

# 유한요소법에 의한 드럼 브레이크의 열응력 해석

구병춘\* · 서정원\*\*

## Thermal Stress Analysis of Drums Brakes by Finite Element Method

Byeongchoon Goo, Jungwon Seo

**Key Words:** Commercial Bus(상용 버스), Drum Brake(드럼 브레이크), Interface Element(인터페이스 요소), Finite Element Method (유한요소법)

### Abstract

In the case of axisymmetric thermal analysis of drum brakes, the distribution of frictional heat produced on the interface and temperature difference between mating frictional faces are very interesting problems to computational researchers. In this paper, heat conduction from the interface to the pad and the drum was modeled by using a thin interface element, so artificial division of the generated frictional heat between pad and drum is not necessary. Temperature difference between mating frictional faces is successfully modeled by using the interface element. The influence of some parameters on the thermal stress was checked. The analysis was performed by ABAQUS/Standard code.

#### 기호설명

- $\alpha$  : Thermal expansion coefficient, 1/K
- $\nu$  : Poisson's ratio
- $\rho$  : Density, kg/m<sup>3</sup>
- $c$  : Specific heat capacity, J/kgK
- $E$  : Modulus of elasticity, N/m<sup>2</sup>
- $h$  : Heat transfer coefficient, W/m<sup>2</sup>K
- $k$  : Thermal conductivity, W/mK

### 1. 서론

마찰식 제동시스템의 설계에는 마찰재의 재질, 형상, 냉각조건 등 여러 설계인자가 관련이 있다. 국내의 경우 이러한 여러 인자들을 고려한 설계 기술이 아직 초보적인 단계로 주로 외국의 기술에 의존하고 있는 실정이다. 국내에서는 구병춘<sup>1)</sup>이 드럼을 축대칭으로 모델링하여 유한요소법으로 패드 시험중에 발생하는 브레이크 드럼의

과도상태 열문제를 해석하였고, 박영철 등<sup>2)</sup>은 드럼을 2차원 축대칭으로 모델링하여 유한요소법으로 열응력을 해석하였고, 이계섭 등<sup>3)</sup>은 역시 2차원 축대칭 유한요소 모델링으로 반복제동시의 드럼의 온도분포를 해석하였다. 앞에서 소개한 3편의 연구에서는 마찰재 사이의 접촉에 대한 고려가 없이 주어진 열유속이 입력되는 경우의 연구이다. 접촉을 고려한 연구로는 H. W. Sonn *et al.*<sup>4)</sup>이 항공기용 복합재 디스크 브레이크를 축대칭으로 모델링하여 유한요소법으로 해석하였다. 국외의 연구로는 Newcomb 등<sup>5-6)</sup>이 지난 수십여년간 드럼 브레이크와 디스크 브레이크의 여러 분야에 대해 이론적, 실험적 폭넓은 연구를 하였고, 최근의 연구로는 N. Benseddiq *et al.*<sup>7)</sup>이 디스크와 패드의 마모에 의한 형상의 변화를 고려한 열탄성 접촉해석을 수행하였다.

제동장치 설계에서 마찰재 및 드럼의 성능은 마찰면에서 발생하는 열에 영향을 받는다. 이러한 열 하중을 고려한 해석은 기존에는 많은 가정을 통하여 온도해석 및 열응력 해석을 수행하였다. 그러나 마찰면에서의 마모 등으로 인하여 접촉면에 표면층이 형성되고 이러한 표면층은 패드

\* 한국철도기술연구원 선임연구원

\*\* 한국철도기술연구원 주임연구원

와 드럼사이의 온도 불연속부를 형성한다.

본 연구에서는 상용 버스에 사용되는 드럼 브레이크의 드럼과 패드(라이닝)의 열응력에 미치는 여러 인자들의 영향을 살펴보기 위하여 2차원 축대칭 해석을 수행하였다. 마찰면에서의 온도 불연속도 쉽게 예측하고 마찰열의 분배가 자연스럽게 될 수 있도록 드럼과 라이닝 사이에 인터페이스 요소를 도입하여 해석하였다.

## 2. 마찰면의 온도 불연속 모델링

마찰면사이의 온도 불연속부를 고려한 유한요소법 모델링 기법을 개발하였고 기존의 해석 방법과 비교하였다

### 2.1 드럼만의 모델링

#### 2.1.1 해석조건

적용하는 조건은 다음과 같다.

- 초기속도: 86 km/h, 감속도 : 0.7 g
- 차량무게: 18,000 kgf 초기온도 : 20도
- 해석대상 드럼의 제동에너지 분담률: 28 %

하중조건으로는 접촉면에 제동력에 의해 발생하는 열유속(heat flux)을 주었다. 드럼과 패드의 물성치는 Table 1과 같다.

Table 1 Used values of parameters

Properties	Drum	Pad
E (N/m <sup>2</sup> )	209E9	300E6
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	7800	2250
$\alpha$ (1/K)	11.0E-6	14.0E-6
$\kappa$ (W/mK)	48	0.9
c (W/kgK)	452	1200
h (W/m <sup>2</sup> K)	Inner : 5, Outer : 40	

#### 2.1.2 해석결과

기존의 방법인 드럼만을 모델링하였고 발생하는 열은 제동에너지의 90%가 드럼으로 전달되는 것으로 하여 모델링하였다. Fig. 1은 제동 후 3.48 초 후 변형 전후의 형상을 보여준다. 그림과 같이 S자 형태로 변형이 됨을 알 수 있다

Fig. 2는 열응력이 가장 크게 발생하는 부위인 접촉면 끝단부위에서 13mm 떨어진 곳에서 드럼의 두께 방향에 대해 시간에 따른 온도변화를 나타내고 있다. 그림과 같이 제동 후 0.2 초에서는 표면의 온도는 125℃까지 증가하였으며 드럼 끝단 면까지는 열전달이 되지 않은 상태이다. 0.8초

에서는 드럼끝단에서의 온도가 약간 증가함을 알 수 있으며 제동이 끝나는 시점인 3.48초에서는 드럼 끝단 온도가 200℃까지 증가하였다.

이러한 모델은 발생하는 열량을 임의로 분배 해주어야 하고 패드부분의 온도변화를 예측할 수 없는 단점이 있다

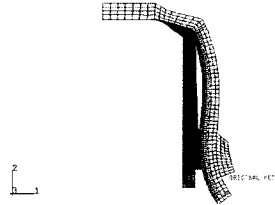


Fig. 1 Deformation of drum

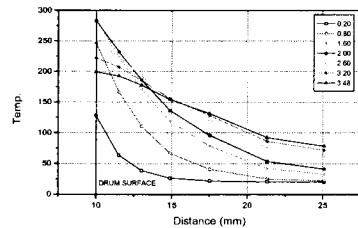


Fig. 2 Drum temperature versus time

### 2.2 인터페이스요소를 이용한 모델링

#### 2.2.1 해석모델

드럼 및 패드에 발생하는 온도변화를 살펴보기 위하여 드럼과 패드사이 인터페이스 요소를 사용하여 모델링하였다. Fig. 3은 해석에 사용된 모델이다. 그림과 같이 드럼, 패드 및 슈를 모델링 하였다. 인터페이스 요소는 두께 0.5mm로 드럼과 라이닝 사이에 발생하는 마모입자, 산화막 등을 나타내며 인터페이스 요소에 사용된 탄성계수는 1E-10 N/m<sup>2</sup>이다

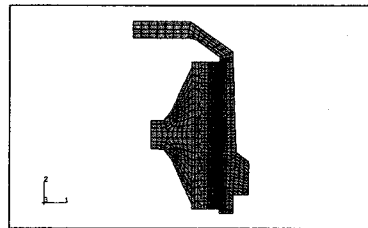


Fig. 3 Axisymmetrical model

### 2.2.2 해석결과

인터페이스 요소의 물성치는 측정하기 곤란하므로 요소의 물성치 변화에 따른 온도변화의 영향을 살펴보았다. Fig. 4는 제동후 3.48초 후의 변형모습을 보여주고 있으며 드럼의 경우에는 S자 형태로 변형이 되었고 패드의 경우에는 양끝단이 바깥쪽으로 변형되었다

Fig. 5는 인터페이스 요소의 물성치를 패드의 물성치와 같게 하였을 경우의 온도분포이다. 그림과 같이 인터페이스 요소에 급격한 온도 불연속부분이 형성되었으며 제동후 1.4초에서는 패드 부분이 1075℃까지 상승하고 있으며 이때 드럼의 온도는 170℃가 발생하였다.

열 전달은 패드부분의 경우 열전달계수가 작기 때문에 접촉면에서 5mm까지 전달되었으며 드럼은 드럼두께(15mm) 전반에 걸쳐 열이 전달되었음을 알 수 있다. Fig. 6은 인터페이스 요소 중에서  $k$ (열전달계수)값이 1.8일 경우로서 1.4초후에 745.7℃,  $k=2.7$ 일 경우에는 602℃까지 온도가 올라갔다. 인터페이스 요소의 열전달 값이 커짐에 따라 패드에서의 최고온도는 낮아지며 드럼의 마찰면에서의 온도는 상승하였다. 따라서 인터페이스 요소의 물성치에 따라서 온도변화의 차이가 발생함을 알 수 있다.

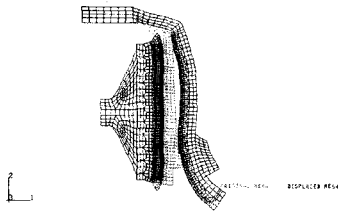


Fig. 4 Deformation(Time=3.48)

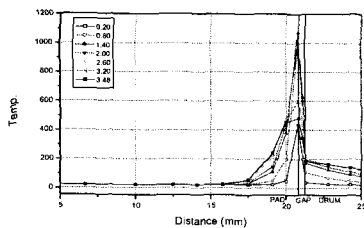


Fig. 5 Temperature distribution vs time ( $k=0.9$ )

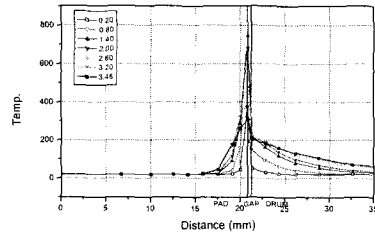


Fig. 6 Temperature distribution vs. time ( $k=1.8$ )

### 2.3 인터페이스요소의 고찰

기존 방법인 드럼만을 모델링하여 해석한 결과와 인터페이스요소를 이용하여 해석한 결과를 비교 고찰하면 다음과 같다.

Fig. 7은 제동후 0.8초후의 두 모델의 길이방향에 따른 온도분포를 나타낸 것이다. 드럼만을 모델링 하였을 경우는 드럼표면의 온도가 280℃이고 인터페이스요소를 이용한 경우에는 250℃가 발생하였다. 이러한 결과는 패드와 인터페이스요소 사이에 유입된 열량이 인터페이스요소를 통하여 드럼방향으로 전달이 잘 되지 않기 때문에 인터페이스 요소를 사용할 경우에는 온도가 낮다.

Fig. 8은 두 가지의 모델의 드럼표면에서의 시간에 따른 온도변화를 나타내고 있다. 그림과 같이 드럼만의 모델은 제동시간의 중간 부분인 1.8초 후에 최대온도가 약 280℃가 발생하였고, 인터페이스 요소를 사용할 경우에는 제동시간의 중간에서 약간 증가한 시간인 2.1초 후에 최대온도가 250℃가 발생하였다.

인터페이스 모델의 경우에는 마찰면의 불연속부를 잘 설명하고 있으나 기존의 방법보다 드럼에서의 온도를 작게 평가하므로 실험을 통하여 검증이 필요하다. 인터페이스 모델을 사용할 경우에는 인터페이스요소의 물성치를 잘 유추하여 사용하여야 한다.

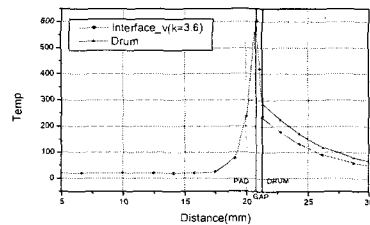


Fig. 7 Temp. distribution of two model( $t=0.8$ )

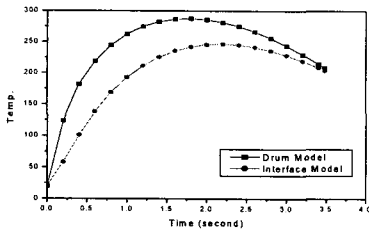


Fig. 8 Temperature distribution vs. time

### 3. 패드 물성치 변화에 따른 온도 및 열응력 분포

#### 3.1 해석조건

드럼 및 패드로 유입되는 열의 분담비는 식(1)의  $\beta$ (드럼으로 유입되는 양)로 표현된다.<sup>6)</sup>

$$\frac{1}{\beta} = 1 + \frac{A_1(v_1)^{0.5}}{A_2(v_2)^{0.5}} \quad (1)$$

여기서,  $v_i = \rho_i c_i k_i$  ( $i=1$ 이면 패드,  $2$ 이면 드럼)

아래의 해석은 열이 패드와 인터페이스의 경계면에서 발생하는 경우이며 해석조건은 Table 2와 같다.

Table 2 Used values of parameters

case	$\beta$ (%)	$\rho_1 c_1 k_1$ $\times 10^3$	$\frac{\rho_1 c_1 k_1}{\rho_2 c_2 k_2}$	$k_1$	$\rho_1$	$c_1$
a1	89.3	2,430	0.0144	0.9	2,250	1,200
a2	71.4	27,000	0.160	10	2,250	1,200
a3	63.9	54,000	0.320	20	2,250	1,200
a4	59.3	81,000	0.470	30	2,250	1,200
a5	55.6	108,000	0.638	40	2,250	1,200
b1	89.3	2,430	0.0144	0.9	2,250	1,200
b2	71.4	27,000	0.160	0.9	25,000	1,200
b3	63.9	54,000	0.320	0.9	50,000	1,200
b4	59.3	81,000	0.470	0.9	75,000	1,200
b5	55.6	108,000	0.638	0.9	100,000	1,200
c1	89.3	2,430	0.0144	0.9	2,250	1,200
c2	71.4	27,000	0.160	0.9	2,250	13,333
c3	63.9	54,000	0.320	0.9	2,250	26,666
c4	59.3	81,000	0.470	0.9	2,250	39,506
c5	55.6	108,000	0.638	0.9	2,250	53,000

#### 3.2 열 분담비에 따른 온도변화

접촉면에서의 발생열 분담비를 동일하게 하고 열전달계수(Case a), 밀도 (Case b), 비열 (Case c)의 값을 다르게 할 경우의 해석을 수행하였다.

Fig. 9는 분담비가 71.4%일 경우로서 비열의 값이 커질 경우(Case c2)가 가장 낮은 온도가 발생하고 밀도의 값이 커질 경우(Case b2)가 그래프의 중간에 위치하고 있다. 그리고 열전달계수가 커질 경우가 드럼의 온도변화에 가장 작은 영향을 미친다.

온도분포의 경향은 열전달 계수가 커질 경우에 최고온도가 제동후 2.4초 경과 할 시 170.7°C가 발생하였고 비열과 밀도가 커질 경우 최고온도는 제동의 끝난 후인 3.48초에서 132.9°C, 83.64°C가 발생하였다. Fig. 10은 분담비가 0.47인 경우로서 역시 분담비가 증가하므로 드럼의 온도는 낮아지며 전반적인 경향은 분담비가 71.4% 경우와 동일하다.

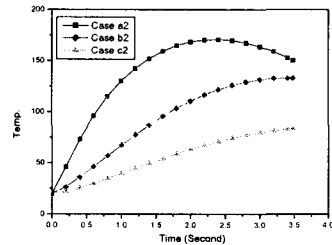


Fig. 9 Temperature distribution ( $v_1/v_2 = 0.16$ )

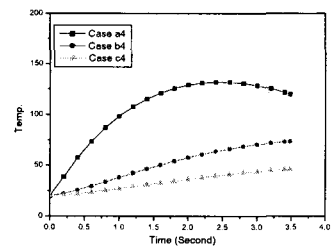


Fig. 10 Temperature distribution ( $v_1/v_2 = 0.47$ )

#### 3.3 물성치 변화에 따른 온도분포

$v_1/v_2$ 의 변화에 따른 드럼의 온도변화를 살펴 보기 위하여 우선  $k$ 를 변화시켰을 때의 드럼의 온도분포는 Fig. 11과 같다. 그림과 같이  $k$ 값이 커짐에 따라 드럼의 온도가 낮아지며 최고온도는  $k=0.9$  일 때 제동후 2.2초후에 247°C이고,  $k=10$ 일 경우는 170°C이다.  $k=20$ 부터 40까지에서의 최고 온도는 2.4초후에 각각 146, 132, 122°C로써  $k$ 값

이 커짐에 따라 최고온도 발생 시기가 길어졌다.

Fig. 12 - 13은 각각의  $k$ 값에 대한 시간에 따른 온도 분포를 나타냈다. Fig. 12는  $k=0.9$  일 경우로서 패드에서의 최고온도는 1.6초후에 746°C 이고 온도는 패드의 15mm까지 전달되었다. Fig. 13은  $k=20$ 인 경우로서 패드의 최고온도는 1.6초후에 338°C가 발생하였고 패드로의 열 전달은 24mm까지 전달되었다.

Fig. 14는 밀도의 변화에 따른 온도분포를 Fig. 15는 비열의 변화에 따른 온도 분포를 보여준다. 그림과 같이 비열이 높아짐에 따라 드럼의 온도가 낮아짐을 알 수 있다. 열전달계수, 비열 및 밀도변화에 따른 드럼의 온도변화는 열전달계수의 변화가 가장 작은 영향을 미침을 알 수 있다.

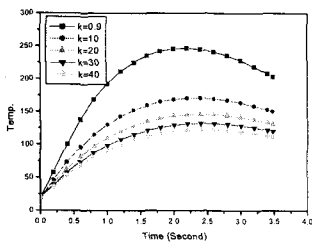


Fig. 11 Drum Temperature vs.  $k$  of the pad

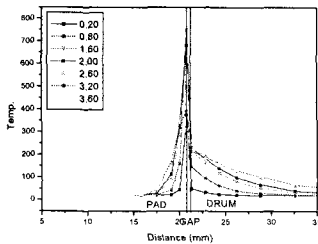


Fig. 12 Temperature distribution ( $k=0.9$ )

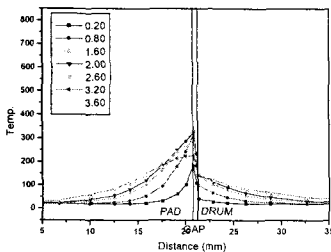


Fig. 13 Temperature distribution ( $k=20$ )

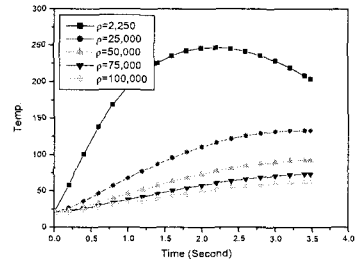


Fig. 14 Drum temperature vs.  $\rho$  of the pad

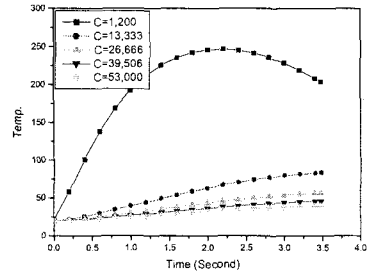


Fig. 15 Drum temperature vs.  $c$  of the pad

#### 3.4 물성치 변화에 따른 열응력분포

물성치 변화에 따른 열응력(Von Mises) 변화를 살펴보면 Fig. 16 ~ 18과 같다. 열응력은 온도의 함수이기 때문에 온도변화의 경향과 일치한다. Fig. 16 ~ 17은 열전달계수  $k$ 의 변화에 따른 드럼 및 패드 접촉면에서의 등가응력의 변화를 나타내고 있으며 그림에서 최대응력은  $k=0.9$ 일 때 2초후에 발생하며 크기는 457MPa이고  $k=10$ 일 경우에는 2.2초후 302MPa이 발생하였다.  $k=20, 30, 40$  일 경우에는 2.2 초후에 각각 252, 224, 204 Mpa이 발생하였다. Fig. 17은 패드의 등가응력 변화를 나타내며 최대응력은 1.4초후에 2.25MPa이 발생하고  $k=10$ 일 경우에는 1.62MPa이 발생한다.  $k=20, 30, 40$  일 경우에는 각각 1.32, 1.15, 1.03 Mpa이 발생하였다.

Fig. 18은 밀도 변화에 따른 결과이며 밀도가 증가함에 따라 등가응력이 낮아졌다. 드럼의 등가응력은 각각 457, 220, 141, 104, 82MPa이 발생하였다. 비열의 변화에 따른 결과는 드럼 및 패드의 등가응력의 전반적인 경향은 밀도변화와 유사하지만 그값은 약간 작게 발생하였다.

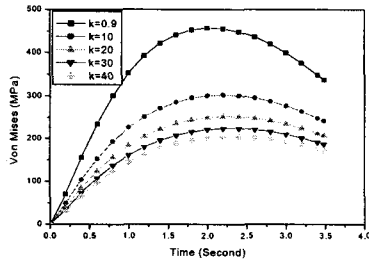


Fig. 16 Von-mises stress of drum vs. k

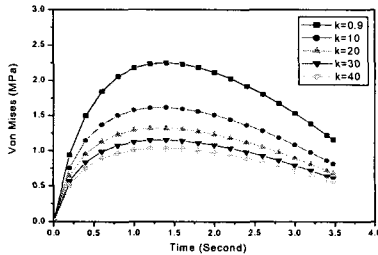


Fig. 17 Von-mises stress of pad vs. k

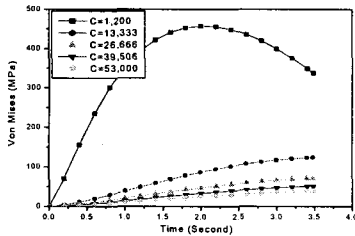


Fig. 18 Von-mises stress of drum vs. c

#### 4. 결론

상용차의 기계식 제동장치인 드럼 브레이크의 온도해석 및 열응력 해석을 수행을 통하여 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 드럼 브레이크의 온도해석을 위해 드럼과 라이닝 사이에 인터페이스 요소를 도입하여 마찰열을 임의로 분할하지 않고도 해석을 수행할 수 있는 간단한 방법을 제시하였다.
- 2) 인터페이스 요소를 사용한 드럼 및 라이닝의 온도분포 예측은 라이닝부의 온도상승 및 마찰면에서의 온도 불연속 현상을 잘 설명해준다.

3) 인터페이스 요소를 사용하였을 경우 인터페이스 요소의 물성치에 따라 마찰면의 온도가 변화한다. 패드표면의 온도는 1075℃에서 602℃까지 변화하며 이때 드럼의 표면은 170℃에서 250℃까지 증가한다.

4) 패드의 물성치 변화에 따른 드럼의 온도변화는 비열 및 밀도의 변화에 따라서는 온도가 크게 변화하지만, 열전달 계수의 변화에 대해서 상대적으로 작게 변화하였다.

#### 후 기

본 연구는 국방부 민간겸용기술사업의 지원으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) 구병춘, 1990, "유한요소법에 의한 페이드 시험 중에 발생하는 브레이크 드럼의 열응력 해석," 쌍용자동차기보 제2호, pp.160~183.
- (2) 박영철, 박동성, 허선철, 1999, "FEA를 이용한 브레이크 드럼의 열응력 해석," 대한기계학회 1999년도 추계학술대회 논문집 A, pp.476~481.
- (3) 이계섭, 국중영, 천인범, 1999, "드럼 브레이크 시스템의 비정상 열전달 해석," SAE No. 99370295, pp.172~181.
- (4) H. W. Sonn, C. G. Kim, C. S. Hong and B. I. Yoon, 1996, "Axisymmetric Analysis of Transient Thermoelastic Behaviors in Composite Brake Disks," J. of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 10, No. 1, pp.69~75.
- (5) R. J. Ashworth, M. El-Sherbiny and T. P. Newcomb, 1977, "Temperature Distributions and Thermal Distortions of Braking Drums," Proc Instn Mech Engrs, Vol 191 19/77, pp.169~176.
- (6) A. J. Day and T. P. Newcomb, 1984, "The dissipation of frictional energy from the interface of an annular disc brake," Proc Instn Mech Engrs, Vol 198D No11, pp.201~209.
- (7) N. Benseddig, D. Weichert, J. Seidermann and M. Minet, 1996, "Optimization of Design of Railway Disc brake Pads," pp.51~61.