

탄성 다물체계 동역학을 기반으로 한 부유식 해상 풍력 발전기 타워의 구조 해석[§]

박광필* · 차주환**† · 구남국*** · 조아라* · 이규열***

*㈜대우조선해양 중앙연구소, **목포대학교 해양시스템공학과, ***서울대학교 조선해양공학과

Structural Analysis of Floating Offshore Wind Turbine Tower Based on Flexible Multibody Dynamics

Kwang-Phil Park*, Ju-Hwan Cha**†, Namkug Ku***, A-Ra Jo* and Kyu-Yeul Lee***

* Central R&D Institute, Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering, Co., Ltd.,

**Dept. of Ocean Engineering, Mokpo Nat'l Univ.,

***Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul Nat'l Univ.

(Received December 13, 2010 ; Revised September 13, 2012 ; Accepted September 24, 2012)

Key Words: Structural Analysis(구조 해석), Floating Offshore Wind Turbine(부유식 해상 풍력 발전기), Flexible Multibody System Dynamics(탄성 다물체계 동역학)

초록: 본 논문에서는 부유식 플랫폼의 동적 거동을 고려하여 해상 풍력 발전기 타워의 구조 해석을 수행하였다. 풍력 발전기는 플랫폼, 타워, 나셀, 허브 그리고 3 개의 블레이드로 구성된다. 타워는 3 차원 빔 요소를 사용하여 탄성체로 모델링하여 탄성 다물체계 동역학을 기반으로 한 운동 방정식을 구성하였다. 회전하는 블레이드에는 블레이드 요소 운동량 이론에 따라 계산된 공기역학적 힘이 적용되었고, 부유식 플랫폼에는 유체정역학적 힘, 유체동역학적 힘 그리고 계류력이 적용되었다. 타워의 구조 동역학적 거동을 수치적으로 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션 결과를 이용하여 굽힘 모멘트와 응력을 산출하고 허용치와 비교하였다.

Abstract: In this study, we perform the structural analysis of a floating offshore wind turbine tower by considering the dynamic response of the floating platform. A multibody system consisting of three blades, a hub, a nacelle, the platform, and the tower is used to model the floating wind turbine. The blades and the tower are modeled as flexible bodies using three-dimensional beam elements. The aerodynamic force on the blades is calculated by the Blade Element Momentum (BEM) theory with hub rotation. The hydrostatic, hydrodynamic, and mooring forces are considered for the platform. The structural dynamic responses of the tower are simulated by numerically solving the equations of motion. From the simulation results, the time history of the internal forces at the nodes, such as the bending moment and stress, are obtained. In conclusion, the internal forces are compared with those obtained from static analysis to assess the effects of wave loads on the structural stability of the tower.

1. 서론

해상 풍력 발전기의 경우 경제성 있는 풍향을 얻기 위해 설치 위치가 해안으로부터 멀어지고 있고, Fig. 1 과 같이 깊은 수심으로 인해 부유식

플랫폼(platform)을 사용한 설치가 시도되고 있다.⁽¹⁾ 따라서 풍력 발전기 타워(tower)의 구조 해석에 부유식 플랫폼에 의한 동적인 영향을 고려할 필요가 있다. 본 논문에서는 부유식 풍력 발전기의 운동 방정식을 구성하고, 동적 거동을 고려하여 타워 모델에 대해 구조 해석을 수행하였다.

먼저 탄성 다물체계 동역학을 기반으로 하여 부유식 풍력 발전기의 운동 방정식을 구성하였다. 운동 방정식은 Fig. 2 와 같이 3 개의 블레이드

§ 이 논문은 대한기계학회 2010 년도 추계학술대회(2010. 11. 3.-5., ICC 제주) 발표논문임

† Corresponding Author, jhcha@mokpo.ac.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

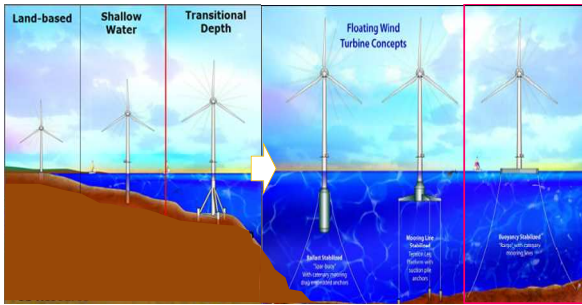


Fig. 1 Wind turbine platform types for different water depths

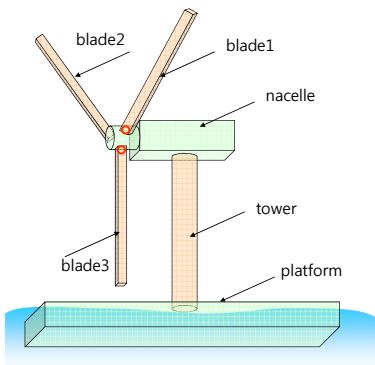


Fig. 2 Configuration of a floating wind turbine

(blade)와 허브(hub), 나셀(nacelle), 타워, 그리고 플랫폼으로 이루어진 풍력 발전기를 대상으로 하였다.

외력으로는 블레이드에 작용하는 풍력과 부유식 플랫폼에 작용하는 유체정역학 힘, 유체동역학적 힘 그리고 계류력을 고려하였다. 타워는 굽힘에 의해 3 차원 변위를 갖는 유한개의 빔 요소로 모델링 되었다. 구성된 운동 방정식을 수치적으로 풀어 매 단위 시간마다 타워의 절점 변형 변위를 구하고, 변형 변위와 강성 행렬을 통해 각 절점에서 내력 모멘트와 응력을 구한다.

본 연구는 다물체 동역학과 구조 해석을 병행하여 전체적인 경향을 확인하고 동적 하중 경계 조건을 도출하는 것에 초점을 맞추고 있으며, 이러한 결과는 국부 구조 해석에 사용될 수 있다.

2. 관련 연구

이강수 외⁽²⁾는 고정식 해상 풍력 발전기 타워를 대상으로, 유지 보수를 위해 운항하는 바지(barge) 선이 충돌하는 경우에 대해, 충격력을 고려하여 구조 해석을 수행하였다. 상용 구조 해석 시스템을 사용하여 타워의 유한 요소 모델을 만들어 구조 해석을 수행하였다. 이봉민 외⁽³⁾는 풍력 발전기

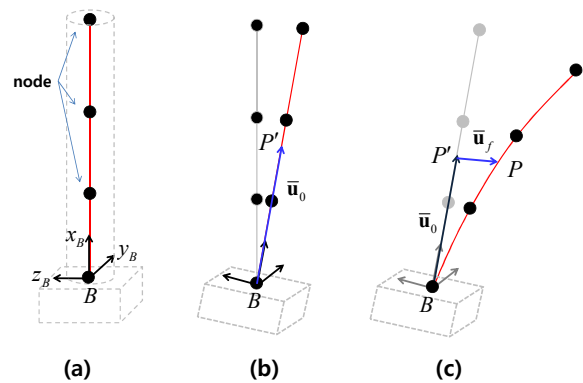


Fig. 3 (a) Beam element model, (b) rigid body motion, and (c) deformation of the floating wind turbine tower

의 타워에 풍력과 지진 하중을 적용하여 구조 해석을 수행하였다. 플랫폼은 고정식이며 상용 구조 해석 시스템을 사용하여 타워를 모델링 하고 해석 하였다. 홍혁수 외⁽⁴⁾는 고정식 풍력 발전기 타워에 대해 고유진동수 해석, 강도해석 등을 수행하였다. 선급에서 제공하는 가이드라인과 계산 식을 사용하여 해석을 수행하였으며, 풍력과 자중을 고려하였다. Joshua⁽⁵⁾는 TLP(Tension Leg Platform) 형식의 5MW 급 부유식 풍력 발전기를 설계하고 상용 소프트웨어를 사용하여 타워의 구조 해석을 수행하였다. 해양파에 의한 외력은 외부 프로그램을 사용하여 계산하였고, 풍력은 정적인 하중으로만 고려하였다. 한편, 다물체 동역학 상용 시스템을 사용할 경우 유체역학적 힘을 별도로 계산하여 연동해야 하는데, 수치적인 안전성을 위해 운동방정식의 관성력에 무한주파수 부가질량을 고려하지 못하는 한계점이 있다.

본 논문은 부유식 풍력 발전기를 대상으로 풍력과 해양파에 의한 외력을 동적인 하중으로 고려하고, 타워의 동적 거동에 따른 구조 해석을 수행하였다. 이 때, 플랫폼, 타워 그리고 상부 구조물의 연성된 운동 방정식을 구성하여 타워의 절점 변형을 계산하고, 이를 통하여 내부 응력을 계산 하였다.

3. 부유식 해상 풍력 발전의기 탄성 다 물체 모델링

3.1 유한 요소 정식화를 이용한 타워 모델링

풍력 발전기 타워는 3 차원 변위를 갖는 등가의 빔 요소로 모델링 되었다. Fig. 3(a)는 부유식 풍력 발전기에 고정된 타워의 형상과 이것을 빔 요소로 모델링한 것을 나타낸다. 그림에 플랫폼은 일부만

표현되어 있다. B-프레임은 타워 고정 좌표계이다. 탄성 다물체계 동역학에서 사용하는 플로팅 레퍼런스 프레임 방법(floating frame of reference formulation)을 기반으로 Fig. 3(b)와 같은 강체 운동에 Fig. 3(c)와 같은 변형(deformation)을 추가하여 타워의 전체적인 거동을 기술 하였다.

타워의 임의의 점 P 의 위치 벡터를 관성 좌표계에 나타내면 식 (1)과 같다. 여기서 E -프레임은 관성 좌표계를 나타내며, ${}^E \mathbf{R}_B$ 는 두 좌표계 사이의 회전 변환 행렬이다. $\bar{\mathbf{u}}_0$ 는 타워 고정 좌표계에서 정의된 점 P 의 위치 벡터이다. 이 때 변형 벡터 $\bar{\mathbf{u}}_f$ 는 식 (2)와 같이 정의된다. 여기서 \mathbf{q}_f 는 양쪽의 절점 좌표를 의미하며, 하나의 절점에 각 축 방향 변위와 회전을 나타내는 총 6 개의 절점 좌표를 사용한다. \mathbf{S} 는 양쪽 절점 좌표를 보간(interpolation)하는 함수로 구성된 형상 행렬이다.

$$\mathbf{r}_{P/E} = \mathbf{r}_{B/E} + {}^E \mathbf{R}_B (\bar{\mathbf{u}}_0 + \bar{\mathbf{u}}_f) \quad (1)$$

$$\bar{\mathbf{u}}_f = \mathbf{S} \mathbf{q}_f \quad (2)$$

x_B, y_B 평면상의 굽힘(bending)은 Fig. 4에서 절점 좌표 e_2, e_6 와 e_8, e_{12} 를 3차 함수로 보간하여 표현한다. z_B, x_B 평면상의 굽힘에 대해서는 e_3, e_5 와 e_9, e_{11} 를 보간한 3차 함수를 사용하고, 인장과 비틀림(torsion)에 대해서는 e_1 와 e_7 , e_4 와 e_{10} 을 각각 사용하고 선형 함수로 보간한다.

3.2 외력

외력으로는 Fig. 5와 같이 풍력과 유체정역학적 힘, 유체동역학적 힘, 계류력 그리고 중력을 고려하였다.

풍력은 BEM(Blade Element Momentum) 이론에 의해 각 블레이드 요소에 작용하는 힘과 모멘트로써 계산하였다.^(6,7) 하나의 블레이드 요소에 작용하는 힘은 식 (3)과 같다. 여기서 dT 는 블레이드 회전면에 수직으로 작용하는 힘이고, dQ 는 회전 방향으로 작용하는 힘이다. ρ 는 공기의 밀도, V 는 바람의 입사 속도이고 c 는 블레이드 요소 회전면적이 전체 회전면적에서 차지하는 비율이다.

ϕ 는 바람의 입사각이며, C_L 과 C_D 는 각각 블레이드 요소의 형상과 입사각에 따라 얻어지는 추력계수와 항력 계수이다.

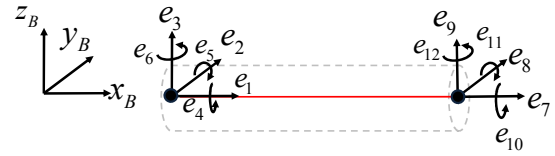


Fig. 4 Nodal coordinates of a beam element

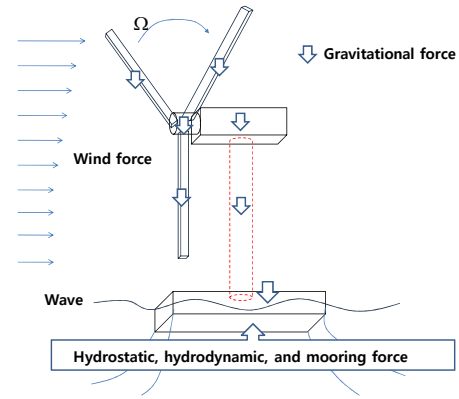


Fig. 5 External forces considered for the floating wind turbine

$$dT = \frac{1}{2} \rho V^2 c (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) dr \quad (3)$$

$$dQ = \frac{1}{2} \rho V^2 c (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) dr$$

플랫폼에 작용하는 유체정역학적 힘은 식 (4)와 같다. 여기에서 ρ_{sw} 는 해수 밀도, $v(t)$ 는 매 단위 시간마다 변하는 플랫폼의 자세와 파고를 고려한 침수 부피를 나타낸다. g 는 중력 가속도, $x_{Buoyancy}, y_{Buoyancy}$ 는 부력 중심 좌표이다.⁽⁸⁾

$$\mathbf{Q}_{Hydrostatic}(\mathbf{q}, t) = \begin{bmatrix} \rho_{sw} g [0; 0; \int_{v(\mathbf{q}, t)} dV; \int_{v(\mathbf{q}, t)} y_{Buoyancy} dV; \\ - \int_{v(\mathbf{q}, t)} x_{Buoyancy} dV; 0; 0]^T \end{bmatrix} \quad (4)$$

유체동역학적 힘은 식 (5)와 같이 플랫폼 표면에 작용하는 압력을 침수 표면에 대하여 적분하여 시간 영역에서 구한다. 여기서 z 는 수면아래 위치이며, ϕ 는 전진 속도가 없는 속도 포텐셜(velocity potential)이다. 속도 포텐셜이 만족하는 지배 방정식은 식 (6)과 같으며, 이것은 질량 보존으로부터 유도되는 라플라스 방정식(Laplace equation)이다.

$$P = -\rho_{sw}gz - \rho_{sw} \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (5)$$

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (6)$$

속도 포텐셜은 식 (7)과 같이 입사파 포텐셜 (incident potential, ϕ_I) 과 교란 포텐셜(disturbed potential, ϕ_d)로 구분하고, 입사파 포텐셜은 지배 방정식과 자유 수면(free surface), 해저면(bottom) 그리고 측면(lateral) 경계 조건에 의해 식 (7)과 같이 구할 수 있다. 여기서 ω, k, A, θ 는 각각 파진동수(wave frequency), 파수(wave number), 파고(wave amplitude) 그리고 입사 각도 이다.

$$\phi_I = \frac{g}{\omega} A e^{kz} \sin(kx \cos \theta + ky \sin \theta - \omega t) \quad (7)$$

교란 포텐셜은 자유 수면, 해저면 경계 조건 및 식 (8)과 같은 물체 표면 경계 조건을 만족한다. 여기서 \mathbf{x} 는 물체 고정 좌표계에서 정의된 표면까지의 위치 벡터이며, ξ_T 는 관성 좌표계에서 정의된 물체 중심까지의 위치벡터, ξ_R 은 미소 각도를 가정하여 선형화(linearization)된 회전 벡터이다.

$$\frac{\partial \phi_d}{\partial \mathbf{n}} = \frac{\partial \delta}{\partial t} \cdot \mathbf{n} - \frac{\partial \phi_I}{\partial \mathbf{n}}, \quad \delta = \xi_T + \xi_R \times \mathbf{x} \quad (8)$$

교란 포텐셜을 구하기 위해, 식 (9) 와 같이 그린 정리(Green theorem)의 특수한 형태인 제 2 그린 항등식(Green's second identity)을 이용한다. 여기서 G 는 식 (10)과 같은 3 차원 랭킨 소스(Rankine source)(Nakos et al.⁽¹⁰⁾)를 사용하였다.

$$\phi_d = \iint_{S_{Body}} \left(\phi_d \frac{\partial G}{\partial n} - G \frac{\partial \phi_d}{\partial n} \right) dS \quad (9)$$

$$+ \iint_{S_F} \left(\phi_d \frac{\partial G}{\partial n} - G \frac{\partial \phi_d}{\partial n} \right) dS$$

$$G(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \frac{1}{4\pi} \frac{1}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|} \quad (10)$$

계류선은 현수선(catenary)으로 가정하여 계산된 힘이 플랫폼에 연결된 지점에 작용하는 것으로 고려하였으며, 식 (11)과 같이 계산한다. 여기에서 $T_{H,k}$ 는 k 번째 계류선의 수평 방향 힘이고, ψ_k 는 각 계류선(mooring line)이 해상 크레인의 선체와

이루는 각도이다.

$$\mathbf{Q}_{Mooring}(\mathbf{q}) = \left[\sum_{k=1}^n T_{H,k}(\mathbf{q}) \cos \psi_k; \sum_{k=1}^n T_{H,k}(\mathbf{q}) \sin \psi_k; \mathbf{0}; \sum_{k=1}^n T_{H,k}(\mathbf{q}) [x_k \sin \psi_k - y_k \cos \psi_k]; \mathbf{0} \right]^T \quad (11)$$

그리고 모든 물체에는 중력을 고려하였다.

3.3 탄성 다물체계 기반의 운동 방정식

부유식 해상 풍력 발전기의 운동방정식은 식 (12)과 같다. 여기서 \mathbf{q} 는 각 물체에 고정된 좌표계의 위치와 회전각도를 나타내는 일반화 좌표(generalized coordinates) 벡터이며, 탄성체로 모델링된 타워와 블레이드에 대해서는 절점 좌표(nodal coordinates)가 포함된다. \mathbf{M} 은 각 물체의 질량 및 질량 관성 모멘트 행렬이다. \mathbf{D} 는 구조 감쇠 행렬이고, \mathbf{K} 는 탄성체 전체의 강성 행렬이며 이 두 행렬은 절점 좌표에 해당하는 항만 값을 가진다. $\mathbf{C}_q^T \lambda$ 는 물체간 연결 관계에 의해 발생하는 구속력 벡터이고, \mathbf{Q}_v 는 회전력과 코리올리 힘(Coriolis force) 벡터이다. \mathbf{Q}_e 는 3.2 절에서 설명한 외력 벡터이며, 일반화 좌표 방향으로 성분이 분해되어 있다. 운동 방정식의 유도는 박광필 외⁽¹¹⁾를 참조한다.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} + \mathbf{C}_q^T \lambda = \mathbf{Q}_v + \mathbf{Q}_e \quad (12)$$

4. 타워의 구조 해석

4.1 내력

절점 좌표로부터 각 절점에 작용하는 내력은 식 (13)과 같다. 여기서 \mathbf{q}_{f_i} 는 i 번째 절점 좌표이며, f_i 는 그 절점에서의 내력으로, 식 (14)와 같이 각 축 방향의 전단력과 굽힘 모멘트이다. \mathbf{K}^e 는 하나의 요소에 대한 강성 행렬로 균일 단면적을 갖는 직선 요소의 3 차원 강성 행렬을 사용한다.⁽¹¹⁾

$$\begin{bmatrix} f_i \\ f_{i+1} \end{bmatrix} = \mathbf{K}^e \begin{bmatrix} \mathbf{q}_{f_i} \\ \mathbf{q}_{f_{i+1}} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$f_i = [V_{x_i} \quad V_{y_i} \quad V_{z_i} \quad M_{x_i} \quad M_{y_i} \quad M_{z_i}]^T \quad (14)$$

Table 1 Properties of the floating offshore wind turbine for dynamic structural analysis.

Blade	Mass	17.7 Mg
	Mass Moment of Inertia	11,776 Mg
Hub	Mass	56.7 Mg
	Mass Moment of Inertia	116 Mg · m ²
	Angular Velocity	1.257 rad/sec
Nacelle	Mass	240 Mg
	Mass Moment of Inertia	2,608 Mg · m ²
Tower	Mass	347 Mg
	Sectional Area	0.483 m ²
	Area Moment of Inertia	5.716 m ⁴
	Young's Modulus	210 KN/mm ²

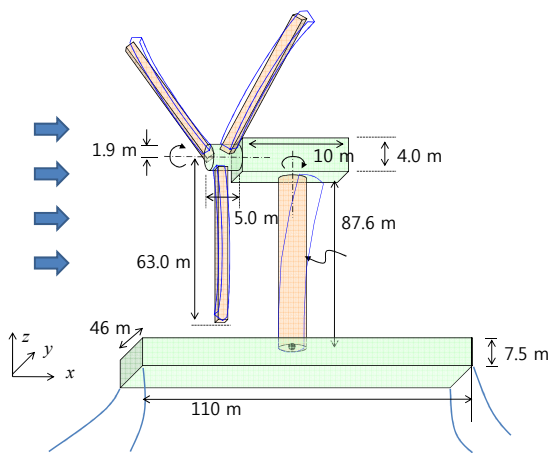


Fig. 6 Principal dimension of the floating offshore wind turbine for dynamics structural analysis

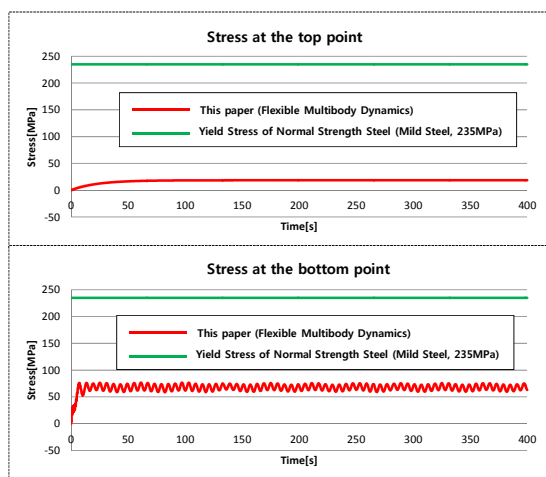


Fig. 7 Simulation result : the stress at the top and bottom of the tower

4.2 부유식 풍력 발전기 타워의 구조 해석
구조 해석에 사용된 부유식 풍력 발전기의 기본

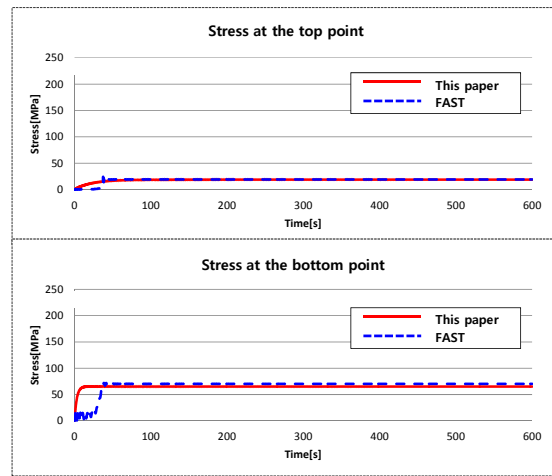


Fig. 8 Comparison of the stress between FAST and this paper

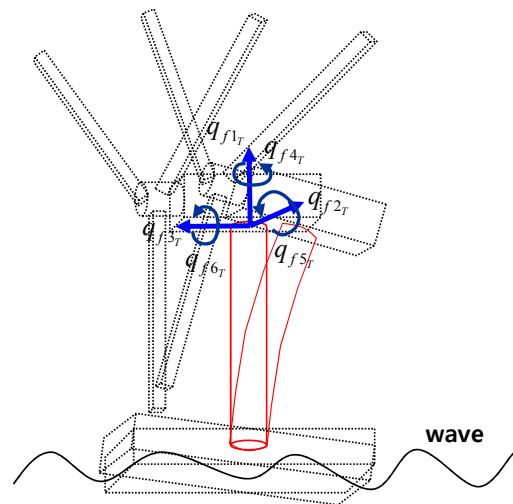


Fig. 9 Translational and rotational deformation at the top of the tower

제원은 Fig. 6 과 같다. 이것은 5-MW 급 참조 모델로 그 속성 값은 Table 1 과 같다.

진폭 0.5m, 주기 0.628/sec, 길이 126.5m 인 해양 파가 x 축에 대해 45 방향으로 입사하고, 바람은 x 축 방향으로 속도 12m/sec 로 입사되는 것으로 가정하였다. 그리고 낫셀에 연결되는 타워의 상단부, 플랫폼에 고정된 타워의 하단부에 대해 응력을 계산하였고, 그 결과는 Fig. 7 과 같다. 타워의 상단부에서는 최대 약 30 Mpa 의 응력이 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 동적인 효과에 의한 진폭이 거의 보이지 않는다. 한편 타워의 하단부에서는 최대 약 65 Mpa 의 응력이 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 약 10 Mpa 의 진폭을 가지고 응력이 진동하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 타워의

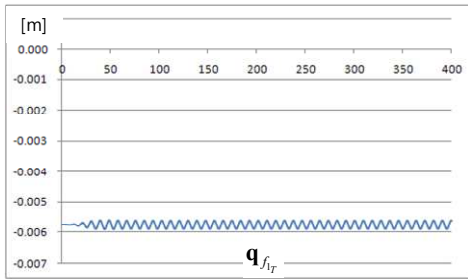


Fig. 10 Longitudinal deformation at the top of the tower

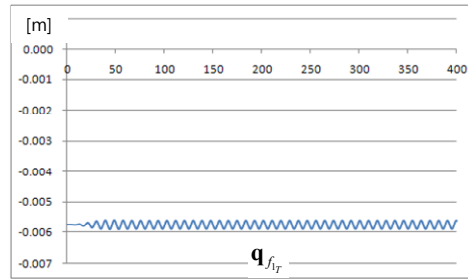


Fig. 15 Vertical bending deformation at the top of the tower

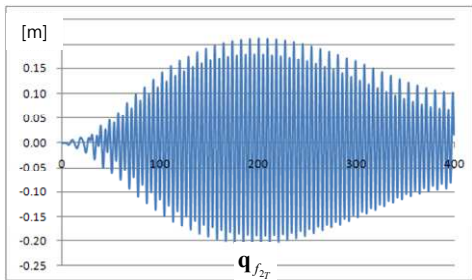


Fig. 11 Horizontal deformation at the top of the tower

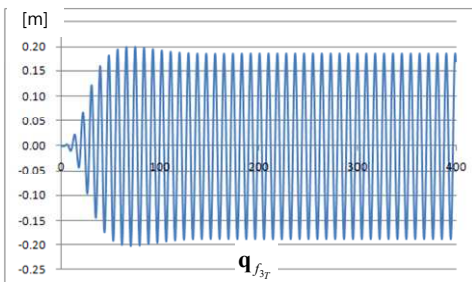


Fig. 12 Vertical deformation at the top of the tower

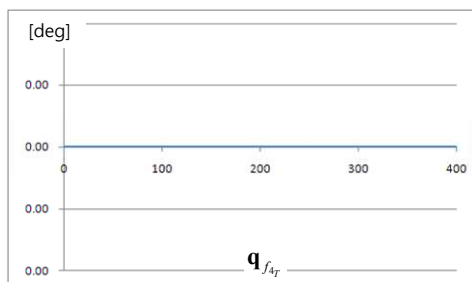


Fig. 13 Torsional deformation at the top of the tower

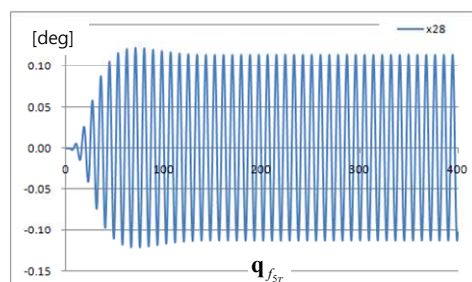


Fig. 14 Horizontal bending deformation at the top of the tower

재질을 일반 강철로 가정할 때의 허용 응력인 235 Mpa 보다 낮은 응력이 발생하는 것을 확인하였다.

본 논문의 결과를 비교하기 위하여 공개되어 있는 풍력 발전기 코드인 FAST⁽¹⁴⁾와 동일한 조건에서 계산한 응력을 Fig. 8 에 나타내었다. 여기서는 동일한 유체력을 적용하기 어려운 문제로 인해, 플랫폼이 고정되어 있는 것으로 가정하였다. 본 논문의 결과는 FAST 에 비해 약 7%의 차이가 있는 것을 확인하였다.

4.3 부유식 풍력 발전기 타워의 변형

Fig. 9 는 타워 상단의 세 방향의 병진 변형과 세 방향의 회전 변형을 나타내고 있으며, 시간에 대한 각 변형량은 Fig. 10~15 에 나타나 있다.

길이 변형의 최대 진폭은 약 0.2m 이고, 회전 변형의 최대 진폭은 약 0.1 도인 것을 확인할 수 있다. 타워의 길이가 87.6m 인 것에 비해 매우 적은 양이므로 기하 비선형성이 크지 않다고 볼 수 있으며 본 논문의 가정이 합리적임을 입증하고 있다.

5. 결론 및 향후 연구 계획

본 논문에서는 5MW 급 부유식 풍력 발전기에 대하여 탄성 다물체계를 기반으로 한 동역학 방정식을 구성하고, 타워의 동적 구조 해석을 수행하였다. 진폭 0.5m, 주기 0.628/sec 인 해양파가 x 축에 대해 45 방향으로 입사하고, 바람은 x 축 방향으로 속도 12m/sec 로 입사되는 조건에 대해 타워의 고정단에서 약 65 MPa 에서 15MPa 의 진폭으로 응력이 발생하였다. 플랫폼이 고정된 경우에 공개 코드와 결과를 비교하여 고정단의 응력이 약 7%의 오차가 있는 것을 확인하였다. 향후에는 블레이드도 탄성체로 가정하여 종합적인 해석을 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 a) 대우조선해양(주) b) 국방과학연구소

수중운동체기술특화센터 SM-11 과제 "수중 운동체의 체계/부체계 기능 및 성능 시뮬레이션을 위한 네트워크 기반의 가상 복합 시스템 모델 구조 연구" c) 서울대학교 해양시스템공학 연구소 d) 2012 년도 목포대학교 중형조선산업 지역혁신센터(RIC) e) 지식경제부 산업원천기술개발사업(10035331, 시뮬레이션 기반의 선박 및 해양플랜트 생산기술 개발)의 지원을 받아 연구되었음을 밝히며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Nielsen, F. G., Hanson, T. D. and Skaare, B., 2006, "Integrated Dynamic Analysis of Floating Offshore Wind Turbines," *Proceedings of 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, OMAE2006-92291.
- (2) Lee, K. S., Park, J. B., Won, J. B. and Kim, M. E., 2010, "Shock Analysis of an Offshore Wind Turbine of 3MW rating with Blade Equivalent Beam Model," *Proceeding of the SNAK(Society of Naval Architecture of Korea) Spring Conference*, pp.1688~1694.
- (3) Lee, B. M., Jeong, W. I., Ye, S. H., Ahn, S. H. and Bae, D. M., 2010, "Comparison of Static Analysis and Dynamic Structural Analysis of Wind Turbine Power Plant Induced by Tubular Wind Load Random," *Proceeding of the SNAK(Society of Naval Architecture of Korea) Spring Conference*, pp.1709~1718.
- (4) Hong, H. S., Park, J. I., Bang, J. H., Ryu, J. Y. and Kim, D. H., 2006, *Proceeding of the KSNRE(Korean Society for New and Renewable Energy) Fall Conference*, pp.301~304.
- (5) Joshua, D. P., 2009, "Structural Analysis and Design of Floating Wind Turbine Systems," Ph.D thesis, MIT.
- (6) Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N. and Bossanyi, E., 2001, *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Sons.
- (7) Hansen, M. O. L., 2009, *Aerodynamics of Wind Turbine*, Second Edition, Earthscan.
- (8) Lee, K. Y., Cha, J. H. and Park, K. P., 2010, "Dynamic Response of a Floating Crane in Waves by Considering the Nonlinear Effect of Hydrostatic Force," *Ship Technology Research, Schiffstechnik*, Vol.57, No.1, pp.62~71.
- (9) Cha, J. H., Park, K. P. and Lee, K. Y., 2010, "Numerical Analysis for Nonlinear Static and Dynamic Response of a Floating Crane with Elastic Booms," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 34, No. 4, pp. 501~509.
- (10) Nakos, D. E., Kring, D. C., and Sclavounos, P. D., 1993, "Rankine Panel Methods for Transient Free Surface Flows," *6th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics*.
- (11) Park, K. P., Cha, J. H. and Lee, K. Y., 2010, "Dynamic Response Analysis of the Elastic Tower of a Wind Turbine on a Barge Type Platform," *Proceeding of the SNAK(Society of Naval Architecture of Korea) Fall Conference*.
- (12) Przemieniecki, J. S., 1968, *Theory of Matrix Structural Analysis*, Mc-Graw Hill.
- (13) Jonkman, J. and Butterfield, S., 2009, "Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development," NREL TP-500-38060.
- (14) FAST Change Log (v7.00.01a-bjj, 235 KB, 02-November-2010), <http://wind.nrel.gov/designcodes/simulators/fast/>