

블레이드 연성을 고려한 부유식 풍력터어빈 모형시험 연구

김현조 (삼성중공업주)

홍사영, 김진하 (선박해양플랜트연구소)

1. 서론

부유식 풍력 터어빈의 플랫폼 자체는 기존의 유전개발 및 생산에 사용되어 왔던 플랫폼의 연장선에서 개발되고 있다고 할 수 있다. 기존의 심해유전 개발을 위한 플랫폼은 수십년간 개발된 해석법과 모형시험을 포함한 검증된 일련의 설계 방법이 존재한다. 또한, 해석법 및 모형시험에 대한 상관관계에 대해서 꾸준히 연구되어 왔다.

부유식 풍력 터어빈은 기존의 플랫폼에 회전하는 풍력터어빈과 긴 타워로 이루어져 있기 때문에, 풍력 터어빈의 성능해석을 위해서는 aero-hydro-servo-elastic의 연성을 추가로 고려하여야 한다고 알려져 있다. 이를 위해서 현재 해석 모델들이 개발되고 있으며, FAST (NREL), SIMO/RIFLEX+HAWC2 (MARINTEK), GH-bladed (Garrad Hassan) 등이 대표적이라고 할 수 있다. 하지만, 이러한 연성거동해석 모델은 모형시험이나 실선 계측 데이터로 검증되지 못하였으며, 따라서, 아직까지 해석 모델과 모형시험 (또는 실선) 사이의 상관관계가 명확하지 않은 문제점이 있다.

그 주요 원인은 아직 충분한 모형시험의 데이터가 축적되지 못하는데 기인한다고 할 수 있다. 2012년에 DeepCwind consortium에서 주관한 MARIN (네덜란드)에서 체계적인 시험이 이루어졌지만 (Koo, 2012), 그 이외의 시험의 결과는 거의 발표되지 않고 있다. 따라서 앞으로 많은 모형시험이 수행되어 충분한 데이터를 확보하여야 해석모델의 검증과 추후 인증에 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

바람, 파도, 그리고 조류가 포함된 복합 환경 하에서 연성 거동을 포함한 모형시험은 아직 시도 자체가 도전적으로 여겨질 만큼 시도가 많지 않았고, 모형 시험에 대한 적절한 기법 자체의 논의도 시작 단계라 할 수 있다 (ABS, 2012). 본 논문에서는 부유식 풍력 터어빈의 블레이드 연성을 고려한 모형시험의 기법에 대해서 검토하고, 수행된 모형시험 결과를 소개한다.

2. 모형시험

블레이드 연성을 고려한 모형시험은 선박해양플랜트연구소의 해양공학수조에서 수행되었다. Fig. 4.1에서 바람과 파도를

재현한 상태에서 터어빈을 회전시키면서 수행한 모형시험의 한 장면을 보여주고 있다. 이 실험에서는 7MW 급의 풍력터어빈을 기초로 하여 모형 풍력터어빈의 제원을 결정하였다.

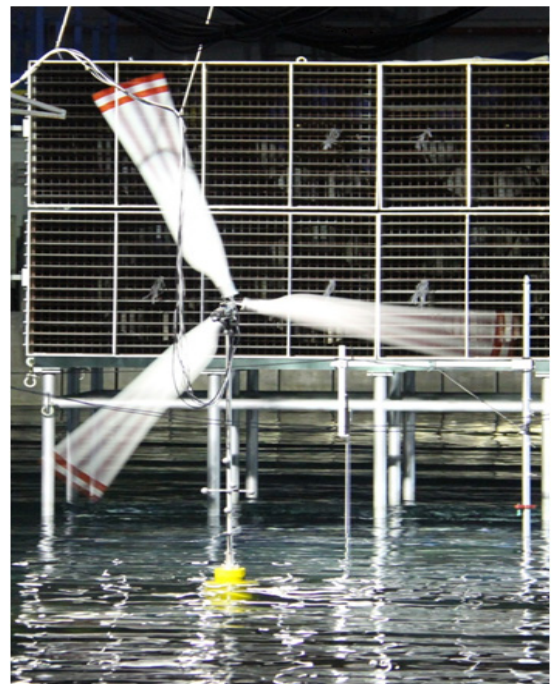


Fig. 1 A snapshot of model test with rotating blades

2.1 모형블레이드의 설계 및 제작

파도 중의 부유식 플랫폼에 대한 모형 시험은 주 외력이 파도에 의해서 발생하기 때문에 전통적으로 Froude 수에 의해 상사법칙을 만족시킨다. 하지만, 부유식 풍력터어빈에 작용하는 외력은 파도와 조류에 의한 외력뿐만이 아니라 바람과 블레이드의 회전의 공력에 의한 외력도 존재한다. 이러한 풍력발전기 블레이드의 공력 특성은 알려진 바와 같이 Reynolds 수에 크게 의존한다. 따라서 풍력터어빈 모형시험에서 실제 풍력발전기와 같은 공력 특성을 얻기 위해서는 Reynolds 수에 의한 상사를 수행해야 한다. 하지만, Froude 와 Reynolds 수를 동시에 만족시키는 것은 불가능하다.

만약 블레이드를 Froude수의 상사법칙으로 축소 모형을

제작하게 되면, 모형시험에서 블레이드에 의한 thrust와 torque가 Froude 법칙에 의하여 상사된 양만큼 나오지 않게 된다. (Martin, 2011)

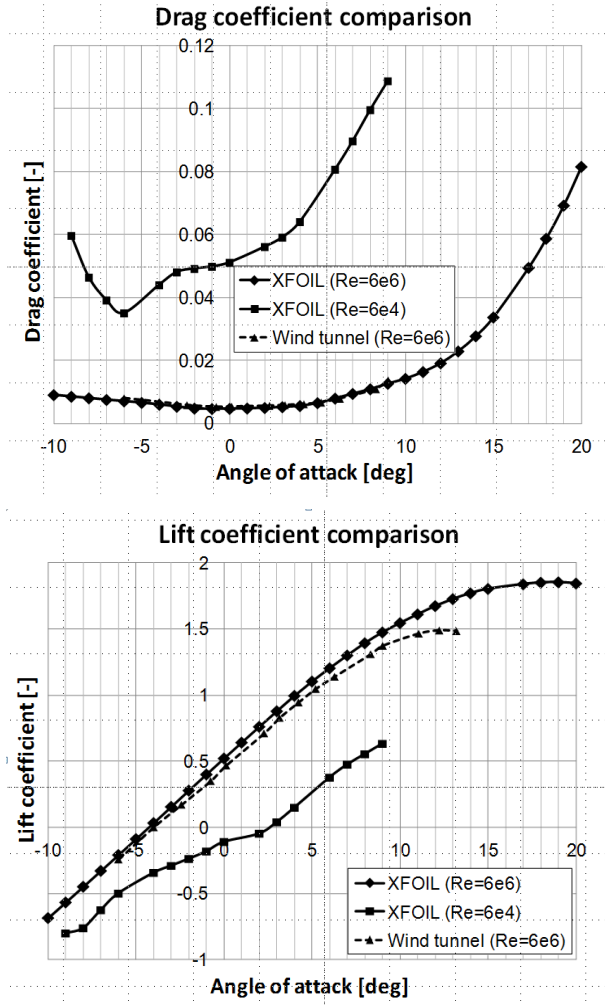


Fig. 2 Aerodynamic characteristics in high and low Reynolds number condition: Lift coefficients(left) and Drag coefficients(right)

Fig. 2는 부유식 풍력 터빈의 블레이드 팁에 사용된 NACA 익형을 대상으로 Reynolds 수에 따른 양력계수(C_{lift})와 항력계수(C_{drag})의 변화를 나타낸다. 공력 특성을 파악하기 위해 panel method 기반의 XFOIL (Drela, 2001)을 사용하였다. 일반적인 풍력터빈의 블레이드 팁 근방에서의 에어포일 설계 받음각은 0deg ~ 6deg이다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 설계 받음각 영역에 걸쳐 6×10^4 Reynolds 수의 양력계수는 6×10^6 Reynolds 수의 양력계수에 비해 현저히 감소됨을 알 수 있다. 항력계수는 양력계수와 달리 현저히 증가함을 알 수

있다. 에어포일의 양력계수, 항력계수와 블레이드 단면 power 계수 (C_{torque}), thrust 계수(C_{thrust})의 관계는 다음과 같다.

$$C_{torque} = C_{lift}(\alpha) \cdot \sin(\beta) - C_{drag}(\alpha) \cdot \cos(\beta) \quad (1)$$

$$C_{thrust} = C_{lift}(\alpha) \cdot \cos(\beta) + C_{drag}(\alpha) \cdot \sin(\beta) \quad (2)$$

여기서, α 는 attack angle(deg), β 는 induced velocity를 고려한 inflow angle(deg)을 의미한다.

이상의 검토를 통해서 블레이드 형상을 Froude 상사법칙에 의하여 축소하게 되면 실선에서 요구하는 thrust 및 power 보다 작게 나온다는 것을 확인할 수 있다.

실선 부유식 풍력발전기 블레이드와 Froud 수로 축소한 블레이드 모형을 대상으로 TSR의 상사조건을 만족하는 조건에서 CFD 해석을 수행한 결과를 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 보는 바와 같이 모형 블레이드의 power 계수와 thrust 계수는 실제 블레이드에 비해 급격히 감소함을 확인 할 수 있다.

Table 1 Performance comparison of real scaleblade and model scale blade

TSR = 10.44	C_{power} [-]	C_{thrust} [-]
Real scale offshore blade	0.492	0.810
Small scale offshore blade	-0.289	0.236

따라서, Reynolds 수에 크게 의존하는 블레이드의 공력 특성을 모형스케일에서도 유지하기 위하여, 본 연구에서는 모형 시험을 위해 저 Reynolds 수에서 우수한 공력 특성을 나타내는 두께비가 작은 종류 에어포일을 사용하여 모형 블레이드 재설계를 수행하였다. 제작상의 제약조건으로 두께비를 최소 5% 이상 확보하면서 설계를 수행하였다. 공력계수는 XFOIL (Drela, 2001)을 활용하였으나, 저 Reynolds 수에서는 XFOIL의 수렴 문제로 인해 정확한 설계 공력 계수 확보가 어려워 설계 후 CFD를 이용한 공력 성능 평가를 병행하였다. 재설계된 블레이드의 단면 에어포일은 구조적 강성을 고려하여 두께비를 6~21%로 구성하였으며 CFD로 평가한 블레이드의 공력 특성은 TSR=10.44에서 power계수 0.093, thrust계수 0.681의 공력 특성을 나타내었다. 블레이드의 코드길이를 증가시켜 블레이드의 thrust 계수(0.681)를 실제 블레이드의 thrust계수(0.810)와 동일하게 설계가 가능하지만, 블레이드 중량의 제약 조건 (250g 이하/길이 1.33m) 으로 thrust는 85% power는 20%에서 설계하였다. Thrust는 90m 높이에서 플랫폼에 큰

모멘트를 야기하고, 이에 플랫폼의 운동성능에 큰 영향을 주기 때문에 Thrust를 가능한 근접하게 맞추고자 하였으며, power는 더 이상 증가시키기 힘들었다.

앞서 말하였듯이 경량의 블레이드 제작을 위해서 탄소섬유를 재료로 블레이드를 제작하였으며, 제작 및 시험의 편의를 위해서 모형 스케일은 1/55로 선정하였다. 이 스케일에서 블레이드의 길이는 1.33m로 결정되고, 모형 풍력 터빈의 주요한 치수 및 무게는 Table 2에 나타내었다.

탄소섬유를 이용하여 경량으로 블레이드를 제작하였지만, 결과적으로 약 20%정도 무겁게 (~300g) 제작이 되었다. 제작 후에 모형 블레이드에 무게를 가하여 블레이드의 끝단의 변형 정도를 계측하여 충분한 강도를 가지는지를 확인하였다. 실선스케일로 thrust의 작용점으로 예측되는 블레이드 길이의 67% 위치에 60tonf를 가했을 경우 3.2m의 끝단의 변형이 계측되었다. 실선의 경우 정격출력(rated output)의 풍속에서 약 10m의 변형이 발생하는 것으로 알려져 있기 때문에, 결과적으로 모형의 강도가 실선보다 큰 것으로 나타났다. 강성의 상사는 제작 시 고려하지 않았으며, 단지 모형시험에 필요한 강도의 확보를 목표로 하였다.

Item	Value
Blade length [m]	1,33
Blade weight [g]	250
RPM [rev/min]	90
Nacelle weight [kg]	2.0
Tower top [kg] (Blade+hub+nacelle)	3,5

2.2 센서부 및 구동부의 구성

풍력 터빈 모델에는 블레이드를 일정 RPM으로 회전시키기 위한 구동장치 및 6자유도 운동, nacelle에서의 가속도, thrust, torque, 회전수, 계류력을 계측하기 위하여 센서를 설치하였다. 계측항목 및 사용된 센서의 자세한 내용은 Table 3에 나와 있다. 또한, 설치된 모습은 Fig. 3에 나타나 있다.

모형시험은 바람이 있는 상태에서 모터를 구동하여 블레이드를 일정한 RPM으로 회전하면서, 이때 발생하는 thrust와 torque 및 6자유도 운동과 가속도를 계측한다.

블레이드의 pitch 제어와 터빈의 yawing 제어를 위한 시스템은 모형시험의 복잡성을 피하기 위하여, 이번 시험에서는 고려하지 않았다.

Table 3 Measurement items and sensors

Measurement items	Sensors	Remarks
6-DOF motions	ATOM	Optical motion measurement sytem
Accelerations at nacelle	accelerometer	3-axis
Thrust	loadcell	Force and moment at top of tower (3-axis)
RPM	encorder	
Mooring tension	loadcell	1-axis

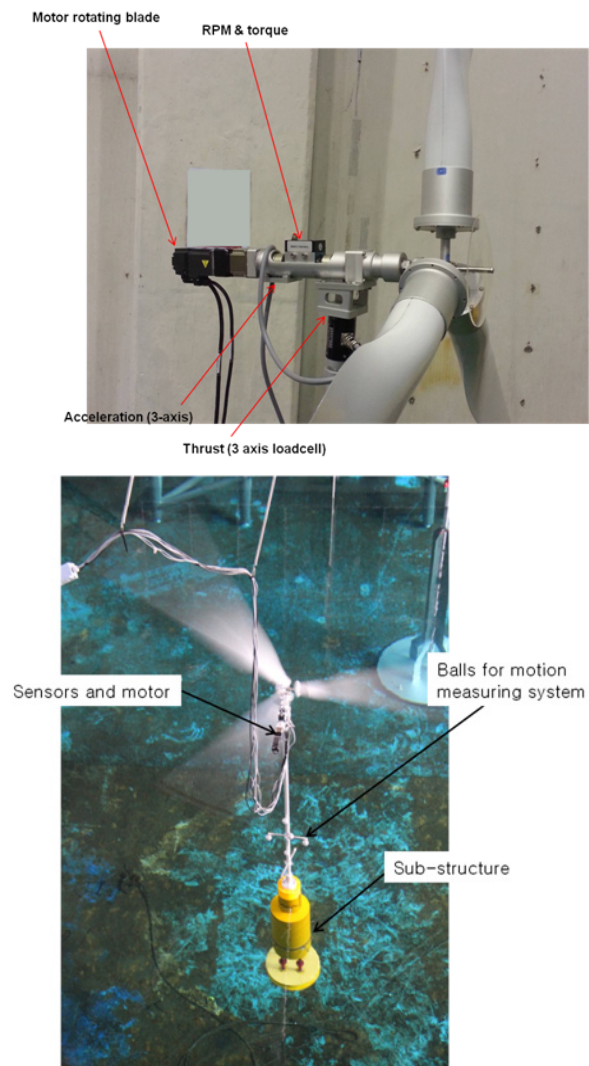


Fig. 3 Sensors and an actuator equipped on the model wind turbine

2.3 모형시험 프로그램 및 환경조건

풍력터빈 모형시험은 바람 중 블레이드의 회전에 의해서 전체 플랫폼의 거동에 어떤 영향이 있는지를 주로 보고자 하였다. 이런 목적에 맞게 모형시험 프로그램을 구성하였으며, Table 4에 간략히 나타내었다 (Martin, 2011).

모형시험에서 고려한 환경조건은 Table 5에 나타내었으며, 풍속은 대상 풍력터빈의 최대 tip speed가 되는 9.0m/s와 생존조건에 해당하는 46m/s를 선정하였고, 생존조건인 경우 blade의 pitch를 조절하고, 회전하지 않도록 하였다. 파도 조건은 운동 RAO를 구하기 위한 규칙파/white noise spectrum, 그리고 운전조건과 생존조건에 해당하는 불규칙파를 선정하였다.

Table 4 Model test program

Test items	Description
Hammering test	Tower natural period
Thrust-torque-wind speed	Relationship between thrust-torque-wind speed
Wind speed distribution	Wind speeds around blade sweep area
Free decay test w/wo steady wind	System natural period and damping w/wo wind
Regular waves w/wo steady wind	Motion RAO w/wo wind
White noise w/wo steady wind	Motion RAO w/wo wind
Irregular waves tests	Operation and survival Combination of wind and waves Survival condition with feathered turbine

Table 5 Wave conditions

	Hs[m]	Tp[sec]	Spectrum	Remarks
Regular				8 waves
White noise	5.0	4~33.6		
Operation 1	2.4	10.0	PM	Vw=9.0 m/s
Operation 2	5.0	12.0	Jonswap	Vw=9.0 m/s
Survival	11.2	16.7	PM	Vw=46 m/s

3. 모형시험 결과

부유식 풍력 플랫폼은 SHI-KORDI 공동연구를 통해서 5MW 급으로 개발된 Spar를 사용하였다 (김진하, 2013). 부유체의 배수용적은 7000m³ 이며 GM은 6m로 맞추었으며, 시험 중에 계측한 각 운동모드의 고유주기는 Table 6과 같다. 부유체의 계류를 위해서 선형스프링을 이용한 4점 taut 계류 시스템을 이용하였다 (김진하, 2013).

Table 6 Natural periods of motions in real scale

	Period[s]	freq. [rad/s]
Pitch/roll	35.09	0.18
heave	27.14	0.23
Yaw	19.52	0.32

준비 시험의 일환으로 hammering test를 통해서 tower의 고유진동수를 계측하였는데, 1차 모드가 모형스케일로 3.4Hz로 실선의 translation mode의 3Hz (모형스케일) 보다 좀 더 강하게 모델링이 되었음을 알 수 있었다.

바람 발생을 위해서 Fig. 10에서 볼 수 있듯이 선박해양플랜트연구소의 바람발생장치를 사용하였으며, 준비시험에서 블레이드의 sweep area에 대해서 hot-wire 풍속계를 이용하여 위치별로 풍속을 계측하였다. 결과를 보면 전체적으로 위치별로 차이가 나타났으며, 추후 시험에서 균일한 풍속을 얻기 위한 세심한 준비가 필요할 것으로 보인다.

모형시험 결과 중에서 불규칙파 중의 pitch 운동의 스펙트럼을 블레이드가 회전할 경우 및 회전하지 않는 경우에 대해서 비교하여 Fig. 4에 나타내었다.

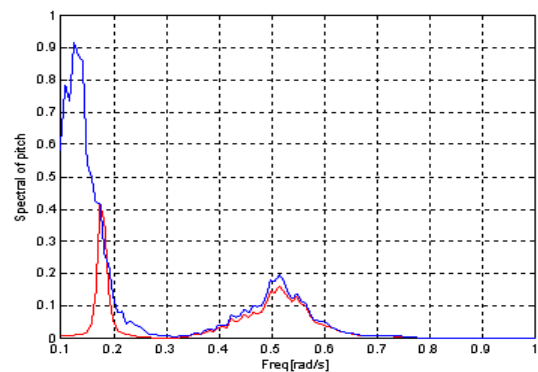
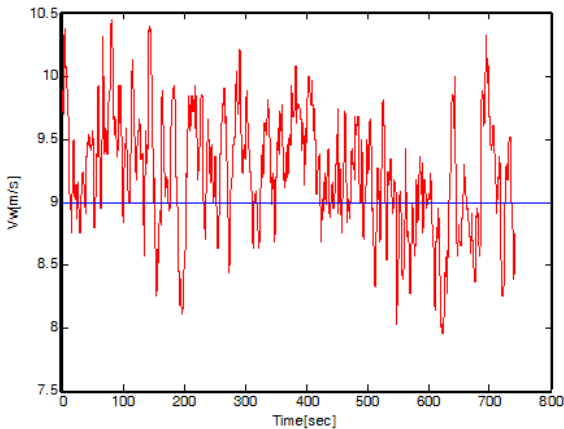
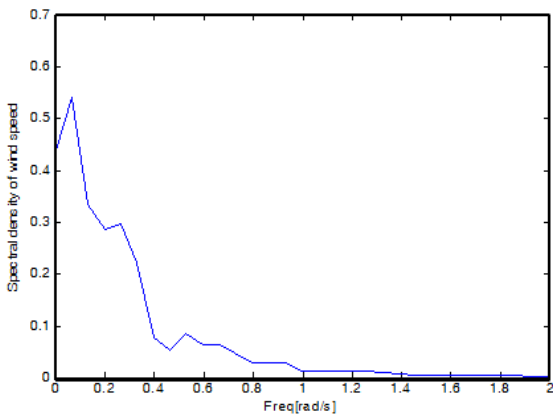


Fig. 4 Comparison of spectral density of pitch motion with (blue) and without (red) wind and rotating blades at the operation 2 wave condition (Hs=5.0m)

두 결과를 비교하면 파도 주파수대의 운동에서는 블레이드의 회전과 바람에 의한 영향이 크지는 않지만, 블레이드의 회전에 의해서 운동이 약간 증가한 것으로 나타났다. 또한 저주파수 운동은 큰 차이를 보이며, 블레이드가 회전할 때 저주파수 운동이 크게 증가한 것으로 나타났다. 이 저주파수 운동은 바람 발생장치의 바람의 성분에 포함된 저주파수 성분에 의하여 주로 야기된 것으로 보인다. Fig. 5에는 한 계측된 바람의 시계열 및 스펙트럼 해석을 결과를 보여주고 있으며, 저주파수에 상당히 큰 에너지가 있음을 알 수 있고, 이러한 저주파수 성분이 터빈의 저주파수 운동을 크게 야기시킨다고 할 수 있다. 이러한 저주파수의 pitch 운동은 풍력터빈에서의 큰 운동을 야기하여 풍력터빈의 효율을 감소시킬 가능성이 있다.



(a)



(b)

Fig. 5 Time series(a) and spectral density(b) of measured wind speed

모형시험의 관점에서는 Steady wind를 가정하여 시험을 수행하기 위해서는 바람발생장치의 저주파수 변동성분을 저감하는 노력이 필요할 것으로 보인다. 한편으로는 실제 해상에서의 풍속은 이러한 저주파수 성분이 상당히 크고 이를 위

해서 풍력터빈의 제어가 필요하다. 본 실험에서는 블레이드를 일정한 속도로 회전시켰기 때문에, 바람의 저주파수 성분에 의한 저주파수 운동이 크게 야기된 것으로 보이며, 실제로 풍력터빈의 제어기의 성능에 따라서 이러한 저주파수 성분의 운동은 크게 감소할 수 있을 것으로 보인다.

따라서, 향후 제어를 포함한 연성 해석을 통해서 이러한 저주파수 운동의 증감을 검토해야 할 것으로 보인다. 또한 모형시험에서도 블레이드 피치제어를 포함하여 좀 더 실제에 가까운 상태에서 모형시험을 수행해야 할지를 검토해야 할 것으로 보인다. 또한, 부유체의 yaw error(γ)의 증가로 $\cos^2\theta$ 에 비례하여 풍력터빈의 효율을 감소시킬 가능성이 있기 때문에, yaw 각도제어의 포함을 역시 검토해야 할 것이다 (Madson, 2003).

4. 결론

부유식 풍력 터빈의 블레이드 회전을 고려한 모형시험을 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 실선과 모형선의 Reynolds 수의 차이에 의한 공력특성의 차이를 줄이기 위하여 모형 블레이드를 새로 설계함으로써 실제에 근접한 thrust를 얻었으며, 카본 섬유로 가벼운 모델 블레이드를 제작하는 기법을 개발하였다.

(2) 모형시험 결과 중에서 불규칙파 중의 pitch 운동의 스펙트럼을 블레이드가 회전할 경우 및 회전하지 않는 경우에 대해서 비교한 결과 파도 주파수대의 운동에서는 블레이드의 회전과 바람에 의한 영향이 크지는 않지만, 저주파수 운동이 크게 증가한 것으로 나타났다. 실제 해상에서의 풍속은 이러한 저주파수 성분이 상당히 크고 이를 위해서 적절한 풍력터빈의 제어가 필요한 것으로 판단된다.

(3) 파랑 중 바람의 영향을 정확히 고려하기 위해서는 향후 제어를 포함한 연성 해석을 통해서 이러한 저주파수 운동의 증감을 검토가 중요할 것으로 판단되지만, 시험의 복잡성이 크게 증가하는 문제점을 해결하기 위한 모형시험의 단순화 방법 또한 하나의 숙제로 생각된다.

후 기

본 논문은 "SHI-KORDI 협력사업을 위한 해양공학수조를

공동활용연구" 및 "Spar 기반 연계형 지지구조물 기술개발" 과제와 관련한 결과의 일부임을 밝힌다.

참 고 문 헌

- ABS. (2012). Floating Wind Turbines.
- Drela, M. (2001). XFOIL 6.94 User Guide, MIT Aero & Astro, Harold Youngren, Aerocraft Inc.,
- Koo, B., Goupee A., Lambrakos, K, Kimbal, R., (2012). "Model Tests for a Floating Wind Turbine on Three Different Floaters", Proc. of the 31st OMAE, OMAE2012-83642, Rio de Janeiro, Brazil.
- Madson, H. A., et al. (2003). Yaw aerodynamics analyzed with three codes in comparison with experiment, Int. 41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA2003-519.
- Martin, H.R. (2011). Development of a scale model wind turbine for testing of offshore floating wind turbine systems, Thesis for the degree of master of science, University of Maine.



김 현 조

- 1970년생
- 2009년 MIT 해양공학 박사
- 현 재 : 삼성중공업 수석연구원
- 관심분야 : 해양구조물, 계류시스템, DP시스템
- 연 락 처 : ***-***-***
- E - mail : hyunjo.kim@samsung.com



홍 사 영

- 1960년생
- 1994년 서울대학교 조선해양공학과 박사
- 현 재 : 선박해양플랜트연구소 책임연구원
- 관심분야 : 부유체동역학, 해양플랜트, 계류시스템
- 연 락 처 : ***-***-***
- E - mail : sayhong@kriso.re.kr



김 진 하

- 1967년생
- 2006년 충남대학교 선박해양공학과 박사
- 현 재 : 선박해양플랜트연구소 책임연구원
- 관심분야 : 내항성능해석, 모형시험, 해양에너지
- 연 락 처 : ***-***-***
- E - mail : jhakim@kriso.re.kr

2014년도 춘계공동학술대회

일 자: 2014년 5월 22일(목)~23일(금)

장 소: 부산 BEXCO