



가속내구에 의한 자동차 내외장재 마찰소음 실험연구 고찰

An Experimental Study on the Friction Noise of Interior and External Automotive Materials by Endurance Test

배 상 규* · 김 기 선** · 강 재 영†
Sang-Kyu Bae*, Key-Sun Kim** and Jaeyoung Kang†

(Received February 14, 2019 ; Revised April 12, 2019 ; Accepted April 25, 2019)

Key Words : Squeak Noise(스퀴소음), Stick-slip(스틱슬립), Friction Noise(마찰소음), Endurance Test(가속내구)

ABSTRACT

In this study, we investigated the noise characteristics using the friction curve of an ABS material where surface changes occurred owing to continuous friction using a friction test apparatus. To artificially generate instability, the acceleration and the friction coefficient were measured after 90 000 cycles rubbing at a normal force of 40 N and a velocity of 80 mm/s. The change in the slope according to the coefficient of friction and the slip speed is considered to be an important factor of friction noise and it can be inferred that the slope of the sound is caused by the accelerated durable friction noise. It can be inferred that the moment the slope becomes negative is the endurance life of ABS.

1. 서 론

최근 자동차의 경량화와 함께 방청성, 가공성, 내충격성, 내약품성 및 내마모성에 대한 우수성으로 플라스틱 재료가 자동차부품 소재로 많은 부분 응용되고 있다. 이러한 플라스틱의 사용증가와 함께 자동차의 플라스틱화에 따른 많은 연구가 활발히 추진되고 있다. 또한, 자동차는 단순히 교통수단으로서의 역할 뿐만 아니라 정숙성, 승차감에서 안락함 등 감성품질이 요구되고 있으며, 차량의 무게를 경량화하면서 실내소음을 저감시키고자 많은 연구가 활발히 진행되고 있다. 최근 엔진의 고효율화와 연비절감 차원의 경량화가 진행되고 있지만, 필연적으로 소음의 증대를 초래하게 되고 특히 저주파 소음이 실내소음을 증가시켜 클레임

의 원인이 되고 있다. 이러한 자동차 실내소음의 증가 현상은 승객들의 요구인 정숙성 추구에 역행하는 현상으로 최근 이에 대한 대책이 급속히 대두되고 있는 실정이다.

접촉한 두 물체의 상대운동의 결과로 이들 재료의 마찰이 발생하며, 진동과 소음을 유발하는 매우 중요한 원인이 된다. 마찰소음 현상은 자동차의 내구 감성 품질을 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 변화되는 특성을 지닌다.

† Corresponding Author ; Member, Department of Mechanical Engineering, Inha University

E-mail : kangj@inha.ac.kr

* Member, Chungnam Technopark

** Member, Division of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University

A part of this paper was presented and selected as one of best papers at the KSNVE 2019 Annual Spring Conference.

‡ Recommended by Editor Jun Hong Park

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

이와 관련된 최근의 연구로서 Woo⁽¹⁾는 마찰소음은 마찰초기에는 발생하지 않고 마모가 어느 정도 진행된 이후 발생하며, 마모가 충분히 진행된 이후에는 마찰력의 크기나 소음이 거의 일정하다고 한다. 또한 마찰소음은 stick 이후 slip이 일어날 때 발생하며 마찰에 의한 squeak 소음의 주된 요인이라고 밝히고 있다. 마찰에 의한 소음이 stick-slip 현상에 의한 것이기 때문에 마찰조건을 stick-slip 영역에서 stick 영역으로 바꿔주면 소음을 제어할 수 있다고 판단하였다. Kim⁽²⁾는 건성마찰음에서 마찰과 진동에 의해 발생하는 마찰소음은 stick-slip 형태의 동적 불안정성과 관련이 있는 마찰소음으로서, 마찰기구 전체의 고유진동수와 밀접한 관계가 있는 현상임을 밝힌 바가 있고 이밖에 건성 마찰음에 관한 연구에서 건성상태에서 발생하는 미끄럼 접촉진동과 마찰소음을 실험을 통해 분석하였다. 특히 마찰소음은 겉으로 보기에 동적으로 안정된 상태에 있는 마찰 과정 중에서도 발생하는 비교적 폭넓은 주파수 범위의 불규칙한 소음현상이고, 이것은 고유의 마찰현상보다 기본적으로 내재적인 불규칙한 동적 특성에 기인한 것이라고 하였다. 소음과 관련된 마찰현상의 동특성 중에서 특히 중요한 것은 마찰면에 불규칙하게 존재하는 표면 돌기에 의해 발생하는 마찰 접촉면에 수직인 미소 진동이라고 밝힌 바 있다.

마찰에 의한 진동 소음 현상에 대해 Jibki와 Chen 등^(3,4)은 실험을 통해 마찰소음은 마모량 사이의 상관관계가 존재함을 실험적으로 연구하였고, 또한 Kang⁽⁵⁾은 음의 기울기는 마찰소음의 중요한 인자임을 이론적으로 검증하였다. Nam⁽⁶⁾은 기초 마찰시험을 통해 음의 기울기는 소음의 중요한 인자임을 확인하였으며, 음의 기울기를 고려한 FEM brake squeal 해석⁽⁷⁾을 통해 음의 기울기에 의해 특정한 모드에서 squeal이 발생할 수 있음을 확인하였고, 음의 기울기가 마찰소음에서 매우 중요한 인자임을 연구하였다. 하지만 기존 연구들은 전단마찰에 의한 접촉소음인 스킵(squeak)에 대한 체계적인 연구 및 가속내구에 따른 마찰소음 연구는 매우 부족한 상황이다.

따라서 이 논문에서는 자동차부품에 주로 사용되는 ABS 소재에 대하여 불안정성이 가장 큰 왕복운동 마찰이음 시험을 통하여 가속내구에 의한 속도에 따른 squeak 소음의 특성, 마찰 곡선의 기울기의 변화가 진동 특성에 미치는 영향과 예측 방법에 대해 연구하고자 하였다.

2. 본 론

2.1 이론적 배경

이 연구에서는 가속내구 시험시 발생하는 음의 기울기 특성을 연구하고자 하였다. 음의 기울기는 마찰소음의 주요 메커니즘으로 마찰속도의 변화에 따른 마찰계수의 변화에 의해 나타난다. Fig. 1은 음의 기울기에 따른 불안정성을 보여주는 단순 슬라이딩 모델이다⁽⁸⁾.

Fig. 1의 슬라이딩 모델에서 식 (1)과 같은 진동방정식으로 표현할 수 있다.

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

Fig. 2는 마찰속도에 따른 마찰계수 변화를 나타내는 마찰곡선을 나타낸다.

Fig. 2에서 특정구간의 마찰속도 (v_0, μ_0)에서 선형화한 직선을 식 (2)와 같이 할 수 있다.

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

여기서 λ 를 (v_0, μ_0) 점에서의 마찰계수 기울기라고 하며, 식 (3), 식 (4)와 같다.

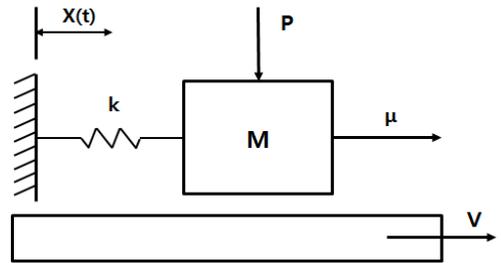


Fig. 1 Sliding model

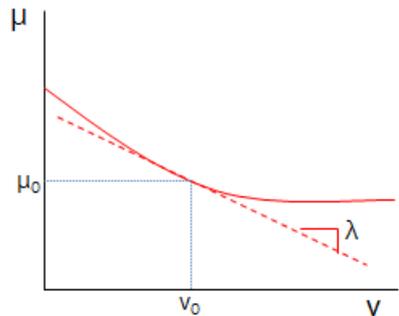


Fig. 2 Friction curve

$$\lambda = \left. \frac{d\mu}{dv} \right|_{v=v_0} \quad (3)$$

$$\mu_0 = \mu(v_0) \quad (4)$$

마찰계수-속도 선도에 의해 나타난 식 (2)를 식 (1)에 대입하면 마찰계수와 슬라이딩 속도의 영향을 받는 방정식 (5)와 같다.

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

식 (5)에서 마찰곡선의 기울기 λ 의 기울기가 음수가 되면 시스템이 불안정하여 마찰소음으로 발현된다.

2.2 실험 장치

이 연구의 실험장치는 재료 마찰 이음 시험기를 사용하여 데이터를 측정하였다. Fig. 3은 실험장치의 구조도를 나타낸다. Carrier와 carriage의 끝단에 시험소재를 부착시킨 후, carrier 작동기의 코일에 전류를 인가하여 수직력을 제어하며, carrier 작동부는 판스프링으로 연결되어 carriage holder에 부착시킨다. Sliding carriage는 모터에 의해 속도 및 변위가 제어되고 좌, 우 운동을 하면서 두 재료간의 마찰을 유도하였다.

Carrier에 와전류센서로 마찰력과 마찰계수를 측정하고, 가속도 센서를 부착하여 두 재료간의 마찰에 의한 진동을 측정하여 가속도를 측정하였다.

Fig. 4는 마찰계수 계산을 위한 모델이다.

마찰접촉을 하고 있는 시스템에서 마찰력, 마찰계수와 수직항력과의 관계는 식 (6)과 같이 나타낸다.

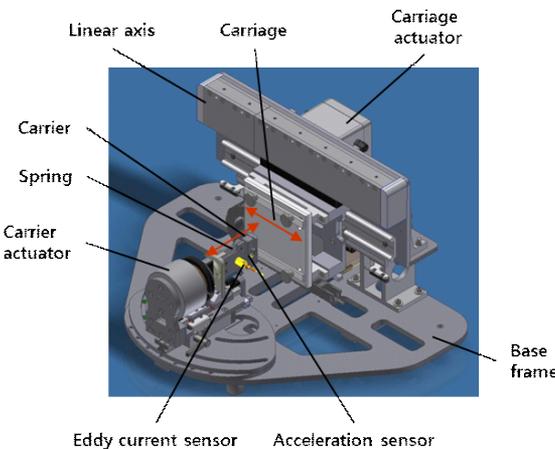


Fig. 3 Structure of test equipment

$$F_R = \mu \times F_N \quad (6)$$

여기서 F_R 는 마찰력, μ 는 마찰계수, F_N 은 수직항력이다. 그리고 판 스프링에 작용하는 횡하중 마찰력(F_R)은 식 (7)과 같이 나타낸다.

$$F_R = k \times x \quad (7)$$

여기서 k 는 스프링상수, x 는 벤딩에 의한 변위량이며, 와전류 센서로 측정된 값이다. 힘의 평형에 따라 식 (6)과 식 (7)을 정리하면 다음과 같이 마찰계수를 구할 수 있다.

$$\mu = \frac{k \times x}{F_N} \quad (8)$$

즉, 마찰계수는 횡하중 마찰력/수직항력으로 정의할 수 있다.

Fig. 5는 실험장치의 블록 다이어그램을 나타낸다. 전원을 공급하여 재료마찰 시험기를 구동하고 가속도센서, 와전류센서 등으로부터 마찰계수, 가속도 값을 측정하고, 가속도에 대한 FFT분석을 통해 마찰소음의 영향을 분석하고자 하였다.

2.3 실험 조건 및 실험방법

실험환경은 습도 20%, 온도 25 °C 조건에서 측정하였으며, 시편은 자동차 내장재로 많이 사용되는 ABS 재질로 carriage 소재는 70 mm × 60 mm, spring 소재는 50 mm × 25 mm의 시편을 사용하였다.

진동기는 servo motor를 사용하여 컴퓨터와 연계하여 프로그램으로 제어하였다. 측정 장비의 spring 측면에 와전류센서를 부착하여 마찰력을 측정하고, carrier의 끝단에 가속도 센서를 부착하여 진동을 측정하였으며, sampling rate는 6400 Hz로 하였으며,

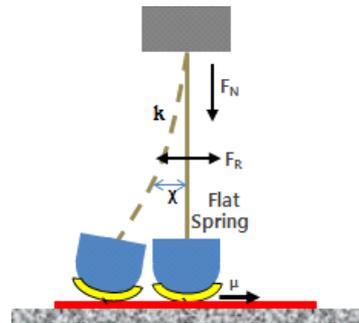


Fig. 4 Model for friction coefficient calculation

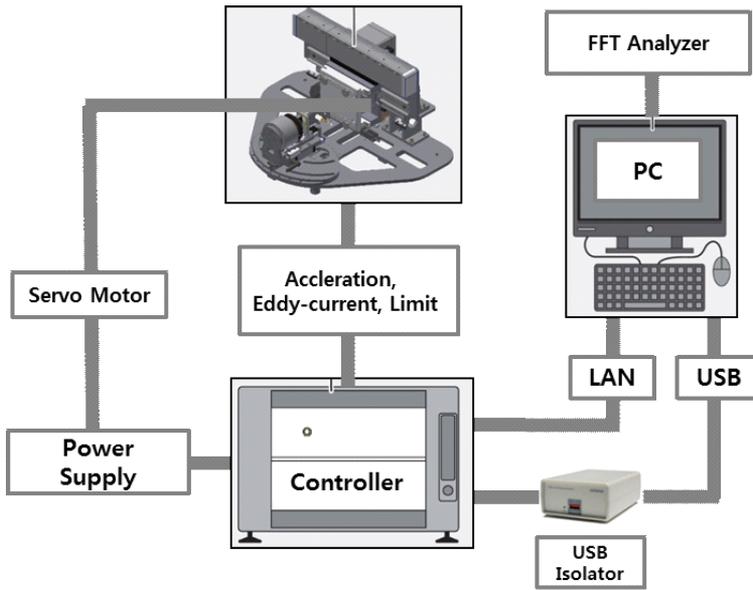


Fig. 5 Block diagram of the test equipment

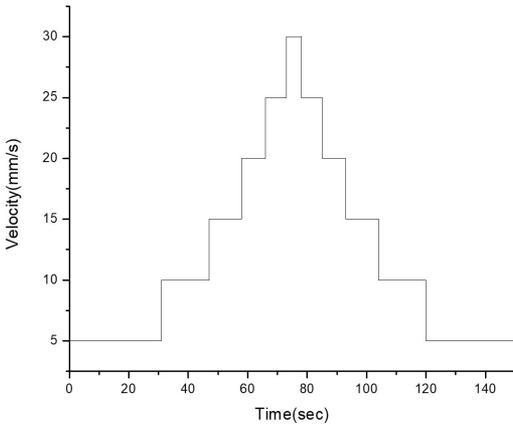
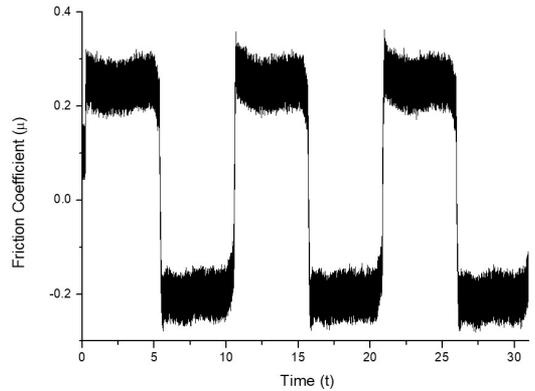
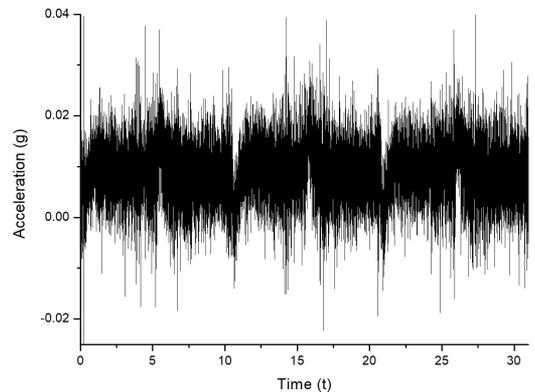


Fig. 6 Test mode of friction noise



(a) Friction coefficient



(b) Acceleration

Fig. 7 Friction coefficient and acceleration relationship at $t = 73 \text{ sec} \sim 78 \text{ sec}$

sensitivity는 calibration값을 사용하였다.

시험조건은 독일 자동차산업협회 VDA230-206 규격에 따라 friction force는 10 N, 이송거리는 20 mm로 하였다. Fig. 6과 같이 속도는 5 mm/s~30mm/s 범위에서 5 mm/s로 증가 및 감소시키며 각 속도구간마다 3회씩 반복하여 시험하였다. Fig. 7은 속도 30 mm/s 구간에서의 마찰계수, 가속도의 그래프를 나타낸다.

가속내구 시험 전 상태인 0 cycle에서 90 000 cycle까지 가속내구 시험을 진행하였으며, 5000 cycle, 20 000 cycle, 45 000 cycle, 65 000 cycle 구간에서도 마찰계수와 가속도의 마찰이음 특성을 연구하기 위하여 Fig. 6의 시험모드로 마찰소음 시험을 실시하였다.

마찰소음을 측정하기 위하여 인위적으로 소재에 마찰을 일으켜 소음을 발생시키기 위해 가속 조건인 normal force 40 N, 속도 80 mm/s로 하여 가속내구 시험을 실시하였으며, 소음을 직접 확인할 수 있었던 90 000 cycle까지 실험을 진행하였다.

2.4 실험 결과

이 논문에서는 재료 마찰 이음 시험기를 사용하여 시스템의 불안정을 인위적으로 발생시키기 위하여 마찰력 40 N, 속도 80 mm/s로 90 000 cycle까지 마찰시켰다. 가속 및 회전센서를 계측하여 마찰계수로 환산하였으며, 이 때 양의 기울기가 발생하는 속도와 음의 기울기가 발생하는 속도에서 기울기의 변화가 마찰에 의한 소음진동에 어떠한 영향을 미치는지 연구하였다.

가속내구가 소음에 미치는 민감도 및 마찰표면의 변화가 마찰계수 및 소음진동의 동적변화에 미치는 영향을 고찰해 이 결과 다음과 같은 각각의 특성을 발견할 수 있었다.

가속내구에 의한 마찰소음을 3 cycle 반복 시험결과 60 000 cycle에서 약하게 소음이 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 90 000 cycle의 return mode에서 소음이 확실하게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 8은 마모가 없는 초기 상태에서는 가속도의 변화가 -0.14 g ~ 0.13 g로 큰 변화가 없지만, 45 000 cycle 내구시험 이후 가속도는 -1.1 g ~ 1.8 g로 약간의 변화가 감지되었다. 90 000 cycle에서는 가속도의 변화가 -1.7 g ~ 4.1 g로 큰 폭으로 변화하는 모습을 볼 수 있었다. 마찰에 의해 소음이 발생할 때 나타나는 시스템의 불안정성을 가속도가 감지하여 센서의 변위가 급변하게 되는 시점에서 소음이 발생하는 시점으로 판단할 수 있다.

Fig. 9는 마찰소음 특성이 확실하게 나타나는 90 000 cycle 내구시험 후 속도 10 mm/s, 20 mm/s, 30 mm/s에서의 가속도 및 마찰계수와와 특성을 분석하였다. 속도 10 mm/s에서 가속도 및 마찰계수는 일정한 간격폭을 유지하고 있어 소음에 영향을 주지 않는 것을 알 수 있다. 속도 20 mm/s에서는 return 모드에서 가속도 및 마찰계수의 변화가 발생하여 소음이 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 속도 30 mm/s의 return mode에서 가속도 및 마찰계수가 큰 폭으로 변화하여 소음이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

가속내구가 소음의 미치는 상관관계를 확인하기 위하여 소음을 발생시켰으며, Fig. 10은 소음이 가장 크게 발생하는 속도 30 mm/s 구간에서의 마찰소음을 계

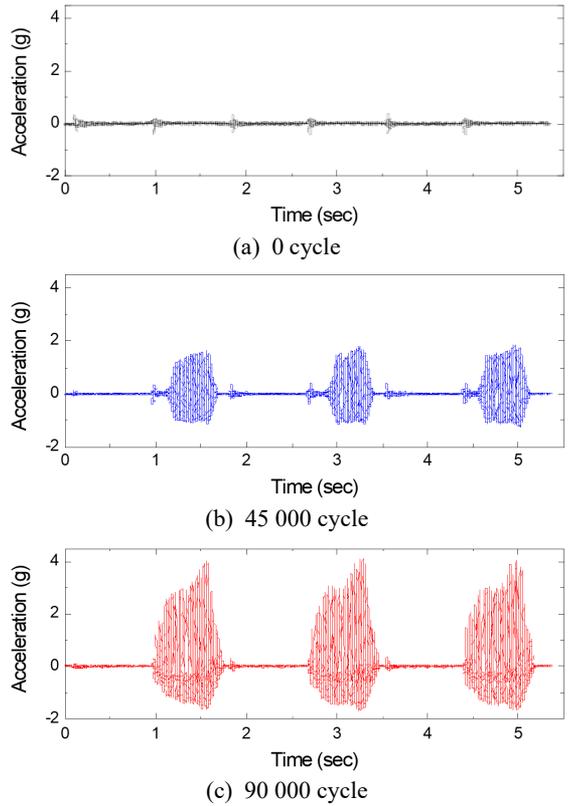
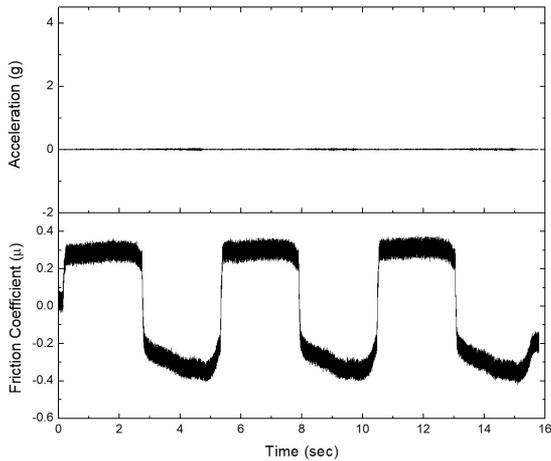


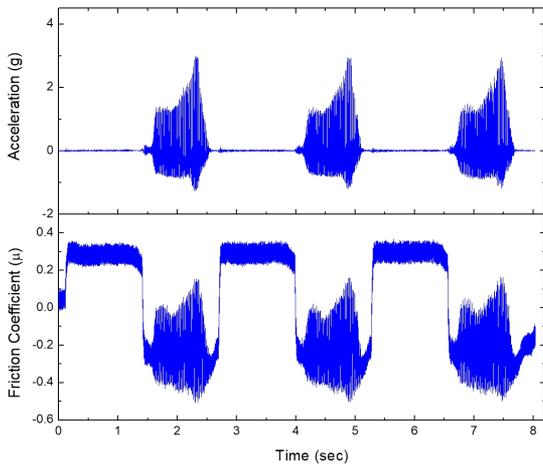
Fig. 8 Sliding cycle

측하여 0 cycle과 90 000 cycle에서의 FFT 분석을 통해 주파수에 따른 소음의 크기를 나타낸 결과이다. 0 cycle에서는 마찰소음이 없는 작동소음이며, 이 작동소음은 마찰이 발생하지 않을 때 모터 등의 시스템 소음이다. 이 작동소음과 비교하여 90 000 cycle에서 발생하는 소음은 마찰에 의한 소음임을 확인할 수 있었다.

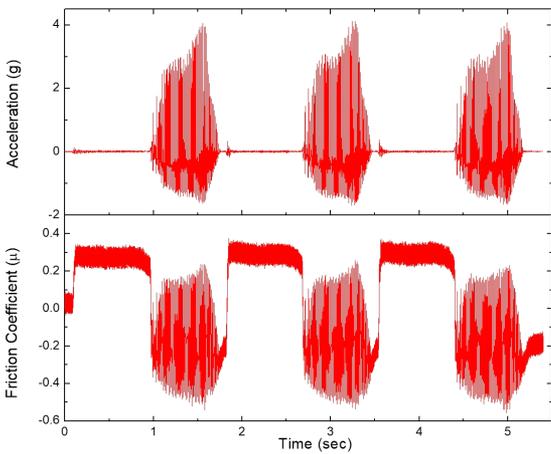
Fig. 11(a)의 $\mu-v$ 선도는 속도 30 mm/s를 중심으로 마찰계수의 변화는 미끄럼 속도가 증가할수록 감소하는 음의 기울기를 보이고 있다. 내구시험 이전 0 cycle ㉠곡선에서 λ 는 속도 30 mm/s를 중심으로 양측에서 양의 기울기를 나타내고, 45 000 cycle 내구시험 이후 ㉢곡선에서 5 mm/s ~ 25 mm/s 구간에서 양의 기울기가 25 mm/s ~ 30 mm/s 구간에서 음의 기울기를 나타내며, 90 000 cycle 내구시험 이후 ㉤곡선에서는 5 mm/s ~ 10 mm/s 구간에서 λ 는 양의 기울기가 10 mm/s ~ 30 mm/s 구간에서 λ 는 음의 기울기가 형성되는 것을 알 수 있다. 또한, 음의 기울기를 나타내는 속도 구간에서 소음이 발생하는 것을 직접 확인할 수 있었다. 음의 기울기는 마찰소음 메커니즘으로 마찰 시스템을 불안정



(a) 10 mm/s



(b) 20 mm/s



(c) 30 mm/s

Fig. 9 Acceleration and friction coefficient by speed in 90 000 cycle

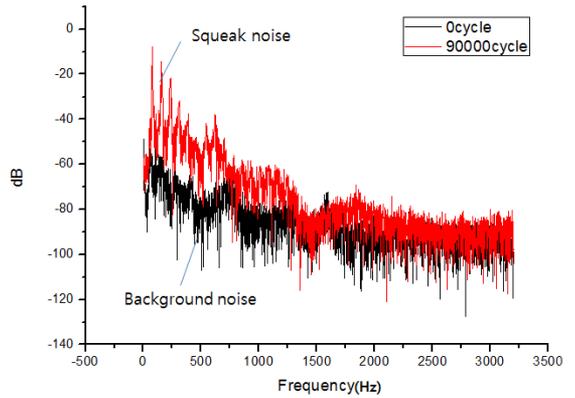
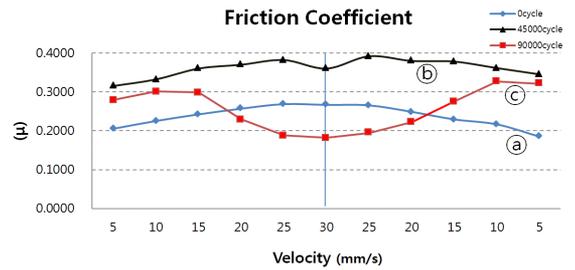
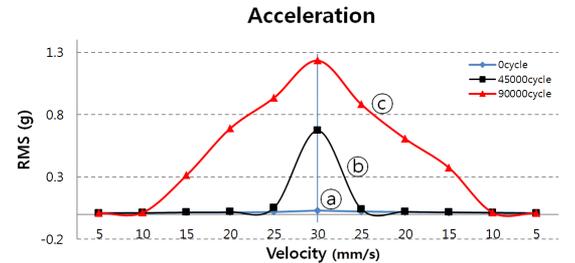


Fig. 10 FFT Analysis in 90 000 cycle



(a) $\mu - v$ slope



(b) RMS- v slope

Fig. 11 Negative friction velocity slope

하게 하는 요소로 잘 알려져 있다.

Fig. 11(b)의 RMS- v 선도는 속도에 따른 진폭의 평균값 RMS값으로 나타낸 그래프이며, 속도가 30 mm/s 일 때 90 000 cycle 내구시험 이후 ㉔곡선의 값은 1.23, 내구시험 이전 0 cycle ㉑곡선의 값은 0.03으로 약 42 배의 차이가 발생되어 ㉔에서 RMS값이 크게 발생하고 이는 실제 소음이 관측되어 마찰소음에 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다.

가속내구 cycle이 증가할수록 속도에 따른 마찰계수 기울기 λ 는 어느 순간 값이 (-)로 변하게 되는데, 이 때 시스템의 불안정으로 squeak이 발생하게 된다. Fig. 12 는 90 000 cycle에서 기울기의 변화가 가장 큰 구간인

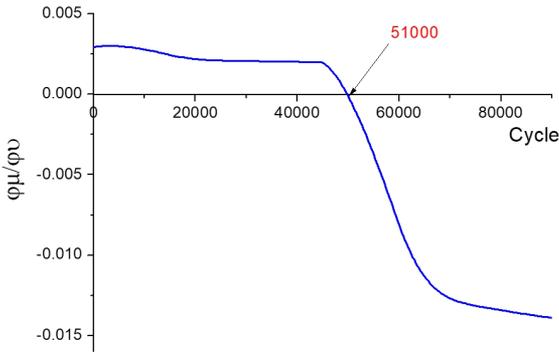


Fig. 12 Negative slope trend at velocity 20 mm/s

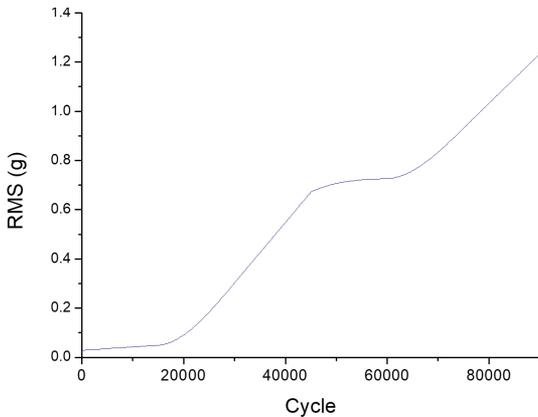


Fig. 13 RMS according to acceleration duration (V = 30 mm/s)

속도 20 mm/s에서의 가속내구 cycle별로 기울기를 나타낸 것이다. 마찰계수 기울기는 45 000 cycle까지는 완만한 양의 기울기를 보이다가 이후 급격히 감소되고 있으며, 0이 되는 지점인 51 000 cycle에서 음의 기울기가 시작되어 소음이 발생하는 시점이라는 것을 예측할 수 있었다.

Fig. 13은 속도 30 mm/s에서 가속내구 cycle별 RMS 값의 변화추이를 나타낸다. 20 000 cycle~40 000 cycle, 70 000 cycle~90 000 cycle 구간에서 급격하게 상승하는 현상을 확인할 수 있었다.

3. 결 론

이 논문은 가속내구에 의한 재료 간의 마모에 따른 마찰계수를 예측하였고 마찰계수-속도의 기울기의 변화에 따른 소음진동 특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 미끄럼 거리가 증가하면서 마찰소음이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

(2) 미끄럼 거리가 증가하면서 마찰계수와 속도 곡선에서 음의 기울기가 발생하며 51 000 cycle부터 음의 기울기가 시작되어 소음진동이 발생하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

(3) 마찰계수와 미끄럼 속도에 따른 기울기 변화는 마찰소음의 매우 중요한 인자이며, 음의 기울기가 가속 내구 마찰소음의 원인임을 유추할 수 있었다.

이러한 결과를 바탕으로 차후에 플라스틱-가죽 등 이종 재질, 온도 환경조건에서의 마찰이음 특성을 연구할 예정이며, 마찰에 의해 소음이 발생하는 부위의 소재변경 및 엠보싱 적용 등을 통해 마찰소음을 줄일 수 방안을 제안하는 자료로 활용할 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 2018년 산업통상자원부의 창의산업거점 기관지원사업의 지원을 받아 수행된 연구결과임(R00 03581).

References

- (1) Woo, J., 2016, A Study on Relationship between Tribological Properties and Noise in Stick-slip Friction, Master's Thesis, Sungkyunkwan University, Seoul, Korea, pp. 41~42.
- (2) Kim, C., 1984, A Study on Dry Friction - Induced Sound - An Experimental Study on Vibration and Noise during Sliding of Dry Metal Surfaces, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 8, No. 6, pp. 591~598.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) 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.

(6) 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.

(7) 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.

(8) Baek, J., 2017, FEM Analysis and Experimental Investigation of the Friction Noise about the Various Friction Condition, Master's Thesis, Kongju National University, Gongju, Korea, pp. 7~8.



Sang-Kyu Bae is working as a team manager at the Automotive Center of Chungnam Technopark and completed his Ph.D. in Mechanical Engineering at Kongju National University.



Key-Sun Kim is a professor in the Department of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju National University, Cheonan. His field of specialization are Design of the component manufacturing process of the car.



Jaeyoung Kang is a professor in ME, INHA University. He received his Ph.D degree in ME from Purdue University, 2008. His research interests include friction noise, structural vibration and space flight dynamics.