

압입축의 손상저감을 위한 최적설계 연구

고재천^a, 이종수^b, 최하영^{c*}

Optimal Design of Press-Fitted Axle Shaft Considering Stress Relief

Jaechun Ko^a, Jongsoo Lee^b, Ha-Young Choi^{c*}

^a Department of Mechanical Engineering Yonsei University, Republic of Korea

^b School of Mechanical Engineering Yonsei University, Republic of Korea

^c Department of Mechanical Engineering Dongyang Mirae University, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	8	July	2013
Revised	26	August	2013
Accepted	25	September	2013

Keywords:

Press-fitted assembly
Finite element analysis
Back-propagation neural networks
Reliability based design optimization

ABSTRACT

Creation of a stress relief groove is a fairly simple yet high-performance method. During the application of this method, it is important to consider the location and size of the groove in order to achieve better performance. Consequently, this research proposes an approach for optimizing the application of the stress relief groove method to a press-fitted assembly. In a boss design, the position and diameter of the groove are configured as design variables and the design of experiments is applied. Based on this information, a 3D model is built and analyzed using the finite element analysis software ABAQUS. Meta-models are created using back-propagation neural networks. Then, deterministic optimization results obtained from a genetic algorithm are compared with the results of the finite element analysis. The temperature sensitivity of the optimized model is analyzed, and finally, reliability-based design optimization is conducted for enhancing the design quality.

1. 서론

본 연구의 대상인 철도차량의 압입축(*press-fitted assembly*)은 차축이 차륜 및 베어링 등이 압입되어 결합되어 있는 형태이다. 차량 운행시 여러 종류의 하중들이 압입축에 복합적으로 작용하고 있으며, 특히 압입축의 접촉 끝부분에서 큰 압력이 반복적으로 발생한다. 이러한 경우 압입축에 프레팅이 발생하면 접촉면이 손상되어 피로강도가 감소된다. 주행 중 철도차량 차축의 파손이 발생하면 대형사고가 발생할 수 있으므로 차축의 손상을 방지하기 위해서 압입축의 손상에 대한 연구가 진행되고 있다^[1-4].

Wise 등은 침탄 또는 고주파 열처리 등 표면처리 및 열처리에 의한 축 압입부 표면의 압축 잔류응력이 압입부 피로 수명 향상에 미치는 영향을 검토하였다^[5]. Nishioka 등은 압입부의 끝단에 발생하는 응력은 축 압입부의 형상변화와 축의 필렛 반지름 변화에 의해 응력집중이 완화되어 피로수명 향상의 효과를 보고하였다^[6]. Peterson과 Wahl은 압입 끝부분의 형상이 피로수명에 미치는 영향에 대해 연구하기 위해 광탄성 실험을 실시하였으며, 압입 접촉부에 발생하는 응력 분포를 확인하고 보스의 응력 완화 홈(*stress relief groove*)의 영향을 검토하였다^[7]. 응력 완화 홈은 보스에 홈을 만들어 주어 접촉 끝부분에 집중되는 응력을 완화시켜 피로 수

* Corresponding author. Tel.: +82-2-2610-5168

Fax: +82-2-2610-1852

E-mail address: hychoi@dongyang.ac.kr (Ha-Young Choi).

MPa가 되도록 압입공차를 조절하여 시험시와 유사한 해석결과를 얻도록 해석 모델링을 하였다.

형상, 재질 및 외부 구속상태에 따라 물체는 고유한 진동 특성을 나타낸다. 압입축에 발생하는 동적반응 문제의 해결을 위한 정보를 얻기 위해 본 해석모델의 구속상태에서 ABAQUS를 이용한 고유 진동 해석을 수행하였다. 압입축의 응력 완화 홈의 위치와 형상을 변화시켜 해석을 해본 결과에서 1차 고유 진동수 해석의 평균값은 약 17 Hz로 나타났다.

2.2 최적화 문제의 구성

최적화 설계 과정은 오류 역전과 신경망을 이용하여 근사모델을 생성한 후 유전자 알고리즘을 이용하여 최적화하는 방법으로 수행하였다^[11]. 근사최적화를 수행하게 되면 직접 최적화 수행시보다 해석에 필요한 시간이 줄어들며 높은 시간비용의 절감을 가능하게 할 수 있다. 최적화한 모델에 극한의 온도조건에 의한 목적함수와

제한조건의 민감도를 분석하고 신뢰성 기반 최적 설계를 수행하였다. 최적화 진행과정을 Fig. 6에 나타내었다. 설계 목표 및 제한조건에 대해 아래와 같이 정식화하였다. 목적함수 $F_{pressure}$ 는 보스와 축 사이에 발생하는 접촉압력으로써 최소화하고, 보스의 Von Mises stress, g_{stress} 와 압입축의 1차 고유 진동수 $g_{frequency}$ 를 제한조건으로 하였다. 1차 고유 진동수의 제한조건은 유한요소 해석결과로 얻은 평균값 17 Hz보다 10%이상 높은 20 Hz를 제한조건의 최소값으로 결정하였다. 설계변수는 보스에 적용할 응력 완화 홈의 위치와 형상을 결정하는 x_1, x_2, x_3 으로 선정하였으며 Fig. 5와 같다.

$$\text{Minimize } F_{pressure}$$

$$\text{Subject to } g_{stress}(x_i) \leq 350MPa$$

$$g_{frequency}(x_i) \geq 20Hz$$

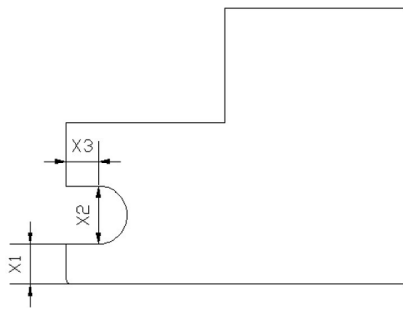


Fig. 5 Design variables of stress relief groove

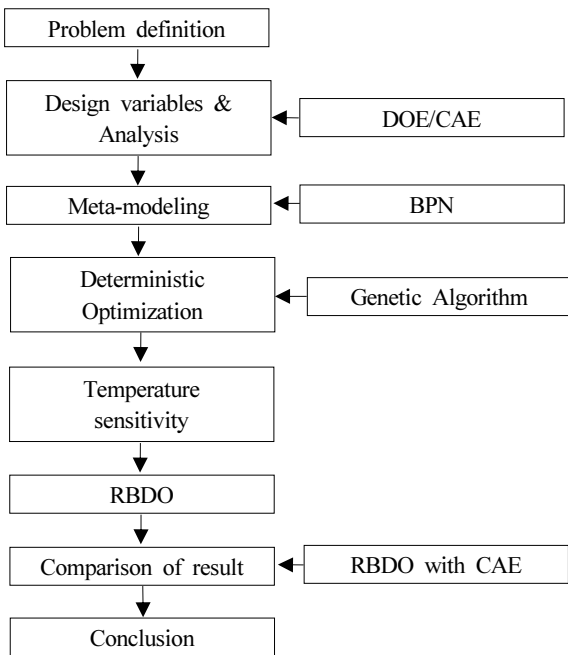
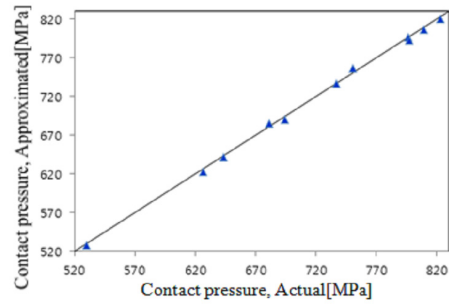
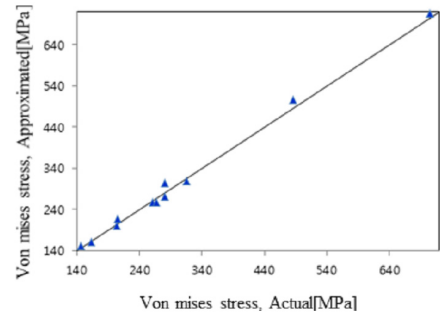


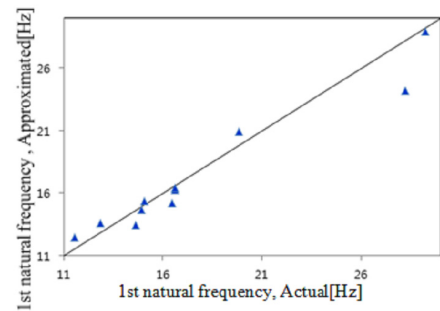
Fig. 6 Optimization Process



(a) Accuracy of RSM - Contact pressure



(b) Accuracy of RSM - Von Mises stress



(c) Accuracy of RSM - 1st Natural frequency

Fig. 7 Accuracy of Real CAE and BPN

Table 2 Result of Training data

	Contact pressure	Von Mises stress	1st Natural frequency
min	527.01	146.83	11.55
max	823.29	714.93	29.22
RMSE	3.73	12.51	1.50

Range of design variables

$$0.7 \text{ mm} \leq x_1 \leq 2.5 \text{ mm}$$

$$0.3 \text{ mm} \leq x_2 \leq 3.5 \text{ mm}$$

$$0.0 \text{ mm} \leq x_3 \leq 1.5 \text{ mm}$$

2.3 근사화 모델링

오프 역전과 신경망을 이용한 근사화를 위해 유한요소 해석을 통해 확보한 결과를 이용하여 목적함수와 제한조건에 대해 신경망 학습을 수행하였다¹²⁾. 근사화 결과의 정확도는 학습에 사용된 110개의 데이터 이외의 무작위로 추가 선정된 11개의 데이터를 이용하여 RMSE(root mean square error)를 통해 정확도를 산출하였으며 Fig. 7과 Table 2에 나타난 결과 (a) Contact pressure, (b) Von Mises stress, (c) 1st natural frequency는 모두 유한요소 결과값(Actual)과 유사한 근사모델을 산출하였다.

3. 최적설계

3.1 최적화 결과

유전 알고리즘을 이용하여 세대수 200, 인구수 200, 교배율은 30%, 변이율은 10%로 설정 후 최적화를 수행하였으며 제한조건

Table 3 Results of Deterministic optimization

DO	x_1	x_2	x_3	Contact pressure	Von Mises stress	1st Natural frequency
$f(x), g_1(x)$	0.91	2.50	0.14	637.42	296.72	17.71
$f(x), g_1(x), g_2(x)$	0.88	2.33	0.17	651.37	278.21	26.14

Table 4 Result validation with CAE

CAE	Contact pressure	Von Mises stress	1st Natural frequency
Initial	829.42	100.00%	16.33
$f(x), g_1(x)$	641.35	77.33%	19.44
$f(x), g_1(x), g_2(x)$	660.99	79.61%	26.34

으로 보스의 피로한도만 고려하였을 경우와 1차 고유진동수까지 추가하여 두 가지의 제한조건을 고려했을 경우의 최적화 결과를 비교하였다¹³⁾.

Table 3에 나타난 결과에서 보스의 피로한도만을 고려하였을 경우의 최적해가 접촉압력이 더 낮은 것을 확인할 수 있지만 1차 고유진동수에 대한 제한조건을 위반한 상태이다. 1차 고유진동수에 대한 제한 조건을 추가한 경우의 결과는 접촉압력이 감소하고 2가지 제한조건을 모두 만족하였다. 결정론적 방법으로 얻은 최적해를 유한요소 해석하여 그 결과를 확인해 보았으며 그 결과가 유사함을 알 수 있었다.

Table 4에 나타난 해석결과에서 제한조건을 하나만 하였을 경우와 두 가지로 하였을 경우 모두 접촉압력이 20%이상 감소된 것을 확인할 수 있다. 또한 주어진 제한조건을 모두 만족하여 설계목표에 맞는 결과를 도출하였다.

3.2 온도 조건의 영향

철도차량과 같이 다양한 하중이 연속적으로 작용하는 구조물의 설계에 있어서 구조물의 사용 환경 및 재료의 피로 특성을 동시에 고려해야 한다. 특히 극한상황에서는 재료의 물성치가 변함에 따라 신축을 하게 되고 이에 따라서 발생하는 에너지가 응력으로 축적된다. 온도 변화량이 큰 경우에는 과도한 응력이 발생하여 좌굴을 일으키거나 인성이 저하되어 취약해진다. 하절기에는 철도차량의 일부분이 57°C까지 상승하고 저온 환경에서는 -40°C까지 온도가 낮아진다고 한다. 그만큼 온도는 철도차량의 주행시 안정성을 결정하는데 중요한 요인이라 할 수 있으며 관련한 연구가 현재 활발하게 진행되고 있다¹⁴⁾. 본 연구 대상인 압입축의 물성치는 일반적인 SFA60과 유사하다. 온도변화에 따라 달라지는 SFA60 물성변화를 적용하여 유한요소 해석을 수행하였다. Table 5에 나타난 SFA60의 물성치를 보면 온도가 변화함에 따라 탄성계수는 변화하

Table 5 Material properties of SFA60

Material	Temperature	Young's modulus	Poisson ratio
Steel	-40°C	217 GPa	0.3
	20°C	207 GPa	
	60°C	190 GPa	

Table 6 Analysis results for the temperature change

Temperature	Contact pressure	Von Mises stress	1st Natural frequency
-40°C	663.23	100.34%	26.10
20°C	660.99	100.00%	26.34
60°C	658.16	99.57%	27.21

Table 7 Design variables of RBDO

	Standard deviation	Lower bound	Initial Design	Upper bound
X ₁	0.088	0.7	0.88	2.5
X ₂	0.233	0.3	2.33	3.5
X ₃	0.017	0.0	0.17	1.0

Table 8 Results of RBDO

Method	Percent Variation (%)	x ₁ (mm)	x ₂ (mm)	x ₃ (mm)	Contact pressure (MPa)	Von Mises stress (MPa)	Frequency (Hz)
DO	-	0.875	2.332	0.172	651.37	278.21	26.14
RBDO	68.26	0.874	2.353	0.171	672.31	273.43	27.73
	95.46	0.893	2.370	0.167	676.56	270.04	28.40
	99.73	0.901	2.394	0.165	678.08	269.24	28.80

지만 포아송비는 변화지 않음을 알 수 있다. 앞서 최적화한 압입축 모델에 대하여 극한의 온도 변화를 적용한 해석을 수행하였으며 해석결과를 Table 6에 나타내었다. 이 해석결과로부터 본 연구에 적용한 유한요소 해석 모델에서는 온도에 의한 영향은 미미한 것으로 나타났다.

4. 신뢰성 기반 최적설계

신뢰성기반 최적설계의 설계목표 및 제한조건을 아래에 나타내었다^[15]. 각각의 제한조건에 대하여 신뢰도를 68.26%, 95.46%, 99.73%로 설정하여 설계를 진행하였다. 기존의 설계변수를 신뢰성 설계에 맞게 Table 7과 같이 표준 정규 분포의 형태를 가지는 랜덤변수의 형태로 설계를 진행하였다. 결정론적 최적화 방법으로 획득한 설계변수(X_i)를 평균으로 ±10%를 공차로 설정 하였으며 표준편차의 수준을 변경하며 결과를 확인 하였다. Table 7에 나타낸 설계변수는 공차 범위가 ±1σ인 경우이다.

Table 8에 나타낸 신뢰성기반 최적설계 결과에서 결정론적 최적해에 비해 보수적인 해를 산출한 것을 확인할 수 있다. 또한 표준편차의 범위가 증가할수록 더욱 보수적인 해가 얻어짐을 알 수 있다.

Minimize $F_{pressure}$

Subject to

$$P(G_{stress}(X_i) = g_1) \geq \text{Target reliability of}$$

$$68.26\%, 95.46\%, 99.73\%, \quad i = 1, 2, 3$$

$$P(G_{frequency}(X_i) = g_2) \geq \text{Target reliability of}$$

$$68.26\%, 95.46\%, 99.73\%, \quad i = 1, 2, 3$$

5. 결론

본 연구 대상인 철도차량의 차축은 주행안전에 매우 중요한 부분으로 차축의 형상을 단순화한 압입축 모델에 응력 완화 홈을 설계하였다. 설계를 위해 압입축 회전 굽힘 피로시험을 모사한 유한요소 해석 모델을 개발하였고 근사최적설계를 통해 압입부의 접촉압력을 최소화하였다. 제한조건으로 1차 고유진동수와 보스의 피로 한도를 고려한 결과를 모두 만족하였고 근사 최적화 결과와 실제 해석 결과를 비교하였다. 또한 극한 온도 조건이 압입축에 미치는 영향도를 살피기 위해 온도와 물성 조건을 달리하여 해석하였으나 본 연구에 이용된 유한요소 해석 모델에서는 온도조건 변화에 의한 영향은 미미하였다. 마지막으로 신뢰성기반 최적설계를 통해 공차에 의한 제한조건 위반 가능성을 고려하여 보수적인 최적해를 산출해 내었다.

주요 연구결과는 다음과 같다.

- (1) 실제 해석결과와 근사최적화 결과 비교
- (2) 극한조건 온도변화에 의한 해석 및 영향도 분석
- (3) 신뢰성기반 최적설계를 통한 보수적인 최적해 산출

추후 본 연구를 통해 얻어낸 응력 완화 홈의 설계기법을 철도차량의 차축에 적용함으로써 내구성을 증가시키고 설계시 소요되는 시간과 비용을 절약할 수 있을 것이다.

6. 후기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2011-0024829).

References

- [1] 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, 218:4 267-278.
- [2] Pilkey, W. D., Pilkey, D. F., 2008, Stress Concentration Factors, John Wiley & Sons.
- [3] Lee, D. H., Kwon, S. J., Choi, J. B., Kim, Y. J., 2007, The Effect of Fretting Wear on Fatigue Life of Press-fitted Shaft, Korean Society of Mechanical Engineering, 34:11 1083-1092.

- [4] Lee, D. H., Kwon, S. J., Ham, Y. S., You, W. H., 2010, Characterization of Fretting Damage in a Press-fitted Shaft below the Fretting Fatigue Limit, *Procedia Engineering*, 2:1 1945-1949.
- [5] Wise, S., Burdon, E.S., 1964, The dual roles of design and surface treatment in combating fatigue failures, *J. Instn Loco. Engrs*, 54 142-177.
- [6] Nishioka, K., Komatshu, K., 1967, Researches on Increasing the Fatigue Strength of Press-Fitted Axle, *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, 33:248 503-511.
- [7] Peterson, R.E., Wahl, A.M., 1935, Fatigue of Shafts at Fitted Members, With a Related Photoelastic Analysis, *J. Appl. Mechs.*, 57 A.1-A.11.
- [8] Lee, D. H., Kwon, S. J., Seo, J. W., Kwon, S. T., You, W. H., 2010, Evaluation of Fatigue Crack Initiation Life according to the Hub Contact Shape in a Press-fitted Shaft, *Korean Society for Precision Engineering 2010 spring conference*, 1467-1468.
- [9] ABAQUS, 2012, ABAQUS Version 6.12, SIMULIA.
- [10] HyperMesh, 2011, HyperMesh Version 11.0, Altair Engineering Inc..
- [11] Chang, Y. C., Chiu, M. C., Wu, L. W., 2010, Shape Optimization of Mufflers Hybridized with Multiple Connected Tubes Using the Boundary Element Method, Neural Networks, and Genetic Algorithm, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 224:4 901-913.
- [12] Homil, k., Stinchcombe, M., White, H., 1990, Universal Approximation of an Unknown Mapping and Its Derivatives Using Multilayer Feed-forward Networks, *Neural Networks*, 3:5 551-560.
- [13] Goldberg, David E., John, H., 1988, Genetic Algorithms and Machine Learning, *Machine learning* 3:2 95-99.
- [14] Kim, J. H., Kang, K. W., Goo, B. C., You, W. H., 2006, A Study on the Low Temperature Mechanical Characteristics of SM490A for the Railroad Vehicle Structure, *Korean Society for Railway*, 9:6 695-700.
- [15] Youn, B. D., Choi, K. K., Yang, R. J., Gu, L., 2004, Reliability-Based Design Optimization for Crashworthiness of Vehicle Side Impact, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 26:3-4 272-283.