◎ 논 문

제동시간이 통풍형 디스크 브레이크 시스템의 건전성에 미치는 영향

곽우경* · 홍창기* · 김윤제**

Influence of the Braking Time on the Soundness of Ventilated Disc Brake Systems

Woo-Gyeong Gwak*, Chang-Ki Hong*, Youn-Jea Kim**

Key Words : Ventilated disc brake systems(통풍형 디스크 브레이크 시스템), Heat transfer coefficient(열전달 계수), Braking time(제동 시간)

ABSTRACT

In order to analyze the soundness of ventilated disc brake systems, numerical study was performed with various vane shapes. In particular, two different vane type, and the braking time from 3.0 s to 4.5 s with the interval of 0.5 s were considered. Transient temperature distributions on the ventilated disc brake assembly were calculated using ANSYS CFX ver. 16.1. To elucidate the soundness of ventilated disc brake systems, moreover, the heat transfer coefficients were evaluated. Results were graphically depicted with different geometrical vane configurations and braking time.

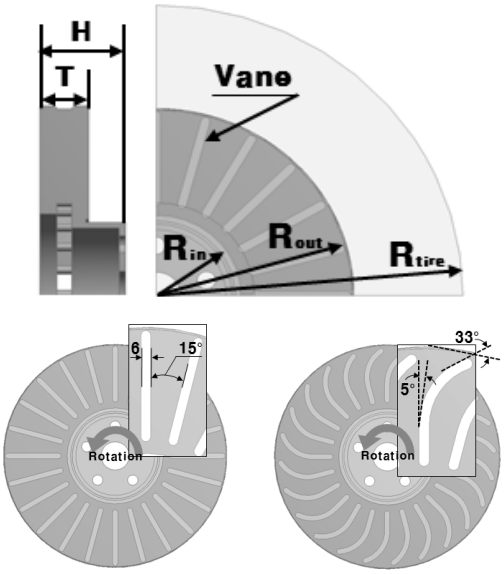
1. 서 론

브레이크 시스템은 자동차의 안전과 관련된 중요한 요소 중 하나이다. 디스크 브레이크는 자동차 바퀴와 함께 회전하는 원판을 장착하여 그 양쪽의 바깥쪽에서 유압 피스톤으로 작용하는 브레이크 패드를 밀어 붙여 마찰력으로 제동하는 것이다. 일반적으로 브레이크 디스크의 냉각은 브레이크 시스템으로 유입되는 공기를 통한 대류 열전달에 크게 의존을 한다. 따라서 디스크의 발열 면적을 넓히거나 베인(vane) 유로의 형상변경을 통해 냉각공기가 브레이크 시스템에 잘 유입되도록 설계해야 한다. 제동 시 마찰력에 의해 발생된 열로 인해 브레이크 오일 속에 기포가 발생되어 브레이크가 잘 작동되지 않는 베이퍼 록(vapor rock) 현상과 브레이크 패드가 변질되어 마찰력이 감소하면서 브레이크가 밀리거나 작동되지 않는 페이드(fade) 현상은 브레이크 성능을 저하시키는 가장 큰 원인이 된다. 이러한 문제점을 최소화 시켜 제동성능을 향상시키기 위한 연구개발이 활발히 수행되고 있다. 제동시간이 감소될수록 발생되는 열에너지가 증가하므로, 차량의 안전성을 높이기 위해서는 방열을 최대화 시키는 브레이크 디스크에 관한 연구가 필요하다.

특히 브레이크 디스크는 제동 안전성 및 제동 조건에 따라 발생되는 열에너지를 최대한 방열시킬 수 있는 고열전도 등을 충족해야한다. 이에 따라 차량용 브레이크 디스크의 제동 및 냉각성능을 개선하기 위한 많은 연구들이 이루어지고 있다.

Belhocine 등[(1)]은 ANSYS-CFX 상용프로그램을 이용하여 주철재 브레이크 디스크의 열적거동을 분석하였는데, 디스크 온도분포가 형상에 따라 달라질 수 있다는 연구결과를 발표하였다. Ko와 Yoon[(2)]은 ANSYS-FLUENT

* 성균관대학교 대학원 기계공학과
** 성균관대학교 기계공학부
E-mail : yjkim@skku.edu



(a) straight (b) straight and curvature

Fig. 1 Schematic of the ventilated disc

상용프로그램을 이용하여 탄소복합소재 브레이크 디스크의 유동특성을 분석하여 디스크의 통풍구 형상에 따라 냉각성능이 달라진다는 것을 연구하였다. Ryu 등[3]은 브레이크 디스크의 경량화 및 차량의 연비성능을 향상시키기 위해 주철재와 알루미늄 소재의 브레이크 디스크에 대한 제동성능을 비교 분석하여, 알루미늄 소재의 디스크 제동시간이 주철재 디스크보다 낮다는 것을 알아내었다. Kim 등[4]은 반복되는 제동으로 인해 주철재 브레이크 디스크와 패드 사이에서 발생되는 마찰열의 상승을 제어하기 위한 방법으로 히트파이프 등의 유로형상에 관한 연구를 수행하였다. Kang과 Choi[5]는 상용차에 장착된 통풍형 브레이크 디스크 내부의 베인 형상에 따라 제동 시 브레이크 디스크에서 발생하는 열유동 특성 및 응력을 분석하였다. Rajagopal 등[6]은 베인 형상변화에 따라 유동 및 열전달 특성을 분석하였다. 이와 같이 베인 유로 형상변화에 대한 유동특성과 제동시간이 브레이크 디스크에 미치는 영향 분석에 관한 연구가 진행되어 왔다. 하지만, 급격한 제동시간에 따라 발생되는 고열이 브레이크 시스템에 미치는 영향을 분석하고, 브레이크 시스템의 건전성을 평가한 연구는 미미한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 효율적인 열전달이 일어날 수 있도록 다양한 형상 및 제동조건을 적용하여 안전성에 대한 연구를 수행하였다. 특히, 베인 형상 변화 및 제동시간을 달리하여 시간변화에 따른 온도분포 및 열전달계수를 비교 분석하였다.

Table 1 Input parameters

Description	Values
Inner disc radius (R_{in}), mm	50.25
Outer disc radius (R_{out}), mm	131
Disc thickness (T), mm	29
Disc high (H), mm	51
Number of vanes	25
Disc surface swept by brake pad (A_d), mm^2	35814.15
Tire radius (R_{tire}), mm	203.2
Vehicle mass (m), kg	1385
Initial speed (V_o), m/s	100
Rate distribution of the braking forces (ϕ), %	70

2. 수치해석

2.1. 해석모델 및 격자생성

디스크 내부의 베인 형상은 Fig. 1에 도시한 바와 같이 2가지 통풍 구조로 분류하였다. 일직선으로 뻗어 있는 직선형(straight)과 곡선형(straight and curvature)이다. R_{out}과 R_{in}이 각각 131 mm, 50.25 mm인 브레이크 디스크에 25개의 통풍구 베인이 등간격으로 위치하고 있다. 통풍형 브레이크에서 발생하는 온도 및 열전달계수를 계산하기 위한 입력 값은 Table 1에 기술하였다. 두 가지 형상에 대해 3.0 s부터 4.5 s까지 0.5 s 간격으로 제동시간을 각각 적용하였다.

브레이크 디스크 형상은 CATIA V5와 ANSYS Design Modeler를 사용하여 고체영역과 유동영역으로 2개의 3차원 모델을 생성하였다. ANSYS Meshing을 사용하여 계산영역 전체에 사면체(tetrahedron) 격자를 적용하였으며, 유동영역의 격자는 약 300,000개, 고체영역 격자는 약 120,000개로 구성하였다(Fig. 2참조).

수치해석은 ANSYS CFX 16.1을 사용하여 열분석을 위한 빠른 계산을 위해 대칭(symmetry) 조건을 적용하였으며, 단순 제동조건에 부합한 열·유동 해석을 수행하였다.

2.2. 해석 조건

주행 중인 차량의 운동에너지가 제동 시 브레이크 디

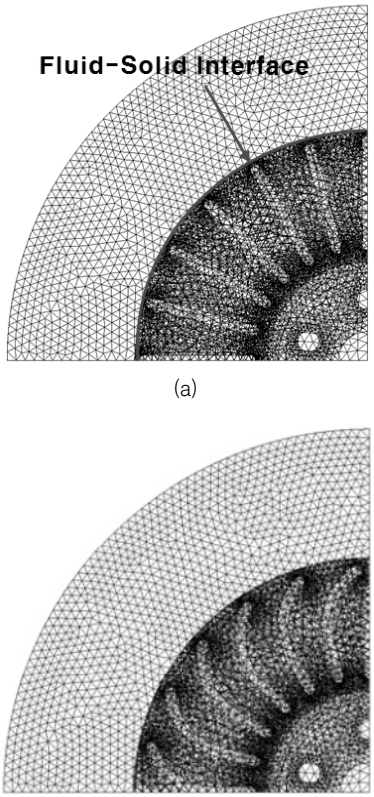


Fig. 2 Meshing of the ventilated disc and fluid domain (a) straight and (b) straight and curvature

스크와 패드의 마찰에 의해 발생된 열에너지로 모두 변환된다고 가정하였다.

본 연구에서 사용한 주행 시 발생한 운동에너지 식과 마찰에 의한 열유속(heat flux) 식은 다음과 같다.[7]

$$KE = \frac{1}{2} m (V_1^2 - V_o^2) \tag{1}$$

$$q = \frac{\phi}{2} \frac{KE}{A_d t_\Delta} \tag{2}$$

여기서 m은 자동차의 중량, V_1은 최종속도, V_0는 초기속도, ϕ는 제동력 분포비율, A_d는 브레이크 패드가 브레이크 디스크와 접촉면적을 나타낸다.

난류모델로는 k-ε 모델을 사용하였으며, 작동유체는 이상기체로 설정하였다. 본 연구에서 사용된 이상기체(air)와 회주철(steel) 브레이크 디스크의 물리적 성질을 Table 2에 기술하였다.

Table 2 Material properties of air and brake disc

Materials	Density (kg/m^3)	Thermal conductivity (W/m·K)	Specific heat (J/kg·K)
Air	1.1614	0.026	1007
Steel	7854	60.5	434

Table 3 Boundary conditions

Analysis type		Transient
Braking time		3.0 ~ 4.5 s
Time step		0.01 s
Fluid domain (air)	Inlet	100 [km/hr]
	Outlet	0 Pa
	Opening	0 Pa
	Atmospheric pressure and temperature	
Solid domain (brake disc)	Rotation	44.34 [rad/s]
	Disc surface	Heat flux
Interface		GGI
Rotating direction		Counterclockwise

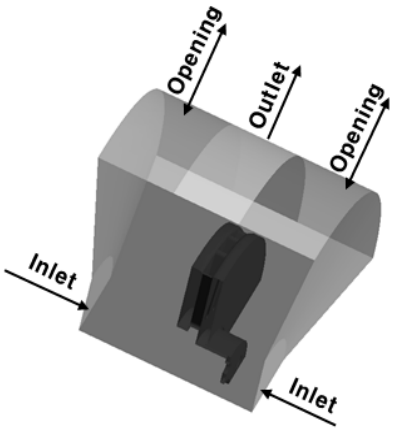


Fig. 3 Fluid domain of the ventilated disc

Figure 3에 통풍형 브레이크의 유동영역을 나타내었고, 공기와 접하는 브레이크 디스크 면에 대해서는 점착조건(non-slip condition)을 사용하였다. 또한, 디스크와 공기 경계면의 nonuniform mesh에서 해석이 가능한 인터페이스로서 GGI(General Grid Interface) 조건을 사용하였고, 브레이크 디스크의 해석을 위한 경계조건은

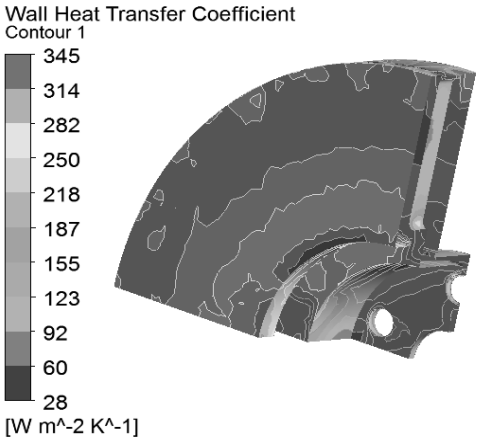


Fig. 4 Distribution of heat transfer coefficient on a ventilated disc of straight vane type

Table 3에 나타내었다. 시간 경과에 따른 온도분포 및 열전달계수를 계산하기 위해 정상상태해석을 수행하여 초기 온도 값을 계산한 후 비정상상태해석을 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 열전달계수

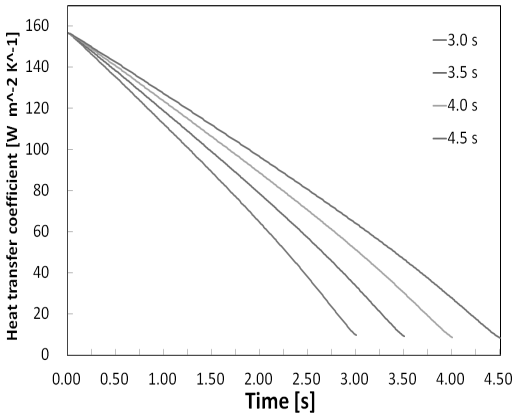
열전달계수는 공기의 속도와 브레이크 디스크 형상에 관한 수치이다. 브레이크 디스크 표면에서의 열전달계수는 시간 경과에 따라 달라진다. 열전달계수는 브레이크 디스크 베인의 회전속도와 유입되는 기체의 속도에 관계가 있지만, 디스크의 물성치와는 관계가 없다. 디스크 벽면에서의 평균 열전달계수는 Fig. 4에 도시하였고, 두 개의 형상에서 제동시간에 따른 열전달계수의 변화는 Fig. 5에 도시하였다.

열전달계수는 제동시간에 따라 변하지만 두 형상의 경우 비슷한 특성을 보이고 있어 방열성능이 유사함을 알 수 있다.

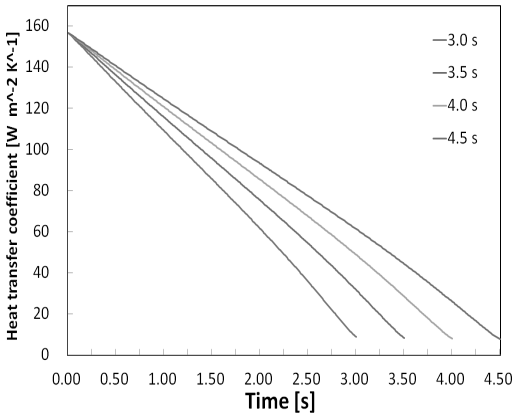
3.2. 속도분포

주행 중 공기는 디스크 중앙부로부터 유입되어 베인 유로를 통해 외부로 유출되면서 냉각이 이루어지는 조건으로 해석하였다. 통풍구 형상에 따른 3차원 속도분포를 디스크 중앙부의 평면으로 Fig. 6에 도시하였다.

최대 속도가 직선형(straight type)은 34.7 m/s, 곡선형(straight and curvature type)은 33.2 m/s로 유사한 속도 값을 보이고 있다. 하지만 직선형의 경우 베인 유로 끝 지점에 와류장이 형성되는 것을 볼 수 있다.



(a) straight type



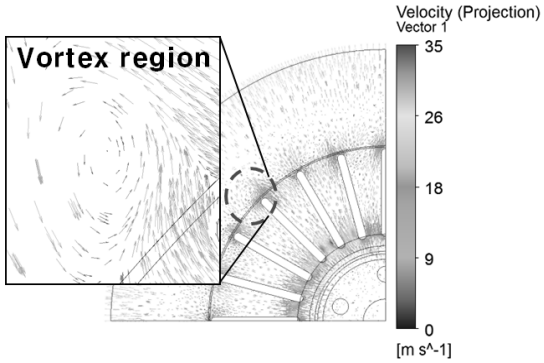
(b) straight and curvature type

Fig. 5 Variation of heat transfer coefficient of brake disc surface in transient case

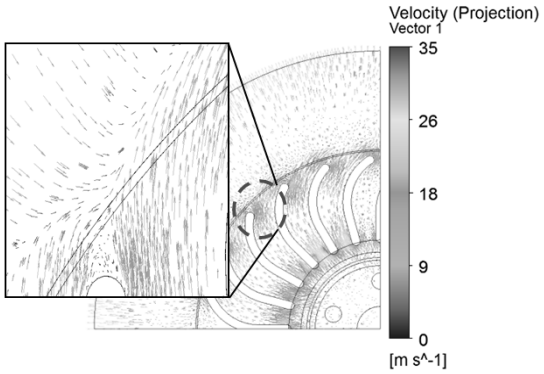
이러한 와류장이 형성되면 제동 시 디스크 표면에서 발생되는 고열을 방출시키지 못할 뿐만 아니라 디스크온도를 상승시키기 때문에 열변형이 발생될 수 있을 것으로 사료된다.

3.3. 온도분포

제동시간 변화에 따라 패드와 디스크가 접촉하는 면에서의 온도분포를 Fig. 7에 도시하였다. 제동시간 감소함에 따라 최고온도가 상승하는 것을 알 수 있으며, 제동시간이 3.0 s에서 직선형 브레이크 디스크의 온도 상승

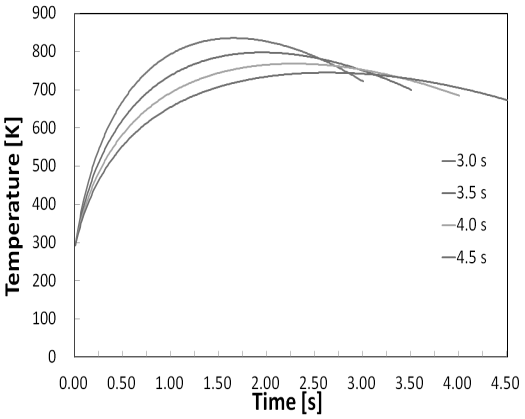


(a) straight type

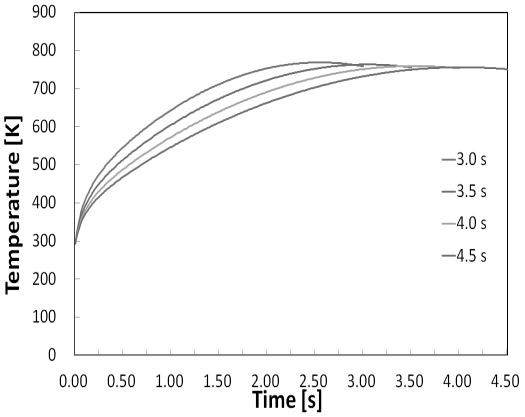


(b) straight and curvature type

Fig. 6 Flow velocity of the ventilated brake discs



(a) straight type



(b) straight and curvature

Fig. 7 Variation of temperature of brake disc surface for in transient case

률이 높아 열변형이 발생될 것으로 유추할 수 있다. 이와 달리 제동시간이 3.0 s일 경우 곡선형에 비해 최고온도가 낮게 나타났으며, 급제동 조건에서는 온도 상승률이 적어 열변형이 상대적으로 작은 것으로 사료된다. 하지만 제동시간이 증가할수록 직선형의 최고온도는 곡선형보다 낮아지는 것으로 나타났으며, 방열성이 더 높은 것을 알 수 있다. 따라서 형상에 따라 제동조건이 달라지면 브레이크 성능이 달라져 디스크 브레이크 시스템의 건전성에 미치는 영향이 달라짐을 알 수 있다.

4. 결 론

브레이크 디스크의 베인 형상과 제동시간 변화에 따른 디스크 브레이크 시스템의 건전성을 분석하기 위해 두 가지 베인 구조를 제시하였고 제동시간 변화에 따라 브레이크 성능에 큰 영향을 미치는 인자들을 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 두 가지 베인 구조에서 열전달 성능은 유사하였지만, 속도분포에서는 직선형의 유속이 높았으나 와류장이 형성되었다. 이러한 와류장에 의해 정체유동이 발생하여 디스크의 온도가 상승됨을 알 수 있다.
2) 제동시간이 3.0 s인 경우 곡선형 베인 구조가 우수한 방열 성능을 나타내었으며, 온도 상승률이 낮아 열변형이 작을 것으로 판단되기 때문에 급제동 시 디스크 브레이크의 구조적 안전성을 확보할 수 있다.
3) 제동시간이 증가할 경우 직선형의 최고온도가 곡선형보다 낮아지는 것으로 나타났으며, 이는 반복제동이나 긴 제동시간을 가진 조건에서는 직선형 브레이크 성능이 좋은 것으로 유추된다.

4) 두 형상에서 제동조건에 따라 브레이크 성능이 달라지는 것을 알 수 있었으며, 제동조건에 따라 브레이크 시스템의 건전성에 미치는 영향이 달라지는 것을 알 수 있었다. 향후에는 디스크의 형상변화를 고려한 FSI(Fluid-Structure Interaction) 기법을 통해 열응력에 대한 연구를 수행할 예정이다.

참고문헌

(1) A. Belhocine, A. R. Abu Bakar, M. Bouchetara, 2014, "Numerical Modeling of Disc Brake System in Frictional Contact," Tribology in Industry, Vol. 36, No. 1, pp. 49~66.

(2) D. G. Ko, S. K. Yoon, 2015, "Numerical Study on the Flow Characteristics according to the Ventilation Holes Shape of the Carbon Composite Brake Disk," Transactions of KSAE, Vol. 23, No. 2, pp. 191~198.

(3) M. R. Ryu, H. E. Nae, H. S. Kim, D. H. Lee, S. B. Lee and J. H. Park, 2013, "A Study on Braking Performance of Break Disc," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 12, No. 3, pp. 13~20.

(4) M. G. Kim, S. K. Ko and M. W. Lee, 2008 "A Study for the Cooling Performance of a Brake with Heat Pipes," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 32, No. 4, pp. 563~569.

(5) C. U. Kang, G. J. Choi, 2014, "Thermal Fluid Flow and Deformation Analysis of Medium Commercial Vehicle Ventilated Brake Disc in Braking," Transactions of KSAE, Vol. 22, No. 7, pp. 63~69.

(6) T. K. Raj Rajagopal, R. Ramachandran, M. James, S. C. Gatlewar, 2014, "Numerical Investigation of Fluid Flow and Heat Transfer Characteristics on the Aerodynamics of Ventilated Disc Brake Rotor using CFD," THERMAL SCIENCE, Vol. 18, No. 2, pp. 667~675.

(7) ANSYS, Inc., ANSYS CFX Transient Brake Rotor, 2010.