

이송전류신호를 이용한 이송계의 마찰특성에 관한 연구

Friction Characterization of Feed Drive Systems using Feed Motor Current

김기대(서울대 대학원), 조현우(서울대 대학원), 주종남(서울대학교 기계설계학과)

ABSTRACT

In machine tools, frictional force exists between the table and the bed, and in ballscrews. In this paper, feed motor current is used to measure the motor torque and frictional force. A hall sensor is used to measure the feed motor current. Some frictional phenomena in feed drive systems, such as, the relationship between feedrate and frictional force, lubrication conditions and frictional force, and feed direction and frictional force, are obtained. Generally, the friction behavior is in good agreement with Stribeck's curve. However, the data shows significant scatter when feedrate is high.

key words : frictional force, feed motor current, feedrate, lubrication conditions, feed direction,

Stribeck's curve

1. 개요

이송계에서 마찰의 존재로 인하여 불스crew의 효율이 저하되고 이송안내면의 마찰계수값이 변화하는 등 여러가지 현상이 따른다. 현재 연구되고 있는 여러 연구과제 중 각종 센서를 이용하여 공작기계의 상태를 감시하는데 있어서 마찰력 해석이 제대로 되어있지 않아 애로점이 많다. 현재까지도 해석의 어려움 때문에 연구가 제대로 진행되고 있지 않아 공작기계의 설계시에 어려움도 뒤따른다. 본 연구에서는 테이블과 베드사이 안내면의 마찰을 해석하기위하여 공작기계의 이송구동모터의 입력선을 통과하는 전류센서로서 각상의 교류전류를 측정하여 모터 토크를 구하고 적절한 모델링으로 마찰력을 구하였다. 실험을 통하여 이송속도와 마찰력과의 관계, 안내면의 윤활상태와 마찰력과의 관계, 이송방향에 따른 마찰력의 변화 등을 살펴보았다.

2. 이론적 배경

2.1 속도와 하중에 대한 마찰력의 일반적인 모델

속도와 마찰력과의 관계를 기준의 일반적인 모델링을 통해서 살펴보면, 점성 마찰력, 부울용 마찰력, 스틱슬립(stick-slip)으로 나뉘어지고 다음과 같은 부하케이스를 갖는다.

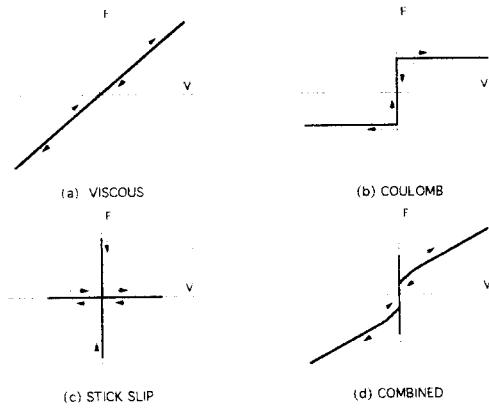


그림 1. 속도와 마찰력과의 관계 모델링

2.2 속도와 하중에 대한 윤활된 면에서의 마찰력의 모델

공작기계에서는 각축의 안내면을 통하여 이송되며, 각축의 안내면은 더브태일 안내면, 각형 안내면 등의 형상으로 연삭(grinding)된 면이나, 다카이트(Turcite)를 붙인 면으로 가운데에 오일이 지나갈 수 있는 홈이 파져있고 이를 통해 윤활시킨다. 테이블이나 판레트, 공작불 등이 이송되므로 이들의 하중으로 인한 쿠옹용 마찰력이 존재하며, 오일로 윤활된 이송면을 이송하면서 점성 마찰력이 존재하고 또한 이송속도와 이송량이

아주 작을 때 스틱슬립(stick-slip)이 존재한다. 이와같이 접촉 경계면에 윤활유가 존재하여 윤활막을 형성할 경우 마찰계수는 그림 2의 Stribeck곡선이 제시하는 바와 같이 ZN/P 의 값에 따라 변화한다. 여기서 Z 는 윤활유의 점도, N 은 미끄럼 속도, P 는 가해지는 하중을 뜻한다. ZN/P 가 아주 작은 경우, 실제적인 유막은 존재치않으며 따라서 윤활제의 점도는 중요하지 않고 두 접촉체와 윤활제 사이의 물리, 화학적 작용에 의해 형성된 단분자 두께의 흡착층이 접촉면에 존재하는 영역을 경계윤활(Boundary lubrication: 그림의 III영역)이라하여, ZN/P 가 어느정도 점차 증가할때는 비록 그 두께는 얇지만 유막이 형성되기 시작하여 두 접촉면간의 직접적인 접촉 기회가 감소하므로 마찰계수는 점차 감소한다.(부분탄성유체윤활 및 혼합윤활영역: II영역) 그러나 ZN/P 가 더욱 증가하기 시작하면 유막 두께가 계속 커지고 이에따라 윤활유의 점성 마찰 효과가 커지므로 마찰계수는 점차 키진다.(유체윤활 및 탄성유체윤활영역: I영역) 따라서 마찰계수는 유막의 존재여부 및 그 두께와 밀접하게 관련지어지며 이에따른 윤활영역의 분류가 그림 2에서 설명되고 있다.

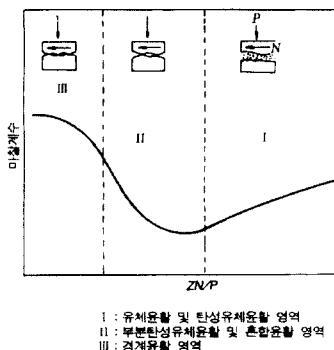


그림 2. Stribeck곡선과 윤활 영역의 분류

3. 실험장치구성 및 방법

3.1 전류센서

테이블 이송축의 전류를 측정하기 위하여 그림 3와 같은 형상의 전류센서(hall sensor)를 모터동력선에 인입하여 교류모터의 U상, V상의 전류를 측정하였다.

홀센서는 홀효과(hall effect)에 의하여 철십인을 관통하는 전류의 세기에 비례한 자장이 홀소자의 양단에 자계를 형성하여 비례하는 홀전압이 발생하게 되는 원리로 전류를 측정하는 센서이다. 이것은 주회로와 절연이 된 상태로 전류를 검출할 수 있어 양호한 전류량을 측정할 수 있다. 이러한 홀센서의 장점은 기계자체의 회로에 영향을 미치지 않고 전류의 세기에 따라 카신을 겪쳐서 설치함으로써 감도 문제를 해결할 수 있으며,

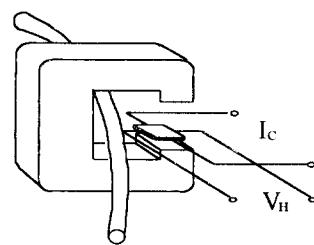


그림 3. 홀센서의 형상

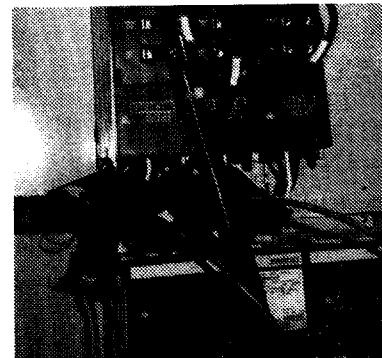


그림 4. 홀센서의 위치

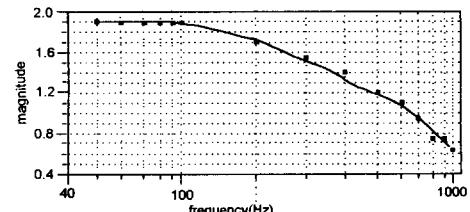


그림 5. 홀센서의 주파수 대역폭

비용면에서도 저렴하다는 점 등을 들 수 있다. 그러나 측정원리가 전자기 유도(electro-magnetic induction)현상을 이용한 것 이므로 주파수 대역에 제한을 받게된다. 그러므로 센서의 주파수 특성을 알아보기위하여 주파수대역폭(bandwidth)을 구하여 사용가능범위를 구하는 작업이 필요하다. 그림 5는 전류소스(current source)를 사용하여 구한 홀센서의 주파수 특성을 나타낸다. 실험결과 주파수 대역폭은 일반적인 밀링작업의 이송 상태를 감지하기에 충분하였다.

3.2 실험 방법

실험에 사용된 공작기계의 사양은 다음과 같다.

- * 머시인 종류 : (주)봉일중공업의 머시닝센터 MCH-10
- * 허용하중 : 500kg
- * X축 이송범위 : 600mm
- * X축 이송모터의 출력 : 4.7HP

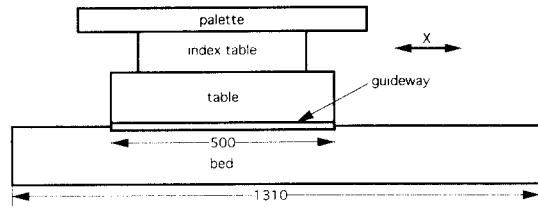


그림 6. 테이블과 베드, 팔레트, 이송안내면의 형상 및 치수

* X축 이송모터의 토크정수 : 12.0 kgf cm/A

* X축 이송 불스코류의 폭지 : 10 mm

* 테이블의 안내면 : 다카이토(turcite)면으로 길이 500mm

* 베드의 안내면 : 현상된 면으로 길이 1310mm

그리고 다음과 같은 과정으로 수차례 반복 실험하였다.

(1) 이송속도를 20mm/min에서 급속이송(10,000mm/min)까지 여러단계로 변화시켜가면서 이송속도에 따른 모터 토크 및 테이블 마찰력의 변화를 측정하였다.

(2) 이송 스토로코는 X축 최대이송범위 600mm 중, 중앙의 550mm만큼 음, 양 두방향으로 이송시켰고, 테이블의 위치에 따른 마찰력의 변화와 이송방향에 따른 마찰력의 변화를 살펴보았다.

3.3 모터토크의 계산

홀센서를 통해 측정한 이송축의 동력모터에 인입되는 U,V상 전류를 통해 전류 실효값, 모터의 토크, 테이블과 불스코류의 총 마찰력을 계약적으로 구할 수 있다.

먼저, 카르하호프 법칙에 의해 W상 전류치를 계산하고, 이들의 실효 전류치를 계산하다. 그리고 이 실효 전류치에 모터 사양에 나와 있는 토크 정수를 곱해서 토크값을 계산한다.

$$I_u = -(I_u + I_v) \quad (1)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{(I_u^2 + I_v^2 + I_w^2)}{3}} \quad (2)$$

$$\text{Torque(kgf cm)} = I_{rms}(A) \times \text{Torque정수(kgf cm/A)} \quad (3)$$

3.4 모터토크와 마찰력과의 관계

모터토크는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$T = J \frac{\partial \omega}{\partial t} + T_f + T_i \quad (4)$$

여기서 J 는 공작물과 이송개의 토트, 이송축, 베어링, 기어와 모터 자체의 관성모멘트를 나타내는 값이고, θ 는 각속도, T_f 는 마찰로 인한 토크손실, T_i 는 절삭력과 같은 외부 로드에 의한 토크의 손실을 나타낸다. 여기서 절삭을 하지 않고, 가감속이 없

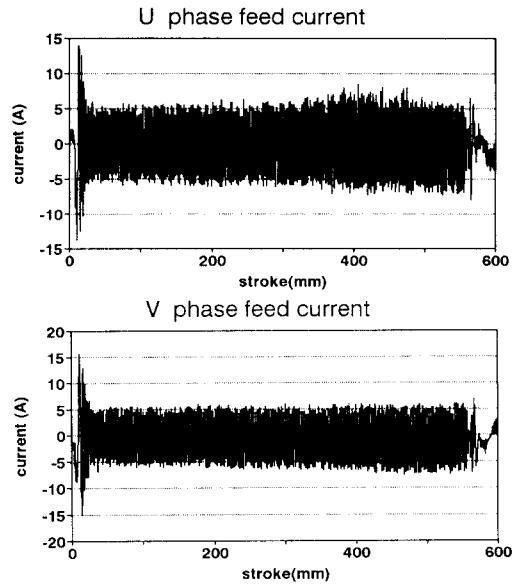


그림 7. 홀센서로 측정된 U상,V상 전류신호

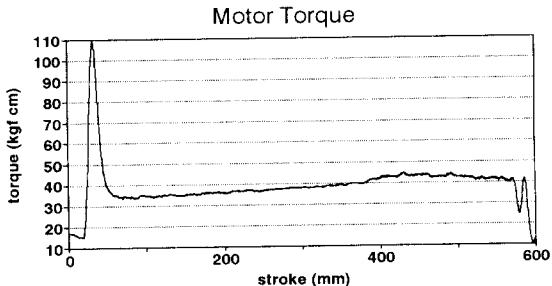


그림 8. 모터토크의 변화

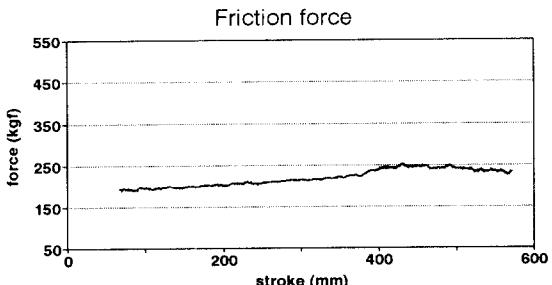


그림9. 테이블 마찰력의 변화

는 정상상태(strady-state)에서 모터 토크를 얻었다면 이는 공작기계 마찰 손실만으로 인한 토크이다.

정상상태에서의 마찰력은 불스코류에서 불에 의한 마찰력, 테이블과 베드사이의 안내면에서 마찰력의 합력으로 나타나나, 불스코류에서 생기는 마찰현상은 불스코류의 효율(η)로서 나타낼 수 있다. 대부분의 공작기계에서 불스코류의 효율을 0.9($\eta=0.9$)로 가정하므로 이에 따르기로 한다.

그리고 볼스크류 1회전당 테이블이 볼스크류 피치만큼 이송되므로 다음과 같은 모터 토크(T)와 테이블의 마찰력(F_f)과의 관계식이 성립된다.

$$\eta T \theta = F_f d \quad (\eta : \text{볼스크류 효율}) \quad (5)$$

$$F_f = \eta T \frac{\theta}{d} = \eta T \frac{2\pi}{p} \quad (p : \text{볼스크류 피치}) \quad (6)$$

위와같은 과정으로 공작기계 이송시 교류모터의 전류를 측정함으로써 테이블의 마찰력을 구할 수 있다. 그림 7.8.9에서 위의 과정을 그래프로 나타냈다.

4. 실험 및 결과

4.1 이송속도에 따른 테이블 마찰력의 변화

각 이송속도에 따른 마찰력의 변화를 여러번 반복 실험한 결과가 그림 10에 나타내었다. 이송속도가 증가함에 따라 안내면이 부분적으로 탄성유체윤활상태가 되어 모터 토크와 정상상태에서 이에 비례한 테이블의 마찰력을 감소한다. 이송속도가 300mm/min~500mm/min 이상이 되면 이송속도가 증가함에 따라 안내면이 유체윤활상태가 되어 점성 마찰의 증가로 테이블의 마찰력이 증가한다.(그림 11) 또한 이송속도가 작을 때는 여러번 실험을 하여도 같은 이송속도(이송조건)이면 같은 위치에서의 테이블 마찰력의 변화가 적으나, 이송속도가 커질 때는 이송시 필요한 모터토크는 테이블과 베드사이의 안내면의 윤활상태에 특히 민감해져 같은 이송속도라 하더라도 윤활상태의 변화에 따라 마찰력의 패턴 변화가 심하다. 이는 각 이송속도에서 반복 실험한 후 이송시 각 위치에 있어서 마찰력의 표준편차의 평균값을 살펴보면 알 수 있다.(그림 12)

4.2 테이블 위치에 따른 테이블 마찰력의 변화

같은 이송속도라고 할지라도 테이블의 위치(x축 이송위치)에 따라 테이블 마찰력이 변화한다. 원점(x=0mm)에서 멀어짐에 따라 마찰력이 서서히 변화하다가 x축 이송의 한계점(x=600mm)에 도달하였을 때는 마찰력이 크게 증가한다. 이렇게 마찰력이 증가하는 것은 다음과 같은 이유를 때문이라고 보여진다. 첫째, x축 이송의 한계점에 도달하였을 때는 그 위치까지 테이블을 자주 이송시키지 않아 테이블과 베드의 안내면의 표면 거칠기와 윤활 상태가 빈번히 사용하는 원점과 중앙 위치에 비하여 좋지 않고 볼스크류의 효율이 나쁘다는 것이고, 둘째, 원점에서 실험 준비를 하고 있을 때 이미 안내면에서 윤활막이 형성되어 윤활 상태가 어느정도 좋아졌으나 x축으로 이송함에 따라 윤활상태가 나쁜 안내면이 나타나기 시작하므로 마찰력이 증가하는 것으로 볼 수 있다.

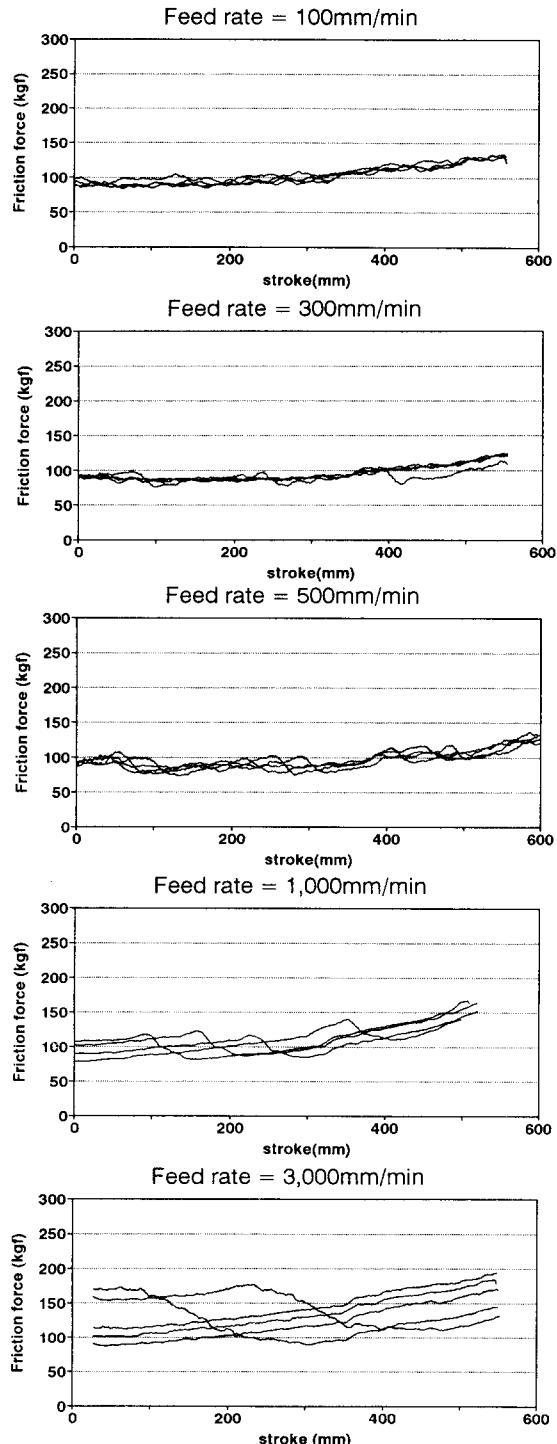


그림 10. 이송속도에 따른 마찰력의 변화의 반복실험 결과

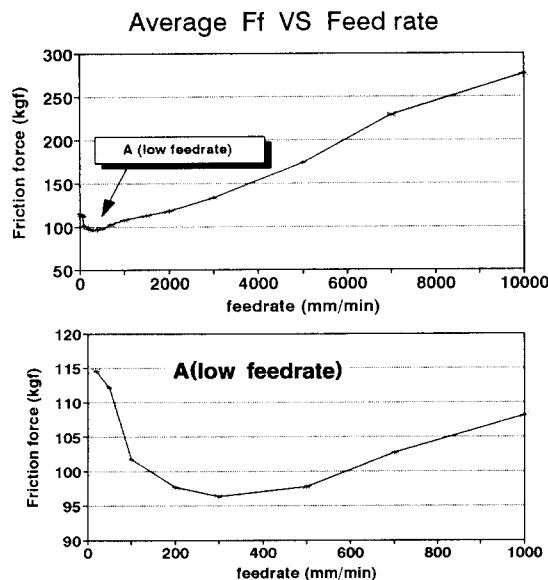


그림 11. 이송속도에 따른 평균 마찰력

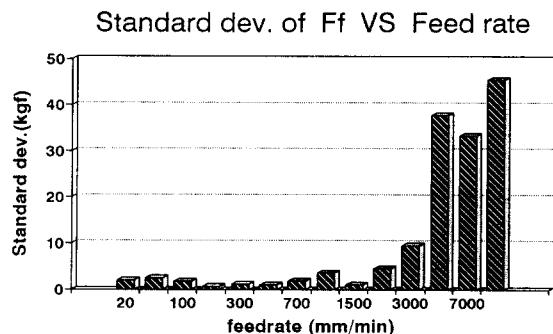


그림 12. 이송속도에 따른 평균마찰력의 표준편차

4.3 양(+)과 음(-)방향에 따른 테이블 마찰력의 변화

같은 이송속도라고 할지라도 양(+)방향으로 이송할 때와 음(-)방향으로 이송할 때에 마찰력의 변화 패턴이 달라진다. 이는 그림13과 그림10을 비교해보면 알 수 있다. 양(+)방향으로 이송시에는 마찰력이 점점 증가하는 패턴이 있으나, 음의 방향으로 이송시에는 테이블과 배드 안내면의 상태가 나쁘고 불스크류 효율이 나쁜 x=550mm 부분에서 마찰력이 크다는 것은 같으나, 원점으로 복귀할수록 윤활막이 형성되지 않아 윤활상태가 나쁜 부분을 지나면서 마찰력은 다시 키지는 성향을 보이고 있다.

5. 결 론

이송전류신호를 이용하여 테이블의 마찰력을 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 이송속도가 증가함에 따라 약 300mm/min~500mm/min까지만은 부분탄성유체윤활영역으로 마찰력이 작아지고 더욱

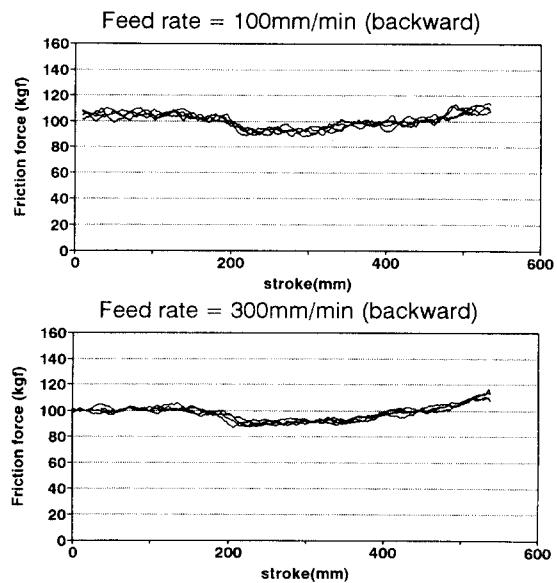


그림13. 음(-)방향 이송시의 마찰력의 변화

이송속도가 증가하면 탄성유체윤활영역이 되어 점성마찰의 증가로 마찰력이 증가한다.

- (2) 이송속도가 작을때는 실험을 반복하더라고 테이블의 위치에 따라 일정한 마찰력의 패턴을 보였으나 이송속도가 증가하면 이송안내면의 윤활상태에 특히 민감해져서 마찰력의 패턴이 윤활상태에 따라 많은 변화를 보였다.
- (3) 빈번히 사용되지 않는 x축 이송 한계점에서는 이송 안내면의 표면 거칠기와 윤활상태가 나쁘고, 불스크류효율이 나빠 마찰력이 증가한다.
- (4) 윤활막이 이미 형성된 지점과 형성되어있지 않은 위치에서 테이블 이송시 마찰력이 다른데 이는 x축 이송을 양(+)과 음(-)방향으로 이송시의 마찰력 패턴의 비교를 통해 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. 潤滑工學, 정문출판사, 韓國機器油化試驗検査所, 1991
2. "Computer simulation of stick-slip friction in mechanical dynamic systems" Transaction of the ASME, Vol.107, March 1985, pp 100-103, Dean Karnopp
3. "An investigation of stick-slip friction on the contouring accuracy machine tools" Int. J.Mach. Tools Manufact Vol.35, No.4, pp 565-576, 1995 Y.S.Tarn & H.E. Cheng
4. "Modeling and identification of a class of servomechanism systems with stick-slip friction", Transaction of the ASME, Vol.110, september 1988, pp 324-328, Ka C. Cheok & Hongxing Hu & Nan K. Loh