

디스크 브레이크와 패드의 접촉을 고려한 벤틸레이티드 디스크 브레이크의 열적거동에 관한 연구

마정범^a, 이봉구^{b*}

Thermal Behavior of Ventilated Disc Brakes Considering Contact Between Disc and Pad

Jeong-Beom Ma^a, Bong-Gu Lee^{b*}

^a School of Mechanical Engineering, Dongyang Mirae University, 445 Gyeongin-ro, Guro-gu, Seoul, 152-714, Republic of Korea

^b Division of Mechanical Engineering Technology, Yeungnam University College, 170 Hyeonchung-ro, Nam-gu, Daegu, 705-703, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received 9 May 2014
Revised 13 June 2014
Accepted 13 June 2014

Keywords:

Thermal judder
Ventilated disc brake
Finite element analysis
Thermal stress
Temperature distribution

ABSTRACT

When the brakes of a vehicle are applied, large amounts of heat are generated on the surfaces of the brake discs owing to friction between the discs and the brake pads. A high temperature gradient on the disc surfaces leads to thermal deformation and severe disc abrasion. Ultimately, the thermal deformation and disc wear give rise to a thermal judder phenomenon, which has a major effect on the stability of the vehicle. To investigate and propose a solution to these problems, thermo-elastic instabilities under applied thermal and mechanical loads were analyzed using the commercial finite element package ANSYS by considering the contact surfaces between the discs and pads. Direct-contact three-dimensional finite elements between the discs and pads were applied to investigate the disc friction temperature, thermal deformation, and contact stress so that the thermal judder phenomenon on the surface of the disc could be predicted.

1. 서론

자동차 산업이 급속히 발전함에 따라 엔진의 고출력화, 차량의 경량화 및 고연비화, 고속화가 지속적으로 진행되고 있다. 급격하게 증가하는 자동차와 더불어 교통사고의 지속적인 증가로 인해 자동차의 제동시스템에 대한 중요성이 대두되고 있다. 최근 자동차의 엔진이 고성능화 되고, 도로 조건 및 주행조건이 향상되면서 주행 속도가 고속화 되어 자동차 제동장치의 작동 조건이 예전에 비해 더 심한 열적, 기계적 하중에 노출되고 있으며 이로 인해 제동거리를 대폭적으로 단축시킬 수 있는 브레이크 개발에 많은 연구가

진행되고 있다.

디스크 브레이크는 디스크와 패드 사이의 마찰력을 이용하여 움직이는 장치의 운동속도를 가능한 빠른 시간내에 감소시키거나 정지시키는데 그 목적이 있다.

정상주행 상태에서 브레이크는 제동과 주행을 반복하게 되며, 제동이 반복해서 일어날 때 마다, 디스크는 마찰에 의한 열발생과 전도와 대류에 의한 방열과정을 반복하게 된다. 자동차가 이동할 때 발생된 운동에너지는 대부분 마찰열의 형태로 브레이크 디스크에 전달되어 결과적으로 디스크와 패드의 접촉면 사이의 온도를 급격하게 상승시키게 된다. 제동 시 디스크와 패드 사이의 접촉면에서

* Corresponding author. Tel.: +82-53-650-9212

Fax: +82-53-625-0861

E-mail address: poistive@ync.ac.kr (Bong-Gu Lee).

발생하는 열에너지로 인하여 브레이크 마찰면을 중심으로 브레이크 시스템의 온도가 상승하여 제동성능을 저하시키는 마멸, 열크랙 및 열변형 등의 열적 문제를 발생시키고 브레이크 제동력을 불균일하게 변화시킨다^[1-2]. 이러한, 열적 문제가 디스크에 미소한 진동과 소음을 발생시키는 열적 저더의 원인이 되고, 브레이크 기능에 이상을 가져오며, 미끄럼 마찰조건이 불안정하게 되어 제동거리를 더욱 증가시키므로 마찰열에 의한 열적 저더는 브레이크 설계 시 반드시 고려해야 할 사항이다^[3-5].

이러한 문제점을 규명하고 해결하기 위해 다양한 실험적 연구가 수행되어 왔고, 최근에는 컴퓨터를 이용한 유한요소프로그램의 획기적인 발달로 실제 현상과 유사한 브레이크 제동 모델에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 기법이 많이 도입되고 있다^[6-8].

열적 저더는 브레이크 디스크와 패드 사이의 마찰열에 의한 열변형 때문에 발생하게 되는데, 이러한 열탄성 불안정성의 해석을 통한 브레이크 소음/진동 문제를 해결하고자 하는 연구가 계속되어 왔다. 마찰에 의한 열탄성 불안정성 현상은 디스크와 패드의 기계적, 열적 성질, 기하학적 형상, 마찰 계수 및 미끄럼 속도 등이 관련된 매우 복잡한 현상이다. 이와 같이 열탄성 문제는 열해석 과 열변형 해석 및 디스크와 패드의 접촉 문제들을 서로 연계해서 풀어야 하는 어려움 때문에 비교적 단순한 모델을 통한 해석적 접근이 요구되고 있다. 지금까지 브레이크 디스크에 대한 연구는 열탄성 문제를 해결하기 위해 수치해석기법과 유한요소해석을 사용한 연구들이 진행되고 있다.

Sung과 Kim^[9-11] 등은 수치해석기법과 FEM 방법을 사용하여 브레이크의 열적 거동해석과 열응력 해석 연구를 진행하였다. 하지만 이 연구는 패드의 직접적인 마찰영향에 대한 고려는 하지 못하고, 단지 대류 열전달 계수 값의 변화에 중점을 두고 열해석을 진행하였다. Hwang^[12]과 Lee^[13]도 제동 시 발생하는 마찰열과 대류 열전달 계수를 적용하여 브레이크 최적설계를 하였지만, Limpert의 이론식을 바탕으로 계산한 마찰열을 패드와 접촉하는 디스크 표면에 균일하게 적용하였을 뿐, 패드의 접촉압력 경계조건은 고려하지 못하였다. Limpert^[14]는 브레이크 디스크의 열해석에 대한 방법에 대해 실험적인 계산식을 사용하여 단일제동 및 반복제동에서의 디스크와 패드의 마찰에 의해 발생하는 열유속과 대류조건에 관한 계산식을 규명하였다. 즉, 계산식을 사용하여 제동에 관련된 초기온도 및 디스크와 패드의 물성치 및 특성을 적용시켜 보다 이해하기 쉽게 해석하였다. Kao^[15]는 FEM 방법을 사용하여 열해석에 대한 연구를 진행하였는데, 패드와 디스크 브레이크의 2차원 축대칭 모델을 사용하여 디스크와 패드의 마찰계수와 접촉압력을 고려하여 유한요소 해석을 하였다. Kao가 사용한 유한요소해석을 이용한 열해석 연구는 제동 시 디스크와 패드사이에서 발생하는 마찰열에 대한 열기계적 연성문제를 고려한 방법으로 발생하는 온도분

포와 압력의 변화를 측정하였다.

본 연구에서는 기존의 Limpert가 제안한 실험적 계산식을 이용한 해석방법과 Kao 제시한 디스크와 패드의 접촉압력에 대한 해석 방법을 참고로 하여 3차원 축대칭 모델을 통하여 실제로 제동 시 발생하는 디스크와 패드의 접촉을 고려한 온도 해석 및 열변형 해석을 하였다. 이러한 새로운 FEM 방법은 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 디스크와 패드의 접촉면에서 발생하는 열탄성 불안정성 문제를 열하중과 기계적 하중으로 동시에 고려하여 해석하였다.

여기서는 특히 디스크와 패드가 직접 접촉하는 3차원 축대칭 모델을 구성하여 디스크의 마찰면 온도, 열변형, 접촉 열응력을 관찰함으로써 디스크에서 일어나는 열적 거동을 보다 정확하게 관찰하고자 한다.

2. 브레이크 디스크의 열변형 해석

2.1 제동시 발생하는 열에너지

브레이크 디스크에는 Drum brake, Solid disc brake와 Ventilated disc brake 가 있다. 자동차가 제동할 때는 전륜의 분담율이 80% 정도이고, 후륜의 분담율이 20%이다. Solid disc brake는 냉각 성능이 좋지 않아서 주로 후륜에 사용되고, Ventilated disc brake는 제동 시 효과적인 열의 발산을 위해 전륜에 사용된다. Ventilated disc brake는 방열 면적의 증가와 공기 유동에 의한 방열화를 증대하기 위해 벤트 홀이 만들어져 있다. 주행하는 자동차가 제동하게 될 때 운동에너지는 패드와 디스크의 마찰 에너지뿐만 아니라 자동차 바퀴와 지면과의 마찰, 공기 저항에 의한 손실 등 많은 요인에 의해 기타 에너지로 변환된다. 그러나 자동차 바퀴와 지면의 마찰은 무시할 정도로 작다고 가정하고 또한 기타 요인에 의한 에너지 손실도 무시할 수 있을 정도로 작다고 가정한다면 주행 중인 운동 에너지가 모두 패드와 디스크의 마찰 에너지로 변환된다고 가정할 수 있다.

본 연구에서는 디스크와 패드의 마찰에 의해 발생하는 열에너지가 패드와 닿는 디스크에 유입되는 열유속을 계산하여 적용하였다. 자동차가 제동을 하였을 경우 발생하는 마찰열에 의한 디스크와 패드 사이에 유입되는 열유속은 FMVSS 105-75(브레이크 다이내모 시험규격)의 제 2 페이드 시험 중에서 감속 구간만을 고려하기로 한다. 즉 97km/h 속도로 주행 중인 자동차가 0.6G(중력가속도) 로 4.578초 동안 감속하여 정지 상태에 도달한다. 제동 시 패드와 브레이크 사이에 발생하는 마찰은 모두 열에너지로 변환된다고 가정한다. 이때 디스크와 패드의 마찰에 의한 열유속은 다음과 같다^[13].

$$q = \frac{\alpha\gamma(m + \frac{I}{r^2})[2V_1 - \alpha(t_2 - t_1)]}{10\pi(R_0^2 - R_1^2)} \quad (1)$$

I_r 는 바퀴의 회전관성 모멘트, V_1 차량의 초기 속도, α 는 차량의 감속비, r 타이어의 반경, R_0 는 패드의 외측 둘레원의 반경, R_1 는 패드의 내측 둘레원의 반경, m 은 차량 질량을 나타낸다. 여기서, γ 는 열 분배율로써 다음식과 같다.

$$\gamma = \frac{q_d''}{q_d'' + q_p''} = \frac{1}{1 + (\frac{\rho_d c_d k_d}{\rho_a c_a k_a})^{1/2}} = \frac{1}{1 + \sqrt{\eta}} \quad (2)$$

여기서, ρ 는 밀도, c 는 비열, k 는 열전도 이며, 침자 d 는 디스크 브레이크, p 는 패드의 물성치를 의미한다.

2.2 대류 열전달

제동장치에서는 감속구간, 가속구간, 그리고 등속구간에서 각각의 상황에 따라 적용되는 열유속과 대류열전달 계수가 달라진다. 예를 들면, 감속구간일 경우에는 열유속과 대류가 같이 적용되고, 가속구간과 등속구간에서는 열유속은 없고 대류만 적용된다. 이러한 상황들을 고려해 보면, 감속 구간일 때는 열유속과 대류의 값이 모두 적용되므로, 대류 열전달계수를 구해야 된다. 벤틸레이티드 디스크 브레이크의 경우에는 벤트 홀부분과 솔리드 부분에 각각의 대류 열전달계수를 구하여 적용해야 된다. 두 부분의 경우 대류 열전달 특성이 다르다. 벤트홀 부분은 관유동 특성을 보이므로 솔리드 부분과는 대류의 특성이 다르다. 또한 층류와 난류에서의 대류 열전달 계수 값이 다르다. 레이놀즈수에 의해 어느 속도에서 층류와 난류로 변하는지 확인하고, 이 값에 의해 대류열전달 계수 값을 구하여 적용하였다.

$$h_v = 0.0231 + (d_h/l)^{0.67} Re^{0.8} Pr^{0.33} \times (k_a/d_h) \quad (3)$$

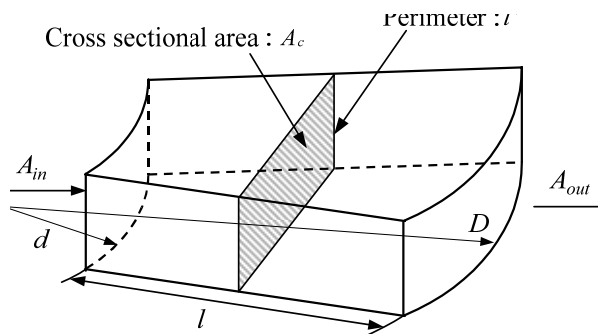


Fig. 1 Geometry of vent hole for calculating the heat transfer coefficient

그리고 층류일 경우($Re \leq 10^4$)에는 다음과 같이 대류 열전달 계수를 구하게 된다.

$$h_v = 1.86(RePr)^{1/3} (d_h/l)^{0.33} \quad (4)$$

이때 사용되는 레이놀즈수 및 프란틀수는 다음의 식으로 계산된다.

$$Re = V_{ave} \frac{\rho_a d_h}{\mu_a} \quad (5)$$

$$Pr = \frac{3600 \cdot c_a \mu_a}{k_a} \quad (6)$$

여기서 d_h 는 수력 직경이며, V_{ave} 는 냉각구멍내의 공기의 평균 유동속도, ρ_a 는 공기의 밀도, μ_a 는 공기의 점성계수, k_a 는 공기의 열전도 계수, c_a 는 공기의 비열로서 수력직경과 공기의 평균 유동 속도의 계산은 아래와 같다.

$$d_h = 4A_c/l$$

$$V_{ave} = \frac{(V_{IN} + V_{OUT})}{2}$$

$$V_{IN} = 0.158n_T(D^2 - d^2)^{1/2}$$

$$V_{out} = V_{IN}(A_{IN}/A_{OUT})$$

디스크 상·하면을 통한 대류 열전달도 레이놀즈수를 구한 후 난류일 경우와 층류일 경우에 각각의 대류 열전달계수를 구하게 된다. 난류일 경우에는 다음의 식을 사용한다.

$$h_d = 0.70(k_a/D) Re^{0.55} \quad (7)$$

또한 층류일 경우에는 아래의 식을 적용하여 구하게 된다.

$$h_d = 0.04(k_a/D) Re^{0.8} \quad (8)$$

이때 사용되는 레이놀즈수는 다음과 같이 계산된다.

$$Re = V \frac{\rho_a D}{\mu_a} \quad (9)$$

2.3 유한요소 모델

본 연구에서는 열방출 성능을 개선한 벤틸레이티드 디스크 브레이크 모델을 이용하여 유한요소해석을 수행하였으며, 모델의 벤트

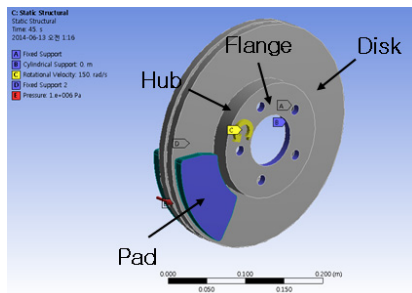
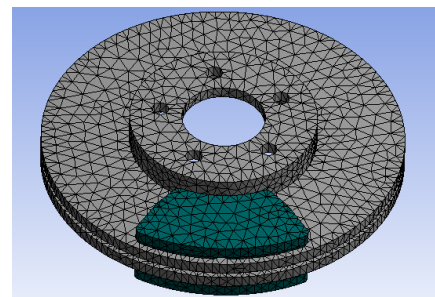


Fig. 2 Boundary conditions for disk and pads

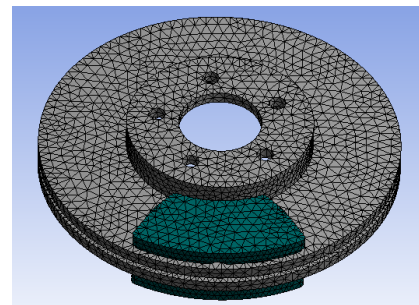
홀의 수는 일반 벤틸레이티드 디스크 브레이크와 같이 50개를 사용하여 3D 모델링 하였다. Fig. 2은 디스크 브레이크에서 발생하는 마찰열 접촉 거동 문제를 해석하기 위해 본 연구에서 사용한 디스크-패드 모델이다. 디스크 브레이크는 원주상으로 7.2도 간격으로 대칭을 이루고 있고, 다시 이것은 축대칭을 이루므로, 실제 해석은 이 부분을 ANSYS 자동격자 생성기능을 통하여 전체 디스크 브레이크를 3차원 사면체 요소로 생성하여 해석오차를 최소화 하였다. 벤틸레이티드 디스크 브레이크와 패드의 유한요소 모델에서 사용된 총 요소의 수는 73,152개이고, 총 절점 수는 122,514개이다. 자동차가 제동하게 될 때 운동에너지는 주행 중 발생하는 운동 에너지가 모두 패드와 디스크의 마찰 에너지로 변환된다고 가정할 수 있다. 제동 시 디스크와 패드의 마찰에 의한 열유속을 열-구조 연성해석에 적용하는 이유는 패드의 압력효과에 의해 실제로 발생하는 열에너지를 적용하기 위한 것이다. 결국, 패드가 디스크 양쪽에서 균일한 압력으로 가해져 마찰열이 발생하고 다시 그 마찰 열에 의해 압력의 변화를 일으키게 하는 열-구조 연성효과를 고려할 수가 있는 것이다. Limpert^[14] 실험식을 적용하여 디스크 양쪽에 접촉하고 있는 패드의 뒷면에 가해진 제동 마찰력은 1 Mpa이고, 디스크나 패드는 주변의 공기와 접촉하면서 강제대류에 의해서 냉각되며, 마찰면에서의 복사열은 없다고 가정하였다. 또한 디스크와 패드의 마찰 표면에서는 마찰열이 균일하게 발생되고 냉각된다고 가정하였다. 디스크-패드 모델의 냉각을 고려할 때 대류 열전달 계수는 자동차의 주행속도, 반복제동 회수, 디스크 주변의 공기 속도 유동장 등에 영향을 받지만 본 해석에서는 평균값보다 약간 높은 40 W/m²K, 외부온도를 상온 조건인 22℃로 정해 대류에 의한 냉각효과를 고려하였다. Moon, gortyshov에 따르면 어떠한 표면이든 그 표면에 작은 홈을 형성할 경우 대류 열전달 효과는 2배 이상 상승된다고 하지만 본 연구에서는 디스크 브레이크에 작용하는 열전달 계수는 같다고 가정하고 유한요소 해석을 수행하였다. 브레이크 디스크 열에너지 변화를 알아보기 위한 유한요소 해석에 사용한 디스크의 재질은 주로 주철과 같은 금속재료를 사용하고, 패드는 비석면 계통의 복합재료를 사용하였으며 디스크 재질의 기계적 특성은 Table 1과 같다.

Table 1 Material property for a disk brake and pad

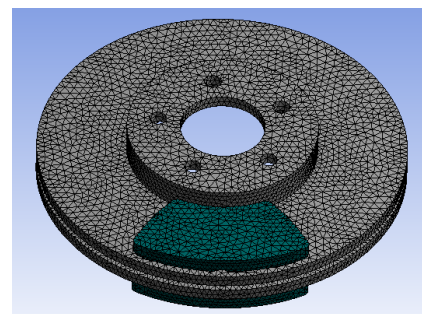
Material Property	Disk brake	Pad
Elastic modulus (GPa)	125	820
Poisson's ratio	0.25	0.25
Density (kg/m ³)	7100	3660
Coefficient of thermal expansion (1/K)	12e-6	30e-6
Thermal conductivity (W/m·K)	54	1.01
Specific heat (J/kg·K)	586	1034



Type (a)



Type (b)



Type (c)

Fig. 3 Each elements of disk brake and pad

Table 2 Number of nodes and elements of disk and pad

Type	Disk brake		Pad	
	Nodes	Elements	Nodes	Elements
(a)	46728	27899	3864	2086
(b)	66815	39953	5915	3312
(c)	104390	62704	9020	5190

벤트레이티드 디스크 브레이크의 요소생성은 Fig. 3과 같이 디스크 전체 조립상태에서 요소를 생성하였으며, 이 경우의 디스크와 패드의 절점수와 요소 수는 Table 2와 같다.

3. 해석 결과

3.1 온도분포

단일 제동구간에서 브레이크 제동이 끝나는 시간(4.5초)에 디스크와 패드에 작용하는 마찰로 발생하는 온도분포를 type(a)~(c) 모델별 각 절점 수와 요소 수에 따른 최소, 최대 온도를 table 3에 나타내었다. 디스크 브레이크 초기 온도를 500°C로 가정한 상태인 Fig. 4의 온도 분포를 보면 3개의 모델 모두 최고온도 495°C는 디스크에 분포하였고, 최저온도 308°C는 패드부분으로 각각의 모델에 따른 온도 차이는 거의 없지만 보다 오차범위를 최소화 하기 위하여 온도분포, 열변형, 열응력의 해석은 type (c)를 기초로 하여 수치해석을 수행하였다.

Fig. 4는 제동이 시작되는 시간(0.136초)부터 제동이 끝나는 시간(4.578초)에 따른 온도분포를 나타냈다. 디스크와 패드의 접촉부의 온도가 제동초기에 발생된 마찰로 인한 운동에너지가 열에너지

로 변환되어 최고 온도가 495°C임을 Fig. 4에서 알 수 있다. 이는 대류 열전달로 마찰열을 효과적으로 공기 중으로 방출시키기 위한 벤트홀 부분이 제동초기에는 제 기능을 하지 못하는 것이다. Fig. 4에서는 기존의 해석방법인 열유속 및 대류조건을 적용시키는 것 외에 추가적으로 패드의 침투에 의해 생기는 압력의 영향을 고려하였고, 패드와 접촉하는 디스크 표면의 열유속에 대해 속도의 영향을 고려하였다. 이로 인해 패드와 접촉하는 디스크 안쪽이 바깥쪽 부분의 온도 보다 더 많이 증가하고 있는 형상이다. Fig. 4(a)~(d)은 브레이크 제동이 일어나는 시간동안의 온도분포를 나타내는 그림으로 반경방향의 온도 분포는 디스크의 외경쪽이 높고 내경쪽이 낮다. 이것은 외경쪽은 디스크 표면에서 발생한 온도가 더 이상 전도되지 않고, 플랜지와 연결된 내경쪽으로 열전달이 발생하기 때문이다.

Fig. 4(d)는 브레이크 제동 시 감속이 완료되는 시간(4.57초) 일 때 디스크와 패드의 온도분포를 나타내고 있다. 전체 디스크 형상을 사용하여 나타낸 결과로서 제동 초기에서는 온도차가 거의 미미하였으나 감속이 완료되는 시간에는 초기온도에 비해 벤트홀을 통한 방열 효과가 나타나고 있음을 알 수 있다. 초기 제동 시 발생하는 마찰열에 의한 온도를 500°C 로 가정하여 해석한 결과, 감속이 완료되는 시간에 온도는 최소 308°C, 최대 495°C 의 온도분포를 보이고 있다. 이러한 결과 반복 제동과 같은 여러 번의 제동구간에 더 확실한 차이가 날 수 있음을 예측할 수 있다.

Table 3 Min & max temperature of Disk and Pad

Type	Disk brake	Pad
	Temperature max (°C)	Temperature min (°C)
(a)	495.40	308.29
(b)	495.39	308.35
(c)	495.38	308.23

3.2 열변형

Fig. 5는 제동시작 직후부터 제동시간의 경과에 따른 열변형을

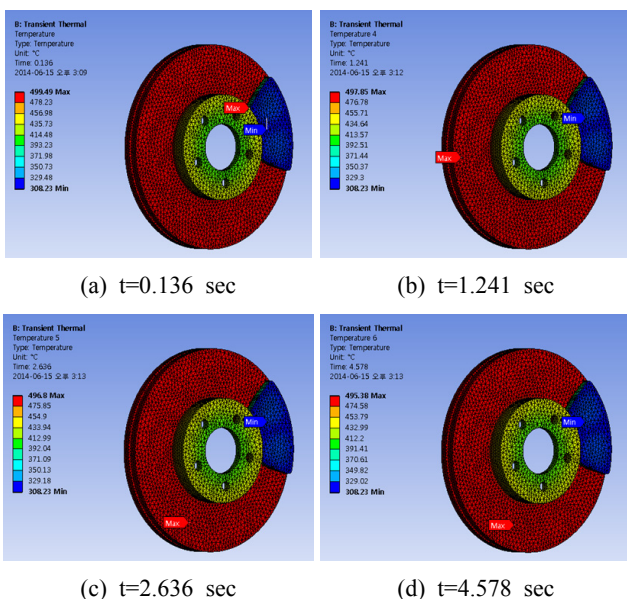


Fig. 4 Temperature distribution of brake disk

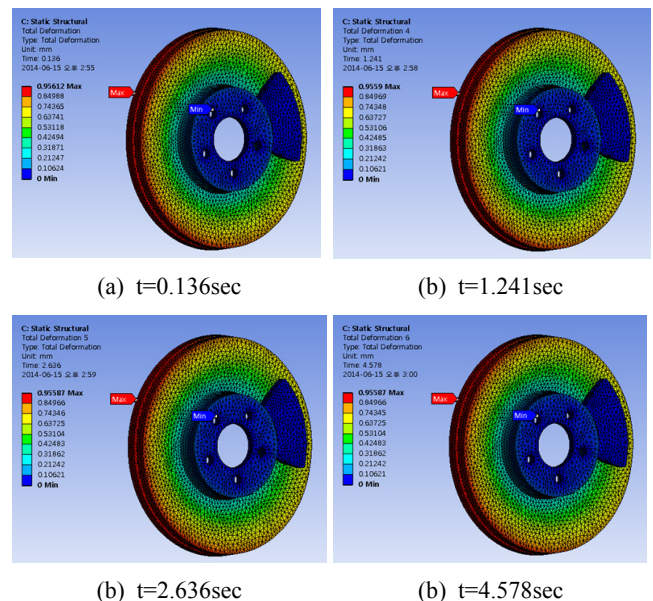


Fig. 5 Thermal deformation of brake disk

나타낸 것이다. 모델의 최대변형은 제동이 처음 시작되는 시간인 0.136초에 반경방향 끝에서 최대 변형량은 0.956 mm로 나타났으며, 최소 변형량은 0.106 mm로 제동이 끝나는 4.578초에 나타났다. 이것은 제동이 시작된 초기에는 디스크와 패드의 접촉부분 보다 디스크의 원주방향으로 열변형이 집중되고, 제동이 진행되면서 패드 접촉부분 보다 회전 원주방향으로 디스크 외곽부분에 열변형이 증가하는 것을 관찰 할 수 있다.

이는 패드와 디스크에 작용하는 힘과 압력으로 발생한 마찰열이 고속으로 회전하는 디스크의 원심력방향으로 열전달 되어 나타나는 것으로 생각된다.

Fig. 5에서 보여지는 것과 같이 제동이 지속적으로 진행되면 제동 직후의 디스크와 패드의 변형이 점차 줄어들게 되고 디스크의 고정부가 있는 방향으로 열변형 부위가 전파됨을 알 수 있다. 이는 제동 직후 마찰로 인해 발생하는 고온의 열이 시간이 경과 함에 따라 디스크 브레이크 전체로 열전달되어 디스크에서 나타나는 온도차가 감소하게 된 것으로 생각된다.

3.3 열응력 해석

단일 제동 시 디스크와 패드의 상호 마찰작용에 의해 발생하는 디스크의 응력분포를 예측하였다. 응력의 발생은 열 입력에 의한 온도 발생과 패드와 디스크의 마찰과 압력작용의 복합적인 결과로서 발생하는데, 초기 제동 시 발생하는 응력분포와 감속이 완료되는 구간시점을 각각 해석하였다.

Fig. 6는 초기 브레이크 제동 시 디스크에서 발생한 응력분포를 보여 주고 있는 그림이다. von mises 응력해석 결과 디스크표면보다 플랜지 부분에서 불균일한 응력분포가 생성된다. 이러한 국부적인 응

력차는 응착마찰이론에 의해 더욱 국부적인 접촉을 하게 되며 제동 표면에 압축소성 변형에 의해 미소크랙을 생성할 것으로 보인다.

브레이크 제동 시 디스크의 플랜지에서 가장 높은 응력이 발생하는데, 그 이유는 디스크와 패드사이의 상대 마찰운동에 의하여 발생한 대단히 높은 마찰열에 의하여 디스크의 벤딩이나 비틀림과 같은 기계적 원인이 플랜지에 가장 많은 영향을 미쳤기 때문으로 생각된다. 디스크에서 발생하는 열응력이 온도차에 가장 민감하게 영향을 받는다고 했을 때 공기의 유입이 자유롭지 못해서 플랜지부분에서 국부적인 온도차가 크기 때문이다.

Fig. 6(a)~(d)은 브레이크 제동을 시작하여 감속이 완료된 시점에서의 응력분포를 나타낸 그림으로 제동 초기에 플랜지에서 최대 2223MPa 로서 같은 디스크에서 발생하는 최저응력 0.06MPa에 비해 상당히 높은 응력분포를 나타낸다. 이것은 디스크와 패드의 상대 마찰운동으로 열팽창이 일어나고, 회전운동을 하는 디스크가 허브와 볼트 스크류에 의해 고정되면서 회전 마찰운동의 영향으로 플랜지 부분에 발생하는 비틀림과 굽힘과 같은 기계적 원인이 플랜지에 가장 많이 영향을 미치기 때문이다. 지금까지의 수치해석을 통하여 얻은 결과를 바탕으로 디스크의 불균일한 온도분포와 열응력으로 인한 열변형이 반복 제동 시 심화되어 열간저터 현상이 발생하게 되는 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 상용 유한요소 프로그램 ANSYS를 이용하여 디스크와 패드의 마찰로 인하여 발생하는 온도분포, 열응력, 열변형을 해석을 통하여 얻을 수 있었다. 수치해석 결과 디스크에 마찰로 인한 운동에너지가 열에너지도 변하면서 최고온도 495°C는 디스크에 분포하였고, 최저온도 308°C는 패드부분으로 나타났다. 브레이크 제동이 일어나는 시간동안의 온도분포는 반경방향으로 디스크의 외경쪽이 높고 내경쪽이 낮다. 이것은 외경방향은 디스크 표면에서 발생한 온도가 더 이상 전도되지 않고, 플랜지와 연결된 내경방향으로 열전도가 발생하기 때문이다. 또한 디스크 브레이크에 발생하는 열변형은 제동이 처음 시작되는 시간인 0.136초에 반경방향 끝에서 최대 변형량은 0.956 mm로 나타났으며, 최소 변형량은 0.106 mm로 제동이 끝나는 4.578초에 나타났다. 그리고 브레이크 제동시 디스크에서 발생하는 굽힘과 비틀림과 같은 기계적 원인으로 인한 열응력의 영향으로 가장 많은 영향을 받게 된다. 또한, 단일 제동시간 경과에 따른 온도분포 해석을 통하여 디스크 표면의 불균형 온도분포로 인해 디스크 표면의 일시적인 변형이 발생되고 이로 인한 열적저터 현상이 발생함을 알 수 있었다.

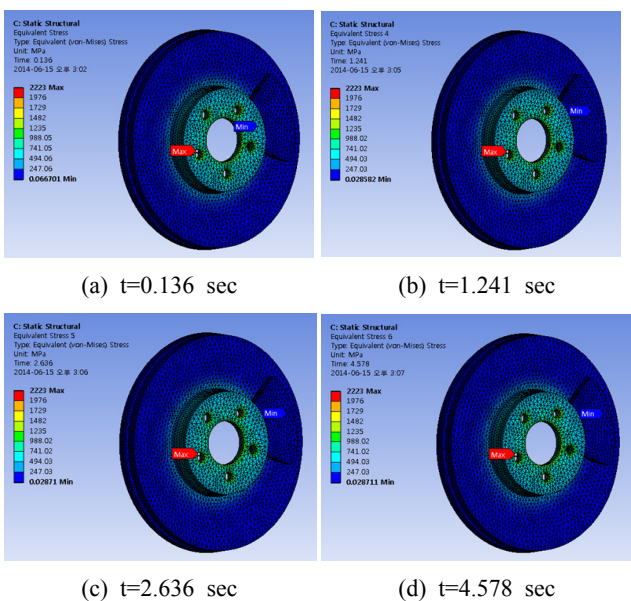


Fig. 6 Equivalent (Von-mises) stress distribution

References

- [1] Yeo, T. I., 1998, Finite Element Analysis of Thermoelastic Contact Stability with Sliding Friction, *Trans. of the KSME(A)* 22:7 1185-1192.
- [2] Kim, C. K., Sung, B. Y., 1998, Thermal Behavior Analysis of Disk Brake System During Quick Braking, *Trans. of the KSME(A)* 22 1106-1113.
- [3] Rainbolt, J. D., 1975, Effects of Disk Material Selection on Disk Brake Rotor Configuration, *SAE 750733* 1973-1814.
- [4] Anderson, A. E., Knapp, R. A., 1989, Hot Spotting in Automotive Friction Systems, *Int. Conf. on Wear of Materials* 2 673-680.
- [5] Jimbo, Y., Mibe, T., Akiyama, K., Matsui, H., Yoshida, M., Ozawa, A., 1990, Development of High Thermal Conductivity Cast Iron for Brake Disk Rotors, *SAE 750733* 22-28.
- [6] Lee, B., Cho, C., Lee, S., Cho, H., 2004, Computer Simulation on Mechanical Evaluation of Ceramic Matrix Composite Automobile Brake Disks, *PacRim 5 Special Issue* 5:112 S423-S427.
- [7] Lee, S. K., Sung, B. Y., Ha, S. K., 2000, Optimal Design of Ventilated Disc Brake Rotor, *Trans. of the KSME(A)* 24:3 593-602.
- [8] Zagrodzki, P., Lam, K. B., AlBahkali, E. J., Barber, R., 2001, Nonlinear Transient Behavior of a Sliding System with frictionally excited Thermoelastic Instability, *ASME J. Tribol.* 123 699-708.
- [9] Kim, C. K., Sung, B. Y., 1998, Thermal Behavior Analysis of Disc Brake System during Quick Braking, *Trans. of the KSME(A)* 22:6 1106-1113.
- [10] Kim, S. M., 2009, A Study on Thermal Analysis in Ventilated Disk Brake by FEM, *Korea Society of Manufacturing Technology Engineers* 18:5 544-549.
- [11] Kim, S. T., Kim, J. H., Kim, J. S., 2005, A Study on Temperature Distribution of Disc Brake System Considering the Material Property of the Disc Brake Piston, *Korea Society of Manufacturing Technology Engineers* 14:6 45-51.
- [12] Kim, C. K., Hwang, J. T., 1999, Tribological Analysis on The Contact Behaviors of Disc Brake Due to Frictional Heating, *Journal of KSTLE* 15:2 199-205.
- [13] Lee, T. H., Lee, K. K., Jeong, S. J., 2001, Optimal Design for the Thermal Deformation of Disk Brake by using Design of Experiments and Finite Element Analysis, *Trans. of the KSME(A)* 25:12 1960-1965.
- [14] Limpert, R. 1992, Brake Design and Safety, *Society of Automotive Engineers Inc.* 89-133.
- [15] Kao, T., Richmond, J. W., Douarre, A., 2000, Brake Disc hot Spotting and Thermal Judder: an Experimental and Finite Element Study, *Int. Journal of Vehicle Design* 23 276-296.