

## 등가상수를 이용한 벤트레이트 디스크의 축대칭 온도 해석

여 태 인\*

울산대학교 기계·자동차공학부

### Axisymmetric Temperature Analysis of Ventilated Disk using Equivalent Parameters

Taein Yeo\*

*\*School of Mechanical and Automotive Engineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea*

*(Received 6 August 2002 / Accepted 29 October 2002)*

**Abstract** : In automotive brake systems, the frictional heat generated can cause high temperature at the interface of rotor and pad which may deteriorate the material properties of the sliding parts and can result in brake fade. Conventionally, a pie-shaped 3-dimensional model is adopted to calculate temperature of ventilated disk using finite element method. To overcome the difficulties in preparing 3D finite element model and reduce the computational time required, the ventilated rotor is to be analyzed, in this study, as an axisymmetric finite element model in which, taking into considerations the effects of cooling passages, a homogenization technique is used to obtain the equivalent thermal properties and boundary conditions for the elements placed at the vent holes. Numerical tests show the proposed procedure can be successfully applied in practice, replacing 3-dimensional thermal analysis of ventilated disk.

**Key words** : Disk brake(디스크 브레이크), Wear life(마모수명), Friction material(마찰재), Axisymmetric finite element(축대칭 유한요소), Thermal stress(열응력), Judder(저더)

#### 1. 서론

자동차용 브레이크의 디스크와 마찰재 사이에서 발생하는 마찰열은 표면 온도 상승을 가져와 재료 특성을 저하시키고 페이드(fade) 등의 문제를 일으킨다. 또한 마찰면에서의 높은 온도 구배는 과도한 열응력을 발생시켜 장기간의 사용 후에 디스크 표면 균열을 발생시키는 한편, 로터(rotor) 전체의 불균일한 온도 분포는 디스크가 바깥쪽(outboard)으로 변형하여 디스크 축에 대하여 수직성을 잃게 된다. 이러한 코닝(conning) 현상은 RTV(rotor thickness variation)를 초래하고 이는 곧 저더(judder)로 연결

된다.<sup>1)</sup>

따라서 브레이크 시스템의 초기 설계 단계에서 디스크의 온도 예측은 매우 중요하다. 솔리드 로터(solid rotor)인 경우 형상이 축대칭이므로, 열의 인입, 발산에 대하여 원주 방향으로 평균한 값을 경계 조건으로 사용하면 축대칭 해석을 사용할 수 있다. 한편, 최근에 주로 사용되고있는 벤트레이트 디스크(ventilated disk)의 경우에는 Fig. 1(a)에 보여진 바와 같이, 로터의 회전에 의해 벤트 홀(vent hole)을 통과하는 반경 방향의 공기 흐름을 이용하여 방열 효과를 증대시키고 있다. 따라서 벤트레이트 디스크 브레이크는 냉각 특성이 우수하여 고성능 자동차의 전후륜, 일반 자동차의 전륜등에 사용되고 있다. 이 경우 벤트 홀과 벽의 존재로 인해 축대칭

\*To whom correspondence should be addressed.  
ytn@mail.ulsan.ac.kr

해석이 불가하여, Fig. 1(b)와 같이 파이(pie) 모양의 3차원 유한요소 모델을 사용하여 각각의 대칭면에 적절한 경계조건을 부가한다.<sup>2)</sup>

그러나, 유한요소법에 의한 과도응답 해석시 수치적인 불안정을 피하기 위해 시간 증분이 충분히 작아야 하므로,<sup>3)</sup> 페이드 해석과 같이 상당히 큰 제동기간 동안의 해석에 3차원 모델의 사용은 매우 많은 계산량을 필요로 한다.

3차원 온도분포를 구하기 위해, 최근에는 FFT-FEM법을 사용하여 원주방향으로 푸리에 변환(Fourier transform)된 열전도 방정식에 대하여, 2차원 유한요소 해석을 하여 이 결과를 역변환하는 방법이 연구되고 있다.<sup>4)</sup> 이때, 벤트 홀에서의 냉각을 고려하기 위해 대류 열전달 계수의 평균값을 사용하거나,<sup>5)</sup> 매우 복잡한 방법인 Layered FFT-FEM을 사용하여야 한다.<sup>6)</sup> 그러나, 이 방법은 상용 프로그램에서는 지원하지 않으므로, 마찰재 수명 해석이나 페이드 해석 등 디스크 표면의 원주 방향 온도 분포만 필요한 경우에 사용된다.<sup>5)</sup>

따라서 본 연구에서는 벤티레이티드 디스크의 벤

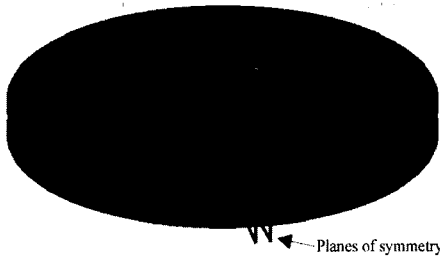


Fig. 1 (a) Finite element model of a ventilated brake disk

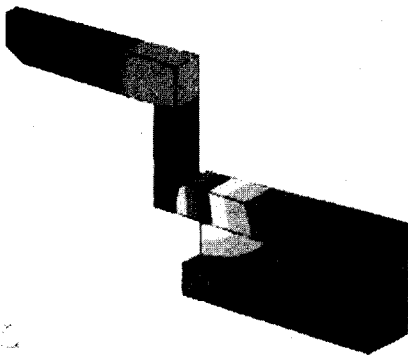


Fig. 1 (b) Thermal analysis with pie-shaped 3 dimensional model

트 홀의 효과를 고려하기 위해, 이 부분의 열적 물성치 및 경계조건에 대하여 등가 값을 도입함으로써 상용 프로그램을 이용한 축대칭 유한요소를 사용하는 방법을 개발하여, 설계 단계에서 온도 해석에 필요로 하는 시간과 비용을 줄이고자 하였다.

## 2. 디스크의 온도해석

### 2.1 등가 대류 열전달 계수

차량의 제동시 브레이크 시스템의 디스크와 패드 사이의 마찰면에서 발생하는 열의 일부는 패드로 전달되나, 대부분은 디스크로 유입된다. 디스크에 유입된 열의 일부는 복사에 의해 주위로 방출되거나 허브로 전달되기도 하지만, 대부분은 마찰면이나 벤트 홀에서 대류에 의해 주위 공기로 방출된다. 따라서, 온도 해석에 있어서 대류 열전달 계수의 값은 매우 중요하다. 그러나 그들을 정확히 측정하기는 매우 어렵고, 또한 많은 비용을 필요로 하므로, 최근에는 수치 해석적인 방법에 의해 열유동 해석을 하여 열 전달 계수를 구하는 법이 연구되고 있다.

본 연구에서는 참고 문헌<sup>7,8)</sup>에 발표된 열전달 계수에 대한 실험식을 사용하였다. Fig. 2(a)에 편의상 로터의 디스크 부분만 나타내었으며, 벤트 홀 및 디스크의 내/외경에서의 열전달 계수는 Fig. 2(b)의 축대칭 모델에서와 같이 등가 물성치로 변환하여 사용하였다.

먼저 마찰면에 수직인 벤트 홀의 벽면 즉, Fig. 2(a)에서 수직 벽면에서의 대류 열전달을 고려하기 위해, 본 연구에서는 MSC/NASTRAN의 삼각형 축대칭 요소의 요소면(element face)에서의 대류 열전달 기능을 이용하였다. 즉, 이 곳에서의 대류 열전달 계수  $h_v$ 는 축대칭 모델의 요소 면에서의 등가 대류 열전달 계수  $h_1^*$ 로 변환될 수 있다. 축대칭 요소 하나에 대하여 그 면적을  $\Delta A$ 이라 표시하면, 축대칭 요소 면에서의 대류에 의한 열손실은 그 요소가 위치한  $2N$ 개의 벤트 홀 벽에서의 열 손실과 같아야 하므로

$$h_1^*(T - T_\infty)\Delta A = h_v(T - T_\infty)(2N\Delta A) \quad (1)$$

이다. 식 (1)에서  $T$ 는 요소면에서의 온도를,  $T_\infty$ 는 벤

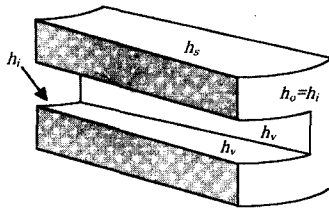


Fig. 2 (a) Convective heat transfer coefficient for 3D model

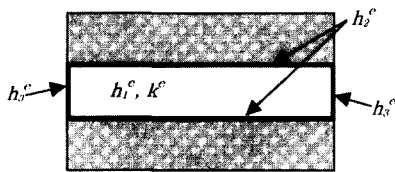


Fig. 2 (b) Equivalent convective heat transfer coefficient for axisymmetric model

트 홀을 지나가는 공기의 온도를, 그리고  $N$ 은 벤트 홀의 개수를 표시한다. 식 (1)에서

$$h_1^c = 2Nh_v \quad (2)$$

이다.

마찰면에 평행한 벤트 홀 벽면, 즉 Fig. 2(a)에서 상하 벽면에서의 대류 열전달 계수  $h_v$ 는 축대칭 모델에서 벤트 홀 상하 가장자리에 위치한 요소 변(element edge)에서의 대류 계수  $h_2^c$ 로 등가시킬 수 있다. 즉,

$$h_2^c (T - T_\infty) (2\pi \bar{r} \Delta r) = h_v (T - T_\infty) (N\phi \bar{r} \Delta r) \quad (3)$$

이다. 식 (3)에서  $\phi$ 는 벤트 홀 하나의 각도를,  $\Delta r$ 은 요소 변의 길이를,  $\bar{r}$ 는 디스크 축에서 요소 변 중심까지의 길이를 표시한다. 식 (3)의 좌변은 축대칭 요소의 변에서의 대류에 의한 열손실을 나타내고, 우변은 그 변이 위치한  $N$ 개의 벤트 홀 벽에서의 열손실을 나타낸다. 식 (3)에서

$$h_2^c = \frac{N\phi h_v}{2\pi} \quad (4)$$

이다.

디스크의 외경과 내경에 위치한 요소 변에서의 열전달 계수  $h_i = h_o$ 의 등가 물성치  $h_3^c$ 도 마찬가지로 다음의 식에서 구할 수 있다.

$$h_3^c (T - T_\infty) (2\pi r_{i,o} \Delta z) = h_i (T - T_\infty) \{ (2\pi - N\phi) r_{i,o} \Delta z \} \quad (5)$$

따라서

$$h_3^c = \frac{(2\pi - N\phi) h_i}{2\pi} \quad (6)$$

이다. 식 (5)에서  $r_{i,o}$ 은 디스크의 내/외경을,  $\Delta z$ 는 그곳에 위치한 요소 변의 길이를 표시한다.

이상과 같이 등가 열전달 계수는 벤트 홀의 크기 등 기하학적 형상에 따라 변하는데, 식 (6)이 적용되는 내외경에서의 방열량은 식 (2), (3)이 적용되는 벤트 홀 벽에서의 방열량에 비해 매우 작으므로, 냉각 특성을 좋게 하기 위해서 벤트 홀 벽의 면적과 공기 속도를 동시에 증가시키는 것이 효과적이다. 이를 위해 최근에는 벤트 홀의 형상을 나선형으로 만들기도 한다.

### 2.2 등가 열전도 계수

벤트 홀에 위치한 요소에 대하여는 실제 열전도 계수  $k$ 를 등가 열전도계수  $k^e$ 로 변환하여 사용한다. 즉, 축대칭 요소에서의 열전도량이 실제 디스크의 벤트 벽을 통한 열전도량과 같아야 하므로

$$k^e = \frac{(2\pi - N\phi) k}{2\pi} \quad (7)$$

이다.

### 3. 결과

제안된 방법의 타당성을 검증하기 위해 국산 대형 승용차의 브레이크 디스크에 대하여 수치해석을 하였다. Table 1은 해석에 사용된 디스크의 제원을 나타내고, Fig. 3은 축대칭 해석에 사용된 유한 요소 모델을 나타낸다.

Table 1 Geometrical dimensions and thermal properties of rotor used in the analysis

|                              |            |  |        |
|------------------------------|------------|--|--------|
| Outer/Inner rotor radius, mm | 128.0/80.0 | Thermal conductivity, W/m <sup>2</sup> C | 48.5   |
| Rotor thickness, mm          | 24.0       | Specific heat, Nm/Kg <sup>2</sup> C      | 419.0  |
| Vent hole size, mm           | 10.0 × 5.0 | Density, kg/m <sup>3</sup>               | 7228.0 |

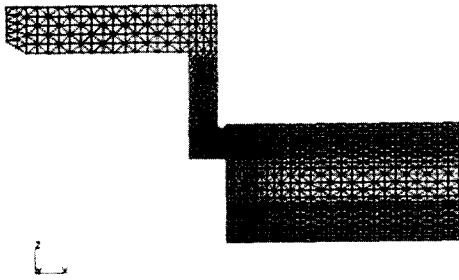


Fig. 3 Finite element model for axisymmetric analysis of brake disk

### 3.1 단일제동

디스크 온도 해석에 사용되는 주행 모우드의 하나인 단일 제동의 경우에는, 제동 시간이 짧아 마찰 열이 벤트 홀에 거의 전달되지 못한다.<sup>8)</sup> 따라서, 표면 최고 온도는 벤트 홀의 영향을 거의 받지 않기 때문에 등가 축대칭 해석과 3차원 해석은 동일한 결과를 가져온다. 그러므로, 본 연구에서는 단일 제동 모우드에서의 해석은 생략하였다.

### 3.2 연속 제동

그러나 반복제동이나 연속 제동의 경우 디스크 전체의 온도 상승에 의해 벤트 홀에서의 냉각 효과가 매우 커진다. 따라서 제안된 방법의 타당성 및 유용성 검토를 위해서 본 연구에서는 차량이 5°의 경사를 일정 속도 50kph로 내려가고 있는 연속 제동 모우드를 선택하였다.

Fig. 4는 정상 상태 온도해석을 나타낸다. Fig. 4(a)는 파이 모양의 모델을 이용한 3차원 해석 결과의 대칭 단면에서의 온도 분포이다. Fig. 4(b)는 등가 물성치를 사용한 축대칭 해석 결과를, Fig. 4(c)는 비교를 위해 등가 물성치를 사용하지 않은 축대칭 해석 결과를 나타낸다. Fig. 4(a, b)에 나타난 바와 같이, 축대칭 해석의 특성으로 인해 벤트 홀의 온도 분포는 두 방법에 따라 약간의 차이가 있으나, 마찰면, 햇(hat), 언더컷(undercut) 등 디스크의 성능에 온도 분포가 결정적인 역할을 하는 곳에서는 거의 동일함을 알 수 있다. 그러나 Fig. 4(a, c)에 나타난 바와 같이, 등가 물성치를 사용하지 않은 축대칭 해석 결과는 3차원 해석과 매우 다른 결과를 준다는 것을 알 수 있다.

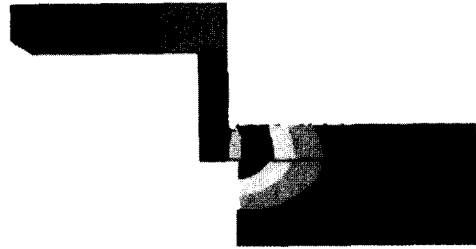


Fig. 4 (a) Temperature distribution from axisymmetric analysis of brake disk

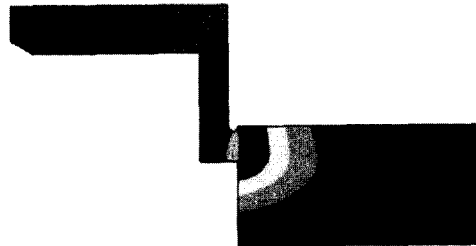


Fig. 4 (b) Temperature distribution from the proposed method

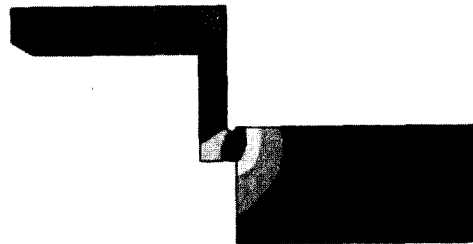


Fig. 4 (c) Temperature distribution from 2D analysis w/o using equivalent parameters

Fig. 5(a)에서는 마찰 표면에서의 반경 방향( $r$ -dir.)의 온도 분포를, Fig. 5(b)에서는  $r=104mm$  인 곳에서 깊이 방향( $z$ -dir.)의 온도 분포를 각각의 해석 방법에 따라 비교하고 있다. 3차원 해석인 경우, 온도는 원주 방향의 산술 평균을 나타낸다. 이 그림들에서 보여진 바와 같이 등가 물성치를 사용한 축대칭 해석은 3차원 온도 해석 결과와 거의 일치하지만, 그렇지 않은 축대칭 해석은 실제 온도를 예측하는데 무리가 있다는 것을 보여준다. 등가 물성치를 사용한 축대칭 해석 방법의 유용성은 Fig. 6(a,b)와 같이 벤트 홀에서 열의 방출이 상당한 부분을 차지하는 과도 응답 상태의 온도 해석에서는 더욱 명확해진다. Fig. 6(a,b)는 제동 시작 후  $t=60sec.$  때의 온도

등가상수를 이용한 벤트레이트 디스크의 축대칭 온도 해석

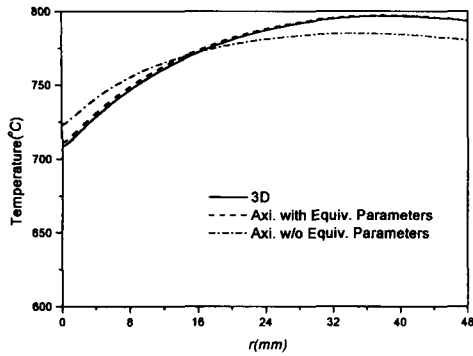


Fig. 5 (a) Steady state temperature variation in radial direction at the disk surface

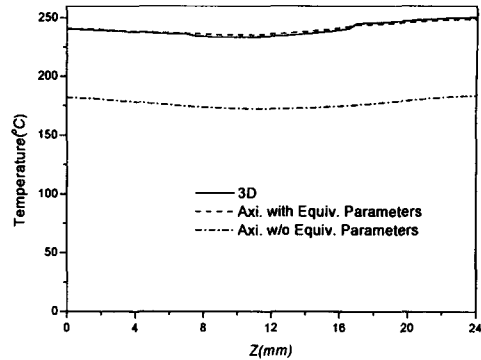


Fig. 6 (b) Transient temperature variation in axial direction

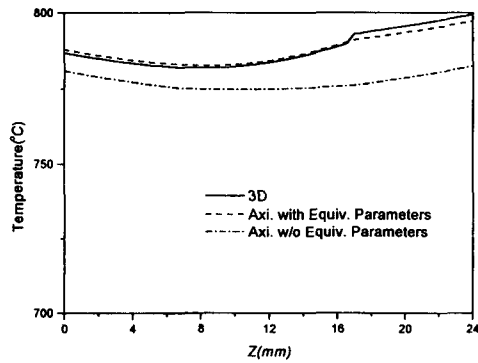


Fig. 5 (b) Steady state temperature variation in axial direction

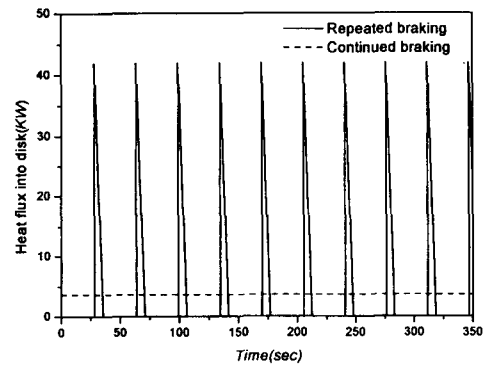


Fig. 7 Heat absorbed by disk in fade and drag mode

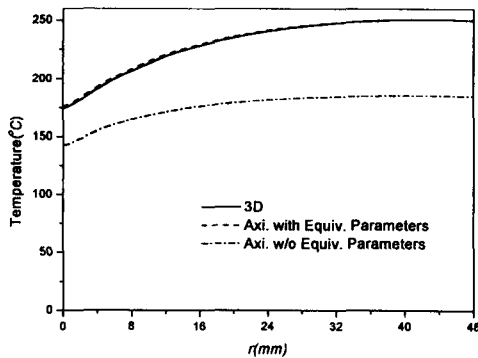


Fig. 6 (a) Transient temperature variation in radial direction at the disk surface

해석 결과이다. 실제 물성치를 사용한 축대칭 해석은 표면 온도에서 최대 30%의 오차를 가지고 있지만, 본 연구에서 제안된 방법은 5% 이내의 오차를 가져온다는 것을 알 수 있다.

3.3 반복 제동

본 연구에서는 0.1g로 100kph까지 가속하여 0.4g로 정지하는 10회의 제동으로 구성된 반복 제동 모우드를 사용하였으며, Fig. 7은 디스크로 유입되는 마찰열을, Fig. 8은 세 방법을 사용하였을 때의 디스크 표면 온도 해석 결과를 보여준다. 그림에서

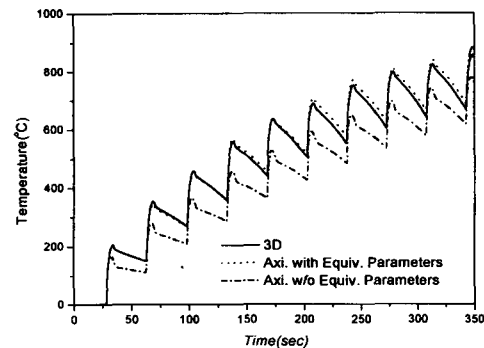


Fig. 8 Temperature at the disk surface in fade mode

보여진 바와 같이 제동이 반복되는 긴 시간의 과도 온도 해석에도, 등가 상수를 도입한 축대칭 온도 해석은 기존의 3차원 해석을 대체할 수 있다는 것을 보여준다.

#### 4. 결 론

벤티레이티드 디스크의 온도 해석을 위해 3차원 모델의 사용시 필요로 하는 모델링 및 계산 시간의 단축을 위해, 벤트 홀에서 열적인 등가 파라메타를 사용한 축대칭 해석 방법을 제시하고 그 가능성을 검토하였다.

상용 프로그램을 사용한 수치해석 결과, 제안된 방법은 3차원 유한요소 해석을 성공적으로 대체할 수 있다는 것을 보여주고 있으며, 이 방법은 표면 온도 해석, 페이드 해석, 마찰재 수명 해석 등과 같이 디스크의 과도 온도 해석에 매우 유용하게 사용될 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 울산대학교 RRC의 부분 지원에 의한 것입니다.

#### References

1) J. D. Fieldhouse, C. Beveridge, "An Experimental

Investigation of Hot Judder," Proceedings of the 19th Annual Brake Colloquium & Exhibition, SAE, pp.85-94, 2001.

2) B. Blot, "Computation of a Thermally Stressed Brake Disc," SAE 890086, 1986.

3) T. J. R. Huges, "The Finite Element Method," Chap. 8, pp.459-479, 1987.

4) A. Floquet, M. C. Dubourg, "Non-axisymmetric Effects for 3D Thermoelastic Analysis of a Brake System," ASME, Journal of Tribology, Vol.116, pp.401-408, 1994.

5) Taein Yeo, "A Study on Wear Life Prediction of Disk Brake Pads," KSAE, Vol.10, No.4, pp.199-205, 2002.

6) A. Floquet, M. C. Dubourg, "Realistic Braking Operation Simulation of Ventilated Disk Brakes," ASME, Journal of Tribology, Vol.118, pp.466-472, 1996.

7) D. C. Sheridan, J. A. Kutchev, F. Samie, "Approaches to the Thermal Modeling of Disc Brakes," SAE 880256, 1988.

8) R. Limpert, Brake Design and Safety, SAE, Chap.3, pp.125-144, 1999.