

사질토에 근입된 헬릭스 피치에 따른 헬리컬 파일의 수치해석적 거동분석

Analysis of Helical Pile Behavior in Sands Varying Helix Pitch Based on Numerical Analysis Results

박종호¹, 이기철², 최병현³, 김동욱^{4*}

Jongho Bak¹, Kicheol Lee², Byeong-Hyun Choi³, Dongwook Kim^{4*}

¹Student Member, Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon 22012, Republic of Korea

²Member, Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon 22012, Republic of Korea

³Student Member, Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon 22012, Republic of Korea

⁴Member, Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon 22012, Republic of Korea

ABSTRACT

Oil sands, which are largely distributed in Canada and Venezuela, are a mixture of crude oil and sandy soils. In order to extract crude oil from oil sands, construction of massive oil sand plants is required. Generally, the typically-used foundation types of the oil sand plant are driven piles and cast-in-place piles. Most of the oil sand plants are located in cold and remote regions. Installation of driven piles in frozen or organic surface soils is difficult due to high resistance and installation equipment accessibility, while the cast-in-place pile has concrete curing problem due to cold temperature. Helical pile can be installed quickly and easily using rotation with a little help of vertical load. As the installation of helical pile is available using a small and light-weight installation equipment, accessibility of installation equipment is improved. The helical pile has an advantage of easy removal by rotation in reverse direction compared with that of installation. Furthermore, reuse of removed helical piles is possible when the piles are structurally safe. In this study, the behavior of helical piles varying helix pitch was analyzed based on the numerical analysis results. Numerical model was calibrated based on the results of model helical pile tests in laboratory. The ultimate helical pile loads, the displacement of each helix attached to the shaft of the helical pile, and the load sharing ratio of each helix were analyzed.

요 지

캐나다 및 베네수엘라에 주로 분포하는 오일샌드는 원유들이 모래질 흙의 간극에 존재한다. 이러한 오일샌드로부터 원유를 따로 추출하기 위해서는 규모가 큰 플랜트를 건설해야 한다. 일반적으로 오일샌드 플랜트의 기초는 주로 항타말뚝 혹은 현장타설말뚝이 사용되고 있다. 하지만 주로 극지에 위치한 오일샌드는 얼어있는 지반과 표층의 유기토 때문에 항타말뚝의 시공 및 장비 진입에 어려움이 있으며, 현장타설말뚝의 경우 기온이 낮기 때문에 콘크리트 양생에 문제가 있다. 이번 연구의 주제인 헬리컬 파일은 크지 않은 연직력에 기초한 회전력을 중심으로 빠르고 간편하게 시공이 가능하다. 따라서, 접근성이 떨어지는 극지방에서도 소형장비를 사용하여 간단한 시공이 가능하며, 헬리컬 파일의 두부에 역회전을 가해 말뚝기초의 인발 및 재사용 또한 용이하다. 이번 연구에서는 헬릭스 피치를 변화시켜 헬리컬 파일 및 헬릭스의 거동을 수치해석으로 분석하였다. 수치해석의 검증은 모형 헬리컬 파일의 실내모형실험 결과와 비교하여 수행하였으며, 헬릭스의 피치에 따른 헬리컬 파일의 극한하중, 헬리컬 파일의 축에 부착한 각 헬릭스의 변위, 하중분담률을 분석하였다.

Keywords : Oil sand, Helical pile, Model laboratory test, Numerical analysis, Helix pitch, Ultimate load, Displacement, Load sharing ratio

Received 23 Oct. 2018, Revised 5 Nov. 2018, Accepted 8 Nov. 2018

*Corresponding author

Tel: +82-32-835-8460; Fax: +82-32-835-0775

E-mail address: dwkim@inu.ac.kr; wookdong2@gmail.com (D. Kim)

1. 서론

한정적 자원인 원유의 고갈화로 인하여 전 세계적으로 유가가 상승하고 있다. 이에 따라 전통적 방법인 시추방식으로 생산한 원유에 비해 높은 생산단가로 외면을 받아왔던 비전통적 방식에 의한 원유 생산에도 상당한 이목이 집중되고 있다. 특히 채굴기술의 발전 및 장비의 대형화로 생산단가가 상대적으로 낮아진 오일샌드 개발이 크게 주목 받고 있다(Park et al., 2007). 오일샌드는 점토, 모래, 물 및 미네랄 등과 원유에 해당되는 비투멘(bitumen)의 혼합물로, 캐나다 및 베네수엘라에서만 오일샌드 개발로 약 4.5조 배럴의 원유 생산이 가능하다고 보고되었다(Abramov et al., 2009). 하지만 오일샌드의 원유에 해당되는 핵심성분인 비투멘은 원유보다 비중이 크고 모래에 높은 점도로 붙어있기 때문에 원유를 추출하기 위해서는 큰 규모의 플랜트 설치가 필요하다(Park et al., 2009). 현재 오일샌드 플랜트의 말뚝기초는 주로 항타말뚝 혹은 현장타설말뚝이 사용되고 있다. 하지만 오일샌드의 개발이 가장 활발하게 진행 중인 캐나다 알버타(Alberta) 주는 극지에 위치하여 기온이 낮고 교통의 미발달로 접근성이 떨어지기 때문에, 비교적 큰 시공장비가 사용되는 항타말뚝을 오일샌드 플랜트의 말뚝기초로 사용하기에는 시공상 어려움이 있다. 또한, 오일샌드 지역의 상부지층이 유기토이기 때문에 무거운 말뚝설치 장비가 자립하기 어려운 실정이다. 현장타설말뚝의 경우에도 낮은 양생온도로 품질관리가 어려우며, 철근조립-거푸집설치-타설-양생 등의 과정에 따라 공기가 늘어나 시공비용이 추가적으로 발생된다(Lee, 2016). 특히 세계적으로 환경문제에 대한 관심이 제고됨에 따라, 구조물의 철거과정에서 말뚝기초의 완전한 제거 및 재활용 가능 여부 또한 중요해지고 있다(Cho, 2007). 하지만 항타말뚝과 현장타설말뚝은 높은 지지력 확보를 위해 깊고 단단한 지반층까지 시공되기 때문에, 사실상 인발 및 재활용이 어렵다. 실제로, 가동을 마친 플랜트 현장은 말뚝기초를 제거하기 위해 상당한 깊이를 굴착하고, 노출된 말뚝을 절단하는 철거과정을 거친다. 이러한 말뚝의 철거 과정은 추가적인 시간과 비용을 필요로 한다.

본 연구의 주제인 헬리컬 파일은 강관으로 이뤄진 중심축과 중심축에 부착되는 한 개 이상의 헬릭스로 이뤄진 말뚝기초로, 기초 두부에 가해지는 회전력과 크지 않은 연직력에 의해 지반으로 회전 관입된다(Kurian and Shah, 2009). 회전관입기로 헬리컬 파일의 두부에 회전력을 가하면, 회

전력은 헬리컬 파일의 중심축을 통해 헬릭스에 전달되고, 이에 따라 발생하는 관입력이 지반의 전단저항보다 커지면서 헬리컬 파일의 시공은 이루어진다(Lee et al., 2014). 다른 보편적인 말뚝기초들과 비교하였을 때, 헬리컬 파일은 굴착 및 항타가 필요 없고, 시공장비 또한 소형이기 때문에 극지환경에서 시공상 매우 유리하다. 또한 역방향으로 회전력을 헬리컬 파일에 가했을 경우, 쉽게 인발이 가능하기 때문에 제거 및 재활용에 이점이 있다. 이외에도 헬리컬 파일은 항타말뚝 및 현장타설말뚝과 같은 보편적인 말뚝기초들에 비해 높은 압축력 및 인장력, 제한된 부지에서의 적용 등과 같은 성능상 많은 이점들을 가지고 있다(Sakr, 2011).

기존 헬리컬 파일에 대한 연구는 과거에도 활발히 진행되었다. Rao et al.(1991)는 점성토에 설치한 헬리컬 파일에 대하여, 압축 및 인장시험을 실시해 헬릭스의 직경 및 간격이 다른 헬리컬 파일의 거동과 지지력을 분석하였다. Lee et al.(2014)은 현장재하시험을 통해 중심축의 직경 및 헬릭스의 직경에 따른 중소구경 헬리컬 파일의 지지력을 분석하였다. Sakr(2009)는 오일샌드 환경에서 대구경 헬리컬 파일의 헬릭스 개수를 바꾸어 현장재하시험을 실시하였으며, 그에 따른 헬리컬 파일의 압축 및 인장 저항력을 분석하였다. 현재까지는 주로 헬릭스의 개수, 직경, 헬릭스 간의 간격에 대한 연구가 중점적으로 이루어졌다. 하지만 헬릭스의 피치 및 거동에 대한 연구는 부족한 실정이며, 이에 대한 상관관계를 도출할 필요가 있다고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 ABAQUS/CAE 프로그램(SIMULIA, 2014)을 이용한 헬리컬 파일의 거동분석을 수행하였다. 수치해석 결과의 신뢰성을 위해 헬리컬 파일 및 지반의 모델링은 모형 헬리컬 파일의 말뚝재하시험 데이터에 근거하여 동일하게 모사하였다. 헬리컬 파일은 직경 100mm (2D; D=헬리컬 파일 중심축의 직경), 두께 2mm인 3개의 헬릭스를 중심축에 부착한 형태로 모델링하였으며, 헬릭스 피치를 25mm(0.5D), 50mm(1D), 75mm(1.5D)로 변화시켜 헬리컬 파일의 극한하중, 각 헬릭스의 거동 및 하중분담률을 분석하였다.

2. 헬리컬 파일의 지지력 산정 방법

헬리컬 파일은 하나 이상의 헬릭스(helix or helical plate)가 중심축(shaft)에 용접된 강 구조물(steel structure)로써

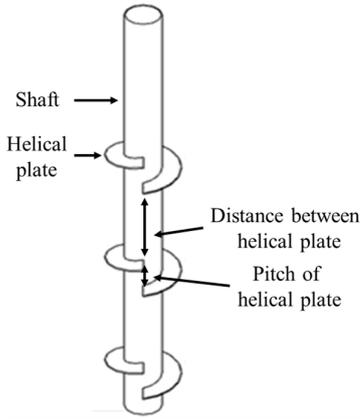


Fig. 1. Schematic of a helical pile [modified after Carol and Roy (2018)]

깊은 기초로 간주되며, 모든 유형의 하중을 지지하는데 사용된다. 헬리컬 파일의 기본 모식도는 Fig. 1과 같다. 이러한 헬리컬 파일의 장점은 다음과 같다: (1) 설치 시 진동이 적거나 거의 없어 지반 거동으로 인한 구조물 손상 가능성이 줄어든다. (2) 모든 기상 조건에서 설치가 가능하며, 콘크리트 기초처럼 양생 시간(curing time)이 필요 없기 때문에 즉각적인 하중 시험 및 구조물 설치가 가능하다. (3) 매입말뚝처럼 선굴착과 같은 과정이 불필요하고 높은 수위에서도 시공이 가능하다. (4) 설치가 빠르고, 깊은 말뚝 기초 설치에 필요한 장비와 비교했을 때, 간소한 장비로도 시공이 가능하다. (5) 설치방향과 역방향으로 회전시켜 인발하면 철거 및 재활용이 쉽다(Helical Anchors, Inc., 2014).

정확한 말뚝기초의 지지력 산정은 설계 하중 범위 내에서 지반의 파괴를 막고, 안전성 확보의 기준이 되기 때문에 중요하다. 일반적으로 헬리컬 파일은 기존 말뚝기초과 다르게 축에 헬릭스가 추가로 부착되기 때문에, 헬릭스의 수동 저항 또는 헬릭스 사이에 갇힌 흙의 전단저항도 고려하여 지지력을 산정한다. 헬리컬 파일의 말뚝재하시험을 통해 기초 두부에 가한 연직하중에 따른 침하를 관찰할 경우, 헬리컬 파일의 지지거동은 일반 말뚝과 큰 차이를 보이지 않는다. 즉, 헬리컬 파일의 일반적인 하중-침하 곡선(Fig. 2)은 일반적인 말뚝의 하중-침하 곡선과 유사하다.

하지만, 하중-침하 곡선을 자세히 분석하면 다음과 같은 특징이 있다. 일반적으로 하중-침하 곡선은 기울기의 변화점을 기준으로 선형 영역(linear region), 전이 영역(transition region), 최종 선형 영역(final linear region)의 3가지 영역으로 구별할 수 있으며, 각 영역은 다음과 같이 설명할 수 있다(Kulhawy, 2004): (1) 선형 영역(linear region)은

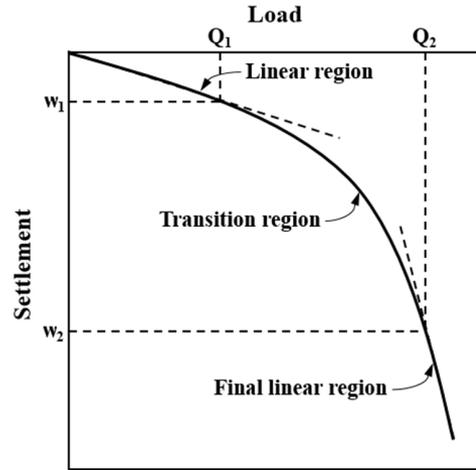


Fig. 2. Load-Settlement curve of helical pile (modified after Kulhawy, 2004)

헬리컬 파일에 가해지는 축하중이 증가함에 따라 두부에 가해지는 축하중이 헬리컬 파일의 주면에서 선단으로 전이되는 구간으로, 헬리컬 파일 축의 주면 마찰력과 말뚝 하단의 선단지지력이 발현된다. (2) 전이 영역(transition region)은 헬리컬 파일 축의 주면 마찰저항이 최대값(limit resistance)에 도달하면서, 헬리컬 파일의 날개 부분인 헬릭스를 통해 하중이 흙으로 전이된다. 이 영역은 각 헬릭스의 선단 지지력과 헬릭스 사이에 위치한 흙의 전단저항이 주로 발현되는 구간으로, 흙의 전단파괴(plunge failure)가 일어난다. (3) 최종 선형 영역(final linear region)은 헬리컬 파일의 항복이 발생한 영역으로, 이 영역에 포함된 하중에 대해서는 헬리컬 파일의 극한 지지력을 초과하였다고 판정한다. 이에 따라, 헬리컬 파일의 극한지지력은 최종 선형 영역을 넘지 않아야 하며, 전이 영역 내의 범위를 목표로 산정해야한다.

Table 1은 앞서 언급된 최종 선형 영역(final linear region)에 도달하기 전인 전이 영역(transition region)의 물리적인 현상을 분석하여 다양한 연구자들이 제시한 헬리컬 파일의 극한 하중(ultimate load) 산정식을 나타낸다. Davisson's criterion(Davisson, 1973)은 극한 하중 산정에 있어 말뚝의 축강성을 고려하기 때문에 합리적이며, 하중-침하 곡선에 적용이 간편해 가장 널리 사용된다. O'Neill and Reese (1999)가 제시한 기준은 말뚝 두부 직경의 5%에 해당하는 침하가 발생했을 때의 하중을 극한하중으로 산정한다. Livneh and El Naggar(2008)이 제시한 극한 하중은 헬리컬 파일의 재하시험과 수치해석을 통해 구성된 식으로부터 계산되며, Elkasabgy and El Naggar(2014)가 제시한 기준은

Table 1. Estimation method of ultimate load of helical pile by researchers

Researchers	Ultimate load
Davisson (1973)	$S_P = \frac{Q_{ULT} \times L}{E_P \times A} + \frac{D}{120}$ <p>where S_P is the pile head settlement at ultimate load Q_{ULT}, L is the pile embedded length, E_P is the elastic modulus of pile, A is the effective cross sectional area of pile, and D is the lead helix plate diameter.</p>
O'Neill and Reese (1999)	The ultimate failure limit as the load that produces a settlement equal to 5 % of the diameter of the pile to e. $S_P = 0.05 \times D$
Livneh and El Naggar (2008)	$S_P = \frac{Q_{ULT} \times L}{E_P \times A} + 0.08 \times D$
Elkasabgy and El Naggar (2014)	$S_P = \frac{Q_{ULT} \times L}{E_P \times A} + 0.035 \times D$

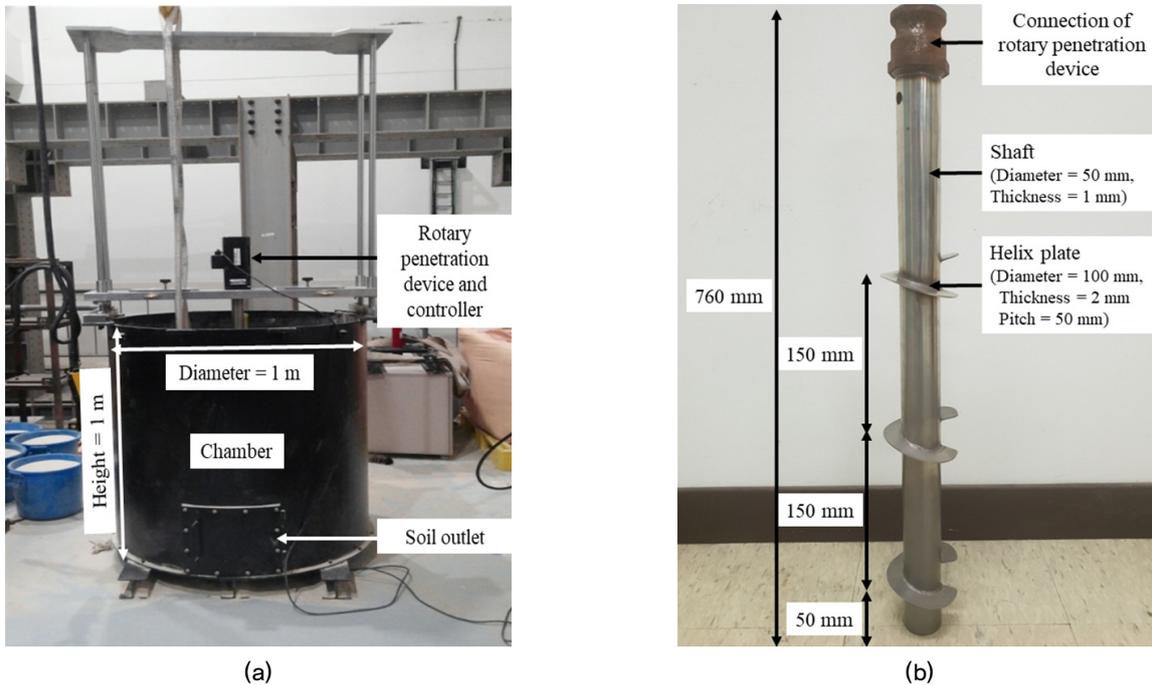


Fig. 3. (a) Soil chamber and (b) helical pile and their dimensions used for laboratory model test

Livneh and El Naggar(2008)의 저항력 산정을 대구경 헬리컬 파일의 현장실증시험으로 개선한 방법이다.

3. 실내모형실험 및 수치해석 결과 비교

3.1 실내모형실험

본 연구의 목적은 헬리컬 파일의 중심축에 부착한 헬릭스 피치에 따른 헬리컬 파일의 거동분석이다. 실제 실험에서는 각 헬릭스의 거동을 보기 어렵기 때문에, 헬리컬 파일의 두부에 가해지는 하중에 따른 헬릭스의 변위 및 하중분담률을 수치해석을 통해 추가적으로 파악하고자 한다.

이에 따라, 수치해석의 신뢰성 및 정확도를 검증, 확인하기 위해 모형 헬리컬 파일의 실내 실험을 선행적으로 수행하였다. 이후 수치해석에서는 ABAQUS/CAE 프로그램(SIMULIA, 2014)을 사용하여 실내모형실험을 모사하였고, 수치해석에서 도출된 결과를 실내모형실험의 결과와 비교하기 위하여 하중-침하 곡선을 비교분석하였다.

실내모형실험에 사용된 토조와 헬리컬 파일의 규격은 Fig. 3과 같다. 토조의 직경과 높이는 1m이고, 토조 측면에는 관입장치 결합을 위한 지지대가 설치되어 있으며, 헬리컬 파일은 직경 50mm, 두께 1mm의 강관축(shaft)에 직경 100mm, 두께 2mm인 헬릭스가 강관축의 하단 50mm 지점부터 150mm 간격으로 부착된 형태이다. 지반 조성

Table 2. Physical properties of crushed sands used in this study (Lee et al., 2017)

Property	Test	Crushed sands
Classification of soil	KS F2302 (2002)	SP (Poorly graded sand)
Specific gravity G_s	KS F2308 (2016)	2.66
Friction angle ϕ	KS F2343 (2007)	32.77°
Maximum density $\gamma_{d,max}$	JIS A1224 (2009)	15.46 kN/m ³
Minimum density $\gamma_{d,min}$	JIS A1224 (2009)	12.92 kN/m ³

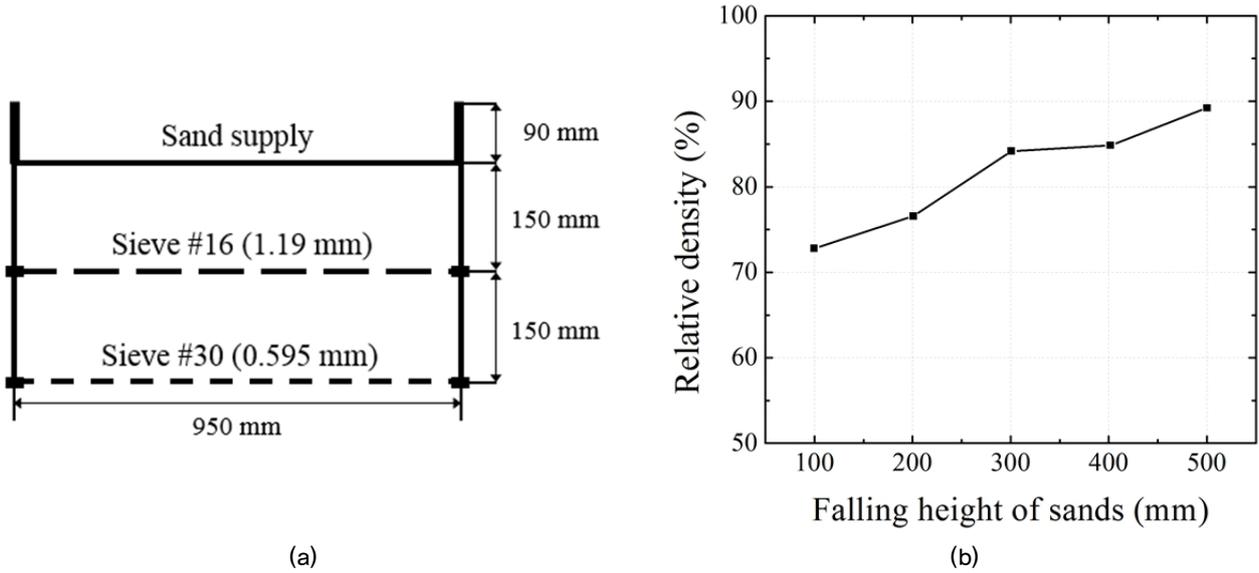


Fig. 4. Sand pluviator; (a) Schematic of sand pluviator and (b) Relationship between relative density and falling height of sand (modified after Lee et al., 2017)

재료의 입도분포곡선 및 물성치는 Lee et al.(2017)에 근거한 실험으로 산정하였으며(Table 2), 일정한 다짐도를 위하여 모래 강사법을 사용하였다(Lee et al., 2017). 지반 조성을 위한 상대밀도 목표치는 90%이며, 기존 문헌 결과를 토대로 두 개의 체[#16 sieve(1.19mm), #30 sieve(0.595mm)]를 강사높이 500mm로 하여 강사하였다(Fig. 4). 지반 조성이 완료되면 회전관입장치를 통해 헬리컬 파일이 지반 내로 삽입되며, 회전 조건은 속도 30rpm, 상재하중 85kg이다.

3.2 실내실험결과 모사 수치해석 모델링 및 결과

실내모형실험을 모사한 수치해석의 모델링은 Fig. 5와 같다. 모델링은 2차원으로 구성할 경우, 헬릭스의 형상 및 피치를 정확히 모사할 수 없어 3차원으로 구성하였으며, 해석에 사용된 지반과 헬리컬 파일의 요소 유형은 C3D8R (An 8-node linear brick, reduced integration, hourglass

control)으로 설정하였다. Mesh의 크기는 지반의 경우 0.1m, 헬리컬 파일 0.01m로 설정하였으며, 총 9,514개(지반 = 6,078개, 헬리컬 파일 = 3,436개)의 요소로 구성하였다. 헬리컬 파일의 헬릭스는 각각 shape-solid와 type-revolution으로 모델링한 후, y축을 기준으로 parameter angle을 360° 회전시켜 형성하였으며, 이에 따른 피치 값은 추가로 설정하였다. 수치해석에 사용된 모래지반 및 헬리컬 파일 물성은 Table 3에 정리하였다. 모델링한 헬리컬 파일은 실내모형실험에 사용된 모형 헬리컬 파일의 재료인 스테인리스강(stainless steel)의 물성치를 적용하였으며, 지반의 탄성계수(elastic modulus), 점착력(cohesion), 내부마찰각(friction angle) 그리고 포아송비(Poisson's ratio)는 지반 조성에 사용된 파쇄모래의 직접전단, 일축압축 등의 시험을 통해 산정하였다.

해석 과정의 진행순서는 다음과 같다: (Step 1)경계 및 경계면 조건 설정-헬리컬 파일과 지반의 접촉조건은 회전관입을 고려하여 constraints-tie로 설정하였다. 경계 조건

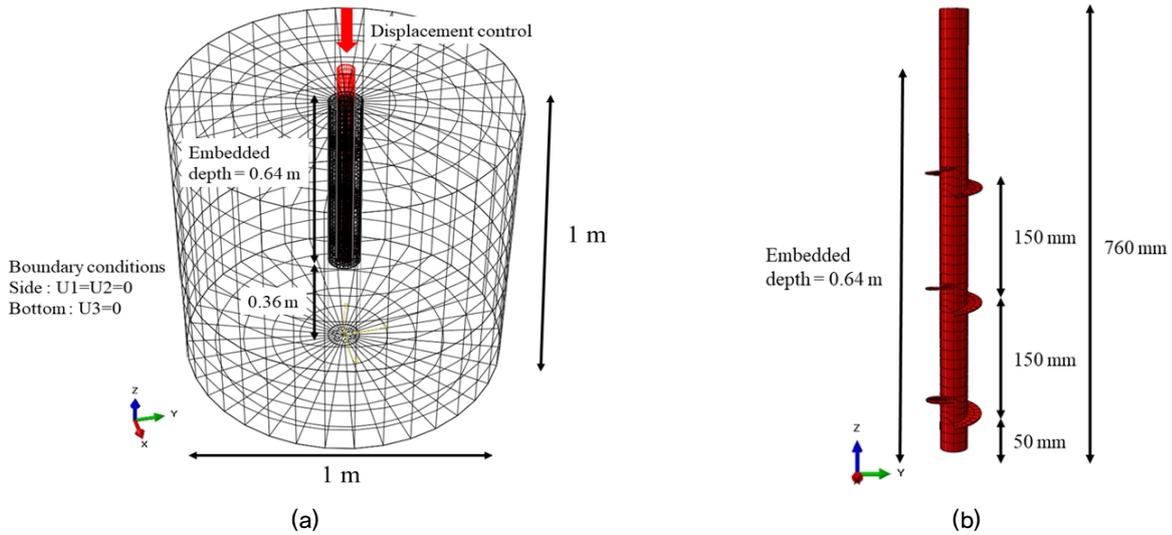


Fig. 5. Modeling used in the numerical analysis: (a) integrated model of ground and pile and important dimensions and (b) enlarged helical pile model and its dimensions

Table 3. Material properties used for numerical analysis

Material properties		Soil	Helical pile
Model		Elastic and plastic (Mohr-Coulomb)	Elastic
Sort		Silica sand	Stainless steel
Density (kN/m ³)		13,91	78,00
Elastic	Elastic modulus (MPa)	15	190,000
	Poisson's ratio	0,25	0,27
Mohr-Coulomb plastic	Friction angle (°)	32,77	-
	Dilation angle (°)	2,77	-
	Cohesion (kPa)	1,0	-

은 지반 하부의 움직임을 제한하기 위해 지반 하부 부분을 displacement/rotation에서 $U_3=0$ 으로 설정하고, 지반 측면은 토조로 구속되어 있기 때문에 $U_1=U_2=0$ 으로 설정하였다. (Step 2)Geostatic 적용-중력이 전체 모델에 적용하여 지반과 구조체에 과도한 변형을 유발시킬 수 있다. 이러한 이유 때문에 geostatic 과정을 통한 지반과 구조물을 하중 재하 전에 안정화 시켰다. (Step 3)하중 재하-말뚝 두부의 변위를 제어하여 각 단계마다 가해진 하중을 구하였다. 즉, 재하 하중은 변위 제어에 따른 반력을 통해 계산하였다.

헬리컬 파일의 실내모형실험과 수치해석에 따른 하중-침하 곡선은 Fig. 6과 같다. 실내모형실험과 실내모형실험을 모사한 수치해석의 하중-침하 곡선이 유사하기 때문에, 이후 진행한 나머지 수치해석 케이스에 대한 결과의 신뢰성 및 정확도가 확보되었다고 판단된다.

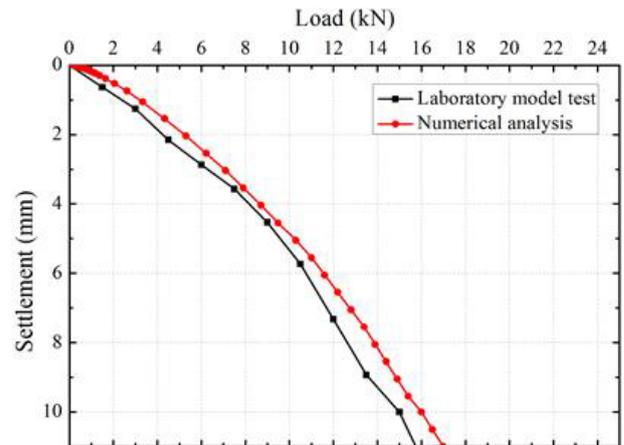


Fig. 6. Comparison of laboratory model test and numerical analysis

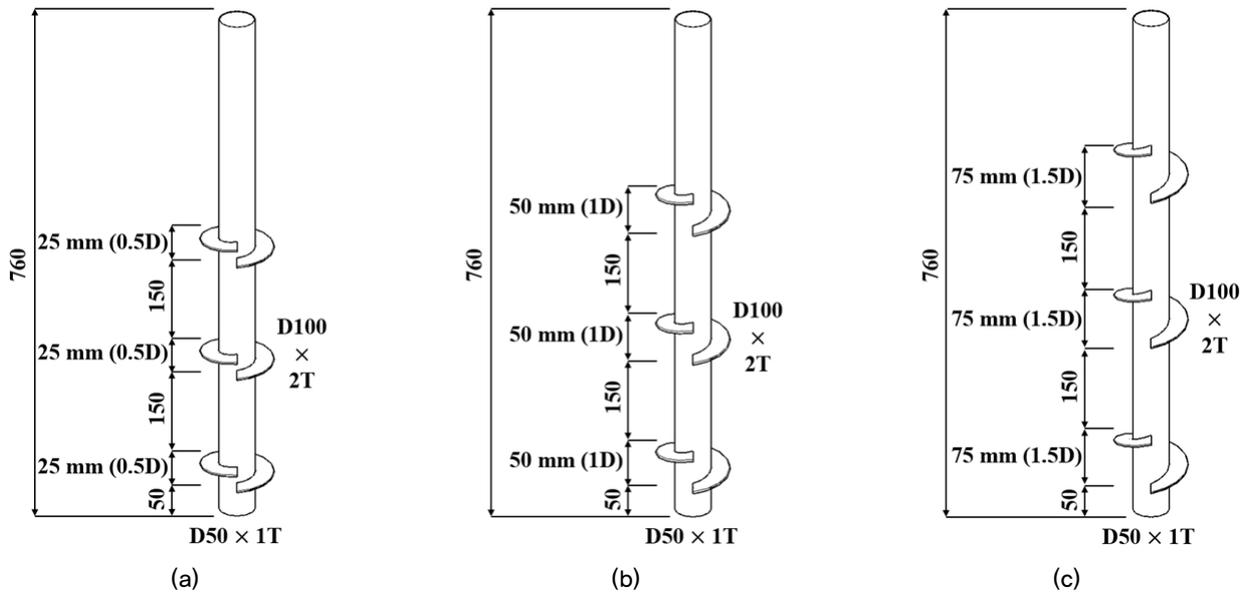


Fig. 7. Four different pitches of helical piles (units in mm): Helix pitch equal to (a) 25 mm (0.5D), (b) 50 mm (1D), and (c) 75 mm (1.5D)

4. 헬릭스 피치 변화에 따른 헬리컬 파일 거동 수치 해석

4.1 수치해석 Case

헬릭스의 피치변화에 따른 헬리컬 파일의 극한하중, 헬릭스의 변위 그리고 헬릭스의 하중분담률을 파악하기 위하여 다음과 같은 해석 케이스를 설정하였다(Fig. 7). 수치해석에 사용된 지반 및 헬리컬 파일의 물성은 Table 3에 나온 값을 사용하였다. 헬리컬 파일의 중심축은 길이 760mm, 직경 50mm, 두께 1mm이며 축에 부착된 헬릭스는 직경 100mm, 두께 2mm로 실내모형실험과 동일하다. 헬릭스의 부착위치는 중심축의 하단 50mm부터 150mm 간격으로 고정하였다. 수치해석 케이스의 변수인 헬릭스 피치는 25mm(0.5D; D= 헬리컬 파일 중심축의 직경), 50 mm(1D), 75mm(1.5D)로 구성하였다.

4.2 헬리컬 파일의 거동 및 극한하중 분석

헬리컬 파일의 헬릭스 피치 변화에 따른 수치해석 결과는 Fig. 8과 같다. Fig. 8은 해석 케이스별 하중-침하 곡선 및 이론식에 따른 극한하중 산정 직선을 나타내며, 이에 따라 산정된 극한하중은 Table 4와 같다. 헬리컬 파일의 극한하중은 Table 1에 나타난 4가지 이론(Davisson, 1973;

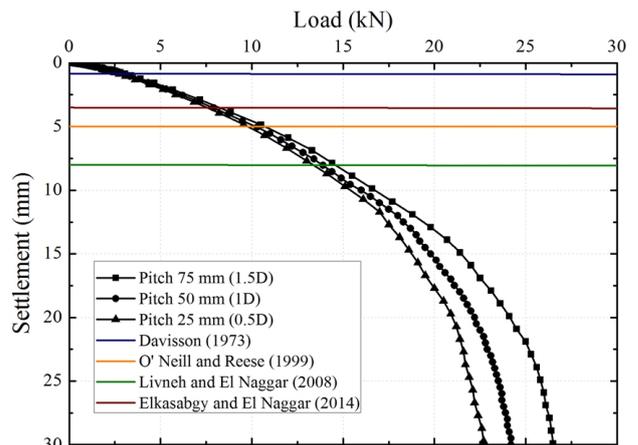


Fig. 8. Load-settlement curves of helical piles with different helix pitches and the ultimate loads by different criteria

O'Neill and Reese, 1999; Livneh and El Naggar, 2008; Elkasabgy and El Naggar, 2014)을 따랐다.

헬리컬 파일의 하중-침하 곡선에서 오른쪽에 위치한 곡선은 동일한 하중이 작용할 경우 침하량이 상대적으로 적기 때문에 더 높은 극한하중(지지력)을 가진다고 할 수 있다. 해석 결과, 하중-침하 곡선의 초기 선형부분은 헬릭스의 피치변화에 따라 극한하중의 변화가 미미했으나, 전이 영역부터는 헬릭스 피치가 증가할수록 헬리컬 파일의 지지력이 증가하는 경향이 나타났다. 각 이론식에 따른 극한하중 산정결과에 따르면 Davisson's criterion(Davisson,

Table 4. Ultimate loads and the corresponding settlements for different helix pitches

Pitch	Davisson (1973)		O'Neill and Reese (1999)		Livneh and El Naggar (2008)		Elkasabgy and El Naggar (2014)	
	Ultimate load (kN)	Settlement (mm)	Ultimate load (kN)	Settlement (mm)	Ultimate load (kN)	Settlement (mm)	Ultimate load (kN)	Settlement (mm)
25 mm (0.5D)	2.27	0.84	9.96	5	13.55	8.03	7.82	3.51
50 mm (1.0D)	2.40	0.84	10.34	5	14.12	8.03	8.13	3.52
75 mm (1.5D)	2.58	0.84	10.90	5	14.81	8.03	8.57	3.52

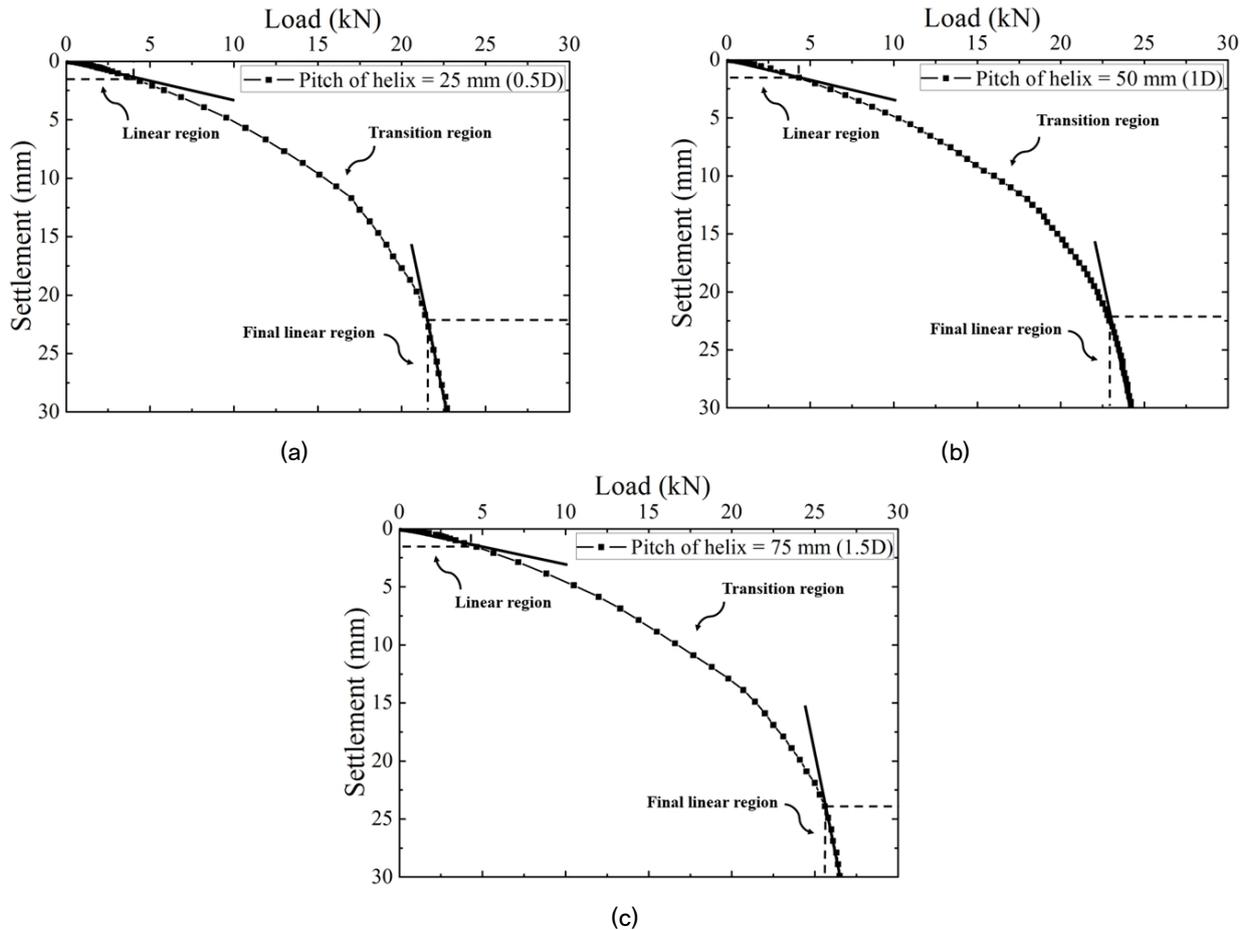


Fig. 9. Linear, transition, and final linear regions from load–settlement curves varying helix pitches: helix pitch of (a) 25 mm (0.5D), (b) 50 mm (1D), and (c) 75 mm (1.5D)

1973)의 극한하중이 가장 낮게 산정되어 가장 보수적인 이론으로 판단되며, Livneh and El Naggar’s criterion (Livneh and El Naggar, 2008)은 극한하중이 가장 크게 산정되었다. 또한 극한하중 산정이론에 따른 헬리컬 파일의 지지력의 차이는 최대 7.5배로, 큰 편차가 나타났다.

Table 4와 같이 헬리컬 파일의 극한하중을 대표적인 헬리컬 파일의 극한하중 이론들로 산정하는 것은 편차가 크기 때문에, Kulhawy(2004)의 이론을 이용하여 헬리컬 파

일의 극한하중을 재산정하였다. 앞서 언급된 바와 같이 Kulhawy(2004)는 헬리컬 파일의 하중-침하 곡선을 선형 영역(linear region), 전이영역(transition region), 최종 선형영역(final linear region)로 구분하였고, 극한하중을 전이 영역 내에서 산정해야한다고 하였다. 따라서 헬리컬 파일의 극한하중을 전이 영역에서 최종 선형 영역으로의 전환점으로 결정하였다. 헬릭스 피치에 따른 헬리컬 파일 하중-침하 곡선의 영역 구분은 Fig. 9에 나타냈으며, 산정한

Table 5. Loads and corresponding settlements of turning points from linear to transition regions and those from transition to final linear regions

Pitch	Point separating between the linear region and the transition region		Point separating between the transition region and final linear region	
	Load (kN)	Settlement (mm)	Load (kN)	Settlement (mm)
25 mm (0.5D)	4.06	1.43	21.53	22.19
50 mm (1.0D)	4.33	1.54	22.92	22.25
75 mm (1.5D)	4.26	1.36	25.50	23.68

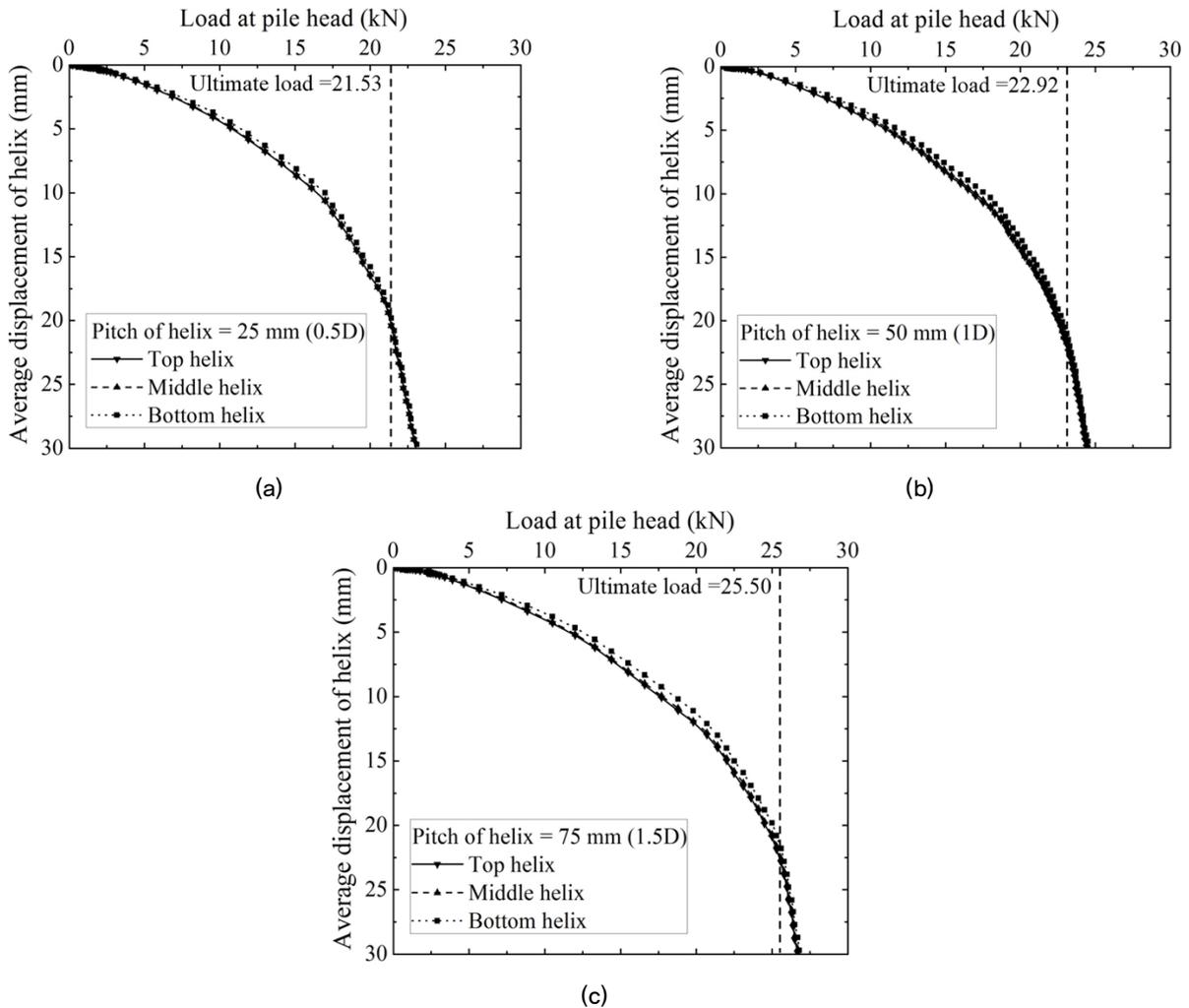


Fig. 10. Displacement of each helix with load at pile head; pitch of helix is (a) 25 mm (0.5D), (b) 50 mm (1D) and (c) 75 mm (1.5D)

극한하중 값은 Table 5와 같다. 주어진 하중 범위에서 대부분의 영역은 전이 영역으로 확인되었으며, 초기 선형 영역에서는 피치에 따른 경향이 나타나지 않았다. 하지만 극한하중은 헬릭스 피치의 증가에 따라 뚜렷하게 증가하는 경향을 보였다. 즉, 극한하중적 관점에서 헬리컬 파일의 지지력은 헬릭스 피치가 증가할수록 증가된다고 판단된다.

4.3 헬릭스의 변위 이동량

추가적으로 각 헬릭스의 거동을 파악하기 위해, 말뚝 두부에 작용한 하중에 따른 피치별 각 헬릭스의 변위를 측정하였다. Fig. 10은 말뚝 두부에 하중이 작용하였을 때, 헬릭스 피치변화에 따른 각 헬릭스의 평균 변위를 나타낸다. 말뚝 두부에 작용한 하중이 증가할수록 헬릭스의 평균 변

Table 6. Average displacement of each helix when the equivalent load is applied

Helix location	Average displacement of each helix with pitch of helix		
	25 mm (0.5D)	50 mm (1.0D)	75 mm (1.5D)
Top	19,4 mm	16,8 mm	14,0 mm
Middle	19,4 mm	16,7 mm	13,8 mm
Bottom	18,8 mm	16,0 mm	13,0 mm

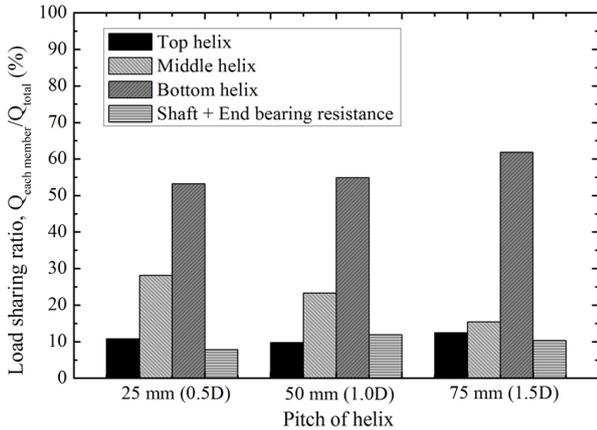


Fig. 11. Load sharing ratio with pitch of helix

위량은 증가하였으며, 극한하중 이상의 하중에서는 변위가 커져 헬릭스가 휨응력을 크게 받는 것으로 나타났다. 헬릭스 위치(top, middle, bottom)에 따른 헬릭스의 변위는 차이가 거의 없었지만, 하단 헬릭스가 상단 및 중단 헬릭스보다 변위가 적게 발생하는 경향을 보였다.

Table 6는 헬릭스의 피치가 다른 헬리컬 파일에 동일한 하중을 재하했을 경우, 각 헬릭스의 평균 변위량을 나타낸다. 이때, 재하하중은 세 가지 수치해석 케이스의 극한하중을 초과하지 않는 범위인 21kN을 적용하였다(Table 6). 헬릭스의 변위량이 크다는 것은 지지력이 낮거나 헬릭스가 말뚝 축(shaft)과 함께 거동하는 것을 의미하며, 변위량이 적다는 것은 지지력이 높거나, 위쪽에서의 힘이 발생했음을 의미한다. 분석결과, 헬릭스의 피치가 증가할수록 헬릭스의 침하가 적게 발생하였다. 또한 하단 헬릭스가 상단, 중단 헬릭스에 비해 특히 적게 침하된 것으로 보아, 위쪽에서의 힘이 발생되었을 것으로 판단된다.

4.4 헬릭스의 하중분담률

헬릭스 피치에 따른 각 헬릭스의 하중분담률을 분석하기 위해 헬릭스의 변위 이동량과 같이 하중 21kN을 적용하였다. 헬릭스의 하중분담률 산정식은 식 (1)과 같다. 여

기서, Load Distribution Ratio(LDR)는 각 헬릭스, 헬리컬 파일의 선단 및 주면이 받는 하중분담률이며, $Q_{each\ member}$ 는 각 부재가 받는 하중, Q_{total} 는 말뚝 두부에 작용하는 하중(21kN)이다.

$$LDR(\%) = (Q_{each\ member} / Q_{total}) \times 100 \quad (1)$$

헬릭스 피치에 따른 각 헬릭스의 하중분담률은 Fig. 11과 같다. 하중분담률 분석 결과, 하단 헬릭스가 가장 큰 하중을 분담하였고, 헬리컬 파일 축의 선단, 주면 및 중단 헬릭스가 비교적 적은 하중을 분담하였다. 헬릭스의 피치가 커질수록 하단 헬릭스의 하중 분담은 증가하였으며, 중단 헬릭스의 하중 분담은 감소하는 경향을 보였다. 또한 상단 헬릭스는 피치변화에 따라 하중분담률의 변화가 미미하였다. 이를 통해 헬리컬 파일의 최하단 헬릭스가 지지력 관점에서 가장 중요한 역할을 한다는 것을 파악하였다.

5. 결론

본 연구는 수치해석을 통해 헬리컬 파일 및 헬리컬 파일의 축에 부착한 헬릭스의 거동을 알아보았다. 이를 위해 헬리컬 파일의 실내모형실험을 진행하였고, 모델링은 실험결과 데이터로 바탕으로 실시되었다. 해석 변수는 헬릭스 피치로 설정하였으며, 이에 따른 헬리컬 파일의 극한하중, 헬릭스의 변위 그리고 헬릭스의 하중분담률 분석결과는 다음과 같다.

- (1) 수치해석으로 헬리컬 파일의 실내모형실험을 모사한 경우, 실내모형실험과 수치해석의 헬리컬 파일 하중 침하 곡선은 비슷한 경향을 보였다. 이를 통해, 수행한 수치해석의 신뢰성 및 정확도를 입증하였다고 판단된다.
- (2) 헬리컬 파일의 극한 하중을 4가지 극한 하중이론 (Davisson, 1973; O'Neill and Reese, 1999; Livneh and El Naggar, 2008; Elkasabgy and El Naggar, 2014)에 따라 산정한 결과, 헬릭스의 피치가 증가할수

록 헬리컬 파일의 극한하중 또한 증가하였다. 헬리컬 파일 하중-침하 곡선의 초기 선형구간은 헬릭스 피치에 따라 극한하중의 변화가 거의 없었지만, 전이구간부터는 헬릭스 피치의 증가에 따라 뚜렷하게 극한하중이 증가하였다.

- (3) 4가지 극한 하중이론 중 Davisson's criterion이 헬리컬 파일의 극한하중을 가장 보수적으로 산정하였으며, 극한하중을 가장 크게 산정한 Livneh and El Nagggar criterion과 비교하여 최대 7.5배의 차이가 나타났다. 4가지 이론에 따른 극한하중은 편차가 크기 때문에, Kulhawy(2004) 이론에 따라 헬리컬 파일 하중-침하 곡선의 전이구간에서 최종 선형구간으로의 전환점을 극한하중으로 재산정하였다.
- (4) 헬릭스 피치별 헬리컬 파일에 동일한 하중을 재하했을 때, 헬릭스의 변위는 헬릭스 피치 증가에 따라 감소하였다. 중단, 상단 헬릭스에 비해 하단에 위치한 헬릭스의 변위가 가장 적게 발생하였으며, 하단 헬릭스의 변위가 적게 발생하는 것은 중단, 중단 헬릭스에 비해 크게 휨이 발생하였기 때문이라고 판단된다.
- (5) 헬리컬 파일의 하중분담률을 알아본 결과, 하단 헬릭스가 가장 큰 하중을 분담하였으며, 헬리컬 파일 축의 선단, 주면 및 중단 헬릭스가 비교적 적은 하중을 분담하였다. 헬릭스 피치의 증가에 따라 하단 헬릭스의 하중분담률은 증가하였고, 중단 헬릭스의 하중분담률은 감소하였다. 또한 헬릭스 피치의 증가에 따라 헬리컬 파일의 선단, 주면 및 중단 헬릭스 하중분담률은 변화가 거의 없었다.
- (6) 헬릭스 피치가 길어짐에 따라 헬리컬 파일의 지지력이 증가하는 것을 확인하였지만, 최하단 헬릭스의 하중분담률과 휨 또한 증가하는 것을 확인하였다. 따라서, 헬리컬 파일의 헬릭스 피치는 최하단 헬릭스를 최우선적으로 고려하여 설계해야 된다고 판단된다.

Acknowledgement

This research was performed as a part of the oil sand plant R&D research (18IFIP-B089078-05), 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.

References

1. Abramov, O. V., Abramov, V. O., Myasnikov, S. K. and Mullaekae, M. S. (2009), "Extraction of Bitumen, Crude Oil and its Products from Tar Sand and Contaminated Sandy Soil under Effect of Ultrasound", *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol.16, No.3, pp.408-416.
2. Carol, M. and Roy, R. M. (2018), "Ultimate Load Bearing Capacity and Settlement of Triangular Screw Pile based on Desing Parameter", *International Research Journal of Engineering and Technology*, Vol.5, Issue.6, pp.475-477.
3. Cho, C. (2007), "Next Decade of Pile Foundation in Korea", *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol.55, No.1, pp.74-83. (in Korean)
4. Davisson, M. T. (1973). *High Capacity Piles. Proceeding of the Lecture Series*, Innovaions in Foundations Construction. Illinois, ASCE.
5. Elkasabgy, M. and El Nagggar, 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.
6. Helical Anchors, Inc., 2014, "Engineering Design Manual".
7. Japanese Industrial Standards (JIS), (2009), Test method for minimum and maximum densities of sands, A 1224, Japanese Industrial Standards, Tokyo, Japanese.
8. Korean Agency for Technology and Standards (KATS) (2002), The method for particle size distribution of soils, F 2302, Korean Agency for Technology and Standards, Chungcheongbuk-do, Korea.
9. Korean Agency for Technology and Standards (KATS) (2007), Testing method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions, F 2343, Korean Agency for Technology and Standards, Chungcheongbuk-do, Korea.
10. Korean Agency for Technology and Standards (KATS) (2016), Standard test method for density of soil particles, F 2308, Korean Agency for Technology and Standards, Chungcheongbuk-do, Korea.
11. 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.
12. 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.
13. 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 Geosynthetics Society*, Vol.13, No.4, pp.77-85. (in Korean)
14. Lee, J. (2016), "Construction Technology in Cold Regions", *Journal of Korean Architecture and Building Science*, Vol.60,

- No.5, pp.32-36. (in Korean)
15. Lee, J., Lee, K. and Kim, D. (2017), "Analysis of Axial Capacity and Constructability of Helical Pile with Inner Cone Penetration", *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol.16, No.4, pp.1-11. (in Korean)
 16. Livneh, B. and El Naggar, M. H. (2008), "Axial Testing and Numerical Modeling of Square Shaft Helical Piles under Compressive and Tensile loading", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.45, No.8, pp.1142-1156.
 17. O'Neill, M. W. and Reese, L. C. (1999), *Drilled Shaft: Construction, procedures and design methods*. FHWA-IF-99-025.
 18. 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 Oilsands by Patent Analysis", *Journal of Clean Technology*, Vol.15, No.3, pp. 210-223. (in Korean)
 19. Park, Y., Choi, W. C., Jeong, S. Y. and Lee, C. W (2007), "High Value-added Technology of Oil Sand", *Journal of Korean Chemical Engineering Research*, Vol.45, No.2, pp. 109-116. (in Korean)
 20. Rao, S. N., Prasad, Y. V. S. N. and Shetty, M. D. (1991), "The behaviour of model screw piles in cohesive soils", *Soils and Foundations*, Vol.31, No.2, pp.35-50.
 21. Sakr, M. (2009), "Performance of Helical Piles in Oil Sand", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.46, No.9, pp.1046-1061.
 22. Sakr, M. (2011), "Installation and Performance Characteristics of High Capacity Helical Piles in Cohesionless Soils", *The Journal of the Deep Foundations Institute*, Vol.5, No.1, pp. 39-57.
 23. SIMULIA (2014), *6.14 Documentation Collection*, ABAQUS/CAE User' Manual.