모형실험을 통한 모래지반에서 석션버켓기초의 관입저항력 평가

Investigation on the Penetration Resistance of Suction Bucket Foundation in Sand using Model Test

김 근 수¹⁾·권 오 순[†]·오 명 학¹⁾·장 인 성¹⁾ Keunsoo Kim·Osoon Kwon·Myounghak Oh·Insung Jang

Received: March 28th, 2014; Revised: April 21st, 2014; Accepted: May 19th, 2014

ABSTRACT : Suction bucket foundation is installed with the differential pressure created by pumping water out of bucket. Bucket foundation has usually been utilized in mooring anchor for offshore platform or floating oil and gas production facilities in the open sea. After suction bucket foundation successfully was applied as the foundation for offshore wind turbines in Europe, it recently attracts much attention in Korea, too. To estimate the penetration resistance of the suction bucket foundation is one of the important matters that should be considered during its installation. This study carried out a series of model tests to investigate the penetration resistance of suction bucket foundation. And the mobilized soil strength factor was reviewed through comparing the experimental results by two installation ways (e.g., push-in-load and suction) and the results calculated by the conventional equation.

Keywords: Suction bucket foundation, Push-in-load installation, Suction installation, Penetration resistance, Mobilized soil strength factor

요 지: 석선버켓기초는 펌프로 버켓 내부의 물을 외부로 배출할 때 발생한 압력차로 지반에 설치되는 기초이다. 버켓기초는 외해 의 플랫폼이나 석유·가스 시추시설을 계류시키기 위한 앵커로 주로 사용되었으나, 최근 유럽을 중심으로 해상풍력발전의 기초로 적용되기 시작하면서 국내에서도 큰 관심을 받고 있다. 석선버켓기초의 관입저항력 산정은 석선버켓기초를 성공적으로 시공하기 위해 고려해야 할 주요 사항 중의 하나이다. 본 연구는 석선버켓기초를 관입시킬 때 필요한 관입력을 평가하기 위해 실내모형실험 을 수행하였다. 실내모형실험은 압입설치 및 석선설치에서 측정한 관입저항력을 관입성능평가에서 많이 사용되는 기존의 이론식과 비교하여 강도감소계수의 적절한 범위를 검토하였다.

주요어: 석션버켓기초, 압입설치, 석션설치, 관입저항력, 강도감소계수

1. 서 론

석선버켓기초는 버켓 내부의 물을 수중펌프로 밖으로 배 출시킬 때 발생하는 내·외부의 압력차를 이용하여 설치하 는 기초로, 여기서 버켓기초는 양동이(bucket)를 거꾸로 놓 은 것과 같은 형상이라 하여 붙여진 이름이다. 또한 설치 시 와 반대순서로 물을 버켓 내부로 유입시키면 인발이 가능하 므로, 사용완료 후 제거가 가능하다는 장점이 있다(Bang et al., 2000). 버켓기초는 주로 외해의 플랫폼이나 석유·가스 시추시설을 계류시키기 위한 앵커로 사용되어왔으나, 최근 유럽을 중심으로 해상풍력발전의 기초공법으로 적용하는 사례가 점차 증가하고 있다(Houlsby et al., 2005).

버켓기초가 석션압으로 관입되는 동안 버켓기초와 주변지 반과의 상호역학관계를 규명하기 위한 연구는 그동안 많은 연구자들에 의해 수행되었다(Bang et al., 2000; Houlsby & Byrne, 2005; Tran & Randolph, 2008; Senders & Randolph, 2009). 석션압이 버켓기초의 내부에 작용하면 버켓기초 내 부에 흐름이 발생하기 때문에 버켓 내부의 흙은 상태가 변 화되고, 이때 지반의 투수계수, 흙의 밀도 및 강도정수의 변화 등을 정확하게 측정하는 것이 쉽지 않다. 다만 수치해 석(Houlsby & Byrne, 2005; Tran & Randolph, 2008)이나 간극수압측정(Senders & Randolph, 2009)과 같은 간접적인 방법으로 흙의 밀도가 느슨해지고 내부마찰각이 감소하기 때문에 석션버켓기초의 관입저항력이 감소하는 것을 확인 하였을 뿐이다. Bang et al.(2000)은 투수가 고려된 얕은 기 초의 지지력 산정식에 강도감소계수(mobilized soil strength factor)를 적용하여 석션버켓기초의 관입저항력 산정방법을 제시하였다.

¹⁾ Coastal Development & Ocean Energy Research Division, Korea Institute of Ocean Science & Technology

[†] Coastal Development & Ocean Energy Research Division, Korea Institute of Ocean Science & Technology (Corresponding Author : oskwon@kiost.ac)

본 연구에서는 모래지반에서 석션버켓기초를 관입시킬 때 필요한 관입력을 실내모형실험에서 평가하고자 하였다. 이를 위하여 버켓기초를 압입설치와 석션설치 방법으로 각 각 관입시켰을 때 얻어지는 관입저항력을 측정한 후, 관입 성능평가에서 많이 사용되는 Bang et al.(2000)의 방법과 비 교하였다.

2. 강도감소계수에 의한 관입저항력 산정방법

2.1 강도감소계수(mobilized soil strength factor)

Fig. 1은 일반적으로 알려져 있는 석선버켓기초의 관입원 리를 보여준다. 버켓기초의 관입과정은 자중관입 단계와 석 선관입 단계로 나누어진다. 버켓기초를 해저면에 안착시키 면 버켓기초는 자중에 의해 지반의 일정 깊이까지 관입되는 데 이 과정을 자중관입 단계라 한다. 이때의 힘의 평형 관계 를 고려하면, 임의의 깊이에서의 관입저항력보다 자중에 의 한 관입력이 조금이라도 크면 관입이 계속되고 같으면 자중 관입이 종료된다.

이후 석션관입이 시작되는데, 펌프로 버켓기초 내부의 물을 외부로 배출하면 이로 인해 버켓기초 내·외부에는 압 력차가 발생한다. 이 압력차는 버켓기초의 상판에 수직하중 처럼 작용하여 버켓기초는 지반에 압입되는 것처럼 거동한 다. 버켓기초는 관입력이 관입저항력과 같아지는 깊이까지 관입되며, 힘의 평형상태에 도달하면 버켓기초는 관입을 멈 춘다. 이때 압력차를 증가시키면 버켓기초는 다시 관입된 다. 이러한 과정을 반복하여 버켓기초를 설계깊이까지 관입 시킨다.

포화된 모래지반에서 석션압이 작용하면 버켓기초의 외 부에서 내부방향으로 침투가 발생하는데, 버켓기초 내부에



Fig. 1. Penetration mechanism of suction bucket foundation

서는 상향침투로 인해 모래가 느슨해지고 유효응력이 감소 한다. 이로 인해 모래의 내부마찰각, 그리고 모래와 버켓기 초 사이의 마찰각도 감소한다. 따라서 지반의 관입저항력은 크게 감소하고 버켓기초는 더욱 쉽게 관입될 수 있다. Bang et al.(2000)은 지반의 관입저항력을 얕은 기초의 극한지지 력식으로 산정하고, 석션버켓기초의 설치 중 발생된 내부마 찰각의 감소량을 정량화하기 위한 방법으로 강도감소계수 (α)를 적용하는 방법을 제시하였다. Bang et al.(2000)의 강 도감소계수는 Eq. (1)로 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \frac{\tan \phi'_{m}}{\tan \phi'} \tag{1}$$

여기서 ϕ' 는 흙의 유효 내부마찰각(effective friction angle), ϕ'_m 는 유효 발휘마찰각(mobilized effective friction angle)이다.

2.2 선단저항력

버켓기초의 관입저항력은 임의의 깊이에서 버켓기초 선 단의 선단저항력과 버켓기초 내·외 벽체의 주면마찰력의 합이다. 버켓기초의 벽체두께(t)를 얕은 기초의 폭(B)으로 가정하면, 버켓기초의 선단은 기초형상이 띠기초라고 가정 할 수 있다. 그러므로 버켓기초가 관입되는 동안 선단에서 발생하는 저항력을 산정하는 방법은 얕은 기초가 띠기초 형 상일 때 사용하는 극한지지력식을 이용할 수 있으며, 이때 의 극한지지력식은 Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$q_u = c' N_c + q' N_q + 0.5\gamma' t N_\gamma \tag{2}$$

여기서 c'은 흙의 점착력, q'은 얕은 기초의 관입깊이에 서의 유효상재하중, γ' 는 흙의 수중단위중량, t는 버켓기 초의 벽체두께이다. N_c 는 Prandtl(1921)에 의한 지지력계 수, N_q 는 Reissner(1924)에 의한 지지력계수, N_{γ} 는 Caquot & Kerisel(1953)와 Vesic(1973)에 의한 지지력계수이다. 석 선버켓기초의 관입저항력 산정을 위해 유효 발휘마찰각 (ϕ'_m)을 각각의 지지력계수에 적용하면 Eq. (3), Eq. (4) 그 리고 Eq. (5)와 같다.

$$N_{q} = e^{\pi \tan^{\phi'_{m}}} \tan^{2} \left(45^{\circ} + \frac{\phi'_{m}}{2} \right)$$
(3)

$$N_c = \left(N_q - 1\right) \cot\phi'_m \tag{4}$$

$$N_{\gamma} = 2(N_q + 1) \tan \phi'_m \tag{5}$$

2.3 주면마찰력

버켓기초는 일반적인 말뚝에 비해 직경이 커서 주면적 또한 매우 크기 때문에 버켓기초 내·외 벽체에서 발생하는 주면마찰력을 고려할 필요가 있다. 주면마찰력은 Eq. (6)으 로부터 구할 수 있다.

$$q_{s} = \sum_{i=1}^{N} \int_{0}^{L_{i}} \pi D f_{s} \, dz = \sum_{i=1}^{N} \int_{0}^{L_{i}} \pi D \big(c' + \sigma' K_{o} \tan \delta \big) \, dz \quad (6)$$

여기서 D는 버켓기초의 직경, f_s 는 단위주면마찰력, c'은 흙의 점착력, σ' 은 임의의 깊이에서 유효상재압력, K_o 는







(b) Bucket foundations

Fig. 2. Schematic diagram of model test on installation of bucket foundation

흙의 정지토압계수, δ는 버켓기초의 벽체와 흙 사이의 마찰 각, *L_i는 i* 번째 층에서 버켓기초의 절편길이, *N*은 층의 수 이다.

3. 버켓기초 관입 실내실험

3.1 토조 및 버켓기초

실내실험에서 버켓기초의 관입저항력을 측정하기 위한 토조와 모형버켓기초를 Fig. 2에 보인 바와 같이 제작하였 다. 토조는 폭, 길이, 높이가 800 mm인 정육면체 형상이며, 토조의 벽면은 버켓기초의 관입거동을 용이하게 관측하기 위하여 투명 아크릴로 만들어졌다. 본 연구에서 사용한 버 켓기초의 제원을 Table 1에 제시하였다. 버켓기초의 길이 (L)는 100 mm로 일정하며, 직경(D)은 100, 150, 300 mm로 제작하여 L/D를 변화시켰다.

3.2 지반조건

토조실험을 위한 모형지반은 400 mm 두께의 사질토 지 반을 조성한 후, 수심은 350 mm가 되도록 하였다. 지반조 성에 사용된 시료는 주문진 표준사로 기본특성은 Table 2와 같다. 모형지반의 상대밀도는 약 35~40 % 수준으로 조성 하였으며, 지반조성 후 휴대용 콘관입시험기를 사용하여 지 반특성을 평가한 결과 모형지반의 유효 내부마찰각은 30° 로 나타났다(Oh, 1993).

3.3 실험방법

본 연구에서는 압입설치와 석션설치 방법으로 석션버켓 기초를 관입시키고 버켓기초가 관입하는 동안의 관입저항 력을 측정하였다. Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)는 두 가지 방법으로

Table 1. Geometry of	bucket	foundations	with	thickness	of	5	mm
and length	of 100 r	mm					

Diameter, D (mm)	100	150	300
Aspect ratio, L/D	1	0.67	0.33
t/D	0.05	0.033	0.017
Interior area, A _i (mm ²)	6,361.7	15,393.8	66,052.0
Tip area, A _t (mm ²)	1,492.3	2,277.7	4,633.8

Table 2. Index properties of Jumunjin sand

	Parti	cle size ((mm)	C C		24	
Gs	D ₁₀	D ₃₀	D ₆₀	Cu	Cg	Y sat	
2.65	0.36	0.48	0.61	1.69	1.05	18.56 kN/m ³	

버켓기초를 관입시키기 위한 실험장치를 보여준다. 압입설 치 방법은 포화된 모래지반에서 침투가 발생하지 않을 때의 관입저항력을 측정하기 위해 수행하였으며, 석션설치 방법 은 침투로 인해 강도가 감소한 지반에서의 관입저항력을 측 정하기 위해 수행하였다.

압입설치 방법에서 버켓기초를 관입시키기 위한 수직하 중은 유압실린더로부터 강봉을 통해 버켓기초에 전달되도 록 하였고, 유압실린더와 강봉 사이에 로드셀을 연결하여 수직하중을 측정하였다. 수직하중이 증가함에 따라 버켓기 초는 지반에 관입되는데, 이때 발생하는 수직변위는 두 개 의 LVDT를 사용하여 측정하였다. 유압실린더와 LVDT는



(a) Push-in-load installation



(b) Suction installation

Fig. 3. Schematic diagram of model test on installation of bucket foundation

실험하는 도중 다른 실험 장치에 의한 간섭을 받지 않도록 프레임에 고정시켰다.

석선버켓기초의 설치는 일반적으로 자중관입 단계와 석 선관입 단계로 이루어진다. 자중관입 단계에서 콘크리트나 강재로 만들어진 버켓기초는 매우 단단한 지반이 아니라면 최소관입깊이가 일반적으로 확보된다. 최소관입깊이는 석 선버켓기초의 설치 도중에 지반의 불안정(모래지반은 보일 링, 점토지반은 플러깅)이 나타나지 않고 석선버켓기초를 설계깊이까지 관입시키는데 필요한 자중관입 단계에서의 관입깊이이다. 그러나 아크릴로 제작한 모형버켓기초는 자 중이 매우 작아서 자중관입에 의한 최소관입깊이의 확보가 어려우므로 모형실험에서는 임의의 깊이까지는 압입설치 방법으로 버켓기초를 관입시켜 자중관입을 대체하였다.

초기관입깊이 결정을 위해 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm 의 초기관입깊이 조건에 대해 예비실험을 수행한 결과, 직 경이 100 mm인 버켓기초의 경우 초기관입깊이가 20 mm, 30 mm, 40 mm일 때 관입 도중 보일링이 발생하였다. 그러 나 초기관입깊이가 50 mm일 때는 모든 직경의 버켓기초에 서 보일링이 발생하지 않았다. 따라서 본 실험에서는 버켓 기초를 50 mm 깊이까지 압입설치 방법에 의해 관입시킨 후 석션압을 가하여 최종관입깊이까지 설치하는 방법으로 실 험을 수행하였다.

4. 설치방법에 따른 버켓기초의 관입거동

4.1 압입설치

Fig. 4(a)는 직경이 150 mm이고, 길이가 100 mm인 버켓 기초를 압입설치 방법으로 관입시킬 때 경과시간에 따라 수 직하중과 수직변위의 변화를 보여준다. 수직하중은 유압실 린더를 이용하여 1 mm/sec의 일정한 속도로 재하하였고, 단 계재하방식에 따라 수직변위 매 10 mm마다 2분 동안 수직 하중을 유지하였다.

Fig. 4(b)는 직경에 따른 관입깊이-수직하중의 관계를 보 여준다. 단계재하방식에 따라 하중을 재하한 후 매 10 mm 마다 2분 동안 하중을 유지하였으므로, 각 단계에서 2분이 되었을 때의 수직변위와 하중을 각 단계에서의 관입깊이와 관입저항력으로 결정하였다. 버켓기초의 직경이 증가하면 선단면적(≈πDt)도 증가하므로, 버켓기초의 직경이 증가 함에 따라 임의의 깊이에서의 관입저항력도 증가하였다. 그 리고 모래지반에서는 깊이가 증가함에 따라 강도가 증가하 므로, 버켓기초가 관입되면서 관입저항력 또한 증가하는 경 향을 보였다. 이러한 경향은 Tran et al.(2007)과 Tran &







Fig. 4. The behavior of bucket penetrated by push-in-load installation

Randolph(2008)의 원심모형실험결과에서도 볼 수 있다. 이 들은 버켓기초의 관입깊이가 증가함에 따라 관입저항력의 증가율이 증가하는 이유는 주면마찰력의 증가율이 깊이의 증가율보다 크기 때문이라고 하였다.

4.2 석션설치

Fig. 5(a)는 직경이 150 mm이고, 길이가 100 mm인 버켓 기초를 석선설치 방법으로 관입시킬 때 경과시간에 따른 버 켓기초의 내·외부 압력차와 수직변위의 변화를 보여준다. 버켓기초를 50 mm 깊이까지 초기관입시킨 후, 매우 천천히 펌프의 회전속도를 증가시켰다. 버켓기초가 관입을 시작하 면 펌프의 회전속도를 유지하였고, 1분 동안 버켓기초의 관 입량이 0.5 mm 이하가 되면 더 이상 관입되지 않는 것으로 가정하였다. 그러면 펌프의 회전속도를 천천히 증가시켜 버 켓기초가 다시 관입되도록 하였다. 이러한 과정을 반복하여 버켓 상판과 내부의 모래가 닿으면 관입을 종료하였다. 가 장 큰 내·외부 압력차는 버켓 상판이 모래에 당을 때 발생 하였는데, 그 크기는 1.2 kPa이었고 이때 버켓기초 내부에







Fig. 5. The behavior of bucket penetrated by suction installation

서 배출되는 물의 양은 1.3 ℓ/min이었다.

Fig. 5(b)는 직경에 따른 관입깊이-석션압의 관계를 보여 준다. 1분 동안 버켓기초의 관입량이 0.5 mm 이하가 되었 을 때의 수직변위와 내·외부 압력차를 각각 관입깊이와 석 션압으로 결정하였다. 직경이 클수록 버켓기초를 관입시키 기 위해 더 큰 석션압이 필요하였다. 그리고 석션압은 관입 깊이가 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가하였다. 이러한 경향은 모래지반에서 버켓기초의 관입실험을 수행한 기존 의 연구결과와 유사하였다(Allersma et al., 2001; Tran et al., 2007; Tran & Randolph, 2008).

5. 버켓기초의 관입저항력 평가

5.1 설치방법에 따른 관입저항력 비교

설치방법(압입과 석션)에 따른 버켓기초의 관입저항력 은 Fig. 6에서 비교할 수 있다. 그림에서 석션설치에 의한 관입저항력은 임의의 깊이에서 측정한 석션압에 버켓기초 의 내부단면적을 곱하여 계산한 값이다. Table 3에서 설치 방법과 직경에 따른 관입저항력, 그리고 압입설치 시 관입 저항력에 대한 석션설치 시 관입저항력의 비율을 확인할 수 있다. Table 3에 정리한 관입저항력은 최종관입깊이에 서의 저항력이다. 앞에서 언급한 바와 같이 압입설치 시에 는 버켓기초의 관입깊이가 증가함에 따라 관입저항력의 증 가율이 증가하는 반면, 석션설치 시에는 관입저항력의 증 가율이 거의 일정하였다. 50 mm부터 80 mm까지의 구간에 서 압입설치 시 관입저항력에 대한 석션설치 시 관입저항력 의 비율은 깊이에 따라 다르므로, 관입깊이가 50, 60, 70, 80 mm일 때 설치방법에 따른 관입저항력의 비율을 평균하였 다. 직경이 100 mm, 150 mm와 300 mm인 버켓기초의 석션 설치 시 관입저항력은 압입설치 시 관입저항력의 3.5 %, 7.2 %, 그리고 16.8 %에 해당하였다.

Tran & Randolph(2008)는 직경과 길이가 60 mm이고, 두 께가 0.3 mm인 버켓기초를 상대밀도 91 %의 모래지반에 압입설치와 석션설치 방법으로 각각 관입시키는 원심모형 실험(중력가속도 100 g)을 수행하였다. 버켓기초를 압입설 치 방법으로 설계깊이까지 관입시킬 때의 관입저항력은 약 15 MN인 반면, 석션설치에 의한 관입저항력은 압입설치 시 의 약 18 %인 2.8 MN이었다. 석션설치 시 관입저항력이 압 입설치 시 관입저항력보다 작은 이유는 석션설치 시 발생하 는 투수효과 때문에 모래의 밀도가 느슨해지고 유효응력이 감소하여 선단에서의 저항력이 크게 감소하기 때문이다.

5.2 압입설치 시 관입저항력 산정

버켓기초의 압입설치 시 관입저항력은 선단저항력과 주면 마찰력을 더하여 산정할 수 있다. 모형지반의 유효 내부마찰 각 30°를 사용하여 계산한 직경 100 mm, 150 mm, 300 mm 버켓기초의 관입저항력을 Fig. 7에 검은 점선으로 나타내었 다. 각각의 직경에서 최종관입깊이일 때의 관입저항력은 38.1 N, 58.9 N, 그리고 109.9 N이었다. 계산으로 구한 관입 저항력은 압입설치 시 측정한 관입저항력과 약 80 %의 차 이를 보였다(Table 4).

Shiraishi(1990), Tatsuoka et al.(1997), Cerato & Lutenegger (2007)는 모래지반 위에 놓인 얕은 기초의 극한지지력을 연 구하기 위해 재하실험을 수행하였으며, 실험결과 매우 작은 기초의 극한지지력은 얕은 기초의 극한지지력식으로 계산 한 극한지지력보다 매우 크다고 하였다. 이들은 그 이유를 Mohr-Coulomb 파괴포락선과 한계상태이론으로 설명하였 다. Mohr-Coulomb 파괴포락선으로부터 결정되는 흙의 내 부마찰각은 구속압이 작을수록 증가하는데, 매우 작은 기초



Fig. 6. Comparison of penetration resistance with installation way

Table 3. Comparison of penetration resistance with installation way

Diameter of bucket	100 mm	150 mm	300 mm
Q_{R-push} by push-in-load installation	226.5 N	340.7 N	661.5 N
Q_{R-suc} by suction installation	6.7 N	19.2 N	90.5 N
$\left(\mathit{Q}_{R-\mathit{suc}} / \mathit{Q}_{R-\mathit{push}} ight)_{ave}$	3.5 %	7.2 %	16.8 %

Q means penetration resistance obtained by tests; R is a abbreviation of resistance

아래의 지반은 조밀한 흙처럼 체적팽창이 발생한다.

의 아래에 있는 지반의 응력상태는 매우 작기 때문에 이때 의 내부마찰각은 설계에 사용되는 내부마찰각보다 크다. 또 한 폭이 다른 기초가 간극비가 같은 지반 위에 놓여 있다 하더라도 폭에 따라 다른 거동을 보이는데, 폭이 작은 기초

Cerato & Lutenegger(2007)가 제안한 방법으로 실험결과 를 역산하였을 때 모형지반의 유효 내부마찰각은 45°이고, 이때의 유효 내부마찰각을 사용하여 계산한 관입저항력을



Fig. 7. Penetration resistance calculated by effective friction angle (ϕ' =30°)





Table 4. Comparison of resistance force expected from bearing capacity equation

Diameter of bucket	100 mm	150 mm	300 mm
F_{R-eq} by $\phi'=30^{\circ}$	38.1 N	58.9 N	109.9 N
F_{R-back} by $\phi'=45^{\circ}$	222.5 N	343.8 N	650.0 N
$\left(F_{R-eq}/Q_{R-push}\right)_{ave}$	17.4 %	21.4 %	19.4 %
$\left(F_{R-\mathit{back}}/\mathit{Q}_{R-\mathit{push}} ight)_{ave}$	119 %	147 %	134 %
$\left(Q_{R-suc}/F_{R-eq} ight) _{ave}$	19.3 %	35.9 %	91.8 %

Q and F respectively means penetration resistance obtained by tests and bearing capacity equation; R is a abbreviation of resistance

Fig. 8에 나타내었다. Cerato & Lutenegger(2007)의 방법으 로 계산된 관입저항력은 압입설치 시 측정한 관입저항력과 잘 일치하므로 압입설치 시 나타난 높은 관입저항력은 실내 모형실험에서의 낮은 응력상태 때문에 발생하였음을 확인 할 수 있었다.

5.3 석션설치 시 관입저항력 산정

Bang et al.(2000)에 의한 관입저항력을 산정하는 방법은 앞서 제시한 Eqs. (1)~(6)과 같다. 이 방법은 얕은 기초의 지지력공식에 강도감소계수를 적용함으로써 유효응력이 감 소된 지반에서의 관입저항력을 산정할 수 있는 방법이며 지 금까지의 연구들(Houlsby & Byrne, 2005; Tran et al., 2007; Senders & Randolph, 2009; Tran & Randolph, 2008) 중에서 비교적 간단하게 관입저항력을 산정할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 Bang et al.(2000)에 의한 방법으로 버켓기초의 설치방법에 따른 관입저항력을 산정한 후 실험결과와 비교 하였다. 버켓기초의 직경이 100 mm, 150 mm, 300 mm일 때, 석션설치 시 측정된 관입저항력은 Table 4와 같이 얕은 기초의 지지력공식으로 산정한 관입저항력의 19.3 %, 35.9 %, 91.8 %였다. 그리고 버켓기초의 직경에 따라 적용한 강도감 소계수는 0.1, 0.4, 0.96이었으며, 이 값들은 Bang et al.(2000) 에 의한 강도감소계수의 범위(0.3~1.0)보다 약간 작은 것 으로 나타났다. 각 버켓기초에 강도감소계수를 적용하여 산 정한 석션설치 시 관입저항력은 Fig. 9와 같다. 그리고 버켓 기초의 직경에 따라 적용한 강도감소계수와 산정된 관입저 항력, 그리고 산정된 관입저항력에 대한 측정된 관입저항력 의 비율을 Table 5에 정리하였다. 석션버켓기초의 직경이 클수록 관입저항력을 산정하기 위해 적용해야 할 강도감소 계수는 증가하는 경향을 보이고 있으나, 이러한 경향은 실 내모형실험에서의 결과이므로 현장에 적용하기 위해서는 더 많은 연구가 필요하다.

6. 결 론

모래지반에서 석션버켓기초를 관입시킬 때 필요한 관입 력을 평가하기 위해 실내모형실험을 수행하여 관입성능평 가에서 많이 사용되는 Bang et al.(2000)의 방법과 비교하 였다. Bang et al.(2000)의 방법은 투수가 고려된 얕은 기초 의 지지력 산정식에 강도감소계수(mobilized soil strength factor)를 적용하고 있는데, 여기에서는 실내모형실험으로



Fig. 9. Penetration resistance reduced by mobilized soil strength factor (α)

Table 5. Comparison of Penetration resistance reduced by mobilized soil strength factor (α)

Diameter of bucket	100 mm	150 mm	300 mm
α	0.1	0.4	0.96
F_{R-red} by $lpha$	11.3 N	23.0 N	101.7 N
$(F_{R-red}/F_{R-eq})_{ave}$	21.7 %	31.1 %	91.3 %
$(Q_{R-suc}/F_{R-red})_{ave}$	72.2 %	100.5 %	99.6 %

Q and F respectively means penetration resistance obtained by tests and bearing capacity equation; R is a abbreviation of resistance

82 >> Investigation on the Penetration Resistance of Suction Bucket Foundation in Sand using Model Test

압입 및 석션을 각각 적용하였을 때 얻어지는 관입저항력을 측정하여 강도감소계수의 적절한 범위를 검토하였으며 다 음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 압입설치와 석션설치 방법 모두에서 버켓기초의 직경
 이 커질수록 관입저항력이 증가하였으며, 버켓기초의 관입깊이가 깊어질수록 관입저항력도 증가하였다.
- (2) 석션설치 방법에서 측정된 관입저항력은 압입설치 방법 에서 측정된 관입저항력에 비해 3.5 %~16.8 % 범위로 나타났는데, 이것은 Tran & Randolph(2008)에 의해 수 행된 100 g 원심모형실험의 결과인 18 %보다 다소 작은 값을 보이고 있다. 이것은 모형의 크기가 작은 조건에서 수행된 실내토조실험에서 나타나는 낮은 응력상태조건 으로 인한 것으로 판단된다. Cerato & Lutenegger(2007) 의 방법으로 역산하면 모형지반의 내부마찰각을 45°로 평가할 수 있어 압입설치 방법에서 나타나는 높은 관입 저항력을 설명할 수 있다.
- (3) Bang et al.(2000)의 방법에서 사용하는 얕은 기초의 지 지력공식으로 산정한 관입저항력과 비교하면, 석선설치 방법에서 측정된 관입저항력은 19.3 %~91.8 %의 범위 로 나타났다. 그러므로 실험결과에 따라 모래지반에서 강도감소계수(mobilized soil strength factor)의 범위는 0.1~0.96의 값으로 산정되었다.
- (4) 버켓기초의 설치는 석선을 이용하면 압입설치 방법보 다 쉽게 이루어지는 점을 실내모형실험에서 확인하였 다. 그리고 석선버켓기초가 관입되는 동안의 거동과 관 입메커니즘의 규명은 다양한 형상의 버켓기초에 대한 관입거동의 관측, 수치해석에 의한 관입저항력의 평가 와 같은 후속 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 2010 건설기술혁신사업(과제번호: 10기술혁신E04)인 "대구경(직 경 5 m급) 및 대수심(수심 60 m 이하) 해상풍력기초시스템 기술개발"과제로 수행되었습니다.

References

- Allersma, H. G. B., Hogervorst, J. R. and Pimoulle, M. (2001), Centrifuge modeling of suction pile installation using a percussion technique, Proc. of 11th International Offshore and Polar Engineering Conference, International Society of Offshore and Polar Engineers, Stavanger, Norway, pp. 620–625.
- Bang, S., Preber, T., Cho, Y., Thomason, J., Karnoski, S. R. and Taylor, R. J. (2000), Suction piles for mooring of mobile offshore bases, Marine Structures, Vol. 13, No. 5. pp. 367~382.
- Caquot, A. and Kerisel, J. (1953), Sur le terme de surface dans le calcul des fondations en milieu pulverulent, Proc. Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Zurich, Vol. 1, pp. 336~337.
- Cerato, A. B. and Lutenegger, A. J. (2007), Scale effects of shallow foundation bearing capacity on granular material, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 133, No. 10, pp. 1192~1202.
- Houlsby, G. T. and Byrne, B. W. (2005), Design procedures for installation of suction caissons in sand, Proc. of the ICE, Geotechnical Engineering, Vol. 158, No. 3, pp. 135~144.
- Houlsby, G. T., Ibsen, L. B. and Byrne, B. W. (2005), Suction caissons for wind turbines, Proc. International Symposium Frontiers in Offshore Geotechnics – ISFOG, Taylor and Francis, Perth, Australia, pp. 75~93.
- Oh, S. N. (1993), A study on estimation of shear strength parameters using cone index, Master's thesis, Seoul National University, pp. 32~47 (in Korean).
- Prandtl, L. (1921), Über die eindringungsfestigkeit (härte) plastischer baustoffe und die festigkeit von schneiden, Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik, Vol, 1, No. 1, pp. 15~20.
- Reissner, H. (1924), Zum erddruckproblem, Proceedings, First International Congress of Applied Mechanics, Delft, pp. 295~311.
- Senders, M. and Randolph, M. F. (2009), CPT-based method for the installation of suction caissons in sand, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 135, No. 1, pp. 14~25.
- Shiraishi, S. (1990), Variation in bearing capacity factors of dense sand assessed by loading tests, Soil and Foundation, Japanese Geotechnical Society, Vol. 30, No. 1, pp. 17~26.
- Tatsuoka, F., Goto, S., Tanska, T., Tani, K. and Kimura, Y. (1997), Particle size effects on bearing capacity of footing on granular material, International Symposium on Deformation and Progressive Failure in Geomechanics, Nagoya, Japan, pp. 133~138.
- Tran, M. N., Randolph, M. F. and Airey, D. W. (2007), Installation of suction caissons in sand with silt layers, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 133, No. 10, pp. 1183~1191.
- Tran, M. N. and Randolph, M. F. (2008), Variation of suction pressure during caisson installation, Geotechnique, Vol. 58, No. 1, pp. 1~11.
- Vesic, A. S. (1973), Analysis of ultimate loads of shallow foundations, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, American Society of Civil Engineers, Vol. 99, No. SM1, pp. 45~73.