

# 건조 사질토 지반에 설치된 석션 버켓기초의 장기 반복하중에 의한 누적회전각 산정

## Accumulated Rotations of Suction Bucket Foundations under Long-term Cyclic Loads in Dry Sandy Ground

이 시 훈<sup>1</sup> Lee, Si-Hoon  
최 창 호<sup>2</sup> Choi, Changho  
김 성 렬<sup>3</sup> Kim, Sung-Ryul

### Abstract

A suction bucket foundation has been considered to be a potential foundation type for offshore wind turbines. A suction bucket foundation is usually installed in soft soil, so the accumulated displacement of the foundation may occur under long-term cyclic loads. In this study, a series of 1-g model tests were performed to analyze the accumulated rotation of suction bucket foundations under long-term cyclic horizontal loads. The dry model ground was prepared to have two different soil densities by air-pluviation method. The model tests were performed varying the embedment depth of the suction bucket, the soil density, and the amplitude of cyclic load. A one-way horizontal cyclic load was applied over  $10^4$  cycles. Test results showed that the accumulated rotation of the suction bucket foundation increased with the increase in the number of cycles and load magnitudes. Based on the model test results, a new equation was proposed to evaluate the accumulated rotation of the suction bucket foundations in dry sandy ground under long-term cyclic horizontal loads.

### 요 지

최근에 해상 풍력발전기의 기초구조물로 석션 버켓기초가 적용되고 있다. 그런데, 석션기초는 보통 해양 연약지반에 설치되므로 장기 반복하중에 의해 누적변위가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 1-g 모형실험을 수행하여 장기 수평 반복하중을 받는 석션 버켓기초의 누적 회전각을 분석하였다. 지반조건은 2가지 밀도의 건조 사질토 지반에 대하여 실험하였다. 모형석션 버켓기초의 근입깊이, 모형지반의 밀도, 반복하중의 크기를 변화시키며 실험을 수행하였다. 수평 반복하중은 일방향 재하로 최대  $10^4$ 번까지 재하하였다. 실험결과, 석션 버켓기초의 누적회전각은 재하횟수와 재하진폭이 증가에 비례하여 증가하였다. 실험결과를 이용하여 건조 사질토 지반에 근입된 석션 버켓기초의 장기 누적회전각을 산정할 수 있는 경험식을 제안하였다.

**Keywords** : Suction bucket foundation, Dry sandy ground, Accumulated rotation, Cyclic load, Model test

1 정회원, (주)이화기술단 연구원 (Member, Researcher, Rhehwa Engineering Co., LTD.)

2 정회원, 연구위원, 한국건설기술연구원 지반연구소 (Member, Research Fellow, Geotechnical Research Institute, Korea Institute of Civil Engrg. and Building Technology)

3 정회원, 동아대학교 토목공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Eng., Dong-A Univ., Tel: +82-51-200-7622, Fax: +82-51-201-1419, [sungryul@dau.ac.kr](mailto:sungryul@dau.ac.kr), Corresponding author, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2017년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

# 1. 서론

최근, 해상 풍력발전기의 기초구조물로서 석션 버켓 기초의 적용 연구가 활발히 수행되고 있다. 버켓기초는 지금까지 해상작업대, 자켓구조 등과 같은 해상구조물에 널리 적용되어 왔다(Tjelta and Haaland, 1993; Bransby and Randolph, 1998; Houlsby et al., 2005; Luke et al., 2005).

석션 버켓기초는 별도의 대형 시공장비가 필요없고 시공이 간편하기 때문에 해저지반이 점토 또는 보통 조밀한 사질토 지반인 경우 가장 경제적인 기초형식으로 알려져 있다. 버켓기초는 컵을 뒤집어놓은 형상의 기초로서, Fig. 1에 보인 바와 같이 처음 기초의 자중에 의해 지반에 조금 근입된 후 펌프를 이용하여 버켓기초 내부의 물을 배출함으로써 발생하는 버켓 내-외부의 압력차를 이용하여 지반에 관입을 하는 기초이다. 버켓기초는 대형 시공 장비가 필요하지 않고 시공 속도가 빠르기 때문에 다른 기초구조물 형식에 비하여 시공비용이 30~50% 이상 절감되는 것으로 알려져 있다. 그리고 압력차를 이용하여 기초를 관입하기 때문에 무소음, 무오탁의 친환경성 공법이기도 하며, 암반을 제외한 다양한 지반에 설치가 가능한 장점이 있다. 또한 필요시 기초 내부에 압력을 가하여 쉽게 제거할 수 있는 장점도 있다.

해상 버켓기초는 시공비용 및 적용범위 측면에서 큰 장점이 있지만 최근까지 적용사례는 많지 않다. 그 이유는 버켓기초는 얇은기초의 일종으로 이동과 회전이 함께 발생하는 등 파괴 메커니즘이 복잡하여 실무적인 설계법이 정립되어 있지 않기 때문이다. 특히, 해상 풍력발전기와 같은 해상구조물에는 풍력, 조력 및 파력 등에

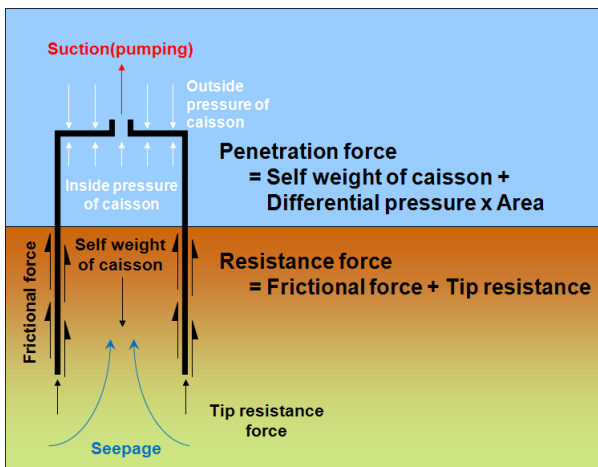


Fig. 1. Penetration mechanism of a bucket foundation

의한 장기간에 걸친 반복하중의 영향으로 장기 누적변위가 발생할 수 있지만 이에 대한 버켓기초의 거동예측 및 설계법이 정립되어 있지 않다.

최근 버켓기초의 설계시 중요 고려사항은 반복 수평하중을 받을 때 누적 회전각이다(Zhu et al., 2013). 버켓기초는 연약지반이 널리 분포하는 해저 토사지반에 근입되기 때문에 풍력 및 조력 등에 의한 장기간의 반복하중이 작용할 때 버켓기초의 변위가 누적되어 증가할 수 있다. 지금까지 일부 연구자들에 의해 사질토 지반에서 수평반복하중을 받는 버켓기초의 거동에 대하여 연구된 바 있다(e.g. Byrne, 2000; Villalobos, 2006; LeBlanc et al., 2010; Zhu et al., 2013). LeBlanc et al.(2010)은 사질토 지반에 설치된 말뚝기초에 대하여 상대밀도, 하중크기 및 하중재하 방향을 달리하여 실험을 수행하였으며, 실험 결과 반복하중 및 하중의 크기가 증가함에 따라 기초의 누적 회전량이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 하중 재하방향이 양방향 재하일 경우, 일방향 하중 재하의 경우보다 누적 변위 발생량이 큰 것으로 나타났다. Zhu et al.(2013)은 사질토 지반에 설치된 단일형 버켓기초에 대하여 누적 변위량을 산정하기 위하여 다양한 1-g 모형실험을 수행하였으며, 실험결과 반복횟수 및 수직하중의 크기가 증가함에 따라 누적 변위량이 증가하는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 모래지반에 설치된 버켓기초에 장기 수평반복하중이 작용할 때의 누적 회전각을 분석하였다. 1-g 모형실험을 수행하여 반복하중의 진폭과 지반밀도, 버켓제원 등을 변화시키며 다양한 조건에 대한 실험을 수행하였다. 실험결과로부터, 버켓기초의 제하강성, 누적회전각 등을 분석하고 최종적으로, 버켓기초의 장기 누적회전각을 산정할 수 있는 경험식을 제안하였다.

# 2. 모형 실험 조건

Fig. 2는 본 연구에서 사용한 재하장비와 시험체 단면을 보여준다. 재하장비는 LeBlanc 등(2010)이 제안한 장비를 개량하여 제작하였다. 재하장비의 원리는 다음과 같다. 우선 좌측의 무게  $m_2$ 는 우측의 구동모터, 재하대, 무게  $m_1$  등의 전체무게와 동일하며 철선(Loading wire 2)로 연결되어 좌우측 힘의 균형을 이루고 있다. 이후 구동모터를 이용하여 무게  $m_1$ 을 회전시키면 우측의 재하대에 작용하는 모멘트가 증가 또는 감소하면서 버켓기초에 연결된 철선(Loading wire 1)을 통해 버켓기초에

수평 반복하중이 작용하게 된다. 수평 반복하중의 진폭은 무게  $m_1$ 의 크기를 변화시켜 조정할 수 있다. 본 시험 장비는 10,000번 이상의 수평 반복하중을 안정적으로 재하할 수 있으며 반복하중의 진폭을 자유롭게 조정할 수 있다(Lee et al., 2014).

모형토조는 강재로 제작하였으며, 토조의 좌우 크기 및 높이는 3차원 수치해석 결과로부터 버킷의 변형에 영향을 주지않는 최적크기를 결정하였다. 수치해석 결과, 버킷으로부터 토조 좌우까지 거리는 버킷직경의 2배 이상, 버킷기초의 선단 끝으로부터 버킷직경의 1배 이상일 경우 동일한 하중-변위 결과가 얻어졌다. 그러므로, 이 결과를 이용하여 토조의 제원은 직경 600mm, 높이 350mm로 제작하였다.

본 연구에서는 원형 버킷 기초구조물의 제원으로 직경( $D$ ) 15m, 근입깊이( $L$ ) 7.5m와 15m로 가정하였다. 그리고, 버킷재료는 두께 30mm의 강재를 가정하였다. 원형 구조물에 대하여 Wood(2004)가 제안한 상사법칙을 적용하여 길이 상사비 1/100에 대한 모형 버킷기초를 제작하였다. 그 결과, 모형 버킷은 Fig. 3과 같이 두께

1mm의 알루미늄으로 제작되었으며, 버킷의 직경( $D$ )은 150mm, 측벽의 길이( $L$ )는 75mm( $L/D=0.5$ )와 150mm( $L/D=1.0$ )의 2가지로 제작하였다. 버킷상단 중앙 구멍의 나사선을 이용하여 타워에 해당하는 막대와 기초를 연결하였다. 모형타워의 무게는 10N인데, 이는 5MW 해상 풍력발전기에서 대략 10MN의 수직하중에 해당하는 무게이다.

모형지반의 흙은 실리카 모래를 사용하였다. 이 실리카 모래의 최대, 최소 건조단위중량은 각각  $16.1\text{kN/m}^3$ 과  $12.39\text{kN/m}^3$ , 비중은 2.65로 조사되었으며, Fig. 4에 나타난 바와 같이 국내 해상풍력단지 설치가 계획되어 있는 서해안 새만금 단지의 모래지반과 유사한 입도분포를 가지고 있다.

건조 지반은 강사법을 이용하여 2가지 밀도를 조성하였다. 깊이별로 상대밀도가 균일한 지반을 만들기 위하여 낙하높이를 5cm간격으로 일정하게 유지하였다. 그 결과, 낙하높이는 350mm와 550mm를 적용하였을 때 모형지반의 상대밀도는 각각 34%와 49%로 나타났다. 1g 모델의 경우 낮은 구속압에서 실험하기 때문에 현장

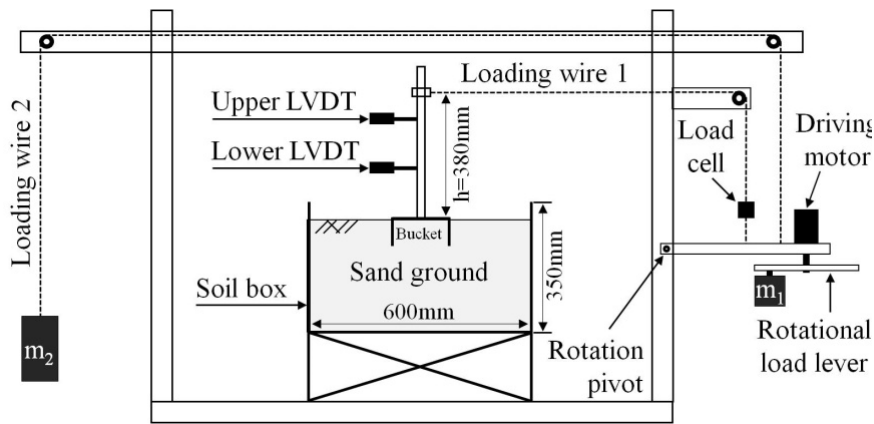


Fig. 2. Schematic drawing of long-term cyclic loading equipment

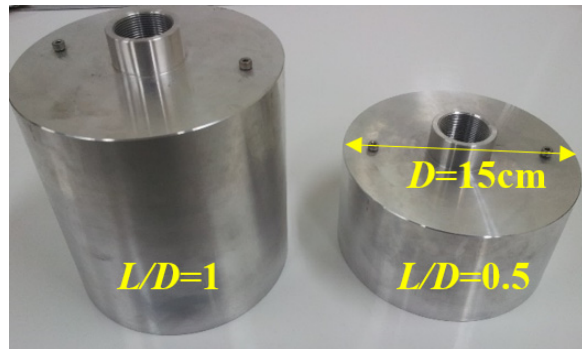
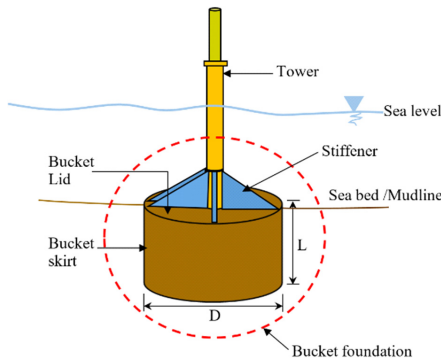


Fig. 3. Prototype and model bucket foundations

의 높은 구속압에서의 지반거동을 재현하기 어렵다. 그러므로, 본 연구에서는 지반을 최대한 느슨하게 조성하고자 노력하였다. 그 이유는 한계상태 개념에서 흙의 최종적인 항복 응력조건은 한계상태로 수렴하는데, 1g 상태의 작은 구속압에서는 최대한 느슨한 지반을 조성하는 것이 필요하기 때문이다(Altaee and Fellenius, 1994; Been and Jefferies, 1985).

지반조성이 완료된 후 모형버켓은 압입시스템을 이용하여 버켓상단이 지표면과 닿을 때까지 0.5mm/sec의 일정한 속도로 관입하였다. 버켓기초를 압입하여 설치할 경우 석션압으로 근입한 경우보다 수평지지력의 경우 약 10-30% 정도 증가하는 것으로 연구된 바 있다(Lee et al., 2015). 본 연구에서는 지반 배수가 원활한 경우의 버켓거동을 관찰하고자 건조 사질토 지반을 적용하였으며 석션압 적용을 할 수 없었기 때문에 압입방법을 적용하였다. 본 압입 설치 방법은 기존의 유사실험에서도 적용된 바 있다(LeBlanc et al., 2010; Zhu et al.,

2013).

그리고, 타워와 기초구조물의 회전각을 측정하기 위하여 2개의 LVDT를 타워에 설치하였다. 하부 LVDT는 버켓기초의 상단으로부터 높이 15cm, 상부 LVDT는 높이 30cm에 설치되었다. 상부와 하부 LVDT에서 측정된 수평 변위의 차와 두 LVDT 사이의 거리를 이용하여 반복하중 횟수에 따른 누적 수평 회전각을 산정할 수 있다. 그리고, 반복하중 크기를 측정할 수 있는 로드셀을 재하 철선(Loading wire 1)에 연결하였다.

수평하중 재하 위치는 풍력, 파력, 조력 등의 복합하중을 고려할 수 있도록 결정하였다. 기존 연구에서는 식 (1)을 적용하여 하중 재하 위치를 결정하였다(1.87~2.07 by Zhu et al., 2013; 2.0 by Foglia et al., 2014; 3.3 by Cox et al., 2014). 본 연구에서는 기존 연구의 평균값을 적용하여 하중 재하 위치를 결정하였다. 그 결과, 버켓기초 상단면으로부터 380mm의 높이에 수평하중을 재하하여 복합적인 하중이 작용하는 조건을 모사하였다.

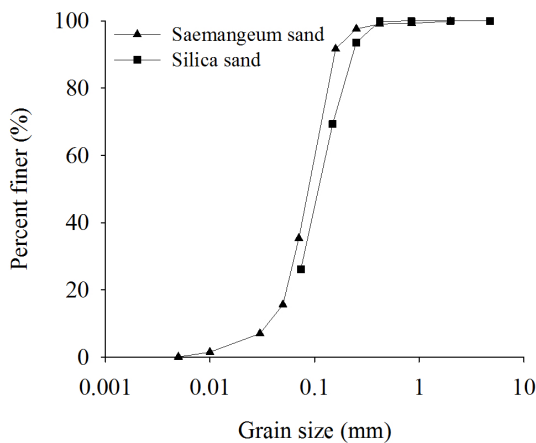


Fig. 4. Particle-size distribution curve of model ground

$$e = M / (HD) \quad (1)$$

여기서,  $e$ =편심(eccentricity),  $M$ =모멘트 하중,  $H$ =수평하중,  $D$ =버켓 직경

모형실험은 크게 2가지 단계로 수행되었다. 첫 번째 단계는 정적 수평하중을 가하여 버켓기초의 정적 항복하중을 산정하였다. 두 번째 단계는 하중진폭을 달리하여 장기 반복하중을 가하면서 버켓기초의 누적 회전각을 측정하였다. Fig. 5는 정적재하와 반복하중 재하 예를 보여준다. 정적재하의 경우 수평하중-회전각 곡선을

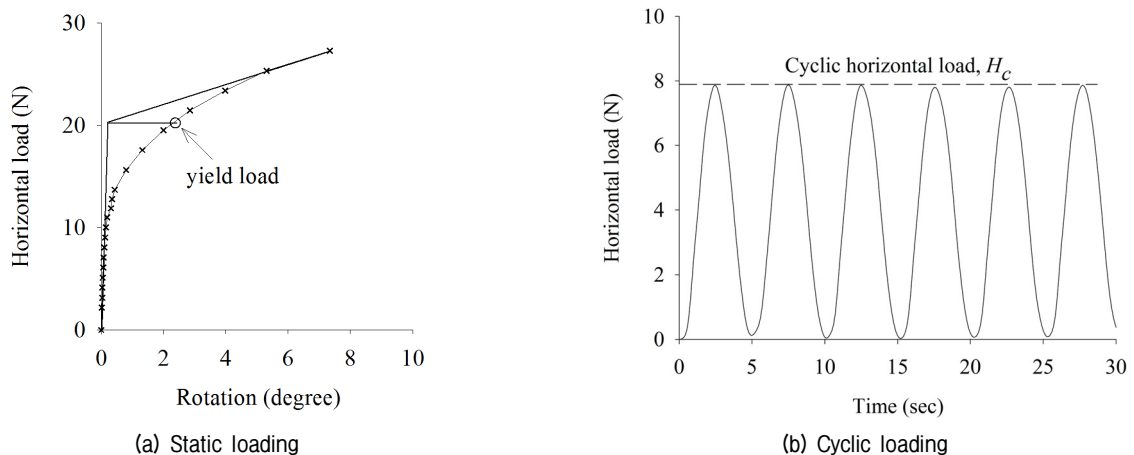


Fig. 5. Typical results of static and cyclic loadings

산정한 후 Tangent intersection 방법(Villalobos, 2006; Hung and Kim, 2014)을 적용하여 곡선의 초기부와 후반부에 대한 접선을 그어 그 교차점을 항복하중  $H_0$ 으로 결정하였다.

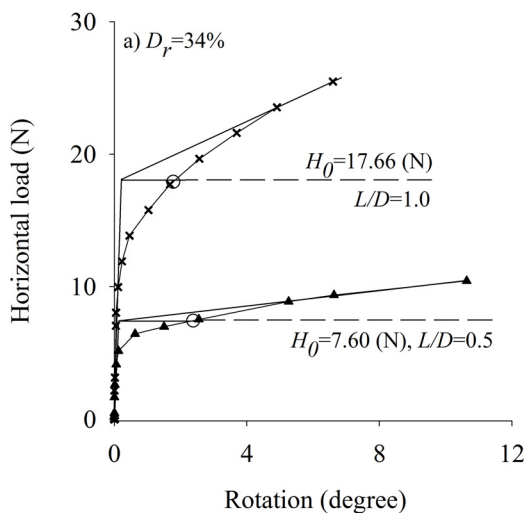
반복하중의 경우 최소값이 0이 되는 일방향 하중을 재하하였다. 일방향 하중은 양방향 하중에 비하여 보수적인 하중 재하조건이기 때문에 안전측의 지지력 산정 결과를 얻을 수 있다. Fig. 5에서, 반복하중의 진폭을  $H_c$ 로 정의하였으며,  $H_c$ 값은 항복하중  $H_0$ 에 대하여 일정한 비율  $R_c(=H_c/H_0)$ 이 되도록 결정하였다.

해상풍력발전기에 적용되는 버켓기초의 경우 설계수명인 20년 동안 피로한계상태에 대하여  $10^7$ 번의 반복하중을 고려하여 안정성을 검토하도록 제안하고 있다(DNV, 2007). 본 연구에서는 실험 시간 상의 제약으로 최대 10,000번 정도의 재하를 통해 이후의 변위 경향성을 찾고자 하였다.

모형실험에 적용한 하중 주파수는 0.2Hz로서 상사법칙을 적용하여 원형 구조물에 작용하는 주파수로 환산하면 0.006Hz가 된다. 이 값은 바람의 외력주파수 범위 내의 주기가 긴 정적하중에 해당한다. 본 연구에서는 모든 경우에 대하여 0.2Hz를 적용하여 모형실험을 수행하

Table 1. Model test cases

	Test condition	Number of tests
Static loading	L/D=0.5, L/D=1.0 $D_r=34\%, 49\%$	4
Cyclic loading	L/D=0.5, L/D=1.0 $R_c=0.3, 0.5, 0.7$ (target) $D_r=34\%, 49\%$	12



였다.

Table 1은 본 장에서 수행한 모형실험 조건을 보여준다. 모형실험 종류는 상대밀도 2가지, 버켓기초의 지반 근입깊이 2가지, 반복하중의 진폭 3가지로 변화시키며 정적실험 4회, 반복하중실험 12회 등 총 16회의 실험을 수행하였다. 변수  $R_c$ 는 반복 수평하중의 진폭을 항복 수평하중으로 나눈 값으로 정의하며,  $R_c=0.3, 0.5, 0.7$ 의 반복하중을 재하하는 것으로 계획하였다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 정적 수평하중 재하

Fig. 6은 정적 수평 재하실험 결과를 보여준다. 상대 밀도가 34%로 조성된 지반에서는 Fig. 6(a)에서 보는 바와 같이  $L/D$ 비가 0.5인 경우 7.60N,  $L/D$ 비가 1.0인 경우 17.66N으로 산정되었다. 상대밀도가 49%인 경우 Fig. 6(b)와 같이  $L/D$ 비가 0.5인 경우 9.42N,  $L/D$ 비가 1.0인 경우 20.60N으로 산정되었다. 즉, 상대밀도 및  $L/D$ 비의 증가에 따라 항복하중이 증가하는 경향을 보여주었다.

버켓기초의  $L/D$ 비의 증가에 따른 항복하중 값을 분석한 결과 상대밀도가 34%인 경우 약 2.3배 증가하는 것으로 나타났으며, 상대밀도가 49%인 경우 약 2.2배 증가하였다. 그 이유는 버켓기초의 길이가 증가함에 따라 수평방향으로 저항하는 버켓기초의 면적이 증가하기 때문이다.

동일한  $L/D$ 비에서 상대밀도의 변화에 따른 항복하중 값을 분석한 결과 상대밀도가 34%에서 49%로 증가함

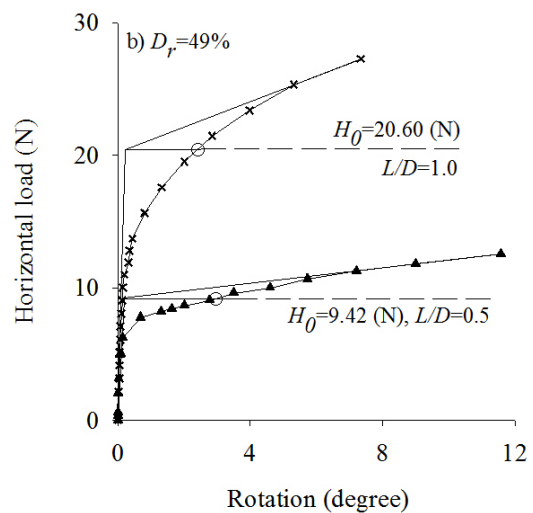


Fig. 6. Determination of horizontal yielding loads by horizontal static loading

에 따라  $L/D$ 비가 0.5인 경우 약 1.24배 증가하였으며,  $L/D$ 비가 1.0인 경우 약 1.17배 증가하였다. 그 이유는 상대밀도가 증가함에 따라 조밀한 지반이 조성되며 이로 인하여 지반의 수평방향 저항력이 증가하기 때문이다.

### 3.2 반복 수평하중 재하

Fig. 7은 상부 변위계 및 하부 변위계로부터 측정된 반복하중 횟수에 따른 누적 수평변위의 대표적인 결과를 보여준다. 버켓 수평변위는 하중 재하 초기에 급격히 발생하였으며 점차 변위발생속도가 일정해지는 경향을 보여준다.

Fig. 8은 Fig. 7의 누적 수평변위 결과로부터 산정된 버켓 회전각 결과이다. Fig. 8(a)는 일반 스케일을 적용

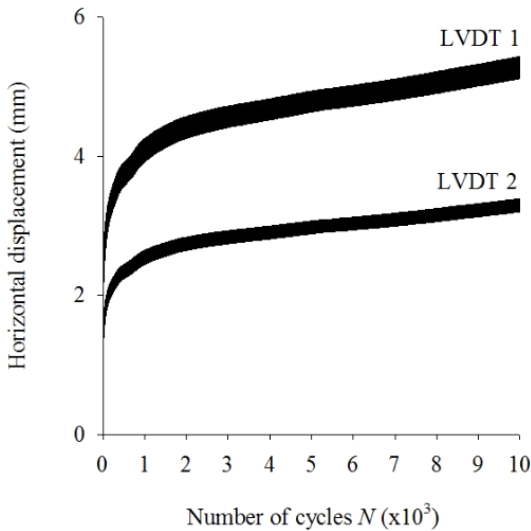


Fig. 7. Horizontal accumulated displacement according to number of cycles

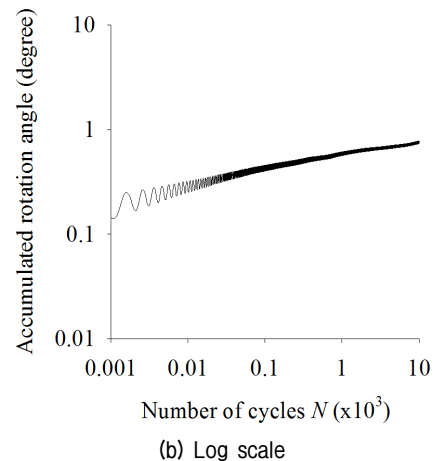
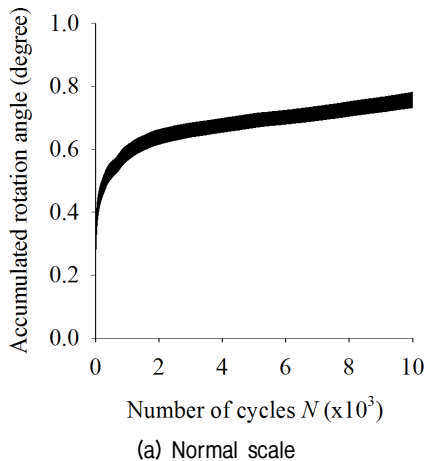


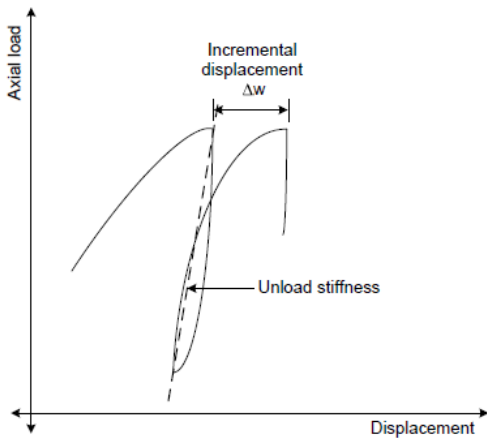
Fig. 8. Accumulated rotation angle under cyclic loading ( $L/D=1.0$ ,  $Dr=49\%$ )

한 결과로서, 변위 결과와 마찬가지로 초기에 회전이 급격하게 발생한 후, 재하횟수가 증가함에 따라 주변 지반의 다짐현상으로 인하여 회전발생 속도가 일정해지는 것으로 판단된다. Fig. 8(b)는 x축과 y축의 값에 로그 스케일을 적용한 결과로서, 회전각이 직선형태로 증가한다. 그러므로, 로그 스케일 관계를 이용하여, 재하횟수 증가에 따라 버켓기초의 누적 회전량을 예측할 수 있는 설계식을 개발할 수 있다.

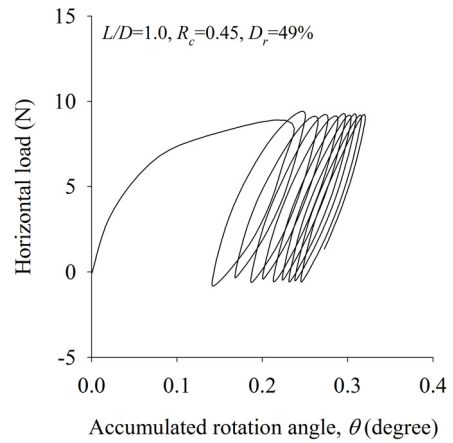
### 3.3 제하 강성(unloading stiffness) 결과

반복 하중을 받는 버켓기초의 경우 제하강성(unloading stiffness)을 분석하는 것이 중요하다. 그 이유는 반복하중으로 인하여 강성이 저하하게 되면 최종적으로 점차 누적변위가 증가하고 버켓기초가 불안정해지기 때문이다. 반복하중을 가할 때 제하강성의 정의는 Fig. 9(a)와 같다. 제하강성은 직전 하중단계의 정점(upper peak)에서 하중 감소시 최저 정점(lower peak)을 이은 선의 기울기로서 정의된다. Fig. 9(b)는 버켓기초의 하중-회전각 곡선의 대표적인 결과로서 반복하중이 가해진 초기에는 회전각의 발생크기가 가장 크기 때문에 제하 강성 기울기가 작으며, 반복횟수가 증가함에 따라 주변 지반의 다짐현상으로 인하여 회전각의 발생량이 점차 줄어들어 제하강성 기울기가 점차 커지는 경향을 보여준다. 이는 기존의 Zhu et al.(2013), Cox et al.(2014)등의 연구와 비슷한 결과이다.

Fig. 10과 Fig. 11은 각각의 상대밀도에서 반복횟수 증가에 따른 제하 강성의 변화를 보여준다. 상대밀도와  $L/D$ 비에 관계없이 반복횟수가 증가함에 따라 제하 강

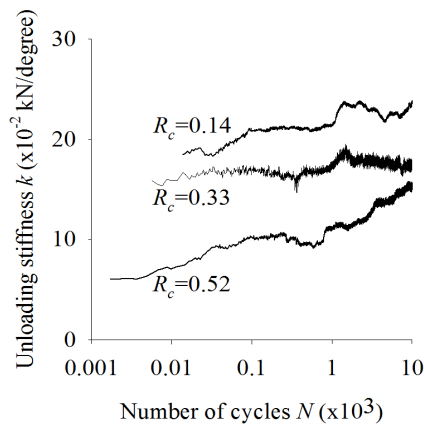


(a) Unloading stiffness (Kelly et al., 2006)

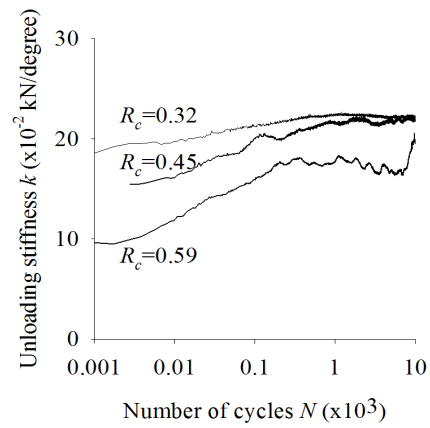


(b) Test result

Fig. 9. Definition of unloading stiffness and typical test result

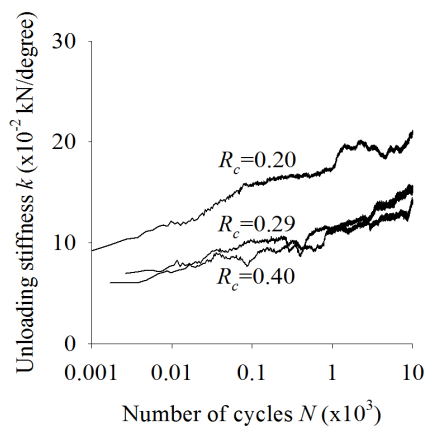


(a) L/D=0.5

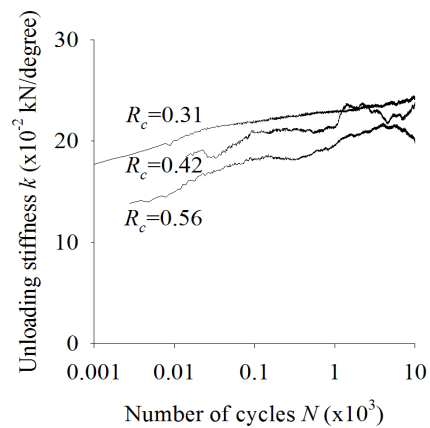


(b) L/D=1.0

Fig. 10. Variation of unloading stiffness with L/D ( $D_r=34\%$ )



(a) L/D=0.5



(b) L/D=1.0

Fig. 11. Variation of unloading stiffness with L/D ( $D_r=49\%$ )

성은 증가하는 것으로 나타났다. 그리고, 반복하중의 진폭이 증가함에 따라 제하 강성의 값은 작게 나타났는데, 그 이유는 하중의 크기가 커짐에 따라 회전 발생량이

커지고 이로 인하여 주변 지반의 강성이 저하되기 때문으로 판단된다.

#### 4. 장기 누적 회전각 예측식의 개발

LeBlanc et al.(2010)은 반복하중-회전각 곡선을 이용

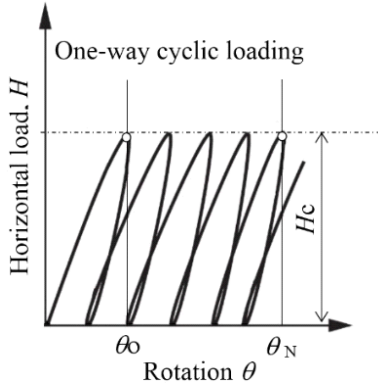


Fig. 12. Definition of  $H_c$ ,  $\theta_0$  and  $\theta_N$  values (LeBlanc et al., 2010)

하여 Fig. 12와 같이  $H_c$ ,  $\theta_0$  및  $\theta_N$ 의 기호를 정의하였다. 첫 번째 하중 사이클의 최대 하중에서의 회전각을  $\theta_0$ , N 번째 하중 사이클의 최대 하중에서의 회전각을  $\theta_N$ 으로 정의하였다.

Fig. 13과 Fig. 14는 각각 상대밀도 34%와 49%에 대한 결과이다. 그림의 y축 값은 누적 회전각을 첫 번째 사이클의 회전각으로 나누어 정규화한 정규 누적 회전량을 나타낸다. 버켓기초의 정규 누적 회전량은 반복횟수 및 반복 하중의 크기에 따라 증가하였다. 반복 하중의 크기가 작은 경우( $N < 100$ ) 정규 회전량 값이 급격하게 증가하다가  $N=100$ 회 이상 일 때부터 정규 회전량 증가속도가 일정해지는 것으로 나타났다. 또한, 반복 하중의 크기가 큰 경우( $R_c=0.5$  이상) 초기에 큰 변위가 발생하면서 작은 반복 횟수에서 정규 회전량의 증가속도

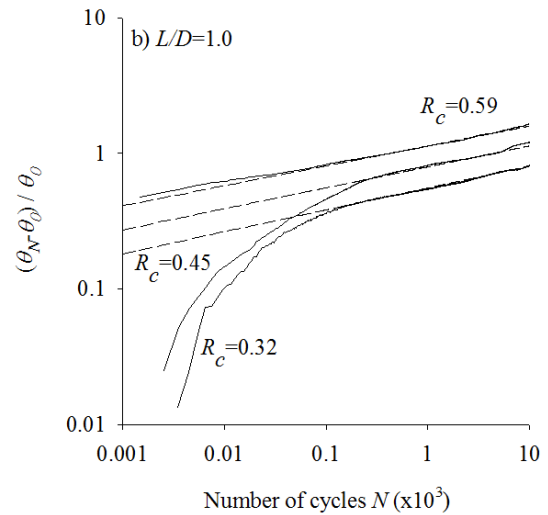
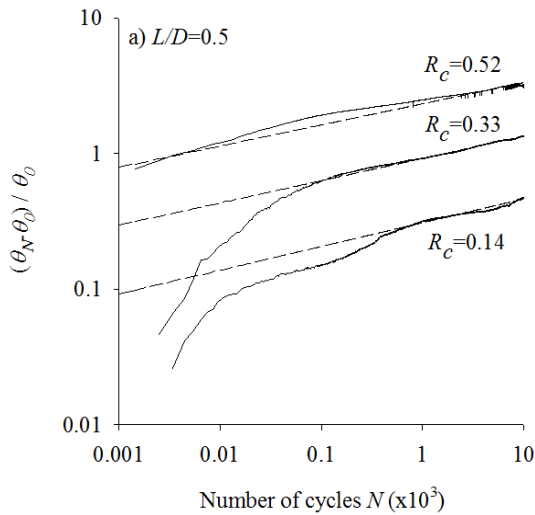


Fig. 13. Accumulated rotation of bucket foundation with  $R_c$  values ( $D_r=34\%$ )

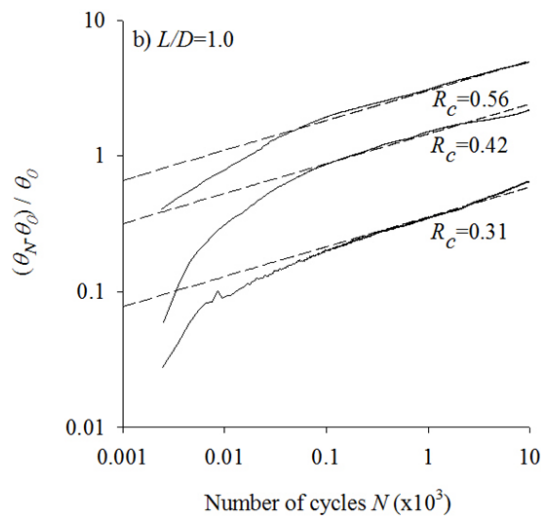
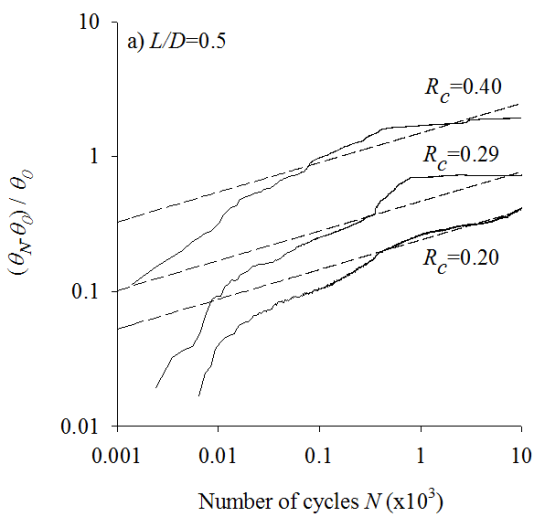


Fig. 14. Accumulated rotation of bucket foundation with  $R_c$  values ( $D_r=49\%$ )



가 일정해졌다.

위 실험결과를 이용하여 사질토 지반에 근입된 버켓 기초의 누적 회전각을 산정할 수 있는 예측식 (2)를 제안하였다. 이 식은 버켓기초의 근입깊이( $L/D$ ), 그리고 반복 수평하중 비( $R_c$ )를 이용하여 반복횟수 증가에 따른 정규 누적 회전량을 산정한다. 기존의 LeBlanc et al. (2010)과 Zhu et al.(2013)의 연구에서도 유사한 공식이 제안된 바 있다.

$$\frac{\theta_N - \theta_0}{\theta_0} = T_b \times N^\alpha \times \beta \quad (2)$$

- 여기서,  $\theta_N$  = N번째 사이클에서의 누적 회전량,
- $\theta_0$  = 첫번째 사이클에서의 누적 회전량,
- $T_b$  = 반복수평하중비( $R_c$ )를 고려한 무차원 계수,
- $N$  = 반복횟수,
- $\alpha$  = 반복횟수 영향을 고려한 계수,
- $\beta$  =  $L/D$ 비를 고려한 계수

식 (2)의 입력변수들  $\alpha$ ,  $\beta$  및  $T_b$ 을 산정하기 위하여 최소 자승법을 적용하였다. 즉, 식으로 예측한 회전량과 실험에서 얻어진 회전량 값의 차이가 최소가 되는 입력 변수값들을 시행착오법으로 산정하였다.

상대밀도가 34%로 조성된 지반의 경우  $\alpha=0.14$ 로 산정되었으며  $L/D=0.5$ 인 경우  $\beta=1.8$ ,  $L/D=1.0$ 인 경우  $\beta=0.9$ 로 얻어졌다. 상대밀도가 49%로 조성된 지반의 경우  $\alpha=0.22$ 로 산정되었으며  $L/D=0.5$ 인 경우  $\beta=1.3$ ,  $L/D=1.0$ 인 경우  $\beta=1.0$ 으로 얻어졌다.

Fig. 15는 각각의 상대밀도에 따른  $T_b$ 의 변화를 보여 준다.  $T_b$  변수는  $R_c$ 값으로 정의할 수 있으며 상대밀도 34%에 대한 식은 식 (3)으로 나타낼 수 있으며, 상대밀도 49%에 대한 식은 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$T_b = 1.06 \times R_c^{1.421} \quad (3)$$

$$T_b = 3.72 \times R_c^{2.961} \quad (4)$$

식 (2)에서 결정된 예측값과 실험결과의 누적회전량을 비교하기 위하여 Fig. 13과 Fig. 14에 예측값을 점선으로 표시하였다. 예측식으로 계산된 회전량은 100회 이상의 반복횟수부터는 실험값을 잘 모사하는 것으로 나타났다.

### 5. 결론 및 요약

본 연구에서는 건조 사질토 지반에 근입된 버켓기초에 대하여 반복 수평하중 재하실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다. 다만, 본 연구에서는 건조사질토 지반에 대한 실험을 수행하였는데, 이 조건은 지반의 투수성이 커서 배수가 원활한 조건에 해당한다. 만일, 지반의 비배수 거동이 예상되는 경우에는 버켓 내부의 석션압 발생, 과잉간극수압의 누적 등에 의해 본 실험과 다른 결과가 얻어질 수 있다.

- (1) 버켓기초의 수평 항복하중은  $L/D$ 비가 0.5에서 1.0으로 증가함에 따라 버켓기초의 수평방향 지지면적

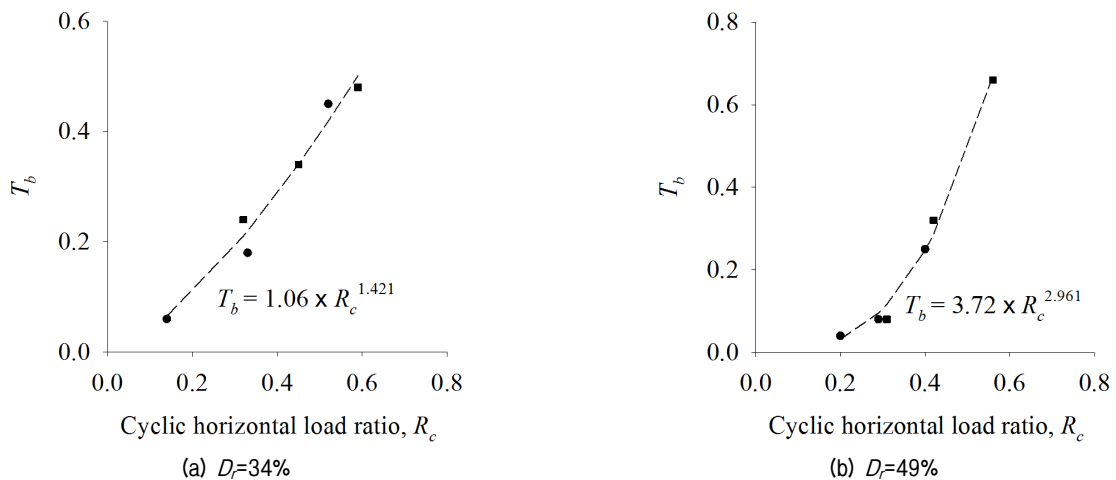


Fig. 15. Variation of  $T_b$  parameters with  $R_c$  and  $D_r$  values

이 증가하여 약 2배 증가하였다. 동일한  $L/D$ 비에서 상대밀도가 34%에서 49%로 증가함에 따라 수평 항복하중은  $L/D$ 비가 0.5인 경우 약 1.24배 증가하였으며,  $L/D$ 비가 1.0인 경우 약 1.17배 증가하였다.

- (2) 버켓기초의 장기 수평거동을 분석하기 위하여 반복 수평재하 실험을 수행하였다. 먼저 반복하중으로 인한 제하 강성을 분석한 결과 상대밀도와  $L/D$ 비에 관계없이 반복횟수가 증가함에 따라 제하 강성은 증가하는 것으로 나타났으며, 하중의 크기가 증가함에 따라 제하 강성값은 작게 나타났다.
- (3) 버켓기초의 정규 누적 회전량은 반복횟수 및 반복 하중의 크기에 따라 증가하였다. 반복 하중의 크기가 작은 경우 정규 회전량 값이 급격하게 증가하다가  $N=100$ 회 이상 일 때부터 정규 회전량 증가속도가 일정해지는 것으로 나타났다.
- (4) 반복하중 실험결과를 이용하여 버켓기초의 장기 누적회전량을 산정하는 예측식을 제안하였다. 이 식은 버켓기초의 근입깊이( $L/D$ ), 그리고 반복 수평하중 비( $R_c$ )를 이용하여 반복횟수 증가에 따른 정규 누적 회전량을 산정한다. 식의 입력변수값들은 최소자승법을 적용하여 예측식으로 계산된 회전량과 실험에서 얻어진 회전량 값의 차이가 최소가 될 때의 값을 결정하였다. 예측식으로 계산된 회전량은 100회 이상의 반복횟수부터는 실험값을 잘 모사하는 것으로 나타났다. 다만, 본 입력변수들은 특정조건인 모형실험 결과로부터 얻어졌기 때문에 버켓의 실제거동과 달라질 수 있다.

## 감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 이공분야 기초연구사업(NRF-2014R1A1A2055858)의 지원을 받아 수행되었습니다.

## 참고문헌 (References)

1. Altaee, A. and Fellenius, B. H. (1994), "Physical Modeling in Sand", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.31, No.3, pp.420-431.
2. Been, K. and Jefferies, M. G. (1985), "A State Parameter for Sands", *Géotechnique*, Vol.35, No.2, pp.99-112.

3. Bransby, M. F. and Randolph, M. F. (1998), "Combined Loading of Skirted Foundations", *Geotechnique*, 48, pp.637-655.
4. Byrne, B. W. (2000), "Investigations of Suction Caissons in Dense Sand", PhD Dissertation, Magdalen College, University of Oxford.
5. Cox, J. A., O'Loughlin, C. D., Cassidy, M., Bhattacharya, S., Gaudin, C., and Bienen, B. (2014), "Centrifuge Study on the Cyclic Performance of Caissons in Sand", *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, Vol.14, No.4, pp.99-115.
6. Det Norske Veritas (2007), "Design of Offshore Wind Turbine Structures", Offshore standard DNV-OS-J101.
7. Foglia, A., Ibsen, L. B., Nicolai, G., and Andersen, L. V. (2014), "Observations on Bucket Foundations under Cyclic Loading in Dense Saturated Sand", Proceedings of the 8<sup>th</sup> international conference of physical modelling in geotechnics (ICPMG), CRC Press.
8. Houlsby, G. T., Ibsen, L. B., and Byrne, B. W. (2005), "Suction Caissons for Wind Turbines", *Frontiers on Offshore Geotechnics (ISFOG 2005)*-Gourvenec & Cassidy (eds), Taylor & Francis group, London, ISBN 041539063X, pp.75-93.
9. Hung, L. C. and Kim, S. R. (2014), "Evaluation of Undrained Bearing Capacities of Bucket Foundations under Combined Loads", *Marine Georesources and Geotechnology* 32, pp.76-92.
10. Lee, J. H., Do, J. U., and Kim, S. R. (2015), "A Comparative Study on the Resistances of Bucket Foundation in Sand with Different Installation Methods", *Int. J. of Geomate*, Vol.8, No.1, pp.1186-1189.
11. Kelly, R. B., Houlsby, G. T., and Byrne, B. W. (2006), "Transient Vertical Loading of Model Suction Caissons in a Pressure Chamber", *Geotechnique*, Vol.56, No.10, pp.665-675.
12. LeBlanc, C., Houlsby, G. T., and Byrne, B. (2010), "Response of Stiff Piles in Sand to Long-term Cyclic Lateral Loading", *Geotechnique*, Vol.60, No.2, pp.79-90.
13. Lee, S. H., Kim, S. R., Lee, J. Y., and Choi, C. H. (2014), "Development and Verification of Long-term Cyclic Loading Equipment to Analyze behavior of Foundation of Offshore Wind Turbine", *Korean Geotechnical Engineering*, Vol.30, No.10, pp.8-17. (in Korean)
14. Luke, A. M., Rauch, A. F., Olson, R. E., and Mecham, E. C. (2005), "Components of Suction Caisson Capacity Measured in Axial Pullout Tests", *Ocean Engineering* 32, pp.878-891.
15. Tjelta, T. I. and Haaland, G. (1993), "Novel Foundation Concept for a Jacket Finding its Place", *Offshore site investigation and foundation behaviour* 28, pp.717-718.
16. Wood, D. M. (2004), *Geotechnical Modelling*, Spon Press, New York, USA.
17. Villalobos, F. A. (2006), "Model Testing of Foundations for Offshore Wind Turbines", PhD dissertation, Keble College, University of Oxford.
18. Zhu, B., Byrne, B. W., and Houlsby, G. T. (2013), "Long-term Lateral Cyclic Response of Suction Caisson Foundations in Sand", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.139, No.1, pp.73-83.

Received : September 5<sup>th</sup>, 2016

Revised : November 4<sup>th</sup>, 2016

Accepted : November 14<sup>th</sup>, 2016