

# 실리콘 공정 및 동 도금 기술을 이용한 탐침형 정보저장장치의 전자기력 미디어 구동기 제작

論 文

53C-4-7

## Development of an Electromagnetic Actuator for Probe-based Data using Si Storage by Process and Cu Electroplating

趙 鎮 佑\* · 李 庚 一\* · 金 成 鉉\* · 崔 榮 珍\*

(Cho Jin-Woo · Lee Kyung-Il · Kim Sung-Hyun · Choi Young-Jin )

**Abstract** - An electromagnetic actuator has been designed and fabricated for probe-based data storage applications. The actuator consists of permanent magnets(SmCo) housing and a media platform which is connected to the Si frame by four couples of Si leaf springs. In order to generate electromagnetic force, Cu coils were electroplated under the media platform. The magnetic field distribution was calculated with 3D Finite Element Method of Maxwell 3D program. The field strength felt by Cu coils was estimated to be about 0.33T when the distance between the media platform and permanent magnets is 200um. The static and dynamic motions of the actuator were analyzed by FEM method with ANSYS 5.3. The measured displacements of the actuator were about  $\pm 92\mu\text{m}$  for input current of  $\pm 40\text{mA}$  and the resonance frequency was 100Hz. The proposed electromagnetic actuator can be utilized for media driver of probe-based data storage system.

**Key Words** : electromagnetic actuator, data storage, Si leaf spring, Cu coil, SmCo permanent magnets, resonance frequency

### 1. 서 론

개인 정보 사용량이 폭발적으로 증가하고 있는 최근의 추세로 볼 때 정보저장장치의 고밀도화 및 소형화에 대한 요구가 더욱 커지고 있다. 탐침형 정보저장장치는 나노미터 영역의 날카로운 탐침과 기록매체간의 물리적 상호 작용력을 이용하여 정보를 기록 및 재생하는 정보저장장치이다. AFM의 작동 방식을 응용하고 있는 탐침형 정보저장장치는 크게 정보를 인식하는 탐침부, 정보가 기록 또는 재생되는 미디어부 및 미디어부를 구동하여 탐침부와 정확한 위치 정밀도를 갖도록 제어하는 구동부로 이루어져 있다. 전체 시스템의 핵심 부품은 마이크로머시닝 기술을 이용하여 대량 제작이 가능하므로 고밀도화, 소형화, 저전력화, 저가격화가 가능하다는 점에서 정보저장장치의 새로운 장을 열 수 있는 기술이다.[1] 탐침부 단일 헤드로 이루어진 경우에는 적절한 정보의 기록/재생 속도를 만족하기 어려우므로, 다수의 캔틸레버를 병렬로 사용하게 된다. 이 경우 일반적인 스피들 모터를 사용하여 기록미디어를 회전시키는 기존의 회전식 구동기는 적용이 어렵다. 따라서 이를 해결하기 위해서는 2차원으로 미디어를 구동할 수 있는 구동기의 채용이 필수적이다. [2], [3] 본 논문은 전자기력을 이용하여 미디어를 구동할 수 있는 탐침형 정보저장장치용 미디어 구동기 제작에 관한 것

이다. 전자기력을 이용한 미디어 구동기는 도금을 통해 구리 코일을 형성하고 이를 영구자석과 결합시킨 후, 구리 코일에 전류를 흘려 미디어를 구동하는 방식이다. 탐침형 정보저장장치는 데이터 비트의 크기가 10nm 수준이고, 단일 캔틸레버가 점유하는 영역의 크기가 수십 $\mu\text{m}$ ×수십 $\mu\text{m}$  수준이므로, 미디어 구동기는 수 nm의 위치 정확도 및 수십  $\mu\text{m}$  수준의 변위가 가능하여야 한다. 또한, 기존의 일반적인 마이크로머시닝 기술에서는 무시될 수 있었던 온도변화에 의한 미세한 열 팽창 변형 역시 탐침형 정보저장장치에서는 간과할 수 없는 중요한 요소이다. 기존의 전자기력을 이용한 구동기는 Cu 도금으로 코일부 및 스프링 부를 형성하였다. 그러나 탐침형 정보저장장치에 미디어 구동기가 실질적으로 적용되기 위해서는 온도 변화에 대한 변형이 없고 응답 주파수가 100Hz이상 이어야하며 중력에 의한 처짐 정도 역시 고려되어야 한다. 이러한 여러 가지 제한 요소를 고려할 때 기존의 Cu 도금으로 형성된 스프링부는 적용이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 실질적인 미디어 구동기의 필요조건을 충족할 수 있는 구조로서 Si 스프링을 사용하였으며 작동 시 온도 변화를 최소화 할 수 있는 구조로 새롭게 설계하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 절 작동원리 및 구조

##### 2.1.1 작동 원리

일반적으로 구동기를 설계하는 경우 구동변위와 공진주파수는 서로 상충되는 관계에 있다. 동일한 구동력 하에서 구

\* 正 會 員 : 전자부품 연구원  
接受日字 : 2003年 10月 7日  
最終完了 : 2004年 2月 21日

동변위는 지지 스프링의 탄성계수  $k$ 와 반비례하고, 공진주파수는 구동력과 상관없이  $(k/M)^{1/2}$ 와 비례 관계에 놓인다. 따라서 대변위 구동과 높은 공진주파수를 동시에 확보하기 위해서는 기본적으로 구동력이 커야 하고, 구동부의 질량  $M$ 이 작은 상태에서 적절한  $k$ 값을 설정하여야 한다.

전자기력 구동의 경우 구동력은 코일부에서의 자기장의 세기와 자기장의 영향을 받는 코일의 유효 길이 및 코일에 인가해주는 전류의 세기에 비례한다. 영구 자석 위에 coil을 놓고 전류를 흘리면 Lorentz 힘을 받게 되는데 이를 이용하여 moving part를 움직일 수 있다. 그림1은 본 연구에서 디자인한 전자기력 미디어 구동기의 작동원리를 보여주고 있다.

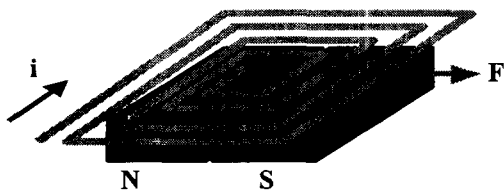


그림 1. 전자기력을 이용한 미디어 구동기의 구동원리

$$F = \overline{B_z} i l_{eff}$$

$B_z$  : 코일에서의 평균자기장의 세기

$i$  : 인가 전류의 세기

$l_{eff}$  : 자기장의 영향을 받고 있는 코일의 유효 길이

Fig. 1 operating principle of electromagnetic actuator

### 2.1.2 구동력 해석

구동변위를 높이기 위해서는 같은 구동력( $F$ )에 대해 스프링의 탄성계수( $k$ )가 작을수록 유리하고, 공진주파수를 높이기 위해서는 탄성계수가 큰 것이 유리하므로, 구동변위를 높이는 방향과 공진주파수를 높이는 방향은 서로 상충된다. 따라서 두 조건을 원하는 범위에서 충족시키기 위해 Figure of Merit의 계산이 필요하다.

구동변위 목표를  $\Delta$ , 공진주파수 목표를  $f_r$ 라 한다면,

$$\frac{F}{k} > \Delta, \quad \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M}} > f_r$$

따라서 위 두 식을 결합하면 구동 성능을 만족하는 필요조건 Figure of Merit은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$fm \equiv \frac{F}{M \Delta (2\pi f_r)^2} > 1 \quad \Leftrightarrow \quad fm \equiv \frac{i_{coil} \overline{B_z} l_{eff}}{M_{Si} + M_{coil} \Delta (2\pi f_r)^2} > 1$$

$k$ 는 위 조건이 만족될 경우 다음과 같은 범위를 갖게 되므로 스프링 크기를 조절하여 범위 안에 들어가도록 할 수 있다.

$$F/\Delta > k > (2\pi f_r)^2 M$$

따라서 목표가 정해졌을 경우 이 조건을 만족시키기 위해서 필요한 것은 구동력  $F$ 와 구동질량  $M$ 을 적절히 조절하는 것이다.

스프링에 영향을 주는 질량  $M$ 은 다음과 같이 Si 기판, 코일, 패드 전극, 절연막 등으로 구성되어 있으며 Si 기판과

coil을 제외하면 다른 부분은 그 비중이 낮으므로 두 가지만을 고려하였다.

$$M = M_{Si} + M_{coil}$$

여기서 미디어부에 해당하는 Si 기판의 면적은 둘 다  $24mm \times 24mm$ 이며 두께는  $0.39mm$ 이므로 코일이 차지하고 있는 부분이 식각된 것을 고려하지 않는다면,

$$M_{Si} = 2.33g/cm^3 \times 24mm \times 24mm \times 0.39mm = 0.523g$$

한편 위에서 무시한 것을 보상하기 위해 코일의 계산에서는 실리콘과 구리의 밀도차만을 고려하여 질량을 구하도록 하는데 코일의 분포가 자석 면적 안에서 선폭  $w_{coil}$ 과 pitch  $p_{coil}$ 의 비율로 결정되며 총 4개의 코일 문치가 있으므로 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$M_{coil} = 4 \times (w_{coil}/p_{coil})^2 \times (8.96 - 2.33)g/cm^3 \times 8mm \times 8mm \times t_{coil}$$

figure of merit,  $fm$ 을 계산해보면,

$$fm = \frac{0.1A \times 0.3315T \times 32mm^2 / p_{coil}}{0.523g + 4 \times (w_{coil}/p_{coil})^2 \times 6.63g/cm^3 \times 64mm^2 \times t_{coil}} \frac{1}{50\mu m \times (2\pi \times 100Hz)^2} > 1$$

그러나 coil의 선폭 및 높이는 식각, 도금 공정에 의한 제약을 받기 때문에 pitch에 의존하게 되며  $fm$ 은  $p$ 에 따른 단조 감소 함수가 된다. 이를 고려하면,

$$p_{coil} < 155 \mu m$$

따라서 pitch를  $155 \mu m$ 보다 작게 할수록 스프링 상수의 허용 폭이 넓어져 설계 및 제작이 용이해지나 실제 공정 상의 제약조건으로 인해 최종 값은 pitch  $120 \mu m$ , 코일 선폭  $100 \mu m$ , 코일 두께  $60 \mu m$ 로 결정하였으며 이때  $fm$ 은  $1.35$ 가 된다. 스프링의 폭은 유한요소해석 프로그램인 ANSYS 6.1을 사용하여 변위 및 공진주파수를 만족시키는 값을 찾아 내었으며 그 결과  $90\mu m \pm 5\mu m$ 에서 만족함을 알 수 있었다.

또한 유한요소해석을 통해 중력에 의한 처짐 및 X-Y crosstalk을 분석한 결과  $z$  방향에 대해 약  $11\mu m$ , X/Y 방향에 대해서는  $14\mu m$ 의 처짐이 발생하였고 X축 구동( $50\mu m$ ) 시에 Y축은 약  $40 \text{ nm}$ 의 간섭현상이 발생함을 알 수 있었다.

코일부에서의 자기장의 세기가 커지기 위해서는 영구자석의 잔류자석밀도가 커야 하고, 자석과 코일 부와의 간격이 작아야 한다. 본 연구에서는 Mathematical을 이용하여 수치해석 방법으로 코일부에서의 자기장 분포를 계산하고자 하였다. 이 계산의 결과로부터 어느 정도의 잔류자석밀도와 두께를 가지는 영구자석이 필요한가를 결정하였고, 영구자석과 코일부 간의 간격을 어느 정도로 하여야 할 것인가를 결정하였다.

다음으로는 코일의 유효길이를 결정하여야 한다.

코일의 유효길이는 코일의 폭에 의해 결정된다. 코일의 폭을 작게 할수록 유효길이를 증가시킬 수 있으나, 공정에 있어서 선폭 구현의 한계로 인해 마음대로 줄일 수 없다. 또한 선폭이 줄어드는 경우 코일 단면의 감소 및 전체 길이의 증가로 인해 저항이 증가하게 되고, 코일에 전류를 흘릴 때 동일 전류에 대해 더 많은 Joule 열이 발생하여 전체 구동기의 열적 안정성을 떨어뜨린다. 따라서 코일의 열발생 문제 및 공정 구현 가능성을 고려하여 코일의 선폭 및 두께를 결정하

었다.

본 계산에서는 코일의 배치에 대해 다음과 같은 가정을 하였다.

- 코일은 직사각형 단면적을 갖는다. ( $w \times h$ )
- 코일은 이상적 비저항값  $\Omega_{Cu}$  과 밀도  $\rho_{Cu}$  를 갖는다.

본 계산에서 가정한 코일의 형태는 다음과 같다.

위 그림처럼 나선 형태가 아닌 정사각형 형태가 여럿 있는 것으로 가정했는데 이는 코일의 선폭이 자석 크기에 비해 충분히 작기 때문에 코일의 길이, 저항, 질량 등을 계산할 때 큰 영향을 주지 않는다.

이러한 구조에서 자석의 긴 방향의 길이를  $a(4 \times 8$  크기 자석의 경우  $a=8\text{mm}$ )라 하고 다양한 크기를 가진 사각형 형태의 코일이  $N$ 개 있다고 하면, 위 코일 위치에서 코일의 길이의 합  $l$  은 다음과 같다.

$$l = 4 \times N \times \frac{a}{2} = 2aN$$

한편, 정사각형  $N$ 의 개수는  $\text{pitch}$ 를  $p_{coil}$ 라 하였을 때 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$N \times p_{coil} = a/2 \Leftrightarrow N = a/2p_{coil}$$

(물론  $N$ 은 어디까지나 자연수이지만 편의상 위와 같이 놓고 계산할 수 있다.)

따라서 코일 위치의 코일 길이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

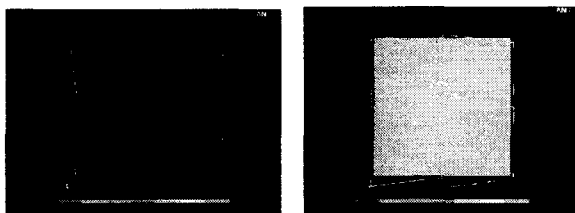
$$l = 4 \times a/2 \times N = 2a \times a/2p_{coil} = a^2/p_{coil}$$

한 축을 구동하기 위해 현재 구조는 위와 같은 코일 2개를 사용하고 있으며 실제 자기장에 유효한 길이는 한 축 방향에 평행한 부분만 해당되므로 전체 길이  $l_{total}$ 의 반이다. 따라서

$$l_{total} = 2l = 2a^2/p_{coil}$$

$$l_{eff} = l_{total}/2 = a^2/p_{coil}$$

이렇게 계산된 구동력의 결과를 바탕으로 하여, 원하는 구동변위 및 공진주파수를 달성할 수 있도록 스프링 구조를 설계하였고 상용유한 해석 도구인 ANSYS 5.3을 이용하여 해석을 수행하였다. Fig. 2는 유한요소해석법을 이용하여 분석한 미디어 구동기의 해석 결과이다.



a) static analysis      b) modal analysis  
 최대 변위 : 약 90  $\mu\text{m}$ , 구동력 : 17.7 mN  
 1st resonance : 118 Hz

그림 2. 미디어 구동기의 구조 해석  
 Fig. 2 structure analysis of a media actuator

### 2.1.3 자기장 해석

구동력  $F$ 는 코일에 흐르는 전류, 유효길이, 평균 자기장의 곱인데, 전류값을 고정시킨 상태에서 일정한 전류자속밀도  $M$ 을 가진 자석에 의해 발생하는 임의 위치의 자기장값은 다음과 같이 표면에서의 자속 밀도 값 만으로부터 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \vec{B}(\vec{r}) &= \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{V'} \rho_M \frac{(\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dv' + \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{S'} \sigma_M \frac{(\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} da' + \mu_0 \vec{M}(\vec{r}) \\ \rho_M(\vec{r}') &\equiv -\nabla' \cdot \vec{M}(\vec{r}') \quad , \quad \sigma_M(\vec{r}') \equiv \vec{M}(\vec{r}') \cdot \vec{n} \\ &= \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{S'} \sigma_M \frac{(\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} da' \end{aligned}$$

실제 설계상에서는 스테이지의 크기와 코일의 배치를 고려하여 자석의 크기를  $4\text{mm} \times 8\text{mm}$ 로 고정하였으므로, 두께가  $t$ 인 자석 두개를 N, S 극을 반대로 해서 나란히 배치하는 경우(자석의 윗면을  $z=0$ 으로 잡을 때)에 대해 공간상의 임의의 한 점  $(x, y, z)$ 의 자기장을 계산하면 다음과 같다.

$$B_z(x, y, z, t) = \frac{\mu_0 M_z}{4\pi} \left( \int_{-a}^a \int_{-a}^a dz' \int_{-a}^a dy' \left[ \frac{z}{[(x-x')^2 + (y-y')^2 + z]^2} - \frac{z+t}{[(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z+t)^2]^2} \right] - \int_{-a}^a \int_{-a}^a dz' \int_{-a}^a dy' \left[ \frac{z}{[(x-x')^2 + (y-y')^2 + z]^2} - \frac{z+t}{[(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z+t)^2]^2} \right] \right)$$

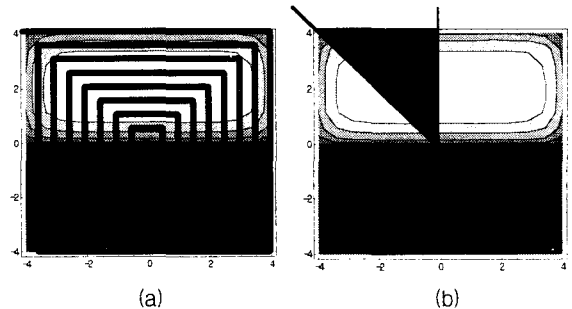


그림 3. 코일부에서의 자기장 분포 및 평균자기장 세기 계산을 위한 모델

Fig. 3 Model for calculating magnetic distribution and average magnetic field

이때, 구동력에 기여하는 코일은  $x$ 축에 평행하게 되어 있는 코일들로 여기에 인가되는 평균적인 자기장의 세기는, 코일의 선폭이 충분히 작아 비교적 조밀하게 분포한다면 Fig. 3의 (b)에서 주황색으로 표시된 부분의 평균값과 거의 일치할 것이다. ( $x$ 축에 대해 대칭 구조이므로) 따라서 이 부분의 평균자기장의 세기는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} B(z, t) &= \frac{1}{8} \int_{-a}^a \int_{-a}^a dz' \int_{-a}^a dy' dB_z(x, y, z, t) \\ &= \frac{1}{8} \frac{\mu_0 M_z}{4\pi} \int_{-a}^a \int_{-a}^a dz' \int_{-a}^a dy' \left( \int_{-a}^a \int_{-a}^a dz'' \int_{-a}^a dy'' \left[ \frac{z}{[(x-x'')^2 + (y-y'')^2 + z]^2} - \frac{z+t}{[(x-x'')^2 + (y-y'')^2 + (z+t)^2]^2} \right] - \int_{-a}^a \int_{-a}^a dz'' \int_{-a}^a dy'' \left[ \frac{z}{[(x-x'')^2 + (y-y'')^2 + z]^2} - \frac{z+t}{[(x-x'')^2 + (y-y'')^2 + (z+t)^2]^2} \right] \right) \end{aligned}$$

본 연구에서 선정된 영구자석은 SmCo로 잔류자속밀도는 1 Tesla 이다. 따라서 이를 기반으로 위 평균자기장의 세기

를 여러 가지 z(자석과 코일과의 거리), t(자석 두께) 값에 대해 계산하였다. 자석의 두께에 대해서는 두께가 두꺼워지면 평균자기장의 세기가 증가하나 점차 의존성이 줄어들고 거리에 대해서는 항상 급격히 평균자기장의 세기가 변하기 때문에 가급적 거리를 가까이하는 것이 중요함을 알 수 있다.

자석의 두께를 키운다면 평균자기장의 세기의 증가를 기대할 수 있으나 현재 목표가 전체 정보저장 장치 두께가 5mm 이내이므로 구동부 두께를 생각하면 자석의 두께를 4mm 이상 키우기는 어렵다고 할 수 있으며 두께를 4mm로 키우더라도 3mm에 비해 수%의 이득밖에 없을 것이다.

따라서 자석의 두께는 3mm, 자석과 코일 중심과의 거리는 0.2mm로 결정하였고, 이 때 코일부에 미치는 평균 자기장의 세기는 0.332 Tesla 일 것으로 추정하였다. Fig. 4는 위치에 따른 표면 자기장 분포를 보여주고 있다.

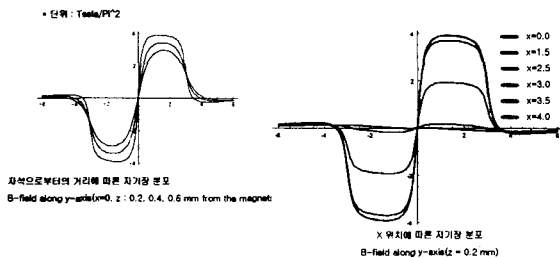


그림 4. X, Z 방향으로의 위치에 따른 표면 자기장 분포  
Fig. 4 surface magnetic distribution according to distance to X, Z direction

2.2 공정 및 구동기 설계

in-plane 방식의 스프링 구조를 제작하기 위하여 도금 공정의 개선을 통하여 Cu 코일의 비저항을 크게 낮추어 코일의 두께를 최소화하였고, 스프링의 재질을 Si로 선정하여 공정 프로세스를 단순화하였다는 점이다. 코일의 두께를 낮춤으로써 얻을 수 있는 장점은 도금 스트레스를 줄임으로써 Si 지지부의 파손 문제를 해결할 수 있으며, 코일부의 뒷면을 미디어 장착 또는 증착부로 바로 사용이 가능하다는 점이다.

동일한 스프링 탄성계수 조건에서 높은 공진주파수를 구현하기 위해서는 구동되는 부분의 질량(M)이 작아야 하므로, 영구자석부를 고정시키고 코일부에 미디어를 장착하여 코일부를 구동시키는 방식을 선정하였다. (Fig 6)

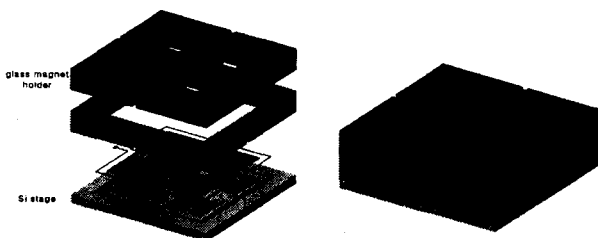


그림 5. 전자기력을 이용한 미디어 구동기의 구조 개념도  
a) 미디어 구동기의 구조 b) 조립된 미디어 구동기의 외형  
Fig. 5 model of electromagnetic actuator  
a) Structure of actuator b) assembly

코일부의 경우 X축 및 Y축 두 방향의 구동이 필요하므로, 두 가지 방향의 구동력이 발생하도록 코일을 배치하였으며, 동일 구동 전류에서 더 많은 구동력을 얻기 위하여 각 방향의 코일을 각각 2개씩 배치하였다.

구동기는 크게 코일이 형성된 구동부와 영구자석을 고정시키는 자석부로 이루어져 있으며, 각각의 부분을 따로 제작한 후 접합하는 것으로 공정을 설계하였다. Fig 6은 미디어 구동기 제작을 위한 전체 공정도를 개략적으로 보여주고 있다.

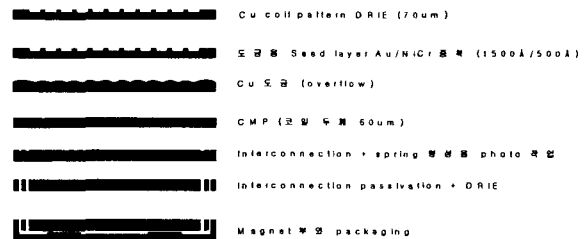


그림 6. 미디어 구동기 제작을 위한 전체 공정도  
Fig. 6 Flowchart for manufacturing electromagnetic actuator

먼저 표면 저항이 2,000Ω 이상인 고 저항 실리콘 웨이퍼 양면을 CMP하여 TTV가 ±1.0μm 이하가 되도록 400μm 두께로 가공하였다. 준비된 고 저항 실리콘 웨이퍼를 세정한 후, 한쪽 면 위에 PR을 사용하여 코일 형상을 패터닝하였다. 코일의 선폭 및 간격은 설계상에서 결정된 바와 같이 각각 100 μm 및 20μm로 설정하였으며, PR 패터닝 후 DRIE 공정을 사용하여 실리콘 웨이퍼 표면을 코일 형상에 따라 70μm 깊이까지 식각하였다. Fig. 7은 PR 패터닝 후 DRIE로 식각된 미디어 구동기의 코일 형성부를 보여주고 있다.

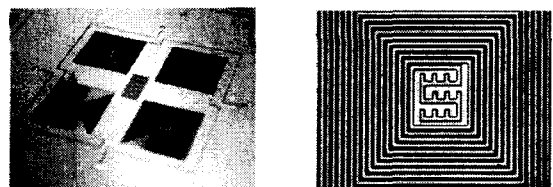


그림 7. DRIE로 식각된 코일 형성부의 구조  
a) DRIE 후의 코일 형성부 b) 코일 형성부의 상세 구조  
Fig. 7 Coil pattern etched by DRIE process  
a) Si coil pattern after DRIE b) micro structure

이렇게 준비된 웨이퍼에 Cu 도금을 실시하기 위하여 전도성 기저층인 NiCr(500Å)/Au(1500Å)을 증착하였다. 기저층 증착 후 Cu를 80μm 두께로 도금하여 실리콘 구조물의 trench를 완전히 채울 때까지 overflow 시켰다. DRIE로 식각된 패턴 내부는 공정 특성상 black Si이 형성되기 쉽다. 이러한 black Si은 폴리머와 Si의 반응 부산물로 일반적인 wet chemical 처리로는 제거가 어려우며 특히 도금 시 계면 도금 stress에 의해 이상 도금 거동을 보인다. Fig 9 a)는 DRIE 공정 후 패턴 내부에 black Si이 형성되었을 때 기존의 도금 방식에서 발생하는 이상 도금 거동을 보여 주고 있으며 b)는 본 연구에서 새롭게 적용된 건식방식 및 reverse pulse 전류 인가 방식을 이용하여 문제점이 해결된 정상도금 상태를 보여주고 있다.

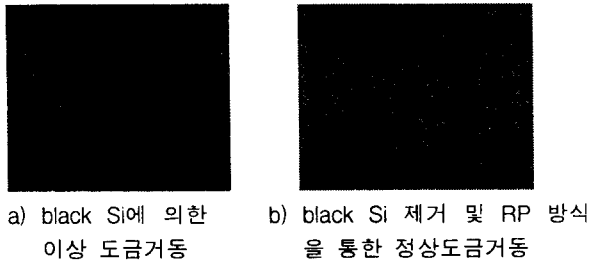


그림 8. DRIE 공정 시 패턴 내부에 발생하는 black Si에 의한 도금 거동  
 Fig. 8 Effect of black Si on Cu electroplating

코일 형성을 위한 Cu 도금은 trench 도금 시 seam 현상 및 계면 stress를 극복하고 도금 불량을 억제하기 위하여 reverse pulse 방식으로 도금하였고 이 때 forward 전류와 reverse 전류의 상대 비율은 6:4로 하였다. 도금 초기에는 pulse 도금 방식을 이용하여 trench 바닥면에서 throwing power를 높였으며 도금이 진행되면서 reverse pulse 방식의 상대 전류 비율을 조절하며 도금 하였다. Cu 도금 후 실리콘 웨이퍼의 전체 두께가 390 $\mu$ m 되도록 표면을 CMP하였다. CMP된 실리콘 웨이퍼에는 60 $\mu$ m 두께의 Cu 코일이 120 $\mu$ m pitch 간격으로 형성되어 있으며 TTV는  $\pm 2\mu$ m이다. Fig. 9는 Cu 도금 및 CMP 공정 후 Cu 코일이 형성된 실리콘 웨이퍼의 표면을 보여준다.

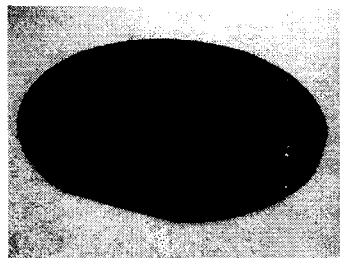


그림 9. Cu 도금으로 제작된 coil형상  
 Fig. 9 Cu coil made by Cu electroplating and CMP

Cu 도금 후 Si wafer를 300 $\mu$ m 두께가 되도록 표면을 CMP하였다. CMP에 의해 Cu 코일이 상호 분리된 Si wafer는 60 $\mu$ m 두께로 Cu coil이 형성되어 있으며 TTV는  $\pm 1\mu$ m이다. Cu CMP 후 코일이 형성된 Si wafer 표면에 절연층을 형성하였다. 절연층은 negative thick PR 로 형성하였으며 2차 Si DRIE 공정에서 구조물을 release하기 위하여 전극 부위 및 Si spring 영역이 드러나도록 patterning하였다. Cu coil과 외부 회로와의 interconnection을 위해 screen printing 방법을 이용하여 Silver paste로 전극을 형성하였으며 curing 후 2차 Si DRIE 공정을 이용하여 코일부 부위를 release 하였다. Fig.10은 interconnection 전극 형성 후 2차 DRIE 공정으로 Si spring이 release된 Cu coil stage부를 보여주고 있다. 제작된 전자기력 미디어 구동기는 Cu coil 영역과 전체 chip의 frame 부위가 Si spring에 의해 hinge 구조로 연결되어 있다.



그림 10. 2차 DRIE 후 release된 Cu coil 구동부, 하우징 및 패키징  
 Fig. 10 assembly of electromagnetic actuator  
 a) media and Cu coil b) magnet housing c) assembly

### 2.3 구동 테스트

제작된 구동기는 High resolution CCD optics ( $\times 10,000$ ) 및 Probe Station을 사용하여 정전류방식으로  $\pm 5\text{mA}$ 에서  $\pm 40\text{mA}$ 까지 전류를 인가하며 구동 변위를 측정하였고, 2mA에서 공진주파수를 측정하였다. Fig. 11은 인가전류 변화에 대한 구동기의 구동변위 변화를 보여주고 있다.

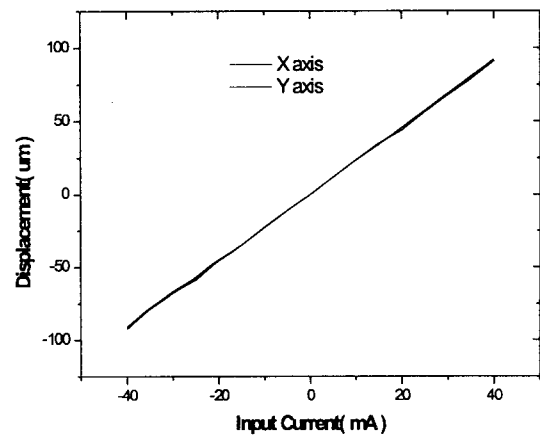


그림 11. 인가전류 변화에 따른 구동변위 변화  
 Fig. 11 Movements test of electromagnetic actuator

기록매체인 미디어 부를 장착하기 위해서는 구동기 표면이 경면을 가져야하나 본 연구에서는 구동변위를 손쉽게 측정하기 위하여 미디어가 장착될 부위에 Au 테스트 패턴을 형성하였다. 패턴의 폭 및 간격은 둘 다 100 $\mu$ m로 설정하였다. 구동 결과 x축 및 y축 모두  $\pm 40\text{mA}$ 의 인가전류에서 최대  $\pm 92\mu$ m의 변위를 보이는 것으로 관측되었다. 또한 인가 전류 변화에 대해 우수한 선형성을 보여주고 있으며 구동기의 유효 변위를  $\pm 50\mu$ m라 할 때 구동 전압은 0.9V, 소비전력은 36mW이며 최대 유효 공진주파수는 100Hz인 것으로 측정되었다. table 1는 제작된 미디어 구동기의 성능 test 결과를 보여주고 있다. Fig 12는 인가 주파수에 따른 공진폭을 측정된 결과이다.

표 1. 전자기력 미디어 구동기 성능 test 결과

Table 1 actuating test of electromagnetic actuator

Electromagnetic actuator	
구동범위	$\pm 92\mu\text{m} / \pm 40\text{mA}$
공진주파수	100Hz
소비 전력	36mW
구동 전압	0.9V
크기	30mm × 30mm × 3.2mm

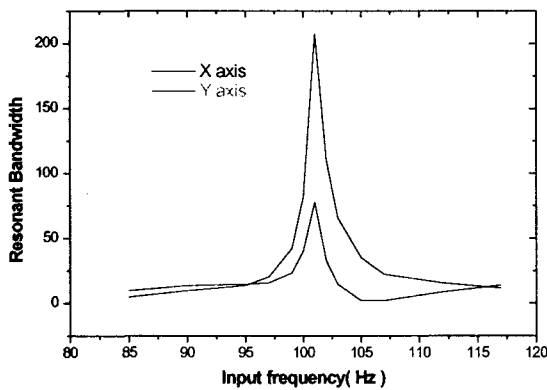


그림 12. 주파수에 따른 공진 폭 변화

Fig. 12 Resonant bandwidth according to input frequency

### 3. 결 론

이상 MEMS 공정 및 도금공정을 이용하여 전자기력을 이용한 탐침형 정보저장장치의 미디어 구동기를 제작하였다. Figure of Merit식 및 유한요소해석법을 이용하여 구동력을 해석하였고 SmCo 영구자석의 위치에 따른 평균 표면 자기장 분포를 해석하여 미디어 부와 코일부를 설계하였다. 제작된 미디어 구동기는  $\pm 40\text{mA}$  인가 시 최대변위가  $\pm 92\mu\text{m}$ , 구동 전압이 0.9V, 소비전력이 36mW이며 선형성 및 공진 주파수가 안정적인 작동 특성을 보여주고 있다. 향후에는 중력에 의한 미디어 구동기 stage부의 처짐 현상 및 미디어 구동기 작동 시 코일 저항에 의한 열 발생 현상 또한 제어하여 실질적으로 탐침형 정보저장장치의 미디어 구동기로 사용할 수 있는 새로운 형태의 구동기를 제작할 예정이며 구동기의 제어분해능을 측정하기 위하여 conventional AFM stage (제어분해능 :  $<10\text{nm}$ ) 와의 비교 테스트를 통한 제어분해능 측정을 시도할 예정이다.

#### 감사의 글

본 논문을 산업자원부에서 진행하고 있는 차세대신기술개발사업 중 대용량정보저장장치 개발의 일환으로 제출하며 이에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- [1] P. Vettiger, M. Despont, U. Drechsler, U. Durig, B. Gotsmann, W.Haberle, M. A. Lantz, H. Rothuizen, R. Stutz, G. Binnig, and H. Rohrer, "The Millipede-Nanotechnology Entering Data Storage", IEEE Trans. on Nanotechnology, Vol. 1, No. 1 pp39~55, 2002
- [2] S. Hoen, P. Merchant, G. Koke and J. Williams, "Electrostatic Surface Drive : theoretical considerations and fabrication", Transducer 97, Vol. 1, pp41~44, 1997
- [3] Chris S.B. Lee, Sejin Han and Noel C. MacDonald, "Single Crystal Silicon (SCS) XY-Stage Fabricated by DRIE and IR alignment", MEMS 2000. The Thirteenth Annual International Conference on. pp.28. 33, Jan. 2000.

### 저 자 소 개



#### 조진우(趙鎭佑)

95년 2월 성균관대학교 재료공학과 석사 졸업  
 97년 2월 - 98년1월 LG금속 연구소 근무  
 98년 2월 - 현재 전자부품연구원 근무



#### 이경일(李庚一)

97년 2월 서울대학교 물리학과 석사 졸업  
 97년 2월 - 현재 전자부품연구원 근무



#### 김성현(金成鉉)

00년2월 서울시립대 제어계측공 석사졸업  
 00년2월 - 02년2월 미래로 시스템 근무  
 02년3월 - 현재 전자부품연구원 근무



#### 최영진(崔榮珍)

99년 2월 서울대학교 물리학과 박사 졸업  
 99년 3월 - 현재 전자부품연구원 근무