

## 유한요소법을 이용한 모드변환형 초음파 모터의 해석 및 제작

### Analysis and Fabrication of the Mode Conversion Type Ultrasonic Motor Using Finite Element Method

이재형, 박태곤

Jae-Hyung Lee, Tae-Gone Park

#### Abstract

An ultrasonic motor is a motor which uses vibration -a type of elastic vibration- to obtain a driving force, which then drives the motor using friction. In this paper, mode conversion type - single resonance mode ultrasonic rotary motor that use langevin type ultrasonic vibrator was studied. This model was proposed for the first time by Japanese Kumada in 1985. In this study, finite element analysis (FEA) of a stator and bidirectional driving characteristic of a rotor was newly obtained. The amplitude and phase of displacement and elliptical trajectory of beam was confirmed by FEA. The fabricated motor was operated to clockwise and counterclockwise in 40.8 [kHz] and 44.2 [kHz] respectively. But bidirectional driving characteristics did not coincide each other.

**Key Words** : Ultrasonic motor, Langevin type ultrasonic vibrator, Finite element analysis

#### 1. 서 론

인간의 귀가 감지할 수 있는 음파의 주파수는 50 [Hz]로부터 20 [kHz]로서, 이 범위의 주파수를 가청 주파수라 한다. 그리고 초음파란 20 [kHz] 이상의 주파수를 갖는 음파나 기계적 진동을 의미한다. 여기서 초음파 모터를 정의하자면 초음파 영역의 기계적 진동을 구동원으로 하는 액추에이터 이다[1]. 달리 표현하자면, 초음파 모터는 탄성진동 형태의 초음파 진동과 회전자와 고정자 사이의 접촉점에서 발생하는 마찰을 이용하여 구동하는 모터이다[2]. 이것은 전계 또는 자계에 의해 발생하는 힘으로 구동되는 일반적인 전자기 모터와 비교해 전혀 새로운 개념의 모터라고 말할 수 있다.

전자기 모터는 100년이 넘는 역사를 자랑하고 있어, 오늘날 산업의 전반적인 분야에서 중요한 동력원으로 사용되고 있다. 이와 달리, 초음파 모터에 관한 연구는 불과 20~30년 전부터 시작되어 전자기 모터의 단점을 보완하기 위해 오늘날까지 이에 대한 연구와 개발이 진행되고 있다.

오늘날 미국, 일본과 같은 선진국에서는 초음파

모터를 이미 '차세대 모터'로 선정하여 그 연구와 개발이 매우 활발하다. 또한, 최근 중국에서도 직경 1 [mm]의 초소형 초음파 모터를 제작하여 초음파 모터의 소형화 분야에선 세계적인 기록을 보유하고 있다. 하지만 우리나라는 '초음파 모터의 불모지'라고 불릴 만큼 열악한 연구 환경과 시장, 그리고 부족한 연구 인력으로 인해 선진국과의 기술적인 차이는 매우 크다. 최근 한 벤처기업에 의해 국내에서도 초음파 모터가 상용화되고 일부 대학과 연구기관에 의해 다수의 논문이 발표된 바가 있지만 독자적인 모델과 기술로서 선진국과 경쟁하기에는 아직도 부족한 점이 많다.

그래서 본 논문에서는 란쥬반형 진동자를 이용하여 모드변환형-단일공진모드 초음파 회전모터에 관해 연구하였다. 본 모델은 1985년 일본의 쿠마다에 처음으로 제안되었다. 하지만 본 논문에서는 이전에 제안되었던 모델에 대해서 유한요소해석을 이용한 시뮬레이션, 새로운 재료의 회전자 도입, 그리고 양방향 운동의 특성을 비교했다는 점에서 기존의 연구와의 차이점과 본 논문의 목적이 있다.

## 2. 구조와 동작원리

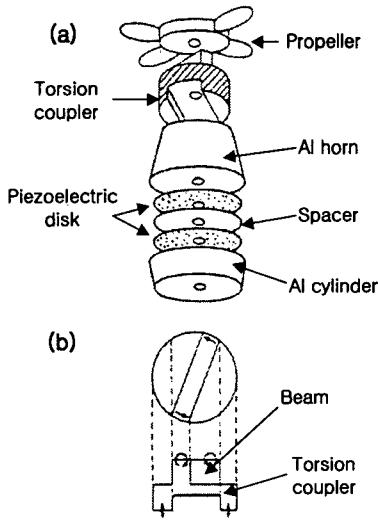


그림 1. 모터의 구조와 비틀림 커플러의 동작.

본 논문에서 연구하고자 하는 모터는 관류반형 진동자를 이용한 초음파 회전모터로서 모드변환형-단일공진모드 초음파 모터로 분류된다.

그림 1의 (a)와 (b)는 각각 본 모터의 구조와 비틀림 커플러의 동작을 나타내고 있다. 가장 근본적인 진동원은 압전 세라믹 디스크이다. 두께방향으로 분극된 압전 세라믹 두장을 분극방향이 서로 마주보게 구성한 후, 이를 금속블럭 사이에 삽입하여 관류반형 진동자가 구성된다. 압전 세라믹의 전극에 교류전원이 인가되면 압전효과에 의해 진동하게 된다. 본 진동자에서 발생한 중-진동은 비틀림 커플러에 자연스럽게 전달된다. 비틀림 커플러는 그림 1의 (b)와 같이 원형의 디스크를 중심으로, 아랫부분은 사각홈에 의한 평행한 두 다리가 위치하고 있으며 윗부분은 아래의 두 다리와 대각선으로 놓인 빔이 위치하고 있다.

이러한 구조의 비틀림 커플러는 중-진동이 아랫부분에서 전달되면 두 다리와 홈에 의해 굽힘-진동이 발생하게 되고, 윗부분의 빔은 굽힘-진동에 의해 비틀림-진동이 발생하게 된다. 다시 말해 관류반형 진동자와 비틀림 커플러로 구성된 본 모터의 고정자는 중, 굽힘, 비틀림의 진동모드변환을 동시적으로 이행하면서 동작하게 된다. 이러한 진동의 조합은 회전자와 접촉을 하는 빔의 끝 부분에서 타원변위를 형성하게 된다. 결국 비틀림 진동이 발생하는 빔의 윗부분에 베어링에 의해 축에 삽입된 회전자를 올려놓고, 스프링에 의한 힘으로 적절한 접촉력을 유지시켜주면, 회전자는 접촉면 사이의 마찰에 의해 회전하게 된다[3].

## 3. 시뮬레이션

시뮬레이션은 유한요소해석 프로그램인 ANSYS 7.0을 이용하여 이루어졌다. 모터의 동작은 고정자에 의해서 결정되기 때문에 고정자만 해석의 모델이 되었다.

### 3.1 모드해석

그림 2는 모드해석이 결과로서, 고정자의 중-굽힘-비틀림의 진동모드에서 41.585 [kHz]의 고유 주파수가 확인되었다. 여기서 나타난 변위에 대한 결과는 임의의 값으로서, 특별한 의미를 가지지 못한다.

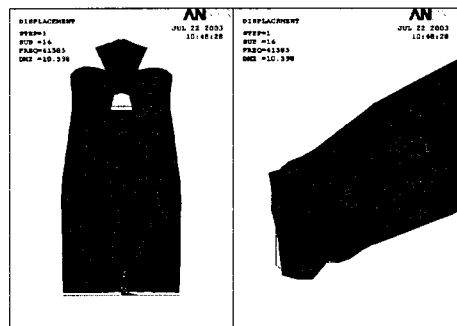


그림 2. 모드해석의 결과.

### 3.2 하모닉해석

주파수의 범위를 20 [kHz]에서 60 [kHz]까지 설정한 후, 주파수를 200 [Hz]씩 증가함에 따른 빔의 끝 부분에서의 변위의 진폭과 위상을 살펴보았다. 여기서 X축 변위는 비틀림-진동을, Z축 변위는 중-진동을 관장한다고 말할 수 있다.

그림 3에서와 같이 진폭의 경우 X축 진폭이 가장 크고 Y축 진폭이 가장 작게 나타났다. 또한 주파수 40.8 [kHz]와 44.2 [kHz]에서 비교적 큰 피크를 보인다. 그림 4의 위상의 경우, 세 축의 변위가 주파수에 따른 위상차를 보이며 42.4 [kHz]에서 부호가 반전된다.

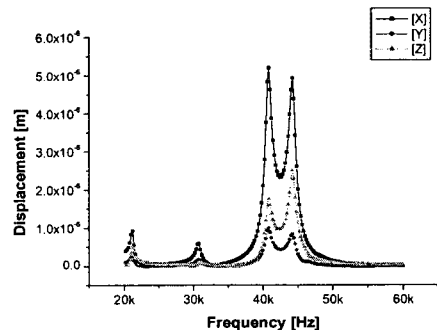


그림 3. 주파수에 따른 변위의 진폭.

## 4. 제작 및 실험 결과

### 4.1 모터의 제작

시뮬레이션 결과를 바탕으로 하여 실제 초음파 모터를 제작하였다. 그림 7에서 그 모습을 확인할 수 있다. 회전자와 고정자와 접촉을 이루어 상당한 마모가 예상되는 부위로서, 별도의 마찰재를 부가하는 것이 일반적이다. 하지만 본 연구에 있어서는 베어링 자체를 회전자로 이용하였다. 베어링의 커버를 이루는 금속은 코탄소 베어링 특수강으로서, 마모에 대한 내구성이 우수하며 표면상태가 양호하다. 그래서 제작된 모터에 있어서 베어링은 베어링 본연의 역할과 더불어 마찰재 그리고 회전자의 역할을 동시에 수행하게 된다. 이러한 다중 기능을 가지는 베어링 회전자를 도입함으로써 모터의 전체적인 구조를 보다 간소화 하게 되었다.

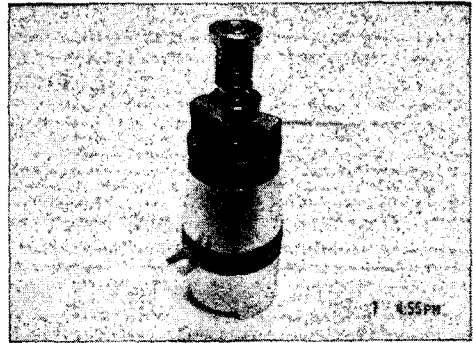


그림 7. 제작된 모터.

### 4.2 모터의 특성

우선 모터의 동작 주파수를 확인하기 위해 입력 전압을 50 [Vrms]로 고정하고, 주파수 가변에 따른 모터의 속도를 측정하였다. 그림 8에서 음의 부호를 가지는 속도는 모터의 시계방향 회전을 의미한다. 본 그래프에서 속도의 주된 피크점은 주파수 32.5, 38.0, 48.2 [kHz]에서 나타났다. 그런데 주파수 32.5 [kHz]에서는 고정자의 종진동이 너무 크게 발생하여 모터의 구동이 매우 불안하였다. 그래서 시계방향 운전에 있어서는 38.0 [kHz], 반시계방향 운전에 있어서는 48.2 [kHz]를 본 모터의 동작 주파수로 결정하였다.

끝으로 그림 9에서는 입력전압에 따른 모터의 속도를 나타내었다. 모터의 속도는 전압과 비례적인 관계를 보였다. 그리고 반시계방향 운전 속도가 시계방향보다 전체적으로 높게 나타나 양방향 운전특성이 서로 일치하지는 않음이 확인되었다.

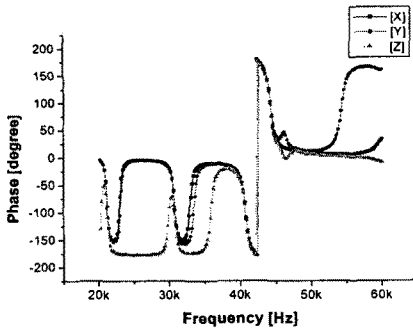


그림 4. 주파수에 따른 변위의 위상.

고정자의 타원궤적은 커플러의 빔에서 발생한다. 그래서 우선 빔의 위치에 따른 타원궤적을 살펴보고 그 결과를 그림 5에 나타내었다. 이 때 주파수는 40.8 [kHz]이다. 여기서 node 163, 15, 431은 각각 빔의 시작점, 끝점, 끝점 중 꼭지점으로 정의할 수 있다. 결과로서 node 431에서 관측된 타원궤적이 가장 양호함을 확인할 수 있다.

그림 6은 node 431 지점에서 관측된 입력전압에 따른 타원궤적의 모습이다. 결과로서 입력전압이 클수록 보다 큰 궤적을 형성하며 전압가변으로 인해 모터의 속도제어가 가능함을 예측할 수 있다.

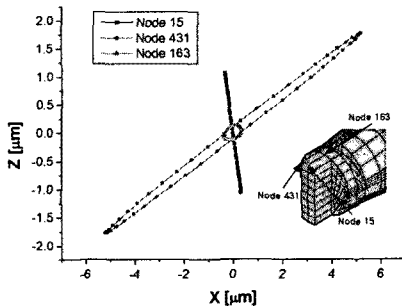


그림 5. 빔의 위치에 따른 타원궤적.

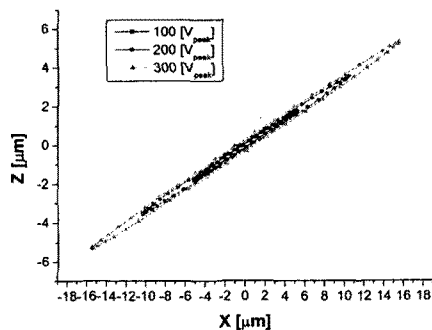


그림 6. 입력전압에 따른 타원궤적.

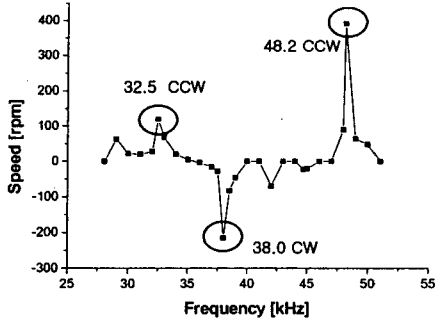


그림 8. 주파수에 따른 모터의 속도.

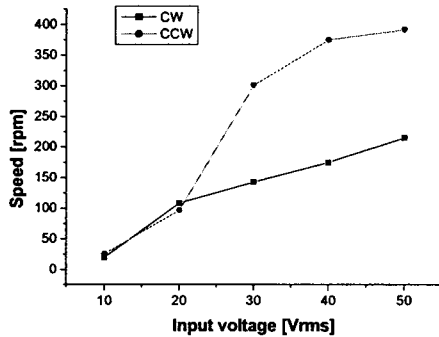


그림 9. 입력전압에 따른 속도.

## 5. 결 론

본 논문에서는 유한요소법을 이용해 모드변환형 초음파 모터를 해석하고, 이를 바탕으로 하여 실제 초음파 모터를 제작하여 그 특성을 고찰하였다.

우선 모드해석의 결과로부터 고정자의 종-굽힘-비틀림 진동모드에서 41.585 [kHz]의 고유주파수가 확인되었다. 다음으로 하모닉해석에서는 주파수에 따른 변위의 진폭과 위상, 그리고 빔의 위치와 입력 전압에 대한 타원궤적이 확인되었다. 변위의 진폭은 주파수 40.8 [kHz]와 44.2 [kHz]에서 피크를 보였고, 위상은 42.4 [kHz]에서 그 부호가 반전된다. 그리고 타원궤적의 크기는 입력전압에 비례하는 특성을 보였다.

제작된 모터의 동작 주파수는 시계방향과 반시계 방향이 각각 38.0 [kHz]와 48.2 [kHz]로 결정되었다. 그리고 모터의 속도는 입력전압에 비례함과 동시에 양방향 운전특성이 서로 일치하지 않음이 확인되었다.

## 참고 문헌

- [1]. Toshiiku Sashida, Takadhi Kerjo, "An Introduction to Ultrasonic Motors", p.1, 1993

- [2]. S. Ueha, Y. Tomikawa, M. Kurosawa, N. Nakamura, "Ultrasonic Motors Theory and Applications", pp.1-7, p.93, 1993
- [3]. 이재형, 박태곤, "관류반형 진동자를 이용한 초음파 회전 모터에 관한 연구", pp.223-227, 2003년도 한국전기전자재료학회 춘계학술대회논문집