◎ 논 문

http://dx.doi.org/10.22680/kasa2019.11.1.023

카본 세라믹 복합재 디스크의 벤트 구조 최적화를 통한 냉각성능 향상에 관한 연구

심재훈* · 신웅희* · 이중희* · 전갑배* · 김병철* · 곽정후* · 임동원** · 현은재*** · 전태형*** · 이재만****

A Study on Improvement of Cooling Performance through Vent Structure Optimization of Carbon Ceramic Composite Disc

J. H. Shim*, U. H. Shin*, J. H. Lee*, G. B. Jeon*, B. C. Kim*, J. H. Kwack*, D. W. Lim**, E. J. Hyun***, T. H. Jeon***, J. M. Lee****

Key Words : Carbon Ceramic Composite Disc(카본 세라믹 복합재 디스크), Vent Structure(벤트 구조), ARIZ(아리즈), Substance-field model analysis(물질-장 모델 분석), Robust Characteristic(강건 특성)

ABSTRACT

Recently, use of composite materials has been increasing for body structures and chassis parts in the car industry because of weight reduction effect and excellent mechanical·thermal characteristics. However, application of composite materials in brake system is very difficult because it is hard to obtain enough brake performance due to low heat storage capacity of the composite materials. In this paper, we will present new carbon ceramic composite disc with high flow characteristic. To obtain this characteristic, new vent structures were designed by using ARIZ method and substance-field model analysis. The flow effect of these vent structures on the brake performance was verified by pugh matrix and cooling test. The test results show improvement of cooling performance up to 30℃. Finally, These results will improve brake the reliability of the brake performance for the high performance vehicles and electric vehicles.

1. 서 론

최근의 자동차 산업은 강력한 글로벌 환경 규제에 따른 연비 법규 만족과 더불어 대형 세단, 대형 SUV 및 전기차 시장에 대한 경쟁이 더욱 더 치열해지고 있으며, 이에 대응하기 위한 다각적인 경량화 및 고급화 기술 개발이 요구되고 있다.

* 현대자동차
** 데크카본
*** 상신브레이크
**** 남양공업
E-mail : jhs4u@hyundai.com

특히, 복합재의 경우 높은 기계적·열적 우수성으로 인하여 자동차 분야의 언더바디 샤시 및 차체 구조 등에 적용하기 위한 활발한 연구가 이루어 지고 있다.[1~10]

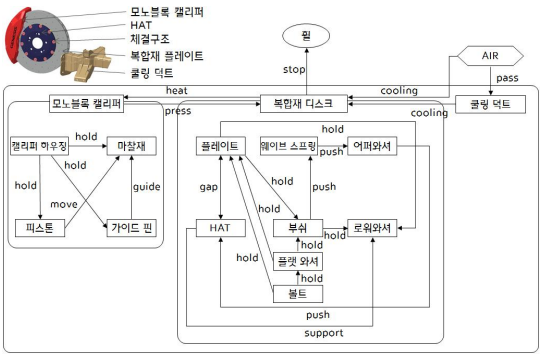
그러나, 복합재를 제동시스템에 적용할 경우 단위 부피당 열용량이 주철 대비 매우 열세하여 냉각성능 확보에 상당한 어려움을 가지고 있다.[1]

냉각성능 부족에 따른 열부하가 디스크에 증가할 경우 순차적으로 디스크의 열변형을 악화시켜 차량의 제동 안정성을 확보할 수 없게 된다. 특히, 제동 성능은 최근 대형 세단, 대형 SUV 및 전기차의 출력 및 토크 증가 추세와 비례하여 시급한 기술 개발이 요구되지만 아직까지 이와 같은 요구에 대한 복합재의 냉각성능 향상과 관련한

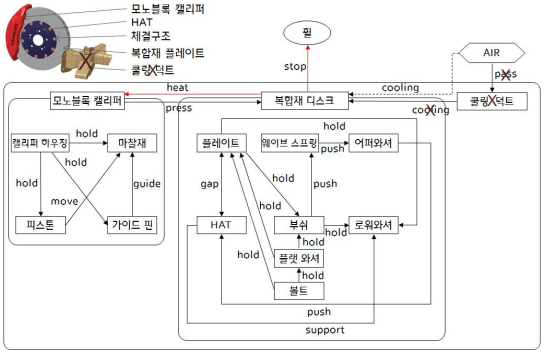
자동차안전학회지:제11권, 제1호, pp. 23~29, 2019
논문접수일: 2018.11.16, 논문수정일(1차: 2019.1.17, 2차: 2019.2.15), 게재확정일: 2019.2.26

연구 성과는 미흡한 수준이다.

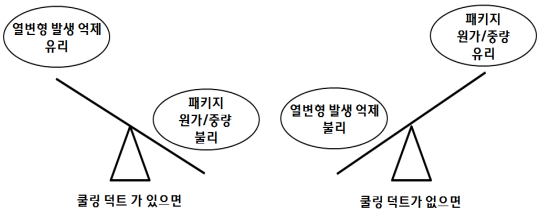
따라서, 본 연구에서는 유럽 및 일본 경쟁사에 대응하기 위하여 높은 냉각성능을 갖는 복합재 디스크를 개발하고자 하였다. 이를 위해서 새로운 복합재 디스크의 형상 최적화를 집중적으로 고려하였으며, 다양한 개발 방법론을 병행하여 개발 완성도를 향상시키고자 하였다. 끝으로, 이와 같은 복합재의 경량·고급화 기술 개발을 통하여 국내 자동차 산업의 경쟁력 향상에 기여하고자 하였다.



(a) Function analysis



(b) Trimming



(c) Definition of engineering contradiction

Fig. 1 Definition of engineering contradiction using function analysis and trimming

2. 설계 컨셉 개발

일반적으로, 제동시스템은 배력장치에 의해서 배력된 유압을 이용하여 상호 마찰을 통한 제동력을 발생시키는 캘리퍼 및 디스크와 차량의 주행 또는 정지시 제동시스템의 열변형을 억제하면서 안정적인 제동 특성을 유지할 수 있도록 냉각 기능을 담당하는 쿨링 덕트로 구성된다.

Fig. 1의 (a)는 일반적인 제동시스템에 대한 기능 분석을 나타내고 있다. 여기서, 모노블록 캘리퍼와 복합재 디스크는 각각 도시된 바와 같이 각 단위 시스템의 기본 구성을 위한 여러 개의 서브 부품의 조합으로 구성된다. 새로운 제동시스템의 설계 컨셉 도출을 위하여 Fig. 1의 (b)에서와 같이 쿨링 덕트의 기능을 트리밍 하였으며, 전체 제동시스템의 부족 기능과 유해 기능을 새롭게 도시하였다. 그리고 쿨링 덕트 트리밍 및 부족·유해 기능 분석을 통하여 쿨링 덕트가 있는 상황과 없는 상황에서의 장·단점을 파악하여 Fig. 1의 (c)에서와 같이 쿨링 덕트가 있을때, 없을때를 고려한 기술적 모순을 도출하였다.

아래의 Fig. 2는 도출된 기술적 모순을 트리즈 방법론 중 ARIZ을 적용한 분석 프로세스를 나타내고 있다. 여기서, ARIZ는 'Algorithm for Inventive Problem Solving'의 러시아어의 영문 약자이다. 가혹 반복 제동 상황에서도 강건한 독자적인 복합재 디스크의 냉각성능 향상이 본 연구의 목표인 만큼 트리즈 이론 중에서 가장 강력하고 고난위도인 ARIZ 이론을 적용하여 설계 완성도를 극대화시키고자 노력하였다.

한편, Fig. 1에서 도출된 기술적 모순을 해결하기 위하

Fig. 2 Consideration process of IFR (Ideal Final Result) and physical contradiction using ARIZ application

여 전체 제동시스템에서 가용한 자원을 검토 및 선정하였으며, 기술적 모순에 대한 모순 재정립 및 심화를 거쳐 쿨링 덕트가 있을 때, 없을 때에 발생하는 기술적 모순인 패키지와 원가/중량의 상관관계를 분석하였다. 아래의 Fig. 3은 이와 같은 고찰을 거쳐 기술적 모순에서 물리적 모순으로 변환된 일련의 과정을 나타내고 있다.

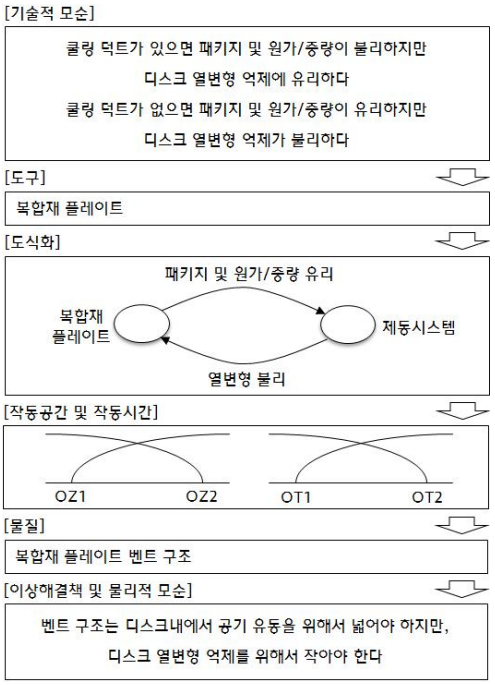


Fig. 3 Analysis result of converting engineering contradiction to physical contradiction

도시된 바와 같이, 기술적 모순 해결을 위한 도구를 고려하기 위하여 제동시스템 내의 서브 자원 요소 중 복합재 플레이트를 설정하였다. 이와 같이 도구를 제동시스템 내에서 선정한 이유는 외부에서 도구를 도입할 경우 비용 및 추가적인 유해한 기능이 유입됨을 방지하여 제동시스템의 이상성(Ideality)을 극대화시키기 위함이다. 또한, 복합재 플레이트는 순차적으로 제동시스템과의 도식화 검토를 통하여 유익한 기능 측면에서는 패키지 및 원가·중량에 유리함을 확인하였고 유해한 기능 측면에서는 열변형 억제에 불리한 방법으로 고찰되었다.

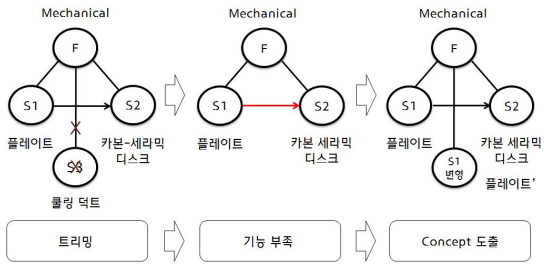
그리고 복합재 플레이트의 작동 공간(Operating Zone) 및 작동 시간(Operating Time) 등의 관계에서는 공간 및 시간에 대해서 독립적으로 작용되지 않음을 확인하였으며, 따라서, 상시 유익한 기능을 수행할 수 있도록 고려되어야 함을 확인하였다. 이와 같은 상관관계를 모두 고려하여 초기 기술적 모순을 물리적 모순으로 전환하도록 하였다. 또한, 새롭게 전환되는 물리적 모순을 해결할 수 있도록 파라미터 및 장 분석을 실시하여 복합재 플레이트의 벤트 구조 최적화를 통한 이상해결책(Ideal Final Result) 및 물리적 모순을 새롭게 확립하였다. 최종적으로 확립된 이상해결책은 벤트 구조 최적화를 통한 공기 유동과 열변형을 모두 고려한 방법이었다.

3. 상세 설계 결과

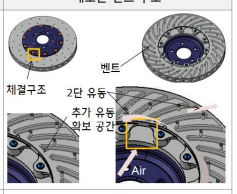
2장에서 도출된 이상해결책에 대하여 물질-장 모델 분석을 순차적으로 실시하여 개발하고자 하는 컨셉의 구체화 및 상세 설계를 실시 하였다.

물질-장 모델 분석의 표준해 Class2의 2-2-2인 “도구의 분할”을 적용하였으며, 이때 사용된 도구는 Fig. 2 및 Fig. 3에서 정의된 복합재 플레이트의 벤트 형상 및 개수를 고려하여 상세 설계를 수행하였다.

최종 상세 설계를 마친 결과를 아래의 Fig. 4에 나타내고 있으며, 도시된 바와 같이 새로운 사양은 기존 사양 대



(a) Substance Field analysis and standard solution

구분	기존 벤트 구조	새로운 벤트 구조
형상		
체결 개수	12개	10개
유로부	-	유로부 및 공기 유량 증대
벤트 구조	1단 진선 벤트	2단 와선 벤트 구조
유동 흐름	단일 유동	2단 유동
벤트수	소수 구조 불가	소수 구조 가능

(b) Comparison results

Fig. 4 Results of concept derivation

비 현격한 설계적 차이를 나타내고 있다.

첫째, 벤트 구조에 대하여 기존 1단 직선 벤트 구조에서 2단 와선 벤트 구조로 변경하였다. 이를 통해, 주행 및 정지시 유동의 흐름을 1단 직선 유동에서 2단 와선 유동으로 변경하여 유동 특성을 최대한 효율적으로 활용할 수 있도록 하였다.

둘째, 체결 구조의 개수를 기존 12개에서 10개로 축소하였다. 축소된 공간을 효과적으로 활용하기 위하여 공기 유동을 위한 개구부 면적을 극대화 하였으며, 2단 와선 벤트 구조와 병행하여 추가적인 냉각성능 향상과 부품수 축소를 통한 원가 절감 및 조립성 향상이 가능하도록 하였다.

셋째, 기존 사양의 경우 벤트 수를 36개와 같은 비 소수의 구조를 가질 수 밖에 없으나, 새로운 벤트 구조에서는 2단 와선 벤트 구조로 추가적으로 확보된 유동 공간을 기반으로 소수 구조 및 다양한 벤트 형상이 가능하다. 일반적으로 벤트의 소수 구조는 회전체의 공진을 저감하는 역할을 하는 것으로 알려져 있으며, 이를 통해서 전체 제동시스템의 NVH 문제를 저감시킬 수 있게 된다. 정리하면, 이와 같은 새로운 벤트 구조 설계의 장점들로 인하여 기존 벤트 구조 대비 공기 유동 향상을 통한 냉각성능과 제동 특성이 향상될 수 있도록 하였다.

4. 상세 설계 결과에 대한 검증

2장과 3장을 통하여 얻은 설계 결과에 대하여 아래의 Fig. 5에서와 같이 정량적인 설계 적합성을 확인하기 위한 분석을 수행하였다. 분석의 수단으로는 pugh matrix를 이용하였으며, 3장에서 수립한 새로운 컨셉이 다른 제동 냉각성능을 향상시키는 컨셉들과 비교하여 우세 또는 열세 여부를 판별하도록 하였다.

판별 항목은 본 연구의 적용 효율성 향상을 위한 항목 등을 종합적으로 고려하여 원가 절감, 모순 해결 및 이상 해결책, 부품 수, 중량, 조립 시간, 기능 및 성능의 유지, 독자 모델 개발 등 총7항목에 대하여 평가를 수행하였다.

평가 결과 기존의 디스크 냉각 컨셉들 중에서는 컨셉3인 더스트 커버의 형상 변경을 통하여 공기 유동을 최대한 디스크에 집적시키는 방법이 가장 높은 평가를 얻었으나, 전체적인 평가 항목을 고려하였을 때 만족할 만한 수준으로 판단되지는 않았다. 반면에 본 연구에서 새롭게 개발한 벤트 구조인 컨셉5는 앞의 컨셉1~컨셉4 대비 전 평가 항목에 대하여 우세한 컨셉으로 확인되었다.

한편, 아래의 Fig. 6과 Fig. 7은 1차 pugh matrix를 통하여 얻은 설계 결과에 대하여 SC/Tetra V7을 이용한 유동 해석 및 2차 pugh matrix 결과를 각각 나타내고 있다.

해석 방법은 동일한 차량 속도를 기준으로 대류 열전달량에서 대류 열전달계수와 표면적을 이용하여 상대 비교를 수행하였다. 1차 pugh matrix에 이어 2차 pugh matrix를 수행하였던 주된 이유는 1차 pugh matrix 평가에서 얻은 최적의 결과인 새로운 벤트 구조 컨셉5에 대한 정량적인

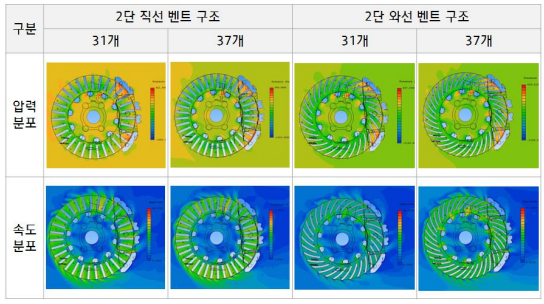


Fig. 6 CAE analysis for second step pugh matrix

구분	기존	Concept #1	Concept #2	Concept #3	Concept #4	Concept #5
		cooling duct	cooling fan	air guide	dust cover	Heat pipe	2단 vent
원가		-	S	+	-	+
모순 해결		-	S	-	-	+
부품 수	제동 시스템	-	S	+	+	+
중량		-	S	+	-	+
조립 시간		-	+	+	+	+
성능	벤트	+	S	-	-	+
독자 모델		S	S	S	S	+
Total	+	1	1	4	2	7
	-	5	0	2	4	0

Fig. 5 First step pugh matrix to evaluate novel design result comparing other system

구분	기존 案	Concept #1	Concept #2	Concept #3	Concept #4
	2단 vent	31개 2단 직선 vent	37개 2단 직선 vent	31개 2단 와선 vent	37개 2단 와선 vent
원가		+	+	+	+
모순 해결		-	-	-	+
부품 수	제동 시스템	+	+	+	+
중량		S	S	S	S
조립 시간		+	+	+	+
성능	벤트	-	-	-	+
독자 모델		S	S	S	+
Total	+	3	3	3	6
	-	2	2	2	0

Fig. 7 Second step pugh matrix to evaluate final design result

설계 결과를 더욱 더 심도 있게 판별하기 위함이었다. 이를 위해서 2차 pugh matrix를 실시하기 전에 유동 해석을 수행하여 신뢰성 있는 분석 결과를 기반으로 2차 pugh matrix 평가를 실시 및 판별하도록 하였다. 해석 모델은 31개, 37개의 소수를 갖는 2단 직선 벤트 구조와 31개, 37개의 소수를 갖는 2단 와선 벤트 구조를 각각 상세 설계를 실시하여 유동 해석을 수행하였다.

해석 결과 37개 벤트를 갖는 2단 와선 구조가 제동시 냉각성능에 대한 기여도가 가장 우수하였으며, 31개 및 37개 2단 직선 컨셉은 거의 차이가 없음을 확인하였다. 이와 같은 유동 해석 결과를 기반으로 하여 2차 pugh matrix 평가를 수행하였다. 여기서, 2차 pugh Matrix 평가의 신뢰성을 확보하기 위하여 1차 pugh matrix때와 동일한 평가 항목을 적용하여 평가를 수행하였다. 이와 같은 일련의 과정을 거쳐 최종적으로 2차 pugh matrix의 평가 컨셉 중 37개 벤트 수를 갖는 2단 와선 구조인 컨셉 4가 최적의 설계 결과임을 Fig. 7에서와 같이 최종적으로 확인할 수 있었다.

5. 제작 결과

2장에서부터 4장까지 서술한 설계 검증 결과를 모두 반영한 제작 결과를 아래의 Fig. 8에 도시하였다. 37개 벤트 수를 갖는 2단 와선 벤트 구조와 더불어 복합재 플레이트와 HAT 체결 구조도 기존 12개소에서 10개소로 축소하여 제작을 마쳤다.

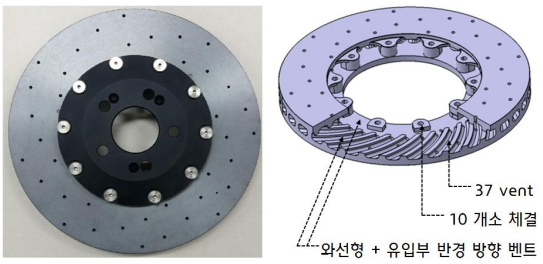


Fig. 8 Manufacture result

6. 냉각성능 평가 결과

유동 해석을 통한 최적사양인 37개 벤트 수를 갖는 2단 와선 벤트인 컨셉4 이외에 기존의 1단 직선형 설계 사양과 2단 벤트인 컨셉1부터 컨셉3까지의 구조를 포함한 모든 사양에 대한 냉각성능을 비교 평가하였다. 아래의 Fig. 9는 총 5가지 사양에 대한 상세 평가 결과를 나타내고 있다.

평가 결과 유동 해석에서 냉각성능 기여도가 1순위인 37개 벤트 수를 갖는 2단 와선 벤트 구조는 기존의 36개 벤트 수를 갖는 1단 직선 벤트 구조 대비 30℃의 온도가 저감되는 우수한 냉각성능을 갖는 것으로 계측되었다. 반면에, 2단 직선 벤트 구조는 기존 1단 직선 벤트 구조 대비 냉각성능은 우세하였으나, 2단 와선 벤트 구조 대비에서는 미흡한 수준으로 확인되었다.

계측 결과에 대한 주요 원인을 분석하면, 3장의 상세 설계시 유로부의 증대를 통한 공기 유량 증가와 더불어 2단 와선 벤트 구조를 적용하여 복합재 플레이트 내부의 유동을 극대화 시켜 대류 열전달량 측면에서 표면적을 증가시킨 결과이며, 4장의 유동 해석 결과와도 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 한편, 중량 및 마모량은 기존 사양을 포함한 5가지 전 사양 모두에 대하여 동등한 수준임을 확인하였다. 따라서, 5가지 모든 사양에 대하여 동등한 중량 및 마모량 효과를 얻을 수 있음을 고려하였을 때 37개 벤트 수를 갖는 2단 와선 벤트 구조가 최적의 사양으로 타당함을 확인하였다.

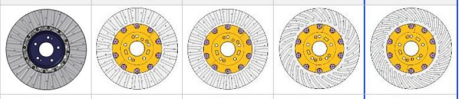
구분		기존	최적화			
벤트 형상		1단 직선	2단 직선		2단 와선	
벤트 수		36 개	31 개	37 개	31 개	37 개
설계 형상						
시제품						
냉각성능	해석결과	-	3 순위	4 순위	2 순위	1 순위
	온도	506 ℃	484 ℃	485 ℃	526 ℃	476 ℃
	중량	6.42kg	6.39kg	6.26kg	6.11kg	6.25kg

Fig. 9 Comparison result on both CAE analysis and test

7. 강건성 평가

본 연구 결과에 대한 최종적인 신뢰도 확인을 위하여 강건성 평가를 실시하였다. Fig. 10은 강건성 평가 결과를 나타내고 있다. 저감속 및 고감속을 포함한 다양한 제동 조건을 여러 사이클로 반복하여 가혹 제동 모드를 기반으로 한 강건성 평가를 수행한 결과 37개 벤트 수를 갖는 2단 와선형 벤트 구조가 MEAN값 및 S/N비를 모두 고려하였을 때 최적의 사양임을 확인할 수 있었다. 이와 같

은 6장에서 7장까지의 평가 결과를 통하여 본 연구에서 도출한 설계 컨셉에 대한 우수성을 최종적으로 확인할 수 있었다.

구분		기존	최적화			
벤트 형상		1단 직선	2단 직선		2단 와선	
벤트 수		36 개	31 개	37 개	31 개	37 개
설계 형상						
냉각 성능	온도	506 ℃	484 ℃	485 ℃	526 ℃	476 ℃
	중량	6.42kg	6.39kg	6.26kg	6.11kg	6.25kg

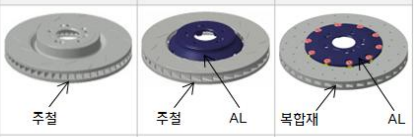
구분	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	· · ·	N20	MEAN	S/N
기존	215	258	289	316	339	356	374	· · ·	506	400.95	-52.23669
컨셉 1	197	245	283	312	333	350	369	· · ·	484	394.70	-52.11165
컨셉 2	200	248	279	307	329	349	360	· · ·	485	391.10	-52.03333
컨셉 3	203	255	292	319	342	360	375	· · ·	526	412.15	-52.51191
컨셉 4	198	244	276	309	331	344	365	· · ·	476	388.85	-51.97807

Fig. 10 Test result of robust characteristics

8. 경량화 효과 분석

아래의 Table 1은 3가지 디스크 재질에 대하여 동일 사이즈를 고려하여 설계했을 경우 각각의 재질별 중량 비교 결과를 나타내고 있다.

Table 1 Comparison of lightweight effect

구분	주철	이종 주조	복합재
형상			
사이즈	ϕ380	ϕ380	ϕ380
중량 (g/대)	50,214	43,690	25,286
경량화 효과	-	13%	50%

도시된 바와 같이 복합재 디스크는 주철 재질 대비 50%의 경량화 효과, 이종 주조 재질 대비는 42%의 경량화 효과를 각각 얻을 수 있게 된다. 이와 같은 결과는 복합재의 소재 특성 가운데 하나인 밀도가 주철 재질 대비 33% 수준이면서, 기계적·열적 특성이 우수하기 때문에 가능한 결과이다.[(1)]

이와 같은 복합재의 경량화 효과를 차량에 적용할 경우 스프링 아래 질량을 현저하게 저감할 수 있게 되어 주행성능 및 연비 향상에 크게 기여할 수 있을 것이다.

9. 결 론

본 연구는 당면한 환경 규제에 대응하면서 대형 세단, 대형 SUV 및 전기차에서 필수적으로 확보해야만 하는 미래 선점 경량화 고급 기술에 관한 연구였으며, 아래와 같은 유용한 결론을 통하여 연구의 우수성을 확인 하였다.

1) ARIZ를 활용한 문제점 해결 방법론 기반의 컨셉 설계를 통하여 복합재 설계를 위한 주요 영향 인자를 분석하였다.
2) 설계 컨셉의 평가를 위하여 pugh matrix 및 유동해석을 병행하여 타당성을 확인하였다.
3) 분석된 주요 영향 인자를 기반으로 제작된 새로운 복합재 디스크는 기존 복합재 디스크 대비 냉각성능을 30℃ 저감하는 효과를 얻을 수 있었다. 이와 같은 결과는 경쟁사와 비교했을 때 매우 독창적인 벤트 구조 결과이며, 차량의 제동 열부하를 저감시켜 제동 안전성 향상에 크게 기여할 수 있음을 확인하였다.
4) 경량화 효과 분석 결과 동일 사이즈의 주철 재질 디스크 대비 약 50% 중량 저감 효과를 얻을 수 있었다. 이를 통해 주행 성능 및 연비 향상에 크게 기여할 수 있음을 확인하였다.
5) 국산화 개발을 통하여 국내에 전무했던 복합재 기반의 고급 제동시스템 개발 기술력 및 인프라를 구축하였으며, 이를 통해 다가올 해외 경쟁사와의 경쟁에 대응할 수 있도록 하였다.

참고문헌

(1) M. Krupka, A. Kienzle, 2000, “Fiber Reinforced Ceramic Composite for Brake Discs”, SAE International, 2000-01-2761.
(2) 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.
(3) Y. Lu, K. Wang, L. Jiao, G. S. Martynkova, 2008, “Ceramic Abrasive in Brake Friction Materials”, SAE International, 2008-01-2538.
(4) A. L. Swarbrick, 2012, “Surface Conditioning of Carbon-Fiber Ceramic Rotors against Organic Pads”, SAE International, 2012-01-1833.

(5) 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

(6) J. H. Shim, D. W. Lim, E. J. Hyun, K. J. Kim, H. K. Kim, 2016, “A study on coupling structure of carbon ceramic composite using substance-field analysis and friction·wear characteristics control”, KSAE annual spring conference, pp. 380~388.

(7) J. H. Shim, D. W. Lim, E. J. Hyun, K. J. Kim, G. G. Jung, H. K. Kim, 2018, “A study on Development of Brake System and Performance Improvement using Carbon Ceramic Composite”, KSAE annual spring conference, pp. 318~325.

(8) J. H. Shim, J. H. Lee, U. H. Shin, 2018, “A study on Analysis of Effect Factors and Development to Improve Brake Safety”, KASA spring fall conference, pp. 11~16.

(9) J. H. Shim, J. H. Lee, U. H. Shin, 2018, “A study on Analysis and Test for Improvement Factors of Brake Stiffness Feeling”, Journal of auto-vehicle safety association, pp. 39~44.

(10) J. H. Shim, J. H. Lee, U. H. Shin, D. W. Lim, E. J. Hyun, H. K. Kim, 2018, “A study on improvement of fade characteristic of composite brake through optimization of flow performance”, KASA annual fall conference, pp. 143~148.