

## 분해능 향상 및 대구동 범위를 위한 보이스코일 모터의 설계

\*유용민, \*조주희, \*권병일  
\*한양대학교

### Design of VCM(Voice Coil Motor) for improvement in resolution and driving in a large displacement

\*Y.M.YOU, \*J.H.CHO, \*B.I.KWON  
\*Hanyang University

**Abstract** - In this paper, a design of VCM(Voice Coil Motor) for the measurement system of nano-level force and displacement was proposed and developed. This paper present the VCM shape for improvement of position resolution and guarantee of a large displacement. And then the finite element analysis method(FEM) utilized to produce linear driving thrust and satisfy required thrust of the system. The result shows the applicable possibility of the proposed VCM as a study for nano-level measurement system.

## 1. 서 론

최근에 반도체 산업과 초정밀 가공기기, MEMS기술이 급격히 발전하면서, 나노급의 힘 및 위치 결정을 요구하는 시스템에 대한 요구가 증대되었다. 나노레벨의 힘 및 변위 측정용 시스템은 여러 방식이 있으나 주로 압전물질(Piezoelectric material)를 이용한 변위 제어에 대한 연구가 주류를 이루고 있다. 하지만 압전소자의 경우 구동 범위가 작으며 복잡한 회로 시스템이 요구되는 단점을 지니고 있다. 이에 비해 보이스코일 모터(Voice Coil Motor)는 비교적 긴 행정 거리를 가지며, 간단한 구동 알고리즘을 가지고 있다. 이러한 보이스 코일모터는 하드디스크나 광디스크 내의 픽업 구동장치등에 사용되면서 그 사용분야가 비약적으로 증가하였지만, 극미소 하중 및 변위 제어용 구동기로의 연구는 미비한 상태이다 [1-3].

본 논문에서는 보이스코일 모터의 대구동 뿐만 아니라 고분해능 확보를 위한 연구를 수행하였으며, 분해능 향상을 위한 방법으로 위, 아래 두 개의 공극을 갖는 보이스코일 모터의 형상을 제안하였다. 위, 아래 공극의 코일은 이중 서보 방식으로 아래 공극의 코일은 대구동의 범위 확보를 목적으로 하고, 윗 공극의 코일은 분해능 향상을 목적으로 하였다. 또한 자기회로의 경로인 철심을 포화시킴으로써 넓은 전류범위(0-1A)에서 선형적인 추력이 발생하는 VCM을 설계하였다.

## 2. VCM의 설계

### 2.1 분해능 향상 및 대구동을 위한 VCM의 형상 제안

VCM은 요오크와 영구자석을 포함하는 고정자와 보빈에 코일을 감은 가동자로 구성된다. 코일에 전류가 흐르면 로렌츠력(Lorentz force)이 발생하게 되며, 추력은 식(2.1)과 같다.

$$F = N B i l [N] \quad (2.1)$$

여기서  $N$  : 코일의 턴수,  $B$  : 공극 자속밀도,  $i$  : 입력 전류,  $l$  : 코일의 축 방향 유효길이이다.

그림 1은 VCM의 제안 모델에 대하여 보여주고 있다.

윗 공극의 coil 1은 분해능 향상을, 아래 공극의 coil 2는 대구동 범위의 확보를 목적으로 하고 이중 서보 추력 인 가방식을 채택하였다. 이때 제안 모델의 추력은 식(2.2)과 같다.

$$F = N_1 B_1 i_1 l + N_2 B_2 i_2 l [N] \quad (2.2)$$

여기서  $N_1, N_2$ : 코일 1, 2의 턴수,  $B_1, B_2$ : 코일 1, 2의 공극 자속밀도,  $i_1, i_2$ : 코일 1, 2의 입력전류이다. 위, 아래 공극의 코일에서 발생하는 추력의 방향은 모두 같은 축 방향(그림 1의  $x$ 축 방향)이다. 아래쪽 공극의 coil 2는 큰 추력을 발생시켜 비교적 긴 행정거리를 확보하게 하며, 동시에 위쪽 공극의 coil 1은 미소한 추력을 발생시켜 분해능을 향상시키도록 한다.

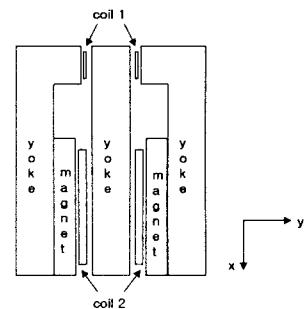


그림 1 VCM의 제안 모델  
fig. 1 Proposed model of the VCM

그림 2는 VCM이 적용되어질 시스템의 구조 및 요구사항을 나타내고 있다. 그림 2의 시스템은 나노레벨 힘 및 변위 측정을 구현하기 위한 기구로써, 이중 서보 방식의 VCM을 적용하여 고분해능 및 대구동 범위의 직선 운동이 가능하도록 한다.

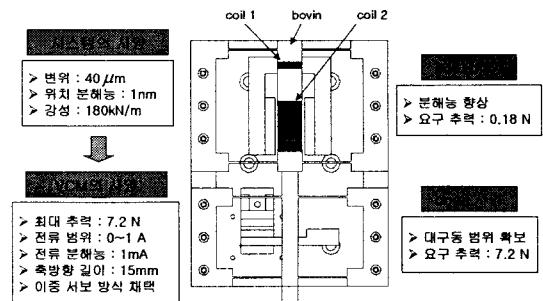


그림 2 시스템의 구조 및 요구 사항  
fig. 2 Structure and requirement of the system

## 2.2 설계 과정

그림 1에서의 제안 모델을 기본 형상으로 하여 각 부분의 개략적인 크기를 결정하였다. 설계변수는 추력에 가장 큰 영향을 미치는 영구자석의 두께, 공극의 길이, 아래쪽 공극의 coil 2의 턴수로 결정하였고 그림 3과 같은 설계과정을 거쳐 설계를 수행하였다. 유한요소법(Finite Element Method)을 이용하여 특성해석을 수행하였고, 요구 추력 및 중앙철심의 포화 상태를 고려하여 요구사항에 적합한 설계변수를 결정하였다.

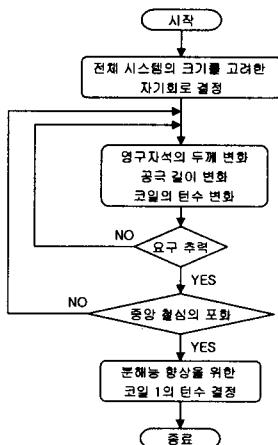


그림 3 설계과정  
Fig. 3 Design process

### 2.2.1 기본설계

전체 시스템에서 요구되는 VCM의 크기는 형상에 제약으로  $50 \times 60 \times 15$ (가로mm  $\times$  세로mm  $\times$  높이mm)이내로 설계하였다. 코일은 직경 0.3mm를 사용하였으며, 코일의 축 방향 유효길이는 실제 공극 자계속에서 추력을 발생하는 가동코일로써 본 논문에서 제안한 VCM모델의 경우 축 방향 길이의 2배이므로 30mm가 된다. 요오크의 재질은 누설의 영향을 줄이기 위하여 투자율이 높고 1.8[T]지점에서 포화되는 S23을 사용하였다.

### 2.2.2 영구자석 두께 및 공극의 길이 결정

영구자석은 최근 많이 이용되고 있는 NdFeB계열을 사용하였으며, 잔류자속 밀도는 1.2[T]이다. 공극의 길이는 코일을 지탱하는 보빈과 코일을 삽입 할 수 있는 공간이 충분히 확보되어야 한다. VCM 형상의 제약으로 인하여 영구자석의 길이와 높이는 각각 35mm, 15mm로 결정하였으며, 또한 2차원 유한요소해석을 이용하여 영구자석의 두께를 2, 4, 6, 8mm로 변화시키고 동시에 아래쪽 공극의 길이를 각각 2~5mm로 변화시켜가며, 시스템이 요구하는 추력을 만족하고 전류에 대한 추력이 선형적으로 유지되도록 VCM의 형상을 결정하였다.

그림 4는 영구자석의 두께와 아래쪽 공극의 길이 변화에 따른 공극 자속밀도와 예상 추력을 나타낸다. 예상 추력은 식(2.1)을 이용하여 유한요소해석으로 얻어진 공극 자속밀도, 공극의 길이에 따라 삽입할 수 있는 코일의 턴수, 코일에 최대로 인가할 수 있는 전류(1A), 그리고 코일의 유효길이의 곱으로 결정되는 최대 예상 추력이다. 삽입할 수 있는 코일의 턴수는 공극의 길이에 따라서 변화하게 되며, 표 1과 같다.

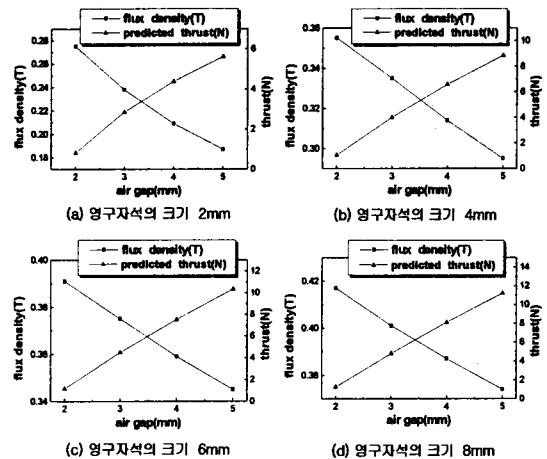


그림 4 영구자석과 공극의 길이에 따른 공극 자속밀도와 예상 추력의 비교

Fig. 4 Comparison of air gap flux density and predicted thrust with variation of permanent magnet and air gap length

표 1 공극의 길이의 변화에 따른 코일 턴수  
Table 1 Coil turns with variation of air gap length

공극의 길이(mm)	2	3	4	5
코일의 턴수(turn)	100	400	700	1000

시스템의 사양을 만족하기 위해 요구되는 VCM의 추력은 시스템의 변위와 강성에 비례하여, 식(2.3)과 같다.

$$F = x k_e [N] \quad (2.3)$$

여기서  $x$  : 변위,  $k_e$  : 시스템의 강성이다. 시스템에서 요구되는 최대 변위가 40um정도이고 시스템의 강성은 180kN/m이므로, 식(2.3)에 의해 VCM의 요구 추력은 7.2N정도가 된다. 따라서 VCM의 요구추력을 만족하는 영구자석의 두께와 아래쪽 공극의 길이를 가지는 세 개의 모델을 선정하였으며, 결과는 표 2와 같다.

표 2 요구 추력을 만족하는 VCM 모델의 치수와 특성  
Table 2 Dimension and characteristics of VCM model to satisfy required thrust

모델 치수 및 특성	I	II	III
영구자석의 크기(mm)	4	6	8
공극의 길이(mm)	4	4	4
공극 자속밀도(T)	0.314	0.359	0.387
추력(N)	6.594	7.539	8.127
시스템의 변위(um)	36.6	41.9	45.15
중앙 철심의 자속밀도(T)	1.654	1.811	1.887

제어특성의 향상을 위하여 전류에 따른 추력의 선형적인 발생은 자기회로의 경로인 철심을 포화시킴으로써 주자속이 되는 영구자석의 자속에 비하여 전류에 의한 자속을 최소화함으로써 출력의 선형성을 향상시켰다[4]. 표 2에서 영구자석의 길이가 6mm 이상(모델 II, III)일 때, 철심이 충분히 포화되므로 전류에 따른 추력의 선형성을 유지할 수 있다. 최종적으로 영구자석의 효율성을 고려하여 두께가 6mm인 영구자석(모델 II)으로 결정하였다. 따라서 영구자석의 크기는  $6 \times 35 \times 15$ (가로mm  $\times$  세로mm  $\times$  높이mm)이고, 아래쪽 공극의 길이는 4mm로 결정하였다.

위쪽 공극의 공극 자속밀도는 0.622T이다. 위쪽 공극의 coil 1은 전류 분해능 1mA에서 시스템의 위치분해능 1nm를 만족하기 위하여, 식(2.1)과 식(2.3)에 의해 코일의 최대 인가 전류(1A)를 인가시에 0.18N의 추력이 요구되며 위쪽 코일의 턴수는 10turn으로 결정하였다.

### 2.3 설계 결과 및 특성

그림 5는 설계된 VCM의 치수를 나타낸다. 위쪽 공극의 coil 1과 아래쪽 공극의 coil 2는 하나의 보빈에 고정되며, 위쪽 공극의 코일은 미소한 추력으로 분해능을 향상시키게 하고, 아래쪽 공극의 코일은 대구동의 변위 확보를 하게 한다.

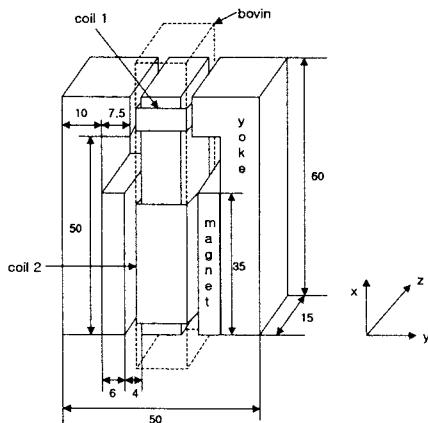
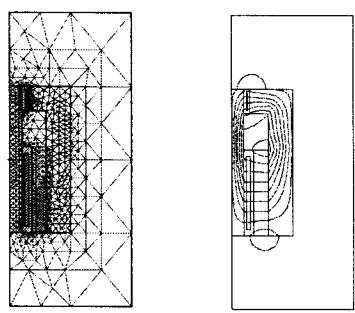


그림 5 설계된 VCM의 치수 [단위 : mm]

fig. 5 Dimension of the designed VCM (unit : mm)

그림 6은 설계된 VCM의 요소분할도와 자속의 분포를 나타낸다.



(a) element mesh shape

(b) flux distribution

그림 6 VCM의 요소 분할도와 자속 분포

fig. 6 Element mesh shape and flux distribution of the VCM

그림 7은 전류 범위 0~1A에서 유한요소 해석을 이용하여 얻어진 위쪽 공극의 coil 1과 아래쪽 공극의 coil 2에서의 추력 특성을 나타내며, 위쪽과 아래쪽 코일의 추력은 모두 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

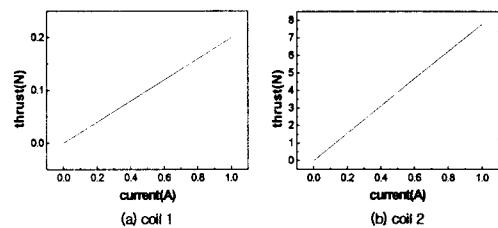


그림 7 전류변화에 따른 추력 특성

fig. 7 Thrust characteristic according to the current variation

표 3은 해석결과로 얻어진 각 코일의 특성을 나타낸다. 각 코일의 예상 최대 변위는 코일의 최대 전류인 1A 인가시에 추력과 변위의 관계식인 식(2.3)에 의해 계산하였으며, 전류 분해능이 1mA 일 때의 위치 분해능을 나타내었다. 코일 1의 위치 분해능은 1.1nm로써 미소한 위치 분해능을 보였으며, 코일 2의 최대 변위는 43.2um로써 비교적 큰 변위의 구동범위를 가짐을 알 수 있다.

표 3 각 코일의 특성

Table 3 Characteristics of each coil

특성 코일	최대 추력(N)	최대 변위(um)	위치 분해능(nm)
코일 1	0.2	1.1	1.1
코일 2	7.776	43.2	43.2

### 3. 결 론

본 논문에서는 나노레벨 힘 및 변위 측정을 구현하기 위한 시스템에 적용이 가능한, 분해능 향상 및 대구동 변위를 위한 이중 서보 방식의 VCM 설계를 수행하였다. 기본 설계를 통하여 개략적인 구조를 설계하였으며, 2차원 유한요소법을 사용하여 영구자석의 크기와 공극의 길이를 결정하였다.

설계 결과 자기회로의 경로인 요오크를 포화시킴으로써, 코일에 인가되는 전류 범위(0~1A)내에서 선형적인 추력 특성을 얻을 수 있었다. 또한 위쪽 공극의 coil 1을 통하여 분해능을 향상시켰으며, 아래쪽 공극의 coil 2에 의해 대구동의 변위를 확보하였다.

### (참 고 문 헌)

- [1] Toshiyuki shima, Hiroyasu Fujimori, "An accurate measurement of magnetostriction of thin films by using nano-indentation system", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 35 No. 5, pp. 3842-3844, 1999.
- [2] Kenji Uchino, "Recent trend of piezoelectric actuator developments", IEEE Inter. Symp. on Micromechatronics and Human Science, pp. 3-9, 1999.
- [3] Masahito Kobayashi, Roberto Horowitz, "Track Seek Control for Hard Disk Dual-Stage Servo Systems", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 37 No. 2, pp. 949-954, 2001.
- [4] 김덕현 외, "불평형 자기회로를 고려한 가동코일형 리니어 진동 액츄에이터의 설계 및 특성해석", 전기학회논문지, 제49B권 제6호, pp. 403~410, 2000.