



[2016-3-OE-002]

# 해저파일-지반 상호작용을 고려한 작업 레그의 동적 응답 해석

허상환<sup>1)</sup> · 구원철<sup>2)\*</sup> · 박민수<sup>3)</sup>

## Dynamic Response Analysis of a Jack-up Leg with Pile-Soil Interaction

Sanghwan Heo<sup>1)</sup> · Weoncheol Koo<sup>2)\*</sup> · Min-Su Park<sup>3)</sup>

Received 30 May 2015 Revised 10 October 2015 Accepted 10 November 2015

**ABSTRACT** Using the substructure method, numerical models of pile-soil interaction of diagonal and diamond types of jack-up legs were developed for dynamic response analysis. Wave and current forces acting on the leg were calculated using the modified Morison equation. Wind load was computed using the DNV formula. Modal analysis was performed to estimate the eigenvalues of the structure. The Newmark-beta method was used to calculate the dynamic behaviors of the structure in the time domain analysis. Maximum displacement and bending stress were computed for each type of leg. Reliability analysis was carried out for both types of legs to obtain a reliability index for the uncertainty of input wave periods.

**Key words** Jack-up leg(작업 레그), Substructure method(부분구조법), Morison equation(모리슨방정식), Wind load(풍하중), Modal analysis(모드해석), Newmark-beta method(뉴마크 베타법), Reliability analysis(신뢰성 해석)

### Nomenclature

 $[M]$  : mass matrix $[K]$  : stiffness matrix $[C]$  : damping matrix $u$  : displacement vector of structure, m $F_a$  : environmental force, N $F_b$  : reaction force between the structure and the foundation, N $v_w$  : wind velocity, m/s $v_R$  : reference 1 minute wind speed at  $z_0$ , m/s $z_0$  : reference height, m $z_w$  : height of load point above the still water level, m $n$  : 11 for elevated condition, 14 for ocean transit condition in open sea $\rho_w$  : air density, kg/m<sup>3</sup> $C_s$  : shape coefficient of member $A_w$  : projected area of member in the direction of air flow, m<sup>2</sup> $\alpha$  : angle between the direction of the wind and the cross sectional plane of the member, rad

1) Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University

2) Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University E-mail: wckoo@inha.ac.kr  
Tel: +82-32-860-7348 Fax: +82-32-864-5850

3) Structural Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology

$F_{Wind}$	: wind force, N
$F_{Wave}$	: wave force, N
$v_s$	: water particle velocity, m/s
$\rho_s$	: seawater density, kg/m <sup>3</sup>
$V$	: enclosed volume of member, m <sup>3</sup>
$A_s$	: projected area of member in the direction of seawater flow, m <sup>2</sup>
$C_m$	: inertia coefficient of member
$C_d$	: drag coefficient of member
[L]	: influence matrix
$T_s$	: significant wave period
$u_a^c$	: displacement caused by mass forces for the fixed foundation system
$R_p$	: force from the pile head
$E_{soil}$	: modulus of elasticity of soil
$\nu$	: Poission's ratio of soil
$\rho_{soil}$	: density of soil
$v_{soil}$	: shear wave velocity of soil
[G]	: transformation matrix
$S_{\eta}$	: energy spectral density function
$H_s$	: significant wave height
$\eta$	: wave elevation
$N$	: number of waves
$\varphi$	: random phase
$q$	: uncertain parameter
$\bar{q}$	: mean value of the parameter
$\epsilon$	: random number
$\delta$	: variation coefficient
$\beta_R$	: reliability index
$\bar{R}$	: mean value of the paramter
$\bar{S}$	: average response
$\sigma_R$	: standard deviation of $\bar{R}$
$\sigma_S$	: standard deviation of $\bar{S}$

## subscript

a : unconstrained nodal point on the upper structure

b : point connected to the pile-soil foundation

p : pile-soil foundation

## 1. 서 론

전 세계의 주요 에너지원 중 화석연료의 비중과 중요성은 여전히 크지만, 화석연료의 지속적인 광범위한 사용은 인류에게 다양한 환경재해 및 자연재해를 야기 시킨다. 이에 따라, 화석연료에 대한 의존성을 줄이고, 전 지구적인 환경 문제를 해결하기 위해 다양한 친환경에너지에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 풍력발전은 신재생에너지원 중 가장 실용화에 근접한 대안이며, 뚜렷한 개발 효과와 더불어 급속한 확대 기조를 보이고 있다.<sup>[1]</sup>

해상 풍력발전은 육상 풍력발전에 비해 양질의 바람으로 보다 효율적인 발전을 할 수 있으며, 바다라는 공간을 활용하여 대규모 발전 단지 조성에 유리하다.<sup>[2]</sup> 해상 풍력 발전 기의 설치는 고중량의 상부구조물을 안정적으로 설치하기 위해 Jack-up 시스템을 갖춘 해상 풍력 발전기 설치선을 필요로 한다.<sup>[3]</sup> 설치선이 작업을 수행할 때 대부분의 환경 외력은 Jack-up leg에 작용하기 때문에, 안정적인 작업 수행을 위해 다양한 환경조건하에서 Jack-up leg의 안전성 확보가 필수적이다.

Jack-up leg에 대한 해양 동역학적 수치해석 연구는 파랑중 비선형 운동 응답의 관점에서 많은 연구가 진행되었고<sup>[4,5,6]</sup>, 최근에 다양한 형상의 leg에 대한 해양동역학적 수치해석을 수행하였다.<sup>[7]</sup> 또한, 고정 지반 조건 하에서 단순화된 해상 풍력 발전기 설치선에 대한 통합 운동해석도 수행된 바 있다.<sup>[8]</sup> 그러나, 해저면에 파일형태로 설치되는 Jack-up leg의 특성상 해양 동역학적 거동 특성을 보다 명확하게 파악하기 위해서는 해저파일-지반의 상호작용을 반드시 고려해야 한다.

본 연구에서는 Jack-up leg 구조물을 부분구조법을 이용하여 상부 구조물과 해저 지반 구조물로 나누어, 해저파일-지반의 상호작용을 구조물 운동방정식에 포함하여 해석하였다. 부분구조법을 이용한 파일조건과 파일-지반 상호작용 연계 해석은, Park 등의 다목적 고정식 사각형 해양구조물에 대한 해양 동역학 거동 해석 연구를 통해 관련

식이 개발되었다.<sup>[9]</sup>

본 연구에서는 위 개발식을 응용하여, 다양한 단일형 Jack-up leg 형태에 대한 해양동역학적 해석을 통해 해저면으로부터 수직 위치에 따른 최대 수평 변위와 최대 굽힘 응력을 평가하였다. Jack-up leg는 파장에 비해 지름이 작은 세 장체이므로 이에 작용하는 파랑하중은 모리슨 방정식을 이용하여 계산하고, 수면 위 상부 구조물에 작용하는 풍하중은 선급에서 규정한 식을 이용하여 구하였다. 구조물의 동적 응답을 계산하기 위해, 모드 해석과 뉴마크 베타법을 이용하여 시간영역에서 해석하였다. 또한, 유의파주기 변화에 따른 구조물 운동 변위에 대한 신뢰성 해석을 수행하여 안정성을 검토하였다.

## 2. 문제의 정식화

### 2.1 운동 지배 방정식

부분구조법을 이용하여 유체 영향 구조물과 해저파일-지반의 상호작용을 고려한 구조물의 운동 지배방정식은 식 (1)과 같다.<sup>[9,10]</sup>

$$\begin{aligned} & \left[ \begin{bmatrix} M_{aa} \\ M_{ba} \\ M_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{ab} \\ M_{bb} \end{bmatrix} \right] \begin{bmatrix} \ddot{u}_a \\ \ddot{u}_b \end{bmatrix} + \left[ \begin{bmatrix} C_{aa} \\ C_{ba} \\ C_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{ab} \\ C_{bb} \end{bmatrix} \right] \begin{bmatrix} \dot{u}_a \\ \dot{u}_b \end{bmatrix} \\ & + \left[ \begin{bmatrix} K_{aa} \\ K_{ba} \\ K_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{ab} \\ K_{bb} \end{bmatrix} \right] \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_a \\ F_b \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

$F_a$ 는 구조물에 작용하는 환경 외력으로써, 본 연구에서는 유체영역의 파랑하중과 수면 위 구조물에 작용하는 풍하중을 가정하였으며,  $F_b$ 는 해저파일-지반의 상호작용에 의해 발생하는 반력이다.

해수면 위 수직 높이에 따른 바람의 속도 분포는 식 (2)와 같다.<sup>[11]</sup>

$$v_w(z_w) = v_R \left( \frac{z_w}{z_0} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

본 연구에서는 설치선의 작업 수행 환경일 때 구조물의 응답 해석이 목적이므로,  $n$ 의 값을 11로 정하였다.

수면 위 구조물에 작용하는 풍하중은 식 (3)과 같이 계산할 수 있다.

$$\{F_{Wind}\} = [\because 0.5\rho_w C_s A_w \cos \alpha \because] \{v_w^2\} \quad (3)$$

Leg 구조물은 실린더 형태의 파일로 구성되어 있으므로, 형상계수( $C_s$ )는 원형실린더 표준값인 0.5를 적용하였다.

구조물에 작용하는 파랑하중은 입사파장에 비해 구조물 지름이 작기 때문에, 세장체 구조물로 가정하여 모리슨 방정식을 이용하여 계산할 수 있으며, 구조물과 물 입자의 상호작용을 고려한 수정된 모리슨 방정식은 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} \{F_{Wave}\} &= [C_I] \{v_a\} - [C_A] \{\dot{u}_a\} \\ &+ [C_{Drag}] \{[\dot{v}_a - \dot{u}_a] (\dot{v}_a - \dot{u}_a)\} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서 } [C_I] &= [\because \rho_s C_m V \because] \\ [C_A] &= [\because \rho_s (C_m - 1) V \because] \\ [C_{Drag}] &= [\because 0.5\rho_s C_d A_s \because] \end{aligned}$$

본 연구에서 고려한 leg 구조물은 원형실린더 형태의 요소들로 구성되어 있으며, 관성 계수와 항력 계수의 값은 원형실린더 표준값인 2와 1을 각각 적용하였다. 식 (4)의 우변 세 번째 항은 비선형 항력항이며, 본 연구에서는 등가 선형화법과 최소자승법을 이용하여 이를 선형화하여 해석 결과의 신뢰성을 유지하면서 계산의 편의성을 도모하였다. 본 계산에 적용된 등가 선형화법은 기존 연구를 통해 그 해석 결과의 신뢰성이 입증되었다.<sup>[7,12]</sup> 계산된 파랑하중(식 (4))과 풍하중(식 (3))을 운동 방정식 (1)에 대입하면 최종 운동 지배방정식 (5)를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & \left[ \begin{bmatrix} \widetilde{M}_{aa} \\ M_{ba} \\ M_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{ab} \\ M_{bb} \end{bmatrix} \right] \begin{bmatrix} \ddot{u}_a \\ \ddot{u}_b \end{bmatrix} + \left[ \begin{bmatrix} \widetilde{C}_{aa} \\ C_{ba} \\ C_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{ab} \\ C_{bb} \end{bmatrix} \right] \begin{bmatrix} \dot{u}_a \\ \dot{u}_b \end{bmatrix} \\ & + \left[ \begin{bmatrix} K_{aa} \\ K_{ba} \\ K_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{ab} \\ K_{bb} \end{bmatrix} \right] \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{F_{Wind}\} \\ \{F_b\} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서 } [\widetilde{M}_{aa}] &= [M_{aa}] + [C_A] \\ [\widetilde{C}_{aa}] &= [C_{aa}] + [C_{Drag}] \end{aligned}$$

구조물의 변위는 정적 변위와 동적 변위로 구성되어 있으며, 이를 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \{u_a\} \\ \{u_b\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [I] & [L] \\ 0 & [I] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_a^c\} \\ \{u_b\} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

여기서  $[L] = -[K_{aa}]^{-1}[K_{ab}]$

한편, 해저파일-지반의 상호작용에 의해 발생하는 반력  $F_b$ 는 식 (5)에 식 (6)과 변환 행렬을 대입하여 구할 수 있다. 여기서 임피던스 모델을 이용하면 운동방정식을 다음과 같이 표현할 수 있다.<sup>[10]</sup>

$$[M_p]\{\ddot{u}_p\} + [C_p]\{\dot{u}_p\} + [K_p]\{u_p\} = \{R_p\} \quad (7)$$

여기서 감쇠행렬과 강성행렬은 구조물과 지반의 탄성계수, 해저파일의 전단파속도 및 지름과 단면모멘트, 지반의 전단파속도를 이용하여 구할 수 있다. 이 때, 지반의 미소변형 전단탄성계수(small-strain shear modulus)는 지반의 전단파속도의 제곱과 밀도의 곱으로 구할 수 있으며, 지반의 탄성계수(elastic modulus)는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.<sup>[13]</sup>

$$E_{soil} = 2.0(1+\nu)\rho_{soil}v_{soil}^2 \quad (8)$$

$F_b$ 와 해저파일의 윗 부분에 작용하는 힘  $R_p$ 의 관계는 식 (9)와 같으며,  $F_b$ 와 식 (7), (9)를 이용하면 운동 지배 방정식을 간단히 표현할 수 있다.<sup>[14]</sup>

$$[G]^T\{F_b\} = -\{R_p\} \quad (9)$$

일반적으로 구조물의 동적 운동 특성은 구조물의 고유주기에 따라 달라지고, 이를 모드 해석을 통하여 구조물의 고유주기와 모드 형상을 구할 수 있다. 또한, 구조물의 운동응답을 시간영역에서 도출하기 위해 뉴마크 베타법을 이용하여 계산을 수행하였다.<sup>[7]</sup>

## 2.2 파랑 스펙트럼

본 연구에서는 해상의 불규칙 파를 고려하기 위해 충분히 발달한 풍파에 대한 주파수 스펙트럼 모델 중 하나인 Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼을 적용하였다.<sup>[15]</sup> 이를 이용하면 유의파고와 유의주기에 따른 에너지 스펙트럼은 식 (10)과 같이 표현할 수 있다.

$$S_{\eta\eta}(\omega) = 2516.7 T_s^{-4} \omega^{-5} H_s^2 \exp\left(-\frac{1636.5}{(T_s\omega)^4}\right) \quad (10)$$

파의 고도는 식 (11)에 의해 구할 수 있으며, 이를 이용하여 물 입자의 속도와 가속도를 구할 수 있다.<sup>[16]</sup>

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^N \sqrt{2S(\omega)} \Delta\omega \cos(\omega_i t + \varphi_i) \quad (11)$$

본 연구에서는 총 500개의 규칙파들을 이용하여 불규칙파를 표현하였으며, 파주파수의 범위는 0.01rad/s부터 2.0rad/s까지를 적용하였다.

## 2.3 신뢰성 해석

다양한 환경 외력 인자의 영향에 따른 해양 구조물의 동적 거동 안정성 검토를 위해 신뢰성 해석을 수행하였다. 입력되는 환경 인자 매개 변수의 불확실성에 따른 구조물의 동적 응답 변화를 분석하여 구조물의 동적 안정성을 예측 할 수 있다. 입력 매개 변수에 따른 불확정 변수는 식 (12)로 표현할 수 있다.

$$q = \bar{q}(1 + \epsilon\delta) \quad (12)$$

여기서  $\epsilon$ 는 -1부터 1사이의 값을 가지는 임의의 수이며,  $\bar{q}$ 는 입력 매개 변수의 평균값,  $\delta$ 는 입력 매개 변수의 변화 계수를 나타낸다. 신뢰성 지수는 식 (13)에 의해 계산할 수 있다.<sup>[17]</sup>

$$\beta_R = \frac{\bar{R} - \bar{S}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (13)$$

$\sigma_R$ 은 매개 변수의 표준 편차로써, 매개 변수의 평균값과 멤버 강도의 변화 계수의 곱으로써 구할 수 있다. 일반적으로 신뢰성 지수가 3보다 클 경우, 적용된 입력 매개변수에 대한 구조물의 안정성이 확보되었다고 판단할 수 있다.

### 3. 수치 결과 및 분석

다양한 형태의 Jack-up leg에 대한 해양 동역학적 수치 계산을 통해, 최대 운동 변위와 굽힘 응력이 상대적으로 작은 leg 형상이 Diagonal 형과 Diamond 형임을 확인하였다.<sup>[7]</sup> 따라서, 본 연구에서는 이 두 형상의 leg에 대해 보다 정밀한 해양동역학적 거동 해석을 위해, 해저파일-지반 상호작용을 포함하여 동적 응답 해석을 수행하였다.

Fig. 1은 Diagonal 형상과 Diamond 형상의 단일 leg의 모델을 나타낸 것이다. 모델들의 BAY 한 개의 길이는 10m이고, 10개의 BAY로 구성되어 총 leg의 길이는 100m이다. 구조물 자체 보강을 위해 10m 간격으로 수평 부재(Horizontal member)와 Span breaker member를 배치하였다. 수평 부재들의 보강을 위해 경사 부재(Inclining bracing member)를 부재 사이에 배치하게 되는데, 배치 형태에 따라 leg의 형상이 구분된다. Diagonal 형 leg는 총 153개의 삼차원 보 요소(Beam element)와 63개의 노드점으로 구성되어 있으며, Diamond 형 leg는 총 264개의 삼차원 보 요소와 93개의 노드점으로 구성되어 있다. 각 멤버들은 steel로 구성되어 있고, 탄성계수는  $2.1 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$ ,

강성계수는  $8.1 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$ , 단위 부피당 무게는  $77 \text{ kN/m}^3$ 를 사용하였다. 각 member별 지름과 두께는 Table 1에 나타내었다.

구조물의 고유주기와 모드 형상은 모드 해석을 이용하여 구하였다. Table 2는 해저면에 고정 지반 조건을 적용하였을 때, leg 형상에 따른 1차부터 5차모드까지의 고유주기는 모두 1.3초 내외의 값을 가지는 것을 확인할 수 있다.

해저파일 및 지반의 물성치는 Table 3에 나타내었다. 해저면에 침투된 파일은 steel로 구성되어 있다고 가정하였으며, 각 chord당 하나의 해저파일이 연결되어 있다. Fig. 2는 Diagonal 형의 단일 leg의 해저파일-지반 모델링을 나타낸 것이다.<sup>[18]</sup>

계산을 수행하기 위한 환경 조건으로 우리나라 서남해의 50년 재현주기 해양파와 풍속을 적용하였으며, 유의파고와 유의파주기는 각각 7m, 11.76sec 이다.<sup>[19]</sup> 또한, 서남지역 인 군산과 목포 해역에서의 50년 재현주기 풍속(10 minute 기준)은 각각 23.8m/s, 26.6m/s로 제시되었다.<sup>[20]</sup> 이의 평균값인 25.2m/s를 1 minute 기준 풍속으로 변환하면 약 36.04m/s이며, 본 연구에서는 이 값을 계산에 사용하

Table 1. Structural properties of member

Member	Diameter (mm)	Thickness (mm)
Chord	450	100
Horizontal	350	50
Span breaker	220	20
Inclining	270	30

Table 2. Natural period of Jack-up leg

	First mode	Second mode	Third mode	Fourth mode	Fifth mode
Diagonal	1.311	1.309	0.760	0.331	0.331
Diamond	1.354	1.346	0.604	0.316	0.316

Table 3. Properties of pile and soil

Description	Value
Diameter of pile	450 mm
Shear wave velocity of pile	3,200 m/s
Density of soil	1.7 ton/m <sup>3</sup>
Poisson's ratio of soil	0.4

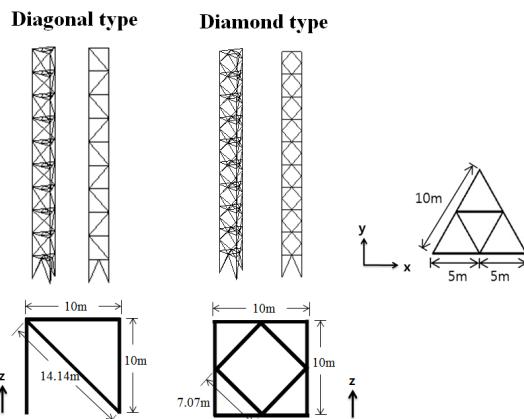


Fig. 1. Diagonal and Diamond types of Jack-up leg

였다. 이 때, 구조물에 작용하는 입사파와 바람은 모두 x축 방향으로 입사한다고 가정하였으며, 수심은 70m를 적용하였다.

Fig. 3은 해저면에 고정 지반 조건을 적용하였을 때의 leg 상부의 운동 변위를 시계열로 나타낸 것이며, 시간영역 해석을 위한 시간간격(time step)은 0.05초, 총 계산시간은 250초를 적용하였다. 고정 지반 조건은 leg의 맨 밑부분과 해저 지반이 고정되어 있는 것이며, 이는 지반의 전단파속도가 매우 큰 것과 같은 의미를 가진다. 불규칙파가 입사함에 따라 Leg의 운동 변위도 불규칙하게 변하며, 풍하중의 영향에 의해 변위의 평균값이 0이 아닌 것을 확인할 수 있다. 또한, Diagonal 형 leg가 Diamond 형 leg에 비해 보다 큰 수평 변위를 가짐을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 두 형태 leg의 수직 코드(chord)에서 발생한 최대 운동 변위와 최대 굽힘 응력을 해저면에서부터 수직 위치에 따라 비교한 것이다. 이 때, 해저면은 Fig. 3과 마찬가지로 고정 지반 조건을 적용하였으며, 이에 따라 해저

면에서의 변위는 0인 것을 확인할 수 있다. 최대 운동 변위는 Diagonal 형과 Diamond 형 각각 0.808m, 0.612m의 값을 가지며, Fig. 3에서 확인한 것과 같이 Diamond 형이 더 작은 것을 알 수 있다. 이는 Diamond 형이 더 많은 경사 부재들로 구성되어 있어, 수평 움직임에 대한 저항이 더 크기 때문이다. 최대 굽힘 응력은 Diamond 형 일 때 훨씬 큰 값을 가지는데, 이는 경사 부재가 많기 때문에 leg의 중량이 더 크기 때문으로 판단된다. 또한, 해저면으로부터 25m 지점에서 굽힘 응력 값이 가장 큰 값을 가지는 것을 알 수 있으며, Diagonal 형의 경우는 20m 지점에서 가장 큰 값을 가진다. 단일 실린더 형태의 구조물의 경우, 최대 굽힘 응력은 해저면에서 발생한다. 본 연구에서 사용된 구조물들은 수직 코드(chord)가 수평 부재와 경사 부재 등으로 연결되어 있으며, 이 영향에 의해 최대 굽힘 응력이 해저면 보다 위쪽에서 발생한 것으로 판단된다.

해저파일-지반 상호작용을 고려한 leg의 운동 변위는 Fig. 5에 나타내었다. 지반의 전단파속도에 따른 leg 상부 ( $z=100m$ )과 해저면( $z=0m$ )에서의 최대 운동 변위를 비교하였는데, leg 상부의 최대 운동 변위는 Diagonal과 Diamond 형상 모두 지반의 전단파속도가 증가함에 따라 전체적으로

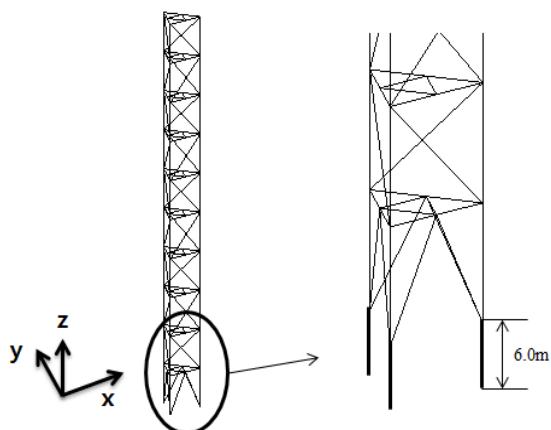


Fig. 2. Diagonal type single Jack-up leg model with pile-soil foundation<sup>[16]</sup>

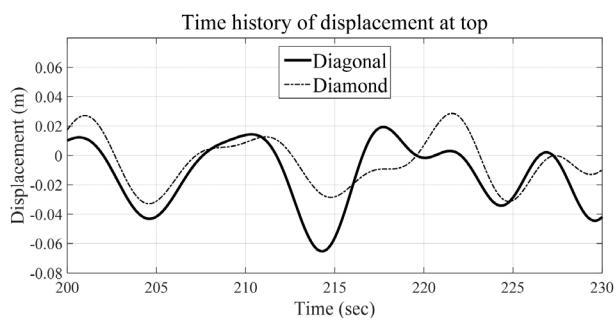


Fig. 3. Time history of displacement at top ( $t=200\sim230$  sec)

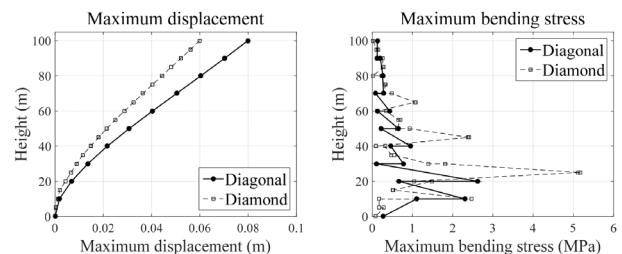


Fig. 4. Maximum displacement and maximum bending stress at vertical locations

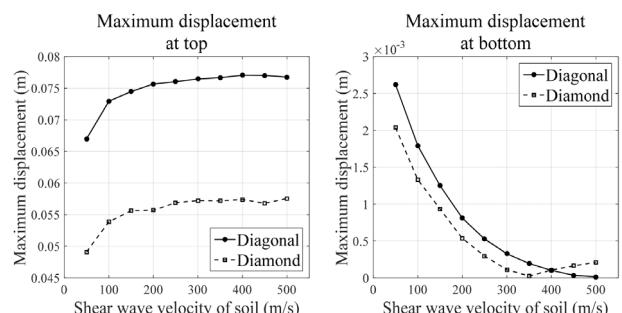


Fig. 5. Comparison of maximum displacement at the top and bottom of leg

증가하는 경향을 보이며, 고정 지반 조건 하에서의 계산 결과에 수렴할 것으로 예측된다. 이처럼 변위가 증가하는 이유는 전단파속도가 증가함에 따라 지반의 경도(단단함)가 증가하여, leg 상부의 운동을 지반에서 흡수하는 정도가 작아지기 때문으로 판단된다. 또한, Fig. 4에서 확인한 바와 같이 Diagonal 형의 운동변위가 Diamond 형에 비해 그 값이 더 큰 것을 확인할 수 있다. 해저면에서 leg의 최대 운동 변위는 Diagonal 형과 Diamond 형 모두 전단파속도에 따라 그 크기가 감소하는 경향을 보인다.

앞서 Fig. 4의 결과를 통해 leg의 최대 굽힘 응력 발생 지점은 Diagonal 형은 해저면으로부터 20m 지점, Diamond 형은 25m 지점인 것을 확인하였다. 계산을 통해 최대 굽힘 응력이 두 번째로 큰 지점은 Diagonal 형은 10m 지점, Diamond 형은 35m 지점인 것을 확인하였으며, 이 때 전단파속도에 관계없이 최대 굽힘 응력 발생 지점은 동일한 것을 확인하였다. Fig. 6은 각 leg 형상별로 최대 굽힘 응력이 가장 큰 두 지점에서의 전단파속도에 따른 결과를 나타낸 것이다. Diagonal 형 leg의 최대 굽힘 응력 지점인 20m 지점에서의 최대 굽힘 응력 변화는 전단파속도가 50m/s 보다 클 때, 전단파속도에 따라 감소하는 경향을 가진다. 반면, 최대 굽힘 응력이 두 번째로 큰 10m 지점에서는 전단파속도의 변화에 따라 값이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 지반이 단단해짐에 따라 최대 굽힘 응력이 발생하는 위치가 10m 지점으로 이동함을 의미한다. 반면, Diamond 형의 경우 최대 굽힘응력 지점인 25m 지점에서의 값은 전단파속도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 가지며, 두 번째로 큰 35m 지점에서의 값 또한 소폭 증가하는 경향을 보인다. 앞서 Fig. 4의 결과를 통해, 지반이 고정조건인 경우에는 25m 지점에서 다른 지점들보다 확연히

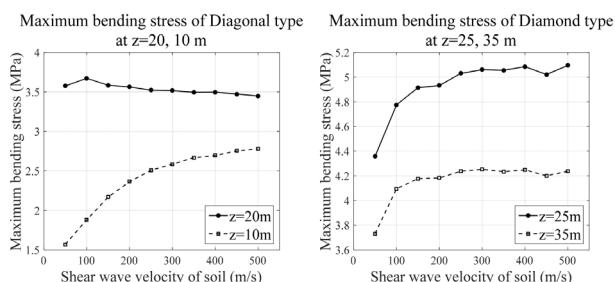


Fig. 6. Comparison of maximum bending stress for various shear wave velocities of soil

더 큰 값을 가지고, 35m 지점에서는 비교적 작은 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 이는 전단파속도가 증가함에 따라 최대 굽힘 응력이 발생하는 위치가 25m 지점으로 이동함을 의미한다. 이상의 결과들을 통해 지반의 전단파속도에 따라 해저파일-지반 상호작용으로 인해 leg 하부의 굽힘 응력에 미치는 영향이 leg의 형상별로 상이함을 확인하였다. 따라서 정밀한 leg 설계를 위해서는 해저지반-구조물 상호작용이 고려된 해양동역학적 해석이 반드시 필요함을 알 수 있다.

Leg 상단에서 최대 운동 변위에 대한 신뢰성 해석을 수행하였다. 설계 변수로 유의파주기를 이용하였으며, 6초에서 14초까지 2초 간격으로 설정 하였다. 허용 설계 변위는 0.2m로 가정하였고, 변화계수들은 모두 0.1을 적용하였다. 각각 350회 내외의 계산을 수행하여, 신뢰성 지수가 일정한 값으로 수렴하는 것을 확인하였다. Fig. 7은 신뢰성 해석의 결과를 나타낸 것이다. Diamond 형의 신뢰성 지수가 Diagonal 형보다 대체로 큰 값을 가지는데, 이는 Diamond 형의 운동 변위가 Diagonal 형보다 더 작음을 의미한다. 또한, Diagonal 형은 유의파주기가 증가함에 따라 신뢰성 지수가 계속 증가하는 것을 확인할 수 있으나, Diamond 형의 경우 소폭 감소하다가 10초 이후부터 증가하는 것을 확인할 수 있다. 신뢰성지수가 증가한다는 것은 구조물의 평균 운동 변위가 감소하는 것을 의미한다. 이는 구조물이 세장체로 이루어져 있어 유의파주기가 증가함에 따라 입사파가 구조물에 주는 영향이 감소하기 때문으로 판단된다. 하지만, 두 형태 모두 신뢰성 지수가 3보다 크기 때문에, 본 계산에서 적용한 입사파주기변화에 따른 구조물의 변위 안정성은 확보되었다고 판단할 수 있다. 본 연구에서는 단

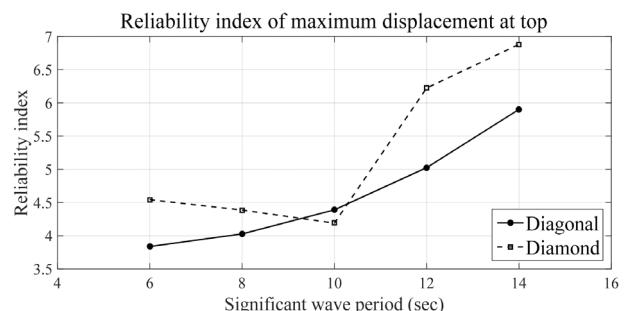


Fig. 7. Reliability index of maximum displacement for significant wave period ( $H_s=7.0\text{m}$ ,  $v_r=36.04\text{m/s}$ ,  $v_s=100\text{m/s}$ )

일 leg에 대한 해양동역학적 해석과 신뢰성 검토를 수행한 것으로, 다수 leg가 포함된 Jack-up 시스템을 설계하는데 중요 기초 자료로 활용될 수 있으며, 본 계산을 통해 leg 형태에 따른 각각의 거동 및 굽힘응력 변화를 파악할 수 있다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 Diagonal 형 및 Diamond 형의 Jack-up leg의 해양동역학적 해석을 부분구조법을 이용하여 해저파일-지반의 상호작용을 고려하여 수행하였다. 구조물에 작용하는 파랑하중은 수정된 모리슨 방정식을 이용하여 계산하고, 풍하중을 선급식을 이용하여 산정하였다. 구조물 운동 모드 해석과 뉴마크 베타법을 이용하여 구조물의 동적 응답을 시간영역에서 해석하였으며, 최대 수평변위와 굽힘응력을 각 높이에 따라 계산하고 비교하였다. 또한, 해저지반의 전단파속도에 따른 두 형태의 leg 구조물의 동적 응답을 비교하였으며, 입사 유의파주기 변화에 대한 구조물의 운동 변위 신뢰성 해석을 수행하여 안정성 여부를 판단하였다. 대체로 Diamond 형 leg가 Diagonal 형보다 상대적으로 작은 운동 변위를 가지고 신뢰성 지수가 큰 것으로 파악되었다. 또한, 지반의 전단파속도에 따라 해저파일-지반 상호작용으로 인해 leg 하부의 굽힘 응력이 leg 형상별로 상이함을 알 수 있었다. 이를 통해 정밀한 Jack-up leg 설계시 해저지반-구조물 상호작용이 고려된 해양동역학적 해석이 반드시 필요함을 확인할 수 있었다.

본 연구는 단일 leg에 대한 해양동역학적 거동 해석과 신뢰성 검토를 수행한 것으로, 다수 leg가 포함된 해상 풍력 발전기 설치선 Jack-up 시스템뿐만 아니라 자켓식 플랫폼 (Jacket platform) 등을 설계하는데 중요 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

## 후 기

본 연구는 광역경제권 선도사업 육성사업(3차)의 지원으로 수행된 연구결과 중 일부임. 이 논문은 2015년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(해양에너지 융복합 인력 양성). 또한 본 논문

은 산업통상자원부 해양플랜트 특성화대학의 지원을 받아 수행되었습니다.

## References

- [1] 김호민, 2013, “풍력발전 국내외 현황 및 풍력용 초전도발전기 기술 전망”, 초전도와 저온공학, 15(1), 4-8.
- [2] Esteban, M.D., Diez, J.J., López, J.S., Negro, V., 2011, “Why offshore wind energy?”, Renewable Energy, 36(2), 444-450.
- [3] 성창경, 오정환, 2014, “서남해 2.5GW 해상풍력사업 추진현황과 이슈”, 대한조선학회지, 51(1), 23-26.
- [4] Zheng, X.Y., Liaw, C.Y., 2004, “Non-linear frequency-domain analysis of jack-up platforms”, International Journal of Non-Linear Mechanics, 39(9), 1519-1534.
- [5] Cassidy, M.J., 1999, “Non-linear analysis of jack-up structures subjected to random waves”, PhD Thesis, University of Oxford.
- [6] Williams, M.S., Thompson, R.S., Housby, G.T., 1998, “Non-linear dynamic analysis of offshore jack-up units”, Computers & structures, 69(2), 171-180.
- [7] 김지석, 박민수, 구원철, 2014, “다양한 형상의 Jack-up Leg에 대한 해양 동역학적 수치해석”, 한국해양공학회지, 28(5), 371-377.
- [8] 허상환, 구원철, 박민수, 2014, “Jack-up Rig 의 다양한 풍하중에 의한 해양 동역학적 수치해석”, 2014년도 한국해양공학회 추계학술대회 논문집, 1, 360-362.
- [9] 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, Coastal, and Ocean Engineering, 138(4), 275-285.
- [10] Yamada, Y., Kawano, K., Iemura, H., Venkataramana, K., 1988, “Wave and earthquake response of offshore structure with soil-structure interaction”, Proceeding of Japan Society of Civil Engineers, Structure Eng./Earthquake Eng., 5(2), 361s-370s.
- [11] Det Norske Veritas, 2012, “Self-elevating Units”, <http://www.dnv.com>
- [12] 허상환, 구원철, 박민수, 2014, “해상 풍력 발전기 설치선을 위한 Jack-up Leg의 해양 동역학적 수치해석”, 2014년

- 도 한국해양공학회 춘계학술대회 논문집, 1, 1820-1823.
- [13] Zhou, Y.G., Chen, Y.M., 2005, “Influence of seismic cyclic loading history on small strain shear modulus of saturated sands.”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 25(5), 341-353.
- [14] Park, M.S., 2009, “Dynamic response evaluations of offshore platforms due to wave force interactions and seismic force”, Ph.D. Dissertation, Kagoshima University, Japan.
- [15] 서경덕, 권혁동, 이동영, 2008, “한국 연안 삼해파의 통계적 특성”, 한국해안·해양공학회논문집, 20(4), 342-354.
- [16] Penzien, J., Kaul, M.K., Berge, B., 1972, “Stochastic response of offshore towers to random sea waves and strong motion earthquake”, Computers & Structures, 2(5-6), 733-759.
- [17] Al-Ansari, M.S., 2013, “Reliability index of tall buildings in earthquake zones”, Open Journal of Earthquake Research, 2(3), 39-46.
- [18] 허상환, 구원철, 박민수, 2015, “해저파일-지반 상호작용을 고려한 잭업레그의 해양동역학적 수치해석”, 2015년도 한국해양공학회 춘계학술대회 논문집
- [19] 최한식, 서승기, 최병렬, 2012, “서남해안에 적합한 해상 풍력발전기 하부기초형식에 대한 연구”, 대한토목학회 학술대회, 554-557.
- [20] 권순덕, 이재형, 2008, “태풍 시뮬레이션을 통한 서남해안의 극한풍속 예측”, 대한토목학회논문집 A, 28(4A), 431-438.