

높은 세장비의 Comb-parallel 타입 마이크로 액츄에이터의 개발

이승재(포항공대 대학원 기계공학과), 조동우*(포항공대 기계공학과), 김중영(삼성 테크윈)

Development of a Comb-parallel Type Micro Actuator with High Aspect Ratio

S. J. Lee(Mechanical Eng. Dept., POSTECH), D. W. Cho(Mechanical Eng. Dept., POSTECH),
J. Y. Kim(Samsung Techwin Co., Ltd.)

ABSTRACT

Electrostatic actuation was adopted for ease of fabrication. We proposed a new driving scheme that uses the vector sum of forces generated by comb-finger and by parallel plate. The moving and fixed electrodes are arranged to maximize the driving force. In this paper, an electrostatic field analysis is performed by Maxwell analysis tool for micro actuators. From the analysis, a comb-parallel type micro-actuator with 4 μm width, 6 μm overlap and 45 μm height could be designed. In order to compare the new type of actuator with the conventional comb type of actuator, we arranged that both types have the same area and the same number of actuators. To make a high aspect ratio structure, we are developing fabrication process using SU-8 and electro-plating

Key Words : electrostatic force(정전기력), microactuator (마이크로 액츄에이터), high aspect ratio (높은 세장비), SU-8, Comb-parallel

1. 서론

미세구조물에서 정지된 구조물과 구동부의 상대운동을 얻기 위해 이용되는 구동력으로는 전자기력(electro-magnetic force), 압전력(piezo-electric force) 그리고 정전력(electro-static force) 등이 있다. 전자기력은 구동부를 움직이게 할 수 있는 힘은 상대적으로 크나 열이 많이 발생하여 구조물이 온도에 의한 변형을 일으킬 수 있다. 그리고 압전력의 경우도 힘은 상대적으로 충분하지만, 압전재료의 변형량이 크지 않기 때문에 구동부를 움직이는 거리에 한계를 가지고 있다. 한편 정전력을 이용하는 방법중에서 주로 사용되는 comb-type 의 액츄에이터는 구조가 간단하고 큰 구동거리를 가지며, 구동전압과 구동거리가 선형적인 장점이 있어 많이 사용되고 있다.

하지만 고밀도 HDD(hard disk drive) head 와 같이 수 밀리그램의 헤드(head)를 구동시키기 위해서는 기존의 정전력을 이용한 액츄에이터는 적합하지 않다. 예를 들어 25000 TPI (tracks per inch)의 고밀도 HDD 의 경우, 약 1 μm 범위의 트랙(track) 사이에

헤드(head)를 정확하게 위치시키기 위해서는 선형적인 구동거리 및 큰 힘이 필수적이다[1,2] 하지만 현재의 comb-type 이나 parallel-type 의 정전력 액츄에이터로는[3] 구동력의 확보와 비선형적인 구동 특성 때문에 한계가 있다. 또한 액츄에이터를 구동시키는 방향에 대해서는 감성이 작아야 하고, 구동방향과 수직인 방향에 대해서는 강성이 커야 한다. 그러므로 이러한 조건을 만족시키기 위해서는 정전력을 이용한 높은 세장비의 구조물이 필요하다. 따라서 높은 세장비를 가지며 구동력의 확보를 위해서 comb-type 에서 발생하는 힘과 parallel-type 에서 발생하는 힘을 모두 이용하는 새로운 방식의 정전력을 이용한 액츄에이터가 제시되었다[4]. 정전력을 이용한 액츄에이터의 구동력은 구동전극과 고정전극의 높이에 비례하며 전극과의 거리에 반비례한다. 따라서 제시된 새로운 방식의 액츄에이터는 기존의 comb-type 액츄에이터보다 높은 세장비를 가지는 구조물을 만들기 위해서 한 번의 코팅으로 100 μm 이상의 두꺼운 막을 만들기가 용이한 PR (photo resist) 인 SU-8 이 사용되었다. 하지만 전극부분의 폭이 수 마이크로미터의 크기를 가져 실제로 미세구조물을

제작하여 그 특성을 파악하는데 어려움이 있다

본 연구에서는 큰 구동력과 선형적인 구동거리, 높은 강성을 가지며 또한 제작이 상대적으로 용이한 새로운 형태의 comb-parallel type의 마이크로 액츄에이터를 개발하였다. 그리고 Maxwell 해석기를 사용하여 구동구간에서 최대의 합력 및 최대 선형 구간을 얻을 수 있는 조건을 수치해석을 통하여 구하였다 또한 수치해석을 이용하여 기존의 comb-type 액츄에이터와 비교를 하였고, 동일한 면적에 동일한 수의 액츄에이터를 배열되게 제작하여 향상된 구동력을 확인하려 하였다.

2. 정전력 액츄에이터의 설계

정전력을 이용하여 미세 구조물을 구동시키는 방법들로는 comb-type 과 parallel-type 이 있다. comb-type 은 구동거리가 크고 선형적인 장점이 있지만, 단위면적당 구동력은 약한 단점이 있다 parallel-type 은 단위면적당 구동력이 큰 장점이 있지만, 구동거리에 있어선 비선형적인 단점이 있다 한편 HDD head 에서와 같이 작은 구동거리에서 큰 힘을 내야 하는 경우에는 comb-type 이나 parallel-type 은 작은 구동력과 구동거리의 비선형성으로 인해서 적당하지 않다. 따라서 본 연구에서는 작은 구동거리에서 선형적으로 큰 힘을 낼 수 있도록 개발된 액츄에이터에 대해 comb-type 및 parallel-type 과 각각 비교하여 보았다 또한 parallel-type 에 의해서 발생하는 비선형적인 구동거리는 bias 전압을 가해줌으로써 최소화하였다

2.1 Comb-parallel type actuator

comb-parallel type 의 액츄에이터는 comb-type 에서 발생하는 F_x 와 parallel-type 에서 발생하는 F_y 의 합력 F 를 이용하는 것이다(Fig 1). 즉, F 의 방향을 구동부가 움직이는 방향으로 설계한다면 모든 힘을 구동 방향으로 집중시킬 수 있게 되는 것이다.

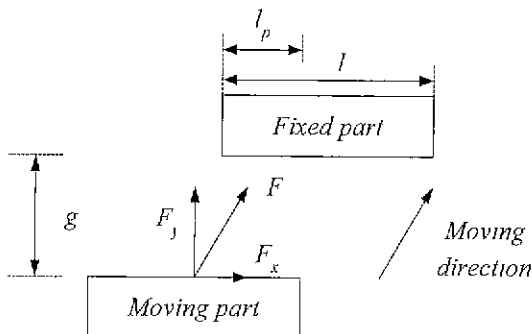


Fig. 1 Actuating scheme of the micro actuator

Fig 1 의 F_x 는 일반적인 comb-type 의 구동력으로, 식 (2)와 같이 표현된다.

$$F_x = \frac{1}{2g} \epsilon_a h V^2 \quad (1)$$

여기서, ϵ_a = 공기의 유전율 (8.86 pF/m)
 h = 전극의 높이
 g = 전극 사이의 간격

식(1)에서 알 수 있듯이 F_x 는 전극의 높이와 입력 전압의 제곱에 비례하고 전극사이의 간격에 반비례한다. 따라서 힘을 증가시키기 위해서는 높은 세장비를 갖는 구조물의 설계가 필수적이다

한편 F_y 는 일반적인 parallel-type 에서 발생하는 힘으로서 식 (2)와 같다

$$F_y = \frac{\epsilon_a h l_p V^2}{2(g - y)^2} \quad (2)$$

여기서, ϵ_a = 공기의 유전율 (8.86 pF/m),
 h = 전극의 높이
 g = 전극 사이의 간격
 l_p = 전극 사이의 겹치는 길이

식(2)에서 알 수 있듯이 F_y 는 전극의 높이, 전극끼리의 겹치는 길이, 입력된 전압의 제곱에 비례하고 전극사이의 거리에는 제곱에 반비례한다.

따라서 comb-type 의 F_x 와 parallel-type 의 F_y 의 합력인 F 를 구동력으로 하는 comb-parallel type 액츄에이터는 동일한 조건에서 기존의 comb-type 이나 parallel-type 보다 높은 구동력을 가지게 된다 한편 F_y 의 경우 구동 방향에 대해 힘이 비선형성을 가진다 이러한 비선형성은 구동력의 변화를 위해 전압을 제어할 때 문제가 된다. 이에 따라 힘의 선형화 과정이 필요하게 된다.

2.2 힘의 선형화

수치해석 결과 간격을 4 μ m로 정했을 경우 입력 전압에 관계없이 pull-in effect 가 1.37 μ m 에서 일어나게 된다

parallel-type 고정부에 전압 V 를 인가할 때 필요한 구동 거리를 위해 요구되는 스프링 강성을 K 라 하면 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다

$$F = \frac{\epsilon A V^2}{2(g - x)^2} = Kx \quad (3)$$

$$K = \frac{\epsilon A V^2}{(g - x)^4} \quad (4)$$

한편 일반적인 parallel-type 의 경우 입력 전압에 관계없이 초기 간극 g 에 대해서 $g/3$ 인 위치까지 구동을 하면 pull-in effect 에 의해서 시스템이 불안정하게 되어 구동부가 고정부에 붙어 버리는 현상이 생긴다.

식(3), (4)를 정리하면 x 값이 $g/3$ 가 되며, 이를 이용하면 pull-in effect 가 $1.33 \mu\text{m}$ 에서 나타나며, 이는 수치해석에 의한 값인 $1.37 \mu\text{m}$ 와 큰 차이가 없다.

한편, 제안된 comb-parallel type 액츄에이터의 구조는 Fig. 2 와 같다. 즉 comb-type 과 parallel-type 의 합력 F 는 방향이 일치하도록 고정부 2 개를 대칭이 되도록 배치하고, 이 사이에 구동부를 위치시킨다. 선형화 과정은 일반적인 parallel-type 과 같다. 즉, 고정부의 한 쪽에는 $V_b + V_c$ 를, 또 다른 한 쪽에는 $V_b - V_c$ 를 가해 주는 것이다. 여기서 V_b 는 nominal bias voltage 이고, V_c 는 control voltage 이다[5].

이같이 V_b 를 이용하여 선형화가 이루어지면 구동부가 $g/3$ 이상을 움직일 수 있게 설계할 수 있다. 또한 두 개의 고정부에 각기 다른 전압을 가해 주면서, 선형화가 이루어지기 때문에 구동부의 크기는 V_b 가 없을 때 보다 줄어들게 된다. Maxwell 해석에 의한 수치해석 결과를 보면 주 전극에 50V, 10V를 주어 선형화 시키는 경우에 $1.7 \mu\text{m}$ 이상까지도 pull-in effect 는 일어나지 않음을 알 수 있다.

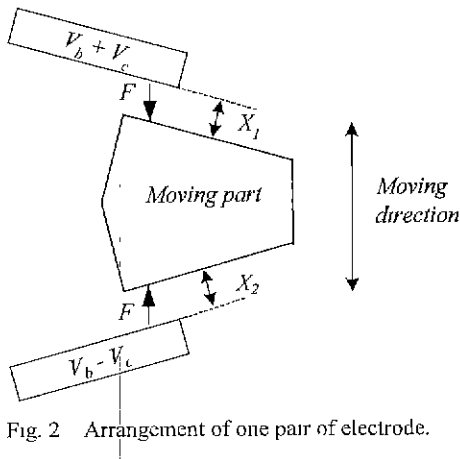


Fig. 2 Arrangement of one pair of electrode.

본 연구에서 선형화 된 정도를 고려하는 범위는 $1.5 \mu\text{m}$ 일 때 까지 이다. Maxwell 해석 결과를 보면 구동부와 고정부가 전압이 가해지기 전에 접치는 길이가 $6 \mu\text{m}$ 정도 될 때까지는 위의 선형화 조건을 만족한다. 하지만 그 이하의 길이에서는 구동력이 적게 나오기 때문에 구동력을 일반적인 comb-type 보다 50% 이상 향상을 목적으로 할 때는 $6 \mu\text{m}$ 가 최적의 접치는 길이임을 알 수 있다.

2.3 전기장 해석

comb-parallel type 에 대해 고정부에 가해진 전압차와 이에 대한 구동부의 움직이는 힘의

관계를 해석하기 위해 전기장 해석을 수행하였다.

Fig. 3 은 comb-parallel type 의 전기장 해석 결과인 전압 분포를 나타낸다.

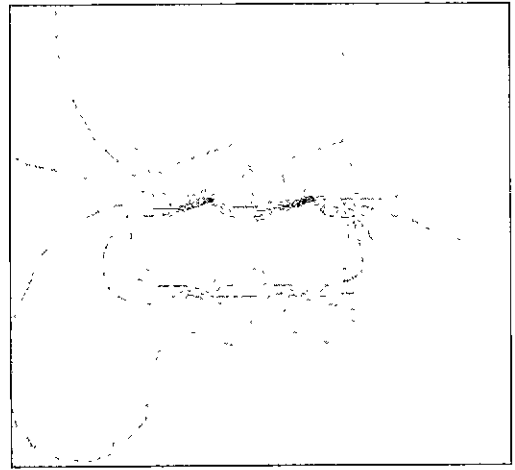


Fig. 3 Electrostatic field analysis (by Maxwell)

Fig. 3 에서 보인 알 수 있듯이, $V_b + V_c$ 가 가해진 위쪽 고정부와 구동부 사이에서는 전압차가 크게 되고, $V_b - V_c$ 가 가해진 아래쪽 고정부와 구동부 사이의 전압차는 상대적으로 작게 된다. 따라서 구동부는 고정부에 가해진 전압차에 의해서 선형적으로 위쪽 방향으로 움직이게 된다. Table 1 은 전기장 해석에 이용된 조건이다.

Table 1 Simulation condition.

Parameter	Symbol	Value
Nominal bias voltage	V_b	12V
Control voltage	V_c	$\pm 6V$
Gap	g	$4 \mu\text{m}$
Overlap length	L_p	$6 \mu\text{m}$
Height of the electrode	H	$45 \mu\text{m}$
Length of electrode	L	$20 \mu\text{m}$

기존의 comb-type 과 comb-parallel type 의 구동력을 비교하기 위해 식(1) 과 식(2) 이용하면 $F_x = 0.36E-3 \text{ N}$, $F_y = 0.54E-3 \text{ N}$ 를 얻는다. 이를 이용하여 합력 F 를 구하면 $F = 0.648E-3 \text{ N}$ 이 된다. 따라서 합력 F 는 F_x 보다 1.8 배 큰 구동력을 가지며, 따라서 comb-type 보다 comb-parallel type 의 액츄에이터를 이용하면 동일한 조건에서 1.8 배 큰 구동력을 얻을 수 있음을 알 수 있다. Maxwell 해석을 이용, 구동력을 수치해석 한 결과에서는 comb-type 은 $F_x = 0.65E-3 \text{ N}$, comb-parallel type 은 $F_y = 0.94E-3 \text{ N}$ 값을 보인다. 따라서 comb-parallel type

이 필요로 하는 구동력을 일반적인 comb-type 보다 50% 이상 향상시키려는 목적에 잘 부합한다고 볼 수 있다

한편, 구동력의 방향을 단일 축으로 집중시키기 위해서는 전극을 구동방향에 대하여 비스듬하게 배열해야 한다. 이때 기울어진 각도는 고정부의 전극과 구동부의 전극이 겹치는 길이에 따라 달라지게 된다. Maxwell 해석을 이용하면 겹치는 전극의 길이가 길어질수록 전극의 기울어지는 각도는 작아지는 것을 알 수 있다 이는 겹치는 길이가 길어지면 parallel-type 의 특성이 커지기 때문이다.

comb-parallel type 을 이용하여 동일한 전극의 면적을 갖는 comb-type 액츄에이터의 구동력보다 50% 향상된 구동력을 얻기 위해서는 전극의 겹치는 길이는 $6 \mu\text{m}$ 이며, 이때 수평에 대한 전극의 기울어진 각도는 17° 이다.

한편, 구조물의 제작시 SU-8 의 잔류응력으로 인한 전극의 휘어짐을 줄이기 위해 고정부의 전극을 3 개씩 통합하여 배열하였다(Fig 4).

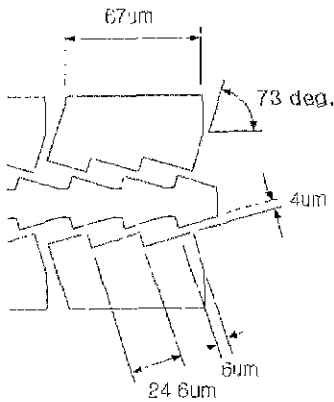


Fig. 4 Geometry of micro actuator

2.4 스프링의 설계

comb-parallel type 의 액츄에이터를 기존의 comb-type 의 액츄에이터와 비교하기 위해 동일한 면적($1480\text{mm} \times 1100\text{mm}$) 내에 동일한 개수(150 개)의 액츄에이터를 배열하였다. 그리고 Maxwell 해석을 사용하여 구동력을 구한 후 스프링을 설계하였다.

스프링의 설계는 double-folded suspension [3]으로 하였으며(Fig. 5), 관계식은 식(5)와 같다.

$$x(y) = \frac{F_x}{4(12EI_x)} (3Ly^2 - 2y^3) \quad \text{for } 0 \leq y \leq L \quad (5)$$

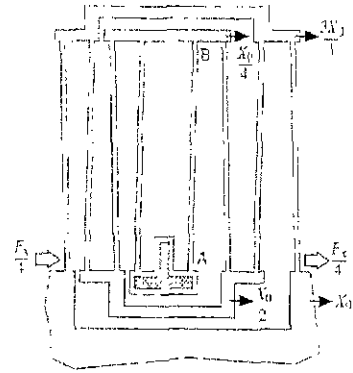


Fig. 5 Mode shape of a double-folded suspension.

Fig. 5 에서 스프링의 길이가 L 이고, 액츄에이터의 구동부가 X_0 만큼 구동했을 때의 스프링 AB 의 이동거리는 $X_0/4$ 가 된다 이를 식(5)에 적용하여 스프링 길이 L 를 구하면 식(6)과 같다.

$$L = \sqrt[3]{\frac{12EI_x X_0}{F_x}} \quad (6)$$

여기서, X_0 = 구동거리

F_x = 구동력

I_x = 스프링의 단면 관성모멘트

L = 스프링 길이

E = Young's modulus

식(6)을 이용하여 액츄에이터가 구동하기 위한 스프링의 길이를 구하면 $L > 500 \mu\text{m}$ 이 된다

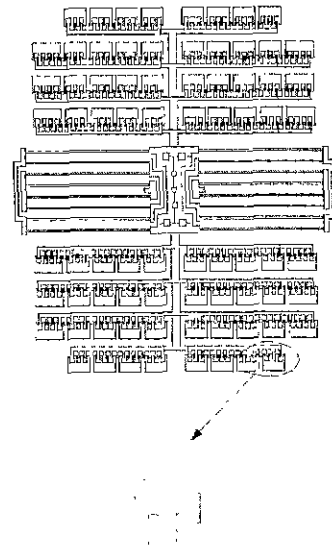


Fig. 6 Comb-type microactuator

Fig. 6 과 Fig. 7 은 comb-type 과 comb-parallel type 을 비교하기 위해 각각 설계된 액츄에이터이다. 액츄에이터의 개수는 각각 150 개씩 배열하였다

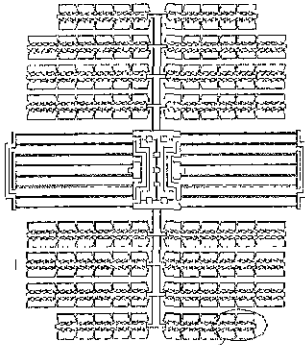


Fig. 7 Comb-parallel type microactuator.

3. 제 작

정전력을 이용해 구동시키는 마이크로 액츄에이터는 높은 세장비를 가진 구조물을 요구한다. 본 연구에서는 공정이 다소 복잡해지나, 배선처리가 용이하고 다층의 구조물을 쌓는 게 용이한 도금 공정을 이용하여 액츄에이터를 제작하였다. 도금을 위한 틀의 제작으로는 자외선으로 SU-8 을 사진 식각하는 방법을 이용하였다.

3.1 SU-8 의 성분 및 특성

본 공정에 사용된 SU-8 의 성분 및 특성은 다음과 같다.

- (1) SU-8 은 [6,7] 스핀 코팅을 이용하여 한 번의 코팅으로 100 μm 이상의 두꺼운 막을 만들기가 용이하다는 장점을 가지고 있다. 따라서 본 공정에서는 SU-8 을 이용해 45 μm 의 높이를 가지는 구조물을 제작하려 하였다
- (2) 다른 PR 보다 빛에 대한 높은 투과성을 가지고 있기 때문에 보다 두꺼운 막을 적은 빛 에너지로 노광할 수 있다. 이러한 높은 투과성은 노광 시에 발생하는 빛의 반사 및 흡수량을 적게 하여 형성되는 PR 도금 틀의 경계면의 형상을 좋게 만들어 준다.
- (3) SU-8 은 다양한 종류의 화공약품에 대해서

좋은 내성을 가지고 있어 공정 설계 시 많은 종류의 식각액을 이용할 수 있다. 하지만 이 때문에 나중에 SU-8 을 제거하기 어려운 단점이 있다. 따라서 이의 해결을 위해 O_2 플라즈마 에칭 (plasma ashing)을 수행한다. 위의 특성 외에도 도금틀의 내부응력이 크다는 단점이 있다. Table 2 는 SU-8 에 대한 공칭 조건이다.

Table 2 Condition for patterning of SU-8.

	Temp.	Time	RPM
Spin coating	-	20	2500
Soft baking	72 $^{\circ}\text{C}$	30min	-
Exposure	-	30sec	-
PEB	85 $^{\circ}\text{C}$	30min	-
Development	-	5min	300

3.2 공 정

본 공정에서는 절연층 식각, 전극 형성, 희생층 형성 그리고 도금틀 형성을 위해서 총 4 장의 마스크를 사용하였다.

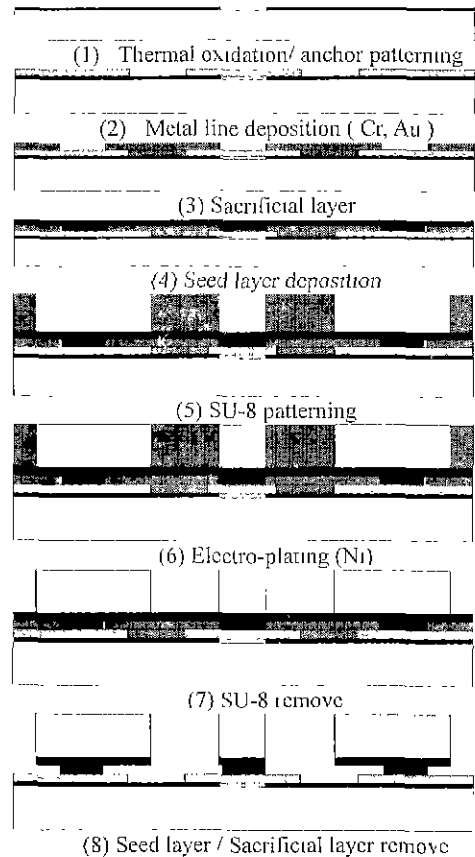


Fig 8 Fabrication process

공정도와 공정내용을 보면 다음과 같다 Fig. 8 은 본 공정의 공정도 이다.

- (1) 실리콘 기판의 절연을 위해서 산화막을 형성한다. 이 때 구동부에 생길 수 있는 전압의 접지를 위해 BOE (buffer oxide etcher)를 이용하여 산화막을 부분적으로 제거하여 구동부와 실리콘 기판을 전기적으로 연결한다(mask 1)
- (2) Thermal evaporator 를 이용하여 Cr(250Å) / Au (2000Å) 막을 증착 시킨 뒤 하부전극을 형성한다 (mask 2).
- (3) AZ 9260 PR 을 이용하여 약 6 μm 두께의 희생층을 만든다(mask 3)
- (4) 도금 기반층을 형성하기 위해 thermal evaporator 를 이용하여 Cr/Au 를 증착 한다.
- (5) SU-8 을 이용하여 55 μm 의 높이를 가지는 도금 틀을 형성한다. 그 후 밑에 있는 Au 를 RIE 를 이용해 전식 식각 한다(mask 4)

4. 결론

본 연구에서는 comb-type 에서 발생하는 힘과 parallel-type 에서 발생하는 힘을 모두 이용하는 comb-parallel type 의 마이크로 액츄에이터를 설계하였다. 또한 comb-type 과 comb-parallel type 을 비교하기 위해 Maxwell 해석을 이용한 수치해석을 수행하였다. 수치해석 결과 comb-parallel type 의 액츄에이터가 comb-type 의 액츄에이터에 비해 50%의 구동력의 향상을 보인다 또한 parallel-plate 에서 생기는 문제인 비선형성을 최대한 줄일 수 있음을 알 수 있다. 또한 수치해석 결과를 이용하여 실험적으로 comb-type 과 comb-parallel type 을 비교하기 위한 동일한 조건을 갖는 미세 구조물을 각각 설계하였다. SU-8 을 이용하여 도금 틀을 만들고 Ni 도금을 수행하여 최소선폭 4 μm, 높이 45 μm의 미세구조물을 제작할 수 있었다.

도금 틀을 만들기 위해 SU-8 을 이용하여 2500rpm 으로 spin coating 한 결과 50μm 의 두께를 가지며 aspect ratio 가 약 1.12 인 도금 틀을 제작할 수 있었다

후 기

본 연구는 산업자원부 차세대 신기술 개발 사업의 연구지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다

참고문헌

1 Grochowski, E., Hoyt, R. F., "Future trends in Hard

Disk Drive", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 32, No. 3, pp. 1850-1854, 1996.

2. Imamura, T., Koshikawa, T., Katayama, M. "Transverse Mode Electrostatic Microactuator for MEMS-Based HDD Slider", IEEE Proceedings of MEMS, pp. 216-22, 1996.

3. Tang, W. C., "Electrostatic Comb Drive for Resonant Sensor and Actuator Applications", Ph.D. Dissertation University of California at Berkeley, 1990

4 Dong-Woo Cho, Jong-Young Kim, Sang-Jo Lee, Ji-Whang Park, Seok-Moon Choi, Seung-Do Ahn, "A Microactuator for a High-density Hard Disk Drive". ASME 2000. MEMS-Vol 2. pp 307-312. 2000

5. Koganezawa, S., Takaashi, K., Mizoshita, Y., Uematsu, Y., Yamada, T., Hasegawa, S., Uedo, T., "A Flexural Piggyback Mill-Actuator for Over 5 Gbit/in². Density Magnetic Recording". IEEE Proceedings MEMS. Vol. 32, No. 5, pp. 3908-3910, 1996.

6. Hiroshii Miyajima, Mehran, Mehregany, "High-Aspect Ratio Photolithograph for MEMS Applications", J of MEMS Vol. 4, No 4, pp 220-229, 1995.

7 H Lorenz, M. Despont, N. Fahrni, N. LaBlanca, P. Renand, P Vettiger, "Su-8 a low-cost negative resist for mems". IOP publishing Ltd, pp. 121-124, 1997