

고정식 자켓형 해양구조물의 지반 물성치에 따른 구조 응답에 관한 연구

한상웅¹·이강수²·장범선^{3,†}·최준환⁴
서울대학교 해양시스템 공학연구소¹
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트 연구소²
서울대학교 조선해양공학과 및 해양시스템 공학연구소³
서울대학교 조선해양공학과⁴

A Study on the Effect of Soil Properties on Structural Behavior of Fixed Jacket Type Offshore Structure

Sangwoong Han¹·Kangsu Lee²·Beom-Seon Jang^{3,†}·Junhwan Choi⁴
Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul National University¹
Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering²
Dept Naval Architecture & Ocean Engineering Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul National University³
Dept Naval Architecture & Ocean Engineering, Seoul National University⁴

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

For a fixed jacket type offshore structure directly supported by the seabed, the structural behavior of offshore structure depends on the soil properties. Soil properties affect on the stiffness of the piles and the boundary condition in the structural analysis. The structural analysis is performed using PSI (Pile-Soil Interaction) suggested in the code and design rule. PSI analysis of the jacket structure is carried out after various soil types are selected according to the soil properties like internal friction angle, undrained shear strength, unit weight and so on. Three types of soil are selected by varying strength for a clay and sand, respectively. The structural analysis of the jacket structure is performed using these soils. The results about axial and lateral reaction force and the stress and displacement on the structure are compared. As a results, the structural response is smaller as the soil becomes more stiff. In conclusion, it is confirmed that the structural response of fixed jacket type offshore platform supported by seabed is sensitive to the change of soil properties.

Keywords : Pile-Soil Interaction(파일-지반 상호작용), Soil properties(지반 특성), Internal friction angle(내부마찰각), Undrained shear strength(비배수 전단강도), Unit weight(단위 중량)

1. 서론

고정식 자켓형 해양구조물은 천해에 설치할 수 있다는 장점으로 인해 오랫동안 많은 지역에서 운용되어 왔다. 고정식 자켓형 해양구조물의 거동을 파악하기 위하여 구조물의 파일을 지지하는 지반과 파일의 상호작용에 관한 선행 연구가 많이 진행되어왔다. Yi et al. (2015)는 자켓 기초의 거동을 해석하기 위하여 파일과 지반 사이의 상호작용(pile-soil interaction)을 고려하였다. 지반 물성치의 비선형성을 고려하기 위하여 확률 변수를 사용한 반면 지반 모델을 등가 선형 스프링으로 단순화하여 연구를 수행

하였다. 또한 친환경 신재생 에너지에 대한 관심이 커지면서 해상 풍력 터빈 하부 자켓 구조물에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 지진 하중에 대한 자켓 구조물의 동적 구조 응답을 구하기 위하여 유한요소해석을 이용한 파일-지반 상호작용 모델을 이용하기도 한다 (Ku & Chien, 2016). 고정식 구조물인 해상 풍력 터빈 중에 하부구조가 트라이포드 같은 구조로 되어있으면 세굴 깊이가 신뢰도 지수에 미치는 영향이 크지 않음으로 파일-지반 상호작용 해석을 안 해도 되지만 파일로 고정되는 구조에는 지반 물성값의 영향이 크기 때문에 파일-지반 상호작용 해석을 수행해야 한다 (Yi et al., 2016). 해상 풍력 터빈의 동적 거동 계산

에 파일-지반 상호작용 모델이 사용되기도 한다. 다양한 지반 조건에 대하여 유한요소해석의 시간 해석이 수행되어 해상 풍력 터빈의 동적 거동을 계산하고, 지진 하중에 대하여 해상 풍력 터빈이 받는 구조 응답에 관하여 연구가 수행되었다 (Pedro et al., 2016). 구조물의 안전성은 지반에 박혀있는 파일의 지지력에 의존하기 때문에 파일-지반 상호작용 해석을 반드시 수행해야 한다 (Park et al., 2014). 파일-지반 상호작용 효과는 지반 물성치의 다양한 특성에 따라 달라지고, 구조물의 거동 또한 이에 따라 많은 영향을 받는다. 실제 지반은 수많은 토질 입자가 모여서 하나처럼 거동하는 물질이고, 그래서 위치와 거동에 따라 물성치가 변하는 비선형성을 가지게 된다. 이러한 비선형성으로 인해 균일 물성치를 가정하거나 깊이에 따른 지반 물성치의 변화만을 고려한 단순 해석적 모델의 해석 결과와 현실적 해석 결과는 차이가 발생하게 된다.

본 논문에서는 파일과 지반 사이의 축 방향 마찰력 및 수평 지지력을 이용한 파일-지반 상호작용 모델에 대하여 설명하였다. 선급 규정을 이용하여 기존에 진행되어있는 연구 내용을 파악하고 이를 이용하여 고정식 자켓형 해양구조물의 구조해석을 수행하였다 (Behrouz, et al., 2012). 지반의 종류와 물성치에 따라 파일-지반 상호작용 효과를 고려한 구조해석을 진행하였다. 다양한 지반 물성치를 고려하기 위하여 점토와 모래를 사용하였고, 각각의 지반을 강도에 따라 세 종류로 나누어 해석을 수행하였다. 상용프로그램인 SACS를 이용하여 모델링 및 해석을 수행하였고, 구조해석 모델은 대표적인 고정식 자켓형 해양구조물 모델을 사용하였다. 구조해석 과정은 API 및 DNV 규정을 참고하여 파일-지반 상호작용 효과를 고려하였다. 지반의 종류에 따른 해석 결과를 비교함으로써 다양한 지반에 대한 구조물에 미치는 영향을 분석하였다.

2장에서는 고정식 자켓형 해양구조물의 구조해석 방법론에 관하여 서술하였다. 먼저 파일-지반 상호작용 모델에 대하여 설명한 후에 해석에 필요한 기본 하중의 조합을 정리하였다. 이후 고정식 자켓형 해양구조물의 구조 모델링 방법 및 해석 방법에 관하여 서술하였다.

3장에서는 파일-지반 상호작용 모델에 대한 케이스 스터디 결과 및 지반에 따른 구조해석 결과에 관하여 서술하였다. 먼저 지반 물성치에 따라 변하는 축 방향 마찰력과 수평 지지력 모델에 관하여 비교분석을 수행하였다. 이후 해당 파일-지반 상호작용 모델을 사용한 구조해석을 수행하고 해석 모델에 관한 정보와 하중 및 경계 조건에 대한 정보를 설명하였다. 이러한 구조해석 결과를 비교하여 지반에 따라 구조물이 받는 영향에 대하여 분석하였다.

4장에서는 최종적으로 외력을 받는 고정식 자켓형 해양구조물을 파일과 지반의 상호작용 효과를 고려하여 구조해석을 수행할 때 지반 물성치에 따른 구조 응답이 받는 영향에 대하여 정리하였다.

2. 방법론

2.1 파일-지반 상호작용을 고려한 해석 방법론

고정식 해양플랜트 구조물의 하부구조는 일반적으로 단일 파일이나 자켓 형식을 사용하고 있다. 파일-지반 상호작용을 묘사할 때에는 파일의 축 방향 마찰력에 대한 t-z 곡선과 수평 지지력에 대한 p-y 곡선을 이용한 비선형 스프링의 조합으로 하부구조를 모델링한다.

아래 Fig. 1에서 보이듯 비선형 파일-지반 상호작용 모델은 비선형 스프링 모델로 표현된다 (Zaaijer, 2006).

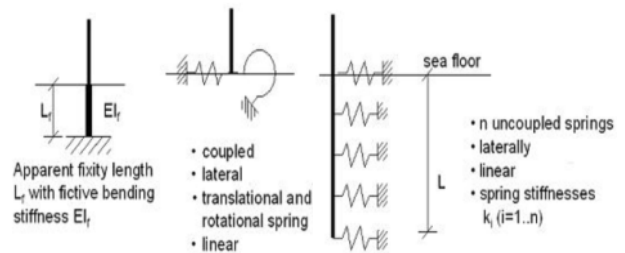


Fig. 1 Non-linear pile-soil spring model (Passon & Kühn, 2005)

t-z 곡선은 축 방향 마찰력에 대한 비선형 스프링 모델을 나타낸다. 점토에 관한 t-z 곡선은 다음과 같이 표현된다 (API, 2002).

$$f(=t_{max}) = \alpha c \tag{1}$$

$$\alpha = 0.5\Psi^{-0.5} \quad \Psi \leq 1.0 \tag{2}$$

$$\alpha = 0.5\Psi^{-0.25} \quad \Psi > 1.0 \tag{3}$$

여기서, 식 (1)의 f 는 최대 축 마찰력(kPa)이고 α 는 무차원 계수, c 는 해당하는 위치의 지반의 비배수 전단강도(kPa)이다. α 는 식 (2), (3)에 표현되어 있으며 Ψ 는 c/p_0 값, 여기서의 p_0 는 해당 위치에서의 유효 과부하 압력(kPa)을 의미한다.

$$f(=t_{max}) = Kp_0 \tan \delta \tag{4}$$

모래의 t-z 곡선에 관한 식 (4)에서 K 는 수평 토압 계수(수평 수직 유효 응력의 비율)이다. 뾰족하지 않은 개방형 파이프 파일의 경우 일반적으로 인장 및 압축 하중 모두 K 를 0.8로 가정한다. 완전 변위가 발생하는 파일(양 끝이 막혀있는 파일)일 때 K 값을 1로 가정한다. δ 는 지반과 파일벽 사이의 마찰각이다.

식 (1)~(4)에 표현된 최대 축 마찰력 f 를 이용하여 Fig. 2에 t-z 곡선을 나타내었다. 목적에 따라 단순화된 탄원전 소성(elastic-perfectly plastic) 곡선을 사용하여 비선형 스프링을 정의하였다.

p-y 곡선은 수평 지지력에 대한 비선형 스프링 모델을 나타낸다. 점토에 관한 p-y 곡선은 다음과 같이 표현된다 (API, 2002).

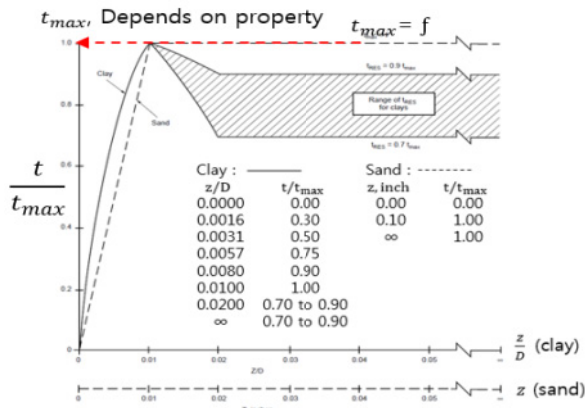


Fig. 2 Axial frictional force of pile : t-z curve (API, 2002)

$$p_u = 3c + \gamma X + J \frac{cX}{D} \text{ for } X < X_R \quad (5)$$

$$p_u = 9c \text{ for } X \geq X_R \quad (6)$$

$$X_R = \frac{6D}{\frac{\gamma D}{c} + J} \quad (7)$$

식 (5), 식 (6)의 p_u 는 극한 저항력(kPa)이다. 극한 저항력을 계산하기 위해 필요한 입력값으로 c 는 점토의 비배수 전단강도(kPa), D 는 파일의 단면지름(mm), γ 는 토양의 유효단위 중량(MN/m^3), J 는 무 차원 경험 상수로 멕시코만의 점토에서는 일반적으로 0.5의 값을 사용한다. 그리고 X 는 토양 표면으로부터의 깊이(mm)이고, 기준이 되는 X_R 는 식 (7)에 나타나 있으며 감소한 저항 영역의 바닥에서 토양 표면까지의 깊이(mm)를 의미한다.

$$p_{us} = (C_1 \times H + C \times D) \times \gamma \times H \quad (8)$$

$$p_{ud} = C_3 \times D \times \gamma \times H \quad (9)$$

$$p = A \times p_u \times \tanh\left[\frac{k \times H}{A \times p_u} \times y\right] \quad (10)$$

$$A = (3.0 - 0.8 \frac{H}{D}) \geq 0.9 \text{ for static loading} \quad (11)$$

모래의 p-y 곡선에 관한 식 (8), (9)에서, p_u 는 극한 저항력으로 힘을 단위 길이로 나눈 값(kPa)이다. 얇은 지역에서는 식 (8)을 적용하고, 깊은 지역에서는 식 (9)를 적용하는데, 설계단계에서는 해당 깊이에서 두 식을 계산하여 작은 값을 사용한다. 계산된 극한 저항력을 이용하여 식 (10)과 식 (11)을 이용하여 파일이 받는 수평 저항력을 계산한다. 여기서 H 는 깊이, ϕ' 는 모래의

내부 마찰각(deg), 그리고 c_1, c_2, c_3 는 Fig. 3에 의해 결정된 계수이다. A 는 주기적 또는 정적 하중 조건을 고려한 계수이고 k 는 지반 반력 계수(kN/m^3)이다.

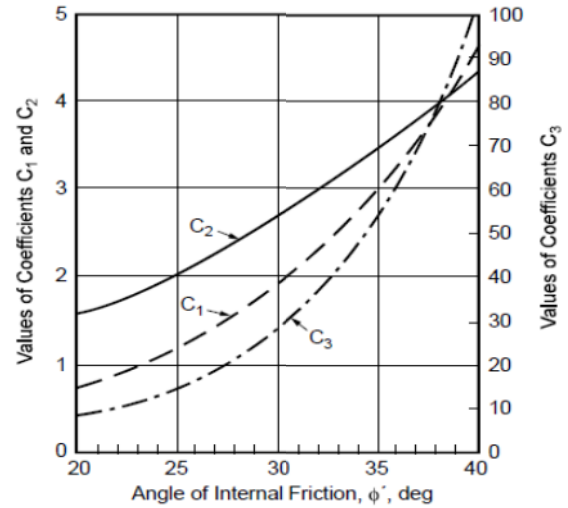


Fig. 3 Coefficients as function of Φ' (API, 2002)

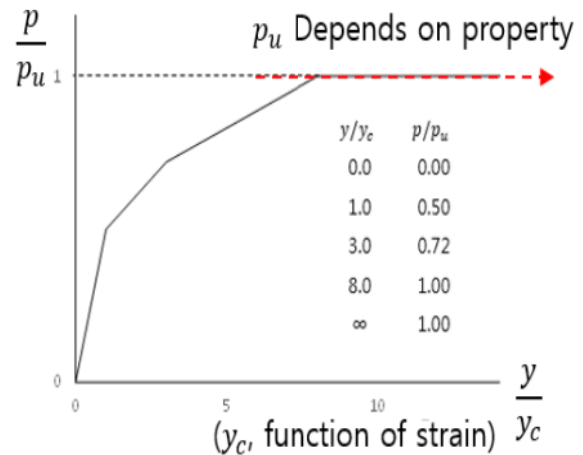


Fig. 4 Lateral bearing capacity : p-y curve (API, 2002)

식 (10)을 이용하여 계산된 수평 저항력을 이용하여 Fig. 4에 p-y 곡선을 나타내었다. t-z 곡선과 마찬가지로 목적에 따라 단순화된 비선형 스프링으로 정의하여 구조해석에 적용하였다.

2.2 자켓형 해양구조물의 해석 방법론

고정식 해양구조물의 구조해석 절차는 API (2002)와 DNV (2014)을 참고하였다. 이와 같은 코드 및 선급 규정의 내용을 기반으로 고정식 해양플랜트 구조물의 환경조건에 따른 설계기준을 적용하였다. 조류, 파랑, 바람과 같은 환경조건을 방향에 맞게 조합하여 해석에 적용하였다 (Yasser & Nagggar, 2004; Lee et

al., 2017). 조류는 설계기준인 DNV (2010)를 참고하여 속도를 2m/s로 설정하였다. 조류와 파랑은 자켓 구조물에 적용하였다. 바람은 상부 구조물의 투영면적과 풍속을 이용하여 풍하중 계산식에 의해 계산하였다.

중력 하중은 플랫폼 층(platform deck), 자켓, 레그(leg) 같은 구조물에 걸리는 하중(structural dead load), 해양구조물에서 사용하는 장비 및 설비에 걸리는 하중(facility dead load), 작동 중에 플랫폼 내의 유체 중량, 장비와 배관에 있는 유체 하중(fluid load), 그리고 실제 하중으로 이동 가능한 하중(live load)과 상부 모듈 하중(topside module load) 등을 고려하였다. 이 외에 드릴 굴착에 의한 하중, 얼음 하중, 진흙 하중, 지진하중 등이 있지만 이번 연구에서는 고려하지 않았다. 이와 같은 기본적인 하중을 조합하여 고정식 해양구조물의 구조해석을 수행하였다.

2.3 파일-지반 상호작용 모델링 방법 및 해석 방법

본 연구에는 상용프로그램인 SACS를 이용하여 고정식 해양구조물의 기본 구조 모델링 및 구조해석을 수행하였다(SACS, 2015).

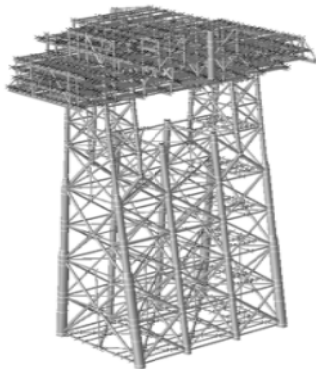


Fig. 5 SACS model of fixed jacket platform

Fig. 5에 나타난 고정식 자켓형 해양구조물에 대하여 파일-지반 상호작용 모델링 및 해석을 수행하였다. 구조물은 2만톤급 상부 구조물의 하중을 지지할 수 있도록 설계되었고, 레그(leg)는 8개이다. 계획 수심은 130 m로 자켓 구조물의 전체 높이는 약 139 m이다. 파일은 84인치를 적용하고 설치 해역의 p-y 곡선, t-z 곡선의 값을 깊이마다 적용하여 해저면 하부의 파일-지반 상호작용 효과를 모델링하였다. 대상 해역은 인도네시아 해역의 환경조건을 고려하였고, 구조물에 적용되는 하중을 고정식 해양구조물의 코드 및 선급 기준에 맞게 조합한 후 고정식 해양구조물에 적용하여 해석을 진행하였다 (ESDEP, 2014).

3. 해석 및 결과

3.1 토질 물성치에 대한 케이스 스터디

다양한 지반에 대한 파일-지반 상호작용 해석을 하기 이전에 지반 물성치에 대한 p-y, t-z 곡선의 케이스 스터디를 수행하였다. 두 지반 중 점토를 선정하여 관입 된 파일의 20m 깊이 위치에서 지반의 물성치에 따른 수평 저항력 및 축 방향 마찰력의 변화를 분석하였다.

Fig. 6은 비배수 전단강도가 증가함에 따라 수평 지지력을 나타내는 p-y 곡선을 나타낸 것이다. 비배수 전단강도가 큰 지반일수록 같은 수평 변위에 대하여 더 큰 수평 저항력을 가진다는 것을 검증하였다.

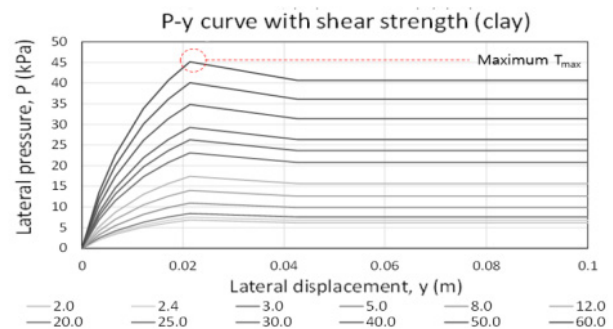


Fig. 6 Case study results to confirm p-y curve

점토의 축 방향 마찰력은 t-z 곡선을 통해 나타내어진다. 점토 지반에서 t-z 곡선을 계산할 때의 입력값으로는 비배수 전단강도, 단위 중량 그리고 파일 깊이가 있다. 이 세 가지 입력값에 대하여 케이스 스터디를 수행하였다. Fig. 7은 관입 된 파일의 20 m 깊이 위치에서 전단 강도가 증가함에 따른 축 방향 마찰력 결과를 나타낸 것이다. Fig. 8은 마찬가지로 관입 된 파일의 20 m 깊이 위치에서 단위 중량에 대한 축 방향 마찰력을 나타낸 결과이다. Fig. 9는 전단 강도가 20 kPa로 균일하다고 가정할 때 파일의 깊이 위치가 증가함에 따른 축 방향 마찰력의 결과를 나타내었다. 그래프에서 나타난 것과 같이 전단강도, 단위 중량 그리고 파일 깊이 위치가 커질수록 축 방향 마찰력은 증가하였다. 일반적으로 지반의 강도가 커질수록 전단강도, 단위중량이 큰 값을 가지고, 깊은 위치에 있는 지반일수록 중력의 영향으로 지반의 강도가 커진다. 이러한 결과를 볼 때 지반의 강도가 커질수록 축 방향 마찰력이 커지는 것을 검증하였다.

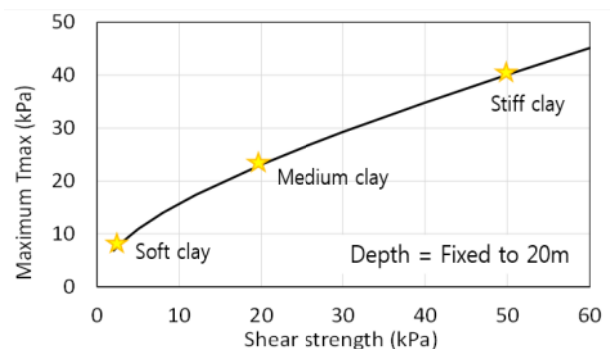


Fig. 7 Shear strength - Max. Tmax curve

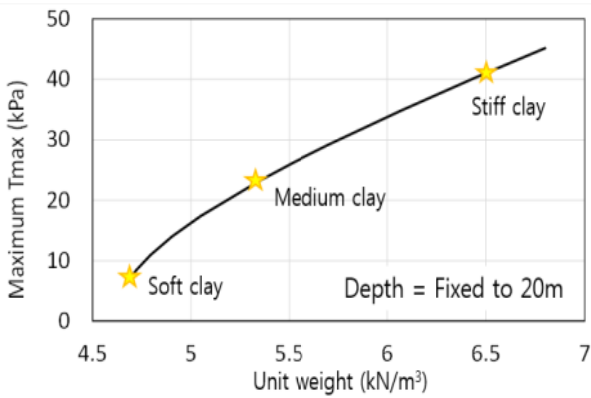


Fig. 8 Unit weight - Max. Tmax curve

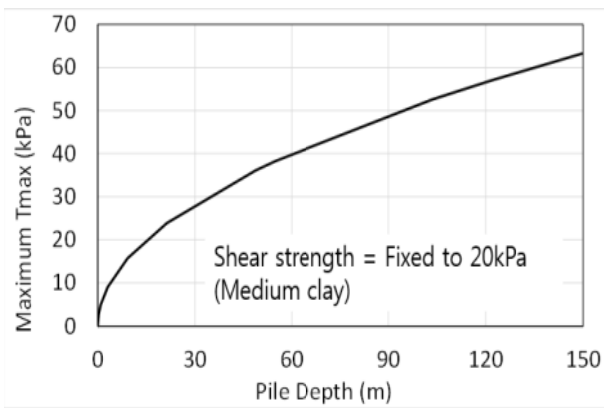


Fig. 9 Pile depth - Max. Tmax curve

케이스 스터디 결과를 이용하여 고정식 자켓형 해양구조물에 파일-지반 상호작용 해석을 수행하기 위한 지반을 선정하였다. 점토와 모래 지반에 대하여 강도에 따라 각각 세 가지 종류의 지반과 물성치를 선정하여 해석에 적용하였다. 비배수 전단강도(c)와 단위 중량(γ)을 조절하여 점토 지반의 종류를 연약 점토(soft clay), 중간 점토(medium clay), 단단한 점토(stiff clay)로 선정하고 Table 1에 정리하였다. 모래 지반의 경우 내부 마찰각(ϕ)과 단위 중량(γ)을 조절하여 느슨한 모래(loose sand), 중간밀도 모래(medium sand), 조밀한 모래(dense sand)를 선정하고 Table 2에 정리하였다. 선정된 점토와 모래 지반에 대하여 p - y 곡선과 t - z 곡선을 계산하여 비교하였다.

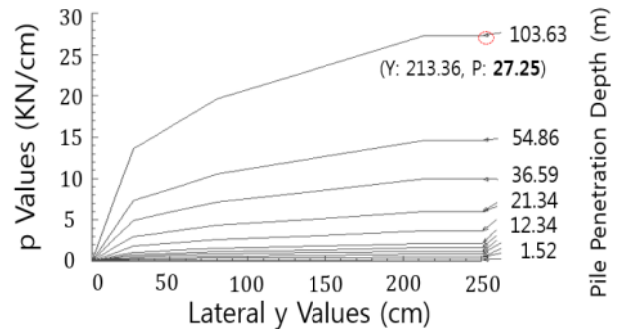
Table 1 Detail of selected clay soil properties

Soil properties	Undrained shear strength - C (kPa)	Effective soil weight - γ' (kN/m^3)
Soft clay	2.4	4.7
Medium clay	20	5.34
Stiff clay	50	6.44

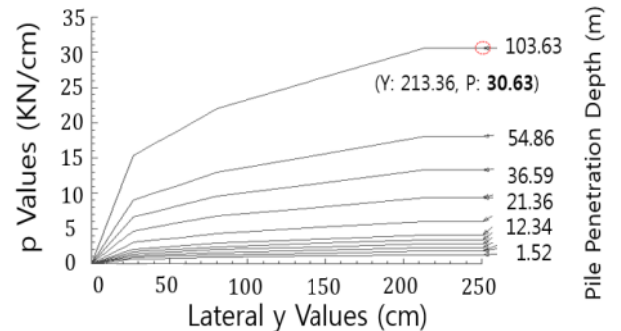
Table 2 Detail of selected sand soil properties

Soil properties	Angle of internal friction - Φ ($^\circ$)	Effective soil weight - γ' (kN/m^3)
Loose sand	27	4.5
Medium sand	32	6
Dense sand	37	8

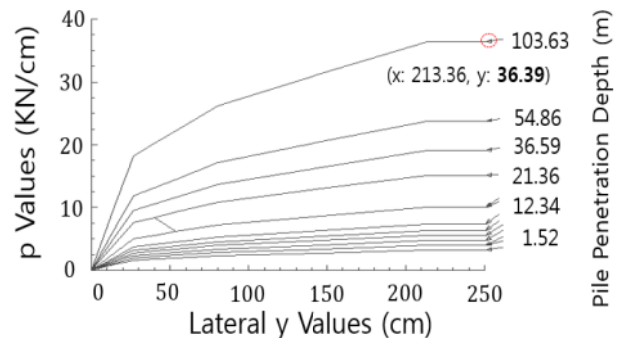
Fig. 10에서는 관입된 파일의 깊이 위치별로 선정된 세 종류의 점토의 수평 지지력을 비교하였고, Fig. 11에서는 축 방향 마찰력을 비교하였다. 비교한 결과는 최대 수평력 및 최대 축 방향 마찰력이 연약 점토에서 단단한 점토로 갈수록 커지는 것으로 나타났다. 이 결과는 연약 점토에서 단단한 점토로 갈수록 구조물을 강하게 지지함을 의미한다.



(a) p - y curve of soft clay



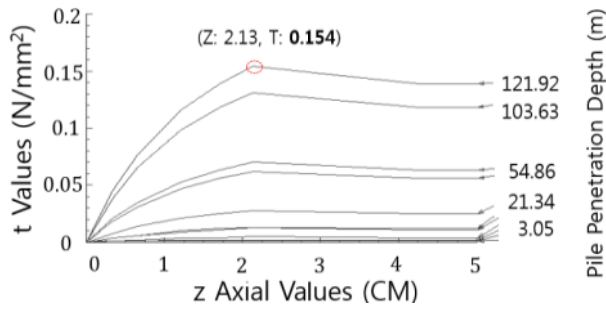
(b) p - y curve of medium clay



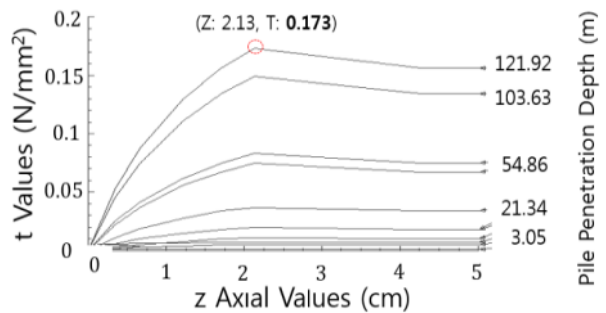
(c) p - y curve of stiff clay

Fig. 10 p - y curve of clays

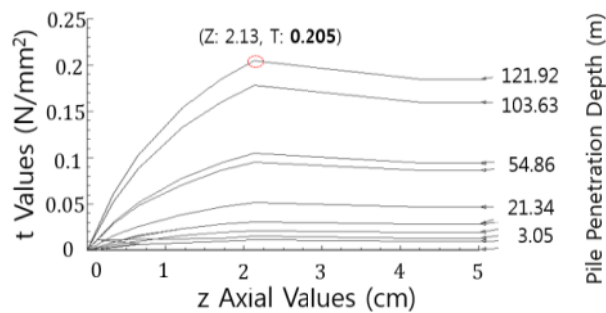
Fig. 12에서는 관입 된 파일의 깊이 위치별로 선정된 세 종류의 모래의 수평력을 비교하였고, Fig. 13에서는 축 방향 미찰력을 비교하였다. 비교한 결과는 최대 수평력 및 최대 축 방향 미찰력이 느슨한 모래에서 조밀한 모래로 갈수록 커지는 것으로 나타났다. 이 결과는 점토와 마찬가지로 느슨한 모래에서 조밀한 모래로 갈수록 구조물을 강하게 지지하여 구조물이 더욱 구속됨을 의미한다.



(a) t-z curve of soft clay

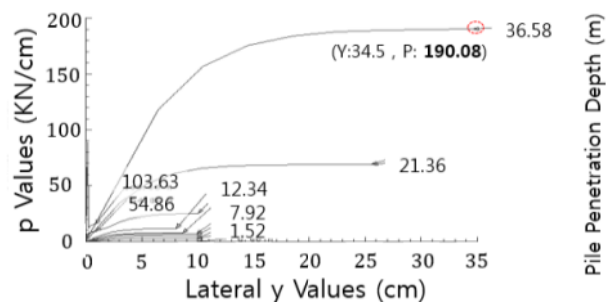


(b) t-z curve of medium clay

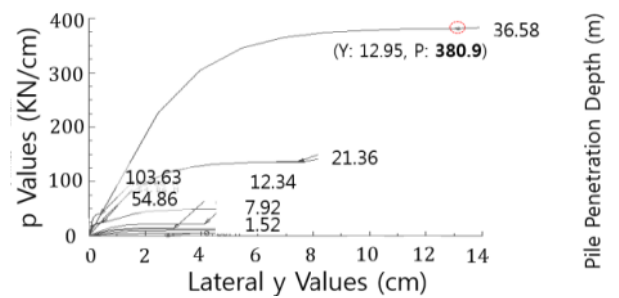


(c) t-z curve of stiff clay

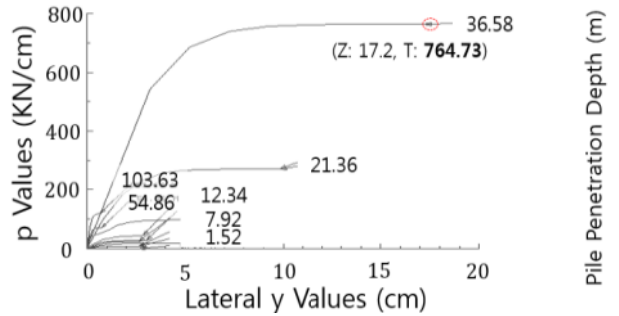
Fig. 11 t-z curve of clays



(a) p-y curve of loose sand

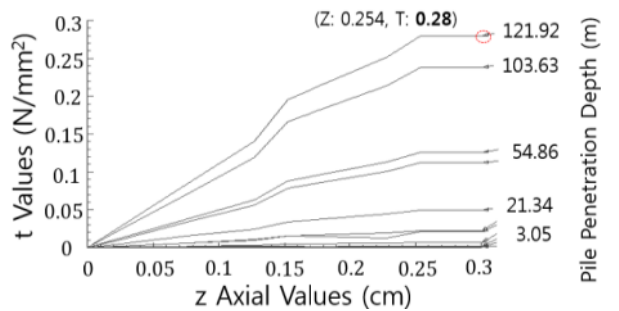


(b) p-y curve of medium sand

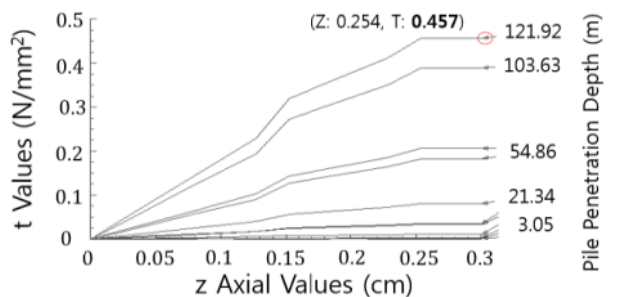


(c) p-y curve of dense sand

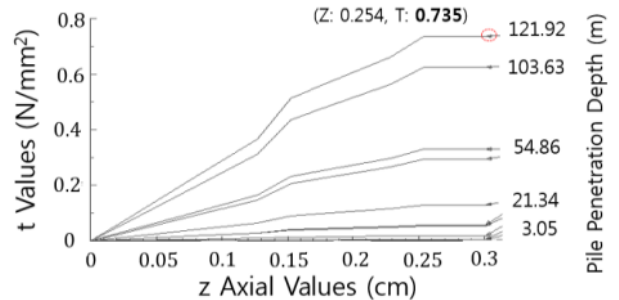
Fig. 12 p-y curve of sands



(a) t-z curve of loose sand



(b) t-z curve of medium sand



(c) t-z curve of dense sand

Fig. 13 t-z curve of sands

3.2 파일-지반 상호작용 효과를 고려한 구조해석

지반 물성치가 구조물에 미치는 영향을 알아보기 위하여 고정식 자켓형 해양구조물의 구조해석을 진행하였다. 지반의 영향을 고려하기 위하여 파일-지반 상호작용 모델을 적용하였다. Fig. 14에는 자켓 구조물 모델에 경계 조건이 적용되는 해저면의 8개 지점을 표시하였다. 경계 조건으로는 비선형 스프링으로 모델링되는 파일-지반 상호작용 효과가 적용되었다. 파일-지반 상호작용 모델은 파일의 제원과 지반의 t-z 곡선, p-y 곡선을 이용하여 모델링되었다.

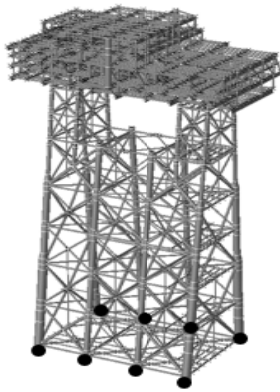


Fig. 14 SACS model and boundary condition

구조해석에 적용된 하중 정보는 Table 3에 표시하였고, 이러한 하중이 적용되는 방향은 Fig. 15에 나타내었다. Table 3에 표시된 하중의 종류는 2.2장에서 설명되었다. 이러한 하중들을 방향에 따라 조합하여 구조해석을 진행하였다.

Table 3 Condition of load case

Load case	Identification
LC1	Gravity load
LC2	Topside module load
LC3.1 ~ LC3.8	Environment load 0°~ 360° (45° Intervals)

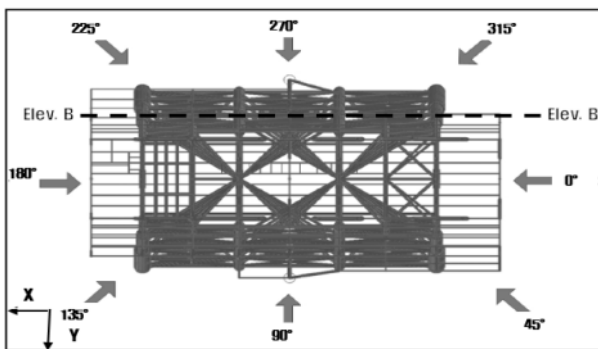


Fig. 15 Direction of environment load

3.2.1 구조해석으로 인한 파일의 결과 분석

각 방향에서의 환경하중을 이용한 자켓 모델의 구조해석 결과 중 Unity Check(허용응력비) 값을 기준으로 가장 취약한 조건에서의 파일 해석 결과에 대하여 분석하였다. 파일의 깊이별로 발생하는 축 응력, 굽힘응력, 전단응력 등을 이용하여 깊이별 조합 응력 및 Unity Check 값이 도출된다.

Fig. 16은 연약 점토, 중간 점토, 단단한 점토에 대한 파일의 Unity Check 값을 확인한 결과이다. 연약 점토에서 단단한 점토로 갈수록 Unity Check 값이 작아지는 것을 확인할 수 있으며 이는 연약 점토에서의 약한 지지력으로 인해 구조물의 자유도가 커지면서 응력이 커진 것으로 판단된다.

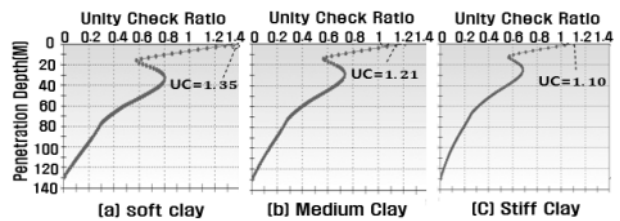


Fig. 16 Pile UC value of clay soil

Fig. 17과 Fig. 18의 그래프는 점토 지반으로부터 파일이 받는 축 방향 반력 값과 수평 방향 반력 값의 결과이다. 연약 점토에서 단단한 점토로 갈수록 비배수 전단강도 및 단위 중량이 커지며 최대 지반 반력 값이 나오는 파일의 깊이 위치는 알아지고 반력 값은 증가한다. 이는 비배수 전단강도 및 단위 중량이 커질수록 파일의 지지력이 증가하여 파일의 구조적 안전성을 확보하기 수월하다는 것을 의미한다.

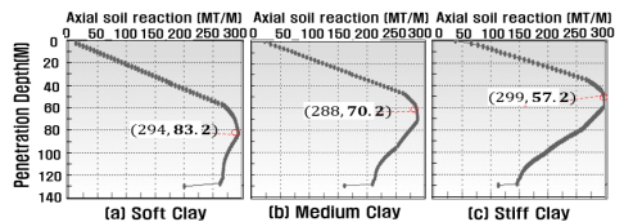


Fig. 17 Axial soil reaction of clay soil

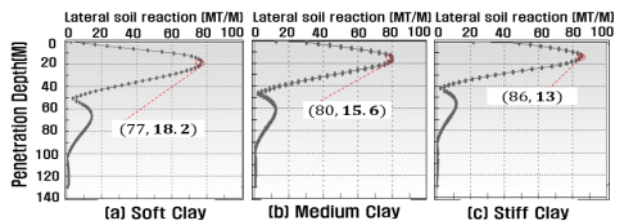


Fig. 18 Lateral soil reaction of clay soil

느슨한 모래, 중간농도 모래, 조밀한 모래로 파일-지반 상호작용 효과를 고려한 구조해석 결과를 분석하였다. 아래 Fig. 19

는 세 종류의 모래에 대하여 파일의 Unity Check 값을 확인한 결과이다, 점토와 마찬가지로 느슨한 모래에서 조밀한 모래로 갈수록 차이는 작지만, Unity Check 값이 작아진다. 이러한 경향성 역시 느슨한 모래일수록 파일의 변위가 더 크게 발생하여 응력이 크게 발생한 것으로 판단된다.

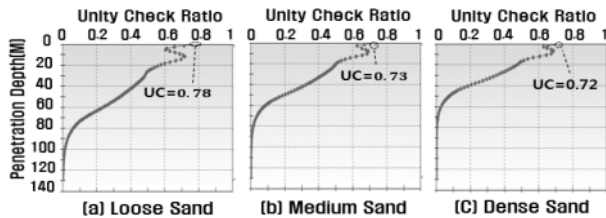


Fig. 19 Pile UC value of sand soil

Fig. 20과 Fig. 21의 그래프는 모래 지반으로부터 파일이 받는 축 방향 지반 반력 값과 수평 방향 지반 반력 값의 결과이다. 느슨한 모래에서 조밀한 모래로 갈수록 내부 마찰각과 단위 중량이 커지며 최대 지반 반력이 발생하는 파일의 깊이 위치는 알아지고 반력 값은 증가한다. 이는 내부 마찰각 및 단위 중량이 커질수록 파일의 지지력이 증가하여 파일의 구조적 안전성을 확보하기 수월하다는 것을 의미한다.

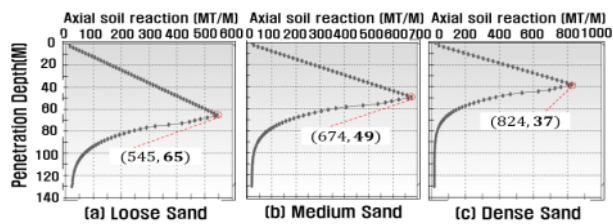


Fig. 20 Axial soil reaction of sand soil

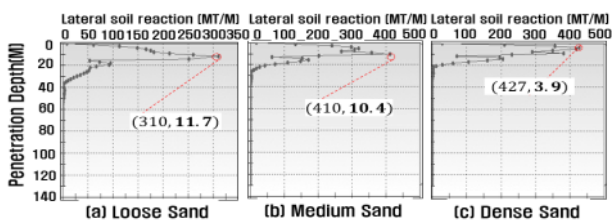


Fig. 21 Lateral soil reaction of sand soil

3.2.2 구조 해석으로 인한 자켓 구조물의 결과 분석

선정된 점토와 모래 지반에서의 파일-지반 상호작용 효과를 고려한 구조해석 결과 중 가장 취약한 조건에서의 자켓 구조 해석 결과를 분석하였다. Fig. 22에서와 같이 파일-지반 상호작용 모델이 적용된 해저면 근처 구조에서 Unity Check 값이 크게 나타났다. 발생한 Unity Check 값의 크기는 Table 4에 나타내었으며 연약 점토에서 단단한 점토로 갈수록 값이 작아지는 것을 확

인할 수 있다. 이는 지반이 단단해질수록 구조물이 구조적 안전성을 확보하기 수월하다는 것을 의미한다.

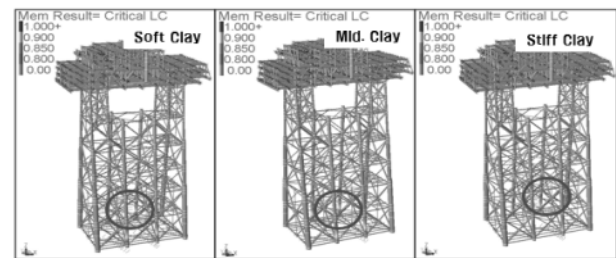


Fig. 22 Location of maximum UC value - Clay B.C.

Table 4 Maximum UC value of analysis results - Clay B.C.

Case	Soft clay	Medium clay	Stiff clay
	UC	UC	UC
Value	1.21	1.08	0.97

모래 지반에서의 Unity Check 값이 가장 큰 부분은 Fig. 23에서와 강조된 위치와 같이 자켓 구조물의 중앙부이다. Table 5에 나타내어지듯이 느슨한 모래에서 조밀한 모래로 갈수록 Unity Check 값이 작은 차이로 작아진다. 이는 점토와 달리 모래 지반이 충분히 강한 지지력을 가지고 있으므로, 경계 조건의 영향보다 구조적으로 취약한 부위에 Unity Check 값이 더 크게 발생하는 것으로 판단된다. 또한 전체 Unity Check 값을 비교할 때 점토 물성치를 적용한 해석 결과와 같이 지반이 단단해질수록 구조물이 구조적 안전성을 확보하기 수월해짐이 검증되었다.

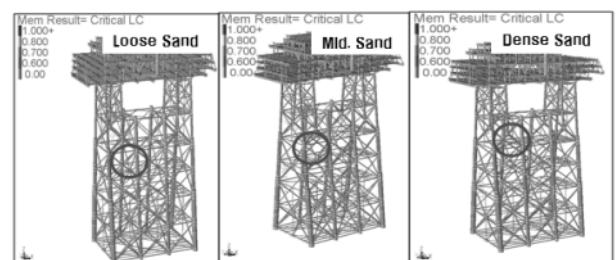


Fig. 23 Location of maximum UC value - Sand B.C.

Table 5 Maximum UC value of analysis results - Sand B.C.

Case	Loose sand	Medium sand	Dense sand
	UC	UC	UC
Value	0.754	0.752	0.75

3.2.3 구조 해석으로 인한 구조물의 변위 분석

고정식 해양구조물인 자켓형 구조물의 구조해석으로 인한 파일 및 자켓 구조물의 구조 응답을 분석하였다. 환경 하중을 견디는 자켓형 해양구조물은 해양 지반에 파일을 깊숙이 침투시켜 지지력을 확보하므로, 지반의 특성에 따라 구조물이 외력을 견디는 힘이 차이가 나는 것을 확인할 수 있었다. 지반의 종류에 따른 구조물의 거동을 정확히 파악하기 위하여 응력만이 아닌 해저면에서의 변위가 어떻게 발생하는지 분석하였다. 해저면에서의 변위를 측정하기 위하여 구조물의 파일과 파일로부터 이어져 올라가는 자켓 구조물의 레그(leg)의 제일 윗부분까지를 대상으로 선정하였다. 변위 값은 변형되는 구조물의 최대 변위 값으로 비교를 수행하였고 점토와 모래의 각 세 종류의 지반에 대하여 비교하였다. Fig. 24는 점토의 세 가지 종류에 대한 구조물의 최대 변위 값을 비교하였고, Fig. 25에는 모래의 세 가지 종류에 대한 구조물의 최대 변위 값을 비교하였다.

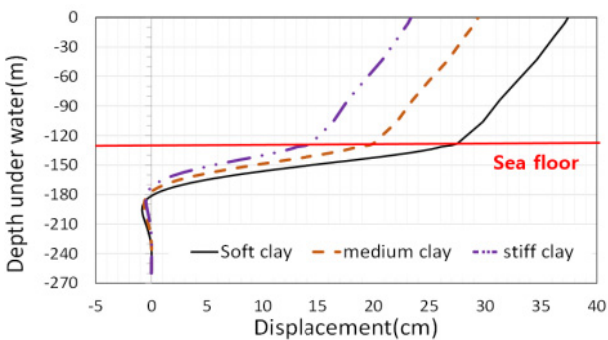


Fig. 24 Chart of displacement - clay boundary condition

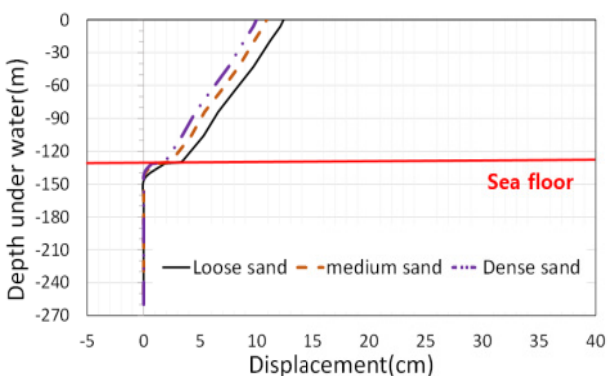


Fig. 25 Chart of displacement - sand boundary condition

Fig. 24에서는 연약 점토에서 단단한 점토로 갈수록 해저면에서의 곡률이 작아져서 변위 값이 작아진다. Fig. 25에서도 느슨한 모래에서 조밀한 모래로 갈수록 해저면에서의 곡률이 작아져서 변위 값이 작아진다. 비교적 강도가 약한 점토 지반에서의

변위가 모래 지반에서의 변위보다 더 크게 발생하였고, 이는 앞서 설명된 응력 결과와도 부합한다. 결과적으로 단단한 지반일수록 지반이 파일의 움직임을 강하게 구속하여 변위가 작아지고, 이에 따라 파일에 발생하는 응력이 작아지는 것을 의미한다. 또한 이러한 파일의 결과가 해저면 상부 구조물에도 영향을 미쳐 마찬가지로 단단한 지반일수록 상부 구조물의 응력도 작아지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 지반의 특성이 파일 및 자켓 구조물의 변위 및 응력에 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 고정식 해양구조물이 환경 하중을 받을 때, 해양구조물을 지지하는 파일과 지반의 상호작용 효과를 고려하여 지반의 물성치의 변화에 따라 구조물이 받는 영향에 대하여 분석하였다. 점토와 모래 지반에 대하여 각각 강도에 따라 세 종류의 지반을 가정하여 구조해석을 진행하였다. 단단한 점토일수록, 비배수 전단강도 및 단위 중량이 커질수록 파일 및 자켓 구조물의 Unity Check 값은 작아졌다. 또한 축 방향 지반 반력의 최대값과 수평 방향 지반 반력의 최대값은 커지고, 최대 지반 반력이 발생하는 파일의 깊이 위치는 알아졌다. 모래의 경우 조밀한 모래일수록, 내부 마찰각 및 단위 중량이 커질수록 Unity Check 값이 작아졌다. 마찬가지로 축 방향 지반 반력의 최대값과 수평 방향 지반 반력의 최대값은 커지고, 최대 지반 반력이 발생하는 파일의 깊이 위치는 알아졌다. 선정된 지반의 해석 결과를 볼 때 연약 점토, 중간 점토, 단단한 점토, 느슨한 모래, 중간밀도 모래, 그리고 조밀한 모래로 갈수록 지반이 견고해진다. 파일 및 구조물의 변위 결과와 응력 결과를 보면, 견고한 지반일수록 해저면 근처에서의 곡률이 작아져서 변위도 작아지고, 이에 따라 응력 또한 작아진다. 이는 단단한 지반일수록 구조적 안전성을 수월하게 확보할 수 있다는 의미이고, 연약지반에서는 고정식 해양구조물 설계 시 주의를 기울여야 한다는 것을 의미한다.

향후에는 다양한 자켓 샘플에 대하여 파일-지반 상호작용을 고려한 해석을 진행하여 검토 비교해 볼 예정이다. 이번 논문에서는 균일 점토, 혹은 균일 모래 지반에 대하여 연구를 진행하였지만 혼합 지반의 경우에 대하여 파일-지반 상호작용을 고려한 해석을 진행하여 비교 연구해 볼 것이다. 또한 고정식 자켓형 해양구조물의 해석에서 구조물의 동적 거동에 대한 연구를 진행할 예정이다.

후 기

본 연구는 선박해양플랜트연구소에서 주요사업으로 수행중인 “해양플랜트 구조안전성평가 체계구축을 위한 구조설계엔지니어링 기반기술 연구(2/3)[PES9470]”의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다. 서울대학교 공학연구원의 지원에도 감사를 드립니다.

References

- American Petroleum Institute (API), 2002. *Planning, designing and constructing fixed offshore platforms—working stress design*. Recommended Practice, API-RP-2A-WSD 21th.
- Behrouz, A., Hamed, R.S., Davoud, S. & Hasan, G., 2012. Effect of soil pile structure interaction on dynamic characteristics of jacket type offshore platforms. *Journal of Coupled Systems Mechanics* 1(4), pp 381–395.
- Bentley Systems, 2015. *SACS Help—Release 10.0*. Retrieved from SACS Help Viewer.
- Det Norske Veritas (DNV), 2010. *Environmental conditions and environmental load*. Recommended Practice, DNV-RP-C205.
- Det Norske Veritas (DNV), 2014. *Design of offshore wind turbine structures*. Recommended Practice, DNV-OS-J101.
- Ku, C.Y. & Chien, L.K., 2016. Modeling of load bearing characteristics of jacket foundation piles for offshore wind turbines in Taiwan. *Journal of Energies* 9(8), 625.
- Lee, K.S., Park B.J., Kim, H.S., & Kim, D.Y., 2017. Study of rule scantling method and structural evaluation to obtain structural design technology for fixed offshore platform. *Journal of Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering*, 2017(58), pp 69–79.
- Park, M.S., Jeong, Y.J., You, Y.J. & Hwang, Y.K., 2014. Natural frequency of a gravity substructure for offshore wind turbines due to soil conditions. *40th Conference in Korean Society of Civil Engineers (KSCE)*, Daegu, Korea, pp 1273–1274, October 2014.
- Passon, P. & Kühn, M., 2005. State-of-art and development needs of simulation codes for offshore wind turbines. *Copenhagen Offshore Wind 2005 Conference and Expedition Proceedings*, Copenhagen, Denmark, pp 26–28, October 2005.
- Pedro, G., Antonio, R., Mario, S. & Jose', D., 2016. Dynamic characterisation of wind turbine towers account for a monopile foundation and different soil conditions. *Journal of Structure and Infrastructure Engineering* 13(7), pp 942–954.
- The European Steel Design Education Programme (ESDEP), 2014. *Structural systems : Offshore*. Lecture 15A, ESDEP WG 15A.
- Yasser, E.M., & Naggar, M.H.E., 2004. Response of fixed offshore platforms to wave and current loading including soil–structure interaction. *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24, pp 357–368.
- Yi, J.H., Kim, S.B., Han, T.H., Yoon, G.L. & Andersen, L.V., 2015. Influence of pile–soil–interaction on natural frequency of bottom–fixed offshore wind turbines considering material uncertainties. *The 2015 World Congress on Advances in Civil, Environmental, and Materials research (ACEM15)*, Incheon, Korea, pp 25–29, August 2015.
- Yi, J.H., Kim, S.B. & Yoon, G.L., 2016. Reliability analysis of offshore wind turbines considering soil–pile interaction and scouring effect. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 28(4), pp 222–231.
- Zaaijer, M.B., 2006. Foundation modelling to assess dynamic behavior of offshore wind turbines. *Journal of Ocean Research* 28, pp 45–57.

