

< 논문 >

실험계획법을 이용한 세탁기 플랜지 단면 최적설계

김의수[†] · 이인수* · 김병민**

(2007년 1월 24일 접수, 2007년 3월 29일 심사완료)

Optimum Design of Washing Machine Flange using Design of Experiment

Eui Soo Kim, In Soo Lee and Byung Min Kim

Key Words : Design of Experiment (실험계획법), Optimum Condition (최적조건), Response Surface Method (반응표면법), Main Effect (주효과), Interaction Effect (교호효과)

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. Shafting system is mainly divided into flange and shaft. Flange is located between the drum and shaft, transferring power from the shaft to drum, and acting as a supporter of the back of the drum. Because section of flange has various design factors according to configuration of flange, the optimum conditions can't be easily determined. Using a design of experiment (DOE), this study was performed investigating the interaction effect between factors as well as the main effect of the each design factor under bending and twist and proposed optimum condition using center composition method among response surface derived from regression equation of simulation-based DOE.

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. 이 중 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 드럼세탁기 동향은 국내 수요자의 요구에 맞추어 대용량 세탁을 가능하게 하고 또한 건조성능을 개선하기 위해 높은 회전수로 탈수도를 증가시키는 것이다. 환경 및 에너지에 대한 관심이 높아지면서

헤급회수를 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, 이불빨래 등의 대형 세탁물에 대한 요구가 커짐에 따라 세탁기의 세탁용량을 대형화 하고 있다. 이와 같이 세탁기가 고속화 대형화 될수록 드럼과 샤프트 사이에 위치하여 모터에서 발생한 동력을 축을 통해 드럼에 전달하고 드럼백의 강성역할을 하는 플랜지에는 더욱 큰 하중이 복합적으로 작용하여 파단강도와 피로수명의 문제점을 대두시킨다. 우리가 흔히 말하는 구조물의 강성은 휨강성도로 표현하는데 이는 물체가 가지는 고유의 물성치 (탄성계수)가 같다면 단면형상에 따라 결국 강도가 결정되어진다. 플랜지의 경우 단면크기과 형상은 선택의 폭이 넓다는 장점을 가지고 있으나 수많은 단면 중에서 생산비 및 재료비의 상승없이 여러조건을 만족하는 최적의 단면크기와 형상을 찾는 것은 매우 어려운 단점이 될 수도 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 플랜지 단면에 대한 최적화 연구가 필요하다고 할

[†] 책임저자, 회원, 국립과학수사연구소
E-mail : eui44013@lycos.co.kr
TEL : (02)2600-4985 FAX : (02)2600-4986

* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

** 회원, 부산대학교 기계공학부

수 있으며, 수많은 단면형상과 크기 중에서 성형성 및 급형의 단순성 등을 고려하여 제시된 형상에 대해서만 치수를 결정하는 것이 설계시간 및 비용을 줄일 수 있는 방법이다. 최근의 연구를 살펴보면 상용프로그램인 미니탭을 이용한 실험계획법을 요소설계 및 최적조건을 구하는데 많이 이용하고 있는데 최적의 단면형상을 제시하기 위해 이를 단면설계에 활용하는 경우는 매우 미흡한 실정이다.⁽¹⁻⁶⁾ 미니탭은 원래 기초통계학을 수강하는 학생들을 위하여 1972년 미국의 펜실베이니아 주립 대학에서 개발되었다. 하지만 그 후 공학, 사회학, 심리학, 경영학 등 자료의 분석을 통해서 연구를 하는 모든 분야에서 널리 사용되고 있다. 또한 GE에서 6-시그마 활동의 분석 툴로 미니탭을 사용하여 6-시그마를 성공적으로 정착시킨 이후로 최근에는 6-시그마 활동을 하는데 있어서 필수적인 분석도구로 자리를 잡아가고 있다. 미니탭은 기본적인 데이터의 입출력 방식이 엑셀과 비슷하여 복잡한 통계 분석을 간단히 할 수 있고, 통계적 의미를 쉽게 이해할 수 있도록 강력한 그래픽을 지원하고 있다.

본 연구에서는 미니탭사에서 제조한 상용프로그램인 미니탭 15을 활용한 실험계획법을 사용하여 발생응력에 영향을 미치는 많은 단면의 설계변수중에서 목적함수에 큰 영향을 미치는 설계변수를 통계학에 기초한 주효과, 교호효과 분석을 통해서 쉽게 선정하고 선정된 설계변수를 입력값으로 입력과 출력의 상관관계인 회귀모형함수를 추정하여 이를 반응표면 최적화 루틴을 이용하여 중량이 최소가 되는 최적의 플랜지 단면 형상을 제시한다.

2. 플랜지 설계

2.1 적용대상

스핀드럼의 회전으로 세탁물을 들어 올려서 떨어 뜨리는 낙차에 의한 충격력으로 세탁하는 방식인 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 회전을 발생하는 하중을 지지하기 위하여 플랜지(Flange)라고 하는 구조물이 장착되며 축은 이 플랜지에 고정되어서 터브의 베어링에

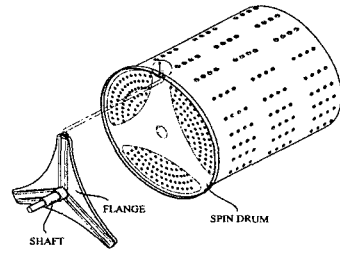


Fig. 1 Scheme of shaft system

지지되고 있다. Fig. 1은 플랜지를 포함한 축계의 개략도를 보여준다.

2.2 응력상태

세탁물을 담고 회전하는 세탁작과 볼트로 체결된 플랜지는 원심력과 언밸런스에 의한 굽힘모멘트와 회전에 의한 비틀림모멘트를 동시에 받는 경우로 Rankin이 주장한 최대주응력설과 Guest가 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 상당비틀림모멘트(Equivalent twisting moment)가 비틀림모멘트로 작용하였을 경우의 비틀림응력에 상당하다는 것이다.⁽⁷⁾ 여기서 세탁기 플랜지에 작용하는 굽힘모멘트와 비틀림모멘트는 일정하지 않고 복잡하게 변동하든지 또는 충격적으로 작용하는 경우가 많아 동적영향을 고려하여 플랜지를 설계하기 때문에 동적효과계수 $k_m = 2.0$,

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

$k_t = 1.5$ 의 값을 곱하여 나타내었다.

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

플랜지의 휨강성도는 단면 2 차모멘트로 크게 설계함으로써 증가하며 최대굽힘응력과 단면 2 차모멘트의 관계식은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{e-max} = \frac{M_{e-max} C}{I} = \frac{M_{e-max}}{Z} \quad (5)$$

여기서 C 는 중립축으로부터의 거리이며, I 는 단면 2 차모멘트, Z 는 단면계수이다. σ_{e-max} 를 최대상당응력으로 하여 플랜지가 파손하지 않기 위해서는 σ_e 가 허용응력 σ_a 보다 작아야 된다.

2.3 단면형상

식 (5)와 같이 만약 물성치가 동일하다고 가정하면 단면형상에 따라 강도가 결정되어진다. 본항

$$I = \int y^2 dA = \frac{(2F_1 + F_2 + 4T)H^3}{12} + H(2F_1 + F_2 + 4T)\left(\frac{H}{2} - y\right)^2 - 2\left\{\frac{F_1(H-T)^3}{12} + F_1(H-T)\left(\frac{H+T}{2} - y\right)^2\right\} - \left\{\frac{F_2(H-T)^3}{12} + F_2(H-T)\left(\frac{H+T}{2} - y\right)^2\right\} \quad (6)$$

에서는 수많은 단면형상 중에서 다이캐스팅 성형성, 금형의 단순성, 비용과 생산성 등을 고려하여

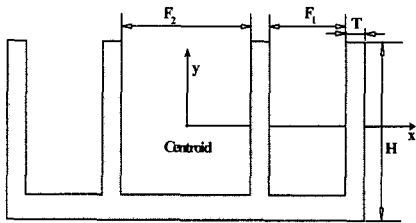


Fig. 2 Configuration of section type I

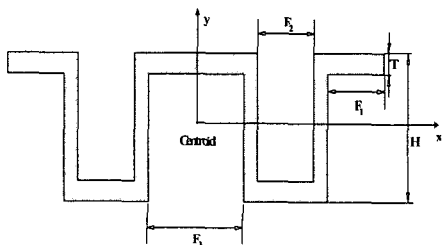


Fig. 3 Configuration of section type II

$$I = \int y^2 dA = \frac{(2F_1 + 2F_2 + F_3 + 4T)H^3}{12} + H(2F_1 + 2F_2 + F_3 + 4T)\left(\frac{H}{2} - y\right)^2 - 2\left\{\frac{F_1(H-T)^3}{12} + F_1(H-T)\left(\frac{H+T}{2} - y\right)^2\right\} - 2\left\{\frac{F_2(H-T)^3}{12} + F_2(H-T)\left(\frac{H+T}{2} - y\right)^2\right\} - \left\{\frac{F_3(H-T)^3}{12} + F_3(H-T)\left(\frac{H-T}{2} - y\right)^2\right\} \quad (7)$$

두 가지 형상을 Fig. 2, Fig. 3 에 제시하였다. 또 한편 제시된 형상에 대한 단면 2 차모멘트 값을 설계 변수로 표현하여 각각 식 (6), (7)에 나타내었다.

3. 실험계획법을 이용한 최적설계

3.1 실험계획법의 개요

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(최적조건 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. 목적특성의 변화에 미친 여러가지 인자들의 영향 정도를 정량적으로 평가하는 실험데이터의 해석방법에는 분산분석(ANOVA : Analysis of Variance), 상관분석(Correlation Analysis), 회귀분석(Regression Analysis), 요인배치 분석(Factorial Design Analysis), 반응표면 분석(Response Surface Analysis), 혼합물 분석(Mixture Analysis) 등이 있다. 이들 분석기법을

통하여 요인효과와 추정과 최적조합의 공정조건을 설정하고 설계방식을 표준화한다.⁽⁸⁾

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 함수를 f 로 나타내면, $y = f(x)$ 로 나타낼 수 있고 이 때 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.

4. 플랜지 단면에 대한 응용

4.1 목적함수의 정의와 설계변수의 선정

구조물의 확정론적 최적설계 방법에 대해 수식을 전개하면 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } F(d) \\ & \text{Subject to } G_i(d) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots \\ & \quad H_k(d) \leq 0 \quad k = 1, 2, \dots \\ & \quad (d_i)^L < d_i < (d_i)^U \quad i = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)에서 $F(d)$ 는 목적함수, $G_i(d)$ 는 부등호 구속조건, $H_k(d)$ 는 등호 구속조건이며, d_i 는 설계변수이고 $(d_i)^L$ 및 $(d_i)^U$ 는 설계변수가 가지는 최소, 최대값을 나타내는 주변 구속조건으로 정의 된다.⁽⁹⁾ 본 연구에서는 Fig. 2, Fig. 3에서 제시된 단면형상에 대해 플랜지의 목적함수인 단면적을 최소화하고 허용응력에 대한 구속조건을 만족하는 범위내에서 단면설계변수에 대해 반응표면법(response surface method)을 사용하여 근사적으로 수식화하고 이를 이용하여 최적설계를 수행한다. 위에서 언급한 방법으로 확정론적 최적 설계를 수행하면 설계 변수에 대해 최적값을 찾을 수 있다. 최적설계

조건으로서 목적함수는 플랜지 면적을 최소화하는 것으로 설정하였고, 구속조건은 $\sigma_{e-max} < \sigma_a$ 되도록 설정하였으며, σ_a 값은 ADC3 종의 인장강도를 진동, 충격이 있을 시 안전율 6 을 적용하여 50MPa 을 설정하였다. 설계변수는 플랜지 단면형상의 각 치수인 F1, F2, F3, H, T 를 각각 설정하였다. 이와 같은 방법으로 최적설계를 수행하여 설계 변수인 플랜지 단면의 치수들을 구할 수 있다.

4.2 요인설계

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 소

Table 1 Design factor and level of type I

	F1(mm)	F2(mm)	H(mm)	T(mm)
-1	30	30	20	4
+1	50	50	30	7

Table 2 Orthogonal arrays of type I

Experiment No.	F1	F2	H	T
1	30	30	20	4
2	50	30	20	4
3	30	50	20	4
4	50	50	20	4
5	30	30	30	4
6	50	30	30	4
7	30	50	30	4
8	50	50	30	4
9	30	30	20	7
10	50	30	20	7
11	30	50	20	7
12	50	50	20	7
13	30	30	30	7
14	50	30	30	7
15	30	50	30	7
16	50	50	30	7

Table 3 Design factor and level of type II

	F1(mm)	F2(mm)	F3(mm)	H(mm)	T(mm)
-1	30	30	30	20	4
+1	50	50	50	30	7

Table 4 Orthogonal arrays of type II

Experiment No.	F1	F2	F3	H	T
1	30	30	30	20	4
2	50	30	30	20	4
3	30	50	30	20	4
4	50	50	30	20	4
5	30	30	50	20	4
6	50	30	50	20	4
7	30	50	50	20	4
8	50	50	50	20	4
9	30	30	30	30	4
10	50	30	30	30	4
11	30	50	30	30	4
12	50	50	30	30	4
13	30	30	50	30	4
14	50	30	50	30	4
15	30	50	50	30	4
16	50	50	50	30	4
17	30	30	30	20	7
18	50	30	30	20	7
19	30	50	30	20	7
20	50	50	30	20	7
21	30	30	50	20	7
22	50	30	50	20	7
23	30	50	50	20	7
24	50	50	50	20	7
25	30	30	30	30	7
26	50	30	30	30	7
27	30	50	30	30	7
28	50	50	30	30	7
29	30	30	50	30	7
30	50	30	50	30	7
31	30	50	50	30	7
32	50	50	50	30	7

요된다. 이에 본 논문에서는 실험계획법과 제시된 계산식을 병행 사용하여 목적하고자 하는 설계모델을 찾는 방법을 제안, 검토하였다. Table 1, Table 3 은 type I 과 type II 의 설계인자와 그 인자들의 수준을 각각 나타내었고, Table 2, Table 4 는 type I 과 type II 에 대해 실험 순서에 따른 각각의 실험조건을 직교배열표로 나타내었다.

4.3 요인분석

설정된 설계인자가 서로 상호작용을 가지고 있는지, 응력의 변화에 가장 영향을 미치는 인자는

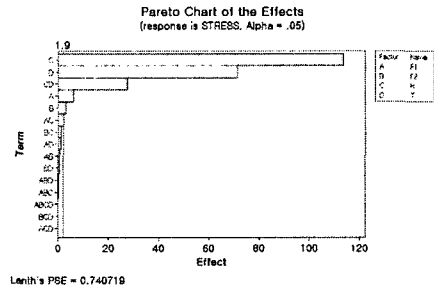


Fig. 4 Pareto plot of section type I

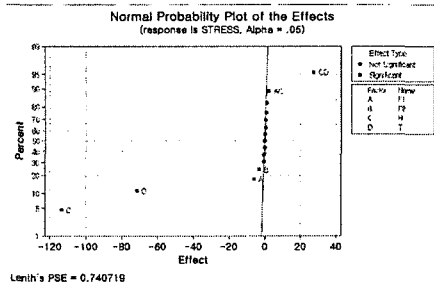


Fig. 5 Normal probability plot of section type I

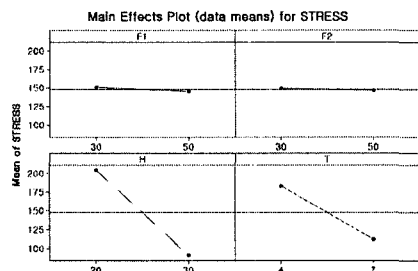


Fig. 6 Main effect plot of section type I

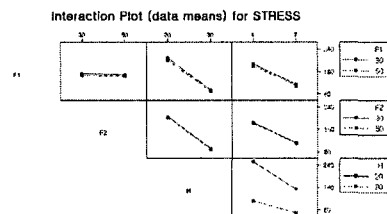


Fig. 7 Interaction effect plot of section type I

무엇인지, 영향을 미친다면 어느 정도의 영향을 미치는지를 파악하기 위해 요인분석을 수행하였다.

이는 중요설계인자를 도출하고 최적설계시 고려해

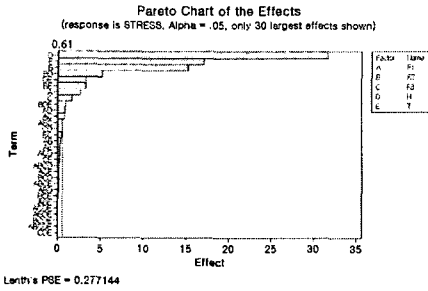


Fig. 8 Pareto plot of section type II

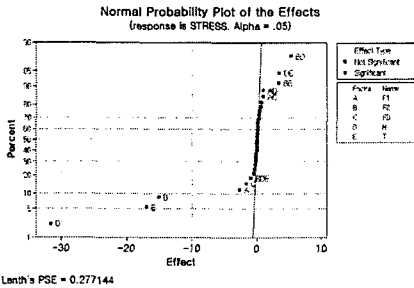


Fig. 9 Normal probability plot of section type II

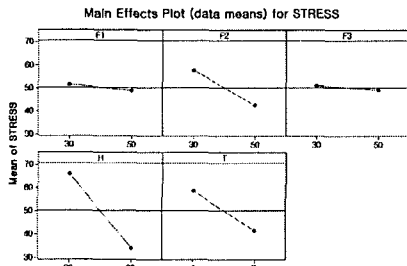


Fig. 10 Main effect plot of section type II

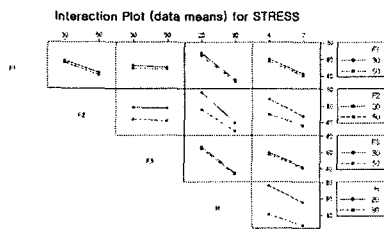


Fig. 11 Interaction effect plot of section type II

야 하지 않을 인자를 제거함으로써 보다 정밀하고 정확한 최적의 설계값을 제시하는 데 필수조건이라 할 수 있다. 요인분석 방법에는 여러가지가 있으나 본 연구에서는 파레토도와 정규확률분포도로 유의한 인자를 파악하고, 주효과와 교호효과를 분석함으로써 중요설계인자 및 상호작용에 대해 알아 보았다. Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7 에 type I 에 대한 요인분석 결과를 나타내었고, Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11 에 type II 에 대한 요인분석 결과를 나타내었다. Fig. 4 에서 가운데 점선보다 큰 인자는 유의수준 0.5 에서 유의함을 뜻하고, Fig. 5 에서는 정규선에서 멀리 떨어질수록 유의함을 의미하므로 type I 에서는 F1, F2, H, T, F1*H, H*T 인자는 유의한 것으로 나타나고 나머지 교호인자는 모두 유의하지 않음을 알 수 있다. Fig. 6 과 Fig. 7 에서는 F1, F2 는 응력에 미치는 영향이 매우 미비하나 H, T 는 모두 응력과 음의 강한 상관관계를 가지며 그 영향이 매우 크고 인자간 교호작용은 존재하지 않음을 알 수 있다. type II 에서는 Fig. 8, Fig. 9 를 통해 F1, F2, F3, H, T, F1*F3, F1*H, F2*T, H*T, F2*H 인자는 유의하고 나머지 교호인자는 모두 유의하지 않으며, F2, H, T 인자가 응력에 많은 영향을 미치는 주요인자이고 F2 와 H 간의 교호작용은 미비하게 존재하나 그 외 인자간 교호작용은 존재하지 않는다.

4.4 최적설계

분석된 내용을 통해 미니탭에서 지원하는 반응표면설계 중 가장 일반적인 중심합성법을 사용하여 최적의 설계값을 제시하였다. 중심합성법은 효율적으로 1, 2 차항을 추정하고자 할 때와 요인 배치 실험 후에 추가 실험하여 곡률 반응변수를 모델화 할 때 많이 사용되며,⁽⁸⁾ 본 연구에서는 유의하지 않는 인자와 교호작용들을 제외하고 실험데이터와 가장 적합한 축소회귀모델을 찾기 위해 다수의 항에 몇 차례 재적합시키는 과정을 반복하였으며 그 결과를 Fig. 12, Fig. 14 에 나타내었고 그 회귀모델에 의해 얻어진 최적 요인 수준은 Fig. 13, Fig. 15 와 같다. type I 은 인자간 교호작용이 전혀 존재하지 않으므로 1 차항으로 그 식을 추정하였고 type II 의 경우는 유의한 교호작용이 하나 이상 존재하므로 이를 포함하는 완전 2 차항으로 반응표면 모델을 축소시켰으며, 그 결과 반응 값의 호감도 d 가 모두 1 인 적합한 모델을 찾을 수 있었다.

4.5 결과 및 고찰

Table 5 는 신뢰도 95%일 경우 type I 과 type II 의

Response Surface Regression: STRESS, AREA versus F1, F2, H, T

Response Surface Regression: STRESS versus F1, F2, H, T

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for STRESS

Term	Coeff	SE Coef	T	P
Constant	126.895	0.9259	137.056	0.000
F1	-1.206	1.0523	-1.146	0.262
F2	-0.603	1.0523	-0.573	0.571
H	-25.967	1.0523	-24.678	0.000
T	-15.353	1.0523	-14.580	0.000

S = 5.155 R-Sq = 96.9% R-Sq(Adj) = 96.5%

Analysis of Variance for STRESS

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	4	21884.2	21884.2	5471.04	205.88	0.000
Linear	4	21884.2	21884.2	5471.04	205.88	0.000
Residual Error	26	690.9	690.9	26.57		
Lack-of-Fit	20	690.9	690.9	34.55		
Pure Error	6	0.0	0.0	0.00		
Total	30	22575.1				

Fig. 12 Response surface regression of section type I

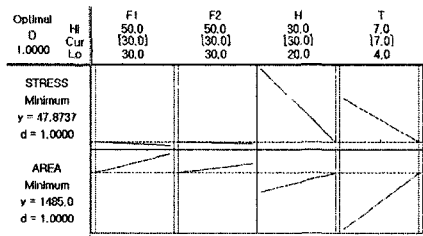


Fig. 13 Optimum design values of section type I

Response Surface Regression: STRESS, AREA versus F1, F2, F3, H, T

Response Surface Regression: STRESS versus F1, F2, F3, H, T

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for STRESS

Term	Coeff	SE Coef	T	P
Constant	41.7724	0.21707	192.437	0.000
F1	-0.2670	0.03496	-7.638	0.000
F2	-2.0249	0.03496	-58.249	0.000
F3	-0.1825	0.03496	-5.223	0.000
H	-3.9181	0.03496	-112.024	0.000
T	-3.1854	0.03496	-91.125	0.000
F1*F1	0.0225	0.04971	0.453	0.653
F2*F2	0.2252	0.04971	4.529	0.000
F3*F3	0.0070	0.04971	0.141	0.899
H*H	0.7523	0.04971	15.122	0.000
T*T	0.4165	0.04971	8.369	0.000
F1*F2	0.0198	0.04967	0.412	0.684
F1*F3	0.0188	0.04967	0.461	0.649
F1*H	0.0235	0.04967	0.473	0.631
F1*T	0.0167	0.04967	0.337	0.703
F2*F3	0.0094	0.04967	0.191	0.858
F2*H	0.4183	0.04967	8.425	0.000
F2*T	0.2521	0.04967	5.075	0.000
F3*H	0.0259	0.04967	0.521	0.615
F3*T	0.0078	0.04967	0.156	0.884
H*T	0.2517	0.04967	5.069	0.000

S = 0.2301 R-Sq = 100.0% R-Sq(Adj) = 99.9%

Analysis of Variance for STRESS

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	20	2548.08	2348.98	117.403	2218.1	0.000
Linear	5	2312.96	2312.96	462.513	8738.54	0.000
Quadratic	5	25.32	25.32	5.065	96.333	0.000
Interaction	10	9.97	9.97	0.997	19.04	0.000
Residual Error	22	1.16	1.16	0.053		
Total	42	2549.22				

Fig. 14 Response surface regression of section type II

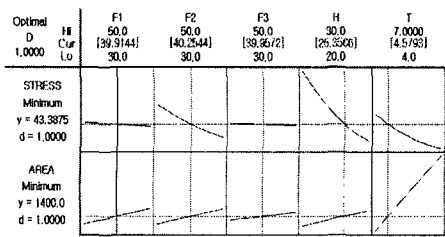


Fig. 15 Optimum design values of section type II

Table 5 Comparison of optimum design values

Type	F1 (mm)	F2 (mm)	F3 (mm)	H (mm)	T (mm)	Length (mm)	Stress (MPa)/ Area (mm)
Type I	30	30		30	7	118	47.9/1485
Eq.	$Y=126.895-25.967*H-15.353*T$						
Type II	39.9	40.3	40	26.4	4.6	200.3	43.4/1400
Eq.	$Y=41.7724-0.367*F1-2.8379*F2-0.1835*F3-5.918*H-3.1854*T+0.2032*F2*F2+0.7253*H*H+0.4165*T*T+0.4183*F2*H+0.2621*F2*T+0.2517*H*T$						

최적설계 결과를 정리해서 보여준다. 만약 전체 폭에 제한이 있다면 type I의 설계를 채택할 수 있으나 두께가 많이 두꺼워지고 단면적 또한 커지므로 좋은 설계 방향이라 할 수 없으며, 또한 F1, F2는 응력에 거의 영향을 미치지 못하고 H, T의 변화에 대해서만 응력에 대한 영향력이 크므로 단면 2 차 모멘트를 크게 하여 강도를 향상시켰다는 본 연구의 본래 목적에는 부합하지 못한다고 사료된다. type II의 경우는 교호작용을 고려한 적합한 모델이라 볼 수 있으나 전체 폭이 길어지는 단점을 갖고 있으므로 전체 폭을 구속조건으로 두고 실험계획법을 다시 적용한다면 더욱 만족스러운 결과를 얻을 수 있다고 판단되어진다.

5. 결론

본 연구에서는 상용프로그램인 미니탭을 활용한 실험계획법을 사용하여 다양한 단면 설계변수 중에서 목적함수에 큰 영향을 미치는 중요설계변수를 쉽게 선정하고 회귀모형함수를 추정하여 이를 반응표면 최적화 루틴을 이용하여 최적의 플랜지 단면 형상을 제시하였다. 이는 통계적 해석을 통해 형상결정에 대한 자유도가 많아 예측이 어려울 때 설계에 대한 기준값을 설정하는데 매우 유용하며, 더 나아가 복잡한 단면의 최적형상도 통계적으로 쉽게 접근할 수 있는 기틀을 마련하였다고 생각된다. 차후 중심합성법이 가지고 있는 단점에 대한 대체방법과 실제 결정된 최적값으로 제품을 제작하여 실험이 병행되어 진다면 아주 효과적인 설계방법으로 적은 시간과 비용으로 요구하는 제품을 생산 할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- (1) Kim, N. H., Choi, M. H., Kim, S. Y. and Chang, E. G., 2006, "Design of Experiment Method Considering Interaction Effect of Process Parameters for Optimization of Copper Chemical Mechanical Polishing Process," *Microelectronic Engineering*, Vol. 83, pp. 506 ~ 512.
- (2) Song, C. S., Kim, J. H., Kim, J. H., 2003, "Selection of Optimum Machining Condition of Dry Turning Using Taguchi Method," *Autumn conference of KSMTE*, pp. 19 ~ 24.
- (3) Kim, J. S., Park, C. J., Park, T. W., 1996, "Suspension Parameter Design Using a Design of Experiments," *KSAE*, Vol. 4, No. 1, pp. 16 ~ 27.
- (4) Lee, S. G., Won, S. H., Lee, H. W., Lee, J., 2005, "Optimal Design of High Precision Maglev System using Finite Element Method and Design Of Experiments," *Summer conference of KIEE*.
- (5) Onwubiko, C., 2000, *Introduction to Engineering Design Optimization*, Prentice Hall.
- (6) Marek, R., Micha, Y., 1988, "Optimal Design of a Thin-Walled Cross-Section Subject to Bending with Torsion Against Creep Rupture," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 30, No. 2, pp. 127 ~ 136.
- (7) Jeong, S. M., 1996, *The Latest Design of Machine*, DONGMYEONG INC, pp. 248 ~ 250.
- (8) Lee, S. B., 2005, *Design of Experiment on the Center of Example*, ERETEC INC, pp. 13 ~ 14, pp. 185.
- (9) Lim, J. S., Yim, H. J., Lee, S. B., Heo, S. J., 2002, "Reliability Based Design Optimization for Section Shape of Simple Structures," *Spring conference of KSNVE*, pp. 672 ~ 676.