

ALE 기법을 이용한 모래지반에서 석션 매입 앵커의 인발 거동 분석

나선홍* · 장인성** · 권오순*** · 이승현****

Na, Seon Hong* , Jang, In Sung** , Kwon, O Soon*** , Lee, Seung Hyun****

Study on Pullout Behavior of Embedded Suction Anchors in Sand using ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) Technique

ABSTRACT

The embedded suction anchor, ESA, is one type of mooring anchor systems which utilizes the suction pile or caisson to penetrate the anchor into the sea bed and develops its capacity under pullout load. In this study, the numerical analysis using ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) Adaptive Meshing technique was performed to simulate the pullout behavior of the ESA, and the results were compared to those of the previous research, centrifuge model tests and the analytical method based on limit equilibrium theory. The pullout behaviors of the ESA under horizontal, vertical, and inclined loading were evaluated. The analysis results showed that the maximum horizontal pullout load was developed when the location of loading point was at the mid-point, and the each vertical pullout load gave the similar value regardless of the locations of the loading points. The pullout load decreased as the load inclination angle increased at the mid-point of the anchor.

Key words : Sand, Embedded suction anchor, Pullout behavior, Numerical analysis, ALE

초록

석션 매입 앵커(Embedded Suction Anchor; ESA)는 석션 기초(Suction Pile or Caisson)를 이용하여 앵커를 지중에 매설한 후 인발에 저항하는 계류앵커형식이다. 본 연구에서는 ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) Adaptive Meshing 기법을 이용한 수치해석을 통해 석션 매입 앵커의 인발 거동을 모사하고, 그 결과를 기존 연구에서 수행된 원심모형 실험 및 한계 평형법을 이용한 해석적 방법의 결과와 비교·분석 하였다. 이를 통해 앵커의 수평·연직·경사 방향의 인발 거동을 평가하였으며, 수치 해석 결과, 수평 재하 시 중간 위치에서 가장 큰 저항력을 발휘하는 것으로 나타났다. 연직 재하의 경우 재하 위치와 무관하게 유사한 저항력이 발휘 되었으며, 수평 저항력이 가장 큰 중간 위치에서 경사 하중을 가한 결과 경사각이 증가할수록 인발 저항력이 감소하는 것으로 나타났다.

검색어 : 모래, 석션 매입 앵커, 인발 거동, 수치해석, ALE 기법

1. 서론

해상구조물은 크게 고정식 구조물과 부유식 구조물로 구분되며 환경적인 조건과 용도에 따라 다양한 형태와 크기를 갖는다. 석션 기초(suction pile or caisson)는 고정식 및 부유식 구조물 모두에 적용되고 있는 기초 형식 중 하나로, 1950년 대 이후부터 도입되기

* 정회원 · 교신저자 · 한국해양과학기술원 연안개발에너지연구부 연구원
(Corresponding Author · Korea Institute of Ocean Science and Technology · naskiz@kiost.ac)
** 정회원 · 한국해양과학기술원 연안개발에너지연구부 책임연구원 (isjang@kiost.ac)
*** 정회원 · 한국해양과학기술원 연안개발에너지연구부 책임연구원 (oskwon@kiost.ac)
**** 신문대학교 공과대학 토목공학과 교수 (shlee02@sunmoon.ac.kr)

Received August 19, 2013/ revised September 15, 2013/ accepted November 4, 2013

시작하여 석유시추선의 지지와 해상 풍력 발전 타워의 기초로 활용되는 등 다양한 형태의 해상 구조물에 사용되고 있다. 또한 해상플랫폼의 계류를 위한 앵커로 활용되기도 하여 국내의 경우 침매 터널의 계류 시설로 사용된 바 있다(Cho et al., 2008).

석션 매입 앵커(Embedded Suction Anchor; ESA)는 석션 기초와 동일한 원기둥 형태의 단면 형상을 가지며 석션 기초 선단부에 부착되어 해저면 하부 원하는 깊이에 설치된다. 이 후 석션 기초는 인발하여 회수되고 매입된 앵커의 측면에 설치된 인발작용점(padeye)을 통해 하중에 저항하게 된다. 국내에서 대우건설이 석션 매입 앵커(ESA)를 개발하여 최초로 부유식 방파제의 계류 장치로 사용하였다(Kim et al., 2005a).

일반적으로 지중에 설치되는 앵커는 관입, 인발, 회전 등의 거동으로 인해 주변 지반에 큰 변형을 야기하게 되며, 수치해석에서는 이러한 대변형 해석 시 요소망 왜곡 등 여러 문제 발생하게 되는데, 이를 해결하기 위한 많은 연구가 수행되었으며 Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) 기법도 그 중 하나이다(Benson, 1989; Ghosh and Kikuchi, 1991). 그리고 Hu and Randolph (1998)는 ALE 기법을 확장하여 Remeshing and Interpolation Technique with Small Strain (RITSS) 기법을 개발하고, 이를 활용하여 평판앵커의 거동 평가를 위한 다양한 연구를 수행한 바 있다(Song et al., 2008; Yu et al., 2009; Wang et al., 2010). 그러나, 새로운 형식의 앵커인 ESA의 거동을 수치해석을 이용하거나 ALE 기법을 활용해 연구한 사례는 보고된 바 없다.

본 연구에서는 범용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS (Dassault Systèmes, 2012)를 이용해 모래지반에서 ESA의 인발 거동을 분석하였으며, 이를 효과적으로 모사하기 위해 ABAQUS/Explicit에서 제공되는 ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) Adaptive Meshing 기법을 적용하였다. ESA의 인발작용점과 인발 방향을 달리하며 저항력을 산정하고, 수치해석을 통해 산정된 저항력과 기존에 제시된 이론식 및 원심모형실험 결과를 비교분석하였다.

2. 기존 연구

Kim et al.(2005a, 2005b)은 모래지반에서 ESA의 성능을 평가하기 위해 원심모형 실험을 수행하였는데, 그 결과, 플랜지가 없는 원기둥 형태의 앵커의 경우 인발 작용점이 낮을수록 최대 인발 저항력이 증가하며 인발 경사가 수평일 때 저항력이 가장 크게 나타났고, 경사 재하 시 각도가 연직으로 갈수록 저항력이 점점 줄어들어 경사각이 60° 이상이 되면 인발 저항력에 큰 차이가 나타나지 않았다. 원기둥의 둘레를 따라 플랜지가 있는 앵커의 경우 인발 작용점이 앵커의 중앙에 위치하고 수평 재하를 했을 때 최대 인발 저항력을 나타냈고, 인발 각도가 연직으로 커질수록

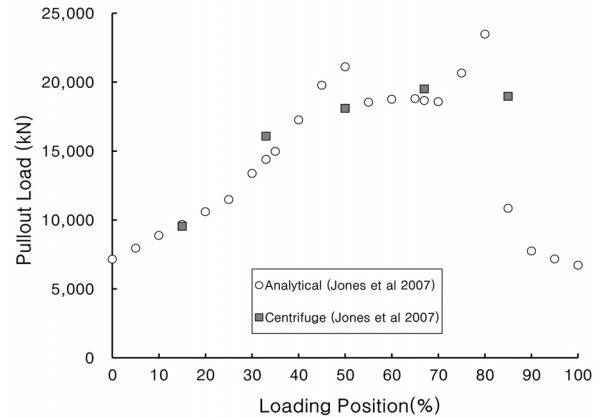


Fig. 1. Pullout Load of the ESA Under Horizontal Loading (Jones et al., 2007)

저항력이 줄어드는 경향이 나타났다. 그리고 플랜지에 의해 앵커의 저항력이 최대 110% 증가한 것으로 나타났다.

Jones et al.(2007)은 모래지반에서 ESA에 대하여 극한 수평 및 연직 저항력에 대한 해석식을 제시하고, 그로부터 산정된 저항력과 원심모형실험을 통해 도출된 저항력을 비교하였다. 그 결과, 수평 저항력의 경우 인발 작용점에 따른 저항력의 차이가 크게 나타났고, 최대 수평 저항력은 인발 작용점이 앵커 상부에서 아래로 앵커길이(L)의 2/3인 지점에서 나타났다. 연직 인발의 경우는 인발 작용점이 앵커의 중심부에 위치할 때 저항력이 가장 크게 나타났으며, 경사 인발은 경사각이 증가할수록 저항력이 감소하는 것으로 나타났다.

이처럼 ESA는 인발작용점의 위치와 인발 방향에 따라 저항력의 큰 차이를 보인다. 기존에 수행된 원심모형 실험을 보면, 실험에 따라 경사 각도에 따른 지지력의 감소 경향은 유사하게 나타났으나 인발 작용점에 따른 수평 방향 최대 저항력의 위치는 다른 결과를 보였다. 또한 이론식을 이용한 해석해 결과는 원심모형 실험과 유사한 결과를 보이지만, Fig. 1에서 보는 것처럼 인발작용점이 앵커 길이의 50~80%에 있을 때 불규칙한 결과를 보인다. 더불어, 이론식을 이용한 경사 저항력은 각각의 이론식으로 도출된 수평 및 연직 저항력 결과와 원심모형실험에서 도출된 인발 저항력을 비교한 후 산정되기 때문에 그 한계점이 있다고 판단된다.

3. 수치해석

3.1 ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) Adaptive Meshing Technique

Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) 기법은 대변형 거동 해석 시 발생하는 요소망 왜곡 문제를 해결하기 개발된 기법으로,

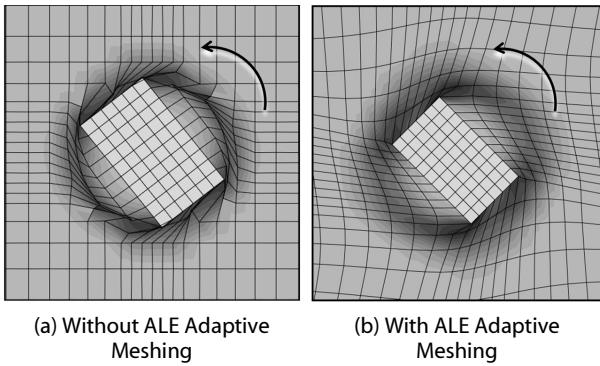


Fig. 2. Simple Example of ALE Adaptive Meshing in Numerical Analysis

수치적 오류로 인한 부정확한 해석을 개선하고 대변형을 모사하기 위해 사용된다. 본 연구에서는 ABAQUS/Explicit에서 제공하는 ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) Adaptive Meshing 기법 (Dassault Systèmes, 2012)을 이용하여 석션 매입 앵커(ESA)의 인발 거동을 모사하였다. ALE 기법을 적용하게 되면 수치해석 시 요소망 왜곡 문제를 해결하기 위해 해석 절점 변위와 재료 변위를 분리하여 해석하고, 해석 과정 전반에 걸쳐 요소망의 왜곡을 최소화 시키는 알고리즘이 적용되게 된다. 또한, 절점 변위와 재료의 변위를 구분하여 해석하지만 이전 단계에서 계산된 각 요소의 변수 값은 변위 발생 이후에도 재료 변위와 부합하도록 2차 Advection 기법이 적용된다(Van Leer, 1997). Fig. 2는 예비해석을 통해 살펴본 지반 내 구조물의 회전에 따른 거동을 나타낸다. ALE 기법의 적용을 통해 구조물의 회전에 따른 주변 요소망의 과도한 뒤틀림 현상이 개선되고, 원하는 회전량까지 해석이 진행되는 것을 확인할 수 있다. 또한 기존 연구에서 구조물 관입 시 ALE 적용을 통한 거동 예측 개선효과를 살펴볼 수 있다(Kim et al., 2013).

3.2 해석 조건 및 방법

상용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS/Explicit (Dassault

Systèmes, 2012)를 이용해 ALE Adaptive Meshing 기법을 적용하고 ESA에 대한 수치해석을 수행하였다. Jones et al.(2007)에서 사용한 ESA의 원형과 지반 조건을 이용해 모델링하고, 배수조건에서 해석을 수행하였다. 모래지반과 앵커는 각각 Mohr-Coulomb 항복 모델 및 탄성모델을 사용하고, 앵커가 목표 심도에 매입되어 있는 상태를 초기 조건으로 가정하였다. Table 1에 수치해석에서 사용한 앵커와 지반의 입력물성을 정리하였다.

매입된 앵커는 지표로부터 앵커 최상단면까지의 깊이가 7.5m 이고, 원통형으로 크기는 직경 1.5m, 높이 2.5m, 두께 0.075m 이며, 120°의 간격으로 세 개의 플랜지가 달려있다. 플랜지의 길이는 0.5m로 앵커체와 동일한 높이를 가지며 두께는 0.05m이다. 플랜지가 있는 원통형 앵커와 지반을 효과적으로 모델링하기 위해 8절점을 가진 3차원 연속체 요소를 적용하였으며, 응력 및 변형률의 계산을 위해 저감적분법을 채택하였다(C3D8R). 대칭조건을 이용하여 반단면만을 모델링하였으며, 예비 해석으로 후면부의 앵커 날개가 해석에 큰 영향을 미치지 않는 것을 확인하고 해석의 효율성을 위해 제외하였다. 또한, 해석 영역을 넓혀 가며 경계면의 구속 조건이 앵커의 거동에 영향을 미치지 않도록 평가하여 경계면까지의 거리를 선정하였으며, 앵커를 기준으로 좌우 10D, 아래로 6D로 선정하였다(여기서, D는 앵커의 직경). 요소망의 크기는 앵커 인접부의 응력과 변형률을 정밀하게 고려하기 위해 앵커에 가까울수록 요소의 크기를 작게 하였다. Figs. 3 and 4에 ESA의 재원과 수치해석에 사용된 요소망을 나타내었다. 해석 시 지반과 앵커가 분리되지 않도록 하였으며, 앵커 경계면 절점에서의 속도 벡터를 이용한 변위 제어를 통해 재하를 모사하였다. 초기 지중 응력 재현 이후 재하를 모사하고 0.2m/s의 속도를 부여하여 동적인 영향을 최소화 하였다. ABAQUS/Explicit에서는 ABAQUS/Standard에서 지원하는 “Geostatic Step”을 통한 초기 지중 응력 재현이 되지 않기 때문에, 하중 재하에 앞서 따로 해석 단계(step)를 설정해 초기 응력(initial stress)을 부여하고 앵커의 경계 구속 조건을 변화시켜 초기 지중 응력을 재현하였다(Dassault Systèmes, 2012).

Table 1. Input Properties

Soil (Mohr-Coulomb Model)	Effective Unit Weight, γ' (kN/m ³)	10.0
	Friction Angle, ϕ' (Deg.)	39.0
	Dilation Angle, δ (Deg.)	0.0
	Cohesion, c (kN/m ²)	0.0
	Young's Modulus, E (kPa)	50,000.0
	Poisson's Ratio, ν	0.3
Embedded Suction Anchor (Elastic Model)	Unit Weight, γ_t (kN/m ³)	78.0
	Young's Modulus, E (kPa)	210.0×10^6
	Poisson's Ratio, ν	0.3

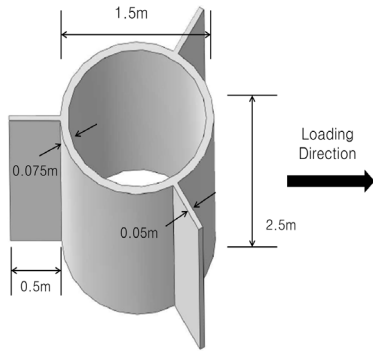


Fig. 3. Geometry and Dimensions of the ESA

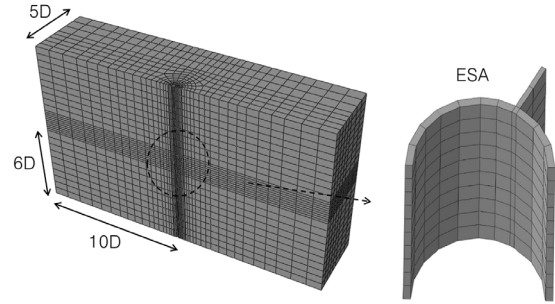


Fig. 4. Typical Mesh for the ESA

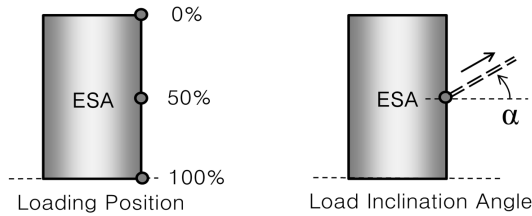


Fig. 5. Loading Position and Inclination Angle

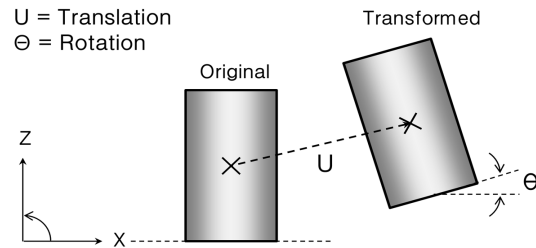


Fig. 6. Translation and Rotation

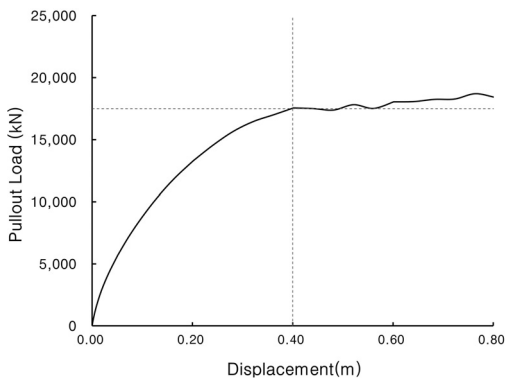
재하 위치는 앵커 상단을 0%, 하단을 100%로 규정하고, 앵커의 거동을 이동량(translation)과 회전량(rotation)으로 구분하여 분석하였다. Figs. 5 and 6에 재하 위치와 각도, 앵커의 이동량 및 회전량의 정의를 각각 나타내었다.

4. 수치해석 결과

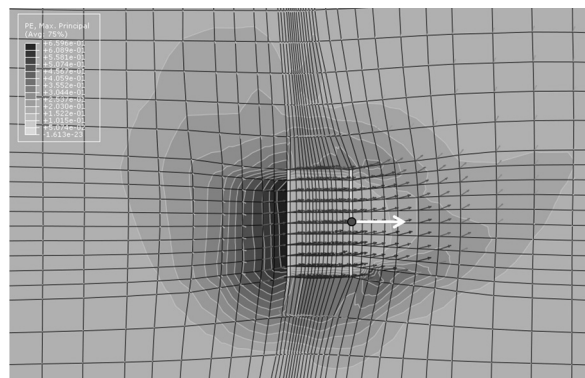
4.1 수평 방향 인발거동

먼저 인발작용점이 앵커 중앙에 위치하고, 수평 재하 조건 하의 해석결과를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7(a)에서처럼 수평변위가

0.4m 보다 큰 구간에는 변위에 따른 하중 증가가 거의 없어 저항력이 수렴하는 경향을 보인다. 반면, 다른 인발 조건에서는 재하에 따른 뚜렷한 파괴 거동을 보이지 않았다. 재하위치 50%에서 수평 재하 시 ESA의 거동을 보면, 회전운동이 거의 없는 순수한 평행이동 보이고 변위가 약 0.4m에 이르러 지반의 파괴로 저항력이 극한값에 도달한 것으로 판단된다. 이에 따라, 본 해석에서는 변위 0.4m를 기준으로 각 재하 조건 별 저항력을 산정하고 그 결과를 기존에 수행된 원심모형 실험 결과와 이론식을 이용한 해석해의 결과와 비교하였다. 변위 0.4m는 앵커 직경의 약 27%, 플랜지를 포함한 앵커 직경의 20%에 해당된다(Song et al., 2008).



(a) Load-Displacement Curve



(b) Deformed Mesh Under Horizontal Loading

Fig. 7. Pullout Load of the ESA Under Horizontal Loading at Loading Position 50%

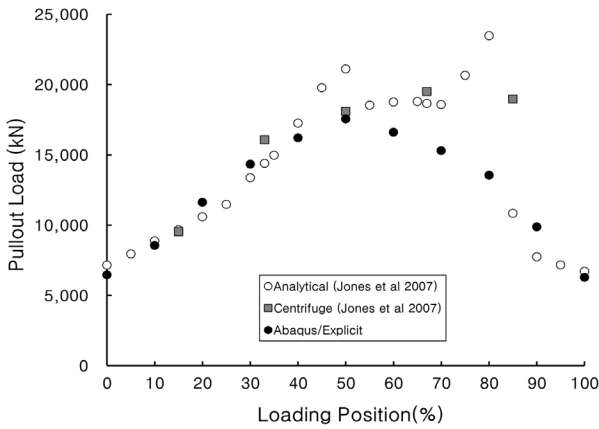


Fig. 8. Pullout Load of the ESA Under Horizontal Loading

Fig. 8에 수평재하 위치를 0%부터 100%까지 달리하여 도출한 수치해석 결과와 Jones et al.(2007)이 발표한 논문의 결과를 비교하여 나타내었다. 수치해석 결과를 보면 재하 위치가 앵커의 중앙부에 위치할 때 앵커의 저항력이 가장 크고, 끝단으로 갈수록 저항력이 줄어드는 것을 알 수 있다. 재하 위치가 중앙부 상단에 위치할 때에는 이론식을 이용한 해석해와 수치해석결과가 매우 유사한 경향을 보인다. 그러나 해석해의 경우 재하 위치가 중앙부 아래로 가면 저항력이 줄어들었다가 다시 80% 위치에서 증가하고 이후에 급격히 감소하는 모습을 보여 해당 구간에서 뚜렷한 경향성이 나타나지 않는다. 원심모형의 경우는 재하 위치가 아래로 갈수록 저항력이 증가하다가 약 67% 위치에서 최대값을 보인다. 수치해석을 통해 도출된 재하 위치 50%에서의 수평저항력은 원심모형 및 해석해 결과와 비교해 각각 약 3%, 18% 과소평가되는 것으로

나타났다.

Fig. 9는 재하 위치 별 ESA의 이동량 및 회전량의 실제 값을 도시화한 그림이다. Fig. 9에 나타난 회살표는 재하 위치가 0~50%, 그리고 50~100%로 각각 변화할 때 앵커의 중심의 이동 모습 및 회전거동의 변화를 나타낸다. 즉, 재하 위치가 0%에 있을 때는 앵커의 회전량(약 13.3°)이 크고 이동량(약 0.16m)은 작은 결과를 보이지만, 50%에 위치할 때 ESA는 회전량(약 0.2°)이 거의 없고 수평으로 이동(약 0.39m)한 것을 볼 수 있다. 마찬가지로 재하 위치가 50%에서 하부로 이동할수록, 다시 앵커의 회전량은 커지고 이동량은 감소하는 것을 알 수 있다. 재하 위치가 앵커 중앙에서 위 또는 아래로 이동하면 회전 방향은 반대지만 이동량이 감소하고 회전량은 증가하는 경향을 보여 유사한 거동을 보인다. 재하 위치가 중앙에 있을 때는 충분한 이동량이 발생하여 해당 방향의 지반이 큰 저항력을 발휘하게 되지만, 재하 위치가 끝단으로 갈수록 이동량 보다는 회전량이 증가하고 국부적인 마찰저항이 발생되어 인발저항력이 감소하는 것으로 판단된다.

4.2 연직 방향 인발거동

재하 위치를 앵커의 0%에서 100% 까지 바뀌가면서 연직 인발 해석을 수행하였다. 연직 변위가 0.4m 일 때의 저항력을 산정하여 기존 원심모형 및 해석해 결과와 비교하고, 이를 Fig. 10(a)에 나타내었다. 수치해석 결과 앵커의 저항력이 재하 위치에 상관없이 거의 유사한 값을 나타내었다. 기존 논문 결과와 비교해 보면 연직 저항력의 경우 재하 위치가 0%에서 50%로 이동할 때 저항력이 점점 커지며, 재하 위치가 중앙부 아래로 가면 저항력이 다소 감소하는 모습을 보인다.

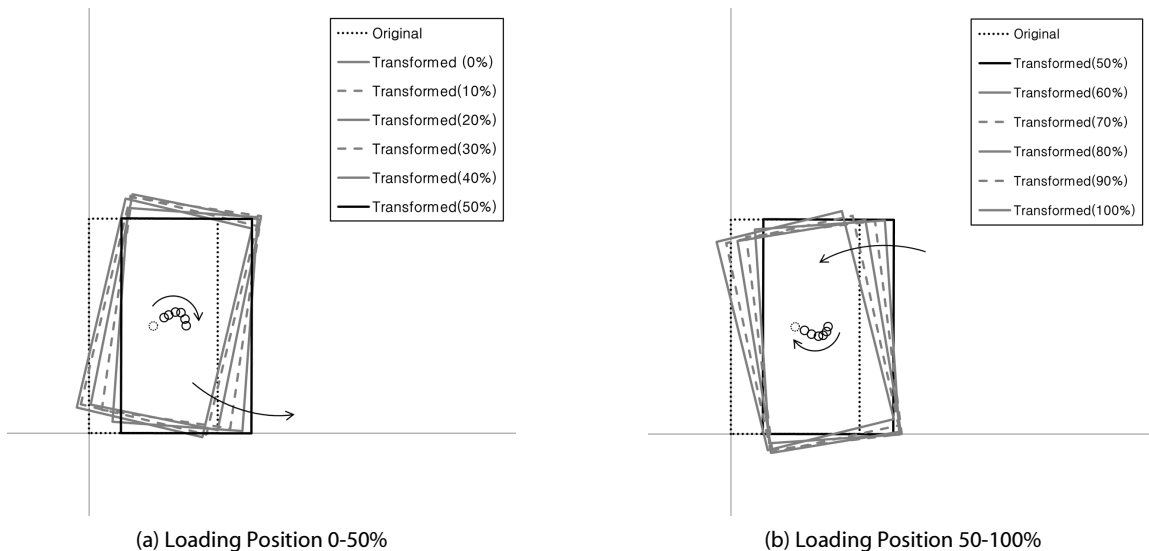


Fig. 9. Translation and Rotation of the ESA Under Horizontal Loading

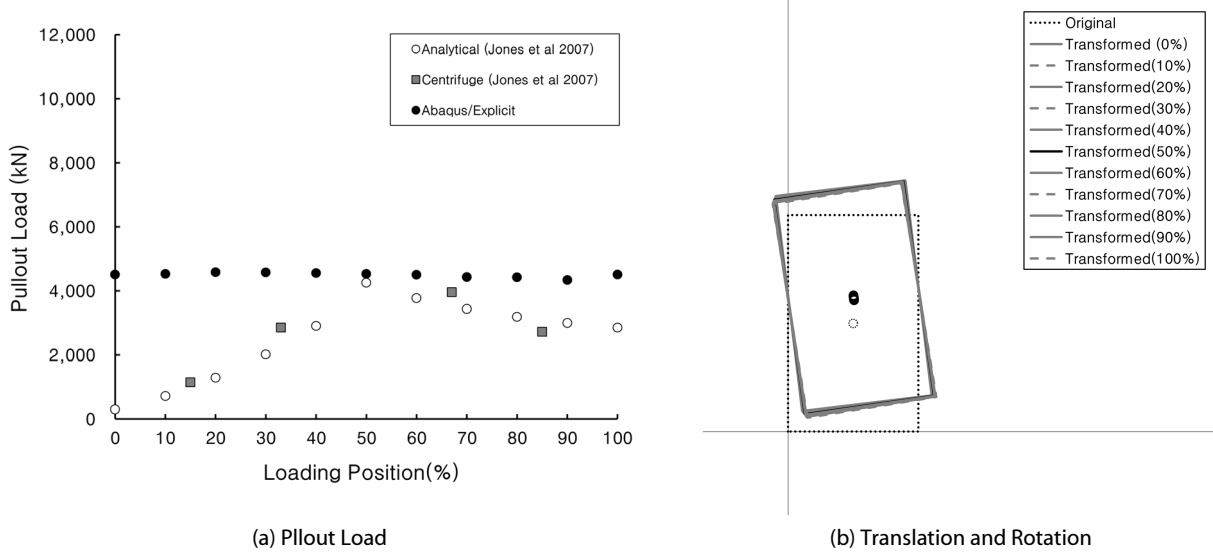


Fig. 10. Pullout Behavior of the ESA Under Vertical Loading

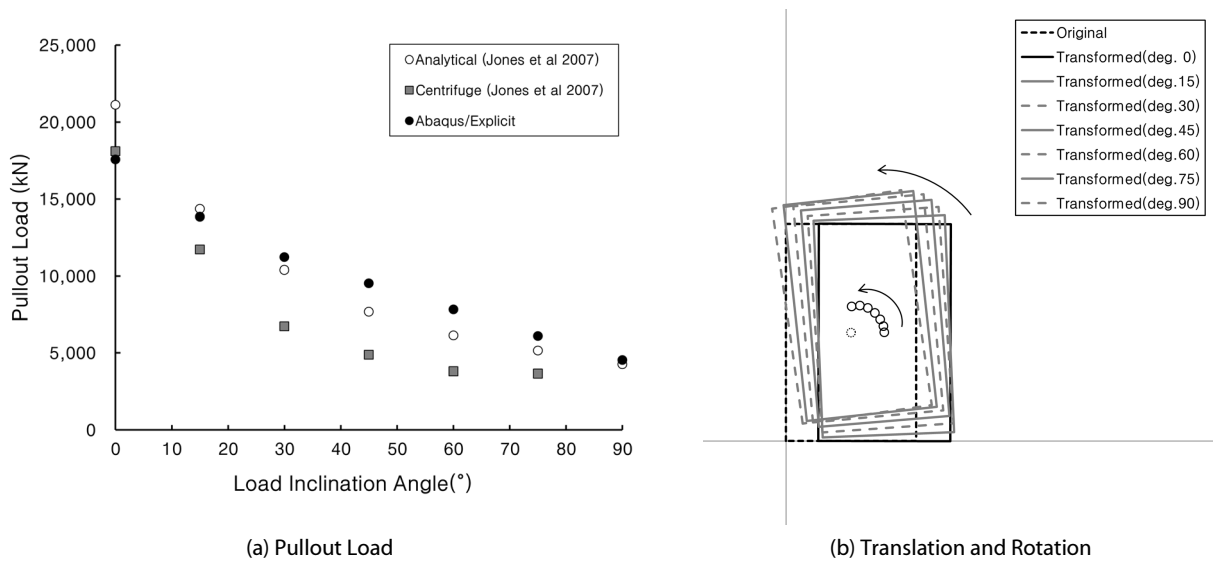


Fig. 11. Pullout Behavior of the ESA with Different Loading Inclination Angle (at 50%)

이러한 결과를 분석하기 위해 Fig. 10(b)에서 재하위치에 따른 앵커의 연직 인발 거동을 나타내었다. 연직 저항력이 유사한 것처럼 앵커의 연직 거동 또한 인발작용점에 따른 차이가 거의 나타나지 않았다. 해석해 및 원심모형실험 결과에서는 연직 재하 위치별 앵커의 회전량이 충분히 고려되어 지지력이 감소하는 현상이 나타났으나, 수치해석에서는 연직재하 시 재하 위치가 앵커의 상단부에 있을 때 앵커의 회전량 발생이 크지 않아 지지력 감소 경향이 나타나지 않았다. 다만, 재하 위치가 앵커의 중심부에 있을 때 수치해석결과 도출된 저항력과 해석해를 통해 산정된 저항력이 약 6.5%로 나타나 매우 유사한 것으로 나타났다.

4.3 경사 방향 인발거동

앞선 해석 결과를 살펴보면 ESA의 저항력은 재하 위치 50%에서 수평으로 재하 하였을 때 최대값이 나타났다. 이에 중앙부에서 경사 재하를 하였을 때의 인발 거동을 보고자 수치해석을 수행하였다. Fig. 11(a)는 경사 하중에 따른 ESA의 저항력을 나타낸다. 경사각도가 15°, 30°, 45°, 60°, 75°로 증가함에 따라 기존 논문 결과와 유사하게 앵커의 저항력이 감소하는 경향을 보였다. 수치해석을 통해 산정된 저항력은 해석해와 비교해 최소 약 3.5%에서 최대 약 24.3%의 차이가, 원심모형실험과 비교하면 3.0~105.0%의 차이가 나타났다.

Fig. 11(b)는 경사 인발에 따른 앵커의 거동을 나타낸 그림으로, 경사 각도가 증가할수록 앵커의 이동량은 감소하고 회전량은 증가하는 결과가 나타났다. 그러나 경사각이 15°일 때 회전량은 약 2.4°, 경사각이 75°일 때는 약 6.2°로 나타나 재하 각도 대비 각각 약 16%, 약 8.3%에 그쳐, 경사 재하 시 앵커의 회전은 재하각도에 비해 작게 발생하는 것으로 보인다. 수평 재하 시 최대 저항력이 발휘된 조건 하에서의 거동과 비교해 보면, 경사 재하 시 각도가 증가함에 따라 앵커의 회전효과로 이동량이 감소하고 이동방향이 달라지면서 전면부 지반의 지지효과 또한 감소해 앵커의 저항력은 최대 수평 저항력에 미치지 못하는 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 3차원 범용 유한요소해석 프로그램 ABAQUS/Explicit을 이용하여 ALE 기법을 적용한 수치해석을 통해 모래지반에 매입된 석션 앵커(ESA)의 인발 거동 모사하고, 기존에 수행된 원심모형실험 결과와 한계평형이론을 통해 산정된 해석해의 결과를 비교 분석하였다. 이를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 수치해석 결과를 통해 도출된 인발작용점 위치별 수평 저항력은 기존 원심모형 및 해석해를 통해 도출된 결과와 매우 유사한 경향을 보였다. 최대 수평 저항력은 인발 작용점이 앵커의 중앙에서 나타났고, 원심모형 결과 및 해석해 결과와 비교해 각각 약 3%, 18% 과소평가되었다.
- (2) 연직 인발 저항력은 모든 인발 작용점에서 유사한 값이 도출되어 기존 결과와 차이를 보였다. 기존 원심모형 및 해석해를 통해 산정된 최대 연직 저항력은 인발작용점이 50% 위치에서 나타났으며, 이 때 수치해석에서는 연직저항력을 약 6.5% 과대평가하였다.
- (3) 최대인발저항력이 나타난 50%위치에서 경사 인발을 한 결과 기존 결과와 유사하게 재하 각도가 증가할수록 저항력은 감소하는 경향을 보였다. 수치해석결과와 해석해의 차이는 최소 3.5~24.3%, 원심모형 실험 결과와는 3.0~105.0%의 차이가 나타났다.

감사의 글

본 연구는 한국해양과학기술원(KIOST) 주요 사업 “천해용 해양도시 건설을 위한 계류앵커 기술개발(PE98942)”의 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

- Benson, D. J. (1989). “An efficient, accurate, simple ale method for non-linear finite-element program.” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 72, No. 3, pp. 305-350.
- Cho, I. H., Kwag, D. J., Bang, S. and Cho, Y. (2008). “Use of suction piles for temporary mooring of immersed tunnel element.” *Proceedings of 18th Int. Offshore and Polar Eng Conf & Exhibition*, International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE), Vancouver, Canada, pp. 665-669.
- Dassault Systèmes (2012). *ABAQUS, Version 6.12 Documentation*.
- Ghosh, S. and Kikuchi, N. (1991). “An Arbitrary Lagrangian-Eulerian finite element method for large deformation analysis of elastic-viscoplastic solids.” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 86, No. 2, pp. 127-188.
- Hu, Y. and Randolph, M. F. (1998). “A practical numerical approach for large deformation problems in soil.” *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 22, No. 5, pp. 327-350.
- Jones, K. D., Bang, S. and Cho, Y. (2007). “Pullout capacity of embedded suction anchors in sand.” *Ocean Engineering*, Vol. 34, No. 16, pp. 2107-2114.
- Kim, K. O., Kim, Y. S., Kim, T. H. and Ko, B. H. (2005a). “Centrifuge model test on the pullout capacity of embedded suction anchor with flanges in sand layer.” *Proceedings of Korean Society of Civil Engineers Conference*, Korean Society of Civil Engineers, KSCE, pp. 3427-3430 (in Korean).
- Kim, K. O., Kim, Y. S. and Ko, B. H. (2005b). “Centrifuge model tests on the pullout capacity of embedded suction anchor without flanges in sand layer.” *2005 Joint Conference of Geotechnical Engineering*, Korean Society of Civil Engineers, KSCE, Kyeonggi, Korea, pp. 517-520 (in Korean).
- Kim, S. M., Jung, Y. H. and Lee, J. (2013). “A numerical simulation of the installation of suction caissons via adaptive remeshing technique.” *KGS Spring National Conference 2013*, Korea Geotechnical Society (KGS), Gyeongbuk, Korea, pp. 1451-1460 (in Korean).
- Song, Z., Hu, Y. and Randolph, M. F. (2008). “Numerical simulation of vertical pullout of plate anchors in clay.” *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, ASCE, Vol. 136, No. 4, pp. 866-875.
- Van Leer, B. (1977). “Towards the ultimate conservative difference scheme. IV. A new approach to numerical convection.” *Journal of computational physics*, Vol. 23, No. 3, pp. 276-299.
- Wang, D. Hu, Y. and Randolph, M. F. (2010). “Three-dimensional large deformation finite-element analysis of plate anchors in uniform clay.” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 136, No. 2, pp. 355-365.
- Yu, L., Liu, J., Kong, X. J. and Hu, Y. (2009). “Three dimensional numerical analysis of the keying of vertically installed plate anchors in clay.” *Computers and Geotechnics*, Vol. 36, No. 4, pp. 558-567.