

# 압입축 끝단의 손상저감을 위한 보스부 형상 최적설계

변성광\*,#

\*동양미래대학교 기계공학부

## Optimization of Boss Shape for Damage Reduction of the Press-fitted Shaft End

Sung-Kwang Byon\*#

\*Department of Mechanical Engineering, Dongyang Mirae UNIV.

(Received 28 March 2015; received in revised form 31 March 2015; accepted 3 April 2015)

### ABSTRACT

The press-fit shaft is an important part used in automobiles, vessels, and trains. This study proposes an optimized design method to reduce damage that may occur in the press-fitted shaft by modifying the shape of the boss step of the press-fitted shaft. To reduce the time and cost of running the optimized design method, an approximate design optimization is applied and an optimized algorithm is generated using a genetic algorithm that is widely used in engineering fields and an approximate model using a response surface method. The planned experiments for the data that are needed to generate the approximate model use a central composite design (CCD) and Latin hypercube sampling (LHS), and the results of the approximate optimization using the above two design of experiments are to be compared.

**Key Words :** Condition Press-fitted Shaft(압입축), Response Surface Method(반응표면법), Central Composite Design(중심합성계획법), Latin Hypercube Sampling(라틴하이퍼큐브), Optimization(최적화)

### 1. 서 론

자동차, 선박, 항공기, 철도차량 등의 산업에서 고속화 및 고출력 등의 성능향상이 요구되고 있으며, 이러한 가혹한 환경에서 수명연장 또한 요구되고 있다. 이 축은 압입 혹은 끼워 맞춤 등으로 조립되어 있으며 압입축에 다양한 하중들이 반복적으로 작용한다. 압입축의 접촉면에서는 미세한 상대 슬립이 발생하고 이로 인해 마모와 피로 등이 발생

하여 수명이 감소된다. 따라서 손상을 발생시키는 마모와 피로의 발생 및 진전에 대한 연구와 압입축의 손상을 방지하기 위한 연구가 진행되고 있다<sup>1-4)</sup>. 압입축에 발생하는 주요 손상은 미세한 상대 슬립에 의한 프레팅 현상이고, 프레팅 손상을 저감하기 위한 연구가 진행되어 왔다.

압입축의 손상을 저감하기 위한 주요 연구로는 Nishioka와 Komatshu<sup>5)</sup>가 압입부 접촉 끝단의 프로파일이 균열발생위치에서 미치는 영향을 평가하였다. Wise와 Burdon<sup>6)</sup>은 표면처리 및 열처리에 의한 축 압입부 표면의 압축 잔류응력이 압입부 피로 수

# Corresponding Author : skbyon@dongyang.ac.kr

Tel: +82-2-2610-1814, Fax: +82-2-2610-1852

명에 미치는 영향을 검토하였다. Peterson과 Wahl<sup>[7]</sup>은 압입 끝단의 형상이 피로수명에 미치는 영향에 대해 연구하기 위해 광탄성 실험을 실시하였으며, 압입 접촉부에 발생하는 응력 분포를 확인하고 보스의 응력완화 홈(stress relief groove)의 영향을 검토하였다. 이상의 연구들은 주로 실험에 의한 손상저감 연구이고, 손상저감을 위한 수치해석에 관한 연구는 최근에 수행되고 있다<sup>[1]</sup>.

압입축의 끝단에는 보스와 축사이의 접촉압력이 크게 집중하기 때문에 접촉 끝단의 접촉압력이 피로와 마모에 영향을 미칠 것으로 판단된다<sup>[8]</sup>. 따라서 본 연구에서는 압입축 끝단부의 보스의 형상을 변화시켜 압입축 끝단에서 발생하는 접촉압력을 최소화하는 방법을 제안하고자 한다.

## 2. 압입축 최적화 방법

본 논문은 유한요소해석으로 데이터를 구해 근사 최적화<sup>[9]</sup>하여 보스의 형상을 설계하고자 한다. 최적화 방법은 여러 분야에서 그 유용성이 입증된 유전자알고리즘<sup>[10]</sup>과 반응표면법<sup>[11]</sup>을 최적화 알고리즘과 근사모델을 생성하는 방법으로 각각 이용하였다. 근사최적화를 위해서는 근사모델이 필요하며, 효과적인 근사모델을 생성하기 위해서는 실험계획법(Design of Experiments, DOE)의 선택이 중요하다.

반응표면법은 반응변수와 두 개 이상의 요인들 간의 관계를 파악하는데 사용된다. 가장 적합한 응답을 구하기 위한 통계적 방법으로, 몇 개의 결정된 분석값과 결과의 회귀 분석 값을 통하여 특성모사함수를 입력변수들의 향으로 표시하는 함수의 다항식으로 표현된다. 본 연구의 최적화 문제에 대한 근사화 모델 생성은 공학 분야에서 널리 사용되고 있는 실험계획법인 중심합성계획법<sup>[12]</sup>과 라틴하이퍼큐브<sup>[13]</sup>를 이용하였다. 중심합성계획법(Central Composite Design)은 중심점을 기준으로 특정한 수준과 축점을 통해 실험을 실시하는 실험계획방법으로 적은 양의 실험횟수로 반응곡면을 추정할 수 있고 축차실험(sequential experiments)이 가능하다. 라틴하이퍼큐브(Latin Hypercube Sampling, LHS)는 표본공간 전체에서 표본이 추출되도록 각 확률 변

수의 범위를  $n$  개의 범위로 나눈 다음 각 구간에서 하나씩 추출하되 중복되지 않게  $n$  개를 뽑는 방법이다. 본 최적설계 연구에서 이 두 실험계획법을 서로 비교하였다.

### 2.1 압입축 설계

본 연구의 압입축 최적설계 과정은 Fig. 1과 같이 먼저 실험계획법에 의해 유한요소해석을 수행하여 데이터를 얻었다. 이 데이터로 근사모델을 생성하고 유전자 알고리즘을 이용하여 압입축의 손상을 최소화하도록 최적화한다.

### 2.2 유한요소해석 방법

유한요소해석 모델은 축과 보스로 조립되어 있는 압입축을 회전 굽힘 피로시험 시편으로 형상을 단순화하여 Fig. 2와 같이 하였다.

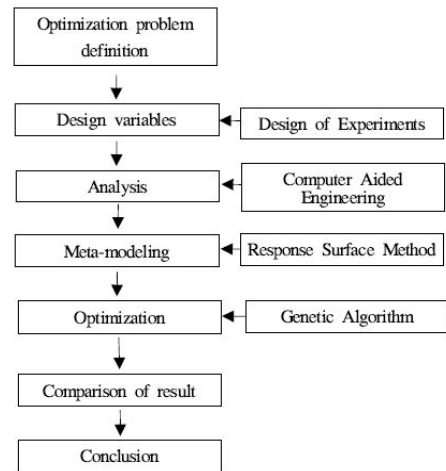


Fig. 1 Optimization process

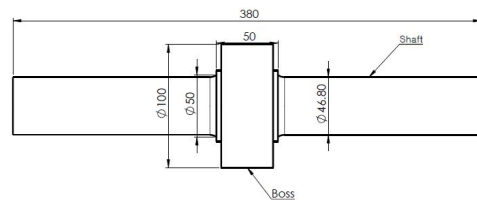


Fig. 2 Geometry of the press-fitted shaft

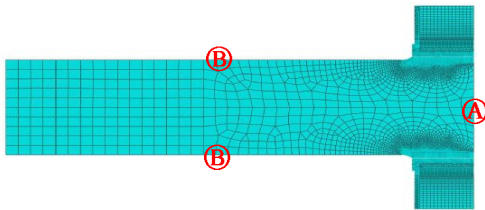
**Table 1 Material properties of press-fitted shaft**

Material	Young's modulus	Poisson ratio
Shaft	203 GPa	0.3
Boss	203 GPa	0.3

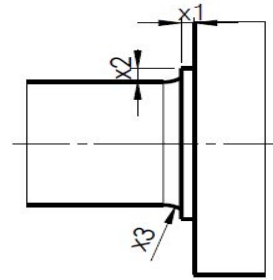
변수  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  범위의 각각 중간값 3.50 mm, 5.50 mm, 10.00 mm를 사용하여 2차원 해석과 3차원 해석을 하였으며, 해석시간은 2차원 해석의 경우 CPU time 32초, 3차원 해석의 경우 CPU time 62,477초가 소요되었다. 접촉압력은 2차원 해석의 경우 250 MPa, 3차원 해석의 경우는 237 MPa으로 약 5% 차이가 났으며, von Mises 응력은 2차원 해석의 경우 324 MPa, 3차원 해석의 경우는 314 MPa으로 약 3% 차이가 났다. 본 논문에서는 해석시간을 줄이고자 2D 해석모델로 해석하였다. 해석모델의 압입부 축 지름은 50 mm, 전체길이는 380 mm이며, 보스의 바깥 지름은 100 mm, 폭은 50 mm이다. 해석 모델의 물성치는 Table 1과 같이 탄성계수는 203 GPa이고 푸아송비는 0.3으로 하였다.

압입축의 유한요소 해석은 상용 유한요소해석 프로그램 ABAQUS<sup>[14]</sup>를 이용하였다. 압입축 해석 모델은 Fig. 2와 같이 축방향으로 형상과 하중조건이 대칭이기 때문에 Fig. 3과 같이 전체 시험편의 1/2을 모델링하여 해석시간을 단축하였다. 압입부의 끝단에서 접촉압력이 급격하게 변화하므로 이 부분에 최소요소 크기를 0.01 mm로 설정하였다.

보스의 재료는 피로한도 259 MPa<sup>[2]</sup>으로 하고, 압입축의 축과 보스사이 접촉면에서의 간섭량 (shrinkage allowance)을 나타내는 공칭 접촉 압력을 평균 Lamé의 공칭 접촉압력<sup>[15]</sup>으로 약 80 MPa이 되도록 하였다. 이 평균 Lamé의 접촉압력을 갖도록 보스를 축을 누르는 방향으로 이동을 시켰다.



**Fig. 3 Finite element model for the press-fitted shaft**



**Fig. 4 Design variables**

Fig. 3의 A지점을 고정하고 B지점에 하중 300 N을 가하였다.

최적설계에 사용될 설계변수는 압입축의 접촉압력 분포가 축과 접하는 보스 단부에서 급격히 증가하기 때문에 보스 끝단의 형상과 보스와 접촉하는 부분의 축의 형상으로 Fig. 4와 같이 하였다. 축과 보스 사이에서 발생하는 접촉압력은 이 부위의 손상에 많은 영향을 주기 때문에 축과 보스 사이에서 발생하는 접촉압력을 최소화시키는 것을 목적함수로 하였으며, 제한함수는 보스의 형상이 변화함에 따라 보스 단부에서 발생하는 응력이 피로 한도를 넘지 않도록 제한 조건으로 하였다. 제한조건은 메타모델의 근사값과 실제 해석값의 오차를 10%로 고려하여 안전율을 1.1로 주었다. 설계변수의 구간 설정은 Lanoue 등<sup>[6]</sup>의 프레팅 피로 강도 저감을 대한 논문의 모델을 참고하여 정하였다. 최적설계문제를 다음과 같이 정하였다.

Minimize  $F_{Contact\ pressure}$

Subject to  $g_{stress}(x_i) \leq 235\ MPa$

Design variables

$$0.5\ mm \leq x_1 \leq 6.5\ mm$$

$$2.5\ mm \leq x_2 \leq 8.5\ mm$$

$$6.0\ mm \leq x_3 \leq 14.0\ mm$$

근사최적화는 최적화 과정에서 계산비용을 절감할 수 있으며, 또한 합리적으로 생성된 근사모델 혹은 메타모델은 민감도와 같은 설계정보를 산출할 수도 있다<sup>[17]</sup>. 근사모델을 만들기 위한 데이터를 얻

**Table 2 Results of central composite design**

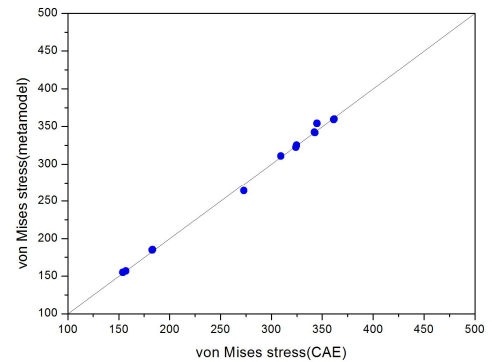
Design Variables [mm]			Contact pressure [MPa]	von Mises stress [MPa]
x1	x2	x3		
0.50	4.00	8.00	454.10	183.00
0.50	4.00	12.00	463.00	183.30
0.50	7.00	8.00	460.70	154.10
0.50	7.00	12.00	479.20	157.10
6.50	4.00	8.00	95.43	342.40
6.50	4.00	12.00	95.52	342.80
6.50	7.00	8.00	144.90	361.40
6.50	7.00	12.00	134.60	361.80
3.50	5.50	10.00	249.70	324.80
2.00	5.50	10.00	373.20	272.90
5.00	5.50	10.00	146.00	344.90
3.50	2.50	10.00	105.20	324.10
3.50	8.50	10.00	356.90	309.30
3.50	5.50	6.00	256.20	324.40
3.50	5.50	14.00	244.90	324.80

**Table 3 Results of Latin hypercube sampling**

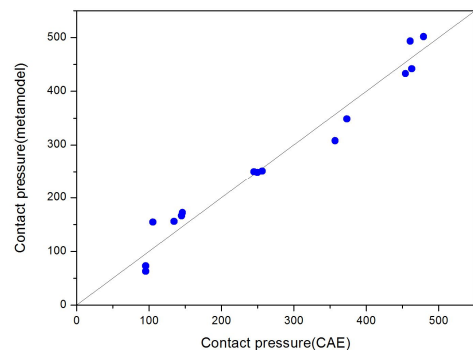
Design Variables [mm]			Contact pressure [MPa]	von Mises stress [MPa]
x1	x2	x3		
0.50	6.29	7.68	436.30	173.40
0.82	7.24	8.95	434.50	196.80
1.13	6.92	7.26	416.30	225.00
1.45	4.71	13.16	373.40	273.90
1.76	3.13	9.37	264.10	322.70
2.08	7.55	8.53	391.30	279.70
2.40	7.87	10.21	379.00	294.90
2.71	8.50	13.58	377.40	304.90
3.03	5.03	6.84	253.90	347.80
3.34	6.61	11.47	292.00	342.70
3.66	3.76	12.32	116.20	375.70
3.97	4.08	8.11	125.50	378.10
4.29	4.40	6.00	132.80	381.80
4.61	5.97	12.74	178.30	387.60
4.92	5.66	11.89	146.20	392.60
5.24	2.82	9.79	94.44	369.60
5.55	2.50	11.05	97.57	366.70
5.87	3.45	10.63	90.03	377.90
6.18	8.18	6.42	200.40	416.00
6.50	5.34	14.00	82.30	404.60

기 위해 실험계획법을 이용하여 유한요소해석을 수행하였다. 실험계획법은 중심합성계획법과 라틴하이퍼큐브를 이용하였으며 Table 2와 Table 3과 같다.

근사모델을 반응표면법을 이용하여 이차 다항식 모델을 생성하였다. 근사모델의 정확도를 확인하기 위하여 중심합성계획법과 라틴하이퍼큐브의 실제값과 각각의 근사모델에 의해 얻은 값을 비교하여 Fig. 5와 Fig. 6에서 보여주고 있다. von Mises 응력의 정확도는 R-제곱(수정)이 라틴하이퍼큐브의 경우와 중심합성계획법의 경우 모두 0.99로 거의 동일하였다. 접촉압력은 라틴하이퍼큐브의 경우가 R-제곱(수정)이 0.95로 중심합성계획법의 경우의 R-제곱(수정)이 0.90에 비해 근사모델이 더 정확도가 높았다.

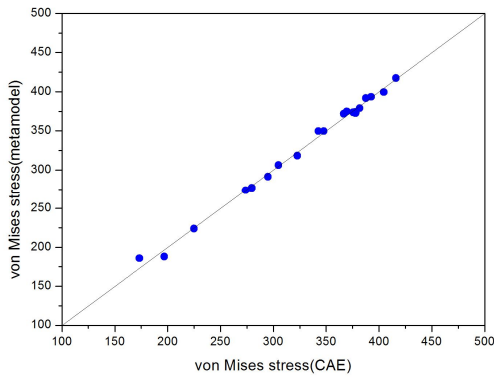


(a) von Mises stress

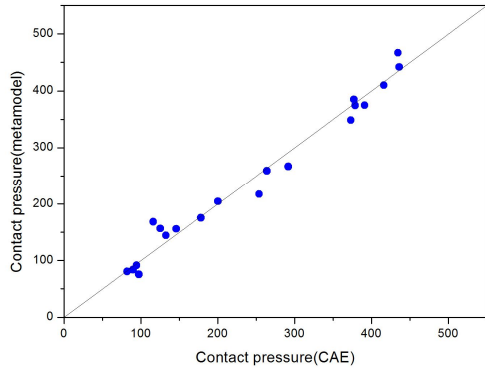


(b) Contact pressure

**Fig. 5 Accuracy of response surfaces method(CCD)**



(a) von Mises stress



(b) Contact pressure

Fig. 6 Accuracy of response surfaces method(LHS)

### 3. 최적화 결과

#### 3.1 최적설계

압입측 최적설계 문제에 대해 실험계획법을 중심합성계획법과 라틴하이퍼큐브를 이용하여 생성한 근사모델을 적용하여 접촉압력을 최소화하도록 보스 형상의 최적설계를 진행하였다. 최적설계 알고리즘은 유전자 알고리즘을 이용하였으며, 세대수 100, 인구수 100, 교배율 30%, 변이율 10%로 하였다. 압입측 최적설계 문제에 대해 실험계획법을 중심합성계획법을 이용한 경우와 라틴하이퍼큐브를 이용한 경우의 최적화 결과를 Table 4에서 비교하

였다. 제한조건인 von Mises 응력의 샘플링 데이터 분포가 중심합성계획법보다 라틴하이퍼큐브의 높은 값을 가지고 있기 때문에 라틴하이퍼큐브보다 중심합성계획법이 목적함수 접촉압력을 최소화할 수 있었다.

Table 5에서 변수  $x_1$ ,  $x_2$ 가 0 mm이고 보스단부의 축의 곡률  $x_3$ 은 직선으로 연결된 초기 모델과 중심합성계획법과 라틴하이퍼큐브로 생성한 근사모델을 이용하여 근사 최적화한 결과를 CAE(Computer Aided Engineering) 해석결과와 비교하였다. 초기모델의 접촉압력은 487.3 MPa이고 중심합성계획법을 이용하여 근사최적화하였을 경우의 접촉압력은 304.9 MPa으로 약 37%가 감소되었으며, 라틴하이퍼큐브를 이용하여 근사최적화하였을 경우는 315.0 MPa로 약 35%가 감소되었다. 이때, CAE해석 결과 von Mises stress가 중심합성계획법의 경우는 258.7 MPa이며 라틴하이퍼큐브의 경우는 257.5 MPa로 모두 피로한도 259.0 MPa 이하로 안전성을 만족하였다. 근사최적화한 압입측의 응력 분포를 보스부분을 확대하여 Fig. 7에서 보여주고 있다.

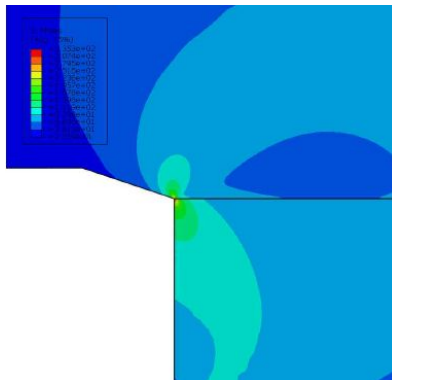
근사모델의 정확도는 라틴하이퍼큐브가 중심합성계획법보다 우수하지만, 최적화 결과는 중심합성계획법에 의해 만든 근사모델의 경우가 접촉압력을 더 감소시켰다.

Table 4 Results of the optimization

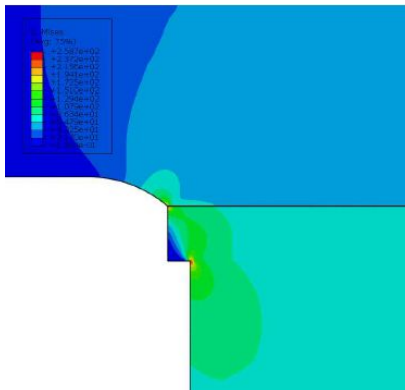
DOE	Design Variables [mm]			Contact pressure [MPa]	von Mises stress [MPa]
	$x_1$	$x_2$	$x_3$		
CCD	1.23	3.01	6.76	338.9	235.0
LHS	0.76	4.89	7.63	368.6	235.0

Table 5 von Mises stress distribution

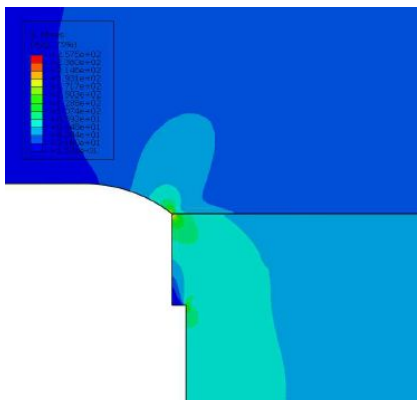
	Contact pressure [MPa]	von Mises stress [MPa]
Initial	487.3	-
CCD	304.9	258.7
LHS	315.0	257.5



(a) Initial model of the press-fitted shaft



(b) Using a central composite design



(c) Using a Latin hypercube sampling

Fig. 6 von Mises stress distribution

## 4. 결 론

본 논문은 동력을 전달하는 중요한 부품인 압입축의 손상을 저감하기 위한 최적설계방법을 제안하였다. 유전자알고리즘과 반응표면법을 이용하였고, 효과적인 근사모델을 생성하기 위해 중심합성계획법과 라틴하이퍼큐브로 실험계획을 하여 압입축을 단순화한 모델을 2D 유한요소해석을 통해 데이터를 획득하였다. 이 두 개의 실험계획법에 의해 생성된 근사모델을 이용하여 유전자알고리즘으로 압입축의 축과 보스 사이의 접촉압력을 최소화하였다. 본 연구의 최적설계방법에서는 중심합성계획법이 라틴하이퍼큐브보다 목적함수인 접촉압력을 더 많이 최소화하였다. 최적설계된 보스부의 끝단의 형상이 접촉압력을 완하시켜 최적설계된 보스부 형상의 접촉압력이 기존형상보다 약 37%를 감소시켰다.

본 연구에서는 압입축의 손상을 저감시키는 근사최적설계 방법을 제안하고, 근사최적설계에서 데이터를 획득하는 실험계획법이 최적화 결과에 미치는 영향을 확인하였다.

향후 복잡한 압입축 보스부의 형상에 적용할 수 있으며, 효율적인 근사최적설계를 위해서는 2D해석의 한계와 근사최적화의 오차를 극복할 수 있는 방법을 적용하는 것이 필요하다.

## 후 기

이 논문은 동양미래대학교의 2013 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음

## REFERENCES

1. Lee, D. H., Kwon, S. J., Ham, Y. S., You, W. H., "Characterization of Fretting Damage in a Press-fitted Shaft below the Fretting Fatigue Limit," Procedia Engineering, Vol. 2, No. 1, pp. 1945-1949, 2010.
2. Lee, D. H., Kwon, S. J., Choi, Kim, J. B. Y. J., "Experimental Study on Fatigue Crack Initiation and Propagation due to Fretting Damage in

- Press-fitted Shaft," Korean Society of Mechanical Engineering, Vol. 31, No. 6, pp. 701-709, 2007.
3. Pilkey, W. D., Pilkey, D. F., Stress Concentration Factors, John Wiley & Sons, 2008.
  4. Smith, R. A., Hillmansen, S., 2004. "A Brief Historical Overview of the Fatigue of Railway Axles," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol. 218, No. 4, pp. 267-278, 2004.
  5. Nishioka, K., Komatshu, K., "Study on the Means for Improvement in Fatigue Strength of Press-Fitted Axles," Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 33, No. 248, pp. 503-511, 1967.
  6. Wise, S., Burdon, E. S., "The dual roles of design and surface treatment in combating fatigue failures," Journal of the Institution of Locomotive Engineers, Vol. 54, pp. 142-177, 1964.
  7. Peterson, R. E., Wahl, A. M., "Fatigue of Shafts at Fitted Members, With a Related Photoelastic Analysis" Journal of Applied Mechanics, Vol. 57, pp. A.1-A.11, 1935.
  8. Makino, T., Yamamoto, M., Hirakawa, K., "Effect of Contact Edge Profile on Fretting Fatigue Crack Initiation Site in Press-Fitted Axle," Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series A, Vol. 63, No. 615, pp. 2312-2317, 1997.
  9. Song, B. C., Bang, I. K., Han, D. S., Han, G. J., Lee, K. H., "Structural Design of a Container Crane Part-Jaw, Using Metamodels," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 7, No. 3, pp. 17-24, 2008.
  10. Holland, J. H., Adaptation in natural and artificial systems. Ann Arbor, University of Michigan Press, 1975.
  11. Hong, K. J., Jeon, K. K., Cho, Y. S., Choi, D. H., Lee, S. J., "A Study on the Construction of Response Surface for Design Optimization," Trans. of the KSME(A), Vol. 24, No. 6, pp. 1408-1418, 2000.
  12. Park, S. H., Modern Design of Experiments. Minyongsa, Korea, 1995.
  13. Simpson, T. W., Lin, D. K. J., Chen, W., "Sampling Strategies for Computer Experiments: Design and Analysis," International Journal of Reliability and Applications, Vol. 2, No. 3, pp. 209-240, 2001.
  14. ABAQUS, ABAQUS Version 6.12, SIMULIA, 2012.
  15. Ugural, A. C., Fenster, S. K., Advanced strength and applied elasticity. Prentice-Hall, Inc, 1995.
  16. Lanoue, F., Vadean, A., Sanschagrin, B., "Fretting fatigue strength reduction factor for interference fits," Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 19, pp. 1811-1823, 2011.
  17. Song, C. Y., Lee, J., "Strength Design of Knuckle Component Using Moving Least Squares Response Surface Based Approximate Optimization Methods" Proc. IMechE, Part D: Journal of Automobile Engineering, Vol. 223, No. 8, pp. 1019-1032, 2009.