

## 복합하중을 고려한 국내 서남해 지반에서의 Spudcan 설계

### Spudcan Design under Combined Load in Southwestern Sea of Korea

유진권<sup>1)</sup> · 박두희<sup>†</sup> · Saeed-ullah Jan Mandokhail<sup>1)</sup>

Jinkwon Yoo · Duhee Park · Saeed-ullah Jan Mandokhail

Received: July 6<sup>th</sup>, 2016; Revised: July 15<sup>th</sup>, 2016; Accepted: September 8<sup>th</sup>, 2016

**ABSTRACT** : An optimized spudcan was designed for the Southwestern Sea, an area mostly comprised of sand and soft clay layers. The spudcan was designed using guidelines by SNAME, ISO, and InSafeJIP, as well as the yield surface for combined loads. The probe test method was applied to define a yield surface used in estimating spudcan stability. Numerical analyses that considered vertical, horizontal, and moment loads in Southwestern Sea resulted in a design of 8 m diameter spudcan. Additionally, the empirical equations suggested by previous studies can estimate a reasonable spudcan bearing capacity at shallow depth. Each yield surface calculated from Mohr Coulomb and Hardening soil model showed different shapes, however the yield surface also grew with increasing spudcan diameter. This yield surface is a useful reference, along with site investigation results and published guidelines, to estimate the stability of a spudcan in the Southwestern Sea.

**Keywords** : Jack-up barge, Spudcan, Combined loading, Bearing capacity, Yield surface

**요지** : 본 연구에서는 가이드라인에 제시된 스퍼드캔의 설계 프로세스에 따라 서남해 연약지반 조건에 최적화된 스퍼드캔의 형상 및 크기를 도출하고, 안정성 평가를 위한 복합하중 작용 시의 항복면을 정의하였다. 이를 위해 일정한 수직하중 작용 시 수평하중과 모멘트 하중을 가하여 수평하중-수평변위, 모멘트-회전변위간의 상관관계를 통해 항복면을 산출하는 프로브 방법을 적용하였다. 분석 결과, 복합하중을 고려한 서남해 지반에서 요구되는 스퍼드캔의 직경은 8m로 나타났으며, 가이드라인에 제시된 지지력 산출 경험식을 통해 지지력을 계산할 경우 얕은 심도에서는 비교적 정확한 지지력의 예측이 가능한 것으로 나타났다. 제시된 항복면은 Mohr Coulomb 모델과 Hardening soil 모델을 각각 적용하였을 시 서로 다른 형상을 보였으나, 스퍼드캔의 직경이 증가함에 따라 점차 확장되는 경향을 보였다. 본 연구를 통해 제시된 항복면은 실제 스퍼드캔이 설치될 지역의 지반조사 결과, 가이드라인과 더불어 추후 해상풍력단지 조성 시 스퍼드캔의 안정성 평가에 유용한 참고자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

**주요어** : 잭업바지, 스퍼드캔, 복합하중, 지지력, 항복면

## 1. 서론

해상 풍력 발전단지 조성을 위한 대부분의 해상 작업은 잭업바지(jack-up barge)로 불리는 전문 설치 구조물을 통해 이루어진다. 일반적인 잭업바지는 수심에 따라 자체적으로 플랫폼의 높낮이 조절이 가능하도록 설계되어있으며, 플랫폼에 연결된 레그와 푸팅으로 구성되어있다. 이때 해양 지반에 잭업바지를 안정적으로 고정시키고 지지하기 위한 푸팅을 가리켜 스퍼드캔(spudcan)이라 지칭한다. 스퍼드캔은 관입 시의 편의성과 요구되는 지지력을 동시에 만족시킬 수 있도록 콘을 뒤집어 놓은 형태로, 바닥 부분에는 뾰족한 모서리(spigot)로 이루어져 있는 것이 일반적이다.

전 세계적으로 잭업바지의 기초에 해당하는 스퍼드캔과 관련하여 수치해석과 실내 시험 등 다양한 방법을 통해 활발

한 연구가 진행 중에 있다. Byrne & Houlsby(2001), Gottardi et al.(1999), Martin(1994), Hossain & Randolph(2010b), 그리고 Zhang et al.(2011)은 work-hardening plasticity 모델을 적용하여 스퍼드캔의 관입 거동 시 탄소성(elasto-plastic) 거동을 모사하였으며, Houlsby & Martin(2003)은 점토지반에서 스퍼드캔의 지지력계수(bearing capacity factor)에 관련된 연구를 진행한 바 있다. 또한, 다수의 연구자들에 의해 복잡한 3차원 형상의 스퍼드캔에 대한 형상계수(shape factor) 관련 연구 결과가 제시되기도 하였다(Drescher & Michalowski, 2009; MICHALOWSKIĆ, 2001; Teh et al., 2007; Zhao et al., 2014). 최근에는 Govoni et al.(2010), Hossain & Randolph (2010a), 그리고 Teh & Leung(2010)가 센트리퓨지(centrifuge)를 통한 실내 시험을 수행하여 수직-수평-모멘트 하중에 대한 항복면(yield surface)을 제시하였으며, Kohan et al.(2014)

1) Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

† Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University (Corresponding Author : [dpark@hanyang.ac.kr](mailto:dpark@hanyang.ac.kr))

과 Purwana et al.(2005)은 연약점토 지반에서 스퍼드캔의 추출 메커니즘 연구 결과를 발표하였다. 하지만 이에 반해 국내에서는 아직 스퍼드캔 관련 연구는 시작단계에 머물러 있는 실정이다.

본 연구에서는 국내 서남해 연약지반에 최적화된 스퍼드캔의 형상 및 크기 도출을 통해 복합하중 작용 시 스퍼드캔의 안정성을 평가하고자 하였다. 이를 위해 가이드라인에 제시된 설계 프로세스와 서남해 지역 지반조사 데이터에 대한 상세 분석이 수행되었으며, 3차원 비선형 유한요소해석을 통해 복합하중에 대한 항복면을 제시하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 설계 프로세스

최근 육상에 비해 상대적으로 공간의 제약이 적은 대규모 해상 풍력발전단지 조성이 활발하게 진행됨에 따라 가이드라인을 통해 작업까지 지지를 위한 스퍼드캔의 설계 프로세스가 제시되었다(InSafeJIP, 2011; ISO, 2009; SNAME, 2008). 가이드라인을 통해 제시된 스퍼드캔 설계 프로세스는 크게 지반조사(geotechnical site investigation), 지반조사 데이터의 분석 및 입력 파라미터 산정(geotechnical data interpretation/soil engineering parameter selection), 지반 조건별 관입 특성 예측(prediction of spudcan penetration), 지반의 위험요소 예측(prediction of geotechnical hazard), 그리고 작업까지의 설치 및 스퍼드캔의 인발(jack-up installation/spudcan extraction)의 총 5단계의 프로세스로 구분되어진다. 각각의 단계별 검토 사항은 Table 1에 정리하여 나타내었다.

### 2.2 지반 조건에 따른 수직지지력

ISO(2009), InSafeJIP(2011), 그리고 SNAME(2008)에서

는 해양 지반 조건을 모래, 점토만으로 이루어진 단일지반과 모래와 점토로 구성된 다층지반으로 나누어 각각의 지반 조건별 지지력 산출 경험식을 제시하였다. 모래와 점토로만 이루어진 단일지반에서의 수직지지력은 기존 연구자들의 연구를 통해 오랜 기간 동안 다양한 연구가 진행되었다. 과거 실험을 통해 경험적으로 산정되었던 지지력계수( $N_c, N_q, N_\gamma$ )는 해석기술의 발전과 함께 정해(exact solution)가 제시되기도 하였다. 가이드라인을 통해 제시된 모래지반에서의 지지력 경험식 또한 지반의 상재하중과 스퍼드캔 하부지반의 자중이 서로 독립적으로 작용하중에 저항한다고 가정함으로써 기존 얇은기초의 지지력 경험식(Hansen, 1970; Meyerhof, 1963; Terzaghi, 1943; Vesic, 1975)과 동일하게 제시되었다.

$$F_V = (0.5\gamma'BN_\gamma s_\gamma d_\gamma + p'_0 N_q s_q d_q)A \quad (\text{sand}) \quad (1)$$

$$F_V = (C_u N_c s_c d_c + p'_0)A \quad (\text{clay}) \quad (2)$$

여기서,  $\gamma'$ 은 흙의 유효단위중량,  $B$ 는 기초의 폭,  $p'_0$ 는 상재하중, 그리고  $A$ 는 스퍼드캔의 최대 단면적을 나타낸다. 또한  $N_\gamma, N_q$ 는 지지력계수,  $s_\gamma, s_q$ 는 원형 또는 사각형 기초에 대한 형상계수, 그리고  $d_\gamma$ 와  $d_q$ 는 깊이계수를 각각 의미한다. 모래와 점토 단일지반에서의 경험식은 내부 마찰각과 비배수전단강도( $c_u$ )를 통해 계산하도록 각각 제시되었다는 점을 제외하면 기존 얇은기초 지지력 경험식을 근간으로 하고 있는 것을 알 수 있다. 하지만 가이드라인에서는 추가적으로 스퍼드캔의 관입 시 발생하는 backflow의 영향을 고려하도록 제시하였으며 다음의 경험식을 최종적으로 제안하였다.

$$V_{Lo} = F_V - F'_0 A + \gamma'V \quad (3)$$

여기서,  $V_{Lo}$ 는 프리로딩(preloading) 시의 최대 수직반력,  $F_V$

Table 1. Process checklist for spudcan design

	Design process	Checklist
1	Geotechnical site investigation	- Geotechnical site investigation planning - Sampling and field testing - Soil laboratory testing
2	Geotechnical data interpretation	- Sand (selection of friction angle) - Clay (derivation of $c_u$ from field penetrometers)
3	Prediction of spudcan penetration	- Single layer (sand/clay) - Multi-layer (strong over soft soils/soft over strong soils)
4	Prediction of geotechnical hazard	- Geohazard (punch-through/scour/spudcan-footprint interaction/extraction difficulties)
5	Spudcan installation/extraction	- Installation procedures - Water jetting through spudcan nozzles - Cyclic loads - Excavation of the soil present above the spudcan

는 수직방향의 지지력,  $F_0$ 는 backflow로 인해 발생하는 유효 상재 하중,  $A$ 는 스퍼드캔의 최대 단면적,  $\gamma'$ 은 흙의 유효 단위중량, 그리고  $V$ 는 스퍼드캔의 관입으로 인해 치환된 흙의 체적을 의미한다. 모래와 점토로 구성된 다층지반의 경우 스퀴징(squeezing)과 펀치스루(punch-through)의 두 가지 파괴 메커니즘 현상을 고려하도록 제시되었다. 스퀴징(squeezing) 메커니즘은 단단한 층 상부에 연약 점토층이 형성되어 있는 경우에 발생하며  $B \geq 3.45T(1+1.1D/B)$ 의 조건에서 발생하고, 반대로  $T < B$ 의 조건에서 발생하지 않는다고 제안하였다(Fig. 1). 여기서  $D$ 는 spudcan이 관입되어 있는 관입 깊이,  $T$ 는 spudcan 하부의 연약 점토층의 두께, 그리고  $B$ 는 스퍼드캔의 직경을 나타낸다.

펀치스루(Punch-through) 메커니즘은 점토층 위에 단단한 모래층이 위치할 때 발생하며 상부의 모래층과 하부 점토층 사이의 강도의 비(coefficient of punching shear,  $K_s$ )를 통해

정의되었다. SNAME(2008)에서는 기존의 Hanna & Meyerhof (1980)가 제시한 모래층과 점토층 사이의 강도의 비를 단순화하여 다음의 경험식으로 제안하였다.

$$K_s \tan \phi \approx 3c_u / B\gamma' \quad (4)$$

여기서,  $\phi$ 는 모래의 내부 마찰각,  $c_u$ 는 점토층의 비배수 전단강도,  $\gamma'$ 은 모래의 단위중량을 나타낸다. 모래와 점토의 단일지반에서와 마찬가지로 다층지반에서도 backflow를 고려하여 경험식이 제시되었으며 제시된 다층지반에서의 지지력 경험식은 다음과 같다.

$$F_V = F_{V,b} - AH\gamma' + 2\frac{H}{B}(H\gamma' + 2p'_0)K_s \tan \phi A \quad (\text{no backflow}) \quad (5)$$

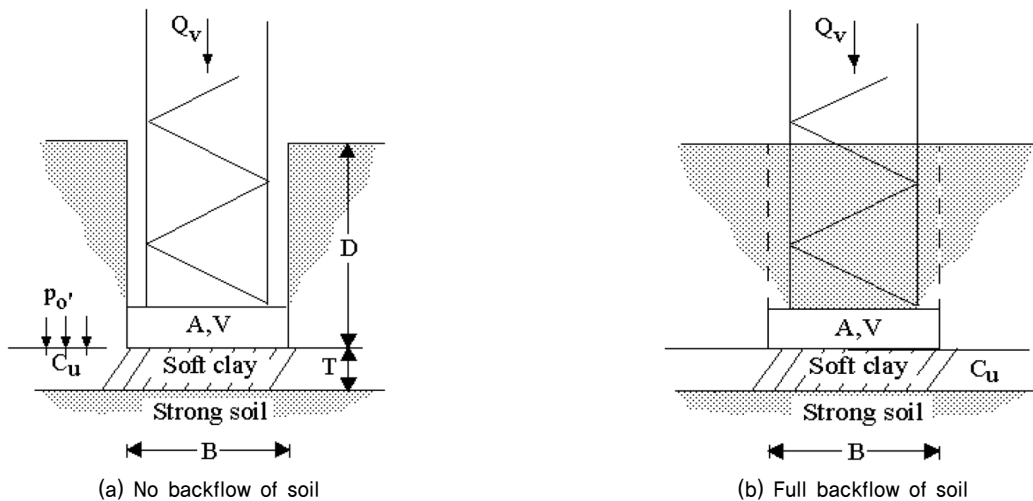


Fig. 1. Spudcan bearing capacity analysis – squeezing clay layer (SNAME, 2008)

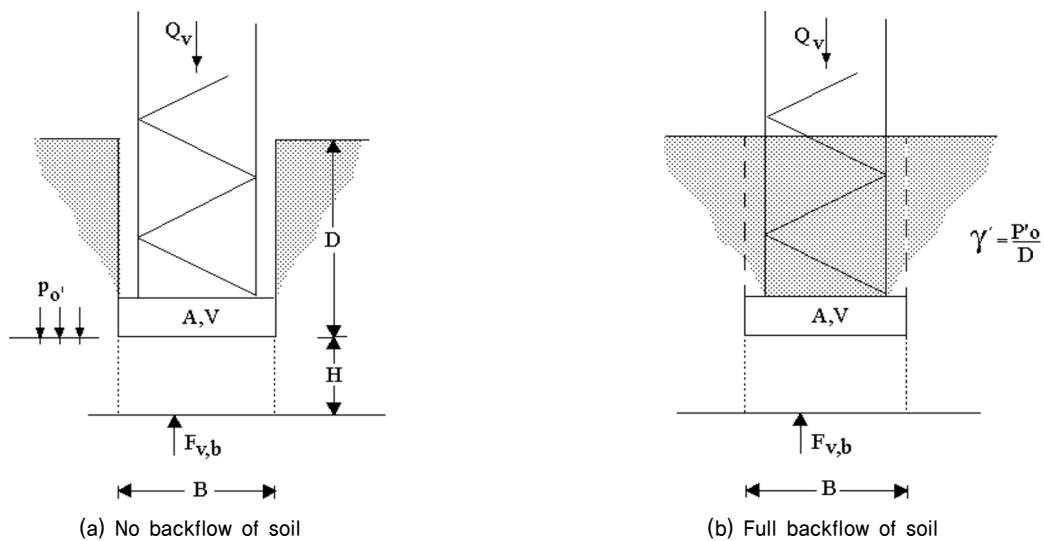


Fig. 2. Spudcan bearing capacity analysis – sand over clay (SNAME, 2008)

$$F_v = F_{v,b} - AH\gamma' - AI\gamma' + 2\frac{H}{B}(H\gamma' + 2p'_0)K_s \tan\phi A$$

(full or partial backflow) (6)

여기서,  $F_{v,b}$ 는 backflow가 발생하지 않았을 때 점토 단일 지반에서의 지지력,  $H$ 는 스퍼드캔 하부의 모래층 두께, 그리고  $I$ 는 스퍼드캔 상부의 모래층의 두께를 의미한다(Fig. 2).

### 2.3 안정성 검토

SNAME(2008)에서는 스퍼드캔의 안정성 평가를 위한 총 3단계의 프로세스를 제시하였다. 안정성 평가를 위한 단계는 프리로드(preload)와 수평방향의 미끄러짐(sliding), 편형식의 스퍼드캔에 대한 수직·수평방향의 지지력, 그리고 변위에 대한 검토로 구성된다. 첫 단계인 프리로드와 수평방향의 미끄러짐에 대한 검토는 프리로딩 시 작용하는 수직방향의 하중, 지지력, 그리고 감소계수(reduction factor)와의 상관관계를 통해 이루어진다. 마찬가지로 미끄러짐에 대한 검토 또한 수평방향으로 작용하는 하중, 지지력, 그리고 감소계수와의 상관관계를 통해 수행된다.

$$Q_v \leq \phi_p V_{L0} \quad (\text{preload check}) \quad (7)$$

$$Q_H \leq \phi_{Hfc} F_H \quad (\text{sliding check}) \quad (8)$$

여기서,  $Q_v$ 와  $Q_H$ 는 프리로드 시 수직 및 수평방향으로 작용하는 하중,  $V_{L0}$ 는 프리로딩 시의 지지력,  $F_H$ 는  $Q_v$ 가 작용하고 있을 때의 수평방향의 지지력, 그리고  $\phi_p$ 와  $\phi_{Hfc}$ 는 지지력에 대한 안전율을 의미하는 감소계수를 나타낸다. SNAME(2008)에서는 지지력에 대한 감소계수를 수직방향에 대해서는 0.9, 수평방향에 대해서는 0.8(모래/배수)과 0.64(점토/비배수)로 각각 제시하였다. 다음 단계인 편형식의 스퍼드캔에 대한 수직, 수평방향의 지지력 검토 또한 감소계수를 적용하여 작업바지 운영 중에 작용하는 수직, 수평, 그리고 모멘트 하중에 대한 검토를 수행하도록 제시하였다.

$$Q_{vH} \leq \phi_{vH} F_{vH} \quad (9)$$

여기서,  $Q_{vH}$ 는 복합하중,  $F_{vH}$ 는 복합하중 작용 시의 지지력, 그리고  $\phi_{vH}$ 는 감소계수로 0.85로 제시되었다. 최종적으로는 앞서 수행되었던 검토 단계에서 조건을 만족시키지 못한 사항에 대한 추가적인 변위 검토를 수행함으로써 스퍼드캔의 안정성 검토가 종료된다.

### 2.4 프로브 방법(Probe test method)

프로브 방법을 적용하여 복합하중에 대한 항복면을 정의한 연구결과는 기존 연구를 통해 다수 발표된 바 있다(Martin, 1994; Zhang et al., 2011). 일반적인 프로브 방법은 푸팅에 항복이 발생할 때까지 수직 하중을 재하( $V = V_0$ )시키고, 정해진 하중까지 제하( $V / V_0$ )시킨 후 수행된다. 일정한 수직 하중( $V / V_0$ )이 작용하고 있는 상태에서 수평방향과 모멘트 하중을 작용시키면 수평하중과 수평변위( $h$ )의 상관관계( $H : h$ ), 그리고 모멘트( $M$ )와 회전변위( $\theta$ , rotational disp.)의 상관관계( $M : \theta$ )를 통해  $V:H:M$  평면상에 하나의 항복점이 생성된다(Fig. 3). 마찬가지로 다양한 수직 하중( $V / V_0$ )과 관입 심도가 고려된 해석이 반복적으로 수행되면 3차원의 항복면의 정의가 가능해진다.

## 3. 지반 조건 및 수치해석

### 3.1 서남해 대표 단면

본 연구에서는 국내 서남해 지역의 광역 시추공 8개와 실증단지 3개의 시추공에서 대한 지반조사 데이터 분석을 수행하였다. 분석 결과, 실증단지에서 떨어진 광역 시추공 8개 지역의 경우 실증단지에 비해 상부 모래층의 두께가 상대적으로 두텁게 형성되어 있는 것으로 나타났으며, 반대로 실증단지 3개 시추공의 경우에는 상부의 2~6m의 모래층을 제외하면 대부분의 지반이 실트와 점토로 이루어져 있는 것으로 나타났다. 원위치 시험(in-situ test)과 각종 실내 시험 데이터를 바탕으로 가장 연약한 지역으로 판단되는 실증단지의 시추공을 서남해 지역의 대표 단면으로 선정하였다. 측정된 모든 SPT-N치는 에너지 효율과 구속압에 대한 보정을 수행하여 적용하였으며, Fig. 4에는 선정된 서남해 대표 단면의 시추주상도를 도시하였다.

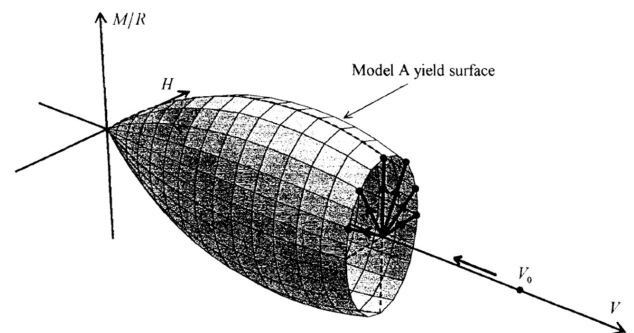


Fig. 3. Determination of points on yield surface (Martin, 1994)

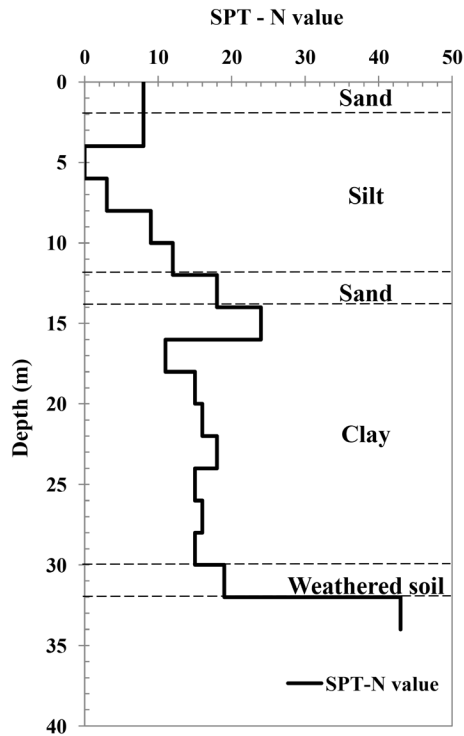


Fig. 4. Applied soil profile in Southwestern Sea

### 3.2 스퍼드캔 형상

3차원 비선형 유한요소해석을 위한 스퍼드캔의 형상은 Hu et al.(2013)에 의해 제안된 UWA(University of Western Australia) 스퍼드캔을 기본 형상으로 채택하였다. UWA 스퍼드캔은 중앙의 원형 판을 중심으로 상하로 경사진 팽이의 형태를 지니고 있으며 관입의 용이성을 위한 뾰족한 모서리(spigot)을 지니고 있는 것이 특징이다. SNAME(2008)에 제시된 경험식 및 안정성 평가 프로세스에 따라 분석을 수행하였으며, 프리로딩(preloading) 시 요구되는 지지력을 바탕으로 역산을 통해 지지력 확보가 가능한 스퍼드캔의 단면적을 산정하였다. 분석 결과 7,970kN의 수직하중만을 고려하였을 시 6m 직경, 수평-모멘트 하중을 동시에 고려하였을 시

8m 직경의 원형 단면적이 요구되는 것으로 나타났다. 수치 해석에 적용된 UWA 스퍼드캔의 형상 및 크기는 Fig. 5에 나타내었다.

### 3.3 수치해석

본 연구에서는 3차원 유한요소해석 프로그램인 PLAXIS-B.V. (2010)를 이용하여 스퍼드캔과 지반 사이의 거동을 모사하였다. 수치해석에서 지반은 선형의 탄성-소성 상관관계를 바탕으로 구성된 Mohr-Coulomb 모델과 탄성계수의 세분화( $E_{50}$ ,  $E_{oed}$ ,  $E_{ur}$ )를 통해 지반의 비선형 거동 및 변형특성을 보다 사실적으로 모사가 가능한 Hardening soil 모델이 적용되었다. 해석수행 시 요구되는 입력물성치는 각종 실내 시험과 경험식을 통해 산출되었다. 이때 모래 지반에서의 점착력( $c$ )은 해석의 안정성을 위하여 1kPa를 적용하였으며, 실제 모래 지반의 팽창각(dilatancy angle,  $\psi$ )이 마찰각보다 작은 비관련흐름(non-associated flow rule) 특성을 보이는 점(Loukidis & Salgado, 2009)에 기인하여 다음의 경험식을 통해 팽창각을 산정하였다. 적용된 팽창각 산출 경험식은 기존 연구들(Brinkgreve et al., 1998; Itasca, 2011; Kim et al., 2014)을 통해 대표성을 갖는 것으로 분석된 바 있다.

$$\psi = \phi - 30^\circ \quad (10)$$

단, 내부 마찰각이 30°인 경우에는 해의 수렴이 어려운 점을 고려하여 팽창각을 1°로 적용하였다. Table 2와 Table 3에는 분석을 통해 산출된 입력물성치를 각각의 구성 모델 별로 정리하여 나타내었다. 각각의 모델에 적용된 입력물성치는 대표단면으로 선정된 지반의 시추조사 데이터를 바탕으로 내부 마찰각은 Dunham(1954), 탄성계수는 Mitchell & Gardner(1975)에 의해 제시된 경험식을 통해 산출되었다.

지반 모델의 크기는 하중 작용 시 경계조건의 영향을 받지 않도록 폭과 깊이 방향으로 스퍼드캔의 직경대비 6D,

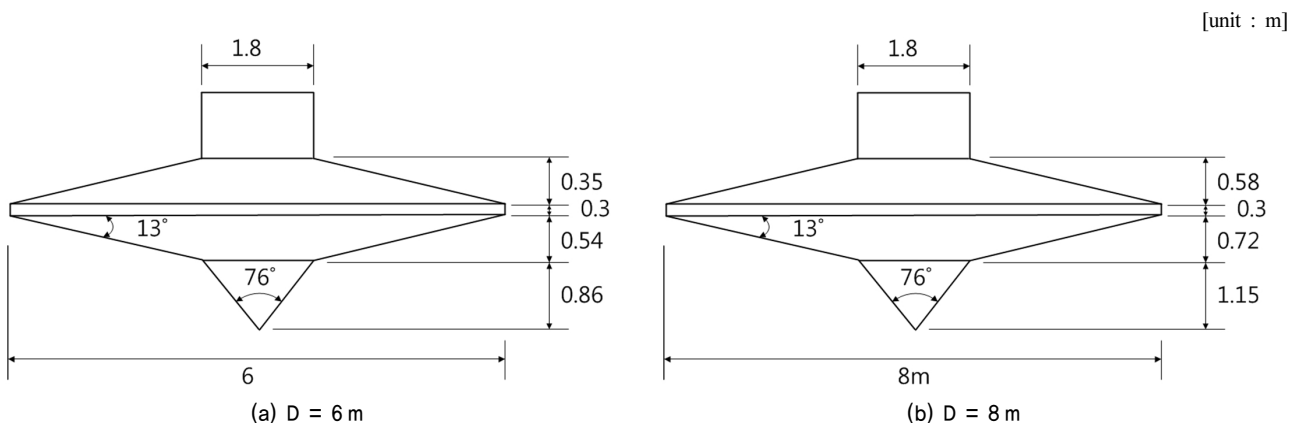


Fig. 5. Dimensions of designed UWA spudcan

5D로 각각 모델링 하였으며, 측면경계는 수평방향으로, 하부경계는 수직, 수평방향으로 모두 구속하였다. 또한 스퍼드캔의 직경, 구성모델별 지지력 및 항복면의 변화를 분석하기 위해 지반 파괴 메커니즘 시 스퍼드캔에 발생하는 응력 및 변형은 고려하지 않았으며 변형이 발생하지 않는 강

체(rigid body)로 모델링 하였다.

본 연구를 통해 수행된 모든 수치해석은 스퍼드캔이 심도 6m에 관입되어 있을 시로 가정하였으며, 수평방향 외력에 대한 고려를 위해 수직하중 재하 후 수평하중이 작용하는 작용 높이를 변경하며 항복면을 정의하는 프로브 방법을 적

Table 2. Input parameter (Mohr Coulomb model)

	Sand	Silt	Sand	Clay	Weathered soil
Depth (m)	0 ~ 2	2 ~ 12	12 ~ 14	14 ~ 32	32 ~ 34
$\gamma'$ (kN/m <sup>3</sup> )	9.0	8.91	9.0	8.91	9.0
E (kN/m <sup>2</sup> )	19,800	10,020	17,770	17,000	85,150
$\nu$	0.3	0.3	0.3	0.49	0.3
c (kN/m <sup>2</sup> )	5	9.7	5	100	0
$\phi$ (°)	25	33.7	32	0	42.7
$\psi$ (°)	1	3.7	2	1	12.7

Table 3. Input parameter (Hardening soil model)

	Sand	Silt	Sand	Clay
Depth (m)	0 ~ 2	2 ~ 12	12 ~ 14	14 ~ 32
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	9.0	8.91	9.0	8.91
E (kN/m <sup>2</sup> )	19,800	10,020	17,770	17,000
E <sub>50</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	19,800	10,020	17,770	-
E <sub>oed</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	15,840	8,019	14,216	-
E <sub>ur</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	59,400	30,072	53,310	-
$\nu$	0.3	0.3	0.3	0.49
c (kN/m <sup>2</sup> )	5	9.7	5	100
$\phi$ (°)	25	33.7	32	0
$\psi$ (°)	1	3.7	2	1

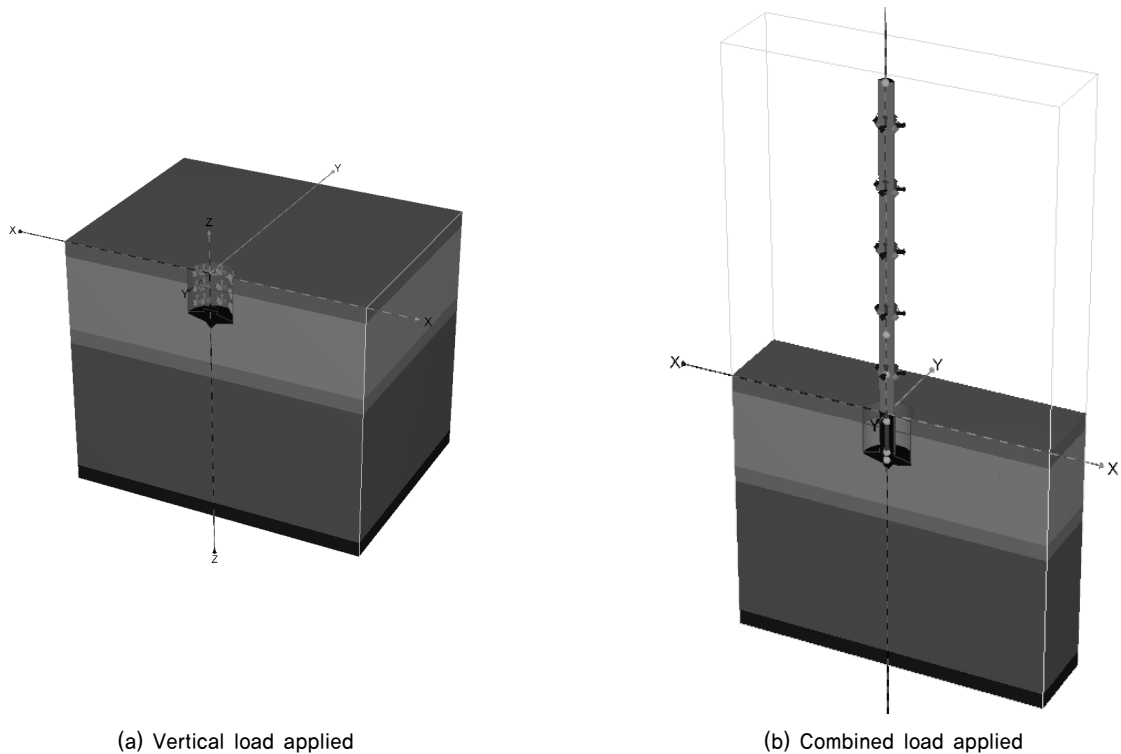


Fig. 6. Numerical modelling per each applied loading step

용하였다. 프로브 방법을 통한 항복면 산출 시에는 스퍼드 캔이 항복 될 때까지 수평방향에서 변위를 작용시켰다. Fig. 6에는 수직하중 적용 시와 수직하중 작용 후 프로브 방법을 적용하였을 시의 모델 개요도를 각각 도시하였다.

#### 4. 해석 결과 및 분석

본 장에서는 수치해석모델의 검증에 위해 모래와 점토만으로 이루어진 단일지반과 대표 단면으로 선정된 서남해 다층지반에 하부가 평평(flat)한 직경 6m의 스퍼드캔을 모델링하여 수치해석을 우선적으로 수행하였다. 수치해석을 통해 산출된 지지력은 기존 제시된 경험식(Hanna & Meyerhof, 1980; Vesic, 1975)을 통해 계산된 지지력과 비교·분석하였다. 검증된 수치해석모델에는 가이드라인의 설계 프로세스에 따라 설계된 UWA 스퍼드캔 형상을 모델링 함으로써 서남해 대표 단면에서의 항복면을 산출하였다.

##### 4.1 단일지반에서의 지지력

모래와 점토로 이루어진 단일지반 수치해석 결과로부터의 지지력은 산출된 하중-변위 곡선으로부터 tangent intersection method(Kim, 2012)를 이용하여 산정하였다. 단일 모래지반에서의 지지력은 Hansen(1970)과 Vesic(1975)에서 33.5MN과 36.3MN, Mohr Coulomb과 Hardening Soil을 적용한 수치해석에서는 30MN과 29MN으로 각각 계산되었다. 또한 단일 점토지반에서는 Hansen(1970)의 경우 32MN, Vesic(1975)의 경우 25.7MN, 그리고 Mohr Coulomb 모델에서는 24MN의 지지력이 산출되었다. 전체적으로 수치해석을 통해 산출된 지지력이 경험식을 통해 계산된 지지력보다 다소 보수적으로 산출되었다. 이는 기존의 지지력 경험식들은 내부마찰각과 팽창각이 일치한다는 가정( $\phi = \psi$ )하에 관련흐름법칙(associated flow rule)에 따라 제안된 반면, 수치해석 모델은  $\phi > \psi$ 의 비관련흐름법칙(non-associated flow rule)이 적용되었기 때문으로 판단된다. 또한 일반적으로 선형으로 계산되는 경험식의 특성상 장경비가 1이 넘는 상대적으로 깊은 심도에서의 지지력은 다소 큰 오차를 나타낼 것으로 판단되지만, 반대로 장경비 1 이하의 얕은 심도에서는 기존 연구를 통해 제안된 경험식(Hansen, 1970; Meyerhof, 1963; SNAME, 2008; Vesic, 1975)을 통해서도 적절한 지지력을 산출할 수 있는 것으로 나타났다.

##### 4.2 다층지반에서의 지지력

수치해석과 경험식을 통해 산출된 다층지반에서의 지지

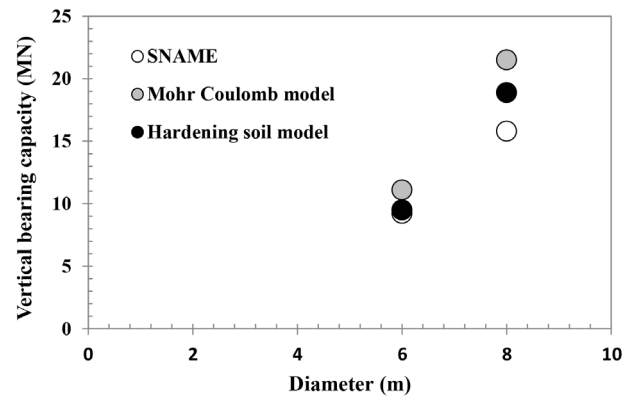


Fig. 7. Calculated vertical bearing capacity in layered soils

력을 Fig. 7에 정리하여 도시하였다. 다층지반에서 수행한 수치해석은 단일지반에서의 경우와 마찬가지로 Mohr Coulomb 모델과 Hardening soil 모델이 적용되었으며 SNAME(2008)에 제시된 경험식을 통해 계산된 지지력과 비교·분석하였다. 분석 결과, 직경 6m로 해석을 수행한 경우 Mohr Coulomb 모델에서 11.1MN, Hardening soil 모델에서 9.5MN의 지지력이 산출되었으며, 경험식을 통해서서는 9.3MN의 지지력이 계산되었다. 마찬가지로 직경 8m에 대한 수치해석 결과, Mohr Coulomb 모델의 경우 21.5MN, Hardening soil 모델의 경우 18.9MN, 그리고 SNAME(2008)을 통해 15.81MN으로 산출되었다. 단일지반에서 수치해석을 통해 산출된 지지력이 경험식을 통해 산출된 지지력보다 다소 보수적으로 나타났던 결과와는 반대의 경향을 나타냈으며, 수치해석과 경험식간에는 6m 직경 기준으로 Mohr Coulomb 모델에서는 약 16.7%, Hardening Soil 모델에서는 2.8%의 오차를 보였다. 이는 수치해석을 통해 산출된 지지력의 경우, 단단한 모래층과 하부의 점토층간의 상호 유기적인 지반 거동으로 인한 펀치스루(punch-through)와 같은 파괴 메커니즘이 고려되었기 때문으로 판단된다. SNAME(2008)을 통해 제시된 다층지반에 대한 경험식의 경우에도 펀치스루(punch-through) 및 backflow가 고려되기는 하였지만, 실제 다층지반에 스퍼드캔 관입 시 발생하게 되는 메커니즘 예측을 통한 정확한 지지력 예측은 단일 지반에 비해 어려운 것으로 나타났다.

##### 4.3 항복면 산출

앞서 수행한 다층지반에 대한 수치해석모델 검증을 바탕으로 실제 가이드라인 프로세스에 따라 설계된 UWA 스퍼드캔의 항복면을 산출하였다. 이때 수평방향 외력에 대한 고려를 위해 수직하중 재하 후 수평방향 하중이 작용하는 작용 높이를 변경하며 항복면을 산출하는 프로브 방법(probe test method)을 적용하였다. Fig. 8과 Fig. 9에는 프로브 방법을 통해 수평하중 작용 시 발생하는 전단응력을 각각의

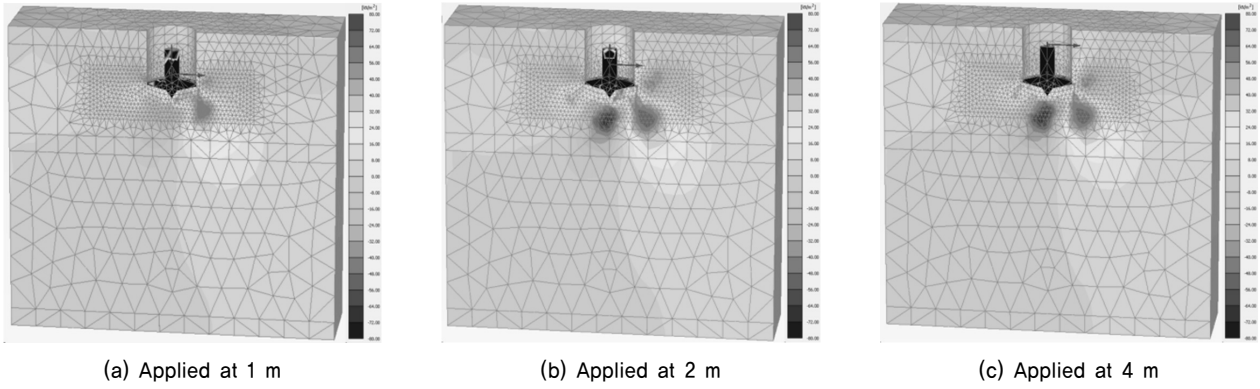


Fig. 8. Shear stress contour (Mohr Coulomb model)

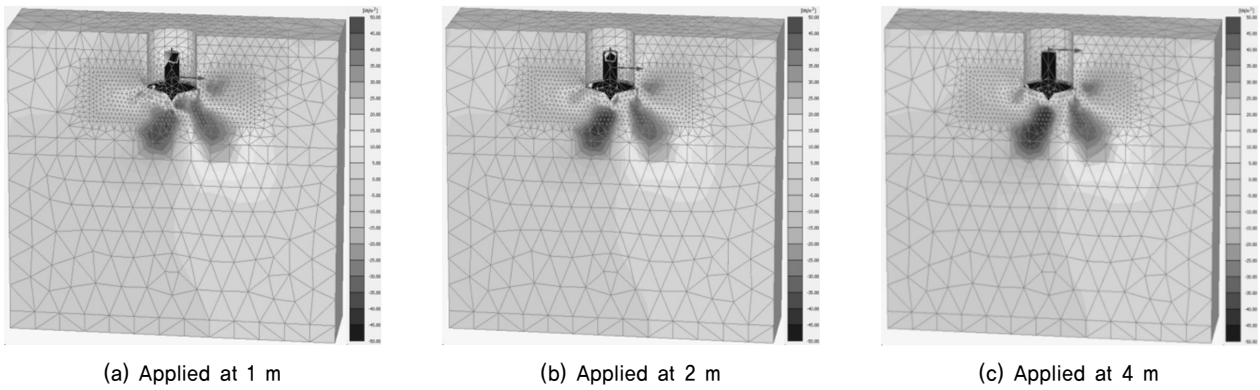
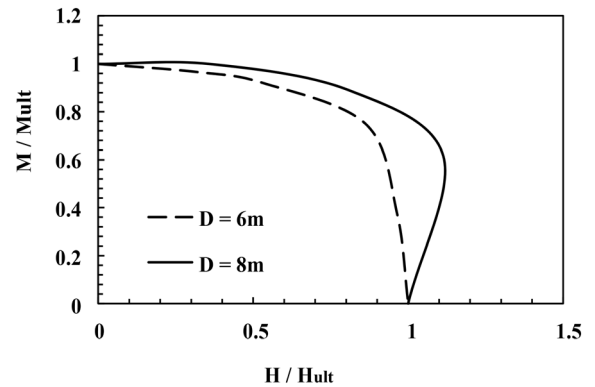


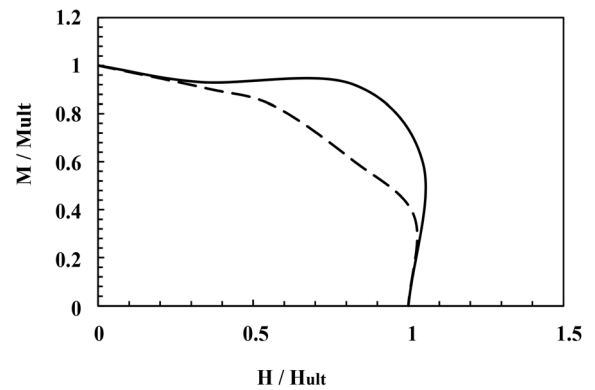
Fig. 9. Shear stress contour (Hardening soil model)

모델별로 도시하였다.

수평방향 하중이 작용하는 작용점이 스퍼드캔으로부터 멀어질수록 발생하는 모멘트 하중은 증가하나, 수평방향으로 작용하는 하중은 감소함에 따라 스퍼드캔의 우측 하단부에 발생하는 전단응력은 작용하는 모멘트 하중의 크기에 비례하여 증가하지는 않는 것으로 나타났다. 하지만 발생하는 전단응력은 수평방향 하중이 작용하는 작용점의 위치에 관계없이 뾰족한 모서리(spigot) 주변에 집중되는 현상이 확인되었다. Fig. 10에는 각각의 구성모델별 산출된 항복면을 도시하였다. 산출된 항복면은 수평방향으로의 극한 지지력( $H_{ult}$ )과 극한 모멘트( $M_{ult}$ )로 정규화해서 나타냈으며, 최대 모멘트( $M_{max}$ )가 양의 수평하중 작용 시 발생하고 수평방향 최대 지지력( $H_{max}$ )이 양의 모멘트 작용 시 발생하는 특성에 따라 항복면은 모멘트 축에 대해 대칭으로 형성되지 않는 것으로 나타났다. 구성모델에 따라서는 Mohr Coulomb 모델과 Hardening soil 모델에서 항복면의 형상이 서로 다르게 나타났지만, 스퍼드캔의 직경이 증가함에 따라 항복면이 점차 확장되는 현상이 두 모델 모두에서 동일하게 나타났다. 이는 관입 심도의 증가 또는 감소로 인한 지지력의 변화가 항복면의 형상 및 크기에 주는 영향을 분석한 기존의 연구결과(Byrne & Houlsby, 2001; Zhang et al., 2011)와 일치한다.



(a) Mohr Coulomb model



(b) Hardening soil model

Fig. 10. Proposed yield surface for designed UWA spudcan



## 5. 결 론

본 연구에서는 가이드라인에 제시된 스퍼드캔 설계 프로세스에 따라 서남해 연약지반 조건에 최적화된 스퍼드캔의 형상 및 크기를 도출하고, 설계된 스퍼드캔의 안정성 평가를 위한 복합하중 작용 시의 항복면을 제시하였다. 이를 위해 수평방향 하중이 작용하는 작용 높이 변경을 통해 항복면을 산출하는 프로브 방법을 3차원 비선형 유한요소해석에 적용하였으며, 스퍼드캔의 형상, 직경, 그리고 구성 모델에 의한 항복면의 변화 형상을 분석하였다. 분석 결과, 선정된 서남해 대표단면에서 7,970kN의 수직하중 작용 시 요구되는 스퍼드캔의 최소 직경은 6m, 수평-모멘트 하중을 모두 고려하였을 시 8m 직경의 원형 단면적이 요구되는 것으로 나타났다. 본 연구를 통해 산출된 스퍼드캔 형상을 통한 관입 심도 6m에서의 지지력 분석을 수행한 결과, 기존 연구나 가이드라인을 통해 제시된 단일지반에 대한 경험식들은 발현되는 지지력을 적절하게 예측 가능한 것으로 나타났으나 다층지반의 경우, 실제 스퍼드캔 관입 시 발생하게 되는 메커니즘 예측을 통한 정확한 지지력 예측은 단일 지반에 비해 어려운 것으로 나타났다.

프로브 방법을 통해 산출된 항복면은 Mohr Coulomb 모델과 Hardening soil 모델을 각각 적용하였을 시 서로 다른 형상을 보였으나, 스퍼드캔의 직경이 증가함에 따라 항복면은 점차 확장되는 것으로 나타났다. 특히 지반의 비선형 거동 및 변형특성의 사실적 모사가 가능한 Hardening soil 모델을 적용하여 산출된 항복면은 서남해 지역에 스퍼드캔 설치 시 스퍼드캔에 작용할 것으로 예상되는 모멘트, 수평방향 하중과의 비교를 통해 사전에 위험성 여부 판단을 위한 안정성 평가에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 수치해석상 검토한계점의 보완 및 위험요소의 고려를 위해 실제 스퍼드캔이 설치될 지반에 대한 철저한 지반 조사와 실내 실험이 필수적으로 수반되어야 할 것으로 판단되며, 다양한 지반조건, 형상, 그리고 심도에 따른 항복면에 대한 추가적인 연구도 요구된다.

## 감사의 글

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20133010021770).

## References

1. Brinkgreve, R., Vermeer, P. and Bakker, K. (1998), Plaxis: Finite element code for soil and rock analyses:[user's Guide], AA Balkema, pp. 1~376.
2. Byrne, B. and Houlsby, G. (2001), Observations of footing behaviour on loose carbonate sands, *Géotechnique*, Vol. 51, No. 5, pp. 463~466.
3. Drescher, A. and Michalowski, R. L. (2009), Shape factor sr for shallow footings, *Geomechanics and Engineering*, Vol. 1, No. 2, pp. 113~120.
4. Dunham, J. (1954), Pile foundations for buildings, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol. 80, No. 1, pp. 1~21.
5. Gottardi, G., Houlsby, G. and Butterfield, R. (1999), Plastic response of circular footings on sand under general planar loading, *Géotechnique*, Vol. 49, No. 4, pp. 453~470.
6. Govoni, L., Gourvenec, S. and Gottardi, G. (2010), Centrifuge modeling of circular shallow foundations on sand, *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, Vol. 10, No. 2, pp. 35~46.
7. Hanna, A. and Meyerhof, G. (1980), Design charts for ultimate bearing capacity of foundations on sand overlying soft clay, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 17, No. 2, pp. 300~303.
8. Hansen, J. B. (1970), A revised and extended formula for bearing capacity, *Akademiet for de Tekniske Videnskaber*, Vol. 28, pp. 5~11.
9. Hossain, M. and Randolph, M. (2010a), Deep-penetrating spudcan foundations on layered clays: centrifuge tests, *Géotechnique*, Vol. 60, No. 3, pp. 157~170.
10. Hossain, M. and Randolph, M. (2010b), Deep-penetrating spudcan foundations on layered clays: numerical analysis, *Géotechnique*, Vol. 60, No. 3, pp. 171~184.
11. Houlsby, G. and Martin, C. (2003), Undrained bearing capacity factors for conical footings on clay, *Géotechnique*, Vol. 53, No. 5, pp. 513~520.
12. Hu, P., Stanier, S., Cassidy, M. and Wang, D. (2013), Predicting peak resistance of spudcan penetrating sand overlying clay, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 140, No. 2, pp. 04013009.
13. InSafeJIP (2011), InSafeJIP: Improved guidelines for the prediction of geotechnical performance of spudcan foundations during installation and removal of jack-up units, RPS Energy, pp. 1~124.
14. ISO (2009), Petroleum and natural gas industries—site-specific assessment of mobile offshore units—, International Organization for Standardization, pp. 1~288.
15. Itasca, F. (2011), Fast lagrangian analysis of continua, Minneapolis, pp. 1~3058.
16. Kim, D.-J., Youn, J.-U., Jee, S.-H., Choi, J., Lee, J.-S. and Kim, D.-S. (2014), Numerical studies on bearing capacity factor  $N_\gamma$  and shape factor of strip and circular footings on sand according to dilatancy angle, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 30, No. 1, pp. 49~63 (in Korean).
17. Kim, S. R. (2012), Evaluation of vertical and horizontal bearing capacities of bucket foundations in clay, *Ocean Engineering*, Vol. 52, pp. 75~82.
18. Kohan, O., Gaudin, C., Cassidy, M. J. and Bienen, B. (2014),

- Spudcan extraction from deep embedment in soft clay, *Applied Ocean Research*, Vol. 48, pp. 126~136.
19. Loukidis, D. and Salgado, R. (2009), Bearing capacity of strip and circular footings in sand using finite elements, *Computers and Geotechnics*, Vol. 36, No. 5, pp. 871~879.
  20. Martin, C. M. (1994), Physical and numerical modelling of offshore foundations under combined loads, University of Oxford, pp. 1~306.
  21. Meyerhof, G. G. (1963), Some recent research on the bearing capacity of foundations, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 1, No. 1, pp. 16~26.
  22. MICHALOWSKIĆ, R. (2001), Upper-bound load estimates on square and rectangular footings, *Géotechnique*, Vol. 51, No. 9, pp. 787~798.
  23. Mitchell, J. K. and Gardner, W. S. (1975), In situ measurement of volume change characteristics, *In Situ Measurement of Soil Properties*: ASCE, pp. 279.
  24. PLAXIS-B.V. (2010), *PLAXIS 3D reference manual*: Delft, Netherlands: Plaxis Company, pp. 1~364.
  25. Purwana, O., Leung, C., Chow, Y. and Foo, K. (2005), Influence of base suction on extraction of jack-up spudcans, *Géotechnique*, Vol. 55, No. 10, pp. 741~753.
  26. SNAME (2008), *Guideline for site specific assessment of mobile jack-up units*, The society of naval architects & marine engineers, New Jersey, City, NJ, USA, pp. 1~366.
  27. Teh, K. and Leung, C. (2010), Centrifuge model study of spudcan penetration in sand overlying clay, *Géotechnique*, Vol. 60, No. 11, pp. 825~842.
  28. Teh, K., Leung, C. and Chow, Y. (2007), Some considerations for predicting spudcan penetration resistance in two-layered soil using miniature penetrometer, *Offshore site investigation and geotechnics, Confronting New Challenges and Sharing Knowledge: Society of Underwater Technology*, pp. 47~52.
  29. Terzaghi, K. (1943), *Theory of consolidation*, Wiley Online Library, pp. 1~510.
  30. Vesic, A. (1975), Bearing capacity of shallow foundations, *foundation engineering handbook*, Winterkorn and Fang, Ed: Van Nostrand Reinhold Company, New York, pp. 121~147.
  31. Zhang, Y., Bienen, B., Cassidy, M. J. and Gourvenec, S. (2011), The undrained bearing capacity of a spudcan foundation under combined loading in soft clay, *Marine Structures*, Vol. 24, No. 4, pp. 459~477.
  32. Zhao, J., Duan, M., Zhang, A., Wang, F. and Zhang, M. (2014), Bearing capacity of square spudcan of jack-up rig based on a three-dimensional failure mechanism, *Ships and Offshore Structures*, Vol. 9, No. 2, pp. 149~160.