

해상풍력 모노포드 버켓기초의 지지력 거동 - 원심모형실험 및 수치해석

Bearing Capacity of a Monopod Bucket Foundation for Offshore Wind Towers - Centrifuge and Numerical Modeling

| | | | |
|--------------------|----------------|--------------------|----------------|
| 김 동 준 ¹ | Kim, Dong-Joon | 추 연 옥 ² | Choo, Yun Wook |
| 김 수 린 ³ | Kim, Surin | 김 재 현 ³ | Kim, Jae-Hyun |
| 최 호 영 ⁴ | Choi, Ho-Young | 김 동 수 ⁵ | Kim, Dong-Soo |
| 이 만 수 ⁶ | Lee, Man-Soo | 박 영 호 ⁷ | Park, Yung-Ho |

Abstract

In order to evaluate the bearing capacity behaviour of a monopod suction bucket foundation for an offshore wind tower at the western sea of Korea, a centrifuge load test and numerical analyses were performed. The monopod bucket foundation was designed to be installed in a silty sand layer. The model soil was prepared to simulate a target site by using soil samples having similar properties and controlling relative density. In-flight miniature cone penetration test and bender element array were used to confirm that the model soil had represented the target site conditions. The load - rotation curve of the centrifuge load test was analysed. A series of numerical analyses were performed to validate the experimental conditions. Self-weight of the model, distance to the boundary and elastic modulus of the soil layer were varied to study their effects on the load - rotation curves.

요 지

해상풍력 기초로 사용되는 모노포드 석션 버켓기초의 지지력 거동에 대하여 원심모형실험과 수치해석을 통하여 연구하였다. 대상 구조물은 서해안 지역을 대상으로 검토된 해상풍력타워 기초로, 실트질 모래층에 설치하는 것으로 설계되었다. 원심모형실험에 사용된 모형지반은 대상 지반과 유사한 물성을 갖도록 조성하였다. 실험 가속 상태에서 소형 콘 관입시험과 벤더 엘리먼트를 사용한 전단파속도 측정을 통하여 물성을 평가하고 모사 대상 지반과의 유사성을 검증하였다. 원심모형실험으로 해상풍력 기초에 작용하는 하중을 재하하고 거동을 계측할 수 있도록 실험 시스템을 구축하였고, 모노포드 석션 버켓기초의 하중-회전각 관계를 통해서 지지력 거동을 평가하였다. 최적의 실험 조건을 선정 및 검증하기 위하여 수치해석을 수행하였으며, 모델의 자중, 모델과 경계면의 거리 및 지반 탄성계수의 변화에 따른 지지력 거동의 차이를 검토하였다.

Keywords : Suction bucket foundation, Monopod, Offshore wind, Centrifuge test, Silty sand

1 정희원, 현대건설(주) 연구개발본부 차장 (Chief Research Engineer, Hyundai Engineering and Construction)

2 정희원, KAIST 건설및환경공학과 연구교수 (Research Professor, Dept. of Civil and Env. Eng., KAIST, Tel: +82-42-350-7204, Fax: +82-42-350-7200, ywchoo@kaist.ac.kr, 교신저자)

3 정희원, KAIST 건설및환경공학과 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil and Env. Eng., KAIST)

4 정희원, 삼성물산 기술연구센터 선임연구원 (Senior Researcher, Construction Technology Center, Samsung C&T Corp.)

5 정희원, KAIST 건설및환경공학과 교수 (Professor, Dept. of Civil and Env. Eng., KAIST)

6 정희원, 현대건설(주) 토목환경사업본부 부장 (General Manager, Hyundai Engineering and Construction)

7 정희원, 현대건설(주) 연구개발본부 상무 (Director, Hyundai Engineering and Construction)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

해상풍력은 전 세계적으로 신재생 에너지 관련 산업의 큰 화두이며 국내에서도 많은 관심을 보이고 있는 분야이다. 전 세계 해상풍력은 2012년 현재 총 4,242 MW의 용량이 설치되어 있으며, 그 중 90% 이상이 영국과 덴마크를 중심으로 한 유럽 지역에 집중되어 있다. 유럽 외 시장에서는 최근 육상을 포함한 풍력 누적 설치량에서 전 세계 1위 자리를 차지한 중국이 해상풍력에서도 적극적인 움직임을 보여주고 있다. 2011년 말 기준 전 세계 풍력 설치 용량은 238GW이며, 2011년도에는 41GW가 추가 설치되어 누적 설치량 기준으로 21%가 증가되어 급격한 성장세를 보이고 있다. 전 세계적인 경제 위기 상황에도 풍력 산업은 지속적인 성장세를 보이고 있으며, 특히 기존의 EU 및 미국 등 OECD 시장 중심에서 벗어나, 라틴 아메리카, 아프리카, 아시아 등에서도 성장이 이루어지고 있다. 해상풍력 시장은 현재로서는 연간 설치 용량의 2.5% 정도로서 작은 규모이나, 2020년까지 EU 40GW, 중국 30GW 용량 설치를 추진 중에 있으며, 일본의 경우 후쿠시마 지역 20km 해상에 15MW 규모의 부유식 해상풍력 실증 프로젝트를 4년에 걸쳐 추진하고 있다(Vedruna et al., 2012).

석션 버켓기초는 해상공사에 강점을 가지는 기초형식으로, 대형 기초를 빠른 속도로 설치 가능하며, 관입을 위해 대형 장비가 필요하지 않고, 항타 또는 굴착에 의한 소음 및 수중 부유물의 발생이 적은 장점을 가지고 있다. 이를 감안하여 석션 버켓기초를 해상풍력타워에 적용하기 위한 연구가 전 세계적으로 활발하게 진행되고 있으며(Houlsby and Byrne, 2000; Houlsby et al., 2005; Zhu et al., 2011), 기상탑에 대해서는 성공적으로 적용된 사례가 보고되었다(LeBlanc et al., 2009; Recharge, 2012).

해상풍력 기초에는 풍하중, 파랑하중 및 조류하중으로 인한 수평력과 모멘트 하중이 주요 하중으로 작용하게 된다. 점토 지반에 설치된 석션 버켓기초에 대해서는 해양 플랜트 분야에서의 활용을 위하여 다수의 연구가 진행되었다(Bransby and Randolph, 1998; Gourvenec, 2007; Yun and Bransby, 2007). 해상풍력타워를 대상으로 한 연구는 영국의 옥스퍼드 대학, 덴마크의 알보그 대학 등 유럽의 연구진에 의하여 실내 1G 모형실험, 수치해석 등을 이용하여 연구가 이루어져 왔다. 이러한 연구들은 현재까지의 주요 해상풍력 시장인 북해의 조밀한 모래

지반을 대상으로 연구가 수행되었다(Byrne and Houlsby, 2003; Villalobos, 2006; Ibsen et al., 2012). 국내에서는 서해안 지역에 2.5GW 단지 개발 계획을 대표적으로 (Ministry of Knowledge Economy, 2010) 제주도 및 서남해안 지역에서 해상풍력단지 개발이 추진되고 있다. 서해의 지반 조건은 기반암의 깊이가 깊고, 세립 퇴적사질토층이 두껍게 분포되어 있어 이러한 지반 조건에서의 석션 버켓기초에 대한 연구가 필요한 실정이다(Kim et al., 2010; Choo et al., 2011; Zhu et al., 2011; Kim et al., 2012).

본 논문에서는 서해안 위도 인근 지역에 대하여 예비설계 결과로 산출된 석션 모노포드에 대한 원심모형실험을 실시하여 지지력 거동을 평가하였다. 또한, 수치해석을 수행하여 실험 조건이 결과에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 원심모형실험 모델링

2.1 원심모형실험 장비

원심모형실험은 지반구조물의 축소모형을 고속으로 회전시켜 인위적인 원심력장을 가함으로써 실제 현장과 동일한 응력상태에서 실험을 수행하는 지반공학분야의 대표적인 모형실험기법이다. 원심모형실험의 기본 개념은 모형지반구조물의 응력상태를 원형 구조물과 동일한 상태로 재현함에 있으며, 모형의 축척과 가속도 상태에 따라 원형 구조물과 모형 구조물에 나타나는 물리량의 상관관계(상사비)를 도출하여 실험을 설계한다. 원심모형실험을 위하여 제작된 1/N 축척의 모형에 대하여 깊이별 응력 상태를 현장과 동일하게 만들기 위해서



Fig. 1. Centrifuge equipped with a test-ready model of this study

는 증력가속도의 N배로 가속하여야 한다(Kim et al., 2013).

본 연구는 KAIST에 설치된 KOCED 지오센트리퓨지 실험센터의 원심모형실험 장비를 이용하여 수행되었다. 이 장비는 빙형식 원심모형실험기로서 반경은 5.0m이며, 240G·ton의 용량을 가지고 있다. 장비에 대한 자세한 설명은 Kim et al.(2013)에 소개되어 있다(Fig. 1).

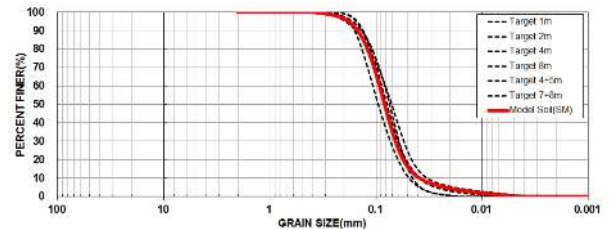
2.2 지반 조건, 모형지반 조성 및 평가

본 연구는 서해안 위도와 안마군도 사이에 위치한 지역을 대상으로 하였다. 대상 지반은 상층부 약 11m 두께의 실트질 모래층, GL-11m~32m 구간의 점토질 실트 및 실트질 점토(ML, CL)층, 그 하부에 위치한 실트질 모래층, 약 50m 깊이에 위치한 기반암으로 구성되어 있다. 대상 지역의 수심은 약 15m 이다. 대상 구조물 직경의 약 2배 깊이까지의 지층 구성을 Table 1에 요약하였다(Kim et al., 2012).

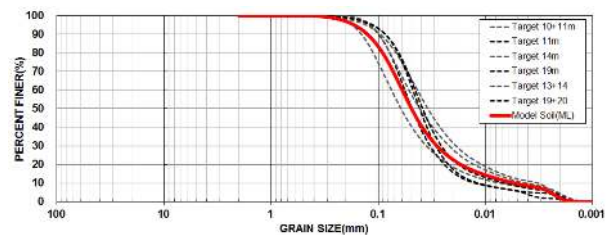
대상 지역의 층별 입도분포를 분석한 결과, 크게 SM층(GL0~GL-11m)과 ML층(GL-11~GL-32m)의 두 그룹으로 구분되는 것으로 확인되었다(Fig. 2). 대상 지반 조건을 모형실험에서 재현하기 위하여, 대상 지역 인근 해안 여러 지점에서 소량의 시료를 채취하고 물성을 분석하여 대상 지점과 유사한 지점을 선정한 후, 모형지반 조성에 필요한 양의 시료를 추가로 채취하여 사용하였으며, 사용된 시료에 대하여 물성 시험을 실시하여 결과 분석에 사용하였다. SM층의 경우 추가로 채취된 시료가 초기의 시료 및 대상 지역의 시료와 유사하여 모형지

반 조성에 그대로 사용하였으나, ML층의 경우에는 추가로 채취된 자연시료의 입도분포가 초기 시료 및 대상 지반과 차이가 있는 것으로 나타나, 분쇄 실리카 실트를 5:5 비율로 추가 혼합하여 입도분포를 대상 지역 시료와 유사하게 조정하여 사용하였다. 광물 성분 분석 결과 석영을 주성분으로 하고 있으며, 장석과 운모 등 성분 비율도 유사함을 확인하였다. 또한, SM층과 ML층 모두 점토광물의 함량은 입도분포와 광물 성분 분석 결과에서 모두 미미한 것으로 나타났다. Fig. 2에 모형지반 조성에 사용된 시료의 입도분포를 대상 지반의 입도분포와 비교하여 나타내었으며, Table 2에 모형지반 조성에 사용된 시료의 기본 물성을 요약하였다(Kim et al., 2012; Hyundai Engineering and Construction, 2012).

실험 적용 상사비는 원형과 실제 구조물의 크기를 1:1로 유지한 상태에서 기초의 상부 중심으로부터 토조까지의 수평 및 수직 거리가 모노포드 직경의 2배 이상을 확보할 수 있도록 1/70로 선정하였다. 기초의 직경 대비



(a) SM layer (GL0 ~ GL-11m)



(b) ML layer (GL-11 ~ GL-32m)

Fig. 2. Grain size distributions of soil samples from the target site and model soils

Table 1. Summary of soil layers of the target site

| Item | SM layer | | ML layer | |
|-------|----------|---------|-----------|---------|
| | GL(m) | SPT N | GL(m) | SPT N |
| GL(m) | 0 ~ -4 | 17 ~ 39 | -4 ~ -11 | 50 |
| SPT N | | | -11 ~ -20 | 19 ~ 31 |
| | | | -20 ~ -32 | 10 ~ 19 |

Table 2. Basic properties of model soils

| Item | SM layer | ML layer |
|---|--|---|
| Passing #200(%) | 47 (40 ~ 50) | 75 |
| Maximum dry density*(Mg/m ³) | 1.65 | 1.77 |
| Minimum dry density**(Mg/m ³) | 1.20 | 1.14 |
| Grain size (mm) | D ₁₀ =0.045, D ₅₀ =0.080, D ₆₀ =0.095 | D ₁₀ =0.0055, D ₅₀ =0.050, D ₆₀ =0.060 |
| Cu | 2.11 | 10.91 |
| G _s | 2.67 | 2.64 |

* Head (2006)

** ASTM D 4254 (2006)

중심으로부터 토조 벽면까지의 수평 거리 비율은 2.03 (450mm/221.4mm)이며, 조성 깊이는 대상 지반의 지층 분포를 고려하여 기초 직경의 약 2배인 457mm(원형 32m) 깊이까지 조성하였다. 조성된 SM층과 ML층의 두께는 각각 157mm와 300mm이다.

대상 지반에 대한 표준관입시험 결과에 기초하여 상

대밀도를 추정하였으며, 이를 고려하여 모형지반의 조성 밀도를 선정하였다. ML층은 층당 50mm씩 총 6층으로 나누어 정적 유압 다짐으로 목표 밀도가 되도록 조성하였으며, 상부의 SM층은 층당 52mm씩 총 3층으로 정적 유압 다짐과 13.5kg의 추를 사용한 동적 다짐을 실시하였다. 조성 후에는 토조의 상부로부터 물을 천천히 흘려서 포화시켰다. 조성된 모형지반의 건조밀도는 투입된 시료의 무게와 함수비를 측정하여 산정하였으며, SM층의 경우 조성 층별로 1.50~1.55Mg/m³, 상대밀도 72.4~82.7%, ML층의 경우 1.44~1.49Mg/m³, 상대밀도 58.4~66.3%로 평가되었다.

모형지반 조성이 완료된 후에, 1G 상태에서 모형버켓 기초를 압입하여 설치 후, 모형지반을 실험 중력가속도까지 가속하여 재하시험 이전에 지반의 침하가 완료되도록 하였다. 이후 1G 상태로 감속하여 모형 및 계측시스템 점검한 후, 실험 중력가속도 상태로 재가속하고 중력가속도 증가에 따라 다소 발생하는 지반 침하 및 모델의 변위가 안정화 된 이후에 계측 초기치를 설정하고 실험을 실시하였다. 실험 중력가속도 상에서(in-flight) 직경 10mm의 소형 콘 관입시험기를 사용하여 콘 선단저항값(q_c)를 측정하고, 벤더엘리먼트를 사용하여 층별 선단파속도(V_s)를 측정하였다. 콘 선단저항값은 160mm(원형 기준 11.2m)에서 약 10MPa의 값을 나타내고 그 하부에서는 5~10MPa로 감소되었으며, 선단파속도 역시 해당 깊이에서 급격하게 감소되는 것으로 나타나 층별 물성 차이를 확인할 수 있었다(Fig. 3).

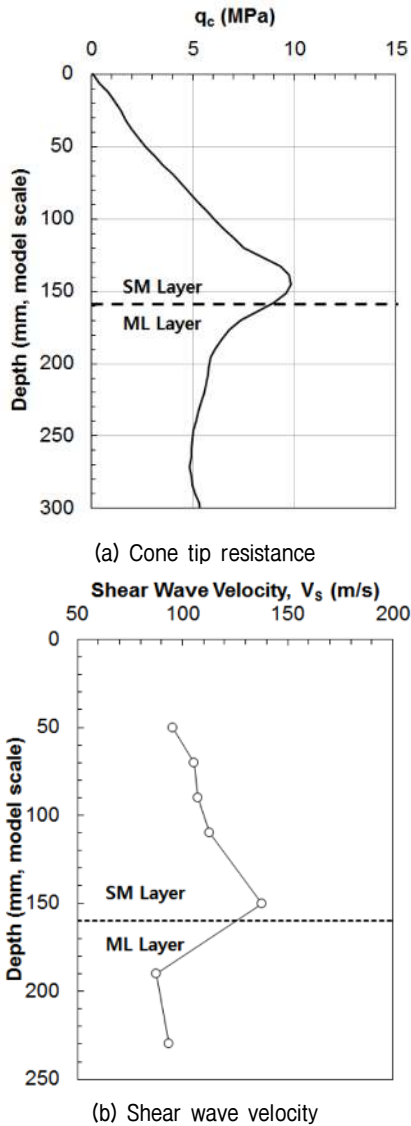


Fig. 3. Cone tip resistance and shear wave velocity profiles

2.3 실험 대상 석션 버켓기초

본 연구에서는 해상풍력 석션 모노포드 버켓기초에 대하여 실험을 실시하였다. 대상 버켓기초의 외경과 길이를 기준으로 상사비를 적용하여 원심모형실험 모델의 치수를 산정하였으며, 실제 구조물과 동일한 재료인 강재를 사용하여 제작하였다(Table 3). 동일한 재료를

Table 3. Dimensions of target, prototype and model bucket structures

| Item | Monopod | | |
|----------------------|---------------|---------------|----------------|
| | Target bucket | Prototype | Model |
| Bucket diameter (D) | 15.5m | 15.5m | 221.4mm |
| Skirt length (L) | 10.5m (0.68D) | 10.5m | 150.0mm |
| Skirt thickness | 40mm (0.26%D) | 70mm (0.45%D) | 1.0mm (0.45%D) |
| Toplid thickness | 40mm | 490mm | 7.0mm |
| Weight (Bucket only) | 4.49MN | 9.72MN | 28.351N |



Fig. 4. Model bucket foundation

사용하여 상사비대로 치수를 축소시킨 경우, 원심모형 실험 조건에서 원형 구조물의 응력 및 변형 거동을 재현할 수 있다(Wood, 2004). 다만, 본 연구에서는 모델 제작의 한계로 인하여 버킷 벽면은 상사비를 그대로 적용한 값보다 두꺼운 1mm로 제작하였으며, 실제 구조물의 상판과 타워하단 연결부에 설치되는 보강재 대신 모델 상판의 상판의 두께를 7mm로 증가시켜 기초구조물 자체의 변형량을 최소화하도록 하였다. 또한 재하 지점과 기초를 연결하는 수직 연결봉도 충분한 강도 및 강성을 확보할 수 있도록 제작하였다. 이에 따라, 모델의 강성과 무게가 원형에 상사비를 적용한 값보다 증가되었다. 본 연구의 목적이 기초의 구조적 변형보다는 지반의 지지력 거동에 대한 것이므로 강성의 증가는 적절한 것으로 판단하였으며, 자중의 증가에 의한 영향은 수치해석을 통하여 검토하였다. 수치해석에 대한 내용은 4장에 기술하였다. 실험에 사용된 모노포드 버킷기초 모형을 Fig. 4에 나타내었다.

2.4 재하 하중 조건, 재하 단계 및 계측 시스템

해상풍력타워에는 풍하중과 파랑하중이 주요 하중으로 작용하며 수평력으로 작용하나, 기초와 하중 작용점과의 수직 거리차로 인한 모멘트가 추가적으로 발생한다. 예비설계 결과 각 하중 요인의 값이 산출되었으며, 이들 요인들을 단일 지점에서 수평력으로 작용시키는 경우의 등가 높이는 33.0m로 산정되었다(등가 높이 = 모멘트 합계/수평력 합계). 이러한 하중 조건을 모사하기 위하여 원심모형실험에서도 기초 모델과 수직 이격 거리를 두고 수평력을 재하할 수 있도록 재하 및 계측장치를 구성하였으며, 1/70로 축소시켜 기초 상단에서 471mm

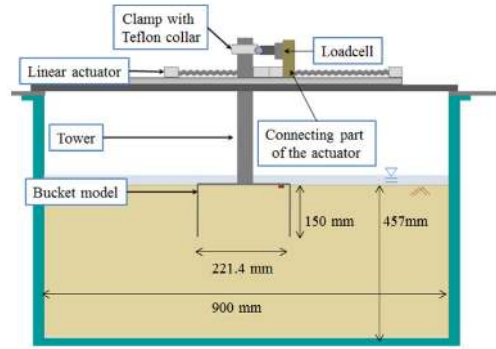


Fig. 5. Schematic diagram of loading system

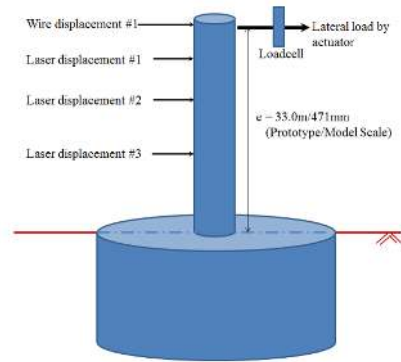


Fig. 6. Measurement locations

높이에 수평 하중이 작용하도록 하였다(Fig. 5).

구조물에 가해지는 수평력은 가력 액추에이터와 구조물 사이에 로드셀을 설치하여 계측하였다. 재하는 변위 제어로 실시하였으며, 속도는 액추에이터 기준 0.5mm/s (기초 하단을 회전 중심점으로 가정한 경우 2.77°/min)로 적용하였다. 구조물의 변위는 구조물의 수평 이동 거리 및 회전각을 산출할 수 있도록 수직 위치가 다른 여러 지점에서 수평 변위를 계측하였다(Fig. 6).

재하는 크게 두 단계로 나누어 실시하였다. 첫 번째는 기초의 항복 하중을 판별하기 위한 목적으로 예비 수치 해석 및 지지력 검토 결과를 참조하여 예상되는 항복 하중을 초과할 수 있도록 재하 및 제하하였고, 두 번째 단계에서는 회전각 10° 이상까지 충분한 변위가 유발되도록 재하 하여 항복 이후 범위까지의 거동을 확인하고자 하였다.

3. 원심모형실험 결과

실험에서 구해진 하중-회전각 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 항복 하중의 산정 방법은 Villalobos(2006) 등의 방법을 적용하였으며, 항복 모멘트는 198MN·m, 항복

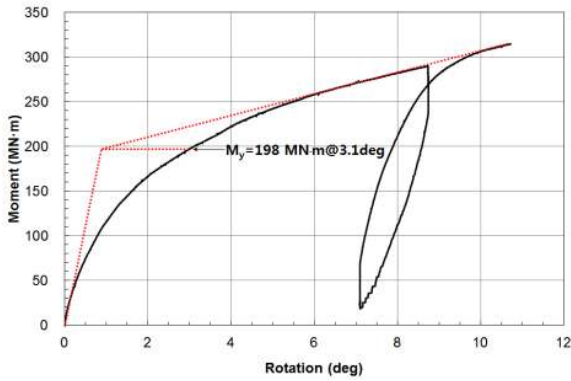
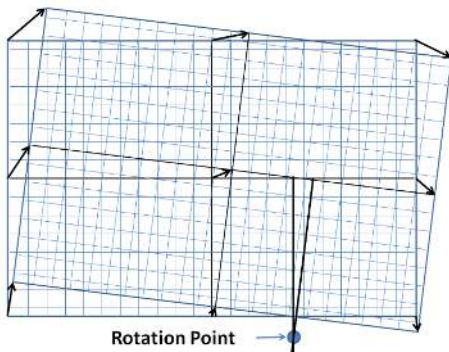


Fig. 7. Moment-rotation angle curve of monopod bucket foundation



(a) Picture on model after test



(b) Displacement of model bucket

Fig. 8. Pictures on centrifuge model after centrifuge test

수평하중은 6.0MN으로 평가되었다. 변위가 증가하면서 모멘트-회전각 곡선의 기울기가 점진적으로 감소되는 것으로 나타났으며, 제하 및 재재하시의 기울기는 초기 기울기와 유사하였다. 항복 지지력으로 산정된 회전각이 3° 이상으로서 다소 큰 것으로 판단되어, 설계시에는 이를 고려하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

재하실험 종료 이후 버켓기초 및 지반의 변형 양상을 Fig. 8(a)에 표시하였으며, 이때의 버켓기초의 변위를 초기상태와 비교하여 Fig. 8(b)에 표시하였다. 수평 하중 및 모멘트 하중이 가해짐에 따라 버켓 본체의 회전

발생하였으며, 이에 따라 주동측에서는 버켓기초의 벽체의 인발이 발생하고 수동측에서는 벽체의 침하가 발생한 것을 알 수 있다. 실험 종료 시점에서의 회전 중심점은 수동측으로부터 직경의 약 1/3 정도만큼 안쪽에 위치하였으며 수직 위치는 버켓기초 본체의 바닥면으로부터 버켓기초 본체 길이의 약 1/10 정도 하단에 위치하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 검토된 버켓기초의 경우 본체 내의 한 점을 중심으로 회전하는 것이 아니고 회전과 이동이 함께 발생하는 것으로 나타났다.

실험 후 수동측 지반은 최대 수 mm 정도의 용기가 발생하였으며, 용기 범위는 버켓 외면으로부터 버켓 직경의 약 1D 범위까지 발생한 것으로 관찰되었다. 주동측 지반에서는 약 20~30mm(0.09~0.135D) 정도 깊이로 지반이 함몰된 것이 관찰되었으며, 이는 버켓 본체의 회전 및 이동에 따라 주동측 지반과 간격이 벌어지면서 나타난 현상으로 판단된다.

4. 실험 조건에 대한 수치해석 검토

4.1 검토 범위 및 수치모델 개발

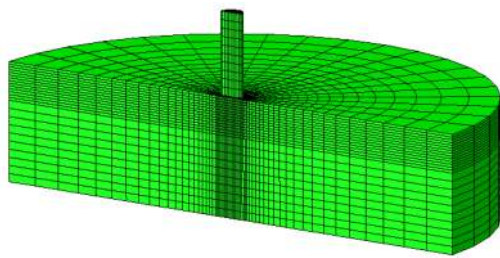
원심모형실험 조건의 적정성을 검증하기 위하여 수치해석을 실시하였다. 대상 구조물에서 버켓기초의 자중이 2.22MN, 상하부 구조물의 자중이 5.75MN으로 산정되었으며, 원심모형실험에서는 각각 9.72MN, 9.41MN으로 실험이 수행되었으므로 각 경우에 대한 결과를 비교하였다. 원심모형실험 모형지반의 수평 및 수직 경계거리가 2.0을 약간 상회하는 정도로서 Abdel-Rahman and Achmus(2006)을 참고하여 영향이 미미할 것으로 판단되는 수평 7D, 수직 4D일 때와 실험에 적용된 2D 조건일 때의 결과를 비교하였다. 또한 지반탄성계수에 따른 하중-변위 곡선의 변화를 검토하였다. 본 논문에서 검토된 해석 case를 Table 4에 나타내었다.

수치해석은 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS(2011)를 이용하여 수행하였다. 3차원 해석을 실시하였으며, 구조물의 형상과 하중 조건의 대칭성을 감안하여 반단면에 대하여 모델링하고 지지 조건을 적용하였다(Fig. 9). 버켓기초의 치수는 원심모형실험 모델의 치수에 중력가속도를 곱한 원형을 기준으로 산정하였으며, 기초와 하중 작용점을 연결하는 연결봉은 변형을 최소화하기 위하여 속이 찬 단면으로 모델링하고 단위중량은 0.01kN/m³을 적용하여 연결봉의 무게가 해석 결과에 미

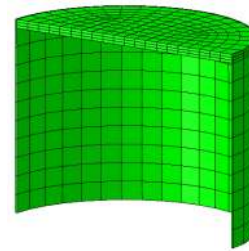
Table 4. Numerical analysis cases

| Item | Case | Bucket weight (MN) | Super and structure weight, V (MN) | Young's modulus of SM layer (MPa) | Distance to boundary* | |
|-----------------------------|------|--------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|----------|
| | | | | | Horizontal | Vertical |
| Weight of structures | 1 | 9.72 | 9.41 | 10 | 7D | 4D |
| | 2 | | 5.75 | | | |
| | 3 | 2.22 | 9.41 | | | |
| | 4 | | 5.75 | | | |
| Distance to boundary | 5 | 9.72 | 9.41 | | 2D | 2D |
| Young's modulus of SM layer | 6 | 9.72 | 9.41 | 5 | 7D | 4D |
| | 7 | | | 20 | | |

*D=Diameter of bucket foundation



(a) Mesh of soil and structures



(b) Mesh of bucket foundation

Fig. 9. Finite element mesh for numerical analysis

치는 영향을 최소화 하였다. 실험의 원형 조건과 같이 33.0m 높이의 연결봉 상단에 수평 변위를 가하여 하중을 재하하였고, 재하점에서 발생하는 반력과 기초 상판의 변위를 출력하였다.

요소는 저감적분이 적용된 8절점 선형 연속체 요소(C3D8R)를 사용하였다. 버켓기초 요소에는 등방 선형 탄성 모델을 적용하고, 지반 요소에는 사질토 지반의 거동을 적절히 모사할 수 있는 비관련 흐름 규칙(non-associated flow rule)을 갖는 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였다. 지반의 물성은 모형지반에 사용된 시료와 성형 조건에 대하여 기본 물성시험과 직접전단시험을 실시한 결과를 적용하였으며, 버켓기초가 설치되는 SM층

과 버켓기초 접촉면간의 마찰각은 SM층 내부 마찰각의 2/3를 적용하였다. 버켓기초와 지반이 접촉하는 면에는 경계면요소를 적용하여 두 요소의 분리와 미끄러짐 거동을 구현하였고, 전단강도에 도달하기 전의 탄성 변형은 고려하지 않았으며, 경계면의 전단강도는 경계면에 작용하는 수직압축응력과 마찰계수를 곱하여 산정되도록 하였다(Abdel-Rahman and Achumus, 2006; Le et al., 2011). 버켓의 변형 물성은 강재의 일반적인 값을 사용하였으며, 단위중량은 수치해석 기초모델의 중량이 원심모형실험에 사용된 기초 모델의 중량 및 대상 기초구조물의 중량과 같도록 역산출하여 해석 case 별로 적용하였다. 수치해석 입력 물성을 Table 5에 요약하여 나타

Table 5. Input parameter of soil model and bucket foundation

| Parameters | Bucket foundation | SM layer | ML layer |
|---|--|-----------|----------|
| Unit weight, γ' (kN/m ³) | 75.9 (Bucket weight 9720 kN) 17.3 (Bucket weight 2220 kN) | 9.5 | 8.6 |
| Young's modulus, E_s (MPa) | 200,000 | 5, 10, 20 | 10 |
| Poisson's ratio, ν | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| Internal friction angle, Φ (°) | - | 33.7 | 34.5 |
| Dilation angle, ψ (°) | - | 11.7 | 0 |
| Cohesion, c (kPa) | - | 16.1 | 5.2 |
| Later earth pressure at rest, K_0 | - | 0.5 | 0.5 |
| Soil-steel frictional angle, δ (°) | - | 22.5 | - |

내었다.

해석 단계는 다음과 같이 크게 네 단계로 수행하였다. 순서에 따라, (a) 지반의 수직 및 수평 응력을 설정된 K_0 값에 따라 형성하였으며, (b) 버켓기초를 발현시켜 버켓기초가 설치 완료된 상태의 조건을 형성하였고, (c) 상재하중을 버켓기초 상판에 등분포하중으로 작용시켜 상부구조물이 설치된 조건을 모사하였고, (d) 연결봉 상단에 변위를 발생시켜 수평하중이 작용되는 단계를 모사하였다.

4.2 해석 결과 및 분석

버켓기초의 자중과 상부수직하중(V)에 따른 하중-회전각 곡선 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 곡선의 초기 부분에서는 각 경우의 결과가 거의 동일하였으나, 약 0.5° 이후부터는 차이가 발생하였으며, 자중과 상부하중이 클수록 동일 회전각에 대한 수평하중이 큰 것으로 나타났다. 이것은 탄성조건에서는 자중과 상부하중의 영향이 미미하나, 자중과 상부하중이 증가할수록 항복 거동이 발생하기 시작하는 변위가 증가되며, 그에 따라 지지력도 증가되는 것으로 해석된다. 원심모형실험에서 항복점으로 판별된 회전각 3.1° 를 기준으로 원심모형실험 조건에 대한 지지력과 대상구조물 조건에 대한 지지력의 비는 $1.17(=9,732\text{kN}/8,298\text{kN}; 17\%\text{증가})$ 로 나타났다.

경계 거리에 따른 하중-회전각 곡선을 Fig. 11에 비교하여 표시하였다. 초기 부분에서는 거의 동일한 것으로 나타났으나, 약 0.5° 이후부터 차이가 발생하기 시작하였다. 경계거리가 충분히 확보된 경우에 비하여 실험에 적용된 조건에서는 회전각 3.1° 를 기준으로 할 때 약 $1.06\text{배}(=10,323\text{kN}/9,732\text{kN}; 6\%\text{감소})$ 큰 것으로 나타났다.

버켓기초가 위치하는 SM층의 탄성계수의 차이에 따른 결과를 Fig. 12에 비교하여 표시하였다. 탄성계수의 변화에 따라 하중-회전각 곡선은 초기부터 차이를 보였다. 따라서, 변위 거동을 정확하게 평가하기 위해서는 탄성계수를 수치해석 모델에 구현하는 방법에 세심한 고려가 필요한 것으로 판단된다.

수치해석을 이용하여 원심모형실험 조건의 영향을 검토한 결과, 자중 및 상부하중의 증가 그리고 경계거리의 감소에 따라 초기부터 약 0.5° 범위까지는 영향이 미미한 것으로 나타났으나, 그 이상의 변형 범위에 대해서는 다소 과대평가될 가능성이 있는 것으로 나타났다. 탄성계수 값에 따라 수치해석 결과 값이 초기부터 큰 차이

를 보이는 것으로 나타난 점을 고려할 때, 현장의 탄성계수를 정확하게 평가하고 수치해석 모델에 구현하는 것이 중요할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 원심모형 실험조건이 결과에 미치는 영향을 이상적인 조건에서의 경우와 비교하는 것을 목적으로 수치해석을 수행하였다. 향후 원심모형실험으로 얻어진 하중-변위 거동과 수치해석에 의한 결과를 직접적으로 비교하기 위해서

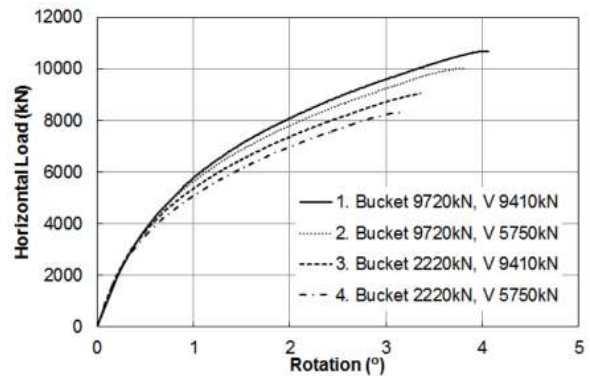


Fig. 10. Comparison of load-rotation angle curves with different bucket and structure weights

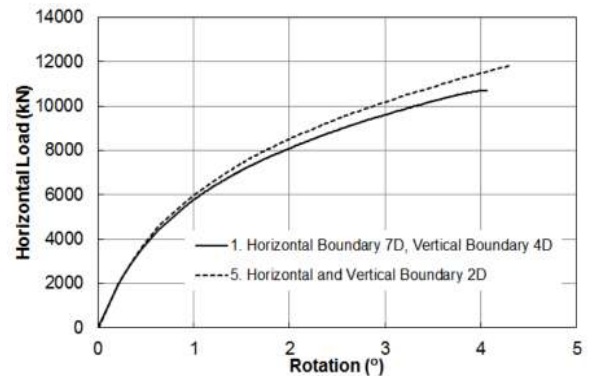


Fig. 11. Comparison of load-rotation angle curves with different distances to boundary

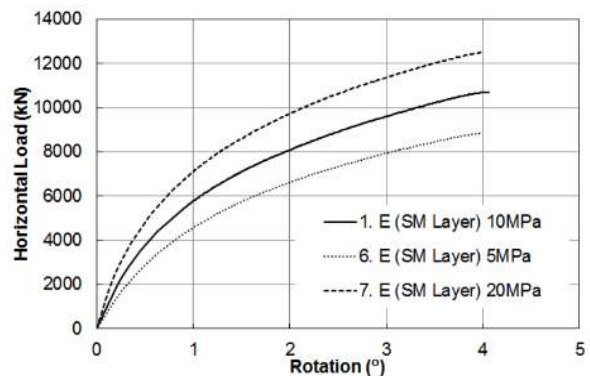


Fig. 12. Comparison of load-rotation angle curves with different Young's moduli of SM layer

는 깊이에 따른 수직 및 수평 구속압 변화에 의한 지반 탄성계수의 변화와 지반 변형율에 따른 비선형성 등 추가적인 항목들에 대한 고려가 필요하며, 본 연구에서 적용한 지반 구성 모델보다 엄밀한 지반의 구성 모델을 적용하고 관련 지반 물성치에 대한 정확한 산정이 필요하다고 사료된다.

5. 결론 및 고찰

해상풍력 모노포드 석션 버켓기초를 적용한 해상풍력 모노포드 기초에 대하여 원심모형실험을 수행하여 지지력 거동을 평가하였으며, 수치해석을 수행하여 원심모형실험 모델의 무게와 경계조건이 미치는 영향에 대하여 검토하였다. 원심모형실험으로 회전각 기준 10° 이상의 충분한 변형 범위에 대하여 지지력 거동을 평가하였으며, 이를 통해 초기, 항복 및 항복 이후의 거동을 파악하고 설계 및 해석시 참고할 수 있는 기준 실험 결과를 제공하고자 하였다. 대규모 해상풍력 단지가 추진되고 있는 서남해안 지역은 실트질 모래 및 실트 지반으로 주로 구성되어 있으므로, 이러한 지반 조건에서 석션 버켓기초의 거동에 대하여 지속적인 연구가 필요한 것으로 사료된다. 본 연구에서 도출된 주요 결론은 아래와 같다.

- (1) 해상풍력타워에 대한 하중 조건에서 모노포드 버켓 기초의 하중-회전각 거동을 평가한 결과, 항복 모멘트는 198MN·m, 항복 회전각은 3.1°로 나타났다. 항복 회전각이 통상적인 해상풍력 기초의 변위 기준보다 큰 범위인 것으로 판단되며, 따라서 기초의 설계지지력 산정을 위해서는 명확한 변위 기준을 설정하고 항복 이전 범위에서 기초의 변위 거동을 신뢰성 있게 평가하여야 할 것으로 판단된다.
- (2) 항복하중보다 큰 하중이 작용한 경우, 모노포드 버켓기초는 회전과 이동이 함께 발생하였으며, 회전 중심점은 기초 선단 하부의 지반 내에 위치하였다.
- (3) 수치해석을 통하여 기초의 자중 및 상부 수직하중의 영향에 대하여 분석한 결과, 초기 회전각 0.5°까지는 영향이 미미한 것으로 나타났으며, 그 이후 항복지점까지의 범위에서는 이상적인 경우보다 다소 과대평가하는 것으로 나타났다.
- (4) 모노포드 버켓기초의 하중-변위 거동은 기초가 위치하는 지층의 탄성계수 값에 크게 영향을 받는 것

으로 나타났으며, 모노포드 기초의 변위 거동을 수치해석으로 정확하게 예측하기 위해서는 현장 탄성계수를 엄밀하게 평가하고 수치해석 모델에 구현하는 것이 중요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 국토해양부 2010 건설기술혁신사업 “대규모 대수심 해상기초시스템 기술 개발(과제번호 10기술혁신E04)” 과제 성과의 일부이며, 한국건설교통기술평가원 및 현대건설(주)의 연구비 지원과 연구단, 세부과제 주관 및 참여기관의 협조에 감사드립니다.

참고 문헌

1. ABAQUS (2011), *User's Manual*. Version 6.11
2. Abdel-Rahman, K. and Achmus, M. (2006), “Behaviour of Monopile and Suction Bucket Foundation Systems for Offshore Wind Energy Plants”, *Proceedings of 5th International Engineering Conference*, Sharm El-Sheikh, Egypt.
3. ASTM D 4254-00 (2006), Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density, ASTM.
4. Bransby, M. F. and Randolph, M. F. (1998), “Combined Loading of Skirted Foundations”, *Geotechnique*, Vol.48, Issue.5, pp.637-655.
5. Byrne, B. W. and Houlsby, G. T. (2003), “Foundations for Offshore Windturbines”, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences*, Vol.361, Issue.1813, pp.2909-2930.
6. Choo, Y. W., Kim, D. J., Kim, S., Kim, D. S., and Lee, M. S. (2011), “Model tests on suction pile installation in sand for offshore wind turbine foundation”, *Proceedings of ASEM'11plus*, Seoul, Korea, pp.3783-3793.
7. Gourvenec, S. (2007), “Failure envelopes for offshore shallow foundations under general loading”, *Geotechnique*, Vol.57, Issues.9, pp.715-728.
8. Head, K. H. (2006), *Manual of Soil Laboratory Testing*, Vol. 1, Whittles Publishing, London.
9. Houlsby, G. T. and Byrne, B. W. (2000), “Suction Caisson Foundations for Offshore Wind Turbines and Anemometer Masts”, *Wind Engineering*, Vol.24, Issue.4, pp.249-255.
10. Houlsby, G. T., Ibsen, L. B., and Byrne, B. W. (2005), “Suction caissons for wind turbines”, *Frontiers in Offshore Geotechnics : ISFOG*, pp.75-93.
11. Hyundai Engineering and Construction (2012), *Bearing Capacity Evaluation of Suction Bucket Foundation Using Geotechnical Centrifuge Test*, Report for Development of Construction Technology for Bucket Foundation System at Deep Sea, Offshore Wind-energy Foundation System (OWFS) R&D program.
12. Ibsen, L. B., Barari, A., and Larsen, K. A. (2012), “Modified vertical bearing capacity for circular foundations in sand using reduced friction angle”, *Ocean Engineering*, Vol.47, pp.1-6.

13. Kim, D. J., Kim, S., Choo, Y. W., Kim, D. S., and Lee, M. S. (2010), "Installation of Suction Caisson Foundation for Offshore Wind Turbine: Model Test", *Proceedings of KGS Fall National Conference*, Gyunggi, Korea.
14. Kim, D. J., Choo, Y. W., Kim, S., Kim, J. H. Kim, D. S., Jee, S. H., and Choi, J. (2012), "Centrifuge Study of Suction Bucket Foundations for Offshore Wind Towers", *Proceedings of KGS Fall National Conference*, Seoul, Korea.
15. Kim, D. S., Kim, N. R., Choo, Y. W., and Cho, G. C. (2013), "A newly developed state-of-the-art geotechnical centrifuge in South Korea", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.17, No.1, pp.77-84.
16. Le, C. H., Jeong, J. U., and Kim, S. R. (2011), "Numerical Analysis on Bearing Capacity of a Suction Bucket in Clay", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.27, No.10, pp.25-33.
17. LeBlanc, C., Ahle, K., Nielsen, S. A., and Ibsen, L. B. (2009), "The monopod bucket foundation, Recent experience and challenges ahead", *European Offshore Wind 2009 Conference & Exhibition*, Stockholm, Sweden.
18. Ministry of Knowledge Economy (2010), *Roadmap for Promoting Offshore Wind Power*.
19. Recharge (2012), <http://www.rechargenews.com>.
20. Vedruna, E. S., Muhlenbach, M., Dale, M., and Pollock, C. (2012), "Offshore Wind energy Webcast : Make or Break for a Challenged Industry", *IHS emerging energy research*.
21. Villalobos, F. A. (2006). *Model Testing of Foundations for Offshore Wind Turbines*. Ph.D Dissertation, University of Oxford, UK.
22. Wood, D. M. (2004), *Geotechnical Modelling*, Spon Press, London and New York.
23. Yun, G. and Bransby, M. F. (2007), "The horizontal-moment capacity of embedded foundations un undrained soil", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.44, pp.409-424.
24. Zhu, B., Kong, D. Q., Chen, R. P., Kong, L. G., and Chen, Y. M. (2011), "Installation and lateral loading tests of suction caissons in silt", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.48, pp.1070-1084.

(접수일자 2012. 11. 21, 심사완료일 2013. 4. 2)