

모래지반에서 버켓기초 설치에 의한 지반교란 평가

Evaluation of Soil Disturbance Due to Bucket Installation in Sand

김 재 현¹ Kim, Jae-Hyun

이 승 태² Lee, Seung-Tae

김 동 수³ Kim, Dong-Soo

Abstract

Bucket foundations are widely used in offshore areas due to their various benefits such as easy and fast installations. A bucket is installed using self-weight and the hydraulic pressure difference across the lid generated by pumping out water from inside the bucket. When buckets are installed in high permeable soil such as sands, upward seepage flow occurs around the bucket tip and interior, leading to a decrease in the effective stress in the soil inside the buckets. This process reduces the penetration resistance of buckets. However, the soil inside and outside the bucket can be disturbed due to the upward seepage flow and this can change the soil properties around the bucket. Moreover, upward seepage flow can create significant soil plug heave, thereby hindering the penetration of the bucket to the target depth. Despite of these problems, soil disturbance and soil plug heave created by suction installation are not well understood. This study aims to investigate the behavior of soil during suction installation. To comprehend the phenomena of soil plug heave during installation, a series of small-scale model tests were conducted with different testing conditions. From a series of tests, the effects of tip thickness of bucket, penetration rate, and self-weight were identified. Finally, soil properties inside the bucket after installation were approximated from the measured soil plug heave.

요 지

버켓기초(bucket foundation)는 해상 구조물 지지를 위해 사용되는 구조물로 간편하고 빠르게 지반에 설치할 수 있어 종래의 기초를 대체하여 해양에서 널리 활용되고 있다. 버켓기초는 기초 자중과 버켓 내부의 물을 외부로 배출시킴으로써 발생하는 내외부 압력차를 이용해 설치된다. 버켓기초가 모래지반과 같이 투수성이 높은 지반에 설치될 경우에는 석션압에 의해 버켓 외부지반에서 내부방향으로 침투수류(seepage flow)가 형성된다. 석션압에 의해 발생하는 상향의 침투수류는 내부지반의 유효응력을 감소시켜 버켓기초의 관입저항력을 낮추는 역할을 하지만 내부지반이 연약해 지고 융기(heaving)되는 현상이 발생할 수 있다. 이는 버켓기초가 목표 깊이까지 설치되는 것을 저해하고 장기거동에 영향을 줄 수 있다. 하지만 현재까지도 이에 대한 연구가 미진한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 축소모형실험을 통해 버켓기초 설치 중 발생하는 석션압과 지반 교란현상을 실험적으로 평가하였다. 이를 위해 버켓기초의 선단부 두께, 관입속도와 자중이 각각 석션설치 및 지반교란에 미치는 영향을 실험적으로 확인하고 교란된 지반의 물성을 추정하였다.

Keywords : Bucket foundation, Suction installation, Physical model test, Sands, Soil disturbance

1 정희원, 한국건설기술연구원 인프라안전연구본부, 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Dept. of Infrastructure Safety Research, Korea Institute of Civil Engrg. and Building Technology, Tel: +82-31-910-0501, Fax: +82-31-910-0235, jaehyun@kict.re.kr, Corresponding author, 교신저자)

2 비희원, 포스코 광양제철소 투자엔지니어링실, 사원 (Assistant Manager, Investment Planning & Engrg. Office, POSCO)

3 정희원, 한국과학기술원 건설및환경공학과, 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environ. Eng., KAIST)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2019년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

버켓기초(bucket foundation)는 육상에서 사용되는 말뚝에 비해 직경이 크고 길이가 짧은 기초형식으로 시공성 및 경제성이 높아 1980년대 이후 해양구조물의 기초로 널리 활용되고 있다. 버켓기초는 컵(cup)을 뒤집어 놓은 형상으로 일반적으로 직경(D)은 4~6m, 직경대비 길이비(L/D)는 3~6이 주로 활용되고 있다(Andersen et al., 2005). 버켓기초의 가장 큰 특징은 석션펌프(suction pump)를 이용한 설치에 있다. 본 공법은 버켓을 해저면에 자중으로 안착시킨 후 내부의 해수를 펌프를 이용해 외부로 배출시키면서 발생하는 음의 압(negative pressure)으로 설치하는 공법으로 수심에 제약이 없고, 시공 중 소음이 발생하지 않는다는 장점이 있다. 특히, 해상조건에서 적용이 유리하여 널리 활용되고 있으며, 최근까지도 버켓기초 설치 및 지지력 평가에 관한 연구가 지속적으로 보고되고 있다(Cotter, 2010; Erbrich and Tjelta, 1999; Housby and Byrne, 2005; Iskander et al., 2002; Larsen et al., 2013; Tjelta et al., 1986; Tran and Randolph, 2008).

투수성이 높은 모래지반에 버켓기초를 설치할 경우, 내외부 수압차에 의해 기초 내부의 해수가 외부로 배출될 뿐만 아니라 버켓기초 바깥쪽 지반에서 내부지반으로 침투수류(seepage flow)가 발생한다(Kim et al., 2017; Tran et al., 2005). 특히, 버켓 상단으로 향하는 상향의 침투수류(upward seepage flow)는 지반의 유효응력을 감소시켜 기초의 지중관입이 용이하도록 돕는 역할을 한다. 하지만, 상향의 침투수류는 기초 내부지반을 과도하게 용기시킬 가능성이 있으며 기초가 목표 깊이까지 관입되지 못하는 현상이 발생할 수 있다. 이는 기초가 목표 지지력을 발현하지 못하게 하는 주요 원인이 될 뿐만 아니라 운용 중 환경하중(파랑, 조류 등)에 의해 간접적으로 기초 주변 지반에 과도한 세굴을 유발시켜 기초의 성능을 저하시키는 원인이 된다(Tran and Randolph, 2008). 실제로 버켓기초 설치에 의한 지반 용기는 현장사례에서도 지속적으로 보고되고 있다(Senpere and Auvergne, 1982; Tjelta, 1995).

선행 연구결과에서는 버켓기초 설치에 의해 발생하는 지반 용기는 기초의 자중, 버켓 선단부 두께, 관입깊이 등에 영향을 받는 것으로 확인되었다(Allersma et al., 1997; Bang et al., 1999; Tran, 2005). 하지만, 이러한 연구 결과들은 대부분 실험 종료 후 관측 자료들에 기반하고 있거나 수치 해석적 결과를 토대로 규명하고 있으며

설치 중 지반의 변형을 직접적으로 관측하지 못한 단점이 있다.

Housby and Byrne(2005)은 모래지반에 버켓기초를 관입하기 위해 필요한 석션압 산정방법을 제안하고 현장실험을 통해 검증하였다. 본 산정법은 원지반 대비 투수계수비($k_f = k_{in}/k_{out}$)를 입력변수로 활용하여 석션설치시 발생하는 지반교란을 간접적으로 반영하고 있으며 현장 실험결과와 비교하여 $k_f = 2.0 \sim 3.0$ 임을 제안하였다. Housby and Byrne(2005)은 이러한 투수계수 변화를 버켓 벽체 인근의 지반이 느슨해져서 발생하는 것으로 언급하였다. Tran et al.(2005)은 원심모형실험을 이용하여 버켓기초 설치거동을 실험적으로 평가하고, 설치 중 예측된 깊이별 유량과 수치해석 결과를 비교하여 투수계수비(k_f)를 1.5로 제안한 바 있다. Bang et al.(2000)은 침투수류에 의한 지반교란을 고려하기 위해 얇은기초 지지력 산정법에 강도감소계수를 적용하여 관입력을 산정한 바 있다. 하지만, 현재까지도 버켓기초 설치 중 발생하는 지반교란 특성과 영향인자에 대한 연구결과 간의 차이가 있으며 관련된 연구가 미진한 실정이다.

본 연구에서는 모래지반에서 버켓기초 설치 중 발생하는 석션압과 침투량을 예측하고, 석션설치 거동에 영향을 미치는 지반교란 현상을 직접 관측하기 위해 모형 실험을 실시하였다. 또한 버켓기초 선단부 두께, 관입속도, 기초 자중이 지반교란에 미치는 영향을 실험적으로 비교 분석하였다. 이를 위해 석션설치 모사가 가능한 축소모형실험 시스템을 구축하고 모형실험을 실시하였다.

2. 모래지반에 설치되는 버켓기초 관입거동 선행 연구

투수성이 높은 모래지반에서 버켓기초의 관입력(V)은 식 (1)과 같이 선단부 저항력과 내외부 벽체에서 발생하는 마찰저항력의 합으로 산정된다(Housby and Byrne, 2005).

$$V = \frac{\gamma' z^2}{2} (K \tan \delta) (\pi D_{out}) + \frac{\gamma' z^2}{2} (K \tan \delta) (\pi D_{in}) + \left(\gamma' z N_q + \gamma' \frac{t}{2} N_\gamma \right) (\pi D_{avg} t) \quad (1)$$

여기서, γ' = 지반의 유효단위중량

z = 버켓기초 근입 깊이

D_{in} , D_{out} , D_{avg} = 버켓 내부, 외부, 평균 직경

t = 선단부 두께

K = 토압계수
 δ = 벽체와 지반간의 마찰각
 N_q, N_γ = 지지력 계수

Houlsby and Byrne(2005)은 기초 벽체의 관입으로 발생하는 지반응력 증가를 고려하여 관입력을 산정할 수 있는 방법을 제시하였다. 지반 응력이 증가되는 영역이 깊이에 따라 선형적으로 증가하고, 증가되는 영역 내에서는 응력이 일정하다고 가정할 경우, 버켓기초의 관입력은 식 (2)로 표현될 수 있다.

$$V = \gamma' Z_{out}^2 \left[\exp\left(\frac{z}{Z_{out}}\right) - 1 - \left(\frac{z}{Z_{out}}\right) \right] (K \tan \delta) (\pi D_{out}) \\ + \gamma' Z_{in}^2 \left[\exp\left(\frac{z}{Z_{in}}\right) - 1 - \left(\frac{z}{Z_{in}}\right) \right] (K \tan \delta) (\pi D_{in}) \\ + \sigma'_{end} (\pi D_{avg} t) \quad (2)$$

여기서, $Z_{out} = \frac{D_{out} \{ [1 + (2fz/D_{out})]^2 - 1 \}}{4K \tan \delta}$

$$Z_{in} = \frac{D_{in} \{ 1 - [1 - (2fz/D_{in})]^2 \}}{4K \tan \delta}$$

$$\sigma'_{end} = \sigma'_{vo} N_q + \gamma' t N_\gamma$$

$$\sigma'_{vo} = \text{원지반 수직응력}$$

식 (2)의 f는 버켓기초 관입에 의해 지반의 응력이 증가되는 범위가 깊이에 따라 선형적으로 증가된다고 가정 할 때의 기울기 상수(즉, f = 벽체로부터 응력이 증가된 수평거리/버켓기초 선단부 관입깊이)를 의미한다. 기초 자침 후 석션압을 이용해 관입할 경우에는 석션압과 침투수류에 의한 지반의 유효응력 변화를 고려하여 관입력을 산정할 수 있다. 이때, 버켓기초 내부의 지반에서는 상향의 침투수류로 유효응력이 감소되며, 버켓 외부 지반에서는 버켓기초 내부로 해수가 침투하므로 유효응력이 증가된다. Houlsby and Byrne(2005)은 석션압과 침투수류에 의한 응력 변화를 고려하여 관입력을 식 (3)과 같이 표현하였다.

$$V + s \left(\frac{\pi D_i^2}{4} \right) \\ = \left(\gamma' + \frac{ap}{z} \right) Z_{out}^2 \left[\exp\left(\frac{z}{Z_{out}}\right) - 1 - \left(\frac{z}{Z_{out}}\right) \right] (K \tan \delta) (\pi D_{out}) \\ + \left[\gamma' - \frac{(1-a)p}{z} \right] Z_{in}^2 \left[\exp\left(\frac{z}{Z_{in}}\right) - 1 - \left(\frac{z}{Z_{in}}\right) \right] (K \tan \delta) (\pi D_{in}) \\ + \left\{ \left[\gamma' - \frac{(1-a)p}{z} \right] Z_i \left[\exp\left(\frac{z}{Z_i}\right) - 1 \right] N_q + \gamma' t N_\gamma \right\} \times (\pi D_{avg} t) \quad (3)$$

여기서, p = 버켓 상단에 작용하는 석션압
a = 버켓 상단과 벽체 선단부 간의 과잉 간극수압비 $\left(= \frac{a_1 k_f}{(1-a_1) + a k_f} \right)$
 a_1 = 지반교란이 발생하지 않았을 경우의 과잉 간극수압비 $(\approx 0.45 - 0.36(1 - \exp(-z/0.48D))$
 k_f = 원지반 대비 설치에 의해 변화된 지반 투수계수비 $(= k_{in}/k_{out})$

식 (3)의 좌변과 우변을 정리하면 관입에 필요한 석션압을 산정할 수 있다. Houlsby and Byrne(2005)이 제안한 버켓기초 관입력 산정법은 기초 설치에 의한 응력증가와 침투에 의한 지반교란 및 유효응력 변화를 함께 고려하고 있어 합리적인 관입력 산정법이라 할 수 있으나, 설계에 필요한 지반정수(밀도, 마찰각, 기초-지반 간 마찰각, 토압계수 등)에 대한 정확한 물성값이 필요하며 현장에 적용할 경우 많은 가정 사항이 요구되는 문제점이 있다. 특히 지반교란 정도를 반영하는 투수계수비($k_f = k_{in}/k_{out}$)에 대한 정량적 분석이 미미하여 추가연구가 요구되고 있다.

3. 축소모형실험

3.1 실험시스템

본 연구를 위해 모래지반에 버켓기초를 각각 석션 및 압입설치(jacking installation)가 가능하도록 실험시스템을 구성하였다. 활용된 토조는 내부 직경 900mm, 높이 700mm인 원형 토조로 강재로 제작되었다. 버켓기초의 압입설치를 모사하기 위해 수직방향으로 변위를 유발 시킬 수 있는 1축 하중재하장치를 구축하였고, 관입 중 유발되는 저항력과 관입깊이를 측정하기 위해 인장/압축 로드셀(load-cell)과 레이저센서(laser sensor)를 설치하였다. 버켓기초의 압입설치를 위해 1축 하중재하장치와 버켓기초를 로드(rod)로 연결하였고, 하중재하장치에 로드셀을 연결하여 설치 중 관입력을 측정할 수 있도록 하였다(Fig. 1).

석션설치는 토조 내부와 외부의 수위차(water head difference)를 이용하여 버켓기초 내부의 물을 외부로 배출하는 기법을 활용하였다. 이를 위해 버켓기초를 토조 내 목표 위치에 안착시킨 후 버켓 상판에 호스를 연결하여 버켓 내부의 물이 외부로 배출 될 수 있도록 하였다. 호

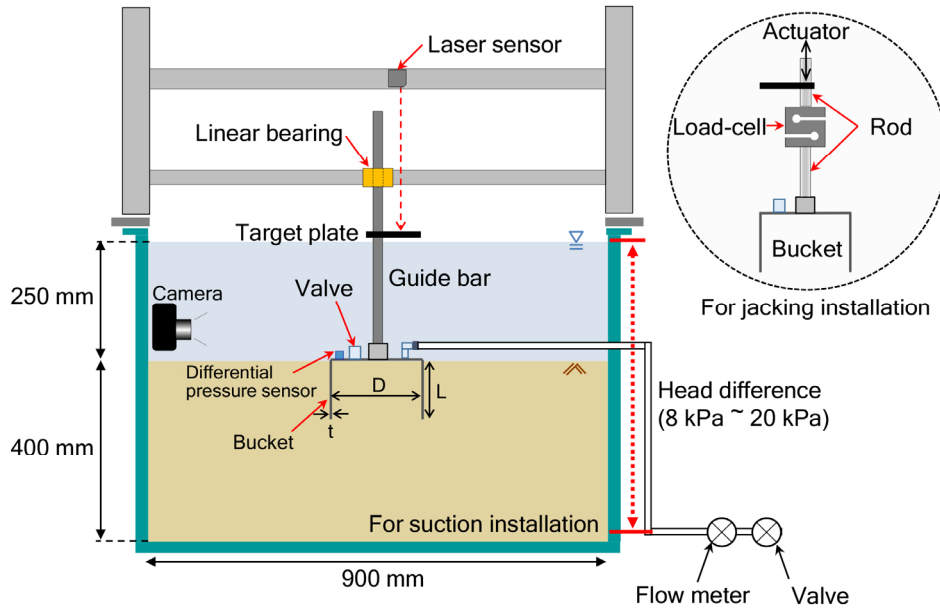


Fig. 1. Experimental setup of suction bucket installation test

스 끝단에는 유량계(flow meter)와 밸브(valve)를 설치하여 배출되는 유량을 실시간으로 측정할 수 있도록 하였으며, 배수 밸브의 위치를 조절하여 수위차를 조절하였다. 또한, 관입 중 기초의 회전과 측방으로의 이동을 막기 위해 버킷 상단에 가이드 로드(guide rod)를 설치하고 토조에 연결되어 있는 선형 베어링(linear bearing)을 통해 수직방향으로만 관입될 수 있도록 유도하였다. 설치 중 발생하는 석션압은 차압계(differential pressuremeter)를 버킷 내외부에 설치하여 측정하였다. 관입깊이는 가이드 로드에서 설치된 플라스틱 타겟을 레이저센서로 측정함으로써 획득하였다. Tran and Randolph(2008)은 토조 경계

면이 설치거동에 미치는 영향을 검토하였으며, 기초 직경대비 토조 직경($D_{\text{bucket}}/D_{\text{container}}$)이 4 이상일 경우 경계면이 설치거동에 미치는 영향이 미미하다고 보고하였다. 본 연구에서는 직경이 200mm인 버킷기초를 활용하여 토조 중앙에서 실험($D_{\text{bucket}}/D_{\text{container}} = 4.5$)이 실시되었으므로 설치 시 경계면 효과는 미미할 것으로 판단된다.

3.2 모형지반

본 연구에서는 인공파쇄 된 실리카 모래(silica sand)를 사용하였다. 본 시료는 입자가 곱고, 입도분포가 양

Table 1. Geotechnical properties of tested soils (after Kim et al., 2016)

Items	Properties
Specific gravity, G_s	2.65
Fine contents passing #200 (%)	0.9
Max. dry density * (t/m^3)	1.64
Min. dry density ** (t/m^3)	1.24
Grain size (mm)	$d_{10}=0.148$ $d_{50}=0.237$ $d_{60}=0.257$
Soil classification, USCS [†]	SP
Critical friction angle, ϕ'_c	36.6
Permeability, k (m/s)	$5.1 \times 10^{-4} \sim 6.0 \times 10^{-4}$ for $D_r = 60 \sim 75\%$
Uniformity coefficient, C_u	1.60
Plastic index, PI	NP

*ASTM D 4253-14 (2014)

**ASTM D 4254-00 (2006)

†ASTM D 2478-11 (2011)

호하여 축소모형실험에 적합하다. 본 시료를 이용하여 실내실험을 수행한 결과 비중은 2.65, 최소 및 최대 건조밀도가 각각 1.24t/m^3 , 1.65t/m^3 으로 확인되었다. 상대 밀도(D_r) 60~75% 범위에서 투수계수(k)는 $5.1 \times 10^{-4} \sim 6.0 \times 10^{-4}\text{m/s}$ 로 확인되었다(Kim, 2016). 또한 본 시료를 사용하여 50~400kPa 범위의 구속압조건에서 배수삼축실험(CD)을 실시한 결과 한계상태내부마찰각(ϕ'_{crit})은 36.6° 로 나타났다(Kim et al., 2016). 상세한 지반물성을 Table 1에 정리하였다.

모형지반은 건조낙사법(air pluviation method)을 이용하여 조성하였다. 건조낙사법은 일정한 높이에서 건조된 모래를 토조 내부로 낙하시켜 목표밀도의 지반을 조성하는 방법으로 강사장치(sand rainer)를 이용하여 낙사높이, 이동속도, 개구부 크기를 조절하여 밀도를 조절할 수 있다. 본 연구에서는 $D_r = 60\%$ 이고 높이가 400mm인 균질한 모형지반을 조성하였다. 낙사 후 토조 내 모래지반의 표면을 평탄화하기 위해 진공청소기와 토조 상단으로부터 높이 조절이 가능한 끌개를 이용해 표면을 고르게 하였다. 조성된 모래지반은 전체무게와 부피를 이용해 밀도를 체크한 후 지표면부터 물을 천천히 흘려 모형지반이 포화되도록 하였다. 최종적으로 지표면 위로 250mm가 되도록 물을 채웠다.

3.3 모형기초

본 연구에서는 버켓기초가 설치되는 동안 내부지반의 변형을 측정하기 위해 기초 내부가 육안으로 관측될 수 있는 아크릴(acrylic)로 모형기초를 제작하였다. 버켓

기초는 외부직경 200mm, 길이 200mm로 직경대비 길이(L/D)가 1인 모형기초를 활용하였다. 또한, 선단부 두께가 관입거동에 미치는 영향을 확인하기 위하여 선단부 두께를 각각 3, 5, 7mm($t/D = 0.015, 0.025, 0.05$)로 제작하였다. 또한, 압입설치 중 버켓기초에 과도한 변형을 유발시킬 가능성이 있어 동일한 직경의 모형버켓을 알루미늄(aluminium)으로 제작하여 실험에 활용하였다(Table 2). 기초 자중(self-weight)이 설치거동에 미치는 영향을 확인하기 위해 기초 상단에 설치된 가이드 로드 위에 다양한 무게의 분동을 올려둔 채 실험을 실시하여 자중영향을 확인하였다.

관입 중 발생하는 내부지반 용기량을 관측하기 위해 아크릴 외벽에 줄자를 관입깊이 방향으로 부착하고, 방수팩으로 물 유입이 차단된 디지털 카메라(digital camera)를 이용하여 관입 중 발생하는 지반 용기량을 수중에서 촬영하였다. 이후 영상분석을 통해 관입깊이에 따른 버켓기초 외부지반과 내부지반의 높이차(용기량)를 시각적으로 계측하였다.

3.4 실험조건 및 방법

버켓기초 설치에 따른 관입력 및 지반교란을 평가하기 위하여 총 9회의 모형실험을 실시하였다. T-1과 T-2에서는 압입설치와 석션설치 시 관입력을 비교하기 위해 알루미늄으로 제작된 모형버켓을 이용하여 실험을 실시하였다. 또한 선단부 두께영향(T-3, T-4, T-5), 관입속도 영향(T-6, T-7), 자중 영향(T-8, T-9)을 확인하기 위해 동일한 밀도의 지반에서($D_r = 60\%$) 버켓기초 설치실

Table 2. Testing conditions

Test ID	Bucket dimension*				Soil condition**		Installation method	Applied head difference (kPa)	Material
	D (mm)	L (mm)	t (mm)	mass*** (kg)	D_r (%)	γ_d (t/m^3)			
T-1	200	200	2	-	60	1.45	Jacking	-	Aluminum
T-2	200	200	2	-	60	1.45	Suction	-	Aluminum
T-3			3	1.2				8	Acrylic
T-4			5	1.2				8	Acrylic
T-5			10	1.2				8	Acrylic
T-6			3	1.2				3	Acrylic
T-7			3	1.2				8	Acrylic
T-8			3	1.2				>20	Acrylic
T-9			3	1.8				8	Acrylic

* D = bucket diameter, L = skirt length, t = skirt wall thickness

** D_r = soil relative density, γ_d = soil dry unit density

*** total weight of suction bucket model in air condition

험이 실시되었다. 상세한 실험조건은 Table 2와 같다.

압입실험(T-1)을 제외하고 모든 실험이 동일한 절차로 수행되었다. 모형지반이 조성된 후 토조에 고정된 선형 베어링에 버켓기초를 연결시키고 지표면에 서서히 안착시켰다. 이때, 버켓 내부에 기포가 존재하지 않도록 주의했다. 이후, 지반파괴가 발생하지 않는 범위에서 버켓기초를 지표면으로부터 20mm($z/D = 0.1$) 깊이까지 손으로 천천히 눌러 관입시켰다. 관입 중에는 버켓 내부의 물이 외부로 배출될 수 있도록 버켓 상단에 연결된 밸브를 개방했다. 이후, 버켓기초에 배수 호스를 연결하고 배수 밸브를 열어 석션압이 기초 내부에 작용할 수 있도록 하였다. 실험은 버켓기초 내부 상판이 지면에 닿는 시점에서 종료하였다. 실험 과정에서 석션압, 배출유량, 관입깊이와 함께 디지털 카메라로 버켓기초의 관입거동을 수중 계측하였다.

압입실험(T-1)의 경우, 관입 중 배수상태가 유지되도록 버켓기초 상단의 밸브를 개방한 채 지표면에서부터 0.2mm/s의 일정한 속도로 관입하였다.

4. 결과 및 토의

4.1 설치방법에 따른 관입력 비교

설치효과를 확인하기 위해, 동일한 단면의 버켓기초를 활용하여 압입설치와 석션설치 실험을 실시하였다. Fig. 2는 설치 방법에 따른 관입력을 나타낸다. 각 축은 비교를 위해 무차원으로 정규화하여 나타내었다($p/\gamma D - z/D$). 압입설치의 경우 계측된 관입력을 버켓 단면적으로 나

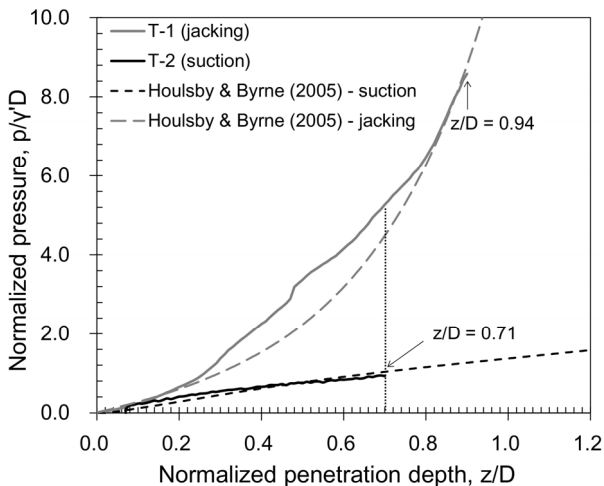


Fig. 2. Comparison of jacking and suction installation

눈 값을 정규화($p=V/(\pi D^2/4)$) 하였다. 그 결과, 동일한 지반에 설치됨에도 불구하고 압입설치가 석션설치에 비해 큰 관입력을 보였으며 그 차이는 설치깊이가 깊어질수록 커졌다. 압입설치는 $z/D = 0.71$ 관입지점에서 석션설치에 비해 7.6배 큰 것으로 확인되었다. 압입설치의 경우 벽체가 관입되면서 주변 지반의 유효응력을 증가시켜 관입력이 크게 증가되었다(Kumara et al., 2016). 반면 석션설치는 상향으로 침투수류가 발생하여 지반의 유효응력을 감소시킴으로써 관입력을 저하시켰다고 판단된다. 하지만 석션설치 시 $z/D = 0.71$ 에서 버켓 상판이 내부지반에 닿아 실험이 종료되었고, 압입설치의 최종관입깊이($z/D = 0.94$)에 비해 현저히 낮았다. 이는 석션설치에 의해 내부지반이 융기되어 기초가 목표 관입 깊이까지 관입되지 못했기 때문이다.

계측된 결과를 Houslby and Byrne법으로 예측된 결과와 함께 Fig. 2에 도시하였다. 관입력 예측을 위해 기초 제원, 지반의 유효단위중량(γ), 한계상태내부마찰각(ϕ_{crit}), 벽면-지반 간 경계면 마찰각($\delta \approx 2/3\phi_{crit}$)을 입력 변수로 이용하였다. 토압계수(K)는 Villalobos(2007)가 제안한 $K = (2 - \cos^2\phi_{crit})/\cos^2\phi_{crit}$ 를 활용하여 추정하였다. 또한, 기초 관입에 의한 응력증가 영역의 기울기 계수(f)와 투수계수비(k_f)는 각각 $f = 1$ 과 $k_f = 1.5$ 로 가정하였다. 그 결과, Houslby and Byrne 방법이 압입 및 석션설치에 의한 관입력을 적절히 예측하고 있음을 확인하였다.

4.2 벽체 두께 영향

Figure 3(a)는 버켓기초 벽체 두께에 따른 관입깊이별 정규화 된 석션압을 보여준다. 관입초기에는 석션압이 급격히 증가하고, 이후 비교적 선형적으로 증가하였다. 관입 초기 석션압의 급격한 증가는 실험전 일정깊이까지 버켓기초를 인위적으로 관입시켰기 때문이다. Tran and Randolph(2008)은 모형실험에서 초기 압입관입이 설치거동에 미치는 영향을 검토하였으며, 초기 압입관입이 석션설치 거동에 미치는 영향이 미미함을 확인하였다. 따라서 본 연구에서도 초기 압입관입 효과를 배제할 수 있을 것으로 판단된다.

본 실험을 통해 자중이 동일한 조건에서 버켓의 두께가 증가할 경우, 같은 깊이에서 석션압이 증가하는 것이 확인되었다. 이는 선단부 두께가 증가함에 따라 관입에 요구되는 선단지지력이 증가했기 때문이다. 하지만 초기관입 이후 관입깊이에 따른 석션압 증가량은 선단부

두께에 관계없이 $z/D:p/\gamma D=1:1.5$ 로 일정하였다. 이는 선형연구에서 축소 및 원심모형실험을 통해 확인된 경향과 유사하다(Tran, 2005; Kim et al., 2017).

Figure 3(b)는 버켓기초 설치 중 배출되는 전체유량 대비 지반으로부터 배출되는 침투수의 유량비($Q_{seepage}/Q_{total}$)를 나타낸다. 여기서, 석션설치 중 상향으로 침투한 침투수 유량($Q_{seepage}$)은 식 (4)를 이용하여 획득할 수 있다.

$$\begin{aligned} Q_{seepage} &= Q_{total} - Q_{displaced \text{ water by the penetration of the bucket}} \\ &= Q_{total} - r(\pi D^2)/4 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, Q_{total} = 측정된 초당 배출유량(cm^3/s)

$Q_{displaced \text{ water by the penetration of the bucket}}$ = 버켓 관입에 의해 배출되는 초당 유량(cm^3/s)

r = 버켓 관입속도

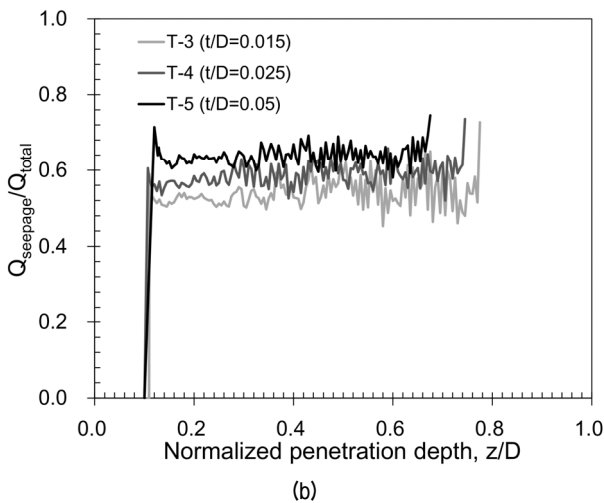
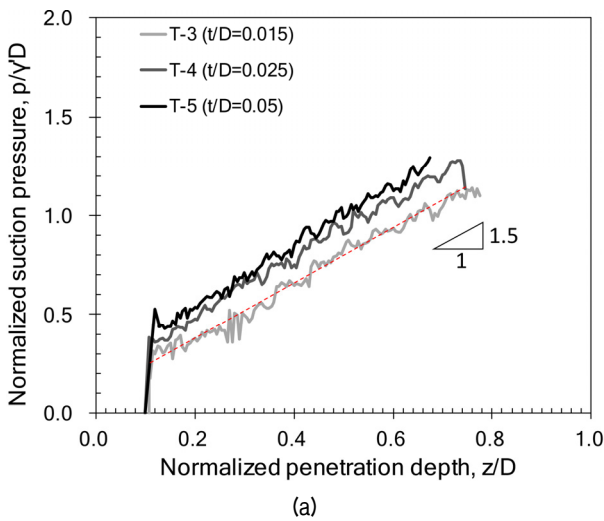


Fig. 3. Installations with different wall thickness: (a) suction pressure with depth; (b) seepage flow with depth

석션설치가 시작되는 시점부터 관입이 종료되는 시점까지 침투수 유량비가 0.54~0.64의 범위 내에서 일정하였으며, 평균적으로 전체 유량의 60%를 차지하였다. 특히, 선단부 두께가 두꺼울수록 침투유량이 차지하는 비중이 커지는 것을 확인하였다. 이는 선단부 두께에 따른 석션압의 경향과 일치한다. 선단부 두께가 증가할수록 관입을 위한 상향의 침투수류가 커지는 것으로 판단된다.

Figure 4는 디지털 카메라를 이용하여 측정된 버켓기초 관입깊이에 따른 내부지반 유효 용기량을 나타낸다. 유효 용기량은 석션설치에 의해 외부지반이 벽체 내부로 유입되지 않는다는 전제하에 내부지반 전체 용기량에서 지중에 관입된 버켓의 벽체 부피를 제외한 순수 용기량을 의미한다. 그 결과, 내부 지반은 버켓기초가 관입됨에 따라 증가하였다. 이는 기초가 관입됨에 따라 발생하는 석션압이 증가하는 것에 기인하는 것으로 판단된다. 또한, 선단부 두께가 두꺼울수록 내부지반의 용기량이 커졌으며 앞서 언급한 버켓 두께에 따른 석션압과 침투유량의 상관관계와 일치하였다. 관입이 종료되는 시점에서 지반 용기량은 버켓 직경의 10~13%의 범위를 보였다.

본 연구에서는 카메라를 이용해 버켓기초의 내부 벽체와 접한 지반의 변형량만을 측정하였기 때문에 내부지반의 전체 용기량을 확인하는데 한계가 있으므로 결과의 절댓값을 산정하기 위해서는 추가의 연구가 필요하다.

4.3 관입 속도 영향

Figure 5(a)는 관입속도에 따른 석션압을 비교한 결과

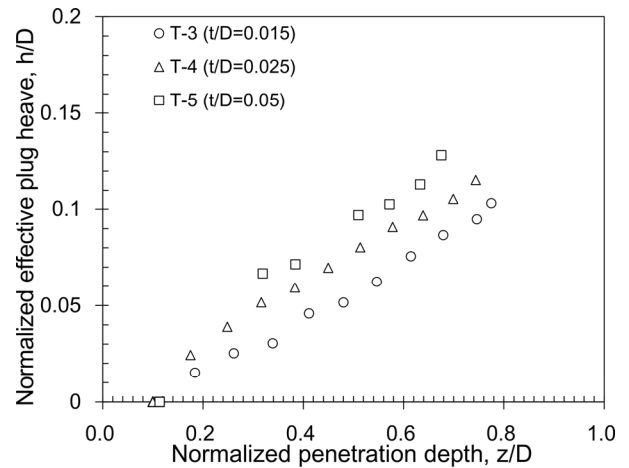


Fig. 4. soil plug heave with different wall thickness

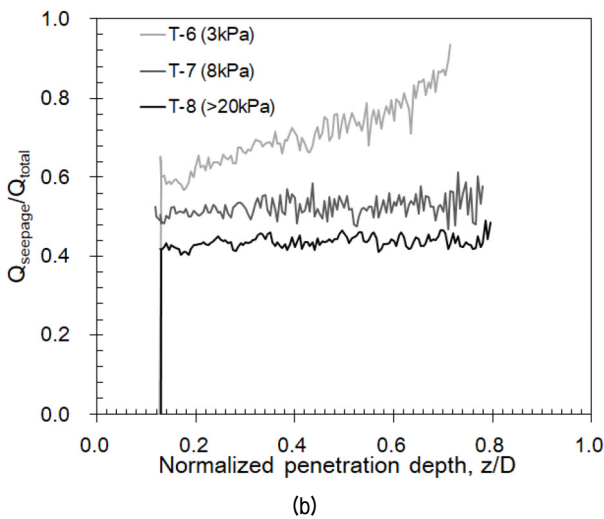
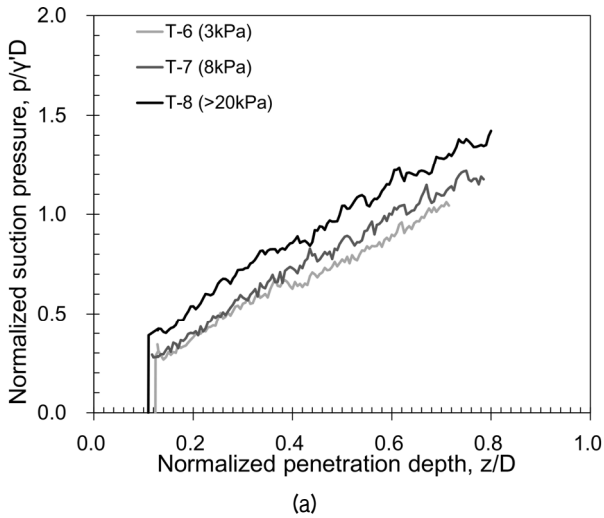


Fig. 5. Installations with different flow rate: (a) suction pressure with depth; (b) seepage flow with depth

를 보여준다. 관입속도는 배출되는 호스와 토조 내부간의 높이차(수두차)를 통해 조절하였으며, 빠르게 관입되는 실험(T-8)의 경우, 배수펌프를 이용하였다. 각 실험에서 목표한 수두차로 배수할 경우 각각 최대 0.45(T-6), 1.02(T-7), 2.24(T-8)mm/s로 관입되는 것을 확인하였다. 그 결과, 관입속도가 빠를수록 동일한 깊이에서 더 큰 석션압이 계측되었다. 하지만, 배출유량 대비 침투유량은 관입속도가 빨라질수록 낮아졌다(Fig. 5(b)). 이는 버켓 내부의 물이 빠른 속도로 배출되면서 내부지반에서 유출되는 침투량이 작아졌기 때문이다. 이로 인해 높은 속도로 관입될 때의 석션압은 낮은 속도로 관입될 때보다 높게 나타난다.

Figure 6은 관입속도에 따른 관입깊이별 내부지반 유효 용기량을 비교하였다. 관입속도가 상대적으로 낮은 실험(T-6)에서 지반 용기가 크게 발생하였다. 각 실험별

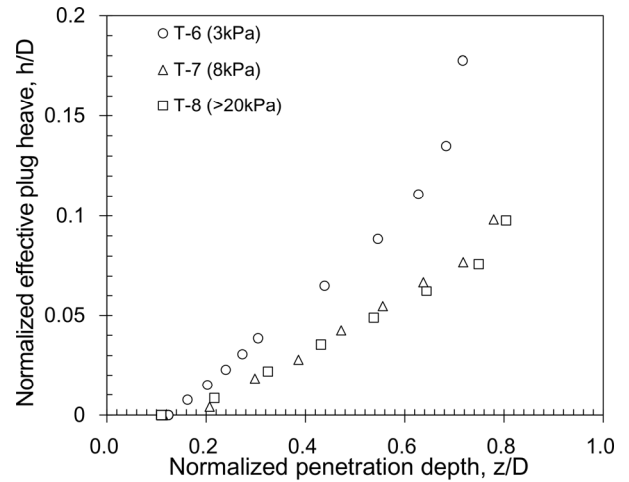


Fig. 6. soil plug heave with different flow rate

로 발생한 최대 용기량은 각각 0.18D(T-6), 0.10D(T-7, T8)로 확인되었다. 관입속도가 낮을 경우, 석션압은 상대적으로 감소하나 배출되는 유량 중 상향으로의 침투량이 차지하는 비중이 커져 지반을 더 용기시키는 것으로 판단된다. 이를 통해, 상향으로의 침투량이 지반변형에 미치는 영향이 큰 것을 확인 할 수 있다.

4.4 자중 영향

Figure 7은 기초 자중에 따른 석션압과 내부지반 용기량을 비교하였다. 그 결과, 자중의 크기가 커질수록 초기 관입량이 커지며, 동일한 깊이에서 석션압은 낮아졌다. 또한 관입깊이에 따른 석션압의 증가량(기울기)은 자중에 관계없이 유사하였다. Tran and Randolph(2008)은 모형실험을 통해 버켓기초의 자중이 석션압에 미치는 영향을 확인하고 본 연구와 동일한 결과를 도출 하였다.

Figure 7(b)는 자중에 따른 관입깊이별 지반 유효용기량을 나타낸다. 버켓기초 관입에 따른 지반 용기량은 관입깊이가 $z/D = 0.5$ 에 도달할 때 까지 유사한 경향을 보이다가 이후 자중이 큰 T-9에서 상대적으로 작은 지반 용기가 발생하였다. 관입 종료시점에서 최대 지반 유효용기량은 각각 0.10D(T-3), 0.08D(T-9)로 관측되었다. 자중의 크기가 클수록 관입에 필요한 석션압과 상향으로의 침투수류 또한 작아지기 때문에 지반 유효용기량이 낮아지는 것으로 판단된다. 하지만, 실험 T-9의 경우, 관입초기에는 T-1과 유사한 용기량을 보이다가 용기량 변화량이 급격히 감소되었다. 본 실험에서는 디지털 카메라와 버켓 외벽에 부착되어 있는 줄자로 내벽근처의 국부적인 지반변형을 관측했기 때문에 계측값을 전체

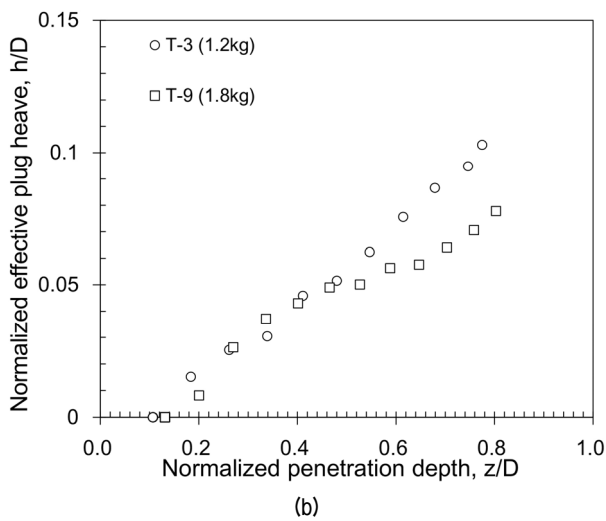
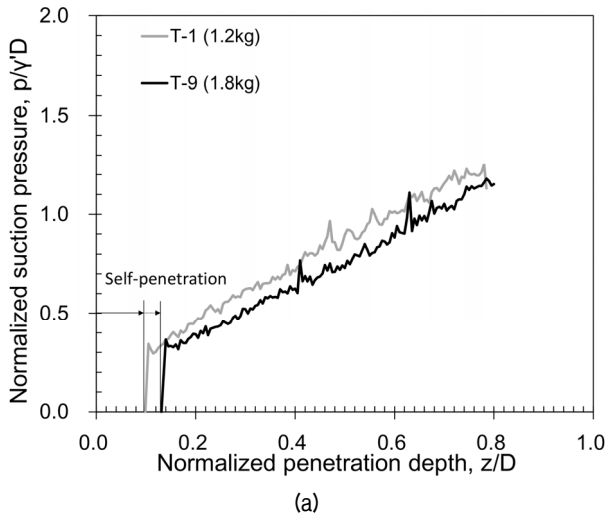


Fig. 7. Installations with self weight: (a) suction pressure with depth; (b) soil plug heave

지반의 평균적인 용기량으로 간주하는데 한계가 있으며 오차를 발생한 원인으로 판단된다. 내부지반 전체 거동을 분석하기 위한 추가연구가 필요하다.

4.5 투수계수 변화

모형실험에서 계측된 지반 용기량을 바탕으로 원지반 대비 교란된 버켓기초 내부지반의 투수계수비(k_r)를 추정하였다(Fig. 8). 원지반 투수계수는 Table 1의 값을 보간하여 활용하였으며, 벽체 내부지반의 투수계수는 계측된 유효용기량이 순수하게 내부지반 팽창에 의해 발생한 것으로 가정하여 산정하였다. 그 결과, 전 실험에서 버켓기초가 관입됨에 따라 내부지반의 투수계수비가 점차 증가하였다. 이는 내부지반의 평균적인 투수계수가 증가하는 것을 의미한다. 지반의 투수계수는 입자

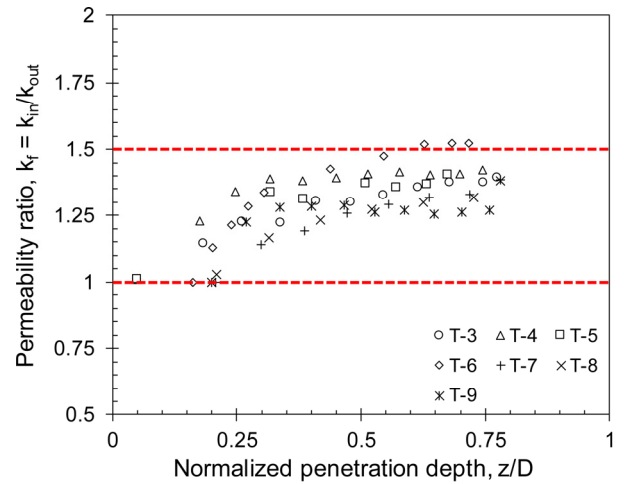


Fig. 8. Variation of permeability ratio due to suction installation

의 간극비(void ratio)에 영향을 받으므로 내부지반이 팽창된 것을 알 수 있다. 관입이 종료되는 시점에서 k_r 의 범위가 1.25~1.5인 것으로 확인되었으며, Tran(2005)의 연구결과와 유사하였다. 또한, Hously and Byrne법에서 $k_r = 1.5$ 로 가정하고 관입력을 추정된 결과가 실험결과와 유사한 것을 재확인 하였다(Fig. 2). 원지반의 상대 밀도 $D_r = 60\%$ 에서 지반 용기량을 바탕으로 산정된 내부지반의 상대밀도는 $D_r = 10\sim 20\%$ 로 감소했으며 원지반 6~11%의 지반 밀도가 감소한 것으로 추정된다.

5. 결론

본 연구에서는 모래지반에 설치되는 버켓기초의 설치효과를 검증하기 위해 축소모형실험을 실시하였다. 이를 위해 석션설치에 의한 관입력을 압입설치와 비교하였다. 또한 석션설치 시 내부지반 교란에 영향을 미치는 버켓기초 선단부 두께, 관입속도, 자중의 영향을 확인하였다. 이를 위해 실내에서 버켓기초를 압입 및 석션설치를 실시 할 수 있는 실험시스템을 개발하고 다양한 조건에서 실험을 수행하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- (1) 동일한 기초로 압입 및 석션설치 실험을 실시한 결과, 석션설치 종료시점에서 압입설치가 석션설치에 비해 7.6배 큰 관입력이 요구되었다. 이는 석션설치 시 상향의 침투수류가 지반의 유효응력을 감소시켜 관입력을 감소시키는 것에 기인하는 것으로 판단된다. 하지만 상향의 침투수류는 내부지반을 용기시켜 버켓기초가 목표 깊이에 관입되는 것을 저해한다.

- (2) 버켓기초의 선단부 두께, 관입속도, 버켓기초 자중이 석션압에 미치는 영향을 실험적으로 확인하였다. 그 결과 선단부 두께, 관입속도가 커질수록 석션압이 크게 나타났으며 버켓 자중이 커질수록 석션압이 작게 나타났다.
- (3) 석션설치 중 내부지반이 선형적으로 용기하였으며 관입이 종료되는 시점에서 버켓 직경의 8~18% 범위에서 내부지반이 용기되었다. 이는 석션설치 중 발생하는 상향의 침투수류로 인해 지반이 느슨해진 것으로 지반 용기량이 선단부 두께, 관입속도, 자중에 영향을 받는 것이 확인되었다.
- (4) 내부지반 용기량을 바탕으로 투수계수 변화를 추정 한 결과 원지반 대비 투수계수 변화비($k_f = k_{in}/k_{out}$)는 최대 1.5인 것으로 확인되었으며, Houlby and Bynre(2005)의 예측결과와 잘 일치하였다. 실험을 바탕으로 추정한 결과 석션설치 시 내부지반의 밀도가 원지반 대비 6~11% 감소된 것으로 추정된다. 본 연구에서는 디지털 카메라를 이용하여, 아크릴로 제작된 버켓기초 벽체와 접한 지반의 용기량을 관측하였기 때문에 전체 지반의 거동을 정량적으로 평가하는데 한계가 있다.
- (5) 석션설치에 의한 지반교란은 지반 투수특성에 크게 영향을 미치는 지반조건(밀도, 지반종류, 지층특성)에 크게 영향을 받을 것으로 판단되며 이에 대한 추가 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업(케이블교량 글로벌 경쟁력 강화를 위한 전주기 엔지니어링 및 가설공법 개발, 18SCIP-B119953)의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

1. Allersma, H.G.B., Plenevaux, F.J.A., and Wintgens, J.F. (1997), "Simulation of Suction Pile Installation in Sand in a Geocentrifuge", *Proceedings of the 7th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Honolulu, USA, pp.761-766.
2. Andersen, K.H., Murff, J.D., Randolph, M.F., Clukey, E.C., Erbrich, C.T., Jostad, H.P., Hansen, B., Aubeny, C., Sharma, P., and Supachawarote, C. (2005), "Suction Anchors for Deepwater Applications", *Proceeding of International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics*, Perth, Australia, pp.3-30.

3. Andersen, K.H., Jostad, H.P., and Dyvik, R. (2008), "Penetration Resistance of Offshore Skirted Foundations and Anchors in Dense Sand", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.134, No.1, pp.106-116.
4. American Society for Testing and Materials (ASTM). (2006), "Standard Test Method for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density", ASTM D4254-00, West Conshohoken, PA.
5. American Society for Testing and Materials (ASTM). (2011), "Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)", ASTM D2487-11, West Conshohoken, PA.
6. American Society for Testing and Materials (ASTM). (2014), "Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table", ASTM D4253-14, West Conshohoken, PA.
7. Bang, S., Cho, Y., Preber, T., and Thomason, J. (1999), "Model Testing and Calibration of Suction Pile Installation in Sand", *Proceedings of the 11th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Seoul, Korea, pp.235-256.
8. Bang, S., Preber, T., Cho, Y., Thomason, J., Karnoski, S.R., and Taylor, R.J. (2000), "Suction Piles for Mooring of Mobile Offshore Bases", *Marine Structures*, Vol.13, No.5. pp.367-382.
9. Cotter, O. (2010), "Installation of Suction Caisson Foundations for Offshore Renewable Energy Structures", PhD thesis, Oxford University, UK.
10. Erbrich, C.T. and Tjelta, T.I. (1999), "Installation of Bucket Foundations and Suction Caissons in Sand-geotechnical Performance", Offshore Technology Conference, Houston, USA, paper OTC 10990.
11. Houlby, G.T. and Byrne, B.W. (2005), "Design Procedures for Installation of Suction Caissons in Sand", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Geotechnical Engineering*, Vol.158, No.3, pp.135-144.
12. Iskander, M., El-Gharbawy, S., and Olson, R. (2002), "Performance of Suction Caissons in Sand and Clay", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.39, No.3, pp.576-584.
13. Kim, J.H. (2016), "Model Testing of Bucket Foundations for Offshore Structure in the Centrifuge and Development of Miniature Cone", PhD thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Korea.
14. Kim, J.H., Choo, Y.W., Kim, D.J., and Kim, D.S. (2016), "Miniature Cone Tip Resistance on Sand in a Centrifuge", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.142, No.3, 04015090.
15. Kim, J.H., Lee, S.T., and Kim, D.S. (2017), "Observation of Sand Movement during Bucket Installation", *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics* (ahead of print).
16. Kumara, J. J., Kikuchi, Y., and Kurashina, T. (2016), "Effects of the Lateral Stress on the Inner Frictional Resistance of Pipe Piles Driven into Sand", *International Journal of Geo-Engineering*, Volume 7, Paper no. 1, DOI 10.1186/s40703-016-0015-x
17. Larsen, K.A., Ibsen, L.B., and Barari, A. (2013), "Modified Expression for the Failure Criterion of Bucket Foundations Subjected to Combined Loading", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.50, No.12, pp.1250-1259.
18. Senpere, D. and Auvergne, G.A. (1982), "Suction Anchor Piles - A Proven Alternative to Driving or Drilling", Offshore Technology Conference, Houston, USA, Paper OTC 4206.

19. Tjelta, T.I. (1995), "Geotechnical Experience from the Installation of the Europipe Jacket with Bucket Foundations", Offshore Technology Conference, Houston, USA, Paper OTC 7795.
20. Tjelta, T.I., Guttormsen, T.R., and Hermstad, J. (1986), "Large-scale Penetration Test at a Deepwater Site", Offshore Technology Conference, Houston, USA, Paper OTC 5103.
21. Tran, M.N. (2005), "Installation of Suction Caissons in Dense Sand and the Influence of Silt and Cemented Layers", PhD thesis, University of Sydney, Australia.
22. Tran, M.N. and Randolph, M.F. (2008), "Variation of Suction Pressure during Caisson Installation in Sand", *Géotechnique*, Vol.58, No.1, pp.1-11.
23. Tran, M.N., Randolph, M.F., and Airey, D.W. (2005), "Study of Seepage Flow and Sand Plug Loosening in Installation of Suction Caissons in Sand", *Proceeding of the 15th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE)*, Seoul, Korea, pp. 516-521.
24. Villalobos, F. (2007), "Installation of Suction Caissons in Sand", *Proceeding of 6th Chilean Conference of Geotechnics*.

Received : September 22nd, 2018

Revised : October 9th, 2018

Accepted : October 11th, 2018