

Terfenol-D 작동기를 이용한 초정밀 스텝모터의 성능평가

김재환*, 이현일**

High Precision Stepping Motor Using Terfenol-D Actuators: Its Performance Test

Jaehwan Kim* and Hyunil Lee**

ABSTRACT

High precision step motor using Terfenol-D linear actuators is proposed and its performance is tested. Four Terfenol-D linear actuators are set up perpendicular to the rotor and saw-tooth current signals are applied on the actuators. It was found that the rotation angle is increased as the excitation current, the inertia of the rotor, and the contact force between the rotor and the push device are increased. The rotation angle per step of 0.001° and blocking torque of 0.2Nm are achieved. The effect of the time delay between the excitation signals is also investigated.

Key Words : Terfenol-D linear actuator (터페놀 D 선형 작동기), High Precision Stepping Motor (초정밀 스텝모터)

1. 서론

최근 첨단 기술의 발달과 더불어 여러 분야에서 고정밀도를 갖는 작동기를 필요로 하고 있다. 이러한 미세 변위를 제어할 수 있는 작동기로서 압전재료를 이용한 것이 있다⁽¹⁾. 압전재료는 응답이 빠르므로 높은 주파수에서도 사용이 가능한 장점이 있으나 반면에 변위가 작은 단점이 있다. 따라서, 변위를 키우기 위하여 여러 가지의 변위 확대기구를 연구하고 있으며⁽²⁾, 다수의 압전층을 쌓아서 단위 전압 당 변위를 키우고 있다. 또한 미세 변위를 제어할 수 있는 작동기의 재료로서 큰 힘과 변위를 낼 수 있는 형상기억합금이 있다. 그러나 형상기억합금은 응답속도가 늦기 때문에 사용분야가 제한적이다.

이러한 압전재료 및 형상기억합금의 단점

을 극복할 수 있는 재료로서 자왜재료가 각광을 받고 있다^(3,4). 자왜재료란 자기장에 의해 재료의 모양이 변하는 자왜효과(magnetostriction effect)가 발생하는 재료를 말한다. 최근에 지구상의 희귀 금속인 테르븀에서 자기장에 대하여 1000ppm 이 넘는 변형률을 갖는 성질이 발견되었고, 이 재료에 디프로슘(Dysprosium)과 철을 추가하여 $Tb_{0.3} Dy_{0.3} Fe_{1.9-1.95}$ 의 조성을 갖는 Terfenol-D 라는 합금을 개발하였다⁽⁵⁾. 일반적으로 자왜재료는 밀도가 상당히 높고 인장강도보다 압축강도가 훨씬 큰 값을 갖는 전형적인 취성재료의 성질을 갖고 있다. 변형률은 1000ppm 이상으로 압전재료에 비해 훨씬 큰 값을 가진다. 자기변형 재료는 자기장이 증가함에 따라 자기장의 방향에 무관하게 항상 양(+) 방향으로만 늘어나는 성질을 가지고 있다. Fig. 1에서 알 수 있듯이 자기장의 방향이 +, -에 관계없

* 인하대학교 기계공학과

** 인하대학교 대학원

이 항상 +의 변위가 발생하고 가압력이 증가함에 따라서 변위가 증가한다.

자왜재료는 이와 같이 큰 변위와 힘을 낼 수 있으므로 이를 이용한 다양한 작동기와 모터의 개발에 많은 관심이 모아지고 있다. 높은 해상도와 긴 행정을 갖는 탄성파형 선형 모터⁽⁶⁾, 유압 작동기를 대신할 수 있는 유압 실린더와 자왜 유압 펌프가 통합된 작동기⁽⁷⁾, 그리고 저속에서 큰 토크를 내는 로봇용 회전 자왜모터의 개발이 최근에 보고되었다⁽⁸⁾.

스테핑 모터는 회전각도를 펄스로 제어하는 모터로서 산업전반에 걸쳐 널리 사용되고 있다⁽⁹⁾. 스텝핑 모터는 마이크로 스텝핑 기술이 사용되는데 이러한 기존의 모터는 부피가 크고 전력을 많이 소모하는 점이 있다. 따라서, 본 논문에서는 정밀한 변위와 큰 힘을 낼 수 있는 자왜재료를 이용한 초정밀 스텝모터를 제안하고 그 가능성을 살펴보고자 한다. 제안하는 초정밀 스텝모터는 극 미세각과 큰 작용력을 낼 수 있으며 단전이 되더라도 마찰력에 의해 현 위치를 유지할 수 있다. 여기서는 자왜재료를 이용한 선형 작동기의 설계, 제작 그리고 초정밀 스텝모터의 구성에 대하여 설명하고 가진 전류, 접촉력, 시간지연 등에 따른 모터의 회전각성능을 살펴보고자 한다.

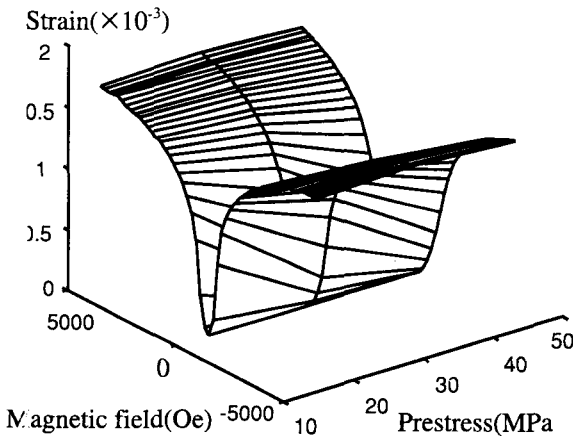


Fig. 1 Magnetostriction of Terfenol-D

2. 스텝 모터의 설계

본 논문에서 제안하는 스텝모터는 다수의 자

왜 선형 작동기를 회전체 주위에 설치하여 마찰력과 관성력에 의하여 스텝핑 작용을 일으키는 원리의 모터이다. 작동기에 톱니파 형태의 전류를 보내면, 전류가 서서히 증가할 때 서서히 작동기의 변위가 늘어나면서 마찰력에 의해 회전체를 돌려주게 된다. 그러다가 갑자기 전류가 떨어지게 되면 회전체의 관성에 의해 완전히 회전체가 복귀하지 못하고 일부 남게 된다. 이러한 작용이 순차적으로 계속되면서 회전체는 스텝작용을 일으키게 된다. Fig.2는 자왜 작동기를 이용한 스텝모터의 개략도이다.

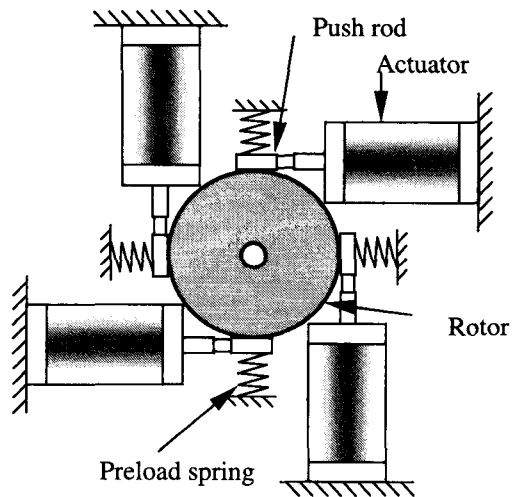


Fig. 2 Schematic diagram of step motor

2.1 선형 작동기 설계

선형작동기는 기존의 연구를 바탕으로 설계하였다⁽¹⁰⁾. Fig. 3은 선형 자기변형 작동기의 단면을 나타내고 있다. Terfenol-D 자왜재료 주위에 자기장을 형성시켜 주기 위하여 솔레노이드 코일을 설치하였으며 자기장에 의해 늘어난 변위가 푸시로드(push rod)에 전달될 수 있게 하였고 가압력을 조절할 수 있게 압축 스프링과 나사부를 설치하였다. 본 논문에서 사용된 자왜재료는 Terfenol-D로서 $\phi 6 \times 50 \text{mm}$ 이며 솔레노이드 코일은 Terfenol-D 재료에 선형성이 좋은 850 오스테드(oersted)의 자기장을 인가 시켜줄 수 있도록 제작하였다. 사용된 코일은 코일의 저항 성분에서 발생하는 열 발생을 줄이기 위하여 지름 1.5mm의 비교적 굵은 코일을 사용하였고 코일의 총 권수는 568이다. 이 코일에는 최대 5A까지 전류를 가할 수 있다.

외부 케이스는 자기장에 의한 자화를 방지하기 위해 알루미늄을 사용하였다. Terfenol-D 봉에 가압력을 조절할 수 있는 압축 스프링의 스프링계수는 1.1kg/mm 이며 최대 12.5kg 까지의 가압력을 가할 수 있다.

2.2 스텝 모터의 설계

스텝모터를 설계하기 위해서 먼저 미세 회전각을 설정하였다. 본 설계에서 목표로 한 회전각은 0.001°이다. 그리고 자기변형 작동기의 최소 변위를 1μm로 가정하여 회전체의 직경을 100mm로 계산하였다. 또한 로터와 푸시로드의 접촉력을 인가 시켜주기 위해 임의로 가압력을 조절할 수 있도록 설계하였다.

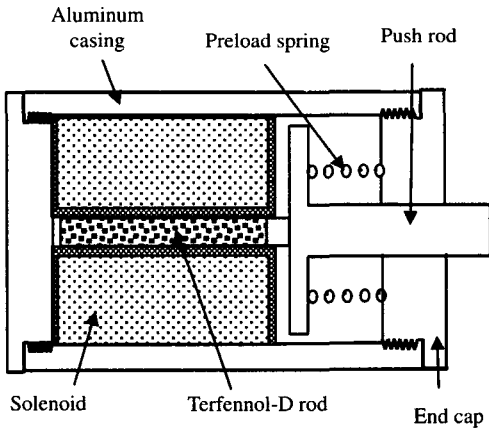


Fig. 3 Schematic diagram of the Terfenol-D actuator

3. 성능실험

3.1 Terfenol-D 작동기의 성능실험 방법

제안된 작동기의 성능을 실험하기 위해서 Fig. 4와 같은 실험장치를 구성하였다. 신호처리기(Digital signal processing board)를 사용하여 톱니파형의 전압신호를 전류공급장치(HP 6268B)에 가하였으며, 여기서 전압에 따라 전류가 톱니파형으로 변화하여 나온 신호를 자기변형 작동기에 입력시켰다. 그리고, 작동기에서 얻어진 변위는 비접촉식 변위센서(Nevada 7200)를 사용하여 측정하였고, 실제로 인가된 전류는 자속 감지형 전류계(Tektronix A622)를 사용하여 측정하였으며 각각의 신호는 신호분석기(HP35665)를 사용하여 나타내었다.

3.2 Terfenol-D 작동기의 성능실험결과

Fig.5는 톱니파가 입력 되었을 때 변위를 나타내는 것으로서 주파수가 올라갈수록 파형이 일그러짐을 알 수 있다. 그 이유는 일차적으로 전류

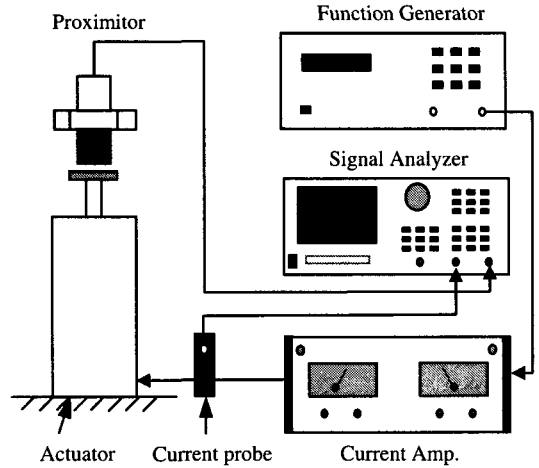
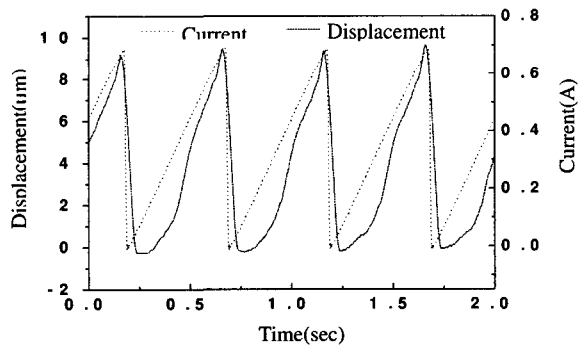
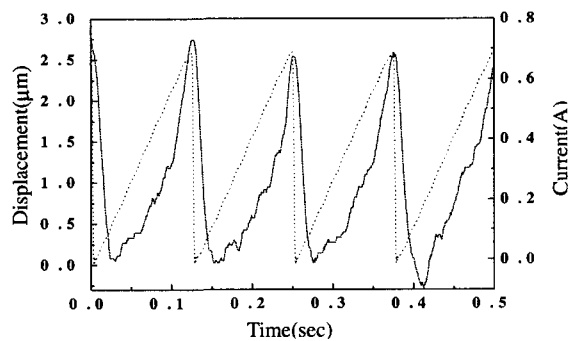


Fig. 4 Schematic diagram of experimental setup for the Terfenol-D actuator



(a) 2Hz



(b) 8Hz

Fig. 5 Displacement output and current input of the Terfenol-D actuator for saw-tooth signal

증폭기의 응답지연이 큰 것과 (상승시:300msec/ 하강시:30msec) 솔레노이드 코일의 시정수(time constant)에 기인한 것으로 사료된다. 코일의 인덕턴스를 측정할 결과 4.3mH 이고 저항이 1.1ohm 이나와서 시정수는 4.3/1.1=3.9msec 가 된다. 그 다음 이유로, Terfenol-D 자왜재료의 히스테리시스와 작동기 요소들 간의 마찰로 인한 영향 때문에 파형의 왜곡이 생긴 것으로 사료된다. 따라서 솔레노이드 코일의 설계시 시정수를 최대로 줄이고, 응답지연이 적은 전류 증폭기를 사용하는 것이 필요하다.

3.3 스텝모터의 성능실험 방법

제안된 스텝모터의 성능을 실험하기 위해서 Fig.6 과 같은 실험장치를 구성하였다. 회전하는 회전체의 끝 단에 강성의 재질을 갖는 레버를 고정하고, 끝 단에서 비접촉식 변위센서를 통하여 변위를 측정할 후 회전각으로 환산하였다. 이 때 회전각이 매우 작으므로 측정할 직선 변위를 각도로 환산하더라도 오차를 무시할 수 있다고 가정하였다. Terfenol-D 작동기의 가진을 앞에서 작동기의 성능실험과 같은 방법으로 톱니파 가진을 하되 2 개씩 짝을 지어서 시간차를 두고 가진하였으며 인가되는 전류, 회전체와 푸시로드 사이의 접촉력, 작동기들 사이의 위상차들의 영향을 고찰하였다.

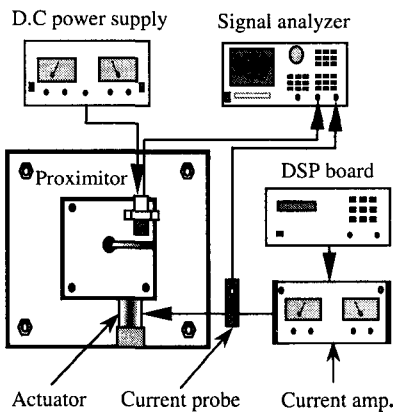
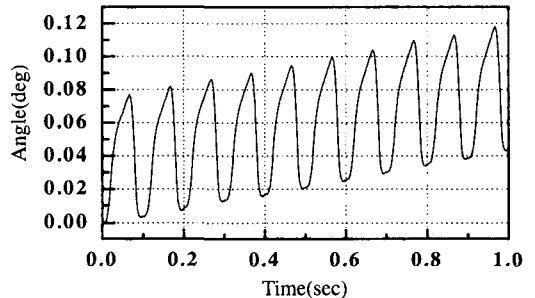


Fig. 6 Experimental setup for the stepping motor

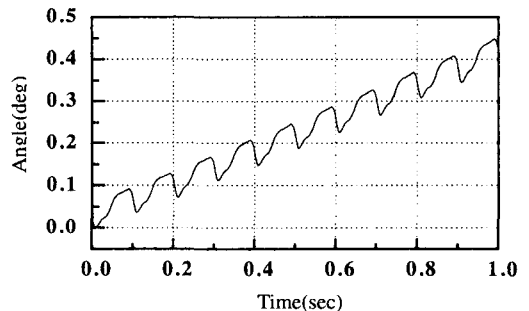
3.4 스텝모터의 성능실험 결과

스텝모터의 성능은 인가전류, 회전체와 푸시로드 사이의 접촉력, 작동기에 인가되는 전류의

위상차를 변화시켜 가며 평가하였다. 이 때, 회전체의 관성 모멘트는 약 56kg·m² 이고 베어링의 마찰 토크는 6.8 N·cm 이며 푸시로드와 회전체의 마찰계수는 측정할 결과 0.125 가 나왔다. Fig. 7 은 두 개의 작동기에 6A 의 전류를 10Hz 로 가하고 접촉력을 0.5 kg 으로 한 상태에서 두 개의 작동기 신호의 위상차에 의한 회전각의 변화를 나타낸다. Fig. 7-1-a 는 두개의 작동기에 같은 위상의 가진을 주었을 때의 회전각 특성을 보이고 있다. 예상했던 것처럼 속도가 낮으므로 관성력 효과가 두드러지지 못하고 역방향 회전이 발생함을 알 수 있다. Fig. 7-1-b 는 작동기에 인가되는 두개의 가진 입력을 주기의 25%에 해당하는 위상차를 주었을 때의 회전각을 나타내고 있다. 두 작동기와 회전체와의 마찰력 상쇄효과로 인하여 역방향 회전이 줄어들면서 회전각이 많이 증가함을 알 수 있다. 이것은 첫번째 작동기가 미는 동작과 두번째 작동기가 미는 동작이 주기의 25% 만큼 겹쳐져있으므로 25%에 해당하는 시간에 한 작동기가 톱니파형에 따라 갑자기 수축할 때, 다른 작동기가 밀어주기 때문에 역방향 회전이 줄어들었다.

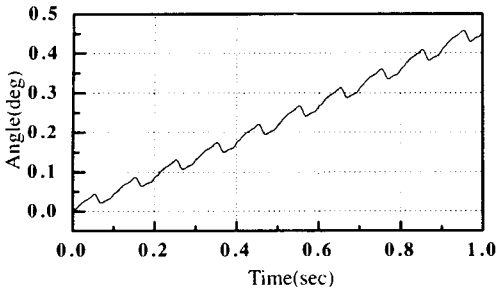


(a) 0% time delay

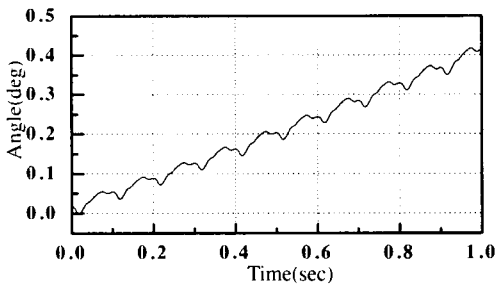


(b) 25% time delay

Fig. 7-1 Rotation angle with different time delay (a, b)



(c) 50% time delay



(d) 75% time delay

Fig. 7-2 Rotation angle with different time delay(c, d)

Fig. 7-2 (c)는 50% 위상차를 주었을 때의 회전각 특성으로 25%일 때 보다 회전각이 커짐을 알 수 있다. Fig. 7-2 (d)는 75%일 때의 회전각 특성을 나타내고 있다. 이 위상차는 이론적으로 25%일 때의 회전각 특성과 같아야 하지만, 회전체의 기계적 정밀도와 접촉력의 차이로 인하여 회전각 특성이 25%일 때와 약간 다르게 나타났다.

최적의 성능조건을 얻기 위해 전류를 3A, 4.5A, 6A로 변화시키고, 작동기 간에 인가되는 전류의 시간지연은 10Hz에서 주기의 20%인 0.25sec씩 증가시켰으며, 푸시로드와 회전체(로터)와의 접촉력은 0.3 kg, 0.4 kg, 0.5 kg으로 변화시켜가며 회전각 측정실험을 하였다. Table 1은 0.3kg 접촉력에서 전류와 위상차에 의한 스텝 당 회전각을 나타낸 것이다. 여기서, 3A의 전류를 가지고 위상차를 주지 않았을 때는 관성력에 의한 역회전 방지효과가 작아서 회전체가 미약하게 회전함을 알 수 있다. 그리고 전류가 증가함에 따라 회전각이 증가하며 25%와 75%의 위상차에서는 거의 같은 회전각특성을 보이고, 특히 50% 위상차를 주었을 때에 회전각이 최대가 된다. Table 2는 0.5kg 일 때의 결과이다. Fig.8은 이 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 접촉력을 증가시켰을 때 3A의 낮

은 전류에서도 안정된 회전특성을 나타낸다. 50%의 위상차에서 가장 큰 회전각을 나타내며 접촉력이 0.3kg에서 0.5kg으로 증가함에 따라 회전각이 0.0085 °/step에서 0.024 °/step으로 증가함을 알 수 있다.

Table 1 Rotation angle versus excitation current and time delay (0.3kg contact force)

[Unit: °/step]

Current \ Delay	6A	4.5A	3A
0	0.004	0.002	0.0001
25%	0.02	0.014	0.0066
50%	0.028	0.018	0.0085
75%	0.019	0.012	0.0053

Table 2 Rotation angle versus excitation current and time delay (0.5kg contact force)

[Unit: °/step]

Current \ Delay	6A	4.5A	3A
0	0.0042	0.0038	0.0012
25%	0.0389	0.0253	0.0144
50%	0.045	0.026	0.024
75%	0.0389	0.023	0.015

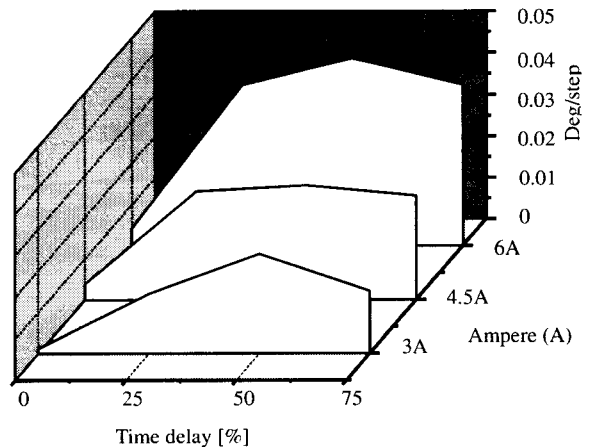


Fig. 8 Rotation angle vs current and time delay (0.5kg)

모터 회전체의 영향을 살펴보기 위하여 회전체의 관성모멘트를 30.2 kg·m²로 줄이고 같은 실험을 행하였다. 관성 모멘트의 조절은, 구리로 만든 부가된 회전체를 제거함으로써 하였다. Table 3 은 그 결과를 나타낸 것으로서 두 작동기의 위상차는 영으로 하였다. 회전각이 대체적으로 감소했는데, 이는 질량의 감소로 인해 관성효과가 떨어졌기 때문이다. 그리고 접촉력이 증가함에 따라 회전각이 줄어들었는데, 이것은 회전관성이 줄어들어 따라 접촉력에 의한 역회전 효과가 커졌기 때문인 것으로 사료된다.

Table 3 Rotation angle versus excitation current and contact force (54% inertia)

		[Unit: %/step]	
Contact force \ Current	6A	4.5A	
	0.2 kg	0.004048	0.002932
0.3 kg	0.00276	0.001819	
0.4 kg	0.002298	0.001434	
0.5 kg	0.00141	0.000684	

지금까지는 외부하중이 없는 상태에서 성능을 살펴보았다. 다시 말해서 순수 회전각도만을 보았는데, 전달할 수 있는 회전 토크를 보기 위하여, 회전을 멈추는 정지 토크(blocking torque)를 측정하였다. 정지 토크는 로드 셀을 레버가 지나는 곳에 설치하고 모터가 회전하려고 할 때 걸리는 힘을 로드셀을 통하여 측정함으로써 구하였다. 그 결과 마찰력과 전류에 따라 차이는 있으나 약 0.2Nm 가 나왔다. 이 값은 순수 관성력보다는 마찰력에 의해 얻어진 값으로 회전속도 및 정밀도와 회전토크에 대한 보다 자세한 연구가 요망된다. 그리고 실제 응용을 생각한다면, 시스템의 크기를 줄이는 노력과 전류 증폭기의 소형화에 대한 노력이 필요하다.

4. 결론

자왜 선형 작동기를 이용한 초정밀 스텝모터를 설계, 제작하고 성능실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

자왜 선형 작동기의 성능은 초정밀 스텝모터의 성능에 매우 중요한데, 이것은 자왜재료의 히스테리시스, 솔레노이드 코일의 시정수 그리고 전류 증폭기의 응답지연으로 인해서 저하된다. 따라서, 작동기의 성능을 향상시키기 위해서는 솔레노이드 코일과 전류 증폭기로 인한 응답지연을 줄이는 것이 필요하다. 회전각의 정밀도는 전류, 접촉력, 관성 그리고 작동기 간의 위상차에 의해 달라지며, 전류가 커짐에 따라 회전각이 증가하고 관성과 접촉력 간에는 서로 상관된 효과가 있으며 작동기 사이의 시간지연을 50%로 했을 때 가장 큰 회전각을 얻을 수 있었다. 10Hz 로 작동했을 때 약 0.001 %/step 의 회전각을 얻었으며 자기변형 작동기의 코일과 전류증폭기를 개선하여 회전속도를 높인다면 보다 정밀한 각도의 제어가 가능할 것이다. 제안된 스텝 모터의 실용화를 위하여 마모, 열발생 및 내구성에 대한 자세한 연구가 요망된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 핵심전문연구 (981-1007-049-1) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. Mason, W.P., "Piezoelectricity, its history and application," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 70, No. 6, pp. 1561-1566, 1981.
2. Garcia-Bouito, G., Brennan, M. J., Elliott, S. J., David, A., and Pinnington, R. J., "A novel high-displacement Piezoelectric actuator for active vibration control," *Smart Material and Structure*, Vol. 7, No. 1, pp. 31-42, 1998.
3. Anjanappa, M., and Wu, Y., "Magnetostrictive particulate actuators: configuration, modeling and characterization," *Smart Material and Structure*, Vol. 6, No. 4, pp. 393-402, 1997.
4. Jeong, H. and Park, K., "Active Vibration Suppression Using a Magnetostrictive Material," *Asia-Pacific Vibration Conference '97*, pp. 9-13, November 1997.
5. Calkins, F. T., Dapino, M. J. and Flatau, A. B., "Effect of prestress on the dynamic performance of a

- Terfenol-D transducer," *Int. Symp. on Smart Structures & Materials (SPIE)*, Vol. 3041, pp. 293-304, 1997.
6. Kottamasu, V., "Magnetostrictive Elastic Wave Type Linear Motion with TERFENOL-D," *SPIE's 4th Annual Symposium on Smart Structures and Materials*, Vol. 3044, pp. 363-369, San Diego, CA, USA, March 1997.
 7. Weisensel, G.N., Pierce, T.D. and Zunkel, G., "High-authority smart material integrated electric actuator," *SPIE's 4th Annual Symposium on Smart Structures and Materials*, Vol. 3044, pp. 382-390, San Diego, CA, USA, March 1997.
 8. Teolis C.A., and Loncaric, J., "A Rotary Magnetostrictive Motor for Robotics," *Technical Research Report TR93-27*, Institute for Systems Research, University of Maryland, 1993.
 9. Howald, L., Rudin, H. and Guntherodt, H.-J., "Piezoelectric inertial stepping motor with spherical rotor," *Rev. Sci.Instrum*, Vol. 63, No. 8, pp. 3909-3912, 1992.
 10. 이현일, 김재환, "선형 Terfenol-D 작동기의 성능평가," 대한기계학회 1998년도 추계학술대회논문집 A, pp. 570-573, 1998.