

## 브레이크 디스크 로터 표면 수직 구멍의 영향에 관한 연구

서 영 진<sup>1)</sup> · 오 제 하<sup>2)</sup> · 이 준 상<sup>3)</sup> · 강 경 수<sup>4)</sup> · 정 근 성<sup>\*2)</sup>

한국과학기술원 기계공학과<sup>1)</sup> · 전주기계산업리서치센터<sup>2)</sup> · (주)데크<sup>3)</sup> · 현대모비스 제동설계부<sup>4)</sup>

## A Study on the Cross-drilling Effects of Brake Disc Rotor

Youngjin Seo<sup>1)</sup> · Jeha Oh<sup>2)</sup> · Junsang Lee<sup>3)</sup> · Kyoungsoo Kang<sup>4)</sup> · Geunsung Jung<sup>\*2)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

<sup>2)</sup>Department of Automotive Engineering, Jeonju Machinery Research Center, 750-01 Palbok-dong, Deockjin-gu, Jeonju 561-844, Korea

<sup>3)</sup>Carbon Ceramic Composite Team, DACC, 750-01 Palbok-dong, Deockjin-gu, Jeonju 561-844, Korea

<sup>4)</sup>Department of Brake R & D, MOBIS, 80-10 Mabuk-dong, Guihung-gu, Yongin-si, Gyeonggi 449-910, Korea

(Received 25 April 2007 / Accepted 21 September 2007)

**Abstract** : Cross-drilling on the brake disc is generally known as a way of improving cooling efficiency. In other theories, cross-drilled holes act like a path of gas or water and are also known that they can reduce fading and wetting of brake rotors. However, in disc rotors with cross-drilling, thermal crack phenomena have been reported more frequently and more manufacturing cost should be paid than non cross-drilled disc rotors. In this study, to examine various effects of cross-drilling on the brake disc, two kinds of brake disc rotors, cross-drilled and non cross-drilled, were used in computational fluid dynamic analyses and dynamometer tests.

**Key words** : Brake disc rotor(브레이크 디스크 로터), Cross-drilled hole(수직구멍), Carbon-ceramic brake disc(탄소-세라믹 브레이크 디스크), Dynamometer(다이내모미터), AMS fade mode(에이엠에스 감쇄 모드)

### 1. 서론

브레이크 디스크는 제동이라는 차량의 가장 기본적인 기능을 수행하는 핵심 부품으로 일정 속도로 주행 중인 자동차의 운동에너지를 브레이크 패드와의 마찰에 의해 열에너지로 변화시켜 그 운동 에너지를 소산시킨다. 이때 발생하게 되는 열에너지는 브레이크 디스크 로터 자체 및 그 주변의 부품으로 전도, 대류의 방법으로 열전달이 발생하기 때문에 이에 의한 온도상승으로 브레이크 시스템의 열변형을 야기하여 진동이나 소음 등을 유발, 그 수명을 단축시키게 되고,<sup>1-4)</sup> 그 주변 부품의 경우는 증기폐색(vapor lock) 등의 치명적인 결함을

야기하기 때문에 브레이크 디스크의 설계에서는 그 냉각성능의 극대화가 중요한 설계 인자 중의 하나라고 할 수 있다.<sup>5)</sup> 냉각 성능의 향상을 위해서 일반적으로 많이 사용되는 디스크 내부의 환기구(vent)와 함께, Photo. 1에 보인 것처럼 디스크 로터의 표면에 수직 구멍(cross-drilling)을 가공하는 것 또한 디스크 로터의 냉각 성능을 어느 정도 향상시키는 것으로 알려져 있다. 또 이 디스크 로터의 수직구멍은 패드와의 마찰 시 발생하는 가스나 패드의 분진을 배출하여 제동 시 마찰력 감쇄(fade) 현상을 방지하는 기능 및 빗물 등이 브레이크 로터에 유입되는 경우 이를 배출 하는 통로로 이용되어 제동성능을 향상시킨다는 이론도 어느 정도 알려져 있다.

\*Corresponding author, E-mail: jgns@jmrc.re.kr

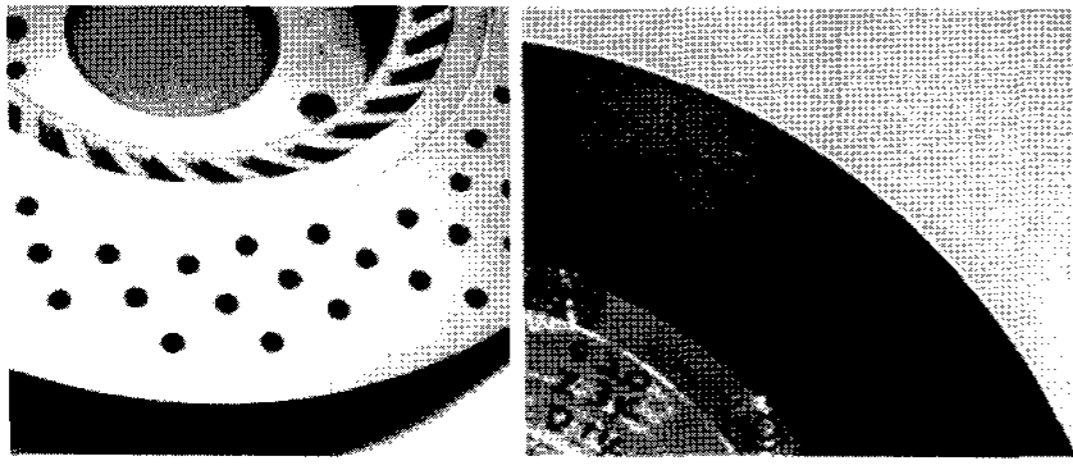


Photo. 1 디스크 브레이크 로터 표면의 수직 구멍



Photo. 2 반복적인 열하중에 의한 수직구멍 주위 크랙

하지만, 아직까지 이러한 효과들에 대한 정량적인 또는 정성적인 내용은 정확히 알려진 바가 없으며, 또 디스크 로터 표면의 수직 구멍은 제동 시 반복되는 열하중에 대해서 Photo. 2에 보인 것처럼 수직 구멍 주위에서 갈라짐(crack)이 발생하고 확산되어가는 등 수직 구멍이 없는 디스크 로터 보다 구조적으로 취약한 경향을 보이며, 생산성적인 면에서도 가공비의 증가 같은 단점을 보이기도 한다.

본 연구에서는, 디스크 로터 표면의 수직 구멍의 효과에 대해 보다 정확한 분석을 하고자, 같은 형상의 디스크 로터에 수직 구멍 가공을 한 경우와 하지 않은 경우 두 가지의 모델을 가지고 해석적, 실험적 분석을 수행하였다. 전산 유체 해석을 이용하여 수직구멍이 있는 경우와 없는 경우의 내부 유동 및 열전달의 비교 분석이 이루어졌으며, 수직구멍의 유무에 따른 두 가지의 브레이크 디스크를 제작, 다이내모미터 시험을 통하여 각각의 마찰계수, 워터리커버리(water recovery) 성능, 디스크 로터와 패드의 마모량 및 최고 온도 등 제동성능을 비교 분석하였다.

## 2. 전산유체해석

### 2.1 디스크 모델

본 연구에 사용된 디스크 모델은 고온에서의 제동성능 및 내구성, 내산화성이 우수한 탄소-세라믹

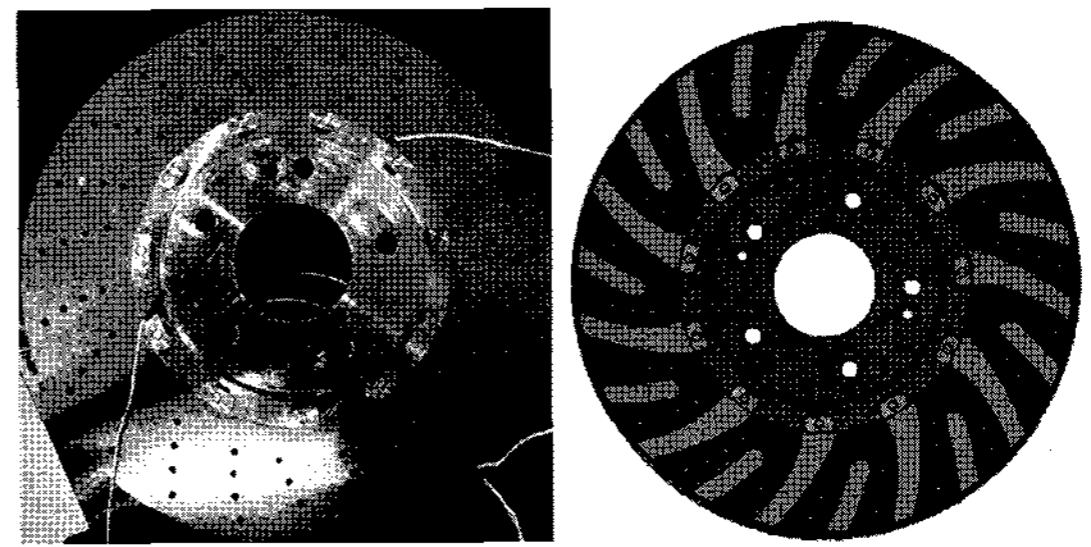


Photo. 3 탄소-세라믹 브레이크 디스크 및 내부 벤트

(carbon-ceramic) 브레이크 디스크로, 디스크 로터 부분은 탄소-세라믹, hat 부분은 STS304 재질로 구성된 2-piece 형태를 이루고 있다. 본 연구에 사용된 디스크와 내부의 환기구(vent) 형상은 Photo. 3과 같으며, 수직 구멍이 있는 모델은 직경 5mm 인 수직구멍이 로터의 상, 하면에 총 176개가 가공되어있다.

### 2.2 전산 해석

브레이크 디스크의 전산해석은 디스크 로터의 수직 구멍이 있는 경우와 없는 각각의 경우를 1/11 부분모델로 단순화시켜 Fig. 1과 같이 모델링하여 해석을 수행하였다.

전산해석에 사용된 디스크 각 부품의 물성치를 Table 1에 보였다. 결합 부품인 볼트와 너트, 부쉬 등은 햇파트(hat part)와 같은 재질인 STS304로 이루어

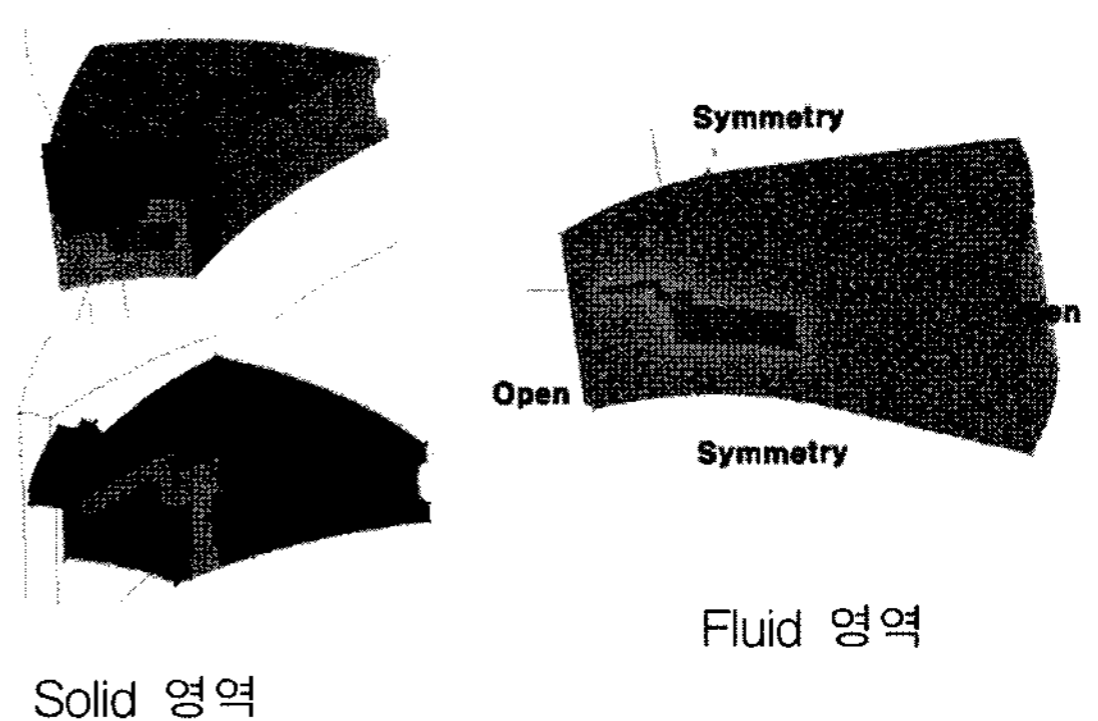


Fig. 1 수직 구멍 유무에 따른 유동장 해석 모델

Table 1 브레이크 디스크 로터 물성치

부 품	소 재	밀도 (kg/m <sup>3</sup> )	열전도도 (W/m·K)	비 열 (J/kg·K)
Rotor	C-SiC	2200	39	1100
Hat	STS304	7980	16.3	500

Table 2 AMS fade mode spec

제동 시작 속도	100 km/h
제동 끝 속도	0 km/h
감속도	1 g
제동 간격	25 sec
제동 횟수	10 회
디스크 초기 온도	80 °C

저, 전산해석 시 같은 물성치를 사용하였고, 각 부품과 공차가 없는 이상적인 결합 상태를 가정하였다.

브레이크 주위의 냉각 공기의 유동 및 대류로 인한 과도 열전달 해석 조건은 Table 2에 보인, 연속적인 급제동 하에서 차량의 제동 성능을 확인하기 위해 주로 유럽 국가에서 널리 사용되고 있는 에이엠에스감쇄모드(AMS fade mode)를 수치적으로 모사하여 차량의 제동에너지와 디스크의 회전수 등을 각각의 모델에 적용하였으며, ANSYS CFX를 이용하여 복합 열전달 해석을 수행하였다.<sup>6)</sup>

### 2.3 전산해석 결과

에이엠에스감쇄모드(AMS fade mode)에서 수직 구멍의 유무에 따른 두 가지 모델의 시간에 따른 디스크 로터 상의 최고 온도의 변화를 Fig. 2에 보였다. 첫 번째 제동단계에서의 온도는 수직 구멍이 있는 경우 138°C, 구멍이 없는 경우가 135°C로 거의 차이를 보이지 않았다.

이어지는 각 제동단계별 온도에서는 수직 구멍의 유무에 따라 약간 다른 열발생율과 열방사량에 의해 조금씩 온도 차이를 보이긴 했지만 누적 값을 말

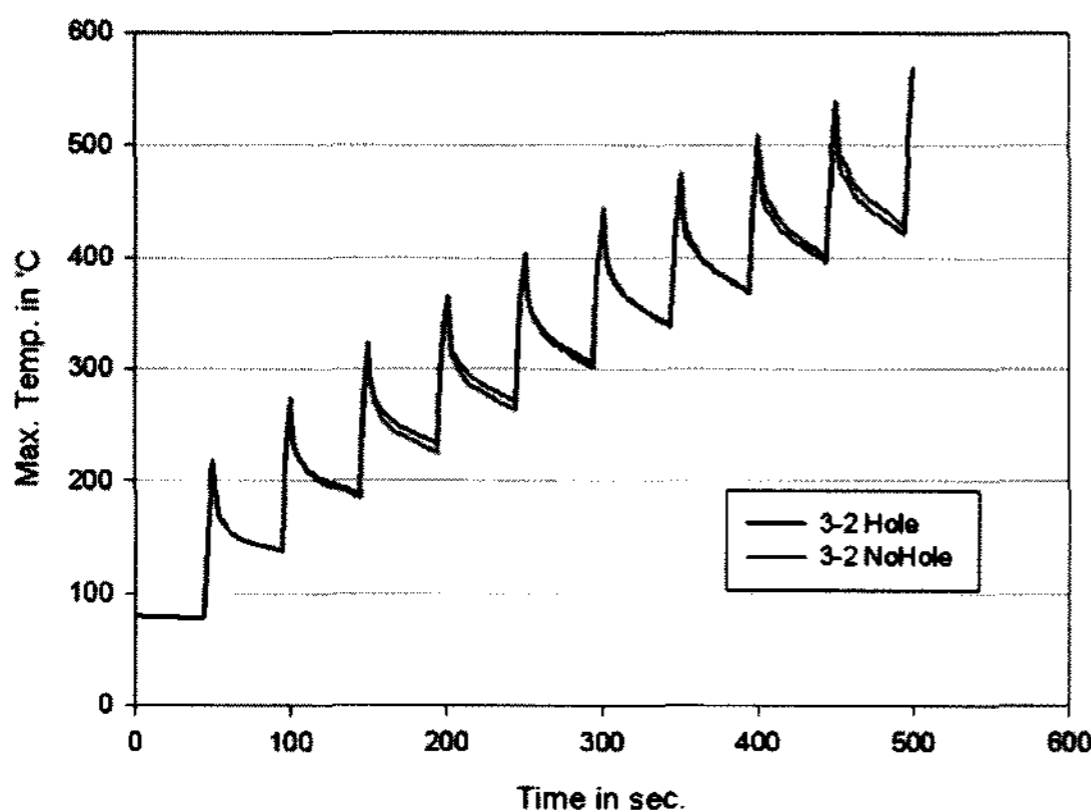


Fig. 2 AMS fade mode step별 최고 온도

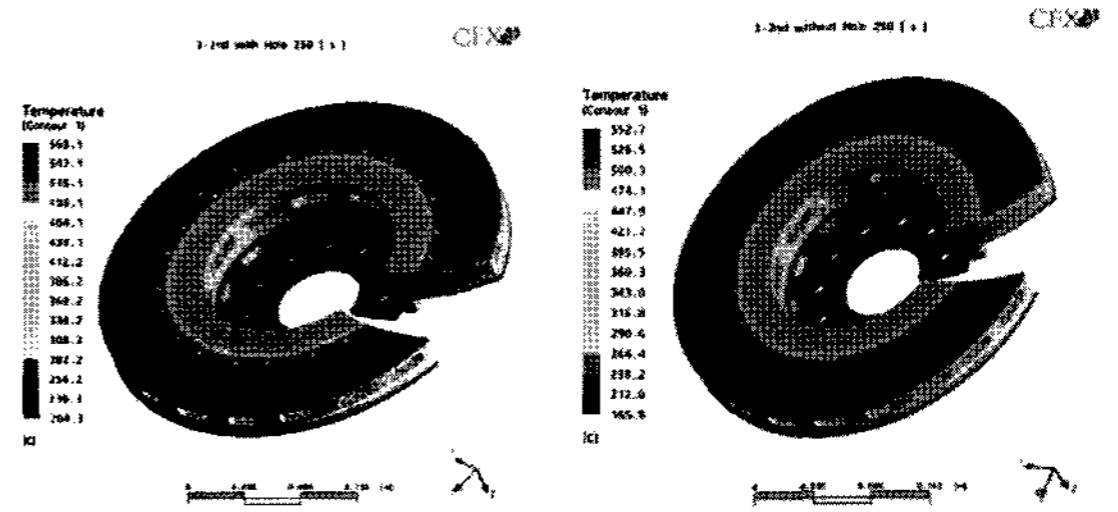


Fig. 3 AMS fade mode 최종제동단계의 모델별 온도분포

해주는 최종 제동단계에서도 수직 구멍이 없는 모델이 있는 모델에 비해서 약 15°C 정도 낮은 값을 가지는, 그리 주목할 만한 차이를 보여주진 않았다. Fig. 3에 보인 최종 제동단계의 온도 분포에서 두 가지 모델은 로터의 표면이나 단면에서 모두 큰 차이를 보이지 않고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 4의 벡터플롯에서 보인 것처럼 로터 환기구 중앙에서의 유동은 수직 구멍이 없는 경우가 그림 상에 점선으로 표시된 커다란 와류(vortex) 영역으로 인해서 약간 불균일한 분포를 보였으며, 수직 구멍이 있는 경우는 이 구멍으로 유입되는 유동으로 인해서 상대적으로 적은 와류(vortex) 영역을 보이고 있음을 알 수 있다.

하지만, Fig. 5에 보인 환기구 벽면에서의 유동은 수직 구멍이 없는 경우에는 와류(vortex) 영역이 약간 증가하는 경향을 보이지만 전체적으로 유동특성의 변화가 나타나지 않는 반면에, 수직 구멍이 있는 경우에는 이 구멍으로 유입되는 공기로 인해 환기구 내부 전체적으로 유동 성능이 현저하게 저하되는 것을 볼 수 있다. 즉, 수직 구멍으로 유입되는 공

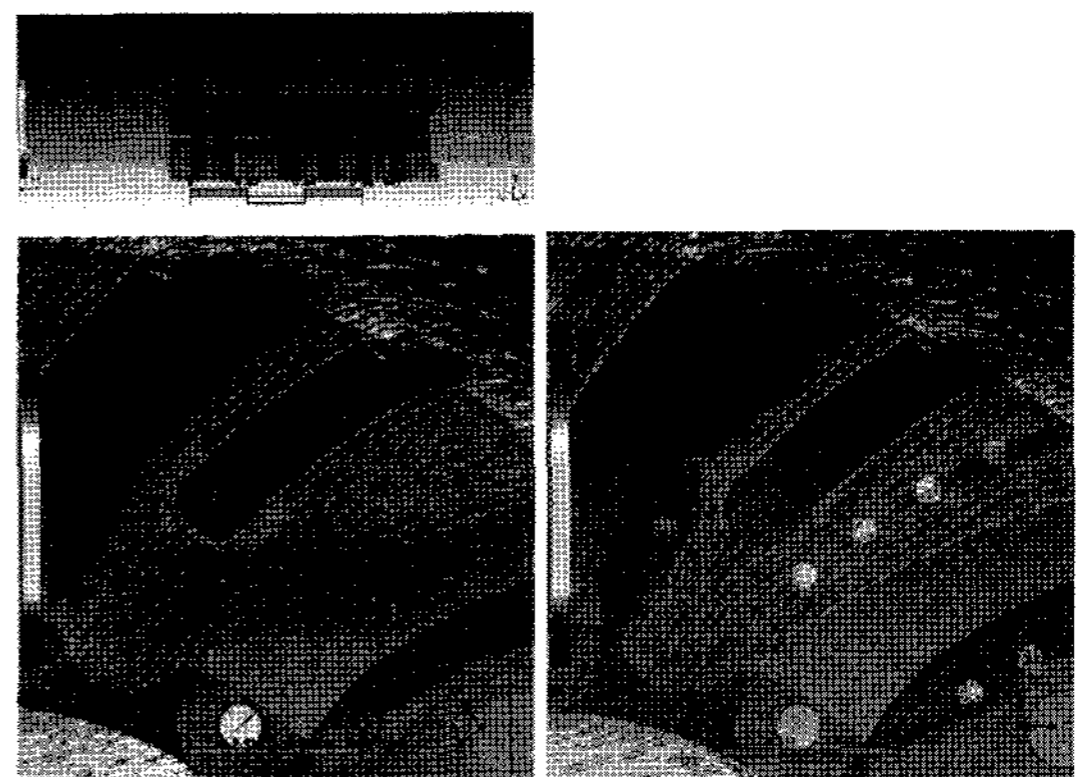


Fig. 4 모델별 로터 환기구 중앙에서의 유동

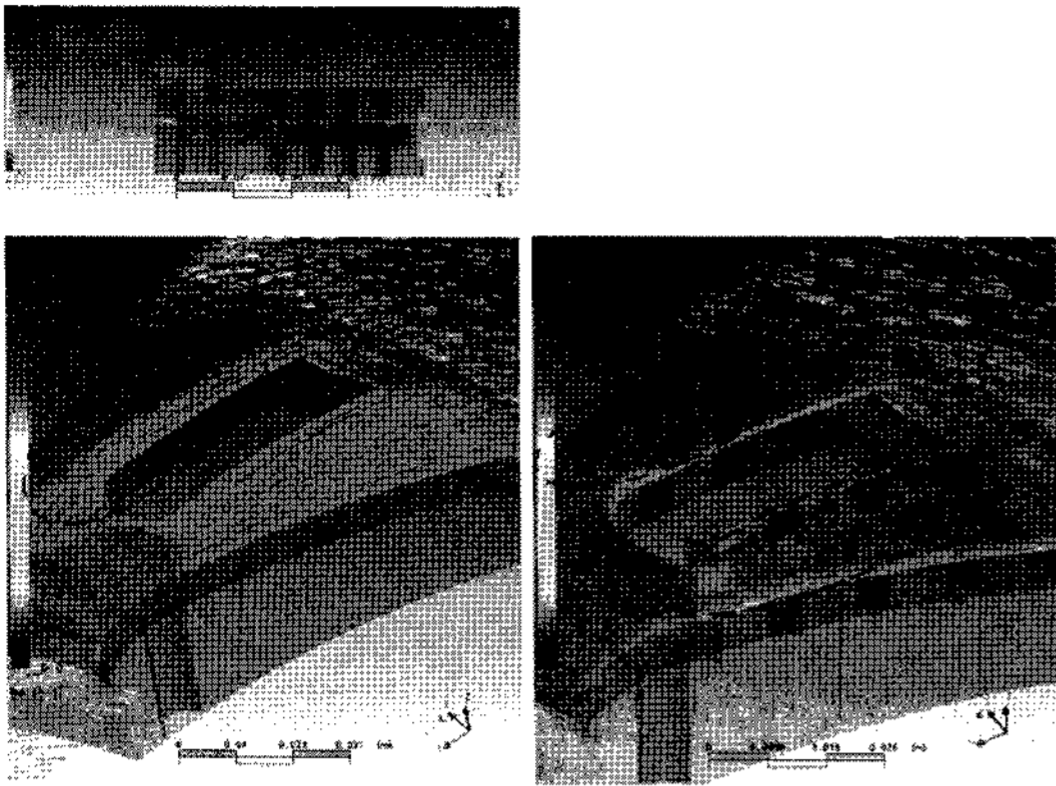


Fig. 5 모델별 로터 환기구 벽면에서의 유동

기 유동은 환기구 단면의 중앙부에 거의 정체된 와류(vortex) 영역에서는 운동에너지를 더해서 어느 정도는 유동 효율을 개선 할 수 있으나, 유동이 원활하게 이뤄지는 환기구의 벽면 부근에서는 환기구 내 유동에 유동저항으로 작용하여 전체적인 유동 효율을, 특히 열전달이 가장 활발하게 일어나는 디스크 표면에서의 유동 효율을 저하시킨다고 할 수 있다.

디스크 표면에서의 유동 역시 Fig. 6에 보인 것처럼 수직 구멍의 영향이 없는 햇파트(hat part) 근처의 유동은 거의 유사한 형태를 보이고 있다.

수직 구멍이 없는 디스크의 표면유동은 반경방향으로 점차적으로 속도가 증가하는데 비해서, 오른쪽 쪽에 보인 수직 구멍이 있는 경우는 이 구멍으로 빨려 들어가는 유동으로 인해, 그 주위의 유동이 영향을 받아 속도 분포가 불균일하며, 결과적으로 유동 효율이 떨어지고 있음을 확인 할 수 있다. 아래의 Table 3에 보인 것처럼, 냉각공기의 유동 관점이 아닌 열전달의 관점에서 두 가지 디스크 로터 모델의

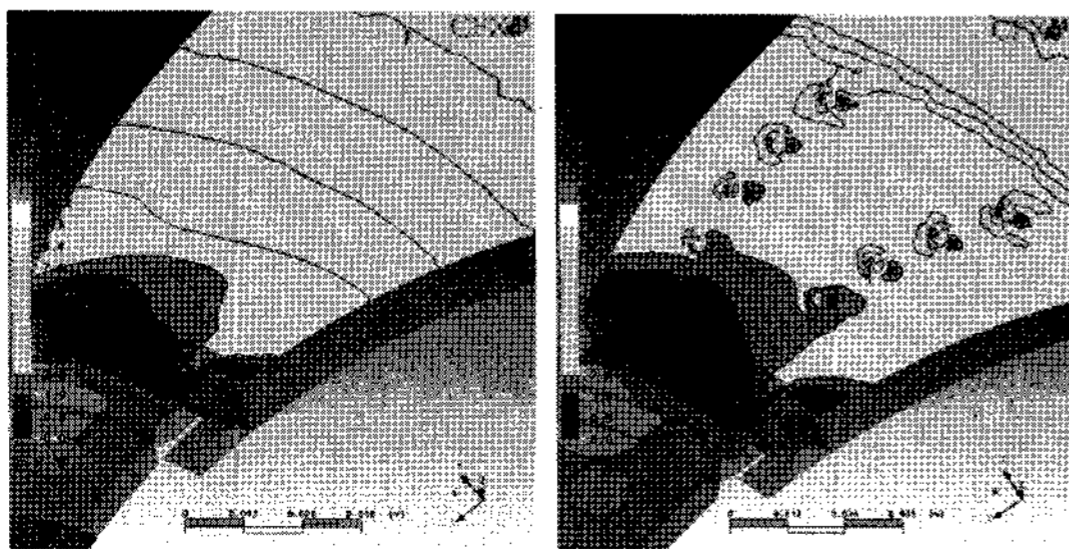


Fig. 6 모델별 디스크 표면 유동의 속도 분포

Table 3 모델별 형상 비교

모델	체적 (cc)	표면적 (cm <sup>2</sup> )	열속 유입 면적(cm <sup>2</sup> )
Cross-drilled	1509	2994	976
Non cross-drilled	1544	2786	1010

형상 비교를 보면, 수직 구멍의 유무에 따라서 체적과 표면적 그리고 패드와의 마찰에 의해 발생하는 열속(heat flux, J/m<sup>2</sup>sec)의 유입면적, 즉 디스크 로터와 패드의 접촉 면적에 약간의 차이가 있음을 볼 수 있다.

디스크 로터의 밀도가 일정한 경우이므로 체적으로 표현될 수 있는 열용량의 관점에서는, 수직 구멍이 없는 경우가 약간 유리한 값을 가지며, 냉각 열전달이 이루어지는 디스크 표면적을 비교해보면 수직 구멍이 있는 경우가 약간 유리한 값을 가진다고 할 수 있다. 한편, 디스크의 발열 면적이라고 할 수 있는 열속 유입 면적은 수직 구멍이 없는 경우가 약간 더 큰 값을 가지므로, 같은 양의 열에너지가 수직 구멍이 있는 모델과 없는 모델에 유입되는 경우, 열속 유입면적이 약간 큰 수직 구멍이 없는 경우가 보다 적은 단위 면적당 열속을 가지게 됨을 생각할 수 있다.<sup>7)</sup>

### 3. 다이نام모 시험

#### 3.1 다이نام모 시험

브레이크 다이نام모미터를 이용한 시험 역시 수직 구멍이 있는 모델과 없는 모델 두 가지를 각각 제작하여 시험하였으며, 실제 차량의 관성과 제동력을 구현할 수 있는 브레이크 다이نام모미터(LINK model 3800)를 이용하여 평가하였다. Photo. 4는 시험에 사용된 다이نام모미터와 디스크를 보여준다. 다이نام모미터 시험에 필요한 차량의 제원은 대형 승용 차량의 제원을 설정, 이용하였으며, 제동 모드는 HMC 881 성능모드를 이용하였다. HMC 881은 효력(effectiveness) 특성을 평가하는 모드로, 마찰계수의 수준, 속도 및 감속도별 마찰계수의 안정성, 마찰력 감쇄 수준(fade) 및 회복(recovery) 등의 평가와 고속으로 회전하는 디스크에 물을 분사한 후 제동력의 회복성을 측정하는 워터리커버리(water recovery) 시험 등으로 구성되어 있다.

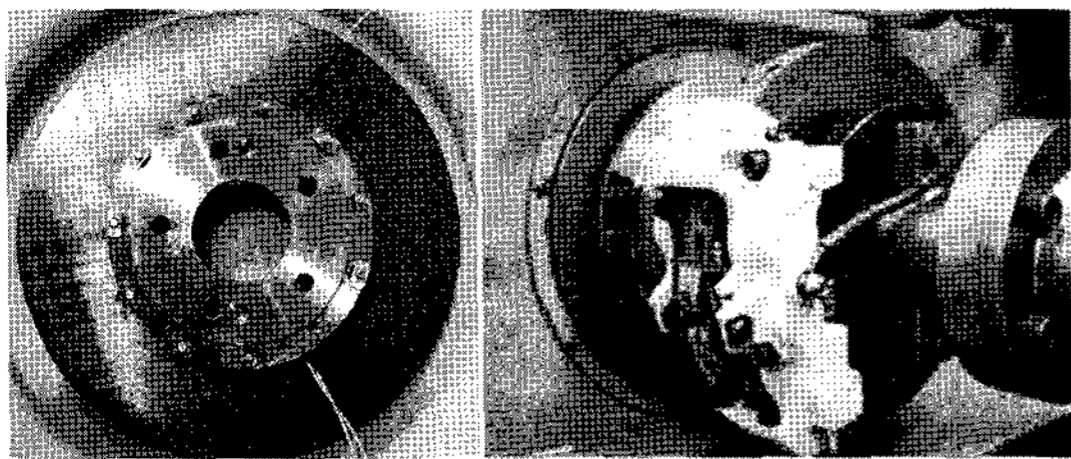


Photo. 4 브레이크 디스크 로터 다이내모 시험

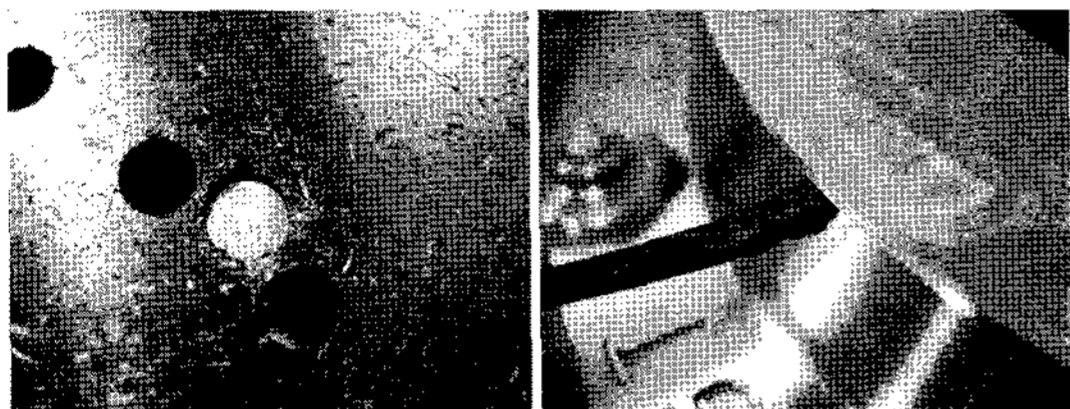


Photo. 5 디스크 로터 및 hat part에 장착된 열전대

다이내모 미터 시험 중 각 제동 시험 별 브레이크 디스크의 온도를 측정하기 위하여 디스크 로터 및 헛파트(hat part)를 비롯한 브레이크 패드 등에 열전대를 장착하였으며, 이를 통한 브레이크 시스템의 각 부위별 온도 측정을 수행하였다.

### 3.2 다이내모 시험 결과

0.1g에서 0.8g까지 각 감속도별 디스크 마찰계수 값의 변화를 나타내는 2차, 3차 효력 시험(Effectiveness)의 각 디스크 별 결과를 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다.

수직 구멍이 없는 모델의 경우 2차 효력 시험과 열이력 후의 3차 효력 시험에서의 평균마찰 계수 값이 각각 0.441과 0.413을 나타내었으며, 수직 구멍이 있는 모델의 경우에는 0.419와 0.434의 값을 보여 그리 큰 차이를 보이지 않는 것을 볼 수 있으며, 각 감속도 및 초기 속도 별 마찰계수의 분포 형상 또한 그리 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있다.

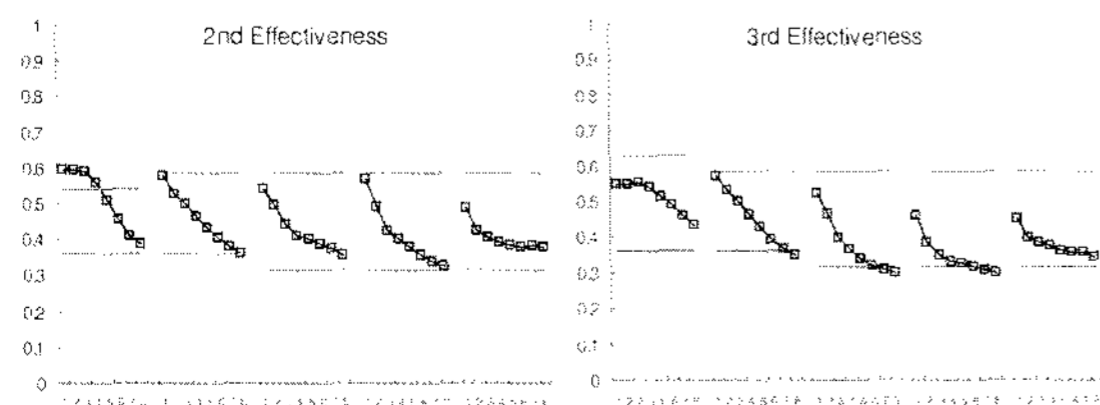


Fig. 7 Non cross-drilled disc effectiveness

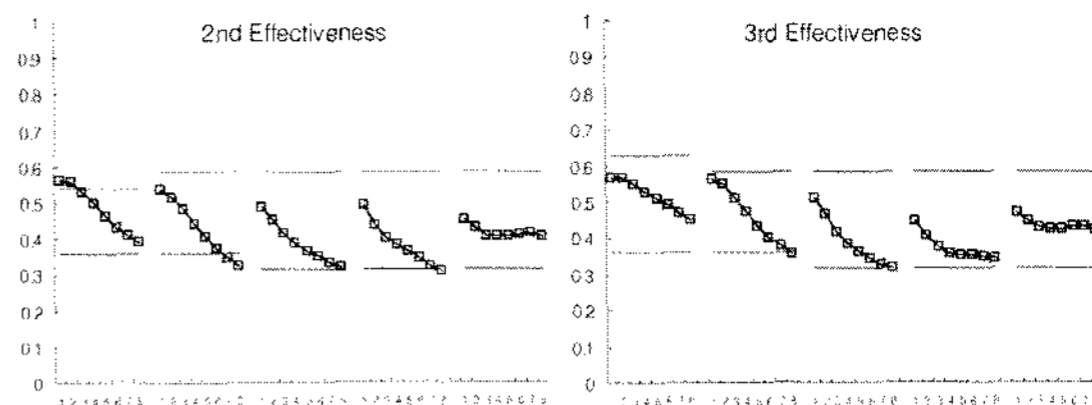


Fig. 8 Cross-drilled disc effectiveness

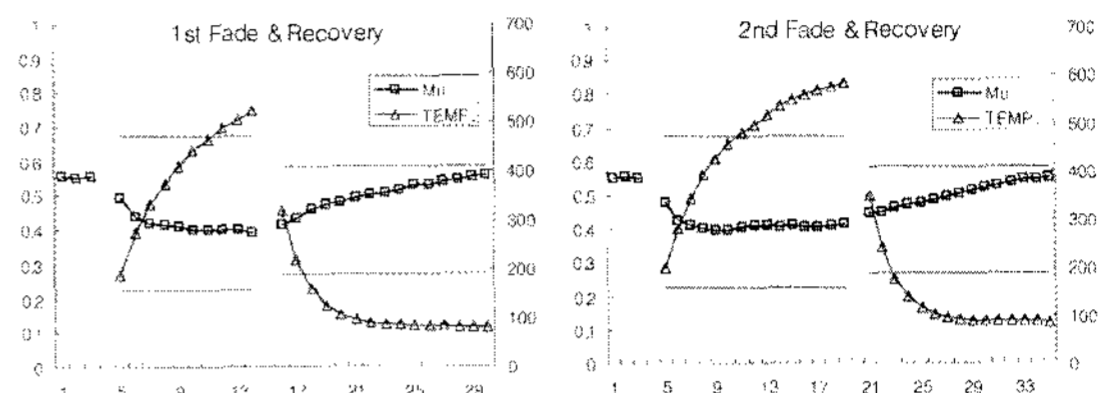


Fig. 9 Non cross-drilled disc fade

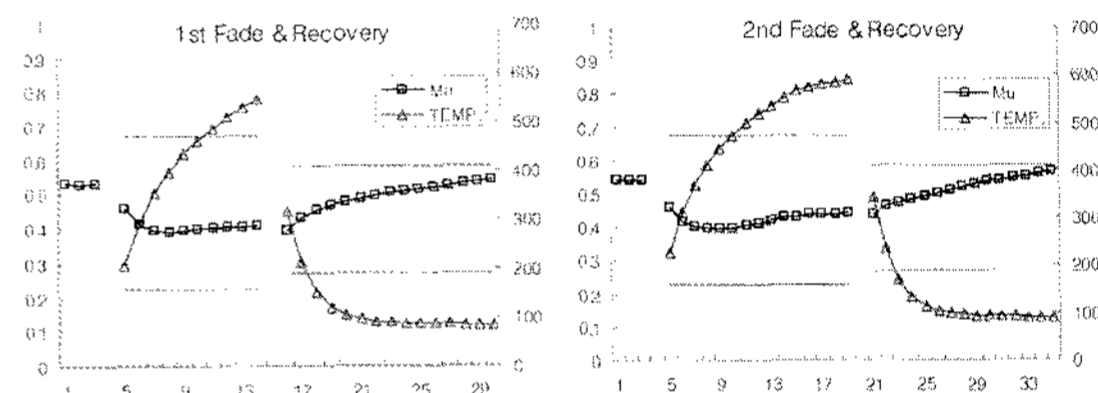


Fig. 10 Cross-drilled disc fade

시속 100KPH에서 0.45g의 감속도로 차량이 완전 정지 할 때까지를 모사한 마찰력 감쇄(Fade) 시험은 35초의 간격으로 10번의 제동이 2회 반복되어 이루어지는데, Fig. 9와 Fig. 10에 각 디스크 모델 별 시험 결과를 나타내었다. 수직 구멍이 없는 경우의 1차 마찰력 상실(Fade)과 2차 마찰력 상실(Fade) 시험에서의 최고 온도 값은 각각 521°C와 583°C를 나타냈으며, 수직 구멍이 있는 모델의 경우에는 각각 544°C와 590°C의 값을 보여 전산해석의 결과와 마찬가지로 두 가지 모델이 그리 큰 온도 차이를 나타내지 않음을 확인하였다.

1차 및 2차 마찰력 감쇄(Fade) 시험의 온도 및 마찰계수의 변화 또한 두 가지 모델이 거의 유사한 경향을 보여, 디스크 표면의 수직 구멍은 제동 성능에는 그리 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 또한, 두 가지 모델 모두 디스크의 온도가 상승해도 마찰계수가 감소하지 않는 전형적인 세라믹 브레이크 디스크의 특성을 잘 나타내고 있음을 확인할 수 있었다.

Table 4 다이내모미터 시험 후 마모량 및 분수시험 결과

모 델	Water recovery( $\mu$ )	Disc wear(mm)	Pad wear(mm)
Cross-drilled	0.414	0.001	0.661
Non cross-drilled	0.384	0.003	0.529

Table 4에서는 다이내모미터의 물 분사 제동 시험에서의 평균 마찰 계수 값과 제동시험 전과 후의 디스크 및 패드의 마모량을 측정, 그 값을 나타내었다. 두 가지 디스크 모델의 가장 많은 성능의 차이를 예상했던 물 분사 제동시험에서도, 평균 마찰계수 값은 그리 큰 차이를 보이지 않았으며, 마모의 경우에는 수직 구멍이 있는 모델이 상대적으로 많은 패드의 마모량을 나타내었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 브레이크 디스크의 표면에 가공된 수직 구멍의 영향을 전산 해석과 다이내모미터 시험을 통하여 분석하였다.

- 1) 수직 구멍의 유무에 따른 두 가지 디스크 모델의 전산해석 결과, 디스크 로터의 최고온도는 큰 차이를 보이지 않아, 본 연구에 사용된 디스크 모델에서는 수직 구멍이 냉각 성능의 개선에 영향을 미치지 못함을 확인하였으며, 이는 로터 표면의 수직 구멍으로 유입되는 냉각공기로 인한 환기구 내외부의 유동특성과 열전달 면적 및 패드와의 마찰 면적의 차이 등이 복합적으로 작용하는 결과라고 예상할 수 있다.
- 2) 수직 구멍의 유무에 따른 두 가지 디스크 모델을 제작하여, 다이내모미터 시험을 통해서 그 제동 성능을 분석해본 결과, 두 가지 모델이 각 감속도별, 초기 제동 속도별 제동 시험뿐만 아니라, 디스크 로터의 최고 온도 및 워터리커버리(water recovery) 시험 등에서도 거의 비슷한 시험결과를 나타내었다.
- 3) 두 가지 디스크 모델의 다이내모 시험 전후 측정된 디스크와 패드의 마모량 비교에서, 디스크의 경우 거의 비슷한 값을 보였으나, 패드의 경우에

는 수직 구멍이 있는 경우가 약간 높은 마모량을 보였다.

본 연구에 사용된 탄소-세라믹 소재 브레이크 디스크의 경우에는 제동 성능과 냉각성능 및 배수 성능에서 로터 표면에 수직 구멍을 가공하는 것이 거의 효과가 없음을 확인하였다. 보다 정확한 수직 구멍의 영향 분석을 위해서는 환기구의 다양한 형상과 수직 구멍의 크기, 위치 및 개수 등 형상 요소를 비롯하여, 일반적인 회주철 재질의 디스크 로터 등에 대한 시험과 분석 등의 추가적인 검증이 필요하리라 생각되며, 또한 NVH 특성 및 실차 시험 등의 다양한 분석을 통하여 냉각 성능 및 제동 성능 이외의 수직 구멍에 의한 효과에 대한 연구가 필요하리라 생각된다.

#### References

- 1) K. W. Hong, "Thermal Deformation and Structure Analysis of Disk Brake System," Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.334-341, 1993.
- 2) R. A. Burton, "Thermal Deformation in Frictionally Heated Contact," WEAR, Vol.59, pp.1-20, 1980.
- 3) T. Lui and S. K. Rhee, "High Temperature Wear of Semi-Metallic Disc Brake Pads," 1st International Conference on Wear of Materials, pp.552-554, 1977.
- 4) S. K. Rhee, M. G. Jacko and P. H. S. Tsang, "The Role of Friction Film, Wear and Noise of Automotive Brakes," SAE 900004, pp.29-36, 1990.
- 5) S. K. Lee, "Optimal Design of Ventilated Disc Brake Rotor," KSME J., Vol.24, No.3, pp.593-602, 2000.
- 6) R. Limpert, Brake Design and Safety, Society of Automotive Engineers Inc., 1992.
- 7) R. Limpert, "Cooling Analysis of Disc Brake Rotors," SAE 810420, 1981.