

공작기계용 40,000rpm 고속주축의 정·동적 해석과 최적설계에 관한 연구[§]

김동현* · 이춘만^{*†} · 최현진**

* 창원대학교 기계설계공학과, ** 대구기계부품연구원

Static and Dynamic Analysis and Optimization Design of 40,000-rpm High-Speed Spindle for Machine Tools

Dong Hyeon Kim^{*}, Choon Man Lee^{*†} and Hyun Jin Choi^{**}

^{*} Dept. of Mechanical Design & Manufacturing Engineering, Changwon Nat'l Univ.,

^{**} Daegu Machinery Institute of Components & Materials.

(Received June 13, 2012 ; Revised August 26, 2012 ; Accepted August 29, 2012)

Key Words: High Speed Spindle(고속주축), Finite Element Analysis(유한요소해석), Response Surface Method(반응표면법), Interactions Plot(상호효과도)

초록: 주축은 공작기계의 핵심요소로서 주축의 정·동적 특성은 공작물의 가공정밀도에 직접적으로 영향을 미친다. 주축의 특성은 축 크기, 베어링 간격, 내장모터의 위치 등에 의해 결정된다. 그러므로 축 크기, 베어링 간격, 모터위치의 선정은 주축 특성을 개선하는데 중요한 요소라 할 수 있다. 본 논문은 40,000rpm 고속주축의 정·동적 해석과 최적 설계에 관한 연구로, 유한요소해석과 최적화를 위한 통계분석을 하였다. 이를 위하여 반응표면법을 사용하여 목적함수와 설계변수를 최적화하였다. 최적화 대상은 주축의 고유진동수의 최대화와 변위의 최소화이다. 설계변수는 축길이, 축직경, 베어링 간격, 모터위치로 선정했다. 최적설계를 통해 도출된 설계안으로 초기모델보다 개선된 결과를 얻을 수 있었고, 본 연구의 결과를 주축 설계에 적용하면 주축의 정·동적 특성 개선에 도움이 될 것으로 기대된다.

Abstract: The spindle is the main component in machine tools. The static and dynamic characteristics of the spindle directly affect the machining accuracy of workpieces. The characteristics of the spindle depend on the shaft size, bearing span, built-in motor location, and so on. Therefore, the appropriate selection of these parameters is important to improve the spindle characteristics. This paper presents the analysis of the static and dynamic characteristics and optimization design of a 40,000-rpm high-speed spindle. Statistical analysis for optimization and finite element analysis were performed. This study uses the response surface method to optimize the objective function and design factors. The targets are the natural frequency and displacement. The design factors are the shaft length, shaft diameter, bearing span, and motor location. The optimized design provides better results than the initial model, and these results are expected to improve the static and dynamic characteristics of the spindle.

1. 서 론

공작기계 설계의 핵심 요구사항은 최종 가공물의 표면조도 및 치수정밀도를 극대화하는 고성능화와 생산원가 절감 등을 들 수 있다. 특히 공작

기계에서 가장 중요한 부분이라 할 수 있는 주축의 설계 시에는 고려해야 할 사항들이 많다.

공작기계용 주축의 설계 시 표준화된 주축 설계 방법, 절삭 미케니즘(mechanism), 가공 과정의 체터 안정성 및 구조 동역학 등을 고려해야 하고, 설계단계에서부터 주축계의 정적·동적·열적 특성에 대한 신뢰성 확보가 필요하다.⁽¹⁻³⁾ 그리고 주축의 고속화와 고정밀화를 만족하기 위해 주축 크기와 모양, 주요 부품들의 적절한 조합 등을 찾는 과정들을 거쳐야 한다.

[§] 이 논문은 2012년도 대한기계학회 생산 및 설계공학부문 춘계학술대회(2012. 6. 26-27., 대전컨벤션센터) 발표논문임.

[†] Corresponding Author, cmlee@changwon.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

주축의 정적·동적·열적 특성을 파악하여 주축 최적설계와 가공조건의 최적화를 위해 많은 연구자들이 여러 가지 변수를 고려하여 연구결과를 발표하였다.

Jedrzejewski 등⁽⁴⁾은 유한요소법을 이용하여 고속 주축의 열적 거동 특성을 개선하는 연구를 수행하였다. Kim 등^(5,6)은 유한요소해석을 통해 공작기계 구조물 전체의 열적특성을 분석하여 열적 안정화 설계에 관한 연구를 수행하였고, 고속주축의 정적·동적 특성을 분석하고 강성을 평가하는 연구를 수행하였다.

Hwang 등⁽⁷⁾은 주축의 설계단계에서 발생할 수 있는 여러 가지 제한 조건을 고려하여 최적의 주축 크기를 결정하기 위해 꼭지점계획법을 적용하였다. Park 등⁽⁸⁾은 40,000rpm 고속 주축의 가공에서 가공조건이 표면거칠기와 절삭력, 절삭온도에 미치는 영향을 분석하여 가공성을 향상시키는 최적 가공조건을 선정하는 연구를 수행하였다. Shin 등⁽⁹⁾은 40,000rpm 고속주축의 소형화 및 경량화를 만족하면서 회전정밀도를 향상시키기 위해 위험속도와 중량을 최적화 변수로 선정하고, 실험계획법을 이용하여 형상 최적화를 수행하였다. 설계변수는 베어링 간격과 축 직경만을 고려하였다. Lim 등⁽¹⁰⁾은 다구찌 실험계획법을 적용하여 40,000rpm 고속주축의 정·동적 강성이 최대가 될 수 있는 최적 조건을 도출하였다. 설계변수는 베어링 간격과 강성만을 고려하였다.

Melkote 등⁽¹¹⁾은 난삭재에 대한 레이저보조 마이크로(micro) 밀링 가공에 관한 연구를 수행하였다. 레이저 보조가공(laser assisted machining)은 공작물에 레이저 빔을 조사하여 공작물을 연화시켜 가공을 진행하는데 이 때 주축에 체결된 공구 앞에서 레이저 빔이 선행하게 된다. 레이저보조가공에 고속가공을 적용하기 위해서는 주축이 정·동적으로 안정되어야 하므로 주축의 정·동적 특성을 개선하여 안정적인 설계가 필요하다.⁽¹²⁾

Baek 등⁽¹³⁾과 Lim 등⁽¹⁴⁾은 반응표면법을 이용하여 코제라이트 세라믹 모노리스 담체(cordierite ceramic substrate)의 파단계수에 대한 회귀모델을 추정하는 연구와 5 축 임펠러(impeller) 정삭 가공의 최적화에 관한 연구를 각각 수행하였다.

기존 연구⁽⁷⁻¹⁰⁾에서는 설계변수로 베어링 간격과 축직경 및 베어링 강성 등을 고려하였으나, 본 연구에서는 주축 특성에 영향을 미치는 여러 가지 인자 중에서 축 길이, 내부 직경, 베어링 간격, 내장형 모터(built-in motor)에서 축을 지지하고 있는

Table 1 Specification of the spindle system

Description	Type
Max. speed	40,000rpm
Bearing	Ceramic angular contact ball bearing □45, □35
Preload	Constant pressure preload
Lubrication	Oil-air
Built-in motor	IBAG HF120AI36HK 12.6kW/5Nm
Cooling	Water coolant
Tool type	HSK-E40

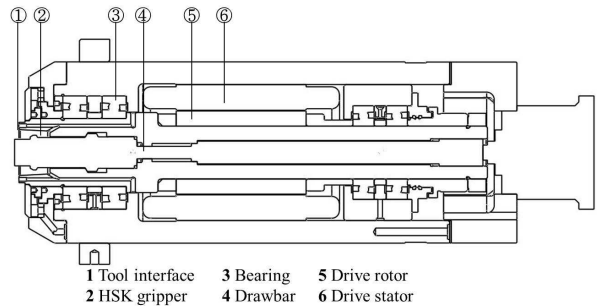


Fig. 1 Schematics of 40,000rpm spindle system

로터(rotor)의 위치 등을 설계변수로 선정하고, 주축의 고유진동수 최대화와 선단부변위 최소화를 동시에 고려한 최적화 설계를 수행하였다.

2. 40,000rpm 고속 주축

2.1 주축계 구조

본 연구의 해석대상인 고속주축을 Fig. 1에 도식화 하였다. 그리고 Table 1에 세부사양을 나타내었다. 주축은 빌트인 모터(built-in motor) 형식이며, 전·후반부에 각각 2 개씩 설치한 앵글러 콘택트 볼베어링(angular contact ball bearing)에 의해 주축이 지지되는 구조로 설계되어 있다. 또한 베어링의 윤활 방법으로 미량 급유 방식인 오일-에어 윤활(oil-air lubrication)을 적용하였다. 그리고 베어링 외륜부와 모터 부분에 냉각자켓(cooling jacket)을 설치하여 주축계 온도 상승을 억제하도록 하였다.

2.2 해석모델

주축의 정동적 특성을 파악하기 위해 Fig. 2와

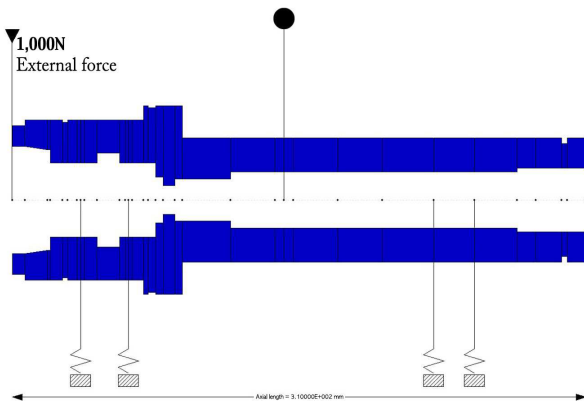


Fig. 2 Rotor-shaft-bearing FE model

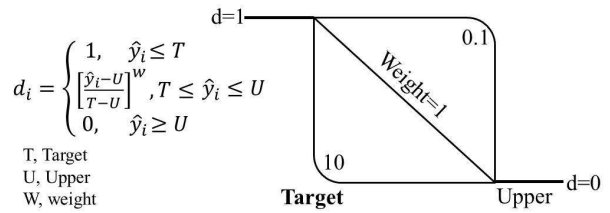
같이 해석모델을 구축하였다. 전·후반부 베어링이 병렬조합배열(DT type)로 이루어진 구조이고, 내장형 모터의 로터는 질량효과와 관성효과만을 고려하였다. 정적 해석을 수행하여 주축선단부의 변위를 파악하고 동적 해석을 통해 1 차모드 고유진동수를 파악하였다. 정적 해석 시 주축 선단부에는 반경방향으로 1,000N의 힘을 가하였다. 이는 일반적인 고속가공 시 주축에 가해질 수 있는 절삭력을 고려한 것이다. 해석은 상용 회전체 해석소프트웨어 ARMD를 사용하였다.

3. 최적설계

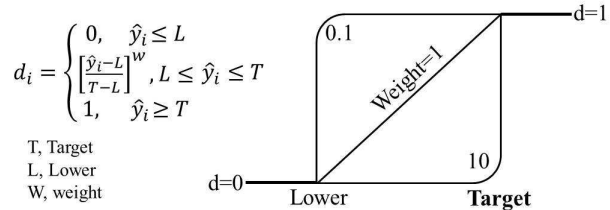
3.1 반응표면법(RSM)

반응표면법은 하나 또는 여러 개의 반응변수와 정량적인 실험변수 또는 인자 집합과의 관계를 규명하는데 사용하는 실험 설계 방법으로 반응변수를 최적화할 수 있는 인자의 조건을 찾는 데 목적이 있다.

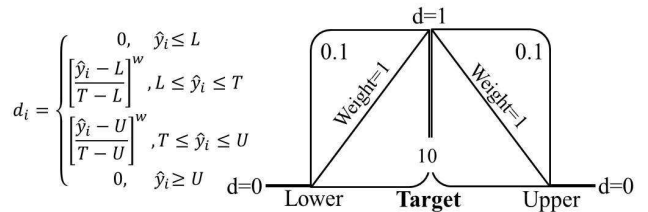
본 연구의 해석대상인 고속주축과 같은 경우 여러 개의 반응변수가 존재한다. 각 반응변수는 실험값 분석을 위한 일반적 절차에 따라서 분석을 할 수 있다. 일반적으로 한 반응변수에 최적인 조건은 다른 반응변수에는 최적이지 아닐 수 있다. 그러므로 여러 개의 반응변수를 동시에 최적화하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 고속주축 설계 시 고려해야 할 여러 개의 변수에 대하여 만족함수(desirability function)를 이용하여 다중 반응 최적화를 수행하였다. 만족함수는 반응변수에 대한 만족의 정도를 0-1 사이의 값으로 나타내는 함수이다. 만족함수가 1일 때 최상이고, 0일 때 최악을 뜻한다. Fig. 3에 반응변수의 형태에 따른 만족함수를 나타내었다. (a) 망소특성은 반응변수가 작을수록



(a) Smaller the better type characteristic



(b) Larger the better type characteristic



(c) Nominal the better type characteristic

Fig. 3 Desirability functions according to reaction factors

좋은 경우이다. 반응변수 값이 T 보다 작으면 목표가 달성되었으므로 만족함수의 값은 1이다. 만일 반응변수가 T와 U 사이에 있는 경우 만족함수는 0과 1 사이 값을 갖고 W에 따라 달라진다. (b) 망대특성은 반응변수가 클수록 좋은 경우이다. 반응변수 값이 T보다 크면 목표가 달성되었으므로 만족함수는 1이다. (c) 망목특성은 반응변수가 목표치가 있어 이 값보다 작거나 크면 좋지 않다. 반응변수 값이 정확히 T와 일치하면 만족함수는 1이 된다. (15)

3.2 실험계획

고속주축의 최적설계 절차는 Fig. 4와 같다.

본 연구에서는 주축의 선단부 변위 최소화과 1차모드 고유진동수의 최대화를 목적함수로 선정하였다. 절삭가공 시 주축 선단부의 변위는 가공오차에 직접적으로 영향을 미칠 수 있다. 그리고 모드 해석을 통한 고유진동수의 파악은 공진영역과 chatter진동 주파수 대역을 검토하기 위한 것이 주된 목적이다. 주축의 진동모드가 안정적이기 위해서는 고유진동수가 공진주파수를 크게 상회하도록 설계해야 한다.

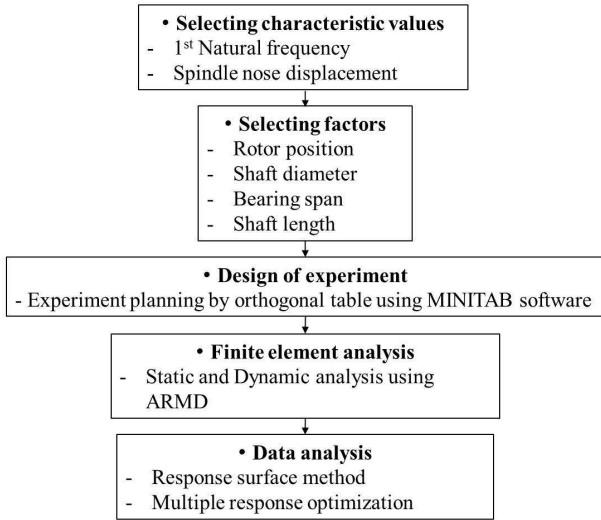


Fig. 4 Experimental procedure

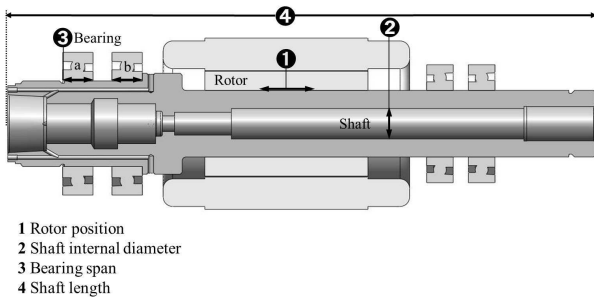


Fig. 5 Design factors

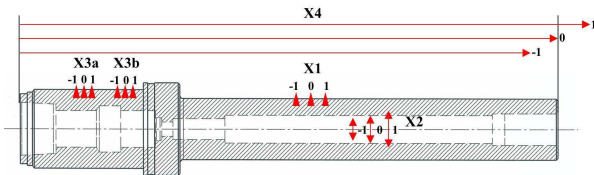


Fig. 6 Design factors using coded units

주축의 설계과정에서 주축의 직경은 베어링과 빌트인 모터의 규격에 의해 제한을 받고, 주축의 길이는 클램핑(clamping) 시스템의 규격에 의해 제한을 받는 경우가 많다. (7) 따라서 본 연구에서는 이에 대한 영향을 고려하여 설계변수와 설계변수의 범위를 선정하였다. 설계변수로는 로터 위치, 축 내부 직경, 전반부에 설치된 두 개의 베어링의 간격, 축 길이를 선정하였다. Fig. 5 에 선정된 설계변수를 나타내었고, Table 2 에 설계변수의 범위를 나타내었다. 설계변수의 치수선정은 설계변경이 용이한 범위 내에서 선정하였다.

총 5 개의 설계변수를 각각 3 수준으로 적용하여 반응표면설계에서 Box-Behnken 법으로 실험을 설

Table 2 Experimental ranges of the design factors

The design factors	Range	
Rotor position	$-5\text{mm} \leq X1 \leq +5\text{mm}$	
Shaft internal diameter	$-2\text{mm} \leq X2 \leq +2\text{mm}$	
Bearing span	Front	$-2\text{mm} \leq X3a \leq +2\text{mm}$
	Rear	$-2\text{mm} \leq X3b \leq +2\text{mm}$
Shaft length	$-14\text{mm} \leq X4 \leq +14\text{mm}$	

계하였다. Box-Behnken 법에서 인자의 수준은 가장 높은 포인트와 가장 낮은 포인트이다. 인자 수준에 대해 낮은 수준은 -1, 높은 수준은 +1 이라는 코드화된 단위를 사용하였다. Fig. 6 에 설계변수와 인자수준에 대해 나타내었다.

Table 3 에 총 46 회로 설계된 실험계획과 함께 실험계획에 따라 설계변수를 변경하여 실시한 주축선단부 변위와 고유진동수 해석결과를 나타내었다. 5 개의 설계변수를 각각 변수 내에 최저값, 중심값, 최대값 등 3 개수준으로 무작위로 배열하였다. 실험설계와 분석은 상용 통계 소프트웨어 Minitab 을 사용하였다.

최적설계를 수행함에 있어 적절한 설계변수를 선정하는 작업은 매우 중요하다. 변수들 간의 상호작용이 없으면 최적화가 무의미해지기 때문이다. 따라서 본 연구에서 선정한 5 개의 설계변수들 간에 상호작용을 파악하였다. Fig. 7 에 고유진동수에 대한 각 변수들 간의 상호작용도를 나타내었다. 변수가 5 개이므로 상호작용의 매트릭스를 생성하여 나타내었다. 그림의 선들이 평행선인 경우 변수들 간에 상호작용이 없는 것으로 판단할 수 있다. Fig. 7 의 1 과 같이 X3a 와 X1 변수 사이의 상호효과를 확인할 수 있다. 표시된 선이 평행하지 않으므로 상호작용이 있다는 것을 나타내고 있다. Fig. 8 은 주축선단부 변위에 대한 각 변수들 간의 상호작용도를 나타내고 있다. Fig. 8 의 1 과 같이 X4 와 X1 변수 사이의 상호효과를 확인할 수 있다.

표시선의 폭이 크므로 확실한 상호작용이 있음을 알 수 있다. 설계변수 사이의 상호효과를 분석한 결과 대부분의 인자가 분명한 상호작용을 하고 있는 것으로 파악되었다. Fig. 7 과 Fig. 8 에서 나타나듯이 상호작용 여부를 쉽게 판단할 수 없는 인자들도 있지만 주축 설계 시 중요하게 고려되는

Table 3 Results of analysis for different analysis conditions

No. of Exp.	X1	X2	X3a	X3b	X4	1 st freq. [Hz]	Disp. [μm]
1	-1	0	0	1	0	1,268	2.68
2	1	0	-1	0	0	1,267	2.42
3	1	0	1	0	0	1,269	2.96
4	1	0	0	0	1	1,232	2.96
5	-1	0	0	-1	0	1,236	2.73
6	0	0	-1	0	1	1,215	2.44
7	0	1	-1	0	0	1,252	2.44
8	0	1	0	0	1	1,216	2.70
9	-1	0	1	0	0	1,254	3.00
10	0	0	0	0	0	1,251	2.70
11	-1	0	0	0	-1	1,268	2.70
12	1	0	0	1	0	1,268	2.68
13	0	0	0	1	-1	1,283	2.68
14	0	0	0	0	0	1,251	2.70
15	0	1	0	1	0	1,268	2.68
16	-1	0	0	0	1	1,217	2.70
17	1	0	0	0	-1	1,270	2.70
18	1	0	0	-1	0	1,239	2.73
19	0	-1	0	0	-1	1,265	2.70
20	0	-1	0	0	1	1,211	2.70
21	0	0	1	-1	0	1,239	3.04
22	0	0	0	0	0	1,251	2.70
23	-1	-1	0	0	0	1,249	2.70
24	0	0	-1	0	-1	1,267	2.44
25	0	1	0	0	-1	1,270	2.70
26	0	0	1	0	-1	1,269	2.99
27	1	1	0	0	0	1,254	2.70
28	0	1	1	0	0	1,254	3.00
29	0	0	1	0	1	1,217	2.70
30	0	0	-1	1	0	1,266	2.42
31	0	0	0	-1	-1	1,253	2.73
32	0	-1	0	-1	0	1,234	2.73
33	-1	1	0	0	0	1,253	2.70
34	0	0	-1	-1	0	1,236	2.46
35	0	0	0	1	1	1,230	2.68
36	0	0	1	1	0	1,268	2.96
37	0	-1	0	1	0	1,263	2.67
38	0	0	0	0	0	1,251	2.70
39	0	0	0	0	0	1,251	2.70
40	0	-1	-1	0	0	1,247	2.43
41	1	-1	0	0	0	1,250	2.70
42	0	0	0	-1	1	1,203	2.73
43	0	1	0	-1	0	1,238	2.73
44	-1	0	-1	0	0	1,251	2.43
45	0	-1	1	0	0	1,250	2.99
46	0	0	0	0	0	1,251	2.70

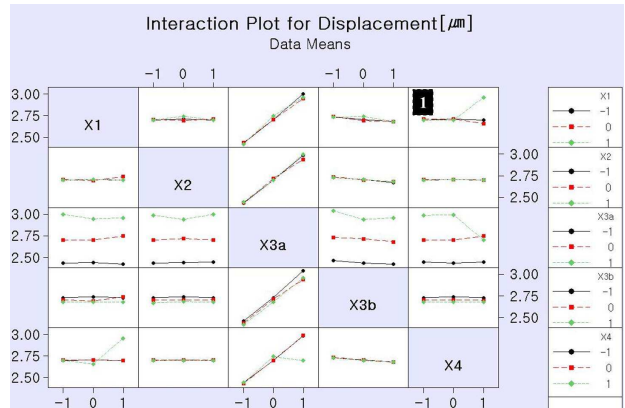


Fig. 7 Interaction plot for natural frequency

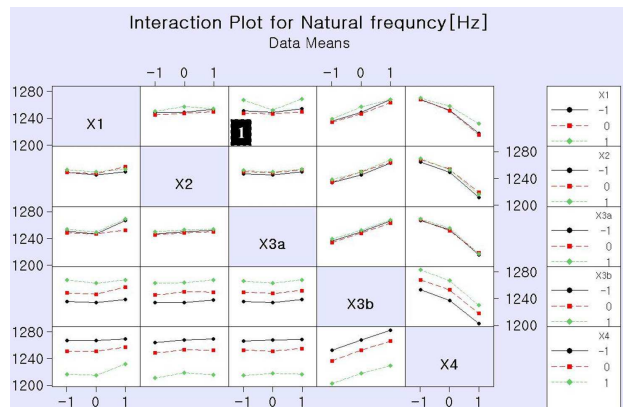


Fig. 8 Interaction plot for displacement

인자들을 선정하였고, 고유진동수와 변위를 함께 최적화 하는 것이 목적이기 때문에 본 연구에서 선정한 5 개의 설계변수는 서로 충분히 상호작용 효과가 있다고 판단된다.

3.3 반응최적화 분석

5 개의 설계변수를 조합하여 2 개의 목적함수를 동시에 최적화하기 위해 다중반응최적화를 수행하였다.

주축선단부 변위는 최소화해야 하는 망소특성이므로 목표값 2.42 μm , 상한값 3.04 μm 를 선정하였다. 그리고 고유진동수의 경우는 최대화해야 하는 망대특성이므로 하한값 1,121 Hz, 목표값 1,283 Hz 를 선정하였다. 선정한 값은 46 개의 실험결과를 참고 하였다. 중요도는 목적함수의 상대적 중요성에 따라 값을 지정하는데 본 연구에서는 2 개의 목적함수가 동등하게 중요하므로 중요도 값을 각각 1 로 부여하였다. Table 4 에 다중반응최적화의 결과를 나타내었고, Fig. 9 에 그림으로 나타내었다.

최적조건은 X1 은 -1 수준, X2 는 0.54 수준, X3a 는 -1 수준, X3b 는 1 수준 그리고 X4 는 -1

Table 4 The multiple response optimizations

Parameters						
	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
1 st freq. [Hz]	Max	1,211	1,283	1,283	1	1
Disp. [μm]	Min	2.42	2.42	3.04	1	1
Global Solution						
X1 = -1						
X2 = 0.54						
X3a = -1						
X3b = 1						
X4 = -1						
Predicted Response						
1 st freq. = 1,288.95						
Disp. = 2.41						
Composite Desirability = 1.00						

Table 5 Comparison results

Model		1 st natural frequency[Hz]	Displacement [μm]
Initial	ARMD (simulation)	1,251	2.70
Optimization	RSM (predict)	1,288	2.41
	ARMD (simulation)	1,285	2.41

수준으로 나타났다. 그리고 이때 고유진동수와 주축선단부 변위의 예측 값은 각각 1,288.95 Hz 와 2.41 μm 로 나타났다. 두 목적함수가 모두 목표치를 만족하므로 종합만족도(composite desirability)가 1로 나타났다.

3.4 검증해석

5 개의 설계변수가 최적 조건일 때 ARMD 를 이용하여 검증해석을 한 결과와 초기모델의 해석 값 그리고 반응표면법의 다중반응최적화를 통해 예측된 결과에 대한 비교를 Table 5 에 나타내었다.

반응표면법을 통해 예측된 결과와 최적조건을 실제 시뮬레이션 한 결과, 고유진동수는 약 0.23%의 오차가 나타났고, 변위는 오차가 없는 것으로 나타났다. 그리고 초기모델과 비교한 결과 고유진동수가 약 2.87% 증가했고 변위가 약 10.74% 감소한 것으로 나타났다. 검증해석결과, 도출된 최적조건을 실제 주축에 적용하면 성능을 개선하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

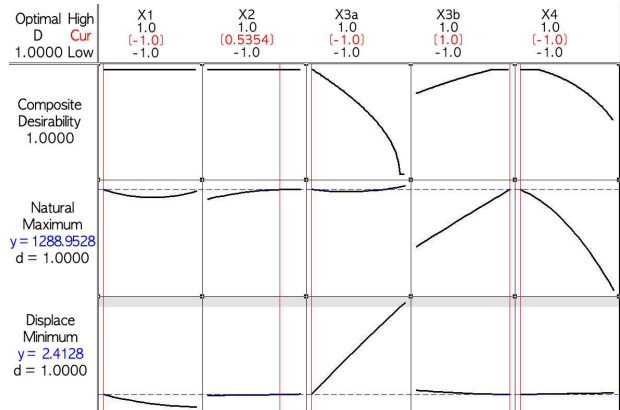


Fig. 9 Plot for the multiple response optimization

4. 결론

고속주축의 정·동적 특성을 해석하고, 주축 설계시 고려해야 할 핵심인자들 선정하였다. 그리고 정·동적 특성을 최적화 하기 위해 반응표면법을 적용하여 최적설계안을 도출한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 최적설계를 위한 목적함수는 고유진동수의 최대화, 선단부 변위의 최소화로 선정하였다. 고유진동수는 1 차모드만을 고려했고, 선단부에 1,000N의 절삭력을 가했을 때의 변위를 고려하였다. 설계변수는 내장형 모터의 로터위치, 축 내부직경, 전반부에 설치된 2 개의 베어링 간격, 축 길이 등 5 개를 선정하였다.

(2) 반응표면법을 이용하여 5 개의 변수에 각각 3 수준을 적용하여 46 회의 실험계획을 설계하였고, 여러 개의 설계변수를 동시에 최적화하기 위해서 만족함수를 이용한 다중반응최적화를 수행하였다.

(3) 최적설계를 통해 도출된 설계안을 이용하여 검증해석을 수행하였다. 최적설계에 의한 예측 값과 최적설계안을 적용했을 때 실제 해석 값의 오차는 고유진동수 약 0.23%, 변위는 오차가 없는 것으로 나타났다. 그리고 초기모델과 비교결과 고유진동수가 약 2.87 % 증가했고, 변위는 약 10.74 % 감소한 것으로 나타났다. 목적함수를 모두 만족하는 결과를 얻었으므로 본 연구의 결과를 실제 주축에 적용하면 주축의 정·동적 특성 개선에 도움이 될 것으로 기대된다.

후기

이 논문은 2012 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012-0005688).

참고문헌

- (1) Maeda, O., Cao, Y. and Altintas Y., 2005, "Expert Spindle Design System," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 45, pp. 537~548.
- (2) Lin, C. W. and Tu, J. F., 2007, "Model-Based Design of Motorized Spindle Systems to Improve Dynamic Performance at High Speeds," *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 7, No. 2, pp. 94~108.
- (3) Abele, E., Altintas, Y. and Brecher, C., 2010, "Machine Tool Spindle Units," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 59, pp. 781~802.
- (4) Jedrzejewski, J., Kowal, Z., Kwasny, W. and Modrzycki, M., 2005, "High-Speed Precise Machine Tools Spindle Units Improving," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 162-163, pp. 615~621.
- (5) Kim, D. H. and Lee, C. M., 2010, "A Study on the Thermal Stabilization Design of a New Concept Compact Machining center," *Journal of the KSPE*, Vol. 27, No. 12, pp. 119~124.
- (6) Kim, D. H. and Lee, C. M., 2011, "The Static and Dynamic Analysis of a 45,000rpm Spindle for a Machine Tool and Evaluation of Its Stiffness," *Journal of the KSPE*, Vol. 28, No. 4, pp. 422~426.
- (7) Hwang, Y. K. and Lee, C. M., 2009, "A Study on the Determination of Shaft Size Using the Extreme Vertices Design," *Trans. of the KSMTE*, Vol. 18, No. 2, pp. 214~220.
- (8) Park, S. J., Kim, D. H. and Lee, C. M., 2012, "A Study Determining the Optimal Machining Conditions for a 40,000rpm Ultra High Speed Spindle System," *Precision Engineering*, Vol. 36, pp. 451~457.
- (9) Shin, J. H. and Lee, C. M., "A Study on Spindle Shape Design Using Design of Experiments," *Journal of the KSPE*, Vol. 26, No. 4, pp. 120~127.
- (10) Lim, J. S., Chung, W. J. and Lee, C. M., 2009, "Selection of Bearing Position for Improving Static and dynamic stiffness of 40,000rpm SHgh-Speed Spindle," *Journal of the KSMPE*, Vol. 8, No. 1, pp. 10~17.
- (11) Melkote, S., Kumar, M., Hashimoto, F. and Lahoti, G., 2009, "Laser Assisted Micro-Milling of Hard-to-Machine Materials," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 58, No. 1, pp. 45~48.
- (12) Kim, K. S., Kim, J. H., Choi, J. Y. and Lee, C. M., 2011, "A Review on Research and Development of Laser Assisted Turning," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol.12, No.4, pp. 753~759.
- (13) Baek, S. H., Cho, S. S., Shin, S. G. and Joo, W. S., 2006, "Size Effect on the Modulus of Rupture in Automotive Ceramic Molithic Substrate Using Optimization and Response Surface Method," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 30, No. 11, pp. 1392~1400.
- (14) Lim, P. and Yang, G. E., 2007, "Optimization of Finish Cutting Condition of Impeller with Five-Axis Machine by Response Surface Method," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 31, No. 9, pp. 924~933.
- (15) Derringer, G. C. and Suich, R., 1980, "Simultaneous Optimization of Several Response Variables," *Journal of Quality Technology*, Vol. 12, pp. 214~219