

본 연구는 1996년도 교육부 학술 연구 조성비(기계공학 ME96-E-31)에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

## 자기변형재료를 이용한 절삭공구용 마이크로포지셔너의 개발

박 영 우\*, 원 문 철\*

### Development of a Cutting Tool Micropositioner Using a Magnetostrictive Material

Young-Woo Park\*, Moon-Cheol Won\*

#### ABSTRACT

In the machining process, variation in cutting forces results in relative displacements between the tool and the workpiece leading to tool vibration. Also there is a demand to change the depth of cut very frequently. One solution for the both cases is to develop a system which has the ability to reposition a cutting tool to a very small level, i.e., micron. This paper presents the development of a micropositioner using a magnetostrictive material. The developed micropositioner is implemented to a lathe and subjected to various tests. The results show that the micropositioner with a magnetostrictive actuator has good potential for machining application.

**Key Words** : magnetostriction(자기변형), micropositioning(미소위치결정), relative displacement(상대변위), Terfenol-D(터페놀-디), machining(절삭가공), PI control(PI 제어)

#### 1. 서 론

가공시 절삭력의 변동은 공구진동을 야기하면서 절삭공구와 가공물 사이의 상대적 변위를 일으켜 절삭가공의 질에 영향을 미친다. 따라서, 공구와 가공물 사이의 상대적 변위를 일정한 수준으로 유지하는 것이 필요하다. 또한, 경우에 따라서 절삭깊이를 매우 빈번하게 바꾸면서 비원통형 가공물을 가공해야될 필요가 있다. 이러한 문제들은 공구를 마이크로 단위로 제어할 수 있는 능력을 갖춘 마이크로포지셔너를 개발함으로써 가능하다.

마이크로포지셔너에 사용 가능한 기술은 다양하다. 즉,

압전, 유압, 기억형상합금, 전자기, 정전기 등을 들 수 있다<sup>1-4</sup>. 그 중 압전 액추에이터가 가장 많이 사용되고 있으나 변위와 출력이 상대적으로 작은 단점이 있다.

자기변형 효과는 1842년 제임스 쥬올에 의해 니켈에서 처음으로 발견되었다. 그 후 코발트, 철, 그리고 이러한 재료들의 합금들로 자기변형효과를 보이는 것으로 밝혀졌으나 최대 자기 변형치가 50ppm정도로서, 유사한 기능을 가진 압전재료의 변형치보다 상당히 작았기 때문에 그리 큰 관심을 끌지는 못하였다. 그러나 철과 희토류 금속의 합금에 기초한 자기변형재료의 개발은 새로운 응용분야의 발전을 급격히 야기했다. 현존하는 자기변형재료

\* 충남대학교 메카트로닉스공학과

로서 가장 유망한 것은 미국의 Etrema사에서 생산. 판매하고 있는 Terfenol-D이며 약 2000ppm정도의 최대 자기 변형치를 낼 수 있다<sup>5</sup>. Terfenol-D는 희토류 금속인 테르븀(Terbium)의 Ter, 철(iron)의 원소기호인 Fe, 개발된 장소인 NOL(Navy Ordance Lab), 그리고 또 다른 희토류 금속인 디스프로슘(Dysprosium)의 D로 구성된 합성어이다.

자기변형재료를 이용한 분야는 국내에서는 아직 연구가 활성화되지 않은 상태이지만, 외국의 경우 이러한 재료를 이용한 연구가 매우 활발하다. Calkins 등은 Terfenol-D 액추에이터를 이용하여 수직 밀링머신의 떨림을 줄이고자하는 연구를 했지만, 실제적으로는 저자들이 설계한 회전축을 이용하여 밀링가공을 시뮬레이션 했다<sup>6</sup>. Eda 등은 자체에 개발한 자기변형재료를 이용한 액추에이터를 개발하여 초정밀 가공에 성공적으로 적용하였다<sup>7</sup>. Mechler 등은 자기변형재료를 이용한 액추에이터가 절삭가공용 마이크로포지쇼너를 개발해서 그 가능성을 제시했지만 제한된 범위의 가공에 적용하는데 그쳤다<sup>8</sup>.

본 연구의 목적은 자기변형재료를 이용한 선삭용 마이크로포지쇼너를 개발하고 개발된 시스템을 실제가공에 적용하여 정적 및 가공 특성 시험 그리고 동특성 및 위치 제어를 행함에 있다.

## 2. 자기변형

자기변형 현상은 자기변형재료가 자장 속에서 축방향으로 길이가 늘어나고 줄어서 선형적으로 움직이는 현상이다. 외부 전원장치에 의해 구동되는 코일이 자기변형재료를 감싸고 필요한 자기장을 공급한다. 이러한 현상은 Fig. 1에 나타난다. 만약 Terfenol-D 로드상에 가해진 기계적 응력이 없다면, 선형적 변환은 아래의 식으로 표현될 수 있다.

$$S = Hd \tag{1}$$

단,  $d$ 는 Terfenol-D의 자기변형 상수로서  $20 \times 10^{-9}$  m/A의 값을 가진다.

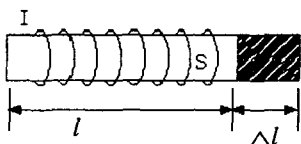


Fig. 1 Magnetostriction Phenomeeon

자장밀도(H)는 다음과 같이 표현된다.

$$H = n \times I = \frac{N}{l} \times I \tag{2}$$

단, N=코일의 감은 횟수, l=로드의 길이, I=전류. 또한 로드들의 늘어난 길이가  $\Delta l$ 인 경우, 스트레인은 다음과 같이 정의된다.

$$S = \frac{\Delta l}{l} \tag{3}$$

본 연구에서 사용한 직경 10 mm, 길이 45 mm인 Terfenol-D로드의 경우, N = 1200회, I = 2 A일 때  $\Delta l$ 은 약 0.036 mm로 계산되어진다.

Terfenol-D 로드들의 높은 에너지 밀도는 높은 힘을 제공한다. 이러한 관계는 다음 식으로 표현된다.

$$F = \frac{E \cdot A \cdot \Delta l}{l} \tag{4}$$

단, E=Terfenol-D의 탄성계수, A=Terfenol-D로드의 단면적.

직경 50mm의 Terfenol-D 로드들이 4500N 이상의 힘을 내는 반면, 직경 6.35mm의 로드들은 220~330N의 힘을 내는 것으로 알려져 있다<sup>9</sup>.

## 3. 마이크로포지쇼너의 개발

마이크로포지쇼너는 프레임, 자기변형 액추에이터와 마운터, 코일, 위치센서, 힘센서, preload 나사 등의 요소로 구성되어진다. 마이크로포지쇼너의 기능상의 요구사항은 다음과 같다: 약 0.1mm의 선형 운동 범위를 가질 것; 백래시가 없을 것; 응답성이 빠를 것; 약 300 N의 최대 힘을 낼 수 있을 것.

프레임은 두께 약 8 cm의 알루미늄 블록을 사용하여 밀링머신으로 가공되어졌다. 액추에이터로는 직경 10 mm, 길이 45 mm의 Terfenol-D 로드들이 사용된다. 액추에이터 마운트는 직경 50 mm, 길이 60 mm의 원통형 엔지니어링 플라스틱을 가공하여 만들었으며 0.4 mm 굵기의 에니멜선을 액추에이터 마운트에 약 1200회 감았다. 개발된 마이크로포지쇼너의 예비시험 중 액추에이터의 끝 부분이 칩핑되는 현상이 야기되었다. 이것은 액추에이터로 사용한 Terfenol-D 로드들의 낮은 인장강도, 연성의 부족, 그리고 액추에이터와 preload용 나사의 중심

집 불일치에서 기인한다. Steel cap을 가공하여 한쪽 면 이는 로드를, 다른 한 쪽 면에는 preload용 나사를 끼워서 액추에이터와 preload용 나사의 중심점 불일치를 해결하고, 액추에이터와 steel cap사이에는 종이 테이프를 오려 붙여서 걸리는 하중의 분산을 통해 액추에이터의 끝 부분이 칩핑되는 현상을 해결했다. Fig. 2는 완성된 마이크로포지셔너이다.

#### 4. 실험장치

본 연구에서 개발된 마이크로포지셔너의 정적 및 절삭 시험을 위해 사용한 실험장치와 동특성 분석 및 위치제어에 사용한 실험장치는 각각 Fig. 3과 Fig. 4와 같다. 실험장치는 실험용 선반, 마이크로포지셔너, 직류 전원 공급기, 함수발생기, 코일 드라이버, 데이터 취득 시스템, 586급 IBM PC 등으로 구성되어진다. 코일 드라이버는 cropping 주파수 1k Hz를 이용한 PWM방식으로 구동되는 일반적인

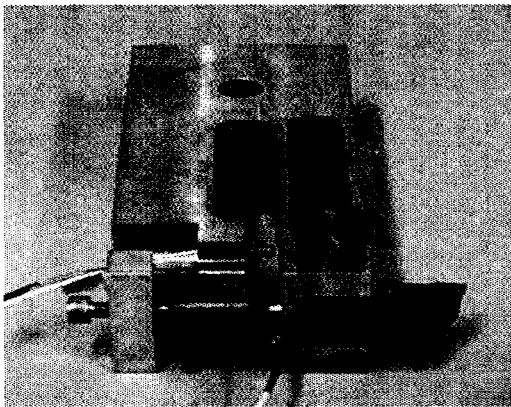


Fig. 2 Developed Micropositioner

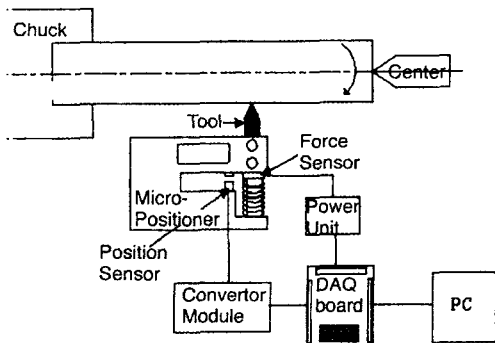


Fig. 3 Experimental Setup for Static and Machining Tests

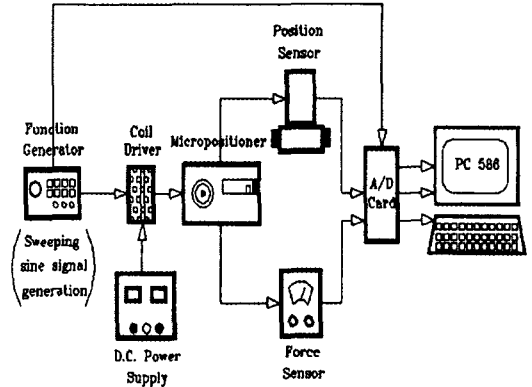


Fig. 4 Experimental Setup for Dynamic Tests

D.C. 모터 드라이버와 유사하게 제작되었다. 데이터 취득 시스템은 미국 National Instrument사의 ATMIO-16E-10 보드와 LabVIEW를 이용하여 개발된 VI(Virtual Instrument)로 구성된다.

#### 5. 실험결과 및 고찰

##### 5.1 마이크로포지셔너의 정적 특성실험

정적 특성 실험에서는 코일에 전류를 흘리지 않은 상태에서 마이크로포지셔너의 프레임만의 강성 그리고 프레임과 액추에이터가 결합된 상태에서의 강성을 알아내는 실험을 수행하였다. 다음에는 코일에 전류를 흘리면서 힘과 변위의 관계를 알아보았는데, 전류는 직류 전원 공급기에서 손으로 조작되어 공급되었다. 이 실험은 Terfenol-D 로드와 약 200 N 정도의 preload를 가한 후 실험하였다.

정적 특성 실험 결과로부터 프레임만의 강성은  $1.02 \times 10^6$  N/m으로 계산되며, 프레임과 Terfenol-D 로드의 결합체의 강성은  $1.05 \times 10^7$  N/m으로 계산된다. 코일에 전류를 흘리면서 힘과 변위의 관계를 알아보는 실험 결과 (Fig. 5)에서 전류가 일정한 구간에서 힘의 감소가 보이는 것은 힘 센서의 전하방출(discharge)현상에 기인한다. 따라서 전류가 3 A에서 다시 0 A로 떨어졌을 경우 잔류하는 힘은 약 18 N정도이며, 이것은 약 12%의 히스테리시스를 의미한다. 이러한 현상은 Fig. 6의 전류 대 힘에 대한 히스테리시스 곡선에서도 관찰된다. 실험으로부터 최대의 전류가 3 A 호를 때 Terfenol-D가 약 150 N 정도의 힘을 발생시키는 데, Terfenol-D가 낼 수 있는 최대 힘(300~400 N)을 발생시키기 위해서는 Ter-

fenol-D의 비선형성을 고려해야 함을 알 수 있으며, 정밀한 제어를 위해서는 히스테리시스 효과도 고려해야 함을 알 수 있다.

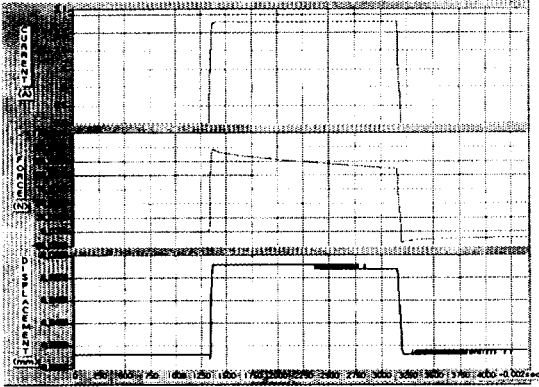


Fig. 5 Generated Force and Displacement with Abrupt Change of Current

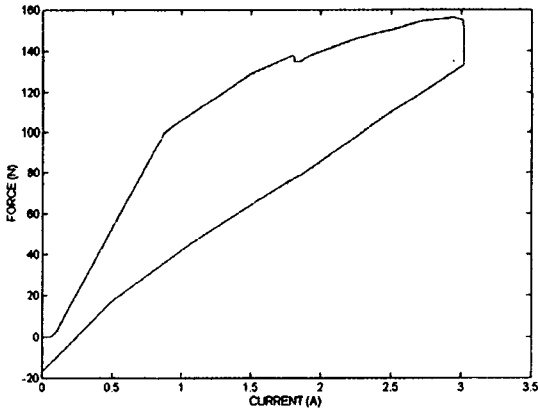


Fig. 6 Hysteresis Curve (Force Vs. Current)

5.2 절삭실험

Table 1은 선반가공 실험 조건을 나타낸다.

Table 1 Experimental Conditions

수준	절삭속도 m/min	절삭깊이 mm	이송량 mm/rev
높음	200	2.0	0.42
중양	100	1.0	0.21
낮음	50	0.5	0.105

가공재료로는 직경 75 mm, 길이 500 mm 알루미늄 2024 환봉을, 공구로는 초경 (DNMG 150608)을 각각 사용하였다. 가공실험은 크게 마이크로포지쇼너에 전류를 흘린 상태(ON)와 안 흘린 상태(OFF)로 나누어서 행해진다. 절삭실험을 실시할 때마다 가공물의 편심을 제거하기 위하여 절삭깊이 0.2 mm로 다듬질 가공을 실시하였다. 공구 마멸에 따른 실험 값의 오차를 줄이기 위하여 매 절삭실험마다 공구를 교환하였다. 절삭력과 변위의 측정에는 각각 PCB사의 압전로드셀과 Electro사의 근접센서로 검출한 신호를 각각 Power Unit와 Converter Module을 통한 후 National Instruments사의 A/D Converter Card를 거쳐 그래프로 나타내어진다.

Fig. 7은 절삭속도 100 m/min., 절삭 깊이 1 mm, 이송량 0.21 mm/rev.의 절삭조건으로 절삭했을 때 시간의 경과에 대한 전압(상), 절삭력(중) 그리고 변위(하)를 측정하여 그 결과를 나타낸 그래프이다.

Fig. 7에서 다음과 같은 상황이 관찰된다:

첫째, OFF상태의 가공이 시작되자마자 절삭력이 (-) 레벨로 떨어지고 gap이 증가한다. 이것은 주 절삭력에 의한 모멘트의 영향으로 굴근부분에 미소한 뒤틀림이 생기면서 그 영향으로 gap은 증가하고 힘은 감소한다고 생각된다.

둘째, ON상태가 되자 절삭력과 gap이 급격히 증가하고, 시간의 경과에 따라 절삭력이 줄어드는 경향이 있다. 이것은 ON상태가 되면 Terfenol-D 로드에서 자기장이 형성되어 Terfenol-D 로드 길이가 방향으로 늘어나면서 힘과 변위의 증가를 가져오기 때문이다. 또한, 시간에 따라 절삭력이 줄어드는 경향은 실제 절삭력의 감소라기 보다는 센서자체의 전하가 서서히 방출된다고 생각할 수 있

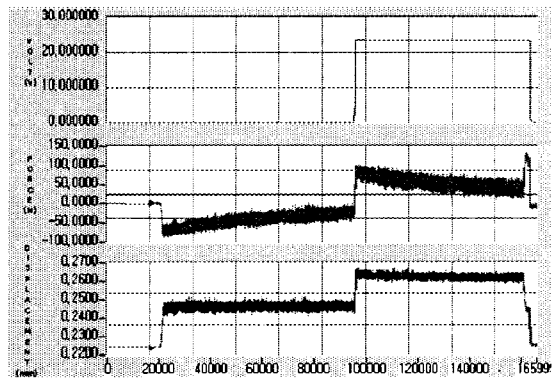


Fig. 7 Time vs. Voltage, Cutting Force, and Displacement

다. 그래서 가공이 끝난 부분의 절삭력을 보면 절삭력이 상승되는 현상을 볼 수 있다.

같은 절삭조건에서 절삭력과 gap에 대한 OFF, ON상태의 표준편차를 비교해보면, ON상태에서의 평균 표준편차(절삭력 = 9.45 N, gap = 1.15 μm)가 OFF상태에서의 평균 표준편차(절삭력 = 10.06 N, gap = 1.33 μm)보다 적음을 알 수 있다. 즉, 마이크로포지쇼너를 사용함으로써 가공물과 공구의 상대적 변위를 줄일 수 있음을 의미한다.

### 5.3 동특성 실험

마이크로포지쇼너의 동특성은 마이크로포지쇼너의 닫힌 루프 제어기(힘제어 또는 변위제어)를 설계할 때 효율적으로 사용될 수 있다. 동특성은 마이크로포지쇼너 프레임의 기계적인 특성, 코일 시스템의 특성 및 코일 드라이버의 특성 모두가 종합된 한 시스템으로 분석되었다. 동력학적 시스템의 동특성을 실험적으로 규명하는 방법은 충격 응답 실험, 사인파 입력 실험, 임의 신호(random 파) 입력 실험 등이 있다<sup>(10)</sup>. 본 연구에서는 사인파 입력 실험 방법의 일환으로 스위핑 사인 신호(sweeping sinusoidal signal)로 시스템을 가진 하는 방법을 사용하였다. 데이터 취득 주기는 2 msec였다. 실험에서 함수 발생기로부터 0.2~4.8 V 사이에서 변하는 0.1부터 50 Hz까지의 스위핑 사인파를 발생시켜 이를 코일 드라이버의 입력 단에 접속하였다. 스위핑은 0.1부터 50 Hz까지 선형 스위프 방식으로 60초 동안에 행해졌다. 또한 코일드라이버에 공급되는 전압을 15V, 25V, 45V 및 60V로 변화시켜 각각의 전압 하에서 힘센서 및 변위센서의 출력을 스위핑 사인파와 함께 기록하였다.

스위핑 사인파 입력 실험 데이터로부터 스위핑 신호 전압 대 발생 힘과 스위핑 신호 전압 대 발생 변위에 대한 전달함수를 구하기 위해 주파수 분석을 수행하였다. 주파수분석 결과 전원공급기 전압이 25V 보다 큰 경우 보다(Bode) 선도에서 이득 값이 전압이 25V 보다 작은 경우 보다 감소하는 비선형성이 나타남을 알 수 있었다. 주파수 분석 보다 선도로부터 마이크로포지쇼너는  $\omega = 14\pi$ 의 코너 주파수를 가지는 선형 1차 시스템으로 근사화될 수 있었다. 즉,

$$\text{힘 또는 변위의 전달함수} = \frac{k}{s + 14\pi}$$

전압입력이 15V 및 25V 일 때 변위의 전달함수에 k값

은 약 0.067이 되었다. Fig. 8은 전압입력 15V 일 때 보디 선도이다.

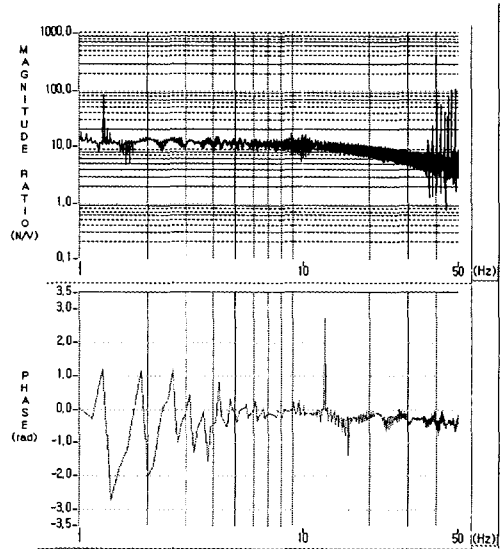


Fig. 8 Bode Diagram of Displacement at 15 V

### 5.4 마이크로포지쇼너의 위치제어

위치센서의 출력전압을 되먹임하여 공구끝 변위를 원하는 위치로 변화시키는 닫힌루프제어를 수행하였다. 마이크로포지쇼너는 근사적으로 직류모터의 속도제어 문제와 유사하다. 따라서 모터 속도제어의 경우와 같이 P-제어 방법으로는 정상상태오차를 0으로 만들 수 없으므로 본 연구에서는 PI-제어 방법을 사용하였다. 제어 알고리즘에 적용을 위하여 데이터 취득에서 사용된 LabVIEW 4.0을 사용하였다.

먼저 동특성 분석 결과를 사용하여 이론적으로 PI 제어를 설계하였다. 미리 행해진 예비실험으로부터 P 이득 값이 큰 경우 변위센서 잡음을 증폭하는 것이 확인되어 P 이득을 비교적 작은 값인 5로 정하였다. 위와 같이 P 이득을 고정하고 I 이득이 500, 1000, 1500인 경우 닫힌 루프 극점의 위치는 Table 2와 같이 계산된다. 따라서 닫힌 루프시스템은 안정된 시스템이 되고 I 이득( $k_i$ )이 증가할수록 시스템이 빠른 응답을 보이며 overshoot가 없는 제어응답을 보일 것으로 해석되었다. 또한, I-제어입력의 채용으로 닫힌 루프 시스템은 정상상태오차가 없으리라 예상된다. 다음에 실험을 통하여 제어기의 성능이 검증되었는데, 가공시 가공물의 회전수는 900 RPM이며 이송량은 0.105 mm/rev이었다. 실험시 전류공급기 전

압은 15V로 고정하여 사용하였고, 제어 루프 타임은 100 msec 였다. 제어 실험은 P 이득을 5로 정하고 제어 기 설계시 계산된 세 가지 I 이득들(500, 1000, 1500)에 대하여 모재가 가공되지 않는 경우와 가공 시에 대하여 행하여 졌다

Table 2 Closed-Loop Poles Depending On I-Gain

$k_i$	$s_1$	$s_2$
500	-0.78	-43.57
1000	-1.58	-42.76
1500	-2.41	-41.93

Fig. 9는 가공실험시 I 이득이 500, 1000, 1500 일 때의 제어 결과이다. 제어이전의 초기 변위는 0.040 mm 이고 제어 목표치는 0.045 mm이다. 그림에서 overshoot 및 정상상태 오차가 거의 없는 것을 관찰할 수 있는데 이는 해석적 결과와 일치한다. I 이득이 1500일 때 약 0.5 초 후에 원하는 위치로 제어되는 것을 관찰할 수 있다. 또한 I 이득이 500일 때 약 1.7초 후에 원하는 위치로 제어되었다. 모재를 가공하지 않는 경우의 실험결과도 가공시의 실험결과와 유사한 결과를 보여주었다. Fig. 9에서 위치센서 잡음이 상당히 관측되는데 이는 코일 드라이버에서부터 기인하는 것으로 추정되며 향후 연구에서 이를 제

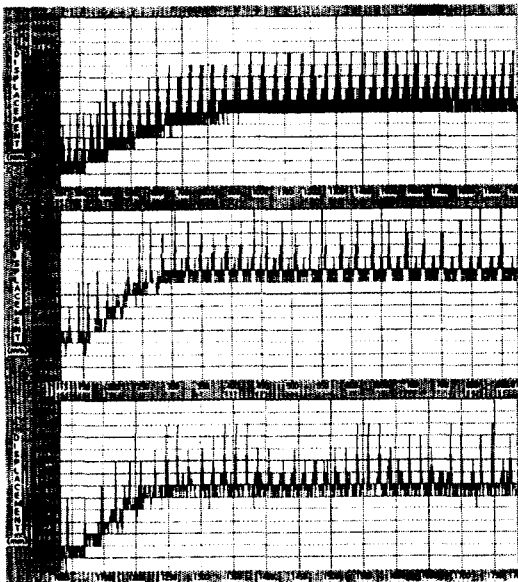


Fig. 9 Experimental Result of PI Control when Machining with Three I-gain :(Top) 500, (Middle) 1000, (Bottom) 1500

거하여야 할 것이다.

## 6. 결론 및 향후 연구방향

자기변형재료를 이용한 선삭용 마이크로포지쇼너를 설계, 제작하여 정적 및 가공 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 개발된 마이크로포지쇼너는 입력전류가 약 0~0.7 A 까지의 경우 선형시스템으로 간주할 수 있으며, 3 A 까지 전류를 흘린 경우 약 12 %정도의 히스테리시스 특성도 보이는 비선형 시스템이다.
2. 개발된 마이크로포지쇼너를 절삭가공에 적용한 결과, 공구와 가공물사이의 상대변위를 줄일 수 있었다.
3. 동특성 실험결과, 입력전류가 0.7A 이하인 경우 마이크로포지쇼너는 약 7 Hz의 코너주파수를 가지는 선형 1차 시스템으로 근사화될 수 있었다.
4. PI 위치제어 실험결과 정상상태오차와 overshoot가 거의 없고, 빠른 제어응답을 얻을 수 있었다.
5. 본 연구에서 사용한 자기변형재료는 히스테리시스 특성을 보이며, 아주 취성이 강한 재료이다.

향후 연구방향은 주절삭력에 의한 굴근 부분의 뒤틀림을 해결할 수 있는 시스템의 보완, 실용화를 위한 closed-loop 제어시스템의 설계 및 적용, 인덕턴스가 적은 코일시스템의 사용을 통한 시스템의 동특성 향상, 필터 등을 채용하여 변위센서의 잡음을 제거하는 방법의 도출 등이다.

## 참 고 문 헌

1. Wells, D. L., Iversen, E. K., Davis, C. C., and Jacobsen, S. C., "An Investigation of Hydraulic Actuator Performance Trade-offs Using Generic Model," Proceedings of the 1990 IEEE Conference on Robotics and Automation, pp. 2167-2173, 1990.
2. Ikuta, K., "Micro/Miniature Shape Memory Alloy Actuator," Proceedings of the 1990 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2156-2161, 1990.
3. Hollis, R., "Design for a Planar XY Robotics Fine Positioning Device," Proceedings of the Symposium on Robotics and Manufacturing Automation, ASME WAM, pp. 291-298,

- 1985.
4. Mahadevan, R., "Capacitance Calculation for a Single-Stator, Single-Rotor Electrostatic Motor", 1987 IEEE Micro Robots and Teleoperators Workshop, pp. 93-100, 1987.
  5. Butler, J. E., Application Manual for the Design of ETREMA Terfenol-D Magnetostrictive Transducers, Edge Technologies, Inc., Ames, IA, 1988.
  6. Calkins, F. T., Zrostlik, R. L., Flatau, A. B., and Vogel, J. M., "Terfenol-D Vibration Control of a Rotating Shaft", ASME WAM, 1994.
  7. Eda, H., Ohmura, E., Sahashi, T., and Kobayashi, T., "Ultraprecise Machine Equipped with a Giant Magnetostriction Actuator-Development of New Materials,  $Tb_xDy_{1-x}(Fe_yMn_{1-y})_n$  and Their Application", Annals of the CIRP, Vol. 41, pp. 421-424, 1992.
  8. Michler, J. R., Moon, K. S., Sutherland, J. W., and Kashani, A. R., "Development of a Magnetostiction Based Cutting Tool Micropositioner", Transactions of NAMRI/SME, Vol. XXI, pp. 421-427, 1993.
  9. Goodfriend, M., "Material Breakthrough Spurs Actuator Design", Machine Design, March, pp. 147-150, 1991.
  10. Landau, I. D., System Identification and Control Design, Prentice Hall, 1990.