

1. 서론

환경친화적인 에너지원에 대한 필요성이 계속 부각되는 가운데, 해상풍력발전기에 대한 연구는 유럽 및 미국을 중심으로 활발히 이뤄지고 있다. 2009년부터 노르웨이의 Statoil사가 개발한 Hywind-OC3 구조물은 실해역에서 운용을 하고 있으며, 현재 phase IV 모델 개발이 이뤄지고 있다 (JONKMAN J., 2010). 그러나 현재까지의 연구는 대부분이 단독 부유체 해석이 상당수를 차지하며, 해상풍력발전단지에 대한 연구는 제한적이다. 이에 선박해양플랜트연구소에서는 2012년부터 연계형 부유식구조물 기술 개발을 통한 신개념 해상풍력발전단지 연구가 진행 중에 있다. 본 연구에서는 다물체 연성해석 기법에 탄성 연결체를 고려하는 기법을 적용하여 건조비, 설치비 및 운용비를 대폭 절감할 수 있는 경량의 연계구조물을 적용한 대규모 부유식 해상풍력단지의 가능성을 기술적으로 검토하였다.

이를 위해 각 부유체의 동유체력은 고차경계요소법 (High-Order BEM)을 이용하여 산정하였으며, 등가 스프링을 이용하여 선형장력 형식 계류식을 모사, 연결체는 유한요소법을 이용하여 모델링하였다. 2x2, 3x3 정사각 배치의 해상풍력발전 단지에 대한 파랑 중 운동 특성 및 연결체 끝단의 구조 해석을 통해 확장된 경우의 대규모 단지의 성능이 개별 구조물의 성능과 동일함을 확인하였다.

2. 연계형 부유식 해상풍력발전단지

본 연구에 활용되는 해양구조물의 하부 형상은 5MW급 해상풍력발전기 Hywind-OC30이며, 이에 대한 상세한 제원은 김윤호 등(2012)의 연구에서 찾아볼 수 있다. 본 연구에서는 2x2 및 3x3 정사각형 배치에 대한 수치해석이 수행되었으며, 후자의 전체 시스템은 Fig. 1에 모사되었다.

각 부유체간 이격거리는 부유체 중심을 기준으로 500m이며, 직경 1,570m, 길이 490.6m의 원형 실린더 형상의 연결체가 사이에 위치하고 있다. 선형장력 형식 계류식의 경우, SHI-KORDI 협력사업으로써 수행된 2011년 연구결과를 참고하여 15.608kN/m의 강성을 지닌 계류선으로 결정하였다. 연결체의 주요 제원은 Table 1에 정리되어 있다.

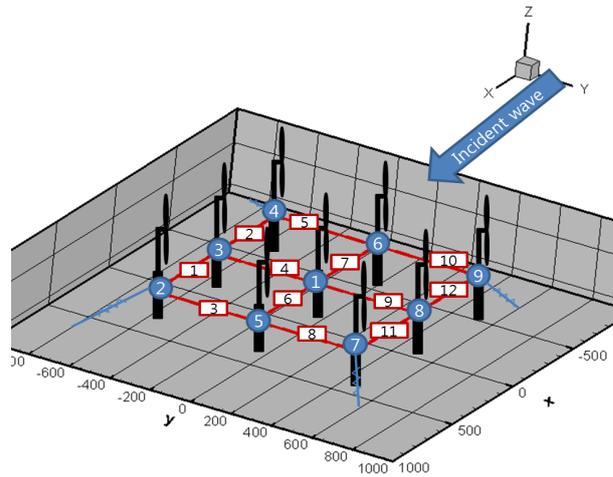


Fig. 1 3X3 Square Array of Floating offshore Wind Turbines with Flexible Connectors & Taut Mooring Lines

Table 1 Characteristics of the Connector

Item	Value
Mair per unit length [kg/m]	1985.0
Mwater per unit length [kg/m]	49.05
Axial stiffness [kN]	4.92e07
Bending stiffness [$kN \cdot m^2$]	1.28e07
Torsion stiffness [$kN \cdot m^2$]	9.89e06
Length of each element [m]	9.812
Drag coefficient	1.2
Mass coefficient	2.0
Diameter [m]	1.57
Cross section area [m^2]	0.239

환경외력으로는 파랑하중만 고려하였으며, 바람과 조류에 의한 하중은 본 연구에서는 포함되지 않았다. 두 배치 모두 Survival Condition인 180 deg 입사, Sea state 8 ($H_s = 11.5m/s$, $T_p = 16.4sec$, ITTC spectrum) 불규칙파 중 운동특성 및 연결체 끝단의 장력을 계산하였다.

3. 수치해석 기법: 부유체와 연결체, 계류선 연성 해석

부유체와 연결체, 선형장력 계류선의 시간영역 연성 해석 방정식은 식 (1)과 같다.

$$[M_b + M_{add}(\infty)][\ddot{\xi}] + \int_0^t R(t-\tau)[\dot{\xi}]d\tau + [K_b + K_m][\xi] = f_w + f_c \quad (1)$$

여기서 M_b , M_{add} 는 부유체 질량 행렬과 무한대에서의 부가 질량 행렬, $R(t-\tau)$ 는 시간기억함수, K_b , K_m 은 각각 정유체력 복원력, 선형장력 현수선의 강성행렬을 의미한다. f_w 는 파랑하중, f_c 는 연결체에 의한 외력을 의미한다. 연결체의 운동은 유한 요소법으로 정식화되었으며, 이는 Kim, et al.(2010)에 상세히 기술되어 있다. 운동방정식에서 동유체력 계수 및 파랑기진력, 파랑하중은 고차경계요소법으로 구하였다 (Hong, et al., 2012).

4. 수치해석 결과

4.1 2x2 정사각형 배치의 해상풍력발전단지

먼저 4개의 부유체를 2x2 정사각형 배치를 구성하고, 그 사이를 탄성 연결체로 연결하였다. 그리고 모든 부유체는 15,608kN/m의 선형 계류선이 설치되었다. 각 부유체의 운동 시계열에 대한 통계해석을 수행하였고, 이는 Fig. 2과 같다.

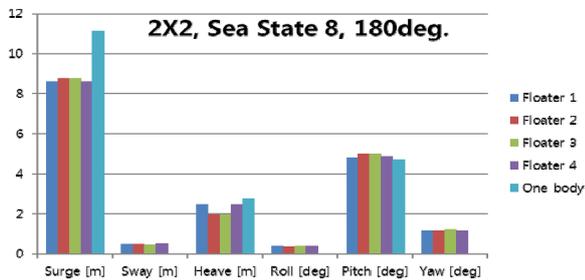


Fig. 2 Significant Double Amplitude of Floater Motions for 2x2 Square Array with Sea State 8, Head-sea condition

동일한 선형장력 계류선을 설치한 단독 부유체의 운동값에 비해 heave, pitch는 유사한 값을 보이나, surge 운동은 연결체의 설치에 의해 약 25%의 운동 저감을 보이고 있다. 또한 연

결체와의 연성으로 인해 선수파 조건에도 불구하고 좌우운동 (sway, roll, yaw)이 일정값 도출되었다.

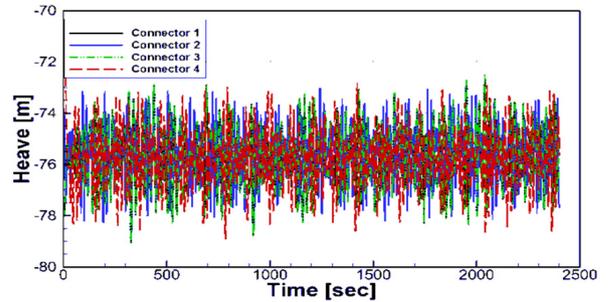


Fig. 3 Time series of Heave Motions of Middle Point of each Connector in 2x2 Array with Sea State 8

이 때 연결체 중앙의 운동은 Fig. 3에 나타나 있다. 초기에 약 6.0m 처진 상태에서 정적평형을 찾은 뒤 동적 거동을 띄게 된다. 운동의 절대값은 부유체의 그것과 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다.

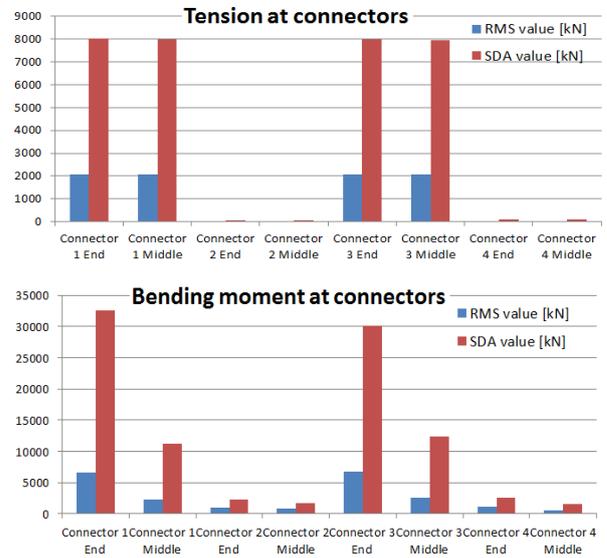


Fig. 4 Mean & Significant height of tension(Upper) and Bending moment(Lower) of Connectors' end and middle

마지막으로 연결체 끝단에 걸리는 유효장력과 휨 모멘트의 Mean and Significant Height Value는 Fig. 4로 도식화하였다. x축에 평행하게 놓인 1,3번 연결체에 걸리는 장력과 휨 모멘트가 주된 반면, y축에 평행한 2,4번의 경우 그 값이 미미하다. 이는 선수파 조건에서 2,4번의 경우 부유체 운동에 거의

거스르지 않고 함께 움직이는 반면, 1,3번은 파랑하중을 적게 받음에 따라 부유체 운동에 반하게 움직임으로써 많은 장력과 모멘트가 걸리는 것으로 사료된다.

가장 많은 장력과 모멘트를 받는 것은 1번 연결체이며, 이 때 걸리는 응력은 약 $218MN/m^2$ 로 계산되었다. ASTM mild steel 시리즈의 항복응력이 약 $400MN/m^2$ 부근인 점을 감안 하면 안전계수 1.2~1.3(Survival Condition) 적용 시 항복응력을 견딜 수 있는 구조라 판단된다.

4.2 3×3 정사각형 배치의 해상풍력발전단지

다음으로 9개의 부유체를 3×3 정사각형 배치를 한 후 사이를 12개의 탄성 연결체 및 모서리에 위치한 2, 4, 7, 9번에 선형장력 계류선을 설치한 시스템을 모델링하였다. 앞선 2×2 배치와 동일한 환경조건에서 계산을 수행하였고, 평면운동에 따른 궤적은 Fig. 5에 나타내었다.

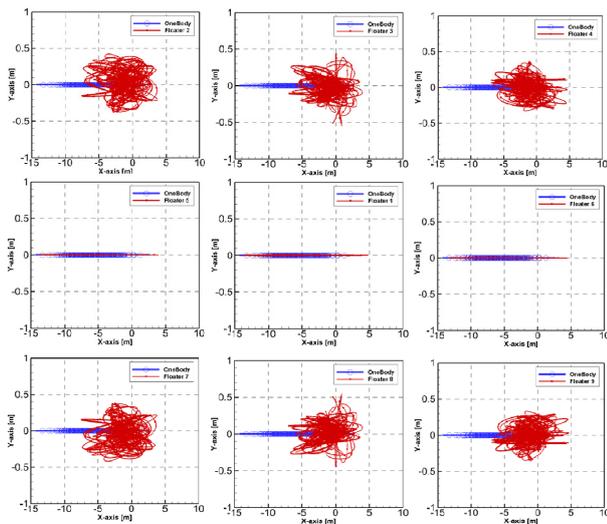


Fig. 5 Contour of the 3X3 Array Floaters in XY-plane

동일 선상에 계류선이 설치되지 않은 5, 1, 6번의 경우 약 14.2m까지 뒤로 밀려나는 것을 확인할 수 있으나 그 외의 부유체들은 선형장력 계류선에 의해 약 7.0m까지만 밀려났으며 중앙선에 위치한 부유체들의 표류로 인해 양 쪽에 위치한 부유체들의 y 방향 변위가 나타난 것을 볼 수 있다.

Figs. 6, 7은 각 연결체 끝단에 걸리는 유효장력을 나타내었다. x축에 평행한 연결체들에 걸리는 장력이 Y축에 평행한 연결체들에 걸리는 장력보다 지배적인 경향은 2×2 배치에서와 같이 나타났으며 절대적 크기도 2×2 배치와 큰 차이를 보이지 않음을 확인하였다.

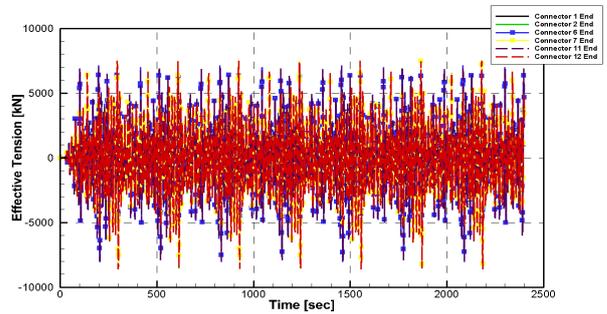


Fig. 6 Effective Tension of Connectors laid X-axis Parallel with 4 Mooring Lines

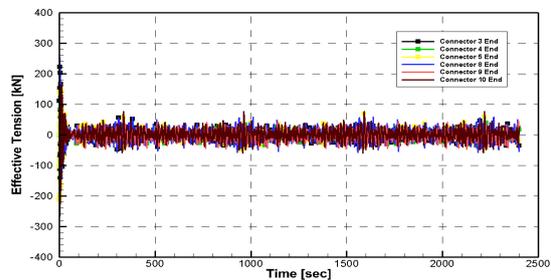


Fig. 7 Time series of Effective Tension of Connectors laid Y-axis Parallel with 4 Mooring Lines

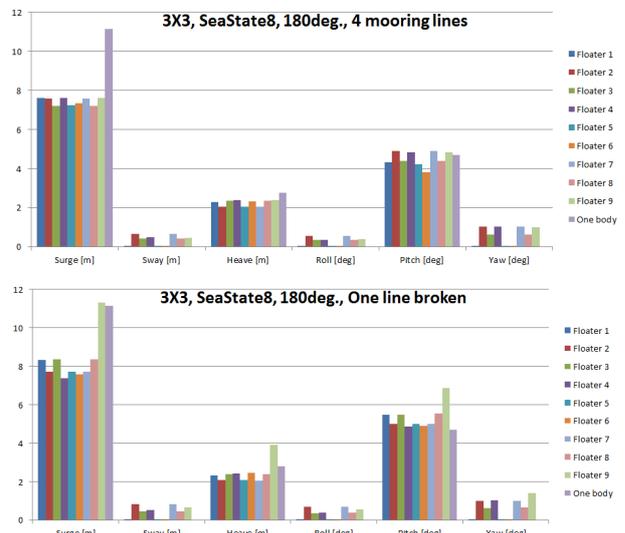


Fig. 8 Significant Double Amplitude of Floater Motions for 3×3 Square Array with 4 Mooring Lines Case(Upper), One line failure Case(Lower)

마지막으로 4개의 선형장력 계류선이 모두 설치된 경우(Fig. 8 Upper graph)와 9번 부유체에 설치한 계류선이 파단되었을 시에 대해 해석한 경우(Fig. 8 Lower graph)를 비교하였다.

먼저 위 그래프를 Fig. 3과 비교했을 시 전후운동이 약 1.0m 감소하였다. 반면, 상하운동과 종동요운동은 다소 증가하였으나 그 값이 미미하다. 이는 부유체보다 연결체가 더 많이 늘어남에 따라 나타난 변화로 추정된다. 또한 가운데 선상의 부유체들은 대칭적인 배치로 인해 좌우운동이 거의 발생하지 않음을 확인하였다.

Fig. 8의 위 그래프와 아래 그래프를 비교하였을 시, 9번 부유체의 surge, heave, pitch가 계류선 파단으로 인해 눈에 띄게 증가했음을 알 수 있으며 이로 인해 다른 부유체들의 운동도 변화하였으나 그 크기는 크지 않은 것으로 확인되었다.

5. 결론

본 논문에서는 시간영역 다수 부유체 운동시뮬레이션 기법을 이용하여 탄성 연결체와 선형장력 계류선이 설치된 해상풍력발전단지의 파랑 중 운동응답 및 연결체 구조해석을 수행하여 단독 부체와의 성능을 비교함으로써 부유식 해상풍력발전단지의 기술적 가능성을 검토하였다. 2X2, 3X3 두 가지 정사각형 배치에 대해 Survival Condition에서 해석이 수행되었으며 특히 3X3의 경우 한 계류선이 영구적으로 파단된 경우에 대해서도 수치적 검토가 이루어졌다.

- (1) 2X2 배열의 해석 결과, 전후 운동이 단독 부유체 운동에 비해 약 25% 감소하였고, 다른 운동의 경우 비슷한 값이 도출되었다. 연결체와 선형장력 계류선과의 연성으로 인한 좌우로의 운동영향은 미미한 것으로 나타났다.
- (2) 3X3 배열의 해석 결과, 정성적으로는 2X2 배열의 계산과 유사한 결과가 나왔으며, 더 많은 연결체의 설치로 인해 전후운동이 소폭 감소하였다. 이로부터 대단위 부체의 경우 각 부체의 운동감소를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.
- (3) 영구적인 4번 선형장력 계류선의 파단 시에도 전체적인 성능 변화는 크지 않은 것으로 나타났다.
- (4) 시간영역 다수 부유체 운동시뮬레이션 기법을 이용하여 탄성 연결체와 선형장력 계류선이 설치된 해상풍력발전단지의 파랑 중 운동응답 및 연결체 구조해석을 수행하여 대형 부유식 해상풍력발전 단지 설계해석기술이 개발되었으며 단지를 구성하는 부체의 성능은 단독 부체에 비해 우수한 것으로 평가되었다.

후 기

본 연구는 선박해양플랜트연구소의 주요연구사업인 "SPAR 연계형 지지구조물 기술개발"의 성과 중 일부임을 밝힙니다.

참 고 문 헌

Hong S.Y., Hong S.W., Nam B.W. and Kim Y.H.(2012), "Design and Analysis of an Array of Floating Wind Turbine Structures", Proc. of the ISOPE-PACOMS, Vladivostok, Russia.

Jonkman J.(2010), "Definition of the Floating System for Phase IV of OC3", NREL/TP-500-47535.

Kim B.W., Sung H.G., Hong S.Y. and Jung H.J.(2010), "Finite Element Nonlinear Analysis for Catenary Structure Considering Elastic Deformation", J. Computer Modeling in Engineering & Science, Vol 63, No 1, pp 29-45.

김윤호, 홍사영, 남보우, 홍석원(2012), "강체 연결체를 고려한 복수 Spar형 부유체의 거동 해석", 한국해양공학회 2012년도 추계학술대회, pp 89-93.

김진하, 홍사영, 김현조 (2013), "부유식 해상풍력플랫폼의 형상설계에 대한 운동 및 가속도 응답의 비교 연구", 한국해양과학기술협의회 공동학술대회.



홍 사 영

- 1960년생
- 1994년 서울대학교 조선해양공학과 박사
- 현 재: 선박해양플랜트연구소 책임연구원
- 관심분야: 부유체동역학, 해양플랜트, 계류시스템
- 연 락 처: ****-****-****
- E-mail: sayhong@kriso.re.kr



김 윤 호

- 1984년생
- 2012년 서울대학교 조선해양공학과 석사
- 현 재: 선박해양플랜트연구소 연구원
- 관심분야: 다물체 연성해석, 계류시스템
- 연 락 처: ****-****-****
- E-mail: yunhokim@kriso.re.kr



남 보 우

- 1979년생
- 2006년 서울대학교 조선해양공학과 석사
- 현 재: 선박해양플랜트연구소 선임연구원
- 관심분야: 부유체동역학
- 연 락 처: ****-****-****
- E-mail: bwnam@kriso.re.kr



홍 석 원

- 1954년생
- 1988년 미시간대학교 응용역학 박사
- 현 재: 선박해양플랜트연구소 책임연구원
- 관심분야: 해양플랜트, 해양에너지
- 연 락 처: ****-****-****
- E-mail: swhong@kriso.re.kr