

## 타워와 블레이드의 탄성효과를 고려한 부유식 해상풍력발전기의 동적거동해석

정혜영\* · 손정현\*\*†

\* 부경대학교 대학원 메카트로닉스공학과, \*\* 부경대학교 기계자동차공학과

### Dynamic Behavior Analysis of Floating Offshore Wind Turbine Including Flexible Effects of Tower and Blade

Hye Young Jung\* and Jeong Hyun Sohn\*\*†

\* Graduate school of Mechatronics Engineering, Pukyong Nat'l Univ.,

\*\* Dept. of Mechanical & Automotive Engineering, Pukyong Nat'l Univ.

(Received February 20, 2012 ; Revised June 13, 2012 ; Accepted June 13, 2012)

**Key Words:** Offshore Wind Turbine(해상풍력발전기), Wind Load(풍하중), Wave Load(파랑하중), Flexible Effects(탄성효과)

**초록:** 부유식 해상풍력발전기의 시뮬레이션을 위해서 본 연구에서는 2MW 육상 풍력발전기에 부유구조물인 Tension Leg Platform(TLP) 구조를 추가하였다. 기상청 관측데이터와 해수면으로부터의 높이에 대해 풍속을 정의하는 지수법칙을 이용하여 풍하중을 산출하고 블레이드와 타워에 일정한 높이간격으로 적용하였다. 상대모리스 방정식을 이용하여 파랑하중을 모델링하였다. 블레이드의 회전속도를 정격속도인 18rpm 으로 고려하고, 풍하중과 파랑하중 작용 시 2MW 의 부유식 해상풍력기의 동적거동 해석을 수행하였다. 파랑하중에 대한 해상풍력기의 공진특성을 조사하기 위해 타워와 블레이드의 탄성체 모델을 구성하여 해상풍력기의 고유진동수를 계산하였다. 타워와 블레이드의 탄성효과가 해상풍력기의 거동에 미치는 영향을 분석하기 위해 타워만 탄성체로 구성된 탄성타워모델과 타워와 블레이드가 탄성체로 고려된 탄성타워 블레이드모델을 각각 강체 모델과 비교하였다.

**Abstract:** To establish a floating offshore wind turbine simulation model, a tension leg platform is added to an onshore wind turbine. The wind load is calculated by using meteorological administration data and a power law that defines the wind velocity according to the height from the sea surface. The wind load is applied to the blade and wind tower at a regular distance. The relative Morison equation is employed to generate the wave load. The rated rotor speed (18 rpm) is applied to the hub as a motion. The dynamic behavior of a 2-MW floating offshore wind turbine subjected to the wave excitation and wind load is analyzed. The flexible effects of the wind tower and the blade are analyzed. The flexible model of the wind tower and blade is established to examine the natural frequency of the TLP-type offshore wind turbine. To study the effect of the flexible tower and blade on the floating offshore wind turbine, we modeled the flexible tower model and flexible tower-blade model and compared it with a rigid model.

### 1. 서론

해상풍력발전은 육상에서와 달리 고 풍력에너지 밀도로서 바람의 분포가 균일하고 대형부지확보가 용이하여 초대형 풍력 발전 시스템 건설이 가능하며 소음, 그림자, 전파방해 등의 거주환경 문제 등

제한조건이 발생하지 않는 장점을 가지고 있다. 해상풍력발전은 해저 지반의 기초 위에 풍력발전기를 설치하여 해상에서 부는 안정된 바람을 통해 생산된 전력을 해저케이블을 통해 육상의 변전소를 통해 계통에 연계하거나 수요자에 직접 공급한다. 따라서 초기 투자 비용이 많이 들고 정비에 있어서도 어려움이 예상된다.

최근에는 심해에 해상풍력발전 단지를 조성하기 위해 해상풍력발전기에 대한 연구 및 조사가 활발

† Corresponding Author, [jhsohn@pknu.ac.kr](mailto:jhsohn@pknu.ac.kr)

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

히 이루어지고 있다. 해상풍력기 설치의 기초 개념으로 콘크리트(concrete caisson), 모노파일(monopile), 자켓(jacket), 부유식(floating type)이 제시되었다. 60~900m의 깊은 수심에서는 부유식 해상풍력기가 다른 기초들보다 경제적이라고 보고되고 있다.<sup>(1,2)</sup>

S. Butterfield<sup>(2)</sup>는 해상풍력발전기의 공학적인 접근방법과 해석을 수행하였다. 박태현 등<sup>(3)</sup>은 시간영역에서 부유식 기초중 하나인 TLP(tension leg platform)의 거동을 해석하였다. I. Dyer<sup>(4)</sup>는 주파수영역에서 해양 환경 하중을 받는 해상풍력 발전시스템을 해석하였다.

대형 국책사업으로 5MW 해상풍력발전 개발 연구가 진행 중에 있으나 콘크리트(concrete caisson), 자켓(jacket)등 고정식 해상풍력기를 대상으로 하고 있다. 설치비용을 줄이면서 효과적으로 해상의 풍력 에너지를 이용하기 위해서는 부유식 해상풍력기 개발에 힘써야하며 특히, 지지기반인 부유체의 안정화를 꾀할 수 있는 플랫폼 개발이 무엇보다 중요하다.

TLP는 악천후 속에서도 해양구조물이 쉽게 그 자세와 기능을 유지할 수 있도록 특별히 고안된 해양 플랫폼(platform)으로 본 연구에서 해상풍력기의 자세 안정성을 위해 고려되었다. TLP 타입의 부유구조체는 파도와 함께 연속적으로 움직이고 풍력기는 회전체를 가지고 있다. 풍력타워와 블레이드는 비용감소를 위해 높이에 비해 매우 얇게 설계된다. 그러므로 TLP 타입의 부유식 해상풍력기의 고유진동수를 조사하고, 타워와 블레이드의 탄성효과를 분석할 필요가 있다. 풍력타워와 블레이드 각각의 고유진동수를 해석한 사례는 있으나, 블레이드 통과주파수와 파랑하중에 따른 부유식풍력기의 거동을 분석한 사례는 알려지지 않았다. 풍력타워와 블레이드의 탄성효과가 부유식 풍력기의 거동에 미치는 영향도 분석되지 않았다.

본 연구에서는 국내 해상 조건에 알맞은 부유식 풍력발전기를 개발하기 위한 선행연구로써, 국내 해상환경조건에서 풍력타워의 탄성변형과 블레이드의 탄성변형을 고려한 부유식 풍력발전기의 동적거동해석을 수행하였다. 해상풍력기를 다물체시스템으로 모델링하였고, 블레이드와 타워를 탄성체로 모델링하였으며, 풍하중과 파랑하중을 모델링하여 해석을 수행하였다.

## 2. 부유식 해상풍력기 모델링

### 2.1 부유식 해상풍력기의 동역학 모델링

본 연구에서는 2MW 육상풍력기의 풍력타워 아래에 TLP의 부유체가 고정되도록 모델링하여 해

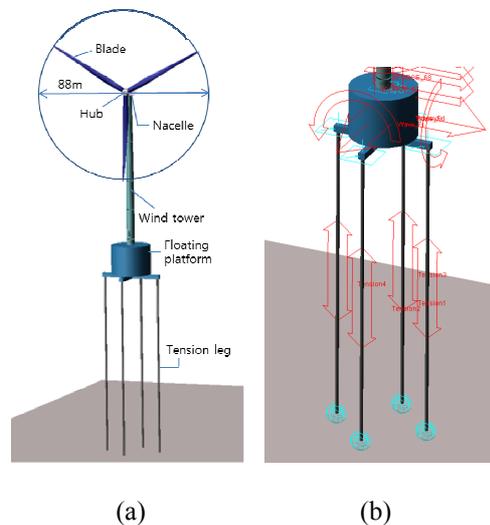
상풍력기로 고려하였다. 2MW 육상풍력기는 크게 풍력타워, 너셀, 허브 그리고 세 개의 블레이드로 구성된다. 2MW 풍력발전기의 스펙을 Table 1에 정리하였다.

Fig. 1은 ADAMS를 이용하여 강체 모델링을 수행한 것이다. Fig. 1(a)는 해상풍력기 부품들의 명칭을 나타내고, Fig. 1(b)의 아래쪽 네 화살표들은 TLP가 네 개의 힘 요소들로 모델링된 것을 나타내며, 위쪽의 화살표는 유체력을 나타낸다.

풍력타워와 허브는 너셀과 회전조인트로 연결된다. 허브는 기어박스과 회전조인트로 연결되고, 기어박스는 2단의 유성기어열과 피니언기어로 연결된다. 각 기어열은 회전조인트로 연결하였다. 기어박스와 발전기는 너셀과 두 개의 부싱으로 연결되어 있다. TLP 부유체는 6 자유도를 가지며, 풍력타

**Table 1** Specification of 2MW offshore wind turbine

Rotor orientation	Upwind
Hub height	78 m
Blade diameter	88 m
Rotor speed	18 rpm
Main-shaft tilt angle	6 degree
Blade mass	10 ton
Hub mass	5 ton
Nacelle mass	63 ton
Tower mass	141 ton



**Fig. 1** 2MW floating offshore wind turbine modeling

위와 너셀이 회전 1 자유도를 가지며, 너셀은 6 자유도를 가진다.

타워, 블레이드, 플랫폼을 다물체 시스템으로 모델링하면, 향후 다양한 하중조건하에서의 거동 시뮬레이션을 통해, 거동특성, 조인트 반력 등을 분석하여 부품 설계 및 내구성능 해석에 유용하게 활용할 수 있다.

2.2 타워와 블레이드의 탄성체 모델링

블레이드와 타워의 유한요소를 생성하여 진동모드를 뽑아내기 위해, MSC/PATRAN 을 이용하였다. 풍력타워의 유한요소는 20 개의 파트와 5639 개의 셸요소(shell element)로 모델링되었고, 블레이드는 8 개의 파트와 6336 개의 셸요소를 이용하여 모델링하였다. 풍력타워와 블레이드는 모두 두께가 길이에 비해 현저히 얇으므로 면체(surface body)로 고려하여 모델링하였다. 50 개의 진동모드 중에 1~3 차까지의 굽힘모드를 탄성체 모델링에 진동모드로 사용하였다. 풍력은 각각의 part 의 중앙 노드점에 가하였다. Fig. 2 는 풍력타워와 블레이드의 탄성체 모델링을 나타내고, Fig. 3 은 풍력타워의 임의의 5 개 파트와 풍력이 가해진 노드를 나타낸것이다.

3. 하중 모델링

3.1 풍하중 모델링

해수면으로부터 높이에 따른 풍속을 계산하는 방법으로는 로그법칙(logarithmic law)과 지수법칙(power law)이 있고 지수법칙이 주로 이용되며(4) 본 연구에서도 풍하중을 모델링하기 위해 그 법칙을 적용하였다. Fig. 4 에서 실선은 로그법칙을, 점선은 지수법칙을 각각 의미한다. 식 (1)은 지수법칙을 사용하여 높이에 따른 풍속을 계산하는 식이다. 여기서  $U_r$  은 해수면으로부터 표준고도에 있을 때의 풍속을 의미하고 기상청에서 관측된 데이터를 기준으로 하였다. 식 (1)의 멱지수  $1/n$  은 Fig. 4 로부터 풍속 10m/s 에는 1/10, 50m/s 에는 1/7 임을 알 수 있다. Fig. 5 는 기상청에서 측정한 제주도 인근해안의 풍속으로 7.4m/s 에서 10m/s 에 이르는 변동풍속을 나타낸다. 풍하중은 식 (2)와 같이 계산될 수 있으며,  $\rho_a$  는 공기 밀도( $1.2kg/m^3$ ),  $C_D$  는항력계수,  $A$  는 면적,  $U$  는 식 (1)에서 계산된풍속을 의미한다.

$$U(z) = U_r (Z / Z_r)^{1/n} \tag{1}$$

$$F_w(t) = \frac{1}{2} \rho_a C_D A U^2(t) \tag{2}$$

풍하중은 풍속에 따라 달라지며, 본 연구에서는 타워를 20 개의 파트로 나누어 각 파트의 해수면으로부터의 높이에 따라 파트 중심에 풍하중을 적용하였다. 또한, 블레이드는 8 개의 파트로 나누었

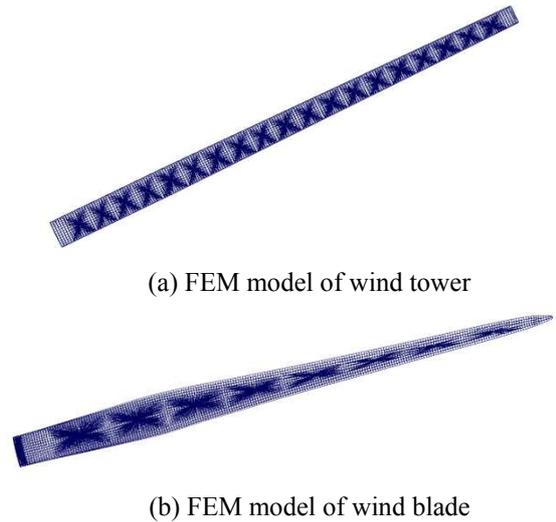


Fig. 2 Flexible modeling

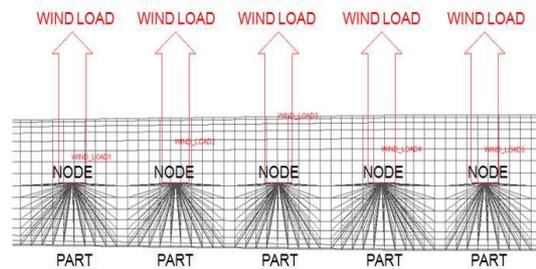


Fig. 3 Five parts and nodes of flexible wind tower

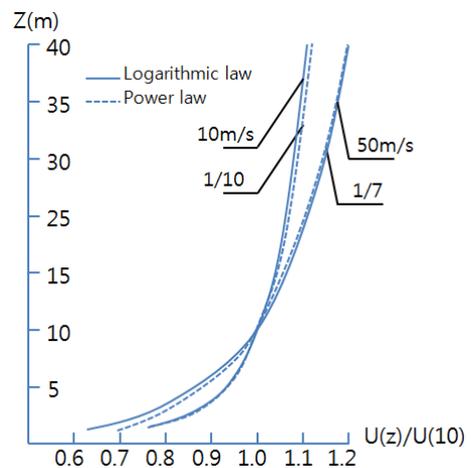


Fig. 4 Offshore wind velocity profile by power law and logarithmic law

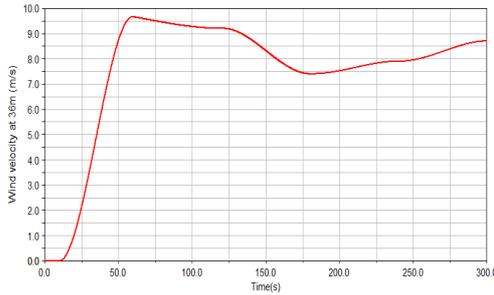


Fig. 5 Fluctuating wind velocity at Jeju island

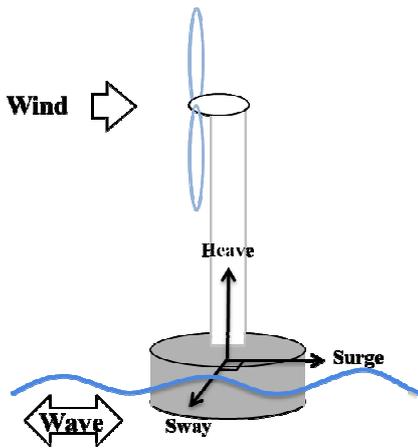


Fig. 6 Wave load and wind load direction

으며, 블레이드의 3 차원 기하학적 형상을 고려하지 않고 평판으로 가정하여 풍하중을 타워와 비슷한 방법으로 각각의 파트중심마다 적용하였다. 동적거동 해석에서는 허브에 토크를 가해 블레이드의 회전운동을 고려하였다. 블레이드의 항력계수는 참고논문(4)을 따라 2 로 가정하였으며, 타워의 항력계수는 1.8 을 적용하였다. Fig. 6 에서 surge 방향은 풍하중과 파랑하중이 작용하는 방향을 의미한다.

3.2 파랑 하중 모델링

본 연구에서는 파랑하중을 모델링하기 위하여 수립자속도식을 이용하였으며, 심해조건에서 surge 방향의 수립자속도(u)는 식 (3)와 같이 부유체의 높이(z)와 시간(t)의 함수로 표현된다.(5) 여기서 h 는 수심을 의미하며, ω 는 파랑하중 각속도를 나타내며, x 는 진행방향 변위를 의미하고, k 는 파수를 의미하며 L 은 파장 즉, 파의 길이를 나타낸다. Fig. 7 은 파고 H 의 사인파가 적용된 TLP 를 표시한 것이다.

식 (4)는 상대모리슨방정식(relative Morison equation)을 나타내며, 일반적으로 파랑하중의 시간이력을 표현한다. 부유식 풍력발전을 위한 플랫폼은 풍하중

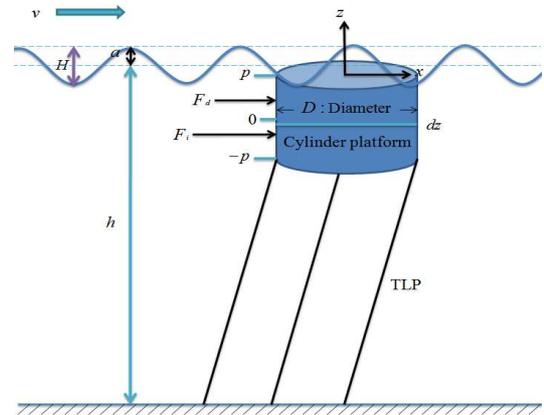


Fig. 7 TLP under sine wave force

과 파랑하중에 따라 수평방향으로 변위 및 속도가 발생하게 되므로 본 연구에서는 식 (4)와 같은 상대운동 모리슨 방정식을 사용하여 파랑하중을 모델링하였다. 모리슨 방정식은 파력을 나타내는 함수로서 항력(drag force)과 관성력(inertia force)의 합으로 나타낸다. 식 (4)의 첫번째 항은 항력을 나타내고, 두번째 항은 관성력을 의미한다. 여기서  $C_d$  는 항력계수이며,  $C_m$  은 관성력 계수이다. 해수 밀도인  $\rho$  는  $1023kg/m^3$  이다. 본 연구에서는 플랫폼을 원형실린더로 고려하였고, 실린더의 지름을  $D$  로 표시하였다. 식 (4)에서  $\dot{x}$  과  $\ddot{x}$  는 부유체의 surge 방향 속도와 가속도를 의미한다. 식 (4)의 첫번째 항과 두번째 항을 유체력이 작용하는 부유체의 높이(2P)에 대해 적분하여 유도된 식 (5)와 (6)을 이용하여 관성력과 항력을 계산하고 부유체의 중심에 적용하였다.

$$u(x,t) = \frac{a\omega \cosh(k(z+h))}{\sinh(kh)} \cos(kx - \omega t) \tag{3}$$

$$f_x = f_{dx} + f_{ix} = C_d \frac{1}{2} \rho D (u - \dot{x}) |u - \dot{x}| + C_m \rho \frac{\pi D^2}{4} (\ddot{u} - \ddot{x}) \tag{4}$$

Inertia force :

$$\int_{-p}^p f_{ix} = \int_{-p}^p C_m \rho \frac{\pi D^2}{4} (\ddot{u} - \ddot{x}) dz = \frac{1}{2} C_m \rho \pi r^2 \left( -\frac{(1 - e^{-kp}) H \omega^2 \sin(kx - \omega t)}{k} - 2p\ddot{x} \right) \tag{5}$$

Drag force :

$$\int_{-p}^p f_{dx} = \int_{-p}^p C_d \frac{1}{2} \rho D (u - \dot{x}) |u - \dot{x}| dz = (C_d e^{-2kp} \rho r ((-1 + e^{2kp}) H^2 \omega^2 \cos(\omega t - kx)^2 - 8e^{kp} (-1 + e^{kp}) H \omega \cos(\omega t - kx) \dot{x} + 8e^{2kp} k p (\dot{x})^2)) / 8k \tag{6}$$

### 4. 동적 거동 해석

본 연구에서는 3 개의 해석모델(강체모델, 탄성 타워모델, 탄성타워블레이드 모델)을 고려하였다. 탄성 타워모델과 탄성타워블레이드 모델의 탄성풍력타워는 5639 개의 같은 엘리먼트수를 가진다. 풍속은 허브높이에서 8.5m/s 를 주었고, 파랑하중은 파고 2.0m, 파주기 5.0sec 를 고려하였다. 블레이드의 회전속도는 정격속도인 18rpm 이 되도록 하였다. Fig. 8 은 풍하중이 가해지지 않고 부유식 플랫폼을 고정할 경우 풍력타워의 surge 방향 응답을 나타낸 것이다. 본 연구에서 사용한 해상풍력기의 1 차 고유진동수는 0.7Hz 임을 알 수 있다. 이는 참고논문(6)의 결과와도 잘 부합됨을 볼 수 있다.

Fig. 9 는 TLP 에 걸리는 장력을 나타내었고 파랑하중이 부유체에 surge 방향으로 작용하고 풍하중이 풍력기 전체에 같은 방향으로 적용될 때 해저면과 부유체 사이의 TLP 장력은 4.3e+06N 과 5.0e+06N 사이에 있다는 것을 알 수 있다.

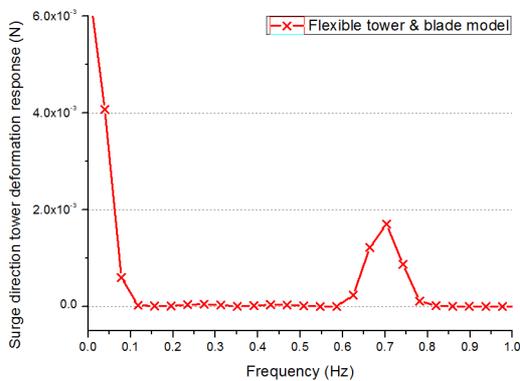


Fig. 8 Surge deformation response of tower without load

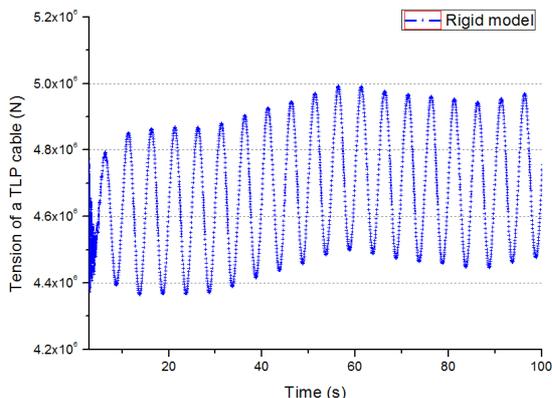


Fig. 9 Tension of a TLP cable

너셀은 풍력타워와 회전조인트로 연결되어 있고, 너셀내의 기어박스는 너셀과 두 개의 부싱으로 연결되어 있다. 따라서 풍력타워가 풍하중과 파랑하중에 따라 움직임이 발생하면, 부싱의 변형이 발생하게 된다. 기어박스를 통해서 발전기로 회전에너지가 전달되므로 기어박스의 동적거동과 안정성은 무엇보다 중요하다. 본 연구에서는 육상 풍력기에 설치된 부싱강성을 사용하여 해상환경에서 시뮬레이션을 수행하였으며, 파랑하중 및 풍하중에 따른 부싱력을 살펴보았다.

Fig. 10, 13 에는 너셀과 기어박스를 연결하는 부싱의 surge 방향과 sway 방향의 부싱력을 나타내고 있다. Fig. 11, 14 는 Fig. 10 과 12 의 결과를 명확히 보여주기 위해 Fig. 10, 13 의 일부를 보여주고 있다. Fig. 12, 15 에는 부싱력의 FFT 결과를 정리하여 나타내었다. Fig. 12 를 보면 0.2Hz 가 나타나는데, 이것은 1/파주기와 같다. Fig. 15 에서 0.9Hz 에서 피크가 있는 것을 볼 수 있으며, 이는 블레이드 통과 주파수(blade pass frequency, BPF)와 일치한다. BPF 는 식 (7)을 이용하여 계산할 수 있다. 식 (7)에서 rpm 은 블레이드의 회전 속도이고 n 은 블레이드 개수를 의미한다.

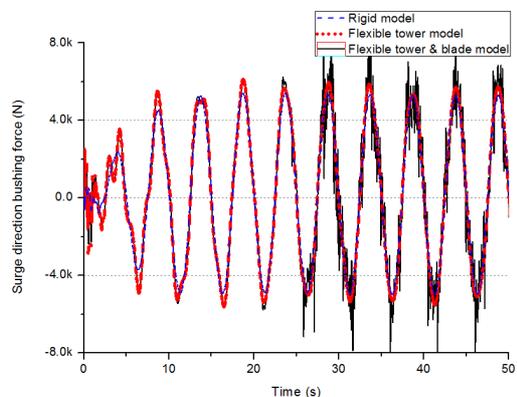


Fig. 10 Comparison of bushing forces in surge direction

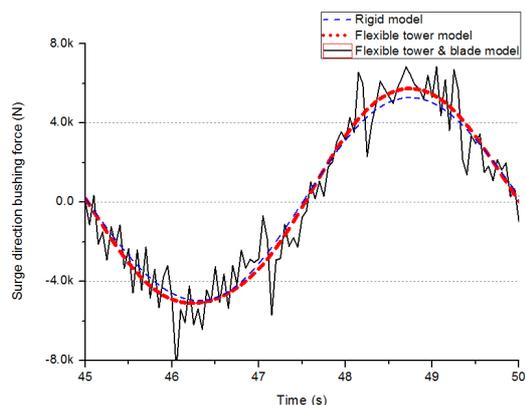


Fig. 11 Comparison of bushing forces in surge direction

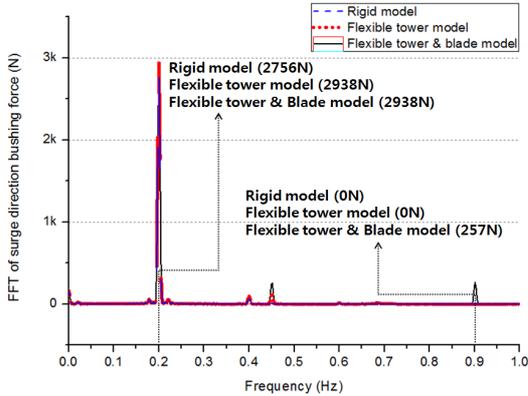


Fig. 12 Comparison of FFT of bushing forces in surge direction

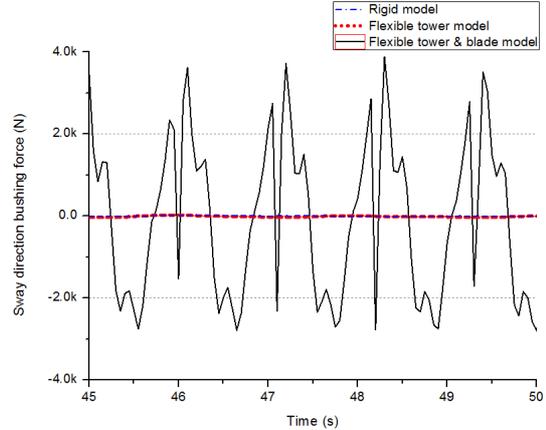


Fig. 14 Comparison of bushing forces in sway direction

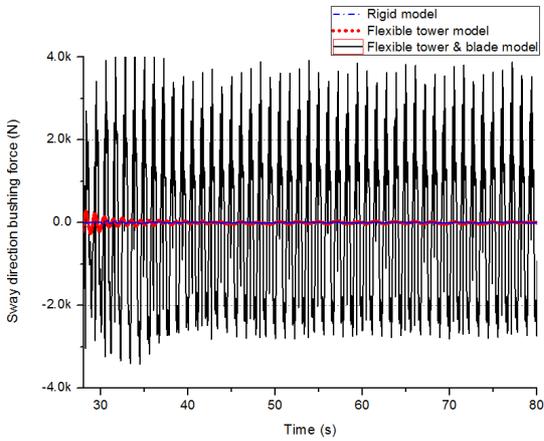


Fig. 13 Comparison of bushing forces in sway direction

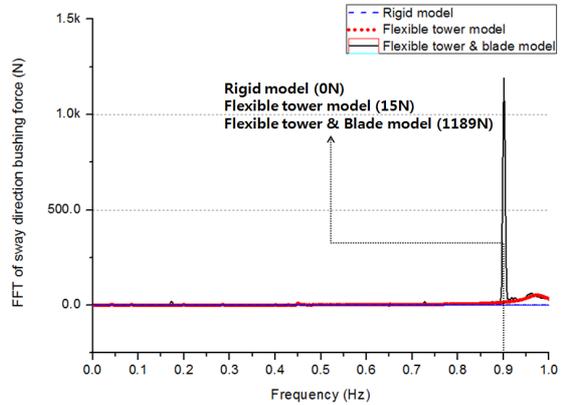


Fig. 15 Comparison of FFT of bushing forces in sway direction

$$BPF = rpm * n / 60 \quad (7)$$

해상풍력기의 설계 단계에서는 블레이드 통과 주파수와 파랑하중의 가진주파수를 모두 고려하여 해상 풍력기의 고유진동수 설계를 수행하여야 한다. Fig. 11 과 Fig. 14 를 보면, 타워만 탄성체로 모델링 하였을 때는 강체와 비슷한 부싱력이 발생하지만 풍력타워와 블레이드 모두 탄성체로 모델링하였을 때는 부싱력이 블레이드 통과주파수에 의해 크게 나타나는 것을 볼 수 있다.

그러므로 설계 단계에서 풍력타워와 블레이드는 탄성체로 고려하여 모델링하고 해석해야 할 것으로 사료된다.

### 5. 결론

본 연구에서는 육상 2MW 풍력기와 TLP 를 이용하여 모델링된 2MW 급 부유식 해상풍력발전기를 대상으로 동적거동을 분석하였다. 풍력타워와

블레이드의 탄성효과를 고려하여 풍력기를 모델링 하였다. 풍력기의 고유진동수는 0.7Hz 였으며, 파랑하중 진동수 범위가 일반적으로 0.07Hz ~ 1.0Hz 사이이고, 모델링된 부유식 풍력기는 주로 파랑하중에 의해 영향을 받으므로 부유식 해상풍력기의 고유진동수가 공진현상을 피하기 위해 1Hz 이상이 나오도록 설계되어야 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, BPF 가 1Hz 이상이 나오도록 블레이드의 회전속도가 결정되어야 함을알았다. 블레이드 및 타워의 탄성효과를 고려하였을 때 스웨이 방향의 부싱력이 크게 나온 것을 확인할 수 있었으며, 설계 단계에서 풍력타워와 블레이드의 탄성효과를 고려한 모델링이 수행되어야 정확한 해석을 할 수 있음을 알 수 있었다.

본 연구 수행 결과, 부유식 해상용 풍력타워는 육상용보다 더 강건하게 설계되어야 함을 알 수 있다. 본 연구에서 개발한 해상 부유식 풍력발전기의 탄성다물체동역학 모델은 향후 부품 설계 및 내구성능 해석 등에 활용될 수 있다.

후 기

이 논문은 2010 학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임(PK-2010-072).

참고문헌

- (1) Musial, W.D., Butterfield, C.P. and Boone, A., 2004, "Feasibility of Floating Platform Systems for Wind Turbines," 23<sup>rd</sup> ASME Wind Energy Symposium Proceedings, Reno, Nevada, January, NREL/CP-500-34874.
- (2) Musial, B. W., Jongman, J. and Sclavounos, P., 2007, "Engineering Challenges for Floating Offshore Wind Turbines," *NREL Conference paper*, USA, Cp-500-38776R.
- (3) Park, T. H. and Cho, J. W., 2002, "A Time Domain Calculation for the TLP(Tension Leg Platform)," In *Proceedings of the Korean Society of Ocean Engineers*, Korea, pp. 256~260.
- (4) Dyer, I., Taylor, R. E., Newman J.N. and Price, W.G., 1990, *Sea Loads on Ships and Offshore Structure*, Cambridge University press, United Kingdom, pp.174~222
- (5) Kim, D.G., "Dynamics of Structures," *Goomibook*, Korea, pp.671~699.
- (6) 2005, *Wind turbine - Part1 : Design Requirements*, International Electrotechnical Commission(IEC) - 61400-1 Ed. 3.
- (7) Sohn, J., Jang, J. and Yoo, W., 2010, "Multibody Modeling and Analysis of Floating Offshore Wind Power System," *Trans. Of the KSME A*, Vol. 34, No. 10, pp. 1350~1352.