

압전회전작동기를 이용한 스텝모터에 관한 연구

Research for Stepping Motor Using Piezoelectric Torsional Actuator

김 준 혁* · 김 재 환† · 정 달 도**

Jun Hyuk Kim, Jaehwan Kim and Dal Do Chung

(2005년 2월 21일 접수 : 2005년 3월 23일 심사완료)

Key Words : Piezoelectric Stepping Motor(압전스텝모터), Piezoelectric Torsional Actuator(압전회전작동기), Piezoelectric Shear Mode(압전전단모드), One-way Clutch Bearing(일방향 클러치 베어링)

ABSTRACT

In this paper, a new type of piezoelectric stepping motor is designed, manufactured and tested. This motor is composed of piezoelectric torsional actuator and a pair of one-way clutch bearings. The torsional actuator consists of 16-polygonal tube of piezoceramic that can produce an angular displacement associated with shear mode. One-way clutch bearing converts oscillation of torsional actuator into a continuous stepping rotation. The proposed stepping motor does not require any conversion mechanism for stepping motion like any other motors. In the design process, the shear resonance mode of piezoelectric actuator is analyzed by using a commercial finite element analysis program, and the performance of the fabricated torsional actuator is measured. 0.124° of maximum angular displacement is measured in square wave excitation on the actuator only. The stepping motor is manufactured by assembling a pair of one-way clutch bearings and the torsional actuator. The maximum rotation speed of 72 rpm and the blocking torque of 3,136 mNm are measured at 3540 Hz and 100 V/mm. Once the proposed piezoelectric stepping motor is miniaturized, it can be used for many compact and precise moving applications.

기 호 설 명

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

1. 서 론

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 개발되었다. 그러나 이 초음파 모터도 진행파를 생성하기 위한 전기회로의 복잡함, 구동력이 되는 고정자

† 책임저자 : 정희원, 인하대학교 기계공학과
Email : jaehwan@inha.ac.kr
Tel : (032) 860-7326, Fax : (032) 868-1716

* 정희원, 인하대학교 대학원 기계공학과

** I.H.S.

(stator)와 회전자(rotor) 사이의 마찰력으로 인한 모터 수명, 효율 면에서 아직도 개선해야 할 점을 안고 있다.

이 연구에서는 새로운 구동 방식과 성능 향상을 위해 압전 재료의 전단 모드(shear mode)를 이용한 16각 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.

2. 16각 튜브형 압전회전작동기 설계

2.1 압전 세라믹의 형상 및 치수

선행된 연구⁽³⁾에서는 6분절로 이루어진 원통형의 압전 회전 작동기를 제작, 성능을 시험하였으나 이 연구에서는 평판형 압전재료를 사용함으로써 압전 세라믹의 가공이 용이하고, 정확도가 높으며 전극간의 거리를 줄여 인가전압을 낮출 수 있도록 하였다. Fig. 1은 이 연구에서 제안한 압전 회전 작동기를 나타내고 있다. 사다리꼴 형상을 가진 하나의 분절을 배열하여 16각으로 이루어진 튜브형 압전 회전 작동기를 설계하였다. 16각의 압전 세라믹을 사용한 이유는 평판형 압전재료를 사용하여 회전변위가 나오는 것을 보이기 위한 시도이고, 실용화 단계에서는 분절의 수를 늘임으로써 인가전압을 낮출 수 있다. 압전 세라믹은 PZT-5A를 선택하였고 16각 튜브의 외접원, 내접원의 지름을 각각 22.5 mm, 20.1 mm로 디자인 하였으며 압전 세라믹 한 분절의 두께는 1 mm이고 분극 방향의 길이는 25 mm로 하였다. 각 분절에서 발생하는 전단 변형은 다음과 같다.

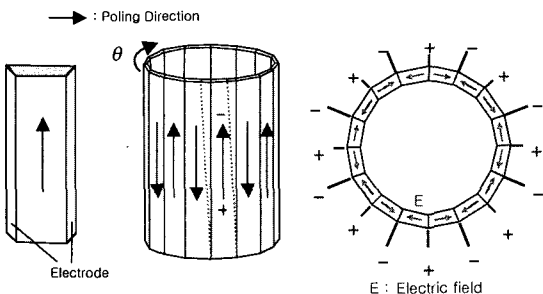


Fig. 1 Configuration of the piezoelectric torsional actuator

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

여기서 d_{15} 는 전단압전상수 이고 E 는 전기장을 나타낸다. 분절이 튜브형을 이루고 있으므로 이 전단 변형은 아래의 식과 같이 압전 작동기의 회전각 변위인 β 로 직접 변환될 수 있다.⁽³⁾

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

2.2 유한 요소법을 이용한 작동기 해석

16분절의 압전 세라믹을 Fig. 1과 같이 조립한 상태에서 교차하는 분극 방향에 직각으로 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 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 모드 해석을 하였다. 사용된 요소는 SOLID5 로 8개의 절점을 갖는 3차원 요소이고 총 요소 수는 320개, 총 절점 수는 567개로 구성하였다. 16각 튜브를 구성하는 압전 세라믹 중 한 분절만을 조립 상태의 경계 조건을 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 해석하였다. 해석 결과 Fig. 2와 같이 첫 번째 전단 고유 모드가 4,566 Hz에서 발생하였고 22,098 Hz에서 두 번째 전단 고유 모드가 나타났다.

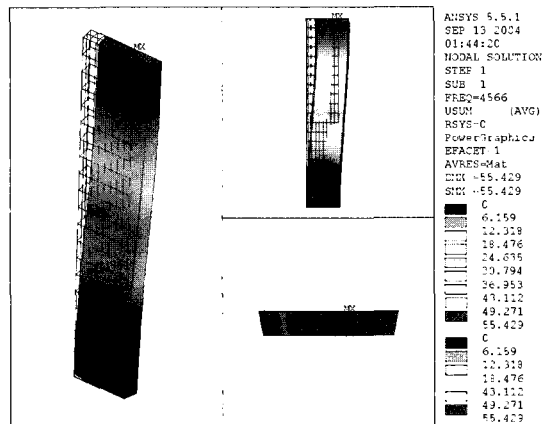


Fig. 2 1st shear mode of PZT segment

3. 스텝모터의 구조 및 작동원리

3.1 스텝모터의 구조

(1) 16각 튜브형 압전회전작동기의 구조

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

(2) 스텝모터의 구조

이러한 구조를 가진 튜브형 압전 회전 작동기는 주 파수를 가진 전압이 입력되면 일정 각도의 회전, 역

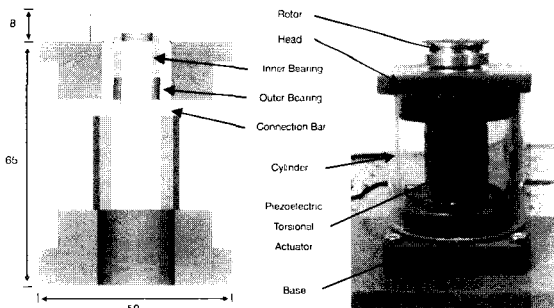


Fig. 3 Construction of piezoelectric step motor

회전의 진동 형태의 변형을 반복할 뿐 연속적인 회전 운동을 일으키지는 못한다. 따라서 모터로서의 기능을 갖추기 위해 Fig. 3과 같이 압전 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 50 mm이고 높이가 65 mm이다.

3.2 작동원리

장착된 한 쌍의 한 방향 클러치 베어링의 작동원리는 Fig. 4와 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.

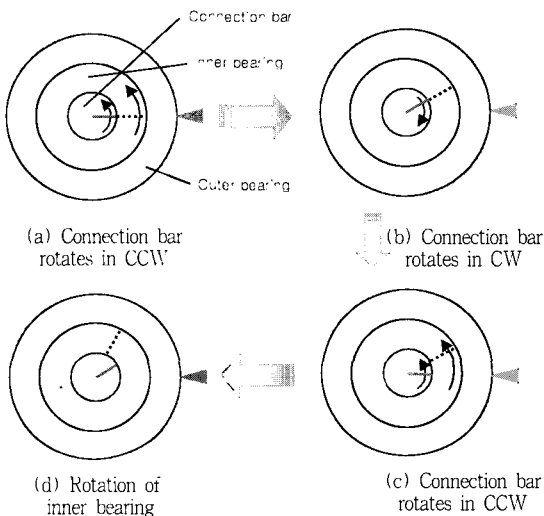


Fig. 4 Operation principle of step motor

4. 스텝 모터의 성능 평가

4.1 압전 회전 작동기의 성능 평가

모터의 성능 평가 전에 압전 회전 작동기가 제대로 작동하는지를 검증하기 위해 압전 회전작동기만의 회전각 변위를 측정해 보았다. 측정에 앞서 압전 세라믹의 유한 요소 해석 결과로 얻은 전단 모드 공진 주파수를 실험적으로 찾기 위해 Fig. 5와 같이 HP4192A 임피던스 분석기(impedance analyzer)로 세 단계별로 어드미턴스(admittance)를 측정하였다. 압전 재료 단일 분절의 경우, 16개의 분절을 조립하여 완성된 작동기를 베이스에 고정시킨 경우, 작동기 윗면에 연결봉을 부착한 경우에 대한 각각의 측정 결과를 나타내었다.

Fig. 6의 결과로부터 알 수 있듯이 각각의 PZT분절의 경우 54~55 kHz 사이의 값에서 전단 모드 공진 주파수가 측정되었다. 16개의 분절들을 튜브 형으로 조립한 후 베이스에 고정했을 경우에는 9180 Hz에서 첫 번째 전단 모드 공진 주파수가 측정되었으며 이 값은 유한 요소 해석으로 얻은 4566 Hz와 많은 차이를 보였다. 유한 요소해석에서 작동기 윗면에 연결봉을 부착한 경계 조건을 적용한 것처럼 제작된 16각 튜브형 압전 회전 작동기에 연결 봉을 부착한 후 다시 어드미턴스를 측정한 결과 4790 Hz에서 전단 모드 공진 주파수가 측정되었다. 실제 제작과정에 따라 경계 조건이 변화되면서 점점 공진 주파수가 낮아져 해석 결과와 비슷한 주파수를 갖게 됨을 알 수 있다. 따라서 압전 회전 작동기의 전단 모드 공진 주파수는 해석 결과와 어드미턴스 측정으로부터 4000 Hz~5000 Hz 사이에 존재함을 확인 할 수 있었고 실제 작

동기만의 공진 주파수를 찾기 위해 작동기 성능을 실험하였다.

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 -5 V~5 V의 사인파(sine wave)와 사각파(square wave)를 발생시켜 Trek 50/750 고전압 증폭기에서 80배 증폭하여 -400 V~400 V의 전압을 인가하였다. 최대 변위가 나오는 주파수를 찾기 위해 HP35665A 동적 신호 분석기(dynamic signal analyzer)로 주파수 분석을 수행한 결과 사각파의 경우 3540 Hz에서, 사인파의 경우 3600 Hz에서 가장 큰 변위가 발생함을 알 수 있었다.

실제 최대 회전각 변위가 나오는 주파수는 유한 요소 해석 결과인 4566 Hz와 어드미턴스 측정값인 4790 Hz와 차이가 있는데 이는 레이저 센서로 변위 측정을 위해 작동기 상단에 부착된 반사경, 그리고 어드미턴스 측정 시 입력되는 전압은 1.1 V인데 실제 가해지는 전압은 800 V이다. 이러한 영향들로 인해 어드미턴스 측정값과 실제 변위 측정값에서 주파수의 차이를 보이는 것으로 판단된다.

주파수 분석을 통해 나온 각각의 주파수로 가진한 후 나오는 회전각을 측정해 보았다. 가진 시, 발생하는 변위는 레이저 변위 센서에서 $5\mu\text{m}$ 당 1V가 발생하도록 설정하였으며 이 때 회전각은 반사경의 중심에서부터 측정 지점까지의 거리 및 레이저 변위 센서의 환산 계수로부터 구할 수 있다. Fig. 7의 결과와 같이 사인파의 경우 3.8 V가 나오므로 $19\mu\text{m}$ 의 변위가 반사경의 끝 단에서 발생하고 있음을 알 수 있고, 회전각으로 환산하면 약 0.109° 가 되고 사각파의 경우는 약 4.32 V가 나오므로 $21.6\mu\text{m}$ 의 변위가 발생하였으며 이 값을 환산하면 약 0.124° 의 최대 회전각 변위가 발생함을 알 수 있었다. 사인파, 사각파의 두 경우 모두 반사경 양 끝 단의 변위가 최대를 보이고 있고 중심부의 변위는 거의 발생하지 않으므로 본 압전 회전 작동기가 순수 회전각 변위를 발생하고 있음을 확인 할 수 있었다. 또 두 가진 주파수가 미세한 차이는 보이지만, 사각파의 경우 더 큰 변위가 발생하는 것을 알 수 있는데 이는 두 파형의 전압값을 실효치(rms) 전압으로 보았을 때 사각파와 사인파가 갖는 에너지 차이 때문이라 판단된다.⁽⁴⁾

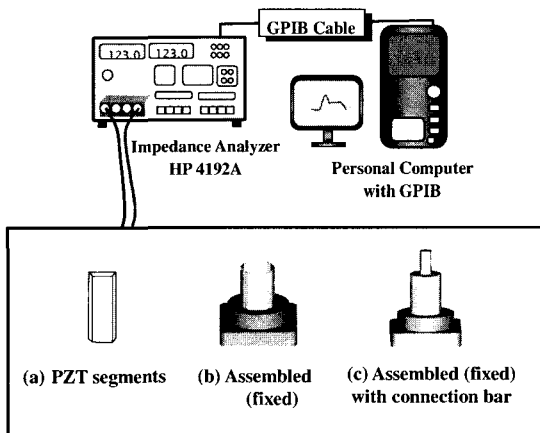


Fig. 5 Experimental apparatus for admittance measurement

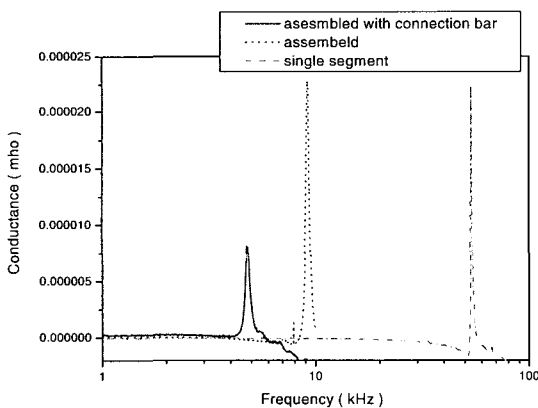


Fig. 6 Comparison of admittance w.r.t each step

4.2 스텝 모터의 성능 평가

제작된 모터의 성능 평가를 위해 회전자의 한 부분에 반사판을 붙이고 레이저 센서를 이용해 회전시 검출되는 펄스의 개수를 이용해 rpm을 측정하였다. 10 Hz부터 10 kHz까지 주파수 스위핑(sweeping)을 하며 최대 회전수가 나오는 주파수 대역을 확인하였다.

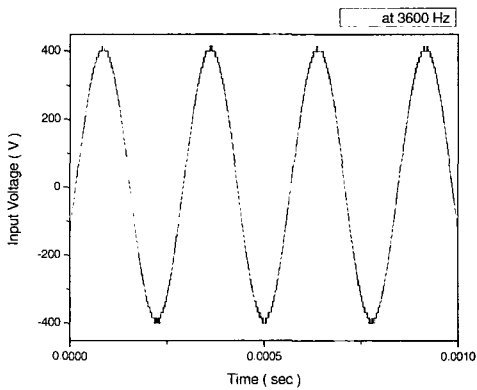
그 결과 Fig. 8의 (a)와 같이 100 V/mm의 입력 전기장 하에 최대 분당 회전수는 사각파가 3540 Hz에서 약 72 rpm, 사인파의 경우는 3700 Hz 부근에서 약 60 rpm으로 측정되었다. 그 이외에도 사각파의 경우는 1250 Hz에서 미세한 움직임 보여 약 5 rpm의 회전수와 5000 Hz의 주파수 대역에서도 10 rpm을 웃도는 회전수를 보였다. 그러나 사인파의 경우는 최대치가 나왔던 3700 Hz 부근을 제외하고는 회전이 거의 발생하지 않았다. 이는 사각파의 경우가 확실히 사인파보다는 압전 회전 작동기에 발생하는 변위를 축적할 수 있는 능력이 좀 더 앞선다는 것을 알

수 있다.

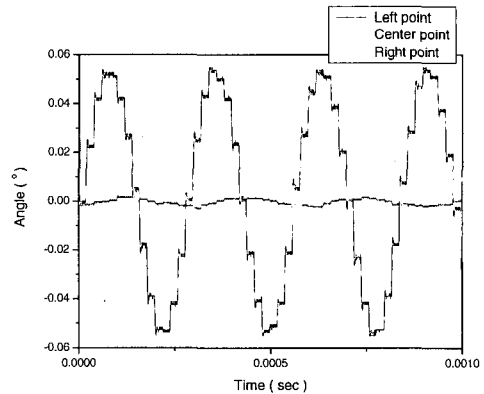
사각파는 최대 회전수가 나오는 구동 주파수가 3540 Hz로 압전 작동기만의 변위 측정 주파수와 일치하지만, 사인파는 3700 Hz로 3600 Hz보다 100 Hz 증가한 값에서 더 큰 회전수를 보였다. 이는 베어링의 장착 등으로 인해 주파수의 변화가 있음을 알 수 있다.

Fig. 8의 (b)는 입력 전기장에 대한 분당 회전수를 나타내며 (a)의 그래프에서 최대 rpm이 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 사인파보다 사각파의 가진이 모터 성능 향상에 도움이 됨을 알 수 있다.

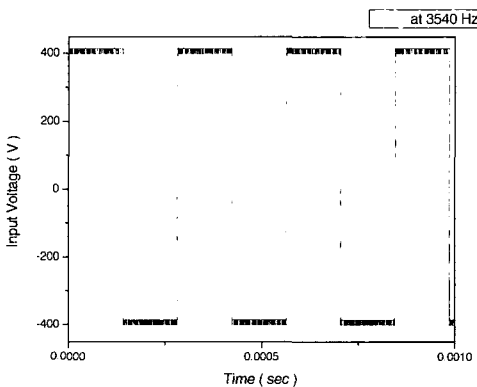
회전 속도는 부하가 걸리지 않은 상태에서의 측정 한 값이기 때문에, 모터의 토크(torque) 특성을 평가해 보았다. 실험 조건은 100 V/mm의 전기장하에 사



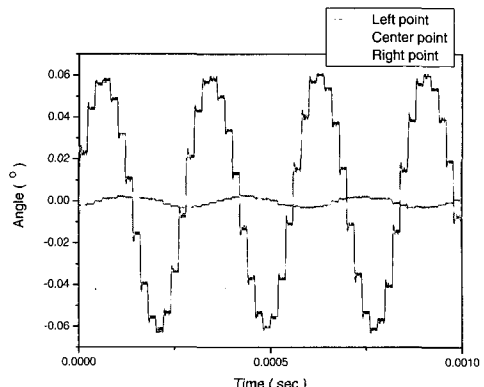
(a) Input voltage (sin)



(b) Displacement (sin)

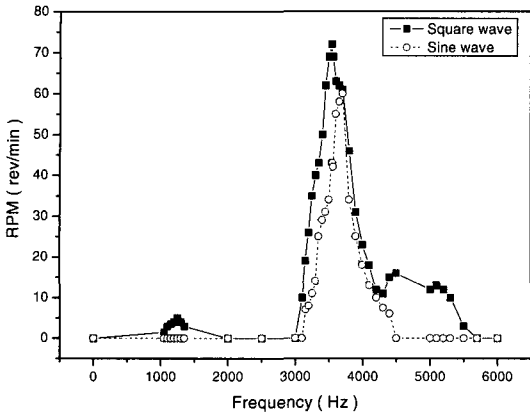


(c) Input voltage (square)

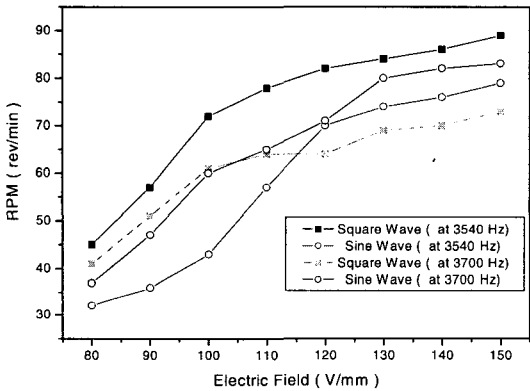


(d) Displacement (square)

Fig. 7 Input voltage and output displacement



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



(b) RPM versus electric field

Fig. 8 Measurement of RPM w.r.t frequency & electric field

각과 가진으로 가장 좋은 회전 속도가 발생했던 3540 Hz의 주파수로 가진 하였다. Fig. 9는 회전 속도에 대한 토크 특성을 나타낸 것으로, 스텝 모터의 최대 블로킹 토크(blocking torque)가 3.136 mNm로 측정되었으며 최대 토크는 회전 속도가 증가할수록 점점 감소되는 값을 가짐을 알 수 있었다.

5. 구동 회로의 개발

5.1 스텝 전용 구동 회로의 개발

압전 스텝 모터의 회전 수 측정 및 토크 특성에 관한 성능 평가 과정을 통하여 압전 스텝 모터의 실제 응용 분야에 적용 가능성을 확인하였다. 이를 위해서 스텝 모터 구동을 위한 시스템의 간편화를 위해 Fig. 10과 같이 함수 발생기와 전압 증폭기의 역할을

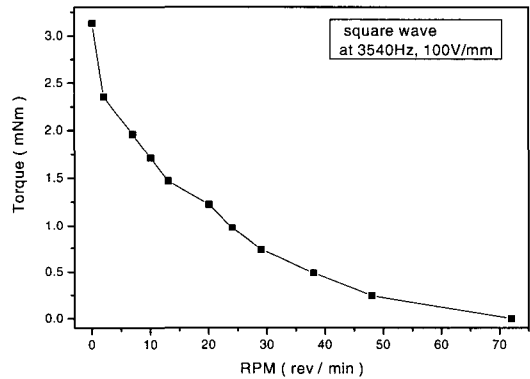


Fig. 9 Relation between RPM and torque

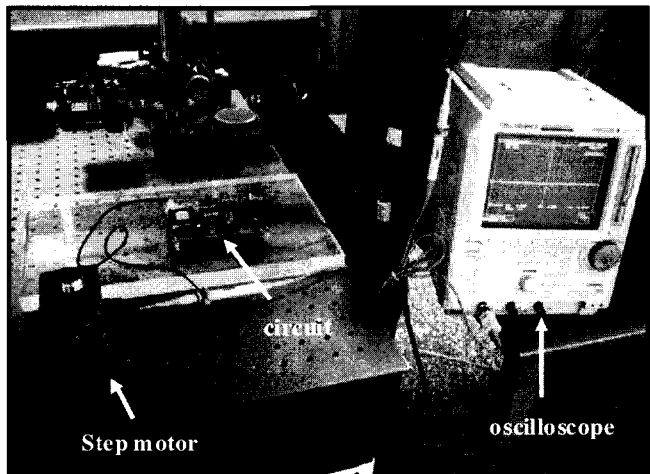
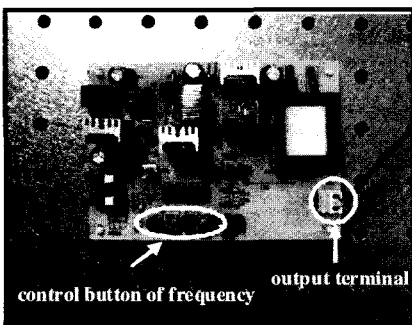


Fig. 10 Driving circuit & experimental setup

대신할 압전 스텝 모터 전용 구동 회로를 개발하였다. 개발한 구동 회로 역시 실험에서 사용되었던 것처럼 -400 V ~ 400 V의 전압을 갖는 사각파형이 발생하도록 제작하였으며, 가진 주파수는 스텝 모터에 맞는 주파수 가진을 할 수 있도록 회로에 설치된 가변 저항을 이용하여 주파수 조절을 가능하도록 제작 하였다.

5.2 구동 회로를 이용한 스텝 모터의 성능 평가

제작된 구동 회로를 이용하면 간단히 모터의 구동을 할 수 있다. Fig. 10과 같이 압전 스텝 모터에 직접 구동 회로의 출력 단을 연결하고, 구동 회로에서 발생하는 주파수의 파형과 조절을 위해 오실로스코프를 사용하였다. 구동 회로를 통해 가진 되는 전압의 주파수를 이전 실험에서 최대의 성능을 보였던 3540 Hz로 세팅을 하고 레이저 센서를 이용해 회전 시 검출되는 펄스의 개수를 이용해 분당 회전 수를 다시 측정하였다.

그 결과 구동 회로에서 100 V/mm, 3540 Hz 전기장 가진 시 77 rpm의 분당 회전 수가 측정 되었다. 이는 전에 측정된 72 rpm과 비슷한 값으로 구동 회로를 이용하여 가진 시에도 모터가 성능을 잘 발휘할 수 있음이 확인되었다.

6. 결 론

이 논문에서는 16각 튜브 형 압전 회전 작동기와 한 쌍의 한 방향 클러치 베어링을 이용한 압전 스텝 모터를 설계, 제작하고 성능을 평가하였다.

압전 세라믹의 전단 모드 공진 주파수를 이용하여 모터를 구동한다는 개념으로 접근하여 압전 회전 작동기를 설계하기 위하여 ANSYS를 이용한 유한 요소 해석을 수행하였으며 같은 전압을 가하더라도 보다 높은 전기장을 얻기 위해 한 분절의 압전 세라믹을 크기도 줄이고 사다리꼴 형태로 제작하였다. 이 압전 세라믹들을 배열하여 16각 튜브 형 압전 회전 작동기를 제작하고 성능을 평가하였다.

또한 스텝 모터로서의 적용을 위해 한 쌍의 클러치 베어링을 역방향으로 장착하여 모터의 성능 평가를 수행하였다. 보다 큰 에너지를 같은 사각파의 가진에

서 사인파보다 더 좋은 모터의 성능이 나옴도 확인하였다. 스텝 모터는 3540 Hz의 주파수를 갖는 100 V/mm의 전기장 가진에서 최대 분당 회전수 72 rpm을 가지며 최대 블로킹 토크도 3.136 mNm로 측정되었다.

이 연구에서 설계하고 제작한 압전 회전 작동기를 이용한 스텝 모터는 구동 방식과 구조가 간단하다는 장점과 작동기의 전단 모드의 변형으로 축적된 스텝 운동이 연속적인 회전 운동으로 변환됨으로써 정밀한 분해능을 갖는 정밀 스텝 모터로서의 적용도 가능하다는 것을 보여 주고 있다.

앞으로 스텝 모터가 가청 주파수 대역에서 구동함으로써 발생하는 소음의 저감과 더욱 정밀한 클러치 베어링을 이용한 분해능, 정확한 속도 제어, 토크 성능 등에 관한 연구를 수행하여 압전 스텝 모터의 성능을 보다 향상 시킬 수 있음을 보여야 할 것이다.

참 고 문 헌

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