왕복운동에서의 고유주파수 변화에 따른 마찰소음 특성 연구

Characteristics of Friction Noise with Changes of the Natural Frequencies in the Reciprocating Motion

최 호 일*. 강 재 영†
Hoil Choi and Jaeyoung Kang

(Received February 12, 2014 ; Revised March 18, 2014 ; Accepted March 20, 2014)

Key Words : Friction Noise(마찰 소음), Reciprocation(왕복 운동), Natural Frequency(고유주파수)

ABSTRACT

Experimental study is conducted for investigating the characteristics of friction-induced noise with respect to the variation of system geometry. In this study, a vertically fixed rod is in contact with the reciprocating plate which is controlled by the step motor. Friction noise is generated during the reciprocating motion due to the frictional contact between the plastic pin and the aluminum plate. The frequencies of the friction noise are changed when the height of the rod varies. However, it is found that the vibration modes involved in the friction noise are not changed. It implies that the unstable modes remain unstable regardless of the change of the system geometry, and thus, there are the certain mode shapes which are likely to produce friction noise.

1. 서 론

두 물체가 접촉운동을 할 때 마찰이 발생하고 진동이 발생하게 되는데 그때 그 물체의 불안정 모드의 고유진동수로 진동하여 소음이 발생하게 된다. 마찰로 인한 소음 및 진동은 접촉운동을 할 때 마모가 되며 발생하는 주된 현상이다. 이를 제어하기 위해 현재까지 여러 가지의 연구와 실험이 진행되어 왔다. 일반적인 마찰과 진동, 소음에 관한 현상에 대해 Choi 등⁽¹⁾은 왕복운동 중 마찰 소음에 관한 실험을 하여 마찰소음은 마찰변위가 큰 진동모드임을 확인했고, Grandin 등⁽²⁾은 왕복운동에 따라 진동 특성에 대한 표면 텍스처링의 효과에 등을 관찰하였

다. 또한 Autay 등⁽³⁾은 왕복 마찰운동 중 강의 마찰 및 마모 특성을 시험 하였으며, Chen 등⁽⁴⁾은 왕복 접촉운동 중 마찰에 의한 진동의 시간-주파수 특성을 분석하였으며, Drees 등⁽⁵⁾은 마찰운동 중 얇은 코팅에 따른 마찰 특성을 연구하였다. 또한 Mo 등⁽⁶⁾은 홈 텍스처 표면의 마찰 및 마모의 효과와 진동소음 특성을 연구하였고, Park 등⁽⁷⁾은 회주철의 디스크 브레이크의 부식에 따른 스틱슬립 마찰에 의한 강화에 대하여 연구하였다. 또한 Nam 등^(8,9)은 캘리퍼 접촉강성을 고려한 브레이크 스컬을 해석하였고, 미끄럼 속도 및 마찰 곡선에 따른 마찰 소음 특성을 연구하였다. 하지만 기존 연구들은 고유 주파수 변화에 따른, 소음 및 진동 특성에 대한 심층적인 연구를 하지 않았다.

† Corresponding Author ; Member, Division of Automotive & Mechanical Engineering, Kongju National University
E-mail : jkang@kongju.ac.kr
Tel : +82-41-521-9263

* Division of Automotive & Mechanical Engineering, Kongju National University

‡ Recommended by Editor SungSoo Na

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

이 논문은 우리 연구실에서 직접 설계, 제작한 기초 마찰시험기인 왕복운동 장치를 이용하여 하중을 가하여 왕복운동 하였을 때의 마찰력, 소음을 측정하고 시스템의 고유주파수의 변화를 주어 나타나는 마찰소음 특성들을 살펴보았다. 또한 모달 해석을 이용하여 각 마찰소음 피크주파수에 따른 값들을 확인하여 기여한 진동모드들을 연구하고자 하였다.

2. 본 론

2.1 실험장치

Fig. 1에서 보는 것과 같이 왕복 마찰운동을 할 수 있는 장비를 우리 연구실에서 직접 설계, 제작하여 각 데이터를 수집하였다. 로드 센서부근의 축을 영점으로 기준을 잡고 끝에 무게 추를 달아 수평을 맞춘 다음에 핀에 연결된 로드 셀에 하중을 가하였다. 또한 하부에서는 모터를 장착하여 리드스크류와 알루미늄 시편을 연결하여 왕복운동을 할 수 있게 하였다. 리드스크류를 따라 운동하는 시편에는 약 2 cm 가량의 거리를 두고 리미트 센서를 장착하였다. 시편은 그 두 개의 리미트 센서를 통해 두 사이를

왕복운동하게 된다. 그 위에 플라스틱 핀이 하중을 받아 왕복 접촉 마찰운동을 하게 된다. 하중은 2 kg의 원판을 로드빔 위에 올려놓았다. Fig. 1의 (a)는 실험 장비를 측면도로 도면화 한 그림이고 (b)는 실제 실험 장비를 촬영한 사진이다.

2.2 실험 조건 및 실험 방법

Fig. 2는 이 실험에 사용된 측정 장비와 실험 순서이다. 로드셀과 무게 추의 중심인 힌지 부근에 로드 센서를 장착하여 왕복운동 할 때 가해지는 힘을 측정하였고 핀의 바로 윗부분에 3축 가속도계를 부착하여 햄머링 테스트를 통한 각 축에 대한 고유 주파수를 측정하였다. 또 소음이 날 때 마이크로폰을 핀 근처에 두어 소음을 측정하여 고유 주파수와 비교해 보았다. 이와 같은 방법을 로드的高低이를 총 7가지의 변화를 주어 각각의 데이터를 수집하였다.

모터의 속도는 60 rpm의 속도로 구동하였는데 그 구동은 옆에 부착된 리미트 센서 사이를 왕복하게

(b) Picture of test set-up
Fig. 1 Reciprocating system

Fig. 2 A block diagram for the test procedure

Fig. 3 friction force in pre-run test

되는 원리이다. 먼저 구동 값이 올바르게 나오는지 확인을 위해 선 실험(pre-run test)를 실시하여 나온 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

이 실험실의 환경은 습도 20 %, 온도 20 ℃의 상온 상태를 유지하였으며, 알루미늄 재질의 시편과 폴리에틸렌 재질의 플라스틱 핀에 하중을 가하여 측정하였다. 또한 15 cm 정도 떨어진 거리에 마이크로폰(sensitivity : 54.1 mV/Pa, frequency range : 20 Hz to 20 kHz)으로 측정하였고, 주변 소음상황은 마찰소음 주파수에 영향을 주지 않았다⁽¹⁾. Fig. 4에서는 이 실험장비의 모멘트 및 마찰계수를 구하는 공식을 나타내었다. 초기의 실험 장비는 W1과 W2가 평형을 이루고 있다. W1은 로드빔, 로드, 핀의 무게중심에서의 무게이며 W2는 무게 추의 무게이다. R_x , R_y 는 힘 센서를 원점으로 한 각 축에 대한 힘의 합이다.

$$Wl_1 = Wl_2 \text{ (Balance)} \quad (1)$$

또한 센서의 원점의 힌지 부분에 작용하는 반력과 모멘트 값들은 다음과 같다.

$$f = R_x \text{ (Measured value)} \quad (2)$$

$$R_y + N - W_1 - W_2 - W = 0 \quad (3)$$

$$\sum M_{\text{hinge}} = Wl_1 - Wl_2 - Wl_3 + Nl_3 - FH = 0 \quad (4)$$

모멘트의 합은 0이 되므로 마찰계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N = \frac{Wl_3 + Fh}{l_3} \quad (5)$$

Fig. 4 Forces and geometry in the reciprocating system(h : height of the rod)

$$\mu = \frac{f}{N} = \frac{fl_3}{Wl_3 + Fh} \quad (6)$$

위의 수식은 이 실험에서 마찰계수를 구할 때 사용한 수식이다. 위의 수식을 사용하여 구한 시간에 따른 마찰계수를 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5는 처음 왕복운동을 시작했을 때와 장시간 왕복운동 후 소리가 발생하는 구간에서의 마찰계수의 변화를 각 그래프로 나타낸 것이다. 음의 마찰계

(a) Initial(no friction sound)

(b) During friction sound

Fig. 5 Friction coefficient

Table 1 Height type(7-type) with respect to h (height-of rod)

Type	Abbreviation	Value(h)
Long	L	129 mm
Longmid	LM	116 mm
Midlong	ML	103 mm
Mid	M	30 mm
Midshort	MS	78 mm
Shortmid	SM	65 mm
Short	S	52 mm

수는 왕복운동 시 방향이 바뀌면서 나타난 것이다. Fig. 5(a)는 초기 왕복운동을 시작하였을 때의 값을 나타낸 그래프이며 약 0.1의 마찰계수를 확인할 수 있었다. 또한 소리가 완전히 나기 시작한 구간에서는 Fig. 5(b)의 그래프와 같이 약 0.2의 마찰계수를 구할 수 있었다. 처음 왕복운동을 시작한 다음 마찰계수가 0.2 정도까지 증가하면서부터 소리가 나기 시작하였다. 건 마찰 조건에서 마찰 지속시간에 따라 마찰계수가 증가하는 현상은 일반적인 마찰현상이다. 시간이 경과되면서 핀과 시편의 마찰로 인하여 부스럼이 생기며 이로 인해 마찰력과 마찰계수가 증가하게 된다⁽¹⁰⁾.

Table 1은 로드 에 대한 7가지 높낮이의 변화의 값을 나타낸 것이다. Table 1의 Value(h)는 Fig. 4의 시편부터 로드빔까지의 거리(h)이다. 가장 짧은 부분 S(52 mm)부터 가장 긴 부분 L(109 mm)까지 높낮이의 변화를 줌으로써 시스템 고유주파수가 변하게 된다.

3. 시험결과

3.1 마찰소음 측정

Fig. 6은 상기 실험방법에 따른 마찰을 장시간 일으켰을 때 소음이 나기 시작할 때부터 핀 근방에 마이크로폰을 두어 가장 긴 L(long, 129 mm) 부터 가장 짧은 S(short, 52 mm)까지 총 7가지의 로드 높이 변화를 주어 각각의 스펙트럼(spectrum)을 계측한 결과를 나타내었다. 그림에서 보는 것과 같이 모든 구간에서 약 2개 내지 3개의 피크(peak) 주파수 구간을 확인할 수 있었다. 각각의 피크 주파수를 로드 높이의 변화에 따라 각각 비교해본 결과 피크 주파수는 로드 높이가 높을수록 주파수가 점점 낮아지는 두 개의 피크 주파수와 주파수의 변화가 없는 한 개의

(a) L =129 mm

(b) LM=116 mm

(c) ML=103 mm

(d) M=90 mm

(e) MS=78 mm

(f) SM=65 mm

(g) S=52 mm

Fig. 6 Friction noise for the 7 different set-up

Fig. 7 Peak frequency of friction noise according to the height of the rod(h)

피크 주파수가 보임을 확인할 수 있었다. 첫 번째 피크 주파수는 로드 높이가 점점 높아질수록 주파수가 낮아지는 피크 주파수로 52 mm의 S일 때 약 5200 Hz부터 점점 낮아지면서 마지막 129 mm인 L일 때 700까지 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 두 번째는 90 mm인 M일 때 10000 Hz에서부터 점점 낮아지다가 마지막 129 mm인 L일 때 4500 Hz까지 낮아지는 피크 주파수를 확인할 수 있었다. 마지막으로 7개의 구간 모두가 일정한 값인 6500 Hz의 피크 주파수로 나타난 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 7은 Fig. 6의 피크 주파수들을 로드 높이와 주파수의 꺾은선그래프로 나타낸 것이다. 52 mm의 S, 65 mm의 SM, 78 mm의 MS에서의 2차 피크 주파수는 14000 Hz를 넘어야지만 확인할 수 있어서 굳이 표시하지 않았다. 따라서 마찰운동을 할 때 무수히 많은 모드 중에 특정모드가 고유주파수가 변하더라도 불안정성을 유지하면서 마찰소음을 유발할 수 있음을 확인할 수 있다. 이러한 특정 불안정 모드는 다음의 모달 해석으로 파악할 수 있다.

3.2 FEM 모달 해석 결과

Fig. 8의 그림은 중간길이인 M(90 mm)의 FEM모달 해석 결과이다. 재질은 핀은 플라스틱 재질인 MC 나일론이며 로드빔은 알루미늄, 로드와 무게추는 스틸이다. 각 물성치는 Table 2와 같다. 그림에서 보는 것과 같이 1차 피크 주파수의 모드 형상은 1차 굽힘 모드임을 확인할 수 있었다. 또한 L부터 S까지의 모든 타입에서 그 결과를 확인할 수 있었다. 3차 피크 주파수의 모드 형상 또한 로드-핀에 대한 2차 굽힘 모드임을 확인할 수 있었다. 그리고 6500 Hz라는 일정한 주파수의 2차 피크 주파수의 모드 형상을

Table 2 Material Properties

	Material	Elastic modulus [E][GPa]	Density [ρ][kg/m ³]
Pin	MC Nylon	6.7E+10	3320
Road beam	Aluminum	1.1E+09	1150
Rod	Steel.	1.6E+11	8400
Weight

(a) 1st mode('A' mode)

(b) 2nd mode('B' mode)

(c) 3rd mode('C' mode)

Fig. 8 Mode shapes of squeak mode for length M=90 mm

Fig. 9 Natural frequency analysis of friction noise mode according to the height of the rod (h) from FEM

확인 한 결과 연결부 빔의 1차 굽힘 모드임을 확인할 수 있었다. 로드 높이 h 의 변화에 영향을 받지 않는 빔이 굽힘이 일어나 약 6500Hz 부근에서 소음을 유발하는 원인임을 확인할 수 있었다.

이때 12000 Hz까지 대략 40여개의 진동모드가 존재하며, 그 중 소음주파수를 발생시키는 3개의 진동모드를 로드 길이 별로 추적해보면 Fig. 9와 같다. 유한요소법(FEM)을 이용한 3개의 고유모드 주파수(Fig. 9)와 마찰소음 피크 주파수(Fig. 7)가 거의 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 따라서, 특정 진동모드가 길이가 변하더라도 지속적으로 불안정성이 유지되어 마찰소음을 유발하고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

고유주파수 변화가 가능한 왕복 운동 장치를 통해 알루미늄과 플라스틱 두 가지 재질의 접촉 왕복운동에 따른 마찰력 및 소음을 시험하였다. 또한 시험 면부터 로드 셀까지의 로드 높이 h 를 총 7가지 타입의 로드 높이 및 고유주파수를 변화시켜 소음을 측정하였다. 초기 운동을 시작하고 소음이 나기 시작할 때 소음스펙트럼을 측정하여 FEM 모달 해석을 한 결과값과 비교를 해 보았다. 그 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) 길이에 따라 소리가 발생하는 1차와 3차 모드 형상은 변하지 않았지만 주파수가 변하는 결과를 확인할 수 있었다.

2) 또한 2차 모드 형상처럼 불안정한 모드는 길이에 따라 주파수가 변하지 않고 지속적인 소음을

유발하는 결과를 확인할 수 있었다.

3) 고유주파수가 변하더라도 불안정성을 유지하는 특정 굽힘모드에서 마찰소음이 지속적으로 유발됨을 알 수 있었다.

References

- (1) Choi, H. and Kang, J., 2013, Experimental Study under Reciprocating Sliding on the Friction Noise, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 23, No. 7, pp. 640~644.
- (2) Grandin, M. and Wilkund, U., 2013, Effects of Surface Texturing on Friction and Vibration Behaviors of Sliding Lubricated Concentrated Point Contacts under Linear Reciprocating Motion, Tribology International, Vol. 62, pp. 198~207.
- (3) Autay, R., Kchaou, M. and Dammak, F., 2012, Friction and Wear Behavior of Steels under Different Reciprocating Sliding Conditions, Tribology Transactions, Vol. 55, No. 5, pp. 590~598.
- (4) Chen, G. X. and Zhou, Z. R., 2007, Time-frequency Analysis of Friction-induced Vibration Under Reciprocating Sliding Conditions, Wear, Vol. 262, No. 1-2, pp. 1~10.
- (5) Drees, D., Celis, J. P. and Achanta, S., 2004, Friction of Thin Coatings on Three Length Scales under Reciprocating Sliding, Surface and Coatings Technology, Vol. 118~189, pp. 511~518.
- (6) Mo, J. L., Wang, Z. G. and Chen, G. X., 2013, The Effect of Groove-textured Surface on Friction and Wear and Friction-induced Vibration and Noise, Wear, Vol. 301, No. 1-2, pp. 671~681.
- (7) Park, C. W., Shin M. W. and Jang, H., 2014, Friction-induced Stick-slip Intensified by Corrosion of Gray Iron Brake Disc, Wear, Vol. 309, pp. 89~95.
- (8) Nam, J. and Kang, J., 2013, Brake Squeal Analysis with Respect to Caliper Contact Stiffness, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 23, No. 8, pp. 717~724.
- (9) Nam, J. and Kang, J., 2013, Characteristics of Friction Noise with Respect to Friction Curve, Transactions of The Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 23, No. 5, pp. 423~430.
- (10) Sherrington, I. and Hayhurst, P., 2001,

Simultaneous Observation of the Evolution of Debris Density and Friction Coefficient in Dry Sliding Steel Contacts, *Wear*, Vol. 249, No. 3-4, pp. 182~187.

Hoil Choi is a senior in the Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University in 2013. He is currently a undergraduate 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 Associate Professor in the Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University. He received his Ph.D. degree in Mechanical Engineering from Purdue University in 2008. His research interests include friction noise, structural vibration and nonlinear dynamics.