

모형실험을 활용한 저수심 사질토 지반에서 원형관 설치 석션압 평가

신진화¹, 김재현², 이주형^{1*}

¹한국건설기술연구원, ²강원대학교

Evaluation of Suction Installation for the Circular Pipe into Low-water Sandy Ground via Model Test

Zhen-Hua Xin¹, Jae-Hyun Kim², Ju-Hyung Lee^{1*}

¹Department of Infrastructure Safety Research, KICT

²Department of Civil Engineering, Kangwon National University

요약 본 연구에서는 해상(수상) 교량기초 시공 시 석션압으로 간편하게 설치될 수 있는 원형관 공법을 개발하고자, 실내 모형실험을 통하여 저수심 모래지반에 원형관 관입 시 설치 석션압을 평가하였다. 포화된 사질토의 반복실험을 위해 3개의 진동발생기를 활용한 진동다짐 토조 시스템을 구축하였고, 지반강도 확인을 위하여 소형 콘관입 장비를 활용하였다. 진동다짐 토조 시스템은 내부의 모래지반에 반복적으로 진동을 가하여 효율적으로 균질한 모래지반을 확보할 수 있었다. 다양한 지름과 두께를 가지는 원형관 모형체를 제작하고, 다양한 수심조건에 대하여 석션관입 실험을 수행하였다. 실험을 통한 석션압 분석결과 원형관의 관입깊이가 커짐에 따라 석션압은 커지고 지름이 클수록 원형관을 관입시키는데 필요한 석션압은 작아지는 것을 확인하였다. 특히, 수위가 낮을수록 석션관입을 위해 원형관 내부에서 끌어 올려야 하는 수두가 커지는 반면, 높아진 수두에 의한 물의 무게는 원형관의 전체 자중을 증가시켜 관입에 필요한 석션압은 작아짐을 알 수 있었다. 따라서, 저수심 조건에서 석션압을 이용하여 원형관을 설치할 경우 수심의 영향을 고려하여 설계 석션압을 결정해야 할 것으로 판단된다.

Abstract In this study, a circular pipe can be installed by suction pressure for construction on soft ground with a low-water level. A series of laboratory-scale model tests were conducted in sandy ground to comprehend the suction pressure of the circular pipe in low-water levels. For repeated tests on saturated sandy soil, a container was mounted with three vibration generators on the floor. A repetitive vibration was applied using the vibration system for ground compaction. In the model tests, different diameters and thicknesses on saturated sandy soil with a water depth were considered. The result showed that the suction pressure increased with increasing penetration depth of the circular pipe. Moreover, the suction pressure required to penetrate the pipe decreased with increasing diameter. In the low-water level, the total suction pressure measured at the top lid increased because additional suction pressure is required to lift the water column. On the other hand, this led to a decrease in suction pressure to penetrate the circular pipe because the weight of the water column is applied as a dead load. Therefore, it is necessary to consider the water level to design the required suction pressure accurately.

Keywords : Low-Water Depth, Suction Pressure, Sandy Ground, Circular Pipe, Model Test

이 논문은 2020년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원(과제번호 20208520130010, 마찰지저 기반 해상풍력 하이브리드 모노파일 기술 개발)과 2020년도 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업 지원을 받아 수행된 연구임 (20SCIP-B119954-05, 케이블교량 글로벌 경쟁력 강화를 위한 전주기 엔지니어링 및 가설공법 개발)

*Corresponding Author : Ju-Hyung Lee(KICT)

email: leejh73@kict.re.kr

Received October 19, 2020

Revised January 25, 2021

Accepted February 5, 2021

Published February 28, 2021

1. 서론

원형관 석션관입 공법은 대구경의 원형관을 해저면(또는 하저면)에 안착시키고 상부를 밀폐시킨 뒤에 펌프를 이용해 내부에 물을 주입시키거나 배출시켜 신속히 시공하는 공법이다. 원형관 석션관입 공법은 깊은 수심에서 석션 펌프를 이용해 신속히 설치되는 석션 버켓기초와 유사하지만, 시공 전과정에서 원형관 상부가 수면 위에 노출되기 때문에 시공 중 구조물 내부의 수압분포에서 차이가 발생한다. 특히, 원형관 상부가 수면위에 노출되어 있어야 하므로 원형관 내부의 공간중 일부가 공기 중에 노출된 상태에서 석션설치가 이루어져야 하는 문제가 있다. 저수심 조건에서 원형관을 안전하게 시공하기 위해서는 현장시공에 앞서 실내 환경에서 석션압을 검토할 필요가 있다.

원형관 석션관입 시공중 내부에 작용되는 석션압이 지반의 관입저항력을 극복하지 못하면 구조물이 충분히 관입되지 않아 소요 지지력을 확보하지 못하며, 구조물 주변으로 과도한 세굴이 유발될 가능성이 있다[1]. 반면, 석션압이 너무 클 경우 원형관 내부에 인접한 지반에서 파이프(piping) 혹은 플러깅(plugging) 현상이 발생하여 관입이 되지 않는다[2,3]. 이러한 이유로 지반조건과 관입저항력을 고려하여 관입에 필요한 설계 석션압을 정확히 산정하는 것이 중요하다. 사질토 지반에서 버켓기초의 관입저항력과 석션압 분석은 과거부터 많은 연구자에 의해 진행된 바 있다[4,5]. Bang 등(2000)은 해저지반에 버켓기초를 설치할 때 소요되는 선단저항력과 주변마찰력을 산정하고, 석션 설치 시 석션압에 의한 지반 강도감소계수(Mobilized effective soil friction angle ratio)를 제시함으로써 소요 석션압을 산정하였다[6]. Senders와 Randolph (2009)는 CPT 방법으로 지반상대밀도를 분석하고 석션 버켓 기초를 설치하면서 중간밀도와 조밀한 밀도에서 자중 관입 및 석션압을 평가하였다[7]. 국내에서도 다양한 조건에서의 소요 석션압을 판단하기 위해 버켓기초 석션설치 시 관입저항력과 석션압에 대한 연구가 보고되고 있다. Kim 등 (2015)은 실트질모래 지반에서 버켓기초의 관입저항력 증가효과를 고려한 저항력 변수 산정 방안을 도출하였다[8]. Lee 등 (2015)은 실험적인 방법으로 관입방법에 따른 석션설치 시 침투수력을 분석하고 이에 변화되는 관입저항력을 평가하였다[9]. 하지만 해상교량기초 시공을 위한 원형관과 같이 시공 중 구조물 상부가 수면위에 노출된 구조물에 대해 석션압을 평가한 사례는 전무한 상황으로 이에 대한 연구가 필요

한 실정이다. 따라서 본 연구를 위해 실내에서 원형관을 설치할 수 있는 실험시스템을 구축하고 저수심 조건에서 원형관 단면이 석션압에 미치는 영향을 비교 검토하였다. 또한, 저수심 영향을 고려한 석션압을 관입저항력 산정식에 반영하여 결과의 신뢰성을 확보하였다.

2. 원형관 석션관입 메커니즘

원형관은 내부에서 석션힘으로 물을 끌어올려 외부로 배출시키는 과정을 통하여 원형관 내외부의 압력차를 발생시켜 석션관입 된다. 이때, 석션압이 작으면 충분한 압력차를 생성할 수 없고 목표관입 깊이에 도달할 수 없게 된다. 또한, 관입의 상한계(upper limit)를 초과하면 원형관 상단으로 향하는 상향의 침투수류(upward seepage flow)를 과도하게 유발시켜 지반을 파괴시킨다. 투수성이 높은 모래지반에서는 주로 파이프 현상이 일어나고 점성토의 지반에서는 주로 흠이 구조물 내부에서 뿜혀지는 플러깅(plugging) 현상이 발생한다. 이는 기초가 목표 깊이까지 관입되는 것을 저해하고, 운영 중 과도한 세굴을 유발시켜 구조물의 성능을 저하시킬 수 있다[10]. 따라서 원형관 설치를 위한 적절한 석션압을 판단하는 것이 필요하다. 이때, 저수심 조건(원형관 상부가 수면위로 노출된 경우)에서 적절한 석션압을 판단하기 위해 수면위로 높아진 수두를 고려하여야 한다.

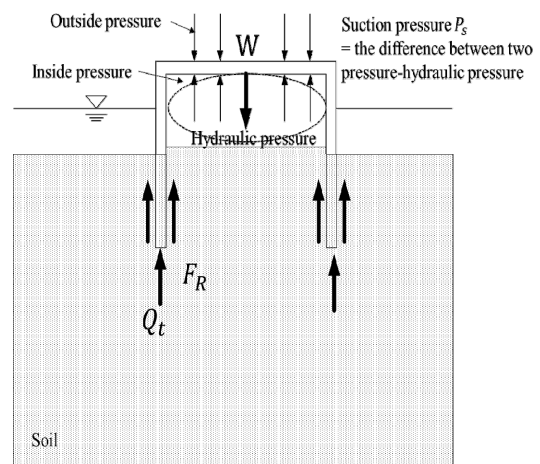


Fig. 1. Penetration mechanism of steel pipe cofferdam

석션압으로부터 발생하는 침투수력은 지반을 교란시키고 지반의 유효토압을 변화시킨다(Fig. 1). 유효토압은

석션관입을 진행하면서 침투수력으로 인하여 실제 흙의 포화단위중량보다 작아지는데 이때 변화된 토압을 유효 토압이라고 한다. 관입저항력을 계산함에 있어 실제 변화된 유효토압을 사용한다. 강관내측의 유효토압은 지반의 단위중량과 하중으로 인한 원형관의 단위면적당 주변저항력의 합에서 석션압을 뺀 값이다. 흙의 수중 단위체적 중량 (γ')이 일정하고, 지반의 용기량과 관입깊이($d+\delta$)에 대한 유효토압은 다음 Eq. (1)로 나타낼 수 있다[11].

$$\sigma'_{vin} = \gamma'(d+\delta) + F_{Rfi}/A_s - P_s$$

σ'_{vin} : Effective earth pressure inside the suction bucket
 γ' : Saturated unit weight of soil
 $d+\delta$: Penetration depth and elevation height
 F_{Rfi}/A_s : Side resistance
 P_s : Suction pressure

3. 실험조건 및 방법

3.1 실내모형 토조

원형관 석션압을 확인하기 위해 Fig. 2와 같이 토조 시스템을 구축하였다. 시스템은 모형지반을 조성하는 토조, 지반을 특정 밀도로 조성하기 위한 다짐장치 그리고 간극수압계 및 변위계 등 계측시스템으로 구성되었다. 토조 내부의 규격은 1500 × 1500 × 1500 mm (가로×폭×높이)이며 상응하는 부피의 흙+물의 상부하중을 견딜 수 있게 철로 제작되었다. 본 실험과 같이 물을 사용하며, 반복적으로 실험을 수행해야 하는 경우에는 일반적인 지반조성법인 강사법 (sand raining method)을 적용하기 어렵다. 따라서 본 실험에서는 토조 하단에 3개의 진동기(ViroMaster Inc.; VHFV-750S)를 설치하여 토조에 담겨진 지반(모래)을 진동으로 교란하여 다질 수 있도록 제작하였다. 토조 하단의 네 모퉁이와 바닥 사이에는 각각 고강도 스프링을 설치하여 진동에너지가 시료에 충분히 전달되도록 하였다. 포화된 지반에 모형 원형관을 석션설치하면 지반이 교란되는데, 실험 후 진동다짐을 하여 지반을 목표 밀도로 재조성 할 수 있는 장점이 있다. 진동다짐 후 목표 밀도를 확인하기 위해 실험 전후 모형 지반의 동일한 위치에서 콘관입 실험을 실시하였으며, 진동다짐시스템을 활용할 경우 지반이 다져지고 목표 강도를 회복하는 것을 확인하였다. 일반적으로 현장에서 활용되는 콘의 경우 직경이 35.7 mm로 실내모형 토조에서

사용할 경우 경계면 효과(boundary effect)가 발생할 우려가 있어 실내실험용 콘을 사용하였다. 본 연구를 위해 제작된 실내 토조실험용 콘은 직경 10 mm, 선단 각 60°인 소형 콘이다. 콘 배면에는 압력센서를 부착하여 지반에 관입되면서 발생하는 콘의 선단저항치(q_c)를 연속적으로 획득할 수 있도록 구성하였다. 본 연구에 사용된 소형콘은 원심모형실험에서 계측된 콘관입 저항치와 지반물성과의 관계가 고찰되었고 지반의 물성을 평가할 수 있는 가능성이 확인된바 있다[12,13].



(a)



(b)

Fig. 2. Test chamber system
(a) Test chamber; (b) Vibrator

3.2 모형지반

모형지반은 주문진 표준사를 470 mm 높이로 조성한 포화지반이다. 조성된 지반면으로부터 물을 충분히 스며들도록 지반 위까지 채워 포화상태를 이루게 하였다. 시험에 사용된 시료의 물리적 특성은 Table 1에 나타난 것과

같이 비중은 2.66, 균등계수는 1.43, 곡률계수는 0.90, 통일분류법상 SP로 구분된다. 포화단위중량은 18.5 kN/m³, 최소 간극비와 최대 간극비는 0.59와 0.93이다. 또한, 포화상태에서의 내부마찰각(ϕ'_c)은 30°이다. 모형 지반에서 반복실험을 위하여 진동에너지로 지반을 다짐하여 매 실험별로 유사한 지반조건을 조성하였고 준비된 모형지반에 콘관입시험을 매회 실시하여 지반조성의 반복성과 물성을 확인하였다. 포터블 소형콘의 경우 모래지반에서 PCPT(Portable cone penetration test)를 실시하였고 콘관입저항력(q_c)과 상대밀도 D_r 는 상관관계식은 Eq. (2)를 이용하여 도출하였다[14]. 진동장치로 10분 가량의 지반진동을 가하면 실험전 지반강도를 충분히 회복할 수 있었고 회복된 지반의 Skempton(1986)의 상대밀도와 N 값의 상호관계식 Eq. (3)에서 해당 N 값을 얻을 수 있었다[15].

$$D_r = 31.6 \ln(q_c) + 24.7$$

여기서, D_r = Relative density(%)
 q_c = 콘관입저항 (kg/cm²)

(2)

$$D_r = \left(\frac{N}{60}\right)^{0.5}$$

여기서, D_r = Relative density(%)
 q_c = 콘관입저항 (kg/cm²)

(3)

Table 1. Geo-technical properties of tested soil

| Items | | Physical properties |
|--|-----------|---------------------|
| Specific gravity | G_s | 2.66 |
| Grain size (mm) | d_{10} | 0.43 |
| | d_{60} | 0.62 |
| Uniformity coefficient | C_u | 1.43 |
| Coefficient of curvature | C_c | 0.90 |
| Saturated unit weight (kN/m ³) | γ' | 18.5 |
| Max. void ratio | e_{max} | 0.93 |
| Min. void ratio | e_{min} | 0.59 |
| Soil classification, USCS | - | SP |
| Saturated critical friction angle (°) | ϕ'_c | 36 |

3.3 실험방법

저수심 조건에서 원형관의 설치 석션압을 평가하기 위하여 총 6회의 모형실험을 시행하였다. 원형관의 단면, 스커트 두께 및 수위 조건에 따른 세부 실험조건은

Table 2와 같다. Case 1~3은 원형관의 길이와 스커트 두께(L/t=400/5 mm)를 일정하게 하고 지름에 (D/L=200/400 mm, 300/400 mm, 400/400 mm) 차이를 두었다. Case 4~5는 길이와 지름(L/D=400/200 mm)이 일정한 원형관에서 두께에 (D/t=200/5 mm, 200/10 mm) 차이를 두었다. 또한, 모형 원형관은 자중 영향을 최소화하기 위해 아크릴로 제작하였다. 수위 영향을 평가하기 위해 Case 5~6 조건에서 스커트 두께/길이/지름(t/L/D)이 6/400/400 mm인 강재로 제작된 모형 원형관을 사용하였고 수위가 포화된 지반으로부터 각각 0 mm와 200 mm인 저수심 조건에서 석션설치 실험을 실시하저수심 모래지반을 조성한 후 상부에 가이드 로드(guide rod)가 부착된 원형관을 선형 베어링에 고정시켜 원형관이 수직으로만 이동이 가능하고 수평 변위가 발생하지 않도록 하였다. 또한, 원형관을 지반에 안착한 후 자침을 모사할 수 있도록 지표면으로부터 관입깊이가 50 mm 내외가 되도록 원형관을 천천히 눌러 관입시켰다. Fig. 3과 Fig. 4와 같이 모형 원형관 설치 중 회전과 측방이동을 방지하기 위하여 원형관 상단에 수평 가이드 로드와 선형 베어링을 설치한 모습이다. 석션관입 중에는 원형관 내부에 물이 가득 채워진 후 호스를 통해 빠져나갈 수 있도록 2개의 흡입배관을 원형관 상판(top lid)에 연결하였으며, 배출되는 물은 토조로 다시 유입되도록 하여 일정한 수위를 유지하도록 하였다. 또한 모형 원형관 석션관입 시 관입깊이는 가이드 로드와 플라스틱 판을 설치하여 레이저센서(laser sensor)로 측정함으로써 실시간으로 변위를 측정하였다. 실험에서 석션압을 측정하기 위하여 원형관 내부상단에 간극수압계를 설치하였고 지표면에 간극수압계를 넣어 토조의 전체 수두변화를 측정하였다.

설치된 간극수압계를 통해 원형관 내부상단에서 측정된 석션압을 상부석션압이라 하고 수면위로 노출된 물기둥의 높이를 고려하여 순수하게 원형관을 관입시키는데 소요되는 석션압(강관 내외부의 압력차-물기둥의 부피에

Table 2. Model dimensions and water level

| No. | D/L/t(mm) | Water level (mm) | Weight (kN) |
|--------|------------|------------------|-------------|
| Case 1 | 200/400/5 | 100 | 0.023 |
| Case 2 | 300/400/5 | 100 | 0.042 |
| Case 3 | 400/400/5 | 100 | 0.056 |
| Case 4 | 200/400/10 | 100 | 0.036 |
| Case 5 | 400/400/6 | 0 | 0.255 |
| Case 6 | 400/400/6 | 200 | 0.255 |

해당하는 압력)을 관입석선압이라고 하였다. 펌프를 원형관 내부에 물을 외부로 배출시키면 강관에 석선압이 작용된다. 이때, 토조에 채워진 물이 모래지반을 통해 강관 내부로 유입되어 토조의 수위가 점차 낮아졌으나 수위차는 최대 1 mm~2 mm 사이로 나타나 결과 값에 큰 영향을 미치지 않았다. 원형관 직경대비 토조 벽체까지의 간격비는 $D_{bucket} / D_{chamber}$ 는 3.75~7.5로 측면 경계가 설치저동에 미치는 영향이 미미하다고 판단하였다[16].

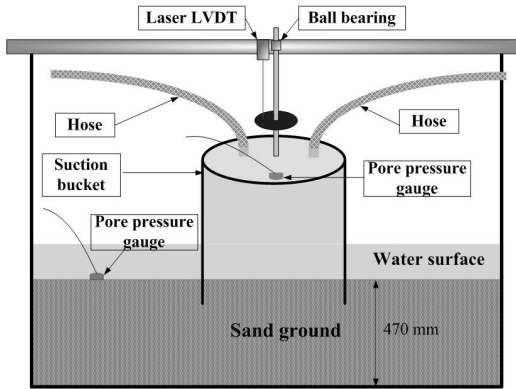


Fig. 3. Model test system



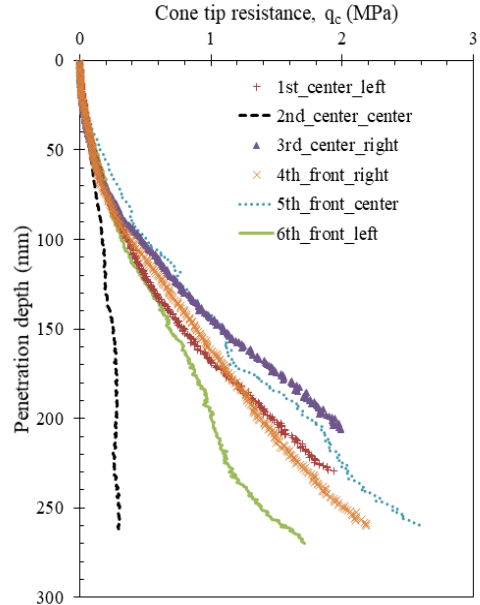
Fig. 4. Model test system scene

4. 결과분석 및 고찰

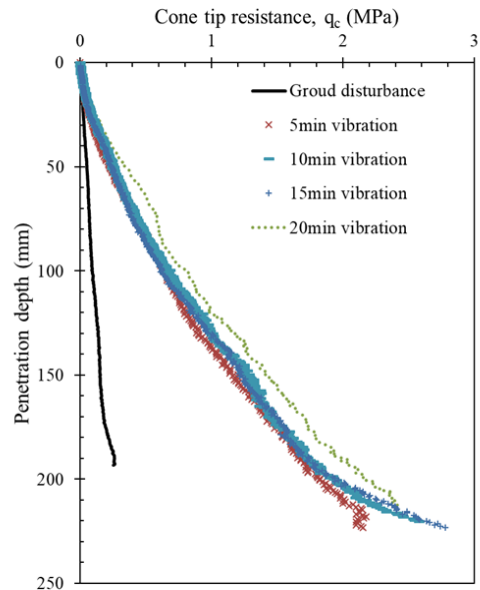
4.1 콘관입 시험결과

석선관입 시 투수성이 큰 모래지반에서는 상향의 침투수력(hydraulic upward gradient)으로 교란되어 실험이 수행된 위치의 지반강도(또는 밀도)가 현저히 떨어진다. 비슷한 지반강도를 얻기 위하여 교란된 지반에 진동을 가하였고 교란전/후 콘관입 시험을 통하여 지반의 강도를 확인하였다. 원형관 설치실험 위치 중심지점과 중심지점으로부터 4방면으로 200 mm 떨어진 지반위치에 콘관입시험을 실시하였다. 콘관입시험기는 유압식으로

15 mm/s의 관입속도로 300 mm 깊이까지 관입하였다. Fig. 5(a)는 석선설치 후 수행된 콘 관입깊이별 선단저항치(q_c)를 나타낸다. 그 결과, 원형관 관입축 중심에 위치한 지반에서 강도가 가장 많이 감소되는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 5(b)는 원형관 설치 후 진동에너지를 가한



(a)



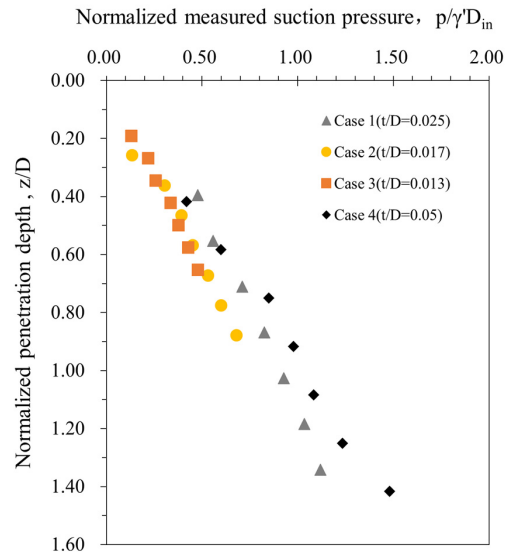
(b)

Fig. 5. CPT results according to penetration depth
(a) Cone tip resistance according to vibration time
(b) Cone tip resistance according to penetration location

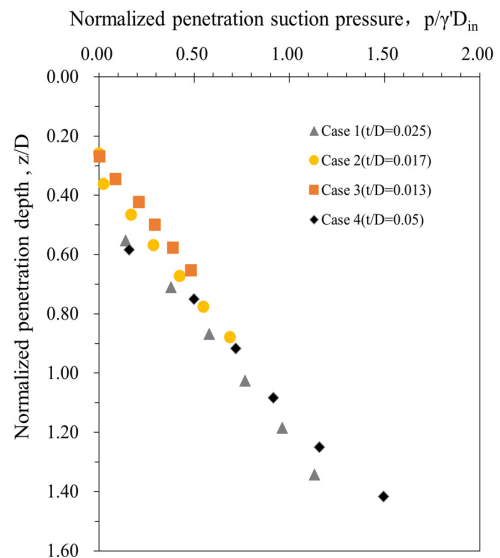
시간에 따른 콘 관입실험 결과를 보여준다. 원형관 관입 축 중심부 부근의 지반강도는 진동을 5분 이상 가하면 일정한 값으로 수렴이 되는 것을 확인하였다. 이때, 지반 강도는 190 mm 관입깊이에서 0.29 MPa에서 1.76 MPa로 최소 83.8%이상 지반강도를 회복하였고 식 Eq.(2)와 Eq.(3)에 대입하였을 때 N값 9에 해당하는 강도를 얻을 수 있었다.

4.2 원형관 단면에 따른 석션압 평가

저수심 모래지반에서 4개의 다른 단면크기의 원형관 (Case 1 ~ Case 4) 설치 석션압을 분석하였다. 초기 조건에서 원형관의 자침 깊이를 모두 50 mm로 맞추었고 수위는 지표면으로부터 100 mm로 설정하였다. 초기 조건을 맞춘 후 펌프를 가동하여 원형관 안의 공기가 배출 되면서 내부에 물이 천천히 차오르게 한다. 물을 끌어 올리는 단계에서 측정되는 석션압은 증가하지만 관입깊이는 크게 증가하지 않았다. 수두가 원형관 내부 끝까지 차게 되면 석션압이 급격히 증가하면서 관입속도도 증가하는 것을 확인하였다. 이때, 관입깊이와 측정된 석션압의 관계를 Fig. 6과 같이 나타내었고 각 축은 비교를 위해 무차원으로 정규화하여 나타내었다. X축은 원형관의 지름과 지반 단위중량을 반영하여 $p/\gamma'D_{in}$ 로 나타내었고 Y축은 지름을 반영하여 z/D_{in} 로 나타내었다[17,18]. 여기서 p 는 석션압, γ' 는 지반의 단위중량, D_{in} 는 원형관의 내경, z 는 물이 채워진 상태에서의 관입깊이를 나타낸다. Fig. 6(a)는 관입깊이별 원형관의 상부석션압이고 Fig. 6(b)는 관입깊이별 원형관의 관입석션압이다. 여기서 상부석션압은 원형관 상부에서 측정된 석션압이고 관입석션압은 상부석션압에서 수면위로부터 들어 올린 물기둥의 수두 변화를 뺀 석션압으로 순수하게 원형관을 지반에 관입시키는 압력을 의미한다. Case 1~3에서 스킵트 두께(t)가 5 mm일 때 관입깊이(z/D_{in})에 따른 상부석션압($p/\gamma'D_{in}$)은 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. Case 4~5에서 스킵트 두께(t)가 각각 5 mm와 10 mm일 때 상부석션압은 두께가 큰 조건에서 크게 나타났다. Fig. 6(b)의 관입석션압은 상부석션압보다 더 수렴된 선형적인 관계를 보여준다. 이는 상승된 수두를 뺀 때 관입깊이(z/D_{in})에 따른 관입석션압은 지름과 두께에 관계없이 선형적으로 비례하여 증가한다. 즉, 동일한 수심 조건에서 원형관 관입에 작용하는 관입석션압은 단면에 상관없이 일치하는 경향을 보여준다.



(a)



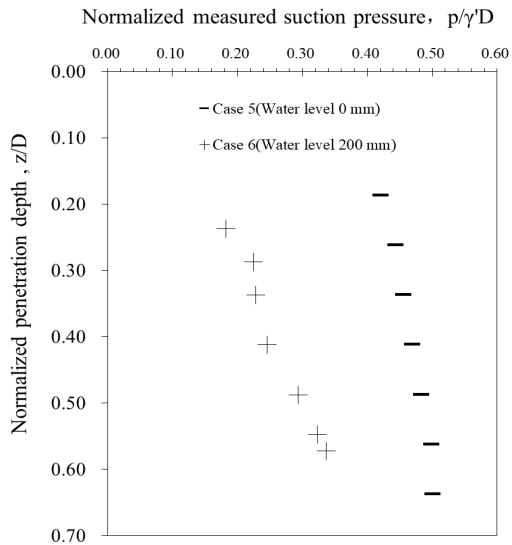
(b)

Fig. 6. Suction pressure according to shape of bucket
(a) Measured suction pressure according to shape of bucket
(b) Penetration suction pressure according to shape of bucket

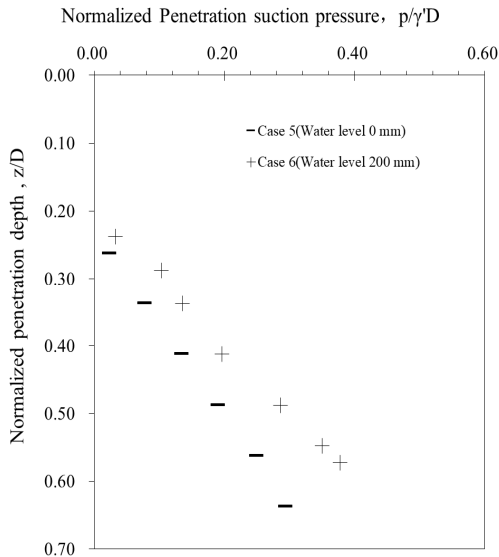
4.3 저수심 조건에 따른 석션압 평가

$D/L=400\text{mm}/400\text{m}$ 인 동일한 원형강관을 수심이 다른 조건에서 관입깊이별 설치 석션압을 Fig. 7.과 같이 나타내었다. 실험결과로부터 수심이 다른 조건에서 관입석션압과 상부석션압은 다른 경향을 보여준다. Fig. 7(a)에서

원형관 상부석션압을 비교한 결과 수심이 0 mm인 포화 조건은 수심이 200 mm인 수심조건보다 관입깊이 $z/D=0.56$ 에서 석션압이 51.7% 크게 나타났다. 하지만 Fig. 7(b)로부터 원형관에서 상승된 수두를 뺀 관입석션압은 최종 관입깊이에서 석션압은 반대로 32.7% 작게 나타났



(a)



(b)

Fig. 7. Suction pressure according to water level
(a) Measured suction pressure by depth
(b) Penetration suction pressure by depth

다. 수심조건 0 mm 포화조건에서 수심이 200 mm 조건보다 상부석션압은 높게 나오고 관입석션압은 작게 나오는 상반되는 결과를 나타낸다. 이는 물이 원형관 끝까지 차오르면서 0 mm 포화지반 조건에서 자증이 더 커지기 때문이다. 원형관을 관입시키는 작용력은 원형관의 자증과 원형관의 내외부 압력차이의 합으로 산정된다. 따라서 단면이 같은 원형관을 설치하더라도 자증이 증가되면 낮은 관입석션압으로 설치될 수 있다. 즉 저수심 조건에서 수심을 고려하여 관입 석션압을 산정할 필요가 있다.

Fig. 8은 상부석션압과 관입석션압을 비교한 그래프이다. Case 1 ~ Case 6은 상부석션압을 나타냈고 Case 1' ~ Case 6'은 관입석션압을 나타내었다. 결과 수두가 차올랐을 때 초기관입 깊이에서 상부석션압과 관입석션압은 차이가 가장 크고 원형관이 수심까지 도달하면 차이가 안 나타난다. 이는 원형관이 수위까지 관입되면서 물기동에 의한 자증효과가 사라졌기 때문으로 판단된다. 같은 원형관 단면조건에서 상부석션압과 관입석션압의 최대 차이는 각각 수심 0 mm 포화지반 조건에서 $\Delta p/\gamma'D=0.46$, 수심 100 mm 조건에서 $\Delta p/\gamma'D=0.21$, 수심 200 mm 조건에서 $\Delta p/\gamma'D=0.15$ 이다. 이는 수두가 증가함에 따라 석션압의 차이도 증가하였고 초기관입깊이에서 석션압의 차이는 1.4배에서 3.1배로 증가하였다.

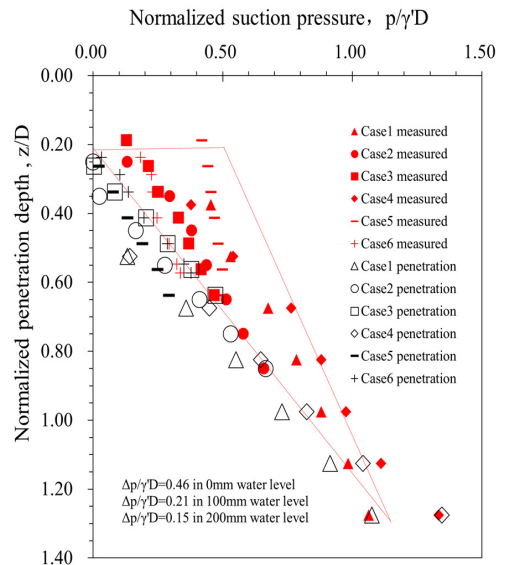


Fig. 8. Comparison of suction pressure by cases

4.3 저수심 조건에서 설계석션압 평가

원형관을 석션 설치함에 있어 설계석션압은 관입저항

력에 비례한다. 실험결과로부터 저수심 조건에서는 같은 단면의 원형관이라도 수심에 따라 관입석션압은 다르다. 관입석션압은 내외부 압력차이 외 상승된 수두로부터 증가된 자중 영향을 고려하여야 한다. 관입저항력은 선단저항력과 벽체에 대한 주면마찰력의 합이다. 변화된 원형관 관 자중과 저수심 조건에서 침투수류로 인한 지반의 유효토압을 고려하여 관입저항력을 구하였다. 원형관이 지반에 관입되면서 받는 선단저항력은 Terzaghi의 얇은기초 극한지지력식 Eq. (4)로 구할 수 있다. 선단저항력은 원형관의 두께(t)를 얇은기초의 폭(B)이라고 가정할 때 원형관의 단면은 띠형기초의 선단지지력 공식에 의해 구할 수 있다. 여기서 γ' 은 흙의 수중단위중량, t 는 원형관의 두께, σ'_v 은 기초 내측에서 구한 선단의 유효토압(kPa)이다. 지지력계수 N_q 와 N_γ 는 식 Eq. (5)과 Eq. (6)으로 구할 수 있다.

$$q_u = \gamma' \left(\frac{t}{2} \right) N_\gamma + \sigma'_v N_q \quad (4)$$

$$N_q = \left\{ \frac{1}{1 - \sin \phi'_m} \right\} \exp \left\{ \left(\frac{3}{2} \pi - \phi'_m \right) \tan \phi'_m \right\} \quad (5)$$

$$N_\gamma = (N_q - 1) \tan (1.4 \phi'_m) \quad (6)$$

Bang 등(2000)은 원형관이 관입 시 발생하는 지반의 내부마찰각 변화를 강도감소계수(mobilized soil strength factor, α)를 적용하는 방법을 제시하였고 Eq. (7)과 같이 나타내었다. 여기서 ϕ' 는 유효 내부마찰각이고(effective friction angle)이고 ϕ'_m 는 유효 발휘 마찰각(mobilized effective friction angle)이다[6].

$$\alpha = \frac{\tan \phi'_m}{\tan \phi'} \quad (7)$$

주면마찰력은 원형관 내·외부 벽체와 모래지반 사이에서 발생한다. 모래지반에서 원형관의 주면마찰 저항력은 다음 Eq. (8)과 같이 구할 수 있다[19].

$$F_R = \mu \cdot K_s \cdot \pi \cdot (\sigma'_{vin} + \sigma'_{vo}) \cdot d \quad (8)$$

μ : Coefficient of friction
 K_s : Coefficient of friction earth pressure
 $(\sigma'_{v} + \sigma'_{vo})$: Effective soil pressure inside and outside of suction bucket
 d : Penetration depth

저수심 조건에서 원형관의 단면과 수두를 고려하여 계산된 관입저항력과 측정된 관입석션력을 Fig. 9에 나타냈고 보정계수를 Table 3에 정리하였다. 보정계수(α)는 실험결과로부터 측정된 석션력과 계산을 통해 산정된 관입저항력을 비교하여 보정한 값이다. 결과 원형관 단면의 스킵트 두께 대비 직경의 비(t/D)가 0.013~0.025일 때 $\alpha = 0.93 \sim 1.22$ 의 범위를 보였으며 계산된 관입저항력과 석션력은 유사하였다. Case 4에서 두께가($t/D = 0.05$) 2배일 때 관입저항력과 석션력에 대한 보정계수는 $\alpha = 0.64$ 로 차이가 크게 나왔다. 이는 원형관의 스킵트 두께가 커질 경우 선단저항력이 커지고 관입저항력을 판단하는데 오차가 커진다.

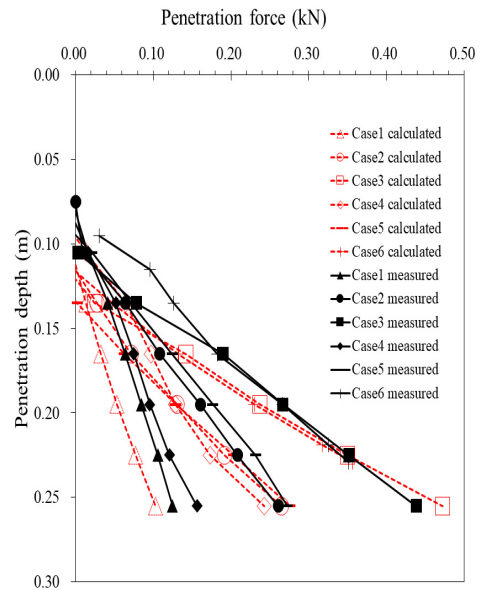


Fig. 9. Comparison of calculated and measured penetration force

Table 3. Test results for shape of suction buckets and water level

| No. | Calculated suction force (A) | Measured suction force (B) | Modification factor (B/A) |
|--------|------------------------------|----------------------------|---------------------------|
| Unit | kN | kN | (α) |
| Case 1 | 0.1 | 0.12 | 1.22 |
| Case 2 | 0.27 | 0.26 | 0.98 |
| Case 3 | 0.47 | 0.44 | 0.93 |
| Case 4 | 0.24 | 0.16 | 0.64 |
| Case 5 | 0.28 | 0.27 | 0.98 |
| Case 6 | 0.36 | 0.35 | 0.99 |

5. 결론

본 연구에서는 저수심 모래지반에 대하여 원형관 가설 공법의 설치 석션압을 평가하고자 실내 모형실험을 수행하였다. 실험을 위해 진동다짐 토조 시스템 및 다양한 단면을 가지는 원형관 모형체를 제작하고, 다양한 수심조건에 대하여 석션관입 실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 진동다짐 토조 시스템을 이용한 지반조성의 반복성과 균질성을 확인하기 위해 석션관입 실험 전/후 소형 콘 관입시험을 실시하여 지반물성을 측정하였다. 석션관입에 의해 교란된 지반은 5분 이상 진동다짐을 하여 본래의 균질한 지반강도를 회복하는 것으로 나타났다. 포화된 사질토 지반에서 반복실험 시 진동다짐 토조 시스템이 효율적임을 알 수 있었다.
2. 저수심 조건에서 원형강관의 관입석션력은 지반의 관입력을 극복하는 힘과 강관 내외부의 수두차로 나뉜다. 강관 내부에서 증가된 수두가 같을 때 관입 깊이(z/D)에 따른 관입석션압($p/\gamma'D$)은 단면에 관계없이 일정하였다.
3. 수심이 낮아질수록 상부석션압은 커지고 관입석션압은 작게 나타나는 것을 확인하였다. 이는 석션에 의해 강관 내부에 채워진 물이 강관 전체의 자중을 증가시키는 효과가 있기 때문이다.
4. 저수심 조건에서 관입저항력 산정 시 원형관의 관입석션압을 적용하여 계산된 관입저항력은 측정된 석션관입력과 근접하게 나와 실험결과의 신뢰성을 확인하였다. 또한, 단면조건에서 두께와 지름의 비 (t/D)는 0.025 이하에서 오차가 작음을 알 수 있었다.

References

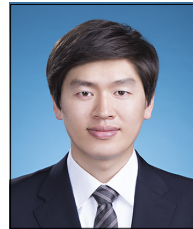
- [1] M. Iskander and S. El-Gharbawy, "Performance of Suction Caissons in Sand and Clay", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.39, No.3, pp.576-584, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1139/t02-030>
- [2] M. N. Tran, "Installation of Suction Caissons in Dense Sand and the Influence of Silt and Cemented Layers", PhD thesis, University of Sydney, Australia, 2005
- [3] T.I. Tjelta, "Geotechnical Experience from the Installation of the Europipe Jacket with Bucket Foundations", *Offshore Technology, Conference, Houston, USA*, 1995. DOI: <https://doi.org/10.4043/7795-MS>
- [4] G. T. Houlsby and B. W. Byrne, "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, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1680/jgeeng.2005.158.3.135>
- [5] H. G. B. Allersma, F. J. A. Plenevaux, and J. F. Wintgens, "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, 1997.
- [6] S. Bang, T. Preber, Y. Cho, J. Thomason, S. R. Karnoski, "Suction Piles for Mooring of Mobile Offshore Bases", *Marine Structures*, Vol. 13, No.3-4, pp.367-382, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0951-8339\(00\)00012-5](https://doi.org/10.1016/S0951-8339(00)00012-5)
- [7] M. Senders, and M. F. Randolph, "CPT-Based Method for the Installation of Suction Caissons in Sand", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.135, No.1, pp. 14-25, 2009. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2009\)135:1\(14\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2009)135:1(14))
- [8] D. J. Kim, J. U. Youn, K. Y. Lee, S. H. Jee, Y. W. Choo, "Jacking Penetration Resistance of Bucket Foundations in Silty Sand Using Centrifuge Modelling", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.31, No.1, pp.25-35, 2015. DOI: <https://doi.org/10.7843/kgs.2015.31.1.25>
- [9] J. H. Lee, J. U. Do, S. R. Kim, "A Comparative Study on the Resistances of Bucket Foundation in Sand with Different Installation Methods", *Institute journal of Geomat*, Vol.8, No.1, PP.1186-1189, 2015.
- [10] M. N. Tran, M. F. Randolph, and D. W. Airey, "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, 2005.
- [11] O. S. Kwon, I. S. Jang, H. D. Ahn, "Suction Foundation Structure Technical Manual", *Korea Ocean Research and Development Institute*, pp. 61-94, 2010.
- [12] J. H. Kim, Y. W. Choo, D. J. Kim, and D. S. Kim, (2016), "Miniature Cone Tip Resistance on Sand in a Centrifuge", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.142, No.3, 2016.

DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001425](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001425)

- [13] J. H. Kim, D. J. Kim, D. S. Kim, Y. W. Choo, "Development of Miniature Cone and Characteristics of Cone Tip Resistance in Centrifuge Model Tests", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, pp. 631~642, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.12652/Ksce.2013.33.2.631>
- [14] J. S. Park, Y. H. Son, S. K. Noh, T. H. Bong, "Estimation of the Relative Density and Internal Friction Angle for Sand using Cone-tip Resistance of the PCPT", *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineer*, Vol. 54, No. 4, pp.137-145, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.5389/KSAE.2012.54.4.137>
- [15] A. W. Skempton, "Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation", *Géotechnique*, Vol.36, No.3, pp. 425-447, 1986.
DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.1986.36.3.425>
- [16] M. N. Tran, and M. F. Randolph, "Variation of Suction Pressure during Caisson Installation in Sand", *Géotechnique*, Vol.58, No.1, pp.1-11, 2008.
DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.2008.58.1.1>
- [17] J. H. Kim, S. T. Lee, and D. S. Kim, "Observation of Sand Movement during Bucket Installation", *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, Vol.19, No.1, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1680/iphmg.16.00048>
- [18] J. H. Kim, S. T. Lee, and D. S. Kim, "Evaluation of Soil Disturbance Due to Bucket Installation in Sand", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.34, No.11, pp.21-31, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.7843/kgs.2018.34.11.21>
- [19] K. S. Kim, M. H. Oh, O. S. Kim, T. H. Kim, "Investigation on the Penetration Resistance of Suction Bucket Foundation in Sand using Model Test", *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol.15, No.6, pp.75-83, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.14481/jkges.2014.15.6.75>

김 재 현(Jae-Hyun Kim)

[정회원]



- 2011년 8월 : 한국과학기술원 건설환경공학과 (공학석사)
- 2016년 8월 : 한국과학기술원 건설환경공학과 (공학박사)
- 2016년 9월 ~ 2018년 2월 : 한국과학기술원 박사후연구원

- 2018년 3월 ~ 2020년 8월 : 한국건설기술연구원 전임연구원, 수석연구원
- 2020년 9월 ~ 현재 : 강원대학교 토목공학전공 조교수

<관심분야>

해양기초, 축소모형실험, 지반물성평가

이 주 형(Ju-Hyung Lee)

[정회원]



- 2002년 2월 : 서울대학교 지구환경시스템공학부 (공학석사)
- 2014년 8월 : 서울대학교 건설환경공학부 (공학박사)
- 2002년 3월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 연구위원

- 2019년 7월 ~ 현재 : ㈜지오오션 대표이사 (사내벤처)

<관심분야>

해양기초, 신재생에너지, 건설IT융합

신 진 화(Zhen-Hua Xin)

[정회원]



- 2019년 8월 : 명지대학교 토목환경공학과 석박사통합 (공학박사)
- 2019년 9월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 박사후연구원

<관심분야>

해양기초, 토질역학, 지반보강