

# 계류선에 비대칭 부착생물 발생 시 스파형 구조물의 거동 및 계류장력 변화에 대한 수치해석 연구

하윤진<sup>1</sup> · 임창혁<sup>2</sup> · 김정석<sup>1\*</sup><sup>1</sup>선박해양플랜트연구소 친환경해양개발연구본부 선임연구원<sup>2</sup>선박해양플랜트연구소 친환경해양개발연구본부 선임기술원

## A Numerical Study on the Motion and Mooring Tension Variations of a Spar-Type Structure Due to Asymmetric Marine Growth on Mooring Line

Yoon-Jin Ha<sup>1</sup>, Chang-Hyuck Lim<sup>2</sup>, and Jeong-Seok Kim<sup>1\*</sup><sup>1</sup>Senior Researcher, Eco-friendly Ocean Development Reseach Division, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea<sup>2</sup>Senior Engineer, Eco-friendly Ocean Development Reseach Division, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

### 요 약

본 연구에서는 비대칭 해양생물부착이 스파형 부유식 구조물의 거동 응답 및 계류장력 특성에 미치는 영향을 분석하기 위해 수치해석을 수행하였다. 해양생물부착은 실제 해상 환경에서 흔히 관찰되는 비균일 부착 조건을 모사하기 위하여, 세 개의 캐터너리 계류선 중 하나의 계류선에만 발생하는 것으로 가정하였다. 해양생물 두께 변화에 따른 계류선의 단위 길이당 질량, 횡방향 항력 및 부가질량 계수, 접선방향 항력 및 부가질량 계수의 변화는 DNVGL 설계지침에 제시된 산정식을 이용하여 평가하였다. 수치해석 결과, 비대칭 해양생물부착은 스파형 구조물의 전후동요 및 상하동요 운동 평균값을 크게 변화시키나 표준편차 변화에는 큰 영향을 주지 않는 것을 확인하였다. 반면, 계류장력의 경우 평균값과 표준편차 모두 해양생물 두께 증가에 따라 민감하게 변화하였다. 이러한 결과는 비대칭 해양생물부착이 전체 구조물 거동 변화가 크지 않더라도 계류계 응답에는 상당한 영향을 미칠 수 있음을 보여주며, 스파형 부유식 구조물의 설계 및 해석 시 기초적인 자료를 제공하였다.

**Abstract** – In this study, numerical analyses were performed to investigate the effects of asymmetric marine growth on the motion response and mooring tension characteristics of a Spar-type floating structure. Marine growth was assumed to occur on only one of three catenary mooring lines, representing non-uniform attachment conditions commonly observed in offshore environments. Variations in mooring line mass density, transverse drag and added mass coefficients, and tangential drag and added mass coefficients associated with different marine growth thicknesses were calculated using the formulations specified in DNVGL guideline. The numerical results show that asymmetric marine growth induces changes in the mean values of surge and heave motions, while its influence on the standard deviations of these motions remains limited. In contrast, both the mean and standard deviation of the mooring tension are sensitive to increasing marine growth thickness under asymmetric conditions. These results indicate that non-uniform marine growth can significantly affect mooring system responses, even when its impact on global platform motions is relatively small. The findings of this study provide fundamental insights into the importance of considering asymmetric marine growth in the design and analysis of Spar-type floating structures.

**Keywords:** Marine Growth(해양생물부착), Spar Platform(스파형 구조물), Catenary Mooring System(현수식 계류시스템), Platform Motion(구조물 거동), Mooring Tension(계류장력)

\*Corresponding author: jskim@kriso.re.kr

## 1. 서 론

부유식 해상풍력 터빈과 파력발전기 등 해양재생에너지 구조물은 최근 대수심 해역으로 적용이 확대되고 있으며, 이에 따라 장기간 해양환경에 노출되는 구조물의 거동 특성과 내구성에 영향을 미치는 요인에 대한 검토가 중요해지고 있다. 특히 해수 중에서 성장하는 해양생물부착은 구조 부재 표면에 다양한 생물이 축적되는 현상으로, 해상구조물의 유체역학적 특성 변화와 직결되는 주요 환경 요인으로 인식되고 있다. 해양생물부착은 미생물에 의해 형성되는 생물막뿐만 아니라 따개비, 연체동물, 관형 생물 및 해조류와 같은 대형 생물의 부착을 포함하며, 이러한 생물 군집은 구조물 표면의 형상과 물리적 특성을 변화시킨다.

해양생물의 축적으로 인해 구조 부재 및 계류시스템의 외경, 질량 및 표면 거칠기가 증가하게 되면, 유체와의 상호작용이 변화하여 항력 및 관성력이 증대될 수 있다. 이로 인해 구조물에 작용하는 유체력 하중이 증가하고, 반복 하중에 따른 피로 손상이 가속화되거나 부식이 촉진될 가능성이 있다. 결과적으로 이러한 변화는 해상 에너지 장치의 구조적 안전성뿐만 아니라 장기적인 운용 효율과 수명에 영향을 미칠 수 있다.

해양생물부착이 해상 구조물 성능에 미치는 영향은 설치 해역의 환경 조건, 구조물 형식 및 계류 방식에 따라 다르게 나타난다. 선행 연구에 따르면 파력발전기를 대상으로 한 사례에서 생물 부착으로 인해 흡수가 증가하고 발전 성능이 저하되는 현상이 관찰되었으며, 그 영향의 크기는 부착 정도에 따라 차이를 보였다(Tiron *et al.* [2013]; Wright *et al.* [2016a]). 한편, 방오 코팅과 같은 생물 부착 저감 기법은 환경 규제와 유지관리 측면의 제약으로 인해 장기적인 해결책으로 적용하는 데 한계가 있는 것으로 보고되고 있다.

부유식 구조물의 위치 유지와 안정성을 담당하는 계류시스템 또한 해양생물 부착의 영향을 크게 받는다. 기존 연구에서는 생물 부착으로 인해 체인형 현수식 계류선의 피로 수명이 감소하며, 긴장 계류 구조물의 경우 과도한 생물 부착이 텐션의 초기 장력 감소를 유발하여 구조적 안전성을 저하시킬 수 있음이 제시되었다(Yang *et al.* [2017]; Wright *et al.* [2016b]). 최근에는 해양생물 부착이 계류선의 고유 특성과 동적 응답을 변화시킬 수 있음이 확인되었으며(Spraul *et al.* [2017]), 이는 부유식 해상풍력 터빈 설계 시 생물 부착 효과가 고려되어야 함을 제시하였다.

이러한 기존 연구들을 바탕으로, 계류선에 형성되는 해양생물부

착의 공간적·시간적 특성을 분석한 연구에서는 생물 부착이 계류계의 유체역학적 거동을 변화시켜 부유식 구조물의 안정성과 동적 성능에 영향을 미칠 수 있음을 제시하였다(Dubois *et al.* [2025]). 그 뿐 아니라 생물부착으로 인한 항력 증가와 동적 응답 변화가 부유식 해상풍력 시스템의 운용 효율 및 사용 수명에 부정적인 영향을 줄 수 있음이 추가적으로 확인되었다(Poozesh *et al.* [2025]).

이와 같이 기존 연구들은 해양생물 부착이 부유식 해상 재생에너지 구조물의 유체역학적 거동과 구조적 건전성에 있어 중요한 고려요소임을 공통적으로 강조하고 있다. 이에 따라 DNVGL 설계지침 [2018]에서는 해양생물 부착 효과를 설계와 해석 과정에 반영할 것을 요구하고 있다. 해당 지침서에서는 해양생물 부착으로 인한 직경 및 질량 증가, 유체 항력 변화가 계류 장력 변동과 피로 손상에 미치는 영향을 고려하도록 명시하고 있다.

해양생물부착은 부유식 해양재생에너지 구조물의 장기 거동과 계류계 응답에 실질적인 영향을 미치는 요소로서, 이를 고려한 체계적인 해석과 설계가 요구된다. 이에 본 연구에서는 계류선에 해양생물부착이 비대칭으로 발생하는 경우를 대상으로, 장기 운용 조건에서 스파형 부유체의 거동 특성과 계류장력 변화 양상을 수치적으로 분석함으로써 해양생물부착으로 인해 발생하는 물리적인 현상을 확인하였다.

## 2. 수치해석방법

### 2.1 해석모델

본 연구에서는 기존 연구를 통해 검증된 미국 국립재생에너지연구원(NREL)의 공개 자료인 OC3-Hywind Spar 플랫폼(Jonkman [2010])을 활용하여, 계류선에 발생하는 해양부착생물(marine growth) 두께 변화에 따른 스파형 플랫폼의 운동 특성 및 계류장력 변동을 수치적으로 분석하였다. 플랫폼의 구성 및 주요 계원은 Fig. 1과 Table 1에 제시하였다.

Jonkman[2010]의 모델에는 NREL 5 MW 공개 풍력터빈이 포함되어 있으나, 본 연구에서는 터빈을 제외하고 하부 스파형 플랫폼만을 대상으로 해석을 수행하였다. 모든 수치해석은 해상풍력 구조물 해석에 널리 활용되는 OpenFAST v4.1.2 프로그램을 이용하여 수행되었다. 여기서, 계류해석은 OpenFAST에서 제공하는 Lumped-mass 기반의 FE 모델을 활용하였다.

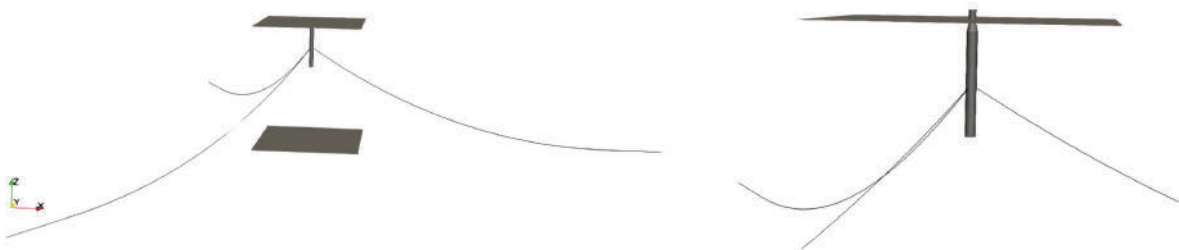


Fig. 1. OC3-Hywind spar platform.

**Table 1.** Representative principal dimensions of the OC3-Hywind spar platform (Jonkman[2010])

Parameter	Unit	Value
Depth to Platform Base Below SWL	m	120
Elevation to Platform Top Above SWL	m	10
Depth to Top of Taper Below SWL	m	4
Depth to Bottom of Taper Below SWL	m	12
Platform Diameter Above Taper	m	6.5
Platform Diameter Below Taper	m	9.4
Platform Mass, Including Ballast	kg	7,466,330
CM Location Below SWL Along Platform Centerline	m	89.9155
Platform Roll Inertia about CM	kg-m <sup>2</sup>	4,229,230,000
Platform Pitch Inertia about CM	kg-m <sup>2</sup>	4,229,230,000
Platform Yaw Inertia about Platform Centerline	kg-m <sup>2</sup>	164,230,000

**Table 2.** Environmental conditions

White Noise Wave	
Significant wave height (m)	6
Wave period range (s)	6-31
Heading angle (°)	180
Irregular Wave (JONSWAP Spectrum, $\gamma = 3.3$ )	
Significant wave height (m)	9.14
Peak period (s)	13.6
Heading angle (°)	180

## 2.2 파도조건

본 연구에서는 계류선에 발생한 해양부착생물 두께 변화에 따른 Spar 플랫폼의 운동 응답 및 계류장력 특성을 분석하기 위해 백색 잡음파(White Noise Wave)와 불규칙파(Irregular Wave)를 고려하였다. 백색잡음파 조건은 Jonkman and Musial[2010]에서의 파고 기준을 플랫폼 고유주기를 고려하여 파주기 범위를 고려하였으며, 불규칙파 조건은 Jonkman and Musial[2010]에서의 극한조건을 고려하였다. 불규칙파는 스펙트럼 기반으로 21,600개의 파도 주파수 성분이 중첩되었다. 그리고 모든 해석에서의 시간간격은 0.0125초로 Jonkman[2010]의 OC3-Hywind Spar 플랫폼 해석과 동일한 시간간격이 적용되었으며, 파랑의 입사 방향은 정면파(Head sea) 조건으로 제한하였다.

## 2.3 계류선의 해양부착생물 두께 변화

DNVGL 설계지침[2018]에서는 해양부착생물 두께에 대해 실측 자료의 사용을 권고하고 있으나, 본 연구에서는 해당 자료를 확보할 수 없었기 때문에 해양부착생물 두께에 따른 계류선의 질량밀도 및 횡방향 항력계수를 DNVGL 설계지침[2018]에 제시된 식 (1), (2), (3)을 이용하여 산정하였다. 또한, 횡방향 부가질량계수 역시 식 (3)을 그대로 적용하였다.

$$M_{growth} = \frac{\pi}{4} [(D_{nom} + 2\Delta T_{growth})^2 - D_{nom}^2] \rho_{growth} \cdot \mu \quad (\text{kg/m}) \quad (1)$$

$$W_{growth} = M_{growth} \left[ 1 - \frac{\rho_{seawater}}{\rho_{growth}} \right] \frac{1}{1000} \quad (\text{kg/m}) \quad (2)$$

여기서  $\rho_{growth}$  = 해양부착생물 밀도(density of marine growth),

$\rho_{seawater}$  = 해수 밀도(density of seawater)

$D_{nom}$  = 체인 또는 와이어의 공칭직경 (nominal chain or wire rope diameter)

$\mu$  = 계류선상수(체인 : 2.0, 와이어: 1.0) (mooring line constant (chain : 2.0, wire : 1.0))

$\Delta T_{growth}$  = 해양부착생물 두께(marine growth surface thickness)

$M_{growth}$  = 해양부착생물 질량(mass of marine growth)

$W_{growth}$  = 해양부착생물 무게(weight of marine growth)

DNVGL 설계지침[2018]에서는 해양부착생물의 밀도를 수심 및 해역 조건에 따라 1100~1325 kg/m<sup>3</sup> 범위로 제시하고 있다. 본 연구에서는 보수적인 접근을 위해 1325 kg/m<sup>3</sup>의 값을 적용하였으며, 해양 부착생물 두께에 따라 식 (2)로 산정된 수중중량을 계류선의 질량밀도에 추가하여 반영하였다.

해양부착생물 두께에 따른 횡방향 항력계수의 변화는 식 (3)에 의해 정의된다.

$$C_{D,growth} = C_D \left[ \frac{D_{nom} + 2\Delta T_{growth}}{D_{nom}} \right] \quad (3)$$

여기서  $C_D$  = 항력계수(스터드 체인 : 2.6, 스텐드리스 체인 : 2.4, 스트레드 로프 : 1.8, 덮개없는 스파이럴 로프 : 1.6, 덮개있는 스파이럴 로프 : 1.2) (drag coefficient(stud chain : 2.6, studless chain : 2.4, stranded rope : 1.8, spiral rope without sheathing, spiral rope with sheathing : 1.2))

다만, 식 (3)을 활용하여 접선방향 항력계수 및 부가질량계수에 적용할 경우 해양부착생물 두께 변화에 따라 계수가 과도하게 변동하는 문제가 발생하였다. 또한, DNVGL 설계지침[2018]에서는 접선방향 항력계수 및 부가질량계수 변화에 대한 고려를 하고 있지 않다. 이에 따라 본 연구에서는 ISO 설계지침[2012, 2016]을 참고하여, 해당 계수들이 해양부착생물 두께에 대해 선형적으로 변화하도록 식 (4)와 같이 수정하여 적용하였다. ISO 설계지침[2012, 2016]에서는 해양부착생물에 대하여 Jack-up 구조물에 초점을 맞추었으나, 본 연구에서의 계류선은 Jack-up 구조물보다 상대적으로 가늘기 때문에 해양부착생물 두께 변화에 따른 접선방향 항력계수와

부가질량계수의 변화를 ISO 설계지침[2012, 2016]의 정의에 따라 적용하여도 무리가 없을 것으로 판단된다. DNVGL 설계지침[2018]에서는 해양 부착생물 두께에 따른 항력계수 변화에 대해 대체적인 산정 방법의 적용을 허용하고 있다. 본 연구에서는 식 (3)을 해양 부착생물 두께에 따른 횡방향 부가질량계수의 변화에도 동일하게 적용하였다. 한편, ISO 설계지침[2012, 2016]에 따르면 해양 부착생물 두께에 따른 접선방향 항력계수의 변화는 식 (4)에 나타난 바와 같이 선형 관계를 가정하여 산정하도록 제시하고 있다.

$$C_{DAx, growth} = C_{DAx} + 2\Delta T_{growth} \quad (4)$$

식 (4)는 해양부착생물 두께에 따른 접선방향 부가질량계수의 변화에도 동일하게 적용하였다.

Table 3에는 OC3-Hywind Spar 플랫폼의 계류선 초기 물성치를 제시하였으며, 본 연구에서는 DNV 설계지침[2021]과 Spraul *et al.*[2017]의 연구를 참고하여 50 mm, 100 mm, 150 mm의 해양부착생물 두께를 고려하였다.

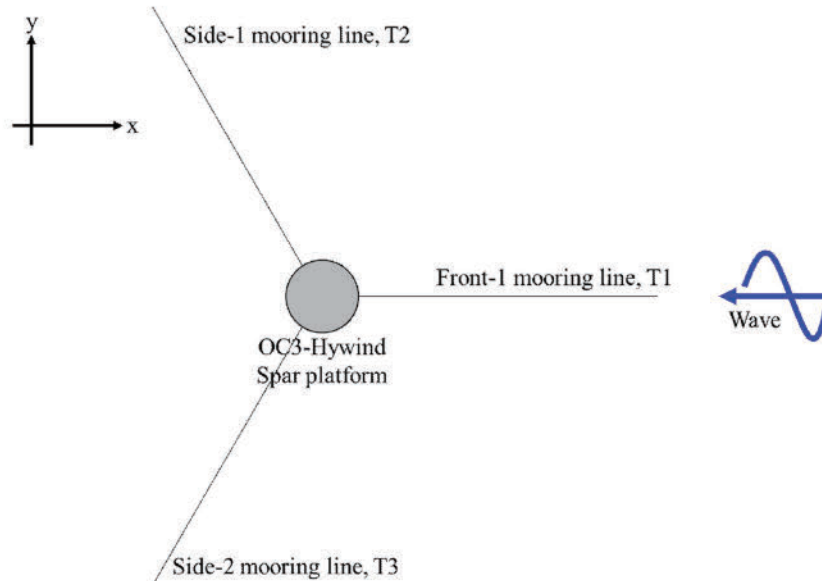
DNV 설계지침[2021]에서는 해양부착생물 두께가 2년 동안 0mm

**Table 3.** Initial values for the mooring lines of the OC3-Hywind spar platform

Diameter (m)	0.09
Mass density (kg/m)	77.7066
Transverse drag coefficient	1.6
Transverse added mass coefficient	1.0
Tangential drag coefficient	0.1
Tangential added mass coefficient	0.0

에서 100 mm까지 일정한 비율로 증가한 후 안정적으로 유지된다는 가정을 포함하나, 본 연구에서는 보수적인 평가를 위하여 해양부착생물 두께 150 mm를 추가적으로 검토하였다. 그리고 해양부착생물은 모든 계류선에 동일하게 두께로 발생되지 않는 가정으로 계류선에 해양부착생물이 비대칭으로 발생함을 고려함으로써 보수적인 평가를 수행하였다.

Fig. 2는 OC3-Hywind Spar 플랫폼의 계류 시스템 구성을 나타낸다. 본 연구에서는 계류선에 비대칭 해양부착생물 발생 시 스파형 플랫폼의 거동 및 계류장력을 분석하기 위하여 전면-1 계류선



**Fig. 2.** Configuration of the mooring system of the OC3-Hywind spar platform (Jonkman [2010]).

**Table 4.** The initial motions and pre-tensions of the OC3-Hywind spar platform

	Original	MG=50mm at Front 1-line	MG=50mm at Side 1-line	MG=100mm at Front 1-line	MG=100mm at Side 1-line	MG=150mm at Front 1-line	MG=150mm at Side 1-line
Surge offset (m)	0.00	3.46	-1.87	10.43	-5.34	18.07	-9.13
Sway offset (m)	0.00	0.00	3.08	0.00	9.13	0.00	15.70
Heave offset, draft (m)	0.00	-0.33	-0.33	-1.11	-1.11	-2.21	-2.21
Roll offset (deg.)	0.00	0.00	-0.02	0.00	-0.05	0.00	-0.10
Pitch offset (deg.)	0.00	-0.05	-0.07	-0.01	-0.09	0.05	-0.12
Yaw offset (deg.)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pre-tension, T1 (kN)	910	1,004	958	1,220	1,060	1,531	1,192
Pre-tension, T2 (kN)	910	958	1,004	1,060	1,220	1,192	1,531
Pre-tension, T3 (kN)	910	958	958	1,060	1,060	1,192	1,192

(Front-1 mooring line)과 측면-1 계류선(Side-1 mooring line)에 해양부착생물 발생을 가정하여 수치해석을 수행하였다.

Table 4는 각 위치에 해양부착생물이 발생하였을 때 그 두께 증가에 따른 OC3-Hywind Spar 플랫폼의 초기위치와 초기장력을 보여준다. 전면-1 계류선에 해양부착생물 발생 시 그 두께 증가에 따라 플랫폼이 전면으로 크게 이동한 것을 확인할 수 있으며, 해양부착생물 두께 증가에 따른 계류선 무게가 증가하여 플랫폼이 가라앉는 것을 확인할 수 있다. 다만, 플랫폼이 전면으로 기울어지는 각도는 크게 바뀌지 않는 것을 확인할 수 있다. 측면-1 계류선에 해양부착생물 발생 시에는 그 두께 증가에 따라 플랫폼이 후면과 측면으로 크게 이동하며, 가라앉는 깊이는 전면-1 계류선 해양부착생물 두께에 따른 가라앉는 깊이 변화와 동일한 것을 확인할 수 있다. 또한, 전면 및 측면 그리고 회전하는 각도는 크지 않은 것을 확인할 수 있다. 아울러, 계류선 1개에 해양부착생물이 발생하여도 전체 계류선의 초기장력이 크게 바뀌는 것을 확인할 수 있다. 이는 계류선 1개에 해양부착생물 발생이 전체 계류장력 변화에도 기인할 수 있음을 확인할 수 있다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 백색잡음파 해석

본 연구에서는 수치해석 결과의 타당성을 검증하기 위하여 Ahn and Shin(2019)의 모형시험 결과와 직접 비교를 수행하였다. Fig. 3은 Ahn and Shin(2019)의 모형시험결과와 수치해석결과를 직접 비교한 그림이다.

여기서 “Original”은 본 연구에서 수행한 수치해석 결과이며, 파란색 실선은 Table 2의 백색잡음파 수치해석 결과이다. 또한 파란색 점은 규칙파 수치해석 결과를 의미하며, 이때 적용된 규칙파 조건은 Ahn and Shin(2019)에서 수행된 규칙파 모형시험 조건과 동일하게 설정하였다. 한편, 속이 빈 검은색 네모는 Ahn and Shin(2019)에서 보고된 모형시험 결과를 나타낸다. 비교 결과, 본 연구의 수치해석 결과는 Ahn and Shin(2019)의 모형시험 결과와 정량적 및 정성적으로 좋은 일치성을 보이는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 Fig. 2에 제시된 바와 같이, 계류선 중 단일 라인에만 해양생물이 부착된 경우(전면-1, 측면-1)에 대한 OC3-Hywind Spar

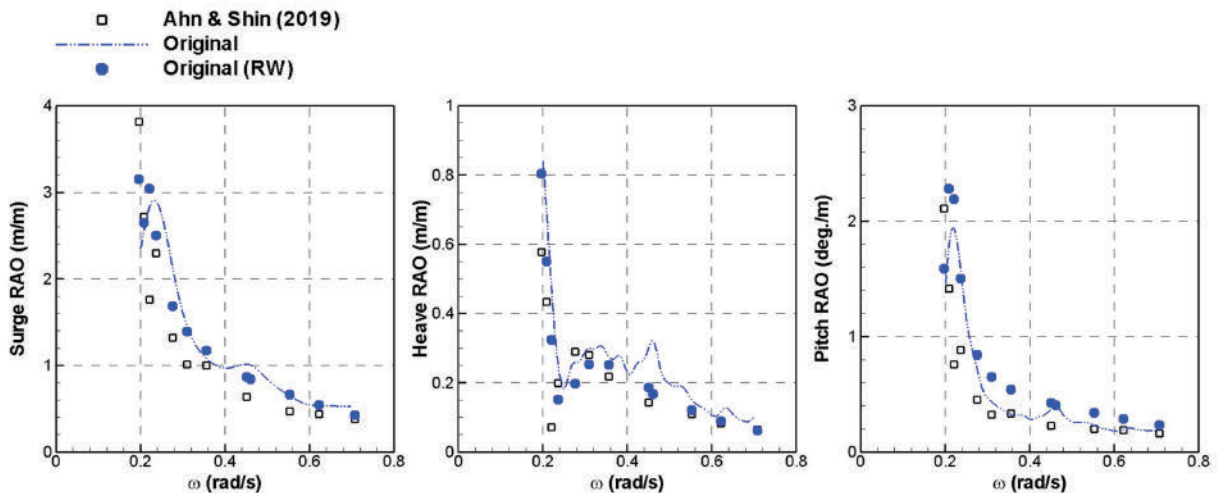


Fig. 3. Motion RAOs for the original model.

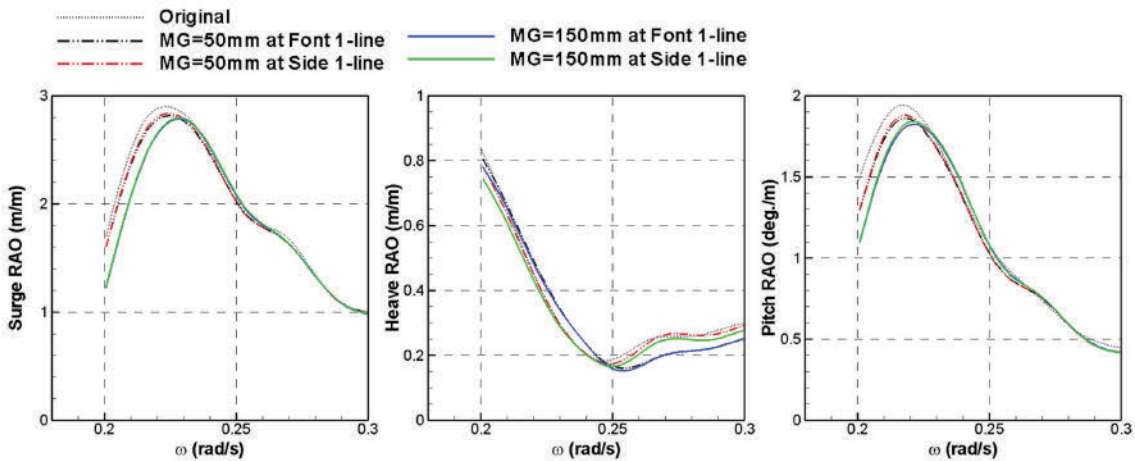


Fig. 4. Motion RAOs according to the marine growth thickness on front and side one mooring line.

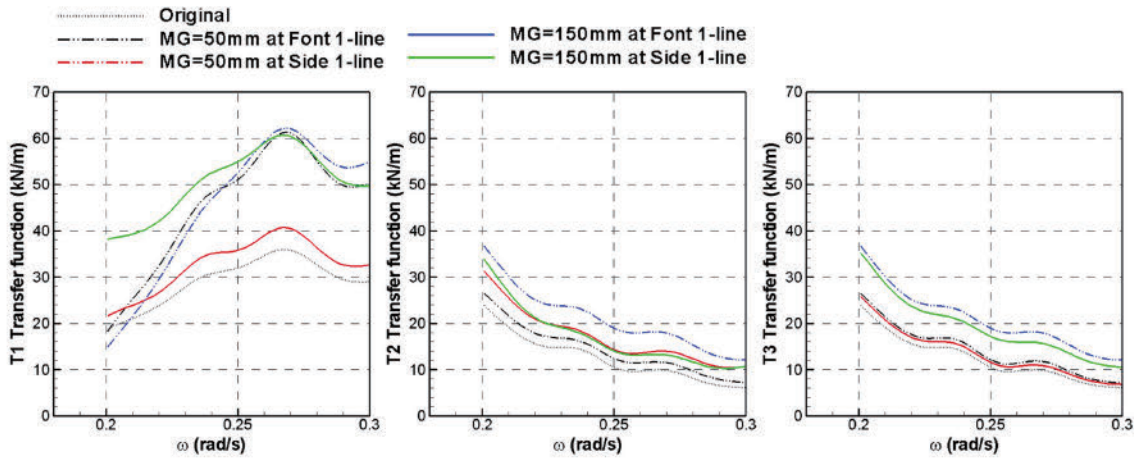


Fig. 5. Transfer functions of the mooring line tensions according to the marine growth thickness on front and side one mooring line.

플랫폼의 운동 RAO를 보여준다. 본 해석에서는 대표적인 해양부착생물 두께로 50 mm와 150 mm를 고려하였다. 해양부착생물 두께 50 mm의 경우 해양부착생물이 발생하지 않은 'Original'과 비교하였을 때, 전면-1 및 측면-1 계류선 중 어느 한 라인에 해양생물이 부착되더라도 전후동요(surge), 상하동요(heave), 종동요(pitch)

의 경우 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있다. 다만, 해양부착생물 두께 150 mm의 경우에는 전후동요(surge)의 경우, 해양부착생물 두께가 증가함에 따라 전후동요의 공진주파수가 고주파수 영역으로 0.01 rad/s 정도 이동하는 경향을 볼 수 있다. 이는 종동요(pitch) 운동도 유사한 현상을 보이며, 상대적으로 두꺼운 해양생물 부착으로

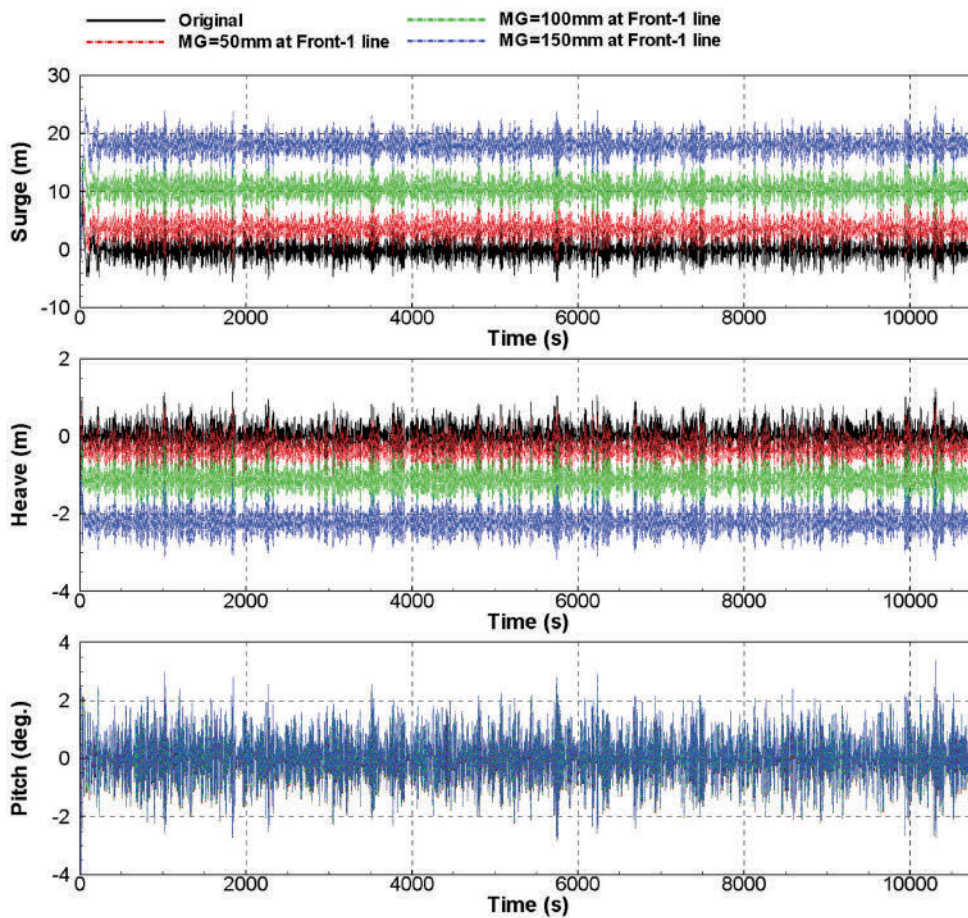


Fig. 6. Time histories for the platform motions according to the marine growth thickness on front 1-mooring line.

인해 계류선의 중량이 증가하고 Table 4와 같이 이에 기인되는 플랫폼의 흘수변화에 따른 배수량 증가에 의한 영향으로 사료된다.

한편, Fig. 4에서 상하동요(heave)의 경우, 전면-1 계류선에 해양생물이 부착된 경우 상쇄주파수(Cancellation frequency)가 0.01rad/s 정도 이동한 것을 확인하 수 있으며, 이는 전면에 상대적으로 무거운 계류선이 위치할 때 상하방향의 파랑강제력이 변화한 것으로 사료된다. 다만, 측면-1에 계류선이 위치하는 경우에는 그 영향 크지 않은 것으로 판단된다.

Fig. 5는 계류선 장력의 전달함수(transfer function)를 나타낸다. 해양부착생물 두께가 증가함에 따라 각 계류선의 장력 또한 증가하는 경향이 확인된다. 특히 T1을 살펴보면, 해양부착생물이 전면-1 계류선에 부착된 경우와 측면-1 계류선에 부착된 경우 사이에 저주파수 영역에서의 응답 특성이 다르게 나타남을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 2와 Table 4에서와 같이 플랫폼을 기준으로 대각방향의 특정 각도를 가진 측면-1 계류선의 경우 해양부착생물로 인한 계류선 무게증가로 저주파수 영역에서 T1의 장력변화를 크게 발생시키는 것으로 판단된다. 따라서, 해양부착생물 두께가 증가함에 따라 계류선의 중량증가로 플랫폼의 흘수 및 배수량이 변화한

다. 그 결과, 전후동요 및 중동요 운동의 공진주파수는 고주파수 영역으로 이동하나 상하동요의 변화는 크지 않다. 또한, 계류선 중량 증가로 인해 계류선 장력은 전반적으로 증가한다.

### 3.2 불규칙파 해석

본 연구에서는 Table 2에 제시된 불규칙파 조건에 대해 일련의 수치해석을 수행하였다. 또한 3시간에 대한 불규칙파 조건의 수치해석이 진행되었다.

Fig. 6은 Fig. 2에서의, 전면-1 계류선에만 해양부착생물이 발생한 경우를 가정한 플랫폼 운동의 시계열을 보여준다. 해양부착생물 두께가 증가함에 따라 전후동요 및 상하동요의 평균값은 변화하나, 각 운동의 시간에 따른 변동 진폭은 큰 차이를 보이지 않는 것으로 확인된다. 또한, 플랫폼 운동의 평균값은 Table 4와 근접한 것을 확인할 수 있다. 전후동요의 경우 해양부착물로 인한 전면-1 계류선의 중량증가로 플랫폼에 전방 방향의 인장력이 추가로 작용하였으며, 상하동요의 경우에는 계류선 중량증가로 인한 플랫폼의 흘수변화로 판단된다. 반면, 중동요는 Table 4에서와 같이 해양부착생물의 영향은 크지 않은 것을 확인할 수 있다.

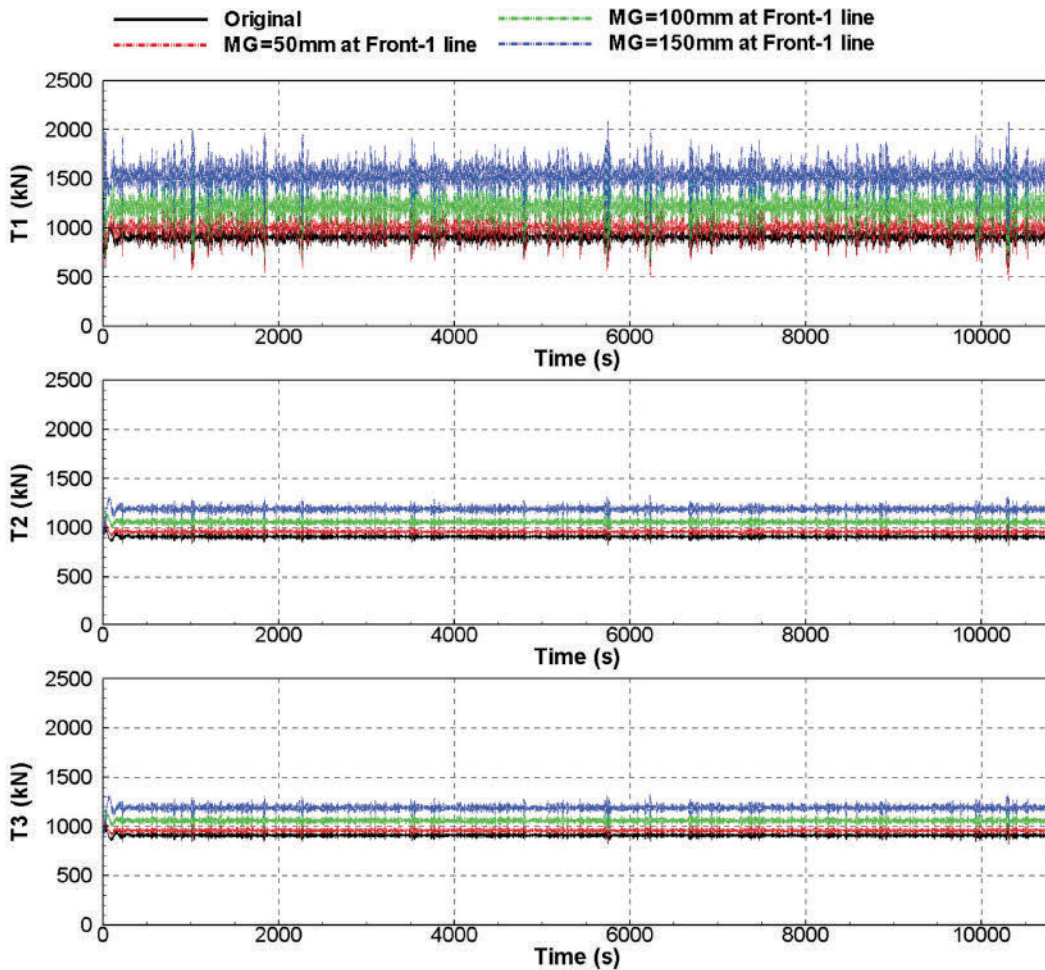


Fig. 7. Time histories for the mooring line tensions according to the marine growth thickness on front 1-mooring line.

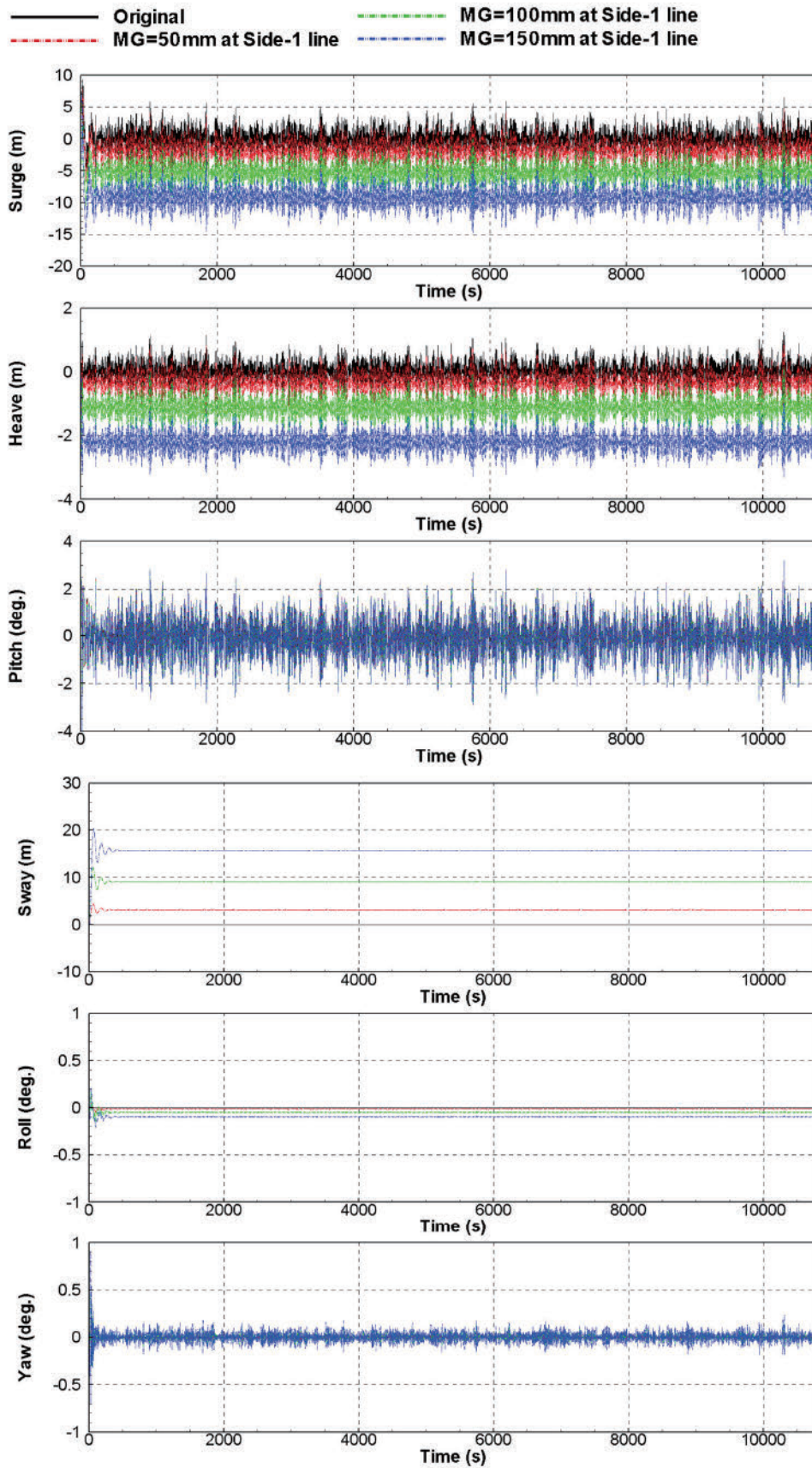


Fig. 8. Time histories for the platform motions according to the marine growth thickness on side 1-mooring line.

Fig. 7은 전면-1 계류선에만 해양부착생물이 발생한 경우를 가정한 계류선 장력의 시계열을 보여준다. 계류선 전면-1 계류선에만 해양부착생물이 발생한 경우에도 해양부착생물 중량증가로 인해 플랫폼의 전후동요 및 상하동요의 평균값이 변화하며, 이에 따라 모든 계류선의 초기장력(pre-tension)이 변하는 것을 확인할 수 있으며, Table 4에 제시된 초기장력과 근접한 것을 확인할 수 있다. 또한 해양부착생물에 의한 계류선의 중량 증가로 인한 계류선 장력의 시간에 따른 변동성이 증가하며, 이는 계류선 무게 증가로 가라앉은 플랫폼 주위 계류선이 보다 긴장상태로 변화함에 따라 계류선의 유효강성이 증가한 것으로 판단된다. 따라서 계류선 간 해양부착생물의 분포가 비대칭적인 경우에도, 해양부착생물로 인한 계류선의 중량증가가 플랫폼의 전후동요 및 상하동요 평균값 그리고 초기장력 및 장력 변동은 발생하나 유의미한 플랫폼 거동의 시간에 따른 변동은 크지 않다.

Fig. 8과 9는 Fig. 2에 제시된 측면-1 계류선에만 해양부착생물이 발생한 경우의 플랫폼 운동과 계류선 장력 시계열을 각각 나타낸다. Fig. 6과 7의 결과와 유사하게 해양부착생물 두께가 증가함

에 따라 플랫폼의 전후동요 및 상하동요 평균값 그리고 계류선 초기장력과 변동량이 변화하는 것을 확인할 수 있다.

특히 Fig. 8의 전후동요는 Fig. 6과는 달리 해양부착생물 두께가 증가할수록 평균값이 음의 방향으로 이동하는 현상이 나타난다. 이는 Table 4와 같이 플랫폼을 기준으로 대각방향에 위치한 측면-1 계류선에 해양부착생물로 인한 중량증가로 플랫폼을 후방으로 인장하는 효과가 발생한 것으로 사료된다. 또한, Fig. 8의 좌우동요(Sway), 횡동요(Roll) 그리고 선수동요(Yaw) 운동은 Table 4와 같이 플랫폼의 초기위치만 변화될 뿐 시간에 따른 플랫폼 운동의 변동성은 매우 작은 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 Side-1 계류선에만 해양부착생물이 발생한 경우에 대한 플랫폼 운동 및 계류선 장력의 고속 푸리에 변환(FFT)을 통한 응답 스펙트럼 밀도(Power Spectral Density)를 보여준다. 파랑 주파수 영역에서는 해양부착생물의 존재가 플랫폼 운동에 미치는 영향이 크지 않은 것으로 관찰된다. 반면, 해양부착생물로 인한 계류선 중량 증가로 인해 저주파 영역에서는 플랫폼의 전후동요 및 상하동요의 성분에 변화가 나타난다. 계류선 장력의 경우, 해양부착생

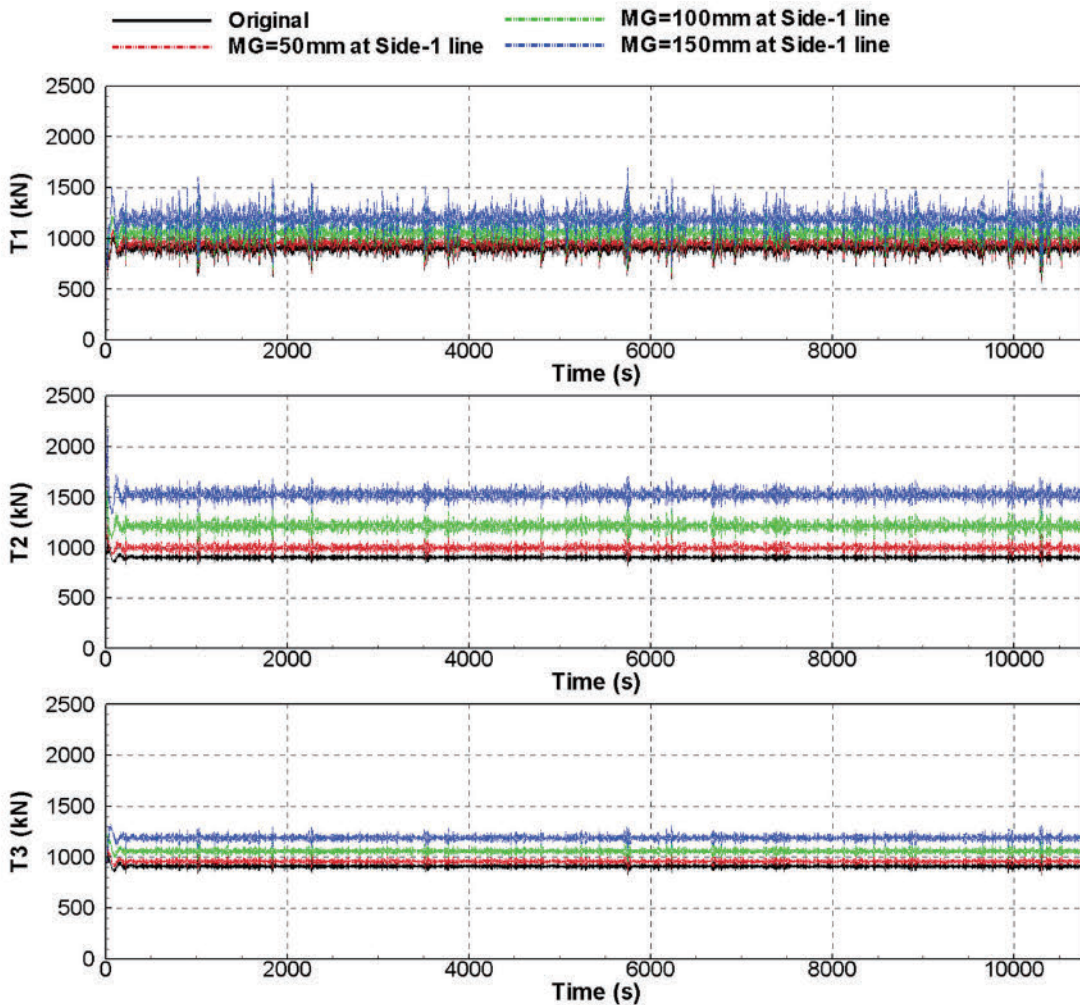


Fig. 9. Time histories for the mooring line tensions according to the marine growth thickness on front 1-mooring line.

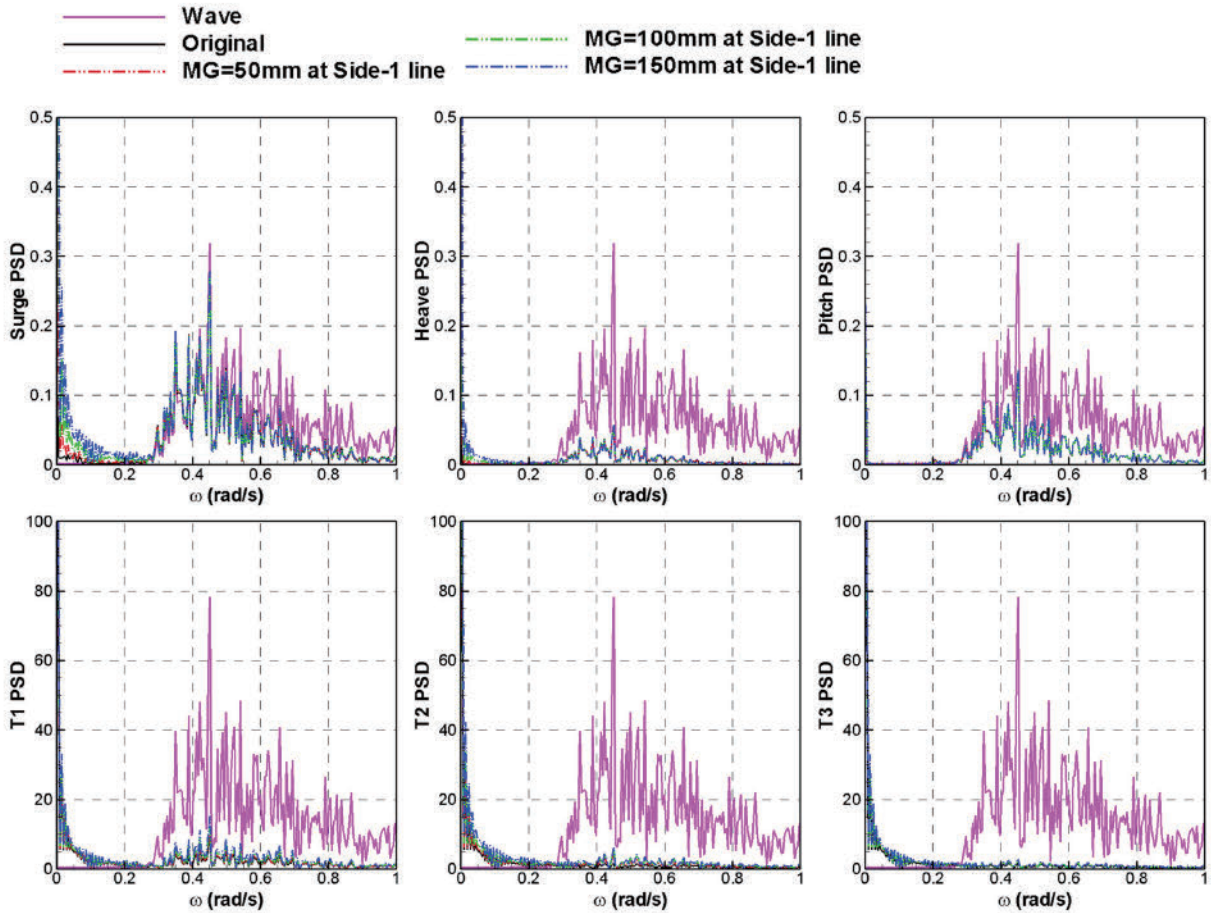


Fig. 10. Power spectral densities of the motions and mooring line tensions for the mooring line tensions according to the marine growth thickness on side 1-mooring line.

물 두께 증가에 따른 계류선 중량증가의 영향으로 저주파 영역과 파랑 주파수 영역 모두에서 해양부착생물의 영향을 확인할 수 있다.

Fig. 11은 전면-1과 측면-1 계류선 중 하나의 계류선에만 해양부착생물이 발생한 경우에 대한 플랫폼 운동의 평균값과 표준편차를 보여준다. 단일 계류선에 해양부착생물에 의한 중량이 증가하더라도 플랫폼 운동의 표준편차는 크게 변화하지 않는 것을 확인할 수 있다. 그러나 해양부착생물이 발생한 위치에 따라 해당 계류선의 중량증가로 인하여 플랫폼 전후동요 평균값의 방향을 변화시키며, 상하동요 평균값에도 변화가 발생한 것을 확인할 수 있다.

Fig. 12는 각 계류선 장력의 평균값과 표준편차를 보여준다. 해양부착생물이 단일 계류선에만 발생한 경우에도 중량증가로 인하여 계류선의 초기장력이 변화하며, 계류선 장력의 표준편차 또한 증가하는 것을 확인할 수 있다. 전후동요와 상하동요의 평균값은 해양부착생물에 의한 계류선 두께 50 mm씩 증가함에 따라 200% 정도씩 증가하며, 계류장력의 평균값은 ‘Original’ 대비 비선형적 (50 mm: 10.3% 증가, 100 mm: 34.1% 증가, 150 mm: 68.2%)으로 증가한다. 다만, 흥미로운 것은 전면-1에 해양부착생물이 발생되는 경우 T1을 보면, 해양부착생물 두께 100 mm 이후에는 계류장력의

표준편차가 수렴된 것을 확인할 수 있으나, 측면-1에 해양부착생물이 발생하는 경우에는 해양부착생물 두께에 따라 표준편차는 점차 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 전면-1에 100 mm 두께 이상의 해양부착생물 발생 시 계류선이 동일한 긴장상태를 유지한 것으로 판단된다. 또한, 해양부착생물 두께 150 mm일 때 ‘Original’ 대비 200%의 계류선 장력의 표준편차가 증가한다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 스파 플랫폼의 계류선에 발생하는 해양부착생물의 영향을 평가하기 위하여 일련의 수치 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 백색잡음과 해석결과 해양부착생물로 인한 단일 계류선의 중량증가는 플랫폼의 전후동요 및 종동요 고유주파수를 고유주파수 영역으로 0.01 rad/s 정도 이동시키며, 상하동요의 경우 전면-1에 해양부착생물이 발생하였을 때 상쇄주파수가 0.01 rad/s 정도 고주파수영역으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 또한 플랫폼 기준으로 대각방향에 위치한 측면-1에 해양부착생물이 발생한 경우 전면-1

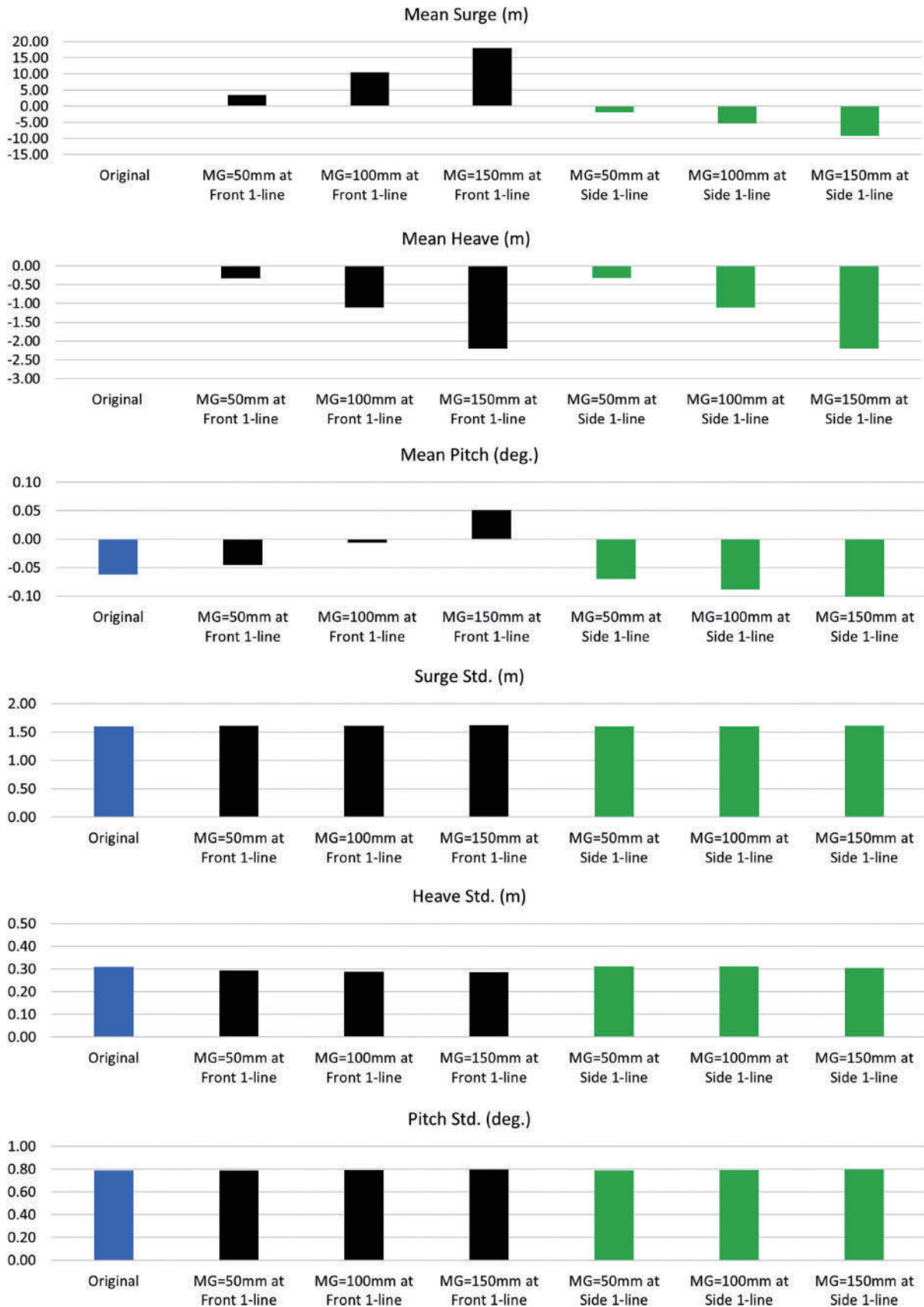


Fig. 11. Mean values and standard deviations for the platform motions according to the marine growth thickness.

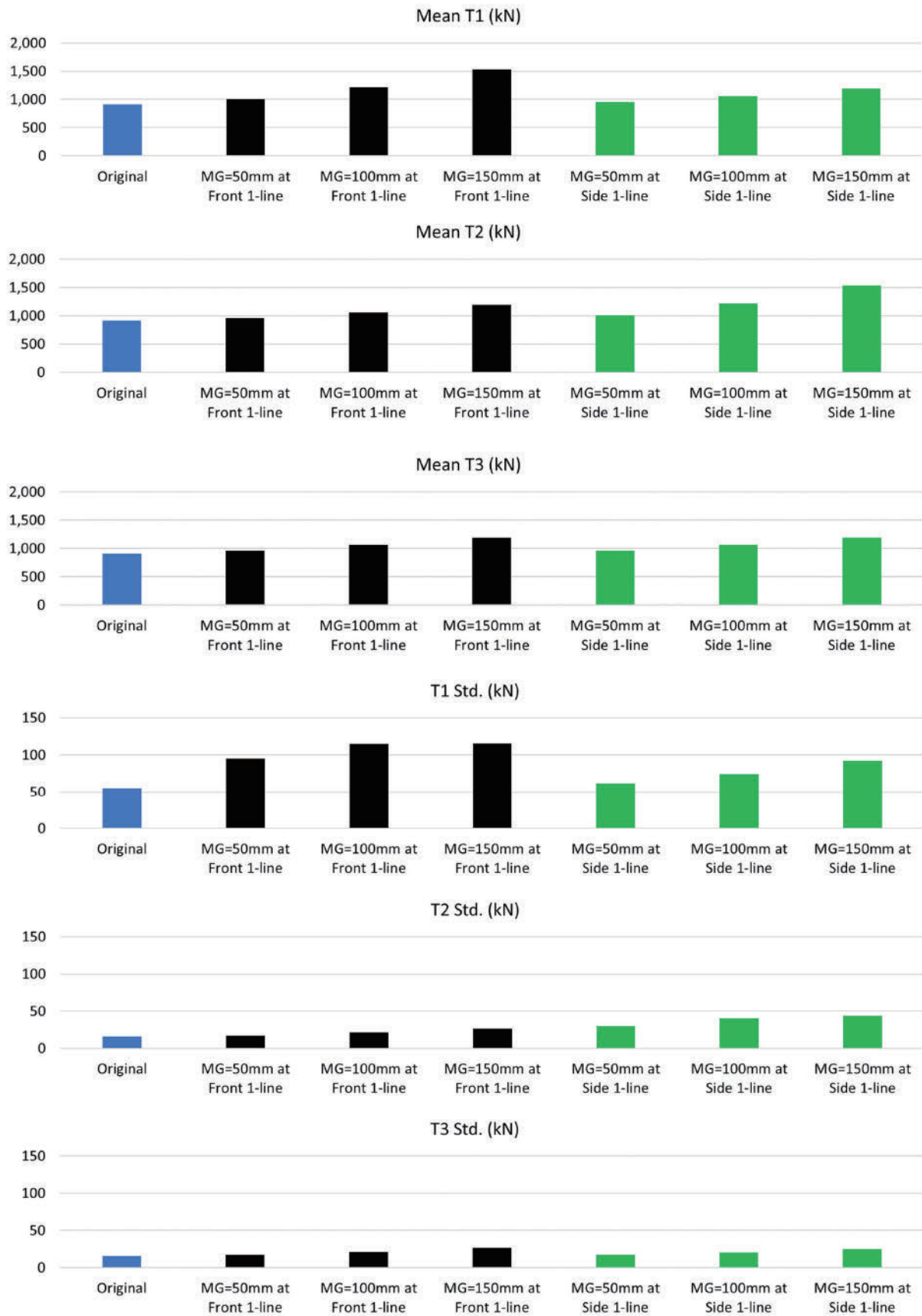


Fig. 12. Mean values and standard deviations for the mooring line tensions according to the marine growth thickness.

계류제도 긴장상태로 변화함에 따라 저주파수 영역에서 계류장력이 상대적으로 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다.

• 불규칙과 해석결과 해양부착생물로 인한 단일 계류선의 두께 증가에 따라 플랫폼 전후동요 및 상하동요 평균값이 200%정도씩 변화한다. 반면, 플랫폼 운동의 표준편차 변화는 크지 않다. 또한 해양부착생물이 단일 계류선에만 발생하더라도 계류선의 초기장력이 그 두께에 따라 'Original' 대비 10.3%, 34.1%, 68.2%로 비선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 또한, 계류장력의 표준편차는 최대 200%정도 증가함을 확인할 수 있다.

• 본 연구결과는 해양부착생물이 계류선에 비대칭적으로 발생하더라도 그 영향이 국부적인 문제에 국한되지 않고, 플랫폼의 평균 거동 및 계류계 전체의 장력 변화가 플랫폼의 동적 응답과 피로 성능에 영향을 미칠 수 있음을 보여준다. 또한, 해양부착생물이 비대칭적으로 발생할 경우 그 위치에 따라 계류의 피로성능이 서로 다를 수 있음을 확인할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 선박해양플랜트연구소에서 2026년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구(과제번호: KRIT-CT-23-026, 미래 기술 적용형 통합수중감시 특화연구센터)이며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## References

- [1] Ahn, H.J. and Shin, H., 2019, Model test and numerical simulation of OC3 spar type floating offshore wind turbine. *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, 11(1), 1-10.
- [2] Dubois, A., Schoefs, F. and Cottier, B., 2025, Spatio-temporal evolution and engineering implications of biofouling communities on floating wind turbines mooring lines. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 320, 109302.
- [3] DNVGL, 2018, DNVGL-OS-E301 Position Mooring, Chapter 2.8 Marine Growth, 38-39.
- [4] DNV, 2021, DNV-RP-C205 Environmental Conditions and Environmental Loads, 115.
- [5] ISO, 2016, ISO 19905-1: Petroleum and Natural Gas Industries — Site-specific Assessment of Mobile Offshore Units — Part 1: Jack-ups.
- [6] ISO, 2012, ISO/TR 19905-2: Petroleum and Natural Gas Industries — Site-specific Assessment of Mobile Offshore Units — Part 2: Jack-ups Commentary and Detailed Sample Calculation.
- [7] Jonkman, J., 2010, Definition of the Floating System for Phase IV of OC3. NREL Technical Report, NREL/TP-500-47535.
- [8] Jonkman, J. and Musial, W., 2010, Offshore Code Comparison Collaboration(OC3) for IEA Task 23 Offshore Wind Technology and Deployment, NREL Technical Report, NREL/TP-5000-48191.
- [9] Poozesh, P., Nieto, F., Fernández, P.M., Ríos, R. and Díaz-Casás, V., 2025, Biofouling on offshore wind energy structures: Characterization, impacts, mitigation strategies, and future trends. *J. Mar. Sci. Eng.*, 13(7), 1363.
- [10] Spraul, P., Pham, D.T. and Pakrashi, V., 2017, Effect of marine growth on floating wind turbines mooring lines. *Proc. 23e Congr. Fr. Méc.*, Lille, France.
- [11] Tiron, R., Gallagher, S., Doherty, K., Reynaud, E.G., Dias, F., Mallon, F. and Whittaker, T., 2013, An experimental study of the hydrodynamic effects of marine growth on wave energy converters. *Proc. Int. Conf. Ocean Offshore Arct. Eng. (OMAE2013-10698)*, Nantes, France.
- [12] Wright, A., Pakrashi, V. and Murphy, J., 2016a, Influence of biofouling on the dynamics of tension-moored floating wind turbines. *Proc. Int. Conf. Renew. Energies Offshore*, Lisbon, Portugal.
- [13] Wright, A., Pakrashi, V. and Murphy, J., 2016b, The dynamic effects of marine growth on a point absorbing wave energy converter. *Proc. Offshore Energy Storage Symp.*, Valletta, Malta.
- [14] Yang, S.H., Ringsberg, J.W., Johnson, E. and Hu, Z., 2017, Biofouling on mooring lines and power cables used in wave energy converter systems—Analysis of fatigue life and energy performance. *Appl. Ocean Res.*, 65, 166-177.

Received 12 January 2026

1st Revised 27 January 2026, 2nd Revised 21 February 2026

Accepted 3 March 2026