

제동 강성감 향상 인자에 대한 해석 및 검증에 관한 연구

심재훈* · 신윙희* · 이중희* · 전갑배* · 김병철* · 김봉수* · 이강국**

A Study on Analysis and Test for Improvement Factors of Brake Stiffness Feeling

Jae Hun Shim*, Ung Hee Shin*, Joung Hee Lee*, Gae Bae Jeon*,
Byong Cheol Kim*, Bong Su Kim*, Kang Kuk Lee**

Key Words : High Performance Caliper(고성능 캘리퍼), High Performance Disc(고성능 디스크), Heat Capacity(열용량), Hydraulic Stiffness(액압 강성), Harsh Braking(가혹 제동), Stiffness Feeling(강성감)

ABSTRACT

Conventional brake system was used for passenger cars and SUV for a long time. However, the high performance brake system has strongly required because of increase of engine power and customer's favorites etc. In this paper, a new high performance brake system for Europe was proposed. For this system, the high performance caliper and disc were newly developed. The superiorities of the developed high performance brake system were verified via heat capacity, hydraulic stiffness, corrosion and harsh braking mode test. Also, the high performance caliper and disc for the light-weight were applied to AL-Alloy and can obtain the weight reduction effect of 2.9 kg per vehicle. Finally, a developed high performance brake system is expected to be used for realization of the high performance at the same platforms.

1. 서론

미국과 일본을 중심으로 진보된 차량의 기술 개발 트렌드가 유럽으로 이동함에 따라 유럽 경쟁사의 라인업에 전략적으로 대응하기 위한 고성능 및 고급화 시스템의 개발이 강하게 요구되고 있다. BMW, BENZ, AUDI와 같은 유럽 선진 경쟁사들의 경우 고성능 차량에 대한 지속적인 투자 및 기술 개발을 통하여 성능 향상과 기술적 인프라를 구축했을 뿐만 아니라 고급화 이미지를 고객에게 강하게 심어줌으로써 고성능 차량 시장의 점유율을 주도하고 있는 실정이다.

이에 따라 당사도 유럽을 대상으로 적극적으로 전략적

인 차량을 개발 및 출시하였으며, 이러한 성과를 기반으로 향후에도 당사의 고성능 차량 시장에 대한 점유율 확대 및 고급차 이미지 구축을 진행하고 있다.

이와 같은 시장 상황에 대응하기 위하여 본 연구에서는 유럽 경쟁사에 전략적으로 대응하기 위한 고성능 브레이크 시스템에 관한 연구를 수행하였다.

이를 통해 제동 안전성과 제동감 향상 그리고 중량 경쟁력을 확보 하고자 하였다.

우선적으로, 고성능 디스크는 휠 조건하에서 디스크의 외경을 최대한 증대하는 것과 병행하여 디스크 마찰면의 벤트 및 베인 형상 최적화를 통한 제동성능 및 열용량을 향상 시킬 수 있도록 하였다. 이를 통해 저터 등과 같은 NVH 성능과 유럽 잡지사 제동감 상대 비교 평가 및 제동 거리 단축에 기여하고자 하였다.

또한, 고성능 캘리퍼는 기존의 캘리퍼 대비 하우징 강

* 현대자동차

** 현대모비스

E-mail : jhs4u@hyundai.com

성 보강 구조를 적용하여 액압 강성 개선을 통한 초기 스트로크 축소 및 선형적이고 강성감 있는 제동감 구현에 초점을 맞추었다.

끝으로, 알루미늄을 적용시킨 경량화 기술을 적용하여 차량의 스프링 아래 질량 저감을 통한 연비 향상에 기여하고자 하였다.⁽¹⁻¹⁰⁾

2. 전체 제동시스템 컨셉 개발

제동시스템에 대한 개발을 위하여 아래의 Fig. 1에서와 같이 개발 컨셉 검토를 실시하였다.

먼저 STEP1에서 제동 안전성이 부족하게 되는 근본 원인 분석을 실시하였다. 그리고 STEP2에서는 STEP1에서 도출된 근본 원인에 대한 모순 분석을 실시하여 2개의 이상해결책 (Ideal Final Result)를 도출하였다. 마지막으로 STEP3에서는 도출된 2가지의 이상해결책에 대한 타당성 검토를 실시하여 이상해결책2가 근본 원인을 해결하기 위한 최종 이상해결책으로 적합함을 확인하였다.

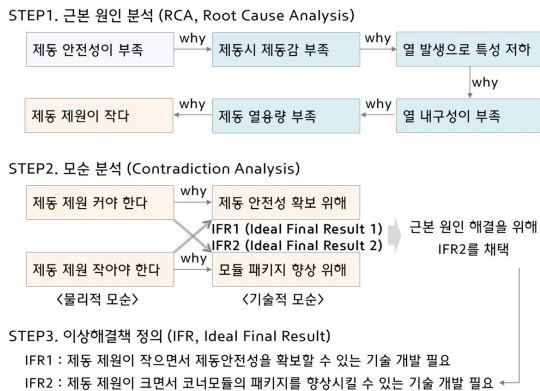


Fig. 1 Consideration of disc size in the corner module

3. 디스크 설계

3.1. 디스크 컨셉 설계

고성능 디스크 설계를 위하여 우선적으로 휠 내 공간에 적합한 디스크 사이즈 제한 검토를 수행하였다.

알루미늄 휠의 경우 발란스 웨이트와 스틸 휠 각각 설계 기준을 준수하여 디스크 사이즈를 검토하였으며, 검토 결과 기존의 $\Phi 320 \times 28t$ 대비 $\Phi 330 \times 28t$ 로 3.1%의 외경

증대를 갖는 디스크 제원을 설정하였다. 또한, 고성능 컨셉에 적합한 디스크 방열성능 및 NVH 특성을 위해 마찰제와 매칭되는 디스크 마찰면에 대한 상세 구조를 설계하였으며, 그 결과 기존 디스크의 직선형 벤트 대신 계단형 벤트를 적용하였다.

아래의 Fig. 2는 휠 공간에 대한 디스크 설정 제원의 레이아웃 검토 결과를 나타내고 있으며, Fig. 3은 설정된 고성능 디스크 제원에 적용한 벤트 구조 비교를 각각 나타내고 있다.

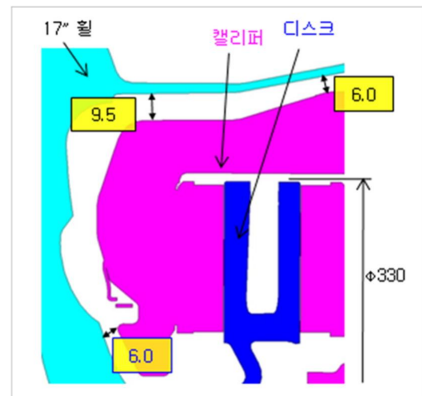


Fig. 2 Consideration of disc size in the corner module

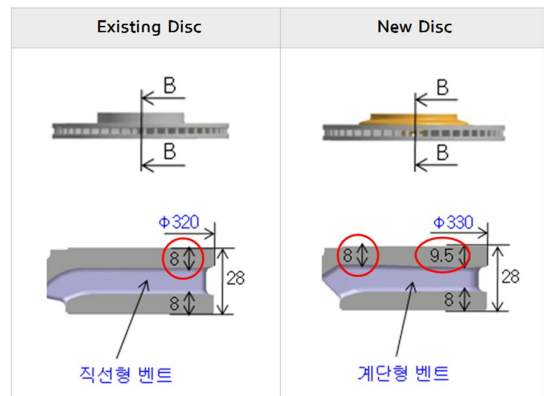


Fig. 3 Comparison of vent structure between existing 17 inch brake and new 17 inch brake

3.2. 디스크 이중 주조 접합 구조

기존의 디스크 제작 방법과는 다르게 본 연구에서는 이중 주조 기법을 이용하여 고성능 디스크를 제작 하였다. 디스크의 마찰면은 마찰제와의 마찰특성을 고려하여

주철 재질 소재를 적용하였으며, 휠과 접촉하여 회전토크를 전달하게 되는 휠 접합면은 알루미늄 재질 소재를 적용한 이중 주조 접합 구조로 고성능 디스크를 경량화 하였다.

이중 주조 접합 공법이란 전처리 가공을 마친 디스크 마찰면 가공품을 알루미늄 금형에 삽입한 후 휠 접합면을 제작하기 위하여 알루미늄을 용탕 주입 시킨다. 그 후 응고 기간을 거친 다음 알루미늄 금형을 이형시켜 최종적으로 이중 주조 디스크를 제작하는 방법이다. 아래의 Fig. 4는 고성능 디스크의 경량화를 위하여 본 연구에서 적용한 이중 주조 접합 방식의 디스크 제작 개념도를 나타내고 있다.

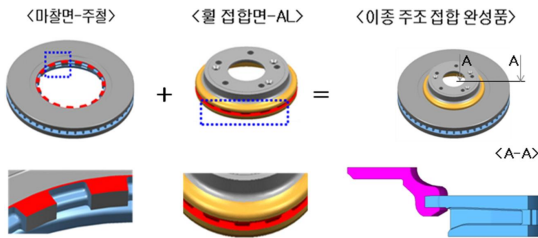


Fig. 4 Structure of double casting disc

3.3. 디스크 열용량 해석

설계를 마친 고성능 디스크의 설계 적합성을 검증하기 위하여 열용량 해석을 수행하였다.

일반적으로 디스크의 열용량이 부족한 경우 과도한 열변형 때문에 DTV(Disc Thickness Variation)의 악화로 디스크 마찰면의 런아웃이 증대하게 된다. 증대된 런아웃은 순차적으로 BTV(Brake Torque Variation)를 악화시키게 되어 결국 저터와 같은 문제를 야기시키게 된다.

따라서, 디스크의 열용량 확보는 제동성능을 결정하는 매우 중요한 요인이라 할 수 있다.

Table 1은 기존 디스크와 본 연구에서 제안한 고성능

Table 1 Comparison of heat capacity analysis results

Division	Existing Disc		New Disc	
	Outer Board	Inner Board	Outer Board	Inner Board
Heat Capacity	527.7℃	531.5℃	498.9℃	513.6℃
Thermal Distribution				

디스크와의 열용량 비교 결과를 나타내고 있다. 해석 조건은 동일한 중량 및 차속을 갖는 차량에 대하여 반복 제동을 수행한 후 디스크에서 발생하는 온도를 측정하였다.

고성능 디스크의 경우 디스크 외경을 기존 대비 3.1% 증대시켰을 뿐만 아니라 벤트 형상도 기존 디스크 대비 최적화를 하였다. 그 결과 캘리퍼 마찰재와 매칭되는 디스크 마찰면 체적을 902.1cm²에서 927.6cm²로 2.75% 개선할 수 있었다. 이와 같은 요인들을 기반으로 동일 차량 제원 조건 하에서 열용량 해석을 수행한 결과 4.5%의 열용량 개선 효과를 얻을 수 있었으며, 유럽 저터 상황에 효과적으로 대응하기 적합한 고성능 디스크임을 확인 하였다.

4. 캘리퍼 설계

4.1. 캘리퍼 설계 컨셉 - 가이드 로드 구조

캘리퍼는 제동시 발생된 유압의 힘을 이용하여 기계적으로 회전하는 디스크와 마찰을 발생시켜 차량을 정지시키는 기능을 한다. 이때, 디스크와 마찰재 간의 마찰을 지지해주는 역할을 캘리퍼의 하우징이 담당하게 되는데 하우징의 강성 정도에 따라 제동 초기 무효 스트로크 축소 및 제동감에 영향을 주게 된다.

Fig. 5는 캘리퍼에 대한 기존과 고성능 구조에 대한 상대 비교를 각각 나타내고 있다.

기존의 캘리퍼와 차별 되는 가장 큰 차이점은 캘리퍼에 액압이 작용할 때 하우징의 전·후진을 지지해주는 가이드 로드가 기존 캘리퍼의 경우 토크 멤버에 관통되어 연결 되어 있는 반면 고성능 캘리퍼의 경우는 토크 멤버를 관통하지 않고 연결된다는 것이다.

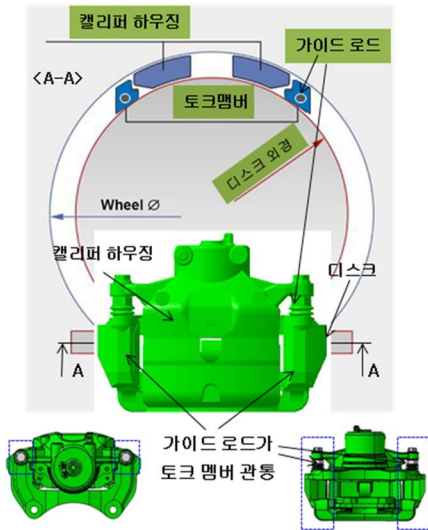
이를 통해 8만큼의 하우징 내 공간을 확보할 수 있게 되고 결과적으로 디스크의 외경을 증대할 수 있게 된다.

이와 같은 효과를 바탕으로 본 연구에서는 전술한 바와 같이 디스크의 외경을 기존 디스크 대비 $\Phi 10$ 증대시킬 수 있었다.

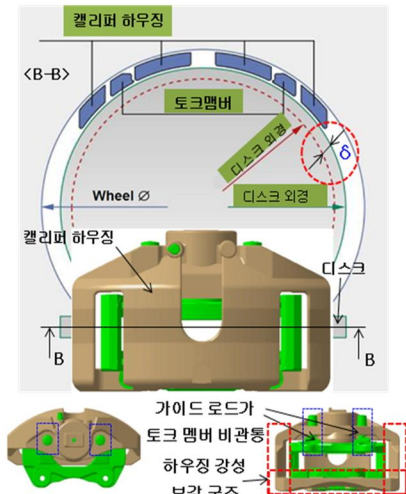
또한, 고속으로 회전하는 디스크를 제동할 때 캘리퍼 하우징의 액압 강성이 부족한 경우 하우징의 끝단부가 상방향으로 들어올려지는 “들뜸” 현상이 발생하게 되는데 이와 같은 현상은 초기 무효 스트로크가 증가하게 되는 원인이므로 강성감 있는 제동감 구현에 악영향을 주게 된다.

이와 같은 문제점을 개선하기 위하여 Fig. 5에 도시한 것과 같이 강성 보강 구조를 하우징에 적용하였다.

강성 보강 구조의 중요한 역할은 하우징의 양 끝단부



(a) Existing Caliper



(b) New Caliper

Fig. 5 Comparison of caliper guide rod structure between existing caliper and new caliper

를 감싼 상태로 상호 연결되어 제동시 하우징이 상방향으로 들려지는 반력을 최대한 억제할 수 있다는 것이다. 이와 같은 효과는 캘리퍼에 가해지는 액압의 강·약에 관계없이 회전하는 디스크에 마찰계의 마찰력을 그대로 전달할 수 있게 되어 제동력을 향상시킬 수 있게 되며, 초기 제동시 무효 스트로크 축소를 통하여 강성감 있는 제동감 구현이 가능하게 되는 장점을 가지게 한다.

4.2. 캘리퍼 설계 컨셉 - 패드 지지 구조

가이드 로드 구조와 더불어 패드 지지 구조에 대해서도 고성능 설계 컨셉을 적용하였다.

아래의 Fig. 6은 패드 지지 구조 비교 결과를 나타내고 있다.

기존 캘리퍼의 경우 차량 방향에 따라 트레일링측의 패드 지지부가 PUSH 구조만으로 설정되어 있어 토크가 집중 되어지는 반면, 고성능 캘리퍼의 경우는 트레일링과 리딩측이 PUSH-PULL 구조로 각각 설정되어 토크를 분담하게 된다. 이와 같은 구조를 통하여 기존 대비 토크 멤버의 변형량을 크게 저감할 수 있게 되며, 4.1의 설계 컨셉과 병행하여 제동시 강성감 있는 제동감을 구현 할 수 있게 된다.

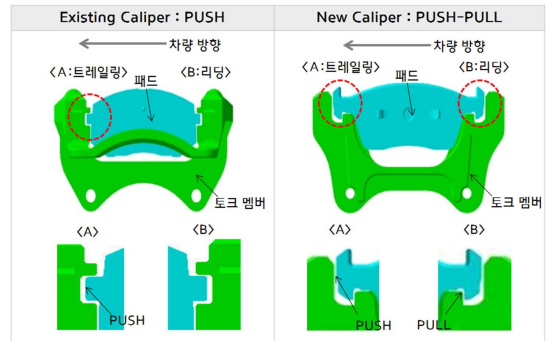


Fig. 6 Comparison of pad supporting structure between existing caliper and new caliper

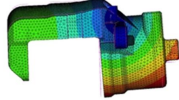
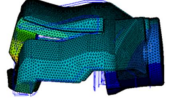
4.3. 캘리퍼 강도 해석

설계를 마친 고성능 캘리퍼의 설계 적합성을 검증하기 위하여 강도 해석을 수행하였다.

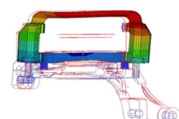
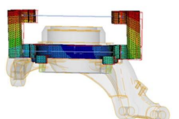
아래의 Fig. 7은 기존 캘리퍼와 본 연구에서 제안한 고성능 캘리퍼의 강도 해석 비교 결과를 나타내고 있다.

먼저 하우징의 경우 액압 70bar 조건에서의 하우징 변형량에 대한 강성 해석을 수행하였으며, 해석 결과 기존 캘리퍼 대비 58%의 개선 효과를 얻을 수 있었다. 이와 같은 훌륭한 결과를 얻을 수 있었던 것은 강성 보강 구조를 하우징에 적용하여 변형을 억제한 것이 주요 원인이라 할 수 있다.

한편, 토크 멤버에 대한 해석을 수행하였다. 해석 조건은 감속시 발생하는 토크를 패드에 부과한 후 패드가 토크 멤버에 미치는 반력을 이용하여 해석을 수행하였다.

Division	Existing Caliper	New Caliper
Analysis Result		
Stiffness [mm]	0.1613	0.068

(a) Comparison of caliper housing stiffness

Division	Existing Caliper	New Caliper
Analysis Result		
Stiffness [mm]	0.591	0.421

(b) Comparison of caliper torque member stiffness

Fig. 7 Comparison of caliper analysis result

그 결과 기존 캘리퍼 대비 29%의 개선 효과를 얻을 수 있었으며, 이와 같은 하우징과 토크 멤버의 해석 결과를 통하여 고성능 캘리퍼의 설계 적합성을 검증 하였다.

4.4. 경량화 결과

고성능과 아울러 경량화에 대한 요구는 최근 자동차 산업의 주요한 이슈가 되고 있다. 이는 경량화를 통하여 차량의 중량을 저감함으로써 연비 개선 효과를 얻을 수 있기 때문이다.

본 연구에서는 고성능 구현 방법 제시 이외에 차량의 연비 향상에 기여하고자 경량화 기법을 적용하였다. 디스크의 경우 전술한 바와 같이 휠 접합면을 주철 대신 알루미늄을 적용한 이중 주조 기법을 적용하였으며, 캘리퍼는 하우징 재질을 주철에서 강성 보강 구조로 구성된 알루미늄 하우징을 적용하였다.

이와 같은 경량화를 통하여 2.9kg대의 절감 효과를 얻을 수 있었다.

5. 평가 결과

5.1. 캘리퍼 변형량 평가

고성능 캘리퍼의 성능 검증을 위하여 소요 액량 평가를 수행하였다. 평가 방법은 철 패드 조건에서 캘리퍼에 액압을 부여한 후 캘리퍼의 변형량을 측정하였다. 동일한

압력 조건하에서 고성능 캘리퍼는 기존 캘리퍼 대비 소요 액량이 12%가 저감된 것으로 확인 되었다.

전술한 해석 결과와 평가 결과가 모두 기존 캘리퍼의 변형량 대비 고성능 캘리퍼의 변형량이 월등히 우수한 것으로 나타났으며, 주요 원인은 하우징 강성 보강 구조를 적용한 결과이다.

이와 같은 결과를 통하여 초기 무효 스트로크 축소가 가능한 강성감 있는 고성능 캘리퍼의 설계 적합성을 검증 하였다. 아래의 Fig. 8은 기존 캘리퍼와 고성능 캘리퍼의 소요 액량 비교 평가 결과를 나타내고 있다.

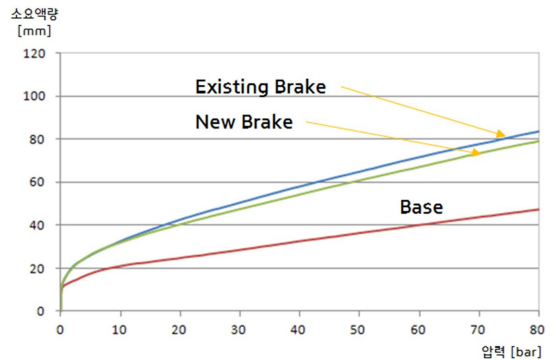


Fig. 8 Comparison of caliper deformation test result

5.2. 캘리퍼 드래그 평가

드래그는 디스크와 패드의 간극 및 런아웃(Run Out)에 의하여 잔류 토크가 발생하는 것으로, 심할 경우 차량의 끌림 현상 및 연비 저하를 야기시키게 된다. 따라서, 드래그 평가는 변형량 평가와 함께 필히 검증해야 하는 캘리퍼의 주요 특성 중 하나이다.

아래의 Table 2는 기존 캘리퍼와 고성능 캘리퍼의 드래그 평가 결과를 나타내고 있다.

평가 결과 기존 캘리퍼 대비 30%의 드래그 감소 효과를 얻을 수 있었다. 이와 같은 결과를 얻게 된 주요 원인은 하우징 및 토크멤버의 강성을 기존 캘리퍼 대비 개선한 결과이다.

Table 2 Comparison of drag test results

Division	Drag (kgf.cm)	
Existing Brake	24.5	Base
New Brake	17.1	30% ↓

5.3. 디스크 부식 및 가혹제동모드 평가

이중 주조 기법로 제작된 고성능 디스크의 내구성 검증을 위하여 염수부식 후 가혹제동모드 평가를 수행하였다.

평가 방법은 우선 주철-알루미늄 접합 부위를 염수 상태에서 부식시킨 후 저·고속 알파인 평가와 초고속·급제동 Fade 평가를 각각 수행하여 디스크 이중 주조 접합부의 내구성을 확인하는 것이다.

본 연구에서는 주철-알루미늄 접합부에 대한 부식 평가를 강화하기 위하여 기존 대비 2배 이상 많은 시간을 염수 부식 시켰으며, 그 후 가혹제동모드 평가를 수행하였다.

이와 같이 장시간 부식 및 가혹제동모드로 고성능 디스크를 평가하는 이유는 알루미늄 재질 특성상 500°C 이상의 온도 상태에서는 내열성이 취약하다는 단점을 가지고 있기 때문이며, 이와 같은 점을 고려하여 알파인 평가와 Fade 평가를 통하여 디스크 온도를 상승시켜 이상 유무를 검증하기 위함이다.

또한, 이중 주조 기술의 구조상 주철-알루미늄 접합부에 대한 부식 및 접합면의 내구성을 필히 검증해야 하기 때문이다.

아래의 Fig. 9는 염수 부식 평가 마친 고성능 디스크의 주철-알루미늄 접합부를 나타내고 있으며, Fig. 10은 염

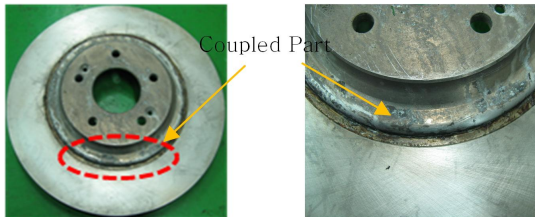


Fig. 9 Test result of salt water spray

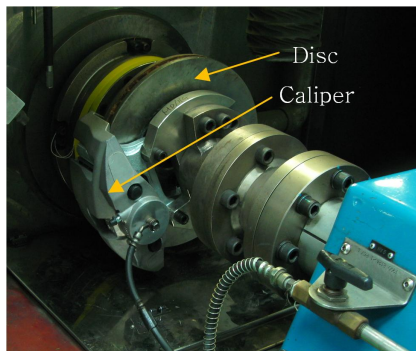


Fig. 10 Test of harshness brake mode

수 부식을 마친 디스크의 가혹제동모드 평가를 각각 나타내고 있다.

장시간 부식 및 가혹제동모드 평가를 마친 고성능 디스크를 아래의 Fig. 11에 도시하였다.

주철-알루미늄 부식 접합면은 평가 후에도 크랙이나 박리와 같은 문제점 없이 안정적인 결합 상태를 유지하였다.

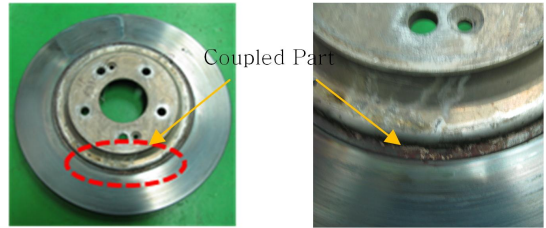


Fig. 11 Test of harshness brake mode

한편, 아래의 Fig. 12는 가혹제동모드 평가시 고성능 디스크의 주철-알루미늄 접합면과 기존 디스크의 단일 재질 주철 접합면과의 온도 상승 비교 결과를 나타내고 있다.

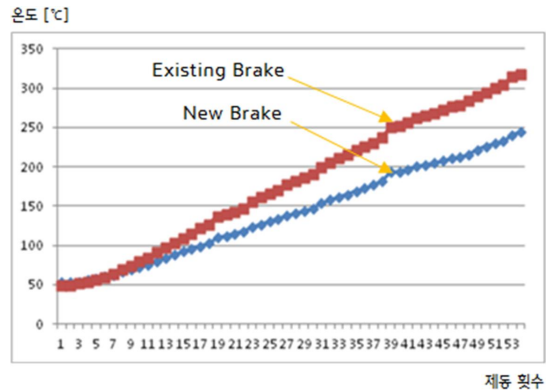


Fig. 12 Test of harshness brake mode

기존 디스크의 경우 접합면의 최대 상승 온도는 315°C 까지 온도가 상승한 반면에 고성능 디스크의 경우는 접합면의 최대 상승 온도가 250°C까지만 상승 하였다.

이와 같이 가혹제동시 안정적인 결과를 얻을 수 있었던 원인은 알루미늄 재질이 주철 재질 대비 열전도성이 우수하여 열 발산이 빠르게 진행되었기 때문이라 할 수 있다.

6. 결 론

본 연구의 목적은 제동 안전성에 대한 자동차 시장의 요구를 충족시키기 위한 고성능 브레이크 시스템 개발이었다. 새로운 브레이크 시스템의 설계 적합성을 검증하였으며, 향후 본 연구의 성과를 이용하여 차량의 안전성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 확신한다.

- 1) 기존 디스크 대비 3.1%의 외경이 증대된 새로운 디스크를 설계하였다. 또한, 고성능 디스크의 방열 성능 향상을 위하여 기존의 직선형 벤트 대신 계단형 벤트를 적용하였다.
- 2) 기존 디스크 대비 2.75%의 마찰면 체적 증대와 벤트 형상을 최적화한 결과 기존 대비 4.5%의 열용량 개선 효과를 얻을 수 있었다.
- 3) 가이드 로드와 패드 지지구조를 고성능 컨셉으로 신규 설계했으며, 이를 통해 강성감 있는 제동감을 얻을 수 있도록 하였다.
- 4) 하우징과 토크멤버에 대한 변형량 해석 결과 기존 대비 58%와 29%의 개선 효과를 얻을 수 있었으며, 이와 같은 결과를 통하여 강성감 있는 제동감과 제동거리 단축에 효과적임을 확인하였다.
- 5) 연비 향상에 기여하기 위하여 경량화 기법을 적용하였다. 디스크는 휠 접촉면에 주철-알루미늄 이중 구조 기법을 적용하였으며, 캘리퍼는 하우징 강성 보강 구조에 알루미늄을 각각 적용하여 경량화를 하였다. 그 결과 기존 대비 2.9kg/대의 절감 효과를 얻을 수 있었다.
- 6) 캘리퍼 변형량 및 드래그 평가와 디스크 부식 및 가혹제동모드 평가를 통하여 본 연구에서 제안한 고성능 브레이크 시스템이 기존 브레이크 시스템 대비 우수함을 검증하였다.

참고문헌

- (1) Jason J. Tao and H. T. Chang, 2003, "A System Approach to the Drag Performance of Disc Brake Caliper", SAE International, 2003-01-3300.
- (2) SooSang. Kim, SuBu Cho and TaeJung Yeo, 2005, "A Study on the Effects of Piston and Finger Offset on the Pressure Distribution at Disk Brake Pad Interface", SAE International, 2005-01-0794.
- (3) L. S. Rajaram and S. Sudharsan, 2005, "Optimization of Caliper Housing Using FEM", SAE International, 2005-26-060.
- (4) Pyung Hwang, Xuan Wu and YoungBae Jeon, 2008, "Repeated Brake Temperature Analysis of Ventilated Brake Disc on the Downhill Road", SAE International, 2008-01-2571.
- (5) Christopher Thomas Griffen, 2011, "Effects of Brake Pad Boundary Contact Surfaces on Brake Squeal", SAE International, 2011-01-2355.
- (6) Alan Backstrom, 2011, "Brake Drag Fundamentals", SAE International, 2011-01-2377.
- (7) Junghan. Kim, Namyoul. Ryu, YoungTaek. Kim, 2012, "Optimized Caliper Design for Low Drag Using DFSS Method", SAE International, 2012-01-1835.
- (8) Jin. Han, HackEan. Lee, 2015, "A Study of Effects of Ferritic Nitrocarburized Brake Disc on Its Corrosion Resistance and Braking Performance", 자동차안전학회지 제7권, 제2호, pp. 19~24.
- (9) WooGyeong. Gwak, ChangKi. Hong, 2016, "Influence of the Braking Time on the Soundness of Ventilated Disc Brake System", 자동차안전학회지 제8권, 제1호, pp. 7~12.
- (10) JaeHun. Shim, JoungHee. Lee, 2018, "A Study on Analysis of Effect Factors and Development to Improve Brake Safety", KASA Spring Conference, 11-16.