

## 다구찌기법을 이용한 공압피팅용 원형 판스프링의 설계변수 최적화

권태하\* · 서창희\*† · 이락규\* · 오상균\* · 정윤철\* · 임환빈\*\*

\* 대구기계부품연구원, \*\* ㈜상아뉴메틱

### Optimization of Design Parameters for Lock-Claws of Pneumatic Fitting Using Taguchi Method

Tae Ha Kwon\*, Chang Hee Suh\*†, Rac Gyu Lee\*, Sang Kyun Oh\*, Yun-Chul Jung\* and Hwan Bin Lim\*\*

\* Daegu Mechatronics & Materials Institute,

\*\* Sang-A Pneumatic Co., LTD

(Received April 30, 2013 ; Revised August 29, 2013 ; Accepted September 25, 2013)

**Key Words** : Pneumatic Fitting(공압피팅), Lock-Claws(원형 판스프링), Finite Element Simulation(유한요소해석), Design of Experiment(실험계획법), Taguchi Method(다구찌 기법)

**초록**: 공압피팅은 공압이 사용되는 시스템 및 기계에서 작동유체를 공급하기 위한 유연호스의 접속 및 탈착을 원활히 할 수 있게 하는 공압 시스템의 핵심 요소이다. 공압피팅의 구성요소인 원형 판스프링의 응력분포를 유한요소해석을 통하여 살펴본 결과 원형 판스프링은 공압피팅에 유연호스가 장착 될 때 국부적인 소성변형이 일어나는 것으로 나타났다. 원형 판스프링의 응력집중을 분산시키기 위해 다구찌 실험계획법을 이용하여 최적설계를 수행하였다. 원형 판스프링의 반경, 외측폭, 굽힘각을 주요 설계변수로 설정하였으며 다구찌 실험계획법을 통해 원형 판스프링에 작용하는 최대응력에 폭이 81.3%, 굽힘각이 10.9%, 반경이 1.5%의 기여율을 가짐을 확인하였으며, 최적설계시 초기 형상의 원형 판스프링에 비해 약 4% 정도 응력분산의 효과가 있음을 알 수 있었다.

**Abstract**: The stress concentration of lock-claws, which are one of the important parts for pneumatic fitting for a flexible tube connection, was investigated by finite element simulation. In this study, the generation of the local plastic deformation was predicted when the tube was hooked up to a pneumatic fitting in order to disperse the stress concentration, and design optimization was carried out using the Taguchi method. For the optimization, the outer width, bending angle, and inner radius of the lock-claws are used as main variables. As a result, their respective contribution ratios are revealed as 81.3%, 10.9%, and 1.5%. The ratio of the total stress distribution was improved by 4% compared with the initial design of the lock-claws.

#### 1. 서론

공압피팅(Pneumatic fitting)은 각종 공장자동화 생산라인 및 산업기계등에 널리 사용되고 있다. 공압피팅은 공압이 적용된 분야의 시스템 및 기계에서 최종 작동기구인 밸브와 액츄에이터등에 작동유체를 공급하기 위한 유연호스(Flexible tube)의 탈착을 원활히 할 수 있게 하는 공압 시스템의 핵

심요소이며, 자동화 장비의 집중배관을 소형 및 경량화 할 수 있는 장점을 가진다.

공압피팅은 피팅 방법을 개선한 원터치 피팅, 밸브없이 유체의 흐름을 차단할 수 있는 스톱피팅, 유체의 흐름을 조절 할 수 있는 밸브피팅 및 로터리 조인트 피팅 등 공압 조절을 위한 다양한 메커니즘이 적용되고 있다.<sup>(1)</sup>

기존의 공압피팅에 대한 연구들은 공압피팅의 수명 분석<sup>(2)</sup> 및 간략화된 원형 판스프링의 응력해석에 대한 연구<sup>(3)</sup>가 일부 수행되고 있으나 공압피팅의 반복사용과 내부 공압에 의한 원형 판스프링(Lock-claws)의 응력해석 및 파손에 관한 연구는

† Corresponding Author, [suhch@dmi.re.kr](mailto:suhch@dmi.re.kr)

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

미미한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 공압피팅의 원형 판스프링의 거동을 예측하여 응력집중을 분산시킬 수 있도록 기존의 원형 판스프링형상인 U 형과 개선된 원형 판스프링 형상인 E 형에 대한 유한요소해석을 수행하였으며, 개선된 원형 판스프링 시제품을 제작하여 공압피팅의 압축시험과 해석결과를 비교·평가하여 해석결과의 유효성을 검증하였다.

또한, 개선된 원형 판스프링의 최적설계를 위해 응력집중부의 주요 설계변수를 정립하여 다구찌(Taguchi) 실험계획법을 적용하여 직교배열표를 만들고 S/N 비를 계산하여 최적 조건을 도출하였으며, 최대응력에 영향을 미치는 인자의 기여도를 산출하였다.

## 2. 유한요소 해석

### 2.1 유한요소 모델

공압피팅은 슬리브(Sleeve), 칼라(Collar), 원형 판스프링(Lock-claws), 백링(Back ring) 및 패킹(Packing)으로 구성된다. 본 연구에서는 Ø8 mm 유연호스용 공압피팅을 대상으로 연구하였으며 그 개요도를 Fig. 1 에 도시 하였다.

공압피팅내의 원형 판스프링은 유연호스가 삽입될 때 가장 심한 변형을 받으며 삽입 후 공압의 가감이 일어나 반복적인 하중을 받게 되어 최종적으로 파단이 발생한다. 따라서, 유연호스가 삽입될 때 원형 판스프링의 거동 예측이 중요하다.

Fig. 2 에 유한요소모델의 요소 및 경계조건을 나타내었다. 원형 판스프링은 사면체 요소(Tetra elements)를 사용하였으며 요소의 평균크기는 약 0.02 mm 로 두께 방향으로 요소가 10 개 이상 존재하도록 충분히 미세하게 모델링 하였다. 슬리브, 칼라, 백링은 강체로 가정하였으며 패킹은 원형 판스프링의 거동에 영향이 없으므로 해석모델에서략하였다. 실제 사용환경과 동일하게 칼라와 백

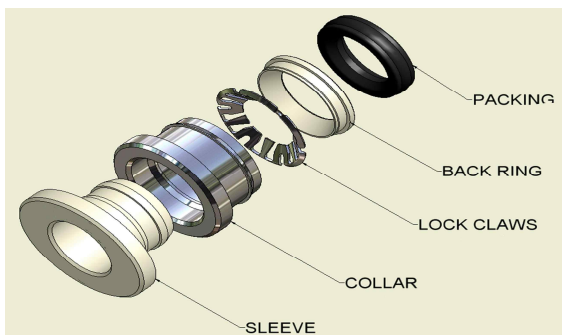


Fig. 1 Schematic diagram of pneumatic fitting

링은 위치를 고정시키고 슬리브를 칼라와 접촉하는 시점까지 -X 방향으로 1 mm 를 이동시키면서 원형 판스프링의 거동을 살펴보았다. 해석모델은 해석시간을 고려하여 대칭모델을 사용하였다. 원형 판스프링의 거동시 미세한 소성변형의 발생이 예상되기 때문에 탄-소성 해석을 수행하였으며 상용 탄소성해석 프로그램인 MSC.Marc 2010 을 사용하였다. 해석에 사용된 탄성계수는 210 GPa, 프아송비는 0.3 을 사용하였으며, 실험에서 얻어진 유동응력을 사용하였다. 마찰계수는 건조상태를 감안하여 0.2 로 정하였다.

또한, 기존의 원형 판스프링 형상인 U 형을 변경하여 개선된 원형 판스프링의 형상인 E 형을 설계하여 추가적인 해석을 수행하였으며 그 형상을 Fig. 3 에 나타내었다.

### 2.2 재료 특성

원형 판스프링의 소재는 0.2 mm 두께의 SUS304 를 사용하였으며 유동응력의 획득을 위해 인장시험을 수행하였다. 인장시험은 KS B 0802 규격에 의해서 수행하였으며 시험편은 KS B 0801 13B 호 형상으로 가공하여 사용하였다. 시험장비는 Instron 5569 시스템을 사용하여 변위제어 방식의

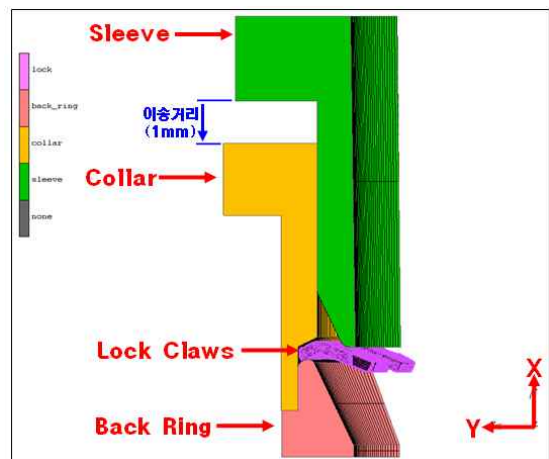
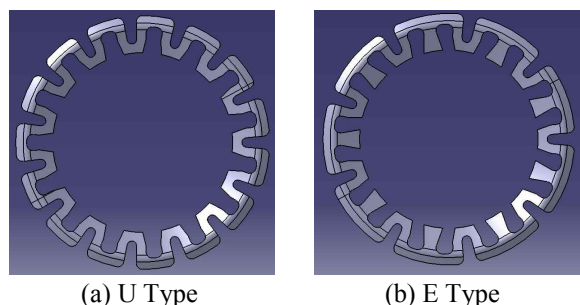


Fig. 2 Finite element model



(a) U Type

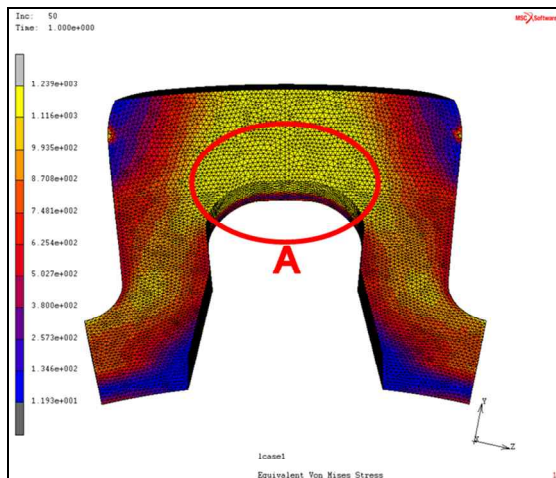
(b) E Type

Fig. 3 Geometry of lock-claws

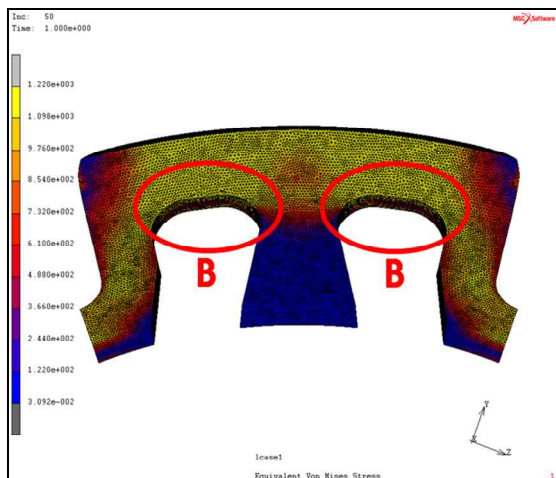
로 2 mm/min 의 속도로 수행하였다. 변형률의 정확한 측정을 위해서 표점거리가 50 mm 인 연신율계를 사용하여 변형률을 측정하였다. 실험에서 얻어진 유동응력을 Swift 모델( $\sigma=K(\epsilon_0+ \epsilon)^n$ )을 이용하여 근사하였으며 도출된 변수값은  $K=2,350$ ,  $\epsilon_0=0.06$ ,  $n=0.25$  이며, 항복강도는 1,200 MPa, 인장강도는 1,404 MPa, 연신율은 20%로 나타났다.

### 2.3 유한요소 해석 결과

해석결과를 Fig. 4 에 나타내었다. U 형 원형 판스프링의 경우 최대응력이 1,239 MPa, E 형 원형 판스프링의 경우 1,220 MPa 로 나타났다. U 형에 비해서 E 형의 경우가 미소하게나마 최대응력의 감소가 나타났다. 이러한 최대응력값은 소재의 항복응력을 미소하게 넘어서는 응력이며, 원형 판스프링의 반복 사용시 국부적으로 미세한 소성변형을 일으킬 것으로 예상된다. 두 경우 모두 응력집



(a) U Type



(b) E Type

Fig. 4 The result of finite element simulations

중부는 유사한 경향을 나타냈으며 Fig. 4(a)의 A, (b)의 B 에 도시한 바와 같이 외경쪽 대칭 중심부에서 응력집중이 나타났다. 이는 기존의 연구에서 공압피팅의 반복사용시 원형 판스프링이 파단되는 영역(Fig. 5)과 일치하고 있으며 본 연구에서 수행된 해석 결과의 신뢰성을 확인 할 수 있다.

## 3. 시제품 제작 및 평가

### 3.1 시제품 제작

Fig. 6 에 제작된 공압피팅과 원형 판스프링 시제품을 도시하였다. E 형 원형 판스프링은 프로그래시브 금형으로 제작하였으며, 나머지 부품들은 기계가공으로 제작하였다. 원형 판스프링은 판재 소재를 사용하여 내부 및 외부 형상을 절단한 후 최종적으로 절곡 및 취출의 과정을 통해 제작하였다.

### 3.2 평가

제작된 시제품의 압축실험은 Instron 5569 시스템을 사용하여 변위제어 방식으로 2 mm/min 의 속도로 수행하였다. Fig. 7 에 시제품의 압축실험과 해석결과를 비교하였다. 두 결과가 유사한 경향을 보이며 최종 1 mm 압축 시 하중값은 실험에서 21 N, 해석에서 24.5 N 으로 근소한 차이가 나타난 반면 0 ~ 0.6 mm 압축시는 하중값의 차이가 나타났다. 이는 제작된 시제품의 가공오차에서 기인하



Fig. 5 The fracture of lock-claws after fatigue test<sup>(2)</sup>



(a) Assembly

(b) E Type lock-claws

Fig. 6 Manufactured pneumatic fitting and lock-claws

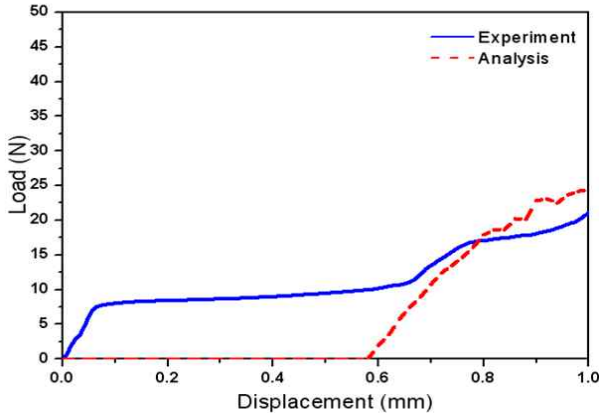


Fig. 7 The comparison of load-extension curves between experiment and simulation

는 것으로 판단된다.

#### 4. 원형 판스프링의 최적설계

##### 4.1 다구찌 설계법

본 연구에서는 원형 판스프링의 응력 집중을 분산시키기 위한 최적 설계 조건을 도출하기 위해 실험계획법 및 다구찌 기법(Taguchi method)를 적용하였다. 다구찌는 잡음에 의한 품질변동으로 발생하는 손실을 최소화하기 위한 방법으로 직교 배열표를 작성할 것을 제안하였고, 직교배열표를 바탕으로 실험하여 얻은 데이터를 분석하는 방법으로 평균분석(Analysis of mean, ANOM)과 분산분석(Analysis of variance, ANOVA)을 수행하였다. 또한 최소화할 함수로는 S/N 비의 개념을 도입하였다. S/N 비는 신호대 잡음의 비율이며 S/N 비 값이 클수록 잡음에 둔감하다고 할 수 있다. 제품 수명 향상을 위한 목적함수인 최대 응력은 작을수록 좋은 특성을 나타내므로 다구찌 기법 망소특성인 손실함수를 적용하여 S/N 비를 비교하여 최적의 수준을 예측하였다. 다구찌 최적화 이론에서는 목표치에 대한 평균제곱편차, 즉 MSD(Mean square deviation)값을 통하여 설계 또는 공정목표에 대하여 최적화를 수행한다. 최대 응력의 반복적인 측정값을  $y_1, y_2, \dots, y_n$  라고 할 때 MSD 는 다음 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$MSD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad (1)$$

여기서  $y$  는 실험 결과값,  $n$  은 실험 회수를 나타낸 것이다. 결과적으로 망소특성의 S/N 비는 다음 식 (2)로 표현된다.<sup>(4-8)</sup>

$$SN = -10 \cdot \log(MSD) \quad (2)$$

Table 1 Design variables and levels

Design Variables	Level 1	Level 2	Level 3
R (mm)	0.20	0.25	0.30
W (mm)	0.40	0.45	0.50
$\theta$ (degree)	120	125	130

Table 2 Orthogonal array of Taguchi  $L_9(3^4)$

No.	Variables			Experiment Condition
	R	W	$\theta$	
1	1	1	1	$R_1W_1\theta_1$
2	1	2	2	$R_1W_2\theta_2$
3	1	3	3	$R_1W_3\theta_3$
4	2	1	2	$R_2W_1\theta_2$
5	2	2	3	$R_2W_2\theta_3$
6	2	3	1	$R_2W_3\theta_1$
7	3	1	3	$R_3W_1\theta_3$
8	3	2	1	$R_3W_2\theta_1$
9	3	3	2	$R_3W_3\theta_2$

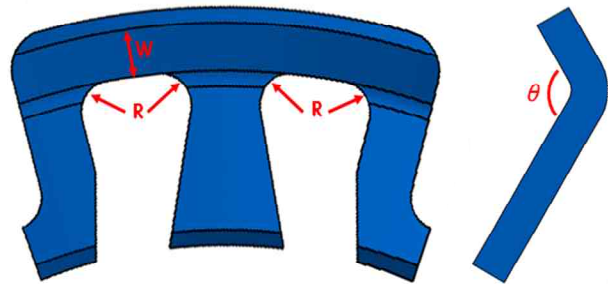


Fig. 8 Shape and design variables of E type lock-claws

##### 4.2 설계 변수와 직교 배열표

원형 판스프링의 최적설계에 사용된 변수는 초도 해석에서 응력집중이 나타났던 외경쪽 대칭 중심부의 형상 치수를 인자로 설정 하였으며 Fig. 8 에 선정된 인자를 나타내었다. 선정된 설계인자는 응력집중이 발생하는 영역주변의 반경(R), 폭(W), 굽힘각( $\theta$ ) 이다. 본 연구에서는 각 인자들간의 상호작용은 없는 것으로 간주하여 각 인자의 독립적인 영향만을 평가하였다.

Table 1 에 선정된 3 개의 변수(Variables)들과 3 개의 수준(Levels)을 나타내었다. 여기서 중간 수준인 Level 2 는 초도 시제품의 형상 치수로서 Level 1 은 초도 시제품보다 낮은 수준, Level 3 은 초도 시제품보다 높은 수준으로 설정하였으며 적용된 직교배열표를 Table 2 에 나타내었다.

4.3 해석결과 및 S/N 비 도출

다구찌 기법은 제어조건들이 실험 결과에 미치는 영향의 정도를 평가 특성치로 변환하여 산포를 작게 하는 조건들의 값을 찾아내므로 각 파라미터별 S/N 비의 평균값을 계산하면 최적의 설계 조건을 도출 할 수 있다.<sup>(9-13)</sup> Table 3 은 직교배열표에 따라 유한요소 해석을 수행한 후 그 결과값을 나타낸 것이다. 여기서, 응력분포는 초도해석결과 (Fig. 4(b))와 동일하며 Table 3 에는 그 결과값만을 나타내었다.

Table 3 The results for FEM

No.	Experiment Condition	Max. Von-mises Stress (MPa)	S/N Ratio (dB)
1	R <sub>1</sub> W <sub>1</sub> θ <sub>1</sub>	1,199	-61.5763
2	R <sub>1</sub> W <sub>2</sub> θ <sub>2</sub>	1,218	-61.7129
3	R <sub>1</sub> W <sub>3</sub> θ <sub>3</sub>	1,256	-61.9798
4	R <sub>2</sub> W <sub>1</sub> θ <sub>2</sub>	1,202	-61.5981
5	R <sub>2</sub> W <sub>2</sub> θ <sub>3</sub>	1,228	-61.7840
6	R <sub>2</sub> W <sub>3</sub> θ <sub>1</sub>	1,233	-61.8193
7	R <sub>3</sub> W <sub>1</sub> θ <sub>3</sub>	1,205	-61.6197
8	R <sub>3</sub> W <sub>2</sub> θ <sub>1</sub>	1,208	-61.6413
9	R <sub>3</sub> W <sub>3</sub> θ <sub>2</sub>	1,272	-62.0897

Table 4 Response table for S/N Ratio

Placement Factor	R	W	θ	
S/N Ratio	1	-61.76	-61.60	-61.68
	2	-61.73	-61.71	-61.80
	3	-61.78	-61.96	-61.79
Delta	0.05	0.36	0.12	
Rank	3	1	2	

Table 5 Result of the ANOVA for Von-mises Stress

Source	Sum of Square	DOF	Mean Square	Contribution(%)	F	P
	S <sub>i</sub>	φ <sub>i</sub> - 1	S <sub>i</sub> / (φ <sub>i</sub> - 1)	S <sub>i</sub> / S <sub>t</sub> × 100	S <sub>i</sub> / S <sub>e</sub>	
R	0.004	2	0.002	1.5	0.23	0.81
W	0.209	2	0.105	81.3	12.81	0.07
θ	0.028	2	0.014	10.9	1.72	0.37
Error	0.016	2	0.008	6.3		
Total	0.257					

4.4 평균분석(ANOM) 결과

Table 4 는 다구찌 기법을 적용한 결과를 나타낸다. Fig. 9 는 원형 판스프링의 최대응력에 대한 수준별 요인 효과도를 나타내었으며, S/N 비에 대한 반응표로부터 가장 큰 영향을 주는 인자는 폭 (delta=0.36, 순위 1)으로 나타났다. 또한, 최대응력에 대해 S/N 비가 최대인 설계변수는 반경 0.25mm, 폭 0.40mm, 굽힘 각 120° 로서 최적의 조건이라고 판단되었다.

4.5 분산분석(ANOVA) 결과와 최적 모델의 S/N 비

각각의 인자들이 원형 판스프링의 최대응력에 미치는 영향을 분석하기 위하여 분산분석을 실시하였으며 그 결과를 Table 5 에 나타내었다.

분산분석 결과에서 폭이 최대응력에 미치는 영향이 가장 큰 것으로 나타났다. 각 인자에 대한 기여율을 살펴보면 반경이 1.5%, 폭이 81.3%, 굽힘 각이 10.9% 기여율을 나타내었다. 여기서, 유의수준 10% 하에서 폭의 P 값이 7.2%로 유의한 것으로 나타났으며 나머지인자는 유의하지 않는 것으로 나타났다.

최적 조건에서 S/N 비에 대한 예측 값을 식 (3) 을 통하여 구할 수 있다.

$$\hat{\mu}_{SN_0} = \bar{R}_2 + \bar{W}_1 + \bar{\theta}_1 - 2\bar{T} \quad (3)$$

식 (3)에서  $\bar{R}_2$  와  $\bar{W}_1$ ,  $\bar{\theta}_1$  은 각각 Table 4 에 나타낸 각 인자의 최적수준 시 S/N 비이며  $\bar{T}$  는 Table 3 에 나타낸 각 실험조건들의 S/N 비의 산술 평균값이다. 이를 통하여 구한 최적 조건의 예측 S/N 비는 약 -61.4942 dB 가 되어 기존의 최대응력이 가장 낮게 나온 No.1 의 실험조건의 S/N 비에 비해 0.13% 정도 상승되었음을 알 수 있다.

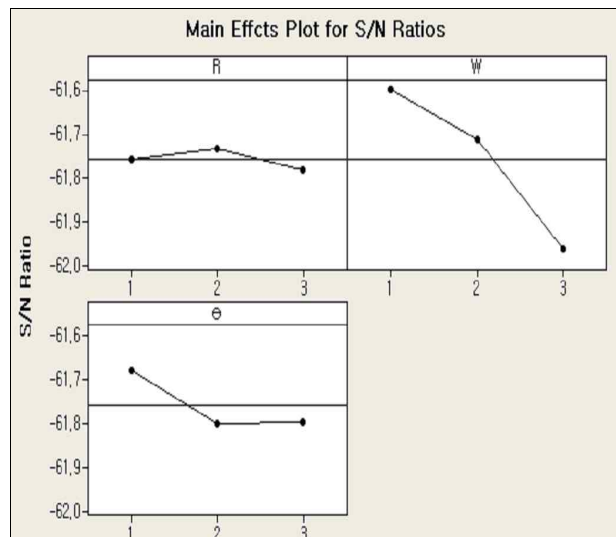


Fig. 9 S/N ratio graphs with respect to each factor

#### 4.6 최적조건의 결과 비교

다구찌 기법을 이용하여 얻은 조건의 적용 결과를 확인하기 위하여 최적 조건인  $R_2W_1\theta_1$ 에 대한 해석을 추가로 수행하였다.

해석결과 응력분포는 직교배열표에 나타낸 9 가지 경우와 마찬가지로, 초도해석(Fig. 4(b))과 유사하게 나타났다. 직교배열표에 속한 실험 중 가장 작은 최대응력을 가지는 No.1( $R_1W_1\theta_1$ )의 경우 1,199 MPa, 최적 조건인  $R_2W_1\theta_1$ 의 조건에서는 1,196 MPa로 나타났으며 No.1과 비교하여 최적조건이 약 3 MPa(0.3%) 정도 줄어들었음을 확인할 수 있었다. 이를 통해 다구찌 방법의 최적조건 선정의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

### 5. 결론

(1) 공압피팅의 원형 판스프링의 응력해석을 수행하였다.

(2) 기존 U형 원형 판 스프링 모델 대비 개선된 E형 원형 판 스프링 모델을 제시하였으며, 개선된 E형 원형 판스프링의 최대응력이 근소한 차이로 낮게 나타났다.

(3) 두 모델이 동일하게 외경쪽 대칭 중심부에서 응력 집중이 일어남을 확인하였으며, 이는 내구시험에서 얻어진 결과와 잘 일치함을 보였다.

(4) 제작된 시제품의 압축실험과 해석결과를 비교 비교·평가 하여 해석결과의 타당성을 확인하였다.

(5) 다구찌 실험계획법에 의하여 원형 판스프링의 최대응력을 최소화하는 최적 조건은 반경이 0.25 mm, 폭이 0.40 mm, 굽힘각이 120° 일 때로 나타났으며 최대응력에 영향을 미치는 정도로는 폭이 81.3%, 굽힘 각이 10.9%, 반경이 1.5%의 기여율을 나타내었다.

(6) 최적 조건의 해석결과 기존의 초기 형상의 원형 판스프링에 비해 약 4% 정도 응력 분산효과가 있음을 알 수 있었다.

### 참고문헌

(1) Kwon, T. H., Lee, L. G., Oh, S. K., Jung, Y. C., Suh, C. H. and Lim, H. B., 2012, "Finite Element Simulation for Lock-Claws of Pneumatic Fitting," *Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf.*, pp. 257~260.

(2) Kang, B. S., Song, J. S., Yoo, Y. C. and Kim, H. E., 2007, "Life Analysis of Flexible Tubes Fitting for Pneumatic System," *Proc. of the KSME spring annual meeting*, pp. 1842~1847.

(3) Chang, Y. J., Kim, Y. J., Kim, I. S., Hwang, B. O., Lee, W. R. and Lim, S. B., 2001, "A Stress Analysis on One-Touch Fitting of Pneumatic Systems," *Proc. of*

*the KSME Spring Annual Meeting*, pp. 871~876.

(4) Kim, Y. S. and Park, K. C., 1996, "Sensitivity Analysis of Material and Process Variables Affecting on the Stamping Formability," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 20, No. 7, pp.2246~2256.

(5) Oh, S. K., Lee, K. K., Suh, C. H., Jung, Y-C. and Kim, Y. S., 2011, "Robust Optimization of the Solenoid Assembly in Electromagnetic Limited Differential by Considering the Uncertainties in Machining Variables," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 35, No. 10, pp. 1307~1313.

(6) Oh, S. K., Suh, C. H., Jung, Y-C., Kim, D. B., Sung, J. H. and Kim, Y. S., 2008, "Optimization of design Variables of the Multi Layer Bellows Using FE-Simulation and Design of Experiment," *Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf.*, pp. 277~280.

(7) Park, S. H., 2006, *Modern Design of Experiments*, Minyoungsa, Mapo-gu Seoul-si Korea, pp.563~589

(8) Choi, W. K., Choi, S. G., Shin, H. J. and Lee, E. S., 2012, "A Study in the Optimal Machining of 12 inch Wafer Polishing by Taguchi Method," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 11, No. 6, pp. 48~54.

(9) Kim, S. H., Park, Y. C. and Park, J. H., 2010, "Optimization of Pre-form for Manufacturing of Automobile Crum Clutch Hub Products Using Taguchi Method," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 9, No. 6, pp. 101~108.

(10) Lee, S. K., Lee, J. E. and Kim, B. M., 2008, "Optimization of Dies Angles to Improve the Dimensional Accuracy and Straightness of the Shaped Drawn Product Based on the ED Simulation and the Taguchi Method," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 32, No. 16, pp. 474~480.

(11) Composeco-Negrete, C., 2013, "Optimization of cutting parameters for minimizing energy consumption in turning of AISI 6061 using Taguchi methodology and ANOVA," *Journal of cleaner production*, V.53, pp.195~203.

(12) Kuram, E. and Ozcelik, B., 2013, "Multi-objective optimization Using Taguchi Based Grey Relational Analysis for Micro-Milling of AL 7075 Material with Ball Nose End Mill," *Journal of the international Measurement Confedation*, Vol.46, No.6, pp. 1849~1864

(13) Siddesha, H. S. and Shantharaja, M., 2013, "Characterization of Mechanical Properties of Aluminum Processed by Repetitive Corrugaton and Straightening Process Using Taguchi Analysis," *The journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, Vol.65, pp. 294~298.