하기 때문에 추가적인 정지 시스템이 필요 없으므로, 정밀 제어 특징 또한 갖는다. 따라서 이러한 여러 장점을 가진 초음파 모터에게 미래의 새로운 사업 분야에서의 응용이 기대되어진다.

본 논문에서는 이러한 초음파 모터의 한 종류인 소형 로터리 초음파 모터의 설계 및 해석을 하기 위해 수치해석법인 유한요소법이 사용되었다. 유한요소법을 통해 과도 및 정상 상태에 대한 해석을 함으로써 임피던스 그래프와 변위를 구하였고, 진행파가 존재함도 확인하였다.

본 논문의 결과는 소형 로터리 초음파 모터의 제작이 가능함을 보였고, 소형 초음파 모터의 체계적인 설계에 활용될 수 있을 것이다. 추후 논문에서는 제작중인 시제품을 통하여 이론적인 결과를 검증하고자 한다.

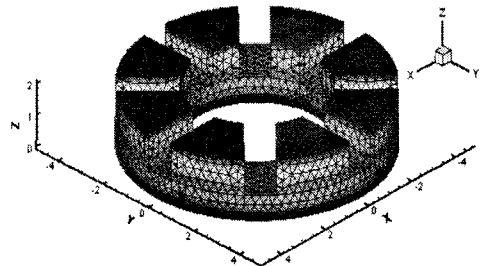
## 2. 본 론

### 2.1 초음파 모터의 개요

로터리 초음파 모터는 그 종류에 따라 다양한 동작 원리가 존재한다. 본 논문에서는 여러개의 굴곡파(flexural wave)들이 결합해서 하나의 진행파(progressive wave)가 만들어지는 원리를 가진 초음파 모터를 설계 및 해석하였다. 굴곡파들로 진행파를 생성하기 위해 하나의 압전체에 폴링 방향이 반대인 2쌍의 분극을 생기도록 하였다. 또한 소형 로터리 초음파 모터를 구동시키기 위해서 90도 위상차가 나는 2개의 전압원이 사용되었다.

그림1은 해석에 사용된 소형 로터리 초음파 모터 모델

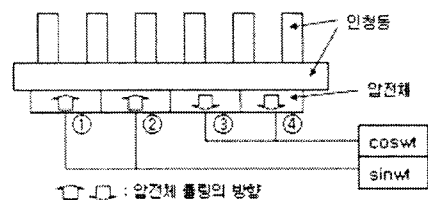
을 나타낸 것이다. 그림의 단위는 [mm]이다. 본 논문에서 사용하는 그림 1과 같이 외경이 9[mm], 내경이 5[mm], 티스 부분을 포함한 인칭동 부분의 높이가 1.5[mm], 압전체의 두께는 0.5[mm]로 하였다. 티스 부분은 8개로 구성되어 있으며, 최대 변위량이 수 마이크로 미터(40[V<sub>Dr</sub>] 기준) 이상이 되도록 티스 부분을 구성하였고, 또한 위의 사양들은 현재의 제작상의 한계를 염두에 두고 설계되었다.



<그림 1. 해석에 사용된 소형 초음파 모터 모델>

### 2.1.1 초음파 모터의 동작 원리

그림 2는 본 논문에서 설계 및 해석한 소형 로터리 초음파 모터의 개념도이다. 그림 2와 같이 해석 모델은 4개로 분극된 압전체와 2개의 전압원이 사용된다.



<그림 2. 소형 초음파 모터의 개념도>

압전체 분극 1~4에 의해 생성되는 파는 각각 식 (1)-(4)와 같다[1].

$$A \sin(\omega t - kx) + A \sin(\omega t + kx) \quad (1)$$

$$B \sin\{\omega t - k(x + 90^\circ) + 90^\circ\} + B \sin\{\omega t + k(x + 90^\circ) + 90^\circ\} \quad (2)$$

$$C \sin\{\omega t - k(x + 180^\circ) + 180^\circ\} + C \sin\{\omega t + k(x + 180^\circ) + 180^\circ\} \quad (3)$$

$$D \sin\{\omega t - k(x + 270^\circ) + 270^\circ\} + D \sin\{\omega t + k(x + 270^\circ) + 270^\circ\} \quad (4)$$

4개로 분극된 압전체로 인한 진행파를 알기 전에, 우선 압전체 분극 ②에 대해 살펴보자. 압전체 분극 ②에 대한 식인 식 (2)에서 일부분을 식 (5)와 같이 놓으면,

$$\begin{aligned} -90^\circ k + 90^\circ &= m\pi, & 90^\circ k + 90^\circ &= n\pi \quad (5) \\ 180^\circ k &= (n-m)\pi \end{aligned}$$

식 (5)를 정리하면,

$$90^\circ = \lambda(n-m)/4 \quad (m \neq n), \quad 90^\circ = \pi(m+n)/2 \quad (6)$$

식 (6)으로부터  $n=1, m=0$  임을 알 수 있다. 압전체 분극 ①과 압전체 분극 ②의 굴곡파가 결합해서 발생하는 부분 진행파를 나타내기 위해 식 (1)와 식(2)를 더하면,

$$\begin{aligned} &A\sin(\omega t - kx) + A\sin(\omega t + kx) \quad (7) \\ &+ B\sin(\omega t - kx) + B\sin(\omega t + kx + 180^\circ) \\ &= (A+B)\sin(\omega t - kx) + (A-B)\sin(\omega t + kx) \end{aligned}$$

$A=B$ 라고 가정하고 식 (7)을 정리하면,

$$2A\sin(\omega t - kx) \quad (8)$$

즉, 식 (8)은 압전체 분극 ①과 압전체 분극 ②의 굴곡파가 결합해서 발생하는 부분 진행파를 보여준다. 마찬가지로 방법으로 압전체 분극 ③과 압전체 분극 ④의 굴곡파가 결합해서 발생하는 부분 진행파는 식 (9)와 같이 표현된다.

$$2A\sin(\omega t - kx) \quad (9)$$

그러므로 4개로 분극된 압전체 전체에 의해 생성되는 총 진행파는 식 (8)과 식 (9)를 더한  $4A\sin(\omega t - kx)$ 로 나타낼 수 있다.

## 2.2 압전 방정식

압전 현상은 전기계와 기계계가 결합되어 발생하는 현상이다. 식 (10)은 압전 현상을 설명해 준다[2].

$$\begin{aligned} T &= c^E S - e^t E \quad (10) \\ D &= e S + \epsilon^S E \end{aligned}$$

- 여기서,  $T$ : 기계적인 응력(stress)의 벡터  
 $S$ : 기계적인 변형(strain)의 벡터  
 $E$ : 전기장의 벡터  
 $D$ : 유전 변위의 벡터  
 $C^E$ : 일정한 전기장  $E$ 에 대한 기계적 강성 행렬  
 $e^S$ : 일정한 기계적인 변형  $S$ 에 대한 유전율 행렬  
 $e$ : 압전 행렬  
 $t$ : 전치(transposed)를 뜻함

행렬 방정식 식 (11)은 Hamilton's variation으로부터 구해진다[3][4].

$$\begin{aligned} -\omega^2 M + j\omega D_{uu} + K_{uu}u + K_{u\phi}\phi &= F_B + F_S + F_P \quad (11) \\ K_{u\phi}^t u + K_{\phi\phi}\phi &= Q_S + Q_P \end{aligned}$$

- 여기서,  $K_{uu}$ : 기계적인 응력 행렬  
 $D_{uu}$ : 기계적인 댐핑 행렬  
 $K_{u\phi}$ : 압전 결합 행렬  
 $K_{\phi\phi}$ : 유전 강성 행렬  
 $M$ : 질량 행렬

- $F_B, F_S, F_P$ : 기계적인 몸체(Body), 표면 (Surface), 점 전하(Point charges)  
 $Q_S, Q_P$ : 전기적인 표면(Surface), 점 전하(Point charges)

## 2.3 유한요소법 해석 결과

임피던스 및 변위를 해석하기 위해 소형 로터리 초음파 모터에 대해 유한요소법 해석하였다. 40[V<sub>p-p</sub>] 전압이 인가된 상태에서 유한요소법으로 해석하였다.

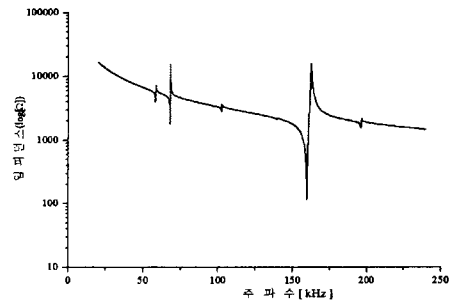
### 2.2.1 임피던스 해석

전기적인 임피던스는 식 (12)에 의해 계산된다.

$$Z(\omega) = \frac{\Phi(\omega)}{j\omega Q_o} \quad (12)$$

- 여기서,  $\omega$ : 각주파수  
 $\Phi(\omega)$ : 전극의 전위  
 $Q_o$ : 전하

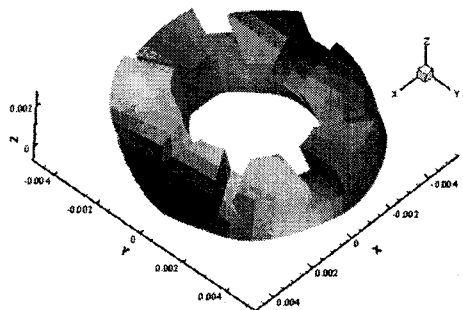
그림 3은 해석 모델의 임피던스 해석 결과를 보여준다. 그림 3에서 보듯이 존재하는 여러 개의 공진 주파수 중, 파장이 360°인 모드(B<sub>01</sub> 모드)를 사용하기 위해 162.6[kHz] 주파수를 동작 공진 주파수로서 선택하였다.



<그림 3. 임피던스 해석 결과>

### 2.3.2 변위 해석

파장이 360°인 모드(B<sub>01</sub> 모드)와 최대 변위량이 수 마이크로 미터(40[V<sub>p-p</sub>] 기준) 이상이 되는 변위를 모두 만족하는 변위를 찾기 위해 유한요소법 해석을 하였다. 유한요소법 해석을 통해 공진 주파수가 162600[Hz]일 때 파장이 360°이면서 z축 방향으로의 최대 변위량이  $2.08 \times 10^{-6}$ [mm]임을 확인하였다. 이 결과는 수 마이크로 미터 이상의 변위량이므로 소형 로터리 초음파 모터를 동작시키기에 적절한 변위량 임이 확인되었다. 그림 4는 변위 해석의 결과를 나타내며, 그래프의 단위는 [m]이다.



<그림 4. 변위 해석 결과(B<sub>01</sub> 모드)>

### 2.3.3 타원 운동 해석

타원 운동 유무를 관찰하기 위해 7개의 샘플 노드들은 그림 5와 같이 디스 상에서 선택되었다.

타원 운동은 식 (13)-(14)과 같이 변위와 위상각 값으로 그려진다[2].

$$x = |x| \times \sin \left[ \frac{2\pi}{n} \times i + \text{rad}(x) \right] \quad (13)$$

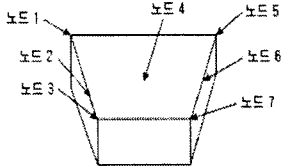
$$y = |y| \times \sin \left[ \frac{2\pi}{n} \times i + \text{rad}(y) \right] \quad (14)$$

여기서,  $n$ : 타원 운동의 분할 수

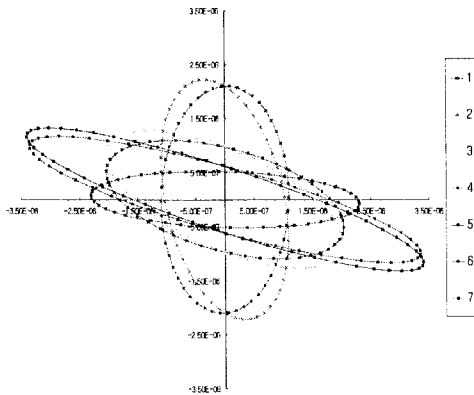
$i$ : 0부터  $n$

$\text{rad}(k)$ : 복소수  $k$ 의 라디안

그림 6은 식 (13)-(14)로부터 그려진 7개의 샘플 노드들에 대한 타원 운동을 나타낸다. 40[V<sub>p-p</sub>]이고 162600 [Hz]인 전기적 입력원에 대해 7개의 샘플 노드 모두 반시계 방향의 타원 운동을 나타낸다. 그림 6과 같이 z축 방향으로의 최대 변위는 2.08\*10<sup>-6</sup>[mm] 임이 확인된다. 이 변위는 수 마이크로 미터 이상이므로 소형 로터리 초음파 모터가 동작하기 위한 적절한 변위이다.



<그림 5. 디스 상에서 선택된 7개의 노드>



<그림 6. 타원 운동 그래프>

### 3. 결 론

본 논문에서는 유한요소법 해석법을 통해 과도 및 정상 상태의 소형 로터리 초음파 모터를 체계적으로 설계하고 해석하였다. 우선 소형 로터리 초음파 모터의 변위를 해석하였고, 진행과의 존재를 확인하였다. 해석 결과의 타당성은 1차로 상용 해석툴을 통해 검증하였고, 제작중인 시제품의 실험결과를 통해 추후 논문에서 검증할 것이다.

본 논문의 결과는 소형 초음파 모터의 제작이 가능함을 보였고, 소형 초음파 모터의 체계적인 설계에 활용될 수 있을 것이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] S. Ueha, Y. Tomikawa, "Ultrasonic Motors Theory and Applications", OXFORD 출판, 12-16쪽, 1993년
- [2] Jong-Seok Rho, Byung-Jai Kim, Chang-Hwan Lee, Hyun-Woo Joo and Hyun-Kyo Jung, "Design and Characteristic Analysis of LIB4 Ultrasonic Motor Considering Contact Mechanism," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol.52, 2054-2064쪽, 2005년 11월
- [3] Hyun-Woo Joo, Chang-Hwan Lee, Jong-Seok Rho, Hyun-Kyo Jung, "Identification of material constants for piezoelectric transformers by three-dimensional, finite-element method and a design-sensitivity method", Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on Volume 50, Issue 8, 965 - 971쪽, 2003년 8월
- [4] Y.Kagawa, T.Tsuchiya, T.Kataoka, T.Yamabuchi, and T. Furukawa, "Finite Element Simulation of Dynamic Response of Piezoelectric Actuator", Journal of Sound and Vibration(1996), 519-538쪽, 1996년