

다양한 형상의 Jack-up Leg에 대한 해양 동역학적 수치해석

김지석* · 박민수** · 구원철***

*현대중공업

**한국건설기술연구원

***인하대학교 조선해양공학과

Numerical Analysis of Hydrodynamic Characteristics for Various Types of Jack-up Legs

Ji-Seok Kim*, Min-Su Park** and Weoncheol Koo***

*Hyundai Heavy Industries, Ulsan, Korea

**Structural Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Gyeonggi, Korea

***Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon, Korea

KEY WORDS: Offshore wind turbine installation vessel 해상 풍력 발전기 설치선, Jack-up leg 잭업 레그, Morison equation 모리슨 방정식, Modal analysis 모드해석, Newmark-beta method 뉴마크 베타법, Natural period 고유주기

ABSTRACT: In this study, the hydrodynamic characteristics of various types of jack-up legs for a wind turbine installation vessel were analyzed. Using the modified Morison equation, the wave and current excitation forces on the jack-up legs were calculated. A modal analysis was performed to predict the dynamic responses for various types of jack-up legs. The Newmark-beta time integration scheme was used to solve the equation of motion in waves in the time domain. The maximum displacement and maximum bending stress were computed for four different types of legs, and their results were compared to select an optimum leg type. Finally, a six-leg jack-up rig with the selected optimal legs was modeled, and its natural period and hydrodynamic behaviors were evaluated.

1. 서 론

화석연료의 고갈과 환경오염, 그리고 지속 가능한 에너지원 확보에 대한 관심이 높아지면서, 전 세계적으로 친환경 에너지원에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 풍력 발전은 풍력 에너지의 방대한 보유량과 에너지원 활용의 무한한 성장 가능성으로 많은 주목을 받고 있다. 설치 환경과 대용량 발전에 많은 제약이 존재하는 육상 풍력 발전과는 달리 해상 풍력 발전은 그 잠재성과 활용 면에서 많은 장점을 가지고 있다. 이러한 이유로 해상 풍력 발전기(Offshore wind turbine) 시장은 갈수록 커지고 있으며, 그와 함께 대규모 해상 풍력 발전 단지를 설치하기 위한 해상 풍력 발전기 설치선(Offshore wind turbine installation vessel)의 수요 또한 증가하고 있다. 해상 풍력 발전기 설치선은 수심 60m 이하의 연안에서 사용되는 고정식 발전기 주를 이루고 있다(Lee et al., 2013). 그 중 가장 일반적으로

많이 사용되고 있는 Jack-up 형태의 해상 구조물은 Rack & Chord를 이용한 Jack-up leg의 자동승강(Self-elevating) 시스템을 통하여 선체를 수면 위로 끌어올려 고정시킨 상태에서 발전기 설치 작업을 수행한다. 따라서 해상풍력발전기 설치선의 핵심 부품인 Jack-up leg의 설치를 위해서는 선박의 크기와 하중과 같은 선박 특성과 Jack-up 시스템의 특징, 설치 위치에서의 해상 환경 조건, 지지되는 해저 지질 조건 등을 모두 고려해야 한다(Jang and Choi, 2013).

그러므로 다양한 해상 조건에 따른 Jack-up leg의 해양 동역학적 거동 특성을 정확히 파악하는 것은 구조물 설계에 매우 중요한 요소이다. 그간의 국내외 여러 연구 결과들에서는 Jack-up leg의 과량중 비선형 운동 응답의 정확한 산정 방법(Williams et al., 1998; Cassidy, 1999; Zheng and Liaw, 2004)등에 초점을 맞추어 연구가 진행되었으나, Leg 형상에 따른 운동 거동의 특성파악 및 비교 검토 연구는 거의 없는 실정이다. 따

Received 21 October 2013, revised 18 June 2014, accepted 14 August 2014

Corresponding author Weoncheol Koo: +82-32-860-7348, wckoo@inha.ac.kr

© 2014, The Korean Society of Ocean Engineers

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

라서, 본 연구에서는 다양한 형상의 Jack-up leg에 작용하는 파력과 조류력을 모리슨 방정식(Morison et al., 1950)을 이용하여 계산하였다. 또한 모드해석(Modal analysis)과 뉴마크 베타 시간적분법(Newmark-beta time integration method)를 이용하여 Jack-up leg의 해양 동역학적 특성을 시간영역에서 해석하여, 각 형상별 Leg의 최대 수평 변위와 최대 굽힘 응력을 계산하고 비교하였다. 이를 통해 최적 형상의 Leg를 적용한 Six-leg 형태의 단순화된 해상 풍력 발전기 설치선에 대한 해양 동역학적 특성을 평가하였다.

2. 문제의 정식화

Jack-up leg의 파랑 중 운동응답 해석을 수행하기 위해 구조물의 운동지배방정식은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (1)$$

여기서 $[M]$, $[C]$, $[K]$ 는 각각 질량행렬, 감쇠행렬, 강성행렬을 나타내며, $\{F\}$ 는 외력, $\{u\}$ 는 구조물의 변위벡터를 나타낸다. 해양구조물 해석에서 가장 일반적으로 사용되는 취송류의 속도 프로파일(Wind driven current velocity profile)은 해저면으로부터의 높이에 따라 다음의 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다 (Dawson, 1983).

$$U_{Current}(z) = U_w \left(\frac{z}{h} \right) \quad (2)$$

여기서, z 는 해저면으로부터의 높이, h 는 수심, 그리고 U_w 는 수면에서의 조류 속도를 나타낸다.

본 연구에서는 Jack-up leg에 사용되는 철재 실린더형 파이프(Steel frame)의 특성상 입사파장(λ)에 비해 각 파이프의 지름(D)이 작기 때문에 ($D/\lambda < 0.2$), 파입자와 구조물 변위간의 상호작용을 고려한 수정된 모리슨 방정식을 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다(Stelson and Mavis, 1955).

$$F = (C_M - 1)\rho V(\ddot{v} - \ddot{u}) + \rho V\dot{v} + \frac{1}{2} C_D \rho A |\dot{v} - \dot{u}|(\dot{v} - \dot{u}) \quad (3)$$

여기서, C_M 는 관성계수, ρ 는 해수의 밀도, V 는 구조물의 침수 부피, \ddot{v} 는 파입자의 가속도, \ddot{u} 는 구조물의 가속도, C_D 는 항력계수, A 는 구조물의 파 입사방향의 침수 투영면적, \dot{v} 는 파입자의 속도, 그리고 \dot{u} 는 구조물의 속도를 나타낸다. 본 연구에서는 파입자의 경우 선형파 이론인 Airy wave theory를 사용하였으며, 또한 C_M 는 2.0, C_D 는 1.0을 사용하였다(OCDI, 1999).

구조물에 작용하는 외력은 관성력과 항력으로 구성된 모리슨 방정식을 이용하여 구조물의 각 노드 점에 대한 행렬식으로 표현하여 쓰면 식 (4)과 같다.

$$\{F\} = [C_M]\{\ddot{v}\} - [C_m]\{\ddot{u}\} + [C_D]\{|\dot{v} - \dot{u}|(\dot{v} - \dot{u})\} \quad (4)$$

여기서,

$$[C_M] = [\cdot \cdot \cdot \rho C_M V \cdot \cdot \cdot]$$

$$[C_m] = [\cdot \cdot \cdot \rho (C_M - 1) V \cdot \cdot \cdot]$$

$$[C_D] = \left[\cdot \cdot \cdot \rho C_D \frac{A}{2} \cdot \cdot \cdot \right]$$

식 (4)의 오른쪽 3번째 항은 물입자와 구조물간의 속도차로서 비선형성을 나타낸다. 본 연구에서는 이 같은 비선형성의 영향을 최소화하기 위해 물 입자와 구조물의 상대변위 r 을 대입하여 다음 식 (5)와 같은 운동지배방정식을 유도하였다(Malhotra and Penzien, 1970).

$$\begin{aligned} & [[M] + [C_m]]\{\ddot{r}\} + [[C] + [\widehat{C}_D]]\{\dot{r}\} + [K]\{r\} + \{e\} \\ & = [[M] + [C_m] - [C_M]]\{\ddot{v}\} + [C]\{\dot{v}\} + [K]\{v\} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, $\{e\} = [C_D]\{|\dot{r}\dot{r}\} - [\widehat{C}_D]\{\dot{r}\}$, \widehat{C}_D 는 등가선형항력 계수, 그리고 $r = v - u$ 이다.

식 (5)에서 오차벡터 $\{e\}$ 가 최소가 될 수 있도록 최소자승법(Hartnett and Mullarkey, 1996)을 이용하여 \widehat{C}_D 을 결정함으로써 비선형 감쇠력 항을 근사적으로 선형화할 수 있다. 따라서 등가선형화법에 의해 선형화된 운동방정식은 다음 식 (6)과 같다.

$$[\widetilde{M}]\{\ddot{u}\} + [\widetilde{C}]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = [C_M]\{\ddot{v}\} + [\widehat{C}_D]\{\dot{v}\} \quad (6)$$

여기서,

$$\begin{aligned} [\widetilde{M}] &= [[M] + [C_m]] \\ [\widetilde{C}] &= [[C] + [\widehat{C}_D]] \\ [\widehat{C}_D] &= \left[\sqrt{\frac{8}{\pi}} \sigma_r \right] \end{aligned}$$

σ_r 은 물입자와 구조물의 상대속도(\dot{r}) 표준편차를 나타낸다. 구조물의 동역학적 특성은 구조물의 고유주기와 밀접한 관련이 있으며, 고유값 해석을 통하여 구조물의 고유주기와 진동모드를 구할 수 있다. 모드해석을 수행할 때, 각 모드의 고유벡터 $\{\phi\}_i$ 를 이용하여 구조물의 동역학적 변위 $\{u(t)\}$ 는 다음 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{u(t)\} = [\Phi]\{q\} = \{\phi\}_1 q_1(t) + \{\phi\}_2 q_2(t) \dots + \{\phi\}_N q_N(t) \quad (7)$$

여기서, $[\Phi]$ 와 $\{q\}$ 는 고유값 해석을 통해 구한 모드행렬과 표준 변위 벡터를 나타낸다.

식 (7)을 식 (6)에 대입하여 모달 매트릭스의 전치행렬($[\Phi]^T$)을 양변에 곱하면 다음과 같은 식 (8)을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} [I]\{\ddot{q}\} + [\cdot \cdot (2\beta_j \omega_j) \cdot \cdot]\{\dot{q}\} + [\cdot \cdot \omega_j^2 \cdot \cdot]\{q\} \\ = [\Phi]^T [C_M]\{\ddot{v}\} + [\Phi]^T [\widehat{C}_D]\{\dot{v}\} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, $[I]$ 는 단위행렬이고, ω_j , β_j 는 j번째 모드의 고유진동수와 감쇠계수를 나타낸다.

구조물의 동역학적 특성을 시간영역에서 해석하기 위하여 뉴마크 베타 시간 적분법을 이용하였다. 시간 영역에서의 표준 가속도 벡터 $\{\ddot{q}\}$, 표준 속도 벡터 $\{\dot{q}\}$, 표준 변위 벡터 $\{q\}$ 는 n번째와 n+1번째의 time step에서의 관계식을 다음과 같은 식(9)로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \ddot{q}_{n+1} &= \bar{F} - 2\beta_j \omega \dot{q}_{n+1} - \omega^2 q_{n+1} \\ \dot{q}_{n+1} &= \dot{q}_n + \frac{h}{2} (\ddot{q}_n + \ddot{q}_{n+1}) \\ q_{n+1} &= q_n + h \dot{q}_n + \left(\frac{1}{2} - \gamma\right) h^2 \ddot{q} + \gamma h^2 \ddot{q}_{n+1} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, $\bar{F} = [\Phi]^T [C_M] \{\ddot{v}\} + [\Phi]^T [\hat{C}_D] \{\dot{v}\}$, h 는 각 time step에서의 시간 간격이며, γ 는 가속도 변화에 따른 계수로 본 계산에서는 0.25를 사용하였다.

식(9)을 계산하여 각 모드에서의 진동응답 변위를 구함으로써 입사파에 의한 해양구조물의 운동 응답을 계산할 수 있다 (Stephen and Mark, 1963; Park et al., 2012).

3. 수치 결과 및 분석

3.1 수치계산 검증

본 연구에서는 다양한 형태의 Jack-up leg에 대한 해양 동역학적 수치해석에 앞서 Fig. 1의 단순 형상의 Jack-up 해양구조물(Dawson, 1983)에 대해 수치계산을 수행하고, 상용 프로그램인 SACS(Structural analysis computer system)와 ANSYS ASAS를 이용한 계산 결과와 비교하였다. 정확한 비교를 위하여 두 상용 프로그램 모두 수치계산과 동일하게 Airy wave theory를 적용하여 계산 하였다.

Fig. 2는 구조물의 운동 응답 계산을 위해 사용된 고유벡터의 개수에 따른 노드점 3과 1에서의 최대 변위와 최대 굽힘 응력을 비교한 것이다. 2차항 이상의 고유벡터를 사용할 경우, 계산값이 수렴하는 것을 알 수 있다. 이는 입사파로 인한 해양구조

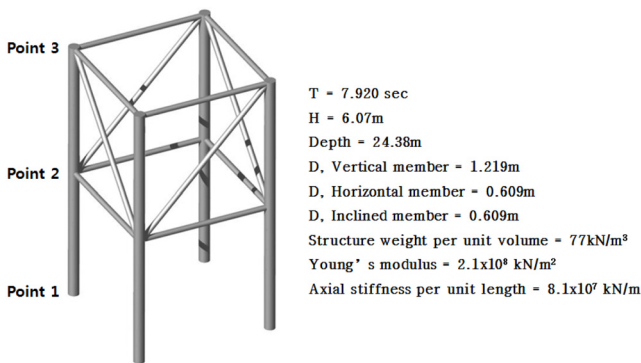


Fig. 1 Simple model of an offshore structure (Dawson, 1983)

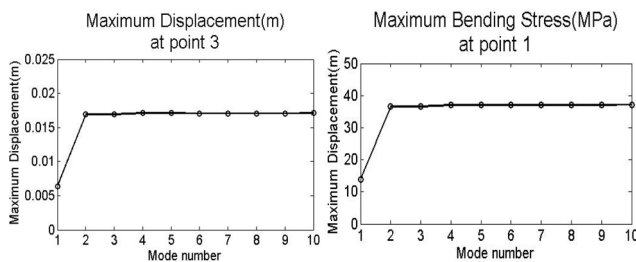


Fig. 2 Maximum displacement and bending stress at point 3 and point 1 according to mode number

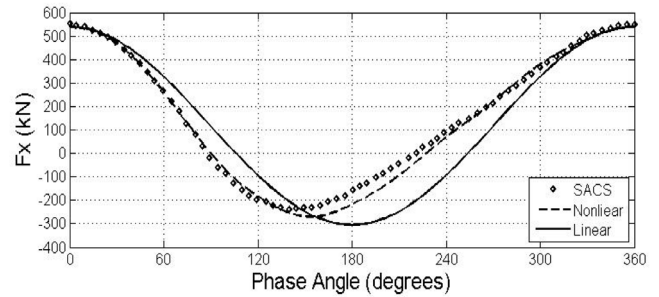


Fig. 3 Comparison of external horizontal force on the simple offshore structure model ($H=6.07m$, $T=7.92s$, $U_w=1.0m/s$)

물의 운동 응답이 비교적 낮은 진동 모드에 의해 지배되기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 계산의 정밀성과 효율성을 고려하여 5차항까지의 고유벡터를 사용하여 계산값을 도출하였다.

Fig. 3은 입사파에 의한 구조물에 작용하는 수평 외력의 한주기 동안의 변화를 각 계산 방법에 따라 비교한 것이다. 파고(H) 6.07m, 파주기(T) 7.92초의 입사파와 U_w 가 1.0m/s인 취송류가 동일한 방향에서 입사할 때, SACS의 결과(Jamaluddin et al., 2005), 비선형 항력이 포함된 모리슨 방정식 (식 (1)과 식 (4)), 그리고 등가 선형화된 항력이 포함된 모리슨 방정식을 (식 (6)) 이용한 구조물에 작용하는 수평방향 외력을 서로 비교하였다. 외력의 최대값은 본 연구에서 사용한 모리슨 방정식의 결과와 SACS의 결과와 대체로 동일한 것을 확인 할 수 있으며 각 위상 각별 외력의 변화는 비선형 항력이 포함된 모리슨 방정식이 SACS의 결과와 매우 유사함을 확인할 수 있다. 이는 SACS의 계산 결과가 비선형 항력을 포함하여 외력을 구하기 때문이라고 판단된다.

Table 1는 Fig. 3에서 계산한 외력을 바탕으로 구조물의 각 높이에 위치한 노드점(Point) 1, 2, 3에서의 최대 운동변위를 비교한 것이다. 본 연구에서 계산한 결과와 SACS의 결과는 매우 유사함을 확인할 수 있고, 노드점 2와 노드점 3에서 대략 4.09%, 1.69% 정도의 차이가 발생하였는데, 이는 Fig. 3에서 알 수 있듯이 등가 선형화된 항력이 포함된 모리슨 방정식을 이용한 수평 외력과 SACS에서 구한 외력의 미세한 차이에 기인한다고 판단된다. 또한 구조물의 시간 이력 응답은 Fig. 3의 외력과 같이 선형값과 비선형값의 차이를 보임을 확인하였다.

Table 2는 입사파($H=6.07m$, $T=7.92s$)에 의한 구조물의 최대 운동변위와 최대 굽힘 응력을 구조물의 각 높이별 노드점에서 계산하고 그 결과를 ANSYS ASAS의 결과와 비교하였다. 본 계

Table 1 Comparison of maximum displacement of the simple model induced by incident wave and current

Point	Displacement [m]		
	SACS	Present Study	Difference [%]
1	0	0	
2	0.0150	0.0156	4.09
3	0.0168	0.0171	1.69

Table 2 Comparison of maximum displacement and bending stress of the simple model induced by incident wave

Point	Displacement [m]			Bending Stress [MPa]		
	ANSYS ASAS	Present Study	Diff. [%]	ANSYS ASAS	Present Study	Diff. [%]
1	0	0		23.43	24.74	5.59
2	0.0106	0.0104	-1.51			
3	0.0115	0.0114	-0.95			

산 결과는 상용프로그램의 결과와 매우 일치하였고, 노드점 2와 3에서 최대 운동변위의 차이는 1.51%와 0.95% 정도였다. 또한 노드점 1에서의 최대 굽힘 응력 역시 그 차이가 대략 5.59%였다. 이는 ANSYS ASAS가 비선형 모드해석을 통한 결과인 반면, 본 연구에서는 등가선형화된 모드해석으로 계산을 수행하였기 때문으로 판단된다.

이상의 비교를 통해 본 계산 결과는 ANSYS ASAS와 SACS와 같은 전문 상용 프로그램의 결과와 해의 경향성 및 정확도에서 만족할 만한 일치성을 나타내고 있음을 확인할 수 있으며, 최대 5% 이내 차이는 등가선형 항력과 비선형항력의 계산 방법의 차이에서 기인한다고 할 수 있다.

3.2 다양한 Jack-up leg에 대한 해양 동역학적 수치계산

다양한 Leg 형태에 따른 해양 동역학적 특성을 파악하기 위해, 부재의 지름은 같고, 부재 배치 형태가 각기 다른 4가지 형태의 Leg를 Fig. 4에 나타내었다. 표준 형태(Standard type)의 Leg는 길이 100m의 3개의 수직 실린더(지름 0.4m)로 구성되었으며, 보강을 위해 Leg의 수직방향 10m 간격으로 수평 부재(Horizontal member, 지름 0.35m)와 Inner bracing member(지름 0.22m)를 배치하였다. 또한 이를 63개의 노드점과 126개의 3차원 보 요소(Beam element)로 모델을 구성 하였다. 표준 형태의 leg를 기준으로 수평부재들 사이에 보강이 되는 경사 부재(Inclining bracing member, 지름 0.27m) 설치 형상에 따라 Diagonal type, Diamond type, X-brace type, V-brace type 등 4가지로 구분하였고, 각 방향 별 부재의 지름은 모든 형태의 Leg가 동일하다.

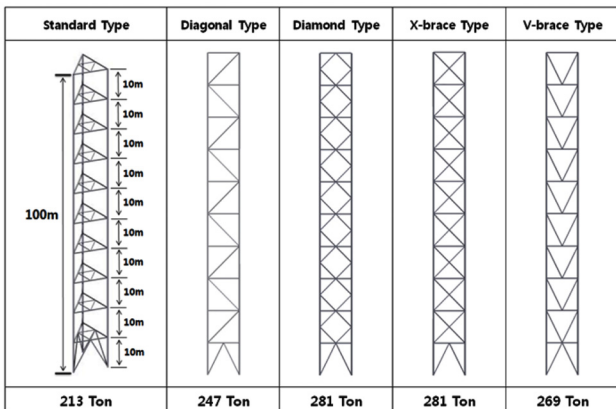


Fig. 4 Various types of Jack-up legs

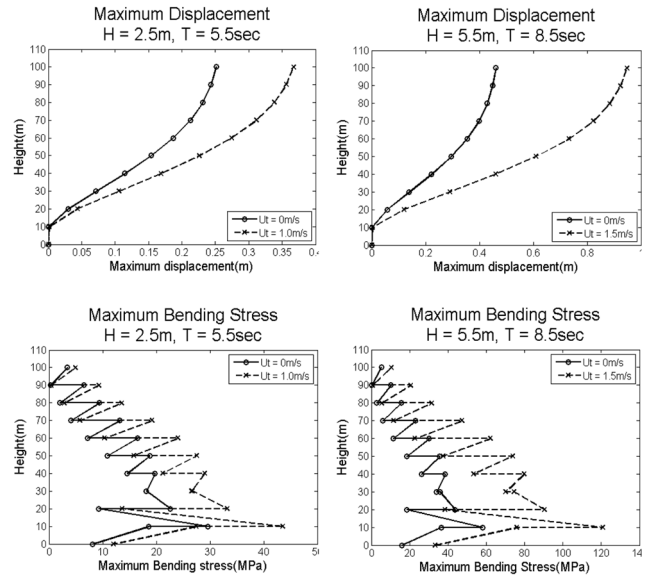


Fig. 5 Maximum displacement and bending stress at each location of the standard leg, left figures ($H=2.5m, T=5.5sec$) and right figures ($H=5.5m, T=8.5sec$)

Fig. 5는 표준 형태의 Leg에 대해 각각 파고(H) 2.5m, 파주기(T) 5.5초일 때와 파고(H) 5.5m, 파주기(T) 8.5초일 때에 각 높이에 따른 최대 운동변위와 최대 굽힘 응력의 비교를 나타낸다. 입사파와 같은 방향으로 조류가 흐를 경우, 입사파만 작용할 경우보다 Leg의 최상단부(100m)에서의 최대변위가 각각 46% ($H=2.5m, T=5.5sec, U_w=1.0m/s$)와 105% ($H=5.5m, T=8.5sec, U_w=1.5m/s$)씩 증가하였다. 최대 굽힘 응력의 경우, Leg의 상부에서부터 아래로 갈수록 크기가 증가하며 하단부인 10m 지점에서 최대가 되었다. 이는 수평방향 변위의 증가로 인해 Leg의 하단부로 내려갈수록 굽힘 응력이 증가하며, 하단부 10m 지점에 경사부재가 보강되어 있기 때문이다. 또한, 구조물 하단부와 해저면은 고정되었다고 가정하였다. 최대 굽힘 응력의 경우 역시, 입사파에 조류가 포함되면 최대 응력이 각각 47% ($H=2.5m, T=5.5sec, U_w=1.0m/s$)와 108% ($H=5.5m, T=8.5sec, U_w=1.5m/s$)씩 증가함을 확인할 수 있다.

앞에서 기본 형상의 Leg에 대한 비교를 통해 Jack-up leg의 대략적인 동역학적 특징을 알아보았고, 이제 Fig. 4에서 제시한 다양한 형상의 Jack-up leg에 대한 해양 동역학적 특성을 파악하기 위해, 입사파와 조류에 따른 각 Leg의 최대 변위와 응력을 비교하였다.

Fig. 6은 각각 파고(H) 2.5m, 수면조류속도(U_w) 1.0m/s 인 경우와 파고(H) 5.5m, 수면조류속도(U_w) 1.5m/s인 두 가지 환경 조건을 적용하여 5초에서부터 12초까지의 파주기(T)에 따른 각 모델의 최대 운동변위와 최대 굽힘 응력의 비교를 나타낸다.

최대 운동변위는 모든 비교 대상 Jack-up leg에서 파주기 6초에서 나타났고, 이후로는 점차 감소하는 것을 확인할 수 있으며, Diamond type에서 가장 작은 운동변위를 가짐을 알 수 있다. 최대 굽힘 응력의 경우 Diamond type과 V-brace type의 Jack-up leg의 경우 파주기 6초에서 가장 큰 값을 가지며, 이후

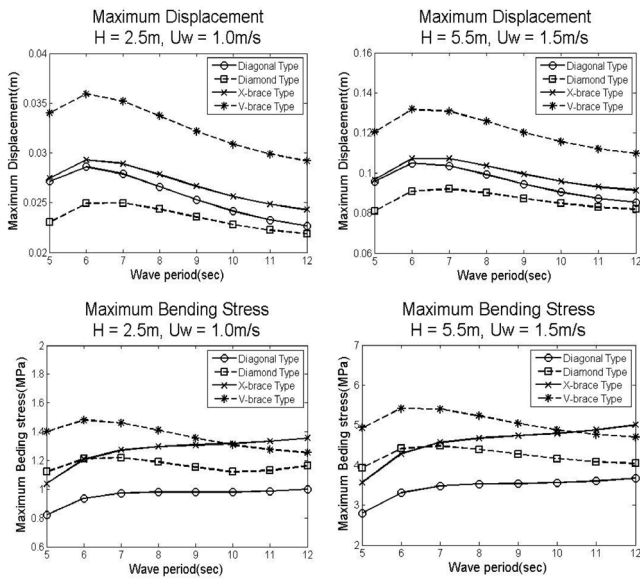


Fig. 6 Comparison of maximum displacement and bending stress for various types of legs with two different load conditions

로는 조금씩 감소하는 반면, Diagonal type과 X-brace type은 파주기의 증가에 따라 최대 굽힘 응력이 서서히 증가함을 알 수 있다. 또한 Diagonal type의 Jack-up leg가 모든 파주기 영역에서 가장 작은 최대 굽힘 응력을 가짐을 알 수 있다. 이는 Diagonal type의 경우 다른 형태에 비해 외력이 작용하는 투영 면적이 상대적으로 적어 leg에 작용하는 환경 외력이 비교적 작기 때문으로 판단되며, 구조적으로 가장 안정적이라고 예상되는 Diamond type 역시 최대 굽힘 응력이 대체로 작음을 확인할 수 있다.

3.3 단순화 모델의 해상풍력발전기 설치선에 대한 수치해석

본 연구에서는 Fig. 6의 비교 결과를 바탕으로 최대 운동변위가 가장 작은 Diamond type과 최대 굽힘 응력이 가장 작은 Diagonal type의 Jack-up leg를 각각 적용하여, Fig. 7과 같이 해상 풍력 발전기 설치선을 단순화한 6-legs type Jack-up Rig에 대한 해양 동역학적 특성을 분석하였다. Diagonal type 모델의 경우 378개의 노드점과 960개의 3차원 보 요소로 구성 되었

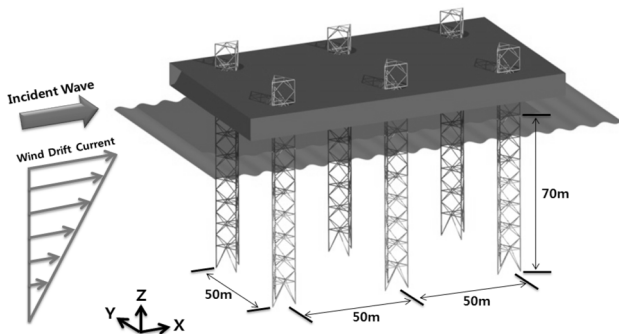


Fig. 7 Overview of an simplified three dimensional six-legs Jack-up Rig with the diamond type legs

Table 3 Structural properties of the Jack-up Rig.

Description	Value
Deck size	60 x 130 m
Jack-up leg height	100 m
Water depth	70 m
Leg member diameter	0.45 m
Horizontal member diameter	0.35 m
Inclining bracing member diameter	0.27 m
Inner bracing member diameter	0.22 m
Deck weight	450 MN
Structure weight per unit volume	77 kN / m ³
Young's modulus	2.1 x 10 ⁸ kN / m ²
Axial Stiffness per unit length	8.1 x 10 ⁷ kN / m

으며, Diamond type의 경우 558개의 노드점과 1626개의 3차원 보 요소로 모델을 구성하였다. 본 계산 모델의 자세한 제원과 물성치는 Table 3에 나타내었다. 또한, 모델에 작용하는 입사파와 조류는 동일한 방향에서 입사한다고 가정하였다.

고유값 해석을 통해 구한 Diagonal type과 Diamond type의 Jack-up Rig의 1차 모드부터 5차 모드까지의 고유주기는 Table 4와

Table 4 Mode natural periods(sec) for two Jack-up Rigs

	First mode	Second mode	Third mode	Fourth mode	Fifth mode
Jack-up Rig with Diagonal	10.293	9.618	9.294	4.070	3.760
Jack-up Rig with Diamond	11.226	10.860	9.852	4.390	3.208

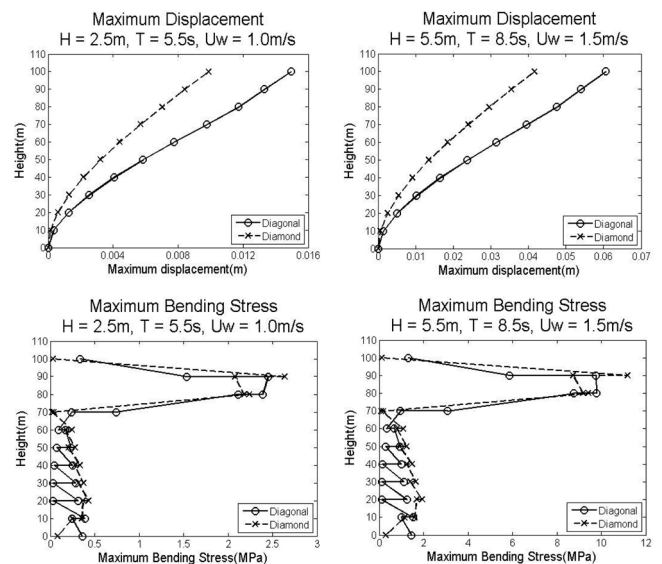


Fig. 8 Comparison of maximum displacement and bending stress at various vertical locations for a six-legs Jack-up Rig with Diagonal type and Diamond type legs. Left figure (H=2.5m, T=5.5sec, Uw=1.0m/s) and right figure (H=5.5m, T=8.5sec, Uw=1.5m/s)

같으며 각각의 1차 모드에서의 고유주기는 10.293초와 11.226초로 계산되었으며 이는 Rig 설계 및 설치 시 환경 외력에 대한 구조물의 공진현상을 예측할 수 있는 중요한 요소이다.

Fig. 8은 Diagonal type과 Diamond type의 Jack-up Rig에 대해 각각 파고(H) 2.5m, 파주기(T) 5.5초, 수면조류속도(U_w) 1.0m/s일 때와 파고(H) 5.5m, 파주기(T) 8.5초, 수면조류속도(U_w) 1.5m/s일 때 Leg의 각 높이별 노드점에서의 최대 운동변위와 최대 굽힘 응력을 비교하였다.

최대 운동변위의 경우 두 환경 외력 조건에 대해 모든 노드점에서 Diamond type의 Jack-up Rig가 Diagonal type보다 작으며 최상단인 100m 지점에서는 각각 34%, 31%씩 작은 값을 가짐을 알 수 있다. 최대 굽힘 응력의 경우는 두 모델 모두 Deck가 Leg에 고정된 80~90m 지점에서 급격히 증가하고 그 이후로는 매우 작아졌다가 수심 아래로 내려 갈수록 약간씩 증가함을 알 수 있다. 또한 최대 운동변위와는 달리 Diagonal type의 Jack-up Rig가 Diamond type보다 약간 작은 값을 가짐을 확인할 수 있다. 이를 통해 단일 Leg에 대한 수치해석 결과와 전체 Jack-up Rig 모델 해석 결과의 경향성이 일치함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 해상 풍력 발전기 설치선으로 사용되는 Jack-up leg의 각 형상 변화에 따른 Leg의 최대 변위와 최대 굽힘 응력의 변화를 비교하고 환경외력과 이에 따른 최적의 운동 응답특성을 가지는 Leg 형상을 선정하였다. 수정된 모리슨 방정식을 이용하여 입사파와 조류에 의한 외력을 구하였고, 특히 비선형 항력을 등가 선형화 항력으로 환산하여 외력을 계산하고 그 차이를 비교하였다. 모드해석을 통해 각 모드의 고유 주기를 계산한 후 뉴마크 베타 시간적분법을 이용하여 운동 방정식을 시간영역에서 해석하여 운동응답을 구하였다. 본 계산 결과의 신뢰성을 확보하기 위해 단순한 형상의 해상구조물에 대해 상용 전문 프로그램인 ANSYS ASAS와 SACS의 계산 결과와 비교하여 해의 정확성을 확인하였다.

Jack-up leg의 부재 설치 형상에 따라 Diagonal type, Diamond type, X-brace type, V-brace type 등 총 4가지 형상의 leg로 구분하고, 각 형상별 Leg의 최대 수평 운동변위와 최대 굽힘 응력을 계산하고 비교하였다. 이를 통해, 같은 환경외력 조건 하에서 Diamond type의 Leg가 다른 형상에 비해 가장 작은 최대 수평 운동변위를 가지지만 Leg의 단위 무게가 다른 type에 비해 상대적으로 커서 경제성의 고려가 필요하다. 최대 굽힘 응력은 Diagonal type이 가장 작고 단위 무게 역시 가장 작아서 비교 대상중 경제성 측면에서 장점이 있음을 확인하였다.

이를 바탕으로 단순화 모델의 해상 풍력 발전기 설치선(Six-legs Jack-up Rig)을 Diagonal type과 Diamond type의 Leg로 구성하여 각 구조물의 모드별 고유주기와 환경외력에 따른 최대 변위와 최대 굽힘 응력의 발생 위치와 특성을 파악하였다. 이 같은 수치 해석 결과는 차후 Jack-up Rig의 설계 및 설치 시 고려해야 할 중요 요소이다.

본 연구는 해상 풍력 발전기 설치선의 Jack-up leg에 대한 해양 동역학적 통합 해석 모델 개발을 위한 초기 연구 결과로서, 차후 상부구조물을 포함한 구체적인 모델링과 정밀한 계산을 통해 보다 정확한 파랑중 운동응답과 성능평가가 진행될 예정이다.

후 기

본 연구는 광역경제권 선도산업 육성사업(2차)의 지원으로 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다. 또한, 이 논문은 2014년도 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었음. (INHA-50673-01)

References

- Cassidy, M.J., 1999. Non-linear Analysis of Jack-up Structures Subjected to Random Waves. Ph.D. Dissertation, University of Oxford.
- Dawson, T.H., 1983. Offshore Structural Engineering, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., USA.
- Hartnett M.A., Mullarkey T.P., 1996. Numerical Evaluation of Hydrodynamic Loadings on Fixed Offshore Structures. Advances in Computational Techniques for Structural Engineering, Civil-Comp Press, UK, 263-268.
- Jang, B.S., Choi, J.H., 2013. Introduction of Wind Turbine Installation Vessel (WTIV), Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea, 26(2), 25-30.
- Jamaloddin, N., Samsul, I.B., Mohammad, S.J., Waleed, A.M.T., Shahrin, M., 2005. Simulation of Wave and Current Force on Template Offshore Structures. Suranaree Journal of Science and Technology, 13(3), 193-210.
- Lee, E.C., Jang, W.Y., Shin, S.R., 2013. A Study on the Soft Ground Subsidence Beneath the Jack-up Rig Working for Offshore Wind Turbine Installation. Journal of the Korean Society of Marine Engineering, 36(8), 1136-1142.
- Malhotra, A.K., Penzien, J., 1970. Non Deterministic Analysis of Offshore Structures. Journal of the Engineering Mechanics Division, Proceedings of ASCE, EM6, 985-1003.
- Morison, J.R., O'Brien, M.P., Johnson, J.W., Shaaf, S.A., 1950. The Forces Exerted by Surface Waves on Piles. Petroleum Transactions TP2846, 189, 149-154.
- The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan (OCDI), 1999. The Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan. MLIT, Japan.
- Park, M.S., Koo, W.C., Kawano, K., 2012. Numerical Analysis of the Dynamic Response of an Offshore Platform with a Pile-soil Foundation System Subjected to Random Waves and Currents. Journal of Waterway Port Coasts and Ocean Engineering, 138(4), 275-285.

- Stelson, T.E., Mavis, F.T., 1955. Virtual Mass and Acceleration in Fluids. Proceeding of American Society of Civil Engineering, 81, 1-9.
- Stephen, H.C., Mark, W.D., 1963. Random Vibration in Mechanical System. Academic Press Inc.
- Williams, M.S., Thompson, R.S.G., Housby, G.T., 1998. Non-linear Dynamic Analysis of Offshore Jack-up Units. Computers & Structures, 69, 171-180.
- Zheng, X.Y., Liaw, C.Y., 2004. Non-linear Frequency-domain Analysis of Jack-up Platforms. International Journal of Non-linear Mechanics, 39, 1519-1534.