

## 제동 패턴을 고려한 드럼 브레이크의 열적 거동 특성에 대한 연구

이 계 섭<sup>\*1)</sup> · 손 성 수<sup>1)</sup> · 양 기 현<sup>2)</sup>

기아자동차 특수설계팀<sup>1)</sup> · 기아자동차 특수차량연구실<sup>2)</sup>

### A Study on the Thermal Behavior Characteristic of Drum Brake considering Braking Patterns

KyeSub Lee<sup>\*1)</sup> · SungSoo Son<sup>2)</sup> · KiHyun Yang<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Military Vehicle Engineering Team, Kia Motors Co., 700 Naebang-dong, Seo-gu, Gwangju 502-711, Korea

<sup>2)</sup>Military Vehicle R&D Group, Kia Motors Co., 700 Naebang-dong, Seo-gu, Gwangju 502-711, Korea

(Received 8 February 2006 / Accepted 7 March 2006)

**Abstract** : Each part of drum brake system is loaded by continual mechanical force and thermal force every time of braking, so enough strength and stability are required. Thermal characteristic is one of the important factors in drum brake systems design. This paper presents the thermal performance such as temperature distribution and thermal contact stress of drum brake system considering several braking patterns; 80th heat braking test mode, heat fade braking test mode, general road mode, steep slope road mode and off road mode. Transient heat transfer analysis and Thermo elastic contact analysis is executed to obtain the temperature distribution, and to evaluate thermal stress of drum brake by using ABAQUS/Standard code. This procedure of analysis can effectively be used to improve the quality problem of brake system and to get design guideline of the new product.

**Key words** : Drum brake(드럼 브레이크), 80th heat braking test(80회 발열 제동 시험), Heat fade braking test(히트 패드 시험), Steep slope road(급경사 내리막길), Transient heat transfer analysis(과도 열전달 해석), Thermo elastic contact analysis(열탄성접촉해석)

### 1. 서론

빈번하게 발생하고 있는 브레이크 파열에 의한 차량 사고, 급경사 내리막길 버스 차량의 사고 등등 이런 일련의 사고들은 대부분은 제동 장치의 원활치 못한 작동에 기인한다. 현재 차량에 적용되고 있는 제동 형태는 마찰식 제동 시스템이 주로 사용되고 있으며, 이 제동 시스템은 차량 운동 에너지를 제동에 의해 열로 변환시키는 것이 기본 원리이다. 브레이크 시스템에서 발열 특성을 고려한 설계가 되지 않으면, 차량 운행 중 지속적인 운

도 상승으로 제동 성능의 저하라든가 마찰재 파손 등의 치명적인 문제가 발생하여 대형 사고로 이어질 가능성이 높게 된다. 그래서 브레이크 시스템의 초기 설계 단계에서 열용량부터 검토되어야 한다.

브레이크 시스템에서 이런 열적문제에 대해서 국내외적으로 많은 연구가 이루어지고 있는데, 지난 수십여 년 동안 Newcomb<sup>1-3)</sup> 등은 드럼과 디스크 브레이크의 여러 분야에 폭넓게 연구를 진행하고 있으며, Highly<sup>4)</sup>는 브레이크 시스템의 열적 특성을 결정하는 연구를 진행했었다. 국내에서는 김청균<sup>5)</sup> 등이 수치해석적인 방법으로 열적 특성에 대해서 연

\*Corresponding author, E-mail: kslee124@kia.co.kr

구를 하고 있으며, 구병준<sup>6)</sup> 등은 드럼과 마찰재의 접촉 특성을 고려한 연구를 진행해 오고 있다.

최근 연구 동향을 살펴보면, 마찰재사이의 접촉 특성을 고려한 연구 방향과 마찰재사이의 접촉을 고려하지 않고 마찰열을 직접 입력하는 연구 방향으로 크게 구분, 진행되어지고 있다.

각 연구 방향의 장단점이 있겠지만, 본 연구에서는 여러 가지 차량 운행 및 제동 조건을 고려한 열적 특성을 검토하고자 상대적으로 효율성이 우수한 후자의 연구 방향을 선택하였다.

본 연구에서는 5가지 제동 패턴을 고려한 열전달 해석(Heat transfer analysis)을 통하여 드럼 브레이크 시스템의 발열 특성을 살펴보았다. 그리고 여기서 계산된 발열 특성을 고려하고, 드럼과 라이닝 패드 접촉을 고려한 열탄성 접촉 해석(Thermo elastic contact analysis)을 통하여 드럼 부품의 강도를 평가하였다.

과도 열전달 해석과 열탄성 접촉 해석은 상용 범용 해석용 툴인 ABAQUS/standard code를 이용하였으며, 5가지 제동 패턴은 일반적으로 브레이크 시스템의 성능 실차 시험에 적용하고 있는 80회 발열 시험과 Heat fade 시험 그리고 실제 주행 특성과 유사하다고 할 수 있는 일반 도로, 급경사 내리막길 도로와 차량 운행 특성상 고려되어 져야 하는 비포장도로이다.

## 2. 드럼 브레이크 시스템

본 연구 대상 차량은 화물 적재 총 중량이 12톤이고, 축간 거리 4.8m인 중대형 상용 트럭 급 차량으로, 차축은 전륜 쪽에 1개와 후륜 쪽에 2개의 3축으로 구성되어 있다. 차축에 장착된 드럼 브레이크 시스템 중에서 Photo. 1과 같이 후륜차축에 장착된 브레이크 시스템에 대해서 연구가 이루어졌다.

이 브레이크 시스템은 드럼식 유압 브레이크로, 리딩 슈, 트레일링 슈와 앵커부로 구성된 일반적인 리딩-트레일링 슈 형식을 취하고 있으며, 브레이크 페달 작동 시 입력부인 휠 실린더에 유압이 공급되어 휠 실린더내의 피스톤이 양쪽으로 밀려나가고, 이에 따라 브레이크 슈가 브레이크 드럼의 너비 방



Photo. 1 Drum brake system configuration of vehicle

향으로 확장, 드럼에 압착되어 제동 작용이 이루어진다.

드럼 브레이크 시스템 구조는 드럼 전진 회전 방향의 앞쪽에 위치한 리딩 슈와 뒤쪽에 위치한 트레일링 슈, 슈를 지지하는 앵커부 그리고 드럼으로 구성되어 있다. 드럼은 마찰재와 마찰이 발생하게 되는 주물재질의 드럼 본체와 차축과 드럼 연결부재의 이중 구조로 구성되어 있으며, 이 구조는 현재 일반적으로 사용되고 있는 드럼 브레이크 시스템 구조와 상이한 구성을 이루고 있다.

## 3. 유한 요소 해석

### 3.1 해석 모델

열전달 해석과 열탄성 접촉해석을 수행하기 위해 구성한 드럼 브레이크 시스템 해석 모델은 Fig. 1과 같이 8절점 솔리드 요소를 이용한 3차원 모델로 구성하였다.

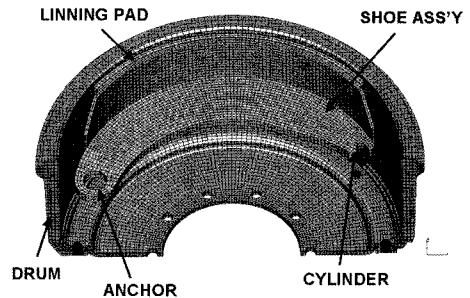


Fig. 1 FEA half model of drum brake assembly

해석 모델은 드럼, 슈 조립체, 라이닝 패드로 구성되어 있으며, 솔리드 요소개수는 38,881개, 절점 개수는 50,102개이다. 그리고 제동 시 열이 상대적으로 높게 발생하는 리딩 슈 부분의 발열 현상을 파악

하고, 해석 효율성과 시간 단축을 위해 전체 드럼 브레이크 시스템의 1/2만 해석 모델로 구성하였다.

각 구성 부품인 드럼, 슈 조립체의 재질은 GC25, SM10C이며, 주철계열인 GC25, 일반 기계구조용 탄소강인 SM10C 와 라이닝 패드의 재료 물성치를 해석에서는 Table 1의 값을 취하였다.

Table 1 Material properties of drum, shoe and lining pad

Material properties	Drum	Shoe	Lining pad
Elastic modulus (N/m <sup>2</sup> )	1.25E+06	2.09E+06	3.00E+03
Poisson's ratio	0.25	0.3	0.25
Mass density (kg/m <sup>3</sup> )	7198	7815	2250
Thermal expansion co. (K-1)	1.2E-05	1.1E-05	1.4E-05
Specific heat (J/kgK)	586	452	1200
Thermal conductivity (W/mK)	54	48	0.9

### 3.2 열전달 해석

주행 중인 차량에 제동을 가하면, 드럼과 라이닝의 마찰에 의해 열이 발생하게 된다. 드럼에 발생하는 열은 드럼 물체를 통해 외측표면으로 전달되며, 외측 표면에서 외부 공기에 의해 일부는 방열되고 나머지는 드럼에 축적된다. 또한 라이닝과 슈 조립체에 발생하는 열은 내부가 밀폐되어 있어 브레이크 시스템에 축적되나, 냉각 홀과 틈새로 유입되는 공기에 의한 열 손실도 무시할 수 없다. 이런 제동 과정을 차량 운행 중에 계속적으로 반복하게 되면, 브레이크 시스템 전체 온도가 지속적으로 상승하여 포화 상태에 도달할 수도 있다.

발열 특성은 크게 제동 초속, 종속, 감속도, 제동 빈도, 차량 하중 등의 제동 조건과 주행 속도, 분위기 온도, 차량 레이아웃 등의 냉각 조건 그리고 라이닝 면적, 드럼 열용량, 방열 면적 등의 브레이크 용량에 의해 결정된다.

따라서 드럼 브레이크 시스템에 대해서 Fig. 1과 같이 해석 모델을 구성하고, 발열 특성을 평가하기 위한 제동 조건을 수치적 환산한 마찰열(Heat flux)과 대류 열전달계수(Film coefficient)값<sup>8)</sup>을 계산한 다음, 여기서 계산된 값을 경계조건으로 하여 Fig. 2

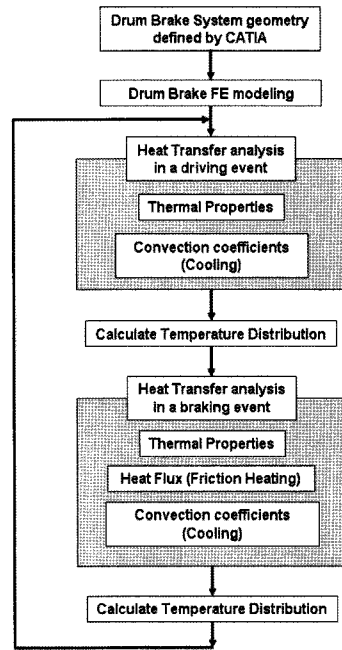


Fig. 2 Flow chart of drum brake heat transfer analysis

의 과도 열전달 해석(Transient heat transfer analysis)을 수행하였다.

#### 3.2.1 마찰 열(Heat flux)

차량 제동 시 차량이 지니고 있던 운동에너지는 식 (1)에 의해 마찰 열(Heat flux)로 환산하였다.

$$Q = 0.9 \times ma(V_0 + at_b) \quad (1)$$

where,  $m$  : Gross vehicle weight (kg)

$a$  : Deceleration of gravity (m/s<sup>2</sup>)

$V_0$  : Initial velocity (m/s)

$t_b$  : Braking time (sec)

여기서 계산된 마찰열 값은 단위 면적 값으로 하여 드럼과 라이닝의 마찰 면에 열 하중조건으로 입력하였다.

#### 3.2.2 대류열전달 계수(Film coefficient)

제동 마찰열에 의해 온도가 상승된 브레이크 시스템이 주변 공기에 의해 방열되는 현상을 대류 경계층 이론을 적용한 대류 열전달 계수(Film coefficient)로 계산하여 표현하였다. 대류열전달 계수는 다음과 같은 식 (2)에 의하여 구하였다.

$$h = 0.1 \times (K_a/D) \times Re^{2/3} \quad (2)$$

$$Re = (V \cdot \rho_a \cdot L) / \mu_a \quad (3)$$

where,  $K_a$  : Thermal conductivity of air (W/m·K)

$D$  : Drum diameter (m)

$Re$  : Reynolds number

$V$  : Vehicle velocity(m/s)

$\rho_a$  : Density of air (kg/m<sup>3</sup>)

$L$  : Characteristic length (m)

$\mu_a$  : Viscosity of air (kg/m·s)

외부 공기 온도는 37°C로 하였으며, 이때 공기의 열전도율, 밀도와 점도 값을 적용하였다.

드럼 직경은 0.419m이며, 차량 속도는 주행할 경우 대표적인 속도 값으로 일정하게 유지한다고 가정하였으며, 제동할 경우 차량 속도는 초기 속도에서 감속도에 따라 감속되는 속도를 그대로 표현하였다. 그래서 주행시 대류열전달계수 값은 대표 속도에 따라 일정하다고 가정하였으며, 제동시 열전달계수 값은 초기 속도에 의해 계산된 값에서 초기 속도에서 정지할 때까지 시간동안 감속도를 기울기로 한 1차 선형 감쇠 함수에 따라 감소되는 값을 입력하였다.

그리고 드럼 내부 부품의 냉각 홀이나 틈새를 통하여 유입되는 공기에 의한 방열 현상은 단품 시험에서 내부 부품에 부착된 온도 센서의 측정치와 해석에서 얻은 결과를 비교, 수정 과정을 통하여 드럼 내부의 방열 수준을 결정하였다. 드럼 내부의 방열 효과는 외부 공기에 의한 대류 현상의 40% 수준으로 가정하였다.

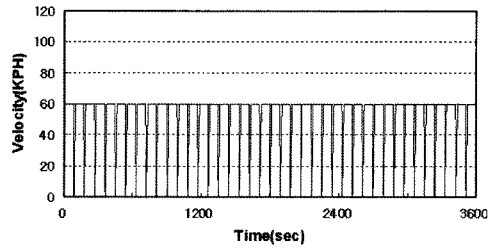
### 3.2.3 주행 및 제동 패턴(Braking patterns)

본 연구에서는 드럼 브레이크 시스템의 열적 특성을 파악하기 위해 5가지 제동 패턴을 고려하였다.

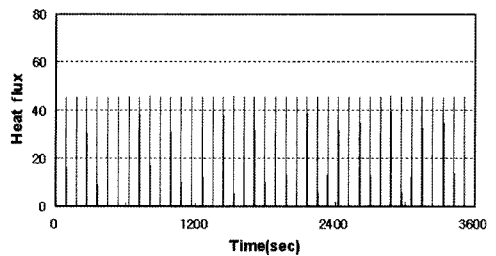
먼저 일반적인 브레이크 시스템의 발열 및 성능 시험에 적용되는 80회 발열 제동 시험과 Heat fade 시험 제동이며, 두 제동 패턴은 정형화된 규칙에 의한 반복 과정을 수행한다.

80회 발열 제동 시험은 주행 속도 60KPH, 종속도 0KPH, 감속도 0.35G, 1사이클 소요시간 90.0sec의 조건을 가지고 80회 반복 수행하는 시험이고, Heat fade 시험은 Base line, Heat fade, Recovery의 3단계로 진행된다. Base line 단계는 주행속도 50KPH, 종속도

0KPH, 감속도 0.3G, 1사이클 소요시간 120sec, 반복 횟수 3회이며, Heat fade 단계는 70KPH, 0KPH, 0.4G, 90sec로 15회 반복, Recovery 단계는 50KPH, 0KPH, 0.3G, 120sec로 10회 반복하게 된다. 두 제동 패턴의 총 소요 시간은 80회 발열 시험의 경우 3600sec이고, Heat fade 시험은 2910sec이며, 시간에 대한 차량 속도 및 마찰열(Heat flux) 값 변화는 Fig. 3~4와 같다.

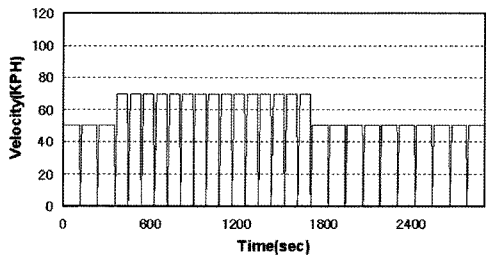


(a) Velocity vs. time

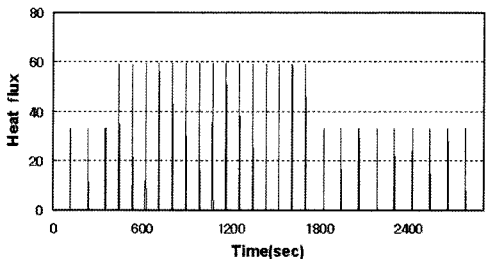


(b) Heat flux vs. time

Fig. 3 80th heat braking test mode



(a) Velocity vs. time



(b) Heat flux vs. time

Fig. 4 Heat fade braking test mode

다음으로 위 두 조건과 같이 정형화된 주행 및 제동 패턴 조건이 아닌 실제 주행 시 발생할 수 있는 조건인 일반 도로, 급경사 내리막길 도로와 비포장 도로이다. 3가지 조건은 적당한 주행 도로를 선정하고, 최대 주행 속도에 제약을 둔 후에 실제 주행을 하면서 차량의 속도 및 제동 조건을 샘플링 하였다.

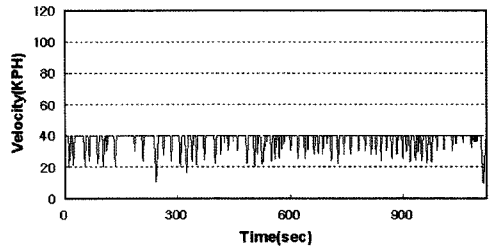
3가지 조건의 총 주행시간 및 제동 횟수는 주행 도로 여건상 각각 다르게 샘플링 되었다. 먼저, 일반 도로 경우 2161sec 주행 시간에 15회 제동을 하였으며, 급경사 내리막길 도로는 1125sec와 76회 제동, 비포장도로는 480sec와 19회 제동을 하였다. 각 조건의 시간에 대한 속도 및 마찰열 변화는 Fig. 5~7과 같다. 여기서, 제동 이후 다음 제동 작동 전까지의 차량 주행 속도는 세부적인 속도는 무시하고, 대표 하는 속도 값으로 통일하였다.

### 3.3 열탄성 접촉 해석

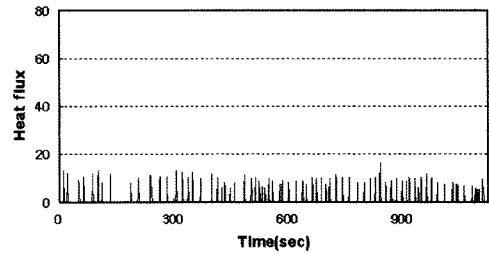
열적 특성을 고려한 드럼 브레이크 시스템의 강도 평가를 위하여 Fig. 1과 같은 해석 모델을 구성하고, 열탄성 접촉 해석을 수행하였다.

브레이크 페달 작동 시 유압의 유입에 의한 하중 입력 위치가 되는 실린더에 피스톤의 작동 방향으로 하중을 작용하였으며, 슈를 지지하는 앵커부에

대한 순수 회전 성분과 리딩 슈와 트레일링 슈 앵커 위치의 평행 축에 대한 변위 성분 구속을 풀어 주었다. 그리고 차축과 볼트 체결되는 부위는 모두 완전 구속하고, 축대칭 부위는 축대칭 구속 조건을 적용하였다. 드럼과 라이닝 사이의 마찰 계수는 라이닝 패드의 기본 마찰 특성 값인 0.38을 적용하였다.

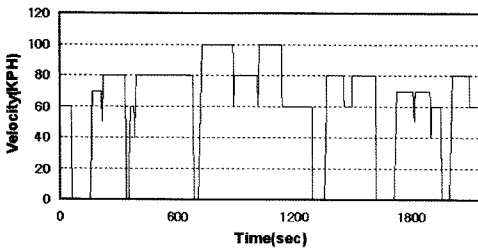


(a) Velocity vs. time

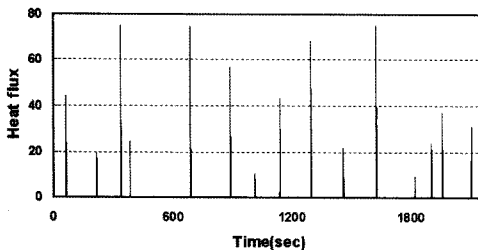


(b) Heat flux vs. time

Fig. 6 Steep slope road mode

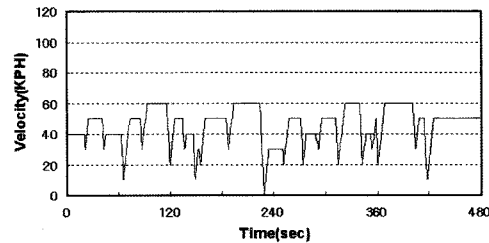


(a) Velocity vs. time

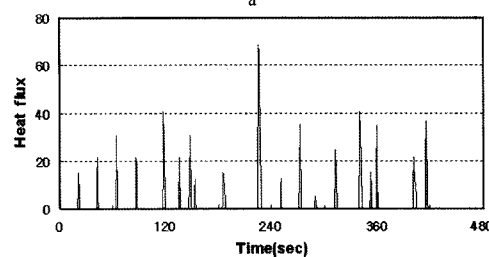


(b) Heat flux vs. time

Fig. 5 General road mode



(a) Velocity vs. time



(b) Heat flux vs. time

Fig. 7 Off road mode

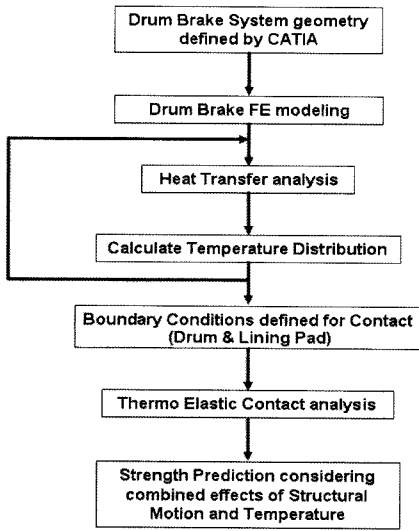


Fig. 8 Flow chart of thermo elastic contact analysis

열탄성 접촉 해석은 Fig. 8과 같은 과정을 거쳤으며, 이때 열전달 해석 결과는 5가지 제동 패턴에서 최고 발열 특성을 나타내는 제동 횟수에서 열적 특성을 적용하였다. 추가적으로 발열 특성이 고려되지 않은 브레이크 시스템에 대해서 접촉 해석을 수행하여 열을 고려한 해석결과와 상대 비교하였다.

#### 4. 결과 및 검토

##### 4.1 드럼 브레이크의 발열 특성

본 연구에서 고려한 5가지 제동 패턴의 총 주행 시간과 제동 횟수는 정해진 규칙과 샘플링과정의 한계로 각각 다르다. 80회 발열 제동 시험은 3600sec와 80회, Heat fade 시험은 2910sec와 28회, 일반도로는 2161sec와 15회, 급경사 내리막길 도로는 1125sec와 76회 그리고 비포장도로는 480sec와 19회이다. 각 제동패턴에 따른 드럼 브레이크 시스템의 열적 특성을 상대 비교하기 어려우므로, 총 주행 시간을 2800sec로 동일하게 하였다. 각 제동 패턴의 제동 횟수는 80회 발열 제동 시험의 경우 31회, Heat fade 시험은 27회, 일반 도로는 19회, 급경사 내리막길은 183회, 비포장도로는 112회로 제동 횟수를 변경하였다.

먼저, 해석의 신뢰성을 검증하기 위해 80회 발열 제동 시험 조건에 대한 결과를 자체 시험 보고서<sup>9)</sup>의

라이닝 패드 실측 결과와 비교하였다.

자체 시험보고서의 라이닝 패드 실측 결과는 80회 발열 해석 조건과 동일한 조건에서 실제 차량의 주행 시험을 통하여 얻은 온도 값으로, 라이닝 패드 내부에 부착한 온도 측정 센서(TEMPERATURE LOGGER)를 이용하여 측정하였다.

온도 측정 센서는 슈 조립체에서 라이닝 패드로 홀을 뚫어 부착하였으며, 센서 위치는 드럼과 접촉하는 라이닝 패드 외곽 면에서 안쪽 두께방향으로 5mm정도 되는 면, 원주 및 폭 방향으로는 중심에 위치하도록 하였다.

Fig. 9는 해석과 시험 결과 비교이며, 5회 제동횟수별 온도 값을 정리하였다. 30회 제동 후 라이닝 패드에 발생하는 최대 온도는 해석 287°C, 시험 289°C로 거의 동일한 수준이며, Fig. 9에서 보듯이 전반적으로 열전달 해석과정에서 얻은 결과치가 실제 라이닝 패드의 온도 변화 궤적을 잘 묘사하고 있다.

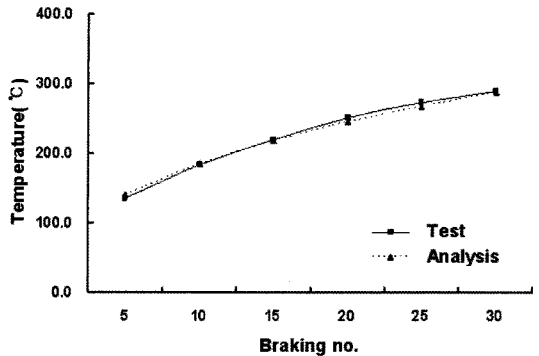
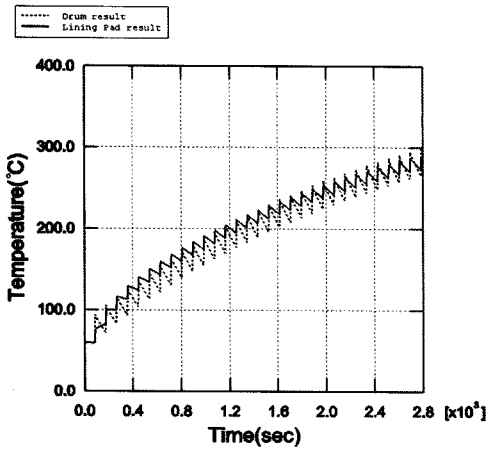
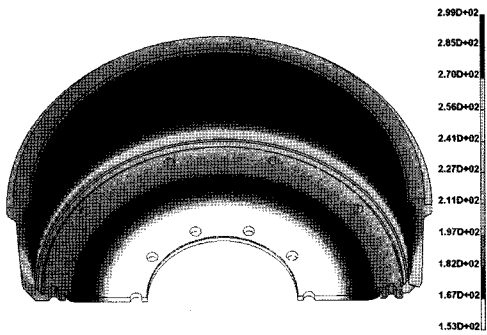


Fig. 9 Comparison of temperature history at lining pad - FEA prediction vs. test measurement

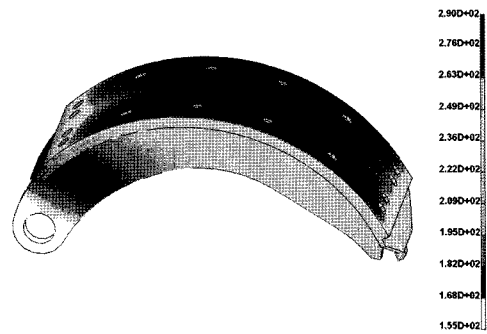
Fig. 10은 80회 발열 제동 시험조건에 대한 열전달 해석 결과이다. 라이닝 패드와 드럼의 온도 변화 궤적은 반복되는 제동형태를 표현하면서 선형적으로 증가하고 있다. 최고 온도는 드럼에서 299°C, 라이닝 패드에서 290°C가 발생하였으며, 이때 드럼과 라이닝 패드와 슈 조립체 온도 분포는 Fig. 10(b), (c)와 같다. 드럼과 라이닝 패드 접촉 부위를 중심으로 온도가 높게 나오고 있으나, 라이닝 패드의 온도 분포는 슈 조립체에 전달되는 열이 존재하므로 중심 부주위 온도가 상대적으로 적다.



(a) Temperature history vs. time at lining pad & drum



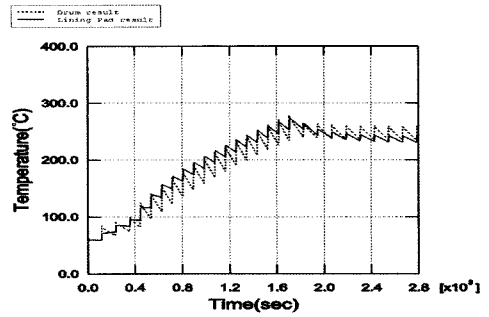
(b) Temperature contour at drum



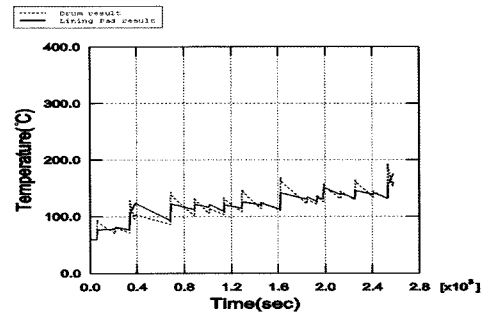
(c) Temperature contour at lining pad & shoe

Fig. 10 FEA results in the 80th heat braking test mode

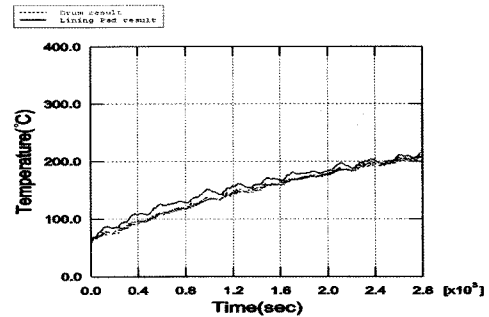
제동 및 냉각 조건이 다른 4가지 제동 패턴의 경우, 드럼과 라이닝, 슈 조립체 온도 분포는 열의 전달 수준 차이에 의해 약간씩 차이는 있지만 거의 동일한 수준이므로 온도 분포도는 생략하였으며, 드럼과 라이닝 패드에서 발생하는 온도 변화 궤적을 Fig. 11에 나타내었다.



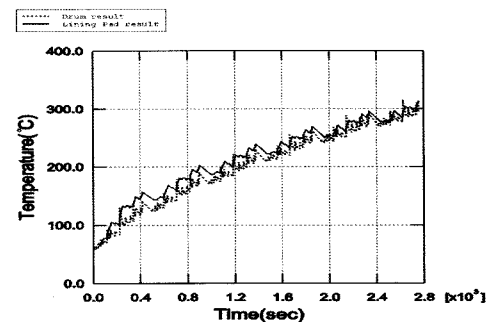
(a) Heat fade braking test mode



(b) Ggeneral road mode



(c) Steep slope road mode



(d) Off road mode

Fig. 11 Temperature history vs. time at lining pad & drum in the four braking patterns

Table 2 Max. temperature at lining pad & drum with five braking patterns (unit: °C)

	Heat fade mode	General road	Steep slope road	Off road
Lining pad	274	176	215	314
Drum	279	194	210	316

Fig. 11의 결과를 보면, 드럼과 라이닝 패드의 온도 변화 궤적 결과는 4가지 패턴 각각의 제동 조건 특성을 잘 표현하고 있다. 각 제동조건에서 드럼과 라이닝 패드에서 발생하는 최고 온도 값은 Table 2와 같다.

주행시간 2800 sec 동안 각 제동 패턴에 대한 열전달 해석에서 마찰열(Heat flux)과 열전달 계수(Film coefficient)의 크기를 80회 발열 제동 시험 조건의 값을 기준으로 비교해보면 다음과 같다.

먼저, 마찰열 크기는 ‘일반 도로(45.9%) < 급경사 내리막길(64.3%) < Heat fade (90.7%) < 80회 발열 제동 시험 ≤ 비포장도로(100.1%)’ 순으로 비포장도로 조건에서 마찰열이 제일 크게 발생하며, 열전달 계수는 ‘급경사 내리막길(71.7%) < 비포장도로 (86.3%) < Heat fade(99.6%) ≤ 80회 발열 제동 시험 < 일반 도로(109.6%)’ 순으로 일반 도로조건에서 외부 공기에 의한 방열이 활발하게 일어난다.

5가지 제동 패턴의 드럼 발생 온도결과를 보면 ‘일반도로(194°C) < 급경사 내리막길(210°C) < Heat fade(279°C) < 80회 발열 제동 시험(299°C) < 비포장도로(316°C)’ 으로 마찰열 크기 량과 동일하게 나타났다. 여기서, 80회 발열 제동 시험과 비포장 도로 조건의 마찰열은 거의 동등한 수준이나 냉각 조건에서 80회 발열 제동 시험에 비해 비포장도로가 86.3% 불리한 조건이다. 그래서 비포장도로 조건에서 발생 온도는 80회 발열 제동 시험 조건에 비해 5.7%(17°C) 정도 높게 발생하였다.

#### 4.2 드럼 브레이크의 강도 평가

드럼과 라이닝, 슈 조립체에 발생하는 응력은 마찰열에 의한 열하중과 드럼과 라이닝의 접촉에 의한 기계적 하중에 의해 발생하는데, 특히 드럼과 라이닝 접촉면에서 발생하는 마찰열과 전도열이 서로 불균일하게 분포되면 열응력이 발생하게 된다.

본 연구에서는 Fig. 8과 같은 열탄성 접촉 해석을 통하여 드럼 브레이크 시스템의 열적 특성을 고려한 드럼 응력 결과를 얻었다. 추가적으로 열 하중을 고려하지 않은 조건에 대해서 열탄성 접촉 해석을 수행, 열 하중의 영향성을 살펴보았다.

Fig. 12의 드럼 응력 분포도는 열하중 조건이 고려되지 않은 경우와 80회 발열 제동 시험, 비포장 도로

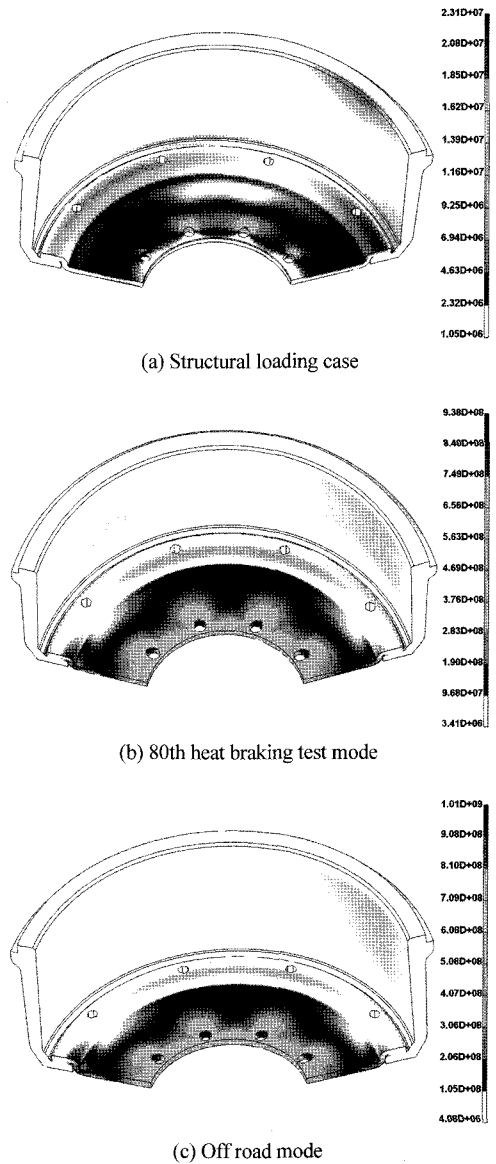


Fig. 12 Comparison of drum stress contours - due to structural loading vs. due to combined structural and thermal loading



로에서 열탄성 접촉 해석 결과이다. 나머지 경우는 응력 수치만 다르고 분포도 경향은 거의 동일하다.

Fig. 12 결과를 보면, 응력이 높게 발생하는 부위는 차축과 볼트 연결되는 볼트 홀 부위이다. 이 부위는 드럼 마찰면에서 전도된 열에 의한 팽창 현상과 볼트 체결에 의한 구속 현상으로 인하여 응력이 높게 발생하게 된다.

열탄성 접촉해석을 통하여 얻은 드럼 응력 수치는 열하중 조건을 적용하지 않을 경우 23.1MPa, 80회 발열 0.94GPa, Heat fade 0.74GPa, 일반국도 0.53GPa, 급경사 내리막길 0.78GPa, 비포장도로 1.01GPa으로 나타났다. 열하중 조건을 적용하지 않는 경우는 열하중을 고려한 경우에 비해 상대적으로 매우 낮은 응력이 발생하였으며, 이는 실제 드럼의 강도 상태를 적절히 표현하지 못한 결과이다. 그러므로 드럼 강도 평가에서는 열적 특성이 필수 고려되어야 한다.

5가지 제동 패턴에서 드럼 응력 결과는 전반적으로 열전달 해석에서 드럼과 라이닝 패드 온도가 높게 발생한 조건, 특히 볼트 홀 부위의 온도가 높게 발생한 제동 패턴에서 응력 수치가 높게 나타났다.

볼트 홀 근처의 온도를 살펴보면, 80회 발열 158°C, Heat fade 119°C, 일반국도 84°C, 급경사 내리막길 131°C, 비포장도로 171°C으로, 마찰열이 크게 작용하는 제동 패턴에서 볼트 홀에 더욱더 많은 열이 전도된다.

그러나 급경사 내리막길 경우, 외부 공기에 의한 냉각 조건이 다른 조건에 비해 상대적으로 부족하여 볼트 홀에 전도된 열이 쉽게 방열되지 않는다. 그래서 드럼에서 발생하는 온도가 높은 Heat fade 경우에 비해 볼트 홀 근처 온도가 상대적으로 높고, 발생하는 응력 수치도 높게 나타났다.

## 5. 결론

드럼 브레이크 시스템에 대해 5가지 제동 패턴을 고려한 과도 열전달 해석과 열탄성 접촉 해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 실제 차량주행 및 제동 조건을 고려한 드럼 브레이크 시스템의 발열 특성과 강도를 평가할 수 있는 해석 기법을 정립하였다.
- 2) 드럼 브레이크 시스템의 발열 특성에 대한 해석 기법의 신뢰성을 실차 시험 결과와 비교를 통하여 검증하였다.
- 3) 5가지 제동 패턴에 대한 드럼 브레이크 시스템의 발열 특성 비교를 통하여 드럼과 마찰재의 마찰에 의한 마찰열과 외부 공기에 의한 방열조건의 영향성을 파악하였다.
- 4) 드럼 강도에 대한 마찰열의 기여도를 살펴 보았으며, 드럼의 발생 온도 특히, 응력 수치가 높게 발생하는 부위의 온도가 드럼 강도에 중요한 변수임을 확인하였다.
- 5) 본 연구에서 수행한 드럼 브레이크 시스템에 대한 열전달 및 열탄성 접촉 해석 과정은 향후 브레이크 시스템의 품질 개선 문제라든가 개발 초기 설계단계에서 효과적인 평가 방법으로 활용할 수 있다.

## References

- 1) A. J. Day, P. R. J. Harding and T. P. Newcomb, "A Finite Element Approach to Drum Brake Analysis," Proc. I Mech E, Vol.193, pp.401-406, 1979.
- 2) R. J. Ashworth, M. EL. Sherbiny and T. P. Newcomb, "Temperature Distributions and Thermal Distortions of Brake Drums," Proc. I Mech E, Vol.191, pp.169-177, 1977.
- 3) A. J. Day and T. P. Newcomb, "Combined Thermal and Mechanical Analysis of Drum Brake," Proc. I Mech E, Vol.98, No.15, pp.287-294, 1984.
- 4) F. H. Highly, "Techniques of Determining the Thermal Characteristics of Brake Drums and Discs," SAE 710589, pp.2020-2028, 1971.
- 5) C. K. Kim and B. Y. Sung, "Thermal Behavior Analysis of Disc Brake System during Quick Braking," Transactions of the KSME A, Vol.22, No.6, pp.1106-1113, 1998.
- 6) B. C. Goo and J. W. Seo, "Thermoelastic Contact Analysis of Drums Brakes by Finite Element Method," Transactions of KSAE, Vol.9, No.3, pp.173-180, 2001.
- 7) K. S. Lee, J. Y. Kuk and I. B. Chyun, "Un-

- steady State Heat Transfer Analysis of Drum Brake System,” Transactions of KSAE, Vol.7, No.9, pp.172-181, 1999.
- 8) R. Limpert, “Brake Design and Safety,” Society of Automotive Engineers, Inc., pp.89-133, 1992.
- 9) Y. G. Kim, 수출차 B-PROJECT차량 발열시험 결과보고, 자체 시험보고서, Kia Motors Co., 2005.
- 10) ABAQUS/Standard User's Manual, Ver.6.4, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., USA, 2003.