

## 모래지반에서 도넛형 석션기초의 관입 성능 평가를 위한 수치해석 기법에 대한 연구

박해용\* · 권오순\*\* · 한인숙\*\*\* · 강 현\*

### Study on Numerical Analysis for Penetration Performance Evaluation of Doughnut-Type Suction Foundation in Sand Layer

Haeyong Park\*, Osoon Kwon\*\*, Insuk Han\*\*\* and Hyoun Kang\*

*Key Words* : Doughnut type suction foundation (도넛형 석션기초), Penetration performance (관입 성능),  
Pore pressure (간극수압), Numerical analysis (수치해석), Model test (모형실험)

#### ABSTRACT

It is difficult to control differential settlement and long-term settlement on soft ground with the template used in the pre-filing method of offshore wind power. In this study, the template adopted a suction foundation with high utility on soft ground. To analyze the penetration performance of the doughnut-type suction foundation, step-by-step numerical analysis was applied by calculating the minimum suction pressure needed for ground penetration at that depth. Scale model tests were performed and compared with the numerical analysis results. The ratio of the inside diameter compared to the outside diameter is higher, and penetration by suction was more advantageous than push-in load penetration. The step-by-step numerical analysis method showed an error within 2 % compared to the model tests, so the numerical analysis method confirmed results that the penetration performance of the doughnut-type suction foundation is valid.

#### 1. 서론

석션기초는 초기에 석유 및 가스 채취를 위한 계류용 앵커로 활용되었다.[9][16] 최근에는 설치가 빠르고 공사비가 적게 드는 장점이 있어 해상풍력발전기의 하

부 기초구조물로서 많이 활용되고 있다[10][11][12]. 석션기초는 내부의 물을 외부로 배출하면서 발생하는 관입 저항력의 감소로 인하여 항타에 비해 작은 하중으로도 관입이 용이하다는 장점이 있다. 모래 지반에서는 석션으로 인해 발생하는 침투류의 흐름으로 기초 내부 토체의 유효응력 변화가 관입 저항력을 감소시키는 주요 원인으로 작용한다. 석션기초의 관입 성능 평가를 위해 모형실험이나 수치해석을 통해 많은 연구가 진행되어 왔다[5][6][13][15][16][17].

수치해석을 통한 석션기초 관입은 지반과 기초 벽면 접촉면에서 상대 변위가 모사되어야 하고 관입 깊이가 깊어질수록 주변 지반에 큰 변형을 유발하게 된다. 일반적인 유한요소 해석(Standard) 시, 요소망 왜

\* 한국해양과학기술원, 해양ICT융합연구센터  
\*\* 한국해양과학기술원, 해양ICT융합연구센터 (교신저자)  
\*\*\* 서울기술연구원, 연구기획실  
E-mail : oskwon@kiost.ac.kr  
DOI : <https://www.doi.org/10.33519/kwea.2022.13.4.007>  
Received : September 14, 2022, Revised : November 17, 2022  
Accepted : November 24, 2022

곡으로 인하여 많은 문제가 발생하게 된다. 이를 해결하기 위한 방법 중 하나로 Arbitrary Lagrangian Eulerian(ALE) 기법으로, 대변형으로 인한 요소망의 왜곡을 제어하는 기법이다[4][7]. ALE 기법 외에 Han et al.(2015)[8]의 연구에서는 석션에 의해 기초의 길이만큼 관입되는 전체과정을 연속적으로 해석하는 방법이 아닌, 관입 깊이별로 단계를 분할하여 별도의 독립적 해석을 수행하는 기법을 제안하였다. 석션으로 인한 간극수압 변화를 모사한 유효응력 해석으로, 특정 관입깊이가 발생 시 해당 깊이에서의 관입에 필요한 최소 석션압을 산정한 바 있다.

최근 국내에서는 신재생 에너지에 대한 관심 증가로 해상풍력발전 개발이 가속화되고 있으며, 2030년까지 해상풍력 12 GW 신규 공급을 달성하기 위해 다른 해안에 비해 비교적 낮은 수심인 서남 해안권에 대형 개발계획이 진행 중이다. 해상풍력 하부 구조물 중 자켓 구조물은 서남해 실증단지과 탐라 해상풍력 등 보편적으로 사용되고 있다. 국내에서는 자켓을 해저 지반에 거치한 후 파일을 시공하는 포스트파일링(post-piling) 방식을 사용하고 있으나, 해외에서는 Fig. 1과 같이 자켓 구조물이 육상에서 제작되는 동안 파일을 우선 시공하여 공사 기간 단축의 장점이 있는 프리파일링(pre-piling) 방식을 주로 사용하고 있다. 프리파일링 방식에서는 자켓이 설치되어야 할 정확한 위치에 파일을 시공하기 위해서 기본적으로 포켓과 프레임으로 구성된 템플리트를 수중 해저면에 거치한다. 여기서, 포켓은 포켓 내부로 파일을 유도하여 설치 위치에서 정밀 시공이 가능하게 하며, 자켓 형상에 따라 포켓은 3개 또는 4개를 적용하기도 한다. 연약지반에 설치되는 템플리트는 자중만으로 과도한 침하가 발생하므로 이를 예방하기 위해 포켓 하부에 머드매트를 설치하고 있다. 하지만, 서남해안과 같이 매우 연약한 지반의 경우에는 머드매트 만으로는 부등침하나 장기 침하를 제어하기가 쉽지 않다.

본 연구에서는 Fig. 2와 같이 연약지반에서 활용도가 높은 석션기초와 프리파일링 공법에서 사용하는 템플리트를 함께 적용하였으며, 도넛 형태의 석션기초를 제안하고 이에 대한 관입 성능을 분석하기 위해 Han et al.(2015)[8]의 단계별 수치해석 기법을 적용하여 해당 깊이에서의 지반관입에 필요한 최소 석션압을 산정하였다. 또한, 축소 모형실험을 수행하여 수치해석 결과와 비교하였다.

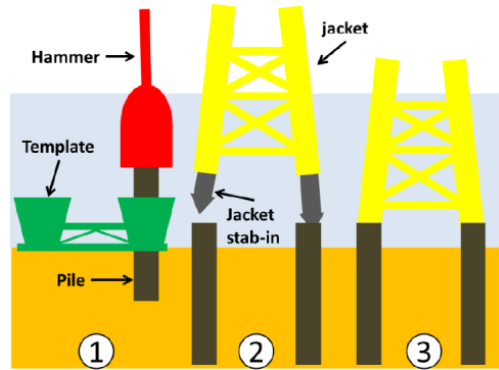


Fig. 1 Pre-piling principle (Benjamin B. 2014)

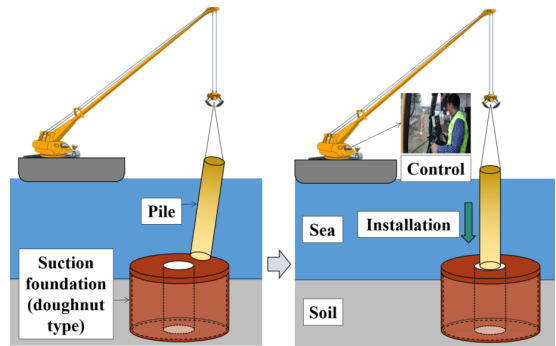


Fig. 2 Concept of suction foundation(doughnut type)

## 2. 수치해석 조건 및 모델링 검증

### 2.1 모델링 절차

석션압을 구현하고 해저 지반으로의 관입을 모사하기 위해 석션기초의 수치모델링 절차는 세 단계로 이루어진다. (1) 기초가 설치되는 지반의 지중 응력 조건 (geostatic condition)을 구현하는 단계로, 중력가속도를 적용하여 자중에 의한 지반 구속압으로 변위가 0으로 안정화되는 단계이다. (2) 기초의 자중만이 작용하는 단계로, 초기 관입깊이를 평가하는 것이다. 지반에 일정 깊이(초기 관입깊이)만큼 관입 된 후, 석션압을 가하는 방법을 적용하기 위해 기초 벽면이 초기 관입깊이만큼의 면적을 지반 모델에서 제거하였다. 기초의 벽면과 지반이 접촉하는 면에는 면대면(surface to surface) 조건을 이용하였다. 접촉면은 쿨롱 마찰(coulomb friction) 모델에 의해 미끄러짐이 결정된다. 접촉면의 마찰각은 사질토지반의 내부마찰각의 3분의

2 크기로 가정된다( $\tan 2/3\theta$ )(Achmus et al., 2009; Achmus et al., 2013; Park et al., 2016). 초기 관입깊이는 기초의 높이를 고려하여 1 m 단위로 설정하였고, 석션기초의 지반관입이 1 m부터 7 m까지 7가지 케이스에 대해서 각각 모델링하였다. (3) 세 번째 단계는 석션압에 의한 관입이 적용되는 단계로서, 기초 내외부의 간극수압을 임의로 조정하여 석션압에 의한 간극수압 변화를 모사하였다. 수심 20 m 조건에서, 기초 외부의 간극수압은 지반 표면에는 200 kPa인 정수압을 적용하였고, 기초 내부의 간극수압은 석션압에 의해 일정하게 감소시켜 주는 방법을 적용하였다. 이 방법을 통해 기초 내부로 투수가 발생하도록 모사하였다. 여기서 기초 내부의 수압은 50 kPa까지 감소하는 것으로 가정하였다. 기초 외부와 내부의 간극수압 차이만큼 상판에 수직하중이 작용하여 지반에 관입되도록 하였다(Fig. 3). 각 초기 관입깊이 별 해석을 통해 석션압이 증가하는 만큼 관입이 선형적으로 증가하다가 수렴하는 구간에서의 석션압(S)을 최소 석션압( $S_{min}$ )으로 정의하였다.

석션 관입과 비교하기 위해 초기 관입깊이별 수치해석 기법을 이용해 압입 관입 해석도 수행하였다. 지중 응력 상태 구현 단계와 기초의 자중 구현 단계는 석션 관입 방법과 동일하고, 세 번째 단계에서 기초 내부의 간극수압은 200 kPa으로 유지한 상태로 정적하중을 재하하였다. 관입이 시작되는 압을 최소 압입 하중으로 정의하였다.

## 2.2 해석조건

도넛형 석션기초 거동을 모사하기 위해 유한요소

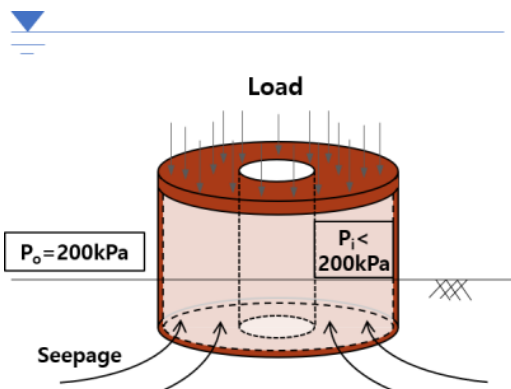


Fig. 3 Suction penetration mechanism

해석프로그램인 ABAQUS(ver. 6.12)를 사용하였다. 모델링은 해석 시간을 고려하여 Fig. 4와 같이 2차원 축대칭모델을 사용하였고, 석션압 비교를 위해 기존의 석션기초와 도넛형 석션기초, 두 가지 기초에 대한 해석을 수행하였다. Fig. 5와 같이 제원은 직경(D) 8 m, 높이(L) 8 m, 두께는 상판 80 cm, 외부벽면 40 cm이다. 도넛형의 경우, 내부 벽면이 별도로 존재하고 두께는 10 cm이며 상판의 면적은 외부 직경(D)의 면적에서 내부 직경( $D_{in}$ )의 면적이 제외된 것이다. 해저 지반은 단일 지층으로서 모래 지반을 적용하였고 수치해석에 적용된 범위는 경계면에서 석션기초 관입 거동에 영향을 미치지 않도록 높이와 폭을 파일 직경의 10D로 설정하였다.

유한요소 수치해석에 적용한 요소망은 석션기초가 관입되는 위치에서는 변위와 석션압의 변화를 정밀히 확인하기 위해 조밀하게 하였다. 파일의 요소 개수는 약 152~180개, 지반은 약 946~1,302개로 구성하였으며(Fig. 6), 모델링의 형상을 고려하여 연속적인 사각형 요소를 적용하였다. 해저 지반은 연속적이므로 외곽 측면은 x축 방향, 바닥 면은 y축 방향의 변위를 구속하였다.

석션기초의 경우 강제로 가정하였으며 지반은 Mohr-coulomb 항복이론 모델을 적용하여 탄소성 상태로 가정하였고, 물성치는 Table 1과 같다. 여기서, 강제로 적용할 경우 벽체 두께는 직경의 2% 이내로 적용하는 것이 일반적이지만[8] 모형실험과 비교하기 위해 벽체두께는 40 cm를 적용하였다. Table 1에서 적용한

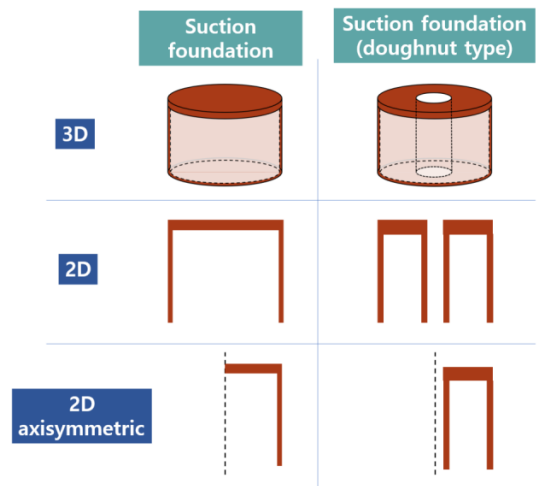
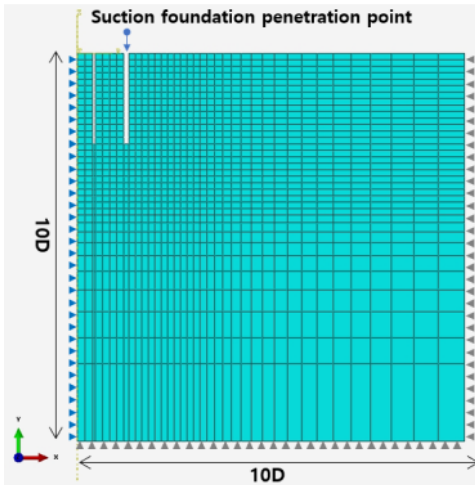
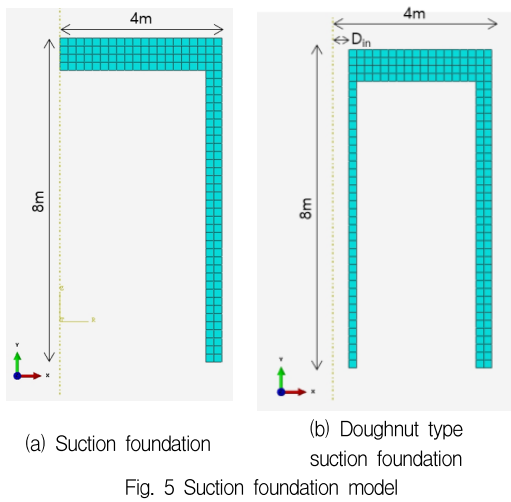


Fig. 4 Suction foundation type



석선 기초는 강재의 재료특성을 사용하였으나, 현실적으로 40 cm의 두께의 벽체는 콘크리트를 사용할 경우에 부합하며, 모래지반에서 강재와 콘크리트의 단위중량에 따른 즉시 침하량의 차이가 미미하여 강재를 적용한 결과를 그대로 사용하였다.

해석변수로는 초기 관입깊이 단계별 해석을 위해 1~7 m 범위에서 1 m 단위로 깊이를 결정하였고, 도넛형 석선기초에서 내부 직경( $D_{in}$ )의 크기에 따른 관입 기법에 대해 수치해석과 모형실험을 통해 검토하기 위해 외부 직경(D) 대비 0~0.6까지 0.2 단위로 설정하였다. 결정된 해석조건은 Table 2와 같으며 총 56 조건에서 수치해석을 수행하였다.

Table 1 Input parameter of numerical analysis

Values	Soil (Mohr-coulomb model)	Suction pile (Elastic model)
Dry density, $\gamma_{dry}$	1.425 t/m <sup>3</sup>	6.8 t/m <sup>3</sup>
Young modulus, E	8,640 kPa	210 GPa
Poisson's ratio, $\nu$	0.3	0.3
Friction angle, $\phi$	30	-
Undrained shear strength, $C_u$	1 kPa	-
Hydraulic conductivity, k	$6.4 \times 10^{-3}$ cm/sec	-
Void ratio, e	0.868	-

Table 2 Numerical analysis case

Case	A	B	C	D
$D_{in}/D$	0	0.2	0.4	0.6
Initial penetration depth	1 m~7 m			

### 2.3 수치해석 모델링 검증

단계별 석선기초 초기 관입깊이 수치해석을 통해 모사하기 위해 Han et al.(2015)[8]의 연구에서의 석선 기초와 동일한 형상인  $D_{in}/D=0$ (case A)에 대하여 Fig. 7과 같이 초기깊이(1 m~5 m)별 석선압 재하(loading) 시 관입깊이에 대해 도시하였다. Han et al.(2015)[8]의 연구에서는 직경과 높이가 6 m, 상판과 벽면의 두께가 0.12 m를 적용하여 기초의 체원과 지반의 물성치가 상이하므로, 석선압(S)은 지반의 유효 단위중량( $\gamma'$ )과 파일의 직경(D)으로, 지반의 변위는 파일의 직경으로 정규화하였다. 초기 관입깊이가 작을수록 낮은 석선압에서 관입이 잘되는 것으로 나타나 기존 연구와 유사한 경향을 보였으며, 각 조건 별 오차범위는 3 % 이내인 것으로 나타나 관입깊이 별 단계적 수치해석 방법이 타당한 것으로 확인하였다.

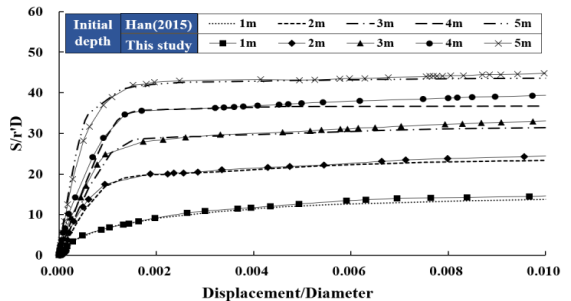


Fig. 7 Comparison between this FE results and Han et al.(2015) FE results

### 3. 수치해석 결과 및 분석

#### 3.1 도넛형 석션기초 성능 분석

도넛형 석션기초의 내부 직경( $D_{in}$ )에 따른 최소 석션압을 확인하기 위해 초기 관입깊이가 7 m인 조건에서 석션압을 0에서부터 점진적으로 증가시키면서 발생한 지반의 수직 변위 관계를 Fig. 8에 나타내었다. 내부 직경이 작을수록 낮은 석션압에서 점진적으로 관입이 잘 되는 것을 볼 수 있으며, 반대로 내부 직경이 클수록 관입되기 위한 석션압은 증가함을 확인하였다. 이는 Tran and Randolph (2008)[18]의 연구결과에 따르면 동일한 석션압이 작용하면 상판의 면적이 넓을수록 압력-힘의 변환에 따라 기초에 작용하는 수직하중이 크게 작용하게 되므로,  $D_{in}/D=0$ 의 경우 도넛형에 비해 작은 석션압으로도 관입이 잘 되는 것을 알 수 있다.

수치해석을 통해, 내부 직경( $D_{in}$ )에 따른 초기 관입깊이 단계별 최소 석션압 산정 결과를 Fig. 9에 도시하였다. 최소 석션압은 내부 직경이 클수록 증가하는 것으로 나타났다. Table 3은 내부 직경의 크기와 최소 관입깊이 별로 최소 석션압 수치를 나타내었는데, 초기 관입깊이 1 m의 경우 2~7 m의 최소 석션압과 큰 차이를 보였다. 초기 관입깊이 1 m 결과를 제외하고,  $D_{in}/D=0$ 에서 각 초기 관입깊이 2~7 m에서의 평균 최소 석션압을 계산하였다. 동일한 방식으로  $D_{in}/D=0.2\sim 0.6$ 에서도 평균값을 산정하여  $D_{in}/D=0$  대비 도넛형 석션기초( $D_{in}/D=0.2\sim 0.6$ )의 평균 최소 석션압을 Fig. 10에 도시하였으며, 증분율을 확인하기 위해 선형으로 추세선을 나타내었다. 여기서,  $S_{min,D_{in}}$ 은 초기 관

입깊이(2~7 m) 별 도넛형 석션기초의 내부 직경에 따른 최소 석션압의 평균값을 의미하며,  $S_{min,D}$ 는  $D_{in}/D=0$ 에서의 초기 관입깊이(2~7 m) 별 최소 석션압의 평균값을 의미한다. 내부 직경이 외부 직경( $D$ ) 대비 0.2씩 증가할수록 62.5 %의 최소 석션압이 증가하는 것으로 나타나, Tran and Randolph(2008)[18]의 연구에서 석션기초의 직경이 증가함에 따라 관입 저항력이 증가한다는 결과와 같이 도넛형 석션기초에서도 외부 직경은 동일하지만 내부 직경의 크기에 따라 선단면적과 주변에 작용되는 저항력이 작용하였음을 알 수 있다. 내부 직경이 클수록 최소 관입깊이가 깊어질수록 최소 석션압은 증가하였지만, 석션에 의한 지반 관입은 잘 되는 것으로 나타나 도넛 형태의 기초에 석션 관입이 가능함을 확인하였다.

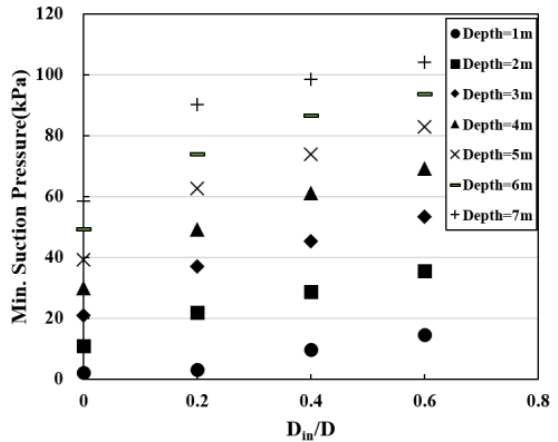


Fig. 9 Min. suction pressure vs  $D_{in}/D$

Table 3. Min. suction pressure comparison

Depth (m)	$D_{in}/D$			
	0	0.2	0.4	0.6
1	2.2 kPa	3.2 kPa	9.7 kPa	14.6 kPa
2	11 kPa	21.9 kPa	28.7 kPa	35.6 kPa
3	20.9 kPa	37.0 kPa	45.4 kPa	53.4 kPa
4	29.9 kPa	49.3 kPa	61.2 kPa	69.3 kPa
5	39.2 kPa	62.6 kPa	73.9 kPa	83.0 kPa
6	49.2 kPa	73.9 kPa	86.5 kPa	93.6 kPa
7	58.7 kPa	90.2 kPa	98.6 kPa	104.1 kPa

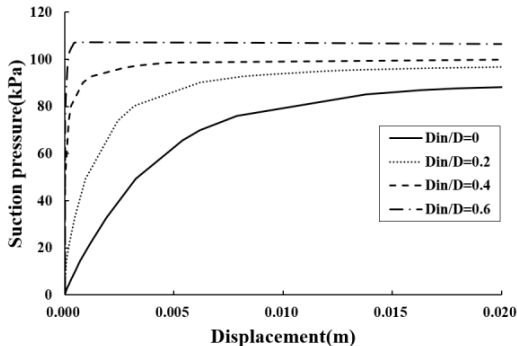


Fig. 8 Suction penetration at 7 m initial penetration depth of suction foundation

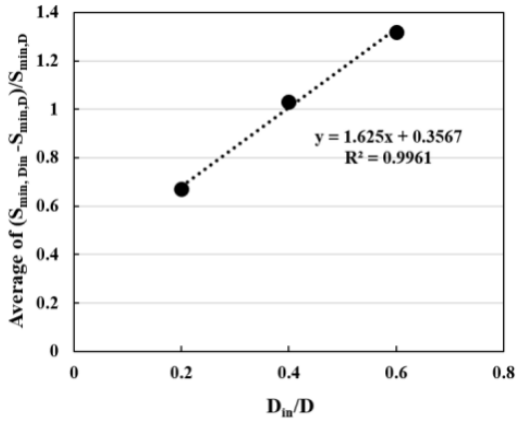


Fig. 10 Variation of average minimum suction pressure ratio based on  $D_{in}/D=0$  according to  $D_{in}/D$

$D_{in}/D=0.6$ 의 경우  $D_{in}/D=0.2, 0.4$ 에 비해 지반에 관입되기 위한 최소 석선압이 큰 것으로 나타났는데, 석선압이 커지게 되면 모래지반에서는 보일링이 발생할 수 있다. 이를 검토하기 위해  $D_{in}/D=0.6$ 의 경우에 대해 수치해석에서 구해진 값을 바탕으로 초기 관입깊이별 상한 석선압을 산정하였고, Fig. 11에 최소 석선압과 상한 석선압을 나타내었다.

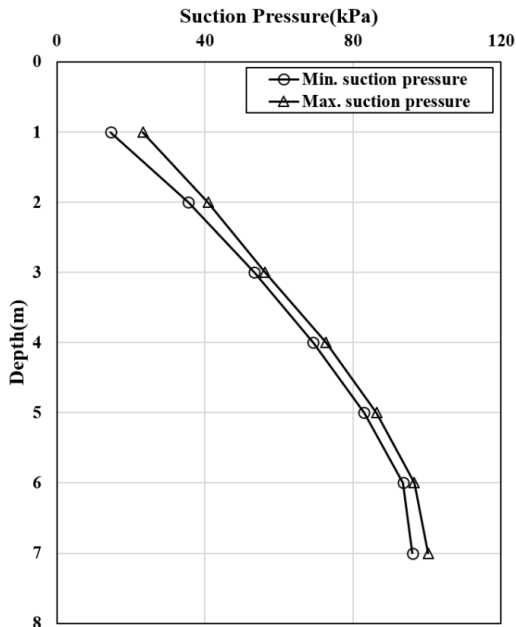
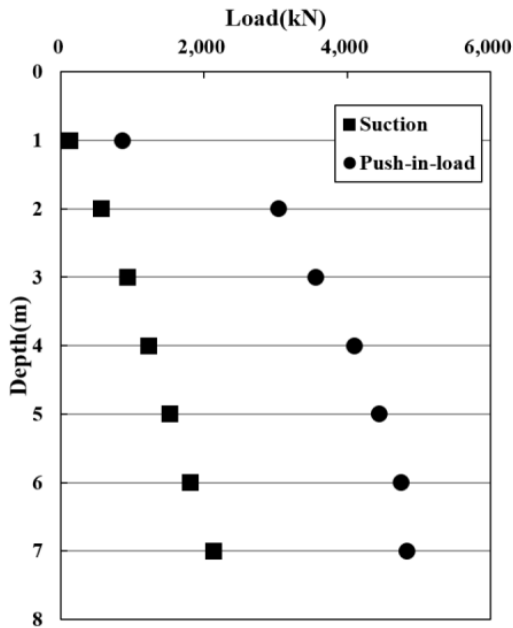


Fig. 11 Maximum suction pressure vs minimum suction pressure based on  $D_{in}/D=0.6$

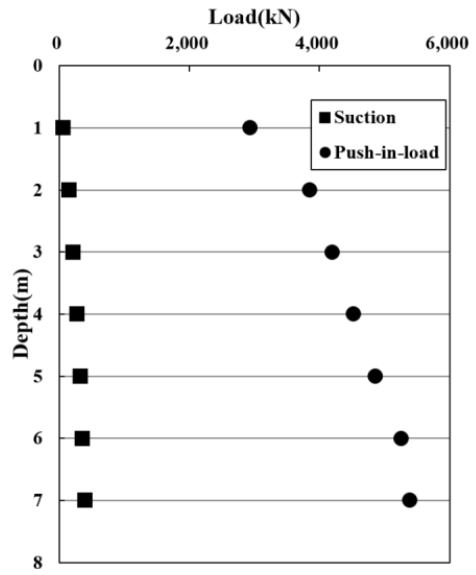
### 3.2 도넛형 석선기초 석선 및 압입 거동 비교

도넛형 석선기초의 내부 직경( $D_{in}$ )이 클수록 최소 석선압은 증가하는 것으로 나타났는데, 압입에 의해서도 관입이 동일한 경향인지 파악하기 위해 Fig. 12에 내부 직경에 따른 석선 관입에서 최소 석선압에 단면적을 곱하여 최소 석선 하중과 압입 관입에서의 최소 압입 하중을 나타내었는데, 최소 석선 하중이 압입 관입에 필요한 하중보다 작은 것을 확인할 수 있다. 이는 Han et al.(2015)[8]의 연구에서와 같이 석선에 의해 석선기초 내에 간극수압 감소로 인하여 배출되는 간극수에 의한 침투현상이 유효응력 감소에 의한 영향임을 간접적으로 파악한 바 있다. Fig. 13은 내부/외부 직경비( $D_{in}/D$ )가 0.2이고 초기 관입깊이가 7 m에서의 간극수압 분포도와 수치를 나타낸 것으로써 석선에 의한 기초 내부 간극수압이 낮아짐을 확인할 수 있다.

도넛형의 경우 내부/외부 직경비가 커질수록 최소 석선 하중은 최소 석선압과는 달리 작아지는 것을 확인할 수 있는데 이는 면적과 비례하기 때문이다. 이와는 반대로 최소 압입 하중은 내부 직경이 커질수록 증가하는 것으로 나타나, 관입에 필요한 최소 석선 하중은 압입 관입 하중에 비해  $D_{in}/D=0.2$ 의 경우 29 %,  $D_{in}/D=0.4$ 의 경우 13 %,  $D_{in}/D=0.6$ 의 경우 5 % 수준이었다. Han et al.(2015)[8]에서는  $D_{in}/D=0$  석선기초에서 석선 관입에 필요한 최소 석선 하중이 압입 관입에 필요한 최소 압입 하중의 50 %인 점과 비교할 때, 내부 직경이 커질수록 압입 관입에 비해 상대적으로 최소 석선하중이 감소함을 확인할 수 있다. 즉, 도넛형 석선기초의 경우 내부 직경이 클수록 압입 관입에서는 관입저항력이 급격히 증가하여 관입에 필요한 하중이 커지는 반면에, 석선 관입은 석선으로 인해 발생하는 침투류로 인하여 토체의 유효응력의 변화로 인한 관입 저항력을 감소시키므로 작은 관입저항력이 발생되어 압입 관입에 비해 상대적으로 작은 하중에서 관입이 가능함을 확인하였다.

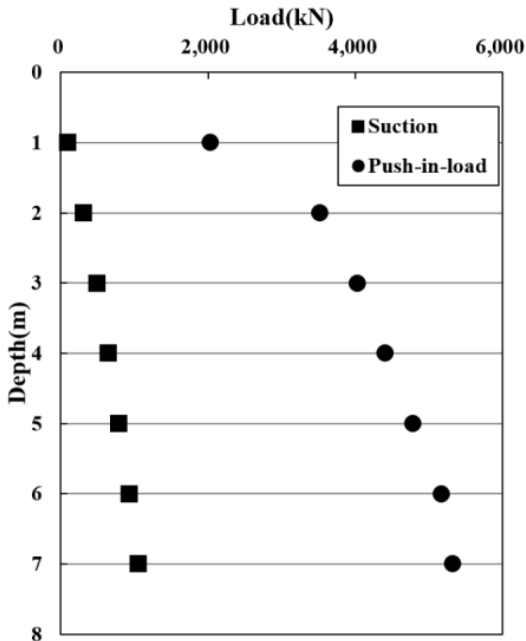


(a)  $D_n/D=0.2$



(c)  $D_n/D=0.6$

Fig. 12 Comparison between minimum suction pressure (penetration load) and push-in load



(b)  $D_n/D=0.4$

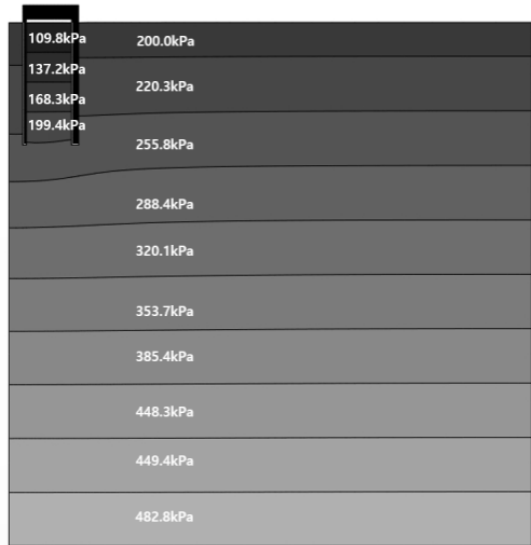


Fig. 13 Pore pressure variation at  $D_n/D=0.2$  (initial depth=7 m)

#### 4. 모형실험과 수치해석 비교

##### 4.1 모형실험 조건 및 방법

도넛형 식선기초의 수치해석 결과를 검증하기 위해

내부/외부 직경비가  $D_{in}/D=0.2$ 인 경우에 대하여 모형실험을 수행하였다. 기초의 직경, 높이, 두께에 대해서는 수치해석에 적용된 직경 8 m, 높이 8 m을 고려하여 1/80 크기로 설정하였으며, 상세 제원은 Table 4와 같다. 기초의 재질은 석션 관입 시 파일 내부의 상태를 육안으로 확인하기 위해 투명 재질의 아크릴로 결정하였다. Tran and Randolph(2008)[18] 연구 결과에서는 파일 관입깊이 대비 토조 직경이 2 이상 되도록 하여 경계면이 석션기초 관입 거동에 영향을 미치지 않는다고 보고한 바 있다. 이를 반영하여 토조는 한변을 80 cm로 제작하여 관입깊이 대비 토조 직경비가 8으로써 석션 관입 시 경계면에 영향은 없는 것으로 간주하였다.

석션 관입 축소 모형실험은 파일 상판에 설치된 호스를 펌프와 연결하여 파일 내부의 물을 외부로 배수시켜 석선에 의해 지반에 관입되도록 하였다. 석션압을 확인하기 위해 파일 내·외부의 수압차를 확인할 수 있는 차압계와 지반 관입량을 측정하기 위해 LVDT를 설치하였다(Fig. 14).

모형실험에서 지반조성은 모래(주문진 표준사)를 사용하였으며, 물성치는 수치해석에 적용된 수치와 동일하다. 석션기초의 길이와 관입에 영향을 받지 않도록 토조에 40cm 높이까지 상대밀도 25% 수준으로 균질하게 조성하였다. 본 조건에서의 지반 조건에서 도넛형 석션기초가 관입 되기 위한 유량을 0.5~1L/min 범

위로 설정하였고 예비 실험을 수행하여 최종적으로 관입 되기 위한 최소유량은 0.81 L/min으로 결정하였다. 초기 관입깊이 결정은 0~2 cm까지 0.5 cm 단위로 예비 실험을 수행한 결과 초기 관입이 1.5 cm 이내에서는 관입 도중 기초 벽면 부에서 보일링이 발생하여 최종 관입이 불가능하였으므로, 2 cm로 결정하여 모형실험을 수행하였다.

4.2 모형실험과 수치해석 결과 비교

모형실험의 신뢰도를 확보하기 위해 동일한 조건에서 3회 실험을 수행하여 도출된 관입깊이 비(L/D)와 석선에 의해 관입된 최소 석션 하중에 대한 결과와 동일한 제원에서의 수치해석 결과를 Fig. 14에 도시하였다. 여기서, 관입깊이 비(L/D)는 기초 관입깊이(L)에 직경(D)으로 무차원화 한 것이다. 수치해석 결과 데이터는 각 단계에서 초기 관입깊이에서 관입이 시작되는 최소 석션압에 대해 면적을 곱하여 하중으로 변환한 수치이다. 모형실험과 수치해석 결과 석션기초가 지반에 관입 되기 위한 하중 오차는 약 2 % 이내로 유사한 경향을 나타내고 있어 본 연구에서 수행한 도넛형 석션기초 단계별 수치해석 방법이 유효하다는 것을 확인할 수 있다.

Table 4. Design of model test using suction foundation

Diameter, D(cm)	Inside diameter, $D_{in}$ (cm)	Height (cm)	Thickness		
			Plate, $t_1$ (cm)	Outside, $t_2$ (cm)	Inside, $t_3$ (cm)
10	2	10	1	0.5	0.3

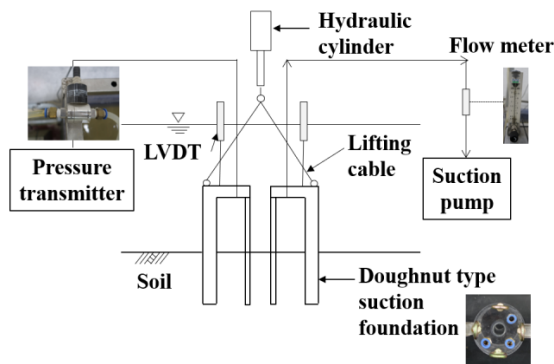


Fig. 14 Schematic diagram model test

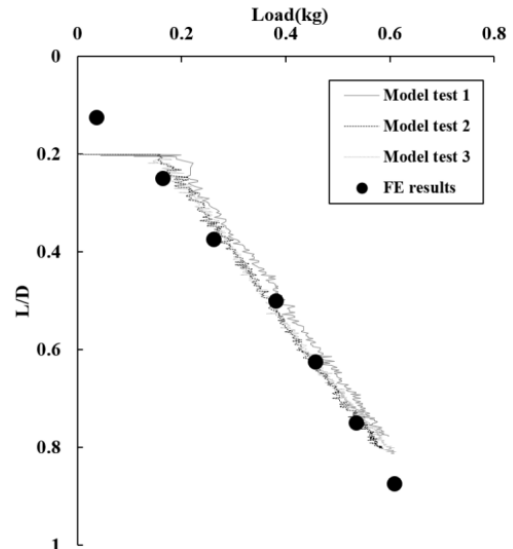


Fig. 15 Comparison with FEM analysis and model test at  $D_{in}/D=0.2$  (Penetration depth variation with suction pressure)



## 5. 결론

도넛형 석션기초에 대해 초기 관입깊이에 따른 단계별 수치해석 기법을 적용하여 내부 직경의 크기에 따른 관입 성능을 분석하고 수치해석과 축소 모형실험을 통해 도출한 최소 석션압을 비교한 결론은 다음과 같다.

- (1) 기초 내부/외부 직경비( $D_{in}/D$ )가 클수록 최소 석션압은 증가하였으며, 초기 관입깊이가 깊어질수록 최소 석션압이 증가하였다.
- (2) 도넛형 석션기초는 관입에 필요한 최소 석션 하중은 최소 압입 하중에 비해  $D_{in}/D=0.2$ 의 경우 29 %,  $D_{in}/D=0.4$ 의 경우 13 %,  $D_{in}/D=0.6$ 의 경우 5 % 수준으로, 내부 직경이 클수록 압입 관입에서는 관입저항력이 급격히 증가하여 관입에 필요한 하중이 커지는 반면에, 석션 관입은 석션으로 인해 발생하는 침투류로 인하여 토체의 유효응력의 변화로 인한 관입 저항력을 감소시키므로 작은 관입저항력이 발생되어 압입 관입에 비해 상대적으로 작은 하중에서 관입이 가능함을 확인하였다.
- (3) 단계별 수치해석 방법을 검증하기 위해 축소모형 실험을 수행하여 비교한 결과 최소 석션 하중은 2 % 내의 오차를 보여 도넛형 석션기초의 관입 거동 수치해석 기법의 유효함을 확인하였다.

## 후기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No.20213030020110)

## 참고문헌

- [1] Achmus, M., Akdag, C.T. and Thieken, K., 2013, "Load-bearing behavior of suction bucket foundations in sand", Applied Ocean Research, Vol. 43, pp.157~165.
- [2] 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.

- [3] Benjamin, B., 2014, "Analysis of the installation of a series of piles for offshore wind turbine foundations", Master's thesis, University of rostock, pp. 27~31.
- [4] 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.
- [5] Chen, F., Lian, J., Wang, H., Liu, F., Wang, H., and Zhao, Y., 2016, "Large-scale experimental investigation of the installation of suction caissons in silt sand", Appl. Ocean Res. 60, pp. 109~120.
- [6] Erbrich, C.T. and Tjelta, T.I., 1999, "Installation of bucket foundations and suction caissons in sand", geotechnical performance In: Offshore Technology Conference, Houston, TX, Paper OTC 10990, p. 11.
- [7] 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.
- [8] Han, I.S., Kwon, O., and Kim, K.S., 2015, "Application of numerical step by step analysis for suction foundation installation behavior evaluation in sand", Journal of Korean Society of Coastal Disaster Prevention, Vol. 2, No. 3, pp. 113~118(in Korean).
- [9] Hogervorst, J. R., 1980, "Field trials with large diameter suction piles", Proc. Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, pp. OTC 3817.
- [10] Houlsby, G.T., Ibsen, L.B., and Byrne, B.W., 2005, "Suction caissons for wind turbines. In: Frontiers in Offshore Geotechnics", ISFOG, Perth, WA, Australia, pp. 75~93.
- [11] Ibsen, L. B., 2019, "Mono-bucket for deutsche bucht, results of 18 years research", danish geotechnical society seminar, Accessed: 2019.10.23.

- [12] Le, C.H., Ding, H.Y., and Zhang, P.Y., 2018, "Prototype testing for the partial removal and re-penetration of the mooring dolphin platform with multi-bucket foundations", *Mar. Struct.* 59, pp. 80~93(in Korean).
- [13] Mehravar, M., Harireche, O., Faramarzi, A., and Alani, A.M., 2017, "Modelling the variation of suction pressure during caisson installation in sand using FLAC3D", *Ships Offshore Struct.* 12, pp. 893~899.
- [14] Park, J.S., Park, D. and Yoo, J.K., 2016, "Vertical bearing capacity of bucket foundations in sand", *Ocean Engineering*, Vol. 121, No. 1, pp. 453~461.
- [15] Senders, M. and Randolph, M.F., 2009, "CPT-based method for the installation of suction caissons in sand", *J. Geotech. Geo environ Eng. ASCE* pp. 14~25.
- [16] Senpere, D. and Auvergne, G. A., 1982, "Suction anchor piles: a proven alternative to driving or drilling", *Proc. Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, USA, Paper OTC 4206.
- [17] Tjeta, T.I., Guttormsen, T.R., and Hermstad, J., 1986, "Large-scale penetration test at a deepwater site. In", *Offshore Technology Conference*, Houston, TX, Paper OTC 5103, pp. 12.
- [18] Tran, M. N. and Randolph, M. F., 2008, "Variation of suction pressure during caisson installation in sand", *Geotechnique*, Vol. 58, No. 1, pp. 1~11.