

자기부상을 이용한 리니어모터의 코깅 포스 및 모멘트 측정장치의 설계 Design of Cogging force and moment measurement system for linear motors using magnetic levitation

*#박철훈, 최상규, 함상용, 백선희, 오정석

*#C. H. Park(parkch@kimm.re.kr), S.K Choi, S.Y. Ham, S.H. Baek, J.S. Oh
한국기계연구원 나노융합·생산시스템연구본부

Key words : Linear motor, Cogging force, Cogging moment, Magnetic levitation

1. 서론

대부분의 공작기계는 공구나 가공대상을 이송하기 위한 직선운동유닛으로 구성되어있다. 직선운동유닛은 베어링, 이송기구, 변위센서, 동력전달요소, 모터 등이 결합되어 대상물을 원하는 방향과 위치로 직선 이동시키는 단위 조립체이다. 운동정밀도 관점에서 베어링의 경우 레일의 가공오차, 레일의 탄성변형, 마찰 및 불/물러의 치수 오차 등이 주요한 오차 요인이고 이외에도 레일의 조립오차 및 볼 스크류의 조립 동심도, 모터의 코깅 등이 주요한 오차 요인으로 작용한다. 한국기계연구원은 전달합수기법을 이용하여 직선운동유닛의 운동정밀도 및 위치결정오차를 예측할 수 있는 알고리즘을 개발하고 실험적으로 검증하였으며, 이를 발전시켜 직선운동유닛의 정밀도를 예측할 수 있는 시뮬레이터를 개발 중에 있다. 정밀도 예측 시뮬레이터는 베어링, 모터, 엔코더 등의 모델 및 구성요소의 정보와 가공/조립오차, 운전/경계조건 등을 DB 및 대화창 등을 통해 사용자가 입력하면 직선운동유닛의 운동정밀도를 예측해주는 프로그램이다. 동력전달요소를 생략하면서 대상물을 직선운동시키기 위해 리니어 모터를 사용하는 직선운동유닛의 경우 운동정밀도를 예측하기 위해서는 리니어모터의 코깅포스(cogging force) 및 코깅모멘트(cogging moment) 정보가 필요하다. 이를 위해서는 기본적으로는 모터의 모델로부터 가져오는 형상정보를 이용하여 해석적인 방법(analytical method)으로 예측하는 방법이 있으나 모터의 모든 형상을 해석에 반영하기 어렵기 때문에 FEM tool 을 사용하여 리니어 모터 모델별로 코깅포스 및 모멘트를 미리 예측하여 DB 를 구축하는 방법도 병행하여 시도하고 있다. 어떠한 방법을 사용하더라도 예측한 코깅 데이터를 실험적으로 검증하는 단계는 필요하다. 본 연구에서는 리니어모터의 코깅 데이터에 대한 예측 결과를 실험적으로 검증하기 위한 장치와 이를 이용한 측정 방법을 제시한다.

2. 코깅포스의 측정방법

리니어모터의 코깅포스는 이동자 코일과 자석트랙 사이 자력의 수평방향 합력이 이동자 코일과 자석트랙의 상대위치에 따라 달라지면서 발생하는데, 이를 측정하기 위해서는 리니어모터 이동자를 등속제어를 하면서 모터드라이버의 전류 출력을 측정 후 여기에 식(1)과 같이 모터의 추력정수(force constant)를 곱하여 계산하는 방법이 있다. 여기서, K_p 는 모터의 추력정수, i_p 은 모터 드라이버의 전류출력, f_p 는 K_p 와 i_p 를 곱하여 얻은 추력, f_f 는 베어링 등 지지부에 의한 마찰력, f_c 는 코깅포스이다. 일반적으로 리니어모터를 사용한 이송계는 LM 가이드나 유정압베어링 등에 의해 지지되어 마찰력이 발생하는데 모터드라이버의 출력 전류는 이 마찰력을 보상하기 위한 DC 성분과 코깅포스에 의한 속도변동을 보상하기 위한 AC 성분으로 이루어져있다. 따라서, 계산된 f_p 로부터 DC 성분인 f_f 를 제거하면 코깅포스를 계산해 낼 수 있다. 그런데, 여기에서 베어링 마찰력 f_f 를 순수한 DC 성분으로 가정하기 위해서는 베어링의 안내면이 완벽한 직선면이 되어야 하지만 현실적으로는 불가능하기 때문에 f_f 에는 코깅포스의 주기와 동기되지않는 마찰

력의 불균일에 의한 AC 성분이 포함된다. 따라서, 현실적으로는 식(1)에서 단순히 DC 성분을 제거하여 코깅포스를 구하는 방법에는 안내면 마찰력의 불균일에 의한 오차가 포함되는 문제가 있다.

$$f_p = K_p i_p = f_f + f_c \quad (1)$$

3. 코깅모멘트의 측정방법

리니어모터의 코깅모멘트는 이동자 코일과 자석트랙 사이 자력의 수직방향 성분이 모멘트중심에 대해 좌우로 불균일하게 분포되어 발생한다. 이를 측정하기 위해서는 베어링과 이동부사이에 로드셀을 부착하여 모멘트중심에 대해 좌우로 작용하는 힘을 각각 측정하고, 모멘트중심과 로드셀 사이의 거리를 곱하여 더함으로써 계산할 수 있다. 그러나 이동부와 베어링사이에 로드셀을 장착하여 측정할 경우 자력에 의한 힘이 로드셀과 베어링에 나뉘어져 변위를 발생시킬 것이므로 로드셀 데이터만 가지고 정확한 코깅모멘트를 측정하기는 무리가 있다. 그리고, 일반적으로 리니어스테이지에서 전원 및 신호선처리용으로 많이 사용되는 체인케이블(chain cable)에 의한 간섭력도 코깅모멘트를 정확히 측정하는 데에 대한 장애가 된다.

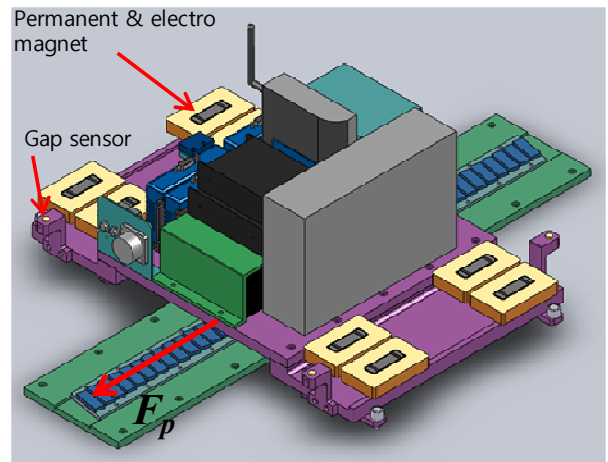


Fig.1 Perspective view of cogging force & moment measuring device

4. 자기부상형 코깅포스와 코깅모멘트 측정장치

앞 절들에서 언급한 코깅포스와 코깅모멘트를 측정하는데 존재하는 문제점들을 해결하고자 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 자기부상을 이용한 리니어모터의 코깅포스와 코깅모멘트 측정장치를 고안하였다. 리니어모터의 이동부는 일반적인 접촉식 베어링에 의해 지지되는 것이 아니라 자기부상력에 의한 비접촉 자기베어링에 의해 지지된다. 리니어모터의 자석트랙에 의한 강한 흡인력을 극복하기 위해 자기부상용 액츄에이터는 영구자석과 전자석을 결합한 하이브리드형 자기베어링으로 구성한다. 자기베어링을 사용하면 마찰력이 거의 존재하지 않기 때문에 코깅포스를 측정

하는데 문제가 되었던 안내면 마찰력의 불균일에 의한 오차를 해결할 수 있다. 특정위치에서 리니어모터의 이동자 코일에 작용하는 코깅모멘트는 앞뒤 자기베어링용 제어기에 입력된 기준 공극을 일정하게 유지하기 위해 가하는 힘에 의해 모멘트평형이 유지되게 된다. 이때 앞뒤 자기베어링에서 발생하는 힘은 식(2)에 의해서 계산할 수 있다. 여기서 K_x , K_i 는 각각 자기베어링의 위치강성(position stiffness)과 전류강성(current stiffness)이고, x 는 현재 자기베어링의 공극간격, i_m 은 자기베어링의 제어전류이다. Fig. 2에 코깅모멘트 측정장치의 개념을 나타내었다.

$$F = -K_x x + K_i i_m \quad (2)$$

$$M = (F_2 - F_1) \frac{d}{2} \quad (3)$$

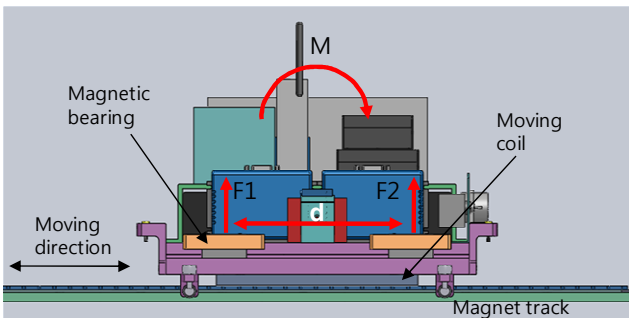


Fig. 2 Concept of cogging moment measuring method

자기부상형 리니어모터 이동부를 구성하기 위해서는 전원, 센서, 엔코더, 통신 케이블 등이 많이 필요하게 되는데, 이들을 외부 제어기와 연결하게 되면 케이블에 의한 간섭력에 의해 코깅모멘트를 정확하게 측정하기 어렵다. 따라서 본 측정장치에서는 제어기, 리니어모터 드라이버, 자기부상용 드라이버 등을 모두 이동부 위에 장착시키고, 데이터를 취득하기 위한 호스트컴퓨터와 제어기 사이는 무선랜으로 통신을 하도록 하여 완벽한 비접촉식 측정장치를 구성하였다. Fig. 3에 측정장치의 구성을 나타내었다.

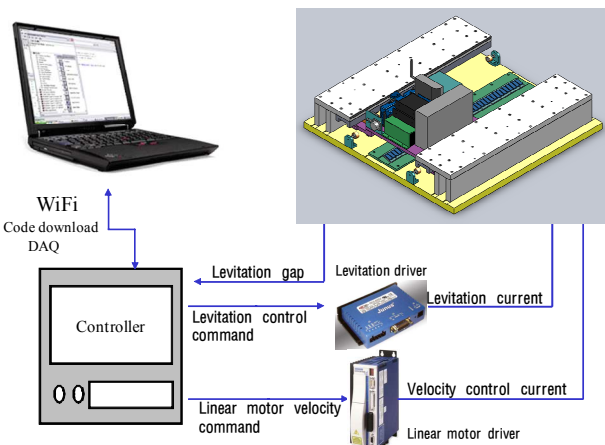


Fig.3 Configuration of cogging force & moment measuring system

5. 자기부상 전자석의 설계

코깅데이터 측정장치용 하이브리드형 자기베어링이 지 지해야하는 부하의 대부분은 리니어모터의 흡인력이기 때문에 측정대상 리니어모터의 흡인력의 크기에 따라 전자석 설계가 결정된다. 본 연구에서는 이동자 코일과 자석트랙이 정상적인 간격일 때 흡인력이 1,500N 급인 Trilogy와 Yaskawa 리니어모터를 대상으로 하는 측정장치용 하이브리드형 자기베어링 전자석을 설계하였다. 이동부가 부상하지

않을 때의 이동자 코일과 자석트랙의 간격 0.5mm 에서는 약 1900N의 흡인력이 발생하고 이동부의 질량은 약 30kg으로 예측되었다. 따라서 4개의 전자석은 최소한 2,200N의 힘을 발생할 수 있어야 한다. 여기에 1.4의 안전율을 고려하여 정상상태의 간격에서 약 3,100N의 힘이 발생되도록 전자석을 설계하였다. 표 1과 Fig. 4에 설계된 전자석의 사양과 단면형상을 대해 나타내었다.

Table 1 specification of hybrid type electromagnet

Item	Value
Nominal air gap[mm]	1
Area of pole[mm ²]	780
Number of turn[times]	200
Max current[A]	10
Thickness of permanent magnet[mm]	2.6
Residual flux density of permanent magnet[T]	1.16
Current gain, K_i [N/A]	38.1
Position gain, K_x [N/m]	-1.7×10^5

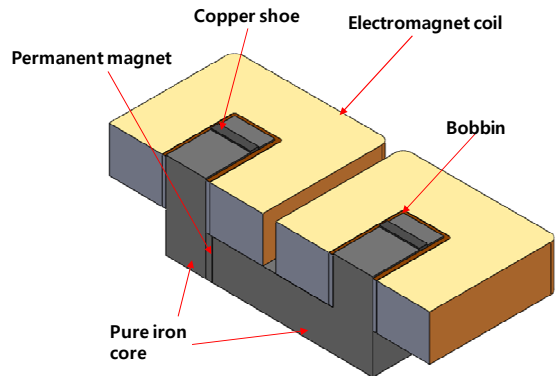


Fig.4 Cross sectional view of hybrid type electromagnet

6. 결론

지금까지 자기부상을 이용한 코깅토크 및 코깅모멘트의 측정장치에 대해 소개하였다. 비접촉식의 자기베어링을 이용함으로써 기존 방식에서 발생할 수 있는 오차를 줄여 정확한 코깅토크 및 코깅모멘트를 측정할 수 있을 것으로 기대한다. 향후 실험장치를 제작하여 실제 측정된 데이터와 해석적으로 예측한 데이터를 비교하여 정확한 예측방법을 정립해 나갈 예정이다. 이러한 방법으로 보완된 코깅토크 및 코깅모멘트 예측방법은 직선운동유니트의 운동정밀도 예측에 활용될 것이다.

후기

본 연구는 지식경제부 국가플랫폼기술개발사업으로 수행되는 직선운동유니트 정밀도 예측 및 통합 시뮬레이터 개발사업[10033595]의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 오정석, 박천홍, "대칭구조 철심형 리니어모터 이송계에서의 코깅현상에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 제 25권, 제 10호, 115-121, 2008.
- 김경호, 오정석, "공작기계의 기하학적 오차 평가기술", 한국공작기계학회지, 제 18권, 제 5호, 5-21, 2009
- Maslen, E., Allaire, P., Noh, M. and Sortore, C., "Magnetic bearing design for reduced power consumption," Journal of Tribology, 118, 839-846, 1996.