

브레이크 드럼의 형상에 따른 과도 열전달 해석

김양술[#], 안수철^{*}

Transient Heat Transfer Analysis of Brake Drum Shape

Yang-Sul Kim[#] and Su-Chul An^{*}

ABSTRACT

This paper presents a transient heat transfer analysis of a drum brake shape. The transient heat transfer analysis of automotive drum brakes with frictional contact is performed by using the finite element method. The drum brake type studied in the page is the internally expanding one in which two shoes fitted externally with frictional material are forced outward against surface a rotating drum on the wheel unit. In this case, the braking power is produced by the friction force between a drum and a lining, and is converted into heat. The brake drum has constant material properties. The air inside the drum has temperature-dependent thermal conductivity and enthalpy. Radiation effects are ignored. The result explains the reason why hair crack and cause of drum failure occur. The temperature of drum is in proportion to the drum thickness and nonlinear changes at every points of drum. It's necessary for the decrease of the drum temperature to make the air inside drum flow.

Key Words : Drum brake (드럼 브레이크), Heat transfer interpretations (열전달 해석)

1. 서론

유압식 브레이크에 속하는 드럼 브레이크는 차륜과 일체로 회전하는 브레이크 드럼내부에 Fig. 1 과 같이 두 개의 브레이크슈(brake shoe)가 있다. 브레이크슈와 확장력을 발생시키는 부품들은 백 플레이트(back plate)에 설치된다. 제동을 하면 브레이크 슈는 확장 기구에 의하여 드럼의 내면에 압착되고 브레이크슈에 부착된 라이닝과 드럼내부의 마찰력에 의하여 제동 효과가 발생된다. 드럼 브레이크는 마찰면적을 크게 할 수 있기 때문에 대형 자동차의

전·후륜과 승용차의 후륜에 주로 사용되고 있다.¹

드럼 브레이크는 제동력이 좋은 반면에, 브레이크를 계속해서 가혹한 조건으로 반복 조작할 경우, 브레이크 드럼과 브레이크슈에 마찰력이 축적되어 브레이크 드럼과 브레이크슈를 열팽창 시키고 동시에 라이닝의 마찰계수를 저하시켜 제동력이 감소하는 페이드 현상이나 헤어크랙이 일어날 수 있다. 이러한 현상은 브레이크 드럼의 열용량이 충분하지 않거나 방열성이 좋지 못 할 경우 또는 긴 내리막에서 반복 사용할 때 일어난다.²

기존의 드럼 브레이크를 연구한 논문들은 열용

☞ 접수일: 2007년 7월 3일; 게재승인일: 2008년 5월 13일

교신저자: 홍익대학교 기계정보공학과

E-mail: kimys@hongik.ac.kr Tel. (041) 860-2586

* 홍익대학교 기계정보공학과 대학원

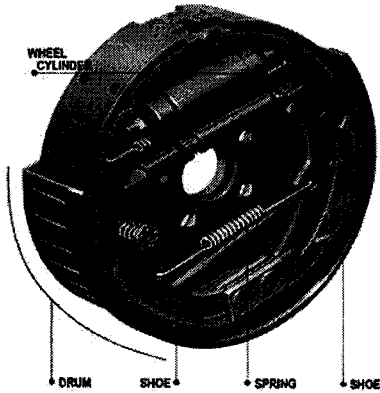


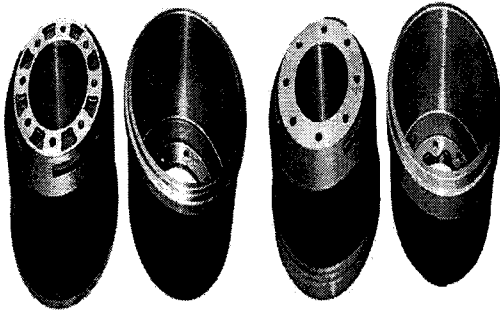
Fig. 1 Drums brake assembly

력과³ 열탄성 접촉해석⁴ 및 열전달,⁵ 동특성해석⁶ 등을 수행하였고, 한 가지 모양의 일반 드럼 브레이크에 국한하여 해석을 수행하였다. 이 논문에서는 브레이크 드럼의 형상에 따른 과도 열전달 해석을 하여, 실제 차량의 조건에 좀 더 현실적인 접근을 시도하였다.

2. 브레이크 드럼의 형상에 따른 해석

2.1 문제의 구성

브레이크 드럼의 일반적인 형태는 Fig. 2와 같다.



(a)dong-a axle (b) ssangyong transtar
Fig. 2 Brake drums

Fig. 2에서 알 수 있듯이, 실제 상용차에 쓰이는 브레이크 드럼의 형태는 실질적으로 틀리다. 이유는 내부의 열을 얼마만큼 좋게 방열 시키느냐는 방법론에서 모양의 변화를 가져온 것이다. 브레이크 드럼의 형태는 국내 상용차를 기준으로 크게 두 가

지로 나눌 수 있다. 외부의 모양변화가 없는 경우와 원주방향에 90도의 각을 가진 냉각핀이 달린 경우이다.

이 논문에서는 외부의 모양변화가 없는 경우를 Case 1 이라 칭하며, 원주방향에 90도의 각을 가진 냉각핀이 달린 경우를 Case 2 라 칭하고, 원주방향과 평행한 냉각핀을 가진 경우를 Case 3 라 칭하며 각각의 단면적은 같다. 각각의 형상에 대한 모델링은 3D modeler인 Pro-e를 사용하여 모델링 하였으며, 각각의 형상은 Fig. 3과 같다.

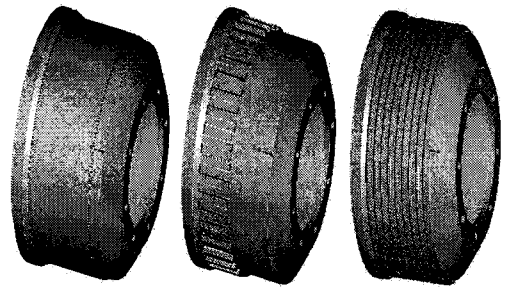


Fig. 3 Brake drum of case 1, case 2, case 3

각각의 형상에 대한 해석은 유한요소해석 프로그램인 Ansys를 사용하여 결과치를 얻어 냈으며, 해석 조건은 고속의 조건 120Km/h의 달리고 있는 상용차를 가속한 제동조건 0.5g로 제동하였을 때, 드럼의 변형이 심한 400K에서 700K 사이의 온도를 주 관심대상으로 삼았고, 드럼의 외부는 공기에 의한 대류 열전달을 외부 조건으로 주었으며, 시간에 따른 열전달의 변화를 해석하기 위하여 과도 열전달 해석을 하였다.

열전달 프로세스는 적당한 율방정식(rate equation)으로 정량화하는 것이 가능하며, 온도분포 T(x)를 가지는 1차원 평면 벽에 대한 율방정식은 다음과 같다.

$$q''_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

열유속(heat flux) q''_x (W/m²)는 전달 방향에 수직인 단위면적당 열전달율이며, 이 방향으로의 온도구배 dT/dx 에 비례한다. 비례상수 k 는 열전도율(thermal conductivity, W/m-K) 이라는 전도 물성치이며, 온도분포가 선형인 경우 온도구배는 다음과

같다.

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (2)$$

(2)식에 의해 열유속을 다시 쓰면

$$q''_x = -k \frac{dT}{dx} = k \frac{\Delta T}{L} \quad (3)$$

이 방정식은 단위면적(unit area)당의 열전달을 준다는 뜻이며, 면적 A인 평면 벽을 통한 전도에 의한 열전달을 $q_x(W)$ 는 열유속과 면적의 곱인 $q_x = q''_x \cdot A$ 이다. 대류열전달의 특별한 성질에 관계없이 적절한 대류열유속은 다음 형태로 표현된다.

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (4)$$

여기서 대류열유속(heat flux) $q''(W/m^2)$ 은 표면 온도 T_s 와 유체온도 T_∞ 와의 차이에서 비례한다. 이 식을 Newton의 냉각 법칙(Newton's law of cooling)이라 하고 비례상수 $h(W/m^2 \cdot K)$ 는 대류 열전달 계수(convection heat transfer coefficient), 막 컨덕턴스(film conductance), 또는 막 계수(film coefficient)라 부르며 대류 열전달에 영향을 미치는 모든 파라미터들을 포괄한다. 특히 이것은 표면의 기하학적 형상, 유동의 성질 그리고 유체의 열역학적 물성치와 전달 물성치들의 변화에 영향을 받는 경계층에서의 조건들에 의존한다.

반복 제동시의 드럼의 온도 분포는 다음과 같다.

$$\Delta T = \frac{q_D t}{\rho_D C_D V_D} \quad (5)$$

반복 제동을 한 후 드럼의 냉각을 나타내는 총괄식(Lumped Formulation)은 다음과 같다.

$$A_0 h_D [T_\infty - T(t)] = \rho_D C_D V_D \frac{dT(t)}{dt} \quad (6)$$

식(6)을 적분하면, 다음과 같은 냉각 온도 반응을 얻게 된다.

$$\frac{T(t) - T_\infty}{T_i - T_\infty} = e^{-(A_0 h_D / \rho_D C_D V_D) t} \quad (7)$$

공기유동에 완전히 노출된 드럼의 열전달계수 값은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$h_D = 0.1(k_D / D) Re^{2/3} \quad (8)$$

여기서 k_D 는 열전도율이며, h_D 는 드럼의 열전달계수이다.

이 논문에서 드럼의 열전도율은 $54.7(W/m \cdot K)$, 밀도는 $7870(kg/m^3)$, 비열은 $574(J/kg \cdot K)$ 로 하였으며, 드럼의 온도는 $700K$ 로 하였다. 드럼 외부의 공기 온도는 $298K$ 이며, 대류 열전달 계수는 100 으로 가정하였다. 또한 드럼 내부의 라이닝과 드럼사이의 공기의 열전도만을 고려한 것은, 공기의 유동이 거의 없고 대류가 미비하기 때문이다.

드럼의 라이닝이 제동을 하여 내부의 온도가 $700K$ 까지 상승한 후, 드럼과 라이닝의 간격이 일정하게 떨어진 후부터 드럼의 열전도에 의한 온도 분포를 10 초 동안 20 Step으로 나누어 파악하였다. 내부공기의 온도에 따른 열전달 계수는 Table 1과 같다.

Table 1 Air Conductivity

Air Conductivity (W/m·K)					
temperature	Conductivity	temperature	Conductivity	temperature	Conductivity
400K	33800	550K	43900	700K	52400
450K	37300	600K	46900	750K	54900
500K	40700	650K	49700		

드럼내부의 공기 열전달계수로는 패드와 라이닝의 효과를 완전히 나타내지 못할 것이라는 가정 아래 공기의 엔탈피 값을 해석요건으로 추가하였다.

또한, 내부공기의 온도에 따른 엔탈피 변화는 Table 2와 같다.

Table 2 Air Enthalpy

Air Enthalpy (J/kg)					
temperature	Enthalpy	temperature	Enthalpy	temperature	Enthalpy
400K	400980	550K	555740	700K	713270
450K	451800	600K	607020	750K	767290
500K	503020	650K	659840		

2.2 Case 1,2,3 드럼의 과도 열전달 해석

2.2.1 해석 모델

해석모델의 외부조건과 내부조건은 2.1절에서 제시한 조건과 같으며, 해석을 하기 위하여 Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6과 같이 브레이크 드럼의 단면을 형상화하여 2D로 해석을 하였다.

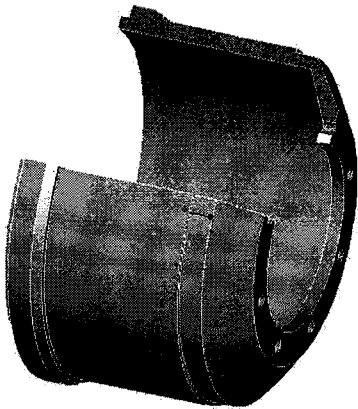


Fig. 4 Brake drum section shape of case 1

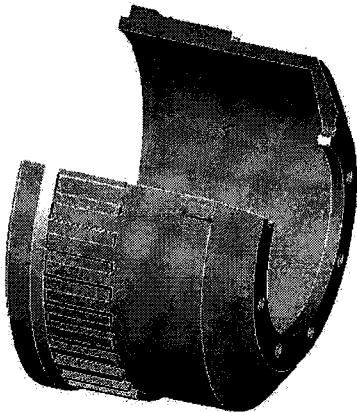


Fig. 5 Brake drum section shape of case 2



Fig. 6 Brake drum section shape of case 3

브레이크 드럼의 단면만을 해석한 이유는, 내부로부터 외부로의 열전달이 중요하기 때문이다. 각각의 형상에 대한 열전달 해석을 하였다. 해석모델 중 Case 3의 경우를 살펴보았다. Fig. 7은 위의 Fig. 6을 모델링 한 것이고, Fig. 8은 브레이크 드럼의 외부조건을 준 상태이다. 실제로 공기의 유동이 있는 부분에 대류 열전달 계수를 주었다. Fig. 9는 모델을 Meshing한 것이다.

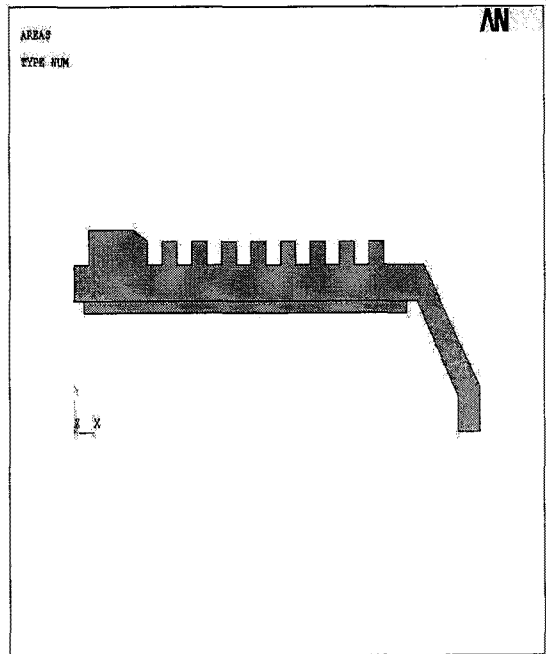


Fig. 7 2D Modeling of Case 3

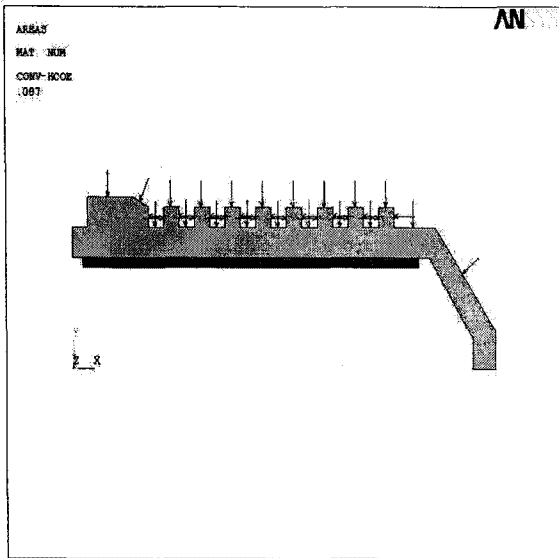


Fig. 8 Surface Condition of Case 3
(Convection Heat Transfer Coefficient of Air)

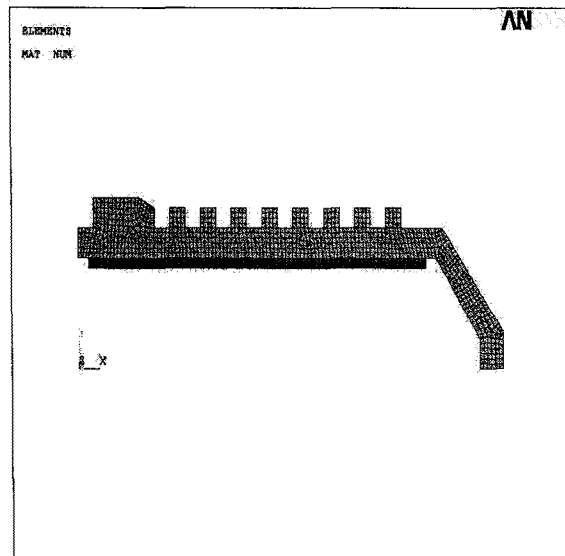


Fig. 9 Finite Element Mesh of Case 3

2.2.2 Case 1, 2, 3 드럼의 해석

모델 단면을 해석단면으로 삼고 드럼 내측의 라이닝이 제동 후에 그사이의 공기층을 모델링 하여 열전도 계수와 엔탈피 값을 조건으로 주었다. 드럼과 라이닝이 제동을 하여 속도를 감속한 다음, 주 브레이크에서 발을 떼어 드럼과 라이닝이 떨어졌을

때 즉 그 사이의 공기가 700K부터 냉각되는 과정의 열전달을 보이고 있다. 시간은 10초이며 20단계로 드럼의 내부 온도는 600K이다. 각각의 형상을 2단계에서 20단계로 해석을 하였다. 각각의 형상의 해석 중 최종단계인 20단계 일 때의 해석결과를 Fig. 10~12로 나타내었다.

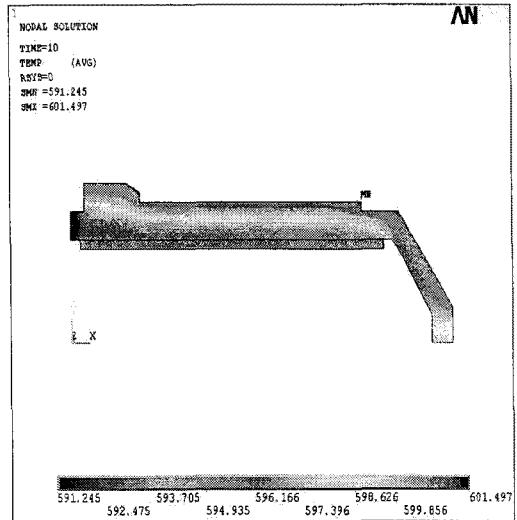


Fig. 10 Temperature distribution inside the brake for step 20 of case 1

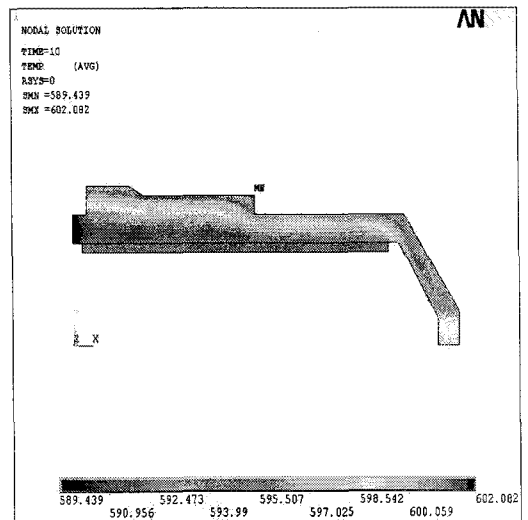


Fig. 11 Temperature distribution inside the brake for step 20 of case 2

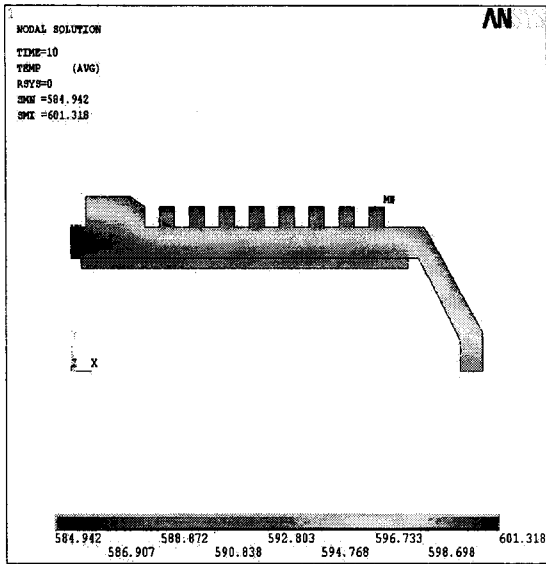


Fig. 12 Temperature distribution inside the brake for step 20 of case 3

2.3 해석 결과 및 분석

Case 1의 경우, Fig. 10의 그림을 보면, 최고 온도는 제동이 끝난 후 원점을 기준으로 5/8지점에서 원점으로 이동하였고, 최저 온도는 6/8지점에서 고정되었다. 제동반복의 경우 최고온도점인 5/8지점에서 지속적으로 온도가 올라갈 것으로 사료되며, 이는 이 지점에서 헤어크랙이 발생할 가능성이 가장 크다. 열전달의 온도 분포는 비교적 균일하게 전달됨을 알 수 있다.

Case 2의 경우, Fig. 11의 그림을 보면, 최고 온도는 제동이 끝난 후 원점을 기준으로 6/8지점에서 원점으로 이동하였고, 최저 온도는 4/8지점에서 고정되었다. 제동반복의 경우 최고온도점인 6/8지점에서 지속적으로 온도가 올라갈 것으로 사료되며, 이는 이 지점에서 헤어크랙이 발생할 가능성이 가장 크다.

Case 3의 경우, Fig. 12의 그림을 보면, 최고 온도는 제동이 끝난 후 원점을 기준으로 4/8지점에서 원점으로 이동하였고, 최저 온도는 5/8지점에서 우측의 냉각핀 끝부분으로 이동하였다. 제동반복의 경우 최고온도점인 4/8지점에서 지속적으로 온도가 올라갈 것으로 사료되며, 이는 이 지점에서 헤어크랙이 발생할 가능성이 가장 크다. 열전달의 온도

분포는 전체적으로 균일함을 알 수 있다.

아래의 Fig. 13은 각각의 형상에 대한 최고점과 최저점들의 온도분포를 함께 나타낸 것이고, Fig. 14는 최고점과 최저점들의 온도차를 나타내고 있다.

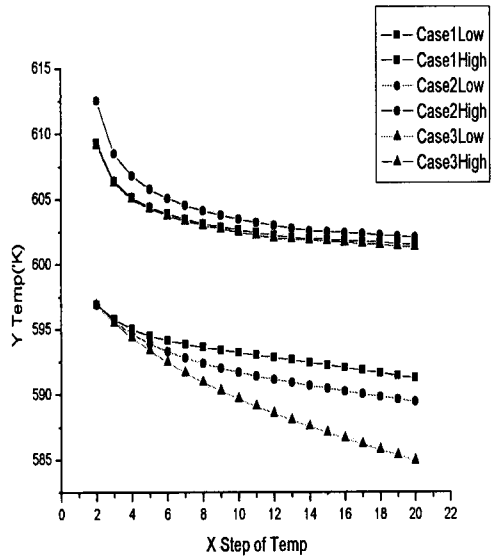


Fig. 13 Brake drum max-min temp comparison for all cases

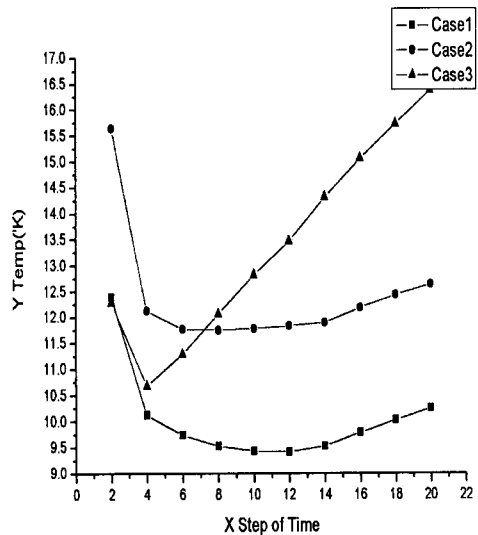


Fig. 14 Brake drum subtraction temp comparison

Fig. 14를 보면 최고점의 기울기는 전체적으로 거의 같은 기울기를 나타내고 있지만, 최저점의 기울기는 Case 3이 가장 크며, 그 다음으로 Case 2, Case 1의 순이다. 그리고 온도차가 가장 큰 것은 Case 3이며, 그다음으로 Case 2, Case 1이다.

3. 결론

이 논문에서는 각각의 형상에 따른 브레이크 드럼의 과도 열전달 해석을 하였다. 일반적인 해석의 대상인 Case 1과 요즘 늘어나고 있는 형태의 Case 2, 마지막으로 제안한 Case 3에 대한 해석을 통하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

1) 각각의 형상에 대해 헤어크랙이 일어날 부분을 지정하였다. 헤어크랙이 발생할 가능성이 있는 부분은 브레이크 드럼의 안쪽 면 이었고, 그 위치는 Case 1의 경우 원점을 기준으로 5/8지점이었으며, Case 2의 경우 원점을 기준으로 6/8지점 이었고, Case 3의 경우 원점을 기준으로 4/8 지점이었다.

2) 각각의 형상에 대해 페이드 현상 및 열전달의 경향을 살펴보았다. 페이드 현상은 브레이크 드럼의 열용량이 충분치 못하거나 방열성이 좋지 못할 경우 발생한다. 따라서 페이드 현상을 줄이는 것은 방열성을 좋아지게 하는 것이며, 이것은 과도 열전달을 크게 하는 것이다. 또한, 과도 열전달이 온도차에 비례하므로, 각각의 형상에 대한 온도차를 보면, 온도차가 큰 것은 Case 3이며 그다음 순으로 Case 2와 Case 1이다. 이것은 곧 과도 열전달이 가장 좋은 것은 이 논문에서 제시한 Case 3이며, 그다음 순으로 Case 2, Case 1이다.

차후에 각각의 형상에 대한 실험치와의 비교 규명이 필요하며, 전체적인 경향을 살펴봄으로서 현장에서 브레이크 드럼을 설계하는 엔지니어에게 실질적인 도움이 될 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2006학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었음.

참고문헌

1. Kim, C. S., "Fundamentals of Automotive 1999 Engineering," SciTech, pp. 232-245, 1999.
2. Crouse, W. H. and Anglin, D. L., "Automotive Mechanics," McGraw-Hill, pp. 711-728, 1993.
3. Halderman, J. D., "Automotive Brake Systems," Prentice-Hall, pp. 98-118, 1997.
4. Frention, J., "Handbook of Vehicle Design Analysis," M.E.P, pp. 675-705, 1997.
5. Park, Y. C. and Park, D. S., "Thermal stress Analysis of Brake Drum by Using Finite Element Analysis," Transaction of KSAE, Vol. 8, No. 3, pp. 77-84, 2000.
6. Goo, B. C. and Seo, J. W., "Thermoelastic Contact Analysis of Drum Brakes by Finite Element Method," SAE, Vol. 9, No. 3, pp. 173-180, 2001.
7. Lee, K. S., Kuk, J. Y. and Chyun, I. B., "Unsteady State Heat Transfer Analysis of Drum Brake System," Transaction of KSAE, Vol. 7, No. 9, pp. 172-181, 1999.
8. Lee, H. N., Lee, S. T., Lee, K. C. and Song, S. K., "Dynamic Characteristics Analysis of Brake Drum and Shoe," Journal of KASBIR, Vol. 4, No. 2, pp. 85-92, 2004.
9. Ham, S. K. and Lee, K. S., "Stress and temperature analysis of a drum brake using FEM," Proceeding of the Korean Society for Precision Engineering Spring Conference, pp. 707-710, 2001.
10. Yoon, Y. S., Nam, J. S., Yoo, S. E. and Han, B. S., "Temperature Distributions and Thermal Distortions of the Al-MMC Brake Drum," Proceeding of the Korean Society for Precision Engineering Autumn Conference, pp. 433-436, 2000.