

3 차원 고체요소모델을 활용한 해상풍력터빈 하부구조의 위상최적화[§]

김 원 철* · 정 태 진**

* 군산대학교 기계자동차공학부

Topology Optimization of Offshore Wind-Power Turbine Substructure Using 3D Solid-Element Model

Won Cheol Kim* and Tae Jin Chung**

* School of Mechanical and Automotive Engineering, Kunsan Nat'l Univ.

(Received May 14, 2013 ; Revised December 30, 2013 ; Accepted January 10, 2014)

Key Words: Concept Design(개념설계), Multi-loaded Substructure(다 하중 하부구조), Structural Shape(구조형상), Topology Optimization(위상최적화)

초록: 기계나 토목 구조물의 형상은 일반적으로 전통적인 방법들을 이용하여 얻었다. 예를 들면 전력 송전탑이나 해상풍력 하부구조물 이외의 다른 구조물들도 조직적으로 만든다. 한편 컴퓨터 그래픽의 급속한 성장으로 인해, 진화된 구조해석 및 최적설계기법들을 이용하고 있다. 본 논문에서는 해상 풍력 터빈을 위한 자켓 구조물의 구조형상을 위상최적화 기법을 통하여 연구하였다. 이번 연구는 실제작동하중 상태로 시뮬레이션을 위하여 다 하중으로 종속시켰으며, 최적화 목적 함수는 주어진 경계조건아래 컴플라이언스로 정의하였다. 최적화는 고유진동수와 체적을 구속함수로 사용하였으며, 1 단계 모델의 결과는 2 단계 구조를 위한 외형을 빠르게 볼 수 있도록 한다. 그 결과로 사각뿔대의 3D 모델은 위상최적화를 통하여 개발하였다.

Abstract: The structural layout of mechanical and civil structures is commonly obtained using conventional methods. For example, the shape of structures such as electric transmission towers and offshore substructures can be generated systematically. However, with rapid advancements in computer graphic technology, advanced structural analyses and optimum design technologies have been implemented. In this study, the structural shape of a jacket substructure for an offshore wind turbine is investigated using a topology optimization technique. The structure is subjected to multiple loads that are intended to simulate the loading conditions during actual operation. The optimization objective function is defined as one that ensures compliance of the structure under the given boundary conditions. Optimization is carried out with constraints on the natural frequency in addition to the volume constraint. The result of a first step model provides quick insights into the optimum layout for the second step structure. Subsequently, a 3D model in the form of the frustum of a quadrilateral pyramid is developed through topology optimization.

- 기호설명 -

ρ : 밀도
 w : 가중치
 C : 컴플라이언스
 V_f^* : 최적체적설계치
 $f_{n_1}^*$: 최적 1 차 고유진동수치

$f_{n_2}^*$: 최적 2 차 고유진동수치

FCCD : 표면중심합성설계법

1. 서 론

신재생에너지 중에는 바람을 이용한 풍력에너지 기술이 널리 발달이 되어 육상 곳곳에 풍력터빈을 많이 설치하여 효율적으로 에너지를 생산하고 있다. 하지만 최근에는 이마저도 한계에 부딪혀 해당지역에서 지역갈등과 더불어 풍력발전단지에서 나오는 무색 공해 때문에 많은 어려움과 동시에 용량제한에 많은 영향을 받고 있다. 그래서 이미

§ 이 논문은 대한기계학회 CAE 및 응용역학부문 2013년도 춘계학술대회(2013. 5. 23-25., BEXCO) 발표논문임.

† Corresponding Author, tjchung@kunsan.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

유럽은 1980년대 후반, 우리나라는 2010년대 해상으로 눈길을 돌렸다. 해상에서는 육상보다 바람의 자원은 많다. 하지만 바다에 위치하기 때문에 기초 시설을 만드는데 많은 어려움이 있다. 육상의 기초제작 기술로는 역부족이다. 특히 터빈과 타워를 지지할 하부구조물설계가 가장 중요한 요소이다. 이것의 종류는 수심에 따라 여러 가지로 나뉘지만 우리나라 해양의 특성상 자켓 형식과 모노파일 형식이 많이 거론되고 있다.

자켓은 4~8개의 원통형 상부구조의 자체 무게와 바람, 파도, 조류 등 수평방향 외력에 저항하는 역할을 한다. 이 구조물은 주로 수심 100~150m 내외의 해역에 많이 설치되었지만 기술의 발달로 최고 수심 300m의 깊은 바다에도 설치되는 등 대형화 되고 있다.⁽¹⁾

본 논문에서는 해상풍력 자켓 구조물을 개념설계부분에 대하여 논의하고자 한다. 자켓 구조물은 흔히 역학에서 말하는 트러스 구조의 응용이다. 이러한 트러스 구조도 적절하게 배치되어야 적은 소재로 최대의 활용도를 높일 수 있다. 이에 따라 3차원 고체모델로 위상최적화를 수행하여 외형의 개념을 얻은 다음, 3차원의 속이 빈 모델을 활용하여 다시 한번 위상최적화를 통한 자켓 구조물의 전체적인 외형을 파악해 볼 것이다. 이에 따라 환경하중을 받는 비슷한 구조물에 대해서 유사한 방법으로 개념설계에 많은 도움이 될 것으로 판단된다.

2. 모델링

2.1 설계하중

해상구조물에서 풍력발전기의 구성은 블레이드, 나셀, 나셀을 지지할 타워, 그리고 타워의 지지부로서 하부구조물인 자켓이 있다. 또한 육상과 달리 설치 장소가 해양의 특성을 가지고 있기 때문에 공

기역학과 더불어 파랑하중을 생각해야 한다. 여기서 사용한 설계하중은 타워와 나셀, 블레이드의 무게하중과, 정수력 하중, 해류하중, 파력하중, 바람하중을 고려한다.⁽²⁾ 다음은 각 하중에 대한 내용이다. 다음의 각 하중은 Fig. 1에 나타내었으며, (a)는 풍력발전기 모델의 주요 구성요소를 나타내었으며, (b)는 3D 모델로서 고체요소를 적용한 하중을 도시하였다. 설계하중의 산정은 식 (1)을 참조하였으며, 고체요소 표면에 일반적인 아래의 하중을 각각 인가하였다. 본 논문에서는 임계적인 하중은 고려하지 않았으며, 다 하중의 영향에 따른 위상 최적화를 고려하였다.

고정 하중. 자켓 상단에 위치한 풍력발전기부분의 임의의 무게하중을 인가하고, 타워 상단으로부터 작용하는 모멘트를 x, y, z축에 인가하였다.

정수력 하중. 바닷물 수심이 깊어질수록 정수압압력이 증가하여 구조물은 육상보다 많은 측압력을 받게 되며, 해상 구조물 설계 시 기본적으로 고려해야 할 사항이다. 여기서는 압력의 분포하중을 부분집중하중으로 변경하여, 모델에 하중을 인가하였다.

해류 하중. 지구의 공전과 자전에 따라 일정하게 흐르는 해류와 조석간만의 차가 많은 곳은 하루에 두 번씩 발생하는 밀물과 썰물로 조류가 발생하여 바닷물의 방향이 바뀌며, 이에 따라 유속을 가지는 해류가 존재한다. 유속에 대한 힘을 고려하며 하중을 인가하였다.

파력 하중. 일반적인 환경상황에서는 파력 하중의 영향이 적지만 강풍이나 태풍, 해일이 일어날 때, 파력 하중은 구조물에 파동 충격 하중을 주어 파손의 위험이 있기 때문에 많은 연구가 필요한 부분이다. 해류의 운동방정식 중 하나로서 스톡스 5차이론⁽³⁾을 사용하여 집중하중으로 인가하였다.

바람 하중. 일상적인 환경상황에서는 중요도 면에서 다소 떨어지지만 기후에 따라 발생하는 태풍이나 강풍으로 인한 구조물에 영향이 있어서 집중하중으로 변경하여 인가하였다.

$$F = C_D \left(\frac{1}{2} \rho V^2 A \right) \tag{1}$$

식 (1)은 침수물체 주위의 하중을 계산하는 것으로 주위의 환경에 따라 각각 대입하였다.

지금까지 살펴본 환경하중을 사용하여 극한 상태로 취하여 외부하중조건으로 대입하였다. 유한요소해석을 실시한 다음, 최적화를 진행할 것이다. Table 1은 본 연구를 위한 설계하중이다.

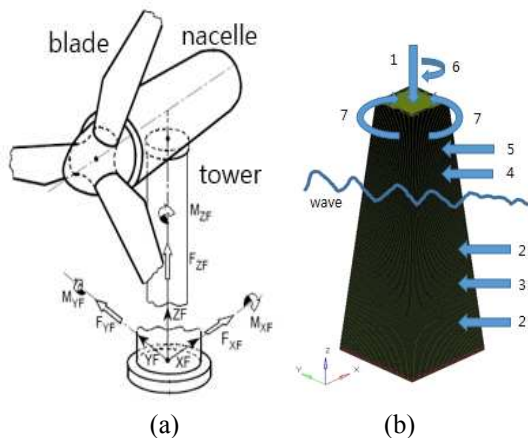
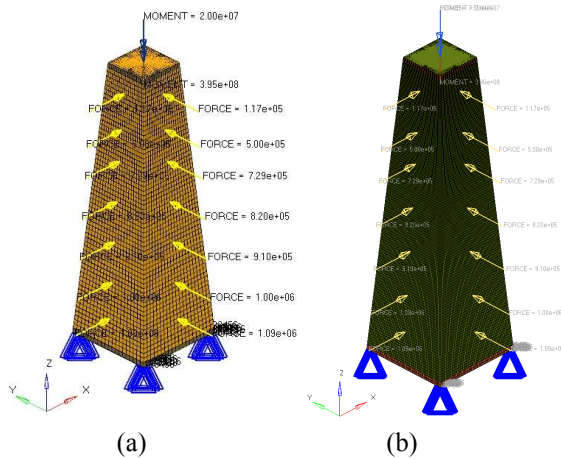


Fig. 1 Description of problem (a) Upper part,⁽²⁾ (b) Lower part

Table 1 Load applied to the substructure

Load	Value	Description
1. Static Load	75.0e+5N	Weight of Blade, Nacelle and Tower
2. Hydrostatic Load	6m	7.3e+5N
	15m	8.2e+5N
	24m	9.1e+5N
	33m	10.0e+5N
	42m	10.9e+5N
3. Current Load	5.4e+5N	Current Velocity 10m/s
4. Wave Load	5.0e+5N	Reference ⁽³⁾
5. Wind Load	1.2e+5N	Wind Velocity 50m/s
6. Moment	168.0e+5Nm	Z axis
7. Moment	2790.0e+5Nm	X and Y axis

**Fig. 2** Support and loading conditions imposed on the substructure design, (a) Solid model (b) Hollow model

2.2 모델링 및 해석방법

대상 해석 모델은 하부구조물의 외형을 본 따서 3 차원 고체 모델링을 진행한다. 모델링 순서는 두 단계로 진행한다. 1 단계는 3 차원 고체요소를 사용하여 결과를 분석 한 다음, 2 단계는 1 단계의 해석 결과를 바탕으로 다시 수행한다. 이에 따라 Fig. 2 는 3 차원 고체모델에 경계조건과 하중조건을 부여한 FE 모델이다. 이 두 모델 중 (a)는 1 단계 3 차원 고체모델이며 위상최적화를 진행한다. (b)는 2

단계 모델로서 1 단계의 결과를 바탕으로 그의 외형에 따라 3 차원 고체모델을 만들었다. 속이 빈 사각 빨대를 사용하여 FE 모델링을 한 후 다시 한번 위상최적화를 수행한다. 그리고 (a)와 (b)의 결과를 통하여 위상최적화를 활용한 개념설계에 대하여 논의한다.

3. 최적화

3.1 최적화 프로세스

연구 진행을 위한 최적화 알고리즘이다. 가장 먼저 1 단계 FE 모델을 가지고 위상최적화를 시작한다. 1 단계 위상최적화 결과를 일차적으로 정의하고, 2 단계 FE 모델을 이용하여 최종적으로 하부구조물의 위상최적화를 마친다. 이 최적화 결과를 활용하여 두 모델의 상관성을 분석하고 재설계를 하면서 유한요소해석을 한다.

3.2 최적화 공식

최적화는 목적함수와 구속함수로 이루어져 있고, 구속조건에 맞게 목적함수가 적절하게 계산되어야 좋은 결과가 나타난다. 목적함수는 스트레인 에너지, 즉 컴플라이언스를 사용하여 에너지를 작게 하는 외적 형상을 찾으려 한다. 구속함수는 체적을 기준치 이하로 하며, 고유진동수를 찾아서 모드를 강화한다.⁽⁴⁻⁶⁾

$$\text{Minimize } f(\rho) = \sum w_i C_i = \frac{1}{2} \sum w_i f_i^T u_i$$

subject to

$$g_1(\rho) = V_i^* \leq V_i^0 \quad (2)$$

$$g_2(\rho) = f_{n_1}^* \geq f_{n_1}^0$$

$$g_3(\rho) = f_{n_2}^* \geq f_{n_2}^0$$

$$Ku = f$$

$$0.01 \leq \rho_i \leq 1.00$$

식 (2)에서 w 는 각 하중의 가중치로서 등가의 값을 사용하였다. 체적에 대해서는 기존 체적에서 몇 % 남기는 것으로 정의하였다. 고유진동수는 1, 2 차 고유진동수로서 모드에 대한 값을 사용하였다. 이 모드는 하부구조물이 상부로부터 큰 모멘트를 받았을 시 안정성을 위해서 구속함수로 사용하였다.⁽⁷⁾

4. 수치해석

수치해석에 사용할 재료는 강으로 하였다. 또한

상용소프트웨어인 OptiStruct 11 을 사용하여 위상 최적화 결과를 얻었다. 식 (2)를 프로그램에 대입 하여, 수치해석을 진행하였다. Table 2 는 재료 물성 기본 상수이며, 이 표의 값을 사용하여 모델에 적용하였다. 수치해석에 사용된 부재 크기 제어는 각 모델에서 일정하게 분할된 육각형 요소의 크기를 변화시켜 위상의 변화를 관찰하였다. 이 방법은 제한된 범위 내에서 요소의 크기를 입력하여야 하므로 실험계획법 중 FCCD 의 방법⁽⁸⁾을 이용하여 각각의 요소크기를 산정하였다.

5. 결과 및 논의

5.1 1 단계 모델 최적화 결과

Table 3 은 1 단계 모델에 FCCD 의 실험값에 따라 여러 최적화 결과를 나타내었다. 고체요소를 사용하여 기본적으로 위상최적화 설계영역을 고찰 하였다. 각각의 결과를 보면 하중이 인가된 부분만 점으로 나타나고 구조물의 다리에 해당하는 부분만 재료가 필요한 것으로 볼 수 있다. Fig. 3 은 Table 3 에서 대표적인 표본을 선정하여, 1 단계 위상최적화 이력 곡선과 함께 이력 시간 대비 고체 모델의 위상 변화를 나타내었다. 속이 빈 표면만 필요한 부재 형태가 나타나는 것을 볼 수 있다.

5.2 2 단계 모델 최적화 결과

Table 4 는 2 단계 모델에 FCCD 의 방법으로 실험값을 추출해서 여러 위상최적화 결과를 나타내었다. 2 단계 모델은 1 단계에서 얻은 결과를 비교함과 동시에 실제 개념모델링을 위한 기초자료로 사용하기 위하여 진행하였다. Table 3 과 비교하여 보면 표면만을 다루었기 때문에 구조물의 강성을 높여주는 표면에 부재가 나타남을 알 수 있다. 이를 통하여 하부구조물의 개념설계 안을 얻었다. Fig. 4 는 Table 4 에서 얻은 결과 중 대표적인 표본을 선정하여, 2 단계 위상최적화 이력곡선과 함께 이력 시간 대비 위상의 변화를 나타내었다. Fig. 3 과 같이 X 형태의 부재들이 각각의 면을 대신하고 있는 것을 볼 수 있다. Fig. 4 의 결과를 바탕으로 재설계를 진행한다. Table 5 를 통하여 두 모델에 대한 초기값과 최종값을 비교하였다.

Table 2 Property of the material used for the substructure

Material	Density (kg/m ³)	Poisson's ratio	Young's Modulus(Pa)
Steel	7.8e+3	0.3	2.1e+11

Table 3 Optimal topology of the substructure for step1 case

Member size control(m)	Volume 0.3	Volume 0.35
2.47-7.41		
4.94-14.82		
7.41-14.82		

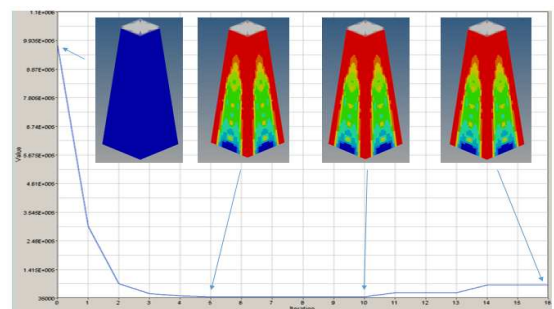


Fig. 3 Optimization history for the step1

Table 4 Optimal topology of the substructure for step2 case

Member size control(m)	Volume 0.3	Volume 0.4
0.94-4.70		
1.41-5.64		
1.88-3.76		

Table 5 Results of topology optimization based on problem definition

	Volume constraint 0.3		
	Iteration	Compliance(Nm)	1 st Natural Frequency (Hz)
Step1	Iter. 0	9.7e+5	1.42
	Iter. end	8.4e+4(-91.3%)	1.61(+13.4%)
Step2	Iter. 0	2.2e+6	1.5
	Iter. end	2.0e+5(-90.9%)	2.0(+33.3%)

Table 6 Structural performance of the post-processed substructure

	Vertical	Horizontal
Force Stress(MPa)	1.62	9.29
Moment Stress(MPa)	3.66	27.7
1 st Natural frequency(Hz)	3.6	

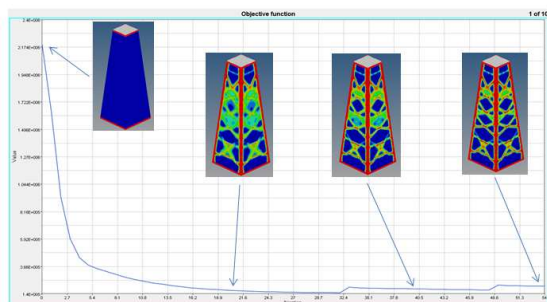


Fig. 4 Optimization history for the step2

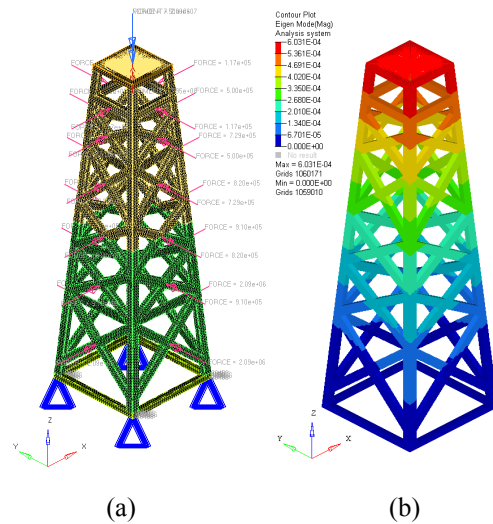


Fig. 5 Remodeling of the substructure optimal topology and verification of the natural frequency (a) Remodeling (b) Mode analysis(1st)

5.3 재설계 및 재해석

Fig. 3, 4 는 1, 2 단계 위상최적화의 이력곡선을 나타내었다. 위상최적화를 통해서 얻은 레이아웃의 바탕으로 재설계를 실시하였으며, 유한요소해석을 통하여 최적화 전, 후의 결과양상을 다시 비교하였다. Fig. 5 는 재설계한 모델과 이 모델의 1 차 고유진동수를 해석한 것이다. 이를 통하여 위

상최적화가 잘 진행된 것을 확인할 수 있다. 하지만, 상단과 하단은 비설계 영역으로 지정하였기 때문에 차후 재검토가 필요하다.

5.4 논의

Table 5 는 두 모델이 컨플라이언스가 감소하여 변형을 적게 일으키며, 고유진동수가 증가하여 1 차 모드에 대해 강화를 의미한다. 또한 Table 6 은 같은 조건을 부여하여 위상최적화 결과와 비교하였다. 이 단계는 개념모델의 추천단계이므로 각각의 항목에 따라 응력을 나타내었으며, 모두 허용 응력 이내에 들었다. 1 차 고유진동수는 같은 조건이라 하더라도 각 연결부의 정확한 묘사 등에 따라 오차가 발생을 하였다. 재해석 결과를 통하여 위상최적화가 실제 설계모델에 부합하는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 지금의 연구는 환경하중을 집중하중으로 변경하여 구조물에 인가하였다. 실제 존재하는 해석 대상에는 주요 환경하중이 분포하중으로 인가 됨으로써 현재의 해석과 최적화 과정에서 오차가 발생 수 있다. 그러므로 차후 연구는 오차를 줄일 수 있고, 더욱이 하중 부여 방법과 함께 분포하중으로 다시 인가하여 레이아웃을 재검토해 보아야 할 것이다. 또한 본 연구에서는 정수압을 포함하여 하중으로 인가를 하였지만, 정수압이 제거되고 수면에 잠긴 부분이 해류하중만 작용한다면 어떻게 위상최적화가 진행될 지 후행연구를 해야 한다.

6. 결 론

3 차원 모델을 활용한 연구를 통해서 다음과 같은 결론을 얻었고, 미진한 부분도 발견하였다. 후행연구에서는 하중의 정확한 모델링을 연구하여 더 정확한 위상최적화 결과를 얻고자 한다.

(1) 1 단계 모델을 활용하여 고체요소에서의 주어진 하중에 대한 위상최적화 결과를 얻었으며, 속이 빈 형태를 얻을 수 있었다.

(2) 2 단계 모델은 1 단계 위상최적화 결과를 바탕으로 하여 모델에 대한 재해석과 동시에 표면에 점으로 나타났던 부분에 대해서 상세적인 위상최적화 결과를 얻을 수 있었다.

(3) 1, 2 단계의 개념설계를 통하여 구조물의 형태는 도출하였지만, 상세설계 및 제조와 관련된 구체적 설계는 보완이 필요하다.

(4) 본 연구를 통하여 해상풍력터빈의 자켓 형태인 하부구조의 개념설계 결과를 얻었으며, 다리는 기존과 동일하며, 브레이싱 부분은 X 자 형태의 위상최적화 결과를 얻었다. 이를 통하여 후행 연구에 도움이 되기를 바란다.

후 기

본 연구는 2012 년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 20124010203240)이며, 2011 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다. (No. NRF-2011-0023016).

참고문헌 (References)

- (1) Choi, K. S., 2010, "Introduction of Offshore-Plant," *Munundang*, Seoul, pp. 26, 30.
- (2) Germanischer Lloyd, 2010, *IV. Rules and Guidelines Industrial Services – 1. Guideline for the Certification of Wind Turbines*, 2010 edition.
- (3) Kim, k. D., Choi, D. H., Sim, J. S. and Kim, K. C., 2011, "Development and Design of Offshore Wind Turbine Support Structures," *KSCE Magazine*, Vol.59, No.5, pp.28~37.
- (4) Kim, W. C., Henry, P., Ahn, I. G. and Chung, T. J., 2012, "Design of Telescopic Boom for Aerial Lifts Using Topology, Shape, and Size Optimization," *KSME CAE Spring Conference*, pp.285~286.
- (5) Bruns, T. E., 2007, "Topology Optimization by Penalty(TOP) Method," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 196, pp.4430~4443.
- (6) Saitou, K., Izui, K., Nishiwaki, S. and Papalambros, P., 2005, "A Survey of Structural Optimization in Mechanical Product Development," *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, Vol. 5, pp.214~226.
- (7) Altair Engineering, 2010, *Optistruct Training Manual*.
- (8) PIDOTECH Inc, 2012, *PIAnO 3.5 Tutorial Manual*.