

# 고속전철용 디스크 브레이크의 열탄성 마멸에 관한 수치적 연구

황준태 · 김청균

홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

## Numerical study on the Thermoelastic Wear of a Disk Brake for a High-Speed Train

Jun Tae Hwang · Chung Kyun Kim

Tribology Research Center, Hongik University

**Abstract** - This paper presents the results of thermoelastic wear phenomena in ventilated disk brakes for a high-speed train using finite element method. The computed results show that the sinusoidal distortions due to non-uniform distributions of temperature profiles may lead to thermoelastic wears at the rubbing surface. This may decrease the life of a disk brake and produce micro-cracks, noise and squeals between two rubbing surfaces.

**Key Words** : ventilated disk brake, high speed train, thermoelastic wear, frictional heating, thermal cracks, sinusoidal distortion, tribology

### 1. 서론

유럽과 일본을 중심으로 대용량의 초고속 수송과 고출력화 및 안전성을 강조한 새로운 고속전철이 등장하면서 제동 시스템은 더욱 가혹한 상태에서 제동 성능을 확보해야 하고, 더욱이 제동거리를 대폭적으로 단축한 초고속의 제동성능을 갖추어야 한다. 디스크/패드식 브레이크가 가혹한 건조마찰 상태에서 운전되어야 할 경우, 브레이크의 마찰 접촉면에서 발생하는 트라이볼로지 기술에 의한 문제 해결법도 강조되어야 한다.

디스크 브레이크의 마찰면에서 일어나는 마멸, 열크랙 및 열탄성 문제로 인한 열적저더 현상(thermal judder)이 발생하고[1-3], 이로 인한 브레이크의 진동과 스텝 문제[4,5]는 결국 브레이크 시스템의 수명단축으로 이어지고, 중국에는 철도차량 사고로 이어진다.

여기서 필연적으로 수반되는 브레이크 디스크와 패드사이의 비균일 마찰열에 의한 열탄성 불안정성(thermoelastic instability) 해석[6]은 브레이크 설계에서 가장 중요한 문제중의 하나이다. 브레이크가 건조

마찰을 할 경우, 마찰면에서는 국부적인 표면온도가 1,500℃ 이상으로 상승하기 때문에 마찰열 집중현상에 의한 열탄성 마멸이나 열크랙 문제를 해결한다는 것은 고속용 디스크/마찰재 개발시 가장 중요하게 다루어야 할 과제이다.

본 연구는 Fig. 1에서 보여준 것과 같은 디스크와 마찰재의 계면에서 발생된 열탄성 마멸문제(thermoelastic wear)를 비선형 유한요소해석 프로그램 MARC [7]로 해석하여 최적의 디스크와 마찰재를 설계할 수 있는 기본 데이터를 제공하고자 한다.

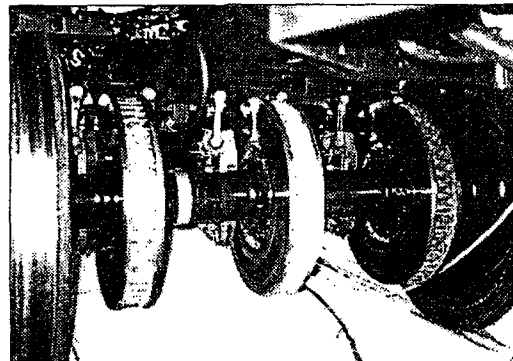


Fig. 1 해석 대상인 TGV-K 디스크 브레이크

## 2. 수치적 해석

### 2-1. 열에너지 및 가정

디스크와 마찰재 패드의 마찰 접촉면 사이에서 발생된 마찰열이 서로 같다고 가정할 경우, 디스크 내부로의 열유동을  $\dot{\gamma}$ 는 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{1 + \left( \frac{\rho_P \cdot C_P \cdot \lambda_P}{\rho_R \cdot C_R \cdot \lambda_R} \right)^{1/2}}$$

여기서,  $\lambda$  = 열전도 계수

$\rho$  = 밀도

$C$  = 비열

첨자  $P$  = 패드

첨자  $R$  = 디스크 로터

디스크와 패드 마찰면 사이의 열탄성 마찰문제를 해석하기 위해 필요한 가정을 요약하면 다음과 같다.

- 디스크와 패드 접촉면에서의 열적특성은 균일하다.
- 열의 유입이나 방열은 마찰면에 수직하게 발생된다.
- 마찰면에서의 복사열 문제는 배제한다.
- 패드는 완전 단열재이고, 철도차량의 모든 운동에너지는 제동시 모두 열에너지로 전환되어 디스크로 전달된다.
- 디스크-패드 사이에서 발생하는 마찰열은 접촉면에서 균일하게 생성된다.

### 2-2. 감속도

기존의 철도차량과는 달리 고속전철은 일정한 감속도를 계속해서 유지할 수 없고, 전철의 주행 속도에 따라 달라지는 감속도를 가지고 제동한다. 최근의 고속전철의 주행속도는 300km/h 이상으로 대단히 높기 때문에 높은 감속도를 가지고 갑자기 제동을 하면 고속전철의 제동시스템 뿐만 아니라 승객의 안전성은 보장할 수 없게 된다. 그래서 제동 작용에 의하여 고속전철의 속도는 감소하고 감속도는 점점 높아나가게 된다. 이와 같은 이유로 고속전철 브레이크 해석에서는 2개의 구간에서 일정한 감속도를 갖는 제동 패턴을 사용하였다. 즉, 300~215km/h의 주행속도 구간에서는 감속도를 0.9m/s<sup>2</sup>로 고정하여 18KN의 압력으로

1차 제동을 하고, 215~0km/h의 주행속도 구간에서는 감속도를 1.2m/s<sup>2</sup>로 고정한 후에 20KN의 압력으로 제동하여 정지시킨다.

### 2-3. 해석 방법

브레이크 마찰면에서 발생하는 온도분포와 열응력 거동에 관련된 적열점, 마멸·크랙 문제는 브레이크가 1~5회의 반복제동을 하였을 경우 마찰면에서의 온도 분포, 열응력 분포, 열변형 거동 등을 비선형 유한요소법으로 해석하였다.

고속전철에서 가장 중요한 안전장치는 브레이크 시스템이기 때문에 보다 가혹한 제동조건을 만들어 충분한 안전성을 확보할 수 있도록 하였다. 즉, 브레이크가 1회 제동으로 고속전철을 정지할 수 있음에도 불구하고, 본 연구에서는 5회 반복제동을 하는 경우에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 즉, 1회 제동 사이클은 75초 동안 제동을 하고, 이후에 약 100초 동안 방열(냉각)하여 디스크를 정상상태로 만드는 과정을 말하며, 5회 제동이란 이러한 과정을 5회 동안 반복하여 해석하였다는 것을 말한다.

고속용 디스크 브레이크에서 발생하는 마찰열에 대한 유한요소해석을 위하여 사용한 디스크 브레이크 재질의 기계적 특성은 Table 1에서, 그리고 해석조건은 Table 2에서 각각 제시하고 있다. 또한, 유한요소 해석에서 필요한 경계조건은 Fig. 2와 같고, 디스크 마찰면에서의 열탄성 거동에 관련된 관찰점 위치는 A~F로 Fig. 3에서 표시하였다.

Table 1 Mechanical and material properties of a disk brake\*

Dimension	Ø 640 × 80t
Elastic modulus, $E$ (N/mm <sup>2</sup> )	$2.15 \times 10^{11}$
Poisson's ratio, $\nu$	0.3
Mass density, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	7,850
Thermal expansion coef., $\alpha$ (mm/mm · K)	$12 \times 10^{-6}$
Thermal conductivity, $k$ (W/m · K)	45
Specific heat, J/kg · K	460
Weight, kg	100
Tension hardness, MPa	1050 ~ 1250
Yield strength, MPa	970

\* Proc. Instn Mech. Engrs, Vol. 209, IMechE, 1995.

Table 2 Simulation data of a disc-spot pad used in the finite element analysis

Simulation Conditions	Values
Number of element	848
Number of node	1131
Element mode	Three-dimensional 8-node isoparametric arbitrary hexahedral
Vehicle axle load, kg	17,000
Wheel diameter, mm	920
Number of disk per a axle	3
Atmospheric temperature, °C	50

\* UIC code 541-3

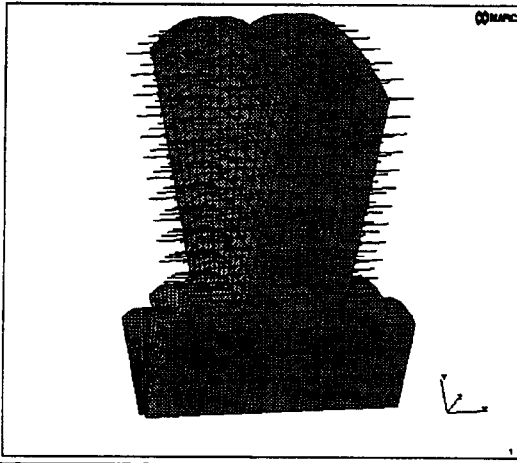


Fig. 2 디스크-패드에서 기계적 압력 및 마찰열 입력 분포

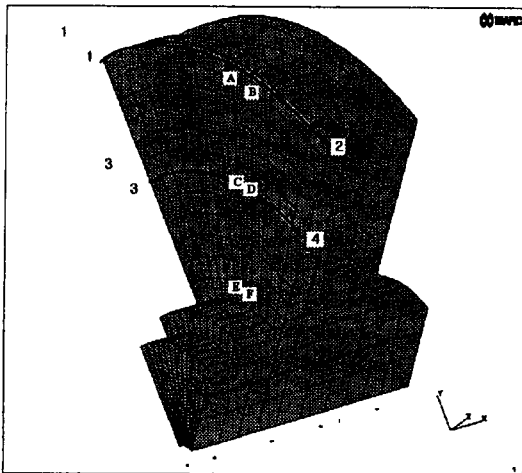


Fig. 3 해석에 사용된 관찰점의 위치 및 방향

### 3. 해석결과 및 토의

브레이크의 제동에 의해 발생된 열에너지는 고속전철의 운동 에너지가 전환된 것으로, 열 에너지 모두가 디스크-점박이식 마찰 제동에 의해 100% 소산된다고 가정할 경우, 디스크 브레이크 시스템에서 발생한 열량은 19.7MJ로 대단히 높다.

Fig. 4는 최고속도 300km/h에서 마찰제동을 1회부터 5회까지 반복제동을 하였을 경우에 디스크의 미끄럼 마찰면에서 발생하는 온도분포를 디스크의 대표적인 마찰부 6곳 A~F에서의 온도변화 패턴을 보여준다. Fig. 3에서 반경방향으로 위치한 마찰점 A, C, E는 벤트홀이 있는 위치, 즉 대류에 의한 열전달이 원활하게 이루어지는 디스크의 표면이고, 위치 B, D, F는 벤트홀 리브와 디스크가 만나는 벽에 붙어있는 디스크의 표면을 말하는 것으로 벤트홀이 있는 지역보다는 열용량이 상대적으로 큰 지역을 말한다.

Fig. 4에서는 1회부터 5회까지 반복제동을 할 경우, 시간이 경과함에 따라서 패드와 접촉하는 디스크의 대표적인 접촉점 6개의 위치에서 마찰열이 축적되고, 또한 소산되는 과정을 표시하고 있다. 이들 결과에 의하면 1회 제동을 하였을 경우, 마찰점 위치 E와 F, 즉 패드의 하단부와 접촉하는 미끄럼 마찰면에서 최고온도가 발생한다. 또한, 마찰점의 위치 C와 D는 패드와 접촉하는 마찰부의 기하학적 중심부로 이보다는 약간 아래쪽에서 최고온도가 발생하고 있으며, 제동회수가 증가함에 따라서 회전축과 가까운 E와 F점을 제외하고는 마찰 접촉면에서 온도가 비교적 고르게 분포하면서 전반적으로 상승하는 경향을 나타낸다. 이것은 마찰제동시 발생한 높은 온도가 벤트홀의 적극적인 냉각작용에 의한 바깥쪽 반경방향으로 전도되기 때문이다.

Fig. 4에서 보여주는 것처럼 디스크의 최고 온도는 1회 제동시 485°C, 2회 제동시 678°C, 3회 제동시 920°C, 4회 제동시 1156°C이며, 5회의 반복제동이 끝난 직후에는 1449°C의 대단히 높은 온도가 발생한다. 실제로 고속전철이 운행하는 상황에서는 5회의 반복제동을 하는 경우가 없기 때문에 문제가 되지는 않는다. 그러나, 디스크의 마찰면에서 온도가 680°C를 넘어서면 일반적으로 마멸량이 급격하게 증가한다. 가열되었

던 디스크의 탄소소재가 급냉에 의하여 마르텐사이트 조직으로 변하면서 조직은 매우 경해지고, 부피는 약 4% 정도 증가하기 때문에 열탄성 마멸이나 열균열이 발생할 우려가 많다[8]. 그래서, 고속용 디스크 설계에서 미끄럼 마찰부의 극부적인 최고온도 증가를 억제시키고, 마찰부의 온도를 전체적으로 균일하게 감소시키는 일은 대단히 중요함을 알 수 있다.

디스크 미끄럼 마찰면에서 발생하는 온도의 수치적 계산을 위해 사용된 식은 다음과 같다.

$$\Delta T = \frac{\text{Heat Flux [MJ]}}{460 [\text{J/kg} \cdot \text{K}] \cdot \text{Weight [kg]}}$$

300km/h로 주행을 하던 고속전철을 제동할 경우, 발생된 온도를 상기 식으로 계산하고, 여기에 대기 온도를 고려하면 476℃가 된다. 또한, 이 경우를 유한요소법으로 해석한 결과는 485℃로 이들 사이의 오차는 단지 2.1%로 대단히 근사적임을 알 수 있다. 여러 가지 최고속도에 대하여, 상기 식으로 계산한 값과 컴퓨터 시뮬레이션으로 계산한 값을 비교한 결과를 Table 3에서 제시하고 있다. 이들 결과에 의하면, 상기 식을 이용한 최고온도와 유한요소법으로 해석한 결과가 최대 5% 이내에 있다는 사실은 열탄성 마멸 연구에서 가장 중요한 온도분포 결과에 대한 신뢰성이 대단히 높다는 사실이다.

상대접촉 마찰운동을 하고 있는 두 물체에서 한쪽의 온도 변화는 그 위치에서 재료의 열변형을 일으키고, 그 결과로 나타나는 두 물체간의 접촉 압력의 변화는 마찰열을 변화시키므로 결국 그 위치에서 온도가 연속적으로 변하면서 미끄럼 마찰방향으로 약간씩 이동하는 현상이 발생한다. 마찰열의 변화가 물체내의 열확산 속도에 비해 상대적으로 빠르면 이와 같은 온도 변화가 커지게 되므로 열탄성 거동 관점에서 보면, 불안정한 마찰 시스템이 된다. 그러나, 마찰재 내부로의 열확산 속도가 크면 마찰열의 변화는 점점 사라지게 되므로 안정된 마찰 시스템이 된다. 이와 같은 열탄성 불안정성 문제에서 디스크에서 발생하는 마찰열이 빠르고 고르게 확산시키는 것은 미끄럼 마찰 시스템에서의 열안정성 측면에서 매우 중요하다.

Fig. 5는 브레이크가 1회 제동을 하였을 때, 최고 제동속도가 300, 350, 400km/h에서 디스크 마찰면의 온도분포를 디스크 마찰면의 최외곽에서 휠 축(wheel

shaft)쪽으로, 즉 Fig. 3의 A에서 E의 방향으로 측정 한 결과이다. Fig. 5에서 가로축의 왼쪽은 마찰면의 바깥쪽이 되고, 오른쪽은 휠 축의 안쪽이 된다. 그림에서 보여주는 바와 같이 제동을 하였을 때, 반경방향으로의 온도분포는 정현파의 형태를 나타내는데, 가장 높은 온도가 발생하는 위치는 Fig. 6에서 표시한 휠 축과 가까운 마찰면의 위치 ①(Fig. 5에서는 약 150mm 부근)에서 발생한다. 이와 같이 정현파 형태로 발생한 표면온도가 마찰면의 원주방향으로 균일하게 분포하기 때문에 마찰 제동력이 증가함에 따라서 디스크 표면에서 발생하는 원주방향으로 마멸을 일으키는 스크래칭(scratching) 현상의 원인이 된다. Fig. 5의 150mm 부근에서처럼, 디스크의 마찰열에 의해 국

Table 3 마찰면에서 발생한 최고온도의 수치적 해석 값과 FEM 계산 값의 비교

속도 (km/h)	발생 열량 (MJ)	수치적 해석 온도 (해석값 + 대기온도) (°C)	FEM 계산 온도 (°C)	오차 (%)
		두께 : 80 (mm) 무게 : 100 (kg)	두께 : 80 (mm) 무게 : 100 (kg)	
300	19.6	476	485	2.1
350	26.7	610	641	5.1
400	30.9	722	734	1.7

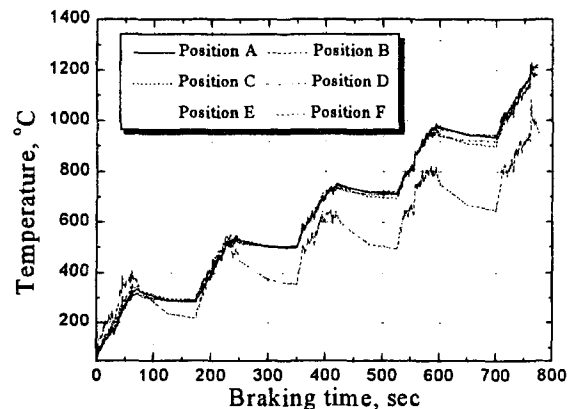


Fig. 4 최고속도 300km/h에서 5회 반복제동 하였을 경우, 디스크 접촉면의 주요 마찰점에서 발생된 온도 패턴

부적으로 발생된 돌기부(asperity)는 상대 마찰표면 패드에 의하여 연삭 마멸이 발생되기 쉽고, 팽창되었던 돌기부가 마멸에 의하여 탈락되면서 주변에 비하여 상대적인 온도 저하가 일어나기 때문에 냉각에 의한 마찰표면에서 홈(textured surfaces)이 패인 것처럼 마멸이 발생하게 된다. 또한, 마찰열에 의한 팽창과 냉각이나 마멸입자의 탈락에 의한 수축 변형거동도 역시 정현파와 비슷한 형태로 발생하고 있다.

Fig. 6은 최고 제동속도 300km/h에서 1회 제동을 하였을 때, 디스크 마찰면에서의 온도분포를 보여주는 그림으로 패드와 접촉하는 마찰면의 중간 아래의 좌·우에서 높은 온도가 발생하였고, 중간보다 약간 윗쪽에서는 가장 낮은 온도가 발생하였다. 특히, 마찰점의 위치 ②와 ③에서는 가장 높은 온도 484.7°C가 발생하였다. 이와 같이 국부적으로 발생한 높은 온도는 적열점(hot spot) 현상을 유발하여 그곳에서 마찰면의 열팽창과 국부적인 용융이나 열탄성 마멸을 일으키는 원인이 된다.

Fig. 7은 최고 제동속도 300km/h에서 1회 제동을 하였을 때, 디스크 마찰면의 축방향 거동량 분포를 나타낸 결과이다. 마찰면에는 여러 가지의 색 띠가 나타난 것으로 보아 상당히 불균일한 열변형이 발생하였음을 알 수 있다. Fig. 6의 온도분포와 비슷한 형태로 높은 온도가 발생한 마찰면의 중간아래 부분과 좌·우에서 열팽창으로 큰 변위량이 발생하고 있는데, 특히 마찰점 위치 ②와 ③에서 가장 큰 열변형량 0.1373mm가 발생하였다. ②와 ③와 같이 국부적으로 팽창한 곳이 적열점이 발생할 수 있는 지점이 된다. 이와 같이 디스크의 마찰면이 패드와의 상대 마찰운동이 열변형에 의한 불균일성 발생하게 되면 ②, ③와 같은 곳에서는 국부적으로 온도를 더 크게 일으켜서 그 위치에서의 용융, 또는 강도 저하로 이어져서 열탄성 마멸로 발전될 수 있고, 열저터와 스킨소음의 원인이 되기도 한다.

Fig. 8은 최고 제동속도 300km/h에서 1회 제동을 하였을 때, 디스크 마찰면의 응력 분포이다. 그림에서 보여주는 바와 같이 다양한 응력 분포가 발생하였음을 알 수 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이 휠축에 가까운 위치 C점에서 가장 높은 von Mises 응력이 발생하고, 위로 올라갈수록 감소하다가 위치 B에서 다

시 커지고, 이후 다시 감소하여 위치 A에서 가장 낮게 발생한다. 위치 A를 포함해서 좌우로 마찰면 상부에 짙은 검은 색을 띠고 있는 세 부분(화살표로 표시된 지역)은 벤트홀(vent hole)이 있는 곳으로서 공기에 의한 냉각 때문에 벤트 리브가 있는 곳에 비하여 상대적으로 온도가 낮게 발생한다. 즉, 대류에 의한 열전달 효과가 크게 나타나고 있는 부분으로 응력은 온도에 의해 가장 많은 영향을 받기 때문에 온도가 낮은 곳에서 응력이 낮게 나오는 것은 당연하다. 또한,

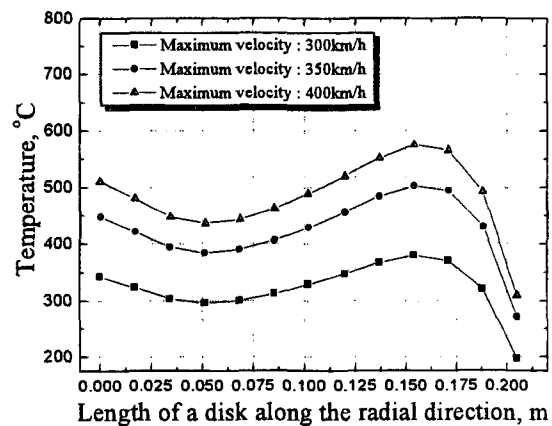


Fig. 5 1회의 제동을 하였을 때, 최고 제동속도에 따라 디스크 마찰면의 반경방향(A→E선)을 따라서 발생한 온도분포

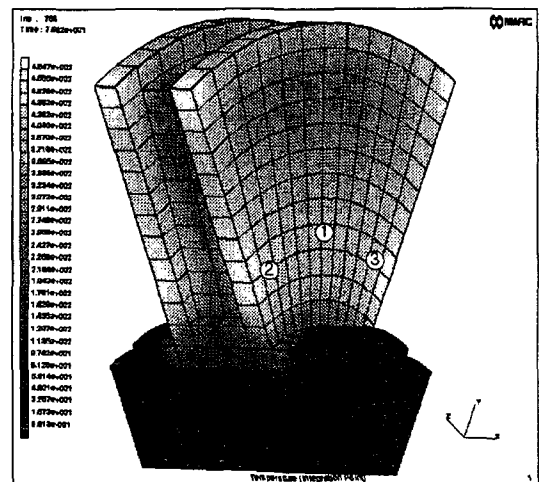


Fig. 6 최고 제동속도 300km/h에서 1번 제동을 하였을 때, 디스크 마찰면에서 발생한 온도 분포도

그림에서 알 수 있듯이 마찰면에서 발생한 응력은 세로 방향으로 분포한다. 이와 같이 세로 방향으로 발생한 응력이 항복응력을 넘게 되면 세로 방향으로 열크랙(thermal cracks)이 발생하게 된다. 이것은 실제의 디스크에서 발생된 마찰열 크랙과 일치하는 결과이다.

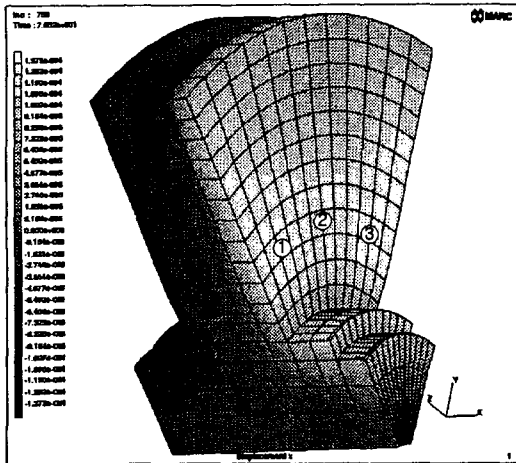


Fig. 7 최고 제동속도 300km/h에서 1번 제동을 하였을 때, 디스크 마찰면에서 발생한 축방향의 열거동 분포도

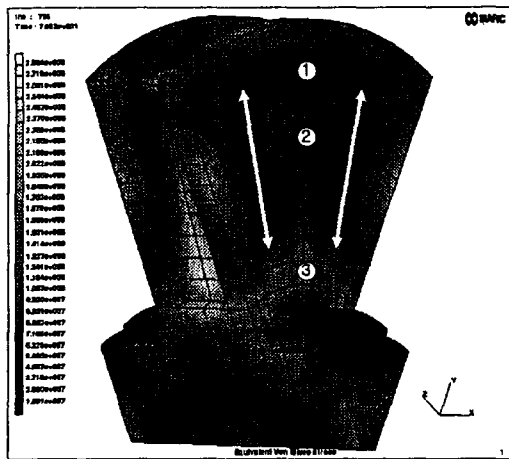


Fig. 8 최고 제동속도 300km/h에서 1번 제동을 하였을 때, 디스크 마찰면에서 발생한 von Mises 응력 분포도

### 5. 결론

패드와 접촉하는 디스크 마찰면에서 발생될 수 있는 열탄성 마멸에 대한 수치적 해석결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 디스크에서 반경방향으로 거의 불안정성을 결정하는 섭동 온도는 접촉면의 길이와 거의 같은 주기를 가지는 정현파의 형태로 나타난다.

(2) 디스크 마찰면에서 원주방향으로 열탄성 마멸이 발생하는 것은 마찰면에서 정현파 형태의 열변형 거동이 규칙적으로 발생하기 때문이다.

(3) 디스크의 온도가 680℃가 넘어서면 마멸량이 급격히 증가하는데, 이것은 고온에 의하여 디스크 조직이 매우 연하게 되기 때문이다. 또한, 가열된 디스크 카본소재가 급냉에 의하여 마르텐사이트 조직으로 변하게 되면, 조직은 매우 경해지고, 부피는 약 4% 정도 증가하기 때문에 열균열이 발생할 우려가 많다. 따라서, 디스크의 온도가 급격히 증가하지 않도록 신속히 균일하게 방열하는 것이 대단히 중요하다.

(4) 열팽창 계수가 클수록 접촉면에서의 마찰열의 유입에 따른 접촉 압력의 증가가 커지므로 브레이크는 불안정하다. 그러나, 열전달 계수가 크면 마찰열을 빨리 확산시키므로 접촉 압력의 증가를 막을 수 있어서 디스크 마찰면 시스템에서의 트라이볼로지적 변형 거동은 안정된다.

### 참고문헌

1. Rainbolt, J. D., "Effects of Disk Material Selection on Disk Brake Rotor Configuration," SAE 750733, pp.1973-1814, 1975.
2. Anderson, A. E. and Knapp, R. A., "Hot Spotting in Automotive Friction Systems," Intl. Conf. on Wear of Materials, Vol. 2, pp.673-680.
3. Jimbo, Y., Mibe, T., Akiyama, K., Matsui, H., Yoshida, M., and Ozawa, A., "Development of High Thermal Conductivity Cast Iron for Brake Disk Rotors," SAE 900002, pp.22-28, 1990.
4. Crolla, D. A. and Lang, A. M., "Brake Noise and Vibration - The State of the Art," IMechE, 1991.
5. Rhee, S. K., Jacko, M. G., and Tsang, P. H. S.,

- "The Role of the Friction Film in Friction, Wear and Noise of Automotive Brakes," *Wear*, Vol. 146, 1991.
6. Kwangjin Lee and Baber J. R., "An Experimental Investigation of Frictionally-excited Thermoelastic Instability in Automotive disk Brakes Under a Drag Brake Application", *Journal of Tribology*, Vol. 116, pp.409-414, 1994.
  7. MARC Program Capabilities, MARC Analysis Research Corp., Palo Alto, CA, Sept. 1996.
  8. Kalpakjian, S., "Manufacturing Processes for Engineering Materials," Addison-Wesley Pub., 1991.