

탐침형 정보저장장치 제어용 초정밀 구동기의 설계

이경일, 조진우, 김성현, 최영진
전자부품연구원

Design of the electromagnetic actuator for probe-based data storage

Kyoung-Il Lee, Jin-Woo Cho, Seong-Hyun Kim, Young-Jin Choi
Korea Electronics Technology Institute

Abstract - 탐침형 고밀도 정보저장장치의 구현에 필수적인 초정밀 구동기의 성능을 개선하기 위해 단순화된 모형을 설정하고 각 설계 변수들이 구동 특성에 미치는 영향을 분석하여 이를 통해 원하는 사양의 구동기를 설계하고 실제 제작을 통해 그 모형의 타당성을 검증하였다. 전자기력을 이용한 구동기는 변위, 공진 주파수 등 여러 조건을 동시에 만족시켜야하나 전자기-기계가 복합적으로 결합된 시스템이므로 그 특성의 이해와 설계를 위해서는 보다 단순화된 모형의 도입이 필요하다. 본 논문에서는 코일부를 단순화하고 자석으로부터 인가되는 평균자기장을 통해 구동 특성을 분석하였으며 이는 실제 제작 결과와 잘 일치하였다.

1. 서 론

정보통신기술이 발전하면서 멀티미디어 자료 등 사용자가 다루는 데이터의 양이 급속히 증가하고 있으며 이에 따라 정보저장장치의 대용량화가 요구되고 있다. 그러나 기존 광학식 저장장치나 자기 디스크 등은 향후 물리적 한계에 도달할 것으로 예상되고 있어 새로운 방식의 정보저장 방식에 대한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 그 가운데 탐침형 정보저장장치는 주사탐침현미경(SPM) 기술을 바탕으로 한 것으로 매우 우수한 탐침 끝부분을 매체에 아주 가깝게 접근시켜 국소적인 물리적 변화를 유발시켜 정보를 기록하는 방식을 통틀어 말한다. 여기에는 기록의 대상이 되는 매체와 기록을 수행하는 탐침, 그리고 그 둘의 상대적인 위치를 변화시켜주는 구동기가 필수적이다. 기존 정보저장기술과 달리 탐침형 정보저장장치에서는 탐침 하나가 아닌 매우 많은 수의 탐침들을 배열시켜 높은 기록/판독 속도를 구현하기 때문에 회전형 구동기가 아닌 X-Y 이동형 구동기가 필요하다. 탐침형 정보저장장치용 구동기에 요구되는 성능에는 여러 가지가 있는데 각 탐침 간의 거리만큼에 해당하는 정보기록 영역을 주사하기 위해 수십 μ 이상의 구동 변위가 필요하며 정보 기록 밀도를 높이기 위해서는 수 nm 이하의 정밀도를 가져야 한다. 또한 기록 속도와 진동에 대한 내성을 위해서는 가급적 높은 공진 주파수가 요구되며 구동기의 작동이 기록 판독에 영향을 주어서는 안된다. 이러한 조건들을 만족시키기 위해 다양한 구동 방식이 연구되고 있으며 특히 소형화와 가격 경쟁력, 정밀도 등에서 유리한 MEMS 기술을 이용하여 정전기력 [1]이나 전자기력[2,3]을 이용한 연구가 진행되고 있다. 이중 전자기력을 이용한 구동기는 저전압 구동이 가능하고 변위가 크며 정보 기록 영역을 넓게 할 수 있다는 장점이 있으나 영구 자석을 이용하므로 전체 부피가 커지고 전류 구동을 하기 때문에 전력 소모가 크고 온도 상승 문제가 생길 수 있다. 따라서 모든 조건을 만족시키기 위해서는 정확한 설계가 필수적이므로 본 논문에서는 전자기력을 이용한 구동기의 설계 방식을 제안하고 그 타당성을 검증해 보았다.

2. 본 론

2.1 미디어 구동기의 작동 원리

본 논문에서 다루고자 하는 구동기의 구조는 그림 1과 같다. N, S극을 엇갈리게 배치시킨 자석쌍들과 일정한 간격을 두고 코일이 마주보고 있으며 자석쌍 두께가 한 축을 구동하도록 되어 있어 X, Y 구동이 가능하다. 코일이 붙어있는 판의 반대쪽 면은 정보 기록면으로 이용되며 이 판은 스프링에 의해 외부에 고정되어 코일에 전류가 인가됨에 따라 로렌츠 힘에 의해 판이 해당 방향으로 이동하게 된다. 이때 스프링 상수가 너무 낮으면 공진주파수가 낮아지며 스프링 상수가 너무 높으면 구동력으로 원하는 변위를 얻을 수 없으므로 구동력에 맞도록 적절한 스프링 상수를 결정하는 것이 중요하다. 한편 구동력을 높이기 위해 코일의 개수를 늘리면 판의 질량도 늘어나므로 공진주파수가 낮아지며 또 좁은 면적에서 코일의 길이만 늘리면 저항이 높아져 발열량이 늘어나므로 역시 적절한 조정이 필요하다. 따라서 구동 목표를 만족시키기 위해서는 공정 한계에 맞게 여러 가지 조건을 동시에 고려해야함을 알 수 있다.

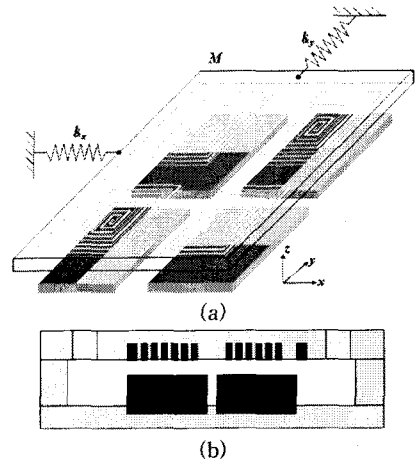


그림 1 구동기의 구조 (a) 측면 (b) 단면

2.2 구동 조건

먼저 변위와 공진주파수를 만족시키는 조건은 다음 식 (1), (2)와 같다.

$$\frac{F}{k} > \Delta \tag{1}$$

$$\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M}} > f, \tag{2}$$

여기서 F는 전자기력에 의한 구동력, k는 각 방향 스프링의 상수, Δ는 목표 변위, M은 코일을 포함한 판의 질량, fr은 목표 공진주파수이다. 이 두가지 조건을 동시에 만족시키는 스프링 상수 k가 존재하기 위해서는 다음 식 (3)의 필요조건이 만족되어야만 한다.

$$fm \equiv \frac{F}{M \Delta (2\pi f_r)^2} > 1 \quad (3)$$

식 (3)이 만족될 경우에만 스프링 상수 k가 다음 허용 범위 내에서 식 (1), (2)를 모두 만족시키게 되며 fm이 1보다 크면 클수록 그 범위는 넓어지게 된다.

$$F/\Delta > k > (2\pi f_r)^2 M \quad (4)$$

2.2.1 구동 모델

식 (3)에서 구동력 F는 다음과 같이 코일에 흐르는 전류와 거기에 인가되는 평균자기장, 그리고 코일의 길이의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$F = i_{coil} \bar{B}_z l_{eff} \quad (5)$$

여기서 코일에 흐르는 전류를 일정값으로 고정시킨 경우를 가정하면 구동력은 평균 자기장과 길이에 의해 결정된다. 일반적으로 영구 자석에 의한 자기장은 다음 식 (6)과 같이 주어진다.

$$\bar{B}(z) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{-z}^0 \frac{M(\beta)}{|\beta - z|^3} d\beta + \frac{\mu_0}{4\pi} \int_0^z \frac{M(\beta)}{|\beta - z|^3} d\beta + \mu_0 M \quad (6)$$

그림 1에서 보듯이 일정한 자화값 M을 가진 직육면체 형태의 자석(a × b × tm)이 서로 다른 방향으로 그림 2와같이 배열되어 있을 때 임의점 (x,y,z)에서의 z 방향 자기장은 식 (6)의 두번째 항으로부터 z=0과 z=-tm 두면만 고려하여 식 (7)과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

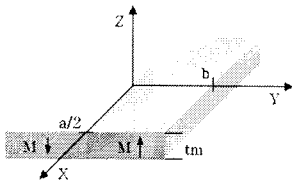


그림 2 자석 쌍의 배열

$$B_z(x, y, z) = \frac{\mu_0 M_z}{4\pi} \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} \left[\int_0^z \frac{z}{((x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2)^{3/2}} - \frac{z+tm}{((x-x')^2 + (y-y')^2 + (z+tm)^2)^{3/2}} \right] dy' dx' - \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} \left[\frac{z}{((x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2)^{3/2}} - \frac{z+tm}{((x-x')^2 + (y-y')^2 + (z+tm)^2)^{3/2}} \right] dy' dx' \quad (7)$$

이때 발생하는 자기장의 분포는 그림 3과같이 대칭적인 형태로 나타나게 되며 이 분포는 y=2b 이상에서는 10% 이내가 되며 y=3b 이상에서는 2% 이내가 된다.

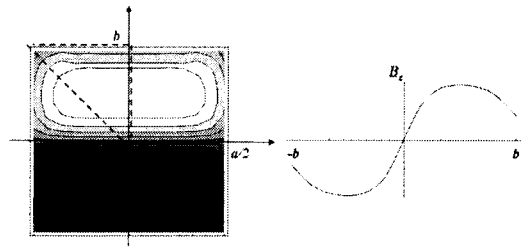


그림 3 한쌍의 자석에서 발생하는 자기장

한편 그림 1과같은 구조에서 자석이 그림 3과같이 배열되어 있으면 y 축과 평행한 코일에 인가되는 힘은 대칭성에 의해 모두 상쇄되며 x 축과 평행한 코일에 인가되는 힘만이 실제 구동력으로 작용함을 알 수 있다. 따라서 구동력을 구하기 위해서는 코일이 자석 크기에 비해 충분히 조밀하고 균일하게 자석 전 면적에 걸쳐 분포되었다고 가정한다면 그림 3에서 점선으로 둘러싸인 삼각형 부분의 평균 자기장을 구함으로써 구동력을 구할 수 있다. 이 부분의 평균 자기장은 식 (7)에서 구한 z 방향 자기장을 적분함으로써 계산할 수 있으므로 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{B}_z = \frac{1}{8} \int_0^b dy \int_{-a/2}^{a/2} dx B_z(x, y, z) \quad (8)$$

또 나선형 코일의 유효 길이는 코일이 충분히 조밀하다고 가정하고 a=2b인 경우 일정 간격을 가진 여러 길이의 정사각형 코일 N개의 합으로 볼 수 있고 또 한 축을 구동하는데 사용되는 두 자석쌍에 해당되는 코일 중에서 절반이 상쇄되는 부분임을 감안하면 실제 유효 길이는 한 자석쌍 위의 코일 길이와 같으므로 식 (9)와 같이 코일의 피치 p에 의존함을 알 수 있다.

$$l_{eff} = 4 \times a/2 \times N = 2a \times a/2p_{coil} = a^2/p_{coil} \quad (9)$$

이제 매체 및 전체 구동기의 크기가 결정되면 식 (5)~(9)로부터 식 (3)을 만족시키는 조건을 알 수 있으며 fm은 코일 피치가 감소함에 따라 증가하는 것을 알 수 있다.

2.2.2 구동 시의 발열

구동력을 높이기 위해서는 식 (9)에서 알 수 있듯이 최대한 피치를 줄여야 하나 일반적으로 코일의 피치를 줄이면 구형 가능한 코일의 두께 역시 공정 한계로 인해 줄어들므로 전체 코일의 저항을 높히 결과적으로 온도 상승을 불러올 수 있다. 본 논문에서 다루고 있는 구동기에서는 전류가 스프링부를 통해 공급되므로 식 (4)에 의해 결정된 스프링 상수 범위에서 가능한 발열을 낮추는 구조를 선택해야 한다. 기록 매체 판과 외부는 스프링을 통해서만 연결되어있으며 발열이 상온 부근이므로 전도에 의한 열전달만을 고려하기로 하자. 이때 X, Y 두축에 대해 전 범위를 주사할 경우 매체 판의 포화 평균 온도 상승은 다음 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta T = P \times \frac{1}{4C_s} \frac{l_s}{w, h_s} = \frac{2}{3} i_{max}^2 R \frac{1}{4C_s} \frac{l_s}{w, h_s} \quad (10)$$

여기서 Cs는 스프링의 열전달계수, w, h, l은 각각 스프링의 폭, 높이, 길이이며 R은 한 축에 해당하는 코일의 전체 저항이다.

2.3 제작 및 평가

상기 모델의 유효성을 알아보기 위해 실제 소자를 제작하였다. 매체 판으로 실리콘 기판을 사용하고 구리 도금으로 코일부를 제작하였으며 SmCo 자석을 고정시킨 부분과 결합하여 구동기를 완성하였다. 자세한 공정은 지난 발표[4]와 동일하다. 조립된 형태는 그림 4와 같으며 Si 기판의 최종 두께는 400 μ m, 매체 판의 크기는 약 22mm x 22mm, 자석 면적은 4mm x 8mm로 가정하고 자석쌍끼리는 간섭을 줄이기 위해 4mm 이상 간격을 두었다. 이때 발생하는 평균 자기장은 식 (8)로부터 표 1과 같이 구할 수 있다.

표 1 자석 두께 및 거리에 따른 평균 자기장(Tesla)

	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
0.5	0.147	0.109	0.085	0.068	0.055
1.0	0.223	0.170	0.135	0.109	0.090
1.5	0.268	0.208	0.167	0.137	0.113
2.0	0.298	0.233	0.188	0.155	0.129
2.5	0.318	0.250	0.203	0.168	0.141
3.0	0.332	0.263	0.214	0.177	0.149

위의 표에서 볼 수 있듯이 자석의 두께가 두껍고 간격이 좁을수록 평균 자기장이 높으므로 가공 공차를 고려하여 자석 두께는 3 mm, 자석표면과 코일 중심부의 간격은 0.2 mm로 고정하였다. 실제 구동 목표를 100Hz 이상, 변위 25 μ m 이상으로 설정하고 식 (3)의 조건을 살펴보면 코일 피치가 170 μ m 이하일 때 fm이 1 이상이 되었다. 실제 제작에서는 공정 한계를 고려하여 코일 피치를 120 μ m로 설계하였으며 이 때 스프링의 탄성 계수가 530 ~ 700 N/m 범위에 들면 조건을 만족하도록 하였는데 식 (10)과같이 스프링의 탄성계수를 높히면 온도 상승이 감소하므로 약 700 N/m를 갖도록 하였다. 스프링 상수의 결정은 유한요소 해석 프로그램을 이용해 정적, 공진 해석을 한 결과 스프링의 폭을 약 200 μ m로 설계하였다. 허용 범위 내에서 스프링 상수를 최대한 높혔기 때문에 최종 설계 사양은 공진주파수 140 Hz에 변위 25 μ m이며 X, Y에 대해 전 범위를 주사할 경우 평균 온도 상승은 약 10도 정도로 예상되며 이때의 소모 전력은 약 20 mW이다.

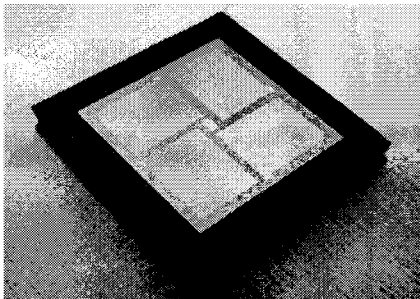


그림 4 제작된 구동기의 외부 형태

제작 공정 결과 전체 크기는 약 5mm x 28 mm x 28 mm였으며 실리콘 식각 공정 후 스프링의 폭이 약 190 μ m 정도로 구현되었으며 코일부는 정확한 치수대로 되었다. 비디오 화면을 통해 측정한 변위는 구동 전류 100mA에서 약 28 μ m였으며 첫 번째 공진 주파수는 약 135 Hz에서 나타났다. 이는 설계치보다 스프링 폭이 줄어들어 스프링 상수가 낮아졌기 때문으로 추정할 수 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 코일부는 조립 후 자석과 마주보고 있어 밖으로 드러나지 않기 때문에 코일부의

온도를 직접 측정할 수는 없었으나 반대면(기록면)에서의 표면 온도는 비접촉 표면 온도 측정기로 약 5도 이내의 온도 상승이 있었다.

따라서 실제 복잡한 전체 구동기 대신 단순화된 모델에 의해 구동기의 변위 및 공진 특성을 잘 이해하고 설계할 수 있다.

3. 결 론

전자기력을 이용한 초정밀 구동기에 대해 코일부와 평균 자기장을 통해 단순화된 모형을 설정하고 통해 해석하고 이를 바탕으로 실제 제작을 통해 그 모형의 타당성을 검증하였다. 본 논문에서는 코일부를 단순화하고 자석으로부터 인가되는 평균자기장을 통해 구동 특성을 분석하였으며 이는 실제 제작 결과와 잘 일치하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Hoen, Merchant, Koke and Williams, "Electrostatic Surface Drives: Theoretical Considerations and Fabrication", Transducers, V.1, p.41-44, 1997.
- [2] H. Rothuizen, U. Drechsler, G. Genolet, W. Haberle, M. Lutwyche, R. Stutz, R. Widmer, and P. Vettiger, "Fabrication of a Micromachined Magnetic X/Y/Z Scanner for Parallel Scanning Probe Applications", Microelectronic Engineering", V.53, p.509-512, 2000
- [3] H. Rothuizen, M. Despont, U. Drechsler, G. Genolet, W. Haberle, M. Lutwyche, R. Stutz, and R. Widmer, P. Vettiger, "Compact Copper/epoxy-based Electromagnetic Scanner for Scanning Probe Applications", MEMS Conference, p.582-585, 2002
- [4] 조진우, 이경일, 김성현, 최영진, "MEMS 공정을 이용한 탐침형 정보저장장치 제어용 초정밀 구동기 제작", 대한전기학회 하계학술대회, C권, p.2003.