

대형 부유식 파력-해상풍력 복합발전 구조물의 극한환경 운동 성능에 대한 실험적 연구

김경환 · 홍장표 · 박세완 · 이강수 · 홍기용[†]

한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소, 해양플랜트연구부

An Experimental Study on Dynamic Performance of Large Floating Wave-Offshore Hybrid Power Generation Platform in Extreme Conditions

Kyong Hwan Kim, Jang Pyo Hong, Sewan Park, Kangsu Lee and Keyyong Hong[†]

Offshore Plant Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

요 약

본 연구에서는 대형 부유식 파력-해상풍력 복합발전 구조물의 극한환경 운동 성능에 관한 실험적 연구를 다루고 있다. 대형 부유식 복합발전 구조물에 대한 운동 성능을 평가하기 위하여 1/50 축척비의 모형을 제작하였다. 그리고 설계된 계류선의 사양에 부합하는 계류선 모형을 제작하였고 자유감쇠시험 및 static pull-out 시험을 통하여 검증하였다. 주어진 구조물의 수심을 만족하기 위하여 계류선 테이블을 도입하고 환경조건에 계류판에 따른 환경조건을 확인하였다. 모형시험에서 규칙파 중 운동응답을 확인하고 파랑, 조류, 바람의 복합환경 하중을 적용하여 극한환경 운동성능을 해석하였다. 최대 운동 및, 가속도를 예측하여 운동 안전성을 판단하였고 최대 변위와 계류 하중도 선급기준에 따라 판단하였다. 이로부터 복합발전 구조물의 운동 특성에 대하여 토의하였다.

Abstract – The present study experimentally considers dynamic performance of large floating wave-offshore hybrid power generation platform in extreme conditions. In order to evaluate the motion performance of the large floating hybrid power generation platform, 1/50 scaled model was manufactured. A mooring line was also manufactured, and free-decay and static pull-out tests were carried out to check the mooring model. A mooring line table was introduced to satisfy the water depth, and environmental conditions were checked. Motion responses in regular waves were measured and complicated environmental conditions including wave, wind, and current were applied to see the dynamic performance in extreme/survival conditions. Maximum motion and acceleration were judged following the design criteria, and maximum offset and mooring tension were also checked based on the rule. The characteristics of hybrid power generation platform are discussed based on these data.

Keywords: Hybrid Power Generation Platform(복합 발전 구조물), Motion Response(운동 응답), Mooring Tension(계류 장력), Model Test(모형시험)

1. 서 론

세계적으로 신재생에너지에 대한 연구개발이 지속되고 있으며 무한에 가까운 해양에너지에 대한 관심이 높아지고 있다. 해양에너지원은 파력, 풍력, 조력 등 다양한 형태가 있으며 해상풍력에 대한 연구가 가장 활발하게 진행되고 있다. 육상풍력에서 축적된 경험과 기술을 바탕으로 고정식 해상풍력이 활발히 개발되었으며, 이미 여러 곳에 대단위 발전단지가 구축되었다. 최근에는 미래시장

가능성에 따라 부유식 해상풍력에 대한 연구가 확대되고 있다. 부유식 해상풍력은 세계적으로 WindFloat이나 Fukushima 프로젝트가 실증시험을 마친 단계에 이르고 있으며(WindFloat[2015], Fukushima Offshore Wind Consortium[2015]), 많은 연구들이 발표되고 있다. 국내의 해상풍력산업은 부유식 해상풍력뿐만 아니라 고정식 해상풍력에 대한 기술도 해외에 뒤쳐져있는 상황이나 서남해 해상풍력 실증단지 개발사업과 한국형 부유식 해상풍력발전시스템 실증화 사업이 수행되며 미래시장 장악과 풍력시스템 국산화를 위한 연구를 가속하고 있다. 국내의 부유식 해상풍력관련 연구로는 Shin and Kim[2011], Park and Shin[2015], Tran and Kim[2015]등이 있다.

[†]Corresponding author: khong@kriso.re.kr

파력발전기는 유럽의 국가들이 연구개발을 지속하고 있으며 국내에서도 고정식 구조에 기반한 실증구조물이 설치되었다. 또한 부유식 파력발전 구조물에 대한 연구들이 진행되고 있다(Nam *et al.*[2011], Hong[2012]). 이처럼 해양에너지를 이용한 발전은 부존량이나 설치 가능지역에 제한이 있는 고정식 형태보다 부유식 형태로 개발이 가속화되고 있는 상황이다.

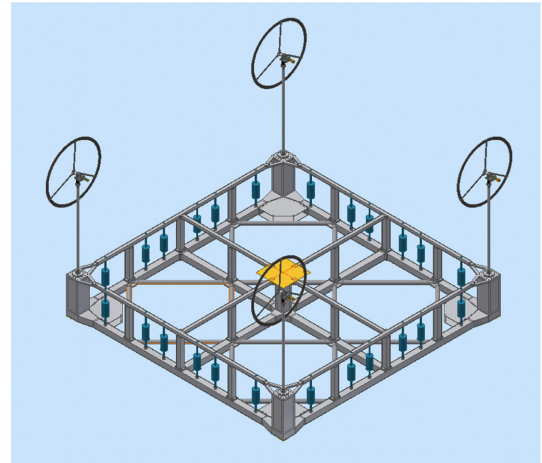
최근 들어 발전 적지가 일치하는 파력과 해상풍력을 복합하여 발전하는 형태의 구조물이 등장하고 있다. 이러한 형태의 발전시스템은 다수의 파력발전기와 풍력발전기들을 하나의 단일 구조물에 결합하여 공간적 효율성을 높이고 계류시스템이나 플랫폼의 이송 및 설치에 소요되는 비용을 줄일 수 있다는 장점이 있다. 영국, 노르웨이 등에서 Poseidon[2015], Wave Treader[2015], W2-Power[2015] 복합발전 구조물들이 개발되었으며 Poseidon의 경우에는 실증시험을 마친 단계에 있다. 국내에서도 해양수산부의 지원하에 ‘10MW급 파력-해상풍력 연계형 발전시스템 설계기술 개발’ 연구가 수행되고 있으며, 대형 반잠수식 형태의 복합발전 시스템 설계가 진행되고 있다(Kim *et al.*[2015]).

복합발전 구조물의 등장과 실증 시험에도 불구하고 아직까지 복합발전 구조물의 운동특성에 관한 구체적인 연구결과들이 발표된 사례가 많지 않다. 단일 부유식 해상풍력 구조물이나 파력발전기 구조물에 대한 수치해석 및 모형시험 연구들은 다수 존재하나, 다수의 파력과 해상풍력 발전시스템을 통합한 해석기법이나 모형시험 사례가 거의 없다. ‘10MW급 파력-해상풍력 연계형 발전시스템 설계기술 개발’ 연구과제에서는 복합발전 구조물의 개념설계 및 기본설계와 더불어 이에 대한 운동성능을 해석하기 위한 수치해석 기법이 개발되었고 극한조건 및 생존조건에 대한 해양수조 모형시험이 수행되었다. 본 논문에서는 복합발전 구조물에 대한 해양수조 모형시험을 소개하고 복합발전 구조물에서 검토되어야 하는 주요 운동성능을 다룬다. 복합발전 구조물의 특성과 모형시험을 소개하고 모형시험에서 측정한 규칙파 중 운동응답 및 생존조건과 극한조건에서 운동성능 결과를 제시한다. 그리고 설계된 계류선에 대한 모델링과 one-line test 및 static-pull out test에 의한 검증 결과를 보이고, 생존조건 및 극한조건에서의 계류하중 결과로부터 설계된 계류선의 안전성을 판단한다. 이를 바탕으로 복합발전 구조물에서 요구되는 운동특성을 토의하고 설계된 구조물의 안전성에 대하여 검토한다.

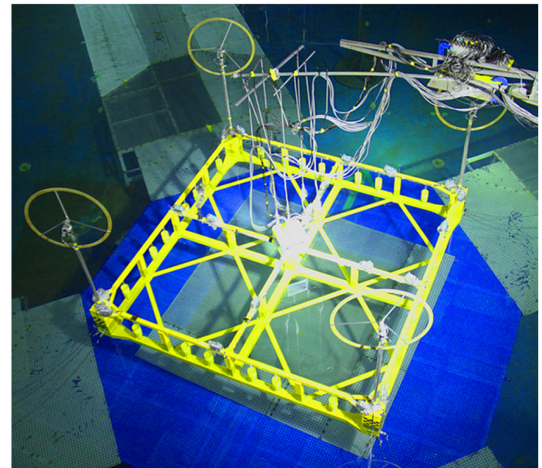
2. 모형시험

2.1 모형

대형 반잠수식 복합발전 구조물의 설계에 관한 개략적인 내용은 Kim *et al.*[2015]에 나타나 있다. 복합발전 구조물의 설계는 기본설계가 진행 중에 있으며 본 연구에서 성능평가를 위하여 적용된 구조물은 초기 기본 설계안으로 제시된 모형이다. 복합발전 시스템은 기반구조물인 반잠수식 부유체와 계류시스템이 있고 다수의 풍력발전기와 파력발전기로 구성되어 있다. 그리고 발전과 관련한 전



(a) CAD Model



(b) Setup of model

Fig. 1. Hybrid power generation platform model.

력제어 시스템 및 운동저감장치 등이 있다. Fig. 1과 Table 1에는 모형시험에 적용된 모형의 형상과 주요치수를 나타내었다. 반잠수식 구조물은 네 개의 칼럼과 각 칼럼을 연결하는 외곽의 폰툰으로 구성되어 있고 상부 갑판부도 칼럼을 연결하는 외곽 갑판 구조가 있다. 또한 외곽 폰툰을 연결하는 십자 형태의 내부 폰툰이 존재하며 갑판부도 동일하다. 대각선으로 배치된 부재는 보강재이며 외곽 폰툰과 갑판을 따라서 24개의 파력발전기가 배치된다. 풍력발전기는 네 곳 칼럼의 위에 설치된다. Fig. 1(a)의 형상을 보면 칼럼 하부에 감쇠판 형태의 운동저감장치가 있으나 본 연구에서 운동저감장치는 적용되지 않았다.

기반구조물의 주요치수와 관련하여 석유의 생산에 적용되는 전통적인 반잠수식 구조물은 그 길이와 폭이 주로 100m 이내이며 주요 구조(primary structure)인 폰툰(pontoon)과 칼럼(column), 보조 구조(secondary structure)인 보강재(brace) 등으로 구성된다. 일반적으로 폰툰과 칼럼은 보강재에 비하여 그 단면적이 크다. 또한 전통적인 구조물은 석유의 생산을 위한 복잡하고 다양한 생산 장비들이 배치되며 이를 위하여 상당히 큰 갑판면적이 필요하다. 복합발

Table 1. Principal dimension of hybrid power generation platform

Design cases	Unit	Prototype	Model (target)	Model (measured)	Difference (%)
Water depth	m	80	1.6	1.6	0
Displacement	MT	26,766	0.21412	0.21478	0.30
Draft (design)	m	15	0.3	0.3	0
Deck still water clearance	m	9	0.18	0.18	0
Column span (center to center)	m	150	3	3	0
Center of gravity above keel	m	13.68	0.274	-	-
Metacentric height (GM)	m	101.3	2.026	2.031	0.25
Roll radius of gyration (Rxx)	m	58.66	1.173	-	-
Pitch radius of gyration (Ryy)	m	58.73	1.174	-	-
Yaw radius of gyration (Rzz)	m	78.54	1.570	-	-

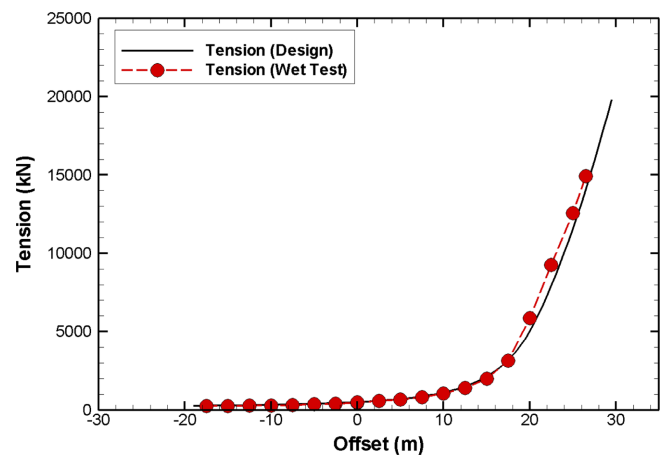
전을 위한 반잠수식 구조물은 그 폭과 길이가 풍력터빈의 배치로 인하여 최소 100m를 넘어야 하며, 따라서 기존 반잠수식 구조물에 비하여 그 크기가 상당히 크다는 특징이 있다. 기존 구조물과 유사하게 폰톤, 칼럼, 보강재 등이 있으나 칼럼이나 폰톤의 단면적이 보강재와 큰 차이가 나지 않는다. 또한 파력발전기와 풍력발전기 및 일부의 전력설비 배치만이 요구되기 때문에 큰 갑판면적이 요구되지는 않는다. 따라서 엄밀하게 본 연구에서 적용되는 반잠수식 구조물은 일반적인 형태의 반잠수식 구조물과 크기, 중량의 배치가 다르기 때문에 기존 반잠수식 구조물과 운동 특성이 다를 수 있다.

모형시험에 적용된 축척비는 1/50이며 Froude 축척법을 따른다. 본 구조물은 대부분 세장형 부재로 구성되어 점성 효과가 있을 수 있다. 따라서 계류선의 분포 영역과 해양수조의 크기를 고려하여 제작할 수 있는 최대 크기로 제작하였다. 구조물의 칼럼과 칼럼 사이 거리 및 흘수는 각각 150 m, 15 m이며, 모형에서는 3 m, 0.3 m이다. 해당 구조물은 세장형 부재로 구성되어 있어 주어진 부재들을 유사하게 제작하지 않으면 모형의 관성을 맞추거나 변경하기가 쉽지 않다. 또한 모형의 길이와 폭이 모두 커서 관성을 측정하기 위한 대형그네 제작에 어려움이 있었다. 따라서 그네를 이용하여 관성을 측정하지 않고 모형제작 단계에서 CAD를 이용하여 요소별 부재, 모형에 배치되는 센서, 케이블 등의 구체적인 장비까지 모델링하고 최대한 설계된 관성반경에 근사하도록 모형을 제작하였다. 그리고 그네를 이용한 관성반경과 무게중심 측정을 하지 않고, 대신에 해양수조에서 경사시험을 통하여 메타센터 높이(GM)를 구하고 Table 5에서와 같이 자유감쇠시험을 통하여 고유주기를 맞추는 방향으로 시험을 수행하였다. 플랫폼과 풍력발전기의 구조는 알루미늄 재질로

제작되었으며 파력발전기는 PVC로 제작되었다. 본 논문에서는 극한조건과 생존조건을 다룸으로 풍력터빈과 파력발전기는 고정된 것으로 가정하였다.

계류선은 12점 계류이며 각 칼럼에 3개씩 위치한다. R4 Studless 체인을 사용하며 직경은 136.535 mm (uncorroded)이고 계류선 길이는 600 m이다. Table 2에 계류선의 제원을 나타내었다. 초기 설치된 계류선은 부식되지 않은 상태(uncorroded)이며 부식(corroded)이 진행될수록 최소파단하중(minimum breaking load)이 줄어들게 된다. 본 모형시험에서는 초기 설계된 계류선의 중량을 적용하였고 최소파단하중은 부식된 상태의 값을 적용하였다.

Fig. 2는 1개의 계류선에 대하여 설계된 계류선의 변위(offset)에

**Fig. 2.** One-line restoring curve including pretension.**Table 2.** Mooring system

Item	Unit	Uncorroded chain	Corroded chain	Strength analysis model		
				Prototype	Model (target)	Model (measured)
Chain type		R4 Studless	R4 Studless	R4 Studless	Studless	Studless
Chain diameter	mm	136.525	127.0	136.525	2.73	2.73
Dry mass	kg/m	372.8	322.6	372.8	0.15	0.15
Wet mass	kg/m	324.3	280.6	324.3	0.13	0.13
Minimum breaking load	kN	16893	14955	14955	0.12	-
Length	m	600	600	600	12.0	12.0

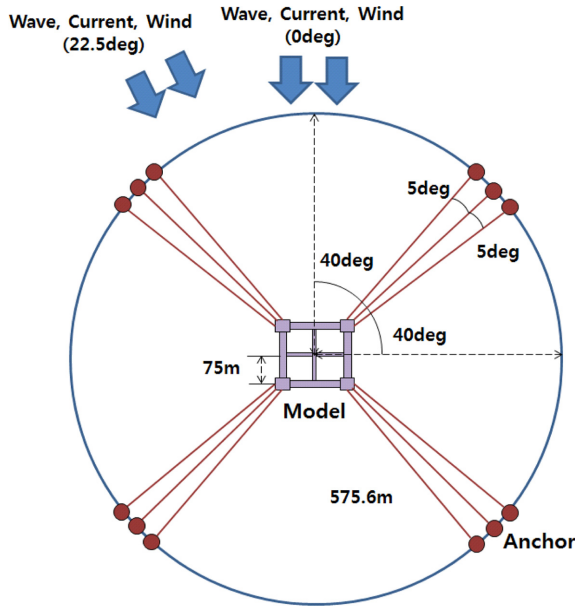


Fig. 3. Configuration of mooring line.

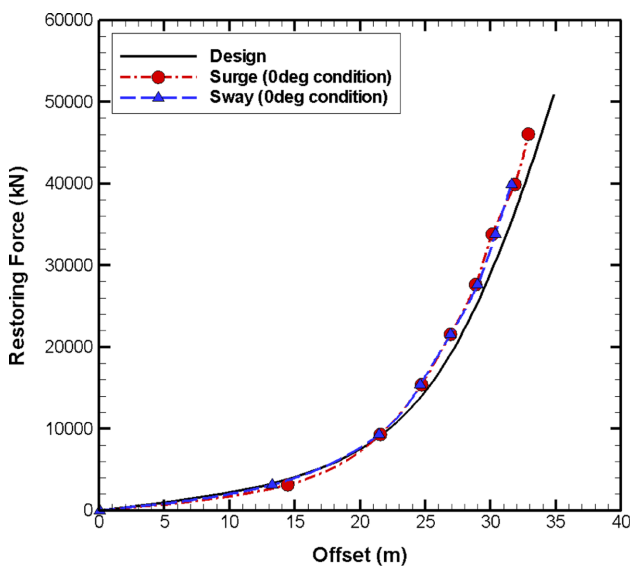
다른 장력과 모형으로 제작한 계류선의 장력을 나타내었다. Fig. 2에 나타난 장력은 정적 및 동적 하중을 모두 포함하고 있다. 계류선의 변위는 계류선의 길이 방향으로 적용한 값이다. 계류선 모형 제작에는 체인, 스프링이 적용되었다. 페어리드(fairlead)에서 앵커(anchor) 위치까지는 시중에서 구할 수 있는 체인을 적용하였고 끝단에 스프링을 적용하였다. 실제 계류선 체인과 모형의 계류선 체인은 축척에 따라 거의 동일한 중량을 갖으나 동일한 강성을 갖지는 않으므로 변위가 커질수록 복원력에 차이가 있을 수 있으며 이를 스프링으로 보정하였다. 모형과 설계 계류선의 장력을 보면 대체로 유사하게 나타난다. 변위가 18 m 이상인 구간에서는 다소 차이가

있으며 이는 스프링에 의해 보정되는 구간이다. 설계된 1개 계류선의 pretension은 500 kN이다. 계류선 1개 600 m의 전체 무게는 1908 kN이며 수심이 낮아 443 m 정도의 계류선이 해저면에 닿아 있다. 따라서 pretension은 500 kN이다. 모형시험에 적용된 계류선이 500 kN 정도의 pretension 결과를 보여주는 것을 알 수 있다. Fig. 3은 계류선의 배치를 보여준다.

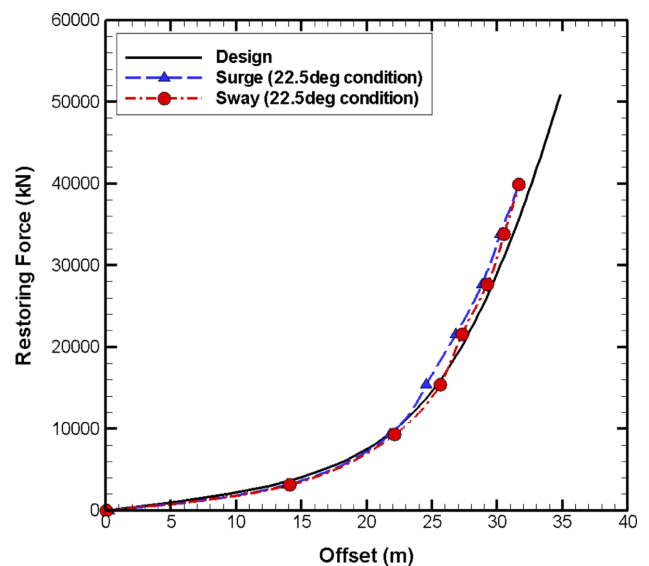
Fig. 4는 플랫폼 모형과 계류선 모형을 해양수조에 설치하고 static-pull out 시험을 통하여 계측한 12개 계류선 전체의 복원력 곡선을 나타낸다. Fig. 4에서의 변위는 Fig. 2와 달리 계류선의 길이방향으로 변위가 아닌 플랫폼을 기준으로 surge나 sway 방향으로 변위를 나타낸다. 또한 Fig. 4의 복원력은 Fig. 2와 달리 계류선에 작용하는 pretension을 제외한 동적 하중만을 나타낸다. 각각 설계된 결과와 설치된 계류선 모형의 결과가 대체로 유사한 경향을 갖는 것을 알 수 있다. 20 m 이상의 변위에서 발생하는 차이는 실험의 오차를 고려하였을 때 허용가능한 수준이라고 할 수 있다.

2.2 계측장비

본 모형시험에서는 플랫폼의 최대 운동, 나셀 상부에서의 최대 가속도, 계류선의 최대 장력을 계측하여 복합발전 구조물의 성능을 평가하는 것이 주요 목적이다. 이를 위하여 Table 3에 나타난 계측 센서들이 적용되었다. 6자유도 운동 계측에는 광학식 계측 장비인 RODYM이 적용되었다. 나셀 상부에 2축 가속도계를 배치하여 가속도를 측정하였고 12개 계류선의 페어리드 부근에 장력계를 배치하였다. 플랫폼 주변의 파고 계측을 위하여 3개의 파고계가 배치되었고 플랫폼의 공극(air gap)을 계측하기 위하여 19개의 파고계가 플랫폼에 부착되었다. Fig. 4에 계측 센서들의 위치를 나타내었다. ML은 계류하중 계측 센서 위치이며 RBM은 상대파고계 계측 위치이다. WT는 풍력터빈을 나타낸다.



(a) 0deg condition



(b) 22.5deg condition

Fig. 4. Total restoring curve w.r.t platform offset based on the static pull-out test (pretension is not included).

Table 3. Measuring items & devices

Measuring item	Measuring device	No. of channel (Unit×No.=Total)	Location
6DOF motion	Optical sensor (RODYM)	6×1=6	Near the platform center
Wave elevation	Wave probe	1×3=3	Platform front, left
Relative wave elevation	RBM (wave probe fixed on the platform)	1×19=19	Around of platform
Nacelle acceleration	2-axis accelerometer	2×4=8	Nacelle top
Mooring load	1-axis load cell	1×12=12	Fairlead
Wind load	3-axis load cell	3×4=12	Tower top

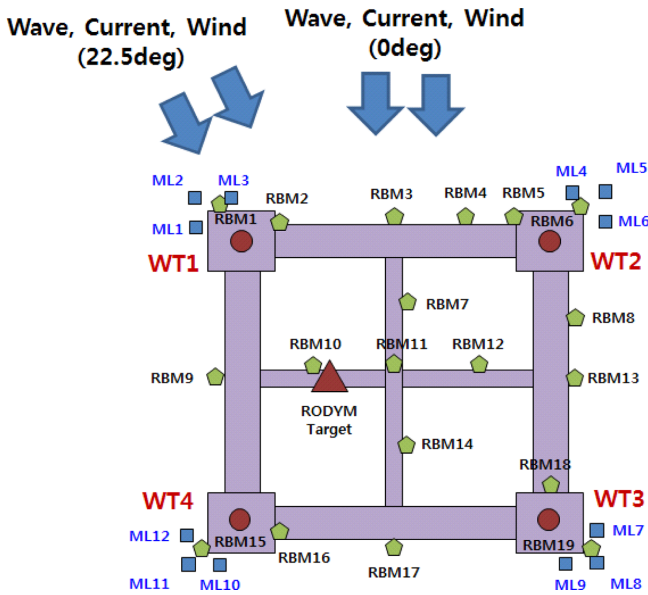


Fig. 5. Location of sensors.

2.3 모형시험 조건

초기 설계 단계에서 복합발전 플랫폼의 운동성능 평가를 위하여 생존조건 및 극한조건 환경조건들이 적용되었다. 생존조건은 100년 재현주기의 환경조건이며 극한조건은 50년 재현주기이다. 각 조건에서 파력발전기와 풍력터빈은 운용하지 않는다고 가정한다. Table 4는 복합발전 구조물이 설치될 해역인 제주도 서쪽 해역에서의 환경조건(Kim *et al.* [2015])을 나타내고 있다. 바람, 파랑, 조류의 환경조건은 동일 방향에서 오는 것으로 적용되었으며 입사각은 0deg와 22.5deg가 적용되었다. 해당 입사각은 설치 해역의 바람과 파랑의 주요 입사각을 고려하여 적용되었다.

모형시험이 수행된 KRISO의 해양수조 수심은 3.2 m이다. 모형에 맞는 수심은 1.6 m로 차이가 있다. 이를 보정하기 위한 방법으로 모형을 더 크게 제작하여 수심을 맞추거나 절단계류방법(truncated

method)을 응용한 역절단계류방법(reverse truncated method)를 적용할 수도 있다. 그러나 모형을 더 크게 하는 경우는 계류선의 배치의 공간적 제약이 있으며, 절단계류방법은 계류선 모형 제작과 수치해석 기법의 보정에 많은 노력과 시간이 필요하다. 본 연구에서는 상대적으로 적용이 용이한 계류판 방법을 도입하였다. 계류판이라는 것은 계류선이 배치되는 영역에 테이블을 설치하여 계류선의 기하학적 상사를 맞추어주는 방법이다. 즉, Fig. 6(a)와 (b)에서 보는 바와 같이 계류선이 분포되는 영역의 수심을 계류판으로 맞추어 주는 것이다. 본 방법은 엄밀하게 수심의 효과보다 계류선의 기하학적 상사 효과를 맞추는 것이 주 목적이다.

계류판을 설치하는 경우 파랑과 조류에 산란이 일어날 수 있으며 주로 조류보다는 파랑이 산란되는 효과가 클 수 있다. 계류선의 경우에는 파랑보다 조류에 의한 영향을 많이 받으므로 파랑의 산란 효과는 어느 정도 무시할 수 있다. 그러나 플랫폼의 경우에는 산란되는 파랑에 큰 영향을 받으므로 이에 대한 검토가 필요하다. 일반적으로 계류판의 바닥이 완전히 막혀 있는 경우에는 파랑의 산란 효과가 더 커지게 된다. 따라서 본 연구에서는 임의로 공극률이 20% 정도인 타공판을 도입하여 파랑의 산란효과가 감소되도록 하였다. 그리고 플랫폼 주변의 파랑 스펙트럼이 설계환경조건에 근사하는지를 검토하였다. Fig. 6(c)는 모형을 설치하기 전에 모형 주변의 5곳 위치에 파고계를 배치하고 100년 재현주기 파랑과 조류조건을 적용하였을 때 측정한 파랑스펙트럼을 보여주고 있다. 플랫폼의 좌측면을 제외하고 파랑 스펙트럼은 구형하고자 하는 파랑 스펙트럼에 근사한 것을 알 수 있다. 해양수조에서 발생할 수 있는 오차를 고려하면 측정한 파랑 스펙트럼은 계류판의 존재에도 불구하고 수궁할만한 결과를 준다고 볼 수 있다. 엄밀하게 파랑 스펙트럼이 근사하다고 하여 유동의 궤적이 설계조건과 같을 수는 없다. 그러나 최소한 플랫폼 주변의 영역에서 파랑 스펙트럼이 근사하는지 확인하여 수궁할만한 결과를 얻었다.

바람 환경조건은 모형 설치 이전에 플랫폼의 중앙 위치, 수면 위 10 m 높이에 풍속계를 설치하여 계측 및 보정하였다. 바람발생장

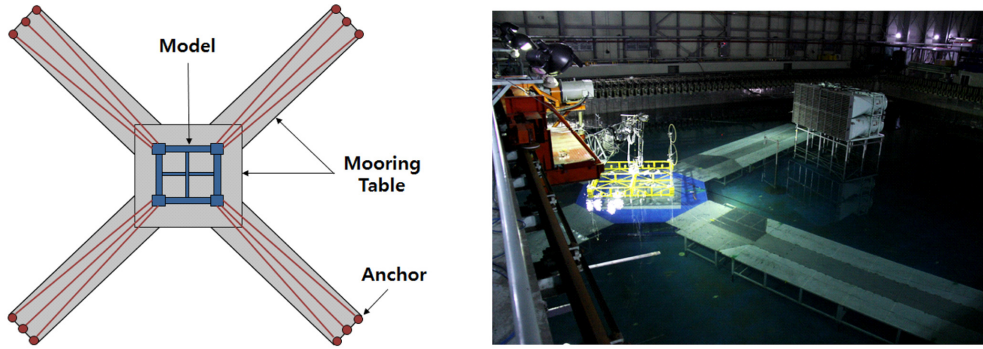
Table 4. Environmental conditions

Test condition	Wave (Hs, Tp)	Current (speed)	Wind (speed*)	Direction
Survival	100-yr (11.32 m, 15.1 sec)	100-yr (1.52 m/s)	100-yr (48.41 m/s)	0., 22.5 deg (COD)***
Extreme	50-yr (9.72 m, 13.98 sec)	Rev. 50-yr** (1.00 m/s)	50-yr (43.41 m/s)	0., 22.5 deg (COD)***

*Wind speed at 10m above from mean water level.

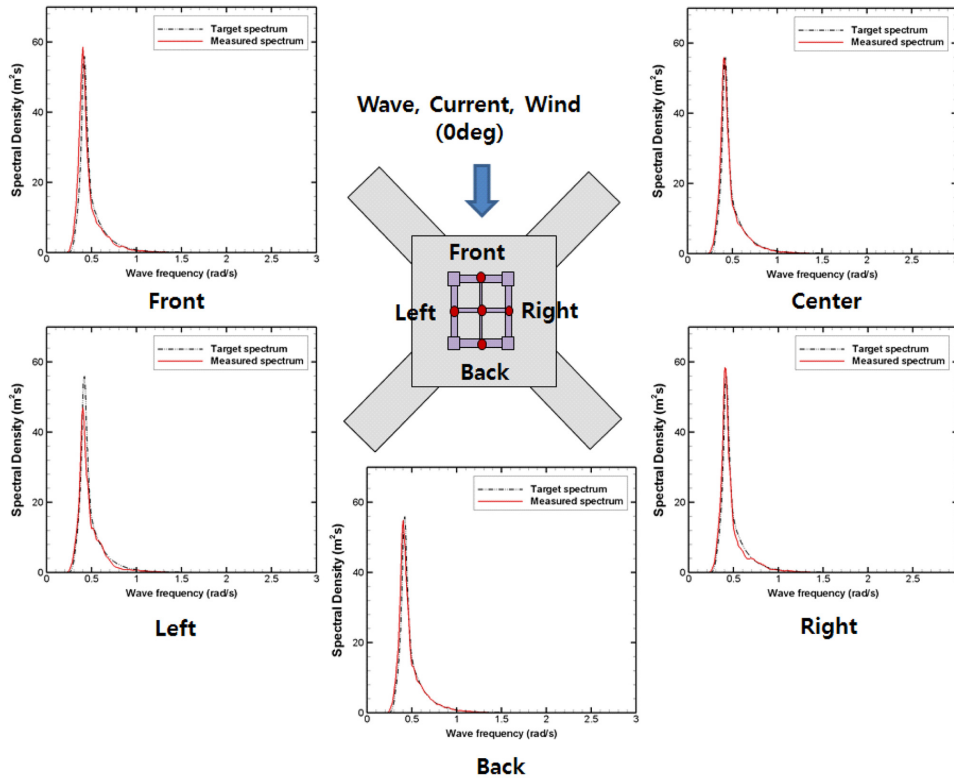
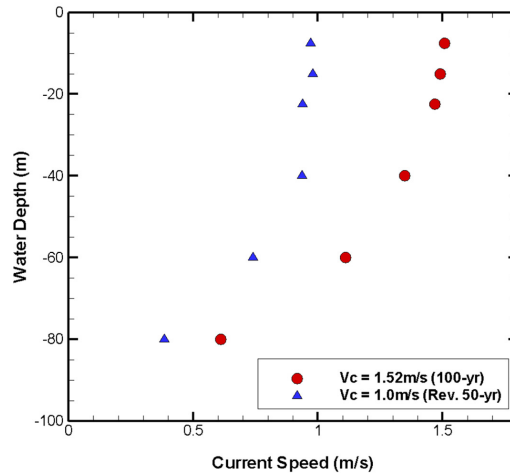
**Current speed for 50-yr condition was revised from the actual 50-yr condition considering the current speed of other locations e.g. Gulf of Mexico.

***COD : co-directional wave, current, and wind



(a) Configuration of mooring line table

(b) Setup of mooring line table

(c) Wave spectrum near the platform ($H_s=11.32\text{m}$, $T_p=15.1\text{sec}$, $V_c=1.52\text{m/s}$, direction=0deg, COD)(d) Current profile $V_c=1.0\text{m/s}$ & 1.52m/s **Fig. 6.** Mooring line table, wave spectrum near the platform, & current profile.

치의 전압을 조정하며 풍속을 조정하였고 설계풍속이 구현되는 전압을 찾아 모형시험에서 적용하였다. 풍속계는 미국 TSI ALNOR의 8465 (windowless hot wire anemometer probe)이다. 이는 열선형 풍속계로서 평면 양방향 계측, 0~50 m/s의 풍속 계측이 가능하다. 조류 환경조건은 바람 환경조건과 동일하게 모형 설치 이전에 플랫폼의 중앙 위치, 수면 아래 7.5 m 깊이에 유속계를 설치하여 계측 및 보정하였다. 조류발생장치의 전압을 조정하며 유속을 조정하였고 설계 유속이 구현되는 전압을 찾아 모형시험에서 적용하였다. 유속계는 3차원 전자식 유속계로서 일본 KENEK의 VM-1001RS 모델이다. 0~2 m/s까지의 유속 계측이 가능하며 x,y,z 방향 유속 계측이 가능하다. 조류의 경우에는 플랫폼의 중앙 위치에서 수심에 따른 유속분포도 계측하였다. Fig. 6(d)는 수심에 따라 계측된 유속 분포를 보여주고 있으며 수면 부근에서 설계유속에 근사한 유속이 나타나는 것을 알 수 있다. 계류판에 의해 조류가 산란될 수 있으나 조류가 수평으로 순환하는 점을 고려하면 산란되는 효과는 작다고 볼 수 있다.

3. 해석 결과

3.1 자유감쇠 시험

설치된 모형의 고유주기를 검토하기 위하여 자유감쇠 시험을 수행하였다. 자유감쇠의 초기 변위는 인력에 의하여 임의로 적용되었고 진동을 관찰할 수 있는 최소의 변위를 적용하였다. 강제 동요 후 불확실성을 제거하기 위하여 초기의 진동은 제외하고 고유주기를

Table 5. Natural period from free-decay test

Mode	Design (sec)	Model test (sec)	Difference (Difference/Design (%))
Surge	103.7	105.68	1.91%
Sway	103.7	105.45	1.69%
Heave	16.5	16.53	0.18%
Roll	15.3	15.96	4.31%
Pitch	15.3	16.19	5.82%
Yaw	115.4	142.15	23.18%

해석하였다. Table 5는 자유감쇠 시험에 의한 6자유도 운동의 고유주기 결과를 나타내고 있다. Design 항목은 부유체, 계류계 해석 프로그램인 WAMIT과 ORCAFLEX를 이용하여 계산된 결과를 의미한다. 계산에서는 주요 및 보조부재 모두를 패널로 모델링 하여 WAMIT으로 동유체력 계수를 구하였고 ORCAFLEX를 이용하여 주요 및 보조부재에 대한 Morison 항력을 적용하였다. 대부분의 운동에서 5% 내외의 오차를 보이며 양호한 결과를 보여주는 것을 알 수 있다. Yaw 운동은 관성 및 계류계의 복원력을 맞추기가 어려우므로 차이가 많이 발생하나 주로 관심이 되는 최대 변위나 heave 및 pitch 운동에 큰 영향을 미치지 않으므로 무시하였다.

3.2 규칙파 중 운동 응답

불규칙파 중 운동성능을 해석하기 전에 규칙파 중 운동응답을 계측하였다. Fig. 7과 8은 파랑의 입사각이 0deg와 22.5deg인 경우의 운동 응답을 나타내었다. 수치해석은 DNV-GL의 운동해석 프로그램

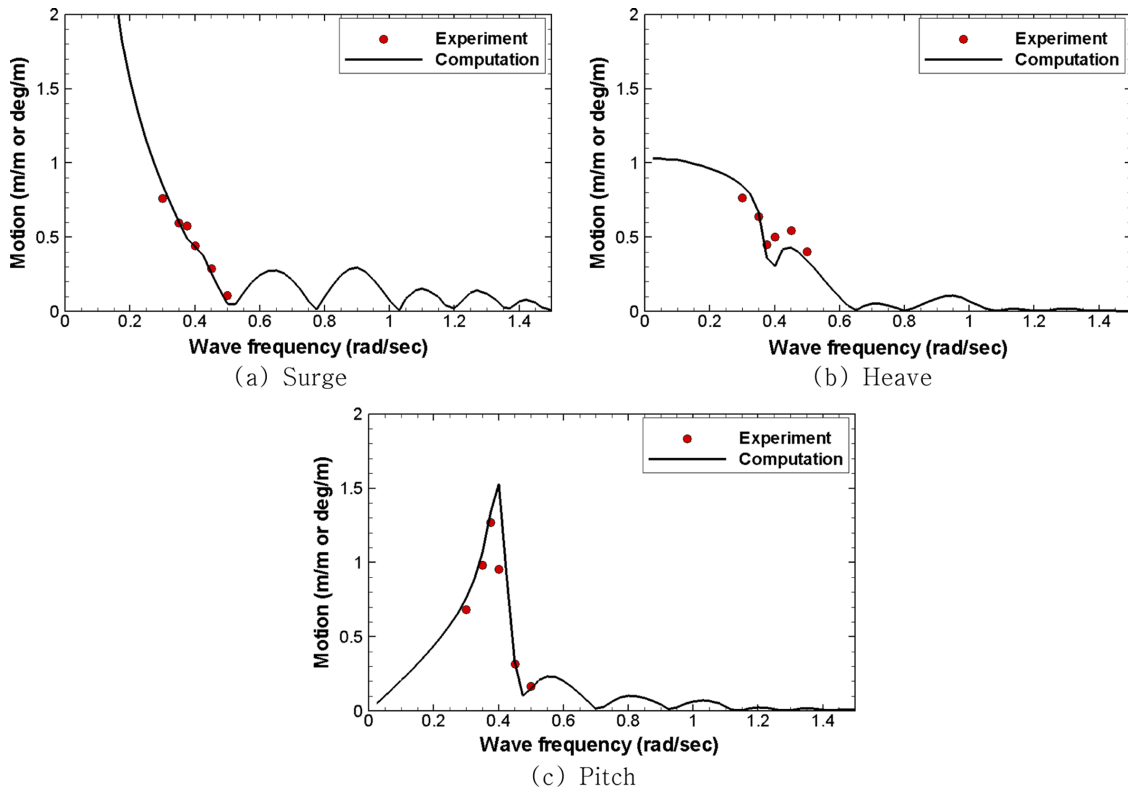


Fig. 7. Motion responses in regular waves (heading angle = 0deg).

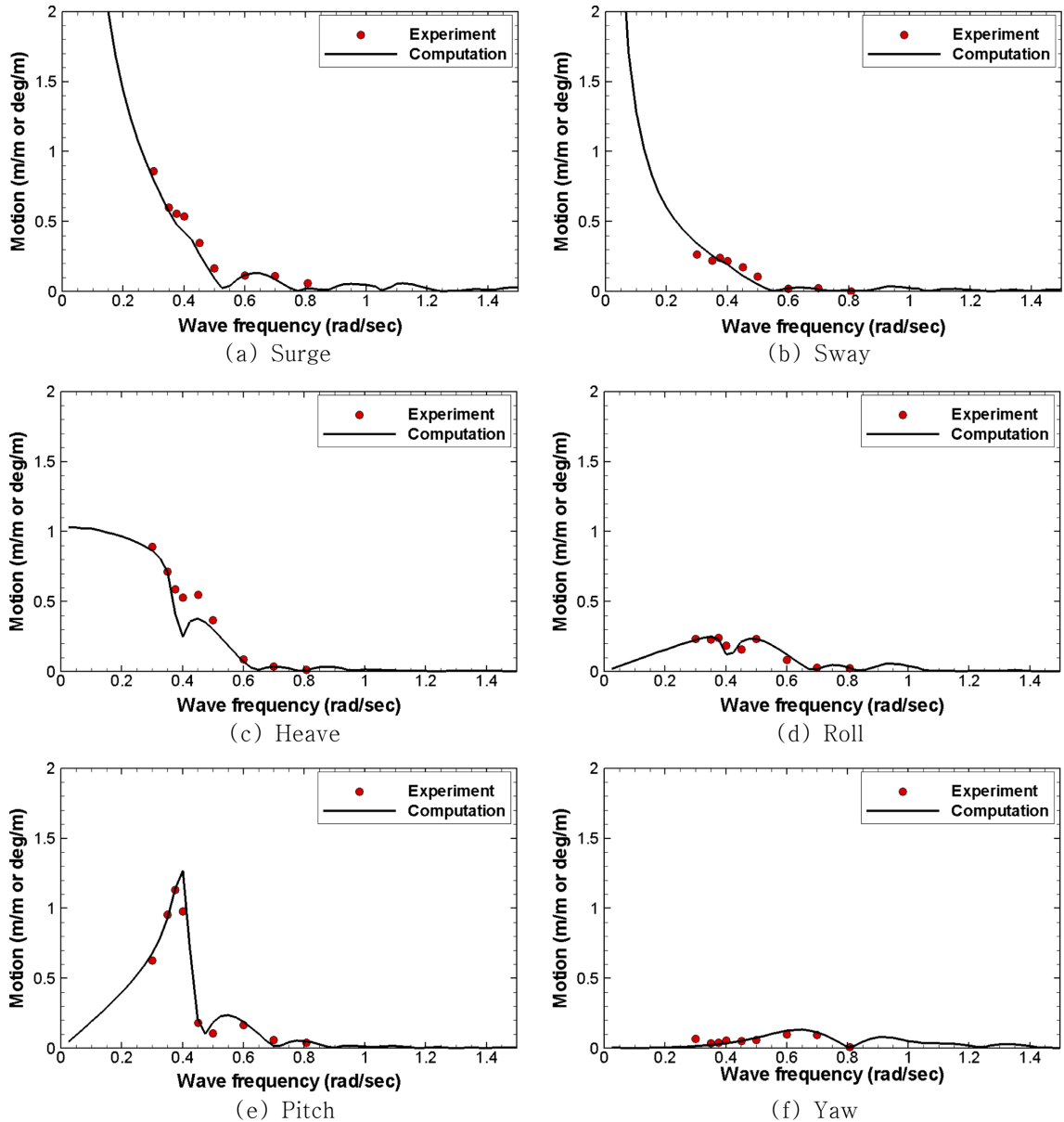


Fig. 8. Motion responses in regular waves (heading angle = 22.5deg).

램인 WADAM을 사용하였으며 가상감쇠(artificial damping)를 적용하여 공진에서의 운동크기를 맞추었다. 가상감쇠는 WADAM에서 임의의 값을 속도에 비례하는 값으로 적용할 수 있으며 본 해석에서 적용된 감쇠값은 모형시험의 결과에 근사하도록 임계감쇠(critical damping)값의 5% 정도를 적용하였다. 모형시험은 계류계를 포함하고 있으나 WADAM에서는 계류계의 영향이 고려되지 않는다. 그러나 공진주기 부근의 규칙과 운동응답은 계류계의 영향이 크게 중요하지 않으므로 WADAM의 결과와 비교하였다. 모형시험과 수치해석 결과를 비교해보면 대체로 비슷한 경향이 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

운동 특성을 살펴보면 pitch에서의 공진주기가 15 sec 정도에 나타나는 것을 알 수 있다. 일반적인 반잠수식 구조물이 30 sec 부근

에서 고유주기를 갖는 것을 볼 때 복합발전 구조물은 주기가 짧은 것을 알 수 있다. 본 연구결과로부터 반잠수식 구조물이어도 그 크기가 커지면 고유주기가 꽤 짧아지는 것을 알 수 있으며 이는 생존 조건으로 적용되는 100년이나 500년 재현주기의 파랑주기에 가까워짐을 의미한다. 따라서 이와 같은 대형 반잠수식 구조물의 운동 성능은 생존조건 관점에서 주의 깊게 검토될 필요가 있으며 향후 반잠수식 구조물의 설계에 있어서도 참고할 필요가 있다.

3.3 극한환경 중 운동 성능

극한환경은 생존조건을 포함한 100년 재현주기와 50년 재현주기의 환경조건이 적용되었다. 두 경우에 파력발전기와 풍력터빈은 정지되어 있다. 환경조건으로는 바람, 파랑, 조류가 동시에 적용되

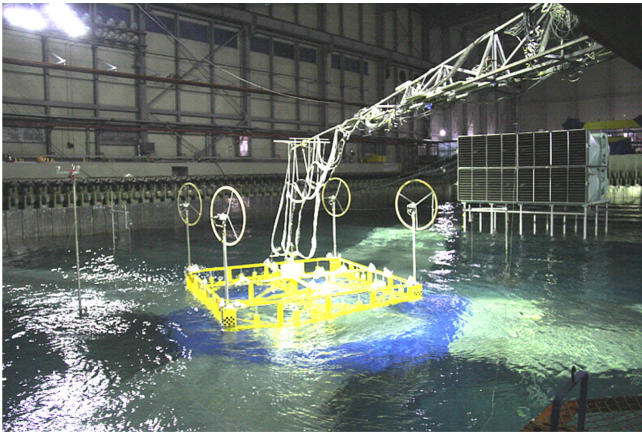


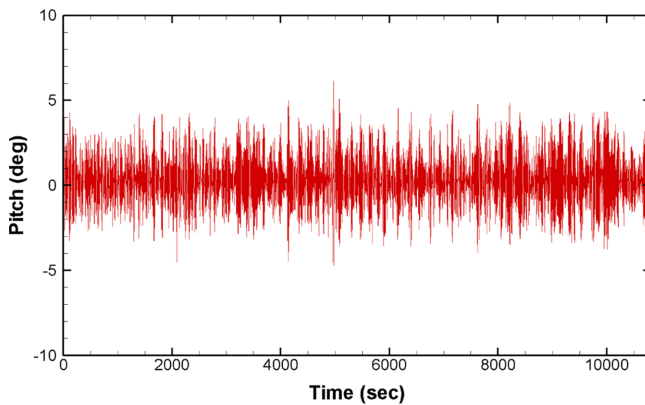
Fig. 9. Model test in survival condition (heading = 22.5deg).

있고 같은 방향으로 적용되었다. Fig. 9는 100년 재현주기 조건의 복합환경 하중이 작용하는 경우의 모습을 나타내었다.

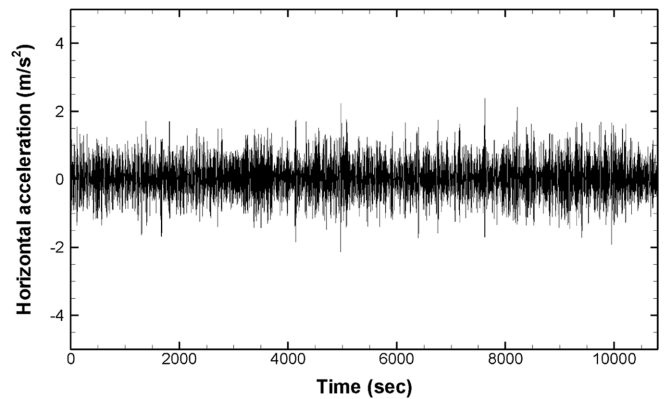
Fig. 10과 11은 불규칙파 모형시험 중 계측된 운동 및 계류선의 하중 시계열을 보여주고 있다. Figs. 7과 8에서 보는 바와 같이 pitch 운동 응답은 규칙파 조건에서 22.5deg보다 0deg인 경우에 크게 나

타났으며 불규칙파 모형시험에서도 0deg인 경우에 크게 나타났다. 계류하중은 플랫폼의 투영 면적이 0deg보다 22.5deg 조건에서 클 수 있으며 불규칙파 모형시험에서도 22.5deg인 경우에 크게 나타났다. 계측 시간은 실선기준 3시간이며 Fig. 11(a)의 변위가 주로 21 m 부근에서 나타나며 이때 ML #3의 장력은 4000 kN 정도로 나타난다. Fig. 11(b)의 계류선의 장력은 Fig. 2와 달리 pretension이 제외된 결과이며, Fig. 11(a)의 변위는 플랫폼의 초기 위치로부터 플랫폼이 떨어진 거리를 의미한다. 즉, 계류선의 길이 방향이나 surge나 sway 방향이 아닌 플랫폼의 초기 위치로부터 임의의 위치까지의 거리를 의미한다. Fig. 2의 계류선 1개의 장력 결과와 비교해보면 Fig. 11(b)의 결과는 500 kN의 pretension이 빠져있고 엄밀하게 계류선 길이방향의 변위가 아니다. 따라서 Fig. 2에서 변위가 21 m인 경우의 6000 kN 정도보다 작은 장력이 나타나고 있다.

Table 6은 모형시험에서 계측된 시계열에서 구한 최대 운동, 가속도 및 계류하중을 보여주고 있다. 풍력터빈의 나셀이나 로터는 일반적으로 전체 무게중심으로부터 멀리 떨어져 있기 때문에 작은 회전운동에도 큰 운동을 하게 된다. 따라서 부유식 해상풍력 구조물에서는 pitch나 roll의 운동이 중요하게 된다. Pitch나 roll은 바람이나 조류보다 파랑에 의하여 기진되는데 결과를 보면 0deg의 조

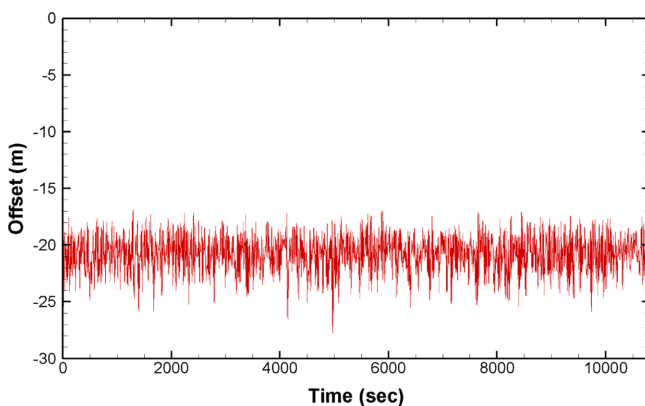


(a) Pitch motion

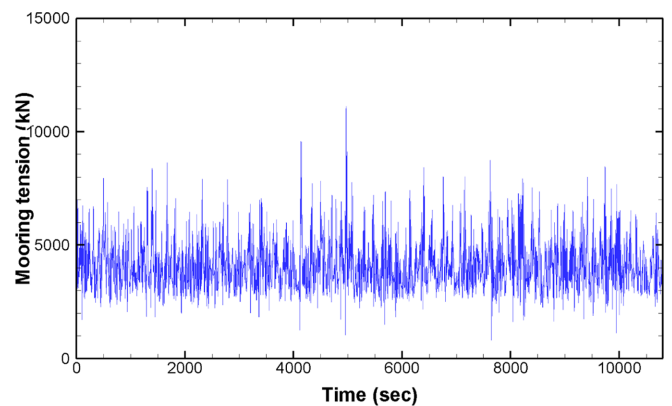


(b) Horizontal acceleration

Fig. 10. Time histories of pitch motion and horizontal acceleration (100-yr condition, heading angle = 0deg).



(a) Platform offset from the origin



(b) Mooring tension w/o pretension (ML#3)

Fig. 11. Time histories of platform offset and mooring tension (100-yr condition, heading angle = 22.5deg).

Table 6. Model test results

Wave	Heading		Max. Offset (m)	Max. Heave (m)	Max. Pitch (deg)	Max. Acc. (m/s ²)	Max. Tension (kN)
	Current	Wind					
100-yr	0deg (COD)		27.92	2.63	6.12	2.26	7320.9
	100-yr	100-yr					
100-yr	22.5deg (COD)		27.73	3.11	5.25	2.07	11118.2
	100-yr	100-yr					
50-yr	0deg (COD)		24.28	2.22	3.97	1.75	4582.6
	1 m/s	50-yr					
50-yr	22.5deg (COD)		23.29	2.71	3.76	1.59	6578.8
	1 m/s	50-yr					

Table 7. Motion performances of other platforms

Model	Max. Heave (m)	Max. Pitch (deg)	Environmental condition
WindFloat	4.93	5.77	Survival condition (100-yr) Hs=13.5m, Tp=17 sec
			Vw=25.9 m/s (10 m height), Vc=0.8 m/s
WindSea	10.3	6.2	Survival condition (100-yr) (Details are not presented)

다. 계류하중의 경우에는 조류와 바람의 영향을 많이 받으며 이는 조류나 바람의 방향에 대한 플랫폼의 투영면적과 관련이 있다. 플랫폼의 투영면적은 0deg보다 22.5deg에서 크게 이에 따라 계류하중도 22.5deg에서 크게 나타났다. 50년 재현주기의 환경조건도 100년 재현주기의 경향과 비슷하게 나타났으며 상대적인 운동이나 하중의 크기는 작았다.

Table 7은 유사 구조물인 WindFloat과 WindSea의 운동성능 결과를 나타내었다. WindFloat는 실험실에서 실증시험이 완료되었으며 풍력터빈이 1기인 반잠수식 해상풍력발전 구조물이다(WindFloat [2015]). 현재는 6MW 이상의 풍력터빈 구조물이 설계되었으며 해당 결과는 2MW 풍력터빈에 대하여 수행된 모형시험 결과이다(Roddier *et al.*[2009], Cermelli *et al.*[2009]). WindSea는 3.6MW급 풍력터빈 3기가 삼각형 반잠수식 구조물에 배치된 구조물이며 모형시험을 포함한 설계결과가 제시된 구조물이다(WindSea[2015]). 두 구조물의 길이는 각 구조물에 대한 생존조건(100년 재현주기 조건) 모형시험 결과에서 pitch 운동이 5.77deg나 6.2deg 정도인 것을 알 수 있다. 복합발전 구조물이나 WindFloat, WindSea에 적용된 환경조건이 엄밀하게 같지는 않지만 유사한 pitch 운동 크기를 나타내는 것을 알 수 있고 생존조건에서 운동성능이 크게 나쁘지 않음을 알 수 있다.

Table 8에는 선급 및 일반적인 해양구조물에서 요구되는 설계조건에 기반하여 복합발전 구조물의 운동성능을 평가하였다. 최대 회

전운동이나 나셀 상부에서의 최대 가속도에 관한 기준은 무게중심으로부터 멀리 떨어진 풍력터빈의 운용에 직접적이며 이는 풍력터빈의 사양에 따라 다를 수 있다. 아직까지 이와 관련된 규정이 선급에서 제시된 바는 없으나 일반적인 해양구조물에서는 10deg나 0.4g (g : gravity constant)이하로 요구된다. 이를 고려할 때 본 복합발전 구조물의 최대 회전운동과 최대 가속도는 수공할만한 성능을 갖는다고 볼 수 있다. 계류계의 성능과 관련한 기준은 ABS[2015]와 API RP 2SK[2005]에 제시되어 있다. 최대 하중에 대한 안전계수가 생존조건에서 1.05, 극한조건에서 1.67 이상이어야 한다. 추가적으로 최대 변위가 수심(water depth, WD)의 50% 이하인 조건이 계류시스템 설계 기업의 경험을 반영하여 제시되었다. 최대 변위조건은 계류선과 전력선(power cable)의 간섭을 제한하기 위하여 필요하다. 설계된 계류선은 플랫폼의 최대 변위 조건과 안전계수 조건을 만족하는 것을 알 수 있다. 계류선 모델링에 오차를 10%로 고려한다고 하여도 변위나 안전계수는 주어진 조건을 만족한다.

4. 결 론

본 연구에서는 ‘10MW급 부유식 파력-해상풍력 연계형 발전시스템 설계기술 개발’ 연구과제에서 설계된 대형 반잠수식 구조물과 계류시스템에 대한 생존조건 및 극한조건 운동성능평가를 수행하였다. 이를 위하여 1/50 축척비의 모형을 제작하고 해양수조에서

Table 8. Summary of platform performance

Item	Model test result	Criteria	Satisfaction
Max. Rotational Motion	6.12deg	< 10deg	Yes
Max. Acceleration	0.23g	< 0.4g	Yes
Max. Offset	34.9%WD	< 50%WD	Yes
Safety Factor of Mooring Line	1.26	> 1.05 (Intact Survival)	Yes
	2.27	> 1.67 (Intact Extreme)	Yes

바람, 파랑, 조류 환경조건을 적용하여 운동, 계류선 하중 등을 예측하였다. 예측된 결과를 유사구조물 및 설계기준에 따라 검토해보았고 다음과 같은 결론을 얻었다.

세장체로 구성된 대형 반잠수식 복합발전 구조물의 운동주기는 일반적인 반잠수식 구조물의 운동주기보다 짧으며 100년 재현주기의 파랑주기에 가깝다. 따라서 대형 반잠수식 구조물은 일반적인 반잠수식 구조물보다 상대적으로 운동이 커질 수 있으므로 이에 대한 검토가 필요하다.

부유식 복합발전 구조물에 있어서 무게중심으로부터 멀리 떨어진 풍력터빈에 의해 최대 회전운동, 나셀 상부에서의 최대 가속도 등이 검토되어야 하며, 본 연구에서 설계된 대형 반잠수식 구조물은 유사 부유식 풍력발전 구조물과 비교하였을 때 적절한 회전 운동 성능을 보여주었다. 또한 계류시스템의 설계는 기존에 제시된 규정에 따라 설계가 가능하며 본 연구에서 설계된 구조물은 최대 변위와 안전계수 조건을 만족하였다.

모형시험에서 수심을 보정하기 위한 타공형 계류판은 계류선의 기하학적 상사를 쉽게 맞출 수 있으면서도 모형 주변의 파랑 환경을 크게 왜곡시키지 않으므로 수조의 수심을 줄여야 하는 해양수조 모형시험에 제한적으로 적용될 수 있다.

본 연구에서 제시된 연구결과는 향후 복합발전 구조물의 운동성능평가에 대한 자료로 활용될 수 있을 것이며 대형 반잠수식 구조물의 설계에도 활용될 수 있을 것이다. 추후 풍력터빈과 파력발전기의 운용을 고려한 운동성능평가가 수행되면 복합발전 구조물에 대한 종합적인 성능검토가 가능할 것이다.

후 기

본 연구는 해양수산부의 해양청정에너지기술개발사업 “10MW급 부유식 파력-해양풍력 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] API RP 2SK, 2005, Recommended Practice for Design and Analysis Stationkeeping Systems for Floating Structures, 2nd Edition, American Petroleum Institute.
- [3] Cermelli, C., Roddier, D. and 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., 135-143.
- [4] Fukushima Offshore Wind Consortium, 2015, “Fukushima Floating Offshore Wind Farm Demonstration Project (Fukushima FORWARD) - Construction of Phase I”, <http://www.fukushima-forward.jp/english/pdf/pamphlet4.pdf> (accessed September, 07, 2015).
- [5] Hong, K., 2012, “Survey on Domestic and International Technologies and Market of Wave Energy Converter (파력발전 국내외 기술현황 및 미래전망)”, Joint Conference of The Korean Association of Ocean Science and Technology Societies (한국해양과학기술협의회 공동학술대회), 98-106.
- [6] Kim, K.H., Lee, K., Sohn, J.M., Park, S., Choi, J.S. and Hong, K., 2015, “Conceptual Design of Large Semi-submersible Platform for Wave-Offshore Wind Hybrid Power Generation”, J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, Vol. 13, No. 3, 1-10.
- [7] Nam, B.W., Hong, S.Y., Kim, K.B., Park, J.Y. and Shin, S.H., 2011, “Numerical Analysis of Wave-induced Motion of Floating Pendulum Wave Energy Converter”, J. Ocean Eng. Technol., Vol. 25, No. 4, 28-35.
- [8] Poseidon, 2015, <http://www.floatingpowerplant.com> (accessed by September, 07, 2015).
- [9] Park, J.-H. and Shin, H., 2015, “A Study on the Optimal Shape Design of a Floating Offshore Wind Turbine”, J. Soc. Nav. Archit. Kor., Vol. 52, No. 3, 171-179.
- [10] 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., 845-853.
- [11] Shin, H.-K., Kim, K.-M., 2011, “Motion Analysis of 5-MW Floating Offshore Wind Turbine”, J. Ocean Eng. Technol., Vol. 25, No. 5, 64-68.
- [12] Tran, T. T. and Kim, D.-H., 2015, “The Coupled Dynamic Response Computation for a Semi-submersible Platform of Floating Offshore Wind Turbine”, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol. 147, 104-119.
- [13] W2-Power, 2015, <http://www.pelagicpower.com> (accessed by September, 07, 2015).
- [14] Wave Treader, 2015, <http://www.power-technology.com/projects/greenoceanenergywav/> (accessed by September, 07, 2015).
- [15] WindFloat, 2015, “WindFloat”, <http://www.principlepower-inc.com/products/windfloat.html> (accessed July, 06, 2015).
- [16] WindSea, 2015, “About WindSea”, <http://www.windsea.no/sfiles/07/1/file/windsea.pdf> (accessed July, 06, 2015).

Received 14 September 2015

1st Revised 26 October 2015, 2nd Revised 30 November 2015

3rd Revised 25 January 2016

Accepted 28 January 2016