

Numerical Analysis of Peak Uplift Resistance of Buried Pipeline in Sand and Soft Clay

Dae-Hean Kwon* and Young-Kyo Seo*

*Ocean Engineering Department, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea

연약 점토와 사질토에 묻힌 파이프라인의 극한 인발저항력 산정

권대현* · 서영교*

*한국해양대학교 해양공학과

KEY WORDS: Buried pipelines 묻힌 파이프라인, Peak uplift resistance 극한 인발저항력, Embedment ratio 근입비, Geogrid 지오그리드, Numerical modeling 수치해석, Finite element method 유한 요소법

ABSTRACT: Subsea pipelines are one of the most important structures used to transport fluids such as oil and natural gas in offshore environments. The uplift behavior of the pipeline caused by earthquakes and buoyancy can result in a pipeline failure. The objective of this study is to examine the peak uplift resistance through parametric studies with numerical modeling by PLAXIS 3D Tunnel. The effects of the embedment ratio and pipe diameter were first examined for uplift resistance in sand and soft clay conditions. Then the length of geogrid layers and the number of geogrid layers were examined in terms of ability to resist uplift behavior.

1. 서 론

해저파이프라인은 원유, 천연가스, 폐수 등 유체를 운송하는 중요한 해저 구조물이다. 해저파이프라인은 부력, 지진 등 자연 현상으로 인하여 인발거동이 발생하며, 이는 파이프라인의 주요 파괴원인이다. 이러한 인발작용에 의한 파괴현상을 규명하기 위하여 사질토와 점토에 매설된 파이프의 극한 인발저항력 (Peak uplift resistance, PUR)에 관한 많은 연구가 진행 되고 있다. 사질토 지반에 묻힌 파이프 라인과 인발거동을 보강하기 위한 지오그리드 사용 유·무에 따른 극한 인발저항력을 실내모형실험을 통해 산정 하였으며(Armaghani et al., 2015), 또한 사질토 지반에 근입된 파이프의 직경, 표면 거칠기 그리고 근입비에 따른 인발거동 평가를 위하여 실내모형실험이 이루어졌다(Bang et al., 2003). 점토 지반에 근입된 스트립앵커의 인장 파괴 영향 범위 내에 위치한 지반의 파괴 현상과 흡입간극수압 (Suction pore water pressure) 발생으로 인한 극한 인발저항력 산정이 수치해석을 통해 수행되었다(Thorne et al., 2004). 그 외 국·내외 스트립앵커와 파이프의 인발거동에 관한 연구가 많이 진행되었다(Bae et al., 2008; Murray and James, 1987). 스트립앵

커는 지반 보강에 사용되는 반면 파이프는 유체를 운송할 때 사용되지만 매립되어 있는 스트립앵커와 파이프라인의 인발거동이 매우 유사하다고 보고하였다(Dickin, 1994). 이들의 연구는 사질토와 점토에 매립되어있는 파이프라인의 인발저항력 산정에 초점을 두고 있다. 그러나 실제 육상(Onshore)과 해상(Offshore) 현장에서는 지오그리드를 통해 지반을 보강한다. 지오그리드란 지반 내 묻혀있는 파이프 및 구조물 등의 주변 지반 인장파괴를 보강하기 위한 재료로써 지반공학 분야에서 많이 활용되고 있다.

본 연구는 실내 모형실험에 앞서 파이프 거동해석이 아닌 파이프 주변에 위치한 지반의 거동 즉, 인발저항력 경향성 파악 목적을 두고 사질토(Loose and dense sand)와 연약점토(Soft clay)에 묻힌 파이프의 극한 인발저항력을 3차원 유한요소해석 프로그램인 PLAXIS 3D Tunnel(Brinkgreve and Broere, 2001)을 이용하여 산정하였다. 묻힌 파이프는 프로그램에서 제공되는 터널(Tunnel)요소를 활용하여 라이닝(Lining)이 없고 단위중량이 적은 강체 파이프로 모사하여 근입비(H/D), 파이프 직경 (D), 지오그리드 길이(L) 및 보강 층수(Layer)를 변수로 정의한 후 육상과 해상 상태에서의 극한 인발저항력을 산정하였다.

Received 14 February 2017, revised 22 June 2017, accepted 22 June 2017

Corresponding author Young-Kyo Seo: +82-51-410-4683 yseo@kmou.ac.kr

© 2017, The Korean Society of Ocean Engineers

This is an open access article distributed under the terms of the creative commons attribution non-commercial license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

2. 기존 이론

극한 인발저항력은 앵커 및 파이프 표면의 인장영향 범위 내에 위치한 지반에서 파괴가 발생할 때의 저항력을 말한다. 이러한 인발저항력을 산정하기 위한 이론들은 Meyerhof 이론(Meyerhof, 1975), Das 이론(Das, 1978) 등이 있으며, 이들은 실내 모형실험과 현장실험을 통하여 사각앵커, 원형앵커 그리고 스트립앵커의 극한 인발력에 관한 다양한 식들을 제안하였다. 그 중 본 연구에서는 파이프의 근입깊이 산정을 위해 Meyerhof(1975)의 파괴계수(F_c)와 한계 근입비의 상관관계에 관한 이론을 참고하여 구하였다.

지반 파괴계수(F_c)는 근입된 앵커(원형, 사각형, 스트립)가 인발로 인하여 파괴 시 근입깊이(H)와 근입된 앵커 등의 직경(D)의 최대비를 말하며, 식 (1)은 스트립앵커에 적용되는 파괴계수이며, 식 (2)는 원형앵커와 사각형앵커에 적용되는 파괴계수이다.

$$F_c = 0.6\left(\frac{H}{D}\right) \leq 8 \tag{1}$$

$$F_c = 1.2\left(\frac{H}{D}\right) \leq 9 \tag{2}$$

한계 근입비(F_{cr})는 파괴계수 식 (1)과 식 (2)를 통하여 구할 수 있으며, 식 (3)과 식 (4)처럼 나타낼 수 있다. 여기서 식 (3)은 스트립앵커의 한계 근입비를 나타내고, 식 (4)는 원형앵커와 사각형앵커의 한계 근입비를 나타낸다. Fig. 1은 한계 근입비와 파괴계수의 상관관계 그래프를 나타낸 것이다.

$$F_{cr} = \left(\frac{H}{D}\right)_{cr} = \frac{8}{0.6} \approx 13.5 \tag{3}$$

$$F_{cr} = \left(\frac{H}{D}\right)_{cr} = \frac{9}{1.2} = 7.5 \tag{4}$$

본 연구는 스트립앵커의 한계 근입비를 통해 파이프 근입깊이를 산정하였다. 근입깊이 산정 시 통상적으로 해양 구조물에 적용되는 안전율 2~3을 감안하여 본 논문에 적용하였다.

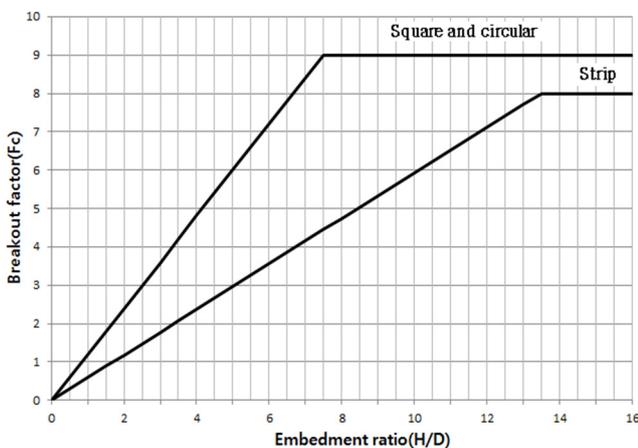


Fig. 1 Variation of F_c with H/D

3. 수치해석조건

3.1 수치모형

해석에 사용된 지반의 모형은 $600\text{mm} \times 200\text{mm} \times 400\text{mm}$ (가로×세로×높이)의 크기를 적용하였다. 파이프는 직경 26mm, 36mm, 46mm의 세 가지이며 길이는 150mm로 통일하였다. 근입깊이는 스트립앵커의 한계근입비에 각 파이프의 직경을 적용하여 최대 근입깊이를 산정하였다. 최대 근입깊이 산정 후 안전율 3과 규칙성을 고려하여 100mm, 150mm, 200mm 총 세 가지의 근입깊이 조건으로 해석하였다. 지오그리드 길이는 파이프 직경에 비례하여 $5D$, $10D$ 의 두 가지로 모사하였고, 폭은 200mm로 고정하였다. 지오그리드 보강 층수는 1층과 2층으로 보강하여 최대 인발저항력을 산정하였다. 지오그리드 2층 보강 시 지오그리드 간의 간격은 파이프 직경에 비례하여 $1.5D$ 로 고정하였으며, 수치모형의 모식도는 Fig. 2와 같다.

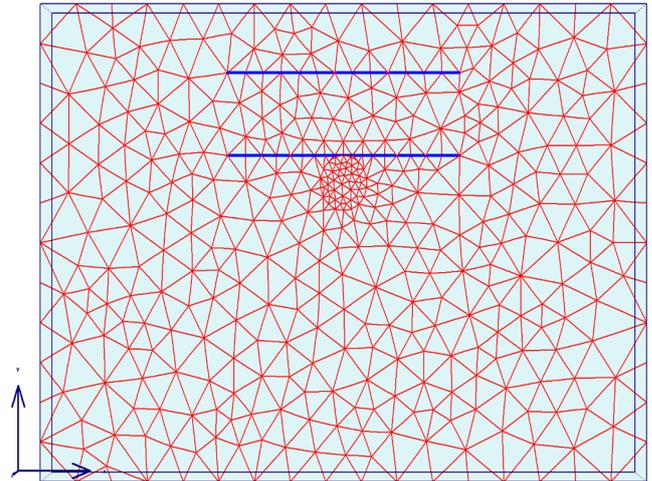


Fig. 2 Modeling of pipeline and geogrid in PLAXIS 3D Tunnel

3.2 육상 및 해상 상태 구현

지반의 현상상태를 모사하기 위해 육상 상태 일 때 사질토와 연약점토에 습윤 단위중량(γ)를 적용하였으며, 해상 상태 일 때는 포화단위중량(γ_{sat})를 적용하였다. 여기서 γ 는 흙을 건조시키지 않은 상태에서의 단위중량을 의미하고, γ_{sat} 는 흙이 포화(포화도 100%)되어있는 경우 즉, 간극이 완전히 물로 채워져 있는 상태의 단위중량을 의미한다. 수면의 높이는 파이프의 근입깊이에 비례하여 $3H$ 으로 고정시켜 해석하였다.

3.3 해석재료

지반의 거동을 모사하기 위해 토질 해석에 주로 사용되는 Mohr-Columb 구성방정식을 사용하였다. 사질토의 물성치는 Niroumand et al.(2013)의 연구를 참고하여 사용하였으며, 연약점토 물성치 중 비배수 전단강도는 실내모형시험에 주로 사용되는 카올리나이트를 함수비 40%로 조성 후 실내 베인실험(Vane test)을 통해 구한 값을 사용하였다. 본 수치해석에 사용된 흙의 물성치는 Table 1과 같다.

Table 1 Material properties of sand and clay

Parameter	Unit	Loose sand	Dense sand	Soft clay
Unit weight [γ]	kN/m ³	19	21	16.48
Unit weight [γ_{sat}]	kN/m ³	20	22	17.48
Friction angle [ϕ]	Degree	32	40	1
Cohesion [c]	kN/m ²	1	1	5.9
Poisson ratio [ν]	-	0.3	0.3	0.3
Modulus of elasticity [E]	kN/m ²	20,000	35,000	3,500

Table 2 Material properties of pipe and geogrid

Parameter	Unit	Pipe	Geogrid
Unit weight [γ]	kN/m ³	78	1
Poisson ratio [ν]	-	0.2	0.3
Tensile strength [T]	kN/m	-	60
Modulus of elasticity [E]	kN/m ²	2.6E7	-
Apparent opening size	mm ²	-	21

수치해석에 사용한 파이프와 지오그리드의 물성치는 Armaghani et al.(2015)의 논문을 참조하였다. PLAXIS 3D Tunnel에서는 본 연구에 적용된 지오그리드와 다른 재료를 제공하기에 Babu and Singh(2009) 연구를 참고하여 판 요소(Plate element)로 구현하였다. 그리고 지반의 인발저항력과 변형에 주목적을 두었기에 Tunnel요소를 통해 파이프는 라이닝이 없고 단위중량이 적은 강체로 구현하였다. 본 수치해석에 사용된 물성치는 Table 2와 같다.

3.4 해석조건

지반의 경계조건은 수평방향($U_x = U_z = 0$) 그리고 연직방향($U_y \neq 0$)로 적용하였다. Fig. 3과 같이 지반과 파이프 및 지오그리드의 경계조건은 접촉면(Interface)거동 조건을 적용하였다. 격자 생성은 전체적으로 조밀격자(Fine mesh)를 사용하였으며, 실제 거동이 많이 발생하는 파이프와 지오그리드에는 격자를 추가 생성하였다. 그리고 파이프와 지오그리드의 위치를 설정하기 위하여 Fig. 4에 보인 바와 같이 조각(Slice) 3개를 생성하였으며, 토압계수(K_0)는 $K_0 = 1 - \sin\phi$ 로 사용하였다. 여기서 ϕ 는 흙의 내부 마찰각을 의미한다.

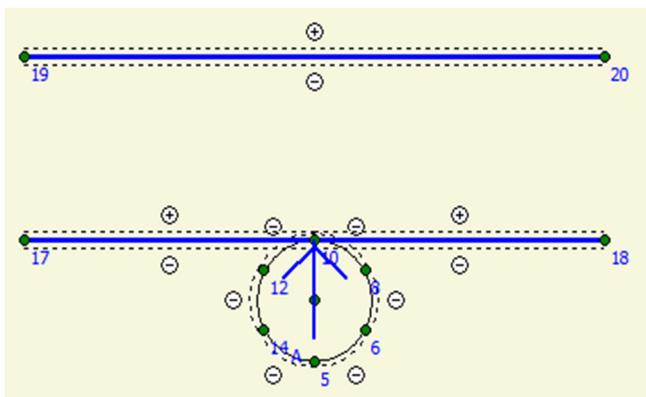


Fig. 3 Pipe and geogrid interface condition

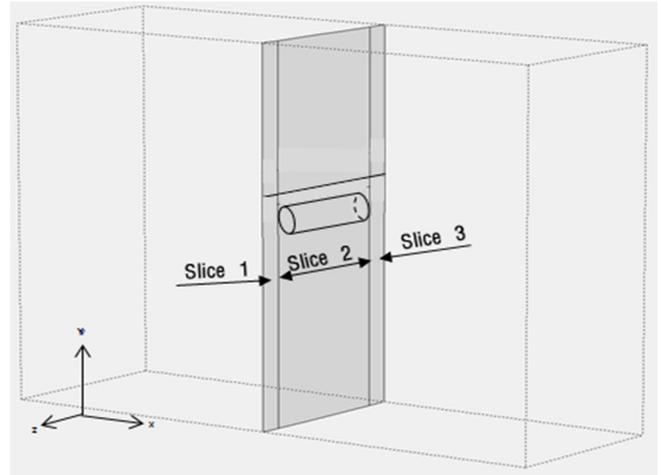


Fig. 4 Formation of slice in PLAXIS 3D Tunnel

4. 수치해석 결과

실내 모형실험에 앞서 경향성 파악을 위하여 사질토와 연약 점토에 근입된 파이프의 극한 인발저항력 산정을 위하여 파이프 직경, 근입 깊이, 지오그리드 보강 층수 및 길이 등의 각 영향인자들을 변화시켜 육상과 해상 상태에서 각각 135회 총 270회 수치해석을 수행하였다. 수치해석을 통해 도출된 극한 인발저항력은 q_u 와 $q_{u(b)}$ 의 비로 무차원화 하여 그래프로 표기하였다. 여기서, $q_{u(b)}$ 는 직경 26mm 파이프가 근입비 3.8에서 도출된 극한 인발저항력이며 약 0.35kN으로 산출되었다. q_u 는 그 외 해석 조건에서 도출된 극한 인발저항력이다.

4.1 육상 상태에서의 극한 인발저항력

Figs. 5-8은 육상 상태에서 직경 26mm 파이프의 극한 인발저항력을 보여주고 있다. Fig. 4는 근입비에 따른 극한 인발저항력을 보여주고 있다. 근입비가 커질수록 극한 인발저항력 상승률은 느슨한 모래에서는 65%, 조밀한 모래에서는 68% 그리고 연약점토에서는 57%로 도출되었다. Fig. 5는 지오그리드 1층 보강 전/후에 따른 극한 인발저항력을 보여주고 있다. 1층 보강 시 극한 인발저항력 상승률은 느슨한 모래에서는 35%, 조밀한 모래에서는 25% 그리고 연약점토에서는 22%로 도출되었다. Fig. 6은 지오그리드 2층 보강 전/후에 따른 극한 인발저항력을 보여주고 있다. 2층 보강 시 극한 인발저항력 상승률은 느슨한 모래에서는 27%, 조밀한 모래에서는 30% 그리고 연약점토에서는 17%로 도출되었다. Fig. 7은 지오그리드 길이에 따른 극한 인발저항력을 보여주고 있다. 지오그리드 길이 10D로 해석 시 5D와 비슷한 경향을 보였다. 위와 같은 극한 인발저항력 상승률 경향은 파이프 직경 36mm와 46mm에서도 비슷한 경향을 보였지만, 직경이 커질수록 파이프 주변 지반의 인발 영향 범위가 넓어져 인발저항력은 더 높게 산출되었다. 26mm에서 36mm 변경 시 지오그리드 보강 전 12%, 1층 보강 시 14% 그리고 2층 보강 시 17%씩 상승하였다. 26mm에서 46mm 변경 시 지오그리드 보강 전 15%, 1층 보강 시 18% 그리고 2층 보강 21%씩 상승하였다. 그리고 파이프의 직경이 커져도 지오그리드 길이에 따른 인발저항력은 지오그리드 1층 보강에서 도출된 결과와 큰 차이가 없었으며, 상세 결과는 Table 3과 같다.

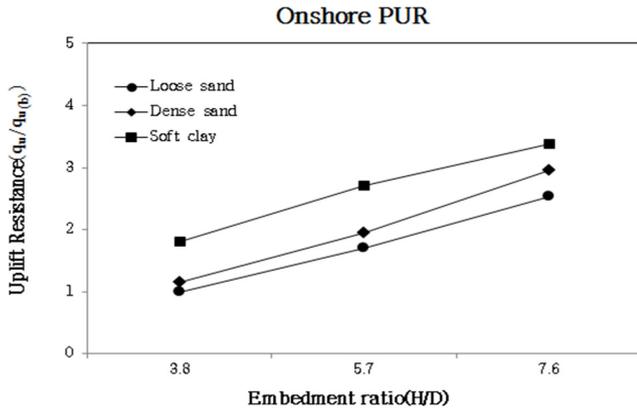


Fig. 5 The effect of H/D in onshore state ($D = 26$ mm)

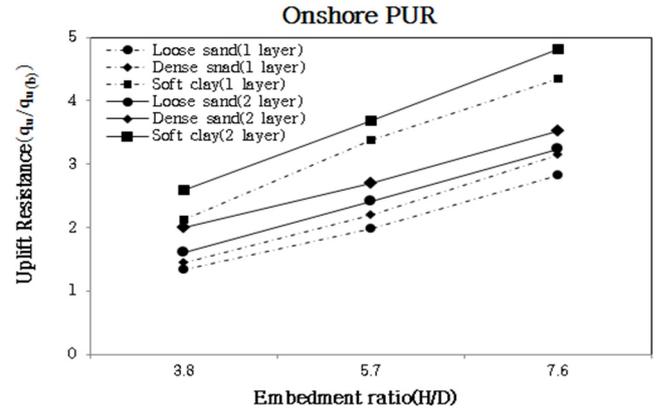


Fig. 7 The effect of 2 layer geogrid ($D = 26$ mm, Geogrid length = $5D$) in onshore state

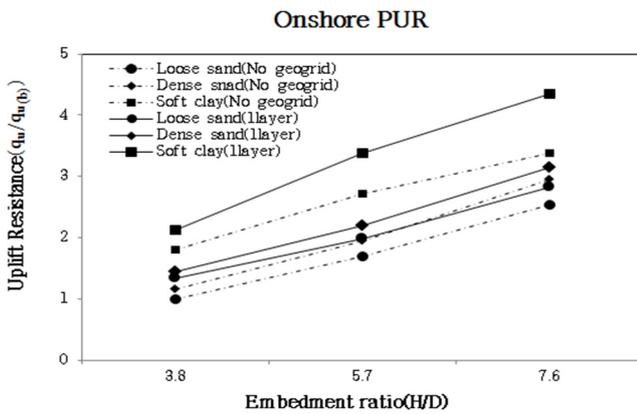


Fig. 6 The effect of 1 layer geogrid ($D = 26$ mm, Geogrid length = $5D$) in onshore state

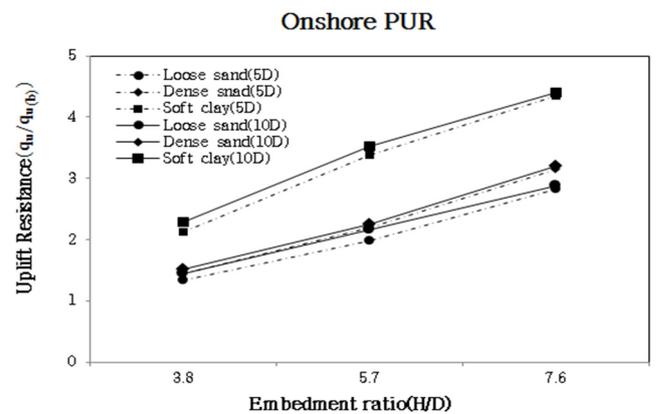


Fig. 8 Comparison of $5D$ and $10D$ ($D = 26$ mm, 1 layer geogrid) in onshore state

Table 3 Result of PUR on loose sand and clay in onshore state

Test No	D [mm]	H/D	Gogrid layer	Goegrid length	PUR ($q_u/q_{u(b)}$)		
					Loose sand	Dense sand	Soft clay
1	36	2.7	-	-	1.09	1.26	1.94
2	36	2.7	1	5D	1.41	1.55	2.31
3	36	2.7	2	5D	1.85	2.30	2.79
4	36	4.1	-	-	1.79	2.05	3.18
5	36	4.1	1	5D	2.06	2.30	3.56
6	36	4.1	2	5D	2.58	2.75	3.86
7	36	5.5	-	-	2.69	3.06	3.94
8	36	5.5	1	5D	2.91	3.22	4.68
9	36	5.5	2	5D	3.30	3.64	5.10
10	46	2.1	-	-	1.17	1.36	2.09
11	46	2.1	1	5D	1.51	1.66	2.50
12	46	2.1	2	5D	2.05	2.60	3.00
13	46	3.2	-	-	1.87	2.16	3.42
14	46	3.2	1	5D	2.17	2.43	3.81
15	46	3.2	2	5D	2.74	3.20	5.00
16	46	4.2	-	-	2.82	3.12	4.40
17	46	4.2	1	5D	3.00	3.34	4.95
18	46	4.2	2	5D	3.43	4.00	5.11

4.2 해상 상태에서의 극한 인발저항력

Figs. 9-12는 해상 상태에서 직경 26mm 파이프의 극한 인발저항력을 보여주고 있다. Fig. 8은 근입비에 따른 극한 인발저항력을 보여주고 있다. 근입비가 커질수록 극한 인발저항력 상승률은 느슨한 모래에서는 67%, 조밀한 모래에서는 65% 그리고 연약점토에서는 53%로 도출되었다. Fig. 9는 지오그리드 1층 보강 전/후에 따른 극한 인발저항력을 보여주고 있다. 1층 보강 시 극한 인발저항력 상승률은 느슨한 모래에서는 36%, 조밀한 모래에서는 28% 그리고 연약점토에서는 18%로 도출되었다. Fig. 10은 지오그리드 2층 보강 전/후에 따른 극한 인발저항력을 보여주고 있다. 2층 보강 시 극한 인발저항력 상승률은 느슨한 모래에서는 32%, 조밀한 모래에서는 29% 그리고 연약점토에서는 26%로 도출되었다. Fig. 11은 지오그리드 길이에 따른 극한 인발저항력을 보여주고 있다. 지오그리드 길이가 10D로 변경 시

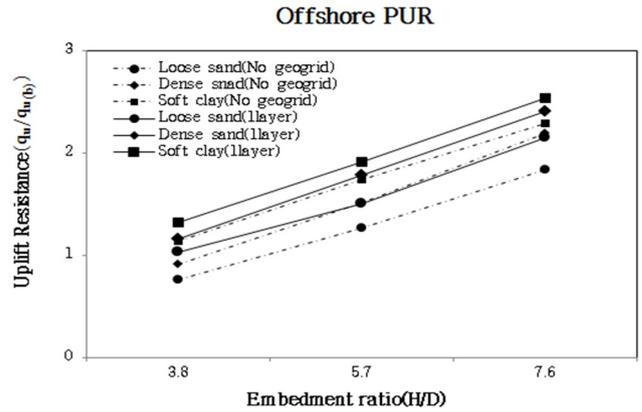


Fig. 10 The effect of 1 layer geogrid ($D = 26\text{mm}$, Geogrid length = $5D$) in offshore state

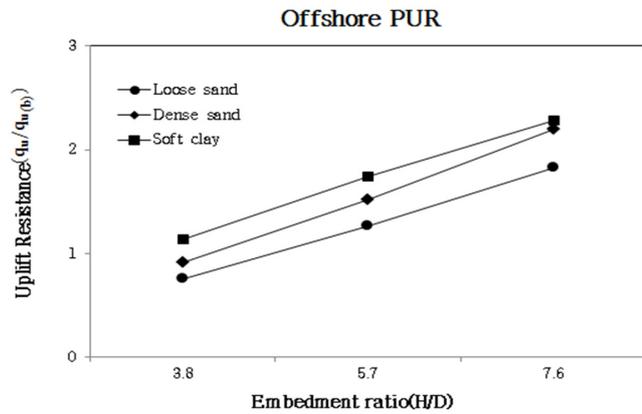


Fig. 9 The effect of H/D in offshore state ($D = 26\text{ mm}$)

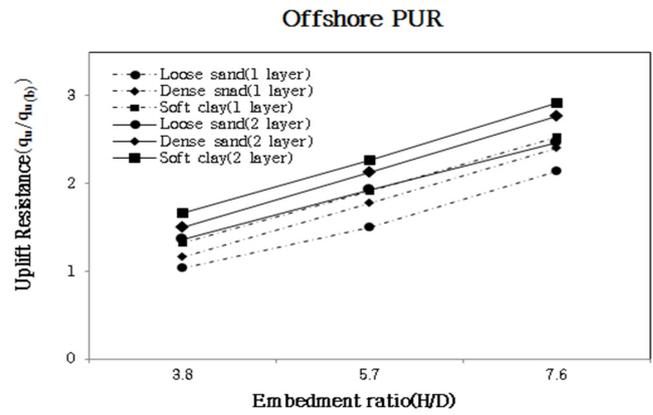


Fig. 11 The effect of 2 layer geogrid ($D = 26\text{ mm}$, Geogrid length = $5D$) in offshore state

Table 4 Result of PUR on sand and clay in offshore state

Test No	D [mm]	H/D	Gogrid layer	Goegrid length	PUR ($q_u/q_{u(b)}$)		
					Loose sand	Dense sand	Soft clay
19	36	2.7	-	-	0.80	0.96	1.18
20	36	2.7	1	5D	1.10	1.24	1.47
21	36	2.7	2	5D	1.53	1.72	1.95
22	36	4.1	-	-	1.33	1.59	1.79
23	36	4.1	1	5D	1.60	1.87	2.06
24	36	4.1	2	5D	2.04	2.26	2.47
25	36	5.5	-	-	1.91	2.27	2.37
26	36	5.5	1	5D	2.22	2.54	2.69
27	36	5.5	2	5D	2.69	2.88	3.20
28	46	2.1	-	-	0.86	1.03	1.24
29	46	2.1	1	5D	1.17	1.33	1.64
30	46	2.1	2	5D	1.71	1.93	2.25
31	46	3.2	-	-	1.40	1.68	1.85
32	46	3.2	1	5D	1.70	1.96	2.37
33	46	3.2	2	5D	2.19	2.42	2.79
34	46	4.2	-	-	1.96	2.35	2.44
35	46	4.2	1	5D	2.38	2.68	2.90
36	46	4.2	2	5D	2.84	3.07	3.5

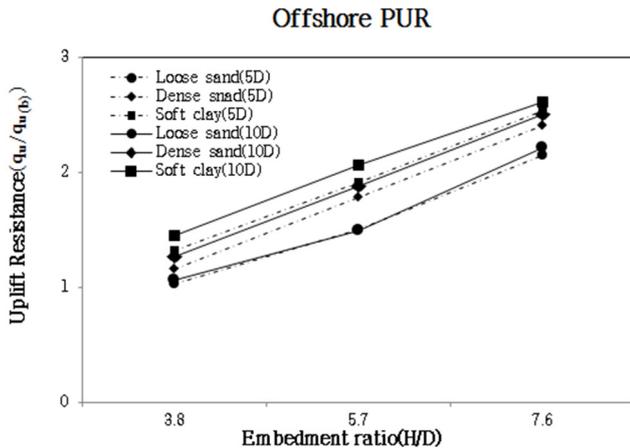


Fig. 12 Comparison of 5D and 10D ($D = 26$ mm, 1 layer geogrid) in offshore state

육상 상태와 비슷한 경향을 보였다. 위와 같은 결과는 파이프의 직경이 커질수록 육상상태와 동일하게 인발저항력 상승률 경향은 비슷하나 직경이 커질수록 인발저항력은 더 높게 산출되었다. 직경 26mm에서 36mm 변경 시 지오그리드 보강 전 10%, 1층 보강 시 13% 그리고 2층 보강 시 15%씩 상승하였다. 26mm에서 46mm 변경 시 지오그리드 보강 전 15%, 1층 보강 시 17% 그리고 2층 보강 20%씩 상승하였으며 상세 결과는 Table 4와 같다. 그리고 해상 상태에서 극한 인발저항력 육상 상태보다 약 25~30% 낮게 산출되었다.

5. 결 론

본 논문은 사질토와 연약점토에 묻힌 파이프의 극한 인발저항력 산정을 위하여 육상과 해상 상태에서 파이프 직경, 근입비, 지오그리드 층수 및 길이에 따른 각 영향 인자들을 변화시킴으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 파이프가 육상 상태에 묻혀있을 때 극한 인발저항력은 해상 상태보다 항상 높게 산출되었다. 이는 육상 상태일 때 간극수압이 발생을 하지 않아 실제 작용하는 유효연직응력과 전연직응력이 동일하지만 해상상태에서는 간극수압이 발생하여 유효연직응력은 전연직응력에서 간극수압을 제외하므로 더 낮은 인발저항력이 발생한다고 판단하였다.

(2) 육상 상태에서 연약점토의 극한 인발저항력은 느슨한 모래보다 최대 77% 그리고 조밀한 모래보다 최대 55% 높게 산출되었다. 해상 상태에서는 느슨한 모래보다 최대 50% 그리고 조밀한 모래보다 최대 25% 높은 인발저항력이 산출되었다.

(3) 조밀한 모래는 육상 상태에서 느슨한 모래 보다 최대 16% 해상 상태에서는 20% 높은 인발저항력이 산출되었다.

본 연구는 실내 모형실험에 앞서 사질토와 연약점토에 묻힌 파이프라인의 인발 저항력을 수치해석을 통하여 경향을 파악하는 것에 중점을 두었다. 향후 본 연구 결과 값을 토대로 실내 모형실험을 실시할 예정이다.

후 기

본 연구는 2016년 산업통상자원부 지원 산업핵심기술과제 “ARC7 극지 환경용 해양플랜트 내빙구조 설계기술 개발(10063417)” 과제의 지원으로 수행된 결과임.

References

- Armaghani, D.J., Faizi, K., Hajihassani, M., Mohamad, E.T., Nazir, R., 2015. Effects of Soil Reinforcement on Uplift Resistance of Buried Pipeline. *Measurement*, 64, 57-63.
- Babu, G.S., Singh, V.P., 2009. Simulation of Soil Nail Structures using PLAXIS 2D. *Plaxis Bulletin*, Spring(25), 16-21.
- Bae, W.S., Lee, B.G., Kwon, Y.C., Lee, J.D., 2008. Study on Pullout Behavior of Pipe Anchor. *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, 9(1), 5-10.
- Bang, S.T., Kim, Y.J., Kim, J.M., Kim, J.G., 2003. The Pullout Behavior of Pipe Anchor in Sandy Soil. *Proceedings of Korean Geoenvironmental Society Conference*, 219-225.
- Brinkgreve, R.B.J., Vermeer, P.A., 2001. *Manual of Plaxis 3D Tunnel*. AA Balkema, Rotterdam.
- Das, B.M., 1978. Model Tests for Uplift Capacity of Foundations in Clay. *Soils and Foundations*, 18(2), 17-24.
- Dickin, E.A., 1994. Uplift Resistance of Buried Pipelines in Sand. *Soils and Foundations*, 34(2), 41-48.
- Niroumand, H., Kassim, K.A., Nazir, R., 2013. The Influence of Soil Reinforcement on the Uplift Response of Symmetrical Anchor Plate Embedded in Sand. *Measurement*, 46(8), 2608-2629.
- Meyerhof, G.G., 1975. Uplift Resistance of Inclined Anchors and Piles. *Proceedings of the 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Moscow, 12(1), 167-172.
- Murray, E.J., Geddes, J.D., 1987. Uplift of Anchor Plates in Sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, 113(3), 202-215.
- Thorne, C.P., Wang, C.X., Carter, J.P., 2004. Uplift Capacity of Rapidly Loaded Strip Anchors in Uniform Strength Clay. *Geotechnique*, 54(8), 507-518.