

브레이크 디스크의 마찰열과 휠 스포크 형상의 상관관계 Correlation of Wheel sopoke shape and frictional heat of Brake disc

*권태완¹, 박인백¹, 이수도¹, #이석희²

*T. W. Kwon¹, I. B. Park¹, S. D. Lee¹, #S. H. Lee²(sehlee@pusan.ac.kr)

¹ 부산대학교 대학원 지능기계공학과, ² 부산대학교 기계공학부

Key words : Brake disc, FEA, Wheel, Heat flux

1. 서론

자동차의 디스크 브레이크는 주행하는 차량의 운동에너지를 디스크와 패드의 마찰로 운전자가 원하는 속도로 감속하거나, 주행 중인 차량을 정지시키는 역할을 한다. 마찰에 의해 발생하는 열은 브레이크의 로터에 열응력을 발생시켜 로터의 열 변형을 야기하고, 이로 인한 디스크와 패드 간에 불균일한 마찰은 히트 페이드(Heat fade), 브레이크 저더(Brake Judder), 스켈(Squeal) 및 열 균열(Heat crack) 등의 원인이 된다. 지금까지 브레이크 디스크의 열 발생과 관련된 연구동향으로는 수치해석기법과 FEM(Finite Element Method)을 통해 디스크의 열적 거동 해석과 열응력 해석 연구가 진행되었다.^{1,2} 하지만, 이러한 연구는 디스크와 패드의 마찰을 고려하지 않았으며, 대류 열전달 계수 값의 변화에 중점을 두었다. 또 다른 연구로는 열발산을 높이기 위해 디스크와 패드 간의 에너지 방정식을 적용하여 상용 유체해석 프로그램을 사용한 디스크 내 벤트 홀의 방열효과에 관한 연구들이 진행되어 왔다.^{3,4}

휠은 자동차의 중량을 이겨내고 구동축과 제동력을 노면에 전달하는 중요한 부품으로 제동과 안전성 및 연비와도 관련이 있다. 기존의 연구들은 벤트 홀을 중심으로 디스크와 패드의 방열효과를 연구하였으나, 벤트 홀의 구조상 한계로 뛰어난 방열 효과를 가지지 못했다. 본 논문에서는 차량 제동 시 브레이크 디스크에 발생하는 마찰열과 휠 스포크 형상의 상관관계를 조사하고자 한다.

2. 형상 모델링과 해석 조건

2.1 브레이크 디스크와 휠 모델 측정



(a) 3D Scanner



(b) Ventilated brake disc



(c) Aluminum alloy wheel



(d) SHUK[®] alloy wheel

Fig. 1 3D Scanner, Brake disc and Alloy wheel model

Table 1 FARO Laser scanner specification

브레이크 디스크와 휠의 제원과 형상은 제작사와 차종에 따라

Accuracy	50 μ m
Repeatability	\pm 50 μ m
Points per line	640 point/line
Scan rate	30 frames/second
	19,200 points/second

다르나, 본 연구에서는 12inch 디스크와 17inch 순정휠, 시중에 판매하고 있는 17인치 SHUK[®] 휠을 FARO[®] LASER 3D 스캐너를 사용하여 초당 19,200개의 점 data를 획득, CATIA V5를 이용하여 각각 모델링하였으며, FARO[®] LASER 3D 스캐너의 제원과 벤틸레이티드 브레이크 디스크와 순정 휠과 애프터 마켓용 SHUK[®] 휠의 구조를 Table 1과 Fig.1에 나타내었다.

2.2 차량 제동에너지와 해석 조건

속도 V_2 로 주행하고 있는 차량이 제동할 때 발생하는 제동에너지는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_b = \frac{m}{2} (V_1^2 - V_2^2) + \frac{I}{2} (\omega_1^2 - \omega_2^2) \quad (1)$$

식(1)에서 m =차량의 중량, V_2 는 제동 시작 시 차량초기속도, V_1 은 제동 완료 후 차량속도, ω_1 은 제동 시작 시 각속도, ω_2 는 제동 완료 후 각속도를 각각 나타낸다. 만약 차량이 완전 정지한다면 $V_2=\omega_2=0$ 이 되므로 아래의 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$E_b = \frac{m}{2} V_1^2 + \frac{I}{2} \omega_1^2 \quad (2)$$

식(2)에서 바퀴의 회전에너지는 차체의 관성에너지에 비해 매우 작기 때문에 무시할 수 있으며, 회전 질량에 대한 수정계수 k (correction factor for rotating masses)를 이용하여 일반적으로 제동에너지의 열적 특성을 해석한다.⁵

$$E_b = \frac{m}{2} \left(1 + \frac{I}{R^2 m}\right) V_1^2 \approx \frac{km V_1^2}{2} \quad (3)$$

$$K \approx 1 + \frac{I}{R^2 m} \quad (4)$$

R 은 타이어의 반지름(m), I 는 대류에 의한 방열을 고려하기 위해서는 대류 열전달 계수를 적용하여야 한다. 대류 열전달 계수의 경우 차량의 속도에 따라 변화하며, 공기의 유속이 차량의 속도와의 관계도 선형적이다.⁵ 본 논문에서는 12인치 디스크와 17인치 휠을 장착한 차량을 기준으로 하였으며, 차량에 대한 정보는 Table 2와 같다.

또한, 디스크와 휠은 같은 방향으로 회전하고 있으며 휠 외측에서 휠 내측으로 강제 대류 상태, 휠 외측은 자연대류 상태로 경계조건을 주었다.

Table 2 Vehicle information

Laden weight of a vehicle (kg)	2560
Front energy rate (%)	60
The initial velocity of vehicle (km/h)	97km/h
The initial temperature (°C)	30

4. 결론

본 논문에서 차량 제동 시 발생하는 마찰열과 휠의 스포크 형상과의 상관관계를 유한요소 프로그램을 이용하여 해석하였다. 기존에 진행되었던 연구들은 브레이크 디스크의 마찰열과 벤트 홀 내부의 유동 관계를 연구하였으나, 휠을 포함한 휠 내부의 유동을 고려하여 해석한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 1) 디스크와 패드에서 발생한 마찰열을 효과적으로 배출하기 위해서는 디쉬 타입의 휠 모델보다 스포크 타입의 휠 모델이 더 우수하다는 것을 유추할 수 있다.
- 2) 디쉬 타입 순정 휠의 경우 휠 스포크 내부에 와류가 발생하여 디스크와 패드 사이에 발생한 마찰열을 휠 외부로 빨리 배출시키지 못한다는 것을 유추할 수 있었다. 스포크 타입의 SHUK[®] 휠 모델에 비해 배출되는 공기의 속도는 평균적으로 6% 느리며, 휠 내부 온도는 평균 24.2% 정도 높은 것을 알 수 있었다.
- 3) 위의 결과로 유추해 볼 때 디스크 브레이크의 마찰열을 효과적으로 방출하기 위한 휠 스포크 형상 최적화의 중요한 요소로 휠 스포크 면적을 고려해야 한다는 것을 알 수 있었다.

향후 계획으로는 브레이크 디스크 발열 감소를 위한 휠 스포크 형상을 최적화를 위한 다양한 휠 스포크 형상에 대한 연구를 진행할 예정이다.

후기

본 연구는 부산대학교 2단계 BK21사업의 연구지원을 받아 수행하였으며, 연구에 도움을 주신 CA-TECH 관계자분들께 감사드립니다.

참고문헌

1. C. K. Kim, B. Y. Sung, "Thermal Behavior Analysis of Disc Brake system during Quick Braking" KAME A, Vol. 22, No. 6, 1106-1113, 1998.
2. C. K. Kim, K. I. Lee, "Tribological Analysis on the contact Behaviors of Disk Brakes Due to Frictional Heatings" KSME A, Vol.23, No.10, 1845-1852, 1999.
3. 김청균, 황준태, "디스크 브레이크의 마찰열 접촉거동에 관한 트라이볼로지적 연구 -벤트 홀의 방열효과를 중심으로 -," KSTLE, Vol.15, No.2, 199-205, 1999
4. Fred Z. Shen, D. Mukutmoni, K. Thrington, and J. Whaite, "Computational Flow Analysis of Brake Cooling", SAE 971039, 1997
5. Rudolf Limpert, "Brake design and safety second edition," SAE, 111-172, 1999.

상용 유체 해석프로그램인 CFdesign[®]을 이용하여 난류 모델로 7km/h에서부터 97km/h로 5km/h씩 순차적으로 차량 속도를 증가시키며 각 속도별로 휠 스포크 형상에 따른 공기의 유속을 100회 반복 계산하였다. 해석 시 사용된 요소의 수는 13,000개의 사면체 셀로 브레이크 모듈 내의 유체영역을 모델링하였다. Fig.2와 Fig.3은 각각 정상상태로 돌아온 후 휠 내부 공기의 평균온도와 휠 외부로 빠져나가는 공기의 평균 유속은 Fig.2, Fig.3과 같다.

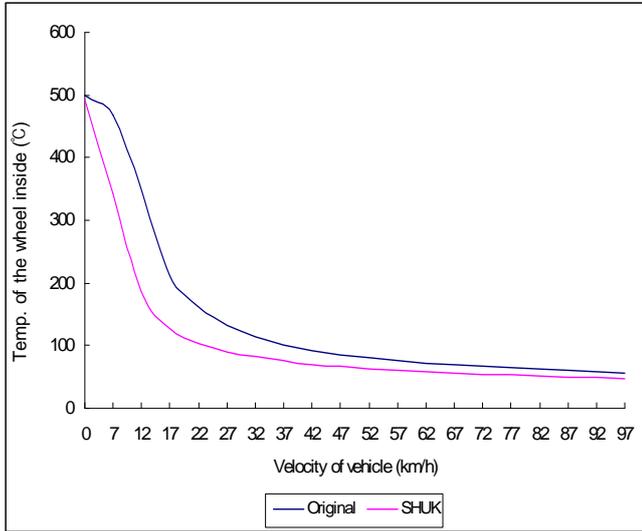


Fig.2 Temperature of the wheel inside

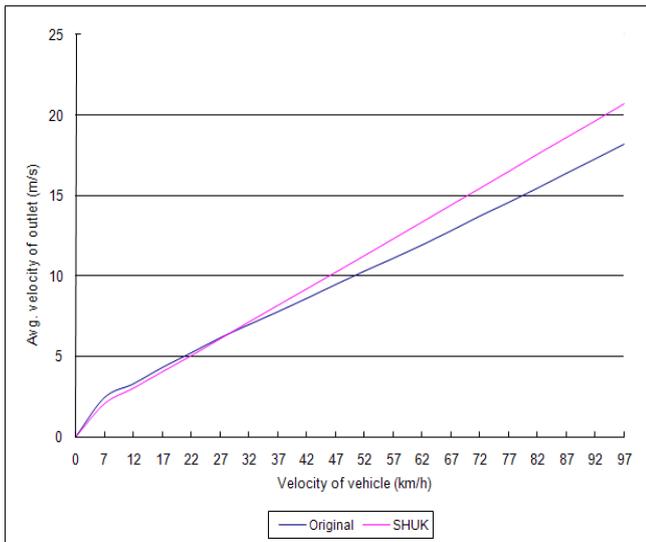


Fig.3 Average velocity of outlet

3. 해석 결과 및 고찰

유동 해석 결과 디쉬 타입 순정 휠이 스포크 타입의 SHUK[®] 휠에 비해 내부 온도는 24.2% 높았으며, 휠 외부로 배출되는 공기의 유속은 최고 14%가 느린 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 디쉬 타입의 순정 휠의 경우, 스포크 면적이 넓어 디스크와 패드 사이에 발생한 디스크 표면의 마찰열에 의해 가열된 공기가 휠 내부에서 와류 상태로 머물러 있어 휠 내부의 온도를 상승시키는 결과를 가져왔으며, 그 결과 마찰열을 효과적으로 방출하기가 힘들다는 것을 해석 결과를 얻었다.

또한, 휠 내부에서 외부로 빠져나가는 공기의 유속은 저속인 경우 디쉬 타입의 순정 휠이 휠 외부로 배출되는 유속이 8% 빠르나, 차량이 고속으로 주행 시 스포크 타입의 SHUK[®] 휠이 최대 14% 더 빠르게 휠 내부의 공기를 외부로 배출한다는 것을 알 수 있었다. 이는 휠 스포크 면적과 형상이 주행 속도에 따른 휠 내부 공기의 배출에 영향을 주는 인자라 할 수 있다.