한국해양환경공학회지
Journal of the Korean Society
for Marine Environmental Engineering
Vol. 14, No. 3. pp. 184-191, August 2011

부유식 파력발전장치용 계류시스템의 초기설계

정동호† · 신승호 · 김현주 · 이호생
한국해양연구원 해양시스템안전연구소

A Preliminary Design of Mooring System for Floating Wave Energy Converter

D.H. Jung†, S.H. Shin, H.J. Kim and H.S. Lee
Maritime & Ocean Engineering Research Institute, MOERI/KORDI

요 약

부유식 파력발전시스템의 필수요소인 계류시스템에 관한 초기 설계를 수행하였다. 국내 · 외에서 개발된 부유식 파력발전장치용 계류시스템 사례를 살펴보았으며, 계류시스템 구성 요소에 대하여 분석하였다. 계류시스템의 요소인 앵커와 계류선에 대하여 초기 설계를 수행하였는데, 계류선은 주로 해저면 위에 얹혀 있는 고중량 부분과 부체에 매달려 있는 저중량 부분으로 나누었다. 앵커와 연결되어서 주로 해저면 부근에 있는 일부분은 고중량 체인을 사용함으로써, 부체로부터 전달되는 강제가진에 의한 동적에너지를 감쇠시킬 수 있으며, 앵커의 중량과 부피를 줄일 수 있다. 또한 체인의 모든 부분이 해저면 위로부터로 들려 올려질 경우 앵커에는 수평력과 수직력이 작용하여 앵커의 지지력이 감소하게 되는데, 고중량 체인을 앵커 부근에 배치함으로써 이를 방지할 수 있을 것이다. 부체와 해저면 사이에 매달리는 부분은 저중량 체인을 사용함으로써, 체인의 자중과 거동이 부체의 에너지 생산 기능에 영향을 최소로 미치게 할 수 있을 것이다. 초기 설계된 계류시스템 모델의 안전성 평가를 위하여 정적 및 거동 해석을 수행하였다. 태풍 등의 열악한 해양환경 조건에서 앵커 부근의 체인 장력도 앵커의 지지력을 초과하여 설계된 앵커는 수평 이동되어 기능을 수행하지 못하게 될 것으로 예측되었다. 따라서, 앵커는 중량을 증가시키거나 지지력을 증대시킬 수 있는 방안이 강구되어야 할 것이다. 본 연구 결과는 향후 기능성과 안전성을 만족시키는 계류시스템의 상세 설계를 위한 자료로 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract – Preliminary design of a mooring system for a floating wave energy converter(WEC) is performed. A mooring line is designed to consist of two parts; the one is a chain in heavy weight laid on the seabed and linked to an anchor on the seabed and the other is a light weight chain suspended at a floater. A high weight chain laid on the seabed can contribute to mitigate dynamic energy propagated from top oscillation and decrease anchor weight and volume. Through a low weight chain suspended between a floater and seabed the WEC's function to produce energy from wave can be affected in minimum by the motion of a chain. The static and dynamic analyses for the designed mooring system were carried out to evaluate WEC system's safety. The present study shows that the designed gravity anchor moves horizontally due to the tension exerted on the anchor in the severe ocean environmental condition. The present mooring system should be redesigned to satisfy the safety requirements. The present study will be useful to predict the safety of the mooring system under ocean environment.

Keywords: Floating wave energy converter(부유식 파력발전장치), Mooring system(계류시스템), Preliminary design(초기 설계), Safety analysis(안전성 해석)

†Corresponding author: dhjung@moeri.re.kr

1. 서 론

파력발전시스템은 해수면의 상하 운동으로 인하여 발생하는 에너지를 에너지 변환장치의 기계적인 운동에너지로 변환한 후, 전기 에너지로 변환하여 전기를 생산하는 시스템이다. 파랑에너지를 기계적 운동에너지로 변환하는 원리에 따라서 진동수주형(OWC, oscillating water chamber), 월파형(OTD, overtopping device), 그리고 가동물체형(WAB, wave activating body)와 같이 크게 세 가지 형태의 발전시스템으로 나누어진다(Fig. 1). 진동수주형은 해수면의 운동에 의한 수실 내의 공기 흐름을 1차 에너지 변환장치의 운동에너지로 변환시켜서 발전한다. 월파형은 구조물 위로 월파되는 해수를 집적시킨 후 낙하되는 해수의 운동에너지를 이용하여 발전하며, 가동물체형은 파랑에 의해서 구조물이 상하 혹은 회전 운동하여 1차 에너지 변환장치의 압력에너지 혹은 운동에너지로 변환하여 발전한다. 파력발전시스템은 설치 위치에 따라 연안, 천해, 심해 설치형과 같이 세 가지로 분류된다. 해안선 부근에 설치되는 연안형 파력발전시스템은 주로 방파제와 연계해서 이용되며, 천해형은 수심 30 m이내, 그리고 심해형은 40 m 이상의 수심에 설치된다. 해안선에 설치되는 시스템과 천해형은 주로 해저면에 고정되는 고정식 구조형식을 나타낸다. 반면에 적용수심이 깊어지는 경우 고정식 구조 형식을 이용하면 경제적 비용이 증대되기 때문에, 심해형의 경우 부유식 구조형식을 가진다.

부유식 파력발전시스템은 파력발전 장치를 포함하는 부체와 부체를 일정 위치에 유지하는 계류시스템으로 구성된다. 따라서, 부유식 파력발전시스템은 발전시설을 포함하는 부체를 계류시스템과 간단히 분리할 수 있으며, 이로 인하여 유지 보수에 유리하다는 장점이 있다. 그러나, 계류시스템은 파랑 및 조류에 의해 지속적으로 거동하게 되며, 계류시스템의 거동은 파력발전 장치의 효율에 영향을 미칠 수 있다. 부유식 파력발전시스템은 계류시스템

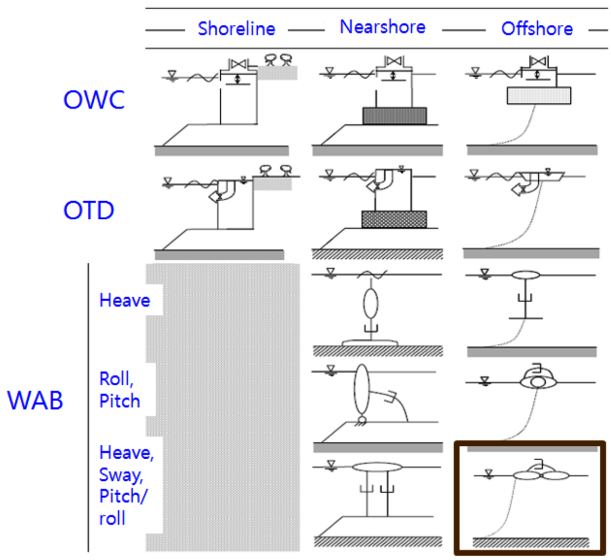


Fig. 1. Wave energy device according to mechanism and installation depth.

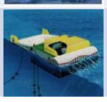
		Mooring type	Property	Material
주전A호		4 compliant mooring	Buoy attached compliant line	Chain
Pelamis		Spread mooring(Main+ yaw restraint)	Minimum footprint	Chain
Mighty Whale		Spread mooring (4+2)	Intermediate anchor	Chain

Fig. 2. floating wave energy converters and mooring lines developed in domestic and overseas.

의 설계에 따라 경제성이 크게 지배되기 때문에 계류시스템의 설계 시 다양한 요소를 효율적으로 고려해야 한다.

부유식 파력발전 시스템은 국내·외에서 개발된 사례가 많지 않으며 대표적인 세 가지 사례를 소개한다(Fig. 2). 국내에서는 한국해양연구원에서 '주전A호'를 개발하여 실해역 실험을 수행한 바가 있다. '주전A호'는 진동수주형 파력발전 시설로써 4점 계류를 통하여 부체를 일정 위치에 유지시켰으며, 계류선의 표층 부근에 소형 부이를 설치하여 부체의 거동에 의한 계류선의 영향을 감소시키고자 하였다. 현재까지 개발된 파력발전시스템 중에서 상용화에 가장 가깝게 개발되고 있는 것은 영국에서 개발된 'Pelamis'로서, 가동물체형 발전장치이며 부체의 위치를 유지시키기 위하여 부체의 앞부분에 스프레이드(spread) 계류형식을 적용하였다. 일본에서 실험용으로 개발한 'Mighty Whale'은 진동수주 형식의 파력발전 시설로서, 역시 스프레이드 계류형식을 사용하였으며 계류선이 해저면과 닿는 부분에 중간 앵커를 설치하여 앵커 중량의 분산 효과를 얻고자 하였다. 언급한 세 가지 구조물은 모두 체인을 계류선으로 사용하여 카테너리 계류특성을 활용하였다.

계류시스템은 일반적인 부유식 해양구조물의 위치유지 목적으로 많이 개발되어져 왔지만, 부유식 파력발전장치용으로 개발된 사례는 많지 않아서 이에 대한 연구도 부족한 현실이다. 일반적인 계류시스템에 관한 거동특성에 관한 연구는 수치해석 및 실험적 연구를 통하여 수행되어져 왔다. 정 등(2004)은 부체에 매달린 계류선의 거동해석을 위하여 수치해석적 방법을 이용하여 상부가진을 받는 계류선의 거동특성을 분석하였다. 그들은 계류선의 모든 부분이 해저면에서 떨어져 있는 상태에 관한 해석을 수행하였으며, 고주파수에서 장력이 크게 발생하는 것을 분석하였다. 김(2009)은 스프레이드 계류된 선박의 거동해석을 수행하였으며, 윤 등(2002)은 중층계류된 인공해저시스템의 파랑중 거동특성을 분석하였다. Johanning *et al.*(2007)은 부유식 파력발전장치를 개발하기 위하여 필요한 계류시스템에 관하여 연구하였다. 그들은 계류선에서 감쇠의 효과와 중요성에 관하여 분석하였으며, 축방향 신장과 상부단 가진이 계류선 거동에 가장 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다. 또한, 부유식 파력발전장치용 계류시스템에 관한 초기 설

계에 관한 연구를 수행한 바 있다(Johanning *et al.* 2006a). 그들은 일반적인 계류시스템 설계 절차에 기초하여 정적해석을 통한 계류시스템 초기 설계를 수행하였다.

한국해양연구원에서는 진자형 부유식 파력발전시스템을 개발 중에 있으며, 본 시스템은 해수면 부근에 진자 형태의 연직 판을 설치하여 파랑의 운동에 의하여 진자가 운동하여 전력을 생산한다.

본 연구에서는 부유식 파력발전시스템의 계류시스템에 관하여 초기 설계를 수행한다. 부유식 파력발전장치용 계류시스템의 특징과 구성요소에 대하여 분석하여, 계류시스템의 구성요소를 설계한다. 설계된 내용은 수치해석을 통하여 안전성을 평가한다.

2. 부유식 파력발전장치용 계류시스템 설계 시 검토 사항

2.1 부유식 파력발전장치용 계류시스템 특징

계류시스템은 일반적인 부유식 해양구조물을 일정 위치에 유지하기 위하여 매우 다양한 형태로 활용되고 있다. 그러나, 일반적인 해양구조물의 계류시스템에 비하여 부유식 파력발전장치용 계류시스템은 몇 가지 차이가 있다. 첫 째는 계류시스템 이용기간으로써, 석유 혹은 가스를 개발하기 위한 계류시스템은 단기간 활용 후 위치를 이동한다. 반면에 부유식 파력발전용 계류시스템은 5년 이상 일정 위치에서 사용된다. 두 번째 차이점은 부유식 파력발전장치용 계류시스템의 거동이 파력발전장치의 효율에 직접적으로 영향을 미친다는 것이다. 따라서, 계류시스템의 거동이 부체의 거동에 최소로 영향을 미치도록 설계되어야 한다. 세 번째 차이점은 계류시스템 파손으로 인한 영향의 범위인데, 석유 혹은 가스 개발용 해양구조물의 계류시스템이 파손되면 인적, 물적, 그리고 해양환경에 치명적인 영향을 미칠 수 있다. 반면에 파력발전장치용 계류시스템이 파손되면 단지 파력발전장치의 손실만 발생하게 된다. 따라서, 두 시스템의 설계 개념도 상이하게 될 것이다.

이 외에도 부유식 파력발전시스템을 발전단지(energy farm) 형태로 개발할 경우, 계류시스템 설계에서 고려할 사항은 다음과 같다.

- 운용하중과 극한하중에서 상부체 위치 유지
- 전력용 케이블 보호 및 장치 사이의 거리 유지
- 충분한 강도, 피로수명, 운용기간 운용 지속성, 생물부착, 부식 등 고려
- 시스템은 30년 이상 지속, 특정요소는 5년 이내 교체 시기
- 여러 부체 설치 시 간섭 없이 하나 부체 제거가능
- 조사와 유지 보수 위해 계류라인 제거 가능
- 조사와 유지보수 목적으로 접안 가능
- 계류라인 사이의 접촉 회피
- 장치 효율성에 역효과가 나지 않도록 설계

2.2 설계 규정 검토

각국의 선급에서는 각종 해양구조물 혹은 선박 설계와 제작 등에 관한 규정을 정의한다. 또는 다양한 경험과 해석에 기초한 추천사례(Recommended Practice)를 제공한다. 부유식 파력발전장치용 계류시스템에 관한 설계 규정 혹은 추천사례는 제공되지 않고 있는데, 그 이유는 현재까지 부유식 파력발전장치를 상업용으로 개발한 사례가 없기 때문이다. 따라서, 부유식 파력발전장치용 계류시스템 설계를 위한 표준화된 모델은 없으며, 설계 표준화에 대한 연구가 향후 필요하다. 비록 표준화된 설계 기준은 없으나, 일반적인 해양구조물 계류시스템 설계 시 활용되는 유사한 규정은 참조될 수 있다(DnV RP, 2001; API, 1969). 그러나, 석유 혹은 가스를 개발하기 위한 해양구조물 계류시스템 설계 기준은 매우 엄격하게 적용된다. 그 이유는 앞서 언급된 바와 같이 해양구조물 계류시스템 파손으로 인하여 인적, 물적, 그리고 해양환경 피해가 심각할 수 있기 때문이다. 따라서, 부유식 파력발전장치용 계류시스템 설계 과정에서는 일반적인 해양구조물 계류시스템 설계 기준 중 사용자가 적절히 판단하여 활용해야 한다. 석유 혹은 가스 개발용 해양구조물 계류시스템 설계 기준 외에도, 부유식 가두리 양식시설물에 관한 설계 기준도 참고할 수 있을 것이다 (DnV, 1989)

3. 계류시스템의 구성

계류시스템은 크게 두 부분으로 구성되는데, 첫째는 앵커이며 둘째는 계류선이다. 본 절에서는 계류시스템의 구성 요소에 대하여 알아보며, 각 구성요소의 특징에 대하여 분석한다.

Table 1에서는 대표적인 계류선의 종류와 그에 따른 특징을 보여주고 있다. 체인은 해저면 마찰에 강하기 때문에 해저면 저질 종류에 상관없이 가장 일반적으로 적용될 수 있다. 장기 계류에도 적합하나, 주기적인 유지보수 작업이 필요하다. 와이어로프는 가격이 가장 낮은 장점이 있으나, 굽힘이 발생하면 강도가 저하되는 단점이 있다. 합성섬유 로프는 수심이 깊은 경우에 자중 효과를 감소시키기 위하여 많이 이용된다. 온도 및 인장력 등에 의해 강성이 변하는 단점이 있으며, 물고기가 뜯어 파손되는 문제가 발생하기도 한다. 계류선은 계류 식에 따라 일점계류, 이점계류, 다점계류, 그리고 자동위치 유지시스템으로 구분된다. 석유 혹은 가스 개발용 해양구조물은 주로 복합적인 계류방식을 적용하는데, 일점

Table 1. Mooring lines and their properties

Mooring Components	Characteristics	Costs
Mooring line		
Chain	Good catenary stiffness effect godd abrasion and bending properties Good for long term mooring	Medium
Wire Rope	Spiral strand is suitable for long term mooring Extreme bending must be avoided	Low
Synthetic Rope	Around zero weight in water neutral buoyant common for very deep water tether application high safety factor problem by fishbites	High

Table 2. Anchors and their properties

Mooring Components	Characteristics	Costs
Anchor		
Gravity Anchor	Horizontal holding capacity by dead weight providing friction between sea-bed and anchor	Medium
Drag-Embedment Anchor	Horizontal holding capacity by embedment of the anchor in the ground in the main installation direction	Medium
Driven Pile / Suction Anchor	Horizontal and vertical holding capacity by a specific embedment anchor	High
Drilled and Grouted Anchor	Horizontal and vertical holding capacity by grouting a pile in a rock with a pre-drilled hole	High

혹은 다점계류 방식을 스프레이드 형식으로 계류한다. 또한 구조물의 중요도 및 특성에 따라 자동위치유지시스템을 혼용해서 사용하기도 한다.

Table 2에서는 앵커의 종류 및 그 특징을 나타내고 있다. 중력식 앵커(gravity anchor)는 앵커 자중에 의하여 해저면과의 마찰에 의하여 부체를 일정 위치에 유지시킨다. 해저면과의 마찰력을 증가시키기 위하여 앵커에 스커트 파일을 설치하기도 하며, 비용이 가장 낮다는 장점이 있다. 관입앵커(drag- embedment anchor)는 앵커가 해저면에 관입되면서 주된 설치 방향으로 수평지지력을 가지는 것이다. 그 외 석션 앵커(suction anchor) 등은 해저면을 천공하여 파일을 설치하여 수평 및 수직 저항력을 발생시키는 것으로서, 지지력은 높으나 설치 비용이 매우 높다는 단점이 있다. 따라서, 석션 앵커 등은 해양구조물이 고가이거나, 구조물의 중요도가 높은 경우에 적용된다. 계류선과 앵커는 설치하고자 하는 구조물의 종류, 경제적 및 사회적 중요성 등을 검토하여 경제적이면서 안전한 시설물을 개발할 수 있도록 해야 한다.

4. 계류시스템의 초기 설계

본 절에서는 앞 절에서 검토한 계류시스템 구성요소를 중심으로 기초적인 계류시스템 설계를 수행한다. 앵커와 계류선의 재질과 제원을 선정하며, 기초적인 거동해석을 수행한다. 단, 본 연구에서 수행되는 초기 설계는 에너지 단지 건설을 위한 계류시스템 설계는 아니며, 실증용 계류시스템에 관한 설계에 국한 한다.

Fig. 3에서는 부유식 파력발전시스템의 전체적인 형상을 보여주고 있다. 계류방식은 1점 계류방식을 선정하는데, 그 이유는 파력발전 부체가 모든 방향의 입사파랑을 흡수할 수 있도록 하기 위해서이다. 1점 계류를 선정 시 부체가 자유롭게 이동하기 때문에, 파력발전단지 건설에서는 불리한 설계가 될 수 있다. 따라서, 발전단지 건설을 위한 계류시스템에서는 부체의 수평이동 범위를 일정 범위 이내로 제약하면서 부체는 모든 방향의 입사 파랑에너지를 흡수할 수 있도록 방안이 강구되어야 할 것이다. 계류선의 재질은 체인으로 선정하였는데, 체인은 장기 계류에 적합하며 카테

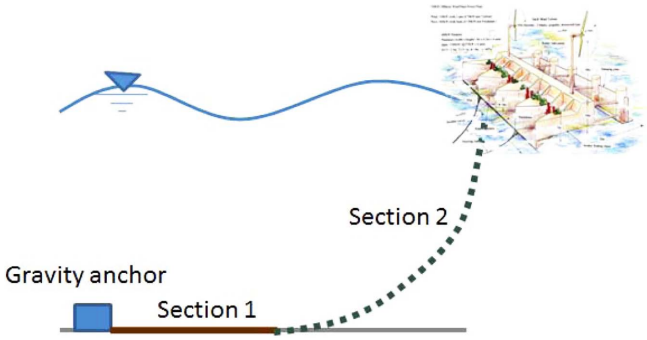
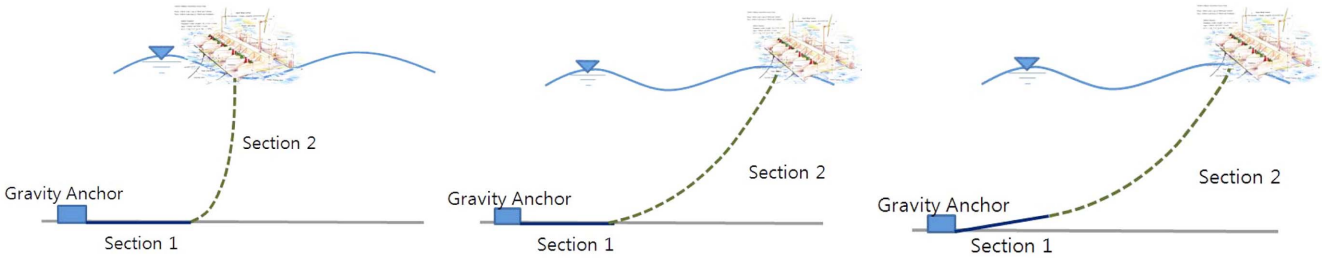


Fig. 3. General configuration of floating wave energy device system.

Table 3. Dimension of chains and anchor

	Anchor	Section 1	Section 2
Material	Concrete	Stud link Chain	Stud link Chain
Diameter (m)		0.06	0.04
Unit weight (N/m)	300,000	750.0	350.0
Breaking load (N)		1,980,000	910,000
Axial stiffness (EA, N)			
Bending stiffness (EI, N·m^2)		60	30
Length (m)		100.0	100.0

너리 특성을 가장 잘 나타내는 재질이다. 합성섬유 로프는 어로활동이 빈번한 국내 환경에서는 적합하지 않다. Johanning *et al.* (2006b)는 수심 60 m에서 와이어로프와 체인에 대하여 부체의 수평 이동 거리에 따른 강성 변화를 해석하였는데, 그 결과에 의하면 같은 강도와 직경을 가지는 두 재질 중 와이어로프가 강성이 크게 발생한다. 강성이 큰 경우 고주파수 하중을 받을 경우 충격력으로 쉽게 작용할 수 있기 때문에 와이어로프 보다는 체인이 보다 적합하다는 결론을 얻었다. 체인 종류는 스터드(stud) 있는 체인으로 선정하였으며, 해저면에 주로 접촉해 있는 영역 1부분(Section 1)과 해저면과 부이 사이에 매달려 있게 되는 영역 2부분으로(Section 2) 나누어서 설계하였다. Table 3에서는 설계된 계류선 제원을 보여주고 있다. 체인은 굽힘에 대한 저항이 거의 없고 축방향 강성이 크게 작용하므로, 굽힘강성(*EI*)은 100이하의 매우 작은 값으로 설정하였으며, 축강성(*EA*)은 큰 값을 사용하였다. 체인은 주로 해저면 위에 놓여 있는 부분은 길이 100 m, 직경 약 0.06 m, 나머지 부분은 길이 100 m, 직경 0.04 m 제원으로 구성된다. 계류선을 두 종류의 체인으로 구성하는 이유는 앵커의 중량과 부피를 감소시키기 위해서이다. 즉, 부체가 수평 외력을 받아서 수평이동을 하면 해저면 위에 놓여 있는 계류선은 해저면으로부터 들려 올라가게 되는데, 이 때 앵커와 연결된 모든 계류선이 해저면으로부터 들려 올라가면 계류선에 의하여 앵커에 작용하는 힘은 수평력 뿐만 아니라, 수직력도 작용하게 된다. 이로 인하여 앵커에 수직력이 작용하면 지지력이 감소되어 앵커가 이동하게 된다. 또한, 부체의 거동은 계류선에 강제 가진력으로 작용하게 되는데, 계류선의 모든 부분이 해저면에서 분리되는 경우에는 고유진동수가 파랑에너지 고유진동수와 공진이 발생할 수 있기 때문



(a) Mode 1 : Calm sea (b)Mode 2 : Operation condition (c) Mode 3 : Extreme condition

Fig. 4. Configuration according to ocean environmental condition.

에 해저면에 놓여 있는 계류선의 중량을 증가시킴으로 고유주기를 높이는 효과도 얻을 수 있다.

해저면과 부이 사이에서 매달리는 부분의 계류선은 중량과 축강성이 약간 작도록 설계하였는데, 계류선의 자중 및 거동이 부체의 거동에 영향을 최소화하기 위해서이다. 앞서 언급한 바와 같이 부유식 파력발전시스템은 계류선의 거동이 발전 효율에 영향을 최소화할 수 있도록 설계하는 것이 매우 중요하므로, 부체와 연결된 계류선의 중량을 적절히 고려할 필요가 있다.

앵커는 해저면을 암반으로 가정하여, 콘크리트로 구성되는 중력식 앵커가 적용된다. 앵커는 수중 중량 300(kN)으로 가정하였다. 본 연구는 실증용 시스템에 관한 실험장치 설계에 한정되므로, 앵커 등의 형상과 같이 관하여 자세한 설계는 제시하지 않는다.

실해역 환경에서 예상되는 전체 시스템의 거동 모드는 Fig. 4와 같다. Fig. 4(a)에서는 파랑과 조류가 거의 작용하지 않는 정온 조건에 대한 계류선의 형상을 보여주며, 해양환경하중의 영향이 미약하여 부체는 계류선과 독립적으로 운동한다. 이 경우에는 계류선에 작용하는 장력도 미소하며, 계류선의 거동이 부체에 영향을 미치지 않기 때문에 계류선에 대한 별도의 해석이 필요치 않게 된다. Fig. 4(b)의 운용조건에서는 부체가 해양환경하중에 의해 수평이동을 하며, 이 때 체인의 일부는 해저면으로부터 들려 올라가게 된다. 마지막으로 Fig. 4(c)의 극한상태에서는 체인의 거의 모든 부분이 해저면으로부터 들려올라가는 상태가 된다. 따라서, 매우 큰 장력이 발생할 것을 예상할 수 있으며, 거동해석을 통하여 구조적 안전성을 평가할 필요가 있다.

5. 설계 안에 대한 기초 해석

본 절에서는 앞 절에서 수행된 초기 설계 안에 대하여 기초 해석을 수행한다. 카테너리 계류선에 관한 정적 해석은 이론식에 의하여 간단하게 수행된다(Berteaux, 1976).

자중이 상대적으로 크고 계류선의 길이가 짧은 경우 다음과 같이 계류선의 특성치를 구할 수 있다. 여기서, 수평장력은 길이에 따라 일정하다고 가정한다.

$$\frac{T_0}{T} = \left[1 + \left(\frac{Ps}{T_0}\right)^2\right]^{-1/2} \tag{1}$$

$$x = \frac{T_0}{P}\sinh^{-1}\left(\frac{Ps}{T_0}\right) \tag{2}$$

$$s = \frac{T_0}{P}\sinh\left(\frac{Px}{T_0}\right) \tag{3}$$

여기서,

T_0 : 인장력의 수평성분

P : 계류선의 단위 유효중량

s : 계류선 길이

x : 앵커점에서부터 수평거리

부체에 작용하는 수평외력이 결정되면 그 힘은 계류선의 수평외력이 될 것이며, (1), (2), (3) 식을 이용하여 계류선의 정적 형상을 결정할 수 있다. Table 4에서는 카테너리 방정식을 이용하여 구한 결과인데, 부체에 작용하는 수평외력에 따라 해저면과 부체 사이의 계류선 길이와 좌표, 그리고 계류선 상단부의 장력을 나타내고 있다. Fig. 5에서는 계류라인의 상부 끝단에 작용하는 수평외력에 따른 정적형상을 보여주고 있다. 수평외력이 증가할수록 계류선은 앵커점에서 점점 멀어지며, 수평외력이 약 30(kN)인 조건에서 영역 2부분의 모든 계류선이 해저면으로부터 들려 올라가는 것을 알 수 있다. 수평 외력이 30(kN)이상 되는 조건에서는 영역 1의 계류선이 들려 올라가기 시작할 것이다. 이것은 동적해석

Table 4. Catenary length and static tension at top point of mooring line according to horizontal force

Case No.	T0 (Horizontal force)	X (Horizontal excursion)	S (Catenary length)	T (Top tension)
1	1000	10.3	52.8	17,929.0
2	3,000	22.3	57.9	19,871.0
3	5,000	31.1	62.6	21,824.1
4	7,500	40.0	68.1	24,275.9
5	10,000	47.6	73.1	26,736.7
6	15,000	60.2	82.2	31,677.1
7	20,000	70.7	90.45	36,633.8
8	30,000	88.3	104.9	46,575.4
9	40,000	103.0	117.7	56,537.8
10	50,000	115.9	129.2	66,511.6
11	70,000	138.2	149.6	86,477.5

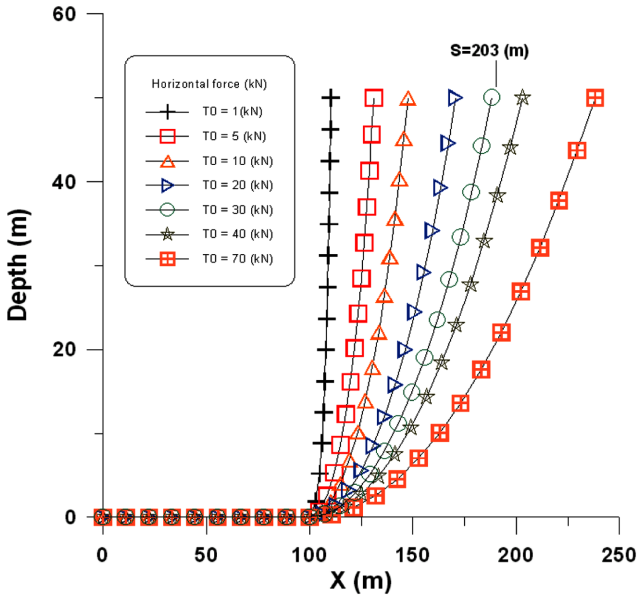


Fig. 5. Static configuration according to horizontal force acting to top point of a mooring line.

을 통하여 알 수 있다.

정 등(2004)은 계류라인의 거동 특성을 파악하기 위하여 계류라인의 동적해석을 수행하였다. 그들은 유한차분법을 적용하여 계류라인에 대한 동적지배방정식을 풀이하였으며, 지배방정식은 강한 비선형성을 나타내기 때문에 뉴톤-랍슨 방법을 적용하여 풀이하였다. 본 연구에서는 정 등이 개발한 계류라인 해석 프로그램을 활용하여 초기 설계된 모델에 대하여 거동해석을 수행하였다. 정 등은 해저지반에 놓여 있는 계류선의 효과를 고려하지 않았다. 본 연구에서는 계류선이 해저면에 접촉하는 경우에는 해저지반이 스프링(spring)과 감쇄(damping)로 작용하는 것으로 고려하였다. Fig. 6에서는 계류선의 일부가 해저면 위에 놓여 있는 경우 전체 시스템에 대한 모델링을 보여준다.

Table 5에서는 계류선에 대한 정적해석 후, 파랑 표류력에 의하여 부체가 수평 이동하는 경우에 대한 해석 입력치를 보여주고 있다. 수평 외력은 30(kN)인 조건에서 해석하므로, 영역 2부분의 길이는 105 m로 해석하였다. 일정 시간이 경과한 후 부체는 0.1(m/s)로 수평이동하고, 100초가 경과된 후에는 정적 평형상태가 되면서 일정 주기와 진폭으로 계류끝단에서 가진되는 것으로 가정하였다.

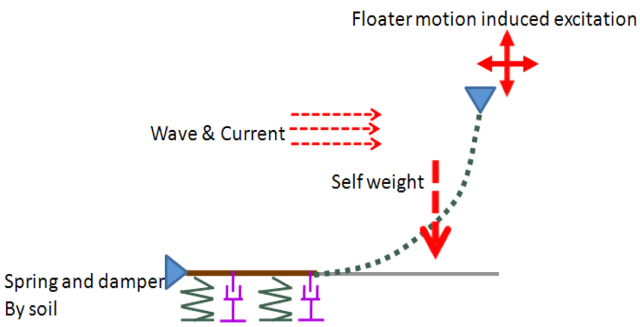


Fig. 6. Modeling for mooring system partially supported on seabed.

Table 5. Simulation condition

Time (s)	Top excitation amp. (m)	Top excitation period (s)	Drift speed (m/s)
0~20	0.5	6	0
20~100	0.5	6	0.1
100~200	0.5	6	0

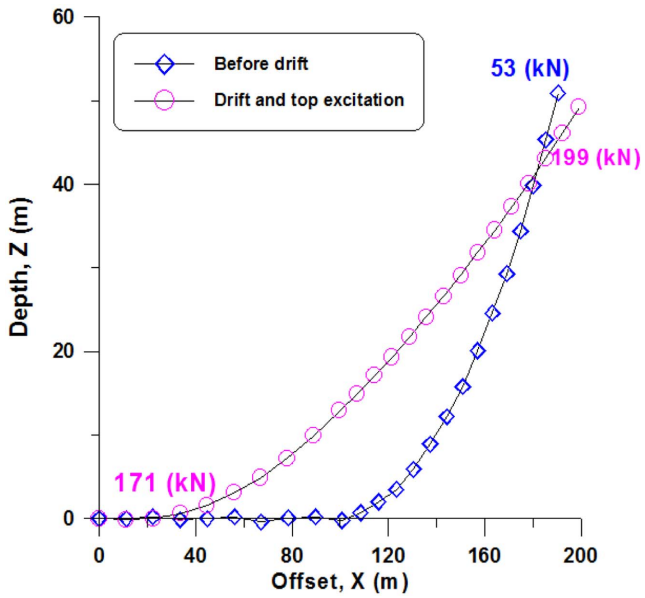
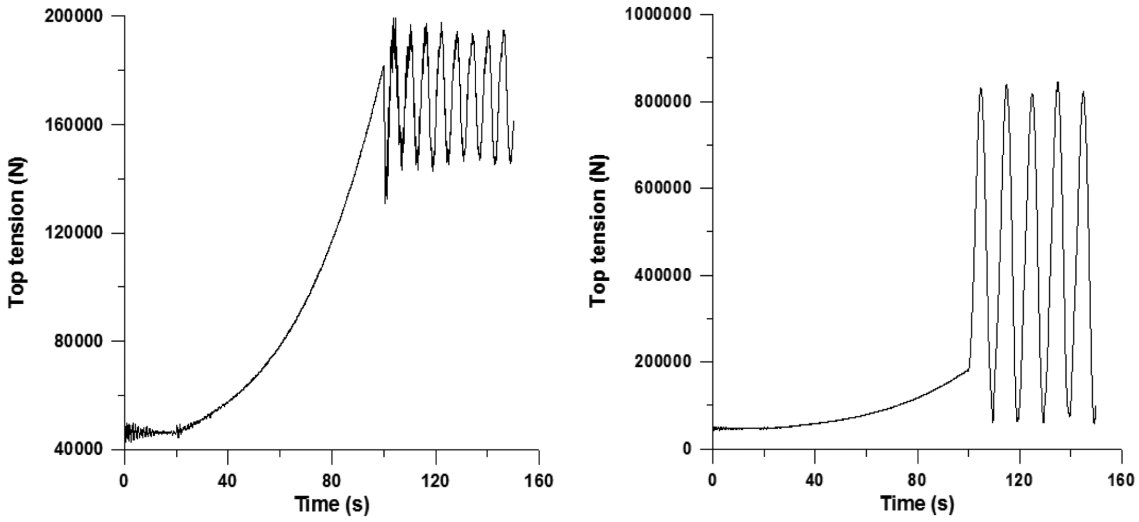


Fig. 7. Changes of configuration and tension by horizontal movement of floater.

Fig. 7에서는 부체가 수평 이동을 하는 경우 계류선 전체의 형상 및 장력의 변화를 보여주고 있다. 파랑과 조류에 의해 부체는 수평외력을 받게 되며, 이로 인하여 계류선 상부 끝단에는 수평외력이 작용하므로 계류선은 형상과 장력이 변하게 된다. 초기 조건에서 영역 1부분은 모두 해저면 위에 놓여 있으며, 영역 2는 해저면과 부체 사이에 매달려 있다. 이 때 계류선 상단에서 장력은 약 53(kN)을 보이고 있는 것을 알 수 있다. 이후 80초 동안은 부체가 파랑 표류력과 조류력에 의해 수평 이동한다고 가정하여, 계류선의 상단이 수평 이동하면서 장력은 증가된다. 이 과정에서 해저면 위에 놓여 있는 영역 1 부분의 계류선은 해저면으로부터 점점 들리게 된다. 수평 이동 후에는 계류선의 상부 끝단이 6(s) 주기와 0.1(m) 진폭으로 가진된다고 가정하엿는데, 이 경우 상부단에서 최대 장력은 199(kN), 앵커점에서 177(kN)의 장력이 발생하게 된다. 앵커점 부근에서 발생하는 장력값을 알게 되면 앵커 설계 시 요구되는 중량 및 설계지지력을 알 수 있다. 현재 30(ton)의 앵커가 고려되고 있으므로, 해저면과의 마찰 계수 등을 고려하여 앵커의 안전성을 확보해야 할 것이다.

Fig. 8에서는 계류선의 상부단이 가진되는 경우 장력의 변동값을



(a) T=6s, H=1m (b) T=10s, H=7m

Fig. 8. Tension variation by horizontal movement of floater in time history.

시간이력으로 보여주고 있다. Fig. 8(a)는 운용상태에서의 결과인데, 부체가 수평이동하면서 장력은 비선형적으로 증가하고 있으며, 가진 조건에서는 약 40(kN)의 장력 변동이 나타나는 것을 알 수 있다. 이 조건에서는 계류선에 작용하는 인장력이 모두 허용인장력 이내에 들기 때문에 안전한 것을 알 수 있다.

태풍 등의 매우 열악한 해양환경 조건에서 계류선의 안전성을 평가하기 위해서 주기 10(s), 파고 7(m) 조건에서 거동 해석을 수행하였으며, Fig. 8(b)에서는 그 결과를 보여준다. 계류선 상부 끝단에서의 장력은 최대 약 800(kN)가지 발생하는 것을 알 수 있다. Table 3에 의하면 2부분의 계류선 허용인장력이 910(kN)임을 고려할 때, 파괴되지는 않지만 구조적으로 매우 위험한 상태임을 알 수 있다. 또한, 이 상태에서 앵커에 작용하는 인장력은 약 700(kN)까지 발생하였다. 따라서, 설계 되었던 앵커는 일정 위치에 고정되지 못하고 이동할 것을 알 수 있으며, 설계 변경을 통하여 700(kN) 이상의 지지력을 가질 수 있는 앵커로 설계되어야 할 것이다. 또는 계류선의 질량 혹은 재질 변경을 통하여 계류선에 작용하는 장력을 감소시킬 수 있는 방안을 강구해야 할 것이다.

6. 결 론

부유식 파력발전시스템의 필수요소인 계류시스템에 관한 초기 설계를 수행하였다. 국내·외에서 개발된 부유식 파력발전장치용 계류시스템 사례를 살펴보았으며, 계류시스템 구성 요소에 대하여 분석하였다. 부유식 파력발전장치용 계류시스템은 상업적으로 개발된 사례가 없어서 지정된 설계규정은 없었으나, 해양구조물 계류시스템 설계기준을 일부 참고할 수 있다. 계류시스템의 요소인 앵커와 계류선에 대하여 초기 설계를 수행하였는데, 계류선은 주로 해저면 위에 얹혀 있는 고중량 부분과 부체에 매달려 있는 저중량 부분으로 나누었다. 앵커와 연결되어서 주로 해저면 부근에 있는 일부분은 고중량 체인을 사용함으로써 앵커의 중량과 부피를 줄일 수 있다. 또한 부체에서 전달되는 강제가진 에너지를 감소시킬 수 있으며, 체인의 모든 부분이 해저면 위로 들려 올려져서 앵커에 수평력과 수직력이 작용하여 앵커의 지지력이 감소하는 문제를 막을 수 있다. 부체에 매달려 있는 체인은 자중 및 거동에 의해 부체에 미치는 영향을 최소화하기 위해 중량이 비교적 가벼운 제원을 사용하였다. 초기 설계된 계류시스템 모델은 안전성 평가를 위하여 정적 및 거동 해석을 수행하였다. 카테너리 이론에 기초하는 정적을 통하여 초기형상 및 장력을 추정할 수 있었다. 동적해석은 체인의 상부 끝단이 수평으로 이동한 후 일정 주기와 진폭으로 가진되는 현상에 대하여 해석하였다. 운용 조건에서는 체인 및 앵커가 안전한 상태를 유지하였으나, 극한 조건에 대한 해석에서는 앵커에 작용하는 체인의 인장력이 과도하여 앵커는 수평 이동될 것으로 예측되었다. 시스템의 안전한 유지를 위해서는 보다 무거운 앵커 또는 체인을 사용하는 설계 변경이 요구되었다. 본 연구 결과는 향후 안전성과 기능성을 가지는 계류시스템 상세 설계 자료로 활용될 것이다.

후 기

본 연구는 ‘부유식 진자형 파력발전시스템 개발’ 및 ‘해역기초생산력 증대를 위한 부유식 인공용승시스템 핵심기술 연구’과제의 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

[1] 정동호, 김현주, 문덕수, 박한일, 최학선, 2004, “수평가진에 의한 계류라인의 장력 응답 연구”, 한국해양환경공학회지, Vol. 7, No. 4, pp. 185-191.

[2] 윤상준, 김현주, 양찬규, 김헌태, 2002, “중층계류식 인공해저 시설물의 파랑 중 운동특성에 관한 실험적 연구”, 해양환경공학회지, Vol. 5, No. 2, pp. 19-27.
[3] 김영복, 2009, “병렬 계류된 모바일하버의 운동응답 및 계류해석”, 한국해양공학회지, 제23권, 6호, pp. 53-60.
[4] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 1996, “Recommended Practice for Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures”, API RECOMMENDED PRACTICE 2SK, 2nd Edition
[5] Berteaux, 1976, Buoy Engineering.
[6] DET NORSKE VERITAS(DNV), 2001, Offshore Standard DNV_OS_E301, Position Mooring.
[7] DET NORSKE VERITAS(DNV), 1989, Position Mooring (POSMOOR), Rules for the Classification of Mobile Offshore Units.
[8] DET NORSKE VERITAS(DNV), 1988, Tentative Rules of DNV for certification of floating fish farms.
[9] Johanning, L., Wolfram, J., Smith, G.H., 2006a, “Mooring design approach for wave energy converter”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Journal of Engineering for the Maritime Environment (JEME).
[10] Johanning, L.,Wolfram, J., Smith, G. H. and Harris, R., 2006b, “Importance of mooring line damping for WECs”. In World Maritime Technology Conference: Marine Renewable Energy (MAREC), IMarEST 2006, March 2006, London, UK.
[11] Johanning, L., Smith, G. H. and Wolfram, J., 2007, “Measurements of static and dynamic mooring line damping and their importance for floating WEC devices”, Ocean Engineering, Vol. 34 pp. 1918-1934.

2011년 6월 7일 원고접수
2011년 6월 30일 심사수정일자
2011년 7월 1일 게재확정일자