

대칭구조 철심형 리니어모터 이송계에서의 코깅현상에 관한 연구

Investigation of Cogging Effect in Bisymmetric Dual Iron Core Linear Motor Stage

✉ 오정석¹, 박천홍¹
✉ Jeong Seok Oh¹ and Chun Hong Park¹

¹ 한국기계연구원 지능형생산시스템연구본부 (Intelligent Manufacturing Systems Research Division, Korea Institute of Machinery & Materials)
✉ Corresponding author: ojs6114@kimm.re.kr, Tel: 042-868-7867

Manuscript received: 2008.3.24 / Revised: 2008.5.27 / Accepted: 2008.7.4

This paper presents bisymmetric dual iron core linear motor stage for heavy-duty high precision applications such as large area micro-grooving machines or high precision roll die machines. In this stage, two iron core linear motors are installed in laterally symmetric way to cancel out the attractive forces. Main focus was given to analyzing the effect of cogging force and moment for two different layouts, which are symmetric and half-pitch shifted ones. Experimental results showed that the symmetric layout is more adequate for high precision applications because of its clear moment cancellation effect. It was also verified that the effect of the residual cogging moment can be suppressed further by increasing the bearing stiffness. One problem of the symmetric layout is added cogging force which hinders smooth motion, but its effect was relatively small compared with that of moment cancellation

Key Words: Iron Core Linear Motor (철심형 리니어모터), Cogging Force (코깅력), Cogging Moment (코깅모멘트), Attractive Force (흡인력), Hydrostatic Bearing (유정압베어링)

1. 서론

리니어모터는 고유의 비접촉 및 직접구동(direct drive) 특성으로 인해 백래쉬(backlash)가 없고 유지보수가 용이하며 고속/고정도 구동이 가능한 등 많은 장점을 가지고 있어 최근 반도체 및 평판디스플레이 제조/검사장비, 전자부품 조립장비, 초정밀 가공기 등에서 그 사용이 급격히 확대되고 있다. 철심형 리니어모터(iron core linear motor)의 경우 무철심형 리니어모터(coreless linear motor)에 비해 단위체적 당 더 큰 추력을 가지고 있고 효율적인 냉각구조 및 상대적으로 저렴한 가격으로 인해 대형의 고부하/고속 이송계에 아주 유리한 장

점을 가지고 있지만 몇 가지 단점으로 인해 대형 초정밀 이송계에서는 그 활용이 제약을 받고 있는 실정이다. 첫째, 철심형 모터는 최대추력의 3 배에서 5 배에 이르는 큰 흡인력(attractive force)을 가지고 있어 이송계의 변형을 유발하며 이로 인해 초정밀 안내면(공기정압 또는 유정압) 및 이송계 구조에 큰 부담으로 작용한다. 둘째, 코일과 자석트랙 사이에 발생하는 자력(magnetic force)의 불균형에 의해 인해 철심형 모터는 코깅력(cogging force) 및 코깅모멘트(cogging moment)를 가지게 되며 이로 인해 등속구동이 어렵고 주기적인 각운동오차를 유발하는 문제점을 가지고 있다.¹ 특히 1m 급 대면적 미세형상 가공기나 2-3m 급 초정밀 롤 굽

형 가공기 등의 대형 초정밀 가공기들에서는 큰 부하에 높은 운동정밀도가 요구되므로 코깅모멘트에 의한 각운동오차를 최소화하는 것이 매우 중요한 과제이다. 코깅모멘트의 경우 추가적인 nulling element²를 사용하여 원래의 모멘트를 상쇄시키는 방법으로 어느 정도 감소시킬 수 있으나 이 경우에도 흡인력은 그대로 존재하는 단점을 가지고 있다.

흡인력과 코깅모멘트의 영향을 동시에 제거할 수 있는 하나의 대안은 대칭구조 철심형 리니어모터 이송계를 구성하는 것이다. 이 경우, 각 모터에 작용하는 흡인력은 서로 상쇄되어 이송계의 구조 변형을 최소화할 수 있으며 아울러 코깅모멘트 또한 동시에 상쇄시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 대칭구조 철심형 리니어모터 이송계의 또 다른 장점은 두 개의 모터를 사용함으로써 얻어지는 높은 추력과 이에 따른 낮은 발열이며 이로 인해 고속화/고추력화에 절대적으로 유리하다.

본 연구에서는 대형 초정밀 이송계에서 철심형 리니어모터의 응용 가능성을 확인하기 위하여 유정압베어링 기반 대칭구조 철심형 리니어모터 이송계를 설계하고 제작하였으며 두 가지의 자석트랙 배치에 따른 코깅현상의 영향을 분석하는데 주안점을 두었다.

2. 철심형 리니어모터에서의 코깅현상

2.1 코깅현상의 원인

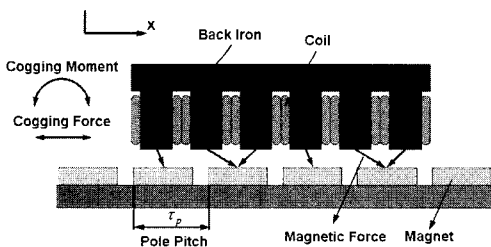


Fig. 1 Typical structure of iron core linear motors

전형적인 철심형 리니어모터의 구조를 Fig. 1에 나타내었다.³ 그림에서 코일부와 자석트랙 사이에 표시된 화살표는 주어진 위치에서 상호간에 작용하는 자력을 나타낸다. 자력의 수평방향 합력(resultant force)은 코일부와 자석트랙 간의 상대위

치에 따라 달라지며 그 주기는 자석트랙의 자극피치(magnetic pole pitch) τ_p 임을 그림에서 쉽게 알 수 있다. 이와 같이 주기적으로 변하는 자력의 수평방향 합력을 코깅력이라 정의하며 코깅력 F_c 는 식(1)과 같이 표현될 수 있다.

$$F_c(x) = F_c(x + \tau_p) \tag{1}$$

코깅력은 등속제어를 구현하는데 있어 장애로 작용하며 이로 인해 매우 높은 수준의 등속구동이 필요할 경우에는 주로 무철심형 리니어모터가 사용되어 왔다.

코깅력에 비해 코깅모멘트 M_c 는 자력의 수직방향 성분의 좌우 불균일에 의해 발생하며 역시 자극피치를 주기로 변화한다.

$$M_c(x) = M_c(x + \tau_p) \tag{2}$$

초정밀 이송계에 주로 사용되는 공기정압 또는 유정압베어링의 경우 일반적인 LM 가이드에 비해 강성이 상대적으로 작으므로 코깅모멘트에 의해 유발되는 각운동오차가 더 커지는 문제점을 가지고 있다. 특히 대형 초정밀 이송계에서는 이송계 끝부분의 경우 아베원리(Abbé principle)에 의한 각운동 오차의 확대효과로 인해 진직도 오차가 매우 커지게 되므로 코깅모멘트의 최소화는 매우 중요한 과제이다.

자력의 수직방향 합력은 철심형 모터의 흡인력으로 정의되며 대략적으로 최대추력의 3-5 배에 이르는 큰 값을 가지게 된다. 긍정적인 관점에서 모터의 흡인력은 베어링의 예압으로 작용하여 강성을 증대시키는 역할을 하게 되지만 과도한 흡인력은 이송계의 변형을 유발하고 이에 따라 이송계 구조 및 베어링 설계에 있어서 큰 부담으로 작용한다.

2.2 대칭구조 철심형 리니어모터 이송계

유정압베어링 기반 대칭구조 철심형 리니어모터 이송계의 구조를 Fig. 2에 나타내었다.

정면에서 볼 때 두 개의 철심형 리니어모터는 완벽한 좌우대칭 구조로 설치되어 각 모터에 작용하는 흡인력은 서로 상쇄되게 된다. 이로 인해 이송계 이동부는 흡인력에 의한 어떠한 영향도 받지

않으며 따라서 구조변형 및 유정압베어링 설계 시의 부담을 최소화할 수 있다. 아울러 두 개의 모터를 사용함에 따라 동일한 구동조건에서의 발열은 하나의 모터만을 사용하는 경우에 비해 약 절반으로 줄어들며 따라서 이송계의 발열 및 열변형을 감소시킬 수 있는 장점을 가지고 있다.

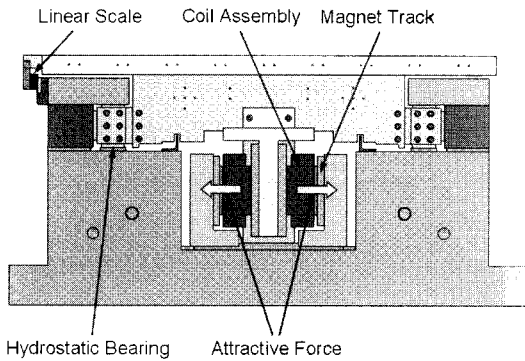
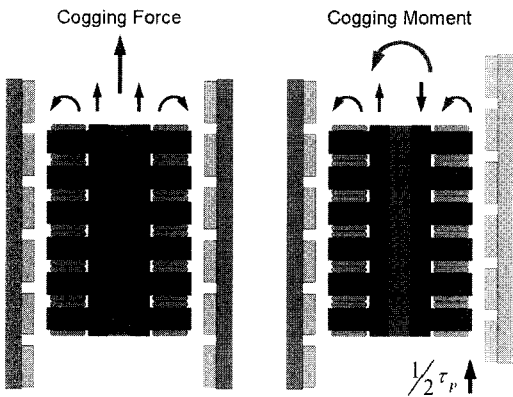


Fig. 2 Bisymmetric dual iron core linear motor stage



(a) Symmetric layout (b) Half-pitch shifted layout
Fig. 3 Two possible layouts in bisymmetric dual iron core linear motor stage

코깅현상의 관점에서는 두 개의 자석트랙을 어떻게 배치하는가에 따라 전혀 다른 두 가지의 영향을 예상할 수 있다. Fig. 3은 대칭구조 철심형 리니어모터 이송계에서 가능한 두 가지의 구성을 보여 주며 각각 Fig. 2의 이송계 구조에서 리니어모터 부분만을 위에서 바라본 형태이다. Fig. 3(a)는 두 개의 자석트랙이 서로 완전한 대칭을 이루고 있는 구성으로(이하 대칭구성으로 표현) 그림

에서 알 수 있듯이 코깅모멘트는 서로 상쇄되고 반면에 코깅력은 합쳐져서 증가하게 된다. Fig. 3(b)는 오른쪽 자석트랙이 왼쪽 자석트랙에 대해 자극 피치의 절반만큼 상대적으로 이동되어 있는 구성을 보여 준다.(이하 반피치이동구성으로 표현) 이 경우 식(1)과 식(2)에 나타난 코깅력과 코깅모멘트를 조화함수라 가정하면 오른쪽 모터의 코깅력과 코깅모멘트는 식(3)과 식(4)에 나타난 것과 같이 위상이 180° 이동되어 대칭구성에 비해 크기는 그대로 유지되면서 방향이 반대로 바뀌게 된다.

$$F_c(x) = A_f \cos\left(\frac{2\pi}{\tau_p}x + \delta_f\right)$$

$$F_c\left(x + \frac{\tau_p}{2}\right) = A_f \cos\left\{\frac{2\pi}{\tau_p}\left(x + \frac{\tau_p}{2}\right) + \delta_f\right\}$$

$$= A_f \cos\left(\frac{2\pi}{\tau_p}x + \delta_f + \pi\right) = -F_c(x)$$

$$M_c(x) = A_m \cos\left(\frac{2\pi}{\tau_p}x + \delta_m\right)$$

$$M_c\left(x + \frac{\tau_p}{2}\right) = A_m \cos\left\{\frac{2\pi}{\tau_p}\left(x + \frac{\tau_p}{2}\right) + \delta_m\right\}$$

$$= A_m \cos\left(\frac{2\pi}{\tau_p}x + \delta_m + \pi\right) = -M_c(x)$$

이 때 A_f , A_m 은 각각 코깅력과 코깅모멘트의 크기이고 δ_f , δ_m 은 각각 코깅력과 코깅모멘트의 x 위치에서의 옵셋위상이다.

따라서 반피치이동구성에서는 코깅력은 상쇄되지만 코깅모멘트는 증가하게 된다. 물론 코깅력과 코깅모멘트가 완전한 조화함수의 형태를 가지는 것은 아니므로 위치에 따라 완벽히 상쇄되는 것을 기대하기는 힘들지만 그 경향은 예상할 수 있다. 본 연구에서는 이상의 두 가지 구성에 대해 실험적으로 그 영향을 측정하고 분석하였다.

3. 실험 및 토의

3.1 실험장치 구성

Fig. 4는 실험에 사용된 대칭구조 철심형 리니어모터 이송계를 보여 주며 Fig. 2의 설계에 따라

제작되었다. 사용된 리니어모터는 Kollmorgen 사의 IC22-075 모델로 최대추력은 1,875 N, 수냉 시 1,493 N의 연속추력을 그 사양으로 하고 있다.

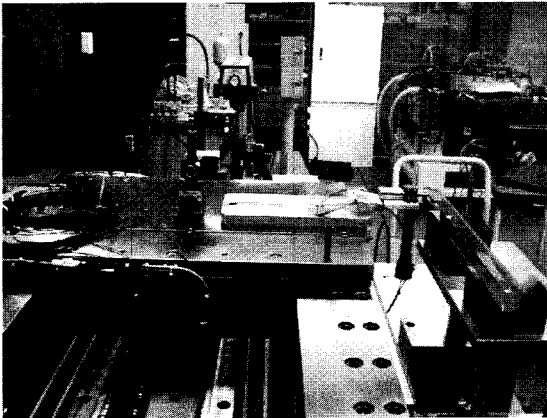


Fig. 4 Picture of experimental setup

최대추력에 비해 냉각 시의 연속추력이 매우 높음을 알 수 있는데 이는 철심형 리니어모터가 효율적인 냉각구조를 가지고 있음에 기인한다. 모터의 자극피치는 16 mm로 코깅력과 코깅모멘트가 16 mm를 주기로 변동할 것을 예상할 수 있다. 모터의 흡인력은 7,300 N으로 최대추력의 3.9 배에 이르는 큰 힘이 작용하고 있으나 본 구조에서는 서로 상쇄되어 이송계의 운동부에는 영향이 없다. 오른쪽 자석트랙 브라켓에는 반피치이동구성 실험을 위해 대칭구성 시의 조립용 탭에 대해 반피치(8 mm) 이동된 탭들을 추가로 가공하였다.

대형 초정밀 가공기에서의 응용 가능성을 확인하기 위해 안내방식으로는 유정압베어링을 사용하였으며 10 kgf/cm²의 공급압력에서 수평방향의 부하하중은 9,420 N, 수직방향의 부하하중은 14,620 N으로 설계되었다.

리니어스케일은 4 μm의 신호주기를 갖는 Mitutoyo 사의 ST-36D 모델을 사용하였으며 4096 체배를 적용하여 약 1 nm의 분해능으로 제어하였다. 제어기로는 MEI 사의 XMP-SynqNet을 사용하였다.

코깅모멘트에 의한 이송계의 yaw 오차를 측정하기 위하여 두 개의 정전용량형 센서(ADE, 3401 모델)와 함께 Zerodur 거울을 기준면으로 사용하였으며 레이저간섭계의 각도모듈을 추가로 설치하여

비교검증을 실시하였다. 총 행정은 600 mm로 설계되었으며 500 mm 길이의 Zerodur 거울로 측정 가능한 450 mm 구간에 대해 운동오차를 측정하였다.

3.2 두 가지 구성의 실험적 비교

Fig. 5는 Fig. 3에 나타난 두 가지 구성에 대한 코깅력을 측정하여 비교한 결과이다. 코깅력에 의한 영향을 명확히 관찰하기 위하여 속도는 10 mm/s로 매우 낮게 설정하였으며 코깅력은 모터 드라이버의 전류출력과 모터의 추력정수(force constant)로부터 계산하였다.

대칭구성의 경우 코깅력의 표준편차는 14.8 N였으며 반피치이동구성의 경우 표준편차는 10.6 N으로 줄어들었으나 그 효과는 예상에 비해 크지 않았다. 그 이유를 분석하기 위해 코깅력 측정 결과의 주파수 분석을 실시하였으며 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 참고로 주파수는 자극피치 주파수에 정규화되었다. 분석결과에서 알 수 있듯이 가장 큰 주기성분은 자극피치를 주기로 하는 성분(주파수 1에 해당)으로 이 주파수에서의 피크 크기는 대칭구성의 0.996에 비해 반피치이동구성을 적용할 경우 0.244로 대폭 줄어들었다.

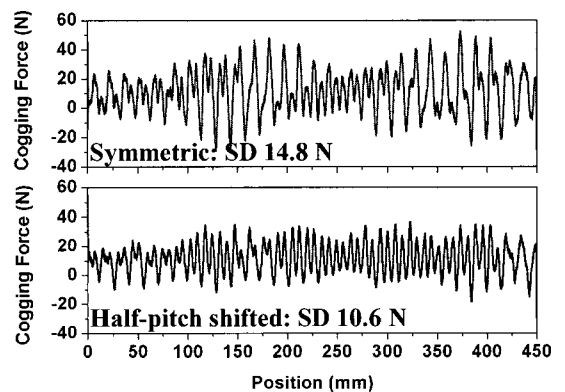


Fig. 5 Comparison of the cogging forces for two layouts

자극피치의 절반(반피치)에 해당하는 주파수 2에서의 피크 크기를 비교하면 대칭구성에서는 0.238이었고 반피치이동구성에서는 0.278로 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 Fig. 3(b)의 반피치이동구성을 위해 오른쪽 자석트랙을 반피치 이동시키

더라도 반피치 주기성분은 상쇄효과가 없음을 감안하면 당연한 결과로 볼 수 있다.

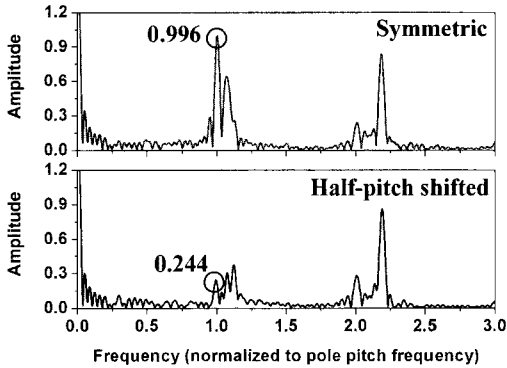


Fig. 6 FFT analysis of the cogging forces

코깅력의 주파수 분석결과에서 다소 의외의 현상으로 볼 수 있는 점은 약 1.1 과 2.2 의 주파수에 위치하는 피크의 존재이다. Fig. 3 에서 알 수 있듯이 대칭구조 철심형 리니어모터 이송계의 코깅력은 좌우에 위치한 각각의 철심형 리니어모터 코깅력의 합으로 나타나게 되므로 본래의 단일 모터에 해당 주파수 성분이 없으면 코깅력 측정결과에서도 그 주파수는 관측할 수 없다. 다시 말하면 1.1 과 2.2 의 주파수에 있는 피크 성분은 본래의 철심형 모터에 포함되어 있는 주기성분으로 자석 트랙의 상대적인 배열오차와는 무관하다. 이와 같은 자극피치 주파수의 정수배가 아닌 주파수 성분은 모터 제작사의 anti-cog 설계나 자석트랙의 자극피치 불균일, 또는 구동 시 코일에 흐르는 전류에 의한 전자기장의 영향으로 추정되나 정확한 원인에 대해서는 분석이 더 필요하다.

이상에서 보듯이 자극피치 주파수 성분을 제외한 나머지 주파수 성분은 반피치이동구성을 택하더라도 그 크기가 그대로이거나 상쇄효과가 미약하였으며 이들 주파수 성분의 크기가 자극피치 주파수 성분의 크기에 비해 상대적으로 작지 않으므로 반피치이동구성에서의 코깅력 상쇄효과가 반감됨을 알 수 있다.

두 가지 구성에서의 코깅력에 의한 영향을 관찰하기 위하여 서보의 추종오차를 측정하였으며 Fig. 7 에 추종오차 측정결과를, Fig. 8 에 추종오차의 주파수 분석결과를 나타내었다. 추종오차의 주파수 특성은 Fig. 6 에 나타낸 코깅력의 주파수 특

성과 유사함을 알 수 있으며 자극피치 주파수에서의 피크 크기는 대칭구성에서 0.050, 반피치이동구성에서 0.012 로 감소비율 또한 거의 동일하였다. 다만 코깅력의 주파수 분석결과와는 달리 대칭구성에서 주파수 2.2 에 해당하는 피크 성분의 크기가 0.073 으로 가장 크게 나타났으며 반피치이동구성에서도 그 크기는 그대로 유지되었다. 이에 따라 반피치이동구성에서의 추종오차 감소효과는 코깅력 감소효과에 비해서도 작음을 알 수 있으며 이는 Fig. 7 의 추종오차 측정결과에서 확인할 수 있다. 추종오차의 표준편차는 대칭구성 시 0.98 μm 에서 반피치이동구성 시 0.84 μm 로 줄어들어 14.3 %의 감소비율을 보였으며 이는 코깅력의 감소비율 28.4 %에 비해 상대적으로 작았다.

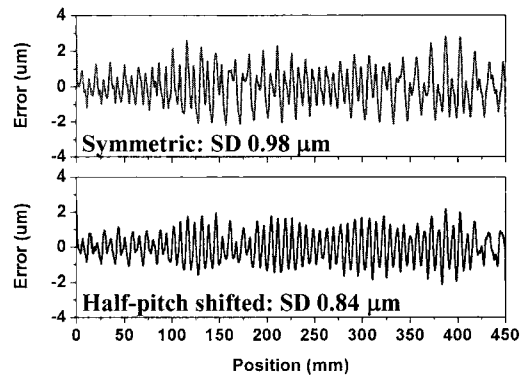


Fig. 7 Comparison of the following errors for two layouts

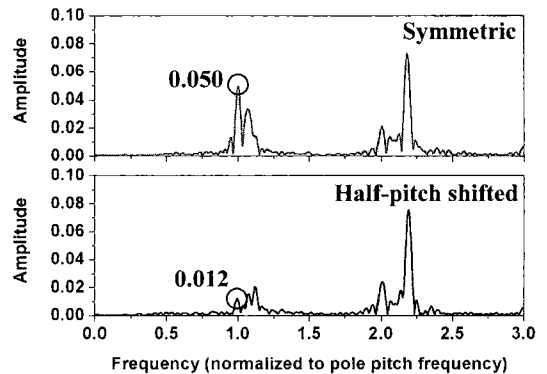


Fig. 8 FFT analysis of the following errors

코깅모멘트의 영향을 관찰하기 위한 yaw 오차 측정결과 및 주파수 분석결과를 각각 Fig. 9 와 Fig.

10 에 나타내었다. 정전용량형 센서로 측정한 yaw 오차 측정결과는 레이저간섭계로 측정한 결과와 잘 일치하였으며 편의상 정전용량형 센서로 측정한 결과만을 나타내었다.

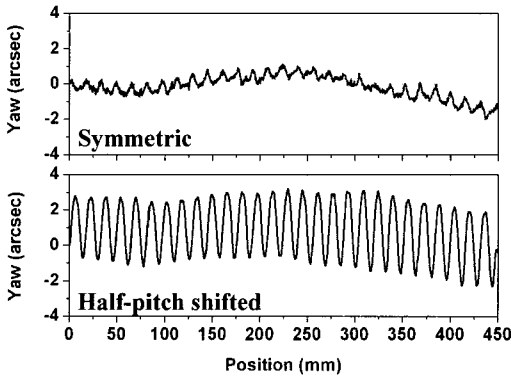


Fig. 9 Comparison of the yaw errors for two layouts

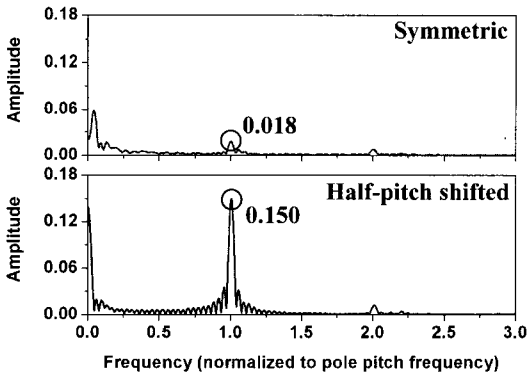


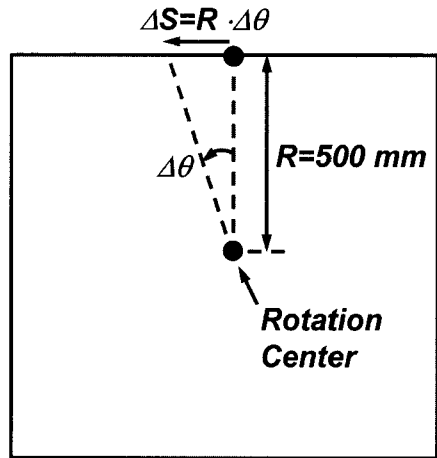
Fig. 10 FFT analysis of the yaw errors

코깅력과는 달리 yaw 오차의 경우 그 주기성이 명확하게 나타나며 자극피치 주파수에 주도적인 피크성분이 나타나는 것을 알 수 있다. 자극피치 주파수에서의 피크 크기는 반피치이동구성 시 0.150 에서 대칭구성 시 0.018 로 줄어들어 감소비율 88 %의 큰 상쇄효과를 보이고 있다. Fig. 9 의 실제 yaw 측정결과를 비교하면 반피치이동구성 시 약 2 arcsec 의 진폭이 대칭구성 시 약 0.5 arcsec 이하로 감소하였다.

3.3 유정압베어링 강성의 영향

1m 급 대면적 미세형상 가공기나 2-3m 급 초정

밀 롤 금형 가공기 등의 대형 초정밀 가공기들에서는 미세패턴의 가공정밀도를 위해 진직도 및 각운동 오차의 최소화가 매우 중요하므로 3.2 의 실험결과를 볼 때 대칭구성이 절대적으로 유리한 것으로 판단할 수 있다.



ΔS : Amplitude of straightness fluctuation at the end of the moving table

$\Delta \theta$: Amplitude of yaw fluctuation

Fig. 11 Effect of the yaw fluctuation on the horizontal straightness at the end of the moving table

Fig. 11 과 같이 이송계 상판의 길이를 1 m 로 가정하고 yaw 오차의 회전 중심을 상판의 중심으로 가정할 때 0.5 arcsec 의 잔류 yaw 오차 진폭 ($\Delta \theta$)에 의한 이송계 상판 끝 부분에서의 진직도 요동의 진폭(ΔS)은 아베원리에 의해 약 1.2 μm 로 계산할 수 있다. 이와 같은 대칭구성 시의 잔류 yaw 오차를 베어링의 설계개선을 통하여 더 줄일 수 있는지 그 가능성을 확인하기 위하여 대칭구성에서 유정압베어링의 오일 공급압력을 변화시키면서 yaw 오차의 변화를 관찰하였다. Fig. 12 와 Fig. 13 은 오일 공급압력의 변동에 따른 yaw 오차의 변화 및 주파수 분석결과를 각각 나타낸다. 공급압력은 각각 6 kgf/cm^2 , 10 kgf/cm^2 , 16 kgf/cm^2 로 설정하였다. 자극피치 주파수에서의 피크 크기를 비교하면 공급압력 6 kgf/cm^2 에서 0.031 의 피크가 공급압력 16 kgf/cm^2 에서는 0.011 로 줄어들었으며 베어링 강성 강화에 의해 반피치 주기성분 역시 비슷한 비율로 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 최종적으로 yaw 오차의 잔류진폭은 약 0.3 arcsec

이하로 억제되었으며 이는 Fig. 11 의 구성에서 이송계 상판 끝 부분 진직도 요동의 진폭을 0.7 μm 이내로 억제할 수 있음을 의미한다.

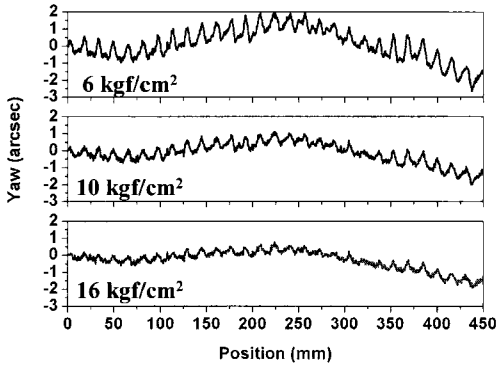


Fig. 12 Comparison of the yaw errors for different oil supply pressure in symmetric layout

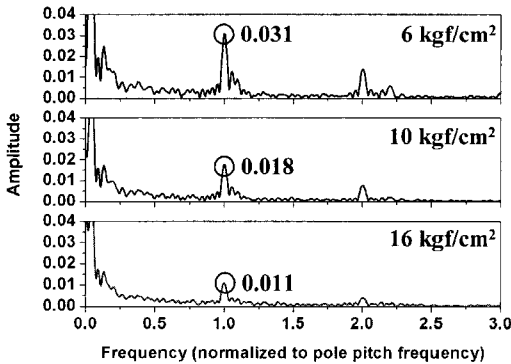


Fig. 13 FFT analysis of the yaw errors for different oil supply pressure in symmetric layout

4. 결론

본 연구에서는 대형 초정밀 이송계에서 철심형 리니어모터의 응용가능성을 확인하기 위하여 흡인력을 서로 상쇄할 수 있는 대칭구조 철심형 리니어모터 이송계를 설계하고 제작하였다. 특히 철심형 리니어모터의 코깅현상에 의한 영향을 분석하는데 주안점을 두었으며 이를 위하여 코깅모멘트를 상쇄할 수 있는 대칭구성 및 코깅력을 상쇄할 수 있는 반피치이동구성의 두 가지 구성에

대해 코깅력, 추종오차, yaw 오차를 각각 측정하여 그 결과를 비교, 분석하였다. 실험 결과 대칭구성에서의 코깅모멘트 상쇄효과가 매우 명확함을 확인할 수 있었으며 대형 초정밀 이송계에서의 진직도 및 각도오차의 중요성에 비추어 볼 때 대칭구성이 상대적으로 유리한 것으로 판단된다. 아울러 대칭구성에서도 완전히 상쇄되지 않고 잔류하는 yaw 오차의 요동성분은 유정압베어링의 강성 향상을 통해 상당량 더 감소시킬 수 있음을 실험적으로 확인하였다. 대칭구성에서의 yaw 오차의 잔류 진폭은 약 0.3 arcsec 이내로 억제되었으며 이를 통해 대형 초정밀 이송계에서 철심형 리니어모터의 응용에 관한 가능성을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 전략기술개발사업 “대면적 미세 가공시스템 기술개발” 과제의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Slocum, A., Basaran, M., Cortesi, R. and Hart, A. J., “Linear Motion Carriage with Aerostatic Bearings Preloaded by Inclined Iron Core Linear Electric Motor,” Precision Engineering, Vol. 27, Issue 4, pp. 382-394, 2003.
2. Rothenhöfer, G. and Slocum, A., “Nulling the Pitch Error of Permanent Magnet Open Face Linear Motion Components,” Proc. of the 6th euspen conference, Vol. 1, pp. 261-264, 2006.
3. Marsh, J., “Anti-Cog Technology Application Note,” Technical document of Parker Trilog, www.trilogysystems.com
4. Oh, J. S. and Park, C. H., “Bisymmetric Dual Iron Core Linear Motor Stage for High Force/Speed Applications and Its Experimental Verification on the Enhancement of Motion Errors,” Proc. of the 2nd ASPEN conference, pp. 67-70, 2007.
5. Katsuki, M., Kawatsu, K. and Gahuhari, M., “Linear Motor Drive Apparatus,” US Patent No. 6724104, 2001.