

제동성능 고급화 인자 분석을 통한 복합재 제동시스템 개발에 관한 연구

심재훈* · 신용희** · 이중희* · 황세라* · 임원석** · 김병철*
 임동원*** · 현은재**** · 이재민***** · 김홍기*****

A Study on the Development of Composite Brake System through Analysis of advanced Braking Performance Factors

J. H. Shim*, U. H. Shin**, J. H. Lee*, S. R. Hwang*, W. S. Yim**, B. C. Kim*,
 D. W. Lim***, E. J. Hyun****, J. M. Lee*****, H. K. Kim*****

Key Words : *Mono-block caliper*(모노블록 캘리퍼), *Brake disc*(브레이크 디스크), *Brake effort*(브레이크 답력), *Brake stroke*(브레이크 스트로크), *Carbon Ceramic Composite Brake*(카본 세라믹 복합재 브레이크)

ABSTRACT

The luxury car market has been steadily growing for the last 10 years and it might keep expanding in the future. Furthermore, it is expected to be a very competitive market because luxury cars are considered to reflect the technology level of motor companies. For this reason, it is very important for motor companies to improve performances of luxury vehicles. However, it takes years for the companies to increase the technology level for the high performances. In this paper, we aim to analyze the technologies for high quality brake performances through investigation of two luxury vehicle models and develop a new high performance brake system. First, we found out a variety of effective factors for the high performances. Second, we conducted the brake performance analysis to figure out the relationship between brake effort and brake feeling. Finally, we developed the new brake system using carbon ceramic composite materials to satisfy the high quality brake performances.

1. 서론

글로벌 고급차 시장은 매년 연평균 10% 이상의 꾸준한 성장세를 보이고 있으며, 향후에도 지속적인 성장과 더불어

글로벌 경쟁사간 치열한 시장 경쟁이 이루어질 것으로 예측되고 있다. 특히, 유럽 경쟁사들의 경우 오랜 기간 동안 축적된 고급화 기술 노하우를 바탕으로 글로벌 고급차 시장을 주도하고 있다. 그러나 국내 상황은 고급화 기술에 대한 구체적인 기술력 확보는 아직까지 미흡한 상황이다.⁽¹⁻³⁾

본 연구에서는 이와 같은 상황에 대응하기 위하여 다음과 같은 연구 목표를 수립하였다. 첫째, 제동시스템 고급화 기술에 대한 상세 영향 인자 분석을 통한 고급차의 설계 차별화 방안에 대하여 분석하고자 한다. 그리고 이와 같은 분석을 통해서 고급차 개발시 제동 안전성 향상을 위한 설계 방안으로 활용하고자 한다. 이를 위해 먼저 고급차의 사양

* 현대자동차, 책임연구원
 ** 현대자동차, 연구원
 *** 데크카본, 부장
 **** 상신브레이크, 수석연구원
 ***** 남양텍스모, 연구원
 ***** 만도, 선임연구원
 E-mail : jhs4u@hyundai.com

분석을 통하여 제동 고급화 기술 분석을 실시하였다.^(4,5)

둘째, 고급화 사양 분석을 기반한 경쟁사의 제동시스템 성능 분석을 수행하여 고급화 기술에 대한 개발 컨셉 분석을 실시하였다.^(6,7)

셋째, 이와 같은 분석을 기반으로 후속 연구를 실시할 경우 국내 자동차 산업의 기술적 차별화 및 성능 우위를 확보할 수 있는 정량적 기술 데이터 확보에 기여하고자 하였다.

넷째, 새로운 제동시스템 고급화 기술을 개발하여 경쟁사 대비 우수한 성능을 확보할 수 있도록 하였다.

끝으로, 이와 같은 연구를 통한 제동시스템의 국내 고급화 기술력 및 인프라를 구축하여 고급차 기술 발전에 기여하고자 하였다.^(8,9)

2. 기본차 및 고급차 사양 분석

2.1. 전륜 브레이크

고급화 기술 분석을 위하여 A사와 B사의 제동시스템을 각각 분석하였으며, 이때, A사와 B사에 대하여 기본차와 고급차를 함께 분석하였다. 아래의 Table 1은 A사와 B사의 차량 출력 제원을 나타내고 있다. 도시된 바와 같이 A, B사 모두 기본차에서 고급차를 개발시 급격한 엔진 출력의 증가를 확인할 수 있었으며, 이에 대응하기 위한 제동시스템의 차별화 사양이 적용될 것으로 예측할 수 있었다.

한편, 두 회사에 대한 기본, 고급 두 차종을 각각 비교한 이유는 기본차에 대한 정보는 많은 데이터 확보가 되어 있는 반면에, 기본차의 고급화 차종의 경우는 실질적인 연구가 부족하기 때문이다.

따라서, 본 연구의 방법에 있어서, 제동시스템 고급화에 대한 차별화된 분석 결과를 얻기 위하여 기본차를 기준으로 고급화 제동 특성에 대한 분석을 집중적으로 수행하였다.

Table 1 Comparison of engine power

구분	Company A		Company B	
	기본	고급	기본	고급
엔진 출력	245마력	560마력 (+128.6%)	302마력	550마력 (+82.1%)

Fig. 1은 전륜 브레이크에 대한 A사와 B사의 사양 분석 결과를 나타내고 있다. 분석 결과 기본차 대비 고급차의 차이점은 디스크의 경우 고급화 특성을 위하여 대구경 디스크를 적용하였으며, 마찰면에 타공을 적용하여 방열 성능 및 제동시 가스 분출이 용이하도록 하였다.

한편, 캘리퍼의 경우 기본차 대비 모노블록 캘리퍼를 적용하였으며, 상품성 향상을 위하여 캘리퍼에 도색 및

구분	Company A			Company B	
	기본	고급	기본	고급 기본	고급 옵션
디스크					
	Φ348x24t Vent	Φ400x36t Vent	Φ322x32t Vent	Φ360x36t Vent	Φ402x39t Vent
	재질	AL+주철	AL+주철	주철	AL+주철
중량	8,454 g/EA	13,853 g/EA	10,655 g/EA	13,741 g/EA	7,699 g/EA
캘리퍼					
	Φ60	2x(Φ36+Φ34+Φ30)	Φ60	2x(Φ38+Φ34+Φ32)	—
	타입	1P AL+주철	6P AL 모노블럭	1피스톤 AL+주철	6P AL 모노블럭
중량	5,924 g/EA	6,840 g/EA	7,591 g/EA	8,000 g/EA	9,480 g/EA

Fig. 1 Comparison of front brake between basic specification and luxury specification

브랜딩을 적용하였다. 일반적으로 모노블록 캘리퍼는 대구경 디스크 적용시 면압, 제동 강성 및 큰 제동력 확보를 위하여 폭넓게 적용되고 있는 추세이다.

또한, 모노블록 캘리퍼의 경우 대구경 디스크의 매칭을 고려한 후 중량 저감을 위하여 AL 재질을 적용하게 된다. B사의 경우 고급화 사양에서도 다시 차별화를 시도하여 카본 세라믹 복합재 브레이크를 적용하였으며, 이를 통해 우수한 제동력 및 중량 저감 효과를 얻는 것을 확인하였다. 일반적으로 카본 세라믹 복합재 브레이크를 적용할 경우 주철 단일 재질 브레이크 대비 50% 이상의 중량 저감 효과를 얻는 것으로 보고되어 있다.^(1~3)

2.2. 후륜 브레이크

아래의 Fig. 2에 도시한 바와 같이 후륜 브레이크도 전륜 브레이크와 성능 균형을 맞추기 위하여 고급차 사양의 경우 대구경 디스크를 적용하고 있으며, 모노블록 캘리퍼

구분	Company A			Company B	
	기본	고급	기본	고급 기본	고급 옵션
디스크					
	Φ330x20t Vent	Φ396x24t Vent	Φ300x22t Vent	Φ360x26t Vent	Φ360x32t Vent
	재질	AL+주철	AL+주철	주철	—
중량	7,408 g/EA	9,246 g/EA	7,020 g/EA	10,939 g/EA	6,172 g/EA
캘리퍼					
	Φ43.9	—	Φ42	2x(Φ32+Φ30)	—
	타입	1P 주철 (EPB)	—	1P AL+주철	4P AL 모노블럭
중량	5,462 g/EA	6,614 g/EA	2,638 g/EA	3,820 g/EA	4,140 g/EA

Fig. 2 Comparison of rear brake between basic specification and luxury specification

를 전륜과 병행 적용하여 제동 안정성 및 상품성의 조화를 확보하고 있는 것으로 나타났다.

다만, A사의 고급차 사양의 경우 EPB(Electric Parking Brake) 파킹시스템 적용을 위하여 AL 노노블록 캘리퍼 대신 주철 캘리퍼에 액추에이터를 장착한 MOC(Motor On Caliper)를 적용하였다. 본 분석을 통해서 얻은 시사점은 고급차에서도 제동 실용성 향상을 위하여 EPB 시스템을 확대 적용하는 추세임으로, 이를 위하여 시장성을 고려한 EPB 통합형 노노블록 캘리퍼에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

3. 성능 분석

3.1. Company A 제동 성능 분석

부품별 상세 분석 및 고급화·차별화 인자 분석을 수행한 후 분석된 인자를 기반으로 각 경쟁사 별로 제동감 특성 분석을 위한 제동시스템 성능 검토를 실시하였다. 아래의 Fig. 3의 (a)는 기본차와 고급차에 대한 페달 답력에 따른 감속도 분석 결과를 나타내고 있으며, Fig. 3의 (b)는 페달 스트로크에 따른 감속도 분석 결과를 각각 나타내고 있다.

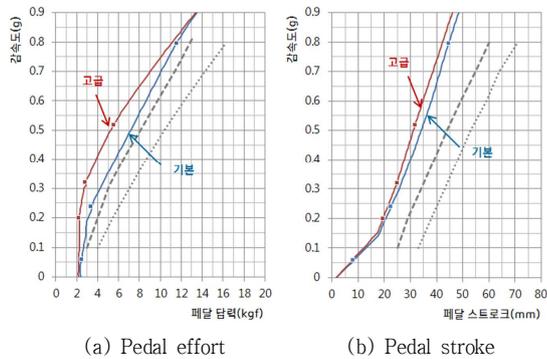


Fig. 3 Comparison of brake feeling between basic car and luxury car for company A

도시된 바와 같이 페달 답력은 기본차 대비 고급차 사양의 경우 가벼운 답력 확보를 통하여 제동 조작성을 향상시키고 있는 것으로 나타났다. 한편, 페달 스트로크 측면에는 고급차가 기본차 대비 페달 스트로크가 짧았으나, 전체적으로 기본차 및 고급차 모두 비교적 짧은 페달 스트로크를 확보하여 응답성 향상 및 다이내믹한 방향으로 제동 신뢰성을 향상시키고 있는 것으로 나타났다.

3.2. Company B 제동 성능 분석

B사에 대해서도 동일한 분석 방식을 이용하여 제동시스템 성능 검토를 통한 제동감을 분석하였다.

아래의 Fig. 4의 (a)와 (b)에서 도시한 바와 같이 기본차 대비 고급차는 가벼운 답력을 통하여 제동 조작성을 향상시키는 것으로 나타났다. 또한, 짧은 페달 스트로크를 통하여 응답성을 향상시키는 것으로 나타났다.

이와 같은 분석 결과는 A사의 제동시스템과 유사한 제동감 구현 컨셉으로써 경쟁사 고급차에 대한 전반적인 제동시스템 개발 컨셉을 파악할 수 있다는 점에서 매우 중요한 의미를 갖는 분석 결과라 할 수 있다.

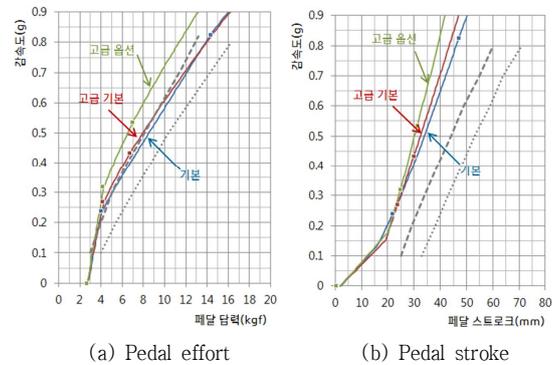


Fig. 4 Comparison of brake feeling between basic car and luxury car for company B

3.3. Company A와 B에 대한 종합 분석

A와 B사에 대한 효력감 및 밟는감 분석을 기반으로 제동감 특성에 대한 상세 분석을 실시하였다. 아래의 Fig. 5는 페달 작동시 강성 측면의 분석을 위한 페달 스트로크

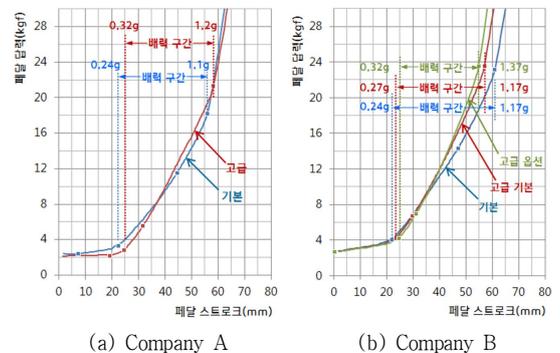


Fig. 5 Comparison of pedal stiffness between basic car and luxury car for company A and company B

와 페달 답력의 분석 결과를 나타내고 있다. 상세한 분석 결과 도출을 위하여 초기 작동 구간, 배력 구간, 니포인트 구간별로 분석을 실시하였다.

먼저, 초기 작동 구간에서는 기본차의 경우 답력 변화에 의한 운전자 피드백 제공을 위하여 초기 조작성이 유리한 쪽으로 개발된 반면에 고급차의 경우 상대적으로 작은 강성을 구현하여 가볍고 경쾌한 조작감이 구현되도록 한 점을 볼 수 있었다.

그리고 배력 구간에서는 기본차의 경우 전반적으로 부드럽게 배력을 연결하여 이질감이 적도록 한 반면에 고급차의 경우 답력 증가율을 상대적으로 높여서 탄탄하게 받쳐주는 느낌을 주도록 하였다. 끝으로, 니포인트 구간에서는 고급차의 경우 배력 구간과 부드럽게 연결하면서 니포인트가 기본차 대비 상대적으로 늦게 발생하도록 하였다.

정리하면, 고급차의 경우 저감속 구간에서는 상대적으로 페달 스트로크를 증대하면서 부드러운 느낌을 준 반면에, 중·고감속 구간에서는 강성 증대를 통한 페달 감성감을 증가시키는 것으로 분석되었다.

4. 고급화 기술 개발

4.1. 카본 세라믹 복합재 디스크 개발

4장에서는 경쟁사 분석 통해서 나타난 제동 고급화 기술인 카본 세라믹 복합재 제동시스템에 대한 본 연구의 분석 및 개발 결과에 대하여 서술하고자 한다. 먼저, 디스크의 경우 새로운 카본 세라믹 복합재 디스크를 개발하였다.

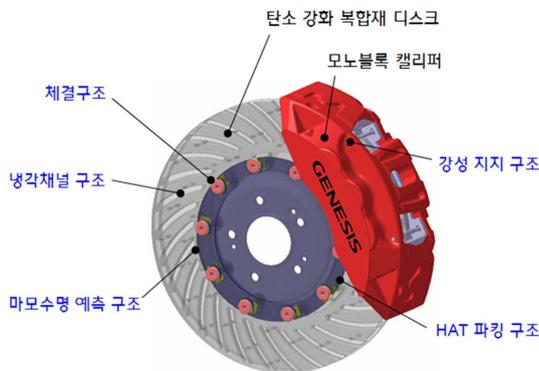


Fig. 6 Development of composite brake system for luxury cars

아래의 Fig. 6에서와 같이 복합재 디스크의 탁월한 냉각성능을 확보하기 위하여 2단 와선형 벤트 구조를 적용하였다. 이를 통해서 유동성능을 극대화 시켜 기존 복합재 디스크 대비 30°C의 온도 저감 효과를 얻을 수 있었다. 또한, 경쟁사와 차별화되는 독자적인 체결구조, 마모수명 예측 구조 및 HAT 파킹 구조를 개발하여 실차에 적용할 수 있도록 실용화 하였다.^(1~3,6,7)

4.2. 전·후륜 모노블록 캘리퍼 개발

고급화 기술에 걸맞는 안정적인 제동 면압과 선형적인 제동감 확보를 위하여 아래의 Fig. 7에서와 같이 전·후륜 모노블록 캘리퍼를 새롭게 개발하였다.

A와 B사 분석을 통해서 확인된 제동 고강성감 확보를 위하여 전륜 6피스톤 모노블록 캘리퍼의 경우 하우징 상단에 중간빔을 구성하였으며, 후륜 4피스톤 모노블록 캘리퍼의 경우 기본 강성을 유지한 상태에서 외관 디자인 개선을 중점적으로 고려하였다. 이와 같은 검토를 통해서 차량의 전체적인 강성 확보를 통한 선형적인 제동감 및 제동 안전성이 구현될 수 있도록 하였다.

구분	전륜 6 피스톤 모노블록 캘리퍼		
해석			
기여도	9순위	7순위	7순위
해석			
기여도	6순위	5순위	4순위
해석			
기여도	3순위	2순위	1순위

(a) Analysis results for front 6P mono-block caliper

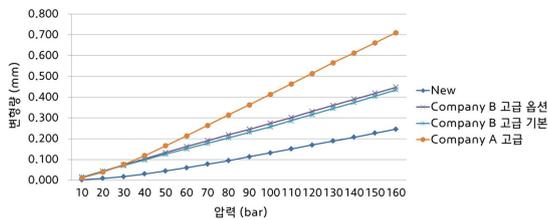
구분	후륜 4 피스톤 모노블록 캘리퍼		
해석			
기여도	5순위	4순위	3순위
해석			-
기여도	2순위	1순위	-

(b) Analysis results for rear 4P mono-block caliper

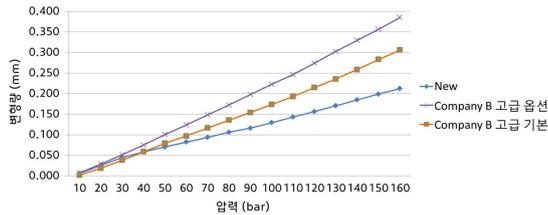
Fig. 7 Analysis results for front and rear mono-block caliper

한편, 아래의 Fig. 8은 강성 해석의 1순위를 기반으로 제작된 전·후륜 모노블록 캘리퍼와 A, B사 사양에 대한 변형량 비교 평가 결과를 나타내고 있다. 전륜 모노블록 캘리퍼의 경우 기준 압력 70bar에서 A사 대비 70.5%, B사 대비 56.2%의 변형량 저감 효과를 얻을 수 있었다.

또한, 후륜 모노블록 캘리퍼 경우 B사 대비 20.5%의 변형량 저감 효과를 얻을 수 있었다. 또한, 전·후륜 모노블록 캘리퍼 모두 제동 전압력 구간에 대해서도 A, B사 대비 현저한 변형량의 우세함을 확인하였다. 여기서, A사의 후륜은 분석 결과에서 나타난 바와 같이 모노블록 캘리퍼가 아닌 관계로 비교에서 배제시켰다.



(a) Test results of deflection for front 6P mono-block caliper



(b) Test results of deflection for rear 4P mono-block caliper

Fig. 8 Test results of deflection for front 6P and rear 4P mono-block caliper

4.3. 드래그 평가 검증

강성 확보에 대한 추가 검증을 위하여 제동 드래그 평가를 병행하여 차량의 이상 끌림으로 인한 연비 및 주행 성능 저하에 대한 검증을 실시하였다. Table 2는 전·후륜 제동 드래그에 대한 A, B사와의 비교 결과를 나타내고 있다. 계측 결과 전륜은 A사 대비 81.3%, B사 대비

Table 2 Test results for drag

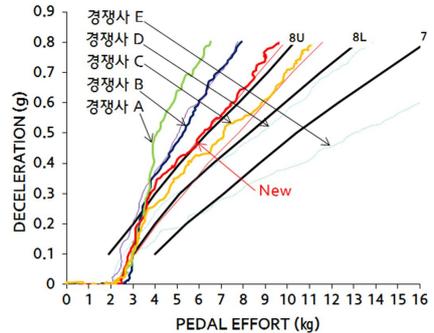
구분	Company A 고급	Company B 고급 기본	Company B 고급 옵션	New
전륜 드래그 (kg · cm)	36.4	8.1	30.5	6.8
후륜 드래그 (kg · cm)	-	9.9	7.2	3.7

16.0%의 우세함 확인하였으며, 후륜은 B사 대비 48.6%의 우세함을 각각 확인하였다.

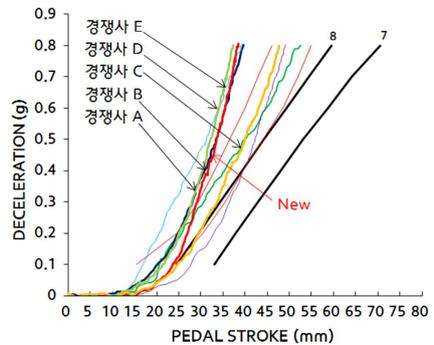
4.4. 제동감 평가 및 경쟁사 비교 분석

여러 경쟁사들과의 제동감 상대 비교는 직접적으로 경쟁사 고급차의 제동성능 개발에 대한 성능육성 방향 및 전략을 파악할 수 있기 때문에 매우 의미 있는 평가라 할 수 있다. 이를 위하여, 아래의 Fig. 9의 (a)와 (b)에 본 연구에서 구현한 복합재 제동시스템을 차량에 탑재하여 계측한 제동감 결과 도시하였다. 이때, 객관적인 비교 평가를 위하여 여러 경쟁사 고급차와의 제동감 계측 비교 결과를 함께 도시하여 비교 분석이 가능하도록 하였다.

분석 결과 효력감을 나타내는 페달 답력과 감속도의 관계에서는 경쟁사 대비 선형적인 관계를 갖는 것으로 계측되었으며, 밟는감을 나타내는 페달 트래블과 감속도의 관계에서는 전체적으로 경쟁사와 동등한 수준으로 계측되었다. 종합적으로 여러 경쟁사들과 비교하였을 때 높은



(a) Pedal effort vs decel



(b) Pedal stroke vs decel

Fig. 9 Comparison of brake feeling between newly developed specification and competitors

제동 응답성을 가지면서 제동시 급작감이 없는 탁월하고 안정적인 제동 특성을 갖는 것을 확인할 수 있었다.

4.5. 상품성 향상 기술 개발 - 외관 도색 개발

외관 도색 기술 경우 경쟁사별로 차별화된 색상과 노하우를 갖고 있으나, 국내의 경우 아직까지 활발한 시도 및 연구는 미흡한 실정이다. 아래의 Fig. 10은 A, B사와 새롭게 개발된 모노블록 캘리퍼의 도색 비교 결과를 나타내고 있다. 페인트 경화 온도, 도색 표면 조도 및 발색 상태 등을 조합하여 다양한 실험을 수행하였으며, 그 결과 광택은 경쟁사 동등 수준의 결과를 얻을 수 있었으며, 도색 부착성은 경쟁사들 대비 박리 현상이 없는 매우 우수한 결과를 얻을 수 있었다.



Fig. 10 Comparison of exterior color between newly developed specification and competitors

4.6. 경량화 효과 분석

복합재 제동시스템은 고급차의 제동성능을 극대화 시키면서, 탁월한 경량화 효과를 통한 연비 향상 효과를 얻을 수 있다. 이와 같은 결과는 복합재의 소재 특성 중 밀도가 주철 재질 대비 33% 수준이면서, 열적·기계적 특성이 우수하기 때문에 가능한 결과이다. 아래의 Fig. 11은

구분	주철	이중 주조	복합재
영상			
사이즈	φ 380	φ 380	φ 380
중량 (g/대)	50,214	43,690	25,286
경량화 효과	-	13%	50%

Fig. 11 Comparison result of total weight according to various disc materials

디스크 재질에 따른 경량화 효과를 나타내고 있다. 복합재 디스크는 주철 디스크 대비 50%, 이중 주조 디스크 대비 42% 이상의 경량화 효과를 각각 얻을 수 있다.⁽³⁾

5. 결 론

본 연구는 고급차 제동시스템의 차별화 기술 개발에 기여하기 위한 연구였다. 이와 같은 결과를 시작으로 향후 활발한 연구가 이루어지길 바라며, 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 제동시스템 사양 분석을 통하여 기본차와 고급차의 사양 차이를 각각 검토하였으며, 이를 통해 플랫폼을 활용한 기본차 및 고급차 개발시 제동 제원 설정의 적합성을 고찰하였다.
- 2) 제동시스템 제원과 부품별 상세 고급화 영향 인자를 체계적으로 분석하였으며, 이와 같은 분석을 통하여 고급차 사양 개발시 제동 안정성 확보 및 설계 완성도가 향상 될 수 있음을 확인하였다.
- 3) 차량 및 제동 제원을 반영한 제동시스템 성능 검토를 통하여 기본차와 고급차의 차별화된 제동 컨셉을 분석하였으며, 이와 같은 방법을 활용하여 설계할 경우 차별화된 제동성능 컨셉 설정에 기여할 수 있음을 확인하였다.
- 4) 고급차의 제동 안전성 및 상품성 향상을 위하여 새로운 카본 세라믹 복합재 제동시스템을 개발하였다. 연구의 완성도 검증을 위하여 복합재 디스크와 모노블록 캘리퍼를 경쟁사 사양과 각각 비교 평가를 수행하였으며, 그 결과 우수한 제동 특성을 확인할 수 있었다.
- 5) 제동 특성 이외에 제동 드래그 및 경량화 효과를 비교 분석하였으며, 본 연구 결과를 활용할 경우 차량의 스프링 아래 질량을 획기적으로 저감하여 연비 극대화 및 R&H 성능 향상에 크게 기여할 수 있음을 확인하였다.
- 6) 고급차에 걸맞는 고급스러운 외관 이미지 구현을 극대화하기 위하여 도색 기법을 새롭게 개발하였으며, 경쟁사 동등 이상의 광택 및 부착성을 확인하였다.

참고문헌

(1) J. H. Shim, D. W. Lim, E. J. Hyun, K. J. 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.
- (2) J. H. Shim, 2016, "A study on coupling structure of carbon ceramic composite using substance-field model analysis and friction/wear characteristics control", KSAE Annual Spring Conference, pp. 380~388.
- (3) J. H. Shim, D. W. Lim, E. J. Hyun, 2018, "A study on Development of Brake System and Performance Improvement using Carbon Ceramic Composite", KSAE Annual Spring Conference, pp. 318~325.
- (4) J. H. Shim, U. H. Shin, J. H. Lee, 2018, "A study on analysis of effect factors and development to improve brake safety", KASA Annual Spring Conference, pp. 11~16.
- (5) 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.
- (6) J. H. Shim, U. H. Shin, J. H. Lee, 2018, "A study on Improvement of Fade Characteristic of Composite Brake Through Optimization of Flow Performance", KASA Annual Autumn Conference, pp. 143~148.
- (7) J. H. Shim, U. H. Shin, J. H. Lee, D. W. Lim, E. J. Hyun, 2019, "A study on improvement of cooling performance through vent structure optimization of carbon ceramic composite brake", Journal of Auto-Vehicle Safety Association, pp. 23~29.
- (8) J. H. Shim, J. H. Lee, 2019, "A study on analysis of differentiation technology and development for brake system of luxury cars", KASA Annual Autumn Conference, pp. 32~37.
- (9) J. H. Shim, J. H. Lee, D. W. Lim, 2019, "A study on development of ideal final result to reduce NVH deterioration characteristics of composite brake system", KSAE Annual Autumn Conference, pp. 348~353.