

모래와 점토 단일지반에서의 스퍼드캔 관입/추출 거동 평가

Evaluation of Spudcan Penetration/Extraction Behavior in Uniform Sand and Clay

유진권¹ Yoo, Jin-Kwon
박두희² Park, Duhee
강재모³ Kang, Jaemo

Abstract

We performed laboratory spudcan penetration and extraction tests considering various geometries. Jumunjin sand, representative standard sand in South Korea, and kaolinite were used for uniform sand and clay layers, respectively. The measured vertical bearing and pull-out capacities were compared to empirical equations for shallow foundations. The results showed good agreement between measured and calculated bearing capacity from laboratory test and previous study at shallow depths. The effect of spudcan geometry is shown to depend on site condition. The influence of a sharp spigot is not significant in clays. The slope of the spudcan surface is shown to influence the pull-out capacity. The characteristics of spudcan penetration and extraction behavior considering various geometries can be a useful reference for determining spudcan geometries.

요 지

본 연구에서는 다양한 형상 및 서로 다른 스케일로 설계된 스퍼드캔을 통한 관입/추출 실내 시험을 수행하였다. 이를 위해 국내의 대표적인 표준사인 주문진 모래와 카올리나이트를 사용하여 모래지반과 점토지반을 각각 조성하였다. 관입 시험을 통해 측정된 지지력은 기존 연구자들에 의해 제시된 얇은 기초 지지력 경험식으로 계산된 지지력과 비교하였으며, 스퍼드캔의 형상에 따른 관입/추출 시의 지지력 및 추출 시 요구되는 추출력의 차이를 비교·분석하였다. 분석 결과, 기존 연구자들에 의해 제시된 지지력 산정 경험식은 실제 관입을 통해 측정되는 지지력을 얇은 심도에서 비교적 정확하게 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 형상에 따른 차이는 모래지반과 점토지반에서 각각 다르게 나타났으며 상대적으로 연약한 점토지반에서 날카로운 spigot으로 인한 영향이 적은 것으로 나타났다. 또한 스퍼드캔의 경사는 관입 시 보다는 추출 시 요구되는 추출력에 더 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 본 연구를 통해 나타난 모래와 점토지반에서의 스퍼드캔 형상 별 관입/추출 거동 특성을 통해 스퍼드캔 설계 시 형상에 따른 지지력 및 추출력 특성파악에 참고자료가 될 수 있을 것으로 판단된다.

Keywords : Spudcan, Penetration/extraction test, Spudcan geometry, Bearing capacity

1 비회원, 한양대학교 건설환경공학과 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Hanyang Univ.)

2 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Hanyang Univ., Tel: +82-2-2220-0322, Fax: +82-2-2220-1945, dpark@hanyang.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

3 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Hanyang Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2017년 9월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

해상 작업 시 사용되는 잭업바지(jack-up barge)의 기초에 해당하는 스퍼드캔(spudcan)은 해저면에 잭업바지를 안정적으로 고정시키고 지지하는 역할을 담당한다. 일반적인 스퍼드캔은 요구되는 지지력을 만족시키고 해저 지반에 관입을 용이하게 하기 위해 콘을 뒤집어 놓은 형태로 제작하는 것이 일반적이다. 스퍼드캔의 하부 중심은 날카로운 spigot으로 이루어져 있어 수평방향 저항력을 증가시킬 수 있도록 구성되어 있다.

해상에 설치되는 스퍼드캔은 육상에 설치되는 얇은 기초의 이론을 적용하여 지지력을 산출하는 것이 일반적이다. 하지만 육상에서의 일반적인 얇은 기초 형상과는 달리 콘의 형태와 spigot으로 불리는 날카로운 모서리를 지니고 있어 얇은 기초의 지지력 이론 적용 시 주의를 요한다. Housby and Wroth(1984)는 스퍼드캔의 콘 형상과 spigot으로 인하여 지표면으로부터 기울어져 미끄러짐 현상이 발생할 수 있다고 제시하였으며, Baligh and Scott(1976)은 관입 시 지반이 방사방향(radial direction)으로 스퍼드캔의 관입 거동보다 앞서 이동함으로써 Prandtl의 파괴모드에 따라 거동하지 않음을 증명하였다. 또한 Cassidy and Housby(2002)는 깊은 심도에서의 강도 발현 시 날카로운 모서리로 인해 응력집중 현상이 발생함을 제시하였으며, Housby and Martin(2003)은 콘의 각도 변화에 따른 지반과 스퍼드캔의 거동특성을 분석하였다. 스퍼드캔 관입 시 거동은 수치해석이나 실내 시험을 통한 연구 결과가 제시된 바 있다. Tan(1990), Martin(1994), Hossain and Randolph(2010b), Martin and Housby(2000), 그리고 Zhang et al.(2011)은 work-hardening plasticity 모델을 적용하여 스퍼드캔 관입 시의 거동을 모사하였고, Gottardi et al.(1999), Martin(1994) 그리고 Martin and Housby(2000)는 1g와 실제 지반에서 전체적인 거동패턴이 유사하게 나타나는 점을 고려하여 모래, 점토지반에서의 복합하중 작용 시 하중조건 및 스퍼드캔 직경에 따른 항복면(yield surface)을 각각 도출하였다. 또한 Govoni et al.(2010), Hossain and Randolph(2010a), 그리고 Teh and Leung(2010)은 센트리퓨지(centrifuge)를 통한 실내 시험을 통해 수직-수평-모멘트 하중에 대한 항복면을 제시하였다. 스퍼드캔의 추출 거동 및 추출력 관련 연구는 점토지반을 중심으로 연구가 진행되었다. Vesic(1969)은 실내 시험을 통해 비배수 전단강도, 관입 깊이, 그리고 추출계수(breakout factor)를 적용한 원형과 사각형

형상의 스퍼드캔에 대한 추출력 산출 경험식을 제안하였으며, Rapoport and Young(1985)은 점토와 모래지반에 관입되어 있는 사각 푸팅의 추출 시 거동 및 추출력을 지지력 계수와 형상 계수를 통하여 제안하였다. 최근에는 Hossain and Dong(2013)이 단일 지반과 복합지반에서의 스퍼드캔 추출 시의 거동을 센트리퓨지를 통한 실험으로 입증한 바 있다. 다양한 연구결과가 발표된 국외에 비해 국내에서는 스퍼드캔 관련 연구가 아직 시작 단계에 머물러 있는 실정이며 실제 설계된 스퍼드캔을 통한 실증 및 적용된 사례가 없다.

본 연구에서는 가이드라인(SNAME, 2008; ISO, 2009; InSafeJIP, 2011)에 제시된 스퍼드캔 설계 프로세스에 따라 산출된 다양한 형상의 스퍼드캔을 일정한 스케일로 축소 제작하여 관입/추출 시험을 수행하였다. 또한 가장 보편적으로 사용되는 UWA 스퍼드캔 이외에 모래, 점토뿐만 아니라 암반으로 이루어진 지반에서도 동시에 적용 가능한 평평한 바닥면을 지닌 다양한 형상의 스퍼드캔에 대한 관입/추출 시험을 수행하였다. 주문진 모래와 카올리나이트를 사용하여 조성된 모래와 점토 지반에서의 관입/추출 시험을 통해 산출된 지지력 및 추출력을 바탕으로 스퍼드캔의 최대 단면적 형상, 상부와 하부 경사의 존재 여부, spigot, 그리고 최대 단면적 크기가 지지력 및 추출력에 미치는 영향을 평가하였다. 또한 기존에 널리 적용되고 있는 얇은 기초의 지지력 경험식과 최근 스퍼드캔 설치가이드라인을 통해 제시된 지지력 산출 경험식과의 비교·분석 및 지지력 예측 정확성을 평가하였다.

2. 이론적 배경

2.1 모래지반에서의 지지력

모래지반에서의 일반적인 지지력 산출 시, 스퍼드캔은 형상에 관계없이 원형의 평평한 푸팅으로 단순화하여 다음의 경험식을 통해 계산된다.

$$q = \frac{Q_v}{(\pi D^2 / 4)} = \frac{\gamma' D}{2} N_{\gamma, strip} s_\gamma d_\gamma + \gamma' d N_{q, strip} s_q d_q \quad (1)$$

여기서 Q_v 는 하중, $N_{\gamma, strip}$ 과 $N_{q, strip}$ 은 연속기초의 지지력계수, s_γ 와 s_q 는 형상계수, 그리고 d_γ 와 d_q 는 깊이계수를 각각 의미한다. 스퍼드캔이 지반에 완전히 관입된 경

우와는 다르게 일부만 관입되었을 시 다음의 경험식을 통해 지지력의 산출이 가능하다.

$$q = \frac{Q_v}{(\pi D^2 / 4)} = \frac{\gamma' D'}{2} N_{\gamma, strip} s_{\gamma} d_{\gamma} \quad (2)$$

여기서 D' 은 지반에 관입되어 있는 스퍼드캔의 유효 단면적을 나타낸다. 모래지반에서의 지지력 산출을 위한 얇은 기초 지지력 경험식은 기존 여러 연구자들로부터 다양하게 제시된 바 있으며, 스퍼드캔 설치를 위한 가이드라인(SNAME, 2008)에서도 기존 제시된 Terzaghi (1943), Meyerhof(1963), Hansen(1970), 그리고 Vesic(1975)의 경험식을 기반으로 지지력을 산출하도록 추천하고 있다. 추가적으로 SNAME(2008)에서는 기존 경험식에서 고려하지 않은 스퍼드캔의 관입 시 발생하는 back-flow의 영향을 고려할 수 있도록 경험식을 제안하고 있다.

기존 연구자들을 통해 제시된 얇은 기초의 지지력 경험식은 지지력 산출을 위한 대부분의 지지력계수가 경험적인 방법을 통해 산출된다. 최근에는 보다 신뢰성 높고 정확한 지지력계수 산출을 위해 응력특성이나 유한 요소 해석 프로그램을 통한 수치해석적 접근을 통해 지지력계수(N_c , N_q , N_{γ})에 대한 정해(exact solution)가 제시되기도 하였다. 또한 Randolph et al.(2004)에 의해 지지력계수 $N_{\gamma, circular}$ 와 $N_{q, circular}$ 간의 상관관계가 다음과 같이 제시된 바 있다.

$$N_{\gamma, circular} \approx 0.75(N_{q, circular} - 1) \tan \phi \quad (3)$$

이 때, 관련흐름법칙(associated flow rule)에 따라 내부 마찰각(friction angle)과 팽창각(dilatancy angle)이 서로 동일하다는 가정하에 지지력계수(N_c , N_q , N_{γ})를 산출하는 경우, 실제 팽창각은 내부 마찰각보다 작기 때문에 산출되는 푸팅의 지지력은 과대예측 될 수 있다고 제시된 바 있다(Bolton, 1986; Frydman and Burd, 1997; Randolph et al., 2004). 상대적으로 상대밀도가 낮은 모래에서는 팽창각이 $N_{\gamma, circular}$ 에 미치는 영향이 작지만(Ports and Zdravkovic, 2001), 단단한 모래지반일 경우에는 그 영향이 점차 증가하여, 지지력 산출을 위한 $N_{\gamma, circular}$ 의 산정에는 신중을 기할 것을 제안하였다(Frydman and Burd, 1997).

2.2 점토지반에서의 지지력

점토로 이루어진 지반에서의 깊이에 따른 비배수전단강도(undrained shear strength, S_u)는 심도가 증가할수록 선형으로 증가한다는 가정하에 다음과 같이 표현이 가능하다.

$$S_u = S_{um} + kz \quad (4)$$

여기서, S_{um} 은 해저지표면에서의 비배수전단강도를 의미하며 k 는 심도에 따른 비배수전단강도의 증가 비율, 그리고 z 는 깊이를 나타낸다. 깊이에 따른 비배수전단강도의 선형적인 증가 영향은 강도불균질성의 정도(degree of strength non-homogeneity) 또는 불균질성 계수(non-homogeneity factor)로 불리는 kD/S_{um} 를 통해 나타내어진다. 여기서 D 는 스퍼드캔의 직경을 나타낸다. 스퍼드캔 설치를 위한 가이드라인(SNAME, 2008)에서는 앞서 모래지반에서의 지지력 산출 시와 마찬가지로 점토 지반에서도 기존 연구자들에 의해 제시된 얇은 기초의 지지력 산출 경험식을 기반으로 지지력을 산출하도록 제시하고 있다.

$$q_u = N_c S_u + \gamma' d \quad (5)$$

여기서, N_c 는 무차원의 지지력계수, γ' 은 지반의 유효 단위중량, 그리고 q_u 는 스퍼드캔이 관입되어 있는 심도에서의 평균 지지응력을 의미한다. 실무적인 관점에서는 q_u 에 단면적을 고려해줌으로써 스퍼드캔과 연결되어 있는 레그에 가해지는 하중으로 고려하기도 한다. 앞서 모래지반에서와 마찬가지로 SNAME(2008)에서는 점토 지반에 대해서도 back-flow의 영향을 고려해 줄 수 있는 경험식을 다음과 같이 제시한바 있다.

$$q_u = N_c S_u + \gamma' d - p'_0 + \frac{\gamma' V}{A} \quad (6)$$

여기서, p'_0 는 back-flow가 발생함으로써 흘러 내려온 흙의 상재하중, V 는 스퍼드캔이 관입됨으로써 발생된 공간의 체적, 그리고 A 는 스퍼드캔의 최대 단면적을 의미한다.

3. 시험개요

3.1 시험장비 및 시료

본 연구에서는 서로 다른 4가지 형상의 스퍼드캔을 이용한 실내 시험을 통해 스퍼드캔의 관입/추출 메커니즘을 분석하였다. 실내 시험을 위한 시험장비는 수직 및 수평방향으로의 하중 및 변위를 재하할 수 있고, 원하는 위치에서의 관입/추출 시험이 가능하도록 좌·우로의 이동이 자유롭도록 제작되었다. 제작된 시험장비의 전경은 Fig. 1에 도시하였다.

모래지반 조성을 위한 아크릴 토조는 100cm*100cm*100cm(B*L*H)의 크기로 제작되었으며, 국내의 대표적인 실험용 표준사인 주문진 모래로 낙사법을 적용하여 상대밀도(D_r) 60%의 모래지반을 조성하였다. 상대밀도 60%의 모래지반 조성 후에는 물을 가득 채워 넣어 포화된 상태로 만들어 주었다. 점토지반에서의 관입/추출 시험을 위한 압밀 토조는 직경(D) 100cm와 높이(H) 100cm로 제작되었다. 점토지반 조성을 위해 카올리나이트 분말이 사용되었으며 지반 조성 시에는 카올리나이트와 물을 1:1의 비율로 혼합하여 토조에 채워 넣은 후, 총 4단계의 하중을 가하여 압밀 과정을 진행하였다. 4kPa의 하중으로 압밀 과정을 시작하여 8kPa, 16kPa, 그리고 32kPa의 하중을 단계 별로 재하하였다. 하중 재하 시, 압밀 토조 하부에는 필터페이퍼(filter paper)를 부착하여 압밀 시 카올리나이트 입자를 제외한 물만 토조 밖으로 빠지도록 하였다. 각각의 하중 단계 별로 약 3주간의 하중 재

하를 통해 더 이상의 변위가 발생하지 않는 시점을 압밀이 종료된 시점으로 판단하였다. 소형 베인전단시험(vane shear test)을 통해 조성된 점토지반에서의 비배수전단강도를 측정된 결과, 총 4단계의 압밀 과정을 거쳐 조성된 점토지반의 비배수전단강도는 10kPa로 나타났다. 조성된 점토지반은 모래지반과는 달리 재조성시 오랜 기간이 소요되는 점을 고려하여 직경 100cm의 압밀 토조에서 동시에 수행되었으며, Boussinesq에 의해 제시된 차트를 통해 수평방향으로의 영향범위를 고려해 주었다. Boussinesq는 심도(z)에 대한 스퍼드캔 반지름(a)의 비(z/a), 그리고 하중의 중심에서 수평방향으로의 거리(r)와 스퍼드캔 반지름의 비(r/a)를 통해 수직하중 작용 시 심도별 수평방향으로의 영향범위를 제시하였다. 본 연구에서 수행된 각각의 스퍼드캔 관입/추출 시험은 Boussinesq에 의해 제안된 최대 수평방향으로의 영향범위($r/a \approx 2.5$)를 벗어나도록 장변(L) 또는 직경(D) 대비 3배 이상의 거리를 확보한 상태에서 수행되었다. 검토 결과, 하중의 중심에서 각각의 관입/추출 시험 경계까지의 거리와 스퍼드캔 반지름과의 비는 작은 스케일의 스퍼드캔에서 3.13, 그리고 큰 스케일의 스퍼드캔에서 3.17로 Boussinesq에 의해 제안된 최대 수평방향으로의 영향범위를 벗어나 서로 간섭없이 시험이 수행된 것으로 나타났다. Fig. 2에는 압밀 토조에서 수행된 관입/추출 시험의 개요도 및 시험 종료 후의 전경을 도시하였다. Fig. 2(b)에 나타난 바와 같이 각각의 관입/추출 시험이 서로 간섭없이 수행이 되었음을 확인할 수 있다. 하지만 관입 시험과는 달리 추출 시험의 경우, 식 (7)에 따라 균열로 인하

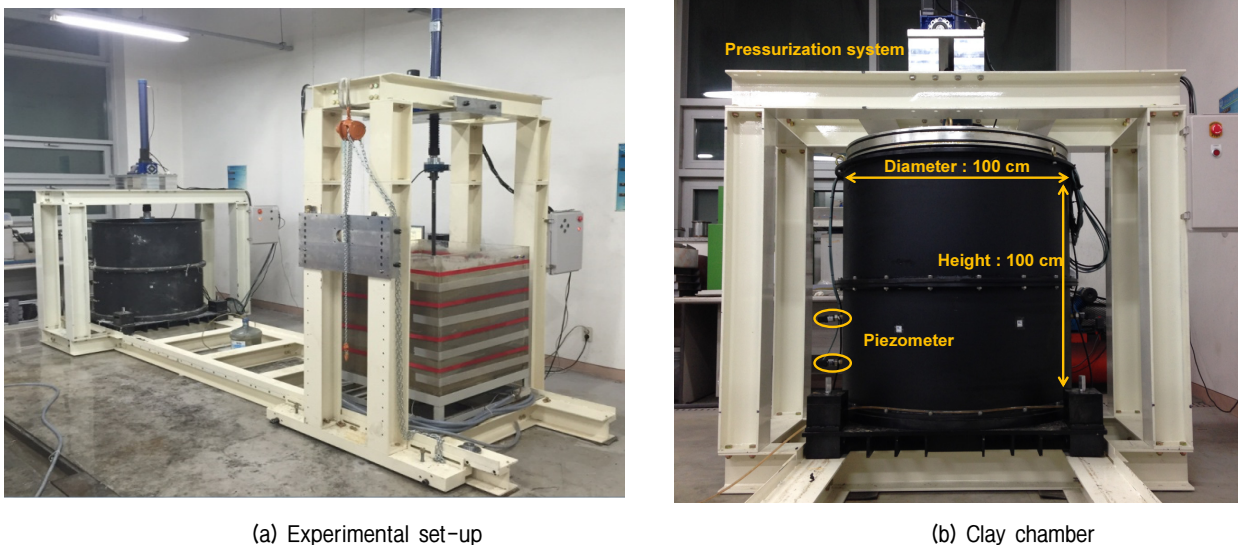
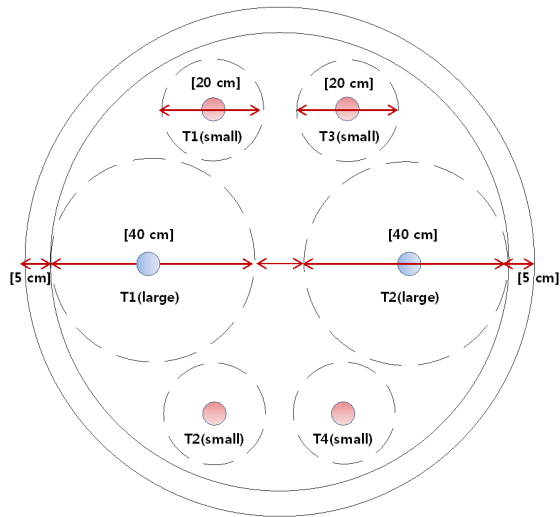


Fig. 1. Experimental set-up for spudcan penetration/extraction test



(a) Tested position (Dimension in model scale)



(b) Penetration/extraction tests

Fig. 2. Tested position and influence range in clay

여 back-flow 발생이 예상되는 심도만큼의 관입이 이루어 지지 못하였고, back-flow 발생 후 직경 100cm의 토조에서 다수의 시험이 불가능하였기 때문에 점토에 대한 추출 시험 결과는 수록하지 않았다.

$$Z_c = \frac{2S_u}{\gamma} \quad (7)$$

Table 1. Properties of tested soils

Property	Jumunjin sand	Kaolinite
G_s	2.65	2.60
C_u	1.46	-
D_{50} (mm)	0.56	-
e_{max}	0.98	-
e_{min}	0.605	-
LL	-	44.94%
PL	-	29.38%

Table 2. Dimension of tested spudcans

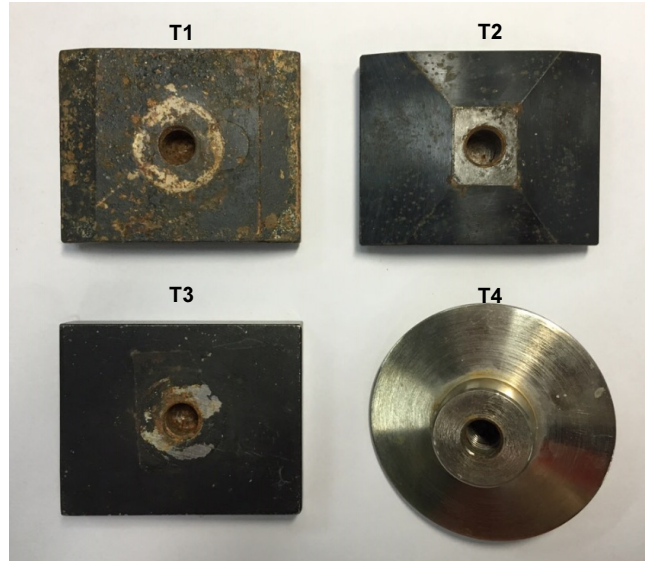
	B (mm)	L (mm)	H (mm)	D (mm)	Shape
T1 (small)	50	63	12	-	Rectangular
T2 (small)	50	63	12	-	Rectangular
T3 (small)	50	63	12	-	Rectangular
T4 (small)	-	-	12	63	Round
T1 (large)	100	126	24	-	Rectangular
T2 (large)	100	126	24	-	Rectangular
T3 (large)	100	126	24	-	Rectangular
T4 (large)	-	-	24	126	Round

여기서, Z_c 는 인장균열 깊이, S_u 는 점토의 비배수전단 강도, 그리고 γ 는 단위중량을 각각 나타낸다. Table 1에는 모래지반과 점토지반 조성에 사용된 주문진 모래와 카올리나이트의 기본 물성치를 정리하여 나타내었다.

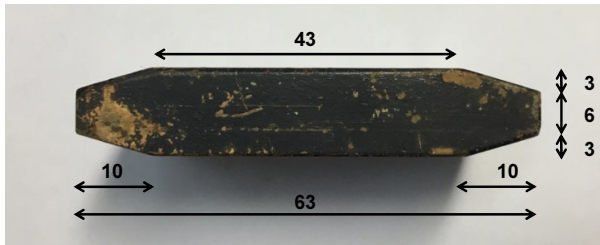
3.2 스퍼드캔 형상

스퍼드캔의 관입/추출 과정에서의 지지력 및 추출력, 그리고 스퍼드캔과 지반간 거동 분석을 위해 총 4가지 형상의 스퍼드캔에 대한 실내 시험을 진행하였으며, 크기에 따른 영향 분석을 위해 총 2가지 스케일의 스퍼드캔에 대한 관입/추출 시험을 진행하였다. Fig. 3에는 실내 시험에 사용된 스퍼드캔의 정면 및 측면 형상을 각각 도시하였으며, Table 2에는 각각의 스퍼드캔에 대한 제원 및 형상 정보를 정리하여 나타내었다.

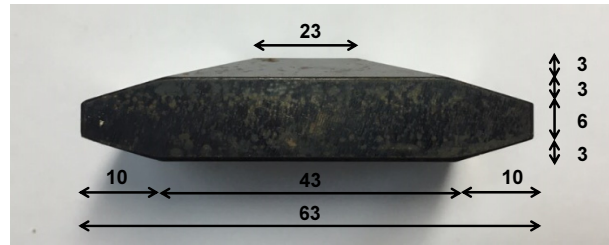
실내 시험에 사용된 모든 스퍼드캔은 동일한 스케일일 경우, 형상만 다를 뿐 같은 크기의 최대 단면적을 갖도록



(a) Front view of tested all spudcans



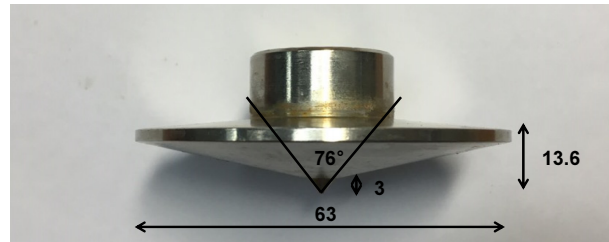
(b) T1 (side view)



(c) T2 (side view)



(d) T3 (side view)



(e) T4 (side view)

Fig. 3. Front and side views of tested small size spudcans (unit: mm)

설계되었다. 완전한 사각형 형태의 T3 형상을 기준으로 T1은 상부와 하부에 경사를 주었고, T2의 경우에는 하부는 T1과 동일하지만 추출 시의 추출력 비교를 위해 작업 바지의 레그(leg)가 연결되는 부위까지 경사를 연장시켜 설계하였다. T4 스퍼드캔 형상은 Hu et al.(2013)에 의해 제안된 UWA(University of Western Australia) 스퍼드캔으로써 중앙의 원형 단면을 중심으로 상하로 경사진 팽이의 형태를 이루고, 하부 중심에는 관입의 용이성을 위한 spigot을 지니도록 설계되었다. 본 연구에서는 전세계적으로 모래 또는 점토지반에 보편적으로 적용되고 있는 UWA 스퍼드캔(T4) 형상과 모래, 점토 뿐만 아니라 암반으로 이루어진 지반에도 적용될 수 있는

평평한 바닥면을 지닌 사각형 형태의 스퍼드캔(T1, T2, T3)에 대한 실내 시험을 수행하여 형상에 따른 차이점 및 spigot으로 인한 영향을 분석하고자 하였다. 또한 스퍼드캔의 최대 단면적에 따른 영향 분석을 위해 각각의 스퍼드캔 형상에 대하여 작은 스케일의 스퍼드캔(T1(small), T2(small), T3(small), T4(small))과 Fig. 3에 도시한 각각의 제원을 2배 크기로 확대한 동일한 형상의 스퍼드캔(T1(large), T2(large), T3(large), T4(large))을 제작하여 관입/추출 시 지지력과 추출력을 각각 측정하였다. 본 연구에서 수행된 모든 실내 시험은 일정한 속도로 관입/추출이 진행되도록 변형률(strain) 컨트롤을 통해 50mm/min의 일정한 속도로 관입 및 추출 시험을 수행하였다.

4. 시험 결과 및 분석

스퍼드캔 형상에 따른 지지력 및 추출력 분석을 위해 앞서 언급한 총 4가지 형상의 스퍼드캔에 대한 관입/추출 실험을 모래와 점토지반에 대하여 각각 수행하였다. 또한 스퍼드캔의 최대 단면적 차이로부터 나타나는 지지력과 추출력을 측정하여 비교 및 분석하였다. 각각의 형상 별로 측정된 지지력은 기존 연구자들에 의해

제시된 얇은 기초 지지력 경험식(Meyerhof, 1963; Hansen, 1970; Vesic, 1975) 및 가이드라인(SNAME, 2008; InSafeJIP, 2011)의 지지력 경험식과 비교 및 분석하였다.

4.1 모래지반에서의 지지력 및 추출력

Fig. 4에는 스퍼드캔 형상 별 관입/추출 시험을 스퍼드캔 관입 전, 관입 과정, 추출 과정, 그리고 추출 후의

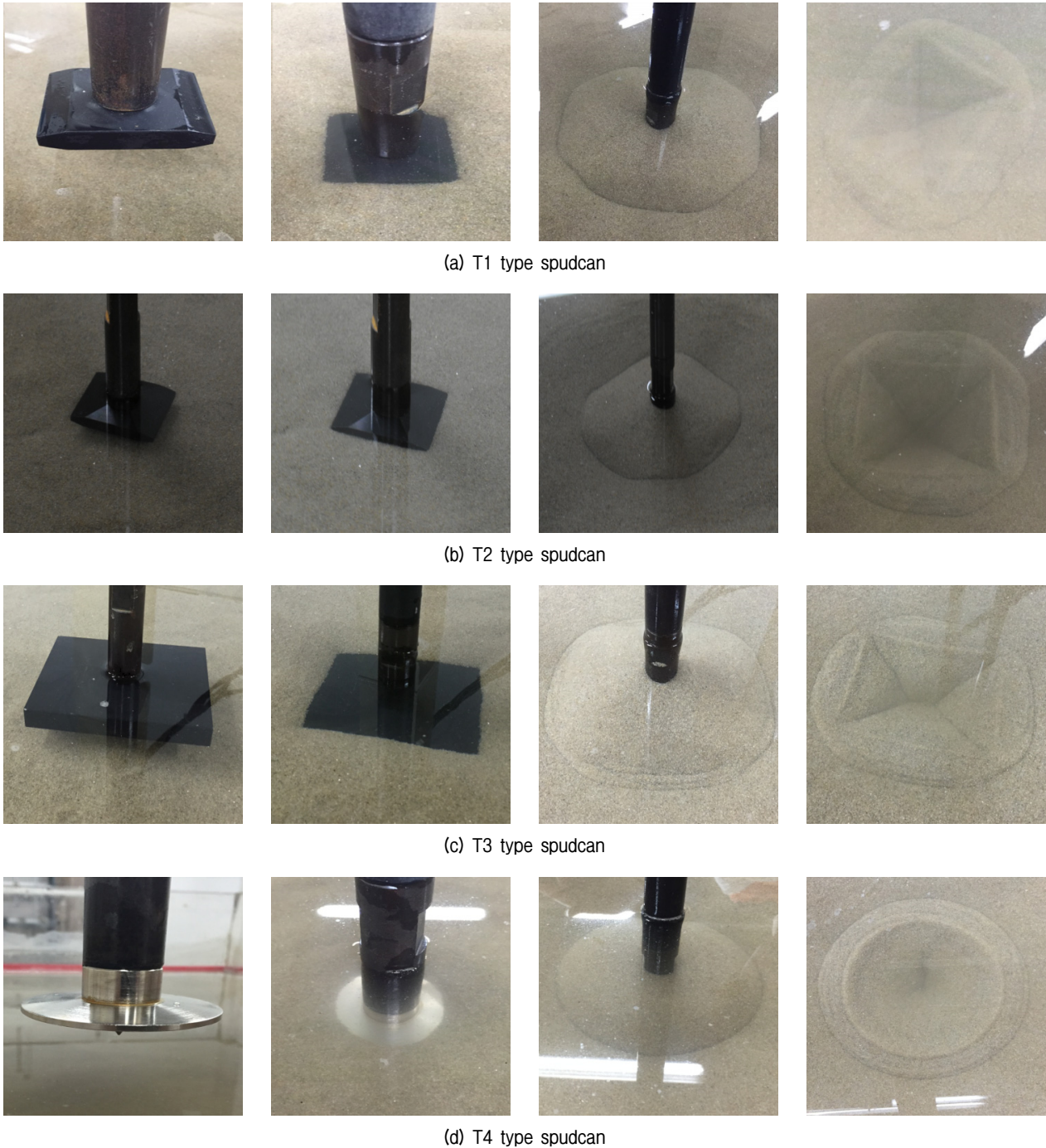


Fig. 4. Penetration/extraction procedures of tested spudcan in sand

단계 별로 각각 도시하였다. 스퍼드캔의 형상 별로 관입이나 추출 과정에서의 영향 범위는 크게 차이가 나지 않는 것으로 나타났으나, 추출 과정이나 추출 후 지반에 나타나는 형상은 각각 다르게 나타났다. 이와 같은 현상은 스퍼드캔의 최대 단면적 크기에 관계없이 동일하게 관찰되었다. Fig. 5에는 스퍼드캔 관입 시 측정되는 지지력을 각각의 형상 및 스케일 별로 도시하였다. 실내 시험에 사용된 스퍼드캔의 스케일이 실제 현장에 설치되는 스퍼드캔에 비해 매우 작은 비율이지만 관입 시 각각의 스퍼드캔 주변에서 발생하는 평균 응력(mean stress)의 크기와 동일한 상대밀도에서도 응력 조건에 따라 지반의 내부 마찰각에 차이가 발생하기 때문에 형상 및 스케일에 따른 지지력이 다르게 나타났다. 실내 시험을 통해 측정된 지지력은 현재까지도 실무에서 설계 시 널리 적용되고 있는 Meyerhof(1963), Hansen(1970), Vesic(1975)의 경험식, 그리고 최근 가이드라인(SNAME, 2008; InSafeJIP, 2011)을 통해 제안된 식으로 산출된 지지력과 비교하였다. 이 때, 모래지반에서의 지지력 산출 시 요구되는 내부 마찰각은 상대밀도 60%의 주문진 모래에 대한 삼축압축시험을 추가적으로 수행하여 산출된 내부 마찰각(39°)을 적용하였다. 측정결과를 스퍼드캔의 관입 깊이(H)와 단면적을 원형으로 고려하였을 시 환산한 스퍼드캔의 직경(D)의 비로 도시하였다.

분석 결과, 기존 연구를 통해 제시된 지지력 산출 경험식들은 실제 스퍼드캔의 관입 시 발생하는 지지력을 비교적 정확하게 예측할 수 있는 것으로 나타났다. SNAME(2008)을 기준으로 H/D의 비가 0.15, 1.0, 2.0, 그리고 3.0 일 때 T1(small)의 경우 0.69, 0.72, 1.04, 1.77, T2(small)의 경우 0.74, 0.67, 1.06, 1.82, T3(small)의 경우 0.77, 0.7, 1.09, 1.9, T4(small)의 경우 0.47, 0.55, 0.66, 그리고 1.05로 각각 나타났다. 다만, Fig. 5(a)에 나타난 바와 같이 실제 관입 시험을 통해 산출되는 지지력은 관입 깊이가 증가함에 따라 형상이나 크기에 관계없이 비선형 특성을 나타내는데 비해, 경험식을 통해 산출되는 지지력은 선형으로 증가하므로 깊은 심도에서의 지지력은 다소 큰 오차를 나타낼 수 있는 것으로 조사되었다. 하지만 H/D의 비가 상대적으로 작은 얕은 심도에서는 비교적 정확한 지지력 예측을 할 수 있을 것으로 판단된다.

최대 단면적을 갖는 단면의 형상이 서로 동일한 스퍼드캔의 경우, 관입 시 측정되는 지지력에는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 사각형 형상을 최대 단면적의 형상으로 하는 경우(T1, T2, T3), 스퍼드캔의 상부와 하부 경사의 유무에 관계없이 지지력은 유사하게 측정되었다. 하지만 최대 단면적이 계산되는 단면이 원형 형상을 기본으로 하는 경우에는

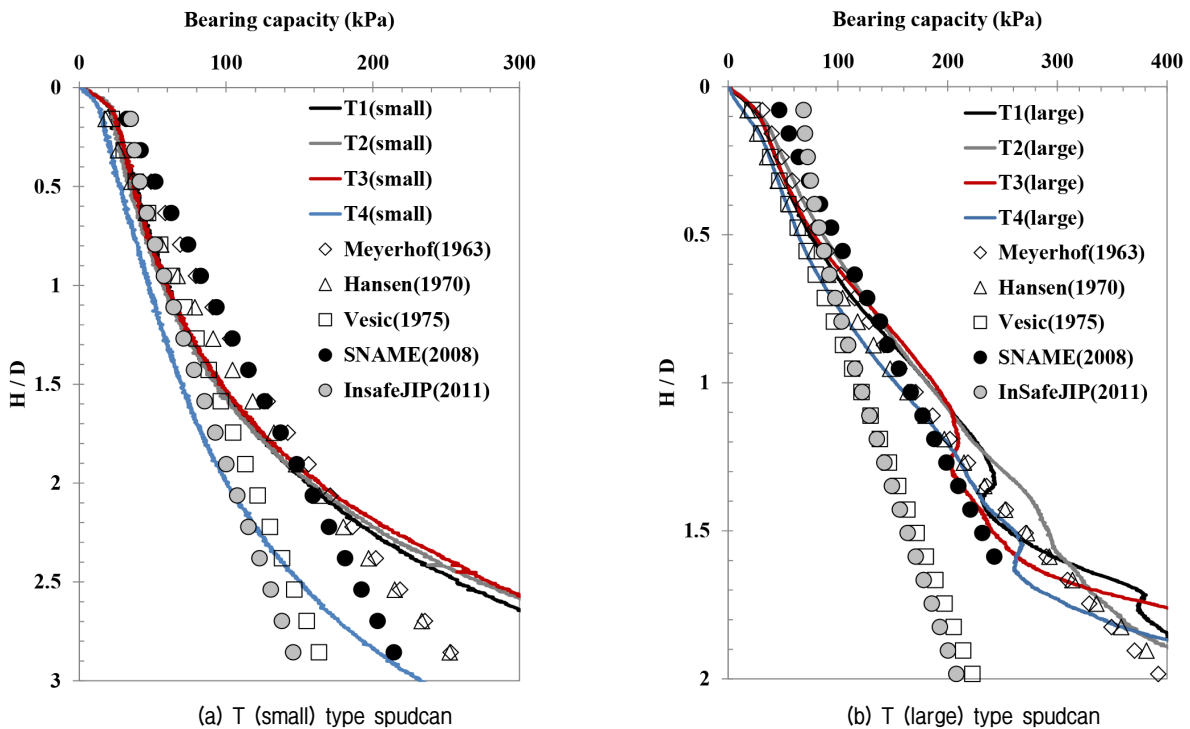


Fig. 5. Calculated bearing capacity from empirical equation and testing results in sand

최대 단면적의 넓이가 사각형 형상과 동일하더라도 측정되는 지지력에는 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 이는 실내 시험에 사용된 UWA 스퍼드캔(T4) 하부의 경사의 각도와 하부 중심의 날카로운 spigot의 영향으로 판단되며 날카로운 spigot을 지닌 UWA 스퍼드캔의 경우, 보다 정확한 지지력 및 거동 예측을 위해서는 기존 단면적만을 고려하여 지지력을 산출하는 경험식과는 별도로 하부 콘의 경사와 spigot의 각도 등 다양한 영향 요소들에 대한 고려가 필요함을 의미한다. 또한 실내 시험을 통해 산출된 스퍼드캔 크기에 따른 지지력을 비교·분석한 결과, 스퍼드캔의 길이와 폭을 일정비율로 증가시킬 경우, 지지력은 증가하지만 일정한 비율을 가지고 증가하지는 않는 것으로 나타났다. 이는 과거 Berry (1935), De Beer(1963), 그리고 Cerato and Lutenegeger (2007)가 제시한 scale effect와 동일한 현상으로 판단된다.

Fig. 6에는 관입되어 있는 스퍼드캔을 추출할 시 측정된 추출력을 도시하였다. 단면적이 작은 T(small) 스퍼드캔의 경우 형상에 따른 추출 시의 추출력에 차이가 거의 발생하지 않았으나 상대적으로 단면적이 큰 T(large) 스퍼드캔의 경우 각각의 형상 별로 추출 시의 추출력에 다소 차이가 발생하였다. 상부와 하부의 경사없이 완전한 사각형의 형태(T3)로 이루어진 스퍼드캔의 경우 다른 형상의 스퍼드캔에 비하여 추출 시 가장 큰 힘이 요

구되는 것으로 나타났다. 이는 추출 시 모서리 부근에서 응력집중 현상이 발생하여 경사를 지니고 있는 다른 스퍼드캔에 비해 비교적 더 큰 힘이 요구되는 것으로 판단된다. 반대로 원형의 단면적에 상대적으로 가장 긴 경사면 및 spigot을 지니고 있는 T4 스퍼드캔의 경우 그 차이는 크지 않지만 사각형 형상을 바탕으로 하는 T1, T2, 그리고 T3 스퍼드캔에 비해 추출 시의 힘이 적게 필요한 것으로 나타났다. 따라서 동일한 단면적을 지니고 있다는 가정하에 관입 시 지지력 측면에서는 사각형 형상의 스퍼드캔이 원형 형상의 스퍼드캔보다 큰 지지력이 발현되고, 추출 시에는 경사와 spigot을 지닌 원형 형상의 스퍼드캔이 더 작은 힘으로도 추출이 가능하다는 시험 결과로 미루어 볼 때, 실제 작업바지를 설치할 위치에서의 지반조건을 복합적으로 고려하여 지지력 확보 및 추출 시에 유리한 형상의 스퍼드캔을 효율적으로 적용하는 것이 적합하다고 판단된다.

4.2 점토지반에서의 지지력 및 추출력

Fig. 7에는 점토지반에서의 관입 시험 결과를 각각의 형상 별로 도시하였다. 모래지반에서와 마찬가지로 점토지반에서 관입 시험을 통해 측정된 지지력을 Meyerhof (1963)와 SNAME(2008)에서 제시한 경험식으로 산출

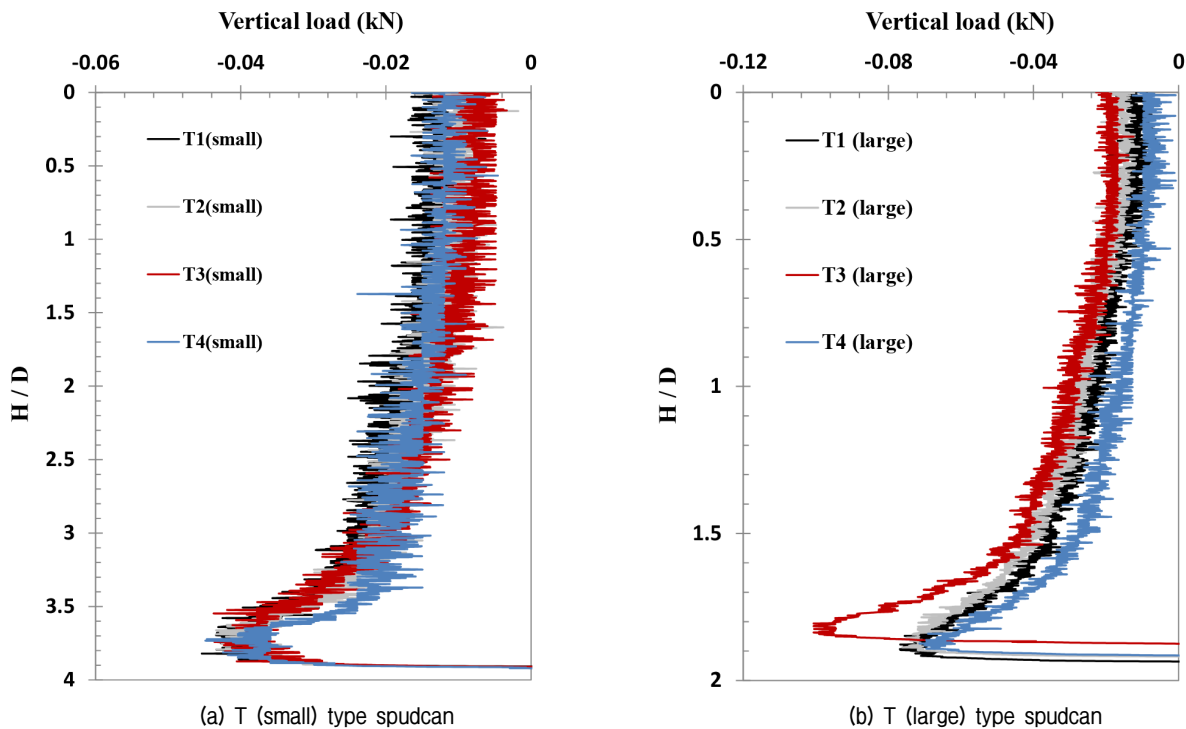


Fig. 6. Measured extraction vertical load in sand

한 지지력과 비교하였다. 이 때, 경험식을 통한 지지력 산출에 요구되는 비배수전단강도는 앞서 언급한 바와 같이 4단계의 압밀 과정 종료 후 소형 배인전단시험을 통해 측정된 10kPa를 적용하였다. 분석 결과, 모래지반에서 측정된 지지력과는 달리 점토지반에서는 관입 깊이가 일정 수준을 넘어가게 되면 심도가 증가하여도 지지력이 거의 일정하게 유지되는 경향이 나타났으며, 기존 제시된 경험식을 통해 모래지반보다 비교적 더 정확하게 얕은 심도에서의 지지력 예측이 가능한 것으로 나타났다. SNAME(2008)을 기준으로 H/D의 비를 비교해보면 0.15, 1.0, 1.5, 그리고 2.0일 때 T1(small)의 경우 0.5, 0.83, 0.85, 0.86, T2(small)의 경우 0.67, 1.14, 1.2, 1.31, T3(small)의 경우 0.93, 1.41, 1.47, 1.48, T4(small)의 경우 0.53, 1.03, 1.07, 그리고 1.11로 각각 나타났다.

스퍼드캔의 형상에 따라서는 모래지반에서 나타난 결과에 비해 형상에 따른 지지력의 차이가 비교적 큰 것으로 나타났다. Fig. 7(a)에 나타난 바와 같이 경사를 지닌 스퍼드캔(T1, T2, T4) 형상의 경우 심도에 따른 지지력 차이가 크게 나타나지 않았으나 완전한 사각형 형상의 T3 스퍼드캔의 경우 다른 형상에 비해 보다 큰 지지력이 측정되었다. 반면, 원형 형상을 기본으로 하여 하부의 경사와 하부 중심의 날카로운 spigot을 지닌 T4 스퍼드캔의 경우, 모래지반에서는 상대적으로 작은 지지력이 측

정되는데 비해 점토지반에서는 다른 스퍼드캔 형상들과 비슷한 지지력이 측정되었다. 이는 단단한 모래 지반에 비해 상대적으로 강도가 약하고 관입이 용이한 점토 지반의 경우, 관입 시 날카로운 spigot으로 인한 영향이 적기 때문이며 지반조건이 보다 단단해 지면 spigot으로 인한 영향이 뚜렷이 나타날 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 두 가지 스케일로 제작된 다양한 형상의 스퍼드캔에 대한 관입/추출 시험을 수행하였다. 이를 위해 국내의 대표적인 실험용 표준사인 주문진 모래와 카올리나이트를 사용하여 모래지반과 점토지반을 각각 조성하였다. 관입 시험 결과, 기존 연구자들에 의해 제시된 얕은 기초의 지지력 경험식과 가이드라인에 제시된 경험식은 모래지반과 점토지반에서의 지지력을 비교적 정확하게 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 형상에 따른 차이는 모래지반과 점토지반에서 각각 다르게 나타났다. 모래지반에서는 원형 스퍼드캔을 제외한 사각형의 스퍼드캔에서 경사의 유무에 관계없이 비슷한 지지력이 측정되었으며, 원형 스퍼드캔에서는 날카로운 spigot의 영향으로 측정되는 지지력에는 다소 차이가 발생하였다. 하지만 점토지반에서는 spigot으로 인한 지지

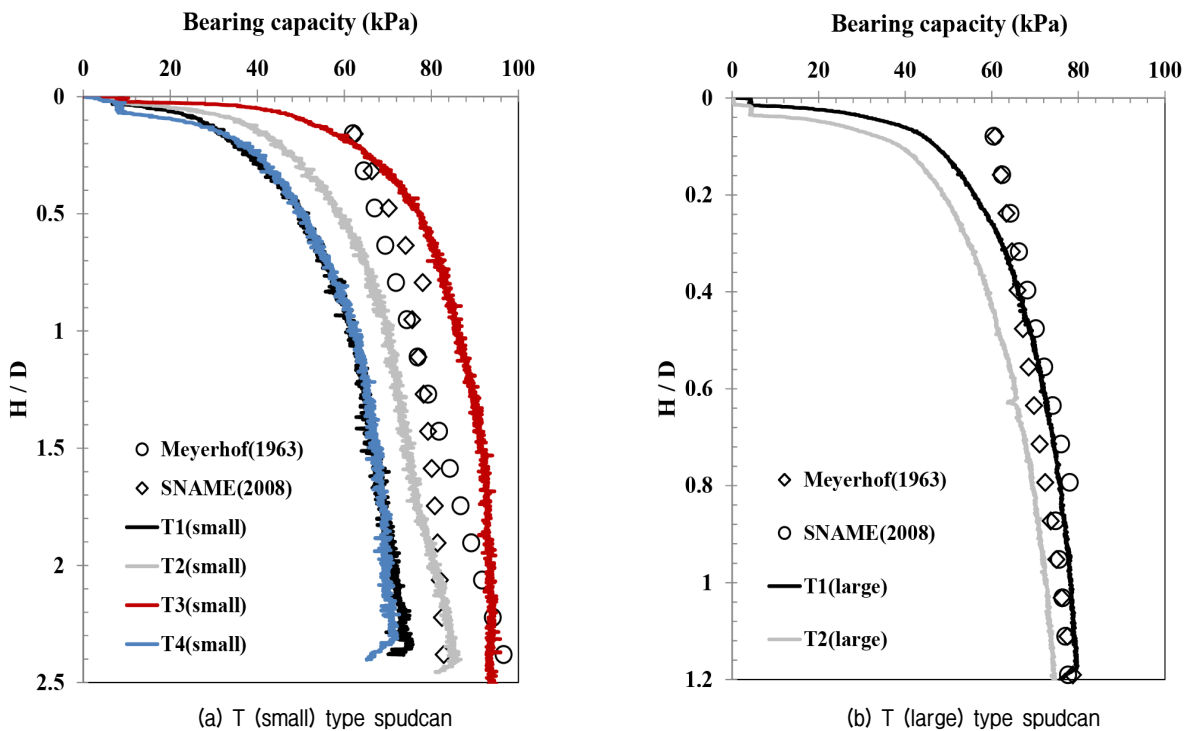


Fig. 7. Calculated bearing capacity from empirical equation and testing results in clay

력의 차이는 크게 발생하지 않는 것으로 나타났다. 추출 시의 추출력은 스퍼드캔의 경사의 유무가 측정 결과에 영향을 미치는 것으로 조사되었다. 실제 경사가 존재하는 형상의 스퍼드캔에서는 스케일에 관계없이 모두 비슷한 추출력이 측정되었으나, 경사가 없는 완전한 사각형 형태의 스퍼드캔의 경우에는 다른 형상에 비해 다소 높은 추출 시의 추출력이 요구되는 것으로 나타났다. 본 연구를 통해 나타난 모래와 점토지반에서의 스퍼드캔 형상 별 관입/추출 거동 특성을 통해 스퍼드캔 설계 시 형상에 따른 지지력 및 추출력 특성파악에 참고자료가 될 수 있을 것으로 판단된다. 추후, 모래와 점토로 이루어진 다층 지반, 그리고 수평방향으로의 외력이 고려된 복합 하중에 대한 추가적인 실내 시험 및 수치해석을 통한 항복면이 산정된다면 지반조건 및 해양환경조건에 최적화된 스퍼드캔의 설계에 도움이 될 수 있을 것이라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2017년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20133010021770).

참고문헌(References)

- Baligh, M.M. and Scott, R.F. (1976), "Analysis of Wedge Penetration in Clay", *Géotechnique*, Vol.26, No.1, pp.185-208.
- Berry, D.S. (1935), "Stability of Granular Mixtures", *ASTM*, Vol. 35, pp.491-507.
- Bolton, M.D. (1986), "The Strength and Dilatancy of Sands", *Géotechnique*, Vol.36, No.1, pp.65-78.
- Cassidy, M. and Houlsby, G. (2002), "Vertical Bearing Capacity Factors for Conical Footings on Sand", *Géotechnique*, Vol.52, No.9, pp.687-692.
- Cerato, A.B. and Lutenegeger, A.J. (2007), "Scale Effects of Shallow Foundation Bearing Capacity on Granular Material", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.133, No.10, pp.1192-1202.
- De Beer, E. (1963), "The Scale Effect in the Transposition of the Results of Deep-sounding Tests on the Ultimate Bearing Capacity of Piles and Caisson Foundations", *Géotechnique*, Vol.13, No.1, pp.39-75.
- Frydman, S. and Burd, H.J. (1997), "Numerical Studies of Bearing-capacity Factor $N \gamma$ ", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.123, No.1, pp.20-29.
- 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.
- 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.
- Hansen, J.B. (1970), "A Revised and Extended Formula for Bearing Capacity", *Akademi for de Tekniske Videnskaber*, Vol.28, pp.5-11.
- Hossain, M. and Randolph, M. (2010a), "Deep-penetrating Spudcan Foundations on Layered Clays: Centrifuge Tests", *Géotechnique*, Vol.60, No.3, pp.157-170.
- Hossain, M. and Randolph, M. (2010b), "Deep-penetrating Spudcan Foundations on Layered Clays: numerical analysis", *Géotechnique*, Vol.60, No.3, pp.171-184.
- Hossain, M.S. and Dong, X. (2013), "Extraction of Spudcan Foundations in Single and Multilayer Soils", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.140, No.1, pp.170-184.
- Houlsby, G. and Martin, C. (2003), "Undrained Bearing Capacity Factors for Conical Footings on Clay", *Géotechnique*, Vol.53, No. 5, pp.513-520.
- Houlsby, G. and Wroth, C. (1984), "Calculation of Stresses on Shallow Penetrometers and Footings", *Proc IUTAM/IUGG Seabed Mechanics, Newcastle*, pp.107-112.
- 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, 04013009.
- InSafeJIP (2011), *InSafeJIP: Improved guidelines for the prediction of geotechnical performance of spudcan foundations during installation and removal of jack-up units*, RPS Energy.
- ISO (2009), *Petroleum and natural gas industries—Site-specific assessment of mobile offshore units—*, International Organization for Standardization.
- Martin, C. and Houlsby, G. (2000), "Combined Loading of Spudcan Foundations on Clay: Laboratory Tests", *Géotechnique*, Vol.50, No.4, pp.325-338.
- Martin, C.M. (1994), *Physical and Numerical Modelling of Offshore Foundations under Combined Loads*, PhD thesis, University of Oxford, UK.
- Meyerhof, G.G. (1963), "Some Recent Research on the Bearing Capacity of Foundations", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 1, No.1, pp.16-26.
- Ports, D. and Zdravkovic, L. (2001), "Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering": Thomas Telford, London.
- Randolph, M., Jamiolkowski, M., and Zdravkovic, L. (2004), "Load Carrying Capacity of Foundations", *Proc. Skempton Memorial Conf., London*, 1, pp.207-240.
- Rapoport, V. and Young, A. (1985), "Uplift Capacity of Shallow Offshore Foundations", *Uplift Behavior of Anchor Foundations in Soil*: ASCE, pp.73-85.
- SNAME (2008), *Guideline for site specific assessment of mobile jack-up units*, The society of naval architects & marine engineers, New Jersey, City, NJ, USA.
- Tan, F. (1990), *Centrifuge and numerical modelling of conical footings on sand*, PhD thesis, University of Cambridge, UK.
- Teh, K. and Leung, C. (2010), "Centrifuge Model Study of Apudcan Penetration in Sand Overlying Clay", *Géotechnique*, Vol.60, No. 11, pp.825-842.

28. Terzaghi, K. (1943), Theory of Consolidation, Wiley Online Library.
29. Vesic, A. (1975), "Bearing Capacity of Shallow Foundations, Foundation Engineering Handbook, Winterkorn and Fang, Ed": Van Nostrand Reinhold Company, New York.
30. Vesic, A.S. (1969), *Breakout resistance of objects embedded in ocean bottom*, DTIC Document.
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.

Received : July 6th, 2016

Revised : March 10th, 2017

Accepted : March 22nd, 2017