

부유식 해상 풍력 발전기의 Tower Top 및 Rotor Shaft에 작용하는 동적 하중 계산

Dynamic Constrained Force of Tower Top and Rotor Shaft of Floating Wind Turbine

구 남 국* 노 명 일† 이 규 열**
Ku, Nam-Kug Roh, Myung-Il Lee, Kyu-Yeul

요 지

본 연구에서는 부유식 해상 풍력 발전기의 로터 축과 타워 상단에 작용하는 동적 하중을 계산하였다. 부유식 해상 풍력 발전기는 부유식 플랫폼, 타워, 낫셀, 허브, 그리고 3개의 블레이드로 구성되어 있는 다물체계 시스템이다. 본 연구에서는 이들 모두를 각각 6 자유도를 갖는 강체로 가정하였다. 부유식 해상 풍력 발전기의 타워는 플랫폼에 고정되어 있고, 3개의 블레이드는 허브에 고정되어 있다. 낫셀은 타워의 상부에 회전 관절로 연결되어 있으며, 블레이드와 허브로 구성된 로터는 낫셀과 회전 관절로 연결되어 있다. 본 연구에서 부유식 풍력 발전기의 운동 방정식은 다물체계 동역학을 기반으로 한 운동방정식 구성 방법 중 하나인 recursive formulation을 이용하여 구성하였다. 외력으로는 부유식 플랫폼에 작용하는 비선형 유체 정역학 힘과 선형 유체 동역학적 힘 그리고 계류력을 고려하였고, 블레이드에 작용하는 풍력을 고려하였다. 이와 같이 구성된 운동 방정식을 해를 구하여 풍력 발전기를 구성하고 있는 각 요소들의 각 연결 부위에 작용하고 있는 구속력을 계산하였다. 그 결과, 동적 상태에서 풍력 발전기에 작용하는 하중은 정적 상태에서 풍력 발전기에 작용하는 하중보다 큰 것을 알 수 있으며, 따라서 부유식 풍력 발전기의 구조해석의 입력 값으로서 정적 하중보다 동적 하중을 고려하는 것이 더 엄격한 해석 기준이라고 할 수 있다.

핵심용어 : 부유식 해상 풍력 발전기, 다물체계 시스템, recursive formulation, 동적 하중

Abstract

In this study, we calculate dynamic constrained force of tower top and blade root of a floating offshore wind turbine. The floating offshore wind turbine is multibody system which consists of a floating platform, a tower, a nacelle, and a hub and three blades. All of these parts are regarded as a rigid body with six degree-of-freedom(DOF). The platform and the tower are connected with fixed joint, and the tower, the nacelle, and the hub are successively connected with revolute joint. The hub and three blades are connected with fixed joint. The recursive formulation is adopted for constructing the equations of motion for the floating wind turbine. The non-linear hydrostatic force, the linear hydrodynamic force, the aerodynamic force, the mooring force, and gravitational forces are considered as external forces. The dynamic load at the tower top, rotor shaft, and blade root of the floating wind turbine are simulated in time domain by solving the equations of motion numerically. From the simulation results, the mutual effects of the dynamic response between the each part of the floating wind turbine are discussed and can be used as input data for the structural analysis of the floating offshore wind turbine.

Keywords : floating wind turbine, mutibody system, recursive formulation, dynamic constrained force

1. 서 론

최근 화석 연료의 고갈 및 환경 오염에 대한 우려로 인하

여 신 재생 에너지에 대한 관심이 높아지고 있으며, 그 중 풍력 발전은 그 규모가 점점 커지고 있는 추세이다. 그러나 운반상의 문제로 인하여 육지에 설치 가능한 풍력 발전기의

† 책임저자, 정회원 · 울산대학교 조선해양공학부 교수
Tel: 052-259-2165 ; Fax: 052-259-2836
E-mail: miroh@ulsan.ac.kr

* 서울대학교 조선해양공학과 박사후과정

** 서울대학교 조선해양공학과 및 해양시스템공학연구소 교수

• 이 논문에 대한 토론을 2012년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2013년 2월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

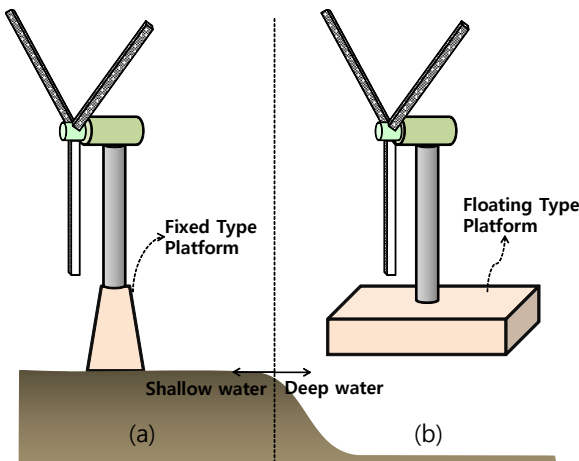


그림 1 Wind turbine platform types; (a) Fixed type platform, (b) Floating type platform

용량이 최대 3-MW로 제한되기 때문에, 최근 개발되고 있는 5-MW 용량 이상의 풍력 발전기의 설치 위치가 대형 구조물의 운반이 가능한 해상으로 변경되고 있으며, 점점 해안으로부터 멀어지고 있다. 따라서 그림 1(a)와 같이 풍력 발전기의 플랫폼(platform)이 고정식에서 그림 1(b)와 같이 부유식으로 변경되고 있다. 이로 인하여 고정식 플랫폼에 설치되어 있을 때 보다 풍력 발전기의 동적 거동(dynamic response)이 커지게 되었고, 이로 인하여 풍력 발전기의 주요 연결 부분에 작용하는 동적 하중(dynamic load) 해석이 보다 중요하게 되었다. 이에 본 연구에서는 부유식 풍력 발전기의 운동 방정식을 구성하고, 동적 하중을 해석하였다. 본 연구에서 계산된 동적 하중은 부유식 해상 풍력 발전기의 구조 해석의 입력 값으로 사용할 수 있다.

부유식 풍력 발전기의 운동 방정식은 다물체계 동역학을 기반으로 한 운동방정식 구성 방법 중 하나인 recursive formulation을 이용하여 구성하였다.

외력으로는 부유식 플랫폼에 작용하는 비선형 유체 정역학적 힘과 선형 유체 동역학적 힘 그리고 계류력을 고려하였고, 블레이드에 작용하는 풍력을 고려하였다. 이와 같이 구성된 운동 방정식을 해를 구하여 풍력 발전기를 구성하고 있는 각 요소들의 각 연결 부위에 작용하고 있는 구속력을 계산하여 해상에서의 거동이 풍력 발전기에 가해지는 동적 하중에 영향을 주고 있음을 확인하였다.

2. 관련 연구 현황

Jonkman(2007)은 5-MW급 부유식 풍력 발전기에 대해 풍력과 해양파를 고려하여 동적 거동을 해석하였다. 이 연구에서는 공기역학적 힘을 계산하는 공개용 코드(code)와, 해

양파 외력을 계산하는 상용 코드로부터 계산된 외력을 입력 받아 동역학 해석을 할 수 있는 프로그램을 개발하였으며, 이를 이용하여 풍력 발전기의 주요 부분에 작용하는 동적 하중을 해석하였다. 그러나 플랫폼의 운동이 미소하다고 가정 한 뒤 선형화된 유체 정역학적 힘을 고려하였기 때문에 과도한 자세변화에 대한 계산 결과는 정확도가 낮다. 또한 유체 동역학적 힘은 상용 프로그램을 이용하여 주파수 영역에서 계산한 뒤 Cummins equation을 이용하여 시간 영역으로 변경하였기 때문에 직접 시간 영역에서의 운동방정식을 푸는 것에 비해 과도 구간(transient range)에서의 결과의 정확도가 떨어진다.

Nielsen 등(2006)은 스파(spar) 형식의 플랫폼을 가진 풍력 발전기에 대해 동적 거동을 해석하였다. 상용 프로그램을 이용하여 부유식 풍력 발전기를 모델링하고, 풍력과 해양파 외력, 계류력등을 계산하였으며 동적 거동 해석을 하였다. 풍력 발전기는 강체로 모델링한 것과 탄성체로 모델링한 것을 비교하였으며, 또한 실제 모형을 제작하여 실험을 수행하고, 프로그램을 이용한 동적 거동 해석 결과와 실험 결과를 비교하였다. 이 연구 역시 유체 정역학적 힘, 동역학적 힘 모두 선형화하여 계산하였으며, 유체 동역학적 힘은 상용 프로그램을 이용하여 주파수 영역에서 해석한 결과를 이용하여 계산하였다.

임오강(2012), 최현철(2010)은 각각 풍력 발전기 기어박스의 최적 설계와 지진 응답해석을 수행하였다. 해당 논문들은 풍하중 및 기기 자체의 자중을 하중으로 고려하였다. 해상 풍력 발전기의 설계시에는 해당 논문에서 고려한 풍하중 및 자중 외에 본 논문에서 고려하고 있는 해상에서의 동적 하중을 고려하면 조금 더 엄격한 기준의 구조해석을 수행할 수 있으리라 본다.

박광필(2011a; 2011b)은 바지 타입의 해상 풍력 발전기의 타워 및 블레이드를 탄성체로 가정하고, 운동방정식을 augmented formulation을 기반으로 구성하였다. 운동 방정식의 외력 항에는 풍력, 해양파에 의한 유체력 및 계류력을 포함하였으며, 모두 자체 개발한 코드를 이용하여 동적 거동 및 하중 해석을 수행하였다.

본 연구에서는 부유식 해상 풍력 발전기를 구성하는 구성 요소를 모두 강체로 가정하였다. 이렇게 모든 구성 요소를 강체로 가정하면 실제 탄성체로 가정하는 것 보다는 계산의 오차가 약 5%이하가 될 것으로 예상된다(박광필, 2011b). 그러나 본 논문에서는 회전하는 블레이드와 타워, 그리고 풍력 발전기를 구성하는 구성 요소가 많을수록 augmented formulation에 비하여 계산의 효율성이 좋은 recursive formulation을 이용하여 6자유도 운동을 하는 플랫폼의 연

성된 운동 방정식을 구성하였고, 풍력, 해양파에 의한 유체력 및 계류력을 운동 방정식의 외력에 포함하였다. 본 연구에서는 비선형 유체 정역학적 힘을 고려하여 과대 경사에서도 보다 정확한 계산이 가능하게 하였으며, 유체 동역학적 힘은 자체 개발한 코드를 이용하여 3D Rankine panel method를 통해 시간 영역에서 직접 계산하였다. 또한 구남국(2010)은 계산하지 않았던 해상 풍력 발전기의 주요 부분에 작용하는 동적 구속력을 계산하였다.

3. 부유식 해상 풍력 발전기의 운동 방정식

본 연구에서는 다물체계 동역학 기반의 recursive formulation을 적용하여 부유식 풍력 발전기의 운동 방정식을 구성하였다.

3.1 부유식 풍력 발전기의 구성

그림 2에서 보는 바와 같이 본 연구에서 대상으로 하고 있는 부유식 풍력 발전기는 바지 형태의 부유식 플랫폼(floating type platform)과 타워(tower), 낫셀(nacelle), 허브(hub) 그리고 3개의 블레이드(blade)로 구성되어 있다. 타워는 플랫폼에 고정되어 있고, 3개의 블레이드는 허브에 고정되어 있다. 낫셀은 타워의 상부에 회전 관절로 연결되어 있으며, 블레이드와 허브로 구성된 로터는 낫셀과 회전 관절로 연결되어 있다.

부유식 해상 풍력 발전기의 경우 바다물에 떠 있는 플랫폼의 거동이 타워나 낫셀, 블레이드의 거동에 영향을 미치게 되며, 역으로 블레이드의 회전 운동이 낫셀이나 타워, 플랫폼의 운동에 영향을 미치게 된다. 이러한 대상에 대해 기계 분야에서는 여러 물체가 여러 가지 형태의 관절로 연결되어 서로 구속력(constraint force)을 주고받으며 움직이는 다물체

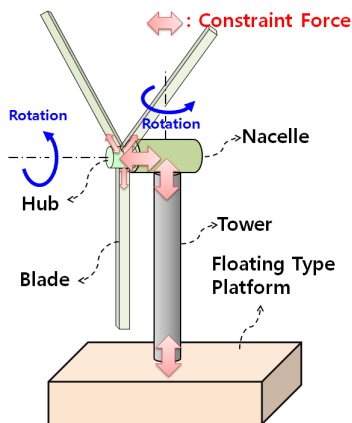


그림 2 Configuration of a floating offshore wind turbine

계의 거동 해석을 수행하였다(Shabana, 2005). 여기에서 각 물체가 서로 주고받는 구속력은 실제 해당 부위에 작용하는 하중을 뜻한다. 한편 조선해양공학 분야에서는 바다물 위에 떠 있는 플랫폼이 해양파로 인하여 발생하는 거동 해석을 수행하고 있다(Kring, 1993; 김경환, 2008).

본 연구에서는 해양파의 영향을 받아 운동하는 부유식 플랫폼의 거동 해석과, 그 위에 설치된 풍력 발전기에 작용하는 동적 하중 해석을 위해 기계 분야에서 활용하고 있는 다물체계 동역학 기반으로 운동방정식을 구성함으로써, 부유체와 풍력 발전기 사이의 상호 연성 효과를 고려하였다.

3.2 좌표계 정의

부유식 풍력 발전기의 운동 방정식을 구성하기 위하여 그림 3과 같이 좌표계를 정의하였다. n -frame은 관성 좌표계(inertial reference frame)이고, b_P -frame, b_T -frame, b_N -frame, b_R -frame은 각각 플랫폼, 타워, 낫셀, 로터에 고정되어 있는 물체 고정 좌표계이다. 부유식 풍력 발전기의 일반화 좌표(generalized coordinates) \mathbf{q} 는 식 (1)과 같이 정의하였다.

$$\mathbf{q} = [\mathbf{q}_P^T \quad q_N \quad q_R]^T$$

$$\mathbf{q}_P = [{}^n r_{O_P/E,x} \quad {}^n r_{O_P/E,y} \quad {}^n r_{O_P/E,z} \quad \phi_{b_P/n,x} \quad \theta_{b_P/n,y} \quad \psi_{b_P/n,z}]^T$$

$$q_N = \theta_{b_N/b_T}, \quad q_R = \theta_{b_R/b_N} \quad (1)$$

플랫폼의 위치(position) 및 자세(orientation)을 나타내는 일반화 좌표 \mathbf{q}_P 는 6개의 성분을 갖는데, \mathbf{q}_P 의 첫 번째 3

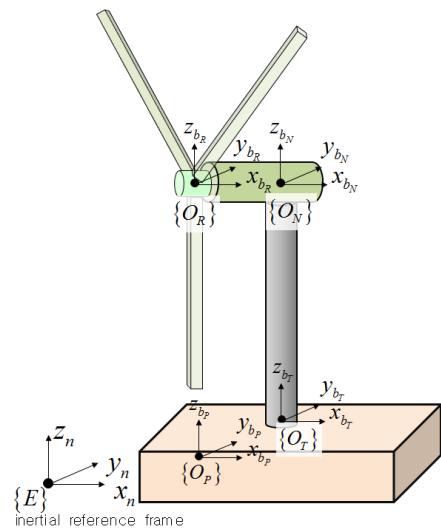


그림 3 Reference frames of the floating offshore wind turbine

개 성분은 위치를 나타내는 ${}^n\mathbf{r}_{o_p/E}$ 의 x, y, z 성분이며, 마지막 3개 성분은 자세를 나타내는 zyx 오일러 각도의 성분이다. q_N 은 플랫폼을 기준으로 낫셀이 회전한 각도, q_R 은 낫셀을 기준으로 로터가 회전한 각도를 나타내므로 각각 1개의 성분을 갖는다.

3.3 Recursive formulation을 이용한 운동 방정식 유도

Dynamics는 forward dynamics와 inverse dynamics로 분류된다. Forward dynamics는 위치, 속도, 그리고 외력이 주어졌을 때 외력을 받은 시스템에서 발생하는 가속도를 계산하는 과정을 말하며, inverse dynamics는 위치, 속도, 그리고 가속도가 주어졌을 때, 주어진 가속도를 발생시키기 위한 힘을 계산하는 과정을 말한다. 그림 4와 같이 유도된 식을 이용하여 inverse dynamics 문제를 풀 수 있으며, 이를 이용하여 본 연구에서 대상으로 하는 forward dynamics 문제, 즉 각 강체에 작용하는 힘 \mathbf{f}_i 가 주어졌을 때, 식 (1)에서 정의한 coordinate의 가속도인 $\ddot{\mathbf{q}}$ 를 계산하기 위한 운동 방정식을 유도할 수 있다(Featherstone, 2008). 해상 풍력 발전기를 대상으로 상세히 유도된 운동 방정식은 참고문헌 구남국(2010)을 참고한다.

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{v}_{i-1} + \mathbf{S}_i \dot{q}_i \quad (2)$$

$$\mathbf{a}_i = \mathbf{a}_{i-1} + \mathbf{S}_i \ddot{q}_i + \dot{\mathbf{S}}_i \dot{q}_i \quad (3)$$

$$\mathbf{f}_i^B = \mathbf{I}_i \mathbf{a}_i + \mathbf{v}_i \times {}^* \mathbf{I}_i \mathbf{v}_i \quad (4)$$

$$\mathbf{f}_i = \mathbf{f}_i^B - \mathbf{f}_i^e + \mathbf{f}_{i-1} \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\tau}_i = \mathbf{S}_i^T \mathbf{f}_i \quad (6)$$

여기서, \mathbf{v}_i 는 6개의 요소를 가진 i 번째 강체의 속도 벡터, \mathbf{a}_i 는 6개의 요소를 가진 i 번째 강체의 가속도 벡터, q_i 는 일반화 좌표계, \mathbf{I}_i 는 i 번째 강체의 질량 및 질량 관성 모멘트, \mathbf{f}_i^B 는 i 번째 강체에 작용하는 모든 합력, \mathbf{f}_i^e 는 관절에 의한 힘과 구속력을 제외한 i 번째 강체에 작용하는 모든 외력, \mathbf{f}_i 는 i 번째 강체에 작용하는 구속력, $\boldsymbol{\tau}_i$ 는 i 번째 관절에 의해 작용하는 관절에 의한 힘이다.

3.4 Recursive formulation을 이용한 물체 사이의 구속력 계산

3.3절에서 유도된 운동 방정식을 이용하여 forward dynamics 문제를 풀면 $\ddot{\mathbf{q}}$ 을 계산할 수 있다. 이렇게 계산된 $\ddot{\mathbf{q}}$ 과 그림 4의

식들을 이용하여 $i-1$ 번째 물체와 i 번째 물체 사이에 걸리는 구속력을 계산하는 식을 유도하였다. 즉 각 물체의 연결 부위에 가해지는 하중은 아래와 같이 식 (2)~(4)를 순차적으로 계산하여 구할 수 있다.

$$\mathbf{c}_i = \mathbf{S}_i \cdot \dot{q}_i + {}^i \mathbf{v}_i \times \mathbf{S}_i \cdot \dot{q}_i \quad (7)$$

$$\mathbf{p}_i = {}^i \mathbf{v}_i \times {}^i \hat{\mathbf{I}}_i \cdot {}^i \mathbf{v}_i \quad (8)$$

$$\boldsymbol{\tau}_{constraint}^{i-1,i} = \mathbf{S}_i^T \left(\mathbf{I}_i \cdot \left({}^i \mathbf{X}_{i-1} \cdot \mathbf{a}_{i-1} + \mathbf{S}_i \cdot \ddot{q}_i + \mathbf{c}_i \right) + \mathbf{p}_i \right) \quad (9)$$

다물체계 동역학 운동 방정식을 구성하는 다른 방법인 augmented formulation은 운동 방정식에 이미 구속력을 나타내는 변수가 포함되어 있어 위와 같은 추가적인 계산이 필요하지 않다. 그러나 recursive formulation의 경우에도 식 (7)~(9)는 한번 유도를 해주면 그 식이 변경되지 않으며, 오히려 풍력 발전기 시스템의 구성 요소가 많아질수록 augmented formulation에 비하여 계산의 효율성이 더 좋아지므로 recursive formulation을 사용하여 운동 방정식을 구성하는 것이 더 효율적이다.

4. 부유식 풍력 발전기의 거동 해석 순서 및 작용하는 외력

그림 4는 본 연구에서 수행하는 동역학 해석의 순서를 나타내고 있다. 부유식 플랫폼 위에 풍력 발전기가 설치되면 정적 평형 상태가 될 때까지 플랫폼이 경사하게 된다. 따라서 먼저 phase 1에서는 부유식 해상 풍력 발전기의 정적 평형상태를 다음과 같은 순서로 계산한다.

- ① 부유식 플랫폼의 초기 상태를 가정한다.
- ② 식 (10)을 이용하여 부유식 플랫폼이 정적 평형상태인지 판단한다.

$$\mathbf{f}_{Total}^e(\mathbf{q}^{(k)}) = \mathbf{0} \quad (10)$$

- ③ 정적 평형상태가 아니면 식 (11)을 이용하여 다음 시간의 부유식 플랫폼의 자세를 결정한다.

$$\mathbf{q}^{(k+1)} = - \left[\frac{\partial \mathbf{f}_{Total}^e(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} \Big|_{\mathbf{q}^{(k)}} \right]^{-1} \mathbf{f}_{Total}^e(\mathbf{q}^{(k)}) + \mathbf{q}^{(k)} \quad (11)$$

- ④ 정적 평형 상태이면 해당 자세를 0초에서의 플랫폼 자세로 정의하고 phase 2로 넘어간다. 즉, phase 1에서 경사 각을 계산한 뒤 벨러스팅(ballasting)을 하여 플랫폼의 자세를 직립(upright)상태로 만들고, phase 2에서 동역학 해석을 수행하게 된다. phase 2에서 각

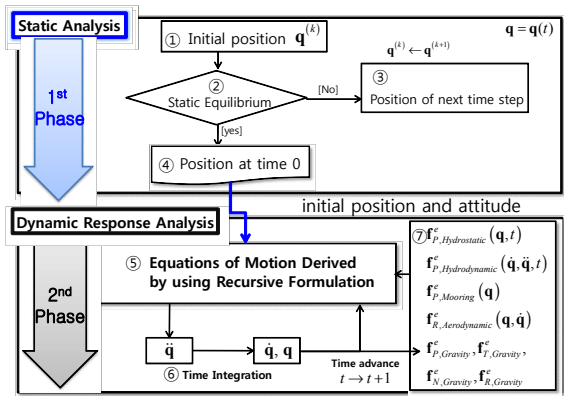


그림 4 Procedure of the simulation for the floating wind turbine

힘의 아래첨자 P, T, N, R은 각각 플랫폼, 타워, 너셀, 로터를 의미한다. phase 2에서는 다음과 같은 순서로 동역학 해석을 수행한다.

- ⑤ 3.3절, 3.4절에서 설명한 recursive formulation을 이용하여 유도한 다물체계 운동 방정식을 이용하여 각 물체의 가속도를 계산한다.
- ⑥ 가속도를 적분하여 다음 시간의 물체의 자세를 계산한다.
- ⑦ 다음 시간의 물체의 자세를 이용하여 부유식 풍력 발전기에 가해지는 각종 힘을 계산한 뒤 이를 다시 운동 방정식에 대입하여 운동 방정식을 푼다.

4.1 유체 정역학적 힘

Phase 1에서는 과대 경사각을 가지는 부유식 플랫폼의 정적 평형 자세를 구하기 위해, 모든 힘의 합력은 0이라는 비선형 지배 방정식을 구성하였고, 순차적 선형화를 통해 비선형 지배 방정식의 해를 구하였다. 방정식에는 복원성능에 영향을 미치는 침하, 횡경사, 종경사가 연성되어 있으며, 이에 따라 변하는 복원력 미계수들은 수선 면적, 수선 면적의 1차, 그리고 2차 모멘트의 형태로 식 (12), (13)과 같이 유도되었다.

$$\frac{\partial \mathbf{f}_{Hydrostatic}^e(\mathbf{q}^{(i)})}{\partial \mathbf{q}^{(i)}} \Delta \mathbf{q}^{(i)} = -\mathbf{f}_{Hydrostatic}^e(\mathbf{q}^{(i)}) \quad (12)$$

$$\frac{\partial \mathbf{f}_{Hydrostatic}^e(\mathbf{q}^{(i)})}{\partial \mathbf{q}^{(i)}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_B}{\partial z} & \frac{\partial F_B}{\partial \phi} & \frac{\partial F_B}{\partial \theta} \\ \frac{\partial M_{BT}}{\partial z} & \frac{\partial M_{BT}}{\partial \phi} & \frac{\partial M_{BT}}{\partial \theta} \\ \frac{\partial M_{BL}}{\partial z} & \frac{\partial M_{BL}}{\partial \phi} & \frac{\partial M_{BL}}{\partial \theta} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -\rho g \cdot A_{WP} & -\rho g \cdot \cos \theta \cdot T_{WP} & \rho g \cdot L_{WP} \\ -\rho g \cdot T_{WP} & -\rho g \nabla \cdot \{ {}^n x_{B/O} \sin \theta + {}^n z_{B/O} \cos \theta \} & \rho g \cdot I_P \\ \rho g \cdot L_{WP} & -\rho g \cdot \cos \theta \cdot I_T & -\rho g \nabla \cdot {}^n y_{B/O} \cdot \sin \theta + \rho g \cdot \cos \theta \cdot I_P \\ & & -\rho g \nabla \cdot {}^n z_{B/O} - \rho g \cdot I_L \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기서, z는 플랫폼의 침하량(q_{P3}), θ 는 종경사 각(q_{P5}), ϕ 는 횡경사 각(q_{P4}), ρ 는 바닷물의 밀도, F_B 는 부력, M_{BT} 는 부력에 의한 횡 복원 모멘트, M_{BL} 은 부력에 의한 종 복원 모멘트, A_{WP} 는 수선면적, T_{WP} 는 횡 1차 면적 모멘트, L_{WP} 는 종 1차 면적 모멘트, I_T 는 횡 2차 면적 모멘트, I_L 는 종 2차 면적 모멘트, I_P 는 극 2차 모멘트, 그리고 ${}^n x_{B/O}$, ${}^n y_{B/O}$, ${}^n z_{B/O}$ 는 플랫폼 고정 좌표계에서 부력 중심까지의 x, y, z 위치를 의미한다.

Phase 2에서 부유식 플랫폼에 작용하는 유체 정역학 힘 $\mathbf{f}_{P,Hydrostatic}^e$ 은 매 단위 시간마다 변하는 플랫폼의 자세와 파고를 고려하여 계산하였으며, 식 (14)와 같다(Lee 등, 2010).

$$\begin{aligned} & \mathbf{f}_{P,Hydrostatic}^e(\mathbf{q}, t) \\ &= \rho_{sw} \mathbf{g} [0; 0; \int_{V(\mathbf{q}, t)} dV; \int_{V(\mathbf{q}, t)} y_{Buoyancy} dV; \\ & \quad - \int_{V(\mathbf{q}, t)} x_{Buoyancy} dV; 0]^T \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, ρ_{sw} 는 해수의 밀도, \mathbf{g} 는 중력가속도, $V(\mathbf{q}, t)$ 는 플랫폼의 침수 부피, $x_{Buoyancy}$, $y_{Buoyancy}$ 는 부력 중심의 좌표이다.

4.2 유체 동역학적 힘

유체 동역학적 힘은 3D Rankine panel method를 사용하여 시간 영역에서 계산하였다. 속도 포텐셜(velocity potential)의 지배 방정식은 식 (15)와 같이 라플라스 방정식(Laplace equation)이다. 본 연구에서 대상으로 하고 있는 것은 계류되어 있는 해상 풍력 발전기이기 때문에 전진 속도가 없는 것으로 가정하고 속도 포텐셜을 입사파 포텐셜(incident potential)과 교란 포텐셜(disturbed potential)로 구분한다.

$$\nabla^2 \phi = 0, \quad \phi = \phi_i + \phi_d \quad (15)$$

위의 입사파 포텐셜은 아래의 경계조건을 만족해야 한다.

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial z} - \frac{\partial \eta_i}{\partial t} = 0 \quad \text{at } z = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial \phi_l}{\partial t} + g\eta_l = 0 \quad \text{at } z = 0 \quad (17)$$

$$\left. \frac{\partial \phi_l}{\partial z} \right|_{z=-h} = 0 \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \phi_l(x, y, z, t) &= \phi_l(x, y, z, t + T) \\ \phi_l(x, y, z, t) &= \phi_l(x + L, y, z, t) \\ \phi_l(x, y, z, t) &= \phi_l(x, y + L, z, t) \end{aligned} \quad (19)$$

식 (16)~(19)는 각각 선형화된 운동학적 자유 수면(linearized kinematic free surface), 선형화된 동역학적 자유 수면(linearized dynamics free surface), 해저면(bottom) 그리고 측면(lateral) 경계 조건이다. 여기서, η_l , T , L 는 입사파의 진폭(amplitude), 주기(period), 그리고 길이이다.

교란 포텐셜은 지배 방정식과 경계 조건에 대한 식 (16)~(18) 이외에 식 (20)의 물체 표면 경계 조건, 그리고 식 (21)의 방사 조건을 만족한다.

$$\frac{\partial \phi_d}{\partial \mathbf{n}} = \frac{\partial \delta}{\partial t} \mathbf{n} - \frac{\partial \phi_l}{\partial \mathbf{n}}, \delta = \xi_T + \xi_R \times \mathbf{r} \quad (20)$$

$$\frac{\partial \eta_d}{\partial t} = \frac{\partial \phi_d}{\partial z} - 2\nu\eta_d + \frac{\nu^2}{g}\phi_d \quad (21)$$

여기서, δ 는 관성 좌표계에서 정의된 물체 표면의 위치벡터이고, \mathbf{r} 은 물체 고정 좌표계에서 정의된 물체 표면까지의 위치 벡터, ξ_T 는 관성 좌표계에서 정의된 물체 중심까지의 위치 벡터(q_{P1}, q_{P2}, q_{P3})를, ξ_R 는 물체 고정 좌표계의 자세를 정의한 회전 각도 벡터(q_{P4}, q_{P5}, q_{P6}), η_d 는 교란에 의한 파의 진폭, ν 는 방사 조건 계수를 의미한다.

위와 같이 정의된 문제는 먼저 입사 포텐셜을 해석적으로 계산한 뒤 이를 식 (19)에 대입하고, 교란 포텐셜을 수치적으로 풀어 계산한다. 이 때, 식 (22)와 같은 형태의 제 2 그린 항등식(Green's second identity)를 사용하며, G 에는 식 (23)의 3D Rankine Source를 사용하였다(Kring, 1993; 차주환, 2010).

$$\phi_d = \iint_{S_{body}} \left(\phi_d \frac{\partial G}{\partial n} - G \frac{\partial \phi_d}{\partial n} \right) dS + \iint_{S_r} \left(\phi_d \frac{\partial G}{\partial n} - G \frac{\partial \phi_d}{\partial n} \right) dS \quad (22)$$

$$G(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \frac{1}{4\pi} \frac{1}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|} \quad (23)$$

여기서, \mathbf{x} 는 관성 좌표계에서 정의된 3D Rankine source의 위치이고, \mathbf{x}' 은 관성 좌표계에서 정의된 3D Rankine source가 영향을 주는 panel의 위치이다.

이와 같이 계산된 속도 포텐셜을 베르누이 방정식(Bernoulli equation)에 대입하여 물체 표면에 작용하는 압력을 계산할 수

있고, 압력을 식 (24)과 같이 물체의 침수표면적을 따라 적분하여 부유식 플랫폼에 작용하는 유체 동역학적 힘 $\mathbf{f}_{P,Hydrodynamic}^e$ 을 계산한다.

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_{P,Hydrodynamic}^e(\dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}, t) & \\ &= \left[-\iint_S \frac{\partial \phi}{\partial t} \mathbf{n} dS_{(1 \times 3)}; -\iint_S \frac{\partial \phi}{\partial t} (\mathbf{r} \times \mathbf{n}) dS_{(1 \times 3)} \right]^T \end{aligned} \quad (24)$$

여기서, S 는 침수 표면적, \mathbf{r} 는 물체 표면에 위치한 각 panel의 위치 벡터 즉, 물체 고정 좌표계에서 정의된 물체 표면까지의 위치 벡터이다.

4.3 풍력

풍력은 BEM(Blade Element Momentum) 이론에 의하여, 각 블레이드 요소에 작용하는 힘을 구하고, 허브의 축에 작용하는 6자유도 힘과 모멘트로 계산한다(Moriarty 2005). 식 (25)과 식 (26)을 이용하여 블레이드 요소에 작용하는 블레이드 평면에 수직 방향인 힘과 수평 방향인 힘을 계산하였다.

$$dT = \frac{1}{2} \rho V^2 c (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) dr \quad (25)$$

$$dQ = \frac{1}{2} \rho V^2 c (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) dr \quad (26)$$

여기서, ρ 는 공기의 밀도, c 는 블레이드 요소 회전면적이 전체 회전 면적에서 차지하는 비율, V 는 들어오는 바람의 속도, ϕ 는 블레이드 평면과 들어오는 바람이 이루는 각도이다. C_L 과 C_D 는 각각 양력 계수와 항력 계수이다. 하나의 블레이드 요소에 의해 로터에 작용하는 힘과 모멘트는 식 (27a)와 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} dT_x &= dT \\ dT_y &= -dQ \cdot \cos \psi \\ dT_z &= dQ \cdot \sin \psi \\ dM_x &= dT_y \cdot z_{blade} + dT_z \cdot y_{blade} \\ dM_y &= dT_x \cdot z_{blade} \\ dM_z &= -dT_x \cdot y_{blade} \end{aligned} \quad (27a)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_{R,Aerodynamic}^e(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) & \\ &= \left[\int_R dT; \int_R (-\cos \psi) dQ; \int_R \sin \psi dQ; \right. \\ & \quad \left. \int_R z_{blade} dT_y + \int_R y_{blade} dT_z; \int_R z_{blade} dT; \int_R (-y_{blade}) dT \right]^T \end{aligned} \quad (27b)$$

여기서, ψ 는 블레이드의 회전 방위각(q_R)이다. 식 (27a)로 계산된 힘과 모멘트를 식 (27b)과 같이 블레이드 길이 R로 적분하면 로터에 작용하는 힘과 모멘트 $\mathbf{f}_{R,Aerodynamic}^e$ 을 계산할 수 있다.

4.4 계류력

부유식 플랫폼에 작용하는 계류력 $\mathbf{f}_{P,Mooring}^e$ 은 계류선을 현수선(Catenary curve)로 고려하여 식 (28)과 같이 계산하였다(Faltinsen, 1990).

$$\mathbf{f}_{P,Mooring}^e(\mathbf{q}) = \left[\begin{array}{c} \sum_{k=1}^n T_{H,k}(\mathbf{q}) \cos \psi_k; \sum_{k=1}^n T_{H,k}(\mathbf{q}) \sin \psi_k; \\ \mathbf{0}_{(1 \times 3)}; \sum_{k=1}^n T_{H,k}(\mathbf{q}) [x_k \sin \psi_k - y_k \cos \psi_k] \end{array} \right]^T \quad (28)$$

여기서, $T_{H,k}$ 는 k번째 계류선의 수평 방향 힘, ψ_k 는 k번째 계류선이 플랫폼의 수평선과 이루는 각도이다.

5. 부유식 풍력 발전기에 작용하는 동적 하중

풍력 발전기에서 상대적으로 반복 하중에 의한 피로 누적 이 큰 곳은 블레이드 루트(blade root), 로터 축(rotor shaft), 타워 상단(tower top), 타워 기저(tower base) 부분이다(박중식, 2009). 본 연구에서는 이 중 로터 축과 타워 상단에 작용하는 동적 하중을 계산하였으며, 하중 계산을 위하여 사용된 해상 풍력 발전기 모델의 주요 치수 및 외력은 표 1 및 그림 5와 같다.

그림 6은 타워 상단과 낫셀의 연결 부위에 작용하는 하중을 나타낸 그래프이다. 그림 6(a)는 x축 방향으로 작용하는 구속력을, 그림 6(b)는 z축 방향으로 작용하는 구속력을, 그림 6(c)는 y축을 기준으로 작용하는 구속 모멘트를 나타내며, 점선과 실선은 각각 플랫폼이 고정되어 있는 경우와 파랑 중 운동하고 있는 경우를 가정하고 계산하였을 때 작용하는 하중을 나타낸 것이다. 파랑 중 플랫폼이 운동하고 있는 상태의 동적 하중이 플랫폼이 고정되어 있는 상태의 하중보다 최대 30% 더 큰 것을 알 수 있다.

그림 7은 로터 축에 작용하는 하중에 대하여 계산한 결과이다. 그림 7(a)는 x축 방향으로 작용하는 구속력을, 그림 7(b)는 z축 방향으로 작용하는 구속력을, 그림 7(c)는 y축을 기준으로 작용하는 구속 모멘트를 나타내며, 점선과 실선은 각각 플랫폼이 고정되어 있는 경우와 파랑 중 운동하고

표 1 Properties of the floating wind turbine, wind, and wave used in this study

Hub+Blade	Mass	74.4Mg
Nacelle	Mass	240Mg
Tower	Mass	347Mg
Platform	Mass	16,450Mg
Wind	Speed	12m/s
	Direction	0degree
Wave	Amplitude	0.2m
	Frequency	0.628rad/s
	Length	126.5m
	Direction	45degree

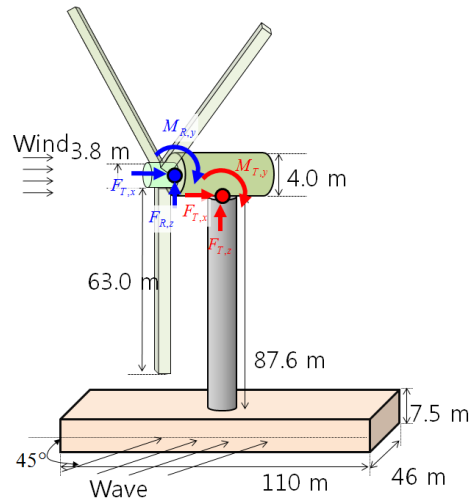


그림 5 Principal dimensions of the floating wind turbine

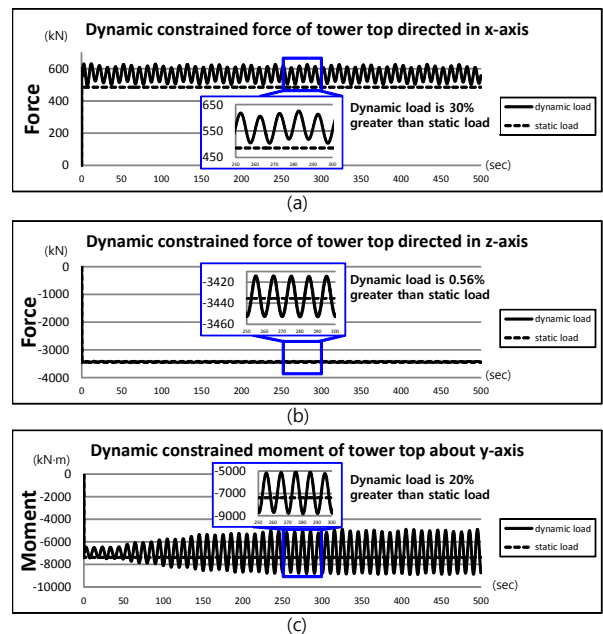


그림 6 Simulation results of dynamic constrained Force of tower top

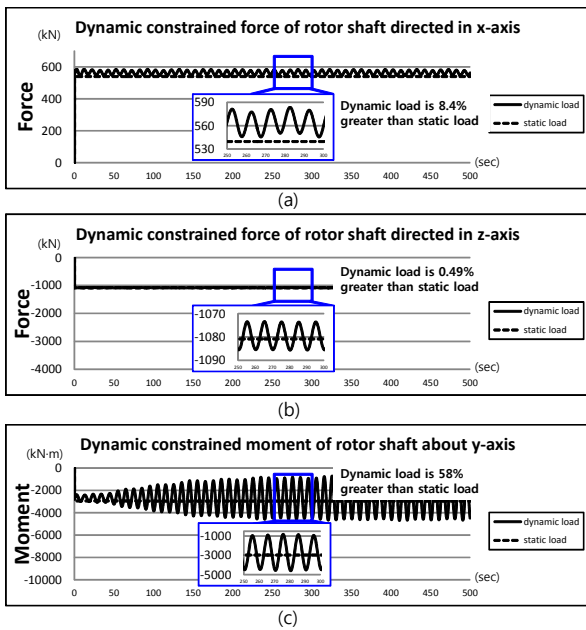


그림 7 Simulation results of dynamic constrained Force of rotor shaft

있는 경우를 가정하고 계산하였을 때 작용하는 하중을 나타낸 것이다. 이 역시 파랑 중 플랫폼이 운동하고 있는 상태의 동적 하중이 플랫폼이 고정되어 있는 상태의 하중보다 최대 58% 더 큰 것을 알 수 있다.

그림 6, 7에서 x , z 축 방향의 힘과 y 축에 대한 모멘트만 표기한 것은 그 크기가 다른 축에 대한 값에 비해 크기 때문이다. z 축 방향 힘은 중력에 의해 발생하여 그 크기가 가장 크고, x 축 방향 힘은 풍력에 의해 발생하지만, y 축 방향으로 큰 힘이 가해지지 않는다. 또한 모멘트의 경우에는 중력이 작용하는 점(무게 중심)이 로터 축이나 타워 상단으로부터 x 축 방향으로 떨어져 있어 y 축에 대한 모멘트를 발생시키지 않는다.

6. 결론 및 향후 연구 계획

본 연구에서는 부유식 해상 풍력 발전기의 동적 거동이 풍력 발전기의 주요 부분인 로터 축과 타워 상단에 작용하는 동적 하중에 어떤 영향을 미치고 있는지 해석하였다. Recursive formulation을 적용하여 운동 방정식을 구성하였으며, 외력으로서 비선형 유체 정역학 힘, 선형 유체 동역학 힘, 계류력, 풍력을 고려하였다. 하중 계산 결과 타워 상단과 낫셀의 연결 부위에 작용하는 동적 하중은 정적 하중보다 최대 30% 더 크고, 로터 축에 작용하는 동적 하중은 정적 하중보다 최

대 58%가량 더 큰 것을 알 수 있다. 따라서 부유식 풍력 발전기의 구조해석의 입력 값으로서 정적 하중보다 동적 하중을 고려하는 것이 더 엄격한 해석 기준이라고 할 수 있다. 이를 이용하면 정적인 상태의 하중을 이용하여 구조부재를 설계할 때 동적 하중을 대비하여 적용하는 안전 계수를 보다 정교하게 결정할 수 있을 것으로 예상된다. 향후에는 운동 방정식 구성의 자동화를 통해 원하는 부위에 각 물체의 연결 부위를 추가하는 것을 용이하게 하여 타워의 임의의 지점에 작용하는 동적 하중 해석을 수행하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 (a) 지식경제부 산업원천기술개발사업(10035331, 시뮬레이션 기반의 선박 및 해양플랜트 생산기술 개발) (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 BK 21 해양 기술 인력 양성 사업단 및 해양 시스템 공학 연구소의 지원 (d) 한국연구재단(R33-2008-000-10150-0)의 지원을 받아 연구되었음을 밝히며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

구남국, 차주환, 박광필, 조아라, 이규열 (2010) Recursive Formulation을 이용한 부유식 풍력 발전기 동적 거동 해석, 2010년 한국풍력에너지학회 추계학술대회, 27~29.

김경환, 김용환 (2008) Weak-scatterer 가정에 기반한 비선형 선박 운동해석, 2008년 대한조선학회 추계학술대회, pp.635~644.

박광필 (2011a) 해상 작업 중인 부유식 풍력 발전기의 유연 다물체계 동역학, 공학박사 학위논문, 서울대학교 조선해양공학과.

박종식, 남윤수, 김정기, 최명현 (2009) 공단성 제어를 위한 MW급 풍력발전기 피로 하중 해석, 한국정밀공학회 춘계학술대회, pp.267~268.

임오강, 정기용, 이대연, 최은호, 조진래 (2012) 5MW급 풍력발전기용 기어박스 하우징의 형상 최적설계, 한국전산구조공학회논문집, 25(3), pp.237~244.

차주환, 박광필, 구남국, 이규열 (2010) 3D Rankine Panel Method를 이용한 전진속도가 없는 선박의 시간 영역 운동 해석, 서울대학교 선박설계자동화 연구실 내부 연구 보고서.

최현철, 김동현, 김동만, 박강균 (2010) 풍하중 효과를 고려한 MW급 풍력발전기 타워의 지진응답 해석, 한국전산구조공학회 논문집, 23(2), pp.209~216.

- Featherstone, R.** (2008) Rigid Body Dynamics Algorithms, Springer.
- Jonkman, J.M.** (2007) Dynamics Modeling and Load Analysis of an Offshore Floating Wind Turbine, Technical Report, NREL/TP-500-41958.
- Kring, D.C.** (1994) Time Domain Ship Motions by a Three-Dimensional Rankine Panel Method, MIT, Ph.D Thesis.
- Lee, K.Y., Cha, J.H., Park, K.P.** (2010) Dynamic Response of a Floating Crane in Waves by Considering the Nonlinear Effect of Hydrostatic Force, *Ship Technology Research*, 57(1), pp.62~71.
- Moriarty, P.J., Hansen, A.C.** (2005) AeroDyn Theory Manual, NREL/TP-500-36881, pp.2~3.
- Nielsen, F.G., Hanson, T.D., Skaare, B.** (2006) Integrated Dynamic Analysis of Floating Offshore Wind Turbines, Proceedings of 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Hamburg, Germany.
- Park, K.P., Cha, J.H., Lee, K.Y.** (2011b) Dynamic Factor Analysis for the Heavy Lifting Operation Considering an Elastic Boom Effects, *Ocean Engineering*, in 3rd review.
- Shabana, A.A.** (2005) Dynamics of Multibody Systems, 3rd edition, Cambridge University Press.
- Faltinsen, O.M.** (1990) Sea Loads on Ships and Offshore Structures, University of Cambridge.

- 논문접수일 2012년 6월 29일
- 논문심사일
 - 1차 2012년 7월 10일
 - 2차 2012년 9월 14일
- 게재확정일 2012년 9월 19일