

## 철심형 리니어모터 이송계의 추종성 향상에 관한 연구

송창규\*(한국기계연구원 자동화연구부), 황주호(한국기계연구원 자동화연구부),  
박천홍(한국기계연구원 자동화연구부), 김경호(KAIST), 정재한(삼익공업)

### Study for Improvement of Tracking Accuracy of the Feeding System with Iron Core Type Linear DC Motor

Chang Kyu Song(KIMM), Joo Ho Hwang(KIMM), Chun Hong Park(KIMM),  
Kyung Ho Kim(KAIST), Jae Han Jung(Samick Co.)

#### ABSTRACT

The requirements for higher productivity call for high speed of the machine tool axes. Iron core type linear DC motor is growly accepted for a viable candidate of the high speed machine tool feed unit LDM, however, has inherent disturbance force components: cogging and force ripple. These disturbance force directly affects the carriage tracking accuracy and must be eliminated or reduced. Reducing motor ripple, this paper adapted the feedforward compensation method. Experiments carried out on the linear motor test setup show that this compensation method is usable in order to reduce the motor ripple.

**Key Words** : Linear Motor(리니어 모터), Iron Core(철심), Feeding System(이송계), Tracking Error(추적 오차), Feedforward(피드포워드), Cogging(코깅), Force Ripple(추력 리플)

#### 1. 서론

현대 생산기술의 특징은 고생산성의 추구하고 대상 가공품 형상의 복잡성에 있다고 할 수 있다. CAD로 설계된 복잡한 형상을 가공하며 고생산성을 달성하기 위해서는 생산 기계인 공작기계 각 축이 고속화되면서 동시에 높은 정도의 운동 정밀도를 갖는 것이 필연적이다. 형상의 복잡성이 증가한다는 것은 급격한 코너부가 많다는 것을 의미하며 이런 코너부에서 가공 정밀도를 유지하기 위해 전통적으로 사용했던 방식인 감속 가공은 생산성을 저해한다. 특히 와이어 방전가공기와 같은 고에너지 빔 가공기의 경우에는 코너에서의 감속이 overburning을 일으킬 우려가 있다. 따라서 고속가공기는 궤적을 따라 가공할 때 고속을 유지하면서 가공을 지속하여야 하므로 공작기계의 각 축이 공구 궤적에 대해 추적 오차를 갖지 않는 것이 중요하다. 또한 고속 가공기를 구매하는 많은 사용자들은 정삭 공정을 없애고 한번의 가공으로 요구되는 형상을 깎아내어 생산성을 높이는 경향이 있는데 이러한 가공에서 공작기계 이송

축의 요구 정밀도는 전통적인 공작기계 축의 설계와 전통적인 제어 기법으로는 도달할 수 없는 정도이다.

고속 가공기의 이송계를 구성하는 기존의 방법은 회전모터와 볼스크류로 이루어지는 간접적 드라이브 방식이지만 속도와 가속도 및 정밀도에서 제한적이다. 반면 최근의 각종 국제 공작기계전시회에서 선보이고 있는 리니어모터에 사용한 직접구동 방식의 공작기계 축은 간접적 드라이브 방식에 비해 다음과 같은 장점을 갖고 있기 때문에 그 수요가 점증하고 있다<sup>[1]</sup>.

- 백래쉬가 없고 마찰이 작다.
- 가속도와 속도에 기계적 제한이 없다 : 속도는 엔코더의 밴드폭이나 전원 회로에 의해서만 제한된다.
- 기계적으로 간단하고 그로 인해 높은 신뢰성과 높은 프레임 강성을 보인다.

본 논문은 리니어 DC 모터(LDM)로 구성된 이송계에서 추적오차를 줄여 그 추종성을 향상시키는 방법에 대해 논한다. LDM이 갖는 외란적 성격의 모터

리플의 특성을 파악하고 피드포워드 제어에 의해 리플의 영향을 감소시킬 수 있음을 보인다. 이러한 제어 방식의 유용성을 검증하기 위하여 실험장치를 제작하고 실험결과를 제시한다.

## 2. 철심형 리니어 모터 이송계

### 2.1 리니어 모터 이송계의 제작

추종성 향상을 위한 실험을 위해 Fig. 1과 같은 리니어DC모터로 이송계를 설계 제작하였다. 2축으로 구성되었지만 실험은 보다 작은 축인 y축을 대상으로 실험하였다 전체적인 구성은 Normac社의 철심형 리니어모터와 THK社의 LM 가이드 및 Glentek社의 모터 앰프(SMA8115)로 구성하였고 리니어스케일은 분해능 1 $\mu$ m인 RSF社의 MSA 6706을 채택하였다 실험대상인 y축 리니어모터(BLH-2)는 공작기계 이송계에 많이 사용되는 철심형 리니어 모터로 철심에 삼상의 권선이 감겨있고, 추력을 높이기 위하여 두개의 이동자가 결합되어 있다. 최대추력은 2,600 N이고 연속추력은 1,300 N이다



Fig 1. The Feed Unit with Linear DC Motor

사용된 제어기는 MEI社의 PC 내장형 DSP 콘트롤러를 사용하였으며 P-I-D 제어를 수행한다

### 2.2 추종성 향상을 위한 제어기 설계

#### 2.2.1 코깅과 추력리플

리니어 DC 모터는 철심형과 무철심형의 두 종류가 있다. 철심에 코일을 감은 철심형이 무철심형에 비해 추력이 크기 때문에 공작기계에서는 주로 철심형이 사용된다. 하지만 철심형은 추력이 큰 대신에 이송계에 대해 외란이라 할수 있는 모터 리플이 발생하여 정밀도가 떨어지는 단점이 있다. 모터 리플에는 코깅(cogging)과 추력 리플(force ripple)의 2가지가 있다. 코깅은 자기적인 외란이라 할 수 있고 추력

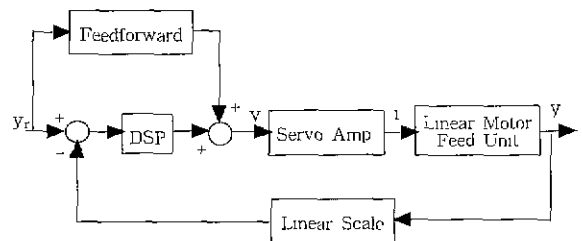
리플은 전자기적 영향에 의한 외란이라고 할 수 있다. 코깅은 배열된 영구자석에 대해 자성체인 철심의 위치가 자기적으로 안정된 상태를 찾아가려는 경향에 의해 나타난다. 이것은 모터 코일의 자석에 대한 상대적인 위치에만 관계가 있고 모터 전류와는 독립적이다. 추력리플은 코일에 전류를 흘렸을 때 코일에 발생하는 자기장이 영구자석과 결합하여 나타내는 힘으로서 무철심형에도 존재하는 힘이다. 추력 리플은 모터 전류가 영이 아닌 때에만 발생하고 이것의 절대값은 요구되는 힘과 이송자의 상대적 위치에만 의존한다.

#### 2.2.2 피드포워드 제어

이송계의 제어에 일반적으로 사용되는 PID 제어 방식은 위치결정정도는 매우 좋지만 입력되는 명령 신호가 동적으로 빠르게 변화하면 추적 오차를 발생하여 추종성 정밀도가 떨어진다. 철심형 리니어 모터의 경우에 코깅과 추력리플이 외란으로 작용하면서 입력신호를 동적으로 변화시키므로 추종성 오차를 야기하게 되어 있다. 이렇게 급격히 변하는 명령으로 인해 빚어지는 동적 오차는 피드포워드 제어방식을 적용하면 전적으로 혹은 부분적으로 제거될 수 있다고 알려져 있다<sup>[2]</sup>. 모터 리플에 대한 일반적인 보상방법들<sup>[3-5]</sup>은 역기전력(back emf)을 추정 혹은 측정하여 모터 전류를 변화시키는 방법을 주로 채택하였는데 반해 피드포워드 방식을 사용하면 하드웨어를 변경하지 않고도 보상이 가능하여 간편하다는 이점이 있다.

#### 2.2.3 시스템 모델링

피드포워드 제어를 적용하기 위한 제어계의 블록 선도는 Fig. 2와 같다.



$y_r$  : reference position  
 $y$  : output position  
 $v$  : voltage  
 $i$  : motor current

Fig. 2 Block Diagram for Feedforward Control System

블록 선도상의 피드포워드 항은 모터 리플의 모델을 구하여 그 역수를 넣었다. 모터 리플의 모델은

다음 절에서 실험적으로 구한다.

### 3. 추종성 향상 실험

#### 3.1 코깅과 추력리플의 실험적 모델링

코깅과 추력리플을 실험적으로 구하는 방법은 Fig 3에 보인 바와 같이 로드셀과 나사장치로 구성된 추력 측정장치로 일정 지점에서의 힘을 측정한다. 힘을 측정하는 방법외에 레이저 간섭계(HP 5529)로 가속도를 측정하여 가속도의 리플에 질량을 곱하여 코깅과 추력리플의 합을 구할 수 있다.

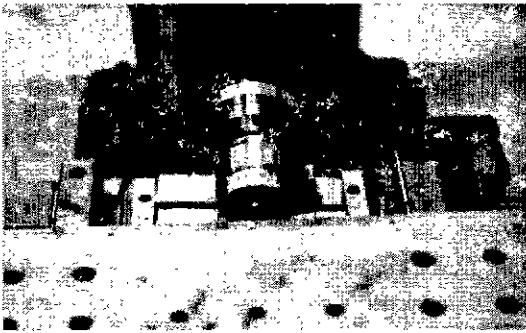


Fig. 3 Force Measuring Equipment

실험적으로 측정된 코깅과 추력리플의 합력으로부터 적합한 모터 리플 모델을 구한다. 영구자석이 일정간격으로 배열되어 있어 주기적이므로 리플 모델은 하모닉 성분으로 추정하였다.

$$y = A \sin\left(\pi \frac{x - x_c}{w}\right) \quad \cdot (1)$$

(1)식과 같이 모델을 추정하고 비선형 최소자승 방법으로 회귀분석한 결과  $A=1.35$ ,  $X_c = -16$ ,  $w=22.53$ 을 얻었다

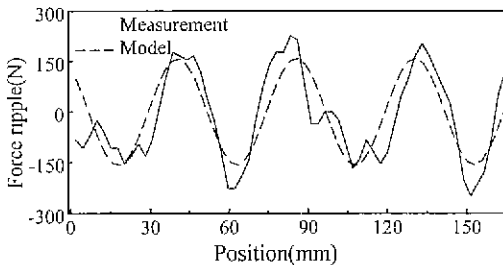


Fig 4 Force Ripple : Measurements and Model

Fig. 4에 리플의 측정치와 추정된 모델을 보였다. 측정치를 보면 리플값은 300 N으로 최대추력의 11%의 큰 값을 알 수 있다.

#### 3.2 추적 오차의 실험결과

앞에서 구한 리플모델의 역수로 피드포워드 필터를 정하여 서보 앰프에 그에 해당하는 전압값을 부가해서 이송계 제어 실험을 한 결과 리플이 줄어들었음을 확인할 수 있었다.

### 4. 결론

고생산성을 확보하기 위한 노력의 일환으로 고속 가공기의 이송축에 급속하게 채택하기 시작한 철심형 리니어 DC 모터는 철심으로 인해 코깅과 추력 리플이 발생한다. 이 모터 리플은 이송 테이블의 동특성에 직접적으로 영향을 미치므로 기급적 감소시켜야 한다. 본 연구에서는 철심형 리니어 DC 모터 이송계를 제작하여 실험적으로 구한 모터 리플 모델로부터 피드포워드 필터를 제어기에 부가하여 이송계의 제어를 실행한 결과 모터 리플이 감소하는 결과를 얻을 수 있었다.

### 참고문헌

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. Feullet, "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.