

디스크 정렬불량에 기인한 브레이크 스켈소음의 실험해석

박 주 표 · 최 연 선*

성균관대학교 대학원 기계공학과 · 성균관대학교 기계공학부

Experimental Analysis on Brake Squeal Noise Due to Disk Misalignment

Ju-Pyo Park · Yeon-Sun Choi*

School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Gyeonggi 440-146, Korea

(Received 27 January 2004 / Accepted 25 June 2004)

Abstract : To investigate the mechanics of brake squeal noise, the sound and vibration of an actual brake system was measured using a brake dynamometer. The experimental results show that disk run-out due to the misalignment of brake disk varies with brake line pressure and becomes the important factor of brake squeal noise generation. Also, it was confirmed that the frequency of the squeal noise equals to the natural frequency of the disk bending mode.

Key words : Squeal(스켈), Run-out(런아웃), Misalignment(정렬불량)

1. 서론

마찰기인진동에 의해 발생하는 브레이크 스켈(squeal) 소음은 고주파성 소음으로 승객의 불쾌감을 유발하여 이를 저감 시키기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다.

Abdelhamid¹⁾은 스켈을 캘리퍼(caliper), 디스크(disk), 패드(pad) 등 구성부품 내에 존재하는 음(-)의 감쇠력에 기인하는 불안정 진동 모드가 발생시키는 소음이라고 하였다. Chung²⁾은 스켈은 수직항력의 변화에 의한 가변 마찰력에서 기인한다고 하였다. Shin³⁾은 2 자유도 브레이크 모델에 루쓰 판별법(Routh criterion)으로 안정성 해석을 하였으며, 스켈 발생을 억제하기 위해서는 디스크와 패드의 고유진동수가 가능한 한 멀리 떨어져 있어야 한다고 하였다.

이와 같은 이론해석과 더불어 Liles⁴⁾는 유한요소 해석을 통해 디스크와 패드의 마찰에 의한 연성

(coupling)을 강성행렬의 비대칭 요소로 표현하여 시스템의 복소고유치(complex eigenvalue)를 구해 안정성 여부를 판별하였고 불안정 모드가 스켈발생의 원인이라고 설명하였다. 스켈의 실험적 연구로 Nishiwaki⁵⁾는 모터로 구동되는 브레이크 실험장치를 제작하고 더블 펄스 레이저 홀로그래피(double-pulse laser holography)를 사용하여 스켈이 발생하는 동안 브레이크의 진동을 관측하여 캘리퍼와 패드의 고유진동수는 스켈 주파수와 관련이 없으며 디스크의 고유진동수가 스켈 주파수와 일치함을 확인하였다. Ichiba⁶⁾는 가속도계를 이용하여 브레이크의 진동을 측정하고 마찰력의 변화가 스켈을 발생시키며, 마찰력의 변화요인으로 디스크 런아웃(run-out)의 변화에 따른 가변적인 수직항력이라고 하였다. Suzuk⁷⁾는 브레이크 다이노미터(brake dynamometer)를 사용하여 실험을 한 결과, 스켈을 발생시키는 자려진동의 가진 에너지는 회전속도와 같은 주기를 가지고 변화하는 마찰력이며, 마찰력의 변화는 디스크의 변위에 기인한다고 하였다. Bergman⁸⁾는 Volvo

*To whom correspondence should be addressed.
yschoi@yurim.skku.ac.kr

850에 쓰이는 패드와 디스크로 실험장치를 제작하여 마찰 조건의 변화에 대해 연구하였고, 마찰계수가 임계값보다 작으면 스켈이 발생하지 않으며, 마찰력이 증가하면 스켈 발생 빈도를 증가시킨다는 것을 확인하였다.

이와 같이 많은 연구자들이 스켈 발생 메커니즘에 대해 이론해석, 유한요소해석, 실험 등을 통한 많은 연구가 있어왔다. 그러나 스켈에 관한 정확한 발생 메커니즘이나 해결대책은 밝혀지지 않은 상태이고, 연구자와 연구방법에 따라 다양한 해결방안이 제시되고 있다. 이에 본 연구에서는 브레이크 다이내모 실험을 통해 스켈을 발생시키는 원인을 규명하고자 하였다.

2. 브레이크 다이내모 실험

스켈소음을 재현하고 측정하기 위해 실제 자동차에 사용되는 브레이크를 Fig. 1의 미국 LINK사의 관성형 브레이크 다이내모(Inertia type single-ended brake dynamometer)에 장착하여 실험하였다.

초기 디스크의 런아웃은 3/100 mm로 측정되었다. 여기서 런아웃은 회전축과 디스크의 경사각에 의해 생기는 변위를 의미한다. 브레이크 패드는 새 제품과 중고제품을 사용하였고, 각 제품에 대해 2번

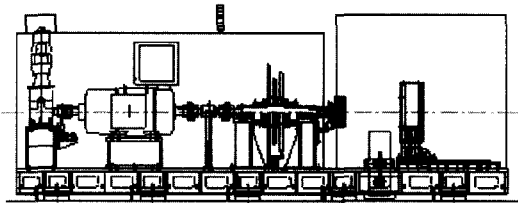


Fig. 1 Brake dynamometer

Table 1 Measured item

Channel	Measured data(direction)
1	Velocity of caliper(rotational)
2	Acceleration of caliper(normal)
3	Acceleration of caliper(radial)
4	Sound level
5	Disk run-out
6	Disk RPM
7	Brake torque
8	Brake line pressure

씩, 모두 4번의 실험을 수행하였다. 각 채널별 측정 데이터는 Table 1과 같고 센서의 부착위치는 Fig. 2와 같다. 브레이크 라인압력은 10, 15, 20, 25, 30 bar로 변화시키며 브레이크를 작동시켰다.

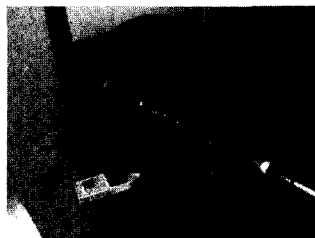
초기 디스크 회전속도는 430 RPM이고 회전수가 17 RPM으로 떨어질 때까지 브레이크를 작동시켰으며 브레이크를 가한 후에는 패드 온도가 120℃가 될 때까지 브레이크를 냉각하였다. Fig. 3은 이와 같은 실험 절차를 나타낸 것이다.

3. 스켈소음

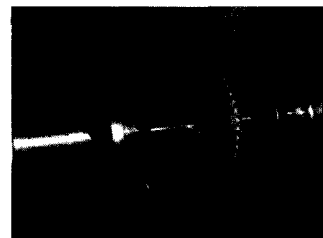
브레이크에서 발생한 소음과 주변 소음을 구별하기 위해 다이내모의 회전수가 감소하는 동안 캘리퍼 진동에 대한 워터폴 다이어그램(waterfall diagram)과 Fig. 2(b)의 음압계(sound level meter)로 측정된 음압을 비교하였다. 스켈소음은 브레이크 시스템의 기계적 진동에 의한 고체음(structure borne noise)이며 이 경우 진동 주파수와 소음의 주파수 성분은 일치하게 된다. 따라서 진동주파수와 음압주파수가 일치한다면 이것은 브레이크 진동에 기인한 소음이며, 소음의 주파수 성분이 1 kHz~10 kHz



(a) Accelerometers

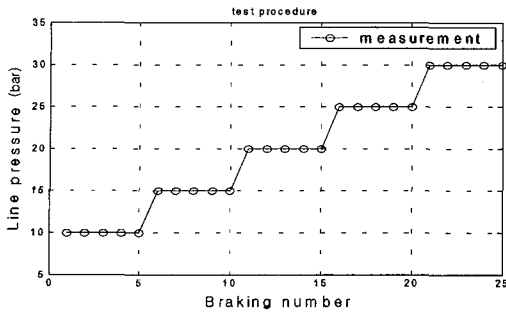


(b) Sound level meter

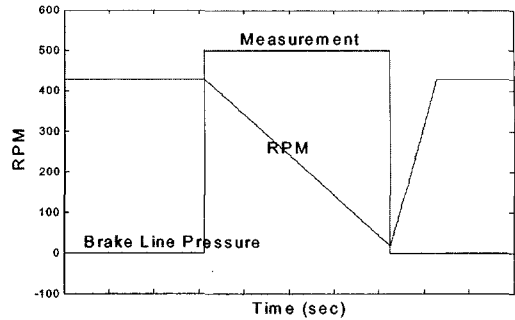


(c) Laser sensor

Fig. 2 Sensors for brake dynamometer experiment

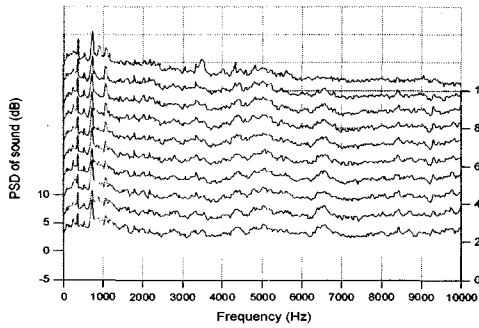


(a) Test sequence

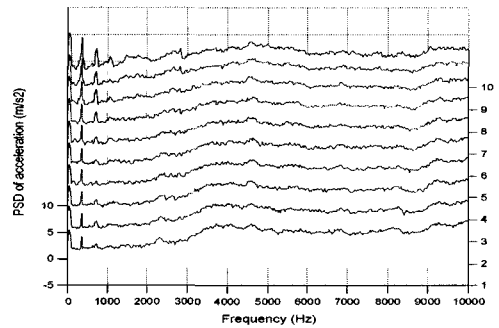


(b) Pressure and rotational speed during braking

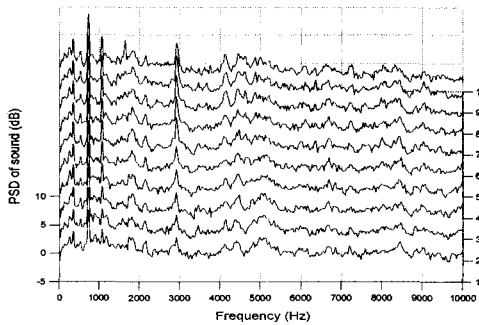
Fig. 3 Squeal measurement



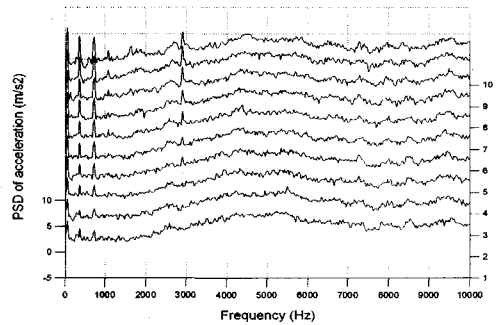
(a) Sound pressure at 10 bar



(b) Acceleration of the caliper at 10 bar



(c) Sound pressure at 30 bar



(d) Acceleration of the caliper at 30 bar

Fig. 4 Waterfall diagram

사이에서 나타날 경우 이것은 스켈소음으로 정의할 수 있다.⁹⁾

본 실험에서 스켈소음은 다이내모의 회전수가 감소할 때 발생하였다. 따라서 음압에 대한 워터폴 다이어그램에서 회전수가 줄어들어 따라 주파수 성분의 변화를 확인할 수 있었다. 실험결과 총 4번의 실험 중, 새 패드로 처음 실험한 경우에 스켈이 발생하였고, 이 중 10 bar를 제외한 15, 20, 25, 30 bar의 라인

압력일 때 스켈이 발생하였다. Fig. 4의 (a), (b)는 스켈이 발생하지 않은 경우의 캘리퍼 진동과 음압의 워터폴 다이어그램이고, (c)와 (d)는 스켈이 발생한 경우의 워터폴 다이어그램이다. 워터폴 다이어그램은 제동을 시작해서 디스크가 정지하기까지의 시간을 10 등분하고, 각 구간에서의 데이터를 주파수 분석하여 나타낸 것으로 그래프의 아랫부분이 제동초기, 윗 부분이 제동말기를 의미한다.

음압레벨을 나타낸 (c)에서 3 kHz의 주파수 성분이 제동 말기에 증폭되는 것을 볼 수 있다. 캘리퍼 가속도를 나타낸 (d)에서도 이와 같은 현상이 발생하는 것으로 볼 때, 제동 말기의 소음은 브레이크에서 발생한 소음이라는 것을 알 수 있다. 3 kHz의 주파수는 실험 모드해석 결과, Fig. 6과 같은 굽힘모드(bending mode)를 가지는 디스크의 고유진동수와 일치함을 확인하였다. 스켈이 디스크의 고유진동수와 관련이 있음을 알 수 있다. Fig. 5는 브레이크를 가하지 않은 경우 음압의 주파수 스펙트럼으로 3 kHz의 주파수성분이 없으며, 1 kHz 미만에서만 주파수 성분이 나타남을 알 수 있다.

Fig. 4로부터 스켈소음의 주파수가 3 kHz임을 확인하였으므로 음압신호의 필터링을 위해 통과대역이 2 kHz~4 kHz인 대역통과필터(bandpass filter)를 사용하였다.

런아웃의 필터링은 Fig. 7과 같이 런아웃의 주파수 분석결과 디스크의 회전주파수인 7 Hz이상은 노이즈임을 고려하여 통과 대역이 20 Hz인 저역통과

필터(low pass filter)를 사용하였다.¹⁰⁾

Fig. 8에 필터링 된 음압레벨, 디스크 런아웃, 브레이크 토크(brake torque)를 나타내었다. 스켈이 발생한 구간의 시간응답만을 나타내었다. Fig. 8의 (a)에서 스켈이 발생하여 음압 레벨이 커지는 것을 확인할 수 있다. (a)와 (b)의 그래프를 비교하여 음압이 증폭되는 주기가 브레이크 토크의 변화 주기와 일

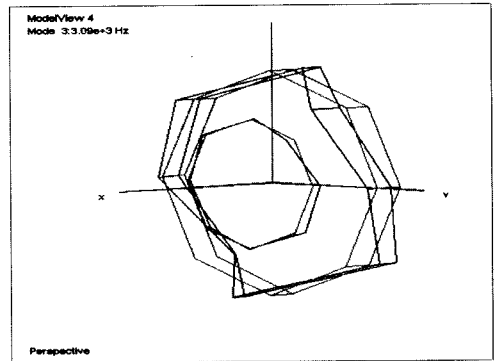


Fig. 6 Mode shape of the disk at 3 kHz and original mode shape

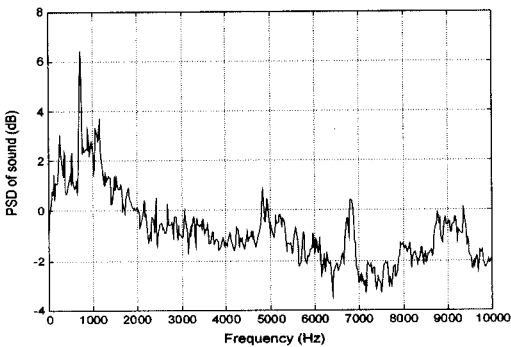


Fig. 5 Power spectrum of the sound pressure without braking

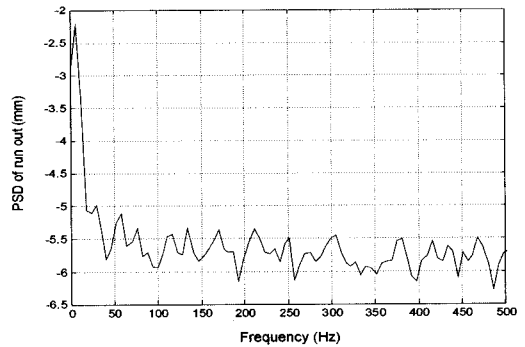
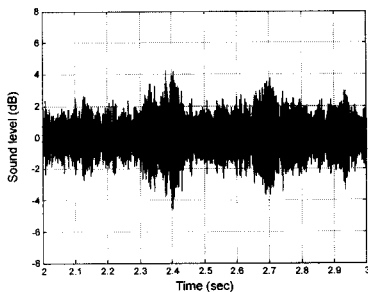
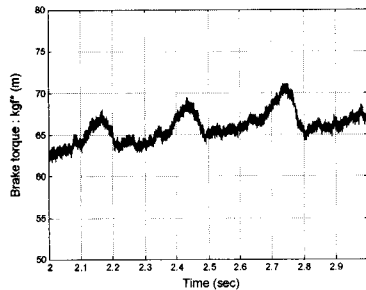


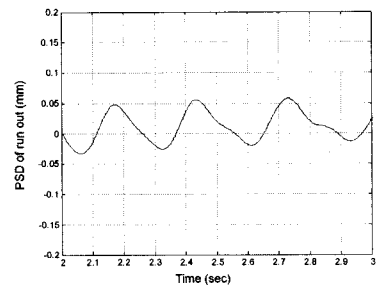
Fig. 7 Power spectrum of run-out



(a) Sound level at 30 bar line pressure



(b) Brake torque at 30 bar line pressure



(c) Run-out at 30 bar line pressure

Fig. 8 Filtered data

치함을 알 수 있고, (b)와 (c)의 그래프를 비교하여 브레이크 토크의 변화 주기와 런아웃의 변화 주기가 일치함을 확인할 수 있다. 즉 런아웃의 발생으로 인해 수직항력이 변화하게 되고, 이로부터 가변적인 마찰력이 발생하게 되어 브레이크 토크가 변화하고 있음을 확인할 수 있다. 즉 스켈소음의 발생이 런아웃에 의한 가변적인 마찰력이 원인이라는 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상을 주파수 영역에서 확인하기 위해 Fig. 9의 (a)에 런아웃, (b)에 브레이크 토크의 워터폴 다이어그램을 나타내었다. (a)로부터 런아웃에 디스크의 회전성분인 7 Hz 주파수가 나타남을 알 수 있다.

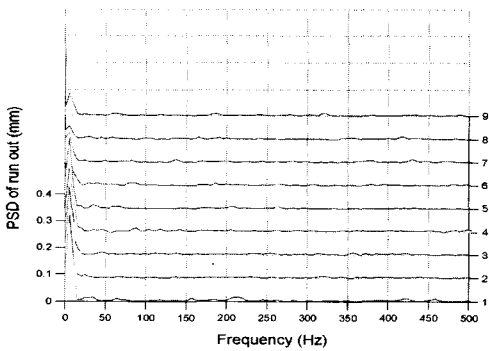
제동 말기로 갈수록 디스크 회전주파수성분이 작아지는 것을 확인할 수 있다. 디스크 런아웃 신호에 회전주파수성분이 존재한다는 것은 디스크 정렬불량이 있다는 것을 의미한다. (b)의 브레이크 토크 신호에서도 디스크 런아웃의 주파수와 일치하는 7 Hz

성분이 있음을 알 수 있다. 이것은 브레이크 토크 변화의 원인이 가변적인 마찰력이며, 이와 같은 가변적인 마찰력은 디스크 런아웃에 의한 수직항력변화로부터 기인한다는 것을 의미한다.

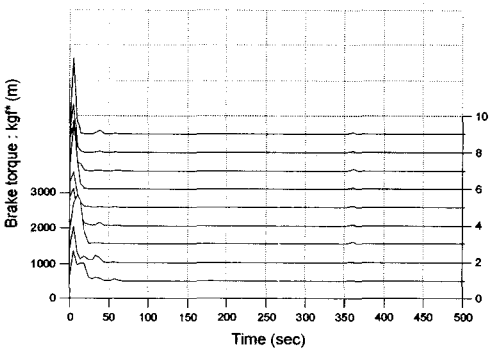
4. 디스크 런아웃과 마찰특성

Fig. 10은 각 라인압력에서 브레이크를 가하기 전과 후에 측정된 런아웃의 크기를 나타낸 것이다. 브레이크를 가한 후에 런아웃이 커진다는 것을 알 수 있고, 라인압력에 비례하여 런아웃이 커짐을 알 수 있다. 즉 디스크에 가해지는 수직항력에 의해 런아웃이 변화한다고 볼 수 있다.

Fig. 11은 패드를 바꿔가며 4번 반복하여 실험을 수행하는 동안 측정된 런아웃의 크기를 나타낸 것으로 스켈이 발생한 경우는 런아웃의 크기가 0.035 mm를 초과하였다. 이로부터 스켈이 발생하지 않은 경우보다 상대적으로 런아웃이 크다는 것을 확인할



(a) Run-out at 30 bar line pressure



(b) Brake torque at 30 bar line pressure

Fig. 9 Waterfall diagram

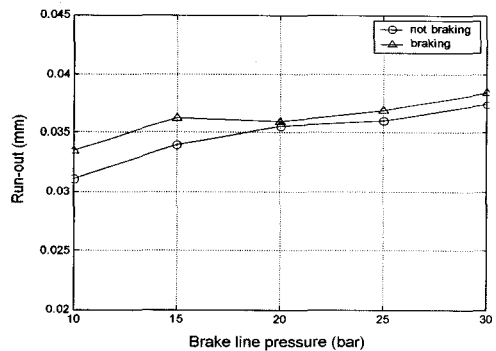


Fig. 10 Run-out vs line pressure

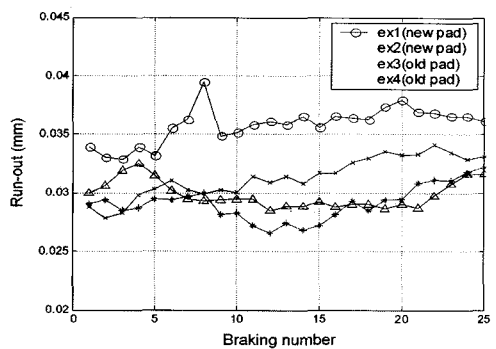


Fig. 11 Run-outs for every experiment

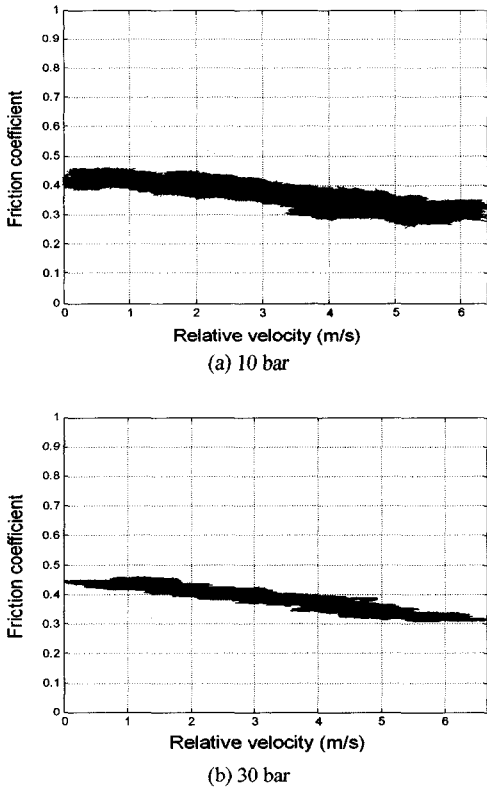


Fig. 12 Friction curve

수 있고 이로부터 런아웃의 크기가 스켈 발생에 영향을 미치는 요인임을 알 수 있다.

Fig. 12는 스켈이 발생하지 않은 10 bar와 스켈이 발생한 30 bar에서 상대속도와 마찰계수와의 관계를 나타낸 것이다. 상대속도는 디스크 RPM과 회전 반경으로부터 계산한 디스크 속도와 디스크 회전 방향으로 측정된 캘리퍼 속도와의 차로 계산하였다. 스켈이 발생하지 않은 경우에도 마찰곡선의 음의 기울기를 가지고 있으므로 마찰곡선의 음의 기울기가 스켈을 발생시키는 직접적인 원인이 아니라는 것을 알 수 있다. Fig. 13은 4번의 실험에서 측정된 마찰계수를 나타낸 것으로서 스켈이 발생한 경우의 마찰계수가 스켈이 발생하지 않은 경우보다 상대적으로 크다는 것을 알 수 있다.

이것은 Fig. 11에 나타낸 런아웃과 스켈발생과의 관계와 일치하는 현상으로 런아웃과 마찰계수가 동시에 큰 경우에 스켈이 발생한다는 것을 알 수 있다. 또한 라인압력 10 bar에서는 브레이크 횡수가 증

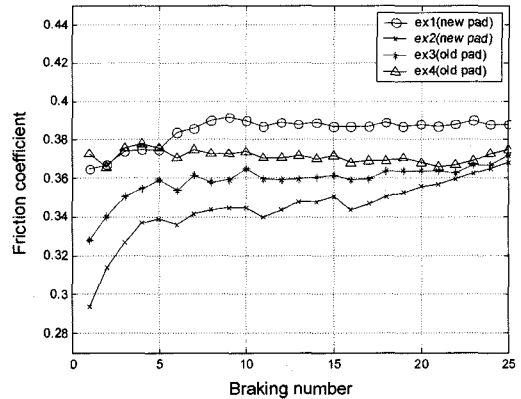


Fig. 13 Measured friction coefficient for every experiment using dynamometer

가함에 따라 마찰계수도 함께 증가 한다는 것을 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서는 브레이크 스켈 소음을 재현하고 발생 원인을 규명하기 위해 브레이크 다이내모 실험을 수행하였다. 실험결과 스켈소음은 마찰력의 변화하는 경우 발생하며, 마찰력의 변화는 정렬불량에 의한 디스크 런아웃에서 기인한다는 것을 확인하였다. 또한 스켈의 주파수는 굽힘모드(bending mode)를 가지는 디스크의 고유진동수와 일치함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하는 산업기술개발사업(샤시코너모듈 공통기반기술개발)으로 지원되어 수행하였습니다.

References

- 1) M. K. Abdelhamid, "Structural Instability Test/Analysis of Brake Squeal," SAE 951281, 1995.
- 2) C.-H. Chung, W. Steed, K. Kobayashi, H. Nakata, "A New Analysis Method for Brake Squeal Part 1: Theory for Modal Domain Formulation and Stability Analysis," SAE 2001-01-1600, 2001.
- 3) K. Shin, M. J. Brennan, J. E. Oh, C. J. Harris,

- “Analysis of Disc Brake Noise Using a Two Degree of Freedom Model,” *Journal of Sound and Vibration*, Vol.254, No.5, pp.837-848, 2002.
- 4) Liles GD, “Analysis of Disc Brake Squeal Using Finite Element Method,” SAE 891150, 1989.
 - 5) M. Nishiwaki, H. Harada, H. Okamura, T. Ikeuchi, “Study on Disc Brake Squeal,” SAE 890864, 1989.
 - 6) Y. Ichiba, Y. Nagasawa, “Experimental Study on The Disc Brake Squeal,” SAE 930802, 1993.
 - 7) T. Suzuki, Y. Kumemura, N. Okudai, T. Yamamoto, M. Nagai, “Analysis of Disc Brake Squeal,” SAE 971038, 1997.
 - 8) F. Bergman, M. Eriksson, S. Jacobson, “Influence of Disc Topography on Generation of Brake Squeal,” *WEAR* 225-229(1999)621-628, 1999.
 - 9) D. W. Kim, H. W. Lee, “A Study for the Improvement of the Brake Squeal Noise,” *Transactions of KSAE*, Vol.4, No.6, pp.223-228, 1996.
 - 10) S. D. Stearns, R. A. David, *Signal Processing Algorithms in MATLAB*, Prentice Hall, 1996.