

## 드럼 브레이크 시스템의 비정상 열전달 해석

### Unsteady State Heat Transfer Analysis of Drum Brake System

이계섭\*, 국종영\*, 천인범\*  
Kyesub Lee, Jongyoung Kuk, Inbum Chyun

#### ABSTRACT

The brakes employed on commercial vehicles must be able to withstand three types of demanding services which are use-emergency stops from high speed, many repeated stops as in a delivery or bus route, and speed control in mountain descents.

Two types of friction brakes are in use ; drum breaks and disc brakes. Drum brakes are of the internally expanding type in which two shoes fitted externally with friction material are forced outward against the inside of 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.

In this research, an unsteady state heat transfer analysis for drum brake system of heavy truck has been performed by ABAQUS/Standard code in the case of single-braking and the repeated braking condition.

The temperature histories obtained by the Finite Element analysis have been compared with the result calculated by the simplified formulation and the result obtained by the experiment of real vehicle conditions.

주요기술용어: Drum Brake System(드럼 브레이크 시스템), Braking Power(제동마력), Temperature History(온도계적), Distribution of Temperature(온도분포), Unsteady State Heat Transfer Analysis(비정상 열전달해석)

#### 1. 서론

자동차의 브레이크 시스템은 주행 중인 자동차의 속력을 줄이거나 주차 중 불의에 의한 자동차의 이동을 방지하는 장치로써, 승객의

안전성 측면에서 조향장치와 더불어 가장 중요한 시스템이다. 그래서 자동차 제동시의 안전성 확보를 위해 새로운 고성능 브레이크 시스템의 개발은 중요한 과제로 꾸준히 연구되어지고 있다.

브레이크 시스템은 자동차의 주행속도, 제동조건, 도로조건, 재질과 형상, 차체의 형상,

\* 정회원, 기아자동차

냉각조건등 매우 다양하고 복잡한 설계인자를 고려한 최적설계가 요구되어지고 있다.<sup>1,10)</sup>

지금까지 국내에서는 축적된 관련 기술들이 부족하여 적절한 대응을 못하고 있으며, 많은 기술들을 해외에 의존하고 있는 형편이다. 그러나, 최근에는 국내에서도 마찰, 마멸 특성 해석이나 유한 요소법(Finite Element Method)을 이용한 브레이크 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

브레이크 시스템의 연구 개발에서는 열변형과 편 마모, 소음과 진동의 발생, 과도한 온도 상승으로 인한 열적인 문제가 중요한 연구 대상으로 되고 있다.

지금까지 연구 동향을 보면, Newcomb<sup>2~5)</sup> 등은 유한요소법(FEM)을 이용하여 제동시 패드(Pad)와 디스크(Disc)사이의 압력 분포에 대한 연구와 디스크에 불 균일하게 분포한 압력을 고려한 열적 특성을 연구하였으며, Katsuhiko<sup>6)</sup> 등은 디스크 브레이크의 비정상 열적 거동을 연구하였고, Highly<sup>7)</sup>는 브레이크 시스템의 열적 특성을 결정하는 기술에 대해서, Rhee<sup>8)</sup> 등은 브레이크 시스템의 마찰, 마멸, 소음에 대한 마찰 막(Friction Film)의 영향에 대해 각각 연구하였다. 또한 김청균<sup>9)</sup> 등은 Slab법을 이용하여 급제동시 디스크 브레이크의 온도 제적을 수치 해석적인 방법으로 연구하였다.

브레이크 시스템의 설계 인자들이 다양하고 복잡하여 브레이크 설계시에 이론적 접근 방법은 어려움이 많으므로 실제와 유사한 반복 실험을 통하여 브레이크 시스템을 최종 검증하는 것으로 새로운 브레이크 시스템을 개발하여 왔다. 그러나 최적의 브레이크 시스템을 전적으로 시행착오적인 반복 실험에 의존할 경우 시간적으로나 경제적으로 많은 손실을 초래하게 된다. 브레이크 시스템에 관련된 제반 설계 인자를 고려한 유한 요소 계산을 수행함은 설계 개발 기간을 단축시킬 수 있으므로 새로운 브레이크 시스템의 개발 가능성에 대한 사전 검토가 요구되거나 또는 대상

차량이 바뀌는 경우에는 매우 유효한 연구 수단이 되고 있다.

본 연구에서는 대형 상용 차량에 사용되고 있는 드럼 브레이크 시스템에 대하여, 특히 차량의 제동 시 드럼과 라이닝의 마찰에 의해 열을 발생시키고, 그에 따른 열변형이나 소음 등의 문제를 발생시키는 드럼에 대해 상용 해석 코드인 ABAQUS/Standard<sup>13)</sup>를 이용하여 비정상 열전달 해석을 수행하였다.

해석은 주행 중이던 차량이 1회 제동시와 도로 조건에 따라 제동과 주행을 반복하는 반복 제동의 두 경우에 대해서 드럼의 열적 거동 특성을 파악하였다. 해석에서 얻은 드럼의 열적 거동 특성은 총괄시스템(Lumped-System)과 반-무한 고체(Semi-Infinite Solid)로 가정간 간단한 수치 계산식(9),(14) 결과와 실차 상태에서 실험한 결과<sup>12)</sup>와 비교·검증하였다.

본 연구는 드럼에 대한 비정상 열전달 해석을 통하여, 브레이크 시스템에 대한 설계 기술 검토 및 향후 독자 개발을 위한 설계 기술력 확보를 위해 수행되었다.

## 2. 기본 이론

### 2.1 제동에너지 및 제동 마력

경사가 없는 일반 도로에서 초기 속도  $V_1$ 으로 주행 중인 차량을 제동시킬 경우, 차량에 존재하는 차체 관성에너지, 바퀴의 회전에너지의 합을 제동에너지(Braking Energy)<sup>10)</sup>라고 한다.

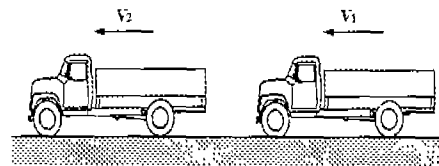


Fig. 1 Vehicle on the road

Fig. 1과 같이 초기 속도  $V_1$ 에서 제동한 후 속도  $V_2$ 까지 차량을 감속시킬 때 제동에너지

는 다음과 같다.

$$E_b = \left(\frac{m}{2}\right)(V_1^2 - V_2^2) + \left(\frac{I}{2}\right)(\omega_1^2 - \omega_2^2) \quad (1)$$

제동에 의해 차량이 완전 정지하게 되면  $V_2$  와  $\omega_2$ 가 0이 되므로, 식(1)은 다음과 같이 된다.

$$E_b = \frac{1}{2} m V_1^2 + \frac{I \omega_1^2}{2} \quad (2)$$

여기서,  $m$ 은 차량 질량을 나타내며,  $I$ 는 회전하고 있는 부품들의 관성 질량모멘트를 나타낸다. 회전하고 있는 모든 부품들이 바퀴의 회전에 비례한다고 가정하면  $V=R\omega$ 로 표현할 수 있고,  $V=R\omega$ 를 이용하여 식(2)을 정리하면 다음과 같이 된다.

$$E_b = \frac{m}{2} \left(1 + \frac{I}{R^2 m}\right) V_1^2 \approx \frac{k' m V_1^2}{2} \quad (3)$$

여기서,  $R$ 은 타이어의 반경을 나타내고,  $k'$ 는 회전 질량에 대한 수정 계수(Correction Factor Rotating Disc)를 나타낸다. 회전 질량에 대한 수정계수는 차량의 종류에 따라 다르게 나타나는데<sup>10)</sup>, 승용차의 고속기어에서는 1.05~1.15, 저속기어에서는 1.3~1.5값을 갖는다. 그리고, 상용차의 고속기어에서는 1.03~1.06, 저속기어에서는 1.25~1.6값을 갖는다.

본 연구의 대상인 대형 상용차량은 대부분 후륜 구동의 형태를 취하고 있으므로, 1개의 뒷바퀴에 걸리는 제동에너지는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E_b' = \frac{\eta_b k' m V_1^2}{2} \quad (4)$$

여기서,  $\eta_b$ 는 전체 제동에너지 중에서 1개의 뒷바퀴에 걸리는 제동에너지 비율을 나타낸다.

일정한 감속도로 제동하는 경우에 차량을 정지시키는데 필요한 제동마력은 제동에너지를 제동하는 동안의 시간으로 미분한 값과 동

일하다.

$$P_b = \frac{d(E_b')}{dt} \quad (5)$$

감속도가  $a$ 로 일정할 경우, 그때의 속도  $V(t)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$V(t) = V_1 - at \quad (6)$$

식(6)을 식(5)에 대입하면 다음과 같은 제동마력이 얻어진다.

$$P_b = \eta_b k' m a (V_1 - at) \quad (7)$$

식(7)에서 보게 되면, 차량을 정지시키는데 걸리는 시간( $t_b = V_1/a$ )동안 제동마력은 제동과정 동안 일정치 않음을 알 수 있다. 제동마력은 제동이 시작할 순간에 최대가 되고, 차량이 정지하게 될 때 zero가 된다. 제동마력과 시간의 관계는 Fig. 2와 같다.

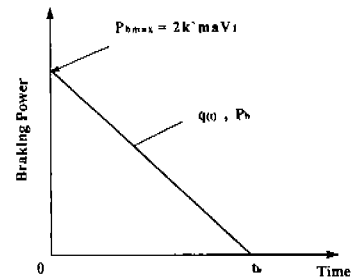


Fig. 2 Braking power vs. time

## 2.2 드럼의 온도 분포

### 2.2.1 1회 제동시 드럼 온도 분포

제동 시간이 짧은 경우, 드럼과 라이닝은 반-무한 고체(Semi-Infinite Solid)로 가정할 수 있다.

이 가정에 의해 드럼 표면의 열량(Heat Flux,  $q_D$ )<sup>11)</sup>은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$q_D(t) = \frac{k(T_0 - T_i)}{\sqrt{\pi a t}} \quad (8)$$

여기서,  $k$ 는 열전도율이며,  $a$ 는 열발산을

( $= k/c \cdot \rho$ )을 나타낸다.

드림 표면의 열 유량(Heat Flux) 값은 식(7)에서 구한 한 바퀴의 제동 마력을 드림과 라이닝이 접촉하는 섬동 면적으로 나눈 열 유량(Heat Flux) 값 중에 드림 부분에만 유입된 값이다.

선형적으로 감소하는 제동마력을 표현한 식(7)과 식(8)을 이용하여 1회 제동 시 드림 표면에 발생하는 온도를 시간의 함수로써 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_i - T_i = \left(\frac{5}{4}\right)^{1/2} \left(\frac{q_D}{k}\right) (\alpha t)^{1/2} \left(1 - \frac{2t}{3t_b}\right) \quad (9)$$

여기서,  $T_i$ 는 드림의 초기 온도를 나타내고,  $t$ 는 제동시간,  $t_b$ 는 차량이 정지할 때까지 시간을 나타낸다.

결과적으로 식(9)에서, 주변 냉각 없이 1회 제동할 경우 드림 표면의 최고 온도는 다음과 같다.

$$T_{\max} - T_i = \left(\frac{5}{18}\right)^{1/2} \frac{q_D \cdot t^{1/2}}{(\rho_D c_D k_D)^{1/2}} \quad (10)$$

### 2.2.2 반복 제동시 드림 온도 분포

초기 속도  $V_1$ 으로 도로를 주행하는 차량은 주행 상황에 따라 제동을 하여 정지하였다가 다시 가속을 하여 일정 속도  $V_1$ 으로 주행하는 일련의 상황을 반복적으로 행하게 된다. 본 연구에서는 이와 같은 상황을 반복 제동이라 하였다.

반복 제동을 하는 경우, 드림에 발생하는 온도는 제동마력, 냉각 시간, 제동 시간들에 의해 간단한 수치 계산식으로 표현할 수 있다. 드림 온도를 계산하기 위해서 드림은 총괄시스템(Lumped System)으로 다루어지고, 열전달 계수와 열에 관련한 물성 값이 일정하다고 가정한다.

총괄적 해석(Lumped Analysis)에서 온도는 공간이 아닌 시간의 함수로 이루어져 있어 드

림 전체가 균일하다고 가정한다.

제동 시간이 냉각 시간보다 훨씬 짧게 되므로, 제동이 작동할 때 냉각을 무시하면 드림의 온도는 다음과 같다.

$$\Delta T = \frac{q_D t}{\rho_D c_D V_D} \quad (11)$$

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

$$A_0 h_D [T_\infty - T(t)] = \rho_D c_D V_D \frac{dT(t)}{dt} \quad (12)$$

식(12)을 적분하면, 다음과 같은 냉각 온도 반응을 얻게 된다.

$$\frac{T(t) - T_\infty}{T_i - T_\infty} = e^{(A_0 h_D t / \rho_D c_D V_D)} \quad (13)$$

식(13)을 적절히 조합하면, n회 제동을 한 후의 온도 값을 얻을 수 있다. n회 제동한 후에 온도 값은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$[T(t) - T_\infty] = \frac{[1 - e^{(-nh_D A_0 t / (\rho_D c_D V_D))}]}{1 - e^{(-h_D A_0 t / (\rho_D c_D V_D))}} \Delta T \quad (14)$$

여기서,  $h_D$ 는 드림의 열전달계수이다. 공기 유동에 완전히 노출된 드림 브레이크의 열전달계수값은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$h_D = 0.1 (k_D / D) Re^{2/3} \quad (15)$$

## 3. 유한요소법을 통한 비정상 열전달 해석

드림 브레이크 시스템의 기본 구조는 드림, 휠 실린더, 휠 실린더로부터 전달된 힘에 의해 드림 내에서 확장하여 제동력을 발생하는 브레이크 슈와 슈를 지지하는 앵커부, 그리고 라이닝으로 구성되어 있다.

본 연구에서는 주행 중이던 차량을 제동하였을 때 드림과 라이닝 사이에 마찰을 통해 발생하는 드림의 열적 거동 특성을 파악하고자 하므로 Fig. 3과 같이 8절점 육면체 요소로

구성된 해석 모델을 만들었다. 해석 모델은 드럼만을 나타내며, 드럼의 물성치는 Table 1과 같다.

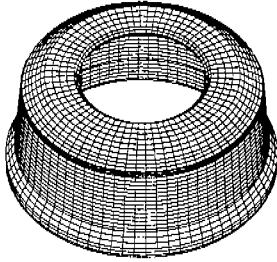


Fig. 3 Schematic of Drum FE model

Table 1 Material property of drum model

|  |         |
|--|---------|
| Young's Modulus( $W/m^2$ )               | 1.25E11 |
| Poisson's Ratio                          | 0.3     |
| Mass Density( $kg/m^3$ )                 | 7240    |
| Heat Conductivity( $J/m-K \text{ sec}$ ) | 54      |
| Specific Heat( $J/kg-K$ )                | 586     |
| Thermal Expansion Coeff.( $1/K$ )        | 1.2E-5  |

그리고, 드럼의 비정상 열전달 해석을 수행하기 위한 초기 조건은 실차 실험<sup>12)</sup>에서 조건을 참조하였다. 차량의 주행속도는 60km/h이고, 주행 중이던 차량을 정지시키기 위한 제동 감속도는 0.35g로 하였다. 이 감속도로 제동을 하게 되면 차량은 4.9초 후에 정지하게 된다. 여기서, 4.9초를 제동 시간으로 한다.

이와 같은 제동 조건을 식(7)에 대입하여 제동 마력을 구하고, 이 값을 단위 면적당 값으로 환산하여 드럼에 열하중(Heat Input) 조건으로 입력한다. 열하중은 Fig. 4에 나타난 것처럼 라이닝과 접촉한 부분에 수직 방향으로 작용하게 된다. 그리고, 실제 차량에서 드럼 표면은 외부공기와 접하여 대류 냉각이 일어나게 되는데, 이를 표현하기 위해 대류 경계층 조건(Convection Boundary Condition)을 적

용하였다. 대류 경계층조건을 적용하기 위해 초기 드럼 온도와 열에 대한 물성 값이 일정하다는 가정 하에 열전달 계수를 구하여 경계조건으로 입력하였다. 초기 드럼의 온도는 70°C이고, 드럼 표면에 접하게 되는 외부 공기 온도는 37°C이다. 이 온도 값도 실차 실험 조건과 동일하다.

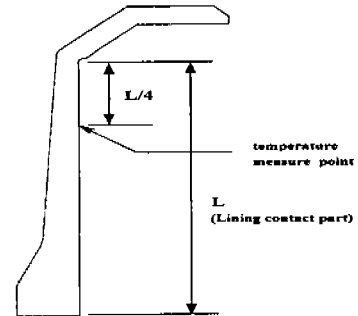


Fig. 4 Schematic section of drum

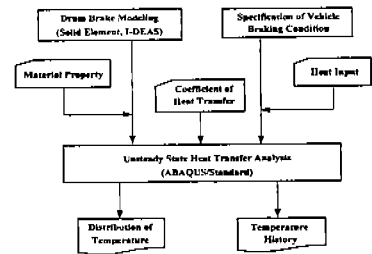


Fig. 5 Analysis system

차량 제동 조건을 통해 얻은 열하중(Heat Input)은 Fig. 2와 같이 선형 감쇠 기울기로 드럼에 제동 시간 동안 작용하게 된다.

이와 같이 드럼의 비정상 열전달 해석을 위한 해석 시스템은 Fig. 5와 같다. 이 해석 과정을 통하여 차량을 제동하였을 때 드럼에 발생하는 열적 거동 특성을 파악할 수 있다.

한편, 도로를 주행하는 차량은 교통 상황에 따라 제동과 주행을 되풀이하게 된다. 따라서 1회 제동에 대한 드럼의 비정상 열전달 해석 방법으로는 이 경우에 대해 드럼의 열적 거동 특성을 파악하기는 힘들다. 그래서 제동과 주

행을 반복하는 경우에 대한 해석 방법은 다음과 같은 과정을 거치게 된다.

차량이 주행을 하다가 제동을 하게 되면 드럼의 온도는 초기 온도에서 상승하게 된다. 다음으로 제동하였던 차량이 가속을 하여 주행하게 되면, 드럼에 접하는 외부 공기에 의해 대류 냉각이 일어나게 된다.

본 연구에서는 차량이 제동을 마치고 주행을 하게 되는 구간을 드럼의 관점에서 냉각 구간으로 간주하였다. 냉각 구간의 시간은 90초로 하였다. 냉각 구간 동안 드럼의 비정상 열전달 해석은 제동을 하고 난 후 드럼 온도 값과 외부 공기에 의한 대류 냉각을 표현하기 위한 열전달 계수(Film Coeff.)값을 입력 조건으로 하여 90초 동안 열전달 해석을 하였다. 이와 같은 방법으로 냉각 구간 동안 드럼의 열적 거동 특성을 파악한다.

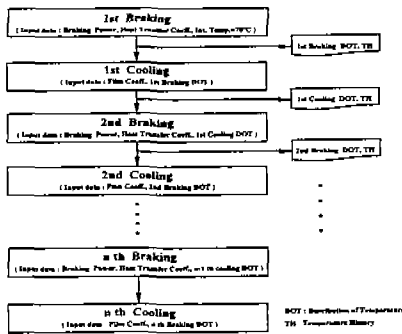


Fig. 6 Analysis flow in the multi-stop

본 연구에서는 차량을 제동하여 정지시키는 제동 구간과 가속시켜 주행하는 냉각 구간을 1 Step으로 하여, Fig. 6과 같이 반복 제동에 대한 드럼의 비정상 열전달 해석을 수행하였다. 제동 Step의 횟수는 실차 실험과 동일하게 80회로 하였다.

#### 4. 결과 및 검토

경사가 없는 일반 도로에서 일정한 속도로 주행 중이던 차량이 제동을 하게 되면, 제동

하는 동안에 움직이던 차량이 가지고 있는 운동에너지는 드럼과 라이닝의 마찰을 통해 열에너지로 바뀌게 된다.

본 연구에서는 60km/h로 주행하던 차량이 0.35g 감속도로 제동될 때와 제동과 주행을 반복하는 두 가지 경우에 대해서 상용해석 코드인 ABAQUS/Standard를 이용하여 드럼의 열적 거동 특성을 파악하였다.

먼저, 제동 시간과 제동 Step에 따른 드럼의 온도 변화를 나타낸 Fig. 7과 Fig. 9 결과는 Fig. 4의 라이닝과 접촉되는 부분(L)의 1/4지점의 온도 측정 점에서 결과를 얻었다. 그 이유는 다음과 같다.

본 연구에서 수행한 유한요소해석 결과를 검증하기 위한 수단으로 간단한 수치계산식<sup>10)</sup>과 실차 제동 실험<sup>12)</sup>의 결과와 비교하였다. 실차 제동 실험에서 차량의 제동 조건은 본 연구에서 유한요소해석을 하기 위한 제동조건과 동일한 조건이며, 초기 드럼온도는 70℃, 주변온도는 37℃로 보상하였다. 그리고, 차량 제동시 드럼에 발생하는 온도를 측정하기 위해 Fig. 4의 온도 측정 점과 동일한 위치에 해당하는 라이닝의 표면에 표면온도계(Thermometer)를 부착하였다.

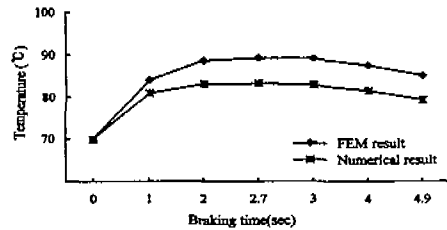


Fig. 7 Temperature history in the single-stop analysis

Fig. 7은 1회 제동을 했을 때 유한요소해석과 식(9)의 수치계산식에 의해 구해진 제동 시간에 대한 드럼의 온도 변화계적이다. 이 결과에서 보면, 드럼은 초기 70℃에서 최고 온도가 발생하는 2.7초까지 급격한 온도 상승

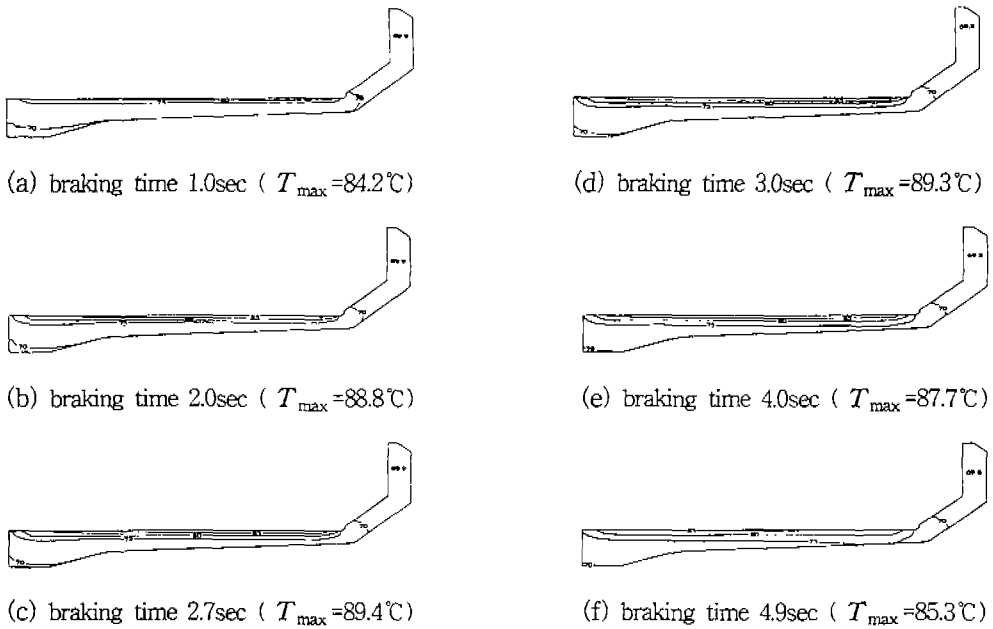


Fig. 8 Distribution of temperature in the single-stop analysis

을 하다가 서서히 냉각하는 경향을 나타내었다. 이와 같은 경향은 드림 표면에 작용하는 열유량이 Fig. 2와 같은 선형감쇠 기울기로 작용하기 때문에 제동 작동시간의 1/2지점에서 최고 온도가 발생하게 된다. 그리고, 최고 온도가 발생한 이후에는 드림에 존재하는 잠열에 의해 제동시간 0초~2.7초 사이의 기울기보다 완만하게 냉각되어진다. 1회 제동에서 발생되는 최고 온도는 유한요소해석과 수치계산식에서 각각 89.4°C, 83.4°C이다. 그리고, 온도 변화는 Fig.7에 나타난 것처럼 수치계산식에 비해 유한요소 해석 결과에서 급속히 가열되고, 거의 동일한 온도 변화 폭으로 냉각되어진다.

제동이 진행됨에 따라 드림 단면에 발생하는 온도 분포는 Fig. 8(a)~(f)와 같이 변하게 된다. Fig. 8의 결과는 1.0초 간격으로 드림의 온도 분포를 나타내었으며, 라이닝과 접촉되는 부분, 즉 마찰 열에너지가 작용하는 부분에서부터 드림 단면 전체에 열의 거동 특성을

확인할 수 있다.

Fig. 8 (f) 결과를 보면, 일부분을 제외한 드림 단면 전반에 걸쳐 온도 변화가 일어나고 있으며, 발생하는 최고 온도는 초기 온도에서 15.3°C 상승한 85.3°C이다. 여기서, 온도 변화가 발생하지 않은 부분이 생기게 되는 이유는 제동 시간이 열에너지 전달 시간 보다 짧기 때문이다.

다음으로, Fig. 9는 80회 반복 제동을 하는 경우에 대한 해석 결과이다. 일반적으로 도로를 주행하는 차량은 돌발적인 상황 등에 대처하기 위해 차량을 제동하였다가 가속하여 주행을 하게 되는 현상을 되풀이하게 된다. 이런 상황에서 드림의 열적 거동 특성을 파악하기 위해 Fig. 6과 같은 과정으로 열전달 해석을 하였다.

Fig. 9결과에서 산부분은 제동을 했을 때 드림의 온도를 나타내고, 골부분은 냉각 구간을 마친 후 드림의 온도를 나타낸다. 그리고, 골에서 다음 골까지의 구간은 제동과 냉각 구간

을 포함한 제동 1Step으로, 1Step동안의 온도 변화를 볼 수 있다. 80Step의 해석 과정을 마치고 난 후에 드럼 온도는 216°C이다. 이 값은 초기 드럼 온도에서 146°C 증가하였다.

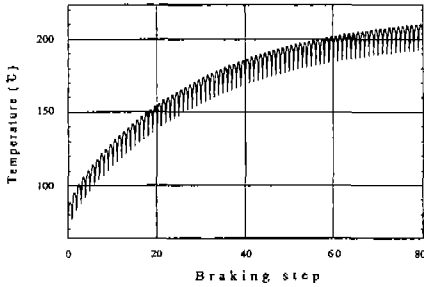
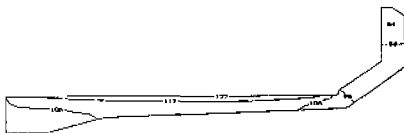


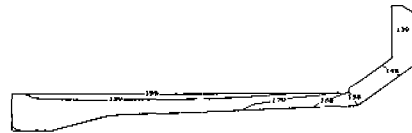
Fig. 9 Temperature history in the multi-stop analysis

드럼의 온도 변화는 Fig. 9에서 볼 수 있듯이 제동에 진행됨에 따라 비선형적으로 증가한다.

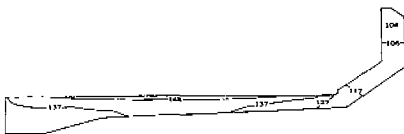
처음 10회 제동을 마친 후 온도 증가량은 59°C이고, 다음 10회 제동을 마친 후에는 27°C 증가한다. 온도 변화량이 0.5배 가량 감소하였다. 70Step에서 80Step까지 구간에서 온도 변화량은 3°C 밖에 되지 않는다. 이와 같은 결과로 판단해 보면, 드럼은 어느 임계 온도에 도달하게 되면 열에 영향을 거의 받지 않음을 예측할 수 있다. 반복 제동을 했을 때 드럼 단면에 생기는 온도 분포는 Fig. 10(a)~(h)와 같다.



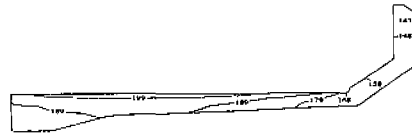
(a) 10th braking step ( $T_{max}=129^{\circ}\text{C}$ )



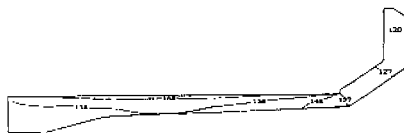
(e) 50th braking step ( $T_{max}=200^{\circ}\text{C}$ )



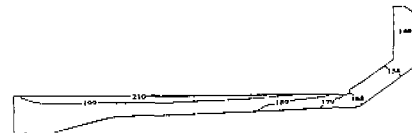
(b) 20th braking step ( $T_{max}=156^{\circ}\text{C}$ )



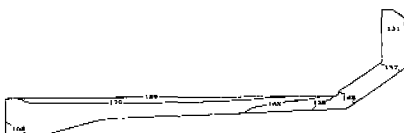
(f) 60th braking step ( $T_{max}=207^{\circ}\text{C}$ )



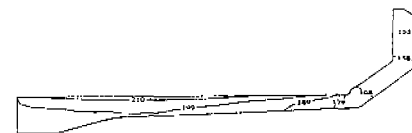
(c) 30th braking step ( $T_{max}=175^{\circ}\text{C}$ )



(g) 70th braking step ( $T_{max}=213^{\circ}\text{C}$ )



(d) 40th braking step ( $T_{max}=190^{\circ}\text{C}$ )



(h) 80th braking step ( $T_{max}=216^{\circ}\text{C}$ )

Fig. 10 Distribution of temperature in the multi-stop analysis



Table 2와 Fig. 11은 유한요소법(FEM)을 이용하여 열전달 해석한 결과와 실차 실험 및 간단한 수치 계산식에 의해 얻은 결과를 비교한 것이다.

먼저, 유한요소해석에 의해 얻어진 결과와 실차 실험의 결과를 비교해보면, 1회 제동을 했을 때 발생하는 최고 온도는 Table 2에서와 같이 유한요소해석 결과가 5%정도 높게 나타났다. 이후 제동 횟수가 늘어나면 드럼에 발생하는 온도 결과 차이가 점점 줄어들게 되며, 최종 80회 제동을 마치고 나서는 3%의 차이만을 나타내었다. 그리고, 유한요소해석에서 나타난 드럼의 온도 변화 특성, 즉 제동마찰에 의해 급상승하던 드럼의 온도가 임계온도에서 열적 평형상태가 이루어지는 특성이 실험결과에서도 동일하게 나타났다.

Table 2 Temperature result of drum (unit: °C)

|                           | FEM          | Experiment | Numerical function |     |
|---------------------------|--------------|------------|--------------------|-----|
| Single-stop (1st braking) | 89.4         | 85.0       | 83.4               |     |
| Multi-stop                | 20th braking | 156        | 155                | 134 |
|                           | 40th braking | 190        | 186                | 188 |
|                           | 60th braking | 207        | 200                | 232 |
|                           | 80th braking | 216        | 209                | 269 |

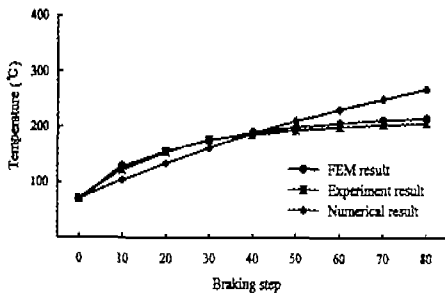


Fig. 11 Comparison with FEM, experiment and numerical result in the multi-stop

그러나, 식(13)을 이용한 수치계산식 결과와 유한요소해석 결과와는 Table 2에 나타난 것처럼 40회 제동에서의 온도 값만이 비슷할 뿐, 나머지 온도 결과 값에서 상당한 차이를 보이고 있으며, Fig. 11의 온도 변화 경향도 전혀 다른 특성을 나타내었다. 이와 같이, 유한요소해석과 실험 결과에 비해 수치계산식의 온도 변화 특성이 다르게 나타나는 이유는 다음과 같다. 반복 제동에서 드럼에 발생하는 온도 값을 유도하기 위한 수치계산식 식(13)은 제동 구간에서 제동마찰력에 의해 나타나는 온도 변화를 표현하는  $\Delta T$ 항과 드럼의 표면에 접하는 외부 공기에 의해 대류 냉각되는 현상을 표현한 나머지 항의 곱으로 이루어졌다. 여기서, 반복 제동의 초기에 유한요소해석 온도 결과보다 작은 이유는 총괄시스템(Lumped System)이라고 가정한 상태에서 유도한  $\Delta T$ 항이 순간 제동마찰에 의해 변화된 드럼의 온도를 고려하지 못하기 때문이다. 또, Fig. 9에서 보는 것처럼 제동이 진행되어 드럼의 온도가 상승함에 따라 냉각되는 양도 비선형적으로 증가하게 되는데, 이와 같은 대류 냉각에 의해 발생하는 온도 변화를 수식에 의해 간략히 표현하므로, 전체적인 온도 변화곡선이 선형적인 형태를 취하게 된다.

위의 결과에서 보면, 본 연구에서 드럼의 열적 거동 특성을 파악하기 위해 사용한 유한요소해석 접근방법은 실차 실험과 거의 동일한 결과를 얻었다. 그러므로, 경제적·시간적으로 많은 투자가 필요한 실차 실험 대신에 본 연구에서 수행된 유한요소해석 접근 방법으로 충분한 결과를 얻을 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구는 대형 상용차에 사용되는 드럼 브레이크 시스템의 요소 중, 열적인 문제에서 우선적으로 고려해야 할 부분인 드럼에 대해서 상용 유한요소 해석 코드(Commercial FEM

Code)인 ABAQUS/Standard를 이용하여 비정상 열전달 해석을 수행하였다. 유한요소 해석 결과를 통해서 1회 제동을 했을 때와 주행 상황에 따라서 제동과 주행을 반복하는 경우에 대해 드럼의 열적 거동 특성을 파악하였다.

그리고, 드럼에 대한 비정상 열전달 해석을 위해 사용한 방법의 신뢰도를 검증하기 위해 실차 실험 결과<sup>12)</sup>와 수치 계산식<sup>10)</sup> 결과와 비교하였다. 유한요소 해석 결과는 실험 결과와 온도 값에서 3% 이하 오차와 전체 과정에서 드럼 온도 변화 경향이 거의 일치하였다. 그러므로, 본 연구에서 사용한 유한요소해석 시스템은 차량 개발의 설계 단계에서 브레이크 시스템에 대한 사양 검토 및 향후 독자 개발을 하기 위한 기초 기술을 제공할 수 있을 것이다.

## 참 고 문 헌

1. 조동두, "자동차 브레이크의 설계요소", 대한기계학회지 제39권 제7호, pp. 49~57, 1997.
2. A. J. Day, P. R. J. Harding, T. P. Newcomb, "A Finite Element Approach to Drum Brake Analysis" Proc. I Mech E Vol. 193, pp. 401~406, 1979.
3. R. J. Ashworth, M. EL. Sherbiny, T. P. Newcomb, "Temperature Distributions and Thermal Distortions of Brake Drums", Proc. I Mech E, Vol. 191, pp. 169~177, 1977.
4. A. J. Day, T. P. Newcomb, "Combined thermal and mechanical analysis of Drum braked", Proc. I Mech E, Vol. 198 No. 15, pp. 287~294, 1984.
5. A. J. Day, T. P. Newcomb, "The dissipation of frictional energy from the interface of an annular disc brake", Proc. I Mech E, Vol. 1980, No. 11, pp. 201~209, 1984.
6. Katsuhiko Harada, Yasuhisa Okumoto, Yasuo Tamai, Nobuhisa Yamaguchi, "フ<sup>レ</sup>レ-キディスクロータの熱解析", いすゞ技報, 1987.
7. Frank H. Highley, "Techniques for Determining the Thermal Characteristics of Brake Drums and Discs", SAE 710589, pp. 2020~2028, 1971.
8. Seong K. Rhee, Michael G. Jacko and Peter H. S. Tsang, "The Role of Friction Film in Friction, Wear, and Noise of Automotive Brakes", SAE 900004, pp. 29~38, 1990.
9. 김청균, 성부용, "급제동시 디스크 브레이크 시스템의 열적 거동 해석", 대한기계학회논문집 A권 제22권 제6호, pp. 1106~1113.
10. Rudolf, Limpert, "Brake Design and Safety", Society of Automotive Engineers, Inc., pp. 89~133.
11. M. Necati OZISIK, "Heat Transfer A Basic Approach", McGraw-Hill Book Co., pp. 101~155.
12. 한상월, " 시내 고급 좌석 BUS 차량 제동 성능실험 결과", 아시아자동차 실험 보고서, 1997.
13. "ABAQUS/Standard User's Manual( I ), ( II ), ( III )", Ver. 5.7, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc.