

〈논문〉 SAE NO. 2000-03-0048

유한요소법을 이용한 브레이크 드럼의 열응력 해석

Thermal Stress Analysis of Brake Drum by Using Finite Element Analysis

박 영 철*, 박 동 성**
Youngchul Park, Dongsung Park

ABSTRACT

Nonlinear transient analysis is executed to obtain the temperature distribution, and to evaluate the thermal stress of brake drum by using FEA(finite element analysis). The result induces the reason why hair crack and the cause of drum failure occurs and the way how stress of drum decreases. The temperature of drum is in proportion to the drum thickness and it processes nonlinear changes at every points of drum. The higher bulk temperature raises, the more stress difference between inner surface and outer surface makes and the highest bulk temperature is at the corner section. It is necessary for the diminishment of the drum stress to make air flow, between drum and rim, move lively and use the materials of higher conductivity. The hair crack and the cause of drum failure seem to be started at the near corner section.

주요기술용어 : Hair Crack(헤어크랙), Finite Element Analysis(유한요소해석), Transient Analysis(과도해석), Bulk Temperature(분위기 온도), Thermal Stress(열응력)

1. 서 론

최근 차량의 단위중량당 엔진출력의 증가에 따른 차량의 총중량의 증가 및 차량평균속도의 증가 등으로 제동조건은 갈수록 가혹해지고 있다. 또한 과적, 과속, 급제동, 급경사주행 등 가혹한

조건하에서 사용되고 있기 때문에, 큰 제동에너지로 인하여 브레이크 드럼에 많은 열이 발생하게 된다. 드럼의 제동표면과 드럼의 외측표면사이에 발생하는 온도차는 드럼의 제동표면에 미세균열인 헤어크랙(hair crack)을 발생시키고¹⁾, 이 헤어크랙이 발생하면 차량에 소음과 진동이 발생하게 되고, 승차감이 떨어지게 되며, 결국에는 헤어크랙이 성장하여 파손에 이르게 된다.

드럼에 발생하는 온도분포는 운전자의 운전습관, 차량중량, 차량속도 등에 따라서 다양하게 변하므로 실험적으로 측정하기는 매우 어렵다. 따

* 회원, 동아대학교 기계공학과

** 회원 동아대학교 대학원

라서 본 연구에서는, 라이닝과 드럼과의 마찰에 의해 발생하는 브레이크 드럼의 온도분포를 유한요소법으로 해석하여, 드럼의 온도분포 경향을 파악하였다. 또한, 이 온도분포에 의해 발생하는 열응력에 대하여 해석을 수행하였다. 이를 위하여, 고속도로 상에서 드럼 내·외면의 시간에 따른 온도곡선을 구하였으며, 이 곡선을 바탕으로 드럼의 온도분포를 비선형(nonlinear) 과도해석(transient analysis)으로 수행하여, 드럼의 각 위치에 발생하는 온도분포를 시간의 변화에 따라 해석하였고, 이 온도분포를 이용하여 열응력 해석을 수행하였다.

2. 브레이크 드럼

대형 상용차에 적용되고 있는 브레이크 어셈블리의 일반적인 구조를 Fig. 1(a)에 나타낸다. 빗금 친 부분이 드럼이며, 드럼 커버(drum cover)에 의해 내부는 막혀있으며, 드럼의 외측은 림(rim)으로 둘러 쌓여져 있다.

브레이크 드럼의 재질은 자동차 메이커마다 조금씩 차이가 있으나 기본적으로는 회주철(FC250)을 사용하고 있다. FC250에 대한 물성값을 Table 1에 나타낸다.

3. 유한요소 해석

라이닝(lining)과 드럼의 마찰에 의해 발생하는 열은 드럼의 위치에 따라 다르고, 제동시간에 따라서도 달라진다. 주행중인 차량에 제동을 가하면, 드럼의 제동표면에서 발생한 열이 드럼의 외측표면으로 전달되고, 외측표면에서는 대류와 복사에 의하여 외부로 열 손실이 발생하게 된다. 또한 드럼의 내부가 밀폐되어 있다고는 하나, 내부 공기로의 열 손실도 무시할 수 없다. 이러한 제동과정을 주행 중에 반복하게 되면, 드럼의 전체 온도가 상승하게 된다. 따라서 드럼에 발생하는 온도분포를 유한요소법으로 해석하기 위해서는 과도해석이 필요하다

Table 1 Mechanical properties of FC250

Properties		FC250
Tensile Strength σ_{ts} (MPa)	Room temp.	250
	373K	230
	473K	241
	573K	259
	673K	249
	773K	230
Modulus of Elasticity, E(MPa)		115.000
Density, ρ (N/mm ³) $\times 10^{-4}$		7.25
Thermal conductivity K(W/mmK) $\times 10^{-3}$	Room Temp.	49.5
	373K	48.5
	473K	47.5
	573K	46.5
	673K	45
	773K	44.5
Specific heat capacity, C(J/N · K)		51
Thermal expansion coeff. α (/K) $\times 10^{-6}$	Room Temp.	10
	473K	11.7
	673K	13

3.1 지배방정식

브레이크 드럼의 온도 분포를 비선형 과도해석으로 수행하는 경우의 행렬식²⁾은 다음과 같다.

$$[C(T)] \{ \dot{T} \} + [K(T)] \{ T \} = \{ Q(T) \} \quad (1)$$

[C] : Specific heat matrix

[K] : Conductivity matrix

[Q] : Heat flow vector

{T} : Nodal temperature

{ \dot{T} } : Time derivative of {T}

식(1)에서 [C(T)], [K(T)], {Q(T)}는 온도의존성을 의미하며 과도해석에서는 하중과 경계조건이 시간에 따라 변한다.

3.2 대류열전달 계수

공기의 흐름에 노출된 브레이크 드럼의 외측 표면에서의 대류열전달 계수(film coefficient)를 구하기 위한 식은 다음과 같다.³⁾

$$h_R = 0.1(K_a / D) Re^{2/3}, \text{ m/hKm}^2 \quad (2)$$

$$Re = \frac{V \rho_a L_c}{\mu_a} \quad (3)$$

D : Drum diameter(m)

K_a : Thermal conductivity of air (Nm/hKm)

V : Vehicle speed (m/s)

ρ_a : Density of air (kg/m³)

L_c : Characteristic length (m)

μ_a : Viscosity of air (kg/m · s)

Re : Reynolds number

V=120km/h, L_c=0.274m, D=0.428m인 경우에 각 온도에 대하여 위 식(2) 및 (3)을 이용하여 대류열전달 계수를 구하면 Table 2와 같다.

Table 2 Film coefficient between drum and rim

Temperature (K)	298	400	500	600	650
Film coeff. (W/mm ² K) × 10 ⁻⁶	43.55	39.00	35.58	33.40	28.72

3.3 해석모델

브레이크 드럼을 유한요소해석 상용프로그램인 ANSYS로 해석하기 위한 모델을 Fig. 1에 나타낸다. 브레이크 드럼은 Fig. 1 (b)와 같이 3차원 원통형 모델이나, 축대칭을 고려하여 Fig. 1 (c)와 같이 2차원으로 생성하였다. 내부의 공기로의 열손실을 고려하기 위하여, 드럼의 내부공기에 의한 대류열전달이 적용되어야 하나, 내부공기의 흐름이 복잡하기 때문에, 대류를 적용하지 않고, 내부공기를 모델링하여 전도에 의한 열손실을 고려하였다. Fig. 1(c)에서 윗 부분은 드럼이며, 아랫부분은 드럼내부의 공기이다. 해석에 사용된 요소는 축대칭을 고려하기 위하여, 축대칭을 고려하기 위하여 축대칭 사각형 요소⁴⁾를 사용하였으며, 전체 요소의 수는 2226개이며, 절점 수는 2324개이다.

3.4 하중조건

제동시 브레이크 라이닝과 드럼과의 마찰에 의해 발생하는 열의 일부는 드럼내부의 공기로 손실이 발생하고, 나머지는 드럼외측의 공기로 대류와 복사에 의해 손실된다. 그러나 복사에 의한 열전달량은 대류의 10-14%정도⁵⁾에 불과하기 때문에 무시하였다.

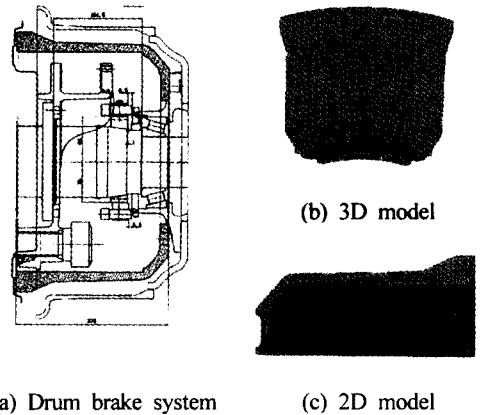


Fig. 1 Drum brake system and FE model

Fig. 2는 드럼의 내측 및 외측표면에서의 온도를 측정하기 위한 시험조건을 나타낸다. 비석면 라이닝이 장착된 차량에 대하여, 드럼의 내측표면의 온도를 473K로 올린 다음, 시속 120km/h에서 0.5g로 감속하여 정지하고, 다시 120km/h로 속도를 올려서 온도의 증가가 없을 때까지 반복시험을 실시하였다. 이 시험조건은 고속도로 상에서의 대형상용차의 주행속도를 120km/h로 추정하였으며, 주행중인 차량의 일반적인 제동조건이 0.2g-0.5g인 점을 감안하여 가혹한 제동조건이라 할 수 있는 0.5g로 감속하였다. 또한, 효율적인 온도데이터를 얻기 위하여 드럼의 변형이 비교적 작은 낮은 온도범위인 473K 이하의 온도 데이터는 피하고, 473K 이상의 온도 데이터만을 유효한 데이터로 취하였다. 드럼 내측표면의 온도측정은, 드럼의 외측표면 쪽에서 내측표면의 1mm전까지 홈을 뚫어, 드럼과 라이닝이 접촉하는 중심위치에서 측정하였으며, 외측표면의 온도

는 드럼 외측표면의 임의의 3점에서의 온도를 측정하여 가장 높은 온도를 나타내는 데이터를 취하였다.

Fig. 3은 드럼의 내측표면과 외측표면에서의 온도변화를 측정한 그래프이다. Fig. 3에서 드럼의 외측표면의 온도가 내측표면의 온도보다 높게 나타나는 구간이 발생하는 것은, 드럼의 내측에서 전달된 열이 드럼의 외측에 도달하면, 드럼의 외측은 온도가 최대치가 되는 반면에, 내측은 제동이 끝이 나서 드럼의 온도가 낮아지기 때문이다. Fig. 3의 inner와 outer의 온도는, 1사이클의 시험이 끝난 뒤, 다시 속도를 올리는 구간과 일정 온도 이하에서 내측표면과 외측표면의 온도가 거의 같게 되는 구간의 데이터는 생략한 것이다.

Fig. 3의 온도 데이터 중에서, 드럼과 라이닝이 접촉하는 내측표면에 대하여는, inner의 값을 입력하고, 드럼 외측표면에는 outer의 값을 입력하여 과도해석을 수행하였다. 이 때 총 해석단계(load step)는 42단계로 하였다. 열응력 해석은 열전달 해석에서 얻어진 다중단계(multiple load step)의 결과를, 구조해석의 각 단계의 하중으로 불러와 다중해석을 수행하였다.

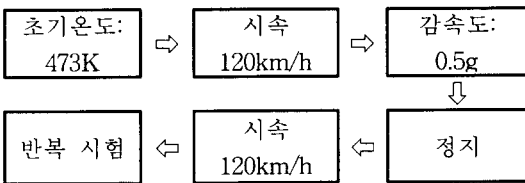


Fig. 2 Test condition of temperature on inner and outer surface of drum

4. 해석결과 검토

4.1 열전달 해석

Fig. 4의 (a), (b)는 각각 하중단계 5와 41에서, 드럼에 발생하는 온도분포를 나타낸다. Fig. 4의 (a)는 드럼의 외측표면의 온도가 내측표면의 온도 보다 더 높은 경우이며, 드럼과 라이닝이 접촉하는 부분에서는 드럼의 두께방향으로 규칙적인 온도 변화가 나타난다. 또한, Fig. 4의 (b)는

드럼의 내측표면의 온도가 외측표면의 온도 보다 높은 경우이며, 최대온도 693K는 Fig. 3의 측정된 온도 중에서 가장 높은 온도영역이다.

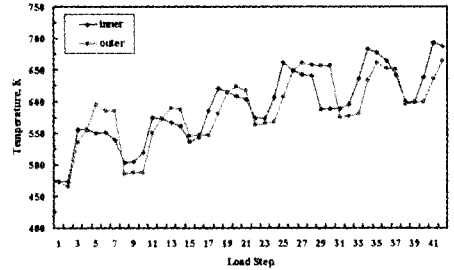
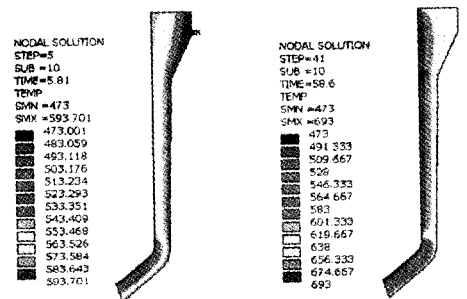


Fig. 3 Applied load for finite element analysis

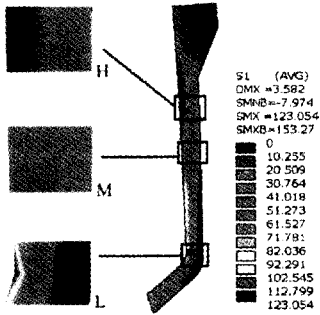
Fig. 5는 드럼의 각 위치에서, 시간에 따라 변화하는 온도를 나타낸 그래프이다. Fig. 5(a)는, Fig. 4(a)의 온도분포를 가지는 경우에 대하여, 열응력을 해석한 결과이다. 그림에서 L위치는 최대응력이 발생하는 위치이며, 드럼의 내측과 외측표면의 온도차가 가장 크게 발생하는 위치이고, M위치는 드럼의 내측과 외측의 응력 차가 가장 작게 나타난 곳이며, H위치는 드럼의 외측표면에 발생하는 응력이 내측표면에서 발생하는 응력 보다 크게 나타나는 곳이다. 이 L, M, H의 각 위치에서, 드럼의 내측을 n1, 외측을 n7로하여 드럼의 두께방향으로 7등분하여, 각 점에서 시간에 따른 온도변화를 Fig. 5의 (b), (c), (d)에 나타내었다.



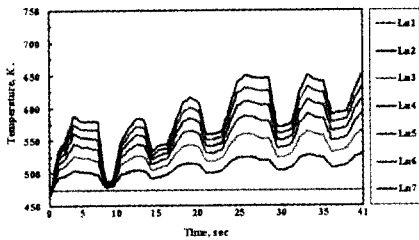
(a) Load Step 5

(b) Load Step 41

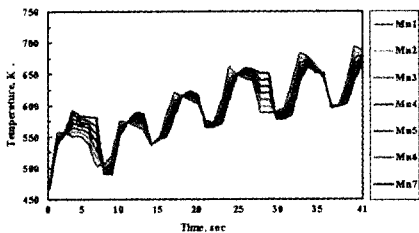
Fig. 4 Temperature distribution of drum



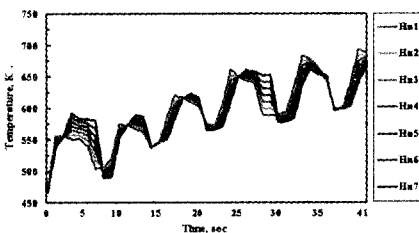
(a) The location of measurement



(b) The change of temperature at the location L



(c) The change of temperature at the location M



(d) The change of temperature at the location H

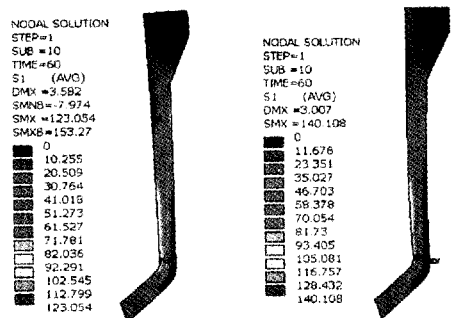
Fig. 5 The change of temperature dependent on time at the location L, M and H

Fig. 4와 Fig. 5로부터 알 수 있듯이, 드럼에 발생하는 온도분포는 드럼과 라이닝이 접촉하는 부분에서는 제동을 반복함에 따라, 드럼의 두께 방향으로 선형성을 보이며 증가하거나 감소한다. L부분에서는, 드럼 내·외측의 온도차가 크게 나타나고 있으며, 및 드럼과 라이닝이 접촉하는 부분과 접촉하지 않는 부분의 온도차도 크게 나타난다. 그러나 M 및 H위치에서는 드럼의 내측과 외측표면의 온도차가 미소하다.

4.2 열응력 해석

FC250과 같은 주철재의 경우는, 인장강도에 비하여 압축강도가 훨씬 높고, 취성이 강하므로, 변형에너지를 대변하는 von Mises 응력을 취하지 않고 최대주응력(maximum principal stress)을 취하였다. Fig. 6은 하중단계가 5인 경우와 41인 경우에 드럼에 발생하는 열응력의 분포를 나타낸다.

모든 단계에서 최대응력은 드럼의 내측표면에서 발생하고 있으며, 드럼에 발생하는 최대응력은 가장 높은 온도분포를 가지는 단계41에서 발생하며, 최대응력은 140MPa이다. 이 최대응력은 693K에서의 인장강도 245MPa 보다는 아주 낮은 값을 나타내나, 이는 순수 열에 의해서만 발생하는 응력이므로, 이 값만으로는 드럼의 안정성 여부를 판단할 수는 없다.



(a) Load step 5

(b) Load step 41

Fig. 6 Stress distribution of drum

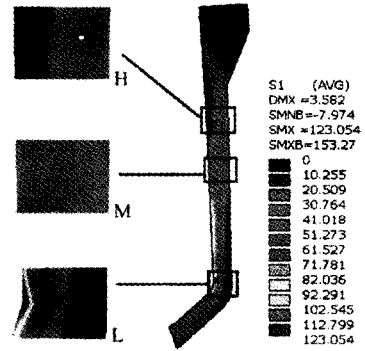
응력분포의 경향을 살펴보면, Fig. 7 (a)의 M 점을 기준으로 하여, L방향과 H방향의 응력분포 양상이 달라진다. L방향에서는 드럼의 내측표면이 외측표면 보다 높은 응력을 나타내며, H방향은 드럼의 외측표면이 내측표면 보다 더 높은 응력을 나타낸다.

Fig. 7의 (b), (c), (d)는 각각 L, M, H위치에서 시간에 따른 응력의 변화를 나타내는 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이, 최대응력은 L위치에서 발생하고, 드럼의 내측표면과 외측표면의 응력차는 약 140MPa로 아주 높은 값을 나타내고, 하중단계가 증가하여도 드럼의 내측과 외측 표면의 응력차는 거의 일정하다. L위치에서 최대응력이 발생하는 것은, L위치에서 드럼의 형상이 변하고 있으며, 드럼과 라이닝이 접촉하는 끝단이기 때문에, 온도변화의 경계가 되어 드럼의 변형이 구속되기 때문이라 생각된다.

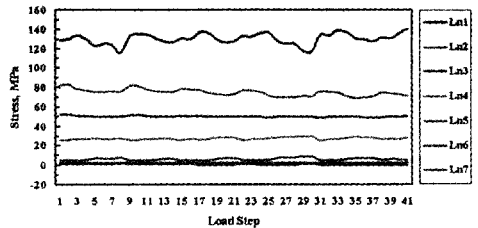
M위치에서는 드럼의 내·외측표면의 응력차가 가장 낮게 나타나고 있으나, 하중단계가 증가함에 따라 응력차의 폭이 줄었다 늘어났다를 반복하면서, 전체적으로는 응력차가 커지는 경향을 나타낸다. 이 처럼 응력차의 폭이 줄었다 늘어났다를 반복하게 되면, 드럼이 마치 반복인장하중을 받는 것과 같아서, 드럼파손의 한 원인이 될 수 있다.

H위치에서는 드럼의 내측표면과 외측표면의 응력차가 비교적 일정하게 나타나며, 하중단계가 증가할수록 응력차가 줄어드는 경향을 보인다. 이 위치에서는 드럼 외측표면에서 높은 응력이 나타난다.

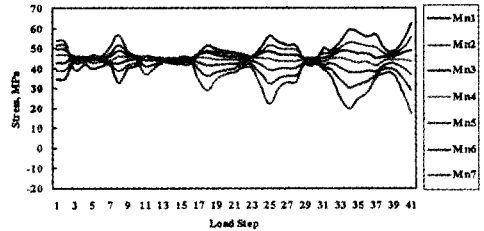
Fig. 5의 (b), (c), (d)와 Fig. 7의 (b), (c), (d)를 비교하여 보면, 드럼에 발생하는 온도차가 커지면, 드럼에 발생하는 응력차도 크게 나타난다. 또한, 드럼 전체의 온도가 높을수록, 응력은 크게 발생한다. 따라서 드럼의 내측과 외측에 발생하는 온도차를 줄이고, 드럼전체의 온도상승을 줄이는 것이, 드럼의 내측과 외측의 응력차를 줄이는 방법이며, 드럼에 발생하는 최대응력의 크기를 줄이는 방법임을 알 수 있다.



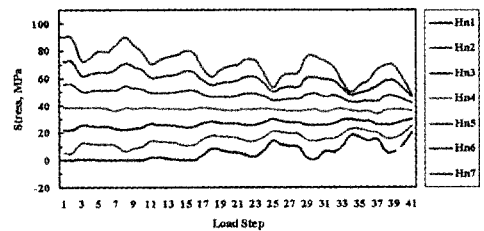
(a) The location of measurement



(b) The change of temperature at the location L



(c) The change of temperature at the location M



(d) The change of temperature at the location H

Fig. 7 The change of stress dependent on time at the location L, M and H

드럼에 발생하는 온도차이를 줄이는 방법으로는, 드럼 재질의 개선을 들 수 있다. 즉, 열전달계수가 높은 재질을 사용함으로써, 드럼의 내측표면과 외측표면의 온도차를 줄일 수 있다. 또한, 드럼의 전체온도를 낮추기 위해서는, 드럼과 림 사이에서의 공기의 유동을 활발하게 해주는 방법, 즉 대류열전달 계수를 높이는 방법과 열용량이 증가하도록 큰 치수의 드럼을 사용하는 방법 등이 있다. 이 경우는 브레이크 어셈블리의 변경이 필요하다.

서론에서 언급하였듯이, 드럼의 내측표면에 발생하는 헤어크랙의 원인은 드럼의 내측표면과 외측표면의 온도차이다. Fig. 5와 Fig. 7로부터, 헤어크랙은 온도차가 가장 크고, 응력차도 가장 큰, L점을 중심으로 생성 될 것으로 판단되며, 헤어크랙을 방지하기 위한 방법으로는, 열전도계수가 높은 재질의 사용과 드럼표면에서의 대류열전달 계수를 높이는 것이다.

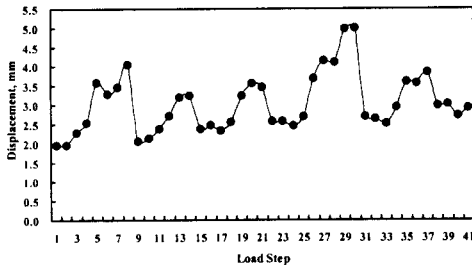


Fig. 8 The change of displacement according to change of load step

Fig. 8은 드럼에 발생하는 변위를 나타낸다. 그림에서, 변위는 단계 8과 단계 30에서 높은 값을 나타내는데, 하중단계 30에서 최대변위를 나타내며, 최대변위는 5mm이다. 이들 단계는 Fig. 3의 온도데이터에서 드럼의 내측과 외측표면의 온도차가 가장 크게 나타나는 곳이다. 따라서, 드럼에 발생하는 변위는 내측표면과 외측표면의 온도차가 클수록, 그리고 드럼의 온도가 높을수록 크게 발생한다.

따라서, 드럼의 온도차를 줄이고, 전체온도를

낮추는 것이, 드럼에 발생하는 변위를 줄이는 방법이다.

5. 결 론

FEA를 이용하여 브레이크 드럼의 온도분포 및 열응력 분포에 대하여 해석한 결과는 다음과 같다.

1) 드럼에 발생하는 온도는 하중단계가 증가할수록 높게 나타나고, 내측표면과 외측표면의 온도차도 하중단계의 증가에 따라 증가하며, L위치에서 온도차가 가장 크게 나타났다.

2) 모든 하중단계에서, 온도에 의해 발생하는 열응력은 드럼의 내측표면에서 최대가 되며, 최대응력은 최대온도인 693K에서 140MPa이다. 드럼에 발생하는 응력은, M점을 기준으로 L점 방향으로서는 내측표면이 외측표면 보다 높은 응력을 나타내고, H점 방향으로서는 외측표면이 내측표면 보다 높은 응력을 나타낸다.

3) 드럼의 내측과 외측표면에 발생하는 응력차는 L위치에서 140MPa로 가장 크게 나타나며, L위치에서는 하중단계의 변화에 따른 응력차의 변화가 미소하고, M위치에서는 응력차가 가장 낮게 나타났으나, 하중단계가 증가함에 따라, 응력차의 변화 폭이 크다. 또한, H위치에서는 하중단계의 증가에 따라 응력차가 점점 감소한다.

4) 드럼에 발생하는 변위는 온도가 높을수록, 온도차가 클수록 크게 나타났으며, 드럼에 발생하는 최대변위는 5mm로 드럼의 끝단에서 발생한다.

5) 드럼에 발생하는 온도차를 줄이기 위한 방법으로는, 열전도계수가 높은 재질을 사용하는 것과 드럼과 림 사이에서 공기의 유동이 활발하게 일어나도록 브레이크 어셈블리를 바꾸는 것이다.

6) 드럼에 발생하는 헤어크랙은, 드럼의 내측과 외측표면의 온도차에 의하여 생성되며, 온도차를 줄이는 것이 헤어크랙의 방지책이다. 헤어크랙은 온도차가 가장 크고, 응력차가 가장 큰, L점을 중심으로 생성될 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 1) A. Fukano and H. Matsui, "Development of Disk Brake Design Method Using Computer Simulation of Heat Phenomena," SAE Technical Paper 860634, pp. 1~7, 1986.
- 2) "ANSYS Heat Transfer User Guide for Revision 5.5", ANSYS Inc. 1999.
- 3) Rudolf Limpert, "Brake Design and Safety," p118, 1992.
- 4) "ANSYS Element Reference Release 5.5", ANSYS Inc. 1999.
- 5) 김휘중, 김종백, 장윤태, 송의환, "트럭 및 대형버스용 튜브리스 래디얼 타이어의 비드부 크랙발생 메카니즘 연구," 한국자동차공학회 1998년 춘계학술대회 논문집, pp. 651~656, 1998.