

사질토 기반에서 경사 인발 하중을 받는 석션 앵커의 회전 거동 평가

배준식¹, 정영훈^{2*}

¹한국과학기술원 건설및환경공학과, ²한국건설기술연구원 미래융합연구본부

Investigation of the Rotational Displacement of the Suction Anchor Subjected to the Inclined Pullout Load in Silty Sand

Jun-Sik Bae¹, Yeong-Hoon Jeong^{2*}

¹Department of civil and engineering, Korea Advanced Institute of Technology

²Department of Future Technogy and Convergence Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building
Technology (KICT)

요약 석션 앵커는 비교적 간편한 설치 방식과 높은 안정성으로 인해 부유식 구조물을 고정하기 위한 기초로 사용된다. 최근, 허용 변위가 작은 부유식 구조물이 증가함에 따라, 석션 앵커의 유발 변위 평가에 대한 수요가 높아졌다. 하지만, 기존 석션 앵커의 연구는 앵커 지지력 평가에 초점을 두었으며, 앵커의 변위에 관한 연구는 증점적으로 수행되지 않았다. 특히, 경사진 하중을 받는 석션 앵커의 주된 변위인, 회전 거동을 평가한 연구는 매우 부족한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 경사 인발 하중이 작용하는 석션 앵커의 회전 거동을 모형실험을 통해 비교 및 분석 하였다. 모형실험은 센트리피지 실험 장비를 사용하였으며, 실험 변수로는 하중의 경사도, 앵커의 크기 및 종횡비가 고려되었다. 하중-회전 변위 곡선을 산정하여, 실험 변수에 따른 석션 앵커의 회전량을 비교하였다. 실험 결과, 석션 앵커의 회전 거동은 하중의 경사도에 큰 영향을 받았으며, 앵커의 크기 및 종횡비에 따른 회전량의 차이는 크지 않았다.

Abstract Suction anchors are used for floating structures because they have advantages in installation and stability. Recently, the demand for floating structures requiring low allowable displacement has increased. Thus, it is strongly suggested that the displacement of the suction anchor be evaluated. However, conventional studies regarding suction anchors have concentrated on the capacity of the anchor, and research on the displacement of the anchor is limited. In particular, rotation is the primary behavior of a suction anchor subjected to an inclined load, and related information has been insufficient. Therefore, the main objective of this paper is to investigate the rotation behavior of a suction anchor via centrifuge model tests. The experimental parameters are the inclination of the pull-out load, anchor dimensions, and aspect ratio. The rotation values of suction anchors were compared using a series of load-rotation curves. The results show that the inclination of the load has a dominant influence on the rotation behavior of the suction anchor.

Keywords : Suction Anchor, Silty Sand, Rotation, Centrifuge Model Test, Inclined Uplift Load

본 연구는 국토교통연구인프라운영원의 국토교통기술촉진연구사업(20CTAP-B132914-04)지원으로 수행되었습니다

*Corresponding Author : Yeong-Hoon Jeong(KICT)

email: yeonghoon@kict.re.kr

Received September 11, 2020

Revised September 28, 2020

Accepted October 5, 2020

Published October 31, 2020

1. 서론

석션 앵커는 원통형의 앵커로, 자중으로 일정 부분 관입 된 후 앵커 내·외부의 압력 차를 유발하여 지중에 설치된다. 석션 압력을 통한 설치 방법으로 인해 대형 장비 없이 앵커를 관입할 수 있어 비교적 저렴한 비용으로 설치되고 시공 중심의 제약이 적다. 따라서 석션 앵커는 수심이 깊은 바다에 설치되는 대규모의 해상 부유식 구조물 및 심해 석유시추선 등에 널리 이용되어왔다 [1-6].

기본적으로 석션 앵커의 설계는 한계 상태 설계법(limit state design, LSD)을 기반으로 하여, 앵커의 최대 지지력에 극한 한계 상태(ultimate limit states, ULS) 및 사고 한계 상태(accidental limit states, ALS)에 해당하는 안전율(factor of safety)을 적용하여 수행된다 [7]. 그 일환으로 이론적 해석, 수치 모델링 및 실험적 연구를 통해 석션 앵커의 지지력을 평가 할 수 있는 다양한 모델들이 제안되었다. 기존의 석션 앵커 연구에서는 이론적 방법 및 실험적 방법을 통해 석션 앵커의 지지력을 예측할 수 있는 다양한 모델들이 제안되었으며 [6, 8], 앵커의 지지력에 영향을 미치는 주요 인자인 하중 조건과 패드아이의 위치에 관한 연구가 진행되어왔다 [9-11].

한편, 최근 개발 중인 초대형 부유식 풍력 발전기, 수중 부유식 터널 등 높은 안전 등급(safety level)이 요구되는 구조물의 설계 시, 사용성(serviceability)을 보장하기 위해 구조물의 지지력뿐만 아니라 허용 변위까지 고려한 설계가 요구되고 있다. 특히 앵커와 구조물이 긴장된 계류선(taut mooring line)으로 연결된 경우, 앵커의 유발 변위는 지지 구조물의 변위를 직접적으로 야기하기 때문에, 최근에는 사용 한계 상태(serviceability limit states, SLS) 혹은 피로 한계 상태(fatigue limit states, FLS)를 앵커의 설계에 반영하여, 앵커의 유발 변위를 구조물의 허용 변위 이내로 제어하는 것이 권장되고 있다 [12, 13]. 따라서 석션 앵커의 지지력뿐만 아니라 유발 변위에도 초점을 둔 연구가 필요성이 대두되고 있다.

석션 앵커의 변위는 병진운동과 회전운동이 복합적으로 나타나기 때문에, 유발 변위를 설계에 반영하기 위해서는 앵커의 거동을 대표할 수 있는 변위를 선택하는 것이 중요하다. 석션 앵커의 변위를 측정할 선행 연구에서는, 앵커의 유발 변위가 앵커 상단부의 변위로 대변되었다. 하지만, 경사진 인발 하중이 앵커의 측면에서 작용하는 경우, 석션 앵커의 주된 변위는 회전 거동으로 나타난다. 따라서 신뢰성 있는 석션 앵커의 변위를 평가하기 위

해서는 앵커의 회전 거동을 석션 앵커의 유발 변위로 정의 하는 것이 타당하다.

석션 앵커의 회전 거동은 앵커의 파괴 메커니즘과 같이 패드아이의 위치, 인발 하중의 경사도, 앵커의 크기 및 종횡비에 영향을 받을 것으로 예상된다. 패드아이의 위치에 따른 석션 앵커의 회전 거동은 Coffman [14] 과 Bang [8]에 의해 비교 분석되었다. 하지만 하중의 경사도 혹은 앵커의 제원에 따른 회전 거동을 비교 및 분석한 연구는 부족한 실정이다. 특히, 인발 하중 기울기는 앵커의 파괴 메커니즘에 큰 영향을 주기 때문에, 하중의 경사도가 회전 거동에 미치는 영향을 주의하여 살펴볼 필요가 있다. 결론적으로 석션 앵커의 회전 거동을 이해하기 위해서는 추가적인 변수를 고려한 회전 변위의 평가가 필요하다.

본 논문에서는 앵커의 회전 거동을 평가하기 위해 앵커 설계에 주요한 변수로 적용하는 앵커 크기와 하중의 경사도에 따른 회전 변위를 비교 및 분석하였다. 수평, 수직 인발 하중을 포함한 4가지의 경사 하중을 앵커에 재하하였으며, 종횡비(aspect ratio) 또는 크기(dimension)가 다른 3가지의 석션 앵커 모델을 이용하여 실험을 수행하였다. 모형실험의 기반은 세립 사질토로 조성하였으며, 현장 지반의 응력 상태를 모사하기 위해 원심 모형실험 장비를 이용하여 석션 앵커 인발 실험을 수행하였다. 실험 결과, 하중-회전 변위 관계를 평가하였으며, 경사 하중의 기울기와 앵커의 크기가 앵커 회전에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 원심모형실험

2.1 원심모형실험장비

원심모형실험은 지반 공학 분야에서 사용되는 대표적인 모형 실험기법으로, 실험 모형을 중력가속도의 N 배로 회전하여 발생하는 원심력을 통해 지반 구조물 모형에 실제 현장과 동일한 응력 상태를 유도하는 실험 장비이다 [15, 16]. 원심모형실험으로 실험을 수행할 경우 상사비를 통해 모형 구조물의 크기를 실제 크기의 1/N로 축소 제작하여 실험을 수행할 수 있어 대형 구조물의 실험에 용이하다. 본 연구에서는 한국과학기술원에 설치된 지오센터리뷰지(KOCED geotechnical centrifuge center) 실험센터에서 원심모형실험이 수행되었다. 원심모형실험장비의 제원은 아래 Table 1에 상세히 기술되어 있다.

Table 1. Specification of the centrifuge facility

Item	Specification
Platform radius	5.0m
Max. capacity	240 g-tons
Max. acceleration	130g with 1,300kg payload
Max. model payload	2,400kg up to 100g

2.2 지반 모델

본 연구에서는 새만금 연안에 분포하는 세립 사질토를 이용하여 지반 모델을 조성하였다. 사용된 시료는 통일 분류법(USCS, unified soil classification system) 분류 체계에 따라 SM (silty sand, 세립질 모래)으로 분류되며, 자세한 시료의 지반 물성 값은 아래 Table 2에 제시되어 있다.

Table 2. The properties of the Samangeum sand (Kim et al., 2016 [6])

Parameters		Values
Sieve analysis	#200 sieve passing	47% (40%-50%)
	D ₁₀ , mm	0.045
	D ₅₀ , mm	0.080
	D ₆₀ , mm	0.095
	C _u =D ₆₀ /D ₁₀	2.11
Compaction	$\gamma_{d,max}$, kN/m ³	16.2
	$\gamma_{d,min}$, kN/m ³	11.8
	OMC*	17%
Direct shear test (D _r = 70%)	ϕ , deg	34
	ψ , deg	8
	c, kPa	7

*OMC : Optimal Moisture Content

원심모형실험의 지반 모델은 지름 900mm 및 높이 700mm인 강제 토조에, 높이 450mm로 조성하였다. 목표 상대 밀도는 단단한 사질토 지반을 모사하기 위하여 모든 실험에서 70%로 설정하였다. 높이에 따라 일정한 상대 밀도를 유지하기 위해서, 지반을 9개 층으로 나누었고, 각 층에 사용된 흙의 양은 목표 상대 밀도에 따라 결정되었다. 최종적으로, 다짐을 통해 각 층의 높이가 50mm가 되도록 지반을 조성하였다 (Fig. 1).

2.3 석션 앵커 모델

본 모형실험에서 사용된 석션 앵커는 강재로 제작되었으며, 각 실험 조건에 부합하도록 중형비가 1이고 크기가 다른 앵커 2개와 중형비가 2인 앵커 1개를 제작하였다. 계류선과 앵커를 연결하는 부분인 패드아이는 최대 지지력을 기대할 수 있는 최적 지점 (앵커 측면, 길이 방향의

2/3지점)에 모사하였다 [5-6, 17]. 추가적으로, 앵커의 회전을 측정하기 위해 앵커 상단에 레이저 타겟과 타겟 지지대를 설치하였다. 자세한 앵커의 크기 및 모양은 Fig. 2에 도식화 하였으며, Table 3에는 실험에 사용된 앵커의 크기를 축소 모형 단위와 프로토타입(실 대형 크기) 단위를 비교하여 표기하였다.

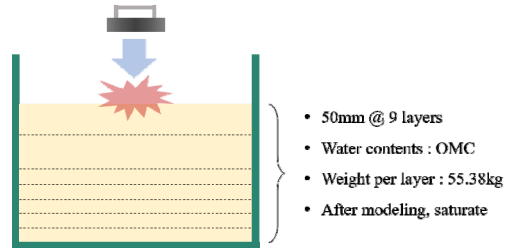


Fig. 1. Methodology for modelling the soil

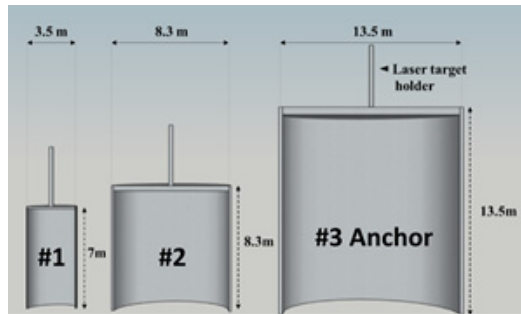


Fig. 2. Suction anchor model with prototype size

Table 3. Suction anchor model with model test and prototype size

Anc-hor	Model size (D / L)	Prototype size (D / L)	G -level	t/D
1	5cm/10cm	3.5m/7m	70g	2%
2	13.83cm/13.83cm	8.3m/8.3m	60g	1.4%
3	22.5cm/22.5cm	13.5m/13.5m	60g	0.9%

원심모형실험에서 시료의 조성 시, 상사비를 고려하여 시료의 크기를 결정하는 것은 한계가 있다. 하지만 실험 조건에 따라서 시료의 상사비가 결과의 분석에 미치는 영향을 검토하여야 한다. Ovesen(1979) [18] 은 원심모형실험에서 말뚝 기초의 직경이 평균 입자의 크기의 35 배 이상이면, 입자 크기가 기초에 미치는 영향은 미비하다고 제시하였다. 본 실험에서 사용된 앵커의 지름은 시료 평균 입자 크기에 100배 이상 크기 때문에, 실험 결과의 해석에 입자 크기에 대한 영향은 크지 않다고 판단하

였다 [19].

앵커의 두께는 앵커의 관입 및 거동에 큰 영향을 미치기 때문에, 축소모델링 수행 시 앵커 두께의 영향에 대한 면밀한 검토가 필요하다. 본 연구에서는 앵커의 거동을 rigid body로 가정하였기 때문에 앵커 자체의 변형을 최소화하고, 패드아이의 설치를 위한 용접 등 제작상의 요건을 충족시키기 위해 앵커의 두께를 2mm로 선정하여 제작하였다. 석션 버켓의 두께 산정과 관련하여 선행 연구자들은 버켓의 직경에 대한 두께의 비율을 각각 0.67% [20], 0.7% [21] 로 권장하였다. 본 연구에서 사용된 앵커의 경우 버켓의 직경에 대한 두께의 비율은 0.9% ~ 2%로 선행 연구자들이 제안한 두께보다 다소 크게 제작되었다. 하지만 본 연구의 주요 관점은 앵커의 관입 거동 평가가 아닌 회전 거동 평가이며, 경사 하중 효과를 평가하는 실험의 경우 동일한 비율을 가진 버켓을 사용하였기 때문에 논문에서 제시한 연구 결과의 신뢰성에는 큰 영향을 주지 않았다고 판단된다.

2.4 원심모형실험 프로그램 및 절차

본 연구에서는 앵커의 크기, 종횡비, 인발하중의 경사각이 앵커의 회전 거동에 미치는 영향을 평가하기 위하여 변수 연구를 실행하였다. 실험 Case I에서는 경사 하중의 각도를 달리하여 인발 하중의 경사도에 따른 석션 앵커의 회전 변화를 관찰하였으며, 실험 Case II에서는 앵커의 크기를 달리하여 앵커 크기가 인발 거동에 미치는 영향을 평가하였다. 아울러 Case I과 Case II의 실험 결과를 비교하여 종횡비의 영향도를 분석하였다. 수행된 원심모형실험의 세부 정보는 Table 4에 정리되어있다.

Table 4. Program of the centrifuge model tests with prototypes scale

Case	Number	Dimension (L : length; D : Diameter)	L/D	Load
				inclination
Case I	1	L7D3.5	2	0°
	2	L7D3.5	2	45°
	3	L7D3.5	2	60°
	4	L7D3.5	2	90°
Case II	1	L8.3D8.3	1	60°
	2	L13.5D13.5	1	60°

1g 상태에서 석션 앵커와 계류선을 연결한 후, 수직 하중 재하 장비를 통해 앵커를 지반에 관입하였다. 관입 시 지반의 교란을 최소화하기 위해 관입 속도를 0.1mm/sec의 느린 속도로 제어하였다 [22]. 앵커의 회전을 측정하기 위해 2개의 레이저 센서를 설치하였으며,

하중의 각도를 조절하기 위해 도르래를 설치하였다. 이후 계류선과 하중 재하 장비를 연결하고, 실험 중 앵커의 거동을 관찰하기 위한 카메라를 설치하였다. 앞서 설명한 센서와 하중 재하 장비 및 도르래의 위치를 각각 Fig. 3(a)과 Fig. 3(b)에 도식화 하였다.

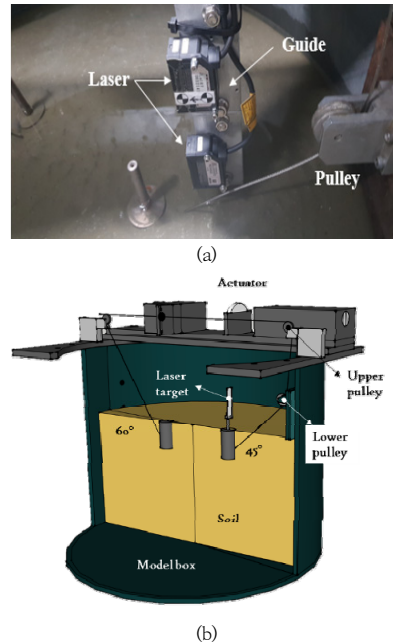


Fig. 3. Sensors and facility for centrifuge model tests: (a)Laser sensors and pulley; (b) Comprehensive test model set

3. 실험 결과 분석

3.1 앵커 크기에 따른 석션 앵커의 회전 거동

Fig. 4(a)는 하중의 경사도와 종횡비가 같을 때, 앵커 크기 변화에 따른 하중-회전 변위 곡선을 나타낸다. 세로 축은 인발 하중을 나타내며, 가로축은 앵커의 회전량을 보여준다. 실험 결과는 모두 상사비 법칙 (scaling laws, 70 or 60:1)에 따라 프로토타입 단위로 변환된 값이다. 하중-회전 변위 그래프는 하중을 변위 제어 방식으로 서서히 증가 시켜 최대 지지력 (ultimate capacity)에 도달할 때까지의 앵커 거동을 나타낸다. 실험 결과, 앵커의 크기가 클수록 앵커의 최대 지지력은 증가하였으나, 인발 하중이 최대 지지력에 도달할 시점에서 회전 값의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

Fig. 4(b)는 앵커에 재하 되는 인발 하중이 최대 지지

력에 도달하는 동안 석션 앵커의 회전을 비교하고, 일반적인 앵커의 회전 거동 경향을 파악하기 위해 앵커의 회전량을 정규화된 하중 (normalized load)에 따라 나타낸 결과이다. 정규화된 하중은 각 앵커의 최대 지지력 대비 앵커에 재하된 인발 하중의 비율(%)로 산정하였다. 정규화된 하중은 Eq. (1) 을 이용하여 계산하였다.

$$NormalizedLoad(\%) = \frac{Pulloutload}{Ultimate\ capacity} \times 100(\%) \quad (1)$$

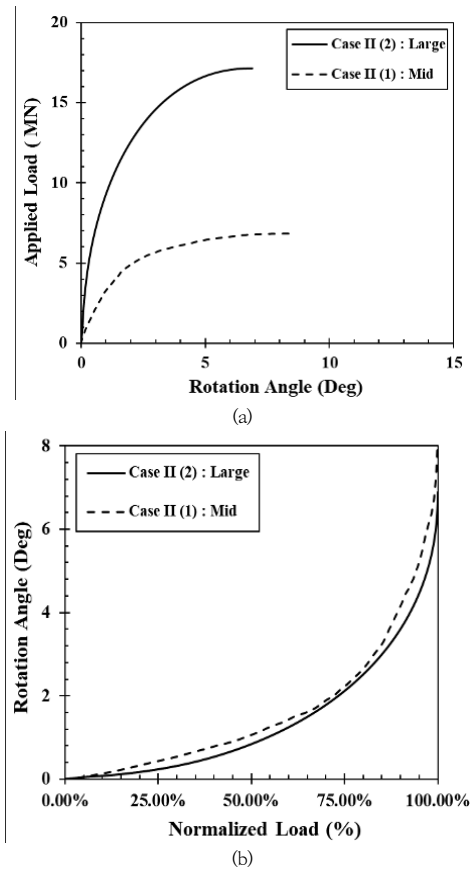


Fig. 4. Influence of the anchor dimension on the suction anchor: (a)Response of the load and rotational displacement; (b)Rotational displacement - Normalized load curve

연구 결과, 앵커가 최대 지지력에 도달하는 동안 발생하는 회전 값은 앵커 크기에 상관없이 비슷한 결과를 보였다 (Fig. 4. (b)). 즉, 최대 지지력 대비 재하 된 하중의 비율이 같은 경우, 유발되는 앵커의 회전량은 매우 유사

하며, 결론적으로 앵커의 크기는 앵커의 지지력 관점에서 매우 큰 영향을 미치지만, 앵커의 회전 거동에 미치는 영향은 매우 작다고 판단된다.

3.2 종횡비에 따른 석션 앵커의 회전 거동

본 실험에서 비교한 앵커는 길이가 비슷하지만, 종횡비가 다른 2종류의 앵커를 이용하여 실험하였다. 인발 하중의 기울기는 60°로 동일하게 작용하였으며, 비교한 모델은 Table. 3에서 case I(3)과 case II(1)이다.

Fig. 5 에서는 정규화된 하중을 통해 앵커 종횡비에 따른 석션 앵커 회전 값의 차이를 제시하였다. 실험 결과, 종횡비가 2인 앵커의 회전 값이 종횡비가 1인 앵커의 회전 값보다 작게 나타났다. 따라서 앵커의 회전 거동을 제어하기 위해서는 종횡비를 크게 설계하는 것이 유리하다. 다만 사질토 지반에서는 앵커의 관입이 어려워 종횡비를 2 이하로 설계하도록 권장된다[2]. 따라서 앵커의 성능과 적용성을 고려하여 앵커의 최적 종횡비를 결정하는 것이 권장된다.

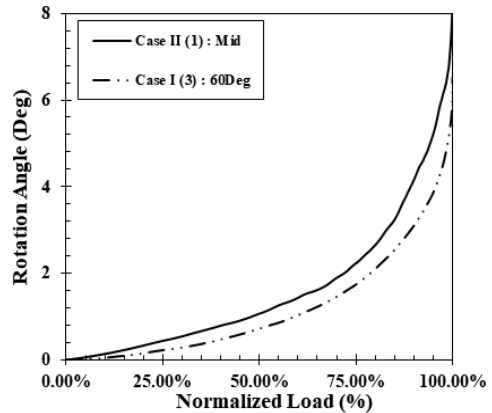


Fig. 5. Influence of the aspect ratio on the suction anchor rotation behaviors

3.3 인발 하중의 경사도에 따른 석션 앵커의 회전 거동

인발 하중의 경사도에 따른 앵커의 회전 거동을 평가하기 위해 동일한 단면을 가진 앵커 모델을 이용하였다. 인발 하중은 지면과 0°, 45°, 60°, 그리고 90°의 경사도를 가지도록 설계하여 실험을 수행하였다 (case I(1), case I(2), case I(3), case I(4)).

Fig. 6은 앵커의 회전량을 정규화된 하중에 따라 나타낸 결과이다. 실험 결과 인발 하중이 수평으로 작용할 때, 가장 큰 회전 값을 나타내었다. 또한 45° 경사 하중 실험

과 60° 경사 하중 실험 결과, 정규화된 하중에 따른 앵커의 회전량은 거의 비슷하게 나타났다. 예상과는 다르게 90° 인발 하중이 작용할 경우, 앵커의 회전량은 가장 적게 나타났다. Zhao(2019) [17] 에 따르면 앵커의 회전 중심은 하중의 경사도에 따라 달라진다. 따라서, 회전 중심의 변화가 인발 하중의 경사도에 따른 석션 앵커의 회전 거동에 영향을 준 것으로 판단된다.

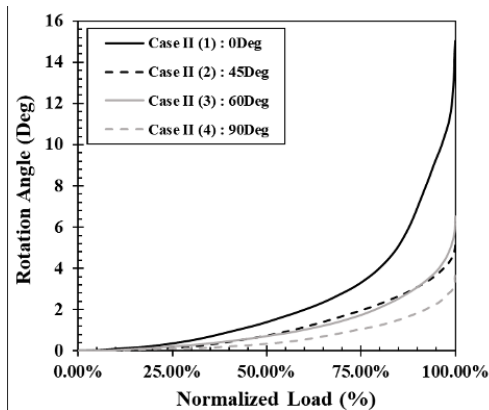


Fig. 6. Influence of the load inclination on the suction anchor rotation behavior

본 실험의 결과는 앵커의 최대 지지력을 동일하게 설계한다면, 하중의 기울기가 높을수록 회전이 적게 일어남을 의미한다. 하지만 하중의 기울기가 높을수록 석션 앵커는 수평 인발 하중에 취약해진다. 결론적으로 계류선이 지면과 일정한 각도를 형성하여 수직 및 수평 인발 하중을 지지할 수 있고, 회전의 제어가 가능하도록 하중의 경사도를 설계하는 것이 권장된다.

4. 결론

본 논문에서는 경사 하중이 작용하는 석션 앵커의 회전 거동을 연구하였다. 다양한 상황을 반영하기 위해 인발 하중 기울기와 앵커 크기 및 종횡비를 연구 변수로 설정하였다. 정규화된 인발 하중 크기에 따른 회전 값을 비교하여 회전 거동을 비교하였으며, 그 결론은 다음과 같다.

[1] 하중의 기울기가 같고, 앵커의 종횡비가 같은 경우, 앵커의 크기는 회전 거동에 큰 영향을 미치지 않았다.

[2] 석션 앵커의 회전 변위는 앵커의 종횡비가 클수록 적게 회전하였다. 따라서 앵커의 종횡비를 크게 설계하는 것이 회전 변위 제어에 유리하다. 하지만 앵커의 종횡비가 커지면 시공성에 문제가 발생할 수 있어 앵커의 최적

종횡비를 선정할 시 변위와 지반 조건에 따른 적용성을 복합적으로 고려하여 설계하는 것이 필요하다.

[3] 석션 앵커의 회전은, 인발 하중의 기울기에 따라 크게 달라진다. 정규화된 하중에 따른 회전 거동은 하중의 기울기가 높을수록 작게 나타난다. 따라서 앵커의 회전 변위를 제어하기 위해서는 하중의 기울기를 높게 설계하는 것이 유리하다. 다만, 비약적으로 높은 기울기의 인발 하중은 구조물의 수평 변위를 제어하기 어려울 수 있어 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

결론적으로, 사질토 지반에서 앵커의 회전 변위 방지가 중요한 구조물을 설계할 경우, 앵커의 종횡비와 하중의 경사도를 고려하여 앵커의 허용 회전 변위를 제어하고, 추가적으로 앵커의 크기를 조절하여 설계 하중을 지지할 수 있도록 설계하여야 한다.

본 실험에서는 하중의 경사도와 앵커의 제원에 따른 석션 앵커의 회전 거동을 센트리퓨지 실험 장비를 이용한 변수 연구를 통해 비교하였다. 반면, 정규화된 하중 크기에 따른 앵커의 회전량을 예측하고 일반화하기 위해서는, 추가적인 변수 연구와 지반 조건의 영향을 반영한 분석이 필요하다.

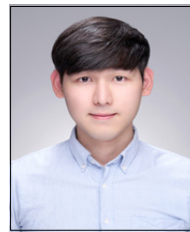
References

- Andersen, K.H., Jostad, H.P., 1999. Foundation Design of Skirted Foundations and Anchors in Clay. Offshore Technology Conference. DOI: <https://doi.org/10.4043/10824-ms>
- Tjelta, T.I., 2001. Suction piles: their position and application today. Proceedings of the 11th International Offshore and Polar Engineering Conference II, 1-6.
- Sparrevik, P., 2002. Suction Pile Technology and Installation in Deep Waters. Offshore Technology Conference 1-9. DOI: <https://doi.org/10.4043/14241-MS>
- Jeanjean, P., Znidarcic, D., Phillips, R., Ko, H.-Y., Pfister, S., Cincicoglu, O., Schroeder, K., 2008. Centrifuge Testing on Suction Anchors: Double-Wall, Over-Consolidated Clay, and Layered Soil Profile 1-14. DOI: <https://doi.org/10.4043/18007-ms>
- Bang, S., Leahy, J.C., Cho, Y., & Kwon, O. 2006. Horizontal Bearing Capacity of Suction Piles in Sand. Transportation Research Record 1975, 21-27. DOI: <https://doi.org/10.1177/0361198106197500103>
- Kim, S.R., Choo, Y.W., Kim, D.S., 2016. Pullout Capacity of Horizontally Loaded Suction Anchor Installed in Silty Sand. Marine Georesources and Geotechnology

- 34, 87-95.
DOI: <https://doi.org/10.1080/1064119X.2014.961622>
- [7] DNV-RP-E303. 2005. Geotechnical design and installation of suction anchor in clay. October 2005.
- [8] Bang, S.C., Jones, K.D., Kim, K.O., Kim, Y.S., Cho, Y.K. 2011. Inclined loading capacity of suction piles in sand. *Ocean Engineering* 38, 915-924.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2010.10.019>
- [9] Aubeny, C. P., Han, S. W., & Murff, J. D. 2003. Inclined load capacity of suction caissons. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 27(14), 1235-1254.
DOI: <https://doi.org/10.1002/nag.319>
- [10] Supachawarote, C., Randolph, M., & Gourvenec, S. 2004. Inclined Pull-out Capacity of Suction Caissons. *International Offshore and Polar Engineering Conference*, 1, 500-506.
- [11] Cho, Y.R., Lee, T.H., Chung, E. S., & Bang, S.C. (2009). Field Tests on Pullout Loading Capacity of Suction Piles in Clay. *Offshore Technology; Ocean Space Utilization* 693-699.
DOI: <https://doi.org/10.1115/omae2003-37016>
- [12] Byrne BW and HoulsbyGT (2004) Experimental investigations of the response of suction caissons to transient combined loading. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 130(3): 240-253.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:3\(240\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:3(240))
- [13] Jeong, Y. H., Kim, J. H., Manandhar, S., Ha, J. G., Park, H. J., & Kim, D. S. (2020). Centrifuge modelling of drained pullout and compression cyclic behaviour of suction bucket. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 20(2), 59-70.
DOI: <https://doi.org/10.4043/10824-ms>
- [14] Coffman, R.A., El-Sherbiny, R.M., Rauch, A.F., Olson, R.E., 2004. Measured horizontal capacity of suction caissons. *Offshore Technology Conference* 1-10.
DOI: <http://dx.doi.org/10.4043/16161-MS>
- [15] Kim, D.S., Kim, N.R., Choo, Y.W., Cho, G.C., 2013. A newly developed state-of-the-art geotechnical centrifuge in Korea. *KSCE Journal of Civil Engineering* 17, 77-84.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12205-013-1350-5>
- [16] Lee, H.Y., Kim, S.R., Kim, J.H., Kim, D.S., Choo, Y.W., Kwo, O., 2014. Evaluation of Behaviors on Mooring Line Embedded in Sand Using Centrifuge Test. *Journal of Ocean Engineering and Technology* 28, 47-54.
DOI: <https://doi.org/10.5574/ksoe.2014.28.1.047>
- [17] Zhao, L., Gaudin, C., O'Loughlin, C. D., Hambleton, J. P., Cassidy, M. J., & Herduin, M. 2019. Drained capacity of a suction caisson in sand under inclined loading. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(2), 1-12.
DOI: <https://doi.org/10.4043/10824-ms>
- [18] Ovesen, NK (1979), "The Scaling Law Relationship", *Proceeding of the 7th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Brighton, Vol 4, pp319-323.
- [19] Yoo, M.T., Cha, S.H., Kim, M.M., Choi, J.I., Han, J.T., 2012. Evaluation of dynamic group-pile effect in dry sand by centrifuge model tests. *International Journal of Offshore and Polar Engineering* 22, 165-171.
DOI: <https://doi.org/10.4043/10824-ms>
- [20] Villalobos, F. A., Byrne, B. W., & Houlsby, G. T. (2010). Model testing of suction caissons in clay subjected to vertical loading. *Applied Ocean Research*, 32(4), 414-424.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2010.09.002>
- [21] Wang, X., Zeng, X., & Li, J. (2019). Vertical performance of suction bucket foundation for offshore wind turbines in sand. *Ocean Engineering*, 180(February), 40-48.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.03.049>
- [22] Villalobos Jara FA 2006. Model Testing of Foundations for Offshore Wind Turbines. Doctoral Dissertation, University of Oxford, Oxford, UK.

배 준 식(Jun-Sik Bae)

[정회원]



- 2018년 2월 : 아주대학교 건설시스템공학과 (공학사)
- 2020년 2월 : 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 (공학석사)
- 2020년 2월 ~ 현재 : 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 (박사과정 중)

<관심분야>

지반공학, 해양기초설계, 석션앵커

정 영 훈(Yeong-Hoon Jeong)

[정회원]



- 2014년 2월 : 홍익대학교 토목공학과 (공학사)
- 2016년 2월 : 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 (공학석사)
- 2020년 2월 : 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 (공학박사)
- 2020년 8월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 박사 후 연구원

<관심분야>

지반공학, 해양기초설계, 반복하중