

해상풍력 석션파일의 수직도 제어에 대한 수치해석

Numerical Analysis on Tilting Control of Suction Pile for Offshore Wind Power

김 병 완¹⁾ · 김 유 석²⁾ · 진 병 무²⁾ · 배 경 태²⁾ · 윤 희 정[†]

Byeongwan Kim · Youseok Kim · Byeongmoo Jin · Kyung-tae Bae · Heejung Youn

Received: March 7th, 2016; Revised: March 9th, 2016; Accepted: August 3rd, 2016

ABSTRACT : Numerical analyses were carried out to simulate tilting control on the suction pile for offshore wind power embedded into cohesive soil and cohesionless soil using finite element software, ABAQUS. A 3-dimensional suction pile was modelled as a wished-in-place pile with 1° tilted from vertical line. The inner room of suction pile was divided into 3 separate rooms for tilting control, and point load was applied to the center of gravity of a separate room to restore the original position of the suction pile. From numerical analyses, required suction pressure was obtained for desired tilting degree, and the maximum/minimum principle stresses of concrete skirt and the Mises stresses of inner steel wall were collected at original position. It was found that the required suction pressure was about 410 kPa for cohesive soil, and about 1,800 kPa for cohesionless soil.; likewise, obtained stresses were greater for cohesionless soil than cohesive soil.

Keywords : Suction pile, Tilting control, Numerical analysis, ABAQUS

요 지 : 본 연구에서는 점성토와 사질토 지반에 관입된 해상풍력 석션파일의 수직도 제어를 모사하기 위해 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 석션파일은 연직방향으로부터 1° 기울어져 지반에 관입된 상태로 3차원으로 모델링 했다. 수직도 제어를 위해 석션파일 내부를 3개의 격실로 분리하고 그 중 한 격실의 상부슬래브 무게중심에 하중을 재하시켜 석션파일을 원위치 시키도록 모사했다. 수치해석 결과로부터 석션파일을 원위치 시키는데 필요한 소요 석션압을 경사도에 따라 구했으며, 원위치 시켰을 때 발생하는 석션파일 콘크리트 스킨트의 최대/최소 주응력과 강재 내부격벽의 Mises 응력을 검토했다. 경사진 석션파일을 원위치 시키기 위해 필요한 소요 석션압은 점성토에서 약 410kPa, 사질토에서 약 1,800kPa로 나타났으며, 석션파일 스킨트와 내부격벽에 발생하는 응력도 사질토에서 더 큰 것으로 나타났다.

주요어 : 석션파일, 수직도 제어, 수치해석, ABAQUS

1. 서 론

해상풍력 기초나 부유식 해상구조물에 대한 사회적인 기술수요 증가에 힘입어 석션파일에 대한 관심이 높아지고 있다. 최근 대수심에서 설치가 용이하고 빠르다는 장점에 해상풍력 기초의 대안 중 하나로 석션파일의 사용성에 대하여 연구 및 검토가 활발히 진행 중이다(Allersma et al., 1999; Kim & Jang, 2011; Lee et al., 2011). 석션파일은 설치의 용이성과 경제성 등 많은 장점을 가지고 있는 반면 단점도 존재한다. 대표적인 단점은 암반층과 같이 견고한 층의 관입이 불가능하다는 점과 석션파일 관입 시 지반의 불균질성이나 해상의 시공여건 등과 같은 불확실한 요소에 의해 파일이 기울어질 수 있다는 점이다. 정밀한 시공을 통해 석

션파일의 연직성을 확보했다 하더라도 연약한 지반과 견고한 지반이 혼재되어 있고, 혹은 암반층까지의 두께가 다를 수 있어 압밀 과정에서 부등침하에 의한 경사가 발생할 수 있다. 또한, 바람이나 파랑과 같은 반복적인 하중이 지속적으로 발생했을 때 설계수명 내에 경사가 발생할 수도 있다. Achmus et al.(2009)이나 Kim et al.(2015)은 반복하중의 영향을 받는 Monopile의 기울기를 반복하중의 크기나 반복횟수에 의해 연구해서 발표한 바 있다. 일반적으로 해상풍력 발전기 제작사가 제공하는 발전기의 허용 경사도는 연직방향으로부터 0.25°로 허용 경사도가 5°(DET NORSKE VERITAS, 2005)나 그 이상으로 설정되어 있는 해상 플랫폼의 석션기초에 비해 기준이 매우 엄격하다. 설계단계에서는 반복하중을 깊이 고려하지 않기 때문에 시공 중 그리고 시공 후의

1) Department of Civil Engineering, Hongik University

2) Daewoo Institute of Construction Technology, DAEWOO E&C

† Department of Civil Engineering, Hongik University (Corresponding Author : geotech@hongik.ac.kr)

석선파일의 수직도 제어는 매우 중요한 기술이다.

장기간 안전성 확보를 위해 석선파일의 수직도 제어에 대한 연구의 중요성에도 불구하고 수직도 제어에 관한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 일반적으로 Monopile 해상기초의 경우에는 기초부 시공 후 TP(Transition Piece)에서 그라우팅을 이용하여 경사를 제어할 수 있는 기술이 제안되어 있다. 석선파일의 수직도는 자중 관입 시 조정되어야 하는 것으로 알려져 있다(Tran et al., 2007; Dendani & Colliat, 2002). 그러나 석선파일 3개를 이용한 Tripod 기초형식을 이용하면 자중 관입은 물론 석선압 관입 시에도 수직도를 조절할 수 있으며, 모형실험을 통해 연약 점토에 관입하는 기초를 석선압 조절을 통해 약 0.5°까지 견고한 점토에서도 6.6°에서 1.29°까지 조정이 가능한 것으로 나타났다(Zhang et al., 2013).

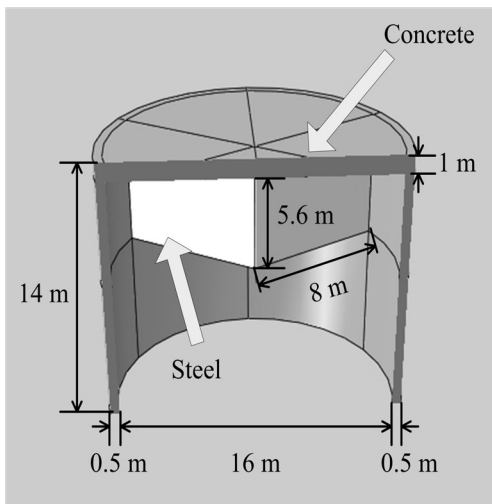


Fig. 1. Schematic view of suction pile with dimensions and materials (concrete skirt and steel inner wall)

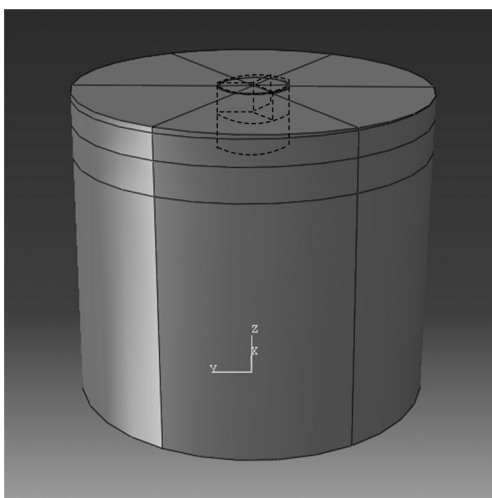
본 연구에서는 Monopod 타입 석선파일의 수직도 제어에 대해 수치해석을 통해 알아보았다. 석선파일의 내부를 3개의 격실로 분리한 후 특정한 격실에 석선압을 가함으로써 수직도를 조절하고자 했다. 수치해석을 위해 ABAQUS/Standard (Simulia DS, 2012)를 활용하였으며, 석선 내부에 설치된 격벽의 길이와 두께, 그리고 지반의 종류를 달리하여 변수연구를 수행하였다. 수치해석 결과로부터 석선파일의 외부 스커트와 내부격벽에 발생하는 응력을 검토하고, 석선파일의 수직도를 제어하는 데 필요한 석선압을 산정하여 제시하였다.

2. 수치해석 모델

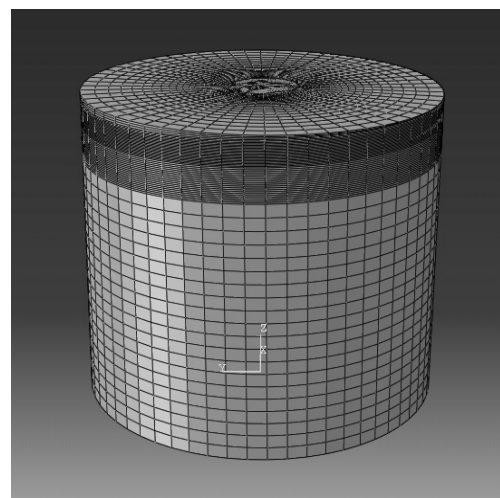
2.1 모델 제원

Fig. 1은 수치해석에 사용된 석선파일의 재료와 제원을 보여주고 있다. 수치해석에 사용된 석선파일은 콘크리트 상부스커트와 스커트로 이루어져 있으며 길이는 14m, 외경은 17m, 내경은 16m이다. 석선파일의 상부스커트와 스커트 두께는 각각 1.0m, 0.5m이며, 내부에는 3개의 격실을 만들기 위해 강제격벽이 3개 설치되어 있다. 내부격벽의 길이와 두께는 변수연구에서 사용되는 값으로 각각 2.8~8.4m, 그리고 20~60mm 사이의 값을 갖는다.

콘크리트 석선파일은 Fig. 1에서와같이 강제격벽과 결합되어 거동하게 되며 두 구조물은 ABAQUS/CAE의 Assembly 모듈에서 Merge 기능을 이용하여 결합시켰다. 다양한 변수의 길이와 두께의 격벽으로 이루어진 석선파일을 1° 회전시킨 후 지반에 관입한 상태로 모사하였다(Fig. 2). 경계면 조건은 석선파일의 크기에 따라 크기를 결정해야 하며, 본 연구에서는 수평 방향으로 말뚝직경 17m의 5배인 85m, 중력



(a)



(b)

Fig. 2. Bird view of (a) numerical model of suction pile and (b) mesh

방향으로 석선파일의 길이 14m의 5배인 70m 크기의 지반 모델을 생성하여 경계면을 설정하였다. 수치해석 결과로부터 사용된 변위와 하중 안에서는 경계면까지 아무런 영향이 미치지 않는 것으로 나타났다.

2.2 지반구성모델

ABAQUS는 요소 종류를 다양하게 설정할 수 있다. 본 연구에서는 콘크리트 석선파일과 강재 내부격벽을 보다 효과적으로 해석하기 위해 석선파일의 경우 solid element인 20절점 6면체 요소(C3D20R)를 사용했으며, 내부격벽에는 shell element인 8절점 요소(S8R)를 사용했다. 석선파일과 내부격벽의 응력 및 변형을 계산은 저감적분법을 채택하였다. 지반요소는 8절점 6면체 요소(C3D8R)를 사용하였다.

점성토지반 및 사질토 지반을 모사하기 위하여 ABAQUS에서 제공하고 있는 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였다. Mohr-Coulomb 모델은 반복하중이 아닌 단방향 하중이 재하 되는 지반에 적합한 모델로 하중재하 속도에 대한 영향을 고려하지 못하는 특성이 있다. ABAQUS에서 제공하는 Mohr-Coulomb 모델은 선형 탄성거동을 보이는 탄성영역과 그 밖의 소성영역으로 나뉜다. Mohr-Coulomb 모델로 만들어진 지반은 초기에 등방성(isotropic)이며 모델에 구속압을 증가시키면 전단강도가 증가하는 성질을 가지고 있다. Fig. 3은 meridional

plane과 deviatoric plane에서의 항복면을 보여주고 있다. Mohr-Coulomb의 경우 육각형의 형태로 평균 구속압이 증가하면서 항복면이 증가하게 된다. 내부마찰각이 0°가 되면 Tresca 모델과 동일한 항복면으로 수렴하게 된다.

석선파일과 지반 사이에 접촉거동은 석선파일과 지반 사이에 접촉면을 생성하고, 접촉면의 거동을 contact pair나 tie를 이용하여 정의할 수 있다. Contact pair를 사용하면 마찰거동이나 분리거동을 실제적으로 표현할 수 있는 반면 ABAQUS/Standard에서 수치해석이 수렴하지 못하는 문제점이 있다. 본 연구에서는 강재격벽 등 많은 접촉거동이 존재하기 때문에 contact pair를 사용하는 경우 수렴을 하지 못하는 문제가 발생하였으며, 따라서 접촉거동은 tie로 정의하였다. 일반적으로 말뚝의 거동을 분석할 때 말뚝의 주면마찰력이 지지력에 큰 영향을 미치기 때문에 접촉면 거동을 모사하는 것이 매우 중요하다. 반면 본 연구에서는 석선파일의 상부 슬래브를 3등분 한 후 한쪽 면의 무게중심에 0.3~0.4m 변위를 가하여 석선파일을 회전시키는 것을 목적으로 하고 있다(2.4절 참조). 따라서 접촉면의 거동보다는 석선파일 하부 전면에 존재하는 지반의 압축거동에 의해 영향을 많이 받게 되고 두 접촉면 정의에 의한 수치해석 결과 차이는 크지 않을 것으로 예상된다.

2.3 입력 물성값

Table 1은 수치해석에 사용된 콘크리트 석선파일, 강재 격벽 및 지반의 입력 물성값을 보여주고 있다. 콘크리트의 수중 단위중량은 14kN/m³, 탄성계수는 32,208MPa, 포아송비는 0.2이며, 강재의 수중 단위중량은 68.5kN/m³이고 탄성계수는 200GPa, 포아송비는 0.3이다. 점성토의 수중 단위중량은 8.36kN/m³, 탄성계수는 10MPa, 포아송비는 0.49, 비배수전단강도는 17kPa, 내부마찰각과 팽창각(dilation angle)은 0°로 사용하였다. 사질토의 수중 단위중량은 9.0kN/m³, 포아송비는 0.3, 내부마찰각은 36°, 팽창각은 6°로 사용했으며, 점착력은 수치해석 시 수렴을 위해 작은 값인 0.1kPa를 적용하였다. 토압계수인 K₀은 포아송비를 이용하여 geostatic 단계에서 자동 산정되는데 그 값은 모래지반에서 0.429, 점

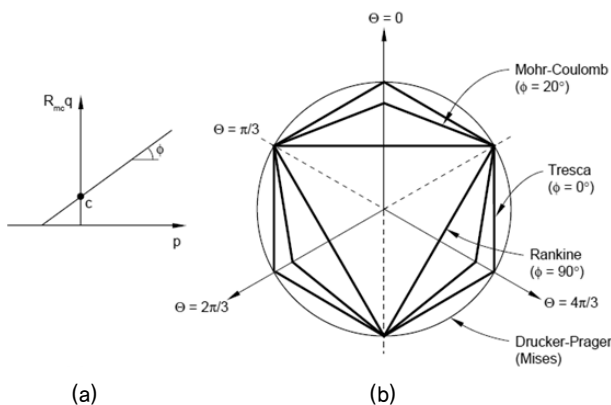


Fig. 3. Yield surface in (a) the Meridional plane and (b) the deviatoric plane (Simulia DS, 2012)

Table 1. Input material parameters

	Model	Submerged unit weight (kN/m ³)	Elastic modulus (MPa)	Friction angle (°)	Dilation angle (°)	Cohesion/Undrained shear strength (kPa)	Poisson's ratio
Clay (Undrained condition)	Mohr-Coulomb	8.36	10.0	0	0	17	0.49
Sand (Drained condition)	Mohr-Coulomb	9.00	Variable	36	6	0.1	0.3
Concrete slab and skirt	Elastic	14.00	32,208	N/A	N/A	N/A	0.2
Inner steel wall	Elastic	68.50	200,000	N/A	N/A	N/A	0.3

토지반에서 0.961이다. 점성토와 사질토 지반의 탄성계수 중 가장 큰 차이는 점성토에서는 동일한 탄성계수를 사용한 반면, 사질토에서는 깊이에 따라 탄성계수가 증가하는 것을 모사하였다는 것이다. 사질토의 탄성계수는 101.3kPa 구속 압에서 30MPa로 가정하였으며, Eq. (1)을 이용하여 깊이에 따라 증가하는 것을 모사할 수 있었다.

$$E = E_{ref} \left(\frac{p}{p_a} \right)^m \quad (1)$$

여기서, E_{ref} 는 대기압에서의 탄성계수, p 는 깊이 별 유효 응력, p_a 는 대기압의 응력이며 101.3kPa로 설정하였고, 계수 m 은 0.5로 설정하였다. 지표면에서의 탄성계수는 약 4.1 MPa이며, 70m 깊이에서의 탄성계수는 약 50MPa로 비선형으로 증가하도록 설정하였다.

2.4 하중조건

지반의 초기응력상태는 initial conditions를 사용하여 정의했으며, 모델의 상부 응력은 0kPa, 점성토와 사질토 조건에서 하부는 지반의 단위중량을 이용하여 계산된 값인 585.2kPa, 630.0kPa로 각각 정의해 주었다. 전 단계로부터 지중응력상태가 만들어지면 1° 기울어진 석션파일의 수직도 제어를 모사하게 된다. Fig. 4는 1° 기울어진 석션파일의 하중 재하 지점을 보여주고 있다. 하얀색 테두리로 나타내는 부분은 격벽이 위치한 것을 의미하며, 하중재하 지점은 우측 격벽 한쌍으로 이루어진 부채꼴의 무게중심을 나타낸다. 연직방향 하중은 부채꼴의 무게중심에 재하 되었으며, 상부슬래브가 평행할 때까지 강제변위를 시킴으로써 모사하였다. 예비 수치 해석을 통해 점성토에서는 0.3m의 변위 이내에서, 사질토에서는 0.4m의 변위 이내에서 상부슬래브의 수평이 달성되

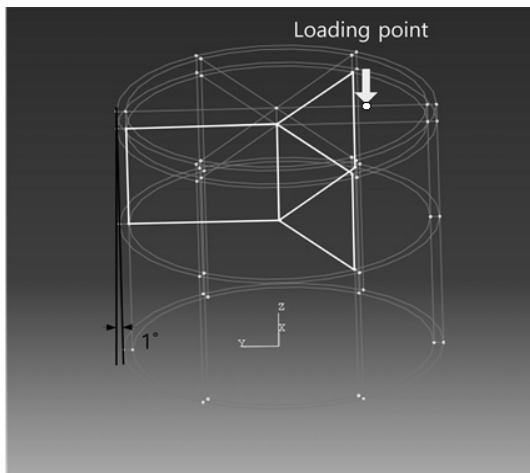
는 것을 알 수 있었으며, 그에 따라 강제변위를 결정하였다. 강제변위에 의해 석션파일이 회전하여 연직방향으로 원위치 시키기 위해 발생한 하중지점에서의 반발력(reaction force)과 변위(displacement)를 이용하여 석션압과 경사도(tilting angle)를 계산하였다. 석션압은 하중점(Fig. 4 참조)에서 발생하는 반발력을 해당 면적으로 나누어 계산되었으며 그 결과는 3장에서 제시하였다.

2.5 변수연구

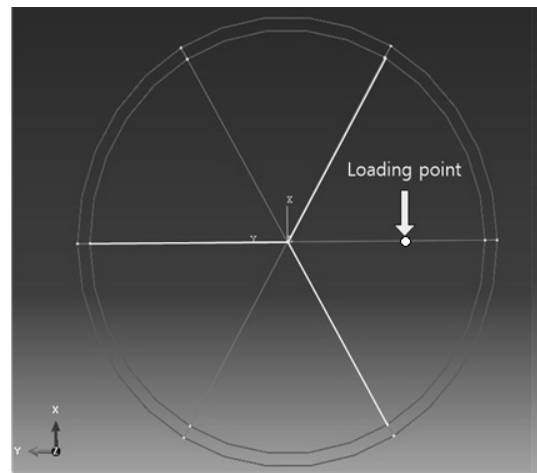
격벽의 두께와 길이를 변수로 설정하여 총 10가지 경우의 수치해석을 수행하였다. 석션파일 내부에 있는 격벽은 총 3개로 이루어져 있으며, 길이는 2.8, 5.6, 8.4m로 총 3개에 대해서, 그리고 두께는 20, 40, 60mm로 총 3개에 대해서 수치해석을 수행하였다. 지반은 점성토와 사질토에 대해서 검토를 하였기 때문에 총 10가지 경우에 대해서 수치해석을 수행하였다. Table 2는 조건에 따른 격벽의 길이와 두께를 표시한 표이다. 각 해석의 첫 알파벳은 지반의 종류, 두

Table 2. Parameters used in the numerical simulation

Case	Soil type	Inner wall length (m)	Inner wall thickness (mm)
C-L2.8-T40	Clay	2.8	40
C-L5.6-T20			20
C-L5.6-T40		5.6	40
C-L5.6-T60			60
C-L8.4-T40			8.4
S-L2.8-T40	Sand	2.8	40
S-L5.6-T20			20
S-L5.6-T40		5.6	40
S-L5.6-T60			60
S-L8.4-T40			8.4



(a)



(b)

Fig. 4. Loading point of tilted suction pile to restore its position used in the numerical simulation: (a) bird view, and (b) plan view

번째는 격벽의 길이, 세 번째는 격벽의 두께를 나타내서 표시하였다.

3. 수치해석 결과

본 절에서는 각각 점성토와 사질토 지반에서 석션파일을 콘크리트 스킵트 부분과 강제 내부격벽 부분으로 구분하여 최대 응력 값을 도출하였다. 또한, 수직도 제어를 위해 필요한 소요 석션압을 석션파일 경사도에 따라 제시하였다.

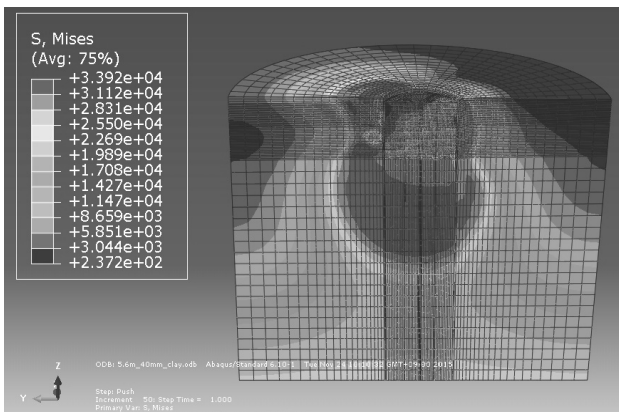
Fig. 5는 Table 2의 C-L5.6-T40과 S-L5.6-T40에 해당하는 석션파일의 1° 경사를 원위치시켰을 때 지반에 발생하는 응력을 Mises 응력의 contour를 보여주고 있다. 동일한 수직도 제어에 대해 사질토의 최대 Mises 응력 값은 점성토의 값에 비해 약 20배 이상 큰 것으로 나타났다. 또한, 점성토의 경우 석션파일이 위치한 지반 주변에 큰 Mises 응력이 발생하였고, 그 영향 범위는 석션파일 하부와 오른쪽까지 영향을 미친 것을 확인할 수 있었다. 반면에 사질토의 경우

에는 석션파일의 선단 부분에서만 큰 Mises 응력이 발생하였다.

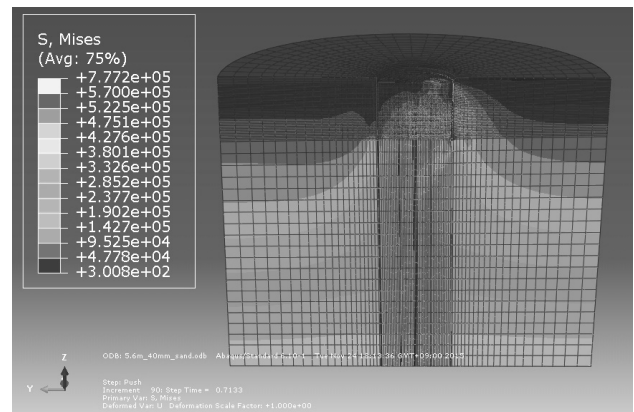
3.1 점성토 지반

Fig. 6은 Table 2의 C-L5.6-T40에 대한 석션파일의 콘크리트 스킵트와 강제 내부격벽에서 발생하는 최대/최소 주응력, 그리고 Mises 응력 contour를 보여주고 있다. 석션파일의 최대 주응력은 지반과 접하는 스킵트 외부에서 발생하였고 최소 주응력은 그와 반대로 지반과 인접하는 스킵트 내부에서 발생하였다. 이는 경사진 석션파일이 수평으로 되면서 스킵트 내부에서는 압축 응력이 발생되고, 외부에서는 인장응력이 발생하는 것으로 판단된다.

내부격벽의 최대 Mises 응력은 좌측 하단에서 발생하는 것으로 나타났다. 최소 Mises 응력은 중앙 지점에서 약간 좌측으로 치진 가장 아래에서 발생하였다. 스킵트는 하중재하지점인 우측에서 최대/최소 주응력이 발생하는 반면 내부격벽은 하중재하의 반대쪽에서 발생하는 것을 알 수 있다.

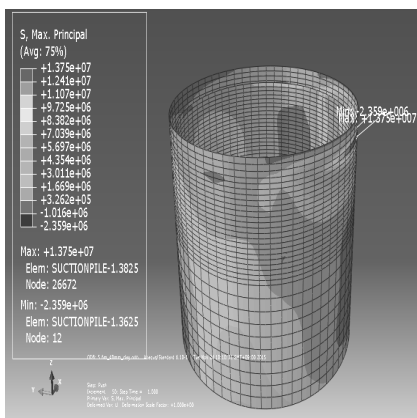


(a)

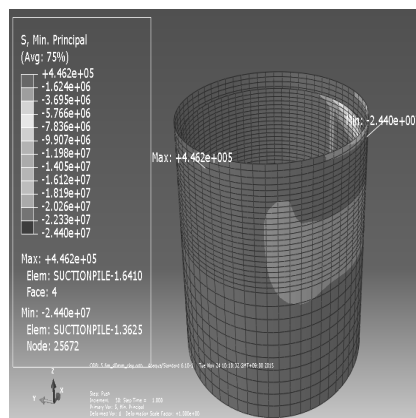


(b)

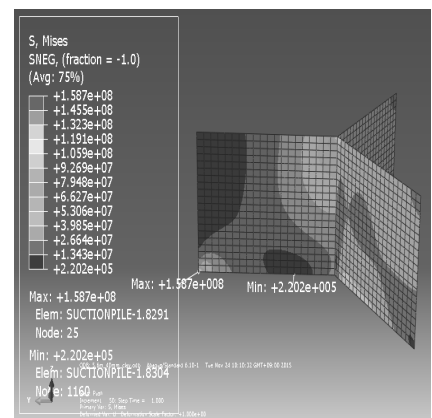
Fig. 5. Mises stress contour for (a) cohesive soil (C-L5.6-T40), (b) cohesionless soil (S-L5.6-T40)



(a)



(b)



(c)

Fig. 6. Contour of (a) major principle stress of concrete skirt, (b) minor principle stress of concrete skirt, and (c) mises stress of inner steel wall for C-L5.6-T40

Table 3은 C-L2.8-T40, C-L5.6-T20, C-L5.6-T40, C-L5.6-T60, C-L8.4-T40 총 5가지 경우의 콘크리트 스커트의 최대/최소 주응력 값과 강재 내부격벽의 최대/최소 Mises 응력 값을 정리하였다. 동일한 내부격벽 두께에 대해 격벽 길이에 따라 발생하는 응력이 변하는 것으로 나타났는데, 격벽 길이가 2.8m에서 8.4m로 증가함에 따라 최대 주응력의 크기는 16.1MPa에서 12.8MPa로 감소하였다. 유사하게 최소 주응력의 크기는 -27.6MPa에서 -23.2MPa로 감소하였다. ABAQUS에서는 (+)값이 인장이고 (-)값이 압축 값을 의미하며, 본 논문에서는 (-)값의 크기를 비교하여 크기가 감소했다고 표현하였다. 내부격벽의 경우 격벽 길이가 증가에 따라 최대 Mises 응력은 증가하였으며 최소 응력은 감소하였다. Mises 응력은 146.4MPa에서 163.1MPa로 약 16.7MPa이 증가하였다. 따라서 격벽의 길이가 증가함에 따라 스커트의 응력은 감소하며 내부격벽의 응력은 증가하는 거동을 예측할 수 있었다. 석션파일의 콘크리트 일축압축강도는 35~45MPa이며, 내부 격벽 강재의 항복강도는 두께에 따라 다른데 SS400을 기준으로 두께 16mm 이하에서는 250MPa, 16~40mm에서는 240MPa, 40mm 이상에서는 220MPa 이상의 강도가 요구된다.

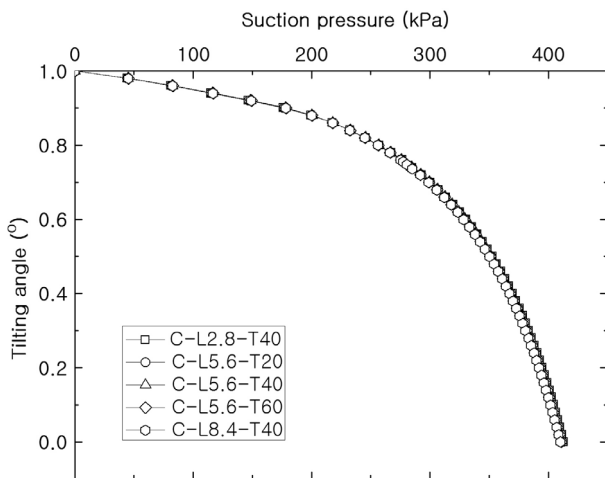


Fig. 7. Required suction pressure to restore tilted suction pile in cohesive soil

Table 3. Stress developed in the concrete skirt and inner steel wall in cohesive soil

Case	Concrete skirt		Inner steel wall	
	Maximum principle stress (MPa)	Minimum principle stress (MPa)	Maximum Mises stress (MPa)	Minimum Mises stress (MPa)
C-L2.8-T40	16.1	-27.6	146.4	0.42
C-L5.6-T20	15.1	-26.2	220.1	1.17
C-L5.6-T40	13.8	-24.4	158.7	0.22
C-L5.6-T60	13.1	-23.4	125.0	0.11
C-L8.4-T40	12.8	-23.2	163.1	0.44

※ (-) is in compression, (+) is in tension

동일한 격벽 길이(5.6m)에 대해 격벽 두께를 20, 40, 60mm로 증가할 때 발생하는 응력도 변한다. 격벽의 두께가 증가함에 따라 최대 주응력의 크기는 15.1MPa에서 13.1MPa로 감소하고, 최소 주응력의 크기는 -26.2MPa에서 -23.4MPa로 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한, 내부격벽에서는 220MPa에서 125MPa로 Mises 응력이 절반 정도 감소하는 것으로 나타났다. 격벽의 두께는 스커트의 응력보다는 내부격벽의 응력에 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 점성토 지반 조건에서 소요 석션압을 격벽의 제원에 따른 수치해석별로 보여주고 있다. 1° 기울어진 석션 파일이 원위치로 돌아가기 위해 필요한 소요 석션압은 격벽의 제원에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났으며, 완전한 수평 상태로 만드는 데 필요한 석션압은 약 410kPa로 예측되었다. 석션파일을 관입하기 위해 필요한 석션압은 지반조건에 의해 결정되나 가용한 석션압은 석션 펌프의 성능에 따라 결정이 된다. 일반적인 펌프의 흡입압은 최대 100kPa 내외로 알려져 있으며, 본 수치해석 결과를 바탕으로 판단하였을 때 석션파일 관입 후 교란된 주변 지반이 재압밀되고 간극수압이 평형을 이룬 경우에는 석션압에 의한 수직도 제어는 실용적이지 않을 수 있는 것으로 판단된다.

3.2 사질토 지반

Fig. 8은 Table 2의 S-L5.6-T40에 대해 석션파일 콘크리트 스커트와 강재 내부격벽에서 발생하는 응력을 비교하였다. 점성토 지반 조건과 마찬가지로 석션파일의 최대 주응력은 지반과 접하는 스커트 외부에서 발생하였고, 최소 주응력은 지반과 인접하는 스커트 내부에서 발생하였다.

내부격벽의 최대 응력의 위치는 점성토 지반 조건과는 다르게 일정한 위치에서 발생하지 않았다. 그러나 Fig. 8의 내부격벽의 최대 응력 contour에서 보이듯이 최소 Mises 응력은 파란색으로 표시되며 좌측 격벽의 중앙 하단부나 우측격벽의 중앙 하단부에 발생하게 되는데, 그 크기는 유사한 것으로 나타났다.

Table 4는 이번 절에서 해석한 사질토 지반의 5가지 경우

Table 4. Stress developed in the skirt and inner steel wall in cohesionless soil

Case	Concrete skirt		Inner steel wall	
	Maximum principle stress (MPa)	Minimum principle stress (MPa)	Maximum Mises stress (MPa)	Minimum Mises stress (MPa)
S-L2.8-T40	70.7	-124.1	778.6	4.05
S-L5.6-T20	69.3	-122.6	832.8	2.99
S-L5.6-T40	61.9	-112.4	447.4	2.75
S-L5.6-T60	58.3	-107.1	355.6	1.37
S-L8.4-T40	58.3	-107.6	426.3	3.30

※ (-) is in compression, (+) is in tension

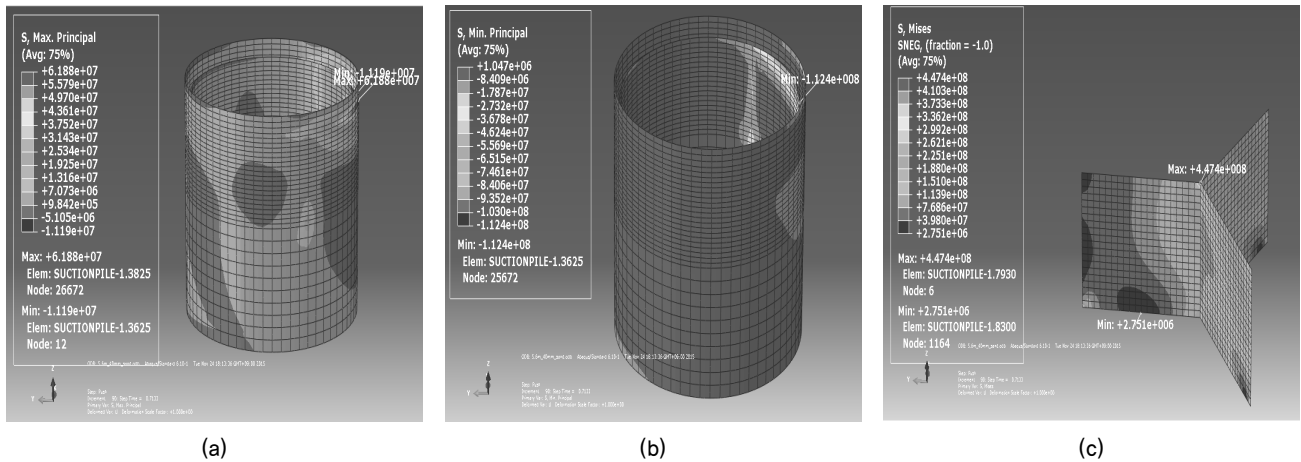


Fig. 8. Contour of (a) major principle stress of concrete skirt, (b) minor principle stress of concrete skirt, and (c) Mises stress of inner steel wall for S-L5.6-T40

에 대해 석션파일 응력 값을 정리한 것이다. 점성토 지반에서의 결과값과 비교했을 때 사질토 지반 조건에서의 응력이 더 크게 측정되었다. 동일한 격벽 두께에 대해 격벽 길이에 따라 응력은 달라지는데, 격벽 길이가 증가할수록 콘크리트 스킨트의 최대 주응력은 감소하였고, 감소 값은 약 12MPa 정도였다. 또한, 최소 주응력의 크기는 -124.1MPa에서 -107.6MPa로 약 17MPa 감소하는 것으로 나타났다. 동일한 격벽 길이에 대해 격벽 두께가 증가함에 따라 스킨트의 최대 주응력은 69.3MPa에서 58.3MPa로 감소하였으며, 최소 주응력의 크기는 -122.6MPa에서 -107.1MPa로 감소하였다. 콘크리트의 일축압축강도가 35~45MPa임을 고려할 때 압축 응력과 인장 응력 모두 강도를 초과하는 것으로 판단된다.

강재 내부격벽 또한 격벽 두께, 격벽 길이에 의해 Mises 응력이 변했다. 격벽 길이가 2.8m일 때 발생한 778.6MPa는 8.4m일 때 426.3MPa로 약 352.3MPa 정도 크게 감소하였다. 격벽의 두께는 20mm에서 60mm로 증가할 때 최대 응력 값이 832.8MPa에서 355.6MPa로 감소하는 것으로 나타났다. 수치해석을 통해 도출된 값을 고려할 때 강재의 항복강도를 검토할 필요가 있는 것으로 판단된다.

Fig. 9는 석션파일 수직도 제어를 위해 사질토 지반에서

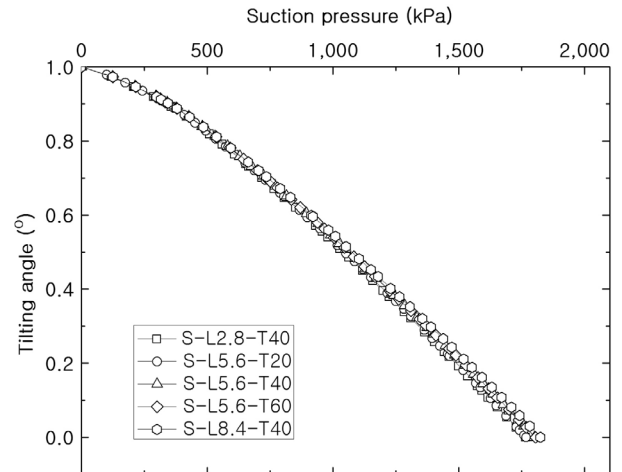


Fig. 9. Required suction pressure to restore tilted suction pile in cohesionless soil

필요한 소요 석션압을 경사각에 따라 보여주고 있다. 총 5가지 경우를 보여주고 있으나 각 사례별 큰 차이는 없는 것으로 나타났으며, 소요 석션압은 약 1,800kPa로 점성토 지반에서보다 4배 이상 필요한 것으로 예측되었다. 또한, 점성토에서의 석션압은 일정한 경사를 지남에 따라 소성을 나타낸 반면, 사질토에서는 소요 석션압이 선형으로 증가하는

것을 확인할 수 있었다. 모든 깊이에서 동일한 비배수전단 강도와 탄성계수를 갖는 점성토 지반과 달리, 깊이에 따라 탄성계수와 전단강도가 증가하였기 때문에 경사진 석션파일의 수평 위치가 되기 위해서는 더 큰 석션압이 요구되는 것으로 판단된다. 사질토 지반에서의 석션파일의 수직도 제어 시 점성토 지반 보다 상대적으로 큰 석션압이 요구되는 것으로 나타났으며, 관입 시 교란된 지반이 안정화 된 이후에는 석션압을 이용한 수직도 제어를 위해서는 이를 제어하기 위한 특수한 펌프가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

유한요소 프로그램인 ABAQUS/Standard를 이용하여 점성토와 사질토 지반에서의 석션파일 수직도 제어를 해석하였다. 석션파일은 지반에 관입되어 1° 기울어진 상태로 모델링 하였으며, 석션파일의 3개의 격실 중 한 곳에 석션압을 가해서 기울기를 조절하는 것을 모사하기 위해 격실 무게중심 지점에 연직방향으로 변위를 제어하였다. 석션파일을 원위치 시키기 위해 필요한 소요 석션압을 산정하였으며, 원위치 시 석션파일에 발생한 응력을 구하였다. 석션파일에 발생한 응력은 콘크리트 스킨에서 최대/최소 주응력과 강재 내부격벽에서의 Mises 응력으로 표시하였다. 또한, 석션파일에 발생한 변형률을 구하였다. 수치해석 결과를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 석션파일의 콘크리트 스킨에 발생하는 최대/최소 주응력은 스킨 외부와 내부에서 각각 발생하였으며, 강재 내부격벽의 길이와 두께가 증가함에 따라 주응력의 크기가 감소하는 것으로 나타났다. 점성토에 관입된 콘크리트의 최소 주응력은 -27.6MPa와 -23.3MPa 사이로 발생하였으나, 사질토에서는 -124.1MPa에서 -107.1MPa 사이의 값으로 발생하여 사질토에서의 응력이 훨씬 큰 것으로 나타났다.
- (2) 석션파일의 강재 내부격벽에 발생하는 최대 Mises 응력은 격벽의 길이와 두께가 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 최대 Mises 응력은 두께가 20mm이고 길이가 5.6m인 격벽에 대해서 나타났으며, 그 값은 점성토에서는 220.1MPa, 사질토에서는 832.8MPa로 나타났다.
- (3) 연직방향으로부터 1° 기울어진 석션파일을 수직도 제어하는데 필요한 소요 석션압은 점성토에서 약 410kPa, 사질토에서 약 1,800kPa로 도출되었다. 석션파일이 관입되면서 교란된 지반이 재압밀되어 평형상태로 복귀하고, 원지반의 물성값을 갖게 되면 수직도 제어를 위

해 큰 석션압이 소요될 것으로 예상되며, 현실적으로 석션파일을 관입하는데 약 100kPa의 석션압이 필요한 것을 고려했을 때 특별한 자세제어 기술이 필요할 것으로 판단된다. 강재 내부격벽의 길이와 두께에 따른 소요 석션압의 크기는 차이가 없었으며, 이는 수직도 제어에 대한 대부분의 저항이 콘크리트 스킨에 의해 발생하기 때문으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부 산하 해양과학기술진흥원의 첨단항만건설 기술개발사업의 연구비 지원(과제명 : 해상풍력 지지구조 설계기준 및 콘크리트 지지구조물 기술개발/20120093)을 받아 수행되었습니다.

References

1. Achmus, M., Kuo, Y. S. and Abdel-Rahman, K. (2009), Behavior of monopile foundations under cyclic lateral load, *Computers and Geotechnics*, Vol. 36, No. 5, pp. 725~735.
2. Allersma, H. G. B., Kirstein, A. A., Brinkgreve, R. B. J. and Simon, T. (1999), Centrifuge and numerical modelling of horizontally loaded suction piles, *International Offshore and Polar Engineering Conference*, Brest, France, Vol. 1, pp. 711~717.
3. Dendani, H. and Colliat, J. L. (2002), Girassol: Design analysis and installation of the suction anchors, *Offshore Technology Conference*, OTC 14209, Houston, Texas, USA.
4. DET NORSKE VERITAS (2005), Geotechnical design and installation of suction anchors in clay. Recommended Practice (DNV-RP-E303).
5. Kim, K., Nam, B. H. and Youn, H. (2015), Effect of cyclic loading on the lateral behavior of offshore monopiles using the Strain Wedge Model, *Mathematical Problem in Engineering*, ID 485319.
6. Kim, Y. S. and Jang, Y. S. (2011), Analysis of load capacity and deformation behavior of suction pile installed in sand, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 27, No. 11, pp. 27~37 (in Korean).
7. Lee, J. H., Kim, D. W., Chung, M. K., Kwak, K. S. and Jung, Y. H. (2011), Numerical analysis of the suction pile behavior with different lateral loading locations, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 27, No. 4, pp. 67~76 (in Korean).
8. Simulia DS (2012), ABAQUS 6.12 Documentation, Providence, Rhode Island, USA.
9. Tran, M., Randolph, M. F. and Airey, D.W. (2007), Installation of bucket foundations in sand with silt layers, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* Vol. 133, No. 10, pp. 1183~1191.
10. Zhang, P., Ding, H. and Le, C. (2013), Model tests on tilt adjustment techniques for a mooring dolphin platform with three suction caisson foundations in clay, *Ocean Engineering*, Vol. 73, No. 15, pp. 96~105.