

부유식 복합 재생에너지 플랫폼 계류선의 효과적 배치에 관한 연구

정준모* · 전기영* · 김유일*

*인하대학교 조선해양공학과

Study on Effective Arrangement of Mooring Lines of Floating-Type Combined Renewable Energy Platform

Joonmo Choung*, Gi-Young Jeon* and Yooil Kim*

*Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Korea

KEY WORDS: Floating type platform 부유식 플랫폼, Renewable energy 재생 에너지, Mooring line 계류선, Taut-leg mooring 인장각식 계류, Line tension 계류선 인장력, RAO 주파수응답함수, Short term sea state 단기해상상태, Fatigue life 피로수명,

ABSTRACT: This paper presents the conceptual design procedure for the taut-leg mooring lines of a floating-type combined renewable energy platform. The basic configuration of the platform is determined based on an understanding of floating offshore plants. The main dimensions and mass distribution are determined based on a hydrostatic calculation. To identify the motion history of the floating platform and the tension history of the mooring lines, a hydrodynamic analysis is executed using Ansys.Aqua. This helps in the selection of the best configuration for the mooring system such as the number of mooring lines, wire types, anchored positions, etc. In addition, the fatigue life of the mooring lines can be predicted from the tension history using the rain-flow cycle counting method.

1. 서 론

화석연료의 고갈과 환경오염으로 지속 가능한 청정에너지원의 필요성이 높아짐에 따라 태양광, 풍력, 조력, 조류력, 파력 등 다양한 재생에너지의 실용화 연구가 가속화 되고 있다. 유럽의 신 재생에너지 선진국인 독일, 스페인, 덴마크, 영국 등은 현재 신 재생에너지 총발전량 중 풍력이 80% 이상을 차지하고 있으며 (Lee et al., 2011), 특히 경제성이 높은 것으로 알려진 해상풍력 발전에 대한 관심이 높아지고 있다.

최근에는 육지보다 우수한 풍력 자원을 보유하고 소음 등의 민원으로부터 자유로운 먼 바다(심해 영역)로의 해상풍력발전기 설치에 많은 관심을 받고 있다. 천해에서 주로 고정식 구조물을 적용하지만, 심해에서는 부유식 구조물을 적용하는 것이 경제적으로 유리한 것으로 알려져 있다. 발전기를 포함한 부유식 구조물은 계류선(Mooring line)에 의하여 위치를 유지한다. 계류선은 부유체의 위치를 유지시켜주는 단순한 기능을 수행하지만, 계류선의 특성에 따라 풍력발전기 너셀(Nacelle)의 운동 특성이 달라지기 때문에 발전효율과 직접적인 연관이 있는 중요한 설비로 인식되고 있다.

이러한 이유로 부유식 풍력발전기는 국내외적으로 많은 연구

가 진행되어오고 있다. Chen et al.(2010)은 CFD(Computation fluid dynamics)기법과 FEA(Finite element analysis)를 실시간으로 연동하여 TLP형 풍력발전기의 계류시스템의 거동을 예측한바 있다. Shin and Kim(2011)은 NREL(National renewable energy laboratory)의 연구결과(NREL, 2009; NREL, 2010)에 제시된 현수선 계류시스템을 채용한 스파(Spar)형 풍력발전기에 대하여 운동 특성을 제시한바 있다. Karimirad and Moan(2012a; 2012b)는 소위 풍하중, 파랑하중, 제어, 구조탄성을 모두 고려한 시간영역 연성해석(Aero-hydro-servo-elastic time domain simulation)을 통하여 현수선 계류시스템을 채용한 스파형 풍력발전기의 동적 거동을 제시한 바 있다. 노르웨이 선급에 의하여 상용화된 SESAM 모듈(Simo와 Riflex), NREL에서 개발한 FAST의 일부 모듈(Aero-Dyn과 TurSim), MARINTEK의 제어모듈을 코드수준에서 결합하여 완전연성해석을 수행하기도 하였다(Kvittem et al., 2012). Brommundt et al.(2012)는 반잠수식 풍력발전기가 북해(North Sea)의 특정해역에서 운용될 때 경험할 수 있는 극한하중조건과 정상운영조건에 대하여 주파수영역해석을 통하여 현수선 계류선의 최적배치를 제시하였다. Tahar and Kim(2008)은 폴리에스터 계류선의 탄성변형을 고려하여 원유생산용 스파의 유체동역학 해석을 수행

Received 29 January 2013, revised 2 July 2013, accepted 12 August 2013

Corresponding author Joonmo Choung; +82-32-860-7346, jmchoung@inha.ac.kr

© 2013, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is improved edition based on proceedings of KSOE Autumn Meeting 2012 in Busan.

하기도 하였으며, 이 연구는 합성섬유 계통의 계류선을 사용하는 데 기초적인 연구로 사료된다.

Statoil사는 현수선 계류(Catenary mooring) 방식을 해양플랜트에 적용했던 공사경험으로부터 Hywind 프로젝트(스파형 부유식 풍력발전기)에 현수선 계류시스템을 적용하여 2010년 9월부터 현재까지 성공적인 운전을 하고 있는 것으로 알려져 있다. Principle Power사는 인장각식(Taut type) 계류선을 적용한 WindFloat 프로젝트(Principle Power, 2012)를 2011년 11월에 운용하기 시작한다. 그러나 인장각식 또는 강선식(Tendon type or tension leg type) 계류선을 채용한 부유식 풍력발전기에 대한 연구는 아직 많이 수행되고 있지 않은 실정이다. 더욱이 이러한 방식의 계류선은 큰 초기 인장력을 요구하기 때문에 계류선의 피로에 대한 고려가 필수적이지만, 국내외적으로 인장각식이나 강선식 계류선의 피로강도에 대한 연구는 많이 수행되고 있지 않다. 국내 전문가 설문조사 결과에 의하면, 국내의 계류선 설계 기술은 국외 선진국에 비하여 50% 이하로 조사되고 있다(Jung et al., 2012).

또한 국내에 조류력발전에 적합한 부지가 많이 산재하고 있으며, 국립해양조사원에 따르면 서남해안의 유속을 조사한 결과 21곳 정도가 상업성을 갖춘 것으로 조사된바 있다. 조류력발전은 풍력발전에 비해 지속적이고 안정적인 발전이 가능하다는 장점도 가지고 있다. 조류력 에너지 잠재력이 높은 지역은 주로 해협이나 수도로 알려져 있지만, 한국의 서해안과 같이 큰 조석차를 보이는 곳에서도 안정적인 조류 유속을 보이고 있기 때문에 풍력과 조류력의 복합형 에너지 플랫폼은 비교적 타당성있는 재생에너지로 분류될 수 있다. 물론 풍력발전과 조류력발전의 입지에 대한 연구조사가 병행될 필요가 있다.

본 논문에서는 부유식 복합 에너지 플랫폼 개념을 사용하여 해상풍력, 조류력, 태양광 발전이 가능한 해상구조물을 제시하고 계류선을 설계하는 방법 및 절차를 제시하고자 한다. 플랫폼에 적용되는 계류선의 형식으로서, 풍력발전기 너셀의 운동을 효과적으로 제어하기 위하여 인장각식 계류방식을 고려하였다. 초기 인장력, 해저면과의 각도에 따른 설계 시나리오를 결정하고, 수

개의 가능한 하중 케이스(Load case)를 가정하여, 상용 프로그램인 Ansys.Aqwa를 이용하여 유체동역학 해석을 수행하였다. 비계류 플랫폼의 부가수 질량(Added mass) 및 방사 감쇠(Radiation damping)를 도출하기 위한 주파수영역 선형해석, 계류된 플랫폼의 자유 수면상 안정 위치를 탐색하는 평형위치해석, 계류된 플랫폼 계류선의 파랑 주파수 유기 공진(Wave frequency-induced resonance) 및 저주파수 공진(Drift motion-induced low frequency resonance)의 주파수 대역을 판정하기 위한 선형 주파수응답해석, 마지막으로 계류선의 인장이력을 도출하기 위하여 계류된 플랫폼의 비선형 시간응답해석을 수행하였다. 이러한 상황식 해석 단계를 거쳐 가능한 계류선 배치 시나리오를 선정하고, 비선형 시간응답해석을 통하여 얻어진 계류선의 인장 이력으로부터 설계수명 동안의 피로 손상을 예측하여 최종적인 계류선의 배치 시나리오를 결정하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 플랫폼 및 계류선 설계

2.1 플랫폼 설계

본 연구에서는 서론에서 언급했듯이 5MW급 풍력발전기와 태양광발전 패널 및 조류력발전기가 설치된 복합 재생에너지 플랫폼을 대상으로 하고자 한다. 플랫폼의 기본적인 형상 및 치수는 주발전원으로 사용될 풍력발전기의 용량을 고려하여 결정되어야 한다. 5MW급 풍력발전기의 제원은 NREL 보고서(NREL, 2009)를 참고하였으며, 부유체의 기본 형상은 WindFloat(Principle Power, 2012)를 참고하여 결정하였다. WindFloat의 경우 최대 운용수심이 50m내외이지만, 본 연구에서는 80m 수심을 가정하였다. Fig. 1 및 Table 1에 구조물의 기본적인 제원을 나타내었다.

2.2 계류선 설계

본 연구에서는 천해에서 부유식 풍력발전기에 타당한 것으로 알려진 인장각식 계류방식을 가정하였다. 해저면과 이루는 각도에 따른 총 3가지 계류선 배치 형태를 고려하였다(Fig. 2 참

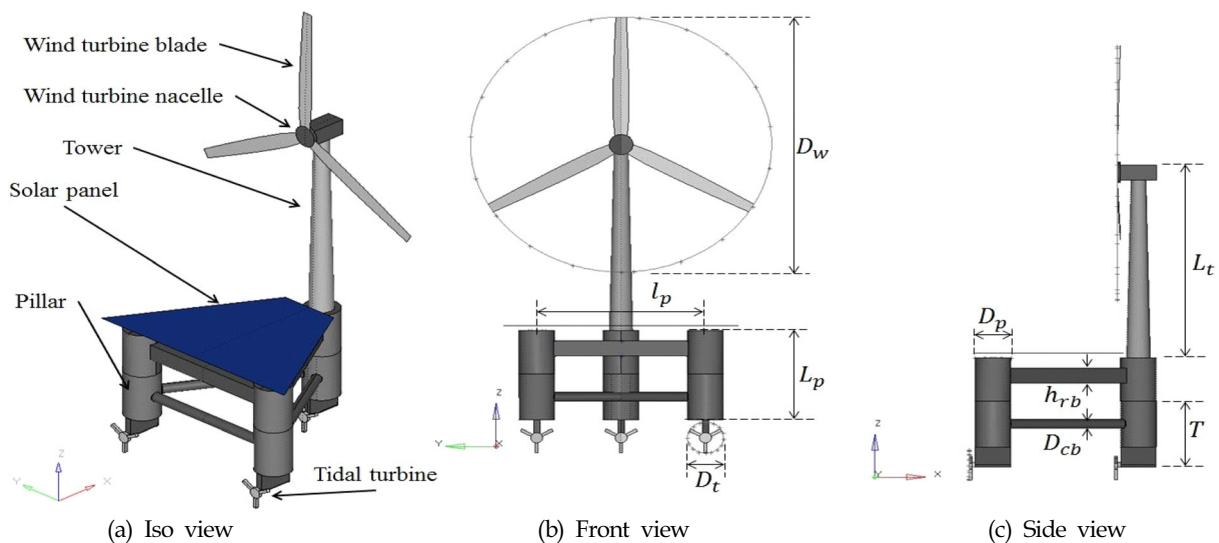


Fig. 1 Sketch on combined renewable energy platform

Table 1 Main dimensions and mass properties of platform

Dimension (m)	D_w	100
	D_t	12
	L_t	70
	L_p	35
	D_p	12
	l_p	56
	D_{cb}	3.6
	h_{rb}	6
	b_{rb} (Breadth of rectangle brace)	4
	T	25
Mass (ton)	Blade and nacelle of wind turbine	350
	Tower of wind turbine	300
	Solar panel	460
	Three pillars and braces	2600
	Tidal turbine	150
	Ballast water	4360
	Total mass	8220

Table 2 Properties of mooring rope

Out diameter (mm)	Mass per unit length (kg/m)	Stiffness (MN)	MBL (tonf)
130.0	7.8	680.0	900.0
137.0	8.6	756.0	1000.0
153.0	10.8	945.0	1250.0
168.0	12.9	1134.0	1500.0
194.0	17.2	1512.0	2000.0

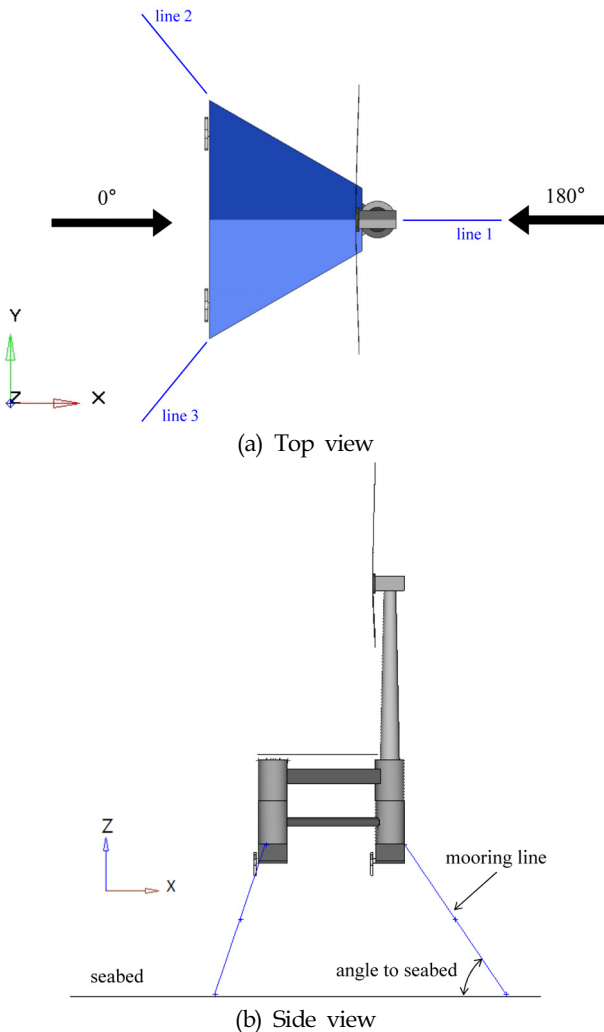
조). Fig. 2(a)에 보인바와 같이 세 개의 필라에 120° 간격으로 계류선이 연결되고, Fig. 2(b)에 보인바와 같이 계류선과 해저면이 이루는 각도를 3가지 (56° , 63° , 70°)로 분류하여 계류선의 배치 시나리오를 설정하였다. 계류선의 재질은 Lankhorst사(Lankhorst, 2012)의 폴리에스터 섬유(상표명 Dyneema)를 적용하였다. Table 2에는 계류선의 재료로 사용되는 Dyneema의 지름에 따른 단위 길이당 질량, 인장강성, MBL(Maximum breaking load)을 나타내었다. 통상 계류 로프의 경우 재료의 탄성계수와 단면적의 곱을 강성으로 정의하며, 따라서 강성의 단위는 하중이 된다(ABS, 2011). 차후 안정위치를 탐색하는 평형위치해석으로부터 얻은 평균 인장력을 감안하여 Table 2에 나타난 계류선 중에서 택일하여 사용하게 된다.

3. 계류선 배치 설계

3.1 배치 설계 절차

가장 큰 중량을 차지하는 풍력발전기의 규격이 결정되었으므로, 이를 바탕으로 전체 중량을 추정하고, 전체적인 중량과 평형을 만족시키는 부력을 가지도록 부유체 구조의 기본적인 제원 및 흡수를 결정하였다. 이렇게 결정된 플랫폼 및 계류선 시나리오에 따라 상향식 유체동역학 해석을 통하여 계류선의 효과적인 배치에 대한 방법을 제안하고자 한다.

첫 번째 단계로서, 비계류 플랫폼의 규칙파에 대한 선형 주파수 응답해석을 통하여 여러 가지 응답에 대한 RAO(Response amplitude operator)를 도출한다. 그러나 본 연구에서 선형 주파수 응답해석은 불규칙파에 대한 주파수 응답해석 또는 시간응답해석의 입력데이터로 사용되는 부가수 질량 및 방사 감쇠 행렬을 구하기 위하여 수행된다. 이는 Ansys.Aqwa의 LINE모듈(Ansys, 2010a; Ansys, 2010b)을 이용하여 가능하다. 두 번째 단계로서, 계류된 플랫폼의 유체 정력학적인 하중에 대한 안정 위치를 탐색하기 위한 평형위치해석을 수행한다. 탐색된 평형위치는 이후의 불규칙파에 대한 주파수 응답해석 또는 시간응답해석을 위한 초기 위치로 사용된다. 평형위치해석으로부터 얻을 수 있는 중요한 정보는 계류선의 초기 인장력이다. 이는 Ansys.Aqwa의 LIBRIUM 모듈(Ansys, 2010a; Ansys, 2010b)을 이용하여 계산이 가능하다. 세 번째 단계로서, 계류된 플랫폼의 불규칙파에 대한 주파수 응답해석을 실시한다. 계류된 플랫폼의 고유 주파수는 운동 RAO를 분석하기 보다는 계류선의 인장력 RAO를 분석하므로써 저주파수(부유체의 운동에 기인) 및 고주파수(계류선의 강성에 기인) 성분을 동시에 파악할 수 있다. 따라서 세 번째 단계는 플랫폼이 계류된 후에 파랑 주파수와 계류된 플랫폼의 고유 주파수와

**Fig. 2** Mooring configuration

의 공진을 판정하기 위하여 사용된다. 본 연구에서는 파랑 주파수와 고유 주파수가 인접할 경우 해당 계류선 배치 시나리오를 채택하지 않았다. 세 번째 단계는 Ansys.Aqwa의 FER모듈(Ansys, 2010a; Ansys, 2010b)을 이용하여 수행이 가능하다. 마지막 단계로서, 세 번째 단계에서 선택된 플랫폼의 계류선 배치 시나리오에 대하여 불규칙파에 대한 비선형 시간응답해석을 실시한다. 이를 통하여 계류선에 작용하는 인장력의 이력을 도출한다. 이는 Ansys.Aqwa의 DRIFT모듈 또는 NAUT모듈(Ansys, 2010a; Ansys, 2010b)을 이용하여 수행이 가능하다. 각 계류 시나리오에 대하여 얻어진 단기해상상태의 불규칙 인장력 이력을 설계수명동안 인장력 이력으로 외삽한 후 설계수명 동안의 피로손상도(Fatigue damage)를 계산한다. 위 과정을 통해 가장 적절한 계류선 배치 시나리오를 결정할 수 있다. 계류선의 배치 시나리오 선정 절차를 요약하면 Fig. 3과 같다.

3.2 환경조건

본 연구에서는 북대서양 해역의 해양환경을 설계조건으로 고려하였다. 북대서양 파면도분포표(DNV, 2010b)에서 가장 확률이 높은 한가지 단기해상상태만 고려하였다. 이에 상응하는 유의파고 H_s 와 영점교차주기 T_z 는 각각 2.5m 및 8.5초이다. 단기해상상태를 표현하기 위하여 JONSWAP(Joint North Sea Wave Project) 스펙트럼을 적용하였다(식 (1) 참조). 이때 T_z 와 T_p (파정주기, Peak period)와의 관계는 식 (2)와 같다. JONSWAP 스펙트럼의 첨도계수 γ (Peak enhancement factor)는 3.3을 적용하였다. 파입사각은 해석의 단순화를 위하여 0° , 90° , 180° 의 3가지만을 고려하였으며, Fig. 2에서 0° 는 $+x$ 방향, 90° 는 $-y$ 방향, 180° 는 $-x$ 방

향이다. 선형 주파수응답해석(LINE 모듈 해석)을 위해서 파주기의 범위를 설정해야하며, 본 연구에서는 JONSWAP 스펙트럼을 도식적으로 나타낸 후 이를 충분히 표현할 수 있도록 파주기의 범위 및 증분을 설정하였다. 결정된 최소파주기 및 최대파주기는 4초 및 26초이며, 해석에 사용된 주기를 Table 3에 나타내었다. 또한 FER해석과 NAUT해석을 위한 파 스펙트럼의 범위를 결정하기 위하여 식 (2)로부터 결정되는 주파수를 최소 주파수로, 스펙트럼 면적의 약 99% 이상에 상응하는 주파수를 최대 주파수로 사용하였다(Ansys, 2010b).

$$S(\omega) = (1 - 0.287 \ln \gamma) \frac{5}{16} \frac{H_s^2}{\omega^5} \exp \left[-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-4} \right] \quad (1)$$

$$\omega_s = \omega_p \times (0.58 + (\gamma - 1.0) \times \frac{0.05}{19.0}) \quad (2)$$

여기서, $S(\omega)$: JONSWAP 스펙트럼

γ : 스펙트럼의 첨도계수

H_s : 유의파고

ω_p : 파정 주파수(Peak frequency)

ω_s : 최소 주파수

조류의 속도는 조류발전을 위하여 2.0m/sec, 방향은 만조와 간조에 상응하는 0° 와 180° 로 가정하였다. 5MW급 풍력발전기의 최대효율이 발생하는 풍속인 11.2m/sec로 가정하였으며(Lefebvre and Collu, 2012), 풍향은 일정 방향 (0°)만 고려하였다. Table 3에 모든 환경조건을 정리하여 나타내었다.

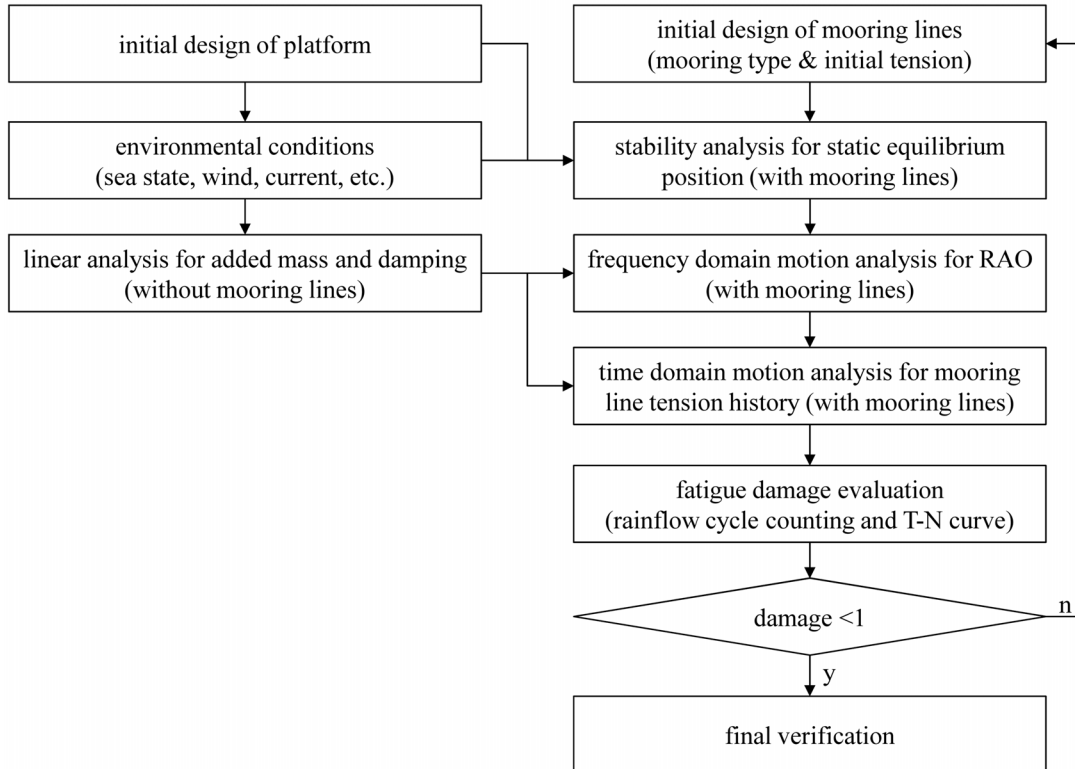


Fig. 3 Arrangement procedure of mooring lines

Table 3 Ocean environmental conditions

Load component		Applied value
Current	Speed (m/s)	2.0
	Direction (degree)	0.0, 180.0
Wind	Wind speed (m/s)	11.2
	Direction (degree)	0.0
Wave	Direction (degree)	0.0, 90.0, 180.0
	H_s (m)	2.5
	T_z (sec)	8.5
	T (sec)	26, 22, 21, 20, 19, 16, 13, 12, 11, 10, 8, 6, 4

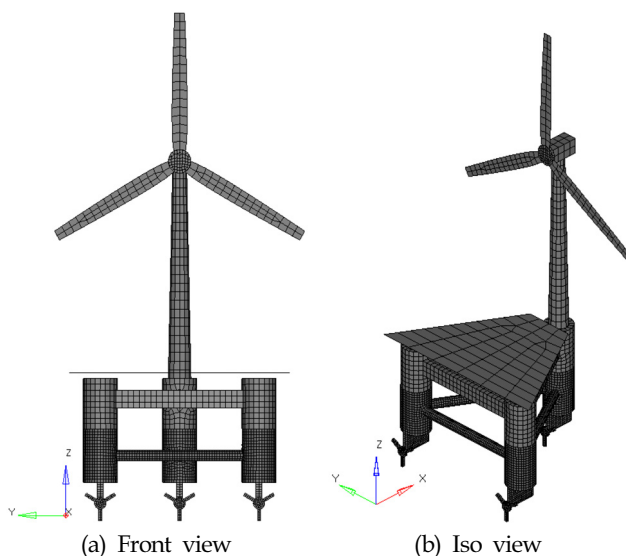
3.3 유체동력학 해석

3.3.1 비계류 플랫폼의 주파수응답해석

전술한 바와 같이 비계류 플랫폼의 주파수응답해석은 계류 플랫폼의 주파수응답해석 또는 시간응답해석에 필요한 부가수 질량 및 방사 감쇠를 얻기 위하여 수행된다. 계류 플랫폼의 주파수응답 해석을 위하여 필요한 구조물의 이산화(요소 생성 또는 패널 생성)에 있어서 요소의 크기는 매우 중요한 인자이다. 즉 요소는 해석에 사용할 최소과주기로부터 예측되는 최소과장을 충분히 표현할 수 있도록 작게 분할되어야 한다. 본 연구에서는 분할한 수면하 회절 요소(Diffraction element)의 최대크기는 1.64m 였으며, 이는 최소과장의 6.5% 수준이다. Fig. 4는 패널 요소로 분할된 플랫폼의 형상을 나타낸다.

3.3.2 계류 플랫폼의 평형위치 해석

풍속, 유속과 같이 안정 환경하중(Steady state environmental load)과 파랑 스펙트럼과 같이 동적 환경하중에 대하여 계류된 플랫폼의 안정화된 위치를 탐색하는 것이 평형위치해석이다. 본 논문에서는 Table 4에서 보는 바와 같이 파랑, 조류, 바람의 입사각에 따라 6가지 하중 케이스를 고려하였다. 풍속에 의한 항력을 고려하기 위하여 수선 상부구조물을 모두 모델링하였으며,

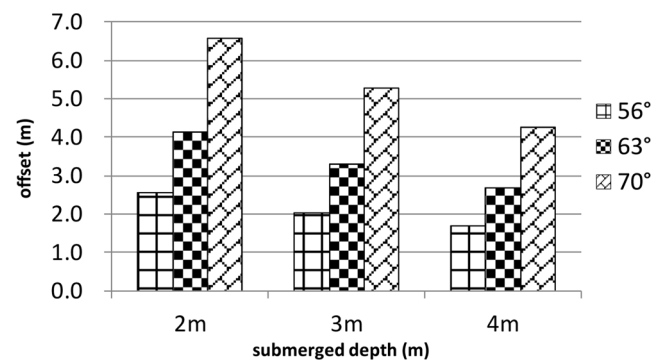
**Fig. 4** Model for hydrodynamic analyses

유속에 의한 항력은 수면하에 위치한 회절요소에 의하여 구현되었다. 이때 유속에 의한 수선 이하 구조물에 대한 항력계수를 1.2로 적용하였으며, 풍속에 의한 수선 이상 구조물의 항력계수는 1.5로 적용하였다(White, 2008).

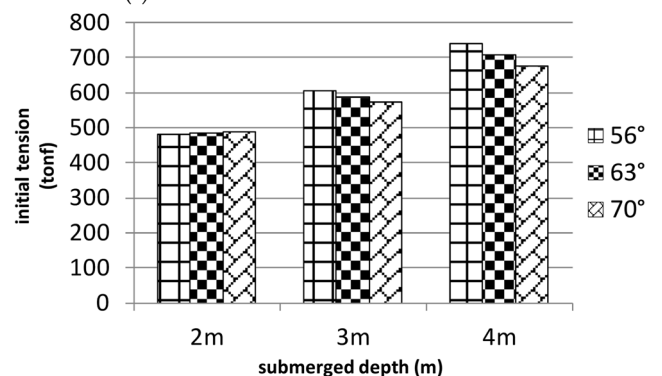
초기 인장력은 부유체의 부력에 의하여 결정되므로, 본 연구에서는 평형 흘수로부터 2m, 3m, 4m의 세가지 반잠수 조건을 고려하였다. 따라서 반잠수 조건 및 인장각도 조건에 의하여 Table 5에 나타난 바와 같이 총 9가지의 계류선 배치 시나리오가 결정되었다. 이러한 조건에 대하여 평형위치해석을 수행하고 이로부터 결정된 초기 인장력의 최대값(6가지 하중 케이스에 대한 최대값) 및 초기 인장력과 MBL과의 비율도 동시에 Table 5에 나타내었다. 초기 인장력의 크기가 대략 MBL 대비 35%~45% 수준이 되도록 계류선의 종류를 선택하였다. 환경 외력을 많이 경험할 것으로 예상되는 1번 계류선의 MBL을 2번 및 3번 계류선보다 한 등급 높게 책정하였다. 여기서 계류선의 강성은 항상 인장 탄성을 유지한다고 가정하였으며, 계류선의 중량은 전체 중

Table 4 Load cases according to environmental conditions

Load case	Wind direction	Current direction	Wave direction
Case 1	0°	0°	0°
Case 2	0°	0°	90°
Case 3	0°	0°	180°
Case 4	0°	180°	0°
Case 5	0°	180°	90°
Case 6	0°	180°	180°



(a) Offset in x direction for load case 1



(b) Mooring tension of line #1 for load case 4

Fig. 5 Comparison of offset and mooring tension

Table 5 Initial tension according to mooring arrangement scenarios and submerged depths

Submerged depth (m)	Scenario	Line number	MBL (tonf)	Initial tension (tonf)	Ratio to MBL (%)
2.0	D2-A56	1	1250.00	481.31	38.50
		2,3	1000.00	408.20	40.82
	D2-A63	1	1250.00	483.06	37.64
		2,3	1000.00	410.51	41.05
	D2-A70	1	1250.00	488.63	39.09
		2,3	1000.00	423.29	42.33
3.0	D3-A56	1	1500.00	604.58	40.31
		2,3	1250.00	536.33	42.91
	D3-A63	1	1500.00	587.33	39.16
		2,3	1250.00	520.56	41.64
	D3-A70	1	1500.00	570.46	38.03
		2,3	1250.00	512.07	40.97
4.0	D4-A56	1	2000.00	739.38	36.97
		2,3	1500.00	669.13	44.61
	D4-A63	1	2000.00	706.50	35.33
		2,3	1500.00	636.38	42.43
	D4-A70	1	2000.00	675.78	33.79
		2,3	1500.00	610.30	40.69

량에 포함되지 않았다.

Table 4에 주어진 하중 케이스에 대하여 평형위치해석을 수행한 후 평형상태(평형위치)와 초기 인장력을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)에서 오프셋(Offset)은 플랫폼의 질량중심이 처음 위치로부터 평형 위치까지의 이동한 거리를 의미한다. 횡방향(y 방향) 오프셋은 대부분 조류에 의하여 발생하였으며, 파랑에 의한 횡방향 오프셋은 무시할만 하였기 때문에(최대 0.1m), 본 논문에서는 x 방향 오프셋만 나타내었다. 계류선이 해저면과 이루는 각이 커질수록 오프셋이 커지는 것을 Fig. 5(a)로부터 알 수 있다. 해저면과 이루는 각이 70° 인 경우 최대 6.7m의 오프셋이 발생하였으며 이는 수심의 8.4%에 상응한다. 원유 생산용 양강기의 경우 수심의 2.5%까지 오프셋을 허용한다(DNV, 2010a). 현재 고려하는 재생 에너지 플랫폼의 경우에도 오프셋이 커지면 단지(Farm)를 조성하는데 제약사항이 될 수 있으며, 풍력발전기의 효율측면에서도 이롭지 못하다. 이러한 이유로 본 연구에서는 계류선과 해저면의 최대각도를 70° 로 설정하였다. 3개의 계류선 중에서 가장 높은 하중을 경험할 것으로 예측되는 1번 계류선을 대상으로 Fig. 5(b)에 초기 인장력을 나타내었다. Fig. 5에서 오프셋의 최대값은 1번 하중 케이스에서 인장력의 최대값은 4번 하중 케이스에서 발생하였기 때문에 이들 하중 케이스에 상응하는 값을 나타내었다.

3.3.3 계류 플랫폼의 주파수응답해석

Table 4에 나타난 6가지 하중 케이스에 대하여 부유체의 운동 응답 특성을 주파수 영역에서 검토함으로써 공진이 발생하는지 확인할 수 있다. 즉 불규칙파에 대한 주파수응답해석을 수행하여 얻은 인장력 RAO를 JONSWAP 스펙트럼과 동시에 나타내어 공진 가능성을 파악할 수 있다. Fig. 6은 Table 4의 1번 하중 케이스에 대한 인장력 RAO를 나타낸다. 본 연구에서는 나머지

하중 케이스의 경우에도 Fig. 6과 유사한 결과를 얻었기 때문에 별도로 나타내지 않았다.

모든 계류선 배치 시나리오에서 인장력 RAO는 양봉형을 나타내고 있으며, 저주파수 대역의 고유 주파수와 및 고주파수 대역의 고유 주파수는 각각 플랫폼 전체의 유체동역학적 강성과 계류선의 강성에 의하여 결정된다고 볼 수 있다. 해저면과 이루는 각도가 커질수록 수직방향 강성이 계류선의 인장강성에 근접하면서 증가하므로 고주파수 대역이 저주파수 대역보다 크게 증가하는 현상이 발생하는 것으로 미루어 이러한 가정은 타당하다고 판단된다 (Fig. 6 참조).

Fig. 6에서 거의 대부분 배치 시나리오는 저주파수 대역이 파랑 주파수 대역으로부터 비교적 고주파수 영역으로 벗어나 있는 것으로 보여진다. TLP (tension leg platform)도 파랑 스펙트럼에 상응하는 주파수 대역에서 고주파수 영역으로 벗어나도록 설계하고 있으며, 본 논문에서도 TLP에 대한 기준을 적용하고자 한다. 즉 DNV(2010a)는 수직 운동 (heave motion)에 대한 고유주기를 5초 이하(고유주파수 1.26 rad/s 이상)이 되도록 권장한다. Fig. 6에서 이를 만족하지 못하는 배치 시나리오는 2m 반잠수 조건에서 D2-A56 및 D2-A63이며, 3m 반잠수 조건에서 D3-A56이므로 이들 세 가지 배치 시나리오를 적절하지 못한 배치 조건으로 간주하고 다음 단계에서 고려하지 않았다.

3.3.4 불규칙파에 대한 시간응답해석

계류 플랫폼의 주파수응답해석을 통하여 적합한 계류선 배치로 판단된 D2-A70, D3-A63, D3-A70, D4-A56, D4-A63, D4-A70의 6가지 배치 시나리오에 대하여 Table 4에 주어진 하중 케이스를 적용하여 시간영역해석을 수행하였다. 시간영역해석을 수행하기 전에 수렴도 테스트(Convergence test)를 통하여 적절한

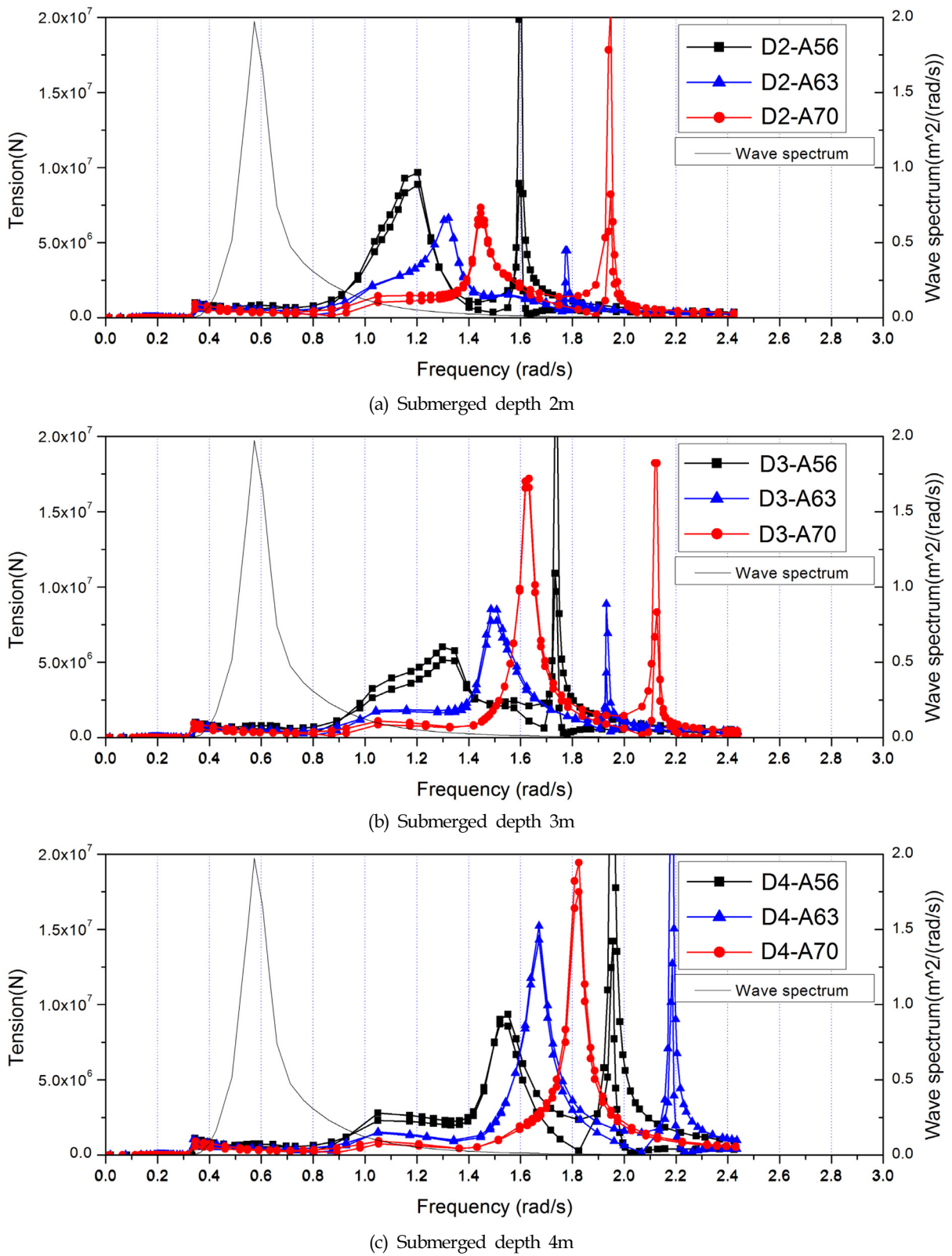


Fig. 6 Mooring tension RAOs of mooring line 1 for different mooring arrangement scenarios

시간 증분을 결정하였다. Fig. 7은 D4-A56에 1번 하중 케이스를 적용하고, 시간증분을 1초, 0.5초, 0.2초, 0.1초, 0.05초로 감소시키면서 해석을 수행하여 얻은 상하 동요의 이력을 나타낸다. 0.2

초 이하의 시간 증분이면 충분히 정도 높은 해석 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단되어 본 연구에서는 0.2초를 시간증분으로 결정하였다. 또한 단기 해상상태를 구현하기 위한 해석 시간을 3시

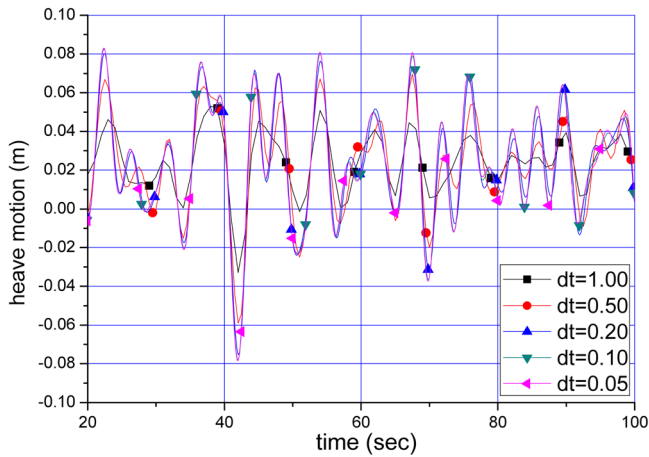


Fig. 7 Convergence test results

간으로 설정하였다. 불규칙파에 대한 시간응답해석 결과는 다음 섹션의 피로해석에서 논의될 것이다.

3.4 피로해석

불규칙 파에 대한 시간 응답해석으로부터 계류선의 인장력의 시계열 데이터를 얻을 수 있다. 인장력 이력은 불규칙하기 때문에 소위 집계법(Counting method)을 이용하여 인장력의 범위 및 평균인장력을 도출할 수 있다. ASTM(1997)에 따르면 여러 가지 집계법이 제공되고 있지만, 본 연구에서는 가장 신뢰성있는 방법으로 알려진 레인플로우 집계(RFC, Rainflow cycle counting)법을 이용하였다. 통상 계류선 등의 인장력은 응력비(Stress ratio)가

양수이므로 평균 인장력의 효과를 고려할 필요가 있지만, 인장력-수명 선도(Tension-life curve)가 0의 응력비 조건에서 생성되었기 때문에 통상적으로 평균 인장력 효과가 이미 재료 데이터에 포함되었다고 간주한다. 따라서 RFC를 이용하여 얻어진 인장력의 범위만을 이용하여 피로강도를 평가하게 된다.

이렇게 얻어진 인장력의 범위는 식 (3)에 보인 선형누적손상법칙(Linear damage accumulation rule)을 이용하여 피로 손상도를 계산할 수 있다. RFC를 이용하면 불규칙 신호를 1반복에 해당하는 인장력 범위로 도출할 수 있으므로 식 (3)에서 분자를 1로 설정한 것이다. 또한 식 (3)에서 분모는 해당 인장력 범위의 파단 수명을 의미하며, 식 (4)에 보인 인장력-수명 선도를 이용하여 i 번째 수명 N_i 를 추정할 수 있다. 인장력-수명 선도는 피로시험을 통하여만 얻을 수 있는 재료 데이터이며, 본 연구에서는 DNV (2010a)에서 제공하는 폴리에스터의 인장력-수명 선도를 적용하였다. 폴리에스터 인장력-수명 선도의 재료상수는 $a_D=0.259$, $m=13.46$ 이었다. 식 (4)에서 R 은 인장력 범위비로서 인장력 범위를 해당 계류선의 MBL로 나눈 값을 의미한다.

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{1}{N_i} \quad (3)$$

$$\log N = \log a_D - m \log R \quad (4)$$

Table 6은 계류선 시나리오 및 하중조건에 따른 설계수명 동안의 계류선의 누적 피로를 나타낸다. 여기서 설계수명 20년을 가정하였으며, 3시간의 단기해상상태에 대한 계류선의 인장력 이력이 설계 수명동안 확장될 수 있다고 가정하여 장기 피로 손상도를 계산하였다. 이러한 선형 확장 방법은 해양플랜트의

Table 6 Long term fatigue damage

Scenario	Line number	Load case						Total damage
		1	2	3	4	5	6	
D2-A70	1	4.87E+02	2.06E-11	1.88E-07	2.90E-06	1.86E-08	2.36E+03	2.84E+03
	2	1.81E+04	8.49E-03	7.14E-06	1.26E-07	3.45E-04	7.73E-01	1.81E+04
	3	1.81E+04	3.50E-07	7.21E-06	1.27E-07	1.47E-04	7.71E-01	1.81E+04
D3-A63	1	3.07E+02	2.28E-10	1.58E-06	2.66E-05	1.46E-08	2.53E+01	3.33E+02
	2	2.11E+02	2.68E-04	1.41E-06	4.37E-07	7.27E-04	5.13E-03	2.11E+02
	3	2.10E+02	1.77E-04	1.41E-06	4.36E-07	3.84E-05	8.77E-03	2.10E+02
D3-A70	1	1.50E+00	3.10E-10	1.08E-08	1.41E-07	9.03E-09	5.43E-01	2.04E+00
	2	2.77E-01	2.50E-06	3.54E-08	5.74E-09	1.75E-05	6.97E-05	2.77E-01
	3	2.77E-01	2.48E-06	3.56E-08	5.68E-09	1.10E-05	6.38E-05	2.77E-01
D4-A56	1	1.18E-01	8.30E-12	9.61E-07	7.52E-06	2.69E-10	4.43E-01	5.61E-01
	2	2.29E+00	4.62E-04	1.07E-06	3.03E-07	2.83E-04	2.37E-02	2.31E+00
	3	2.28E+00	7.55E-04	1.08E-06	3.06E-07	7.45E-05	2.39E-02	2.31E+00
D4-A63	1	1.85E+02	1.21E+03	2.12E+03	3.67E-08	2.53E-10	3.10E-01	3.52E+03
	2	1.13E+06	1.01E+06	1.14E+08	3.27E-09	1.49E-05	4.13E-03	1.16E+08
	3	1.58E+07	8.63E+07	1.66E+08	3.27E-09	1.19E-05	4.13E-03	2.68E+08
D4-A70	1	3.17E-07	7.68E-14	1.94E-09	4.65E-10	6.60E-10	3.05E-01	3.05E-01
	2	2.24E-05	6.13E-06	1.86E-09	3.28E-10	6.84E-07	5.40E-02	5.40E-02
	3	2.24E-05	1.84E-06	1.86E-09	3.27E-10	1.02E-07	5.40E-02	5.40E-02

스펙트럴 피로해석에 통상적으로 이용되는 방법이다.

Table 6을 살펴보면, 하중 케이스 1번 및 6번에서 가장 큰 누적 피로가 발생하였다. 즉 조류 방향과 파랑 방향이 같을 때 가장 큰 피로 손상을 나타내었다. 전반적으로 초기 인장력이 증가할수록 누적 피로도가 감소하는 경향을 보여주고 있는데, 이는 초

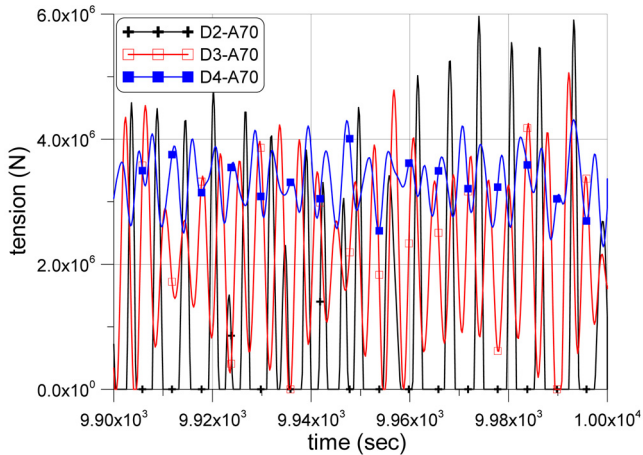
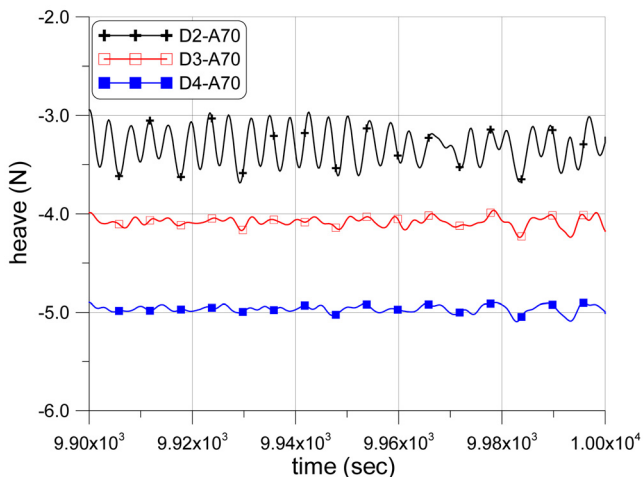
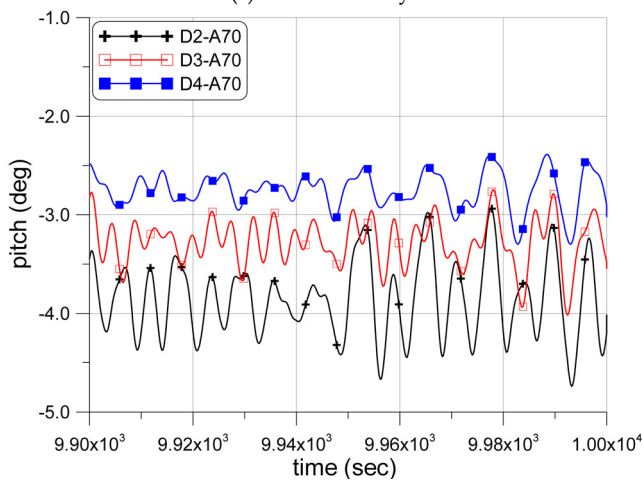


Fig. 8 Comparison of tension histories for load case 1



(a) Heave history



(b) Pitch history

Fig. 9 Comparison of motion histories for load case #1

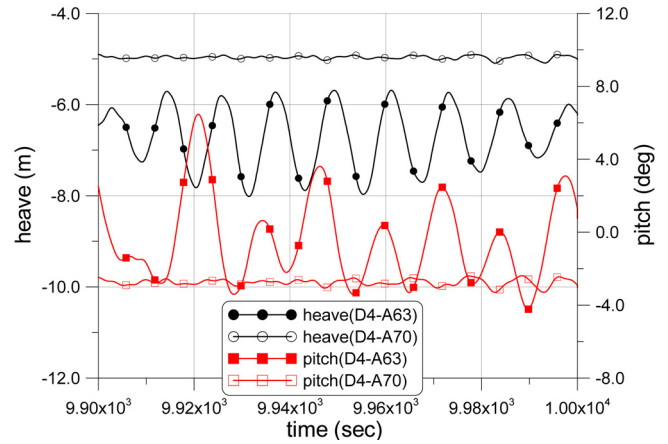


Fig. 10 Comparison of motion histories for load case #3 of scenarios D4-A63 and D4-A70

기 인장력이 부유체의 운동을 억제하여 계류선에 작용하는 동적 인장력이 감소하였음을 의미한다. 이러한 현상은 Fig. 8에서 보 인바와 같이 인장력 시계열 데이터에서 잘 나타나고 있다. Fig. 8은 하중 케이스 1번 및 계류선 1번에서의 인장력 시계열 데이터를 나타내고 있다. 특히 계류선이 극심한 상하동요(Heave) 또는 회전 동요(Pitch)에 의하여 순간적으로 인장상태를 소실하는 경우가 발생하면 매우 큰 범위의 인장력 범위가 발생하여 누적 피로를 급격하게 증가시킨다. 이러한 인장력의 급격한 증가는 부유체의 운동과 밀접한 관련이 있으며, Fig. 9에서 보인바와 같이 평균 인장력의 증가가 부유체 운동을 효과적으로 억제하였음을 확인할 수 있다.

배치 시나리오 D4-A63의 경우 매우 피로에 매우 취약한 것으로 나타났다. 특히 하중 케이스 1번, 2번, 3번에서 많은 피로가 누적되고 있음을 Table 6으로부터 확인할 수 있다. 전술한 바와 같이 운동의 불안정성이 과도한 피로를 누적시키는 주요 원인이며, 운동의 불안정성은 부유체의 공진으로 인하여 발생하는 것으로 추정된다. Fig. 10은 D4-A63 배치 시나리오에서 가장 큰 누적 피로를 발생시키는 하중 케이스 3번에 대한 운동 이력을 나타내며, D4-A70과 비교하여 나타내었다. Fig. 10에서 D4-A63의 상하동요 및 회전동요가 크게 증가하여, 큰 누적 피로가 유발된 것으로 추정된다. 이러한 운동을 제어하기 위해서는 계류선의 배치를 변경하거나 운동 감쇠판(Heave plate) 등을 설치하여 운동의 크기를 감쇠시키는 방법이 있을 수 있다.

4. 고 찰

파랑 빈도분포표의 단기해상상태는 거의 협대역으로 간주되긴 하지만, 다양한 단기해상상태를 고려한다면 파랑주파수는 매우 광범위한 주파수 대역에 존재한다. 따라서 공진을 근본적으로 회피하기 위해서는 부유체의 고유주파수가 좀더 고주파수 영역 또는 저주파수 영역에 배치되도록 계류선을 배치하는 것이 효과적이다. 따라서 본 연구에서 가정한 인장각식 계류선 배치는 현재 해역의 특성에서는 비효율적인 배치일수도 있다. 따라서 차후 연구로는 현수선식 계류방법이나 강선식 계류방법의 타당성이 조사될 필요가 있다.

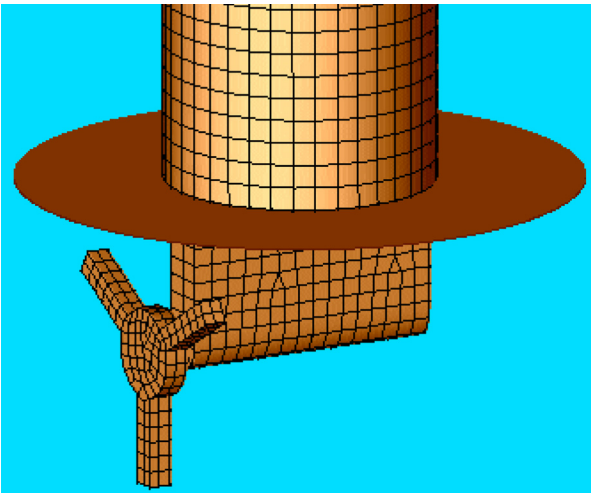


Fig. 11 Heave plate on bottom of a pillar

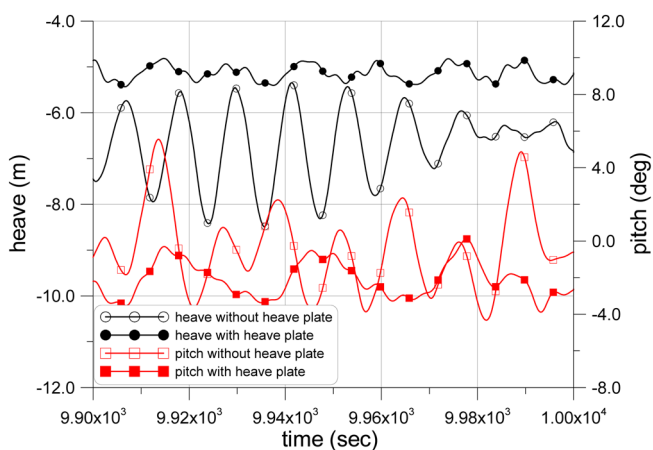


Fig. 12 Effect of heave plate on reduction of motion histories

전술한 바와 같이 부유체 운동의 크기는 직접적으로 계류선의 피로도에 영향을 미치고 있으며, WindFloat(2012)과 같은 실 프로젝트에서는 운동 감쇠판(Heave plate)을 적용하여 부유체의 운동을 감소시키고 있다. Table 6에서 누적 피로가 매우 크게 발생한 D4-A63에 대하여 운동 감쇠판을 부착하여 운동 감쇠판의 유효성을 검토하여 보았다. Fig. 11에 보인바와 같이 모든 필라의 하부에 운동 감쇠판을 설치하였으며, 상대적인 운동의 감소특성을 확인하기 위하여 지름은 필라 지름의 2배로 결정하였다. Fig. 11은 하중 케이스 3번에 대한 운동의 상대적인 감소량을 비교하여 나타내고 있는데, 현저하게 운동의 크기가 감소하였음을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 해상 풍력 발전기를 주전력원, 태양광 발전기 및 조류 발전기를 보조전력원으로 가지는 부유식 복합형 재생 에너지 플랫폼을 가정하였다. 본 논문의 목적은 이 플랫폼의 계류선 배치 설계 절차를 초기 설계 수준에서 제시하는 것이기 때문에, 해상 풍력 발전과 조류력 발전 또는 태양광 발전의 동시 수행에 대한 타당성과 경제성에 대한 고려는 하지 않았다.

부유식 복합 재생 에너지 플랫폼의 주요 형상은 WindFloat (Principle Power, 2012)에 기초하여 설계되었으며, 풍력 발전기의 용량은 5MW급을 가정하였다. 북대서양의 파빈도분포표에서 가장 발현 빈도가 높은 단기해상상태를 파랑하중의 기본조건으로 가정하였으며, 풍속 및 유속은 풍력 발전 및 조류력 발전의 효율성을 담보하는 수준에서 결정되었다. 또한 파도, 조류, 바람의 방향에 따라서 6개의 가능한 하중 케이스로 분류하고 동일한 발현 확률을 가지는 것으로 가정하였다. 비교적 낮은 수심(80m)을 가정하였기 때문에, 인장각식 계류선을 고려하였다. 초기 인장력을 결정하는 반잠수 깊이와 운동 특성에 많은 영향을 미치는 계류선의 인장각도에 따라 9가지 계류선 배치 시나리오를 고려하였다.

선형 주파수응답해석을 통하여 비계류 플랫폼의 6자유도 부가수 질량 및 방사 감쇠 행렬을 도출한 후, 평형위치해석을 통하여 플랫폼의 초기 인장력 및 초기 위치를 결정하였다. 계류 플랫폼의 주파수응답해석을 통하여 계류선의 인장력 RAO를 도출하고 파랑 스펙트럼과의 공진 여부를 판단하여, 공진 가능성이 적은 계류선 배치 시나리오를 선정하였다. 최종적으로 파랑하중을 고려한 비선형 시간영역응답해석을 통하여 불규칙파에 대한 시간영역응답해석을 수행하고, 계류선의 인장력 이력을 도출하였다. 레인폴로직계법을 이용하여 불규칙한 인장력 이력으로부터 인장력 범위를 추출하였으며, 이를 인장력-수명선도와 선형피로누적법칙에 적용하여 설계수명 동안의 누적 피로도를 예측하였다. 이로부터 최소의 누적 피로도를 보이는 계류선 배치 시나리오를 선정하였다.

일부 배치 시나리오의 경우, 계류 플랫폼의 주파수응답해석을 수행하여 계류선과 파랑과의 공진 가능성이 적다는 사실을 확인하였음에도 불구하고, 이에 대한 시간영역해석을 수행한 결과, 파랑 주파수와 공진 가능성을 확인할 수 있었다. 이는 현재의 플랫폼이 현재의 인장각식 계류방식을 이용하여 효과적으로 부유체의 운동을 제어하지 못할 수도 있다는 반증이다. 따라서 현수선식이나 강선식 등의 다른 방식의 계류 방법에 대한 타당성을 조사할 필요가 있다. 실제로 다양한 해상상태의 다양성 즉 다양한 단기해상상태를 경험하는 해역의 파랑 주파수는 상당히 광대역이며, 이를 극복하기 위해서는 인장각식 보다는 확실하게 저주파수 또는 고주파수 대역으로의 이동이 필요하다고 사료된다. 또한 플랫폼의 운동을 효과적으로 억제할 수 있는 운동 감쇠판의 도입이 필수적이라 사료된다. 따라서 다양한 계류 방법과 운동 감쇠판이 플랫폼의 운동에 미치는 효과(계류선의 누적 피로에 미치는 효과)에 대한 향후 연구가 필요할 것이다.

후 기

본 논문은 1) 산업통상자원부 해양플랜트특성화대학사업, 2) 해양수산부 해양에너지 전문인력 양성사업, 3) 인하대학교의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 위 기관의 지원에 감사드립니다.

References

American Bureau of Shipping(ABS), 2011. Guidance Notes on

- the Application of Fiber Rope for Offshore Mooring. ABS, Houston, USA.
- American Society for Testing and Materials(ASTM), 1997. ASTM E 1049-85: Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis. ASTM, USA.
- Ansys, 2010a. AQWA User Manual Release 13.0. Ansys INC, USA.
- Ansys, 2010b. AQWA Reference Manual Release 13.0. Ansys INC, USA.
- Brommundt, M., Krause, L., Merz, K., Muskulus, M., 2012. Mooring System Optimization for Floating Wind Turbines Using Frequency Domain Analysis. *Energy Procedia*, 24, 289-296.
- Chen, Z.S., Kim, W.J., Yoo, J.H., 2010. FSI Analysis of TLP Tether System for Floating Wind Turbine. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 24(1), 10-19.
- Det Norske Veritas(DNV), 2010a. Offshore Standard DNV-OS-E301: Position Mooring. DNV, Norway.
- Det Norske Veritas(DNV), 2010b. Recommended Practice DNV-RP-C205: Environmental Conditions and Environmental Loads. DNV, Norway.
- Jung, D.H., Nam, B.W., Shin, S.H., Kim, H.J., Lee, H.S., Moon, D.S., Song, J.H., 2012. Investigation of Safety and Design of Mooring Lines for Floating Wave Energy Conversion, 26(4), 77-85.
- Karimirad, M., Moan, T., 2012a. Wave- and Wind-Induced Dynamic Response of a Spar-Type Offshore Wind Turbine. *Journal of Waterway, Port, Coastal, Ocean Engineering*, 138(1), 9-20.
- Karimirad, M., Moan, T., 2012b. Feasibility of the Application of a Spar-type Wind Turbine at a Moderate Water Depth. *Energy Princidea*, 24, 340-350.
- Kvittema, M.I., Bachynski, E.E., Moan, T., 2012. Effects of Hydrodynamic Modelling in Fully Coupled Simulations of a Semi-Submersible Wind Turbine. *Energy Procedia*, 24, 351-362.
- Lankhorst, 2012. Ropes for Deep Water Mooring. [online] Available at <<http://www.lankhorstropes.com/>> [Accessed August 2012].
- Lee, J.S., Kang, K.S., Park, B.M., Won, Y.J., Kim, B.G., Ahn, N.S., 2011. A Study on Current Status and Outlook of Offshore Wind Development in Korea. *Journal of Wind Energy*, 2(1), 6-14.
- Lefebvre, S., Collu, M., 2012. Preliminary Design of a Floating Support Structure for a 5MW Offshore Wind Turbine. *Ocean Engineering*, 40, 15-26.
- National Renewable Energy Laboratory(NREL), 2009. Technical Report NREL/TP-500-38060: Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development, Technical Report NREL/TP-500-38060. NREL, USA.
- National Renewable Energy Laboratory(NREL), 2010. Technical Report NREL/TP-500-47535: Definition of the Floating System for Phase IV of OC3. NREL, USA.
- Principle Power, 2012. WindFloat brochure. [Online] Available at: <<http://www.principlepowerinc.com/images/Principle-PowerWindFloatBrochure.pdf>> [Accessed August 2012].
- Shin, H.S., Kim, K.M., 2011. Motion Analysis of 5-MW Floating Offshore Wind Turbine. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 25(5), 64-68.
- Tahar, A., Kim, M.H., 2008. Coupled-Dynamic Analysis of Floating Structures with Polyester Mooring Lines. *Ocean Engineering*, 35, 1676-1685.
- White, F.M., 2008. Fluid Mechanics 6th Edition. McGraw-Hill, New York.