

열부하 및 회생 제동 특성을 고려한 경형 친환경차의 제동시스템 개발에 관한 연구

심재훈* · 신용희** · 이중희* · 황세라* · 임원석** · 김병철*

A Study on Development of Brake System of Light Eco-Friendly Car Considering Heat Load and Regenerative Braking Characteristic

J. H. Shim*, U. H. Shin**, J. H. Lee*, S. R. Hwang*, W. S. Yim**, B. C. Kim*

Key Words : Heat capacity(열용량), Pedal Effort(페달 답력), Pedal Travel(페달 트래블), Judder(저더), Wear Characteristic(마모 특성), Regenerative Braking Cooperation Control(회생 제동 협조 제어)

ABSTRACT

Recently, there is a big issue of downsizing on brake system according to fuel efficiency and regenerative braking cooperation control. Especially, small cars have improved in a variety ways such as electric vehicle and smart car compared to previous small cars. So, small brake system is strongly required in the car industry. A new small brake system for light compact vehicles was proposed in this paper. For this system, the solid type disc and caliper were newly developed. And the important design factors were considered to reduce brake size. First, we calculated the temperature rise of disc through heat capacity formula and CAE analysis. Second, we analyzed the housing and carrier stiffness of caliper to select the reasonable condition. Finally, the superiorities of the developed brake system were verified by heat capacity, consumption liquid level, braking feeling, judder, wear test and regenerative braking cooperation control analysis. A developed brake system is expected to be useful for brake system of light compact platform.

1. 서론

내수 경차에 대한 요구는 경제적 혜택과 연비 등의 장점으로 인하여 꾸준한 판매가 이루어 지고 있다. 또한, 자동차 신형 시장 중 인도, 인도네시아 등 동남아 주요 국가의 글로벌 자동차 시장 점유율은 해마다 꾸준한 상승세를 보이고 있으며, 친환경차 증대 및 이들 국가들의 경제적 성장과 연계될 경우 더욱 더 글로벌 경차 시장이 성장할 것으로 예측 된다. 또한, Fig. 1에서 도시한 바와 같이 일부 자동차 제작사들은 신형 시장의 점유율 향상을 위하여

다양한 고객의 요구 사항을 반영한 경형 EV 및 스마트 차량 등을 공격적으로 개발하고 있는 것으로 보고되고 있다. 따라서, 경차에 대한 지속적인 연구 개발이 필요할 것이며, 이에 대응하기 위한 소형 제동시스템의 개발이 요구된다.

본 연구에서는 이와 같은 상황에 대응하기 위하여 경차에 최적화된 제동시스템을 개발하고자 하였다. 먼저, 경차의 제동 열부하를 고려하여 디스크의 열용량을 검토하였다.⁽¹⁻⁶⁾ 둘째, 검토된 열용량을 기반으로 샤시 모듈의 장착성을 고려한 레이아웃 설계를 수행하였다. 셋째, 경차에 적합한 캘리퍼의 설계를 위하여 다양한 강도 해석을 실시하여 경차에 최적화된 사양을 검토하였다.^(7,8)

결국으로, 위와 같은 설계 검토 결과에 대한 저더 특성,

* 현대자동차, 책임연구원

** 현대자동차, 연구원

E-mail : jhs4u@hyundai.com

마모 특성 평가 및 회생 제동 협조 제어 분석을 실시하여 적합성을 확인할 수 있도록 하였다.⁽⁹⁾



Fig. 1 Competitive EV and smart car for compact car level

2. 본 론

2.1. 열용량을 고려한 Disc Swept Volume 검토

일반적으로 FF(Front Engine, Front Drive) 차량의 경우 차량의 총중량 중 전륜에 걸리는 중량이 후륜에 걸리는 중량 보다 많이 발생하게 된다. 이는 전륜에 더 많은 제동력을 필요로 하게 만들며, 디스크의 열용량이 확보되는 않는 경우 제동시 열부하에 따른 과도한 DTV(Disc Thickness Variation)의 발생으로 인해 디스크 마찰면에 대한 RUN OUT의 증대를 가져오게 된다. 그리고, 증대된 디스크 RUN OUT은 순차적으로 BTV(Brake Torque Variation)의 불안정성을 증대시키게 되며, 결과적으로 저더(Judder)와 같은 NVH 문제를 야기시키게 된다. 그러므로, 차량 개발 초기 디스크의 열용량 확보는 제동시스템의 성능을 결정하는 중요한 요인이 된다.



$$\Delta T = \frac{R_d \cdot W \cdot V_0^2}{203.283 \times v} (\text{°C})$$

where 동하중 배분비 $R_d = R_s + \alpha \cdot \frac{h_{CG}}{l}$ (1)

위의 식 (1)을 이용하여 디스크의 이론 열용량 검토를 수행하였다. 주요 인자로서 디스크의 외경 및 두께를 고려 하였으며, 그 결과 259cm³의 Disc Swept Volume을 갖는 Ø217(외경)×12t(두께) 디스크를 선정하였다. 여기서, Disc Swept Volume은 마찰재와 디스크가 접촉하는 디스크의 면적에 대한 전체 부피를 나타낸다.

2.2. 제동시스템 레이아웃 설정

이론 열용량 검토를 통하여 설정된 Ø217×12t 디스크 및 캘리퍼의 상세 레이아웃을 설계 하였다. 설계시 주요 고려사항으로 경차 컨셉에 맞추어 적용된 휠 및 서스펜션에 장착 가능하도록 디스크 옵셋을 설정하였으며, 캘리퍼의 경우 디스크와의 장착성 및 휠 프로파일과의 간극을 고려하여 레이아웃을 설정하였다. 또한, 단순히 휠에 장착 가능한 캘리퍼의 설계에 그치지 않고, 기존 대비 우수한 강성을 확보 할 수 있도록 최적화 하였다. 캘리퍼에 대한 강성을 확보하려는 이유는 제동시스템 전체의 소요 액량을 최소화하여 제동감을 향상시키는데 있다. 아래의 Fig. 2는 휠 및 서스펜션을 기반으로 최종 설계된 디스크 및 캘리퍼의 상세 레이아웃을 나타내고 있다. 최종 설계 결과 캘리퍼와 주변 부품과의 적정 간극을 확보하여 최적화된 제동시스템의 레이아웃을 설정하였다.

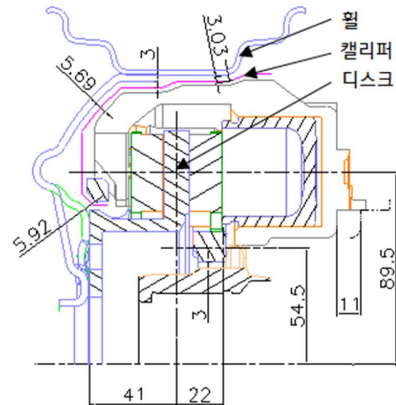


Fig. 2 Design result of brake system for packaging

Fig. 3은 기존 제동시스템과 새로운 제동시스템의 설계 및 경량화 효과 결과를 나타내고 있다. 중량 실측 결과 기존에 적용된 Vent Type 디스크와 캘리퍼 대비 새롭게 개발된 Solid Type 디스크와 캘리퍼의 중량을 각각 1,189g/대, 1,300g/대 총 2,489g/대 저감할 수 있는 경량화 효과를 얻을 수 있었다. 이와 같은 효과를 얻을 수 있었던 것은 Fig. 3에 도시한 바와 같이, 기존 Vent Type 디스크 두께 대비 새로운 Solid Type 디스크의 두께를 6t 축소할 수 있게 되면서 동시에 디스크 두께 축소부 만큼 캘리퍼 하우징의 체적도 축소하였기에 가능한 결과이다. 한편, Fig. 4는 모듈 구성을 위하여 휠 등 상대 부품간의 인터페이스를 고려한 최종 모듈 장착성 결과를 나타내고 있다.

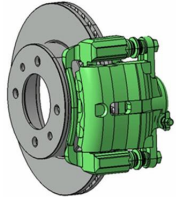
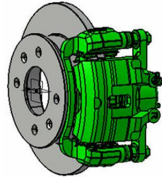
구분	Existing model	New model
형상		
캘리퍼	7,935g/대	6,746g/대 (1,189g/대 ↓)
디스크	7,520g/대	6,220g/대 (1,300g/대 ↓)
타입	Vent type disc	Solid type disc
TOTAL	15,455g/대	12,966g/대 (2,489g/대 ↓)

Fig. 3 Comparison of specification and lightweight between existing model and new model

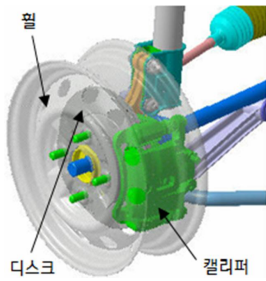
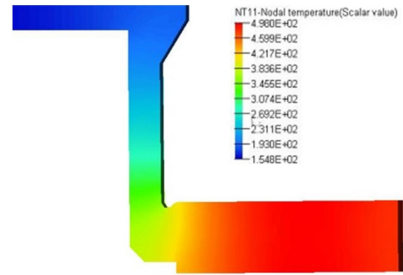


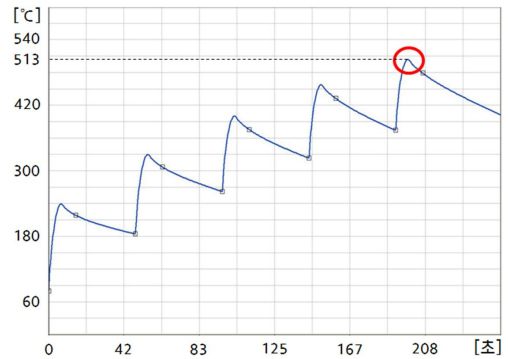
Fig. 4 Chassis module result of brake system

2.3. 열용량 해석

Disc Swept Volume 및 차시 모듈 장착성과 관련한 설계 검토를 마친 디스크에 대해서 차량 제원을 반영한 열용량 해석을 수행하였다. Fig. 5는 열용량 해석 결과를 나타내고 있다. 도시된 바와 같이 실차를 고려한 열용량 해석 결과 디스크의 최대 상승 온도는 513°C로 확인되었다. 전술한 바와 같이 과도한 디스크의 온도 상승은 디스크의 변형을 유발하면서 전체적인 제동시스템의 NVH 및 제동 안전성에 악영향을 주게 된다. 디스크의 재질인 주철의 열부하 내구성을 고려하였을 때, 650°C 이상에서부터 상변화가 발생하기 때문에 본 해석의 결과는 안정적인 열용량을 확보한 설계로 확인될 수 있다. 이와 같은 해석 결과는 2.5장의 평가 결과와 병행하여 확인될 것이며, 저더 특성 평가를 통하여 최종적으로 유효성을 검증하고자 한다.



(a) Temperature contour plot of disc



(b) Max temperature after 5 times braking

Fig. 5 Analysis result of heat capacity for disc

2.4. 캘리퍼 강성 해석

캘리퍼는 배력작용을 거쳐 증압된 유압을 이용하여 디스크와의 상호 마찰을 발생시켜 차량에 제동력을 전달하는 역할을 수행한다. 캘리퍼의 강성 해석을 통해서 사전에 강성 확보를 검증해야만 하는 중요한 이유는 충분한 강성을 확보 함으로써, 전체 제동시스템에 사용되는 소요 액량을 저감하는데 그 이유가 있다. 이와 같은 이유는 소요액량의 저감은 직접적으로 제동감 향상과 연결되기 때문이다.⁽⁸⁾

본 연구에서는 새롭게 개발된 캘리퍼와 A사 캘리퍼의 비교를 통해서 강성 확보의 우수성을 검증하고자 하였다. 먼저, A사 모델과 새로운 모델에 대한 캘리퍼의 Housing 해석을 수행하였다. 해석 결과 새로운 모델이 A사 모델 대비 36% 정도의 변형 저감 효과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 그리고 캘리퍼의 Carrier 해석 결과 역시 새로운 모델이 A사 모델 대비 57% 정도의 변형 저감 효과가 있는 것으로 나타났다. 동일한 휠 제약 조건 하에서 A사 모델 대비 우세한 결과를 얻어 캘리퍼의 설계 적합성을 검증할 수 있었다. 아래의 Fig. 6과 Fig. 7은 캘리

퍼 Housing 및 Carrier의 상세 해석 결과 및 비교를 각각 나타내고 있다.

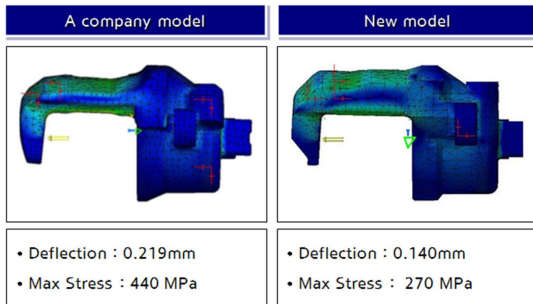


Fig. 6 Analysis result for stiffness for housing

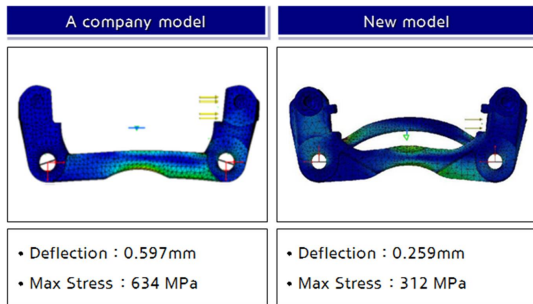


Fig. 7 Analysis result for stiffness for carrier

2.5. 평가 및 분석

2.5.1. 열용량 평가

실차 운전 조건에서 디스크 온도를 실시간으로 측정함으로써 열용량 평가를 수행하였다. 디스크의 온도 측을 위하여 디스크 마찰면에 Thermo Couple을 설치하였으며, 운전 조건은 500m 거리에 대한 가속을 반복한 후 디스크의 온도를 측정 하였다. 평가 결과 디스크 온도는 500°C로 측정되었으며, 열용량 해석 결과인 513°C와 유사한 결과를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 전술한 바와 같이 주철 디스크의 재질 특성을 고려했을 때 650°C 초과 온도부터는 재질의 변형이 발생될 수 있다. 따라서, 본 측정 결과는 상당히 안정적인 열용량 조건을 갖는 것이라고 할 수 있다.

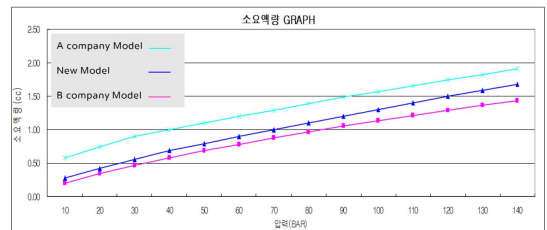
2.5.2. 소요액량 및 제동감 평가

디스크 열용량 평가에 이어서 캘리퍼에 대한 소요액량

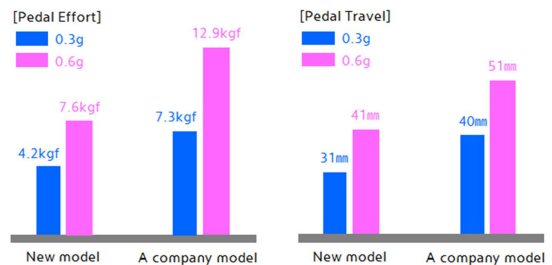
평가를 수행하였다. 캘리퍼의 소요액량은 차량 제동감을 결정하는 매우 중요한 인자로서 소요액량이 적을수록 선형적이고 우수한 제동감을 확보 할 수 있게 된다. 특히, 소요액량이 불리할수록 페달 스트로크가 증가하기 때문에 제동감 측면에서 매우 불리하게 된다. 그러므로 캘리퍼를 제작하기 이전에 2.4장에서와 같은 강성 해석을 통하여 충분한 강성을 검증 및 확보한 후 설계에 반영하여야 한다.

아래의 Fig. 8은 A사 모델과 새로운 모델의 소요액량 및 제동감 비교 결과를 나타내고 있다. 먼저, Fig. 8의 (a)의 소요액량 평가에서 개발 완성도 비교를 위하여 차급이 1단계 높은 차량에서 적용되고 있는 B사 모델의 소요액량도 함께 비교하였다. 도시된 바와 같이, 새로운 모델은 A사 모델 대비 전 압력 구간에 대하여 현저한 소요액량의 우세를 갖는 것으로 예측되었으며, 1단계 높은 차급에서 적용되고 있는 B사 모델과는 동등 수준에 가까운 소요액량을 갖는 것으로 예측되었다. 그리고 기준 압력 70bar에서 A사 모델과의 상대 비교를 통해서 객관적인 소요액량을 비교 측정한 결과 20% 소요액량 저감 효과를 확인할 수 있었다.

이와 같은 결과를 기반으로 Fig. 8의 (b)에서와 같이 실차에 적용한 결과 0.3g 저감속 및 0.6g 고감속 영역에 대하여 Pedal Effort는 평균 41%의 개선효과를 확인 하



(a) Consumption liquid level of calipers



(b) Brake feeling

Fig. 8 Test result for consumption liquid level and brake feeling

였으며, Pedal Travel은 평균 21%의 개선효과를 각각 확인하였다. 이와 같은 결과를 통하여 A사 대비 우수한 제동감을 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다.

2.5.3. 저더 및 마모 특성 평가

저더란 제동중 제동력 변화에 의한 이상 진동의 발생을 말한다. 저더는 고객의 불만 제기 및 클레임 비용 발생 등과 같은 문제를 야기함으로써 자동차 메이커의 이미지 실추 및 수익성 악화를 발생시킨다는 점에서 매우 중요한 문제라 할 수 있다. 아래의 Fig. 9는 저더 문제점 발생에 대한 상세 메커니즘을 나타내고 있다. 2.1장에서 서술한 바와 같이 저더는 과도한 제동 열부하에 따른 디스크의 열변형과 직접적인 관계를 갖고 있으며, 도시된 바와 같이 순차적으로 DTV의 변화와 RUN OUT의 변화를 야기시켜 최종적으로 BTV의 변화에 따른 차량의 이상 떨림을 발생하게 되는 현상이다. 따라서, 열용량 확보는 제동 NVH 성능을 좌우하는 중요한 영향 인자라 할 수 있다.

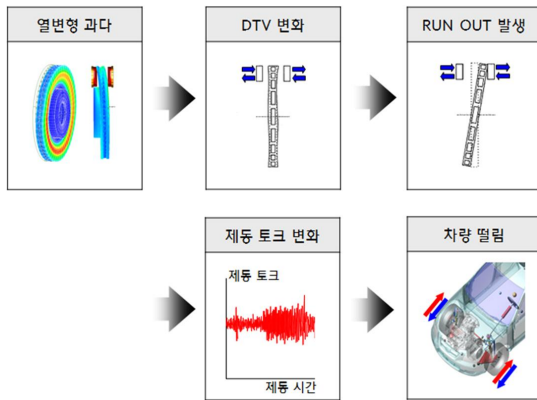


Fig. 9 Mechanism for judder generation

저더 특성에 대한 계측 결과 제동 감속도 변화에 대한 최대 BTV는 5.0kgf·m 수준으로 매우 적은 영향도를 갖는 것으로 계측되었으며, 최대 DTV는 0 μ m에 근접하는 결과를 얻을 수 있다. 또한, 저더 특성 평가 후 마찰재 및 디스크에 대한 표면 상태를 확인하였으며, 디스크 변형시 발생하는 Heat Spot이 없음을 확인하였다.

한편, 저더 특성 평가와 병행하여 마모 특성 평가를 수행하였다. 경차의 주 소비층 특성상 마모에 대한 성능 확보는 전술한 저더 특성과 더불어 반드시 확보되어야 하는 성능이라고 할 수 있다. 마모 특성 평가 결과 Inner/Outer

디스크 각각 36,813km/40,125km로 가혹한 마모 평가 모드를 고려했을 때, 매우 우수한 마모 특성을 갖는 것으로 나타났다. 아래의 Fig. 10은 저더 특성과 마모 특성에 대한 평가 후 디스크의 Inner/Outer 마찰면과 마찰재에 대한 표면 상태를 나타내고 있다. 도시된 바와 같이 디스크 표면의 스코어링과 같은 이상 마찰 문제점이 없음을 확인하였으며, 마찰재 표면도 균일한 마찰 상태를 갖는 것으로 확인되었다.

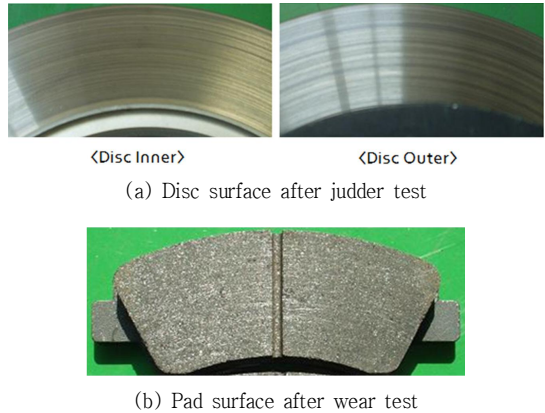


Fig. 10 Analysis result for stiffness for carrier

2.5.4. 회생 제동 협조 제어를 고려한 제동 특성 분석

이번 장에서는 최근 자동차 산업의 큰 이슈 중 하나인 친환경차량에 대한 회생 제동 협조 제어 실행시 제동시스템에 대하여 고찰하고자 한다. EV나 HEV 등 모터 구동을 하게 되는 친환경차량의 경우 연비 향상을 위하여 회생 제동을 하게 된다. 이때, 제동시스템은 운전자의 전체 요구 제동력을 파악하여 회생 제동으로 발생하게 되는 제동 토크 이외의 제동력에 대하여 협조 제어를 실시하여 운전자의 요구 제동력을 맞추게 된다.

Fig. 11은 회생 제동 협조 제어 실행시 감속도에 따른 제동 토크의 배분에 대하여 나타내고 있다. 도시된 바와 같이 제동 초기인 A구간 전까지는 회생 제동을 최대한 활용하면서 연비 향상을 도모할 수 있게 된다. 이때, 제동시스템에 의한 유압 제동은 작동하지 않는다. A~B 구간에서는 회생 제동을 유지하면서 전·후륜의 유압을 증가시키게 된다. B~C 구간에서는 회생 제동을 서서히 감소시키면서, 전·후륜 유압 배분에 수렴하도록 전·후륜의 유압을 증가시키게 된다. C~D 구간은 0.6g 이상의 고감속 구간으로써 기본적인 타력 주행을 위한 회생 제동을 제외

하고는 B~C 구간과 같이 전·후륜의 유압을 증가시키게 된다. 그리고 D~E 구간과 E 구간은 차량의 안전성을 최대한 고려하기 위하여 제동시스템의 제동 토크만을 이용하여 차량의 제동 제어를 수행하게 된다. 이 구간에서는 차량의 안전성 확보를 위하여 기본적인 타력 주행을 위한 회생 제동도 해제시키게 된다. 이와 같은 회생 제동 협조 제어를 통한 제동 토크 배분으로 인하여 제동시스템의 제동 토크를 축소할 수 있게 된다.

본 연구에서 개발된 새로운 모델은 전술한 바와 같이 A사 모델 대비 우수한 제동 성능을 확보할 수 있도록 개발되었다. 이와 같은 개발 결과를 친환경차량에 적용할 경우 탁월한 제동감 및 제동 안전성을 얻을 수 있다. 또한 회생 제동 협조 제어 미적용 차량과 비교했을 때, 전체 제동력 중 유압에 의한 제동력이 감소하게 된다. 이와 같은 효과로, 제동시스템에서 발생하는 제동 토크 측면에서는 약 50%의 저감 효과를 얻을 수 있게 되며, 열용량 측면에서는 유압에 의해 가해지는 제동에너지가 약 42% 저감되어 디스크 온도 상승이 줄어들게 된다. 이는 제동시스템의 제동 토크 및 열부하에 대한 추가 성능 마진을 확보할 수 있게 됨을 의미한다. 따라서, 소형 제동시스템은 향

후 더욱 더 증가될 것으로 예상되는 글로벌 경형 친환경 차량 추세를 고려하였을 때, 활용 가치 상승 및 추가 연구가 활발히 수행될 것으로 분석된다.

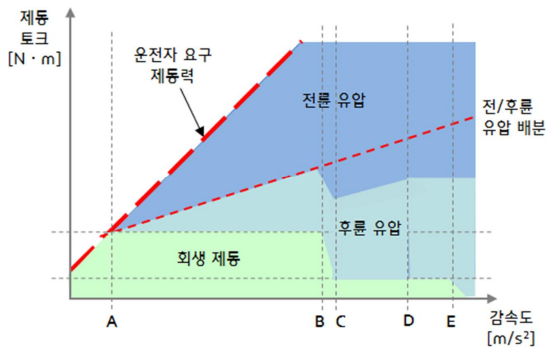
3. 결 론

본 연구는 경형 친환경차를 위한 제동시스템 분석에 관한 연구였으며, 아래와 같은 유효한 결론을 통하여 적합성을 확인하였다.

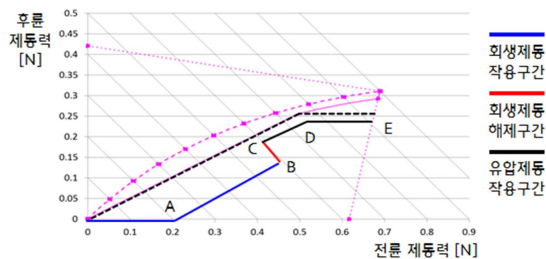
- 1) 열용량을 확보한 디스크의 설계를 위해 259cm³의 Disc Swept Volume을 갖는 Solid Type의 Ø217(외경)×12t(두께) 디스크를 설정하였다.
- 2) 캘리퍼의 레이아웃 설정을 위해 디스크 윗셋을 조정하였으며, 그 결과 동일 휠에 장착 가능한 제동시스템을 새롭게 개발하였다. 또한, 중량 실측 결과 기존에 적용된 Vent Type 디스크와 캘리퍼 대비 새롭게 개발된 Solid Type 디스크와 캘리퍼의 중량을 각각 1,189g/대, 1,300g/대 총 2,489g/대 저감할 수 있는 경량화 효과를 얻을 수 있었다.
- 3) 디스크의 열용량 해석 결과 513°C을 갖는 것으로 확인되었다. 또한, 캘리퍼에 대한 강성 해석을 수행하여 A사 모델 대비 우세한 강성을 갖도록 하였다.
- 4) 열용량 평가 결과 최대 상승 온도는 500°C로 열용량 해석 결과와 매우 유사한 결과임을 확인 하였다. 또한, 소요역량 및 제동감 평가 결과 A사 모델 대비 우세함을 확인하여, 선형적이고 강성감 있는 제동감을 얻을 수 있음을 확인 하였다. 그리고 저터 특성 및 마모 특성 모두 개발 목표에 각각 만족함을 확인하였다.
- 5) 친환경차량의 회생 제동 협조 제어 특성을 고려하여 제동시스템의 제동 토크 배분을 분석하였으며, 그에 따른 소형 제동시스템에 대한 효율성을 고찰하였다.
- 6) 끝으로, 이와 같은 연구 결과를 기반으로 향후 경차 플랫폼에 활용할 경우 표준화 구축 및 제동 성능 향상에 매우 유용할 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) T. K. Kao, 2000, "Brake Disc Hot Spotting and Thermal Judder: an Experimental and Finite Element Study", Journal of Vehicle Design, Vol. 23, pp.



(a) Brake torque distribution for regenerative braking



(b) Operation of front and rear brake force

Fig. 11 Regenerative braking cooperation control on eco-friendly cars such as EV and HEV

- 276~296.
- (2) C. H. Gao, 2002, "Transient Temperature Field Analysis of a Brake in a Non-axisymmetric Three-dimensional Model", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 129, pp. 513~517.
 - (3) C. H. Gao, 2007, "Stress Analysis of Thermal Fatigue Fracture of Brake Discs Based on Thermomechanical Coupling", Journal of Tribology Transaction of the ASME, Vol, 129, pp. 536~543.
 - (4) I. J. Hwang, G. J. Park, 2005, "System mode and sensitivity analysis for brake judder reduction", Transactions of KSAE, Vol. 13, No. 6, pp. 142~153.
 - (5) G. H. Lee, K. H. Kang, 2014, "Characteristics of aggression and brake judder by defferent ZrSiO4 Particle Size", Transaction of KSAE, Vol. 22, No. 7, pp. 144~151.
 - (6) H. U. Moon, E. S. Lee, H. M. Kim, H. R. Hong, 2017, "Optimum design of brake pads for reduction of maximum temperature", KSAE Annual Conference, pp. 545~546.
 - (7) C. G. Ok, T. W. Park, J. W. Yoon, J. H. Choi, 2010, "A study of deceleration characteristic depending on control of vehicle pedal", KSAE Annual Conference, pp. 289~292.
 - (8) J. H. Shim, U. H. Shin, J. H. Lee, 2018, "A study on analysis and test for improvement factors of brake stiffness feeling", Journal of Auto-Vehicle Safety Association, pp. 38~44.
 - (9) J. H. Shim, U. H. Shin, J. H. Lee, 2019, "A study on analysis of small brake system for light eco-friendly car", KASA Annual Spring Conference, pp. 43~48.