



## 고속 회전체의 공진 회피 설계 최적화

김종윤<sup>a</sup>, 김재웅<sup>b</sup>, 김성걸<sup>b,\*</sup>

### Optimization of Resonance Avoidance Design for High-Speed Machines

Jong Yun Kim<sup>a</sup>, Jae Woong Kim<sup>b</sup>, Seong Keol Kim<sup>b,\*</sup><sup>a</sup> Department of Mechanical Design and Robot Engineering, Seoul National University of Science and Technology<sup>b</sup> Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received	26	June	2025
Revised	31	July	2025
Accepted	26	August	2025

##### Keywords:

Modal analysis  
High speed machine  
Optimization  
RSA  
K-NN

#### ABSTRACT

In this study, the design parameters affecting the natural frequency of high-speed machines were optimized. Accurate frequency prediction to avoid resonance is essential during the design stage. Response Surface Method (RSM) and K-Nearest Neighbor algorithm (K-NN) were used as prediction models for optimization. The optimization technique using RSM successfully achieved the target natural frequency, with reliability of the results confirmed by mode matching. Similarly, the K-NN predictions showed similar trends. Accurate prediction was possible with both methods within the search range of the design variables. These findings demonstrate that both approaches can complement each other, providing robust prediction and optimization capability. The results provide useful guidelines for resonance-avoidance design of high-speed rotating systems.

## 1. 서론

산업 현장에서 사용되는 다양한 고속 회전체(high-speed machine)는 생산성 향상과 장비 소형화를 가능하게 하지만, 구조적 진동 문제는 기계의 신뢰성과 수명을 저하시킬 수 있는 요인이 된다. 특히 회전체의 고유진동수가 운전 속도와 일치해 공진 현상이 발생할 경우, 체결의 와해, 부품의 피로 파손, 작동 불능 상태를 유발할 수 있다. 공진을 방지하기 위해 설계 단계에서부터 공진을 사전에 회피할 수 있도록 진동 특성을 예측하고 설계를 최적화하는 기술이 요구된다.

기존 연구에서는 유한요소해석(finite element analysis, FEA)을 기반으로 고유진동수를 도출하고, 설계 변수에 대한 단순 민감도 분석을 통해 공진 회피 설계를 수행한 바 있다<sup>[1]</sup>. 그러나 이러한 접근 방식은 탐색 가능한 설계 공간이 제한적으로 나타난다. 이에

따라 보다 정밀한 기법이 요구되고 있다. 본 연구는 권취 설비에 사용되는 고속 회전체를 대상으로 하며, 선행 연구에서 수행된 모달 테스트(modal testing)를 통해 유한요소모델(FE model)의 신뢰성을 확보하였다<sup>[2]</sup>. 이를 바탕으로 본 논문에서는 표면반응 분석법(response surface method), 유전 알고리즘(genetic algorithm), 최근접 이웃 알고리즘(k-nearest neighbor, K-NN)을 활용하여 3차 모드 기준의 고유진동수에 대한 예측을 수행한다. 이를 통해 공진을 회피하는 설계를 제시하고자 한다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 모드 해석

모드 해석은 구조물의 고유진동수와 모드 형상을 계산하며 시스템의 질량 행렬  $M$ 과 강성 행렬  $K$ 를 바탕으로 고유치 분

\* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6855

E-mail address: rhett@seoultech.ac.kr (Seong Keol Kim).

제로 정의된다<sup>3)</sup>.

$$(K - \omega^2 M)\phi = 0 \quad (2-1)$$

식 (2-1)에서  $\omega$ 는 고유진동수,  $\phi$ 는 고유벡터이다.

## 2.2 표면반응 분석법

표면반응 분석법은 이차 회귀 모델을 통해 입력 변수와 출력 간 관계를 근사한다.

$$y = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \beta_{ii} x_i^2 + \sum \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (2-2)$$

식 (2-2)에서  $y$ 는 출력,  $\beta$ 는 회귀 계수,  $x$ 는 입력 변수,  $\epsilon$ 는 오차항이다. 실험 설계를 위해 중심합성계획법(CCD)을 적용하였다. 중심합성계획법은 인접점(cube point), 축점(axial point), 중심점(center point)으로 구성되어 있다. 추후 기술할 설계 변수인 재료값과 베어링 등가강성 값들의 수준을 지정하여 응답표면을 구축하였다. 최적화는 유전 알고리즘을 적용하였다<sup>4)</sup>. 유전 알고리즘은 표면반응 분석법을 통해 근사한 고유진동수 예측 모델을 바탕으로 공진 회피 최적 설계 조건을 도출하는데 사용된다. 설계 변수의 가능한 조합을 탐색하면서 예측된 고유진동수 값이 목표에 근접하는 해를 도출한다.

## 2.3 최근접 이웃 알고리즘

최근접 이웃 알고리즘은 주어진 입력에 대해 가장 가까운 학습 데이터를 찾아, 해당 출력들의 평균으로 예측값을 산출한다<sup>5)</sup>.

$$\hat{y}(x) = (1/K) * \sum [y_i], i \in N_K(x) \quad (2-3)$$

식 (2-3)에서  $\hat{y}(x)$ 는 예측된 출력 값,  $N_K(x)$ 는 입력  $x$  주변의  $K$ 개 최근접 이웃,  $y_i$ 는 학습 데이터의 기존 출력 값이다. 또한 거리 계산은 유클리디안 거리를 따른다. 본 연구에서는 K-NN 알고리즘을 활용하여 고유진동수를 예측하고, 이를 표면반응 분석법 기반의 회귀모델 및 유전 알고리즘을 통해 도출된 최적 설계 결과와 비교함으로써 K-NN의 예측 신뢰성을 검증하였다.

## 3. 설계 변수 선정

본 연구에 사용되는 고속 회전체는 권취 설비의 일부로서 고속 회전에 의해 실을 감는 기능을 수행한다. 대상 회전체는 슬리브(sleeve), 셸(shell), 링(ring), 베어링(BRG) 등으로 구성되며 Fig. 1은 해당 회전체의 형상 및 구조를 나타내며 정밀 모델로 부른다. 해당 회전체는 한쪽 끝이 고정되고 다른 한쪽은 자유단 조건 하에



Fig. 1 Schematic diagram of the high speed machine

Table 1 Result of modal analysis with free boundary condition

Mode	Natural frequency [Hz]
1	17.819
2	17.866
3	102.95
4	102.99

설치되어 있다. 고속 회전체의 고유진동수는 상용 소프트웨어인 ANSYS의 모드해석을 통해 도출하였으며, 그 결과는 Table 1에 제시하였다. 분석 결과, 기존 운전 속도인 5,600 rpm(reveloution per minute)부터 6,000 rpm까지 회전수를 증가시킬 경우 약 100 Hz 부근에서 회전체의 3차 모드 근접하는 영역이 존재하여 공진 가능성이 있는 것으로 나타난다.

공진을 회피하기 위해 수정할 수 있는 부품은 슬리브와 셸이며, 슬리브 재료(AL 6061-T6)의 E값, 셸의 재료(SCM 435)의 E값, 그리고 베어링 6011의 K값(등가 강성)을 설계 변수로 지정하였다<sup>6)</sup>. 또한 설계 변수 최적화는 ANSYS 내 Design Xplorer를 활용하였으며, 100 Hz의 10%이상인 115 Hz의 도달 가능 여부를 선정기준으로 최적화를 진행했다.

## 4. 표면반응 분석법 및 최적화

### 4.1 표면반응 분석법

앞서 지정한 설계 변수인 슬리브 재료(AL 6061-T6)의 E값, 셸의 재료(SCM 435)의 E값, 그리고 베어링 6011의 K값(4개 지점 분리)을 입력 변수로 지정하고, 회피하고자 하는 고유진동수인 3차 모드를 출력 변수로 설정하였다. 실험계획법은 중심합성계획법을 활용하여 구성하였으며, 실험점의 분포 및 수준은 Table 2에, 각 설계 변수 조합에 따른 고유진동수 결과는 Table 3에 정리하였다.

입력 변수는 총 6개이며, P1은 슬리브 재료의 E값, P2는 셸 재료의 E값, P3는 3차 모드의 고유진동수 값, P4는 4차 모드의 고유진동수 값, P5, P6, P7, P8은 베어링 6011을 스프링으로 대체한 등가 강성 K값이다. 이를 시각적으로 표현하기 위해 Fig. 2에는 페어 플롯(Pair plot) 형태의 산점도 행렬을 제시하였으며, 다차원 변수 간 분포를 시각적 표현을 하기 위해 나타내었으며<sup>6)</sup>, 슬리브 재료의 탄성계수인 E1과 셸 재료의 탄성계수 값인 E2, 베어링 등가강성 K값 들은 이산 수준으로 구분되어 있는 것을 확인할 수 있다.

표면반응 분석법(response surface method)을 통해 각 입력 변수가 출력에 미치는 영향을 정량적으로 분석할 수 있으며, 이는

**Table 2 Design parameters of experiments**

Parameter	Name	Lower bound	Upper bound
P1	Young's modulus [GPa]	68.9	206.7
P2	Young's modulus [GPa]	190	380
P5	Equivalent stiffness 1 [kN/mm]	11.581	34.743
P6	Equivalent stiffness 2 [kN/mm]	11.581	34.743
P7	Equivalent stiffness 3 [kN/mm]	11.581	34.743
P8	Equivalent stiffness 4 [kN/mm]	11.581	34.743
P3	Frequency [Hz]	-	-
P4	Frequency [Hz]	-	-

**Table 3 Parameters of design experiments**

DOE index	P1 [GPa]	P2 [GPa]	P5 [kN/mm]	P6 [kN/mm]	P7 [kN/mm]	P8 [kN/mm]	P3 [Hz]	P4 [Hz]
1	137.8	285	23.162	23.162	23.162	23.162	132.207	132.253
2	68.9	285	23.162	23.162	23.162	23.162	126.148	126.191
3	206.7	285	23.162	23.162	23.162	23.162	137.854	137.901
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
43	177.626	230.088	29.856	29.856	29.856	16.468	127.613	130.081
44	97.974	339.912	29.856	29.856	29.856	16.468	135.631	138.461
45	177.6	339.912	29.856	29.856	29.856	29.856	144.830	144.884

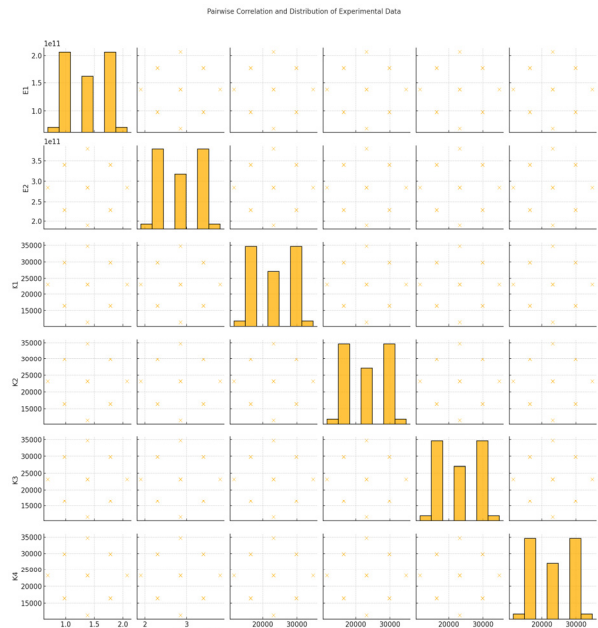
국소 민감도(local sensitivity) 분석으로 대표된다. 국소 민감도는 특정 설계점에서 출력 응답에 대한 각 입력 변수의 기여도를 수치적으로 표현한 지표로, 입력 변수의 변화에 기반하여 출력 값의 최대치와 최소치의 차이를 평균으로 나눈 상대 변화율 방식으로 산출된다.

Fig. 3은 입력 변수들이 3차 모드의 고유진동수(P3)에 미치는 영향을 나타내며, Fig. 4는 4차 모드의 고유진동수(P4)에 대한 민감도 분석 결과를 보여준다. 3차 모드, 4차 모드 모두에서 가장 큰 영향을 미치는 변수는 P2로, 이는 쉘(shell)의 재료 탄성계수(Young's modulus)를 의미한다. 그 다음으로는 P1(슬리브 재료의 탄성계수), 그리고 P5~P8에 해당하는 베어링 6011의 등가 강성 값들이 순차적으로 영향을 미치는 것으로 나타났다.

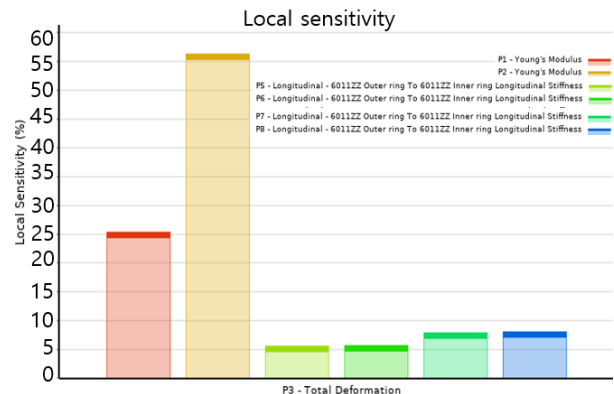
한편, P5~P8은 베어링들을 스프링으로 등가화 시키는 과정에서 2개의 축에 대해 등가 강성을 가지게 되며 따라서 Fig. 3과 4에서 오른쪽에 나열된 4개의 막대는 베어링 위치별 설계변수들이 독립적으로 출력 응답에 영향을 미친 정도를 각각 시각화한 것이다<sup>[7-9]</sup>.

**4.2 최적화**

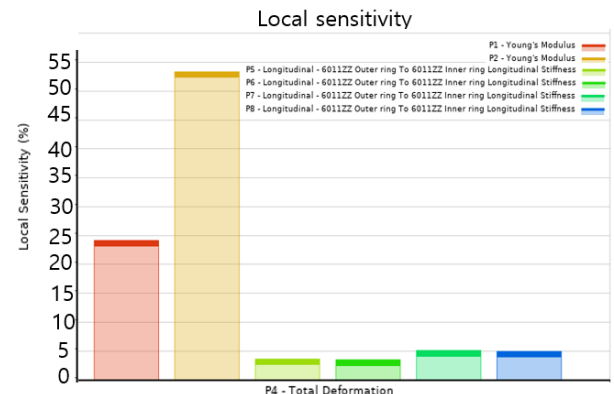
최적화 알고리즘은 ANSYS에서 제공하는 유전 알고리즘<sup>[10]</sup> 을



**Fig. 2 Pairwise distribution of parameters**



**Fig. 3 Local sensitivity for mode 3**



**Fig. 4 Local sensitivity for mode 4**

사용하였으며, 출력이 2개 이므로 다목적 유전 알고리즘(multi-objective genetic algorithm)을 사용하였다. 입력 변수의 수준 내에서 출력을 102.95 Hz에서 10% 이상인 115 Hz으로 목표로써

**Table 4 Candidate points of optimization**

Candidate points	1	2	3
P1 [GPa]	77.348	83.978	106.183
P2 [GPa]	216.186	196.881	191.779
P5 [kN/mm]	17.556	32.426	24.923
P6 [kN/mm]	27.144	17.335	15.288
P7 [kN/mm]	16.527	29.487	25.276
P8 [kN/mm]	18.843	27.175	22.53
P3 [Hz]	114.997	115.1309	114.947
P4 [Hz]	115.012	115.00791	115.049

**Table 5 Result of optimization for 3 design parameters**

	Candidate 1	Candidate 2	Candidate 3
P1 [GPa]	77.348	83.978	106.183
P2 [GPa]	216.186	196.881	191.779
P5-P8 (avg) [kN/mm]	20.018	26.606	22.004

**Table 6 Result of modal analysis based on optimization result**

Mode	Natural frequency [Hz]	
	Candidate 1	Candidate 3
1	19.469	19.172
3	115.58	114.83

지정하면 사용할 수 있는 후보들이 출력되며 이는 Table 4에 게시하였다. Table 5에는 Table 4의 캔디데이트(candidate)에 표현된 베어링 등가 강성 값들의 차이를 고려하기 위해서 평균값으로 통합하였으며 그 결과를 표현하였다<sup>[11]</sup>. 그 중 캔디데이트 1과 3을 활용하여 모드 해석을 통해 얻은 결과는 Table 6과 같으며 캔디데이트 1의 경우 1차 모드에서 19.172 Hz, 3차 모드에서 115.58 Hz를 보인다. 캔디데이트 3의 경우 1차 모드에서 19.172 Hz, 3차 모드에서 114.83 Hz를 보인다. 캔디데이트 1, 3을 반영한 모드는 Fig. 5, 6과 같다.

## 5. 다중 출력 회귀 분석

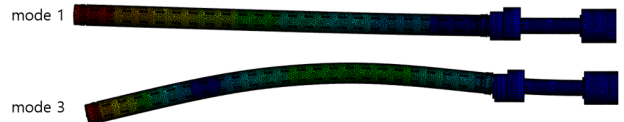
### 5.1 최근접 이웃 알고리즘 기반 다중 출력 회귀 분석

최근접 이웃 알고리즘<sup>[12-14]</sup>은 비모수적 회귀 기법으로 주어진 입력에 대해 가장 근접한 데이터를 기반으로 출력값을 예측한다. 입력과 출력의 관계를 선형적인 관계로 모델링했을 때 유리하다<sup>[15,16]</sup>. 본 연구에서는 목표 고유진동수를 기준으로 구조물의 설계변수를 예측하고, 이를 통해 정방향 고유진동수를 복원하여 예측 정확성을 확인하였다. 분석은 다음의 절차로 수행되었다.

최근접 이웃 알고리즘 목표 고유진동수를 2차원 벡터 입력으로 설정한 뒤, 이를 바탕으로 3개의 최근접 이웃을 K-NN로 탐색하였다. 이때 최근접 이웃의 설계변수를 평균하여 예측값으로 사용하



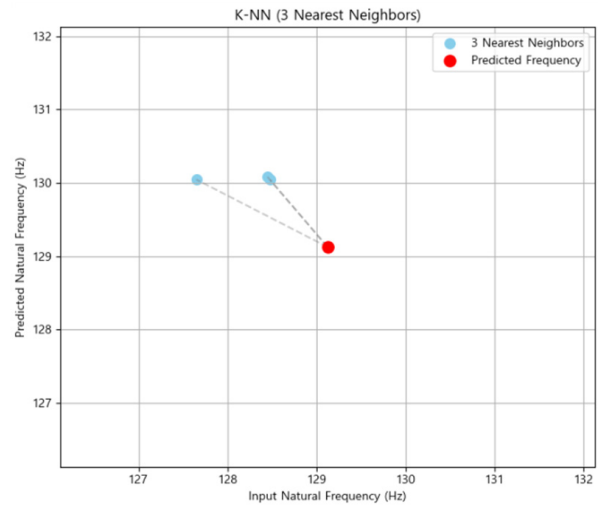
**Fig. 5 Candidate 1 result of modal analysis with free boundary condition**



**Fig. 6 Candidate 3 result of modal analysis with free boundary condition**

**Table 7 Euclidean distance and neighbor frequency**

Index	Distance	Frequency (train)
1	0.545	128.72
2	0.626	129
3	0.762	128.87



**Fig. 7 Euclidean distance and neighbor data near 129 Hz**

였다. 예측된 설계변수는 다시 K-NN 모델에 입력되어 고유진동수를 복원하였다. 이때 사용된 3개의 최근접 고유진동수들의 평균을 최종 예측 고유진동수로 정의하고 학습한 데이터와의 차이가 1 Hz 이하일 경우 예측 일치성이 확보된 것으로 간주하였다. 예측된 설계변수와 학습 데이터 간의 유클리디안 거리(Euclidean distance)<sup>[17]</sup>는 식 (5-1)을 기반으로 하며, 가장 근접한 3개의 이웃을 도출하였다. 이러한 과정은 129 Hz를 예시로 Table 7과 Fig. 7에 과정을 표현하였다.

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (5-1)$$

**Table 8 Result of optimization for 3 design parameters**

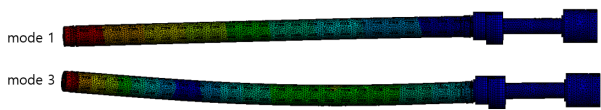
Candidate points	a	b	c
P1 [GPa]	178	178	165
P2 [GPa]	230	230	353
P5 [kN/mm]	25.393	20	23.162
P6 [kN/mm]	25.393	20	23.162
P7 [kN/mm]	25.393	20	27.625
P8 [kN/mm]	29.856	20	27.625

**Table 9 Result of k-nn parameters**

Mode	Natural frequency [Hz]		
	a	b	c
1	19.804	20.376	22.068
3	118.37	126.72	136.46



**Fig. 8 Result of modal Analysis with k-nn parameter a**



**Fig. 9 Result of modal analysis with k-nn parameter b**



**Fig. 10 Result of modal analysis with k-nn parameter c**

여기서  $x$ 는 예측된 설계변수 벡터,  $y$ 는 각 학습 데이터의 설계변수 벡터이며,  $n$ 은 3이다.

Table 8에는 115 Hz, 129 Hz, 150 Hz를 예측했을 때 설계 변수의 값을 각각 a, b, c에 제시하였으며, Table 9에는 Table 7의 설계 변수 값을 모드 해석에 넣었을 때 결과 값을 제시하였다. K-nn parameter 기반 a, b, c를 반영한 모드 형상은 Fig. 8, 9, 10과 같다.

**5.2 결과**

선정한 3개의 설계 변수를 대상으로 3차 모드의 고유진동수를 115 Hz로 목표로써 최적화를 진행하였다. 또한 최근접 이웃 알고리즘을 이용하여 115 Hz, 129 Hz, 150 Hz를 추출하여 후보군을 도출하였다.

**Table 10 Comparison optimization and k-nn results with target frequency 115 Hz**

Mode	Natural frequency [Hz]					
	Candidate 1	%	Candidate 3	%	Candidate a	%
1	19.469	-	19.172	-	19.634	-
3	115.58	0.5%	114.83	0.15%	118.37	2.93%

먼저 3차 모드를 115 Hz로 예측한 결과는 최적화를 통한 결과는 Table 6과 같이 캔디데이트 1의 경우 115.83 Hz, 캔디데이트 3의 경우는 114.83 Hz를 얻는다. 최근접 이웃 알고리즘을 활용한 결과는 Table 9의 a와 같이 118.37 Hz의 결과값을 얻었다. 각 결과와 목표인 115 Hz의 차이를 나타내면 Table 10과 같이 나타나며, 최적화를 통해 도출한 캔디데이트 1의 경우 차이는 0.5%, 캔디데이트 3의 경우 0.15%, 최근접 이웃 알고리즘을 활용한 캔디데이트 a의 경우는 1.36%이다.

최근접 이웃 알고리즘을 활용해 기존 102.95 Hz에서 25%, 45%를 증가시킨 129 Hz와 150 Hz를 예측한 후보를 활용해 나타난 모드 해석 결과는 126.72 Hz, 136.46 Hz이다.

결론적으로 슬리브의 재료(AL 6061-T6) E값, 셸의 재료(SCM 435) E값을 각각 12.2%, 13.7% 증가시키고, 6011 베어링의 K값을 기존보다 72.9% 증가시켰을 때 주요 모드인 3차 모드에서 공진을 회피할 수 있다. 이후 캔디데이트 1을 유한요소모델에 적용한 결과 Table 3와 같이 목표 고유진동수에 도달함을 확인하였고, Fig. 2와 같이 모드 형상이 기존과 동일함을 통해 최종 결과의 신뢰성을 검증하였다.

최적화를 통해 도출한 캔디데이트 포인트 3는 슬리브의 재료(AL 6061-T6) E값, 셸의 재료(SCM 435) E값을 각각 54.11%, 0.94% 증가시켰으며, 6011 베어링의 K값을 기존보다 90.0% 증가시켰다. 그 결과는 Table 6과 같이 Mode 3에서 114.83 Hz로 나타났으며 예측한 115 Hz에 비해 0.15% 차이를 보인다.

또한 최근접 이웃 알고리즘을 통해 115 Hz를 예측한 캔디데이트 a를 모드 해석에 적용한 결과는 118.37 Hz의 결과를 얻을 수 있었고 예측한 115 Hz에 비해 2.93%의 차이를 보이고 최적화 결과인 114.83 Hz과는 3.08%의 차이를 가진다.

최근접 이웃 알고리즘 방법으로 129 Hz와 150 Hz를 예측하였을 때의 도출한 후보군은 Table 7의 캔디데이트 b와 캔디데이트 c이다.

캔디데이트 b의 경우, 슬리브의 재료(AL 6061-T6) E값, 셸의 재료(SCM 435) E값을 각각 58.35%, 21.05% 증가시켰으며, 베어링 6011의 K값을 기존보다 72.70% 증가시켰다.

캔디데이트 c의 경우, 슬리브의 재료(AL 6061-T6) E값, 셸의 재료(SCM 435) E값을 각각 39.48%, -14.21% 증감시켰으며, 베어링 6011의 K값을 기존보다 유지하거나 38.53% 증가시켰다. 캔디데이트 b와 c를 활용한 모드 해석 결과는 각각 126.72 Hz,

136.46 Hz이며, 예측과의 차이는 1.77%, 9.03%를 보인다.

## 6. 결론

본 연구에서는 고속 회전체의 운전 속도에 근접하는 3차 고유진동수에 대한 공진 회피를 목표로, 설계 변수인 슬리브 및 쉘의 재료 탄성계수와 베어링의 등가 강성을 최적화하여 공진을 회피할 수 있는 조건을 도출하였다.

표면반응분석법 기반의 최적화 결과와 최근접 이웃 알고리즘을 이용한 예측 결과는 실제 유한요소 해석을 통해 그 유효성이 확인되었다.

특히, 최적화 결과로 도출된 캔디데이트는 목표 주파수인 115Hz에 0.15% 이내의 오차를 보이며 가장 우수한 성능을 나타냈다. K-NN 알고리즘 역시 근사한 설계 조건을 제시하였으며, 2~3% 수준의 오차로 비교적 정확한 결과를 확보하였다.

또한 K-NN 기반으로 확대 예측한 129 Hz 및 150 Hz 결과 또한 모드 해석 결과와 비교적 일치하나 예측 범주 외에서는 비교적 적은 가능성을 확인할 수 있었다.

결과적으로, 설계 변수에 대한 표면 반응 분석법 기반 유전 알고리즘 최적화 방법은 정밀한 고유진동수 조정에 유리하다. K-NN 알고리즘은 빠른 설계 탐색에 효과적임을 확인하였다. 다만, 최적화 과정에서 제시된 설계 변수의 변화량은 단일 재질의 고정된 물성으로는 직접적으로 구현하기 어렵다. 그러나 본 연구는 물성의 변동 범위와 산업 협력 과정에서 재질 및 부품 특성 조정의 가능성을 고려하여 설계 조건 탐색에 초점을 두었다.

본 연구는 수치 해석 및 예측 모델 검증에 중점을 두어 수행되었기 때문에, 시제품 제작 및 실험 검증 과정은 포함하지 않았다. 따라서 향후 연구에서는 제시된 최적 설계 조건을 반영한 시제품 제작과 실험을 통해 수치 결과의 실제 유효성을 추가적으로 검증할 필요가 있다.

## References

- [1] Kim, J. Y., 2022, Development of Bobbin Holder FE Modeling Consider Vibration, Master Thesis, Seoul National University of Science and Technology, Republic of Korea.
- [2] Kim, J. Y., Kang, J. W., Kim, S. K., 2022, Development of a Computer Simulation Model for Bobbin Holders Considering Vibrations, *J. Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 31:4 263-270, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2022.31.4.263>.
- [3] Kim, B. W., Kyoung, J. H., Hong, S. Y., Cho, S. K., Lee, I. W., 2005, Investigation of Efficiency of Starting Iteration Vectors for Calculating Natural Modes, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, 15:1 112-117, <https://doi.org/10.5050/ksnvn.2005.15.1.112>.
- [4] Myers, R. H., Montgomery, D. C., Vining, G. G., Borror, C. M., Kowalski, S. M., 2004, Response Surface Methodology: A Retrospective and Literature Survey, *J. Qual. Technol.*, 36:1 53-77, <https://doi.org/10.1080/00224065.2004.11980252>.
- [5] Halder, R. K., Uddin, M. N., Uddin, M. A., Aryal, S., Khraisat, A., 2024, Enhancing K-Nearest Neighbor Algorithm: A Comprehensive Review and Performance Analysis of Modifications, *J. Big Data*, 11 113, <https://doi.org/10.1186/s40537-024-00973-y>.
- [6] Archambault, D., Munzner, T., Auber, D., 2024, Tugging Graphs Faster: Efficiently Modifying Path-Preserving Hierarchies for Browsing Paths, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 17:3 276-289, <https://doi.org/10.1109/TVCG.2010.60>.
- [7] Lee, J. H., Shin, D. H., Kim, S. K., 2018, Dynamic Analysis of a High-Speed Winding Machine by Changing Design Parameters, *J. Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 27:2 112-119, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2018.27.2.112>.
- [8] Kim, J. Y., Park, D. H., Kim, S. K., 2021, Modal Analysis of a High-Speed Winder with Optimization, *J. Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 30:4 301-307, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2021.30.4.301>.
- [9] Park, B. G., Jo, S. O., Park, D. K., Jeong, H. J., Lee, S. G., 2016, Development of Vibration Characteristic Analysis Method for the High-Speed Winder Spindle, *Proc. Korean Soc. Mech. Eng. Spring Conf.*, 380-381, <<https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE06660638>>.
- [10] ANSYS, Inc., n.d., viewed 13 May 2025, <[https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secure/corp/v251/en/opti\\_pdo/opti\\_pdo\\_regression\\_models\\_for\\_scalar\\_outputs.html?q=GENETIC%20AGGREGATION](https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secure/corp/v251/en/opti_pdo/opti_pdo_regression_models_for_scalar_outputs.html?q=GENETIC%20AGGREGATION)>.
- [11] Kim, J. W., Kim, S. K., 2022, Modal Analysis of a Bobbin Holder to Avoid Resonance During High Speed Operation, *Proc. Korean Soc. Manuf. Technol. Autumn Conf.*, 250, <<https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE11211057>>.
- [12] Lu, J., Qian, W., Li, S., Cui, R., 2021, Enhanced K-Nearest Neighbor for Intelligent Fault Diagnosis of Rotating Machinery, *Appl. Sci.*, 11:3 919, <https://doi.org/10.3390/app11030919>.

- [13] Ha, D., Ahmed, U., Pyun, H., Lee, C. J., Baek, K. H., Han, C., 2017, Multi-Mode Operation of Principal Component Analysis With K-Nearest Neighbor Algorithm to Monitor Compressors for Liquefied Natural Gas Mixed Refrigerant Processes, *Comput. Chem. Eng.*, 106 96-105, <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.05.029>.
- [14] Bing S., Shuai T., Hongbo S., Bo Z., 2020, Fault Detection and Diagnosis via Standardized K Nearest Neighbor for Multimode Process, *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, 106 1-8, <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2019.09.017>.
- [15] Vitola, J., Pozo, F., Tibaduiza, D. A., Anaya, M., 2017, A Sensor Data Fusion System Based on k-Nearest Neighbor Pattern Classification for Structural Health Monitoring Applications, *Sensors*, 17:2 417, <https://doi.org/10.3390/s17020417>.
- [16] Batista, G. E. A. P. A., Monard, M. C., 2003, An Analysis of Four Missing Data Treatment Methods for Supervised Learning, *Appl. Artif. Intell.*, 17:5-6 519-533, <https://doi.org/10.1080/713827181>.
- [17] Cover, T., Hart, P., 1967, Nearest Neighbor Pattern Classification, *IEEE Transactions on Information Theory*, 13:1 21-27, <https://doi.org/10.1109/TIT.1967.1053964>.



**Jong Yun Kim**

Doctoral Student in the Department of Mechanical Design and Robot Engineering, SeoulTech. His research interest is Machine Dynamics.

E-mail: lkio0416@gmail.com



**Jae Woong Kim**

Bachelor's Degree in Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul Tech. His research interest is Machine Dynamics.

E-mail: woongkj0923@naver.com



**Seong Keol Kim**

Professor in Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul Tech. His research interest is Machine Dynamics.

E-mail: rhett@seoultech.ac.kr