

## 사질토지반에서 인발하중을 받는 석션말뚝에 관한 연구

### A Study on Behavior of Pull-out Loaded Suction Pile in Sands

김진복<sup>1)</sup>, Jin-Bok Kim, 박종운<sup>2)</sup>, Joung-Un Park, 진홍민<sup>3)</sup>, Hong-Min Jin, 권오균<sup>4)</sup>, Oh-Kyun Kwon

<sup>1)</sup> 계명대학교 토목공학과 박사졸업, Ph. D., Dept. of Civil Eng. Keimyung Univ.

<sup>2)</sup> 계명대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng. Keimyung Univ.

<sup>3)</sup> 계명대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng. Keimyung Univ.

<sup>4)</sup> 계명대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng. Keimyung Univ.

**SYNOPSIS** : In this thesis the model tests were performed to the pull-out characteristics of a suction pile subjected to a pull-out in sands. For this model tests, three different soil conditions ( $D_r=45, 65, 82\%$ ), three pile diameters ( $D=100, 150, 200\text{mm}$ ) and three pile lengths ( $L=100, 150, 200\text{mm}$ ), were changed. And the experimental results were also compared with those by the theoretical methods. The results by the experimental and theoretical analysis are as follows.

The ultimate pull-out resistances increased as the relative density of sands, pile diameter, length and the ratio of pile length to diameter increased. The ultimate pull-out resistance by Meyerhof method(1973) overestimated that by the model test, but the results using the soil-pile friction angle suggested by Aas(1966) in the Meyerhof(1973) method were in good agreement with the experimental results.

**Keywords** : Suction Pile, pull-out resistance

## 1. 서론

최근에는 육지뿐만 아니라 해안쪽으로 발전이 급속히 증가하는 추세이다. 해안항만구조물의 경우 육지와는 달리 바다위에 구조물이 설치되는 경우가 발생하게 되는데 이때 구조물의 하부 기초에 있어서 시공 및 공사비가 대단히 많이 소요되는 특징을 가지고 있다. 특히 수심이 깊은 곳에서의 구조물 시공 시 구조물의 하부구조인 기초의 시공이 상당히 어려우며 공사비 또한 대단히 많이 필요하게 된다. 이러한 구조물들을 석션파일을 이용한 구조물로써 대체한다면 시간과 공사비용이 크게 줄어들 수 있다고 본다. 기존의 해양구조물들은 시공이 실시된 이후에 잘못된 점이 발견될 경우에는 시정이 매우 곤란한 특징이 있다. 반면에 석션파일을 사용한 항만구조물의 경우에는 영구구조물일지라도 잘못된 점이 발견되면 석션파일 내부에 압력을 가하여 말뚝을 인발하여 재시공이 가능하며, 임시구조물의 경우에도 구조물을 고정시키는 말뚝의 설치 및 제거가 매우 용이하므로 신속하게 시공 및 해체가 가능하다. 따라서 앞으로 석션파일의 발전 가능성과 용도는 매우 크다고 할 수 있다. 이에 비하여 현재까지 석션파일의 형상비, 인발각도와 작용점의 위치 등에 따른 석션파일의 지지거동 특성에 대한 연구가 미미한 실정이다. 석션파일은 해양구조물에 주로 사용되는 기초구조물로써 석션파일의 두부분에 강선(Cable)을 연결하여 수중이나 수상에 있는 구조물을 지지할 수 있다. 본 연구에서는 일반말뚝에 비해 길이가 짧은 석션말뚝에 대한 실내모형실험을 실시하여 석션말뚝의 인발 거동특성을 분석하고자 하였다. 석션말뚝의 근입깊이 비 변화와 상대밀도 변화에 따라 석션말뚝에 작용하는 인발에 대한 하중 특성 및 거동특성 분석 등에 관한 연구를 수행하였다.



달한다고 하였다. 한편, Meyerhof(1973)는 그림 2와 같이 원형말뚝에 대한  $K_u-\phi$ 의 관계도를 활용하도록 제시하였다.

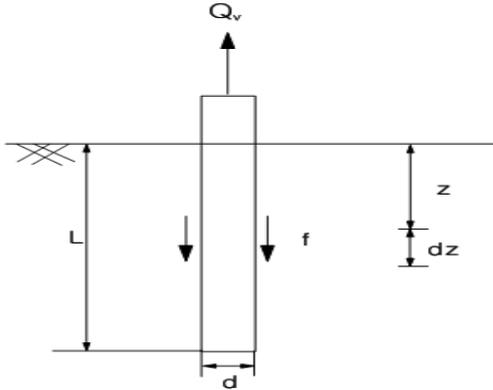


그림 3. 관입깊이와 마찰력의 관계  
(Das 등, 1977)

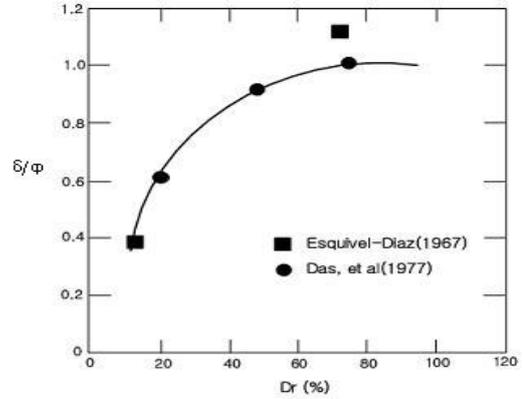


그림 4.  $D_r$ 에 따른  $\delta$ 의 변화  
(Das 등, 1977)

Das, Seely, Pfeifle(1977)는 그림 3과 같이 지반내 말뚝이 인발력을 받을 때 지표면으로부터  $z$ 만큼의 깊이에서 말뚝주면에 발생하는 단위면적당 마찰력  $f$ 를 식(2)와 같이 나타내었다.

$$f = K_u \tan \delta \gamma z \quad (2)$$

따라서, 말뚝의 인발저항력은 식 (3)과 같다.

$$Q_v = \int_0^L p f dz \quad (3)$$

여기서,  $p$  = 말뚝의 주변길이( $\pi d$ )

Das 등(1977)의 모형실험결과에 따르면 단위마찰력  $f$ 는 말뚝의 관입비  $\lambda(L/d)$ 가 증가할수록 선형적으로 증가하다가 어느 한계값 이상에서는 일정한 값에 도달한다고 하였다. 단위마찰력  $f$ 가 일정한 값에 도달하는 관입비를 한계관입비( $\lambda_{cr}$ )라고 하며 한계관입비는 상대밀도( $D_r$ )의 함수인 식 (4)와 식(5)와 같이 표현된다. 말뚝과 지반사이의 마찰각  $\delta$ 는 그림 4에서와 같이  $D_r$ 과  $\phi$ 의 관계로부터 구하여진다.

$$\lambda_{cr} = 0.156 D_r + 3.85 \quad (D_r < 70\%) \quad (4)$$

$$\lambda_{cr} = 14.5 D_r \quad (D_r > 70\%) \quad (5)$$

따라서, 인발저항력  $Q_v$ 는  $\lambda$ 의 함수로 식 (6)과 식(7)과 같이 구하여 진다.

$$Q_v = \int_0^L p (K_u \tan \delta \gamma z) dz \quad (\lambda < \lambda_{cr}) \quad (6)$$

$$= \frac{1}{2} p \gamma L^2 K_u \tan \delta$$

$$Q_v = \int_0^{L_{cr}} p(K_u \tan \delta \gamma z) dz + \int_{L_{cr}}^L p f dz \quad (\lambda \geq \lambda_{cr}) \quad (7)$$

$$= \frac{1}{2} p \gamma L_{cr}^2 K_u \tan \delta + p \gamma L_{cr} K_u \tan \delta (L - L_{cr})$$

이재동(2001)은 인발저항력 산정식 중 Das 등(1977)의 방법이 신뢰도가 높은 것으로 보고하였다. 이재동(2001)은 Das 등(1977)의 식을 기본으로 Meyerhof 등(1968)의 연구결과 점성토에 대한 마찰력( $c_a$ )을 조합하고 모형실험 후 인발보정계수( $K_{cl}$ )를 도입하여 단말뚝의 인발저항력( $T_{us}$ )을 산정하는 식 (8)과 식 (9)와 같이 제안하였다. 그림 5는 지반에 대한 임계근입비를 나타내었으며 근입비에 따른 실측치와 Das의 이론식을 비교함으로써 수정 인발보정계수( $K_{cl}$ )를 나타내었다. 수직인발보정계수( $K_{cl}$ )는 근입비가 작을 때 상대적으로 큰 값을 나타내고, 같은 근입비에서는 상대 다짐도가 낮을 때 큰 값을 나타내었다고 주장하였다.

$L < L_{cr}$

$$T_{us} = K_{cl} p [L c_a + \frac{1}{2} \gamma' L^2 K_u \tan \delta] \quad (8)$$

$L < L_{cr}$

$$T_{us} = K_{cl} p [L c_a + \frac{1}{2} \gamma' L_{cr}^2 K_u \tan \delta + \gamma' L_{cr} K_u \tan \delta (L - L_{cr})] \quad (9.a)$$

$$\lambda_{cr} = 0.156 D_r + 3.85 \quad : D_r < 70\% \quad (9.b)$$

$$\lambda_{cr} = 14.5 \quad : D_r \geq 70\% \quad (9.c)$$

여기서,  $L$  : 말뚝길이

$D_r$  : 상대밀도

$p$  : 말뚝의 유효단위중량

$K_u$  : 인발계수(그림 2 참조)

$\delta$  : 말뚝과 흙의 마찰각(표 1 참조)

$L_{cr}$  : 말뚝의 한계근입길이(= $\lambda_{cr} D$ )

$c_a$  : 점성토와 말뚝사이의 마찰력

$\gamma'$  : 흙의 유효단위중량

$K_{cl}$  : 인발보정계수(그림 5 참조)

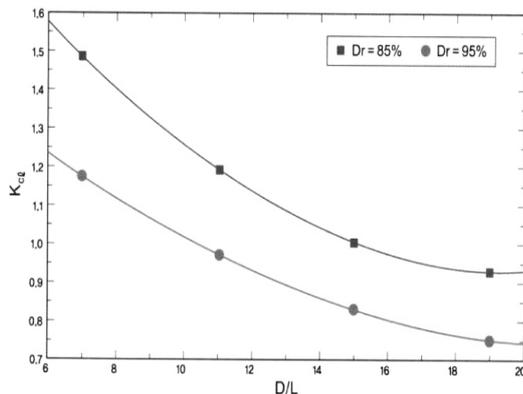


그림 5. 인발보정계수(이재동, 2001)

표 1. 말뚝표면과 흙의 마찰각 $\delta$ (Aas, 1966)

말뚝재료	$\delta$
강말뚝	$20^\circ$
콘크리트말뚝	$3\phi/4$
나무말뚝	$3\phi/4$



### 3.2 모형실험 순서

모형실험은 수중에서 모형지반을 조성하여 실시되었으며, 실험에 사용된 모형지반은 상대밀도가 각각 다른 3종류이다. 지반의 상태를 파악하기 위하여 지반조성 전에 캔을 지반 속에 넣어 지반을 조성하였으며, 실험을 마친 후 캔을 꺼내어 지반의 단위 중량을 확인하고 상대밀도를 확인하였다. 이렇게 측정된 세 종류의 지반의 상대밀도는 각각 45%, 65%, 82%이다.

말뚝에 대한 실험은 말뚝을 설치할 때의 불안정한 지반이 안정될 때까지 일정한 시간이 경과한 후 실시하였으며, 하중재하는 모형토조의 외부에 설치된 와이어와 도르래로 연결된 감속기가 달린 모터를 이용하였다. 이때 하중재하는 2mm/min의 속도를 일정하게 유지하여 모형실험을 수행하였다. 모형실험을 위한 재하장치와 계측기 설치가 완료된 모습(실험 전)과 수평하중을 받아 말뚝이 이동한 모습(실험 후)이 그림 9와 그림 10에 나타나 있다.



그림 9. 인발실험 전 모습

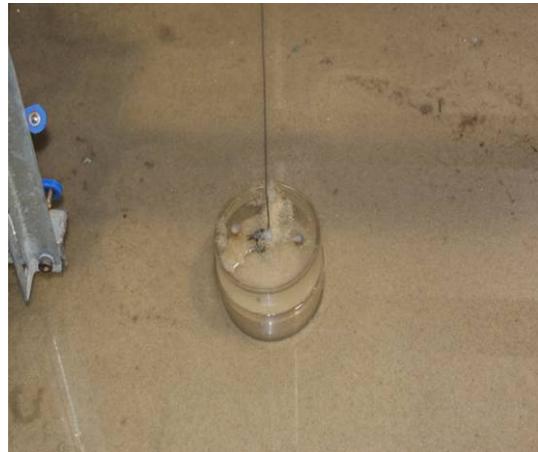


그림 10. 인발실험 완료 후 모습

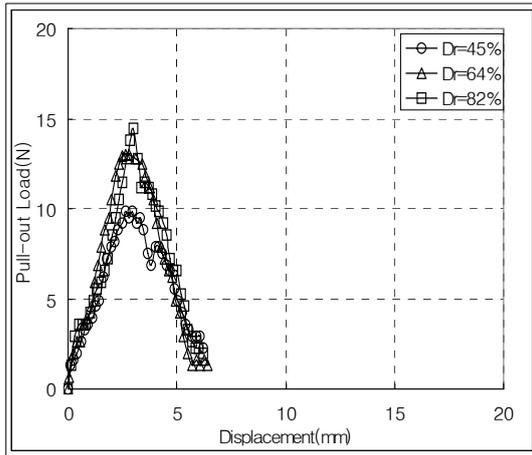
### 4. 모형실험 분석

본 연구에서는 사질토 지반에서 인발하중 대한 말뚝의 거동특성을 연구하기 위하여 모형실험을 실시하였다. 연구 대상 말뚝은 말뚝길이와 직경의 비(L/D)가 매우 작은 석션말뚝이다. 모형실험에 사용된 말뚝은 아크릴로 제작하였으며, 말뚝길이/직경(L/D)의 비가 1인 직경 100mm, 150mm, 200mm인 경우와 L/D가 2인 직경 100mm, 150mm인 말뚝에 대하여 모형실험을 수행하였다.

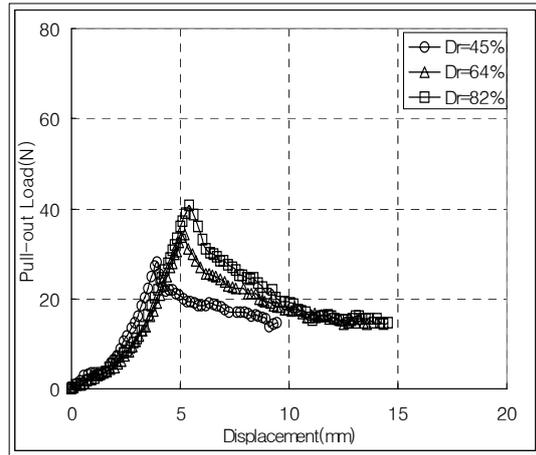
#### 4.1 인발하중에 따른 하중-변위 곡선

수중에 설치된 말뚝길이/직경의 비(L/D)가 매우 작은 말뚝에 대한 인발실험을 실시하였다. 모형지반의 상대밀도가 45%, 64%, 82%인 세 종류에 대하여 모형실험을 실시하였다. 실험에 사용된 말뚝은 말뚝길이/직경 비(L/D)가 1인 경우에 직경이 100mm, 150mm, 200mm이며 L/D가 2인 경우 직경이 100mm와 150mm이다.

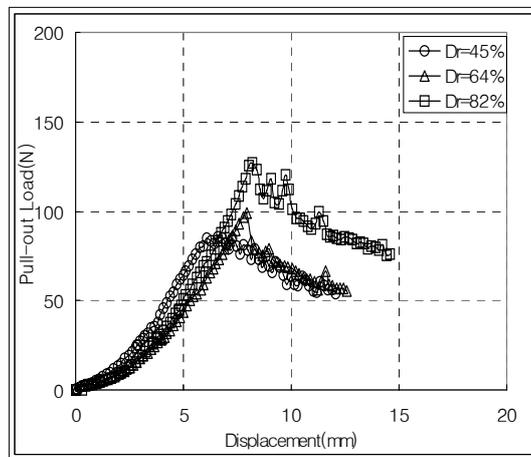
그림 11은 말뚝길이/직경 비(L/D)가 1인 경우 말뚝길이와 직경 및 지반조건에 따른 인발실험 결과를 나타낸 그림이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 인발하중에 따른 말뚝의 최대 저항력은 말뚝직경, 말뚝길이/직경의 비(L/D), 그리고 상대밀도(Dr)가 커질수록 증가하는 것으로 나타났다. 모든 실험조건에서 최대 인발하중은 3~10mm의 변위에서 발생하였으며, 이때의 변형률은 약 3~7%로 나타났다.



(a) D=100mm



(b) D=150mm



(c) D=200mm

그림 11. 인발하중 작용시  $L/D=1$ 인  
말뚝의 하중-변위 곡선

## 4.2 극한 인발하중

상대밀도가 45%, 64%, 82%인 모형형지반에 대한 수직인발실험 결과로부터 P-S곡선을 이용하여 극한하중을 구한 다음, 이 결과를 기존의 이론식에 의한 결과와 비교하였다. 이론적 방법으로는 Meyerhof(1973)와 Das(1977) 방법을 적용하고자 하였다. 그러나 Meyerhof(1973)와 Das(1977) 방법은 말뚝 근입깊이(L)가 한계근입깊이( $L_{cr}$ ) 보다 큰 경우는 해석 결과가 서로 상이하게 나타나지만, 본 연구와 같이 말뚝 근입깊이(L)가 한계근입깊이( $L_{cr}$ ) 보다 작거나 같은 경우에는 해석결과가 동일하므로 본 논문에서는 Meyerhof(1973) 방법을 사용하여 비교하였다. 또한, 말뚝과 흙의 마찰각  $\delta$ 를 표 1을 참고하여 말뚝과 흙의 마찰각  $\delta$ 를  $20^\circ$ 로 동일하게 보고 Meyerhof(1973)식에 이 값을 적용하여 실험결과와 비교하였다.

표 2는 상대밀도에 따른 말뚝의 극한 인발하중을 보여준다. 극한 인발하중은 말뚝의 무게를 제외한 순극한 인발력과 말뚝의 무게를 포함한 극한 인발하중으로 구분하여 나타냈다. 그림 12와 그림 13은 상대밀도에 따른 말뚝의 극한 인발하중과 순극한 인발하중을 보여 준다. 이 그림에서 보는 바와 같이 모든 종류의 말뚝에서 상대밀도가 커짐에 따라 극한 인발하중은 증가하고 있음을 알 수 있다. 말뚝길이/직경의 비( $L/D$ )가 일정한 경우, 말뚝의 직경이 커질수록 말뚝의 극한 인발하중은 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 말뚝의 직경이 동일한 경우, 말뚝의 길이가 길어질수록 극한 인발하중이 증가하는 것으로 나

타났다. 위에서 설명한 바와 같이 말뚝의 길이가 길어질수록, 말뚝의 직경이 커질수록, 그리고 지반의 상대밀도가 높아질수록, 말뚝의 극한 인발하중은 증가하는 것으로 나타났다.

그림 14와 그림 15는 모형실험과 이론적 방법에 의한 지반의 상대밀도에 따른 말뚝의 인발하중을 실험결과와 이론적 방법에 의한 결과를 나타낸 그림이다. 상대밀도 45%인 경우에는 실험결과와 이론적 방법에 의한 결과가 비슷하게 나타났으나, 상대밀도 64%와 82%인 경우는 Meyerhof(1973) 방법에 의한 결과가 실험결과 보다 크게 나타났다. 이 그림에서 보는 바와 같이 Meyerhof(1973) 방법에 의한 극한 인발하중은 상대밀도가 45%인 모든 실험조건에서 모형실험 결과와 비슷한 결과를 나타내지만, 상대밀도가 64%와 82%인 경우에는 과대평가하는 것으로 나타났다. 이와 같이 Meyerhof (1973) 방법은 상대밀도가 큰 경우에는 말뚝의 극한 인발하중을 과대평가하고, 상대밀도가 커질수록 그 차이는 크게 되며, 상대밀도 82%에서는 약 2~3배 정도 큰 결과를 나타냈다.

Meyerhof(1973) 방법은 모형실험 결과를 과대평가하므로, 본 연구에서는 Meyerhof(1973) 이론식에 말뚝과 흙 사이의 마찰각( $\delta$ )  $20^\circ$ (표 1 참조)를 적용하여 모형실험 결과와 비교하였다.  $20^\circ$ 의  $\delta$ 를 적용한 Meyerhof (1973) 방법은 모형실험보다 약간 작은 결과를 나타내지만, 그 차이는 크지 않는 것으로 나타났다. 이와 같이 모형실험과 이론적 방법의 결과를 비교해 본 결과, 말뚝 근입깊이에 따른 차이도 발생하지만 지반조건에 따른 말뚝과 지반 사이의 마찰각을 정확히 산정한다면 실험과 이론적 방법의 차이는 감소할 것으로 판단된다.

표 2. 모형실험에 의한 극한 인발하중 산정 결과 (단위:N)

극한 인발하중		상대밀도	D <sub>r</sub> =45	D <sub>r</sub> =64	D <sub>r</sub> =82
L/D=1	D=100mm	극한 인발하중	9.80	12.90	14.40
		순극한 인발하중	7.37	10.47	11.97
	D=150mm	극한 인발하중	28.20	34.10	40.70
		순극한 인발하중	23.29	29.19	35.79
	D=200mm	극한 인발하중	85.00	99.15	127.30
		순극한 인발하중	72.12	86.27	114.42
L/D=2	D=100mm	극한 인발하중	33.20	38.70	48.60
		순극한 인발하중	29.09	34.59	44.49
	D=150mm	극한 인발하중	125.10	126.70	146.80
		순극한 인발하중	115.74	117.34	137.44

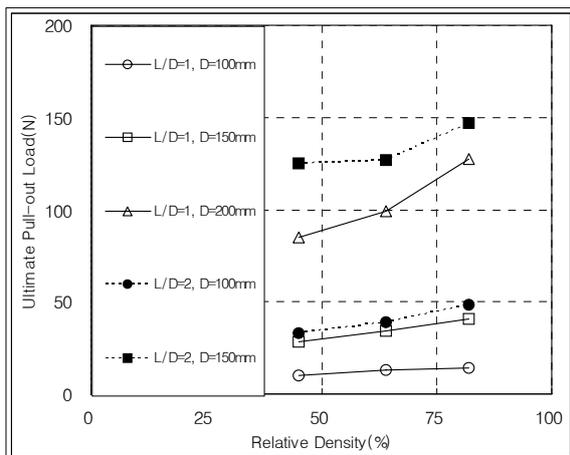


그림 12. 상대밀도에 따른 극한 인발하중

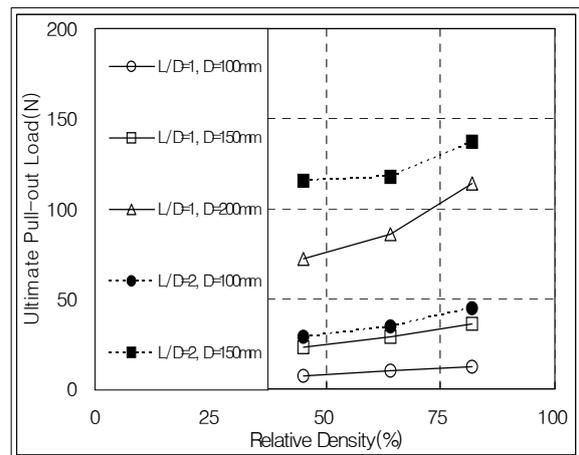
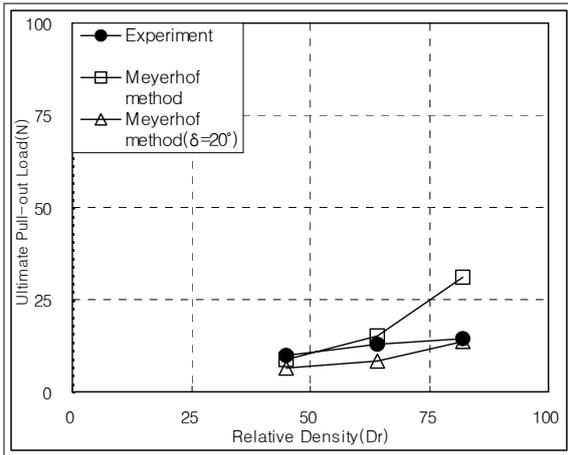
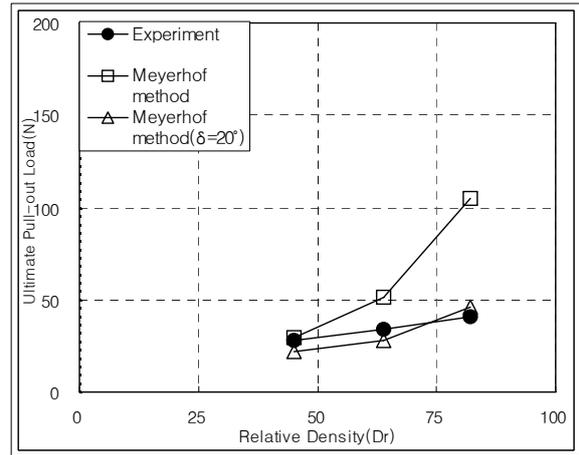


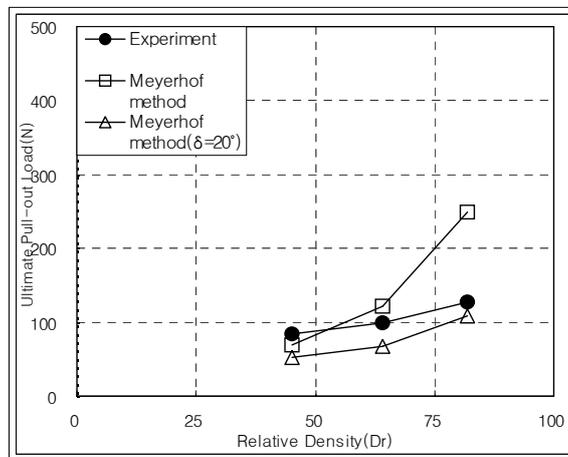
그림 13. 상대밀도에 따른 순극한 인발하중



(a) D=100mm

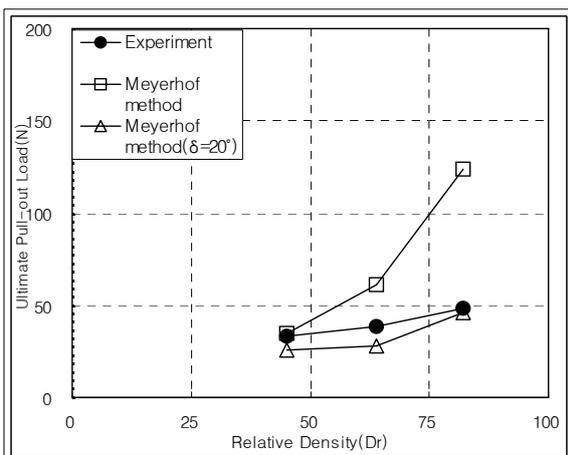


(b) D=150mm

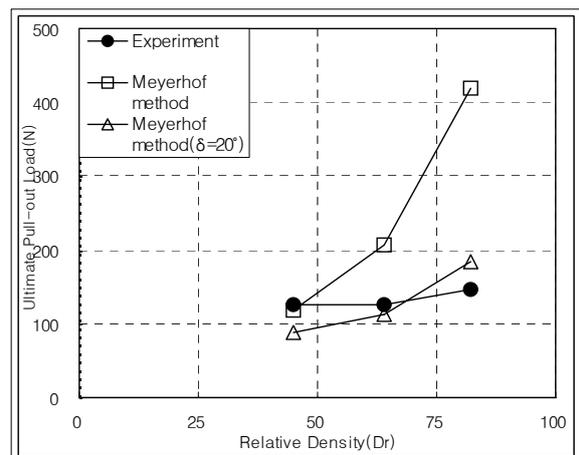


(c) D=200mm

그림 14. L/D=1인 말뚝의 극한 인발하중 비교



(a) D=100mm



(b) D=150mm

그림 15. L/D=2인 말뚝의 극한 인발하중 비교

### 4.3 극한 인발지지력

말뚝의 극한 인발지지력은 표 3은 상대밀도 변화에 따른 말뚝의 극한 인발지지력과 순극한 인발지지력을 나타내고 있다.

그림 16과 그림 17은 상대밀도 변화에 따른 말뚝의 극한 인발지지력과 순극한 인발지지력의 실험값에 대한 실험 결과를 보여 준다. 상대밀도가 45%에서 64%로 증가할 경우 약 1~1.4배 정도 증가하였고, 64%에서 82%로 증가할 경우 1.1~1.3배 정도 증가 하였고, 45%에서 82%로 증가할 경우 약 1.2~1.7배 정도 증가하는 것으로 나타났다. 동일한 상대밀도일 경우, 말뚝길이/말뚝직경 비(L/D)가 1에서 2로 증가할 경우 D=100mm인 경우는 약 1.5~2배 정도 증가하였고, D=150mm인 경우 약 1.8~2.5배 정도 증가하는 것으로 나타났다. 말뚝의 인발 극한지지력의 경우 상대밀도의 증가에 따른 말뚝과 지반사이의 마찰각 증가로 인한 인발 극한 지지력의 증가보다, 말뚝의 직경 및 길이 증가에 따른 말뚝과 지반과의 마찰면적 증가로 인한 극한 인발지지력이 크게 증가하는 것으로 판단된다.

표 3. 모형실험에 의한 극한 인발지지력 산정 결과 (단위:kN/m<sup>2</sup>)

극한 인발지지력		상대밀도			
		D <sub>r</sub> =45	D <sub>r</sub> =64	D <sub>r</sub> =82	
L/D=1	D=100mm	극한 인발지지력	0.31	0.41	0.46
		순극한 인발지지력	0.23	0.33	0.38
	D=150mm	극한 인발지지력	0.40	0.48	0.58
		순극한 인발지지력	0.33	0.41	0.51
	D=200mm	극한 인발지지력	0.68	0.79	1.01
		순극한 인발지지력	0.57	0.69	0.91
L/D=2	D=100mm	극한 인발지지력	0.53	0.62	0.77
		순극한 인발지지력	0.46	0.55	0.71
	D=150mm	극한 인발지지력	0.88	0.90	1.04
		순극한 인발지지력	0.82	0.83	0.97

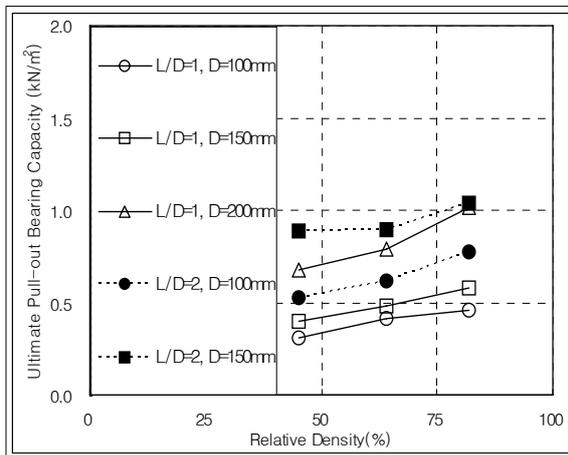


그림 16. 상대밀도에 따른 극한 인발지지력

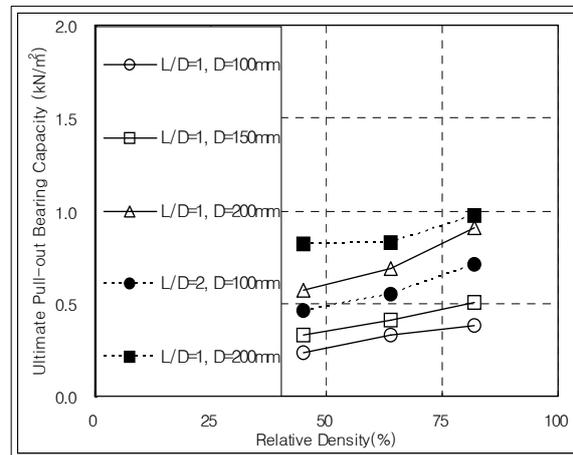
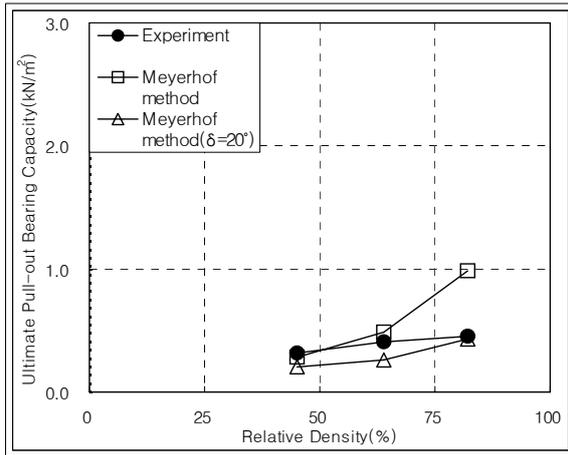
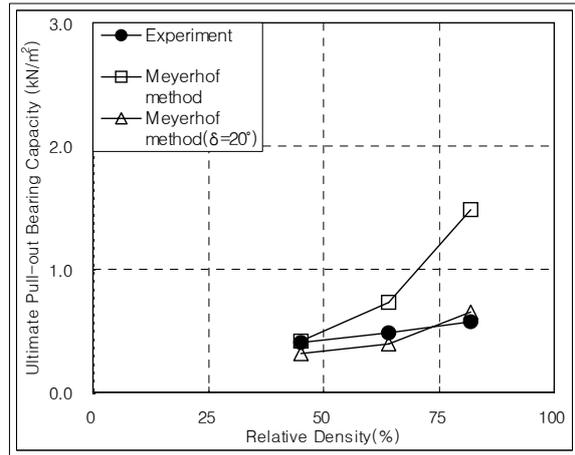


그림 17. 상대밀도에 따른 순극한 인발지지력

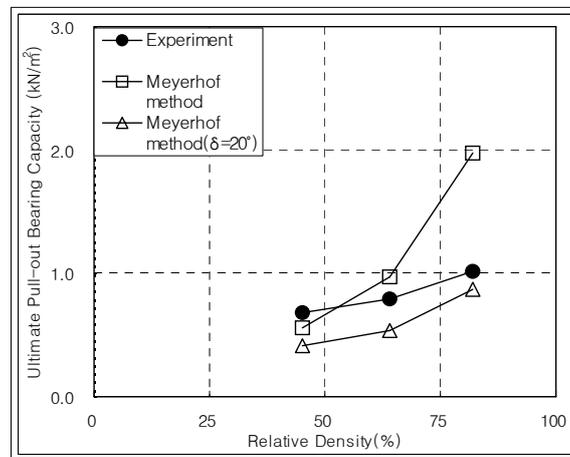
그림 18과 그림 19는 모형실험에 의한 극한 인발지지력을 Meyerhof 방법(1973) 및  $\delta=20^\circ$ 를 Meyerhof 방법(1973)에 적용한 결과와 비교한 그림이다. 상대밀도가 45%인 지반의 경우, 모형실험 결과는 이론적 방법의 결과와 비슷하지만, 상대밀도가 82%로 커지면, Meyerhof(1973) 방법은 모형실험을 과대평가하는 것으로 나타났다. 그러나 Meyerhof(1973) 방법에  $\delta$ 를  $20^\circ$ 로 적용한 결과는 모형실험 결과와 비슷한 것으로 나타났다. 이러한 경향은 말뚝 직경과 길이에 관계없이 모든 조건에서 유사하게 나타났다.



(a) D=100mm

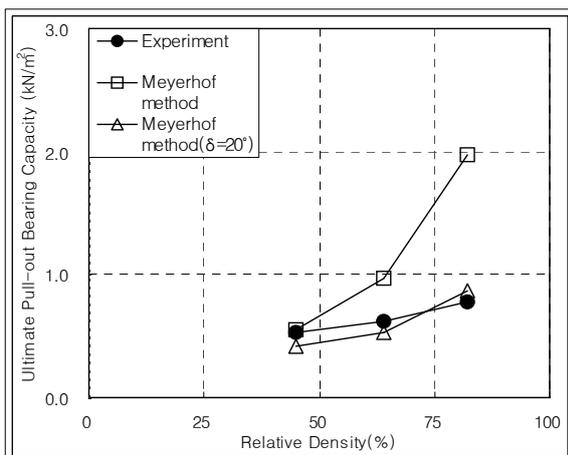


(b) D=150mm

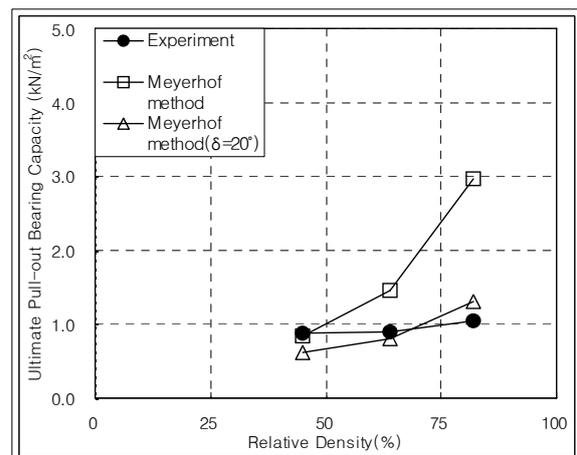


(c) D=200mm

그림 18. L/D=1인 말뚝의 극한 인발지지력 비교



(a) D=100mm



(b) D=150mm

그림 19. L/D=2인 말뚝의 극한 인발지지력 비교

## 5. 결 론

본 연구에서는 사질토 지반에 설치된 석션말뚝의 인발거동 특성에 관한 연구를 위하여 모형실험을 실시하였다. 모형실험에서는 말뚝직경과 길이, 지반의 상대밀도 등을 변화시켰다. 모형실험을 통하여 석션말뚝의 인발거동 특성에 대한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 인발하중에 따른 말뚝의 최대 저항력은 말뚝직경, 말뚝길이/직경의 비(L/D), 그리고 상대밀도( $D_r$ )가 커질수록 증가하는 것으로 나타났다. 모든 실험조건에서 최대 인발하중은 3~10mm의 변위에서 발생하였으며, 이때의 변형률은 약 3~7%로 나타났다.
2. 모형실험에 의한 극한 인발하중은 상대밀도가 45%에서 64%로 증가하면 1~1.3배, 45%에서 82%로 증가하면 1.5배 정도 증가하였고, 말뚝길이/직경의 비(L/D)가 1에서 2로 증가하면 3~4배 정도 증가하는 것으로 나타났다. 이는 말뚝의 극한 인발하중은 상대밀도 보다 말뚝길이 및 직경 증가에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.
3. 기존의 이론식과 비교해 보면 Meyerhof(1973) 방법은 실험치를 과대평가하고, Meyerhof(1973) 방법에서 말뚝과 지반사이의 마찰각도를 Aas(1966)가 제안한 값으로 적용하면, 실험결과와 비슷하게 나타났다.

## 참고문헌

1. 김준석 (1998), 말뚝기초의 설계법과 해설, 과학기술.
2. 이재동. (2001). 화강암풍화대 지반에 매입된 SIP말뚝의 지지력 평가에 대한 연구. 박사학위논문, 충북대학교, 청주.
3. 조천환. (2007). 매입말뚝공법. 이엔지·북.
4. 한대환 (2008), 단말뚝의 수평지지력에 대한 실험적 연구, 석사학위논문, 계명대학교.
5. 한국지반공학회 (2002), 깊은기초, 구미서관.
6. Aas, G. (1966). A study of the effect of vane shape and rate of strain on the measured values of in-situ shear strength of clays. Proceedings of 6th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, 1, 14-145.
7. Chattopadhyay, B. C. and Pise, P. J. (1986). Uplift capacity of piles in sand. *ASCE*, 112(9), 888-904.
8. Das, B. M. and Seely, G. R. (1975). Uplift capacity of Buried model pile in sand. *ASCE*, 101(10), 1091-1094.
9. Das, B. M., Seely, G. R. and Pfeifle, T. W. (1977). Pull out resistance of rough rigid piles in granular soils. *Soil and Foundations*, 17(3), 72-77.
10. Das, B. M. (1983). A procedure for estimation of uplift capacity of rough piles. *Soils and Foundation*. 23(3), 122-126.
11. Meyerhof, G. G. and Adams, J. I. (1968). The ultimate uplift capacity of foundation. *Geotech Jour.*, 5(4), 225-244.
12. Meyerhof, G. G. (1973). Uplift resistance of inclined anchors and piles. Proc., 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2, 167-172.