

## 파력-해상풍력 복합발전을 위한 대형 반잠수식 플랫폼의 개념설계

김경환<sup>1</sup> · 이강수<sup>1</sup> · 손정민<sup>1</sup> · 박세완<sup>1</sup> · 최종수<sup>1</sup> · 홍기용<sup>1,†</sup>  
<sup>1</sup>한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소, 해양플랜트연구부

# Conceptual Design of Large Semi-submersible Platform for Wave-Offshore Wind Hybrid Power Generation

Kyong-Hwan Kim<sup>1</sup>, Kangsu Lee<sup>1</sup>, Jung Min Sohn<sup>1</sup>, Sewan Park<sup>1</sup>, Jong-Su Choi<sup>1</sup> and Keyyong Hong<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>Offshore Plant Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon 305-343, Korea

### 요 약

본 연구에서는 부유식 파력-해상풍력 연계형 발전시스템의 기반구조물 개념설계에 대한 내용을 다루고 있다. 세계적으로 해양 신재생에너지에 대한 관심이 커져가고 있다. 파력과 해상풍력은 다른 해양에너지원과 더불어 주요 관심이 되는 에너지원으로서 발전적지가 대체로 일치한다는 특징이 있다. 따라서 파력과 해상풍력을 복합하여 발전하는 시스템은 경제적으로 많은 이점이 있고 이미 여러 나라에서 파력-해상풍력 복합발전 시스템을 개발하고 있다. 이에 따라 우리나라에서도 10MW급의 파력-해상풍력 복합발전 시스템을 개발하기 위한 연구가 수행되었다. 본 연구에서는 다수 풍력발전기와 파력발전기의 배치를 고려하여 반잠수식 구조물이 설계되었다. 또한 설치해역의 환경을 고려하여 계류시스템과 파워케이블이 설계되었다. 본 논문에서는 이러한 복합발전 플랫폼의 개념설계 결과를 제시하고 다양한 발전시스템의 배치를 고려한 설계상의 어려움을 토의하고 설계 방법을 제시한다.

**Abstract** – The present paper considers the conceptual design of floating wave-offshore wind hybrid power generation system. The worldwide demand for ocean renewable energy is increasing rapidly. Wave and offshore wind energy have been attractive among the various ocean renewable energy sources, and the site to generate electricity from wave and offshore wind accords well together. This means that a hybrid power generation system, which uses wave and offshore wind energy simultaneously has many advantages and several systems have been already developed in Western Europe. A R&D project for a 10 MW class floating wave-offshore wind hybrid power generation system has been also launched in Korea. A semi-submersible platform, which has four vertical columns at each corner of the platform to be connected with horizontal pontoons, was designed for this system considering arrangements of multiple wind turbines and wave energy converters. A mooring system and power cable were also designed based on the metocean data of installation site. In the present paper, those results are presented, and the difficulties and design method in the design of hybrid power generation system are presented.

**Keywords:** Hybrid Power Generation Platform(복합 발전 플랫폼), Conceptual Design(개념설계), Mooring System(계류 시스템), Power Cable(파워케이블), Large Semi-submersible Platform(대형 반잠수식 플랫폼)

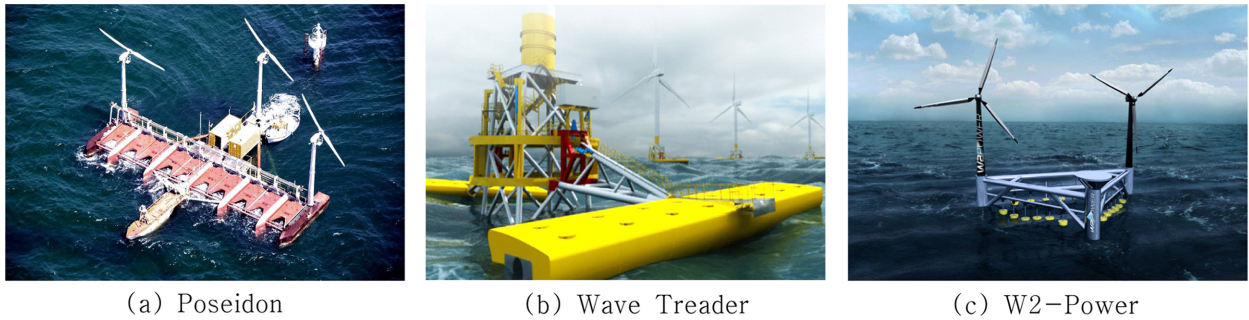
### 1. 서 론

온실가스의 증가에 따라 신재생에너지에 대한 관심이 더욱 커지고 있다. 해양에서의 신재생에너지원은 파력, 풍력, 조력 등 다양한 형태가 있으며 수십 년 동안 이를 개발하기 위한 연구들이 진행되어 왔다. 해상풍력은 다른 발전원에 비하여 비약적으로 발전되었다.

고정식 해상풍력은 이미 실용화되어 세계 곳곳에 대단위 발전단지까지 구축되었고 부유식 해상풍력의 경우에는 해상에서 실증시험을 마친 단계에 들어섰다(WindFloat [2015]). 파력발전기는 발전 효율을 높이기 위한 다양한 형태의 발전기들이 개발되었고 개념설계, 해상 실증시험 및 상용화의 여러 연구들이 수행되고 있다.

파력과 해상풍력은 대체로 발전 적지가 일치한다는 특성이 있다. 즉, 해상에서 풍속이 높은 곳은 파고도 높은 것이 일반적이다. 따라서 파력이나 해상풍력 하나의 발전원으로 발전시스템을 구축하

<sup>†</sup>Corresponding author: khong@kriso.re.kr



(a) Poseidon

(b) Wave Treader

(c) W2-Power

**Fig. 1.** Hybrid power generation platforms (Images taken from <http://www.floatingpowerplant.com>, <http://www.power-technology.com>, <http://www.pelagicpower.com>).

는 것보다 파력과 해상풍력을 복합하여 발전하는 것이 구조물 건조비용 및 설치비용 등에서 경제적이 될 수 있다. 이에 따라 최근에는 유럽을 중심으로 파력과 해상풍력을 복합하여 발전하는 복합발전 시스템들이 등장하고 있다. Poseidon 프로젝트는 3기의 풍력터빈과 다수의 파력발전기를 결합한 부유식 발전구조물로서 20 MW의 전력생산을 목표로 하고 있다. 해당 구조물은 해상에서의 성능시험 평가까지 이루어졌으며 상용화를 앞두고 있다. Wave Treader는 영국에서 개발되고 있는 구조물로서 고정식 해상풍력 구조물에 2개의 파력발전기를 결합한 형태이다. W2-Power는 노르웨이에서 개발되고 있는 부유식 복합발전 구조물이다. 두 개의 풍력터빈과 다수의 파력발전기를 삼각형의 반잠수식 구조물에 결합하는 형태로서 9MW의 전력생산을 목표로 하고 있다. 복합발전 플랫폼들에 대한 모습을 Fig. 1에 나타내었다.

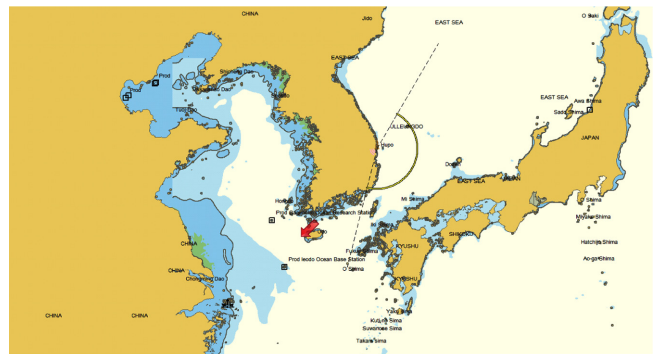
최근 들어 우리나라에서도 해양수산부의 지원 하에 10 MW급 부유식 파력-해상풍력 연계형 발전시스템 설계기술 개발 연구과제가 수행되었다. 심해에서의 부유식 복합발전 시스템 개발을 목표로 하는 본 연구에서는 계류 부유체-다수 풍력터빈-다수 파력발전기 통합 연성해석 기법 개발, 다수 풍력터빈과 파력발전기의 배치, 초대형 부유식 구조물의 설계, 계류시스템 및 파워케이블의 설계, 연계형 파력발전기의 개발, 전력변환 및 제어장치의 개발 등 다양한 연구들이 수행되었다.

다수 풍력터빈과 파력발전기를 하나의 부유체에 배치하기 위해서는 발전기들의 간섭 효과를 최소화하거나 발전량을 극대화하는 배치가 고려되어야 한다. 이에 따라 부유체 구조물도 기존의 석유 및 가스 채취를 위한 전통적인 해양구조물들과 다른 기능이 요구된다. 본 논문에서는 다수 풍력발전기와 파력발전기의 배치를 고려한 대형 반잠수식 구조물의 설계 결과를 제시하고 부유식 복합발전 구조물의 설계상에서 발생할 수 있는 어려움에 대하여 논의한다. 나아가 설치해역에 적합한 계류시스템과 파워케이블의 설계 방법과 결과를 제시하고 고찰한다. 개념설계는 각 요소 및 구조설계 부분의 설계를 포함하나 본 연구에서는 부유체와 계류시스템/파워케이블 개념설계의 내용만 다룰 것이다. 본 연구에서 제시된 설계 방법과 결과는 후후 유사한 복합발전 구조물의 설계와 해석에 유용하게 적용될 수 있을 것이다.

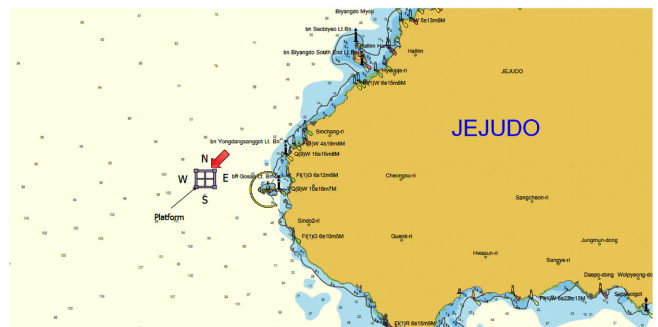
## 2. 설계 기본

### 2.1 요구 기능

복합발전 플랫폼 설계를 위하여 우선 플랫폼 설계를 위한 기능이 정의되어야 한다. 본 연구에서 개발된 복합발전 시스템은 최대 10 MW 이상의 발전량을 목표로 하고 있다. 이를 위하여 8MW를 풍력터빈에서 발전하며 2 MW를 파력발전기에서 발전하는 것을 목표로 한다. 풍력터빈은 이미 상용화된 기술이기 때문에 높은 발전량이 책정되었고 파력발전기는 풍력터빈에 비하여 기술발전 단계가 낮기 때문에 낮은 용량이 책정되었다. 복합발전 플랫폼은 심해에 설치 가능한 부유식 구조물이어야 하며 풍력터빈과 파력발전기의 안정적 운영을 위하여 최대 회전운동, 가속도 등이 허용기준을 만



(a) Installation site



(b) West of Jeju island

**Fig. 2.** Installation site.

축하여야 한다. 또한 부유체 구조물의 안정적 계류와 전력의 안정적인 송전을 위하여 설계기준에 부합하는 계류시스템과 파워케이블이 적용되어야 한다.

해양구조물에서 설치 위치는 구조물 설계의 모든 요소에 영향을 미치는 중요한 요소이다. 본 연구에서는 국내 해안에서 바람과 파도의 에너지 밀집도가 가장 높은 지역 중 하나인 제주도의 서쪽해역을 설치 위치로 선정되었다. 해당 해역은 제주도 서쪽에 위치한 차귀도에 근접한 해역으로 수심은 80 m 정도이다.

## 2.2 규정

복합발전 시스템은 신개념 발전 시스템이며 발전원의 조합에 따라 그 형태가 다양하기 때문에 아직까지 이를 설계하기 위한 일반화된 규정이나 지침이 없다. 부유식 풍력터빈의 경우에도 현재 이를 위한 설계 기준이 지속적으로 개선되고 있는 상황이다. 따라서 파력-해상풍력 복합발전 플랫폼의 설계를 위하여 복합발전 플랫폼이 갖고 있는 요소들에 대한 규정을 검토하고 이들을 복합적으로 적용하였다. 부유체 구조물과 계류시스템 설계는 일반적인 해양구조물인 FPSO(Floating Production Storage Offloading), 반잠수식 구조물(semi-submersible), TLP(Tension Leg Platform) 등의 설계에 적용된 규정들이 있으며 안정성, 설계하중조건, 안전계수 등에 대한 구체적인 설계 기준들이 제시되어 있다. 부유식 풍력터빈의 설계에 적용된 규정은 IEC 및 일부 선급들을 기준으로 제시되고 있다. 부유식 풍력터빈의 규정은 육상용이나 고정식 해상풍력의 규정들을 바탕으로 하고 있으며 해양구조물의 특징을 반영하기 위한 설계하중조건들이 개선되고 있다. 파력발전기는 일부 지침이 제시되고 있으나 다양한 형태의 파력발전기가 존재하고 아직 기술 개발 단계에 있어 지침이 구체적인 내용을 포함하고 있지는 않다. 주요 요소들에 대한 규정을 아래와 같이 정리하였다.

- 부유체 및 계류시스템

ABS, Rules for Building and Classing Mobile Offshore Drilling Units, 2006

ABS FPI Guide: Guide for Building and Classing Floating Production Installations, 2013

API RP 2T, Planning, Designing, and Constructing Tension Leg Platforms, 3rd edition, 2010

API RP 2SK, Recommended Practice for Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures, 2nd edition, 2005

API RP 2SM, Recommended Practice for Design, Manufacture, Installation, and Maintenance of Synthetic Fiber Ropes for Offshore Mooring 1st edition, 2001

API Bulletin 2INT-DG Interim Guidance for Design of Offshore Structures for Hurricane Conditions, 2007

DNV-RP-C103, Column-Stabilised Units, 2010

DNV-RP-F205, Global Performance Analysis of Deepwater Floating Structures, 2010

DNV-OS-C101, Design of Offshore Steel Structures, General (LRFD method), 2007

DNV-OS-C103, Structural Design of Column Stabilised Units (LRFD method), 2007

DNV-OS-C201, Structural Design of Offshore Units (WSD method), 2008

- 부유식 풍력터빈

ABS, Guide for Building and Classing Floating Offshore Wind Turbine Installations, 2013

BV, Classification and Certification of Floating Offshore Wind Turbines, Guidance Note NI 572 DT R00 E, 2010

DNV-OS-J101, Design of Offshore Wind Turbine Structures, 2010

GL, Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines, 2005

IEC 61400-3, Requirements for Offshore Wind Turbines, 2009

- 파력발전기

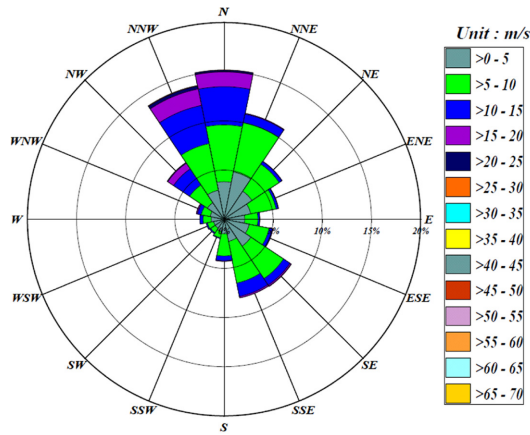
IEC 62600-2, Design Requirement for Marine Energy System (draft), 2014

DNV, Guidelines on Design and Operation of Wave Energy Converters, 2005

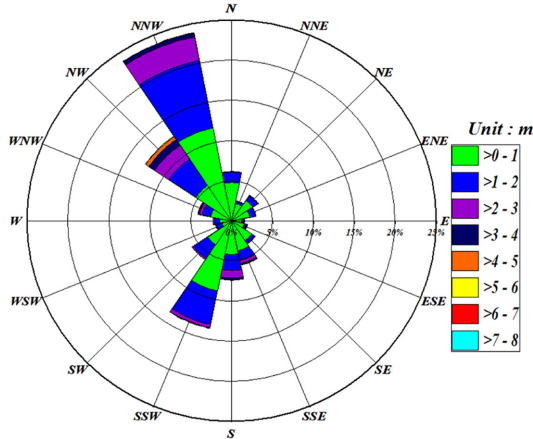
EMEC, Guideline for Design Basis of Marine Energy Conversion System, 2009

## 2.3 환경정보

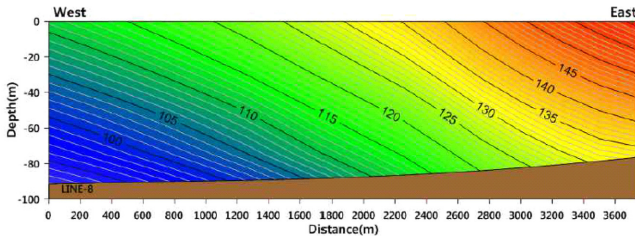
해양환경정보는 해양구조물의 설계에 있어서 가장 중요한 요소이다. 환경정보에 따라 플랫폼과 계류시스템의 형태나 사양이 크게 바뀔 수 있고 발전원 요소별 배치 형태도 바뀔 수 있다. 해양환경 정보에서 핵심적으로 필요한 정보는 바람, 조류 및 파랑 정보이다. 바람 정보는 제주도에 위치한 고산기상대의 계측 정보를 설치위치의 고도로 보정하여 적용하였다. 1분평균, 10분평균, 1시간 평균 자료 산출을 위하여 1988년부터 2012년까지 계속된 정보를 적용하였다. 바람의 고도는 ABS 선급에서 제시된 지수법칙을 적용하여 보정하였고 관측위치는 해안 인접으로 판단하여 바다에서 육지로 0.9배 보정하였다. 또한 바람의 지속시간은 미국 공병단에서 제시한 CEM의 지속시간 보정법을 적용하였다(US Army Corps of Engineers[2002]). 이를 바탕으로 재현주기에 따른 고도별, 방향별 바람분포 정보를 도출하였다. 파랑 정보는 1979년부터 2003년 동안의 파랑정보가 포함된 전해역 심해설계과 추정보고서(KIOST[2005])의 정보를 이용하였다. 재현주기별 설계과 산정을 위하여 SWAN (Simulation Waves Nearshore) 모델 Version 40.72A를 이용하였다. 조류 산정을 위해서는 미국환경보호국에서 공인한 EFDC(Environmental Fluid Dynamics Code) 모델을 사용하였다. 이로부터 재현주기별 유속을 산출하였다. 이외에도 조위, 폭풍해일고 및 해수온도 분포 등의 정보를 제주 조위관측소, 기상청 정보, ADCIRC 수치모델을 이용하여 산정하였다.



(a) Wind rose plot



(b) Wave rose plot



(c) Current profile from west to east (installation site = center)

Fig. 3. Example of metocean data.

### 3. 개념설계

#### 3.1 부유체 개념설계

설계 사양에서 요구되는 발전량을 달성하기 위하여 다수의 풍력터빈과 파력발전기가 대형 부유체에 배치되어야 한다. 최근 개발되는 풍력발전기들은 5 MW를 넘어서 8 MW에 이르기까지 개발이 시도되고 있다. 본 연구에서 개발되는 복합발전 구조물은 대용량의 풍력발전기를 1기 배치하는 것보다 용량이 작더라도 다수의 풍력발전기를 배치하는 것을 주요 목표로 하고 있다. 다수 풍력터빈의 배치 기술이 검증되면 추후 대용량의 풍력발전기 배치를 통하여 발전량을 확장할 수 있는 장점이 있으며 단일 발전시스템보다 경제

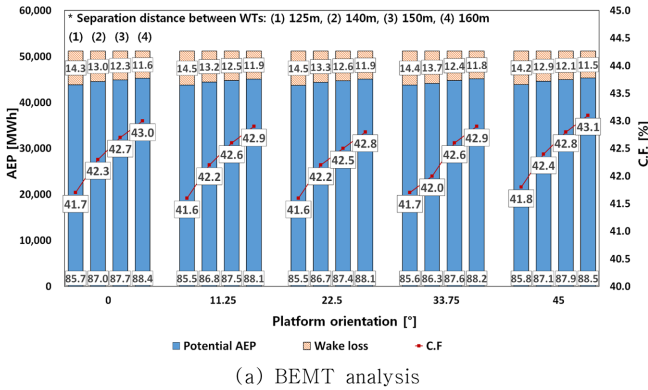
성이 뛰어나다는 점이 검증된다면 향후 단일 발전시스템을 대체하는 발전구조물이 될 수 있다. 현재까지 유럽에서 개발되는 다른 복합발전 구조물들도 단일 부유체에 다수의 풍력터빈을 배치하는 형태를 갖고 있다. 부유식 해양구조물은 FPSO, TLP, 반잠수식 구조물, Spar 등 여러 형태가 있다. 부유체 구조물은 발전기들을 배치하기 위한 충분한 갑판면적이 있으면서도 발전기들의 안정적인 운영을 위하여 뛰어난 운동성능을 가져야 한다. 또한 발전기들의 간섭 효과를 최소화하기 위하여 발전기들이 멀리 배치될 수 있도록 대형 구조가 가능해야 하며 파력발전기들이 부유체와의 간섭없이 자유표면 부근에 배치될 수 있는 구조를 가져야 한다. TLP나 Spar 구조물은 운동성능이 양호하나 제한된 갑판면적을 갖고 있고 천수역에 설치가 어렵다는 단점이 있다. FPSO는 넓은 갑판면적을 갖고 있으나 일반적으로 다른 형태의 구조물들에 비하여 운동성능이 좋지 않다. 또한 파력에너지를 흡수하여 파력발전기의 성능을 떨어뜨릴 수 있다. 반잠수식 구조물은 대형구조의 확장성이 용이하면서도 자유수면 부근에 파력발전기를 설치하기가 용이하고 상대적으로 안정된 운동 성능을 갖고 있다. 이에 따라 본 연구에서 적용 가능한 구조물 형태로 채택되었다.

플랫폼의 크기는 제작비용 관점에서 작게 제작할수록 경제적이다. 그러나 크기가 너무 작으면 풍력터빈이 배치되는 간격이 줄어들게 되며 이는 풍력터빈 간의 간섭으로 인하여 발전량이 손실될 수 있는 가능성이 있다. 또한 풍력터빈이 너무 근접한 거리에 배치되면 피로손상 등의 위험성이 커질 수 있다. 주요 크기 산정을 위하여 풍력터빈의 간섭 효과를 고려한 풍력터빈 발전량 해석이 수행되었다(Park et al.[2015]). Park et al.[2015]는 풍력터빈 간의 거리, 풍력터빈의 용량, 주풍향 대비 풍력터빈의 방향 등에 대한 변수들을 바꾸어 가며 BEMT(Blade element momentum theory) 기법으로 풍력터빈 발전량 해석을 수행하였고 CFD 해석을 통하여 다수 풍력터빈의 발전량 해석 결과를 검증하였다(Fig. 4). 본 연구에서는 Park et al.[2015]의 연구를 바탕으로 플랫폼의 길이와 폭을 각각 150 m로 선정하였다. 플랫폼의 주요치수 설계에 있어서 파력발전기의 간섭에 의한 영향도 검토되었으나 이와 같은 대형 구조물에서 파력발전기는 충분한 거리를 두고 배치할 수 있어 주요치수 선정에 큰 영향을 미치지 않는다고 판단되었다.

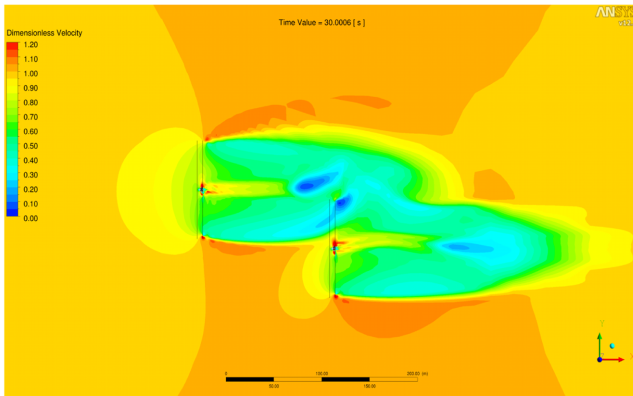
풍력터빈은 본 플랫폼에서 구조부재 다음으로 많은 무게를 차지하는 요소이며 구조적 안전성을 위하여 반잠수식 구조물의 네 곳 칼럼(column) 위에 배치되었다. 일반적으로 해상풍력터빈은 칼럼과 같이 구조적으로 안전한 곳에 배치된다. 반잠수식 구조물은 길이와 폭의 치수가 같으며 구조적으로 안전성을 확보하기 위하여 네 곳 칼럼 사이에 폰툰(pontoon)이 적용되었다. 파력발전기는 100 kW 급 점흡수식 형태로 개념설계 되었으며 24기가 배치되었다(Kim et al.[2014], Cho & Choi[2014]). 설계된 구조물의 형태를 Fig. 5에 나타냈으며 Table 1에 설계된 구조물의 주요치수를 나타내었다.

복합발전 구조물은 로터, 나셀, 타워에 해당하는 풍력터빈 요소와 파력발전 부이, 선형발전기 및 취부장치에 해당하는 파력발전기 요소를 갖고 있다. 또한 선체, 보강재(brace), 밸러스트 수, 계류하





(a) BEMT analysis



(b) CFD analysis

Fig. 4. Wind turbine interaction analysis (Park et al.[2015]).

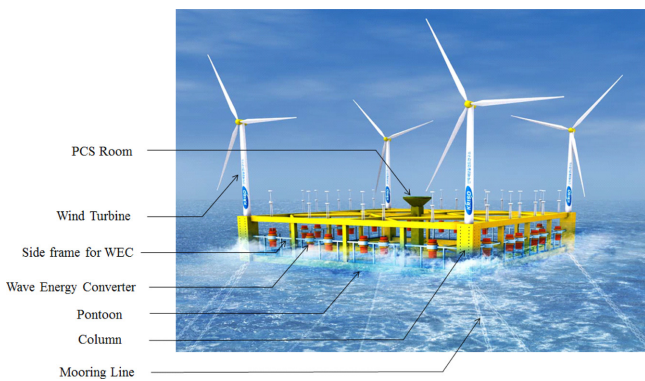


Fig. 5. Conceptual design of hybrid power generation platform.

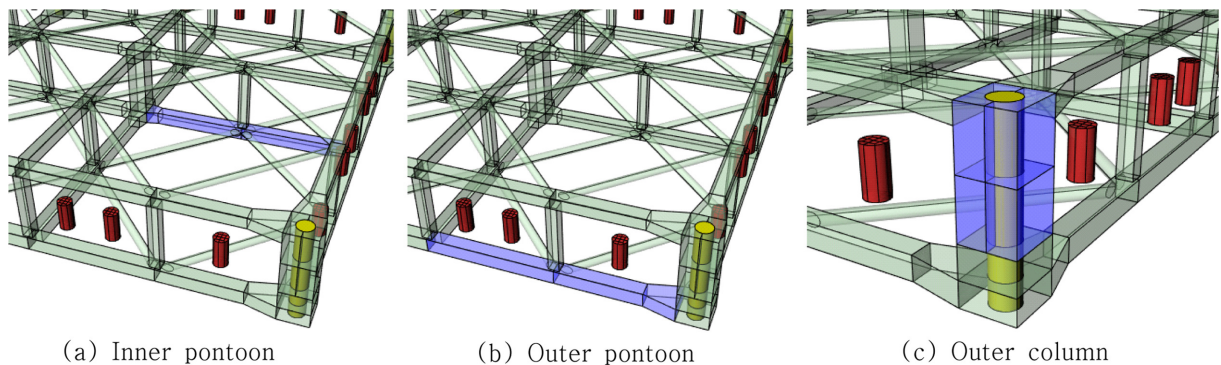


Fig. 6. Example of flooded section.

Table 1. Principal dimension of 10 MW floating wave-offshore wind hybrid power generation platform

Item	Unit	Value
Column span (center to center)	m	150
Draft (design)	m	15
Column height	m	27
Pontoon size (height × width)*	m	4 × 4
Deck size (height × width)*	m	3 × 4
Displacement	Ton	26,848
Weight of hull structure and braces	Ton	13,796**
Weight of wind turbine (tower+rotor)	Ton	1800**
Weight of wave energy converter (incl. frame)	Ton	2,344**
Weight of ballast	Ton	6,255
Center of gravity (from keel)	m	13.67
Roll radius of gyration	m	58.59
Pitch radius of gyration	m	58.65
Yaw radius of gyration	m	78.44
GM	m	101.31

\*Deck and pontoon have square sections and the height and width mean the height and width of the square section.  
\*\*The contingency is about 15%~20%. It is included in this table.

중, 해양장비, 전기장비 등에 해당하는 요소들도 갖고 있다. 개념설계 단계에서는 이들에 대한 무게를 정확하게 추산하기가 어렵다. 따라서 이들에 대한 불확실성을 포함하기 위하여 10~15%에 해당하는 무게를 추가 적용하였다.

ABS[2013]에는 부유식 구조물의 안정성 해석에 대한 기준이 제시되어 있다. 바람에 의한 최대 기울임 모멘트를 계산하고 풍력터빈 발전시, 폭풍 조건시, 이송시에 대한 비손상 및 손상 상태의 안정성을 계산하였다. 바람의 기울임 모멘트 해석은 상용해석프로그램인 WINDOS를 적용하였고 안정성 해석은 GHS를 이용하였다.

풍력터빈과 파력발전기가 운용 가능하기 위해서 복합발전 플랫폼은 적절한 운동성능을 가져야 한다. 일반적으로 최대 회전운동과 가속도가 적당한 범위 내에서 운동해야 하나 선규정이나 기준에 정확한 수치가 제시된 바가 없다. 운동 성능은 파력발전기보다는 풍력터빈의 영향을 많이 받는다고 할 수 있는데 풍력터빈의 주요 구동부인 나셀이나 로터가 부유체 운동 중심으로부터 멀리 떨어진

**Table 2.** Stability results

Loading condition	Power production	Storm condition	Wet tow condition
Maximum VCG (intact)	82.5	82.5	82.5
Maximum VCG (damage)	88.6	88.6	88.6
VCG Margin (intact)	65.11	65.11	64.28
VCG margin (damage)	71.21	71.21	70.38
ABS criteria	Acceptable	Acceptable	Acceptable

\*VCG : Vertical center of gravity

곳에서 움직이기 때문에 부유체의 작은 회전운동에도 크게 제한을 받을 수 있다. 본 연구에서는 설계된 복합발전 구조물의 운동을 해석하고 이를 유사 부유식 풍력터빈 구조물들의 운동 결과와 비교하여 성능을 평가하였다.

복합발전 구조물은 기존의 단일 부유식 풍력터빈 구조물에 비하여 다수의 풍력터빈과 파력발전기를 갖는다는 특징이 있으며 기존에 개발된 풍력터빈 해석 프로그램(FAST, GH-Bladed 등)으로 해석이 어렵다. 이에 따라 Bae *et al.*[2014]가 개발한 MUFOWT (Multiple Units Floating Offshore Wind Turbine) 해석 프로그램을 적용하였다. 이 프로그램은 NREL(National Renewable Research Laboratory)의 FAST해석 프로그램 중 풍력터빈의 동적해석 모듈을 다수 풍력터빈에 대해 해석할 수 있도록 확장 개발한 시간영역 통합 연성해석 프로그램으로 부유체의 거동과 계류계의 거동은 WAMIT과 CHARM3D를 이용한다. Fig. 7은 수치해석에 적용된 패널모델과 해석결과 예를 보여주고 있다.

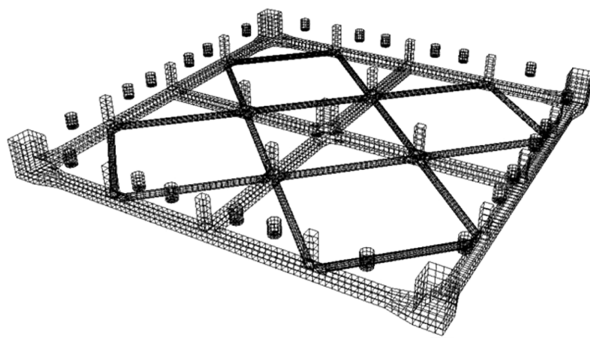
Table 3은 100년 재현주기 조건에서 복합발전 구조물과 다른 부

유식 해석풍력 구조물의 운동해석 결과를 비교하여 나타내었으며 본 연구에서 개발된 복합발전 구조물의 운동 성능이 다른 구조물에 비하여 수렴할만한 결과를 주는 것을 알 수 있다. Table 3에서 Hs, Tp는 유의파고와 주기이며 Vw와 Vc는 바람의 속도와 조류의 속도를 의미한다.

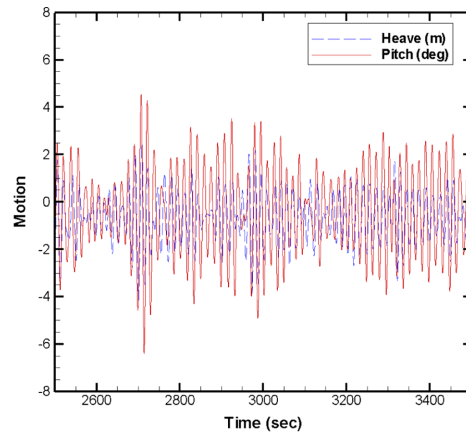
**3.2 계류시스템 및 파워케이블 설계**

부유식 구조물에 대한 계류시스템은 다양한 형태가 존재하나 반잠수식 구조물과 설치해역의 수심을 고려하였을 때 현수선 방식의 계류선 형태가 적합하다. 개념설계 단계에서 계류시스템의 형태의 결정은 플랫폼의 형태, 수심, 설치비용 등을 따져서 결정하는데 해당 계류시스템은 낮은 수심에서 적용이 가능하고 비용이 상대적으로 저렴하다는 장점이 있다.

계류시스템의 형태가 결정되면 선급의 설계하중조건을 만족하는 계류시스템을 설계한다. 본 연구에서는 ABS FPI Guide[2013], API RP 2SK[2005] 규정을 따랐다. 해당 규정은 손상 및 비손상시 최대



(a) Panel model with WEC



(b) Motion signal (100-yr condition)

**Fig. 7.** MUFOWT analysis.

**Table 3.** Motion results

Model	Environmental condition	Maximum heave (m)	Maximum pitch (deg)
Hybrid Power Generation Platform	100-yr condition (Hs=11.32 m, Tp=15.1 sec, Vw=48.41 m/s, Vc=1.52 m/s)	4.16	6.4
WindFloat*	100-yr condition (Hs=13.5 m, Tp=17 sec, Vw=25.9 m/s, Vc=0.8 m/s)	4.93	5.77
WindSea**	100-yr condition	10.3	6.2

\*Roddier *et al.*[2009], Cermelli *et al.*[2009]

\*\*WindSea[2015]

**Table 4.** Mooring chain properties (un corroded chain)

Chain type	Unit	Chain I	Chain II	Chain III
Chain diameter	mm	130.2	136.5	149.2
Dry weight	t/m	0.339	0.374	0.444
Wet weight	t/m	0.293	0.322	0.385
Maximum broken loading	kN	15,596	16,894	19,563

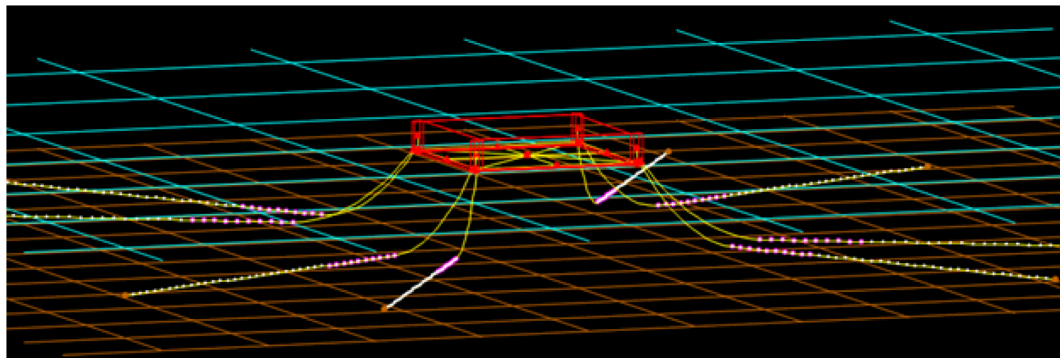
장력과 최대 변위를 만족하도록 제시하고 있으며 이에 대한 내용이 Table 5에 나타나 있다.

계류시스템의 설계를 위해서는 크게 계류선의 제원, 배치, 개수 등이 결정되어야 한다. 계류시스템 설계를 위해서는 일반적으로 적용 가능한 계류선 제원 중 일부를 선택하고 생존조건에 대한 안전계수를 만족하는 배치와 개수를 선택한다. 개념설계 단계에서는 일반적으로 가장 큰 하중이 나타나는 생존조건과 손상조건의 일부를 설계하중조건으로 적용하며 기본설계에서 더욱 세분화된 설계하중조건을 적용하여 설계를 구체화한다. 본 연구에서는 일반적으로 많이 적용되는 R4 Studless 방식의 체인을 선택하였고 Table 4와 같은 사양들을 설계안으로 선택하였다.

계류선의 설계에 있어서 계류선의 길이와, 배치, 개수 등에 대한 민감도 해석이 수행될 수 있다. 그러나 모든 요소들에 대해서 민감도 해석을 하기에는 제한이 있으므로 상대적으로 선택이 쉬운 개수와 배치 간격을 사전 선정하였다. 계류선의 배치는 배치 간격이

좁을수록 계류력이 커지며 계류선의 개수는 개수가 작을수록 계류선과 앵커의 설치비용이 감소한다. 그러나 손상시의 안정성 확보가 필요하기 때문에 너무 작은 개수의 배치나 좁은 간격의 배치는 선급 기준을 만족하기 어렵다. 복합발전 구조물은 사각형의 구조물로서 구조물의 네 모서리에 계류선을 배치하는 것이 안정적이다. 비용감소와 손상시 안정성을 위하여 초기 배치는 계류선의 네 모서리에 각 2개씩 계류선을 배치하였으며 안정적인 배치를 위하여 각 모서리에 배치되는 두 계류선의 간격은 30도로 적용하였다.

설계하중조건 해석을 위하여 부유체의 유체동역학적 계수들은 대표적인 부유체 운동해석 프로그램인 WAMIT으로 해석하였고 시간영역에서 부유체와 계류시스템의 거동은 ORCAFLEX를 적용하였다. Fig. 8에 계류시스템 해석을 위한 ORCAFLEX 모델링 모습을 나타내었다. 계류선 해석에 있어서 중요한 요소는 바람과 조류에 의한 하중을 적용하는 것이다. 이에 대한 정확한 하중 해석을 위해서는 CFD나 풍동시험과 같은 해석이 요구되나 개념설계 단계에



**Fig. 8.** Mooring analysis in ORCAFLEX.

**Table 5.** Maximum tension at fairlead for Chain II

Status	Heading (deg)	Max Tension (kN)	Safety Factor	Criteria	Pass
100-yr Wave, Intact	0.0	6511.3	2.30	>1.67	Yes
100-yr Wave, Intact	22.5	7754.5	1.93	>1.67	Yes
100-yr Wave, Intact	45.0	6777.3	2.21	>1.67	Yes
100-yr Wind, Intact	0.0	6437.0	2.32	>1.67	Yes
100-yr Wind, Intact	22.5	7713.9	1.94	>1.67	Yes
100-yr Wind, Intact	45.0	6775.1	2.21	>1.67	Yes
100-yr Wave, Damaged	0.0	7969.2	1.88	>1.05	Yes
100-yr Wave, Damaged	22.5	10722.0	1.39	>1.05	Yes
100-yr Wave, Damaged	45.0	13208.4	1.13	>1.05	Yes
100-yr Wind, Damaged	0.0	8308.5	1.80	>1.05	Yes
100-yr Wind, Damaged	22.5	10895.3	1.37	>1.05	Yes
100-yr Wind, Damaged	45.0	13061.6	1.14	>1.05	Yes

**Table 6.** Maximum offset for Chain II.

Status	Heading (deg)	Max Tension (kN)	% of Water Depth	Criteria	Pass
100-yr Wave, Intact	0.0	23.2	28.9	<35	Yes
100-yr Wave, Intact	22.5	22.5	28.1	<35	Yes
100-yr Wave, Intact	45.0	22.0	27.5	<35	Yes
100-yr Wind, Intact	0.0	21.9	27.3	<35	Yes
100-yr Wind, Intact	22.5	21.5	26.8	<35	Yes
100-yr Wind, Intact	45.0	20.6	25.7	<35	Yes
100-yr Wave, Damaged	0.0	31.0	38.8	<50	Yes
100-yr Wave, Damaged	22.5	32.9	41.2	<50	Yes
100-yr Wave, Damaged	45.0	30.6	38.3	<50	Yes
100-yr Wind, Damaged	0.0	31.6	39.5	<50	Yes
100-yr Wind, Damaged	22.5	31.5	39.4	<50	Yes
100-yr Wind, Damaged	45.0	29.5	36.9	<50	Yes

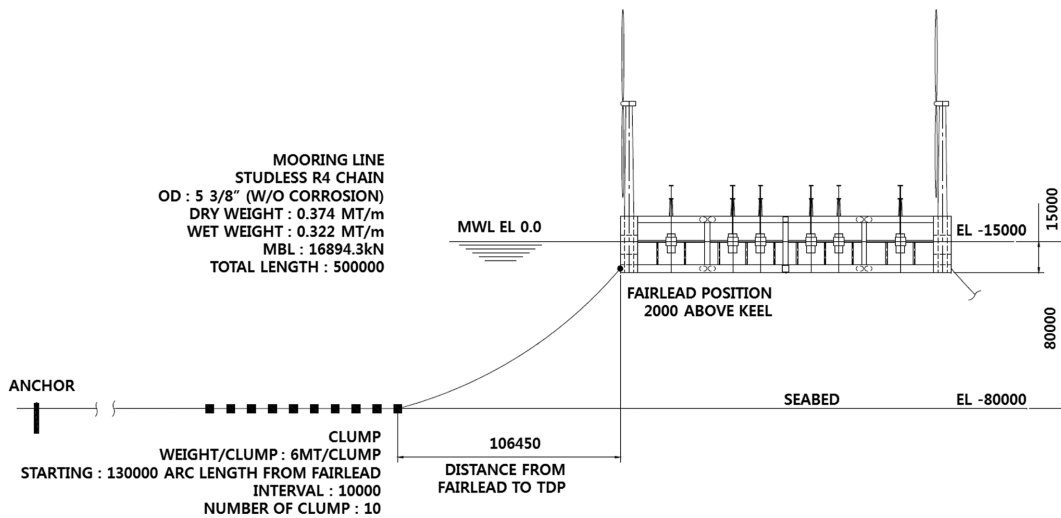
서는 이와 같은 정교한 해석에 많은 시간과 비용이 들어가므로 초기 설계 단계에서 유용하게 적용할 수 있는 WINDOS 해석 프로그램을 적용하였다.

Table 5와 6에 Chain II에 대한 해석 결과의 예를 나타내었다. 계류선의 길이를 500m로 하였을 때의 해석 결과이며 100년 재현주기의 환경조건에 대하여 최대 장력과 변위에 대하여 Chain II가 결과를 만족하는 것을 알 수 있다. 100-yr Wave는 100년 재현주기의 파랑조건에 50년 재현주기의 조류와 바람조건을 적용한 것이며 100-yr Wind는 100년 재현주기의 바람조건에 50년 재현주기의 조류와 파랑조건을 적용한 것이다. 모든 환경 조건은 동일 방향으로 0, 22.5, 45도에 대하여 적용하였고 각 환경하중의 방향 불일치 (misalignment)조건은 고려하지 않았다. Intact는 비손상 조건이며 Damaged는 가장 큰 장력을 받는 계류선이 손상되었을 때를 의미한다. 민감도 해석을 통하여 최종적으로 Fig. 9와 같은 계류시스템 설계가 수행되었다.

파워케이블 설계는 설치형태, 케이블 방향, 케이블 형태에 따른 주요치수 설계 등이 필요하다. 고정식 해상풍력과 같은 구조물에 대한 파워케이블 설계는 구조물과 해저면이 접하고 있어 상대적으로

용이하다. 그러나 부유식 발전구조물의 경우에는 파워케이블이 부유체와 함께 거동하며 해저면에 접촉하기 때문에 최대하중 및 피로하중의 관점에서 설계가 쉽지 않다. 파워케이블의 설치 형태는 Free Hanging, Steep-s, Lazy-s, Steep Wave, Lazy Wave 등 다양한 형태가 있다[Karegar, 2013]. 형태 선정의 중요한 요소는 설치 환경, 수심, 설치 용이성, 비용 등이 있다. 부유체의 운동과 수심 등을 고려하였을 때 가격대비 우수한 성능을 보이는 형태는 Lazy Wave 형태이다. 파워케이블은 API RP 2RD[1998], API SPEC 17E[2003], ISO 13628-5[2009]를 따라 설계하였다. 파워케이블도 계류선 설계와 같이 적용 가능한 파워케이블의 제원을 선정하고 설계하중조건을 만족하는 길이, Hang-off 위치, 각도 및 End Point 등을 선정하고 계류선과의 간섭을 통하여 안전성을 판단한다. 개념설계에서는 생존조건을 기반으로 일부의 조건을 해석하여 설계안을 도출하며 기본설계에서 상세한 설계하중조건을 바탕으로 구체적인 설계를 수행한다. 또한 주요한 요소인 피로해석은 기본설계에서 수행한다. 규정에서 요구하는 것은 최대굽힘반경(Maximum bending radius)과 최대장력의 만족여부와 계류선과의 간섭 여부이다.

파워케이블 개념설계를 위하여 선정된 사양은 Table 7과 같다.



**Fig. 9.** Mooring line design.



**Table 7.** Power cable properties

Parameter	Units	Value
Outside maximum diameter	mm	105
Weight in air	kg/m	21.5
Weight in sea-water	kg/m	12.6
Maximum safe working load	kN	270
Static minimum bend radius	mm	1050
Dynamic bend radius	mm	1575

현재 국내 상용화되어 판매되는 파워케이블은 정적 파워케이블이며 부유식 구조물을 위한 동적 파워케이블은 거의 없는 상황이어서 본 연구에서는 파워케이블 관련 업체의 협력 하에 Table 7과 같은 사양을 적용하였다. 파워케이블 해석도 ORCAFLEX에서 수행하였는데 케이블에 작용하는 항력 및 관성 계수와 해저면의 관련 계수는 Table 8과 같이 적용하였다.

설계하중 조건은 100-yr Wave Intact와 Damaged가 적용되었다. 환경조건의 방향은 180, 90, 0 deg를 적용하였다. 파워케이블 설계는 다양한 요소들이 설계되어야 하며 민감도 해석 수행 시 계류선만큼 많은 해석이 필요하다. Lazy wave 형태에서는 부력 모듈이 적용되며 상용 모델을 참고하여 부력 모듈의 직경, 길이와 무게는 0.4 m,

**Table 10.** Effective tension at hang-off based on dynamic analysis

Condition	Heading (deg)	Maximum tension (kN)
100-yr Wave, Intact	180	8.0
	0	178.9
100-yr Wave, Damaged	90	42.2
	180	7.9
100-yr Wave, Damaged	0	177.8
	90	41.4

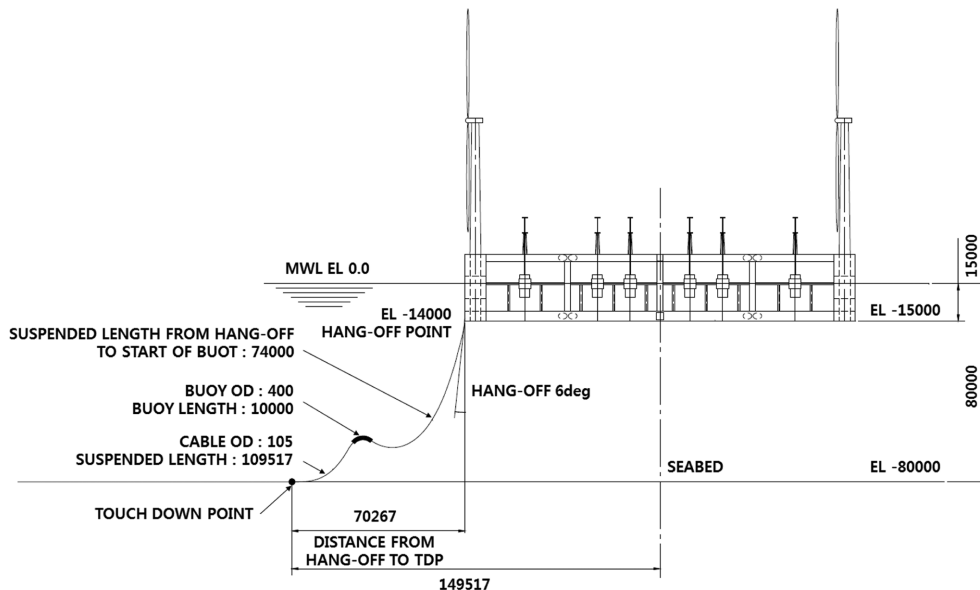
10 m, 545 kg/m<sup>3</sup>로 적용하였다. 파워케이블의 정확한 설계를 위해서는 부력모듈의 위치와 길이, 굽힘 반경의 길이 등 다양한 요소에 대한 민감도 해석이 필요하다. 개념설계에서는 설계사의 경험에 기반하여 hang-off로부터 84 m 위치에 부력모듈이 놓이는 것으로 가정하고 정적 및 동적 해석을 수행하였다. 정적해석으로부터 파워케이블의 hang-off에서의 파워케이블 각도와 touch-down point가 계산되며 주어진 하중조건에 대한 최대하중과 최소 굽힘반경을 만족하는지 확인할 수 있다. 또한 동적해석으로부터 최대 장력과 최소 굽힘 반경의 만족 여부를 판별할 수 있다. Table 9와 10에 정적 및 동적해석 결과의 예를 나타내었으며 Fig. 10에 최종적으로 설계된 모습을 나타내었다.

**Table 8.** Hydrodynamic & seabed coefficient for the power cable global analysis

Hydrodynamic Coefficient	Value	Seabed Coefficient	Value
Normal Drag	1.2	Vertical Soil Stiffness	100
Tangential Drag	0.0	Longitudinal Friction Coefficient	0.45
Normal Inertia	2.0	Transverse Friction Coefficient	0.45
Tangential Added Mass	0.0		

**Table 9.** Minimum bend radius (MBR) based on static analysis

Condition	Minimum bend radius (m)	Location from hang-off (m)	Criteria	Pass
100-yr Wave, Intact	5.217	77.25	>1.05	Yes
100-yr Wave, Damaged	4.691	77.25	>1.05	Yes



**Fig. 10.** Power cable design.

## 4. 결 론

본 연구는 10MW급 부유식 파력-해상풍력 연계형 발전시스템의 개념설계에서 수행된 내용의 일부인 부유체, 계류시스템 및 파워케이블 설계를 다루었다. 설계에 따른 결과를 일부 제시하였으며 아래와 같은 결론을 얻었다.

• 복합발전 시스템의 설계를 위한 규정이나 지침서가 부재하다. 현 단계에서 복합발전 구조물 설계에는 부유체, 계류계, 파력, 해상풍력 등의 개별적인 요소에 대한 규정과 지침을 복합적으로 적용할 필요가 있다.

• 부유체의 주요치수 설계에서 풍력발전기간의 간섭이 중요한 요소이다. 따라서 BEMT 및 CFD 해석을 통하여 후류간섭의 효과를 살펴보고, 부유체 주요치수가 선정되어야 한다. 파력발전기는 풍력발전기에 비하여 크기가 상당히 작기 때문에 충분한 거리를 두고 배치할 수 있으며 대형 구조물에 배치되는 경우 간섭 영향에 대한 고려가 상대적으로 중요하지 않을 수 있다.

• 부유체의 운동 성능은 풍력터빈 및 파력발전기의 거동이 고려된 해석을 통하여 검토되어야 하며 무게중심으로부터 풍력터빈의 나셀이 상당히 먼 거리에 배치되므로 나셀에서의 회전 운동에 대한 검토가 중요하다. 본 연구에서 제시된 구조물은 유사 발전 시스템과 비교하여 양호한 운동 성능을 보여주었다.

• 계류시스템과 파워케이블의 설계에 대하여 선급과 미국석유협회에서 적절한 규정이 제시되어 있으며 본 연구에서는 이에 따른 설계를 수행하였다. 다만 개념설계에서는 계류선 체인이나 파워케이블의 제원에 대한 가정이 필요하며 특히 파워케이블의 경우에는 상용화된 동적 파워케이블의 제원이 부족하여 불확실성이 커질 수 있다.

본 연구에서 제시된 복합발전 플랫폼 설계 절차와 방법은 유사 발전 구조물 설계에 대한 지침이 될 수 있을 것이다. 향후 더욱 구체화된 설계하중조건 해석과 발전기간의 간섭해석 등을 통하여 기본설계 수행이 필요하며 이를 바탕으로 더욱 구체화된 설계 절차와 지침이 마련될 수 있을 것이다.

## 후 기

본 연구는 해양수산부의 해양청정에너지기술개발사업 “10 MW급 부유식 파력-해상풍력 연계형 발전시스템 설계기술 개발”의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## References

- [1] ABS, 2013, Guide for Floating Offshore Wind Turbine Installations, American Bureau of Shipping.
- [2] ABS FPI Guide, 2013, Guide for Building and Classing Floating Production Installations, American Bureau of Shipping.
- [3] API RP 2RD, 1998, Recommended Practice for Design of Risers for Floating Production Systems and TLPs, American Petroleum Institute.
- [4] API RP 2SK, 2005, Recommended Practice for Design and Analysis Stationkeeping Systems for Floating Structures, 2nd Edition, American Petroleum Institute.
- [5] API SPEC 17E, 2003, Specification for Subsea Umbilicals, American Petroleum Institute.
- [6] Bae, Y.H. and Kim, M.H., 2014, “Coupled Dynamic Analysis of Multiple Wind Turbines on a Large Single Floater”, *Ocean Engineering*, Vol. 92, pp. 175-187.
- [7] Cermelli, C., Roddier, D., Aubault, A., 2009, “WindFloat : A floating foundation for offshore wind turbines Part II: hydrodynamics analysis”, *Proc. of the ASME 2009 28th Int. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Eng.*, May 31 - June 5, Hawaii, USA.
- [8] Cho, I.H. and Choi, J.Y., 2014, “Design of wave energy extractor with a linear electric generator Part II. Linear generator”, *J. Korean Society for Marine Environment and Energy*, Vol. 17, No. 3, pp. 174-181.
- [9] ISO 13628-5, 2009, Petroleum Natural Gas Industries - Design and Operation of Subsea Petroleum Production Systems - Part 5: Subsea Umbilicals, International Organization for Standardization.
- [10] Karegar, S., 2013, Flexible Riser Global Analysis for Very Shallow Water, Master Thesis, University of Stavanger.
- [11] Kim, J.R., Bae, Y.H. and Cho, I.H., 2014, “Design of wave energy extractor with a linear electric generator Part I. design of a wave power buoy”, *J. Korean Society for Marine Environment and Energy*, Vol. 17, No. 2, pp. 146-152.
- [12] KIOST, 2005, Estimation of Deepwater Design Wave Height on Korean Sea(전해역 심해설계과 추정보고서 II), Korea Institute of Ocean Science Technology(KIOST), Ministry of Oceans and Fisheries, Korea.
- [13] Park, S.W., Kim, K.H., Lee, K.S., Park, Y.S., Oh, H., Shin, H. and Hong, K., 2015, “Arrangement design and performance evaluation for multiple wind turbines of 10 MW class floating wave-offshore wind hybrid power generation system”, *Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy*, Vol. 18, No. 2, pp. 123-132.
- [14] Roddier, D., Cermelli, C. and Weinstein, A., 2009, “WindFloat: a floating foundation for offshore wind turbines Part I: Design basis and qualification process”, *Proc. of the ASME 2009 28th Int. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Eng.*, May 31 - June 5, Hawaii, USA.
- [15] U.S. Army Corps of Engineers, 2002, Coastal Engineering Manual.
- [16] WindFloat, 2015, “WindFloat”, <http://www.principlepowerinc.com/products/windfloat.html> (accessed July, 06, 2015).
- [17] WindSea, 2015, “About WindSea”, <http://www.windsea.no/sfiles/07/1/file/windsea.pdf> (accessed July, 06, 2015).

Received 13 July 2015

Revised 5 August 2015

Accepted 7 August 2015