휴대용콘의 선단저항값을 이용한 모래의 상대밀도 및 내부마찰각 추정

Estimation of the Relative Density and Internal Friction Angle for Sand using Cone-tip Resistance of the PCPT

박재성* · 손영환**† · 노수각* · 봉태호*

Park, Jae-Sung · Son, Young-Hwan · Noh, Soo-Kack · Bong, Tae-Ho

ABSTRACT

Sand is one of the essential materials used for social infrastructure construction such as embankment, landfill and backfill. It was known that mechanical properties and shear strength of sand are closely related to relative density. Therefore it is very important to determine accurate relative density. In this study, Portable Cone Penetration Tester (PCPT) was used to estimate the relative density and the internal friction angle of sand. PCPT cone-tip resistance (q_c) was measured changing the relative density of the two soil samples—Standard sand (JMJ) and Busan sand (BS). Also, a direct shear test was performed to investigate relationship between relative density and internal friction angle. The size and shape of soil particles were confirmed by using Scanning Electron Microscope (SEM). As a result, the log value of q_c was linearly correlated with relative density and internal friction angle. In particular, the internal friction angle of BS sample was greater than that of JMJ, which was due to difference of the shape and mean size of particles. This result shows that it is important to determine the shape and size of particles as well as relative density to define mechanical property of sand. Through this study, it can be more effectively and conveniently to investigate relative density and shear strength of sand by using PCPT in situ.

Keywords: Portable cone; cone-tip resistance; relative density; friction angle

1. 서 론

모래는 사회 기반시설 공사에서 필수적으로 사용하는 재료 중의 하나이다. 모래는 콘크리트 등의 건설 구조용 재료에 사용될 뿐만 아니라 간척사업, 항만공사와 같은 대규모 공사에서 성토재, 매립재, 뒷채움재 등의 재료로서 폭 넓게 사용되고 있다. 국내에서 생산되는 대부분의 모래는 하천과 바다에서 굴착된 것이다. 예전에는 주로 하천에서 나오는 모래를 건설 재료로 사용하였으나, 자원의 고갈과 운송비 증가 등의 문제로 인해 바다 모래를 사용하는 곳이 증가하는 추세이다.

모래의 전단강도 및 물리 공학적 특성은 밀도 또는 공극비에 큰 영향을 받는다. 하지만 밀도나 공극비는 절대적인 수치로서

흙의 역학적 상태와 직접적으로 연결하기는 어렵다. 따라서 모래의 역학적 상태를 정량적으로 표현하기 위해 주로 상대밀도가 사용되고 있다 (Lambe and Whitman, 1979). 현장에서의 모래 다짐도 관리 또한 상대밀도 값의 범위를 규정하는 방법이 이용된다. 하지만 현장에서 사용하는 재료의 최대, 최소 밀도를 정확히 산정하기 어렵고, 가장 일반적으로 사용하고 있는 들밀도 시험법은 측정 지점이나 시험 숙련도에 따라 결과 값에 큰 차이가 발생하는 단점이 있으며 방사능 장비의 일종인 RI장비는 측정 방법이 간편하고 결과 값을 신뢰할 수 있는 장점이 있는 반면에 고가의 장비이며 취급이 어려운 방사능 물질을 사용한다는 문제점이 있다. 따라서 시험 재료의 최대·최소 밀도를 정확히 산정한 후 현장에서 간편하고 정확하게 측정할 수 있는 상대밀도 측정법이 필요하다. 이를 위해서 장치가 간단하고, 휴대가 간편하며 저항 값을 수치적으로 확인할 수 있는 장점을 가진 휴대용 콘 관입시험기 (Portable Cone Penetration Tester : PCPT)를 적용해 보고자 한다. PCPT는 선단저항을 간편하게 측정할 수 있는 장점이 있어 장비 진입이 어려운 초 연약 지반에서 지반의 강도를 측정하고 장비 주행성 (Trafficability)을 평가하는데 주로 활용되고 있지만 이를 상대밀도 추정과 전단강도 추정에도 활용할

* 서울대학교 조경·지역시스템공학부 대학원

** 서울대학교 조경·지역시스템공학과 조교수, 서울대학교 농업생명과학연구원

† Corresponding author Tel.: +82-2-880-4585

Fax: +82-2-873-2087

E-mail: syh86@snu.ac.kr

2012년 4월 30일 투고

2012년 5월 31일 심사완료

2012년 7월 16일 게재확정

수 있을 것으로 예상된다.

본 연구에서는 바다 모래의 물리적 공학적 특성을 분석하고 주문진 표준사와 비교 검토한 후 PCPT로 측정한 콘 선단 저항과 상대밀도, 전단강도의 관계를 실험적으로 분석하여 최종적으로 콘 선단저항 값을 이용해 상대밀도와 내부마찰각을 추정하는 새로운 식을 제안하고자 한다. 이를 통해 모래의 PCPT 선단 저항 값을 이용하여 간편하고 정확한 상대밀도 및 전단강도 측정 방법을 개발하는데 목적이 있다.

II. 연구동향 및 분석

1. 최대밀도 산정 및 상대밀도

국내·외에서 최대 밀도를 산정하는 시험 방법은 많은 연구를 통해 매우 다양하나 표준화되지 않았다. 시험법은 크게 상하 진동으로 에너지를 가하는 방법과 수평 타격으로 에너지를 가하는 방식으로 구분된다. 국내의 한국공업규격 (KS F, 2004(2009확인))에 규정된 방법은 ASTM에서 1969년에 정한 방법 (ASTM D2049-69)과 거의 유사하며, ASTM은 2000년에 개량한 방법 (ASTM D4253-00 (Reapproved 2006) & D4254-00 (Reapproved 2006))을 새로 규정하였는데 (Lee et. al., 2007), 이 방법들은 모두 상하 진동 방식으로 에너지를 가하는 시험법이다. 그러나 선행 연구에 의하면 (Kwon, 1986) 상하 진동 방식보다 수평 타격 방법이 더 큰 최대밀도를 나타내는 것으로 나타났다. 최대 밀도는 상대밀도 산정에서 중요한 요소로서, 재료가 가질 수 있는 가장 큰 밀도를 찾아내야 하므로 수평타격 방법이 적절할 것으로 판단된다. 만약 최대밀도 (r_{dmax})를 과소하게 산정하면, 상대 밀도 (D_r)를 과대 평가하게 되고 다짐 상태를 잘못 평가하기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 위와 같은 점을 고려하여 최대밀도 산정 시 수평 타격 방식을 이용하고자 한다.

2. 콘 선단저항과 상대밀도

콘 관입시험 (CPT)은 원추형의 콘 (cone)을 지중에 관입시켜 관입 심도와 관입 저항을 측정하여 깊이 방향의 토층 성상 및 콘 지수를 알아내는 정적 관입 시험이다. 이 시험은 흙을 분류하고, 점성토의 비배수 전단강도 산정, 소산 시험을 통한 압밀계수 산정, 과압밀비 (OCR) 평가 등에 사용할 수 있다. 관입 저항 값은 사질토 지반에서 상대 밀도와 내부 마찰각을 추정하는데 이용할 수도 있다. 이와 관련해서는 국내에 비해 국외에서 활발한 연구가 진행되었는데, Villet and Mitchell (1981), Schmertmann's (1978)과 Baldi et al. (1982,1986) 등은 각각 저압축성, 고압축성, 중간 압축성 모래에 대해서 콘 선단저항과 상대밀도의 관계

식을 제안하였다. 특히 Jamiolkovski et al. (1985)는 여러 가지 사질토를 대상으로 시험한 결과를 바탕으로 다음 식(1)과 같이 제시하였다.

$$D_r(\%) = 68 \left[\log \left(\frac{q_c}{\sqrt{\sigma'_v}} \right) - 1 \right] \quad (1)$$

q_c : cone-tip resistance

σ'_v : effective stress

이후, Kulhawy and Mayne (1992)는 여러 종류의 모래 시험 자료에 기초하여 다음 식 (2)을 제안하였다.

$$D_r(\%) = \sqrt{\left(\frac{1}{Q_F} \right) \left[\frac{(q_c/p_a)}{(\sigma'_v/p_a)^{0.5}} \right]} \quad (2)$$

Q_F : an empirical constant of the least-square regression

p_a : atmospheric pressure

이 식은 앞선 연구들에서 제안하는 식들이 재료의 압축성에 따라 달라진다는 점에 착안하여, 압축성에 따른 재료의 차이를 상수 (Q_F)로 표현한 식이다. 위의 두 식 (1)과 (2)는 공통적으로 관입 저항력이 증가함에 따른 상대밀도의 증가 폭이 둔화되는 것을 나타낸다. 하지만 위 연구들은 모두 CPT의 저항값을 이용한 결과로써, 본 연구에서 적용하고자 하는 PCPT 저항값에 직접 적용하기에는 무리가 따른다. 따라서 본 연구에서는 PCPT 저항값과 상대밀도, 내부마찰각과의 상관 관계를 파악할 수 있는 추가적인 연구를 수행하고자 한다.

3. 모래의 상대밀도와 전단강도

모래의 전단강도에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 활동마찰, 회전마찰 등의 마찰저항과 엇물림 (interlocking)으로 나타나는 구조적 저항으로 구분할 수 있다. 모래가 느슨할 때에는 입자들의 활동마찰이, 조밀할 때에는 회전마찰과 엇물림 경향이 크게 나타난다. 이처럼 점착력이 없는 모래에서는 조밀한 정도를 나타내는 상대밀도가 커짐에 따라 공극비가 감소하고 입자 사이의 저항 요소가 복잡해지면서 저항력 또한 커지게 되고 내부마찰각이 크게 나타난다. 물론 모래의 강도-변형 특성은 매우 복잡해서 상대밀도만으로 표현하기에는 무리가 있다. 하지만 많은 공학자 및 실무자들이 설계 자료로서 상대 밀도를 사용하고 있으므로 다양한 모래에 대하여 상대밀도와 전단강도의 관계를 파악하는 것은 의미가 있다. 그래서 상대밀도와 내부마찰각의 상관성 연구는

국내·외에서 활발하게 이루어졌다. Shin and Song (1996), Song (1998) 등은 주문진 표준사를 이용하여 공극비로 표현한 상대밀도와 삼축압축 시험에서 산출한 내부마찰각과의 관계를 연구하였고 Kim (2004)은 Nevada sand, Toyoura sand와 주문진 표준사에 대하여 직접전단 시험을 통해 상대밀도와 전단강도 관계를 분석하였다. 본 연구에서는 위 연구들에서 실시한 상대밀도와 내부마찰각 사이의 관계를 규명하는 방법론을 적용하여, PCPT 저항 값으로 내부마찰각을 추정할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

III. 재료 및 시험방법

1. 재료

본 연구를 위한 시료는 부산 ○○항만 공사에서 매립재로 사용하고 있는 준설펀 모래 (BS)와 주문진에서 생산된 표준사 (JMJ)를 이용하였다. 각 시료의 기본 물성 값은 다음 Table 1에 입도 분포곡선은 Fig. 1에 나타냈다.

Table 1 Physical properties of soils

Sample	G _s	Passing sieve No. 200 (%)	D ₁₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	C _u	C _g	USCS
BS	2.64	0.28	0.13	0.24	0.98	2.05	SP
JMJ	2.67	1.78	0.43	0.58	1.47	1.04	SP

Fig. 1 The particle size distribution curves of samples

두 시료 모두 통일분류법상 SP로 분류되며, 입도가 불량한 모래의 특성을 보이고 있다. 주문진 (JMJ)시료가 부산 (BS)시료에 비해 입경이 크게 나타났으며, 다른 물리적 특성은 유사하게 나타났다.

2. 시험방법

가. 최대밀도 최소밀도 산정

본 연구에서는 최대 밀도 산정 시 더 큰 값을 구할 수 있는 수평 타격 방식을 이용하였다. 수평 타격 방식 중에서 국내에서 많이 사용 (Lee et al., 2010)하고 있는 일본토질공학회 규정 (JSF T 161-1990)을 따랐으며, 최소 밀도 산정 시에도 이 규정을 따랐다.

최대 밀도는 칼라를 장착할 수 있는 몰드 (D=60 mm, H=40 mm)에 같은 질량으로 구분된 10등분 시료를 층마다 나누어 주입하고, 각 층마다 몰드를 회전시키며 100회씩 수평 타격하면서 몰드를 모두 채운 후 질량을 측정하는 방법으로 구하였다. 최소 밀도는 몰드 저면에 깔때기를 설치하고, 시료를 주입한 후 일정한 속도로 상승시켜 깔때기 속의 시료를 몰드에 옮겼다. 몰드에 넘칠 때까지 주입한 후 커터를 이용해 넘친 시료를 정리하고, 이 무게를 측정하여 최소 밀도를 산정하였다.

나. 직접전단시험

모래의 상대밀도와 전단강도의 관계를 분석하기 위해 직접전단 시험을 이용하였다. 시험은 변형률 제어방식으로 진행하였으며, 시료가 모래인 점을 감안하여 직경의 1 %/min의 속도로 변형을 가하였다. 시험은 파괴가 발생할 때까지 시행하는 것을 원칙으로 하였으며, 파괴 발생 이후라도 변형률 10 % 이상까지 변형을 가하며 전단응력과 수직 변위를 함께 측정하였다. 시료는 건조 밀도 별로 분류한 5 종류의 시료를 사용했다. 각 밀도별 시료에 대하여 세 가지 수직하중 (150kN, 300kN, 600kN)을 가하고 파괴 시 전단응력을 측정하여 각 시료의 전단강도를 구하였다.

다. 전자주사현미경 (SEM) 촬영

모래 입자의 크기와 형태를 파악하고 분석하는 것은 입자 간의 마찰 저항과 구조적 저항의 특징을 파악하는데 있어 유용하게 쓰일 수 있다. 하지만 모래 입자의 형태를 육안으로 확인하기에는 어려움이 있어 전자주사현미경을 통해 입자의 형태를 확인하였으며 입자를 100배, 200배, 500배로 확대한 영상을 저장한 후, 입자의 형상과 크기를 비교·분석하였다. 본 연구에 사용된 장비는 독일에서 생산한 모델 (AURIGA)이다.

라. 휴대용 콘 관입시험 (PCTP)

본 연구에서 사용한 PCTP는 국내에서 제작한 장비를 사용하였으며, 개략적인 모식도는 Fig. 2와 같다. 콘의 선단각은 30°이며 저항을 측정하는 선단면적은 6.45 cm²이다. 하중 측정은 압축에 의해 회전하는 다이얼게이지 값을 읽어 확인한다. 게이지 지시 값을 하중으로 환산하여 선단 저항력을 산출하게 된다. 최

대한 밀도가 균일한 시료를 성형하기 위해 몰드를 이용하였으며, 현장에서 일반적으로 사용하는 다짐몰드의 한 종류인 직경 15.0 cm, 높이 17.5 cm의 D 다짐몰드를 사용했다. A다짐 몰드는 직경이 10 cm로 콘 관입 시 구속력으로 인해 측정오차가 크게 발생할 수 있는 점을 고려하여 사용에서 제외하였으며, 몰드가 지나치게 클 경우에는 자중에 의해 상부와 하부의 밀도차가 크게 발생할 수 있는 단점과 별도의 장비 없이 높은 상대밀도를 재현하기에는 어려움이 발생하는 점을 고려하여 D 다짐 몰드를 선정하였다. 건조 시료의 질량을 변경하면서 몰드에 주입하는 방식으로 밀도가 다른 몰드체를 준비하였고, 콘을 일정한 속도 (2 cm/sec)로 관입시켰다. 본 연구에서 측정한 선단 저항 값은 PCPT에서 눈금으로 확인할 수 있는 10 cm 지점의 값이다. 콘 관입 시 관

입속도, 수직도 유지 등 시험오차를 감안하여 30여개 이상의 서로 다른 밀도 시료에 대해 수행하고 그 결과 값을 평균하여 산정하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 최대밀도·최소밀도

일본 토질공학회 기준 (JSF T 161-1990)에 따라 시험한 최대 건조 밀도와 최소 건조 밀도 결과는 다음 Table 2와 같다.

Table 2 Maximum dry density and minimum dry density of experimental soils

Sample	Maximum dry density (KN/m ³)	Minimum dry density (KN/m ³)
BS	16.25	13.54
JMJ	16.45	13.65

BS 시료와 JMJ 시료의 최대·최소 건조 밀도는 크게 차이 나지는 않지만, JMJ 시료가 다소 크게 나타났다. 이는 기본 물성 시험 결과에서 확인한 비중 값과 입도의 차이에서 발생하는 것으로 판단할 수 있다. 시험에 사용한 두 시료와 같이 입자 크기의 편차가 적은 빈한 입도를 가진 흙에서는 비중이 큰 JMJ 시료가 동일한 체적의 몰드 안에서 더 큰 밀도를 나타내기 때문이다.

2. PCPT 선단저항값을 이용한 상대밀도의 추정

본 연구에서는 상대밀도와 PCPT 시험의 선단저항을 측정하여 서로의 상관관계를 규명하고자 하였다. 이는 모래의 재료적 특성

Fig. 2 Schematic diagram for portable cone penetration tester (PCPT)

(a) BS

(b) JMJ

Fig. 3 Relationship between relative density and cone-tip resistance

으로 인해 현장에서 다짐관리가 어려운 점에 착안하여 간편하고 정량적인 방법으로 다짐도를 체크하고 관리하는데 도움이 될 것으로 판단하기 때문이다. 몰드에 질량을 조절하여 밀도가 다른 몰드체를 형성하고 콘을 관입시켜 선단 저항 값을 확인하였으며, 콘 관입 시 발생할 수 있는 시험오차를 고려하여 밀도를 달리하여 30회 이상 실시한 후 그 결과를 Fig. 3에 나타냈다.

시험 결과, 상대밀도 증가에 따라 PCPT 선단 저항력이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 두 시료 사이에 큰 차이는 발견되지 않았으며, 반대수 용지에 그린 그래프에서 상대밀도와 log로 표현한 선단저항력이 직선 관계로 나타나는 것을 확인하였다. 상

대밀도는 선단저항력의 log (Jamolkovski et al., 1985) 또는 제곱근 (Kulhawy and Mayne, 1992)에 비례한다는 점은 앞선 연구들과 유사하지만, 시험 재료가 다르고 사용한 장비가 PCPT이기 때문에 위 연구자들이 제시한 식들과는 다른 형태의 식이 도출되었다. 회귀분석을 통해 얻은 일반적인 관계식은 다음 식

Table 3 Coefficient A,B and R^2 of equation for each samples

Sample	A	B	R^2
BS	27.2	28.3	0.866
JMJ	31.6	24.7	0.924

Fig. 4 Photographs for shape and size of particles on SEM

(3)과 같다.

$$D_r = A \ln(q_c) + B \quad (3)$$

여기서, A는 반대수 그래프에 나타나는 기울기를 의미하며, 이 크기는 상대밀도 변화에 따른 선단 저항력 변화 값으로써, 기울기가 크다는 것은 작은 선단저항력 변화에도 상대밀도가 민감하게 반응하는 것을 의미한다. 따라서 A 값이 큰 시료는 압축성이 크다고 할 수 있다. 그리고 q_c 는 포터블 콘 관입시 발생하는 선단저항 값으로써 일반적으로 kg/cm^2 로 표현한다. 각 시료에 대한 상수 값 (A,B)과 R^2 값은 Table 3에 정리하였다.

회귀식 산정 및 유의도 분석 결과, 두 시료에 대한 선단관입 저항과 상대밀도 관계식의 R^2 값이 0.866~0.924로 유의성이 높게 나타났다. 또한 BS시료가 JMJ 시료에 비해 A값이 조금 낮은 것으로 나타났지만 차이가 크지 않았다. 본 관계식을 적용하면 PCPT 선단저항 값으로 상대밀도 추정이 가능할 것이다. 다만 이 관계식은 실험에 사용한 두 종류 (BS, JMJ) 시료에 대해서만 유효하므로 추후 여러 지역에서 채취한 모래를 대상으로 동일한 실험을 실시한 후 관계식을 유도하고 자료를 축적하는 것이 필요하다. 시료의 압축성에 따라 관계식이 달라질 것으로 예상되므로, 본 연구에서 제시한 방법을 통해 국내 지역별 모래의 압축성을 평가할 수 있을 것이며, 비슷한 압축성을 가진 지역들을 그룹화하는 데도 도움이 될 것이다.

3. 상대밀도와 내부마찰각의 관계

가. 전자주사현미경 (SEM) 촬영 결과

입자의 형상 및 크기를 확인하기 위해 100배, 200배, 500배

확대하여 촬영한 입자의 모습은 Fig. 4와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 임의로 선택된 시료들에서 BS 시료가 JMJ 시료에 비하여 입자의 크기가 작은 것으로 나타났다. 이는 입도분포곡선 결과와 일치하는 것이다. 또한 각 입자의 형상을 비교해 보면, BS 시료가 상대적으로 모난 (Angular) 상태인데 반해 JMJ 시료는 둥근 (Rounded) 형상을 보이고 있다. 이와 같이 두 시료는 평균적인 입자의 크기와 형상이 다르므로 입자 상호간에 마찰 특성에서 차이가 날 것이다. 또한 이러한 마찰 특성의 차이는 내부마찰각에 영향을 미칠 수 있음을 예상할 수 있다.

나. 직접전단시험 결과

수직응력 (3단계)과 최대 전단응력의 관계를 도시하여 Fig. 5에 나타내었다. 그래프에서 직선의 기울기는 내부마찰각을 의미하고, 절편은 점착력을 나타내지만 두 모래 모두 점착력이 없으므로 내부마찰각만을 고려하게 된다. 그림과 같이 상대밀도가 커짐에 따라 전단응력-수직응력 그래프에서 기울기가 증가하며, 이는 내부마찰각이 커짐을 의미한다.

여기서 구한 내부마찰각을 상대밀도에 따라 도시한 그래프는 Fig. 6 (a)에 나타냈고, 같은 방법으로 구한 잔류 내부마찰각의 결과는 Fig. 6 (b)에 도시하였다. 그 결과, 최대 내부마찰각 (ϕ)은 BS 시료가 $38^\circ \sim 44^\circ$ 로 JMJ 시료가 $33^\circ \sim 41^\circ$, 잔류 내부마찰각 (ϕ_w)은 BS 시료가 약 32° , JMJ 시료는 약 29° 로 일정하게 나타났다. 최대 내부마찰각은 두 시료 모두에서 상대밀도가 커짐에 따라 증가하였고, 증가하는 폭이 유사함을 확인할 수 있었다. 그러나 잔류 내부마찰각은 상대밀도에 따라 크게 변하지 않는 것으로 나타났다.

두 시료의 내부마찰각 차이는 최대 내부마찰각과 잔류 내부마

Fig. 5 Results of direct shear test of samples (Shear stress-Normal stress)

Fig. 6 Relationship between friction angle and relative density

Fig. 7 Friction angle of quartz sands as function of grain size (Rowe, 1962)

찰각에서 모두 $3^\circ \sim 4^\circ$ 가량 발생했다. 이는 재료의 구조적 형태 차이에서 발생한 것으로 보이며, SEM 촬영에서 확인한 바와 같이 입자의 크기와 형상이 차이에서 기인한 것으로 보인다. 이와 관련해서 입자의 평균입경이 커질수록 마찰각이 작아진다는 연구 (Rowe, 1962)가 있었으며, Fig. 7에 BS 시료와 JMJ 시료의 평균입경을 표시하였다. 두 시료 간 평균입경의 차이에서 발생하는 마찰각 차이는 약 2° 가량으로 확인되었다. 또한 입자의 형상과 내부마찰각에 관한 연구 (Cho et. al., 2006)에서는 Fig. 8의 연구 결과를 제시하였다. 이 연구에서는 입자의 형상을 수치적으로 표현하는 방법의 한 종류인 원마도 (Roundness)에 따라 내부마찰각 변화 특성을 분석하였다. SEM 촬영 결과를 통해 구한 두 시료의 원마도 (Krumbein Chart 이용)는 BS=0.5, JMJ=0.7이다. 이 결과를 Fig. 8에 함께 나타낸 결과 원마도가 높은 JMJ 시료에서 내부마찰각이 작은 것으로 평가되었다.

요컨대, 상대밀도가 커짐에 따라 내부마찰각은 커지며, 그 변

Fig. 8 Effects of particle shape (roundness) on friction angle (Cho et. al., 2006)

화율은 본 연구에서 사용한 두가지 종류에 상관없이 유사한 경향을 보인다. 하지만 재료의 구조적 특성 (입도, 형상)에 따라 내부마찰각 차이는 발생한 것으로 보인다. 이는 일반적으로 사용하고 있는 상대밀도-내부마찰각의 관계식에서 추가적으로 입자의 특성을 함께 고려해야함을 시사한다. 한편, 앞서 제시한 식 (3)에서 상대밀도는 콘 선단저항의 log값에 비례하는 것으로 나타났다. 이 결과를 상대밀도-내부마찰각 관계와 연결하면 콘 선단저항 값을 이용해 내부마찰각을 추정할 수 있다. 이를 위해서, 직접전단시험에서 사용한 재료들의 상대밀도와 동일한 밀도로 성형한 시료에서 시험한 콘 선단저항 값과 내부마찰각의 관계를 Fig. 9에 나타내었다. 그 결과 그림과 같이 콘 선단저항을 대수축에 두었을 때 내부마찰각과 직선의 관계를 보였다.

Fig. 9 Relationship between friction angle and cone-tip resistance

이 결과에서 회귀 분석을 통해 구한 관계 일반식은 다음 식 (5)와 같다.

$$\phi = C \ln(q_c) + D \quad (5)$$

이 식에서, 각 시료에 대한 상수 값 (C,D)과 R^2 값은 Table 4에 정리하였다.

Table 4 Coefficient C,D and R^2 of equation for each samples

Sample	C	D	R^2
BS	2.898	38.509	0.992
JMJ	3.053	34.232	0.943

두 식의 R^2 값은 각각 0.992, 0.943으로 매우 높은 상관성을 보였다. 상수 C값 (2.898~3.053)은 Fig. 9에서의 기울기 값이며, 이는 앞선 상대밀도와 콘 선단저항과의 관계와 동일하게 두 모래에서 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 즉 이 값은 모래의 압축성에 따라 변동하는 값으로 두 모래의 압축성이 비슷함을 다시 확인할 수 있었다. 그리고 상수 D 값 (38.509, 34.232)은 재료의 입자 특성에 따른 값으로 평균입경이 작고 입자가 상대적으로 모난 (angular) BS시료에서 큰 값을 보였다.

V. 요약 및 결론

본 연구에서는 바다모래 (BS)를 매립재료 등으로 재활용할 때 요구되는 기본적인 물리·공학적 특성을 표준사와 함께 분석하였다. 또한 휴대가 간편하고, 측정 방법이 간단한 PCPT를 이용해

모래의 상대밀도 및 내부마찰각 추정에 관한 연구를 수행하였으며, 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 다양한 상대밀도 시료에 대해 PCPT 선단저항을 측정하고 상관관계를 분석한 결과 두 시료가 매우 유사한 경향을 보였다. 이는 압축성이 유사하기 때문인 것으로 판단되며, 상대밀도가 콘 선단저항 (q_c)의 log값에 비례하는 것으로 나타났다.
2. 상대밀도에 따른 직접전단 시험 결과, 상대밀도가 증가할 때 내부마찰각 또한 증가하는 것으로 나타났으며 그 증가율은 두 시료가 유사하게 나타났다. 하지만 상대밀도가 같을 때 두 시료 간 내부마찰각은 약 4° 가량 차이가 발생했는데 입자의 크기와 형상 차이가 원인인 것으로 판단된다.
3. 내부마찰각은 상대밀도뿐만 아니라 입자의 특성 (입경, 형상)과도 연관되어 있기 때문에 PCPT 저항 값을 통해 내부마찰각 산정 시에는 모래 특성에 따라 개별적인 식을 사용하는 것이 필요하였으며 각 시료에 대한 관계식 산정이 필요하다.

본 연구를 통해 넓은 매립지역에서도 간편하게 모래 지반의 상대밀도를 전체적으로 파악할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 모래 지반의 다짐도 관리, 전단강도 평가 등을 효율적으로 하는데 도움이 될 것으로 기대되며, 다양한 모래의 PCPT 선단저항과 상대밀도 및 내부마찰각과의 관계를 분석하고 자료를 축적하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. American Society for Testing and Materials, 1969. D 2049-69 (withdrawn) Standard Test method for Relative Density of Cohesionless soils. ASTM.
2. American Society for Testing and Materials, 2000. D 4253-00 Standard Test method for maximum index density of soils using a vibratory table. ASTM.
3. American Society for Testing and Materials, 2000. D 4254-00 Standard Test method for maximum index density of soils and calculation of relative density. ASTM.
4. Baldi, G., R. Bellotti, V. Ghionna, M. Jamiolkowski, and E. Pasqualini, 1982. Design parameters for sands from CPT. In *Proc. 2nd Eur. Symp. on Penetration Testing, at Rotterdam, The Netherlands*: 425-432.
5. Baldi, G., R. Bellotti, V. Ghionna, M. Jamiolkowski, and E. Pasqualini, 1986. Interpretation of CPT's and CPTU's. 2nd Part: drained penetration on sands. In

- Proc. 4th Int. Geotech. Seminar: Field Instrumentation and In Situ Measurements*, at Nanyang Technol. Univ., Singapore: 143-162.
6. Cho, G. C., J. Dodds, and J. C. Santamarina, 2006. Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: natural and crushed sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 132(5): 591-602.
 7. Jamiolkowski, M., G. Baldi, R. Bellotti, V. N. Ghionna, and E. Pasqualini, 1985. Penetration resistance and liquefaction of sands. *In Proc. 11th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg.*, at Rotterdam, The Netherlands: 263-296
 8. Japaness Committee of Soils Mechanics and Foundation Engineering, 1990, JSF T-161 : Test method for minimum and maximum densities of sands, 174-175.
 9. Kim, J. H. 2004. Shear strength determination of sand according to the relative density, Gunsan National University, Gunsan, Korea.
 10. Korean Standard, 2004, KS F 2345 : Testing method for relative density of cohesionless soils.
 11. Kulhawy, F. H., and P. W. Mayne, 1992. Calibration chamber database and boundary effects correction for CPT data. *In Proc. First Int. Symp. on Calibration Chamber Testing*, at Potsdam, N.Y: 257-264.
 12. Kwon, O. K, 1986. An experimental study on the determination of the relative density, Seoul National University, Seoul, Korea.
 13. Lambe, T. W., and R. V. Whitman, 1979. *Soil Mechanics, SI Version*: John Wiley & Sons, Inc.: 67.
 14. Lee, J. J., M. M. Kim, S. H. Lee, and B. I. Kim, 2007. An experimental study for suggestion of simple method of determining the maximum relative density. *Journal of Korean Geotechnical Society* 23(10): 23-31.
 15. Lee, K. I., H. T. Lee, M. J. Kim, and J. P. Choi, 2010. A study on the compression characteristics of marin sands. *Proc., Korean Society of Civil Engineers* 36: 1628-1631.
 16. Rowe, P. W, 1962. The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* 269(1339): 500-527.
 17. Schmertmann, J. H, 1978. Guidelines for cone penetration test, performance and design, edited by F. H. A. (FHWA). Washington, D.C.
 18. Shin, S.-H., and M.-H. Song, 1996. The determination of the angle of internal friction from relative density. *Journal of Industrial Technology Research* 10: 17-29.
 19. Song, M.-H, 1998. A study on the relation between relative density and friction force of dried sand. *Journal of Industrial Technology Research* 12: 29-35.
 20. Villet, W. C., and J. K. Mitchell, 1981. Cone resistance, relative density and friction angle. *In Proc. Session on Cone Penetration Testing and Experience*, ASCE National Convention, at New York, N.Y: 177-208.