

압전회전작동기를 이용한 스텝모터에 관한 연구

Research for Step Motor using Piezoelectric Torsional Actuator

김준혁*·정달도**·김재환***

Kim Jun Hyuk, Chung Dal Do and Kim Jae Hwan

Key Words : Piezoelectric Torsional Actuator(압전회전작동기), Shear Mode of Piezoceramic(압전세라믹의 전단모드), One-Way Clutch Bearing(한 방향 클러치 베어링).

ABSTRACT

In this paper, A new type of piezoelectric step motor using piezoelectric torsional actuator and a pair of one-way clutch bearing is designed, manufactured and tested. The torsional actuator consists of 16-polygonal tube that can produce angular displacement using shear mode of piezoceramic. One-way clutch bearing convert oscillation of torsional actuator into continuous rotation. After performance testing of torsional actuator, the optimum condition for driving motor is investigated in terms of wave shape, excitation frequency and electrical field. The performance of the motor is experimentally evaluated. As a result, square wave has larger rotation speed than sin wave, and the maximum rotation speed of 57 rpm is measured at 3850 Hz and 100V/mm

기호설명

- S strain
- d_{15} shear piezoelectric charge coefficient
- E electric field
- l length of the PZT actuator
- r_i radius of the PZT actuator's inscribed circle
- r_o radius of the PZT actuator's circumscribed circle

효율 면에서 아직도 개선해야 할 점을 안고 있다. 본 연구에서는 새로운 구동 방식과 성능 향상을 위해 압전 재료의 전단 모드(shear mode)를 이용한 16 각 튜브형 압전 회전 작동기 제안하고 유한 요소 해석을 통하여 작동기를 설계, 실험을 통하여 성능을 확인하였다. 그리고, 스텝 모터로서의 적용을 위해 한 쌍의 한 방향 클러치 베어링(one-way clutch bearing)을 이용한 모터를 제작하고 성능을 검증하는 실험을 수행하였다.

1. 서론

압전 재료는 지능 재료 중의 하나로 작동 및 감지의 이중 능력을 지니며 빠른 응답성 및 넓은 주파수 대역을 가진다는 장점에 작동기(actuator)로 많이 응용되고 있다.

그 중에서 압전 모터(piezoelectric motor)는 소형화, 빠른 응답성, 정밀한 위치 제어 및 저속에서의 높은 토크를 낼 수 있다는 이점 때문에 관심이 모아지고 있으며^(1,2), 이미 여러 방식의 초음파 모터에 대한 연구가 상당수 진행되었다. 초음파 모터가 가지고 있는 여러 단점들을 개선한 진행파 구동 방식 초음파 모터(travelling wave type ultrasonic motor)도 개발 되었다. 그러나 이 초음파 모터도 진행파를 생성하기 위한 전기회로의 복잡함, 구동력이 되는 고정자(stator)와 회전자(rotor)사이의 마찰력으로 인한 모터 수명,

2. 16 각 튜브형 압전회전작동기 설계

2.1 압전 세라믹의 형상 및 치수

선행된 연구⁽⁶⁾에서는 6 분절로 이루어진 원통형의 압전 회전 작동기를 제작, 성능을 시험하였으나 본 연구에서는 압전 세라믹의 가공도 보다 용이하고, 정확한 각도로 인해 제작도 간편하며 더 많은 분절을 이용하므로 전극간의 거리가 짧아져 같은 전압을 가하더라도 더 큰 전기장이 발생하여 더 큰 변형량을 얻을 수 있도록 작동기를 구성하

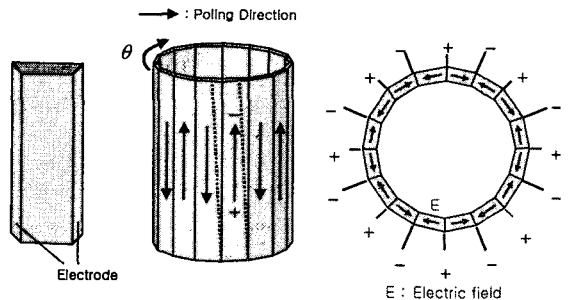


Fig. 1 Configuration of the piezoelectric torsional

* 인하대학교 기계공학과 대학원
E-mail : sunmyuk@hanmail.net
Tel : (032) 872-7925, Fax : (032) 868-1716

** I.H.S

*** 인하대학교 기계공학과

였다. Fig.1 과 같이 사다리꼴 형상을 가진 하나의 분절을 배열하여 16 각으로 이루어진 튜브형 압전 회전 작동기를 설계하였다. 압전 세라믹은 PZT-5A 를 선택하였고 16 각 튜브의 외접원, 내접원의 지름을 각각 22.5mm, 20.1mm 로 디자인 하였으며 이때 압전 세라믹 한 분절의 두께는 1mm 가 된다. 그리고 분극 방향의 길이는 25mm 로 하였다.

이 때 각 분절에서 발생하는 전단 변형은 다음과 같고

$$S_5 = d_{15} \cdot E$$

분절이 튜브형을 이루고 있으므로 이 전단 변형은 아래의 식과 같이 압전 작동기의 회전각 변위인 β 로 직접 변환될 수 있다³⁾.

$$\beta = \frac{l}{(r_i + r_o)/2} \cdot d_{15} \cdot E$$

2.2 유한 요소법을 이용한 작동기 해석

16 분절의 압전 세라믹을 Fig. 1 과 같이 조립한 상태에서 교차하는 분극 방향에 수직의 전기장을 가하면 전단 변형을 일으켜 회전 변위를 얻을 수 있다. 이 회전 변위는 압전 세라믹의 전단 고유 모드에서 최대치를 가지므로 압전 세라믹의 전단 고유 모드를 찾기 위해 상용 유한 요소 해석 프로그램인 ANSYS 를 이용하여 모드 해석을 하였다. 사용된 요소는 SOLID5 로 8 개의 절점을 갖는 3 차원 요소이고 총 요소 수는 320 개, 총 절점 수는 567 개로 구성하였다. 16 각 튜브를 구성하는 압전 세라믹 중 한 분절만을 조립 상태의 경계 조건을

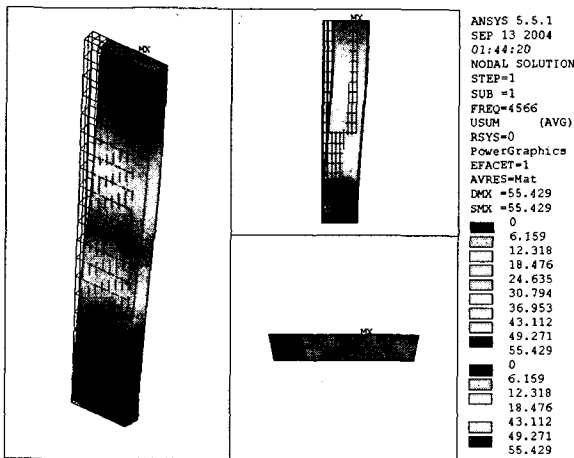


Fig. 2 1st shear mode of PZT segment

적용하여 해석하였다. 아랫면은 3 방향 모두 구속 조건을 주었고 전극면은 튜브의 반경 방향, 즉 한 분절만을 고려했을 때 y 방향으로 구속하였으며 윗면은 연결 봉(connection bar)이 부착되므로 튜브의 접선 방향인 x 방향의 자유도 만 부여하여 해석 하였다. 해석 결과 Fig. 2 와 같이 첫 번째 전단 고유 모드가 4566Hz 에서 발생하였고 22098Hz 에서 두 번째 전단 고유 모드가 나타났다.

3. 스텝모터의 구조 및 작동원리

3.1 스텝모터의 구조

(1) 16 각 튜브형 압전회전작동기의 구조

압전 회전 작동기는 사다리꼴 모양의 압전 세라믹 각각을 분극 방향이 서로 교차되게 배치하여 16 각 튜브형이 되도록 제작하였다. 분극 방향이 교차되게 배열을 하면 이웃하는 두 개 분절의 같은 전극면에 동일한 전기장을 가할 수 있어 제작 면에서 용이하다. 또한 16 분절 모두가 동시에 같은 방향의 전단 변형을 일으킬 수 있다. 분절끼리의 접합은 실버 에폭시(silver epoxy)인 일본 후지쿠라카사이 사의 DOTITE D-500 을 사용하였으며 이때 접합 면은 압전 세라믹의 전극(electrode) 역할을 한다.

(2) 스텝모터의 구조

이러한 구조를 가진 튜브형 압전 회전 작동기는 주파수를 가진 전압이 입력되면 일정 각도의 회전, 역회전의 진동 형태의 변형을 반복할 뿐 연속적인 회전 운동을 일으키지는 못한다. 따라서 모터로서의 기능을 갖추기 위해 Fig.3 과 같이 압

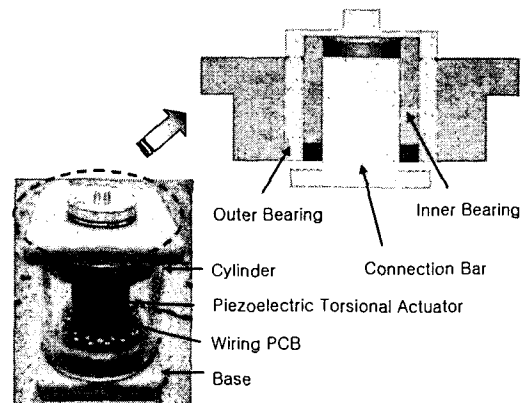


Fig. 3 Schematic diagram of step motor

전 회전 작동기에 연결 봉을 부착하고 한 쌍의 한 방향 클러치 베어링(one-way clutch bearing)을 서로 역방향으로 장착하여 연결 봉으로 전달된 작동기의 진동 운동을 연속적인 회전 운동으로 전환되도록 모터를 구성하였다. 모터의 크기는 가로, 세로 50mm 이고 높이가 65mm 이다.

3.2 작동원리

장착된 한 쌍의 한 방향 클러치 베어링의 작동 원리는 Fig. 4 와 같다. 압전 회전 작동기에서 일어난 정·역회전의 운동은 연결 봉에 의해 내측 베어링에 전달된다. 외측 베어링은 지지대에 항상 고정 상태며 작동기가 반시계 방향(CCW)으로 회전 시 연결 봉과 내측 베어링은 고정 상태로 일체의 운동을 하고, 이때 내측과 외측 베어링은 미끄럼 상태가 된다(Fig.4 (a)). 다음 단계로 작동기가 시계 방향(CW)으로 회전 시 연결 봉과 내측 베어링은 미끄럼 상태가 되어 연결 봉만 원위치로 돌아오게 된다. 이때에는 내측과 외측 베어링이 고정 상태로 외측 베어링이 내측 베어링의 역회전을 방지하는 역할을 하는 것이다(Fig.4 (b)). 이러한 과정이 연속적으로 반복되면서 압전 회전 작동기에서 일어나는 미소각 변위의 스텝 운동이 한 쌍의 한 방향 클러치 베어링을 통해 축적되면서 연속적인 회전 운동으로 변화하게 되는 것이다.

4. 스텝모터의 성능 평가

4.1 압전 회전 작동기의 변위 측정

모터의 성능 평가 전에 압전 회전 작동기가 순수한 회전각 변위를 내는지 알아보기 위해 압전 회전 작동기만을 측정해 보았다. 16 각 튜브형 작동기를 베이스에 고정시키고 작동기 윗면에 연결 봉을 부착하였다. 연결 봉 위에 반사경을 부착하고 Keyence LC-2400A, LC-2430(head) 레이저 변위 센서를 이용하여 반사경의 왼쪽 끝단, 중심 그리고 오른쪽 끝단을 측정하여 이를 회전각으로 환산하는 실험을 수행하였다.

Agilent 33220A 함수 발생기에서 -5V~5V의 정현파(sine wave)와 구형파(square wave)를 발생시켜 Trek 50/750 고전압 증폭기에서 80 배 증폭하여 -400V~400V 가진 하였다. Fig. 5의 결과로부터 반사경의 끝단에서 최대의 변위가 발생하고, 중심에서는 변위가 거의 일어나지 않는 것으로 보아 작동기에서 순수한 회전각 변위가 발생하는 것을 알 수 있다. 이때 회전각은 반사경의

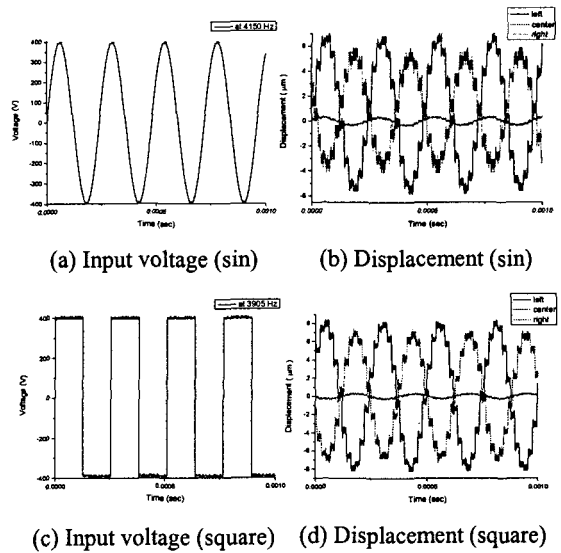


Fig. 5 Input voltage and output displacement

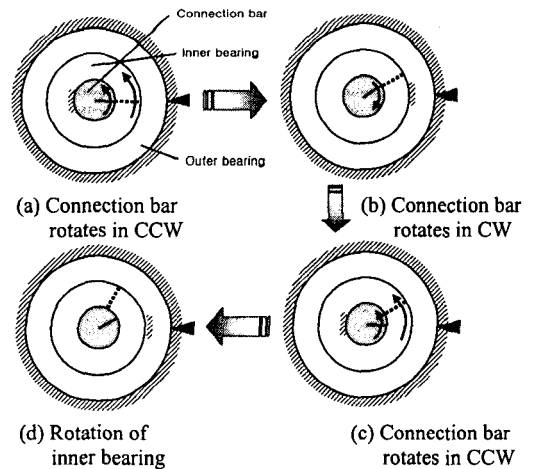


Fig. 6 Operation principle of step motor

중심에서부터 측정 지점까지의 거리 및 레이저 변위 센서의 환산 계수로부터 구할 수 있다. 최대 변위가 발생하는 주파수는 정현파가 4150 Hz, 구형파가 3905 Hz로 두 파형의 특성으로 인해 약간의 차이를 보이고, 두 주파수 모두 해석 결과인 4566 Hz와 비슷한 주파수 대역임을 알 수 있다. 그러나 이 결과와 해석 결과와의 차이는 변위 측정을 위해 부착된 연결 봉과 반사경으로 인해 전

단 모드의 공진 주파수가 낮아졌기 때문에 생각 된다.

가진 시, 발생하는 변위는 레이저 변위 센서에서 5 μm 당 1V 가 발생하도록 설정하였으며 정현파의 경우 2.8 V 로 14 μm , 이것을 회전각으로 환산하면 약 0.08° 이고 구형파는 3.28V 로 16.4 μm , 회전각으로는 약 0.095° 가 된다. 정현파보다 구형파 가진 시 더 큰 변위가 나오는 것을 알 수 있는데 이는 두 파형을 rms 전압으로 보았을 때 구형파와 정현파가 갖는 에너지 차이 때문이라 판단 된다⁽⁴⁾.

4.2 스텝 모터의 성능 평가

제작된 모터의 성능 평가를 위해 회전자의 한 부분에 반사판을 붙이고 레이저 센서를 이용해 회전 시 검출되는 펄스의 개수를 이용해 rpm 을 측정하였다. 10Hz 부터 10kHz 까지 주파수 스위핑 (sweeping)을 하며 최대 회전수가 나오는 주파수 대역을 확인하였다.

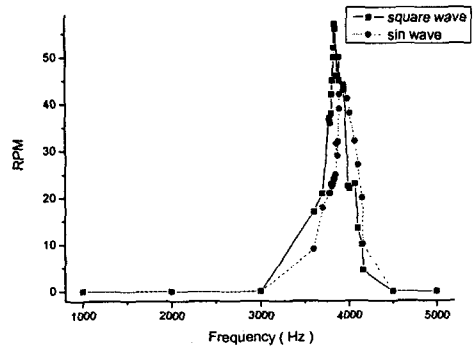
그 결과 Fig. 6 의 (a)와 같이 최대 분당 회전수는 정현파가 3950Hz 부근에서 약 44rpm, 구형파의 경우는 3850Hz 부근에서 약 57rpm 으로 확인되었고 그 이외의 주파수 대역에서는 회전이 거의 발생하지 않았다. 모터 제작 후 베어링으로 인한 질량 증가로 앞서 해석 결과인 4566Hz, 작동기만의 측정시 최대 변위가 나왔던 4150Hz, 3905Hz 보다 주파수 대역이 감소한 것으로 판단 된다.

Fig. 6 의 (b)는 입력 전기장에 대한 분당 회전수를 나타내며 (a)의 그래프에서 최대 rpm 이 나오는 주파수를 기준으로 실험하였다. 그 결과 입력 전기장이 증가함에 따라 모터의 회전수가 증가함을 잘 알 수 있다. 이는 압전 재료의 변형량이 전기장에 대해 선형적이라는 것을 잘 나타내고 있는 것이다. 또한 정현파보다 구형파의 가진이 모터 성능 향상에 도움이 됨을 알 수 있다.

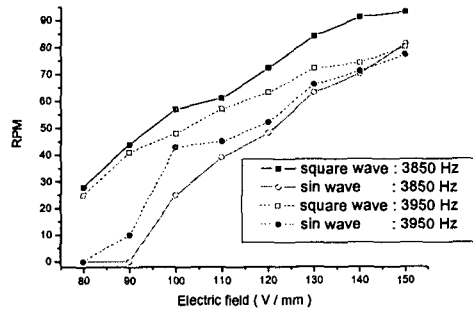
5. 결론

본 논문에서는 압전 회전 작동기를 설계, 제작 성능을 검증하고 한방향 클러치 베어링을 이용하여 모터를 제작하고 성능을 평가하였다. 전단 모드의 공진 주파수를 이용한다는 가정에 실제 가진 주파수와 해석 결과도 거의 일치하며, 모터의 회전속도 제어도 입력 전기장의 변화로 가능하다는 것을 보여준다. 향후 스텝 모터의 분해능, 속도

조절, 토크에 대한 성능을 향상 시킬 수 있는 연구를 수행 할 계획이다.



(a) RPM versus excitation frequency (electric field : 100V/mm)



(b) RPM versus electric field

Fig. 6 Measurement of RPM w.r.t frequency & electric field

참고 문헌

- (1) K. Uchino, 1997, Piezoelectric Actuators and Ultrasonic Motors, Kluwer Academic, Boston ; Dordrecht ; London.
- (2) S. Ueha and Y. Tomikawa, 1993, Ultrasonic Motors : Theory and Application, Clarendon Press
- (3) C. Kim, T. Jessen and Q. M. Zhang, 1997, Composite Piezoelectric Assemblies for Torsional Actuators, Progress report, Naval Research Laboratory.
- (4) W. Xu and T. G. King, 1996, A New Type of Piezoelectric Motor using A Roller Clutch Mechanism, Mechatronics, Vol. 6, pp. 303~315
- (5) A. E. Glazounov, S. Wang, Q. M. Zhang and C. Kim, 1999, High-Efficiency Piezoelectric Motor Combining Continuous Rotation with Precise Control over Angular Positioning, Appl. Phys. Lett., Vol. 75, No. 6
- (6) Jaehwan Kim and Byungwoo Kang, 2001, Performance Test and Improvement of Piezoelectric Torsional Actuators, Smart mater. Struct., Vol. 10, pp. 750~757