

해상공간 개발은 준설매립과 같이 대부분 매립식에 의존하여 왔으나 높은 건설비용과 해양환경 오염의 문제로 최근에는 지사체를 중심으로 경제적이고 친환경적인 부유식 구조체에 대한 검토가 진행중이다. 그러나 아직까지 국내에서는 부유식 구조체 건설에 필요한 해상기초에 대한 연구가 부족하며 국내의 독자적인 설계 기술력 확보가 시급한 실정이다(KICT, 2008).

부유식 구조체는 일반적으로 수심이 비교적 깊은 곳에 설치되며, 장비운용의 제약이나 경제성 등의 이유로 항타말뚝이나 현장타설말뚝 대신에 앵커와 계류시스템(mooring system)이 조합된 형태로 기초를 설계한다. 현재 해상에서 사용되는 앵커 및 기초의 종류는 여러 가지가 있지만, 시공성과 경제성이 뛰어난 드래그앵커(drag anchor)나 석션파일(suction pile)이 가장 많이 쓰인다. 그 중에서도 드래그앵커는 지지력 산정 및 시공에 불확실성이 크기 때문에 드래그앵커보다는 석션파일이 주로 사용되고 있다(Colliat et al., 1995).

일반적으로 석션파일은 컵을 얹어놓은 형상을 하고 있으며, 길이대 직경비(L/D)가 6을 넘지 않는다(Randolph et al., 2005). 석션파일은 해저 지반에 파일을 거치하고 파일 내부의 물을 펌프를 이용하여 외부로 배출할 때 발생하는 파일 내부의 석션 압력을 이용하여 설치한다. 석션파일의 관입력은 파일 단면적, 즉 직경의 제곱에 비례하지만 관입 저항력은 파일의 직경에 비례하므로 직경이 클수록 작은 압력차로도 설치가 가능하게 된다. 이러한 이유로 석션파일은 대구경화되어 왔으며, 시공된 석션파일 중 규모가 큰 것은 직경이 약 30 m에 달하는 것도 있다(Andersen et al., 2005). 최근 국내에서도 대수심 연약지반에 석션파일의 활용이 늘고 있으나, 기술력 및 경험 부족으로 대부분 임시구조물에 쓰이거나 높은 안전율 적용으로 석션파일의 가장 큰 장점인 경제성을 제대로 활용하지 못하고 있는 실정이다.

석션파일의 직경이 커짐에 따라 석션파일 자체 제작비와 설치비용도 크게 증가하게 되었다. 그러므로, 한국건설기술연구원에서는 기존의 대구경 단일형 석션파일 대신에 다수의 중구경 석션파일과 콘크리트 파일캡(pile cap)을 이용한 그룹 석션파일 형식을 제안하였다(KICT, 2011; Fig. 1). 그룹 석션파일은 공장에서 기성품으로 제작되는 강관을 사용하여 제작비를 줄일 수 있으며, 강재나 콘크리트 외에 다양한 재료의 말뚝을 용이하게 적용할 수 있다. 또한 그룹 석션파일 상부에 존재하는 콘크리트 파일캡은

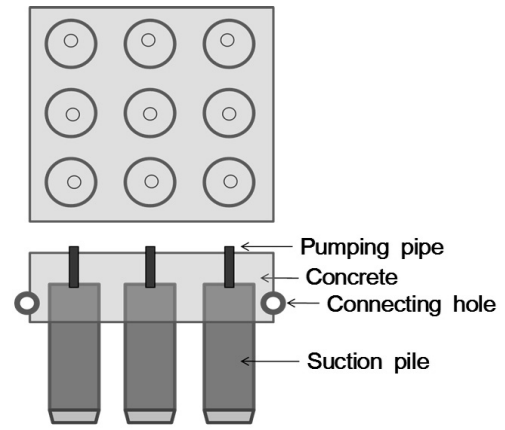


Fig. 1. Schematic diagram of group suction pile (KICT, 2011)

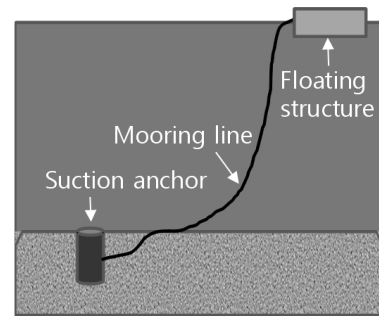


Fig. 2. Suction anchor for floating structures

개별 석션파일들을 견고하게 결합시켜 회전을 억제함으로써 석션파일의 수평방향 지지력 증가효과도 기대된다. 그룹 석션파일의 가장 큰 장점은 개별 석션파일과 콘크리트 파일캡의 모듈화에 의해 현장에서 석션파일의 수량을 용이하게 조절할 수 있어 현장의 지반조건이나 수리조건에 따라 능동적으로 설치가 가능하다는 것이다.

일반적으로 부유식 구조체에 적용되는 석션파일은 대부분 수평하중을 지지하는 앵커의 역할로 주로 사용되어 왔으며, Fig. 2와 같이 현수선(catenary) 형식의 계류선(mooring line)과 조합하여 부유식 구조물을 지지한다. 일반적으로 현수선 형식의 계류선과 조합된 석션파일의 경우 하중의 작용방향은 해저면을 기준으로 $0\sim 20^\circ$ 내외(Randolph et al., 2005)로 수평방향 하중이 지배적으로 작용하게 되므로 석션파일의 수평방향 지지거동을 정확하게 평가하는 것이 중요하다.

그런데, 그룹 석션파일은 이동과 회전이 함께 발생하는 복잡한 지지 메커니즘을 가지고 있으며 파일의 위치를 자유롭게 배치할 수 있기 때문에 일반적인 지지력 산정공식을 적용하는 것이 어렵다. 그러므로, 지금까지 그룹 석션파일의 지지력을 산정할 수 있는 설계법이 명확히 제시되어 있지 않다.

그러므로, 본 연구에서는 그룹 석선파일의 지지거동을 해석할 수 있는 실무적인 모델링 기법을 개발하고자 한다. 이 기법은 기초를 보요소로 모델링하고, 지반의 지지력을 비선형 스프링으로 모델링하는 방법이다. 이 기법은 말뚝 기초의 모델링 방법으로 널리 사용되고 있으며, 기초의 이동 및 회전 등 지반과 기초의 상호작용을 단순하게 모사할 수 있는 장점이 있다.

그런데, 이 스프링 모델에 적용되는 지반의 비선형 스프링 강성은 일반적으로 소구경 말뚝의 실험결과를 이용하여 제안된 경험적인 값이다. 이를 대구경 현장타설 말뚝에 적용하는 경우 p-y 곡선의 형태나 기울기, 극한지반반력이 큰 차이가 난다고 알려져 있다(Kim et al., 2007). 그런데, 그룹 석선파일은 대구경이고 짧은 강성기초의 거동을 보이기 때문에 말뚝기초에 적용되는 비선형 스프링 곡선이 실제 저항력을 제대로 평가하기 어려울 수 있다. 그러므로, 개발된 설계 모델링 기법의 결과를 보정하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 3차원 유한요소해석 결과를 실제거동을 모사할 수 있는 정밀해로 가정된 후 개발된 설계 모델링 기법의 결과를 보정할 수 있는 보정계수를 제안하고자 한다.

2. 수치 모델링 기법 개발

그룹 석선파일은 수평방향 하중에 대하여 이동과 회전이 함께 발생하는 복합적인 거동을 보인다. 그러므로, 그룹 석선파일의 복합적인 지지거동을 모사할 수 있는 새로운 수치 모델링 기법을 개발하는 것이 필요하다.

본 연구에서 적용한 수치 모델링 기법은 Fig. 3과 같이 석선파일을 구조 보요소(beam element), 그리고 주변지반의 지지력을 비선형 스프링 요소로 모델링한다. 이 스프링 모델링 방법은 말뚝기초의 지지거동을 분석할 때 널리 이용되고 있는 방법이다. 본 기법에 적용되는 스프링 계수의 경우 횡방향 지지거동은 p-y 곡선(p는 횡방향 반력, y는 기초의 횡방향 변위), 연직방향 지지거동은 t-z 곡선(t는 주

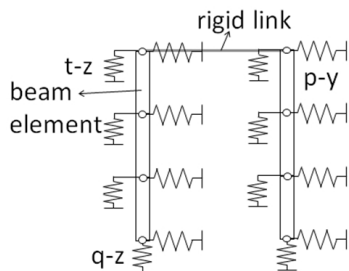


Fig. 3. Pile-soil modeling using non-linear spring model

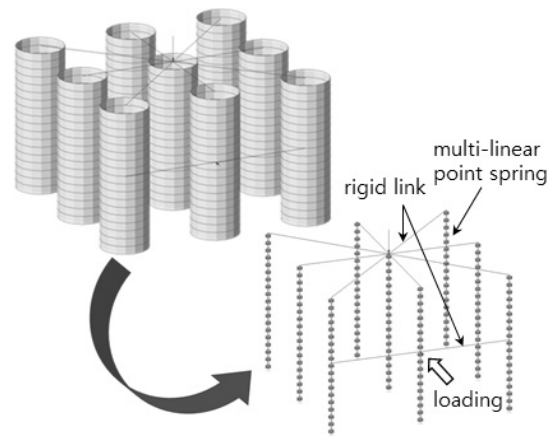


Fig. 4. Numerical modeling of group suction piles in Midas Civil program

면마찰력, z는 기초의 연직변위)과 q-z 곡선(q는 선단지력)으로 모사한다.

모델링은 범용 구조해석 프로그램인 Midas Civil(Midas IT, 2012) 프로그램을 이용하였다. Fig. 4는 Midas 프로그램을 이용한 석선파일의 모델링 요소망을 보여준다. 그림과 같이 파일은 구조 보요소(beam element)로 모델링하였다. 지반의 저항력은 파일의 각 절점에 multi-linear point spring 요소를 설치하여 비선형 스프링 강성을 모사하였다. 푸팅효과를 고려하기 위하여 파일상단의 각 절점을 rigid link 요소를 이용하여 강결시켰다. 그리고, 그룹석선파일의 중앙부에 계류선(mooring line)이 연결되기 때문에 배면 파일들의 중앙절점을 rigid link로 연결한 후 수평하중을 작용시켰다.

점성토 지반에 대한 지반 비선형 스프링 곡선은 해양 구조물 설계기준인 API(2007)에서 제안한 방법을 이용하여 산정하였다. p-y 곡선은 soft clay 모델(Matlock, 1970)을 이용하였다. 그리고, t-z 곡선과 q-z 곡선은 Table 1과 같이 기초 연직변위(z)를 직경(D)으로 나눈 정규화 변위 z/D에 대하여 정규화 지지력 t/t_{max}와 q/q_{max}의 관계를 적용하였다. 여기서, 주면마찰력 최대값 t_{max}와 선단지지력 최대값 q_{max}는 각각 식 (1)과 (2)로 산정하였다.

Table 1. t-z and q-z curves at API method (2007)

z/D	t/t _{max}	z/D	q/q _{max}
0.0016	0.30	0.002	0.25
0.0031	0.50	0.013	0.50
0.0057	0.75	0.042	0.75
0.0080	0.90	0.073	0.90
0.0100	1.00	0.100	1.00

where, z=vertical pile displacement, D=pile diameter

$$t_{\max} = \alpha \times c \quad (1)$$

$$q_{\max} = 9c \quad (2)$$

여기서, c = 해당깊이의 점성토 비배수 전단강도

α = 무차원 계수로 아래 식으로 계산함

$$\alpha = 0.5\psi^{-0.5}, \quad \psi \leq 1.0$$

$$\alpha = 0.5\psi^{-0.25}, \quad \psi > 1.0$$

$$\psi = c/\sigma'_v$$

σ'_v = 해당깊이의 유효상재압

그런데, 그룹 석선파일의 수평방향 저항력은 말뚝간 간섭효과로 인하여 감소하게 된다. 이러한 무리말뚝 효과는 많은 요인들에 의하여 영향을 받지만 주로 말뚝 중심간 간격이 가장 큰 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 Group 프로그램(Ensoft, 2010)에 적용되고 있는 방법을 이용하여 식 (3)~식 (6)과 같이 무리효과 계수 β 를 산정하였다. 각 무리효과 계수는 하중재하 방향을 기준으로 측면말뚝, 전면말뚝, 배면말뚝에 대하여 제안되었다. 최종적으로 식 (6)을 이용하여 산정된 β_s 계수를 p-y 곡선의 p값에 곱하여 수평방향 저항력의 감소효과를 고려하였다.

$$\beta_a = 0.5292 \left(\frac{S}{D} \right)^{0.5659} \leq 1.0 \quad (3)$$

$$\beta_{bL} = 0.7309 \left(\frac{S}{D} \right)^{0.2579} \leq 1.0 \quad (4)$$

$$\beta_{bT} = 0.5791 \left(\frac{S}{D} \right)^{0.3251} \leq 1.0 \quad (5)$$

$$\beta_s = (\beta_b^2 \cos^2 \phi + \beta_a^2 \sin^2 \phi)^{1/2} \quad (6)$$

여기서, β_a = 재하방향에 대하여 측면말뚝

β_{bL} = 재하방향에 대하여 전면말뚝

β_{bT} = 재하방향에 대하여 배면말뚝

ϕ = 하중 재하방향에 대하여 β 계수를 산정하고자 하는 말뚝을 연결한 선이 이루는 각 (Fig. 6 참조)

S = 말뚝 중심간 간격

비선형 스프링은 Midas 프로그램에서 지원하는 multi-linear point spring 요소를 적용하였다. 이 요소는 Fig. 5와 같이 원점을 포함한 총 6개의 (변위, 하중) 점을 입력할 수 있다.

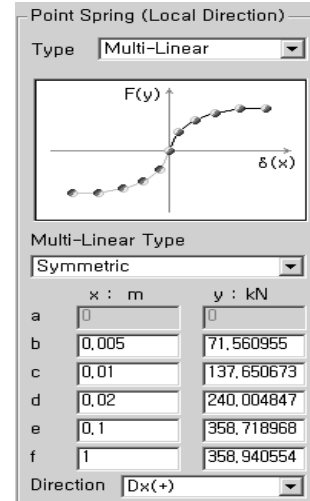


Fig. 5. Input of multi-linear point spring values

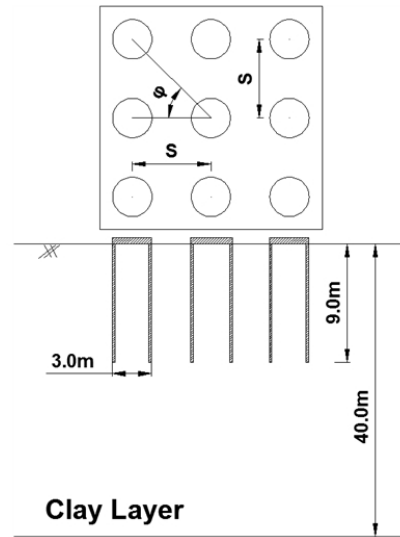


Fig. 6. Geometry of soil and piles adopted in the analysis

그리고, 그림과 같이 대칭조건(symmetric)을 적용하였다. 수평방향(X방향)의 스프링 요소는 해당깊이의 p-y 곡선에 해당하는 값을 입력한다. 그리고, 연직방향(Z방향)의 스프링 요소는 해당깊이의 t-z 곡선에 해당하는 값을 입력한다. 그리고, 기초 선단 연직방향(Z방향)의 스프링 요소는 기초 선단에서의 q-z 곡선에 해당하는 값을 입력한다. 이 때 주의할 사항은 저항력 p는 원래 단위길이에당 저항력(kN/m)의 단위를 가진다. 이에 반해, 프로그램에 입력되는 값은 힘의 단위이므로 해당절점이 대표하는 요소길이를 곱하여 힘의 단위(kN)로 변경한 후 프로그램에 입력하였다.

Midas 프로그램 상에서 비선형 스프링 값을 각 절점에 입력하는 것은 많은 노력이 필요하다. 예를 들어, 3x3 배열의 그룹 석선파일이 근입깊이 9m로 설치된 경우 보요소 길이를 0.5m로 나누고 각 절점에 x, y, z방향의 3개 스프

링을 설치하면 약 500개가 넘는 스프링 요소를 설치하고 스프링 곡선값을 개별적으로 입력하여야 한다. 이를 수작업으로 수행하는 것은 현실적으로 어려우므로 Matlab 프로그램을 이용하여 Midas 해석의 입력파일 자동 생성 프로그램을 제작하였다. 본 프로그램은 기초와 지반에 대한 기본 정보를 입력하면, 그룹 석선파일을 자동적으로 생성하고 각 절점에 x, y, z의 3방향 비선형 스프링 곡선을 multi-linear point spring 요소를 이용하여 설치한다.

3. 해석조건

해석대상은 Fig. 6과 같이 점성토 지반에 3×3열 그룹 석선파일이 설치되는 조건을 가정하였다. 석선파일은 직경이 3m, 두께가 20mm인 강재를 사용하고, 지반 근입깊이는 9m로 적용하였다. 지반조건은 연약, 중간, 견고한 점성토 지반의 3가지 조건, 그리고 그룹 석선파일의 중심간격(S)는 직경(D)의 2배, 3배, 4배로 변화시켰다.

제안된 수치 모델링 기법의 적용성을 분석하고 필요한 경우 해석결과의 보정계수를 제안하기 위하여 3차원 정밀 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석에 이용된 프로그램은 지반공학 분야에서 널리 이용되는 범용 유한요소 수치해석 프로그램인 Abaqus 프로그램(Simulia, 2010)이다. 본 연구는 석선파일의 단기 지지력을 산정하기 때문에 점성토는 비배수 거동을 하게 된다. 그러므로, 점성토 지반에 비배수 전단강도로 흙의 파괴거동을 정의할 수 있는 Tresca 항복기준을 적용하였다. 그리고, 석선파일은 탄성 모델을 적용하였다.

Table 2는 Abaqus 프로그램과 Midas 프로그램에 적용된 지반 입력물성값을 보여준다. 비배수 전단강도와 p-y 곡선 산정에 이용되는 ϵ_{50} 값은 연약, 보통, 견고한 점성토 지반에 대하여 LPILE 프로그램(Ensoft Inc, 2004)에서 제시된 대표적인 값이다. 스프링 해석모델은 p-y 스프링 곡

선의 경우 soft clay 모델(Matlock, 1970), t-z 곡선과 q-z 곡선의 경우 API 기준(2007)을 적용하였다. Abaqus 해석에서도 동일한 비배수 전단강도를 적용하였으며, 탄성계수값의 경우 연약 점성토 지반은 $400 \times S_u$, 중간 점성토 지반은 $700 \times S_u$, 견고한 점성토 지반은 $1000 \times S_u$ 를 적용하였다 (Das, 2011). 포아송비는 0.495를 적용하여 부피변화가 발생하지 않는 비배수 거동을 모사하였다 (Taiebat and Carter, 2000; Yun and Bransby, 2007; Hung and Kim, 2012).

Fig. 7은 Abaqus 해석의 유한요소망을 보여준다. 대칭 조건을 적용하여 중앙 반단면만을 모델링하였다. 그리고 경계면 거리가 해석결과에 미치는 영향을 살펴보기 위해 석선파일과 경계면사이의 거리를 5D~10D로 변화시키며 해석한 결과 석선파일과 경계면 사이의 거리에 관계없이 모두 동일한 하중-변위 곡선이 얻어졌다(Lee et al., 2013). 이 후의 해석에서는 재하방향과 재하직각방향의 경계면과 석선파일의 거리는 5D로 유지하고, 석선파일 선단으로부터 해석바닥면까지의 거리는 석선파일 직경(D)의 10배를 적용하였다. 그리고 단일한 지반조건에 대하여 물성값(연약, 중간, 견고한 점성토 지반)을 변화시키며 해석을 수행하였다.

기초와 지반간에 적용되는 인터페이스 모델은 'rough'

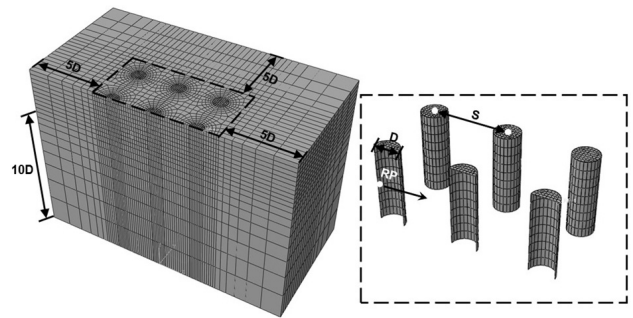


Fig. 7. Finite element meshes and boundary conditions (S/D=3, Abaqus program)

Table 2. Input properties of clay

	Model	E (kPa)	γ_{sub} (kN/m ³)	ν	c or S_u (kPa)	ϕ (deg)	ψ (deg)	ϵ_{50} for p-y curve
Soft clay	M-C	7200	5.71	0.495	18	0	0	0.020
Medium clay		25200	7.28		36			0.010
Stiff clay		72000	8.85		72			0.005
Pile	Elastic	2.1×10^8	6.8	0.2	-	-	-	-

where, E = Young's modulus, γ_{sub} = submerged unit weight, ν = Poisson's ratio, c, ϕ = cohesion and internal friction angle of soil, ϵ_{50} = strain corresponding to one-half the maximum principal stress difference

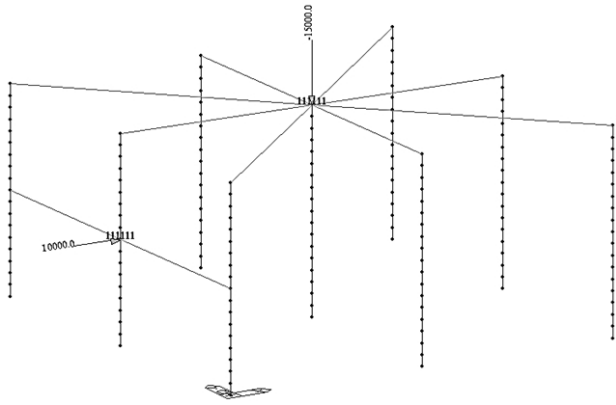


Fig. 8. Modeling of group suction piles (S/D=3, Midas program)

인터페이스를 적용하여 기초와 지반의 분리가 발생하지 않도록 하였다. 이것은 석션압에 의해 기초가 설치된 후에 점성토의 낮은 투수계수에 의해 석션압이 계속 유지되므로 흙과 기초의 분리가 발생하지 않는 거동을 모사한 것이다. 하중재하 방법은 변위 제어 방법을 적용하여 배면 파일들의 중앙부 절점을 기준점(reference point)으로 지정한 후에 기준점의 수평방향 변위를 서서히 증가시키면서 수평하중을 재하하였다. 본 석션파일에 대한 Abaqus 모델링 방법은 원심모형실험 및 기존의 정해 등과 비교하여 검증된 바 있다 (Hung and Kim, 2014a,b).

Fig. 8은 Midas 프로그램에서 모델링된 해석조건을 보여준다. 절점을 0.5m 간격으로 생성하였으며, 각 절점 깊이에 해당하는 p-y 곡선, t-z 곡선을 입력하였다. 그리고, 선단깊이에는 q-z곡선을 입력하였다. 각 파일의 상단절점들은 rigid link 모델을 이용하여 강성체로 연결하였다. 그리고, 하중재하부는 후면 3개의 파일 중앙깊이의 절점을 rigid link로 강결한 후 하중 제어 방법을 적용하여 중앙부에 수평하중을 재하하였다. 항복하중까지의 하중단계는 정밀한 하중-변위 곡선을 도출하기 위하여 최소 20단계 이상이 되도록 하였다. 그리고, 푸팅 중앙부에서의 하중-변위 곡선을 산정하였다.

4. 해석결과의 비교 및 보정계수의 제안

Fig. 9~Fig. 11은 제안된 스프링 모델링 방법과 3차원 유한요소해석에서 얻어진 수평방향 하중-변위 곡선을 비교하여 보여준다. 스프링 모델에서 얻어진 곡선은 형태가 부드럽지 못하고 꺾어지는 경향을 보여준다. 그 이유는 Fig. 5에서 설명한 바와 같이 Midas 프로그램에서 5개의 좌표점만을 입력할 수 있기 때문에 그 점에 해당하는 값을

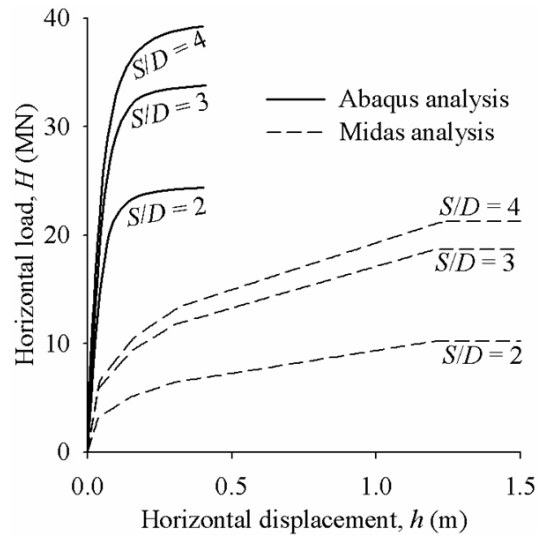


Fig. 9. Comparison of horizontal load-displacement curve (soft clay)

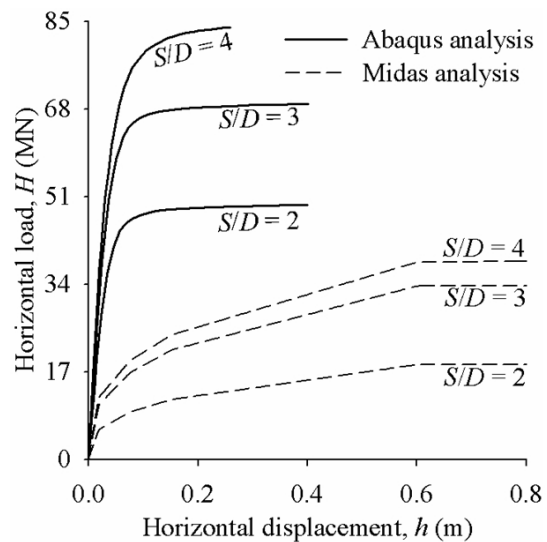


Fig. 10. Comparison of horizontal load-displacement curve (medium clay)

기준으로 곡선이 꺾어지는 형태를 보여준다.

비교 결과를 보면, 점성토 지반의 경우 스프링 모델의 최대 지지력이 작고 최대 지지력이 발생하는 변위는 큰 것으로 나타났다. 이러한 차이는 API 방법(2007)의 p-y 곡선이 소구경 말뚝의 실험결과를 이용하여 경험적으로 제안되었으며, 버켓 형상, 버켓의 대구경 조건, 버켓간 간섭효과 등의 영향을 고려하지 못하기 때문으로 판단된다.

기존의 연구결과에서도 유사한 경향이 관찰된 바 있다. Jeanjean (2009)은 0.9m 직경의 모노파일의 수평저항력을 유한요소해석, p-y 해석, 원심모형실험으로 분석하였다. 유한요소해석의 지지력 산정결과는 원심모형실험과 거의 일치하였지만 soft-clay 모델을 이용한 p-y 스프링 해석법

Table 3. p and y multiplier according to S/D and stiffness of clay

S/D	p-multiplier			y-multiplier		
	soft	medium	stiff	soft	medium	stiff
2	2,273	2,616	2,804	0.125	0.183	0.300
3	1,721	1,994	2,143			
4	1,693	2,063	2,210			

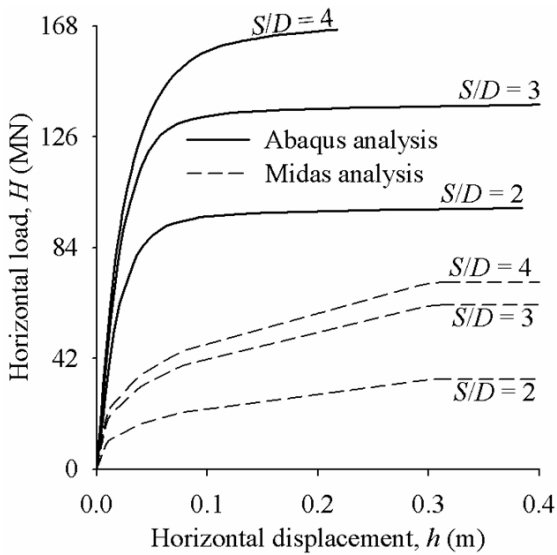


Fig. 11. Comparison of horizontal load-displacement curve (stiff clay)

은 지반 저항력을 상당히 과소평가하는 것으로 나타났다. 또한, Abdel-Rahman과 Achmus (2005)는 p-y 곡선법이 해상 대규격 모노파일의 수평저항력 산정에 적합하지 않다고 제안한 바 있다.

그러므로, 스프링 해석모델이 실제 석션파일의 저항력을 잘 모사할 수 있도록 보정하는 절차가 필요하다. 본 연구에서는 3차원 유한요소해석 결과를 실제에 가까운 정밀해로 가정한 후 개발된 설계 모델링 기법의 결과를 보정할 수 있는 보정계수를 제안하였다. 앵커는 수평저항력에 저항하는 구조체이고 지반의 수평저항력은 p-y 곡선에 의하여 정의되므로 스프링 모델 해석결과와 유한요소해석 결과가 서로 유사해지도록 API 방법으로 산정된 p-y 곡선을 보정하였다. p-y 곡선을 보정하기 위해 Fig. 12과 같이 저항력 p를 보정하는 p-multiplier, 변위 y를 보정하는 y-multiplier의 2가지 계수를 적용하였다.

Table 3은 S/D비와 점성토의 강도에 따른 p-multiplier와 y-multiplier의 산정결과를 요약하여 보여준다. p-multiplier 값은 S/D비와 지반종류 별로 1.693~2.804의 범위로 나타

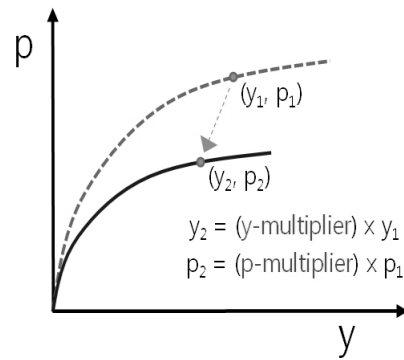


Fig. 12. p and y multiplier for modifying p-y curve

났다. 점성토의 비배수 전단강도가 증가할수록 p-multiplier 값은 점차 증가하는 경향을 보여준다. 반면에 S/D비에 따른 p-multiplier의 변화 경향은 일정하지 않은 것으로 나타났다. 그 이유는 이미 S/D비에 따른 무리말뚝 효과계수를 적용하여 보정된 p-y 곡선을 사용하였기 때문으로 판단된다. y-multiplier는 S/D비에 따라 큰 차이가 발생하지 않았기 때문에 점성토의 강도에 따른 값만을 제안하였다. y-multiplier 값은 0.125~0.3으로 점성토의 강도가 증가할수록 커지는 경향을 보여준다.

Fig. 13~Fig. 15는 보정계수를 적용한 후 얻어진 하중-변위 곡선을 보여준다. 비교 결과, 제안된 모델링 해석결과와 정밀 유한요소해석의 하중-변위 곡선 결과가 서로 잘 일치하는 것으로 나타났다. 다만, 스프링 모델(Midas-Civil analysis)의 최대지지력이 유한요소해석(Abaqus analysis)의 최대값보다 작게 나타났다. 그 이유는 1) 제안된 모델링 해석에서 보수적인 지지력 결과를 얻기 위하여 유한요소해석의 최대 지지력보다 작아지도록 p-multiplier 값을 산정하였으며, 2) 유한요소해석 결과는 항복이후에도 변위 증가에 따라 지지력이 서서히 증가하는 경향을 보여주는데 반해 스프링 모델은 극한 수평저항력을 입력함에 따라 지지력이 더 이상 증가하지 않기 때문이다.

5. 결론

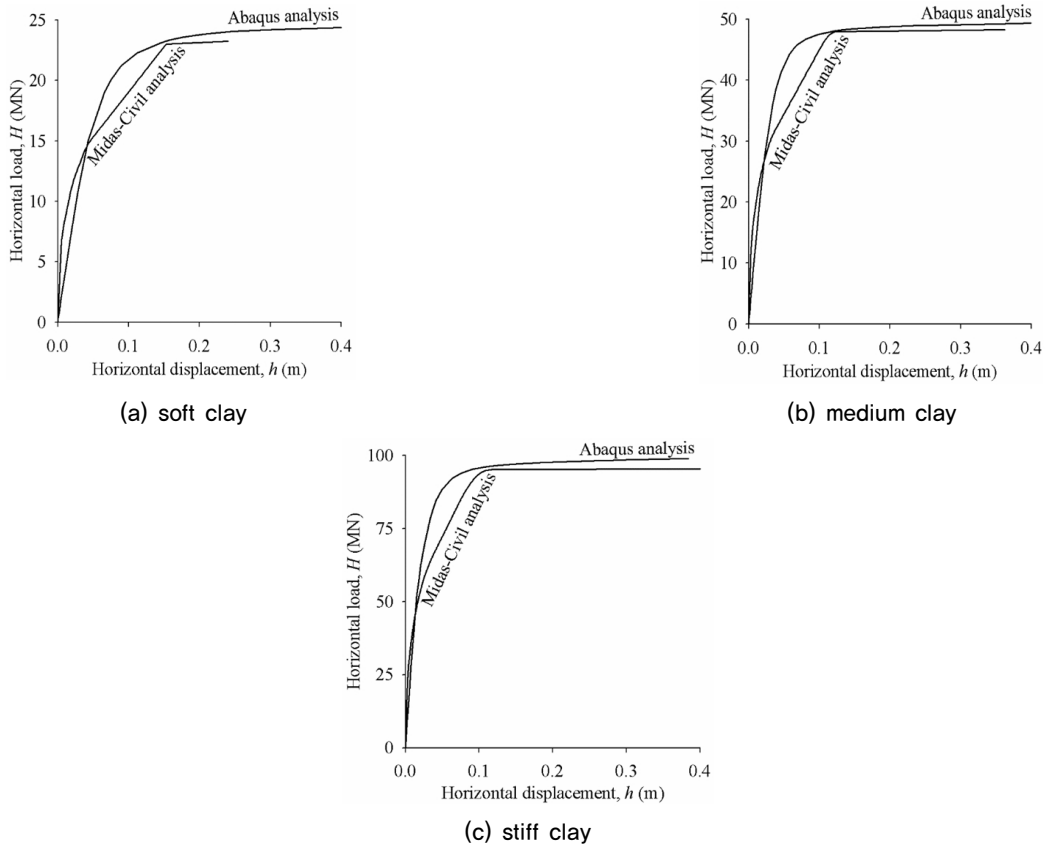


Fig. 13. Comparison of horizontal load–displacement curve after applying modification factors ($S/D=2$)

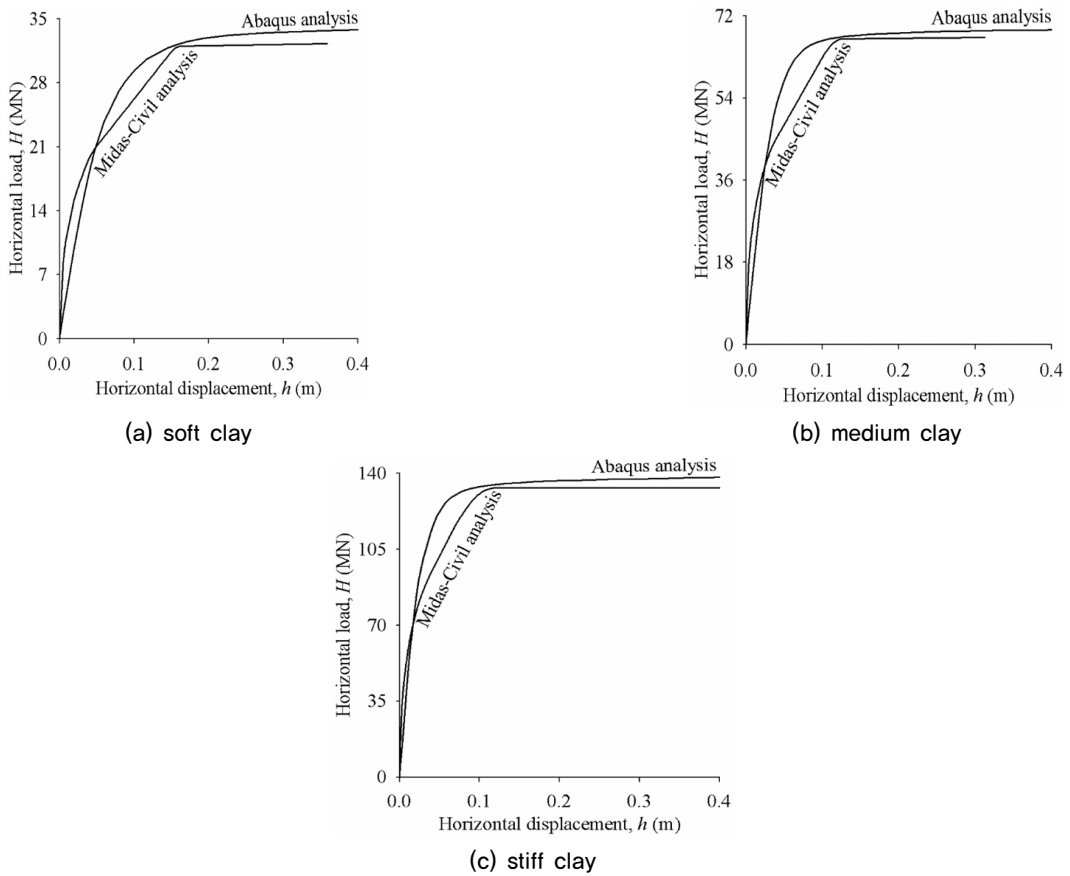


Fig. 14. Comparison of horizontal load–displacement curve after applying modification factors ($S/D=3$)

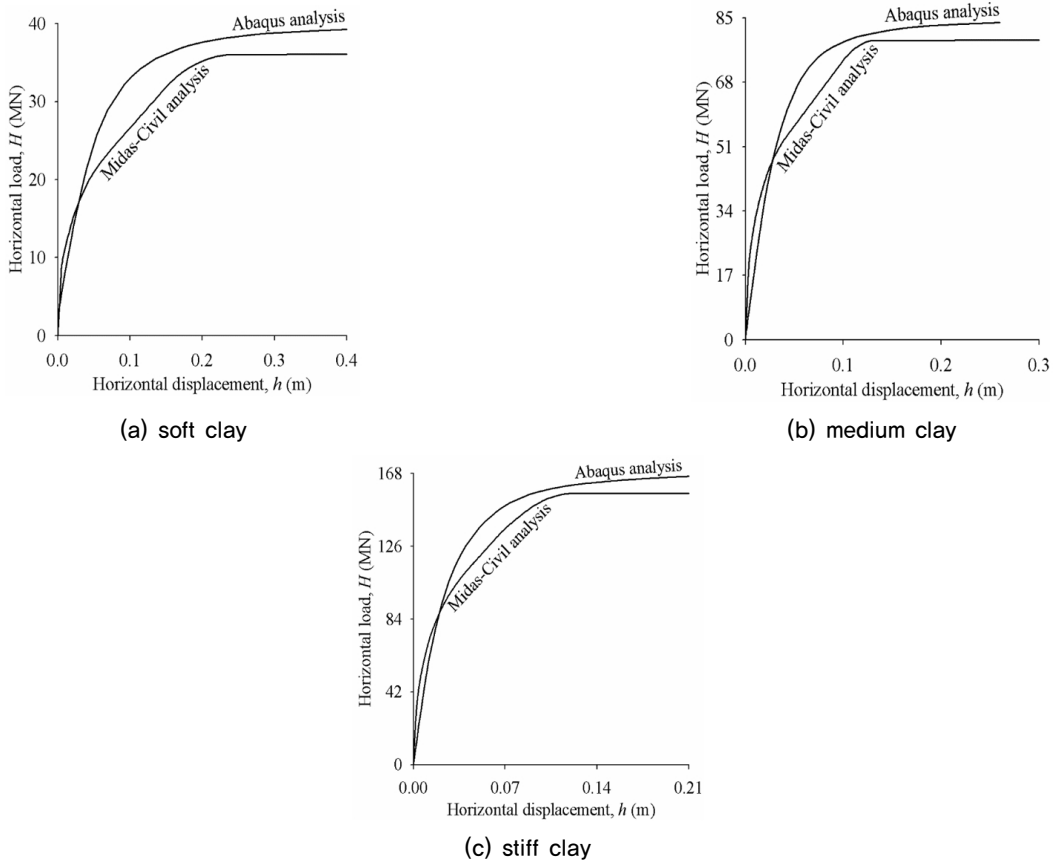


Fig. 15. Comparison of horizontal load–displacement curve after applying modification factors ($S/D=4$)

본 연구에서는 해상 앵커기초로 사용되는 그룹 석선파일의 지지력을 산정할 수 있는 실무적인 수치 모델링 기법을 제안하였으며, 3차원 정밀 유한요소해석 결과와 비교하여 제안된 모델링 기법의 지반저항력을 보정하는 계수를 제시하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 해상 앵커기초로 사용되는 그룹 석선파일의 수치 모델링 기법을 개발하였다. 본 기법은 석선파일을 구조보요소, 그리고 주변지반의 저항력을 보의 각 절점에 x, y, z 방향의 비선형 스프링 요소로 모델링한다. 해석 프로그램은 실무 적용성을 높이기 위하여 범용 구조해석 프로그램인 MIDAS 프로그램을 이용하였다. 푸팅효과를 고려하기 위하여 기초상단의 각 절점을 rigid link 요소를 이용하여 강결시키고, 앵커하중이 작용하는 배면 파일의 중앙절점을 rigid link로 연결한 후 수평하중을 작용시켰다.
- (2) 주변지반의 저항력은 각각 $p-y$ 곡선(횡방향 저항력), $t-z$ 곡선(주면 마찰력), $q-z$ 곡선(선단지지력)의 비선

형 스프링으로 모델링한다. 비선형 스프링 계수는 API 방법(2007)에서 제시한 방법을 적용하여 산정하였다. 그리고, 기초의 수평저항력은 기초 중심간 간격에 따른 무리말뚝 효과에 크게 영향을 받으므로 기초 간격에 따른 무리말뚝 효과계수를 적용하여 수평방향 저항력을 감소시켰다.

- (3) API 방법(2007)의 지반 비선형 스프링 계수는 과거 소구경 말뚝의 현장실험 결과를 이용하여 경험적으로 제시되었는데, 이 방법은 버켓 형상, 버켓의 대구경 조건, 버켓간 간섭효과 등의 영향을 고려하지 못하기 때문에 지반 저항력의 보정이 필요하다. 그러므로, Abaqus 프로그램을 이용한 3차원 유한요소해석 결과를 정밀해로 가정한 후 스프링 모델 해석결과와 비교하였다. 그 결과, 스프링 모델해석이 최대 지지력을 과소평가하고, 최대 지지력이 발생하는 변위는 크게 산정하는 것으로 나타났다.
- (4) 스프링 모델 해석결과를 정밀 유한요소해석 결과에 맞추기 위하여 스프링 모델의 지반저항력 보정계수를 산정하였다. 본 보정계수는 지반 수평저항력을 나타

내는 p-y 곡선에서 저항력 p를 보정하는 p-multiplier와 변위 y를 보정하는 y-multiplier값을 제안하는 것이다. p-multiplier 값은 S/D비와 지반종류 별로 1.693~2.804의 범위로 나타났으며, y-multiplier는 점성토의 강도에 따라 0.125~0.3의 값을 보여주었다. 다만, 본 보정계수는 본 연구의 해석조건에만 유효하며 다른 지반조건에서는 달라질 수 있다.

Acknowledgement

This research was supported by Dong-A University.

References

1. Abdel-Rahman, K. and Achmus, M. (2005), "Finite element modeling of horizontally loaded monopile foundations for offshore wind energy converters in Germany," *Frontiers in Offshore Geotechnics: ISFOG*, pp.391-396.
2. Andersen, K. H., Murff, J. D., Randolph, M. F., Clukey, E. C., Erbrich, C. T., Jostad, H. P., Hansen, B., Aubeny, C., Sharma, P. and Supachawarote, C. (2005), "Suction anchors for deepwater applications", Keynote Lecture, *Proceedings of International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics*, 1. Perth 2005. pp.3-30.
3. API (2007), *Recommended Practice for Planning, Design and Constructing Fixed Offshore Platforms—Working Stress Design*, American Petroleum Institute.
4. Colliat, J. L., Boisard, P., Andersen, K. and Schroeder, K. (1995), "Caisson Foundations as Alternative Anchors for Permanent Mooring of a Process Barge Offshore Congo", *Proceedings of Offshore Technology Conference*, OTC 7797, pp.919-929.
5. Das, B. M. (2011), *Geotechnical Engineering Handbook*, J. Ross Publishing, USA.
6. Ensoft, Inc.(2004), *A Program for the analysis of piles and drilled shafts under lateral loads (LPILE Plus Ver 5.0)*, Technical Manual.
7. Ensoft, Inc.(2010), *A Program for the analysis of a group of piles subjected to vertical and lateral loading (Group Ver 8.0)*, Technical Manual.
8. Hung L. C., Kim, S. R. (2012), "Evaluation of vertical and horizontal bearing capacities of bucket foundations in clay", *Ocean Engineering*, Vol.52, pp.75-82.
9. Hung, L. C. and Kim, S. R. (2014a), "Evaluation of combined horizontal-moment bearing capacities of tripod bucket foundations in undrained clay", *Ocean-Engineering*, Vol.85. pp.100-109.
10. Hung, L. C. and Kim, S. R. (2014b), "Evaluation of undrained bearing capacities of bucket foundations under combined loads", *Marine Georesources and Geotechnology*, Vol.32, No.1, pp.76-92.
11. Jeanjean, P. (2009), "Re-assessment of p-y curves for soft clays from centrifuge testing and finite element modeling," *Offshore Technology Conference*, Texas, USA, OTC20158.
12. KICT (2008), *Development of construction technology for concrete floated offshore infrastructures*, Planning report, KICT 2008-043, pp.3-8.
13. KICT (2011), *Development of novel technologies for low-cost and high-efficiency suction piles(II)*, KICT 2011-091, pp.53-56.
14. Kim, Y.H., Jeong, S.S., Kim, J.H. and Lee, Y.G. (2007), "Effects of Lateral Pile Rigidity of Offshore Drilled Shafts by Developing p-y Curves in Marine Clay", *Journal of KGS*, Vol.23, No.6, pp.37-51.
15. Lee, J.H., Lee, S.H. and Kim, S.R. (2013), "Horizontal Bearing Behavior of Group Suction Piles by Numerical Analysis", *Journal of KGS*, Vol.29, No.11, pp.119-127.
16. Matlock, H. (1970), "Correlation for design of laterally loaded piles in soft clays," *Proceedings of Offshore Technology Conference*, Houston Texas, pp.577-594.
17. Midas IT(2012), *Midas Civil User's Manual*.
18. Randolph, M. F., Cassidy, M. J., Gourvenec, S. M. & Erbrich, C. (2005), "Challenges of offshore geotechnical engineering", *Proc. 16th Int. Conf. Soil Mech. Geotech. Engng*, Osaka, 1, pp.123-176.
19. Simulia (2010), *Abaqus User's Manual*. Dassault Systemes Simulia Corp.
20. Taiebat H. A., Carter J. P. (2000), "Numerical studies of the bearing capacity of shallow foundations on cohesive soil subjected to combined loading", *Géotechnique*, Vol.50, No.4, pp.409-418.
21. Yun G. and Bransby M. F. (2007), "The undrained vertical bearing capacity of skirted foundations in undrained soil", *Soils and Foundations*, Vol.47, No.3, pp.493-506.