함수비를 고려한 모래의 상대밀도 추정을 위한 Fall Cone 관입량의 적용

Application of Penetration in Fall Cone Test to Estimate Relative Density with Variation of Water Content for Sand

최우석* · 손영환**† · 박재성* · 노수각* · 봉태호*

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

ABSTRACT

Relative density, used to express dynamics condition of sand quantitatively, is measured by RI Test, Standard Penetration Test and Cone Penetration Test. Each measurement method has demerits, which is complicated or needs a specific analysis instrument and an analysis of expert. Also the ground is in wet condition commonly because of an unsaturated zone between a saturated zone and a surface, so the behaviour of the ground has different engineering properties unlike the dry ground and it diminishes accuracy of measuring relative density. In this study, the correlation between relative density and penetration of fall cone test in dry condition and wet condition with variation of water content was analyzed and a simple measuring method for relative density was suggested. As a result, there were difference of penetration between dry sands and wet sands, the correlation between relative density and penetration showed linear expression and relative density could be measured by the linear relation.

Keywords: Fall cone test; relative density; water content; linear relation

1. 서 론

최근 건설공사에 있어 매립용 재료로써 모래의 필요성이 증가하고 있다. 모래 매립지만은 다짐을 통해 안정화 및 관리를 하며, 이러한 다짐상태를 정량적으로 표현하기 위해 상대밀도가 사용되고 있다 (Lambe and Whitman, 1979). 현장 상대밀도는 RI장비, 표준관입시험과 콘 관입시험 등을 통하여 추정하는데 RI장비를 이용한 상대밀도 측정은 특수한 분석기기와 전문가의 분석이 필요하고, 표준관입시험과 콘 관입시험은 숙련된 기술자와 큰 장비가 필요하여 다짐이 완료되지 않은 지반에 사용하기 힘들다는 단점이 있다. 이러한 이유로 일반적인 상대밀도 측정은 제한된 위치에서 실시되어 넓은 매립 지반의 정확한 상대밀도를 판단하는데 어려움이 있다. 이에 따라 최근 Park et al. (2012)는 모래의 상대밀도 및 내부마찰각 추정에 있어 사용 및

휴대가 간편한 휴대용 콘 관입시험기 (Portable Cone Penetration Tester : PCPT)를 제시하였지만 그 이외의 상대밀도의 간편한 측정법에 관한 연구는 아직 부족한 실정이다. 또한 일반적으로 불포화 상태로 존재하는 지반은 흡인력에 의한 겉보기 점착력으로 건조 상태의 지반과 다른 공학적 특성을 지니게 되어 (Richefeu et al., 2006; Lu et al., 2007; Kim, 2008; Lu et al., 2009) 표준관입시험이나 콘 관입시험과 같은 관입 저항력에 의한 상대밀도 측정시험의 정확도를 떨어뜨리게 된다. 따라서 상대밀도 측정에 있어 함수비를 고려함과 동시에 적용이 간편하고 신뢰성 있는 측정법에 관한 연구가 필요하다.

Fall cone 시험은 흙의 연경도를 측정하는 간편한 시험으로 Casagrande방법과 더불어 점토의 액·소성한계를 측정하는데 많이 활용되고 있다. Fall cone 시험은 관입량과 비배수 전단강도의 관계로부터 액성한계를 측정하며, 방법이 간편하고 시험자의 개인오차가 작다는 장점이 있다 (Wroth and Wood, 1978). 함수비, 흙의 강도, 관입량 사이의 관계는 점토의 종류에 따라 다르게 나타나지만 일반적으로 반대수지 선상이나 대수지 선상에서 선형관계가 나타남이 알려져 있으며, 이를 통하여 점토의 강도를 간편하게 측정하기도 한다 (Wroth and Wood, 1978; Feng, 2000; Koumoto and Houlby, 2001; Zentar et al., 2009; Song et al., 2010). 또한 흙-시멘트 혼합물의 상 변화,

* 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 6월 4일 투고

2012년 8월 24일 심사완료

2012년 8월 28일 게재확정

풍화토의 풍화도, 유류 오염 점토지반의 전단강도 등 (Kim et al., 2004; Son et al., 2008; Son et al., 2009; Song et al., 2010)을 측정하는데도 그 적용성이 검증되었지만 지금까지 모래와 같이 함수비에 따라 흙의 상 변화가 발생하지 않는 흙에는 적용된 사례가 없다. Fall cone 시험은 시험방법이 간편하며 재료의 강도와 관련된 시험이다. 그리고 일반적으로 상대밀도와 모래의 전단강도는 비례하는 관계를 갖고 있다고 알려져 있으므로 모래의 상대밀도를 측정하는 방법으로 사용될 수 있다고 판단된다.

그러므로 본 연구에서는 모래 매립지반의 상대밀도를 간편하게 측정할 수 있는 방법으로 Fall cone 시험을 제시하였으며 건조 상태와 습윤 상태 모래의 Fall cone 관입량과 상대밀도의 관계를 분석하고자 한다. 이를 통해 Fall cone 시험의 관입량을 이용한 모래의 상대밀도 추정에 있어서의 가능성과 현장에서의 활용을 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 재료

본 연구를 위하여 부산에서 채취한 준설토 (BS)와 주문진 표준사 (JMJ)를 사용하였으며, 재료의 물리적 특성은 Table 1과 같다.

Fig. 1의 입도시험 결과와 같이 두 시료 모두 매우 빈한 입도를 가지고 있으며 통일분류법상 SP로 분류된다. 시료의 평균입

Table 1 Physical properties of soils

	G_s	Passing sieve No. 200 (%)	D_{10} (mm)	D_{50} (mm)	C_u	C_g	USCS
BS	2.64	0.28	0.17	0.24	1.47	0.94	SP
JMJ	2.67	1.78	0.43	0.58	1.47	1.04	SP

Fig. 1 The particle size distribution curves of soils

경은 주문진시료 (JMJ)가 부산항시료 (BS)에 비해 더 크게 나타났다.

2. 시험방법

가. 최소 및 최대건조밀도 산정

현재까지 비점성토의 최대건조밀도를 산정하는 방법은 국·내외 많은 연구를 통하여 다양한 실험방법이 제시되고 있으나 아직까지 실험방법에 있어서의 표준화가 이루어지지 않았다. 최대건조밀도의 결정에 관한 연구에서 Kwon (1986)은 상하진동방식으로 에너지를 가하는 방식인 국내의 한국공업규격 (KS F, 2004 (2009확인))와 ASTM의 ASTM D4253-00 (Reapproved 2006), ASTM D4254-00 (Reapproved 2006)은 수평타격으로 에너지를 가하는 Bowles 방법에 비해 최대건조밀도가 더 작게 나타남을 확인하였다. 최대건조밀도가 실제보다 작게 산정되면 상대밀도를 과대평가하고 지반의 다짐 상태를 잘못 평가할 수 있으므로, 본 연구에서는 수평 타격 방식으로 최대건조밀도를 산정하는 일본 토질공학회 규정 (JSF T 161-1990)에 따라 모래의 최대건조밀도 및 최소건조밀도를 산정하였다. 최대건조밀도는 칼라를 장착한 몰드를 10층으로 나누어 거의 동 질량의 시료를 층마다 나누어 주입하고, 각 층마다 타격점을 회전시켜가며 몰드 측면을 100회 타격하여 시료를 다진 후 칼라를 해체하고 시료의 잉여 부분을 제거한 몰드 내 시료의 질량을 측정하여 구하였다. 최소건조밀도는 시료를 채운 깔때기를 낙하고를 일정하게 유지시키며 몰드 저면 중앙에서부터 일정한 속도로 연직으로 상승시켜 중력에 의한 입자의 재배열을 최소화 하며 시료가 넘치게 채운 후 시료의 잉여 부분을 제거한 몰드 내 시료의 질량을 측정하여 구하였다. 그리고 시험자의 숙련도에 따라 측정값이 과소 혹은 과대평가 될 수 있으므로 5회의 시험을 거치면서 측정값이 수렴하게 되었을 때의 최대·최소값으로 최대건조밀도와 최소건조밀도를 구하였다.

Fig. 2 Apparatus for max. and min. density test and Fall cone test

Fig. 3 Apparatus for Fall cone test

나. Fall cone 시험

Fall cone 시험은 Swedish, British 규정에 따랐으며 Swedish는 내경 60 mm, 깊이 25 mm 용기와 British는 내경 60 mm, 깊이 40 mm 용기를 사용하였다. 각 시험규정에 따라 건조 상태 및 함수비 5 %, 10 %, 15 %, 20 %의 시료에 대하여 상대밀도를 달리하여 성형하였다. 함수비는 일정중량의 시료에 일정량의 물을 첨가하여 인위적으로 조절하였다. 상대밀도는 건조시료의 경우 조밀한 상태는 수평 타격법으로, 느슨한 상태는 낙하고를 달리하며 시료를 성형하였으며 습윤 시료의 경우 정적다짐으로 시료를 성형하였다. 상대밀도 10 % 미만의 매우 느슨한 상태에서 서부터 80 % 이상의 매우 조밀한 상태까지 성형한 각 시료에 대하여 관입량을 4회씩 측정하였으며 평균값을 관입량으로 결정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 상대밀도 산정

일본 토질공학회 기준 (JSF T 161-1990)에 따라 산정한 최대건조밀도와 최소건조밀도는 Table 2와 같다.

최소건조밀도와 최대건조밀도 모두 주문진시료가 부산 시료에 비하여 다소 크게 나타났으나 큰 차이는 발생하지 않았다. 본 연구의 경우 사용한 주문진시료와 부산 시료의 최소건조밀도와 최

Table 2 Maximum dry density and minimum dry density of soils

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

대건조밀도가 유사하게 나타났으므로 상대밀도만이 아니라 다른 요인들의 Fall cone 관입량에 대한 영향을 분석할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 건조 상태에서의 상대밀도-관입량 관계

각 시료에 대하여 건조 상태에서 Swedish & British 규정으로 Fall cone 시험을 실시한 결과는 Fig. 4와 같다.

건조 상태에서의 시험결과 두 시료 모두 건조 상태에서 관입량과 상대밀도의 관계는 선형적으로 반비례하는 것으로 나타났다. 측정된 관입량의 범위는 Swedish 규정의 경우 8~15 mm이며 두 시료간의 관입량이 유사하게 나타났고 British 규정의 경우 15~30 mm이며 주문진시료가 부산 시료에 비해 관입량이 상대적으로 크게 측정되었다. 이러한 두 시험 규정간의 차이는 콘의 선단각과 무게의 차이에 의한 것으로 Fall cone 시험의 관입량은 동일 시료에 대하여 콘의 선단각 크기에 반비례하고 자중에 비례함이 알려져 있으며 (Wood, 1985), 이에 따라 상대적으로 선단각 크기가 작고 무게가 무거운 British 규정이 Swedish 규정에 비하여 관입량의 크기와 측정범위가 크게 나타난 것으로 판단된다. 그러므로 건조 상태의 모래 시료를 대상으로 상대밀도 측정 시 시료 종류에 따른 측정값의 차이가 없는 Swedish 규정은 본 연구에 사용된 두 시료의 경우 동일한 관계식을 적용하여 간편하게 상대밀도를 측정할 수 있다고 판단된다. 그러나 상대밀도 변화에 따른 관입량의 차이가 작고 측정된 관입량의 범위가 작어 측정 시 세심한 주의가 필요할 것으로 사료된다. 시료종류에 따른 측정값의 차이가 나타나고 상대밀도에 따라 관입량이 민감하게 변하는 British 규정은 각 시료별로 다른 관계식을 적용하여 상대밀도를 측정해야 하지만 Swedish 규정에 비하여 정확한 상대밀도 값을 측정할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 4 Relationships between the depth of penetration and relative density in dry condition

Fig. 5 Relationships between the depth of penetration and relative density in wet condition

3. 습윤 상태에서의 상대밀도-관입량 관계

함수비 5 %, 10 %, 15 %, 20 %상태의 두 시료에 대한 시험 결과는 Fig. 5과 같다.

습윤 상태에서의 시험 결과 함수비에 관계없이 두 시료 모두 관입량과 상대밀도의 관계는 선형적으로 반비례하였지만, 기울기는 각각 다르게 나타났다. 두 시료 모두 습윤 상태가 건조 상태에 비해 관입량이 작게 측정되었으나 부산 시료가 주문진 시료에 비해 상대적으로 관입량이 크게 감소하였다. 정적 콘 관입 시험의 경우 일반적으로 습윤 모래에서 콘 저항력과 함수비의 관계는 지수 승에 반비례함이 알려져 있으므로 (Busscher et al,

1997), Fall cone 시험의 콘 관입저항력 또한 함수비의 영향을 받아 습윤 상태에서의 관입량이 건조 상태에 비해 작게 측정된 것으로 사료된다. 이러한 콘 관입저항력과 함수비의 관계는 불포화도의 겉보기 점착력에 기인한 것으로 습윤 모래는 포화도 또는 습윤 정도, 입자크기, 입자 분포, 공극률의 크기에 따라 서로 다른 크기의 점착력을 가지며, 이러한 겉보기 점착력은 일정 수준의 포화도까지 비례하고 입자크기, 공극률에 반비례하는 관계가 나타남이 알려져 있다 (Song, 2011; Cha, 2011). 또한 부산 시료가 평균입경 0.24 mm, 주문진시료가 평균입경 0.58 mm로 주문진시료가 두 배 이상 큰 입경을 갖고 있으므로 이러한 평균입경의 차이도 겉보기 점착력의 차이에 영향을 준 것으로 판단

된다. 따라서 건조/습윤 상태에서의 관입량의 차이의 비교를 통하여 시료 간 함수비의 영향에 대한 판단과 긍정적인 결보기 점착력의 상대적인 크기에 대한 비교가 가능하였다.

4. 상대밀도-관입량관계 회귀식

건조·습윤 상태에서의 시험결과로부터 상대밀도와 관입량의 선형관계의 회귀식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있으며 Table 3은 건조, 습윤 상태에서 회귀식과 R^2 을 정리한 것이다. 앞에서 언급한 건조 상태에서의 Swedish 실험의 경우 부산 시료와 주문진시료에 대하여 하나의 관계식으로 나타내었다. 계수 a 는 관입량에 따른 상대밀도 변화량을 나타내며, 계수 a 와 b 를 통하여 일반적으로 흙이 매우 조밀하다고 판단되는 기준인 상대밀도 85 %에서의 관입량을 계산하였다.

$$Dr = a \cdot (Penetration) + b \quad (1)$$

여기서, Dr : 상대밀도 (%)

$Penetration$: 관입량 (mm)

a, b : 계수

식 (1)의 계수 a 는 Swedish 규정의 경우 $(-)12.43 \sim (-)$

34.85로 나타났으며 British 규정의 경우 $(-)6.60 \sim (-)10.93$ 로 나타났다. 계수 b 는 Swedish 경우 209.12~316.89 범위로 나타났으며, 습윤 상태의 경우 93.61~177.28범위로 건조 상태의 b 값이 크게 나타났다. 측정범위는 Swedish 규정의 경우 0~15 mm, British 규정의 경우 0~30 mm로 나타났다. 이러한 Fall cone 관계식을 통한 상대밀도 측정 시 다음의 사항을 고려해야 할 것으로 판단된다.

첫째, 습윤 모래의 경우 관입량-상대밀도 선형관계식에서의 계수 a , b 는 시료와 함수비에 따른 경향성이 모든 샘플에서 나타나지는 않아 공통적으로 적용할 수 있는 상대밀도와 함수비 범위의 정립이 필요하다. 이를 위하여 상대밀도에 따른 함수비와 관입량의 관계를 Fig. 6에 나타내었다. 둘째, Fall cone 시험에서 계수 a 와 계수 b 로부터 얻은 상대밀도 85 %에서의 관입량을 기준으로 다짐완료 후 지반상태를 평가 할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 상대밀도 85 %에서의 관입량 뿐만 아니라 현장에서 요구하는 상대밀도에 해당하는 관입량을 다짐완료 후 지반상태를 평가하는 기준으로 제시할 수 있을 것이라 판단된다. 셋째, 본 연구에서 사용한 Fall cone 시험기기와 몰드는 실내시험용이므로 현장에서의 적용성은 추후 연구에서 현장실험이나 토조 실험을 통하여 발전시켜야 할 것으로 판단된다. 이에 따라 현장에 적합한 시험방법과 Cone의 무게, 선단각도의 정립이 필요할 것으로 판단된다.

Table 3 Parameters (a , b and R^2) in equation in Fall cone test

Method	Sample	Water Content (%)	Regressive Equation ($Dr = a \cdot (Penetration) + b$)		R^2	Penetration at $Dr = 85$ % (mm)
			a	b		
Swedish	BS&JM	0	-15.94	240.67	0.81	9.77
	BS	5	-22.20	112.67	0.80	1.25
		10	-28.52	93.65	0.95	0.30
		15	-34.85	111.99	0.82	0.77
		20	-32.45	105.44	0.77	0.63
	JM	5	-12.43	111.15	0.91	2.10
		10	-14.89	115.80	0.76	2.07
		15	-27.77	177.28	0.96	3.32
		20	-19.07	127.78	0.91	2.24
British	BS	0	-7.40	209.12	0.94	16.77
		5	-7.11	93.61	0.90	1.21
		10	-8.43	98.98	0.93	1.66
		15	-10.93	125.16	0.90	3.67
		20	-8.53	105.66	0.84	2.42
	JM	0	-8.09	246.02	0.94	19.90
		5	-6.60	125.87	0.95	6.19
		10	-7.58	136.04	0.87	6.73
		15	-6.90	129.72	0.89	6.48
		20	-8.76	149.65	0.86	7.38

Fig. 6 Relationships between the depth of penetration and water content

4. 함수비-관입량관계

Fall cone 시험 결과로부터 산정한 관입량과 상대밀도의 관계식을 이용하여 각 시료별 상대밀도에 따른 함수비와 관입량의 관계를 Fig. 6와 같이 나타내었다.

Swedish 규정의 경우 두 시료 모두 대부분의 상대밀도에서 함수비 5 %에서의 관입량이 높게 나타났으며 함수비 10 %, 15 %, 20 %에서는 대체적으로 일정하게 나타났다. British 규정의 경우 5 % 이상의 함수비에서는 함수비 변화에 따른 관입량의 변화가 Swedish 규정에 비하여 상대적으로 작게 나타났다. 상기 결과에서 5 % 이상의 함수비에서는 함수비가 증가함에도 불구하고 관입량의 변화가 상당히 미미함을 확인할 수 있었다. 이는 일정 함수비 이상에서는 흡인력 혹은 겉보기 점착력이 일정해

Table 4 Regressive equation in wet condition

Method	Sand sample	Regressive Equation ($Dr = a \cdot (Penetration) + b$)		R^2	Penetration at $Dr = 85$ % (mm)
		a	b		
Swedish	BS	- 19.915	85.46	0.60	0.02
	JMJ	- 14.213	112.57	0.76	1.94
British	BS	- 8.4666	104.21	0.87	2.27
	JMJ	- 7.1192	131.26	0.88	6.50

지기 때문 (Richefeu et al., 2006)이라고 판단되며, 시험에 사용한 British 규정과 Swedish 규정의 경우 상대밀도 측정에 있어서 함수비 5 ~ 20 % 범위에서는 동일한 관계식 적용이 가능하다고 판단된다. 이에 대한 관계식은 Table 4와 같고, 각각 함수비

Fig. 7 Differences of penetration at Dr=85 % among Regressive Equations

수비에 따른 관계식을 적용하였을 때와 함수비에 관계없이 동일한 관계식을 적용하였을 때의 상대밀도 85 %에서의 관입량의 차이를 Fig. 7에 나타내었다.

Table 4와 Fig. 7의 결과와 같이 함수비에 관계없이 동일한 관계식을 적용하였을 때 Swedish 규정의 경우 각 관계식의 R^2 은 0.67과 0.70으로 Table 3에서 각각 함수비에 대한 관계식의 R^2 보다 낮게 나타났다. 상대밀도 85 %에서의 관입량은 동일한 관계식을 적용하였을 때가 각각 함수비에 대한 관계식을 적용하였을 때보다 낮게 나타났다. 앞서 Table 3에 제시된 상대밀도 85 %에서의 관입량을 기준으로 관입량이 그 이하로 측정되었다면 다짐이 완료되었다고 판단할 수 있다고 서술하였다. 그러므로 Table 4의 Swedish 규정에서 상대밀도 85 %의 관입량을 기준

으로 다짐 완료도를 판단 시 실제보다 엄격한 기준이 되므로 설계에 적용 시 안전 측 설계가 가능할 것으로 판단된다. British 규정의 경우 각 관계식의 R^2 은 0.87과 0.88로 나타났고 상대밀도 85 %에서의 관입량은 관계식간의 차이가 상대적으로 미미하게 나타났다. 그러므로 British 규정에 의한 습윤 모래의 상대밀도 측정 시 함수비에 관계없이 동일한 관계식을 적용하여도 신뢰성 있는 상대밀도 및 지반상태의 평가가 가능하다고 판단된다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 모래의 상대밀도 추정에 있어 함수비를 고려한 간편한 측정방법을 제시하기 위해 부산항준설모래 (BS)와 주문

진 표준사 (JMJ)에 대하여 Swedish, British 규정에 따른 Fall cone 시험을 실시하였다. 건조 상태와 함수비 5 %, 10 %, 15 %, 20 %의 시료에 대하여 상대밀도에 따른 관입량을 측정하였으며 상대밀도, 관입량과 함수비 각각의 관계를 그래프와 관계식으로 나타내었다. 연구결과의 내용을 요약하면 다음과 같다.

1. 시료에 대한 Fall cone 시험에서 상대밀도와 관입량은 건조 상태와 습윤 상태에서 모두 선형적 반비례관계가 나타났지만 British 규정의 관입량과 측정범위가 더 크게 나타났다. 이는 콘의 선단각과 무게의 차이가 원인 것으로 판단된다.

2. 건조 상태의 시료에서 Swedish 규정은 두 시료에 대하여 동일한 관계식을 적용하여 상대밀도를 측정할 수 있다고 판단되며 British 규정은 시료별로 다른 관계식을 적용해야 하지만 Swedish 규정에 비하여 정확한 상대밀도 값 측정이 가능하다고 판단된다.

3. 습윤 상태의 두 시료 모두 건조 상태보다 관입량이 작게 측정되었으며 부산 시료의 관입량이 주문진 시료에 비해 상대적으로 크게 감소하였다. 이는 입경의 크기 차이로 인한 겉보기 점착력의 차이가 가장 큰 원인인 것으로 판단되며 관입량의 변화를 통해 각 시료들에 대한 함수비의 영향 및 상대적인 겉보기 점착력차이를 정성적으로 비교할 수 있었다.

4. 습윤 모래 경우 함수비에 관계없이 동일한 관계식을 적용하였을 때 Swedish 규정은 일반적으로 조밀한 상태에 대한 판단기준이 되는 관입량이 안전 측으로 나타났고 British 규정은 관계식과 기준 관입량에서 신뢰성 있는 결과 값을 얻을 수 있다고 판단된다. 따라서 Fall cone 시험을 이용하여 함수비의 영향을 고려함과 동시에 관계식을 통한 상대밀도의 간편한 측정이 가능할 것으로 판단되며, 추후 다양한 모래에 대한 실험과 현장 실험을 통하여 현장에 적합한 시험방법과 시험기기의 정립이 필요할 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. American Society for Testing and Materials, 2000. D 4253-00 Standard Test method for maximum index density of soils using a vibratory table. ASTM.
2. 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.
3. Busscher, W. J., P. J., Bauer, C. R., Camp, and R. E., Sojka, 1997. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. *Soil & Tillage Reserch* 43: 205-217.
4. Cha, B. G., 2011. Unsaturated shear strength characteristics of Nak-dong River silty sand. Master's Thesis, Kyungpook University (in Korean).
5. Feng, T. W., 2000. Fall-cone penetration and water content relationship of clays. *Geotechnique* 50(2): 181-187.
6. Japaness Committee of Soils Mechanics and Foundation Engineering, 1990. JSF T-161 : Test method for minimum and maximum densities of sands, 174-175.
7. Kim, J. H., J. Y. Won, S. P. Kim, and P. W. Chang, 2004. Phase changes of soil-cement mixture using fall cone and heat of hydration. *Journal of Korean Geotechnical Society* 20(9): 25-32 (in Korea).
8. Kim, T. H., 2008. Prediction of tensile strength of wet sand(I) : Theory. *Korean Geotechnical Society* 24(6): 27-28 (in Korea).
9. Koumoto, T., and G. T. Houlsby, 2001. Theory and practice of the fall cone test. *Geotechnique* 51(8): 701-712.
10. Korean Standard, 2004. KS F 2345 : Testing method for relative density of cohesionless soils.
11. Kwon, O. K, 1986. An experimental study on the determination of the relative density. Master's Thesis, Seoul National University (in Korea).
12. Lambe, T. W., and R. V. Whitman, 1979. *Soil Mechanics. John Wiley & sons* : 30-31.
13. Lu, N., T. H. Kim, S. Sture, and W. J. Likos, 2009. Tensile strength of unsaturated sand. *Journal of Engineering Mechanics-Asce* 135(12): 1410-1419.
14. Lu, N., B. Wu, and C. P. Tan, 2007. Tensile strength characteristics of unsaturated sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 133(2): 144-154.
15. Park, J. S., Y. H. Son, S. K. Noh, and T. H. Bong, 2012. Estimation of the Relative Density and internal Friction Angle for Sand Using Cone-tip Resistance of the PCPT. *Journal of the Korean Society of Agriculture Engineers* 54(4): 137-145 (in Korea).
16. Richefeu, V., M. S. El Youssoufi, and F. Radjaï, 2006. Shear strength properties of wet granular materials. *Physical Review* 73(5): 051304.
17. Son, Y. H., S. P. Kim, and P. W. Chang, 2008. Estimation of Weathered Degree Using Fall cone in

- Weathered Soil; Silty Sand. *Journal of the Korean Society of Agriculture Engineers* 50(1): 3-10 (in Korea).
18. Son, Y. H., S. K. Noh, S. P. Kim, and P. W. Chang, 2009. Alternative Methods for Classification on Weathered Strata. *Journal of the Korean Society of Agriculture Engineers* 51(3): 3-10 (in Korea).
19. Song, H. D., 2011. Triaxial compression characteristics of unsaturated sands with poor particle size distribution. Master's Thesis, Yeungnam University (in Korean).
20. Song, Y. W., H. S. Lee, and J. B. Park, 2010. Prediction of the shear strength of oil contaminated clay using Fall cone. *Journal of Korean Society of Soil and Groundwater Environment* 15(6): 107-113 (in Korea).
21. Wood, D. M., 1985. Some fall-cone tests. *Geotechnique* 35(1): 64-68.
22. Wroth, C. P., and D. M. Wood, 1978. Correlation of index properties with some basic engineering properites of soils. *Canadian Geotechnical Journal* 15(2): 137-145.
23. Zentar, R., N. E. Abriak, and V. Dubois, 2009. Fall cone test to characterize shear strength of organic sediments. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 135(1): 153-157.