

A study on the optimal design of automotive brake disc rotor using Box-Behnken design and response surface method

Joon Hwang[†] and Seung-Woo Ra^{*}

Department of Aeronautical and Mechanical Design Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 27469, Korea
**Division of Creative Convergence, Korea National University of Transportation, Chungju 27469, Korea*

(Received December 10, 2024)

(Revised December 16, 2024)

(Accepted December 17, 2024)

Abstract In this work, finite element method (FEM) and design of experiment (DoE) were used to design variables based on minimum experimental conditions to cope with the market's high performance requirements for automotive brake disk rotor products. By applying the Box-Behnken Design (BBD) experimental design and the Response Surface methodology (RSM), a four-factor, three-level experimental design and analysis were conducted on four variables, including the vent ratio, cooling fin shape, undercut shape thickness, and undercut angle of the brake disc rotor. A design prediction regression model for the optimal design with high reliability that can predict the correlation with design factors closely related to the dynamic performance of the brake disc rotor was derived. In this study, the BBD method and RSM method were applied to analyze the design and performance of an 18-inch disc rotor, and a design prediction regression model was applied to develop a new 21-inch brake disc rotor, and a reliable performance prediction within 3% compared to FEM was performed to shorten the design period and identify the correlation between the design variables and the dynamic performance of the disc rotor, which is closely related to the squeal noise generation. Currently, the automotive industry is continuously promoting the establishment of a design and development system to effectively shorten the development period while satisfying the high emotional quality needs of consumers, and aims to improve product competitiveness by applying the results of this research to the field.

Key words Automotive brake disc rotor, Design optimization, Design of experiment, Response surface method, Box-Behnken design, Finite element analysis

Box-Behnken 실험설계법과 반응표면분석법을 이용한 자동차 브레이크 디스크 로터 최적설계 연구

황준[†], 나승우^{*}

한국교통대학교 항공·기계설계학과, 충주, 27469

*한국교통대학교 창의융합학부, 충주, 27469

(2024년 12월 10일 접수)

(2024년 12월 16일 심사완료)

(2024년 12월 17일 게재확정)

요약 본 연구에서는 자동차용 브레이크 디스크 로터(automotive brake disc rotor) 제품에 대한 시장의 높은 성능 요구도에 대응하기 위해 유한요소해석법(Finite element Method, FEM)과 실험계획법(design of Experiments, DoE)을 이용하여 최소 실험조건에 의한 설계 변수와 디스크 동적 특성과의 상관성을 분석하여 영향도가 큰 설계변수를 선정하였으며, BBD(Box-Behnken Design) 실험설계법과 반응표면분석법(Response Surface methodology, RSM)을 적용하여 브레이크 디스크 로터의 벤트 비율(vent ratio), 냉각핀(cooling fin) 형상변수, 언더컷(undercut) 형상 두께와 언더컷 각도 등의 4가지 변수를 대상으로 4 요인 3 수준 실험설계와 분석을 통해 브레이크 디스크 로터의 동적 성능과 밀접한 설계인자와의 상관성을 예측할 수 있는 높은 신뢰성의 최적설계를 위한 설계예측회귀모델을 도출하였다. 본 연구에서는 BBD법과 RSM법을 적용하여 18인치 디스크 로터의 설계-성능 분석과 21인치 브레이크 디스크 로터 신제품 개발을 위한 설계예측회귀모델 적용을 통해 FEM 대비 3% 이내의 신뢰성 있는 성능예측을 수행함으로써 설계기간단축과 설계변수와 스켈노이즈(squeal noise) 발생과 밀접한 디스크 로터의 동적 성능 간의 상관성을 규명하였다. 현재, 자동차산업분야에서는 소비자의 높은 감성 품질 요구를 만족시킬 수 있으면서도 효과적인 개발기간단축을 위한 설계개발체계 확립을 지속적으로 추진중이며, 향후 연구 결과를 현업에 적용하여 제품 경쟁력 향상에 활용하고자 한다.

[†]Corresponding author

E-mail: jhwang@ut.ac.kr

1. 서 론

자동차 산업은 글로벌 시장에서 소비자의 요구조건이 더욱 높아짐에 따라 고성능화와 고객 감성을 만족시킬 수 있는 방향으로 지속적인 연구개발이 이루어지고 있다 [1]. 특히 자동차의 제동과 관련하여 가장 중요한 자동차 부품인 브레이크의 성능향상을 위한 지속적으로 향상시키기 위한 업계의 노력이 계속되고 있다[2]. Figure 1에 나타난 바와 같이 브레이크의 주요 성능 목표인 구조강도, 진동, 소음, 온도, 마모, 내구도 등을 만족시킬 수 있는 설계변수의 최적화를 위해 정적, 동적, 열적 측면에서의 3차원 설계와 성능예측을 통해 설계최적화를 수행되어야 한다[3]. 특히, 성능목표를 만족시키기 위해서 시제품 제작과 성능시험평가 등에 소요되는 비용과 시간이 매우 크므로, 이를 효과적으로 줄이기 위한 최적설계조건 도출이 설계단계에서 매우 중요하다.

본 연구에서는 자동차 브레이크 디스크 로터(automotive brake disc rotor)를 대상으로 유한요소해석법(finite element method, FEM)[4,5]과 실험계획법(design of Experiments, DoE)을 이용하여 최소 실험조건에 의한 설계목표를 충족할 수 있는 설계 변수 도출과 설계에 미치는 영향을 분석하였으며, 반응표면분석법(Response surface methodology, RSM[6])과 BBD(Box-Behnken Design)[7] 실험설계법을 적용하여 자동차 브레이크 제조 전문기업인 S사의 18인치 제품에 대한 실험설계와 성능분석을 통해 설계에

측모형을 확립하고, 신규 개발하는 21인치 브레이크 디스크 로터의 성능 극대화를 위한 최적설계 인자를 도출하고, 이를 활용하여 제품설계 최적화 방안을 제안하고자 한다.

2. 브레이크 디스크 로터의 설계 변수 선정

자동차용 브레이크 디스크 로터는 Fig. 2와 같이 Hat, Undercut, Fin 부분으로 구분할 수 있으며, 디스크 로터의 요구 사양에 따라 디스크 직경(size), 언더컷(undercut)의 종류, 핀(fin)의 종류, 핀 개수, 볼트 체결 개수 등에 따라 다양한 형상으로 설계되며, 이러한 디스크 로터 형상에 따라 사용시 정적강도, 고유진동수, 열발생 및 열전달 특성에 따라 디스크 온도구배 등의 특징이 결정된다. 이번 연구에서는 특히 브레이크 디스크의 성능에 미치는 설계 변수 중에서 가장 영향도가 높은 벤트 비율(vent_ratio), 냉각핀(fin) 형상, 언더컷(undercut) 형상을 주요 독립변수로 정의하였다.

벤트 비율은 디스크 외판(outplate)에서 내판(inplate)까지의 제도면 전체 높이 중에서 베인(vane) 높이의 비율로 정의되며, 생산기업에서는 설계상 벤트 비율은 0.27~0.50 범위내에서 조정한다. 핀 형상은 Fig. 3과 같이 오리발(flipper)형, 직선(straight)형, 사다리꼴(trapezoid)형으로 구분되어, 6개의 형상 설계변수로 구성되며, 본 연

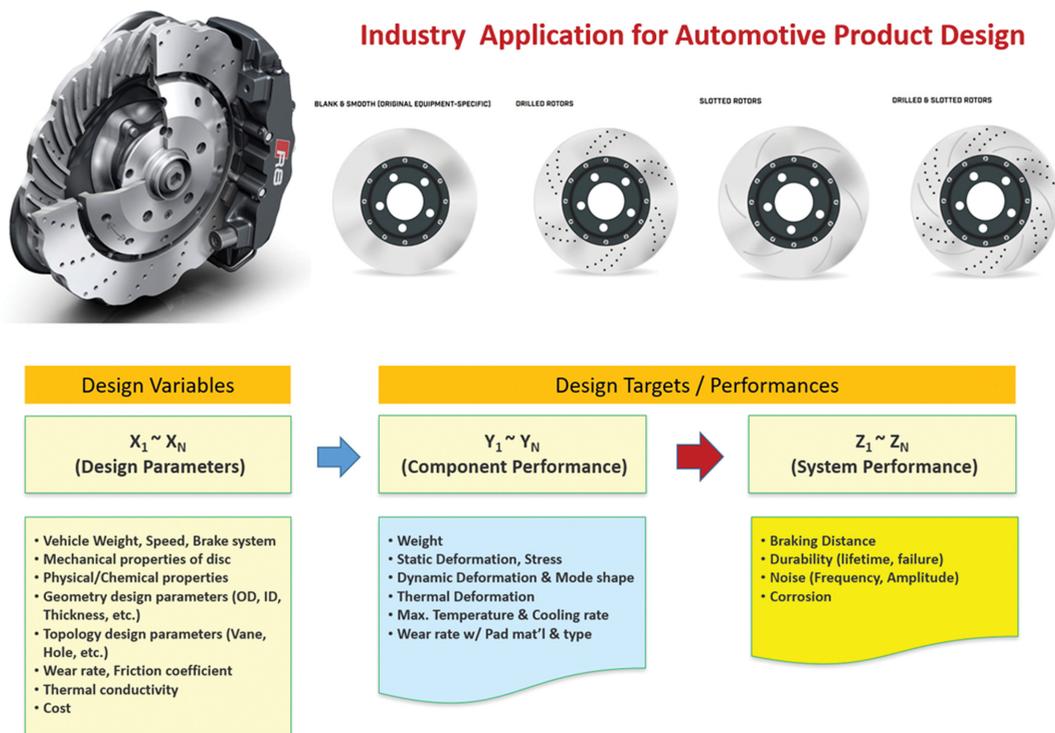


Fig. 1. Design variables, design targets and performances for automotive brake disc.

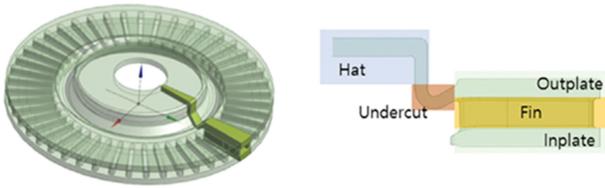


Fig. 2. Structure and cross section view of automotive brake disc rotor.

구에서는 가장 폭넓게 채택되고 있는 오리발형의 핀 형상 설계변수 L3를 독립변수로 지정하였다.

언더컷 형상은 Fig. 4와 같이 V 형식을 채택하고 주요 독립설계인자로서 L2와 θ_1 을 선정하였으며, 이때, L2는 5.5~6.5, θ_1 는 40~65 사이의 값을 설계요구사항에 따라 조정할 수 있다. 특히, 디스크 로터에 대한 3차원

CAE 성능해석 결과들의 분석을 통해 브레이크 디스크 로터 성능에 미치는 영향도가 크며, 제조공정상 주요 관심 설계인자인 벤트 비율(Vent_ratio), 핀 형상변수(Fin-L3), 언더컷 두께(Undercut-L2), 언더컷 각도(Undercut- θ_1)를 최적화해야할 설계변수로 선택하였다.

3. 브레이크 디스크 로터의 유한요소해석

차량의 주행중 제동시에 브레이크 디스크 로터에서 발생하는 진동현상은 브레이크 패드와 접촉력에 영향을 주어 제동 특성에 영향을 주며, 브레이킹 소음인 스켈 노이즈(squeal noise) 발생의 주요 원인이 된다. 유한요소 해석을 통한 브레이크 디스크 로터의 고유진동수와 진폭

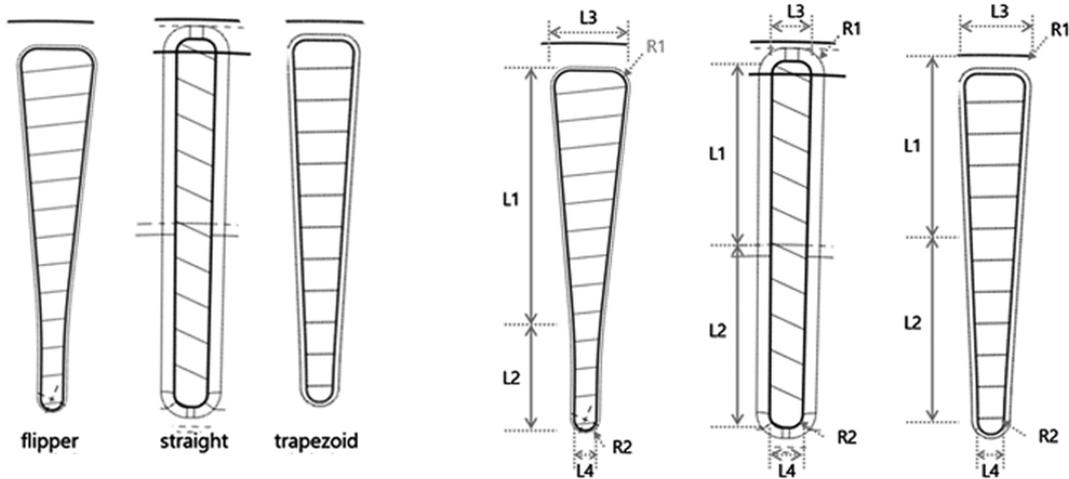
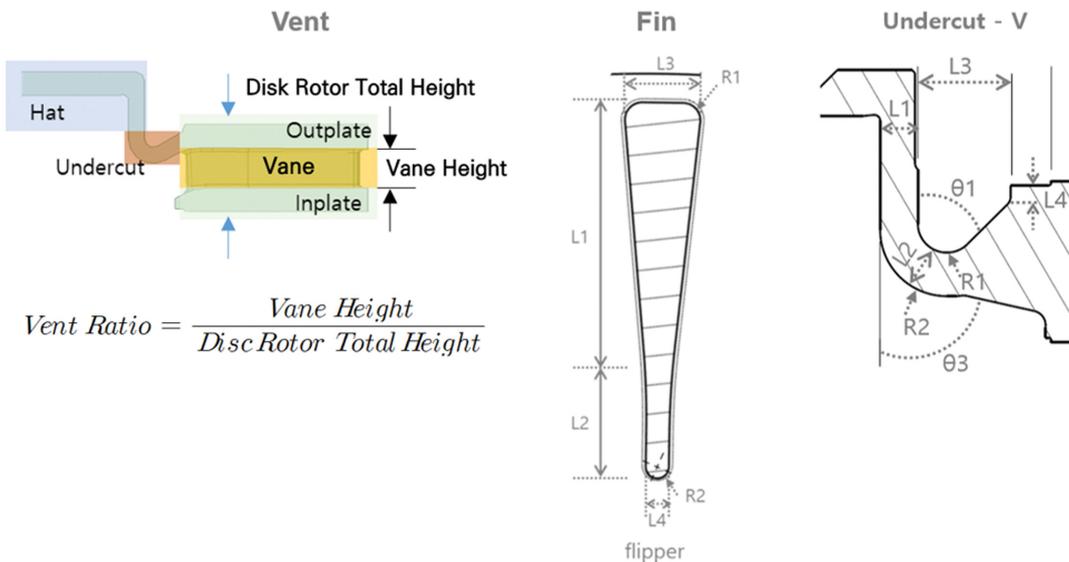


Fig. 3. Main design variables of automotive brake disc rotor fin shape.



$$Vent\ Ratio = \frac{Vane\ Height}{Disc\ Rotor\ Total\ Height}$$

Fig. 4. Vent_ratio, Fin_shape (L3), Undercut_shape (L2, θ_1) as main design variables for automotive brake disc optimization.

변화를 알 수 있는 모달 해석(modal analysis)을 실시하게 되며, 브레이크 디스크 로터에 발생하는 진동모드는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 디스크 두께 기준으로 상하 방향 진동인 OPD 모드(Out-of-Plane diametric mode)와 디스크 면상의 원주 방향 진동인 IPC 모드(In-Plane Circumferential mode)의 진동 특성을 가진다.

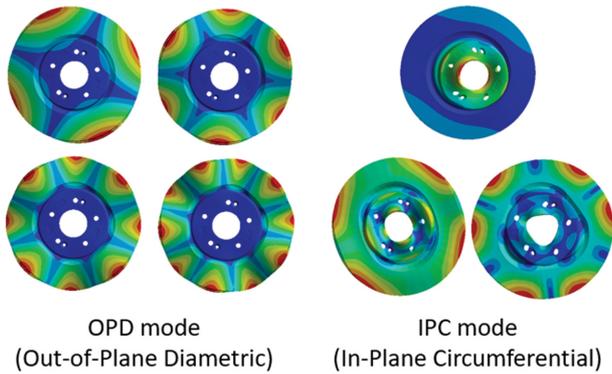


Fig. 5. Vibration modal (OPD mode and IPC mode) analysis examples of automotive brake disc rotor.

Table 1
The structure and specification of machine

Material properties	Values
Young's Modulus (MPa)	66,178
Poisson's ratio	0.27
Density (kg/m ³)	7,200
Thermal Expansion (10 ⁻⁵ /K)	1.2
Reference Temperature (°C)	22
Bulk Modulus (MPa)	47,955
Shear Modulus (MPa)	26,054
Tensile Yield Strength (MPa)	151
Compressive Yield Strength (MPa)	572
Isotropic Thermal Conductivity (W/m K)	45
Specific Heat (J/kg K)	510



Fig. 6. Finite element analysis mesh model for vibration modal analysis of automotive brake disc rotor.

본 연구에서는 18인치(inch) 브레이크 디스크 로터의 3차원 CAD/CAE(Computer Aided Design/Engineering) 방법을 적용한 유한요소해석을 위해 Table 1과 같이 재료 물성을 적용하였으며, Fig. 6과 같이 5만개 이상의 육면체 요소로 디스크 로터 유한요소해석 모델을 구성하여 고유진동수의 변화를 분석하였다.

4. 실험계획법을 활용한 BBD 실험설계 및 RSM 분석 결과

실험계획법을 적용하여 설계변수 독립인자와 진동모드

Table 2
Design variables and levels for design of experiment

Design variables	Level		
	L1	L2	L3
A : Vent_ratio (x ₁)	0.4	0.45	0.5
B : Fin-L3 (x ₂)	6.5	8.5	10.5
C : Undercut-L2 (x ₃)	5.5	6.0	6.5
D : Undercut-01 (x ₄)	55	60	65

Table 3
BBD (Box-Behnken design) set-up for design of experiment

Run	Design variables (Coded value)			
	Vent_Ratio	Fin-L3	Undercut-L2	Undercut-01
1	1	1	2	2
2	3	1	2	2
3	1	3	2	2
4	3	3	2	2
5	2	2	1	1
6	2	2	1	3
7	2	2	3	1
8	2	2	3	3
9	1	2	1	2
10	3	2	1	2
11	1	2	3	2
12	3	2	3	2
13	2	1	2	1
14	2	3	2	1
15	2	1	2	3
16	2	3	2	3
17	1	2	2	1
18	3	2	2	1
19	1	2	2	3
20	3	2	2	3
21	2	1	1	2
22	2	3	1	2
23	2	1	3	2
24	2	3	3	2
25	2	2	2	2
26	2	2	2	2
27	2	2	2	2



Fig. 7. Finite element analysis result example of vibration modal (OPD4) behavior of automotive brake disc rotor.

성능인자간의 상관성 분석을 위해 BBD법을 사용하여 실험설계를 실시하였으며, 종속인자 미치는 영향을 파악하기 위해 RSM법을 적용하였다. BDD 실험설계를 위한 독립변수 및 수준을 Table 2에 정리하였으며, Table 3에는 4요인 3 수준으로 27개의 실험계획서를 구성하여 브레이크 디스크 로터 형상을 설계한 후 유한요소해석을 통해 고유진동수 OPD4 결과를 분석 측정하였다.

특히, 브레이크 디스크 로터와 동적 변형으로 인해 디스크 스킵 소음(squeal noise)과 직결되는 특성을 나타내는 것으로 알려진 OPD 모드는 제동 면(disc rotor braking

Table 4
RSM analysis results of OPD4 modal behavior

No	Estimate	Std. error	Pr (> t)
Intercept	3.6923e+03	1.9329e+02	***
	-3.8023e+03	2.7079e+02	***
	1.8154e+02	5.9438e+00	***
	-3.1229e+01	3.0024e+01	
	-6.4167e-01	3.0024e+00	
	1.4200e+02	5.7764e+00	***
	1.2000e+02	2.3105e+01	***
	-5.6000e+00	2.3105e+00	*
	3.2500e-01	5.7764e-01	
	-1.2000e-01	5.7764e-02	
	-7.0000e-02	2.3105e-01	
	-2.6667e+01	2.0010e+02	
	-8.1885e+00	1.2506e-01	***
	-1.6667e-01	2.0010e+00	
	4.5833e-02	2.0010e-02	*

surface) 상에서의 진동 발생 모드로서, Fig. 7과 같이 4 번째 고유진동수에 의한 진동모드인 OPD4를 주요 성능 지표로 설정하였다. 고유진동수가 특정 목표값 이상이 되도록 하였으며, OPD4의 고유진동수 변화값이 평균 $\pm 3\%$ 이내가 되도록 목표하고 있다. 본 연구에서는 BBD법과 RSM 분석을 통해 OPD4 모드의 고유진동수와 밀접한 설계예측 회귀모델을 구하였다.

OPD4 측정결과를 바탕으로 RSM 분석결과를 Table 4에 나타내었으며, Probability(Pr)가 0.001보다 작으면 ***,

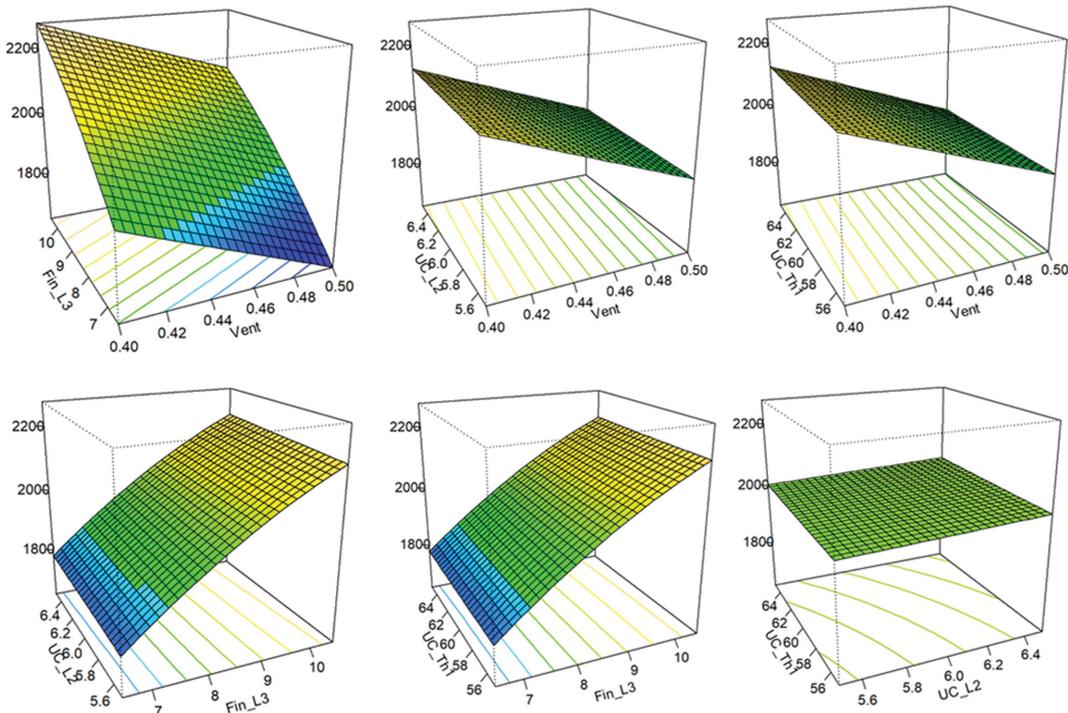


Fig. 8. Response surface analysis results for OPD4 behaviors of 18 inch automotive brake disc rotor as a function of vent_ratio, fin_shape, undercut_shape variables.

0.01보다 작으면 **, 0.05보다 작으면 * 로 표시하였다. 분석결과 OPD4에 대한 Pr 값이 0.01보다 작아 높은 유의성을 보여주고 있으며, R² 값은 1로서 높은 설명력을 보여주고 있다. 측정결과를 바탕으로 추정된 독립변수(설계변수)에 대한 종속변수(디스크 로터 진동모드)의 예측치는 식(1)로 구할 수 있다.

$$OPD4 = 3692 - 3802.3x_1 + 181.5x_2 + 142x_1x_2 + 120x_1x_3 - 5.6x_1x_4 - 8.1x_2^2 + 0.04x_4^2 \quad (1)$$

Figure 8에는 OPD4의 반응표현을 표시하였으며, 두 개의 독립변수 변화에 따른 OPD4 종속변수의 변화를 확인할 수 있다. 유의수준 0.01 기준으로 1차항 Vent_ratio, Fin-L3, 상호작용 Vent_ratio × Fin-L3, Vent_ratio × Undercut-L2, Vent_ratio × Undercut-θ1, 2차항 기준 Vent_Ratio², UC_θ1² 값이 각각 유의미한 결과를 나타냈다. 또한, 1차항, 2차항, 상호작용 모두 고유진동수에 미치는 영향이 유의미하며, 1차항, 2차항, 상호작용 모두에서 Fin-L3가 OPD4에 강한 영향을 주는 것으로 분석되었다. 이번 분석에서의 최적점은 Vent_ratio = 0.31, Fin-L3 = 13.69, Undercut-L2 = 18.31, Undercut-θ1 = 57.71으로 계산되었다.

5. 예측정확도 평가

RSM법을 적용한 디스크 로터의 OPD4 진동모드 예측의 정확성을 평가하기 위해 Table 5와 같은 추가 실험 계획을 수립하여 추가적인 실험을 실시하여 새로운 반응 표면에서의 오차를 비교하였다.

Table 6에는 브레이크 디스크 로터의 OPD4 예측치와 유한요소해석 결과를 비교하여 분석하였다. 분석결과 OPD4 예측치와 측정치 사이의 오차는 최대 3.53%, 평균오차는 1.47%로 나타났으며, RSM 분석을 통한 예측 모델이 정확한 것으로 판단된다. 18인치 디스크 로터에 대한 BBD 실험설계와 RSM 분석을 통해 성능 예측 회귀모델을 도출하였고, 이를 활용한 실험설계의 적정성을 확인하였다.

Table 5 Design parameter for design of experiment for evaluation experiment

Design parameter	Level		
	L1	L2	L3
A : Vent_ratio (x ₁)	0.27	0.375	0.48
B : Fin-L3 (x ₂)	4.0	8.5	13.0
C : Undercut-L2 (x ₃)	5.5	6.0	6.5
D : Undercut-θ1 (x ₄)	40	55	65

Table 6 Prediction evaluation error comparison between RSM and FEM analysis results of 18-inch brake disc rotor's OPD4 modal behavior

No	Estimate	FEM analysis	Error (%)
1	1892	1936	2.27
2	1295	1302	0.54
3	2576	2577	0.04
4	2247	2324	3.31
5	2160	2162	0.09
6	2177	2173	0.18
7	2172	2244	3.21
8	2187	2221	1.53
9	2401	2377	1.01
10	1925	1925	0
11	2399	2403	0.17
12	1949	2016	3.32
13	1583	1618	2.16
14	2418	2488	2.81
15	1612	1601	0.69
16	2420	2464	1.79
17	2388	2383	0.21
18	1943	2014	3.53
19	2419	2409	0.42
20	1944	1973	1.47
21	1589	1555	2.19
22	2406	2427	0.87
23	1598	1622	1.48
24	2418	2493	3.01
25	2169	2181	0.55
Average	2,091	2,116	1.47

6. 반응표면 모델에 의한 21인치 디스크 로터 신제품 설계 제안

자동차 브레이크 제조전문기업인 S사의 21 인치(inch) 브레이크 디스크 로터 신제품 개발을 위해, 본 연구에서는 고유진동수 성능인자의 대상을 확대하여 종속변수로서 OPD4, IPC1, IPC2를 대상으로 설계변수 4요인 3수준으로 27개 실험조건에 대한 BBD 실험설계와 RSM 분석을 실시하였고 분석결과를 Figs. 9~11에 나타냈다.

특히, Fig. 9에는 21인치 디스크 로터 설계조건에서 OPD4를 종속변수로 하는 RSM 분석 결과 Multiple R-squared 값이 0.9959로 높은 설명력을 보였으며, Fig. 10에는 21인치 디스크 로터 설계조건에서 IPC1을 종속변수로 RSM 분석 결과 Multiple R-squared 값이 0.9345, IPC2를 종속변수로 RSM 분석 결과 Multiple R-squared 값이 0.985로 각각 높은 설명력을 보이는 것으로 분석되었다.

앞서 생성된 반응표면법에 기반한 최적설계변수예측을 위해 주요 디스크 로터 동적 성능인자인 OPD4, IPC1, IPC2에 대한 회귀예측방정식을 도출한 결과는 식(2)~(4)와 같다.

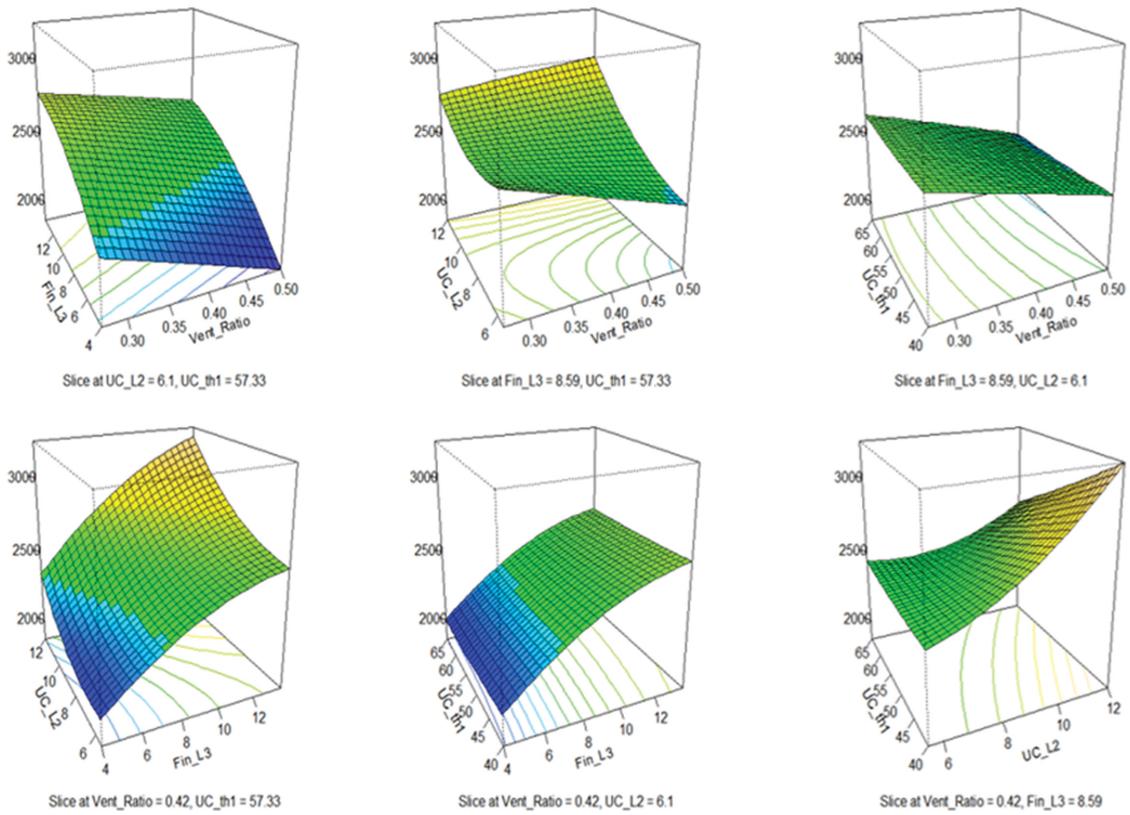


Fig. 9. Response surface analysis results for OPD4 behaviors of 21 inch brake disc rotor as a function of vent_ratio, fin_shape, undercut_shape variables.

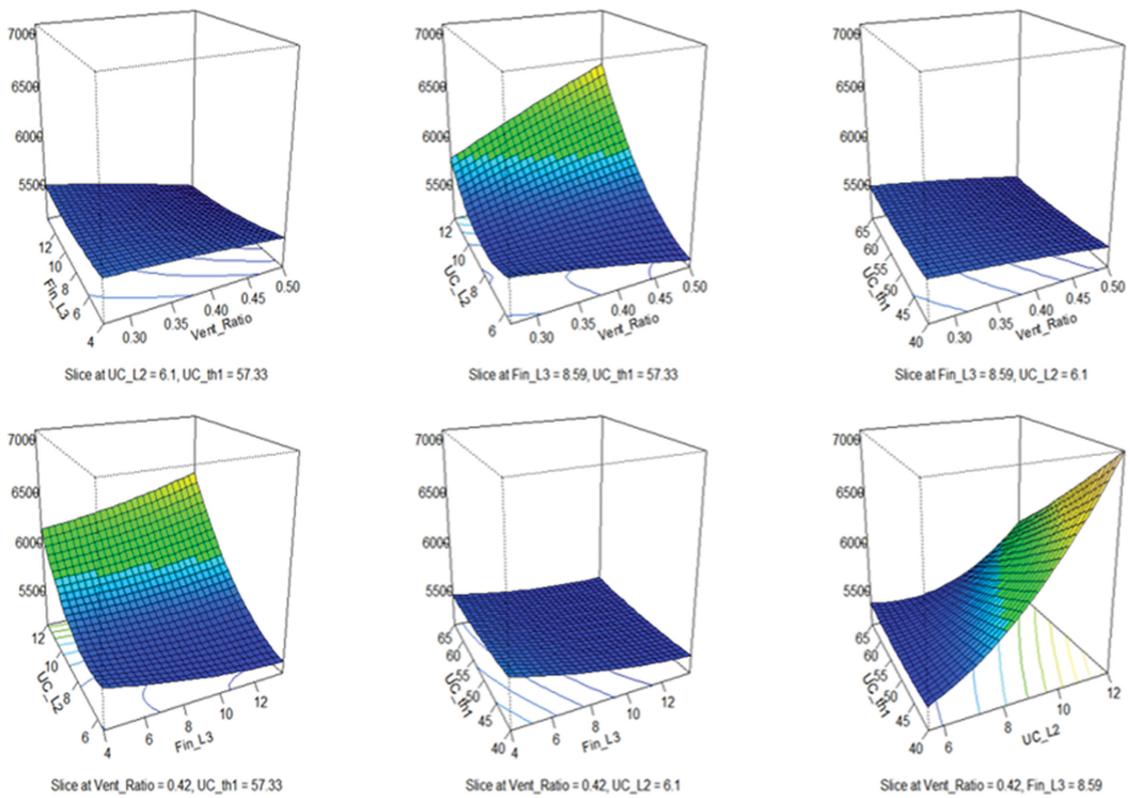


Fig. 10. Response surface analysis results for IPC1 behaviors of 21 inch brake disc rotor as a function of vent_ratio, fin_shape, undercut_shape variables.

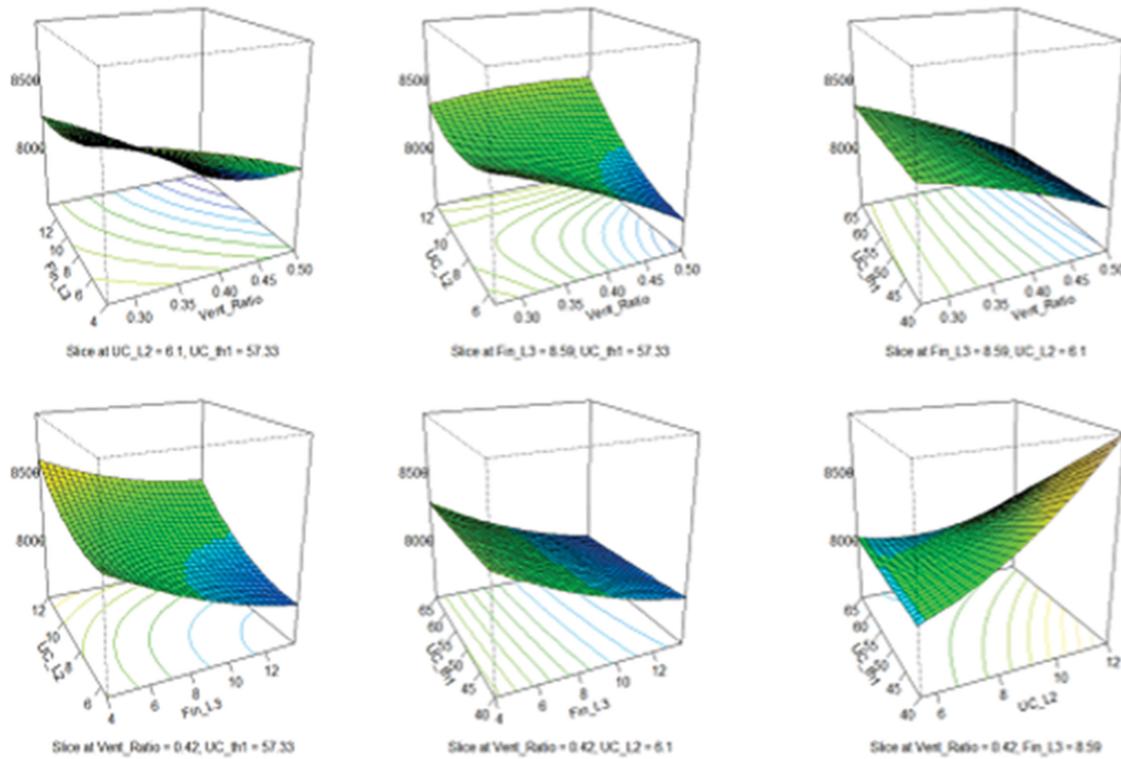


Fig. 11. Response surface analysis results for IPC2 behaviors of 21 inch brake disc rotor as a function of vent_ratio, fin_shape, undercut_shape variables.

$$\begin{aligned}
 OPD4 = & 2552 - 3328.5x_1 + 93x_2 - 94.9x_3 \\
 & + 16.6x_4 + 86.7x_1x_2 + 322.7x_1x_3 - 10.4x_1x_4 \\
 & + 3.4x_2x_3 + 0.01x_2x_4 - 3.5x_3x_4 - 220.4x_1 \\
 & - 4.8x_2^2 + 4.8x_3^2 + 0.07x_4^2
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 IPC1 = & 6775 - 2963.6x_1 + 93.2x_2 - 241.1x_3 \\
 & + 21.5x_4 - 115.x_1x_2 + 729.4x_1x_3 - 9.4x_1x_4 \\
 & + 9.6x_2x_3 + 0.5x_2x_4 - 7.2x_3x_4 - 1162.2x_1^2 \\
 & + 1.8x_2^2 + 23.8x_3^2 + 0.2x_4^2
 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
 IPC2 = & 8244.4 - 44.9x_1 + 48.4x_2 + 33.1x_3 \\
 & + 21.5x_4 - 115.x_1x_2 + 729.4x_1x_3 - 9.4x_1x_4 \\
 & + 9.6x_2x_3 + 0.5x_2x_4 - 7.2x_3x_4 - 1162.2x_1^2 \\
 & + 1.8x_2^2 + 23.8x_3^2 + 0.2x_4^2
 \end{aligned} \tag{4}$$

따라서 디스크 로터의 고유진동수는 디스크 로터의 벤트 비율(vent ratio), Fin 형상변수(Fin-L3), 언더컷 형상 각도(undercut-θ1)와 언더컷 형상 두께(undercut-L2) 순으로 주효과도가 큰 것을 알 수 있으며, 또한, 교호효과도를 나타내는 인자는 (vent_ratio × undercut-L2), (vent_ratio × Fin-L3), (Fin-L3 × undercut-L2) 순으로 교호효과가 큰 것을 확인하였다. 이때 이때 Fin 형상 변수의 Pr-value는 4.77e-06으로, (vent_ratio × undercut-L2)의 Pr-value가 3.88e-07로 각각 산출되어 유의미한 신뢰구간을 나타내었다.

또한, 1차항, 2차항, 상호작용 모두에서 벤트 비율과

Table 7 Prediction evaluation error comparison between RSM and FEM analysis results of 21-inch brake disc rotor's modal behavior

Response variable (Y)	Estimate	FEM analysis	Error (%)
OPD4	4,082	4,127	1.1
IPC1	6608	6772	2.4
IPC2	9945	10055	1.1

Fin 형상변수(Fin-L3)가 OPD4에 강한 영향을 주는 것으로 분석되었다. 이번 분석을 통해 21인치 브레이크 디스크 로터의 최적점은 Vent_Ratio = 0.308, Fin-L3 = 13.69, Undercut-L2 = 12.0, Undercut-θ1 = 57.706으로 산출되었다.

RSM 분석에서도 출된반 응표면회귀식(2), (3), (4)의 제품설계최적화에 대한 유용성을 평가하기 위해 21인치 디스크 로터 신규개발설계에 적용하여 유한요소해석 결과와 비교 결과를 Table 7에 나타내었으며, OPD4, IPC1, IPC2 성능 목표 오차 범위 3% 이내의 신뢰성 있는 예측이 이루어졌다.

7. 결 론

본 연구에서는 자동차 브레이크 디스크 로터의 스킬

소음과 밀접한 고유진동수 특성과 밀접한 설계변수 도출과 최적설계예측회귀모델을 확립하고자, BBD법을 활용한 실험설계와 RSM 분석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 18인치 브레이크 디스크 로터에 대한 유한요소해석을 통해 브레이크 성능에 미치는 영향도가 크며, 제조공정상 중요 설계인자인 벤트 비율(x_1), 핀 형상 두께(x_2), 언더컷 두께(x_3), 언더컷 각도(x_4)를 우선 최적화설계 독립변수로 설정하였고, 고유진동수 OPD 모드와 IPC 모드의 성능변수(Y)를 종속반응변수로 설정 하였다. 최적설계를 위한 예측회귀방정식 도출을 통해 유의성을 검증한 결과, OPD4에 대한 Pr 값이 0.01보다 작아 높은 유의성을 보여주고 있으며, R^2 값은 1로서 높은 설명도가 유의성이 높음을 알 수 있었다.

2) 브레이크 제동시 발생하는 스퀸 노이즈와 밀접한 OPD4의 주효과인자는 디스크 로터상의 벤트 비율, 냉각 핀 언더컷 두께와 언더컷 각도 순으로 나타났다.

3) 21인치 브레이크 디스크 로터 신제품개발을 위해 종속변수인 고유진동수 성능인자의 대상을 확대하여 OPD4, IPC1, IPC2를 대상으로 설계변수 4요인 3수준으로 27개 실험조건에 대한 BBD 실험설계와 RSM 분석을 통해 도출된 최적설계 회귀모델은 FEM 해석과 비교하여 최대 3% 이내의 설계예측 신뢰성을 가지는 결과를 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2023년도 한국교통대학교의 지원을 받아 수행한 연구임.

References

- [1] Deloitte, "2023 Global automotive consumer study, key findings: global focus", Deloitte Development LLC (2023).
- [2] S.M. Jeon, C. Kim, Y.C. Lee, M.J. Cho and N.J. Jeon, "Design optimization of a brake disc considering frictional clamping conditions", Transactions of KSAE (2011) 1739.
- [3] C. Kim, Y. Kwon and D. Kim, "Analysis of low-frequency squeal in automotive disc brake by optimizing groove and caliper shapes", Int. J. Precis. Eng. Manuf. 19 (2018) 505.
- [4] J.N. Reddy, "Finite element method", McGraw Hill (1993).
- [5] K.J. Bathe, "Finite element procedures", Prentice Hall (1996).
- [6] A.I. Khuri and S. Mukhopadhyay, "Response surface methodology", WIREs Comp Stats 2 (2010) 128.
- [7] S.C. Ferreira, R.E. Bruns, H.S. Ferreira, G.D. Matos, J.M. David, G.C. Brandao and W.N.L. DosSantos, "Box behken design : An alternative for the optimization of analytical methods", Anal. Chim. Acta 597 (2007) 179.
- [8] T. Okamura, H. Yumoto and M. Imasaki, "Factorial effect analysis of material and dimensional properties of brake discs for reducing variation in natural frequencies", SAE Tech. Pap. No. 2008-01-2533 (2008).
- [9] C.G. Seo, "Optimization of natural frequency and minimization of frequency variation on OPD/IPC vibrational mode of ventilated disc rotor", Kyungpook National University (2015).
- [10] B.C. Song, D.H. Kang, Y.H. Kim, Y.C. Park and K.H. Lee, "Structural design of a circumferential friction disc-brake, considering thermoelastic instability", J. Korean Soc. Manuf. Process Eng. 6 (2007) 38.
- [11] P.A. Meehan and A.C. Leslie, "On the mechanisms, growth, amplitude and mitigation of brake squeal noise", Mech. Syst. Signal Process. 152 (2021) 231.
- [12] A. Priftis, E. Boulougouris, O. turan and G. Atzamos, "Multi-objective robust early stage ship design optimisation under uncertainty utilising surrogate models", Ocean Eng. 197 (2020) 352.
- [13] C. Liu, J. Li and X. Xu, "Application of improved RSM in the optimization of automotive frontal Crashworthiness", J. Transp. Technol. 6 (2016) 155.