

해상풍력발전기 설치선박의 수정 동적증폭계수 추정식

마국열* · 박주신** · 이동훈** · 서정관****†

* 부산대학교 조선해양공학과 박사과정, 삼성중공업 구조기본상세설계팀 프로, ** 삼성중공업 조선해양연구소 프로

*** 부산대학교 조선해양공학과/선박해양플랜트기술연구원 교수

Modified Empirical Formula of Dynamic Amplification Factor for Wind Turbine Installation Vessel

Kuk-Yeol Ma* · Joo-Shin Park** · Dong-Hun Lee*** · Jung-Kwan Seo****†

* PhD Candidate, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Korea

* Pro., Structure Basic and Detail Design, Structure Engineering Team, Samsung Heavy Industries, Geoje 53261, Korea.

** Pro., Structure, Noise and Vibration Research, Ship and Offshore Research Institutes, Samsung Heavy Industries, Geoje 53261, Korea

*** Professor, Dep. of Naval Architecture and Ocean Engineering/Korea Ship and Offshore Research Institute, Pusan National University, Busan 4641, Korea

요 약 : 최근 친환경, 신재생 에너지 수요에 따라서 해상풍력발전 분야는 빠른 성장세와 설비의 대형화에 따른 전용설치선박의 관련 기술개발이 요구되고 있다. 해상풍력설치선박(WTIV: Wind Turbine Installation Vessel)은 설치 작업 시 선체를 파도의 영향을 받지 않는 높이로 이동시키고 모든 환경하중은 레그가 담당한다. 특히 파랑하중은 불규칙파로 구성되어 있기 때문에, 정확한 동적응답특성을 파악하는 것은 아주 중요한 문제이다. 이러한 동적응답해석은 간이법의 하나인 단자유도법을 널리 활용하고 있으나, 불규칙 파를 고려하지 못하는 제약조건이 있다. 따라서 현재 설계 시 불규칙 파에 대한 시간영역 계산이 가능한 다자유도 계산법을 사용하고 있다. 그러나 다자유도 계산법에서 시간영역 해석은 정도 높은 계산 결과를 제공하지만, 데이터의 수렴도가 민감하고 복잡성에 있어 설계 시 어려움이 있다. 따라서 본 논문은 다양한 변수를 기준으로 한 시간영역 해석을 통하여 불규칙 파의 동적응답 특성을 표현 할 수 있는 동적증폭계수 추정식을 개발하였다. 기존 다자유도 모델 대비 계산시간 단축 및 정확도 확보를 확인하였다. 개발된 동적증폭계수 추정식은 WTIV 및 유사 구조물 설계에 활용이 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 풍력발전기 설치선박, 동적응답, 레그, 단-다중 자유도, 동적증폭계수

Abstract : Eco-friendly and renewable energy sources are actively being researched in recent times, and offshore wind power generation requires advanced design technologies in terms of increasing the capacities of wind turbines and enlarging wind turbine installation vessels (WTIVs). The WTIV ensures that the hull is situated at a height that is not affected by waves. The most important part of the WTIV is the leg structure, which must respond dynamically according to the wave, current, and wind loads. In particular, the wave load is composed of irregular waves, and it is important to know the exact dynamic response. The dynamic response analysis uses a single degree of freedom (SDOF) method, which is a simplified approach, but it is limited owing to the consideration of random waves. Therefore, in industrial practice, the time-domain analysis of random waves is based on the multi degree of freedom (MDOF) method. Although the MDOF method provides high-precision results, its data convergence is sensitive and difficult to apply owing to design complexity. Therefore, a dynamic amplification factor (DAF) estimation formula is developed in this study to express the dynamic response characteristics of random waves through time-domain analysis based on different variables. It is confirmed that the calculation time can be shortened and accuracy enhanced compared to existing MDOF methods. The developed formula will be used in the initial design of WTIVs and similar structures.

Key Words : Wind Turbine Installation Vessel, Dynamic Response, Leg, Single-Multi Degree of Freedom, Dynamic Amplification Factor

* First Author : ky76.ma@samsung.com, 055-630-5237

† Corresponding Author : seojk@pusan.ac.kr, 051-510-2415

1. 서론

전 세계적으로 지구온난화, 미세먼지 등 환경 문제로 친 환경, 신재생에너지에 대한 지속적인 투자가 증가되고 있는 추세이다. 이중 해상풍력분야는 가장 빠르게 성장하고 있는 분야이며, 풍력발전기 용량도 10 MW 이상으로 대형화되고 있다. 이러한 대형발전기를 설치하기 위한 전용 해상풍력발전기 설치선박(Wind Turbine Installation Vessel, WTIV)의 수요 또한 지속적으로 증가할 것으로 예상된다(Park et al., 2020). WTIV는 독자적인 추진시스템을 갖춰서 설치해역까지 이동이 가능하며 설치 해역에 도착하면 레그(Leg)를 지반에 고정시키고, 선체를 파도의 저항을 받지 않는 위치까지 전기구동 잭킹(Jacking) 시스템을 이용하여 승강시키는 작업 구조물이다.

일반적으로 WTIV는 운송, 설치 및 유지/보수 목적으로 해양풍력발전 단지에서 전용으로 사용되고 있고 최근에는 풍력발전기 하부 구조물의 설치 및 해체 작업에도 사용될 수 있도록 설계 및 건조되고 있다. WTIV의 경우 데크(Deck)의 면적과 형상이 중요한 설계 인자 중의 하나이다. 넓은 데크는 화물적재량을 증가시키면서 여유 공간의 확보를 통하여 작업속도를 빠르게 가져갈 수 있는 장점이 있다. 하지만 다양한 환경 하중에 노출 부위가 증가하면서 구조 하중 부담이 커지고, 승강중량(Elevated weight) 증가에 따른 잭킹 시스템 용량 증가를 초래할 수 있다. 특히, 중량 증가는 동적 효과 변화를 가속화 하여 전체 구조 시스템의 설계에 큰 영향을 주는 인자이다.

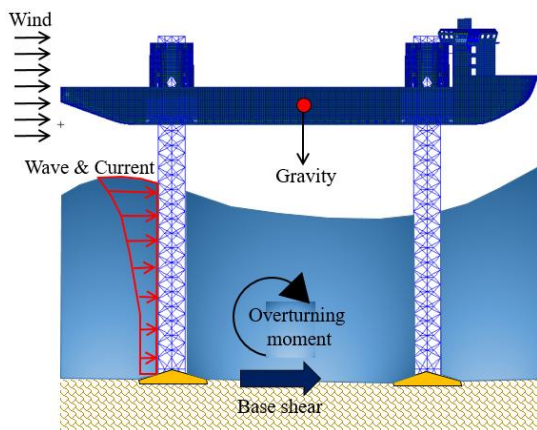


Fig. 1. Typical representation of loads.

잭업이 완료된 WTIV의 구조 강도를 결정하는 데 있어서, 환경 하중과 선박의 자중이 주요 변수이다. Fig. 1과 같이 환경 하중은 주로 레그의 수평 방향으로 작용하며, 스퍼드캔(Spodcan)의 지반 전단력(Base shear)과 WTIV의 전복모멘트

(Overturning moment)를 발생시킨다. 자중은 WTIV의 수직 방향으로 작용하며 선각 중량과 화물 중량으로 구분된다. 이 하중 성분은 최종적으로 레그 끝단의 스퍼드캔을 통해서 해저면의 수직 반발력으로 표현할 수 있다. 외력에 대한 WTIV의 동적 효과를 고려하기 위하여 일반적으로 많이 사용되는 계산법은 동적증폭 계수(Dynamic amplification factor, DAF)를 이용하는 방법이다. DAF 계산법에는 크게 두 종류로 구분할 수 있다. 하나는 단자유도(Single degree of freedom, SDOF) 방법으로, 한 개의 자유도를 갖는 질량-스프링-댐퍼 시스템을 기초로 하여, 동적 시스템을 단순화하는 간이계산 방법 중에 하나로 단순하고 보편적으로 널리 사용되며 빠른 계산 시간에 대한 장점이 있지만, 해의 정확성은 MDOF(Multi degree of freedom, MDOF) 대비 부족하고, 불규칙 파를 고려하지 못하는 단점이 있다.

또 다른 방법은 불규칙 파를 고려한 다자유도계(MDOF) 방법이다. 해양의 상태는 본질적으로 불규칙 파로 공학적으로 구현하기 위해서 서로 다른 위상, 주파수 및 진폭을 선형 중첩을 통하여 계산하는 방법이다. 특히, 100년 파 조건을 결정함에 Non-Gaussian 프로세스에서 최대 극한값(Most probable extreme maximum, MPME)은 상당한 수학적 복잡성을 가지고 있어서 WTIV 설계 시 적용에 어려움이 있다. 따라서 Winterstein and Løseth(1991)이 제안한 방법은 지반 전단력, 전복모멘트를 수학적으로 다루기 쉬운 확률 밀도 함수로 변환을 위하여, 다항식 피팅(Fitting) 함수 활용과 동적증폭계수는 준 정적 해와 동적 해에 대한 MPME 분할 계산으로 최종적으로 결정할 방법을 제안하였다. 그러나 이러한 방법은 실제와 가까운 해상 조건과 환경 조건을 고려함에 따라 해의 정확도는 SDOF보다 높지만, 계산시간이 많이 걸린다는 단점이 있다. 따라서 실제 WTIV 설계 시 활용할 수 있는 해의 정확도와 계산시간도 단축할 방법에 관한 연구가 필요하며, 유사 선행연구에 대해 아래와 같이 요약하였다.

Park et al.(2020)은 jack-up rig 레그 구조물의 설계 및 구조 강도 평가를 위하여, 환경 하중과 승강중량을 변수로 한 시리드해석을 수행하고, 설계기준에 따른 구조 강도 차이를 검토하기 위하여, 허용응력 설계(WSD)와 하중 저항계수 설계법(LRFD) 방법을 적용하였다. 극한환경 조건을 고려하여 WSD 평가 기준이 LRFD에 비하여 약 30% 보수적인 결과를 도출하였고, 하중별 가중치와 안전율의 차이가 원인으로 확인되었다.

Heo et al.(2016)은 대각형(Diagonal) 및 마름모형(Diamond)의 jack-up rig 레그의 해양 동역학적 해석을 부분구조법을 이용하여 해저 파일과 지반의 상호작용을 고려한 수치해석을 수행하였다. 해저지반의 전단과 속도에 따른 두 가지 레그 구조물의 동적 응답을 비교하였으며, 입사 유의와 주기 변화에 대한 구조물의 운동 변위 신뢰성 평가를 하였다. 마름모

형식 레그가 대각형 보다 상대적으로 작은 운동 변위를 가지고, 신뢰성 지수가 큰 것으로 나타났으며, 지반과 파일의 상호작용을 고려한 해양 동역학적 해석이 필요함을 주장하였다.

Hai(2020)은 운영 중인 실 jack-up rig의 주요 작업 모드에 따른 동적 운동특성에 관해서 연구하였다. 주요 해석절차는 SNAME(2002)를 준수하였고, 일부 미포함 사항은 DNV(2010)를 적용하였다. 구조물에 작용하는 환경 하중의 영향 검토를 위하여 파주기, 받음각, 파장을 변수로 한 수치해석을 수행하고, jack-up unit의 고유주기 변화를 분석하였다. 이 변화량을 분석하여, 동적 영향계수를 산정하고, 레그 구조의 구조 강도를 EUROCODE3(2005) 기준으로 평가하였다. 추가적인 연구로서 토양과 스피드켄의 비선형 상호작용 연구를 제시하였다.

그러나 선행연구에서는 jack-up rig에 대한 연구가 주로 수행되었고, WTIV에 대한 연구는 매우 부족한 상황이다. 따라서 본 연구는 WTIV를 대상으로 구조 거동의 동적 효과를 매개변수 분석을 통해 검토하여 DAF 추정식을 개발하였다. 이 식은 다자유도계 방법으로 계산된 결과를 바탕으로 설계 변수를 변화에 따른 고유진동수와 감쇠 계수를 변수로 구성하였다. 동적거동에 대한 응답을 합리적으로 예측하기 위하여 물리적인 계수 조합으로 구성된 단자유도계 식을 보정하는 새로운 다항식을 추가하여 엔지니어가 쉽게 사용할 수 있도록 하였다.

2. 동적 증폭 계수

해상 구조물의 경우, 파랑 하중(Wave load), 풍하중(Wind load), 조류(Current)와 같은 동하중(Dynamic load)에 의한 동적 응답효과를 고려하여 설계에 반영한다. 이 동적 효과를 고려하기 위해 가장 널리 사용되는 방법으로 관성 하중 접근법(Inertial load set approach)이 있다(SNAME, 2002).

관성 하중 접근법은 상세 임의파 동적 해석(Fully detailed random wave dynamic analysis)보다 단순하지만, 충분히 정도 있는 결과를 보여준다(ABS, 2014). 이 접근법은 식(1)과 같이 동적 효과에 의해 추가되는 관성 하중(F_{in})을 계산하여 구조물에 적용함으로써 동적 효과를 고려한다.

$$F_{in} = (DAF - 1) \frac{BS_{(Q-S)max} - BS_{(Q-S)min}}{2} \quad (1)$$

여기서, $BS_{(Q-S)max}$, $BS_{(Q-S)min}$ 는 각각 개별 파의 한 주기 동안 발생하는 최대, 최소 지반 전단력을 나타낸다.

DAF는 구조물의 정적 응답(Static response)에 대하여 동적 응답(Dynamic response)에서 나타나는 특성의 추가적인 증폭 효과를 반영한다. DAF를 계산하는 데 있어 가장 많이 사용

되는 방법으로 SDOF 방법과 임의파 분석 방법을 이용하는 MDOF 방법이 존재한다. SDOF는 한 개의 자유도를 갖는 질량-스프링-댐퍼 시스템을 기초로 하고, MDOF는 시간 영역 임의파 분석을 통하여 다중 자유도 문제를 고려할 수 있다. 본 연구에서는 동적 응답 계수(DAF)를 계산 시 사용하는 두 개의 해석법을 적용하고, 도출된 결과는 DAFs (SDOF-DAF), DAFm (MDOF-DAF)로 구분하여 비교 및 평가를 하였다.

2.1 단자유계 (SDOF) 방법

Fig. 2는 단자유계 방법을 이용한 관성 하중법의 과정을 보여준다. 첫 번째 단계는 대상 구조물을 모델링하는 단계로 구조물의 형상, 재료, 구속조건 등을 파악하고 구체화하는 단계이다. 다음 단계에서는 식(1)에서의 $BS_{(Q-S)max}$, $BS_{(Q-S)min}$ 를 계산하기 위한 In-place analysis 단계와 구조물의 고유진동수를 계산하기 위한 Modal analysis 단계가 진행된다. 계산된 지반 전단력 값과 고유진동수를 이용하여 계산된 DAFs를 이용하여 식(1)을 계산하여 구조물에 추가되는 관성 하중을 적용하는 단계를 거치게 된다. 마지막으로 관성 하중이 적용된 두 번째 In-place analysis를 수행하여 동적 효과를 반영한 WTIV 레그 구조해석을 진행하는 절차로 구성되어 있다.

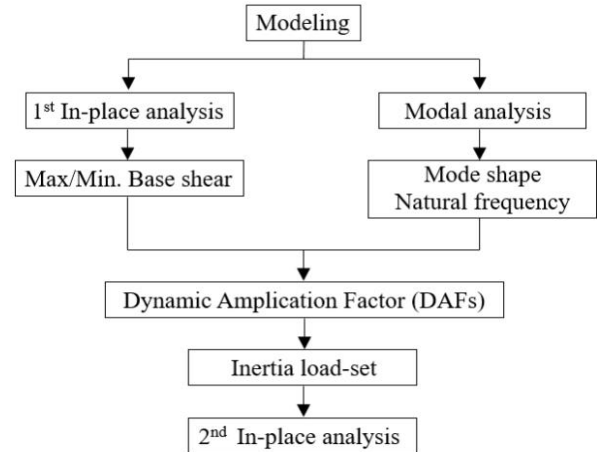


Fig. 2. Inertial load set approach with DAFs calculated using SDOF method.

SDOF 방법은 시스템을 한 개의 자유도를 갖는 질량-스프링-댐퍼 시스템으로 단순화하여, 규칙 파(Regular wave) 조건에서의 DAFs를 아래 식(2)과 같이 계산한다.

$$DAFs = \frac{1}{\sqrt{(1 - \Omega^2)^2 + (2\zeta\Omega)^2}} \quad (2)$$

여기서, $\Omega = T_n/T$ 이며, T_n 은 구조물의 고유진동수, $T = 0.9T_p$,

T_p 는 Most probable peak wave period이다.

감쇠 계수(Damping coefficient) ζ 는 구조적(Structural) 감쇠, 유체역학적(Hydrodynamic) 감쇠, 해저 지질(Soil) 감쇠를 포함하며, 총합이 최대 7%를 넘지 않도록 권고되고 있다 (SNAME, 2002).

SDOF 방법은 동적 시스템을 단순화하여 쉽고 빠르게 DAFs를 계산하여 초기 설계단계에서 유용하게 사용될 수 있는 장점이 있다. 계산시간은 조건별 약 0.5분 이내로 아주 빠르게 결과를 확인할 수 있다. 그러나 P- Δ 효과, 즉, 횡력과 축력을 동시에 받을 경우, 횡력에 의해 발생한 횡 방향 변위와 축력이 조합되어 추가적인 모멘트에 의한 처짐 현상을 표현하기가 어렵고, DAFs에 영향을 미칠 수 있는 해양환경 하중을 고려할 수 없다.

2.2 다중 자유계(MDOF) 방법

관성 하중법의 계산과정 중 DAF를 계산하기 위하여 MDOF를 적용하면 계산 정도를 높일 수 있다. 2.1에서 설명된 관성 하중법 계산과정과 전체적으로는 같으며, DAFm을 계산하기 위한 시간 영역 임의파 분석이 추가된다. Fig. 3은 MDOF을 이용한 관성 하중법의 과정을 보여준다.

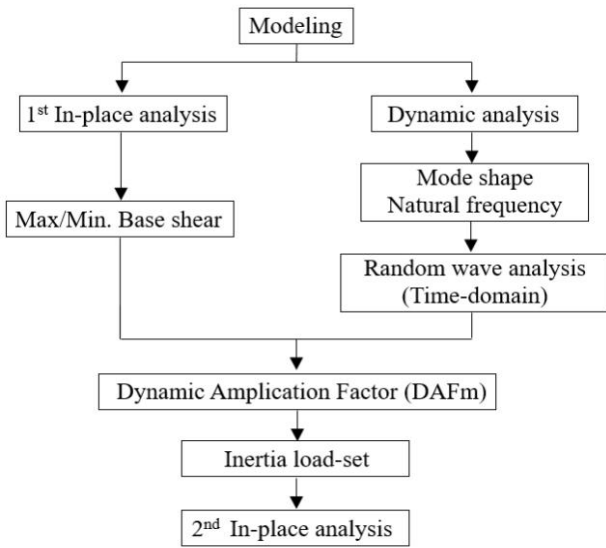


Fig. 3. Inertial load set approach with DAFm calculated using MDOF method.

MDOF 방법에서 이용되는 임의파 분석법(Random wave analysis)은 파(Wave)를 무작위 양(Random quantity)으로 고려하는 것에 기반을 두어, 시간 영역 해석을 통한 특정 환경 하에서 정적 및 동적 응답의 가장 가능성이 큰 최대 극단(MPME, most probable maximum extreme)을 계산한다. SNAME (2002)에서는 Table 1과 같이 jack-up unit의 시간 영역 해석 조

건을 권고하고 있다. DAFm 계산에서는 3시간 동안의 초과 확률 99.9%의 지반 전단력 또는 전복모멘트의 MPME를 이용한다. 이때, DAFm는 정적 응답의 MPME에 대한 동적 응답의 MPME 비율이며 아래 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$DAFm = MPME_{dynamic} / MPME_{static} \quad (3)$$

Table 1. Time-domain analysis for jack-up units (SNAME, 2002)

Item	Description
Standard deviation	$=(H_w/4) \pm 1\%$
Skewness	$-0.03 < \text{Skewness} < 0.03$
Kurtosis	$2.9 < \text{Kurtosis} < 3.1$
Time step	$< T_z/20$ or $T_w/20$

MDOF 방법은 실제와 가까운 해상 조건과 환경 조건을 고려할 수 있는 장점이 있지만, MPME를 계산하는 과정에서 입사각 한 개에 약 60분의 계산시간이 필요하며, 결과를 분석하는 과정에서 전문적인 지식이 요구된다. 따라서 실제 설계 시 활용성에 어려움이 있다.

3. 매개변수 분석

WTIV에 관련된 설계에 필요한 환경인자들이 DAF에 미치는 영향분석을 수행하였다. SDOF 방법과 해양구조물용 범용 해석 프로그램인 SACS(2018)를 이용한 MDOF 방법에 의한 결과 차이를 분석하였다.

일반적으로 DAF에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 구조물의 고유진동수와 파의 진동수와의 차이가 나는 물리량이다. 최대치의 중첩 범위가 작아지면 동적 효과는 줄어들고, 반대의 경우에는 상호 연관 공진 발생으로 인하여 DAF는 커지게 된다. 파의 진동수는 해양환경에 따라 변화되지만, 구조물의 고유진동수는 설계자가 결정할 수 있는 사항으로 설계 인자에 따라 고유진동수의 변화 특성을 검토할 필요가 있다.

따라서, 관련된 지침(SNAME, 2002)인 감쇠 계수(ζ) 또한, DAF에 영향을 미치는 인자로서 최대 7%의 넘지 않도록 본 연구에서는 1%, 3%, 5%, 7%의 감쇠 계수 조건별 동적 응답을 분석하였다.

3.1 대상 구조물

Fig. 4는 연구에 사용된 WTIV 구조물의 형상을 나타내고 있다. SACS로 모델링 된 WTIV는 4개의 레그를 가지고 있으며, 선체는 레그를 관통하고 있다. 설치 선박의 주요 제원들은 Table 2에 표시하였다.

Table 2. Main dimensions of the target WTIV structure

Item	Description
Length over all	155.0 m
Breadth over all	58.0 m
Depth, moulded	11.0 m
Length of leg	115 m
Number of legs	4
Total hull weight	37,000 mt

Table 3. Elevated design condition for parametric study

Item	Description
Water depth	45.0 m
Air gap	15.0 m
Penetration	3.0 m
Wave period	12.9 s
Wind speed (1h sustained)	27.92 m/s
Current	1.0 m/s

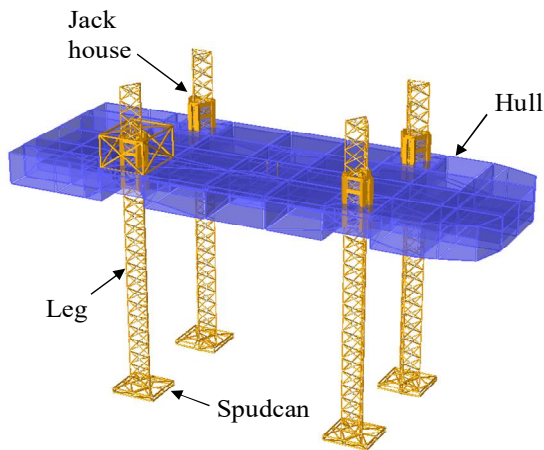


Fig. 4. Target WTIV structure in SACS.

3.2 해석 조건

3.2.1 작업 설계 조건

Table 3과 Fig. 5에 작업된 상태에서 주요 설계 변수 값과 배치도를 나타내고 있으며, 전체 레그 길이를 구성하는 주요 치수를 함께 표시하였다. 파주기(Wave period), 풍속(Wind speed), 조류는 북해(North sea)의 100년 재현주기의 해상데이터를 설계 조건으로 선정하였다.

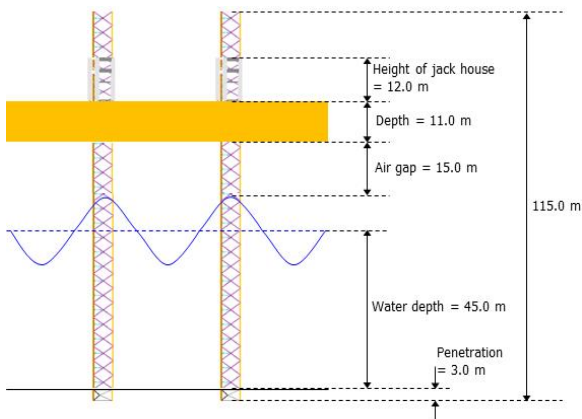


Fig. 5. Elevated design condition for parametric study.

3.2.2 경계 조건

실제 WTIV의 스파드캔과 지질의 경계조건은 Fig. 6의 오른쪽의 부분고정 지지조건(Partially fixed)에 가깝다. 핀(Pinned) 지지조건일 경우 θ_1 은 레그의 기울어진 각도이며, 완전고정 지지조건(Fully fixed)일 경우에는 레그의 기울기 각도 θ_2 는 0으로 간주한다. 그에 비해 부분고정 지지조건일 경우에는 레그 각도 θ_3 는 핀 조건의 각도 θ_1 보다 작다. 그러나 설치 지역의 지질학적 특성에 따른 고정력 정보 부재와 그 불확실성 때문에 보수적인 관점에서 핀(Pinned) 지지조건을 설계에서 주로 사용된다. 핀 지지조건에서 지질은 회전 구속 자유도를 가지지 못하고, 그래서 모멘트 반력이 발생하지 않아 레그 측면에서 보수적인 해석결과를 보여준다. 본 연구에서도 핀 지지조건을 적용하여 매개변수 분석을 진행하였다.

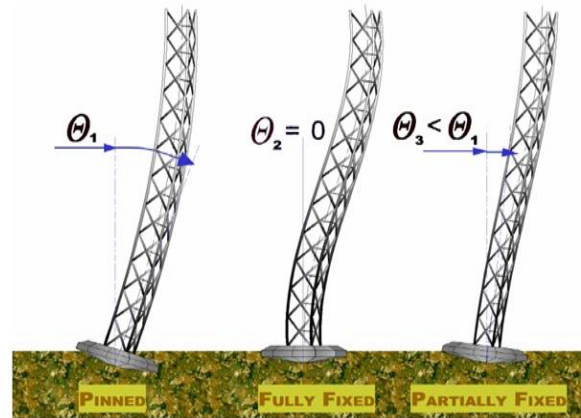


Fig. 6. Spudcan-foundation interface.

3.2.3 항력 계수

항력 계수(Drag coefficient)는 유체력이 구조물에 가해지는 정도를 결정하는 중요한 설계 인자이다. 본 연구에서 레그의 항력계수는 Table 4와 같이 SNAME(2002)에서 제시하는 기준으로 적용하였다. Fig. 7과 같이 복잡한 단면 형상을 가지는 랙(Rack)과 코드(Chord)는 식(4)을 이용하여 항력계수가

결정되고 주요치수는 한쪽 랙 톱니(Rack teeth)를 제외한 랙 (Rack)의 폭을 W로 표현하며, D는 코드(Chord)의 지름이다.

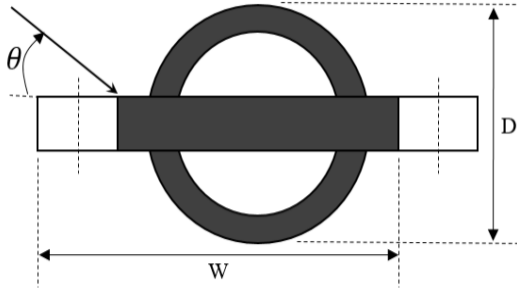


Fig. 7. Schematic for rack & chord.

Table 4. Drag coefficient for tubulars (SNAME, 2002)

Surface condition	Drag coefficient
Smooth	0.65
Rough	1.00

$$C_D = \begin{cases} C_{D0} & \text{for } 0^\circ < \theta \leq 20^\circ \\ C_{D0} + (C_{D1} \frac{W}{D} - C_{D0}) \sin^2(\frac{9}{7}(\theta - 20)) & \text{for } 20^\circ < \theta \leq 90^\circ \end{cases} \quad (4)$$

여기서, θ 는 Fig. 7의 입사(Heading) 각도, C_{D0} 는 Table 4의 항력 계수, C_{D1} 는 랙(Rack)에 수직으로 진행하는 유체에 대한 항력 계수이다.

3.2.4 임의파 분석

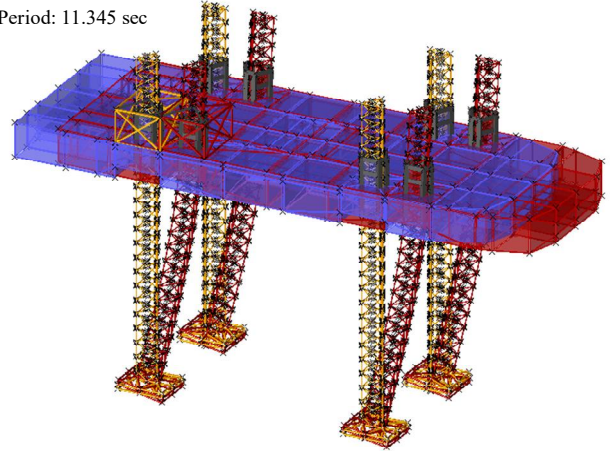
임의파 분석법 수행에 있어 시간 영역 해석에 관한 조건은 Table 1과 같다. 또한, Table 3의 파주기를 지배주기(Dominant period)로 하여 Pierson-Moskowitz 스펙트럼을 적용하였으며, Airy 파 이론을 사용하여 불규칙 파를 고려하였다. DAFm 계산을 위한 MPME 물리량으로 지반 전단력을 사용하였으며, 앞서 식(3)은 식(5)로 나타낼 수 있다.

$$DAFm = \text{Base shear}_{dynamic} / \text{Base shear}_{static} \quad (5)$$

3.3 고유진동수

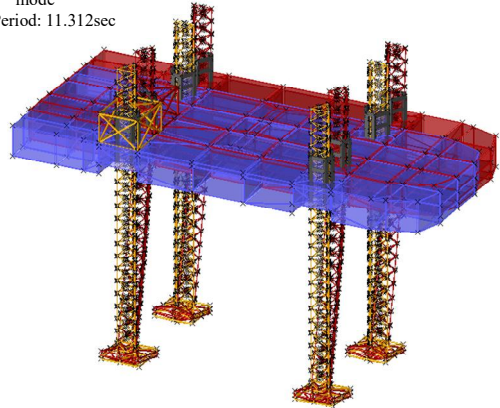
고유진동수는 전술한 것과 같이 구조물의 동적 응답에 가장 큰 영향을 미치는 인자 중 하나이다. 일반적인 WTIV의 1차, 2차 모드는 데크 수준의 병진 운동, 즉 써지(Surge)와 스웨이(Sway) 모드이다. 두 모드의 고유진동수는 일반적으로 유사한 값을 가진다. 두 고유진동수의 높고 낮음은 구조물의 방향성에 따른 강성의 기여도를 판단할 수 있는 지표로 사용된다.

1st mode
Period: 11.345 sec



(a) First vibratory mode, surge mode (contained)

2nd mode
Period: 11.312sec



(b) Second vibratory mode, sway mode

Fig. 8. The first and second vibratory modes of the target WTIV structure.

고유진동수에 따른 SDOF 방법과 MDOF 방법의 DAF 계산 결과를 분석하기 위해 감쇠 계수(ζ)를 5%, 유의 파고(Significant wave height)는 9.57m로 고정하고, 아래 Table 5의 설계 변수들에 따른 영향을 분석하였다.

Fig. 8은 승강 중량 32,500 MT, 코드 간 거리 7.0 m, 레그 베이 높이 4.7m의 대상 WTIV 구조물의 1차, 2차 모드는 Fig. 8과 같다. 1차 모드는 Surge 모드, 2차 모드는 Sway 모드로 계산되어졌다. 이외의 모든 경우에서 1차, 2차 진동 모드의 형상은 동일하였다.

본 연구에서 선정된 레그 구조의 주요 변수는 Fig. 9에서 도시한 바와 같이 코드 간 거리, 베이(Bay) 높이이며, 각각 5가지로 세분화하여 조건별 영향을 검토하였다.

Table 5. Variables for parametric study of DAF

Elevated weight (MT)	Chord distance (m)	Leg bay height (m)
32,500	7.0	4.7
36,000	7.5	5.0
39,500	8.0	5.2
43,000	8.5	5.8
46,500	9.0	6.1

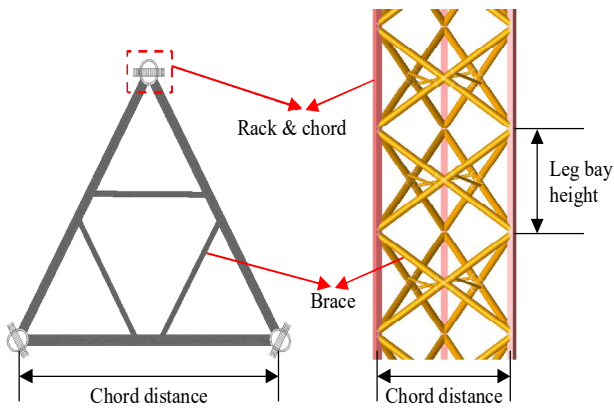


Fig. 9. Schematic for leg members.

감쇠 계수 5%를 고려한 조건에서의 $\Omega (= T_n/T)$ 에 따른 DAF 계산 결과를 Fig. 10에 비교하고 있다. SDOF와 MDOF 방법에 관한 결과는 확연하게 다른 양상을 나타내고 있으며, 특히 Ω 가 0.9부터 1.1 범위에서 DAF 분포 패턴과 결과값의 차이가 크게 나타나고 있다.

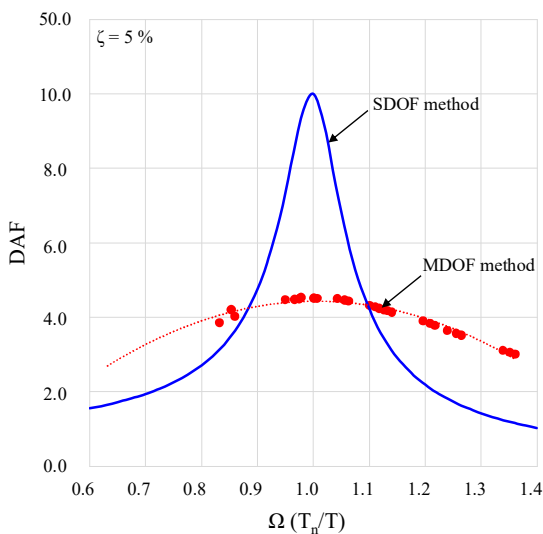
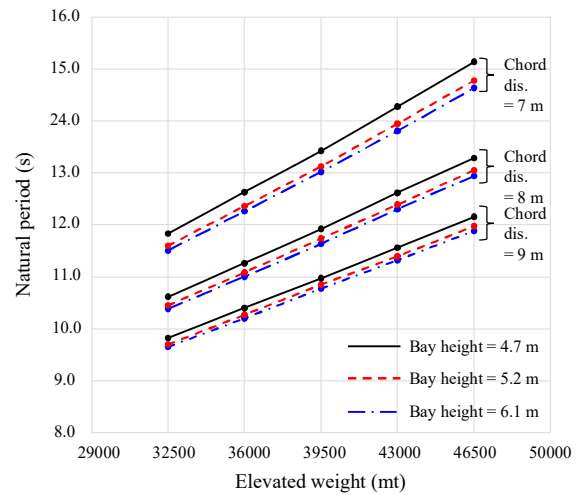


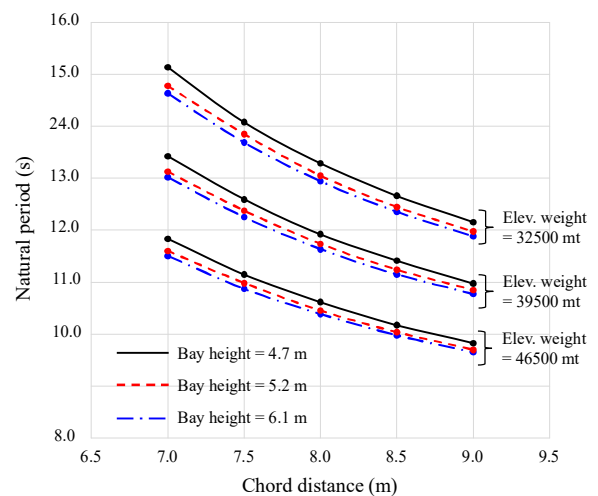
Fig. 10. Variation of DAF according to Ω , SDOF vs. MDOF.

SDOF의 경우 Ω 가 1.0인 지점에서 최대 10.0으로 DAFs가 계산되었고, MDOF 방법에서는 최대 4.54 이상으로 계산되어 평균 2배 이상의 차이가 있었다. 그리고 Ω 가 0.9 이하, 1.1 이상이 되는 범위에서는 SDOF가 평균 0.2~0.9배로 DAF를 낮게 계산하는 것을 확인하였다. SDOF 방법은 실제의 무게 중심 불일치, 비정규적인 파도 하중 그리고 항력의 비선형을 고려하지 못하는 제약조건들을 갖고 있다. 따라서 불규칙 파를 고려하는 MDOF 방법과의 계산 결과에서 큰 차이를 보여주는 것을 확인할 수 있다.

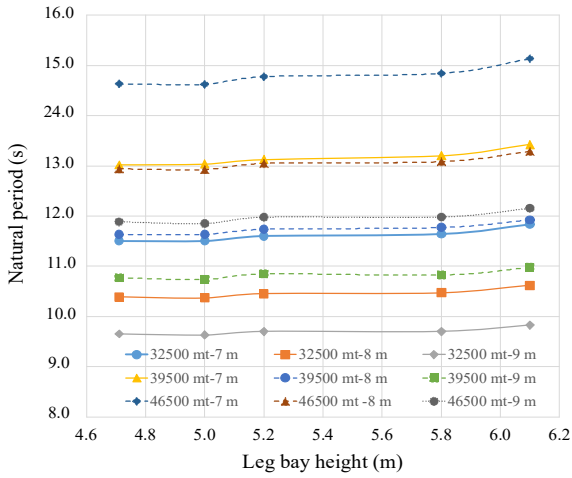
설계변수들이 변화에 따른 DAF 변화는 단지 고유진동수 변화에 따른 DAF의 변화양상을 따를 뿐 DAF에 직접적인 영향을 주지 못하는 것을 확인할 수 있으며, 각 설계 인자가 고유진동수에 미치는 영향을 Fig. 11에 정리하였다.



(a) Elevated weight vs. natural period (continued)



(b) Chord distance vs. natural period



(c) Leg bay height vs. natural period

Fig. 11. Variation of natural period according to the design parameters.

승강 중량이 증가함에 따라 구조물의 고유진동수는 증가하는 경향이며, Fig. 11-(c)과 같다. 구조물 강성의 변화 없이 무게가 증가함에 따라 고유진동수가 증가하였고, 코드 간 거리가 증가할 때는 무게 증가와 비교하면 강성 증가의 비율이 높아서 고유진동수가 줄어드는 것을 확인하였다. 레그 베이 높이가 변화할 때는 레그의 무게가 줄어들고 강성도 함께 줄어들어 고유진동수에는 의미 있는 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

3.4 감쇠계수

감쇠계수 변화에 따른 DAF 계산 결과를 Fig. 12에서 비교하고 있다.

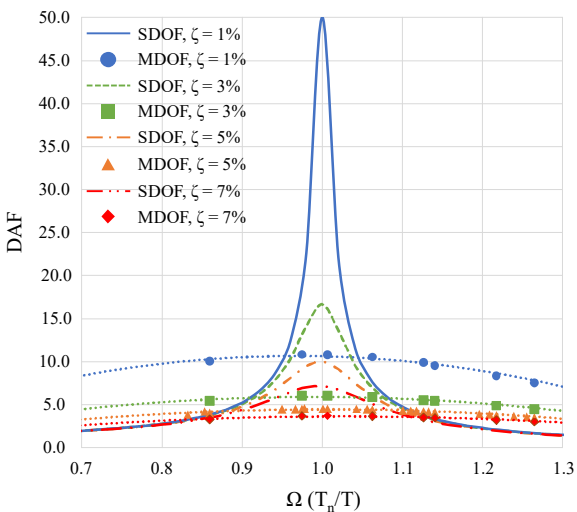


Fig. 12. Effect of damping coefficient on DAF calculation.

SDOF 방법의 경우, 감쇠 계수가 5%에서 1%로 변화함에 따라 DAFs가 5배 상승하였으나, MDOF 방법에서 DAFm은 약 2배의 상승만 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 감쇠 계수가 증가함에 따라 SDOF가 DAF를 낮게 평가하는 범위가 늘어나는 것도 확인할 수 있다.

4. 수정된 DAF 추정식 제안

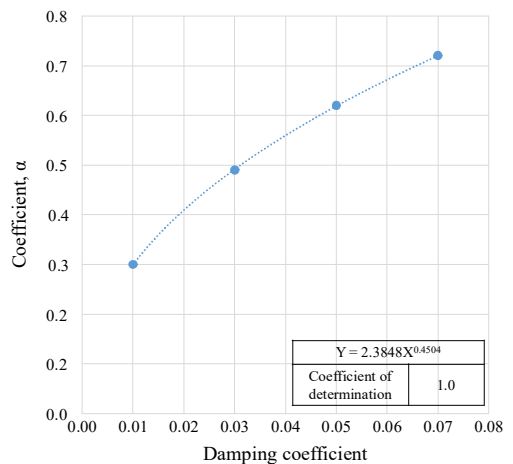
WTIV 및 해양구조물의 설계 과정에 있어서 감쇠 계수는 해양조건, 선주 요구조건 등으로 구조물 설계 전 결정되는 값이다. 반면에 고유진동수는 구조물 설계에 따라 변경될 수 있는 변수이다. 따라서 $\Omega = T_n/T$ 을 변수로 하고, 감쇠 계수를 계산식의 계수로써 사용하는 DAFs의 계산식을 기반으로 하여 DAF 추정식을 개발하였다.

MDOF 방법을 이용한 DAFm 계산 결과를 이용하여 DAF 추정식을 아래 식(6)과 같이 도출하였다. 여기서, ζ 는 감쇠 계수이고, $\Omega = T_n/T$ 이다.

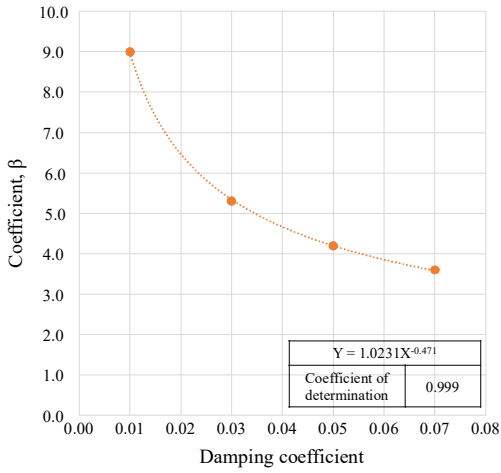
$$DAF = \frac{1}{\sqrt{(1-\alpha\Omega^2)^2 + (\gamma\zeta\Omega)^2}} \quad \text{for } 0.01 \leq \zeta \leq 0.07 \quad (6)$$

where, $\alpha = -1.5\zeta + 0.995$, $\beta = 2.3848\zeta^{0.4504}$, $\gamma = 1.0231\zeta^{-0.471}$

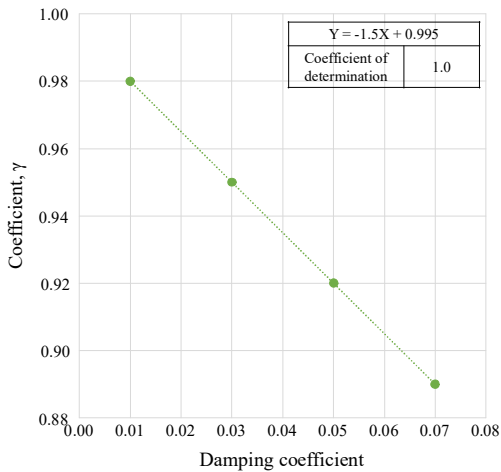
추정식 (6)의 계수 α 는 Fig. 12의 그래프의 가로 방향 폭을 결정하는 계수이며, 계수 β 는 그래프의 세로 방향 폭, 계수 γ 는 그래프의 가로축 평행 이동량을 결정하는 계수이다. DAFm 계산 값과 가장 유사한 계산 결과를 도출하는 계수의 값을 시행 착오법과 결정계수를 이용하여 계산하고, 각 계수들이 감쇠 계수의 함수로 표현할 수 있도록 추세선을 도출하였다.



(a) Trend line of coefficient, α



(b) Trend line of coefficient, β



(c) Trend line of coefficient, γ

Fig. 13. Trend line of coefficients in Equation (6)

추정식 (6)의 계수, α , β , γ 의 추세선을 Fig. 13에 나타내었다. α , β 의 경우, 거듭제곱 형태의 추세선을 따랐으며 결정계수는 각 1.0, 0.99이다. γ 는 선형식의 결정계수는 1.0이다.

DAF 추정식을 통한 계산 결과와 MDOF 방법을 통해 계산된 DAFm간의 상관분석 결과를 Fig. 14에 도시하였다. 추정식이 MDOF 계산 결과와 결정계수 0.994의 수준으로 유사하게 제안된 DAF 추정식의 적합성을 확인하였다. 즉, MDOF 결과 값 대비 0.6%의 오차율을 보이지만, 초기 설계 단계에서 사용하기에는 공학적으로 유용 범위에 있다고 판단하였다.

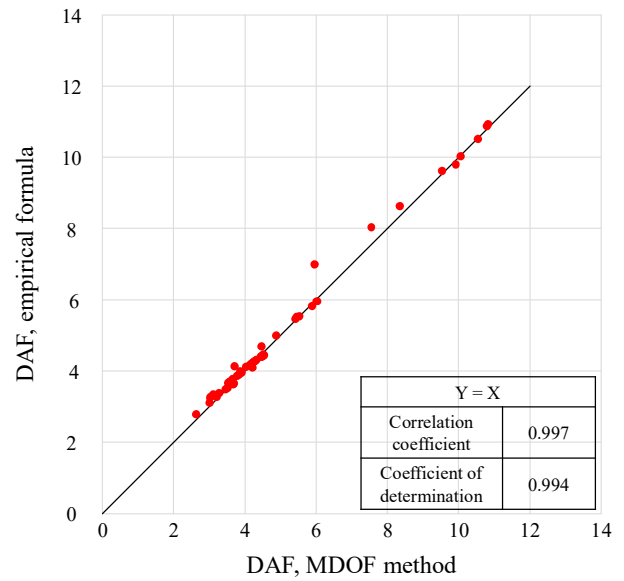


Fig. 14. Correlation analysis result between MDOF method and the proposed empirical formula.

Table 6과 같이 기존 MDOF 결과 값 대비 DAF 추정식은 계산을 위한 별도의 수치해석 모델링 및 전문 계산 프로그램이 필요하지 않은 장점이 있다. 계산에 필요한 시간은 0.5 분 이내로, 기본 설계 단계에서 레그 중량 결정하는 데 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

Table 6. Comparison result of modified formula and existing method with damping coefficient of 5%

Item	Modified DAF	DAFs (SDOF-DAF)	DAFm (MDOF-DAF)
Modeling time	No need	No need	60 minutes
CPU time	0.5 minute	0.5 minute	60 minutes
Accuracy	99.4 %	45.4 %	100 %

5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 DAF를 계산하는 대표적인 두 방법을 비교하고 정확도가 우수한 MDOF 방법으로 계산된 DAFm 값을 기준으로 수정된 DAF 추정식을 제안하였다. DAF 계산에 있어서 SDOF 방법은 감쇠계수 5% 조건이고, Ω 가 1.0 영역에서 DAF 결과는 평균 2배 이상 크게 평가하고 있으며, Ω 가 0.9 이하, 1.1 이상 영역에서는 낮게 평가하고 있다. 레그 구조 설계 시 동적 효과를 직접적으로 고려해주는 DAF 계산값

의 정확도 부족은 불필요한 보강을 포함한 비현실적인 결론을 야기시킬 수 있는 문제점을 갖고 있다.

본 연구에서 제시된 추정식은 Ω 가 0.7~1.3인 구간, 감쇠계수 1%~7% 구간에서 사용이 가능하다. 구조 설계 변수 (Bay height, Chord distance)들은 고유진동수 변화에 따른 DAF의 변화 패턴을 따를 뿐 DAF 값에 직접적인 영향을 주지 않았다. 이를 통해 제시된 DAF 추정식은 파이프형태의 유사 구조로 구성되어 있는 고정식 잭업에도 사용될 수 있을 것으로 판단되나, 이는 추후 연구로 확인될 필요가 있다.

본 연구에서 제시한 DAF 추정식은 계산 준비시간 포함하여, 0.5분 이내에 동적영향 계수를 계산할 수 있도록 설계되었기 때문에, 초기 설계단계에서 동적효과를 효율적으로 결정하는데 역할을 할 것으로 기대된다. 또한, 본 연구에서 개발된 추정식과 매개변수 분석 결과는 초기 설계 단계에서 효율적으로 WTIV의 설계 인자를 결정하는데 도움이 될 것이다.

향후 연구로 제시된 DAF 추정식을 이용한 WTIV의 레그 및 스퍼드캔 구조물의 최적화 기법 개발에 관한 연구가 필요 할 것으로 판단된다.

사 사

본 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

References

- [1] ABS(2014), American Bureau of Shipping, Guidance Notes on Dynamic Analysis Procedure for Self-elevating Units, Houston, USA.
- [2] DNV(2010), Det Norske Veritas, Recommended Practice DNV-RP-C205: Environmental Conditions and Environmental Loads, Bærum, Norway.
- [3] European Standard(2005), Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1.1: General Rules and Rules for Building, Brussels, Belgium.
- [4] Hai, T. V.(2020), Global Response Analysis of the Jack-up Platform Odin, Master Thesis-University of Rostock, pp. 14-91.
- [5] Heo, S. H., W. C. Koo, and M. S. Park(2016), Dynamic Response Analysis of a Jack-up Leg with Pile-soil Interaction, Journal of the New & Renewable Energy, Vol. 12, No. 1, pp. 10-18.
- [6] Park, J. S., Y. C. Ha, and J. K. Seo(2020), A Study on Load-carrying Capacity Design Criteria of Jack-up Rigs under Environmental Loading Conditions, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 26, No. 1, pp. 103-113.
- [7] SACS(2018), SACS Introduction - Release 11.4, Bentley Systems, Pennsylvania. USA.
- [8] SNAME(2002), Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME) Technical & Research Bulletin 5-5a, Guidelines for Site Specific Assessment of Mobile Jack-up Units, New Jersey, USA.
- [9] Winterstein, S. R. and R. Løseth(1991), Jackup Structures Nonlinear Forces and Dynamic Response, Reliability and Optimization of Structural System '90, Lecture Notes in Engineering, Vol. 61, pp. 349-358.

Received : 2021. 06. 18.

Revised : 2021. 07. 27. (1st)

: 2021. 08. 17. (2nd)

Accepted : 2021. 10. 28.