

# 리니어모터 고속이송계 응용 디스크 연삭가공시스템에 관한 연구

유송민\*

Disk grinding process with linear motor feed system

Yoo Song Min\*

## Abstract

From linear motor feed system model, two axis control rules have been applied. As an application process, a flexible disk grinding system process has been also introduced that utilized varying disk orientation with respect to workpiece along with the applied feed speed. A known process model methodologies has been used to formulate processed surface profiles. Various process conditions including cutting speed, maximum feed speed and orientation angles could applied to observe process results sensitivities. Even though continuous and constant feed speed has been applied to the process, the results from the trapezoidal input velocity profiles would be observed and compared.

**Key Words :** Linear motor(리니어모터), Disk grinding process(디스크 연삭 공정), Process control(공정제어)

## 1. 서론

변화하는 생산시스템에 부합하기 위하여 고정도, 고속화, 고효율화 되도록 요구되고 있는 가공시스템을 위하여 새로운 개념의 고속가공이 가능한 지능형 머시닝센터가 도입되고 있다. 새로운 기능을 부가하기 위하여 개선된 제반 기술이 요구되고 있으며 특히 고속가공조건을 충족시키기 위하여 주축 및 이송계의 고속화가 필수적으로 달성되어야 하는데 이를 위하여 재래식 이송계의 기계적인 장애요소

를 극복할 수 있는 리니어모터가 도입되고 있는 추세이다.

일반적으로 회전형태의 모터를 길게 펼쳐 놓은 구조를 나타내는 리니어모터는 자기부상열차에서 사용되는 것과 유사한 형식을 나타낸다. 이러한 리니어모터를 이용한 이송계는 공작기계에서의 각종 장착물이 장착된 운동부의 이송을 담당하게 된다. 리니어모터를 구동함에 있어서 볼스크류(ball screw)와는 달리 기계적인 요소가 배제되므로 여러 가지의 특성면에서 차이가 크다. 대표적인 특징으로 동력전달계에서 나타나는 뒤틀림이나 백래쉬가 없

\* 주저자, 경희대학교 기계공학과 (smyoo@khu.ac.kr)  
주소: 449-701 경기도 용인시 기흥읍 서천리 1

어져 강성이 크게 향상되며 결과적으로 고속가공시에 정밀도의 향상을 기대할 수 있게 된다. 특히 분당 30 m/min이상의 고정도 가공이 가능해야 되는 고속가공기계의 경우에는 볼스크류를 사용하는 이송계의 경우 백래쉬, 발열, 탄성변형 및 낮은 강성으로 인하여 제어성이 저하되므로 리니어모터를 사용한 직접적인 슬라이드 구동을 사용하게 된다.

이송계의 제어기법으로서 재래식 이송계형태인 회전운동형 서보모터시스템에는 재래식 PID제어, 비선형제어 및 feedforward 제어기법 등 다양한 방법에 대한 특징이 비교되었다[1].

리니어모터 제어계를 구성하기 위한 시스템모델링으로서 기자력(magnetomotive force)과 역기전력(back electromotive force)을 이용한 모델이 제기되어 재래식 제어기법에 따른 각종 성능평가가 시도되었으며[2] Lagrange법을 이용한 모델이 개발되어 동작기계의 이송구동계에 적용되었다[3].

리니어모터를 제어하기 위하여 재래식 PID기법도 시도되어 각각의 이득을 조정하기 위한 성능평가가 검토되기도 하였으며 외란(force disturbance)을 보상하는 feedforward 제어기법도 시도되었다[4]. 밀링가공에 MIMO  $H_\infty$  제어를 사용하여 엔드밀가공 중에 절삭력에 의한 추종오차를 감소시켰다[5]. 모델링이 어려운 비선형요소를 신경망을 이용한 학습법을 이용하여 제어기에 적용시킨 결과 추종오차를 상당히 감소시켰다.

이러한 리니어모터의 비선형적 요소로 마찰, cogging 및 추력리플(thrust ripple) 또는 토크리플(torque ripple)현상 등의 장애요소가 있으며 이로 인한 성능저하를 개선하기 위한 노력이 다양하게 시도되었다.

본 연구에서는 개발 중인 리니어모터 및 모터제어기를 토대로 이에 적용시킬 수 있는 가공시스템을 도입하고 이와 접목시킬 수 있는 타당성을 검토한다.

## 2. 리니어모터 이송 가공공정

### 2.1 이송 시스템모델링

리니어모터 이송시스템은 각종 실험을 통하여 계산되었으며 주요변수인 전압과 속도간 시스템의 동력학적인 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{V(s)}{E_a(s)} = \frac{1}{5.072 \times 10^{-6} s^2 + 0.5047 s + 2.2} \quad (m/V)$$

### 2.2 가공 공정모델링

유연성디스크 연삭가공은 공구와 공작물이 이루는 경사각의 변화에 따라 가공이 진행되어 최종적인 가공물의 형상이 결정된다(Fig. 1). 가공공정은 일반적으로 용접비드 및 가공잔류물과 같이 피절삭부의 두께가 얇은 경우 2차원 모델로 해석이 가능하다.

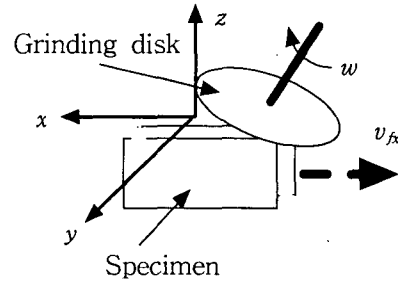


Fig. 1. Disk grinding process

현장에서 수작업으로 진행되는 작업의 형태는 Fig. 2(a)에서와 같이 디스크경사각을 일정하게 유지시킨 채 동일한 방향으로 진행시키는 작업에서부터 Fig. 2(c)와 같이 디스크경사각을 변화시키면서 디스크 중심의 궤적이 임의의 방향으로 진행되는 복잡한 작업으로 다양하다. 후자의 경우에는 디스크 경사각, 이송속도 및 공작물과 공구간에 상대적인 거리의 변화를 모두 고려하여야 한다. 디스크 경사각  $\alpha_0$ 의 변화추이는 작업 중에 인자들을 고려하여 다음과 같이 정의된다 (Fig. 3).

$$\dot{\alpha} = -\frac{v_{fx} \sin \alpha}{R_{sm}} + \frac{1}{area R_{sm}} [k_1 \omega \mu K_s (\alpha_0 - \alpha) \frac{R_s}{R_{sm}} - k_2]$$

상기식에서  $area$ 는 (접촉길이  $\times$  공작물폭)  $A \times b$ 이며  $R_{sm}$ 과 같이 기하학적인 가공 단계에 따라 다르게 정의된다.

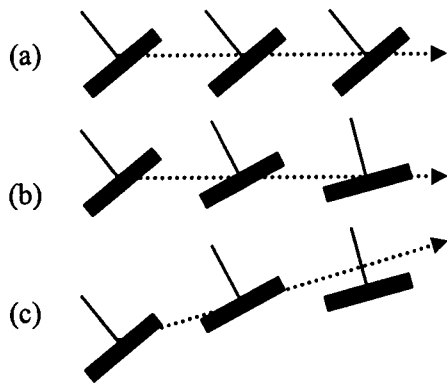


Fig. 2. Disk operation

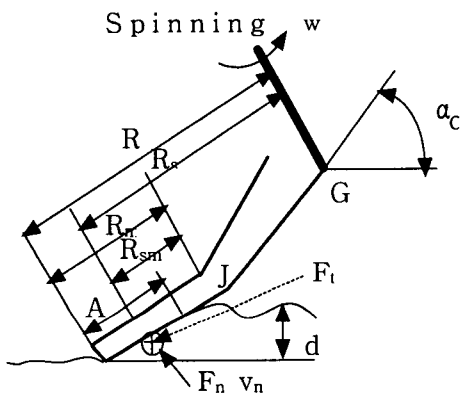


Fig. 3. Process schematics

이러한 가공단계는 초기(Fig. 4 에서 디스크위치 1 → 디스크위치 2), 중기(디스크위치 2 → 디스크위치 3) 및 말기(디스크위치 3 → 디스크위치 4)의 3 단계로 구분된다.

가공과정 중에서 경사각을 변화시키고자 하는 것은 가공작업의 효율화를 기하기 위하여 더욱 효과적으로 가공작업을 제어할 수 있는 가능성을 부여하는 것을 의미하며 이러한 효과는 디스크의 회전중심에 대하여 디스크 경사각을 변화시켜 공작물에 대한 경사각을 임의로 변경시킴으로써 얻어질 수 있다.

가공과정 중 디스크면에 작용하는 속도성분은 공작물의 이송, 디스크각도의 변화 및 가공작업에 의한 디스크의 변형에 따른 3가지 요소들에 의하여 결정된다. 이러한 속도의 평형관계식에 의하여 다음 기본식을 유도할 수 있다 (Fig. 5).

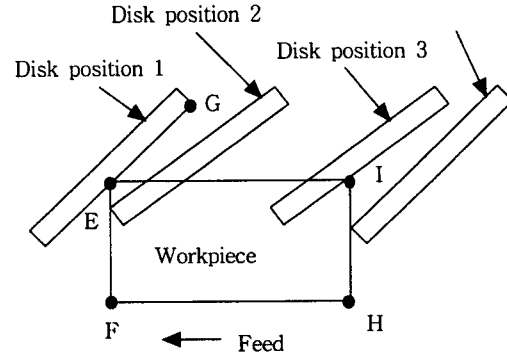


Fig. 4. Process stages

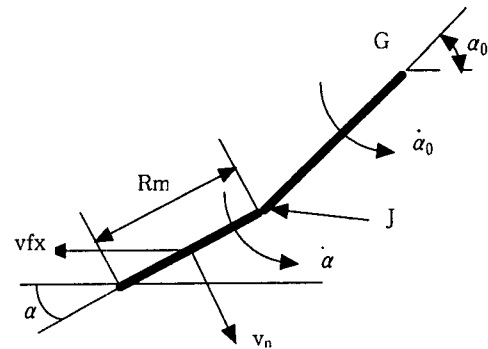


Fig. 5. Velocity balance

$$v_n = \dot{\alpha} R_{sm} + \dot{\alpha}_0 (R_s - R_{sm}) \cos(\alpha_0 - \alpha) + v_{fx} \sin \alpha$$

상기의 관계를 고려한 새로운 공정의 모델은 다음과 같다.

$$\dot{\alpha} = -\frac{v_{fx} \sin \alpha}{R_{sm}} - \frac{\dot{\alpha}_0 (R_s - R_{sm}) \cos(\alpha_0 - \alpha)}{R_{sm}} + \frac{1}{area R_{sm}} \times [k_1 \omega \mu K_s (\alpha_0 - \alpha) \frac{R_s}{R_{sm}} - k_2]$$

상기식들에서  $area$ ,  $R_{sm}$  및  $R_s$ 의 값은 3단계별로 정의되는 기하학적인 관계를 이용하여 구할 수 있으나 디스크경사각의 변화 및 이동작업으로 인하여 공작물표면과 수평방향으로 평행하게 이동하던 디스크의 변형중심 (Fig. 3

에서  $J$ 점)이 임의의 방향으로도 변화하게 되어 이를 보상하는 새로운 기하학적인 관계를 정립시켜야 할 필요성이 제기되었다. Fig. 6은 이론적인 디스크 변형경향을 나타낸 것이다.

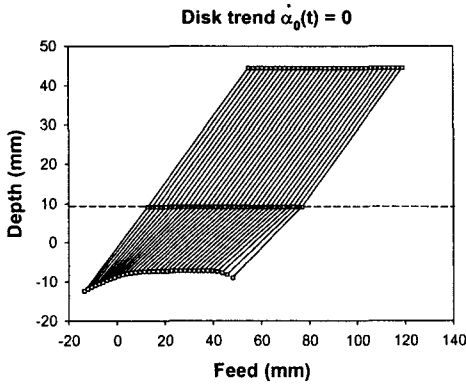


Fig. 6. Simulated disk movement

### 3. 제어기

#### 3.1 제어기

이송계 제어시스템은 본 연구에서는 시스템의 특성이 파악된 상태에서 제어기의 성능을 비교하기 위하여 일반적으로 활용되는 PID제어기의 개념을 활용한다. 본 시스템에서 사용된 PID제어기의 제어이득은 신경망시스템을 적용시켜 추출된 최적의 값을 기준으로 활용한다(Fig. 7). Fig 8은 제어기 및 이송시스템에 적용시킬 기준속도 궤적이다.

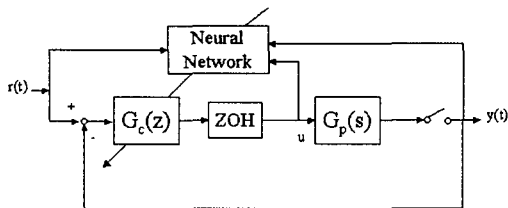


Fig. 7. Controller block diagram

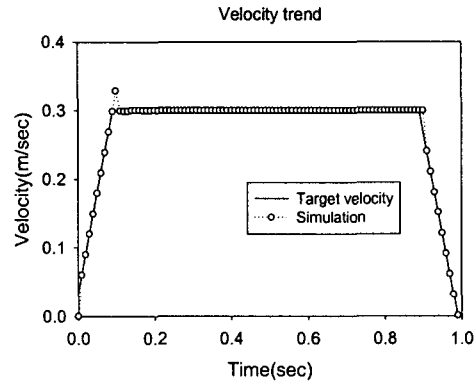


Fig. 8. Velocity reference trajectory

등속도적용에 대한 궤적은 Fig 6에서와 같은 디스크 모양변형 경향으로 확인할 수 있으며 실제 이송궤적 변화에 따른 형상변화의 확인이 가능할 것이다.

사다리꼴의 속도궤적을 추종하는 기준궤적에 대한 위치 오차를 산정하기 위하여 Figs 9 및 10과 같은 위치궤적 및 오차경향을 참조하여 RMS오차를 구할 수 있다.

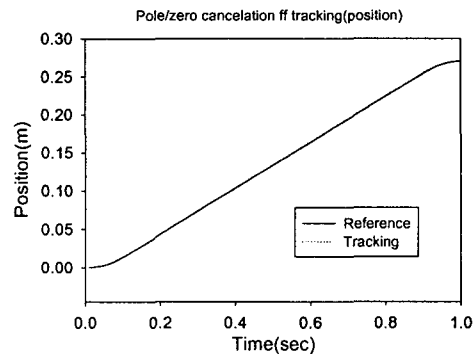


Fig. 9. Position tracking

리니어 모터 이송시스템에 장착된 가공오차를 산정하기 위하여 기준궤적에 대한 최종적인 가공궤적을 Fig. 11에서와 같이 확인할 수 있다. 기준궤적은 이송계의 동력학적 특성과 가공공정의 특성으로 인하여 실가공시 오차를 유발시킨다.

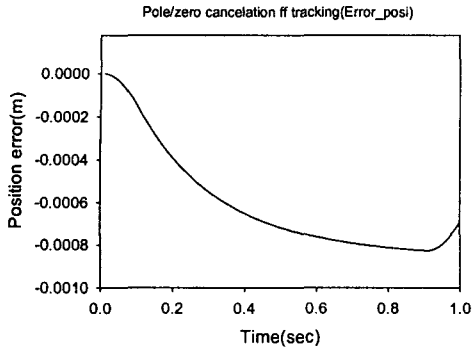


Fig. 10. Position error

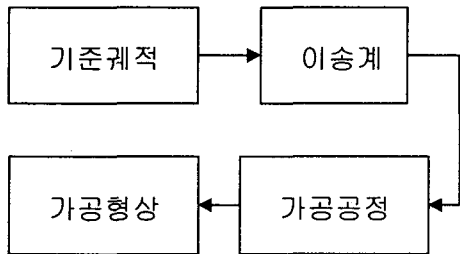


Fig. 11. System schematics

#### 4. 결 론

리니어모터를 이용한 이송시스템의 응용특성을 확인하기 위하여 선정된 가공시스템의 가공특성을 분석하기 위한 각 시스템 군이 제시되었다.

이송계의 모델링은 기존에 선정된 관계식을 설정하여 적용시킨다.

밀링등의 재래식공구를 사용하는 평면가공시스템이 접촉 시키기에 편리하나 이송시스템과 연계하여 동력학적인 특

성이 고려되기 어렵기 때문에 동력학적인 특성이 확인된 유연성디스크 연삭가공시스템이 도입되었다.

제시된 기준궤적은 CNC가공 등에서 일반적으로 사용되는 속도제어 특성궤적으로 2축가공에 응용될 수 있다. 도입될 속도제어특성은 초기부분에 가변속도구간의 특성이 확인될 것이다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Renton, D. and Elbestawi, M.A., 2000, "High Speed Servo Control of Multi-Axis Machine Tools", *Int'l J. of Mach Tool & Manufact.*, Vol. 40, pp. 539~559,
- (2) Ha, K.S., Im, T.B., Chung, J.K. and Yang, J.M., 1999, "High Speed Position Control System with Linear Brushless DC Motor", *Proc. of ICEE*, Vol. 2, pp. 259~262
- (3) Kumin, L., Stumberger, G., Dolinar, D. and Jezernik, K., 1999, "Modeling and Control Design of a Linear Induction Motor", *Proc. of IEEE, ISIE*, Vol., 2, pp. 963~967
- (4) Basie, E., Benzi, F. and Buja, G., 1999, "Force Disturbance Compensation for an A.C. Brushless Linear Motor", *Proc. of IEEE ISIE*, Vol. 3, pp 1350~1354
- (5) Choi, C., Tsao, T.C. and Matsubara, A., 1999, "Control of Linear Motor Machine Tool Feed Drivers for End Milling" Robust MIMO Approach", *Proc of ACC*, Vol. 5, pp. 3723~3727