

## 열전소자를 이용한 정밀 열구동기구의 설계 및 제어

### Design and Control of the Precision Heat Actuator using Thermoelectric Device

°서 장렬, 김 선민, 이 선규

광주과학기술원 기전공학과 (Tel : +82-62-970-2430; Fax : +82-62-970-2384; E-mail : jrseo@ultraman.kjist.ac.kr)

**Abstracts** In the modern manufacturing system, to achieve the unmanned automation, the stability of accuracy is required through a long working period. The thermal deformation of precision machine is predominant in this long time stability. While grinding slender and long workpiece at cylindrical grinding machine, we support workpiece using steadies to prevent the vibration of workpiece. The thermal deformation of the machine by grinding and internal heat source cause processing errors, so the steadies for compensating the thermal deformation in real time are strongly needed. In order to compensate these thermal deformation and grinding processing errors, the device to determine the precise positioning having the stroke of 10 $\mu$ m is necessary. This paper suggests design and make the device to determine the precise positioning using thermoelectric device, to investigate the control characteristics and presents the heat actuator will be very useful in machine tool.

**Keywords** Thermal Deformation, Steady, Compensation, Thermoelectric Device, Heat Actuator

#### 1. 서론

최근 제조산업에 있어서 생산현장의 무인자동화가 급속히 진행되고 있다. 공작기계의 자동화·무인화를 실현하기 위해서는 장시간에 걸쳐 안정된 정도가 요구되는 데, 이를 위해서는 공작기계 열변형의 극복이 가장 중요한 요소가 된다. 이 열변형의 원인으로는 내부 열원과 외부 열원이 있다. 내부 열원으로는 주축 베어링, 기어, 모터, 유압원 등이 있는데, 주축 베어링은 발생열을 적게 하기 위해 그 열적 거동을 해석하여 미소 에어유펙, 자켓냉각, 전자냉각등의 열변형 방지 대책이 제안, 실시되고 있다. 외부 열원으로는 실내 온도의 변화가 있는데 이에 대한 대책으로는 대류나 복사의 열전달에 의한 구성부재의 가열로 공작기계의 열변형을 보정하는 방법이 있다[1]. 주축의 고속화에 의한 열발생을 제어하기 위해서 전자 냉각을 이용한 경우도 있다[2].

정밀한 형상가공을 수행하는 원통연삭기에 있어서 길고 가는 공작물의 진동방지를 위하여 방진구를 사용하여 지지하는데[3,4], 장시간 가공중의 연삭열 및 기계내의 열원에 의한 공작기계의 열변형은 가공오차를 유발하게 되며 이러한 열변형은 장시간에 걸쳐서 수  $\mu$ m 단위로 연속적인 증감을 계속하기 때문에 이를 실시간으로 보상하기 위한 새로운 기구가 요구된다. 본 논문에서는 기존의 원통연삭기에 사용되는 방진구의 기계적인 기능을 해치지 않고 그 지지부에 설치 가능한 기구로서 재료의 열변형을 이용하는 열구동기구(heat actuator)를 제시한다. 이를 통하여 그 소재와 형상의 제약을 받지 않는 저가의 구동기구를 실현할 수 있다. 또한 구동기구와 구동회로에 의한 이산적인 분해능을 가지지 않고, 연속적인 위치결정을 나타내는 시스템을 구현하는 것이 가능하다.

본 논문은 크게 다음과 같은 두 부분으로 나누어 진다.

첫째는, 열구동기구의 기계적 시스템의 설계와 하드웨어 구현에 관해 다룬다. 특별히 본 연구에서는 열구동기구의 열원으로 열전소자(Peltier thermoelectric device)를 이용한 전자 냉각·가열장치를 사용하여 플랜지를 가지는 봉 형상의 구동부를 가열·냉각하며, 이 열변형을 미소 위치결정에 이용하는 열구동 시스템을 설계한다.

둘째로는 제작된 열구동기구의 전달함수를 파악하고 제어기의 최적화된 설계에 의해 열구동기구의 과도응답특성을 개선하고 정상상태오차를 최소화한다

#### 2. 열구동기구의 설계

##### 1.2 열전소자의 원리

열전소자에 의한 전자기열·냉각법은 열전대에 의한 온도 측정 원리를 반대로 이용한 것으로, 2 종류의 물질이 접합되어 있을 때 이 2 종류의 물질간에 전류가 흐르면, 그 접합면에 열의 흡수 또는 발열이 일어나는 것을 이용한 것으로 이를 펠체효과라 부른다. Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 등을 소재로 한 P, N 반도체를 Fig. 1 과 같이 배열하고 전압을 가하면 반도체에 전류가 흐르고 흡열면에서 발열면으로 열이동이 일어난다. 이러한 열전소자는 전기적으로는 직렬로 열적으로는 병렬로 연결되어 있어 열펌핑(heat pumping) 능력은 흐르는 전류와 반도체 소자 쌍의 수에 비례한다. 흐르는 전류를 반대로 바꾸면 열전소자는 흡열면과 발열면이 바뀌어 작동한다. 따라서 한쪽 면에 붙은 물체를 전류의 방향만 바꾸면 가열 또는 냉각을 할 수 있으므로 물체의 온도 조절을 쉽게 할 수 있고 제어 이론을 적용하여 온도 조절이 용이하다.

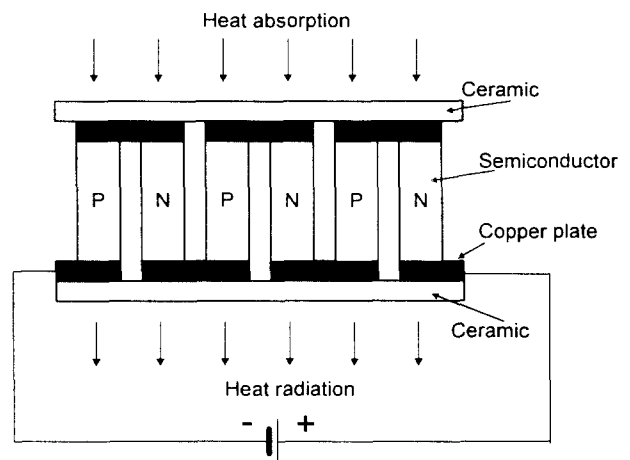


그림 1. 열전소자의 원리  
Fig. 1 Principle of thermoelectric device

## 2.2 열구동기구의 설계

실제 방진구의 변위를 조정하기 위한 구동부의 모델로 Fig. 2 와 같은 실험장치를 구성하였다. 구동부의 지름은 12mm 로 하고 구동부의 한쪽에 3mm 두께의 플랜지를 만들어 이 면에 열전소자를 부착하였다. 열전소자의 플랜지 반대면에는 알루미늄 방열판과 팬을 부착하여 냉각 시의 성능을 향상시켰다. 구동부는 베이클라이트 단열재로 감싸서 열의 누설을 줄이고, 지그에 플랜지부를 나사로 고정하여 구동부만의 열변위가 측정되도록 하였다. 열변위는 0.01 $\mu$ m 의 분해능을 가지는 정전형 비접촉 변위센서를 사용하여 측정하였다. 구동부의 재질을 선정하기 위한 기초 실험으로 구동부의 재질을 강, 구리 및 알루미늄으로 만들어, 일정한 1.8A 의 전류 입력에 대한 과도 열변위 특성을 실험으로 파악하였다. (Fig. 3) 본 연구 목적상 원동연삭기에 적용하기 위한 열구동기구의 설계 목표가 60 초에 5 $\mu$ m 정도의 변위가 요구되므로 봉의 강도를 감안하여 구동부의 재질로 구리를 사용하였다.

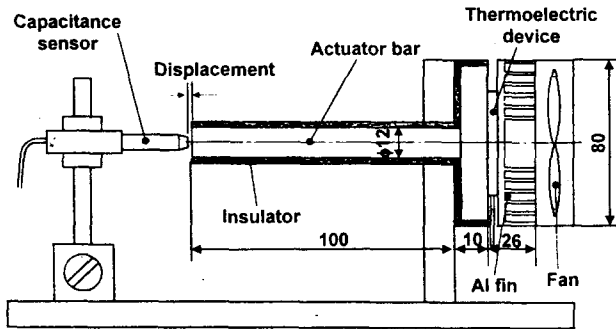


그림 2. 열구동기구의 구조  
Fig. 2 Structure of heat actuator

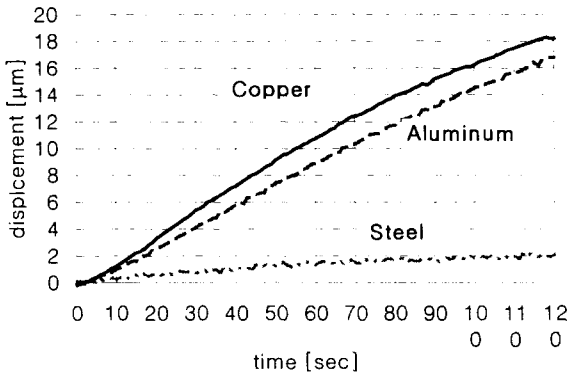


그림 3. 재질의 종류에 따른 변위량 (전류:1.8A)  
Fig. 3 Displacement of various materials (current:1.8A)

## 3. 열구동기구의 제어

### 3.1 시스템의 모델링

열구동기구의 시스템이 원하는 성능을 가지도록 제어기를 설계하기 위하여서는 먼저 이 시스템의 전달함수를 알아야 한다. 이러한 시스템의 전달함수를 구하는 방법은 크게 두 가지가 있다.

첫째는 각 하위 시스템의 물리적 법칙에서 시스템을 기술할 수 있는 수학적 모델을 구하고 이들을 결합하여 시스템 전체의 전달함수를 이론적으로 구하는 방법이다. 둘째는 전체 시스템에 시스템 특성을 잘 나타내는 신호를 입력하고 출력을 분석하여 전체 시스템의 전달함수를 실험적으로 구하는 방법이다. 보통 정현파 신호나 임펄스 신호가 입력으로 사용된다.

열구동기구의 경우 구동봉, 단열재, 열전소자, 방열판, 냉각팬 등의 시스템 하위 구성 요소들의 열전달 방정식과 구동회

로의 특성을 수식화 하여 전체의 시스템 전달함수를 구할 수 있다. 그러나 실제에 있어서 이러한 각각의 열전달 현상을 규명하여 이를 실험으로 확인하고, 전체 시스템으로 통합하여 하나의 전달함수를 구하는 과정은 수많은 실험과 주위환경에 영향을 많이 받는 열전달 특성으로 인하여 결합상의 오차가 많아지는 등 매우 어렵고 오차를 가능성이 있다. 따라서 본 논문에서는 개략적인 수학적 모델을 상정하고, 이를 기반으로 실험을 통해 전체 시스템의 전달함수를 구한다.

구동부의 변위 즉 열팽창은 온도 변화에 비례한다. 즉,

$$\Delta L = \alpha L \Delta T \quad (1)$$

여기서,  $\Delta l$  = 구동부의 변위  
 $\alpha$  = 구동부의 선팽창 계수  
 $L$  = 구동부의 길이  
 $\Delta T$  = 구동부의 온도 변화

구동부의 온도가 일정하고 단열되었다고 가정하면

$$q = C \frac{dT}{dt} \quad (2)$$

여기서,  $q$  = 구동부에 유입되는 열전달률  
 $C$  = 구동부의 열용량  
 $\frac{dT}{dt}$  = 구동부의 온도 변화율

이 된다. 따라서 구동부의 변위는

$$\Delta l = \frac{\alpha L}{C} \int q dt \quad (3)$$

가 된다. 즉 구동부에 유입되는 열전달률  $q$ 에 대한 1/s 의 1 차 시스템이 예상된다.

시스템 전체의 전달함수를 실험적으로 구하기 위하여 Fig. 4 와 같이 실험장치를 구성하였다. 열구동기구, 전류 앰프, 전력공급원 및 동적신호분석기를 연결한다. 동적신호분석기의 신호 분석 기능 중 Swept sine 모드를 이용하여 주파수응답 특성을 구한다. 3A 의 정현파 입력에 대응되는 5V 의 정현파 신호를 입력하고, 정전형 비접촉 변위센서로 측정된 구동부의 변위출력을 동적신호분석기에 입력한다. 이때 출력변위는 100 $\mu$ m 당 10V 의 비율로 동적신호분석기에 입력된다. 입력신호는 15.6mHz 에서 100mHz 까지를 사용하고 100mHz 이상의 신호는 출력신호가 너무 작고 왜곡이 심하여 제외하였다. 이 주파수응답 특성으로 동적신호분석기에서 제공하는 가중최소제곱근사(weighted least-squares fit) 기능을 이용하여 전달함수의 극점과 영점을 구한다. 극점과 영점의 수를 조정하여 여러 가지 전달함수를 구할 수 있다. 실험 결과 측정 주파수 영역이 너무 좁아 전달함수 추정 오차가 우려되어 15.6mHz 이하의 저주파 영역의 특성을 함수 발생기로 2mHz 까지 신호를 입력하고 입력과 출력신호를 X-Y 기록계로 기록하여 수작업으로 전달함수의 크기와 위상을 구하였다. Fig. 5 는 실험치와 실험치로 추정된 전달함수의 보드 선도를 나타낸 것이다. 이 실험결과로부터 전형적인 1 차 시스템으로 예측한 이론과 일치됨을 알 수 있다.

실험으로 추정된 시스템의 전달함수는 다음과 같다.

$$G_x(s) = \frac{0.0020(s+0.4357)}{(s+0.0123)(s+0.1587)} \quad (4)$$

이 전달함수를 보면 열구동기구는 극점이 모두 s 평면의 허수축보다 왼쪽에 있는 안정된 시스템임을 알 수 있다.

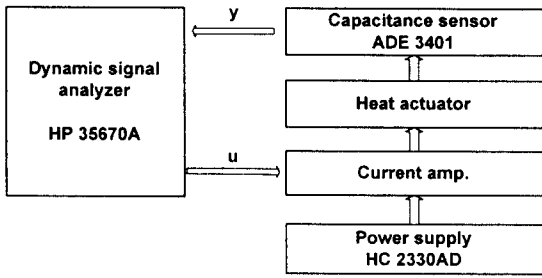


그림 4. 동적신호분석기를 이용한 전달함수 파악  
Fig. 4 Block diagram of system identification using dynamic signal analyzer

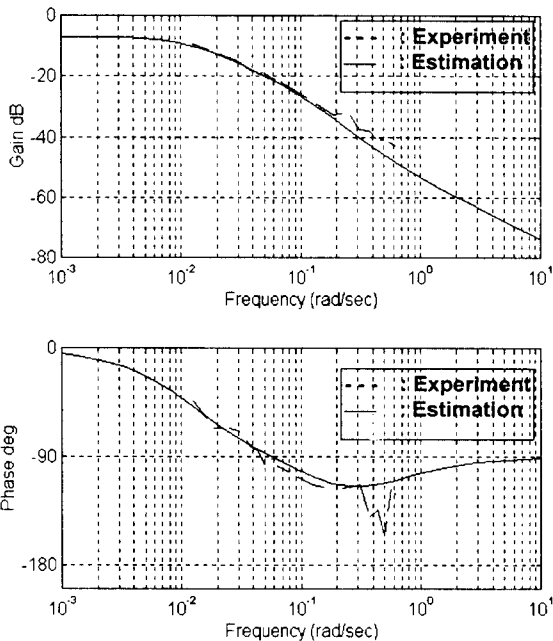


그림 5. 실험 및 근사화한 열구동기구의 보드 선도  
Fig. 5 Bode plot of the heat actuator by experiment and estimation

### 3.2 제어기 설계

열구동기구를, 원통연삭기의 열변형 및 공작물의 연삭력 변화에 따른 변형을 보상하기 위한, 액추에이터로 사용하기 위한 시간영역의 설계사양은 Table 1 과 같다.

표 1. 열구동기구의 시간영역 설계 사양

Table 1. Design specification of the heat actuator in time domain

Performance characteristics	Specification
Step input, Steady state error, $e_{ss}$ [%]	$\leq 0.5$
Maximum overshoot, $M_p$ [%]	$\leq 5$
Settling time, $t_s$ [sec] ( $5\mu\text{m}$ step input)	$\leq 60$

제어기는 설계가 쉽고 산업계에서 많이 사용하는 PID 제어기를 사용한다. 먼저 P 제어기만 사용할 때의 비례상수 K를 구한다. 플랜트의 계단오차상수 (step-error constant)를  $K_p$ 라 하면

$$K_p = \lim_{s \rightarrow 0} G_x(s) = 0.4464 \quad (5)$$

가 된다. 계단입력 정상상태오차 사양을 적용하면 P 제어기의

비례상수 K는

$$e_{ss} = \frac{1}{1 + KK_o} \leq 0.005$$

가 되고

$$K = 445.8 \approx 450 \quad (6)$$

이 된다. 이 P 제어기만 사용하여 0.1초 간격으로 모사 (simulation)한 결과  $e_{ss}=2.41\%$ ,  $M_p=1.16\%$ 로 정상상태오차가 설계 사양을 벗어나므로 시스템의 안정성을 높이기 위하여 I 제어기를 추가한다. I 제어기의 비례상수를  $K_i$ 라 하면 페루프 시스템의 특성방정식은

$$s(s + 0.0123)(s + 0.1587) + 0.002K_i * (s + \frac{K_i}{K})(s + 0.4357) = 0 \quad (7)$$

이 된다. 이 특성방정식의 근궤적을  $K_i$ 에 대하여 그리면 Fig. 6 과 같다. 최대오버슈트를 0.5% 이하로 하기 위해  $\zeta=0.69$  이상의 적분비례상수를 구하여 모사, 시행착오 방법으로 최적의 적분비례상수를 구하면

$$K_i = 0.1668 \quad (8)$$

을 구할 수 있다. 이 PI 제어기를 장착한 열구동기구의 모사결과,  $e_{ss}=0\%$ ,  $M_p=1.65\%$ 로 정상상태 오차가 개선되어 설계 사양을 만족한다. D 보상은 전류 앰프의 한계로 시스템의 과도특성을 더 빠르게 할 수 없으므로 사용하지 않는다. 따라서 PI 제어기의 전달함수는

$$G_c(s) = 450 + \frac{0.1668}{s} \quad (9)$$

이 된다.

표 2. 제어기에 따른 열구동기구의 시간영역 특성 비교  
Table 2. Characteristics comparison of the heat actuator for various controllers in time domain

Performance characteristics	P	PI
Step input, Steady state error, $e_{ss}$ [%]	2.41	0
Maximum overshoot, $M_p$ [%]	1.16	1.65
Settling time, $t_s$ [sec] ( $5\mu\text{m}$ step input)	23.5	23.5

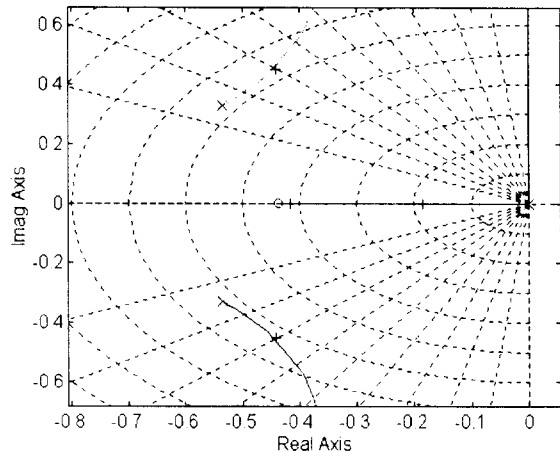


그림 6.  $K=450$  일 때 PI 제어기를 장착한 페루프 시스템의 근궤적  
Fig. 6 Root locus of heat actuator with PI compensator at  $K=450$

#### 4. 결론

원통 연삭기의 열변형 및 연삭력 변화에 따른 공작물의 변형을 보상하기 위한 방진구용 정밀 열구동기구를 설계, 제작하여 시스템의 특성을 파악하고 이에 알맞은 제어를 설계하고 실험을 통하여 열구동기구의 제어 성능을 확인하였다. 열구동기구의 설계에서 열전소자를 채용하여 전류의 방향만 바꾸어 가열과 냉각이 가능한 구조를 만들어 열변위의 제어를 연속적으로 가능한 시스템을 고안하여 실험적으로 주파수 응답과 전달함수를 구하고 PI 제어기를 장착하여 5 $\mu$ m의 계단응답의 정정시간이 30 초 이내인 열구동기구를 개발하였다.

그 결과, 개발된 시스템은 기계가공 시스템에 있어서 기계의 열변형을 저가격으로 보상할 수 있는 것이 입증되었으며, 향후 과제로는 구동부의 열전달 해석을 통하여 구동봉과 집열 플랜지의 최적형상에 대한 검토가 요구된다.

#### 감사

본 연구를 수행함에 있어서 본 학과 류 제하 교수님의 많은 조언에 심심한 감사를 표합니다.

#### 참고문헌

- [1] N. Koreta, K. Watabe, R. Hashimoto and K. Mizuta, "Study on Control of Thermal Deformation of Machine Tool Structure due to Room Temperature's Change by Use of Thermal Insulating Balancing Boards", *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, vol.60, No.6, pp.853-857,1994
- [2] N. Koreta, K. Jinno, T. Rokkaku, N. Mizuta and K. Watabe, "Thermoelectric Cooling of Machine Tool Spindle", *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, vol. 60, No. 5, pp.652-656,1994
- [3] Y. Gao and K. Poster, "Computer Simulation of the Deformation of Slender, Multidiameter Rollers during Grinding", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol.31, No.1, pp.83-93, 1991
- [4] S. Bajpai, "Optimization of Workpiece Size for Turning Accurate Cylindrical Parts", *Int. J. Mach. Tools Des. Res.* Vol. 12, pp. 221-228,1972
- [5] B.C. Kuo, 'Automatic Control Systems', 6<sup>th</sup> ed., Prentice-Hall,1991
- [6] 棚澤 一郎, '溫度測定法', 養賢堂, 1985

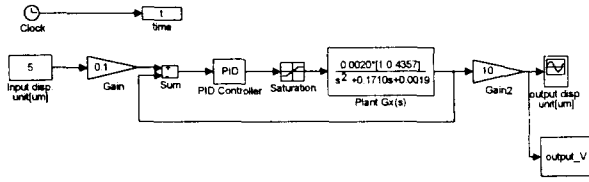


그림 7. 열구동기구의 제어 블록선도  
Fig. 7 Control block diagram of heat actuator

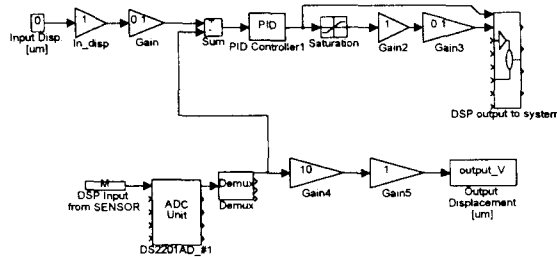


그림 8. DSP를 이용한 열구동기구의 HILS 실험 블록선도  
Fig. 8 HILS block diagram of the heat actuator experiment using DSP

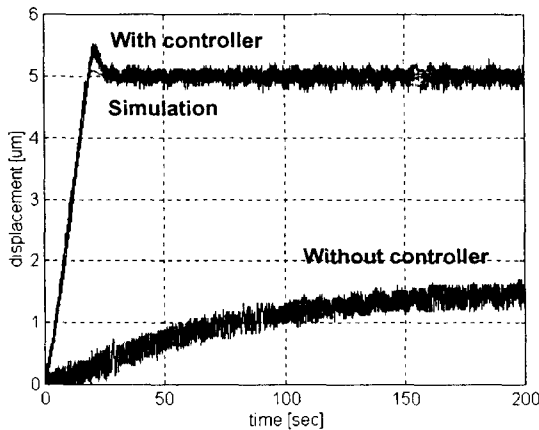


그림 9. 열구동기구의 5 $\mu$ m 계단입력 응답  
Fig. 9 5 $\mu$ m step response of heat actuator

Fig. 7은 열구동기구의 모사를 위한 제어 블록선도를 나타낸 것으로 'Gain'과 'Gain 2'는  $\mu$ m 단위로 입력과 출력을 보기 위한 감도 조정이고 'Saturation'은  $\pm 5V$ 를 한계치로 정하였다.

Fig. 8은 열구동기구의 DSP 블록선도로 열구동기구는 'DSP output to system' 블록을 통해 제어기의 입력신호를 받아 구동되고 그 출력을 'ADC Unit' 블록을 통해 변환한다.

Fig. 9는 열구동기구의 5 $\mu$ m 계단입력에 대한 반응을 나타낸 것으로 PI 제어기를 장착했을 때와 하지 않았을 때의 응답 차이가 매우 큼을 알 수 있다. PI 제어기를 장착했을 때의 모사와 실험 결과가 잘 일치하고 제어기의 설계 사양을 만족함을 알 수 있다. 실험 신호의 진동은, 냉각팬의 진동이 고정 지그의 가벼움으로 구동봉 끝에 나타난 현상으로 실제 방진구에 장착되었을 때에는 방진구가 상당히 무거워 이 진동을 방진구가 흡수하여 문제가 없을 것으로 예상된다.