Transactions of the KSNVE, 24(1) : 28~34, 2014
http://dx.doi.org/10.5050/KSNVE.2014.24.1.028

한국소음진동공학회논문집 제24권 제1호, pp. 28~34, 2014
ISSN 1598-2785(Print), ISSN 2287-5476(Online)

마찰 곡선을 고려한 Pin-on-disk 마찰소음 해석 및 검증

Investigation of Friction Noise with Respect to Friction Curve by Using FEM and Its Validation

남 재 현*·강 재 영†

Jaehyun Nam and Jaeyoung Kang

(Received October 2, 2013 ; Revised December 18, 2013 ; Accepted December 23, 2013)

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

ABSTRACT

This study provides the numerical finite-element method(FEM) estimating the friction noise induced by the negative slope in the friction-velocity curve. The friction noise due to the friction-velocity curve is experimentally investigated through the pin-on-disk setup. The measured squeal frequency is estimated by FEM. The friction curve is measured by the friction test, then it is applied to the complex eigenvalue analysis. The results shows that the experimental squeal frequency can be determined by the FEM analysis. Also, it is emphasized that the negative friction-velocity slope is essential in generating friction noise in the pin-on-disc system.

1. 서 론

마찰에 의한 소음진동은 기계의 신뢰성을 결정하는 매우 주요한 요소 중 하나이다. 마찰력은 접촉한 두 물체의 상대운동의 결과로 발생하며, 진동과 소음을 유발하는 주요한 원인이 된다. 이를 제어하기 위한 연구는 매우 오랜 기간 동안 연구되어 왔다. 마찰에 의한 소음진동 현상은 환경적인 조건 등 매우 복합적인 요소에 의해 발생하기 다양한 메커니즘이 존재한다.

마찰곡선의 기울기는 미끄럼 속도와 마찰계수의 변화로 나타내며, 마찰에 의한 불안정성을 야기 시키는 주요한 메커니즘 중 하나이다. Jibiki와[1], Chen 등[2]은 기초 실험 연구를 통해 마찰에 의한 소음은 자려 진동과 음의 기울기에 매우 밀접한 관련이 있음을 기술하였다. Nam 외[3]는 기초 시험 연구에서 음의 기울기가 발생할 때 소음이 발생할 수 있음을 예측하였다. 마찰 곡선에 관한 일반적인 메커니즘은 Stribeck curve[4]에 의한 것으로 이에 대한 연구는 다양한 방법으로 연구되고 있다.

Nogueira 등[5]은 혼합 윤활 마찰 모델을 설계하여 다양한 인자들을 설계 변수로 정의하여 실험적으로 마찰곡선에 관한 연구를 하였으며, Kang[6~8]은 수치 해석적인 접근을 통해 브레이크 스퀄 소음 연구에서 이론적인 전개를 통해 음의 기울기는 스퀄 소음의 주요한 인자임을 검증하였다. Nam 외[9]는 FEM 해석을 통해 음의 기울기가 고려되었을 때, 발생하는 특정한

† 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

불안정 모드를 확인 하였고 기울기의 크기가 불안정성에 미치는 영향에 대해 확인 하였다. FEM의 이론 모델은 Bajaer[10]에 의해 정의되어 있으며, 해석을 통해 실수부를 확인 하여 검증되었다. 그러나 기존의 문헌들의 경우 실험 또는 수치해석적인 방법만을 사용하여 마찰 곡선에 의한 진동 특성을 확인 하였다.

따라서 이 논문은 마찰 소음의 주요 메커니즘 중 하나인 마찰 곡선을 통해 시험적인 방법과 수치 해석적인 방법의 결과의 상호 관계를 규명하여 상기 시스템에서의 소음 특성을 확인하고자 하였다. 선행 연구된 마찰 곡선에 따른 마찰 소음특성[11]을 통해 음의 기울기가 진동 특성에 어떠한 영향을 미치는지 확인 하였으며, FEM 모델을 구축 하고 복소수 고유치 해석을 수행하여 시스템이 음의 기울기를 가질 때 발생하는 불안정 모드에 대해 확인하였다.

2. 본 론

2.1 실험장치 및 실험 개요

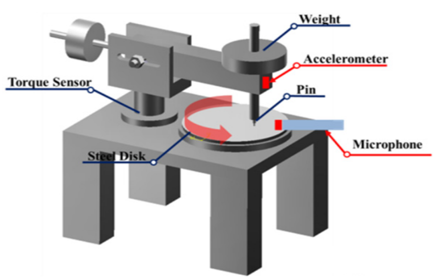
이 논문에서 사용된 시험기는 일반적인 마찰시험에 사용되는 pin-on-disk를 Fig. 1(a)와 같이 직접 제작하였다. 하중은 추를 이용한 시스템을 이용하였으며, 추를 변경하여 원하는 하중을 부과 할 수 있다. (이 논문에서는 9.8 N의 힘을 사용하였다.) 회전은 스텝 모터(DC motor)를 PC로 제어하였으며, 회전판을 회전시켜 마찰재와 디스크의 마찰을 유도하였다. 마찰력은 Fig. 1(b)와 같이 토크센서에서 계측된 데이터를 DAQ(데이터 수집장비)를 통해 전기적인 신호를 물리적인 신호로 환산하였다.

여기서 계측 된 토크를 $Tq[N\cdot m]$라 하면, 마찰력 f는 아래와 같이 표현 가능하다.

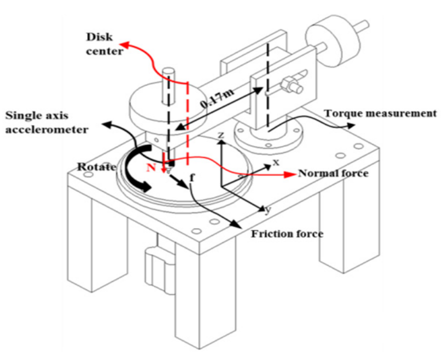
$$f = \frac{Tq[N\cdot m]}{0.17[m]} \tag{1}$$

0.17 m는 핀부터 토크 센서와의 거리이다. 이때, 마찰계수 μ는 아래와 같은 간단한 수학적 연산을 통해 환산 가능하다.

$$\mu = \frac{f}{N} = \frac{\dfrac{Tq[N\cdot m]}{0.17[m]}}{1[kg]\times 9.8[m/s^2]} = \frac{Tq[N\cdot m]}{1[kg]\times 9.8[m/s^2]\times 0.17[m]} \tag{2}$$



(a) Pin-on-disk system



(b) Scheme on friction measurement

Fig. 1 Test setup

Table 1 Data of the pin and disk

	Pin	Disk
Dimension[m]	0.00215	0.14
Length[m]	0.02	0.005
Width[kg]	8e-4	0.6
Material	Aluminum	Steel

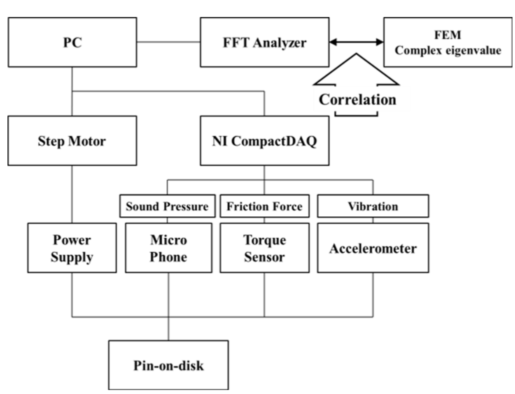


Fig. 2 A block diagram of the pin-on-disk system

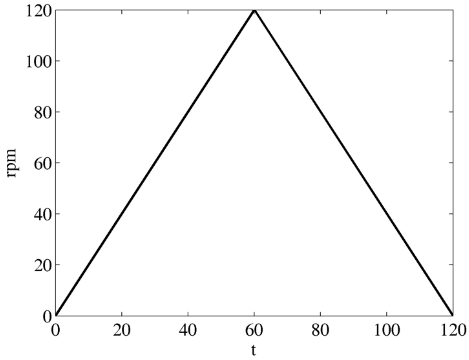


Fig. 3 RPM-time curve

N은 normal force로 9.8 m/s^{2}는 중력 가속도, 1 kg은 하중이다.

마찰 시험에 사용된 시편은 Table 1과 같다.

시스템에서 발생하는 신호의 계측은 3축 가속도계를 몸체에 부착하여 각 방향의 진동을 계측하였으며, 1축 가속도계를 Fig. 1(b)와 같이 핀 근방에 부착하여 마찰방향의 진동을 계측하였다. 마찰에 의한 소음은 소음원과 가까운 위치에 마이크로 폰을 설치하여 계측하였다. 시험 환경은 습도 50 % 온도 24 ℃에서 측정하였으며, Fig. 2는 시험에 연계도를 나타낸 것이다.

2.2 시험결과

일반적인 마찰곡선의 메커니즘인 Stribeck curve는 다음과 같은 특성을 갖는다. 마찰 시 완전 윤활 구간(full film lubrication)에서는 마찰계수가 미끄럼 속도의 증가에 따라 변화가 거의 일정 하지만 윤활 작용이 줄어드는 혼합 윤활 구간(mixed lubrication)이 되면 마찰계수는 미끄럼 속도가 증가함에 따라 감소되는 음의 기울기 곡선을 가진다. 이후 윤활제를 지속적으로 도포하여 완전 윤활 상태가 되는 구간에서는 양의 기울기를 나타낸다. 또한 참고문헌[11]에서 마찰곡선이 음의 기울기를 가질 때 진동 및 소음이 발생하며, 양의 기울기를 가질 때 진동 및 소음이 거의 없음을 확인 할 수 있다.

위와 같은 마찰곡선에 의한 진동 특성을 이 시스템에서 나타내기 위해 초기 소음이 발생하지 않을 때부터 주기적인 소음이 발생하는 초기까지 약 20 rpm으로 30분 정도 마찰시켰다. 이후 DC 스텝 모터를 PC와 연동하여 제어하였다. 모터는 Fig. 3과 같이 시간에 따라 rpm변화한다. 또한 토크 센서에서 발생하는 신호를 수학적인 연산과정을 통해 마찰계수로 환산하여 이 시스템에서의 μ-rpm 곡선을 계측하였다.

Table 2 Data of sensor

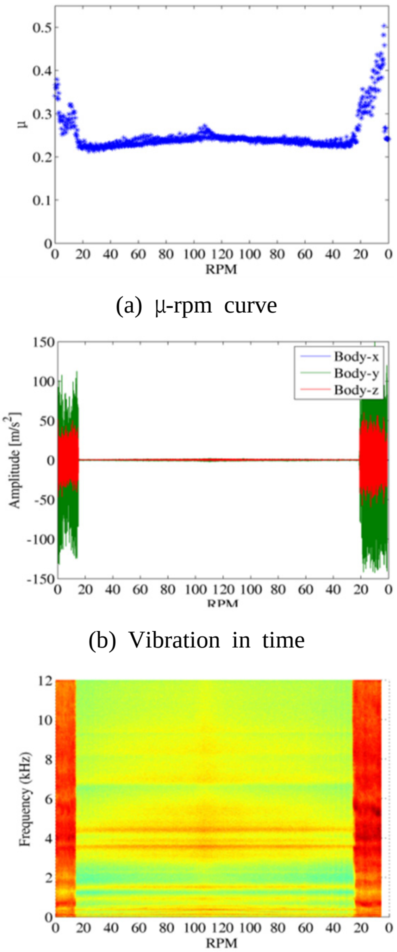
	1-DOF accelerometer	3-DOF accelerometer	Microphone
Sensitivity	9.808 mV/g	X: 10.24 mV/g Y: 9.868 mV/g Z: 9.915 mV/g	54.1 mV/Pa
Frequency range	1 Hz to 25 kHz	X: 1 Hz to 5.5 kHz Y: 1 Hz to 5.5 kHz Z: 1 Hz to 10 kHz	20 Hz to 20 kHz
Mounted resonance frequency	53 kHz	X: 18 kHz Y: 18 kHz Z: 30 kHz	

토크, 1축 및 3축 가속도계, 마이크로폰을 동시 계측하였으며, 시험에 사용된 센서는 Table 2와 같다.

마찰곡선의 기울기가 음의 기울기를 가질 때 발생하는 불안정 주파수를 계측하기 전에 시스템 자체의 구조소음을 계측한 결과 구조 소음은 마찰재와 디스크의 마찰이 발생하지 않을 때 매우 미미한 배경소음이 발생함을 확인 하였다. 따라서 시스템 계측에 영향이 없을 것으로 판단하였다.

이후 9.8 N의 하중을 가하여 핀과 디스크의 마찰을 유도하였다. 최초 주기적인 소음이 발생한 이후 디스크의 속도를 Fig. 3과 같이 초당 2 rpm씩 60초 동안 증가시킨 후 다시 초당 2 rpm씩 감소시켜 마찰계수의 변화 및 진동특성을 계측하였다. 결과는 Fig. 4와 같다.

Fig. 4(a)에서 20 rpm 이하 구간에서는 속도가 증가함에 따라 마찰계수가 감소하는 음의 기울기를 보이고 있으며, 이후 구간에서는 속도의 증가에 따라 마찰계수의 변화가 상대적으로 매우 적다. 120 rpm 이후 속도가 감소하면서 마찰계수의 변화가 거의 없다가 다시 20 rpm 이하 구간에 가까워지면서 급격하게 증가하는 음의 기울기가 발생한다. (b)의 3축 가속도계의 변화를 살펴보면 20 rpm 이전의 구간에서 진폭이 매우 큰 것을 확인할 수 있으며, 다른 구간에서는 진폭이 작다. (c)의 스펙트로그램의 결과 역시 상대적으로 20 rpm 이전 구간에서 진동레벨이 매우 큰 것을 확인할 수 있다. 따라서, 음의 기울기의 경계 영역인 20 rpm으로 고정시켜 각 위치에 부

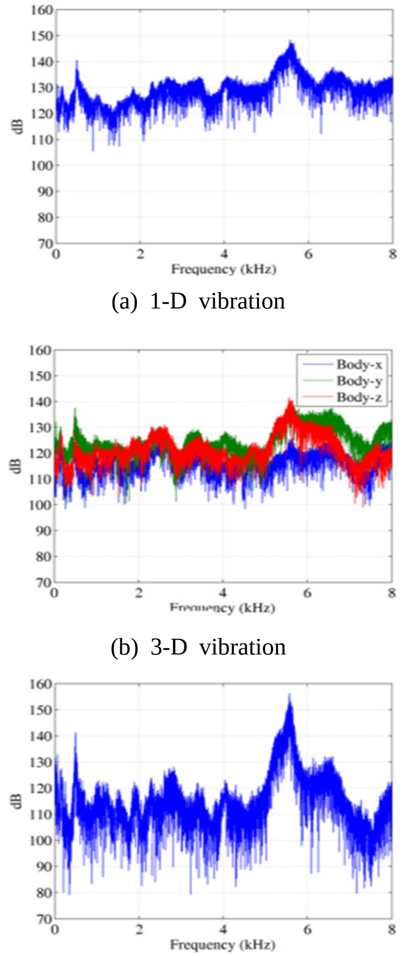


(a) μ-rpm curve

(b) Vibration in time

(c) Spectrogram

Fig. 4 Friction noise with respect to sliding speed



(a) 1-D vibration

(b) 3-D vibration

(c) Microphone

Fig. 5 Vibration and noise at 20 rpm Fig. 4

착한 가속도 계 및 마이크로폰으로 60초 동안 계측하였다. 계측된 신호를 FFT 취한 결과 Fig. 5와 같다.

Fig. 5(a)는 핀 근방에 회전방향으로 부착된 가속도계이며, 5500 Hz 근방에서 peak를 확인 할 수 있다. (b)의 몸체에 부착된 3축 방향 가속도계 역시 5500 Hz 근방에서 peak가 확인되며 (c)의 마이크로폰 계측 결과도 동일한 것을 확인할 수 있다. 따라서 상기 조건일 경우 이 시스템에서 발생하는 불안정 주파수는 5500 Hz 근방임을 확인 할 수 있다.

2.3 FEM 해석모델

시험에서 확인된 5500 Hz 근방의 불안정 주파수에 모드 형상을 유추하고 복소수 고유치 해석의 결과와 상호관계를 규명하기 위해 FEM 해석을 수행하였다. Pin-on-disk의 마찰 모델의 해석은 참고문헌[9]과 같이 ANSYS의 QR damped solver를 이용하여 복소수 고유치 해석을 수행하였다. 우선 원통좌표축 기준으로 각각 (r,θ,z) 방향의 변위벡터는 다음과 같이 표현이 가능하다.

$$\mathbf{u}=[\phi_r]\mathbf{q} \tag{3}$$

$$\mathbf{v}=[\phi_\theta]\mathbf{q} \tag{4}$$

$$\mathbf{w}=[\phi_z]\mathbf{q} \tag{5}$$

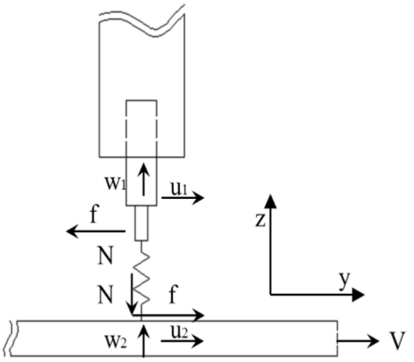


Fig. 6 Contact model

여기서 $[\phi_r]$, $[\phi_\theta]$, $[\phi_z]$는 각각 (r,θ,z) 방향의 정규화된 모드형상 행렬로써(모드의 수 x접촉 노드의 수) 사이즈를 갖는다. $\mathbf{q}$는 진동 좌표 벡터이다.

마찰접촉을 하고 있는 시스템에 대해서 Fig. 6과 같이 접촉 모델을 나타낼 수 있고, 다음과 같이 마찰력에 대한 표현과 상대속도에 대해 표현 가능하다.

$$f = \mu N \tag{6}$$

$$V_{rel} = V - (u_1 - u_2) \tag{7}$$

$$N = P_o + k_c(\omega_2 - \omega_1) \tag{8}$$

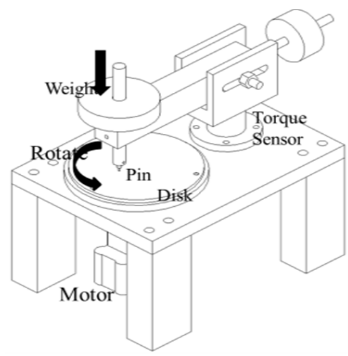
여기서 f는 마찰력이며, μ는 마찰계수, N은 수직항력, k_c는 접촉 강성, p_o는 정하중에 의한 정압이다. 이 논문에서 μ는 미끄럼 속도에 따라 변화하는 함수 일때, 평형상태에 대해 선형화 할 수 있다. 이때 마찰곡선 기울기가 선형요소로 존재한다.

$$\mu = \mu_{eq} + \left(\frac{\partial \mu}{\partial \dot{u}}\right)_{eq} \dot{u} + O(2) \tag{9}$$

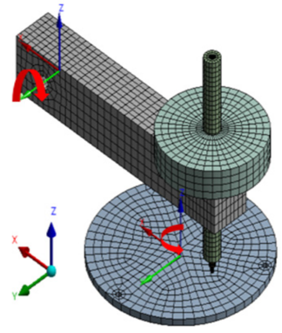
여기서 첨자 eq는 평형점을 의미하고 $O(2)$는 고차항으로 무시하며, $u = u_2 - u_1$이다. 따라서 μ를 마찰력 f에 대해 전개 하면 다음과 같다.

$$f = \left[\mu_{eq} + \left(\frac{\partial \mu}{\partial \dot{u}}\right)\dot{u}\right] N \tag{10}$$

따라서, 마찰계수 기울기 항은 핀에 작용하는 정압(p_o)과 결합하여 다음과 같이 속도 항 $\dot{\mathbf{q}}$에 대응하는 선형 행렬을 만들어 낸다.



(a) Assembly model



(b) FEM model

Fig. 7 Pin-on-disk system

$$[S] = p_o \left(\frac{\partial \mu}{\partial \dot{u}}\right)_{eq} [\phi_\theta][\phi_\theta]^T \tag{11}$$

즉, 마찰계수의 속도에 대한 기울기 함수는 시스템 감쇠 특성에 중요한 역할을 한다. 따라서, 마찰접촉에 의한 운동방정식은 다음과 같다.

$$\ddot{\mathbf{q}} + [S]\dot{\mathbf{q}} + \left([\omega^2] + [K_{asym}]\right)\mathbf{q} = \mathbf{0} \tag{12}$$

여기서 $[\omega^2]$는 단품 고유주파수 행렬, $[K_{asym}]$는 마찰접촉에 의한 비대칭 강성행렬이다. 상기 운동방정식에 대한 고유치 해석을 수행하면 마찰곡선에 대한 스퀼 영향도를 해석할 수 있다. 즉, 실수부(real part)가 양수인 스퀼 모드를 찾아서 마찰곡선의 연관성을 통해 FEM과의 상호관계를 고려해 보고 평형상태의 모드를 확인하여 불안정 모드형상을 유추하고자 한다.

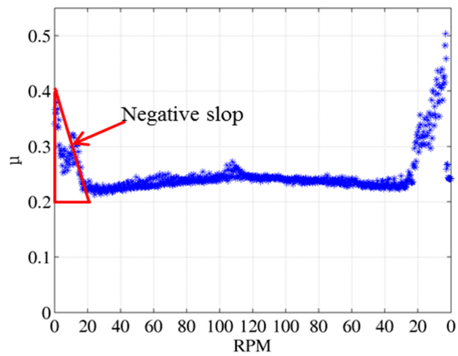


Fig. 8 Friction-rpm curve

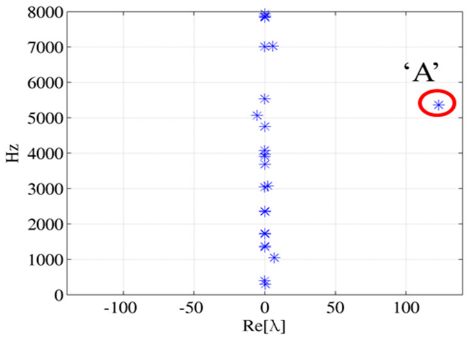


Fig. 9 Complex eigenvalue analysis

모델링은 Fig. 7(a)와 같이 CATIA를 이용하여 설계 하였고, 유한요소 모델은 Fig. 7(b)와 같이 정의하였다. 428개의 linear wedge 요소와 8034개의 linear hexahedron요소를 사용하였으며, 10827의 노드로 이루어져 있다.

해석 절차는 브레이크 스퀼 해석과 동일한 방법을 통해 다음과 같은 해석 메커니즘을 설정하였다.

• 비선형 구조 해석을 통해 힘과 디스크의 회전을 정의 하였다. 이때 마찰력은 비보존력이며, 마찰곡선을 고려하여 강성 행렬 및 감쇠 행렬을 구현 하였다.

• QR Damped solver를 이용하여 복소수 고유치 해석을 수행하였으며, 모드 형상은 평형상태의 모드로 유추하였다.

2.4 FEM 해석결과

계측된 이 시스템의 마찰 곡선을 간략화하여 선형의 기울기를 Fig. 8과 같이 가정하였다. 마찰곡선은 마찰재에 정의되며, 디스크의 미끄럼 속도는 약 20 rpm에 상응하는 pseudo-rotation상태이다. 하중은 9.8 N의 힘을 추에 가하였으며, 몸체 끝단의 홀에 로컬 좌표계를 설정하였다. 로컬 좌표계를 기준으로 각 방향의 변위는 '0'이며, Y 방향의 회전만 가능하도록 정의하였다. 또한 이 시스템은 굽힘 모드가 지배적인 모드임을 유추할 수 있음으로 비선형 옵션에 대한 설정을 굽힘 모드에 맞추어 정의하였다. 해석 결과는 Fig. 9와 같다.

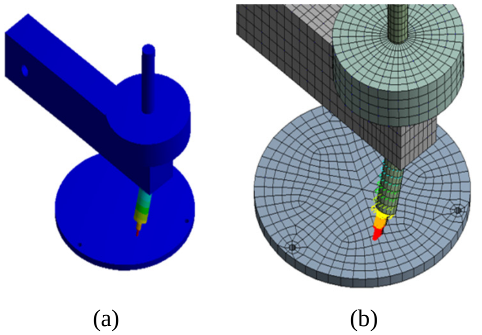


Fig. 10 Unstable mode shape

복소수고유치해석의 결과 18번째 모드인 5500 Hz 근방에서 양의 실수부가 나타남을 확인할 수 있다. 양의 실수부는 복소수고유치해석에서 불안정한 상태를 의미하며, 스퀼발생이 발생할 수 있음을 유추할 수 있다. 불안정모드인 18번째 모드의 평형상태 모드를 확인해 본 결과 Fig. 10과 같다.

Fig. 10(a)의 결과로드의 굽힘모드가 발생하며, 나머지 파트들에서는 강체모드가 발생함을 확인할 수 있다. (b)와 같이 벡터로 확인해 본 결과 회전방향에 민감한 불안정모드임을 확인하였다.

따라서 이 실험에서 초기조건과 환경조건에서는 20 rpm 이하 구간에서 음의 기울기가 발생하며, 음의 기울기가 존재할 때 발생하는 소음은 로드의 회전 방향에 굽힘모드에 의한 것임을 확인하였다.

3. 결 론

이 논문은 마찰소음 진동시험에 사용되는 일반적인 마찰시험기를 직접 제작하여 시험하였으며, 시험환경 및 조건이 위와 같을때의 마찰곡선을 계측하였다. 계측된 마찰곡선에 의한 진동특성을 분석하였으며, FEM 해석결과와 상관관계를 확인하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 이 시스템 및 초기조건에서의 실험결과 20 rpm 이하 구간에서 음의 기울기를 확인할 수 있으며, 이후 20 rpm 이후 구간부터 양의 기울기를 확인할 수 있었다.

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

(3) 이 시스템과 유사한 조건으로 간략화시킨 FEM 복소수고유치해석의 결과와 이 실험의 결과가 매우 유사함을 확인할 수 있다.

(4) 시스템의 조건과 유사하다면 음의 기울기를 고려한 FEM 해석의 결과로 시스템의 불안정모드를 유추할 수 있음을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2012-007301).

References

(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) 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.

(4) Spikes, H. and Olver, A., 2003, Basics of Mixed Lubrication, Lubrication Science, Vol. 16, No. 1, pp. 1~8.

(5) Nogueira, I., Dias, A., Gras, R. and Progri, R., 2002, An Experimental Model for Mixed Friction during Running-in, Wear, Vol. 253, No. 5-6, pp. 541~549.

(6) Kang, J., 2012, Effect of Friction Curve on Brake Squeal Propensity, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 22, No. 22, pp. 163~169.

(7) Kang, J., Krousgrill, C. and Sadeghi, F., 2009, Comprehensive Stability Analysis of Disc Brake Vibrations Including Gyroscopic, Negative Friction Slope and Mode-coupling Mechanisms, Journal of Sound and Vibration, Vol. 324, No. 1-2, pp. 387~407.

(8) Kang, J., 2012, Finite Element Modeling for the Investigation of In-plane Modes and Damping Shims in Disc Squeal, Journal of Sound and Vibration, Vol. 331, No. 9, pp. 2190~2202.

(9) 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.

(10) Bajer, A., Belsky, V. and Zeng, L., 2003, Combining a Nonlinear Static Analysis and Complex Eigenvalue Extraction in Brake Squeal Simulation, 2003-01-3349, SAE, Warrendale, PA.

(11) 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.

Jaehyun Nam received the B.S. 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 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.