

정특성 및 동특성 해석을 통한 고속세탁기 주축의 형상 최적화

김의수#, 이정민*, 김병민**

The Shape Optimization of Washing Machine Shaft for High-Speed Rotation through Analysis of Static and Dynamic Characteristics

Eui Soo Kim[#], Jung Min Lee^{*} and Byung Min Kim^{**}

ABSTRACT

To meet demand of big capacity and high speed rotation for washing machine, more stress from bending and twisting are complexly loaded onto the shaft supporting the horizontal drum, causing problems in fracture strength and fatigue life. Also, Vibration occurs due to the frequency of the rotating parts. But, shaft has various design factors such as diameter and distance between bearings according to configuration of shaft, the optimal values can't be easily determined. Using a design of experiment (DOE) based on the FEM (Finite Element Method), which has several advantages such as less computing, high accuracy performance and usefulness, this study was performed investigating the interaction effect between the various design factor as well as the main effect of the each design factor under bending, twist and vibration and proposed optimum design using center composition method among response surface derived from regression equation of simulation-based DOE.

Key Words : Design of experiment (실험계획법), Response surface method (반응표면법), Center composition method (중심합성법), Main effect (주효과), Interaction effect (교호효과), Natural frequency (고유진동수)

1. 서론

현재 국내에서 사용되고 있는 세탁기는 세탁조의 형식에 따라 세탁조가 입식(stand-up type)일 경우에는 일반세탁기, 세탁 조가 수평으로 놓여져 세탁을 하는 형식은 드럼세탁기로 분류하고 있다. 이중 세탁조가 수평으로 놓여져 낙차에 의한 세탁방식을 채택한 드럼 세탁기는 주로 유럽지역에서

사용되던 방식으로서 소량의 세탁물을 세탁하는 방식이었다. 국내에서도 생활패턴이 서구화 되고 생활수준이 높아지면서 드럼세탁기를 사용하는 소비자들이 점차 늘고 있는 추세이다. 근래의 드럼 세탁기 동향은 국내 수요자의 요구에 맞추어 대용량 세탁을 가능하게 하고 또한 건조성능을 개선하기 위해 높은 회전수로 탈수도를 증가시키는 것이다. 환경 및 에너지에 대한 관심이 높아지면서 행

접수일: 2007년 8월 20일; 게재승인일: 2008년 2월 21일

교신저자: 국립과학수사연구소

E-mail: eui44013@lycos.co.kr Tel. (02) 2600-4974

* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

** 부산대학교 기계공학부

굽힘수를 줄여서 물의 사용량을 줄이고, 건조시간을 단축하여 전력 사용량을 줄이기 위한 목적으로 탈수속도를 고속화 하고 있다. 또한, 건강과 청결에 대한 관심이 높아지면서 매년 세탁시의 세탁량이 늘어나고, 이불빨래등의 대형 세탁물에 대한 요구가 커짐에 따라 세탁기의 세탁용량을 대형화 하고 있다. 이와 같이 세탁기가 고속화, 대형화 될수록 모터의 동력을 드럼으로 전달하면서 주로 축계의 횡방향 하중에 대한 강성 역할을 하는 샤프트에는 더욱 큰 하중이 복합적으로 작용하여 파단강도와 피로수명의 문제점을 대두시킨다. 이를 해결하기 위해서는 정동적 거동을 예측하고 설계자 입자에서는 정동적 부하면에서 발생응력을 최소화한다던가 고유진동수를 높이는 방법등으로 주어진 주축의 요소부품을 적절히 조합하여야 한다. 대용량 고속주축의 요구강성은 힘이나 모멘트의 크기 외에 탄성체의 형상, 지지방법, 재료의 탄성계수 등에 따라서 달라진다. 그러나 주축의 응력상태나 베어링의 조건, 주축의 동특성등을 제대로 이해하지 못하고, 또한 형상결정에 대한 자유도가 많을 경우에 설계에 대한 기준값을 제시하는 데에는 어려움이 따른다. 기존의 연구를 살펴보면 고속 주축에 대해 정동적 강성 개선에 관해서는 많은 학자에 의해 연구가 이루어졌으나 제품의 형상이 상이할 뿐만 아니라 프로그램에 의해 세탁물과 세탁수가 낙하되어 운용되고 주축의 직경등 형상이 미결정된 고속용 드럼 세탁기 주축에 대해서는 제대로 된 연구가 이루어지지 못한 실정이다.¹⁻⁷

이에 본 연구는 국내외 최초로 10Kg 대용량, 1800RPM 고속탈수용 세탁기를 개발하기 위해 상용 프로그램인 미니탭 15 을 활용한 실험계획법과 유한요소법을 병행 사용하여 정동적 특성에 영향을 미치는 설계변수를 통계학에 기초한 주효과, 교호효과 분석을 통해서 쉽게 선정하고 선정된 설계변수를 입력값으로 입력과 출력의 상관관계인 회귀모형함수를 추정하여 이를 다중 반응표면 최적화 루틴을 이용하여 제시된 조건을 모두 만족하는 최적의 주축 형상을 제시하고자 한다.

2. 주축의 설계

2.1 적용대상

스핀드럼의 회전으로 세탁물을 들어 올려서 떨어 뜨리는 낙차에 의한 충격력으로 세탁하는 방식

인 드럼식 세탁기는 외형을 구성하는 프레임내에 세탁시 필요한 세제액이나 세탁수를 저장하는 원통형의 터브(Tub)가 중심축이 수평방향이 되도록 수개의 스프링과 댐퍼에 의해 캐비닛에 지지되어 있으며, 터브 내에는 세탁이나 탈수시 직접 세탁물을 담고서 회전하는 드럼이 터브와 동일한 중심축이 되도록 장착되어 있는데 드럼의 후면부는 드럼의 회전시 발생하는 하중을 지지하기 위하여 플렌지(Flange)라고 하는 구조물이 장착되며 주축은 이 플렌지에 고정되어서 터브의 베어링에 지지되고 있다. 드럼의 회전축 끝단에는 폴리(pulley)를 장착하여 모터의 구동축과 드럼의 폴리를 벨트로 연결하거나 드럼의 회전축에 모터를 바로 장착한 구조를 가지며, 모터는 정류자 모터를 주로 사용한다. Fig. 1 은 드럼세탁기 동력 전달 시스템의 개략도를 보여준다. 이러한 구조를 갖는 주축계는 정동적 부하면에서 주축의 발생응력, 베어링의 수명, 고유진동수등을 적절히 병행 고려하여야만 정동적 특성이 모두 우수한 형상을 결정할 수 있다.

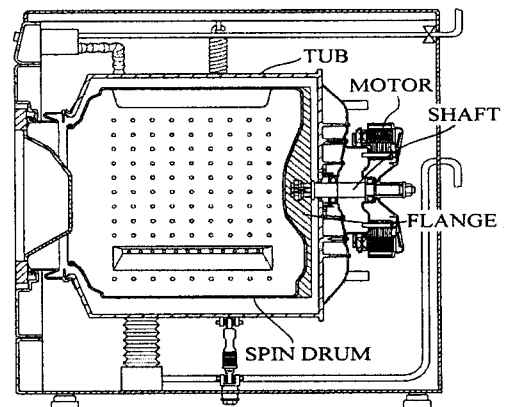


Fig. 1 Scheme of dynamic system

2.2 응력상태

세탁물을 담고 회전하는 세탁조와 볼트로 체결된 플렌지에 인서트 사출되고 끝단에 모터가 장착되어 동력을 전달하는 주축은 원심력과 언밸런스에 의한 굽힘 모멘트와 회전에 의한 비틀림모멘트를 동시에 받는 경우로 Rankin 이 주장한 최대주응력설과 Guest 가 주장하는 최대전단응력설에 의한 상당굽힘응력(Equivalent bending stress)과 상당비틀림응력(Equivalent twisting stress)은 다음 식(1), (2)와 같다.

$$\sigma_e = \frac{\sigma}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} \quad (1)$$

$$\tau_e = \frac{1}{2}\sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} \quad (2)$$

최대주응력설에 의하면 σ_e 는 식(3)과 같은 상당굽힘모멘트(Equivalent bending moment)가 굽힘모멘트로 작용하였을 경우의 굽힘응력에 상당하고, 최대전단응력설에 의하면 τ_e 는 식(4)와 같은 상당비틀림 모멘트(Equivalent twisting moment)가 비틀림 모멘트로서 작용하였을 경우의 비틀림 응력에 상당하다는 것이다. 여기서 세탁기 주축에 작용하는 굽힘모멘트와 비틀림모멘트는 일정하지 않고 복잡하게 변동하든지 또는 충격적으로 작용하는 경우가 많아 동적 영향을 고려하여 플랜지를 설계하기 때문에 동적효과계수 k_m, k_t 의 값을 곱하여 나타내었다.

$$M_e = \frac{1}{2} (k_m M + \sqrt{(k_m M)^2 + (k_t T)^2}) \quad (3)$$

$$T_e = \sqrt{(k_m M)^2 + (k_t T)^2} \quad (4)$$

일반적으로 강과 같은 연성재료의 축은 최대전단응력설이 가장 잘 일치하며 계산도 안전측에 있으므로 Guest 의 식이 많이 채용되고 반면에 취성재료의 경우에는 최대주응력설이 가장 잘 일치하므로 Rankine 의 식이 많이 사용된다.

2.3 베어링 수명

베어링은 크게 미끄럼베어링과 보울베어링으로 대별되며 세탁기에서는 베어링면이 윤활유를 중간에 증개물로 직접 대면하여 미끄럼 접촉을 하는 미끄럼베어링보다는 고온에 강하며 베어링 지름에 비해 길이가 작고 윤활구성력이 작아도 좋은 보울베어링을 사용한다. 보울베어링중에서도 하중을 고려하여 단열 깊은 홈 레이디얼 보울 베어링 63 계열이 보편적으로 사용된다. 고속 주축을 지지하는 베어링의 위치선정은 주축의 정적, 동적 특성에 큰 영향을 미치므로 발열이나 윤활등을 고려하여 최적의 조건을 유지하여야 한다. 본 연구에서는 Fig. 2 에서 보듯이 베어링#1, 베어링#2 가 사용되었고

베어링#1 은 터브 베어링하우징 내에, 베어링#2 는 모터하우징 내에 위치하였고 최적의 조건이 적용되었다는 가정아래 제시된 주축의 형상에 대해 최대의 베어링 수명을 가질 수 있는 베어링위치를 선정하고자 한다. 적용된 베어링 수명계산식은 식 (5)와 같다.

$$L_h = 500 \left(\frac{C}{P} \right) \times \frac{33.3}{N} \quad (5)$$

여기서, $L_h(hour)$ 는 베어링 수명, $C(kg_f)$ 는 기본동적부하용량, $P(kg_f)$ 는 베어링에 작용하는 하중, $N(rpm)$ 은 회전속도를 나타낸다.^{8,9}

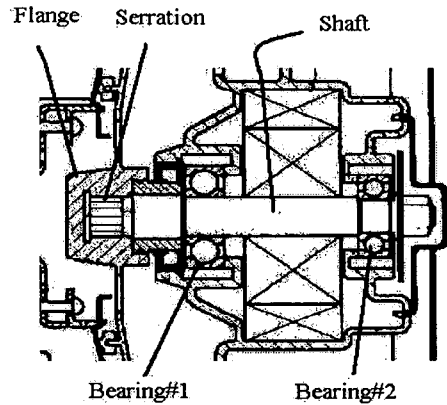


Fig. 2 Scheme of shaft system

2.4 주축계의 동특성

주축은 고속 회전체 이므로 진동에 대한 영향을 많이 받게 되므로 동적 특성을 고려하여 설계되어야 한다. 만약 주축의 고유진동수와 실제 운용주파수가 일치하면 공진현상을 일으켜 파피 문제가 발생될 수 있으며, 또한 공진에 의한 소음이 유발되어 사용자에게 불쾌감을 주기도 한다. 본 연구에서 목표로 하는 회전에서 운용이 가능한 주축을 설계하기 위해서는 지지부를 포함한 주축의 고유진동수가 실제 운용하고자 하는 주파수대역인 30Hz 에서 벗어나 있어야 한다. 따라서 설계 단계에서부터 이를 고려하여 가진주파수에 주축계의 고유주파수가 근접하지 않게 설계해야 한다. 가장 좋은 방법은 중량을 증가시키는 방법이나 생산비 및 가공시간이 증가함으로 미리 해석과 실험을 통해 그 형상을 결정하는 것이 중요하다. 고유진동수를 계산하는 방법에는 전달행렬법, 유한요소법,

모달해석법등이 있으며 본 연구에서는 모달해석을 통해 형상에 대한 고유진동수를 구하고자 한다.

3. 실험계획법을 이용한 최적설계

3.1 MINITAB 을 이용한 실험계획법

실험계획법(Design of experiments)은 제품의 특성에 영향을 미치는 여러가지 인자를 선정하고 이들의 관계를 알아보기 위한 실험을 실시하여 제품의 최적 제조조건을 경제적으로 찾아내는 기법이다. 실험계획법의 주요목적은 어떤 요인이 반응에 유의한 영향을 주고 있는가를 파악하고 그 영향이 양적으로 어느 정도 큰가를 알아내고 유의한 영향을 미치는 원인들이 어떠한 조건을 가질 때 가장 바람직한 반응을 얻을 수 있는가를 알아내기 위해서(최적조건의 결정문제) 사용된다.

실험에 있어서 데이터 산포에 영향을 준다고 생각되는 무수히 존재하는 원인들 중에서 실험에 직접 취급되는 요인을 인자(Factor)라고 부른다. 실험을 하기 위한 인자의 여러 가지 조건을 인자의 수준(Level)이라고 한다. 실험의 목적을 달성하기 위해서는 실험을 실시하기 이전에 실험에 대하여 충분한 계획이 없으면 소기의 목적을 달성하기 어렵다. 실험계획법의 순서는 우선 목적함수를 정의한 후 목적함수에 영향을 미치는 설계변수들에 대한 인자와 수준수를 결정하고 실험배치법을 선택하여 실험을 실시한 후 실험에 대한 결과를 분석함으로써 최적값을 추정하는 내용으로 진행된다.

3.2 반응표면법을 이용한 최적설계

반응표면분석(Response surface analysis)은 분산분석이나 특히 요인배치 실험 등을 통하여 최적 조건을 찾았을 때, 최적 조건 주위에서 입력 변수 x_1, \dots, x_n 가 결과 y 값과 어떤 관계식을 갖고 있는지 분석해 주는 방법이다. 반응변수에 곡률이 존재할 때 반응표면설계를 이용한다. 반응표면설계는 최적반응값에 근사하도록 설계할 수 있다. 최적치라고 추정되는 값 주위에서 입력변수와 반응값과의 관계가 구해지면 이를 그림으로 명확하게 알 수 있어 새로운 최적점을 구할 수 있으면, 실험요인 수준을 가장 좋은 혹은 원하는 반응값이 되도록 조정한다. 반응표면설계는 반응변수와 두 개 이상의 요인들간의 관계를 파악하는데 사용된다. 독립변수 x_1, \dots, x_n 와 종속변수 y 간의 미지의 함

수를 f 로 나타내면, $y = f(x)$ 로 나타낼 수 있다. 미지 함수를 반응함수라 한다. 현장에서 반응함수가 알려진 경우는 거의 없다. 반응함수는 실제 3 차 이상의 고차함수일 수도 있다. 고차함수를 정확히 찾아내는 것은 매우 어려우며 현실에서 적용하기가 복잡하여 실용성이 적다.¹¹

4. 주축 형상 최적화에 대한 응용

4.1 설계변수의 선정과 요인설계

본 연구에서는 정동적 특성을 결정 짓는 목적함수를 발생응력을 최소화하고 베어링 수명을 최대화하며 고유진동수를 운용 환경에 만족시키는 것으로 설정하였으며 이를 위해 설계변수들의 영향을 파악하고 이를 다중 반응표면법을 통해 근사적으로 수식화하여 최종적으로 최적형상을 제시하고자 한다. 주축의 형상을 결정짓는 설계변수는 주축의 직경(D1, D2), 베어링간 간격(L1, L2)을 들 수 있고 최적설계 조건으로서 첫째, 발생응력이 SM45C 항복강도를 진동, 충격이 있을 시 안전율 3 을 적용한 값인 100MPa 이하가 되게 설정하고 둘째, 세탁기의 고장율을 근거로 한 베어링 수명을 2,000,000 hr 이상으로 설정하였으며 셋째, 위와 같은 조건으로 설계된 주축의 고유진동수가 실제 운용하고자 하는 주파수대역인 30Hz 에서 벗어나는지 여부를 미리 해석을 통해 검증하였다. 실험계획법은 우선 설계인자와 수준을 결정하고 특성치에 영향을 미치는 각각의 설계변수들을 조합을 통해 많은 수의 설계 모델들을 만들고 실제로 제작하여 하나씩 검증하여야 한다. 설계변수들의 조합으로 나오는 각각의 설계 모델들을 실제 제작하여 실험하면 상당한 설계시간과 비용이 소요된다. 이에 본 논문에서는 실험계획법과 제시된 계산식을 병행 사용하여 목적하고자 하는 설계모델을 찾는 방법을 제안, 검토하였다. 설정된 설계변수와 사용기호는 Fig. 3 와 같고 Table 1 에 설계인자와 그 인자들의 수준을 각각 나타내었고, Table 2 에 실험 순서에 따른 각각의 실험조건을 직교배열표로 나타내었다. 먼저 짜여진 배열표에 설정된 조건으로 유한요소 해석을 수행한 후 각각의 설계인자가 서로 상호작용을 가지고 있는지, 발생응력과 베어링 수명에 가장 영향을 미치는 인자는 무엇인지, 영향을 미친다면 어느 정도의 영향을 미치는지를 파악하기 위해 요인분석을 수행하였다. 여기서 ST 는 주축에

발생하는 최대등가응력, BF1 는 베어링#1 에 작용하는 최대하중, BF2 는 베어링#2 에 작용하는 최대하중을 나타낸다.¹²

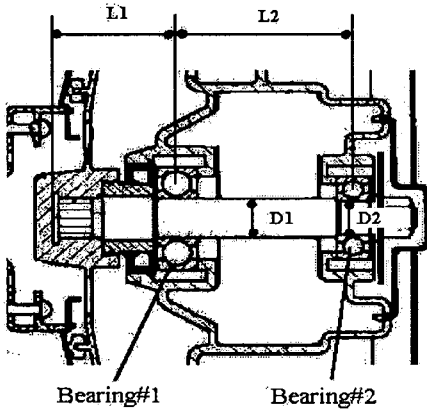


Fig. 3 Design factor and nomenclature

Table 1 Design factor and level

(mm)	D1	D2	L1	L2
-1	35	20	40	50
+1	45	30	60	70

Table 2 Orthogonal arrays

Experiment No.	D1	D2	L1	L2
1	35	20	40	50
2	45	20	40	50
3	35	30	40	50
4	45	30	40	50
5	35	20	60	50
6	45	20	60	50
7	35	30	60	50
8	45	30	60	50
9	35	20	40	70
10	45	20	40	70
11	35	30	40	70
12	45	30	40	70
13	35	20	60	70
14	45	20	60	70
15	35	30	60	70
16	45	30	60	70

4.2 유한요소해석 및 분석결과

각 인자에 따른 발생응력 및 베어링에 작용하는 하중의 변화를 알아보기 위해 FEM (Finite Element Method)를 이용하여 소성가공 공정을 분석할 수 있는 시뮬레이션 프로그램으로서, 현재 전세계적으로 가장 널리 사용되고 있는 소성가공 공정해석용 소프트웨어인 Deform 을 이용하여 유한요소 해석을 수행하였다. 적용된 소재의 물성치는 일반 환봉재료로 많이 사용되는 SM45C 재질로써 생성된 유한요소모델 형상은 Fig. 4 와 같다. 메쉬의 개수는 약 80000 개, 베어링은 그 반력을 얻기 위해 강체로 인식시켰으며 토크를 부여하기 위해서 3D tool 로 시뮬레이션을 수행하였다. 토크(T)는 3KW 모터를 장착하여 1800RPM 운용시 값을 적용하였으며, 모멘트(M)는 10Kg 세탁물에 대한 원심력이 드럼 끝단에 집중적으로 작용한다고 가정하였고 주축과 폴리가 결합하는 부분은 완전구속하의 경계조건을 부여하였다.

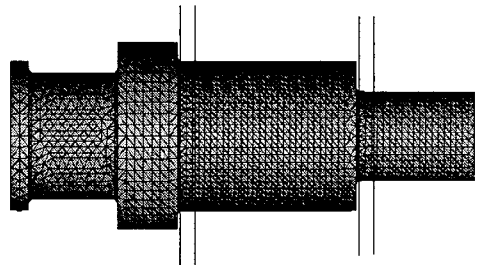


Fig. 4 F.E model for factor analysis

해석결과를 근거로 각 인자의 변화에 따른 발생응력 및 베어링 하중의 영향을 요인분석 결과인 주효과 교호효과 그래프를 통해 파악하였다. Fig. 5 와 Fig. 6 에서 D1, D2, L1, L2 의 모든 설계인자의 변화가 응력에 미치는 영향이 매우 크며 D1, D2 는 응력과 음의 상관관계를 가지는 반면 BF1, BF2 는 응력과 양의 상관관계를 가지고 D2 와 L2 간의 교호작용은 존재함을 알 수 있다. 또한 베어링수명과 관련된 베어링에 작용하는 하중과 설계변수와의 관계를 살펴보면, Fig. 7 과 Fig. 8 에서 D1 과 D2 인자가 BF1 에 미치는 영향은 미비하나 L1, L2 에 대해서는 크게 영향을 받고 Fig. 9 과 Fig. 10 에서는 D1, L1, L2 는 BF2 에 강한 영향을 미치는데 비해 D2 는 영향이 미비하며 인자간 교호작용은 존재하지 않음을 알 수 있다. BF1 교호작용은 존재

하지 않음을 알 수 있다. 고로 모든 설계인자는 발생응력과 베어링 수명을 고려한 최적 형상 설계시 그 조건을 구하는 데 필수설계인자라 할 수 있다.

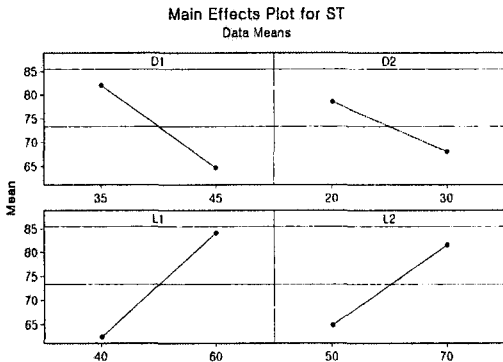


Fig. 5 Main effect plot for ST

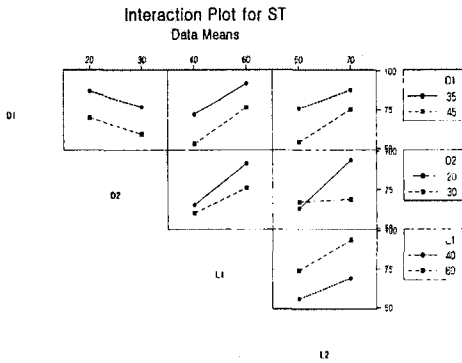


Fig. 6 Interaction effect plot for ST

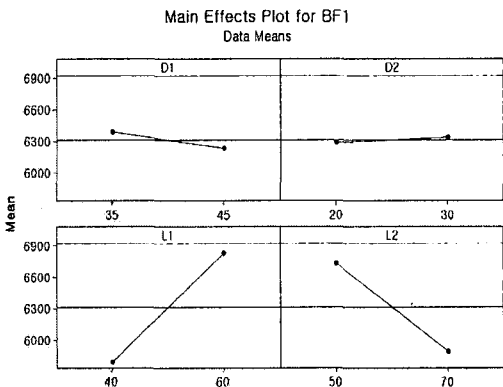


Fig. 7 Main effect plot for BF1

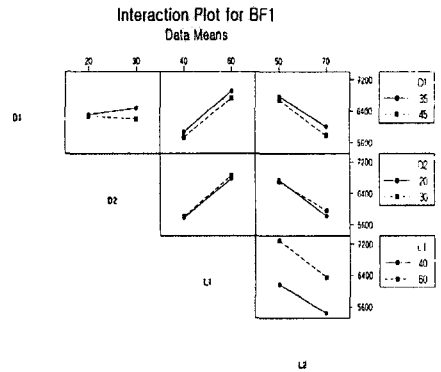


Fig. 8 Interaction effect plot for BF1

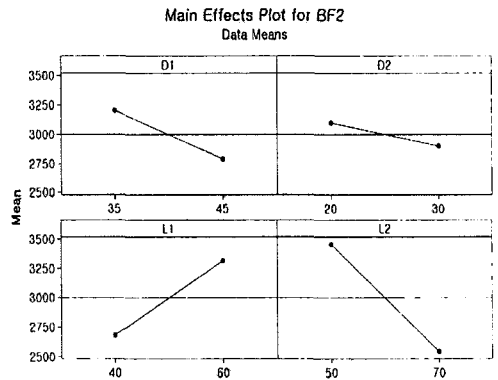


Fig. 9 Main effect plot for BF2

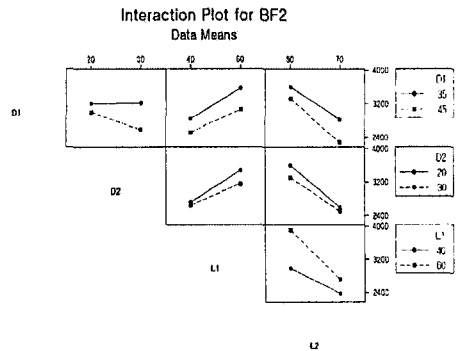


Fig. 10 Interaction effect plot for BF2

4.3 최적설계

분석된 내용을 통해 미니탭에서 지원하는 반응 표면설계 중 반응값이 여러 개 있을 때 이들을 동시에 최적화 시킬 수 있는 방법인 중심합성법을 사용한 다중반응최적법으로 발생응력이 최소화되

고 베어링 작용 하중을 통해 계산되어진 베어링 수명이 최대가 되는 주축의 최적 형상 값을 제시하였다. 중심합성법은 효율적으로 1, 2 차항을 추정하고자 할 때와 요인 배치 실험 후에 추가 실험하여 곡률 반응변수를 모델화 할 때 많이 사용되며, 본 연구에서는 유의하지 않는 인자와 교호작용들을 제외하고 실험데이터와 가장 적합한 축소회귀 모델을 찾기 위해 다수의 항에 몇 차례 재적합시키는 과정을 반복하였으며 그 결과 회귀모델에 의해 얻어진 최적 요인 수준을 Fig. 11 에 나타내었다. 유의한 교호작용이 하나 이상 존재함으로써 이를 포함하는 완전 2 차항으로 반응표면 모델을 축소시켰고 그 결과 반응 값의 호감도 d 가 적합한 모델을 찾을 수 있었다. Table 3 은 신뢰도 95%일 경우 고속탈수용 세탁기 주축계의 결정된 최적 형상 치수를 정리해서 보여준다. 여기서, LH1 은 베어링#1의 수명, LH2 는 베어링#2 의 수명을 나타낸다.

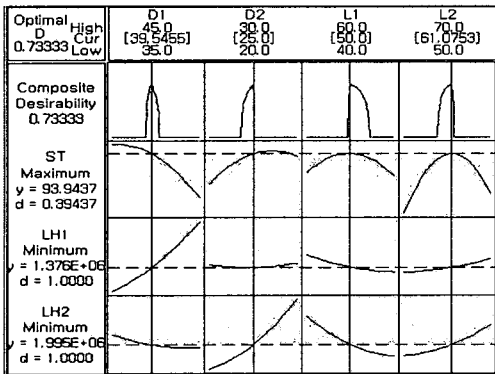


Fig. 11 Result of response surface optimize

Table 3 Optimum design values of shaft

Result	D1 (mm)	D2 (mm)	L1 (mm)	L2 (mm)	ST (MPa)
Value	39.5	25	50	61.1	93.9

4.4 주축의 동특성 해석 및 제작

최적의 형상으로 제시된 주축에 플렌지와의 이중사출을 위한 세레이션 부분 및 폴리 결합을 위한 체결부등을 고려하여 최종 결정된 주축의 형상은 Fig. 12 와 같다. 본 형상에 있어서 주축의 회전 진동수가 스핀들을 구동시키는 모터의 회전 주파수 범위에 있다면 구동 시 공진현상에 의하여 진

동현상이 발생하게 되고 이는 매우 작은 간극을 유지하고 있는 베어링의 파괴도 초래할 수 있다. 따라서 주축의 고유진동수를 설계시 평가하여 반영하는 것은 매우 중요한 사항이 된다. 또한 고속 탈수시 소비자의 질적 감성을 높이고 제대로된 시스템을 운용하기 위해서는 진동이 없는 매우 안정적인 운전상태가 요구 되고 있다.¹⁰ 따라서 본 연구에서는 제시된 주축모델에 대해 제작이전에 모드해석을 수행하여 고유진동수를 구하였다. Fig. 13 에 주축의 진동해석 결과를 나타내었고 측정된 주축의 1 차 진동모드의 고유진동수는 547Hz 로 상용 1,800rpm 을 목표로 하는 세탁기 주축임을 감안할 때 충분히 안정적인 운전이 가능하다고 판단되어 진다. 결국 제시된 최적의 주축 형상은 탈수 운용시 동특성에 대해서도 적합한 모델임을 알 수 있다.

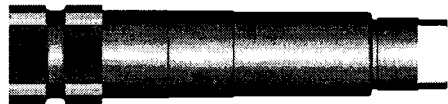


Fig. 12 Final configuration of shaft

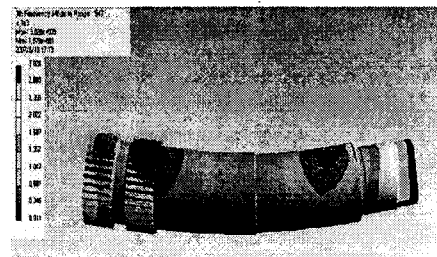


Fig. 13 Result of modal analysis of shaft

5. 결론

본 연구에서는 상용프로그램인 MINITAB 을 활용한 실험계획법과 유한요소법을 병행 사용하여 주축의 정동적 특성에 영향을 미치는 설계변수를 선정하고 그 영향도를 파악하여 회귀모형함수를 추정하고 이를 중심합성법을 이용한 다중반응표면 최적화 루틴을 사용하여 최적의 고속탈수용 세탁기 주축 형상을 제시하였다. 이는 통계적 해석을 통해 조건 결정에 대한 자유도가 많아 예측이 어려울 때 설계에 대한 기준값을 설정하는데 매우

유용하며, 더 나아가 복잡한 최적 형상도 통계적으로 쉽게 접근할 수 있는 기틀을 마련하였다고 생각된다. 차후 중심합성법이 가지고 있는 단점에 대한 보완방법과 실제 결정된 최적값으로 시작품을 제작하여 실험을 통한 데이터가 뒷받침 되어 진다면 아주 효과적인 설계방법으로, 적은 시간과 비용으로 요구하는 제품을 선정하는데 도움이 될 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Lim, J. S., Nam, K. Y., Chung, W. J. and Lee, C. M., "Development of 24,000rpm High-Speed Spindle by Statistical Method," Summer conference of KSMTE, pp. 285-290, 2006.
2. Kim, S. J., Bae, M. I., Kim, H. C. and Kim, K. S., "A Study on Design, Manufacturing and Performance Evaluation of Air Bearing Spindle for PCB Drilling," J. of the KSPE, Vol. 23, No. 4, pp. 29-36, 2006.
3. Chung, W. J., Cho, Y. D., Lee, C. M., Jung, D. W. and Song, T. J., "A Study on the Reduction of Unclamping Time by Design of Experiments," J. of the KSMTE, Vol. 15, No. 3, pp. 1-7, 2006.
4. Lee, T. H., Han, S. Y. and Lim, J. K., "Topology Optimization of the Reinforcement for an Automobile Hood using Design Sensitivity Analysis," Key Engineering Materials, Vol. 183, No. 187, pp. 439-444, 2000.
5. Park, B. Y. and Kim, J. G., "Development of High Speed Machine Tool Spindle Regarding Vibration Characteristics," J. of the KSPE, Vol. 9, No. 3, pp. 149-156, 1992.
6. Kim, S. I., Jo, J. W., Lee, W. J. and Lee, Y. H., "Static/Dynamic/Thermal Characteristics Analysis of a High-Speed Spindle System with 50,000rpm," Summer conference of KSMTE, pp. 494-499, 2003.
7. Ha, J. Y., Song, S. H. and Kwon, O. C., "Dynamic Analysis of the High-Speed Spindle Structure for Machining Center," Autumn conference of KSMTE, pp. 40-45, 1996.
8. Kim, E. S., Lee, I. S. and Kim, B. M., "Optimum Design of Washing Machine Flange using Design of Experiment," J. of the KSME, Vol. 31, No. 5, pp. 601-608, 2007.
9. Jeong, S. M., "The latest design of machine," DONGMYEONG INC, pp. 248-250, 1996.
10. Lim, J. S., Chung, W. J., Lee, C. M. and Lee, J. H., "Improvement of a Stiffness for High-Speed Spindle Using the Taguchi Method," J. of the KSPE, Vol. 24, No. 2, pp. 127-133, 2007.
11. Lee, S. B., "Design of experiment on the center of example," ERETEC INC, pp. 13-14, 185-221, 2005.
12. Ha, D. Y., "The Optimum Design of Vacuum Interrupter with Axial Magnetic Field by using FEM and Design of Experiment," Uni. of HY Doctor's thesis, 2002.