

# 디스크 브레이크 로터 마찰면 가공 형태에 따른 성능 변화 연구

정택수<sup>1)</sup> · 차바우<sup>1)</sup> · 홍윤화<sup>1)</sup> · 김청민<sup>2)</sup> · 홍영훈<sup>2)</sup> · 조종두<sup>\*1)</sup>

인하대학교 기계공학과<sup>1)</sup> · 한양정밀 기술연구소<sup>2)</sup>

## An Experimental Study for Machined Patterns of Friction Surface on Disc Brake Rotor in Performance Aspect

Taeksu Jung<sup>1)</sup> · Bawoo Cha<sup>1)</sup> · Yunhwa Hong<sup>1)</sup> · Cheongmin Kim<sup>2)</sup> · Younghoon Hong<sup>2)</sup> · Chongdu Cho<sup>\*1)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

<sup>2)</sup>R&D Team, HanYang-Precision, 145 Hwanggeum-ro, 89beon-gil, Yangchon-eup, Gimpo-si, Gyeonggi 10048, Korea

(Received 5 April 2016 / Revised 10 May 2016 / Accepted 10 May 2016)

**Abstract** : Cross-drilling and slotting on the frictional surface of a brake rotor are methods used for improving the performance of the brake system. These shapes have particular advantages, such as the shaving effect of a slotted shape, which maintains a clean pad-to-rotor contact surface, and the venting effect of a drilled shape, which provides passageways for the gas to escape. In order to understand the effect of the machined pattern on the brake performance aspect, an experimental method is adopted along with the dynamometer test. The cross-drilled rotor, slotted rotor, and mixed pattern rotor with cross-drilling and slotting machining are prepared and tested in terms of friction coefficient, temperature, braking torque, and noise.

**Key words** : Disc brake rotor(디스크 브레이크 로터), Cross-drilled hole pattern(관통구멍패턴), Slotted pattern(홈패턴), Friction coefficient(마찰계수), Braking torque(제동 토크), Surface temperature(표면온도)

### 1. 서론

브레이크는 움직이는 차량의 운동에너지를 로터와 패드 간의 마찰 접촉에 의한 열에너지로 바꾸어 소산시키는 역할을 한다. 이로 인하여 브레이크 자체 또는 브레이크 시스템과 연결된 부품들은 브레이크로부터 생성되는 열에너지의 영향을 받아 온도 상승을 일으킬 수 있다. 온도가 상승된 부품들은 열변형을 일으키기 쉬우며, 이로 인하여 진동, 소음 등 제품의 사용 연한을 단축시킬 수 있는 문제가 야기된다.<sup>1,2)</sup> 또한, 유압에 의하여 구동하는 브레이크 시스템의 특성 상, 브레이크 시스템의 과열은 유압 라인의 증기 폐색을 유도하여 차량의 운행에 문제를

일으키는 원인이 되기도 한다.<sup>3)</sup>

따라서 브레이크의 설계에 있어 냉각성능의 극대화는 중요한 인자로서 취급되고 있으며, 특히 차량의 고속 주행을 위하여 설치되는 튜닝 부품의 경우 냉각성능이 더욱 중요하게 다루어진다. 브레이크의 냉각 성능 향상은 주로 로터의 공기 배출부(vent)의 형상 및 배치를 통하여 이루어지는 경향이 있으나, 튜닝 부품의 경우, 배출부의 형상 및 배치 최적화와 더불어 마찰면의 패턴 가공을 통한 추가적인 냉각 성능 향상을 도모한다.<sup>4)</sup>

마찰면 가공 패턴의 대표적인 형상으로는 Fig. 1에 보인 것과 같은 관통 구멍 패턴과 홈 패턴이 있으며, 각각의 패턴은 로터 주변의 공기 유동에 영향을 주어 냉각 성능 향상에 도움을 주는 것으로 알려져

\*Corresponding author, E-mail: cdcho@inha.ac.kr

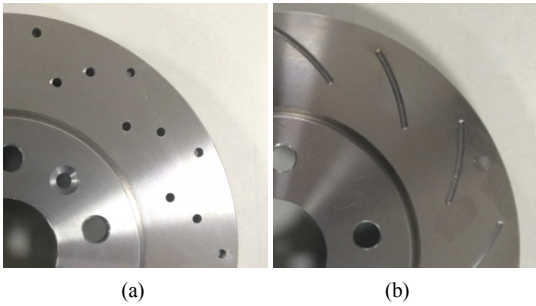


Fig. 1 Machined patterns of disc brake rotor : (a) cross-drilled hole pattern, (b) slotted pattern

있다. 또한 관통 구멍 패턴의 경우, 로터와 패드 간의 마찰열로 인한 패드의 레진이 분해되면서 발생하는 가스를 배출하여 브레이크의 성능이 떨어지는 현상을 방지하는 효과가 있는 것으로 알려져 있으며, 홈 패턴의 경우 패드 표면을 정리하는 기능을 하여 패드와 로터 간의 마찰면의 접촉을 좋게 하는 효과가 있는 것으로 알려져 있다.<sup>5)</sup> 이러한 패턴들이 이미 상용 브레이크의 상당 부분에 적용되어있음에도 불구하고, 마찰면 가공 패턴에 의한 브레이크의 성능 변화에 대한 연구는 미진한 수준에 머물고 있어 해당 부분에 대한 추가적인 연구가 요구되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 브레이크 로터 마찰면의 가공 패턴이 브레이크의 성능에 어떠한 영향을 미치는지 확인하고자, 동일 로트에서 생산된 동일 형상의 로터에 관통 구멍 패턴, 홈 패턴, 두 패턴의 복합 형상을 각각 가공하여 다이내모 시험을 통한 분석을 수행하였다. 제작된 각각의 로터는 동일한 환경 하에서 시험 되었으며, 이 과정에서 마찰 계수, 제동 토크, 온도, 소음이 측정되었다. 측정된 결과는 가공된 패턴에 따라 비교 분석되어 각각의 패턴에 의한 디스크 브레이크의 주요 성능 지표 변화 양상을 추적하기 위한 자료로 활용되었다.

## 2. 디스크 브레이크 형상

본 연구에서는 상용화된 15인치 전륜용 디스크 브레이크 제품을 사용하였으며, 해당 브레이크는 Table 1에 언급된 내용과 같이 조성된 회주철을 사용하여 로터-햇 일체형 형상으로 제작되었다. 제작된 브레이크의 형상은 전체 지름 276 mm, 전체 높이

Table 1 Chemical composition of the gray cast iron (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Carbon equivalent
3.42	2.02	0.64	0.02	0.09	0.20	4.10

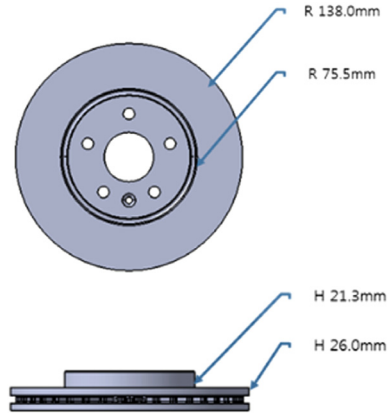


Fig. 2 Geometry of used disc brake rotor

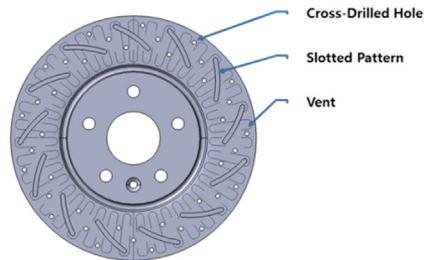


Fig. 3 Machining pattern alignment on rotor friction surface

47.3 mm, 디스크 높이 26 mm로, Fig. 2에 상세 형상을 표기하였다.

Fig. 2에 나타난 디스크 브레이크 로터의 마찰면에 관통 구멍 패턴, 홈 패턴, 두 패턴의 복합 형상을 각각 가공하였으며, Fig. 3과 같이 로터 상의 공기 배출부 형상을 해치지 않는 범위 내에서 가능한 많은 패턴을 배치하여 가공으로 인한 효과가 최대한 작용될 수 있도록 하였다.

가공된 각각의 패턴은 Fig. 4에 나타난 바와 같으며, 관통 구멍 패턴과 홈 패턴이 복합된 형상인 (c)는 관통 구멍 패턴이 가공된 (a)와 홈 패턴이 가공된 (b)를 중첩시킨 형태로, 두 패턴의 혼함으로 인한 성능 변화를 단일 패턴으로 인한 성능 변화와 비교할 수 있는 형태로 가공하였다.

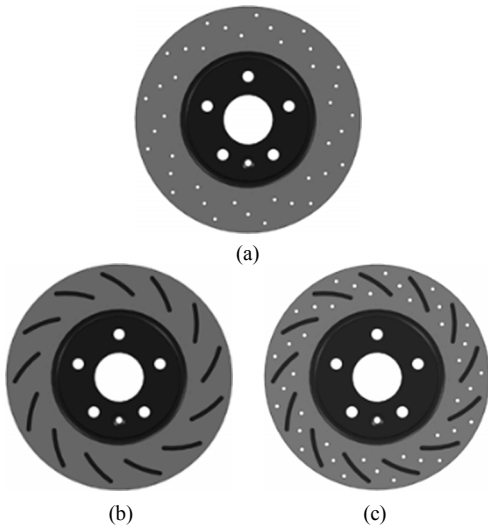


Fig. 4 Patterns on rotor friction surface : (a) cross-drilled hole pattern, (b) slotted pattern, (c) combined pattern: cross-drilled hole and slot

### 3. 다이내모미터 시험

본 연구에서는 앞서 설명한 가공 패턴을 가진 브레이크 로터 3종에 대한 다이내모 시험이 구성되었다. 사용된 다이내모미터는 Fig. 5에 언급된 Link Engineering사의 Dyno 3000으로, 토크 출력 5,650 Nm 로 1,750 RPM을 유지 가능하다. 다이내모미터의 설



Fig. 5 Dynamometer used for experiment

Table 2 Dynamometer information

Information	Specification
Rolling radius	327.0 mm
Wheel load	682 kg
Gross axle weight	1232 kg
Inertia	72.99 kg · m <sup>2</sup>
Piston diameter	60.0 mm
Effective radius	111.0 mm
Number of piston	1 ea

정에는 Table 2에 언급된 중형 승용 차량의 제원이 사용되었으며, FMVSS No. 135(Federal Motor Vehicle Safety Standards, Light vehicle brake system)<sup>6)</sup> 및 SAE J2521<sup>7)</sup>에 언급된 Table 3의 제동 동작을 통하여 브레이크 성능을 시험하였다.

Table 3 Test environment for brake performance<sup>6,7)</sup>

Test	Section	Description
Friction	Warm ramps	5 ramps; 100 km/h; 12 MPa; IBT65-100 °C
Friction and Temp.	Burnish	200 stops; 80 km/h; 0.31g; IBT100 °C
	Cold effectiveness	6 stops; 100 km/h; 0.9g; IBT100 °C 6 stops; 160 km/h; 0.8g; IBT100 °C
	Failed power-brake unit	6 stops; 100 km/h; failed booster pressure or 0.26 g; IBT100 °C
	Fade heating snubs	15 snubs 120-60 km/h; 0.31 g; 55 °C, then every 56 seconds
	Hot performance	1 stop; 100 km/h; BCE; 20 sec after snub 1 stop; 100 km/h; 0.9g; 20 sec after stop
	Cooling stops	4 stops; 50 km/h; 0.31g; 1.5 km distance
	Recovery performance	1 stop; 100 km/h; BCE; 1.5 km distance 1 stop; 100 km/h; BCE; 20 sec after stop
Torque	Warm ramps	3 ramps; 50 km/h; 6 MPa; IBT65-100 °C To be done after temperature tests.
Noise	Reverse module	50 drags; -3 & 3 km/h; 0-20 bar; IBT 150-50 °C
	Stop module	108 stops; 50 km/h; 5-30 bar; IBT 50-250-50 °C
	Matrix module	266 drags; 3 & 10 km/h; 0-30 bar; IBT 50-300-50 °C
	Friction module	6 snubs; 80-30 km/h; 30 bar; IBT 100 °C
	Warm-up module	24 stops; 50 km/h; 5-30 bar; IBT 100-150 °C

## 4. 시험 결과

### 4.1 마찰 계수

패턴에 따른 마찰 계수 측정 시험은 Table 3에 언급된 시험과 같이, Ramp stop 상황과 Step stop 상황으로 구분되어 진행되었다.

Ramp stop 상황의 실험은 100 km/h로 운동 중인 타이어 외경 327 mm의 차량에 탑재된 브레이크에 12 MPa의 피스톤 압력을 점진적으로 가하며 압력이 가해지는 동안의 마찰계수를 측정하는 방법으로 진행되었다. Fig. 6은 각 패턴 별로 측정된 마찰 계수 값을 나타낸 결과이다.

Fig. 6에 나타난 바와 같이, 관통 구멍 패턴의 브레이크가 비교적 높은 마찰 계수를 보였으며, 홈 패턴의 브레이크는 전체 범위에서 낮은 마찰 계수를 보였다. 관통 구멍과 홈 패턴이 복합된 형상의 브레이크는 낮은 피스톤 압력에서 관통 구멍 패턴 대비 낮은 마찰 계수를 보였으나, 10 MPa 이후의 높은 피스톤 압력 구간에서는 가장 높은 마찰 계수를 보임이 확인되었다.

실험 장비의 특성 상, 0.5 MPa 이하의 낮은 피스톤 압력 구간에서는 정확한 마찰 계수 측정이 어려우며, 측정한 결과도 특정한 마찰 계수 변화 경향을 나타내지 않으나, 그 이외의 구간에 대해서는 Fig. 7에 나타난 각 패턴 별 시험 결과의 평균 곡선을 통하여 마찰 계수의 변화 경향을 보다 뚜렷하게 볼 수 있다.

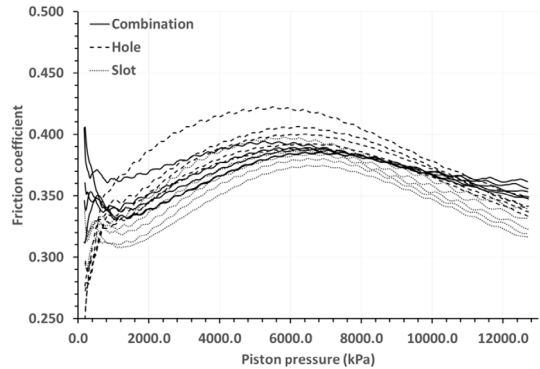


Fig. 6 Friction coefficients measured under warm ramp stops condition for 5 times by patterns

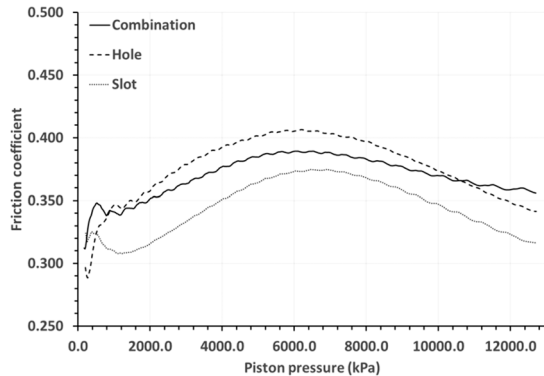


Fig. 7 Average friction coefficients by patterns

Fig. 8은 Table 3에 언급된 다양한 Step stop 상황 하에서의 마찰 계수를 나타낸 결과이다. Step stop의

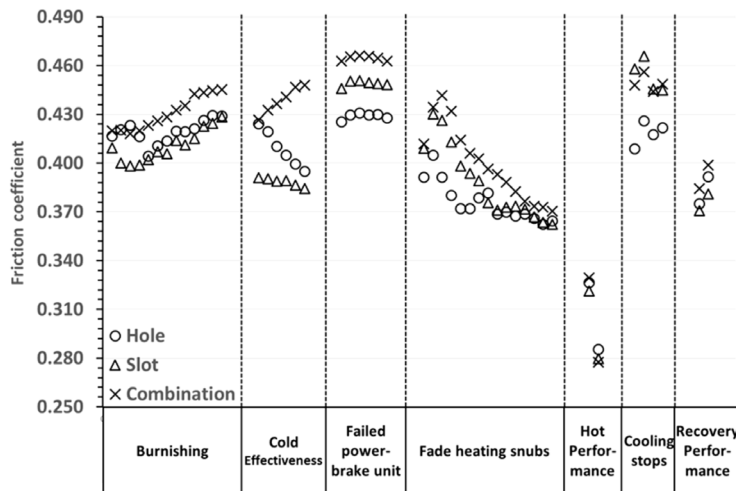


Fig. 8 Friction coefficients measured under various step stops condition by patterns

경우, 대부분 강한 피스톤 압력으로 로터의 정지 시 까지 압력을 가하는 상황으로 이루어져 있기 때문에, Ramp stop 실험 결과 상 10 MPa 이상에서 높은 마찰 계수를 보였던 복합 패턴이 전반적으로 높은 마찰 계수를 보임을 확인할 수 있었으며, 또한 전반적으로 낮은 마찰 계수를 보였던 홈 패턴이 Step stop 시험에서도 낮은 마찰 계수를 보임을 확인하였다. 다만, 낮은 피스톤 압력 하에서 시험이 진행되는 failed power brake unit 시험의 경우, 방열 성능 차이에 의한 온도의 영향으로 인하여 홈 패턴이 관통구멍 패턴 대비 높은 마찰 계수를 보임을 확인하였다.

#### 4.2 온도

패턴에 따른 온도 측정 시험은 Table 3에 언급된 시험과 같이, 다양한 Step stop 상황 하에서 마찰 계수 측정과 병행하여 진행되었다. 브레이크의 운용 중 최대 온도는 hot performance 시험 도중 확인할 수 있으며, 관통 구멍 패턴에서 650 °C, 홈 패턴에서 657 °C 그리고 복합 패턴에서 651 °C로 발생하는 최대 온도는 크게 차이가 나지 않음을 확인할 수 있었다. 또한 각 패턴의 온도 상승 경향성도 특별한 차이 없이 유사한 경향을 보였다. 각 Step stop 상황에서의 온도 상승 경향성은 Fig. 9에 나타낸 바와 같다.

Fig. 10은 Fig. 9에서 나타냈던 각 Step stop 상황 별 로터 온도 변화를 초기 온도와 최고 온도의 차이로

단순화시켜 표기한 것으로, 정지 이후의 최대 온도가 낮은 시험 환경(burnishing, cold effectiveness, failed power brake unit)의 경우 복합 패턴의 온도 변화량이 타 패턴에 비하여 크며, 최대 온도가 높은 시험 환경(fade heating snubs, hot performance)의 경우 관통 구멍 패턴의 온도 변화량이 상대적으로 큼을 확인할 수 있었다.

#### 4.3 제동 토크

패턴에 따른 브레이크의 제동 토크 측정 시험은 Table 3에 언급된 시험과 같이, 온도 및 마찰 계수 측정 시험이 모두 종료된 로터에 대하여 Ramp stop 상황 하에서 진행되었다.

Ramp stop 상황의 실험은 50 km/h로 운동 중인 타이어 외경 327 mm의 차량에 탑재된 브레이크에 6 MPa의 피스톤 압력을 점진적으로 가하며 압력이 가해지는 동안의 제동 토크를 측정하는 방법으로 진행되었으며, 동일한 시험이 3회에 걸쳐 수행되었다. Fig. 11은 각 패턴 별로 측정된 제동 토크 값을 나타낸 결과이다.

Fig. 11에서 보이는 바와 같이, 실험 횟수에 무관하게 패턴 별로 유사한 제동 토크 변화 경향을 나타내고 있음을 확인할 수 있으며, 패턴 별로 상이한 최대 제동 토크 값을 보임을 또한 확인할 수 있다. 측정된 패턴 별 최대 제동토크의 평균값은 관통 구멍

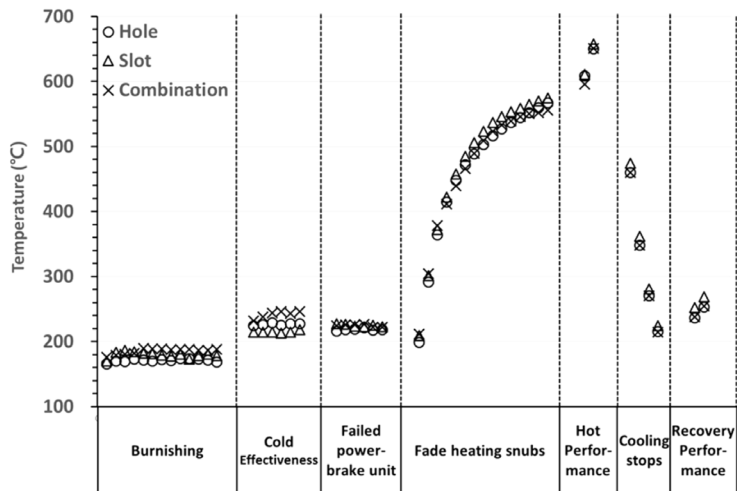


Fig. 9 Rotor temperature measured under various step stops condition by patterns

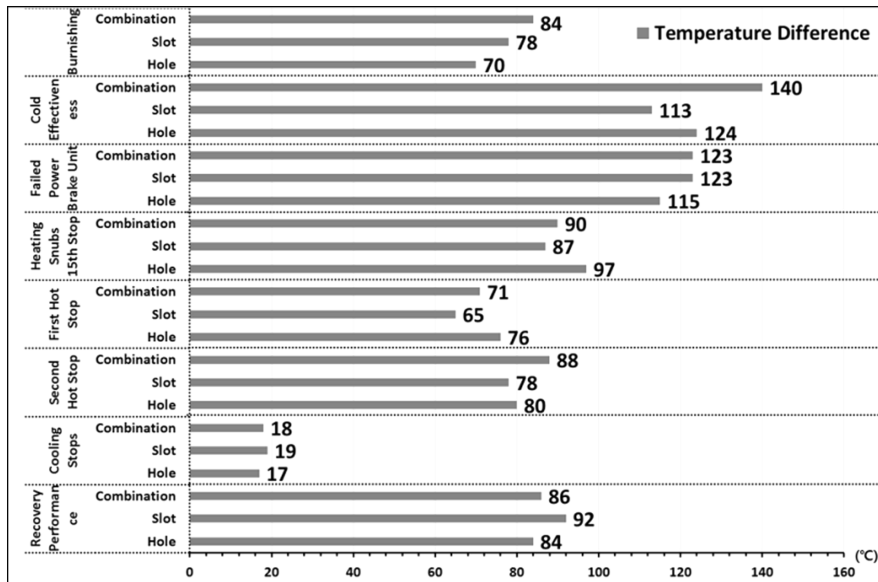


Fig. 10 Rotor temperature difference between initial and maximum

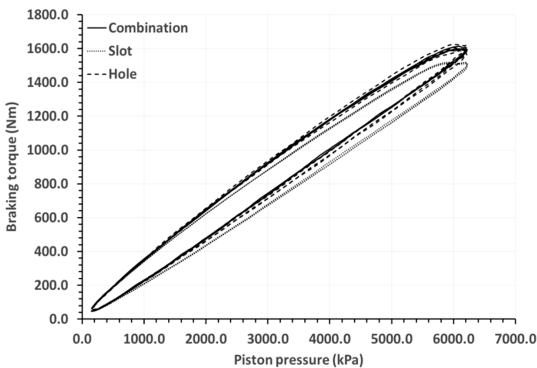


Fig. 11 Braking torque measured under warm ramp stops condition for 3 times by patterns

패턴에서 1,615 Nm, 홈 패턴에서 1,531 Nm 그리고 복합 패턴에서 1,622 Nm로, 홈 패턴의 경우 다른 패턴에 비하여 약 6 % 정도 낮은 토크값을 나타냄을 확인할 수 있었으며, 관통 구멍 패턴과 복합 패턴의 경우 거의 동일한 최대 토크 값과 토크 변화 경향을 보임을 확인하였다.

브레이크의 제동 성능에 영향을 미치는 브레이크 이력현상에 대한 부분도 제동 토크의 측정 중 확인 진행하였으며, 패턴 별 최대 토크 차이 값은 관통 구멍 패턴에서 220.1 Nm, 홈 패턴에서 217.8 Nm 그리고 복합 패턴에서 199.7 Nm로 측정되었다. 측정된

최대 토크 차와 전술한 최대 토크와의 차이를 평균하여 비교하면, 관통 구멍 패턴 13.6 %, 홈 패턴 14.2 % 그리고 복합 패턴 12.3 %로 복합 패턴이 다른 패턴에 비하여 약 2 % 정도 낮은 토크 이력현상을 보임을 확인할 수 있었다. 측정된 실험 데이터는 Table 4에 정리하여 나타내었다.

#### 4.4 소음

브레이크의 소음 시험은 SAE J2521 규격에 따라 진행되었다. 해당 규격에 따른 시험 방법은 브레이크의 초기 길들이기 단계와, 동일한 제동 모드가 3차례 반복되는 소음 평가 단계, 선택적으로 적용 가능한 페이드 단계 및 회복 단계로 구성되어 있다. 각 단계에서 적용되는 제동 상태는 Table 3에 언급된 바와 같으며, 전체 시험 절차 및 제동 횟수는 Fig. 12에 나타낸 바와 같다.

주된 시험 자료가 수집되는 소음 평가 단계에서는 브레이크의 정방향과 역방향 회전 상황에서 완전 정지 동작과 불완전 정지 동작을 반복 수행하며 데이터를 수집하였다. 전체 평가 단계에서 브레이크는 불완전 제동 거동 포함한 제동 동작을 총 2,490회 반복적으로 수행하였으며, Warm stop 상태에서 1,884회, Cold stop 상태에서 606회의 제동 동작이 수

Table 4 Braking torque experiment data measured by patterns

Type	Stops	Pressure @ Max. diff. (kPa)	Max. torque diff. (A) (Nm)	Overall Max. torque (B) (Nm)	Ratio between (A) & (B) (%)	Average (%)
Hole pattern	1	3,357	218.1	1,636	13.3	13.6
	2	3,178	225.1	1,612	14.0	
	3	2,970	217.2	1,598	13.6	
Slot pattern	1	3,645	215.7	1,532	14.1	14.2
	2	3,775	223.2	1,533	14.6	
	3	3,849	214.6	1,527	14.0	
Combined pattern	1	2,869	188.7	1,616	11.7	12.3
	2	3,310	205.8	1,617	12.7	
	3	3,190	204.7	1,632	12.5	

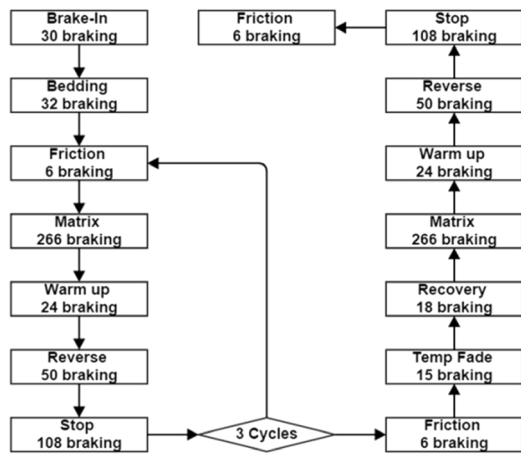


Fig. 12 Braking noise testing procedure of SAE J2521<sup>7)</sup>

행되었다. 본 연구에서는 제동 동작 중 수집된 소음 데이터를 통하여 소음 발생에 취약한 제동 동작을 특정하였으며, 소음 발생 시의 주파수와 그에 따른 소음의 크기를 확인하였다.

각 가공 패턴의 브레이크 소음 시험 결과는 Fig. 13에 나타난 바와 같다. Fig. 13에서 보이는 바와 같이, 5,000 Hz 미만의 주파수에서 전체 가공 패턴의 브레이크가 70 dB 이하의 소음을 발생시키는 경향을 보였으며, 복합 패턴을 제외한 홈 패턴과 관통 구멍 패턴의 브레이크는 12,000 Hz 구간에서 50 dB ~ 95 dB에 걸친 소음을 발생하는 경향성을 보였다. 또한, 12,000 Hz 구간에서 발생한 소음은 브레이크 초기 온도가 0 °C ~ 50 °C 사이에서 진행된 Cold stop 거동 중 발생하는 경향을 보여, 제동 온도와 소음 발생 간에 연관성이 존재할 가능성이 확인되었다.

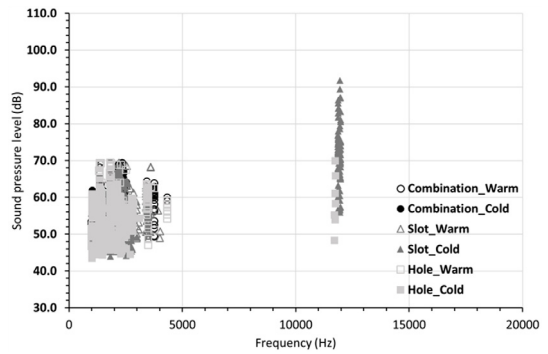


Fig. 13 Braking noise test result - sound pressure level versus frequency

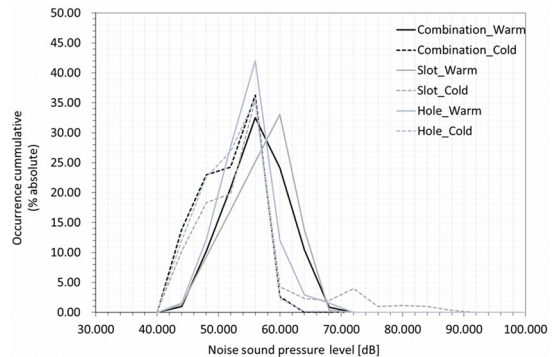


Fig. 14 Noise sound pressure level by occurrence rate

Fig. 14는 발생한 소음의 크기와 발생 정도를 비교한 그림으로, 앞서 Fig. 13에서 언급한 바와 같이 대부분의 소음이 40 dB ~ 70 dB의 구간에서 발생하며, 홈 패턴의 브레이크에 한하여 90 dB의 구간까지 소음이 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 각 패턴 간의 비교 결과, 복합 패턴의 브레이크가 저음 구

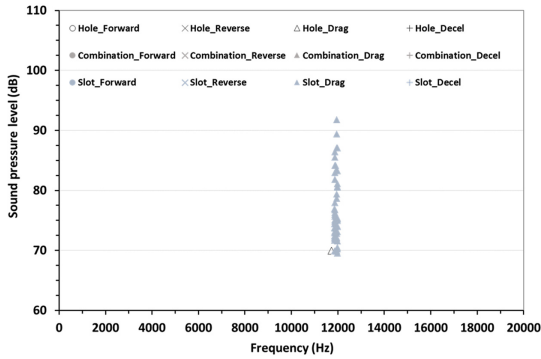


Fig. 15 Noise sound pressure level by specific braking behavior of tested brakes

간의 소음을 가장 낮은 빈도로 발생시키는 경향을 보임을 확인하였다.

Fig. 15는 특정 제동 동작이 소음 발생에 영향을 주는지 확인하기 위하여 제동 동작 별로 소음 발생을 분류한 자료이다. 그림에서 보이는 바와 같이, 소음은 12,000 Hz 대역의 drag 거동(불완전 제동)을 시험하는 시점에 발생하였으며, 발생한 소음은 관통 구멍 패턴과 홈 패턴에서 확인되었다. 해당 시험에서 복합 패턴 브레이크의 소음이 확인되지 않았기 때문에, 앞서 Fig. 14에서 설명한 내용과 같이, 복합 패턴의 브레이크가 타 패턴의 브레이크 대비 높은 소음 저감 성능을 가지고 있음이 확인되었다.

### 5. 결론

본 연구에서는 디스크 브레이크 로터의 표면에 가공된 관통 구멍 패턴과 홈 패턴의 브레이크 성능에 대한 영향을 이해하기 위한 초기단계로서, 마찰 계수, 제동 토크, 온도, 소음 측면에서 랩 다이내모

시험을 통하여 성능 분석이 시행되었으며, Table 5에 정리된 내용과 같은 결과를 확인하였다.

- 1) 마찰 계수 측정 시험 결과, Ramp stop 시험에서는 관통 구멍 패턴의 브레이크가 비교적 높은 마찰 계수를 보였으며, 홈 패턴의 브레이크는 전체 범위에서 낮은 마찰 계수를 보였다. 복합 패턴 브레이크는 낮은 피스톤 압력에서는 관통 구멍 패턴 대비 낮은 마찰 계수를 보이나, 10 MPa 이후의 높은 피스톤 압력 구간에서는 가장 높은 마찰 계수를 보인다. Step stop의 경우, 복합 패턴이 전반적으로 높은 마찰 계수를 보이는 경향이 있으며, 또한 Ramp stop 시험에서와 같이, 홈 패턴이 전반적으로 낮은 마찰 계수를 보임을 확인하였다.
- 2) 온도 시험 결과, 브레이크의 운용 중 최대 온도는 hot performance 시험에 의해 확인 가능하였으며, 최대 온도는 관통 구멍 패턴에서 650 °C, 홈 패턴에서 657 °C 그리고 복합 패턴에서 651 °C로 큰 차이가 발생하지 않았다. 또한 온도 변화량에 있어서는 최대 온도가 낮은 시험 환경 하에서는 복합 패턴의 온도 변화량이 타 패턴에 비하여 크며, 최대 온도가 높은 시험 환경의 경우 관통 구멍 패턴의 변화량이 상대적으로 큼을 확인하였다.
- 3) 제동 토크 시험 결과, 측정된 패턴 별 최대 토크의 평균 값은 관통 구멍 패턴에서 1,615 Nm, 홈 패턴에서 1,531 Nm, 복합 패턴에서 1,622 Nm로 홈 패턴의 경우 다른 패턴에 비하여 약 6% 정도 낮은 토크 값을 나타냄을 확인할 수 있었다. 측정된 브레이크 이력현상의 경우, 패턴 별 최대 토크 차이 값과 최대 토크와의 차이를 평균하는 방법으로 비교하였다. 해당 시험을 통하여 측정된 결

Table 5 Test results by machining patterns on rotor surface

Test	Index	Hole pattern	Slot pattern	Combined pattern
Maximum friction coefficient	Ramp stop	0.402	0.375	0.388
	Step stop	0.431	0.466	0.466
Temperature variation	Hot stop	88 °C	78 °C	80 °C
	Recovery stop	86 °C	92 °C	84 °C
Torque difference ratio	1st	13.3 %	14.1 %	11.7 %
	2nd	14.0 %	14.6 %	12.7 %
	3rd	13.6 %	14.0 %	12.5 %
Noise	Cold stop	O (12,000 Hz)	O (12,000 Hz)	X
	Warm stop	X	X	X



과는 관통 구멍 패턴 13.6 %, 홈 패턴 14.2 %, 복합 패턴 12.3 %로 복합 패턴이 다른 패턴에 비하여 약 2 % 낮은 토크 이력현상을 보임을 확인할 수 있었다.

- 4) 소음 시험 결과, 5,000 Hz 미만의 주파수에서 패턴에 무관하게 전체 브레이크가 70 dB 이하의 소음을 발생시키는 경향을 보였으며, 복합 패턴을 제외한 홈 패턴과 관통 구멍 패턴의 브레이크는 12,000 Hz 구간에서 50 dB ~ 95 dB에 걸친 소음을 발생하는 경향성을 보였다. 해당 경향성은 브레이크 초기 온도가 0 °C ~ 50 °C 사이에서 진행된 Cold stop 환경 하의 drag 제동 동작에서 발생하는 경향을 보였다. 또한, 대부분의 소음이 40 dB ~ 70 dB의 구간에서 발생하며, 홈 패턴의 브레이크에 한하여 90 dB의 구간까지 소음이 발생하는 시험 결과를 확인하였다.

본 연구에서 사용된 마찰면 가공 패턴에 대한 실험 결과, 소음과 토크 이력현상을 포함한 전반적인 관점에서 관통 구멍과 홈 패턴이 조합된 형상이 높은 성능을 보임을 확인하였다. 향후, 보다 명확한 성능 연관 인자 분석을 위하여 실험 계획법과 유한 요소 해석을 활용한 특정 형상 인자 변경 연구가 필요할 것으로 생각되며, 본 연구에서 측정된 시험 결과는 해석의 검증에 활용할 수 있을 것으로 생각된다. 또한 추가적으로 실차 시험 등의 다양한 분석을 통하여 본 연구에서 진행한 브레이크의 성능 인자 이외에 마찰면의 가공 패턴이 영향을 줄 수 있는 효과에 대한 연구가 필요하리라 생각된다.

## 후 기

이 논문은 산업통상자원부가 주관하는 2015년 글로벌 전문기술 개발사업(자동차 튜닝용 고성능 경량 멀티피스 디스크 브레이크 개발, No. 10052284)의 성과물로서 관계자분들께 감사드립니다.

## References

- 1) S. K. Rhee, M. G. Jacko and P. H. S. Tsang, "The Role of Friction Film, Wear and Noise of Automotive Brakes," SAE 900004, 1990.
- 2) A. Belhocinea, C. D. Cho, M. Nouby, Y. B. Yi and A. R. Abu Bakare, "Thermal Analysis of Both Ventilated and Full Disc Brake Rotors with Frictional Heat generation," Applied and Computational Mechanics, Vol.8, No.1, pp.5-24, 2014.
- 3) B. Back, J. Oh, H. Koo, I. Yang, S. Kim, Y. Kim and H. Kim, "Brake Fluid Temperature Simulation Study during Mt. Chiri Descent Based on Brake Dynamo Test," KSAE Spring Conference Proceedings, pp.279-284, 2010.
- 4) H. Sun, "Sensitivity Study on Brake Cooling Performance," SAE 2006-01-0694, 2006.
- 5) Y. Yildiz and M. Duzgun, "Stress Analysis of Ventilated Brake Discs Using the Finite Element Method," Int. J. Automotive Technology, Vol.11, No.1, pp.133-138, 2010.
- 6) Standard Number 135, Light Vehicle Brake Systems, Unite State Department of Transportation, TP-135-01, 2005.
- 7) SAE International Surface Vehicle Recommended Practice, Disc and Drum Brake Dynamometer Squeal Noise Matrix, SAE Standard J2521, 2006.