

고정밀 위치 분해능을 갖는 보이스 코일 모터의 특성 해석

이홍교, 오주환, 권병일
한양대학교

Characteristic Analysis of Voice Coil Motor with Position Resolution of High Precision

Hong kyo Lee, Ju Hwan Oh, Byung Il Kwon
Hanyang University

Abstract - A High precision position control technique is used in many kind of industry areas. Especially this is to be one of the important parts in the development of precision machines. To get high precision and long range, dual servo voice coil motor(VCM) has been designed and implemented.

In this paper, as a simulation and experimental result, the developed dual servo VCM shows the applicable possibility for precision machine system.

1. 서 론

MEMS기술을 이용한 초소형 기계부품은 제품의 소형화 및 집적화 추세에 따라 전자정보 기기, 통신 기기뿐만 아니라 자동차, 의료 기기, 그리고 군사 무기 등 그 적용범위가 확대 되고 있다. 이에 따라 MEMS 구조물에 이용되는 액츄에이터는 공간적 부피 감소를 위한 소형화 및 주위환경에 강한 미세 하중 및 변위 제어 기술이 요구되고 있다[1-2].

기존에 설계/제작된 외부 요오크, 중앙 코어와 영구자석의 폭의 길이가 일정한 형태의 보이스 코일 모터의 경우 공극 및 요오크 끝 부분에서의 누설 자속이 많이 발생한다. 또한 기계적인 가공 및 조립오차 등으로 인하여 제작 후 실험에 의하여 얻어진 추력 및 변위 값이 해석에 의한 값과 큰 오차를 지니고 있었다[3].

따라서 이전 연구에서 공극 및 요오크 끝 부분에서의 누설 자속을 감소시키고, 기계적인 메커니즘을 보완하기 위하여 원통형의 형상을 제안 고정밀의 이중 서보 보이스 코일 모터를 설계하였다[4].

본 논문에서는 제작된 고정밀의 이중 서보 보이스 코일 모터의 시뮬레이션과 실험을 통하여 설계의 타당성을 검증 하고자 하며, 고정밀 가공기기, 첨단과학 장비 그리고 MEMS 용 측정기기 등에 활용 가능성을 증명하고자 한다.

2. 인텐터 시스템의 개발

2.1 이중 서보 보이스 코일 모터

보이스 코일 모터는 영구자석과 코일을 이용, 코일에 인가된 전류에 비례하여 추력을 발생시키는 선형 전동기이다. 그러므로 보이스 코일 모터는 추력 제어가 용이하다는 장점이 있다.

그림 1은 인텐터 시스템에 적용된 가동 코일형 방식의 이중 서보 보이스 코일 모터의 개략도를 보이고 있다. 원통형 요크(yoke)의 내측에 장착된 영구자석에 의해 정적인 자기장이 형성되며, 자기장은 철심(core)과 원통형 요크를 따라 폐경로를 형성한다. 따라서 자기장의 경로 중에 위치해 있는 코일은 자기장 방향의 수직으로 로렌츠 힘(Lorentz's force)를 생성하고, 코일이 감긴 알루미늄

bobbin(보빈)은 직선운동을 하게 된다.

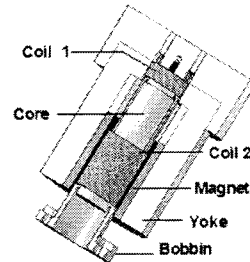


그림 1. 이중 서보 보이스 코일 모터의 모델

위의 그림과 같이 보빈은 미동용(fine motion) 코일(coil 1)과 조동용(coarse motion)의 코일(coil 2)이 각각 감겨져 있으며, 코일 2가 코일 1보다 코일 권선수가 더 많으므로 상대적으로 더 큰 추력을 발생시킨다. 아래쪽 공극의 코일 2는 큰 추력을 발생시켜 비교적 긴 행정거리를 확보하게 하며, 동시에 위쪽 공극의 코일 1은 미세한 추력을 발생시켜 위치 분해능을 향상시키는 역할을 한다. 즉, 이중 서보 제어방식은 조동 코일에 의해 목표 변위 근처까지 도달하도록 전류를 인가하고, 이때 미동 코일에 의해 미세 변위를 제어하는 방법이 적용되었다.

이러한 코일에 전류가 인가될 때, 보이스 코일 모터에서 발생하는 추력은 식 (1)과 같다.

$$F = N_1 B_1 i_1 l_1 + N_2 B_2 i_2 l_2 \quad [N] \quad (1)$$

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, l_1, l_2 : 코일 1, 2가 감긴 축 방향 유효길이이다.

2.2 인텐터 시스템

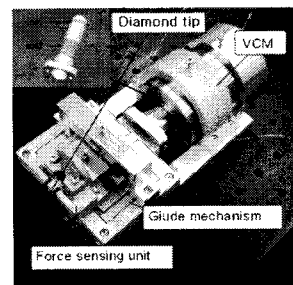


그림 2. 제작된 인텐터 시스템

그림 2는 이중 서보 보이스 코일 모터를 적용하여 실제 제작된 인텐터 시스템을 보여 주고 있다. 인텐터 시스템은 설계 결과 및 고안된 시스템 메커니즘을 바탕으로 제작하였으며, 목표 사양은 표 1과 같다.

표 1. 인텐터 시스템의 목표 사양

	사 양
최대 추력[N]	코일 1: 0.24
	코일 2: 4.58
최대 변위[μm]	75
위치 분해능[nm]	4
강성[kN/m]	61

시스템 사양을 만족하기 위해 보이스 코일 모터의 추력은 시스템의 변위와 강성에 비례하며, 식 (2)와 같다.

$$F = x k_e [N] \quad (2)$$

여기서 x : 변위, k_e : 시스템의 강성이다.

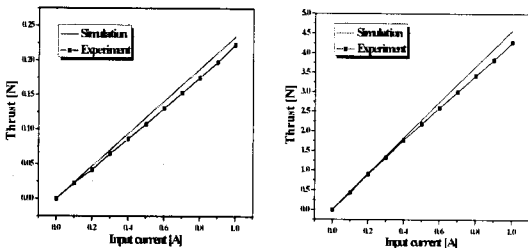
그림 2에서 보는 바와 같이 인텐터 시스템의 주요 구성요소로는 이중 서보 보이스 코일 모터를 이용한 선형 액츄에이터부, 이중 복합 선형 스프링 메커니즘을 적용한 가이드(guide)부, 정전 용량형 센서(capacitance sensor)를 이용한 힘/변위 검출 기구부로 되어 있다. 제작된 이중 서보 보이스 코일 모터는 평행판 스프링으로 지지되어 기구부와 연결되며, 보이스 코일 모터의 최대 이송 거리는 이중 복합 선형 스프링 운동 가이드부의 유효 강성계수에 의존한다.

즉, 이중 서보 보이스 코일 모터에서 발생하는 힘과 변위는 이중 복합 선형 스프링 메커니즘을 거쳐 다이아몬드 팁(diamond tip)에 전달되도록 시스템 메커니즘이 고안되었다.

3. 시뮬레이션 및 실험

3.1 추력의 선형성 검증

인텐터 시스템은 정밀한 위치제어를 필요로 하는 장비이므로, 인텐터 시스템용 보이스 코일 모터의 선형적인 추력특성은 매우 중요하다. 그림 3은 0-1[A]까지의 전류범위에서의 시뮬레이션과 정특성 실험에 대한 코일 1과 코일 2의 추력 특성이며, 두 코일의 추력특성은 식 (1)과 같이 전류에 비례하여 선형적임을 알 수 있다.



(a) 코일 1 (b) 코일 2

그림 3. 전류에 변화에 따른 추력 특성

그림 3과 같이 코일 1에서는 약 5.1[%] 오차를 보였으며, 코일 2에서는 약 6.57[%] 오차를 보였다. 이 오차들은 실험 상의 주위 환경 및 측정 장비 오차가 포함되어 있으므로 큰 오차는 보이지 않는 것으로 사료된다.

3.2 공극 자속 밀도의 측정

보이스 코일 모터의 동작 특성의 파악을 위하여 공극 자속밀도를 측정하였다. 공극자속밀도는 probe를 통해 가우스 미터(Gauss meter)에 의하여 측정되었으며, 누설을 고려하기 위하여 위쪽과 아래쪽 공극의 중앙뿐 아니라, 공극의 위, 아래 끝 부분까지 측정하여 평균값으로 계산되었다. 표 2와 같이 측정 결과 위쪽 공극과 아래쪽 공극의 자속 밀도는 각각 0.29[T]과 0.235[T]로써 설계 결과와 약 5[%]오차가 있었다.

표 2. 공극에서의 자속 밀도 값

	위쪽 공극	아래쪽 공극
설계값[T]	0.311	0.25
측정값[T]	0.29	0.235

3.3 변위 측정

그림 4는 보이스 코일 모터의 변위 측정을 위한 실험 시스템의 블록도이다.

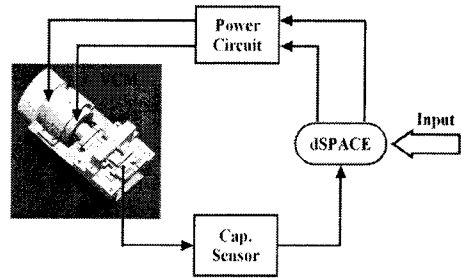


그림 4. 실험 블록도

실험에 사용된 제어 장비인 dSPACE는 부동 소수점(floating point) 처리가 가능하고, 16비트의 4채널과 12비트의 4채널을 갖는 A/D 컨버터와 16비트 8채널 D/A 컨버터로 구성되어있으며, power circuit를 구동시키기 위한 4채널 PWM(pulse width modulation)으로 구성되어 있다. 모든 제어프로그램은 Matlab Simulink로 프로그램 되었다.

dSPACE A/D 컨버터에는 아날로그 형태의 극미소 위치센서의 출력전압을 입력하였고, 주위환경 및 센서의 민감도에 의한 잡음 및 진동을 줄이기 위해 프로그램적으로 필터링하여 제어 프로그램에 피드백 되어졌다.

Power circuit의 스위칭 주파수는 주파수로 인한 자속의 영향을 줄이고, 스위칭으로 인한 전류 리플을 최소화하기 위해 스위칭 동작주파수를 10[kHz]로 설정하였다. 또한, 보이스 코일 모터의 인덕턴스가 매우 낮기 때문에 인가되는 전류의 평활도를 높이기 위해 시뮬레이션 결과를 바탕으로 power circuit의 코일 1 쪽에는 0.2[mH], power circuit의 코일 2 쪽에는 0.5[mH]의 인덕터를 설치하였다.

Matlab Simulink로 구현한 제어 알고리즘으로 제어 기법으로 PI 제어를 사용하였다. 이중 서보 방식으로 코일 1과 코일 2를 동시에 제어하게 된다. 전류 제한 값은 보이스 코일 모터의 최대 실제 전류인 0-1 사이로 조정하였다. Cap.Sensor 일반적으로 정밀한 변위 측정에서 사용되고 있으며 이론적으로 나노 단위 이하의 측정 분해능을 가지고 있다. 그러나 본 논문에서는 노이즈로 인해 측정 분해능은 약 10[nm] 이다. dSPACE의 A/D 컨버터 채널을 통해 들어오는 값은 노이즈 및 측정 잡음을 제거하기 위해 필터링을 하였으며, 나노 미만의 값은 생

략하였다. PC상에서는 보이소 코일 모터의 전체적인 제어 control bar와 control display를 보며 능률적으로 확인 할 수 있다는 장점이 있다. 코일 1(분해능 향상)과 코일 2(큰 구동 범위)의 각각 P gain 과 I gain 값을 조정하며 변위를 제어하게 된다. 또한 실제 위치값 데이터를 나노 단위로 읽어 들이며, 1000개 이상의 실제 값 중에서 100개의 값만을 저장하는 방법으로 실험을 진행하였다. 그림 5는 구축된 실험 시스템의 사진이다.

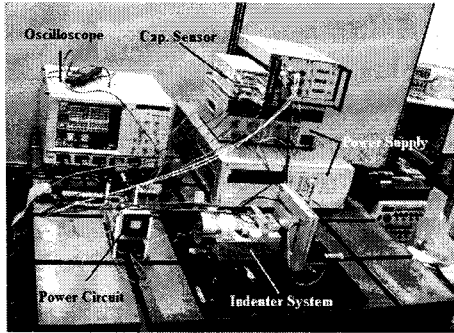
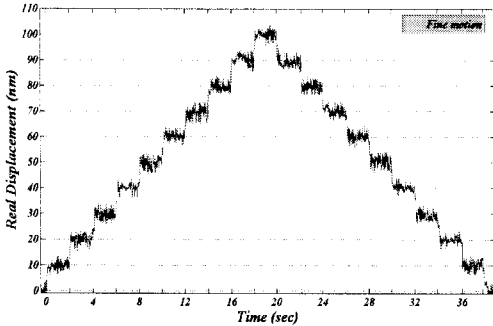


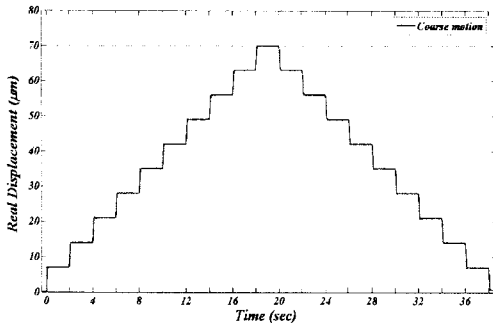
그림 5. 구축된 실험 시스템

그림 6은 코일 1과 코일 2의 최대 변위 내에서 선형적인 특성을 보기 위한 스텝 응답성을 나타내고 있다. 그림을 통해 변위간의 비선형성을 나타내는 이력 현상(hysteresis)과 크립 현상(creep)이 발생하지 않아 본 연구에서의 보이소 코일 모터는 선형적인 움직임을 가지고 있다. 그림 6-(a)와 같이 미소 변위에서는 떨림 현상 및 노이즈가 포함됨을 알 수 있었다.

그러나 이러한 문제는 주위의 환경 및 센서의 감도로 일어났음을 알 수 있고, 최적의 실험적인 조건이 주어 진다면 문제가 없을 것으로 사료된다.



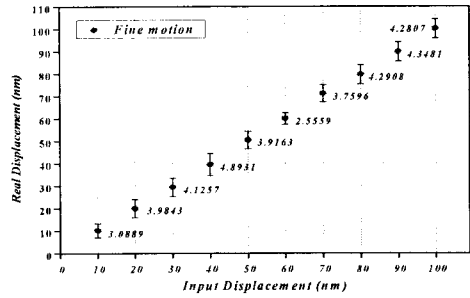
(a) 코일 1



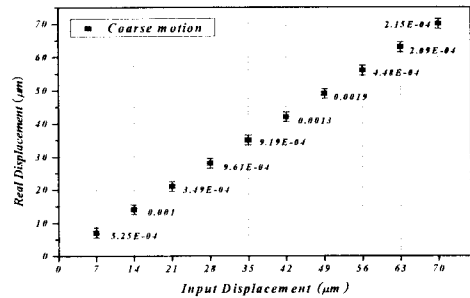
(b) 코일 2

그림 6. 인덴터 시스템의 스텝 응답성

그림 7은 입력에 따른 실제 변위의 값으로 각 입력 변위별 총 5회의 실험을 통해서 평균값과 분산값을 구한 것이다. 분산값은 그래프 상에서 숫자로 표시되어 있고 선형적인 특성과 요구되는 구동 범위를 가짐을 보였다.



(a) 코일 1



(b) 코일 2

그림 7. 인덴터 시스템의 반복 정밀도

4. 결 론

본 연구에서는 고정밀의 위치 분해능을 갖는 이중 서보 보이소 코일 모터를 제작하고, 이로부터 발생하는 미소 추력 및 구동 범위의 감지를 위한 측정 시스템을 구축하였으며, 정전 용량형 변위 센서를 이용하여 측정된 보이소 코일 모터의 구동 범위는 인가 전류에 비례하여 선형적으로 증가됨을 확인하였다. 시뮬레이션 및 실험 결과를 통해 코일 2에서는 비교적 큰 구동 범위를 가지게 되었으며, 코일 1은 나노급의 미소 분해능을 얻게 되었다.

발생된 변위 오차는 센서의 노이즈 문제와 주변의 진동, 그리고 보이소 코일 모터의 발열에 의한 성능 변화가 원인이 된 것으로 추정하여 향후 연구로 변위 센서에 관한 다각적인 검토와 분석이 필요할 것으로 사료된다.

[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] 최현석, 송치우, 한창수, "조정밀 위치 제어를 위한 이중 서보 메커니즘의 설계 및 제어", 한국정밀공학회지, 제20권, 제10호, pp. 22~30, 2003.
- [3] Yong Min You, 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
- [4] 이홍교, 유용민, 권병일, "원통형 보이소 코일 모터 설계 및 특성 해석", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, B권, pp. 1034~1036, 2004