유한요소해석을 통한 얇은 석션 케이스 앵커의 인발력

Holding Capacity of Shallow Suction Caisson Anchor based on Finite Element Analysis

안재훈* · 이한민** · 김윤태***

Ahn, Jaehun · Lee, Hanmin · Kim, Yun-Tae

Abstract

Foundations of offshore structures have been actively studied to provide design guides for oil platforms in the past. Presently, this asset from oil industry now finds its application in the design of the foundations for offshore wind turbines. The analytical solutions for the hold capacity of suction anchors have been developed based on limit equilibrium and limit analysis theorems and often compared to the results of novel approaches such as finite element (FE) analysis. However, some solutions show discrepancy with the FE analysis results under specific conditions, say under certain value of the ratio of length to diameter. The main scope of this paper is to analyze the failure envelope of suction caisson anchors, especially with an aspect ratio of 2 based on FE analysis. The results will provide a basis to enhance the existing plasticity solutions for anchor hold capacity. The effect of soil disturbance and location of optimal loading point are also investigated.

Key words : Suction caisson anchor, Anchor holding capacity, Failure envelope, Optimal loading point

요 지

해양구조물 기초에 대한 연구는 석유 시추를 위한 기술과 발전을 같이해 왔으며, 여기에서 얻어진 기술은 최근 사회적 요구로 인해 급성장하고 있는 분야인 해상풍력발전기 기초에 대한 설계 및 연구에도 적용되고 있다. 현재 상용화된 해상풍력발전기는 주로 수심이 얇은 해상을 대상으로 하지만, 나아가 수심이 깊은 곳의 풍력발전기에 대한 연구도 계속되고 있다. 수심이 깊어지면 발전기 플랫폼의 형태가 부유식이 되는 것이 경제적인 것으로 알려져 있다. 부유식 발전기는 해상지반에 앵커에 의해 지지되며, 앵커의 자중 및 부유식 구조물에 가해지는 바람, 해류 등의 영향으로 앵커에는 수직, 수평의 조합하중이 전달된다. 본 연구에서는 유한요소해석을 통해서 길이-직경비가 2인 석션앵커의 파괴포락선을 산정하고, 기존의 앵커 인발력 산정식과 비교한다. 또한 앵커의 관입시 발생하는 지반의 교란 정도에 따른 인발력 감소와 최적의 하중 재하 위치를 검토한다.

핵심용어 : 석션 케이스 앵커, 앵커 인발력, 파괴포락선, 최적 하중재하점

1. 서 론

전통적으로 해양구조물 기초 및 앵커에 대한 연구는 석유 시추를 위한 기술과 발전을 함께 해왔으며, 최근 급증하는 에너지의 수요로 인하여 해상풍력발전기 기초에 대한 설계 및 연구에도 적용되고 있다. 현재 대부분의 해상풍력발전기는 수심 30 m 정도까지의 얇은 해상에 위치해 있으며, 기초의 형식으로는 모노파일 사용되고 있다. 하지만 80 m 이상의 심해에서는 부유식 풍력발전장치가 더 경제적인 것으로 보고되고 있다(Musial 등, 2006). 이에 따라, 최근에는 심해에서의 부유식 풍력발전기에 대한 연구 뿐 아니라 실증모델의 시

공도 이루어진바 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.

본 연구는 부유식 해상풍력발전기 및 전통적인 부유식 플랫폼에 사용되는 석션 케이스 앵커의 인발력을 분석하는 것을 주된 목적으로 한다. 석션 케이스는 시공시 먼저 자중에 의하여 해상지면에 관입되고, 이 후 케이스의 최종 관입을 위하여 펌프를 이용해 내부의 물을 외부로 배수시켜 내부의 압력을 외부보다 낮게 만든다(Randolph and Gourvenec, 2011).

*정회원. 부산대학교 사회환경시스템공학부 조교수(E-mail: jahn@pusan.ac.kr)

Member. Assistant Professor. 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. 부경대학교 해양공학과 부교수(Tel: +82-51-629-6587, Fax: +82-51-629-6590, E-mail: yuntkim@pknu.ac.kr)

Corresponding Author. Member. Professor. Department of Ocean Engineering. Pukyong National University

Fig. 1. Installation of suction caisson (after Andersen and Jostad, 1999)

Fig. 1에 석션 케이슨 시공과정의 개략도가 제시되어 있다.

석션 케이슨의 개념은 Goodman 등(1961)에 의하여 처음 도입되었으며, 이후 모형실험, 원심모형실험 등의 실험적 방법(Brown and Nacci, 1971; Fuglsang and Steensen, 1991; Andersen et al., 1993; Watson and Randolph, 1997; Watson et al., 2000; House and Randolph, 2001; Clukey et al., 1993) 및 수치적 및 해석적 방법을 통한 연구(Deng, 2001; Cao et al., 2002, 2005a, 2005b; House와 Randolph, 2001; Aubeny et al., 2003; Zhan and Liu, 2010)가 계속 되어 왔다.

한계상태해석(Limit Equilibrium)과 극한해석(Plastic Limit Analysis)법과 같은 간략화 된 해석방법이 석션 케이슨 앵커의 인발력을 산정하기 위해 제안되어 왔으며, 이와 같은 간략화 된 방법들은 흔히 유한요소해석과 같이 검증된 기법과 비교하여 검증하는 것이 일반적이다. 한계상태해석이나 극한해석법은 역학적 기본방정식의 일부만을 만족하는 해석법이며, 이를 사용하기 위해서는 먼저 해석대상 구조물의 파괴기재를 합리적으로 가정하는 것이 선행되어야 하지만(Chen, 1975), 유한요소해석은 파괴기재에 대한 가정 없이 지배방정식들을 모두 만족시키는 결과를 산정해 주기 때문이다. 기존에 존재하는 석션 케이슨 앵커 인발력의 예측을 위한 극한해석법의 경우 길이-직경비가 2 이하인 얇은 앵커의 경우에 유한요소해석의 결과와 일치하지 않는 값을 산정하는 것으로 알려져 있다(Aubeny et al., 2003; Supachawarote, 2006; Det Norske Veritas, 2005). 하지만 길이-직경비가 2 이하인 석션 케이슨 앵커도 부유체의 앵커로서 널리 설계 및 시공이 되고 있는 실정이다(Andersen et al., 2003).

본 연구는 기존의 앵커 인발력 산정해가 오차를 보이는 길이-직경비가 2인 석션 케이슨 앵커를 대상으로 유한요소해석을 통해 인발력을 산정하는 것을 주된 목적으로 한다.

2. 유한요소해석 모델

본 연구에서는 유한요소해석을 위해 ABAQUS(2011) 프로

Fig. 2. Dimensions of anchor and soil

Table 1. Meaning of variables

변수	의미
D	케이슨 직경
L	케이슨 길이
θ	앵커 운동각
P	앵커 하중
z_p	최적하중 재하점의 위치
W	해석모델 폭
H	해석모델 깊이
s_u	지반의 비배수 전단강도

그램을 사용하였으며, 해석 대상은 Fig. 2에서 보인바와 같이 지반과 이에 관입된 원통형 석션 케이슨 앵커로 구성된다. 본 해석대상의 구조는 Table 1에 주어진 변수들에 의해 정의된다. 본 연구에서는 서론에 언급한 바와 같이 $L/D=2$ 인 앵커를 해석대상으로 선정하였으며, 해석 시 케이슨의 직경 $D=5$ m를 사용하였다. 해석모델의 폭은 $W=6D$, 깊이는 $H=6D$ 를 사용하였으며, 지반의 물성치는 균일하다고 가정하였다. 해석 대상 및 하중조건의 대칭성에 근거해 유한요소해석은 3차원 모델의 반 단면을 사용하였으며, 해석에 사용된 유한요소모델이 Fig. 3에 주어지 있다.

해석모델의 석션 케이슨 앵커와 지반은 모두 연속체 요소로 묘사하였으며, 이를 위해 일차 하이브리드(linear hybrid) 저감적분요소(reduced integration element)를 사용하였다. 지

Fig. 3. Finite element model

Table 2. Material properties of soil

탄성계수, E	비배수 전단강도, s_u	포아송비, ν
5,000 kPa	10 kPa	0.49

반의 비배수 상태를 가정하고 0.5에 근접하는 포아송비 $\nu=0.49$ 를 사용하였기 때문에 해석의 정확성을 위해 하이브리드 요소를, 해석시간의 단축을 위해 저감적분요소를 사용하였다. 앵커 인발력 산정을 위한 유한요소해석에서의 하이브리드 및 저감적분요소에 대한 사용은 Andersen et al.(2003)에 의해 언급된 바 있다. 본 논문에서 사용한 해석방법은 전응력을 사용하여 지반의 비배수 상태를 고려하는 전응력 해석법이며, 따라서 시간에 따른 과잉간극수압 및 유효응력의 변화는 해석에 고려되지 않는다.

지반의 구성모델로는 점토의 비배수 상태를 해석하기 위해 흔히 사용되는 von Mises 모델을 사용하였으며, 사용된 물성은 Table 2에 주어지 있다. 이 후 수치해석으로부터 주어지는 앵커 파괴포락선 상의 파괴시 하중을 지반의 비배수 전단강도에 정규화된 형태로 제시하므로(Fig. 11), 해석에 사용된 지반의 전단강도와 해석된 앵커 인발력의 절대적인 값보다 이 둘 사이의 비율이 더 의미 있는 값이 된다. Von Mises 모델의 항복응력 σ_y 와 지반의 비배수 전단강도 s_u 의 사이에는 $\sigma_y = \sqrt{3}s_u$ 의 관계가 있다(Andersen 등, 2003). 지반의 탄성계수는 비배수 전단강도의 500배로 설정하였으며($E/s_u=500$), 본 연구에서는 앵커의 파괴 시의 인발력이 주된 고려 대상이기 때문에 해석 시에 변형률이 파괴에 이를 만큼 충분하다면, 사용된 탄성계수의 값은 의미가 크지 않다. 다만, 케이슨의 강체거동을 위해 케이슨의 탄성계수를 지반의 값에 비해 충분히 큰 값(10^8 배)으로 입력하였음을 밝혀둔다. 해석 시 케이슨과 지반은 일체거동 한다고 가정하였으며, 이에 따라 케이슨과 지반 사이 경계의 강도는 지반의 강도에 지배된다. 케이슨 주변 지반의 강도는 케이슨 시공의 영향으로 감소될 수 있으며, 이에 따른 앵커의 인발력의 감소 경향은 별도로 3.1절에 언급하였다.

유한요소 해석 시에는 지반과 앵커의 무게를 고려하지 않았다. 지반의 경우 응력수준에 따라 강도가 변하지 않는 von Mises 모델을 사용하였으므로 지반의 자중은 앵커의 인발력에 영향을 미치지 않는다. 앵커의 수중중량이 존재하는 경우, 그와 같은 정도로 앵커의 수직 인발력이 증가하기 때문에, 이는 유한요소해석 시에 고려하지 않아도 산정된 수직 인발력에 수중중량을 산술적으로 더해 인발력을 고려할 수 있다(Supachawarote, 2006 참조).

본 연구에서 일괄적으로 적용할 파괴상태를 정의하기 위하여 예비해석을 수행하였다. 석션 케이슨을 운동각 $\theta=0^\circ, 22.5^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 90^\circ$ 으로 파괴에 이르도록 변위를 가하였으며, 이때의 수직, 수평 반력을 산출하였다. Fig. 4에 케이슨의 변위에 대한 수직, 수평반력을 확인할 수 있다. 대체적으로 수평반력은 케이슨 직경의 20%에 해당하는 변위 (1 m)에 도달 시 파괴 값에 수렴하는 경향을 보여주며, 수직 반력의 값은 이 후에도 약간의 증가하는 추세를 가지는 것을

(a) Vertical Reaction

(b) Horizontal Reaction

Fig. 4. Reactions developed on anchors

볼 수 있다. 케이슨 직경의 20%는 실제 문제에서는 굉장히 큰 변위이며, 또한 기존의 문헌에서 파괴상태를 정의한 것을 참조하여(예를 들어, Andersen et al., 2003), 직경의 20%에 해당하는 상태를 파괴상태라고 보고 이 때의 반력을 인발력으로 산정하기로 하였다.

유한요소의 크기에 따라 유한요소모델의 전체 시스템의 강성이 달라지고 이에 따라 산정되는 반력, 즉 앵커의 인발력에도 차이가 생기게 된다. 유한요소의 크기에 따른 인발력 산정치를 정량화하려는 시도로 Fig. 3에 보인 유한요소모델에 비해 전체적으로 2배에 해당하는 요소크기를 가진 모델로 인발력 해석을 수행하였으며, 이에 따른 결과가 Fig. 5에 주어지 있다. 그림으로부터 유한요소의 크기는 지반의 강성, 따라서 산정되는 인발력에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있으며, 이에 따라 본 영향을 정량화하기 위하여 인발력과 요소크기의 관계가 대략적으로 선형이라 가정하였다. 본 가정은 기존 문헌(Kausel, 1974)과 저자의 경험으로 볼 때, 근사적으로 타당한 가정이라 판단된다. 이를 바탕으로 산정해 보면 Fig. 3에 보인 기본 유한요소모델을 바탕으로 했을 때에 비해 요소크기의 영향을 배제했을 때, 즉 요소크기가 무한히 작은 경우에 해당하는 수직, 수평인발력은 각각 93%, 96%에 달하는 것으로 나타났다.

Fig. 5. Holding capacities with respect to element size

3. 해석결과 및 앵커 인발력

3.1 관입 시 교란에 따른 인발력

본 절에서는 석션 케이슨의 관입 시 발생하는 주변 지반의 교란 및 강도감소에 따른 앵커의 인발력 변화를 해석하였다. 석션 케이슨의 시공과정에서 케이슨을 둘러싸고 있는 지반은 시공과정에서 교란되며 이에 따른 전단강도의 감소가 발생한다. 교란에 의해 전단강도의 감소율은 지반 종류에 따라 다르겠지만, 본 연구에서는 Andersen과 Jostad(2002)에 의해

보고된 대로 전단강도가 $0.65s_u$ 로 감소한다는 가정 하에 해석을 수행하였다. 케이슨 시공 시 교란된 범위는, 즉 지반의 강도가 $0.65s_u$ 로 줄어드는 범위는 케이슨의 외측 벽으로부터 바깥쪽으로 0부터 최대 0.3 m까지의 범위 내에서 0.05 m 만큼 변화시키며 해석을 수행하였다. 본 해석에는 모두 동일한 유한요소모델을 사용하여 유한요소의 형상에 따른 영향을 배제하였다. 본 해석의 결과가 Fig. 6과 Fig. 7에 주어져 있으며, 그림에서 볼 수 있듯, 케이슨의 인발력은 교란범위에 크게 영향을 받지 않는 것으로 보인다. 다만 교란에 따라 비배

Fig. 6. Vertical capacity and disturbed distance

Fig. 7. Horizontal capacity and disturbed distance

수 전단강도가 원지반의 65% 수준으로 감소하는 경우, 수직 인발력은 교란되지 않은 경우에 비해 대략 83%, 수평 인발력은 95%정도로 감소하는 것으로 보인다. 본 논문의 3.1절에 보인 결과를 제외한 나머지 해석 결과는 모두 지반의 교란효과를 고려하지 않는 경우를 나타낸다.

3.2 최적 하중 재하깊이

석선 케이슨 앵커에 연결된 계류 케이블을 통해 앵커에 수평, 수직 또는 경사하중이 전달되며, 본 케이블이 연결되는, 즉 하중이 재하 되는 위치는 인발력 산정에 중요한 인자이다. 석선 케이슨에 수평하중이 작용하는 경우 하중재하 위치에 따라 Fig. 8에서 보이는바 같이 앵커의 두부는 전방, 후방으로 회전하거나 또는 특정 위치에 재하 할 경우 회전 없이 이동하게 된다. 케이슨의 인발력은 케이슨이 회전 없이 이동할 경우에 최대 인발력을 가지게 된다(Randolph and Gourvenec, 2011). 한편, 원통형 케이슨의 중심선을 따라 수직하중이 재하되는 하중 재하위치에 대한 구분이 무의미하며, 따라서 수

Fig. 8. Behavior of suction caisson according to the location of loading point

Fig. 9. Horizontal capacity and loading point

평하중 하의 최적 하중재하점은 수직, 수평의 조합하중 하에서도 동일한 최적 하중재하점으로 작용할 것이다.

본 절에서는 최적 하중재하점의 존재를 확인하기 위하여 $z/L=0.45$ 에서 0.7인 범위에서 회전을 구속하지 않고 해당 위치에 수평변위를 가하여 파괴에 이르게 하였다. Fig. 9는 하중재하점과 수평 인발력의 관계를 보이며, 본 결과로부터 $z/L=0.565$ 의 위치에서 수평 인발력이 최대가 되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 본 논문에는 보이지 않았으나, $z/L=0.565$ 인 경우에 앵커의 회전이 최소인 것을 확인하였다.

3.3 석선 앵커의 인발력

하중이 최적 하중재하점에 재하 되었을 때, 케이슨의 인발 방향에 따른 인발력의 양상을 분석하기 위하여, 석선 케이슨의 회전을 구속하고 운동 각 $\theta = 0^\circ, 22.5^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 90^\circ$ 로 파괴에 이르도록 변위를 가하였으며, 이때의 파괴포락선과 하중재하경로를 Fig. 10에 보였다. 초기의 하중재하경로는, 즉 변형 초기에는 앵커의 거동이 탄성거동에 의해 지배되기 때문에 수평, 수직 반력이 선형의 관계에 있으며 기울기는 가해진 운동 각 θ 의 값과 동일하게 나타남을 알 수 있다. 이 후, 앵커의 변형이 커지면 탄성거동에서 벗어나 하중재하경로의 기울기가 달라지고 마침내 파괴에 이르게 된다. 지반의 물성으로 사용된 von Mises 모델은 상관소성흐름(associated flow)에 지배되므로, 파괴포락선 상의 수직백터는 앵커의 운동 각 θ 와 동일하게 된다. 이 또한 Fig. 10의 결과에서 확인할 수 있다.

Fig. 11에는 Fig. 10에서의 인발력의 수직분력 V , 수평분력 H 를 비배수 전단강도와 직경의 길이를 이용하여 정규화한 결과를 나타낸다. Fig. 11로 부터 균일한 비배수 점토에 $L/D=2$ 인 석선 케이슨 앵커가 시공된 경우, 앵커와 지반이 일체 거동 한다는 가정 하에 수직, 수평 및 경사하중 하 앵커의 인발력을 산정할 수 있다. 다만, 해석에 사용된 유한요소 크기의 영향으로, 본 결과는 대략 5% 정도 과대 산정된 값이라는 것을 밝혀둔다. 또한, Fig. 11에 Aubeny 등(2003)이 제안한 극한해석 상계법(Upper Bound Solution, UBS)의 해를 이용한 결과를 비교하였다. 그림의 수평, 수직 축은 각각 지반의 비배수 전단강도 s_u 와 케이슨의 직경 D 로 정규화한

Fig. 10. Failure envelope

Fig. 11. Normalized failure envelope

수평, 수직 인발력을 나타낸다. 서론에 언급한 대로 USB는 역학적 기본방정식 중 일부만을 만족하며, 또한 참값을 과대 산정하는 경향이 있으므로(Chen, 1975), 그림에 보인 경향은 타당하며 역학적 기본방정식을 모두 만족하는 유한요소해석의 결과가 참값에 더 근접하는 것으로 판단할 수 있다.

최적 하중재하점 역시 본 연구에서 유한요소해석을 통해 구해진 값은 $z/L=0.565$, 극한해석(UBS) 값은 $z/L=0.57$ 로 두 값은 매우 근접하는 경향을 보였다.

4. 결 론

길이와 직경의 비가 2인 석션 케이슨 앵커의 인발력을 산 위해 유한요소해석을 수행하였다. 해석 시 지반의 비배수 전단강도는 균일하고 앵커와 지반 사이에는 균열이 없이 일체 거동한다는 가정을 적용하였다.

본문에 보인 결과로부터, 비배수 전단강도와 앵커의 직경이 알려진 경우, 앵커의 파괴포락선을 산정할 수 있다. 또한 앵커의 지중은 해석에 고려하지 않았지만, 인발력의 수직분력에 산술적으로 앵커의 수중중량을 더하는 것으로 고려할 수 있다.

제안된 파괴포락선을 통해 산정된 인발력은 유한요소코기의 영향으로 대략 5% 정도 과대 산정될 수 있음을 밝혀준다. 또한 앵커 관입 시 지반교란의 영향으로 앵커의 강도가 원지반의 65% 수준으로 떨어지는 경우, 실제 인발력은 제안된 파괴포락선으로부터 산정된 인발력 보다 수직분력 83%, 수평분력 95% 정도 수준에 머무를 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 한국에너지기술평가원의 신재생에너지기술개발사업(20113020020010)과 교육과학기술부 한국연구재단의 중견연구자지원사업(2012-047702)의 지원으로 수행된 것으로, 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

Abaqus (2011) *User's Manual*, Version 6.11.
 Andersen, K.H., Dyvik, R., Schroeder, K., Hansteen, O.E. and Bysveen, S. (1993) *Field tests of anchors in clay : predictions and*

interpretation, J. Geot. Eng. Div, ASCE, Vol. 119, No. 10, pp. 1532-1549.
 Anderson, K.H. and Jostad, H.P. (1999) *Foundation design of skirted foundations and anchors in clay*, Proc. Annual Offshore Technology Conference, Houston, OTC 10824, pp. 383-392.
 Andersen, K.H. and Jostad, H.P. (2002) *Shear strength along outside wall of suction anchors in clay after installation*, Proceedings of the 12th international offshore and polar engineering conference, pp. 795-799.
 Andersen, K.H., Murff, J.D. and Randolph, M. F. (2003) *Deepwater anchor design practice phase II report to API/Deepstar volume II-suction caisson anchors*, Technical Report, The Offshore Technology Research Center, Texas A&M University.
 Aubeny, C.P., Han, S.W. and Murff, J.D. (2003) *Inclined load capacity of suction caissons*, Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech, 27, pp. 1135-1254.
 Brown, G.A. and Nacci, V.A. (1971) *Performance of hydrostatic anchors in granular soils*, Proc. annual offshore technology conference, Houston, OTC 1472, pp. 533-543.
 Cao, J., Phillips, R., Popescu, R. and Ak-Khafaji, Z. (2002) *Numerical analysis of the behavior of suction caissons in clay*, Proceedings of the 12th international of offshore and polar engineering conference, pp. 795-799.
 Cao, J., Li, Y., Tjok, K.M. and Audibert, J. M.E. (2005a) *Validation of the use of beam column method for suction caisson design*, Proc. Int. Symp., On Frontiers in offshore geotechnics, ISFOG, pp. 325-331.
 Cao, J., Audibert, J.M.E., Tjok, K.M. and Hossain, M.K. (2005b) *Validation of the use of finite element method for suction caisson design*, Proc. Int. Symp On Frontiers in Offshore Geotechnics, IS-FOG, pp. 333-339.
 Cermelli, C.A., Roddier, D.G. and Weinstein, A. (2012) *Implementation of a 2MW floating wind turbine prototype offshore Portugal*, Proc. annual offshore technology conference, Houston, OTC 23492.
 Chen, W.-F. (1975) *Limit analysis and soil plasticity*, Elsevier, New York.
 Cluky, E.C. and Morrison, M.J. (1993) *A centrifuge and analytical study to evaluate suction caissons for TLP applications in the Gulf of Mexico*, Geotechnical special publication, ASCE, 38, pp. 141-156.
 Det Norske Veritas (2005) *Geotechnical design and installation of suction anchors in clay*, Det Norske Veritas, Norway.
 Deng, W. (2001) *Study on the inclined uplift capacity of suction caissons*, Ph.D. Thesis, University of Sydney.
 Fuglsang, L.D. and Steensen, B.J.O. (1991) *Breakout resistance of suction piles in clay*, Proceedings of international conference, Centrifuge 91, A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 153-159.
 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.J., Koo, B.J., Lambrakos, K.F. and Kimball, R.W. (2012) *Model tests for three floating wind turbine concepts*, Proc. annual offshore technology conference, Houston, OTC 23470.
 House, A.R. and Randolph, M.F. (2001) *Installation and pull-out capacity of stiffened suction caissons in cohesive sediments*, Proceedings of the eleventh international offshore and engineering conference, Vol. 2, pp. 574-580.
 Kausel, E. (1974) *Forced Vibrations of Circular Foundations on Layered Media*, Ph.D. dissertation, Massachusetts institute of technology (MIT), Cambridge, Massachusetts., USA.
 Musial, W. and Butterfield, S. (2006) *Energy form offshore wind*,

- annual offshore technology conference*, Houston, OTC 18355.
- Randolph, M.F. and Gourvenec, S. (2011) *Offshore geotechnical engineering*, Spon Press, New York.
- Supachawarote, C. (2006) *Inclined load capacity of suction caisson in clay*, PhD Thesis, The University of Western Australia, Australia.
- Watson, P.G. and Randolph, M.F. (1997) *Vertical capacity of caisson foundation in calcareous sediments*, Proceedings of the 7th international society of offshore and polar engineering conference, pp. 152-159.
- Watson, P.G., Randolph, M.F. and Bransby, M.F. (2000) *Combined lateral and vertical loading of caisson foundations*, Proc. Annual offshore technology conference, Houston, OTC 12195, pp. 797-808.
- Zhan, Y.G. and Liu, F.C. (2010) *Numerical analysis of bearing capacity of suction bucket foundation for offshore wind turbines*, EJGE, Vol. 15, pp. 633-644.

◎ 논문접수일 : 2012년 10월 04일
 ◎ 심사의뢰일 : 2012년 10월 08일
 ◎ 심사완료일 : 2013년 01월 18일