

PZT 를 이용한 다자유도 초음파 모터 개발

Development of Multi-DOF Ultrasonic Motor Using PZT

손영완¹, 다케무라 겐지로², 박신석^{1,✉}
Youngwan Son¹, Kenjiro Takemura² and Shinsuk Park^{1,✉}

1 고려대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Korea Univ.)
2 게이오대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Keio Univ.)
✉ Corresponding author: drsspark@korea.ac.kr, Tel: 02-3290-3868

Manuscript received: 2009.1.29 / Revised: 2009.11.20 / Accepted: 2010.1.29

This study introduces about development of multi-DOF ultrasonic motor that are composed of a bar-shaped stator and a spherical rotor. The ultrasonic motor is a motor which is operated by vibrations over frequency of 20kHz. The multi-DOF ultrasonic motor will be developed by expanding the basic theory of existing 1-DOF ultrasonic motor. It can generate 3-DOF rotation of the rotor around perpendicular axes using 3 vibration modes of stator. By using finite element methods, the optimal dimension of stator is decided and made the components of stator. When we apply the multi-DOF ultrasonic motor composed of rotor and stator to the driving test system, it will be checked whether the motor can be driven at the direction of 3-DOF or not. And it is proposed how the simulation of square bar shaped multi-DOF ultrasonic motor is accomplished.

Key Words: Multi-DOF (다자유도), Ultrasonic Motor (초음파 모터), PZT (압전 세라믹), Finite Element Method (유한요소법)

기호설명

- V = input voltage
- A = amplitude of input voltage
- f = frequency of input voltage
- ϕ = phase of input voltage
- t = time

1. 서론

인간은 수 백 개의 근육과 골격으로 이루어져 있어서 많은 운동 자유도(Degree of Freedom)를 가지고 있다. 그렇기 때문에 일반적인 기계를 이용해 수행할 수 없는 복잡한 동작들을 능수능란하게 구현할 수가 있다. 예를 들어 사람의 손은 총 16 개의 관절과 22 개의 자유도를 가지고 있기

때문에 외과의사의 수술도구 조작과 같은 미세한 조작이 가능하다. 한편 일반적으로 기계는 1 개의 기계요소를 가지고 1 자유도의 운동 밖에 구현을 못하기 때문에 간단한 반복적인 동작에는 효율성이 높으나 인간과의 친화성은 반드시 높다고는 말할 수 없다.

그러나 최근에 기계의 응용 분야가 다방면에 걸쳐 확대되고 거기에 따라 복잡하고 교묘한 동작을 생성할 수 있는 로봇 손이나 매니퓰레이터(Manipulator)의 개발이 요구되고 있다. 특히 외과 의사들의 동작들을 대신 수행하기 위해 개발된 다빈치(Da vinci)와 제우스(Zeus)와 같은 수술 로봇 시스템이 대표적인 예라고 할 수 있다. 이러한 수술 로봇은 수술 작업의 복잡성을 해결할 수 있도록 협소한 환경에서 운동 자유도의 증가를 필수적으로 해결해야 하는 문제를 가지고 있다. 그러므

로 로봇 핸드나 수술용 매니플레이터를 설계하고 제작하기 위해서는 초소형이고 고성능인 액츄에이터의 개발이 필수불가결하다고 할 수 있다.

현재, 로봇에 많이 쓰이고 있는 일반적인 액츄에이터는 회전식 전자기 모터이다. 그러나 회전식 전자기 모터를 이용하여 로봇 시스템을 구축하는 경우 기어박스에 의한 기구의 대형화와 운동 정지시 유지토크를 위한 전력 소비, 기어의 백래쉬(Backlash), 전자 노이즈(Electric noise) 발생과 같은 문제점을 지적할 수 있다. 이와 같이 회전식 전자기 모터를 이용해서 소형의 다자유도 메커니즘을 구축하기는 힘든 면이 있다고 볼 수 있다.^{1,2}

본 연구에서는 단 하나의 진동자를 이용하여 다자유도를 구현할 수 있는 다자유도 초음파 모터의 개발 방법에 대하여 소개한다. 또한 기존 다자유도 초음파 모터보다 부품 개수를 줄여 시뮬레이션 및 제작공정의 간소화를 목표로 하였다. 초음파 모터란 20kHz 이상의 주파수를 가진 진동을 이용하여 구동되는 모터이다. 기존 1 자유도 초음파 모터의 기본 원리를 확장하여 개발하는 다자유도 초음파 모터는 백래쉬 문제와 큰 부피와 무게를 가지고 있는 전자기 모터와는 다르게 기어박스 없이 저속 고 토크의 성질을 가지고 있고 정지 토크(holding torque)가 커서 응답성이 우수한 특징을 갖고 있다. 그러므로 소형의 다자유도 메커니즘 적용에 효용성이 크다. 구동원인 압전소자에 미리 예압을 주는 볼트 체결 방식인 랑쥬반(Langevin) 타입의 진동자를 수학적 분석(numerical analysis)을 이용하여 기초 설계한다. 이후 유한 요소 해석 프로그램을 이용하여 trial and error 방식을 적용하여 최적의 진동자 설계 치수를 결정한다. 각 부품들을 제작하여 초음파 모터를 조립하여 구동 시스템에 적용하여 실제적으로 3 자유도가 구현이 되는지를 확인해 본다. 그리고 랑쥬반 타입의 다자유도 초음파 액츄에이터와는 다르게 구조가 간단하며 가공이 쉬운 사각 기둥 형태의 다자유도 초음파 모터 개발 초기 단계에 대해서도 논의를 하고자 한다.

2. 원리와 구조

2.1 PZT 의 압전효과

초음파 모터는 기본적으로 압전 세라믹스의 압전성을 응용해서 만든 액츄에이터이다. 압전 효과는 1880 년 Curie 형제에 의하여 실험적으로 발견

되었고 분극 처리된 BaTiO₃ 세라믹스에서 압전 효과가 발견된 지도 반세기 가 경과되었다. BaTiO₃ 세라믹스는 보통 AB₃ 로 표현되는 perovskite 형의 결정구조를 가지고 있으며 A 및 B 를 여러 종류의 원소로 치환한 결과 많은 압전 세라믹스를 발견하게 되었다. 그 중에서 PZT(Lead zirconate titanate : Pb[ZrxTi1-x]O₃)는 BaTiO₃ 보다 우수한 압전성이 입증되어, 압전 세라믹스 분야에 획기적인 업적이 되었다. 압전성(piezoelectricity)은 힘(force)을 가했을 때 전하가 발생하는 현상으로 압력을 의미하는 ‘piezo’ 와 전기를 의미하는 ‘electricity’ 의 합성어이다. 압전성에 의해 압전 세라믹스는 압전 효과(piezo effect)의 성질을 지니게 되는데 이는 가스 착화용 압전 소자, 압력센서, 가속도 센서, 각속도 센서 등의 각종 센서로서 적용할 있다. 반대로 전기를 가해주면 변형이 일어나는데 이를 역 압전 효과(inverse piezo effect)라고 한다. 이 기능을 이용한 것이 바로 압전 액츄에이터 및 초음파 모터라고 할 수 있다.

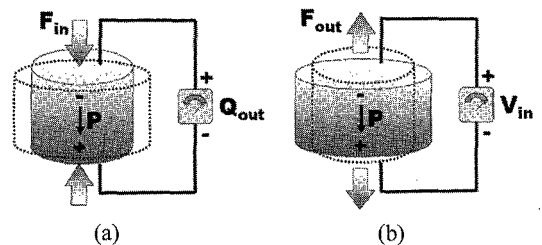


Fig. 1 General characteristics of piezoelectric ceramics
(a) piezo effect (b) Inverse piezo effect

2.2.1 자유도 초음파 모터

초음파 모터는 자석이나 코일을 필요로 하지 않는 새로운 타입의 모터로서, 인간의 청력으로 감지할 수 없는 20kHz 이상의 주파수의 전압 진동원을 이용하여 진동자(Stator)와 회전자(Rotor)의 마찰에 의해 구동력을 갖는 저속 고토크의 차세대 액츄에이터이다.

초음파 모터는 크게 실제적으로 움직이는 회전자와 진동을 일으켜 회전자에게 진동을 전달하는 진동자로 구성되어 있다. 진동자는 전압 차에 의해 진동을 일으키는 압전소자 부분이 있고 여기서 발생한 진동을 증폭시켜주는 역할을 하는 탄성체 부분으로 구성한다. 모터의 운동 형태, 그리고 진동자의 형태에 상관없이 인간의 청력으로 감지할 수 없는 초음파 범위인 20kHz 이상의 고 주파수에 해

당하는 주기적인 역학적 운동을 통하여 진동자에서 발생하는 미소 변형을 일정한 방향의 역학적인 운동으로 확대, 변환시켜 주는 데 있다. 진동자에 해당하는 부분의 변형을 회전자에 역학적인 운동으로 전달 할 수 있는 타원체적을 어떻게 쉽게 만드느냐에 따라 기본적인 구조가 달라진다고 할 수 있다. 이러한 초음파 모터는 타원체적에 의해 결정되는 운동 방향에 의해 크게 선형 초음파 모터(linear type ultrasonic motor)와 회전형 초음파 모터(ring type ultrasonic motor)로 나눌 수 있다.

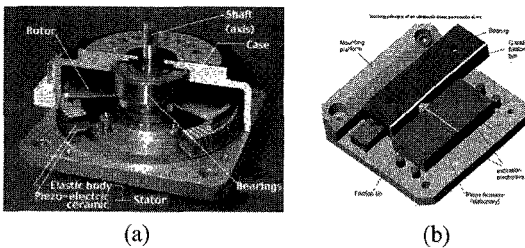


Fig. 2 Structure of ultrasonic motor (a) ring type (b) linear type

2.3 형상 제안

초음파 모터의 기본원리를 확장하여 사람의 손목과 같이 서로 직교하는 3 축 주위의 회전운동을 생성할 수 있는 다자유도 초음파 모터를 제작하려고 한다. 1 자유도 초음파 모터는 단일의 진동자를 가지고 하나의 자유도만 구동을 시킬 수 있지만 다자유도 초음파 모터는 3 축 이상의 자유도를 구현할 수 있다는 것이 그 특징이다. 하나의 진동자를 가지고 3 자유도 운동 구현을 하기 위해서는 다음의 조건을 만족해야 한다.

- (1) 3 개의 고유 진동 모드의 진동수가 일치해야 한다.
- (2) 3 개의 고유 진동 모드의 진동 방향이 서로 직교해야 한다.
- (3) 불필요한 여진을 제거하기 위해 낮은 차수의 진동 모드를 사용해야 한다.

진동자를 실린더형으로 사용한다는 가정 하에 기본적인 진동모드는 휨 진동과 종 진동 그리고 비틀림 진동이 있다. 다자유도 구현에 있어서 자유도의 수, 가진의 용이함을 고려해 볼 때 진동 방향이 서로 직교하는 휨 진동 2 개와 종 진동 1 개를 이용하는 것이 가장 합리적이다. 또한 볼트 체결 란주반(BLT) 방식으로 진동자를 제작한다. 이는 PZT 와 같은 압전재료를 철재 또는 알루미늄

등과 같은 탄성체 사이에 끼워서 볼트로 죄는 방식을 말한다.³ 기본적으로 란주반 형식은 내주조임형과 외주조임형 두 방식이 있는데 형상의 단순화를 위해 내주조임형을 선택하기로 한다. 한편 다자유도 초음파 모터를 제작할 때 란주반 방식으로 적용 시 얻는 장점을 정리한 내용이다.

- (1) 가공·조립이 용이하고 소형화에 적절하다.
- (2) 진동 모드가 단순하기 때문에 압전 소자를 볼트체결 형식으로 예압할 수 있다.
- (3) 압전 소자의 형상을 제조가 용이한 평판 모양으로 제작할 수 있다.

2.4 다자유도 초음파 모터의 구동 원리

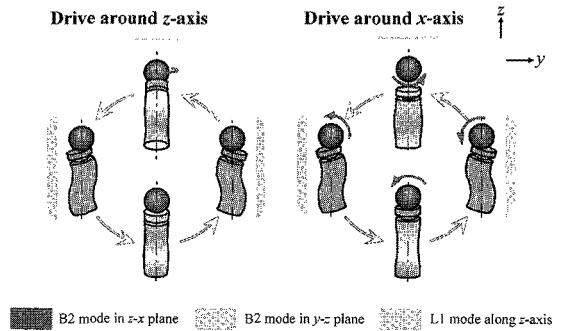


Fig. 3 Driving theory of Multi-DOF ultrasonic motor

기본적인 원리는 1 자유도 초음파 모터의 원리를 확장한 개념이라고 할 수 있다. 현재 개발되어 상용화된 1 자유도 초음파 모터는 하나의 진동자에 고유 진동수가 동일한 2 개의 고유 진동 모드를 시간적으로 위상을 달리해 공진시켜서 회전자와 진동자의 각 접촉 점에 평면상의 타원 운동을 생성하고 있다. 따라서 이 생각을 확장해서 생각해 보면 여러 개의 고유 진동 모드를 이용하면 다자유도 운동을 할 수 있는 초음파 모터를 개발할 수 있다. 즉 3 개의 고유 진동수가 일정한 고유 진동 모드를 선택적으로 조합을 시키면 3 개 이상의 자유도를 갖게 된다. 예를 들면 진동 방향이 서로 직교하는 3 개의 고유 진동 모드를 2 개씩 선택하여 시간적으로 위상을 달리해 공진시키면 진동자와 회전자 사이의 접촉 점에 서로 직교하는 3 평면 내에 타원 운동을 생성할 수 있다.

Fig. 3 에서 실린더 모양 진동자의 휨 진동 모드(bending vibration mode) 두 개와 종 진동 모드(longitudinal vibration mode) 하나를 조합했을 때 진

동 1 주기에서 진동자의 변형에 의해 회전자가 회전하는 모습을 나타내고 있다. 좌측 그림을 보면 z-x 평면의 2 차 휨 진동 모드와 y-z 평면의 2 차 진동 모드를 시간적 위상차 $\pi/2$ 로 조합해 놓은 모습을 나타내고 있다. 이 조합에 의해 진동자의 상단 부분에 z-축 방향으로 타원 운동을 하게 된다. 이때 진동자 부분에 압착된 구 모양의 회전자는 마찰력에 의해 z-축 방향으로 회전하게 된다. 우측 그림은 x 축 회전에 대한 원리를 나타내고 있다. y-z 평면의 2 차 휨 진동 모드와 z-축 방향의 1 차 종 진동 모드를 시간적 위상차 $\pi/2$ 로 조합을 하면 진동자 상단 부분에 x-축 방향으로 타원 궤적이 형성이 되는데 이는 회전자의 x-축 방향 회전을 하게 되는 요인이 된다. 회전자의 y-축 회전 또한 x-축 원리와 비슷하다. 다자유도 초음파 모터는 이와 같이 하이브리드(hybrid)형 초음파 모터라고 할 수 있는데 이는 z-축 회전은 진행파형 모터 원리, x 축과 y 축 회전은 정재파형 초음파 모터 원리를 적용했기 때문이다.

3. 유한 요소 해석을 이용한 시뮬레이션

3.1 모델링

실제 제작에 앞서 유한요소 해석(Finite element analysis)을 이용한 시뮬레이션을 하는 목적은 3 개의 진동 모드를 일치시키는 설계 치수 결정 등이 있다. 해석 프로그램으로는 ANSYS Multiphysics 10.0 을 사용할 것이고 고유 진동수 해석인 Modal analysis 를 통해 진동 모드의 일치를 위한 시뮬레이션을 수행하였다.

다자유도 초음파 모터의 기본적 구조는 회전자와 진동자로 구분된다. 진동자는 진동원인 압전소자와 진폭을 확장시켜 주는 탄성체로 나뉜다. 현재 초음파 모터의 압전소자로 널리 쓰이고 있는 PZT 를 진동원으로 쓸 것이며 탄성체로 황동을 사용할 것이다. 각 재료들에 물성치를 결정해서 각 부품 별로 적용하게 한다.

진동자는 기본적으로 원기둥 형태의 모양을 갖는다. 정확한 시뮬레이션 결과를 얻기 위해 일반적인 실린더형을 만드는 것 대신 균일한 육면체 요소 격자를 만들기 위해서 2D 단면을 그려 준 다음 2D Mapped mesh 를 실행시켜주는 방식으로 모델링을 했다. 그 이후 기준 축을 중심으로 회전시켜 실제 진동자의 형태를 만들었다. 또한 시뮬레이션 시간을 단축하기 위해서 반쪽 원기둥을 모델

링하여 z-x 평면을 기준으로 symmetry fixed 기법을 사용했다.⁴ 이는 진동자의 1 차 종 진동 모드와 2 차 휨 진동 모드의 대칭성에 의해 기인한 것이다. 모델링한 결과 총 6012 개 요소와 7297 개의 절점으로 구성된 반원기둥 모델을 만들었다.

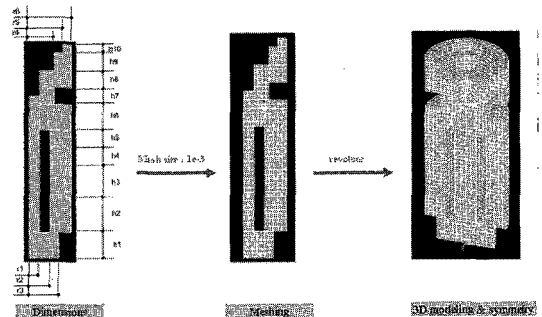


Fig. 4 Modeling process of stator

3.2 시뮬레이션 결과

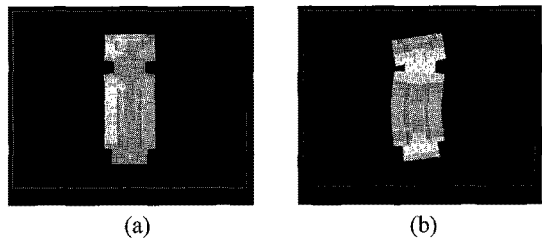


Fig. 5 Modal analysis (a) 1st longitudinal vibration mode (b) 2nd bending vibration mode

시뮬레이션의 최종 목표는 1 차 종 진동 모드의 고유 진동수와 2 차 휨 진동 모드의 고유 진동수를 일치 시키는 진동자 치수를 결정하는 것이다. 이를 위해 모델링한 구조를 Block-Lanczos 법을 이용하여 20 개의 진동 모드를 구했다. 그 중 필요한 두 개의 모드를 선택하여 고유 진동수가 일치하는지를 살펴보았다. Trial and error 방식으로 하나의 변수를 설정하여 두 모드의 진동수를 일치시켰다. 이 방식을 적용하기 위해서는 몇 개의 조정 치수(tuning dimension)를 지정했는데 이는 실제 제작 시에도 적용을 할 수 있는 탄성체 링 두 개의 치수를 결정하였다. Fig. 4 에서 보면 조정 치수(tuning dimension)로 h2 와 h4 를 선택하여 ANSYS Multiphysics 시뮬레이션 방법 중 텍스트 기반의 명령어 방식을 이용하여 변경을 했다.

Fig. 5 는 사용하고자 하는 진동 모드의 모습이

다. 1 차 종 진동 모드는 z 축을 기준으로 위 아래로 움직이는 모습을 볼 수 있고 2 차 횡 진동 모드는 y 축 기준으로 노드점(node point), 반 노드점(anti node point)가 각각 두 개씩인 횡 진동을 볼 수 있다. h2 와 h4 의 길이를 변경하여 시뮬레이션 한 결과는 Table 1 와 같다.

f_{B2} 는 2 차 횡 진동 고유 진동수이고 f_{L1} 은 1 차 종 진동 고유 진동수를 나타낸다. Model 1, 2, 3 은 다른 치수들은 고정된 상태에 조정치수 중 하나인 h4 를 4mm, 5mm, 6mm 으로 변경하며 나타낸 모델이다. 고유 진동수 오차율(Δf [%])은 4.89%, 6.13%, 3.13%의 결과가 나왔다. 탄성체 부품 2 개 중 하나인 h4 의 치수를 오차율이 작았던 4mm 로 결정하고 다시 h2 를 결정하는 것이 효율적인 치수 결정 방법이다. h2 의 길이 변화를 4mm, 5mm, 6mm, 7mm, 8mm 로 변경한 모델이 Model 3,4,5,6,7 이다. 각 모델의 고유 진동수 오차율은 3.13%, 1.64%, 0.23%, 1.10%, 1.69%으로 h2 의 길이가 6mm 일 때 f_{B2} 와 f_{L1} 의 결과가 거의 비슷하다는 것을 알 수 있다. 실제 다자유도 초음파 모터를 제작할 때에는 h2 와 h4 의 길이가 다른 부품을 여러 개 제작하여 적용하는 것이 시뮬레이션 결과와 실제 적용의 차이를 줄이는 방법이 되겠다.

Table 1 Result of Modal analysis

	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 8
h2 [mm]	4	4	4	5	6	7	8
h4 [mm]	6	5	4	4	4	4	4
f_{L1} [Hz]	28363	28445	30531	30103	29686	28942	28346
f_{B2} [Hz]	29751	30188	31486	30597	29755	29259	28824
Δf [Hz]	1388	1743	955	494	69	317	478
Δf [%]	4.89	6.13	3.13	1.64	0.23	1.10	1.69

4. 설계 및 제작

4.1 상세 설계

하나의 진동자 부품을 제작하기 위해서는 시뮬레이션 결과를 바탕으로 치수를 결정하고 각각 부품들을 나누어서 형상을 제작한 다음 조립을 해야

한다. Fig. 6 은 진동자의 설계 단면도를 나타내고 있다. 진동자의 주요 부품은 다음과 같이 이루어져 있다. 크게 헤드(Head) 부분과 실질적으로 진동을 일으키는 진동원인 PZT 그리고 고유 진동수를 변화 시켜줄 수 있는 두 개의 링 부품(Ring1, Ring2) 마지막으로 모든 부품을 결합시켜주는 조임 볼트 샤프트 부품으로 구성되어 있다. 이 결합품 위에 Contact part 가 있는데 이는 구 형태의 회전자와 진동자 사이에 무수히 많은 접촉점을 만들어 타원궤적에 의해 구동하게 하는 매개체가 된다. PZT 는 총 6 개로 외부에 일치하게 만든 진동자의 고유 진동수의 주파수로 정현파 전압을 가하여 진동을 일으킨다. PZT 에 정현파 전압을 인가시켜줄 수 있는 전극(electrode)가 필요하다. 그리고 Support plate 는 모달 해석에서 변위가 거의 발생하지 않는 노드점(nodal point)에 위치하는 것이 좋다.

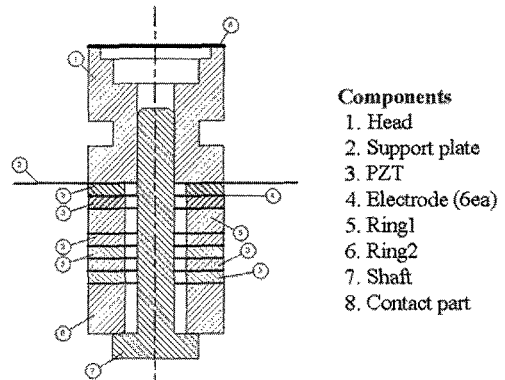


Fig. 6 Cross section of stator

진동자에서 적절한 방향으로 횡 진동과 종 진동을 발생시키기 위해서는 PZT 의 극성(polarity) 방향과 PZT 의 배열이 중요하다. 즉 PZT 는 극성에 의해 변위방향이 달라지기 때문이다. 특히 란쥬반 타입의 다자유도 초음파 모터의 PZT 및 탄성체 부품을 조립할 때에는 여러 개의 진동을 조합해서 구동하기 때문에 극성 방향에 따른 배열 순서가 중요하다. 또한 PZT 의 변위 증폭률 향상을 위해 적층 형태로 진동 원을 구성하는데 Fig. 7 은 두 개의 PZT 를 결합할 때 수축·인장이 나타내는 그림이다. 횡 진동을 위해서는 한 개의 디스크 모양의 PZT 는 각각 원형 180° 씩 극성을 반대로 해서 폴링(Polling)시켜야 한다. 2 개를 적층해서 결합할 때에는 정현파 전압을 전극에 가할 때는 같은 극을 바라보는 형식으로 결합을 해야 한다. 이

와는 다르게 종 진동을 위해서는 디스크 모양의 PZT 에 극성은 원형 360° 한 면에 (+), (-) 폴링 시키면 된다.

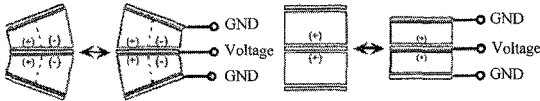


Fig. 7 Characteristics of PZT according to polling direction (a) polarity for bending vibration (b) polarity for longitudinal vibration

4.2 조립

위에서 제작한 각 진동자 부품들은 하나의 축을 가지고 배열이 되어야 한다. 축 일치를 하지 않으면 초음파 모터의 성능뿐만 아니라 다자유도 구현 자체가 안 되는 일이 발생하게 된다. 그렇기 때문에 축을 일치시키기 위한 축 일치 도구(Alignment device)가 필요하다. 또한 PZT 가 들어간 액츄에이터는 예압을 가해서 어느 정도 압축되어 있는 상태에서 구동이 되어야 한다. 보통 PZT 와 같은 압전 소자들은 팽창할 때에는 큰 힘을 만들어 내지만 수축할 때에는 팽창시보다 약 1/500 의 힘밖에 만들어 내지 못한다. 즉 초음파 모터는 PZT 의 수축 인장의 동적 특성이 진동원의 성능에 큰 영향을 주기 때문에 동적 성능의 향상을 위한 예압 디바이스를 제작해야 한다. 예압 디바이스를 이용해 예압된 진동자를 제작한 모습은 그림 8 과 같다.

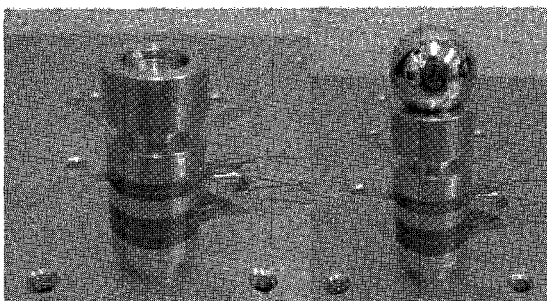


Fig. 8 Multi-DOF ultrasonic motor (left) without rotor (right) with rotor

5. 실험 결과

진동자 위에 지름 20mm 의 스테인리스(Stainless)

재질인 회전자를 올려 놓고 각 진동 모드에 관련된 압전소자 두 채널씩의 진동을 조합을 시켜 구동 테스트를 진행한다. X 축, Y 축 Z 축 회전이 움직이는지를 확인하고 성능 향상을 위해 필요한 요소들을 파악했다. 진동자에 적절한 초기 진폭과 주파수를 조절할 수 있는 함수 발생기(Function generator)가 필요하다. 그리고 이 전압을 필요 이상의 전압을 증폭시키기 위한 전압 증폭기 2 개 이상이 필요하다. 추가적으로 구동 테스트 실험은 두 채널을 사용하기 때문에 함수 발생기에서 나오는 사인과 전압을 두 채널로 나눠서 위상차를 설정할 수 있는 위상 변환기(Phase Shifter)가 필요하다.

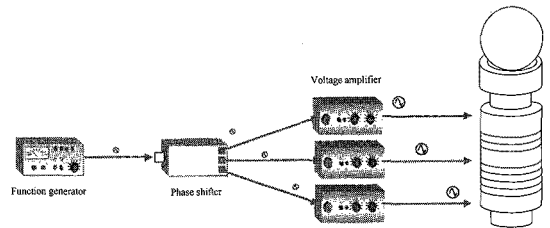


Fig. 9 Configuration of Driving test

진동자에 3 채널의 전압을 가해 주는데 전압 신호는 식 1 과 같다.

$$\begin{aligned}
 V_z &= A_z \sin(2\pi f_z t + \phi_z) \\
 V_y &= A_y \sin(2\pi f_y t + \phi_y) \\
 V_x &= A_x \sin(2\pi f_x t + \phi_x)
 \end{aligned} \tag{1}$$

Table 2 Results of driving test

Rotational Axis	Vibration Mode	Rotating Frequency[kHz]	Amplitude [Vp-p]	Phase [deg]
X-axis	B2_y	31.6	160	0
	L1_z			90,-90
Y-axis	B2_x	30.6	160	0
	L1_z			90,-90
Z-axis	B2_x	31.3	160	0
	B2_y			90,-90

두 채널당 각각 전압 진폭을 일정하게 해 놓고 구동이 되는 최적의 주파수를 표 2 에서 정리를 했다. 또한 위상차의 부호를 바꾸면서 발생하는 현상에 대해서 알아본다.

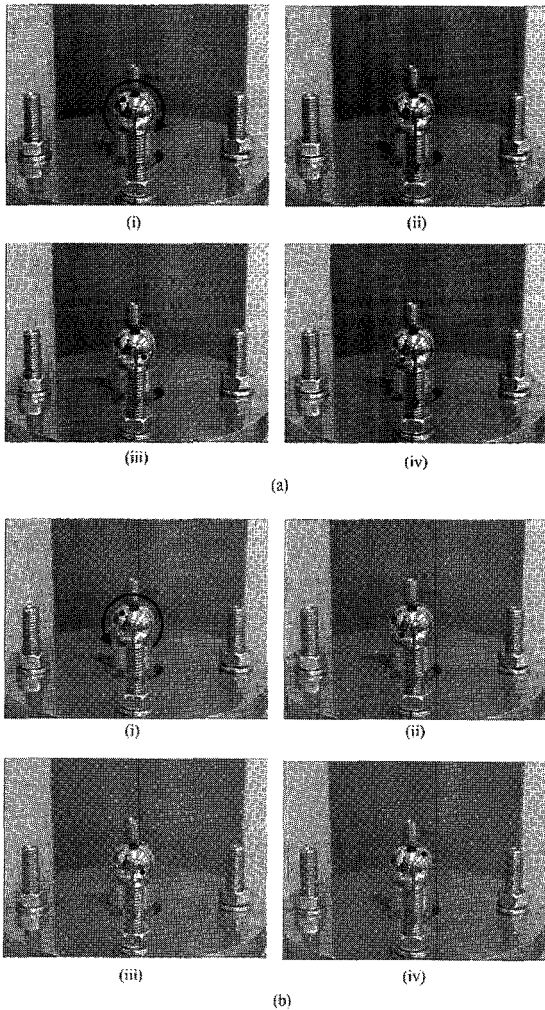


Fig. 10 Driving test at x-axis (a) Clockwise (phase of $L1_z : 90^\circ$) (b) Counterclockwise (phase of $L1_z : -90^\circ$)

Fig. 10 은 x 축 회전 테스트를 나타내는 그림이다. x 축 회전을 위해서는 y 축 휨 진동 모드에 관련된 두 쌍의 압전소자 전극에 160V 의 진폭을 갖는 31.6kHz 주파수를 갖는 사인파 전압을 인가해준다. 그리고 z 축 중 진동 모드의 진동원인 압전소자의 전극에 같은 진폭과 주파수를 가해주는 대신 위상차이를 준다. 위상차 90° 를 주면 시계방향으로 회전을 하게 된다. 그리고 위상차 -90° 를 주면 반시계 방향으로 회전을 하게 된다. 이는 위상차이에 의해 회전의 방향을 바꿀 수 있다는 것을 알 수 있게 해 주는 현상이다. y 축 회전을 위

해서는 x 축 휨 진동 모드 관련 압전소자 전극에 160V 의 진폭과 30.6kHz 주파수를 갖는 사인파 전압을 인가해준다. 그리고 z 축 중 진동 모드의 압전소자에 같은 진폭과 주파수를 가해주고 위상차를 달리 해주면 회전의 방향이 바뀌게 된다. 위의 x 축 회전과 y 축 회전과 마찬가지로 z 축 회전 또한 같은 원리로 적용하면 된다. 두 개의 휨 진동 모드 관련 압전 소자의 전극에 160V 의 진폭, 그리고 31.3kHz 의 사인파를 가하면 위상차를 90° , -90° 를 회전의 변화를 알아 보았다. x 축 회전에서 12rpm, y 축 회전에서 16rpm, z 축 회전에서 24rpm 정도의 결과가 나왔다. 이러한 결과는 z 축의 중 진동 모드 관련된 압전 소자의 성능과 위치 결정이 이러한 성능평가로 나온 주요인이 되겠다.

회전수의 성능을 높이기 위해서는 진동자 진폭인 $1\mu\text{m}$ 를 10 배 정도의 $10\mu\text{m}$ 정도로 만들어야 한다. 이를 위해서는 기존의 하나의 층만으로 제작된 디스크 모양의 압전 소자 대신 같은 크기의 압전 소자이면서 여러 층으로 적층된 Multilayer piezoelectric ceramics 를 사용하면 진폭 성능을 향상시킬 수 있다. 또한 토크 성능을 향상시키기 위해서 초음파 모터의 직접적인 토크 향상 요인인 마찰력을 높이는 방법을 고안해야 한다. 마찰력은 마찰계수와 수직항력이라는 인자에 의해 크기가 결정이 된다. 회전자와 진동자 사이의 Contact part 부분에 적절한 마찰재를 입혀 마찰계수를 높이는 방법이 있겠다. 또한 수직항력을 크게 할 수 있는 수직항력 증가 메커니즘 디바이스를 외부에 설치하여 수직항력 크기를 높게 할 수 있다.

6. 사각기둥 형태 다자유도 초음파 모터 제안

6.1 구조

기존 란주반 (Langevin) 타입의 다자유도 초음파 모터에 비해 구조가 간단하며 가공이 쉬운 사각 기둥 형태의 다자유도 초음파 모터 개발 초기 단계에 대해서 논의하고자 한다.⁵ 이 다자유도 초음파 모터에서는 두 개의 휨 진동(bending vibration) 모드와 한 개의 중 진동(longitudinal vibration) 모드를 이용할 것이다. 유한요소해석 프로그램인 COMSOL Multiphysics 의 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 비

교할 것이다. 그리고 과도 해석(transient analysis)를 통해 접촉 점 타원 궤적 생성 여부를 확인하도록 한다.

그림 10 은 다자유도 초음파 모터의 구조 및 PZT 의 분극 방향과 PZT 에 가해지는 사인파 전압 신호를 나타내는 그림이다. PZT 는 각각 두께 방향으로 분극되어 있으며 앞에서 살펴 보았던 고유 진동 모드를 가진 시키기 위해서 고유 진동수에 해당하는 주파수를 가진 사인파 전압 신호를 가하면 된다. PZT 의 위치는 각 진동모드에서 가장 큰 변위를 나타내는 곳에 위치시켜 성능 향상을 추구 한다.

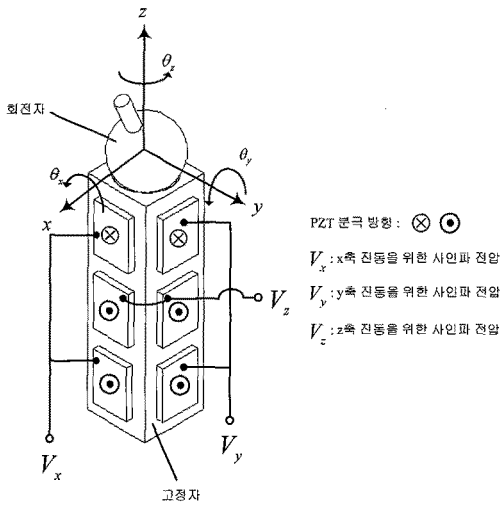


Fig. 11 PZT set polling direction and operated sinusoidal voltage

6.2 유한요소 해석 결과

고유 진동수 해석(Modal analysis)을 통해 이용하고자 하는 진동 모드들의 진동수를 일치시키는 작업을 수행하였다. 진동자의 너비를 10mm 로 고정하고 고정자의 길이나 PZT 의 전체적인 치수를 조정하여 1 개의 진동 모드와 2 개의 진동 모드의 주파수를 일치시켰다. 그림 12 는 1 차 종 진동 모드(1st longitudinal vibration mode)와 2 차 횡 진동 모드(2nd bending vibration mode)의 모습을 나타내고 있다. 고유 진동수 해석 결과 1 차 진동 모드의 주파수는 44.9kHz 이고 2 차 횡 진동 모드의 주파수 44.8kHz 이다. 다자유도 초음파 모터를 실제 구동할 때 가해져야 할 사인파 전압은 위 결과와 일치하는 주파수로 적용해야 한다.

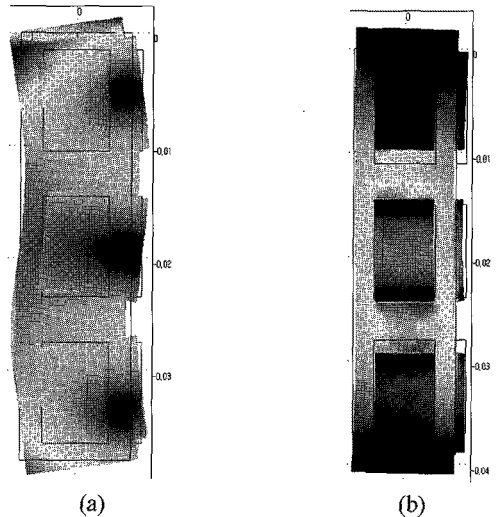


Fig. 12 Modal analysis (a) 2nd bending vibration mode (b) 1st longitudinal vibration

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 가해 주었을 때 나온 결과는 다음과 같다.

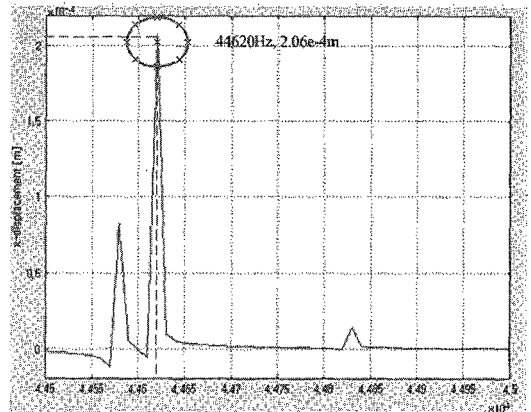
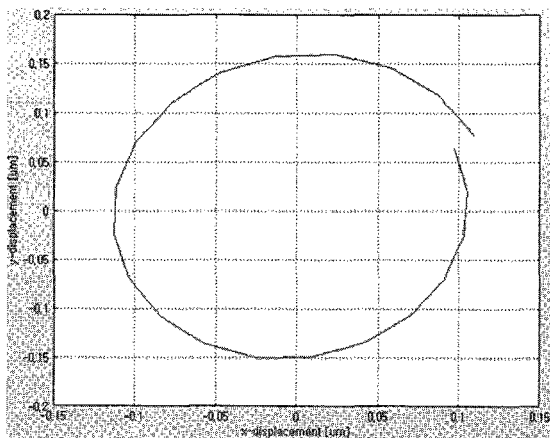


Fig. 13 Results of harmonic analysis (displacement versus frequency)

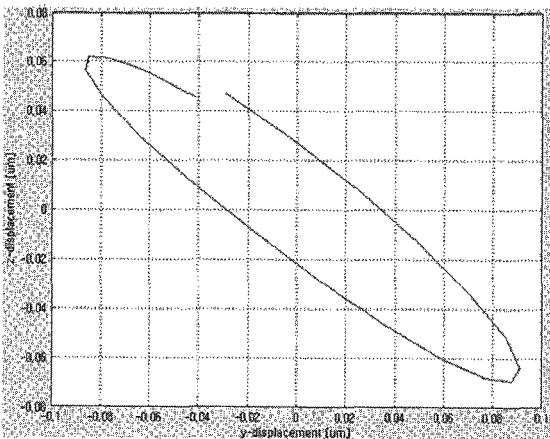
Fig. 13 에서 보면 44620Hz 에서 가장 큰 변위를 보이고 있다. 고유 진동수 해석에 나온 결과값 44.8~44.9Hz 와 비교하면 거의 비슷한 주파수 대역 이라고 볼 수 있다.

다자유도 초음파 모터가 구동할 때에는 진동자 와 회전자의 접촉 점에서 타원 궤적이 생성되어야

한다. 과도해석을 통해 타원 궤적 형성 유무를 판단할 수 있다. PZT 에 가해지는 전압의 진폭은 100V, 주파수는 조화 해석 결과에서 나왔던 44620Hz, 그리고 두 개의 진동모드의 위상차는 90° 로 정하여 가진시킨다. Fig. 14 는 회전자와 진동자 접촉점이라고 예상되는 지점의 x-y 평면에 생기는 타원 궤적, y-z 평면에서 생기는 타원 궤적의 모습을 보여준다. 큰 전압을 가할수록 타원의 장축과 단축은 커지게 되고 위상의 기호를 다르게 하면 타원의 회전 방향 또한 변하게 된다.



(a)



(b)

Fig. 14 Ellipse trajectory by transient analysis (a) x-y plane (b) y-z plane

7. 결론

본 연구에서는 로봇 핸드나 매니플레이터, 그

리고 수술 로봇 시스템과 같이 협소한 환경에서 운동 자유도를 증가시킬 수 있는 다자유도 초음파 모터를 제안하였다. 기존의 회전식 전자기 모터로 로봇 시스템을 구축할 경우 기어의 백래쉬 및 기구의 대형화 같은 문제점이 발생하였다. 이러한 점들을 해결할 수 있는 방법으로서 PZT 를 이용한 단일 진동자로 3 자유도를 구현할 수 있는 초음파 모터를 본 논문에서 제작 실험을 하였다.

실험 결과 기존 연구보다 부품개수를 줄이면서도 x, y, z 축을 기준으로 시계, 반시계 회전이 이루어 졌으며 적절한 속도로 회전하였다. 이번 연구에서 제작한 다자유도 초음파 모터에 회전자와 진동자와의 마찰력 증가를 통한 토크 향상, 기존 PZT 대신 multilayer piezoelectric ceramic 사용으로 인한 변위 증가, 이로 인한 속도 향상 등을 피한다면 로봇 어플리케이션용 액츄에이터로서 성능을 제고 받을 것이다.

그리고 그 밖의 PZT 를 이용한 액츄에이터 모듈로서 란주반 형태 초음파모터보다 가공이 쉬운 사각 기둥 형태의 다자유도 초음파 모터 기초설계와 회전 가능성 시뮬레이션을 수행하였다. PZT 의 역압전 효과를 이용한 여러 가지 응용 모터들은 이번 연구에서 수행한 액츄에이터 모듈 시뮬레이션을 통해 제작한다면 최적의 성능을 발휘할거라 예상이 된다.

참고문헌

1. Amano, T., Ishii, T., Nakamura, K. and Ueha, S., "An Ultrasonic Actuator with Multi-degree of Freedom Using Bending and longitudinal Vibrations of a Single Stator," Proc. IEEE Ultrasonics Symposium, Vol. 1, pp. 979-980, 1998.
2. Ayogi, M., Tomikawa, Y. and Takano, T., "Construction of Multi-Degree-of-Freedom Ultrasonic Motor using Multi-mode Ring-form Vibrator," Proc. 1999 Spring Meeting of the Acoustical Society of Japan, Vol. II, pp. 979-980, 1999.
3. Kurosawa, M., Nakamura, K., Okamoto, T. and Ueha, S., "An Ultrasonic Motor Using Bending Vibrations of a Short Cylinder, IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 36, No. 5, pp. 516-521, 1989.
4. Chang, Z., Sherrit, S., Badescu, M., Bao, X. and Bar-Cohen, Y., "Design and analysis of ultrasonic actuator

- in consideration of length-reduction for a USDC,”
Proc. of SPIE Smart Structures Conference, Vol. 5762,
pp. 72-79, 2005.
5. Chen, Y., Lu, K., Zhou, T., Liu, T. and Lu, C., “Study
of Mini-Ultrasonic Motor with Square Metal Bar and
Piezoelectric Plate Hybrid,” Japanese Journal of
Applied Physics, Vol. 45, No. 5B, pp. 4780-4781,
2006.
 6. Choi, Y. H., Kim, K. H. and Lee, S.-Y., “Design of a
Linear Actuator using Piezoelectric Materials,” Proc.
of the KSPE Autumn Conference, pp. 371-372, 2006.