

마찰력이 작용하는 시스템의 Stick 구현을 위한 마찰모델 제안 및 정확성 검증

A dry friction model to realize stick for simulation of friction-induced dynamic system

최찬규* · 유홍희†

Chan Kyu Choi and Hong Hee Yoo

1. 서 론

마찰은 대부분의 기계 시스템에 존재하며 그 시스템 거동에 큰 영향을 미친다. 또한 마찰에 의해 불필요한 에너지 소모가 발생하며 진동 및 소음의 원인이 되기도 한다. 이러한 현상을 개선시키기 위해서는 정확한 해석을 통한 현상분석이 필요하며 이때 마찰력을 정확히 모델링 하는 것이 필요하다.

쿨롱 마찰 모델(Coulomb's friction model)은 일반적으로 가장 널리 알려진 마찰모델로써 그 형태가 단순하여 마찰이 작용하는 시스템의 해석 해를 구할 때 많이 사용된다. 쿨롱 마찰 모델은 정지마찰계수(static friction coefficient)와 동마찰계수(kinetic friction coefficient)로 표현된 단순한 형태의 마찰 모델이지만 그 함수 형태가 불연속이기 때문에 복잡한 시스템의 수치해석 시 적분 불안정과 같은 문제가 발생할 수 있다. 따라서 대부분의 다물체동역학 해석 프로그램들은 쿨롱 마찰 모델을 spline과 같은 연속 함수를 이용한 근사화된 마찰 모델을 사용하고 있다. 하지만 근사화된 연속 마찰 모델은 오직 상대속도의 함수이기 때문에 그 특성상 두 강체가 stick일 때 상대운동이 발생하지 않아야 함에도 불구하고 미끄럼 현상이 발생하는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 논문에서는 stick을 구현하기 위한 마찰 모델을 제안하였다. 제안된 마찰 모델은 slip상태에서는 기존의 근사모델과 동일하게 연속함수를 사용하여 모델링 되었지만 stick상태에서는 접촉하는 두 강체의 마찰력을 스프링

(spring)-댐퍼(damper)로 모델링 하였다. 이것은 stick 상태에서 접촉면이 외력의 크기에 따라 발생하는 탄성변형(elastic deformation)을 모델링 한 것이며 외력에 의한 접촉면의 탄성변형은 탄성변형한계(elastic deformation limit)를 넘어서지 않는 한 stick 상태를 유지하도록 하였다. 제안된 마찰 모델은 기존의 근사화된 연속 마찰 모델에 비해 stick 상태에서의 미끄러짐 현상이 매우 개선된 결과를 주는 것을 확인하였고 실험결과와 비교하여 그 정확성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 제안된 마찰 모델

Stick 구현을 위해 제안된 마찰 모델은 Fig. 1과 같으며 slip일 때($|v_{rel}| > v_s$)의 마찰력은 식 (1)과 같다. 여기서 a, b 는 형상 파라미터, v_{rel} 는 상대속도, v_s 는 정적 천이속도(static threshold velocity), 그리고 μ_k 는 동마찰계수이다.

$$\mu(v_{rel}) = a^{-(v_{rel}+b)} + \mu_k, \quad v > v_s \quad (1)$$

Stick일 때는 Fig. 1(b)와 같이 스프링-댐퍼로 모델링 되었고 강성 k_{stick} 와 댐핑상수 c_{stick} 는 탄성변형한계 개념을 이용하여 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

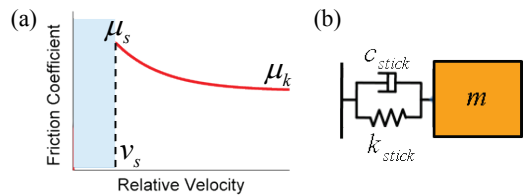


Fig. 1 Proposed friction model

† 교신저자; 정희원, 한양대학교 기계공학부
E-mail : hhyoo@hanyang.ac.kr
Tel : (02) 2220-0446, Fax : (02) 2293-5070
* 한양대학교 대학원 기계공학과

$$k_{stick} = \frac{\mu_s N}{e_{lim}}, \quad c_{stick} = 2\zeta \sqrt{k_{stick} m} \quad (2)$$

여기서 μ_s 는 정지마찰계수, N 은 수직항력, e_{lim} 는 탄성변형한계, ζ 는 감쇠비, m 은 질량이다. Stick상태의 마찰계수는 식 (3)과 같이 구할 수 있고 따라서 마찰력은 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$\mu(x_{rel}) = \frac{\mu_s}{e_{lim}} x_{rel} \quad (3)$$

$$F_{stick} = \mu(x_{rel})N + c_{stick} \dot{x}_{rel} \quad (4)$$

2.2 Stick 구현 예제

Fig. 2는 기울어진 경사면에 물체가 놓여있는 시스템이다. 여기서 $\tan \theta < \mu_s$ 이기 때문에 물체는 stick 상태로써 정지해 있어야 하지만 Fig. 3을 보면 근사화된 마찰 모델은 일정한 속도로 계속 미끄러지는 것을 알 수 있다. 그에 반해 제안된 마찰모델은 stick이 구현된 것을 알 수 있다.

2.3 제안된 마찰 모델의 정확성 검증

제안된 마찰 모델의 정확성을 검증하기 위하여 Fig. 4와 같은 friction oscillator의 실험결과와 제안된 마찰 모델을 이용한 해석 결과를 비교하였다.

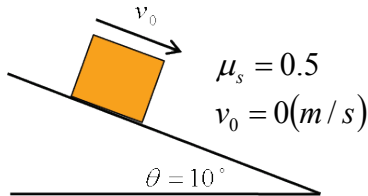


Fig. 2 A mass on inclined surface

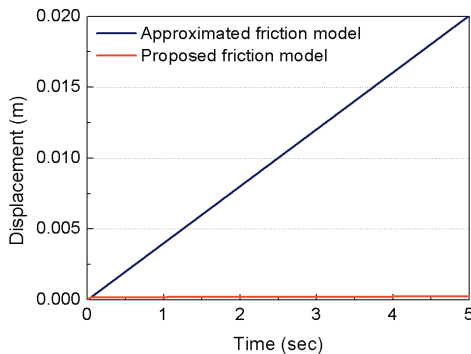


Fig. 3 Analysis result of a mass on inclined surface

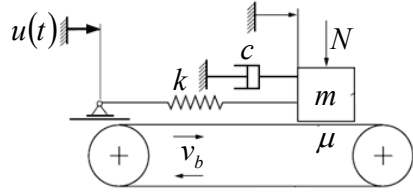


Fig. 4 The friction oscillator

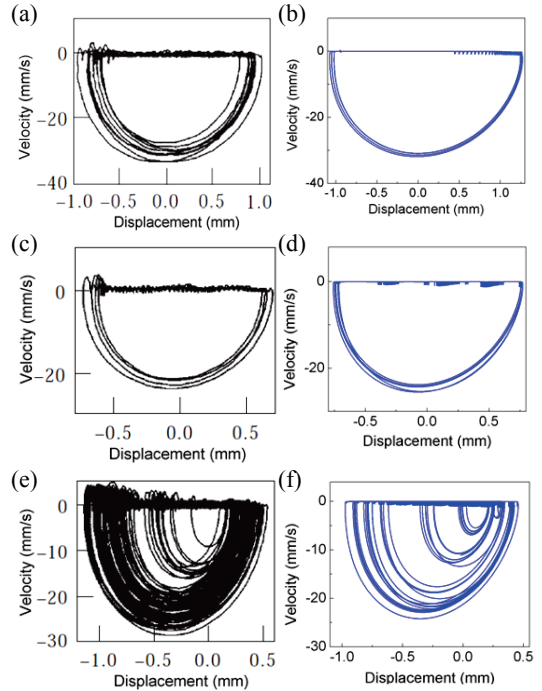


Fig. 5 Experiment(left) and simulation results(right)

Fig. 5(a), (b)는 $u(t) = 0$ 인 경우의 실험결과와 해석 결과를 비교한 것이고 Fig. 5(c)-(f)는 $u(t) \neq 0$ 이고 두 가지의 다른 가진 주파수에 대한 결과를 비교한 것이다. Fig. 5를 보면 제안된 마찰 모델이 실제 마찰 현상을 잘 나타낼 수 있음을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 stick 현상을 구현하기 위한 마찰 모델을 제안하였으며 제안된 마찰 모델은 stick을 구현할 수 있음을 확인하였다. 또한 제안된 마찰모델의 정확성을 실험결과와 비교하여 검증하였다.

후 기

이 논문은 2012년도 2단계 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.