

마찰력 모델을 이용한 안내면 상태 감시 Monitoring of Guideway Status Using Friction Model

*정영훈¹, 배진현¹, 이승열¹, 태현철², 조동우³

*Y. H. Jeong(yhjeong@kpu.ac.kr)¹, J. H. Bae¹, S. Y. Lee¹, H. C. Tae², D.-W. Cho³

¹ 한국산업기술대학교 기계공학과, ² 제주대학교, ³ 포항공과대학교

Key words : Feed drive system, friction, guideway, monitoring, motor current

1. 서론

오늘날 이송시스템(feed drive)은 일반 제조업 분야에서 첨단기술 분야에 이르기까지 가장 기반이 되는 기술로서 그리고 그 성능에 가장 큰 영향을 미치는 부문으로서 자리 잡고 있다. 특히 CNC 기술의 반도체, 디스플레이장치 등 다양한 분야로의 보급은 이러한 기술을 보편화시키는 동시에 그 중요성은 여전히 부각시키고 있다.

이송계의 CNC 제어기술은 복잡한 시스템이 원하는 작동을 할 수 있게 하는 가장 효과적인 방법으로 인식되고 있다. 그러나 안정성 및 성능최적화를 위해서는 제어대상이 되는 시스템에 대한 특성이 명확히 드러나야 하며, 동시에 이를 제어기의 설계에 반영하는 것이 필요하다. CNC 제어기술의 전통적인 대상 시스템으로서 이송계는 공작기계에서부터 생산라인의 물류장치에 이르는 전통적인 제조업 분야와 반도체공정장치 및 각종 디스플레이 장치산업의 공정 장비의 위치결정부 등 다양한 분야에서 사용되고 있다.

이송계는 일반적으로 직선위치결정기구를 의미하며, 회전모터, 볼스크류, 안내면(guideway)을 핵심부품으로 하는 구조와 선형모터와 안내면으로 이뤄진 구조로 양분될 수 있다. 또한 이 두 가지의 이송계는 모두 테이블과 베이스 간의 상대운동에 기반을 두고 있기 때문에 마찰력이 가장 중요한 부하(load)로서 자리잡고 있다. 특히 이송계에서 마찰력은 비선형성과 히스테리시스 등으로 인해 제어성능에 가장 큰 영향을 미치는 성분으로 알려져 있다.

본 연구에서는 시뮬레이션을 이용한 제어성능 예측 등에 활용될 이송계 안내면의 마찰력 모델을 구성하였다. 구성된 마찰력 모델은 일반적인 마찰 특성인 쿨롱(Coulomb), 점성, Stribeck 효과를 포함하고 있으며, 정마찰, 정마찰과 동마찰의 천이를 고려하기 위한 'friction memory' 특성으로 구성되어 있다. 개발된 모델은 이송계 및 서보 시스템, 제어기와 연계되어 이송계의 동적 거동 해석에 활용될 수 있으며, 설계된 이송계에 대한 제어기의 제어성능을 예측하는데 사용될 것이다. 본 연구에서는 개발된 모델의 적용예의 하나로서 안내면의 상태감시에 활용될 수 있음을 보였다.

2. 이송계 안내면의 마찰력 모델

이송계의 마찰력은 일반적으로 정마찰과 동마찰로 구성된다. 정마찰은 접촉면의 상대변위가 발생하지 않는 구간의 마찰력 특성이며, 이 구간에서는 접촉면의 미세한 돌기들의 굽힘에 의한 변위가 발생하는 수준이다[1]. 반면에 상대변위가 존재하는 구간의 마찰특성인 동마찰은 슬립면의 상대속도, 윤활의 조건, 온도, 압력, 거칠기 등 다양한 조건에 의해 결정되며, 그 구성은 일반적으로 쿨롱 마찰과 점성 마찰, 그리고 부분윤활 구간에서 존재하는 Stribeck 효과 등으로 구성되는 것으로 알려져 있다[1]. 본 연구에서는 이러한 이송계 마찰력의 일반적인 구성을 반영하기 위한 일반화된 마찰력에 대한 모델을 정의하고 다양한 형태의 이송계에 적용될 수 있도록 하였다. Fig. 1은 구성된 이송계 마찰력 모델에 대한 기본 구성을 보여준다. 그림에서 보여진 바와 같이 속도와 구동력 등의 이송계의 운동정보를 기본 입력으로 하며, 특히 속도정보로부터 정마찰과 동마찰

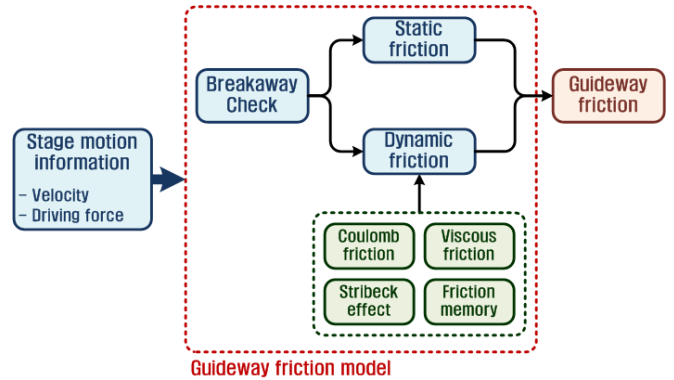


Fig. 1 Overview of guideway friction model

을 구분하게 된다. 특히 속도에 의한 정마찰과 동마찰의 구분은 이론적인 구분기준인 속도가 '0'인 경우를 이용할 경우에는 급격한 수치 변화특성의 비선형성을 동반시키게 되므로 해석 안정성에 심각한 문제를 일으킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Karnopp[2]의 접근방식을 이용하여 (1)과 같이 정마찰과 동마찰을 구분할 수 있도록 하였다.

$$\begin{cases} \text{if } |v| \leq |v_s| & \text{then } F_{friction} = f_{static} \\ \text{if } |v| > |v_s| & \text{then } F_{friction} = f_{sliding} \end{cases} \quad (1)$$

여기서, v , v_s , $F_{friction}$, f_{static} , $f_{sliding}$ 은 각각 이송속도, 정마찰과 동마찰 구분을 위한 이탈에 대한 속도기준치, 이송계의 마찰력, 정마찰력, 동마찰력이다.

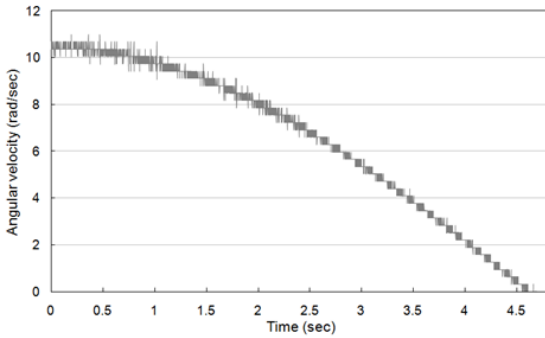
식 (1)에 의해 슬립면의 이탈(breakaway)여부 확인에 의해 정마찰과 동마찰이 구분된다. 정마찰은 저자의 기존 연구[3]에서 정의된 바와 같이 일반적인 방식(힘의 평형)으로 정의되었으며, 동마찰은 Fig. 1에 보인 바와 같이 쿨롱 마찰, 점성 마찰, Stribeck 효과, 'friction memory' 특성으로 구성되어 있다. 특히 'friction memory' 특성은 속도변화에 대한 마찰력 레벨의 시간지연을 의미하므로 점성과 Stribeck 효과에 대한 시간지연특성으로 모델링 할 수 있다. 특히 저속구간인 부분윤활 영역에서 나타나므로 저속영역에서 그 영향이 점성마찰은 시간지연 효과에서 제외될 수 있으나[3], 본 연구에서는 이를 포함하도록 하였다. 부분윤활 구간에서의 마찰력은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$F_{friction} = F_{Coulomb} + f_{fm} \cdot (F_{viscous} + F_{Stribeck}) \quad (2)$$

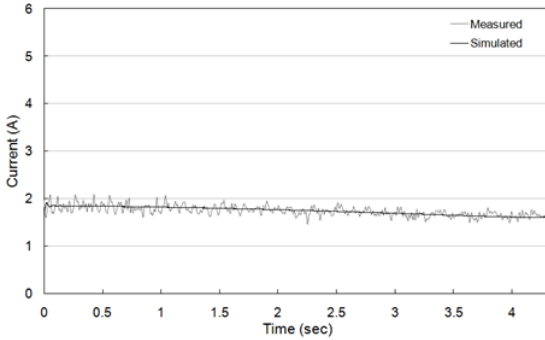
여기서, $F_{Coulomb}$, f_{fm} , $F_{viscous}$, $F_{Stribeck}$ 은 각각 쿨롱마찰, 'friction memory' 함수, 점성 마찰, Stribeck 효과 등이다. 본 연구에서는 friction memory 를 시간지연 함수로 정의하였다. Friction memory 는 저속구간에서의 마찰 특성이므로 이송계의 출발 및 정지 시의 마찰력 수준의 변화에 중요한 역할을 하며, 정마찰에서 동마찰로의 천이에 있어서 중요한 역할을 할 수 있다.

3. 마찰력 모델의 검증과 상태 감시에의 응용

개발된 이송계의 마찰력 모델을 검증하기 위해 실험결과와 비교검증을 수행하였다. 개발된 모델의 파라미터를



(a) Velocity profile of a stage



(b) Predicted and measured current behavior

Fig. 2 Comparison between predicted and measured current behavior for a given velocity profile

정의한 후 주어진 연속적으로 변하는 속도에 대해 실제 전류와 마찰력 모델로부터 예측된 전류를 비교하였다. Fig. 2 (a)는 비교를 위해 주어진 속도거동을 보여준다. 속도명령은 삼각함수형태로 주어졌으며, 이에 대해 실제 측정된 전류 신호와 예측된 전류 신호를 Fig. 2 (b)에서 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 속도의 변화에 따른 마찰력의 변화를 잘 추종하고 있음을 확인할 수 있다.

부식된 표면을 가지는 안내면이 설치된 스테이지에 마찰력 모델을 적용하여 예측된(정상적인 상태의 안내면에 대한) 마찰력 수치와 비교함으로써 안내면 표면의 상태를 감시할 수 있음을 확인하고자 하였다. 대상 이송계에 대한 마찰력 특성을 추출하여 Fig. 3 과 같은 Stribeck 곡선을 얻고 이로부터 모델을 구성하였다. 이 때는 작업영역 중심의 양호한 표면을 가진 영역이 사용되었다. 이송계의 전 영역에 대해 전류신호를 추출하고 같은 조건에 대한 전류를 예측하여, Fig. 4 (a)같이 비교할 수 있도록 하였으며, 이들 간의 차이를 Fig. 4 (b)같이 얻었다. 이로부터 원점으로부터 200 mm 구간 동안에는 마찰력의 특성이 다소 상이함을 확인할 수 있으며, 이는 검사를 통해 이 구간에서는 안내면 표면에 상당한 부식이 있음을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 일반적인 윤활마찰이 이뤄지는 이송유니트에 대한 마찰력 모델을 정의하였다. 본 연구의 동마찰력 모델은 쿨롱, 점성, Stribeck 효과로 구성되어 있으며, 일반적인 이송계에 대한 마찰력 예측에 적용할 수 있도록 일반성을 확보할 수 있는 모델을 구성하였다. 개발된 모델은 변화하는 속도에 대한 이송계의 마찰력을 높은 정확도를 가지고 예측할 수 있음을 보였으며, 그 적용예로서 안내면의 부식상태가 마찰에 미치는 영향을 이용하여 안내면의 표면상태를 모니터링 할 수 있음을 보였다.

후기

본 논문은 지식경제부 국가플랫폼기술개발사업으로 지원된 연구임.

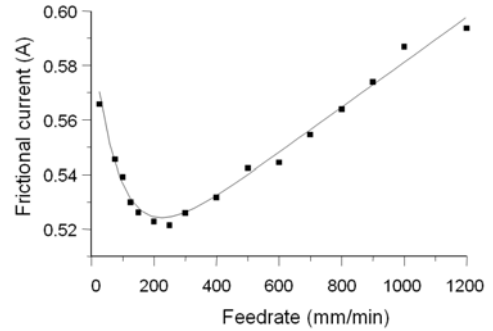
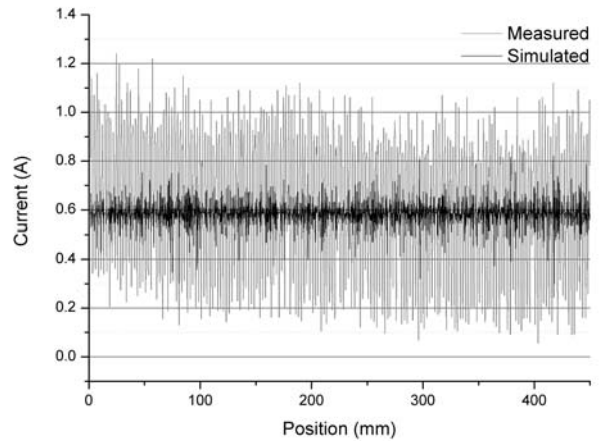
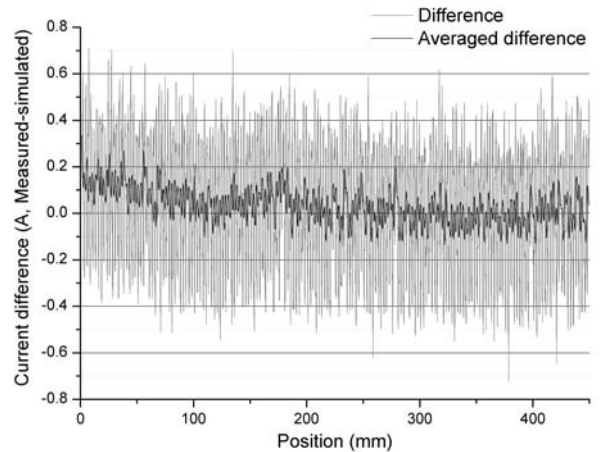


Fig. 3 Overview of a guideway friction model



(a) Measured and predicted current profiles



(b) Difference of measured and predicted current profiles and its moving averaged profile

Fig. 4 Comparison between predicted and measured current behavior for a rusty guideway

참고문헌

1. Armstrong-Helouvry, B., Dupont, P., Canudas, de Wit C., "A Survey of Models, Analysis Tools and Compensation Methods for the Control of Machines with Friction," *Automatica*, Vol. 30, pp. 1083-1138, 1994.
2. Karnopp, D. "Computer simulation of stick-slip friction in mechanical dynamic system," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 107, pp. 100-103, 1985.
3. 정영훈, 민병권, 조동우, "공작기계 이송계의 동적 시뮬레이션 모델의 개발", 한국정밀공학회 2004 춘계학술대회, pp. 488-491, 2004