

# 벤티레이티드 디스크 브레이크의 열응력 해석

김양술<sup>†</sup> · 안수철

홍익대학교 기계정보공학과  
(2008. 4. 25. 접수 / 2008. 6. 12. 채택)

## Thermal Stress Analysis of Ventilated Disc Brake

Yang-Sul Kim<sup>†</sup> · Su-Chul An

Department of Science & Technology, Hongik University  
(Received April 25, 2008 / Accepted June 12, 2008)

**Abstract :** In automotive disc brake system, friction heat is not uniformly distributed due to various reasons such as thermal expansion and imperfections in geometry. It is well known that thermoelastic distortion due to frictional heating affects the contact pressure distribution and can lead to thermoelastic instability, where the contact load is concentrated in one or more small regions on the brake disc surface. These regions then take very high temperatures and passage of hot spots moving under the brake pads can cause low frequency vibration called brake judder. This paper presents the FEM(finite element method) result for the temperature distribution of ventilated disc brake. A steady state two-dimensional model of disc brake system predicts the surface temperatures during a multi-stop driving schedule.

**Key Words :** disc brake, FEM, thermal stress, temperature distribution

### 1. 서론

자동차 보유대수의 급격한 증가와 더불어 자동차에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 자동차의 속도를 줄이거나 정지시키는 Brake 장치의 성능은 안전운행에 있어 무엇보다 중요하다.

Brake 장치는 주행 중인 자동차의 속도를 줄이거나 또는 정지시키고, 주차상태를 유지하기 위해 사용되는 장치로 자동차의 안전에 매우 중요한 역할을 한다. Brake 작용은 움직이는 자동차의 운동 에너지를 Brake 조작에 의해 발생하는 마찰에너지로 바꾸어 주는 것으로, 일반적인 승용차에는 제동력이 많이 필요한 앞바퀴에 Disc brake를, 뒷바퀴에는 Drum brake를 사용하고 있다.

Disc는 Pad 사이의 마찰력을 이용하여 움직이는 장치의 운동 속도를 가능한 빠른 시간 내에 감소시키거나 정지시키는데 그 목적이 있다. 정상 주행 상태 하에서 Brake는 제동과 주행을 반복하게 되며, 제동이 반복해서 일어날 때 마다, Disc는 마찰에 의한 열 발생과 전도와 대류에 의한 방열 과정을 반복

하게 된다.

자동차가 이동할 때 발생된 운동에너지는 대부분 마찰열의 형태로 Brake의 Disc에 전달되어 결과적으로는 Disc와 Pad의 접촉면 사이의 온도를 급격하게 상승시키게 된다.

제동 시 발생하는 열에너지로 인해 Brake의 마찰 부위를 중심으로 구조물의 온도가 상승하여 Brake의 성능을 저하시키는 Brake fade와 열에 의한 크랙 등의 원인이 되므로 적극적으로 대응해야 하는 문제이다.

한편, 마찰부의 온도 증가는 구조물의 부적절한 열변형을 야기하여 Disc와 Pad간에 발생하는 불균일한 마찰의 원인이 되며, Hot spot의 발생을 초래하여 제동 시 마찰부 및 제동력 전달부에 심한 진동을 유발한다. 제동 시 Disc와 Pad 사이에 작용하는 불균일한 마찰력으로 인해 발생하는 진동 현상을 일반적으로 Brake judder라 한다.

반복 제동 시 발생열은 Disc상에 0.2~0.3mm 정도의 초기 균열 현상을 가져오며 균열의 연속적인 발전은 Brake의 밀림, 진동 및 소음의 현상을 가져온다. 그러므로 Disc와 Pad의 마찰면의 온도를 낮추는 것은 제동 성능 형상에 있어서 중요한 문제

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
kimys@hongik.ac.kr

중에 하나이다<sup>1-3)</sup>.

주철 등의 금속재질로 만들어진 Disc의 경우 열 전달율이 높아 열적 거동에 상당한 영향을 가져온다. 특히 완전 정지 이전에 발생하는 높은 온도는 Disc에 있어서 큰 열응력을 발생시켜 순간 균열의 원인이 되므로 이에 따른 Disc의 재질 및 형상변경을 통한 방열증대에 대한 연구가 수행되고 있다.

본 논문에서는 현재 많이 적용되고 있는 Ventilated disc brake의 반복제동에서 오는 접촉 표면온도 및 열응력 해석을 유한요소 프로그램인 ANSYS를 사용하여 제동 시스템의 최적 설계 자료의 제공을 목적으로 한다.

## 2. 이론해석

### 2.1. 디스크 브레이크의 형상과 FEM모델

브레이크 디스크에는 Drum brake, Solid disc brake와 Ventilated disc brake가 있다. 차가 제동 할 때는 전륜의 부담이 80%정도이고 후륜이 20% 정도이다. 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 Fig. 1과 같이 중공이 만들어져 있다.

수치해석을 위해 다음과 같은 가정을 하였다. 일차적으로 짧은 시간(약 5초 이내), 1회 제동에 따른 Disc의 표면 온도 분포 및 내부 열응력을 해석하였으며, 상기 결과를 이용하여 일정시간 반복 제동 및 회복을 반복하는 조건하에서 표면 온도 및 Disc 내부 열응력을 해석하였다. 97km/h의 속도로 달리

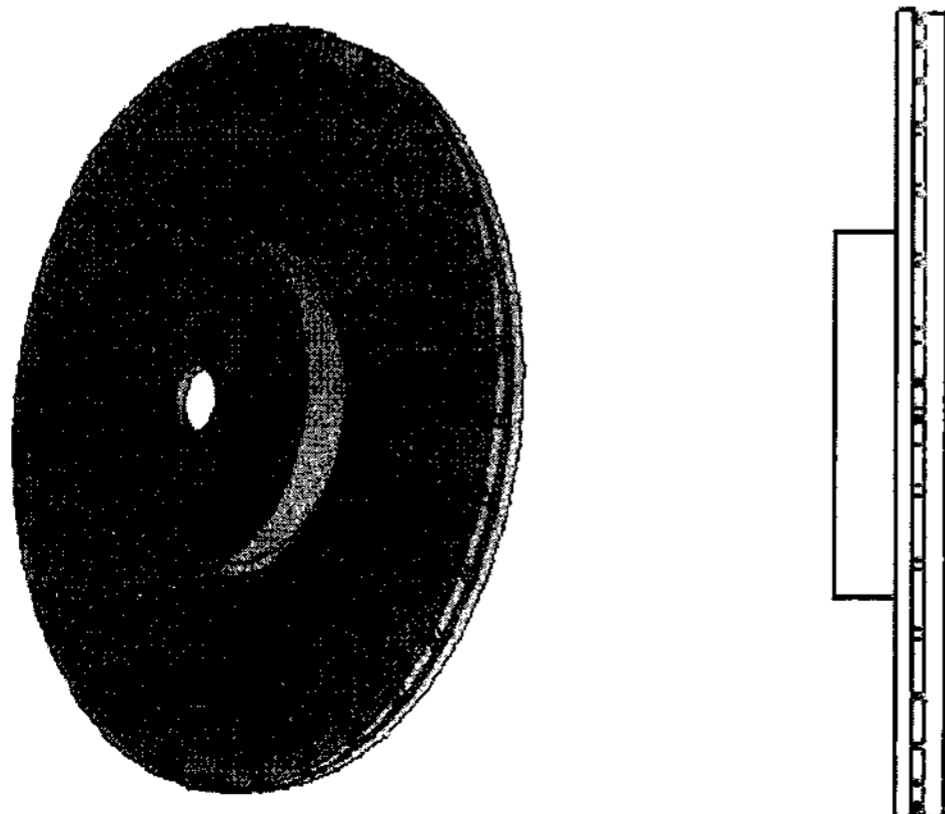


Fig. 1. Shape of Ventilated disc brake.

던 자동차가 0.6g(g:중력가속도)로 4.57초 동안 감속한다. 이후 25초 동안 가속을 하여 97km/h의 속도에 이르면 등속도로 5.43초 동안 등속 한다. 전체적으로 35초가 1cycle이며, 이를 7회 반복 수행하여 표면 온도의 변화 및 Disc 상의 시간에 따른 온도 분포를 해석하였다<sup>1)</sup>.

### 2.2. 수치적 해석모델링

#### 2.2.1. 해석모델

모델링에 사용되는 요소의 타입은 2차원 Quadratic element이다. 유한요소 모델에서 사용된 총 유한요소(element) 개수는 2,024개이고 총절점(node)수는 6,443개이다. Fig. 2는 유한요소 모델을 나타낸다. 또한 Fig. 3은 제동 시 Pad와 접하는 부분에 열속이 적용되는 모습이며, Fig. 4는 제동 시 열속이 적용되는 부분을 제외한 부분에 열전달 계수가 적용되는 모델을 나타낸다.

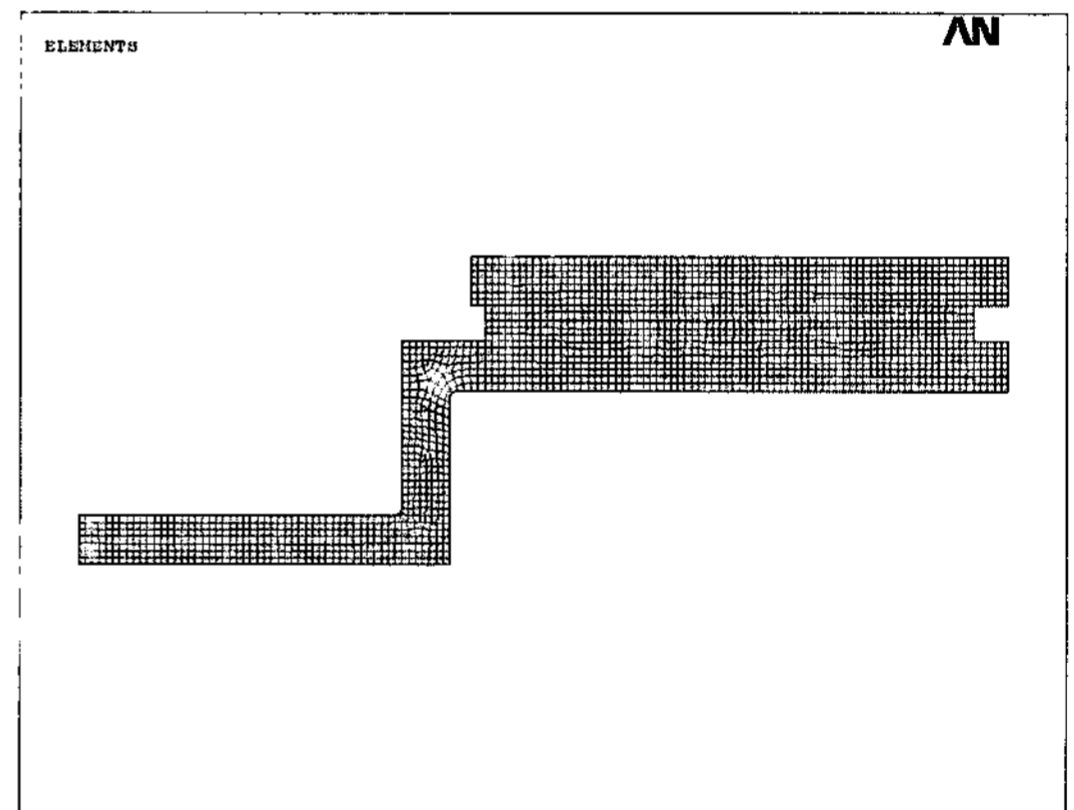


Fig. 2. Finite element mesh of Ventilated disc brake.

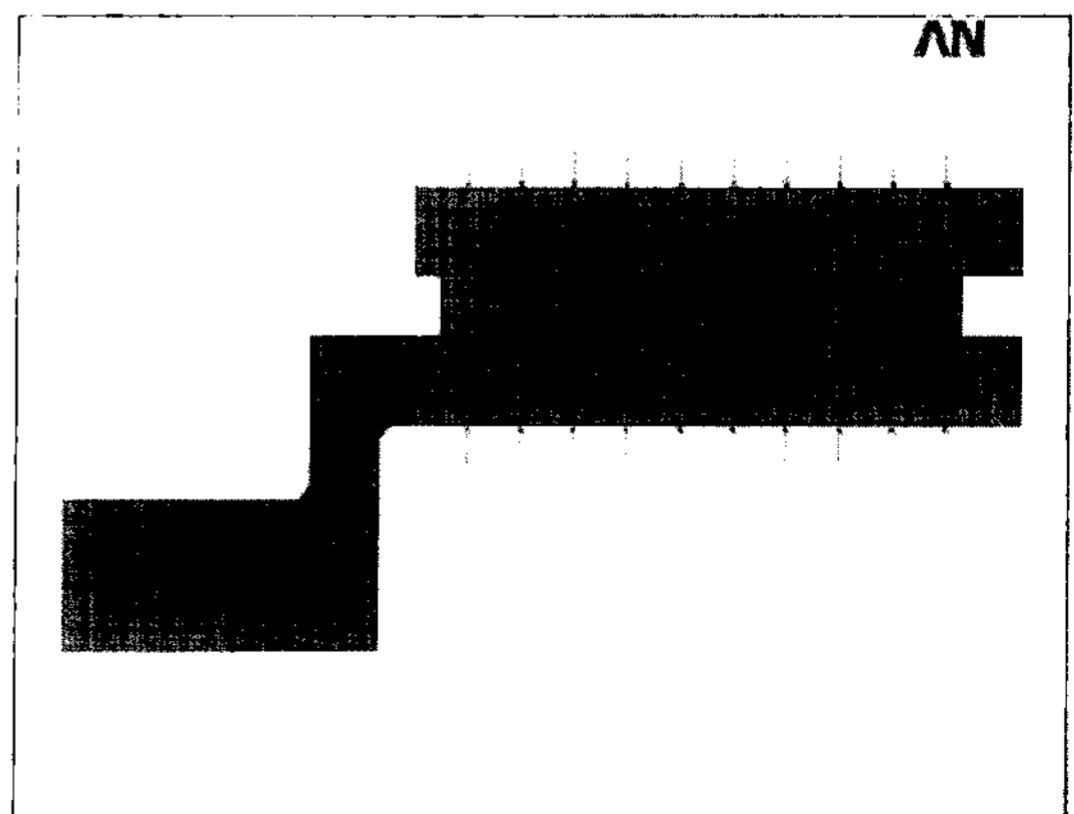


Fig. 3. Finite element mesh of Heat flux.

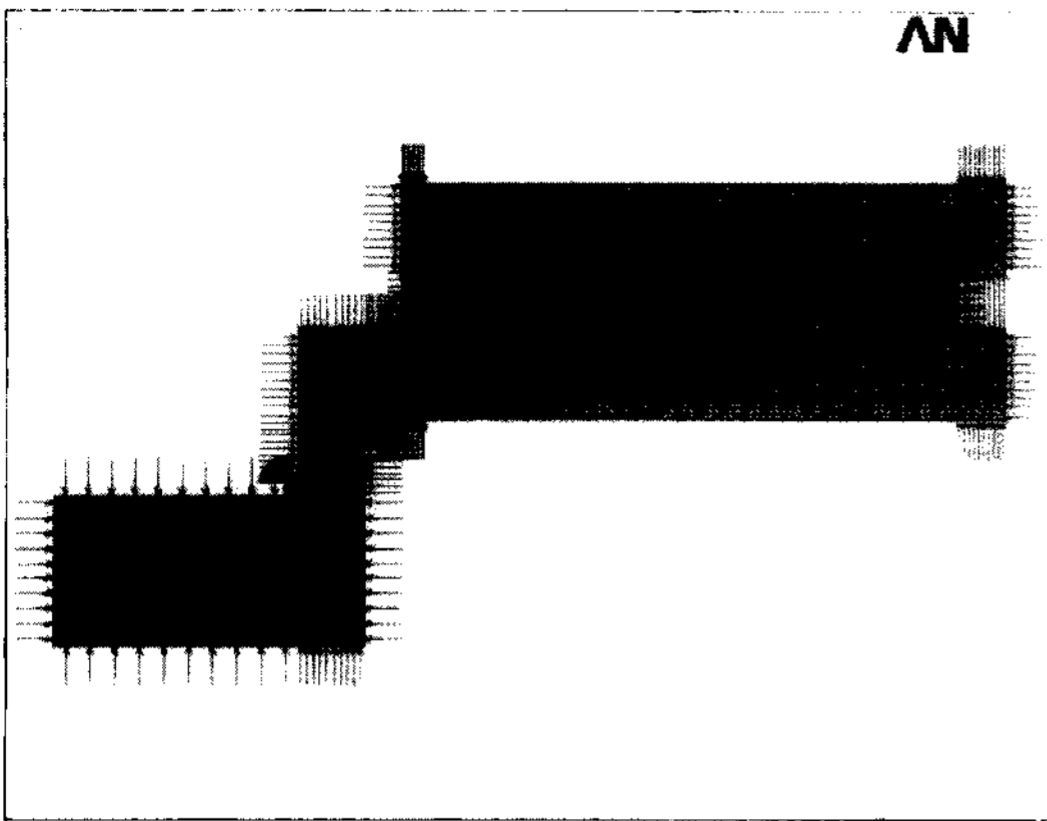


Fig. 4. Finite element mesh of Heat convection.

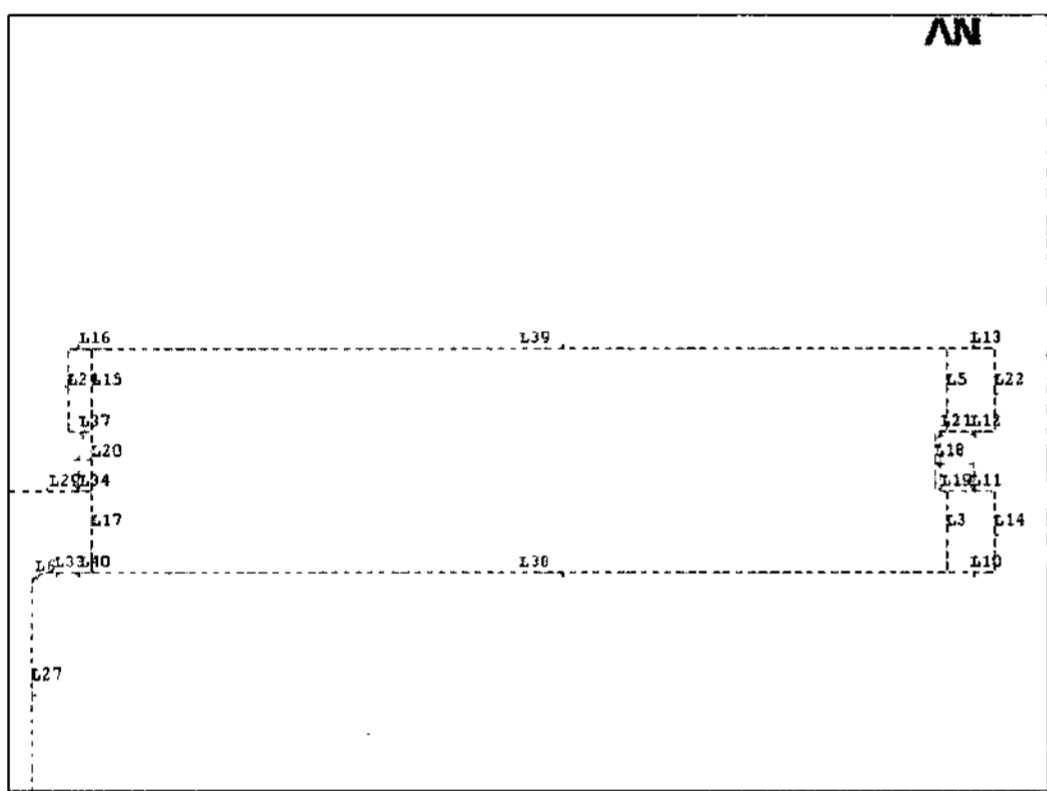


Fig. 5. Boundary and load condition.

2.2.2. 경계조건 및 물성값

축대칭 요소를 사용할 경우 Vent hole부분이 나타나질 않는다. Vent hole 부분에서는 관 유동에 의해 바깥쪽과는 대류의 특성이 다르다. 이 효과를 적용하기 위해 경계조건을 계산해서 정의한다.

Fig. 5는 Ventilated disc brake의 경계 및 하중조건을 나타낸다. Line 11, 12, 18, 19, 20, 34, 37에서는 관 유동에 의한 대류열전달이 적용되고, Line 38, 39에는 열속이 적용되어 Pad와의 마찰이 모두 Disc로 들어간다고 가정하였다. 가속 구간과 등속구간은 열속은 없고 대류에 의한 열전달만 일어나며, 주변온도는 17°C로 적용하였다. 열속이 적용되지 않는 나머지 부분은 대류조건이 적용된다<sup>7)</sup>.

Ventilated disc brake pad의 경우 석면 등의 복합 재료로 만들어지고, Disc의 경우 주철 등의 금속 재료를 사용한다. 위의 재질에 대한 물질 특성들이 아래 Table 1에 나타나 있다.

또한, Fig. 6은 Ventilated disc brake의 경계 및 외력조건을 나타낸다. 경계조건은 Disc의 허브 쪽

Table 1. Material properties

Material	Disc
Thermal conductivity k(W/mK)	57
Density ρ(kg/m <sup>3</sup> )	7100
Specific heat c(J/kgK)	452

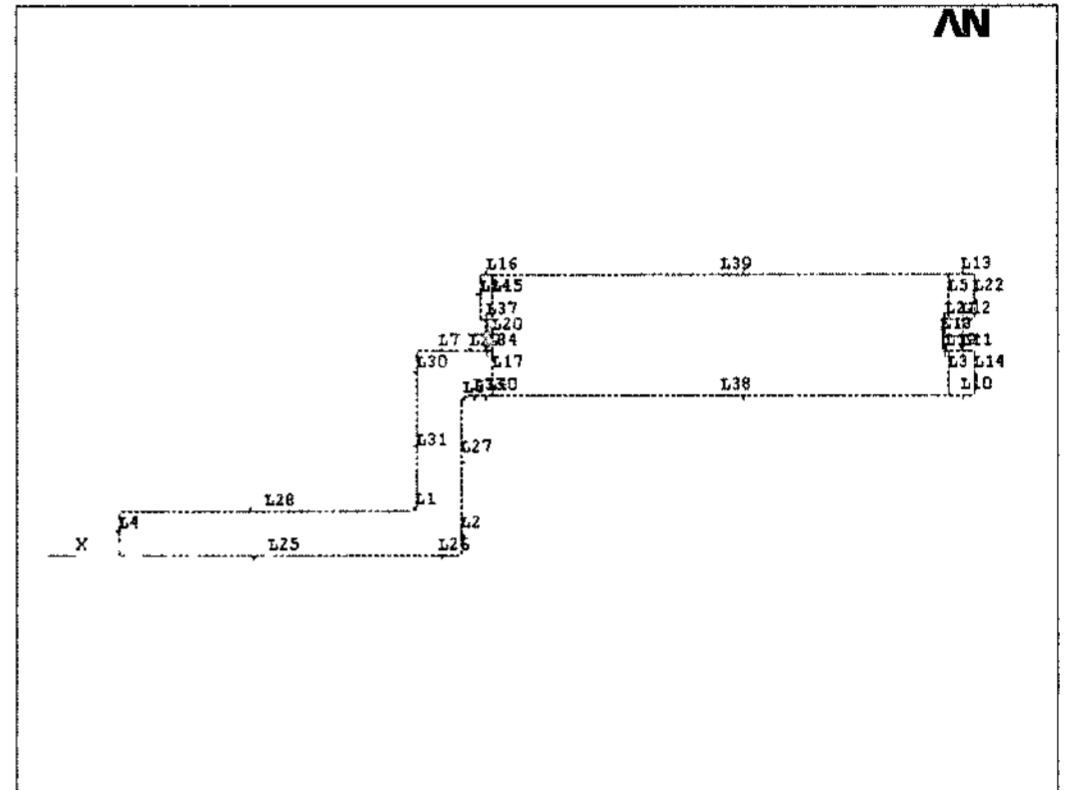


Fig. 6. Boundary and load condition(Thermal stress).

Line 25와 Line 28을 Y축 방향으로 고정하였고, Line 4를 X축 방향으로 고정하였다. 기존 1cycle인 35초를 41개의 구간으로 나누어 시간의 변화에 따른 Disc의 온도분포를 Data화하여 응력계산을 수행하였다. 외력조건으로는 Disc 표면 온도해석을 기준으로 하여 열응력 해석을 수행하였다.

열응력 해석을 위한 조건으로는 Disc brake의 재질은 Case-iron으로 제작되었다고 가정하고, 재질에 대한 물질 특성들이 아래 Table 2에 나타나 있다. 또한 열응력 해석을 위해 Solid 83을 이용하였다.

3. 해석결과 및 고찰

해석결과를 검토하면 온도분포는 Fig. 7~8에서와 같다. 4.57초 동안 감속이 진행되는 구간에서의 Disc의 온도는 Pad와의 마찰에 의한 열이 높게 나타난다. 4.57초 이후 39.57초까지 가속이 되는 구간에서는 대류에 의한 방열이 일어나서 온도가 낮아진다.

Table 2. Material properties of Ventilated disc brake

Material	Disc Brake
Young's modulus E(GPa)	125
Poisson's ratio ν	0.25
Density ρ(kg/m <sup>3</sup> )	7100
Coef. of thermal exp. α(K-1)	1.2e-5

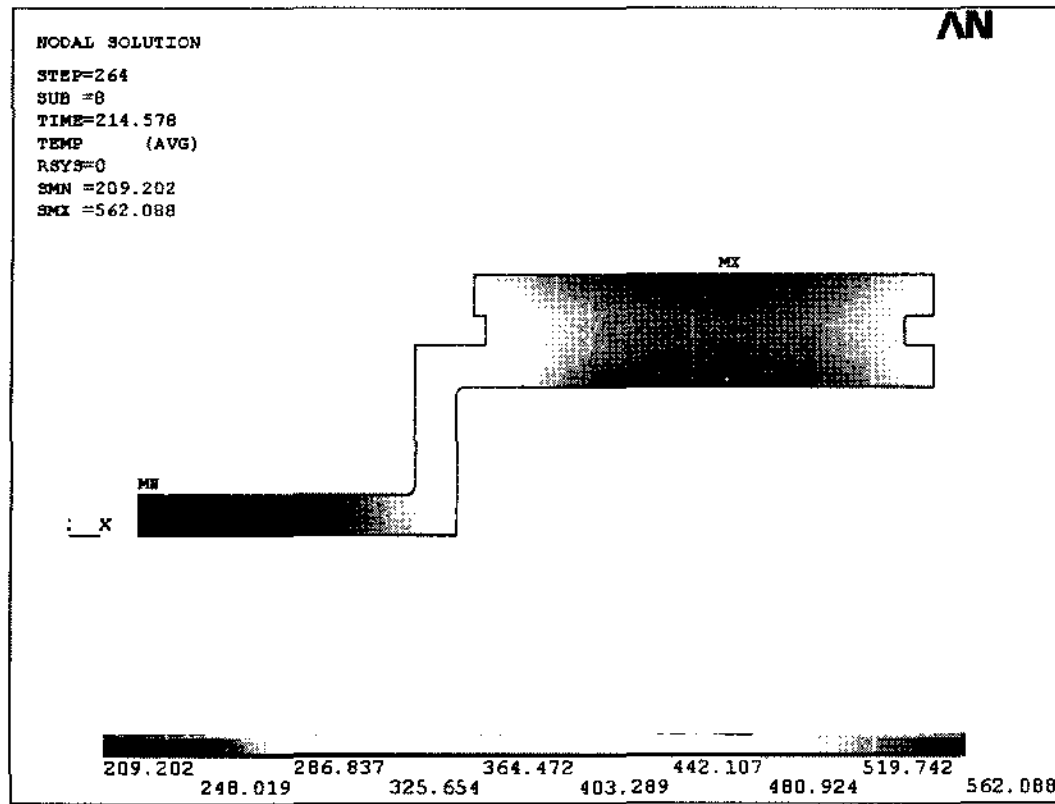


Fig. 7. Temperature distribution of disc brake(final step).

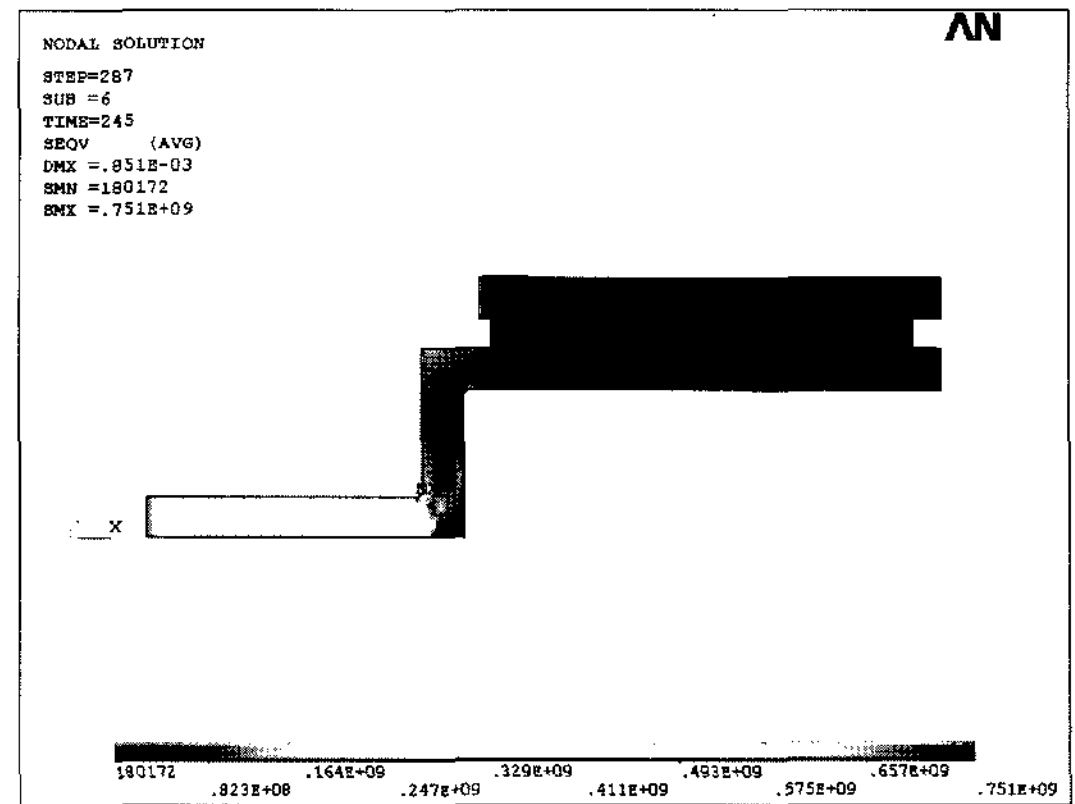


Fig. 9. Thermal stress of ventilated disc brake(final step).

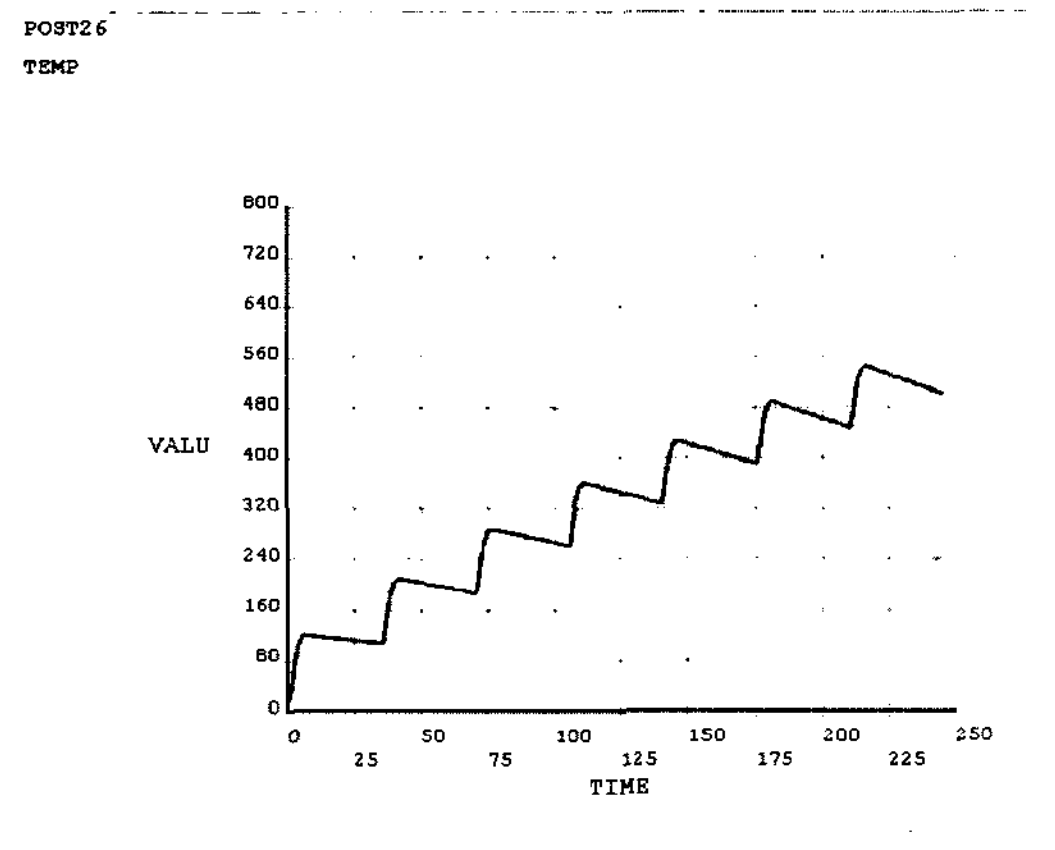


Fig. 8. Temperature distribution of disc brake(total cycle).

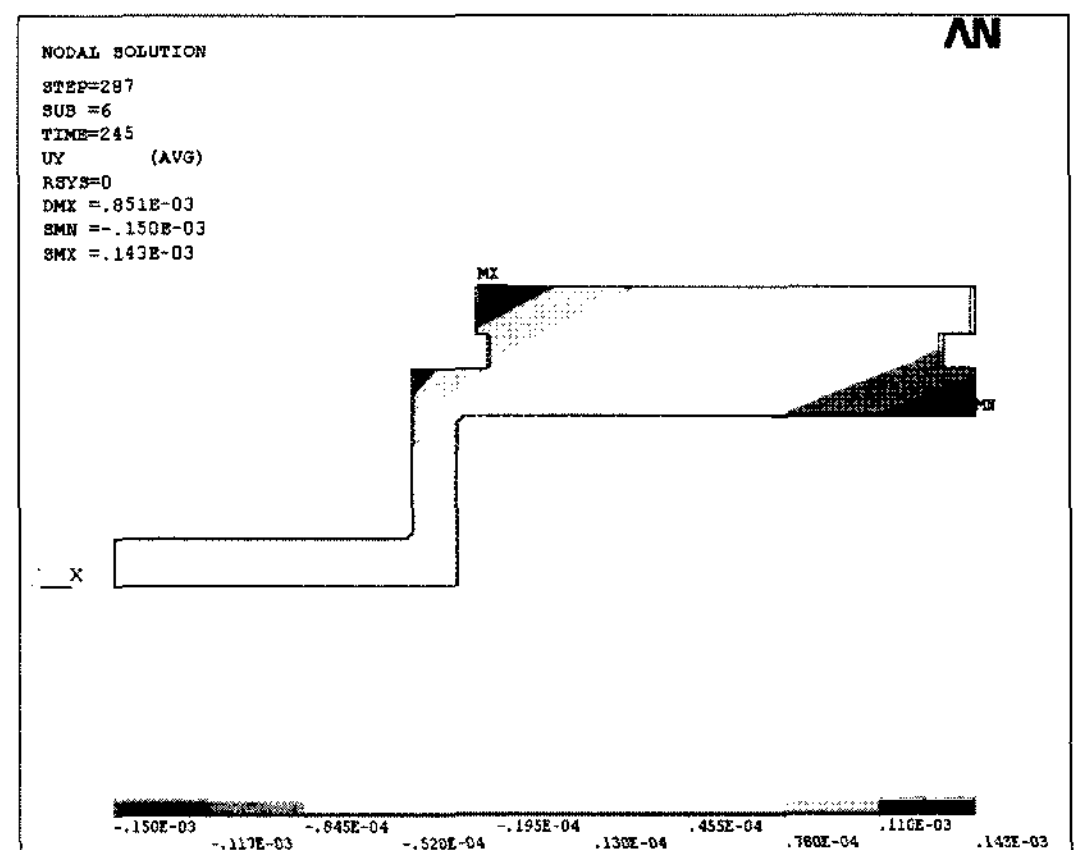


Fig. 10. Thermal displacement of ventilated disc brake(final step).

Fig. 7은 7회 제동 시 각 시점에서의 온도분포를 나타내고 있다. 7회 제동 시 표면의 온도는 약 560°C 까지 상승하게 되며 표면 유입열의 일정량이 허브 까지 전달되게 된다. Disc 표면의 온도가 420°C 까지 상승할 경우 실제로는 Pad 쪽으로의 열 이동이 진행되며 Pad 내부에 존재하는 두께 3mm의 절연 판 및 중공 형 피스톤을 거쳐 작업유체에 열이 전달 되게 된다. 일반적으로 작업유체의 온도가 100°C 이상 되면 베이퍼록 현상이 발생되어 제동 기능을 상실하게 되므로 작업유체로의 열전달을 방지하는 문제는 제동성능에 있어서 다른 하나의 중요한 문제이다. Fig. 8은 7회 반복 제동 시 Disc내의 최고 온도의 분포를 나타낸 것이다. 또한, Disc vent hole 주위의 핀(fin) 온도가 거의 접촉 표면의 온도와 같은 정도로 상승됨을 볼 때 열전도는 내 측면과 외 측면 사이의 벤트 홀 부위로 급격하게 일어남을 알 수 있었다.

또한, 열응력 해석을 살펴보면, 우선 Fig. 9는 Disc brake의 Von-mises stress를 나타낸 것이다. Pad와의 마찰이 있는 부분에서 가장 작은 응력이 발생하며, 허브(hub) 부분을 고정시켰기 때문에 허브 끝단에서도 높은 응력이 발생함을 볼 수 있다.

Fig. 10은 열응력으로 인해 변형된 Disc brake의 형태이다. Pad가 접촉되는 부위가 변형함을 볼 수 있다. 이러한 변형은 Pad를 주기적으로 때리는 소음 및 진동을 유발하는 Hot judder의 원인이 된다. Table 3은 Fig. 5에 나타난 Line 10에서 열응력에 의해 변형된 Disc의 Displacement의 최대·최소값을 나타낸 것이다.

Table 3. The Maximum and minimum displacement in ventilated disc brake

	Maximum	minimum
Displacement	0.3110E-03	0.1057E-05

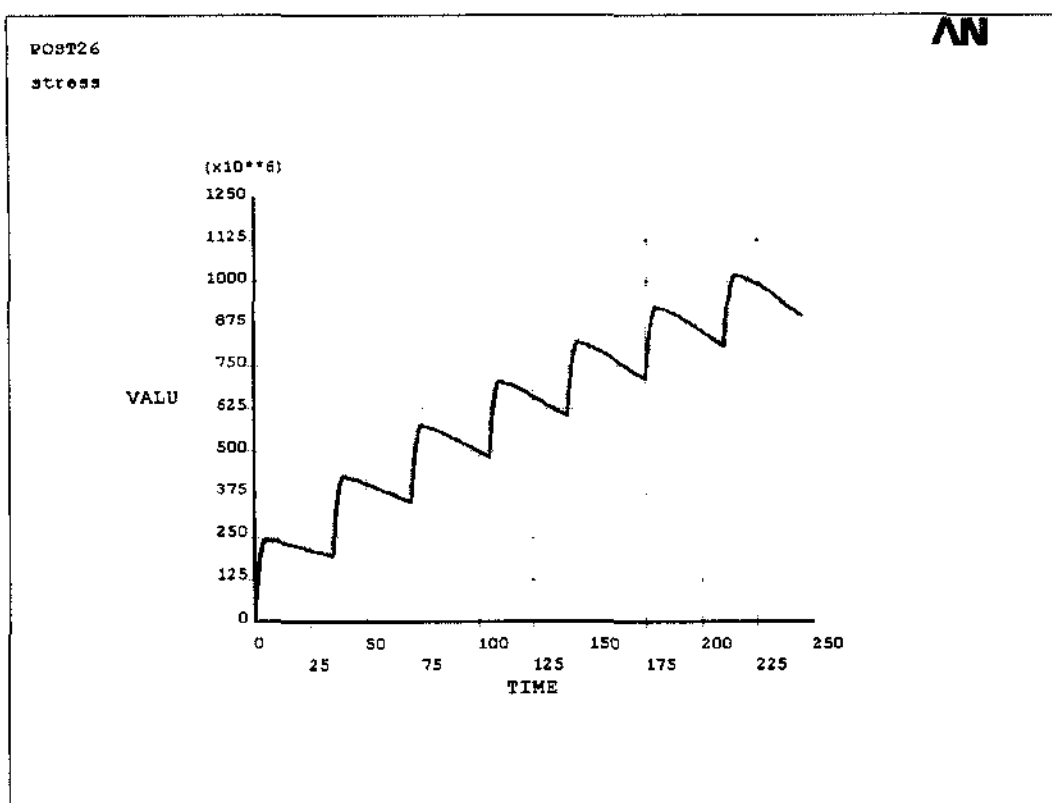


Fig. 11. Thermal stress change of ventilated disc brake.

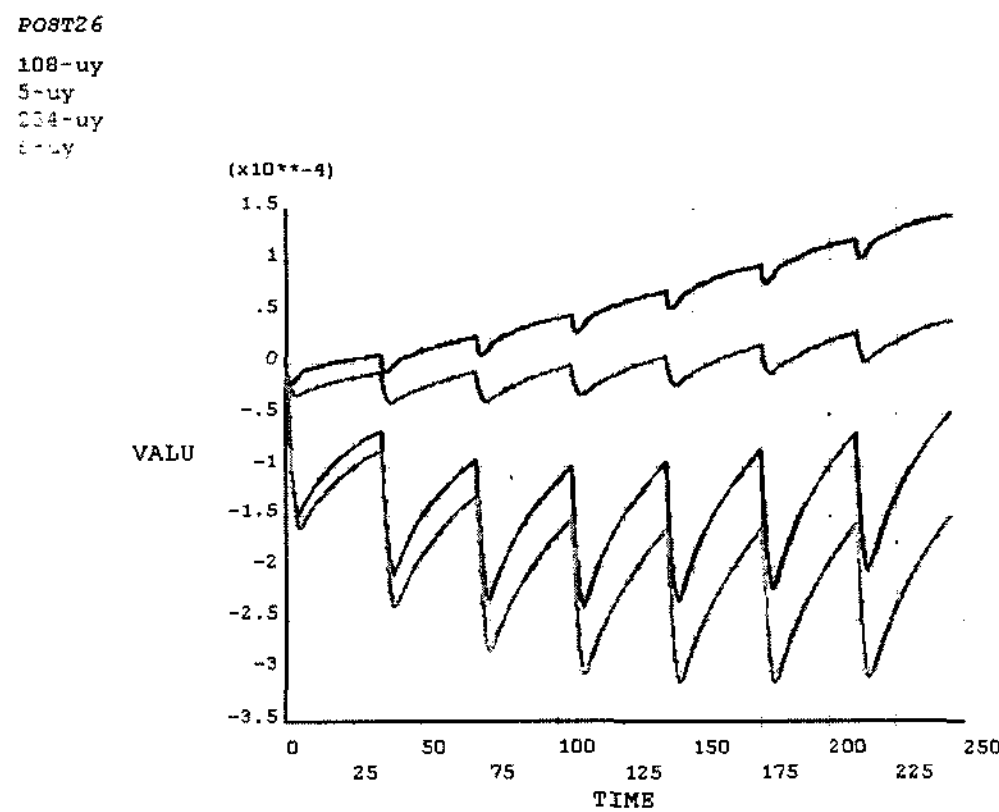


Fig. 12. Thermal displacement change of ventilated disc brake for time variation.

Fig. 11은 시간에 따른 Von-mises stress의 변화량이며, Fig. 12는 Disc 양끝단의 각 노드의 Displacement 변화량을 시간에 따라 나타낸 것이다.

#### 4. 결론

본 연구에서 Ventilate disc brake의 가혹 조건 시 과도 온도 분포에 대한 해석을 수행하였다.

본 연구 결과에 나타나듯이 Disc의 변형이 생기게 된다. 이러한 Disc의 변형은 운전자가 Brake를 작동할 때 생기게 되며, Pad에 진동을 가하며 이 진동은 운전자의 발까지 전달되어 승차감에 영향을 미칠 수 있다.

또한 일반적인 주철 Disc의 경우, 표면온도가 420°C 이상까지 가열 및 방열이 반복되어서 온도가 상승하게 되면, 열적 피로 현상이 발생하게 되며, ‘영구변형늘림’ 현상의 원인이 된다. ‘영구변형늘림’ 현상은 Disc의 온도가 상온으로 돌아와도 회복되지 않으며, 고온 강도의 저하도 수반하게 되어 결과적으로 균열의 원인이 된다.

이러한 Disc의 열응력에 의한 Disc의 변형을 줄일 수 있는 방법으로는 첫째, Disc상의 간헐적인 열유입 및 고온에 따른 상기 현상들은 Vent hole을 구성하고 있는 핀 형상 및 각도 변경을 통한 방열 성능의 향상을 기대할 수 있을 것이다. 둘째, 변형을 줄일 수 있는 알루미늄 계열로 재질을 교체하여 소음 및 진동의 저감 효과를 기대할 수 있을 것이다. 마지막으로, Disc의 형상을 Inner vent형에서 Outer vent형으로 바꾸면 변형이 축 방향으로 일어나게 된다. 그렇게 되면 Pad를 밀거나 진동을 주는 영향이 적어져서 소음 및 진동의 저감 효과를 기대할 수 있을 것이다.

**감사의 글 :** 이 논문은 2007학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었음.

#### 참고문헌

- 1) J. H. Choi, D. H. Kim, I. Lee, H. B. Cha, M. G. Kang, “Transient Thermoelastic Analysis of Disk Brakes Using Finite Element Method”, KSAE, Vol. 10, No. 5, 2002.
- 2) T. I. Yeo, “A study on Wear Life Prediction of Disk Brake Pads”, KSAE, Vol. 10, No. 4, 2002.
- 3) Limpert, R., “The Thermal Performance of Automotive Disc Brake”, SAE 750873, 1975.
- 4) D. Thuresson, “Thermomechanical Analysis of Friction Brake”, SAE 2000-01-2275, 2000.
- 5) Holman, J. P., “Heat Transfer”, 6th edition, Mcgrow-Hill Co, 1986.
- 6) Streeter, V. L. etc, al. Fluid Mechanics. McGraw-Hill, 2000.
- 7) TAESUNG S&A Inc. FAE. Selected problem for ANSYS users. TAESUNG S&A Inc, 2002.