

압축 공기 냉각을 이용한 자기 변형 구동기의 열해석에 관한 연구

곽용길*, MD. G. Mostofa⁺, 황진동⁺⁺, 김선호⁺⁺⁺, 안중환⁺⁺⁺⁺
(논문접수일 2009. 4. 13, 심사완료일 2009. 6. 15)

A Study on Thermal Analysis for Magnetostrictive Actuator Using Compressed Air Cooling

Yong Kil Kwak*, MD. G. Mostofa⁺, Jin Dong Hwang⁺⁺, Sun Ho Kim⁺⁺⁺, Jung Hwan Ahn⁺⁺⁺⁺

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. Therefore, thermal strain of magnetostrictive material obstructs precision position control of magnetostrictive actuator, magnetostrictive actuator is need of cooling system. In this paper, cooling system using compressed cold air is developed and proper temperature and velocity of compressed cold air is studied by thermal analysis according to applied current.

Key Words : Magnetostrictive actuator(자기변형 구동기), Thermal analysis(열해석), 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 움직임을 이용한 마이크로 구동기로는 압전구동기, 형상 기억 합금, 자기변형 구동기 등이 있다. 압전구동기는 응답성은 좋으나 비선형성에 대한 제어가 어렵고 출력이 약해서⁽¹⁾ 큰 힘이 필

* 부산대학교 대학원 지능기계공학과 (ykkwak7@hanmail.net)
주소: 609-735 부산시 금정구 장전동 산 30
+ 부산대학교 대학원 지능기계공학과
++ 현대제철
+++ 동의대학교 메카트로닉스 공학과
++++ 부산대학교 기계공학부

요한 절삭가공이나 마이크로 프레스 가공에는 적합하지 않다. 형상기의 합금은 응답 속도가 느려서 정밀 구동에는 사용할 수 없고, 회전공구 클램핑 장치 등에 적용되어 왔다⁽²⁾. 자기변형소자는 압전소자보다 응답성은 약간 떨어지지만 큰 힘을 발생시키기 때문에 소형이면서 큰 힘을 요구하는 시스템에 적용할 수 있다⁽³⁻⁵⁾.

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 구동기를 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⁽⁶⁻⁸⁾.

따라서, 본 논문에서는 자기변형소자의 열변형에 관해 연구하였다. 자기변형소자 및 구조물에 대하여 3차원 모델링을 통하여 온도와 열변형에 대한 열해석을 수행하였고, 압축 공기의 유량 및 온도에 따른 자기변형소자의 온도 분포와 열변형을 해석하였다.

2. 자기변형구동기의 구조 및 냉각시스템

2.1 자기변형구동기의 구조

Fig. 1과 같이 본 연구에 사용된 자기변형 구동기의 구조이다.

예압볼트(Preload Bolt), 스프링와셔(Spring Washer)로 구동기의 느슨한 조립 오차를 없애고 변형율 특성이 최적이 되는 예압을 인가한다. 코일에서 발생된 자기장의 손실을 최

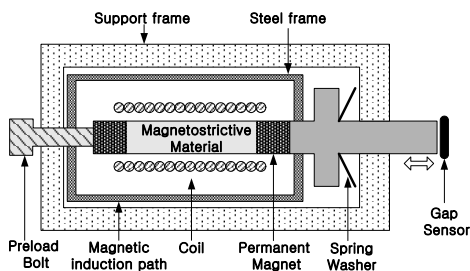


Fig. 1 Structure of magnetostrictive actuator

대한 줄이기 위해 고투자율 소재인 강(S45C)을 사용한 스틸 프레임(Steel Frame), 외각 지지부(Support Frame)는 자기장이 지지부를 통해 흐르는 것을 막기 위해 저투자율이면서 예압을 견딜 수 있는 고강성 재료를 사용한다. 자기변형 구동기의 작동 원리는 코일에서 발생된 자기장이 자기 유도부 로(Magnetic Induction Path)를 통해 자기변형소자로 인가 되고, 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_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.92})의 열전도율은 13.5W/mk, 열팽창계수는 약 $12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 큐리 온도(Curie Temperature)는 380 $^\circ\text{C}$ 이며, 이러한 열의 발생은 구동부, 외각 지지부, 기타 부품에 열팽창을 발생시킨다.

Table 1은 자기변형 액추에이터에서 발생한 총 열변형량에 대하여 주요 요소별 기여도를 실험을 통해 자기변형 소자 및 외각지지부의 열변형량을 각각 조사하여 나타난 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

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.

냉각 시스템에 사용되는 압축 냉각 공기는 Fig. 2와 같은

Table 1 Components contribution to thermal expansion error

components	ratio of total thermal expansion (%)
Magnetostrictive Material	60
Support Frame	30
Other Components	10

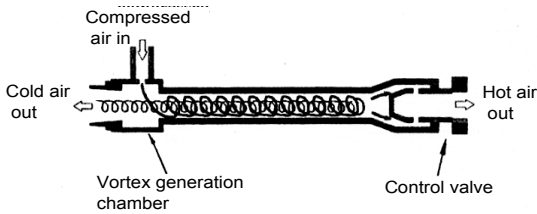


Fig. 2 Diagram of a vortex tube cooling device

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. 2와 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^(9,10).

본 연구에서는 이러한 보텍스 튜브를 통한 압축냉각공기를 냉매로 한 자기변형구동기의 냉각 시스템을 구성하였고, 냉각 공기의 온도는 최저 -8℃이며, 최대 유량은 $1000 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 이다.

3. 열해석

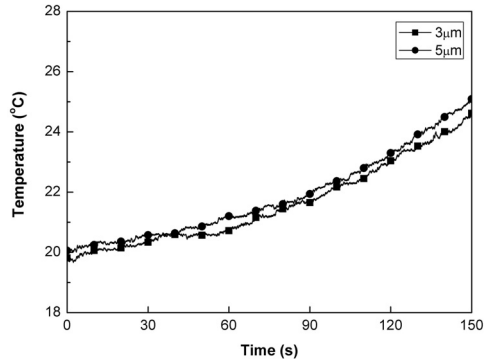
3.1 자기변형구동기의 열변형

Fig. 3은 무냉각 상태에서 자기 변형 구동기에 3, 5 μm 의 스텝 입력에 대한 PD제어를 하였을 때, 자기변형소자의 온도 및 자기변형구동기의 변위그래프이다. Fig. 3(a)에서 보는바와 같이 코일에 전류가 인가되면 온도는 증가한다. 초기에 온도가 증가하더라도 열변형이 작아서 구동기의 위치 제어가 되지만 온도가 증가함에 따라 약 80초 후에는 열변형에 의해 제어가 되지 않고, 변위가 원하는 입력치에 비해 증가하는 것을 볼 수가 있다. 따라서 자기변형구동기를 장시간 구동 시 냉각 장치는 필수적이며, 이에따라 열해석을 통해 입력 전류에 따른 냉각 조건 설정이 필요하다.

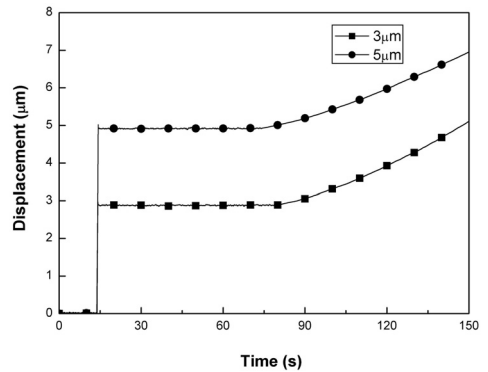
3.2 무냉각 열해석

Fig. 4에서 보는바와 같이 열해석을 위해 자기변형 구동기의 내부 구조를 3D로 모델링 하였다.

내부 및 외부 하우징, 공기, 자기변형소자로 이루어져있으며, 자기변형소자의 길이는 30mm이다. 각각의 부품들에 대



(a) Temperature



(b) Displacement

Fig. 3 Variation of temperature and displacement of step input without temperature control

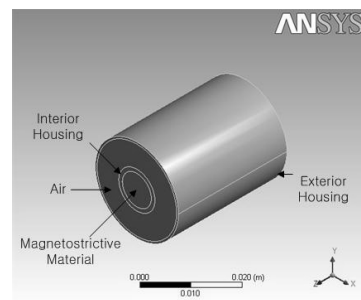


Fig. 4 Modeling of thermal analysis

한 열해석 조건은 Table 2와 같다.

자기변형소자의 물성치는 Tb0.3Dy0.7Fe1.92, 외부 하우징 및 내부 하우징은 알루미늄-6061를 사용하였다. 정상상태 열해석 조건은 대기 온도를 20℃, 공기의 유동이 없고

Table 2 Input condition for thermal analysis in magnetostrictive actuator

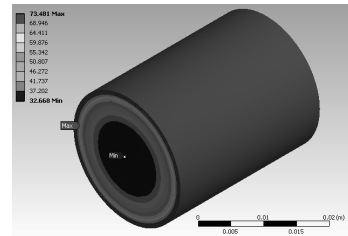
Mesh	Mesh Method		CFX mesh
	Nodes	MM	118724
		Exterior Housing	80132
		Interior Housing	54365
	Elements	MM	27964
Exterior Housing		11764	
Interior Housing		10132	
MM	Density(kg/m ³)	7800	
	Thermal Conductivity(13.5W/m ² °C)	13.5	
	Specific Heat(J/kg °C)	350	
Housing	Density(kg/m ³)	2770	
	Thermal Conductivity(13.5W/m ² °C)	180	
	Specific Heat(J/kg °C)	8755	
Steady-state thermal	Ambient Temperature(°C)	20	
	Convection(W/m ² °C)	5	

(Stagnant), 구동기의 내외부 하우징을 단순한 형태(Simplified Case)로 설정했을 때, 해석프로그램(Ansys)에 의해 공기의 대류열전달 계수는 자연대류인 5W/m²°C으로 설정되었다.

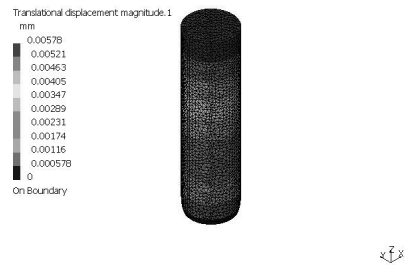
열해석은 냉각을 하지 않았을 때, 자기변형소자의 온도 분포 및 열응력, 열변형을 알아보고, 냉각 공기를 냉매로 하여 강제 대류시켰을 때 인가되는 전류에 따른 온도 분포를 열해석을 통해 온도분포, 열변형을 구하여, 실제 자기변형구동기를 구동할 때, 열변형이 발생하지 않고, 위치제어가 가능한 최적 냉각 조건을 알아보고자 한다.

Fig. 5(a)는 3A 전류를 흘렸을 때 정상상태 온도 분포이다. 코일이 감겨있는 외부 하우징의 온도가 가장 높고, 내부 하우징 및 자기 변형 소자의 온도는 32~37°C 사이의 온도 분포를 보인다. Fig. 5(b)는 그때의 열변형율을 나타낸다. 자기변형소자의 아래 부분은 클램핑 있어 변형이 없고 구동기의 푸쉬로드와 연결된 부분의 최대 열변형은 5.8μm이다.

Fig. 6은 3A 전류를 인가했을 때 시간에 따른 온도 실험 및 시뮬레이션 결과이다. 온도는 일정하게 증가하며, 실험치 및 시뮬레이션 결과값이 유사한 패턴을 보인다. 실험치 온도가 더 높은 이유는 시뮬레이션에서는 전도, 대류만을 고려하였고, 복사열에 대한 영향은 고려하지 않았기 때문이다.



(a) Temperature distribution



(b) Thermal strain

Fig. 5 Steady-state thermal analysis

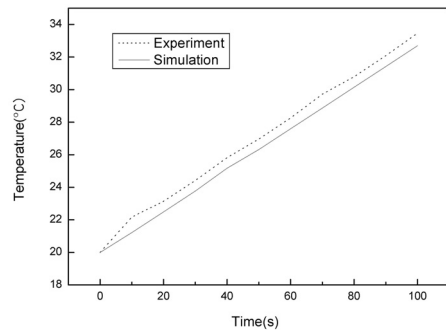


Fig. 6 Simulation result according to time

3.3 냉각 열해석

Fig. 7은 자기변형구동기 내의 공기, 외부하우징, 내부하우징, 자기변형소자의 열해석을 위한 경계조건을 3D로 나타낸 그림이다. Fig. 7에서 보는바와 같이 냉각 공기는 내부하우징, 외부하우징을 모두 통과하여 출구로 향하며, 외부 하우징과 공기의 열이 내부 하우징 및 자기변형소자로 전달된다.

자기변형구동기의 입구 측 공기의 온도 및 유량은 Table 3과 같다. 자기변형소자의 초기 온도는 20°C, 입력 전류는 3A(정상 상태 외부 하우징 온도 73°C)로 하였고, 냉각 공기의 온도 및 유량 조건은 압축 공기의 압력을 압력조절기를

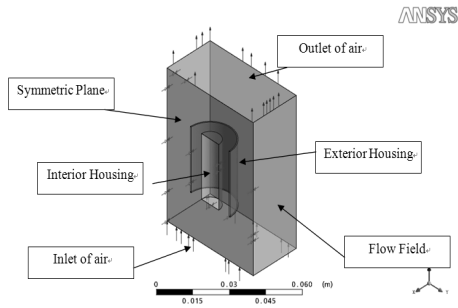


Fig. 7 Diagram of boundary condition

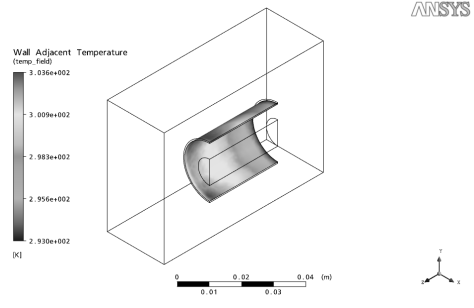
Table 3 Input boundary condition for temperature and flow rate

Node	60546	
Element	270305	
Mesh type	Tetrahedral	
Applied Exterior Temperature	73 °C	
Applied Interior Temperature	20 °C	
Outlet Pressure	1 bar	
Inlet Air Condition	Temperature (°C)	Flow Rate (10 ⁻⁶ m ³ /s)
1	19.5	2.5
2	18	5.0
3	13.4	140
4	13	200
5	7.4	280
6	5.8	310
7	-0.8	360
8	-2.6	410

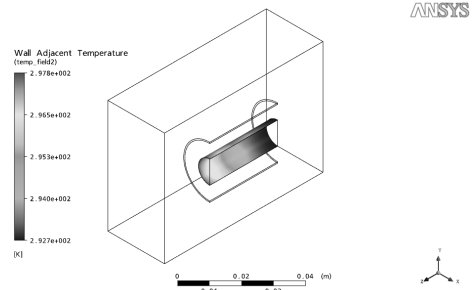
이용하여 8단계로 설정한 후, 열선식 유량계로 측정하여 선정하였다.

Fig. 8은 입구측 공기의 온도가 18 °C, 유량이 5 × 10⁻⁶ m³/s 일때 외부하우징, 내부하우징, 출구 측 공기 온도 및 열변형율을 해석한 결과이다.

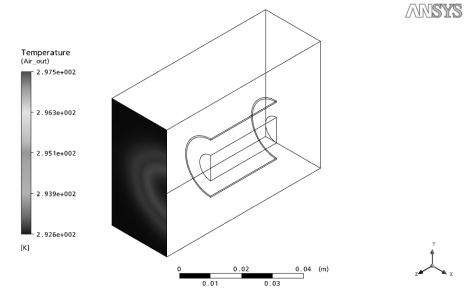
온도 해석 결과 외부하우징의 온도는 42.7 ~ 73 °C 이며, 내부 하우징의 온도는 19.8 ~ 22.6 °C 이다. 내부 하우징의 열 유속은 최대 3.2 W/m², 최소 -26.8 W/m²을 나타내며, 출구측 공기의 온도는 최고 24.4 °C, 최소 19.5 °C 이며, 최대 열변형



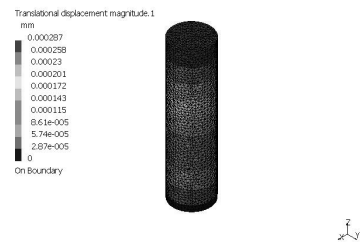
(a) Exterior housing



(b) Interior housing



(c) Outlet air temperature



(d) Thermal strain

Fig. 8 Thermal analysis for inlet air condition 2

율은 0.29 μm 이다.

Table 4는 입구 측 공기의 조건을 8가지로 하여 해석한

Table 4 Simulation results for various inlet air condition

Boundary set at Inlet	Position	Wall Temp (°C)		Heat Flux (W/m ²)		Outlet Air Temp (°C)		Thermal Strain(μm)
		Max	Min	Max	Min	Max	Min	
1	Exterior housing	73.0	47.3	296.6	111.5	30.1	27.2	1.72
	Interior housing	29.0	20.0	-25.5	-162			
2	Exterior housing	73.0	42.7	301.3	107.8	24.4	19.5	0.29
	Interior housing	22.6	19.8	3.2	-26.8			
3	Exterior housing	73.0	39.0	2338	678	15.5	13.45	-0.68
	Interior housing	20.0	17.0	422.5	98.2			
4	Exterior housing	73.0	38.8	3541	951	15.2	13.1	-0.71
	Interior housing	20.0	16.4	576.7	145			
5	Exterior housing	73.0	35.6	6128	1483	10.0	7.45	-1.29
	Interior housing	20.0	13.4	1353	379			
6	Exterior housing	73.0	34.6	6987	1657	8.5	5.9	-1.45
	Interior housing	20.0	12.6	1627	469			
7	Exterior housing	73.0	31.0	9460	2161	2.3	-0.9	-2.13
	Interior housing	20.0	9.1	2703	827			
8	Exterior housing	73.0	30.1	11364	2540	0.7	-2.6	-2.32
	Interior housing	20.0	8.1	3252	1047			

결과이다. 공기의 온도가 낮고, 유량이 클수록 열유속이 점차 증가하여 내부하우징의 온도가 낮아지는 것을 알 수가 있다. 1번 조건(온도 : 19.5°C, 유량 : 2.5×10⁻⁶m³/s)과 2번 조건(온도 : 18°C, 유량 : 5×10⁻⁶m³/s)의 경우에는 열유속이 음수가 되어 출구 측 공기의 온도가 각각 최대 30.1°C, 24.4°C로 상승하며, 3A(정상상태 외부 하우징 온도 73°C) 인가 시에는 공기의 온도는 18°C, 유량이 5×10⁻⁶m³/s 일때가 열변형이 가장 작아 자기변형 구동기를 구동할 때 가장 적합하며, 온도가 더 낮거나 유량이 커지면 자기변형소자는 열수축한다.

4. 결론

본 연구에서는 측정된 온도 값을 기준으로 자기변형구동기의 온도분포 및 열변형을 유한 요소 해석 프로그램에 적용하여 열해석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 무냉각시 3A입력 전류가 흐를 때, 자기변형소자의 온도는 최저 32°C에서 최고 37°C까지 증가하였으며, 이때

열변형은 최대 5.78μm이다.

- (2) 3A 입력 전류가 흐를 때, 냉각 공기의 온도 및 유량을 8가지 조건으로 해석을 하였고, 공기의 온도가 18°C, 유량이 5×10⁻⁶m³/s 일때, 열변형율은 0.29μm로 가장 작다.
- (3) 열해석 결과를 이용하여 자기변형 구동기의 구동시, 냉각 공기의 최적 온도, 유량을 설정하는 것이 가능하다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

- (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) Chung, J. M., Shin, W. C., and Lee, D. J., 2008, "Implementation of the rotating tool clamping device using a shape memory alloy," *Trans. of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 17, pp. 16~20.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) 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*, pp. 76~82.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) Duenas, T. A., Hsu, L., and Carman, G. P., 1996, "Magnetostrictive Composite Material System Analytical/Experimental," *Adv. Smart Materials Fundamentals and Applications*, Boston, MA, pp. 356~361.
- (9) 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.
- (10) 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.