단일벽 및 이중벽 모형앵커를 이용한 석션케이스 앵커의 거동분석 Investigation of Behavior of Suction Caisson Anchors based on Single-Wall and Double-Wall Model Caissons

김유석* · Bertrand Teodosio** · 안재훈***

Kim, Yusuk*, Teodosio, Bertrand**, Ahn, Jaehun***

Abstract

Wind power presently reflects a very promising source of renewable energy. The optimal type of foundations for offshore wind turbines, in very deep water, is the floating type; the research on floating wind turbines is very active worldwide. It is essential to develop anchoring system for floating structures, and the suction caisson anchor is one of most widely used in deep oceans. This paper addresses the anchor holding capacity of suction caisson anchors under vertical pull-out, and friction and reverse end bearing coefficients based on model tests. The values of friction and reverse end bearing coefficients put in similar ranges with literature values, but are still lower than those suggested in design guides. It is, therefore, suggested the current model tests may predict qualitative trends of suction caisson anchors' behaviors. As subsequent works, based on current results, it is planned to conduct cyclic tests to estimate the permanent behavior of anchors under oceanic environments.

Key words : Model test, Suction caisson anchor, Coefficient reverse end bearing, Coefficient of friction

요 지

풍력발전은 신재생 에너지 중 가장 유망하다고 판단되는 에너지 중 하나이다. 심해에서는 부유식 풍력발전기가 가장 경제적인 것으로 평가받고 있으며, 이에 따라 부유식 해상풍력발전기에 대한 연구가 세계적으로 활발하게 진행되고 있다. 해상풍력발전기의 개발에는 부유체를 해양지반에 고정하는 앵커의 개발이 필수적이며, 석션케이스 앵커는 현재까지 가장 널리 쓰이는 해양앵커 중 하나이다. 본 논문은 모형실험을 통해 카울리나이트 점토지반에 관입된 석션케이스 앵커의 수직인발력을 분석하고, 수직인발력으로부터 점토와 앵커 사이의 마찰계수와 앵커의 선단 역지지계수를 산정한다. 산정된 마찰계수와 역지지계수는 기존의 문헌들의 결과와는 유사한 경향을 보이나, 현재 설계에 적용되는 값들보다는 다소 작은 값을 나타낸다. 따라서, 본 모형실험장비는 해양앵커의 정성적 거동을 해석하는데 더 적절한 것으로 판단된다. 향후, 본 논문의 결과를 바탕으로 반복하중 하 석션케이스 앵커의 거동 계측을 통해 해양환경에서 앵커의 영구변형을 산정하기 위한 연구를 이어 진행할 예정이다.

핵심용어 : 모형 실험, 석션 케이스 앵커, 역 선단 지지력 계수, 주면 마찰력 계수

1. 서 론

기후변화협약에 의한 온실가스 감축을 위한 환경적 요구와 유가 불안 시대의 에너지 확보 요구로 인해 신재생에너지 개발에 관한 기술은 세계적으로 중요한 기술로 대두되었다. 이중 해상 풍력에너지는 여러 신재생에너지 기술 중 가장 촉망 받는 에너지원의 하나이며, 이에 따라 최근에는 얕은 해안에 서의 해상풍력 구조물뿐만 아니라 심해에서의 부유식 풍력발

전장치와 이의 기반시설에 대한 연구도 활발하게 이루어지고 있다(Goupee *et al.*, 2012; Cermelli *et al.*, 2012). 부유식 풍력발전장치는 해상의 혹독한 기후 및 하중 하에 노출되어 있으며, 앵커의 인발력을 포함한 풍력발전기 구조물 안정성의 합리적인 해석은 에너지 기반시설의 방재를 위해 필수적인 요소이다.

석션케이스는 심해의 부유체에 적용될 수 있는 앵커 기술로서 세계적으로 석유시추 플랜트 개발과 관련해 가장 널리 시

*부산대학교 사회환경시스템공학부 석사과정(E-mail: yusuk789@gmail.com)
Graduate Student, School of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

**부산대학교 사회환경시스템공학부 석사과정
Graduate Student, School of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

***교신저자. 정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학부 조교수(Tel: +82-51-510-7627, Fax: +82-51-513-9596, E-mail: jahn@pusan.ac.kr)
Corresponding Author: Member, Assistant Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

Fig. 1. Installation of Suction Caisson Anchor (after Goodman, 1961).

공되고 있는 방법 중 하나이다. 석션 케이슨은 자중에 의하여 해상저면에 관입되고, 펌프를 이용하여 케이슨 내부의 압력을 외부의 압력보다 낮게 만드는 방법으로 최종관입 깊이까지 시공을 완료한다(Randolph and Gourvenec, 2011). Fig. 1은 석션케이슨 관입 과정의 개략도를 보여준다. 석션 케이슨의 인발력 및 거동은 모형시험, 원심분리기 시험 등의 실험적 방법(Brown and Nacci, 1971; Fuglsang and Steensen, 1991; Andersen *et al.*, 1993; Watson and Randolph, 1997; Clukey and Morrison, 1993), 그리고 수치적 및 해석적 방법(Deng and Carter, 2002; Cao *et al.*, 2003; Aubeny *et al.*, 2003; Zhan and Liu, 2010)을 통하여 연구가 지속되어 왔다.

본 연구에서는 카올리나이트 지반에서 모형 석션케이슨 앵커의 수직 인발 실험을 통해 최대 수직 지지력 및 주요 계수들을 산정한다. 단일벽 및 이중벽 앵커의 두 가지 모형앵커를 사용하였으며, 석션케이슨 상부캡의 통공이 밀폐된 경우와 그렇지 않은 경우를 고려하였다.

2. 시료 및 실험 방법

2.1 점토 시료

국내 서·남해안 지역의 해상점토는 카올리나이트(Kaolinite), 일라이트(Illite), 몬모릴로나이트(Montmorillonite) 등의 2가지 이상의 주요 광물로 구성된 양상을 보이며, 이와는 대조적으로 부산 점토는 카올리나이트가 주된 광물 성분을 이루는 것으로 알려져 있다(Kim, 2012). 또한 카올리나이트는 지반 공학 분야에서 가장 널리 실험적 연구에 사용되어 온 점토광물이며 이에 따라 그 기본 물성이 잘 알려져 있다. 본 연구에서는 카올리나이트 점토로 모형지반을 조성하여 앵커의 거동 분석을 위한 모형실험에 사용하였다. Table 1에 카올리나이트와 부산점토와의 화학적 성분을, Table 2에는 부산, 광양만 점

Table 1. Chemical Compositions of Kaolinite and Busan Clay (Na, 2012)

Composition	Busan Clay	Kaolinite
SiO ₂	47-65	51.3
Al ₂ O ₃	13-21	38.2
Fe ₂ O ₃	3-1	0.51
CaO	1-9	0.13
MgO	1-4	0.06
K ₂ O	1-3	0.70
NaO ₂	0.2-3	0.12

Table 2. Physical Properties of Kaolinite and Busan, Kwangyang Clay(Na, 2012)

	Busan Clay	Kwang-yang Clay	Kaolinite
Liquid Limit (%)	51-60.2	71.2-80.8	75.7-82.4
Plasticity Index (%)	23-35.6	25.2-29.7	42.5-49.8
Specific Gravity	2.65	2.65	2.65

토와의 토질특성을 비교하였다(Na, 2012).

연구에 사용한 카올리나이트는 인도네시아 산으로 분말 형태의 건조된 카올리나이트를 공급받아 원하는 함수비로 성형하여 사용하였다.

2.2 실험 장비

본 연구에 사용되는 하중 재하장치는 전동모터를 구동하여 하중을 재하하는 방식으로 설계 및 제작하였으며 장비 및 장비의 주요 치수가 Fig. 2에 주어져 있다. 해상에서의 부유식 해상풍력발전기는 바람, 파도, 해류 등의 영향으로 수평 및 수직의 하중이 모두 가해지며, 본 하중은 계류장치를 따라 지반

Fig. 2. Actuator.

Fig. 3. Load Cell.

Fig. 4. Single-Wall Suction Caisson Anchor.

에 관입된 앵커에 전달되게 된다. 이러한 조건 하에서 앵커가 받는 하중을 모사하기 위해 하중 재하장치는 수직, 수평 방향으로 하중을 재하할 수 있도록 설계되었다. 본 논문에서는 재하장치의 수직재하 기능을 사용하여 수직하중 하에서의 앵커의 거동을 분석하였다.

하중 재하장치로부터 재하되는 하중은 Fig. 3에 보인 로드셀을 이용하여 측정하였다. 본 로드셀은 압축과 인장을 모두 측정할 수 있으며 분해능은 1.2314 mV/V, 허용하중은 ± 500 N이다.

실험에 사용된 모형 석션케이스는 중 단일벽(Single-Wall) 케이스는 홀 겹의 알루미늄 파이프와 상단의 캡으로 구성된다 (Fig. 4). 모형의 몸통 부분은 직경 80 mm, 두께 1.5 mm, 높이 180 mm인 파이프로 구성되어 있고, 이의 상부가 캡으로 마감되어 있다. 해상에 실제 시공되는 석션케이스 앵커의 크기를 5m라고 가정했을 때 본 모형의 스케일은 1/62.5에 해당한다.

Fig. 5에서 보인 대로 단일벽 석션케이스의 상부에는 하중 재하장치 및 로드셀과 연결하기 위한 연결부가 있으며, 상부 캡에는 통공을 설계하였다. 통공을 폐쇄하는 것으로 석션케이스에 하중이 작용할 경우 지를 지지하기 위하여 석션이 발현되는 것을 모사하며, 통공을 개방하는 경우에는 케이스에 석션이 발현되지 않는 것을 가정한다. 통공에는 구멍 크기에 맞도록 제작된 나사에 그리스를 발라 조립 및 분해하는 것으로

Fig. 5. Upper Cap of Single-Wall Caisson.

상부 캡의 밀폐 여부를 조절한다. 또한 실험 시에는 항상 앵커 몸체 부분과 상부 캡의 접속부에 그리스를 발라 접속부의 틈을 밀폐하였다.

단일벽 케이스는 그 구조가 간단한 반면 앵커의 내·외부에서 발현되는 인발력을 분리하여 측정할 수 없다는 한계가 있다. 이에 따라, 모형 케이스의 안쪽에서 발현되는 저항력을 전체 저항력과 분리하여 측정하기 위해 이중벽(Double-Wall) 석션케이스 앵커를 설계, 제작하였다. 이중벽 앵커의 설계는 El-Sherbiny(2005)의 연구를 참조하였으며, Fig. 6에 보인 대로 내부와 외부 두 개의 실린더로 구성되어 있으며, 내부 실린더의 상부캡과 외부 실린더의 상부에 모두 로드셀이 장착된다. 외부에 설치된 로드셀로부터 앵커 전체의 저항력을, 내

(a) Parts

(b) Assembled

Fig. 6. Double-Wall Caisson.

Fig. 7. Kaolinite Clay.

부의 로드셀로부터 내부의 저항력을 분리하여 측정할 수 있다. 단일벽 앵커의 경우와 마찬가지로 이중벽 앵커의 내부 실린더 상부 캡에는 통공이 설치되어 있으며, 필요에 따라 이를 개방·폐쇄할 수 있다. 이중벽 케이스 역시 내부 앵커의 몸체와 캡의 접촉 부분의 틈은 그리스로 밀폐하였으며, 내부 캡 통공의 폐쇄 시에도 역시 그리스를 사용하였다.

실험에 사용된 카올리나이트는 Fig. 7과 같이 직경 40 cm, 높이 40 cm인 원통의 토조에 성형하였다. 본 원통의 직경은 모형 앵커 직경의 5배에 해당한다. 실험 시에 앵커는 지반의 직경의 2배인 160 mm 만큼 관입되며, 이에 따라 앵커 관입 후 앵커의 하단 부와 고정단(원통 하단)의 거리는 앵커 직경의 3배가 된다.

2.3 실험 절차

모형실험을 위해 분말 형태의 카올리나이트 건조시료를 함수비가 60~70% 범위에 조성되도록 배합하였다. 배합 후에는 시료 내에 공극이 생기지 않도록 유의하며 토조에 적당한 깊이의 층을 만들며 손으로 다져 지반을 조성하였다. 지반 조성 후에는 시료 내의 수분증발을 방지하기 위해 점토 표면이 물에 잠기도록 유지한 후 7~10일 동안 방치하였다.

이 후 조성된 지반에 하중 재하장비를 이용하여 모형 앵커를 지반에 관입하였다(Fig. 8). 이를 위해 앵커의 상부에 봉이 연결된 캡을 씌워 하중 재하장치와 접속하며, 지반의 교란을 최소화 하기 위해 앵커의 관입 속도는 하중 재하장치의 가장 낮은 구동속도인 1.7 mm/s를 사용하였다. 앵커의 관입 시에는 항상 통공을 개방하였다. 앵커의 관입 후에는 인발 시험 전까지 다시 3일간 앵커와 시료를 방치하였다.

조성된 지반의 강도를 측정하기 위하여, 앵커 인발시험 전·후에 베인전단시험을 수행하여 비배수전단강도를 산정하였다. 실험에 사용된 베인전단시험기의 측정가능한 강도의 범위는 0~260 kPa이며, 지반강도에 따라 각기 다른 베인을 사용하여 강도를 측정하도록 5개로 다른 규격의 베인이 준비되어 있다(Humboldt Mfg. Co., 2013). 본 연구에서는 20×40 mm

Fig. 8. Model Anchor Installed.

Fig. 9. Test Setup.

크기의 베인을 사용하여 회전시 발생하는 토크 저항력을 측정, 비배수전단강도 산정에 사용하였다. 매 측정시마다 원형 토조 가장자리의 세 곳에서 각각 20, 90, 220, 410, 670 mm의 높이에서 베인시험을 수행하였다.

시료의 조성과 앵커의 관입이 완료된 후 앵커의 인발실험은 Fig. 9와 같이 앵커 상부와 하중 재하장치에 케이블을 연결하여 사용하였다. 본 연구의 목적은 앵커의 정적 거동분석이므로, 앵커 인발시험 시에는 하중 재하장치 가장 낮은 구동속도(1.7 mm/s)로 인발하였다. 인발실험은 인발시 케이스 내에 석션이 작용하는 경우와 그렇지 않은 경우를 모사하기 위해 앵커 상부 캡의 통공을 폐쇄하거나 개방한 상태에서 수행하였다.

3. 앵커 인발력 및 계수

앵커 상부 캡의 통공을 개방하여 인발실험을 수행하는 경우에는, 앵커가 앵커 내측면과 외측면의 마찰력을 통해 저항을 하게 된다. 이에 따라 통공 개방 시에는 앵커 내부에 지반의 폐쇄 없이 앵커 자체만 인발되는 파괴 경향을 나타내었다(Fig. 10(a)). 하지만, 통공을 폐쇄 후 실험하는 경우에는, 앵커 내 지반이 앵커와 일체 거동을 하여 앵커는 앵커 내측면의 마찰력과 앵커 하부에서 발현되는 선단 역지지(Reverse End

(a) Open Top

(b) Closed Top

Fig. 10. Failure of Model Anchors.

Bearing) 저항력에 의해 인발에 대해 저항하게 된다. 이에 따라, 통공 폐쇄 후 수행한 인발실험에서는 앵커 내부의 지반이 앵커 내에 폐쇄되며 파괴되는 경향이 관찰되었다(Fig. 10(b)).

통공을 개방하는 경우 앵커의 인발력은 앵커의 내측면과 외측면에 의해 발생되며, 이에 따라 앵커의 최대 인발력 Q_{us} 은 다음의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{us} = A_{w,in} \alpha s_{u,w} + A_{w,out} \alpha s_{u,w} \quad (1)$$

여기서 $A_{w,in}$ 은 앵커 몸체의 내측 넓이, $A_{w,out}$ 은 앵커 몸체의 외측 넓이, α 는 점토와 앵커의 마찰계수, $s_{u,w}$ 는 앵커 관입 깊이 내의 평균 비배수 전단강도를 나타낸다. 한편 통공을 폐쇄하는 경우의 앵커 인발력 Q_{us} 은 앵커 외측면의 마찰력과 앵커 하단부의 선단 역지력(Retard End Bearing Capacity)으로 분리할 수 있으며, 이는 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$Q_{us} = A_{w,out} \alpha s_{u,w} + A_{tip} N_c s_{u,tip} \quad (2)$$

본 식에서 A_{tip} 지반을 포함한 앵커 원형 단면의 넓이(혹은, 상부캡의 원형 단면적), N_c 는 역지력 계수, $s_{u,tip}$ 가 앵커 끝단부의 비배수 전단강도를 나타낸다.

단일벽 앵커를 사용하는 경우에는 먼저 통공개방 실험을 통해 식 (1)로부터 마찰계수 α 를 산정할 수 있다. 이 후 산정된

Table 3. Analysis Cases

	Open Top	Closed Top
Single-Wall	O1	C1
Double-Wall	O2	C2

Fig. 11. Behavior of Open Top Single-Wall Anchor.

Fig. 12. Behavior of Closed Top Single-Wall Anchor.

α 값과 통공폐쇄 실험의 결과를 식 (2)에 대입하여 선단 역지력 계수 N_c 를 계산할 수 있다. 이중관 앵커를 사용하는 경우에는 앵커 전체의 인발력은 외부 로드셀에서, 내부에서 발생하는 인발력은 내부 로드셀에서 측정되므로, 이로부터 앵커 내·외부에서 발생하는 인발력을 따로 산정할 수 있다. 이중관 앵커의 통공을 개방하여 실험을 수행하는 경우 내부에 발생하는 인발력은 식 (1)의 $A_{w,in} \alpha s_{u,w}$ 에 해당하고, 외부의 인발력은 $A_{w,out} \alpha s_{u,w}$ 에 해당하므로, 앵커의 내·외부 표면에서의 마찰계수 α 를 분리하여 산정할 수 있다. 또한 통공을 폐쇄하는 경우에는 내부에서 발생하는 인발력은 식 (2)의 $A_{tip} N_c s_{u,tip}$ 외부 인발력은 $A_{w,out} \alpha s_{u,w}$ 에 해당하므로 역지력 계수 N_c 와 마찰계수 α 를 동시에 산정할 수 있다.

앵커 인발실험은 Table 3에 보인대로 단일벽, 이중벽 앵커에 대해 각각 통공을 개방 혹은 폐쇄한 후 수행하였다. 각각의 조건 하에서 3~4회의 인발실험이 수행되었으며 Fig. 11과 12는 각각 통공을 개방, 폐쇄한 단일벽 앵커의 인발하중-변위 결과를, Fig. 13과 14는 이중벽 앵커의 결과를 보여준다. 그림

Fig. 13. Behavior of Open Top Double-Wall Anchor.

Fig. 14. Behavior of Closed Top Double-Wall Anchor.

에 보인 대로 통공의 개방, 폐쇄에 따른 하중-변위 결과의 경향의 차이는 관찰되지 않았다.

앵커 인발시의 최대 반력으로부터 앵커의 인발력을 산정하였으며 그 결과가 Table 4에 주어졌다. 표에 주어진 실험번호의 앞부분은 실험 수행조건을, 뒷부분은 실험수행 횟수를 나타낸다. 예를 들어, 실험번호 O1-1은 통공을 개방한 단일벽

Table 4. Results of Holding Capacity

Case	Q_{us} (N)	$s_{u,w}$ (kPa)	w (%)
O1-1	126.4	5.71	67.4
O1-2	129.9	6.13	68.9
O1-3	131.3	5.64	66.8
O1-4	143.6	6.63	67.1
C1-1	210.2	5.11	60.4
C1-2	165.7	5.30	65.3
C1-3	200.1	6.40	63.8
O2-1	160.9	6.34	64.6
O2-2	201.1	6.99	68.5
O2-3	146.8	5.54	64.2
C2-1	254.1	6.99	68.5
C2-2	156.2	5.46	65.1
C2-3	233.5	8.01	61.4

Table 5. Friction and Reverse End Bearing Coefficients

Case	α	N_c	
O1	0.28~0.29	-	
C1	0.28~0.29	3.15~4.80	
Case	α_{in}	α_{out}	N_c
O2	0.39~0.46	0.28~0.47	-
C2	-	0.37~0.55	1.71~2.02

앵커로 수행한 첫 번째 실험을 나타낸다. 표의 결과로부터 흙의 강도가 비슷한 상태에서 통공을 폐쇄하여 인발실험을 실시하였을 때가 개방하여 실험했을 때 보다 수직 지지력이 큰 것을 알 수 있다.

Table 4의 결과를 바탕으로 식 (1)과 (2)를 사용하여 앵커의 마찰계수 α 와 역지지계수 N_c 를 산정하였으며 그 결과가 Table 5에 제시되어 있다. 모형실험을 통해 얻어진 앵커의 마찰력 계수는 DNV(2005)에서 권장하는 설계값 보다는 낮으나, Rao *et al.*(1997), El-sherbiny(2005) 등의 기존 모형앵커 연구결과와 근사한 값을 가진다. 앵커의 역지지계수 $N_c = 3.15 \sim 4.80$ 역시 설계 권장치(DNV, 2005; Randolph and Gourvenec, 2011) 보다는 낮은 값을, 기존의 모형시험 결과(Rao *et al.*, 1997; El-sherbiny, 2005)와는 유사한 경향을 나타낸다.

4. 결 론

본 연구에서는 모형실험을 통하여 석션케이슨 앵커의 수직 거동을 관찰하고, 이 결과로부터 앵커의 인발력과 마찰계수 및 역지지계수를 산정하였다. 인발시험은 앵커 전체의 인발력을 측정할 수 있는 단일벽 모형앵커와 앵커 내·외부에 발현되는 인발력을 분리하여 측정할 수 있는 이중벽 모형앵커를 사용하여 각각의 앵커의 통공을 개방하거나 폐쇄한 상태에서 수행하였다.

앵커의 통공을 개방하는 경우, 즉 앵커 상부캡에 석션이 발현되지 않는 경우의 모형앵커의 파괴양상은 앵커가 내외측벽과 지반과의 마찰에 의해 저항하다 뽑히는 양상을 보여 인발 후 앵커 내에 지반의 폐색현상을 찾아볼 수 없었다. 반면 앵커의 통공을 폐쇄하는 경우, 즉 앵커 상부캡에 석션이 발현되는 경우에는 인발 후 앵커에 지반이 폐색되는 것을 확인할 수 있었다. 대체적으로 통공을 폐쇄하는 경우의 인발력이 그렇지 않은 경우보다 크게 나타났다. 하지만 앵커 통공의 개폐여부가 앵커의 하중-변위 곡선의 형태에 미치는 영향은 찾을 수 없었다.

모형실험의 결과로부터 산정한 마찰계수와 역지지계수는 모두 현재 설계기준에 권장되는 값보다 작게 나타났으나, 기

존 문헌의 모형실험결과와는 그 경향이 일치하는 것을 볼 수 있었다. 따라서 1 g 중력 하의 모형앵커실험은 실제 구조물의 정량적인 해석 보다는 정성적인 해석에 더 적합함을 확인하였다.

추후 본 연구의 결과를 바탕으로 반복하중 하의 앵커의 거동을 분석 및 예측하기 위한 연구를 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 지역혁신인력양성사업(NRF-2011 H1B8A2003334)과 중견연구자지원사업(NRF-2011-0029426)의 지원으로 수행된 것으로, 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

- Andersen, K.H., Dyvik, R., Schroeder, K., Hansteen, O.E., and Bysveen, S. (1993) Field tests of anchors in clay II: predictions and interpretation, *J. Geot. Eng. Div., ASCE*, Vol. 19, No. 10, pp. 1532-1549.
- Aubeny, C., Han, S., and Murff, J. (2003) Inclined load capacity of suction caissons, *Int. J. Numer. Anal. Methods. Geomech.*, Vol. 27, No. 14, pp. 1235-54.
- Brown, G. and Nacci, V. (1971) Performance of hydrostatic anchors in granular soils, *Offshore Technology Conference*.
- Cao, J., Phillips, R., Popescu, R., Audibert, J., and Al-Khafaji, Z. (2003) Numerical analysis of the behavior of suction caissons in clay, *Int. J. Offshore Polar. Eng.*, Vol. 13, No. 2.
- Cermelli, C., Roddier, D., and Weinstein, A. (2012) Implementation of a 2MW floating wind turbine prototype offshore portugal, *Offshore Technology Conference*.
- Clukey, E.C. and Morrison, M.J. (1993) A centrifuge and analytical study to evaluate suction caissons for TLP applications in the gulf of mexico. *Design and Performance of Deep Foundations: Piles and Piers in Soil and Soft Rock*, pp. 141-156.
- Deng, W. and Carter, J. (2002) A theoretical study of the vertical uplift capacity of suction caissons, *Int. J. Offshore Polar. Eng.*, Vol. 12, No. 2.
- Det Norske Veritas, DNV (2005) *Geotechnical design and installation of suction anchors in clay*, GAN Grafisk, Norway.
- El-Sherbiny, R. (2005), *Performance of suction caisson anchors in normally consolidated clay*, Ph.D. Thesis, University of Texas at Austin.
- Fuglsang, L. and Steensen-Bach, J. (1991) *Breakout resistance of suction piles in clay*, *Proceedings of the international conference: Centrifuge*.
- Goodman, L.D., Lee, C.N., and Walker, F.J. (1961) The feasibility of vacuum anchorage in soil, *Geotechnique*, Vol. 1, No. 3, pp. 356-359.
- Goupee, A., Koo, B., Lambrakos, K., and Kimball, R. (2012) Model tests for three floating wind turbine concepts, *Offshore Technology Conference*.
- Humboldt Mfg. Co. (2013) <http://www.humboldtmg.com/>, accessed in 2013.
- Kim, M. (2012) *Characteristics of reconstituted clays for model tests*, M.S. Thesis, Pusan National University (in Korean).
- Na, H. (2012) *Undrained shear strength of reconstituted clays based on triaxial compression tests*, M.S. Thesis, Pusan National University (in Korean).
- Randolph, M. and Gourvenec, S. (2011) *Offshore geotechnical engineering*, Spon Press, New York.
- Rao, N.S., Ravi, R., and Prasad, S.B. (1997) Pullout behavior of suction anchors in soft marine clays, *Marine Geosources & Geotechnology*, Taylor and Francis, London, Vol. 15, No. 2, pp. 95-114.
- Watson, P. and Randolph, M. (1997) Vertical capacity of caisson foundations in calcareous sediments, *International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE)*, pp. 784-790.
- Zhan, Y. and Liu, F. (2010) Numerical analysis of bearing capacity of suction bucket foundation for offshore wind turbines, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 15, pp. 633-644.

Received	February 10, 2014
Revised	February 17, 2014
Accepted	March 13, 2014