

# 압축 공기 냉각을 이용한 자기 변형 액추에이터의 위치 추종 성능 향상

박용길\*, 황진동<sup>+</sup>, 김철민<sup>+</sup>, 김선호<sup>++</sup>, 안중환<sup>+++</sup>

(논문접수일 2007. 3. 21, 심사완료일 2007. 5. 22)

## Improvement of Position Tacking Performance of Magnetostrictive Actuator Using Compressed Air Cooling

Yong Kil Kwak\*, Jin Dong Hwang<sup>+</sup>, Churl Min Kim<sup>+</sup>, Sun Ho Kim<sup>++</sup>, Jung Hwan Ahn<sup>+++</sup>

### Abstract

Precision positioning system with magnetostrictive actuator(MA) has widely used in manufacturing devices to control the positioning accuracy to meet the high load and stroke requirements. It has many advantage in comparison with piezoelectric actuator; high force, high strain, high efficient etc. But, the performance of Terfenol-D, the commercially available magnetostrictive material, is highly dependent on the prestress, magnetic field intensity and temperature. This paper present an experimental investigation of the temperature effect on displacement characteristics of magnetostrictive actuator. In this paper, compressed cold air is proposed to improve of positioning accuracy of magnetostrictive actuator. The compressed cold air cooling system has good cooling effect Experimental results confirming the effectiveness of the proposed cooling system as high precision positioning system are also has presented in this paper.

**Key Words** : Magnetostrictive actuator(자기변형 구동기), Thermal strain(열변형), Vortex tube(보텍스튜브), Compressed air cooling (압축공기냉각)

## 1. 서론

최근 광범위한 분야에서 마이크로 구동기의 필요성이 증가하고 있어, 구동기의 다양화와 고성능화에 대한 연구가

꾸준히 진행되고 있다. 특히 소자 자체의 선형적 움직임에 이용한 마이크로 구동기로는 압전구동기, 형상 기억 합금, 자기변형 구동기 등이 있다. 압전구동기는 응답성은 좋으나 비선형성에 대한 제어가 어렵고 출력이 약해서<sup>(1)</sup> 큰 힘이 필

\* 부산대학교 대학원 지능기계공학과 (ykkwak7@hanmail.net)  
주소: 609-735 부산시 금정구 장전동 산 30

+ 부산대학교 대학원 지능기계공학과

++ 동의대학교 메카트로닉스공학과

+++ 부산대학교 기계공학부

요한 절삭가공이나 마이크로 프레스 가공에는 적합하지 않다. 형상기억 합금은 응답 속도가 느려서 정밀 구동에는 사용할 수 없다. 자기변형소자는 압전소자보다 응답성은 약간 떨어지지만 큰 힘을 발생시키기 때문에 소형이면서 큰 힘을 요구하는 시스템에 적용할 수 있다<sup>(2-4)</sup>.

자기 변형 소자의 변형율은 합금원소 구성 비율에 따라 차이가 있지만 최고 2000ppm까지 가능하며, 전체 변형 구간은 비선형적이지만 1200ppm내에 선형적인 구간이 존재한다. 그리고 자기 변형 소자의 조성 비율을 적당히 변화시킴으로써 소자의 선형성이 증가하고 재료의 강도를 증가시킬 수도 있으므로 사용자의 용도에 맞는 소자를 사용할 수도 있다.

자기 변형 구동기 구동하려면 자기변형소자를 둘러싼 코일에 많은 전류를 흘려야 하기 때문에 코일에 많은 열이 발생한다. 이 열은 자화 효과를 감소시키고, 자기변형소자 뿐 아니라 구동기 구조물의 열변형을 유발한다<sup>(5-7)</sup>.

따라서, 자기변형 구동기의 성능을 극대화시키고, 위치정밀도를 향상시키기 위해서는 코일에서 발생하는 열에 대한 냉각대책이 필수적이다. 본 논문에서는 보텍스 튜브(Vortex tube)를 이용한 냉각시스템을 제시하고, 이를 이용해서 자기 변형 구동기 위치 추종성능 특성을 파악하였다.

## 2. 자기변형구동기의 구조 및 냉각 시스템

### 2.1 자기변형구동기의 구조

Fig. 1은 본 연구에 사용된 자기변형 구동기의 구조를 나타낸다.

예압볼트(Preload Bolt), 스프링와셔(Spring Washer)로 구동기의 느슨한 조립 오차를 없애고 변형을 특성이 최적이 되는 예압을 인가한다. 코일에서 발생된 자기장의 손실을 최대한 줄이기 위해 고투자율 소재인 강(S45C)을 사용한 스틸

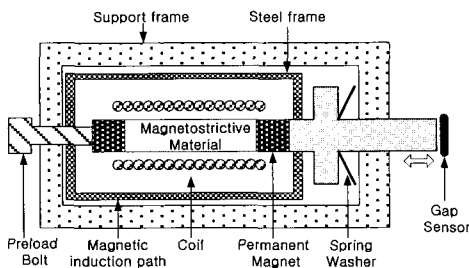


Fig. 1 Structure of Magnetostrictive actuator

프레임(Steel Frame), 외각 지지부(Support Frame)는 자기장이 지지부를 통해 흐르는 것을 막기 위해 저투자율이며서 예압을 견딜 수 있는 고강성 재료를 사용한다. 자기변형 구동기의 작동 원리는 코일에서 발생된 자기장이 자기 유도부(Magnetic induction path)를 통해 자기변형소자로 인가되고, 이때 자기변형소자는 자벽의 이동과 자기모멘트의 회전에 의해 자기장의 방향으로 미소 변형을 하게 된다.

### 2.2 자기 변형 소자의 열팽창

코일에 전류가 흐를때 발생하는 열은 자기 변형 소자 및 구조물에 열팽창을 유발한다. 이는 구동기의 작동 범위를 작게 할 뿐만 아니라 정밀한 위치제어를 어렵게 하는 요소로 작용한다.

실험에 사용된 자기변형소자인 Terfenol-D (Tb<sub>0.3</sub>Dy<sub>0.7</sub>Fe<sub>1.92</sub>)의 열전도율은 13.5W/mk, 열팽창계수는 약 12×10<sup>-6</sup>°C<sup>-1</sup>, 큐리 온도(Curie Temperature)는 380°C이며, 길이는 30mm이다. 따라서 Terfenol-D의 온도가 1°C 증가할 때마다 길이가 약 0.36μm 증가하게 되고, 이러한 열의 발생은 구동부, 외각 지지부, 기타 부품에 열팽창을 발생시킨다.

Tale 1은 자기변형 액추에이터에서 발생한 총 열변형량에 대하여 주요 요소별 기여도를 실험을 통해 자기변형 소자 및 외각지지부의 열변형량을 각각 조사하여 나타낸 결과이다. 코일에 가장 가까이 위치하고 있는 자기변형소자는 코일에서 발생하는 열의 영향을 구동기의 구성요소 중 가장 많이 받는다. 따라서 총열변형량의 60%를 차지하는 자기변형 소자의 냉각은 전체 열변형량을 줄이는데 필수적이다.

### 2.3 냉각 시스템

Fig. 2은 공기냉각이 가능한 구동기 구조이다. 코일로부터 발생된 열이 구동부와 외각지지부로 전달되는 것을 막기 위해 압축냉각 공기를 코일의 외부로 흐르게 하고, 코일과 압축 냉각 공기의 직접 접촉을 통해 구동부와 외각지지부의 온도를 일정하게 유지하도록 구성하였다.

Table 1 Main components of thermal expansion error

| components                | thermal expansion error(%) |
|---------------------------|----------------------------|
| Magnetostrictive Material | 60                         |
| Support Frame             | 30                         |
| Other components          | 10                         |

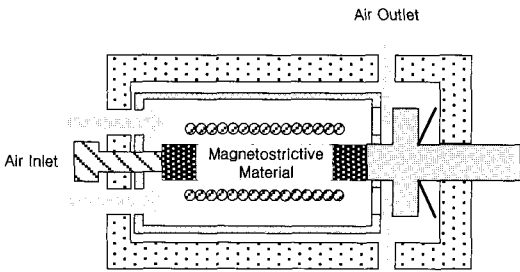


Fig. 2 Magnetostrictive actuator with air cooling device

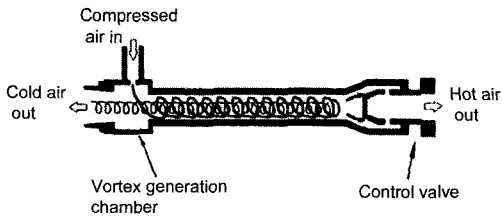


Fig. 3 Diagram of a vortex tube cooling device

냉각 시스템에 사용되는 압축 냉각 공기는 Fig. 3와 같은 보텍스 튜브(Vortex tube)를 사용해서 얻을 수 있다. 보텍스 튜브는 구조가 간단하고, 응답성이 빠르며 조작성이 용이하고 유지비용이 적어 경제적이다. 보텍스 튜브의 기본 구조는 Fig. 4와 같이 압축 공기를 주입하는 노즐과 보텍스를 생성시키는 보텍스 생성실(Vortex Generation Chamber) 그리고 유동하는 동안 벽면 쪽 공기와 중심부 쪽 공기 사이에서 반경 방향으로 에너지 교환이 이루어지는 원형 튜브와 저온 출구 및 고온출구를 통해 방출되는 공기의 유량비를 조절하는 컨트롤 밸브로 구성되어 있다<sup>(8,9)</sup>.

### 3. 실험장치 및 방법

실험 장치는 Fig. 4처럼 최대 20kHz까지 전류입력 명령을 추종할 수 있는 전류 드라이버, 구동기의 변위량을 측정하기 위한 분해능 30nm의 와전류형 갭센서, 온도센서, 데이터 획득 장치, 압축 공기의 압력을 조절하기 위한 압력조절부, 압축공기의 냉각을 위한 보텍스 튜브로 구성되어 있고 구동기의 구동시 냉각장치가 확실히 작동한다. 실험의 정확성을 높이기 위해 온도 및 자화를 초기상태로 만든 후 실험을 반복하였다. 온도는 자기변형소자 표면에서 측정되고, 변위 센서의 측정오차를 줄이기 위해 센서와 구동기를 동일한 베이스에 고정시켜 외부 진동에 의한 영향을 최소화

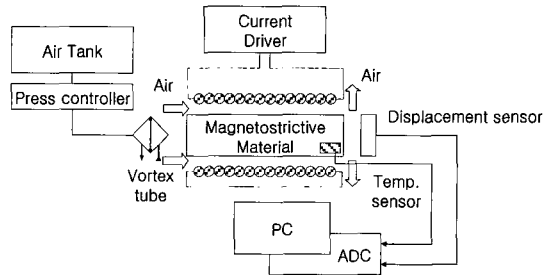


Fig. 4 Block Diagram of Experimental System

하였다.

실험은 우선 압축냉각 공기의 압력을 1.5bar, 2bar, 2.5bar, 3bar, 3.5bar 다섯 단계로 하였고, 입력 전류는 2A, 3A, 4A로 하여 액추에이터의 변위 및 온도 특성을 파악하였다. 그리고 Sin 함수 지령에 대한 추종특성을 파악하였다.

### 4. 실험결과

Fig. 5은 상온에서 스텝 전류를 인가하고 온도가 오르기 전에 자기변형 구동기의 변위를 나타내는 곡선이다. 열변형이 영향이 없기 때문에 전류를 증가시킬수록 거의 선형적으로 변위가 증가하는 것을 알 수가 있다.

Fig. 6은 압축냉각공기를 주입하지 않고 전류의 스텝입력 크기를 3단계(2A, 3A, 4A)로 하여, 전류 인가 시간이 지속될 때 온도 및 변위의 변화량을 나타낸다.

Fig. 6 (a)에서 알 수 있듯이 온도는 시간에 따라 상승하였고, 전류가 클수록 상승률도 크다. Fig. 6 (b)에서 변위는 전

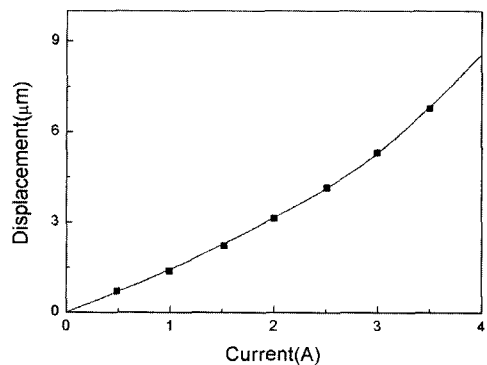


Fig. 5 Displacement of actuator according to step current inputs

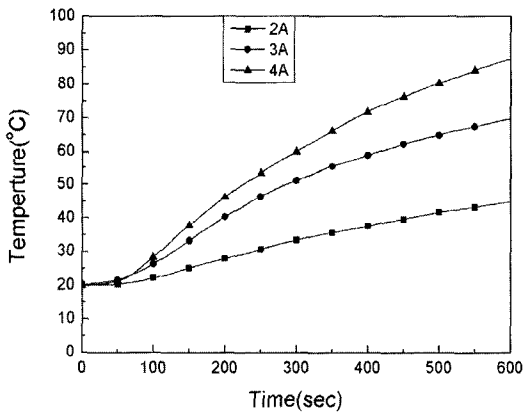
류가 인가된 즉시 전류 크기에 비례한 변위가 발생하였고, 시간이 지날수록 온도가 증가하기 때문에 열팽창으로 변위도 점점 증가하는 것을 알 수 있으며, 전류값이 클수록 변위가 더 크게 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 스텝입력 3A을 인가하였을 때 압축 공기 압력에 따른 온도, 변위 곡선이다.

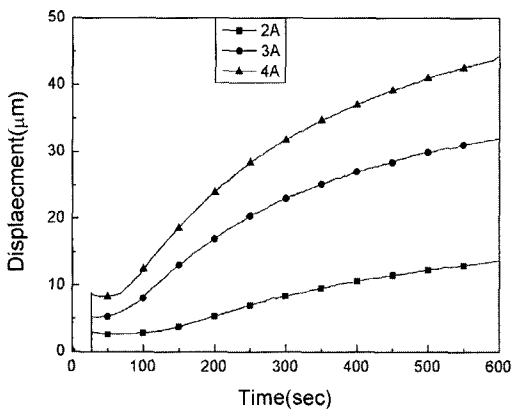
Fig. 7은 스텝입력 3A을 인가하였을 때 압축 공기 압력에 따른 온도, 변위 곡선이다. 전류 인가와 동시에  $6\mu\text{m}$ 의 변위가 생기며, 온도는 공기압력에 따라 변하고, 이에 따라 변위도 동일한 패턴으로 변한다. 압축 공기의 압력이 높을수록 자기변형소자의 온도는 낮게 유지되는 것을 알 수 있으며, 3A의 입력 전류에서는 공기 압력이 1.5bar일 때는 상온에서

빠른 시간 내에 정상상태로 잘 유지됨을 알 수 있으며 압력이 2.5bar 이상일 때는 온도가 더 하강하다가 400초 이후에 온도가 정상상태로 들어섰다. 2.5bar 이상의 압력조건에서는 과냉각으로 문제가 생긴다. 따라서 정밀한 위치제어를 위해서는 초기의 온도를 유지하는 것이 중요하다. 3A의 전류가 인가될 때 초기의 온도를 유지하는 최적의 공기 압력은 1.5bar정도의 압력이라 추정할 수 있다.

Fig. 8은 스텝 입력 4A를 인가하였을 때 공기 압력에 따른 온도, 변위 곡선이다. 4A를 인가하면 약  $8.5\mu\text{m}$  변위가 생긴 후에 전류인가 시간이 지속되면 열팽창만큼 변위가 바뀐다. 압력이 1.5bar 일 때는 온도가 정상상태에 이르지 않고 계속 증가하는 것을 알 수 있으며, 3bar 압력에서 온도가 초기 온

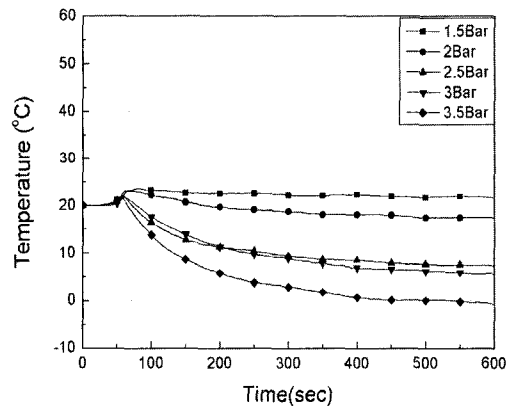


(a) Temperature

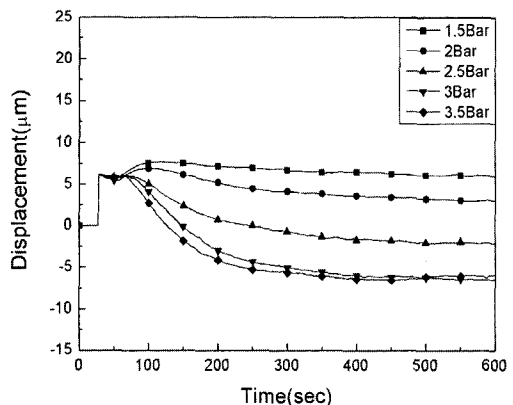


(b) Displacement

Fig. 6 Temperature and displacement behavior without cooling



(a) Temperature



(b) Displacement

Fig. 7 Temperature and displacement behavior under different air pressure(3A input current)

도 이하로 떨어진다. 따라서 초기온도를 유지하는 최적의 압력은 2.5bar와 3bar 사이에 있음을 추정할 수 있다.

Fig. 9는 진폭 3A, 1Hz Sin 지령을 주고, 공기 압력을 2bar 하였을 때 냉각과 무냉각시 구동기의 추종 결과이다. Fig. 9 (a), (b)는 전류를 인가한 후 20초 후의 출력 변위 및 오차 곡선이고 Fig. 9 (c), (d)는 300초 후의 결과이다. 시간이 지날수록 무냉각시 추종의 특성은 응답 계인이 떨어지고, 변위가 점차 위쪽으로 이동되는 것을 알 수 있고, 냉각을 하였을 때는 응답 계인이 일정하게 유지 된다, 냉각을 하면 최대 추종오차는 시간에 따라  $0.25\mu\text{m}$  이내로 유지되지만, 냉각을 하지 않았을 경우에는 최대추종오차가  $0.35\mu\text{m}$ 에서  $0.74\mu\text{m}$ 로 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 냉각 시스템에

의해 위치 정밀도가 향상된 것을 알 수 있다. Fig. 9 (e)는 입력 진폭( $2.5\mu\text{m}$ )에 따른 출력 진폭의 변화를 나타내는 그래

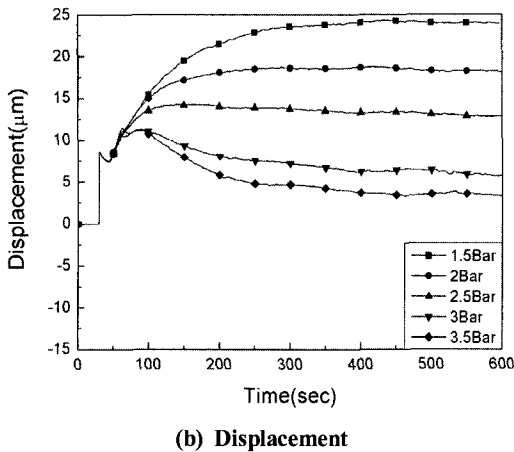
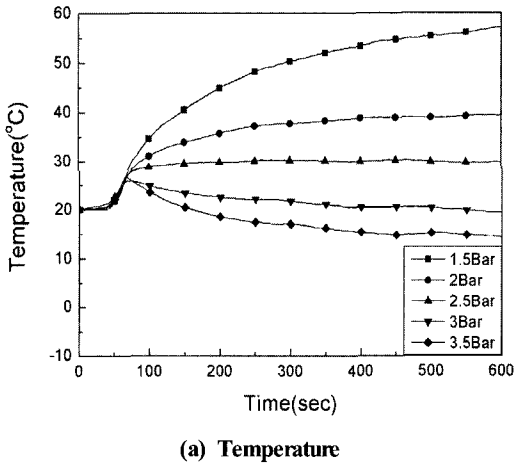
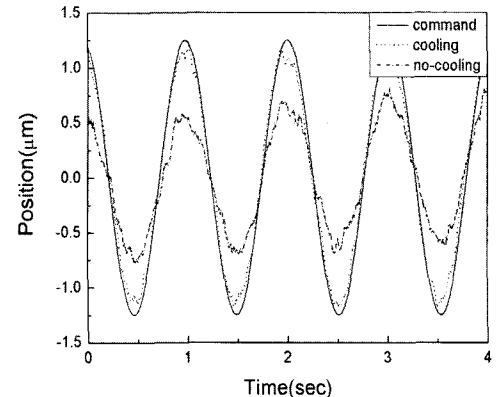
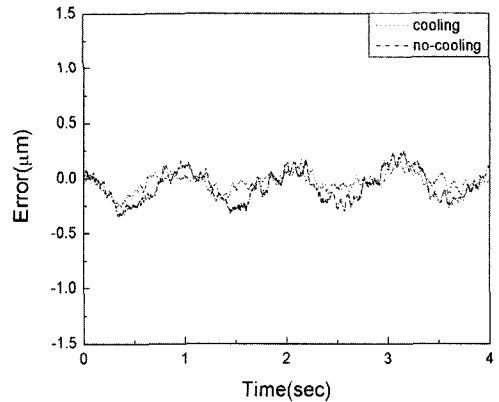
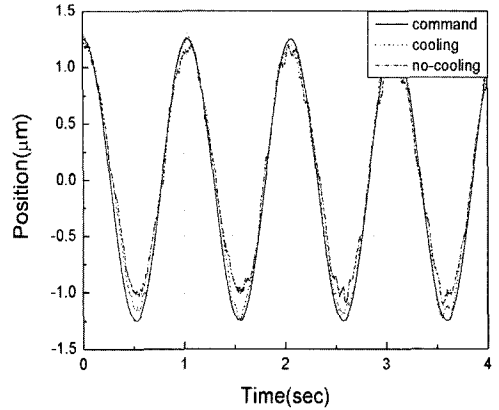
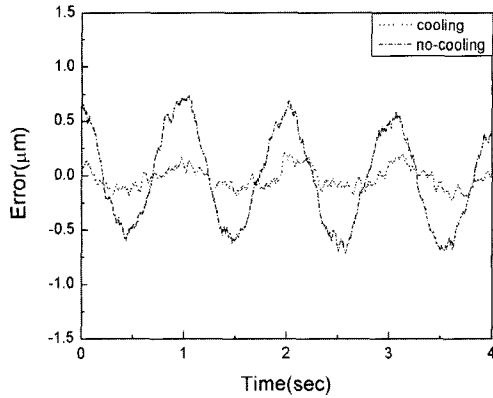
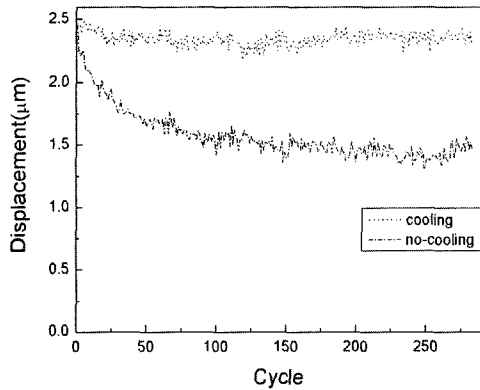


Fig. 8 Temperature and displacement behavior under different air pressure(4A input current)





(d) Tracking error after 20 sec



(e) Amplitude comparison of cooling and no cooling

Fig. 9 Sinusoidal response and tracking error with/without cooling

프이다. 냉각 시에는 출력 진폭의 변화가 일정한 반면 무냉각 시에는 온도 상승으로 인한 출력진폭의 변화가 점점 작아지는 것을 알 수가 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 자기변형소자 구동기의 열팽창 문제를 해결하기 위해 냉각시스템을 개발하였다. 개발된 냉각 시스템에 대해 적정 압력에 따른 냉각효과를 실험하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 스텝 전류를 인가했을 때 자기변형소자의 온도는 시간에 따라 지속적으로 상승하며, 이에 따라 변위가 일정하

게 유지되지 못하므로 정밀 위치제어에는 한계가 발생한다.

- (2) 입력 전류에 따라 온도의 초기상태유지가 가장 잘되는 최적의 공기 압력을 구하였다.
- (3) Sin 지령에 대한 최대 추종 오차는 냉각인 경우 시간에 따라  $0.25\mu\text{m}$  이내로 유지하지만, 무냉각인 경우에는 최대 추종 오차가  $0.35\mu\text{m}$ 에서  $0.74\mu\text{m}$ 로 증가한다.

## 후기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의해 연구되었음

## 참고문헌

- (1) Kim, H. S. and Kim, E. J., 2003, "Piezoelectric tool actuator for precision machining on conventional CNC turning center," *Precision Engineering*, Vol. 27, pp. 335~345.
- (2) Jenner, A. G., Smith, R. J. E. and Wilkinson, A. J., 2000, "Actuation and transduction by giant magnetostrictive alloys," *Mechatronics*, Vol. 10, pp. 457~466.
- (3) Claeysen, F., Lhermet, N., Le Letty, R. and Bouchilloux, P., 1997, "Actuators, transducers and motors based on giant magnetostrictive materials," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 258, pp. 61~73.
- (4) Goodfriend, M. J. and Shoop, K. M., 1991, "High force, high strain, wide bandwidth linear actuator using the material, Terfenol-D," *Proc. of the con. on recent advances in active control of sound and vibration*.
- (5) Dapino, M. J. and Calkins, F. T., 1998, "On identification and analysis of fundamental issues in Terfenol-D transducer modeling," *Proc. of SPIE Smart Structures and Materials*, Vol. 3329, pp. 185~197.
- (6) Hom, C. L. and Shankar, N., 1994, "A fully coupled constitutive model of electrostrictive ceramic material," *Second International Conference on Intelligent Materials*, ICIM, pp. 623~634.
- (7) Duenas, T. A., Hsu, L. and Carman, G. P., 1996,

- “Magnetostrictive composite material system analytical/experimental,” *Adv. Smart Materials Fundamentals and Applications*, Boston, MA.
- (8) Eiamsa, S. and Promvong, P., 2007, “Numerical investigation of the thermal separation in a Ranque-Hilsch vortex tube,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, Issues 5-6, pp. 821~832.
- (9) Liu, J. and Chou, Y. K., 2007, “On temperatures and tool wear in machining hypereutectic Al-Si alloys with vortex-tube cooling,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol, 47, pp. 635~645.