

원심모형실험용 소형 콘 개발 및 콘 선단저항치 특성에 관한 연구

김재현* · 김동준** · 김동수*** · 추연욱****

Jae Hyun Kim*, Dong Joon Kim**, Dong Soo Kim***, Yun Wook Choo****

Development of Miniature Cone and Characteristics of Cone Tip Resistance in Centrifuge Model Tests

ABSTRACT

The standard CPT(Cone Penetration Test), which can be easily performed to investigate in-situ soil engineering properties, has been widely used. CPT are also widely being utilized in centrifuge model tests. In this study, a miniature cone with 10mm diameter was developed and its applicability in the centrifuge was evaluated. The developed miniature cone was equipped with a four degree-of-freedom in-flight robot. A series of cone penetration tests was performed under four centrifuge acceleration levels. As results, the cone resistances measured at the same confining stress within shallow penetration depth were affected by the centrifugal accelerations. The critical depth was proportional to the cone diameter and relative density. Cone resistances results below the critical depth and soil parameters obtained from the laboratory tests were compared with those by previously proposed empirical relations.

Keywords : CPT, Miniature cone, Centrifuge test, Cone tip resistance, Sand

초 록

현장지반의 공학적 특성을 파악하기 위한 콘 관입시험(Cone Penetration Test; CPT)은 원지반의 연속적인 강도 특성을 분석하여 다양한 지반 변수를 손쉽게 획득할 수 있다는 점에서 널리 활용되고 있으며, 원심모형실험에서도 널리 활용되고 있다. 본 연구에서는 원심모형실험에서 콘 선단저항치를 계측할 수 있는 직경이 10 mm인 소형 콘을 개발하고 원심모형실험에서의 적용성을 평가하였다. 개발된 콘으로 4자유도 로봇을 활용하여 원심모형 가속 상태에서 콘 관입시험을 수행하였다. 이 때, 원심가속도 수준을 4회 변화시켜 다양한 유효응력상태에서 콘 관입시험을 실험을 수행하였다. 그 결과, 얇은 관입깊이의 동일한 유효응력에서 콘 선단저항치는 g-level에 영향을 받으며, 선단저항치가 임계 깊이 도달하는 깊이는 g-level과 상대밀도가 커질수록 깊어짐을 확인하였다. 또한, 각 실험에서 임계 깊이에 도달한 선단저항치와 실내실험에서 획득한 지반 물성을 이용하여 기존 경험식과 비교하였다.

검색어 : CPT, 소형콘, 원심모형실험, 콘 선단저항치, 모래지반

1. 서론

실내실험을 위해 현장 시료를 샘플링하는 과정에서 발생하는 지반의 교란은 정확한 현장지반의 물성 평가를 어렵게 한다. 이러한 이유로 지반 물성평가를 위한 다양한 현장실험들이 개발되어 왔다(Jamiolkowski et al., 1985). 콘 관입시험(Cone Penetration Test; CPT)은 현장실험법 중 하나로, 비교적 간단한 장비로 손쉽게 신속하게 지반의 깊이별 주상도를 획득할 수 있는 장점이 있다. 특히

* 한국과학기술원 (zlawogus@kaist.ac.kr)

** 현대건설 (djkim@hdec.co.kr)

*** 한국과학기술원 (dskim@kaist.ac.kr)

**** 교신저자 · 한국과학기술원 (Corresponding Author · Civil and Environmental Engineering, KAIST, ywchoo@kaist.ac.kr)

Received September 13 2012, Revised October 23 2012, Accepted February 15 2013

지반 깊이별로 연속적인 지반 물성평가가 가능하다는 점과 현장실험을 수행하기 어려운 해상조건에서도 실험이 가능하다는 점에서 널리 활용되고 있다.

해상에 설치되는 풍력기초나 부유구조물을 위한 앵커의 해석은 환경의 제약으로 기초의 지지력 평가를 위한 현장실험에 제약이 따르며, 이에 대한 대안으로 현장지반을 효율적으로 모사할 수 있는 원심모형실험이 활발하게 수행되고 있다. 원심모형실험에서 현장지반의 모사의 적절성 및 설계계수 도출을 위하여 콘 관입실험과 같은 지반조사 실험이 원심모형실험에서도 수행되어야 한다. 많은 연구자들이 소형 콘을 이용하여 원심모형실험 가속 중 관입시험을 수행한 바 있다(Bolton et al., 1993, 1999; Bałachowski, 2007). 원심모형실험 가속상태에서 소형 콘을 이용한 모형지반 물성평가는 조성된 지반의 균질성과 반복성을 확인하는데 중요한 역할을 하며, 나아가 다양한 지반물성을 평가하는데 활용될 수 있다.

일반적으로 현장에 지반조사에 적용되는 콘은 직경이 35.7mm로 관입면적이 1000mm²이며, 선단각은 60°이다. 이를 원심모형실험에서 상사비를 고려하여 적용할 때, 70g에서 콘 직경이 0.51mm가 되어야 하며, 이를 원심모형실험에서 모사하기란 현실적으로 불가능하다. 이러한 이유로 현실적으로 제작이 가능한 직경이 10mm 내외인 소형 콘을 이용하여 원심모형실험에 적용하고 있다(Bolton et al, 1993; Senders, 2008). 하지만 상사비 적용시 현장 콘과의 직경차이로 인해 선단저항치가 상이하다는 문제점이 보고되고 있다(Bałachowski, 2007).

본 연구에서는 원심모형실험 가속 중 4자유도 인플라이트 로봇을 이용하여 지반 물성을 평가할 수 있는 직경이 10mm인 소형 콘을 개발하고, 포화된 모래지반에서 콘 직경이 선단저항치에 미치는 영향을 확인하는 것을 목표로 하였다. 이를 위해 다양한 원심가속도 수준에서 그 영향을 비교 분석 하였으며, 측정된 콘 관입저항치를 활용하여 산정한 지반 물성치를 경험식에 의한 결과와 비교하였다.

2. 이론적 배경

CPT 실험에서 획득되는 콘 관입저항치는 모래지반에 설치되는 기초의 지지력 모델을 사용하여 설명될 수 있다. 모래지반에서 계측되는 콘 관입저항치는 낮은 구속압에서부터 높은 구속압까지 연속적인 결과를 나타내며, Figure 1과 같이 얇은 기초와 깊은 기초의 거동이 순차적으로 나타난다. Vesic(1972)은 얇은기초의 파괴모드를 흙의 압축성과 전단강도 특성에 따라 전반전단파괴, 국부전단파괴와 관입전단파괴로 분류하였다. 이때, Terzaghi가 제시한 모델과 같이 일반적으로 조밀한 모래지반에서는 지반이 팽창거동을 보이는 전반전단파괴가 발생하며, 느슨한 모래일수록 지반이 압축거동을 보이는 관입전단 파괴 모드가 발생된다. 여기서, 지반의 밀도가 수축 또는 팽창거동을 결정하는 중요 인자가 된다.

이와 유사하게 일정한 밀도를 가지는 지반에 관입되는 콘 주변 지반의 거동은 구속응력에 따라 발생하는 지반의 수축/팽창 거동에 영향을 받으며, 이러한 거동이 콘 선단저항치에 영향을 미친다.

구속 응력수준이 낮은 얇은 깊이에서는 일반적으로 콘 선단부 주변에서부터 흙 입자가 팽창하는 거동을 보이며, 지표면까지 파괴면이 연장되면서 주변 지반이 융기(Heaving)한다(Figure 1 ①). 이때, 콘 관입 깊이가 증가함에 따라 콘 관입저항치는 포물선 형상으로 증가한다. 콘이 지표면으로부터 깊이방향으로 연속적으로

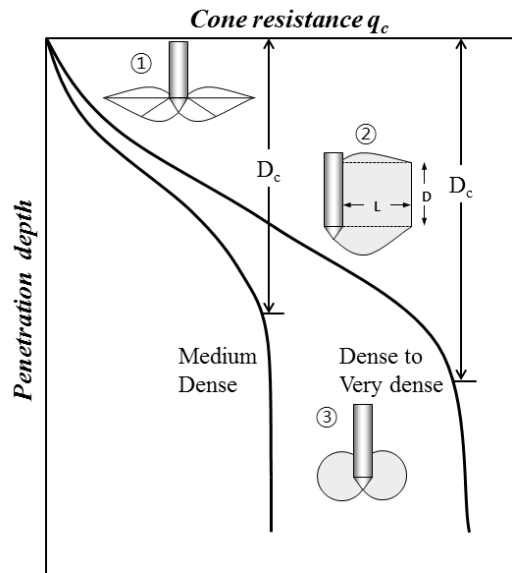


Fig. 1. Failure mechanisms with the different phases of cone penetration (Puech and Foray, 2002)

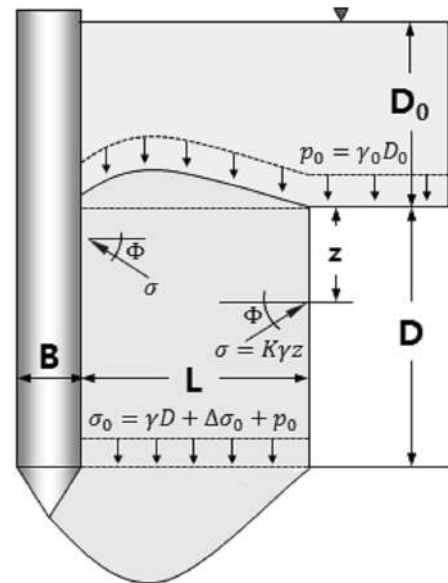


Fig. 2. Failure mechanism of the subsoil with cone penetration (Biares and Gresillon, 1972)

관입되면서 콘 선단부에서 발생하는 파괴면은 지표면까지 이어지며, 원통형 형상을 나타낸다(Figure 1 ②). Biarez and Gresillon (1972)은 콘이 모래지반에 관입되어 주변지반으로 발생하는 파괴면을 원통형으로 가정했을 때, 파괴면의 마찰을 고려한 콘 저항력을 다음과 같이 제시하였다(Figure 2).

$$q_c = 0.3\gamma'BN_\gamma + \sigma_v'N_q^* \quad (1)$$

여기서, q_c = 콘관입저항치
 γ' = 모래의 유효단위 중량

$$N_q^* = N_q(1 + K \sin\Phi' \cdot D/L) \quad (2)$$

Φ' = 모래의 유효 마찰각
 D = 지표면으로부터 콘 어깨까지의 관입깊이
 N_q = 축대칭 조건에서의 무차원 지지력계수(Le Gall, Y., 1966)
 K = 정지상태에서 원통형 파괴면의 마찰력을 결정하는 무차원 계수
 L = 콘 축방향으로 발생하는 원통형 파괴면까지의 거리

$$L = B \cdot e^{\pi/2 \tan\Phi'} \cdot \tan(\pi/4 + \Phi'/2) \quad (3)$$

여기서, B 는 콘 직경

이론적으로 축대칭 조건에서의 N_q 값은 Terzaghi-Prandtl의 2차원 조건에 비해 크며, 다음의 식이 제시된 바 있다(Biarez and Gresillon, 1972).

$$N_q = 1.0584e^{6.1679 \tan\Phi'} \quad (4)$$

여기서, 콘 직경 B 는 기초에 비해 매우 작아서 첫 번째 항이 무시될 수 있으므로, 식 (1)은 다음과 같이 축약 될 수 있다.

$$q_c = \gamma' DN_q^* = \gamma' DN_q [1 + \alpha(\Phi') D/B] \quad (5)$$

Puech and Foray(2002)는 무차원 계수 K 값을 규질(Siliceous) 모래지반의 현장 콘 실험 결과의 역해석을 통해 0.5~4사이의 값을 가지며, 0.7의 값을 사용했을 때, 가장 유사한 결과를 보인다고 보고한 바 있다. 식 (5)를 통해, 지표면 부근에서 측정되는 콘 관입저항치는 축대칭 조건하에서 다음과 같은 특징을 가진다. 관입저항치는 ① 콘 관입깊이에 따라 포물선(Parabolic curve)을 그리며 증가하며, ② 모래 지반의 마찰각에 비례하고, ③ 콘 직경에 반비례한다. 이러한 현상들은 여러 실험적 연구에서 확인된 바

있다(Puech and Foray, 2002; Tufenkjian and Tompson, 2005).

콘이 얇은 깊이에서 깊은 깊이로 관입될 때, 콘 선단부 주변에 발생하는 높은 구속압으로 인해 지반은 팽창거동에서 수축거동으로 전이된다. 이때, 지표까지 연결되어 있던 파괴면이 콘 선단부에 국한되는 국부파괴(Local failure)로 바뀌게 되며, 콘 관입 저항치가 임계 깊이(Critical depth)에 도달하게 된다(Figure 1 ③). 임계상태에 도달한 선단저항치는 콘이 지속적으로 관입되더라도 유사정적(Quasi-static)상태에 도달하게 되며, 구속 응력에 따라 미소하게 증가하는 경향을 보이나 큰 변화 없이 일정한 값을 나타내게 된다(Meyerhof, 1976). Vesic(1972)은 말뚝이 깊은 깊이에 관입될 때 말뚝 선단부 주변에 발생하는 소성거동과 비선형 Mohr-Coulomb 포락선을 고려한 공팽창 이론(Cavity Expansion Theory)으로 선단부 관입저항치의 유사정적 상태를 나타내는 모델을 제시한 바 있다.

일반적으로 직경이 35.7mm인 콘을 포화된 지반에 관입시킬 경우, 유사정적 상태에 도달하는 깊이는 지반상태에 따라 1~2m 깊이로 비교적 낮은 심도에서 발생하는 것으로 알려져 있다(Puech and Foray, 2002). 지표면 2m 까지는 식생물의 존재유무에 따라 콘 관입저항치가 제외되는 점을 감안하면(Madiati and Simoni, 2004), 지반 물성과의 실험적 상관관계에서 유사정적상태에 도달한 선단저항치만을 이용한다고 할 수 있다. 원심모형실험에의 콘 직경(B)은 일반적으로 재료의 입경이 선단저항치에 미치는 영향이 없다고 가정하였을 때, 중력가속도에 비례($B_p = N_g \cdot B_m$, 여기서, B_p =원형의 콘 직경, B_m =소형 콘 직경)하는 상사성을 보인다. 이는 콘 선단부의 삼각뿔에 가해지는 연직응력의 변화량과 그 영향 반경이 원심가속도수준에 따라 증가하기 때문이며, 여러 선행연구에서 모델링 기법(Modeling of Models)을 통해 검증된 바 있다(Bolton et al., 1999; Sharp et al., 2010). 본 연구에서 개발된 소형 콘이 직경이 10mm임을 감안할 때, 비교적 높은 가속도 수준에서는 콘의 거동이 아닌 말뚝의 거동에 가깝다고 할 수 있으며, 표준 콘의 거동과 차이를 보일 것으로 판단된다. 특히 콘의 직경에 영향을 받는 얇은 깊이(낮은 구속응력 상태)에서의 거동에 크게 영향을 미칠 것으로 판단되며, 본 영향은 g-level이 높아질수록 커지기 때문에 원심가속도 수준을 고려한 연구가 필요하다.

3. 소형 콘 관입 시스템

3.1 소형 콘(Miniature cone)

원심모형실험 가속 중 콘 관입시험을 모사하기 위해, 직경이 10mm, 선단 각이 60°인 콘을 개발하였다. 선단저항치는 변형률계로 제작된 로드셀로 측정하였다. 변형률계는 알루미늄에 부착되어 알루미늄의 변형과 함께 신축되며, 동시에 고유저항의 변화를 나타

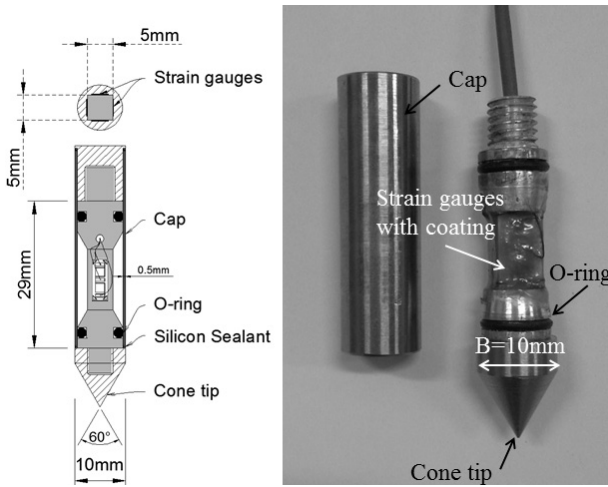


Fig. 3. Miniature cone penetrometer

낸다. 이러한 원리를 응용해 알루미늄이 외부하중에 의해 탄성거동을 보일 때, 변형률계에 입력전압을 가하여 계측되는 출력전압을 통해 하중을 간접적으로 측정할 수 있다. 본 연구를 위해 제작된 로드셀은 자중 관입될 때 발생하는 굽힘력을 제거하기 위해, Vishay사의 N2A-06-S063Q 변형률계 4개를 콘 배면 4방면에 풀브릿지(Full Bridge)형태로 연결하였으며, 차수를 위해 동일사의 M Coat-B를 이용해 표면을 코팅하였다(Figure 3). 변형률계는 콘 선단부에 최대한 가까이 설치되어 외부하중에 의해 발생하는 하중을 정확히 측정할 수 있도록 하였다. 이 때, 콘 주면에 발생하는 마찰력을 선단저항치로부터 분리하기 위하여 로드셀 주변을 캡으로 보호하였으며, 로드셀에 마찰하중이 전달되는 것을 막았다. 또한, 로드셀과 캡 사이를 실리콘으로 막아, 흙 입자나 물이 유입되는 것을 차단하였다.

3.2 선단 저항력 검정(Calibration)

소형 콘의 선단저항치는 콘 선단부 배면에 설치되어 있는 변형률계를 이용하여 측정된 전압으로 계산될 수 있다. 콘의 선단저항치를 측정하기 위해 Figure 4a와 같이 로드셀 검정시스템을 구축하였다. 제작된 시스템은 로드셀 고정판(Pedestal)과 로드셀을 덮는 캡으로 구성된다(Figure 4b). 로드셀 고정판은 로드셀을 고정판에 수직되게 고정시키는 역할을 하며, 캡은 상부에서 재하되는 하중이 로드셀에 전달되도록 한다. 캡은 로드셀과 고정판을 덮을 수 있도록 하였으며, 검정과정에서 캡과 고정판 사이에 그리스를 도포하여 마찰을 최소화하였다. 로드셀 보정시스템을 Figure 4c와 같이 Instron사의 UTM(Universal Testing Machine)에 거치하고, 0.5mm/sec의 속도로 로드셀에 하중을 재하하였다. 이와 동시에, 계측장비인 NI(National Instruments)사의 SCXI-1314를 이용하여 변형률계에서 계측되는 전압을 실시간으로 측정하였다. Figure 5는 총 3회에

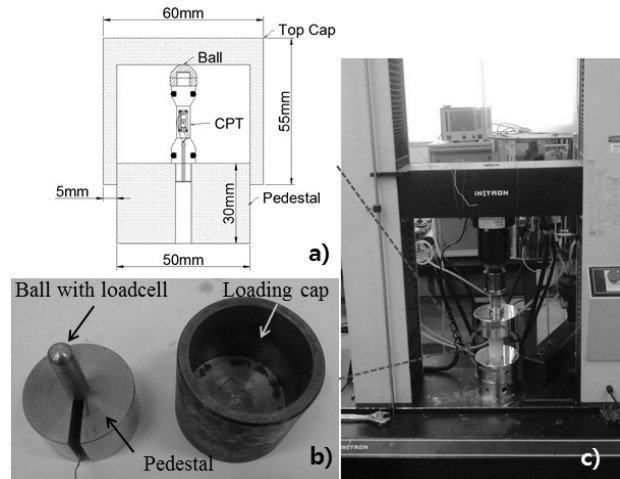


Fig. 4. Load-cell calibration system

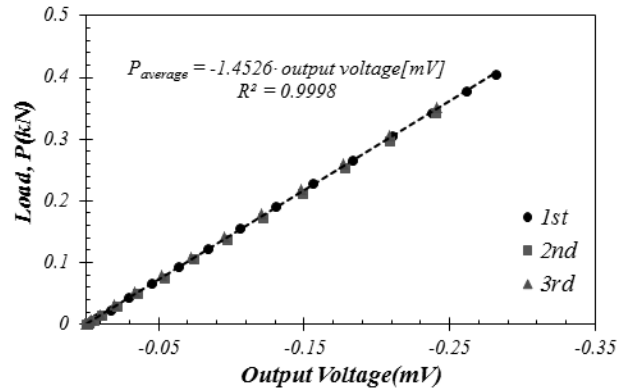


Fig. 5. Calibration of miniature cone : relation of load with output voltage(input voltage: 1V)

걸쳐 수행된 재하하중과 출력전압의 관계를 나타낸다. 작용하중과 측정전압 사이의 관계는 식 (6)과 같다.

$$P_{average}[kN] = 1.4526 \cdot \text{Output Voltage}[mV] \quad (6)$$

3.3 4자유도 로봇 (Four-Degree-of-Freedom Inflight Robot)

프랑스의 Laboratoire Central des Ponts et Chaussées(LCPC)에서 원심모형실험 중 복잡한 시뮬레이션이 가능한 4자유도 로봇이 처음으로 개발된 이후, 축소모형실험에서 로봇이 다방면으로 활용되고 있다(Kim et al., 2013). KAIST Geo-centrifuge 센터에서 보유하고 있는 4자유도 로봇은 원심모형실험기 바스켓 상부에 거치되어, 원적으로 조정될 수 있으며, X, Y, Z 축과 회전 θ_z 으로 운동이 가능하다(Figure 6). 4자유도 로봇의 제원은 Table 1과 같다. 4자유도 로봇은 최대 100g 가속도 수준에서 기동이 가능하다. 로봇의 위치는 각 위치에 설치되어 있는 AC모터를 통해 제어되고,

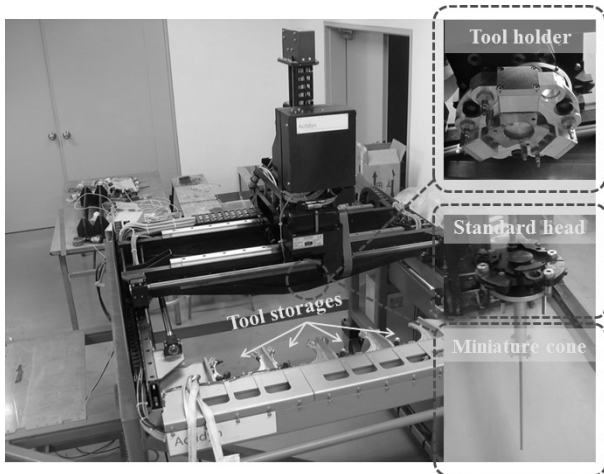


Fig. 6. 4 degree-of-freedom in-flight robot

Table 1. Specification of four DOF in-flight robot

Item	Specifications			
	X	Y	Z	θ_z
Stroke	0.8m	0.6m	0.5m	$\pm 175^\circ$
Maximum speed	50mm/s	50mm/s	50mm/s	5°/s
Loading capacity	± 1 kN	± 1 kN	± 5 kN	± 5 Nm
Accuracy	± 1.0 mm	± 1.0 mm	± 1.0 mm	$\pm 0.5^\circ$

실시간으로 사용자에게 의해 내려지는 명령이나 사전에 프로그램된 동작을 수행할 수 있다. 로봇의 팔에는 삼손집게(Tool holder)의 고정 장치가 있어 Standard head라는 장치를 집어서 작업을 수행한다. 여기서, Standard head에 콘과 같은 실험장비를 부착하여 인플라이트 상태에서 실험을 수행할 수 있다. 로봇은 총 4개의 Standard head를 보관할 수 있는 보관소(Tool storage)가 있으며, 인플라이트 상태에서 공구를 교체해 가며 작업을 수행할 수 있다. 각 공구에는 신호를 교환할 수 있도록 커넥터가 설치되어 있어, 로봇이 공구를 선택적으로 집으면, 이와 동시에 공구에 설치되어 있는 센서의 전기적인 신호를 실시간으로 획득할 수 있다. 본 연구에서는 개발된 소형 콘을 Standard head에 부착할 수 있는 시스템을 구축하고 원심모형실험 가속 중 관입위치를 옮겨가며 콘 관입시험을 수행하였다.

4. 콘 관입시험

4.1 서해안 새만금 시료

콘 직경이 콘 선단저항치에 미치는 영향을 확인하기 위해 서해안 새만금 현장에서 채취한 시료를 이용하여 원심모형실험을 수행하였다. Figure 7은 3회에 걸쳐 수행된 새만금 시료의 입도분포

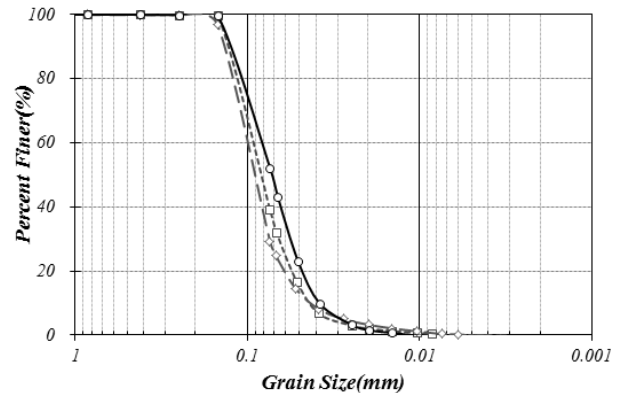


Fig. 7. Particle size distribution of Saemangeum sand

Table 2. Basic properties of Saemangeum sand

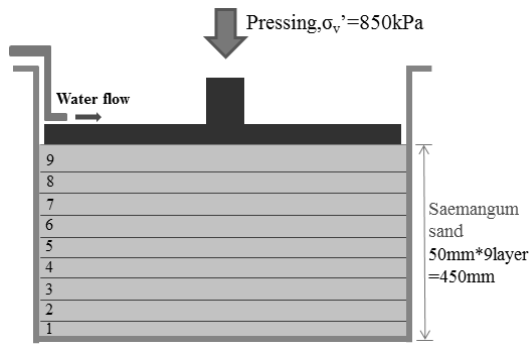
Items	Properties
Fine contents (passing #200)	47%
Max. dry density*(t/m^3)	1.65
Min. dry density**(t/m^3)	1.20
Grain size(mm)	$D_{10}=0.045$ $D_{50}=0.080$ $D_{60}=0.095$
Uniformity coefficient, C_u	2.11
Specific gravity, G_s	2.67

* Head(2006), ASTM D 1557, KS F 2312

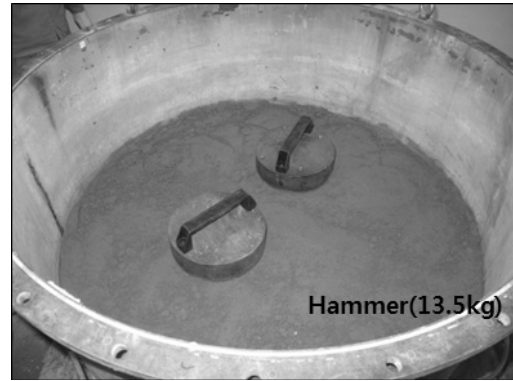
** ASTM D 4254

곡선을 나타낸다. 새만금 시료는 #200번 체 통과율이 47%로 통일분류법상 실트질 모래(SM)로 분류된다. 새만금 시료의 자세한 물성은 Table 2와 같다.

표준 콘은 흙 입자크기 대비 콘 직경이 크기 때문에 흙 입자를 연속체로 가정할 수 있으나, 직경이 작은 소형 콘의 경우 모래 입자의 크기가 콘의 선단 저항력에 영향을 미칠 수 있다. 선행연구에 따르면 $1.27cm^2$ 의 콘이 $10cm^2$ 의 콘에 비해 동일한 지반에서 15%가량 큰 선단저항치를 보인다고 보고된 바 있다(De Lima and Tumay, 1991). Bolton et al.(1993)은 원심모형실험을 이용해 Leighton Buzzard 모래로 수행한 실험에서 입자 크기 대비 콘 직경(B/D_{50})이 28이상에서는 콘 선단저항치가 시료 입자에 영향을 받지 않음을 확인하였다. 본 연구에서는 사용된 시료의 평균 입자크기 대비 콘 직경(B/D_{50})이 약 125임을 감안하면, 입자 크기에 의한 선단저항치의 변화는 미미하다고 판단된다. 한편, 광물 성분 분석(X-Ray Diffraction; XRD 정량 분석)을 통해 새만금 시료는 석영성분이 50~55%로 주를 이루며, 장석과 운모 성분이 각각 30%, 10%로 분포하는 것을 확인하였다.



a) Configuration of model preparation



b) Hammering(13.5kg)



c) Preparation of each soil layer



d) Static loading(850kPa)

Fig. 8. Preparation of soil model

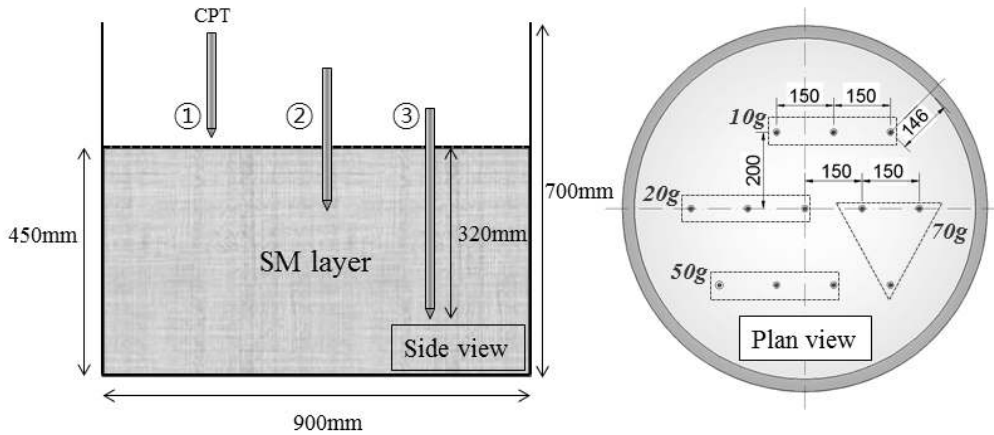


Fig. 9. Locations of cone penetration with g-level (three penetration tests were performed at each g-level stage)

4.2 실험절차

원심모형실험에서 개발된 소형 콘과 4자유도 로봇을 이용하여 원심모형실험에서 콘 관입시험을 수행하였다. 새만금시료를 이용해 내경 900mm, 높이 650mm인 원형토조에 높이가 450mm인 모형지반을 조성하였다. 모형지반의 깊이별 밀도를 균일하게 조성하기 위해, 50mm씩 9층으로 분할하여 다짐 조성하였다. 각 층은

함수비가 16%인 시료를 원형토조에 넣고 매 층에 동일한 다짐에너지를 가하기 위하여, Figure 8과 같이 무게가 13.5kg인 원형추를 500mm 높이에서 일정 횟수만큼 낙하시켰다. 이 후, 압밀기를 이용해 표면에 850kPa의 압력을 가하여 표면을 평탄하도록 하였다. 포화된 모래지반을 모사하기 위해, 조성된 모델을 원심모형시험기 바스켓에 거치하고, 물을 모델 표면으로부터 천천히 주입하여

Table 3. Test conditions

Test No.	Relative Density(D _r)	Internal friction angle*(°)	G-level
T-1	43%	30.4	10
			20
T-2	60%	31.9	50
			70

*ASTM D3080(04)

지표면으로부터 수심 50mm로 조성하였다. 이후, 원심모형시험기를 70g까지 가속하여 모형지반의 포화를 유도하였다. 포화유도과정 후, 원심가속을 중단하고 바스켓 상부에 4자유도 로봇과 직경이 10mm인 콘을 장착한다. 콘 관입시험은 각각 10g, 20g, 50g, 70g에서 단계별로 수행되었으며, 이는 각 g-level에서 상사비 적용 시 원형으로 각각 100, 200, 500, 700mm의 콘을 모사한다. 각 g-level에 도달하여 약 10분간 안정화를 거친 후 10mm/sec의 속도로 콘을 320mm(모형 스케일)까지 지중 관입하였다. Bolton et al. (1999)은 원심모형시험에서 콘 관입속도에 따른 선단저항치의 변화를 비교하여 관입속도가 2.5~20mm/sec에서 선단저항치의 변화가 미미하다고 보고한 바 있다. 본 연구의 콘 관입속도가 선행연구(Bolton et al., 1999)의 범주에 속하기 때문에 관입속도가 선단저항치에 미치는 영향이 미미할 것으로 판단된다.

콘 관입시험은 각 g-level에서 Figure 9와 같이 위치를 옮겨가며 총 3회씩 수행하였다(Figure 9). 본 연구를 위해 상대밀도가 다른 모형지반을 총 2회 조성하였으며, 조성된 모형지반의 조건은 Table 3과 같다.

5. 실험 결과

본 연구를 위해 개발된 소형 콘이 균질한 모형지반에 관입될 때 계속되는 선단저항치의 반복성을 확인하기 위해, 동일한 g-level에서 위치를 옮겨 가며 3회씩 콘 관입시험을 수행하였다. Figure 10은 T-1 실험에서 10g와 70g 가속도 수준에서 각각 3회씩 측정된 선단저항치를 나타낸다. 그 결과, 동일한 원심모형시험 가속수준에서 깊이에 따라 대체로 동일한 선단저항치를 나타내는 것을 확인하였고, g-level이 증가함에 따라 선단저항치도 크게 나타났다. Bolton et al.(1999)은 원형토조를 이용해 수행된 콘 관입시험을 통해, 측벽 경계면으로부터 11B(B= 콘 직경), 바닥면으로부터 10B 이상에서 경계면이 콘 관입저항치에 영향을 미치지 않음을 보고한 바 있다. 본 연구에서는 인플라이트 로봇이 토조의 벽면으로의 접근하는 것에 한계가 있어 경계면의 영향이 나타나는 영역을 확인하지는 못하였지만, 원형토조 측벽 경계면으로부터 14B 이상에서는 경계면까지의 거리가 선단저항치에 미치는 영향이 미미한

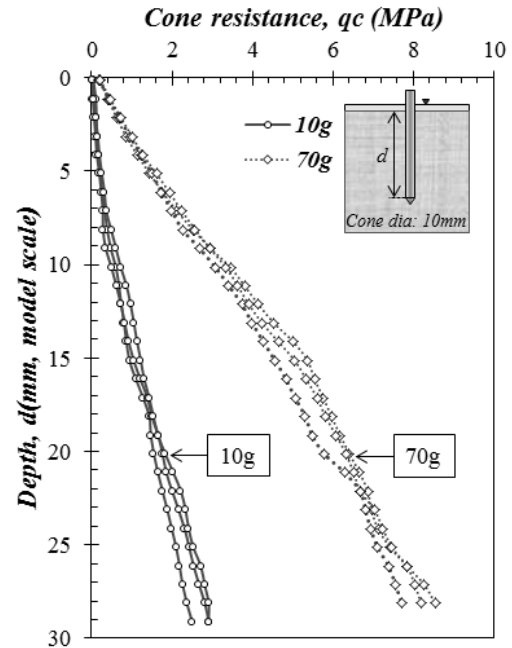


Fig. 10. Repeatability and boundary effect of cone tip resistance with depth

것을 확인 할 수 있었다.

Figure 11은 T-1, T-2에서 각 g-level 별로 측정된 콘 선단저항치를 모형스케일로 나타내었다. 전체 실험결과에서 선단저항치는 T-2의 원심가속도 50g, 70g에서의 실험결과 중 일부 구간을 제외하고, 깊이와 g-level에 비례하여 증가함을 보였다. 일부구간에서 발생한 선단저항치의 역전현상은 본 시료가 서해안 현장에서 채취되면서 조개껍질과 같은 불순물이 일부 포함되어 있어 발생한 것으로 판단되며, 다른 콘 관입시험에서는 나타나지 않았다. Figure 11의 깊이-선단저항치의 관계를 원형스케일로 환산하면 Figure 12와 같다. 콘 선단저항치는 g-level이 변화함에 따라 동일한 깊이에서 차이를 보이고 있으며, 이는 선단 저항치가 콘의 직경에 영향을 받음을 시사한다. 본 시료의 입자 크기가 콘 선단저항치에 미치는 영향이 미미하다고 가정했을 때, de Lima and Tumay(1991)가 보고한 콘 사이즈의 영향이 원심모형시험에서도 나타나는 것을 확인할 수 있다.

콘 선단저항치는 모든 실험에서 깊이가 증가함에 따라 포물선 형태로 증가하다 임계 깊이(Critical depth)를 지나면서 기울기가 감소되는 경향을 보였다. 이는 Puech and Foray(2002)가 제시한 바와 같이 콘이 얇은 깊이에서 깊은 깊이로 전이 되어 발생하는 결과인 것으로 판단된다. 본 연구에서는 한계 깊이 이후 일정 값으로 수렴하는 경우도 있었으나, 많은 경우 기울기가 감소한 뒤에도 계속 증가하는 결과를 보였다. 이 때, 원형 스케일로 환산된 콘 직경이 커질수록 임계 깊이가 커지는 것을 확인하였다.

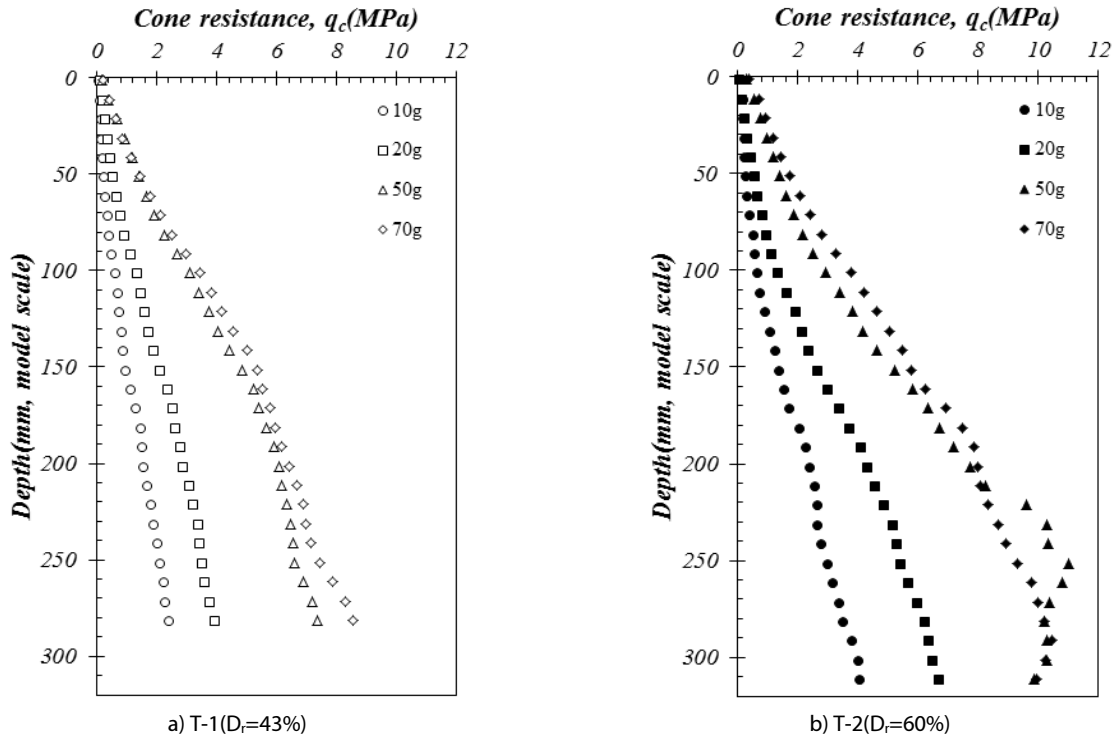


Fig. 11. Cone tip resistance with depth for each g-level (model scale)

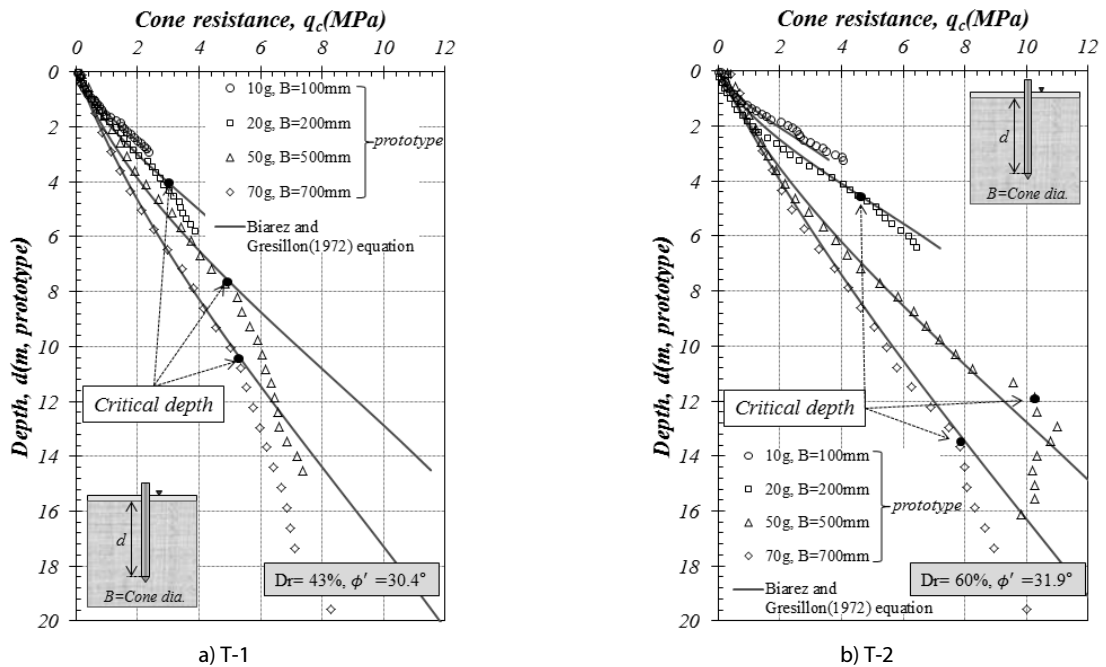


Fig. 12. Cone tip resistance with depth for each g-level(prototype scale)

콘 직경에 따른 콘 관입저항력을 Biarez and Gressillon(1972)에 의해 제안된 모델을 적용하여 콘 관입저항치를 예측하였고, Figure 12에 함께 도시하였다. 이때, 입력 변수인 유효마찰계수(ϕ')

는 직접전단시험을 통해 획득된 값을 이용하였으며, 원통형 파괴면의 무차원 마찰계수인 K -계수는 실험 결과를 역해석하여 추정하였다. 그 결과, K -계수는 Figure 13과 같이 0.4~1.5사이 값을 나타내

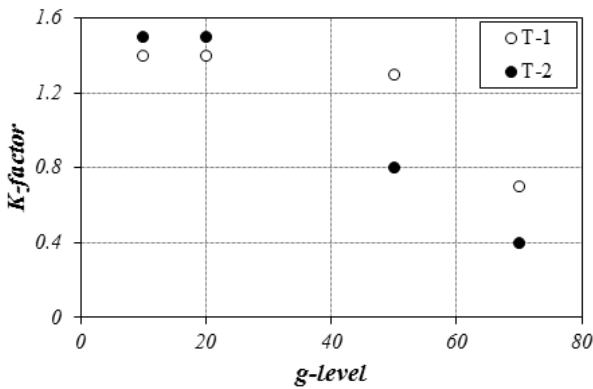


Fig. 13. Relationship between g-level and K-factor by back-analysis of test results

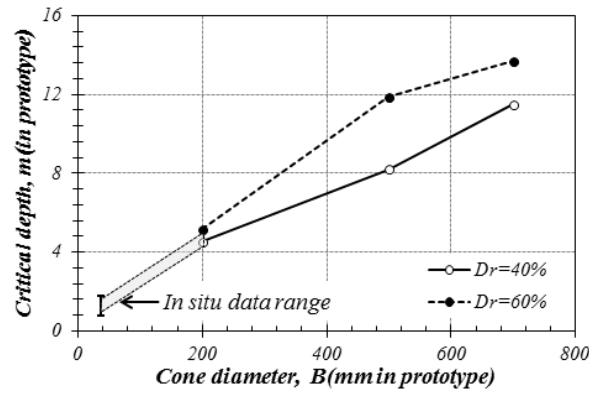
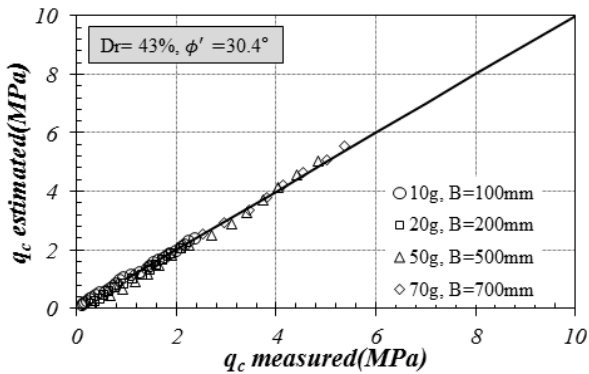
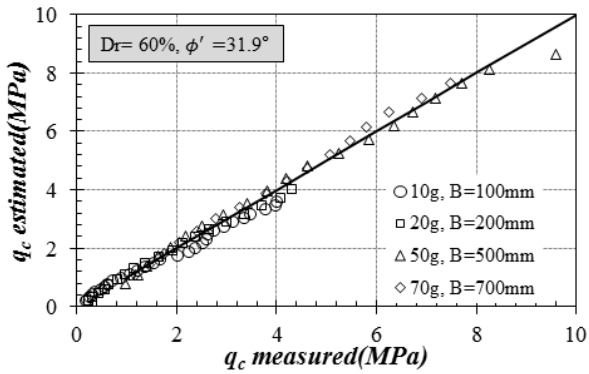


Fig. 15. Critical depth with scaled cone diameter



a) T-1



b) T-2

Fig. 14. Comparison of cone tip resistances measured and predicted by Biarez and Gressillon(1972) model

었다. Puech and Foray(2002)는 포화된 모래지반에서 수행된 현장 CPT 실험에서 K-계수가 0.5~4.0임을 보고 하였으며, 본 연구의 결과와도 상당히 유사한 것을 확인하였다. 본 연구에서는 K-계수가 원심모형실험 가속도수준이 증가함에 따라 비선형적으로 감소하는 경향을 보였으나, 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

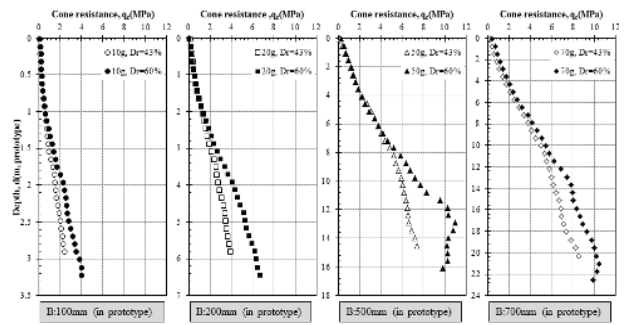


Fig. 16. Comparison of cone tip resistances at different relative densities: 43% and 60%

한편, 원형 스케일로 환산된 콘 직경이 증가함에 따라 콘 선단저항치는 감소하는 것을 확인 할 수 있었으며, Biarez and Gressillon(1972)에 의한 예측값과 실험값은 유사하였다. Figure 14는 실험을 통해 계측된 값과 모델식 간의 상관관계를 나타낸다.

콘 선단저항치가 얇은 깊이에서 깊은 깊이로 전이되는 임계 깊이(Critical depth)는 Figure 15와 같이 원형 스케일로 콘 직경에 비례하여 증가하는 경향을 보이고 있다. Puech and Foray(2002)는 직경이 35.7mm인 콘을 현장의 포화된 모래지반에 관입했을 때, 대략 0.8~1.8m 깊이에서 콘 선단저항치가 임계 깊이에 도달하는 것을 확인한 바 있으며, 실험의 한계로 직접적인 비교는 어렵지만 본 연구에서 확인된 콘 직경-임계 깊이 관계와 대체적으로 선형적인 관계를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 한편, 상대밀도가 높을수록 임계 깊이가 깊어짐을 확인할 수 있다. Figure 16에서 상대밀도에 따른 선단저항치를 g-level별로 구분하여 비교하였다. 깊은 깊이에서 상대밀도에 따른 선단저항치의 차이가 명확히 나타나는 반면, 얇은 깊이에서는 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 얇은 관입깊이에서 선단저항치에 미치는 영향 요인인 유효 내부 마찰각이 각각의 상대밀도에서 30.4°와 31.9°로 큰 차이를 보이지 않았기 때문으로 판단된다. 여기서, 느슨한 상태의 지반(T-1)에서는 임계 깊이가

모호한 반면, 중간 정도의 다짐상태(T-2)에서는 좀 더 명확히 입계 깊이를 확인 할 수 있으며, 이는 지반조건에 따른 기초의 파괴거동과 유사하다.

6. 결과 분석 및 토의

6.1 지반물성-선단저항치 상관관계

모래지반에 관입되는 콘 선단저항치는 지반강도, 변형특성과 유효상재하중에 영향을 받는다(Robertson and Campanella, 1983). 따라서, 콘 선단저항치가 획득되면, 실험적 상관관계를 통해 깊이에 따른 지반 물성정보를 획득 할 수 있다(Baldi et al., 1981; Robertson and Campanella, 1983; Bolton et al., 1993).

Robertson and Campanella(1983)는 여러 연구자들에 의해 수행된 실내 모형실험을 정리하여 비고결상태의 석영질 모래에 대한 저항력 지수(q_c/σ_{vo}')와 유효 내부마찰각(ϕ') 간의 실험적 상관관계를 Figure 17과 같이 도출하였다. 이 때, 본 연구의 결과 중 입계 깊이 이후의 콘 선단저항치(T-1와 T-2의 20g, 50g, 70g 콘 관입시험 결과사용)와 직접전단시험을 통해 도출된 유효 내부마찰각을 함께 도시하여 나타내었다. 본 연구의 경우, 기존 경험식에 비해 과다 평가되는 경향을 보였다. 이는 선행연구에서 사용된 대부분의 시료 평균입径(D_{50})이 0.3 mm 이상인 것에 비해, 본 연구에서 사용된 새만금시료의 경우, $D_{50} \approx 0.1$ mm인 세립 실트질 모래라는 점에서 선행연구와 차이를 보인 것으로 판단된다. 한편, g-level 이 증가할수록, 콘 저항력지수가 점차적으로 감소하는 경향을 나타내었다.

Jamiolkowski et al.(1985)은 실내 모형실험을 통해 기존에 수행된 실내모형실험들을 정리하여, 선단저항치와 상대밀도간의

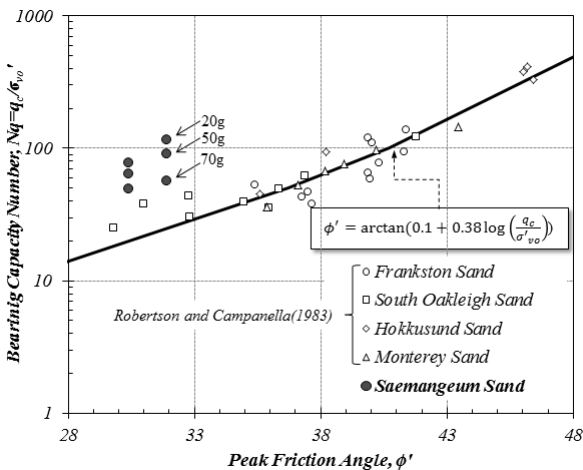


Fig. 17. Relationship between normalized cone resistance and effective peak friction angle and comparison with the previous result by Robertson and Campanella(1983)

상관관계를 연구하였다. Jamiolkowski et al.(1985)은 Figure 18 과 같이 선단저항치를 상재하중으로 정규화($q_c/[\sigma_{vo}']^{0.5}$)하여 나타내었다. 새만금시료에서 측정된 결과값을 함께 도시하면, 다른 시료와도 유사한 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있다. Bolton et al.(1993)은 원심모형실험을 이용하여 Fontainebleau 모래에서 측정된 선단저항치를 상재하중으로 정규화($Q = (q_c - \sigma_v)/\sigma_v'$)하고, 관입깊이를 콘 직경으로 정규화(z/B)하여, 입계 깊이에 도달한 선단저항치와 상대밀도와의 상관관계를 Figure 19와 같이 도출하였다. 본 연구의 경우, 다양한 g-level에서 수행되어 다소 편차가 크게 나타났지만, 대체로 Bolton et al.(1993)의 제안식과 유사한 경향을 나타내었다. 모든 경험식에서 다소간 편차를 보이는 이유는 콘 선단저항치가 모래지반의 전단저항과 변형특성 이외에도 입도 분포와 광물성분에 크게 영향을 받기 때문으로 추정된다. 본 연구와 같이 실트질 모래인 경우, 콘 선단저항치와 지반물성간의 상관관계식의 정량화를 위하여, 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

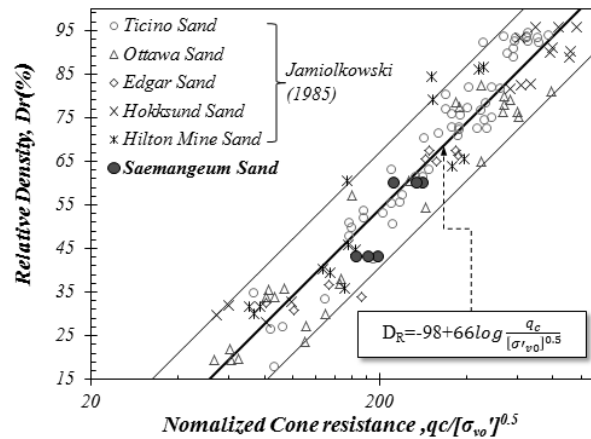


Fig. 18. Relationship between cone tip resistance and relative density(D_r) and comparison with the previous result by Jamiolkowski(1985)

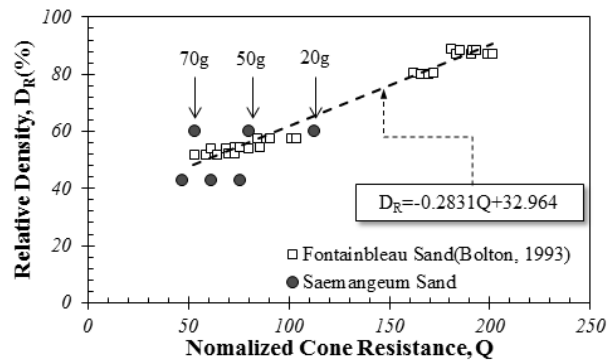


Fig. 19. Relationship between cone tip resistance and relative density(D_r) and comparison with the previous result by Bolton et al.(1993)

6. 요약 및 결론

본 연구에서는 원심모형실험에서 수행되는 콘 관입시험의 결과 값에 대한 원심력장의 영향을 분석하였고, 원심모형실험에서 계측된 콘관입저항치와 지반물성과의 관계를 고찰하였다. 이를 위해 직경이 10 mm인 소형 콘을 개발하고 4자유도 인플라이트 로봇을 활용하여 원심모형시험 가속 중 콘 관입시험을 실시하였다. 이 때, 원심모형실험 가속도 수준을 변화함에 따라, 상사로 인한 원형에 해당하는 콘의 직경 변화가 고려되었다. 또한, 상대밀도가 선단저항치에 미치는 영향을 분석하여, 원심가속상태에서 지반의 물성을 평가할 수 있는 가능성을 확인하였다. 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 원심모형실험 가속 중 콘 관입시험을 수행 할 수 있도록 직경이 10 mm인 소형 콘을 개발하였다. 이 때, 동일한 g-level에서 3회 관입시험을 수행하여 개발된 콘의 반복성을 확인하였다. 토조 측벽 경계면에서 14B(B; 콘직경) 이상에서 실험을 수행하였으며, 이 경우 선단저항치의 경계면 거리에 의한 영향은 미미하였다.
- (2) 원심모형실험 결과, 콘 직경이 커질수록 작은 선단저항치를 보였다. 또한, Biarez and Gressillon(1972)이 제시한 얇은 깊이로 관입되는 콘의 거동모델과 거의 일치하였다. 임계 깊이는 콘 직경이 커질수록 커졌으며, 임계 깊이보다 깊은 구간에서는 선단저항치의 증가 기울기가 감소하였다. 또한, 임계 깊이는 상대밀도가 클수록 명확히 확인할 수 있었다.
- (3) 실험에서 얻어진 콘 선단저항치를 기존 경험식으로 평가한 결과, 조성된 지반 물성과 다소간 차이를 나타내었다. 이는 새만금 시료의 평균입경이 선행연구의 경험식에 사용된 시료와 차이를 보이기 때문인 것으로 추정되고, 세립질 모래에 대한 정량화를 위한 추가 연구가 필요하다.

감사의 글

본 논문은 국토해양부 2010 건설기술혁신사업 “대구경 대수심 해상기초시스템 기술 개발(과제번호 10기술혁신E04)” 과제 성과의 일부이며, 한국건설교통기술평가원 및 현대건설(주)의 연구비 지원에 깊은 감사를 드립니다. 본 논문의 저자는 국토해양부의 U-City 석.박사과정 프로그램에 지원을 받았습니다.

References

KSF-2312(2011). “Standard test method for soil compaction using a rammer”.

American Society for Testing and Materials(ASTM)(2000a). “Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort,” ASTM D-1557, West Conshohoken, Pa.

American Society for Testing and Materials(ASTM)(2002). “Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions,” ASTM D-3080, West Conshohoken, Pa.

American Society for Testing and Materials(ASTM)(2002), “Standard test method for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density,” ASTM D-4254, West Conshohoken, Pa.

Balachowski, L.(2007). “Size effect in centrifuge cone penetration tests, Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics,” *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*, Vol. 54, No. 3, pp. 161-181.

Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V., Jamiolkowski, M., Pasqualini, E.(1981). “Cone resistance of a dry medium sand,” *10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, Vol. 2, pp. 427-438.

Biarez, J. and Gressillon, J.M.(1972). “Essais et suggestions pour le calcul de la force portante des pieux en milieu pulverulent,” *Géotechnique*, Vol. 22, No. 2, pp. 433-450.

Bolton, M. D., Gui, M. W. and Phillips, R.(1993). “Review of miniature soil probes for model tests,” *Proc. 11th South East Asia Geotech. Conf.*, Singapore, pp. 85-91.

Bolton, M. D., Gui, M. W., Garnier, J., Corte, J. F., Bagge, G., Laue, R.(1999). “Centrifuge cone penetration test in sand,” *Géotechnique*, Vol. 49, No. 4, pp. 542-552

De Lima D. C. and Tumay M.T.(1991). “Scale effects in cone penetration tests,” *Geotechnical special publication of ASCE*, F. G. Mclean, ed., No. 27, pp. 38-51.

Durgunoglu, H.T. and Mitchell, J.K.(1975). “Static penetration resistance of soils: I-analyses, II-evaluation of theory and implications for practice,” *Proceedings of the ASCES pecialty Conference on In-Situ Measurement of Soil Properties*, Vol. I, pp. 151-179.

Jamiolkowski, M., Ladd, C. C., Germaine, J. T., Lancellotta, R. (1985). “New developments in field and laboratory testing of soils,” *Proceeding of the international conference on soil mechanics and foundation engineering*, Vol. 1, pp. 57-154.

Kim, D.S., Kim, N.R., Choo, Y.W, Cho, G.C.(2013). “A Newly Developed State-of-the-Art Geotechnical Centrifuge in Korea,” *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 77-84.

Le Gall, Y.(1966). *Contribution à l'étude de la force portante de fondations circulaires peu profondes*, Ph.D dissertation, University of Grenoble.

Madiari, C and Simoni, G.(2004). “Shear wave velocity-penetration resistance correlation for Holocene and Pleistocene soils of an area in central Italy,” *Proceedings ISC-2 on Geotechnical and Geophysical Site Characterization*, pp. 1687-1694.

Meyerhof, G. G.(1974). “Penetration testing outside Europe, General Report,” *Proceedings European Symposium on Penetration Testing*, Stockholm, Sweden, Vol. 2.1, June.

Meyerhof, G.G.(1976). “Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundation,” *11th Terzaghi Lecture, Journal of the Geotechnical*

- Engineering Division, ASCE*, Vol. 102, GT3, pp. 197-228.
- Puech Alain and Foray Pierre(2002). "Refine model for interpreting shallow penetration CPTs in Sands," *Proceeding of the 2002 Offshore Technology Conference*, Houston, Texas USA.
- Robertson P. K. and Campanella, R.G.(1983). "Interpretation of cone penetration tests. Part I: Sand," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 20, pp. 718-733.
- Sharp M. K., Dobry R. and Phillips R.(2010). "CPT-based evaluation of liquefaction and lateral spreading in centrifuge," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering-ASCE*, Vol. 136, No. 10, pp. 1334-1346.
- Tufenkjian, M. R., Yee, E. and Tompson, D. J.(2005). "Shallow penetration resistance of a minicone in sand," *Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Osaka.
- Vesic, A.S. (1972). "Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering-ASCE*, Vol. 123, No. 8, pp. 344-354.
- Vesic, A.S.(1972). "Expansion of cavities in infinite soil mass," *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol. 98, No. 3, pp. 265-290.