

침투해석을 이용한 석션 케이슨에 작용하는 외력 평가

김정수* · 정연주** · 박민수***

Kim, Jeongsoo*, Jeong, Yeon-Ju**, Park, Min-Su***

Estimation on External Forces Applied to Suction Caisson Using Seepage Analysis

ABSTRACT

A suction caisson has been widely used for anchor and foundation of offshore structures due to its broad application, simple installation, and rapid construction. In design of suction caisson foundation, the bearing capacity and the stability of soil are mainly dealt with and analysis methods for them are presented in design codes related to the foundation. On the other hand, the method for structural safety analysis of the suction caisson is not generalized, in particular for load modeling of the caisson under suction. Consequently, there are difficulties in design of the caisson cross section. For this reason, this study analyzed the magnitude and distribution of pore water pressure on inner and outer surface of the caisson using theoretical and numerical seepage analyse, and an approach to reasonably estimate the load applied to the structural analysis of the caisson was presented. Furthermore, effects of penetration depth, anisotropy of permeability, and suction pressure on the pore water pressure were analyzed.

Key words : Suction pressure, Seepage analysis, Structural load modeling, Foundation, Anchor

초록

석션 케이슨은 설치 수심제한이 적고, 비교적 단순한 설치공정과 빠른 시공이 가능하기 때문에 해양구조물용 앵커 및 기초형식으로 활용되고 있으며 그 적용이 점차 확대되고 있다. 석션 케이슨 기초의 설계는 지반의 지지력 및 안정성 검토가 중심이 되며, 관련 설계기준에서 해석 방법을 제시하고 있다. 반면, 케이슨의 구조적 안전성 분석은 방법이 정형화되지 않았으며 특히 케이슨에 작용하는 하중 모델링에 대한 명확한 산정 방법이 정립되지 않아 석션 케이슨 단면 설계에 어려움이 있다. 이러한 이유로 본 연구에서는 이론 및 수치적 침투해석을 통해 석션압에 의해 발생 되는 케이슨 내외부의 간극수압 크기 및 분포를 분석하고, 이를 바탕으로 구조해석에 적용할 수 있는 합리적인 하중 평가 방법을 제시하였다. 추가적으로 관입깊이, 투수계수의 이방성, 석션압 변화가 내외벽에 작용하는 간극수압에 미치는 영향을 분석하였다.

검색어 : 석션압, 침투해석, 구조 하중 모델링, 기초, 앵커

* 정회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 전임연구원
(Corresponding Author · Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · jeongsookim@kict.re.kr)

** 종신회원 · 한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 연구위원
(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · yjjeong@kict.re.kr)

*** 정회원 · 한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 수석연구원
(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · mspark@kict.re.kr)

Received November 20, 2018/ revised December 11, 2018/ accepted January 9, 2019

1. 서론

석션 케이스는 상부가 밀폐된 원통 형태로 자중에 의해 초기 관입된 후에 내/외부 압력차를 이용해 관입 및 지지력을 확보하는 기초 및 앵커 유형이다. 빠른 시공속도뿐만 아니라 일반적인 해상장비의 활용으로도 설치가 가능하기 때문에 다양한 해상 구조물의 기초형식으로 널리 활용되고 있다. 석션 기초의 설계는 지반의 연직, 횡방향, 인발 지지력 평가를 포함하며, 지반침하 등의 안정성 평가도 요구된다. 석션 기초의 지지력 평가는 한계평형상태(limit equilibrium state)에 근간하며, 복잡한 기하형상 및 지반조건에 대해 일반적으로 3차원 유효요소법을 통한 지지력 및 침하 평가가 추천된다(DNV, 2005).

설계방법이 정형화된 지반 지지력 및 안정성 부문과 달리(Bond et al., 2013), 석션 케이스의 구조적 안전성 평가를 위한 설계 단계에서의 외력 평가 방법은 명확히 정립되지 않고 있다. 석션 케이스의 관입 후의 지지력은 중요한 설계인자가 되므로, 기존 연구의 대부분은 석션 기초의 지지력(Kim et al., 2013; Lee et al., 2013; Yoon et al., 2013)과 인발 저항력(Tassoulas et al., 2005; Kim and Jang, 2011; Kim et al., 2014b; Park et al., 2013; Na et al., 2014; Boonyoung et al., 2015)을 평가하기 위한 여러 방법을 제시하였다. 이와 함께, 석션 기초의 관입성 평가를 위한 실험연구(Kim et al., 2014a; Kim et al., 2015)가 수행되었으며, 대변형 해석기법을 관입성 평가에 도입해 석션 기초의 관입과정을 고려한 지지력 평가를 수행한 수치해석 연구들(Zeinoddini et al., 2011; Kim, 2014; Kim et al., 2017; Jin et al., 2017)도 활발히 이뤄지고 있다. 또한 석션 기초의 설치와 지반 안정성을 분석한 다수의 연구(Houlsby et al., 2004; Cotter, 2010; Cerfontaine et al., 2015; Kim et al., 2016; Choo et al., 2016; Kim et al., 2018b)도 수행되었다.

반면 석션 케이스의 합리적 단면설계를 위해서는 케이스 표면에 작용되는 하중 및 분포가 중요한 인자가 됨에도 불구하고, 이에 대한 연구는 활발히 이루어지지 않아 왔다. 이는 석션 케이스의 관입성 및 지지력 평가 시, 석션에 의한 하중을 케이스 상판에 작용하는 연직방향 등분포 하중으로 고려하는 것만으로 충분하기 때문이다. 하지만, 구조적 안전성 평가를 위해서는 상판에 작용하는 하중뿐만 아니라 케이스 벽체에 작용하는 하중이 요구된다. 비록 석션 기초의 구조적 안전성을 평가한 연구가 일부 존재하나(Madsen et al., 2013, Kim et al., 2018a), 석션 작용으로 인한 수압 변화를 고려하지 않았다. 또한, 석션의 영향을 별다른 근거 없이 상판 및 벽체 일부에 작용하는 등분포 하중으로 고려함으로써 구조적 안전성을 평가하였다.

석션 케이스는 석션압에 의해 간극수의 상방 및 하방 침투가

발생하므로, 작용 외력의 합리적인 평가를 위해서는 침투압에 의한 추가적인 외력변화가 고려되어야 하며, 구조해석 시 이를 반영하는 것이 필요하다. Park et al.(2014)과 Ssenyondo et al.(2017)은 석션기초에 대한 침투해석을 수행하였으나, 이는 석션 구조체 선단부의 석션압 변화 영향 분석과 파이프(piping)에 대한 안정성 평가를 위한 것이었다. 이러한 이유로 본 연구는 석션 케이스에 작용하는 하중평가를 위해 수치해석모델을 이용하여 정상 침투해석을 수행하였다. 수치해석에 앞서, 1차원 침투이론에 바탕하여 석션 케이스 이 받는 하중을 명시적으로 제시하였다. 또한 간극수압의 변화를 분석하기 위해 석션 케이스의 관입 깊이, 투수 이방성, 석션압 크기를 달리하여 매개변수 연구를 수행하였다.

2. 연구방법

본 연구는 간극수 흐름이 충분히 느리게 발생하는 지반을 대상으로 한다. 또한 기본적으로 지반의 등방성 및 균질성과 간극수가 이상유체(ideal fluid: 비압축성, 비점성, 비회전성)의 특성을 갖는다고 간주하였다. 이에 근거하여 연속방정식(continuity equation)에 대해 Darcy의 흐름법칙을 적용한 침투방정식을 사용하였다.

2.1 1차원 침투이론을 이용한 석션 케이스 작용 하중 평가

석션 케이스 인입의 간극수 흐름을 단순화하면 각각 Fig. 1과 같이 1차원 상향 및 하향 침투로 고려할 수 있다. 간극수 흐름이 충분히 느리므로, Bernoulli의 정리에서 속도 수두 영향은 무시된다. Fig. 1의 A점과 F점을 지나는 선을 기준면(datum)으로 설정하면 Table 1과 같이 압력수두를 산정할 수 있다. 압력 수두를 이용하여 해수와 지반 영역에 대한 간극수압 변화를 수식화하면 Eqs. (1)~(4)와 같이 정리되며, 수압 변화를 가져오는 요인이 석션압, 정수압, 침투압을 명시적으로 확인할 수 있다. 각 수식은 석션압이 해수 및 지반 영역 전체에 걸쳐 일정하게 작용하며, 정수압과 침투압은 위치에 따라 선형적으로 변화됨을 보여준다. 또한 침투압이 동수경사 즉, 흙의 성질과 심도에 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

Inner sleeve

$$u = -p_0 + \gamma_w z \quad (\text{for water section}) \quad (1)$$

$$u = -p_0 + \gamma_w z + \gamma_w i_{in} (z - l_1) \quad (\text{for soil section}) \quad (2)$$

Outer sleeve

$$u = \gamma_w z \quad (\text{for water section}) \quad (3)$$

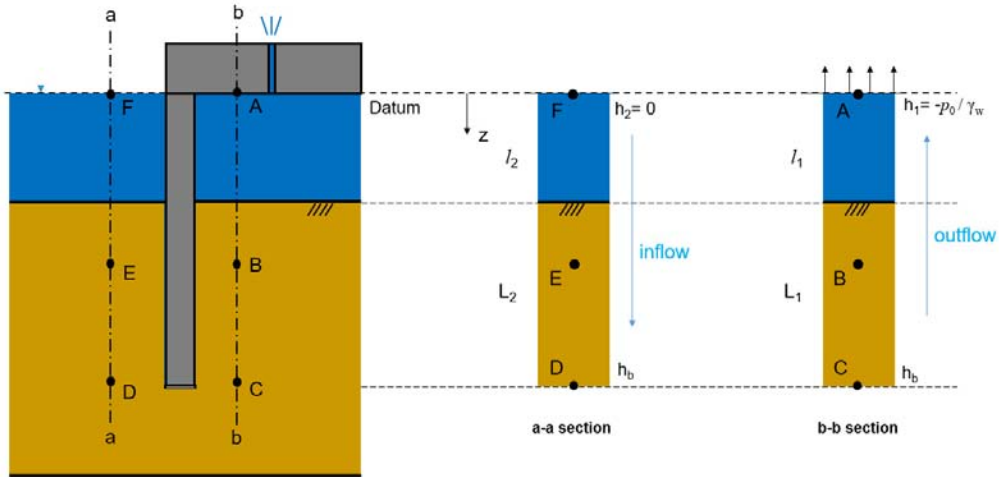


Fig. 1. One-Dimensional Seepage Model of Suction Caisson for Water Pressure Calculation

Table 1. Water Head Calculation

Point	Total head	Pressure head	Height head	Ref.
A	$-p_0/\gamma_w$	$-p_0/\gamma_w$	0	$i_{in} = \frac{h_b - h_1}{L_1}$
B	$-p_0/\gamma_w$	$-p_0/\gamma_w + z$	$-z$	
C	$-p_0/\gamma_w + i_{in}(z - l_1)$	$-p_0/\gamma_w + z + i_{in}(z - l_1)$	$-z$	
D	$i_{out}(z - l_2)$	$z + i_{out}(z - l_2)$	$-z$	$i_{out} = \frac{h_2 - h_b}{L_2}$
E	0	z	$-z$	
F	0	0	0	

$$u = \gamma_w z + \gamma_w i_{out}(z - l_2) \quad (\text{for soil section}) \quad (4)$$

Table 1과 Eqs. (1)-(4)에서 u 는 간극수압, p_0 는 석션압, γ_w 는 물의 단위중량, z 는 기준면으로부터의 거리, h 는 전수두, i 는 동수 경사, l 은 해수영역 높이, L 은 지반영역 높이이다.

2.2 유한요소법을 이용한 침투해석 모델

1차원 침투이론에 의한 간극수압 변화 분석은 석션 케이슨 벽체에 작용하는 수압 크기 및 분포에 대한 명확한 근거를 제시하나, 실제적인 값을 제공하는데 한계가 있으며 케이슨 선단부에서의 급격한 수압 변화를 묘사할 수 없다. 이러한 이유로 유한요소모델을 이용해 석션 케이슨에 대한 침투해석을 수행하고 이를 통해 케이슨 벽체에 작용하는 간극수압 변화를 조사하였다.

침투 지배방정식은 포물형 편미방정식(parabolic partial differential equation)이므로, 시간이 경과됨에 따라 초기 조건의 영향이 미미하고 경계조건의 영향이 지배적인 대표적인 unsteady diffusion 문제에 해당된다. 따라서 본 연구는 석션 케이슨의 관입을 몇 단계로 구분하고 각각에 대한 정상 침투해석을 수행하였다. 석션압에 의한 침투 특성과 석션 케이슨의 기하형상을 고려하기

위해, ABAQUS의 coupled pore fluid diffusion and stress analysis 모듈을 이용하여 해석모델을 생성하였다. 해석모델은 축 대칭성을 고려해 축대칭 형상함수를 갖는 4절점 요소(CAX4P)를 사용하였다. 이 요소는 각 절점 당 2개의 변위 자유도와 1개의 구속압(수압) 자유도를 갖는다. 그러나 본 연구의 목적이 침투에 의한 간극수압 분석에 있으므로, 해석모델의 요소의 모든 절점 변위 자유도는 구속되었다.

본 연구는 대형 석션 케이슨(직경: 20 m, 높이: 15 m, 두께: 20 cm)이 서남해의 위도 및 안마도 인근 해저 지반에 설치된다고 가정하여 지반의 침투 물성을 결정하였다. 대상지역은 평균수심 10 m이며, 모래, 실트, 그리고 점토층이 혼재된 20~30 m 심도의 해상 퇴적층으로 이루어져 있다. 상층부는 느슨 및 연약한 모래 및 실트층이다(KEPRI, 2013). 위와 같은 내용을 반영하여 해석모델은 해수층과 사질층으로 구분하여 생성하였고, 해수와 지반의 포화상태 및 등방성을 가정하여 각각 투수계수 1 m/s와 0.005 cm/s를 적용하였다. 석션압의 크기는 150 kPa이며, 물의 단위중량은 10 kN/m³을 적용하였다.

침투 지배방정식은 원래 전수두(total head)를 변수로 갖는 Laplace 방정식인 반면, 사용된 해석모델의 변수는 수압이다. 그러

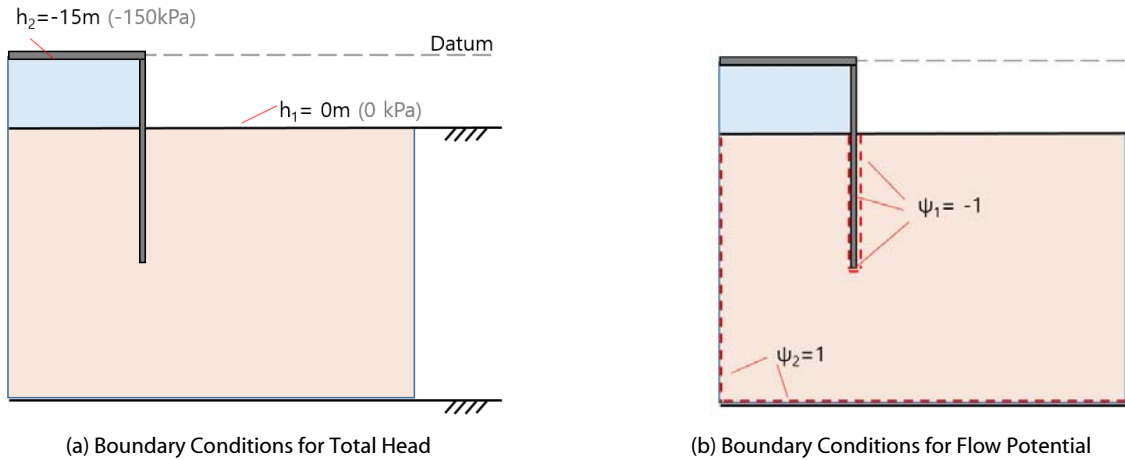


Fig. 2. Schematic Diagram of Axisymmetric Seepage Model for Boundary Conditions

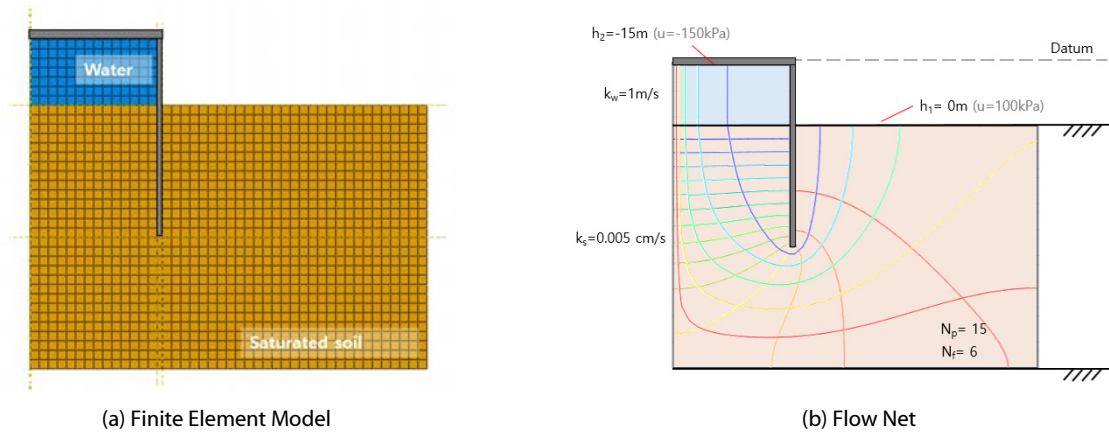


Fig. 3. Finite Element Model and Flow Net (Penetration Depth: 10 m)

나 전수두는 압력수두와 위치수두의 선형 합이다. 따라서 전수두에 상응하는 수압을 해석모델의 경계조건으로 부여하여 해석결과를 얻고, 여기에 정수압을 보정함으로써 케이슨 벽체에 작용하는 총 수압을 산출할 수 있다. 이를 근거로 Fig. 2(a)와 같이 경계조건을 석션 케이슨 상판과 해저면에 부여하였으며, 위치수두(정수압)에 대한 기준선(datum)이 케이슨 상판을 지나가도록 설정하였다. 참고로 Fig. 2는 석션 케이슨이 지중에 10 m 관입한 상태이므로, 실제 수압은 상판과 해저면에 대해 각각 -150 kPa, 100 kPa이어야 한다. 그러나 전수두를 수압 경계조건으로 대신한 것이므로 -150 kPa과 0 kPa이 적용된다. 한편 유선(flow line) 방정식 또한 Laplace 방정식이 되며, 침투 지배방정식의 해와 서로 직교해야 한다. 이러한 성질을 이용해 동일한 해석모델에 Fig. 2(b)와 같이 경계조건만 달리 적용하여 추가 해석을 실시하고 유선망을 도출하였다.

3. 해석결과

2.1절에서 확인한 바와 같이 석션 케이슨에 대한 1차원의 이론적 침투모델을 통해 평가된 간극수압 변화는 항상 선형적이다. 따라서 수치해석결과와 케이슨 내외부 지반에 대한 1차원 침투모델 결과를 비교하여 침투수압 변화의 비선형성을 분석하는 한편 설계모델로써 1차원 침투모델의 적정성을 평가하고자 하였다. 2차원 침투해석에서 얻어진 케이슨 선단의 내외측벽의 전수두는 각각 -4.37 m와 -3.22 m이었으므로, 평균값인 -3.8 m를 1차원 이론해의 하단의 경계값으로 적용하고 이때의 간극수압 변화를 계산하였다. 해석모델의 기하 및 격자망은 Fig. 3(a)와 같다.

석션 케이슨의 관입깊이가 10 m일 때의 해석결과를 중심으로 침투 특성을 분석하고 1차원 침투해와 비교하였다. Fig. 3(b)의 유선망은 케이슨 내부 및 벽체 선단에서 흐름의 급격한 수두 손실이 발생하는 반면, 케이슨 외벽에 인접한 지반에서의 손실 수두 경사는

완만하게 발생됨을 보여준다. 이는 석션 케이스의 상방 침투 구간의 수압 변화가 큰 것을 의미한다. 또한 이 구간에서 등수두선의 간격이 비교적 일정하게 나타나고 있기 때문에 침투압의 영향이 거의 선형적임을 알 수 있다. 실제로, 내/외벽체에 인접한 지반의 간극수압을 해석모델로부터 산출해 Fig. 4와 같이 나타내면, 케이스 내부는 벽체와 선단에 걸쳐 거의 선형적인 수압변화가 발생하고 수압의 절대크기는 양의 방향으로 크게 증가함을 알 수 있다. 반면 케이스 외부는 상대적으로 선단에서 큰 비선형성이 관찰된다.

Table 2는 1차원 이론해와 2차원 축대칭 해석모델을 통해 얻은 수압 변화를 정리한 것이다. 케이스 선단에서의 수압 변화의 비선형성을 확인하기 위해 관찰점의 간격을 선단 근처에서 보다 조밀하게 하였다. 만약 침투압을 무시하고, 석션압과 정수압만 고려했다면 케이스 선단에서의 압력은 내/외벽체에 대해 각각 0과 200 kPa이어야 한다. 그러나 침투해석 결과를 통해 확인할 수 있듯이, 침투압을 고려함으로써 선단에서의 압력은 각각 106.30 kPa과 167.84 kPa로 크게 달라진다. 한편, 해석결과는 침투압을 고려한 1차원 해가 2차원 축대칭 모델에 비해 침투압의 영향을 과대평가하고 있음을

보여준다. Table 2에서 A-B, A-C 간의 수압 차이가 침투압의 크기를 의미하는데, 케이스 내외에 작용하는 수압 모두 A-B간 차이가 더 크다. 이는 케이스 외부의 침투압 변화가 더 큰 비선형성을 갖기 때문으로 분석된다.

1차원 이론해를 통해 알 수 있듯이, 케이스 벽체에 작용하는 수압은 석션에 의한 등분포하중, 정수압, 침투압으로 구성되며, 이들의 합은 축대칭 수치모델에 의한 해석결과와 전반적으로 유사한 값을 보여준다(Table 2). 그러나 기존 연구(Madsen et al., 2013; Kim et al., 2018a)는 정수압만 고려하고 침투압의 영향을 무시하였다. 또한 석션에 의한 등분포하중을 벽체 전 구간이 아닌 해수영역에 대해서만 적용하였다(Fig. 5(a)). 이는 작용 외력을 과소평가한 부분이다. 따라서 구조해석에 적용되는 외력으로써, 정수압뿐만 아니라 석션에 의한 등분포 하중을 케이스 내벽 전체에 적용하고, 침투압 또한 반영하는 것이 필요하다 판단된다(Fig. 6(a)). 이 때, 상/하향 침투압은 각각 정수압을 증가, 감소시키는 방향으로 작용되므로 침투압 적용 시 주의가 필요하며, 침투압 분포의 비선형성이 석션압 크기, 석션 케이스의 관입깊이에 따라

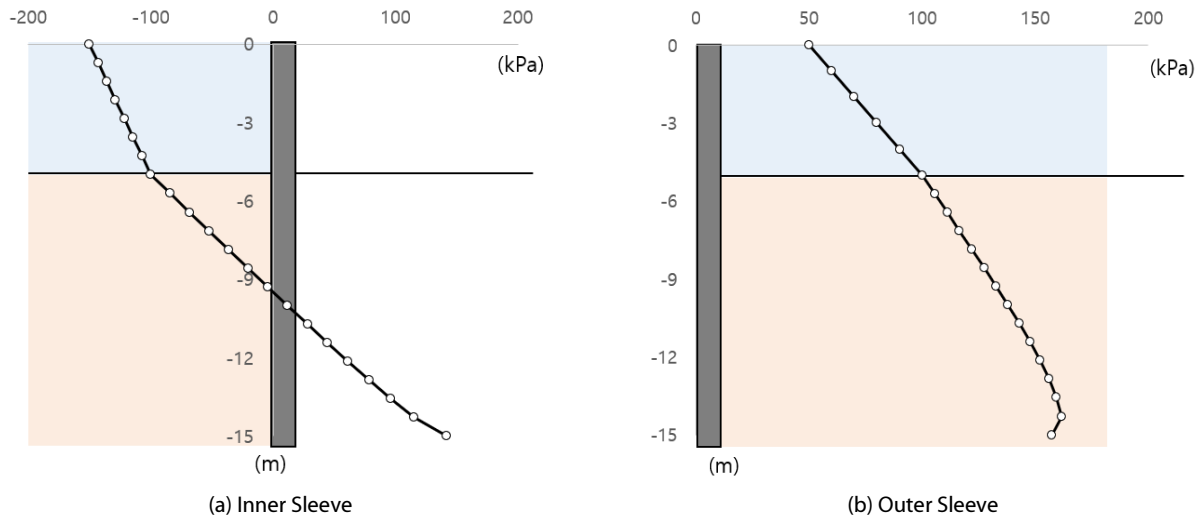


Fig. 4. Total Water Pressure Axisymmetric Seepage Model for Boundary Conditions

Table 2. Comparison Total Water Pressure on Inner and Outer Sleeves. A: 1D Solution without Seepage, B: 1D Solution with Seepage, C: Axisymmetric Seepage Model

			Position (m)					
			-5.0	-10.0	-12.9	-13.6	-14.3	-15.0
Total water pressure (kPa)	Inner sleeve	A	-100.0	-50.0	-21.0	-14.0	-7.0	0.0
		B	-100.0	6.0	67.5	82.3	97.2	112.0
		C	-100.0	-3.5	53.5	68.6	84.7	106.3
	Outer sleeve	A	100.0	150.0	179.0	186.0	193.0	200.0
		B	100.0	131.0	149.0	153.3	157.7	162.0
		C	100.0	140.9	161.8	166.0	169.4	167.8

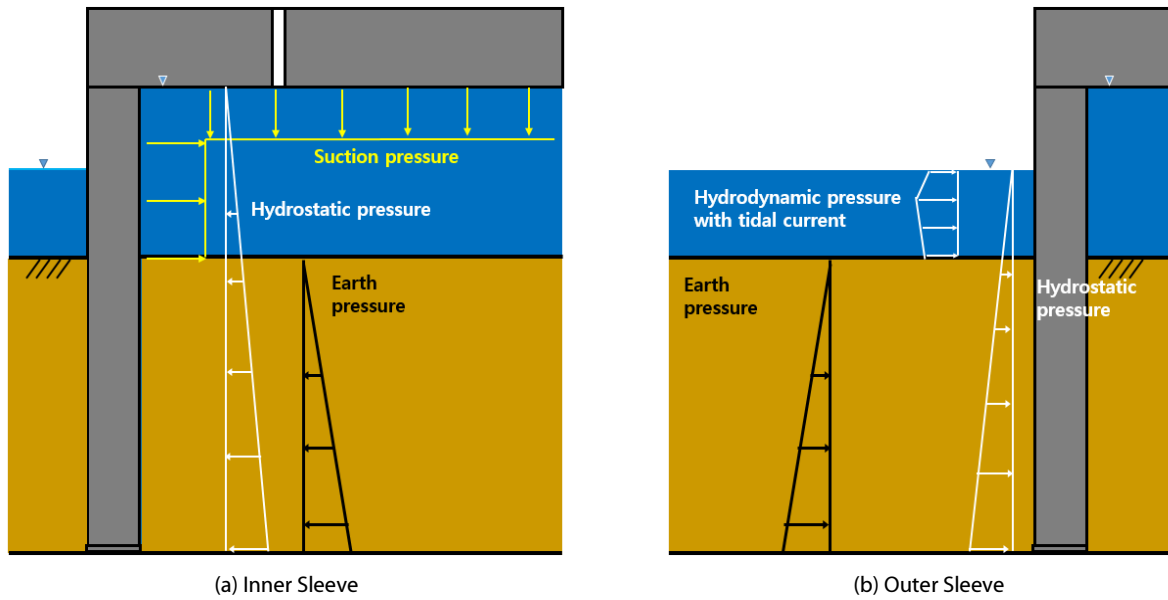


Fig. 5. Conventional Load Distribution on the Surface of Suction Caisson

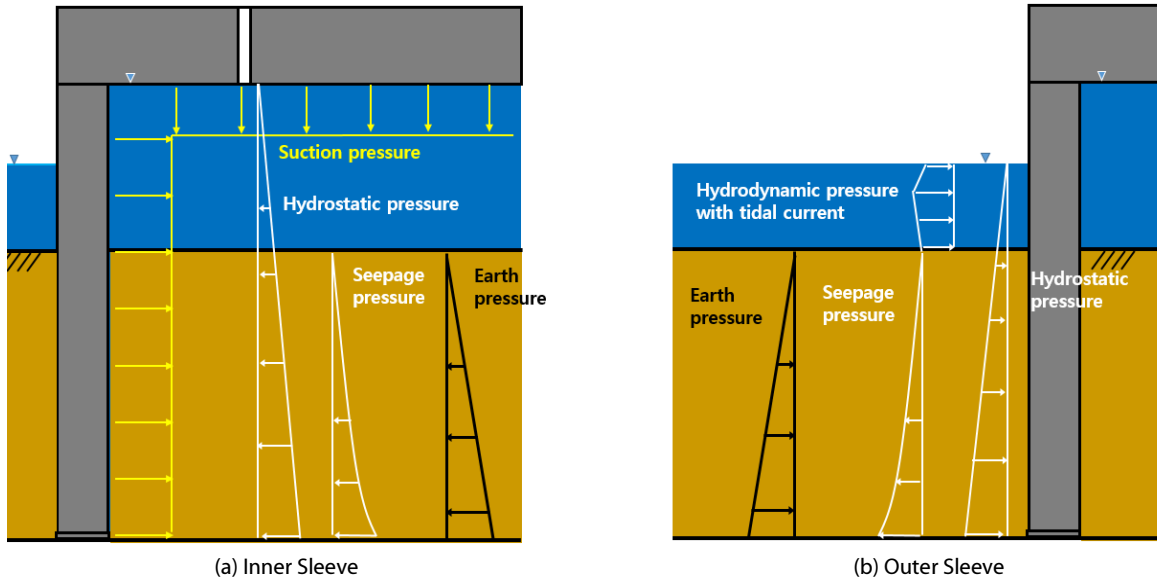


Fig. 6. Proposed Load Distribution on the Surface of Suction Caisson

달라지는 것에 유의해야한다. 외력 분포의 선형성 및 크기 변화에 대한 상세 논의는 4절의 매개변수연구에서 다룬다.

4. 매개변수연구

3장에서 사용된 해석모델을 이용하여 석션 케이슨 관입 깊이, 수평/수직 투수계수 비 영향, 그리고 석션압 크기 영향을 분석하기 위한 추가 해석을 수행하였다. 이 때, 석션압 150 kPa이 재하된

케이슨이 10 m 관입된 상태를 모사한 해석모델을 기본모델로 하였다.

높이 15 m의 석션 케이슨의 관입 깊이를 각각 5 m, 10 m, 15 m로 가정하여 침투해석을 수행하고, 각 경우에 대한 수압분포를 비교 분석하였다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 케이슨 내/외벽 모두에 대해 관입깊이가 깊어짐에 따라 수압 변화율이 완만해졌으며, 이러한 경향은 내벽에 작용하는 수압에 대해 더 명확하게 관찰되었다. 특히 5 m 관입 시, 간극수압의 비선형적 변화가 두드러졌으며,

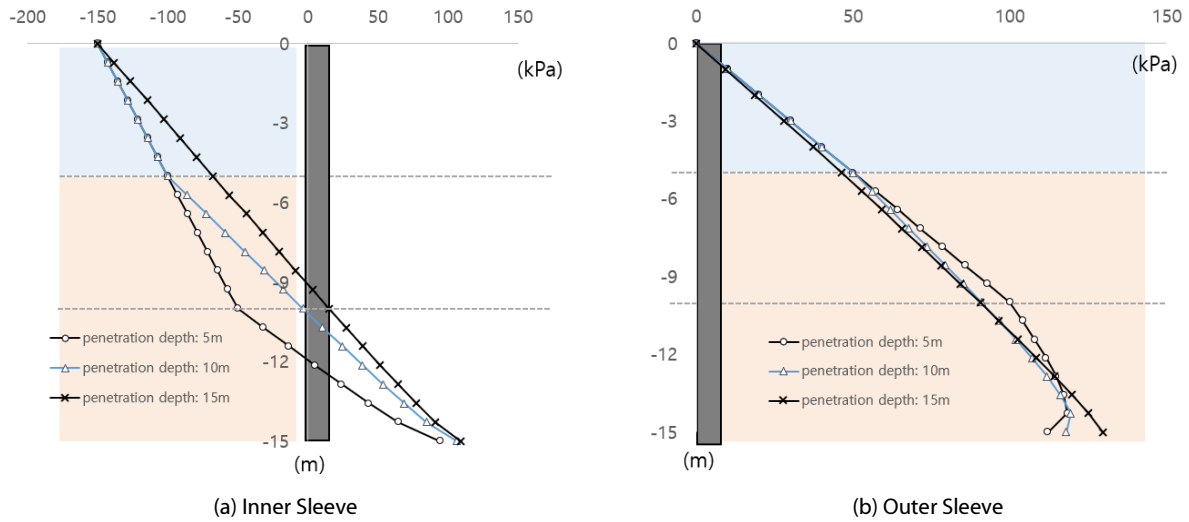


Fig. 7. Comparison with Water Pressure Profiles: Change in Penetration Depth

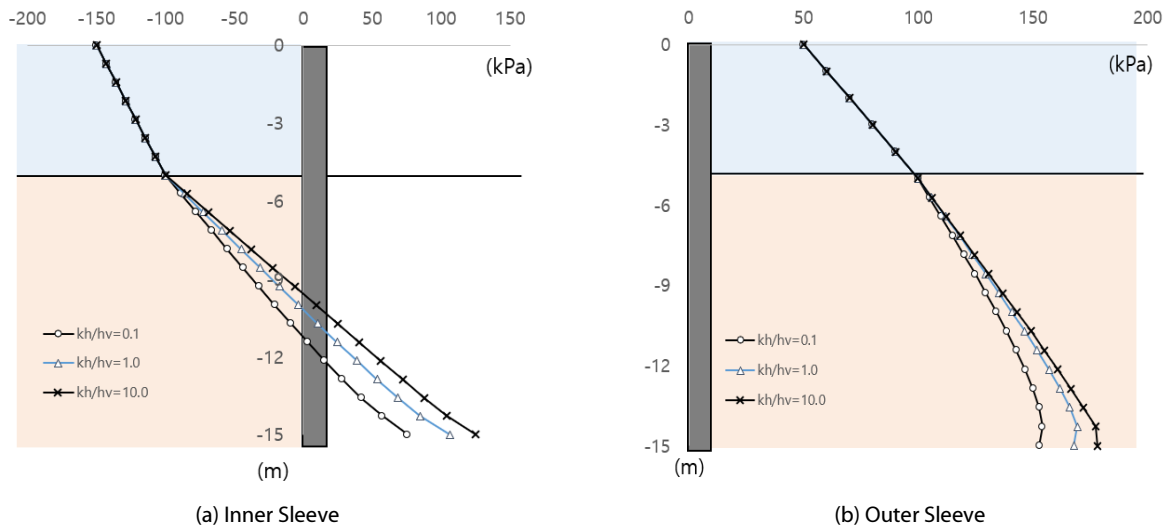


Fig. 8. Comparison with Water Pressure Profiles: Change in Horizontal Permeability

이는 케이스 상판과 해저면에 적용된 상이한 경계조건이 좁은 영역에 충족되어야 하기 때문으로 분석된다.

지반의 수평 투수계수의 크기를 수직 투수계수(0.005 cm/s)의 0.1, 1.0, 10.0배로 달리하여 침투해석을 수행하고 이때의 수압분포를 비교하였다. Fig. 8에 나타난 바와 같이 수평 투수계수가 감소할수록 벽체에 작용하는 수압이 작아지는 경향을 확인할 수 있다. 석션압과 정수압은 투수계수 변화와 무관하므로, 수압변화는 침투압에 기인함을 알 수 있다. 만약 수평 투수계수가 매우 작아지면 실제적으로 1차원 흐름상태가 될 것이며, 벽체에 작용되는 수압은 정수압으로 수렴하게 됨을 추측할 수 있다. 그러나 일반적으로 실제 현장에서의 수평 투수계수는 일반적으로 수직방향에 비해

상당히 크므로(10배 수준), 케이스 벽체에 작용하는 수압은 정수압보다 크게 작용할 수 있다. 한편, 수압 크기와 달리 수평 투수계수의 변화가 수압의 분포형상에 별다른 영향을 미치지 못하는 것을 확인할 수 있다.

석션압 크기를 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa로 달리하여 수압분포를 비교하였다. Fig. 9에서 확인할 수 있듯이, 내벽에 작용하는 수압은 해수층에서 석션압의 변화만큼 단순히 수평이동한 것과 동일하였으나, 지반층에 대해서 서로 다른 수압 변화율을 가지고 변화됨을 확인할 수 있다. 이는 케이스 관입깊이에 대한 매개변수 연구결과와 마찬가지로 경계조건에 부여된 전수두(수압) 조건을 충족하기 위한 것으로 분석되며, 이는 수압 변화가 내외벽간의

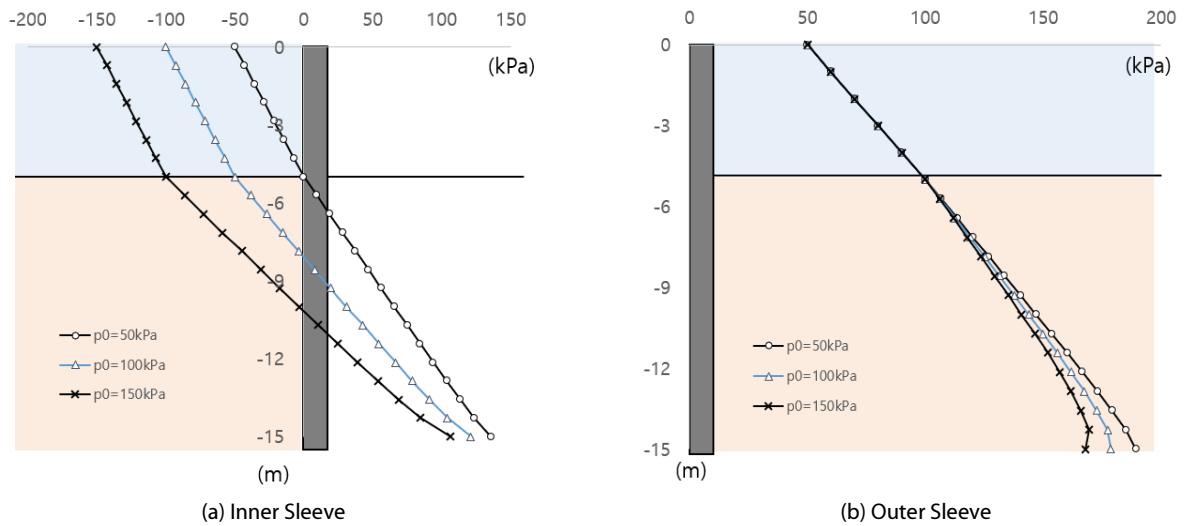


Fig. 9. Comparison with Water Pressure Profiles: Change in Suction Pressure

압력차뿐만 아니라 케이슨의 기하 특성에 크게 좌우되는 것을 의미한다.

5. 결론

본 연구는 침투해석을 통해 석션 케이슨의 단면설계를 위한 수압 크기 및 분포를 분석하였다. 먼저 1차원 침투이론을 통해 케이슨 벽체에 작용하는 수압 변화가 석션에 의한 내외부 압력차, 물의 자중, 침투력에 기인하는 것을 명시적으로 보였으며, 이를 수치 침투해석결과와 비교검토 함으로써 타당성을 확인하였다. 이 과정에서 석션 케이슨 내벽에 작용되는 수압이 거의 선형적 분포를 가지는 반면 외벽은 비선형성이 케이슨 선단을 중심으로 크게 발생됨을 확인하였다. 그리고 석션 케이슨의 관입깊이, 투수계수의 이방성, 석션압 크기를 달리하여 케이슨 벽체에 작용하는 수압 변화를 함께 분석하였다. 매개변수연구 결과로부터 수평 투수계수가 증가할수록 벽체에 작용하는 침투압 영향이 증대됨을 확인하였으며, 수압분포가 단순히 석션압의 크기에 의존적이 아니라 케이슨의 기하형상과 내외부의 수두차에 의해 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 이와 더불어 석션 케이슨 및 기초에 대한 구조해석을 다룬 기존 연구의 하중모델링이 침투압을 배제하고 석션압 분포영역을 축소 적용함으로써 구조해석 결과의 합리성이 결여될 개연성을 가지고 있음을 밝혔다. 다만, 구조모델의 해석요소 따라 기존에 적용된 하중모델링이 구조적으로 안전측인 해석결과를 적용할 가능성이 있다는 점에서 추가적인 검토가 필요할 것으로 판단된다. 그러나 모델링의 합리성 측면에서 본 연구에서 제시된 침투압의 영향 및 석션압 분포가 구조해석에 적용되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원의 “케이블교량 글로벌 경쟁력 강화를 위한 전주기 엔지니어링 및 가설공법 개발”과제의 지원을 받았습니다(과제번호: 16SCIP-B119960). 연구비지원에 감사드립니다. 본 논문은 2018 CONVENTION 논문을 수정·보완하여 작성되었습니다.

References

Bond, A. J., Schuppener, B., Scarpelli, G., Orr, T. L., Dimova, S., Nikolova, B. and Pinto, A. V. (2013). *Eurocode 7: Geotechnical Design Worked examples. In Workshop “Eurocode” (Vol. 7)*, Available at: https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/doc/2013_06_WS_GEO/report/2013_06_WS_GEO.pdf (Accessed: Jan. 8, 2019).

Boonyong, S., Park, K. C. and Kim, I. C. (2015). “Analytical parametric study on pullout capacity of embedded suction anchors.” *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 27, No. 3, pp. 182-189.

Cerfontaine, B., Collin, F. and Charlier, R. (2015). “Numerical modelling of transient cyclic vertical loading of suction caissons in sand.” *Geotechnique*, Vol. 66, No. 2, pp. 121-136.

Choo, Y. W., Olalo, L. and Bae, K. (2016). “Effect of skirt length on behavior of suction foundations for offshore wind turbines installed in dense sand subjected to earthquake loadings.” *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 28, No. 4, pp. 202-211 (in Korean).

Cotter, O. (2010). *Installation of suction caisson foundations for offshore renewable energy structures*, Ph.D. dissertation, Oxford University, UK.

Det Norske Veritas (DNV) (2005). *Geotechnical design and*

- installation of suction anchors in clay*. DNV Recommended Practice RP-E303, Høvik.
- Houlsby, G. T. and Byrne, B. W. (2004). *Calculation procedures for installation of suction caissons*. Report of University of Oxford, No. OUEL2268/04, University of Oxford, UK.
- Jin, Z., Yin, Z. Y., Kotronis, P. and Jin, Y. F. (2017). "Numerical analysis of a suction bucket penetrating in sand with a combined Lagrangian-SPH approach." *Procedia Engineering*, Vol. 175, pp. 189-196.
- Korea Electric Power Research Institute (KEPRI) (2013). *Interim design basis report: Test bed for 2.5GW off-shore wind farm at Yellow Sea*, Report No.:TM.9334. I2013.0703 (in Korean).
- Kim, B., Kim, Y., Jin, B., Bae, K. and Youn, H. (2016). "Numerical analysis on tilting control of suction pile for offshore wind power." *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 17, No. 9, pp. 5-12 (in Korean).
- Kim, D. J., Youn, J. U., Lee, K. Y., Jee, S. H. and Choo, Y. W. (2015). "Jacking penetration resistance of bucket foundations in silty sand using centrifuge modelling." *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 31, No. 1, pp. 25-35 (in Korean).
- Kim, J., Jeong, Y. J. and Park, M. S. (2018a). "Comparison between structural behaviors of suction foundation for offshore cofferdam considering the lid joint characteristics." *Proc. of the KAOSTS Conf.*, KAOSTS, pp. 79-82 (in Korean).
- Kim, J., Won, J., Kim, K. W. and Kim, M. K. (2017). "Penetration analysis of offshore wind turbine substructure foundation subjected to self-weight by a large deformation method." *Proc. of the KSCE Conf.*, KSCE, pp. 638-639 (in Korean).
- Kim, J. H., Lee, S. T. and Kim, D. S. (2018b). "Evaluation of soil disturbance due to bucket installation in sand." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 34, No. 11, pp. 21-31 (in Korean).
- Kim, K., Kwon, O., Oh, M. and Jang, I. (2014a). "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 (in Korean).
- Kim, S. (2014). *The development of finite element analysis technique to simulate the installation process of the suction caissons*, Master Thesis, Kyunghee Univ. (in Korean).
- Kim, S., Choo, Y. W., Kim, D. S. and Sung, H. G. (2013). "Capacity of horizontally loaded suction anchor installed in silty sand." *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 27, No. 1, pp. 59-66 (in Korean).
- Kim, S., Choo, Y. W., Kwon, O. and Kim, D. S. (2014b). "Numerical analysis of group suction anchor of parallel arrangement installed in sand subjected to pullout load." *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 30, No. 11, pp. 61-69 (in Korean).
- Kim, Y. S. and Jang, Y. S. (2011). "Analysis of load capacity and deformation behavior of suction pile installed in sand." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 27, No. 11, pp. 27-37 (in Korean).
- Lee, J. H., Lee, S. H. and Kim, S. R. (2013). "Horizontal bearing behavior of group suction piles by numerical analysis." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 29, No. 11, pp. 119-127 (in Korean).
- Madsen, S., Andersen, L. V. and Ibsen, L. B. (2013). "Numerical buckling analysis of large suction caissons for wind turbines on deep water." *Engineering Structures*, Vol. 57, pp. 443-452.
- Na, S. H., Jang, I. S., Kwon, O. S. and Lee, S. H. (2014). "Study on pullout behavior of embedded suction anchors in sand using ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) Technique." *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, Vol. 34, No. 1, pp. 167-173 (in Korean).
- Park, C. S., Lee, J. H., Baek, D. H. and Do, J. U. (2014). "Design for installation of suction piles in sand deposits for mooring of floating offshore structures." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 30, No. 10, pp. 33-44 (in Korean).
- Park, J., Park, D. and Han, Y. (2013). "Ultimate pullout bearing capacity of the suction pile using numerical analysis." *Proc. of the KGES KGES*, pp. 203-208 (in Korean).
- Ssenyondo, V., An, T. V. and Kim, S. R. (2017). "Numerical investigation on seepage stability of cut-off walls." *Proc. of the KSCE Conf.*, KSCE, pp. 1556-1557.
- Tassoulas, J. L., Maniar, D. R. and Gonzalo Vasquez, L. F. (2005). *Suction Caisson: Finite Element Modeling*. University of Texas, Austin.
- Yoon, S. Y., Jang, H. S., Kim, H. S. and Kwak, Y. M. (2013). "Undrained bearing capacity of suction foundation by numerical analysis." *Proc. of the KSCE Conf.*, KSCE, pp. 2658-2661 (in Korean).
- Zeinoddini, M., Mousavi, S. A. and Abdi, M. R. (2011). "Simulation of suction caisson penetration in seabed using an adaptive mesh technique." *Procedia Engineering*, Vol. 14, pp. 1721-1728.