

그리스 윤활 소형 이송계 마찰력의 이력현상 측정 및 분석

안성우^a, 정영훈^{a*}, 송창규^b

Investigation of Friction Hysteresis in Miniaturized Linear Table Lubricated Withgrease

Sung Woo Ahn^a, Young Hun Jeong^{a*}, Chang Kyu Song^b^a Dept. of Mechanical Eng., Korea Polytechnic Univ., 2121 Jeongwang-dong, Siheung-si, Gyeonggi-do 429-793, Republic of Korea^b Nano Convergence and Manufacturing Systems Research Division, KIMM, 156, Gajeongbuk-Ro, Yuseong-Gu, Daejeon 305-343, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	15	July	2013
Revised	31	July	2013
Accepted	5	August	2013

Keywords:

Hysteresis
Dynamic friction
Linear stage
Stribeck curve
Grease lubrication

ABSTRACT

A precision linear motion table plays a crucial role in manufacturing systems used in various industries such as machine tools, semiconductors, and nanofabrication. In particular, one of the most typical mechanisms for a linear motion table is to use a ballscrew and LM guides. However, this mechanism is inevitably influenced by friction because of the relative motion in its joint regions. One of the most complex phenomena in friction is the hysteresis behavior of dynamic friction, which was compared with the steady dynamic friction that was presented using a Stribeck curve in this study. Therefore, we investigated the dynamic friction and its hysteresis behavior using a miniaturized linear table equipped with a ballscrew and LM guides that were lubricated with grease. Subsequently, it could be seen that hysteresis could be considered a time delay after zero-velocity crossing and that it was influenced by acceleration.

1. 서론

오늘날 직선 이송 시스템은 공작기계 등과 같은 생산 제조설비에 서부터 반도체 제조를 위한 공정장비에서의 초정밀 위치결정장치 등의 첨단기술 설비에 이르기까지 다양한 생산시스템에서 가장 중요한 요소로 다뤄지고 있다. 특히, 볼스크류 기반의 이송 시스템은 이러한 정밀 직선 이송 시스템 중 가장 대표적인 장치로 알려져 있다. 그러나 볼스크류 기반의 이송 시스템은 이송운동에 따른 부품간 상대운동에 의해 필연적으로 마찰력에 대한 영향을 가지고 있다. 이러한 마찰력은 이송 시스템의 주요 이송저항으로 작용하

며, 동적 거동에 영향을 미치기 때문에 깊이 있게 고려되는 것이 필요하다^[1].

일반적으로 마찰력은 정마찰과 동마찰로 구분된다^[2]. 정마찰은 슬립동면간의 상대운동이 없이 접촉면 사이에 직접적인 접촉이 존재하는 동시에, 접촉면 표면의 미세 돌기 부분들이 서로 접촉하여 돌기의 변형에 의한 상대변위가 발생하는 마찰특성을 정마찰이라 한다^[3,4]. 한편, 두 면간의 상대변위가 발생하고 이때 존재하는 마찰에 의한 이송저항을 동마찰이라 한다^[1].

이송 시스템의 마찰에 가장 큰 영향을 미치는 요소의 하나로 윤활이 있다. 일반적으로 윤활을 위해 윤활유(oil) 또는 그리스

* Corresponding author. Tel.: +82-31-8041-0415

Fax: +82-32-8041-0419

E-mail address: yhjeong@kpu.ac.kr (Young Hun Jeong).

(grease)를 윤활제로 사용하고 있으며, 윤활은 습동면에 윤활막을 생성시키기 때문에, 마찰력의 크기를 줄이는 동시에 마모를 감소시키는 효과를 가지고 있다. 특히 윤활에 의해 수력마찰(hydrodynamic friction)의 거동을 보이게 되며, 이 거동은 일반적으로 정지, 경계 윤활, 부분 유체 윤활, 완전 유체 윤활 구간으로 구성되는 Stribeck 곡선^[1]으로 표현된다.

마찰력의 또 다른 중요한 거동으로서 이력현상(hysteresis)이 있다^[5]. 이력현상은 물리적 조건에 의해 일의적으로 결정되지 않고, 물리량이 변화되어온 경과에 영향을 받는 특성으로서 마찰력에서는 동일위치에서 이송방향 및 가속도에 따라 다른 값을 가지는 현상이 대표적으로 소개 되었다. 이러한 마찰력의 이력현상은 Stribeck 곡선을 반영하면서 또한 경과에도 동시에 영향을 받으므로 이들간의 관계 및 그 특성을 명확히 분석하는 것이 필요하다. 대표적인 국내의 연구로는 Canudas de Wit 등이 동마찰, 정마찰, 히스테리시스를 모두 포함하는 마찰력 모델을 개발하여 제안한 바 있으며^[1,6], Choi 등은 Preisach 모델을 이용하여 미소변위 구간의 히스테리시스 현상을 포함하는 마찰력 모델을 개발하고 이를 이용하여 마찰력 보상에 활용하였다^[7].

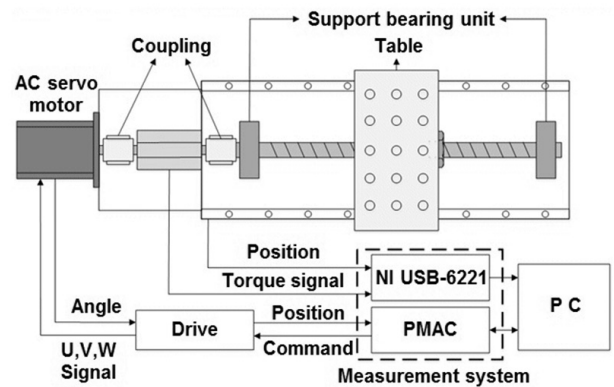
본 연구에서는 예압을 가진 볼스크류 및 LM 가이드로 구성된 소형의 직선 이송 시스템에 대해 그리스 윤활 조건을 부여하고 이 시스템이 가지는 동마찰 특성을 확인하였다. 이와 함께 이력현상을 측정하여 동마찰과의 차이점 및 가속도 등의 이력현상에 대한 영향을 분석하였다. 마찰력 측정을 위해 정밀한 토크센서를 볼스크류 축과 서보모터 축 사이에 연결하여 이송 시스템의 마찰토크를 측정하였으며, 이로부터 마찰력의 거동의 분석하였다.

2. 마찰력의 이력현상 측정 및 분석

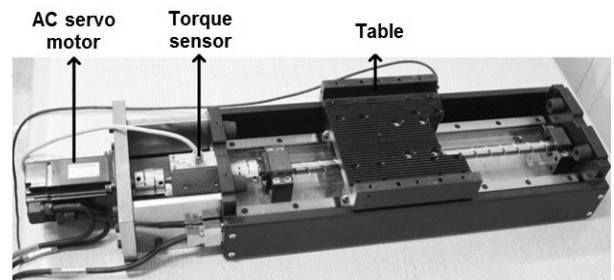
2.1 실험 장치의 구성

이송 시스템이 이송할 때 발생하는 마찰특성을 측정하기 위해 실험장치를 구성하였다. 이송 시스템은 예압이 걸린 볼스크류와 LM 가이드로 구성된 이송 테이블과 AC 서보모터(SIGMA(Σ)-III, Yaskawa), 상용 CNC 제어기(PMAC, DeltaTau)로 구성되어 작동된다. 특히 LM 가이드와 볼스크류-너트 조인트에서 발생하는 마찰력을 측정하기 위해 모터축과 볼스크류 사이에 토크센서(T8, Interface)를 설치하여 직접적으로 측정할 수 있도록 하였다. 습동면 점착상태의 이탈(break-away) 시 이송거동을 정밀하게 측정하기 위해 0.1 μm 의 분해능을 가지는 선형 엔코더(LIDA 47, Heidenhain)를 추가적으로 설치하였으나, 제어루프에는 포함시키지 않고 변위만 측정할 수 있도록 하였다. 이송 시스템의 이송저항 토크와 변위 신호들은 신호수집보드(USB-6225, National Instruments)를 이용하여 획득하였다.

Fig. 1(a)는 실험장치의 구성을 도식적으로 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이, 본 연구의 실험장치는 전통적 이송 시스템에 토크센서와 신호 수집장치가 추가된 형태를 가진다. CNC 제어기와 드라이브를 이용하여 서보모터를 구동하고 신호 수집보드로 토크 센서로부터 얻은 구동 토크 및 선형 엔코더를 이용하여 얻은 미소 이송 거리를 수집하여 PC로 보낸다. 또한 제어기로부터 모터 엔코더로부터 이송 명령과 실제 이송의 차이값을 수집하도록 하였다. Fig. 1(b)는 실제 실험장치에 사용된 이송 테이블을 보여준다. 사용된 이송 테이블은 약 22 cm의 이송범위를 가진다. LM 가이드와 볼스크류의 윤활제로는 그리스(AFE-CA, THK)가 사용되었으며, 해당 그리스는 허용온도 범위가 $-40 \sim 180^\circ\text{C}$ 이며, 동점도(kinetic viscosity)가 40°C 에서 99 mm²/s이다.



(a) Schematics of a feed drive system for friction torque measurement



(b) Actual single-axis linear motion table with a torque sensor

Fig. 1 Experimental setup

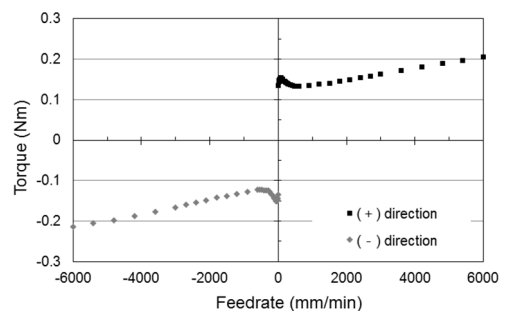


Fig. 2 Stribeck curve

2.2 동마찰 특성의 추출

이송 테이블의 동마찰 특성을 추출하기 위해 실험을 통해 Stribeck 곡선을 획득하였다. 이를 위한 실험은 다양한 속도에 대해 이송 테이블이 등속(constant velocity) 이송을 수행하고, 등속 구간에서의 평균 구동 토크를 측정하여 얻어졌다. Stribeck 곡선은 임계속도(critical velocity)를 기준으로 곡선 거동이 크게 다른 특성을 가지므로 높은 속도에서 낮은 속도로 감소시키며 속도에 대한 측정 간격을 줄이며 실험하였다. 또한 실험은 양과 음의 두 방향 모두에 대해 수행하였다. 이송속도의 범위는 -6,000부터 6,000 mm/min로 하였다.

Fig. 2는 윤활제로 그리스를 사용한 이송 테이블을 정 방향과 역 방향에 대해 동일한 속도로 세 번의 실험을 반복하여 얻어진 평균 Stribeck 곡선을 보여준다. 각 점은 평균값으로서 그 표준편차는 각 평균값의 1.5 %를 넘지 않았다.

그림에서 보인 바와 같이 실험에 이용된 소형 이송 테이블은 일반적인 Stribeck 곡선의 경향을 잘 따르고 있으며, 임계속도 이상에서는 이송속도가 증가함에 따라 마찰 토크가 선형적으로 증가하는 점성마찰의 거동을 잘 보이고 있다. 임계속도는 약 600 mm/min 주변에 있음을 알 수 있다. 따라서, 정지상태, 초 저속부분의 경계 윤활(boundary lubrication), 저속부터 임계속도까지의 부분 유체 윤활(partial fluid lubrication), 완전 유체 윤활(full fluid lubrication) 등의 세 구간으로 나눠 구성됨을 볼 수 있다. Fig. 2로부터 추정할 수 있듯이, 실험에 사용된 그리스 윤활 이송 테이블은 약 0.12 Nm

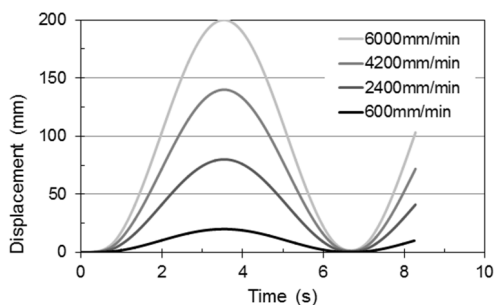
의 쿨롱마찰(Coulomb friction)을 가짐을 알 수 있으며, Stribeck 효과의 크기는 약 0.03 Nm임을 알 수 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 임계속도는 약 600 mm/min이다.

2.3 히스테리시스 거동의 추출

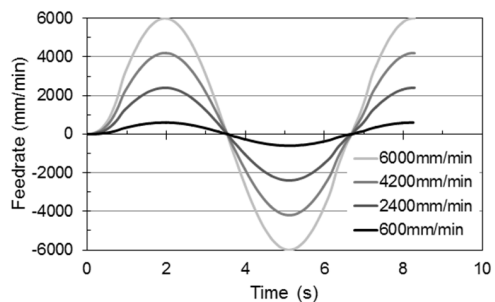
이송 테이블의 히스테리시스 거동을 확인하기 위해 실험조건을 정의하였다. 갑작스러운 속도 변화에 따른 관성효과가 구동토크에 영향을 미치는 것을 최소화하기 위해 삼각함수 모양의 속도파형을 가지도록 하였다. 또한 양의 방향과 음의 방향 모두로 이송을 하도록 하기 위해 삼각함수의 1주기 이상이 포함되도록 하였다. 따라서 변위도 삼각함수 모양을 가지게 되었으며, 이송 범위를 모두 활용 하도록 하였다.

Fig. 3은 실험조건으로 사용된 이송속도와 위치 파형을 보여준다. 특히, Fig. 3(a)에서 보인 바와 같이 변위는 원점부터 200 mm 까지 이송범위를 모두 포함하고 있다. 한편, Fig. 3(b)에서 보인 이송속도의 파형은 1.25주기를 가지며, 약 3.4초 지점과 6.8초 지점에서 양에서 음으로 그리고, 음에서 양으로 속도가 변하는 구간을 가지고 있다. 따라서, 마찰력과 위치에 대한 Lu/Gre 모델^[5]의 최대 이송지점과 최소이송지점에서 보이는 마찰력의 수직 천이 구간이 모두 보이도록 하였다. 그림에서 보인 바와 같이 삼각함수 모양의 이송속도 파형에서 진폭이 6000부터 6,000 mm/min에 이르는 네 가지의 조건에 대해 수행되었다. 삼각함수 파형은 동일한 주파수를 가지도록 하였다. 그림에서 정지마찰 및 초기 출발시의 CNC의 가감속 제어 및 정지마찰에 의한 영향을 없애기 위해 0~2 초까지의 신호들을 제외하고 2초부터 약 8초까지의 신호만을 사용함으로써 시간에 따른 이송속도 그래프가 코사인(Cosine) 함수의 형태를 가지도록 하였다.

마찰력의 이력현상을 확인하기 위해 각 조건 별로 변위에 대한 마찰력의 거동을 분석하였다. Fig. 4는 변위에 따른 마찰력을 나타내는 구동토크의 거동을 보여준다. 그림에서 보인 바와 같이 일반적인 마찰력 히스테리시스 거동을 가짐을 확인할 수 있다. 그러나 이 그래프만으로는 히스테리시스 거동을 명확히 규정하기 곤란하



(a) Displacement



(b) Feedrate

Fig. 3 Motion condition for hysteresis experiments

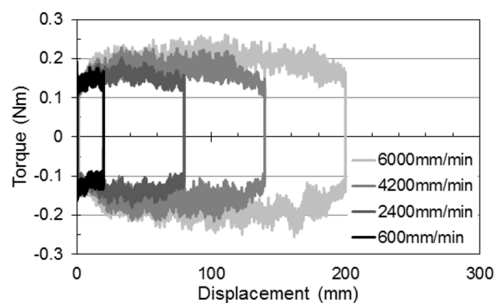


Fig. 4 Friction behavior with respect to displacement when table moves under sinusoidal shape feedrates

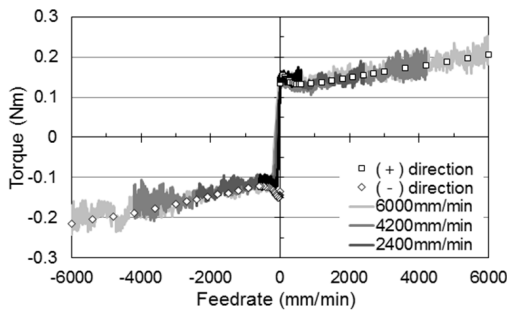
며, 다양한 측면의 분석이 필요함을 할 수 있다.

본 연구에서는 히스테리시스 거동을 이송속도에 따른 마찰력 거동인 Stribeck 곡선과 비교함으로써 일반적인 동마찰 특성과 차이를 확인코자 하였으므로, 이송속도에 따른 마찰력의 거동을 비교하였다. Fig. 5는 Fig. 3에서 보인 이송조건에서 약 3.4초에서 나타난 양의 속도에서 음의 속도로 천이되는 시점 전후 각각 1.5초동안 얻어진 이송속도에 관한 구동토크 곡선을 Stribeck 곡선과 함께 보여준다. 우선, Fig. 5(a)에서는 전 속도 영역에서의 마찰력의 거동을 확인할 수 있다. 이로부터 히스테리시스 거동을 포함하는 마찰력 또한 Stribeck 곡선과 높은 일치도를 보임을 알 수 있다. 그러나, Fig. 5(b)에서 보인 바와 같이 정지상태에 가까운 저속 영역에서는 Stribeck 곡선과는 큰 차이를 가짐을 알 수 있다. 특히 해당 조건이 양의 속도에서 음의 속도로 바뀌는 구간에서의 마찰력 천이구간임을 고려할 때, 양의 속도 구간에서는 Stribeck 곡선과 높은 일치도를 보이며, 영 속도에서 음의 속도로 진행되면서 거동에서 큰 차이를 보임을 알 수 있다. 속도측면에서의 지연과 유사한 효과를 보임을 알 수 있다.

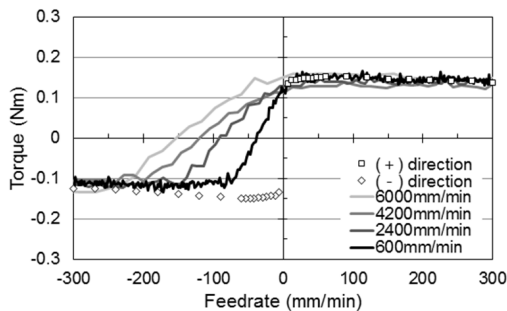
Fig. 6는 Fig. 3에서 보인 이송조건에서 약 6.8초에서 나타난 음에서 양의 속도로 천이되는 시점 전후 약 1.5초동안 얻어진 구동토크를 Fig. 5와 같이 Stribeck 곡선과 함께 보여준다. Fig. 5에서와 마찬가지로 Fig. 6(a)에서는 전 속도 영역에서의 마찰력의 거동을

확인할 수 있으며, Fig. 6(b)에서는 -300부터 300 mm/min까지의 상대적으로 좁은 속도구간에 대한 비교결과를 보여준다. Fig. 5에서와 마찬가지로 전체적인 범위에서는 Stribeck 곡선과 높은 일치도를 보이지만, 정지상태에 가까운 저속 영역에서는 Stribeck 곡선과는 큰 차이를 가짐을 알 수 있다. 또한 음에서 양의 속도로 바뀌는 구간으로서 음의 속도 구간에서는 Stribeck 곡선과 높은 일치도를 보이지만, 양의 속도로 천이되는 구간에서 큰 차이를 보임을 알 수 있다. 이와 같이 속도가 부호를 바꾸는 과정에서 그 효과가 명확히 드러남을 확인할 수 있다.

Fig. 5와 Fig. 6에서 동마찰 특성과 비교함으로써 추정된 히스테리시스의 거동에 대한 사항을 정리하면 다음과 같다. 우선, 히스테리시스 거동을 가지는 마찰특성 또한 Stribeck 곡선으로 대변되는 동마찰 특성을 잘 반영하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 속도가 연속적으로 변하는 경우에서도 마찰력의 크기는 Stribeck 곡선이 보여주는 속도와 마찰력 간의 관계를 잘 반영한다. 이는 Fig. 5(a)와 Fig. 6(a)에서 잘 드러나 있다. 한편, Fig. 5(b)와 Fig. 6(b)에서 보인 바와 같이 정지상태를 지나는 구간에서는 Stribeck 곡선을 그대로 반영하지 못하는 것을 볼 수 있다. 이러한 차이를 보다 정확히 정의하면, 속도가 영(zero)에 도달하기까지는 Stribeck 곡선을 정확히 반영하지만 속도가 영에 도달하여 반대 부호의 속도로 진행되는 초기 구간에서 Stribeck 곡선과는 큰 차이를 보임을 알 수 있다.

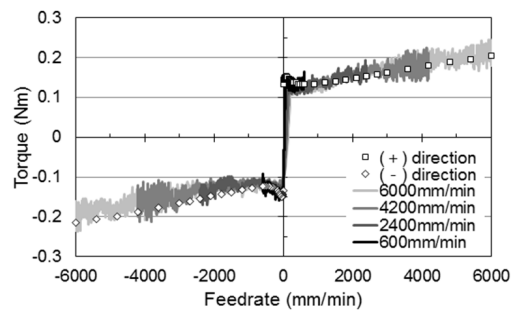


(a) Feedrate range: -6,000~6,000

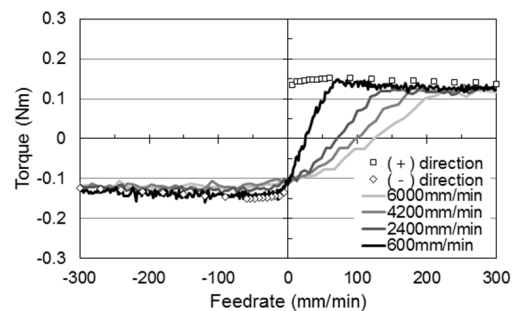


(b) Feedrate range: -300~300

Fig. 5 Friction behavior with respect to displacement when table moves under sinusoidal shape feedrate (from 2.0~5.1 s; positive to negative feedrates)



(a) Feedrate range: -6,000~6,000



(b) Feedrate range: -300~300

Fig. 6 Friction behavior with respect to displacement when table moves under sinusoidal shape feedrate (from 5.1~8.2 s; negative to positive feedrates)

마찰력 거동의 차이가 큰 정지상태를 지나 속도가 증가되는 초기 부분에 대해 보다 구체적으로 정리하면 다음과 같다. 해당 구간에서는 Stribeck 곡선에서 보이는 해당속도에 대한 마찰력에 비해 적은 마찰력이 발생한다. 마찰력은 지연 모델과 유사한 거동을 보인다. 또한, 속도가 더 빠르게 증가하는 조건에 대해 마찰력의 천이특성 또한 더 빨리 진행된다. 이상의 사항을 고려하여 시간적인 측면에서 마찰력의 거동을 분석하였다. Fig. 7은 각각의 조건에 대해 시간에 따른 변화를 보인 것이다. 그림에서 약 6.66초 근처에서 영속도를 지났으며(zero-velocity crossing), 이 후 양의 속도로 점진적으로 증가하였다. 이 경우 Fig. 3에서 보인 다양한 이송 조건에 따라 천이 특성이 달라짐을 보인다. 특히, 늦은 속도일수록 천이 기간이 더 길어짐을 알 수 있다. 따라서 조건에 따라 마찰력은 시간지연을 가지는 것으로 결론지을 수 있다.

시간지연 특성을 분석하기 위해 Fig. 7에서 보인 바와 같이 마찰력의 시간에 대한 천이 거동으로부터 시정수(time constant)를 추출하고, 이를 이송조건에 대한 평균 가속도와 비교하였다. 이를 위해 600 mm/min부터 6,000 mm/min까지 600 mm/min씩 증가시켜 총 10가지의 조건에 대해 5번씩 반복실험을 수행하여 그 결과를 Fig. 8에서 나타내었다. 그림으로부터 마찰력 천이 거동의 시정수는 평균가속도가 증가함에 따라 감소하는 거동을 가짐을 알 수 있다.

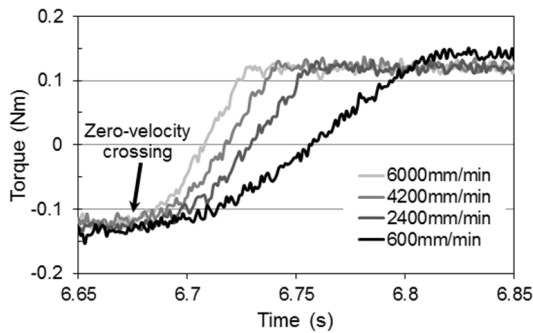


Fig. 7 Transient behavior of friction after zero-velocity crossing

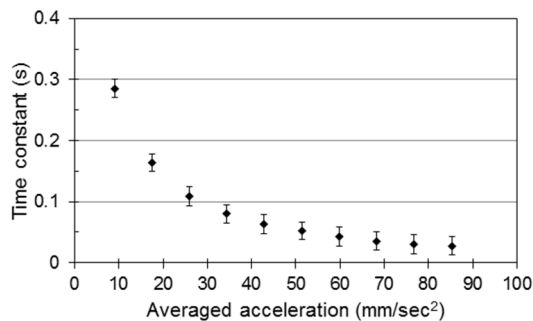


Fig. 8 Time constant of transient behavior of friction with respect to averaged acceleration

3. 결론

본 연구에서는 그리스로 윤활된 소형의 볼스크류 기반 직선 이송 테이블의 히스테리시스 특성을 동마찰 특성과 비교하여 분석하였다. 이를 위해 예압이 걸린 볼스크류와 LM 가이드, AC 서보모터로 구성된 직선 이송 테이블을 구성하였으며, 이송계의 이송저항 토크를 측정하기 위해 토크센서를 추가하였다. 또한 미세 이송을 검출하기 위해 모터에 연결된 회전형 엔코더에 비해 상대적으로 분해능이 높은 선형엔코더를 추가로 부착하여 이용하였다. 이를 이용하여 이송테이블의 동마찰 특성인 Stribeck 곡선을 추출하였으며, 삼각함수 속도과형을 제시하여 히스테리시스 거동을 획득하고, 이를 Stribeck 곡선과 비교하였다. 비교를 통해 히스테리시스 거동은 영속도를 지나 부호가 변경된 초기 구간에서 나타나며, 나머지 구간에서는 Stribeck 곡선과 동일한 거동을 가짐을 보였다. 이로부터 히스테리시스 거동은 속도의 방향이 바뀌어 후 짧은 시간동안 시간지연과 같은 효과로 정의될 수 있으며, 시간지연의 크기는 가속도와 밀접한 관계를 가짐을 확인하였다. 본 연구의 결과를 바탕으로 다양한 윤활 조건에 대해 다양한 가속도에 대한 영향을 분석함으로써 히스테리시스 거동에 대한 수학적 모델의 구성과 예측에 활용될 수 있을 것이다.

후 기

본 논문은 산업통상자원부 산업융합원천기술개발사업 (10033735, 기계장비 제어/방진특성 예측 시뮬레이터 개발)으로 지원된 연구 결과입니다.

References

- [1] Jeong, Y. H., Min, B. -K., Cho, D. -W., Lee, S. J., 2010, Motor Current Prediction of a Machine Tool Feed Drive using a Component-based Simulation Model, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 11:4 597-606.
- [2] Armstrong-Helouvry, B., Dupont, P., Canudas De Wit, C. C., 1994, A Survey of Models, Analysis Tools and Compensation Methods for the Control of Machines with Friction, Automatica, 30:7 1083-1138.
- [3] Johnson, K. L., 1987, Contact Mechanics, Cambridge University Press, Cambridge.
- [4] Dahl, P., 1968, A Solid Friction Model, TOR-158(3107-18), The Aerospace Corporation, El Segundo(USA)
- [5] Padthe, A., Drincic, B., Oh, J., Rizos, D., Fassois, S., Bernstein,

- D. S., 2008, Duhem Modeling of Friction-induced Hysteresis, IEEE Control Systems Magazine, 28:5 90-107.
- [6] Canudas de Wit, C., Olsson, H., Astrom, K. J., Lischinsky, P., 1995, A New Model for Control of Systems with Friction, IEEE Transactions on Automatic Control, 40:3 419-425.
- [7] Choi, J. J., Kim, J. S., Han, S. I., 2004, Pre-sliding Friction Control using the Sliding Mode Controller with Hysteresis Friction Compensator, KSME International Journal, 18:10 1755-1762.