

원통형 보이스 코일 모터 설계 및 특성 해석

이홍교\*, 유용민\*\*, 권병일\*  
한양대학교\*, 모아텍\*\*

Design and Characteristic Analysis of a Cylindrical Voice Coil Motor

Hong Kyo Lee\*, Yong Min You\*\*, Byung Il Kwon\*  
Hanyang University\*, Moatech\*\*

**Abstract** - The most basic form of a direct-drive linear motor is the voice coil motor(VCM). The voice coil motor employs a stationary permanent magnet field assembly in conjunction with a moving coil winding assembly to produce a force proportional to the current applied to the coil. Voice coil motor provide motion capable of extremely fine position sensitivity, limited only by the feedback sensor used to close the control loop. This paper presents dual-servo voice coil motor for improvement of driving range and position resolution. The voice coil motor is a cylindrical shape to improve reliability of a nanoindenter.

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

여기서,  $N$ : 코일의 턴수  $B$ : 공극 자속밀도  
 $i$ : 입력전류  $l$ : 코일의 축 방향 유효길이

일반적으로 보이스 코일 모터는 가동 코일형(Moving-Coil : MC)과 가동 자석형(Moving-Magnet : MM) 구동 방식으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 미소 위치 결정 및 고속 이송 장치에 유리한 가동 코일형 방식을 적용한다. 그림 1은 본 논문에서 제시한 나노 인덴터용 원통형 보이스 코일 모터 형상을 나타내고 있다. 윗 공극(A)의 코일 1은 분해능 향상을, 아래 공극(B)의 코일 2는 큰 구동 범위의 확보를 목적으로 하는 이중 서보 추력 인가방식이며, 이때 제안된 모델의 추력식은 다음과 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 입력전류

두개의 코일에서 발생하는 추력의 방향은 모두 같은 축 방향(그림 1의 Z축 방향)이다. 코일 2는 큰 추력을 발생시켜 비교적 긴 행정거리를 확보하게 하며, 동시에 위쪽 공극의 코일 1은 미소한 추력을 발생시켜 분해능을 향상시키도록 한다.

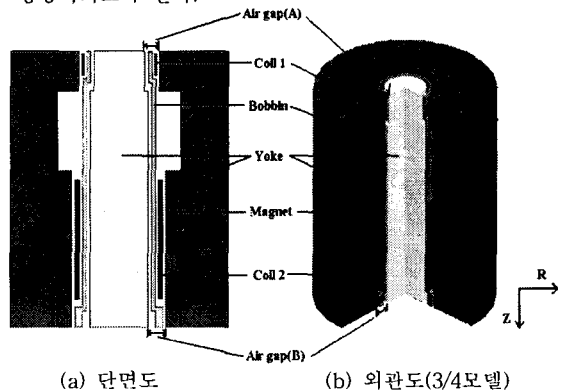


그림 1. 원통형 보이스 코일 모터의 제안 모델  
Fig. 1. Proposed model of the cylindrical voice coil motor

시스템의 사양을 만족하기 위해 요구되는 보이스 코일 모터의 추력은 시스템의 변위와 강성에 비례하며, 식은 다음과 같다.

1. 서 론

현재 극미세 전자기계 시스템의 급속한 발전으로 정밀 기계 구조물을 설계, 제작하기 위한 초소형 부품의 경도, 굽힘, 탄성계수와 같은 역학적 물성치를 정밀하게 측정 분석하는 나노 인덴터에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다. 나노 인덴터는 시료에 인가하는 하중과 변위를 서브 마이크로 즉, 나노 스케일의 분해능으로 미세하게 조절이 가능한 모터가 필수적이다. 보이스코일 모터(Voice Coil Motor)는 크기가 작고 무게가 가벼우며, 간단한 구동원리를 가지고 있으며, 빠른 응답특성으로 직선운동에 용이하며 소형화, 정밀 위치 제어에 유리한 장점을 가지고 있다[1-3].

외부 및 중앙 요오크부와 영구자석의 폭의 길이가 일정한 형태의 보이스 코일 모터의 경우 공극에서의 누설 자속이 많이 발생하며, 기계적인 조립오차 등으로 인하여 제작 후 실험에 의하여 얻어진 추력 및 변위 값이 해석에 의하여 얻어진 값보다 적은 결과가 나타나는 문제점이 있다[4]. 따라서 본 논문에서는 공극부분에서의 누설 자속을 감소시키고, 기계적인 메커니즘을 보완하기 위하여 원통형의 나노 인덴터용 보이스코일 모터를 설계하였다. 또한 두 개의 공극을 두어, 한쪽 공극으로는 큰 구동범위의 확보를 다른 한쪽 공극으로는 분해능 향상을 목적으로 하는 이중 서보 형태의 보이스코일 모터를 제안한다. 제안한 보이스코일 모터의 특성 해석은 유한 요소법을 이용하여 수행하였다.

2. 원통형 보이스 코일 모터 설계

2.1 원통형 보이스 코일 모터의 형상 제안

보이스 코일 모터는 고정자와 보빈에 코일을 감은 가동자로 구성된다. 요오크와 영구자석을 포함하는 영구자석에 의해 형성된 정적인 자기장 내에서 전자석 코일이 형성한 유도 자기력이 형성하는 로렌츠(Lorentz)력을 운동의 기본 에너지로 사용한다. 보이스 코일 모터의 추력식은 다음과 같다.

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

여기서  $x$  : 변위,  $k_e$  : 시스템의 강성이다.

본 연구에서 보이스 코일 모터가 적용될 시스템은 나노 레벨 힘 및 변위 측정을 구현하기 위한 시스템이며, 시스템 사양은 그림 2와 같다. 시스템에 요구되는 최대 변위가 40 [ $\mu\text{m}$ ]이며 시스템의 강성이 114.5 [ $\text{kN/m}$ ]이므로, 큰 구동범위의 확보를 목적으로 하는 코일 2의 최대 요구 추력은 4.58 [ $\text{N}$ ]이다. 또한 전류 분해능이 1 [ $\text{mA}$ ]일 때 요구되는 시스템의 변위 분해능은 2 [ $\text{nm}$ ]이므로, 위치 분해능 향상을 위한 코일 1의 최대 요구 추력은 0.229 [ $\text{N}$ ]이다. 이러한 시스템의 요구사항에 만족하는 코일 설계를 위해 보이스코일 모터의 형상을 변화 시켜가며 설계를 수행하였다.

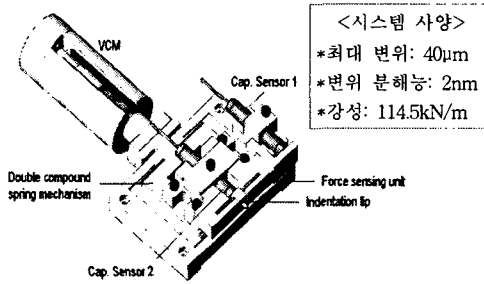


그림 2. 시스템의 사양  
Fig. 2. Specification of the system

## 2.2 설계 과정

그림 1에서 제안한 모델을 기본 형상으로 하며, 시스템 전체의 크기를 고려하여 보이스 코일 모터의 개략적인 크기를 결정한다. 설계변수는 추력에 가장 큰 영향을 미치는 영구자석의 두께, 공극의 길이와 공극의 변화에 따른 코일의 턴수로 결정하였으며, 설계 과정은 그림 3과 같다.

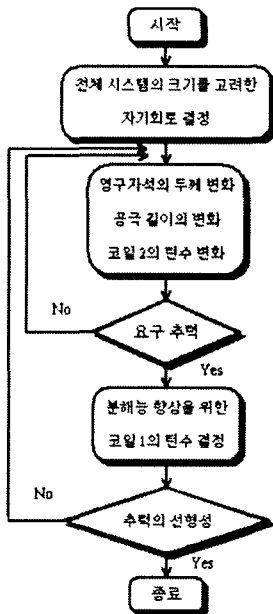


그림 3. 설계과정  
Fig. 3. Design process

## 2.2.1 기본 설계

보이스 코일 모터의 외부 크기는 시스템 전체의 크기를 고려하여 지름60mm×높이70mm로 결정하고, 코일은 직경 0.3 [ $\text{mm}$ ]를 사용하였다. 요오크의 재질은 1.87 [ $\text{T}$ ]에서 포화되는 S15C를 사용하였으며, 보빈은 Al-7075를 사용하였다.

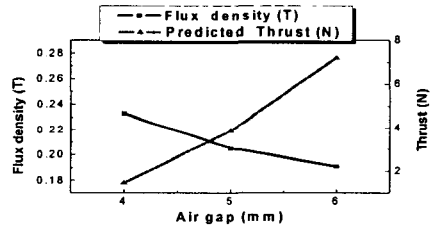
## 2.2.2 영구자석 두께, 공극의 길이 및 턴수의 결정

영구자석은 NdFeB35를 사용하였으며, 잔류자속 밀도는 1.23 [ $\text{T}$ ]이다. 보이스 코일 모터 외부 형상의 제약으로 인하여 영구자석의 길이는 40 [ $\text{mm}$ ]로 결정하였다. 공극의 길이는 보빈과 코일을 삽입 할 수 있는 공간이 확보되어야 하며, 코일의 턴수는 공극의 길이에 따라 결정하였으며, 표1과 같다.

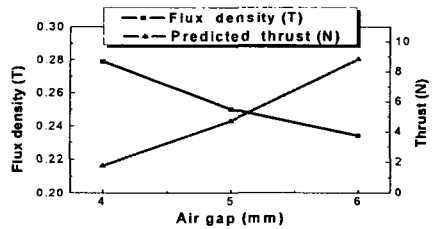
표 1. 공극의 길이의 변화에 따른 코일 턴수  
Table 1. Coil turns with variation of air gap length

공극의 길이(mm)	4	5	6
코일의 턴수(turn)	100	300	600

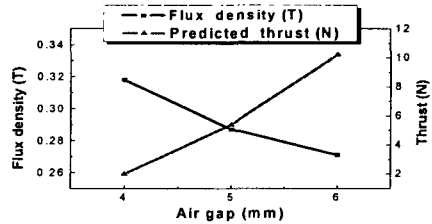
형상에 따른 보이스코일모터의 특성 변화를 살펴보기 위해 영구자석의 두께 및 아래쪽 공극의 길이를 변화시켜가며, 유한요소 해석을 수행하였다. 유한요소 해석을 통한 형상 변화에 따른 공극(B)의 자속밀도 값 및 산출된 예상 추력은 그림 4와 같다.



(a) 영구자석의 두께: 3mm



(b) 영구자석의 두께: 4mm



(c) 영구자석의 두께: 5mm

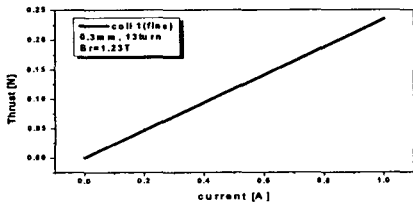
그림 4. 설계변수 변화에 따른 자속밀도 값과 예상추력  
Fig. 4. Flux density and the predicted thrust according to variation of design variables

해석 결과 영구자석의 두께가 4 [mm]이고, 공극(B)의 길이가 5 [mm]일 때 코일 2의 추력은 4.7 [N]이므로, 시스템의 요구 사양을 만족하는 코일 2의 최대요구추력인 4.58 [N]을 만족한다. 따라서 최종적인 영구자석의 크기는 외경34mm×내경26mm×길이40mm로 결정하였다.

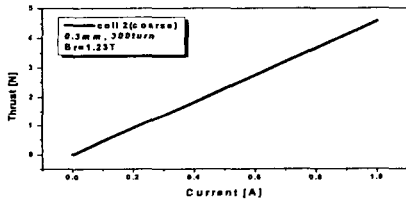
공극(A)의 자속 밀도 값은 0.42 [T]이다. 따라서 전류 분해능 1 [mA]에서 시스템의 위치분해능 2 [nm]를 만족시키기 위해, 코일 1의 턴수는 13[turn]으로 결정하였다.

### 2.2.3 추력의 선형성 검증

나노 인텐터는 정밀한 위치제어를 필요로 하는 장비이므로, 나노 인텐터용 보이스 코일 모터의 선형적인 추력 특성은 매우 중요하다. 추력의 선형성을 검증하기 위하여 결정된 설계 변수의 값 및 코일 턴수를 적용하여, 유한요소해석을 이용한 보이스코일모터의 동특성을 수행하였다. 그림 5는 0A에서 1A까지의 전류 범위에서의 코일 1과 코일 2의 추력 특성이며, 두 코일의 추력특성은 모두 선형적임을 알 수 있다.



(a) 코일 1의 추력 특성



(b) 코일 2의 추력 특성

그림 5. 전류변화에 따른 추력 특성

Fig. 5. Thrust characteristic according to the current variation

### 2.3 설계 결과 및 특성

그림 6은 설계된 보이스 코일 모터의 형상을 나타내고 있으며, 코일 1과 코일 2는 하나의 보빈에 고정된다.

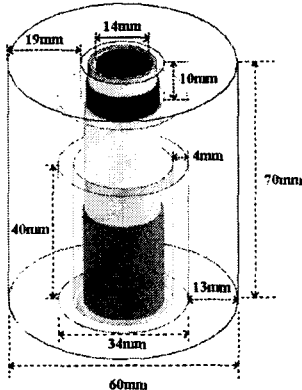


그림 6. 설계된 보이스 코일 모터의 치수

Fig. 6. Dimension of the designed voice coil motor

보빈의 크기는 내경18mm×외경20mm×길이70mm이며, 공극(A)의 길이는 2 [mm]이다.

표 2는 해석결과로 얻어진 각 코일의 특성을 나타낸다. 각 코일의 최대 변위는 본 논문에서의 최대 전류인 1 [A] 인가 시에 추력과 변위의 관계식인 식 (2.3)에 의한 계산 결과이며, 위치 분해능은 전류 분해능이 1 [mA]일 때를 나타내고 있다. 코일 1의 위치 분해능은 2.05 [nm]로써 미소한 위치 분해능을 보였고, 코일 2의 최대 변위는 39.98 [μm] 로써 비교적 큰 구동 범위를 가짐을 알 수 있다.

표 2. 각 코일의 특성

Table 2. Characteristic of each coil

코일 \ 특성	최대 추력 (N)	최대 변위 (μm)	위치 분해능 (nm)
코일 1	0.235	2.05	2.05
코일 2	4.577	39.98	39.98

### 3. 결 론

본 논문에서는 나노 레벨의 힘 및 변위 측정을 구현하기 위한 시스템에 적용될 이중 서보 방식의 원동형 보이스 코일 모터를 설계 하였고, 보이스 코일 모터의 선형성을 유한요소해석으로 검증하였다.

해석 결과 코일에 인가되는 0 [A]에서 1 [A]까지의 전류 범위에서 선형적인 추력을 얻을 수 있었다. 분해능 향상을 목적으로 한 코일 1에서는 전류 분해능이 1 [mA]일 때 2.05 [nm]의 시스템의 위치 분해능을 확보하였으며, 큰 구동범위의 확보를 목적으로 한 코일 2에 대해서는 입력전류 1 [A] 인가 시 39.98 [μm]의 구동의 변위를 얻었다. 또한 원동형 형상의 보이스코일모터를 나노 인텐터에 적용함으로써 공극의 누설현상을 줄이며, 기계적 매커니즘의 안정성 및 조립 오차의 감소 등의 효과를 얻을 것이라 기대되며, 추후 실험을 통하여 이를 검증하고자 한다.

본 연구는 한국과학기술원 특장기초연구 (R01-2001 000-00295-0) 지원에 의하여 수행되었음.

### [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] 최현석, 송치우, 한창수, "초정밀 위치 제어를 위한 이중 서보 매커니즘의 설계 및 제어", 한국정밀공학회지, 제20권, 제10호, pp. 22~30, 2003.
- [4] Yong Min Yoo, Keun Young Yun, Ju Hee Cho, Byung Il Kwon, "Characteristics of VCM for improvement in Resolution and Driving in a Large Displacement", ASAEM, October 22-25, 2003 Seoul Korea, P2-9