

적은 량의 수분에 의해 발생된 사빈사 입자들간의 결합력

김태형* · 강기찬**

*한국해양대학교 건설환경공학부 전임강사

**한국해양대학교 토목환경공학과 석사과정

Infinitesimal Moisture Induced Attraction Force in Beach Sand

T.-H. Kim* · G.-C. Kang**

*Division of Civil and Environment Engineering, Full Time Lecturer, Korea Maritime University

**Department of Civil and Environment Engineering, Graduate Student, Korea Maritime University

요 약 : 해안선 근처의 해수면 위에 존재하는 사빈사는 완전건조나 완전 포화가 아닌 수분을 어느 정도 함유하고 있는 불포화상태로 존재 한다. 이런 불포화 영역에서 굴착된 면은 모세관력에 의해 일정 시간 그 형태를 유지하는 것을 볼 수 있다. 이런 현상들은 지표면 근처의 낮은 응력범위에서 발생하는 것으로 불포화 사빈사간에 영이 아닌 결합력(인장강도와 점착력)이 존재함을 알 수 있다. 그래서 지표면근처의 사빈사 입자간의 인장강도와 점착력의 크기를 정량적으로 평가하기위해 실험을 실시했다. 특히 이들 결합력이 낮은 응력에서 함수량과 세립분에 어떤 영향을 받는지 검토하였다. 영보다 큰 인장강도가 확인되었고 함수비와 세립분이 사빈사 입자들사이에 증가할 수록 인장강도가 증가했다. 하지만 세립분의 인장강도에 미치는 영향은 함수비에 의존하는 것으로 나타났다. 겔보기점착력 또한 측정이 되었고 인장강도와와의 간단한 관계식이 제안되었다.

핵심용어 : 모세관력, 결합력, 점착력, 인장강도, 사빈사

ABSTRACT : Beach sands located above the sea water level exist in an unsaturated rather than a fully saturated or dry state. Within the unsaturated zone, a steep excavated surface can be sustained for some unknown but finite time, and some slopes may remain stable for extended time periods due to capillary forces. These observations clearly indicate small but non-zero values for attraction strength (tensile strength and cohesion) in unsaturated beach sands, especially apparent but not confined to settings where there are low stress levels. Thus, experiments were carried out to quantify the magnitude of attraction strength in moist sands ($D_r = 30\%$) and to examine the variation of these values as a function of moisture content, and presence of small amount of fines. Tensile strength, which is significantly different from zero, increases with increasing moisture content and fines. However, the influences of fines on the tensile strength are substantially dependent on the water content. Apparent cohesion strength is also identified in moist sands. A simple relationship between tensile strength and apparent cohesion is proposed using the obtained data.

KEY WORDS : capillary forces, attraction strength, apparent cohesion, tensile strength, beach sands

1. 서 론

모래 특히 사빈사(beach sands)에 대한 공학적 특성에 관한 연구들은 과거의 수십 년에 걸쳐서 계속되어 오고 있다 (Chancy and Fang, 1986; Noorany and Gizienski, 1970)[4][6]. 하지만 대부분의 연구는 전단강도와 관련된 것이며, 특히 반복적인 하중에 의해 발생하는 액상화현상(모래가 하중을 더 이상

지지 할 수 없는 상태)에 초점을 두고 있다. 왜냐하면 모래 특히 사빈사의 경우 파도의 작용에 의해 위치별 입도분포가 비교적 균등한 구성을 가지기 때문에 액상화가 쉽게 발생되기 때문이다 (Chancy and Fang, 1986; Winterkorn and Fang, 1970)[4][12]. 반면 모래의 인장강도에 관한 연구는 고화된 모래나 점토질을 함유한 모래를 제외하고 연구의 관심 대상이 되지 못했다. 그것은 일반적으로 모래의 인장강도와 점착력은 매우 작거나 없다고 가정되기 때문인데 이것은 재하하중의 범위가 20 kPa 이상이

* kth67399@hhu.ac.kr 051) 410-4465

** sabem1002@hanmail.net 051) 410-4945

적은 량의 수분에 의해 발생된 사빈사 입자들간의 결합력

고 건조 혹은 완전히 포화된 모래에 대해서만 맞는 말이다.

해안선 근처 해수면 위에 존재하는 모래는 완전건조나 완전 포화가 아닌 습기를 어느 정도 함유하고 있는 불포화상태로 존재 한다. 이런 불포화의 모래는 대부분의 해변 지역에서 발견된다. 이런 불포화 영역에서 수직 혹은 경사지게 굴착된 면은 모세관력에 의해 일정 시간 그 형태를 유지하는 것을 볼 수 있다. 이런 현상들은 지표면 근처에서 특히 낮은 응력범위에서 발생하는 것으로 불포화 사빈사간에 영이 아닌 결합력(인장강도와 점착력)이 존재함을 알 수 있다. 물론 굴착된 표면은 시간이 지남에 따른 수분 감소나 조류작용, 침투수, 또는 기계 진동과 같은 요인에 의해 결국 파괴가 발생하겠지만, 이러한 불포화 모래에서 볼 수 있는 현상은 일반적으로 모래에 적용되는 일반적인 가정과는 맞지 않게 어느 정도의 인장강도와 점착력이 존재함을 알 수 있다. 하지만 현재까지 이런 사빈사의 특성에 대한 연구가 무시되고 있는 실정이다.

그래서 본 논문에서는 지표면근처의 사빈사 입자간의 인장강도와 점착력의 크기를 정량적으로 평가하고자 한다. 특히 낮은 함수량과 지표면 근처의 낮은 응력에서의 이들 결합력의 변화를 알아보려고 한다. 또한 획득된 자료들을 근거로, 사빈사에서 인장강도와 점착력 사이의 관계식을 제안하고자 한다. 본 연구는 순수 물에 의한 역학적인 강도의 변화만을 연구 범위로 제한했다.

2. 물 브릿지에서 결합력

적은 량의 물에 의해 발생하는 모세관력은 흙의 공학적 거동에 상당한 영향을 미친다. 낮은 함수량에서 소량의 물은 입자간 접촉면에 그림 1에서와 같이 연결 브릿지를 형성하고, 함수량이 증가함에 따라 이러한 브릿지의 크기는 변하게 된다. 이 브릿지는 입자 상호간 결합력을 발생시키고 결과적으로 점착력과 인장강도를 증가시키는 작용을 한다. 입자간에 작용하는 결합력은 일반적으로 두개 힘으로부터 발생된다. 1) 물-입자 접촉면을 따라 작용하는 표면장력과 2) 물 브릿지 내부와 외부의 압력차에 의한 힘이다 (Pierrat and Caram, 1997; Rumpf, 1961; Schubert, 1984)[8][9][10]. 표면장력은 항상 입자들을 결합하려는 경향이 있는 반면, 압력차에 의한 힘은 물 브릿지내의 순압력이 적은 경우(부의 압력)에만 입자들을 결합시키는 힘으로 작용한다. 입자들 사이의 물 브릿지의 존재 때문에, 이 두개의 힘들이 결합력으로써 함께 작용하는 것이다.

그림 1(a)에 나타난 바와 같이 입자의 직경 d 이고 거리가 a 만큼 떨어져있는 입자사이에 존재하는 물 브릿지를 생각해 보자. 첫 번째 결합력인 F_s 는 표면장력 때문에 발생하는 것으로 다음과 같은 형태의 무차원 수식으로 표현될 수 있다.

$$\frac{F_s}{ad} = \pi \sin\theta \sin(\theta + \delta) \quad (1)$$

여기서, θ 는 물 브릿지 크기 경사각, 그리고 a 와 δ 는 각각 표면장력과 접촉각이다. 두 번째 힘 F_c 는 브릿지 압력차에 의한 것으로 식(2)와 같다.

$$\frac{F_c}{ad} = \pi \left(\frac{\sin\theta}{2} \right)^2 \left(\frac{1}{r^*} - \frac{1}{h^*} \right) \quad (2)$$

여기서

$$h^* = \frac{h}{d} = \frac{\sin\theta}{2} + \frac{r}{d} [\sin(\theta + \delta) - 1]$$

$$r^* = \frac{r}{d} = \frac{(1 - \cos\theta) + \left(\frac{a}{d}\right)}{2\cos(\theta + \delta)}$$

여기서, 매개변수 $h^*(=h/d)$ 와 $r^*(=r/d)$ 는 물 브릿지의 무차원 곡률반경이고 a/d 는 무차원 입자간 거리이다. 위 식에서 h 와 r 은 곡률반경이 원의 호라는 가정하에 유도 되었다. 물 표면의 정확한 형태는 Laplace-Young 방정식에 의해 결정되며 수치해석에 의해 h 와 r 산정된다. 하지만, Heady와 Cahn(1970)[5]는 원으로 가정한 근사 값과 정확한 해석을 비교한 결과 그 차이가 별로 없음을 알았다. 그러므로 원으로 가정한 본 해석이 별 문제가 없다고 할 수 있다.

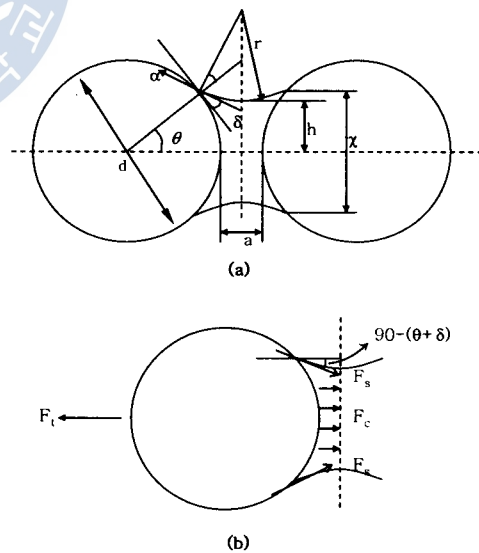


Fig. 1 (a) Water Bridge Bonding Two Spherical Particles (From Pierrat and Caram, 1997)

(b) One-Dimensional Free-Body Diagram of Bonding Forces

전체 무차원 결합력 F_j 는 접촉각과 브릿지 크기 각(δ 와 θ)과 무차원 이격거리(a/d)의 함수로써 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{F_c}{ad} = \pi \sin \theta \left[\sin(\theta + \delta) + \frac{\sin \theta}{4} \left(\frac{1}{r^*} - \frac{1}{h^*} \right) \right] \quad (3)$$

입자간 결합력을 단순 1차원 자유도로 표시하면 그림 1(b)와 같다. 물 브릿지에 의해 연결된 입자들은 서로 잡아당기는 힘이 존재하는데 F_s 는 $\sin(\theta + \delta)$ 의 각도를 가지고 물-입자의 접촉선(= πx)을 따라 작용하고 F_c 는 물 브릿지의 횡단면 면적(= $\pi x^2/4$)에 작용한다. 이러한 힘들은 물 브릿지가 실제적으로 파괴될 때 까지 외적 힘에 저항하는 전체 결합력으로써 함께 작용한다.

3. 실험

평균입경이 0.22mm인 F-75 Ottawa 실리카 모래가 이 시험에 사용되었다(그림 2). F-75의 모래는 2.65의 비중과 각각 0.805와 0.486의 최대, 최소한의 간극비를 가지고 있다. F-75 모래를 이용하여 2 종류 시료를 만들었는데, 첫 번째 시료(F-75-C)는 0.075mm 미만의 입자를 완전히 제거한 것으로 No.200체를 이용 흐르는 물에 씻은 후 건조시켜 준비하였다. 두 번째 시료(F-75-F)는 첫 번째 시료에 중량비로 2%의 세립분을 추가하여 만들었다. 이것은 적은량의 세립분이 물과 재하 압력에 따라 어느 정도 조립질 입자간의 결합력에 영향을 미치는지 알기 위해 만들었다. 그리고 밀도에 따른 인장강도와 점착력의 영향을 배제하기 위해 실험은 상대밀도(Dr)가 느슨한 30%로 공시체를 만들어 실험을 실시하였다.

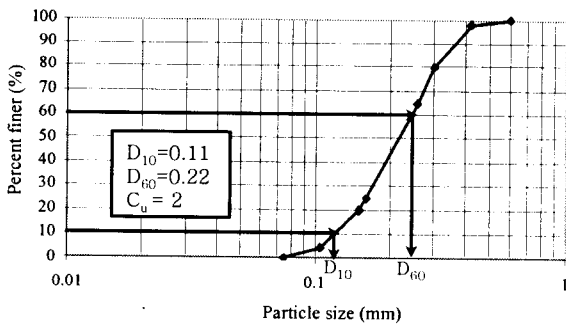


Fig. 2 Grain Size Distribution Curve for F-75 Sand

3.1 직접인장시험

직접인장 시험은 낮은 응력에서 적은양의 수분에 의한 사빈사 입자간의 인장강도를 측정하기 위한 것으로 2 종류의 시료에 대해 각각 상대밀도가 30%이고 0.5 ~ 4.0% 범위의 네 개의 서로 다른 함수량을 가진 공시체를 만들어 실험을 실시하였다.

3.1.1 시험장치

인장실험에 사용된 장치는 그림 3과 같다. 공시체 틀은 (178×178×178mm) 정확히 이등분으로 나뉘지도록 설계되었으며, 틀 내부에서 삼각형 모양의 췌기를 부착시켰다. 이것은 시료와 공시체 틀 간의 접촉을 용이하게 하기 위해 설치하였다. 또한 조립질 입자의 다일레이턴시 각도보다 큰 각도를 가지는 췌기를 사용하여 분할 면에서 균일한 응력 분포를 발생되도록 하였다. F-75의 Owatta 모래의 다일레이턴시 각도는 보통의 재하압력(Batiste, 1998; Sture et al., 1998)[3][11]에서 약 17° 이므로 20°의 각도를 가지는 췌기를 선택하였다. 또한 췌기 면과 시료 사이에서 미끄럼방지를 위해 사포를 췌기 표면에 부착시켰다.

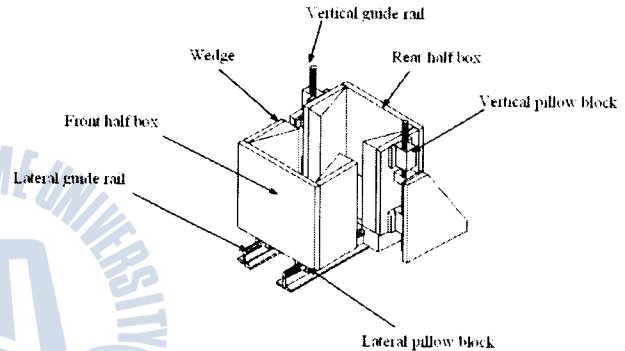


Fig. 3 Direct Tension Apparatus

3.1.2 공시체 준비

균질한 시료를 만들기 위해 혼합기를 이용하여 시료와 물을 혼합시켰다. 물에 의한 물리·화학적 영향을 배제하기 위해 증류수를 사용하였다. 공시체는 각을 가진 햄머를 특별 제작하여 사용하였다. 다짐은 공시체 당 4 개의 층으로 실시되었다. 공시체의 균질한 밀도를 얻기 위해 타격횟수, 햄머의 무게와 떨어뜨리는 높이를 조절하였다. 특히, 본 실험이 낮은 함수량에서 실시되는 관계로 각각의 층다짐 중간 중간 수분의 증발을 방지하기 위해 플라스틱 랩을 덮어주었다. 이것은 본 실험이 낮은 함수량의 공시체 대해 실시되는 관계로 함수량의 작은 변화가 결과에 큰 변화를 가져올 수 있기 때문이다.

3.1.3 시험절차

공시체에 인장하중은 파괴가 일어날 때까지 약 170g/min(또는 약 0.03N/sec)의 비율로 일정하게 하중을 작용시키는 방법을 선택했다. 실험기에서 레일 자체의 마찰에 의한 저항은 미리 측정(115g)하여 최종결과에 반영하였다. 재하-하중 측정의 오차는 ±0.01g이며 인장강도는 파괴 시 하중을 분리면 면적으로 나눔으로써 계산되었다. 실험직후에 전 공시체를 노건조 시켜 공시체의

적은 량의 수분에 의해 발생된 사빈사 입자들간의 결합력

함수량이 측정하였다. 갑작스런 파괴 현상이 모든 시험에서 관측되었고 변위가 0.2mm이하에서 파괴가 발생하였다.

3.2 직접전단시험

이 시험의 목적은 적은 량의 수분이 있는 사빈사에 대해 낮은 응력하에서 전단강도 특히 전단강도 매개변수를 구하는 것이다. 또한 시험에서 얻어진 자료를 인장강도 시험결과와 비교하여 인장강도와 점착력 사이의 관계를 분석하는데 있다.

3.2.1 시험장치

그림 4는 직접전단시험 장치로 178×178mm의 넓이와 15mm 두께로 일반적인 직접전단시험 상자 보다는 크기가 큰 상자를 사용하였다. 넓이가 큰 전단상자는 큰 전단면을 가지므로 낮은 수직 응력 조건에서 전단저항의 발생이 용이하고, 경계효과(boundary effects)를 감소시킴으로써 균질한 응력 분포를 얻을 수 있는 장점이 있다(Perkins 1991)[7]. 직접인장 시험에 사용되는 것과 같은 일정응력 재하방식을 이용하여 하중을 재하 하였다. 하부 전단상자는 이동을 허용하고 이동거리는 ±0.025mm의 정확도를 가지는 다이얼 게이지로 측정하고 상부 전단상자는 고정시켰다.

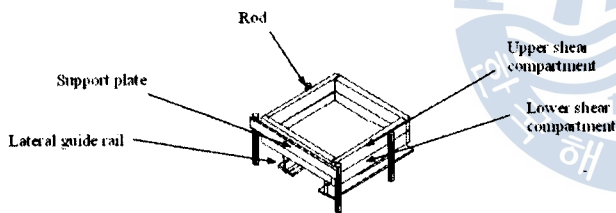


Fig. 4 Direct Shear Apparatus

3.2.2 공시체 준비

상 하부 전단상자 사이에 대략 1.0mm의 분리를 위해 나사를 설치하였다. 공시체 두께 15mm는 ASTM D 3080 표준방법과 F-75 Ottawa 모래의 전단면 두께(3.19 ~ 3.29mm)를 고려하여 결정하였다 (Alshibli and Sture, 1999)[1]. 공시체는 직접인장시험에서 공시체를 만들었던 것처럼 각이진 햄머로 다짐을 하여 준비하였다. 준비된 공시체의 밀도(상대밀도 30%)는 무게를 측정하여 계산하였다. 무게를 측정된 후에는 플라스틱 랩을 사용하여 수분의 증발을 줄여주었다.

3.2.3 시험절차

공시체를 준비한 후 공시체 중간지점을 기준에서 자중을 고려하여 필요한 수직응력을 작용시키고 전단되는 동안 발생하는 접촉에서의 마찰을 줄이기 위해 1mm두께의 테프론 판을 전단상

자 상부와 하부사이에 위치시켰다. 하중은 직접인장시험과 유사하게 약 170(g/min)의 비율로 하중을 일정하게 하부 전단상자에 작용시켜 공시체가 파괴 될 때까지 진행시켰다. 실험 중 상부 전단상자는 고정된 상태로 있으며, 하부 전단상자의 레일에서 발생되는 마찰력은 실험 후 결과에 반영하였다.

4. 시험 결과 및 분석

4.1 직접인장시험

4.1.1 함수량 영향

F-75-C와 F-75-F 모래에서 수행된 시험의 결과 (그림 5) 인장강도는 함수량이 증가하는 것에 따라 증가하는 경향을 보임을 알 수 있다. 이것은 입자들 사이에서의 결합력으로 설명될 수 있는데, 이러한 입자 사이에서의 결합력의 결과, 점착력뿐만 아니라 인장강도를 발생시킴을 알 수 있다. 전장에서 논의되었던 것처럼 두 요소를 구성하는 결합력은 표면장력에 의한 F_s 와 물 브릿지 내의 부의 간극수압 때문에 발생하는 힘 F_c 로 이 두 힘이 입자간 인장강도를 발생시킨다고 볼 수 있다.

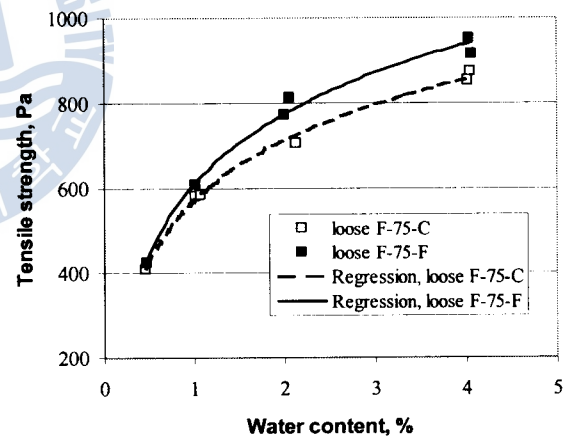


Fig. 5 Results of Direct Tension Testing: Tensile Strength versus Water Content:

(a) F-75-C and (b) F-75-F Sands ($D_r = 30\%$)

4.1.2 세립분 영향

인장강도에서 세립분의 영향은 그림 5에서 확인할 수 있는데 세립분을 함유한 모래의 인장강도가 깨끗한 모래의 인장강도 보다 약간 높음 경향을 보인다. 이것은 세립분이 큰 입자 알갱이에 붙어 입자간 물과 접촉하는 수와 면을 증가시켰기 때문이다. 또한 세립분을 포함한 모래에서 모세관현상은 더 크게 작용하여 큰 인장강도가 발현된 것 같다. 그리고 그림 5는 인장강도에 미치는 세립분의 영향이 함수량에 의해 큰 영향을 받는 것으로 보

여주고 있다. 0.5%의 함수량에서의 모래 인장강도의 변화는 깨끗한 모래나 세립분을 함유한 모래나 거의 동일한 값을 보여주고 함수량이 증가함에 따라 인장강도에서의 세립분의 영향은 분명히 나타난다. 이것은 인장강도에 미치는 세립분의 영향은 먼저 함수량조건에 따라 달라진다는 것을 의미한다.

4.2 직접전단시험

F-75-C와 F-75-F 모래에 대한 결과는 각각 그림 6(a)와 (b)와 같다. 표 1은 네 개의 다른 수직응력 범위에서 겉보기 점착력 c_a 와 내부마찰각 ϕ' 의 크기를 정리한 것이다. 일반적으로 겉보기 점착력은 낮은 응력하에서 쉽게 관찰되는데, 이것은 응력이 낮은 상태에서는 입자간 상대적인 마찰력의 성분이 작기 때문이다. 다시 말하면 높은 수직응력에서는 겉보기 점착력이 존재는 기본적인 메카니즘은 유효하지만 전체 전단강도에서 차지하는 비중이 작아 관찰되기가 쉽지 않기 때문이다.

Table 1 Values of Apparent and Internal Friction Angle for Different Normal Stress Ranges in Direct Shear Tests

(a) Loose F-75-C Sands ($D_r = 30\%$)

w (%)	σ_n (kPa)		σ_n (kPa)		σ_n (kPa)		σ_n (kPa)	
	0.10 - 0.25		0.25 - 0.50		0.50 - 1.00		0.10 - 1.00	
	c_a (Pa)	ϕ' (°)	c_a (Pa)	ϕ' (°)	c_a (Pa)	ϕ' (°)	c_a (Pa)	ϕ' (°)
0.0	113	47	238	28	299	23	209	28
0.5	264	49	390	34	382	34	343	36
1.0	377	47	431	41	463	38	427	40

(b) Loose F-75-F Sands ($D_r = 30\%$)

w (%)	σ_n (kPa)		σ_n (kPa)		σ_n (kPa)		σ_n (kPa)	
	0.10 - 0.25		0.25 - 0.50		0.50 - 1.00		0.10 - 1.00	
	c_a (Pa)	ϕ' (°)	c_a (Pa)	ϕ' (°)	c_a (Pa)	ϕ' (°)	c_a (Pa)	ϕ' (°)
0.0	127	41	208	31	286	24	207	29
0.5	240	56	377	44	554	31	380	39
1.0	328	55	376	51	682	32	452	42

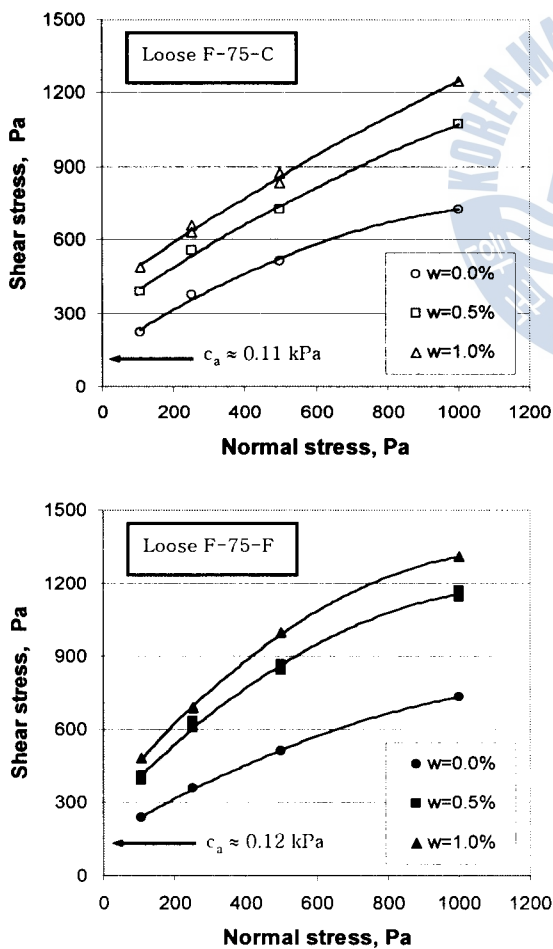


Fig. 6 Results of the Direct Shear Tests: F-75-C and F-75-F Sands ($D_r = 30\%$)

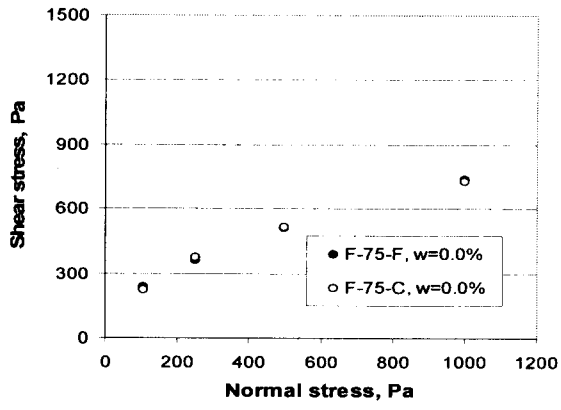
4.2.1 함수량 영향

예상한 바와 같이, 건조한 모래의 강도는 수분이 있는 모래의 강도보다 낮다 (그림 6). 수분이 있는 모래의 겉보기 점착력과 내부마찰각은 건조한 공시체 것보다 높다. 그것은 입자들에서 물에 의한 추가적인 전단저항력을 발생했기 때문이다. 물 브릿지에 의해 발생하는 결합력이 불포화 모래의 전단강도에 상당히 기여하는 것을 알 수 있다. 또, 한 가지 흥미로운 사실은 건조한 모래의 점착력 c_a 가 대략 0.11kPa라는 것이다. 이것은 일반적인 개념과는 다르게 건조한 모래가 점착력을 가지고 있는 것을 의미한다. 이것은 입자들 사이의 결합(interlocking)에 의한 것으로 낮은 응력하에서 나타나는 현상으로 볼 수 있다.

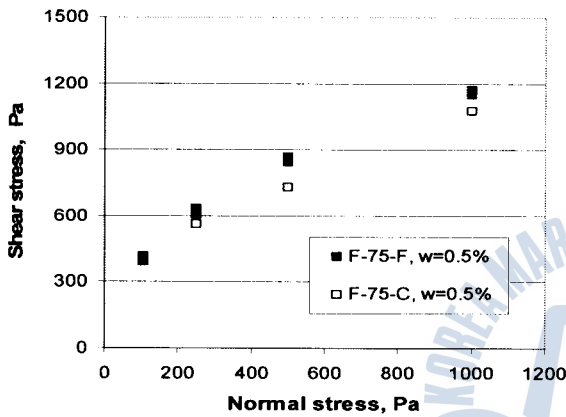
4.2.2 세립분 영향

건조한 모래의 전단강도 매개변수는 세립분에는 큰 영향이 없다 (그림 7(a)와 표 1). 하지만, 함수량이 증가함에 따라 세립분을 포함한 모래가 깨끗한 모래보다 높은 겉보기점착력을 보여준다 (그림 7(b), (c)). 인장실험결과에서 설명했던 것과 같이 세립분이 물 브릿지와 모세관의 작용을 증가시켜 전단저항을 증가시켰기 때문이다.

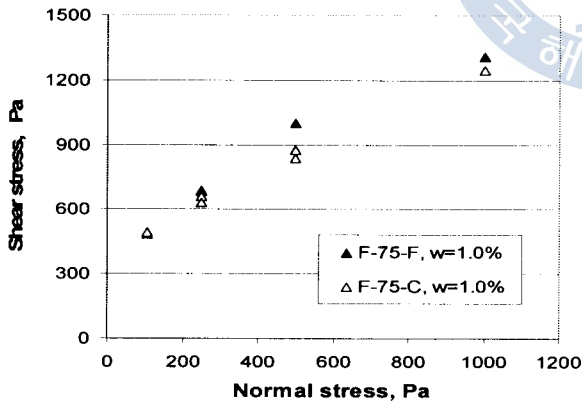
적은 량의 수분에 의해 발생된 사빈사 입자들간의 결합력



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 Comparison of Results of the Direct Shear Tests: F-75 Sands ($D_r = 30\%$)

5. 인장강도와 결보기 점착력의 관계

점착력과 인장강도의 관계는 흔히 수정된 Mohr-Coulomb 모델이나 Chen and Drucker 모델에 의해 설명되는데 본 연구에서는 상대밀도가 낮은 느슨한 사빈사에 대해 직접인장시험과 직접전단시험한 결과를 이용하여 새로운 인장강도 σ_t 와 결보기 점

착력 c_a 사이의 관계를 정립하고자 한다. 특히 낮은 함수량과 낮은 응력 조건에서의 둘 사이의 관계를 알아보는 데 목적이 있다. 표 2는 직접인장과 직접전단시험의 결과이며 간단한 비선형방정식(식 4)이 사용되었다.

$$y = Sx^2 + T \quad (4)$$

Table 2 Values of c_a (in $0.1 < n < 1.0$ kPa) and σ_t for Loose F-75 Sands

Material type	$u(\%)$	$c_a(\text{Pa})$	$\sigma_t(\text{Pa})$
F-75-C	0.5	343	410
	1.0	427	583
F-75-F	0.5	380	426
	1.0	452	609

식(4)에서 S와 T는 매개 변수로 S는 곡률의 경사, T는 인장강도의 크기를 나타낸다. 식(4)의 매개 변수는 정규화된 인장강도와 결보기점착력의 값을 이용하여 결정되었다. 식(4)의 변수 x와 y 대신에 정규화 결보기점착력과 인장강도를 대입시킴으로써 F-75 모래에 대한 인장강도와 결보기점착력 관계는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_{ta}} = 1.6 \left(\frac{c_a}{\sigma_{ta}} \right)^2 - 1 \quad (5)$$

여기서 σ_{ta} 는 평균 인장강도를 나타낸다. 위 결과를 정리하면 그림 8과 같다. 위 그림으로부터 응력이 낮은 상태에서 적은 함수량을 가지는 있는 사빈사의 전단거동과 인장거동을 알 수가 있다. 또한, 위 관계로부터 전단강도 결과로부터 인장강도를 추정할 수 있어(또는 그 반대로) 불필요한 실험횟수를 줄일 수 있을 것이다. 다만 여기서 포물선 모양의 관계식을 사용한 이유는 현재까지의 이론적 결과를 바탕으로 제한한 것임을 밝히는 바이다.

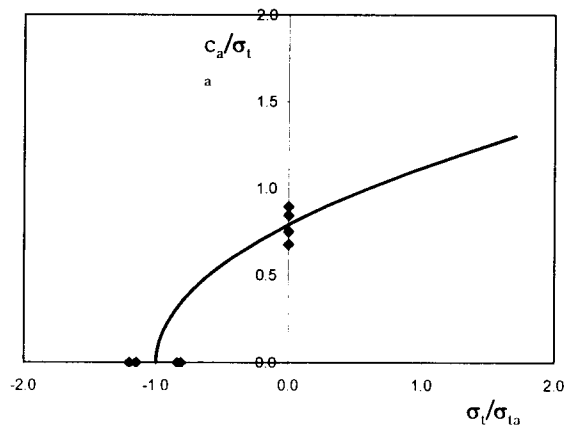


Fig. 8 Comparison of Results of the Direct Shear Tests: F-75 Sands ($D_r = 30\%$)

6. 요약 및 결론

본 연구는 비교적 입자가 균질한 사빈사의 특성을 가지고 있는 모래(F-75 Ottawa)의 인장강도와 겔보기점착력을 평가하기 위해 수행이 되었다 특히 함수량, 세립분 함유량, 응력상태(낮은 응력)에 따른 겔보기점착력과 인장강도의 변화를 관찰하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 0.5 ~ 4.0%의 범위의 함수량에서, 모래의 인장강도는 일반적으로 함수량이 증가함에 따라 증가한다. 또한 세립분은 모래입자들 사이에서 추가적인 결합력을 유발시켜 인장강도를 증가시키거나 함수량에 의존하는 경향을 보인다.

2) 직접전단시험에서, 낮은 수직응력에서 건조한 모래 입자들 사이의 맞물림에 의한 0.11kPa의 겔보기점착력을 구하였다. 수분에 의한 추가적인 겔보기점착력이 물기가 있는 모래 공시체에서 발생한다. 물기가 있는 모래의 겔보기점착력과 내부마찰각은 건조한 모래보다 크고, 이런 경향은 함수량이 증가함에 따라 증가한다.

3) F-75의 Ottawa 모래에 대한 낮은 함수량과 낮은 응력상태에서의 인장강도와 겔보기점착력 사이의 관계식을 제안하였다.

후 기

위 연구는 한국해양대학교 2004년도 신진교수연구지원에 의해 진행된 과제이며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] Alshibli, K. A. and Sture, S., 1999 : "Sand shear band thickness measurements by digital imaging techniques", *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 13, No. 2, pp. 103-109.

[2] ASTM D 3080-72., 1979 : "Direct shear test of soils under consolidated drained conditions", pp. 496-500.

[3] Batiste, S., 1998. *Mechanics of granular materials at low confining stress*, M.S. thesis, University of Colorado at Boulder.

[4] Chaney, R. C. and Fang, H. Y., 1986 : "Static and dynamic properties of marine sediments: A state of the art", *Marine Geotechnology and Nearshore/Offshore Structures*, ASTM STP 923, pp. 74-111.

[5] Heady, R. B and Cahn J. W., 1970 : "An analysis of capillary forces in liquid-phase sintering of spherical particles", *Metallurgical Transactions*, Vol. 1, pp. 185-189.

[6] Noorany, I. and Gizienski, S.F., 1970 : *Engineering properties of submarine soils*, State of Art Review, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, Proc. ASCE, Sept., pp.1735-1762.

[7] Perkins, S. W., 1991 : *Modeling of regolith structure interaction in extraterrestrial constructed facilities*, Ph.D. thesis, University of Colorado at Boulder.

[8] Pierrat, P. and Caram, H. S., 1997 : "Tensile strength of wet granular materials", *Powder Technology*, Vol. 91, pp.83-93.

[9] Rumpf, H., 1961 : *The strength of granules and agglomerates*, *Agglomeration* W.A. Knepper, (ed), Interscience, New York.

[10] Schubert, H., 1984 : "Capillary forces-modeling and application in particulate technology", *Powder Technology*, Vol. 37, pp.105-116.

[11] Sture, S. et al., 1998 : "Mechanics of granular materials at low effective stresses", *Journal of Aerospace Engineering*, ASCE, Vol. 11, No. 3, pp.67-72.

[12] Winterkorn, H.F. and Fang, H.Y., 1970 : "Mechanical resistance properties of ocean floors and beaches in light of the theory of micrometric liquids", *Proc. Inter. Ocean* 70, DÜsseldorf, Vol. 2, pp. 43-46.

원고접수일 : 2005년 12월 30일

원고채택일 : 2006년 1월 9일

