

# 유한요소법을 이용한 사각 기둥 형태의 다자유도 초음파 모터 시뮬레이션

## Simulation of Square bar shaped Multi-DOF Ultrasonic Motor Using Finite Element Method

\*손영완<sup>1</sup>, 겐지로 다케무라<sup>2</sup>, #박신석<sup>1</sup>

\*Youngwan Son<sup>1</sup>, Kenjiro Takemura<sup>2</sup>, #Shinsuk Park<sup>1</sup>(drsspark@korea.ac.kr)

<sup>1</sup> 고려대학교 기계공학부, <sup>2</sup> 일본 게이오대학교 기계공학부

Key words : FEM(유한요소법), Multi-DOF(다자유도), Ultrasonic Motor(초음파 모터)

### 1. 서론

최근, 로봇은 산업 분야뿐만 아니라 의료용, 오락용 등으로 그 영역이 확대되고 있다. 이러한 경향으로 현재 로봇은 인간과 유사한 행동 패턴을 추구해야 하는 요구를 받고 있다. 즉, 인간과 같은 능숙하고 정확한 움직임을 위해서 다자유도의 메커니즘이 필요하다. 기존 전자기 모터를 가지고 다자유도 메커니즘을 구축하면 출력 토크 향상을 위한 감속기 부분으로 인해 부피와 무게가 늘어나는 단점을 갖고 있다. 또한 감속기 부분은 기어로 이루어져 있기 때문에 백래쉬(backlash)로 인한 정확한 위치 컨트롤이 이루어지지 않는 문제점이 있다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해 기존 1 자유도 초음파 모터의 원리를 확장한 다자유도 초음파 모터의 개발이 필수불가결하게 되었다. 다자유도 초음파 모터는 감속기 없이 저속 고 토크의 성질을 갖고 있다. 또한 정지 토크(holding torque)가 커서 응답성이 우수한 특징을 갖고 있다. 이러한 특징들로 인해 기존 다자유도 메커니즘의 단점을 극복할 수 있는 해결책으로 각광 받고 있다.

본 연구는 기존 랑게빈(Langevin) 타입의 다자유도 초음파 모터에 비해 구조가 간단하며 가공이 쉬운 사각 기둥 형태의 다자유도 초음파 모터 개발 초기 단계에 대해서 논의하고자 한다. 이 다자유도 초음파 모터에서는 두 개의 휨 진동(bending vibration) 모드와 한 개의 종 진동(longitudinal vibration) 모드를 이용할 것이다. 유한요소해석 프로그램인 COMSOL Multiphysics의 고유 진동수 해석(Modal analysis)를 통해 위에서 언급한 세 진동 모드가 일치하는 진동수를 구할 것이다. 그리고 조화 해석(harmonic analysis)를 통해 고유 진동수 해석과 비교할 것이다. 그리고 과도 해석(transient analysis)를 통해 접촉 점 타원 궤적 생성 여부를 확인하도록 한다.

### 2. 원리 및 구조

이미 상업화된 1 자유도 초음파 모터는 하나의 자유도를 구현하기 위해서 고정자의 두 개 고유 진동수 모드를 이용한다. 이 때 회전자와 고정자 사이의 접촉 점에서 특정 축 주위로 타원의 궤적이 생성된다. 이 타원 궤적으로 인해 회전자는 특정 축으로 회전하게 된다. 이러한 원리를 확장하여 세 개의 진동 모드를 이용하여 다자유도를 구현할 수 있다. 다자유도 특징을 최적화 하기 위해서는 각 세 개의 고유 진동수가 서로 직교해야 하며 거의 일치해야 하는 선결조건이 있다.

Fig. 1은 다자유도 초음파 모터의 구동 원리를 보여준다. 하나의 종 진동과 두 개의 휨 진동을 이용하여 구동이 된다. A 모드는 z-x 평면에서의 휨 진동 모드를 나타내고, B 모드는 y-z 평면에서의 휨 진동 모드, 그리고 C 모드는 z축

의 종 진동을 나타낸다. Fig.1(a)는 z축 주위로 회전할 때 쓰이는 고유 진동 모드들을 보여 준다.(i),(iii)는 A 모드이고(ii),(iv)는 B 모드인데, A모드와 B모드가 위상 차가 90도로서 결합이 되어 구동이 되면 z축 주위로 회전이 된다. Fig.1(b)는 x축 주위로 회전할 때 고유 진동 모드를 보여준다. Fig.1(a)와 마찬가지로 B모드와 C모드가 위상 차 90도로 결합하여 구동이 되면 x축 주위로 회전이 된다. 마찬가지로 y축 주위로 구동 하려면 A모드와 C 모드를 이용하면 된다.<sup>[1]</sup>

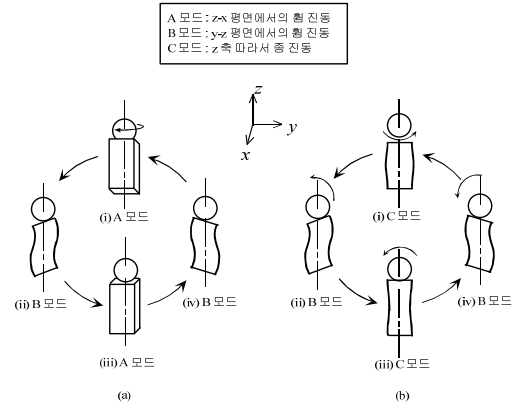


Fig. 1 Driving principle (a)Around the z axis (b)Around the x axis

Fig 2은 다자유도 초음파 모터의 구조 및 PZT의 분극 방향과 PZT에 가해지는 사인파 전압 신호를 나타내는 그림이다. PZT는 각각 두께 방향으로 분극되어 있으며 앞에서 살펴 보았던 고유 진동 모드를 가진 시키기 위해서 고유 진동수에 해당하는 주파수를 가진 사인파 전압 신호를 가하면 된다.<sup>[2]</sup> PZT의 위치는 각 진동모드에서 가장 큰 변위를 나타내는 곳에 위치시켜 성능 향상을 추구한다.

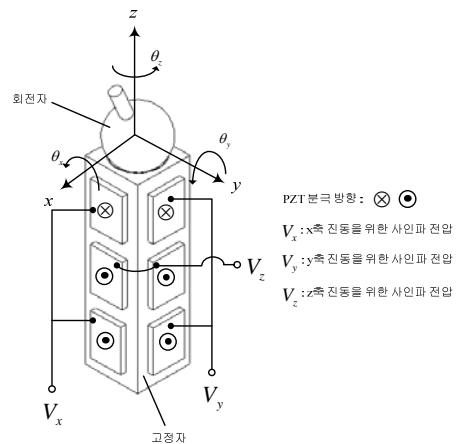


Fig. 2 PZT set polling direction and operated sinusoidal voltage

### 3. 유한 요소 해석 결과

고유 진동수 해석(Modal analysis)을 통해 이용하고자 하는 진동 모드들의 진동수를 일치시키는 작업을 수행하였다. 고정자의 너비를 10mm 로 고정하고 고정자의 길이나 PZT의 전체적인 치수를 조정하여 1 개의 진동 모드와 2 개의 진동 모드의 주파수를 일치시켰다.

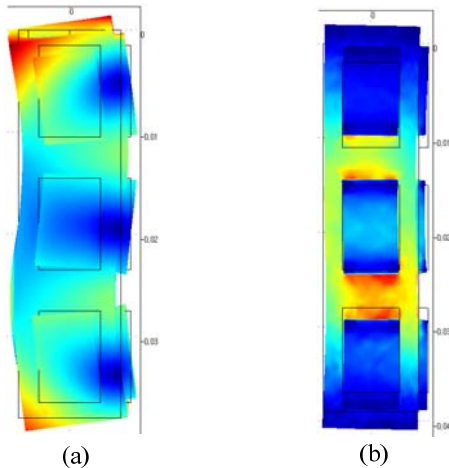


Fig. 3 Modal analysis (a)2<sup>nd</sup> bending vibration mode (b) 1<sup>st</sup> longitudinal vibration mode

Fig.3 은 1 차 종 진동 모드(1<sup>st</sup> longitudinal vibration mode)와 2 차 횡 진동 모드(2<sup>nd</sup> bending vibration mode)의 모습을 나타내고 있다. 고유 진동수 해석 결과 1 차 진동 모드의 주파수는 44.9kHz이고 2 차 횡 진동 모드의 주파수 44.8kHz이다. 다자유도 초음파 모터를 실제 구동할 때 가해져야 할 사인과 전압은 위 결과와 일치하는 주파수로 적용해야 한다.

조화 해석(Harmonic analysis)은 PZT 에 실제적으로 전압을 가했을 때 고정자와 회전자의 접촉 점에서의 변위를 분석하는 방법이다. 주파수 범위는 44500~45000Hz 이고 PZT 에 전압 100V 를 가해주었을 때 나온 결과는 다음과 같다.

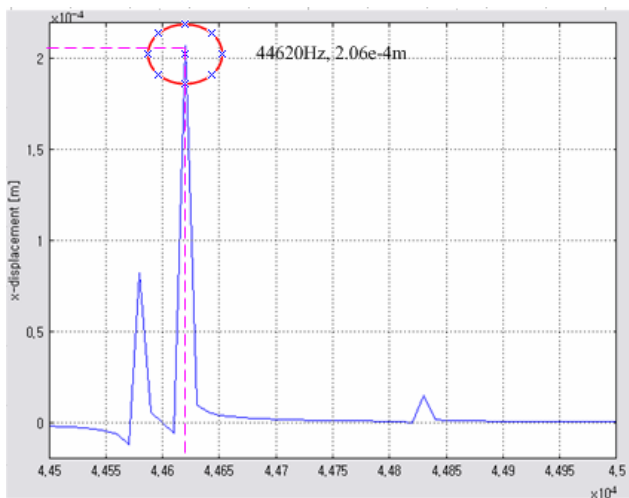


Fig. 4. Result of harmonic analysis (displacement versus frequency)

Fig.4 에서 보면 44620Hz 에서 가장 큰 변위를 보이고 있다. 고유진동수 해석에 나온 결과값 44.8~44.9Hz 와 비교하면 거의 비슷하다고 볼 수 있다.

다자유도 초음파 모터가 구동할 때에는 고정자와 회전자의 접촉 점에서는 타원 궤적(ellipse trajectory)이 생성되어야 한다. 과도해석(transient analysis)을 통해 타원 궤적 형성

유무를 판단할 수 있다. PZT 에 가해지는 전압의 진폭은 100V, 주파수는 44620Hz, 그리고 두 개의 진동모드의 위상차는 90 도로 정하여 가진시킨다..

Fig.5 는 x-y 평면에서 생기는 타원 궤적, y-z 평면에서 생기는 타원 궤적의 모습을 보여준다.

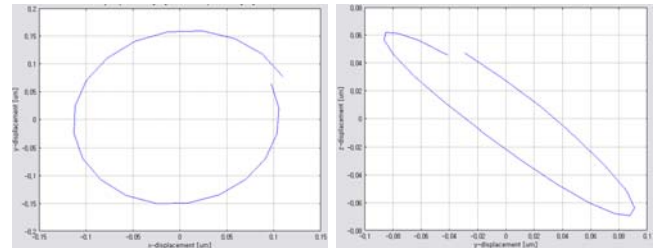


Fig. 5. the ellipse trajectory by transient analysis (a) x-y plane (b) y-z plane

### 4. 결론

본 연구에서는 상용화된 1 자유도 초음파 모터의 원리를 확장한 사각기동 형태의 다자유도 초음파 모터 시뮬레이션 결과에 대한 고찰이다. 고유진동수 해석을 통해 이용하고자 하는 진동 모드들의 진동수를 일치시켰고 조화 해석을 통해 고유진동수 해석의 결과값과 비교하였다. 또한 과도 해석을 통해 회전자와 고정자 사이의 접촉 점의 타원 궤적 형성 유무를 판단하였다.

이와 같이 유한 요소 해석을 통해 나온 결과들은 실제 다자유도 초음파 모터를 제작할 때 유용하게 쓰일 수 있다. 시뮬레이션에 쓰였던 다자유도 초음파 모터의 치수들은 실제 구동하기 위한 선결 조건을 만족시키는 지표가 될 수 있다. 또한 PZT 에 가하는 전압의 진폭, 주파수, 위상 차 선정에 도움이 된다.

향후 실제 사각기동 형태의 다자유도 초음파 모터가 제작된다면 의료용 로봇과 같은 협소한 공간에서 다자유도 구동이 요구되는 분야에 적용이 될 수 있기 때문에 지속적인 연구가 진행되어야 할 것이다<sup>[3]</sup>.

### 후 기

본 연구는 건설교통부가 지원한 “로보틱 크레인 기반 고층 건물 구조체 시공 자동화 시스템 개발(과제번호:06 첨단융합 D01)”사업을 통해 수행됨

### 참고문헌

1. Takemura, K. and Maeno, T., "Characteristics of an Ultrasonic Motor Capable of Generating a Multi-Degrees of Freedom Motion," Proc IEEE Int. Conf. Robotics and Automation 2000, 3660-3665, 2000.
2. Yu Chen, Kai LU, Tiewing ZHOU, Tao LIU and Cunyue LU "Study of a Mini-Ultrasonic Motor with Square Metal Bar and Piezoelectric Plate Hybrid," Japanese Journal of Applied Physics, vol.45, No. 5B, 2006, pp. 4780-4781
3. Shinsuk PARK, Takemura, K. and Maeno, T., "Study on Multi-DOF Ultrasonic Actuator for Laparoscopic Instrument," JSME International Journal, vol.47, No.2, 2004, pp.574-581