

해상 크레인을 이용한 해상 풍력 발전기의 다물체계 동역학 설치 해석

구 남 국¹ · 하 솔¹ · 김 기 수² · 노 명 일^{3*}

¹서울대학교 공학연구소, ²서울대학교 조선해양공학과 대학원, ³서울대학교 조선해양공학과 및 해양시스템공학연구소

Installation Analysis of Multibody Systems Dynamics of an Offshore Wind Turbine Using an Offshore Floating Crane

Nam-Kug Ku¹, Sol Ha¹, Ki-Su Kim² and Myung-Il Roh^{3*}

¹Engineering Research Institute, Seoul National University, Seoul, 151-744, Korea

²Department of the Naval Architecture and Ocean Engineering, Graduate School, Seoul National University, Seoul, 151-744, Korea

³Department of the Naval Architecture and Ocean Engineering, and Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-744, Korea

Abstract

Recently, a number of wind turbines are being installed due to the increase of interest in renewable, environment-friendly energy. Especially, an offshore wind turbine is being watched with keen interest in that it has no difficulty in securing a site and can get high quality of wind, as compared with a wind turbine on land. The offshore wind turbine is transferred to and installed on the site by an offshore floating crane after it was made in a factory on land such as shipyard. At this time, it is important to secure the safety of the turbine because of its huge size and expensive cost. Thus, a dynamic analysis of the offshore wind turbine which is connected with the offshore floating crane was performed based on the multibody systems dynamics in this study. As a result, it is shown that the analysis can be applied to verify the safety of a method for the transportation and installation of the offshore wind turbine suspended by the crane.

Keywords : offshore wind turbine, offshore floating crane, multibody systems dynamics, dynamic response

1. 서 론

최근 화석연료의 고갈 및 환경오염에 대한 우려로 인해, 태양열, 풍력, 파력, 조력 등 신재생 에너지 분야에 대한 관심이 높아지고 있다. 이 중 풍력발전은 그 효율성으로 인해 유럽을 중심으로 그 규모가 점점 증가되고 있는 추세이다. 유럽 공동체 27개국 장관회의에서는 2020년까지 유럽 공동체 전체 에너지 소비량 중 최소한 20%를 신재생 에너지로 대체할 계획을 가지고 있으며, 국내의 경우에는 정부에서 추진 중인 의무 할당제 등의 정책에 힘입어 풍력발전 단지의 개발이 가속화될 것으로 예상되고 있다(Kim *et al.*, 2011). 하지만, 육상 풍력발전의 경우, 부지확보, 소음 및 경관 공해에 따른 민원발생 등의 문제들로 인하여 단지 개발이 어려움

을 겪고 있다. 반면, 해상 풍력발전은 설치 및 운용 상 어려움이 존재하나 부지확보 과정에서 민원이나 용량의 제한이 거의 없고 거대한 에너지 잠재량을 가지고 있어 육상 풍력에 비하여 절대적으로 유리하다고 할 수 있다(Kim *et al.*, 2011). 앞서 언급한 해상 풍력발전의 필요성과 장점에도 불구하고 발전 단가는 아직까지 육상 풍력의 1.5~2배로서 기존의 화석 연료발전소의 전력원에 비해 높은 편이다(Kim *et al.*, 2011). 해상 풍력발전의 활성화와 관련하여 이를 경제적인 측면에서 조망해 보면, 초기 투자비 중 제반 해상작업은 전체 초기비용의 55%를 차지하며, 그 중에서 풍력 발전기 설치작업은 11%에 해당한다(Fingersh *et al.*, 2006).

한편, 풍력 발전기는 일반적으로 Fig. 1에서와 같이 로터 블레이드(rotor blade, 간략히 블레이드), 타워(tower), 낫셀

* Corresponding author:

Tel: +82-2-880-7328; E-mail: miroh@snu.ac.kr
Received June 15 2013; Revised August 10 2013;
Accepted August 12 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.

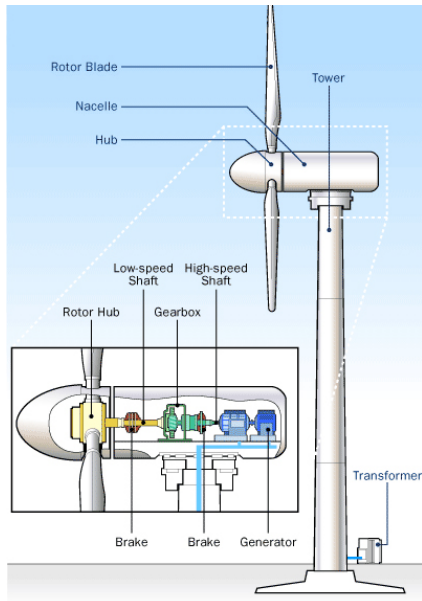


Fig. 1 Configuration of wind turbine (HowStuffWorks, 2013)

(nacelle), 허브(hub)로 등으로 구성된다(HowStuffWorks, 2013). 타워가 육상에 설치되면 육상 풍력 발전기가 되고, 해상에 떠있는 구조물 또는 플랫폼에 설치되면 해상 풍력 발전기가 된다.

해상 풍력 발전기의 동역학 해석과 관련된 연구현황을 살펴보면 다음과 같다.

먼저, Jonkman 등(2007)은 5MW급 부유식 풍력 발전기에 대해 바람과 파도의 영향을 고려하여 동적거동을 해석하였다. 이들은 바람에 의한 외력을 계산하는 공개용 코드와 파도에 의한 외력을 계산하는 상용코드를 기반으로 동역학 해석을 수행할 수 있는 프로그램을 개발하였으며, 이를 이용하여 풍력 발전기의 주요 부분에 작용하는 동적하중을 해석하였다. 그러나 이들은 풍력 발전기가 고정되어 있는 플랫폼의 운동이 미소하다고 가정 한 뒤, 선형화된 유체 정역학적 힘을 고려하였기 때문에 과도한 자세 변화를 고려해야 하는 경우에는 적용이 어렵다는 단점이 있다. 또한, 유체 동역학적 힘은 상용 프로그램을 이용하여 주파수 영역에서 계산한 뒤 Cummins 식을 이용하여 시간 영역으로 변환하였기 때문에, 시간 영역에서의 운동방정식을 직접적으로 푸는 방법에 비해 과도구간(transient range)에서의 결과의 정확도가 다소 떨어지는 한계를 가지고 있다.

Nielsen 등(2006)은 스파(spar) 형태의 플랫폼을 가진 해상 풍력 발전기에 대해 동적거동을 해석하였다. 상용 프로그램을 이용하여 풍력 발전기를 모델링하고, 바람, 파도, 계류 라인(morring line) 등에 의한 힘을 계산한 후, 최종적으로 풍력 발전기의 동적거동을 해석하였다. 풍력 발전기는

강체로 모델링한 것과 탄성체로 모델링한 것을 비교하였으며 또한 실제 모형을 제작하여 실험을 수행하고, 프로그램을 이용한 동적거동 해석결과와 실험결과를 비교하였다. 이들 역시 유체 정역학적 힘과 유체 동역학적 힘을 모두 선형화하여 계산하였으며, 유체 동역학적 힘은 상용 프로그램을 이용하여 주파수 영역에서 해석한 결과를 이용하여 계산하였다.

Lim 등(2012), Choi 등(2010)은 각각 풍력 발전기 내 기어 박스의 최적 설계와 지진에 의한 응답해석을 수행하였다. 이들은 모두 바람에 의한 힘과 기기 자체의 무게를 하중으로 고려하였다. 해상 풍력 발전기의 설계 시에는 이들이 고려한 바람 및 자중 외에, 본 연구에서와 같이 해상에서의 동적하중을 고려하면 보다 엄격한 기준의 구조해석을 수행할 수 있으리라 본다.

Park 등(2011)은 바지(barge) 형태의 해상 풍력 발전기의 타워 및 블레이드를 탄성체로 가정하고, augmented formulation 기반의 운동방정식을 구성하였다. 운동방정식의 외력 항에는 바람과 파도에 의한 유체력 및 계류 라인에 의한 계류력을 포함시켰으며, 자체 개발한 코드를 이용하여 동적거동 및 하중 해석을 수행하였다(Park, 2011; Park *et al.*, 2011).

Ku 등(2012)은 다물체계 동역학을 기반으로 해상에서의 동적하중을 고려하여 부유식 해상 풍력 발전기의 타워 상부와 로터 축(shaft)에 걸리는 동적하중을 계산하였다.

이상과 같이, 해상 풍력 발전기의 동역학 해석과 관련된 연구들은 이미 설치가 완료된 풍력 발전기의 동적거동을 살펴 본 것들이 대부분이었다.

한편, 해상 풍력 발전기의 경우, 설치 시 풍력 발전기를 육상에서 부분적으로 제작한 후 해상에서 조립하는 방법과 Fig. 2 처럼 육상에서 발전기 전체를 조립한 후 한 번에 설치하는 방



Fig. 2 Installation of offshore wind turbine using floating crane (<http://www.scaldis-smc.com/beatricewindfarm.html>)

법이 있다(Kaiser *et al.*, 2010). 해상 풍력 발전기를 운송 지점까지 이송할 때, 보통 해상 크레인이 활용된다. 그런데 이 작업은 해상에서 이뤄지기 때문에 해상 상태에 따라 해상 크레인의 안전성 확보가 매우 중요하다. 이러한 공법을 계획하는 설계자는 해상 크레인으로 이송하는 해상 풍력 발전기의 동적 거동을 예측하고, 그 사이에 연결된 와이어 로프(wire rope)에 작용하는 장력을 사전에 계산해야 한다.

따라서 본 연구에서는 기존 연구들에서 다루지 못했던, 해상 크레인을 이용하여 해상 풍력 발전기를 운송지점까지 이송하여 설치할 때 이들의 동적거동을 다물체계 동역학을 기반으로 해석하고자 하였다. 여기서, 여러 개의 강체(rigid body)로 이루어져 있으며, 각각의 강체는 여러 가지 형태의 관절로서 서로 연결되어 있어, 서로 구속력을 주고받으며 그 움직임을 서로 제한하는 모든 기계 시스템을 다물체계라고 한다.

2. 해상 풍력 발전기의 동역학 해석을 위한 모델링

2.1 해석 개요

본 연구에서 수행한 다물체계 동역학 해석의 전체 구성도는 Fig. 3과 같다. 해상 풍력 발전기와 해상 크레인의 형상 정보와 주요 치수가 결정되면, 각 물체의 6 자유도 연성 운

동을 고려한 14 자유도 연성 운동방정식에 대입한다. 이 운동방정식은 여러 가지 방법으로 유도될 수 있는데, 이는 아래 상세히 설명하였다. 이 운동방정식은 다물체계 동역학을 고려하여 모든 비선형 성분을 고려하고 있다. 그리고 유체 정역학적 힘, 유체 동역학적 힘, 와이어 로프에 의한 힘이 외력으로 계산되어 운동방정식에 대입된다. 다물체계 운동방정식을 풀어 가속도를 구하고, 4차 Runge-Kutta 방법을 사용하여 해상 풍력 발전기와 해상 크레인의 속도, 위치를 계산한 후, 이를 가시화한다. 시뮬레이션 커널에서는 단위 시간만큼 시간을 진행시켜 다시 운동방정식 및 외력에 시간, 위치, 속도를 전달하는 역할을 수행한다.

2.2 다물체계 운동방정식의 구성

다물체 운동방정식 구성방법은 augmented formulation, embedding formulation, recursive formulation 등으로 구분할 수 있다(Cha *et al.*, 2010). Augmented formulation은 다물체의 운동방정식과 구속조건식을 동시에 푸는 방법으로서, 구속력을 직접 계산할 수 있다는 장점이 있지만, 물체의 개수 및 구속조건에 따라 운동방정식의 크기가 커지는 단점이 있다. Embedding formulation은 구속 조건식을 다물체 운동방정식에 대입하여 소거함으로써 운동방정식의 크기를 줄여 푸는 방법으로서, 운동방정식의 계산 시간을 단축시킬 수 있는 장점이 있지만 구속력을 별도로 계산해야 하는 단점이 있다. Recursive formulation은 물체의 연결 관계에 따라 운동방정식을 재귀적으로(recursively) 구성하여 푸는 방법으로서, 물체의 개수와 상관없이 운동방정식의 크기를 6 자유도로 구성할 수 있다는 장점이 있지만 구속력은 별도로 계산해야 하는 단점이 있다. 본 연구에서는 이들 방법 중 제일 효과적이고 효율적이라고 판단되는 recursive formulation에 따라 운동방정식을 구성하였다.

2.3 해상 풍력 발전기와 해상 크레인의 모델링

해상 크레인에 연결된 해상 풍력 발전기의 동역학 해석을 위해 다음과 같은 형상 모델링을 수행하였다.

먼저 해상 풍력 발전기는 5MW급 표준 모델(Jonkman *et al.*, 2009)을 대상으로 하였고, 이의 상세 제원은 Table 1과 같다.

한편, 위의 해상 풍력 발전기를 이송 및 설치하게 될 해상 크레인으로서, 3,600ton의 중량물을 리프팅할 수 있는 "DAEWOO 3600호"를 선정하여 이용하였다. 이 크레인의 길이는 110m, 폭은 46m, 높이는 7.5m이며, 크레인을 구

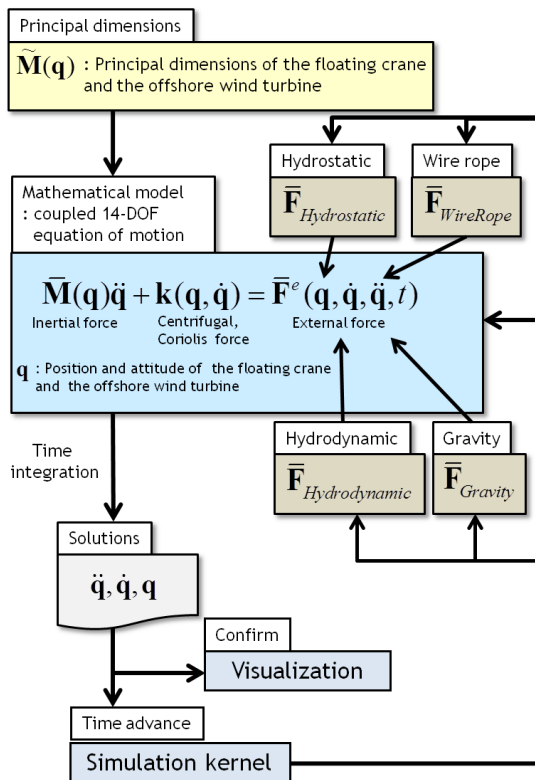


Fig. 3 Configuration of dynamic response analysis for installing floating wind turbine

Table 1 Specification of floating wind turbine

		5MW-NREL	Shape Medel
Tower	Height	77.6m	
	Base Outer Diameter	6.5m	
	Base Wall Thickness	0.027m	
	Top Outer Diameter	3.87m	
	Top Wall Thickness	0.019m	
Hub	Diameter	3m	2.94m
	Height	90m	89m
Rotor	Rotor Diameter	126m	
	Blade Radius	63m	
	Blade Length	61.5m	
Mass	Rotor	110000kg	103219kg
	Blace	17740kg	16569kg
	Hub	56780kg	53512kg
	Nacelle	240000kg	216262kg
	Tower	347460kg	377980kg
	Overall Center of Mass	(-0.2,0.0,64.0)	(-0.19,0.0,64.3)
	Total	697460kg	697461kg

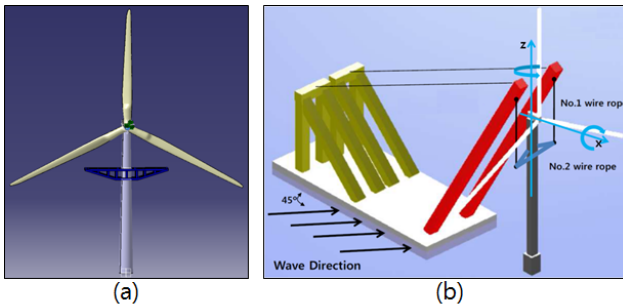


Fig. 4 Geometric model of offshore wind turbine and floating crane

성하는 각 부재는 모두 강체로 가정하였다.

이상과 같은 제원을 가진 해상 풍력 발전기와 해상 크레인에 대해 형상 모델링을 수행하였고, 그 결과는 Fig. 4와 같다. Fig. 4(a)는 해상 풍력 발전기와 리프팅을 위한 가구조물의 형상 모델을 나타낸 것이고, Fig. 4(b)는 동역학 해석을 위한 해상 풍력 발전기 및 해상 크레인의 회전 자유도를 나타낸 것이다.

2.4 동역학 해석을 위한 외력 계산

앞서 언급하였듯이, 본 연구에서는 해상 크레인과 해상 풍력 발전기의 다물체계 운동방정식을 recursive formulation을 이용하여 구성하였다. 그리고 본 연구에서는 외력으로서

해상 크레인에는 유체 정역학적 힘, 유체 동역학적 힘, 와이어 로프의 장력, 중력을 고려하였고, 해상 풍력 발전기에는 와이어 로프의 힘과 중력을 고려하였다.

먼저, 유체 정역학적 힘은 파고(wave height)와 해상 크레인의 자세를 고려하여 침수 표면에 수직하게 작용하는 유체 입자의 압력 성분을 모두 적분하는 pressure integration technique을 사용하면 매 단위 시간마다 비선형 유체 정역학적 힘을 계산할 수 있다. 본 연구에서는 식 (1)과 같이 pressure integration technique의 한 방법인 divergence theorem을 이용하여 유체 정역학적 힘을 침수 부피에 대한 식으로 표현하여 계산하였다.

$$\bar{F}_{Hydrostatic} = \left[0, 0, \rho g \iiint_V dV, \rho g \iiint_V y dV, \right]^T \quad (1)$$

$$\left[-\rho g \iiint_V x dV, 0, 0, 0, 0, 0, 0 \right]$$

유체 동역학적 힘은 식 (2)와 같이 방사력(radiation force)과 파 강제력(wave exciting force)으로 나눌 수 있다.

$$\bar{F}_{Hydrodynamic} = \bar{F}_{Radiation} + \bar{F}_{Exciting} \quad (2)$$

이들은 3D Rankine panel 방법과 같이 직접 시간영역(time domain)에서 계산하는 방법도 있고, 주파수영역(frequency domain)에서 먼저 해석한 뒤 Cummins 식을 이용하여 시간영역으로 변환하는 방법도 있다. 본 연구에서는 전자의 방법을 이용하여 유체 동역학적 힘을 계산하였다. 그 첫 번째 이유는, 앞서 서론에서 밝힌 것과 같이 과도 구간에서의 해석결과의 정확도를 높일 수 있기 때문이다. 두 번째 이유는, 후자와 같이 Cummins 식을 이용하려면 주파수 영역에서 해석한 결과가 있어야 한다는 것이다. 따라서 Cummins 식을 이용하려면 주파수 영역에서 해석한 결과를 낼 수 있는 추가의 해석프로그램이 필요하다. 하지만 전자와 같이 3D Rankine panel 방법을 이용하면 그러한 추가적인 프로그램없이 시간 영역에서 유체 동역학적 힘을 계산할 수 있기 때문에 이 방법을 본 연구에서는 이용하였다. 본 방법에 대한 상세한 내용은 Ku 등(2012)의 연구를 참고하였으며, 최종적으로 3D Rankine panel 방법을 이용하여 유체 동역학적 힘을 구하기 위한 식은 다음과 같다.

$$\bar{F}_{hydrodynamic} = \left[-\iint_S \frac{\partial \phi}{\partial t} \mathbf{n} dS_{(1 \times 3)}; -\iint_S \frac{\partial \phi}{\partial t} (\mathbf{r} \times \mathbf{n}) dS_{(1 \times 3)} \right]^T \quad (3)$$

여기서, S 는 침수 표면적, r 은 물체 표면에 위치한 각 panel

의 위치 벡터 즉, 물체 고정 좌표계에서 정의된 물체 표면까지의 위치 벡터이다.

3. 해상 풍력 발전기의 동역학 해석 수행

본 장에서는 Ku 등(2012)이 개발한 다물체계 동역학 커널을 이용하여 해상 크레인과 와이어 로프로 연결된 해상 풍력 발전기의 동역학 해석결과를 소개한다.

3.1 동역학 해석을 위한 시뮬레이션 모델

해상 크레인에 연결된 해상 풍력 발전기의 동역학 해석을 위해, 본 연구에서는 해상 크레인, 해상 풍력 발전기, 육상 또는 바지선, 운용지점 상의 플랫폼 등의 형상 모델링을 통해 Fig. 5와 같은 시뮬레이션 모델을 구성하였다.

Fig. 5에 나타나 있듯이, 해상 풍력 발전기는 해상 크레인과 4개의 와이어 로프로 연결되어 있다.

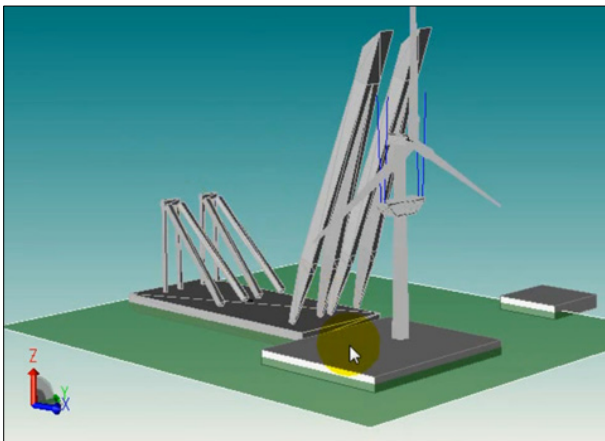


Fig. 5 Simulation model for installation of offshore wind turbine using floating crane

3.2 동역학 해석을 위한 시뮬레이션 시나리오

해상 크레인에 연결된 해상 풍력 발전기의 동역학 해석을 위해, 본 연구에서는 아래와 같은 시뮬레이션 시나리오를 가 정하였다.

- (1) 해상 풍력 발전기가 조립 완료되어 육상 또는 바지선에 놓여있음. 와이어 로프를 이용하여 해상 크레인과 해상 풍력 발전기를 연결함
- (2) 해상 크레인이 해상 풍력 발전기를 들어 올림(hoisting up)
- (3) 해상 풍력 발전기를 든 상태로 해상 크레인이 운용 지

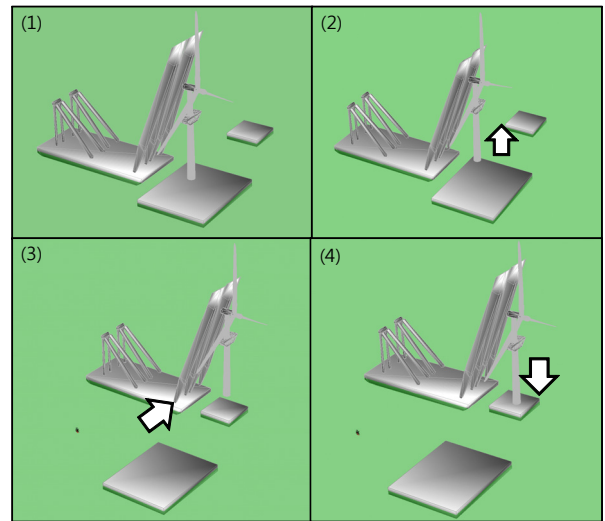


Fig. 6 Scenario of simulation for installation of offshore wind turbine

- 점(본 연구에서는 편의 상 측면 방향으로 이동하는 것으로 가정)까지 해상 풍력 발전기를 운반함(moving)
- (4) 해상 크레인이 운용 지점의 플랫폼 위에 해상 풍력 발전기를 내려놓아(hoisting down) 인양 작업을 완료 함

한편, 동역학 해석 시 파고 0.5m, 주기 0.628rad/s, 입사각 45도인 입사파가 해상 크레인에 작용한다고 가정하였다.

3.3 동역학 해석 결과

Fig. 7은 시뮬레이션 시나리오에 따른 해석결과, 해상 크레인과 해상 풍력 발전기간 와이어 로프에 작용하는 동적하중을 도시한 것이다(4개의 와이어 로프 중 1, 2번 와이어 로프에 대한 결과만을 도시화함). 이 그림에는 초기상태, 해상 크레인이 해상 풍력 발전기를 들어 올릴 때(hoisting up), 운용지점까지 이동할 때(moving), 운용지점 상의 플랫폼 위

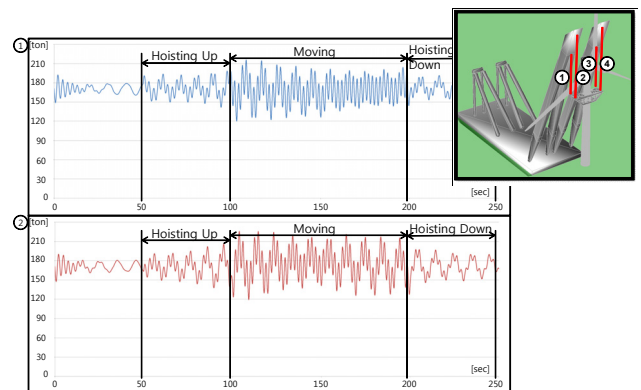


Fig. 7 Dynamic tension of the wire rope between the floating crane and wind turbine

에 해상 풍력 발전기를 내려 놓을 때(hoisting down) 각각 작용하는 와이어 로프의 장력(tension)을 가시화한 것이다. Table 1에 나타나 있듯이, 해상 풍력 발전기의 중량은 약 698톤이며, 4개의 와이어 로프로 해상 크레인과 연결되어 있으므로 각 와이어 로프 당 최대 약 175톤의 중량(정적하중)이 가해진다. 하지만 Fig. 7을 보면, 시뮬레이션 시 해상 풍력 발전기의 움직임에 의해 와이어 로프에는 최대 약 220톤(moving 단계)의 동적하중이 가짐을 알 수 있다. 이는 와이어 로프에 걸리는 하중은 정적하중보다 동적하중이 약 13%정도 크게 나오는 것을 알 수 있다.

한편, 앞서 밝힌 바와 같이, 해상 풍력 발전기는 하나의 강체가 아닌 여러 개의 강체(블레이드, 타워, 낫셀, 허브)로 이루어져 있기 때문에, 그들 사이에 구속력을 주고받게 된다. 구속력을 계산한다는 것은 타워와 낫셀 사이 또는 낫셀과 허브 사이를 연결하는 관절 부분에 작용하는 동적하중을 구한다는 것이다. 본 연구에서는 다물체계 동역학 커널을 활용하여 이러한 구속력 역시 계산하였다. Fig. 8은 시뮬레이션 시 타워와 낫셀 사이에 작용하는 구속력을 도시화한 것이다. Fig. 8을 보면, z 방향(높이 방향) 구속력의 경우 정적하중은 약 3,500kN이나 해상 풍력 발전기의 움직임에 의해 약 2,800~4,000kN의 동적하중이 작용하는 것을 알 수 있다(정적하중 대비 동적하중이 약 15% 차이). 또한 y축에 대한 모멘트의 경우 정적 모멘트는 약 8,000kN·m이나 해상 풍력 발전기의 움직임에 의해 약 6,000~10,000kN·m의 동적 모멘트가 작용하는 것을 알 수 있다(정적하중 대비 동적하중이 약 13% 차이).

본 연구에서 제시한 위 예시는 해상 풍력 발전기의 설치가 진행되는 해당 수역에서, 제한된 기간 내에 이뤄지는 설치작업에 대한 동역학 해석을 수행한 것이다. 일반적으로 이러한

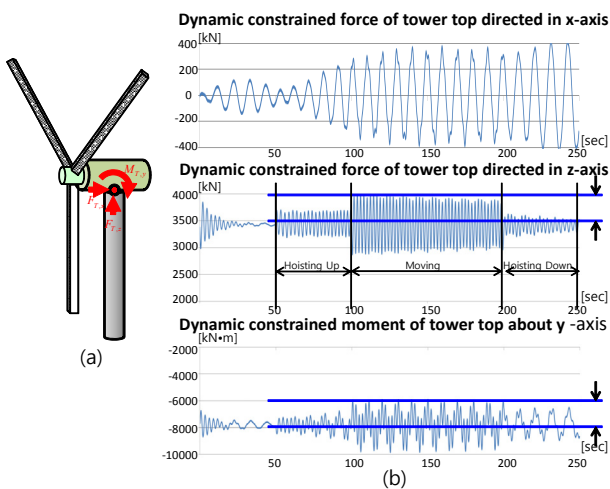


Fig. 8 Dynamic load on the joint between the nacelle and tower top

설치작업에 대한 현장에서의 작업 제한 파고는 0.5m이며, 실제작업은 파도가 거의 없는 잔잔한 해상 상태에서 이루어지게 된다. 따라서 이와 같은 결과는 해상 풍력 발전기의 설치 시 고려할 만한 사항으로 생각된다. 다만, 이송 및 설치작업이 장기간에 걸쳐 이뤄진다면, 해당 수역 내에서의 장기적인 해상상태를 고려하여 동역학 해석을 수행해야 할 것이다.

4. 결론 및 향후 연구 계획

본 연구에서는 해상 풍력 발전기와 해상 크레인에 작용하는 유체력을 포함하여, 해상에서 운동하는 다물체계 시스템의 동적해석을 수행하였다. 특히, 해상 크레인에 의해 해상 풍력 발전기가 움직일 때, 그들 사이의 와이어 로프에 작용하는 장력을 계산하였고, 해상 풍력 발전기의 구성 부품간에 작용하는 구속력 역시 계산하였다. 해석결과, 정적하중에 비해 동적하중이 약 13~15%정도 크게 나옴을 확인할 수 있었다. 이러한 동적하중의 정도는 해상 풍력 발전기의 기구부 설계 시 반영 가능하리라 생각된다. 또한, 본 연구에서 수행한 다물체계 동역학 해석은 해상 풍력 발전기뿐만 아니라 해상에서 작동되는 다양한 해양 장비의 동역학 해석에도 충분히 적용 가능하며, 이를 통해 보다 정확한 설계가 가능하리라 예상 한다.

향후에는 본 해석결과를 현장 데이터와 비교함으로써 시뮬레이션 결과의 정확성 및 효용성을 검토 및 제고할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 (a) 지식경제부 산업원천기술개발사업(10035331, 시뮬레이션 기반의 선박 및 해양플랜트 생산기술 개발) (b) 서울대학교 공학연구소 (c) 서울대학교 해양시스템공학 연구소의 지원을 받아 연구되었음을 밝히며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

Ku, N.K., Rho, M.I., Lee, K.Y. (2012) Dynamic Constrained Force of Tower Top and Rotor Shaft of Floating Wind Turbine, *Computational Structural Engineering*, 25(5), pp.375~380.
 Park, K.P. (2011) Flexible Multibody Dynamics of Floating Offshore Wind Turbine in Marine Operations, Ph. D. Thesis, Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University.
 Lim, O.K., Jung, K.Y., Lee, D.Y., Choi, E.H., Cho,

- J.R.** (2012) Optimum Shape Design of Gearbox Housing for 5MW Wind Turbines, *Computational Structural Engineering*, 25(3), pp.237~244.
- Choi, H.C., Kim, D.H., Kim, D.M., Park, K.K.** (2010) Seismic Response Analysis of a MW Class Wind-Turbine Considering Applied Wind Loads, *Computational Structural Engineering*, 23(2), pp.209~216.
- Kim, S.O., Kim, H.W., Ko, C.B., Kyong, N.H.** (2011) Construction of the 2MW-Offshore Wind Turbine, *Journal of Wind Energy*, 2(2), pp.3~9.
- Fingersh, L., H., M., Laxson, A.** (2006) Wind Turbine Design Cost and Scaling Model, Technical Report, NRE/TP-500-40566.
- Kaiser, M.J., Snyder, B.** (2010) Offshore Wind Energy Installation and Decommissioning Cost Estimation in the U.S. Outer Continental Shelf, U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management, Regulation and Enforcement, Herndon, VA. TA&R Study 648, p.340.
- Ku, N.K., Ha, S., Lee, K.Y., Roh, M.I.** (2012) Dynamic Response Simulation of Lurching Process of the Ship Using Two Floating Cranes Based on Multi-Body System, *Proceedings of the Spring Meeting of the Society of Naval Architecture of Korea*, pp.435~441.
- Cha, J.H., Roh, M.I., Lee, K.Y.** (2010) Integrated Simulation Framework for the Process Planning of Ships and Offshore Structures, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing Journal*, 26(5), pp.430~453.
- HowStuffWorks** (2013) Wind Energy, <http://www.howstuffworks.com>
- Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W., Scott, G.** (2009) Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development, Technical Report, NREL/TP-500-38060.
- 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.** (2011) Dynamic Factor Analysis Considering Elastic Boom Effects in Heavy Lifting Operations, *Ocean Engineering*, 38(10), pp.1100~1113.

요 지

신재생, 친환경 에너지에 대한 관심의 증가로 최근 상당수의 풍력 발전기가 설치되고 있다. 특히, 육상과 달리 부지 확보의 어려움도 없고 고품질의 바람을 얻을 수 있다는 점에서 해상 풍력 발전기가 더욱 주목을 받고 있다. 이와 같은 장점을 가진 해상 풍력 발전기는 육상의 조선소 등에서 제작된 후, 해상 크레인을 이용하여 운송 지점까지 이송되어 설치되는데, 이때 그 크기의 거대함과 고가라는 이유로 무엇보다 안전이 보증되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 해상 풍력 발전기의 이송 및 설치 시 안전성을 보증하기 위한 근거로서, 다물체계 동역학 기법을 활용하여 해상 크레인에 연결된 해상 풍력 발전기의 동역학 해석을 수행하였다. 그 결과, 본 기법이 해상 풍력 발전기의 이송 및 설치방법에 대한 검증용으로 충분히 활용 가능함을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 해상 풍력 발전기, 해상 크레인, 시뮬레이션, 다물체계 동역학, 동적거동