

## 부유식 다수 풍력 발전기에 작용하는 비대칭 공력 하중의 영향

배운혁\* · Moo-Hyun Kim\*\*

\*제주대학교 해양시스템공학과

\*\*Department of Civil Engineering, Texas A&M University, USA

### Influence of Asymmetric Aerodynamic Loading on Multiple Unit Floating Offshore Wind Turbine

Yoon Hyeok Bae\* and Moo-Hyun Kim\*\*

\*Department of Ocean System Engineering, Jeju National University, Jeju, Korea

\*\*Department of Civil Engineering, Texas A&M University, USA

**KEY WORDS:** Wind energy 풍력 에너지, MUFOWT (Multiple unit floating offshore wind turbine) 부유식 다수 풍력 발전기, Mooring tension 계류선 장력, Aerodynamic loading 공력 하중, Coupled dynamic analysis 연성 해석

**ABSTRACT:** The present study developed a numerical simulation tool for the coupled dynamic analysis of multiple turbines on a single floater (or Multiple Unit Floating Offshore Wind Turbine (MUFOWT)) in the time domain, considering the multiple-turbine aero-blade-tower dynamics and control, mooring dynamics, and platform motions. The numerical tool developed in this study was designed based on and extended from the single-turbine analysis tool FAST to make it suitable for multiple turbines. For the hydrodynamic loadings of floating platform and mooring-line dynamics, the CHARM3D program developed by the authors was incorporated. Thus, the coupled dynamic behavior of a floating base with multiple turbines and mooring lines can be simulated in the time domain. To investigate the effect of asymmetric aerodynamic loading on the global performance and mooring line tensions of the MUFOWT, one turbine failure case with a fully feathered blade pitch angle was simulated and checked. The aerodynamic interference between adjacent turbines, including the wake effect, was not considered in this study to more clearly demonstrate the influence of the asymmetric aerodynamic loading on the MUFOWT. The analysis shows that the unbalanced aerodynamic loading from one turbine in MUFOWT may induce appreciable changes in the performance of the floating platform and mooring system.

#### 1. 서 론

최근 전 세계적으로 에너지 수요가 급증함에 따라 전통적인 화석연료에 비해 환경오염을 거의 유발하지 않으며 지속적으로 이용 가능한 신재생 에너지에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 다양한 신재생에너지원 가운데 가장 경제성이 있고 발전단가가 낮은 풍력에너지에 대한 연구 개발이 활발히 진행 중이다 (Henderson et al., 2002; Henderson et al., 2004; Musial et al., 2004; Tong, 1998; Wayman et al., 2006). 풍력발전은 시스템의 설치 장소에 따라 크게 육상풍력발전과 해상풍력발전으로 나누어지며 해상풍력발전은 다시 고정식 및 부유식으로 나눌 수 있다. 일반적으로 수심 60m 이상의 해역에서는 고정식 보다 부유식 풍력발전이 더욱 경제적이 알려져 있다.

부유식 풍력발전기는 상부 풍력발전기를 지지하는 하부 플랫폼(Platform)의 종류에 따라 TLP (Tension-leg platform)형, 스파(Spar)형, 반잠수식(Semi-submersible)형 등의 구조가 제안되었으며 각각의 플랫폼은 운동성능의 뚜렷한 차이가 있으므로, 설치되는 해역의 환경조건에 맞는 적절한 플랫폼의 선정 및 설계가 중요하다. 최근에는 발전단가를 줄이기 위하여 풍력발전기의 크기와 용량이 점차 대형화 되는 추세에 있으며, 이러한 개별 발전기의 대형화와 더불어 단일 플랫폼 상부에 다수의 풍력발전기가 설치되는 부유식 다수 풍력발전기(Multiple unit floating offshore wind turbine, MUFOWT) 모델이 제시되기도 하였다(Bartrop, 1993). MUFOWT는 하나의 플랫폼에 다수의 풍력발전기가 설치되므로 부유식 단일 풍력발전기에 비하여 플랫폼 및 계류선(Mooring line)의 제작 및 설치에 투입되는 비용

Received 2 March 2015, revised 9 June 2015, accepted 22 June 2015

Corresponding author Yoon Hyeok Bae: +82-64-754-3485, yh.bae@jejunu.ac.kr

© 2015, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of Annual Autumn Conference of KSOE 2014 in Jeju.

을 상당히 절감할 수 있는 장점이 있다. 하지만 인접한 풍력발전기와와의 간섭효과에 의한 발전 효율의 저하, 거대 플랫폼 제작의 어려움, 다수 풍력발전기를 효율적으로 제어하기 위한 복잡한 제어기 설계 등과 같이 해결해야할 문제가 여전히 존재한다. 노르웨이의 윈드시(WindSea)에서 제시한 부유식 다수 풍력발전기는 반잠수식 형상의 플랫폼에 3개의 풍력발전기가 설치되어 있으며, 후방에 위치한 풍력발전기의 경우 후류의 영향으로 인하여 전방 발전기의 약 75% 수준의 발전량을 보임을 해석적 방법과 실험을 통하여 확인하였다(Lefranc and Torud, 2011). 이와 같은 부유식 다수 풍력발전기의 운동 해석에 관한 시간영역 수치 해석 프로그램이 최근 개발이 되었고(Bae and Kim, 2014), 부분적으로 손상된 날개에 의해 발생하는 부유식 다수 풍력발전기의 과도 응답 및 이에 따른 플랫폼의 영향이 조사되었다(Bae et al., 2014). 다만, 풍력발전기의 후류에 의한 영향은 이 수치 해석 프로그램에 고려되지 않았다. 이 논문에서는 MUFOWT의 유체력-공력-탄성력-제어-플랫폼-계류선이 모두 고려된 시간영역에서의 해석 프로그램을 이용하여 특정 풍력발전기의 공력하중에 변화가 발생하였을 때 플랫폼의 운동 및 계류선의 장력 응답에 어떠한 영향이 있는지 살펴보았다. 이러한 운동응답해석을 통해 얻어진 결과는 추후 다양한 MUFOWT의 제어기 설계에 필요한 필수적인 자료로 활용할 수 있을 것이다.

## 2. 부유식 다수 풍력발전기의 운동 해석

### 2.1 다수 풍력발전기의 해석

본 연구에서 적용된 MUFOWT의 시간영역 운동 해석은 풍력발전기 해석 프로그램인 FAST (Fatigue, Aerodynamics, Structures and turbulence)를 확장 개발하여 수행되었다. FAST는 미국 신재생 에너지 연구소에서 개발하여 배포하는 풍력발전기 해석용 수치 해석 프로그램으로 고정식 또는 부유식 단일 풍력발전기 해석에 주로 사용되어 왔다(Jonkman, 2003; Jonkman, 2007; Jonkman and Buhl Jr, 2004). FAST는 수평축 풍력발전기의 공력-구조해석을 수행하는 다물체 동역학 해석 프로그램으로, 바람 데이터를 이용하여 날개요소에 작용하는 공력하중을 계산하는 AeroDyn 프로그램 모듈을 포함하고 있다. 회전하는 날개요소에 작용하는 공력과 날개 피치 및 발전기 토크 제어, 로터 회전에 의한 관성력 등이 모두 고려된 풍력발전기의 운동 응답 해석을 수행하며, 사용자의 입력 조건에 따라 타워 하부에 6자유도 운동을 하는 부유식 플랫폼을 연결할 수 있다. 따라서 부유식 풍력발전기의 경우 FAST를 이용하면 상부 풍력발전기가 하부 플랫폼 운동에 미치는 관성력의 효과, 그리고 플랫폼의 6자유도 운동이 상부 풍력발전기의 거동에 미치는 영향이 모두 고려된 해석이 가능하다.

본 연구에서 확장 개발된 Multi-turbine FAST는 부유식 단일 풍력발전기의 지배방정식에 사용된 24개의 자유도 변수 중, 플랫폼의 6자유도를 제외한 18개의 자유도를 탑재된 풍력발전기의 개수만큼 곱하여 이론적으로  $N$  개의 풍력발전기가 탑재된 MUFOWT의 경우  $6+N \times 18$  의 자유도를 가지는 지배방정식을 수립하고, 수치적인 방법으로 매 시간 단계에서 각 변수의 해를

구하게 된다.

$$\begin{aligned}
 F_r &= F_r^{Total\ Turbine} + F_r^{Platform} \\
 &= F_r^{Turbine\#1} + \dots + F_r^{Turbine\#N} + F_r^{Platform} \\
 &= F_r \Big|_{Aero}^{Turbine\#1} + F_r \Big|_{Elastic}^{Turbine\#1} + F_r \Big|_{Gravity}^{Turbine\#1} \\
 &\quad + F_r \Big|_{Generator}^{Turbine\#1} + F_r \Big|_{Damping}^{Turbine\#1} + \dots + F_r \Big|_{Aero}^{Turbine\#N} \\
 &\quad + F_r \Big|_{Elastic}^{Turbine\#N} + F_r \Big|_{Gravity}^{Turbine\#N} + F_r \Big|_{Generator}^{Turbine\#N} \\
 &\quad + F_r \Big|_{Damping}^{Turbine\#N} + F_r \Big|_{Hydro} + F_r \Big|_{Mooring}
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 F_r^* &= F_r^{*Total\ Turbine} + F_r^* \Big|_{Platform} \\
 &= F_r^{*Turbine\#1} + \dots + F_r^{*Turbine\#N} + F_r^* \Big|_{Platform} \\
 &= F_r^* \Big|_{Tower}^{Turbine\#1} + F_r^* \Big|_{Nacelle}^{Turbine\#1} + F_r^* \Big|_{Hub}^{Turbine\#1} \\
 &\quad + F_r^* \Big|_{Blades}^{Turbine\#1} + \dots + F_r^* \Big|_{Tower}^{Turbine\#N} + F_r^* \Big|_{Nacelle}^{Turbine\#N} \\
 &\quad + F_r^* \Big|_{Hub}^{Turbine\#N} + F_r^* \Big|_{Blades}^{Turbine\#N} + F_r^* \Big|_{Platform}
 \end{aligned} \tag{2}$$

MUFOWT의 지배 방정식은 다물체 동역학 해석에 유리한 Kane의 방정식을 활용하여 생성하였으며(Kane, 1961), 이 관계식에 사용된 일반화된 능동형 힘(Generalized active forces)과 일반화된 관성력(Generalized inertia forces)은 하나의 플랫폼 및 다수의 풍력발전기 각각에 대해 개별적으로 얻은 후 모두 더하여 지배 방정식을 구성하게 된다. 식 (1)에 다수 풍력발전기에 작용하는 공력, 탄성력, 중력, 발전기 가진력, 댐핑(Damping)에 의한 외력과 플랫폼에 작용하는 유체력, 계류 복원력을 나타내었고, 식 (2)에 다수 풍력발전기와 플랫폼의 질량 성분으로 인하여 야기되는 일반화된 관성력 성분을 나타내었다.

$$F_r + F_r^* = 0 \quad (r=1,2,\dots,6+N \times 18) \tag{3}$$

$$\sum_{s=1}^n C_{rs} \ddot{q}_s + f_r(\dot{q}_r, q_r) = 0 \quad (r=1,2,\dots,6+N \times 18) \tag{4}$$

식 (1)과 (2)를 Kane의 방정식 식 (3)에 적용하면 식 (4)와 같이 표현되는 6자유도의 플랫폼 운동과  $N \times 18$  자유도의 다수 풍력발전기 거동이 모두 연성된 형태의 계수 행렬  $C_{rs}$ 를 형성하게 되고 가우스 소거법으로 이 행렬을 풀면 플랫폼과 다수 풍력발전기의 연성, 다수 풍력발전기 상호간의 동적 연성이 모두 고려된 전체 시스템의 운동 응답을 얻을 수 있다. Multi-turbine FAST가 풍력발전기의 공력 하중, 타워와 날개의 탄성력, 발전기 토크 제어 및 날개 피치각 제어, 개별 타워 하부의 하중 계산을 담당하게 되고, 이와 함께 플랫폼의 유체 동역학적 하중 및 계류선의 동적 거동 해석은 CHARM3D(Coupled hull and riser, mooring program in 3D)가 담당하게 된다(Bae and Kim,

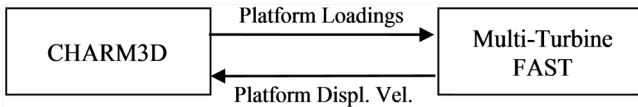


Fig. 1 Basic concept of FAST-CHARM3D coupling

2011; Bae and Kim, 2013a; Bae and Kim, 2013b). CHARM3D는 플랫폼과 계류선의 동적 연성 해석을 위해 개발된 상용 프로그램으로 WAMIT(Wave analysis at MIT)을 통해 얻어진 주파수 영역 데이터를 바탕으로 플랫폼과 계류선의 동적 거동을 시간영역에서 풀어낸다(Kim et al., 1999; Kim et al., 2001; Tahar and Kim, 2003). 이와 같이 Multi-turbine FAST와 CHARM3D 두 개의 독립적인 프로그램 모듈이 매 시간 단계별로 정보 교환을 통해 유체력-공력-탄성력-제어-플랫폼-계류선 거동이 모두 포함된 MUFOWT의 운동 응답을 시간영역에서 얻을 수 있게 된다.

Fig. 1에서와 같이 매 시간 단계별로 CHARM3D는 플랫폼에 작용하는 부가질량력, 방사감쇠력, 선형 또는 비선형 파랑 강제력, 비선형 점성 항력, 계류선에 의한 복원력을 계산하여 Multi-turbine FAST에 전달하고, Multi-turbine FAST는 이 데이터를 바탕으로 플랫폼 및 다수 풍력발전기 전체의 거동을 계산한 후 이를 통해 얻어진 플랫폼의 6자유도 변위 및 속도 정보를 다시 CHARM3D로 넘겨주어 다음 시간 단계의 계산에 이용하게 한다. CHARM3D로 전달된 플랫폼의 6자유도 변위는 다음 시간 단계에서의 계류선 복원력을 계산하는데 이용되며, 플랫폼의 속도 정보는 방사감쇠력 계산을 위한 컨볼루션 적분(Convolution integral)에 사용된다.

2.2 10MW급 부유식 파력-해상풍력 복합발전 구조물의 운동 해석

MUFOWT의 동적 거동 해석을 위하여 Fig. 2와 같이 4개의 풍력발전기가 설치된 반잠수식 형태의 발전장치가 실험 모델로 선정되었다. 이 풍력 발전 시스템은 선박해양플랜트연구소(KRISO)에서 개발 중인 10MW급 부유식 파력-해상풍력 복합발전 구조물로 사각 형상의 반잠수식 플랫폼의 네 기둥에는 4기의 2MW의 풍력발전기가 설치되었다. 설치 수심은 80m로 가정하였고, Fig. 3과 같이 8개의 계류선이 플랫폼의 위치 이동을 제한하고 있다. 각각의 계류선에는 플랫폼의 위치 복원성을 향상시키기



Fig. 2 Platform geometry

위하여 6,000kg의 클럼프(Clump)를 일정한 간격으로 10개씩 부착하였고, 동적 거동을 하는 계류선에 작용하는 유체력은 모리슨 방정식(Morison equation)을 이용하여 수치적으로 계산하였다(Morison et al., 1950). 플랫폼 및 계류선의 제원은 Table 1과 2에 각각 나타내었다. 본 모델은 수치적 검증에 의해 제시된 모델로서 풍력발전기 상호간의 간섭효과나 후류의 영향 등은 고려하지 않았다.

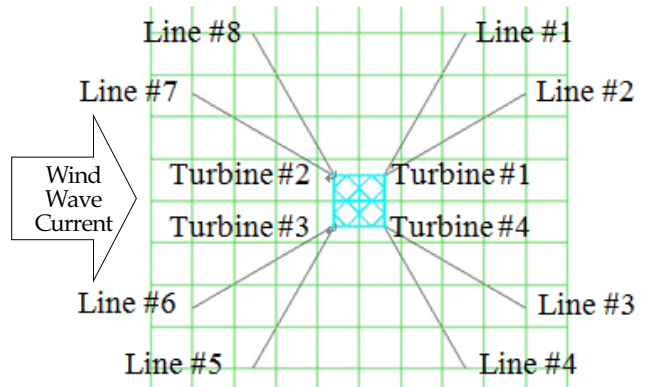


Fig. 3 Turbine location and mooring line arrangement

Table 1 Specifications of semi-submersible platform

Item	Unit	Value
Draft	[m]	15
Platform mass	[MT]	2373.6
Roll radius of gyration	[m]	58.99
Pitch radius of gyration	[m]	58.95
Yaw radius of gyration	[m]	79.38
CG above keel	[m]	13.42

Table 2 Specifications of mooring system

Item	Unit	Value
Number of mooring lines	[ea]	8
Depth to anchors below SWL	[m]	80
Depth to fairleads below SWL	[m]	13
Mooring line outer diameter	[mm]	127
Mooring line wet mass density	[kg/m]	281
Mooring line dry mass density	[kg/m]	322.9
Mooring line extensional stiffness	[kN]	1,377,000
Chain Mooring drag coefficient	-	2.4
Unstretched mooring line length	[m]	500
Arc length to touch down	[m]	130
Clump mass density	[kg]	6,000
Clump starting point from fairlead	[m]	130
Number of clump per line	[ea]	10

**Table 3** Environmental Conditions

Item	Unit	Value
Water depth	[m]	80
Significant wave height	[m]	5.93
Peak wave period	[sec]	10.81
Peak parameter	-	2.2
Current at sea surface	[m/s]	1.75
Wind velocity at hub height (67.5m)	[m/s]	13
Turbulence model	-	Kaimal
Turbulence type	-	NTM

시간영역 해석을 위한 환경 하중 조건으로 바람은 공간상에  $x, y, z$  방향의 속도 성분을 가지는 모든 풍황장(Full field) 데이터틀 IEC 스펙트럼에 맞추어 생성하여 적용하였고, 허브 높이(Hub height)에서의 평균 풍속은 13m/s를 이용하였다. 파랑 조건으로 유의파고(Hs) 5.93m, 최대 주기(Tp) 10.81초, 첨두신장인자(Peak-enhancement factor) 2.2를 적용한 JONSWAP (Joint north sea wave project) 스펙트럼을 이용하여 불규칙 입사파를 생성하였다. 평균 해수면에서 조류(Current)의 속도는 1.75m/s이고, 수심에 따라 1/7 멱법칙(1/7th Power law)을 이용하여 수면 하부의 조류 속도를 적용하였다. 환경 하중의 방향은 Fig. 3의 좌측에서 우측방향으로 작용하는 것으로 해석하였다. 해석에 적용된 환경 하중의 조건은 Table 3에 나타내었다.

초기 과도 응답을 감소시키기 위하여 400초까지는 점진적으로 외력을 증가시켰으며, 이후 3,600초(1시간)동안 주어진 환경 조건에서 해석을 수행하여 전체 시뮬레이션 시간은 4,000초가 되도록 하였다. 일반적인 해양구조물 운동 해석의 경우, 3시간(10,800초) 해석이 요구되나 부유식 해상 풍력발전기 해석의 경우 정상작동 상태(Power production condition)에서는 1시간 해석도 가능성이 알려져 있다(ABS, 2014; Haid et al., 2013).

플랫폼에 작용하는 파랑 강제력은 선형 포텐셜 이론이 적용된 WAMIT을 이용하여 주파수 영역에서 산출 한 후 이를 시간영역으로 변환하여 적용하였다. 이번 연구에서는 1차의 선형 파랑 강제력만을 고려하였으며, 플랫폼의 수면 하부 구조물에 작용하는 비선형 점성 항력은 모리슨 방정식을 적용하여 시간영역의 응답 계산에 포함시켰다. 이때 비선형 점성 항력 계산에 포함된 구조물은 풍력발전기 하부의 주 기둥(Column), 폰툰(Pontoon), 수평 및 수직 방향의 브레이스(Brace), 파력 발전기(WEC, Wave energy converter), 파력 발전기 지지 구조물(WEC guide frame) 등이며, 평균 해수면 상부의 구조물에 작용하는 파에 대해서는 균등 외삽법(Uniform extrapolation)을 이용하여 점성 항력을 계산하였다.

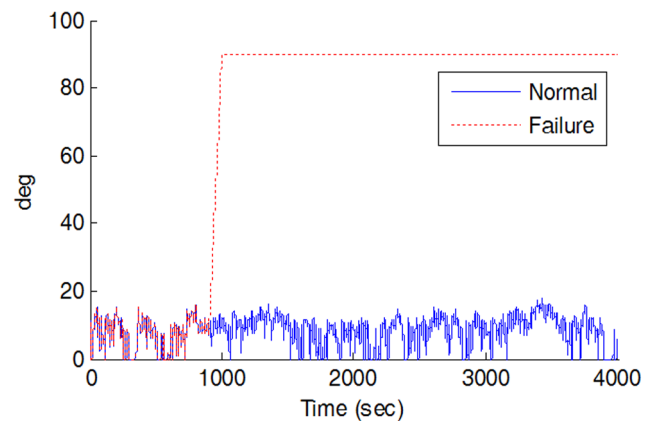
**2.3 비대칭 공력 하중의 영향 평가**

주어진 환경 조건에서 4개의 풍력발전기가 정상 작동 상태에 있으면 각각의 풍력발전기에 가해지는 추력이 평형상태를 이루게 되어 플랫폼의 과도한 선수동요(Yaw)는 발생하지 않게 되고

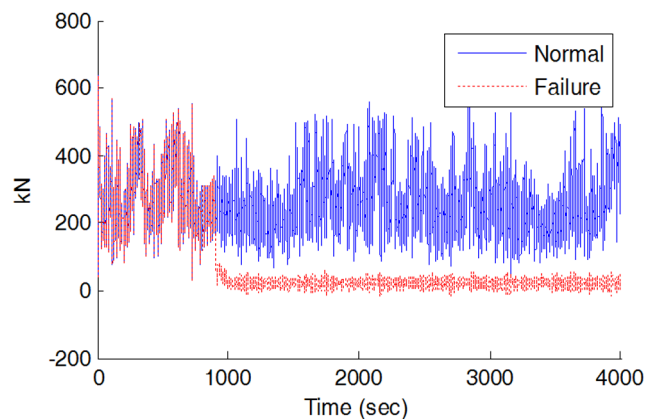
계류선의 장력도 정상상태(Steady-state)의 값에서 큰 변동은 없다고 할 수 있다. 하지만 4개의 풍력발전기 중 하나의 발전기에 공력의 변화가 발생하였을 때 플랫폼의 거동 및 계류선의 장력 응답은 2.1장에서 설명한 시간영역 해석을 통해 확인해 볼 수 있다. 본 연구에서는 Fig.3 에 나타난 2번 풍력발전기의 날개 피치각을 임의로 크게 조정하여 나셀(Nacelle)에 작용하는 추력을 떨어뜨려 인위적인 비대칭 공력 하중을 발생시켰고, 이에 따른 플랫폼의 거동 변화 및 계류선의 장력 변화를 시뮬레이션 하였다.

Fig. 4에서 보이는 바와 같이 2번 풍력발전기의 날개 피치각도를 900 ~ 1,000초 동안 90도로 변화시켜 날개가 받게 되는 항력을 인위적으로 감소시켰다. 실선은 날개의 피치각이 정상상태로 작동될 때를 나타내며, 점선의 경우 피치각 제어가 비정상적인 상태로 플랫폼에 비대칭 공력 하중이 작용하는 경우를 나타낸다. 이러한 변화로 인하여 2번 풍력발전기의 나셀에 작용하는 추력은 Fig. 5와 같이 급격하게 감소하게 된다. 1,000초 이후 평균 추력은 22.53kN으로 정상상태의 평균 추력인 258.56kN 과 비교하여 8.71% 수준으로 감소하였음을 확인할 수 있다.

감소된 추력의 영향으로 플랫폼의 거동에 변화가 생기며, 6자유도 운동에 대한 시간영역의 통계 해석 결과가 Table 4에 정리되어 있다. 통계 수치는 비대칭 공력하중이 작용한 이후의 경향을



**Fig. 4** Blade pitch angle of turbine #2



**Fig. 5** Rotor thrust force of turbine #2

비교하기 위하여 1,000초부터 4,000초까지의 결과를 이용하였다. 사각형 형태의 플랫폼에서 한쪽 모서리에 위치한 풍력발전기에 작용하는 추력이 감소되면서 플랫폼에 선수동요 모멘트를 발생 시키게 되고, 이에 따라 Fig. 6와 같이 플랫폼의 선수동요 운동이 모든 발전기가 정상적으로 작동되는 경우와 비교하여 뚜렷하게 차이가 나게 됨을 확인 할 수 있다. 정상 상태에서의 플랫폼의 최대 선수동요 각도는 약 0.66도이나 비대칭 공력 하중의 영향으로 선수동요의 최대값이 약 1.30도로 변화하게 되어 96.94% 증가한 결과를 보였다. 비교를 위하여 정상상태 대비 비대칭 상태의 평균 운동 응답을 오차율(Error)로 Table 4에 나타내었다.

플랫폼 6자유도 운동의 변화는 상부의 풍력발전기 출력에도 영향을 미치게 되며 비대칭 공력하중 작용 전, 후의 발전기 출력 변화와 정상상태 대비 비대칭 상태의 평균 출력에 대한 오차율을 통계 해석 하여 Table 5에 나타내었다. 문제가 발생한 2번 풍력발전기의 경우 출력이 음(-)의 값을 가지게 되는 경우도

발생하는데, 이는 임의로 변화시킨 날개 피치각 90도가 과도하여 음의 양력이 발생하였고, 이로 인하여 로터의 회전방향이 반대로 되는 경우가 발생하였기 때문이다. 2번 풍력발전기를 제외한 나머지 풍력발전기 출력 평균값의 변화는 약 0.04% 이내로 미미한 수준이다.

또한 계류선 최 상부의 장력도 플랫폼 운동 변화의 영향으로 증가 또는 감소하게 된다. 계류선 #2, #4, #6, #8의 경우 비대칭 공력 하중의 영향으로 인하여 최대 및 평균 장력 모두 증가하였으며, 최대 장력의 증가율은 0.91 ~ 2.92%이다. 반면 계류선 #1, #3, #5, #7의 경우 최대 및 평균 장력이 모두 감소하였으며 최대 장력의 감소율은 0.06 ~ 6.10%으로 확인되었다. 이와 같이 계류선의 위치에 따라 장력의 증감이 다른 것은 좌측 방향에서 우측방향으로 (양의 방향) 가해지는 환경하중으로 인해 결정되는 정상상태에서의 대칭적인 장력 추세와 플랫폼의 선수동요 발생으로 인하여 변동되는 비대칭적인 장력의 추세, 그리고 2번 풍력발전기의 추력이 감소하게 되면서 변화하는 플랫폼 전후동요 (Surge) 변위의 감소 효과 등이 한꺼번에 중첩되어 나타나기 때문이라고 볼 수 있다. 특히 계류선 #1과 #4, 또는 #5와 #8과 같이 서로 대칭 위치에 있는 계류선을 비교하면 그 위치의 대칭성으로 인하여 정상상태에서 장력 변화의 추세는 같은 경향을 보이고 있으나 비대칭 공력 하중 상태에서는 서로 상반되는 장력의 증감 경향을 나타내고 있다. 이러한 차이는 플랫폼의 선수동요로 인하여 발생한다고 볼 수 있다. 8개의 계류선 중 대표적인 위치에 있는 4개 계류선 장력 변화를 Figs. 7 ~ 10에 나타내었고 시간영역의 통계 해석 결과를 Table 6에 정리하였다. Figs 7 ~ 10에 나타난 스펙트럼은 1,000초 ~ 4,000초 구간의 장력 응답 해석 결과를 평균값을 0으로 정규화 하여 나타내었고, 장력 응답의 동적인 효과를 확인하는데 이용하였다.

계류선 #6과 #7의 경우 풍상측(Weather side)에 위치하여

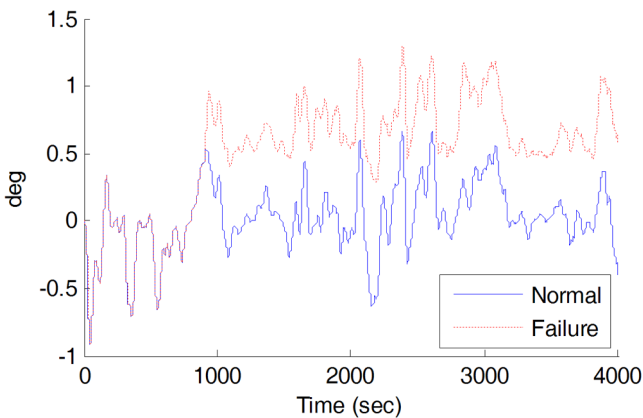


Fig. 6 Platform yaw motion

Table 4 Platform motion statistics

Mode	Normal				Failure				Error [%]
	Maximum	Minimum	Mean	STD	Maximum	Minimum	Mean	STD	
Surge [m]	20.68	16.13	17.59	0.68	20.47	15.90	17.33	0.68	-1.46
Sway [m]	0.04	-0.08	-0.02	0.02	0.03	-0.10	-0.04	0.02	95.22
Heave [m]	0.35	-1.18	-0.41	0.26	0.36	-1.16	-0.40	0.26	-3.08
Roll [deg]	0.03	0.00	0.01	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00	35.45
Pitch [deg]	0.73	-1.62	-0.41	0.35	0.70	-1.66	-0.43	0.35	6.10
Yaw [deg]	0.66	-0.64	0.06	0.22	1.30	0.29	0.70	0.21	1021.34

Table 5 Power output statistics

Turbine	Normal				Failure				Error [%]
	Maximum	Minimum	Mean	STD	Maximum	Minimum	Mean	STD	
#1 [kW]	2156.00	1077.00	1988.76	129.17	2154.00	1076.00	1988.53	129.40	-0.01
#2 [kW]	2166.00	1081.00	1987.59	130.65	-95.95	-382.40	-258.74	56.97	-113.02
#3 [kW]	2198.00	1012.00	1958.80	174.12	2196.00	1008.00	1958.05	175.26	-0.04
#4 [kW]	2185.00	1038.00	1961.69	168.79	2184.00	1045.00	1962.09	167.65	0.02

가장 큰 장력이 작용하게 되며, 플랫폼의 전후동요, 상하동요, 종동요에 따라 장력 응답이 결정된다. Figs. 9 ~ 10의 장력 응답 스펙트럼 해석결과에 따르면, 0.2rad/s 이하의 저주파 성분이 지배적임을 알 수 있으며, 이는 플랫폼의 장주기 전후동요에 의해 발생하는 계류선 최 상부 장력의 변동에 의한 것

임을 알 수 있다. 반면 계류선 #1과 #4 같은 풍하측(Lee side) 계류선의 경우 전후동요에 의한 저주파 응답과 함께 과랑 스펙트럼의 최대 주기인 0.58rad/s 근방의 응답 성분과 종동요 고유주기인 0.42rad/s의 성분도 뚜렷이 나타남을 확인할 수 있다.

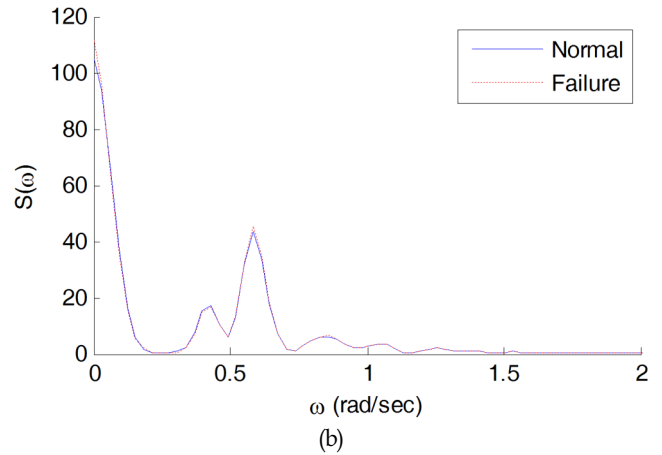
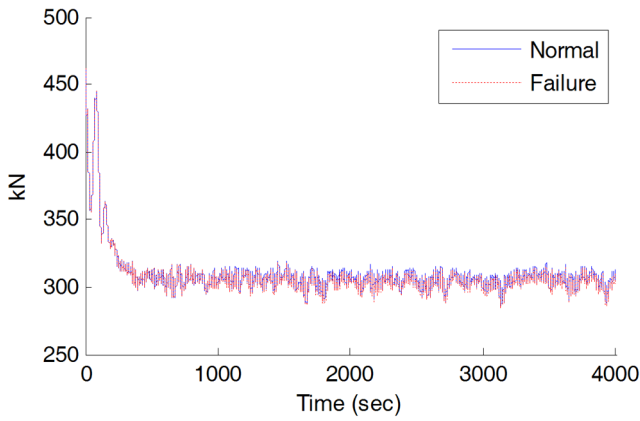


Fig. 7 Line #1 top tension (a) and spectra (b)

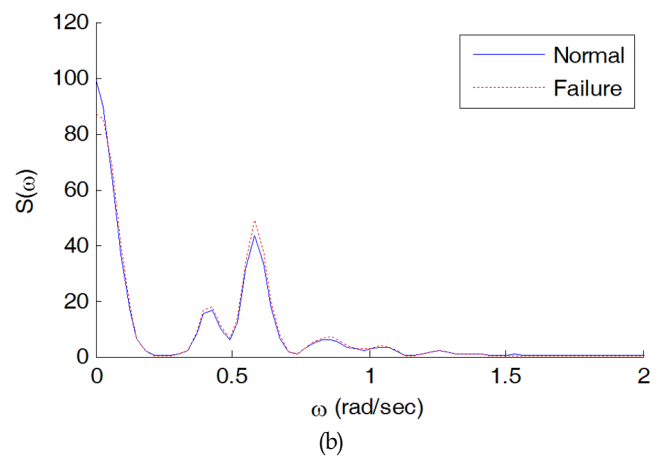
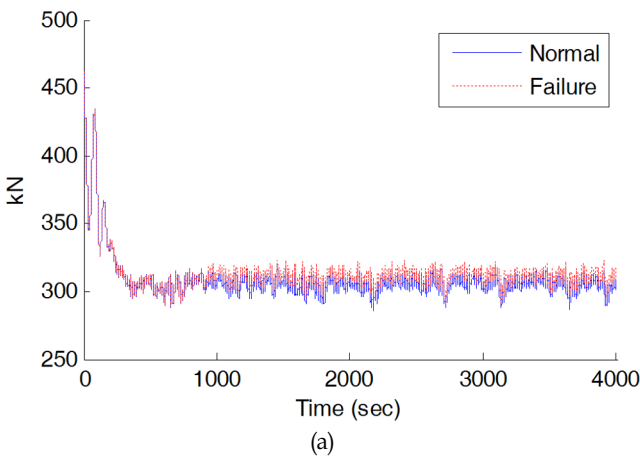


Fig. 8 Line #4 top tension (a) and spectra (b)

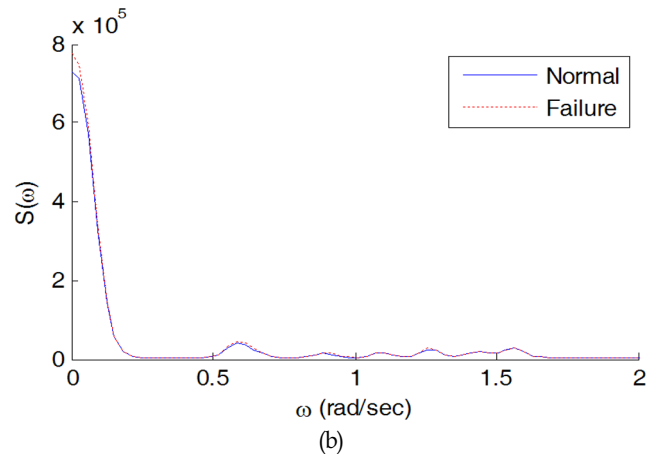
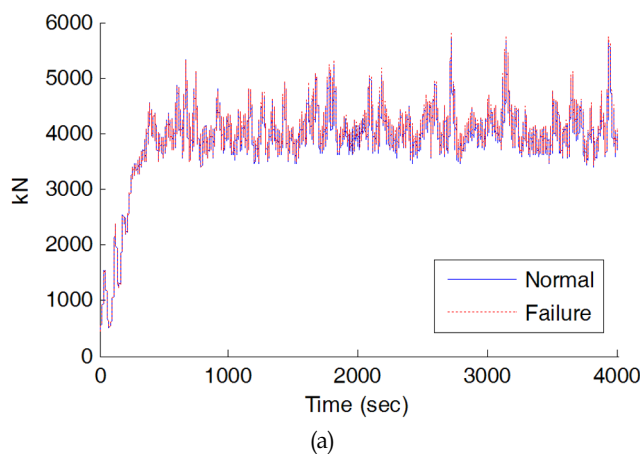


Fig. 9 Line #6 top tension (a) and spectra (b)

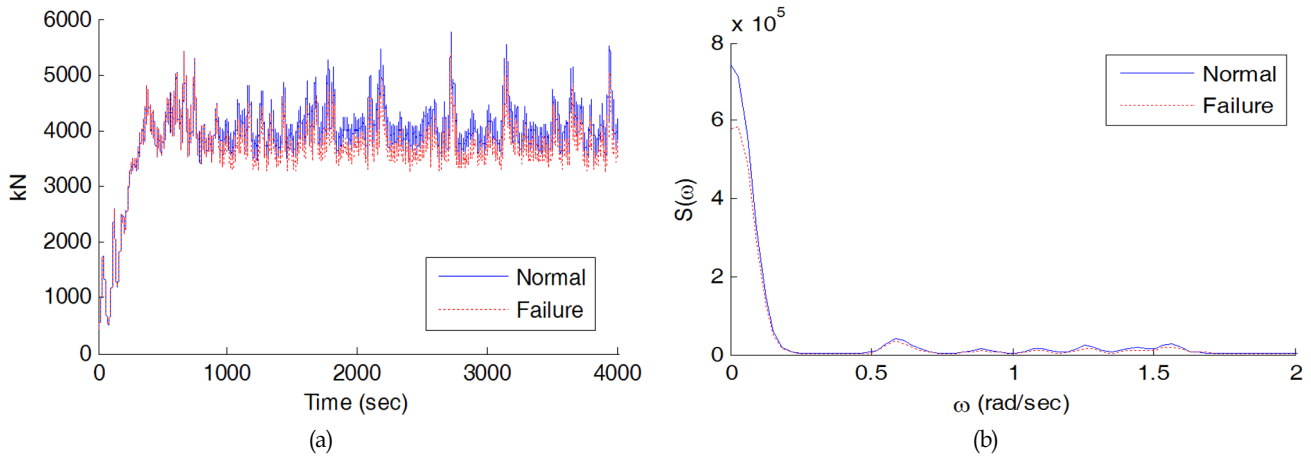


Fig. 10 Line #7 top tension (a) and spectra (b)

Table 6 Mooring line top tension statistics

Line	Normal				Failure				Error [%]
	Maximum	Minimum	Mean	STD	Maximum	Minimum	Mean	STD	
#1 [kN]	319.62	286.18	305.31	4.72	317.96	284.53	303.66	4.73	-0.54
#2 [kN]	259.74	229.30	247.21	4.32	262.76	231.92	250.60	4.48	1.37
#3 [kN]	259.69	230.01	246.59	4.29	259.53	229.59	246.51	4.32	-0.03
#4 [kN]	318.67	285.13	305.40	4.67	323.40	291.41	310.61	4.79	1.70
#5 [kN]	1902.22	1200.91	1448.99	104.46	1786.49	1129.74	1349.81	93.72	-6.85
#6 [kN]	5733.32	3394.53	4089.29	335.45	5785.73	3422.93	4134.30	342.83	1.10
#7 [kN]	5758.61	3429.57	4068.48	334.32	5407.07	3244.84	3797.94	303.85	-6.65
#8 [kN]	1978.79	1230.33	1471.78	104.03	2036.58	1256.87	1506.96	108.59	2.39

### 3. 결 론

본 논문에서는 MUFOWT의 비대칭 공력 하중의 영향에 대하여 조사하였으며, 공력-유체력-탄성력-제어-플랫폼-계류선의 복합적인 요소를 고려한 시간영역 운동응답을 구하기 위하여 FAST를 확장하여 다수의 풍력발전기가 동시 계산 되도록 하였고, 플랫폼 및 계류선 거동 계산을 위하여 CHARM3D를 결합한 복합 프로그램을 개발하여 활용하였다. MUFOWT의 경우 단일 플랫폼 상부 서로 다른 위치에 각각의 풍력발전기가 위치하게 되므로, 하나의 풍력발전기에 문제가 발생하여 추력의 변동이 있으면, 플랫폼의 선수동요 모멘트를 발생시켜 전체적인 플랫폼의 운동 응답과 계류선의 장력 응답이 달라진다. 이러한 결과는 4개의 풍력발전기가 탑재된 반잠수식 플랫폼 모델을 이용하여 시뮬레이션 하였고, 비대칭 공력하중을 적용 하였을 때 플랫폼의 선수동요 변화 및 계류선의 장력 증감을 확인하였다. 특히 계류선의 장력 변화는 플랫폼에 작용하는 환경 하중, 비대칭 공력 하중으로 야기된 플랫폼의 선수동요, 그리고 감소된 추력으로 인하여 변하는 전후동요 변위 등 복합적인 요소로 결정되므로, 본 연구에서 활용한 시간영역 해석이 필수적이라 할 수 있다. 본 연구에서는 다수의 풍력발전기 상호간의 공기역학적 간섭이나 후류의 영향은 고려하지 않았으나, 후류에 의해 감소

되는 풍속과 증가되는 난류강도 등에 대한 실험적인 데이터를 활용하여 후방의 풍력발전기에 전방과는 다른 특성의 바람 데이터를 입력한다면 부분적으로 후류의 영향을 고려한 해석을 수행할 수 있을 것이다. 본 연구결과는 향후 개발이 예상되는 다양한 형태의 MUFOWT의 운동 응답 및 장력 응답 해석에 유용한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

### 후 기

본 연구는 해양수산부의 해양청정에너지개발사업 "10MW급 부유식 파력-해상풍력 연계형 발전시스템 설계기술 개발"과제의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

### References

ABS, 2014. Guidance Notes on Global Performance Analysis for Floating Offshore Wind Turbine Installation. American Bureau of Shipping, 45-47.  
 Bae, Y.H., Kim, M.H., 2011. Rotor-floater-mooring Coupled Dynamic Analysis of Mono-column-TLP-type FOWT (Floating Offshore Wind Turbine). Journal of Ocean

- Systems Engineering, 1(1), 95-111.
- Bae, Y.H., Kim, M.H., 2013a. Coupled Dynamic Analysis of FOWT (Floating Offshore Wind Turbine) with Partially Broken Blade. Proceedings of the 23rd International Offshore and Polar Engineering Conference, Anchorage, AK.
- Bae, Y.H., Kim, M.H., 2013b. Rotor-floater-tether Coupled Dynamics Including Second-order Sum-frequency Wave Loads for a Mono-column-TLP-type FOWT (Floating Offshore Wind Turbine). Journal of Ocean Engineering, 61, 109-122.
- Bae, Y.H., Kim, M.H., 2014. Coupled Dynamic Analysis of Multiple Wind Turbines on a Large Single Floater. Journal of Ocean Engineering, 92, 175-187.
- Bae, Y.H., Kim, M.H., Q, Yu., 2014. The Dynamic Coupling Effects of a MUFOWT (Multiple Unit Floating Offshore Wind Turbine) with Partially Broken Blade. Proceedings of the 24th International Offshore and Polar Engineering Conference, Busan, Korea.
- Barltrop, N., 1993. Multiple Unit Floating Offshore Wind Farm. Journal of Wind Engineering, 17(4), 183-188.
- Haid, L., Stewart, G., Jonkman, J., Robertson, A., Lackner, M., Matha, D., 2013. Simulation-Length Requirements in the Loads Analysis of Offshore Floating Wind Turbines. Proceedings of the 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Nantes, France.
- Henderson, A.R., Leutz, R., Fujii, T., 2002. Potential for Floating Offshore Wind Energy in Japanese Waters. Proceedings of the 12th International Offshore and Polar Engineering Conference, Kitakyushu, Japan.
- Henderson, A.R., Zaaijer, M., Bulder, B., Pierik, J., Huijsmans, R., van Hees, M., Snijders, E., Wijnants, G.H., Wolf, M.J., 2004. Floating Windfarms for Shallow Offshore Sites. Proceedings of the 14th International Offshore and Polar Engineering Conference, Toulon, France.
- Jonkman, J.M., 2003. Modeling of the UAE Wind Turbine for Refinement of FAST\_AD. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO.
- Jonkman, J.M., Buhl Jr, M.L., 2004. FAST User's Guide. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO.
- Jonkman, J.M., 2007. Dynamics Modeling and Loads Analysis of an Offshore Floating Wind Turbine. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO.
- Kane, T.R., 1961. Dynamics of Nonholonomic Systems. Journal of Applied Mechanics 28, 574-578.
- Kim, M.H., Ran, Z., Zheng, W., Bhat, S., Beynet, P., 1999. Hull/mooring Coupled Dynamic Analysis of a Truss Spar in Time Domain. Proceedings of the 9th International Offshore and Polar Engineering Conference, Brest, France.
- Kim, M.H., Tahar, A., Kim, Y.B., 2001. Variability of TLP Motion Analysis Against Various Design Methodologies/Parameters. Proceedings of the 11th International Offshore and Polar Engineering Conference, Stavanger, Norway.
- Lefranc, M., Torud, A., 2011. Three Wind Turbines On One Floating Unit Feasibility Design And Cost. Proceedings of the Offshore Technology Conference, Houston, TX.
- Morison, J.R., Johnson, J.W., Schaaf, S.A., 1950. The Force Exerted by Surface Waves on Piles. Journal of Petroleum Technology, 2(05), 149-154.
- Musial, W.D., Butterfield, S., Boone, A., 2004. Feasibility of Floating Platform Systems for Wind Turbines. Proceedings of the 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV.
- Tahar, A., Kim, M.H., 2003. Hull/Mooring/Riser Coupled Dynamic Analysis and Sensitivity Study of a Tanker-based FPSO. Journal of Applied Ocean Research, 25(6), 367-382.
- Tong, K.C., 1998. Technical and Economic Aspects of a Floating Offshore Wind Farm. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 74(6), 399-410.
- Wayman, E., Scavounos, P., Butterfield, S., Jonkman, J., Musial, W., 2006. Coupled Dynamic Modeling of Floating Wind Turbine Systems. Proceedings of the Offshore Technology Conference, Houston, TX.