

# 마찰 곡선에 따른 마찰 소음 특성

## Characteristics of Friction Noise with Respect to Friction Curve

남 재 현\* · 강 재 영†  
Jaehyun Nam and Jaeyoung Kang

(Received February 20, 2013 ; Revised April 1, 2013 ; Accepted April 3, 2013)

**Key Words** : Friction Noise(마찰 소음), Friction Curve(마찰 곡선), Negative Damping(음의 댐핑), Pin-on-disk(회전 마찰시험계)

### ABSTRACT

The characteristics of friction noise due to the friction-velocity curve is experimentally investigated through the pin-on-disk setup. The rotation speed of the disk is controlled in order to produce the sliding speed variation. Then, the friction coefficient and the corresponding friction noise are simultaneously measured with respect to the sliding speed between the steel disk and aluminum pin. The experimental results show that the negative friction-velocity slope is essential in generating friction noise.

### 1. 서 론

접촉한 두 물체의 상대운동의 결과로 이들 재료의 마찰이 발생하며, 진동과 소음을 유발하는 매우 중요한 원인이 된다. 마찰 소음 현상은 기계의 신뢰성을 결정하는 매우 중요한 요소이다. 따라서 마찰에 의한 진동 소음의 발생 원인과 이를 제어하기 위한 노력은 과거부터 현재에 이르기까지 끊임없는 연구의 대상이 되어왔다.

상대운동에서 발생하는 마찰력은 두 물체의 물리적 특성 및 복합 환경적인 요소의 영향을 받는다. 그 외 실험 방법의 조건 변화에 따라 다르게 측정될 수 있으며, 많은 인자들에 의해 변화하는 특성을 지닌다.

마찰에 의한 진동 소음 역시 마찰력과의 상호 관

계에 따라 위와 같은 다양한 인자들에 영향을 받는다. 마찰에 의한 진동 소음 현상에 대해 Jibki와 Chen 등<sup>(1,2)</sup>은 실험을 통해 마찰 소음은 마모량 사이의 상관관계가 존재함을 실험적으로 연구하였고, Kang<sup>(3,4)</sup>은 복잡한 마찰 소음 현상이라도 이론적 전개가 가능함을 보여 보다 체계적으로 접근하였다. Suh 외<sup>(5)</sup>는 마찰 발생에 대한 기초 연구를 바탕으로 한 stick-slip 현상에 대해 접근하였다. 건성 상태의 연구는 위와 같은 실험으로 전개되고 있으며, 일반적인 마찰 기계 시스템의 경우 윤활 작용이 매우 중요한 인자가 된다. 따라서 Nogueira 등<sup>(6)</sup>은 혼합 윤활(mixed)에서의 마찰 모델을 설계하여 다양한 인자들을 설계 변수로 실험 하였다. Ostvik 외<sup>(7)</sup>는 표면 상태가 기계 부품들의 수명을 결정하는 요소임을 squashing 현상을 통해 서술하였고, Pawlus 외<sup>(8)</sup>는 회전 시간 동안의 마모는 거칠기 분포와 형태에 따

† Corresponding Author ; Member, Division of Automotive & Mechanical Engineering, Kongju National University  
E-mail : jkang@kongju.ac.kr  
Tel : +82-41-521-9268

\* Division of Automotive & Mechanical Engineering, Kongju National University

‡ Recommended by Editor Sung Soo Na

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

라 달라짐에 대해 연구하였다. Andersson 등<sup>(9)</sup>은 윤활 메커니즘을 혼합 윤활에서 완전 윤활 상태의 변화로 서술하였다. 또한 Kang<sup>(10)</sup>은 음의 기울기는 마찰 소음의 중요한 인자임을 이론적으로 검증하였다. Nam<sup>(11)</sup>은 기초 마찰 시험을 통해 음의 기울기는 소음의 중요한 인자임을 확인하였으며, 음의 기울기를 고려한 FEM brake squeal 해석<sup>(12)</sup>을 통해 음의 기울기에 의해 특정한 모드에서 squeal이 발생할 수 있음을 확인 하였고, 음의 기울기가 마찰 소음에서 매우 중요한 인자임을 연구하였다.

따라서 이 논문은 주요한 소음 메커니즘 중 하나인 마찰 곡선에 의한 소음 특성을 확인하고자 가장 일반적인 형태의 마찰 시험기인 pin-on-disk를 설계하고 제작하였다. 이 시스템에서의 마찰 곡선을 확인하였으며, 마찰 곡선의 기울기의 변화가 진동 특성에 미치는 영향에 대해 연구하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 실험장치

이 논문에서 사용된 시험기는 일반적으로 마찰 시험에서 사용되는 pin-on-disk를 Fig. 1과 같이 직접 제작하여 데이터를 계측하였다. 추를 이용하여 하중을 부과하였고, 스텝 모터로 회전판을 회전시켜 마찰재와 디스크의 마찰을 유도하였다. 마찰력은 토크센서를 이용하여 토크가 계측되며, 수확적인 연산을 거쳐 마찰계수로 환산하였다.

진동은 1축 가속도계를 핀 근방에 부착하여, 핀과 가까운 위치에서 마찰방향의 진동을 계측하였고, 3축 가속도계를 pin-on-disk 몸체에 부착하여 3축 방향

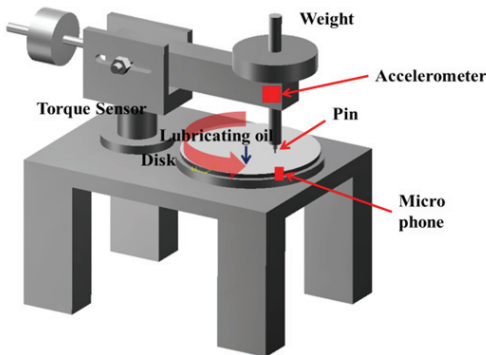


Fig. 1 Pin-on-disk system

진동을 계측하였다. 일반적으로 1축 가속도계는 1.0~25 kHz까지 사용되며, 3축 가속도계는 1.0~10 kHz까지 계측에 사용되는 장비이다. 소음은 마이크로폰을 마찰 방향과 근접하게 설치하여 진동과 동시 계측하였다. 각 신호는 PC와 연동하여 계측장비 및 연산 프로그램을 통하여 데이터화하였다.

실험 환경은 습도 20% 온도 18℃에서 측정하였으며, 시편은 직경 150 mm 두께 5 mm의 스틸 디스크와 직경 2.15 mm의 알루미늄 핀을 사용하였다. 하중은 1 kg의 추를 사용하였으며, 몸체 후방의 평행 추를 이용하여 평형 상태를 유지하였다. 혼합 마찰을 가정한 시험을 수행하기 위해 초기 윤활제를 얇게 도포 한 후 지속적인 윤활제의 추가 공급없이 시험을 수행하였다. 이는 불안정 혼합 윤활상태 (mixed lubrication)에서 음의 기울기가 잘 나타나는 특성을 이용하기 위함이다.

실험은 이 시스템에서의 마찰 곡선을 연구하고 기울기의 변화가 진동 특성에 미치는 영향을 연구하고자 하였다. 따라서 음의 기울기가 존재할 때와 양의 기울기가 존재할 때의 마찰 소음진동 특성을 분석하였다. 혼합 마찰 초기 소음이 발생하지 않을 때부터 주기적인 소음이 발생한 후까지 계측하였다. 이 시험에서 사용된 계측 장비 및 연산 과정은 Fig. 2와 같다.

### 2.2 실험 개요

일반적으로 마찰 곡선 연구에서 이용되는 Stribeck curve는 여러 문헌들에서 사용되고 있으며, 마찰

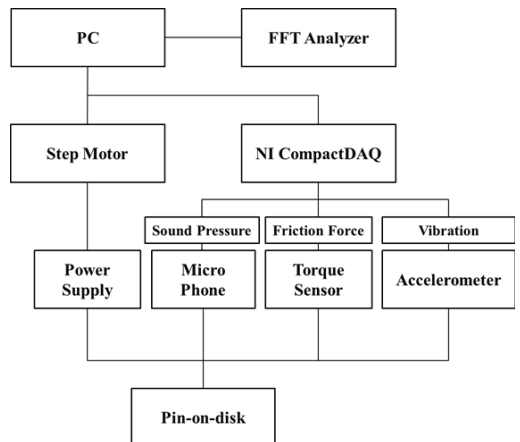


Fig. 2 A block diagram of the pin-on-disk system

곡선의 특성은 다음과 같다. 완전 윤활 구간(full film lubrication)에서는 마찰계수가 미끄럼 속도의 증가에 따라 변화가 적지만, 혼합 윤활 구간(mixed lubrication)에서는 마찰 곡선이 음의 기울기를 가진다. 다시 윤활제를 지속적으로 도포하여 완전 윤활 상태가 되면 마찰 곡선이 양의 기울기를 갖게 된다. 혼합 윤활 구간에서 마찰 곡선의 음의 기울기와 마찰 소음과의 관계를 간단한 모델로 살펴보면 Fig. 3과 같다.

Fig. 3의 자유도 모델은 식 (1)과 같은 방정식으로 표현 될 수 있다.

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = -kx - c \frac{dx}{dt} - \mu P \tag{1}$$

여기서 미끄럼 속도에 따른 마찰 계수는 Stribeck effect 또는 Stribeck curve<sup>(13)</sup>에 의해 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다.

$\mu-v$  선도는 식 (2)와 같이 표현 될 수 있다.

$$\mu(v) = \mu_0 + \lambda(v - v_0) \tag{2}$$

여기서  $\lambda$ 는 식 (3), (4)와 같다.

$$\lambda \equiv \left. \frac{d\mu}{dv} \right|_{v=v_0} \tag{3}$$

$$\mu = \mu(v_0) \tag{4}$$

식 (2)를 식 (1)에 대입하면, 마찰계수와 미끄럼 속도의 영향을 받는 방정식을 식 (5)와 같이 표현 할 수 있다.

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + (c + \lambda P) \frac{dx}{dt} + kx = (\lambda v_0 - \mu_0)P \tag{5}$$

식 (5)에서  $\lambda$ 는  $\mu-v$  선도의 기울기를 의미하며, 기울기가 음일 경우 negative damping term이 증가하여 불안정성이 커지는 것을 예측 할 수 있다. 또한 기울기의 정도에 따라 불안정성이 영향을 받고 있음을 확인하였다.

### 2.3 시험결과

마찰 곡선에 따른 진동 특성 분석은 초기 소음을 발생하지 않을 때, 인위적으로 소음을 발생시키기 위해 약 20 rpm으로 장시간 마찰 시켰다. 그 후 토크를 계측하여 마찰 계수로 환산하였다. 이때 음의 기울기가 발생하는 한 구간과 양의 기울기가 발생하는 한 구간을 설정하여 기울기의 변화가 마찰에 의한 소음 진동에 어떠한 영향을 미치는지 연구하였다.

마찰 곡선에 기울기의 변화에 의한 진동 특성을 계측하기 전에 이 시스템 및 환경 조건에 의한 소음을 마이크로폰으로 계측하였다. 측정 위치는 마찰 시험과 동일 한 위치에서 계측 하였으며, 결과는 Fig. 5와 같다.

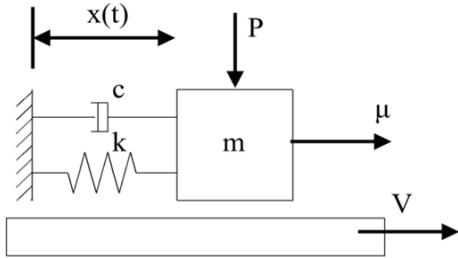


Fig. 3 Simple slider model

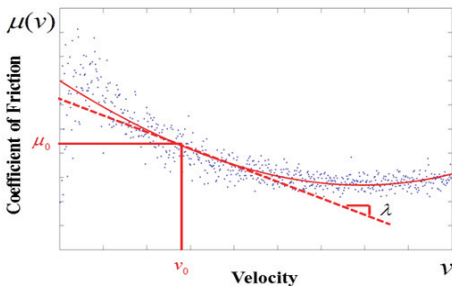


Fig. 4 Typical  $\mu$ -velocity relationship shown with linearized curve

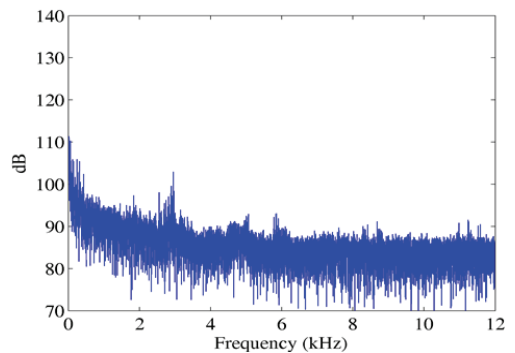


Fig. 5 Environmental noise

환경소음은 시스템에서 마찰이 발생하지 않을 때, 시스템의 구조 소음(모터소음)을 계측한 데이터 이다. 시험은 약 60 sec로 하였으며, sampling rate는 25.6 kHz로 하였다. 계측 장비에 대한 sensitivity는 calibration값을 따랐으며, dB reference는 1  $\mu$ Pa(가속도계), 2  $\mu$ Pa(마이크로폰)로 하였다.

3 kHz부근과 4 kHz 근방에서 발생하는 시스템 자체의 구조적인 모터 작동 소음이 주기적으로 나타나는 것을 확인할 수 있다.

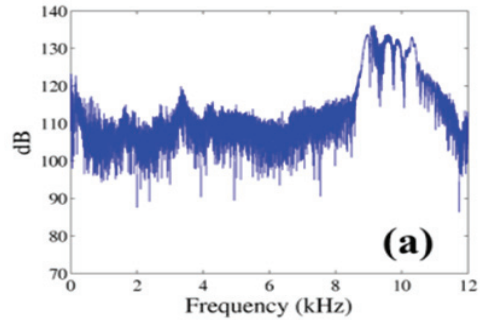
이후 핀을 접촉 시켜 1 kg의 하중을 가하여 디스크의 회전에 따른 마찰을 유도하였다. 초기 소음이 발생한 후부터 토크센서를 이용하여 마찰계수를 확인 하였으며, 주기적인 소음이 발생 할 때 속도를 변화시키면서 마찰계수의 변화를 계측한 결과 Fig. 6 과 같다.

Fig. 6의  $\mu-v$  선도는 20 rpm 부근까지 마찰계수의 변화는 미끄럼 속도가 증가 할수록 감소하는 음의 기울기를 보이고 있다. 이때, 음의 기울기가 존재하는 20 rpm으로 미끄럼 속도를 고정시켜 마찰재 근방에서의 마찰 방향 진동과 몸체의 3축 방향 진동 및 마찰 방향소음을 측정 하여 FFT를 취한 결과 Fig. 7과 같다.

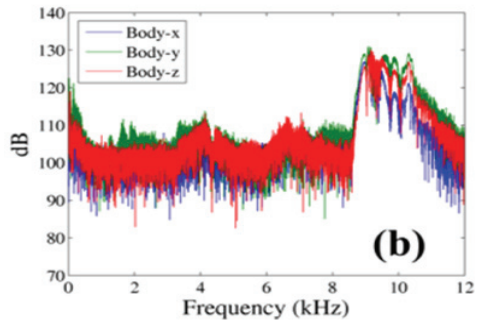
(a)의 마찰재 근방의 마찰 방향 진동은 3 kHz의 시스템 구조의 모터 진동이 발생하고 있으며, 마찰에 의한 진동은 8~10 kHz에서 최대로 발생하고 있다. (b)의 몸체에서 계측 된 3축 가속도계도 핀에서 계측 된 진동과 같은 8~10 kHz 근방에서 발생하였다. (c)의 마찰 방향에서 마이크로폰을 이용한 소음 측정 결과 8~10 kHz로 가속도계와 같았다. 따라서

미끄럼 속도가 20 rpm일 때, 동일 조건에서 마찰에 의한 진동은 8~10 kHz의 주파수 대역의 영역에서 소음 및 진동이 발생함을 확인하였다.

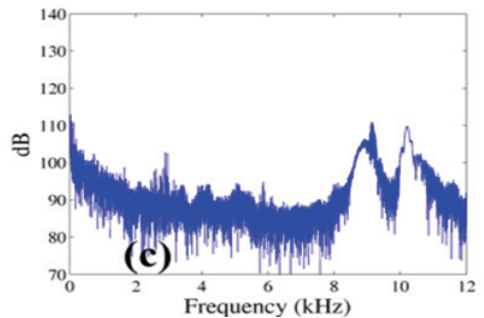
이 논문은 음의 기울기에 의한 진동 특성을 연구 하기 위함이다. Fig. 6의  $\mu-v$  선도를 확인해 보면 0~20 rpm 구간은 음의 기울기가 존재하고 있지만 20 rpm 이후 40 rpm을 지나면서 기울기가 양의 기울기로 변화한다. 따라서 양의 기울기가 존재할 때, 소음 및 진동 특성을 확인해 보기 위해 20 rpm에서의 시험과 동일한 조건에서 양의 기울기가 존재하는



(a) 1-D vibration



(b) 3-D vibration



(c) Sound level

Fig. 7 Vibration and noise at 20 rpm of Fig. 6

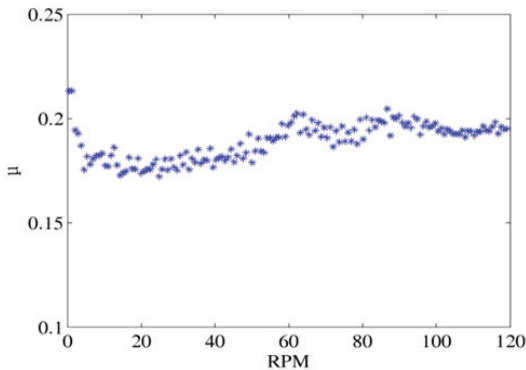


Fig. 6 Friction coefficient with respect to the sliding speed

40 rpm에서의 진동 및 소음 특성을 분석하여 보았다. 결과는 Fig. 8과 같다.

(a)의 마찰 방향 진동은 20 rpm 구간과 다르게 3 kHz의 시스템의 모터 진동은 계측 되지만, 다른 주파수 영역이나 20 rpm에서 계측이 되었던 8~10 kHz의 주파수 영역에서 진동이 발생하지 않음을 확인할 수 있다. (b)의 3축 가속도계 또한 진동이 계측되지 않음을 확인할 수 있으며, (c)의 마찰 방향에 설치된 마이크로폰 또한 시스템 자체의 환경 소음 외 다른 소음은 발생하지 않았다. 따라서 시험 결과

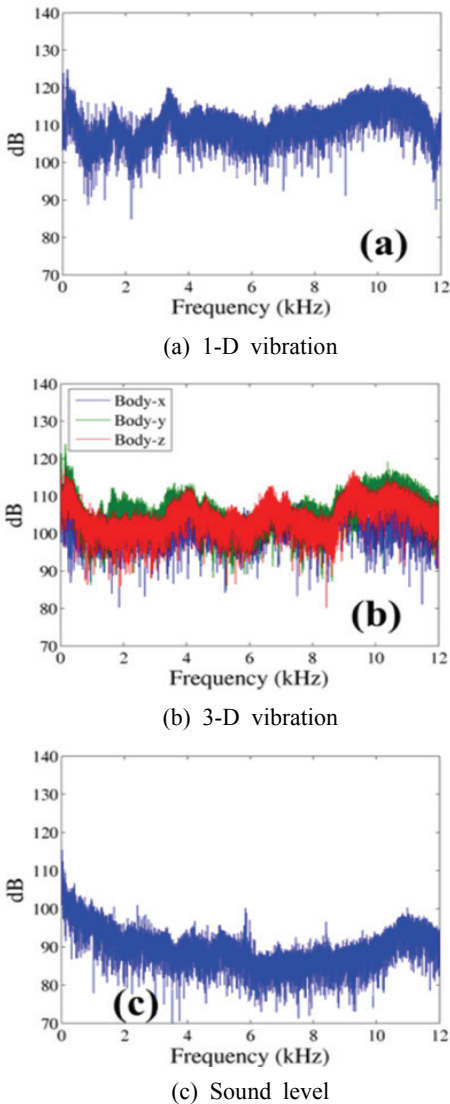


Fig. 8 Vibration and noise at 40 rpm of Fig. 6

마찰 곡선의 음의 기울기를 가지는 구간에서 소음이 발생하였다.

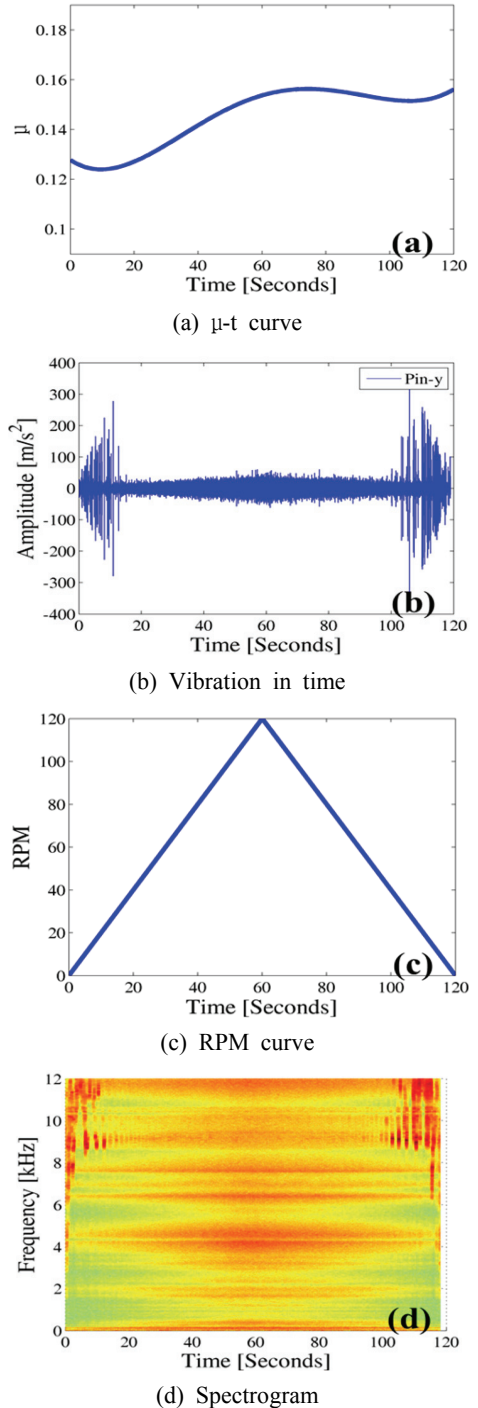


Fig. 9 Friction noise in time



음의 기울기가 소음이 발생할 때 존재하고 있는지 확인하기 위하여 시간에 따른 마찰 곡선의 변화를 측정하였다. 시험 조건은 앞의 시험과 동일하며, 마찰재만 교체하여 시험하였다. 초기 디스크를 20 rpm으로 장시간 회전시켜 인위적으로 소음을 발생시켰다. 시간에 따른 마찰계수의 변화에 따라 소음 및 진동의 특성의 변화에 대해 확인하였다. 인위적으로 소음을 발생시킨 후 0~120 rpm까지 초당 2 rpm 씩 증가 후에 다시 0 rpm까지 초당 2 rpm 씩

감소한다. 결과는 Fig. 9와 같다.

(a)에서 시간에 따른 마찰계수의 평균 변화를 살펴보면, 10 sec근방에서 음의 기울기를 확인할 수 있으며, 20 sec이후에는 양의 기울기가 발생하고, 다시 110 sec에서 음의 기울기가 존재하는 것을 확인하였다. (b)의 마찰 방향의 진동은 음의 기울기가 나타나는 10 sec까지 진동이 발생하며, 양의 기울기가 발생하는 구간에서는 진동이 사라지는 것을 확인할 수 있다. 그러나 음의 기울기가 110 sec에서 다

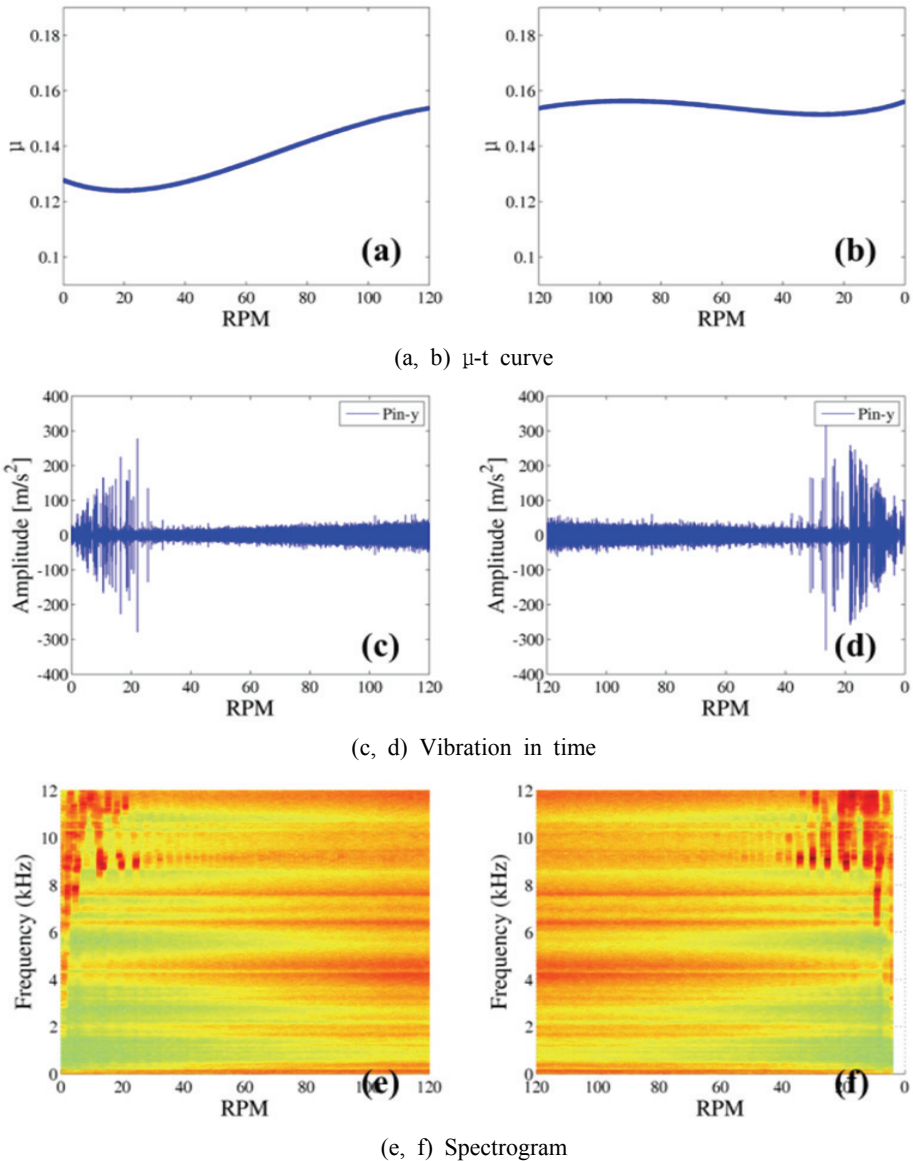


Fig. 10 Friction noise with respect to sliding speed

시 존재할 때, 진동이 다시 발생하였다. (d)의 spectrogram을 통해 진동 발생 변화를 보다 쉽게 확인할 수 있다. (c)는 시간에 따른 미끄럼 속도의 변화를 나타낸 것으로 10 sec가 20 rpm 근방임을 확인할 수 있다. 시간에 따른 마찰계수의 변화를 미끄럼 속도로 환산하여 살펴보면 Fig. 10과 같다.

Fig. 10의 결과 초기 소음 실험과 유사한 마찰계수의 변화를 보이고 있으며, 20 rpm 구간에서 시스템의 음의 기울기 및 소음이 발생하고 있다. 또한 40 rpm 구간에서 양의 기울기가 존재함을 확인할 수 있으며, 기울기가 양 이거나 변화가 거의 없을 경우 소음 및 진동이 사라짐을 확인할 수 있다. 따라서 이 실험에서의 초기 조건 및 시스템은 20 rpm 구간에서 음의 기울기가 존재하며, 음의 기울기가 존재할 때 소음 및 진동이 발생하는 기초 이론 모델과도 일치하였다. 따라서 음의 기울기는 마찰 소음 진동에 꼭 고려해야할 대상임을 확인하였다.

### 3. 결 론

이 논문은 마찰 소음 진동 시험에 일반적으로 사용되는 pin-on-disk를 직접 제작 하여 시험 하였다. 미끄럼 속도의 변화에 따른 마찰계수의 변화를 측정 하였고 기울기의 변화에 따른 소음진동 특성을 분석 하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 이 시스템 및 초기 조건에서의 실험 결과 20 rpm 근방에서 음의 기울기를 확인할 수 있으며, 이후 40 rpm 근방에서부터 양의 기울기를 확인할 수 있었다.

(2) 음의 기울기가 존재하는 20 rpm 이하 구간에서는 소음 및 진동이 발생하고 있으며, 이후 양의 기울기가 존재하면 소음 및 진동이 사라지는 것을 확인할 수 있었다.

(3) 마찰계수와 미끄럼 속도에 따른 기울기 변화는 마찰 소음의 매우 중요한 인자이며, 꼭 고려해야 할 대상임을 확인 하였다.

### 후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2010-0021406).

### 참 고 문 헌

- (1) Jibiki, T., Shima, M., Akita, H. and Tamura, M., 2001, A Basic Study of Friction Noise Caused by Fretting, *Wear*, Vol. 251, No. 1-12, pp. 1492~1503.
- (2) Chen, G., Zhou, Z., Philippe, K. and Leo, V., 2001, Effect of Surface Topography on Formation of Squeal under Reciprocating Sliding, *Wear*, Vol. 253, No. 3-4, pp. 411~423.
- (3) Kang, J., 2010, Tilting Effect of Automotive Seat System on Squeak Noise, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 20, No. 6, pp. 577~582.
- (4) Kang, J., Krousgrill, C. and Sadeghi, F., 2009, Wave Pattern Motion and Stick-slip Limit Cycle Oscillation of a Disc Brake, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 325, No. 3, pp. 552~564.
- (5) Suh, N. and Sin, H., 1981, The Genesis of Friction, *Wear*, Vol. 69, No. 1, pp. 91~114.
- (6) Nogueira, I., Dias, A., Gras, R. and Progre, R., 2002, An Experimental Model for Mixed Friction during Running-in, *Wear*, Vol. 253, No. 5-6, pp. 541~549.
- (7) Ostvik, R. and Christensen, H., 1968/1969, Changes in Surface Topography with Running-in, in: *Proceeding of the Tribology Convention(Part 3P)*, Vol. 183, pp. 57~65.
- (8) Pawlus, P., 1994, An Study on the Functional Proprieties of Honed Cylinders Surface during Running-in, *Wear*, Vol. 176, No. 5-6, pp. 247~254.
- (9) Andersson, P., Juhanko, J., Nikkila, A. and Lintula, P., 1996, Influence of Topography on the Running-in of Water-lubricated Silicon Carbide Journal Bearings, *Wear*, Vol. 201, No. 1-2, pp. 1~9.
- (10) Kang, J., 2012, Effect of Friction Curve on Brake Squeal Propensity, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 22, No. 2, pp. 163~169.
- (11) Nam, J. and Kang, J., 2012, A Basic Experimental Study on the Squeak Noise Using the Pin-on-disk, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 22, No. 8, pp. 736~741.
- (12) Nam, J. and Kang, J., 2012, Unstable Brake Pad

Mode due to Friction-velocity Slope, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 22, No. 12, pp. 1206~1212.

(13) Spikes, H. and Olver, A., 2003, Basics of Mixed Lubrication, Lubrication Science, Vol. 16, No. 1, pp. 1~28.



**Jaehyun Nam** received the BS degree in the Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University in 2012. He is currently a graduate student of Kongju National University and one of the members in Dynamic Stability Lab. His research interest

is the simulation and experiment of disc brake squeal.



**Jaeyoung Kang** is an Assistant Professor in the Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University. He received his PhD degree in Mechanical Engineering from Purdue University in 2008. His research interests include friction noise, structural vibration and nonlinear dynamics.