

# 보이스 코일 모터를 이용한 미세 하중 및 위치 결정 기구의 개발

권기환<sup>#</sup>, 오승환<sup>\*</sup>, 조남규<sup>\*\*</sup>, 윤준용<sup>\*\*</sup>

## Development of Small Loading and Positioning Device using VCM

Ki Hwan Kwon<sup>#</sup>, Seung Hwan Oh<sup>\*</sup>, Nahm Gyoo Cho<sup>\*\*</sup>, Joon Yong Yoon<sup>\*\*</sup>

### ABSTRACT

This paper presents a small loading and positioning device using VCM (voice coil motor). The developed device consists of a VCM-based linear actuating system, a capacitance displacement sensor and a cantilever deflection sensing system. The trust force of the VCM proportional to applied current moves the column supported on two pairs of parallel leaf springs. The infinitesimal displacement of moved column is detected by capacitance displacement sensor with a resolution of 0.1nm and a repeatability of 1nm. Also, a micro cantilever with known stiffness (200N/m), which is mounted on the end of the column, is used as a force sensor to detect the load applied to a specimen. After the cantilever contacts with the specimen, the deflection of cantilever and the load applied to the specimen are measured by using an optical lever system which consists of a diode laser, a mirror and a PSD (position sensitive detector). In this paper, an experimental system was constructed and its actuator and sensing parts were tested and calibrated. Also, the constructed system was applied to the indentation experiment and the load-displacement curve of aluminum was obtained. Experimental results showed that the developed device can be applied for performing nano indentation.

**Key Words** : Positioning(위치 결정), Voice coil(보이스 코일), Linear actuator(선형 구동기), Indentation(압입)

### 1. 서론

최근 급격하게 발전하고 있는 MEMS 기술은 미세한 구조의 반도체 소자 및 기계 부품의 개발을 가능하게 하였다. 이러한 초소형 구조물들을 설계/제작 하기 위해서는 그 역학적 특성의 측정/평가를 통한 물성치의 축적이 요구된다. 일반적으로 미세 구조물은 실리콘과 같은 유연한 재질로 만들

어지며, 그것의 재료역학적 특성은 거대 구조물과 다른 거동을 보인다. 따라서, 미세소자 및 구조물의 재료역학적 특성을 평가하기 위해서는 미세한 힘을 정밀한 변위로 가하여야 한다. 이러한 미세 구조물의 기계적 특성을 측정하기 위한 대표적인 기기로 나노 인덴터(nano indenter), 나노 스크래치 테스터(nano scratch tester) 등이 있다. 이 기기들은 뾰족한 압자를 이용하여 수 $\mu$ N 에서 수 mN 크기의

접수일: 2003 년 5 월 21 일; 게재승인일: 2003 년 8 월 14 일  
# 교신저자: 한양대 대학원 정밀기계공학과  
\* 한양대 대학원 정밀기계공학과  
Email: [pmslab@dreamwiz.com](mailto:pmslab@dreamwiz.com), Tel: (031) 418-0748  
\*\* 한양대 기계공학과

기계적 특성 평가하는 장비이다. 따라서, 이러한 장비들은 미세한 힘과 변위를 발생시킬 수 있는 정밀 구동 기술과 가해진 힘과 변위를 정밀하게 감지할 수 있는 측정 기술이 필수적으로 요구된다. 현재, 이러한 기기들의 적용을 위한 미세 하중 및 변위 발생용 구동기로서 압전소자(PZT)에 의한 방식이 많이 연구되어 왔다<sup>(1-5)</sup>. 압전소자는 수 nm의 고분해능과 빠른 응답 특성을 갖는 장점이 있으나, 구동 범위가 수십  $\mu\text{m}$ 로 작고, 히스테리시스(hysteresis) 현상으로 인해 구동력 제어가 복잡하다. 이러한 압전소자의 구동력 제어를 위해 스트레인 게이지(strain gage)가 이용되고 있으나, 미세 하중을 측정하기 위해서는 고성능 증폭기와 신호 처리 기술이 필요하다. 압전소자와 더불어 나노 인텐터의 적용을 위해 정전기력을 이용한 구동 방식이 연구 되었다<sup>(6-7)</sup>. 정전기 구동 방식은 전압의 제공에 비례하여 정전기력이 발생하여 하중제어가 용이하고, 동시에 정전용량의 변화를 감지하여 변위를 측정할 수 있다는 장점을 갖고 있다. 그러나, 압전소자와 마찬가지로 구동 범위가 매우 작은 단점을 갖는다.

따라서, 본 논문에서는 구동 범위의 한계 및 힘 제어의 난점을 보완하기 위한 방식으로 보이스코일(voice-coil) 선형 액츄에이터를 적용하였다. VCM(voice coil motor)은 구동 범위가 넓고, 전류에 비례하여 추력이 발생되므로 힘 제어에 유리한 장점을 갖고 있으나, 압전소자와 정전기력 방식에 비해 상대적으로 변위 정밀도가 떨어진다는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 서브 나노미터의 분해능을 갖는 정전 용량형 변위 센서를 적용하였으며, 시료에 인가되는 미소하중을 측정하기 위해 PSD(position sensitive detector)를 이용한 Cantilever deflection 방법<sup>(8)</sup>을 적용하였다. 또한, 본 논문에서는 보이스코일 선형 액츄에이터의 미소하중/변위 측정을 위한 실험 장치를 설계 구축하고 시료의 미세 압입 실험에 적용하였다.

## 2. 시스템의 개요

### 2.1 전체 시스템의 구성 및 특징

Fig. 1은 VCM 선형 액츄에이터를 이용한 미세 하중 및 위치 결정 시스템의 개요도를 보인다. VCM으로부터 발생된 추력과 변위는 2개의 평행한 판 스프링 기구를 거쳐 시료에 전달된다.

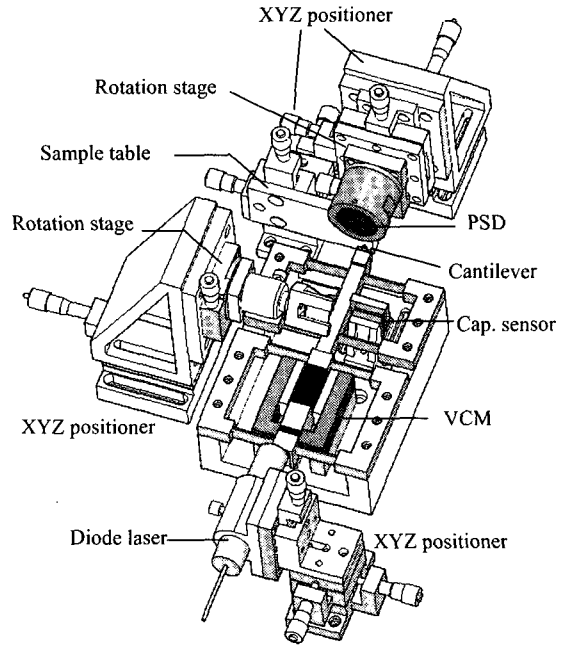


Fig. 1 Schematic of the total system

평행판 스프링 기구는 시료면의 높이 방향에 수직인 두 축 방향의 운동과 3 가지 회전운동이 제한되고, 시료의 높이 방향의 힘과 변위만을 전달하게 된다. 평행판 스프링으로 지지된 칼럼의 끝단부에는 기지의 강성계수를 갖는 마이크로 캔틸레버(micro cantilever)가 부착되어 있다. 이러한 캔틸레버는 시료에 전달되는 하중과 압입깊이를 측정하기 위한 센서의 역할을 하며, 캔틸레버의 굽힘 변위를 고감도로 측정하기 위해 레이저와 PSD를 이용하는 광지레법(optical lever method)이 적용된다. 또한 칼럼부 중앙에 위치한 정전 용량형 변위 센서는 접촉 전/후의 변위 전달량을 감지하는 역할을 한다.

### 2.2 힘 및 변위의 검출 원리

초기 상태에는 레이저가 캔틸레버에 반사되어 PSD 상의 중심부에 spot이 맺히며, 구동기로부터는 하중 인가가 되지 않았으므로 정전용량형 변위 센서의 출력변화는 없다. VCM으로부터 하중이 인가되면 Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이 평행판 스프링이 변위를 발생하고 정전 용량형 센서로 감지되는 변위량은  $z_1$ 이다. 이 때는 시료와 접촉하지 않

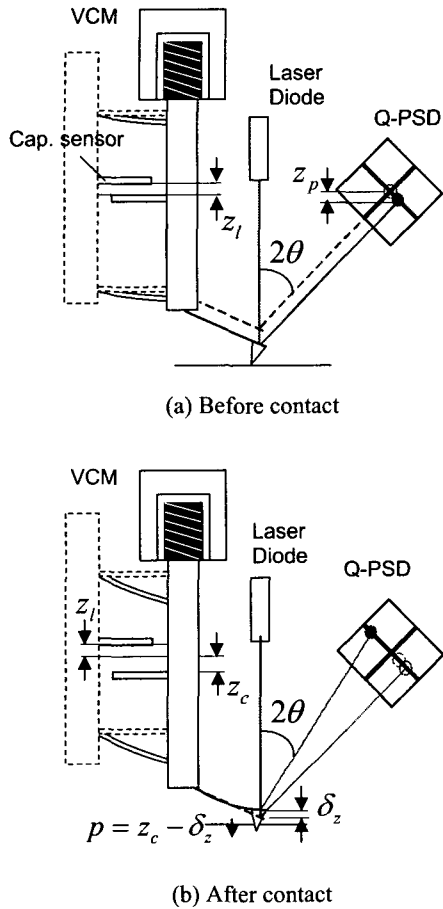


Fig. 2 Measuring principle of force and displacement

은 상태이므로 PSD 위에 맺히는 spot 의 위치변화  $\delta_p$  는  $z \sin 2\theta$  만큼 일어난다. Fig. 2(b)와 같이 캔틸레버가 시료와 접촉하게 되면  $\delta_z$  만큼의 변형이 발생되고 그 양은 PSD 상에 맺히는 spot 의 변위로부터 감지된다. 따라서, 압입 깊이  $p$  는 접촉후의 칼럼부 이동 변위  $z_c$  로부터 캔틸레버 변형량  $\delta_z$  을 뺀 값으로 산출될 수 있다. 또한, 기지의 캔틸레버 강성계수와 캔틸레버 변형량의 관계로부터 시료에 가해지는 하중의 크기를 산출 할 수 있다.

### 3. 시스템의 설계

#### 3.1 VCM 이용한 구동 기구부

VCM 선형 액츄에이터는 정밀 직선 이동형 작

동기로, 영구자석에 의한 정적인 자기장 내에서 코일의 유도자기력이 생성하는 로렌츠 힘(lorentz force)을 이용한다. 보이시 코일은 전류에 비례하여 추력 발생되기 때문에 힘 제어를 위한 선형 서보 제어기 구축이 용이한 장점을 갖는다<sup>(9)</sup>. Fig. 3 은 본 연구에서 적용된 VCM 선형 액츄에이터의 개략도를 보이고 있다. 철심 코어의 내측에 설치된 두 개의 NdFe-B 영구자석에 의해 정적인 자기장이 형성되며, 형성된 자기장은 철심을 따라 폐경로를 형성한다. 따라서, 자기장의 경로 중에 위치에 있는 전자석 코일은 자기장 방향의 수직으로 로렌츠 힘을 생성하고, 코일이 감긴 알루미늄 보빈은 평행판 스프링으로 지지되어 직선운동을 하게 된다. 액츄에이터의 이송부에서는 단면이  $10 \times 10 \text{mm}^2$  이고 길이가 30mm 인 영역 내에서 직경이 0.3mm 인 에나멜 코팅 동선을 320 회 감아 사각 권선형 코일을 형성하였다. 자계속에 전류  $i$  가 흐를 때 발생추력은 식 (1)과 같다.

$$F = NBil \quad (1)$$

여기서,  $N$  은 코일의 턴수,  $l$  은 자계내의 도선의 폭,  $i$  는 입력 전류,  $B$  는 공극 자속밀도를 나타낸다.

Fig. 4 는 VCM 의 2 차원 유한요소해석에 의한 공극에서의 자속 분포를 보이고 있다. 해석 모델은 좌우대칭구조를 가지므로 전체 모델의 1/2 만을 채택하였으며 고정경계조건을 적용하였다. Fig. 5 는 유한요소해석 결과로부터 계산된 공극에서의 자속밀도를 보이며, 공극에서의 평균 자속 밀도는 약  $0.36[T]$ 이다. 그러므로 1A 의 전류를 인가할 때 발생하는 최대 추력은 3.456N 이다.

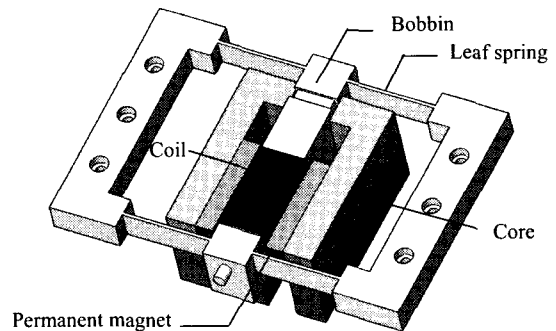
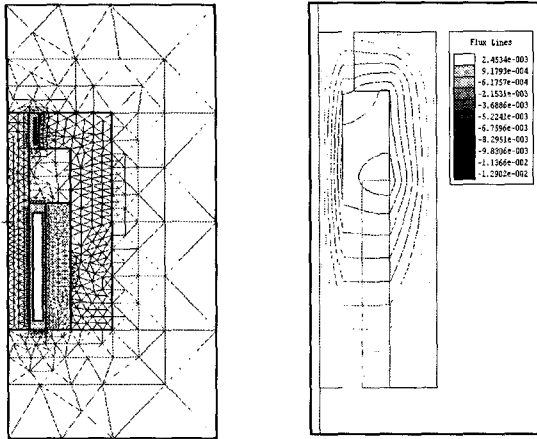


Fig. 3 Schematic of VCM linear actuator



(a) Element mesh shape (b) Flux distribution

Fig. 4 Flux distribution of VCM (unit: Web)

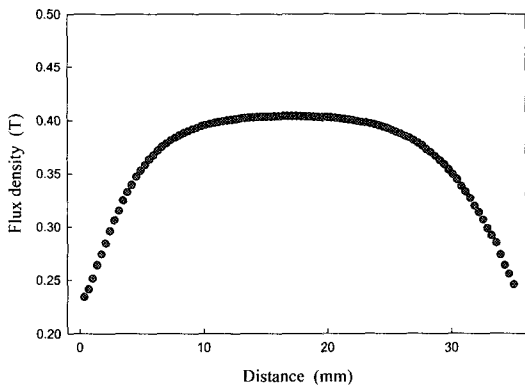


Fig. 5 Air gap flux density

액츄에이터 최대 이송거리는 컬럼부를 지지하는 4 쌍의 평행판 스프링의 유효 강성계수에 의존한다. 한 쌍의 평행판 스프링의 탄성계수는 식(2)와 같다.

$$k_p = 2 \frac{192 E b t^3}{12 l^3} \quad (2)$$

여기서,  $l=70\text{mm}$ ,  $b=10\text{mm}$ , 그리고  $t=0.9\text{mm}$  이며, 판 스프링의 재질은 Al-7075 가 사용되었으며, 탄성계수  $E$  는 약 72Gpa 이다. 그러므로, 4 쌍의 평행판 스프링 구조를 갖는 구동 전달부의 총 강성계수의 설계치는 192 kN/m 로 계산된다.

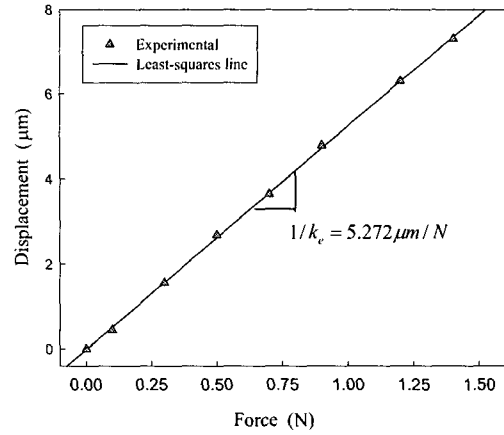


Fig.6 Experimental result for estimating effective stiffness

Fig. 6 은 실험으로부터 산출된 구동 전달부의 유효 강성 계수를 보인다. 실험값들은 기지의 질량을 갖는 각각의 표준추를 컬럼부 위쪽에 올려놓았을 때 정전 용량형 변위 센서로부터 측정되는 변위값들이다. Fig. 6 에서 실험으로부터 산출된 구동 전달부의 총 강성계수는 189.72kN/m 이며 설계값 192kN/m 와 약간 다른 값을 보이는데, 이것은 가공상의 오차에 의해 발생한 것으로 기인된다.

### 3.2 마이크로 캔틸레버(micro cantilever)

본 연구에서는 시료에 전달되는 하중과 압입깊이를 측정하기 위한 센서로서 Fig. 7 에 보이는 V형 마이크로 캔틸레버를 이용하였다.

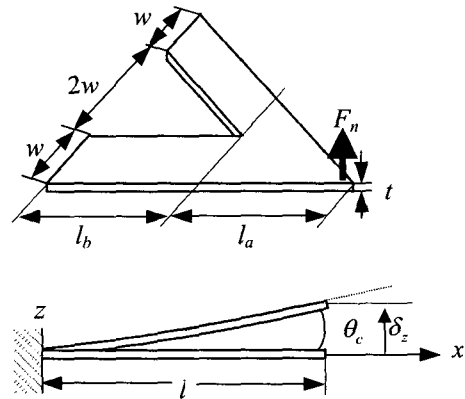


Fig. 7 V-shape micro cantilever

V 형 캔틸레버의 굽힘변위와 굽힘각은 식(3)과 (4)에 의해 계산될 수 있다.

$$\delta_z = \frac{3l_a x^2 + 3l_a^2 l_b + 6l_a l_b^2 + 2l_b^3}{Ewt^3} F_n \quad (3)$$

$$\theta_c = \frac{6l_a x + 3l_b^2 + 6l_a l_b}{Ewt^3} F_n \quad (4)$$

$l_a=l/3, l_b=2l/3, x=l/3$  으로 하면, 굽힘변위와 굽힘각과의 관계는 다음과 같이 구해진다.

$$\theta_c = 1.683 \frac{\delta_z}{l} \quad (5)$$

본 연구에서는 길이  $l=125\mu\text{m}$ , 두께  $t=7\mu\text{m}$ , 너비  $w=35\mu\text{m}$ , 스프링 계수  $k_c=200\text{N/m}$  인 Nano devices사의 실리콘 마이크로 캔틸레버를 사용하였다.

### 3.3 미소 힘 및 변위 측정을 위한 광학계

Fig. 8 은 마이크로 캔틸레버의 굽힘 변위와 시료에 가해지는 미소힘을 측정하기 위한 광학계를 보인다. VCM 선형 액츄에이터로부터 발생된 힘이 시료에 인가되면 표면과 접촉하는 캔틸레버는 굽힘이 발생하게 된다. 캔틸레버의 굽힘 변위는 레이저 빔의 반사각  $\theta_c$  을 변화시키고, 반사된 레이저 빔은 일정한 거리  $D$  에 위치해 있는 PSD 평면에 입사 하게 된다. 캔틸레버의 굽힘각  $\theta_c$  가 미소하다고 하면, 캔틸레버의 굽힘변위  $\delta_z$  와 PSD 평면에 맺히는 광점의 위치 변화  $\delta_{PSD}$  는 다음과 같이 구해진다.

$$\delta_{PSD} \approx D \times 2\theta_c = D \times 2 \times 1.683 \frac{\delta_z}{l} \quad (6)$$

또한, 변위 측정 감도는 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\delta_{PSD}}{\delta_z} \approx 3.37 \frac{D}{l} \quad (7)$$

따라서, 식(4)와 (6)의 관계로부터 캔틸레버에 작용하는 힘  $F_n$  은 식(8)과 같이 산출된다.

$$F_n = \frac{\delta_{PSD}}{3.37D} \frac{27Ewt^3}{49l^2} \approx k_c \delta_z \quad (8)$$

Table 1 은 광학계를 구성하기 위해 사용된 기하학

적 변수 및 시스템 사양을 보인다.

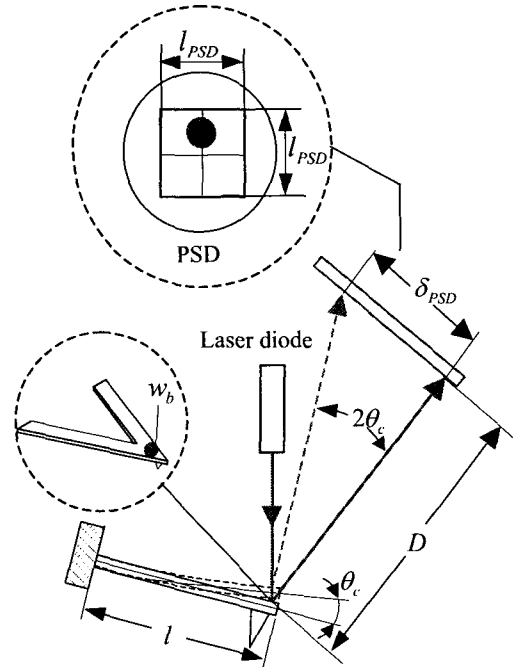


Fig. 8 Geometric configuration of optical system

Table 1 Specifications of optical system

Description	Symbol	Values
PSD active area size	$l_{PSD} \times l_{PSD}$	13×13mm
PSD sensitivity	·	1mV/mm
Distance	$D$	80mm
Cantilever length	$l$	125μm
Laser wavelength	$\lambda$	670nm
Laser spot size	$w_b$	30μm

### 3.4 정전 용량형 변위 센서

두 도체 면의 면적이  $A$  이고 간격이  $d$  일 때 정전 용량은  $C = \epsilon_0 A/d$  의 관계를 갖는다. 여기서  $\epsilon_0$  는 공기의 유전율이다. 따라서, 면적이 일정한 두 도체면 사이의 간격 변화량은 정전용량의 변화에 따른 센서 출력 전압의 값으로부터 측정 될 수 있다. 본 연구에서는 측정범위가  $\pm 150\mu\text{m}$  이고 측정 분해능이 0.1nm 인 PI사의 D-100 모델을 사용하여, VCM의 구동 변위를 측정하였다.

### 4. 실험 및 결과

#### 4.1 실험 장치의 구성

전체 시스템은 VCM 구동부, 정전 용량형 변위 센서, 캔틸레버의 변위측정을 위한 광학계로 구성된다. VCM의 선형 액츄에이터의 미세추력 및 변위를 측정하기 위한 시스템 구성도는 Fig. 9와 같다. PC에 의해 명령되는 전류값은 D/A 채널과 전류 증폭기를 거쳐 VCM에 인가되고, 구동 변위는 정전 용량형 변위 센서(PI, D-100)에 의해 감지된다.

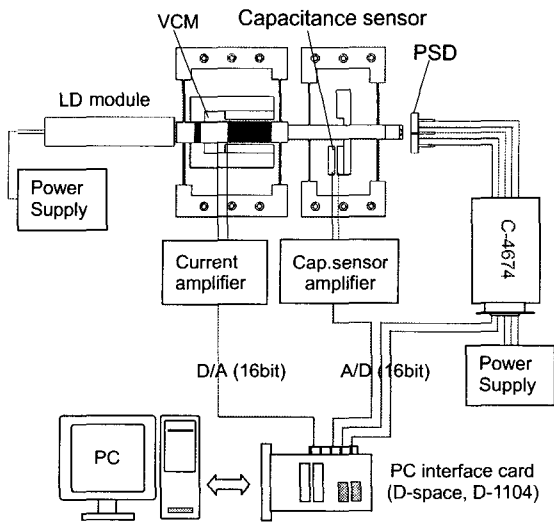


Fig. 9 Schematic diagram of experimental setup

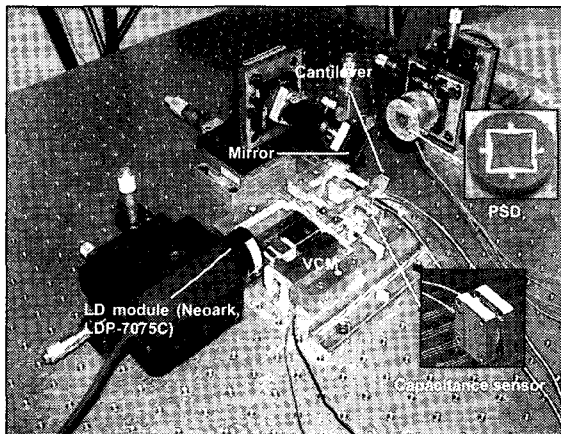


Fig. 10 Photograph of experimental setup

한편, 캔틸레버의 굽힘량은 PSD (HAMAMATSU, S-1880)에 의해 감지되는데, 이것은 PSD의 4개의 출력 단자에서 나오는 신호를 Signal processing circuit (HAMAMATSU, C-4674)에서 노이즈 제거와 신호증폭 등의 처리단계를 거쳐 광점의 위치 좌표로 변환되어 출력되는 값이다. Fig. 10은 본 연구에서 설계 제작된 실제의 시스템을 보이고 있다.

#### 4.2 측정 실험 및 응용

Fig. 11은 정전 용량형 변위 센서의 반복 성능(repeatability)을 평가한 결과를 보여준다. 측정 결과 반복능은  $\pm 1\text{nm}$  이하로 나타났다. 이상적으로, 정전 용량형 변위 센서는 측정 대상물에 설치된 상태에서 레이저 간섭계(laser interferometer)에 의해 보정되어야 하나, 본 실험에서는 제작사(PI)에서 제공되는 다음의 보정 수식을 적용하였다.

$$V_{out} = 10V \times \left( \frac{d}{d_0} - 1 \right) \quad (9)$$

여기서  $d$ 는 정전 용량형 변위 센서의 간격을 나타내며,  $d_0$ 는 공칭거리(nominal distance)로 본 연구에 사용된 센서는  $100\mu\text{m}$ 이다. VCM에 0A에서 1A까지의 전류를 0.1A 단위로 인가되었을 때 구동부의 변위 측정 결과를 Fig. 12에서 보여준다. 측정된 구동 변위는 인가 전류에 선형적으로 비례하여 증가함을 볼 수 있다. 설계에 의한 구동 변위의 감도는  $18\mu\text{m}/\text{A}$ 이나, 실험 결과는 약  $14.3\mu\text{m}/\text{A}$ 로 나타났다. 이러한 오차는 VCM의 코일 양 말단부에서의 자속의 누설에 따른 추력의 감소 및 부품의 가공 및 조립오차에 의해 발생한 것으로 사료된다.

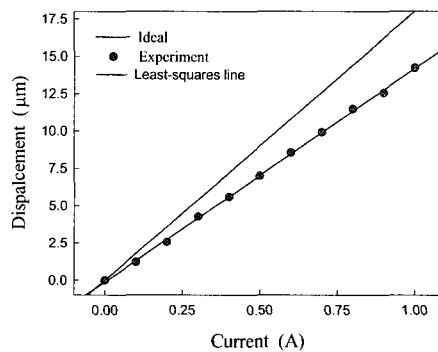


Fig. 11 Repeatability test of capacitance sensor

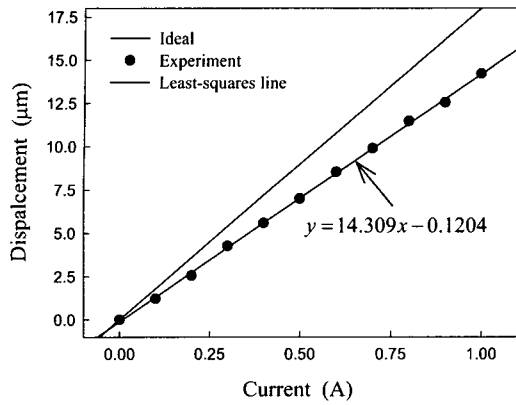


Fig. 12 Output characteristics of VCM actuating part

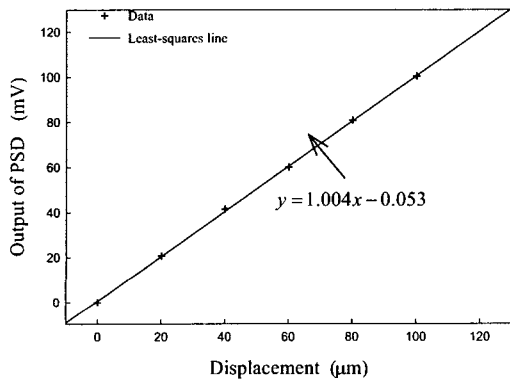


Fig. 13 Calibration result of PSD

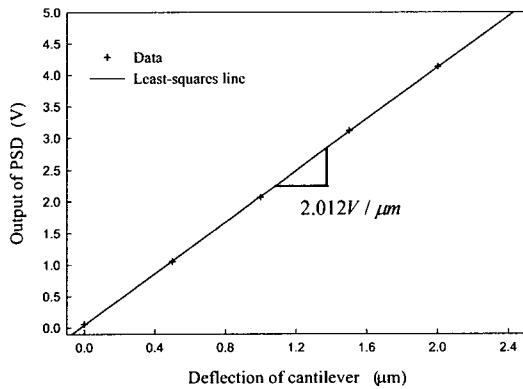


Fig. 14 Measuring sensitivity of cantilever detection system

PSD의 보정 직선을 얻기 위해 캔틸레버에서 반사되어 나온 레이저 빔을 PSD의 중심에 입사 시

킨 후, PSD의 위치를 마이크로 스테이지를 이용하여 X와 Y축으로 각각 20 $\mu\text{m}$ 씩 변화시켜가며 PSD의 출력신호의 변화를 기록하였다. Fig. 13에서 보는 바와 같이 PSD의 위치의 1 $\mu\text{m}$ 변위에 대하여 출력 전압은 약 1.004mV의 변화를 보이는 것으로 나타났다. 이러한 관계를 비교적 정확하게 나타내는 범위는 PSD의 중심으로부터 약 2.5mm 정도이며 이 범위를 넘어가는 경우에는 감도의 급격한 변화가 발생한다. 광학계에 의한 캔틸레버의 변위 측정 감도를 평가하기 위해 캔틸레버와 접촉해 있는 시료를 정밀 포지셔닝 스테이지를 이용하여 0.5 $\mu\text{m}$  단위로 변위를 주면서 PSD의 출력신호를 기록하였다. Fig. 14에서 보는 바와 같이 측정 감도  $V_{\text{PSD}}/\delta_c$ 는 약 2.012V/ $\mu\text{m}$ 로 나타났다. 이는 캔틸레버의 굽힘 변위 1nm에 대한 PSD의 출력 신호 변화가 2.012mV임을 의미한다.

본 연구에서는 위와 같이 평가된 VCM 선형 액츄에이터와 측정 시스템을 이용하여 시료의 압입 실험을 수행하였다. 압입 실험을 위한 시료로서 알루미늄 박막을 이용하였다. 캔틸레버가 시료에 접촉하기 전까지는 캔틸레버의 굽힘이 발생하지 않고 구동 변위만이 발생한다. 그러나, 접촉 후에는 구동 변위의 변화와 함께 캔틸레버의 굽힘이 발생하면서 시료에 미세한 압입이 일어난다. 이러한 압입 깊이  $p$ 는 Fig. 15와 같이 실제 압입이 일어났을 때의 캔틸레버의 굽힘 변위  $\delta_c$ 와 압입 현상이 없다고 가정했을 때의 캔틸레버의 굽힘 변위  $\delta_p$ 의 차로써 산출될 수 있다

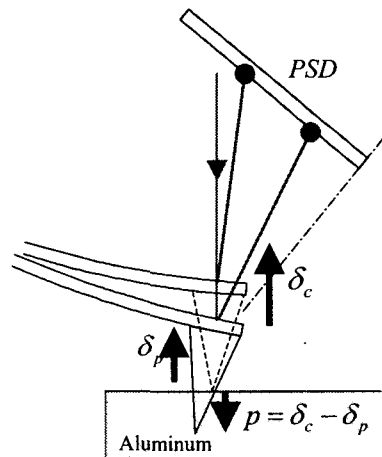


Fig. 15 Description of penetration depth  $p$

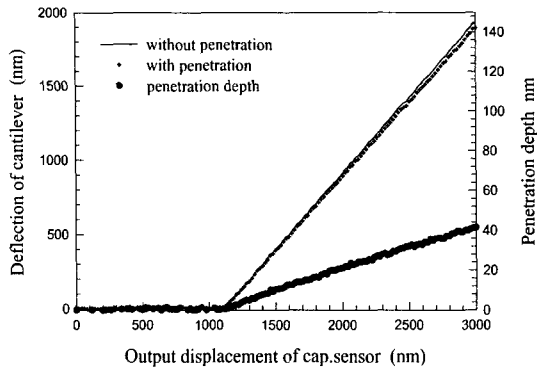


Fig. 16 Calculation of penetration depth

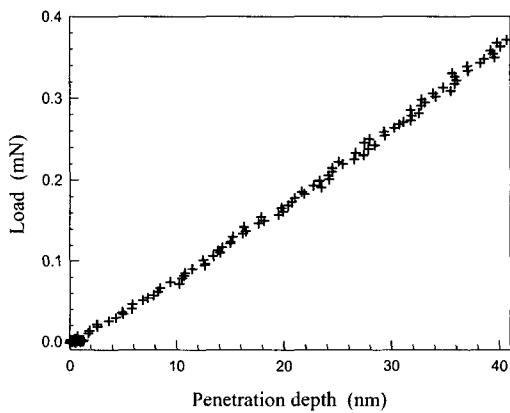


Fig. 17 Load vs. penetration depth

Fig. 16 은 캔틸레버에 의해 시료가 압입 되는 깊이를 산출한 결과를 보여준다. 캔틸레버가 시료에 접촉한 후부터 침투 현상이 발생하며 변위가 증가함에 따라 압입 깊이는 선형적으로 증가함을 볼 수 있다. 시료의 압입 깊이는 약 40nm 의 값을 나타냈다. Fig. 17 은 압입 깊이에 따른 미세 하중의 값의 변화를 보인다. 압입 깊이가 증가함에 따라 캔틸레버에 의해 측정되는 하중 값이 선형적으로 증가됨을 볼 수 있다. 이러한 실험 결과들로부터, 본 연구에서 구축된 측정 시스템은 VCM 에 의해 발생하는 미세추력 및 구동 변위의 정밀한 측정이 가능하며, 또한 미세 압입 깊이의 측정도 가능함을 확인할 수 있다.

### 5. 결론

본 논문에서는 VCM 선형 액츄에이터를 제작

하고, 이로부터 발생하는 미세 하중 및 구동 변위의 감지를 위한 측정 시스템이 구축 되었다. VCM 으로부터 발생된 추력과 변위를 정밀하게 전달하기 위한 운동 가이드로써 평행한 판 스프링 구조가 적용되었다. VCM 의 구동 변위를 높은 분해능으로 측정하기 위해 정전 용량형 센서가 사용되었으며, 테스트 결과  $\pm 1\text{nm}$  이하의 반복성을 보임을 확인하였다. 이러한 정전 용량형 변위 센서를 이용하여 측정된 VCM 의 구동변위는 인가 전류에 비례하여 선형적으로 증가됨을 보였다. 또한, 시료와 접촉시 압입 깊이 및 하중을 측정하기 위해 PSD 를 이용한 캔틸레버 변위 측정 시스템이 설계/적용되었으며, 테스트 결과 약  $2.012\text{mV/nm}$  의 변위 측정 감도를 가짐을 확인하였다. 마지막으로, VCM 의 미세 하중 및 구동 변위의 감지를 위해 구축된 시스템을 이용하여 시료의 압입 실험이 수행되었으며, 제안된 시스템은 압입 깊이와 시료에 가해지는 미세 하중의 정밀한 측정이 가능함을 확인 하였다.

### 후기

본 연구는 과학기술부·한국과학재단 특정기초 연구사업(과제번호 R01-2001-000-00295-0(2002))에 의하여 연구되었으며, 이에 감사 드립니다.

### 참고문헌

1. Dargentou, J. J., Tromas, C. and Audurier, V., " A new technology for nanohardness measurements: Principle and applications, " Surface and Coatings Technology, Volumes 100-101, Issues 1-3, pp. 103-109, 1998.
2. Lu, Y. and Shinozaki, D. M., "Deep penetration micro-indentation testing of high density polyethylene," Materials Science and Engineering A, Vol. 249, pp. 134-144, 1998.
3. Shima, T. and Fujimori, H., "An accurate measurement of magnetostriction of thin films by using nano-indentation system," Magnetics, IEEE Transactions, Vol. 35, pp.3832-3834, 1999.
4. Wei Gao, Robert J. Hocken, John A. Patten, John Lovingood and Don A. Lucca., "Construction and



- testing of a nanomachining instrument," Precision Engineering, Vol. 24, pp.320-328, 2000.
5. Tanoglu, JM., McKnight,S. H., Palmese, G. R. and GillespieJr, J. W., "A new technique to characterize the fiber/matrix interphase properties under high strain rates", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 31, pp. 1127-1138, 2000.
  6. Syed Asif, S. A., Wahl, K. J. and Colton, R. J., "Nanoindentation and contact stiffness measurement using force modulation with a capacitive load-displacement transducer, " Review of Scientific Instruments, Vol. 70, No. 5, pp. 2408-2413, 1999.
  7. Chu LL. Que L. and Gianchandani YB., "Measurements of material properties using differential capacitive strain sensors ", Journal of Microelectromechanical Systems , Vol.11, No.5 , pp. 489-498 , 2002.
  8. Koo, J. Y. and Kim, D. H., "Measurement of weak forces in atomic force microscopy", J. of the KSPE, Vol. 19, No. 3, pp.13-18, 2002.
  9. Yang, S. J., Back, H. C., Kim, B. H., and Chang, I. B., " A Study on the Performance Evaluation of a Voice Coil Actuator for Electro-Discharge Micro-Drilling Machine ", J. of the KSPE, Vol. 18, No. 12, pp152-158, 2001.