

디스크 정렬불량에 기인한 브레이크 스켈소음

박주표[†]·최연선^{*}

Brake Squeal Noise Due to Disk Misalignment

Ju-Pyo Park, Yeon-Sun Choi

Key Words: Squeal(스켈), Run-out(런 아웃), Misalignment(정렬불량), Stability Analysis(안정성 해석)

Abstract

In order to investigate the mechanism of brake squeal noise, the sound and vibration of an actual brake system were measured using a brake dynamometer. The experimental results show that disc run-out varies with brake line pressure and the factor of squeal generation is the run-out due to the misalignment of brake disk. A three degrees of freedom friction model is developed for the disk brake system where the run-out effect and nonlinear friction characteristic are considered. The results of numerical analysis of the model agree well with the experimental results. Also, the stability analysis of the model was performed to predict the generation of brake squeal due to the design parameter modification of brake systems. The results show that the squeal generation depends on the run-out rather than the friction characteristic between the pad and the disk of brake.

1. 서 론

마찰기인진동에 의해 발생하는 브레이크 스켈은 승객의 불쾌감을 유발하며 1930년대 이후 연구가 활발히 진행되어 왔다. Abdelhamid⁽¹⁾은 스켈을 켈리퍼, 디스크, 패드 등 구성부품의 음의 감쇠력에 기인하는 불안정한 진동모드가 발생시키는 소음이라고 하였다. Chung⁽²⁾은 스켈의 발생 원인은 수직항력의 변화에 의한 가변적인 마찰력에서 기인한다고 하였다. Nishiwaki⁽³⁾는 Double-pulse laser holography를 사용하여 스켈이 발생하는 동안 브레이크의 진동을 관측하여

디스크의 굽힘모드가 스켈발생과 관련이 있음을 확인 하였다. Ichiba⁽⁴⁾는 마찰력의 변화가 스켈을 발생시키며 마찰력의 변화요인으로 디스크 런 아웃(run-out)의 변화에 따른 가변적인 수직항력을 지적하였다. 이와 같이 많은 연구자들이 스켈 발생 메카니즘에 대한 연구를 하여왔다. 그러나 아직 스켈에 관한 정확한 발생 메카니즘이나 해결 대책은 밝혀지지 않은 상태이고 연구자와 분석방법에 따라 다양한 해결방안이 제시되고 있다. 이에 본 연구에서는 브레이크 다이내모 실험을 통해 스켈 발생 원인을 규명하고, 이를 바탕으로 한 해석모델을 제시하였다.

2. 브레이크 다이내모 실험

2.1 실험방법

스켈소음을 재현하고 측정하기 위해 뉴 EF 소나타에 사용되는 브레이크를 미국 LINK사의 Inertia type single-ended brake dynamometer에

[†] 성균관대학교 대학원

E-mail : jppark0237@empal.com

TEL : (031)290-7501 FAX : (031)290-5849

^{*} 성균관대학교 기계공학부

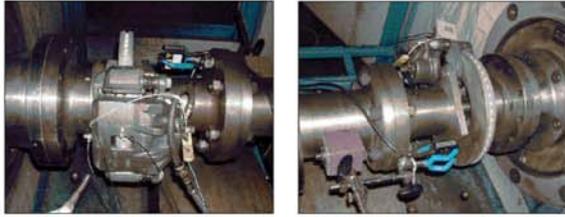
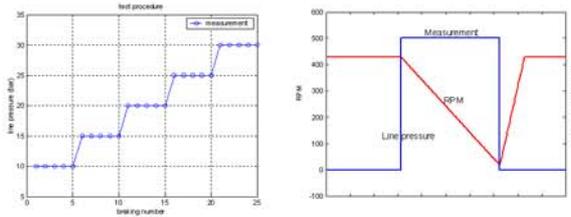


Fig. 1 Sensors



(a) Brake line pressure (b) Disk RPM

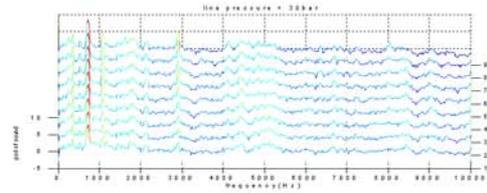
Fig. 2 Squeal measurement

장착하여 실험하였다. 디스크의 초기 run-out은 3/100 mm로 설정하였다. 브레이크 패드는 새 제품과 중고제품을 사용하였고, 각 제품에 대해 각각 2번씩 실험을 수행하였다.

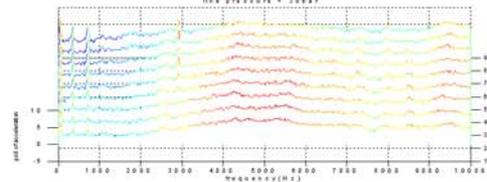
캘리퍼의 가속도, 디스크 런 아웃, 사운드 레벨, 브레이크 토크, 라인압력 등을 측정하였고 센서의 부착위치는 Fig. 1과 같다. 브레이크 라인압력을 10, 15, 20, 25, 30 bar로 하여 디스크 회전속도가 430 RPM에서 17 RPM으로 떨어질 때까지 브레이크를 가하였으며 매회 브레이크를 가한 후에는 패드 온도가 120 ℃가 될 때까지 브레이크를 냉각시켰다. Fig. 2는 이와 같은 실험 절차를 그래프로 나타낸 것이다.

2. 2 스켈 발생 확인

본 실험은 무향실에서 수행한 것이 아니므로 브레이크에서 발생한 소음과 주변 소음을 구별하기 위해 캘리퍼 진동의 waterfall diagram과 음압의 waterfall diagram을 비교하였다. 진동 주파수와 음압의 주파수성분이 일치한다면 이것은 브레이크로부터 기인한 소음이라고 할 수 있다. 스켈은 제동말기에 발생하는 소음이다. 따라서 스켈이 발생했다면 음압의 waterfall diagram에서 RPM이 줄어들에 따라 새로운 주파수 성분이 발생하거나 기존 주파수 성분이 커져야 한다. 실험 결과 4번의 실험 중 두 번째 실험에서 스켈이 발생하였고 이 중 10 bar를 제외한 15, 20, 25, 30



(a) Sound pressure when squeal occurs



(b) Acceleration of the caliper when squeal occurs

Fig. 3 Waterfall diagram

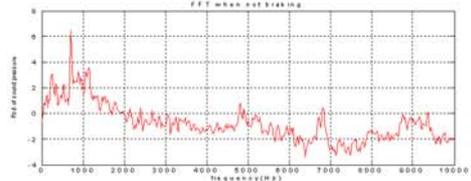


Fig. 4 Power spectrum of the sound pressure without braking

bar로 브레이크를 가한 경우에 스켈이 발생하였다. Fig. 3은 RPM이 줄어들에 따른 캘리퍼 진동과 음압의 주파수 변화를 waterfall diagram으로 나타낸 것으로 두 그래프에서 모두 3 kHz의 주파수 성분이 제동말기에 증폭되는 것을 볼 수 있다. 즉, 제동말기에 발생한 소음은 브레이크에서 발생한 것이라고 할 수 있다. 3 kHz의 주파수는 모드해석 결과 굽힘모드를 가지고 있는 디스크의 3차 고유진동수와 일치하였다. 이것은 Nishiwaki의 연구와 일치하는 현상이다. Fig. 4는 브레이크를 가하지 않은 경우의 음압 waterfall diagram으로 외부소음에는 3 kHz의 주파수성분이 없으며, 1 kHz 미만에서 크게 나타나는 주파수 성분은 외부 소음임을 알 수 있다.

2. 3 시간영역 분석

스켈 발생을 시간영역에서 확인하고 브레이크 토크와 런 아웃과의 관계를 분석하였다. 관심 주파수 범위만을 분석하고 노이즈를 제거하기 위해 FIR필터를 사용하였다⁽⁵⁾. Fig. 3의 waterfall diagram으로부터 스켈의 주파수가 3 kHz임을 확인하였으므로 음압신호의 필터링을 위해 통과대역이 2 kHz~4 kHz인 대역통과 필터를 사용하였

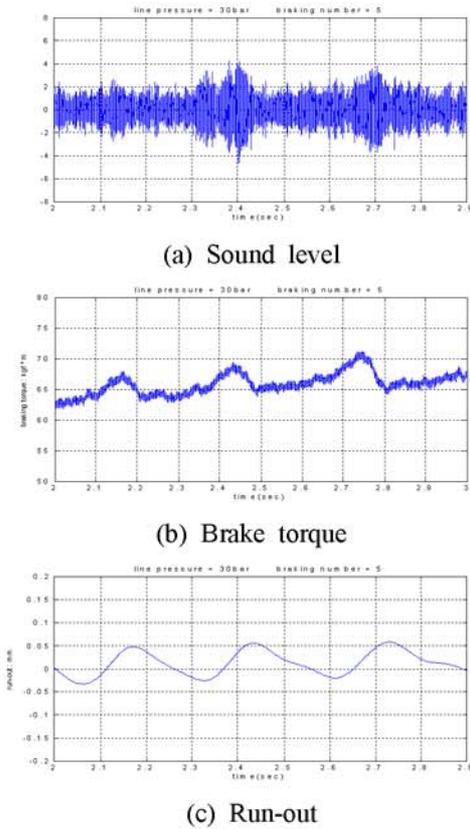


Fig. 5 Time response when squeal occurs

고, 런 아웃의 필터링은 주파수 분석결과 디스크의 회전주파수인 7 Hz이상은 노이즈임을 고려하여 통과 대역이 20 Hz인 저역통과 필터를 사용하였다. Fig. 5에 음압레벨, 런 아웃, 브레이크 토크를 나타내었으며 이들의 관계를 분석하기 위해 스켈이 발생한 구간의 시간응답을 나타내었다. Fig. 5의 (a)에서 스켈이 발생하여 음압 레벨이 커지는 것을 확인할 수 있다. (a)와 (b)의 그래프를 비교하여 음압이 증폭되는 주기가 브레이크 토크의 변화 주기가 일치함을 알 수 있고, (b)와 (c)의 그래프를 비교하여 브레이크 토크의 변화 주기와 런 아웃의 변화 주기가 일치함을 확인할 수 있다. 즉 런 아웃의 발생으로 브레이크 토크가 변화하게 되고 이와 같은 마찰력의 변화가 스켈을 발생시키는 가진력임을 유추할 수 있다. 이와 같은 현상을 주파수 영역에서 확인하기 위해 Fig. 6에 RPM이 줄어들어 따른 런 아웃, 브레이크 토크의 주파수 변화를 waterfall diagram으로 나타내었다. (a)로부터 런 아웃에 디스크의 RPM 성분인 7 Hz 주파수가 나타남을 알 수 있다. 샘플링 주파수가 크고 이로 인한 분해능 저하로 명

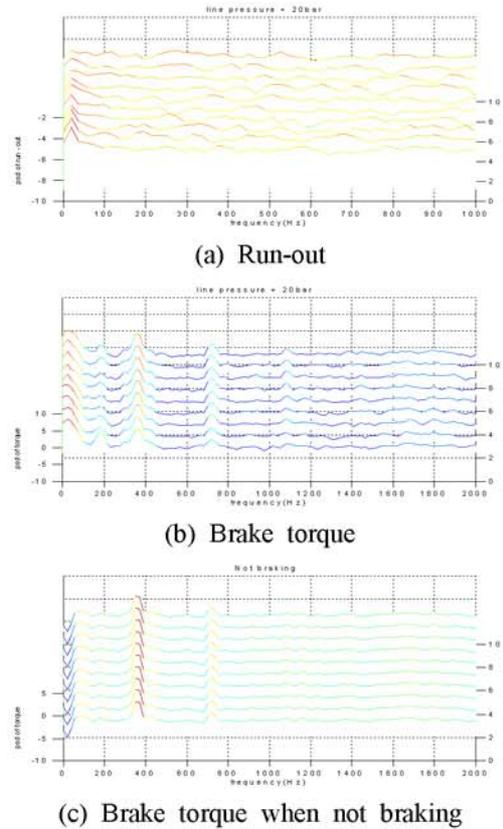


Fig. 6 Waterfall diagram

확히 나타나지는 않지만 제동 말기로 갈수록 RPM 성분이 작아지는 것을 확인할 수 있다. 런 아웃에 RPM성분이 존재한다는 것은 디스크의 정렬불량이 있다는 것을 의미한다. (b)의 브레이크 토크에서도 런 아웃의 주파수와 일치하는 주파수 성분이 있음을 알 수 있다. 이것은 브레이크 토크 변화의 원인이 디스크 런 아웃임을 의미한다. (c) 그래프는 브레이크를 가하지 않는 상태에서 측정된 브레이크 토크 신호를 주파수 분석한 것이다. (b)에서 런 아웃 주파수 이외의 고차 주파수는 노이즈에 의한 것임을 알 수 있다.

2. 4 디스크 런 아웃

Fig. 7은 브레이크 패드와 브레이크 라인압력을 바꿔가며 4번 반복하여 실험을 수행하는 동안 측정된 디스크 런 아웃의 RMS값을 모두 나타낸 것이다. 스켈이 발생한 경우의 런 아웃을 로 나타내었다. 스켈이 발생하지 않은 경우보다 상대적으로 런 아웃이 크다는 것을 확인할 수 있고 이로부터 런 아웃의 크기가 스켈 발생에 영향을 미치는 요인임을 알 수 있다.

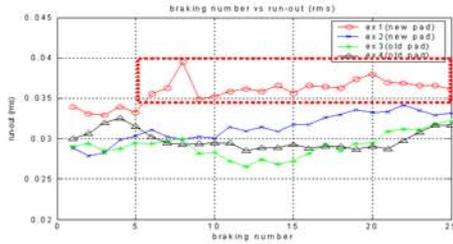


Fig. 7 Run-out of all experiments

2. 5 마찰 특성

디스크와 패드의 상대속도에 따른 마찰특성을 분석하였다. 상대속도는 디스크 RPM과 회전반경으로부터 계산한 디스크 속도와 디스크 회전방향으로 측정된 캘리퍼 속도와의 차로 계산할 수 있고, 마찰계수는 식 (1)과 같이 계산할 수 있다.

$$\mu = \frac{T_B/R}{P_B \times W_A \times 2} \quad (1)$$

μ : friction coefficient

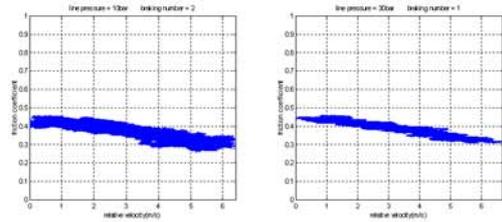
T_b : brake torque

R : distance between disc center and brake pad

P_b : brake line pressure

W_A : wheel cylinder area

Fig. 8은 스켈이 발생하지 않은 라인압력 10 bar와 스켈이 발생한 라인압력 30 bar에서 상대속도와 마찰계수와의 관계를 나타낸 것이다. 두 경우 모두 마찰곡선이 음의 기울기를 가지고 있다. Fig. 9는 라인압력에 따른 마찰곡선의 기울기를 나타낸 것으로 라인압력의 변화에 따라 마찰곡선의 기울기는 거의 변화가 없다는 것을 알 수 있다. Fig. 10은 실험에서 측정된 마찰계수를 모두 나타낸 것으로 브레이크 다이내모에서 직접 측정되었다. 여기서 로 나타낸 부분은 스켈이 발생한 경우의 마찰계수이다. Fig. 10으로부터 스켈이 발생한 경우의 마찰계수가 스켈이 발생하지 않은 경우보다 상대적으로 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 7에 나타낸 런 아웃의 크기와 스켈 발생과의 관계와 일치하는 현상으로 런 아웃과 마찰계수가 상대적으로 큰 경우에 스켈이 발생한다는 것을 알 수 있다. 또한 라인압력 10



(a) 10 bar (b) 30 bar

Fig. 8 Friction curve

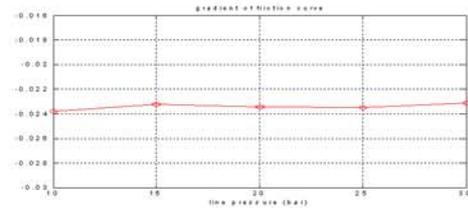


Fig. 9 The gradient of friction curve

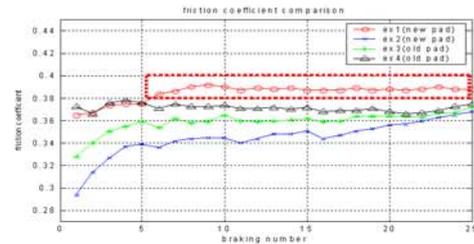


Fig. 10 Friction coefficient of all experiments from dynamometer

bar에서는 브레이크 횟수가 증가함에 따라 마찰계수도 함께 증가 한다는 것을 확인하였다.

3. 브레이크 진동모델

브레이크 다이내모 실험을 통해 스켈 발생이 디스크의 정렬불량에 의한 런 아웃과 관련이 있음을 확인 하였다. 따라서 브레이크 진동 해석모델은 디스크 런 아웃과 이에 따른 수직항력의 변화, 상대속도에 따른 마찰특성 등을 고려한 모델이어야 한다. 본 연구에서는 Fig. 11과 같은 정렬불량을 고려한 3 DOF 마찰모델을 사용하여 브레이크 진동을 해석하고 스켈이 발생하는 조건을 예측하였다. Fig. 11의 모델에서 m_1, m_2, m_3 는 각각 캘리퍼, 브레이크 패드, 디스크의 질량을 의미하며 $y_2(t)$ 는 정렬불량에 의한 디스크 런 아웃을 의미한다. 모델의 운동방정식을 유도하면 식 (2)와 같다. 마찰력은 마찰계수를 상대속도의 합

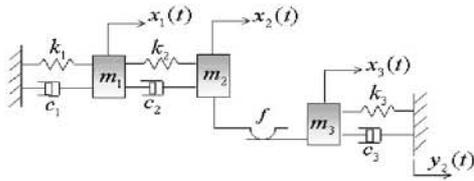


Fig. 11 3-DOF friction model

$$\begin{aligned}
 m_1 \ddot{x}_1 + (c_1 + c_2) \dot{x}_1 - c_2 \dot{x}_2 + (k_1 + k_2) x_1 - k_2 x_2 &= 0 \\
 m_2 \ddot{x}_2 - c_2 \dot{x}_1 + c_2 \dot{x}_2 - k_2 x_1 + k_2 x_2 &= F \\
 m_3 \ddot{x}_3 + c_3 \dot{x}_3 + k_3 x_3 &= -c_3 w_b Y \sin w_b t + k_3 Y \cos w_b - F
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Y : amplitude of disc run-out

w_b : rotating frequency of disc

$$F = \mu(v)N(t) \tag{3}$$

$$N(t) = N_0 + N_1 \cos(wt) \tag{4}$$

수로 하여 식 (3)과 같이 나타낼 수 있으며, 수직 항력은 디스크의 정렬불량 크기에 따라 변화함으로 정현과 함수로 가정하여 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

3. 1 뉴 EF 소나타 브레이크 모델

Fig. 11의 마찰모델이 실제 브레이크 시스템의 해석에 적용 가능한지 확인하기 위해 모델의 운동방정식을 수치적분하고 브레이크 다이내모 실험결과와 비교하였다. 수치적분 시 디스크 런 아웃은 30 bar에서 측정된 런 아웃의 크기인 0.05 mm로 하였다. 디스크 회전수는 Fig. 12 (a)와 같은 실험 데이터로부터 곡선접합을 하여 식 (5)와 같이 시간에 관한 1차 함수로 나타내었고, 마찰계수는 Fig. 12 (b)의 상대속도에 따른 마찰계수 그래프를 곡선접합 하여 식 (6)과 같이 나타내었다. 이 때의 라인압력은 스켈 발생이 가장 명확하게 나타난 30 bar로 하였으며 디스크, 캘리퍼, 패드의 질량 및 강성은 실험적으로 측정하였다.

$$RPM = -93.7 \times t + 412.8 \tag{5}$$

$$\mu(v_r) = -0.0243v_r + 0.4213 \tag{6}$$

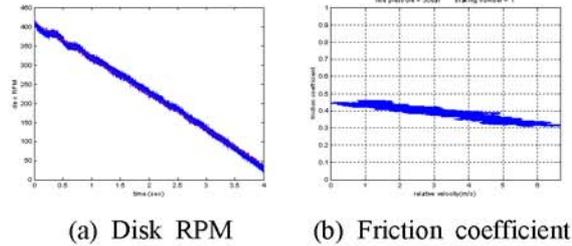


Fig. 12 Experimental results

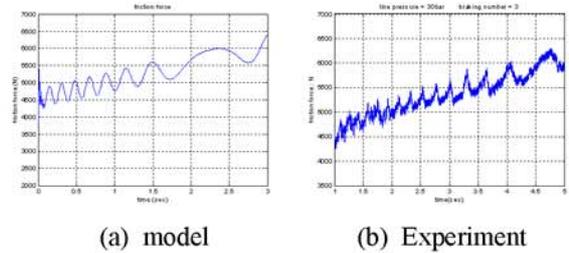


Fig. 13 Comparison of friction force

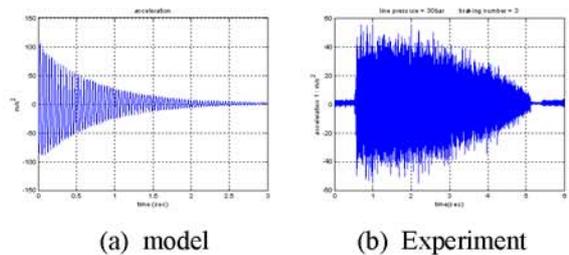


Fig. 14 Comparison of caliper acceleration

Fig. 13은 모델의 마찰력과 실험에서 측정된 마찰력을 비교한 것이다. (a), (b)에서 마찰력이 디스크 런 아웃에 의해 변화되고 제동말기에 디스크 RPM이 줄어들어 따라 마찰력의 변화주기의 폭이 커짐을 볼 수 있다. Fig. 14는 모델응답과 실험결과에서 캘리퍼의 가속도를 비교한 것이다. (a), (b)에서 브레이크를 가한 후 디스크 RPM이 작아짐에 따라 가속도 응답이 작아지는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 모델과 실험의 시간응답을 비교함으로써 Fig. 11의 3 DOF 마찰모델은 실제 브레이크 시스템의 해석에도 적용할 수 있음을 확인하였다.

3. 2 안정성 해석

3. 1의 해석에서 사용된 뉴 EF 소나타 브레이크 해석모델의 운동방정식을 수치적분을 하고 위상선도를 도시하여 브레이크 시스템의 안정성 해석을 하였다. 디스크의 RPM은 스켈의 발생 가능성이 큰 제동말기의 속도인 5 km/h로 계산하여 40 RPM으로 하였다. Fig. 15는 런 아웃이 0.01

mm일 때와 0.06 mm일 때 디스크의 위상선도이다. 여기서 (a)는 런 아웃에 의해 한 개의 주기만을 가지나 (b)에서는 런 아웃 이외의 여러 주기를 갖게 되는 quasi-period 현상이 발생하게 됨을 알 수 있다. 이것은 디스크 런 아웃에 의해 비선형 특성이 나타남을 보여주는 것으로서 시스템이 불안정해 질 수 있음을 의미한다. Fig. 16은 런 아웃의 크기에 따른 분기현상을 나타낸 것으로 런 아웃의 크기가 0.04 mm 보다 커지면 불안정한 응답이 발생함을 알 수 있다. Fig. 17은 마찰계수의 변화에 따른 응답특성을 분석하기 위해 런 아웃에 의한 불안정 응답이 발생하지 않도록 런 아웃의 크기를 0.01 mm로 하고, 마찰계수의 변화에 따른 위상선도를 나타낸 것이다. 마찰계수가 증가함에 따라 위상선도에서 진폭이 커지는 것을 볼 수 있다. 그러나 마찰계수가 커져도 Fig. 15의 (b)와 같이 여러 주기를 갖게 되는 불안정 응답이 발생하지는 않았다. 따라서 마찰계수의 증가가 브레이크의 진동레벨을 크게 하는 원인은 될 수 있으나 스켈과 같은 고주파 진동을 발생시키는 직접적 원인이라고는 할 수는 없는 것이다.

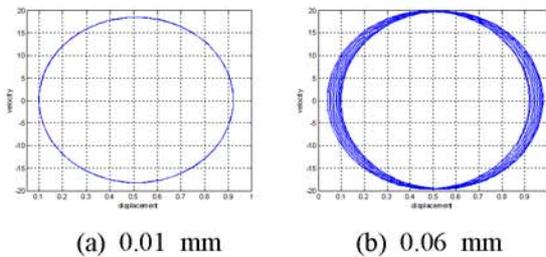


Fig. 15 Phase diagram due to run-out

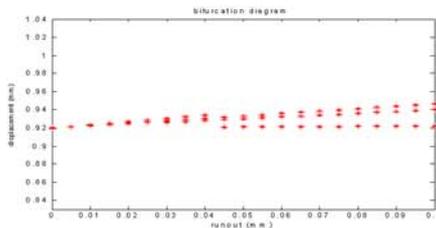


Fig. 16 Bifurcation diagram

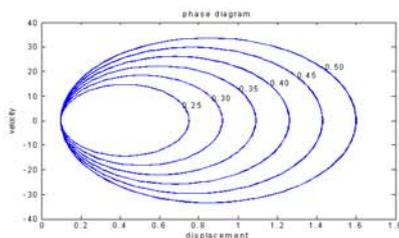


Fig. 17 Phase diagram due to friction coefficient

4. 결 론

본 연구에서는 브레이크 스켈 소음을 재현하고 발생 원인을 규명하기 위해 브레이크 다이내모 실험을 수행하였다. 실험결과 스켈소음은 마찰력이 변화하는 순간 발생하며, 마찰력의 변화는 정렬불량에 의한 디스크 런 아웃에서 기인한다는 것을 확인하였다. 또한 스켈의 주파수는 굽힘모드를 가지는 디스크의 고유진동수와 일치함을 확인하였다. 또한 디스크의 정렬불량과 마찰특성을 고려한 3 자유도 모델의 운동방정식을 유도하고 수치적분하여 실험결과와 비교하고, 분기현상을 도시함으로써 불안정 응답이 발생하는 런 아웃의 크기를 예측하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하는 산업기술개발사업(사시코너모듈 공통기반기술개발)으로 지원되어 수행 하였습니다

참 고 문 헌

- (1) Mohamed Khalid Abdelhamid, 1995, "Structural instability test/analysis of brake squeal", SAE 951281.
- (2) Chih-Hung Chung, William Steed, Kiyoshi Kobayashi, Hiroyuki Nakata, 2001, "A New Analysis Method For Brake Squeal Part 1 : Theory For Modal Domain Formulation And Stability Analysis", SAE 2001-01-1600.
- (3) Masaaki Nishiwaki, Hiroshi Harada, Hiromasa Okamura, Takahiro Ikeuchi, 1989, "Study on Disc Brake Squeal", SAE 890864.
- (4) Yasuaki Ichiba, Yuji Nagasawa, 1993, "Experimental Study on The Disc Brake Squeal", SAE 930802.
- (5) S. D. Stearns, R. A. David, Signal Processing Algorithms in MATLAB, Prentice Hall, 1996.