

모터사이클 디스크 브레이크의 열 및 응력 해석을 통한 형상 설계

강석현*, 박시형*, 이성수**

A Study on Shape Design of Motorcycle Disk using Thermal and Stress Analysis

Seok Hyun Kang*, Si Hyung Park*, Seoung Soo Lee**,

* 건국대학교 대학원 기계설계학과 ** 건국대학교 기계설계학과

ABSTRACT

Studies on brake system recently are focused on braking performance, especially the consideration on safety of braking system in an extreme situation and reduction of vibration and noise during braking operation. The thermal crack and Judder from the friction between brake disc and pad can bring the threaten of passengers' safety in the end. Braking force comes from the change of kinetic energy to friction energy. Since heat energy is developed from here, the analysis on thermal stress and thermal strain can be the good data when selecting the material of brake pad and designing heat radiation holes on the disc and it will also be the data when designing the thickness of the disc. This paper is intended to show a creative design method by suggesting the thermal analysis data through FEM study and using shape design parameters.

Key Words : Vibration(진동), Heat Radiation Holes(방열공), Thermal Analysis(열전달해석), Finite Element Method(유한요소법)

1. 서론

최근의 브레이크 연구경향은 제동능력의 향상과 시스템의 고성능화, 즉 가혹한 제동환경에서의 성능에 대한 안정성 검토, 브레이크 부품의 사용시간 연장과 진동, 소음의 감소 등에 초점을 맞추고 있다. 이와 같은 가혹한 상태에서 작동되어야 하는 디스크-패드 사이의 마찰 면에서의 마멸, 열크랙 및 저더의 결과로 나타나는 소음과 진동은 결국 브레이크 시스템의 성능단축이나 고장으로 이어져 탑승자의 안전을 위협하는 결과를 초래한다¹⁾.

위의 작동환경에 따라 발생하는 브레이크 디스크와 패드 사이의 마찰열에 의한 열적 불안정성 해석은 브레이크 설계에서 가장 중요한 문제 중의 하나이다. 운동에너지가 마찰에너지로 바뀌고 다시 마찰 에너지에 의한 마찰면에서 발생하는 열에 의한 응력해석과 이에 따른 변형률 해석은 브레이크-패드 소재의 선택, 열을 발산하는 방열공 설계에 이용할 수 있으며, 디스크 브레이크의 전체 직경이나 두께같이 형상설계에 이용할 수 있는 데이터로 사용할 수 있다.

그러나 국내에서 생산되는 브레이크는 독자적인 설계를 하지 못하는 실정 이어서, 본 논문에서는 유한요소법을 이용하여 열해석 및 응력 해석을 수행하며 궁극적으로는 해석 결과로부터

얻어지는 데이터를 이용하여 좀더 최적화된 브레이크설계를 하고자 한다.

2. 디스크 브레이크

디스크 브레이크란 휠 허브에 얇은 원판을 부착하여 그 원판을 패드라고 하는 마찰체로 끼워 넣어 제동하는 것이다. 원판이 늘 공기중에 노출되어 있기 때문에 방열 효과가 좋고 제동력이 안정적이라는 장점이 있다. 디스크 플레이트는 휠의 회전과 같이 돌고, 스윙암과 프론트 포크에 부착된 브레이크 캘리퍼가 이 플레이트의 일부를 덮고 있다. 캘리퍼 안에는 드럼 브레이크 슈의 대용인 브레이크 패드가 들어 있고, 그 패드 뒤에는 피스톤이 있다.

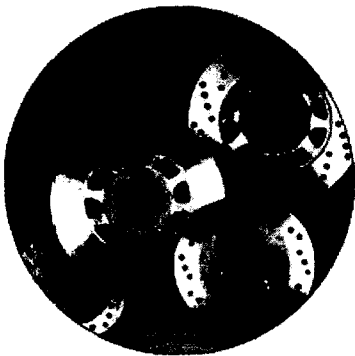


Fig.-1 디스크 브레이크

Fig.-1에서 두께와 직경이 각각 다른 디스크 브레이크 형상을 살펴 볼 수 있다. 그림에서 보듯이 방열공(Thermal Hole)을 뚫어 열발생을 줄인 제품도 눈에 띈다.

3. 해석 모델

3차원 설계 프로그램인 PRO ENGINEER 2000i²를 이용하여 Fig.-2 같이 해석 대상인 브레

이크 디스크를 선정 후 모델링 하였다.

완성된 모델들은 절점과 요소 정보들만을 가지고 계산을 수행하는 유한요소해석에서는 필요하지 않으나, 절점과 요소로 이루어진 유한요소모델을 직접 생성하기가 쉽지 않고, 근래에는 솔리드 모델링 기법에 의해 복잡한 기하모델을 생성하는 방법이 급속도로 발전하고 있으므로 우선 기하모델을 이용하여 절점과 요소를 생성해야 하는 해석영역을 정의하고, 이 영역의 내부에 점과 요소를 자동적으로 생성하는 방법을 대부분 사용하고 있다.

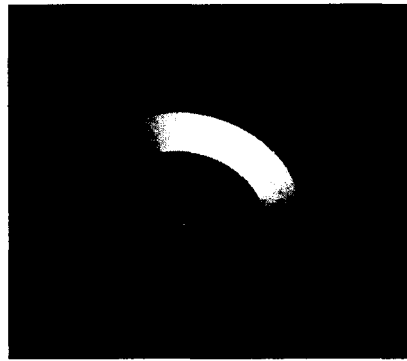


Fig.-2 완성된 디스크 브레이크

4. 하중 조건

4.1 디스크와 패드의 물성치

디스크나 패드는 주변의 공기와 접촉하면서 냉각되며, 마찰면에서의 복사열은 없다고 가정한다. 또한, 디스크와 패드의 마찰 표면에서는 마찰열이 균일하게 발생되어 후에 냉각된다고 가정하였다. Table-1은 브레이크 마찰열에 대한 유한요소 해석 시 사용한 재료의 기계적 특성이다²⁾.

디스크의 재질은 주철이고, 패드는 비 석면 계통의 복합재료를 사용하였다. 디스크와 패드 사이에서 열의 유입이나 방열 과정은 마찰면에 수직하게 발생된다고 가정하며, 차량의 모든 운동에너지는 완전 제동 시, 100% 열 에너지로 전

	Pad (Asbestos free friction material)	Disk (Cast Iron)
Young's modulus	820GPa	125GPa
Poisson's ratio	0.25	0.25
Mass density	3660kg/m ³	7100kg/m ³
Specific heat	1034 J/kgk	586J/kgk
Thermal conductivity	1.01W/mk	54W/mk
Thermal expansion coefficient	20μm/mk	12μm/mk

Table-1 디스크와 패드에 대한 물성치

환 된 다고 가정한다.

4.2 제동조건

Table-1 물성치와 함께 브레이크와 패드의 열해석을 위한 제동 조건은 다음과 같다³⁾.

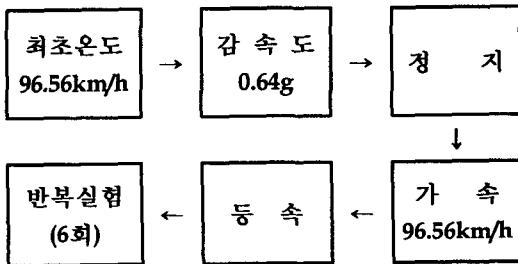


Table-2 시험조건

패드와 디스크가 장착된 오토바이에 대해서 최초 시속 97.56km/h로 주행 중 0.64g로 감속하여 정지한다. 감속 시 주행중인 차량의 일반적인 제동조건이 0.2g - 0.5g인 점을 감안하여 가혹한 제동조건이라 할 수 있는 0.6g로 감속하였다. 이후 20초 동안 가속을 하여 시속 97.56km/h로 속도에 이르면 4.71초 동안 등속운동을 한다. 전

체적으로 25초가 1 cycle 이며, 6회 반복하여 온도 변화와 시간에 따른 온도 분포를 살펴보자.

위에서 계산된 데이터를 가지고 주행 중에 발생하는 운동에너지를 계산하게 된다.

5. 수치적 해석

디스크와 패드의 마찰에 의해 열에너지가 발생, 단위면적당 입력되는 열에너지를 계산한다. 열의 발생시기는 오토바이가 감속하는 구간에서 발생하며, 열속(Heat Flux)의 계산은 차량이 주행 중에 발생하는 운동에너지를 이용하여 계산한다. 이때 발생된 전체 열에너지는 디스크와 패드에 각각 나누어져 입력이 되는데 브레이크 온도 해석은 브레이크에 흡수된 총 에너지와 이 에너지가 패드 또는 디스크 사이에 어떻게 배분되어 있는가에 대한 정확한 결정을 필요로 한다.

다음 식에 의해서 디스크나 패드에 의해 흡수된 상대적 제동에너지 γ 가 얻어진다⁴⁾.

$$\gamma = \frac{q_D}{q_D + q_P} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\rho_P C_P k_P}{\rho_D C_D k_D} \right)^{1/2}}$$

ρ_P, C_P, k_P 는 패드의 밀도, 비열, 열전도율을 나타내며 ρ_D, C_D, k_D 는 디스크의 밀도, 비열, 열전도율을 나타낸다.

이때 차량에 주입되는 열 속은 단위면적당의 열전달율이므로 식은 다음과 같다⁶⁾.

$$q_x = \frac{Q_x}{A} = \frac{\text{주입된에너지}}{\text{단위면적}} [W/m^2]$$

$$q = \frac{ax(m + \frac{I}{r^2})[2V_1 - a(t_2 + t_1)]}{\text{단위면적}}$$

여기서,

Q_x = 차량의 운동에너지, [W]

A = 디스크 패드의 단면적, [m²]

r = 열배분율

a = 감속도, [m/s²]

V₁ = 최초 속도, [m/s]

t₁ = 최초 시간, [sec]

t₂ = 감속 시간, [sec]

이다.

6. 해석 데이터

원래 브레이크 디스크는 3차원 모델이며, 응력문제의 해석은 3차원 모델로 요소를 충분히 분할하여 해석하는 것이 최상이나 컴퓨터의 용량과 계산시간 등을 고려하여 2차원 축대칭모델을 사용하였으며, Fillet부는 생략하여 모델을 단순화하였다. 이대 전체 node의 개수는 140개이다. 각종 물성치의 입력과 요소분할작업이 끝난 후 앞서 계산된 열속과 대류계수를 모델에 적용하여 그 결과를 살펴 보면 Fig.-3은 전체 제동이 끝난 후의 최종온도로 전체 온도 중에 가장 높은 온도인 540.719℃까지 상승한다. Fig.-4는 전체 온도변화 그래프로써 총 6번의 제동과정을 살펴볼 수 있다. 매 cycle 과정 중에서 감속과정에는 온도가 상승하며 가속과 등속 과정에서는 대류에 영향을 받아 온도가 약간 떨어지는 마치 계단 같은 형상을 그래프를 통해서 확인 할 수 있다.

그래프에서 알 수 있듯이, 디스크에 발생하는 온도분포는 패드와 접촉하는 부분에서 제동의 반복에 따라, 온도가 선형적으로 증가하거나 감소하게 된다.

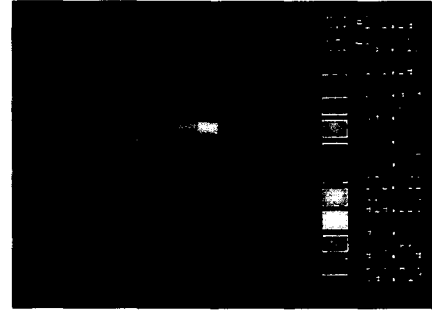


Fig.-3 최종온도

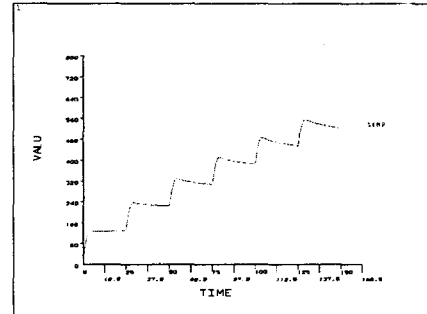


Fig.-4 온도상승곡선

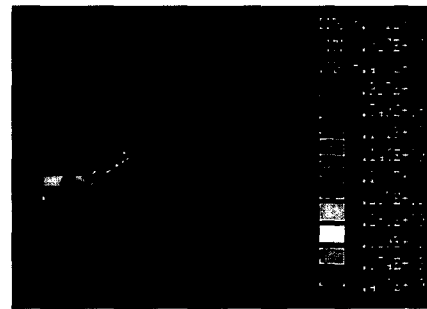


Fig.-5 열응력 분포도

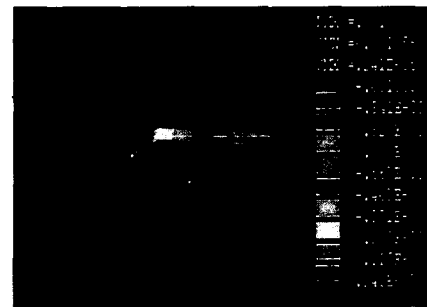


Fig.-6 변위 분포도

Fig.-5는 열응력을 나타내는 그림으로 표면 온도 상승으로 열변형이 시작되면 응력이 발생하기 시작한다. 이때 최대응력의 위치는 마찰면의 왼쪽끝 부분에서 시작되어 감속의 횟수가 늘어남에 따라 그 위치가 밑으로 내려오는 것을 확인할 수 있으며 전체 제동이 끝났을 때에는 구속된 부분에 최대응력이 나타난 것을 볼 수 있다. 이때 최대 응력의 값은 420MPa 이다. Fig.-5는 변위를 나타내며 이때 최대 변위는 1.058mm이다.

7.설계변수

앞서 해석된 기준 디스크 브레이크의 데이터를 가지고 형상에 변화를 주어 해석을 시도하였다.

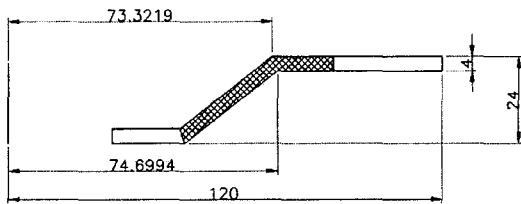


Fig.-7 설계변수 A

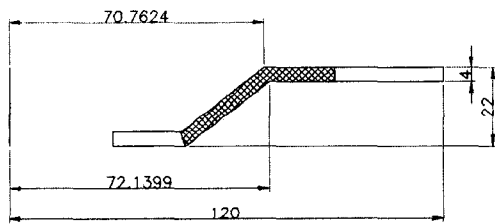


Fig.-8 기준디스크

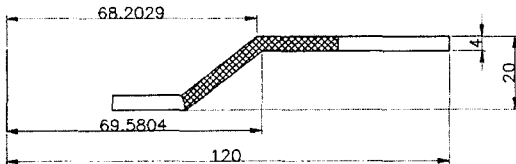


Fig.-9 설계변수 B

Fig.-7은 기준 디스크 치수에서 마찰면의 밑

부분을 기준으로 치수를 2mm 높여 설계한 제품이다. 두께나 전체 직경은 기준 디스크와 동일하다. Fig.-8은 마찰면의 밑부분을 기준으로 2mm 낮게 설계한 제품으로 역시 두께나 전체 직경은 기준 제품과 동일하다. A 와 B 의 두가지 변수를 가지고 앞서 해석된 데이터와 비교하여 해석을 수행하였다.

8. 해석 결과 및 고찰

Fig.-7의 변수의 A의 경우 밑면의 높이가 증가함에 따라 패드가 맞닿는 면의 방열 면적이 좁아져 온도의 상승이 기대 되었으나 결과는 그 반대였다. 높이의 증가와 함께 그림에서 빗금친 부분처럼 꺾인 부분의 단면적이 증가하여 단위 면적당 받는 열속이 감소하여 Fig.-10 처럼 전체 온도는 529.944℃으로 온도가 감소하였으며 열응력도 392MPa로 감소하였다. Fig.-9 변수 B는 기준 디스크보다 2mm 낮게 설계되었으며, 역시 패드와 평행하게 맞닿는 부분의 면적이 증가하여 온도의 하강을 기대 하였으나 A의 경우에서 보듯이 빗금친 부분의 면적이 오히려 감소하여 단위 면적당 받는 열속의 양이 증가하여 Fig.- 12 처럼 온도가 551.632℃ 까지 상승하였으며 이때 최대응력값은 461MPa 인 것을 확인할 수 있다.

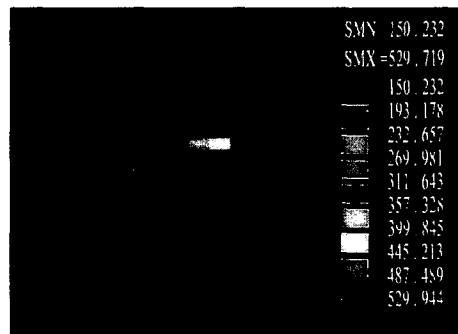


Fig.-10 A의 최종온도

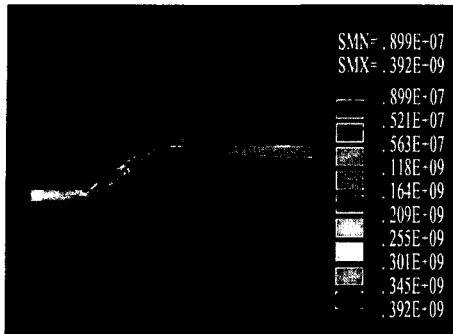


Fig.-11 A의 응력 분포도

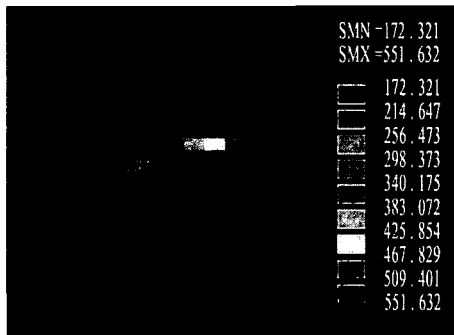


Fig.-12 B의 최종온도

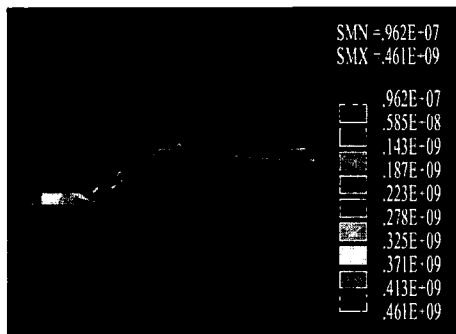


Fig.-13 B의 응력 분포도

9.결 론

본 논문에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 유한요소해석을 통하여 모터사이클 디스크 브레이크의 열전달 및 열응력 해석을 수행하였으며 그 데이터 값을 제시하였다.

2) 해석 결과를 바탕으로 좀더 최적화된 형상을 얻기 위해 각각 A와 B 두 가지로 나누어 해석을 수행하였다.

3) 디스크 폭의 변화에 따른 단면적의 증가 또는 감소로, A의 경우 기준디스크에 비하여 전체온도와 응력이 감소하였으며 B의 경우에는 단면적의 감소로 인하여 온도와 응력이 증가하였다.

4) 디스크 브레이크의 온도 상승은 운전자의 승차감이나 안전에 영향을 미치게 되므로 디스크 표면에 발생하는 온도를 줄이기 위한 방법으로는, 열속이 주입되는 곳의 단위 면적을 넓히거나, 열전도계수가 높은 재질의 사용 또는 방열 작용을 원활하게 하기 위해서 방열공을 뚫는 방법등이 있다.

참고문헌

1. 이상국, 여태인, "디스크 브레이크의 온도 해석 및 열변형 해석을 통한 형상 설계에 관한 연구," 울산대학교, 1999,
2. 박영철, 박동성, "유한요소법을 이용한 브레이크 드럼의 열응력 해석," 한국자동차공학회, 제 8권 제 3호, pp.77-84
3. 임문혁, 신현명, "차량용 브레이크 디스크와 패드의 온도 해석," 계명대학교, 1997
4. Rudolf Limpert, "Brake Design and Safety," pp. 89-132
5. Leon Aslan, "The Development Of Motor-cycle Disk Brake System Using Integrated Product Development"
6. "ANSYS HEAT TRANSFER USER GUIDE" ANSYS INC. 1999.