

자벌레형 정밀 회전 모터의 개발

Development of a Inchworm-Type Precise Rotational Motor

김상채, 김수현, 곽윤근 (한국과학기술원)

Sang-Chae Kim, Soo-Hyun Kim, Yoon-Keun Kwak (KAIST)

ABSTRACT

A new type of rotational motor which is developed has a resolution smaller than 10^{-4} radian and can be accessed for full rotational angles. The operation principle of the motor is based on inchworm motion of two belt driving mechanism. Flexure hinge mechanism, which is pertinent to symmetry construction of the motor, is designed to minimize the effort to frame and is analyzed by using finite element method. Depending on input signal amplitude, rotational angle by one cycle is varied from 0.2×10^{-4} rad to 9.76×10^{-4} rad. This shows that it has the capability of getting very small rotational angle by considering radius of rotor and amplitude of input signal.

Key Words : Inchworm-Type Motor(자벌레형 모터), Flexure Hinge Mechanism(탄성관절 메커니즘), Rotational Step Motor(회전 스텝모터), Piezoelectric Actuator(압전 액추에이터), Belt-Driving Mechanism(벨트구동 메커니즘)

1. 서 론

반도체 장비, 광학기기 등에서 고정도화로의 진전은 정밀도의 한계를 의심하게 하고, 이러한 요구는 기반요소기술 및 장치의 연구, 개발을 수반하게 한다. 특히 압전소자를 이용한 액추에이터는 위치결정기구, 반도체 제조장치, 주사전자현미경(STM) 등에 사용이 증대되고 있다. 이는 기존의 전기, 유압식 등의 액추에이터와 차별화 되는 소형화, 고정밀도의 구동 분해능을 가지는 잇점 때문이다. 1980년대 후반에 시작된 압전소자를 이용한 다양한 형태와 구동방식의 모터 개발은 고정밀도 장치의 성능향상에 많은 기여를 하고 있다.

일반적으로 산업현장에서 사용되는 DC 스텝모터는 고분해능이 필수록 가격이 높아지고 크기가 커

지는 단점이 있다. 이러한 이유로 압전소자를 사용한 직선, 회전형 모터 개발에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이중에 자벌레의 이동을 본받은 형태의 모터는 10^{-4} rad 이하의 고분해능의 스텝 이동과 이를 누적함으로써 광범위한 영역의 이동이 가능한 장점으로 주요 연구대상이 되고 있다. 기존에 개발된 자벌레형 회전모터는 회전운동 생성 방식과 형태에 따라 구별된다. 압전소자와 연결된 판들의 운동조합으로 회전변위를 발생시키는 방식[1-3], 롤러클러치 방식[4], 그리고 비틀림 압전소자(torsional PZT)를 조합한 방식[5]과 스프링 복원력 이용 방식[6] 등으로 나눌 수 있다. 이상의 모터에서 제기되는 문제점으로는 조립할 때 고정자(stator)와 회전자(rotor) 사이의 수 μm 의 간극조절[1-3,6]의 어려움과 회전범위의 제한[1,4]을 들 수 있다.

이상의 문제점을 고려한 2쌍의 벨트 구동 메커니즘을 조합한 새로운 형태의 자벌레형 회전모터를 개발, 제작하고자 한다. 본 형태의 모터는 회전자의 반경을 크게 할수록 단위 사이클 당 회전각이 매우 작아진다. 하지만 본 연구에서는 구동특성을 살펴보기 위해 전회전 영역에서 10^{-4} rad 이하의 고정밀도 회전운동을 발생시킬 수 있도록 설계한다. 또한 조립상의 문제를 최소화하기 위해 회전모터에 적합한 탄성관절 확대기구를 설계하여 압전소자와 벨트를 연결하고, 이에 대한 유한요소해석을 병행한다. 마지막으로 모터의 동특성을 조사하기 위한 기본적인 실험을 수행한다.

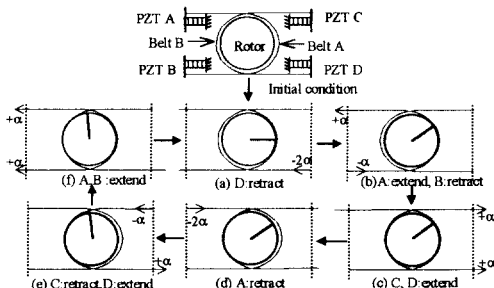


Fig. 1 자벌레형 회전모터의 구동원리

2. 동작원리 및 구조설계

고정밀도의 회전변위 발생이 가능한 회전모터의 구동원리는 두 쌍의 벨트 구동 메커니즘의 순차적인 자벌레 운동으로 회전자를 구동시키며, 과정은 Fig.1로 표현하였다. 벨트 구동메커니즘은 (압전소자 A-벨트 A-압전소자 B)와 (압전소자 C-벨트 B-압전소자 D)로 연결하여 각각 구성된다. 초기상태에서 압전소자 A, B를 동일한 길이(α)만큼 신장하여 벨트 A를 회전자에 밀착시킨 후 (b)와 같이 압전소자 A, B를 신장, 복귀시킴으로써 밀착된 벨트와 함께 회전자가 회전하게 된다. 이때 회전자의 회전량은 식 (1)과 같다.

$$\theta = \alpha/r \quad (r: \text{회전자의 반경}) \quad (1)$$

회전 후 압전소자 C, D를 동일한 길이(α)만큼 신장하여 회전자를 클램핑(clamping)시킴으로써 압전소자 A가 복귀할 때 회전자의 움직임을 방지한다(d). 이때 신장시킨 압전소자 C, D를 복귀, 신장시켜 (e)처럼 회전자를 회전시킨다. 이후 (c), (d)와 마찬가지로 (f), (a)의 과정을 수행한다. 이와 같이 한 사이클의 구동 중에 회전자는 2θ 에 해당되는 반시계 방향의 회전이 발생하게 된다.

Fig. 2는 반시계 방향으로 회전할 때 압전소자에 가해지는 입력전압을 측정한 것이다. 시계방향 회전을 위해서는 압전소자 A와 B의 입력전압을 교환하고, 압전소자 C와 D의 전압을 교환하면 된다.

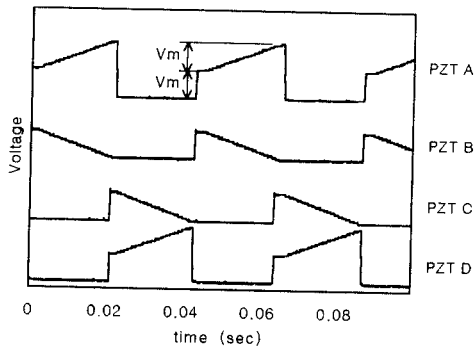


Fig. 2 압전소자 구동입력 신호(22.73Hz)

위와 같은 구동원리를 적용하여 제작한 모터의 개략도는 Fig.3과 같고, 크기는 77×96×20 mm이다. 벨트와 압전소자는 탄성관절을 이용한 확대기구로 연결하였다. 벨트와 압전소자를 Fig.1과 같이 직접

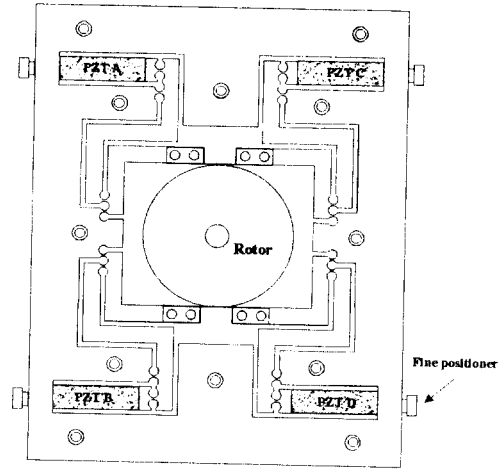


Fig. 3 자벌레형 회전모터의 개략도

연결한 후 회전운동을 실험적으로 확인하였으나 조립할 때 회전자와 벨트사이의 간극 조절의 어려움이 발생했다. 이를 개선하기 위해 Fig.3과 같이 변위확대기구와 미세조절장치를 모터 설계에 고려하였다.

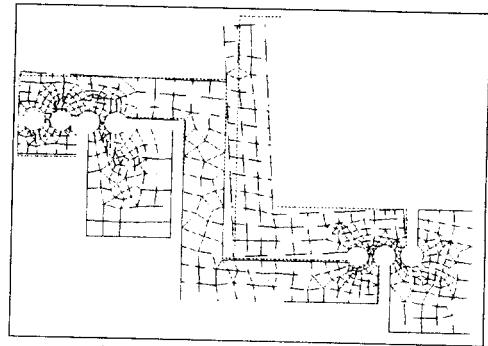


Fig. 4 탄성관절 확대기구의 유한요소해석

일반적으로 변위확대기구[7]는 압전소자의 변위 발생축 상에 확대기구의 출력축을 배치하여 회전성분을 억제시켜 직선변위만을 발생시킨다. 이러한 확대기구도 본 회전 모터에 적용이 가능하나 크기가 커지는 단점이 있다. 이러한 이유로 본 회전모터의 대칭구조에 적합한 탄성관절 확대기구를 설계하였다. 설계된 탄성관절 기구는 압전소자의 직선 변위 입력에 대해 출력축에서 회전과 직선변위의 확대를 동시에 가져온다. 유한 요소 해석을 수행하면 Fig. 4와 같은 결과를 얻을 수 있다. 압전소자에 100V 인가했을 때 발생하는 15.5 μm 의 변위를 탄성관절 확대기구에 가했을 때 출력축의 끝부분 모서리 노드(node)에서의 이동은 수평방향으로 -102 μm , 수직 방향으로 -69 μm 가 발생한다. 실제 제작 후 벨트를 연

결하지 않은 상태에서 측정한 결과는 수평방향으로 $-73.5\mu\text{m}$, 수직방향 $-51\mu\text{m}$ 로 다소차이가 있음을 알 수 있다. 이는 탄성관절의 가공과 측정오차에서 발생했을 것으로 생각된다.

3. 실험장치 및 결과

실험장치는 입력신호 발생장치로 486 PC와 인터페이스 보드, 신호처리를 위해 두 종류의 캡센서와 오실로스코프를 사용했다.

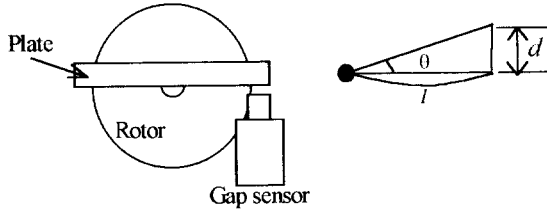


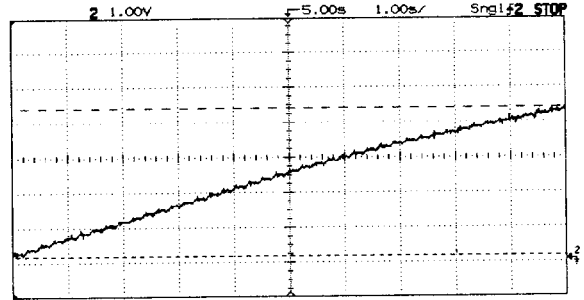
Fig. 5 측정 방법 및 구성

자벌레형 회전모터는 회전각의 크기가 매우 미소하기 때문에 Fig.5와 같이 간접측정 방법을 이용하였다. 센서로는 광역범위 측정을 위해 에디커런트형 캡센서(분해능: $0.5\mu\text{m}$)와 미소범위 측정에 커패시턴스 캡센서($2.5\mu\text{m}/\text{V}$)를 사용하였다. 캡센서로 회전자에 탑재된 판과의 직선변위의 변화를 측정하여 식(2)와 같이 계산하면 회전각을 구할 수 있다.

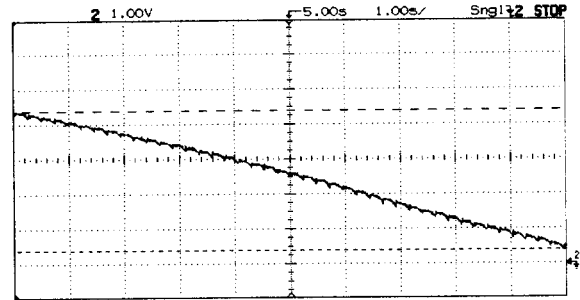
$$\theta = \tan^{-1}(d/l) \quad (2)$$

모터를 구동할 때 인가전압 크기의 구분은 회전자에 벨트를 밀착시키는 Fig.2에 표시된 전압(Vm)을 기준으로 한다. 자벌레형 모터의 양방향 회전운동은 Fig. 6과 같이 단위 스텝의 미소각 회전이 누적되어 회전범위의 확장을 이룬다. 두 쌍의 벨트와 회전자가 최소의 간격으로 동일하게 조립되었을 때 회전운동은 이상적이다. Fig. 6에서 한 사이클 동안에 기울기의 변화는 두 쌍의 벨트 조립상태의 상이한 차이에서 유발되며, 클램핑시에 미소변화가 발생됨을 관찰할 수 있다.

기준으로 삼은 입력전압(Vm)의 크기에 따른 단위 사이클 당 회전각은 Fig.7과 같이 $(0.2 \sim 9.76) \times 10^{-4}$ rad의 크기를 갖는다. 전압의 크기와 회전각은 선형관계에 있고, 양방향에서 약간의 차이는 있지만 거의 일치한다. 입력전압 크기의 증가는 회전자를 감싸고 있는 벨트의 이동거리를 크게 하여 단위 사이클 당 회전각을 증가시킴을 알 수 있다. 따라서, 입력전압의 크기를 조절함



(a) Counter-clockwise



(b) Clockwise

Fig. 6 회전운동형태(Vm=50V, 4.2Hz)

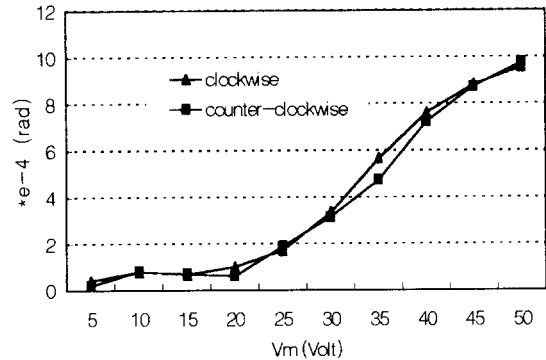


Fig. 7 입력전압(Vm) 크기에 관한 특성

으로써 요구 분해능의 크기를 임의로 정할 수 있다.

Fig. 8은 최대 입력신호인 50V(Vm)을 136회 반복 실험하여 위치정밀도의 특성을 파악한 것이다. 히스토그램은 정규분포곡선과 비슷한 형태를 띤다. 평균은 -9.742×10^{-4} rad이고, 표준편차는 0.238×10^{-4} rad의 값을 가진다. 이처럼 표준편차가 상대적으로 큰 이유는 구동가능 전압의 최대치를 사용해서 압전소자의 히스테리시스와 클램핑시의 미소변화의 영향이 많이 작용했기 때문일 것이다.

한 사이클의 입력신호에는 회전자를 고정시키는 신호와 회전자를 구동시키는 신호로 구성된다. 주파수는

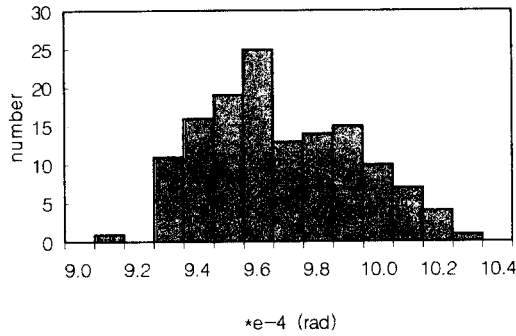


Fig. 8 위치정밀도에 관한 특성($V_m=50V, 4.9Hz$)

회전자를 고정시키기 위한 신호의 시간을 일정하게 정하고(1 msec), 회전자를 구동시키는 신호의 시간을 조절함으로써 변화시켰다. 이에 따른 입력신호의 주파수와 회전자의 속도의 관계는 Fig. 9 와 같다. 각속도 측정은 회전자의 각운동을 측정 한 후 시간에 대한 각변위의 증가를 1 차함수로 커브피팅하여 구했다. 저주파수 쪽

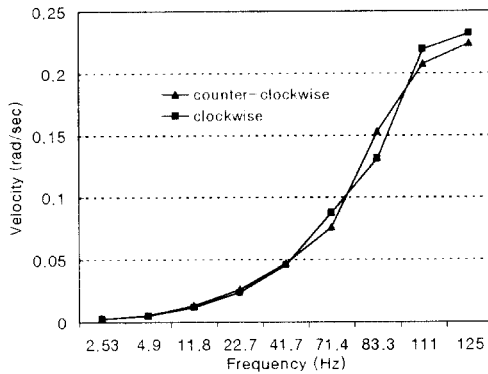


Fig. 9 주파수 - 각속도 특성($V_m=50V$)

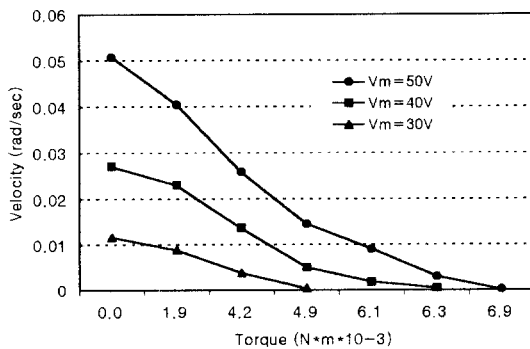


Fig. 10 발생 토크 - 각속도의 관계(41.7Hz)

에서 양방향의 각속도가 거의 동일하고 주파수가 높아 질수록 차이를 보인다. 이와 같은 현상은 저주파수에서는 회전자를 구동시키는 램프(ramp)신호의 증가 기울기가 낮아 회전운동이 상대적으로 안정하기 때문이다.

모터의 토크특성은 회전자의 반경방향 쪽에 줄을 연결하고, 이 줄에 무게를 달아 실험하였다. 무게와 입력 전압(V_m)의 두가지 변수에 대한 실험결과는 Fig.10 과 같다. 입력전압의 크기가 클수록 토크성능이 더 우수해 짐을 알 수 있다. 이는 벨트와 회전자가 밀착할 때 표면 접촉력이 커져 마찰력이 증가하기 때문이다.

4. 결 론

본 논문에서는 10^{-4} rad 이하의 고분해능 회전 위치 결정과 전영역 회전이 가능한 새로운 방식의 자벌레형 스택모터를 개발하였다. 모터의 대칭구조에 적합한 변위 확대기구를 유한요소해석을 통해 설계, 적용하여 모터의 성능실험을 수행하였다. 입력전압의 크기에 따라 $(0.2 \sim 9.76) \times 10^{-4}$ rad 의 고정밀도의 회전운동을 발생시킨다. 본 자벌레형 스택 회전모터는 회전자의 반경길이와 입력전압의 크기를 조절하면 회전정밀도를 매우 높일 수 있는 장점을 가지고 있다.

참 고 문 헌

- 1) Toru ToJo, Kazuyoshi Sugihara, 1987, "Piezoelectric-driven Turntable with High Positioning Accuracy", JSPE., Vol.53, No.6, pp.879-884.
- 2) Hiroyuki Shimizu, 1989, "A Basic Study on the Development of a Highly Accurate Rotational Positioning Actuator", JSME(C), Vol.55, No.517, pp.2371-2375.
- 3) Khanh Duong, 1995, "Development of a Rotary Inchworm Piezoelectric Motor", SPIE, Vol.2443, pp.782-788.
- 4) W.Xu, T.G.King, 1996, "A New Type of Piezoelectric Motor Using a Roller Clutch Mechanism", Mechatronics, Vol.6, No.3, pp.303-315.
- 5) Kazumasa Ohnishi, 1990, "Rotary Inchworm-Type Piezoelectric Actuator", T.IEE, Vol.110-D, No.1, pp.51-58.
- 6) Akira Satake, 1990, "Development of Rotational Fine Positioning Mechanism with Piezoelectric Actuator", ISIE, pp.253-257.
- 7) Iwao Hayashi, 1992, "Development of a Piezoelectric Cycloid Motor", Mechatronics, Vol.2, No.5, pp.433-444.