

가공변수의 불확실성을 고려한 전자제어식 차동제한장치 솔레노이드 어셈블리의 강건 최적설계[§]

오상균* · 이광기** · 서창희* · 정윤철* · 김영석***†

* 대구기계부품연구원, ** 브이피코리아(주), *** 경북대학교 기계공학부

Robust Optimization of the Solenoid Assembly in Electromagnetic Limited Slip Differential by Considering the Uncertainties in Machining Variables

Sang Kyun Oh*, Kwang Ki Lee**, Chang Hee Suh*, Yun-Chul Jung* and Young Suk Kim***†

* Daegu Mechatronics & Materials Institute,

** Consulting Division, VP Korea,

*** School of Mechanical Engineering, Kyungpook Nat'l Univ.

(Received May 18, 2011; Revised August 3, 2011; Accepted August 3, 2011)

Key Words: Machining Variable(가공변수), Uncertainty(불확실성), Solenoid Assembly(솔레노이드 어셈블리), LSD(Limited Slip Differential, 차동제한장치), Response Surface Model(반응표면모델), Robust Optimization(강건 최적설계)

초록: 전자제어식 차동제한 장치는 기계식에 비해서 능동제어가 가능하고 응답성이 좋아 기계식을 대체해 나가고 있다. STS 304 재질의 코일 하우징은 전자제어식 차동제한장치의 솔레노이드 어셈블리에서 가장 중요한 부품이다. 코일 하우징의 제조시 높은 형상 정밀도가 필수적이거나, STS 304의 박판 사용과 가공변수의 변동으로 정밀 가공이 어렵다. 본 연구의 목적은 코일하우징의 가공조건에서 강건해를 구하여 평균과 변동을 최적화 하는 것이다. 코일하우징의 형상정밀도 평균과 표준편차를 최소화 하기 위한 주요 변수로 조의 척킹압력, 절삭속도, 이송속도의 평균과 표준편차가 고려됐다. 가공변수의 변동을 고려하여 평균과 표준편차를 모두 최소화 하는 최적의 조건을 선정하고자 반응표면모델 기반 2차 테일러 전개를 통한 강건 최적설계를 수행하였다.

Abstract: The mechanical limited slip differential (LSD) in vehicles is being replaced by the electromagnetic LSD because of its fast response and better active control characteristics. The coil housing made of STS 304 is one of the most important parts in the solenoid assembly of the electromagnetic LSD. High geometrical accuracy is a prerequisite for the manufacture of such coil housings, but precision machining is difficult because of the use of STS 304 thin plate and the variance in machining variables. The aim of this study is to optimize the mean and variance of the shape accuracy in the coil housing by finding a robust solution for the machining process conditions. The mean and standard deviation of the jaw contact pressure, cutting speed, and feed rate are considered to be the major parameters for minimizing the geometrical mean and variance. The response surface model based on the second-order Taylor series is combined together to minimize the mean and variance of the shape accuracy of the coil housing.

1. 서 론

차동제한장치(LSD)는 기존의 차동장치 위치에 장착되어 차동장치의 단점을 보완하고 설로의 미끄러운 길에서 미끄럼방지, 오프로드(Off-road) 주

행 또는 급선회시 차량의 주행성 및 안정성 확보를 위해 RV 및 SUV 차량에 널리 보급되어 있으며, 최근 고성능 스포츠카와 고급승용차에도 적용이 확대되고 있다. 전자제어식 차동제한장치는 기계식에 비해서 능동제어가 가능하고 응답성이 좋아 기계식을 대체해 나가고 있다.

전자제어식 차동제한장치의 솔레노이드 어셈블리는 디퍼런셜 케이스 내에 장착되어 자력에 의한 왕복운동을 하여 필요한 동력을 얻는 부품으로 미세

§ 이 논문은 대한기계학회 2011년도 신뢰성부문 춘계 학술대회(2011. 5. 19.-20., 서울과기대) 발표논문임

† Corresponding Author, caekim@knu.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

한 전류에서 높은 전류까지 비례 제어를 위해 소재 특성과 형상정밀도 제어가 요구되는 제품이다. 특히, 슬레노이드 어셈블리는 전자제어식 차동제한장치의 핵심 부품으로서, 디퍼런셜 케이스와 조립 및 플런저의 기능유지를 위해 코일 하우징의 형상 정밀도가 매우 중요하다. 그러나, 난삭재인 오스테나이트계 스테인리스강이 사용되고 두께가 얇기 때문에 정밀 가공이 어렵다. 원형 공작물의 가공시 원형정도 저하 현상을 개선하기 위한 보상시스템의 연구⁽¹⁾와 얇은 두께 원형공작물의 채터 안정성 해석에 관한 연구,⁽²⁾ 진원도 모델링에 관한 연구⁽³⁾가 이루어졌지만, 얇은 두께의 난삭재에 대한 척킹 컴플라이언스와 가공변수 변동에 대한 연구는 미비하였다. 오상균 등⁽⁴⁾은 전자제어식 차동제한장치의 슬레노이드 어셈블리를 개발하였으며, 코일 하우징의 형상 정밀도 향상을 위해서 척킹 방법에 대해서 고찰하고, 주요 가공 변수인 척킹 조의 접촉 압력, 절삭 속도, 이송 속도에 대한 영향을 검토하였다. 특히 다구찌 실험계획법을 적용하여 변수의 영향도를 평가한 후에, 각각의 인자에 대한 원통도의 SN비(Signal to Noise ratio)를 분석하여 최적 가공조건을 선정하였다. 하지만 실제 제작에서 발생하는 가공변수의 변동을 고려한 원통도의 최적 가공조건을 선정하지는 못했다.

따라서 본 연구에서는 3수준 직교배열에 의한 반응표면모델을 적용하여, 가공변수의 변동에 따른 원통도를 모델링하여 원통도의 변동을 나타내는 표준편차를 최소화하기 위하여 반응표면모델에 2차 테일러 전개를 적용하여 가공변수의 변동을 고려한 전자제어식 차동제한장치 슬레노이드 어셈블리의 강건 최적설계를 수행하였다.

2. 척킹조건 선정

2.1 코일하우징의 척킹조건

원형의 공작물을 가공할 때, 척의 위치에 따른 공작물 반경 방향의 컴플라이언스 변화로 인해 절삭 깊이의 차이가 발생하여 가공 후 공작물의 원형정도가 저하되며, 공작물의 원형정도 저하는 채터링 현상의 원인이 되고 있다.^(5,6)

본 연구에서는 가공공정에서 척킹조건의 영향을 비교하기 위하여 3조오와 6조오에서 각각 코일하우징과 곡률반경이 동일한 완전접촉 척킹 형태를 모사하여 3면 구속과 6면 구속조건을 부여하여 구조해석을 수행하였다(Fig. 1). 유한요소해

석은 상용 구조해석 프로그램인 NASTRAN을 사용하였으며, 요소의 평균크기는 약 2 mm로 하였고, 코일하우징 내경 절삭점에 집중하중 또는 분포하중이 작용하도록 하중조건을 부여하였다.

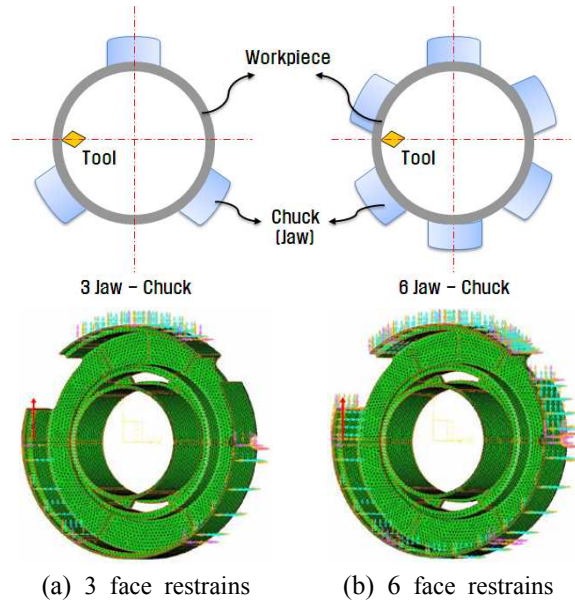


Fig. 1 FE-model of chucking condition used in the present study

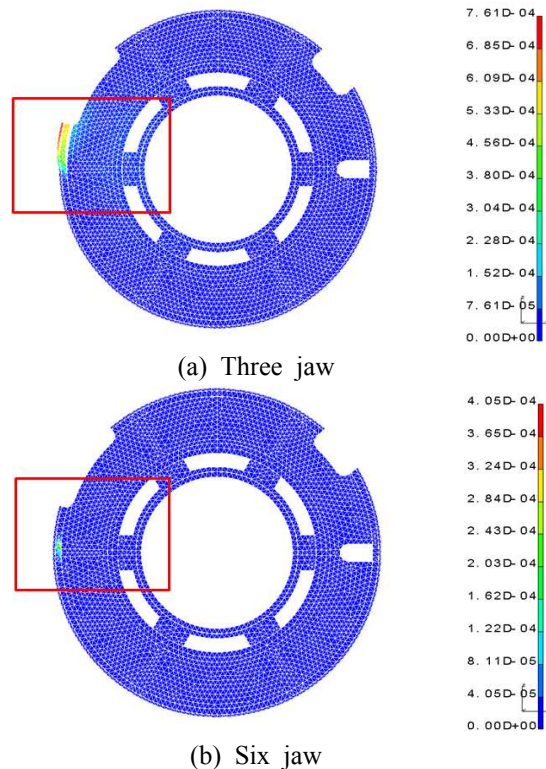


Fig. 2 Distribution of displacement in the coil housings with 3 and 6 jaws.

Table 1 Result of structural analysis

Chucking Jaw Type	Restrains	Loads (N)	Max. Displacement (mm)
Three Jaw	3 Face	100 (Concentrated load)	7.61×10^{-4}
	3 Face	100 (Distributed loads)	3.76×10^{-4}
Six Jaw	6 Face	100 (Concentrated load)	4.05×10^{-4}
	6 Face	100 (Distributed loads)	6.84×10^{-5}

2.2 척킹조건 구조해석

코일하우징의 선삭가공시 척킹형태를 모사하여 변위 분포를 해석한 결과를 Fig. 2과 Table 1에 나타내었다. 3조오에 집중하중이 작용했을 때 비해 동일 하중조건에서 6조오인 6면 구속시 변위가 감소하였으며, 분포하중이 작용했을 때 유사한 결과를 나타냈다. 이 결과를 통하여 6조오의 척킹조건이 3조오에 비해 강성이 우수하여 가공시 제품 변형을 최소화 할 것으로 예측되었으며, 코일하우징의 가공적 설계시 6조오와 완전 접촉 조건을 고려하는 것이 원통도를 최소화하는데 유리하다는 것을 유한요소해석을 통하여 알 수 있었다.

2.3 코일하우징의 제작

본 연구에서는 6조오 다이어프램 척(Fig. 3)을 적용하여 솔레노이드 어셈블리의 코일하우징을 가공하였으며 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 각각 비자성의 오스테나이트계 스테인리스강(SUS 304) 소재, 열간압연연강(SPHC) 소재로 성형한 가이드(B1)와 하우징(B2)을 레이저 용접에 의해 접합 후 최종 선삭 가공하였으며, 코일하우징에서 플런저와 조립 및 미세한 왕복운동을 안내하는 가이드를 가공 최적화 대상으로 하였다.

3. 반응표면모델

3.1 가공변수와 직교배열표

Table 2는 제어인자로서 실험에 적용된 가공변수와 각각의 인자에 대해 3가지 수준을 나타내었다. 여기서, Level 1은 낮은 수준, Level 2는 중간

Table 2 Machining variables and levels

Symbol	Machining Variables	Unit	I/O	Level 1	Level 2	Level 3
P	Chucking pressure	kg/cm ²	Inner	9	10	11
			Outer	9	10	11
S	Cutting speed	m/min	Inner	201	251	302
			Outer	118	148	177
F	Feed rate	mm/rev	Inner	0.056	0.070	0.084
			Outer	0.040	0.050	0.060

Table 3 Orthogonal array L₉(3³)

Experimental No.	Machining variable level		
	P	S	F
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

수준, Level 3은 높은 수준을 의미한다.

실험에 사용된 제어인자는 응답함수인 솔레노이드 어셈블리의 가이드 내경 및 외경 원통도에 가장 큰 영향을 미치는 가공변수인 척킹 조의 접촉압력(P)과 절삭속도(S), 이송속도(F)의 3가지를 선정하였다. 수준은 실제 제품 개발 시 적용하고 있는 조건을 기준으로 설정하였으며, 본 연구에서 적용하는 3수준 직교배열표⁽⁷⁾를 Table 3에 나타내었다.

3.2 반응표면모델

가공변수인 척킹 조의 접촉압력(P)과 절삭속도

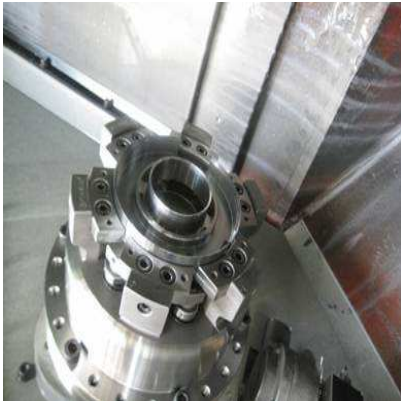


Fig. 3 Diaphragm-chuck of coil housing

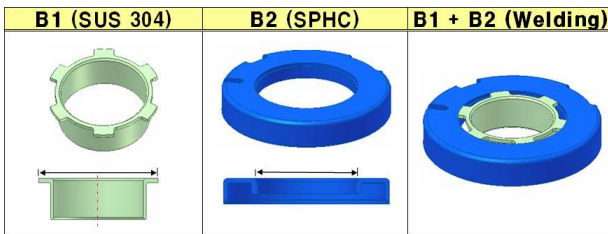


Fig. 4 Coil housing of the solenoid assembly

(S), 이송속도(F)는 일반적으로 식 (1)을 적용하여 [-1, 1]의 범위로 모두 정규화를 시켜서 적용한다.

$$X_i = \frac{x_i - \bar{x}_i}{c_i}, \quad c_i = \text{normalization factor} \quad (1)$$

여기서 \bar{x}_i 는 가공변수 x_i 의 평균값을 의미한다. 3가지 가공변수 x_i 에 대한 응답함수인 원통도 y_1 의 반응표면모델은 식 (2)와 같은 다항식 모델로 구성할 수 있다.⁽⁸⁾

$$Y = X^T\beta + \epsilon \quad (2)$$

여기서 $Y = [y_1]$, $X = [1 \ X_i \ X_i X_j]^T$, ϵ 은 오차항을 나타내며, 식 (2)의 반응표면모델의 미지 계수 항인 $\beta = [\beta_i]$ 는 실험점 오차합의 제곱인 ϵ^2 를 최소화하는 최소자승법(Least Square Method)을 적용하여 오차항의 노름(norm)을 최소화하면 식 (3)을 얻는다.

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y_0 \quad (3)$$

따라서 식 (2)에 식 (3)을 대입하면 응답에 대한 근사식 \hat{Y} 를 식 (4)와 같이 구할 수 있으며, 여기서 Y_0 는 3수준 직교배열을 적용하여 9회에 걸쳐 측정된 응답함수(목적함수)인 원통도를 의미한다.

$$\hat{Y} = X\beta = X^T[(X^T X)^{-1} X^T Y_0] \quad (4)$$

따라서 측정값과 근사값의 잔차 e 는 식 (5)와 같이 구한다.

$$e = Y - \hat{Y} \quad (5)$$

4. 강건 최적설계

4.1 강건 최적설계의 필요성

최근 기업에서 각광을 받고 있는 식스시그마 및 강건설계의 목적인 생산 현장에서 생산되는 제품의 강건성(Robustness)을 고려해야만 하는 이유는 실제 제작 현장에서는 항상 가공변수에 의한 확률변동이 존재하며 본 연구에서 고려하는 접촉압력(P), 절삭속도(S), 이송속도(F)의 확률변동 범위가 각각 $\pm 3\%$, $\pm 0.3\%$, $\pm 0.1\%$ 로 정의되기 때문에 실제 솔레노이드 어셈블리의 가이드 내경 및 외경 원통도의 결과 분석도 평균뿐만 아니라 변동을 대별하는 표준편차까지 같이 분석을 해주어야 한다.

즉 원통도의 평균을 최소화하는 해를 찾는 것이 아니라 원통도의 변동성을 고려한 강건 최적설계를 통하여 평균뿐만 아니라 변동을 모두 최소화할 수 있는 해를 찾아주어야 실제 생산 현장에서 요구하는 확률변동이 적은 최적 가공조건을 선정할 수 있기 때문이다.

4.2 강건 최적설계의 수식화

가공변수의 확률변동을 고려한 강건 최적설계는 다음 식 (6)와 같이 일반화할 수 있다.⁽⁹⁾

$$\begin{aligned} &\text{Objective functions } y_i(x), \quad i = 1, 2, \dots, l \\ &\text{constraints } g_j(x), \quad j = 1, 2, \dots, m \\ &\text{Find } x \\ &\text{to minimize } (\mu_{y_i}, \sigma_{y_i}), \quad i = 1, 2, \dots, l \end{aligned} \quad (6)$$

Subject to constraints $\mu_{g_j} + \sigma_{g_j} \leq 0, j = 1, 2, \dots, m$

where $x_L + \Delta x \leq x \leq x_U - \Delta x$

여기서, l 은 목적함수의 개수, m 은 제약조건
 개수를 의미하며, x, x_L, x_U 는 각각 설계변수와
 설계변수의 하한값과 상한값을 나타낸다. μ_{y_i} 와
 σ_{y_i} 는 각각 목적함수 $y_i(x)$ 의 평균과 표준편차를
 나타내며, μ_{g_i} 와 σ_{g_i} 는 각각 제약조건 $g_i(x)$ 의 평
 균과 표준편차를 의미한다.

4.3 2차 테일러 전개에 의한 표준편차 근사화

목적함수 및 제한조건에의 표준편차는 많은 수의
 실험을 실행하지 않고서는 정확히 구하는 것은 불
 가능하기 때문에, 실험을 통하여 구한 반응표면모델
 에 몬테카를로 모의실험법, 테일러 전개에 의한 근
 사방법 또는 실험계획법 등이 다양하게 활용된다.

몬테카를로 모의실험법이 가장 정확하게 표준
 편차를 구할 수 있지만 많은 양의 계산시간이 요
 구되므로, 일반적으로 테일러 전개를 이용한 계
 산방법이 가장 널리 활용되고 있다. 2차 테일러
 전개를 이용해서 표준편차를 예측하는 방법은 다
 음 식 (7)과 같다.⁽¹⁰⁾

$$\sigma_y^2(x) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial^2 y}{\partial x_i^2} \right)^2 \sigma_{x_i}^4 \quad (7)$$

$$+ \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j>i}^n \left(\frac{\partial^2 y}{\partial x_i \partial x_j} \right)^2 \sigma_{x_i}^2 \sigma_{x_j}^2$$

식 (6)의 방법은 함수가 해석적으로 주어지지
 않다면 1차 및 2차 미분값을 근사적으로 구해
 야 하는 문제점을 가지고 있지만 계산의 편리성
 과 빠른 계산속도 때문에 근사함수가 주어진 경
 우에 가장 널리 적용이 되고 있다.

5. 결과 및 고찰

5.1 원통도 반응표면모델

Table 4는 3수준 직교배열을 적용한 가공변수
 의 총 9회의 조합에 대한 슬레노이드 어셈블리의
 형상정밀도(가이드 내경 및 외경 원통도)를 계측
 한 결과를 나타낸다.

Table 4의 실험데이터를 적용하여 구한 내경및
 외경 원통도의 평균에 대한 2차 다항식 반응표면

Table 4 Inner and outer cylindricity

No.	Machining variable level			Cylindricity (μm)	
	P	S	F	Inner	Outer
1	1	1	1	12.62	20.24
2	1	2	2	11.58	19.68
3	1	3	3	19.48	23.68
4	2	1	2	13.30	18.30
5	2	2	3	16.71	21.38
6	2	3	1	12.57	17.21
7	3	1	3	16.84	22.12
8	3	2	1	13.80	19.37
9	3	3	2	14.98	20.99

모델은 다음과 같으며 반응표면모델의 정확도를
 나타내는 결정계수는 내경 및 외경 원통도인 경
 우에 각각 1(100%)과 0.9998(99.98%)를 나타내며
 이것은 9가지의 실험점들을 2차 다항식 반응표면
 모델이 아주 정확하게 예측한다는 것을 알 수 있
 다.⁽¹¹⁾

$$C_{Inner,m} = 37.79 + 9.71P - 0.0418S - 1717.5F \quad (7)$$

$$- 0.235P^2 - 0.003PS + 0.000015S^2$$

$$+ 0.531SF + 8528.91F^2$$

$$C_{Outer,m} = 226.25 - 30.678P - 0.04713S \quad (8)$$

$$- 1901.08F + 1.44125P^2 + 45.5PF$$

$$+ 1.01458SF + 10100.0F^2$$

내경 및 외경 원통도의 평균에 대한 2차 다항식
 반응표면모델에 2차 테일러 전개를 적용하여 구한
 원통도의 표준편차는 가공변수의 확률변동을 3시그
 마로 정의하여 원통도의 표준편차를 계산하였다.

중요한 가공변수인 접촉압력(P), 절삭속도(S), 이
 송속도(F)의 확률변동 범위가 각각 평균에 대하여
 $\pm 3\%, \pm 0.3\%, \pm 0.1\%$ 이기 때문에, 확률변동을 3
 시그마라고 정의하면 각각의 표준편차는 평균에 대
 하여 접촉압력(P)인 경우는 1%, 절삭속도(S)인 경우
 는 0.17%, 이송속도(F)인 경우는 0.03%로 정의된다.

$$C_{Inner,SD} = (((9.714 - 0.47P - 0.003S) \quad (9)$$

$$\times (0.01P))^2 + (((-0.042) - 0.00301P$$

$$+ 0.00002S + 0.531F)$$

$$\times (0.0017S))^2 + (((-1717.5) + 0.531S$$

$$+ 17057.8F) \times (0.0003F))^2$$

$$+ 0.25 \times (0.4418 \times (0.01P))^4$$

$$+ 1.8075 \times 10^{-9} \times (0.0017S)^4$$

$$+ 581938659.82 \times (0.0003F)^4)$$

$$+ 0.0000090534 \times (0.01P)^2 \times (0.0017S)^2$$

$$+ 0.2821 \times (0.0017S)^2 \times (0.0003F)^2)^{1/2}$$

$$\begin{aligned}
 C_{Outer,SD} = & (((-30.678) + 2.8825P + 45.5F) \\
 & \times (0.01P))^2 + (((-0.047139) \\
 & + 1.01458F) \times (0.0017S))^2 \\
 & + (((-1901.083) + 45.5P \\
 & + 1.01458S + 20200.0F \times (0.0003F))^2 \\
 & + 0.25 \times (16.6176 \times (0.01P)^4 \\
 & + 816080000.0 \times (0.0003F)^4) + 2070.25 \\
 & \times (0.01P)^2 \times (0.0003F)^2 + 1.029379 \\
 & \times (0.0017S)^2 \times (0.0003F)^2)^{1/2}
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Fig. 5는 내경 원통도의 평균($C_{Inner,m}$) 및 표준편차($C_{Inner,SD}$)에 대한 민감도를 나타낸다. 접촉압력(P)과 절삭속도(S)인 경우에는 압력과 속도가 작아지면 원통도의 평균은 감소하지만 반대로 원통도의 변동이 증가하는 모순적인 관계를 보여준다. 반면에 이송속도(F)인 경우에는 속도의 증가가 원통도의 평균에는 영향을 주지만 원통도의 변동에는 영향이 거의 없다는 것을 알 수 있다.

즉 내경 원통도인 경우에는 접촉압력(P)과 절삭속도(S)가 원통도의 평균 및 표준편차에 대하여 모순되는 특성을 가지기 때문에, 모순되는 내경 원통도의 평균 및 변동을 모두 감소시키기 위해서는 강건 최적설계를 적용해야 한다.

Fig. 6는 외경 원통도의 평균($C_{Outer,m}$) 및 표준편차($C_{Outer,SD}$)에 대한 민감도를 나타낸다. 접촉압력(P)인 경우에는 원통도의 평균 및 변동을 최소화시키는 해가 존재하며 절삭속도(S)인 경우에는 속도변화에 따른 원통도의 평균과 변동의 민감도가 미미하다는 것을 알 수 있으며, 이송속도(F)인 경우에는 속도가 감소할수록 원통도의 평균과 변동이 모두 감소한다는 것을 알 수 있다.

즉 외경 원통도인 경우에는 민감도가 미미한 절삭속도(S)인 경우에는 작업자가 작업에 편리한 값으로 선정해주고, 이송속도(F)는 가능한 작게 해주고, 접촉압력(P)인 경우에는 원통도의 평균만 최적설계를 해도 평균과 표준편차를 모두 고려한 강건 최적설계와 유사한 최적해를 얻을 수 있다는 것을 보여준다.

5.2 원통도 강건 최적설계

평균만을 목적함수로 고려하여 최적화를 하는 일반 최적설계와 평균과 표준편차를 동시에 최적화하는 강건 최적설계의 결과가 내경 및 외경 원통도에 미치는 영향을 정량화하기 위하여 변동계수(CV: Coefficient of Variance)를 적용한다. 변동

Table 5 μ and CV comparison between conventional and robust optimization

Optimization		Conventional	Robust	Improvement (%)
Inner	μ	10.92	12.83	-17
	σ	0.1845	0.00869	95
	CV	0.0168	0.000441	97
Outer	μ	17.23	17.21	0.1
	σ	0.022	0.022	-
	CV	0.001274	0.001277	-0.2

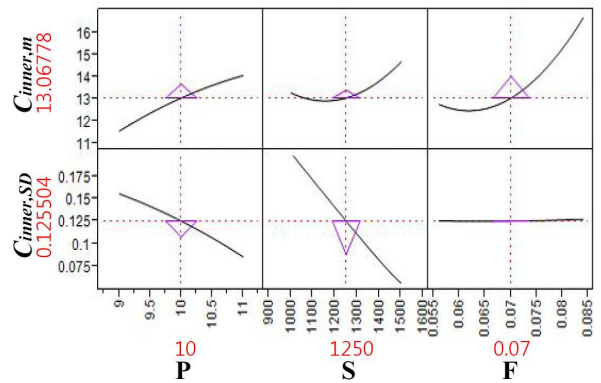


Fig. 5 Sensitivity of inner cylindricity

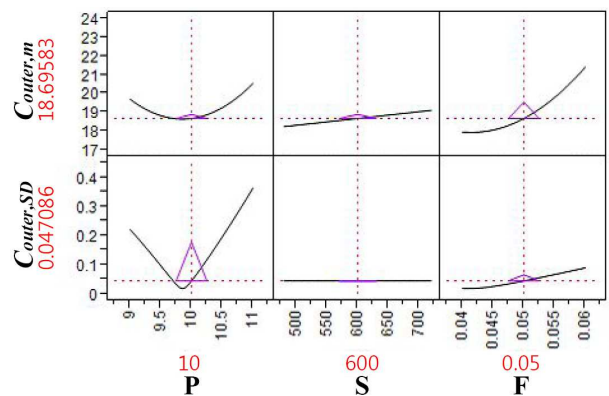


Fig. 6 Sensitivity of outer cylindricity

계수는 표준편차 σ 를 평균 μ 로 나누어 정규화한 값으로 정의되며, 평균 대비 변동(표준편차)이 얼마나 작은지를 나타내는 척도로서 변동계수가 작을수록 원통도 변동이 작은 특성을 가진다는 것을 의미한다.

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \quad (11)$$

후 기

Table 5는 평균만을 가지고 최적설계를 수행한 경우와 평균과 표준편차를 모두 고려하여 강건 최적설계를 수행한 결과를 평균과 CV값으로 비교한 결과이다.

Fig. 5와 Fig. 6에서 분석하여 예측한 결과와 같이 내측 원통도인 경우에는 강건 최적설계를 수행한 결과가 일반 최적설계를 수행한 결과와 비교하여 원통도의 평균은 17% 증가를 하였지만 변동은 95%, CV는 97% 감소한 것을 알 수 있다. 평균과 표준편차의 경향이 모순되는 문제인 경우에는 강건 최적설계를 수행하면 변동을 크게 줄일 수 있음을 확인하였다.

하지만 평균과 표준편차의 경향이 유사하게 나타나는 외경 원통도인 경우에는 평균을 최소화하는 일반 최적설계를 적용해도 강건 최적설계와 거의 유사한 결과를 얻는다는 것을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 전자제어식 차동제한장치의 솔레노이드 어셈블리의 형상 정밀도 향상을 위해 내경 및 외경 원통도의 평균과 표준편차를 모두 최소화하는 최적의 가공변수를 선정하고자 반응표면모델 기반 2차 테일러 전개를 통한 강건 최적설계를 3수준 직교배열 실험에 적용하여 다음의 결론을 도출하였다.

(1) 내경 및 외경 원통도 평균에 대한 2차 다항식 반응표면모델에 2차 테일러 전개를 적용하여 구한 표준편차를 적용하여 평균과 변동의 민감도 해석을 수행하였으며 평균과 표준편차를 모두 최소화하는 강건 최적설계 프로세스를 정립하였다.

(2) 내측 원통도인 경우에는 강건 최적설계를 수행한 결과가 일반 최적설계를 수행한 결과와 비교하여 원통도의 평균은 17% 증가를 하였지만 변동은 95%, CV는 97% 감소하였다.

(3) 평균과 표준편차의 경향이 유사하게 나타나는 외경 원통도인 경우에는 평균을 최소화하는 일반 최적설계를 적용해도 강건 최적설계와 거의 유사한 결과를 얻었다.

(4) 본 연구에서 제안한 강건 최적설계를 적용하면 평균과 표준편차의 경향이 모순되는 내경 원통도인 경우와 평균과 표준편차의 경향이 유사한 외경 원통도인 경우에도 모두 최적해를 구할 수 있다는 것을 입증하였다.

본 연구는 중소기업청의 “산연공동기술개발 사업”으로 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Lee, S. K. and Lee, J. H., 2002, "Chucking Compliance Compensation by Using Liner Motor," *Trans. Korean Soc. Mech. Engng(A)*, Vol. 26, No. 1, pp. 15~22.
- (2) Lai, G. J. and Chang, J. Y., 1995, "Stability Analysis of Chatter Vibration for a Thin-wall Cylindrical Workpiece," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 35, No. 3, pp. 431~444.
- (3) Cho, N. and Tu, J., 2001, "Roundness Modeling of Machined Parts for Tolerance Analysis," *J. Int. Prec. Engng. Nanotech.*, Vol.25, pp.35~47.
- (4) Oh, S. K., Suh, C. H., Lee, R. G., Jung, Y. C. and Kim, Y. S., 2009, "Optimization of Machining Variables to Improve the Geometrical Accuracy of the Solenoid Assembly in Electro-Magnetic LSD," *2009 KSME Fall Annual Meeting*, pp.1123~1128.
- (5) Rahman, M., 1989, "A Study on the Deviation of a Turned Workpiece Clamped by Multiple Jaws," *Annals CIRP*, Vol. 38, No. 1, pp. 385~388.
- (6) Rahman, M. and Ito, T., 1979, "Machining Accuracy of a Cylindrical Workpiece Held by a Three-Jaw Chuck," *Bull. Japan Soc. Prec. Engng.*, Vol. 13, No. 1, pp. 7~12.
- (7) Mason, R. L., Gunst, R. F. and Hess, J. L., 2003, *Statistical Design and Analysis of Experiments*, John Wiley & Sons.
- (8) Myers, R.M. and Montgomery, D.C., 1995, *Response Surface Methodology-Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, John Wiley & Sons, New York.
- (9) Lee, K. K., Park, C. K. and Han, S. H., 2009, "Six Sigma Robust Design for Railway Vehicle Suspension," *Transaction of KSME A*, Vol. 33, No. 10, pp. 1132~1138.
- (10) Taylor, W. A., 1991, *Optimization & Variation Reduction in Quality*, McGraw-Hill.
- (11) SAS Institute Inc., 2010, *JMP User's Guide*.