부유식 해상구조물의 계류를 위한 사질토 지반의 석션파일 설계

Design for Installation of Suction Piles in Sand Deposits for Mooring of Floating Offshore Structures

박 철 수 ¹	Park, Chul-Soo	이 주 형 ²	Lee, Ju-Hyung
백 두 현 ³	Baek, Du-Hyun	도 진 웅 ⁴	Do, Jin-Ung

Abstract

The preliminary design of suction pile as the supporting system for concrete floating structures was performed for the pilot project of the southwest coast area in Korea. Prior to starting design work, site conditions of the area including ground and hydraulic conditions, and a 100-year return period external force were thoroughly evaluated. The suction pile for mooring of the offshore floating structures has to satisfy the lateral resistance against external force as well as the penetration ability according to the soil conditions such as soil types, shear strengths, effective stresses, and seepage forces. In the design, the required penetration depths, which were stable for lateral resistance, were evaluated with the diameters of cylindrical suction pile as the final installing ones. And the design suction pressures at each penetrating depths, at which sand boiling did not occur, were assessed through the comparison of penetration and penetration-resistance forces. As a result, it was impossible for suction piles with the diameter range of 3.0~5.0 m to penetrate into required penetration depths. On the other hand, suction piles with the diameter range of 6.0 m and 7.0 m satisfied both the horizontal stability and the penetration ability by design suction pressures at the required penetration depths of 8.5 m and 8.0 m, respectively.

요 지

본 연구에서는 국내 서남해 해상지역 시범사업의 부유식 콘크리트 해상구조물 계류를 위한 기초시스템으로서 석션파일을 적용하기 위한 예비설계를 수행하였다. 설계에 앞서 시범사업 대상지역인 서남해안에 대한 지반 및 수리 조건, 재현주기 100년의 환경외력 등 현장 조건을 면밀히 검토하였다. 석션파일은 설계하중에 대한 수평방향 지지력을 만족해야하고, 뿐만 아니라 지반종류 및 강도정수, 유효응력, 침투압 등의 조건에 따른 관입성 검토가 수행되어야 한다. 본 설계에서는 석션파일 직경에 따라 설계외력에 대해 수평방향 안정성을 확보할 수 있는 목표 침설깊이를 설정하고, 침설단계별로 상한석션압 이내에서 관입력과 관입저항력 비교를 통해 설계석션압을 산정하였다. 검토결과 직경 3.0~

- 1 정희원, 한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Geotechnical Engrg. Research Div., Korea Institute of Civil Engrg. and Building Technology)
- 2 정희원, 한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실 연구위원 (Member, Research Fellow, Geotechnical Engrg. Research Div., Korea Institute of Civil Engrg. and Building Technology, Tel: +82-31-910-0563, Fax: +82-31-910-0561, leejh73@kict.re.kr, Corresponding author, 교신저자)
- 3 정희원, 한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실 전문연구원 (Member, Research Specialist, Geotechnical Engrg. Research Div., Korea Institute of Civil Engrg. and Building Technology)
- 4 정희원, 한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실 연구보조원 (Member, Research Specialist, Geotechnical Engrg. Research Div., Korea Institute of Civil Engrg. and Building Technology)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2015년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2014 by the Korean Geotechnical Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

5.0m 석션파일의 경우 목표 깊이까지 침설이 불가능하였고, 직경 6.0m와 7.0m 석션파일은 각각 침설깊이 8.5m와 8.0m에서 수평방향 안정성 및 설계석션압에 의한 침설을 모두 만족함을 확인하였다.

Keywords : Design suction pressure, Penetration force and resistance, Lateral loading capacity, Seepage force, Effective stress

1. 서 론

세계적으로 지상공간 고갈 및 육상공간 활용이 제한되는 등 해양공간에 대한 관심이 급증하고 있으며, 이에 따라 해양공간의 이용 및 해양자원 개발 등을 목적으로 다수의 해양 구조물의 건설이 추진되고 있다. 국내에서도 비교적 수심이 깊은 해상 조건에서 LNG 터미널 개발을 검토하는 등 부유식 해상인프라 건설기술 확보가 시급한 실정이다. 부유식 구조체는 장비운용의 제약이나 경제성 등의 이유로 항타말뚝이나 현장타설 말뚝 대신 앵커와 계류시스템(mooring system)이 조합된 형태로 기초를 설계한다. 부유식 해상구조물로 사용되는 앵커 및 기초로는 드래그앵커(drag anchor), 석션파일(suction pile) 등이 있으나, 지지력 산정 및 시공에 불확실성 등을 감안하여 석션파일이 주로 사용되고 있다. 일반적으로 석션파일은 기초 직경의 제공에 비례하는 관입력을 충분히 활용하기 위해 대구경으로 시공되고 있으며 길이대 직경비(L/D)가 6을 넘지 않는다(Randolph et al., 2005; Andersen et al., 2005). 최근 제작 및 설치 비용이 큰 기존의 대구경 단일형 석션파일의 대안으로 중구경 석션파일과 콘크리트 파일캡(pile cap)을 이용한 그룹형 석션파일에 관한 설계 및 시공기술 개발이 진행 중에 있으며 국내 서남해 해상 지역을 대상으로 시범사업(pilot project)이 검토되고 있다. 따라서 본 연구에서는 부유식 구조물의 계류를 위한 기초시스템으로 석션파일을 적용하기 위해 중구경 단일 석션파일에 대한 예비설계를 수행하였으며, 석션파일의 직경, 길이, 석션압 등에 따라 관입력, 관입저항력, 횡방향 지지력을 검토하였다.

2. 설계조건

2.1 설계하중

설계에 적용할 계류시스템의 설계하중(design force)은 설계풍속, 설계조류속, 유의파고 및 유의파주기 등의 조건으로 산정한 표류력(drift force)에 부유 구조물의 운동 및 계류시스템의 연성에 의한 동적 효과를 반영하기 위해 해당 지역의 해상환경을 고려한 동적증폭계수(DFA, Dynamic Amplification Factor)를 곱하여 산정해야 한다. 본 설계에서는 서남해 지역에 대한 동적증폭계수를 별도로 산정하지 않았으며, 예비설계 단계임을 감안하여 표류력을 설계하중으로 적용하기로 한다. 그러나 석션파일의 수평지지력 검토시 소정의 안전율(F.S=2.5)을 적용하였고 계류라인의 자중(단위길이당 수중무게 0.07~6.4kN/m) 등이 설계하중의 상당 부분을 분담할 것으로 예상되므로 표류력을 설계하중으로 적용하는 데에 크게 무리가 없을 것으로 판단된다. 참고로 국내 문헌(Park, 2009)에서는 서아프리카 해역을 대상으로 동적증폭계수를 1.6으로 제시한 바 있고, 본 예비설계와 관련한 연구(Jeong et al., 2013)에서는 서남해지역 설계하중 산정시 이를 적용하고 있다.

표류력 즉, 예비설계 단계의 설계하중 산정을 위해 기존 문헌(Kim et al., 1988; Korea Electric Power Corporation, 2000; Korea Institute of Energy Research, 2003)을 인용하여 설계풍속 36.6m/sec, 설계조류속 1.2m/sec, 유의파고 5.4m/sec, 유의파주기 8.5sec을 적용하였으며, Table 1과 같이 재현주기 100년의 조류하중, 풍하중, 파랑하중을 각각 산정하고 전체 표류력을 6,748kN으로 결정하였다. 부유식 구조물의 계류라인은 네 개의 방향으로

Table 1. Environment external force of concrete floating structure

Current force (kN)	Wind force (kN)	Wave force (kN)	Total drift force (kN)
1,342	2,759	2,647	6,748

Fig. 1. Floating system and design force under disturbed conditions

설치되며 설계하중은 Fig. 1과 같이 하중작용 반대방향의 Anchor B에 위치한 2개의 계류라인에서 저항하므로 석션파일 수평안정성 검토시 적용할 하중은 3,400kN 이다. 하중계산 과정은 본 예비설계와 관련한 연구보고서 (Jeong et al., 2013)에 상세히 기술되어 있어 생략하도록 한다.

2.2 지반조건

Pilot project 대상 위치는 전라남도 신안군 일원 해상으로 1개소의 시추조사 및 CPT(1.0~3.0m), SPT(6.0~10.0m)를 수행하였으나, 콘저항치의 경우 과대하게 평가되어 본 연구에서는 SPT N값을 토대로 설계에 필요한 지반정수를 산정하였다. 지반조사결과 지층상태는 해성퇴적층으로서 실트질 모래(SM)로 구성되어 있으며, 표준관입시험이 수행된 해저면으로부터 6m 이하의 N값은 21/30~31/30으로 보통조밀~조밀한 상대밀도를 나타내었다. 설계적용 물성치는 N값, 경험식 및 문헌값 (Korean Geotechnical Society, 2009) 및 석션기초구조물 기술매뉴얼(Coastal Development Institute of Technology, 2003)을 참조하여 내부마찰각 $\phi=27^\circ$, 점착력 $c=0$, 포화 단위중량 $\gamma_{sat}=20.0\text{kN/m}^3$ 으로 산정하였다.

3. 석션파일 설계

본 설계검토는 기초 직경별로 설계외력에 대해 수평방향 안정성을 확보할 수 있는 최소 근입깊이를 목표 침설깊이(d_R)로 설정하고, 목표 침설깊이까지 상한석션압 이내에서 관입이 가능한지를 검토하는 순으로 수행하였다. 설계석션압은 상한석션압 이내에서 관입저항력

을 극복하도록 하는 기초 침설시 적용 석션압이며 침설 단계별로 산정한다. 여기서 침설이란 석션압에 의해 기초를 지반 내로 근입시키는 것을 의미하며 그 깊이를 침설깊이 d_f 로 정의한다.

3.1 수평방향 안정성 검토를 통한 목표 침설깊이

사질토 지반에 근입된 석션파일의 수평방향 지지력에 대한 연구사례는 많지 않으나, Allersma et al.(2000)은 원심모형실험과 수치해석을 수행하여 사질토 지반에 근입된 석션파일의 수평방향 지지력이 API(1991)에서 제안한 p - y 곡선법의 지지력과 유사하다고 제안한 바 있다. 또한 회전 자유조건에서 석션파일의 수평방향 거동이 말뚝머리 회전 자유조건인 짧은말뚝 거동과 유사하므로 Broms(1964)가 제안한 식의 적용도 가능할 수 있다. 본 예비설계에서는 API(1991) p - y 곡선법을 이용하여 기초 침설에 따른 수평방향 지지력을 산정하고 목표 침설깊이를 결정하였다.

API(1991) 방법은 여러 시방서에서 채용하고 있는 방법으로서 많은 현장시험 결과와 비교하여 적용성이 검증된 바 있다. 일반적으로, p_u 를 산정하는 절차는 Reese의 방법과 유사하며, k 값을 결정하는 절차에서 차이가 난다. p - y 곡선은 다음 식 (1)~(3)을 이용하여 구할 수 있다.

$$p = Ap_u \tanh\left(\frac{kz}{Ap_u}\right) \quad (1)$$

$$p_{us} = (C_1z + C_2D) \gamma' z \quad (\text{for shallow depths}) \quad (2)$$

$$p_{ud} = C_3D \gamma' z \quad (\text{for deep depths}) \quad (3)$$

여기서, A : 주기나 정적하중에 대한 계수(반복하중:

$$A=0.9, \text{ 정적하중: } A=3.0-0.8\frac{z}{D} \geq 0.9)$$

p_u : 깊이 z 에서 극한 수평지지력(kN/m)(식 (2)

와 식 (3) 중 작은 값 적용)

k : 초기 지반반력계수(kN/m³)(Fig. 2(b) 참조)

D : 말뚝의 직경(m)

γ' : 흙의 유효단위중량(kN/m³)

C_1, C_2, C_3 : Fig. 2(a)에서 내부마찰각의 함수

ϕ' : 흙의 내부마찰각(°)

석션파일의 경우 하중의 재하위치와 재하각도에 따라 수평지지력이 상이하지만 본 논문은 예비설계 단계로서 강제기초 제원에 따른 석션파일의 침설 가능여부를 검토하는데 중점을 두고 있으므로 석션파일에 작용하는 하중의 위치를 기초 인발 및 수평저항에 유리한

최적위치(optimal point)로, 재하각도를 0° 즉, 수평하중이 작용하는 것으로 가정하였다.

수평방향 설계하중을 만족하는 석션파일의 직경별 목표 침설깊이(d_R)는 Table 2와 같고, 기초 길이(L)는 침설시 기초 내부 용기량을 고려하여 목표 침설깊이에 0.5m를 추가하여 결정하였다.

3.2 설계석션압 산정

3.2.1 설계석션압 산정 흐름 및 개요

석션파일은 기초 내부의 물을 강제배수시켜 발생하는 기초 내외부 수압차에 의해 수중 지반 속에 침설한 기초를 의미한다. 석션파일 침설 초기에는 관입저항력 대비 기초의 수중 중량이 클 경우 수중 지반 표층에서 기초 자중에 의해 침설(자침)하고 이후 석션압으로 침설하게 된다. 석션파일 설계 및 설계석션압 산정에 앞

Fig. 2. Coefficients and initial modulus of subgrade reaction as function of ϕ'

Table 2. Determination of required penetration depths for lateral capacity of suction pile

Pile diameter, D (m)	Wall thickness of steel pile, t (mm)	Design lateral load (kN)	Allowable lateral load capacity (kN)	Required penetration depth, d_R (m)	Pile length, $L (=d_R+0.5)$ (m)
3.0	18.0	3,400	3,590	9.5	10.0
4.0	24.0	3,400	3,600	9.0	9.5
5.0	30.0	3,400	3,550	8.5	9.0
6.0	36.0	3,400	3,940	8.5	9.0
7.0	42.0	3,400	3,710	8.0	8.5

서, 침설 단계별로 검토되는 상한석선압, 소요석선압, 설계석선압 등의 용어에 대한 이해가 필요하다. 소요석선압은 기초를 침설하기 위해 필요한 최소의 석선압 즉, 지반의 관입저항을 극복하는데 필요한 석선압이며 침설 석선압의 하한 한계를 의미한다. 한편, 설계석선압은 부재의 설계 및 기초의 침설관리에 사용하는 석선압이며, 지반의 관입저항에 대해 여유(관입력의 할증 $S \cdot F_R$)를 고려하여 설정한다. 작용가능 석선압은 시공상 작용시킬 수 있는 최대 석선압으로, 해수면에서 기초 상판까지의 수두차에 상당하는 석선압이다. 그러나 소요석선압을 초과하는 설계석선압을 최대 석선압까지 모두 작용시킬 수 있는 것은 아니다. 내부 토사 조건에 따라 일정 석선압에서 내부 토사가 불안정해져 sand boiling이

Fig. 3. Conceptual relationship of suction pressures

Fig. 4. Penetration force (F_D) and resistance (F_R) of suction pile

Fig. 5. Flow chart of determining the design suction pressure

나 clay plugging이 발생하게 되는데, 이를 피하기 위해 설계과정에서 지반조건 및 침투압을 감안하여 석선압 상한값을 설정한다. 이것이 상한석선압이며 설계석선압은 상한석선압 이내에서 조절되어야 한다. Fig. 3에서 각 석선압에 대한 관계를 개념적으로 보여주고 있다.

석선파일 설계 흐름 중 매우 중요한 과정은 석선파일 구조형식, 시공조건 및 지반조건을 충분히 고려한 설계 석선압의 산정이다. 이때 석선압 증가에 따른 관입력 (F_D)의 증가와 기초내부 침투류 발생에 의한 관입저항력 (F_R)의 감소를 적절히 평가해야 하며 Fig. 4에 나타난 바와 같이 관입력과 관입저항력의 힘의 균형으로부터 석선파일 침설에 필요한 설계석선압을 구한다. 여기서,

p_s 와 p_t 는 기초 내부 및 선단부의 석션압이고, $W+Q$ 는 기초자중 및 추가 상재하중, p_{fi} 와 p_{fo} 는 기초 측벽 내측 및 외측의 주면저항, q_t 는 기초 측벽의 선단저항이다. 본 예비설계의 설계석션압 산정은 석션기초구조물 기술매뉴얼(Coastal Development Institute of Technology, 2003)의 방법을 대부분 준용하였다.

Fig. 5는 설계석션압 산정과정이며 이와 같은 일련의 과정을 침설단계별로 수행하고 단계별 침설완료시 침설깊이(d_f)에 대해 설계석션압을 구한다. 설계석션압 산정의 첫 번째 단계로, 해수면으로부터 기초상판 즉, 기초내부의 수두차를 감안하여 작용가능 석션압 이내로 소정의 기초 내부 석션압(p_s)을 가정하고 침설비에 따른 기초선단 석션압 비(p_t/p_s)로부터 기초선단부의 석션압(p_t)을 결정한다. 두 번째 단계로, 가정한 기초 내부와 선단부의 석션압, 작용면적, 기초의 유효중량 및 상재하중을 이용하여 석션파일의 관입력을 계산한다. 세 번째 단계로, 석션파일 내외부의 동수경사(i) 및 기초 내부 지반 용기량(δ)의 결정, 그리고 이를 이용한 관입저항력의 산정이다. 기초내부의 지반 용기량은 침설시 기초 측벽이 밀어내는 토량 중 기초 내부로 밀어내는 토량에 의한 것으로, 일반적으로 사질토의 경우 흙의 압축량을 무시하고 전량이 기초 내부로 들어간 것으로 간주한다.

3.2.2 침설에 따른 유효응력 변화와 관입저항력

관입저항력은 기초 선단부의 선단저항력과 기초 내측 및 외측의 주면저항력을 모두 고려하며, 석션압 작용시 유효응력의 변화를 고려해야 한다. 기초 외측의 유효응력은 기초 외측의 동수경사 i_{out} 에 의한 하향 침투압을 고려하고, 기초 내측의 유효응력은 상향 침투압을 고려한 유효응력에 기초 침설시 기초 측벽이 내부 지반을 하향으로 끌어내리는 주면저항력을 추가하여 식 (4)와 같이 산정한다. Fig. 6은 기초 내측 흙 요소에 작용하는 응력 관계를 보여주고 있으며, 하향력에 의한 응력증가는 주면저항력/저판면적으로 고려하여 반영한다. 식 (4)

Fig. 6. Equilibrium of soil-slice within suction pile

에서 알 수 있듯이 기초 내측 주면저항력에 의한 응력증가는 결국 기초 내측 유효응력에 의해 결정되므로 실용상 반복 수렴계산을 통해 기초 내측 유효응력을 산정하게 된다.

$$\sigma'_{v in} = (\gamma' - i_{in} \gamma_w) z + \frac{\int_0^z p_{fi} (\pi D_i) dz}{(\pi D_i^2 / 4)} \quad (4)$$

여기서, $\sigma'_{v in}$: 기초 내측 유효응력(kN/m²)

p_{fi} : 기초 내측 주면저항력($= \mu K_o \sigma'_{v in}$)(kN/m²)

μ : 강제기초 내측 벽면 마찰계수($= \tan(2/3\phi)$)

K_o : 정지토압계수

γ' : 흙의 유효단위중량(kN/m³)

i_{in} : 기초 내측 동수경사

z : 기초 내측 용기량(δ)을 포함한 침설깊이($= d_f + \delta$) (m)

D_i : 기초 내경(m)

사질토 지반의 침설시 기초 측벽 내측, 외측 주면저항 산정에 있어 기초 내측, 외측의 유효응력뿐만 아니라 마찰계수와 정지토압계수가 중요한 설계인자가 된다. 석션파일의 경우 침설시 주면저항은 변위량이 큰 경우의 값을 대상으로 한다. 따라서 일반적인 기초 지지력 산정에서의 주면저항과는 다르기 때문에 마찰계수, 정지토압계수를 현장시험으로 구해야 한다. 일본에서는 가고시마항, 나오에쓰항의 실증사례와 실내모형실험 등을 통해 사질토의 토압계수와 마찰계수를 검증하였으며 그 범위는 경우에 따라 기초내측과 외측을 구분하여 토압계수는 0.5~3.0, 마찰계수는 $\tan(2/3\phi) \sim \tan(1.03\phi)$ 를 소개하였다(Coastal Development Institute of Technology, 2003). 본 예비설계에서는 SPT N값으로부터 추정한 내부마찰각을 고려하여 토압계수 0.5, 마찰계수 $\tan(2/3\phi)$ 을 적용하였다.

석션파일 침설시 기초의 선단저항은 측벽두께(t)를 기초폭으로 하고 설계석션압 및 측벽 두께와 침설의 관계를 고려하여 적절한 지지력공식으로 산정한다. 일반적으로 Terzaghi의 지지력 공식을 적용하지만, 강제기초와 같이 석션파일 측벽 두께가 침설깊이에 비해 극단적으로 얇을 경우 Meyerhof의 지지력 공식에 대해서도 검토해야 한다. 상기 지지력 공식 적용의 판단기준으로 석션기초구조물 기술매뉴얼(Coastal Development Institute

of Technology, 2003)에서는 Fig. 7의 우측과 같이 관입에 의한 기초하단 슬립면이 기초 측벽으로 닫힌 경우 즉, 슬립면이 지표면에 닿지 않고 등가자유면(equivalent free surface)과 수평면이 이루는 각이 $\beta = \pi/2$ 인 경우에 Meyerhof 지지력 공식을 적용하도록 하였으며 본 예비설계에서도 이와 같은 적용한계를 기준으로 강제 석션 기초의 선단저항을 산정하였다. Meyerhof의 지지력 공식으로 검토하기 위한 적용한계 침설깊이(d_E)는 Meyerhof 지지력 공식에서 $\beta = \pi/2$ 인 경우의 기초 하단에서 닫힌 슬립면까지의 길이이며 개념적으로 Fig. 7의 우측으로 이해할 수 있고 식 (5)로 산정한다(Meyerhof, 1951; Coastal Development Institute of Technology, 2003). 이와 같이 산정된 한계 침설깊이(d_E)를 유효응력의 변화(식 (4) 참조)를 고려한 식 (6)의 유효침설깊이(d_f')와 비교하게 되는데 측벽 두께(t)로 정규화한 유효침설비(d_f'/t)가 한계침설비(d_E/t) 보다 클 경우 Meyerhof의 지지력 공식을 적용한다. 상기 유효침설비 및 한계침설비는 Fig. 8에서 알 수 있듯이 지반의 내부마찰각에 따라 다르다.

본 예비설계에서 적용한 강제 석션파일은 측벽 두께

Fig. 7. Slip line fields for deep foundation (from Meyerhof, 1951)

Fig. 8. Selection of equation of tip resistance in the sandy soil

(18.0~42.0mm)가 상대적으로 매우 작아 유효침설비가 한계침설비를 초과하여 Meyerhof의 지지력 공식으로 선단저항을 산정하였다. 일례로 직경 7.0m 석션파일의 경우 시범사업 대상 해저지반의 내부마찰각 27°에 대한 한계침설비는 7.0이고 침설 단계별 유효침설비는 36.3~120.2으로 Meyerhof 공식 적용에 해당하였다(Fig. 8).

$$d_E = d_f(\beta = \pi/2) = \frac{\cos \phi \sin \beta}{2 \cos(\eta + \phi) \cos(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2})} e^{\theta_1 \tan \phi} t \quad (5)$$

여기서, β : 등가자유면이 수평면과 이루는 각(°)
 ϕ : 슬립면 내 흙의 내부마찰각(°)
 η, θ_1 : 전단강도 활용도 m 에 따라 결정되는 각(°)
 m : 등가자유면에서 전단강도 활용도
 $(\tau_0 = m(c + \sigma_0 \tan \phi), 0 \leq m \leq 1)$
 t : 기초 측벽 두께(m)

$$d_f' = \sigma_{v' in}' / \gamma_1' \quad (6)$$

여기서, d_f' : 유효침설깊이(m)
 $\sigma_{v' in}'$: 기초 내측 유효응력(kN/m²)(식 (4)로부터 산정)
 γ_1' : 기초 하단의 흙의 수중단위중량(kN/m³)

3.2.3 상한석션압 및 자침량 산정

설계석션압은 보일링, 히빙 또는 지반 팽창 등 지반 파괴에 대한 상한석션압을 넘지 않도록 유의해야 한다. 본 설계에서 석션파일 내부 사질토 지반의 상한석션압(p_{sc})은 선단석션압비를 이용하여 다음의 식 (7)로 구하였다.

$$p_{sc} = \frac{1}{F} (d_f + \delta) \gamma' \frac{1}{1 - p_t/p_s} \quad (7)$$

여기서, F : 안전율(≥ 1.0)
 d_f : 침설깊이(m)
 δ : 기초내부 지반의 용기 높이(m)
 γ' : 모래의 수중단위중량(kN/m³)
 p_t/p_s : 선단석션압비($\leq 1/2$)

석션파일의 해저면 착저시 관입저항(소요석션압) 이

상의 자침량이 확보되는지 즉, 자침 이후 석션압에 의해 침설이 가능한지 확인해야 한다. 석션파일 자침량은 석션압을 0으로 하고 침설깊이를 변화시켜가며 침설에 대한 관입력/관입저항력(S)이 1.5가 되도록 반복 수렴계산하여 결정하였으며, 본 설계에서 검토한 석션파일의 자침량은 대략 1.0m 이었다.

3.2.4 침투류 해석에 의한 기초선단 석션압 검토

석션파일 침설시 기초 선단부 석션압(또는 선단석션압비)은 석션파일 관입력 산정, 기초 내외측 등수경사 산정 및 이를 이용한 유효응력과 관입저항력의 산정 등에 사용되는 매우 중요한 인자이다. 본 논문에서는 Seep/W를 이용한 2차원 정상 침투류해석을 수행하였으며, Table 3과 같이 원형단면 석션파일 직경을 3m, 4m, 6m로 구분하여 각각에 대한 침설깊이 증가에 따른 기초 선단부(Fig. 9(b)의 내측, 중앙, 외측 확인지점)의 석션압을 검토하였다.

Fig. 10(a)는 직경 4.0m 기초의 침설깊이 12.0m에 대한 대표적인 침투해석 결과이며 석션압 작용시 기초 측벽 근처의 등수두선 분포를 보여주고 있다. 등수두선 분포도를 통해 기초 선단에 등수두선이 밀집해 있음을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과는 해석을 수행한 다른 직

경의 다양한 침설깊이에서도 모두 동일하였으며 기초 선단부의 등수두선 밀집도는 침설깊이가 커질수록 더욱 조밀해지는 경향을 보였다. Fig. 10(a)에는 해석 결과로부터 확인한 기초 선단 부근의 내측, 중앙, 외측 정수두와 이를 이용한 기초 선단 압력수두(Δh_{tp}), 기초 내부 압력수두(Δh_s), 선단석션압비(p_t/p_s)의 계산례를 함께 정리하였다. 여기서 기초 내외부 정수두 차에 의해 발생된 압력수두가 석션압에 해당한다. 기초 내부 설계석션압(p_s)은 대상 부지 평균수심을 감안하여 기초 내외부 정수두 차 10m(Δh_s)에 해당하는 100kPa을 적용하였으며, 기초 선단 석션압(p_t)은 기초 외부 정수두(Fig. 9와 10의 ㉓)와 기초 선단 정수두(Fig. 9와 10의 ㉔)의 차(즉, 기초 선단 압력수두 Δh_{tp})로부터 해수의 단위중량을 고려하여 계산할 수 있다. 기초 측벽 선단부 석션압을 평가한 결과 내측(17.5kPa), 중앙(16.2kPa), 외측(14.5kPa) 순으로 내측의 선단석션압이 조금 크게 평가되었으며 그 차이는 크지 않은 것으로 판단된다. 이러한 차이는 기초 외부에서 내부로 정수두 차이만큼 물의 흐름이 발생하고 위치별로 점차 수두가 줄어들어 당연한 결과로 보이며, 설계에서는 침설시 선단저항력 산정에 필요한 기초 내부 유효응력과 기초 내부 상한석션압 평가를 위해 선단부 내측 석션압을 적용하도록 하였다.

Fig. 10(b)는 기초 침설비(침설깊이/기초직경)에 따른 기초 내부 석션압(p_s) 대비 선단 석션압(p_t)의 비 즉, 선단석션압비(p_t/p_s)를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 침설깊이가 커질수록 선단석션압비(p_t/p_s)는 점차 감소는 경향을 보였고 기초 직경에 따른 뚜렷한 차이는 없었다. 해석시 기초 내부 지반의 용기량과 기초벽 두께에 대한 영향은 고려하지 않았다.

Table 3. Case of seepage analysis and penetration ratio

Penetration depth, d_f (m)			Penetration ratio, d_f/D
Dia. 3 m	Dia. 4 m	Dia. 6 m	
0.75	1	1.5	0.25
1.5	2	3	0.50
3	4	6	1.0
6	8	12	2.0
9	12	18	3.0

(a)

(b)

Fig. 9. (a) Modeling of seepage analysis and (b) checking node of suction pressure of pile tip

Vicinity of the tip	Potential head (m)			$\Delta h_{tip} = p_t / \gamma_w$ (m)	$\Delta h_s = p_s / \gamma_w$ (m)	p_t / p_s
	(a)	(b)	(c)	(d) = (a) - (b)	(e) = (a) - (c)	(d) / (e)
Inside	30	28.25	20	1.75	10	0.175
Center	30	28.38	20	1.62	10	0.162
Outside	30	28.55	20	1.45	10	0.145

(a) Typical equipotential line of seepage analysis and calculation of p_t/p_s (case of 4 m of dia., 12 m of penetration depth, and 3.0 of penetration ratio)

(b) p_t/p_s with penetration ratio

Fig. 10. Tip to design suction pressure ratio (p_t/p_s) from seepage analysis

(a) Design suction pressure

(b) Penetration force and resistance

Fig. 11. Suction pressure, penetration force and resistance with penetration depths ($D=3.0$ m, $L=10.0$ m)

4. 설계석선압 산정 및 강제기초 침설검토 결과

Fig. 11~Fig. 15는 침설 단계별 상한석선압 이내의 설계석선압을 산정한 결과이며, 설계석선압 적용시 할증계수($S=1.5$)를 고려한 관입저항력 대비 관입력을 비교한 것이다. 모든 검토 결과에서 침설깊이가 커질수록

해수면과 기초 내부의 수두차가 커져 적용가능 석선압이 증가하였고, 또한 용기량을 포함한 침설깊이($d_f + \delta$)가 커져 연직유효응력 증가로 인해 기초 하부의 과잉간극수압($p_s - p_t$) 증가에도 불구하고 상한석선압이 증가하고 있음을 알 수 있다. 침설깊이가 커질수록 설계석선압을 증가시켜 관입력이 증가하였고 기초 직경이 커질

수록 당연히 더욱 큰 관입력을 보였다. 관입저항력은 앞서 설명한 바와 같이 기초 내외측 측벽의 주면마찰력과 측벽 선단저항력으로 이루어져 있으나 강제기초 측벽

두께가 18.0~42.0mm로 매우 얇기 때문에 침설 초기 얇은 깊이에서 관입저항력의 대략 10~30% 정도만 선단저항력이 기여할 뿐 침설깊이가 커질수록 대부분의 관

Fig. 12. Suction pressure, penetration force and resistance with penetration depths ($D=4.0\text{ m}$, $L=9.5\text{ m}$)

Fig. 13. Suction pressure, penetration force and resistance with penetration depths ($D=5.0\text{ m}$, $L=9.0\text{ m}$)

Fig. 14. Suction pressure, penetration force and resistance with penetration depths ($D=6.0\text{ m}$, $L=9.0\text{ m}$)

(a) Design suction pressure

(b) Penetration force and resistance

Fig. 15. Suction pressure, penetration force and resistance with penetration depths ($D=7.0$ m, $L=8.5$ m)

Table 4. Results of availability for suction pile installation

Pile diameter, D (m)	Required penetration depth, d_R (m)	Available penetration depth by suction			Results
		Depth (m)	Penetration force, F_D (kN)	Resistance force, $^1S \cdot F_R$ (kN)	
3.0	9.5	4.0	558	460	N.G
4.0	9.0	6.0	1,311	1,288	N.G
5.0	8.5	7.0	2,279	2,056	N.G
6.0	8.5	9.0	3,996	3,934	O.K
7.0	8.0	9.5	5,652	5,469	O.K

Note: 1) S ($=1.5$) is the increased coefficient for penetration resistance F_R

입저항력은 주변저항에서 발휘되었다.

기초의 침설 가능 여부를 살펴보면, 목표 침설깊이 (d_R)가 9.5m인 직경 3.0m 기초는 Fig. 11과 같이 석션압에 의한 침설이 4.0m까지만 가능하였다. 깊이 4.0m에서 5.0m로 1.0m 추가 침설시 상한석션압에 준하는 석션압을 가하여도 관입력이 할증을 고려한 관입저항력보다 작았다. Fig. 12와 13의 직경 4.0m, 5.0m 석션파일 또한 목표 침설깊이가 각각 9.0m, 8.5m 인데 반해 상한석션압 근접한 석션압을 가하여도 관입력이 관입저항력을 극복하지 못하고 각각 6.0m, 7.0m까지 겨우 침설이 가능한 것으로 평가되어 수평방향 안정성을 확보할 수 없었다. 반면, 직경 6.0m(Fig. 14)와 직경 7.0m(Fig. 15)의 석션파일은 수평방향 안정성을 만족하는 최소 근입깊이가 각각 8.5m, 8.0m이었으며, 목표 깊이까지 상한석션압 이내의 석션압을 통해 침설이 충분히 가능함을 확인하였다. 상기 검토 내용을 간략히 정리하면 Table 4와 같다.

5. 결 론

본 연구에서는 국내 서남해 해상 지역에 부유식 해상 구조물 계류를 위한 석션파일 예비설계를 수행하였고 현장 여건에 적용 가능한 석션파일의 규모와 침설깊이를 제안하였다. 설계의 주요과정은 석션파일의 수평방향 안정성 검토 및 소정의 목표 침설 깊이별 설계석션압 산정이며, 침설단계별로 석션압에 의한 관입력, 관입저항력, 상한석션압 등을 검토하였다. 다음은 본 연구를 통한 예비설계의 주요 결론이다.

- (1) 본 설계 검토를 통해 다음의 사항들을 만족하도록 설계석션압을 산정하였다. 첫째, 설계석션압은 침설에 대한 여유(침설에 대한 안전율 또는 할증계수)를 고려하여 관입력이 관입저항력 이상 되도록 산정하였다. 둘째, 설계석션압은 기초 부재 강도와 지반파괴(Pilot project 대상지반은 사질토이므로 보일링)에 대한 안정성을 확보하도록 산정하였다. 셋

째, 설계석션압은 해수면과 기초상판의 수두차를 감안하여 사용가능한 석션압 이내가 되도록 산정하였다.

- (2) 설계석션압 산정 시 침투에 의한 기초 내외부의 동수경사와 유효응력, 기초 내부 용기량 등을 신중하게 적용해야하며, 본 연구에서는 이에 필요한 기초 선단부 석션압비를 2차원 정상류 침투해석을 통해 산정하였다. 침투해석은 원형기초 직경 3.0m, 4.0m, 6.0m 및 침설비 25~300%에 대해 수행하였고, 그 결과 직경에 대한 차이는 거의 없었으며 침설비가 커질수록 선단석션압비는 점차 감소하는 경향을 보였다. 선단석션압은 기초 선단 근처 내측, 중앙, 외측에서 확인하였으며 설계석션압 산정시 고려해야 하는 내측의 선단석션압비를 설계치로 선정하여 설계 시 침설비에 따라 적용하였다.
- (3) 기초 내부 유효응력 변화를 고려한 관입저항력 산정은 침설단계별 관입여부를 판단하는 중요한 과정이다. 본 설계에서는 침설단계별로 반복 수렴계산을 통해 상향 침투 및 기초 관입에 의한 기초 내부 지반의 유효응력을 평가하여 기초 내측 주변저항을 산정하였다. 또한 기초 측벽의 유효침설비와 한계 침설비를 비교하여 깊은기초에 해당하는 Meyerhof 지지력 공식으로 선단저항을 평가하였다.
- (4) 본 설계에서는 기초 직경별로 수평방향 안정성을 만족하는 목표 침설깊이를 설정하여 석션압에 의한 침설여부를 평가하였다. 그 결과, 직경 3.0~5.0m의 기초는 목표 깊이까지 침설이 불가능하였고, 직경 6.0m와 7.0m의 석션파일은 수평방향 안정성을 만족하는 목표 침설깊이(각각 8.5m와 8.0m) 까지 석션압을 통해 침설이 가능함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업인 ‘비용절감형 석션기초 기술 개발’ 과제의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

1. Allersma, H.G.B., Brinkgreve, R.B.J., and Simon, T. (2000), "Centrifuge and numerical modelling of horizontally loaded suction piles", *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol.10, No.3, pp.222-228.
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", Keynote Lecture, *International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics*, 1. Perth 2005. Proceedings, pp.3-30.
3. API (1991), *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms*, 19th ed., American Petroleum Inst., API RP 2A.
4. Broms, B.B. (1964), "Lateral resistance of piles in cohesionless soils", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, ASCE, Vol.90, SM3, pp.123-156.
5. Coastal Development Institute of Technology (2003), *Technical manual for suction foundation*, Japan Coastal Development Institute of Technology, translated into Korean by Park, W. S., Kwon, O. S., Jang, I. S., and Ahn, H. D. from Korea Ocean Research and Development Institute, 2010.
6. Jeong, Y. J., Hwang, Y. K., Park, M. S., Lee, D. H., and Kim, B. C. (2013), *Development of Construction Technology for Concrete Floated Offshore Infrastructures / Development of Structural System of Hybrid Floating Structure*, KICT 2012-100, Korea Institute of Construction Technology, 2013.
7. Kim, T. I. and Choi, H. G. (1988), "Determination of Design Waves along the South Coast of Korea", *Science of water*, Korea Water Resources Association, Vol.21, No.4, pp.389-397.
8. Korea Electric Power Corporation (2000), *Technical and Economical Evaluation on 765kV Transmission Line Construction Project*, KEPCO, 2000.
9. Korea Institute of Energy Research (2003), *A study on an offshore wind farm demonstration*, KIER-A22101, Korea Institute of Energy Research, 2003.
10. Korean Geotechnical Society (2009), *Foundation Design code*.
11. Meyerhof, G.G. (1951), "The Ultimate Bearing Capacity of Foundations", *Géotechnique*, Vol.2, Issue 4, pp.301-332.
12. Park, M. (2009), *Preliminary Design Procedure of Mooring System for Deep Water Offshore Platforms*, M.S. Thesis, Seoul National University.
13. Randolph, M., Cassidy, M., and Gourvenec, S. (2005), "Challenges of offshore geotechnical engineering", *16th ICSMGE*, Osaka.

Received : March 24th, 2014

Revised : July 18th, 2014

Accepted : September 23rd, 2014