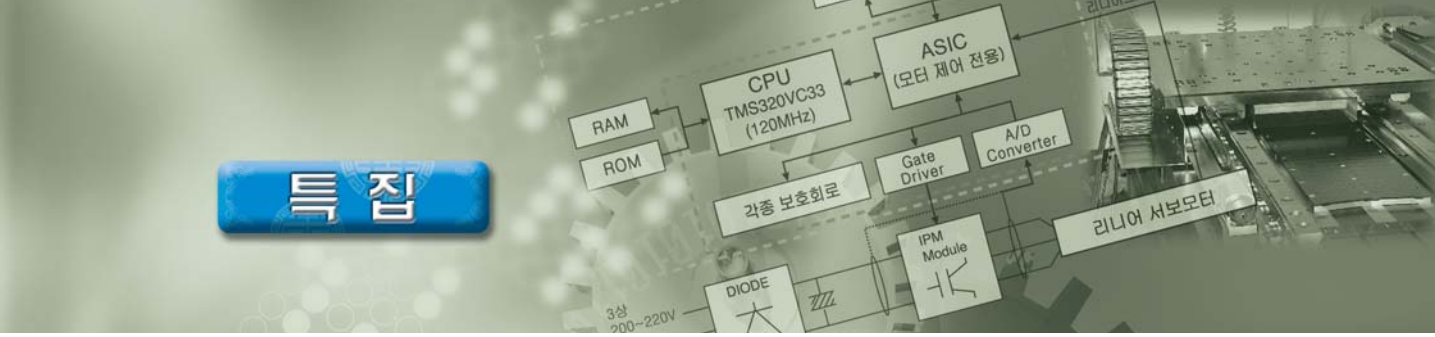


고속 · 고강성 이송시스템 기술개발

정 재 한

□삼익LMS주식회사 기술연구소
□jaehan@samicklms.co.kr

박 재 한

□삼익LMS주식회사 기술연구소
□hans@samicklms.co.kr

정 시 욱

□삼익LMS주식회사 기술연구소
□suchung@samicklms.co.kr

관심분야
■리니어모터 설계
■구조설계 및 최적설계
■리니어모터 구조설계 및 해석
■전자기장 유한요소해석
■전자기계 진동 및 소음 저감 설계
■리니어모터 설계

1. 서 론

1.1 기술개발의 목적 및 중요성

리니어모터는 회전형 모터의 기본 구조를 직선상으로 전개하여 전기에너지를 직접 직선 운동에너지로 변환하는 장치이다. 직선운동의 위치와 속도를 제어하기 위한 종래의 기술은 주로 회전형 서보모터와 볼나사를 이용한 것이었다. 공작기계를 비롯한 공장자동화시스템의 기술발전과 관련하여 고생산성의 실현을 위해 직선운동부의 고속화와 고정도화가 필수적으로 요구되고 있는 추세에 있으며, 기존의 회전형 서보모터와 볼나사를 사용하는 종래의 방법으로는 기술적인 한계가 있다. 또한 최근 들어 고속, 고정밀, 복합 다양한 기능을 원하는 사용자의 요구에 따라 공작기계에 IT 기술까지 접목되면서 지능화, 시스템화 되어 가고 있는 추세이다. 이에 고속·정밀 가공에 대한 관심이 높아지면서 기존의 회전형 서보모터와 볼나사를 이용한 회전운동을 직선운동으로 변환하여 사용하던 것을 변환장치 없이 직접적인 직선구동이 가능한 리니어모터로 대체하여 고속·고정도를 얻기 위한 다양한 연구가 이루어지고 있다. 회전형 모터를 직선 운동 시스템에 적용할 경우 회전운동을 직선운동으로 변화시키기 위한 부가적인 기계변환 장치가 필요하므로 마찰에 의한 에너지의 손실로 시스템 구성이 복잡하게 되고 소음/진동 발생이 필연적으로 수반되어 비효율적인 단점을 가지고 있다. 리니어모터를 응용하는 경우는 일반 회전형 모터에 비해 모터 자체의 효율이 낮고 역률이 떨어지는 등의 단점이 있음에도 불구하고 직접 직선형의 구동력을 발생시키므로 동력 변환장치의 부가에 따른 손실, 소음, 진동 등을 제거한다. 그러므로 능률성, 생산성, 경제성의 면에서 회전형에 비하여 우수한 장점을 가지고 있을 뿐만 아니라 뛰어난 제어성능으로 인해 그 응용 범위

가 넓다.

리니어모터의 장점으로는 백래시가 없고, 마찰이 적으며, 속도 및 가속도에 기계적 제한이 없으며, 스트로크의 구애를 받지 않고, 한 축에 복수의 가동자 탑재 등 다양한 유니트 구성이 가능하다는 점을 들 수 있다. 국내에서는 반도체 장비 등 일부에서 정격 추력 600N 이하의 소형 리니어모터의 적용이 도입되고 있는 단계이나, 공작기계에 적용하여 실용화한 사례는 찾아볼 수가 없다. 특히, 공작기계에 적용하기 위해서는 고추력 및 고강성이 요구되며, 아울러 방열대책, 칩처리, 수직방향 적용시 낙하방지 대책 등이 필요하다. 이에 공작기계에 적용하기 위한 리니어모터의 최적사양을 얻기 위한 전자기적/기구적 특성해석, 방열해석을 통한 리니어모터의 설계가 필요하다.

본 연구는 고속·고추력의 리니어모터 개발을 통하여 각종 공장자동화기기의 고속직선 운동에 적용할 수 있는 리니어모터 시스템의 설계/제작/성능평가 기술과 이를 구동하기 위한 드라이버, 제어기술을 확보함으로써 LM가이드 등과 조합한 고속·고정도 직선운동 시스템 구축을 목표로 하고 있다. 따라서 기존의 볼나사, 서보모터, 서보팩, 모션제어기 등 직선운동 제어부에 관련한 핵심 구성요소를 대체하고, 현재 대부분 미국, 일본으로부터의 수입에 의존하고 있는 제품들에 대한 수입대체는 물론, 선진국에서도 본격적인 보급단계에 있는 리니어모터 응용분야의 차세대 기술개발을 이루고자 한다.

2. 본 론

2.1 연구개발목표

(1) 고속(150m/min.), 고추력(정격 7,000N) 성능을 가진 공작기계용 리니어모터의 개발
(2) 리니어모터 설계/특성해석 연구, 방열 대책 ,자기회로 해석
(3) 개발시제품의 성능평가
(4) 6,000N급 3차시제품 설계, 제작, 성능평가
(5) 4,000N급 2차시제품 제작
(6) 2,400N급 4차시제품 개념설계
(7) 공작기계 요소 부품으로 공급

2.2 고속 고강성 이송시스템 기술개발 (삼익LMS(주))

2.2.1 6,000N급 시제품 3호기의 정특성 해석

2.2.1.1 설계사양

큰 부하를 가진 공작기계에 리니어모터를 적용하여 고속, 고가감속 운동 및 고정도위치결정을 실현하기 위해서는 추력이 가감속시 부하의 관성을 이겨낼 수 있도록 충분히 커야 하며, 일정한 추력 유지 및 주변부품의 변형을 방지하기 위해 가동자는 적절한 온도분포를 유지하여야 하므로 열해석도 필요하다. 아울러, 안정된 운전 및 위치결정정도 향상 및 정지 위치에서의 고강성을 위해 추력리플 및 디텐트력의 분포특성 등을 FEM 해석을 통해서 설계에 반영하였다. 전자기해석의 관점에서 시제품 1호기와 크게 달라진 부분은 없으나 공극이 0.5mm에서 1.0mm로 커졌으므로 동일한 추력을 얻기 위해서는 더 많은 전류가 필요하고, 디텐트력은 공극이 늘어난 만큼 감소된다.

제작하고자하는 리니어모터의 종류는 철심형 리니어직류모터(Iron Core type Linear DC Motor, 철심형 LDM)로써, 정격추력 목표사양은 6,000N이다. 그림 1, 2는 1차측이 2차측보다 짧은 단 1차형 LDM의 구조를 나타내는 것으로써 가동자는 1차측 권선으로 구성되어 있고, 고정자는 영구자석 구성되어져 있으며 전기자 권선이 짧기 때문에 권선에 의한 누설자속이 적으며 효율이 높다. 그러나, 전원을 공급받는 부분이 운동을 하게 되므로 이에 따른 부가적인 급전 장치를 필요로 한다.

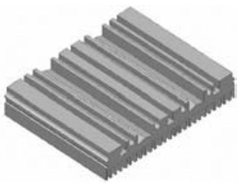


그림1. 1차측(가동자)

그림2. 2차측(고정자)

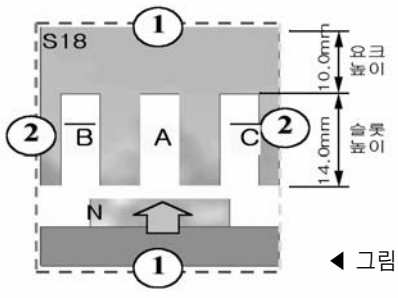
표 1. 6,000N급 시제품3호기 제원

구 분			값	단위
Primary	슬롯수		74	–
	극수		24	–
	재질		S18	–
	슬롯당 도체수		149	–
	상수		3	–
	축방향 길이206.0		㎜	
Secondary	영구자석	종류	Nd-Fe-B	–
		자속밀도	1.30	T
		폭	24.0	㎜
		두께	6.0	㎜
		길이	45.0	㎜
		스큐각	6	deg.
	재질		S45C	–
	축방향길이		206.0	㎜
공극의 길이 1.0			㎜	
구동방식			정현파 구동방식	

2.2.1.2 입력전류 6.4A에서의 추력 특성

먼저, 목표 추력인 6,000N을 얻기 위한 입력 전류량을 결정하기 위한 FEM 해석 모델은 그림 3과 같다. 해석시 단부효과 및 영구자석 Skew는 무시하였다. ①부위는 고정경계조건을 부여하였고, ②는 반주기경계조건을 부여하여 해석을 실시하였다.

해석조건은 코일 당 전류를 6.4A로 하여 가동자의 위치에 따른 추력의 변화를 구하였다. 그리고 그림 5에서 볼 때, 영구자석에 V자형 스큐 를 준 경우의 평균 추력은 스큐가 없는 경우에 비해 0.1%감소하였다. 기제작되었던 6,000N급 시제품1호기와 비교해 볼 때 배선사양이 바뀌고 자기 공극이 늘어나면서 값의 차이가 커진 것으로 판단된다.



◀ 그림3. 해석 모델

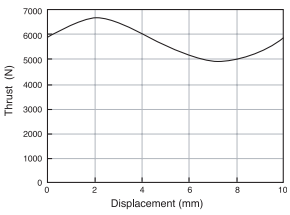


그림 4. 가동자의 위치에 따른 추력변화

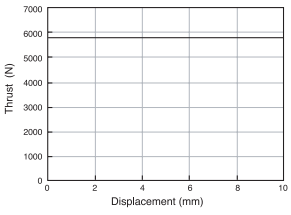


그림 5. 영구자적 One slot pitch V자형 배치

2.2.1.3 디텐트력 특성

그림 6과 7은 스큐의 유무에 따른 디텐트력 특성을 나타낸다. 영구자석을 One slot pitch skew로 하여 V자형으로 배치하는 경우에는 디텐트력이 거의 제거됨을 알 수 있다.

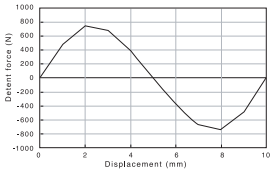


그림 6. 영구자석의 Skew가 없는 경우 디텐트력

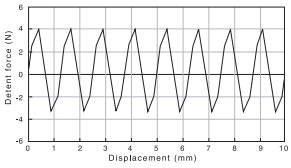


그림 7. 영구자석 One slot pitch V자형 배치시 디텐트력

2.2.2 6,000N급 시제품3호기 제작

리니어모터의 구성은 크게 고정자(2차측)와 가동자(1차측)로 크게 2가지로 분류된다. 본 과제에서 개발하고자 하는 리니어모터는 코일부가 직선운동을 하는 가동자이며, 영구자석이 부착된 코어부분이 고정자로 구성된 형식으로, 직선 운동이 가능하게 하는 LM가이드와 베이스, 테이블, 센서 등으로 구성된 유니트에 리니어모터를 장착하여 사용할 수 있도록 구성되어 있다.

2.2.2.1 고정자 제작

그림 8에서 보면 알 수 있듯이 특징으로는 영구자석이 5.4°정도 기울기를 가지고 V자 형태로 부착이 되어있다. 이는 디텐트력을 줄이고, 제작상의 이점을 고려한 설계이다. 실제 유니트 적용시 다양한 스트로크에 대처가 가능하도록 일정 길이로 모듈화 하였다. 또한 영구자석은 전용의 접착제를 사용하여 고정한 뒤, 별도로 설계한 몰딩금형에 조립하여 에폭시 몰딩 작업을 행하였다. 기존의 고정자 몰딩금형에 비해 더 깨끗한 표면을 얻을 수 있도록 주입이 원활하도록 설계하였다. 이러한 방식으로 영구자석을 보호하고, 공

작기계에 적용시 수분이나 오일, 절삭 칩에 대응할 수 있도록 하였다.

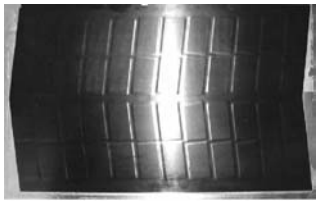


그림 8. 6,000N급 시제품3호기 고정자모듈

2.2.2.2 가동자 제작

고추력용 가동자의 구성은 철심, 코일, 냉각배관, 고정 플레이트로 크게 4부분으로 이루어져 있다. 특히, 단위체적당의 추력 효율을 높이기 위해 정형화된 형상을 가지는 정렬코일을 사용하였으며, 철손이 작은 S18재질로 제작하여 전자기적 특성을 향상시켰다. 또한, 열로 인한 모터의 성능저하를 막고, 주변의 온도특성에 영향을 줄이기 위해 2중 방열구조 및 단열판을 적용하였다.

이와 같이 조립된 가동자는 몰딩금형을 사용하여 에폭시로 몰딩을 하여 사용하도록 하는데, 이는 외부로부터의 손상 및 코일의 절연을 위해 반드시 필요하다.

그림 9. 냉각배관과 모터코어.단열판 조립

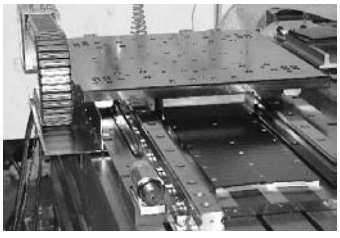


그림 10. 6,000N급 시제품3호기 유니트

2.2.2.3 유니트 제작

6,000N급 시제품 3호기는 대부분의 외형 치수가 시제품 1호기와 유사하므로 기존 시제품 1호기의 유니트를 별도의 추가가공 후 사용하였다. 위 유니트의 설계, 제작을 통해 주요 구성 부품인 LM가이드 적합여부 및 테이블과 베이스의 강성, 냉각장비 적용 등과 같은 기구부의 검토가 이루어졌으며, 성능평가를 통해 운동특성, 정밀도, 모터 강성 등을 파악하였고, 시제품에 적용할 수 있도록 할 수 있었다. 유니트 설계에서는 불필요한 베이스 공간을 줄이는 반면, 이송거리는 500mm에서 650mm로 설계를 하였다. 또한 동정격하중이 88.5kN인 LM가이드를 적용하여 수직흡인력에 대한 강성을 보완하였다.

2.2.3 4,000N급 시제품 2호기 추가제작

공작기계장착을 목표로 제작되었던 4,000N급 시제품 2호기의 전기 사양을 수정하여 신규로 새로이 제작하였다.

2.2.3.1 가동자의 제작

6,000N급 시제품3호기와 4,000N급 시제품2호기는 구조는 같고 모터의 길이만 3호기의 2/3정도이며 드라이버 개발을 위한 시제품용도로 1set, 대우종합기계(주)에 적용하기 위한 4set로, 총 5set를 제작하였다. 그림 11는 모터 코어 모듈과 하부냉각배관의 조립상태를 보여주고 있다. 여기에 단열판과 상부냉각배관을 조립한다. 가동자에 편평코일과 성형코일을 조합하여 조립, 배선작업을 진행한 뒤 에폭시 몰딩작업을 실시하기 전 내전압 테스트를 실시하였으며, 1.5kV를 30초간 인가하였을 때 9mA수준의 내전압성능을 확보하였다.

그림 11. 코어부, 배관, 단열판 조립

2.2.3.2 공작기계 장착

수정 제작된 4,000N급 리니어모터 가동자를 금형센터에 장착하였다. 적용된 리니어모터는 4set로 X축 이송거리 600mm, y축 500mm, Z축 400mm이며 Y축은 2set를 동기제어로 구동하는 방식을 취하고 있다. Z축은 코일부가 고정되고 영구자석부분이 상하방향으로 움직이는 구조를 취하고 있고, Z축과 Y축에는 가이드부에 유압장치를 사용한 브레이크가 적용되어 있어 만약의 사태에 대비하고 있다.

그림 12. 금형센터

그림13. 교체된 리니어모터(Y축)

2.3 공작기계용 리니어모터 드라이브 기술개발
((주)메트로닉스)

2.3.1 시스템 구성

그림 14는 전체 시스템 구성도를 나타낸다. 위치제어기(Position Controller)에서는 위치지령과 궤환(Feedback)된 위치(Position, P)로부터 모터의 속도지령치(Reference Velocity)를 발생시킨다.

속도제어기(Velocity Controller)는 위치제어기의

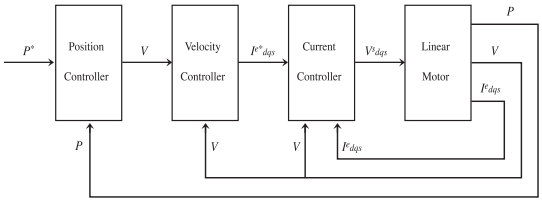


그림 14. 전체시스템 구성도

출력인 속도지령치와 속도(Velocity, V)로부터 모터의 전류지령치(Reference Current)를 발생시킨다. 전류제어기(Current Controller)에서는 위치제어기에서 발생된 전류지령치와 궤환된 속도와 전류(Current)를 이용하여 모터에 인가된 전압지령을 계산하고 PWM(Pulse Width Modulation)을 통하여 모터에 전압(Voltage)을 인가한다.

리니어모터(Linear Motor)는 제어대상시스템으로서 모터에 인가된 전압에 의해 전류(Current)가 발생하고, 전류로부터 추력(Thrust)을 발생시켜 모터의 속도(Velocity, V)와 위치(Position, P)가 변화한다. 모터에서 발생된 실제 전류와 속도 그리고 위치는 센서를 통하여 각종 제어기로 궤환된다.

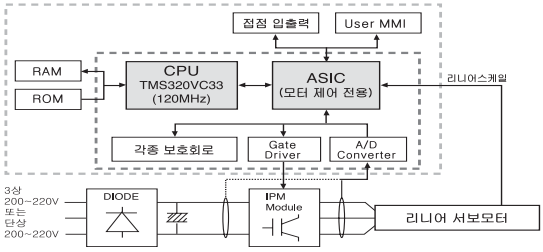


그림 15. 리니어모터 드라이브 블록도

표 2. 리니어모터 드라이브 사양

드라이브 형식		APLD-V3S110
리니어서보모터		Proto-6000-s1
정격	최대모터추력 연속모터추력	15000[N] 6000[N]
	연속출력전류 최대출력전류	50[Arms] 125[Arms]
	최대이송속도	120[m/min]
	입력전원	3상/단상 AC 200 ~ 230[V] +10/-15[%], 50/60[㎐]
	제어방식	3상 정현파 PWM 구동형 전류제어방식
	피드백	Linear Scale(1㎛이하 scale) 및 Hall Sensor
	사용주위온도	0 ~ 45[℃]
	보관주위온도	-20 ~ 65[℃]
	사용/보관,주위습도	90% RH 이하 (결로가 없을것)

2.3.2 리니어모터 드라이브 사양 및 구성

11kW 고출력 리니어모터 드라이브 사양은 표 2와 같다. 또한 리니어모터 드라이브 시스템의 구성을 그림 15에 나타내었다.

2.4 리니어모터 응용 고속 이송계 제어기술개발 (경희대학교)

2.4.1 제어기의 구성

일반적인 시스템의 모델링은 동역학적인 입출력관계의 모델인 전달함수를 관계를 통하여 표현되며 철심형 고추력시스템은 기존의 시제품에서 다음과 같이 구현되었다.

$$\frac{V(s)}{Ea(s)} = \frac{1}{5.072\times10^{-6}s^2+0.5047s+2.2}\ (m/V) \quad (11)$$

2.4.2 이송계의 운전특성

2.4.2.1 신호의 측정 및 처리

리니어모터 이송계의 제어조건별 운전특성을 분석하며 추후에 제반 응답상태에 따른 운전조건을 예측할 수 있는 시스템을 구축하고자 한다(그림 16). 가공방법을 엔드밀, 브러시연삭, 디스크연삭 등으로 설정하였으며AE, 가속도 및 절삭력을 측정하는 것을 목적으로 한다. 가공조건은 이송속도를 65, 110, 185 mm/min으로 설정하고 절삭깊이를 1, 2, 3mm로 선정하여 적용시켰다. 센서를 부착하여 취득한 신호를 RMS처리하였다.

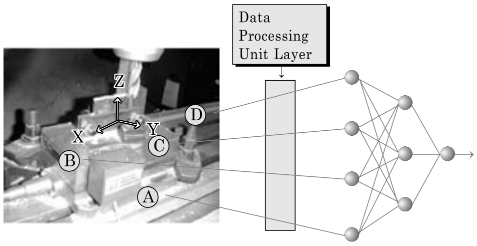


그림16. End milling data processing scheme

음향방출(AE) 신호의 경우 절삭깊이의 증가에 따라 전반적으로 신호의 수준이 증가되는 것으로 나타났으나 이송속도 기준으로 비교하면 속도가 증가함에 따라 빠른 가공으로 인하여 신호의 수준이 감소하는 것으로 나타났다(그림 17(a)). 절삭저항의 경우에는 좌표방향과 관계없이 절삭깊이와 이송속도의

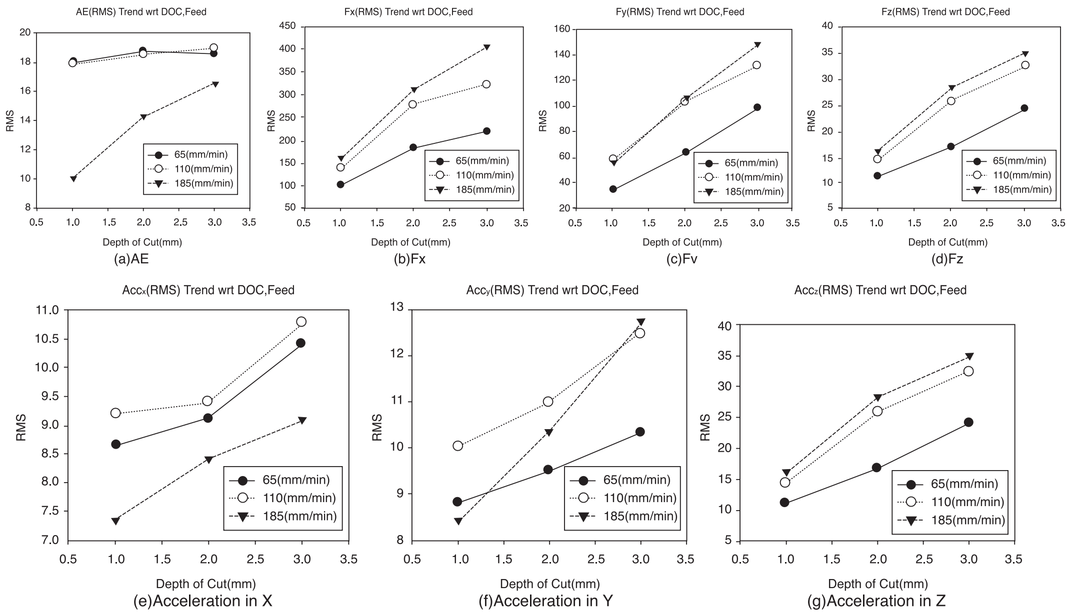


그림 17. Measured Data Trend

증가에 따라 신호치가 전반적으로 증가하는 것으로 나타났다(그림 17(b)~(d)). 가속도 신호를 RMS처리한 경우 일반적으로 절삭깊이에 민감하여 절삭깊이가 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났다 (그림 17(e)~(g)).

2.5 철심형 리니어모터 응용 고속이송계의 정밀도 향상기술과 고속화 실현기술 개발(KIMM)

2.5.1 철심형 리니어모터 시제품의 성능평가

2.5.1.1 모터 특성

모터 자체의 특성으로는 디텐트력(Detent force)과 역기전력(Back- EMF)을 측정하였다. 그림 18에 디텐트력 측정결과와 여현함수로 근사한 결과를 보였다. 디텐트력을 곡선 맞춤한 결과를 보면 디텐트력은 3.2kgf이고 주기는 11.32mm(=5.66×2)이다. 디텐트력 주기 계산은 극피치×2/(슬롯수와 극수의 최소 공배수)로 구할 수 있으며, 고정자 극피치가 30mm, 슬롯수가 6, 극수가 2 임을 고려하면, 디텐트력의 주기가 10mm가 나와야 하는데 이보다는 약간 큰 값이 측정되었다. 디텐트력 3.2kgf(=31.4N)는 정격추력 6,000 N에 비해 0.5% 정도이므로 통상

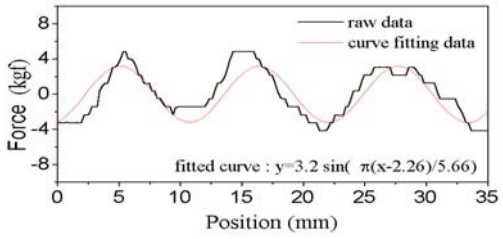


그림 18. 시제품 3호기의 디텐트력 측정 결과

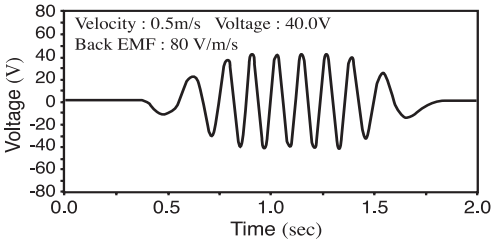


그림 19. 시제품 3호기의 역기전력 측정 결과

1% 미만인 타사의 제품에 비해 뒤떨어지지 않는 값이라고 보여진다.

3호기의 역기전력(Back-EMF)를 측정한 결과를 그림 19에 보였다. 측정 방법은 또 다른 무철심형 리니어모터 이송계에 3호기의 이동자를 고정하여 정속도 0.5 m/s로 이송시키며 이 때 3상중 2개 단자간의 유도전압을 측정하는 방식이다. 이렇게 계산된 역기전력 상수는 80V/m/s로서 Fanuc 15,000C 모터의 역기전력이 107.8V/m/s인 것을 고려하면 다소 작은 값이다.

2.5.1.2 정밀도 특성

개발된 시제품 3호기로의 정밀도 특성을 평가하기 위하여 레이저 간섭계(HP 5529A)로 분해능과 위치결정 정도를 측정하였다. 그림 20에 분해능 평가 결과를 보였다. 3호기의 위치검출기로 1 분해능의 리니어스케일을 장착하였는데 그림 20에서 보면 리니어모터 이송계의 분해능이 리니어스케일의 최소분해능인 1㎛까지 무난하게 나오는 것을 볼 수 있다.

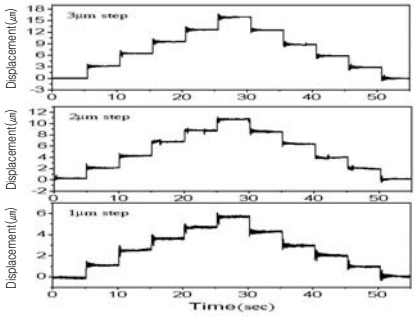


그림 20. 분해능 평가결과

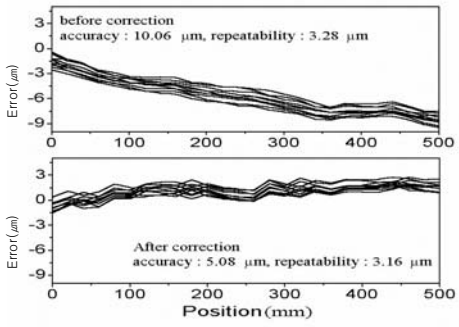


그림 21. 위치결정정도 평가결과

그림 21에 위치결정 정도 실험결과를 보였다. 공작기계 NC 컨트롤러에서 사용되고 있는 보정 방법인 피치오차 보정을 수행한 결과 보정 전에 10의 정밀도 오차를 보이던 것이 보정 후에 5로 감소하였다. 대개의 공작기계가 ±3 내외의 오차를 보이는 것을 감안하면 정밀도 오차는 합격점을 줄 수 있다. 정밀도는 보정이 가능하지만 반복능은 보정할 수 없다는 측면에서 반복능이 중요한데 대략 3의 반복능을 보이는 것은 개선이 필요한 부분이다. 이 반복능은 LM 가이드 등의 기계요소 가공과 조립 및 제어계에 모두

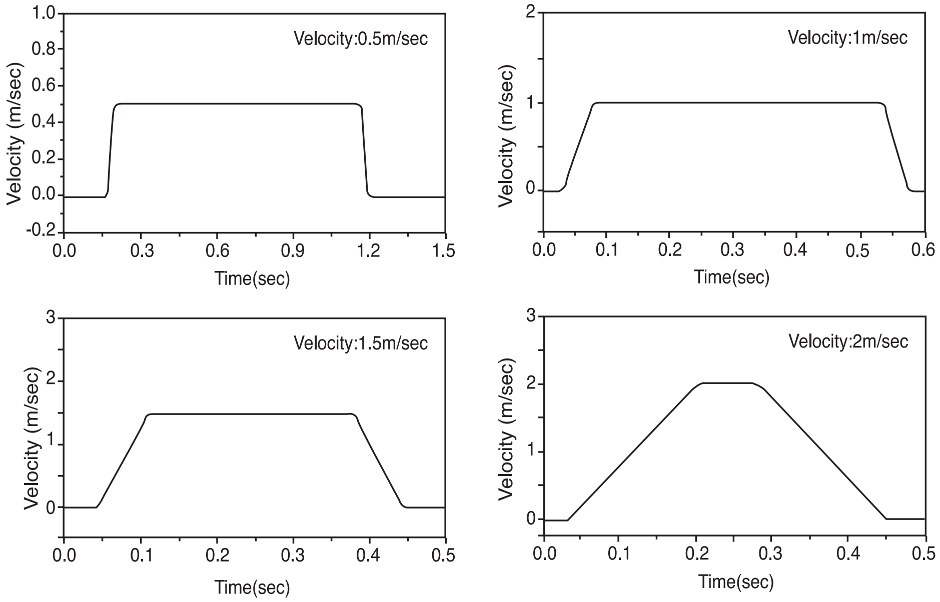


그림 22. 3호기 이송계의 정속 특성 측정 결과

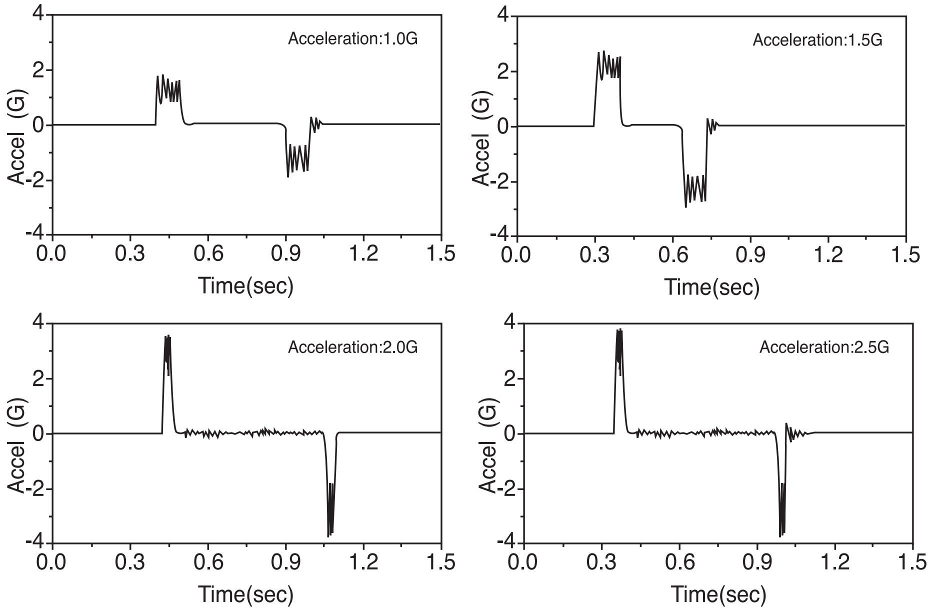


그림 23. 3호기 이송계의 가속도 측정 결과

영향을 받으므로 종합적으로 반복능 향상 대책이 필요하다.

2.5.1.3 운동 특성

3호기로 구성된 이송계의 운동 특성을 파악하기 위하여 정속 특성과 가속도를 측정하였다. 그림 22는 이송계의 정속 특성을 속도별로 측정한 결과이다. 그림에서 보면 정속 구간에서 리플(ripple)이 적어서 정속 특성이 양호한 것으로 판정되었다. 측정결과를 분석하면 속도의 리플이 정속도의 1~2%에 지나지 않아 1단계에서 개발한 1, 2호기의 5%에 비해 개선된 면을 보였다.
그림 23에 가속도 측정결과를 보였는데 그림에서 보면 가속도 2.5G까지 측정되었다. 3호기의 목표 사양이 2.5G이므로 목표사양에 부합한 결과이다.

2.5.1.4 추력 특성

추력 특성은 정강성과 추력상수를 평가하였다. 정강성은 로드셀에 이송자를 대고 로드셀과 이송자의 중간에 고정된 나사를 돌려서 이송자에 변위를 가하면서 이 때의 로드셀이 보인 힘을 측정하는 방식으로 평가한다. 그림 24에 정강성 측정 모습을 보였다.

3번의 측정결과 정강성은 600N/에서 670N/을 보였다. 이러한 범위의 정강성은 양호한 수치로 여겨진다. 그림 25는 추력상수를 측정한 결과이다. 추력상수는 모터의 3상 단자 중 2개 단자에 전류를 공급하고 이 때 발생하는 모터의 추력을 측정하여 추력을 전류로 나눠준 값이다. 그림에서 U,V,W 3상의 2개 단자에 전류를 공급하였을 때 추력 상수는 대략 70 N/A이다.

3. 결 론

1) 기존의 시제품을 설계, 제작, 성능평가 경험을 토대로 6,000[N]급 시제품3호기를 설계, 제작하여 성능평가를 실시하였다. 방열특성을 개선하기 위한 측면 단열판, 제작이 용이하도록 전용 치구와 금형 등을 개선하였고, 고정자의 경우 더욱 양호한 표면상태를 보이게 되었다. 그리고 과년도에 성능이 미비했던 4,000[N]급 시제품2호기의 전기사양을 변경하여 금형센터에 장착하였다. 또한 4,000[N]급 모터를 장착한 유니트를 1대 제작하였다.

고출력 드라이버의 당해년도 개발목표인 리니어모터 드라이버의 제어알고리즘 및 시제품 개발 중에서 제어 알고리즘, 32Bit DSP인 TMS320 VC33을 사용한 컨트롤 회로 및 11kW파워 회로에 대한 개발은 완료되었다.

2) 이송시스템에 사용되는 리니어모터 이송시스템 모델을 토대로 재래식 PID제어기의 인자를 조합하여 가용한 제어이득의 영역을 도식하였다. 실제가공을 수행할 때 공구경로를 산출하는 실가공궤적에 대한 사례조사를 통하여 가공물의 내, 외면 모서리가공을 위한 기준궤적을 도출하였다. 공구의 제원 및 이송계의 특성을 고려한 설계기준으로서 활용이 가능하다.

이송시스템의 운전조건 및 작업결과를 확인하고 예측하기 위하여 일반 엔드밀가공을 재래식 이송계에 적용시켜 이송속도 및 절삭깊이의 가공조건변화에

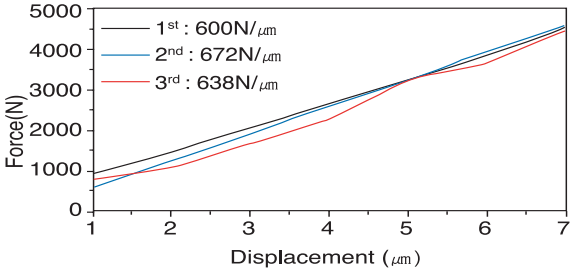


그림 24. 정강성 측정 결과

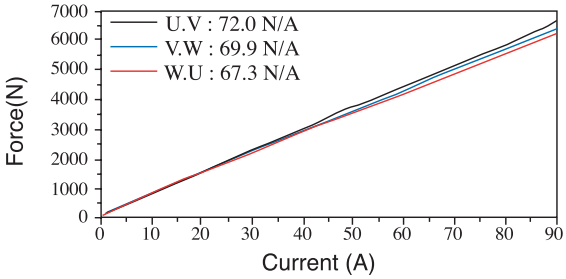


그림 25. 추력상수 측정 결과

대한 결과를 분석하였다. 조건에 따라 일정한 경향을 추출하였으며 리니어 이송시스템에 동일한 가공조건을 적용시켜 비교 분석하였다.

3) 철심형 리니어모터 시제품 3호기로 구성된 단축 이송계의 성능평가를 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 3호기의 디텐트력과 역기전력이 각각 30N, 80V/m/s를 보였으며 디텐트력과 역기전력의 수치는 비교적 만족스러운 값을 보였다.
- 분해능과 위치결정정도의 평가를 수행한 결과 분해능은 리니어스케일 최소 분해능인 1을 보였으며 정밀도는 오차 보정 후 5를 나타냈고 반복능은 3을 보여서 공작기계 이송용으로 적합한 것으로 판정되었다.
- 정속 특성은 2%미만의 안정된 리플을 보였고 가속도는 2.5G로 목표사양에 부합하였다.
- 정강성과 추력상수가 각각 640N/ 및 70 N/A를 보여 양호한 결과를 얻었다.

마지막으로 직선베어링 및 직선안내면의 운동오차 해석법을 제시하고 이를 이용하여 운동특성을 해석하였으며, 등가해석법을 이용한 간접적인 검증실험 결과로부터 운동오차해석의 유용성을 검증하였다. 이로부터 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 레일형상오차 가운데, 베어링 내 유효 볼수에 해당하는 공간주파수 성분과 유효베어링 길이의 1/1.5 이상이 되는 공간주기 성분이 직선베어링의 운동오차에 큰 영향을 미치게 된다.
- 직선베어링의 운동오차는 레일형상오차의 진폭과 선형관계이며, 예압량(베어링 강성)과는 관계없이 일정하게 된다.
- 직선안내면에 있어서 정밀도 평균화 효과를 정량적으로 산출하였다.
- 레일형상오차 가운데 유효베어링 길이의 1/배수 주기의 경우에는 직선, 각운동오차에 거의 영향을 주지 않는다. 또한 2개의 레일에 대해, 유효테이블 길이를 기준으로 1/5이상의 파형 및 두 베어링간의 거리에 대해 정수개인 파형을 모두 제거하면, 직선운동오차에 있어 약 10배 이상의 정밀도 평균화 효과를 얻을 수 있다.
- 동일한 유효테이블 길이의 경우 베어링 수를 증가시킬수록 직선운동오차는 향상된다.

참 고 문 헌

[1] P. Van Den Braembussche, J. Swevers, H. Van Brussel and P. Vanherck, “Accurate Tracking Control of Linear Synchronous Motor Machine Tool Axes”, Mechatronics, Vol. 6, No. 5, pp. 507-521, 1996.

[2] G. Pritschow and W. Philipp, “Research on the Efficiency of Feedforward Controllers in Direct Drives”, Annals of the CIRP, Vol. 41, pp. 411-415, 1992.

[3] E. Favre, L. Cardoletti and M. Jufer, “Permanent -magnet Synchronous Motors: A Comprehensive Approach to Cogging Torque Suppression”, IEEE Trans. Ind. Applic., Vol. 29, pp. 1141-1149, 1993.

[4] H. Le-Huy, R. Perret and R. Feuillet, “ Minimization of Torque Ripple in Brushless DC Motor Drives”, IEEE Trans. Ind. Applic., Vol. 22, pp. 748-755, 1986.

[5] N. Matsui, T. Makino and H. Satoh, “Autocompensation of Torque Ripple of Direct Drive Motor by Torque Observer”, IEEE Trans. Ind. Applic., Vol. 29, No. 1, pp. 187-194, 1993.

[6] 김영희, “자기 및 자성 재료”, 반도출판사, 1997.7

[7] 周壽增, “희토류 영구자석 재료와 그 응용”,울산대학교 출판부, 1999.5

[8] Syed A. Nasar, “Linear Electric Motors: Theory, Design, and Practical Applications”, Prentice-Hall, Inc., 1987

[9] Amitava Basak, “Permanent-Magnet DC Linear Motors”, Clarendon Press, 1996

[10] S. A. Nasar and I. Boldea, 1987, Linear

Electric Motors: Theory, Design and Practical Applications, Prentice-Hall, Inc.
[11] Fawwaz T. Ulaby, "전자기학", 교보문고, 1998.2
[12] Katsuhiko Ogata, Modern control Engineering 2nd Edition, Prentice-Hall, pp.597-605, 1990
[13] 淸水茂夫, 直動ボールガイドシステムの精度平均化效果に關する硏究, 日本精密工學會誌, Vol. 58, No. 11, p.1873, 1992.
[14] 淸水茂夫, 直動ガイドの剛性解析, 日本精密工學會誌, Vol. 64, No. 11, p.1573, 1998.
[15] 박천홍 외, FEM을 이용한 유정압테이블의 운동정밀도 해석 (1. 단면지지형 테이블의 해석 및 실험적 검증), 한국정밀공학회, Vol.17, No.12, p.137, 2000
[16] 삼익공업주식회사, 삼익 LM 가이드의 특성과 사용방법, LM SYSTEM 기술자료 9502
[17] 윤덕용, "공간전압벡터 PWM 기법을 이용한 영구자석형 모터의 속도제어", 단국대전기공학과, 대학원 박사학위청구논문, 1995.
[18] F.Blaschke. "The principle of field orientation as applied to the new transvector closed loop control system for rotation field machines", Siemens Review, Vol. 34, pp. 217 ~ 221, 1972.
[19] D. M. Alter, "Stability of Turning Process with Actively Controlled Linear Motor Feed Drives", Journal of Engineering for Industry, Vol. 116, August, pp 298-307, 1994.