

# 해상 크레인을 이용한 해상풍력발전기의 이송 및 설치 시뮬레이션

## Simulation of the Transportation and Installation of an Offshore Wind Turbine Suspended by a Floating Crane



구 남 국\*

\* 서울대학교 공학연구소 선임연구원

### 1. 서 론

#### 1.1 연구배경 및 필요성

최근 화석연료의 고갈 및 환경오염에 대한 우려로 인하여, 신재생에너지 분야에 대한 관심이 높아지고 있다. 그 중 풍력 발전은 그 규모가 점점 커지고 있는 추세이다. 유럽 공동체 27개국 장관회의에서는 2020년까지 유럽 공동체 전체 에너지 소비량 중 최소한 20%를 재생에너지로 대체할 계획을 가지고 있으며, 국내의 경우에는 정부에서 추진 중인 의무 할당제 (RPS, Renewable Portfolio Standard) 등의 정책에 힘입어 풍력 발전 단지 개발이 가속화될 것으로 예상되고 있다(Kim 등, 2011).

하지만, 육상풍력발전의 경우, 부지확보 및 민원 발생 등의 문제들로 인하여 단지 개발이 어려움을 겪고 있다. 이러한 육상풍력발전예 비해 해상풍력발전은 부지확보 과정에서 민원이나 용량의 제한성이 거의 없고 거대한 에너지 잠재량을 가지고 있어 육상풍력에 비하여 절대적으로 유리하다고 할 수 있다(Kim 등, 2011).

앞서 언급한 해상풍력의 필요성과 장점에도 불구하고 발전단가에 있어서 아직까지는 육상풍력의 1.5~2배(160~220원/kWh, 유럽자료 기준)로서 기존 화석연료 발전소의 전력원에 비해 높다는 점이다(Kim 등, 2011). 해상풍력의 활성화를

위해서 경제적인 측면을 바라보면, 초기 투자비 중 제반 해상작업은 전체 초기 비용의 55%를 차지하며, 그 중에서 풍력 발전기 설치작업은 11%에 해당한다(Fingersh 등, 2006).

해상풍력발전기는 일반적으로 블레이드, 타워, 나셀, 허브로 구성된다. 설치에는 그림 1에서 보는 바와 같이 풍력발전기를 육상에서 부분적으로 제작한 후 해상에서 조립하는 방법과, 그림 2에서 보는 바와 같이 육상에서 발전기 전체를 조립한 후 한 번에 설치하는 방법이 있다(Kaiser 등, 2010). 풍력발전기를 한 번에 설치하는 방법은 해상에서의 작업시간을 단축하여 비용감소의 효과가 있으며, 그림 2와 같이 5MW급 시범 프로젝트에서 시도된 바가 있다(<http://www.scaldis-smc.com/beatricewindfarm.html>).

해상풍력발전기의 인양작업을 할 때, 해상에서 작업을 수행하기 때문에 해상상태에 따라 해상 크레인의 안정성 확보가 매우 중요하다. 이러한 공정을 계획하는 엔지니어는 해상 크레인으로 인양하는 해상풍력발전기의 동적거동을 예측하고, 해상풍력발전기와 해상 크레인 사이에 연결된 wire rope에 작용하는 장력과 풍력발전기의 연결 부분에 작용하는 동적하중을 사전에 계산해야 한다.

이 때, 다음과 같은 사항을 고려해야 한다. 우선 해상 크레인과 해상풍력발전기는 wire rope에 의해 서로 힘을 주고받기 때문에, 서로의 운동이 각각에게 영향을 미치게 된다. 또한 해상풍력발전기는 하나의 물체가 아닌 여러 개의 물

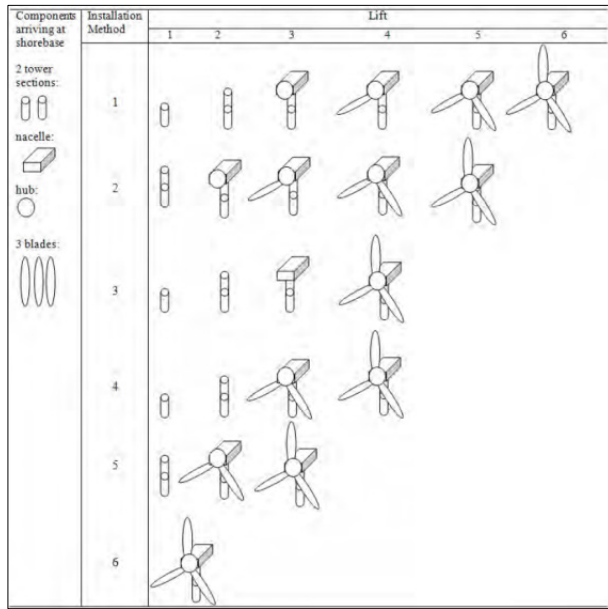


그림 1 Diagrammatic representation of installation methods



그림 2 The Rambiz installing a fully assembled turbine at Beatrice (<http://www.scaldis-smc.com/beatricewindfarm.html>)

체(블레이드, 허브, 낫셀, 그리고 타워)로 이루어져 있으며, 각각의 물체는 회전 관절로 연결되어 있는 다물체계 시스템이다. 즉, 각각의 물체는 관절로 연결된 지점에서 서로의 운동을 구속하고자 하는 힘을 주고 받는다. 이 힘을 구속력이라고 하며, 이 구속력을 계산해야 다물체계 시스템의 운동을 기술할 수 있다. 이와 같이 구속력을 계산하여 다물체계 시스템의 속도, 가속도, 변위를 구하는 학문을 다물체계 동역학이라고 하며, 이 다물체계 동역학 이론을 적용하여 해상 크레인을 이용한 해상풍력발전기의 설치 시뮬레이션 방법에 대하여 알아보자.

## 2. 다물체계(multi-body system) 동역학 기반의 해상풍력발전기 인양작업 모델링

### 2.1 모델링 개요 및 시뮬레이션 수행방법

본 고에서 소개하는 시뮬레이션의 구성도는 그림 3과 같다. 해상 크레인 및 해상풍력발전기의 형상정보 및 주요 치수가 결정되면, 각 물체의 6자유도 연성운동을 고려한 14자유도 연성 운동방정식에 대입한다. 이 운동 방정식은 여러 가지 방법으로 유도될 수 있는데, 이에 대한 상세한 설명은 다음 절을 참고한다. 이 운동방정식은 다물체계 동역학을 고려하여 모든 비선형 성분을 고려하고 있다. 그리고 유체 정역학 힘, 유체 동역학 힘, 로프에 의한 힘, 와이어 로프에 의한 힘이 외력으로 계산되어 운동방정식에 대입된다. 다물체계 운동방정식을 풀어서 가속도를 구하고, 4th order Runge-Kutta 방법을 사용하여 각 물체의 속도, 위치를 계산한 후, 이를 가시화한다. 시뮬레이션 커널에서는 단위 시간만큼 시간을 진행시켜 다시 운동방정식 및 외력에 시간, 위치, 속도를 전달하는 역할을 수행한다.

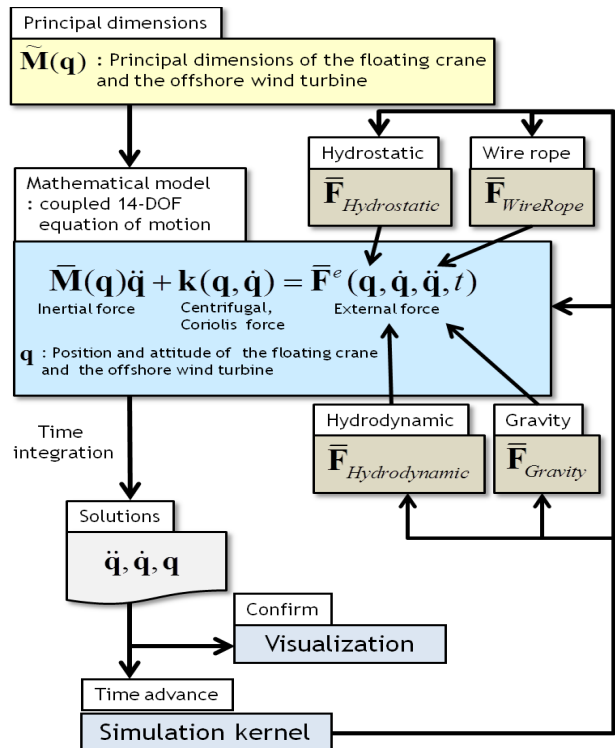


그림 3 Configuration of multi-body system dynamic response simulation for the floating cranes and the offshore wind turbine

## 2.2 다물체계 운동방정식의 구성

다물체 운동방정식 구성방법은 augmented formulation, embedding formulation, recursive formulation으로 구분할 수 있다. Augmented formulation은 다물체의 운동방정식과 구속 조건식을 동시에 푸는 방법으로서 구속력을 직접 계산할 수 있다는 장점이 있지만, 물체의 개수 및 구속 조건에 따라 운동방정식의 크기가 커지는 한계점이 있다. Embedding formulation은 구속 조건식을 다물체 운동방정식에 대입하여 소거함으로써 운동방정식의 크기를 줄여서 푸는 방법으로서, 운동방정식의 계산 시간을 단축시킬 수 있지만 구속력을 별도로 계산해야 한다는 한계점이 있다. Recursive formulation은 물체의 연결 관계에 따라 운동방정식을 재귀적으로(recursively) 구성하여 푸는 방법으로서 물체의 개수와 관계없이 운동방정식의 크기를 6자유도로 구성할 수 있다는 장점이 있지만 구속력은 별도로 계산해야 한다.

## 2.3 절대 좌표계 및 해상 크레인과 대형 중량물의 일반화 좌표

위에서 설명한 바와 같이 다물체계 시스템은 여러 개의 강체로 이루어져 있다. 이와 같은 여러 강체의 위치 및 자세를 정의하기 위해서는 공간상에 고정되어 기준이 되는 관성 좌표계(inertial reference frame, absolute coordinates) 및 각각의 강체에 고정되어 강체의 위치 및 자세를 대표할 수 있는 물체 고정 좌표계(body-fixed frame, generalized coordinates)가 필요하다. 그림 4는 해상풍력발전기의 이송 및 설치 시뮬레이션의 수행을 위해 정의한 관성 좌표계와 고정 좌표계를 보

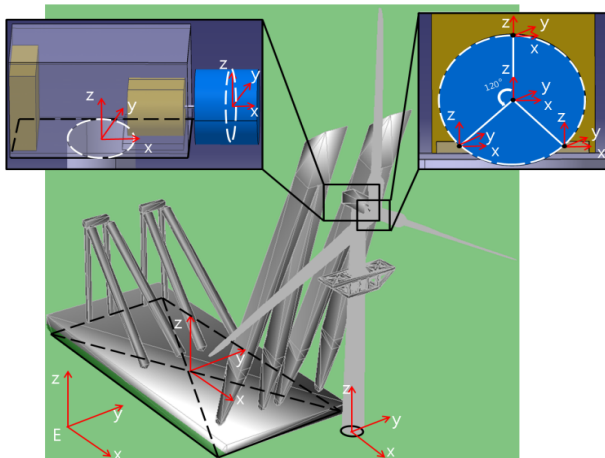


그림 4 The absolute coordinate and the generalized coordinates of the floating crane and the offshore wind turbine

여주고 있다.

## 2.3 해상 크레인 및 해상풍력발전기 구성과 모델링

해상풍력발전기의 이송을 위하여 선택한 해상 크레인은 그림 5와 같은 3600ton의 중량물을 리프팅할 수 있는 해상 크레인 ‘DAEWOO 3600’호이다. 길이는 110m, 폭은 46m, 높이는 7.5m이다. 각각의 부재는 모두 강체(rigid body)로 가정하였다.

해상풍력발전기는 현재 널리 쓰이고 있는 5MW급 참조 모델(reference model)을 대상으로 하였으며, 상세 제원은 표 1과 같다.

그림 6a는 해상풍력발전기와 리프팅을 위한 가구조물의

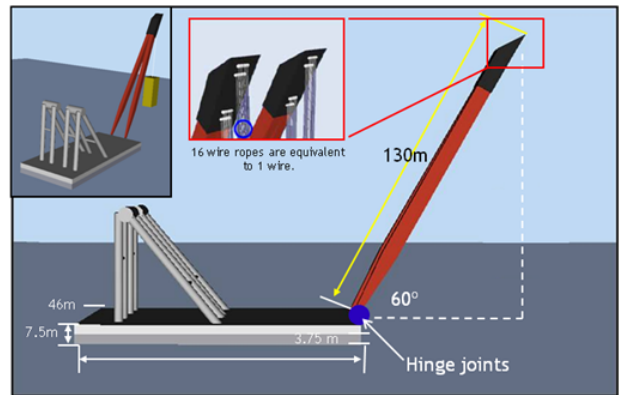


그림 5 Geometric model of the floating crane “DAEWOO 3600”

표 1 Gross properties of the NREL 5-MW reference model and shape model

		5MW-NREL	Shape Model
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[z축]	61.5m	
Mass	Rotor(Blade*3+Hub)	110000kg	103219kg
	Blade	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		697,460kg	697,461kg

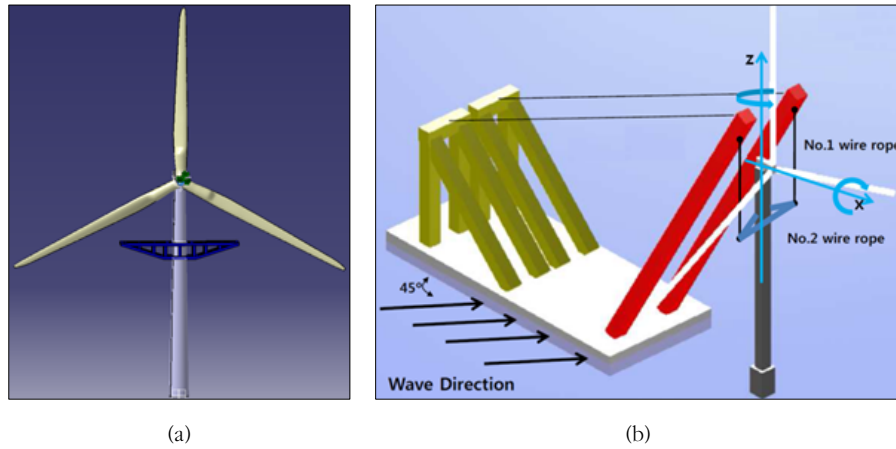


그림 6 (a) Configuration of the offshore wind turbine and a truss structure; (b) Configuration of the offshore wind turbine lifting by the floating crane

형상모델을 나타낸 것이고, 그림 6b는 시뮬레이션을 위한 해상 크레인 및 해상풍력발전기의 회전 자유도를 나타낸 것이다.

### 2.5 외력

그림 3에서와 같이 유체정역학 힘, 유체동역학 힘, 와이어 로프의 장력, 그리고 중력을 고려할 수 있다.

먼저 유체 정역학적 힘은 파고와 해상 크레인의 자세를 고려하여 침수 표면에 수직하게 작용하는 유체 입자의 압력 성분을 모두 적분하는 **pressure integration technique**을 사용하면 그림 7과 같이 매 단위 시간마다 비선형 유체 정역학 힘을 계산할 수 있다. 이 때, 일반적으로 **divergence theorem**을

사용하여 유체 정역학 힘 계산식을 식 (1)과 같이 침수 부피에 대한 식으로 나타낸다.

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

유체 동역학 힘은 방사력(radiation force)과 파강제력(wave exciting force)으로 나누어 살펴볼 수 있고, 이를 식으로 표현하면 식 (2)와 같다.

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

유체 동역학 힘은 3D Rankine panel method와 같이 직접 시간 영역에서 계산하는 방법도 있고, 주파수 영역에서 먼저 해석한 뒤 Cummins 식을 이용하여 시간 영역으로 변환하는 방법도 있다. 식 (3)은 Cummins 식을 이용하여 계산한 유체력 중 방사력 계산 방법을 보여주고 있다.

$$F_{R,i} = -A_{ij} \ddot{y}_j - \int_0^\infty B_{ij}(\tau) \cdot \dot{y}_j(t-\tau) d\tau \quad (i, j = 1, \dots, 6)$$

$$\left( \begin{aligned} B_{ij}(\tau) &= \frac{2}{\pi} \int_0^\infty b_{ij}(\omega) \cos(\omega\tau) d\omega \\ A_{ij} &= a_{ij}(\omega) + \frac{1}{\omega} \int_0^\infty B_{ij}(\tau) \sin(\omega\tau) d\tau \end{aligned} \right) \quad (3)$$

여기서,  $a_{ij}(\omega)$ 는 부가 질량,  $b_{ij}(\omega)$ 는 감쇠 계수,  $B_{ij}(\omega)$ 는 retardation 함수이다. 유체 동역학 힘 중 파 강제력 (wave excitation force)은 주파수 영역에서 계산된 RAO (Response Amplitude Operator)로부터 파고를 고려하여 계산한다.

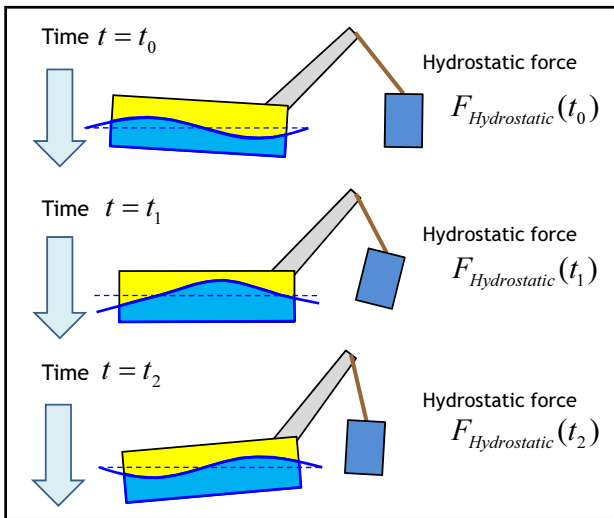


그림 7 Hydrostatic force considering the attitude of the floating crane

### 3. 해상 크레인을 이용한 해상풍력발전기 인양 작업 시뮬레이션

그림 8은 해상 크레인을 이용한 해상풍력발전기 인양작업 시뮬레이션을 위하여 모델링한 결과이다. 이와 같이 모델링을 하여 해상 크레인을 이용한 해상풍력발전기 인양작업 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 다음과 같은 순서대로 진행되었으며, 그림 9는 시뮬레이션 과정을 가시화

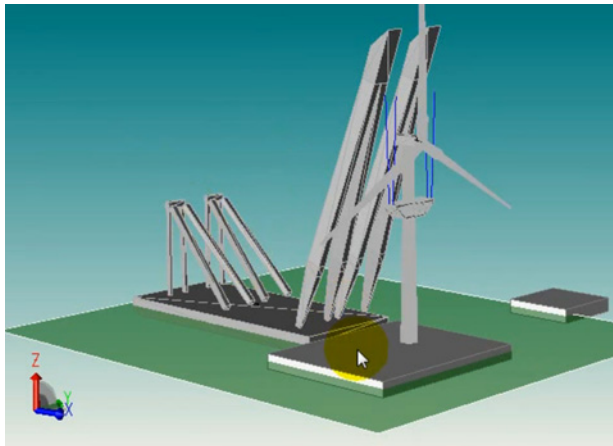


그림 8 The simulation model of the floating cranes and the offshore wind turbine

한 것이다.

- (1) 해상풍력발전기가 전부 조립되어 육상이나 바지에 놓여 있음.
- (2) 해상풍력발전기 **hoisting-up**
- (3) 해상 크레인이 측면방향으로 이동하며 해상풍력발전기를 운반
- (4) 해상풍력발전기 **hoisting-down**
- (5) 해상풍력발전기의 인양작업이 완료되어 해상에 설치됨

그림 10은 시뮬레이션 결과 계산된 wire rope에 걸리는 동적 하중을 도시하였다. 정적하중보다 동적하중은 약 15%~20% 가량 크게 나오는 것을 알 수 있다.

앞서 밝힌 바와 같이, 해상풍력발전기는 하나의 강체가 아닌 여러 개의 강체 (3개의 블레이드, 허브, 낫셀, 그리고 타워)로 이루어져 있기 때문에, 그들 사이에 구속력을 주고 받게 된다. 구속력을 계산한다는 것은 타워와 낫셀 사이 또는 낫셀과 허브 사이를 연결하는 관절 부분에 작용하는 동적하중을 알 수 있다는 것을 뜻한다. 그림 11a는 tower top에 작용하는 구속력을 그림으로 나타낸 것이며, 그림 11b는 tower top에 걸리는 구속력을 그래프로 나타낸 것이다. 구속력 역시 정적하중보다 동적하중은 약 15%~20% 가량 크게 나오는 것을 확인하였다.

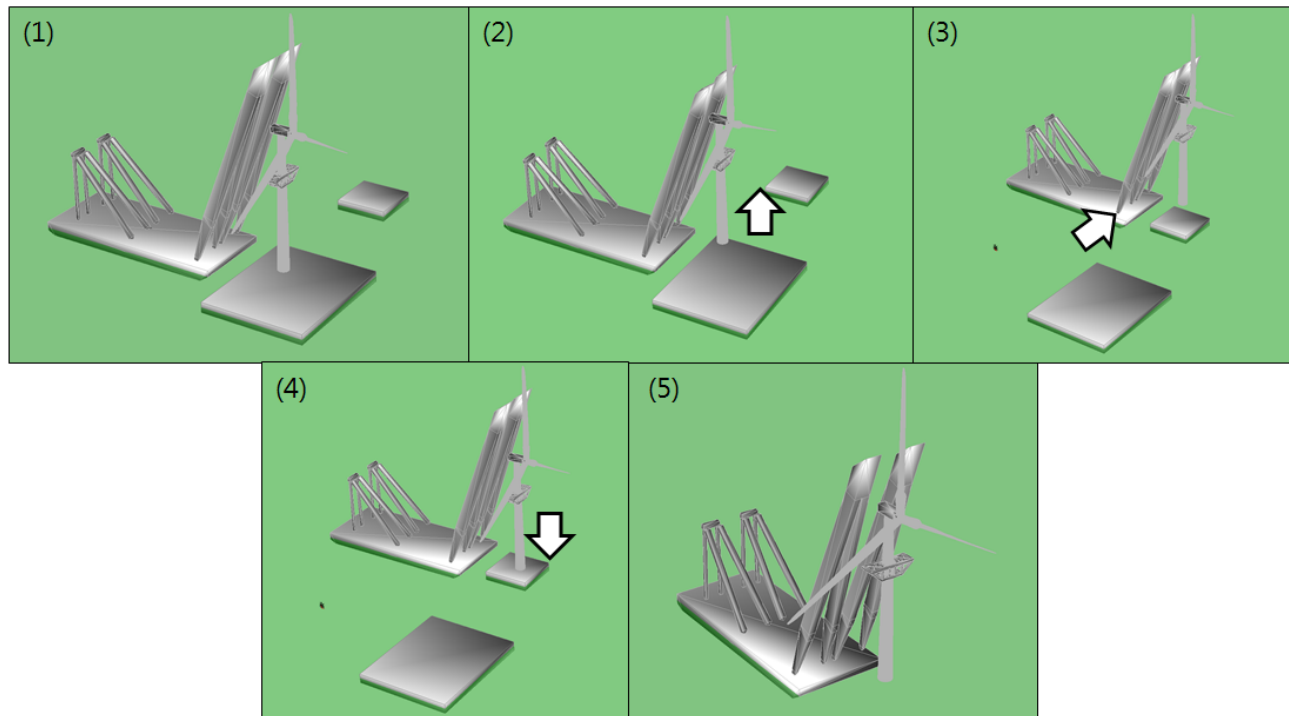


그림 9 The result of the simulation of an offshore wind turbine suspended by a floating crane



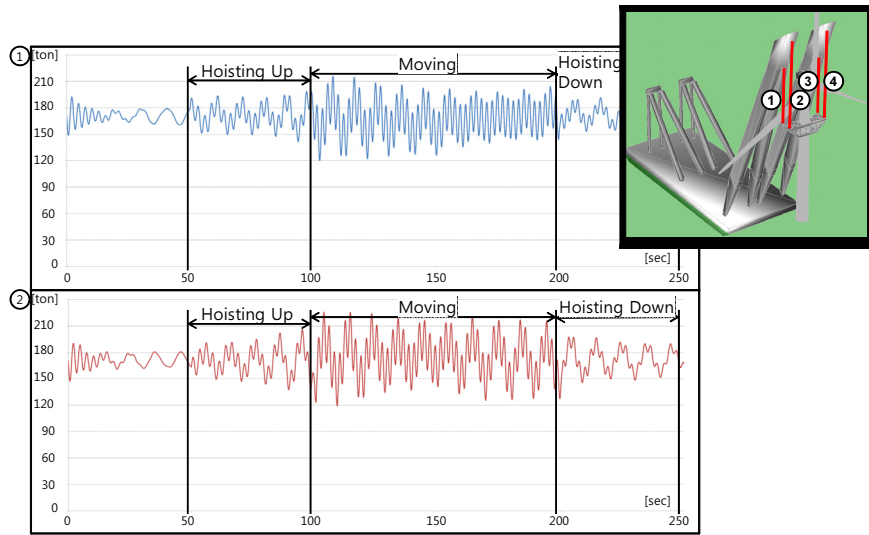


그림 10 The calculated tension of the wire rope between the offshore wind turbine and the floating crane

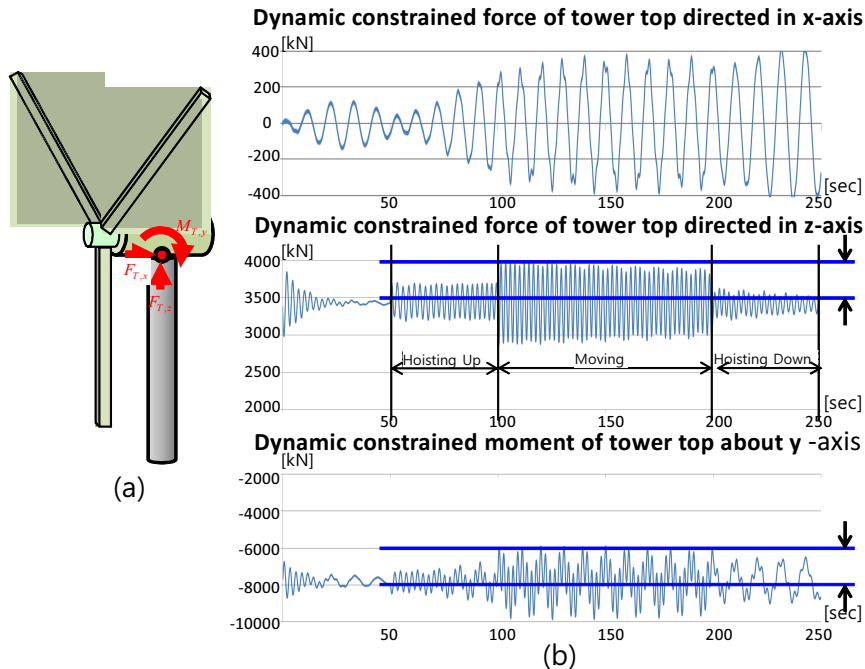


그림 11 (a) Dynamic constraint force acting on the tower top; (b) Calculation results of dynamic constraint force of the tower top

#### 4. 맺음말

본 고에서는 해상 크레인을 이용한 해상풍력발전기의 이송 및 설치 시뮬레이션에 대해 간략히 소개하였다. 해상풍력발전기의 동적인 특성을 고려하여 시뮬레이션을 수행하는 경우에는 정적인 하중과 더불어 동적인 하중을 고려할 수 있으므로, 보다 정확하게 하중을 계산할 수 있고, 이를 적용하여

더 안전한 기구부 설계를 가능하게 함을 알 수 있다. 이는 비단 해상풍력발전기의 설치 시뮬레이션 뿐 아니라 다른 해양 장비의 설치 시뮬레이션에도 충분히 적용 가능하며, 이를 통해 보다 정확한 설계가 가능하리라 예상된다.

[담당 : 노명일 편집위원]