

고성능 및 친환경 차량의 복합재 브레이크 안정감 향상을 위한 스켈 노이즈 강건성 분석에 관한 연구

심재훈* · 이중희* · 신용희** · 임동원*** · 현은재**** · 전태형*****

A Study on Squeal Noise Robustness Analysis to Improve Composite Brake Stability of High Performance and Eco-Friendly Vehicles

J. H. Shim*, J. H. Lee*, U. H. Shin**, D. W. Lim***, E. J. Hyun****, T. H. Jeon*****

Key Words: Composite Brake System(복합재 제동 시스템), Squeal Noise(스켈 노이즈), Robust Design(강건 설계), Brake Pad(제동 마찰재), Mono-Block Caliper(모노블록 캘리퍼), Composite Disc(복합재 디스크)

ABSTRACT

Composite material is very attractive because it has excellent mechanical property and is possible to lightweight due to the low density. However, composite material is less used compared to other systems in the chassis system because it is very hard to solve NVH problem when composite material is applied to vehicle. Especially, reducing squeal noise of composite brake system is essential to apply it to vehicle successfully. In this paper, we present a new solution to reduce squeal noise of composite brake system. To achieve this goal, we analyze main causes of noise using RCA (Root Cause Analysis), CA (Contradiction Analysis) and sequentially get IFR (Ideal Final Result) to solve the problem. Next, we define the function of composite brake system and derive control factors and noise factors. A variety of tests for factors like chamfer, slot, damping shim, underlayer of brake pad are done. In addition, we analyze level of contribution for control factors theoretically. Finally, we get the effective solution for reducing squeal noise.

1. 서론

최근의 다양한 글로벌 연비 규제에 능동적으로 대응하기 위하여 각국의 자동차 산업은 활발한 경량화 기술을 개발하고 있다. 또한, 이와 연계하여 EV 및 수소전기 차량의 시장 점유율은 해마다 가속화될 것으로 예측되고 있다. 특히 EV는 내연기관 차량 대비 높은 출력으로 인

하여 기존 제동시스템 대비 높은 제동성능의 확보가 필요한 상황이다. 이와 같은 상황 속에서 최근 복합재의 차량 적용에 대한 관심이 급격하게 증가되고 있으며, 여러 자동차 OEM 및 학계를 통해서 활발한 연구가 이루어지고 있다.^(3~10)

이와 같이, 복합재가 관심을 받는 이유는 기존 금속 재료 대비 뛰어난 기계적 특성 뿐만 아니라 탁월한 경량화 효과를 얻을 수 있기 때문이다.

그러나, 이와 같은 연구에도 불구하고 복합재를 사시 시스템에 적용하기 위해서는 아직까지도 여러 가지 극복해야 하는 문제점들을 가지고 있다. 특히, 제동시스템의 경우 복합재 제동시스템의 NVH 문제, 그 중에서도 가장 중요한 스켈 노이즈 문제점 해결에 관한 학술적인 연구

* 현대자동차, 책임연구원
 ** 현대자동차, 연구원
 *** 테크카본, 수석연구원
 **** 상신브레이크, 수석연구원
 ***** 상신브레이크, 책임연구원
 E-mail: jhs4u@hyundai.com

성과는 아직까지도 매우 미흡한 수준이다.

이와 같은 원인은 복합재 제동시스템의 마찰·마모 특성이 기존 주철 디스크 및 마찰재에 의한 특성 대비 상대적으로 상이하고 복합재 디스크에 상응하는 마찰재의 연구가 미흡한 결과이다.

이와 관련해서 심재훈 등^(3,4)은 복합재 디스크의 SiC 함량에 따른 마찰재와의 마찰·마모 특성에 대한 연구를 수행하여 마찰재 안정화에 대한 의미 있는 결과를 제시하였다. 또한, 제동시 공기 유동 극대화를 위하여 복합재 디스크의 다양한 벤트 구조를 해석 및 실험을 통하여 심도 있게 분석하였으며, 그 결과 독창적이고 이상적인 벤트 구조를 가질 수 있도록 최적화 하였다.^(6,7)

본 연구에서는 이와 같은 연구 성과를 기반으로 최적화 개발된 복합재 디스크에 대한 마찰재와의 NVH 문제점 중 가장 중요한 스켈 노이즈에 대한 상세 연구를 실시하였으며, 이를 통해서 복합재 제동시스템에 대한 전체적인 개발 완성도를 극대화 하고자 하였다.⁽¹¹⁾

이때, 스켈 노이즈에 대한 정량적인 상세 분석 결과를 추가적으로 실시하여 향후 실차 적용에 있어서 핵심 연구자료로 활용할 수 있도록 하였다. 이를 위해서 강건 설계(Robust Design) 방법론을 적용하였으며, 각각의 노이즈 인자에 둔감하게 반응하는 출력 결과를 얻기 위한 제어 인자를 도출하고자 하였다. 그리고 최종적으로 제어 인자별 기여도 분석을 수행하여 최적의 제어 인자를 상세히 분석 및 제시 하고자 하였다.^(1,2)

2. 개발 컨셉 수립

본격적인 개발을 위하여 복합재 제동시스템의 스켈 노이즈 문제를 저감할 수 있는 이상해결책(IFR, Ideal Final Result)에 대하여 고찰하였으며, 아래의 Fig. 1은 이상해결책 수립 결과에 대한 일련의 컨셉 도출 전개 과정을 나타내고 있다. 이상해결책 도출 전개 과정은 총 3가지 Step으로 구성되어 있으며, 각 Step마다 분석 방법론을 활용하여 최종적으로 근본 문제 해결을 위해 이상해결책을 도출하였다.

먼저, Step 1에서는 스켈 노이즈 발생이라는 고장모드에 대하여 근본 원인 분석(RCA, Root Cause Analysis)을 실시하였다. 분석 결과, 스켈 노이즈는 공진, 이상 마찰, 복합재에 변형 및 과도한 열발생에 의하여 발생하는 것으로 확인됐으며, 최종적인 원인으로는, 복합재 마찰면의 면적이 부족하다라는 결론을 도출하였다.

둘째, Step 2에서 근본 원인 분석 결과를 모순 분석(Contradiction Analysis)으로 확장하여 상세 분석을 실시하였다. 분석 결과, 복합재 마찰면 면적을 증가시켜야 하는 경우와 증가 시키지 말아야 하는 경우에 대한 물리적 모순을 도출하였다. 그리고, 도출된 물리적 모순에 대한 각각의 원인을 파악하여 안정적인 마찰 특성 확보와 코너 모듈의 패키지 공간 확보라는 상호 상반되는 기술적 모순을 도출하였다.

셋째, Step 3에서 모순 분석 결과를 기반으로 이상해

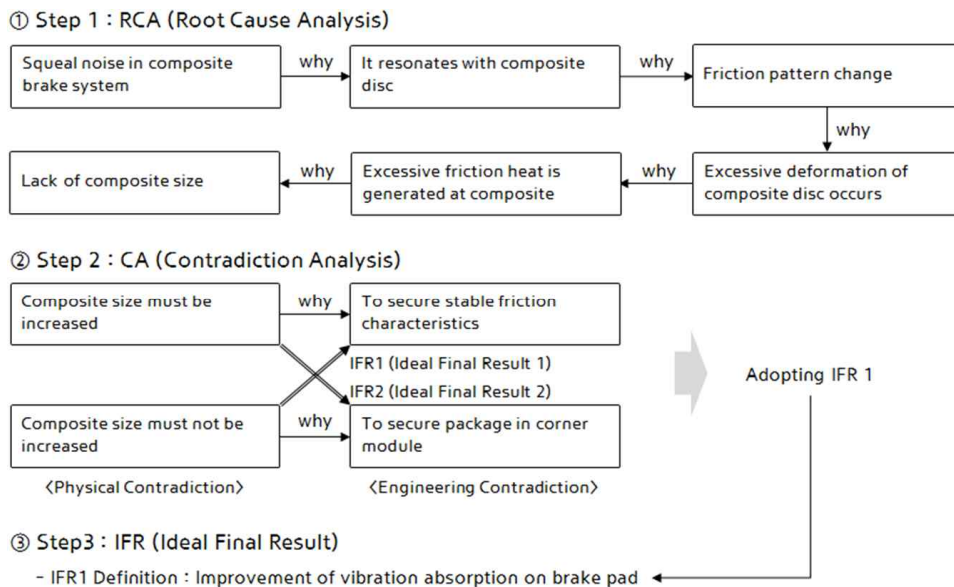


Fig. 1 Analysis on RCA, CA and IFR

결책을 검토하였다. IFR 2의 복합재 마찰면의 면적을 증대시키면서 모듈내의 패키지 공간을 확보하는 방법은 중량 및 원가를 고려하였을 때 부적합하다고 판단하여 배제하였으며, IFR 1의 복합재 마찰면의 면적을 증대시키지 않으면서, 안정적인 마찰 특성을 확보하는 것이 스켈 노이즈 문제 발생이라는 고장모드에 대한 이상해결책임을 확인하였다. 이와 같은 일련의 고찰 과정을 통하여 IFR 1을 반영한 최종 이상해결책인 마찰재의 진동 흡수능 향상을 전체 연구 방향으로 설정하였다.

3. 이상 기능 정의

스켈 노이즈 저감 특성 고려에 앞서 복합재 제동시스템의 이상 기능 정의를 실시 하였으며, 아래의 Fig. 2에 각각의 구성요소에 대한 이상 기능 정의를 도시하였다. 도시된 바와 같이 복합재 제동시스템에서 차량의 속도를 감속 또는 정지시키기 위하여 유압을 발생하는 캘리퍼는 모노블록 캘리퍼 바디와 마찰재로 구분되며, 휠과 연결되어 마찰재와 상호 마찰을 발생시켜 차량을 정지시키는 디스크는 복합재 및 HAT으로 각각 구분됨을 확인하였다. 이와 같은 이상 기능 정의를 통하여 본 구성 요소를 중심으로 순차적으로 수행될 강건 설계를 위한 시스템 단위를 설정하였다. 그리고 시스템 구성을 기반으로 스켈 노이즈 저감 기술을 개발할 경우 품질 문제 해결과 동시에 모노블록 캘리퍼 및 복합재 디스크 조합에 의한 차량의 제동 상품성 극대화가 가능하여 수익성 향상에 크게 기여할 수 있음을 확인하였다.

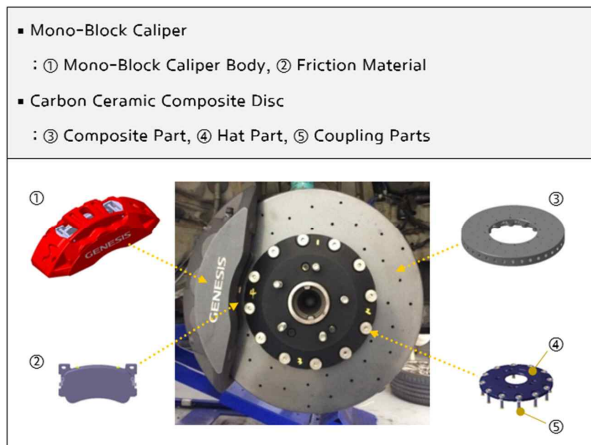


Fig. 2 Definition of ideal function for composite brake system

4. P-diagram 정의

이상 기능 정의에 이어서 P-diagram을 검토하여 복합재 제동시스템의 입력, 출력, 제어 인자 및 노이즈 인자를 도식화 하였다. 아래의 Fig. 3은 이와 같은 검토를 통하여 수립된 P-diagram를 나타내고 있다. 본 연구의 목적인 마찰재의 진동 흡수능 향상을 위하여 강건 설계 방법론을 적용하였으며, 가혹 반복 제동 상황에서도 외부 노이즈에 둔감하게 반응하여 스켈 노이즈 문제를 해결할 수 있는 시스템이 되어야함을 P-diagram 도식화 과정을 통하여 명확히 할 수 있었다.

또한, 출력 반응이 스켈 노이즈를 저감 시키기 위한 것이기 때문에, 망소 특성(Smaller The Better Type Characteristics)이 P-diagram 특성으로 적합한 설정임을 확인하였다.

인자들로는 먼저, 노이즈 인자로 상온 및 저온에서의 제동모드를 각각 설정하였다. 여기서, 고온 제동모드를 노이즈 인자로 추가하여 설정하지 않은 이유는 실험적으로 고온에서는 마찰재의 진동 흡수능이 상온 및 저온 대비 상대적으로 우수하여 충분한 진동 흡수능을 확보하기 때문이다. 다음으로, 상온 및 저온 노이즈 인자에 대해서는 제동모드를 고려한 차속, 제동 압력 및 온도별 상대 습도를 주요 고려 대상으로 선정하였다. 그리고, 제어 인자가 되는 마찰재에 대해서는 마찰재의 몰드 측면과 몰드와 결합하여 작용하는 구성 요소 측면에서 각각 고찰하였다. 그 결과, 마찰재 몰드 측면에서의 제어 인자로 챔퍼와 슬롯을 설정하였으며, 몰드와 결합하여 작용하는 구성 요소 측면의 제어 인자로 는 댐핑 shim과 하층재를 각각 설정하였다. 설정된 노이즈 및 제어 인자에 대해서는 다음 장에 상세히 서술하고자 한다.

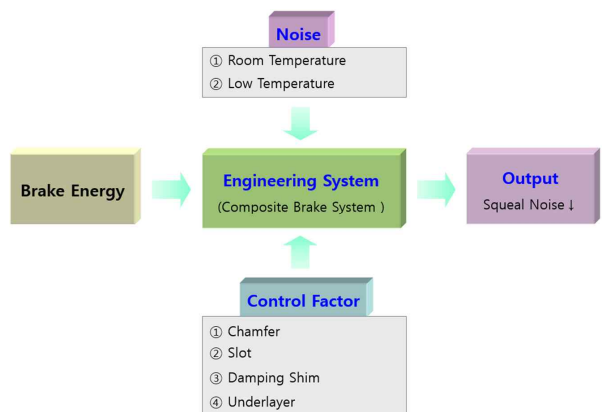


Fig. 3 Definition of P-diagram for composite brake system

5. 노이즈 및 제어 인자 정의

4장에서 설정한 노이즈 및 제어 인자에 대한 상세 수준 및 실험계획법을 아래의 Fig. 4에 도시하였다. 도시된 바와 같이, 노이즈 인자의 경우 상온 상태에서는 차량 속도를 10~50kph 조건에서 제동 압력을 5~35kgf/cm² 까지 적용하였으며, 저온 상태에서는 차량 속도 10~20kph 조건에서 제동 압력을 2~20kgf/cm² 까지 적용하였다.

한편, 제어 인자의 경우, 챔퍼의 제어 인자는 챔퍼 미적용, 양단 일반 챔퍼, 양단 J-cut 챔퍼로 수준을 선정하였고, 슬롯의 제어 인자는 슬롯 미적용, 수직 슬롯, 대각 슬롯으로 상세 수준을 각각 선정하였다. 또한, 댐핑 씬은 Shim 미적용, 아크릴 Shim, 실리콘 Shim을 제어 인자 수준으로 선정하였고, 하층재는 하층재 미적용, 변성 수지 하층재, 페놀 수지 하층재 순으로 상세 제어 인자 수준을 각각 선정하였다. 그리고 실험계획법은 계측 결과에 의한 스킵 노이즈의 실차 적합도를 객관적으로 판단하기 위하여 Ratio와 Index를 모두 평가에 반영되도록 하였다. 여

		Room Temp.	Low Temp.
Factors	Temp.	23 ± 3°C	-10°C
	Vehicle Speed	10~50kph	10~20kph
	Relative Humidity	70 ± 5% RH	50 ± 5% RH
	Brake Pressure	5~35kgf/cm ²	2~20kgf/cm ²

(a) Noise factor levels

		Factors A : Chamfer			Factors B : Slot		
Factors	1 Level				1 Level		
	2 Level				2 Level		
	3 Level				3 Level		
	No Chamfer	Slope	J-CUT	No Slot	Perpendicular	Diagonal	No Underlayer
		Factors C : Damping Shim			Factors D : Underlayer		
1 Level				1 Level			
2 Level				2 Level			
3 Level				3 Level			
No Shim	Acryl Shim	Silicon Shim	No Underlayer	Modified Resin Underlayer	Phenol Resin Underlayer	No Underlayer	

(b) Control factor levels

	A	B	C	D	Ratio [%]		S/N	MEAN		A	B	C	D	Index		S/N	MEAN
					Room Temp.	Low Temp.								Room Temp.	Low Temp.		
1	1	1	1	1						1	1	1	1				
2	1	2	2	2						2	1	2	2				
3	1	3	3	3						3	1	3	3				
4	2	1	3	2						4	2	1	3				
5	2	2	1	3						5	2	2	1				
6	2	3	2	1						6	2	3	2				
7	3	1	2	3						7	3	1	2				
8	3	2	3	1						8	3	2	3				
9	3	3	1	2						9	3	3	1				

(c) Design of Experiment

Fig. 4 Level of noise factors and control factors

기서, Ratio는 스킵 노이즈의 발생 빈도를 나타내며, Index는 스킵 노이즈의 크기를 각각 나타낸다. 이와 같이, Ratio와 Index를 모두 평가에 반영하여 실험계획법을 수행할 경우, 실차 상단에 부합하는 복합재 제동시스템의 스킵 노이즈 개선 효과 검증이 가능하게 된다.

최종적으로, 설정된 상온 및 저온 상태에서의 노이즈 인자에 대한 제어 인자간 상관 관계를 고려하여 스킵 노이즈의 정량적 지수인 Ratio와 Index를 동시에 분석할 수 있는 실험계획법인 L₉3⁴ 매트릭스를 설정하였다.

6. Feasibility Test

실험계획법 절차에 의한 각각의 노이즈 인자 및 제어 인자 조합에 대한 평가를 수행하기 위하여 아래의 Fig. 5에서와 같이 시험 장치를 설치하였다. 도시된 바와 같이, 노이즈 인자인 온도, 차량 속도, 상대 습도, 제동 압력을 실제 제동 모드에서와 같이 동일하게 모사할 수 있는 다이내모미터를 활용하여 복합재 제동시스템을 설치하였다. 그리고 연구 결과를 실제 차량에 적용시에도 객관적이고 일관적인 결과로 활용될 수 있도록 하기 위하여 너클을 추가 반영하여 상온 및 저온 상태에서의 스킵 노이즈 평가를 수행하였다.

한편, 본격적인 시험에 앞서 노이즈 인자 및 제어 인자 선정의 적합성 판단을 위한 Feasibility Test를 실시하였으며, Table 1에 그 결과를 도시하였다. 도시된 바와 같이, 실험계획법의 전체 평가 실험 중 1번과 4번을 먼저 선택하여 실험을 실시하였다. 여기서 1번 실험은 출력 반응이 가장 나쁠 것으로 예상되어 선택한 것이며, 4번은 출력 반응이 가장 좋을 것으로 예상되어 선택한 것이다. 그 결과, 1번과 4번 실험간의 현저한 출력 반응의 차이를 확인할 수 있었다.

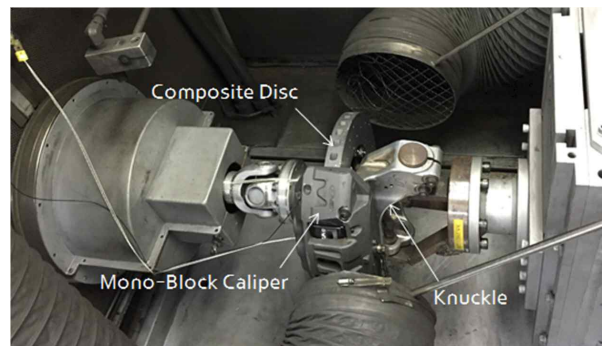


Fig. 5 Setup of test equipment

Table 1 Results of feasibility test

	A	B	C	D	Ratio [%]				S/N	MEAN		A	B	C	D	Index				S/N	MEAN
					Room Temp.	Low Temp.										Room Temp.	Low Temp.				
1	1	1	1	1	49.7	22.9	-31.7	36.3			1	1	1	1	1	6.1	3.8	-14.1	4.9		
2	1	2	2	2							2	1	2	2	2						
3	1	3	3	3							3	1	3	3	3						
4	2	1	3	2	1.5	37.3	-28.4	19.4			4	2	1	3	2	0.1	2.3	-4.4	1.2		
5	2	2	1	3							5	2	2	1	3						
6	2	3	2	1							6	2	3	2	1						
7	3	1	2	3							7	3	1	2	3						
8	3	2	3	1							8	3	2	3	1						
9	3	3	1	2							9	3	3	1	2						

일반적으로, Feasibility Test에서 각각의 출력 반응 분석을 통해서 현저한 변별력의 차이가 확인되지 않을 경우 노이즈 인자 및 제어 인자 수준의 선정 결과에 대한 적합성을 다시 검토하여 실험계획법에 반영해야만 한다. 이는 전체 실험을 완료한 후 실험 데이터를 분석할 때 발생하게 되는 오류 및 왜곡을 사전에 방지함으로써 강건 설계 결과의 신뢰성을 극대화 시키기 위함이다. 본 연구의 경우 이와 같은 Feasibility Test를 수행하여 노이즈 인자 및 제어 인자 수준에 대한 선정 적합성을 사전에 확인할 수 있었다.

한편, Feasibility Test 검증 후 실험계획법을 완료한 전체 실험에 대한 출력 반응 결과를 아래의 Table 2에 도시하였다.

Table 2 Test results of robust design

	A	B	C	D	Ratio [%]				S/N	MEAN		A	B	C	D	Index				S/N	MEAN
					Room Temp.	Low Temp.										Room Temp.	Low Temp.				
1	1	1	1	1	49.7	22.9	-31.7	36.3			1	1	1	1	1	6.1	3.8	-14.1	4.9		
2	1	2	2	2	4.4	7.2	-15.5	5.8			2	1	2	2	2	0.5	0.2	7.1	0.4		
3	1	3	3	3	4.6	58.7	-32.4	31.6			3	1	3	3	3	1.3	17.2	-21.7	9.2		
4	2	1	3	2	1.5	37.3	-28.4	19.4			4	2	1	3	2	0.1	2.3	-4.4	1.2		
5	2	2	1	3	53.6	37.1	-33.2	45.3			5	2	2	1	3	12.0	6.9	-19.8	9.4		
6	2	3	2	1	12.9	50.0	-31.2	31.4			6	2	3	2	1	2.0	4.4	-10.8	3.2		
7	3	1	2	3	29.1	64.4	-33.9	46.7			7	3	1	2	3	7.7	12.9	-20.5	10.3		
8	3	2	3	1	12.6	35.3	-28.4	23.9			8	3	2	3	1	1.2	4.7	-10.8	2.9		
9	3	3	1	2	63.3	61.9	-35.9	62.6			9	3	3	1	2	13.9	9.4	-21.5	11.7		

7. 출력 반응 및 재현성 분석

실험계획법을 통해서 얻어진 계측 데이터에 대하여 출력 반응 분석을 실시하였다. Fig. 6과 Fig. 7은 노이즈 인자와 제어 인자 수준별 Ratio와 Index 각각에 대한 출력 반응 분석 결과를 나타내고 있다.

첫째, Ratio의 경우 각각의 제어 인자 중 1-2-2-2 수준인 챔퍼 미적용, 수직 슬롯, 아크릴 Shim, 변성 수지 하층재 사양에서 높은 S/N 비를 갖는 것으로 확인되었다.

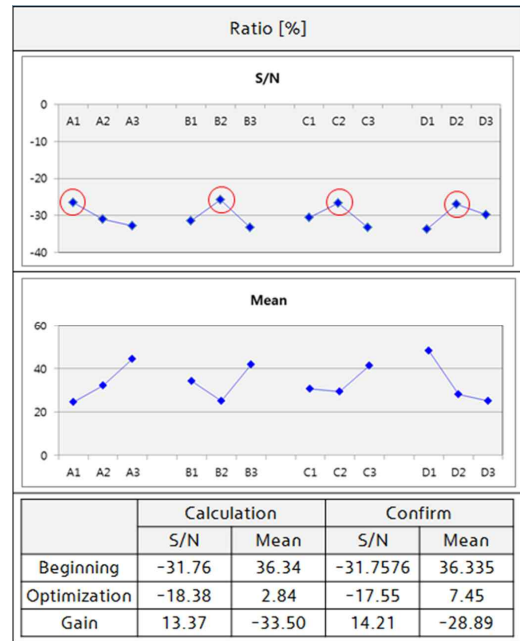


Fig. 6 Analysis of S/N ratio according to control and noise factor

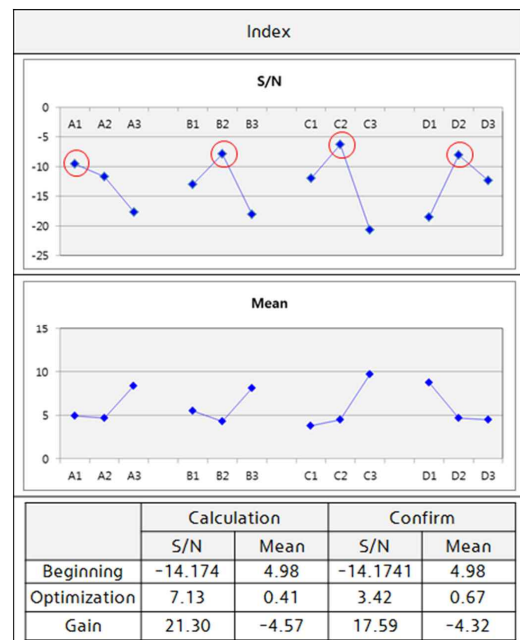


Fig. 7 Analysis of mean value according to control and noise factor

이는 1-2-2-2 수준의 사양이 산포 저감에 최적화 된 것을 나타내며, 스켈 노이즈 저감을 고려하였을 때 가장 우수한 결과를 얻을 수 있음을 나타낸다. 그리고 Mean 값은 세번째 제어 인자인 댄핑 씘에서 1, 2 수준과 네번

제 제어 인자인 하층재에서 2, 3 수준이 상호 유사한 값을 갖는 것으로 나타났다. 전반적으로, Mean 값은 망소 출력 특성을 갖는 것으로 확인되었다.

둘째, Index의 경우 Ratio와 동일하게 1-2-2-2 수준의 제어 인자 사양에서 가장 높은 S/N 비를 갖는 것으로 나타났으며, Mean 값은 챔퍼의 1, 2 수준과 하층재의 2,3 수준에서 상호 유사한 값을 갖는 것으로 확인되었다.

이와 같은 실험 계측 결과 및 본 연구의 목표를 동시에 고려하였을 때, 전체적인 복합재 제동시스템에 대한 스킵 노이즈의 강건성을 확보하기 위해서는 높은 수준의 S/N 비를 갖는 1-2-2-2 사양을 선정하여 노이즈 인자에 둔감한 복합재 제동시스템으로 최적화 구현을 하는 것이 타당함을 확인하였다.

종합적으로 봤을 때, 개선 효과의 정량적 값은 Ratio의 경우 14.2의 S/N 비 이득과 28.9의 Mean 값 저감 효과를 확인하였으며, Index의 경우 17.6의 S/N 비 이득과 4.3의 Mean 값 저감 효과를 얻는 것으로 각각 분석되었다.

한편, 아래의 Table 3은 출력 반응에 대한 재현성 분석 결과를 나타내고 있다. 본 연구에서 재현성 분석을 통해서 확인하고자 하는 중요한 목적은 다음과 같다.

첫째, 제어 인자의 영향이 고객 사용조건에서도 일관성 있게 유지될 수 있는 것을 확인하는 것이다.

둘째, 제어 인자간에 불필요한 강한 교호작용이 없다는 것을 확인하는 것이다.

재현성 분석 결과 추정 및 확인에 대한 S/N 비가 초기 및 최적화를 거치면서 현저한 차별화가 확인되었다. 이와 같은 점은 본 연구에서 수행한 실험계획법이 우수한 재현성을 갖고 있음을 의미하며, 분석 결과를 고객 사용조건으로 확장하였을 때, 스킵 노이즈 저감에 대하여 높은 신뢰성을 확보할 수 있다는 것을 나타낸다. 따라서, 본 연구에 수행한 노이즈 및 제어 인자에 대한 강건 설계가 매우 효과적이고 타당함을 확인할 수 있었다.

Table 3 Analysis of repeatability results

Ratio	Calculation	Confirm	Index	Calculation	Confirm
	S/N	S/N		S/N	S/N
Beginning	-31.76	-31.7576	Beginning	-14.174	-14.1741
Optimization	-18.38	-17.55	Optimization	7.13	3.42
Gain	13.37	14.21	Gain	21.30	17.59

8. 저감 영향 인자 분석

8장에서는 스킵 노이즈 저감에 우세한 영향 특성을 나

타냈던 제어 인자에 대한 이론적 분석을 실시하였다. 대부분의 시스템에서 강건 설계를 통한 최적화를 수행할 경우 이론적 분석 없이 강건 설계를 통한 시스템 최적화 결과를 활용하여 바로 문제점을 개선하고 실차에 적용하는 경우를 많이 볼 수 있다. 이와 같은 경우, 향후 동일 시스템에서 유사한 문제점으로 인한 개선 방향 도출시 각각의 제어 인자에 대하여 개선 기여도를 확인할 수 있는 방법이 없게 된다. 또한, 연구 결과에 대한 지속적인 누적 연구가 불가능하게 되는 취약점이 발생하게 된다. 본 연구에서는 이와 같은 문제점을 고려하여 각각의 제어 인자에 대한 상세 영향도 분석을 실시하였다. 그리고, 이와 같은 분석 결과를 기반으로 향후 지속 가능한 복합재 제동시스템의 NVH 관련 누적 연구 수행이 가능하도록 이론적 기반을 확보하고자 하였다.

8.1. 챔퍼에 의한 영향도 분석

마찰재의 챔퍼는 시스템의 구성에 따라서 개선 효과가 상이하게 나타나는 특징을 갖고 있다. 일반적인 특성으로는 마찰면적의 변화에 따른 면압 개선 효과를 얻을 수 있으며, 챔퍼의 형상에 따라 일반 챔퍼의 경우는 접촉각 개선 효과를 얻을 수 있으며, J-cut 챔퍼의 경우는 내구 진행에 따른 마찰 면적 변화를 저감시키는 효과를 얻을 수 있게 된다. 하지만, 기본적으로 챔퍼가 없는 상황에서도 위와 같은 우수한 성능 향상 효과를 얻을 수 있는 것이 마찰재의 성능 포텐셜 증대 측면에서 매우 유리하다 할 수 있다.

8.2. 슬롯에 의한 영향도 분석

마찰재의 슬롯은 챔퍼와 마찬가지로 시스템의 구성에 따라서 개선 효과가 상이하다는 특징을 갖고 있다. 이와 같은 원인은 4장에서 언급한 바와 같이, 챔퍼와 슬롯이 모두 마찰재의 형상 측면에서의 제어이기 때문에 시스템의 구성마다 개선 효과가 조금씩 상이하게 발생할 수 밖에 없기 때문이다.

하지만, 슬롯은 마찰재의 고유진동수를 이동시킬 수 있는 중요한 제어 인자라 할 수 있다. 또한, 슬롯이 갖는 추가적인 제동성능 향상 효과로는 제동시 발생하는 열 및 가스 방출 효과와 함께 마모에 의한 마찰재의 분진 배출에 탁월한 효과를 얻을 수 있다는 것이다.

Fig. 8은 본 연구에서 사용한 슬롯 형상에 따른 마찰재의 형상을 나타내고 있으며, Fig. 9는 슬롯 형상에 의한



Fig. 8 Shapes of brake pad according to slot patterns

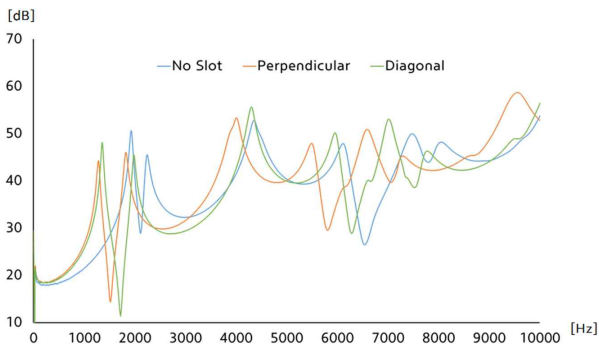


Fig. 9 FRF Analysis according to slot patterns

FRF 분석 결과를 각각 나타내고 있다. 분석 결과, 수직 슬롯 사양의 경우 고유진동수의 Peak Amplitude 특성을 관찰한 결과, 10% 하향 이동이 가능하여 스켈 노이즈 발생 대역을 회피할 수 있는 것으로 분석되었다. 그러나, 대각 슬롯 사양의 경우는 고유진동수의 Peak Amplitude가 이동은 하지만 스켈 노이즈 발생 대역 내에 있어 개선 효과가 미흡한 것으로 분석되었다.

따라서, 수직 슬롯을 활용하여 복합재 제동시스템의 공진 발생을 억제시킬 수 있도록 Peak Amplitude 특성을 크게 저감할 경우, 스켈 노이즈 발생 대역의 회피를 통한 저감에 매우 효과적임을 확인할 수 있었다.

8.3. 댐핑 폼에 의한 영향도 분석

마찰재의 댐핑 폼은 복합재와 마찰재의 상호 마찰시 댐핑을 유리하게 가져가는 효과를 얻을 수 있기 때문에 일반적으로 NVH 저감 특성을 얻기 위하여 많이 사용되고 있다. Fig. 10은 본 연구에서 사용한 다양한 댐핑 폼의 상세 형상 및 재질에 대하여 나타내고 있다. 도시된 바와 같이, 아크릴 계열의 댐핑 폼은 NBR(Nitrile Butadiene Rubber) / Steel / 아크릴의 구조로 캘리퍼와 접촉하고 있으며, 실리콘 계열의 댐핑 폼은 Steel / NBR / 실리콘의 구조로 캘리퍼와 접촉하게 된다. 이때, 캘리퍼와의 상호 접촉시 아크릴 계열 댐핑 폼의 손실 계수(Loss Factor)가 실리콘 계열의 댐핑 폼 대비 상대적으로 우수하여 스



Fig. 10 Shapes of damping shim

켈 노이즈 저감을 위한 효과적인 제어 인자로 작용하는 것을 확인할 수 있었다. 여기서, 손실 계수란 동적 하중을 받는 물체의 진동 1주기 동안 축적할 수 있는 최대 변형을 에너지 중에서 감쇠에 의해 소실되는 에너지량의 상대적인 비율을 의미하며, 손실 계수가 높다는 것은 소실되는 에너지량을 최대한 흡수할 수 있다는 것을 의미한다. 따라서, 아크릴 계열의 댐핑 폼을 적용하여 진동 흡수능을 향상시켜 스켈 노이즈를 저감시키는 것이 타당함을 확인하였다.

8.4. 하층재에 의한 영향도 분석

아래의 Fig. 11은 하층재 제어 인자 사양에 따른 FRF 계측 비교 결과를 나타내고 있다. 계측 결과 변성 수지 하층재 사양이 페놀 수지 하층재 사양 대비 상온 및 저온 모두의 경우에서 우수한 스켈 노이즈 저감 특성 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과는 Fig. 12에서 도시한 바와 같이, 변성 수지 하층재 사양의 댐핑비가 페놀 수지 하층재 사양의 댐핑비 대비 7.5% 우수하여 고유진동수의 Peak Amplitude를 크게 저감시켜, 복합재 제동시스템의 진동을 상대적으로 저감할 수 있는 것으로

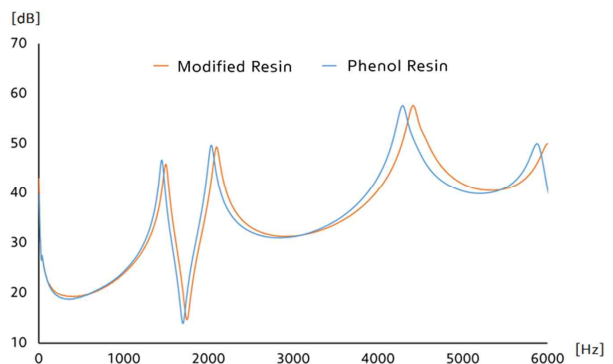


Fig. 11 FRF Analysis according to underlayer types

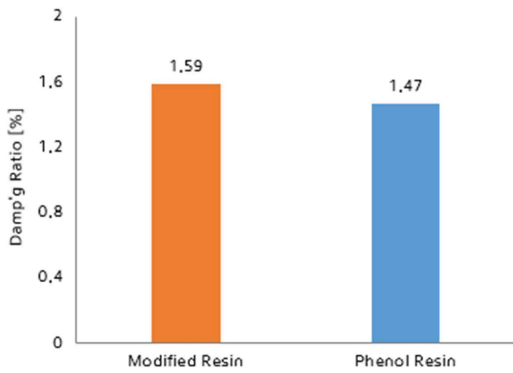


Fig. 12 Comparison of damping ratio according to underlayer types

분석되었다. 다시 말해, 변성 수지 하층재 사양이 저운 및 상운 모두의 경우에서 마찰재의 댐핑능을 향상시켜 스킵 노이즈 발생 저감에 매우 효과적으로 작용한 것으로 분석되었다.

9. 결론

본 연구는 최근 자동차 산업에서 활발한 연구가 이루어지고 있는 고급 경량화 기술인 복합재에 대한 연구였으며, 그 중에서도 현재까지 연구 성과가 매우 미흡한 복합재 제동시스템의 스킵 노이즈 저감에 대한 연구였다. 그리고 아래와 같은 의미 있는 결론을 통하여 본 연구의 우수성을 확인할 수 있었다.

- 1) 스킵 노이즈 발생이라는 고장모드에 대한 근본 원인 분석과 모순 분석을 순차적으로 실시하였으며, 그 결과 마찰재의 진동 흡수능을 향상시키는 방법이 복합재 제동시스템의 스킵 노이즈를 저감할 수 있는 이상해결책을 도출하였다.
- 2) 복합재 제동시스템에 대한 이상 기능 정의를 통하여 실험계획법에 적합한 시스템 범위를 설정하였으며, P-diagram 정의를 통하여 복합재 제동시스템의 강건 설계를 위한 적합한 노이즈 인자 및 제어 인자 수준을 설정하였다.
- 3) 실험계획법에 의한 노이즈 및 제어 인자의 차별화를 확인하기 위하여 Feasibility Test를 실시하여 유효성을 검증하였다. 또한, 스킵 노이즈 저감 효과를 검증하기 위하여 실험계획법에 의한 전체 실험을 수행하였으며, 높은 S/N 비 및 낮은 Mean 값의 유효한 효과를 확인할 수 있었다.

- 4) 계측 결과의 재현성을 추가로 확인하였으며, 이를 통해 고객 사용 조건에서도 우수한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.
- 5) 스킵 노이즈 발생 저감을 위한 제어 인자별 영향도 분석을 수행하였다. 이와 같은 분석을 통해서, 향후 제동시스템에서 폭넓게 사용될 것으로 예측되는 복합재 기술의 개발 완성도가 극대화 될 수 있도록 하였다.
- 6) 본 연구를 기반으로, 복합재 제동시스템의 NVH 문제에 대한 지속적인 연구 성과를 얻을 수 있는 정량적 분석 토대를 확립하였다.

참고문헌

- (1) J. T. Park, N. S. Choi, 2012, "Robust Design of the Disc Brake Pad Shape for Reduction of Uneven Wear", Transaction of KSAE, Vol. 20, No. 1, pp.77~87.
- (2) J. T. Park, S. W. Han, N. S. Choi, 2014, "Robust Design of the Back-Plate Shape of the Disc Brake Pad for Reduction of Uneven Wear", Transaction of KSAE, Vol. 22, No. 1, pp. 8~19.
- (3) J. H. Shim, D. W. Lim, 2016, "A Study on Coupling Structure of Carbon Ceramic Composite using Substance-Field Model Analysis and Friction-Wear Characteristics Control", Spring Conference Proceedings, pp. 380~388, KSAE.
- (4) J. H. Shim, D. W. Lim, 2016, "A Study on Braking Characteristics Control of Carbon Ceramic Composite for Brake Reliability Improvement of Luxury Car and Future Technology Evolution Trend Prediction", Transaction of KSAE, Vol. 24, No. 6, pp. 684~693.
- (5) J. H. Shim, D. W. Lim, E. J. Hyun, 2018, "A Study on Development of Brake System and Performance Improvement using Carbon Ceramic Composite", Spring Conference Proceedings, pp. 318~325, KSAE.
- (6) J. H. Shim, D. W. Lim, 2018, "A Study on Improvement of Fade Characteristic of Composite Brake through Optimization of Flow Performance", Autumn Conference Proceedings, pp. 143~148, KASA.

- (7) J. H. Shim, D. W. Lim, 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.
- (8) J. H. Shim, 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, D. W. Lim, 2019, "A Study on Analysis of Differentiation Technology and Development for Brake System of Luxury Cars", Autumn Conference Proceedings, pp. 32~37, KASA.
- (10) J. H. Shim, D. W. Lim, E. J. Hyun, 2019, "A Study on Development of Ideal Final Result to Reduce NVH Deterioration Characteristics of Composite Brake System", Autumn Conference Proceedings, pp. 348~353, KSAE.
- (11) J. H. Shim, D. W. Lim, E. J. Hyun, 2020, "A Study on Squeal Noise Reduction to Improve Braking Stability of Composite Brake Vehicles", Autumn Conference Proceedings, pp. 144~149, KASA.