

해상 부유식 풍력 타워의 동적거동해석[§]

장진석* · 손정현**†

* 부경대학교 대학원 메카트로닉스공학과, ** 부경대학교 기계자동차공학과

Analysis of Dynamic Behavior of Floating Offshore Wind Turbine System

Jin Seok Jang* and Jeong Hyun Sohn**†

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

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

(Received June 15, 2010 ; Revised October 11, 2010 ; Accepted October 12, 2010)

Key Words: Wind Power System(풍력발전기), Wind Load(풍하중), Wave Load(파랑하중), Platform(플랫폼)

초록: 본 논문에서는 해상 부유식 풍력타워의 동역학 모델링이 제시되고, 다양한 해상환경하중인 풍하중, 파랑하중을 모델링하여 플랫폼의 동적 거동해석을 수행하였다. 풍하중을 모델링하기 위해 풍속은 높이에 따라 변화도록 고려하였고, 파랑하중은 상대운동 모리슨방정식을 이용하여 모델링 하였다. 동적 거동해석을 위해 동역학해석프로그램인 ADAMS 를 이용하였다. 부유식 플랫폼에 많이 쓰이는 tension leg platform 의 네 가지 타입에 대해 동적 거동특성을 비교하였다.

Abstract: In this study, the dynamic modeling of floating offshore wind turbine system is reported and the dynamic behavior of the platform for the offshore wind turbine system is analyzed. The modeling of the wind load for a floating offshore wind turbine tower is based on the vertical profile of wind speed. The relative Morison equation is employed to obtain the wave load. ADAMS is used to carry out the dynamic analysis of the floating system that should withstand waves and the wind load. Computer simulations for four types of tension leg platforms are performed, and the simulation results for the platforms are compared with each other.

1. 서 론

세계 풍력기 발전시장은 덴마크, 독일과 미국 등 풍력발전산업이 발달한 선진국 상위 6 개 업체에 의해 과점화 되어 있다. Vestas(덴마크), GE Wind(미), Enercon(독), Gamaesa(스페인), Siemens(독) 등 상위 6 개 업체가 전체 시장의 80%를 차지하고 있다. 특히, Vestas(덴마크)는 2005 년 기준 전세계 풍력발전설비 시장의 약 33%를 차지하며 풍력발전시스템 시장을 선도하고 있다. 2005 년부터 발효된 교토의정서에 의해 이산화탄소의 의무감축은 이제 현실로 다가오면서, 전 세계는 화석 연료를 대체 할 수 있는 청정에너지에 관심을 크게 기울이고 있다. 그 중에서 풍력 에너지 기술은 바람의

운동에너지를 전기에너지로 변환하는 기술로써 세계 각국은 이미 1980 년대에 대규모의 육상 풍력 발전단지를 조성해 온 바 있으며 국내에서도 실질적인 정부 지원책이 활성화되고 전력 사업 인허가나 계통선 연결 등에 관한 법령이 정비되면 육상 풍력 발전 시스템의 보급은 가속될 것으로 예상되고 있다. 그러나 선진 외국의 풍력 발전 단지 건설 사례와 우리나라 제주 행원, 강원도 대관령의 풍력발전단지 조성계획시의 난점이었던 부지사용과 소음, 시계 및 전파방해 등의 거주환경 및 민원 문제의 사례는 거의 매번 발생하고 있으며 이로 인해 육상 풍력 발전 시스템의 보급은 제한적이 될 수밖에 없었다. 더구나 우리나라는 국토가 협소하고 인구밀도가 높아서 보급량은 결국 한계에 봉착하게 될 것이다.

이에 비해 해상풍력발전은 육상에서와 달리 고 풍력에너지 밀도로서 분포가 균일하고 초대형 풍력 발전 시스템 건설이 가능하고 대형부지확보가 용이하며 소음, 그림자, 전파방해 등의 거주환경문제 제한

§ 이 논문은 2010 년도 대한기계학회 동역학 및 제어부문 춘계 학술대회 (2010. 6. 3.-4., 광주과기원) 발표논문임.

† Corresponding Author, jhsohn@pknu.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

조건이 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 부유식 해상풍력발전에 대한 연구 및 조사가 활발히 이루어지고 있다. 해상 부유식 풍력 발전을 위해서는 지지기반인 부유체의 안정화를 꾀할 수 있는 플랫폼 개발이 무엇보다 중요하다.

박태현 등⁽¹⁾은 시간영역에서 Tension Leg Platform의 거동을 해석하였으며, S. Butterfield⁽²⁾는 해상풍력발전기의 공학적인 접근 방법과 해석을 수행하였다. I. Dyer⁽³⁾는 주파수 영역에서 해양 환경 하중을 받는 해상풍력 발전시스템을 해석하였다. 최근에는 대형국책사업으로 5MW 해상풍력발전 개발 연구가 진행중에 있으나 아직까지 부유식 해상풍력발전에 대한 연구는 활발히 이루어지지 않고 있다. 특히, 본 연구에서 다루는 블레이드 및 드라이브 트레인 등의 복잡한 기구학적 구조를 가진 부유식 해상풍력 발전시스템의 시간영역해석에 대한 연구 사례가 미비하며 본 연구의 대상물인 2MW 급 부유식 풍력발전기는 대형구조물로서 실험을 통한 검증이 어려워 거동특성을 예측하기 위한 해석이 중요하다.

현재 해외에서 개발된 해상 풍력발전단지는 풍력타워를 해저 지면에 고정시켜야 함으로 많은 비용이 요구되고 수심이 낮아야 가능하다. 하지만, 국내 해양조건은 외국과 달리 해안가에서 조금만 벗어나도 수심이 깊어서 풍력발전단지 조성시 플랫폼을 해저면에 고정하기가 어려워서 부유식 풍력발전이 고려될 만하다.

본 연구에서는 국내 해상 조건에 알맞은 부유식 풍력발전기를 개발하기 위한 선행연구로써, 국내 해상환경조건에서 부유식 풍력발전기의 동적거동 해석을 수행하였다. 부유식 풍력발전시설 개발 시 고려되어야 할 하중특성을 파악하고자 다물체동역학 기법을 이용하여 부유식 해상풍력발전시스템을 모델링하였다. 풍력발전기 및 하중모델링과 같은 시스템 모델링을 2 장에 서술하였고, 하중조건에 따른 거동특성을 3 장에 기술하였다.

2. 시스템모델링

2.1 부유식 해상풍력발전기의 다물체동역학 모델링

본 연구에서 고려한 2MW 급 해상 부유식 풍력

Table 1 2MW offshore wind turbine tower specification

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

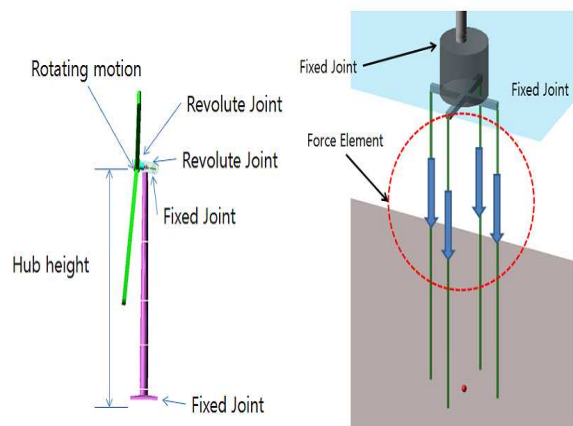


Fig. 1 Wind turbine and platform modeling

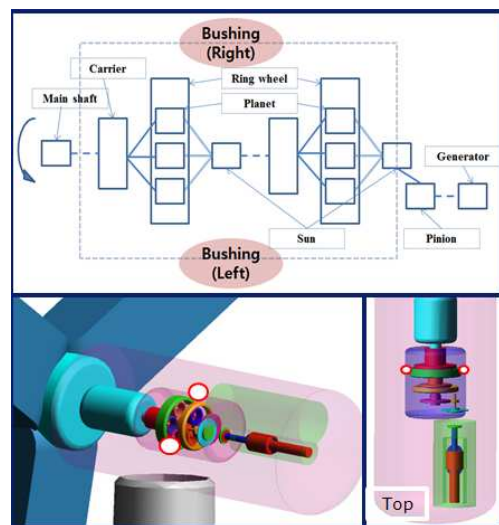


Fig. 2 Drive train by using ADAMS

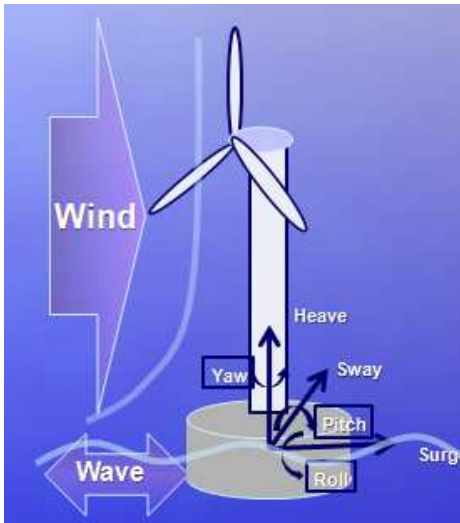


Fig. 3 Coordinate system of floating wind turbine

발전기의 스펙을 Table 1 에 정리하였다. Fig. 1 은 ADAMS⁽⁴⁾를 이용하여 기구학적 구속조건을 부여하여 강체 모델링을 수행한 것이다. Tension Leg Platform 은 힘요소로 모델링 하였다. Fig. 2 는 허브 내에 Drive train 을 동역학적으로 모델링 한 것이다. Drive train 의 기어박스는 나셀(nacelle)과 두 개의 부싱으로 연결되어 있으며, 기어 연결은 구속조건으로 모델링 하였다. 기어박스와 타워, 블레이드, 플랫폼을 다 물체 시스템으로 모델링하면, 향후 다양한 하중조건하에서의 거동 시뮬레이션을 통해, 거동특성, 조인트 반력 등을 분석하여 부품 설계 및 내구성능 해석에 유용하게 활용할 수 있다.

Fig. 3 은 거동 특성을 분석하기 위해 사용한 풍력발전기의 운동좌표계를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 육상풍력발전기와 달리 해양환경하중에 따른 해상풍력발전기의 운동을 예측하기 위하여 Surge 방향으로 풍하중 및 파랑하중이 가해질 경우 해상 풍력발전기의 거동을 분석하였다.

2.2 풍 하중 모델링

풍하중은 식 (1)과 같이 계산될 수 있으며, C_D 는 항력 계수, ρ 는 공기 밀도, A 는 면적, V 는 풍속을 각각 의미한다. 풍하중을 결정하는데 중요한 인자는 풍속으로써 일반적으로 식 (2)와 같이 지면에서의 높이에 따른 속도곡선을 이용한다.⁽⁵⁾

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

$$U(z) = (u^*/k) \ln(z/z_0), \quad \tau = \rho C_{10} U_{10}^2 \quad (2)$$

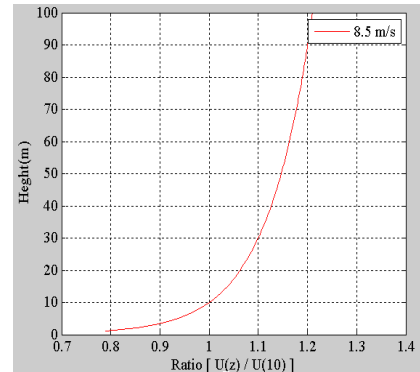


Fig. 4 Vertical profile of wind velocity

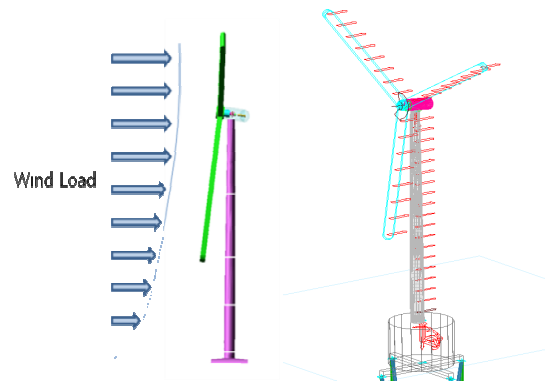


Fig. 5 Wind load modeling

$$u^* = \sqrt{C_{10}} U_{10}, \quad z_0 = 10 \exp\left(-\frac{0.4}{\sqrt{C_{10}}}\right) \quad (3)$$

$$C_{10} = (0.77 + 0.066 U_{10}) \times 10^{-3} \quad (4)$$

τ 는 전단 응력으로 풍속과의 관계를 나타내며 마찰속도 u^* 가 정의된다. 풍속분포는 저항계수 C_{10} 이 주어지면 풍속의 연직 분포가 구해지는데 해상의 넓은 풍속 범위로부터 구하여진 식을 이용한다. 2MW 풍력기의 정격 풍속은 8.5m/s 이며, 풍속 8.5m/sec 일 때 풍속의 연직분포를 Fig. 4 에 나타내었고 $U(z)/U(10)$ 은 높이 z 에서의 풍속을 10m 높이에서의 풍속으로 나누어 나타낸 비(ratio)다. Fig. 5 에 풍하중을 적용한 모습을 나타내었다.

풍하중은 풍속에 따라 달라지며, 본 연구에서는 타워를 20 개의 요소로 나누어 각 요소에 풍하중을 적용하였다. 또한, 블레이드는 8 개의 요소로 나누었으며, 블레이드의 3 차원 기하학적 형상을 고려하지 않고 평판으로 가정하여 풍하중을 적용하였다. 동적거동해석에서는 블레이드의 회전운동

을 고려하였다. 블레이드의 항력계수는 2 로 가정 하였으며 타워의 항력계수는 1.8 을 적용하였다. 공기 밀도는 1.2kg/m^3 이다.

2.3 파랑 하중 모델링

부유력은 플랫폼의 배제된 유체 체적과 유체의 비중량의 곱으로 표현되며 플랫폼은 수면아래 존재하도록 하였고, 플랫폼의 질량중심점에 힘 요소로 모델링 하였다. 본 연구에서는 파랑하중을 모델링하기 위하여 수립자 속도식을 이용하였으며, 심해조건에서 surge 방향의 수립자속도(u)는 식 (5) 와 같이 수면깊이(z)와 시간(t)의 함수로 표현된다. 여기서, h 는 파고를 의미하며, w 는 파랑하중 각속도를 나타내며, x 는 진행방향 변위를 의미하고, k 는 파수를 의미하며 식 (7)과 같이 표현되고 L 은 파장(파의길이)를 나타낸다. 식 (6)은 수립자 속도의 시간에 대한 미분을 나타낸 것이다. 식 (8)은 파장을 나타내고, 여기서 g 는 중력가속도를 의미한다. Fig. 6 은 수립자운동과 관련된 기호를 표시한 것이다. 식 (9)는 상대모리슨방정식(relative Morison equation)을 나타내며, 일반적으로 파랑하중의 시간이력을 표현한다. 부유식 풍력발전을 위한 플랫폼은 풍하중과 파랑하중에 따라 수평방향으로 변위 및 속도가 발생하게 되므로 본 연구에서는 식 (9)와 같은 상대운동 모리슨 방정식을 사용하여 파랑하중을 모델링 하였다. 모리슨 방정식은 파력을 나타내는 함수로서 항력과 관성력의 합으로 나타낸다. 식 (9)의 첫번째 항은 항력을 나타내고, 두번째 항은 관성력을 의미한다. 여기서 C_D 는 항력계수이며, C_m 은 관성력 계수이다. 해수 밀도인 ρ 는 1023 kg/m^3 이다. 본 연구에서는 플랫폼을 원형실린더로 고려하였고, 실린더의 지름을 D 로 표시하였다. 식 (9)에서 \dot{q} 과 \ddot{q} 는 부유체의 surge 방향 속도와 가속도를 의미한다.

$$u(z, t) = \frac{hw}{2} e^{kz} \cos(kx - wt) \quad (5)$$

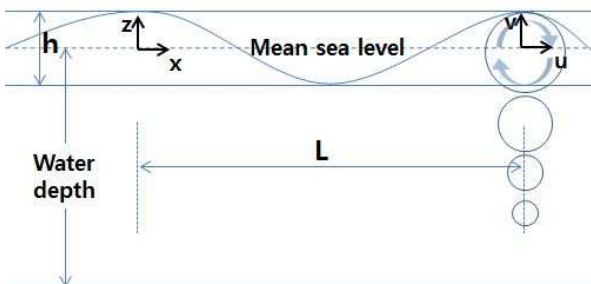


Fig. 6 Definition diagram for an Airy wave

$$\dot{u}(z, t) = \frac{h}{2} w^2 e^{kz} \sin(kx - wt) \quad (6)$$

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (7)$$

$$L = \frac{g}{2\pi} T^2 \tanh\left(\frac{2\pi}{L} h\right) \quad (8)$$

$$f_x = C_D \frac{1}{2} \rho D (u - \dot{q}) |u - \dot{q}| + C_m \rho \frac{\pi D^2}{4} (\ddot{u} - \ddot{q}) \quad (9)$$

관성력 계수는 배제된 유체의 관성력과 부가질량 계수의 합으로 정의되며 참고문헌⁽⁵⁾을 참고하여 총 관성력 계수는 2 를 적용하였다. 식 (9)는 단위길이당 작용하는 힘이므로, 부유체 구조물의 길이에 대해 적분하여 구한 파랑하중을 ADAMS 동역학 모델의 플랫폼의 질량중심점에 외력으로 가하였다.

3. 거동 특성 분석

3.1 하중 조건

해상풍력발전시설은 육상 풍력발전시설과 다른 환경하중을 받게 된다. 본 연구에서는 육상운전조건으로 블레이드의 회전을 받을 때의 풍력타워의 거동과 해상운전조건인 파랑하중이 추가되었을 때의 거동특성을 비교하였다. 블레이드의 회전속도는 구속요소에 각속도를 초기 정지 상태부터 15 초 동안 가속하여 정격발전 회전각속도인 18rpm 을 유지하도록 motion 을 부여하였다. 파랑하중 조건은 파고 2.2m, 파장 25m, 주기 4 초 이다.

3.2 플랫폼 방식에 따른 거동 특성

초기에는 하중이 없는 상태에서 15 초 동안 설계하중만큼 증가시켜서 적용하며 15 초 이후 120 초까지 설계하중을 지속적으로 적용하여 동적 거동특성을 분석하였다. 하중의 크기는 풍속 및 파랑의 특성에 의해 설계된 풍하중 및 파랑하중 크기만큼 가해진다. 파랑하중 은 Beaufort Scale 을 참고하여 해양 환경 하중을 선정하였으며 Beaufort Scale No.5 의 환경인 풍속 8.5m/sec 파고 2.5m 파장 39m, 파랑의 주기 5 초의 해상 조건에서 해석하였다. Table 2 는 Platform 구조에 따른 스펙을 나타낸 것이다. 미국재생에너지연구실(NREL, National Renewable Energy Laboratory)에서는 해상 부유식 풍력발전을 위한 플랫폼 개념설계도를 제시하였다⁽²⁾. 본 연구에서는 제시한 플랫폼 중 TLP 의 Leg 개수에 따라 거동을 비교 분석함으로써 어느 구조가 좀 더 나은 성능을 보이는지 확인하

고자 동적거동해석을 수행하였다.

Fig. 7 은 Leg 수에 따른 플랫폼 구조를 그린 것이다. Surge 방향으로 풍하중 및 파랑하중이 가해지도록 하였다. Fig. 8~10 에는 타워피치각, 부유식 플랫폼 변위, Hub 가속도에 대한 응답을 각각 나타

Table 2 Platform cases

1 Leg	Platform mass	2704 ton
	Platform height	25 m
	Platform radius	7.7 m
	Leg	1 EA
3 Leg	Platform mass	2704 ton
	Platform height	15 m
	Platform radius	10 m
	Leg	3 EA
4 Leg	Platform mass	2704 ton
	Platform height	15 m
	Platform radius	10 m
	Leg	4 EA
6 Leg	Platform mass	2704 ton
	Platform height	15 m
	Platform radius	10 m
	Leg	6 EA

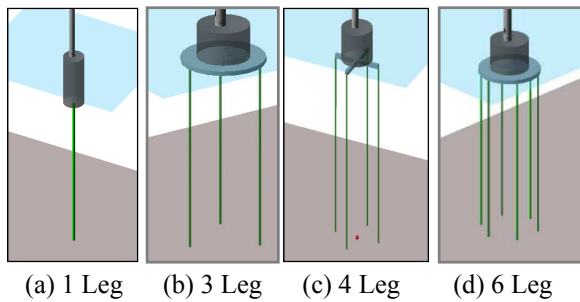


Fig. 7 Cases of Platform Leg

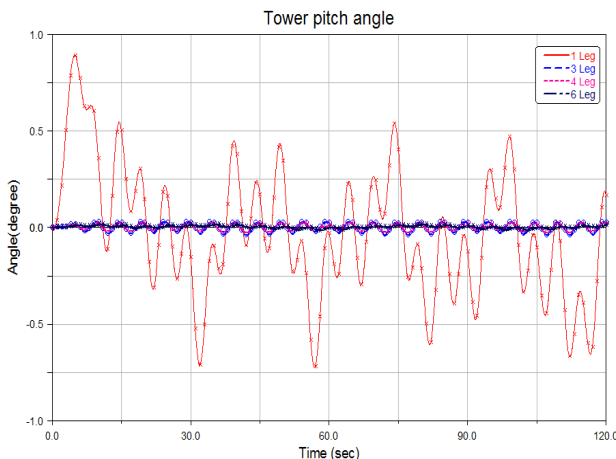


Fig. 8 Tower pitch angle

내었다. 타워피치각은 Fig. 3 에 나타낸 것과 같이 하중방향(surge direction)과 직각을 이루는 sway 축에 대한 회전각을 의미하며, 플랫폼 변위 및 Hub 가속도는 surge 방향의 변위와 가속도를 나타낸 것이다. Fig. 8~10 에서 1 Leg 는 ‘×’, 3 Leg 는 ‘o’, 4 Leg 는 ‘+’, 6 Leg 는 ‘*’의 심볼로 각각 나타내었다.

피치각, 변위, 가속도의 최대값 및 RMS(root mean square) 값을 Table 3 에 정리하였다. Leg 수에 따른 거동 특성을 비교 분석하였다.

Pitch 각은 1Leg 경우 최고 약 1 도 정도의 피치각이 나타난다. 이는 Hub 높이 78m, 블레이드 직경 88m 임을 고려했을 경우, 끝 지점에서 2m 정도 병진운동이 나타남을 의미한다. Leg 3 개 이상인 경우 Pitch 각은 0.04 도 미만으로 비교적 안정한 구조임을 알 수 있다.

Surge 변위 응답은 1Leg 의 경우 다른 경우에 비해 최대값 1.26 m 로 비교적 적은 값이 나타났다. 6Leg 의 경우 Platform 의 Surge 방향의 변위 응답이 3Leg, 4Leg 에 비해 다소 크게 나타난다.

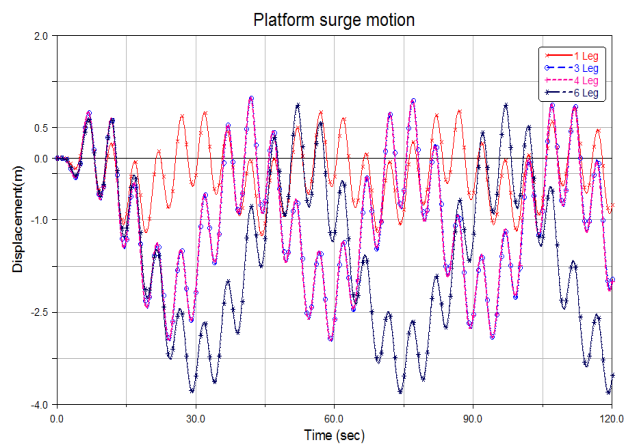


Fig. 9 Platform surge motion

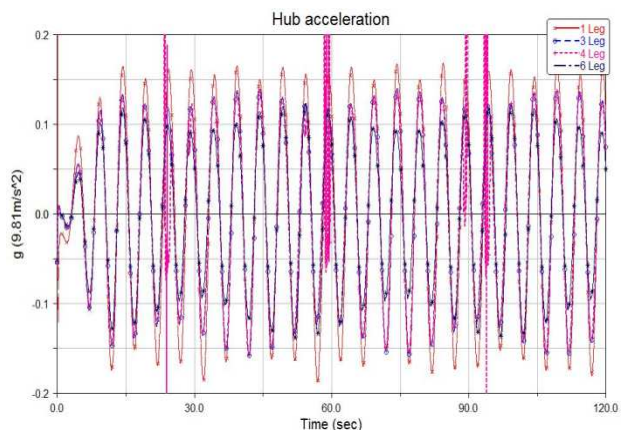


Fig. 10 Hub acceleration

Table 3 Simulation results of floating offshore wind power system by using ADAMS

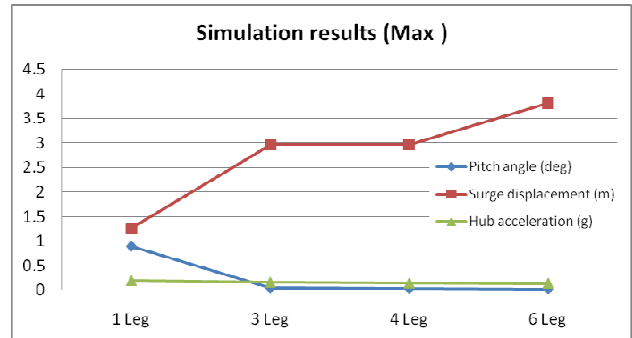
		Pitch angle (deg)	Surge displacement (m)	Hub acceleration (g)
1 Leg	RMS	0.3352	0.5478	0.1128
	MAX	0.8924	1.2599	0.1874
3 Leg	RMS	0.0209	1.3977	0.0930
	MAX	0.0370	2.9594	0.1578
4 Leg	RMS	0.0149	1.3965	0.0886
	MAX	0.0275	2.9599	0.1440
6 Leg	RMS	0.0082	1.9786	0.0772
	MAX	0.0188	3.8157	0.1378

6Leg 의 경우 다리수가 많아서 장력이 많이 걸리게 되어 상대적으로 피치각이 생기기보다 병진운동이 일어나기가 쉬운 구조가 되어 3Leg, 4Leg 에 비해 병진변위가 약간 크게 나타난 것으로 사료된다.

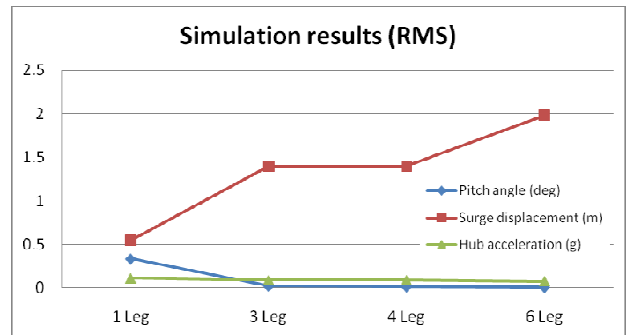
하중이 가해졌을 때 3,4,6 Leg 일 경우에는 부력과 Leg 의 장력이 모멘트를 형성하여 회전운동이 작게 나타난다. 반면 1Leg 의 경우에는 회전운동이 비교적 크게 나타나는 대신 병진운동이 작게 나타난다. 3,4 및 6 Leg 경우처럼 Leg 수가 증가할수록 Pitch 응답이 더 안정적임을 알 수 있으며 3 Leg 와 4 Leg 의 경우 거의 비슷한 응답이 나타난다.

가속도 응답은 1 Leg 의 경우가 다른 구조에 비해 약간 더 크게 나타났다. RMS 값이 0.7~0.1g 이며 최대값이 0.19~0.14g 로 Leg 수가 증가할수록 가속도의 크기가 감소하는 경향을 나타냈으나 다른 응답에 비해 감소율이 비교적 적게 나타났다.

Fig. 11 에 Leg 수에 따른 타워의 동적거동의 최대값과 RMS 값을 그래프로 나타내었다. 경향성을 살펴보면, Pitch 각이 풍력발전기의 내부구조에 허용되는 범위의 응답이라면 설치비용 측면에서 1 Leg 가 더 유리할 수 있으나 회전 운동이 발생하면 허브 끝단에서의 변위, 속도, 가속도가 크게 나타나서 불안정한 구조가 될 수 있다. 6 Leg 의 경우는 4 Leg 에 비해 2 개의 Leg 를 더 설치하였음에도 불구하고 4 Leg 경우보다 변위



(a) Max value



(b) RMS value

Fig. 11 Max and RMS values of dynamic behaviors according to number of legs

응답은 다소 크게 나타났다. 따라서, 3 Leg 의 경우가 Leg 수도 작고 자세도 안정적이어서 효율적임을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 육상의 2MW 급 풍력발전기를 대상으로 해상 부유식 플랫폼 위에 설치하였을 경우를 가정하여 동적 거동분석을 수행하였다. Tension leg platform 구조의 Leg 수에 따른 동적 거동 특성을 비교하였다. 비교 분석 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 시공비 등의 이유로 부유식 플랫폼의 다리를 1개만 가지는 구조로 설계할 경우에는 3, 4 및 6 개에 비해 피치각이 다소 불리하므로 이에 대한 검토가 요구되며, 3 Leg 일 경우, 다리도 적고, 안정적인 자세를 유지함을 알 수 있다.

(2) 3,4 및 6 Leg 구조는 4 절 기구와 흡사하며 운동특성상 Pitch 각 응답의 범위는 작다.

(3) Hub 위치에서 가속도 응답은 육상 풍력 발전과 지지기반이 다른 유체 내에서 운동하게 되어 해상 풍력발전기는 구조의 가속도 응답이 나타나게 된다. 파의 주기에 따라 그 응답이 나타나며 기존 Nacelle 부의 기계 요소에 대한 해석에 활용할 수 있다.

본 연구 수행결과, 풍력발전기는 Surge 방향의

운동보다 해상풍력발전기의 자세가 더 중요하며 3개의 Leg 를 가진 구조가 비교적 안정적이고 효율적임을 알 수 있다. 본 연구에서 개발한 해상 부유식 풍력발전기의 다물체동역학 모델은 향후 부품 설계 및 내구성능 해석 등에 활용될 수 있다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부 일반연구자 지원사업 (No. 2009-0071619)의 지원으로 수행되었으며 이에 관계기관에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 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.
- (2) Butterfield, Musial, W., Jongman, J. and Scavounos, P., 2007, "Engineering Challenges for Floating Offshore Wind Turbines," *NREL Conference paper, USA*, Cp-500-38776R.
- (3) Dyer, I., Eatock Taylor, R., Newman, J.N. and Price, W.G., 1990, *Sea Loads on Ships and Offshore Structure*, Cambridge University press, United Kingdom, pp. 174~222.
- (4) *MSC/ADAMS User's Guide*, 2008, MSC Software Corporation, USA
- (5) Kim, D.G., "Dynamics of Structures," *Goomibook, Korea*, pp. 671~699.

(1) Park, T. H. and Cho, J. W., 2002, "A Time Domain