

리니어모터 이송 유연성 연삭가공 시스템에 관한 연구

유송민*, 최명진+, 신관수**

A study on the linear motor feed flexible disk grinding system

Yoo Song Min*, Myung Jin Choi+, Kwan Soo shin**

Abstract

A flexible disk grinding system process has been introduced that utilized varying disk orientation with respect to workpiece along with the applied feed speed. Various process conditions including cutting speed, maximum feed speed and orientation angles could applied to observe process outcomes. 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. Based on the control strategies including neural network methodologies, several output results were compared to find the optimum process condition. Two axis control results were displayed showing better performance with higher trajectory error for larger training epoch.

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

1. 서론

고정도, 고속화, 고효율화 되도록 요구되고 있는 가공시스템을 위하여 새로운 개념의 고속가공이 가능한 지능형 머시닝센터가 도입되고 있는데 이는 산업현장에 새로운 방식이다. 추가적인 기능을 부가하기 위하여 개선된 제반기술이 요구되고 있으며 특히 고속가공조건을 충족시키기 위하여 주축 및 이송계의 고속화가 필수적으로 달성되어야 하는데 이를 위하여 재래식 이송계의 기계적인 장애요

를 극복할 수 있는 리니어모터가 도입되고 있는 추세이다.

일반적인 형태인 회전형 모터를 길게 펼쳐 놓은 구조를 나타내는 리니어모터는 자기부상열차에서 사용되는 것과 유사한 형식을 나타낸다. 회전모터에 비하여 여러 가지 장점을 지닌 선형 리니어모터를 이용한 이송계는 공작기계에서의 각종 장작물이 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 휨현상이나 백래쉬가 없어서 강성이

* 주저자, 경희대학교 기계공학과 (smyoo@khu.ac.kr)

주소: 449-701 경기도 용인시 기흥읍 서천리 1

+ 경희대학교 기계공학과(mjchoi@khu.ac.kr)

++ 인천대학 기계공학과

크게 향상되며 결과적으로 고속가공시에 정밀도의 향상을 기대할 수 있게 된다. 분당 30 m/min이상의 고정도가 공이 가능해야 되는 고속가공기기의 경우 볼스크류를 사용하는 이송계에 대하여 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_∞ 제어를 사용하여 엔드밀링가공 중에 질삭력에 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 유연성 디스크 연삭가공 시스템에 대하여 여러 가지 제어방법을 적용시키고 그결과의 타당성을 검토하고자 한다.

2. 리니어모터 이송 가공공정

2.1 이송 시스템모델링

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

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

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 피질삭부의 두께가 얇은 경우 2차원 모델로 해석이 가능하다.

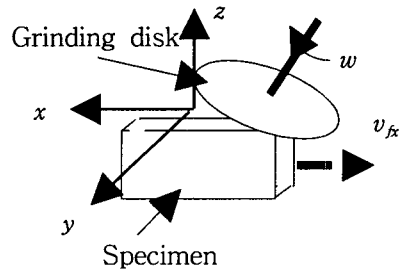


Fig. 1. Disk grinding process

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 α_0 의 변화추이는 작업 중에 인자들을 고려하여 다음과 같이 정의된다 (Fig. 3).

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

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

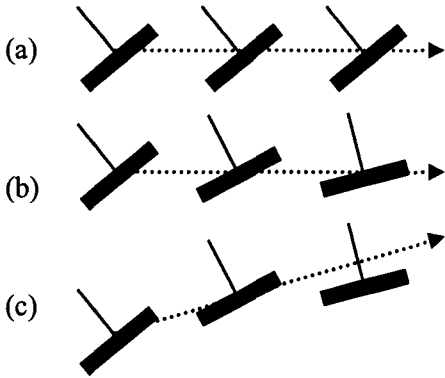


Fig. 2. Disk operation

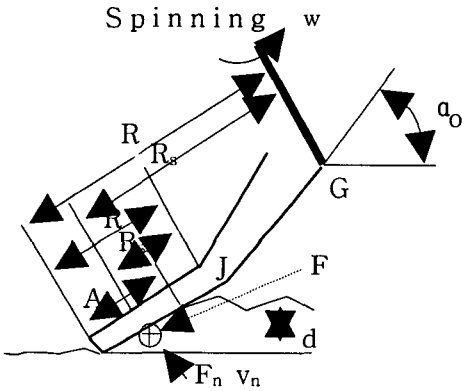


Fig. 3. Process schematics

이러한 가공시스템은 기하학적인 구도에 따라 여러 가지의 가공단계로 정의되고 있다.

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).

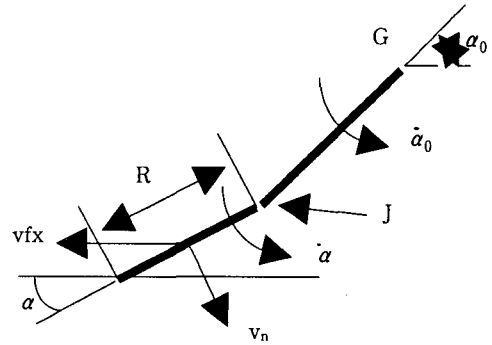


Fig. 4. Velocity balance

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

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 디스크 경사각의 변화 및 이동작업으로 인하여 공작물표면과 수평방향으로 평행하게 이동하던 디스크의 변형중심 (Fig. 3에서 J점)이 임의의 방향으로도 변화하게 되어 이를 보상하는 새로운 기하학적인 관계를 정립시켜야 할 필요성이 제기되었다.

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. 5). Fig 6은 제어기 및 이송시스템에 적용시킬 기준속도 궤적이다.

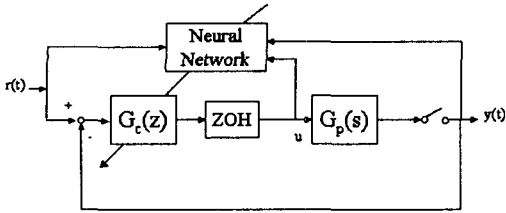


Fig. 5. Controller block diagram

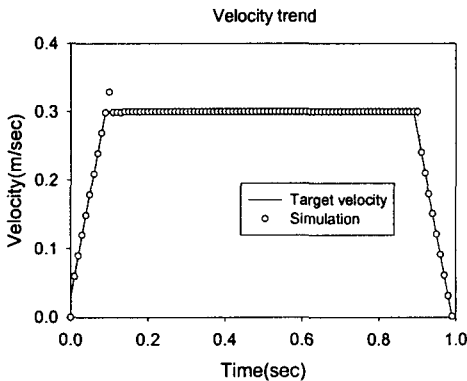


Fig. 6. Velocity reference trajectory

여러 가지의 제어조건을 부여하기 위하여 본 연구에서는 과도응답의 특성에 따라 3가지의 제어상수를 도출하였으며 또한 preview 제어기법을 적용시켜 기준속도궤적에 대한 응답특성을 6, 30 mm/sec의 정상상태 속도기준으로 산출하여 도식하였다(Figs. 7, 8). 적용되는 가공공정의 특성에 반영되도록 그림에 나타난 바와 같이 제어상수의 선정에 따라 정상상태 도달 시간과 과도응답특성이 상이하게 나타났다. Preview 제어기법에 의한 특성은 기준속도궤적과 유사하게 나타났으며 이는 가공시스템의 정확한 동적특성을 반영시킨 결과이다.

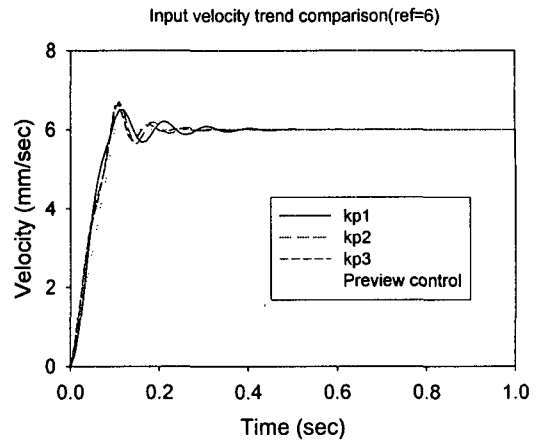


Fig. 7. Velocity profiles for S-S velocity of 6 mm/sec

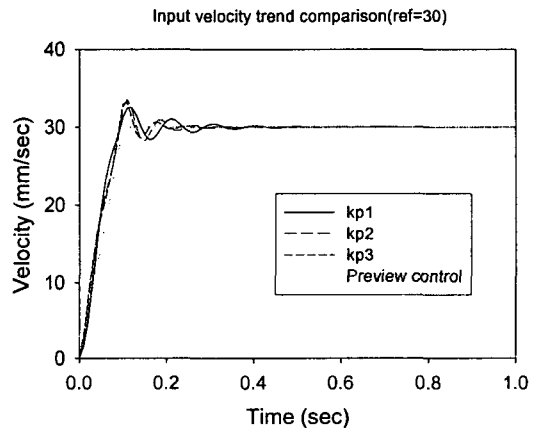


Fig. 8. Velocity profiles for S-S velocity of 30 mm/sec

4. 결과

본 연구에서 적용시킨 속도궤적은 이송속도가 정상속도 상태에 도달할 수 있도록 일반적인 감속유형의 속도궤적이나 본 응용 연삭공정이 적용되는 속도에 민감하며 이에 따라 생산되는 표면의 형상 및 품질이 상이하게 된다.

이송속도는 공구와 공작물이 접촉을 시작하는 시점에서 가속이 적용되며 가공시점과 관계없이 임의의 시점에 정상 상태에 도달하게 된다. 일반적으로 이전 연구에서는 정상 상태의 이송속도만을 적용시켰으나 실제의 가공에서는 공정중에 다양한 유형의 이송속도가 적용될 수 있으므로 가속 시점에 가공이 시작되는 것으로 가정하였다.

Fig. 9는 두가지의 이송속도에 따른 절삭저항의 변화경

향을 비교한 것이다. 이송속도가 빠른 경우에 평균적인 절삭저항치가 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 10는 이에 따른 가공결과를 나타내고 있으며 절삭깊이에 차이를 나타내고 있다.

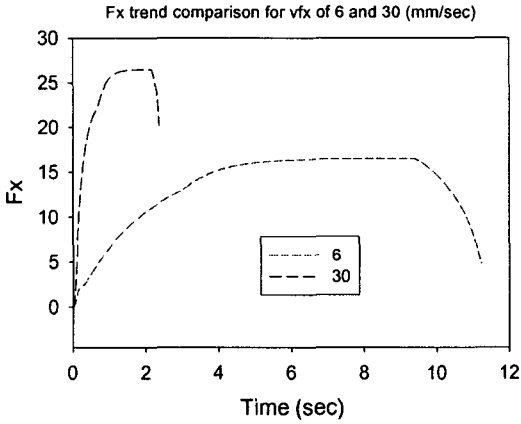


Fig. 9. Fx profile trend comparison

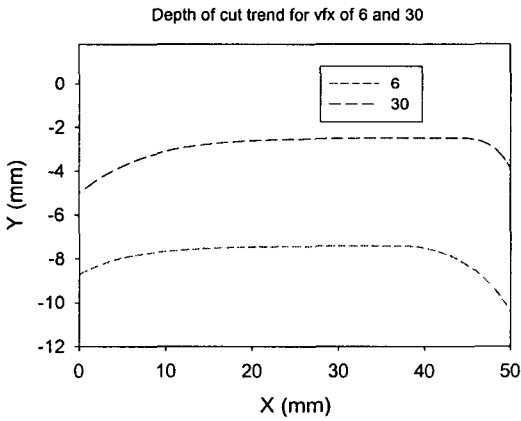


Fig. 10. Depth of cut profile comparison

2축가공을 위한 모서리 운용에서 궤적을 확인하기 위한 여러 가지 운용시스템에 대한 결과가 Figs. 11-13에 나타났다. Fig. 11은 각 축별 속도배분을 나타내고 있으며 Fig. 12는 허용 가속도 기준별 모서리 운용궤적을 나타내고 있다. 그림에서와 같이 허용가속도가 클수록 모서리부에 운용오차가 큰 것으로 나타나고 있다.

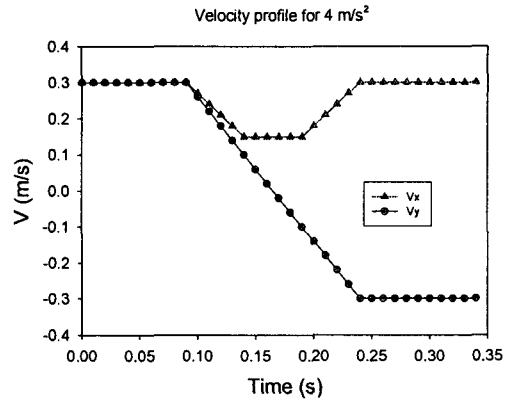


Fig. 11. Velocity distribution

제어이득을 확인하기 위한 신경망학습 횟수별(epoch) 결과는 Fig. 13에 나타나 있는데 학습횟수가 적을수록 오차는 적게 나타나고 있으나 축별 overshoot이 크므로 안정적인 운용을 기대하기 위하여 학습횟수가 큰 것이 권장된다. Fig. 14는 동일한 경우에 대한 소요 가속도 궤적을 나타낸다.

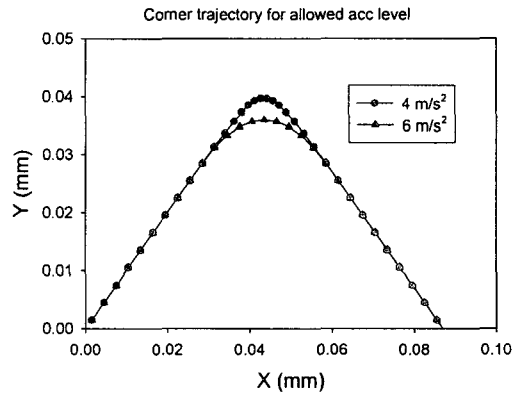


Fig. 12. Corner trajectory

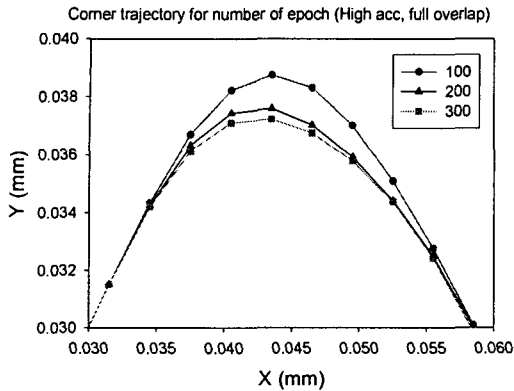


Fig. 13. Corner trajectory for each epoch

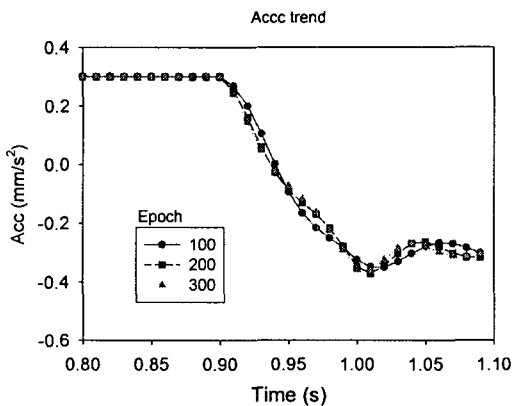


Fig. 14. Required accel. for corner trajectory

4. 결 론

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

이송속도가 정상상태에 도달하였을 때 작업을 시작할 경우에 보다 우수한 작업결과를 기대할 수 있을 것이나 이는 전체 작업시간의 지연을 초래하고 정확한 시점을 맞추기 위한 시스템의 복잡화를 초래하므로 바람직하지 않다.

이송속도에 따라 절삭저항이 다르게 되며 절삭저항값이 크면 평균적인 절삭깊이는 감소한다.

주어진 조건에 따른 모서리 이송궤적특성 분석결과 학습이 진행될수록 용이한 운용이 가능한 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 2004년도 산업자원부의 중기거점과제의 일환으로 (주)삼익LMS의 지원으로 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

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