

부유식 파력발전단지 조성을 위한 계류선 초기설계

정동호* · 송제하* · 신승호*

*한국해양과학기술원 선박해양플랜트연구소

Preliminary Design of mooring line in floating wave energy farm

DongHo Jung*, JaeHa Song*, SeungHo Shin*

*Korea Research Institute of Ship and Ocean engineering (KRISO/KIOST), Daejeon, Korea

KEY WORDS: Mooring line design 계류선 설계, Floating wave energy farm 부유식 파력발전단지, Numerical analysis 수치해석, Anchorless mooring line 앵커없는 계류선

ABSTRACT: In this paper, the mooring system for a floating wave energy farm is designed based on a two-dimensional analysis. The mooring system uses an anchorless mooring line linking two floaters in a floating wave energy farm. The basic equation to determine the length of the mooring line between the two floaters is proposed. The other properties such as the diameter and pretension are taken from the mooring line for a single floater. The dynamic behavior and safety of the designed mooring system under extreme ocean conditions are analyzed with the commercial software Orcaflex. A numerical study shows the stability and high safety in tension of the designed mooring lines for a floating wave energy farm. The proposed anchorless mooring system for a floating wave energy farm results in a considerable reduction in the length of the mooring line, contributing to the economics of a floating wave energy farm.

1. 서 론

무한한 양을 가지는 청정 해양에너지 자원인 파랑에너지는 전 세계적으로 상용화에 접근한 신재생 해양에너지 자원 중의 하나이다. 우리나라도 파랑에너지 개발에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 최근에는 500 kW급 진동수주형 파력발전 실증장치를 개발하여 완공을 앞두고 있다(Hong, 2012). 고정식 파력발전 장치가 주로 천해에 설치되는 반면, 심해에 부존하는 파랑에너지 자원은 부유식 파력발전 장치에 의해 개발된다. 심해는 천해에 비하여 파력에너지 밀도가 높으며, 연안역 부근의 다양한 이해 당사자로부터 자유로울 수 있다는 장점이 있다. 그러나 파력발전 장치의 설치 수심이 깊어질수록 건설비용이 증대되기 때문에, 심해에서 파력발전 방식으로는 부유식이 합리적이다.

파력발전의 상용화를 위해서는 1차 변화 및 2차 변환 등의 발전 관련 효율성 증대를 통한 원천기술의 개발과 동시에 여러 기의 발전시설을 설치하여 경제적 효율성을 높일 수 있는 파력발전 단지 조성 기술의 개발이 절실하다. 파력발전단지 조성을 위해서는 발전장치를 탑재하는 다수의 부유식 구조물을 직렬 혹은 병렬

로 배열해야 하며, 다수의 부유체는 계류선으로 연결된다. 파력발전단지의 성공 여부는 부유체 구조물이 파랑에 의하여 상호 간섭받지 않도록 배치될 수 있는 평면배치에 의해서 결정될 것이다. 또한, 파력발전단지를 건설하기 위해서는 경제적 효율성을 극대화하기 위한 연구가 이루어져야 한다. 부유식 파력발전 장치의 실해역 실증을 위한 비용 중, 계류선과 앵커를 포함하는 계류시스템의 비중은 전체 개발 비용 중 높은 비중을 차지한다. 따라서, 여러 기의 부유식 파력발전 설비를 설치하는 경우에는 큰 비용을 차지하는 계류시스템을 효율적으로 설계하여 경제성을 제고할 필요가 있다. 해저지반 특성에 따라 다르지만, 해저 지반이 암반 지질일 경우에는 앵커의 비용이 특히 많이 소요되기 때문에, 앵커수를 줄임으로써 경제성을 높일 수 있다.

국외에서는 부유식 파력발전 장치에 관한 개발이 활발하게 진행되고 있는데, 포르투갈에서 개발한 750kW급 펠라미스(Pelamis)가 대표적이다(Shin and Hong, 2011). 펠라미스는 실린더형 구조물을 배열하며, 가동물체형 파력발전 원리를 사용한다. 펠라미스의 경우 각 부유식 파력장치를 병렬로 설치하여 각각의 계류시스템으로 구성하였다. 이 경우 계류시스템으로 인한 경제적 비용이 증가하여 전체 시스템의 경제적 효율성이

Received 6 November 2013, revised 10 December 2013, accepted 18 December 2013

Corresponding author Dongho Jung; +82-42-866-3962, dhjung@kriso.re.kr

© 2013, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KAOST 2013 in Jeju..

떨어지는 문제점이 있다. 이 외에도 캐나다에서 개발한 250kW 급 아쿠아부이(AquaBuoy), 덴마크에서 개발 중인 20kW급 웨이브 드래곤(Wave dragon) 등이 있다. 다양한 부유식 파력발전장치가 개발되고 있지만, 현재 각 부유식 구조물 1기에 대한 설계 및 성능평가를 주 목적으로 연구 및 개발을 진행하고 있다. 포르투갈의 펠라미스는 여러 기의 부유식 파력발전장치에 대한 계류시스템 설계를 수행하였지만, 각 구조물과 계류장치는 독립적으로 설계되어, 여러 기를 같은 지역에 설치하는 파력발전단지의 효율성은 고려되지 않았다.

Johanning et al.(2006)은 부유식 진동수주형 파력발전장치를 외해에 적용하기 위하여 필요한 계류시스템에 관하여 연구하였다. 또한, 파력발전단지 조성을 위한 시스템 설계에 관한 연구를 수행하였다(Johanning et al., 2007). 그러나 그들은 부유체의 상호간섭 등에 관하여 집중적으로 연구하였으며, 계류시스템의 효율적인 설계에 관한 연구는 무시하였다. 계류선의 설계에 관한 다양한 문헌은 출판되고 있으나(Berteaux, 1976), 파력발전단지 조성을 위한 계류선의 설계에 관한 연구는 찾아보기 어렵다.

본 연구에서는 부유식 파력발전단지 조성을 위한 계류시스템의 초기 설계를 수행한다. 여러 기의 부유식 파력장치를 계류시키기 위한 기초 연구로서 2기의 부유체를 배열하며, 부유체의 위치를 유지하기 위한 2차원 계류시스템을 설계한다. 계류시스템 중에서 인접한 부유체 사이의 계류선에는 앵커를 사용하지 않으면서, 계류선을 공통으로 사용하는 개념을 제안한다. 1기의 부유체 계류선에 대한 설계치를 기반으로 2기의 부유체 계류선을 설계한다. 계류선 전용 해석 프로그램인 올카플렉스(Orcaflex)를 이용하여 계류선의 거동 해석을 수행하여, 설계된 파력발전단지용 계류선의 안전성과 효율성을 분석한다.

2. 설계 기초 정보

2.1 해양환경 조건

부유식 파력발전장치는 제주해역에 설치되는 것으로 가정하였으며, 참고문헌에서 사용한 해양환경 조건을 적용하였다(Table 1; Jung et al., 2012).

2.2 구조물 기초 제원

부유체는 현재 선박해양플랜트연구소에서 설계 중인 진자형 파력발전 장치를 적용하였다(Jung et al., 2012). 부유체는 높이

Table 1 Environmental condition for target site

Current, m/s	2.0
Current dir.	SW
Wind, m/s	50
Wind dir.	NNW
H_s , m	8.7
T_z , s	12.9
Wave dir.	NW
Water depth, m	40.0

8m, 폭 21m, 길이 29m로 구성된다. 파력발전단지를 설계함에 있어서 기초가 되는 계류선의 특성치는 파력발전 장치 1기에 대하여 설계된 기초자료를 활용하였다. Jung et al.(2012)는 부유식 파력발전장치의 계류선 설계를 위하여 초기장력에 따른 계류선의 거동 특성을 올카플렉스를 이용하여 분석하였으며, $\phi 100$ 3중(Gr.3) 체인 240m 8개의 계류선을 설계값으로 결정하였다.

3. 파력발전단지용 계류선 설계 기본개념

서론에서 언급한 바와 같이 파력발전장치의 상용화를 위해서는 파력발전용 부유체를 효율적으로 배치하여 발전 효율을 높여야 하며, 전체 시스템 제작 및 설치 비용을 최소화하여 경제성을 높여야 한다. 전체 시설비 중에서 계류선의 비중이 매우 높기 때문에, 파력발전단지 설계 시 계류선의 효율적인 설계가 중요하다.

본 연구에서 제안하는 파력발전단지용 계류시스템은 인접하는 파력발전 부유체 구조물의 계류선을 공유하는 것이다. 공유하는 계류선은 앵커를 사용하지 않으며, 단지 계류선의 자중에 의하여 앵커의 기능을 수행할 수 있도록 설계된다. 단, 가장자리에 설치되는 계류선에는 앵커를 사용한다. Fig. 1에서는 파력발전단지의 계류시스템 개념을 보여주고 있다. 여기서, 계류선의 기본 체인은 파력발전장치 1기에 대하여 설계된 계류선의 특성치를 이용한다. 계류선 중 해저면 위에 놓여 있는 부분은 반드시 체인 재질이 사용된다는 가정 하에 설계된다. 그 이유는 계류선의 자중이 부유체의 거동에 대한 복원력 및 앵커의 파지력으로 작용하기 때문이다. 즉, 부유체의 거동에 대하여, 해저면 위에 놓여 있는 계류선의 자중이 저항력으로 작용하게 된다. 본 연구에서 제안하는 계류시스템을 적용하면 여러 기의 파력발전장치가 설치되는 경우, 부유체 사이에 설치되는 계류선에는 앵커를 사용하지 않으며 공유하는 계류선의 길이도 줄일 수 있기 때문에 경제적으로 매우 효율적인 설계가 될 수 있다. 또한, 계류선의 길이가 줄어들어는 경우는 시스템 해역에 설치되어 차지하는 공유수면 면적 자체가 줄어들어는 효과를 얻을 수 있기 때문에, 추가적인 경제적 효과를 얻을 수 있다.

4. 계류선 설계 및 거동해석

4.1 수치해석 개요

본 절에서는 파력발전단지의 계류선 설계 개념을 기반으로

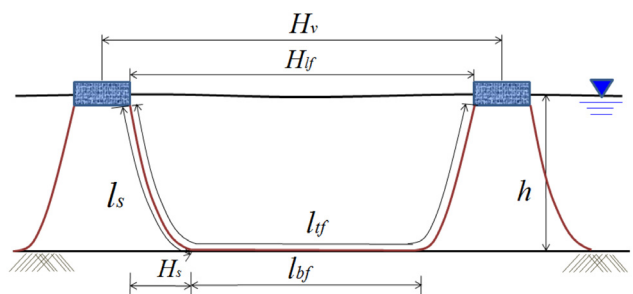


Fig. 1 Concept of mooring system in Wave Energy Farm

수치해석을 수행하여 설계개념의 타당성을 검토한다. 설계모델의 수치해석은 상용소프트웨어인 올카플렉스를 사용하였다. 올카플렉스는 계류선 등의 세장형 구조물 전용 소프트웨어이며, 부유체의 거동 특성은 사용자의 입력자료에 의해 설정된다. 부유체의 거동 특성은 Nam et al.(2012)이 수행한 해석결과를 이용하였으며, 이를 올카플렉스의 입력자료로 사용하여 부유체와 계류선과의 연성 해석을 수행하였다. 극한 해양환경조건에 대한 거동해석을 수행하였으며, 폭풍우가 30분간 지속되는 조건에 대한 해석을 수행 후 와이블(Weibull) 통계값을 사용하여 극값을 추정하였다. 와이블 방법은 극값을 추정하기 위한 통계해석법인데, 올카플렉스에서는 일정 시간에 대한 계류해석을 수행한 후 3시간 폭풍 지속시간에서 발생할 수 있는 계류선의 극한 인장력을 추정하기 위해서 사용된다(Orcina, 2013).

Fig. 2는 올카플렉스를 이용하여 모델링된 두 기의 부유식 파력발전구조물과 계류시스템을 보여주고 있다. 부유체를 기준으로 가운데는 한 기의 계류선을 배치하였으며, 양쪽에는 각각 3기의 계류선을 배치하였다. 파랑 및 조류 등의 해양환경하중은 부유체가 배치된 직렬 방향으로 작용하는 것으로 고려하였으며, 따라서 2차원 해석으로 국한된다. 즉, 구조물은 3차원으로 모델링되었으며 2차원 하중을 적용시켰다. 2차원 해석임에도 불구하고 부유체의 양쪽에는 각각 세 기의 계류선을 배치한 이유는, 2차원적인 해양환경하중이 작용함에도 불구하고 부유체는 3차원적인 형상 및 유체동역학적 특성을 가지기 때문이다. 이로 인하여 부유체는 3차원적인 거동을 나타내며, 수치적 불안정성으로 회전(Roll, Yaw) 운동이 발생하면 시스템 전체가 발산하는 문제가 발생한다. 본 연구의 핵심은 부유체 사이의 계류선 설계이기 때문에, 부유체 바깥쪽은 세 기의 계류선을 설계하여 해석을 수행하였다.

부유체 바깥쪽의 세 기 계류선의 특성치는 부유체 한 기에 대한 계류선 설계값을 그대로 적용하였다(Table 2; Jung et al., 2012). 본 연구에서는 3종 체인을 사용하였는데, 한국선급에서는 체인의 강도에 따라 등급을 1종 ~ 3종으로 구분하고 있다(Korean register of shipping, 2013). 3종은 1종과 단위길이 당 중량은 같으나 허용인장력이 큰 체인을 의미한다. 부유체 두 기 사이에 설치되는 중앙 계류선의 중량, 길이, 그리고 초기장력 등은 중요한 설계 인자인데, 중량과 초기장력은 부유체 1기의 계류선 특성치를 사용하였다. 중앙 계류선의 길이는 파력발전단지 계류선 설계에 있어서 가장 중요한 인자 중의 하나이다. 그 이유는 중앙 계류선의 길이가 길수록 안전율은 높아지는 반면 시설 비용이 증가하고 시설물 점유면적이 증가하기 때문이다. 따라서, 부유체를 연결하는 중앙 계류선의 길이를 최소로 하면서 전체 시스템을 안전하게 유지할 수 있는 설계가 이루어져야 한다. 파력발전단지 설계에서, 부유체 사이의 간격은 부유체의 크기 및 발전 효율 등을 고려하여 결정하게 되는데, 본 연

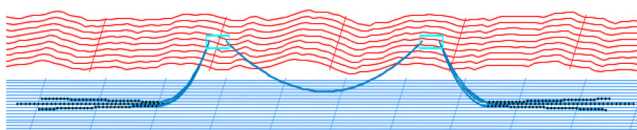


Fig. 2 Modeling of mooring system for Wave Energy Farm in Orcaflex

Table 2 Basic properties of outside mooring lines

	Stud chain(Gr. 3)
Length, m	240
Chain bar diameter, m	0.10
Mass per unit length, kg/m	219
Allowable tension, kN	7,056
Axial stiffness, kN	1.01×10^6

구에서는 계류선 관점에서 부유체 간격을 선정하였다.

4.2 파력발전단지용 계류선의 거동해석 결과

두 기의 부유체 사이에 설치되는 계류선의 길이를 선정하기 위하여 해석을 수행하였다. Table 3에서는 해석에서 다루는 계류선의 특성치와 극한해석을 통하여 구해진 계류선의 최대인장력을 보여주고 있다. 먼저 기본적인 경우에 대한 네 가지 해석을 수행하였다. 첫 번째 해석은 Case basic으로써, 중앙에 설치되는 계류선이 부유체 1기에 대한 계류선 특성치를 그대로 적용하되 길이를 두 배로 하는 경우이다. 이것은 계류선의 길이가 충분히 긴 경우로써, 매우 긴 계류선의 자중이 부유체의 거동에 대한 복원력으로 작용하여 부유체의 거동은 매우 안정적으로 나타났다. 발생한 최대인장력은 약 2663kN이며, 안전율은 2.0 이상으로 계류선은 안전한 상태를 유지할 수 있다는 것을 알 수 있었다(Fig. 3; Det Norske Veritas, 2003). 이 경우에는 부유체 사이의 계류선에 앵커를 사용하지는 않지만, 계류선의 길이를 한 기 계류선 설계값의 두 배를 사용하여 비경제적인 설계가 이루어졌기 때문에 보다 효율적인 설계가 요구된다.

Table 3 Properties and ultimate tensions of responses in center mooring line

	Case basic	Case 1	Case 2	Case 3
Type	Stud Gr.3	Gr.3	Gr.2	Gr.2
Length, m	480	240	240	260
Diameter, m	0.100	0.100	0.150	0.150
Mass per unit length, kg/m	219	219	493	493
Allowable tension, kN	7,056	7,056	9,985	9,985
Ultimate tension, kN	2,663.2	2,626.0	3,324.4	1,304.2

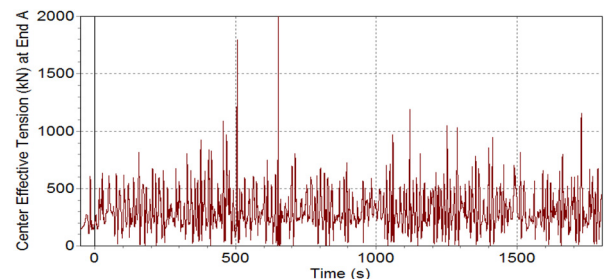


Fig. 3 Top tension at end point of center line in time history

Case 1은 계류선의 특성치는 Case basic과 같지만, 계류선의 길이를 절반으로 줄이는 경우이다. 해석결과에 의하면 이 경우에는 최대인장력이 허용인장력보다 작지만, 폭풍 지속 시간의 대부분에 걸쳐서 중앙 계류선이 해저면에서 들려서 거의 일직선 형태가 유지되는 것을 알 수 있다(Fig. 4). 중앙계류선의 양끝 점과 가운데 점에 대한 장력의 시간이력을 살펴보면 세 절점에서 거의 비슷한 값을 나타내었는데, 이것은 중앙계류선이 해저면 위에 놓여 있지 않고 두 부유체 사이에 매달린 상태를 유지하였다는 것을 알 수 있다. 즉, 중앙 계류선은 전체 길이에 걸쳐 장력이 큰 상태가 지속적으로 나타나기 때문에, 피로수명에 큰 영향을 미칠 수 있을 것으로 예측되어 적절하지 못한 설계로 판단된다.

체인 계류선에서 운동 성능을 개선시키는 가장 단순한 방법은 체인의 중량을 증가시키는 것이다. Case 1에서 나타났던 중앙 계류선의 구조적인 불안정한 현상을 개선하고자 Case 2는 중앙 계류선의 길이는 유지하면서 질량을 증가시켰다. 그 결과를 살펴보면, Case 1에서 발생하였던 극한 상태 모드가 지속적으로 발생하지는 않았지만, 최대인장력이 크게 증가되었다. 이것은 계류선의 길이는 그대로 유지한 상태에서 질량을 증가시키기 때문에 초기 장력이 증가하여 동적응답도 크게 나타난 것으로 사료된다. 그러나, Case 2의 설계도 여전히 중앙 계류선의 모든 부분이 해저면으로부터 들려 올라가는 현상이 발생하여, 설계 개선이 요구된다. Case 1과 Case 2 조건의 결과를 살펴본 결과, 중앙 계류선의 길이가 너무 짧은 경우에는 정적평행 상태에서 대부분의 중앙 계류선이 해저면 바닥과 부유체 사이에 매달리게 되어 초기장력이 과도하게 되며 동적거동 상태에서도 최대인장력이 크게 발생하는 것을 알 수 있었다.

Case basic, Case 1, 그리고 Case 2의 결과를 분석해 보면, 두 부유체를 연결하는 중앙 계류선의 길이가 매우 긴 경우에는 안전율이 충분히 확보되지만 과도한 설계가 이루어져서 비경제적이다. 반면, 중앙 계류선의 길이가 짧은 경우에는 정적평행 상태에서 해저면 바닥과 부유체 사이에 매달린 체인의 길이가 길어지면서 초기장력이 과도하게 되며, 최대인장력이 크게 발생하는 것을 알 수 있었다. 또한 동적거동 상태에서는 중앙 계류선의 전체 부분이 해저면으로부터 들려올라가서 부유체 사이에 매달린 상태가 지속되면서 계류선 전체 길이에 대하여 장력이 크게 발생하게 되며, 피로파괴 위험성이 높아지는 결과를 초래하였다. 비록 체인의 중량을 증가시킬지라도 이 문제점은 크게 개선되지 않았다. 따라서, 경제적이면서 구조적 안전성을 확보할 수 있는 중앙 계류선의 길이를 결정해야 한다.

초기 장력을 일정부분 감소시키고 계류선의 모든 부분이 해저면으로부터 들려올라가는 현상을 방지하기 위하여, Case 3에서는 중앙 계류선의 길이를 260m로 증가시켰다. 이 경우는 Case 2에 비하여 최대인장력이 약 40% 정도로 발생하여 안전율이 높게 나타났다.

간단한 해석을 통하여 부유체 사이의 중앙계류선은 일정 이상의 길이와 질량을 가져야 한다는 것을 알 수 있었다. 따라서, 한 기 부유체의 계류선 설계값을 기본으로 하여 파력발전단지용 계류선의 길이 산정에 관한 연구가 필요하다. 한 기 부유체의 계류선에 대한 설계가 안전하게 수행되어 계류선의 중량, 길

이, 그리고 초기장력 등이 결정되었다면, 그 값을 바탕으로 파력발전단지용 계류선의 길이를 산정하게 된다.

Fig. 1에서 l_{tf} 은 중앙계류선의 전체 길이, l_s 는 중앙계류선의 매달린 길이, l_{bf} 는 중앙계류선이 바닥에 놓여 있는 길이, H_v 는 부유체 중심간의 거리, H_{tf} 는 중앙 계류선의 수평거리, H_s 는 중앙 계류선이 매달려 있는 부분의 수평거리이다. 한 기 부유체에 대하여 설계된 계류선의 길이는 바닥에 놓여 있는 체인 길이 l_{bf} 와 매달린 부분의 길이 l_s 의 합이며, 중앙 계류선의 길이는 한 기 계류선의 전체 길이와 매달린 길이의 합으로 본다면 다음 식을 만족한다.

$$l_{tf} \simeq l_s + l_{bf} + l_s \quad (1)$$

일반적으로 한 기 부유체에 대한 계류선의 길이는 극한환경 하중 하에서도 계류선의 모든 부분이 해저면으로부터 들리지 않을 조건으로 결정된다. 이것은 계류선의 인장력이 앵커에 연직방향으로는 힘이 작용되지 않을 제한조건으로서, 부유체의 거동에 의하여 계류선이 연직방향의 영향을 받지 않을 최소 길이로 설계되었다는 것을 의미한다. 따라서, 두 기의 부유체를 연결하는 계류선 중 바닥에 놓여 있는 부분의 길이는 한 기 부유체 계류선의 바닥에 놓여 있는 길이(l_{bf})보다 길면 부유체의 안전성을 확보할 수 있으며, 경제성을 고려하여 바닥에 놓여 있는 길이로 설정된다. 중앙 계류선의 매달려 있는 부분의 길이 (l_s)는 한 기 부유체의 매달린 부분 특성치와 같기 때문에, 결론적으로 중앙 계류선의 길이는 한 기 계류선의 전체 길이와 매달린 길이의 합인 식 (1)과 같이 산정될 수 있다.

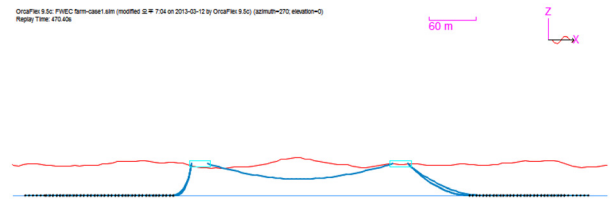


Fig. 4 Ultimate mode of mooring line for case 1

Table 4 Properties of center mooring lines and their ultimate response according to line length

	Case 4	Case 5	Case 6
H_v , m	285	285	305
H_{tf} , m	265	265	285
l_{tf} , m	300	290	310
l_{bf} , m	170	140	160
H_s , m	45	59	59
l_s , m	65	75	75
Pretension, kN	165	200	200
Ultimate tension, kN	-	1,154	1,143

Table 4의 Case 4는 파력발전단지용 계류선의 중앙선 제원을 결정하기 위해 식 (1)을 만족하는 조건 및 최대인장력 값을 보여주고 있는데, 수치해석 과정에서 수치해석적 불안전 현상이 발생하여 해를 구할 수 없었다. 이 현상은 설계의 오류는 아니며, 중앙계류선이 2차원으로 설계되어 해석되는 반면 부유체는 3차원 거동을 하면서 나타나는 수치적 불안정 현상에 기인하는 것으로 사료된다. 이 문제는 계류선의 초기장력을 증가시켜 해결할 수 있기 때문에, Case 5에서는 두 부유체의 위치는 유지하면서 중앙 계류선의 길이를 10m 줄여서 해석하였다. 부유체의 위치를 유지한 상태로 계류선의 길이를 줄이면, 초기장력이 증가된다. 그 결과 부유체 및 계류선은 매우 안정적인 거동 특성을 나타내었으며, 약 1154kN의 최대인장력이 발생할 것으로 예측되었다. 이 결과의 타당성을 보다 더 자세히 검토하기 위하여 계류선의 길이를 20m 증가시키고, 이와 동시에 부유체 사이의 간격도 20m 증가시켜서 해석을 수행하였다(Case 6). 이 조건은 계류선의 초기장력은 그대로 유지하면서 단지 해지면 위에 놓여 있는 계류선의 길이만 증가시키는 효과를 살펴보는 것이다. 계류선의 초기장력을 그대로 유지하면서 해지면 위에 놓여 있는 계류선의 길이만 증가시키는 이유는, Case 5의 설계값의 타당성을 입증하기 위해서이다. 계류선의 거동 특성은 초기장력에 의해 크게 지배되기 때문에 초기장력을 그대로 유지하면서 해석을 수행하였다. 또한 해지면 위에 놓여 있는 계류선의 길이는 증가할수록 안전한 설계가 이루어지기 때문에, 단지 해지면 위에 놓여 있는 체인 길이만 증가시켜 해석을 수행함으로써 Case 5의 계류선 길이만으로도 충분히 안전한 설계가 이루어졌다는 것을 입증하고자 하였다. 그 결과 중앙 계류선에는 약 1143kN의 최대인장력이 발생할 것으로 예측되어 Case 5의 결과와 유사하게 나타났다. 즉, 식 (1)에 기반한 Case 5의 설계값은 타당한 것으로 사료된다.

2기 파력발전장치의 계류선에 대한 설계 개념을 정립한 후에는, 다수 부유체에 대한 확장성을 증명하기 위하여 3기 부유체

에 대한 계류선 설계 및 안전성 평가를 수행하였다. 설계 방법은 2기 부유체의 계류선 설계 방법과 동일하게 적용하여, 식 (1)에 의하여 계류선의 길이를 선정하였다. Fig. 5에서는 올카플렉스를 이용하여 모델링된 3기 부유체와 계류선의 전체 형상 및 배치를 보여주고 있다. 해양환경 조건은 Table 1과 같으며, 2차원적인 하중을 작용시켰다. 극한하중 해석 결과 2번 부유체에 연결된 1번 중앙 계류선에서 약 1,686.9kN의 최대 인장력이 발생하였으며, 3번 부유체에 연결된 2번 중앙 계류선에서 약 1,122.3kN의 최대 인장력이 발생하였다. 1번 중앙 계류선의 우측 끝단에서 가장 큰 최대 인장력이 발생하였으며, 2기 부유체 해석 조건에 비하여 최대인장력은 크게 발생하였으나 여전히 안전율은 4 이상의 높은 값을 보여서 매우 안전한 설계를 알 수 있다. 3기 부유체의 가운데 부유체 부근에서 최대 인장력이 2기 부유체 조건보다 크게 나타나는 이유는, 계류선은 2차원적으로 설계된 반면 부유체는 3차원적인 형상으로 인하여 3차원적인 거동을 나타내기 때문인 것으로 사료된다. 따라서, 향후 3차원 계류시스템 설계로 확장된다면 계류선의 안전율은 보다 높게 나타낼 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 부유식 파력발전단지 조성을 위한 계류시스템 초기설계를 수행하였다. 2차원적인 설계에 국한하였으며, 두 부유체를 연결하는 계류선은 앵커없이 설계하는 새로운 개념을 제안하였으며 설계안을 검토하기 위하여 상용소프트웨어인 올카플렉스를 이용하여 해석을 수행하였다. 두 부유체를 연결하는 계류선에는 별도의 앵커를 설치하지 않으며, 계류선만으로 위치를 유지할 수 있도록 설계하였다. 1기 계류선의 특성치를 바탕으로 두 부유체를 연결하는 계류선의 거동 해석을 수행하였으며, 두 부유체를 연결하는 계류선의 길이는 바다에 놓여 있는 계류선과 매달린 계류선 두 기의 합으로 적용될 때 안전한 설계가 된다는 것을 알 수 있었다. 본 연구 결과를 통하여 파력발전단지를 실증할 때 앵커와 계류선을 절략하여 경제성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 계류선의 길이를 줄이는 것은 전체 파력발전단지가 차지하는 공유수면 면적을 줄일 수 있는 부차적인 효과도 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구는 향후 3차원으로 확장하기 위한 연구가 추가로 필요하다고 판단되는 바이다.

후 기

본 연구는 ‘부유식 진자형 파력발전시스템 개발’ 및 ‘해양심층수의 에너지 이용기술개발’ 과제의 연구결과 중 일부를 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

IMO Res. A.749(18), Code on Intact Stability for All Types of

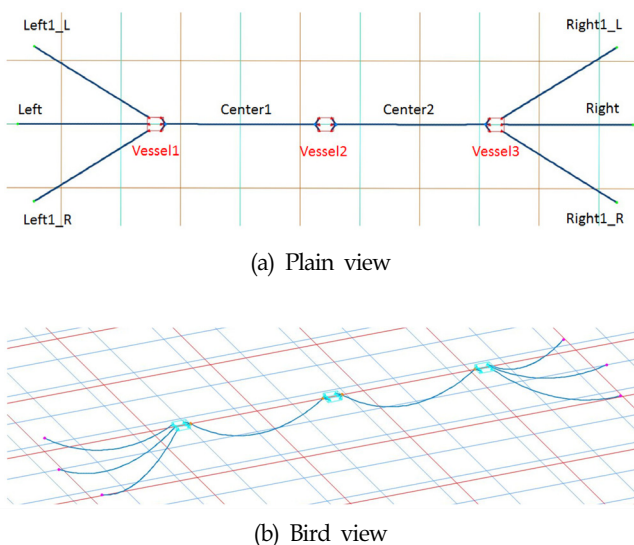


Fig. 5 Modeling of mooring system to keep the position of 3 floating bodies

- Ships Covered by IMO Instruments.
- Berteaux, H.O., 1976. Buoy Engineering (Ocean Engineering, a Wiley Series). Umi Research Pr
- Nam, B.W., Hong, S.Y., Shin, S.H., Hong, S.W., Kim, K.B., 2012. Prediction of the Hydrodynamic Performance of the Floating Pendulum Wave Energy Converter in Regular and Irregular Waves. International Conference of ISOPE2012, Rhode, Greece.
- Det Norske Veritas (DNV), 2003. Offshore Standard DNV_OS_E301. Position Mooring.
- Hong, K.Y., 2012. Technology Trend and Future Prospect on Wave Energy Conversion in Internal and External. The Proceeding in Korea Society of Marine Environment and Energy.
- Johanning, L., Wolfram, J., Smith, G.H., 2006. Mooring Design Approach for Wave Energy Converter. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M Journal of Engineering for the Maritime Environment (JEME).
- Johanninga, L., Smithb, G.H., Wolframc, J., 2007. Measurements of Static and Dynamic Mooring Line Damping and their Importance for Floating WEC Devices. Ocean Engineering, 34, 1918-1934.
- 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 Line for Floating Wave Energy Conversion. Journal of Ocean Engineering and Technology, 26(4), 77-85.
- Korean Register of Shipping, 2013. [Online] Available at: <<http://www.krs.co.kr/>> [Accessed 15 Mar. 2013]
- Shin, S.H. and Hong, K.Y., 2011. The State-of-the-Art and Key Performance Indicators for Commercial Use of the Wave Energy Utilization Technologies. Journal of Korean Civil Engineering, 59(5), 55-62.
- Orcina, 2013. [Online] Available at: <<http://www.orcina.com/>> [Accessed 10 Jan. 2013]