

# 통계적 마찰 모델을 활용한 stick-slip 진동 해석과 정확성 검증

## Stick-slip vibration analysis by using statistical friction model and accuracy verification of the friction model

유흥희† · 강원석‡  
Hong Hee Yoo, Won Seok Kang

**Key Words :** Stick-slip vibration(스틱-슬립 진동), Friction oscillator(마찰 진동자), Monte Carlo simulation(몬테카를로 시뮬레이션), Deterministic friction model(확정적 마찰 모델), Statistical friction model(통계적 마찰 모델)

### ABSTRACT

In this study, friction stick-slip vibration're interpretation of the phenomenon, we used a statistical model of friction. In a previous study using a definite friction factor, but to a dynamic simulation using a constantly changing during the integration time by a Monte Carlo simulation method, not the average coefficient of friction and the dynamic friction coefficient and a constant value in this study.

### 1. 서 론

Fig.1 에서와 같이 바이올린 현과 활의 진동, 문이 삐걱거리는 소리, 차량용 디스크 브레이크의 스컬 소음과 와인 잔의 울림은 우리가 일상 생활에서 쉽게 접할 수 있는 Stick-slip 진동의 형태들이다. <sup>(1)</sup> 마찰 접촉에 의해 발생한 Stick-slip 진동은 기계 시스템에서도 관찰된다. Stick-slip 진동이 발생하는 원인은 두 강체 사이의 저속 미끄러짐 현상 및 부하의 변동에 따라 마찰 특성이 감소하기 때문이다. 또한 기계 시스템에서 부품들 사이의 마찰 접촉으로 발생한 Stick-slip 진동은 불필요한 기계적 떨림을 유발하며 이는 곧 부품들의 마모 및 수명단축의 원인이 되기 때문에 사전에 억제시켜야만 한다. 따라서 마찰 현상을 실제와 유사하게 묘사하고 해석 효율성이 높은 마찰 모델이 필요로 하게 되었으며 다양한 마찰 모델의 연

구가 있었다. 통상적으로는 많은 기계 시스템에서 역학적 단순성과 편리함 때문에 Fig.2 (a)와 같은 쿨롱의 마찰 모델을 사용하고 있다. 하지만 쿨롱의 마찰 모델은 힘의 불연속으로 인해 수치 적분 과정에서 문제가 발생한다. 이에 Song 등은 쿨롱 마찰 모델을 근사화하여 간단하면서도 연속적인 마찰 모델을 제안하였다. <sup>(2)</sup> 그리고 다물체동역학 해석 툴인 RecurDyn 에서는 Fig.2 (b)와 같은 근사화된 쿨롱 마찰 모델을 사용하고 있다. <sup>(3)</sup> 그 결과, 적분구간의 안정성을 보장함으로써 해석의 효율성을 높일 수 있었지만 두 강체가 점착조건으로 접촉 하고 있을 때 저속으로 미끄러지는 현상을 구현하지 못하는 문제점이 있었다. 이를 개선하고자 Roh 등은 새로운 마찰 모델을 제안하였다. <sup>(4)</sup> 그러나 제안된 마찰 모델은 기존의 마찰 모델의 문제점을 개선하였지만, 실험결과를 매우 유사하게 표현할 수 없었다. 기존의 마찰 모델들에서는 정마찰계수와 동마찰계수가 평균값으로 주어진다. 하지만, 본 연구에서는 이 두 마찰계수가 평균값으로 정해진 값이 아닌 몬테카를로 시뮬레이션 방법을 통해서 시간적분 시 지속적으로 변하는 값을 이용해 동역학 시뮬레이션을 하고자 한다.

† Corresponding Author; Member, Department of Mechanical Convergence Engineering, Hanyang University  
E-mail : hhyoo57@gmail.com

Tel : + 82-2-2220-0446 , Fax : + 82-2-2293-5070

‡ Member; Department of Mechanical convergence Engineering, Hanyang University



Fig. 1 Examples of stick-slip vibrations

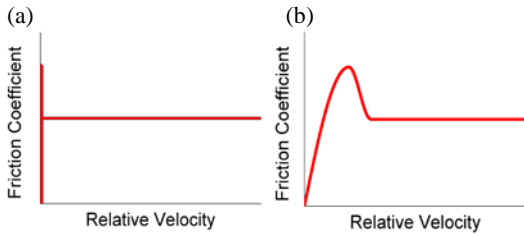


Fig. 2 (a) Coulomb friction model and (b) RecurDyn friction model

## 2. 마찰모델

### 2.1 해석 모델 수립

Fig. 3은 stick-slip 진동을 구현한 마찰계수 함수로 식 (1)와 같은 형태의 함수를 사용하여 구현되었다.

$$\begin{aligned} \mu &= -a^{(v-b)} - \mu_k, \quad v < -v_s \\ \mu &= \frac{\mu_s - \mu_k}{(v_s)^\beta} v^\beta, \quad -v_s \leq v < v_s \\ \mu &= a^{-(v+b)} - \mu_k, \quad v > v_s \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $\mu_s$ 와  $\mu_k$  정적 및 동적 마찰계수를 나타내며  $\beta$ 와  $a(>1.0)$ 의 값은 사용자가 결정하는 상수값이다.

### 2.2 확정적 마찰 계수와 통계적 마찰 계수

Fig. 4는 stick-slip 진동을 구현한 1자유도 마찰진동자 모델이며, Table. 1은 마찰 진동자에 들어가는 물성치이다. Fig. 5는 확정적 마찰계수와 통계적 마찰계수의 차이점을 알아보기 위해 참고 문헌 [1]에 있는 실험결과를 제안된 모델을 이용

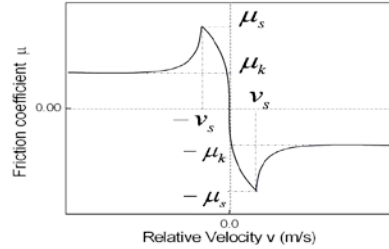


Fig. 3 Proposed friction model

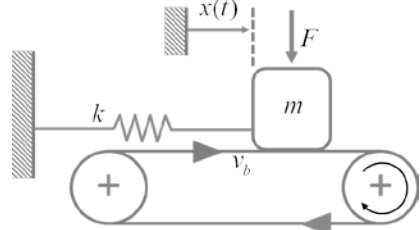


Fig. 4 1DOF friction oscillator

Table 1 Properties of friction oscillator

Parameter	value	Parameter	value
$m(kg)$	6.08	$k(N/m)$	3956
$c(Ns/m)$	0.768	$N(N)$	13
$u_0(m)$	0	$v_b(m/s)$	0.0025
$\mu_s$	0.8	$\mu_k$	0.46

하여 해석결과와 비교하였다.

Fig. 6은 정마찰계수와 동마찰계수가 각각 0.8과 0.46으로 정해졌으며, Fig. 7은 정마찰계수와 동마찰계수를 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 얻은 난수들로 구현한 해석 결과이다. 이 때, 평균값은 0.8과 0.46을 대입하였으며, 표준편차값은 평균값의 5%에 해당하는 0.04와 0.023의 값을 대입하여 얻은 결과이다.

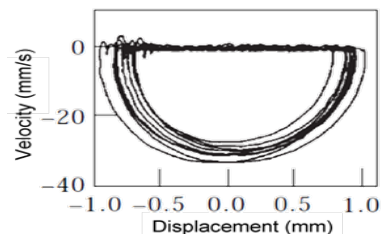


Fig. 5 Experimental result

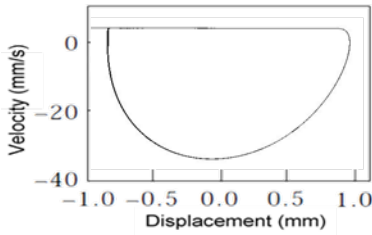


Fig. 6 Simulation result (Deterministic)

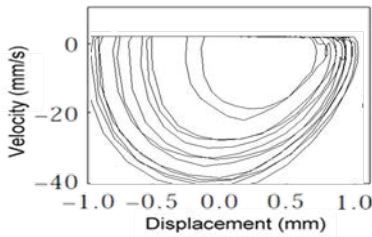


Fig. 7 Simulation result (Statistic)

### 3. 결 론

본 연구에서는 몬테카를로 시뮬레이션 기법을 활용하여 마찰계수를 구하였으며, 마찰계수가 평균값으로 주어졌을 때와 확률적 변수로 주어졌을 때의 차이에 대해 연구하였다.

### 후 기

본 연구는 2011년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20111510100050)

### 참 고 문 헌

- (1) Hinrichs, N., Oestreich, M., and Popp, K., 1998, On the modeling of friction oscillators, *J. Sound Vibration*, Vol. 216, No. 3, pp. 435~459.
- (2) Song, P., Krauss, P., Kumar, V. and Dupont, P., 2001, Analysis of rigid body dynamics models for simulation of systems with frictional contacts, *J. Appl. Mech.*, Vol. 68, pp. 118~128.
- (3) RecurDyn Manual(version 6.2), 2005.
- (4) Roh and Yoo, 2007, Transactions of the Korean society for noise and vibration engineering, Vol. 17, No. 6. pp. 524~530