

자동차 브레이크 디스크의 열 균열 생성

안수익*, 이병하**, 조종두***

Thermal Crack Creation Process in an Automotive Brake Disk

S.Ahn*, B.Lee** and C.Cho***

Key Words : fast Fourier transform, finite element method(FEM), surface temperature, hot spot, stress intensity factor, thermal stress, residual stress, surface crack, ABAQUS

Abstract

This paper describes thermal crack creation process in automotive disks. Thermal cracks have been serious defects which induced disastrous accidents during traveling. The thermal cracks must be regularly eye-inspected. The cracks have been experimentally analysed; but they were not reported by analytic means yet. This paper proposed thermal crack creation process by a computer simulation which enlightened how to investigate thermal crack by cheap means. We explained the disk thermal crack creation and calculated stress intensity factor of an assumed surface crack in an automotive disk.

1. 서 론

운행 중인 자동차의 브레이크 디스크는 패드와의 높은 접촉압력에 의한 마찰열로 인해 불균일한 온도분포를 일으켜서 재질 자체의 급속학적 변화뿐만 아니라 열응력이 발생하고 비선형 소성 및 잔류응력이 발생한다. 이러한 반복적인 브레이크 작동에 의해 디스크 표면에 균열을 일으킬 수 있고 심각한 사고를 유발할 소지가 있다. 이와 같은 균열 발생 현상은 실험을 통한 연구로 고찰되었으나 균열에 대한 정확한 원인이 밝혀진 바 없으므로 브레이크 표면 균열에 영향을 미치는 요인과 보다 다양한 조건으로 해석하기 위해 정확하고 빠른 수치적 해석방법이 필요하였다. 이러한 마찰기구에서 표면온도의 해석을 위해 발표된 방법에는 열원을 이용한 방법(heat source method)⁽¹⁾과 수치해석적 방법이 있다. 열원을 이용한 방법에서는 표면의 한 열원에 의한 온도분포의 함수를 중첩해서 접촉면 위에 분포된 일반해를 구하는데

이용된다. 그러나 유한한 물체에 열원을 이용한 방법의 응용은 적분 변환 기법에 의하여 얻어진 적분 방정식을 해결하기가 쉽지않다.⁽²⁾ 이와 같은 이유로 적분 변환 기법은 여러 가지 다른 모양의 모델에 응용되었지만 단순한 모델에 한정되었으며 복잡한 수학적 수식으로 인해 널리 쓰이지 않는다.

표면 온도 해석의 다른 한 방법으로 유한 요소 방법이 있다. 널리 알려진 유한 요소방법은 마멸 분야 등 많은 분야에 응용되었다. 그러나 기존 유한 해석 방법으로 브레이크를 해석하기 위해서는 3 차원 요소의 온도와 응력의 coupling 된 방정식을 풀어야 하므로 많은 계산 시간과 컴퓨터 성능을 요구한다. 이러한 단점을 위해 Floquet⁽³⁾등은 브레이크의 온도 분포 예측을 위하여 fast Fourier transform 개념과 유한요소 개념을 병합시킨 방법을 제시 하였다. 표면 온도 해석에 좋은 장점을 가진 일반 유한요소법의 단점을 보완하기 위하여 본 연구에서는 fast Fourier transformation을 이용하여 디스크에서의 표면온도 해석 및 응력을 구하였다. 이 방법은 기존 해석방법에 비해 형상의 차원이 한 차원 줄어드므로 계산 시간이 월등히 빠르며 매우 빠른 회전속도를 갖는 디스크의 표면온도와 해석에도 응용되었다.

이와 같은 방법으로 산출된 온도이력 데이터를

* 인하대학교 기계공학과 대학원

** 인하대학교 기계공학과 대학원

*** 인하대학교 기계공학과

열하중 형태로 디스크 모델에 적용시키는 열탄소 성 문제를 상용 패키지인 ABAQUS 를 이용하여 해석하였다. 이 단계에서 산출되는 응력결과를 토대로 하여 디스크 표면에서의 균열의 생성을 예측하여 균열의 크기를 결정하고 이에 따른 응력확대계수 값을 구하여 균열이 디스크의 거동에 미치는 영향에 대해 연구하였다.

2. 이론적 배경

속도항을 포함한 열전달 지배 방정식을 Fourier 변환을 이용하여 frequency 영역에서의 방정식으로 변환 하여 3 차원 모델을 2 차원 모델로 바꾼다.⁽⁴⁾ 이러한 2 차원 모델을 유한요소방법을 이용하여 온도와 응력에 대한 해를 구한 후 각 frequency 에서의 해를 중첩하고 이를 Inverse Fourier 변환을 통해 3 차원에서의 해를 구할 수 있다. 이를 통해 온도 해석에서는 756 자유도 문제를 21 자유도 문제로 풀 수 있었으며 응력해석에서는 2268 자유도 문제를 126 자유도 문제로 해결할 수 있었다.

Fig.1 은 전체 해석단계를 도식적으로 나타낸 그림이다.

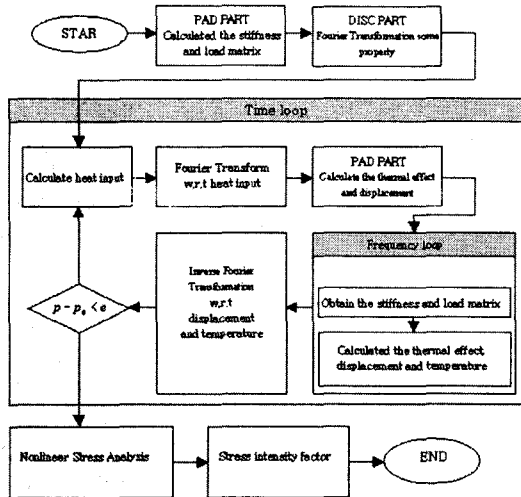


Fig. 1 Flow chart for thermoelastic analysis by using FFT-FEM method

2.1 모델과 경계조건

해석에 사용된 디스크는 두께 16 mm, 안지름이 70 mm, 바깥지름이 130 mm이며 Fig.2 와 같다. 해석에 사용된 유한요소모델은 20 절점 솔리드 요소를 이용하였으며 2664 개의 절점과 432 개의 요소로 이루어져있다. 이 디스크의 회전속도는 2000rpm

이며 브레이크 작동 하중은 패드압력 1.7 MPa 의 크기로 1.5 초 간격으로 step function 의 형태로 가하였다. 브레이크 작동은 125 초 후에 멈추게 되며 이후에는 마찰압력 없이 대류현상에 의해 상온 까지 냉각된다. Table.1 은 해석에 사용된 디스크의 재질에 대한 물성치를 나타낸다.

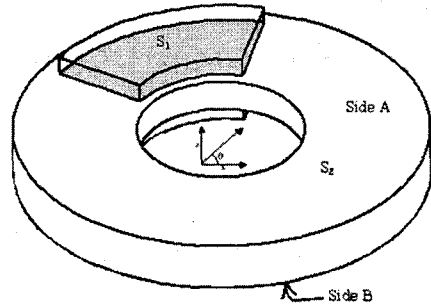


Fig. 2 Three dimensional disk brake model

Table1 Properties of the disk

Density	7228 kg/m ³
Specific heat	419 J/kgK
Conductivity	54 W/mK
Modulus of Elasticity	125 Gpa
Poisson ratio	0.25
Coeff. of thermal expansion	12E-6/K
Yield strength	230 MPa

2.2 해석이론과 과정

FFT-FEM 은 N 차원 모델을 θ 에 대해서 푸리에 변환을 하여 모델을 N-1 차원으로 변환한 후 각 주파수에 대해 해를 구한 후 역 푸리에 변환을 하여 N 차원 모델에 대한 해를 구하는 방법이다. 이 방법의 장점은 fast Fourier transform 의 알고리즘 특성에 따라 곱의 계산과정이 합의 형태로 바뀌므로 계산 수행 시간이 매우 많이 감소되며 특이성 문제가 해소된다는 데에 있다.

앞서 수행된 열 전달 해석을 통해 얻어진 온도 분포 이력을 열 하중조건으로 하여 열 응력을 계산한다. 불균일한 온도분포에 따라 발생하는 팽창률의 차이로 인해 브레이크 작동 과정에는 열 응력이 발생하고 실온으로 냉각이 되면 잔류응력으로 남게 되어 영구변형을 일으키게 된다. 본 연구에서는 von Mises 항복조건에 따라 소성변형이 일어나는 것으로 하여 해석을 수행하였고 변형을 경화 조건은 Perfect plasticity theory 를 적용하였다.

이와 같은 방법으로 산출된 열응력을 근거로 하여 디스크 표면에서의 인장 응력 분포가 200 Mpa 을 넘어서는 영역에서 소성 균열이 일어날

것으로 예측을 하여 인장응력이 최대로 걸리는 step 에서 최대치를 갖는 절점 주위의 각 절점의 응력 값을 내분하여 균열의 크기를 결정한다. 여기서 결정된 균열의 폭과 깊이, 그리고 각 시간 별 인장 응력 값을 이용하여 균열 끝단에서의 응력확대계수를 구하며⁽⁵⁾ 이를 통해 디스크의 균열 거동을 알아본다.

3. 해석 결과

3.1 안정 상태

Fig.3 는 브레이크 작동 초기의 안정적인 상태에서의 온도 분포를 나타내며 Fig.4 은 이때의 열응력 분포를 나타낸 것이다.

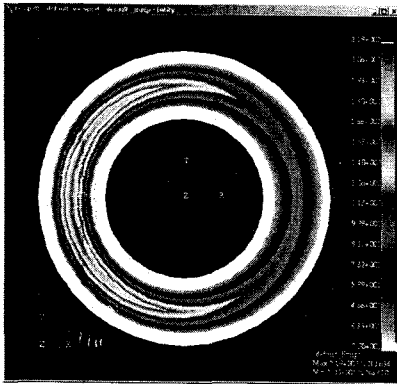


Fig. 3 Temperature distribution at 5 sec

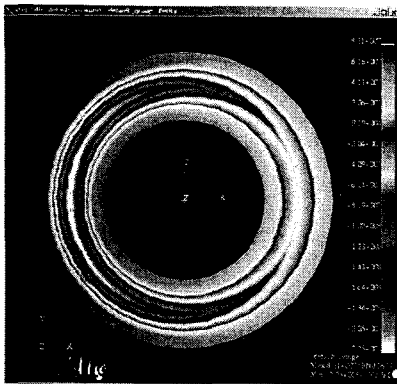


Fig. 4 Stress distribution at 5 sec

3.2 초기 불안정 상태

Fig.5 는 브레이크 작동이 시작되기 125 초 후의 온도 분포를 나타내며 Fig.6 은 이때의 열응력 분

포를 나타낸 것이다. 초기 불안정 상태로서 부분적인 Hot spot 이 나타나기 시작한다.

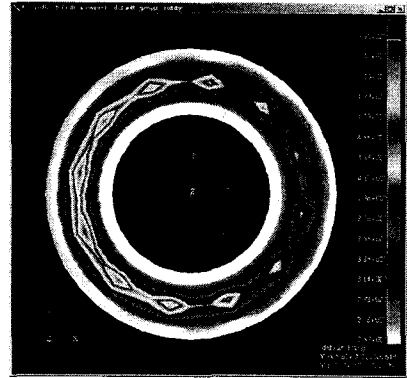


Fig. 5 Temperature distribution at 125 sec

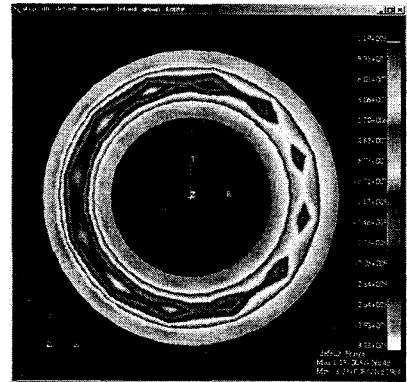


Fig. 6 Stress distribution at 125 sec

3.3 불안정 상태 1

Fig.7 는 브레이크 작동이 시작되기 150 초 후의 온도 분포를 나타내며 Fig.8 은 이때의 열응력 분포를 나타낸 것이다. 이 단계에서 인장응력은 최고조에 달하며 열균열의 크기를 결정하는 단계로 잡은 시점이다. Hot spot 이 전체 디스크 표면에 걸쳐서 뚜렷하게 나타나는 것을 볼 수 있다.

Fig.9 은 이 단계에서 최대 인장응력이 걸리는 부분의 단면에서의 열응력 분포를 나타내는 것으로 이 부분에서 최대 응력이 작용하는 절점의 주위 절점에서의 응력값과 그 거리를 기준으로 균열의 크기를 결정하는데 필요한 데이터를 산출한 결과 균열의 크기는 길이 6 mm, 깊이는 2 mm로 계산 되었으며 이 때의 균열부분에서의 응력확대계수는 13.1MPa m^{1/2}이다.

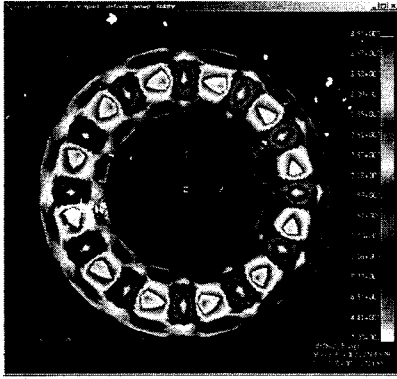


Fig. 7 Temperature distribution at 150 sec

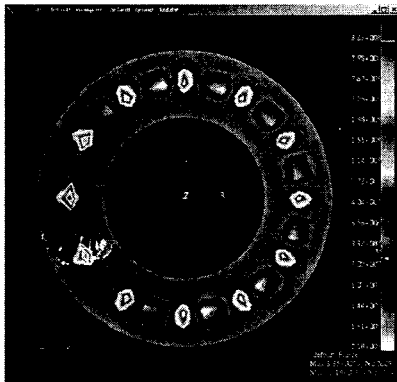


Fig. 8 Stress distribution at 150 sec

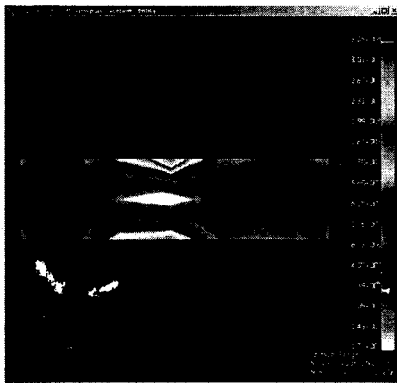


Fig. 9 Stress distribution at the section highest tensile stress applied

3.4 불안정 상태 2

Fig.10 는 브레이크 작동이 시작된지 170 초 후의 온도 분포를 나타내며 Fig.11 은 이때의 열응력

분포를 나타낸 것이다. 이때의 응력확대계수는 $5.3\text{MPa m}^{1/2}$ 이다

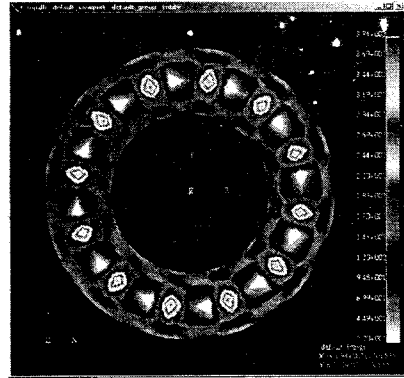


Fig. 10 Temperature distribution at 170 sec

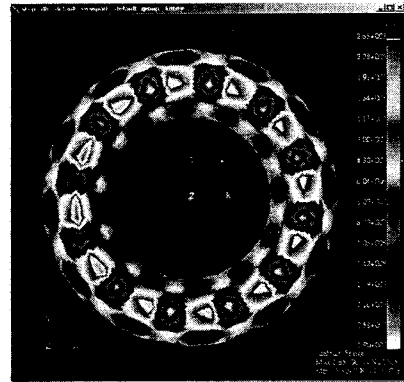


Fig. 11 Stress distribution at 170 sec

3.5 냉각 후

Fig.12 는 브레이크 작동이 끝난 후 완전히 상온으로 냉각된 상태에서의 잔류응력 분포를 나타낸다. 이때의 응력확대계수는 $0.8\text{MPa m}^{1/2}$ 이다

Fig. 13 는 균열부에서의 응력확대계수의 크기를 시간에 따라 나타낸 그래프이다.

참고문헌

- (1) Carslaw, H. S., and Jaeger, J. C., *Conduction of Heat in Solid*, 2nd Edition., Clarendon Press, Oxford, 1959.
- (2) Ling, F. E., *Surface Mechanics*, Wiley, New York, 1973.
- (3) Floquet, A., and Dubourg, M. C., "Nonaxisymmetric Effects for Three-Dimensional Analysis of a Brake," *ASME Journal of Tribology*, Vol.116, 1994, pp 401 ~ 407.
- (4) 조중두, 안수익, "FFT-FEM 을 이용한 윤활 기구에서 표면온도에 관한 연구", *윤활학회지*, 2 월 호, 2000.
- (5) Norman E. Dowling, *Mechanical Behavior of Materials*, 2nd Edition, Prentice Hall Internationalk, INC.,1999

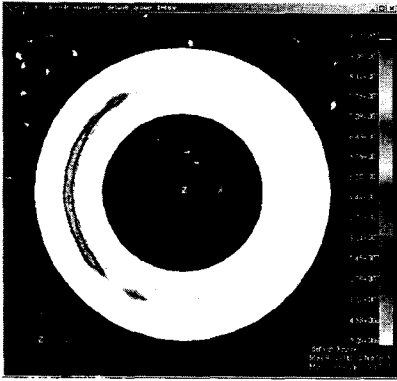


Fig. 12 Residual stress distribution

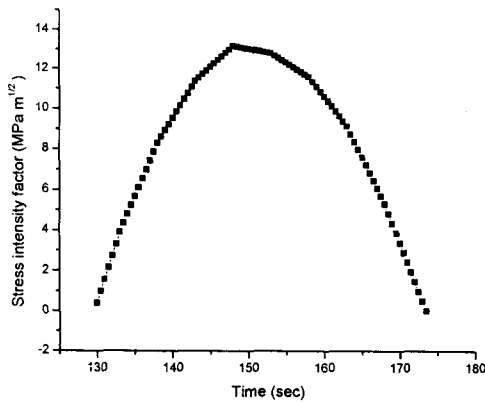


Fig. 13 Stress intensity factor history

4. 결론

FFT-FEM 방법을 이용하여 3 차원의 모델에 대한 비정상 열문제를 풀 수 있었다

1 번 결과에서 얻은 온도 분포를 이용하여 상용 패키지인 ABAQUS 에서 탄소성 문제를 해결하였으며 이는 접촉문제가 포함된 열탄소성 문제를 일반적인 상용패키지로 푸는 것에 비해 많은 시간과 비용을 줄일 수 있었다.

열응력해 결해 발생되는 디스크 표면 잔열기구를 정의하고 시간에 따른 응력확대계수를 정성적으로 구할 수 있었다.