

저속 서보메카니즘의 마찰 보상방법

장흥석*, 이재응**, 우영환***, 한재영***

A Friction Compensation Method for Low Speed Servomechanisms

Heung Seok Chang*, Jae Eung Lee**, Young Hwan Woo***, Jae Young Han***

ABSTRACT

In controlling servomechanism, such as X-Y tables, friction is one of the most significant source of tracking error. Existing friction models work well when the direction of the motion does not change. However, when the direction of motion changes such as traversing a circular profile, relatively large tracking errors referred to as 'quadrant glitches' are introduced.

In this paper, a new friction model, which has a term that can compensate the effect of the quadrant glitches, is proposed. The performance and effectiveness of the proposed model are evaluated through the experimental work. The results show that the controlling servomechanism with the proposed model completely remove the quadrant glitches.

Key Words : Friction (마찰), Friction compensation (마찰보상), Servomechanism (서보기구)

1. 서론

서보메카니즘의 볼스크류, 직선안내기구 및 서보모터 등에서 발생하는 마찰은 위치 정밀도와 윤곽추적 정밀도를 떨어뜨리는 주된 요인 중의 하나이다. 마찰은 고도의 비선형성을 가지므로 매우 다루기 어렵지만, 정밀 로봇이나 CNC 공작기계와 같은 서보기구의 제어기 설계에 있어서 항상 고려해야 할 문제이다. 지금까지 이와 같은 서보메카니즘에서의 마찰현상을 규명하기 위한 많은 연구가 있었다. Dahl은 마찰력이 일정한 값이 아니라 속도의 함수로 표현된다고 가정하고, 정지마찰동안에는 스프링처럼 거동하는 동마찰 모델을 제안

하였다^[1]. 그러나 Dahl모델에서는 정지마찰력이 운동마찰력을 초과하지 않으며, 정지마찰 후, 속도가 증가함에 따라 마찰력이 급격히 감소하는, Streibeck 효과를 고려하지 않고 있다. 한편 Karnopp은 저속영역에서 고전적인 모델이 가지고 있는 비 실제적인 문제를 극복하기 위하여 물체간의 상대속도의 크기에 따라서 정지마찰 모드와 운동마찰 모드로 전환하는 모델을 제안하였다^[2]. 물체간의 상대속도의 크기가 임의의 경계 값 내에 있을 때에는 정지마찰 모드로 해석하고, 그 외의 영역에서는 운동마찰 모드로 해석하는 것이다. 운동마찰 모드에서의 마찰력은 임의로 선택된 함수에 의해서 결정될 수 있다.

* 경기공업대학 자동화계열

** 중앙대학교 기계공학과

*** 중앙대학교 대학원 기계공학과

Haessig와 Friedland는 Dahl과 Karnopp 모델을 변형한 Reset-integrator 모델을 소개하였다^[3]. 이 모델에서는 변위에 해당하는 상태변수를 정의하여 정지마찰 영역에서는 상태변수의 함수로 마찰력을 표현하고, 운동마찰 영역에서는 상태변수가 상수가 되어 쿨롱마찰력으로 표현되도록 하였다.

Dupont는 상태변수모델을 사용하여 마찰을 표현하였고, 상태변수모델이 제어기의 안정성에 어떠한 영향을 주는지 연구하였다^[4]. Canudas는 Streibeck 효과, 이력현상(Hysteresis), 최대 정지마찰력의 변화까지 포함하는 동마찰 모델을 제안하였다^[5]. 이것은 물체사이의 접촉은 강체에 붙어있는 강모(bristle)에 의하여 이루어지는 것으로 가정하고 강모의 평균적인 거동을 기초로 한 모델이다. 그 외에 Southward, Armstrong등 여러 사람이 제어계에서의 마찰현상을 연구하였다^{[6]-[9]}. 이와 같은 모델들은 운동방향이 일정할 경우에는 상당히 잘 맞으나, 서보메카니즘등에서와 같이 운동방향이 수시로 바뀌는 경우에 대하여는 특정부분에서 잘 맞지 않음을 볼 수 있다. 예를들면 CNC 공작기계 등에서 원호보간 운동 시의 사분원점(quadrant point)에서의 quadrant glitch 현상이 그것인데, 이러한 현상은 기존의 마찰모델로는 극복하기 어렵다.

본 논문에서는 운동방향이 수시로 바뀌는 서보메카니즘에서 발생하는 quadrant glitch 현상을 극복할 수 있는 새로운 마찰 모델을 제안하였으며, 제안된 모델의 효과와 타당성을 검증하기 위하여 DC 서보모터에 의하여 구동되는 직선이송장치를 사용하여 다양한 운동제어를 수행하였다. 이를 통하여 각 마찰모델간의 추적오차와 quadrant glitch 현상의 발생 여부를 비교하였다.

2. 마찰 보상

마찰에는 이력현상, stick-slip 현상 등과 같은 비선형 특성이 있기 때문에 다루기가 매우 어렵다. 정밀 서보메카니즘을 제어하기 위해서는 이러한 마찰에 대한 특별한 고려가 필요하다. 이를 위한 간단하고 효과적인 방법은 정확한 마찰 모델을 설정하여 마찰을 보상해 줌으로서 제어계를 선형화하는 방법이다. 많은 마찰모델들이 제안되었으나, 대부분의 모델들은 서보메카니즘이 정지 상태에서 움직이기 시작할 때를 기준으로 마찰을 모델링 하

였으며, 따라서 그렇게 작동되는 경우에는 비교적 잘 맞는 것을 볼 수 있다. 그러나 서보메카니즘이 운동 중에 순간적으로 속도가 영인 점을 지나는 경우에는 기존에 제시된 마찰 모델들이 잘 맞지 않는 것을 볼 수 있다. 예를 들면 CNC 공작기계의 원호보간 가공에서 사분원점에서와 같이 순간적인 정지점을 통과하여 방향을 전환하는 경우 기존의 마찰 모델을 사용하여 제어를 하면 quadrant glitch 현상이 발생함을 볼 수 있다. CNC 공작기계에서는 이 송속도에 따라 수십 μm 의 quadrant glitch 현상이 보고되고 있다^[10]. 전형적인 quadrant glitch의 형상은 Fig.1과 같다.

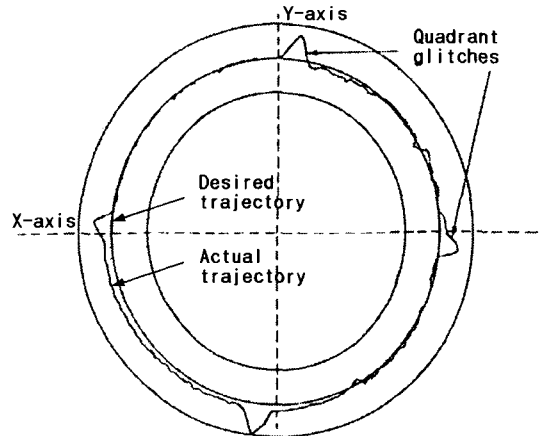


Fig. 1 Typical quadrant glitches in CNC machining

2.1 기존 마찰 보상 모델

서보메카니즘의 각 축이 완전 정지상태에서 운동하는 경우, 운동중 순간 정지 점을 통과 후 계속 진행하는 경우, 그리고 순간 정지 점을 통과하여 방향을 전환하는 경우, 모두가 똑같이 속도가 영인 점을 지나지만 마찰 특성은 상당히 다르다. 특히 극점과 같은 순간 정지 점을 통과한 후 운동방향을 반대방향으로 전환하여 운동하는 경우 극점을 통과한 직후에는 복원력 등의 영향으로 정지상태에서 출발 할 때보다 최대 정지마찰력이 작는데, 기존 마찰 모델을 사용하면 과도한 마찰보상을 행하게 되므로, 커다란 추적에러가 발생하게 된다. 원형 궤적의 추적제어 실험을 통하여 이를 재현하였으

며, 한 축에 대한 결과를 그림에 나타내었다. Fig.2는 마찰보상이 없는 경우의 것이고, Fig.3은 기존의 마찰보상 모델을 사용한 경우의 결과이다. 이때 사용한 기존 마찰 모델식은 Canudas 모델로서 다음과 같다^[5].

$$F_f = \alpha_0 \operatorname{sgn}(V_r) + \alpha_1 e^{-\alpha_2 V_r^2} \operatorname{sgn}(V_r) + \alpha_3 V_r \quad (2-1)$$

여기서 F_f 는 마찰력, $\alpha_0 + \alpha_1$ 는 정지마찰력, α_2 는 Streibek 효과를 표현하기 위한 상수, α_3 는 점성마찰계수, V_r 은 마찰이 발생하는 두 물체의 상대속도를 나타낸다.

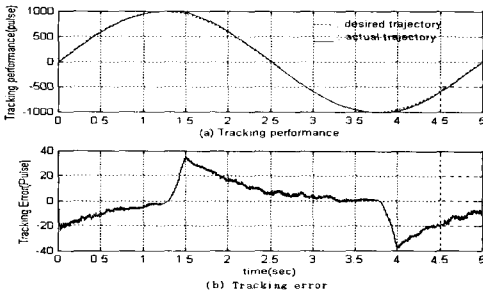


Fig. 2 Tracking performance and tracking error using PID without any friction model

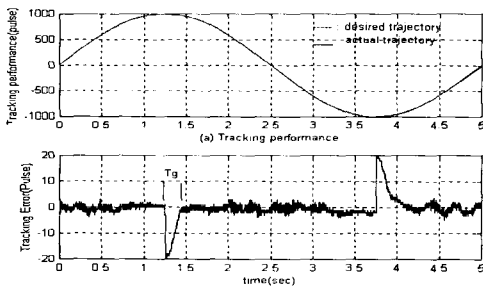


Fig. 3 Tracking performance and tracking error using PID with Canudas friction model

Fig.3에 도시된 바와 같이 기존 모델을 이용하여 제어할 경우, 추적오차를 크게 감소시키는 것을 볼 수 있으나 운동방향 전환 후, 그림과 같이 시

간간격 T_g 동안 커다란 추적에러가 반대방향으로 발생함을 볼 수 있는데, 이는 과도보상의 증거라 할 수 있다. 이와 같은 문제점 때문에 운동방향이 수시로 바뀌는 서보메카니즘에서 기존의 정지-운동마찰 모델을 적용하는 것은 적합하지 않다.

2.2 마찰 보상 모델 제안

본 연구에서는 마찰의 이러한 특성을 고려하여 서보메카니즘 제어계에서 원형계적 추적제어시 흔히 발생하는 quadrant glitch 현상을 제거할 수 있는 새로운 마찰모델을 다음과 같이 제안한다.

$$F_f = \alpha_0 \operatorname{sgn}(V_r) + \alpha_1 e^{-\alpha_2 V_r^2} \operatorname{sgn}(V_r) + F_g \quad (2-2)$$

여기서 F_f 는 마찰력, $\alpha_0 + \alpha_1$ 는 정지마찰력, α_2 는 Streibek 효과를 표현하기 위한 상수, V_r 은 마찰이 발생하는 두 물체간의 상대속도를 나타내고, F_g 는 quadrant glitch가 존재하는 범위에서만 정의되는 함수이며, 이는 복원력의 영향 등을 포함하며, quadrant glitch현상을 보정 할 수 있는 항이다. 식(2-2)의 처음 두 항을 이용하여 마찰을 보상하면 quadrant glitch가 발생되고, 마지막 항 F_g 는 이를 재보상 할 수 있는 항이다. 이를 위하여 본 연구에서는, $F_g(t)$ 를 다음과 같은 3가지 함수 형태로 가정하였고, 이를 그림으로 Fig.4에 나타내었다.

(1) 1차 함수

$$F_g(t) = C_g \left(-\frac{t}{T_g} + 1 \right) \quad (2-3)$$

(2) 3차 함수

$$F_g(t) = C_g \left[1.2 \left(\frac{t}{T_g} \right)^3 - 1.8 \left(\frac{t}{T_g} \right)^2 - 0.4 \left(\frac{t}{T_g} \right) + 1 \right] \quad (2-4)$$

(3) 삼각함수

$$F_g(t) = C_g \left[0.5 + 0.5 \cos \left(\frac{\pi}{T_g} t \right) \right] \quad (2-5)$$

여기서 T_g 는 quadrant glitch가 존재하는 시간간격(time interval)이고, $F_g(t)$ 는 이 시간 간격에서만 존재하는 함수이다.

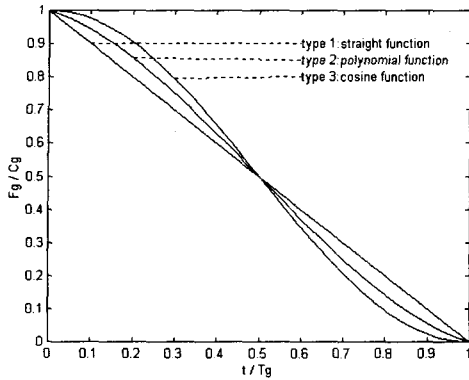


Fig. 4 Various features of $F_g(t)$

C_g 의 크기는 블록극점일 경우에는

$$C_g = F_f |_{t=+0} - F_f |_{t=-0} \quad (2-6)$$

오목극점일 경우에는

$$C_g = F_f |_{t=-0} - F_f |_{t=+0} \quad (2-7)$$

로 정의되며, $F_f |_{t=+0}$ 와 $F_f |_{t=-0}$ 는 식 (2-2)의 세 번째 항을 영이라 하고, $t=0$ 일 때를 기준으로 한 +, -극한값이다. T_g 값은 실험결과로부터 quadrant glitch가 존재하는 시간간격을 측정해서 결정한다.

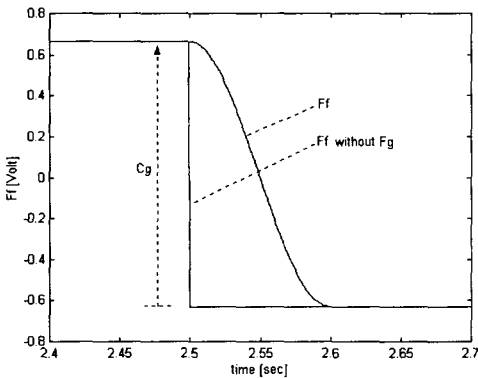


Fig. 5 plot of $F_f(t)$

제안된 모델에 의하면, Fig.5에 도시된 것처럼, 운동 방향이 (+)에서 (-)로 바뀌는 순간 처음 두 항의 부호도 같이 (-)로 바뀌지만, 마지막 항은 T_g 동안 (+) 값을 유지한다. 따라서 마찰 보상치의 부호는 운동방향이 전환되는 극점에서 바뀌는 것이 아니라 $[0, T_g]$ 사이에서 바뀌게 된다.

3. 실험 및 결과 고찰

실험장치는 Fig.6와 같다. 위치검출을 위해 사용하는 3상 encoder의 해상도는 1000 pulse/rev이고, X-Y table의 각 방향 리이드는 5 mm이므로, 1 pulse 당 이송량은 1.25 μ m이다. 위치검출과 제어신호 출력을 위해서 32 bit up/down counter와 10 MHz와 1.25MHz 클럭을 내장하는 AD/DA 보드를 사용하였다. 제어 알고리즘구현은 PC상에서 이루어지며, Borland C++ 컴파일러를 이용하여 제어 프로그램을 개발하였다.

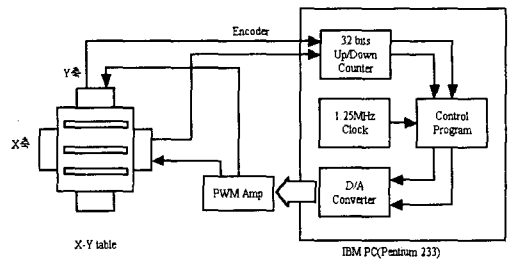


Fig. 6 Experimental setup

AD/DA 보드의 1.25MHz 클럭을 분주하여 1ms 클럭을 만들었고, 이를 1ms 주기로 위치 검출을 하기 위한 PC timer interrupt source로 사용하였다. Interrupt 처리 프로그램은 검출된 위치를 사용하여 제어신호를 계산하고 D/A 포트에 제어신호를 보낸다. D/A포트를 통하여 아날로그신호로 전환된 신호는 PWM Amp.를 거쳐 DC 서보모터로 보내진다. 실험에서는 Fig.7에 도시된 제어기를 사용하여 입력 궤적과 마찰 모델만을 바꾸며 실험하였다. 여기에서 y_r 은 입력궤적, y_c 는 출력궤적, G_c 는 제어기

의 전달함수, G_p 는 서보메카니즘의 전달함수, d 는 외란, n 은 센서잡음을 나타낸다. 제어기로는 CNC공작기계에서 일반적으로 사용하는 PID제어기를 사용하였다.

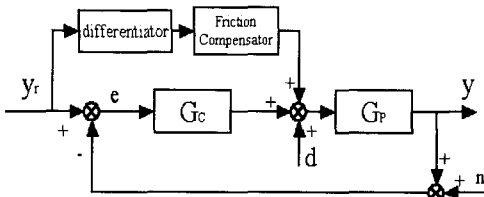


Fig. 7 Controller with feedforward friction compensator

엔코더로부터 읽혀진 위치정보로부터 추적오차 e 가 계산되며, 이로부터 PID제어기는 전압으로 환산된 제어신호를 계산한다. 한편, 앞먹임 마찰 보상기에서는 입력좌표로부터 속도를 계산하고, 앞서 계산된 속도를 사용하여 전압으로 환산된 마찰력을 계산한다. 이렇게 계산된 제어신호와 마찰보상치는 합산되어 서보모터에 보내진다.

실험시 이송속도는 CNC 공작기계에서 강과 두랄루민등과 같은 금속의 정삭가공 시 이송속도가 약 50~ 300mm/min 정도이므로 이 범위에 맞추었다.

3.1 함수 $F_g(t)$ 의 변화에 따른 실험

이 실험은 제안된 마찰모델에서 함수 $F_g(t)$ 를 직선함수, 삼각함수, 직선과 삼각함수 중간형태인 3차 함수로 하였을 때, 이송속도 94 mm/min로 직경5mm의 원형궤적의 윤곽운동을 할 때 한 축만의 추적성능을 관찰한 것이다. 그 결과 table 1에서 처럼, 3가지 경우 모두 최대 추적오차는 3.75 μm 이었고, 오차의 표준편차는 1.19~1.21 μm 이었다. 모든 경우에 있어서 quadrant glitch 현상은 발생하지 않았고 정밀한 추적성능을 보였다. 3가지 함수 중 삼각함수를 사용한 경우가 가장 좋은 결과를 보였으나, 그 차이는 미소하였다. Fig.8은 삼각함수를 사용하였을 때의 실험결과이다.

본 논문에서 수행하는 추가적인 실험은 미소한 차이지만 가장 좋은 결과를 보였던 삼각함수로 하

였다.

Table 1 Tracking performance and tracking error for sine trajectories with different amplitude and frequency

type of $F_g(t)$	tracking error(μm)	
	max error	standard deviation
cosine	3.75	1.19
3-degree polynomials	3.75	1.20
straight line	3.75	1.21

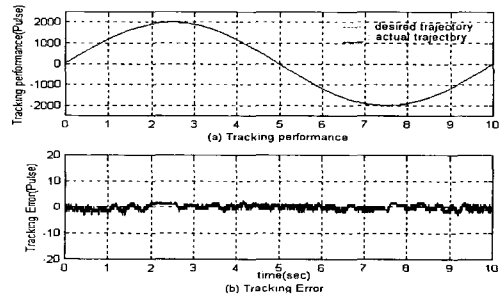


Fig. 8 Tracking performance and tracking error using cosine function for $F_g(t)$ (feedrate : 94mm/min)

3.2 삼각파 궤적 추적

삼각파 궤적 추적이 대한 실험 결과를 Table2와 Fig.9~Fig.12에 나타내었다. 각 Fig.에서 위의 그림은 입력궤적과 출력궤적을 함께 나타낸 것이고, 아래의 그림은 추적오차를 확대하여 나타낸 것이다.

Fig.9은 마찰모델을 사용하지 않은 경우의 결과이며, 속도가 영인 극점부근에서 약 49 μm 정도의 추적오차가 발생함을 볼 수 있었다. 이것은 이 부근에서의 마찰력은 급격하게 비선형적으로 변하는데 선형제어기가 그 변화를 따라 주지 못하기 때문에 발생하는 오차이다. 이러한 오차는 제어기에서 나오는 신호가 마찰력을 극복할 수 있는 수준에 도달할 때까지 증가하다가, 그 이후부터는 오차 값이 감소한다.

Fig.10는 Coulomb 모델을 사용한 경우의 실험결과이며, 최대추적오차는 13.75 μm 이었고, 표준편

차는 $3.19 \mu\text{m}$ 로, 표준편차를 기준으로 할 때 마찰 모델을 사용하지 않은 경우의 17% 정도로 커다란 추적성능 향상을 보이고 있다. 그러나 순간적으로 속도가 영이 되는 지점 부근에서 상대적으로 커다란 오차를 보이고 있다.

Fig.11은 Karnopp 모델을 사용한 경우의 실험 결과이며, 최대추적오차는 $12.5 \mu\text{m}$ 이었고, 표준편차는 $2.16 \mu\text{m}$ 로 Coulomb 모델의 경우보다 32%의 추적성능 향상을 보이고 있다.

Fig.12은 본 논문에서 제안된 모델을 사용한 경우의 실험결과이며, 최대추적오차는 $7.5 \mu\text{m}$ 이었고, 표준편차는 $2.06 \mu\text{m}$ 로 추적성능이 매우 뛰어났으며, 극점에서의 이상 오차현상도 거의 사라졌다. 표준편차를 기준으로 할 때의 추적오차는, 마찰보상을 하지 않은 경우의 11% 정도로 매우 작은 오차를 보이고 있으며, 더욱이 중요한 것은 최대오차인데, 제안된 모델을 사용하여 마찰보상을 하는 경우, 기존의 모델을 사용하는 경우보다 35% 이상의 추적성능이 향상되는 것을 볼 수 있었다.

Table 2 Tracking performance and tracking error for tooth shape trajectory (feedrate : 75mm/min)

case	tracking error(μm)	
	max. error	standard dev.
No Friction	48.75	18.63
Coulomb	13.75	3.19
Karnopp	12.5	2.16
Proposed model	7.5	2.06

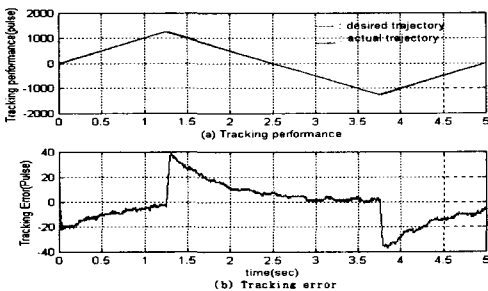


Fig. 9 Tracking performance and tracking error using PID without any friction model

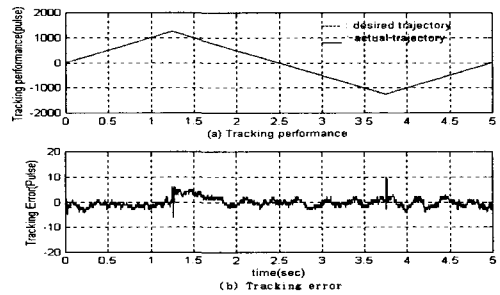


Fig. 10 Tracking performance and tracking error using PID with Coulomb friction model

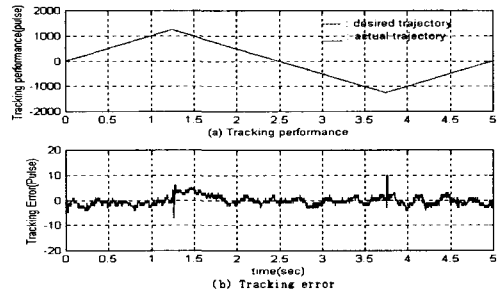


Fig. 11 Tracking performance and tracking error using PID with Karnopp friction model

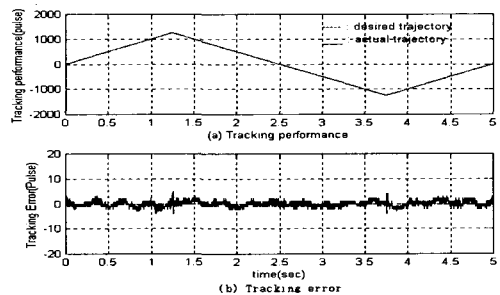


Fig. 12 Tracking performance and tracking error using PID with proposed friction model

3.3 정현파 궤적 추적 실험(I)

이 실험은 X-Y 이송테이블이 반경 1.25mm 의

원운동시 한 축의 추적성능만을 관찰한 것이며, 서보기구가 운동방향이 전환될 때의 마찰의 영향을 관찰하였다.

실험 결과는 Table 3에 주어지고, 각 마찰 모델을 적용한 경우의 실험 결과는 Fig.13~Fig.16에 나타내었다.

Fig.13는 마찰보상을 하지 않은 경우의 실험 결과이며, 속도가 영인 시작점과 방향전환 점 부근에서 상대적으로 커다란 오차를 보이고 있다. 최대 추적오차는 $46.25 \mu\text{m}$ 으로 매우 컸으며, 표준편차도 $18.93 \mu\text{m}$ 을 보이고 있다.

Fig.14은 Coulomb 모델을 사용한 경우이며, 최대 추적오차는 $16.5 \mu\text{m}$ 이고, 표준편차는 $3.44 \mu\text{m}$ 로 마찰보상을 하지 않은 경우의 18%정도로 커다란 추적성능 향상을 보이고 있다. 그러나 운동중 순간적으로 속도가 영이되는 극점에서 quadrant glitch 현상이 관찰되고 있다.

Fig.15는 Karnopp 모델을 사용한 경우이며, 최대 추적오차는 $12.5 \mu\text{m}$ 이고, 표준편차는 $2.36 \mu\text{m}$ 으로 Coulomb 모델보다 31%이상의 추적성능 향상을 보이고 있으나 이 모델을 적용한 경우에도 quadrant glitch 현상이 나타나고 있다.

Fig.16는 제안된 마찰 모델을 사용한 경우이며, 최대 추적오차는 $5 \mu\text{m}$ 이고, 오차의 표준편차는 $1.75 \mu\text{m}$ 으로 기존의 마찰모델의 경우에 비하여 탁월한 추적성능을 보이고 있다. 추적오차는 마찰보상을 하지 않은 경우의 10%미만에 불과하였고, Karnopp 모델을 사용하였을 때 발생하는 추적오차의 72%미만으로 나타났으며, quadrant glitch 현상이 완전히 사라짐을 볼 수 있었다.

Table 3 Tracking performance and tracking error for sine trajectory (feedrate : 94mm/min)

case	error (μm)	
	max. error	standard dev.
No Friction	46.25	18.93
Coulomb	16.5	3.44
Karnopp	12.5	2.36
proposed model	5	1.75

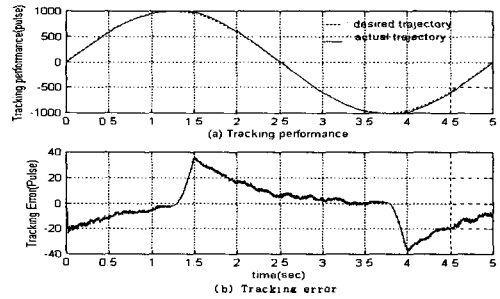


Fig. 13 Tracking performance and tracking error using PID without any friction model

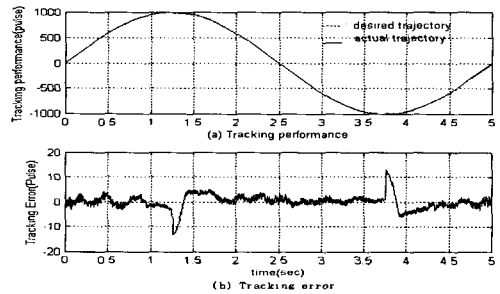


Fig. 14 Tracking performance and tracking error using PID with Coulomb friction model

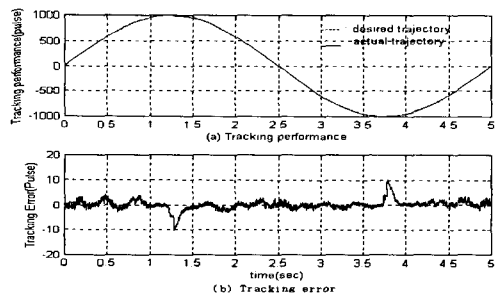


Fig. 15 Tracking performance and tracking error using PID with Karnopp friction model

3.4 정현파 궤적 추적 실험(II)

이 실험은 제안된 마찰모델을 사용하여, 직경 10~20mm의 원형궤적의 추적성능을 관찰한 것이다. 실험결과는 table 4에 주어진다. 직경10mm 원

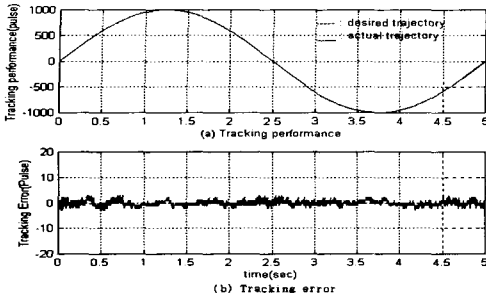


Fig. 16 Tracking performance and tracking error using PID with proposed friction model

호의 경우 추적에러가 이송속도 94 mm/min 일 때 5 μm, 188 mm/min 일 때 6.25 μm를 보이고 있고, 표준편차는 1.16~1.84 μm으로 정밀한 추적 성능을 보이고 있다. 직경20mm 원호의 경우에도 추적오차의 범위가 5~ 6.25 μm을 보이고 있고, 표준편차는 1.21~1.51 μm으로 좋은 추적성능을 보이고 있다. 이송속도가 고정일 경우 직경의 크기는 추적성능에 크게 영향을 주지 않음을 볼 수 있고, 동일한 직경에서 이송속도가 커짐에 따라 에러의 표준편차가 커짐을 관찰할 수 있다.

KS규격 B4408에서 엔드밀의 원호보간 허용정밀도가 40 μm인 점을 고려할 때 실험결과는 허용정밀도의 16% 정도로 뛰어난 추적성능을 보이고 있다.

실험결과를 Fig.17~20에 도시하였고, 제안된 마찰보상기를 갖는 제어가 원형궤적 전 구간에 걸쳐서 뛰어난 추적성능을 가짐을 볼 수 있다. 특히 CNC공작기계에서 항상 나타나던 quadrant glitch 현상이 효과적으로 제거됨을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 서보메카니즘의 정밀 위치제어 및 추적제어를 위한 새로운 마찰모델을 제안하였다. 제안된 모델은 기존의 마찰모델을 사용하여 원형궤적을 추적제어할 경우 사분원점을 지날 때 발생하는 추적오차인 quadrant glitch를 효과적으로 제거할 수 있는 모델이다. 제안된 모델의 타당성과

Table 4 Tracking performance and tracking error for sine trajectories with different amplitude and frequency

diameter (mm)	Feed rate (mm/min)	tracking error(μ m)	
		max. error	standard deviation
10	94	5.00	1.16
	126	5.00	1.35
	157	6.25	1.61
	188	6.25	1.84
20	94	5.00	1.21
	126	5.00	1.26
	157	5.00	1.33
	188	6.25	1.51

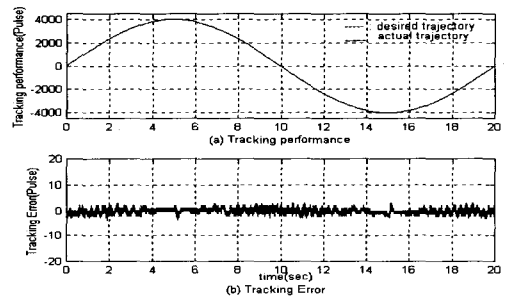


Fig. 17 Tracking performance and tracking error using PID with proposed friction model (diameter=10mm, feedrate=94mm/min)

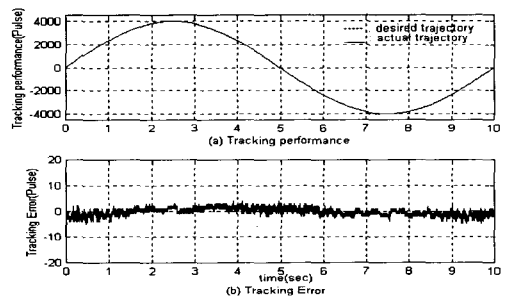


Fig. 18 Tracking performance and tracking error using PID with proposed friction model (diameter=10mm, feedrate=188mm/min)

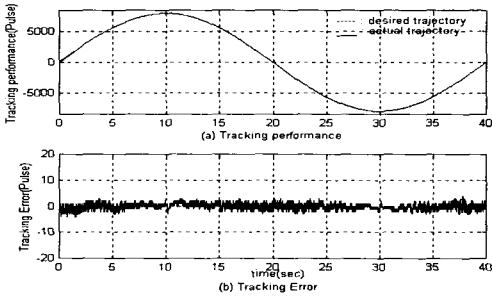


Fig. 19 Tracking performance and tracking error using PID with proposed friction model (diameter=20mm, feedrate=94mm/min)

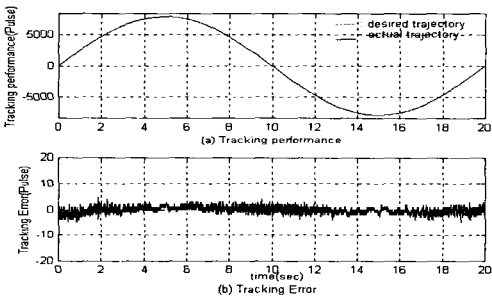


Fig. 20 Tracking performance and tracking error using PID with proposed friction model (diameter=20mm, feedrate=188mm/min)

효율성을 증명하기 위하여 삼각파 궤적, 정현파 궤적에 대한 추적 실험을 행하였다. 그 결과 정현파 궤적의 경우 사분원점에서 발생하던 12.5~16.5 μm 의 추적오차가 사분원점 이외의 영역에서의 추적오차 수준인 5~6 μm 수준으로 감소함을 볼 수 있었고, 따라서 quadrant glitch를 효과적으로 제거 할 수 있었다.

참고문헌

1. P. Dahl, "A solid friction model," Aerospace Corp., El Segundo. CA. Tech. Rep. TOR-0158 (3107-18)-1, 1968.
2. Dean Karnopp, "Computer Simulation of Stick-Slip Friction in Mechanical Dynamic Systems," Trans. ASME, Vol. 107, pp. 100-103, 1985.

3. D.A. Haesig and B. Friedland, "On the Modeling and Simulation of Friction," Trans. ASME, Vol. 113, pp. 354-362, 1991.
4. Pierre E. Dupont and Eric P. Dunlap, "Friction Modeling and PD Compensation at Very Low Velocity," Trans. ASME, Vol. 117, pp. 8-14, 1995.
5. C. Canudas de Wit, H. Olsson, K.J. Astrom, P. Lischinsky, "A New Model for Control of Systems with Friction," IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. 40, No. 3, pp. 419-425, 1995.
6. S.C. Southward, C.J. Radcliffe and C.R. MacCluer, "Robust Nonlinear Stick-Slip Friction Compensation," J. Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 113, pp. 639-645, 1991.
7. Brian Armstrong and Bimal Amin, "PID Control in the Presence of Static Friction: A Comparison of Algebraic and Describing Function," Automatica, Vol. 32, No. 5, pp. 679-692, 1996.
8. Brian Armstrong-Helouvy, "Stick Slip and Control in Low-Speed Motion," IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. 38, No. 10, pp. 1483-1496, 1993.
9. Brian Armstrong-Helouvy, "Frictional Lag and Stick-Slip," Proc. IEEE Intl. Conf. Robotics and Automation, pp. 1448-1453, 1992.
10. Ho Seong Lee and M. Tomizuka, "Robust Motion Controller Design for High-Accuracy Positioning Systems," IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 43, No. 1, pp. 48-55, 1996.