

# 해상풍력발전 설치를 위한 jack-up rig 작업 시 연약지반에 발생하는 지반침하에 관한 연구

이의창<sup>1</sup> · 장원일<sup>†</sup> · 신성렬<sup>2</sup>

(원고접수일 : 2012년 8월 10일, 원고수정일 : 2012년 11월 12일, 심사완료일 : 2012년 11월 22일)

## A Study on the Soft Ground Subsidence beneath the Jack-up Rig Working for Offshore Wind Turbine Installation

Eui-Chang Lee<sup>1</sup> · Won-Yil Jang<sup>†</sup> · Sung-Ryul Shin<sup>2</sup>

**요 약 :** 신재생에너지의 관심이 증가함에 따라 해상풍력발전시장이 확대되고 있다. 열악한 환경에서 해상풍력발전을 안전하게 설치하기 위해서는 jack-up rig를 이용한 작업이 이루어져야하며, 최근에는 기존 jack-up rig의 단점을 보완한 자체추진력을 가진 WTIV가 개발되었다. 이는 60 m이하의 연안에서 주로 작업이 이루어지며, 이러한 지역은 연약 점성토 및 사질토로 jack-up rig 작업 시 지반침하에 대한 안정성 검토가 선행되어야 한다. 본 연구에서는 압밀이론을 고려하여 jack-up rig 작업이 연약지반에 미치는 영향을 FLAC3D를 이용하여 수치해석적인 연구를 진행하였다. 침하정도를 분석하고, 안정적인 jack-up rig 작업을 위해 재하방법을 달리하였다. 본 연구에서 적용한 차등재하방법 중 mid-loading 방법은 clay층에 유리하며, pre-loading 방법은 sand층에 유리한 결과가 나타났다.

**주제어 :** 잭업, 해상풍력발전, 지반침하, 수치해석

**Abstract:** With concern for new renewable energy sources rising, the offshore wind turbine energy market is growing. In order to install offshore wind turbines safely in a harsh environment, jack-up rigs need to be used. Recently, a WTIV(Wind Turbine Installation Vessel), which has a self-propelling system, was developed to replace traditional jack-up rigs. Since the jack-up rig works at 60 meters of depth in offshore and the seafloor is composed mostly of soft clay and sand, it is necessary to conduct a stability examination for ground subsidence before using it. This study conducts an improved numerical analysis of the effect of jack-up rig loading on the soft ground by using FLAC3D considering consolidation theory. This includes analyzing the amount of subsidence when applying different cases of surchargings. It can be concluded that the mid-loading method has an advantage as regards clay layers and the pre-loading method has an advantage as regards sand layers.

**Key words:** Jack-up, Offshore wind turbine, Ground subsidence, Numerical analysis

### 1. 서 론

온실가스 저감대책의 강화와 2012년 신재생에너지 공급의무 할당제(Renewable Portfolio Standard; RPS)의 도입이 시작됨에 따라 대규모 신재생에너지

개발이 요구되고 있다[1]. 신재생에너지 중 풍력발전은 비교적 에너지 효율이 높아 기술적으로 경쟁력을 가지고 있으며, 세계적으로 그 시장이 확대되어가고 있어 지속적인 발전과 개발이 이루어

<sup>†</sup> 교신저자(한국해양대학교 에너지자원공학과, E-mail: jwy@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4438)

1 한국해양대학교 에너지자원공학과, E-mail: Euichang@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4843

2 한국해양대학교 에너지자원공학과, E-mail: srshin@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4681

지고 있다. 풍력발전의 초기에는 기술의 미흡과 발전된 전기이송의 문제 때문에 육상풍력발전을 중심으로 그 수요가 증가하였으나, 육상풍력발전을 위한 양호한 입지의 부족, 소음, 자연경관의 방해 등과 같은 민원의 증가에 따른 어려움으로 최근 해상풍력발전의 개발이 급성장하고 있다. 해상풍력발전은 풍속이 높고 바람의 에너지밀도가 양호하여 출력변동이나 기계적 피로가 감소할 뿐만 아니라 소음과 자연경관의 방해 등의 요인을 고려하지 않아도 된다[2]. 해상풍력발전은 수심 60 m 이하에 설치하여 경제적인 발전이 가능한 monopile, bucket pile, tripod, jacket pile 등으로 분류되는 고정식 해상풍력발전과 수심 60 m 이상에서 경제적인 발전이 가능한 spar, TLP, semi-sub, pontoon 등의 부유식 해상풍력발전으로 나눌 수 있다. 부유식 발전은 고효율에너지의 생산이 가능하지만, 설치비용이 비싸고 구조물의 안정성에 관한 연구가 진행중에 있어 현재까지는 고정식 발전이 주를 이룬다. 고정식 해상풍력발전 설치의 기초설치, 타워설치, 터빈설치의 과정을 통해 이루어지며, 이러한 과정을 위한 장비로는 jack-up rig, floating shear leg, crane barge 등이 사용된다. Floating shear leg나 crane barge는 기초설치, 타워설치, 터빈설치가 모두 가능한 장비이나 자연적인 조건에 불리하다. 5~6 MW급 풍력발전이 주력 모델 군으로 상용화가 진행 중인 해상풍력발전을 보다 안정적인 상태에서 설치하기 위해서는 부유상태가 아닌 해저지반에 leg를 내려 고정된 상태에서 작업을 진행하는 jack-up rig 방식이 가장 적합하다. 이러한 이유로 해상풍력발전 건설에는 주로 jack-up rig가 이용되었으나, jack-up rig는 자체 추진력이 없어 barge에 의해 목표지점까지 이동된다는 단점이 있다. 최근에는 jack-up rig의 단점을 보완하여 효율적인 해상풍력단지를 건설하기 위해 WTIV(Wind Turbine Installation Vessels)가 개발되었다. WTIV는 자체추진력으로 목표지점에 도달하여 spudcan을 지반에 내려 안정된 상태에서 작업을 진행하여 더욱 효율적인 작업이 가능하다. Jack-up rig를 통해 작업이 이루어지는 수심 60 m 이하의 해저는 대부분 모래 또는 점토질로 이루어진 연약한 지반이다. 따라서

발전용량의 증가에 따라 해상풍력발전이 점차 대형화됨으로 해상풍력발전 설치를 위한 jack-up rig 작업 시 연약지반에 발생하는 침하 정도는 안전한 작업을 위해 사전에 검토해야 할 요소이다. 본 연구는 수치해석 프로그램을 이용하여 jack-up rig 작업 시 지반 침하 정도를 분석하였고, 이러한 연구를 통하여 보다 안전하고 효율적인 jack-up rig 작업을 기대한다.

## 2. 이론 및 입력변수

### 2.1 압밀침하 이론

연안에 분포하고 있는 점성토 및 사질토는 연약 지반으로 구조물이나 외부하중을 받으면 체적이 감소하여 침하가 발생한다[3]. 공학적인 관점에서 점성토와 사질토를 구성하는 요소인 점토입자와 모래입자, 물은 비압축성이므로 외부에서 하중을 가하게 되면 간극 속의 공기가 빠져나가거나 하중으로 인해 발생하는 간극 수압의 영향으로 간극 속의 물이 빠져나가 압축이 진행된다. 이러한 변형에 영향을 미치는 요소는 간극비와 투수계수로 각각의 영향은 Figure 1의 모래와 점토의 압축곡선을 보면 쉽게 이해할 수 있다. 모래는 점토에 비해 간극이 작고 투수계수가 크기 때문에 순간적으로 물이 빠져나가며 변형량이 적다. 반면에 점토는 침하 시간이 길고 변형량 또한 크다[4].

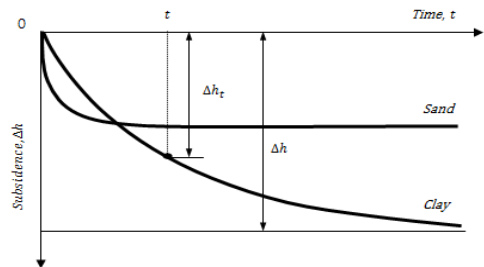


Figure 1: Subsidence curve of sand and clay

기초지반에 작용하는 하중으로 인해 발생하는 응력증가는 반드시 변형을 동반하게 되고, 지반의 압축에 의한 구조물의 침하가 발생하게 된다. 정규 압밀점토에서 토중의 압밀침하량의 계산은 하중강도의 증가로 인해 압축성 점토 중에 생기는 간극

비의 변화로부터 압밀침하량이 구해진다. 이러한 이론을 수식으로 표현하면 아래의 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다[4].

$$\frac{\Delta H}{H_0} = \frac{\Delta V}{V_0} = -\frac{\Delta e}{1+e_0} \quad (1)$$

식 (1)을 압축지수에 관한 식 (2)를 이용하여 식 (3)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C_c = -\frac{\Delta e}{\Delta \log_{10}(p)} \quad (2)$$

$$\Delta H = \frac{C_c}{1+e_0} H_0 \log_{10}\left(\frac{p_0 + \Delta p}{p_0}\right) \quad (3)$$

여기서,  $\Delta H$  : 압밀침하량,  $H_0$  : 초기심도,  $\Delta V$  : 부피변화량,  $V_0$  : 초기부피,  $\Delta e$  : 간극변화량,  $e_0$  : 초기간극,  $C_c$  : 압축지수,  $\Delta p$  : 압력변화량,  $p_0$  : 초기압력

이러한 압밀이론에 의해 사질토 및 점성토에 압밀과정이 진행되면 감소된 간극에 의해 투수계수 또한 변하게 된다. Taylor[5]에 의해 제안된 식 (4)에 외부 압력으로 인하여 압밀작용이 진행될 때,

$$k = D_s^2 \cdot \frac{r_w}{\mu} \cdot \frac{e^3}{(1+e)} \cdot C \quad (4)$$

유체의 성질이 일정하다는 가정 하에 투수계수는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다[6].

$$k = C_1 \cdot \frac{e^3}{(1+e)} \quad (5)$$

여기서,  $k$  : 투수계수,  $D_s$  : 피어기둥 직경,  $r_w$  : 유체의 단위중량,  $\mu$  : 유체의 점성계수,  $e$  : 간극비,  $C$  : 합성형상계수,  $C_1$  : 상수

### 2.2 입력변수

수치해석을 위한 입력변수는 부산시 OO지역의 지질조사보고서[7]의 총 40공 시추공 중 해상시추공 10공의 시추주상도 및 시추공 정보를 통해 조성, 특성, N치 등을 파악하였다. 획득한 연구지역 해상시추공의 평균 물성은 Table 1과 같고 이를 한국도로공사[8], Bowles 등[9]이 제시한 사질·점성토 물성값을 적용하였다. Spudcan의 물성은 rig에 주로 사용되는 H강재로 가로(8 m)× 세로(8 m)의 체원을 가진 탄성체로 Table 2와 같은 물성을 산정하였다.

Table 1: Soil types and physical properties of study area.

심도	기호	특성	평균 N치
-18.9 ~ -28.9 (Floor1)	CL	유기물 함유한 실트질 점토, 매우 연약, 매우 습윤	1
-28.9 ~ -43.2 (Floor2)	SM SC	점토 및 실트 섞인 세립질 모래, 중간내지 조밀, 습윤 실트섞인 세립질 모래, 중간 정도의 상대 밀도, 습윤	33
-43.2 이하 (Floor3)	SR WR	안산암질 연암, 절리 및 균열의 발달 안산암질의 풍화암, 대단히 치밀, 견고	50이상

Table 2: Input data of FLAC3D.

Area	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Young's modulus (MPa)	Poisson's ratio	Friction angle (°)	Cohesion force (Pa)	Porosity (%)	Permeability (m/sec)
Floor1	1900	20	0.4	30	19613	45	10 <sup>-10</sup>
Floor2	2000	81	0.25	35	14709	40	10 <sup>-6</sup>
Floor3	2500	200	0.2	40	196130	-	-
Spudcan	3000	300	-	-	-	-	-

간극과 투수계수는 일반적인 점토와 모래의 자연조건상태 값을 적용하여 A층은 간극률 45%, 투수계수  $10^{-10}$  m/sec를 B층은 간극률 40%, 투수계수  $10^{-6}$  m/sec를 적용하였고[10], 습윤정도는 두 층 모두 완전습윤상태를 적용하였다.

### 3. 유한차분법을 이용한 수치해석

#### 3.1 해석모델 및 조건

수치해석을 위한 프로그램은 Itasca社의 FLAC3D를 사용하였다. FLAC3D란 유한차분해석 프로그램으로 토질 및 암석역학 분야에 널리 사용되는 상용화 프로그램으로 Lagrangian 해석방법을 사용한다[11]. 부산 OO지역의 지질조사 보고서를 통하여 산정한 두께는 floor1 10m, floor2 14m로 모델링하였고, floor3은 10m로 모델링 후 Z축 방향으로 롤러조건을 부여하여 각 층의 물성값을 입력하였다. 경계조건의 영향을 무시하기 위해 외부 하중을 받는 spudcan의 좌·우측을 각각 4배로 적용하여 spudcan직경을 포함해 전체면적  $72\text{m} \times 72\text{m}$ 로 하여 모델링을 하였으며, 수심 19m를 고려하여 정수압을 가하였다. Figure 2는 각 지반의 심도 및 모델면적 등의 제원을 나타낸다.

Grid의 분할은 해석의 편의를 위해 X-축과 Y-축 방향의 grid는 비교적 큰 mesh로 모델링 하였으며, Z-축 방향은 침하를 좀 더 정확하게 관찰하기 위해 floor1은 0.5m간격으로, floor2와 floor3은 1m 간격으로 모델링 하였다(Figure 3). 모델링을 좀 더 사실적으로 해석하기 위해 외부 하중에 의해 감소하는 간극과 간극의 감소로 인해 감소되는 투수계수의 영향을 고려하였다.

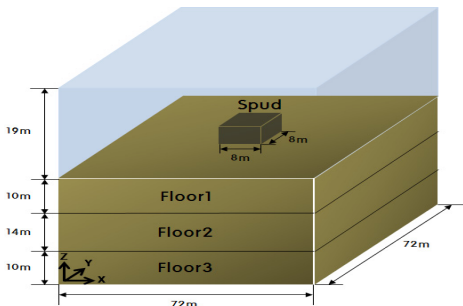


Figure 2: A schematic diagram of the ground.

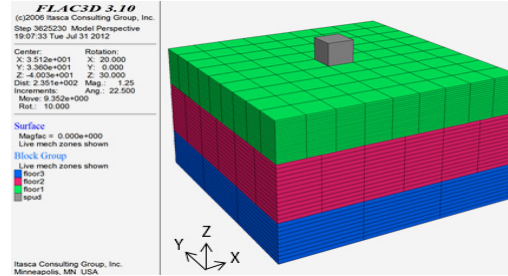


Figure 3: Griding of the ground in FLAC3D

#### 3.2 재하방법에 의한 침하

##### 3.2.1 일정재하에 의한 침하

Figure 4는 spudcan 하부의 응력-변위 그래프를 나타낸다. 그래프의 곡선은 침하 초기에는 간극의 영향으로 지수 곡선을 그리며 침하가 발생하였으며, 이론적으로 완전압밀이 이루어지는 3.1m 부근부터는 선형적인 침하곡선이 나타났다. 완전압밀이 시작되는 3.1m 부근에서 지반의 저항력은 4.84MPa가 나타났으며, 선형적인 침하로 floor1이 완전히 침하가 발생하는 -10m지점의 저항력은 7.03MPa이었다. Spudcan이 floor1을 지나 floor2 지반에 접근하면서 침하가 급격하게 감소하였으며, 침하양상은 floor1과 동일하게 초기에는 지수 곡선을 그리다가 선형적인 침하를 보이나 floor2에 접근하면 침하가 현저하게 감소하여 그래프의 기울기가 완만해지는 것을 확인할 수 있다.

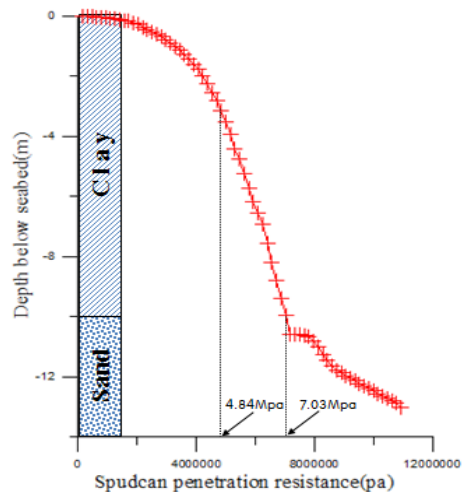


Figure 4: Penetration curve for constant surcharge.

그래프의 양상은 Kiat 등의 연구 결과[12]와 비슷한 양상을 보여준다(Figure 5). 8 m × 8 m 면적의 spudcan을 통하여 11 MPa의 응력이 지반에 발생하였을 때, 최종적으로 13 m의 침하가 발생하였다.

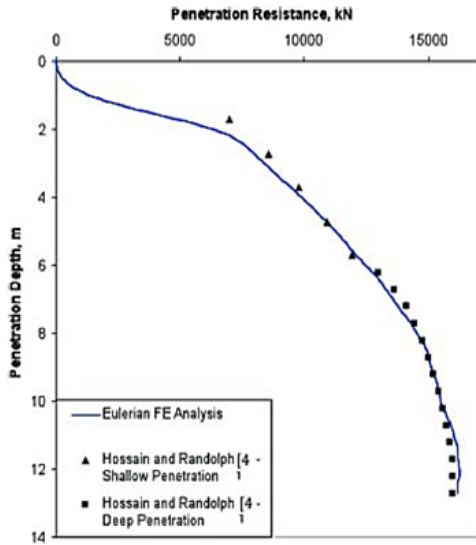


Figure 5: Penetration curve (from Kiat et. al., 2011).

Figure 6과 Figure 7은 spudcan에 접하는 하부지반이 받는 응력이 11 MPa 일 때, 지반이 받는 하중분포와 지반에 발생하는 변위를 각각 나타낸 것으로 spudcan 하부를 중심으로 응력이 집중됨을 알 수 있다. 또한 집중된 응력에 의해 지반에 나타나는 변위를 확인 할 수 있으며, 침도가 증가함에 따라 응력이 감소하고 이에 따라 변위량도 감소되었다.

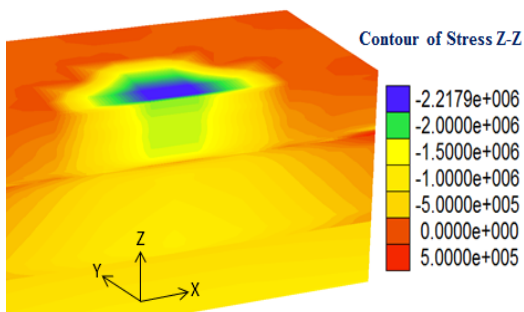


Figure 6: Contour of stress Z-Z at 11 MPa.

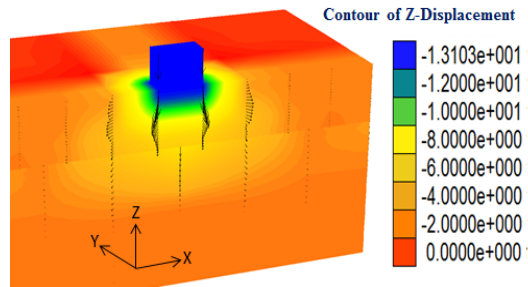


Figure 7: Contour of Z-displacement at 11 MPa.

3.2.2 차등재하에 의한 침하

Figure 4의 그래프 분석결과 floor1에서 급속하게 침하가 발생하여, 불안정한 침하가 예상됨에 따라 재하방법을 달리하여 지반의 저항 정도를 높여 지반침하 정도를 분석하였다. 재하방법은 완전압밀이 시작되는 3.1 m의 지반에 발생한 응력 4.84 MPa를 초기에 가하고 3.1 m 이후부터는 서서히 압력을 증가하는 방법(pre-loading)과 3.1 m까지 서서히 압력을 가하다가 3.1 m에서 floor1층에 완전한 침하가 발생하는 10 m에서 지반에 발생하는 응력 7.03 MPa를 한번에 가하는 방법(mid-loading)으로 그래프 양상의 변화 및 spudcan의 침하정도를 분석하였다. Figure 8의 (a)는 floor1에 pre-loading 방법을 적용한 그래프이다. 지반이 초기에 4.84 MPa의 응력을 받아 1.5 m의 침하를 보였으며, 계속적인 압력 증가로 인해 침하가 증가하였고, floor1이 완전히 침하된 시점에서는 7.97 MPa의 저항력을 나타내었다. Figure 8의 (b)는 floor1에 mid-loading 방법을 적용한 그래프로 Figure 4에서 완전한 침하를 보인 7.03 MPa의 응력을 적용 시 5.5 m의 침하 후 안정화를 보였으며, 10 m의 완전한 침하보인 시점에서 지반의 저항력은 8.28 MPa를 나타내었다. Figure 9의 (a)와 (b)는 floor2에서 나타나는 응력-변위 그래프를 나타낸 것으로 (a)는 pre-loading 방법을 적용한 그래프로 최종응력이 11 MPa에서 12.37 m의 침하가 발생하였고, (b)는 mid-loading 방법 적용한 그래프로 12.76 m의 침하가 발생하였다. 각각의 방법을 적용하여 나타난 응력-변위 그래프를 Figure 10에 나타내었다. Floor1의 clay층에서는 mid-loading 방법이, floor2의 sand층에서는 pre-loading 방법에서 지반이 더 큰 저항력을 나타냈다.

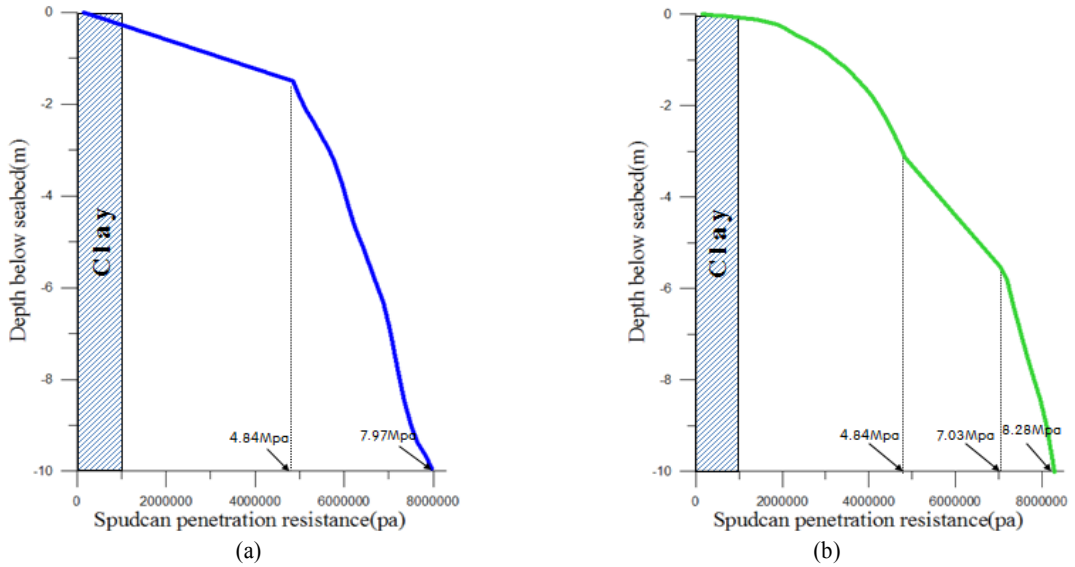


Figure 8: Penetration curves for different surcharges in floor1.

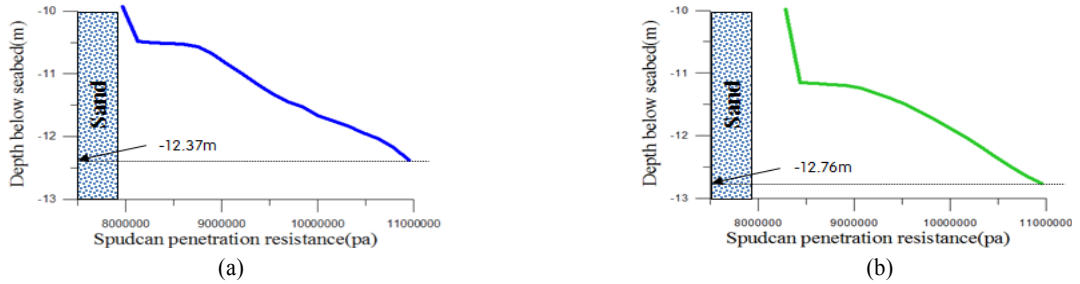


Figure 9: Penetration curves for different surcharges in floor2.

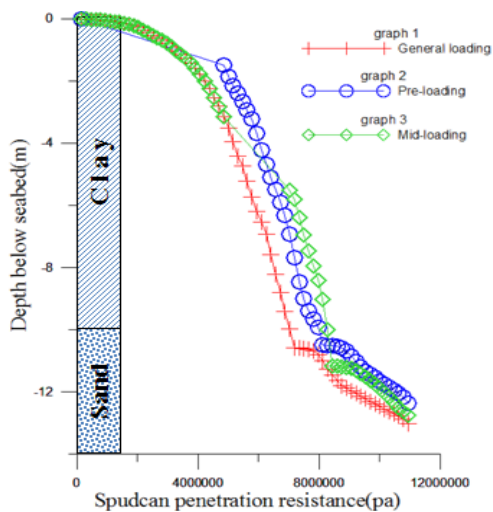


Figure 10: Penetration curves for different surcharges.

#### 4. 결 론

수치해석 방법을 이용하여 차등재하에 따른 해상풍력발전 jack-up rig 작업 시에 발생하는 지반침하 양상과 침하에 따른 지반의 저항정도를 분석하였다. 본 연구를 통한 결론은 다음과 같다.

1) Floor1의 점토층의 초기침하는 간극의 영향을 받아 지수곡선으로 침하가 발생하였으며, 완전히 압밀된 이후에는 선형적인 침하를 보였다. Floor2의 모래층은 floor1보다는 빠르게 간극이 닫혔으며, 응력-변위 그래프의 기울기가 floor1보다 완만하여 보다 안정된 침하양상을 보였다.

2) 8 m × 8 m의 spudcan에 하중을 가하고 지반에 11 MPa의 응력이 작용할 때, 13 m의 침하가 최

중적으로 발생하였다.

3) 차등재하방법을 적용하여 지반에 압력을 가한 floor1에서는 pre-loading 방법을 적용하였을 때, 최대저항 7.97 MPa, mid-loading 방법을 적용하였을 때, 8.28 MPa의 저항이 나타났다.

4) 지반에 발생한 응력이 11 MPa 일 때, pre-loading 방법 적용 시, 12.37 m의 침하가 발생하였고, mid-loading 방법을 적용 시, 12.76 m의 침하가 발생하였다.

5) 응력-변위 그래프 분석결과 mid-loading 방법은 점토층, 즉, 간극이 크고 투수계수가 작은 층에 유리하며, pre-loading 방법은 간극이 적고 투수계수가 큰 모래층에 유리한 결과를 나타내었다.

최근 국내에서 해상풍력발전단지 입지구성을 위한 탐사가 계획·진행되고 있다. 따라서 탐사를 통한 대상지반의 적절한 물성을 획득하고, 본 연구를 바탕으로 하여 jack-up rig 작업 시 적절한 재하방법을 이용한다면 보다 안정적이고 효과적인 해상풍력발전의 설치를 기대할 수 있을 것이라 사료된다.

## 후 기

본 과제(결과물)는 국토해양부의 지원으로 수행한 해양에너지 전문인력 양성사업의 연구결과입니다.

This work is the outcome of a Manpower Development Program for Marine Energy by the Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM).

## 참고문헌

- [1] Ji-Young Kim, Kyuon-Yul Kim and Jun-Shin Lee, "Optimal layout design of offshore wind turbines by response surface analysis", Journal of the Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, vol. 23, no. 2, pp. 163-170, 2011 (in Korean).
- [2] Young-Ho Lee and Beom-Seok Kim, "Outline and outlook of the offshore wind power generation", The 2nd Proceedings of the Korean Society of Marine Engineers Conference, pp. 167-168, 2005 (in Korean).
- [3] Yoon-Kyung Kang and Won-Yil Jang, "A study on subsidence of soft ground using artificial neural network", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 34, no. 6, pp. 914-921, 2010 (in Korean).
- [4] Byung-Sik Chun, Geomechanical Engineering, Goomibook, 1998 (in Korean).
- [5] D. W. Taylor, Fundamentals of Soil Mechanics, Jon Wiley & Sons Inc., New York, 1948.
- [6] B. M. Das, Advanced Soil Mechanics, Hemisphere Publishing Corporation and McGraw-Hill, 1983.
- [7] Sang-Hoon Lee, A Elementary Design Geological Survey Report of Outer Ring Road in Coast Section, Korea Institute of Construction Technology, 1992 (in Korean).
- [8] Korea Expressway Corporation, Road Design Working Affairs Book - Soil and Foundation, 1996 (in Korean).
- [9] J. E. Bowles, Foundation Analysis and Design Fifth Edition, The McGraw-Hill Companies, Inc., 1997.
- [10] Burt G. Look, Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables, Taylor and Francis, pp. 91-100, 2007.
- [11] Itasca Consultion Group. Inc, FLAC3D User's Guide, 2006.
- [12] Tho Kee Kiat, Chun Fai Leung and Yean Khow Chow, A coupled Eulerian-Lagrangian Approach for Spudcan Penetration Analysis, PetroMin Offshore Week, pp. 32-37, 2011.