

습윤 모래에서 인장강도의 예측 (II) : 검증

Prediction of Tensile Strength of Wet Sand (II) : Validation

김 태 형¹ Kim, Tae-Hyung

Abstract

At low normal stress levels, tensile strength of sand characteristically varies with either saturation or suction of soil in an up-and-down manner with a peak tensile strength that can occur at any degree of saturation. A theory that accurately predicts tensile strength of wet sand was presented in the previous study. In this study, the results of uniaxial tensile, suction-saturation and direct shear tests obtained from three sands (Esperance sand from Seattle, Washington, clean sand from Perth, Australia, and Ottawa sand) are used to validate the proposed theory. The closed form expression of the proposed theory can predict well the experimental data obtained from these sands in terms of the variation patterns of tensile strength over the entire saturation regimes, the magnitude of the tensile strength, its peak value, and the corresponding degree of saturation when the peak strength occurs.

요 지

낮은 응력 상태에서 모래의 인장강도는 포화도 또는 흡입력에 따라 증가하다 최대값이 이른 후 감소한다. 최대인장강도는 어느 포화도에서든 발생할 수 있다. 선행 연구에서는 이와 같은 습윤 모래의 인장강도를 정확히 표현한 이론이 제시되었다. 본 연구에서 세 가지 종류의 모래(워싱턴 주 시애틀의 검정 Esperance 모래, 오스트리일리아 서부 Perth 해변 모래, Ottawa 모래)에 대해 실시된 일축인장실험, 함수특성실험, 직접전단실험 결과를 이용하여 제안된 이론을 검증하였다. 제안된 닫힌 형식의 식으로 표현된 이론은 이들 모래들로부터 얻어진 실험결과와 비교 시 전체 포화도 영역에서 인장강도 변화양상, 인장강도 크기, 최대인장강도, 최대인장강도가 발생할 때의 해당 포화도 등을 잘 예측하는 것으로 나타났다.

Keywords : Direct shear, Suction-saturation, Tensile strength, Uniaxial tensile

1. 서 론

인장강도는 외부의 인장응력에 재료가 파괴되지 않고 견디는 강도로 재료 특성의 기준으로 종종 인용된다. 콘크리트나 암석 같은 입자간 결합응력이 강한 재료의 경우, 인장강도는 막대모양의 공시체에 일축인장응력을 파괴될 때 까지 가하여 쉽게 구할 수 있다. 하지만 결합력이 약한 흙과 같은 재료의 경우에는 인장강도

를 측정하기 위해서는 공시체의 형태를 유지시킬 수 있는 특별한 보조 장비가 요구된다(Bishop and Garga, 1969; Al-Hussaini and Townsend, 1974; Kim, 2001; Lu et al., 2005). 흙의 인장강도는 완전 건조상태나 완전 포화상태의 경우 재료 상수로 취급되고 겔보기 점착력 향으로 전단강도와 직접적으로 관련된다. 그러나 불포화 상태에서 인장강도는 일정하지 않으며, 흙의 포화도나 흡입력에 더 의존한다(Kim and Hwang, 2003; Lu et

¹ 정회원, 한국해양대학교 건설환경공학부 조교수 (Member, Assistant Prof., Division of Civil and Environmental Engrg., Korea Maritime Univ., kth67399@hhu.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

al., 2007). 어떤 흙의 경우 그 크기가 수백 kPa에 이르기 때문에 많은 지반공사의 안정성과 성능에 중요한 영향을 미칠 수 있다.

일반적으로 습윤 모래는 포화도 또는 습윤 정도, 입자 크기, 입자 분포, 간극률의 크기에 따라 서로 다른 크기의 점착력을 가진다. 또한 습윤 모래에서 가장 분명한 것은 인장강도가 비선형적 거동을 보이고 흙의 포화도나 흡입력에 의존한다는 것이다. 마른 모래에서 입자간 연결력이 강할 수 있지만 최소한의 인장강도만을 가지고 있다. 마른 모래는 보통 주변의 낮은 상대 습도에 의해 높은 흡입력을 가지고 있다. 모래가 점점 포화되어 습해짐에 따라 포화도는 증가하고 흙의 흡입력 감소한다. 하지만 결합응력(등방인장강도)은 입자크기와 간극률에 따라 다르지만 처음에는 최대값까지 증가한 다음 포화도가 거의 0 이거나 모래가 완전히 포화될 시점에서는 감소한다. 이와 같이 모래의 인장강도는 포화도에 따라 증가하다 감소하는 경향을 보인다.

선행 연구(Prediction of Tensile Strength of Wet Sand(I): Theory)에서는 이와 같은 모래의 인장강도의 거동을 불포화 전체 포화영역(pendular, funicular, capillary)에 대해 하나의 식으로 표현할 수 있는 닫힌 형태의 이론식을 제안 하였다. 이 이론은 Lu와 Likos(2006)가 제안한 흡입응력을 사용하였으며, 재료의 낮은 응력상태에서 내부마찰각 ϕ_i , 함수특성곡선(공기침투압의 역수 값 α , 간극크기범위변수 n)을 알면 습윤 모래 공시체의 인장강도를 예측할 수 있다.

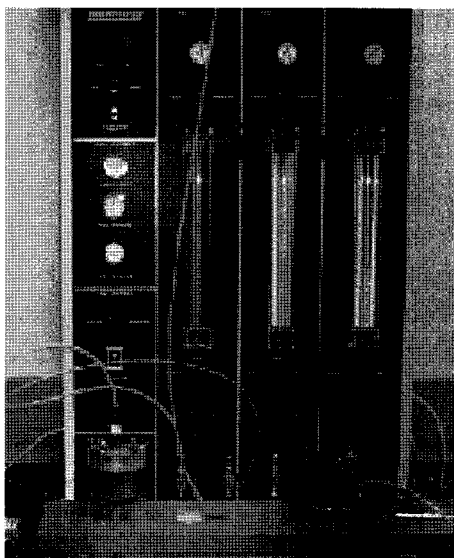
선행 연구의 후속 연구로 본 연구에서는 앞서 제안된 이론의 검증이 이루어졌다. 이를 위해 세계 여러 지역에 분포 되어 있는 세 가지 모래에 대해 실시된 실험결과(함수특성 곡선, 일축인장강도, 낮은 응력 단계에서 내부마찰각)가 연구에 사용되었다. 이들 모래들은 각각 워싱턴 주 시애틀의 검정 Esperance 모래, 오스트리아 서부 Perth 모래, Ottawa 모래 등이다. 이들 모래는 다양한 입자크기, 입자표면형태, 형성 환경을 가지고 있어 제안된 이론을 검증하는데 적합할 것으로 판단된다.

2. 활용된 실험장치 및 측정방법

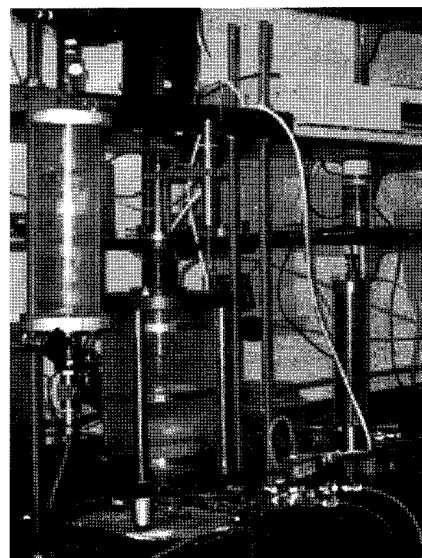
이론의 검증을 위해서는 각각의 시료에 대한 함수특성곡선, 일축인장강도, 낮은 응력상태에서의 내부마찰각 등 세 가지 자료가 필요하다. 이들 자료를 획득하기 위해 실시된 실험을 살펴보면 다음과 같다(Kim, 2001; Kim and Hwang, 2003; Lu et al., 2005, 2007; Likos et al., 2007).

2.1 함수특성실험

함수특성곡선은 시료의 부간극수압과 포화도 사이의 관계를 나타내어주는 매우 중요한 불포화토 고유의 물성으로 일반적으로 실험을 통해 결정된다. 함수특성곡선을 측정하는 방법에는 수직기둥, 원심분리기, 템피셀, 피스톤펌프 등을 이용하는 방법 등이 있다. 본 연구



(a)



(b)

그림 1. 함수특성시험: (a) 템피 셀 방법(Lu et al., 2005, 2007), (b) 피스톤펌프 방법(Kim and Hwang, 2003)

에서 사용된 실험방법은 텀피 셀과 피스톤펌프 기법이다(그림 1).

Lu et al.(2005, 2007)은 텀피 셀 방법을 사용하여 함수특성곡선을 측정하였는데 이 방법은 그림에서 보는 바와 같이 작은 흡기등을 사용하여 함수특성곡선상의 특정 한 점 한 점 해당되는 결과를 측정할 수 있다. 실험 절차는 먼저 흡 공시체와 다공석을 완전 포화시킨 후 공기압을 텀피 셀에 작용시켜 시료의 간극으로 부터 물을 추출한다. 일정한 압으로 흡 내부의 물을 제거하는 동안 흡 시료 내의 압력과 함수량이 평형상태에 이르면 텀피 셀의 무게를 측정하여 함수량을 결정한다.

Kim과 Hwang(2003)은 피스톤펌프 기법을 활용하여 함수특성곡선을 측정하였는데 피스톤펌프 기법은 원래 Znidarcic et al.(1991)에 의해 개발된 방법으로 피스톤펌프, 변환기, 삼축압축셀, 다공석 등으로 구성되며 이 중 피스톤펌프가 가장 중요한 역할을 한다. 사용된 피스톤펌프는 속도와 방향을 실험에 맞게 조정할 수 있다. 이 피스톤 펌프는 연속적이고 안정적인 물 흐름을 제공해 준다. 텀피 셀 방법과 비교하여 피스톤펌프 기법의 장점은 한 점 한 점이 아닌 연속적으로 완전한 함수특성곡선의 측정이 가능하다. 또한 펌프의 방향을 조정함으로써 함수특성곡선의 건조곡선 뿐만 아니라 습윤곡선도 측정이 가능하다.

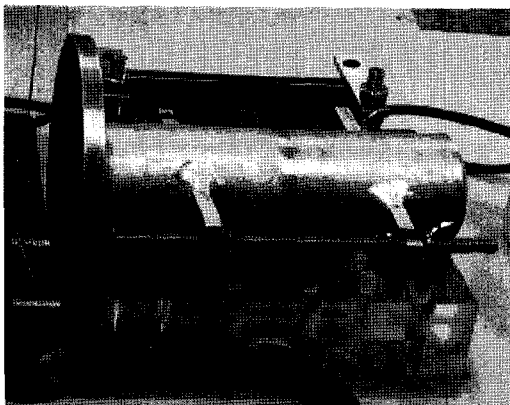
2.2 일축인장실험

일축인장강도 σ_{na} 는 흡 요소가 하나의 주응력 평면에 수직으로 인장응력이 작용하고 직각 평면에 작용하는 응력이 0인 상태에서 파괴되는 경우에 발생하는 것으로

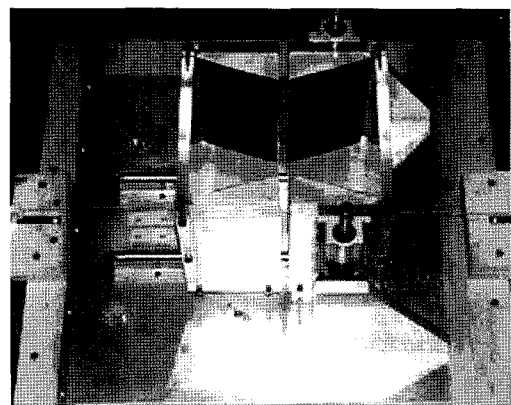
정의된다. 하지만 실제로 일축이라는 조건이 현재 사용되고 있는 일축인장강도 측정 실험에서 구현되지 않는다. 왜냐하면 대부분의 조립토를 사용한 공시체는 재료의 특성 때문에 형태를 유지하기 위해 틀로 구속이 필요하기 때문이다. Lu와 Kim이 일축인장강도를 측정하기 위해 사용한 실험장치 역시 이상적인 일축조건을 구현하지 못한다. 다만, 어느 정도의 일축에 수직방향으로 응력이 작용하나 이로 인한 실험결과와의 오차는 매우 적다고 가정되었다. 또한 틀을 사용하는 관계로 인위적으로 인장파괴면이 정해져 있어 실제 인장강도 보다 큰 값을 얻을 수 있으나 이 또한 무시되고 있다는 점을 알아야 한다.

그림 2(a)는 Lu et al.(2005, 2007)이 제안한 일축인장 실험장치로 두 부분으로 분리될 수 있는 원통형 관을 공시체 틀로 사용하였다. 실험 시 한 부분은 고정되어 있고 다른 부분은 자유롭게 움직일 수 있도록 되어있다. 이 원통형 관은 공시체 성형 과정에서는 잠금쇠로 결합되어 있고 실험 시작 시 잠금쇠를 풀어 공시체가 하중에 반응하도록 되어있다. 실험은 원통형 공시체 관이 설치된 판의 경사를 증가시켜 시료의 무게에 의해 인장파괴가 발생되도록 하였다. 파괴 시 경사각, 시료무게와 기하학적 관계를 고려하여 인장 강도를 결정하게 된다.

그림 2(b)는 Kim(2001)이 사용한 인장실험 장치로 원래 Perkins(1991)가 개발한 장치를 개조한 것이다. 공시체 틀의 크기는 178×178×178mm이며 정확히 반으로 분리되도록 설계되었다. 앞쪽의 틀만 인장하중에 움직일 수 있도록 하였으며 마찰에 의한 하중 손실을 적게 하기 위해 베어링 시스템을 틀 바닥에 도입하였다. 마찰에 의



(a)



(b)

그림 2. 일축인장시험: (a) 원통형 공시체를 이용한 인장강도시험(Lu et al., 2005, 2007), (b) 일축인장시험(Kim, 2001)

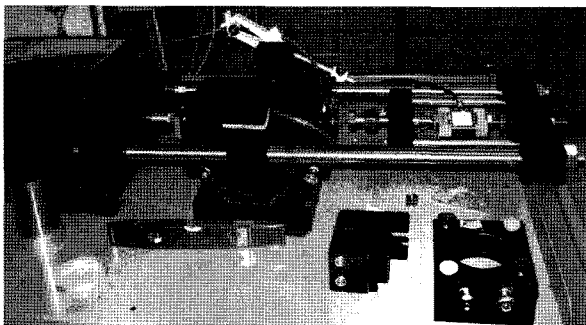
한 평균 하중 손실은 1.12 N로 이 부분은 실험 결과에 보정되었다. 공시체에 하중전달을 용이하게 하기 위해 틀 안쪽에는 삼각형 형태의 썰기를 부착하고 모래와 마찰을 증가시키기 위해 썰기 위에 사포를 부착하였다. 실험은 응력제어방식으로 진행 된다.

2.3 직접전단실험

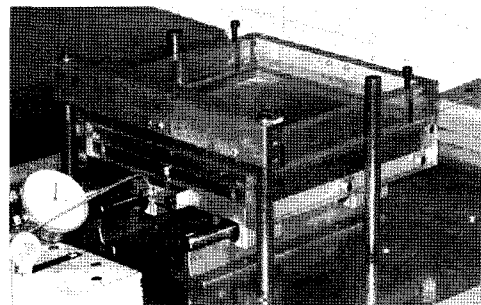
직접전단실험은 물에 의한 결합력(인장강도와 점착력)외에 다른 영향을 배제하고 일축인장강도와 관련되는 겔보기 점착력을 좀 더 정확히 측정하기 위해 수직응력이 낮은 상태에서 실험을 진행하였다.

Likos et al.(2007)은 낮은 수직응력 단계(< 1kPa)에서 직접전단실험장치(그림 3(a))를 사용하여 다양한 포화도 상태에서 마찰각을 측정하였다. 이 실험장치의 특징은 기존의 직접전단실험 장치를 개조하여 흡입력 조절이 가능하도록 하여 전단강도와 흡입력을 동시에 측정할 수 있도록 하였다.

Kim(2001)은 178×178×25.4mm 크기의 전단상자를 사용하여 직접전단실험으로 실시하였다(그림 3(b)). 두께에 비해 상대적으로 넓은 전단상자를 사용하여 낮은 수직응력 조건에서도 어느 정도 크기의 전단강도를 발생시키고 경계효과를 최소화하여 응력분포가 일정하도록 하였다. 상·하부 전단상자는 틈은 시료의 최대 입경을 고려하여 조절할 수 있도록 하였고, 공시체 두께도 ASTM D3080 기준(최소 공시체 두께는 1.25cm 보다 커야하며 시료의 최대직경의 6배 이상보다 커야 함)과 시료의 전단대의 두께를 고려하여 조절하도록 설계되었다(Alshibli and Sture, 1999). 실험은 응력제어방식으로 진행되며 수직응력 100Pa까지 실험이 가능하도록 설계되었다.



(a)



(b)

그림 3. 직접전단시험: (a) 흡입력조절 가능 직접전단시험(Likos et al., 2007) (b) 넓은 전단상자를 사용한 직접전단시험(Kim, 2001)

3. Esperance 모래

모델의 검증을 위해 사용된 첫 번째 모래는 Esperance 모래로 워싱턴 주 시애틀에서 발견되는 검정색의 모래이다. 이 모래의 입도분포곡선은 그림 4와 같다. 모래의 95%이상이 100~150μm 범위에 분포되어 있다.

Lu와 Likos는 Esperance 모래에 대해 직접전단실험, 직접인장실험 및 함수특성곡선 실험을 각각 실시하였다. 일반적인 탬피 셀 방법을 사용하여 함수특성곡선을 측정하였으며 그림 5(a)에서 볼 수 있는 바와 같이 잔류 포화도가 6.5%로 나타났다. 이 모래의 평균 마찰각은 50°로 낮은 수직응력 단계(< 1.0kPa)에서 흡입력조절이 가능한 직접전단실험장치를 사용하여 이 마찰각을 측정하였다(Likos et al., 2007). 일축인장 값은 Lu et al.(2005, 2007)이 제안한 일축인장실험기를 사용하여 측정되었다. 이 모래에 대한 인장강도 실험에서, 93%이상의 포화도에서는 공시체를 만드는 다짐과정에서 액상화가 발생되어 인장강도 측정은 할 수 없었다. 두 개의 간극률 0.4와 0.45로 다짐된 이 모래에 대한 포화도에 따른 인장강도 거동은 그림 5와 같다. 최대인장강도는 915kPa로 포화도 78%에서 나타났다. 함수특성곡선과 일축인장강도는 각각 식 (1)와 식 (2)에 의해 결정되었다.

$$S_e = \left\{ 1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

$$\sigma_{int} = 2 \tan \phi_t \tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi_t}{2} \right) (u_a - u_w) \left\{ 1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (2a)$$

$$\sigma_{int} = 2 \tan \phi_t \tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi_t}{2} \right) \frac{S_e}{\alpha} \left[S_e^{\frac{n}{1-n}} - 1 \right]^{\frac{1}{n}} \quad (2b)$$

측정된 함수특성곡선은 먼저 변수 α 와 n 을 결정하는

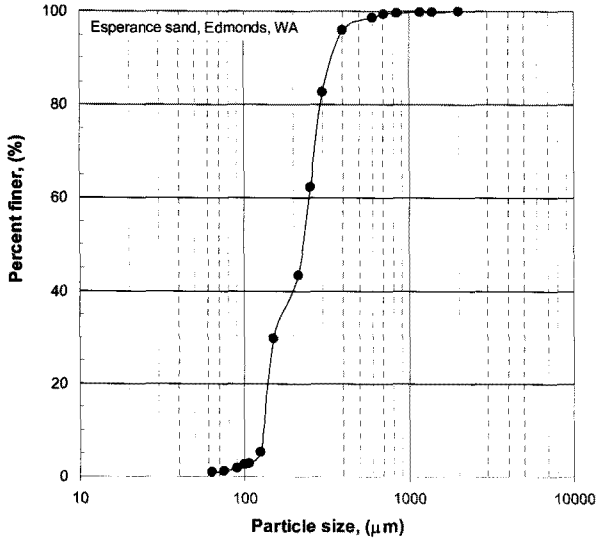
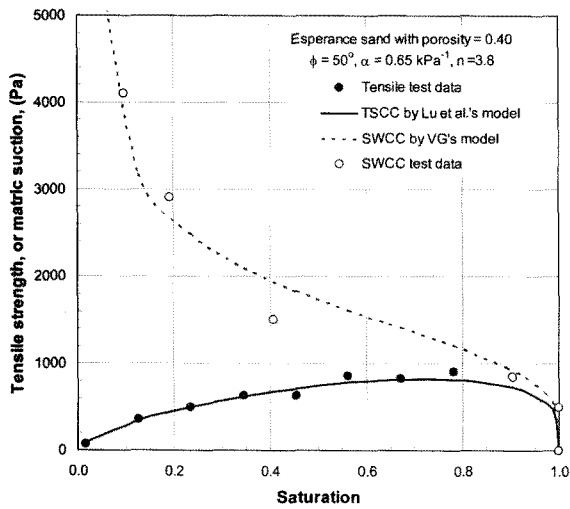
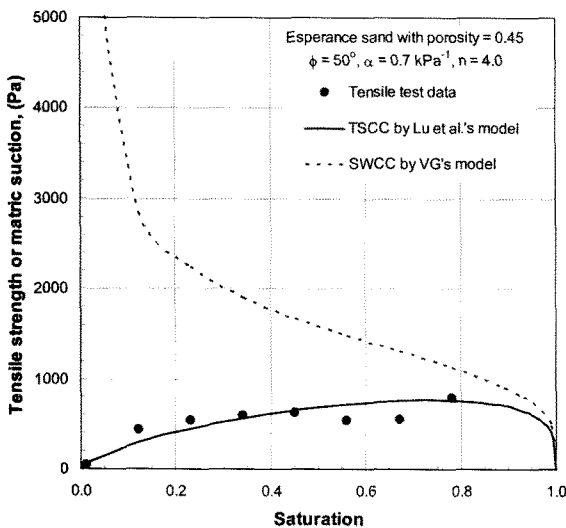


그림 4. Esperance 모래의 입도분포곡선



(a)



(b)

그림 5. Esperance 모래에 대한 함수특성곡선과 인장강도 실측치와 예측치의 비교: (a) 간극률 0.4, (b) 간극률 0.45 공시체

데 사용되었으며 그 결과는 그림 5(a)에 점선곡선으로 표시되었다. 이 모래에서, 0.4 간극률 공시체의 경우 최적의 α 값은 0.65kPa^{-1} 이고 n 은 3.8이다. 이들 두 변수가 측정된 마찰각 51° 와 함께 식 (2b)에 사용되어 인장강도를 예측하였으며 그 결과는 그림 5에 실선으로 표시하였다. 예측된 최대강도와 크기가 전체적으로 실험결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

간극률 0.45의 공시체의 경우, 함수특성곡선 측정이 이루어지지 않았다. 대신 측정된 인장강도 값을 사용하여 직접적으로 α (0.7kPa^{-1})와 n (4.0) 변수를 보정하였다. 잔류포화도 값은 간극률 0.4에 사용된 같은 값 6.5%를 사용하였다. 이들 값은 식 (1)에 사용되어 함수특성곡선을 예측했다(그림 5(b)). 최대인장강도는 792kPa 로 간극률 0.4 모래 공시체에서 나타난 같은 포화도에서 구해졌다. 간극률 0.4 모래 공시체의 경우와 비교해 보면, 작은 공기침투압 값($1/\alpha = 1.43\text{kPa}$ vs. 1.54kPa)과 약간 넓은 간극크기범위를 가지고 있다($n = 4.0$ vs. 3.8). 이 결과는 모래가 높은 간극률을 가지고 있으면 낮은 공기침투압과 넓은 간극크기 분포를 갖는 사실과 일치된다.

4. Perth 모래

모델의 검증에 위해 사용된 두 번째 모래는 오스트리아의 Perth 모래에 대해 실시된 실험결과이다(Lu et al., 2005, 2007; Likos et al., 2007). 이 모래는 상업적으로 이용 가능한 모래이다(White Silica Sands, Cook Industrial Minerals Pty Ltd). 체가름을 통해 분리된 두 개의 모래(Perth 실트질 모래와 Perth 중간 모래)가 실험에 사용되었다. Perth 실트질 모래와 Perth 중간 모래에 대한 입도분포는 각각 그림 6(a)와 그림 7(a)와 같다. Perth 실트질 모래의 평균 입자크기는 $105\mu\text{m}$ 이고 $55 \sim 220\mu\text{m}$ 범위의 균질한 크기의 입자를 가지고 있다.

Esperance 모래의 실험에 이용된 동일한 장치가 Perth 모래의 실험에도 사용되었다. 여러 다양한 포화도 상태에서 1.0kPa 이하의 연직응력 조건에서 평균마찰각은 48° 로 나타났다. Perth 실트질 모래에 대해서만 텀피 셀 방법으로 함수특성곡선이 구해졌다. 잔류포화도는 5.0%이다. 함수특성곡선의 보정을 통해 $\alpha = 0.35\text{kPa}^{-1}$ 과 $n = 2.6$ 을 산출하였다. 포화도에 따른 측정된 인장강도는 그림 6(b)와 같다. 인장강도실험은 포화도 98%까지 실시되었으며, 최대 인장강도는 $1,655\text{Pa}$ 가 40% 포화도에서 측정되었다. 보정된 α 와 n 변수 값은 측정된 마찰각

과 함께 식 (2b)에 사용되어 인장강도를 예측하였으며 그림 6(b)에 실선으로 표현되었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 식 (2b)에 의해 예측된 값은 측정된 인장강도 값과 잘 일치됨을 알 수 있다.

두 번째 모래 그룹에 해당되는 Perth 중간 모래는 평균 입자크기가 451 μm 이고 200에서 900 μm 상대적으로 넓은 입자크기 분포를 가지고 있다(그림 7(a)). 5%의 같은 잔류포화도 값이 계산에 사용되었다. 여러 다양한 포화도에 상태에서 실시된 직접전단실험 결과 평균마찰각이 48°로 Perth 실트질 모래에서 얻은 값과 동일한 값이 구해졌다. 인장실험은 두 개의 서로 다른 간극률 0.37과 0.40의 공시체에 대해 실시되었다(그림 7(b)). 0.37의 간극률을 가진 모래는 포화도 90%에서 최대인장강도는

810Pa를, 간극률 0.4를 가진 모래는 포화도 70%에서 최대인장강도 744Pa가 각각 측정되었다. 전체적으로 이 두 흙은 비슷한 인장거동을 보여주고 있다. 두 개의 간극률에 대한 인장강도를 α 와 n 변수를 보정하기위해 같이 사용하였다. 보정된 α 는 0.8kPa⁻¹이고 n 은 4.0이다. Perth 실트질 모래와 비교하면, 중간 모래는 낮은 최대인장강도(평균 777Pa vs. 1655Pa)를, 작은 공기침투압(1.43kPa vs. 2.86kPa), 그리고 넓은 입자크기 분포($n = 4.0$ vs. 2.6)를 가지고 있는 것을 알 수 있다. 예측된 인장강도는 함수비 79%에서 최대값 750Pa 이며 전체적으로 측정된 값과 잘 일치하는 것으로 나타났다.

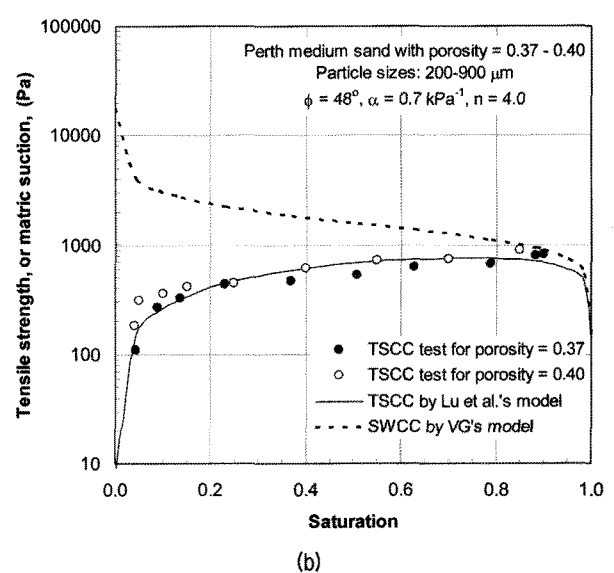
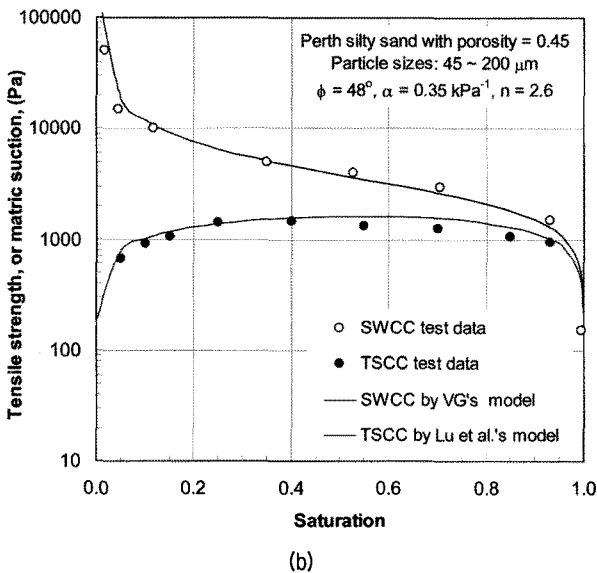
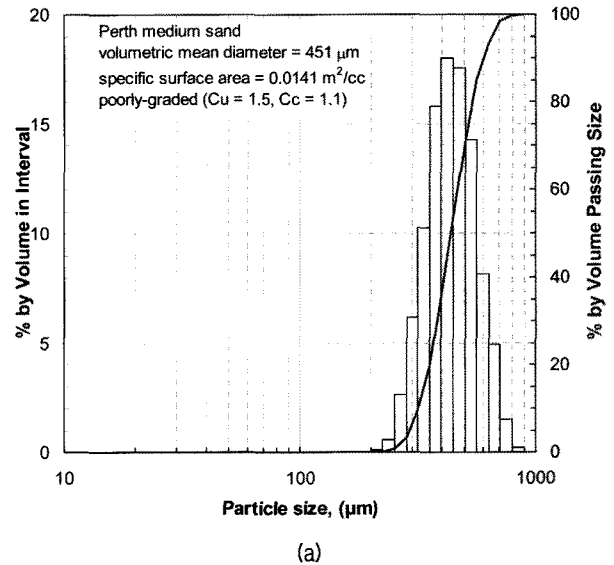
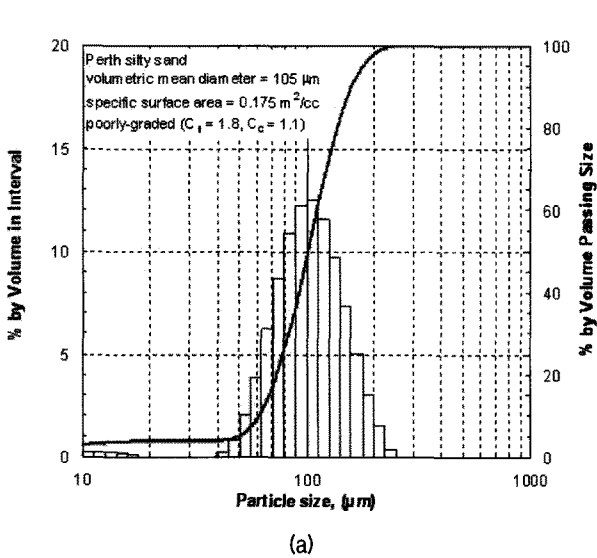


그림 6. Perth 실트질 모래: (a) 입도분포곡선 (b) 함수특성곡선과 인장강도 실측치와 예측치의 비교

그림 7. Perth 중간 모래: (a) 입도분포곡선 (b) 함수특성곡선과 인장강도 실측치와 예측치의 비교

5. Ottawa 모래

모델의 검증에 위해 사용된 세 번째 시료는 Ottawa F-75 모래이다. 이 모래 역시 상업적으로 이용 가능한 모래로 두 종류의 모래가 실험에 사용되었다(Ottawa, IL). F-75 모래를 200번재로 씻어 세립분을 제거한 것(F-75-C)과 F-75 모래에 2%의 세립분을 추가(F-75-F)한 모래이다. F-75 모래에 대한 입도분포곡선은 그림 8과 같다. 모래의 평균입径은 220 μ m이고, 비중이 2.65, 최대 및 최소 간극비가 각각 0.805, 0.486이다.

두 시료 모두 상대밀도 50%(간극률 0.39)에 대해 실험을 실시되었다. 함수특성곡선은 Znidarcic et al.(1991)에 의해 개발된 플로우펌프 기법을 사용하여 측정되었다. 불포화모래의 전단강도는 178 \times 178 \times 15mm 크기의 전단 상자를 사용하여 직접전단실험으로 측정되었다. 본 전단 실험장치는 수직응력 100Pa까지 실험이 가능하다. 인장강도 실험은 원래 Perkins(1991)가 개발한 장치를 개조한 일축인장실험 장치를 이용하여 측정되었다(Kim, 2001).

낮은 응력 범위(0.1kPa~0.25kPa)에서 서로 다른 포화도 상태의 시료에 대해 실시된 직접전단실험 결과 이 모래의 평균 마찰각은 55 $^{\circ}$ 로 나타났다. 깨끗한 Ottawa 모래(F-75-C)에 대해 측정된 함수특성곡선은 그림 9(a)와 같다. 잔류포화도는 15%로 측정되었다. F-75-C 모래와 F-75-F 두 모래에 대한 인장강도 값은 그림 9(a)와 그림 9(b)에 도시되었다. F-75-C 모래의 최대인장강도는 1598 Pa로 포화도 61%에서 측정되었다. F-75-F 모래의 경우 1527Pa 로 포화도 59%에서 측정되었다. 측정된

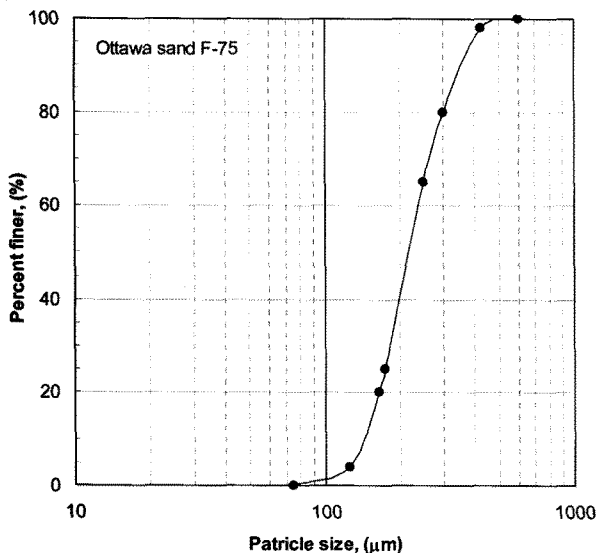
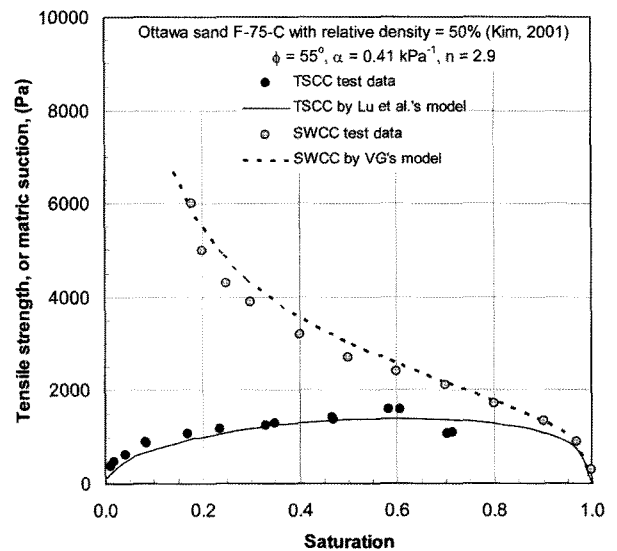


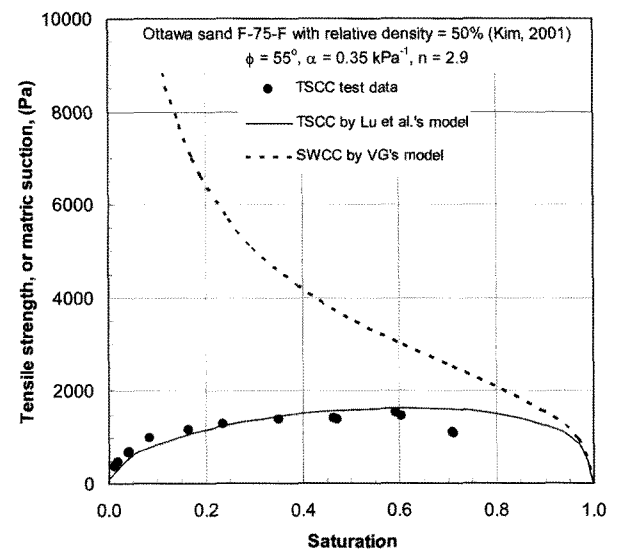
그림 8. F-75 Ottawa 모래의 입도분포곡선

함수특성곡선 값은 변수 α (0.42kPa $^{-1}$)와 n (2.9)을 계산하기 위해 사용되었다. 보정된 변수를 사용하여 예측된 인장강도특성곡선은 그림 9(a) 실선으로 표시되었다. 예측된 인장강도(1395kPa)와 이에 해당되는 포화도(59.6%) 및 전체적인 경향이 상대오류 12.5%로 측정된 값과 잘 일치함을 알 수 있다.

F-75-F모래의 경우, 보정된 인장강도특성곡선은 측정된 인장강도 값을 직접적으로 사용하여 구하였다(그림 9(b)). 예측된 최대인장강도는 1635kPa로 포화도 59.6%에서 발생되었다. 측정된 최대인장강도 값은 1529kPa로 포화도 59.1%에서 나타났다. 예측된 값과 측정된 값 사이의



(a)



(b)

그림 9. F-75 Ottawa 모래에 대한 함수특성곡선과 인장강도 실측치와 예측치의 비교: (a) 깨끗한 시료 (b) 2% 세립분을 포함한 시료

상대유류가 7%이내이다. F-75-C 모래와 비교해 보면, 이 모래가 약간 높은 공기침투압(2.86kPa vs. 2.34kPa)을 가지고 있으나 간극크기범위변수 n 은 2.9로 동일하다.

6. 결론

본 논문에서 선행 연구의 후속 연구로 앞서 제안된 낮은 응력 상태에서 습윤 모래의 인장강도를 정확히 표현한 이론에 대한 검증이 이루어졌다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 이론의 공정한 검증을 위해 서로 다른 입자크기분포, 입자표면형태, 형성 환경을 가진 세 가지 모래 (워싱턴 주 시애틀의 검정 Esperance 모래, 오스트리아 서부 Perth 모래, Ottawa 모래)에 대해 실시된 직접전단실험, 일축인장실험, 함수특성실험 결과가 사용되었다.
- (2) 제안된 인장강도 이론은 불포화 전체 포화 영역 (pendular, funicular, capillary)에서 인장강도 변화양상과 크기를 정확하게 예측할 수 있다.
- (3) 제안된 이론은 최대인장강도 값뿐만 아니라 최대인장강도 발생하는 포화도 상태도 정확하게 예측할 수 있다.

감사의 글

본 연구를 위해 조언과 자료를 제공해주신 Lu 교수에게 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. Al-Hussaini, M.M. and Townsend F.C. (1974), "Tensile testing of soils: A literature review", *Miscellaneous Paper S-74-10*, U.S. Army Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
2. Alshibli, K. A. and Sture, S. (1999), "Sand Shear Band Thickness Measurements by Digital Imaging Techniques", *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol.13, No.2, pp.103-109.
3. ASTM D 3080-72 (1979), "Direct Shear Test of Soils under Consolidated Drained Conditions", pp.496-500.
4. Bishop, A.W. and Garga, V.K. (1969), "Drained tests on London clay", *Geotechnique*, Vol.19, No.2, pp.309-312.
5. Kim, T-H. (2001), Moisture-induced tensile strength and cohesion in sand, PhD Dissertation, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, Boulder, CO.
6. Kim, T-H. and Hwang, C. (2003), "Modeling of tensile strength on moist granular earth material at low water content", *Engineering Geology*, Vol.69, pp.233-244.
7. Likos, W.J., Wayllace, A., Lu, N., and Godt, J. (2007), "Modified direct shear apparatus for suction-controlled testing at low stress levels", *Geotechnical Testing Journal*. Submitted.
8. Lu, N. and Likos, W.J. (2006), "Suction stress characteristic curve for unsaturated soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.132, No.2, pp.131-142.
9. Lu, N., Wu, B., and Tan, C.P. (2005), "A tensile strength apparatus for cohesionless soils", *Proceedings of Experts 2005*, A. Tarantino et al. (eds.), Balkema.
10. Lu, N., Wu, B., and Tan, C.P. (2007), "Tensile strength characteristics of unsaturated sands", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.133, No.2, pp.144-154.
11. Perkins, S. W. (1991). Modeling of regolith structure interaction in extraterrestrial constructed facilities, Ph.D. thesis, University of Colorado at Boulder.
12. Znidarcic, D., Illangasekare, T. and Manna, M. (1991), Laboratory testing and parameter estimation for two-phase flow problems. *ASCE Geotechnical Special Publications* 27, pp.1089-1099.

(접수일자 2007. 11. 9, 심사완료일 2008. 6. 27)