

실차 비교 및 검증을 통한 복합재 브레이크의 개발 효용성 분석에 관한 연구

심재훈* · 권영운** · 이중희* · 신윙희**

A Study on Analysis of Development Effectiveness of Composite Brake through Real Car Comparison and Verification

J. H. Shim*, Y. U. Kwon**, J. H. Lee*, U. H. Shin**

Key Words: Composite Brake(복합재 브레이크), Mono-Block Caliper(모노블록 캘리퍼), Friction Characteristics(마찰 특성), Braking Effect(제동 효력), Heat Capacity(열용량), Circuit Driving(서킷 주행)

ABSTRACT

Composite material is recently very important material for eco-friendly vehicles because of its excellent mechanical property and lightweight effect. So, many research results have been recently published for developing the composite material to apply vehicles. In this paper, new brake system is presented using composite material to response this situation. And advantages in terms of performance compared to competitive company will be discussed in depth to verify superiorities of the new composite brake. To do so, composite brake systems which have the same size as the competitive company to the same vehicle is applied. And superiorities through a variety of test results are presented. First, normal braking performances are compared with competitive company through braking effect, heat capacity and friction test, Second, circuit driving and high speed fade test are also verified with competitive company to confirm harsh braking performances for the new composite brake system. Finally, the effects of applying the composite brake to automobile industry like electric car are analyzed.

1. 서론

최근 차량의 고성능 및 연비 강화 등과 같은 문제가 고 급차 및 친환경차를 중심으로 급격하게 요구되면서, 경량 화는 자동차 산업 전반에 걸쳐 중요한 이슈가 되고 있다.

이와 같은 상황에서, 복합재는 탁월한 기계적, 열적 특 성 및 경량화 효과로 인하여 항공기, 풍력 발전 및 자동차 분야 전반에 걸쳐 활발한 연구가 이루어지고 있으며, 향후 자동차 산업에서 중요한 핵심 소재로 널리 사용될 것으로

예측되고 있다.

특히, 제동시스템에 대한 복합재 적용은 제동성능 뿐만 아니라, 차량 상품성 및 스프링 아래 질량의 경량화를 실 현할 수 있으며, 이를 통해서 R&H 및 연비 향상 효과를 극대화할 수 있기 때문에 많은 연구자들에 의하여 완성도 높은 연구 성과가 보고되고 있다.

Krupka는 디스크에 대한 복합재 적용을 초기에 고려했 던 연구자로서, 주철과 복합재의 물성에 대한 연구를 수행 하였으며, 복합재의 차량 적용시 우수한 제동성능 구현이 가능함을 제시하였다.⁽¹⁾

Gadow는 디스크의 적용에 대하여 복합재의 성형성을 향상시킨 연구 결과를 발표하여 차량 적용에 좀더 용이하

* 현대자동차, 책임연구원

** 현대자동차, 연구원

E-mail: jhs4u@hyundai.com

도록 기여하였다.⁽²⁾

Ioannidis는 주철과 복합재에 대한 소음 및 진동 특성에 대한 정량적 상대 비교 연구를 매우 심도 있게 수행하였으며, 그 결과 복합재의 NVH 성능 향상에 크게 기여하였다.⁽³⁾

Ostermeyer는 이미지 프로파일러를 이용하여 트라이볼로지 관점에서 주철과 복합재의 마찰 특성 및 변형에 대하여 분석하였으며,⁽⁴⁾ Swarbrick은 마찰재에 대한 복합재 표면 조건의 다양한 실험 결과를 제시하여 마찰재 개발에 크게 기여하였다.⁽⁵⁾

고동국은 복합재 디스크의 다양한 벤트 형상에 대한 유동 특성을 해석하였으며, 벤트 형상에 따른 기여도 및 효과 분석 결과를 제시하였다.⁽⁶⁾

그리고 심재훈은 다년간에 걸쳐 설계 및 해석 검증을 포함한 폭넓은 복합재 연구를 수행하여, 독창적인 복합재 체결구조 및 벤트 유동구조를 제시하였으며, 다양한 평가 검증을 수행하여 우수한 연구성과를 도출하였다.⁽⁷⁻¹²⁾

본 연구에서는, 복합재 브레이크의 다양한 실차 검증을 통하여 가혹 제동 상태에서의 성능 검증을 실시하였다. 그리고 이와 같은 성능 검증의 객관성을 확인할 수 있도록 경쟁사 실차 데이터와 비교 분석을 실시하여 개발의 완성도를 확인함과 동시에 경쟁사 동등 이상의 성능과 국산화 및 내재화를 통한 원가 우위를 통하여 향후 수익성 향상에 기여하고자 하였다.

2. 본 론

2.1. 복합재 브레이크 개발 내용

2.1장에서는 복합재 브레이크에 대한 개발 내용에 관하여 기술하고자 한다. 아래의 Fig. 1은 복합재 브레이크를 위하여 새롭게 개발된 기술 내용을 나타내고 있다.

먼저, 체결구조 측면에서 기존 경쟁사에 보편적으로 적용하고 있는 브릿지 타입의 체결구조를 웨이브 와셔를 적용한 체결구조로 변경하여 보다 심플한 외관 이미지와 부품수 축소를 실현하였으며, 복합재 마찰면의 SiC함량에 따른 복합재 디스크와 마찰재의 마찰 특성을 심도 있게 분석하였다. 추가적으로 선행개발을 완료한 마찰재는 향후를 고려하여 중금속 법규 대응을 위한 Cu Free 마찰재로 개발을 확장하였다.⁽⁷⁻⁸⁾

그리고 유동성능 향상을 위하여 복합재 벤트 구조를 2단 와선형 벤트 구조로 최적화하였으며, 열전도도를 기존 22W/m·K에서 27W/m·K로 19% 향상시켰다. 그 결과 전

체 냉각성능을 7% 개선하는 효과를 얻을 수 있었다.⁽⁹⁻¹¹⁾

또한, 복합재 수명 주기의 시인성 확보를 위하여 마모 수명 예측 구조를 경쟁사와 차별화되도록 추가하였으며, 후륜의 경우 전륜과의 일체감을 위하여 후륜 모노블록 캘리퍼 적용을 고려한 DIH(Drum In Hat) 매칭면에 HAT 파킹 구조를 새롭게 개발하여 후륜 모노블록 캘리퍼의 적용성 확보 및 추가 경량화 효과가 극대화될 수 있도록 하였다.⁽⁹⁾

모노블록 캘리퍼 측면에서는 대구경 복합재 디스크 적용에 따른 강성 확보를 위하여 모노블록 캘리퍼 상단에 강성 지지 구조를 적용하였으며, 경쟁사 동등 이상의 부착성 및 광택효과를 얻을 수 있도록 도색 방법을 새롭게 개발하였다.⁽¹⁰⁾

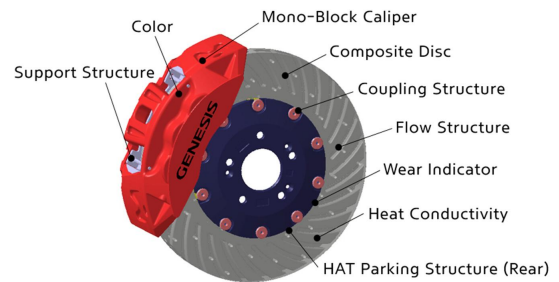


Fig. 1 Development of composite brake

2.2. 실차 시험 구축

2.1장의 개발 내용을 기반으로 경쟁사와의 실차 비교 검증을 통하여 본 연구의 유효성을 검증하고자 하였다. 아래의 Fig. 2는 경쟁사 및 당사 개발 복합재에 대한 실차

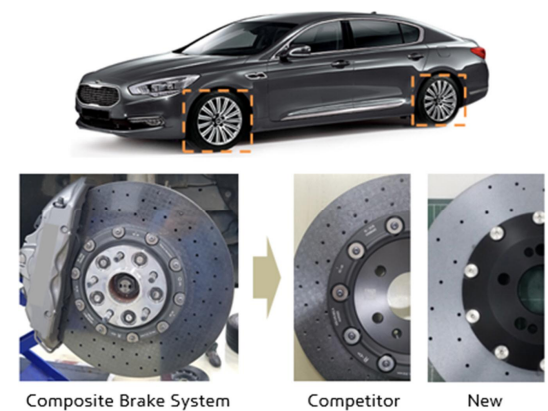


Fig. 2 Installation on competitor and new composite brake

시험을 나타내고 있다.

시험의 객관성을 위하여 차량은 K9에 동일하게 경쟁사와 당사 개발 복합재 브레이크를 적용하여 평가를 수행하도록 하였다. 이때, 노노블록 캘리퍼는 경쟁사의 사양을 동일하게 사용하였으며, 복합재 디스크와 마찰재에 대해서만 개발 사양으로 적용하여 동등한 실차 조건에서의 제동성능 비교 평가가 이루어질 수 있도록 하였다. 한편, 아래의 Table 1은 시험에 적용된 전·후륜 복합재 브레이크 사양의 비교를 나타내고 있다.

Table 1 Specification on front and rear composite brake

		Competitor	New Composite
Front	Caliper	6 Piston Mono-Block - φ36/φ34/φ30-2	— (With New Friction Material)
	Disc	Composite Disc - φ380X38t	— (With New Composite)
Rear	Caliper	4 Piston Mono-Block - φ42/φ380-2	— (With New Friction Material)
	Disc	Composite Disc - φ356X32t	— (With New Composite)

2.3. 효력 평가

기본적인 제동감에 대한 상대 비교를 위해서 동일 차량에 경쟁사 및 새로운 복합재에 대한 실차 효력 평가를 수행하였다. 아래의 Fig. 3은 차량 잠김 상황까지 제동을 했을 때 효력 특성을 나타낸다.

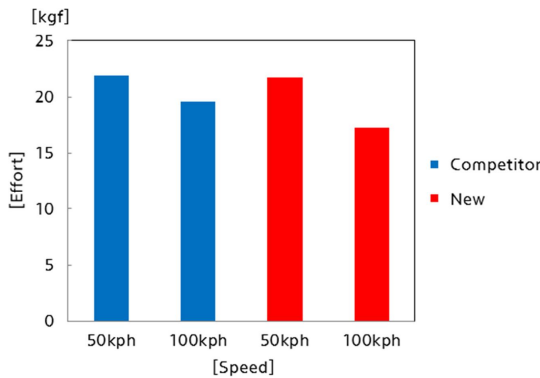


Fig. 3 Validity test on competitor composite brake and new composite brake

일반적으로, 차량 잠김은 감속도 1g 전·후에서 발생하게 된다. 여기서, 1g에 대하여 운전자가 필요하는 요구 제동 답력을 적절하게 확보하는 것이 중요하다.

도시된 바와 같이 차량 잠김 상황에서도 안정적인 답력

특성을 계속할 수 있었으며, 경쟁사 대비 다소 우세한 결과를 확인할 수 있었다.

2.4. 열용량 평가

저속 및 고속 주행을 고려한 열용량 평가를 실시하였으며, 아래의 Fig. 4에 그 결과를 도시하였다.

제동시스템의 특성상 차량 속도가 증가할수록 제동시 디스크의 온도 상승이 발생하게 된다. 이때, 과도한 온도 상승은 주변 부품의 열해와 제동 소음 발생을 유발하게 된다. 이를 위해서 차량 제조사별로 주변 부품의 내열 온도와 디스크 변형 억제제를 위하여 일정 기준 온도 이하로 디스크 열용량을 확보하고 있다.

평가 결과, 경쟁사 및 새로운 복합재 모두 저속의 경우 200°C 이하, 고속의 경우 500°C 이하의 동일한 수준의 열용량을 갖는 것으로 확인되었다.

복합재는 기계적 특성이 뛰어나지만, 낮은 밀도로 인하여 열용량 특성이 낮은 단점이 있다. 본 연구에서 적용된 새로운 복합재 디스크는 냉각성능을 향상시켜 복합재 고유의 열용량 특성을 개선하였으며, 경쟁사와 비교했을 때에도 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

따라서, 지속적으로 복합재의 냉각성능 개선 연구를 수행하여 복합재 디스크의 사이즈 축소를 통한 원가 절감과 성능을 동시에 확보하는 것이 경쟁사와 차별화되는 기술로 유용할 것이다.⁽¹¹⁾

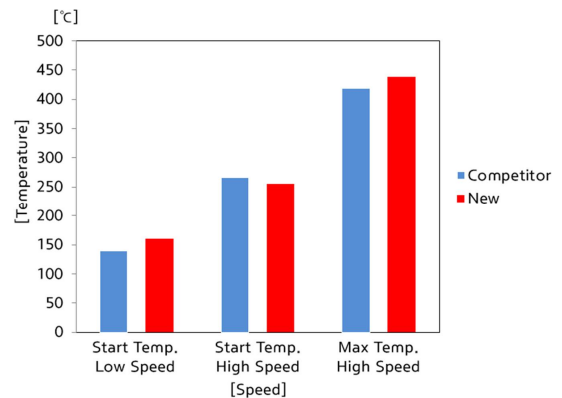


Fig. 4 Heat capacity test on competitor composite brake and new composite brake

2.5. 마찰 특성 평가

복합재 브레이크를 활용한 경우 복합재의 우수한 내마

모성 및 내열성으로 인하여 마찰 특성을 최대화하여 제동 성능을 극대화할 수 있는 장점이 있다. 아래의 Fig. 5는 이와 같은 복합재 브레이크의 마찰 특성을 검증하기 위한 평가 결과를 나타내고 있다.

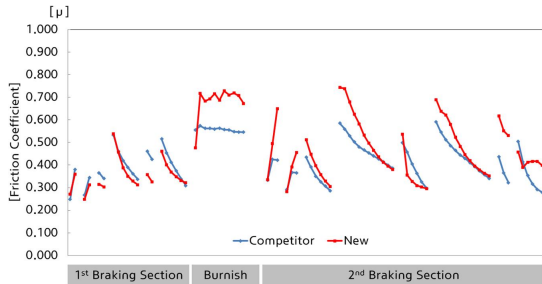


Fig. 5 Friction characteristics test on competitor composite brake and new composite brake

고·저온 및 고·저속 등 다양한 제동 상황에 대한 마찰 특성 평가에서 새로운 복합재는 경쟁사 복합재 대비 전반적으로 높은 마찰 특성을 갖는 것으로 나타났다. 그러나, 마찰 계수의 Min/Max 차이는 다소 경쟁사 대비 높은 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 계측 결과를 기반으로 차량을 좀더 선형적인 제동감을 갖도록 구현하기 위해서는 마찰재의 윤활제와 연삭제 등의 조성 제어를 추가적으로 실시하여 경쟁사 동등 수준 이상의 마찰 계수 안정화 및 마찰 특성을 확보하는 것이 유효할 것으로 판단된다.

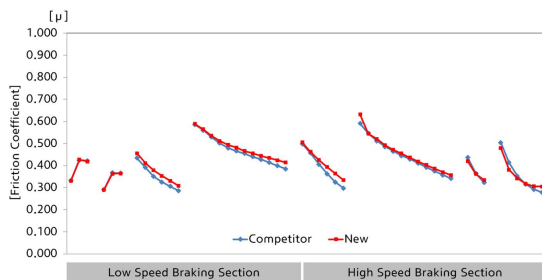


Fig. 6 Friction characteristics test on competitor composite brake and new composite brake in the same friction materials

한편, Fig. 6은 동일한 경쟁사 마찰재를 사용한 경쟁사 및 새로운 복합재 브레이크의 마찰 특성을 나타내고 있다. 도시된 바와 같이 경쟁사와 새로운 복합재 모두 동일 마찰재에 대해서 동일한 마찰 특성을 갖는 것으로 나타났다. 따라서, 새로운 복합재 브레이크에 대한 경쟁사 상대

비교시 동등한 수준의 개발 완성도를 확인할 수 있었으며, Fig. 5에서 언급한 마찰재 안정화를 고려하였을 때, 경쟁사 대비 우수한 복합재 브레이크의 개발이 가능함을 상대 비교 계측 결과를 통하여 확인할 수 있었다.

2.6. 서킷 주행 평가

서킷 주행 평가는 고성능 구현을 위한 차량을 위하여 필수적으로 검증해야 하는 평가이다. 본 연구에서도 새로운 복합재 브레이크의 우수성을 검증하기 위하여 다양한 고급차와 새로운 복합재 브레이크를 장착한 차량과 비교 평가를 실시하였다.

아래의 Fig. 7은 서킷 주행로를 동일 조건으로 주행한 상태에서 차량 감속도가 0.7g 시점에서의 스트로크 계측 결과를 나타내고 있다. 계측 결과 새로운 복합재 브레이크는 서킷 10 LAP 주행 후 스트로크의 증가량이 매우 적었으며, 다른 일반 고급차의 경우 스트로크 변동이 급격하게 증가하였다. 특히, 10 LAP 제동시에는 복합재 브레이크 대비 3배이상 증가함을 확인할 수 있다.

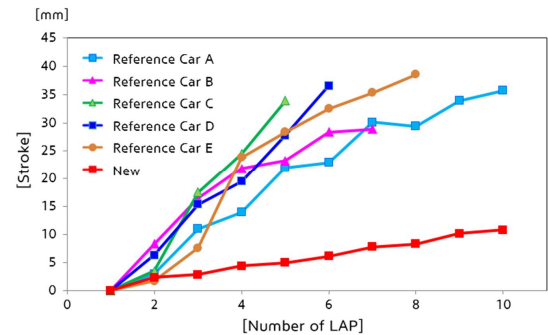


Fig. 7 Circuit test on competitor composite brake and new composite brake

2.7. Fade 평가

서킷 주행 평가와 더불어 Fade 평가를 병행 실시하여 마찰재의 추가 검증을 실시하였다. 아래의 Fig. 8은 15회 제동 후 스트로크의 증가량을 나타내고 있다.

여기서, 서킷 주행 평가와 Fade 평가에서 스트로크의 변화량을 계측하는 이유는 가속 제동에 따른 마찰재의 과다 마모 및 이탈 등으로 인한 제동성능 저하를 확인하기 위함이다. 계측 결과 경쟁사 및 새로운 복합재 브레이크 모두 1회에서 15회까지 안정적인 스트로크를 확인하였으며, 이를 통해서 동등한 Fade 성능을 나타내고 있음을 확인하였다.

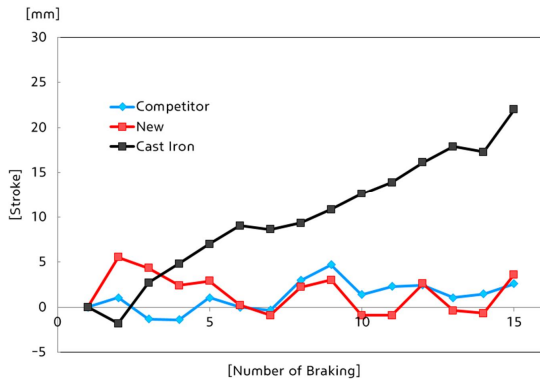


Fig. 8 Fade test on competitor composite brake and new composite brake with cast iron brake

또한, Fig. 8에 기존 일반 브레이크에 대한 추가 평가 결과를 함께 도시하였다. 도시된 바와 같이 일반 브레이크의 경우 15회 반복 제동 상황에서 지속적으로 스트로크가 증가됨을 확인할 수 있었으며, 15회 제동시에는 복합재 브레이크 대비 약 7배 이상으로 스트로크가 악화됨을 확인할 수 있었다.

이와 같은 서킷 주행 평가 및 Fade 평가를 통하여 복합재 브레이크가 고성능 요구에 대하여 매우 적합한 제동성능을 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다.

2.8. 개발 효과 분석

본 장에서는 복합재 브레이크를 차량에 적용시 발생하는 제동 개발 효과에 대하여 기술하고자 한다.⁽⁷⁾

첫째, 가장 중요한 파급 효과 중 하나는 전술한 바와 같이 매우 우수한 제동성능을 구현할 수 있다는 점이었다.

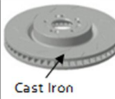
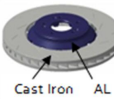
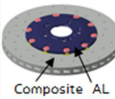
이와 같은 점은 기존 제동시스템에서는 구현될 수 없는 기술로서 고출력을 갖는 전기차 및 고급차의 선형적인 제동 고급감 구현과 상품성 향상에 크게 기여할 수 있을 것이다.

둘째, 매우 탁월한 경량화 효과를 통한 주행성능과 연비 및 전비 향상 효과를 얻을 수 있게 된다. 이와 같은 결과는 복합재의 소재 특성 가운데 하나인 밀도가 단일 주철 재질 대비 33% 수준이면서, 열적, 기계적 특성이 우수하기 때문에 가능한 결과이다. 상세한 경량화 효과 분석을 위하여 아래의 Table 2에 3가지 디스크 재질에 대하여 동일 사이즈를 고려하여 설계했을 경우 각각의 재질별 중량 차이를 비교한 결과를 도시하였다.

도시된 바와 같이 복합재 디스크는 단일 주철 재질 디스크 대비 54% 이상의 경량화 효과, 이중 주조 재질 디스

크 대비는 47% 이상의 경량화 효과를 각각 얻을 수 있게 된다. 이와 같은 경량화 효과로 차량의 스프링 아래 질량을 크게 저감할 경우 주행 성능과 연비 및 전비 향상에 크게 기여할 수 있게 된다.

Table 2 Comparison of lightly weight effect

	Cast Iron	Double Casting	Composite
Shape	 Cast Iron	 Cast Iron AL	 Composite AL
Size	φ380	φ380	φ380
Weight(g/Vehicle)	50,214	43,690	23,126
Lightweight	-	13%	54%

셋째, 미래 모빌리티 분야에서 각광받고 있는 제동 기술 분야인 BBW(Brake By Wire) 기반의 EMB(Electro Mechanical Brake) 시스템을 고려할 경우, 복합재를 적용하여 기존 제동시스템 대비 상대적으로 뛰어난 마찰 특성을 얻게 된다면, EMB의 모터 사이즈를 대폭 축소하는 것이 가능하게 된다.

이와 같은 결과는 원가 절감과 PE(Power Electric) 공간 내의 유압 발생 액추에이터 삭제를 통한 충돌 성능 향상 효과를 얻을 수 있게 되며, 순차적으로 EMB의 실차 적용에 있어 기술적으로 한발 더 다가갈 수 있게 될 것이다.

넷째, 전반적인 차량의 제동 안정성 기술 향상 측면에서도 AEB(Automatic Emergency Braking) 등과 같은 타 시스템과의 협조 제어 기술을 향상시키기 위해서는 기본적인 제동 성능 확보 토대 위에서 제어 기술을 지속적으로 발전시켜야 전체적인 차량의 제동 제어 안정성을 향상시킬 수 있을 것이다.

다섯째, 전기차 등의 다양한 친환경 차량 개발을 위하여 지속적으로 회생 제동량을 증대해야 하는 상황이며, 이는 제동 횟수 감소로 인한 디스크 녹 발생 문제를 야기시키게 된다.

하지만, 복합재 디스크는 녹 발생과 같은 부식 문제를 완벽하게 해결할 수 있어서 클레임 발생 억제를 통한 품질 비용 저감에 크게 기여할 수 있다.

여섯째, 경쟁사들의 경우 카본 세라믹 복합재 브레이크를 독자적인 모델로 활용하면서 높은 수익성 및 자사 고급차의 브랜드 가치를 높이고 있다. 따라서, 고급차 및 전기차 시장에서 지속적으로 경쟁하면서 기존 차량과의 성능 및 브랜드 차별화를 이루기 위해서는 복합재 브레이크의 적용이 필요할 것이다.

3. 결 론

본 연구는 최근 자동차 산업에서 고급 경량화 기술로 활발한 연구가 이루어지고 있는 복합재 브레이크 개발 및 경쟁사와의 제동성능 비교 검증에 관한 연구였으며, 아래와 같은 결론을 통하여 본 연구의 유효함을 확인하였다.

- 1) 기존 복합재에 대한 다양한 연구 결과를 고찰하였으며, 이를 통하여 경쟁사에 대응할 수 있는 새로운 복합재 브레이크를 제시하였다.
- 2) 구현된 새로운 복합재 브레이크를 실차에 적용하여 제동성능을 정량적으로 분석하고자 하였으며, 객관적인 분석 및 기준을 위하여 경쟁사 복합재 브레이크와 함께 실차 상태에서 상호 비교 검증할 수 있도록 하였다.
- 3) 실차 효력 및 열용량 평가를 수행하였으며, 경쟁사 및 새로운 복합재 브레이크 모두 기본 성능에 대한 성능 만족함을 확인하였다. 또한, 추가적인 열용량 향상을 위해서는 본 연구에서 제시한 열전도도 향상 및 유동구조 최적화와 같은 냉각성능 개선 연구들이 유효함을 확인하였다.
- 4) 마찰 특성 평가, 서킷 주행 평가 및 Fade 평가를 수행하여 가혹한 반복 제동 상황에서의 제동성능을 검증하였다. 그 결과 복합재 브레이크가 탁월한 마찰 계수를 확보하면서, 전 제동 구간에 대하여 안정적인 스트로크를 나타내고 있음을 확인하였다.
- 5) 새로운 복합재 브레이크는 경쟁사 대비 동등 이상의 우수한 제동성능 및 양산성 구현이 가능함을 실차 평가를 통하여 검증하였다.
- 6) 복합재 브레이크를 자동차 산업에 적용시 효과 분석을 수행하였으며, 전기차와 같은 친환경 차량에 대하여 중량, 성능, 신기술 그리고 클레임 측면에서 매우 유용함을 제시하였다.
- 7) 국산화 및 기술 내재화 개발을 통하여 고급화 제동 기술 인프라 구축 및 수익성 향상에 기여하도록 하였다.

4. 향후 계획

급변하는 친환경 고출력 차량 대응을 위해서는 기존 제동시스템으로는 동력성능에 걸맞은 제동성능을 확보하기 어려울 것이다. 따라서, 고급화 기술 확보를 위하여 지속적인 연구 및 실차 검증을 수행하여 경량화를 포함한 전비, 수익성 및 상품성을 향상시킬 계획이다.

참고문헌

- (1) M. Krupka, A. Kienzle, 2000, "Fiber Reinforced Ceramic Composite for Brake Discs", SAE International, 2000-01-2761.
- (2) R. Gadow, 2003, "Advanced Manufacturing of Ceramic Matrix Composite for Disk Brake Rotors", SAE International, 2003-01-1178.
- (3) P. Ioannidis, D. C. Barton, P. C. Brooks, 2005, "Noise and Vibration Characterization of Cast Iron and Siliconised Carbon Composite Brake Rotors", SAE International, 2005-01-2313.
- (4) G. P. Ostermeyer, K. Bode, 2009, "Tribological Aspects of Carbon Ceramic and Cast-Iron Brake Rotors with Organic Pad Materials in Simulation and Measurement", SAE International, 2009-01-3010.
- (5) A. L. Swarbrick, 2012, "Surface Conditioning of Carbon-Fiber Ceramic Rotors against Organic Pads", SAE International, 2012-01-1833.
- (6) D. G. Ko, S. J. Yoon, 2015, "Numerical Study on the Flow Characteristics according to the Ventilation Holes Shape of the Carbon Composite Brake Disk", Transaction of KSAE, Vol. 23, No2, pp. 191~198.
- (7) J. H. Shim, D. W. Lim, E. J. Hyun, K. J. Kim, G. G. Jung, H. K. Kim, 2016, "A study on braking characteristics control of carbon ceramic composite for brake reliability improvement of luxury car and future technology evolution trend prediction", Transactions of KSAE, Vol. 24, No. 6, pp. 684~693.
- (8) J. H. Shim, U. H. Shin, J. H. Lee, G. B. Jeon, D. W. Lim, 2019, "A Study on Verification of Actual Car Effectiveness for Composite Brake", Transaction of KSAE, Vol. 27, No. 4, pp. 259~266.
- (9) J. H. Shim, J. H. Lee, 2019, "A Study on Improvement of Cooling Performance through Vent Structure Optimization of Carbon Ceramic Composite Disc", Journal of auto-vehicle safety association, Vol. 11, No. 1, pp. 23~29.
- (10) J. H. Shim, U. H. Shin, J. H. Lee, 2020, "A Study on Development of Composite Brake System through Analysis of advanced Braking Performance Factors",

- Journal of auto-vehicle safety association, Vol. 12, No. 1, pp. 26~32.
- (11) J. H. Shim, U. H. Shin, J. H. Lee, D. W. Lim, 2021, "A Study on Improvement of Cooling Performance of Composite Brake System for Vehicle Standardization", Transaction of KSAE, Vol. 29, No. 6, pp. 533~539.
- (12) J. H. Shim, U. H. Shin, J. H. Lee, D. W. Lim, 2021, "A Study on Squeal Noise Robustness Analysis to Improvement Composite Brake Stability of High Performance and Eco-Friendly Vehicles, Journal of auto-vehicle safety association, Vol. 13, No. 3, pp. 32~40.