

헬릭스 개수 및 직경에 따른 헬리컬 파일 거동의 수치해석적 분석

박종호* · 이기철** · 최병현*** · 김동욱****

Bak, Jongho* · Lee, Kicheol** · Choi, Byeong-Hyun*** · Kim, Dongwook****

Numerical Analysis of Helical Pile Behavior Varying Number and Diameter of Helices

ABSTRACT

Oil extraction from oil sands, a non-traditional crude oil resource, is attracting attention as the oil price fluctuates due to recent economical and political issues. Many oil sands sites are mainly located in the polar regions. For plant construction to extract crude oil from oil sands in harsh environment of the polar regions, fast and simple installation of plant foundation is necessary. However, typically-used conventional foundations such as drilled shafts and driven piles are not suitable to construct under cold temperature and organic surface layers. In this study, helical piles enabling rapid and simple constructions using small rotary equipment without driving or excavation was considered. The helical pile consists of steel shaft and several helices attached to the steel shaft; therefore, the behavior of the helical pile depends on the number and shape of the helices. The effect of the helices' configuration (number and diameter of helices) on helical pile behavior was analyzed based on the numerical analysis results.

Key words : Oil sand, Helical pile, Helix, Numerical analysis

초 록

전 세계적인 경제 및 정치 이슈로 인한 원유가격의 급변으로 비전통 원유자원인 오일샌드에 대한 관심이 증가하고 있다. 주로 오일샌드 현장은 극한지에 위치하고 있다. 혹독한 환경인 극한지의 오일샌드 현장에서 원유를 생산하기 위해서는 빠르고 간단한 절차의 기초 설치가 필요하다. 하지만 플랜트 기초로 주로 사용되는 현장타설 및 항타말뚝은 저온 및 유기토 표층이 있는 극한지 환경에 설치하기가 적합하지 않다. 따라서 본 연구에서는 항타나 굴착없이 소형 회전관입 장비로 간편한 급속시공이 가능한 헬리컬 파일의 거동을 분석하고자 한다. 헬리컬 파일은 강관축에 헬릭스가 부착된 형태로 헬릭스의 개수 및 형상별 지지거동의 차이가 발생되므로, 헬릭스의 조합(개수, 직경)에 따라 지지력 거동의 차이를 수치 해석적으로 분석하였다.

검색어 : 오일샌드, 헬리컬 파일, 헬릭스, 수치해석

1. 서론

최근 주요 산유국들의 원유생산량 감소 및 중동지역의 정치적 불안 등으로 인하여 유가의 변동성이 크게 증가하면서, 전 세계적으로 유가의 불안정이 지속되고 있다. 이에 따라 원유의 안정적인 공급을 위해 전통적 시추방식에 의한 원유자원의 대체재로, 비전통적 원유자원들이 각광 받고 있다(Lee et al., 2010). 그 중에서도 특히 채굴 장비 및 기술의 발전으로 경제성이 크게 높아진 오일샌드가

* 인천대학교 건설환경공학과 대학원생 (Incheon National University · rdvagabond@gmail.com)

** 정희원 · 인천대학교 건설환경공학과 대학원생 (Incheon National University · wlq4619@inu.ac.kr)

*** 인천대학교 건설환경공학과 대학원생 (Incheon National University · qudus555@naver.com)

**** 종신회원 · 교신저자 · 인천대학교 건설환경공학과 부교수 (Corresponding Author · Incheon National University · dwkim@inu.ac.kr)

Received November 22, 2018/ revised January 7, 2019/ accepted January 9, 2019

주목받고 있다(Lee and Ko, 2007). 오일샌드는 모래, 물 등과 원유인 비투멘(bitumen)의 혼합물로 캐나다 알버타주 북부에만 전 세계 원유의 약 14%에 해당되는 오일샌드가 매장되어 있을 것으로 예측된다(Charpentier, 2009). 하지만 오일샌드의 원유에 해당하는 비투멘은 높은 점도로 모래에 붙어있어, 원유 추출공정을 위한 플랜트의 설치가 불가피한 실정이다(Park et al., 2009).

현재 오일샌드 플랜트의 기초는 주로 현장타설 말뚝과 항타말뚝이 사용되지만 캐나다 알버타주와 같은 극지에 주로 위치한 오일샌드 현장은 기온 및 접근성이 낮다. 따라서, 큰 말뚝과 장비를 사용하는 현장타설말뚝과 항타말뚝을 오일샌드 플랜트의 기초로 사용하는 것은 어려움이 있다. 또한 오일샌드 현장의 표토는 두꺼운 유기토가 존재하여 중장비의 이동이 어렵다. 특히 환경에 대한 관심이 증가되면서 플랜트의 철거 시, 환경 복구를 위한 기초의 완전한 제거가 요구되고 있으나 단단하고 깊은 곳에 위치한 현장타설 및 항타말뚝은 완전한 인발이 불가능한 실정이다.

본 연구에서 사용한 헬리컬 파일은 강관 축에 여러 개의 헬릭스가 부착된 형상으로, 일정한 연직력과 회전력을 가함으로써 지반 내로 회전 관입된다(Kurian and Shah, 2009). 헬리컬 파일은 굴착과 항타 없이 회전관입만으로 급속시공이 가능하고, 시공 장비가 소형이기 때문에 접근성이 떨어지는 극지에서도 용이하다. 또한 헬리컬 파일의 두부에 역회전을 가하면 완전한 인발 제거가 가능해 재활용이 용이하며, 높은 압축 및 인장력 보유, 제한된 부지에서의 손쉬운 적용 등의 이점들을 가지고 있어 주거용 및 상업용 건물, 교량, 태양광 발전기 등에 많이 적용되고 있다(Elsherbiny, 2013).

헬리컬 파일은 설치 및 지지력 확보 관점에서 여러 장점이 있어 과거에도 다양한 연구가 수행되었다. Prasad and Rao(1996)는 모형실험을 통해 점토에서의 헬리컬 파일과 강관 말뚝의 수평저항력을 비교 분석하였고, Sakr(2010)는 헬리컬 파일의 현장재하시험을 통해 헬릭스 직경 및 지반 종류에 따른 헬리컬 파일의 거동 및 수평 저항력을 분석하였다. Elkasabgy and Naggar(2014)는 현장재하시험을 통해 대구경 헬리컬 파일의 헬릭스 직경 및 개수를 변화시켜 압축력을 분석하였으며, Lee et al.(2014)은 헬리컬 파일의 중심축 직경과 헬릭스 직경을 변화시켜 정재하시험 및 양방향 재하시험에 의한 헬리컬 파일의 지지력을 비교분석하였다. 기존에는 현장 및 모형실험을 통한 헬리컬 파일의 지지력에 대한 연구가 중점적으로 수행되었으나 세부 요소인 헬릭스의 거동에 대한 연구는 미비한 실정이다.

따라서 본 연구는 헬릭스 형상(개수, 직경)에 따른 헬리컬 파일의 거동 뿐만 아니라 헬릭스의 거동을 수치해석적으로 분석하였다. 수치해석 모델링은 헬리컬 파일의 실내모형실험에 근거하여 동일한 규격으로 모사하였으며, 실내모형실험과 수치해석의 결과를 비교하여 수치해석의 신뢰성을 확보하였다. 수치해석은 헬릭스

형상에 따른 지지력 및 헬릭스 거동을 파악하는데 목적이 있으며 헬릭스 개수 및 직경을 해석변수로 설정하였다.

2. 헬리컬 파일의 하중-침하 곡선

일반적인 헬리컬 파일의 극한하중 산정법은 주로 대구경 혹은 실대형 규격에 적용되는 식으로, 실내실험의 소구경 헬리컬 파일에는 적용하기가 다소 어려우며, 정확성 또한 떨어진다. 따라서 소구경 헬리컬 파일의 지지력은 말뚝의 규격이 아닌 하중-침하 곡선으로 산정하는 것이 객관적이며 합리적이다. Kulhawy(2004)는 헬리컬 파일의 하중-침하 곡선을 기울기의 변화에 따라 선형 영역(linear region), 전이 영역(transition region), 최종 선형 영역(final linear region) 총 3개의 영역으로 구분하였다(Fig. 1). 선형 영역은 헬리컬 파일의 두부에 가해지는 연직하중이 강관중심축을 따라 주변에서 선단으로 전이되는 구간(하중기준 $0 \sim Q_a$; 침하기준 $0 \sim w_a$)으로, 주로 헬리컬 파일 강관축의 주변 마찰저항과 강관축 하단의 선단 지지력이 발현된다. 전이영역은 하중이 헬리컬 파일의 헬릭스를 통해 헬릭스 사이의 위치한 흙으로 전이되는 구간(하중기준 $Q_a \sim Q_b$; 침하기준 $w_a \sim w_b$)이다. 최종 선형 영역은 헬리컬 파일이 이미 극한 지지력을 초과한 구간으로, 헬리컬 파일의 항복이 발생되었다고 판단한다. 즉, 헬리컬 파일의 극한지지력은 전이 영역 내에서 산정되어야 함을 의미한다.

3. 실내모형실험과 수치해석을 통한 하중-침하 곡선 비교

3.1 실내모형실험

본 연구에서는 수치해석의 신뢰성을 위해 헬리컬 파일의 실내모형실험을 우선 실시하였다. 수치해석은 ABAQUS/CAE 프로그램(SIMULIA, 2014)을 이용하여 실내모형실험과 동일하게 모사하였으며, 실내모형실험의 하중-침하 곡선과 비교하였다. 헬리컬 파

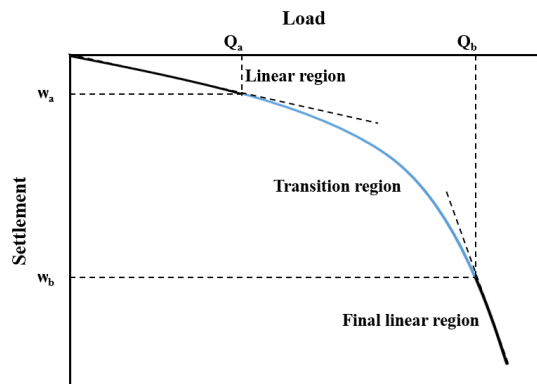


Fig. 1. Three Regions of Load-Settlement Curve of Helical Pile (Modified After Kulhawy, 2004)

일은 길이 760 mm, 직경 50 mm, 두께 1 mm의 강관축에 직경 100 mm, 두께 2 mm의 헬릭스 3개가 150 mm 간격으로 용접에 의해 부착된 형태이며, 토조는 직경 1,000 mm, 높이 1,000 mm로 헬리컬 파일의 회전관입장치가 결합 가능하도록 제작하였다. 지반 재료는 파쇄모래(규사 5호)로 Lee et al.(2017)에 근거하여 선정된 물성치는 Table 1과 같다. 지반은 일정한 다짐도를 위해 모래강사법을 사용하여 상대밀도 90 %로 조성하였으며, 지반 조성 완료 후 헬리컬 파일을 회전 속도 30 rpm, 재하하중 85 kg으로 관입시켜 지지력을 측정하였다.

3.2 실내모형실험 모사 수치해석 및 결과비교

헬리컬 파일의 실내모형실험을 동일하게 모사한 수치해석의

모델링은 Fig. 2와 같다. 모델링은 자세한 헬릭스의 모사를 위해 3차원으로 진행하였으며, mesh의 크기(approximate size)는 헬리컬 파일은 0.015 m, 지반은 0.15 m로 헬리컬 파일의 경우 정밀한 분석을 위해 더 작게 요소를 분할하였다. 수치해석에 사용된 헬리컬 파일 및 지반의 물성치는 Table 2와 같다. 헬리컬 파일에는 실내모형실험의 헬리컬 파일 재료인 스테인리스강의 물성을 적용하였으며, 지반의 물성은 파쇄모래(규사 5호)의 직접전단, 일축압축 시험 등에 따라 선정하였다.

이에 따른, 실내모형실험과 모사 수치해석에 따른 헬리컬 파일의 하중-침하 곡선은 Fig. 3과 같다. 두 개의 하중-침하 곡선에서 유사한 경향이 나타나므로, 수치해석 결과에 대한 신뢰성을 확보하였다고 판단된다.

Table 1. Physical Properties of Sand Used in the Experiment (Lee et al., 2017)

Property	Crushed sands
Classification of soil	Poorly graded sand (SP based on USCS)
Specific gravity	2.66
Friction angle	32.77°
Maximum density	15.46 kN/m ³
Minimum density	12.92 kN/m ³

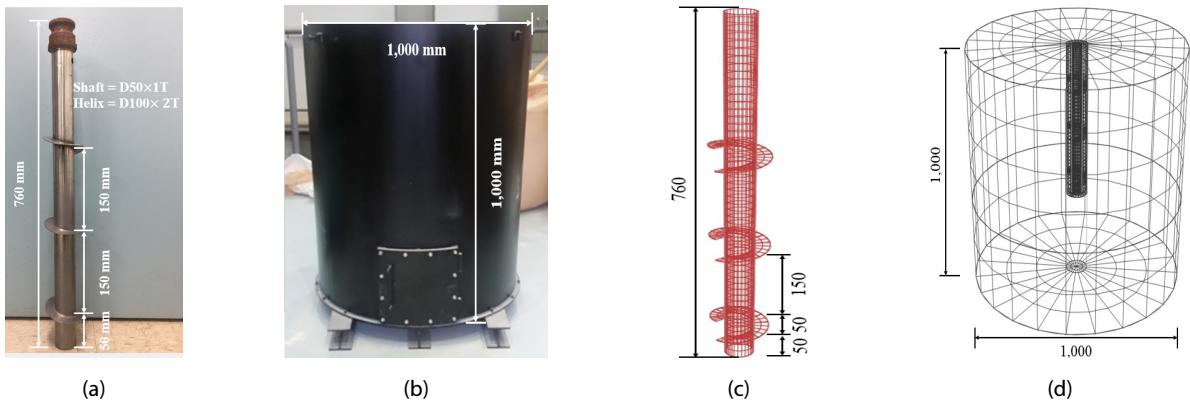


Fig. 2. Dimensions of Helical Pile and Ground: (a) Helical Pile, (b) Soil Tank, and Numerical Models of (c) Helical Pile and (d) Ground

Table 2. Material Properties Used for the Numerical Analysis

Property		Crushed sand	Stainless steel helical pile
Model		Elastic and plastic (Mohr-Coulomb)	Elastic
Dry density		15.21 kN/m ³	78.00 kN/m ³
Elastic	Elastic modulus	15 MPa	190 GPa
	Poisson's ratio	0.25	0.27
Mohr-Coulomb plastic	Friction angle	32.77°	-
	Dilation angle	2.77°	-
	Cohesion	1.0 kPa	-

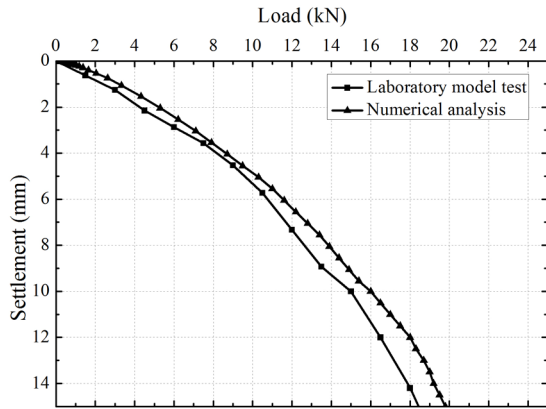


Fig. 3. Comparison of Load-Settlement Curves from Experiment and Numerical Analysis

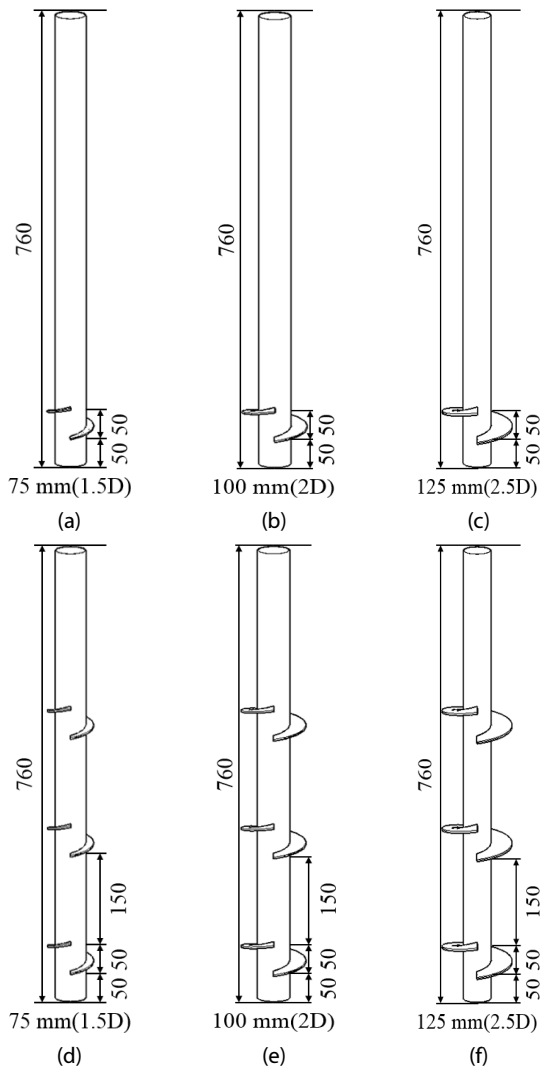


Fig. 4. Helical Piles with the Diameter and Number of Helix; (a) N1-D75, (b) N1-D100, (c) N1-D125, (d) N3-D75, (e) N3-D100 and (f) N3-D125

4. 헬릭스 형상(개수, 직경)에 따른 헬리컬 파일의 거동분석

4.1 수치해석 케이스

헬릭스 형상(개수, 직경)을 변화시켜 헬리컬 파일 및 헬릭스의 거동을 알아보기 위해 Fig. 4와 같은 여섯 개의 케이스를 설정하였다. 헬리컬 파일 및 지반의 모델링은 Table 2의 물성치를 적용하였다. 실내모형실험과 동일하게 헬리컬 파일은 강관의 중심축 길이 760 mm, 직경 50 mm, 두께 1 mm이며, 지반은 직경 1,000 mm, 높이 1,000 mm로 하였다. 수치해석의 변수는 헬릭스 개수 1, 3개 그리고 헬릭스 직경 75 mm (1.5D; D=Shaft diameter of helical pile), 100 mm (2D), 125 mm (2.5D)로 설정하였다. 여기서, N은 헬릭스 개수, D는 헬릭스 직경으로 N1-D75는 직경이 75 mm인 1개의 헬릭스가 중심축에 부착된 헬리컬 파일을 의미한다.

4.2 헬릭스 형상에 따른 헬리컬 파일의 극한하중

헬릭스 개수 및 직경에 따른 헬리컬 파일의 하중-침하 곡선은 Fig. 5와 같다. 하중-침하 곡선의 선형부(Linear region)에서는 헬릭스 형상에 따른 큰 변화가 발생하지 않았지만, 전이영역(transition region)부터 뚜렷한 차이를 확인할 수 있었다. 헬리컬 파일의 중심축에 부착된 헬릭스 개수가 많고, 헬릭스 직경이 클수록 동일 하중에 대해 적은 침하량이 발생하였다.

Fig. 5의 하중-침하곡선과 Kulhawy(2004)의 이론에 따라 헬리컬 파일의 극한하중을 산정하였다. Kulhawy(2004)는 헬리컬 파일의 극한하중은 전이영역 안에서 산정된다 하였으며, 본 연구에서는 극한하중을 전이영역에서 최종 선형영역으로 넘어가는 점으로 정하였다(Fig. 6). 해석 결과, 헬리컬 파일의 극한하중은 헬릭스 개수가 1개에서 3개로 증가할 경우 지지력이 최대 202%로 증가하였으며, 헬릭스 직경 증가에 따라서는 최대 128%로 증가하였다(Table 3).

4.3 헬릭스 형상에 따른 헬리컬 파일의 각 헬릭스 거동

헬리컬 파일 두부에 하중이 작용하였을 때, 축에 부착된 헬릭스의 거동을 알아보기 위해 헬리컬 파일의 응력분포 및 동일한 하중에

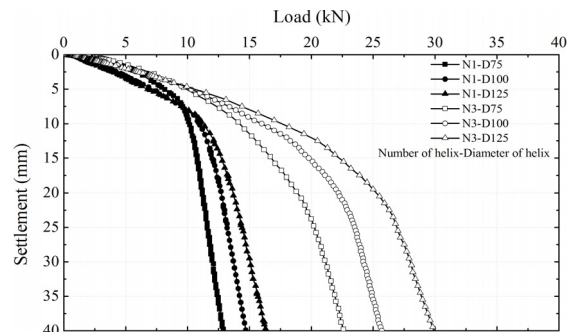


Fig. 5. Load-Settlement Curve of Helical Piles with Helix Shapes

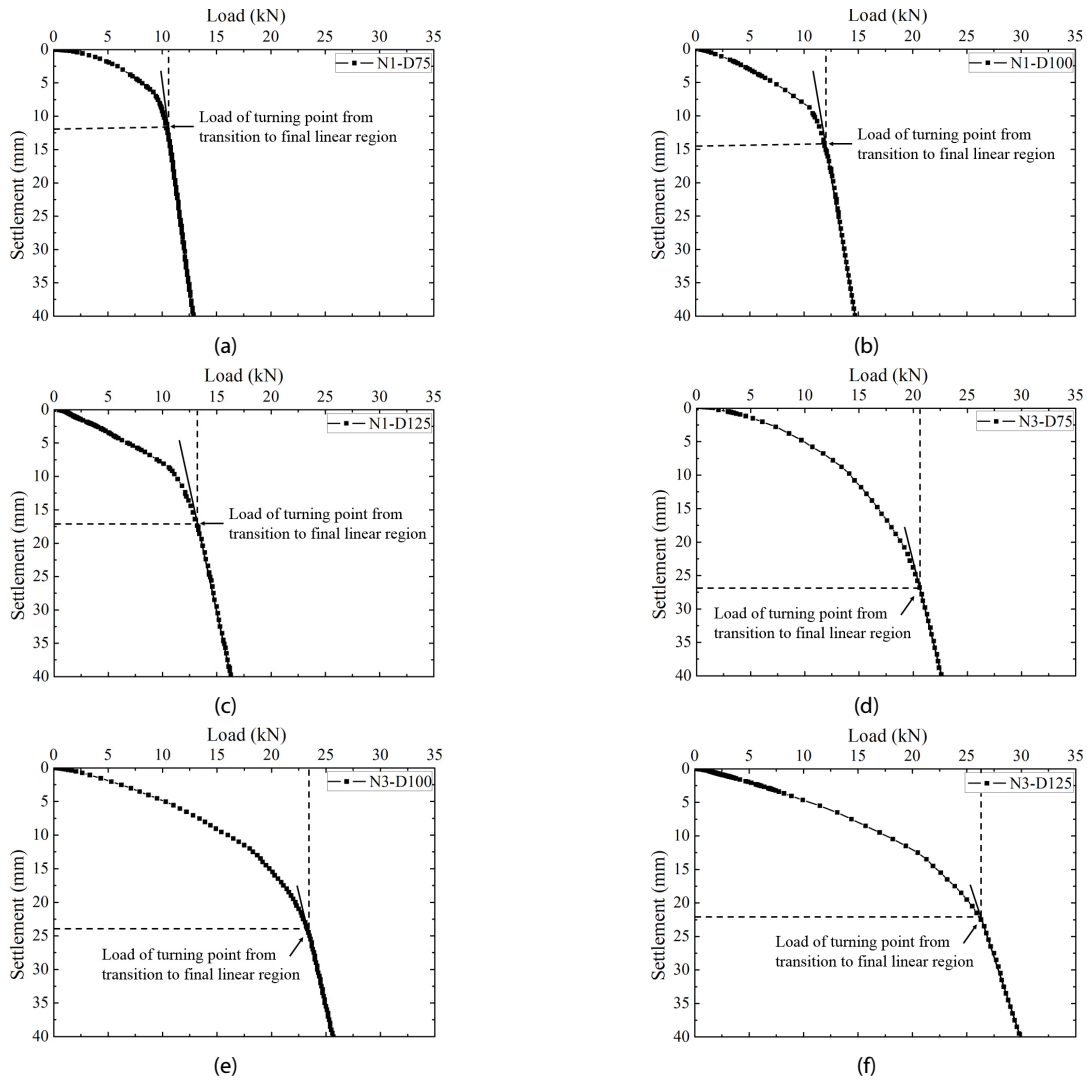


Fig. 6. Calculation of Ultimate Load of Turning Point from Transition to Final Linear Region Varying Number and Diameter of Helices; (a) N1-D75, (b) N1-D100, (c) N1-D125, (d) N3-D75, (e) N3-D100 and (f) N3-D125

Table 3. Ultimate Loads of Helical Pile Varying Number and Diameter of Helices

Cases		Load of turning point from transition to final linear region (kN)
Number of helix	Diameter of helix (mm)	
1	75	10.32
	100	12.09
	125	13.00
3	75	20.52
	100	23.10
	125	26.25

따른 각 헬릭스의 연직 변위량을 측정하였다. 헬리컬 파일의 케이스 별 응력분포는 Fig. 7에 나타났다. 헬리컬 파일의 응력분포는 헬릭스에 집중되었으며, 헬릭스 개수가 1개이고 헬릭스 직경이 75 mm인

경우 헬릭스 직경이 상대적으로 작아 일반 강관말뚝과 비슷하게 선단에도 응력이 집중되었다. 특히 헬릭스가 3개인 경우 최하단 헬릭스에 주로 응력이 집중된 것을 확인하였다.

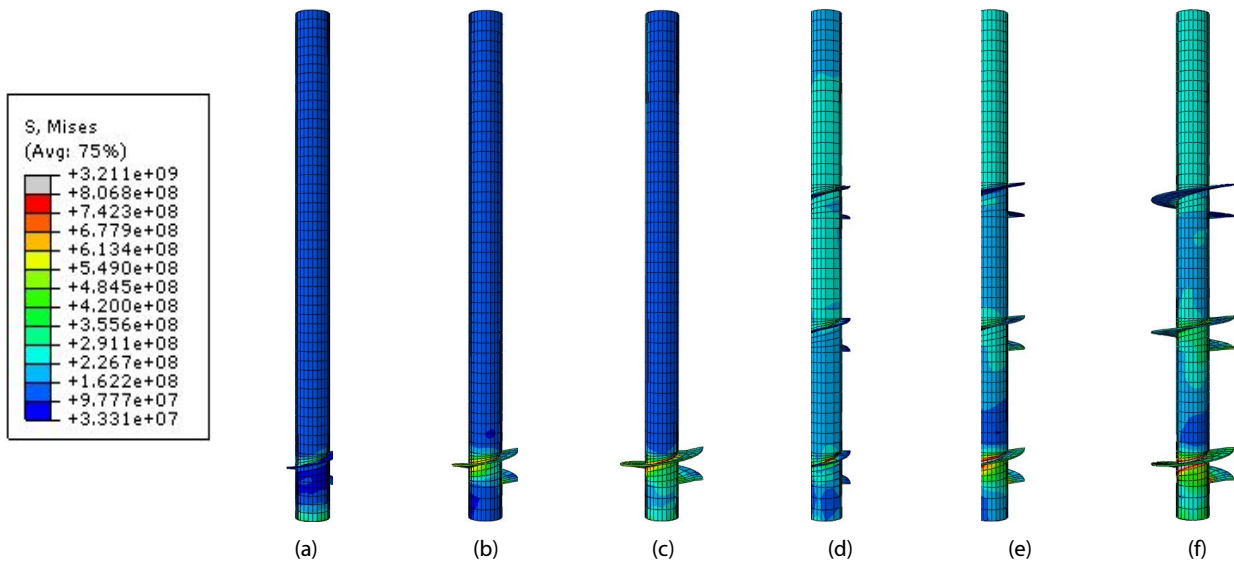


Fig. 7. Stress Distribution of Helical Pile Varying the Number and the Diameter of Helices; (a) N1-D75, (b) N1-D100, (c) N1-D125, (d) N3-D75, (e) N3-D100 and (f) N3-D125

Table 4. Vertical Displacements of Helices for the Cases

Case	Diameter of helix (mm)	Displacement (mm)
N1-D75	75	8.88
N1-D100	100	6.24
N1-D125	125	5.97

Table 5. Vertical Displacements of Helices for the Cases

Helix location	Displacement varying cases (Number of helix - Diameter of helix)		
	N3-75	N3-100	N3-125
Top	5.65	4.90	3.70
Middle	5.58	4.74	3.59
Bottom	5.50	4.34	3.32

각 헬릭스의 변위량 측정을 위해 사용된 동일한 하중은 여섯 종류 헬리컬 파일의 극한하중(Table 3)을 초과하지 않는 10 kN을 적용하였다. 동일한 하중에 따른 헬릭스 변위는 Table 4와 같으며, 헬릭스가 3개인 경우는 Table 5에 정리하였다. 분석 결과, 헬리컬 파일의 헬릭스 개수가 많고, 헬릭스 직경이 클수록 연직 변위가 적게 발생하였다. 헬릭스의 변위가 다른 헬릭스에 비해 작다는 것은 헬리컬 파일이 하중에 의해 침하될 때, 더 많은 하중을 분담하여 그에 따라 위로 힘이 발생했다는 것을 의미한다. 헬릭스 개수가 3개인 경우, 다른 헬릭스에 비해 하단에 위치한 헬릭스가 더 적게 변위했음을 확인하였으며, 하단 헬릭스가 가장 큰 휨응력을 받았다고 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 수치해석을 통해 헬릭스 형상에 따른 헬리컬 파일 및 헬릭스의 거동을 분석하였다. 해석의 변수는 헬릭스 개수, 헬릭스 직경으로 설정하였고, 헬리컬 파일의 극한하중과 동일한 하중에 따른 각 헬릭스의 연직 변위량을 분석하였다. 이에 따른 결론은 다음과 같다.

- (1) 헬리컬 파일의 실내모형실험을 수치해석으로 모사한 경우, 헬리컬 파일의 하중-침하 곡선이 유사한 것을 확인하였다. 이에 따라, 이후 실시한 여섯 케이스의 수치해석의 신뢰성이 확보되었다고 판단된다.

- (2) 헬릭스 형상(개수, 직경)에 따른 헬리컬 파일의 극한하중을 Kulhawy(2004)의 이론에 따라 산정한 결과, 헬릭스 개수가 많고, 헬릭스 직경이 클수록 더 큰 극한하중이 발현되었다. 극한하중은 헬릭스 개수가 1개에서 3개로 증가할 경우 최대 2배 정도 증가하였으며, 헬릭스 직경은 75 mm에서 125 mm로 증가할 경우 최대 30 % 정도 증가하였다.
- (3) 헬리컬 파일 케이스별 응력분포 분석 결과, 헬릭스에 주로 응력이 집중되었으며, 특히 헬릭스 개수가 3개인 경우는 최하단에 위치한 헬릭스에 응력이 가장 많이 집중되었다.
- (4) 동일한 하중(10 kN)에 따른 헬리컬 파일의 헬릭스의 거동 분석 결과, 헬릭스 개수가 많고 헬릭스의 직경이 클수록 연직 변위가 적게 발생하였다. 특히 헬릭스가 3개인 경우, 하단에 위치한 헬릭스가 다른 헬릭스와 비교하여 적게 변위가 발생하였는데 이는 하단 헬릭스가 가장 많은 하중을 분담하며, 이에 따라 위로 휨이 발생하였기 때문이라고 판단된다.
- (5) 본 연구에서는 헬릭스 개수 및 직경의 증가에 따라 헬리컬 파일의 지지력이 증가됨을 확인하였다. 하지만 하단에 위치한 헬릭스가 가장 큰 하중을 분담하고, 가장 크게 휨이 발생되므로, 헬리컬 파일의 설계 시 하단 헬릭스가 우선적으로 고려되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

This research was performed as a part of the oil sand plant R&D research (19IFIP-B089078-06), and was supported by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) and the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (KAIA). The authors appreciate their support.

본 논문은 2018 CONVENTION 논문을 수정·보완하여 작성되었습니다.

References

- Charpentier, A. D., Bergerson, J. A. and MacLean, H. L. (2009). "Understanding the canadian oil sands industry's greenhouse gas emissions." *Environmental Research Letters*, Vol. 4, No. 1, pp. 1-11.
- Elkasabgy, M. and El Naggar, M. H. (2014). "Axial compressive response of large-capacity helical and driven steel piles in cohesive soil." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 52, No. 2, pp. 224-243.
- Elsherbiny, Z. H. and El Naggar, M. H. (2013). "Axial compressive capacity of helical piles from field tests and numerical study." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 50, No. 12, pp. 1191-1203.
- Kulhawy, F. H. (2004). "On the axial behaviour of drilled foundations." *American Society for Civil Engineering, GeoSupport Conference 2004: Drilled Shafts, Micropiling, Deep Mixing, Remedial Methods, and Specialty Foundation System*, Florida, pp. 34-51.
- Kurian, N. P. and Shah, S. J. (2009). "Studies on the behaviour of screw piles by the finite element method." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 46, No. 6, pp. 627-638.
- Lee, D., Na, K., Lee, W., Kim, H.-N. and Choi, H. (2014). "Applicability of bi-directional load test for evaluating bearing capacity of helical piles." *Journal of Korean Geosynthetic Society*, Vol. 13, No. 4, pp. 77-85 (in Korean).
- Lee, D. S. and Roh, N. J. (2010). "Future strategy for the oil industry: Crude oil procurement strategy." *Korea Energy Economics Institute*, Vol. 10, No. 24, p. 27 (in Korean).
- Lee, J., Lee, K. and Kim, D. (2017). "Analysis of axial capacity and constructability of helical pile with inner cone penetration." *Journal of Korean Geosynthetic Society*, Vol. 16, No. 4, pp. 1-11 (in Korean).
- Lee, J. and Ko, H. (2007). "Development and future tasks of oil sands in Canada." *Korea Institute for International Economic Policy*, Vol. 1, No. 20, pp. 1-13 (in Korean).
- Park, K. Y., Han, S. D., Han, H. J., Kang, K. S., Bae, W. and Rhee, Y. W. (2009). "A study on the trend of technology for the treatment of oil from oil sands by patent analysis." *Journal of Clean Technology*, Vol. 15, No. 3, pp. 210-223 (in Korean).
- Prasad, Y. V. S. N. and Rao, S. N. (1996). "Lateral capacity of helical piles in clays." *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 122, No. 11, pp. 938-941.
- Sakr, M. (2010). "Lateral resistance of high capacity helical piles - case study." *63rd Canadian Geotechnical and 6th Canadian Permafrost Conference*, Calgary, Alberta, pp. 402-412.
- SIMULIA (2014). 6.14 Documentation Collection, ABAQUS/CAE User' Manual.