

중량체 적용을 통한 계류선의 설계개선 방안 연구

송제하* · 신승호* · 정동호* · 김현주*

*한국해양과학기술원 선박해양플랜트연구소

Improved design for mooring line with lumped weight at seabed

JaeHa Song*, SeungHo Shin*, DongHo Jung*, HyeonJu Kim

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

KEY WORDS: Mooring line design 계류선 설계, Lumped weight 중량체, Weight and distance 중량 및 간격, Numerical analysis 수치 해석

ABSTRACT: The purpose of this study was to improve the design of a mooring line by attaching a lumped mass to it on the seabed. A numerical analysis of the redesigned mooring system is performed to analyze the effect of the weight of the attached lumped mass using the commercial software Orcaflex. The ultimate tension of the mooring system with the lumped mass is compared with that of a bare mooring line in the original design. An appropriately designed weight for the lumped mass is found to induce a critical lifted point in the mooring line by floater motion in the ultimate condition to move toward the floater position from the anchor point, while maintaining a similar safety factor for the mooring line. On the other hand, it is shown that excess weight for the lumped mass induces snapping in a mooring line, resulting in low safety factor for the mooring system. The distance between lumped weights is shown to be a minor parameter affecting the safety of a mooring line, although a shorter line has an advantage from an economic point of view. Using the optimal weight for the lumped mass attached to the mooring line on a seabed reduces the mooring line length and installation area occupied by a mooring system under real sea conditions.

1. 서 론

부유식 구조물은 부유체와 계류시스템으로 구성되어 있으며, 최근 심해 해상풍력, 해양온도차발전 및 해상파력 발전용 구조물로도 널리 개발되고 있다. 신재생 해양에너지 개발에 있어서 해양구조물 건설 비용이 전체 비용에 비하여 큰 부분을 차지하기 때문에, 신재생 해양에너지의 효율적인 개발을 위하여 경제적인 해양구조물 개발이 필요하다. 부유식 해양구조물에서는 계류시스템 개발 비용이 높은 비율을 차지하기 때문에, 경제성을 고려한 계류시스템의 설계가 매우 중요하게 인식되고 있다 (KIOST, 2011a).

계류시스템 중 계류선은 수심 및 구조물 특징에 따라 체인 등의 재료를 사용하는 카테너리(Catenary) 계류와 긴장(Taut) 계류로 나눌 수 있다. 카테너리 계류는 비교적 수심이 얇은 경우에 적용되며, 계류선의 중량에 의한 인장력이 부유체 이동에 대한 복원력으로 작용한다. 따라서, 계류선의 중량과 인장력이 주요 설계 인자가 된다. Jung et al. (2012)는 카테너리 계류선 설계 절차를 정립하였으며, 초기 강성의 중요성을 고려하여 부유

식 파력발전 구조물의 계류선을 설계하였다.

카테너리 계류선에 비하여 긴장 계류는 비교적 수심이 깊은 해역에 대하여 적용할 수 있으며, 재료는 특수 섬유재질의 로프 혹은 와이어 로프 등이 사용된다. 긴장 계류를 천해역에 적용하기 어려운 이유 중의 하나는 천해역에서 조수간만의 차이가 약간만 발생하여도 설계된 초기 긴장 계류선의 인장력은 크게 변화되기 때문인데, 이로 인하여 긴장 계류선의 역할을 수행하기 어렵게 된다.

앞서 언급한 바와 같이, 카테너리 계류선은 자중에 의한 인장력이 복원력으로 작용하기 때문에, 비교적 무거운 중량을 가지는 체인이 사용된다. 체인은 일부분이 부유체와 해저면 사이에 매달려 있으며, 많은 부분은 해저면 위에 놓여서 극한 환경하중이 작용할 경우 복원력으로 작용한다. 카테너리 계류선의 소요 비용을 줄이기 위해서는 해저면 위에 놓여 있는 많은 부분의 체인 양을 절감할 수 있는 방안을 고안해야 한다. 즉, 계류선 전체의 길이가 절감될 수 있도록 계류시스템을 고안하여 경제성을 향상시킬 수 있다.

계류선의 설계에 있어서 계류선의 길이는 경제성 뿐만 아니

Received 6 November 2013, revised 18 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.

라, 공유수면 점사용허가 면적을 결정하는 중요한 요소이다. 따라서, 계류선의 안전성에 문제가 없는 조건에서 계류선의 길이를 감소시키는 연구가 필요하다.

계류선의 해석에 관한 연구는 도서를 통하여 기초적인 자료가 제시되고 있으며(Berteaux, 1976), 다양한 연구 논문이 출판되고 있다(Chen, et al., 2001; Kim, Y.B., 2009). 그러나, 계류선을 효율적이고 경제적으로 설계하기 위한 연구는 드물다.

본 연구에서는 부유식 파력발전시스템의 계류선 설계에 있어서, 설계 효율성을 높이기 위한 방안으로 계류선에 중량체를 설치하는 방안에 관한 설계를 수행한다. 체인으로 구성된 계류선은 자중이 복원력의 주된 성분이므로, 해저면 위에 놓여 있는 계류선에 중량체를 설치하여 설계효율성을 높이고자 한다. 설계된 계류선의 적합성을 판단하기 위하여 수치해석적 연구를 수행하였다. 안전성 해석은 세장형 구조물 전용 프로그램인 울카플렉스(Orcaflex)를 이용하였다. 중량체의 무게 및 설치 거리 등에 따른 거동 특성을 파악하였다.

2. 기본 설계 조건

본 절에서는 계류선 설계에 적용되는 해양환경조건 및 부유체 구조물 등의 조건을 설정한다.

2.1 해양환경 조건

본 연구에서의 부유식 파력발전 장치는 제주 해역에 설치되는 것으로 가정하였으며, 제주 인근 특정 해역에 대한 해양환경 조건을 설계조건으로 고려하였다. Table 1 에서는 제주도 인근 해역의 특정지점에 대한 해양환경조건으로 50년 재현주기 설계값을 보여주고 있다(KIOST, 2011b). 파랑환경은 겨울에는 NW, 여름에는 SSW 방향이 지배적이다.

Table 1 Ocean Environmental conditions in Jeju

Current (m/s)	2.0
Current dir.	SW
Wind (m/s)	50
Wind dir.	NNW
Hs (m)	8.7
Tp (s)	12.9
Wave dir.	NW (Winter) SSW(Summer)
Water depth (m)	40.0

2.2 구조물 기초 제원

파력발전 장치의 기본 제원 및 거동특성은 계류선의 설계에 있어서 매우 중요한 인자가 된다. 부유체는 높이 8m, 폭 21m, 길이 29m의 제원을 가지며, 진자형 발전장치를 위하여 전면에 2개의 수실로 구성되어 있다(Jung et al., 2012). 계류선의 기초 제원 또한 Jung et al. (2012)가 설계한 자료를 참고하였다. 즉, 초기 설계된 계류선의 초기장력 및 각종 제원 등은 참고문헌

자료를 그대로 사용하였다. 카테너리 계류에서 초기장력은 계류선의 거동특성을 결정하는 중요한 설계인자 중의 하나이며, 본 연구에서는 120 kN의 초기장력을 작용시켰다. 참고문헌과 동일한 조건으로 해석을 수행하며, 중량체 설계를 통하여 초기 설계된 계류선을 개선시키고자 한다.

2.3 중량체 기초 제원

본 연구에서는 부유식 파력발전 장치의 계류선이 해저면 바닥에 놓여있는 부분에 대해서 일정간격으로 중량체를 설치하여 얻어지는 효과를 연구하였다. 계류선에 설치되는 중량체의 기본 제원은 계류선의 총 길이를 줄일 수 있는 중요한 인자가 된다. 중량체는 직육면체의 콘크리트 블록으로 가정하였으며, Table 2에서는 설계에 사용된 콘크리트 블록의 기본 제원을 보여주고 있다. 여기서, $B_a(t)$ 는 중량체의 공기중 중량, $B_s(t)$ 는 중량체의 수중 중량, W_c 는 체인의 수중 중량, $B_{NS}(m)$ 는 중량체의 수중 중량을 체인 수중 중량으로 나눈 값으로써, 중량체의 중량에 상응하는 체인 길이를 의미한다. 전체 5가지의 중량체를 선정하여, 중량체의 중량에 따른 계류선 거동 특성을 살펴보았다.

Table 2 Data of concrete blocks

- Block density : 2300, kg/m ³ ≈ 2000, kg/m ³			
- Chain dia. : 100mm (219, kgf/m ≈ 200, kgf/m)			
Concrete block (m × m × m)	$B_a(t)$	$B_s(t)$	$B_{NS}(m)$, (B_s/W_c)
1m×1m×1m	2	1	5
2m×2m×1m	8	4	20
2m×2m×2m	16	8	40
3m×3m×3m	54	27	135
5m×5m×5m	250	125	625

3. 중량체를 설치한 계류선의 동적해석

중량체가 일정간격으로 설치된 계류선에 대한 설계를 수행하는 과정에서 각 계류선의 안전성을 평가하였는데, 계류선의 안전성은 상용프로그램인 울카플렉스를 이용하였다. 울카플렉스는 세장체 전용 해석프로그램으로서, 부유체와의 연성거동 해석도 가능하다. 부유체의 동수역학적 계수들은 사용자가 직접 입력하게 되는데, 구조물의 거동 및 하중 RAO, 강성, 점성, 부가질량 행렬, 1차 및 2차 파랑하중 등이다. 본 연구에서는 부유체의 운동방정식을 풀이하기 위하여 본 연구팀이 보유하고 있는 부유체 해석용 In-house S/W를 이용하여 부유체의 유체동역학적 계수들을 구한 후, 울카플렉스에 입력자료로 활용하였다(Nam, et al., 2012). 따라서, 부유체와 계류선과의 상호 연성 효과를 고려하였으며, 부유체의 장주기 운동 및 표류감쇠 영향 등이 계류선 거동에 미치는 영향을 고려하여 동적해석을 수행하였다.

본 연구에서는 8개의 선으로 구성되는 4점 계류 방식을 선정

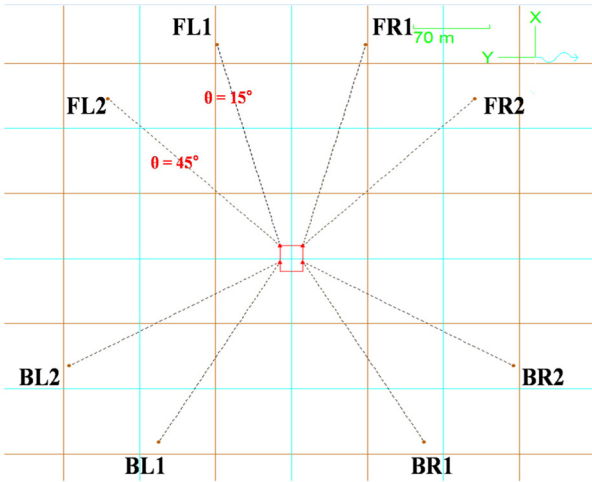


Fig. 1 Layout of mooring line (Jung et al., 2012)

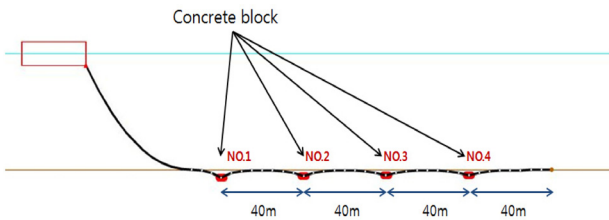


Fig. 2 Layout of weight attached on the mooring

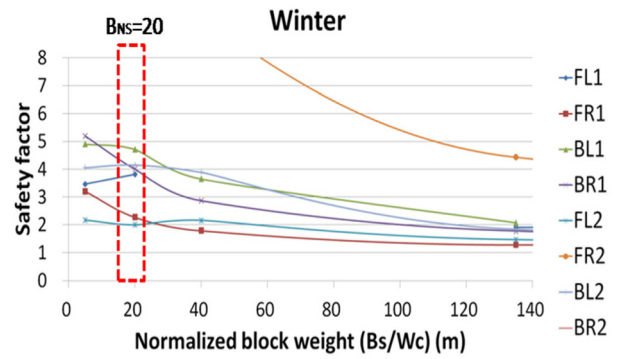
하였으며, 중량체는 앵커로부터 일정 거리만큼 간격을 두고 배치하였다. 계류선의 길이는 극한 환경조건에서 모든 계류선이 해저면으로부터 분리되지 않는 조건으로 결정되었는데(Jung et al., 2012), 중량체를 배치함으로써 해저면으로부터 분리되는 계류선 길이가 감소되도록 설계하였다. 중량체의 제원과 배치 거리를 설계 인자로 하여, 중량체 효율성을 검토하였다.

Fig. 1에서는 울카플렉스에 모델링된 계류선의 배치를 보여준다. Fig. 2에서는 각각의 계류선에 모델링된 중량체의 배치를 보여준다.

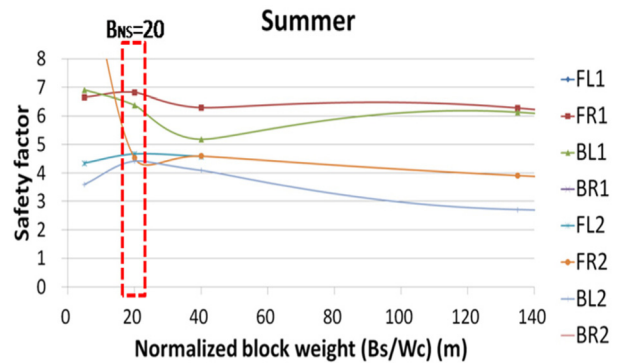
동적해석에서는 2장에서 해양 환경 설계조건을 적용하였으며, 파랑은 50년 재현주기 환경조건을 ISSC스펙트럼으로 구현하였다. 동적해석의 극한환경 조건은 3시간 풍속지속 조건으로 해석이 이루어 졌다. 또한, 극한환경 조건에 대한 계류선의 응답은 3시간 지속시간에 대한 응답을 구한 후 웨이블(Weibull) 분포법에 의한 장기 추정값을 검토하였다(DNV, 2001; API, 1996).

3.1 설치되는 중량체의 제원에 따른 안전율

계류선에 설치되는 중량체의 제원을 변화시키면서 계류선에 발생하는 극한인장력을 해석하였다. 이 때 중량체의 제원은 Table2에 정리된 바와 같이 총 5가지 중량을 적용시켰으며, 각각의 계절조건 환경하중을 적용하여 얻은 안전율은 Fig. 3 (a), (b)에 정리하였다. 여기서, 안전율은 사용된 체인의 허용인장력을 극한인장력으로 나눈 값을 의미한다.



(a) Winter



(b) Summer

Fig. 3 Safety factor of each mooring line according to normalized block weights

Fig. 3은 콘크리트 블록 중량에 따른 계류선의 안전율을 보여주고 있다. 가로축은 콘크리트 블록의 수중중량을 계류선의 단위길이당 수중중량으로 나눈 값인데, 이것은 콘크리트 블록 중량이 계류선의 해당 길이에 상응하는 중량을 의미한다. 예를 들어 20m은 블록의 중량이 체인 길이 20m에 상응하는 중량이라는 의미이다.

Fig. 3에 의하면, 콘크리트 블록을 40m 간격으로 설치하게 되면 콘크리트 블록의 중량이 증가함에 따라 안전율은 대체적으로 감소하는 것으로 나타난다. Fig. 3 (a)와 (b)의 결과로는 100mm 체인의 계류선을 사용할 경우에 $B_{NS} = 20m$ 의 콘크리트 블록을 설치하면 안전율이 2 이상 확보된다는 것을 알 수 있다. 반면, $B_{NS} = 40m$ 과 $B_{NS} = 140m$ 의 콘크리트 블록을 사용하는 경우에는 안전율이 2보다 낮게 나타나서, 중량체의 설치로 인하여 안전율이 보다 낮게 나타난다는 것을 알 수 있다. 이것은 체인 중량에 비하여 콘크리트 블록의 중량이 과다한 경우이며, 콘크리트 블록의 과도한 중량으로 인하여 체인에 스냅핑 효과로 작용되어 인장력이 크게 발생하였기 때문이다.

3.2 설치되는 중량체의 제원에 따른 터치다운 위치 비교

다음은 중량체 설치로 인하여 계류선 절감 효과를 알아보기 위하여, 계류선에 설치되는 중량체의 제원에 따른 터치다운된 계류선이 해저면으로부터 분리되는 한계지점을 비교하였다. 극

한하중 및 부유체의 거동에 의해 계류선이 해저면으로부터 분리되는데, 계류선의 모든 부분이 해저면으로부터 분리되는 경우에는 앵커에 연직하중이 작용하여 앵커의 안전성에 문제가 발생한다. 따라서, 극한하중에 의한 계류선의 터치다운 위치를 파악함으로써, 중량체가 계류선의 안전성에 어떻게 영향을 미치는지를 알 수 있다. 또한, 초기 설계된 계류선의 길이를 어느 정도 줄일 수 있는지를 결정할 수 있다.

Fig. 4에서는 중량체의 설치를 고려하지 않을 경우에 최대장력이 발생한 계류선이 바닥에서 분리되어진 위치를 도시하였다. 중량체가 없을 경우 부유체 중심으로부터 약 201m 지점에서 계류선이 해저면으로부터 분리되었다. Fig. 5에서는 각각의 중량체가 설치된 경우에 대해서 계류선이 해저면으로부터 분리되는 지점을 나타내고 있다. 즉, 괄호 안의 숫자는 중량체의 제원을 나타내며, 괄호 앞의 숫자는 각 경우에 대하여 중량체가 설치되는 경우 부유체의 중심으로부터 계류선이 해저면으로부터 분리되는 지점까지의 수평거리를 나타낸다. 부유체 중심으로부터 안전율이 가장 높게 나타났던 $B_{NS}=20m$ 조건에서는 중심으로부터 약 166m 지점에서 계류선이 해저면으로부터 분리되는 것

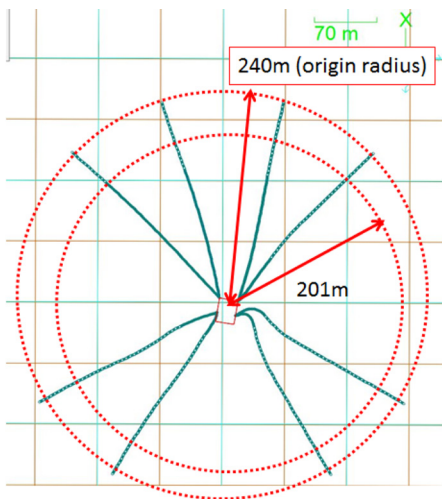


Fig. 4 Touch down area on mooring line (no block)

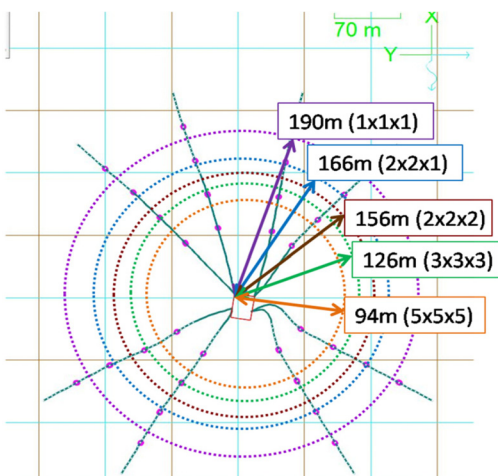


Fig. 5 Touch down area on mooring line (with blocks)

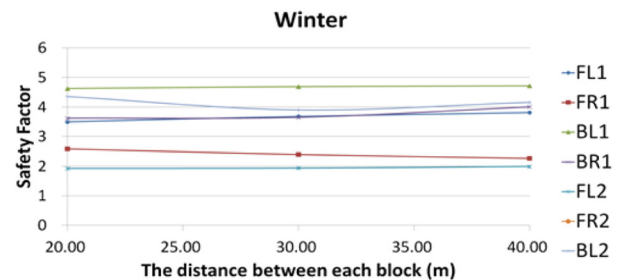
으로 파악되었다. 중량체의 중량이 증가할수록 계류선이 해저면으로부터 분리되는 거리는 감소하지만, 과도한 중량체의 적용은 스냅핑이 발생하여 효율적인 설계가 이루어지지 않는다. 따라서, $B_{NS}=20m$ 의 중량체를 설치한다면 안전율을 높일 수 있거나, 혹은 앵커의 위치를 부유체 중심점으로 이동시킬 수 있어서 계류선의 길이를 감소시키는 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

3.3 설치되는 중량체의 간격에 따른 안전율

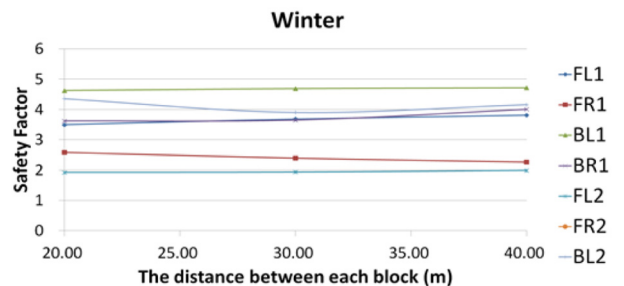
앞 절에서는 계류선의 중량이 계류선의 안전율에 어떤 영향을 미치는지 살펴보았는데, 중량체의 설치간격도 중요한 설계 인자이기 때문에 이에 대한 분석이 필요하다. 본 절에서는 계류선에 설치되는 중량체의 간격이 계류선에 발생하는 인장력에 어떻게 영향을 미치는지를 분석하였다.

앞 절에서 분석한 바와 같이 중량이 $B_{NS}=20m$ 되는 중량체를 계류선에 설치하는 경우, 가장 효율적인 계류선의 설계가 이루어졌다. 따라서, 계류선의 중량은 $B_{NS}=20m$ 으로 동일하게 유지하면서, 계류선에 설치되는 중량체의 간격을 조절하면서 안전율을 평가하였다.

Fig. 6은 계류선에 설치되는 중량체의 설치 간격에 따른 계류선의 안전율을 보여주고 있다. 겨울조건에 비하여 여름조건에서 전체적으로 안전율이 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 여름조건에서는 대부분의 계류선이 설치된 중량체의 효과로 안전율이 4 이상 매우 높게 나타났다. 여름조건에서는 중량체의 간격이 20m인 경우 안전율이 약간 낮게 나타났다. 중량체의 설치 간격에 따른 안전율을 살펴볼 때, 안전율이 낮게 나타난 겨울조건에서 설치 간격에 따른 안전율은 크게 변하지 않았다. 이 결



(a) Winter



(b) Summer

Fig. 6 Safety factor of each mooring line according to normalized block distances

과로 볼 때, 중량체의 간격은 20m만 하더라도 충분한 안전율을 확보할 수 있다는 것을 알 수 있으며, 간격이 40m인 조건에 비하여 계류선의 길이를 줄일 수 있어서 매우 효율적인 설계가 될 것으로 판단된다.

3.4 설치되는 중량체의 간격에 따른 터치다운 위치 비교

앞서 해석한 바와 같이 체인 계류선이 터치다운된 부분에 중량체를 설치한다면, 체인의 길이를 일부 줄일 수 있다. Fig. 7에서는 Fig. 6의 해석결과와 같이 중량체의 중량과 설치 간격으로 중량체를 설치할 경우, 계류선 1기 당 소요되는 계류선 길이를 보여주고 있다. 본 연구에서 다루는 부유식 파력발전장치의 계류선에서는 초기 설계된 계류선에 최적화된 중량체를 설치한다면 계류선 1기당 약 100m의 길이를 줄일 수 있다는 결과를 얻었으며, 총 8기의 계류선에서는 800m의 계류선을 줄일 수 있을 것으로 기대된다. 중량체 설치를 통하여 직접적인 경제적 효과 외에도 계류선이 적용하고 있는 공유수면적이 획기적으로 줄어들게 된다. Fig. 6의 계산 결과에 기초하여 중량체를 설치한다면 초기 공유수면적의 약 2/3을 줄이는 효과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 부유식 파력발전장치의 계류시스템 설계를 개선시키기 위한 방법으로, 계류선에 중량체를 추가하는 방안을 고안하였다. 계류선에 설치되는 중량체의 중량과 중량체 사이의 거리를 설계 인자로 고려하여 최적의 설계가 이루어지도록 하였다. 계류선의 거동 특성과 안전성을 평가하기 위하여 옴카플렉스를 이용하여 수치해석적 연구를 수행하였다. 해석결과 일정 간격으로 중량체를 설치하는 경우 계류선의 안전율은 초기 설계치와 유사하게 유지하면서 계류선이 해저면으로부터 분리되는 지점이 초기 앵커지점에서 멀어지는 것을 알 수 있었다. 이 결과는 계류선의 길이를 줄일 수 있는 효과를 가져올 수 있기 때문에, 설계 측면에서 매우 유리할 것으로 판단된다. 중량체의 중량이 클수록 계류선 길이 감소 효과가 높게 나타나지만,

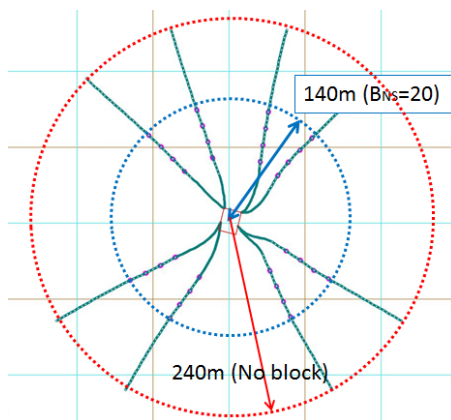


Fig. 7 Comparison of anchor point and area occupied by mooring system for W/WO block.

과도한 중량체의 무게는 계류선에 스냅핑 현상을 유발하여 과도한 인장력이 발생하기 때문에 설계 측면에서 불리하다는 것을 알 수 있었다. 본 연구에서 제안되는 중량체를 계류선에 설치하는 방안은 설치되는 계류선의 길이를 줄여 경제성을 확보할 수 있으며, 계류선 설치 면적을 초기 설계치의 2/3 만큼 줄일 수 있을 것으로 기대된다. 단, 중량체와 계류선을 안전하게 연결할 수 있도록 중량체의 형상 및 연결방법에 관하여 보다 구체적인 설계가 요구되는 바이다.

후 기

본 연구는 부유식 진자형 파력발전시스템 개발 및 '해양심층수의 에너지 이용기술 개발'과제의 연구결과 중 일부를 밝히는 바입니다.

References

- IMO Res. A.749(18), Code on Intact Stability for All Types of Ships Covered by IMO Instruments.
- American Petroleum Institute (API), 1996. Recommended Practice for Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures. API Recommend Practice 2SK, 2nd Edition.
- Berteaux, H.O., 1976. Buoy Engineering (Ocean Engineering, a Wiley Series). Umi Research Pr
- Chen, X., Zhang, J., Ma, W., 2001. On Dynamic Coupling Effects between a Spar and Its Mooring Lines, Ocean Engineering, 28(7), 863-887.
- Det Norske Veritas, 2001. Offshore Standard DNV_OS_E301, Position Mooring, Det Norske Veritas
- 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.
- Kim, Y.B., 2009. Motion Response and Mooring Analysis of Mobile Harbors Moored in Side-by-Side. Journal of Ocean Engineering and Technology, 23(6), 53-60.
- Korea Institute of Ocean Science and Technology (KIOST), 2011a. Proposal Report on Technology for Wave/Wind Hybrid Development.
- Korea Institute of Ocean Science and Technology (KIOST), 2011b. Detail Design Report on Wave Energy Conversion in 500kW Class.
- 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, 607-612.