COSEIK J. Comput. Struct. Eng., 26(5)
pp.351~358, October, 2013
http://dx.doi.org/10.7734/COSEIK.2013.26.5.351

pISSN 1229-3059 eISSN 2287-2302
Computational Structural
Engineering Institute of Korea

고전압 장비 지그의 동특성에 대한 위상, 형상 및 치수 최적화

최 봉 균[1] · 이 재 환[1†] · 김 영 중[2]

[1]충남대학교 선박해양공학과, [2]한국기계연구원 기계시스템안전연구본부

Topology, Shape and Sizing Optimization of the Jig Supporting High Voltage Pothead

Bong-Kyun Choi[1], Jae-Hwan Lee[1†] and Young-Joong Kim[2]

[1]*Department of Naval Architecture and Ocen Engineering, Chungnam National University, Daejon, 305-764, Korea*
[2]*Korea Institute of Machinery and Materials Mechanical System Safety Research Division, Daejon, 305-343, Korea*

Abstract

In the electric power supplying industry, outdoor sealing end (pothead) is used and sometimes it is necessary to check the seismic qualification analysis or test which is intended to demonstrate that the equipment have adequate integrity to withstand stress of the specified seismic event and still performs their function. And since the pothead is mounted on the supporting jig, the avoidance of resonance between the pothead and jig is required. In order to design jig, three types of optimization are performed to get the minimum weight while satisfying the natural frequency constraint using ANSYS. Optimal array, position and thickness of truss members of the jig are obtained through topology, shape and sizing optimization process, respectively. And seismic analysis of the pothead on the jig for given RRS acceleration computes the displacement and stress of the pothead which shows the safety of the pothead. The obtained natural frequency, mass, and member thickness of the jig are compared with those of the reference jig which was used for seismic experimental test. The numerical results of the jig in the research is more optimized than the jig used in the experimental test.

Keywords : *topology, shape, and sizing optimization, density method, pothead, jig, natural frequency, seismic structural analysis*

1. 서 론

옥외 변전소에서 가공선과 지중선을 접속하는데 사용하는 Pothead(Outdoor sealing end)는 지진 환경 하에서 그 기능이 제대로 작동되기 위해서 내진 안전성이 필수적으로 검토되어져야 한다. Pothead는 구조상 제약으로 지면에 고정되는 것이 아니라 철골 구조로 이루어진 지그(jig)에 의해 지지된다. Pothead와 지그의 고유진동수가 일치할 경우 공진에 의해 기능을 제대로 수행할 수 없으며, 심각할 경우 구조적 파손이 우려되므로 이를 예방하기 위하여 둘의 고유진동수가 일정 값 이상의 차이가 나도록 설계할 필요가 있다. 하지만 경험이나 직관에만 의존하여 설계할 경우 반복적인 설계로 시간과 비용의 손실이 클 수 있다. 따라서 최적의 성능과 비용을 만족하는 지그의 형상을 결정하기 위해서, 다양한 요소들 사이의 Trade-off를 통하여 최적의 설계변수를 결정한 후 설계에 적용할 필요가 있다. 위상 최적화는 Bendsøe와 Kikuchi(1988)가 연속체구조물에 적용하는 이론을 발표하였고, Ma 등(1995)은 균질화법을 이용한 고유진동수 최적화, Kawabe와 Yoshida 등(1996)은 밀도를 설계변수로 한 고유진동수 최적화를 연구하였다. 국내에서는 Yoon(2009)이 고유진동수에 대한 최적화 연구를 수행하였다.

본 논문에서는 APDL(ANSYS Parametric Design Language)과 WORKBENCH를 이용하여 지그의 최적설계를 수행한 후, 최적화된 지그 위에 설치된 Pothead와 내진

† Corresponding author:
Tel: +82-42-821-6624; E-mail: jaelee@cnu.ac.kr
Received June 25 2013; Revised October 8 2013;
Accepted October 15 2013
©2013 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

안전성 여부를 검토하였다. 첫째로 지그의 초기 레이아웃을 결정하기 위하여 위상 최적화를 수행하였으며, 위상 최적화 과정에서 유한요소의 크기가 최적화 결과에 미치는 영향을 검토하였다. 다음으로 형상 최적화를 통하여 지그를 구성하고 있는 트러스 부재의 위치 및 각도를 결정하였고, 최적화된 형상을 바탕으로 치수 최적화를 수행하여 부재의 두께를 결정하였다. 마지막으로 모달 해석 및 응답 스펙트럼 해석(Response Spectrum Analysis)을 수행하여 Pothead와 지그의 내진 안전성 여부를 검토하였다. 결과의 적합성 검토를 위하여 6 자유도 진동대 위에서 수행되었던 Pothead 내진 시험 결과(비공개 자료)와 비교하였을때 본 연구는 합리적인 결과를 보이고 있다.

2. 최적화 문제의 정식화

2.1 위상 최적화

위상 최적화는 크게 균질화법(Homogenization design method)과 밀도법(Density method)으로 분류되며, 이 중 밀도법은 상대적으로 문제에 적용하기가 용이하여 주로 사용되어지고 있는데, 설계영역의 밀도분포가 물체의 위상을 표현한다. 밀도가 0인 부분은 질량이 없는 것으로 간주할 수 있고, 1로 갈수록 물체의 질량이 집중됨을 의미한다. 지그의 위상 최적화 경우, 설계변수는 각 유한요소들의 밀도이고, 목적함수는 고유진동수의 최대화이며, 제약조건은 구조물의 전체 부피 중 70%를 제거하는 것이다. 여러 개의 모드 중 대부분의 경우 기본 고유진동수가 구조물의 동적응답을 결정하는 역할을 한다. 이 최적화 문제는 다음과 같다.

Maximize

$$\lambda_{\min} = \min \lambda_i : i = 1,...,N \tag{1}$$

Subject to

$$(K - \lambda_i M)\Phi_i = 0,\ i = 1,...,N \tag{2}$$

$$\int_{\Omega} x_e d\Omega \le V,\ e = 1,...,D \tag{3}$$

Ω는 연속체의 부피, V는 부피 상한, K는 강성 행렬, M은 질량 행렬, Φ_i는 i번째 고유치의 고유벡터이다. 식 (3)은 위상최적화의 설계변수인 밀도를 나타낸다. 밀도법에서 각 유한요소는 밀도가 제외되는 경우에도 수치적 계산이 유지되도록 Pseudo-density(x_e, $x_{\min} \le x_e \le 1$)라는 추가적인 물성치를 가지게 하여, 재료의 강성(K_j)을 새로이 구성한다. 강성 행렬의 특이점(Singularity)을 피하기 위해서 $x_{\min}$이 0이 되어서는 안 된다.

$$x_j = \frac{\rho_j}{\rho_{j0}},\quad K_j = x_j^p K_0 \tag{4}$$

여기서, ρ_j는 j번째 요소의 밀도, ρ_{jo}는 초기 밀도, x_j는 j번째 요소의 Pseudo-density, K_o는 구조물의 원래 강성, p는 Penalization power(일반적으로, $1 \le p \le 5$)이다.

2.2 형상 및 치수 최적화

지그의 형상 최적설계 문제는 비 제약 최적화 문제(Non-constrained optimization)로써 지그를 구성하는 기하학적 변수(Geometric parameter)를 설계변수로 하고, 기본 고유진동수의 최대화를 목적함수로 하여 최적의 설계 형상을 찾도록 정의되었다.

Maximize

$$\lambda_{\min} = \min \lambda_i : i = 1,...,N \tag{5}$$

Subject to

$$(K - \lambda_i M)\Phi_i = 0,\quad i = 1,...,N \tag{6}$$

$$\underline{v_j} \le v_j \le \overline{v_j},\quad j = 1,...,k \tag{7}$$

여기서, k는 독립변수의 수, v_j는 설계 변수(L자 트러스의 위치), $\underline{v_i}$는 설계변수의 하한, $\overline{v_j}$는 상한이다.

지그의 치수 최적설계 문제는 제약 최적화 문제(Constrained optimization)로 Pothead와의 공진 주파수 영역을 피하기 위하여 기본 고유진동수의 범위가 제한되었고, 목적함수는 지그의 전체 질량이며 설계변수는 주 부재와 보조 부재의 두께로 정의되었다.

Minimize

$$W = \sum_{e=1}^{P} L_e \rho_e A_e \tag{8}$$

여기서, W는 지그의 무게, L_e는 e번째 요소의 길이, ρ_e는 e번째 요소의 밀도, A_e는 e번째 요소의 두께이다.

Subject to

$$\omega_i \ge \omega_i^*,\quad i = 1,...,N \tag{9}$$

$$\underline{t}_j \le t_j \le \overline{t}_j, \quad j=1,\ldots,k \tag{10}$$

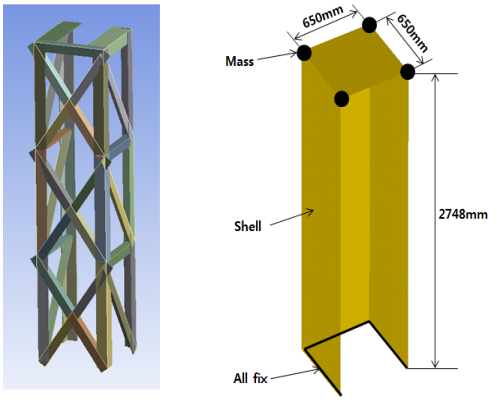
여기서, ω_i는 i차 고유진동수, ω_i^*는 고유진동수의 최소 제약조건, t_j는 설계 변수 공간(L자 트러스의 두께)이다.

3. 지그 최적화

3.1 위상 최적화

기존에 제작되어 진동대에서 내진 시험이 수행된 지그(비교용 지그)는 Fig. 1(a)와 같으며, 위상 최적화를 수행하기 위한 지그의 초기 레이아웃은 Fig. 1(b)에 있다. 이 초기 레이아웃은 지그 내부를 통과하는 Pothead 케이블에 접근이 가능하게 3개의 면이 ㄷ자 형상으로 지면에 수직으로 세워졌으며, 모든 면은 쉘 요소(shell93)로 모델링되었다. 지그 상단에 Pothead가 설치되는 점을 고려하여 상부에 4개의 질량 요소가 생성되었고 최적설계 변수에는 포함되지 않는다. 경계 조건으로 지면에 고정되는 하단부의 6자유도가 구속되었고, 유한요소모델의 정보는 요소 및 질점의 수가 각각 7088개, 21541개, 쉘 요소 두께는 10mm, 질량 요소는 mass21이며, 강철의 밀도, 탄성계수, 포아송 비는 각각 7850kg/m^3, 210GPa, 0.3이다. 최적화 방법으로 쿤-터커 조건을 적용한 최적기준법을 사용하였으며, 최적화 결과에의 수렴정도를 고려하여 최대 반복계산 횟수를 60으로 한정하였고, 모든 과정은 밀도법을 따르고 있는 ANSYS APDL에서 수행되었다.

위상 최적화에서 동일한 최적화 문제라도 요소 크기에 따라 다른 결과가 도출되며(Sigmund and Petersson, 1998), 요소의 크기가 감소할수록 고유진동수와 최적화 형상이 변화하며 크기가 작은 부재들의 수가 증가하는 경향이 있다(Zhou *et al.*, 2001). 따라서 요소 크기와 고유진동수의 상관관계를 찾기 위하여 요소 크기를 10~50mm 까지 2.5mm 간격으로 각각에 대한 유한요소 모델을 생성하여 위상최적화를 수행하였다. Fig. 2에서 요소 크기별 지그의 고유진동수는 0.8~0.92 사이의 값을 보이는데, 요소의 크기가 작을수록 최적화 형상을 명확하게 구현하여 최적화 수준을 높일 수 있을 것으로 보인다. 위상 최적화 과정은 부재의 최종적인 단면 형상 및 치수가 결정되기 이전이므로, 본 연구에서 목표로 하고 있는 공진을 회피하기 위한 지그의 고유진동수 값과는 거리가 있다. 요소의 크기가 감소함에 따라 고유진동수가 증가하는 경향을 보이며, Fig. 3(a)에서 최적화 형상이 뚜렷해짐을 알 수 있다. 하지만 요소 크기가 15mm 이하로 감소하게 되면 지그를 구성하는 부재의 수가 증가하여 제작비용 상승의 문제가 발생하게 되고 요소 크기가 크면 Fig. 3(c)와 같이 형상이 뚜렷하지 않을 수 있다. 요소 크기를 30mm로 하여 결정된 지그의 최적 위상은 트러스 형태로 1층과 2층은 X자, 3층은 Λ자 형태를 보이고 있으며 Fig. 3(b)에 나타난 바와 같다. 이러한 형상은 Bendsoe와 Kikuchi(1998)와 Yoon(2009)의 선행 연구에서도 확인되며, 지그처럼 한 면



(a) (b)

Fig. 1 (a) Reference jig used for experiment
(b) Initial shape of jig for topology optimization

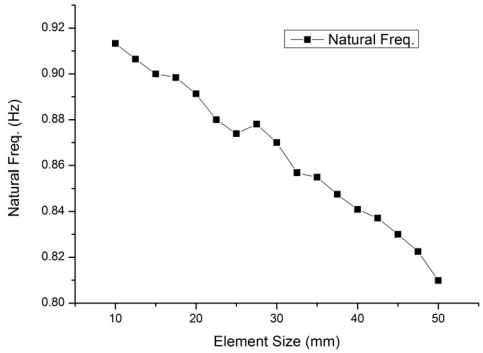
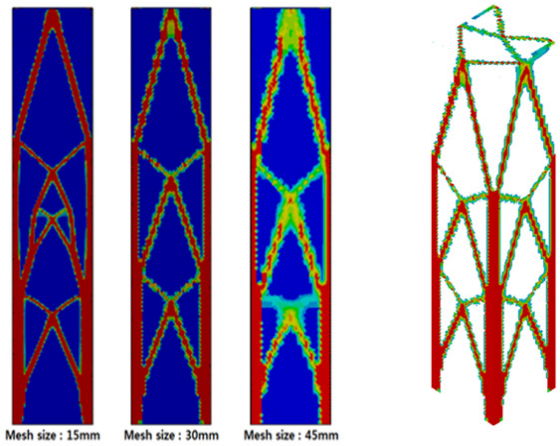


Fig. 2 Relationship between fundamental natural frequency and element size



(a) (b)

Fig. 3 (a) Optimized shapes of different mesh sizes
(b) Optimized topology of jig

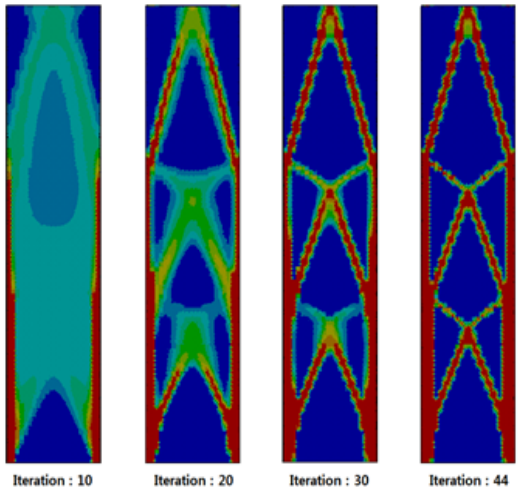


Fig. 4 Evolution of an topology optimization process

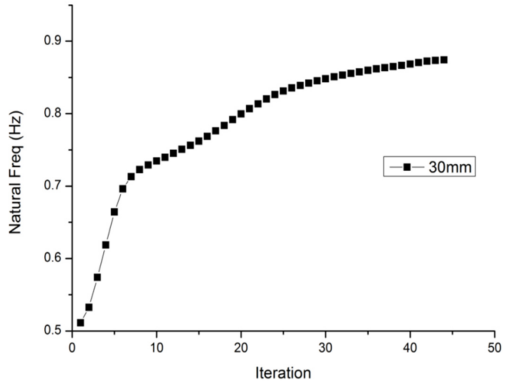


Fig. 5 Convergence history for the 1st natural frequency

이 열려있는 ㄷ자 형상을 지닌 입체 구조물에도 유사한 결과가 나타남을 알 수 있다. 위상 최적화가 진행되는 동안 밀도 분포가 변해가는 과정은 Fig. 4에 나타나 있고, 최종 형상이 결정되기까지 44번의 반복계산이 수렴되는 과정은 Fig. 5에 나타나 있다. 초기에는 상대적으로 지그의 강성에 영향이 적은 부분들이 많이 제거되어 고유진동수가 급격하게 증가하고, 이후 최적화 위상이 점차 안정되어 감에 따라 고유진동수도 수렴하고 있다. 최적화된 지그의 고유진동수는 최적화 이전의 고유진동수인 0.51에서 0.87로 증가하였고, 부피는 $0.058m^3$에서 $0.017m^3$로 70% 가량 제거되었다.

3.2 형상 최적화

형상 최적설계를 위해 지그는 지면에 수직한 방향에 대하여 6 구역으로 분할되고, 이 중 X_1~X_6는 위치가 변하는 설계변수로 Table 1과 같이 설정되었다. Fig. 6 (a)에서 "A" 구역의 부재는 위상 최적화 과정에서는 존재하지 않지만, Pothead와 연결되는 점을 고려하여 추가되었으며 사용된 부재의 치수는 진동대에서의 내진실험에 사용된 비교용 지그와 동일하다. ANSYS WORKBENCH을 이용한 형상 최적화는 실험계획법을 통하여 50개의 추출점(Design point)에 대한 해석을 수행한 후 하드 포인트(Hard point)를 연결하여 고유진동수 최대화가 충족되는 최적점을 찾아 주는 반응표면법을 사용하였다. 반응표면법은 실험계획법의 하나로써 목적함수(종속변수)의 값이 설계변수들의 영역내에서 평면 또는 곡면의 모습을 갖는 것을 가정하고 최적의 조건을 찾게 해준다(Lee *et al.*, 2009). Pothead 지그의 최적화 형상은 Fig. 6(b)와 같이 X_1~X_5의 변수들의 위치가 모두 Upper bound에 가까운 값을 취하고 있으며, X_1의 경우는 구조적 상식과 상통하게 지그의 하단 끝까지 연장되어 있다. Fig. 7에 보여지는 고유진동수에 대한 각 설계 변수의 민감도에서 민감도가 상대적으로 높은 설계 변수들은 길이가 증가하고 낮은 설계 변수들은 길이가 감소하는 경향을 보이고 있다. 민감도는 고유진동수, 변위 응력과 같은 구조물 거동에 대한 설계변수의 영향력을 보여주기 때문에 최적화의 결과를 검증하거나

Table 1 Design variables for shape optimization
(Unit : mm)

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
Initial value	637.5	215.5	637.5	215.5	853
Lower bound	590	200	590	200	780
Upper bound	690	237	690	237	920

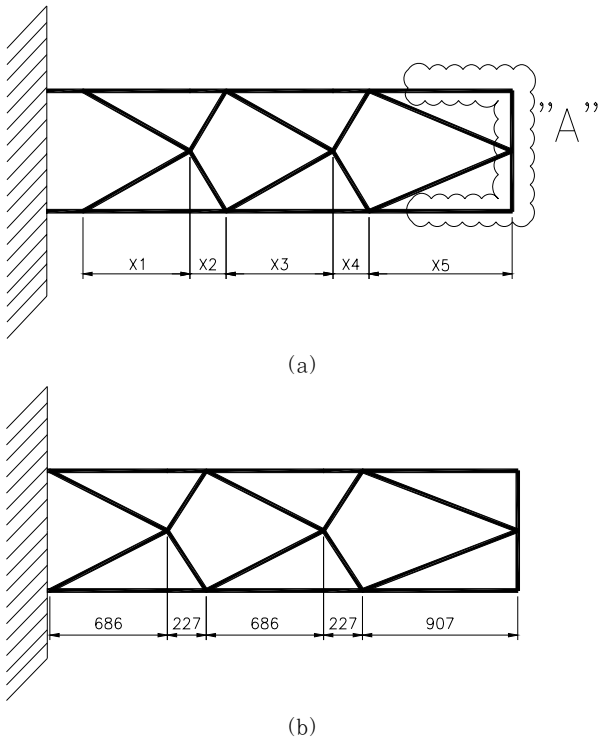


Fig. 6 (a) Shape design variables of jig (b) Optimum shape of jig

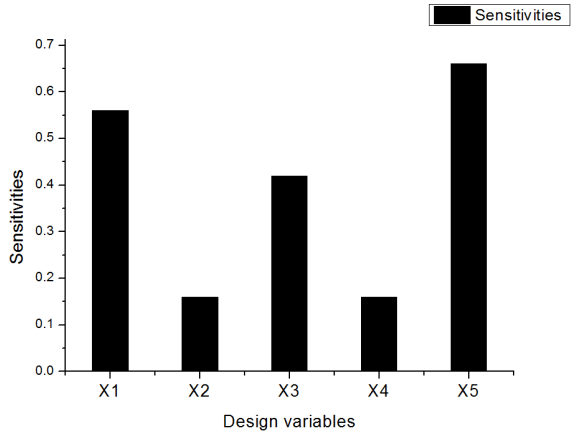


Fig. 7 Sensitivities of design variables for the 1st natural frequency

최적화를 하지 않고도 설계변경에 사용된다(Lee *et al.*, 1995; 2004). Table 1에서 X_1, X_3의 길이와 X_2, X_4의 길이는 최적화 결과, 각각 3:1의 비율을 갖는 특성을 보이고 있다. 기본 고유진동수는 형상 최적화를 수행하기 전보다 1Hz 상승하여 28.3Hz가 되었으며, Fig. 1(a)의 비교용 지그의 기본 고유진동수에 비하면 1.5Hz만큼 상승한 값이다. 형상을 크게 변화시키지 않고 부재의 위치만 변화시키더라도 고유진동수에 영향을 줄 수 있음을 확인할 수 있다.

3.3 치수 최적화

최종적인 지그 부재의 최적치를 찾기 위하여 내진 시험 시 사용된 비교용 지그의 치수를 초기 값으로 하고, Fig. 8에 명시된 바와 같이 주 부재와 보조 부재의 두께를 설계변수로 설정하였으며(Table 2), 목적함수는 질량 최소화, 제한함수는 기본 고유진동수로 설정하였다. 최적화 과정 중, 반응표면 생성 시에 반응표면의 국부적인 민감도를 기반으로 하여 추가적인 추출점을 생성하고 또한 반응표면의 정확성이 충족될 때까지 반복해서 추출점을 생성하고 검증하는 Sparse grid를 사용하는 보간법이 사용되었다.

지그의 치수 최적화 결과, 주 부재의 두께는 6.7mm, 보조 부재의 두께는 5.1mm로 감소하였고 지그의 질량은

Table 2 Design variables and a constraint for sizing optimization

	Initial value	Lower bound	Upper bound
Main member thickness (mm)	9.8	1	12
Sub member thickness (mm)	9.8	1	12
Fundamental frequency (Hz)	28.3	26.8	27

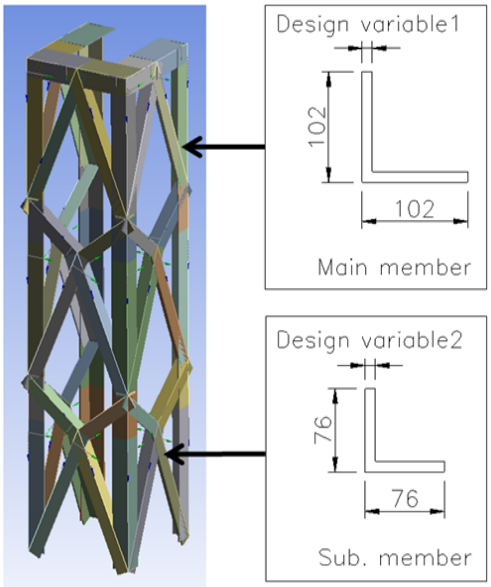
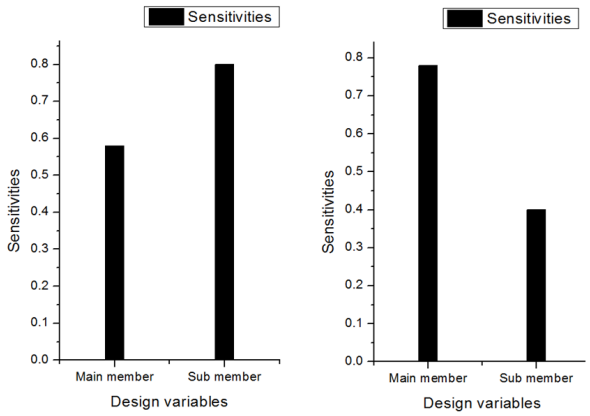


Fig. 8 Sizing design variables of pothead jig



(a) Total mass (b) Natural frequency

Fig. 9 Sensitivities of sizing design variables

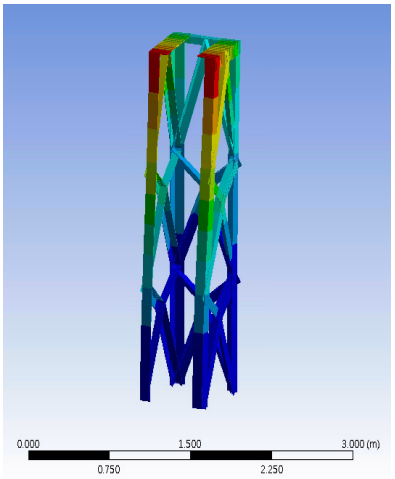


Fig. 10 The 1st mode shape of jig

374.2kg에서 261.4kg으로 감소하였다. 이는 기존에 제작된 비교용 지그 전체 질량에 비해 30% 가량 감소한 값이다. 각 설계 변수의 민감도는 Fig. 9(a)에서 주 부재의 경우 지그의 전체 질량에 대한 민감도는 상대적으로 낮으나, (b)에서 기본 고유진동수에 대한 민감도는 상대적으로 높다. 따라서 주 부재의 두께는 적게 감소하였고, 질량에 대한 민감도가 높은 보조 부재의 두께는 많이 감소하였다. 기본 고유진동수는 26.8Hz로 비교용 지그의 고유진동수와 유사한 결과를 보이고 1차 진동 모드 형상은 Fig. 10에 나타나 있다.

4. 내진 해석

원형의 긴 Pothead의 내부는 일자형 구리심, 외부는 알루미늄, 고무, 폴리부텐 오일(Polybutene oil), 폴리머 등의 다양한 재료로 구성되어 있고 형상이 복잡하여 실물과 같게 유한요소모델링 할 수 없고 내부의 일자형 긴 구리심의 질량과 강성이 Pothead 전체의 구조 특성을 대표하기 때문에 Fig. 11에 보여진 바와 같이 Pothead를 원형의 보 구조로 단순화 한 후, 모달해석을 통해 산출된 고유진동수와 시험으로부터 도출된 고유진동수를 비교해 가며 질량과 강성을 조율하여 실제와 유사한 Pothead 유한요소 모델을 생성하였다. 이어서 지그와 Pothead가 결합된 구조의 모달해석과 내진해석이 수행되었는데, 내진해석에는 Fig. 12 요구 응답 스펙트럼(RRS: Required Response Spectrum) 곡선이 하중이 되고, 모드별 응답을 제곱하여 더하고 제곱근을 취하는 방법인 지진응답 방법 SRSS(Square Root of Sum of Squares method)이 적용되었다(Lee *et al.*, 2007). 지그의 최대변

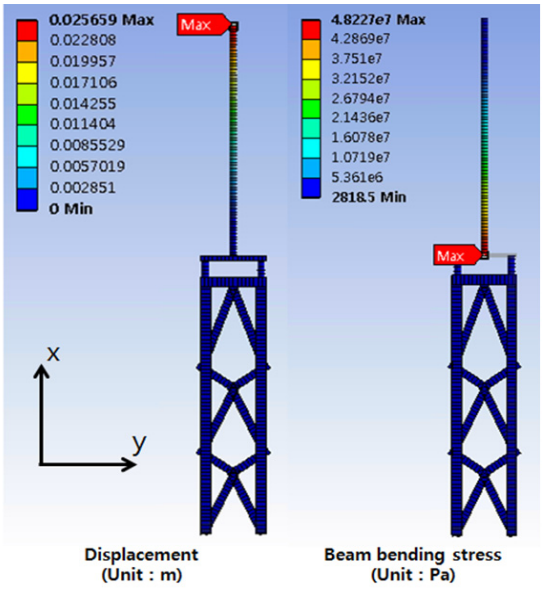


Fig. 11 Results of seismic analysis for optimum jig

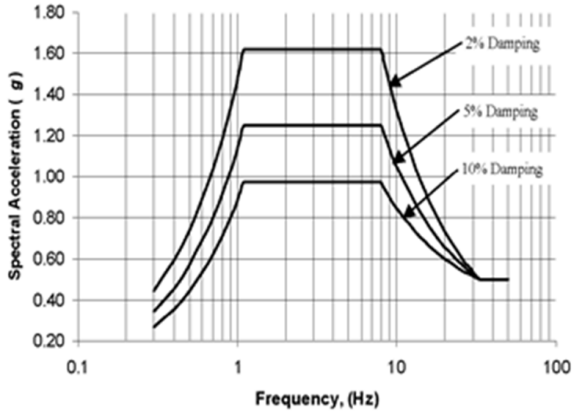


Fig. 12 High required response spectrum

Table 3 Comparison between reference and optimum jigs

	Reference jig design	Optimum jig design
Fundamental natural frequency (Hz)	26.9	26.8
Total mass of jig (kg)	374.2	261.4
Max. deformation (mm)	27	25.6
Max. beam bending stress (MPa)	50	48

위는 Pothead의 상부에 25.6mm, 최대응력은 Pothead의 아래 끝단에 작용하고 있으며 48MPa이다(Fig. 12). Metals Handbook(1990) 기준에서 Pothead에 대한 허용응력은 항복응력 345MPa의 80%인 276MPa으로 설정되므로 Pothead는 지진이 발생하는 상황에 대한 안전성이 확보되었다고 할 수 있다. 기존에 제작된 비교용 지그와 최적화된 지그의 기본 고유진동수 및 지그의 전체 질량과 내진 해석 결과는 Table 3에 있다. 최적화를 수행한 결과 고유진동수는 같은 수준으로 유지되며 질량은 30%가량 감소되었으며, 내진 해석결과 발생한 Pothead의 최대 응력 및 최대 변위도 유사한 결과를 보이고 있다.

5. 결　론

본 연구에서는 총 3단계의 최적화 과정을 통하여 지그의 최적 형상 및 부재의 치수를 결정하였고, 지그 위에 설치된 Pothead가 포함된 시스템의 내진 해석을 수행하여 안전성을 확인하였다.

(1) 지그의 최적화를 위하여 우선 위상 최적화를 수행하였고, 이 과정에서 요소 크기가 최적화 결과에 미치는 영향을 검토하여 적절한 요소 크기를 결정하였다. 요소 크기가 작아질수록 목적함수인 고유진동수가 증가하고 부재의 수가 증가하는 경향을 보였으며, 이를 바탕으로 제작을 고려하여 적합한 요소 크기를 결정하

였다. 위상 최적화 결과 기본 고유진동수는 최적화 이전의 초기 레이아웃에 비해 0.7배 증가한 반면, 지그의 전체 질량은 70% 가량 제거되었으며, 최적의 지그 위상이 도출되었다.

(2) 일반적으로 위상 최적화만으로 최적 형상을 결정하는 것과는 달리 위상 최적화에서 결정된 위상을 바탕으로 지그의 부재 위치를 설계 변수로 하여 형상 최적화를 수행하였으며, 이어서 지그의 부재 두께를 설계 변수로 하여 치수 최적화를 수행하였다. 이상의 3차례에 걸친 최적화 과정을 통해 도출된 지그를 기존에 제작된 비교용 지그와 비교한 결과 고유진동수는 같은 수준으로 유지되었으며, 전체 질량은 30% 가량 감소하였다.

(3) 최적화된 지그 모델에 대하여 직접 내진 해석을 수행한 결과, 기존에 제작된 비교용 지그의 내진 해석 결과와 유사한 결과를 얻었으며, 최대 응력은 48Mpa로써 Pothead 하부 끝단에 작용하고 최대 변위는 25mm로써 Pothead 상부 끝단에서 발생하였다. 이 결과를 토대로 Metals Handbook(1990)의 기준에 의거하여 최적화된 지그의 내진 안전성을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 충남대학교 학술연구비에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

ANSYS, Inc. (2009) Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Applications Release 12.1.

Bendsoe, M. P., Kikuchi, N. (1998) Generating Optimal Topology in Structural Design Using a Homogenization Method, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 71, 1988, pp.197~224.

Kawabe, Y., Yoshida, S. (1996) Structural Optimization by Density Distribution for Maximization of Natural Frequency, *Transactions of the ASME-R-Journal of Mechanical Design*, 118(1), pp.157~159.

Lee, J.H., Huh, Y.J., Joung, T.H., Lee, J.M. (2004) Optimal Design of the Deep-sea Unmanned Vehicle Frame using Design Sensitivity, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 41(3), pp.28~34.

Lee, J.H., Lee, G.H. (1995) Design Sensitivity Analysis and Optimal Design to Control Forced Harmonic Vibration of Structure, *Transactions of the Society of Naval Architects of Korea*, 32(4), pp.64~72.

Lee, J.H., Kim, Y.J., Kim, J.S. (2007) Vibration Analysis of Network Communication Equipment, *Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 20(4), pp.463~468.

Lee, J.H., Kim, J.H. (2009) Optimization of the Passenger Safety Door(PSD) Part using Response Surface Method, *Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 22(1), pp.73~79.

Ma, Z.-D., Kikuchi, N., Cheng, H.-C., Hagiwara, I. (1995) Topological Design for Vibrating Structures, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 121, pp.259~280.

Metals Handbook (1990) Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys, ASM International 10th Ed. 1.

Sigmund, O., Petersson, J. (1998) Numerical Instabilities in Topology Optimization: a Survey on Procedures Dealing with Checkerboards, Mesh-independencies and Local Minima, *Structural Optimization*, 16, pp.68~75.

Yoon, G.H. (2009) Maximizing the Fundamental Eigenfrequency of Geometrically Nonlinear Structures using the Element Connectivity Based Topology Optimization, *Computers and Structures*, 88, pp.120~133.

Zhou, M., Shyy, Y.K., Thomas H.L. (2001) Checkerboard and Minimum Member Size Control in Topology Optimization, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 21, pp.152~158.

요 지

본 논문에서는 Pothead를 지지하는데 사용하는 지그의 고유진동수를 일정 범위로 제한하여 Pothead와 공진을 일으키지 않도록 하는 지그의 최적 설계안을 제시한다. 쿤 터커(Kuhn-Thucker) 조건을 적용한 최적기준법(Optimality criteria method)을 사용하여 위상 최적화를 수행하였고, 이 과정에서 유한요소 크기기 최적 형상에 미치는 영향을 검토하였다. 또한 위상 최적화 결과를 바탕으로 실험 계획법(Design of experiments)과 반응 표면법(Response surface method)을 사용하여 형상 및 치수 최적화를 수행하여 비교용 지그에 비해 전체 질량이 30% 감소되는 결과를 얻었다. 마지막으로 최적화된 지그의 내진 해석을 수행한 Pothead의 응답은 Metal Handbook에서 제시된 내진 응답을 만족하고 있다.

핵심용어 : 위상, 형상, 치수 최적화, 밀도법, 비교용 Pothead, 지그, 고유진동수, 내진구조해석