동수력학 해석 기반 부유식 해양 플랫폼의 동적 운동 및 계류력 산정

차주환* · 문창일** · 송창용*

*목포대학교 해양시스템공학과

**목포대학교 대학원 선박해양공학과

Estimation of Dynamic Motions and Mooring Forces for Floating Type Offshore Platform Based on Hydrodynamic Analysis

Ju-Hwan Cha*, Chang-Il Moon** and Chang Yong Song*

*Dept. of Ocean Engineering, Mokpo National University, Jeonnam, Korea

**Dept. of Naval Architecture and Marine Engineering, Graduate School of Mokpo National University, Jeonnam, Korea

KEY WORDS: Floating type offshore platform 부유식 해양 플랫폼, Hydrodynamic motion 동수력학적 운동, Dynamic load 동적하중, Mooring line 계류선, RAO (Response Amplitude Operators) 진폭응답함수

ABSTRACT: This paper deals with numerical analyses in the context of estimations of hydrodynamic motions and dynamic loads for a floating type offshore platform using some exclusive simulation code such as code for the simulation of a floating type of offshore crane based on multi-body dynamics, along with the commercial code AQWA. Verifications of numerical models are carried out by comparing the RAO results from the simulation code. In the verification analyses, hydrodynamic motions are examined in the frequency domain for the floating type offshore platform according to the mooring lines. Both the hydrodynamic motions and dynamic loads are estimated for floating type offshore platforms equipped with the catenary type and taut mooring lines. A review and comparison are carried out for the numerically estimated results. The structural safety of the connection parts in an offshore structure such as a floating type offshore platform is one of the most important design criteria in view of fatigue life. The dynamic loads in the connecting area between a floating type offshore platform and its mooring lines are estimated in detail according to variations in the mechanical properties of the mooring lines. The dynamic tension load on the mooring lines is also estimated.

1. 서 론

최근 화석연료의 고갈과 환경오염으로 지속 가능한 청정에너지원의 필요성이 높아짐에 따라 태양광, 풍력, 조력, 조류 등 다양한 신재생에너지의 실용화 연구가 가속화 되고 있다. 현재 유럽의 신재생에너지 선진국인 독일, 스페인, 덴마크, 영국에서는 신재생에너지 총발전량 중 풍력이 80% 이상을 차지하고 있으며(이준신 등, 2011), 특히 경제성이 높은 것으로 알려진 해상풍력발전에 대한 관심이 높아지고 있다. 해상풍력발전은 규모의 경제성과 높은 에너지 밀도를 위해 원해지역 설치 및 대단위 발전단지 건설에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

원해지역에 설치가 가능한 해상풍력발전기는 부유식 해양구조물에 풍력발전기를 결합하는 형태이며 Spar, TLP(Tension leg platform), Barge 등의 하부구조물 형식의 유용성이 높은 것으로 알려져 있고, 이중에 현수선(Catenary) 형식의 계류선이 주로 적용되는 부유식 Barge 구조물은 동수력학 운동응답이 복잡하고 복원안정성을 향상시키기 위해 밸러스트(Ballast) 탱크가 필요하나 다양한 수심에서 적용가능하며 앵커(Anchor) 비용이 저렴한 장점이 있어 사용빈도가 높은 해양구조물이다(Musial et al., 2004). 한

편, TLP는 과하중이 최소화되고 운동응답이 단순화되는 구조이지만 앵커의 비용이 비싸고 적용 수심이 한정적인 특징이 있다. 이러한 해양구조물을 안정적으로 설치 및 운용하기 위해서는 설계단계에서 동수력학적 응답 해석을 통한 운동 안정성과 동적하중을 검토하는 것이 중요하며, 관련되어 많은 연구들이 수행되어 오고 있다.

기존의 운동좌표계를 개선한 운동방정식을 정식화 하고, 구조감쇠와 정수압 복원력을 고려한 탄성응답해석을 통하여 TLP의 장력변동, 운동 및 구조내력의 응답산정에 대한 연구가 수행되어졌다(구자삼 등, 1995; 1996). 기존의 탄성응답해석법을 기반으로 인장계류식 해양구조물의 실험모델에 대한 운동, 장력응답을 실험결과와 비교평가하고 굽힘강성의 변화에 따른 동적응답 특성을 평가한 연구도 수행되어졌다(이창호와 손영길, 1998). 기존에 연구되었던 3차원 특이점 분포법과 탄성응답해석법을 결합하여 유체력 및 구성 부재간의 유체역학적 상호 간섭을 고려 할 수 있는 유탄성해석법을 기반으로 인장계류식 해양구조물에 대해서 규칙파와 불규칙파 중에서의 운동응답을 구하는 연구가 수행되어졌다(이창호 등, 1998; 하영록 등, 2010). 시간영역 불규칙파 중에서 선형과 비선형파강제력을 고려하여 ISSC TLP 실선에 대한 비

선형 운동응답 및 변동장력 응답 특성의 연구와 시간영역에 대해서 기억효과 함수를 사용하여 초대형 부유식 해양구조물의 유탄성 응답해석에 대한 연구도 수행되어졌다(이호영과 신현경, 2000; 이창호와 김철현, 2006). 부유식 해상풍력발전기에 대한 동적운동 및 하중응답에 대한 연구와 관련해서 장진석과 손정현(2011)은 인장계류식 해상풍력발전기를 다물체 동역학해석 기법을 이용하여 부유식 해상풍력발전시스템을 모델링 하고 풍하중과 파랑하중을 고려하여 전후동요(Surge) 방향으로 풍하중 및 파랑 하중이 가해 질 경우에 대해서 플랫폼 방식에 따른 풍력발전기의 거동 특성을 분석하였다. Jonkman and Buhl (2007)은 5MW급 부유식 해상풍력발전기에 대해서 Aero-hydro-servo-elastic 응답을 결합한 시뮬레이션 기법을 개발하고 Quasi-static mooring system module을 사용하여 계류삭에 대한 인장을 고려하고 주파수 및 시간 영역에서 플랫폼의 동적 거동 특성을 분석하였다.

본 논문에서는 부유식 해상풍력발전기의 동적운동 및 하중 응답 해석에 대한 초기 연구로서 5 MW급 풍력발전기를 설치할 수 있는 부유식 해양 플랫폼에 대한 주파수 영역에서 계류삭 특성에 따른 응답해석의 수치적 연구를 수행하였다. 부유식 해양 플랫폼의 동적운동 응답해석을 위해서 다물체 동역학해석 기반의 부유식 해상 크레인 시뮬레이션을 위해 개발된 전용 코드를 응용하여 적용하였고 상용 코드인 AQWA를 병행하여 사용하였다(Cha et al., 2010; Lee et al., 2010; ANSYS, 2010). 현재까지 개발된 코드에는 계류삭의 거동이 현수선의 운동특성함수로 정의되어 있기 때문에 계류삭의 다양한 기계적·기하학적 특성을 고려할 수 있는 상용 코드와의 비교검토가 필요하였다. 동적운동 응답과 관련하여 부유식 해양 플랫폼에 계류삭 설치 유무에 따라 동적운동 특성을 검토하였다. 계류삭의 특성에 따른 동적운동 및 하중의 특성을 검토하기 위하여 현수선 형식의 계류삭과 선형장력(Linear taut) 형식 계류삭을 각각 적용하여 응답해석을 수행하였으며, 계류삭의 인장강성 변화에 따른 응답특성을 검토하였다.

2. 운동방정식 및 동수력학적 힘

본 장에서는 계류삭이 설치된 부유식 해양 플랫폼의 동수력학 해석을 위해 사용된 이론에 대해서 간략하게 정리하였다(Cha et al., 2010; Faltinsen, 1990; Lee et al., 2010; ANSYS, 2010). 파도에 따른 구조물의 진폭 응답함수는 아래와 같은 주파수 영역에서의 운동 방정식으로부터 계산된다.

$$[-\omega^2(M_s + M_a(\omega)) - i\omega C(\omega) + K]X(\omega) = F_{Hydrostatic}(q, t) + F_{Hydrodynamic}(\dot{q}, t) + F_{Mooring}(q) \quad (1)$$

$$\text{Added mass \& damping : } \omega^2 M_{aij}(\omega) + i\omega C_{ij}(\omega) = \iint_{s_b} n_i \left(i\omega + U \frac{\partial}{\partial x} \right) \phi_j ds \quad (2)$$

$$\text{Hydrodynamic stiffness : } K_{ij} = -\rho g \iint_{s_b} n_i \omega_j ds \quad (3)$$

여기서 ω 는 파 주파수, M_s 는 구조체의 질량, M_a 는 부가수 질량,

C 는 감쇠, K 는 정수역학적 강성, $F_{Hydrostatic}(q, t)$ 는 정수역학적 힘, $F_{Hydrodynamic}(\dot{q}, t)$ 는 동수력학적 힘, $F_{Mooring}(q)$ 는 계류력, n 는 침수 표면의 접선벡터, U 는 파의 속도, ϕ_j 는 파도에 의한 6 자유도 운동의 속도 포텐셜, ρ 는 물의 밀도, g 는 중력가속도를 각각 나타낸다.

매 단위시간마다 변하는 부유식 해양 플랫폼의 자세와 파고를 고려하여 정수역학적 힘은 다음과 같이 계산된다.

$$F_{Hydrostatic}(q, t) = \rho g \left[0; 0; \int_{V_s(q, t)} dV; \int_{V_s(q, t)} y_{Buoyancy} dV; - \int_{V_s(q, t)} x_{Buoyancy} dV; 0 \right]^T \quad (4)$$

여기서 q 는 매 단위시간마다 변하는 플랫폼의 자세이고, V_s 는 플랫폼의 자세와 파고를 고려한 침수 부피를 나타낸다. $x_{Buoyancy}$, $y_{Buoyancy}$ 는 수선면을 원점으로 하는 부력 중심의 x , y 위치이다.

플랫폼에 작용하는 동수력학적 힘은 시간 영역에서의 3D Rankine panel method를 사용하여 적용한다. 파도에 의한 속도 포텐셜 ϕ 를 입사파에 의한 속도 포텐셜 ϕ_i 와 산란에 의한 속도 포텐셜 ϕ_d 로 구분하였으며, 아래의 Laplace 방정식을 만족한다.

$$\nabla^2 \phi = 0, \quad \phi = \phi_i + \phi_d \quad (5)$$

입사파에 의한 속도 포텐셜 ϕ_i 에 의한 Froude-krylov 힘은 파고를 고려한 정수역학적 힘에서 고려하였으며, 이 때 자유수면 경계 조건, 바닥 경계 조건, 물체 경계 조건을 사용하여 위의 Laplace 방정식을 만족하는 산란에 의한 속도 포텐셜 ϕ_d 이 계산된다. 방사 조건은 아래와 같이 수치적인 감쇄 방법이 사용된다.

$$\frac{\partial \eta_d}{\partial t} = \frac{\partial \phi_d}{\partial z} - 2\nu \eta_d + \frac{\nu^2}{g} \phi_d \quad (6)$$

여기서 ν 는 방사 조건 계수이고, η_d 는 산란에 의한 파도의 진폭이다. 산란에 의한 속도 포텐셜은 3D Rankine source, G와 제 2종 Fredholm 적분 방정식을 사용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\phi_d = \iint_{S_{Body}} \left(\phi_d \frac{\partial G}{\partial n} - G \frac{\partial \phi_d}{\partial n} \right) dS + \iint_{S_f} \left(\phi_d \frac{\partial G}{\partial n} - G \frac{\partial \phi_d}{\partial n} \right) dS \quad (7)$$

$$G(x, x') = \frac{1}{4\pi} \frac{1}{|x - x'|} \quad (8)$$

또한 수치적 안정성을 위해 무한 주파수 부가 질량 $M(\infty)$ 을 사용해야 하며, 이를 적용한 최종적인 동수력학적 힘은 다음과 같이 계산된다.

$$F_{Hydrodynamic}(\dot{q}, t) = \left[- \iint_S \frac{\partial \phi_d}{\partial t} n dS; - \iint_S \frac{\partial \phi_d}{\partial t} (x \times n) dS \right]^T + M(\infty) a_i \quad (9)$$

여기에서 x 는 물체 고정 좌표계에 대한 침수표면 상에 임의의 위치에 대한 위치벡터이고, a_i 는 이전 시간에서의 플랫폼의 가속도이다.

계류력은 계류삭을 현수선 곡선으로 가정하여 다음과 같이 계산하였다.

$$F_{Mooring}(q) = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^n T_{H,k}(q) \cos \psi_k; \sum_{k=1}^n T_{H,k}(q) \sin \psi_k; \\ 0; \sum_{k=1}^n T_{H,k}(q) (x_k \sin \psi_k - y_k \cos \psi_k) \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

여기에서 $T_{H,k}$ 는 k 번째 계류삭에 작용하는 수평 방향 힘이며, ψ_k 는 플랫폼의 x 축과 k 번째 계류삭 사이의 수평 각도이고, x_k , y_k 는 k 번째 계류삭이 부유체와 연결된 지점의 x , y 지점의 위치이다.

3. 동적 운동 및 하중해석

3.1 해석 모델 및 조건

본 연구에서 동적 운동 및 하중해석을 위해서 5 MW급 부유식 해상풍력발전기를 설치할 수 있는 단순화된 해양 플랫폼을 해석모델로 사용하였으며, 주요목은 Table 1에 나타나 있다.

Table 1 Principal dimensions of offshore platform

Width × Length × Height	40 m × 40 m × 10 m
Draft; Freeboard	4 m; 6 m
Water displacement	6000 m ³
Mass including ballast	6,560,000 kg
Center of mass (CM) below still-water-line	0.323 m
Roll inertia about CM	726,900,000 kg·m ²
Pitch inertia about CM	726,900,000 kg·m ²
Yaw inertia about CM	1,463,900,000 kg·m ²
Anchor depth	150 m
Max. allowed frequency	3.205 rad/s
Number of nodes	13,536
Wave direction	-180°
Forward speed	1.0E-13
Separation between opposing anchors	834 m

계류삭 특성에 따른 동적 응답특성의 비교검토를 위하여 계류삭 형태는 현수선 형식의 계류삭과 선형장력 형식 계류삭을 동일한 플랫폼에 각각 적용하여 해석모델을 구성하였으며 Fig. 1에 그 형상을 나타내었다. 계류된 플랫폼들의 동적 운동이 유사한 특성으로 나타나도록 현수선 형식의 모델은 묘박 기준위치(Anchoring reference position)로부터 45° 간격으로 8개의 계류삭을 적용하였고, 선형장력 형식 모델은 90° 간격으로 4개의 계류삭을 각각 사용하였다. 또한, 적용된 계류삭의 재료는 폴리에틸렌 로프와 강철 와이어를 혼용하여 구성되었으며 물성치 및 해양 플랫폼의 기하학적 중심점을 기준으로 한 묘박 기준위치는 Table 2에 기술되어 있다.

해석을 위해 적용된 파도는 선형파(Linear wave)이며 파도 조건은 Table 3에 나타나 있다. Table 3에서의 Head sea의 방향은 Fig. 1 (a)의 x 방향 좌표계를 기준으로 설정된 값이다.

Table 2 Mechanical properties of mooring line

Number of mooring lines	8 (Catenary type); 4 (Linear taut)
Line extensional stiffness	589,000,000 N/m
Line diameter	0.0809 m
Mass density of line	130.4 kg/m ³
Line length	473.3 m (Catenary type); 294 m (Linear taut)
Max. tension	100,000 N
Coordinates of anchoring reference points	(a) : 160 m, -380 m, -150 m (x, y, z) (b) : -200 m, -200 m, -150 m (x, y, z)

Table 3 Wave conditions

Anchor Depth	150 m
Wave Direction	-180° (head sea)
Frequency Range	0.1 ~ 3.204 rad/s
Amplitude	1 m
Wave Type	Airy Wave

(a)

(b)

Fig. 1 Catenary type (a) and linear taut (b) moored offshore platforms

Fig. 2 Hydrodynamic added mass and damping

3.2 부유체 운동 RAO 분석

식 (1)에 나타난 바와 같이 동수력학적 부가수 질량과 감쇠의 산정은 동적 운동응답의 정확도에 많은 영향을 주기 때문에, 플랫폼의 6자유도 운동모드에 대한 동수력학적 부가수 질량과 감쇠를 Fig. 2에 나타내었다. 해석에서 조류나 전진 속도가 고려되지 않았고 해석모델로 사용된 해양 플랫폼이 대칭성을 갖고 있기 때문에 Fig. 2에 나타난 바와 같이 전후동요 모드와 좌우동요(Sway) 모드의 부가수 질량과 감쇠는 동일하게 나타난다. 또한 횡동요(Roll) 모드와 종동요(Pitch) 모드도 동일한 이유로 인해서 부가수 질량과 감쇠는 동일한 결과를 보여준다. 감쇠의 영향은 주파수가 0에 가깝거나 무한대로 증가할수록 거의 소멸되는데 이러한 특성은 기존의 이론에 부합하는 것임을 알 수 있다(Faltinsen, 1990; Newman, 1997). 동수력학적 부가수 질량과 감쇠 결과의 타당성과 관련하여 본 연구에서 사용한 해양 플랫폼 모델과 유사한 사양을 지닌 기존의 연구논문 결과(Jonkman and Buhl,

2007)를 검토하였으며 유사함을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 2장에서 기술된 이론을 기반으로 동적 운동응답 해석을 위해 개발된 코드를 이용하여 계류삭 유무에 따른 운동 특성을 검토하였다. 현재까지 개발된 코드는 현수선 형식의 계류삭만 고려할 수 있기 때문에 계류삭 유무에 따른 운동 해석결과는 현수선 형식에 대해서만 비교하였다. 동적 운동응답은 주파수 영역에서의 RAO(Response Amplitude Operators) 결과를 산정하였으며 개발된 코드의 타당성을 검토하기 위하여 상용 동수력학 해석 프로그램인 AQWA version 13 (ANSYS, 2010)을 이용하여 동일한 조건에 대해서 해석을 수행하여 결과를 비교하였다. 동적 응답결과는 6개 운동모드 중에 계류삭이 고려되지 않은 경우에 대해서 상하동요(Heave)와 종동요에 대한 결과를 Fig. 3에 나타내었고, 계류삭이 고려된 경우에는 전후동요, 상하동요 그리고 종동요에 대한 결과를 Fig. 4에 각각 나타내었다. Fig. 3과 4에 나타내지 않은 운동모드의 응답들은 크기가 매우 작거나 무한대의 운동

Fig. 3 Hydrodynamic motion responses without mooring lines

Fig. 4 Hydrodynamic motion responses with mooring lines

을 특성을 나타내는 응답들이다.

Fig. 3과 4에 나타난 바와 같이 개발된 동적 운동응답 해석 코드의 결과와 AQWA의 결과가 잘 일치함을 알 수 있다. 그러나 계류사를 고려한 경우에서 전후동요 운동의 결과가 AQWA의 결과와 차이가 발생하였다. 이러한 차이는 개발된 코드에서 정의된 계류사의 개별 운동특성함수를 전체의 특성으로 합산하여 고려하는 방식으로 운동특성을 계산한 반면에 AQWA는 계류사의 탄성 재료거동을 추가적으로 수치계산에서 고려하기 때문에 발생한다. 따라서 전후동요와 같이 계류사의 영향도가 큰 운동의 경우에는 AQWA의 결과가 실제 현상에 더 가깝게 표현될 수 있다.

또한 Figs. 3 (a) ~ (b)와 Figs. 4 (b) ~ (c)에 나타난 바와 같이 계류사 유무에 따른 상하동요와 종동요 응답의 특성이 거의 유사하게 나온 이유는 해석에 사용한 파도조건이 현수선 형식의 계류사의 운동에 큰 영향을 주지 못했기 때문으로 판단된다. 본 연구에서는 현재의 파도조건을 기준으로 Fig. 1에 나타난 2가지 형식의 계류사에 대해서 운동응답의 특성을 비교하였다. 현재 개발된 코드가 현수선 형식만 고려할 수 있기 때문에 계류 형식 변화에 따른 동적 운동검토는 계류사의 특성을 좀 더 실제적으로 표현할 수 있는 AQWA를 사용하였으며, Fig. 5에 산출된 결과를 도시하였다.

Fig. 5 Hydrodynamic motion responses for mooring types

Fig. 6 Line extensional stiffness effect on hydrodynamic motion responses for mooring types

(e) Heave motion for linear taut type mooring

(f) Pitch motion for linear taut type mooring

Fig. 6 Line extensional stiffness effect on hydrodynamic motion responses for mooring types (continued)

(a)

(b)

Fig. 7 Mooring line number for catenary type (a) and linear taut (b) moored offshore platforms

Fig. 5에 나타난 바와 같이 상하동요 운동은 계류형식의 변화에 영향이 없는 것으로 나타났으나, 전후동요 운동에서는 응답의 크기가 상당히 차이가 나는 것을 알 수 있다. 이는 선형장력 계류형식이 인장계류와 거의 유사한 형태로 전후동요 운동을 억제하기 때문이다. 또한 종동요 운동과 같은 회전방향의 운동에서는 선형장력 형식의 계류사를 적용한 경우 운동의 크기가 줄어들음을 확인할 수 있다. 계류사는 사용기간에 따라 강성과 같은 기계적 특성치가 변할 수 있으며, 이러한 변화는 운동응답 특성의 변화를 발생시킬 수 있다. 계류사의 강성의 영향도와 관련하여, 계류사의 인장강성 (Line extensional stiffness)의 변화가 계류 형태 별로 미치는 영향을 검토하기 위해서 인장강성이 20%로 감소된 경우의 운동응답을 산정하여 감소 전의 결과와 비교하여 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6에 나타난 것처럼 현수선 형식의 계류사가 설치된 해양 플랫폼의 운동응답은 인장강성의 변화에 대한 영향이 크지 않지만, 선형장력 형식 계류사로 고려된 경우에는 전후동요와 종동요 운동의 응답이 0.5 ~ 1.0 rad/s 주파수 대역에서 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 선형장력 형식 계류사가 설치된 해양 플랫폼에서는 인장강성이 감소될 경우에 전후동요와 종동요 운동의 최대응답 주파수가 계류사의 인장강성이 감소되기 전의 최대응답 발생 주파수보다 지연되어 나타나는 현상이 발생한다.

3.3 계류사 인장력 RAO 분석

계류된 부유식 해양 플랫폼은 파도에 의한 주기적인 힘을 받게 되는데, 계류사가 부유식 플랫폼의 위치를 유지시키는 과정에서 계류사와 연결된 부위에 반복적인 동적하중이 작용하게 된다. 따라서 파도에 의한 부유식 플랫폼의 동적운동을 고려하여 계류사가 연결된 위치에서의 동적하중 산정은 구조적 안전성 검토를 위해 면밀하게 검토되어야 한다. 본 연구에서는 동적 운동해석에서 사용된 동일한 해석모델의 계류사 연결부위에 대하여 계류형식과 계류사의 인장강성변화에 따른 동적하중의 특성을 검토하였다. Fig. 7에는 계류사의 번호를 부여한 상태를 나타내었으며, 동적 하중에 대한 결과는 1번 계류사 연결위치에 대해서 산정하여 검토하였다.

동적 하중해석 산정은 AQWA를 사용하였으며, 해석을 위한 파고의 조건은 동적 운동해석에 사용된 조건과 동일하다. 동적 하중해석결과는 현수선과 선형장력 형식 계류사에 대해서 계류사와 플랫폼 연결부의 3축 방향의 하중과 계류사의 인장하중을 주파수 대역에서 각각 산정하여 검토하였으며, 계류사의 인장강성의 변화가 계류 형태 별로 동적하중에 미치는 영향을 검토하기 위해서 인장강성이 20%로 감소된 경우의 하중을 산정하여 감소 전의 결과와 비교하여 Fig. 8에 나타내었다.

(a) x-direction force for catenary type

(b) y-direction force for catenary type

(c) z-direction force for catenary type

(d) tension force for catenary type

(e) x-direction force for linear taut type

(f) y-direction force for linear taut type

(g) z-direction force for linear taut type

(i) tension force for linear taut type

Fig. 8 Mooring forces for offshore platforms

Fig. 8에 나타난 것처럼 계류사의 기하학적인 특징으로 예상할 수 있듯이 선형장력 형식의 플랫폼 연결부에서의 하중이 현수선 형식보다 크게 발생하였다. 현수선 형식의 플랫폼 연결부에서의 하중은 1.0 rad/s의 주파수에서 최대하중이 발생하는 가우스분포 함수와 유사한 형태로 나타났다. 반면 선형장력 형식의 플랫폼 연결부에서의 하중은 지수적으로 감소하는 형태로 나타났다. 플랫폼의 형상과 계류사 배치에 모두 대칭이기 때문에 Fig. 8 (a)와 (b), (e)와 (f)의 결과는 동일한 것으로 나타났다. 계류사의 인장강성 변화의 영향과 관련하여, 현수선 형식에서는 z 방향의 하중의 크기 변화가 거의 없는 반면 선형장력 형식에서는 z 방향 하중의 변화가 크게 나타났다. 이와 같이 인장강성 변화에 따라서 하중의 방향 별 영향도가 계류형식 별로 다르게 나타날 수 있음을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 부유식 해상풍력발전기의 동적운동 및 하중 응답해석에 대한 초기 연구로서 동수력학적 해석을 기반으로 5 MW급 풍력발전기를 설치할 수 있는 계류된 부유식 해양 플랫폼의 계류형태와 계류사의 인장강성 변화에 따른 동적 운동응답과 동적하중의 특성을 연구하였으며 이로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 현수선 계류사를 적용하여 동수력학적 운동응답을 해석할 수 있도록 개발된 코드와 관련하여 부가수 질량과 감쇠의 산정 결과는 기존 연구 결과와 유사한 것으로 나타났고 플랫폼의 운동 방향별 RAO 결과는 AQWA와의 결과와 유사하게 나타났다. 계류사의 거동이 현수선의 운동특성함수로 정의된 현재까지 개발된 코드는 상용코드의 결과와의 비교로부터 계류상태에 대한 좀 더 정확한 운동특성을 산출하기 위해서 계류사의 기계적 특성의 적용이 필요함을 확인할 수 있다. 저자들은 다양한 형태의 계류사 적용과 계류하중 산출이 가능하도록 추가적인 연구를 수행할 예정이다.

(2) 계류형식에 따라 전후동요 운동에서는 응답의 크기가 상당히 차이가 나는 것을 확인할 수 있었으며, 특히 선형장력 계류형식이 인장계류와 거의 유사한 형태로 전후동요 운동을 억제하는 현상이 크게 나타났다. 종동요 운동과 같은 회전방향의 운동에서도 선형장력 형식의 계류사를 적용한 경우 운동의 크기가 줄어들음을 확인할 수 있다. 또한 동적하중의 결과는 하중의 크기뿐만 아니라 주파수 대역별 하중의 분포형태에서도 큰 차이를 보임을 확인할 수 있다.

(3) 계류사의 인장강성의 변화에 따른 동적 운동응답의 영향도와 관련하여 현수선 형식의 계류사가 적용된 경우 영향도가 크게 나타나지 않은 반면에 선형장력 형식 계류사로 고려된 경우에는 전후동요와 종동요 운동의 응답이 주파수 대역 별로 차이가 발생하는 것으로 나타났고, 인장강성이 감소될 경우에 전후동요와 종동요 운동의 최대응답 주파수가 계류사의 인장강성이 감소되기 전의 최대응답 발생 주파수보다 지연되어 나타나는 현상이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한 동적하중 결과로부터 계류사의 인장강성 변화에 따라서 하중의 방향 별 영향도가 계류형식 별로 다르게 나타날 수 있음을 확인할 수 있다.

(4) 추후 풍력발전기의 기구동역학 해석을 통해 산출된 동적외력을 고려하여 계류형태에 따른 동적 운동응답과 동적하중에 대한 특성을 연구할 예정이며, 이러한 연구를 통하여 부가적 동적외력 효과를 정량적으로 평가할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 논문은 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 광역경제권 선도산업 인재양성사업과 2012년도 목포대학교 중형조선산업 지역혁신센터(RIC)에 의하여 지원된 연구결과입니다.

참 고 문 헌

- 구자삼, 김진하, 이창호 (1995). "인장계류식 해양구조물의 동적 응답 특성 (I)", 한국해양공학회지, 제9권, 제1호, pp 161-172.
- 구자삼, 박찬후, 이창호 (1996). "인장계류식 해양구조물의 동적 응답 특성 (II)", 한국해양공학회지, 제10권, 제1호, pp 25-35.
- 이준신, 강금석, 방병목, 원영진, 김봉기, 안남성 (2011). "국내 해상풍력발전현황 및 방향성 분석", 풍력에너지저널, 제2권, 제1호, pp 6-14.
- 이창호, 구자삼, 조효제, 홍봉기 (1998). "불규칙파중의 인장계류식 해양구조물의 비선형 응답 해석", 한국해양공학회지, 제12권, 제2호, pp 33-42.
- 이창호, 김철현 (2006). "다방향 불규칙파중의 인장계류식 해양구조물의 시간영역 해석", 한국해양공학회지, 제29권, 제5호, pp 36-41.
- 이창호, 손영길 (1998). "인장계류식 해양구조물의 동적응답 특성", 한국동력기계공학회지, 제2권, 제2호, pp 81-86.
- 이호영, 신현경 (2000). "시간영역에서 초대형 부유식 해양구조물에 대한 유탄성 응답 해석", 한국해양공학회지, 제14권, 제3호, pp 29-34.
- 장진석, 손정현 (2011). "해상 부유식 풍력 타워의 동적거동해석", 대한기계학회논문집 A권, 제35권, 제1호, pp 77-83.
- 하영록, 이승철, 구자삼 (2010). "규칙파 중 TLP의 유탄성응답 해석", 한국동력기계공학회지, 제14권, 제2호, pp 48-54.
- Cha, J.H., Roh, M.I. and Lee, K.Y. (2010). "Dynamic Response Simulation of a Heavy Cargo Suspended by a Floating Crane Based on Multibody System Dynamics", Ocean Engineering, Vol 37, No 14-15, pp 1273-1291.
- Faltinsen, O.M. (1990). Sea Loads on Ships and Offshore Structures, University of Cambridge, London.
- Jonkman, J.M. and Buhl, M.L. Jr. (2007). "Development and Verification of a Fully Coupled Simulator for Offshore Wind Turbines", 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Wind Energy Symposium, Reno, Nevada.
- Lee, K.Y., Cha, J.H. and Park, K.P. (2010). "Dynamic Response of a Floating Crane in Waves by Considering the Nonlinear Effect of Hydrostatic Force", Ship Technology

- Research, Vol 57, No 1, pp 62-71.
 - Musial, W., Butterfield, S. and Boone, A. (2004). "Feasibility of Floating Platform Systems for Wind Turbines", 23rd ASME Wind Energy Symposium, Reno, Nevada.
 - Newman, J.N. (1997) Marine Hydrodynamics, The MIT Press, Cambridge, MA, USA.
 - ANSYS (2010). AQWA User's Manual Version 13.
-
- 2012년 1월 25일 원고 접수
2012년 4월 9일 심사 완료
2012년 4월 19일 게재 확정