

탈착형 계류시스템 배치에 따른 부유식 해양구조물의 운동 및 계류성능에 관한 연구

이강수* · 김현성** · 김병완***

A Study on the Global Motion Performance of Floater and Mooring Due to Arrangement of Detachable Mooring System

Kangsu Lee*, Hyun-Sung Kim** and Byoung Wan Kim***

Key Words : Floating offshore wind turbine(FOWT) (부유식 해상풍력터빈), Detachable mooring system (탈착계류시스템), Mooring tension (계류삭 장력), Motion analysis (운동해석), High order boundary element method (고차경계요소법), Finite element method (유한요소법)

ABSTRACT

In this study, the global response characteristics of floater and mooring for floating offshore wind turbine with a detachable mooring system are performed. Global motion and structural response result extracted from the coupled motion analysis of 10MW DTU floating offshore wind turbine with detachable mooring system modeled by high-order boundary element model and finite element mesh, were used to study the characteristics of tension on mooring lines subjected to three different types of ocean loads. Breaking limit of mooring line characterized by wind, current and wave load has a major effect on the distribution of mooring tension found in time domain analysis. Based on the numerical results of coupled motion analysis, governing equation for calculating the motion response of a floater under ocean loads, and excitation force and surge motion and tension respectively are presented using excursion curve. It is found that the response of floater is reliable and accurate for calculating the tension distributions along the mooring lines under complex loadings. This means that the minimum breaking limit of mooring system satisfied a design criteria at ultimate ocean environmental loading conditions.

기호설명

G : 그린함수
 M_{add} : 부가수 질량 [kg]
 C_B : 구조물의 감쇠
 K_B : 구조물의 강성 [kg/m]

w : 구조물의 주파수 [Hz]
 f : 통합하중
 Γ_f : 자유수면 경계면
 Γ_b : sea bottom
 ϕ : 파랑 포텐셜
 t : 시간

- * 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 책임연구원 과학기술연합대학원대학교 선박해양공학스쿨 교수
** 삼성중공업 조선해양연구소, 선임연구원
*** 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 책임연구원, 과학기술연합대학원대학교 선박해양공학스쿨 교수(교신저자)

E-mail : kimbw@kriso.re.kr

DOI : <https://www.doi.org/10.33519/kwea.2023.14.2.003>

Received : March 14, 2023, Revised : April 19, 2023

Accepted : April 20, 2023

1. 서론

부유식 해상풍력발전 플랫폼의 전역거동(Global Behavior)에 직접적인 영향을 미치는 위치유지시스템(Position Keeping System)인 계류시스템은 전체 부유체를 구성하는 운동안정성과 위치유지 및 작업 성능 확보를 위한 필수적인 핵심 구성품이다. 국내의 경우 부유식 해상풍력발전과 관련하여 제작 및 건조기술에

만 집중되어있고 고부가가치 영역인 위치유지시스템의 운송 설치 및 해체 등 주로 유럽의 해외설계엔지니어링 업체에 의존하고 있는 실정이며, 지구온난화의 영향으로 해마다 더욱 강력해지는 태풍의 파괴력에 의한 해상 구조물의 엄청난 손실 및 붕괴 등을 고려하여 피항가능 및 해상 유지보수 비용저감을 위한 새로운 형식의 탈착형 계류시스템 개발이 필요한 실정이다. 특히, 한국에 접근하는 태풍의 성격, 부유체 이동방식, 접근 가능 항만 등을 고려한 연구가 필요한 상태이다. 국내기업들의 고부가가치 핵심부품 선점 및 진입을 통해 신산업창출과 국산화가 가능한 영역으로써 전문기업의 육성 가능성이 높으며 기술경쟁력 확보 가능하므로 국가적 지원이 필요한 상황이다. 부유식 해상 풍력발전시스템의 하부부유체 형식에 따라 다양한 형태의 계류시스템 내부(Internal)과 외부(External), 분리가능(Disconnectable) 으로 구분될 수 있으며, TLP 형식에 적용하는 Tendon 및 Taut, Semi와 SPAR와 같은 부유체 형식에 적용되는 Spread Mooring인 Catenary 등으로 나뉘어 질 수 있다.[1] 본 연구에서는 부유체와 계류선의 탈부착 작업이 안전하고 용이하며, 저비용이 되도록 고안하여 긴급상황 혹은 대규모 유지보수가 필요하여 부유식 풍력발전기를 포함한 부유체를 신속히 sheltered area 또는 항구(또는 전용 Offshore Base)로 이동할 시 탈부착 장치의 기구학적 설계를 포함한 새로운 형식의 혁신적인 계류시스템을 개발하고자 하였다. 또한, 부유식 해상풍력발전기가 거친 해상환경에서 25년 이상 운영안정성을 확보할 수 있도록 위치유지를 위한 계류시스템의 설계는 매우 중요하며 각 방향에서 오는 바람, 파랑, 조류 등의 해양환경 하중 평가와 더불어 각각의 계류선이 견딜 수 있는 최대장력, 반복하중에 의한 피로강도의 확보가 우선되어야 한다. 10MW급 부유식 해상풍력발전기는 DTU 모델을 적용하였고, 하부 부유체는 자체개발한 모델을 바탕으로 하여 시스템을 구성하였다.[2] 이렇게 개념설계를 통해 도출된 탈착형계류를 갖는 모델에 관한 운동해석과 계류선의 응답특성, 장력 등에 관하여 분석하였고 해양환경하중 성분별 미치는 영향에 관해서도 각각이 차지하는 비중분석을 통해 본 탈착계류 설계 시 중요한 주요인자들의 영향을 확인하였다. Fig. 1은 탈착계류시스템의 전체적인 개념에 관해 보여주고 있다.



Fig. 1 Concept of disconnectable mooring system for FOWT

2. 지배방정식 및 시스템 모델링

2.1 탈착계류 핵심장치 개념

Fig. 2는 부유식 해상풍력발전기의 탈착형 계류시스템 핵심 장치인 FCS(Fairlead Chain Stopper) 및 SMP(Submersible Mooring Pulley)에 관해 자세히 보여주고 있다. FCS의 경우, 부유체에 계류선을 고정하기 위한 역할을 하며, SMP는 계류선의 탈부착 시 보조적인 역할을 한다. 양방향 래치를 통해 계류선의 조임 및 풀림이 가능하도록 하며 상시 운영 시에는 장력이 가해진 상태로 유지하게 된다.

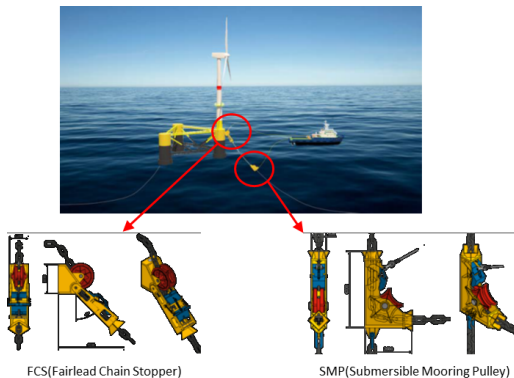


Fig. 2 FCS(Fairlead Chain Stopper) & SMP(Submersible Mooring Pulley) for FOWT

2.2 파랑유동해석에 관한 정식화

부유체, 파랑 및 계류선에 관한 지배방정식을 정식화하여 선박해양플랜트연구소(KRISO)에서 개발한 자체 수치해석코드를 통해 Fig. 3과 같이 설정하였다[3].

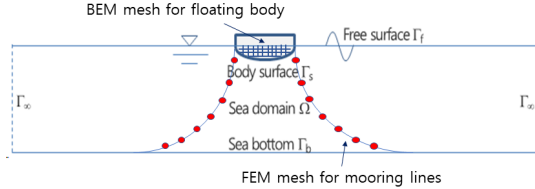


Fig. 3 Numerical formulation for floating body system

파랑유동의 포텐셜은 아래 식과 같이 입사파 포텐셜(ϕ_I), 입사파의 반사 또는 회절 등에 의한 산란파 포텐셜(ϕ_S), 부유체의 운동에 의한 방사파 포텐셜(ϕ_R) 등으로 구분할 수 있다 이때 입사파는 해석적인 산출이 가능하고 산란파와 방사파는 해석적인 계산이 거의 불가능하므로 고차경계요소법(Higher Order Boundary Element Method; HOBEM)[1] 등의 수치적인 기법을 적용한다. 식 (1)에서 (6)과 같이 유도할 수 있다.

$$\phi = \phi_I + \phi_S + \phi_R \quad (1)$$

산란파의 지배방정식과 경계조건은 아래와 같다.

$$\nabla^2 \phi_S = 0 \quad \text{at sea domain } \Omega \quad (2)$$

$$\frac{\partial \phi_S}{\partial z} = \frac{\omega^2}{g} \phi_S \quad \text{at free surface } \Gamma_f \quad (3)$$

$$\frac{\partial \phi_S}{\partial n} = 0 \quad \text{at sea bottom } \Gamma_b \quad (4)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{r} \left(\frac{\partial \phi_S}{\partial r} - ik\phi_S \right) = 0 \quad \text{at } \Gamma_\infty \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi_S}{\partial n} = - \frac{\partial \phi_I}{\partial n} \quad \text{at body surface } \Gamma_s \quad (6)$$

여기에서 ω 는 파도의 각진동수, k 는 파수, ϕ 는 파랑 포텐셜, Γ_f 는 경계면이다.

$i = \sqrt{-1}$, $\frac{\partial}{\partial n} = \vec{n} \cdot \nabla$ 이다. 식 (2)~(5)를 만족

하는 그린함수(G)와 HOBEM을 통해 식 (6)은 식 (7)과 같은 이산화 선형방정식 형태로 유도할 수 있으며 KRISO의 프로그램도 이러한 기법에 기초하여 작성되었다. 자세한 유도과정은 참고문헌[1]에 제시되어 있다.

$$[H]\{\phi_S\} = -[G]\left\{\frac{\partial \phi_I}{\partial n}\right\} \quad (7)$$

방사파의 지배방정식과 경계조건은 식 (8)에서 식 (12)와 같다.

$$\nabla^2 \phi_R = 0 \quad \text{at sea domain } \Omega \quad (8)$$

$$\frac{\partial \phi_R}{\partial z} = \frac{\omega^2}{g} \phi_R \quad \text{at free surface } \Gamma_f \quad (9)$$

$$\frac{\partial \phi_R}{\partial n} = 0 \quad \text{at sea bottom } \Gamma_b \quad (10)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{r} \left(\frac{\partial \phi_R}{\partial r} - ik\phi_R \right) = 0 \quad \text{at } \Gamma_\infty \quad (11)$$

$$\frac{\partial \phi_R}{\partial n} = -i\omega \vec{n} \cdot \vec{u} \quad \text{at body surface } \Gamma_s \quad (12)$$

여기서, Ω 는 해양영역을 나타내며, 마찬가지로 그린함수와 HOBEM으로부터 식 (13)과 같은 이산화 선형방정식을 유도할 수 있다.[4]

$$[H]\{\phi_R\} = -i\omega[G]\{u_n\} \quad (13)$$

이로부터 식 (14)와 같이 부유체의 주파수영역 운동방정식을 최종적으로 도출할 수 있다.

$$(-\omega^2[M + M_{add}] - i\omega[C_B] + [K_B])\{q\} = \{f\} \quad (14)$$

여기에서 $[M]$ 은 부유체의 질량행렬, $[K_B]$ 는 복원력 계수 행렬이고, $\{q\}$ 는 운동벡터이다. $[M_{add}]$ 와 $[C_B]$ 는 각각 방사파 포텐셜에 의한 부가질량과 유체동역학적 감쇠행렬로써 식 (13)의 해를 적분하여 유도할 수 있다. $\{f\}$ 는 파랑하중 벡터로서 식 (7)의 해를 적분하여 도출한다. 식 (14)는 식 (15)와 같은 convolution integral을 통해 시간영역으로 변환할 수 있으며 그 결과는

(16)과 같다. 이로써 주기적인 규칙과 파랑하중 뿐만 아니라 비주기적인 불규칙파 파랑하중을 고려할 수 있다. 또한 우변의 하중 항에 2차 표류력, 바람에 의한 풍하중, 조류력 등을 추가할 수 있으며 이로부터 시간 영역 응답을 구할 수 있다.[5]

$$q(t) = \int_0^t f(t-\tau)h(\tau)d\tau + q_{t=0} \quad (15)$$

$$[M_B + M_{add}(\infty)]\{\ddot{q}\} + \int_0^t [R(t-\tau)]\{\dot{q}(\tau)\}d\tau + [K_B]\{q\} = \{f_{wave}\} + \{f_{drift}\} + \{f_{wind}\} + \{f_{cur}\} \quad (16)$$

여기에서 R은 메모리함수이다. $\{f_{wave}\}$ 는 파랑하중 벡터로서 HOBEM으로부터 산출한 주파수영역의 파랑하중 RAO 결과와 불규칙파 스펙트럼으로부터 시간영역으로 생성할 수 있다. $\{f_{drift}\}$ 는 파도의 2차 성분에 의한 표류력 벡터로서 HOBEM으로 계산되는 quadratic 전달함수와 불규칙파 스펙트럼으로부터 산출한다. $\{f_{wind}\}$ 와 $\{f_{cur}\}$ 는 각각 풍하중 및 조류하중 벡터로서 본 연구에서는 모리슨 식을 이용하여 식 (17)과 (18)과 같이 계산하였다.

$$\vec{f}_{wind} = \frac{1}{2} C_D \rho_{air} |\vec{v}_{wind} - \vec{v}_s| (\vec{v}_{wind} - \vec{v}_s) dA \quad (17)$$

$$f_{current} = \frac{1}{2} C_D \rho_{water} |\vec{v}_{current} - \vec{v}_s| (\vec{v}_{current} - \vec{v}_s) dA \quad (18)$$

2.3 부유체 및 계류선 운동응답 시뮬레이션

본 연구에서는 2.2에서 서술한 부유체에 관한 고차 경계요소법을 이용하여 부유체에 관한 시뮬레이션 모델을 구현하고, 아래 식 (17)에 따라 비선형 catenary 로써 유한요소법(Finite Element Method; FEM)을 적용하여 식 (19)와 같이 계류시스템에 관한 지배방정식을 정식화하였다[8].

$$[M_m]\{\ddot{u}_m\} + [C_m]\{\dot{u}_m\} + [K_m]\{u_m\} = \{f_m\} \quad (19)$$

여기에서 $[M_m]$, $[C_m]$, $[K_m]$ 은 계류선의 질량행렬, 감쇠행렬, 강성행렬이고 $\{u_m\}$ 은 계류선의 변위 벡터, $\{f_m\}$ 은 계류선에 작용하는 하중벡터이다. 식 (16)으로부터 도출되는 부유체의 운동과 식 (17)로부터 도출되

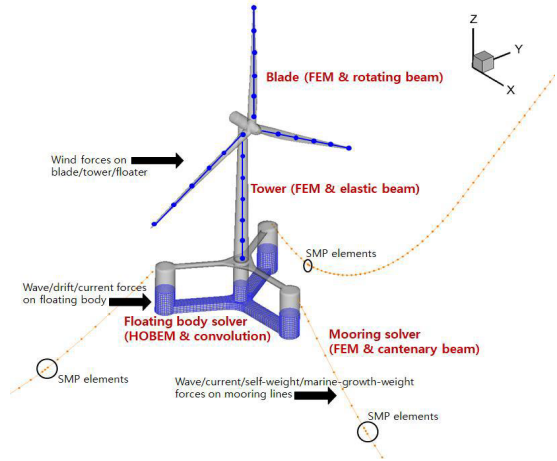


Fig. 4 Simulation model for floater and detachable mooring lines

는 계류선의 장력을 반복법을 통해 상호 연동되어 해석이 가능하도록 하였다. Fig. 4는 부유체/계류시스템에 관한 시간영역 동적연성해석을 위한 수치모델을 보여주고 있다[6, 7].

탈착계류시스템이 적용된 부유식해상풍력발전기가 설치되는 해역의 해양환경조건(파랑, 바람, 조류)과 상부터빈 및 계류시스템에 관한 제원은 각각 Table 1 및 Table 2, 3과 같다. 해양환경조건은 파랑, 바람, 조류에 관한 가장 큰 극치를 해석에 적용하였다.[9]

Table 1 Ocean environmental conditions of installation site

Wave	Significant height (Hs)	8.12 m
	Modal period (Tp)	13 s
	Shape parameter (g)	1.655
	Heading angle (b)	180 deg
Wind	Wind speed	41.09 m/s
	Heading angle	180 deg
Current	Current speed	1.69 m/s
	Heading angle	180 deg

Table 2 Specification of floating offshore wind turbine with detachable mooring system

Type	DTU(Denmark Technical University) 10MW Model
Water depth	150 m
Length×Breadth	86.3×97.903 m
Height (bottom to hub)	158 m
Draft	23.15 m
Wind Turbine System	12,058 ton
KG/GM	19.796/21.954 m
Ixx/Iyy/Izz	2.384e10/2.368e10/1.681e10 kg-m ²

Table 3 Specification of Detachable mooring and Chain system

Type	DTU(Denmark Technical University) 10MW Model
Type	Chain (R4S)
No of lines	3 (in-between angle=120 deg)
Diameter (d)	132 mm
MBL	17,712.82 kN
Axial stiffness (EA)	1.760e9 N
Mass per length (dry/wet)	381.586/331.761 kg/m
Total length (1 line)	942.406 m
Total mass (1 line)	393,529.559 kg
Fairlead from water-line	12 m
From anchor to fairlead	900 m

Fig. 4와 Fig. 5는 계류시스템의 배치에 관해 보여 주고 있다. 계류선의 길이는 전면으로 900미터, 나머지 두 선은 대각선으로 120의 각도를 이루도록 배치되었고 그 사이의 길이는 1,655미터이다. 계류시스템의 총 길이는 942.406미터, 1 set의 총 무게는 394톤이며, 총 3 set으로 구성되어 있으며 계류선 재료는 steel 체인으로 R4S를 적용하였다. 이 때 계류선의 파단한계 (minimum breaking limit)은 약 17,712 kN이다. 설치해역의 수심은 150미터이고 페어리드의 위치는 수면으로부터 상향 12미터에 위치하며 부유체의 단면길이는 약 90미터이다. 해양환경력이 작용하는 좌표는 +x로부터 -x방향으로 작용하도록 하였다. FCS와 SMP의 재질은 DH36강재를 적용하였고 각각의 중량은 40톤, 18톤으로 설계되었다. SMP의 경우 중량에 따라 계류선의 배치에 영향을 줄 수 있으나 현재 설계된 배치를 기준으로 집중질량으로 모사하여 해석에 반영하였다. 본 연구에서 적용한 해석케이스는 IEC61400-3의 6.1 D.L.C.(Design Load Case)를 적용하였고 이는 극한한 계상태(Ultimate Limit State)로써 ULS의 대표적인 5개의 설계하중케이스(1.3, 1.4, 1.6, 6.1, 6.2) 중 하나으로써 계류선에 작용하는 하중이 가장 큰 케이스에 해당된다. 또한, 50년 재현 주기 극치 풍속 모델 (EWM)에 11 % 난류 강도를 풍속으로 적용하며 IFORM결과로부터 얻은 50년 재현 주기 극치 유의 파고를 적용하였다.[7,8]

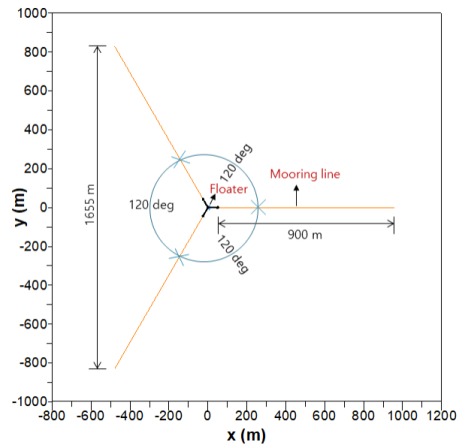


Fig. 5 Arrangement of mooring lines(plan-view)

3. 부유체 및 계류시스템 응답 특성

3.1 계류선의 배치에 따른 특성고찰

일반적으로 해양부유체 구조물의 기본설계 시 부유체 작용하중에 따라 변동하는 surge에 관한 오프셋 곡선을 만들어서 강성을 측정해 보고 오프셋에 따른 계류선의 장력을 간략히 예측해 보는 과정을 수행하게 된다. 본 연구에서도 이러한 excursion curve를 통해 예비설계단계 또는 본격적인 수치시뮬레이션에 앞서 계류선의 복원력(계류강성)의 특성을 파악하고자 하였다.[6] Fig. 6은 KRISO 자체코드를 통해 구현된 부유식 해상풍력터빈 탈착계류시스템에 관한 시뮬레이션 모델을 보여주 고 있고, Fig. 7은 부유체 및 계류시스템을 포함한 전체 수치해석모델에 관한 3차원 모습을 보여주 고 있다.

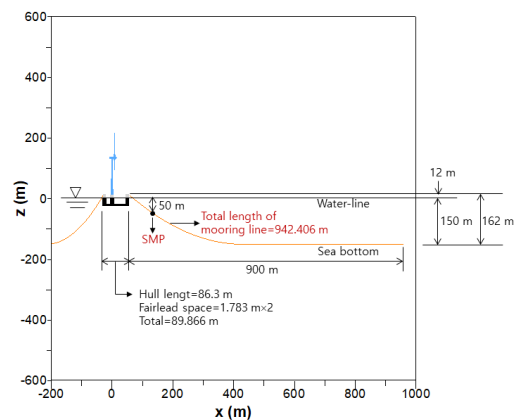


Fig. 6 Arrangement of mooring lines(elevation-view)



Fig. 7 Numerical modeling for Motion Analysis (isometric-view)

Fig. 8은 부유체 하중과 오프셋과의 관계를 보여주고 있다. 또한, Fig. 9는 계류선의 장력과 오프셋과의 관계를 보여주고 있다. 개념설계된 탈착계류체인은 안전율을 고려하여 하중 1000톤, 최대 약 1200톤까지 견딜 수 있도록 하였으나 계류선의 강성이 약간 부족하기 때문에 강성보완을 해야 하는 것으로 판단된다. 강성을 증대시키는 방법으로 체인의 직경을 늘리거나 재료를 변경하는 방법이 있으므로 추후 이를 고려하여 재설계시 참고해야 한다. 페어리드에서 터치타운 포인트까지의 수평거리가 짧아질 경우 계류선의 복원강성이 작아질 수 있는데 이러한 경우 계류선의 배치를 조정하여 강성을 확보하거나 lazy wave 부이를 설치하여 부력을 높이는 방법으로 계류선의 배치를 조정할 필요가 있다.[9,10]

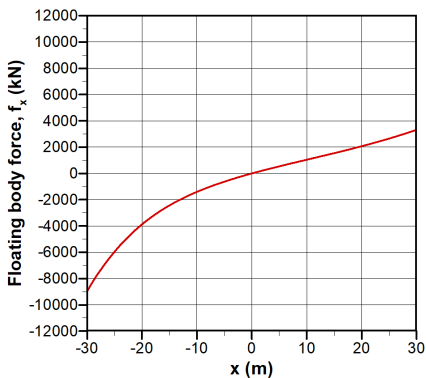


Fig. 8 Floater Offset(force vs. excursion)

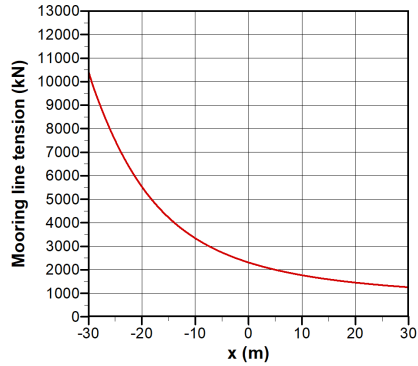
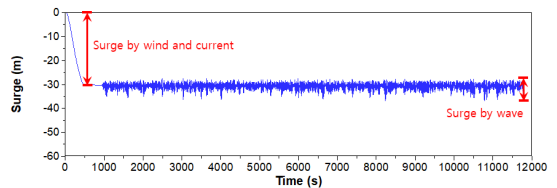


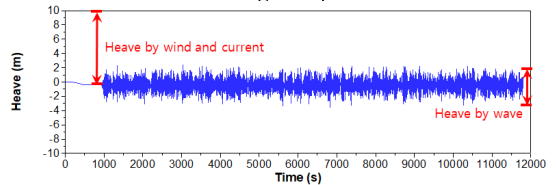
Fig. 9 Floater Offset(tension vs. excursion)

3.2 부유체 및 계류선 응답특성분석

Fig. 10은 부유식 해상풍력발전시스템에 관한 수치 해석 결과 중 운동에 관한 시계열응답으로써 각각 surge, heave, pitch에 관한 운동응답을 보여주고 있다. - Surge, heave, pitch의 최대값은 각각 31.231 m, 9.812 m, 3.075 deg이다. Fig. 11은 수치해석 결과 중 계류선의 장력변화 시계열을 나타낸다. Table 4는 계류선에 작용하는 장력계산결과를 보여주고 있다. 자중에 의한 초기장력은 236톤, 풍하중과 조류하중에 의한 장력은 800톤, 파랑하중에 의한 변동장력까지 포함하면 최대 1,430톤의 장력이 발생한다. 이는 MBL (17,712.82 kN=1,806톤)의 74.2 %에 해당한다. GH-Blade를 통해 계산한 결과는 약 1,470톤으로 2.7 % 차이로 매우 유사한 결과를 얻었다. 다른 해양환경하중 바람, 조류에 비해 파랑에 의한 영향이 지배적으로 큰 것을 알 수 있었다.

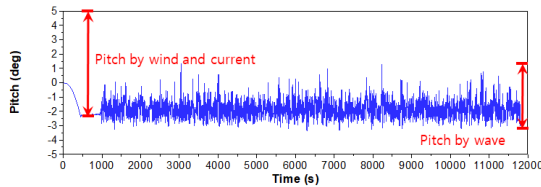


(a) surge response



(a) heave response

Fig. 10 Motion Responses of FOWT(계속)



(c) pitch response

Fig. 10 Motion Responses of FOWT

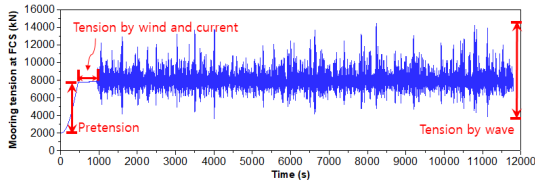


Fig. 11 Mooring Tension Response of FOWT

Table 4 Result of mooring line tensions

Environment	Tensions at FCS [tonf]
Initial layout	236
Initial+wind+current	800
Initial+wind+current+wave	1,430

4. 결론

선박해양플랜트연구소에서 In-house code를 사용하여 고차경계요소법, 계류선은 유한요소법을 통해 연성(coupling)하여 탈착계류가 적용된 부유체에 관해 시간영역 운동해석 결과응답(surge, heave, pitch) 분석을 통해 응답특성과 계류선 장력의 특성을 고찰하였다. 또한, 계류시스템 오프셋, 장력분포, 극한한계치를 예측하여 탈착계류의 건전성에 관한 평가를 수행하였다. 본 연구를 통해 바람, 조류, 파랑하중으로 나누어 각각의 하중성분들이 계류응답에 차지하는 비중을 분석하였고 파랑하중이 전체의 지배적임을 알 수 있었다. 향후 다양한 해상상태와 풍력발전기의 운전상태를 고려하여 부유식 해상풍력 탈착계류시스템 전체에 미치는 영향과 상부 터빈과 부유체의 관성력을 고려하여 더 상세하고 고도화된 연성해석이 수행될 필요성이 있다. 또한, 블레이드 회전에 따라 발생하는 웨더베이닝을 고려한 설계와 해석이 수행되어야 할 것이다.

후기

본 연구는 산업통상자원부 신재생에너지핵심기술개발사업(한국에너지기술평가원-풍력분야)의 지원으로 ‘MW급 부유식 해상풍력 탈착형 계류시스템 개발(과제번호: 20213000000030, 계정번호: PNS4560)’과제에서 수행된 연구결과 중 일부를 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Hong SY, Kim JH, Cho SK, Choi YR, and Kim YS, 2005, “Numerical and experimental study on hydrodynamic interaction of side-by-side moored multiple vessels”. Ocean Engineering Vol. 32, pp 783-801
- [2] Bak, Christian, 2013, “The DTU 10-MW Reference Wind Turbine”, Denmark Technical University
- [3] Kim BW, Sung HG, Kim JH, and Hong SY, 2013, “Comparison of linear spring and nonlinear FEM methods in dynamic coupled analysis of floating structure and mooring system”. Journal of Fluids and Structures Vol. 42, pp 205-227.
- [4] Newman JN, 1985, “Algorithms for the free-surface Green function”, Journal of Engineering Mathematics Vol. 19, 57-67.
- [5] Choi YR, Hong SY, and Choi HS, 2005, “An analysis of second-order wave forces on floating bodies by using a higher-order boundary element method”, Ocean Engineering Vol. 32, 117-138
- [6] Park HJ, Kim JS, and Nam BW, 2023, “Numerical Analysis for Motion Response of Modular Floating Island in Waves”, Journal of Ocean Engineering and Technology Vol. 37(1), pp.8-19
- [7] IEC, 2019, Design Requirements for Floating Offshore Wind Turbines, p. 26~27.
- [8] DNV-GL, 2018, Floating wind turbine structures, p. 126~136.
- [9] Kim MJ and Shin HK, 2020, “A Study on Environmental Conditions for the Estimation of Stability of Floating Offshore Wind Turbine

- Systems”, Journal of Wind Energy Vol.11(4) pp.5-11
- [10] Nam HS, Park DM, Cho SK, and Hong SY, 2022, “Analysis of Relative Wave Elevation Around Semi-submersible Platform Through Model Test: Focusing on Comparison of Wave Probe Characteristics”, Journal of Ocean Engineering and Technology Vol. 36(1), pp.1-10