

화강풍화잔적토의 불포화전단강도에 미치는 순연직응력의 영향

The Influence of Net Normal Stresses on the Shear Strength of Unsaturated Residual Granite Soils

성 상 규*¹ Sung, Sang-Gyu

이 인 모*² Lee, In-Mo

Abstract

The characteristics and prediction model of the shear strength of unsaturated residual granite soils were studied in this paper. In order to investigate the influence of the net normal stress on the shear strength, unsaturated triaxial tests and SWCC tests were carried out by varying the net normal stress. Experimental data for unsaturated shear strength tests were compared with predicted shear strength envelopes obtained from existing prediction models. It was shown that the soil-water characteristic curve and the shear strength of the unsaturated soil varied with the change of the net normal stress. Therefore, to achieve a truly descriptive shear strength envelope for unsaturated soils, the effect of the normal stress on the contribution of matric suction to the shear strength has to be taken into consideration. In this paper, a modified prediction model for the unsaturated shear strength was proposed.

요 지

본 연구에서는 불포화토의 전단강도 특성과 이를 예측하는 모델에 대해 다루었다. 특히, 순연직응력(net normal stress)이 흡수분 특성곡선에 미치는 영향과 불포화토의 전단강도 발현에 미치는 영향에 대해 중점적으로 연구하였다. 이를 위해서 국내에 산재해 있는 화강풍화잔적토를 시료로 하여 불포화삼축압축 시험과 SWCC 시험 등을 실시하였으며, 특히, 순연직응력을 일정하게 유지시킨 상태에서 SWCC를 구할 수 있게끔 기존의 장비를 개량하였다. 불포화토의 전단강도 시험결과와 기존의 강도예측모델에 의해 예측된 강도포락선을 비교해 본 결과, 흡수분 특성곡선과 흡인력(matric suction)을 한 축으로 하는 강도포락선의 기울기가 순연직응력에 따라 변화함을 발견할 수 있었다. 따라서, 보다 정확하게 불포화토의 전단강도 포락선을 묘사하기 위해서는 흡인력에 미치는 순연직응력의 영향이 고려되어야 하는 것으로 나타났다. 본 논문에서는 기 언급한 내용에 근거하여 수정된 불포화토 전단강도 예측모델을 제안하였다.

Keywords : Net normal stress, Prediction model, Soil-water characteristic curve, Unsaturated shear strength

1. 서 론

불포화토는 경우에는 여러 가지 기술적인 문제와 HAED(high air entry disk)의 낮은 투수성으로부터 야기 되는 과도한 시간소모로 인해 시험을 통해 직접적으로

강도정수를 획득하기가 매우 어렵다. 뿐만 아니라, 이들 강도정수 또한, 함수비(포화도)에 따라 그 값이 비선형적으로 변화하기 때문에 이를 명확하게 파악하기 위해서는 여러 번의 반복적인 강도시험이 불가피한 실정이다. 그러므로, 직접적인 강도시험을 통해, 강우나

*1 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Korea Univ., matiny@korea.ac.kr)

*2 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Korea Univ.)

증발 등에 의해 변화하는 불포화토의 역학적인 거동을 예측하는 것은 과도한 시간과 비용이 소요되므로 합리적이지 못하다. 따라서, 불포화 토질역학 분야에서는 간단한 시험을 통해 구할 수 있는 매개체를 이용하여 지반의 강도정수를 예측하는 방법과 모델에 대한 연구가 심도 있게 이루어지고 있다. 불포화토의 가장 큰 특징은 흡인력의 크기에 따라서 함수비(포화도)가 변화한다는 것이며, 이러한 특성을 정량적으로 가장 잘 나타내는 것이 흡-수분 특성곡선(SWCC, soil-water characteristic curve)이다. 이는 구성입자의 입도분포, 다짐도, 초기함수비 등에 의해 지배되는 흙의 구조(structure)와 조직(texture)에 따라 달라지기 때문에 같은 종류의 흙이라 하더라도 응력상태나 형성과정에 따라 각기 다른 모양을 보일 수 있다. 이와 같이, 흙의 불포화 특성을 명확하게 나타내는 까닭에, SWCC는 불포화토의 강도특성과 투수특성을 비롯한 여타 불포화 거동특성을 연구하는 매개체로서 가장 빈번하게 사용되고 있다. 불포화토의 강도를 예측하는 방법은 여러 지반공학자들에 의해 제안되어 왔으며, 그 중에서 SWCC로부터 전단강도를 추정하는 Vanapalli 등(1996)의 모델이 흡인력에 따른 포화도의 변화와 이에 따라, 유효응력으로 발현되는 흡인력의 정도를 불포화토의 기본 원리에 맞추어 가장 충실하게 구현한 것이라 할 수 있다. 이 모델은 근본적으로 Fredlund 등(1977)이 제안한 이론을 확장한 것으로 순연직응력(net normal stress, $(\sigma_n - u_a)$)과 흡인력(matric suction, $(u_a - u_w)$)으로 불리는 두 개의 독립적인 응력상태 변수를 가진다. 따라서, 이 모델에서는 두 변수가 서로간에 영향을 미칠 수 없게 되어 있지만, 실제로는 밀접한 상호관계를 가지고 있음을 지금까지의 경험을 통해서 알 수 있다. 구속압이나 공기압의 변화에 의해 순연직응력이 증가하게 되면, 흙의 체적이 감소하여 보다 치밀한 구조를 형성하므로 상대적으로 간극의 크기가 줄어들게 되며, 모세관 현상에 의해 물을 보유하고자 하는 능력이 커지므로 동일한 흡인력에서 포화도가 상대적으로 증가하게 된다. 따라서, 흙 입자와 물의 접촉면적이 증가되어 흡인력에 의한 입자간의 응집 정도가 보다 강하게 되므로, 전단강도의 증가를 가져오게 된다. 상기의 이유로, 보다 정확한 불포화토의 전단강도 예측을 위해서는 기존의 모델을 순연직응력이 흡인력에 미치는 영향을 고려할 수 있게끔, 수정하여야 할 것으로 생각된다.

본 연구에서는 기존의 연구결과를 바탕으로 국내에 산재해 있는 화강풍화잔적토에 대해 불포화 전단강도

시험을 실시하고 이와 병행하여 흡-수분 특성곡선을 구하였다. 특히, 금번 연구에서는 기존의 시험 장비들을 개량하여 임의의 순연직응력을 일정하게 유지한 상태에서 SWCC를 구함으로써 순연직응력의 변화에 따른 SWCC의 변화 양상을 파악할 수 있었다. 또한, 전단강도 시험결과를 기존의 강도 예측모델에 의한 예측결과와 비교 검토하는 과정에서 순연직응력에 따른 흡-수분 특성의 변화를 고려할 수 있는 보다 개선된 불포화토 전단강도 예측모델을 제안하였다.

2. 불포화 전단강도 예측모델

2.1 개요

일반적으로 불포화토의 전단강도를 결정하는 접근법에는 두 가지가 있다. 독립상태변수(independent state variable) 접근법(Fredlund 등, 1977)과 유효응력(effective stress) 접근법(Bishop, 1959)이다. 전자에서는 응력상태 변수를 순연직응력과 흡인력의 향으로 나누고 전단강도는 다음 식에 의해 평가한다.

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\tan\phi^b \quad (1)$$

여기서, $(\sigma_n - u_a)$ 는 순연직응력, $(u_a - u_w)$ 는 흡인력, ϕ^b 는 흡인력에 따른 전단강도의 증가비율을 나타내는 각이다. 후자는 불포화토의 전단강도를 결정하기 위하여 초기에 사용하였던 접근법으로 최근 들어 다시 이 접근법에 대한 관심이 증가하고 있다(Fleureau 등, 1995; Oberg and Sallfors, 1995; Bolzon 등., 1996; Khalili and Khabbaz, 1998). 이는 유효응력으로 정의되는 하나의 응력상태변수를 가지며 다음과 같이 나타낸다.

$$\tau_f = c' + [(\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)]\tan\phi' \quad (2)$$

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (3)$$

여기서, σ' 은 유효응력, χ 는 유효응력계수(effective stress parameter)로서 0에서 1사이의 값을 가지는 데, 각각 완벽한 건조상태와 포화상태를 의미한다. 전자의 접근법은 많은 지반공학자(Escario and Saez, 1986; Vanapalli, 1996)와 논문에서 넓게 옹호되어 오고 있으나, 토질정수를 결정하는데 방대하고 시간소모가 많은 실내시험이 불가피하며, 시험에 요구되는 전문기술의 수준이 일반적인 지반공학시험실의 능력을 능가하고 있어, 실무

에서 적용하는데는 다소 어려움이 있다. 또한, 흡인력에 따라 ϕ^b 가 비선형적으로 변하기 때문에 이 접근법의 예측 능력이 현장에서 관심 있는 흡인력의 범위에 제한된다는 한계성이 있다. 후자의 방법은 전응력, 간극수압, 공기압에 의해서 변화하는 전단강도를 하나의 응력상태변수에 의해 연관시킴으로써 매우 한정된 불포화상태의 시험이 요구되어 실무에서 이를 적용하기가 간편하긴 하나, 유효응력계수, x 를 결정함에 있어 대부분의 연구가 포화도와의 관계를 규명하는데 초점을 맞추므로써 사실상 실무에서 이를 적용키 위해서는 흙의 함수 특성을 시험을 통해 규명해야 하는 번거로움이 있다. 최근에 들어서는 기존 시험결과의 통계처리를 통해 나타난 일정한 연관성을 x 와의 관계로 수식화 함으로써 보다 간편하게 불포화도의 전단강도를 예측할 수 있는 방법이 몇몇 지반공학자들에 의해 제안되고 있다. Khalili and Khabbaz(1998)는 x 와 흡인력비(흡인력/공기유입값)와의 유일한 관계를 여러 문헌에서 보고된 13개의 전단강도 자료의 분석을 통해 제안하고 다수의 전단강도 시험을 통해 이를 증명하였다. 이 제안식은 간단하게 실무에서 불포화도의 전단강도를 추정하기에는 좋은 것이긴 하나, 분석을 위해 적용된 자료와 흙의 종류에 한계성이 있으므로 추가적인 보완 연구가 있어야 할 것으로 본다. Vanapalli 등(1996)은 전자의 접근법을 보다 발전시켜, 흡인력에 기인하여 발생하는 전단강도 부분은 흡인력이 증가함에 따라 유효습윤접촉면적(effective wetted contact area)이 감소하여, 비선형적으로 나타난다는 개념 아래, ϕ^b 를 시험을 통해 따로 구하지 않아도 SWCC와 포화시의 강도정수만으로도 불포화도의 전단강도를 예측할 수 있는 실용적인 모델을 제안하였다. 이 모델은 흡인력을 유효응력의 한 형태로 보고 ϕ^b 를 이를 발현시키는 토립자와 물과의 접촉면적의 정도 즉, 포화도의 향으로 대체함으로써, 근본적으로는 후자의 접근법과 동일한 이론적 바탕을 이루게 되었다.

2.2 기본 예측모델 선정

문헌조사에 의하면, 지반구조물은 같은 종류의 흙이라고 하더라도 초기함수비, 다짐에너지, 응력이력 등에 따라 그 구조와 조직이 동일할 수가 없으므로 각각의 흙-수분 특성을 고려하지 아니하고는 이론적인 방법에 의해 정확히 불포화도의 전단강도를 예측하는 것이 어려운 것으로 나타났다. 따라서, 흙-수분 특성을 가장 잘

나타내는 SWCC를 이용하는 Vanapalli 등(1996)의 제안 모델이 기존의 불포화도 전단강도 예측모델 중에서 이론적 기반이 가장 충실한 것이라 할 수 있다. 불포화도의 전단강도는 흡인력이 증가함에 따라 비선형적으로 증가하는 것으로 알려져 있다(Vanapalli 등, 1996). 이는 기 언급한 바와 같이 흡인력이 증가함에 따라 습윤접촉면적이 감소함에 기인한 것인데, Vanapalli 등(1996)의 모델에서는 다음의 식 (4)에서 보는 바와 같이 SWCC를 이용하여 흡인력의 변화에 따른 포화도의 변화와 이에 기인한 유효응력의 발현정도를 잘 나타내고 있다.

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w)(\theta^x) \tan \phi' \quad (4)$$

여기서, θ 는 정규화된 체적함수비로 포화도와 유사한 값 (θ/θ_s)이며, x 는 계수이다. 위의 식에서 θ 는 흙-수분 특성시험 결과를 흙-수분 특성곡선식에 의해 회귀분석으로 구한 SWCC를 통해 얻을 수 있다. Vanapalli and Fredlund (2000)에 의해 행해진 4가지의 불포화도 전단강도 예측 방법에 대한 비교 분석에 의하면, Vanapalli 등(1996)의 모델에 의한 예측치가 $0 \sim 15 \text{ kg/cm}^2$ 의 흡인력 범위에서 시험치와 가장 잘 일치하는 것으로 나타나 적용성이 우수한 것으로 평가되었다. 흙-수분 특성곡선식은 흙-수분 특성시험, 예를 들어, 템피셀 시험(tempe cell test)이나 전통적인 압력판 시험(pressure plate test) 등을 통해 구해진 소수의 흡인력-함수비 관계 자료만을 이용하여 임의의 흡인력 범위에서의 연속적인 SWCC를 구하기 위한 경험식이다. 지난 여러 해 동안 많은 지반공학자들에 의해 SWCC를 적절히 묘사하기 위한 흙-수분 특성곡선식이 제안되었으며, Leong and Rahardjo(1997)의 검토결과에 의하면, 다음의 식 (5)와 같은 Fredlund and Xing(1994)의 제안식이 가장 적용성이 좋은 것으로 나타났다.

$$\theta = C(\Psi) \frac{\theta_s}{\{\ln[e + (\Psi/a)^n]\}^m} \quad (5)$$

여기서, θ 는 체적함수비, θ_s 는 포화시의 체적함수비, a , n , m 은 계수이며, $C(\Psi)$ 는 보정계수로 식 (6)과 같이 표현된다. 시험결과와 근접하게 일치된 곡선을 얻기 위하여 식 (5)에 포함된 3개의 계수는 최소자승법을 사용하여 결정한다.

$$C(\Psi) = 1 - \frac{\ln(1 + \frac{\Psi}{\Psi_r})}{\ln(1 + \frac{1000000}{\Psi_r})}, \quad 0 \leq \Psi \leq 10^4 \text{ kg/cm}^2 \quad (6)$$

여기서, Ψ_r 은 잔류함수비(residual water content)에 상응하는 흡인력이지만, 실제로 회귀분석에 의해 결정될 때에는 반드시 그렇게 해석되지는 않는다. Fredlund and Xing(1994)에 의하면, 대부분의 경우, $\Psi_r > 15 \text{ kg/cm}^2$ 이면 만족할 만한 접근을 보이는 것으로 나타났으며, 경험적으로 30 kg/cm^2 을 취하였다. 또한, 보정계수는 흡인력이 10^4 kg/cm^2 으로 접근함에 따라 체적함수비를 0으로 만들기 위한 것으로 특별한 이론적 의미는 없다. 따라서, 낮은 흡인력 범위에서의 곡선은 보정계수에 의해 크게 영향을 받지 않으며, 거의 1과 같다. 그러므로 일반적으로 흡수분 특성 시험이 행해지는 15 kg/cm^2 이하의 낮은 흡인력의 범위에서, 불포화토의 전단강도 예측시에는 굳이 복잡하게 보정계수를 적용하여 SWCC를 구하지 않아도 무난한 것으로 나타났다(Leong and Rahardjo, 1997). 대부분의 SWCC 식이 경험적으로 구해진 것에 비해, Fredlund and Xing(1994)의 제안식은 흡 모체의 간극 크기 분포곡선(pore-size distribution curve)을 이론적 근거로 확립하였다. Sillers and Fredlund(2001)는 9가지의 SWCC 모델식과 3가지의 보정계수의 조합에 대해 통계적인 평가를 실시하였는데 여기에서도 Fredlund and Xing(1994)의 제안식이 가장 정확하게 SWCC를 묘사하는 것으로 평가하였다.

본 연구에서는 문헌조사 결과, 이론적 근거가 가장 명확하고 적용성이 우수하다고 평가받는 Vanapalli 등(1996)의 제안식(식 (4))과 Fredlund and Xing(1994)의 제안식을 각각 불포화 전단강도 예측을 위한 기본 모델과 SWCC 식으로 선정하여 분석을 수행하였다.

2.3 기본 예측모델 수정방향

지금까지의 문헌조사에 의하면, 순연직응력의 변화에 따른 흡수분 특성의 변화가 불포화토의 전단강도 발현에 적지 않은 영향을 미치는 것으로 알려져 있음에도 불구하고 기존의 불포화토의 전단강도예측모델에서는 아직까지 이러한 영향을 적절하게 반영하지 못하고 있다. Vanapalli 등(1996)의 모델에서는 Fredlund 등(1978)이 제안한, 확장된 Mohr-Coulomb 파괴포락선 이론(그림 1 참조)에 근거하여 전체 흡인력의 범위에서 순연직응력에 따른 파괴포락선(이후부터 “FEMS”로 표기)의 기울기는 포화상태에서 구한 내부마찰각(ϕ')과 동일하다는 가정 아래, 구속압이 0인 상태에서 건조과정의 시험을 통해 구한 SWCC만을 이용하여, 순연직응력의 증감

에 관계없이, 흡인력에 의한 전단강도 증가를 일률적으로 적용하고 있다. 다시 말해서, 순연직응력의 증감에 의해서 흡인력에 따른 파괴포락선(이후부터 “FEMS”로 표기)의 기울기가 변화함에도 불구하고 동일한 기울기의 FEMS를 전체 순연직응력의 범위에서 적용하게 되어 있다. 순연직응력이 증가하면, 시료내의 유효응력이 증가할 뿐만 아니라 체적의 감소로 구조가 달라지게 되며, 이에 기인하여, 흡수분 특성 또한 달라지게 된다. 여러 지반공학자들에 의해 기 수행된 연구 결과에 의하면, 동일한 시료라 하더라도 순연직응력이 클수록 SWCC 상의 공기유입값(air-entry value)이 증가하고, 곡선의 기울기가 완만해져 동일한 흡인력에서의 함수비(포화도)가 증가하는 것으로 나타났다(Vanapalli 등, 1996, 1999; Ng and Pang, 2000). 따라서, 흡 입자와 물의 접촉면적이 늘어나므로 흡인력에 의한 입자간의 결속이 강화되어 전단강도가 증가하게 된다. Vanapalli 등(1996)과 Rassam and Williams(1999)의 전단시험 결과에서도 순연직응력이 증가함에 따라 공기유입값이 증가하고 FEMS의 기울기가 다소 변화하는 것을 볼 수 있었다. 따라서, 불포화토의 흡수분 특성이 순연직응력에 매우 의존적이라는 관점에서 볼 때, 보다 정확한 전단강도 예측을 위해서는 기존의 모델에서와 같이 순연직응력이 0인 상태에서 구한 단일의 SWCC를 전체 순연직응력의 범위에 걸쳐 사용할 것이 아니라 임의의 순연직응력 하에서 구한 각각의 SWCC를 사용하여야 할 것이다. Vanapalli 등(1996)도 자신들이 제안한 모델의 한계성을 언급하면서, 정확한 예측을 위해서는 현장상태의 지중 구속압을 제대로 반영한 SWCC를 사용하는 것이 매우 중요함을 강조한 바 있다. 다시 말해서, 기존의 압력판 시험으로는 구속압이 0상태인 SWCC만을 구할 수밖에 없으므로 순연직응력을 조절할 수 있도록 장비를 개량하든지, 현

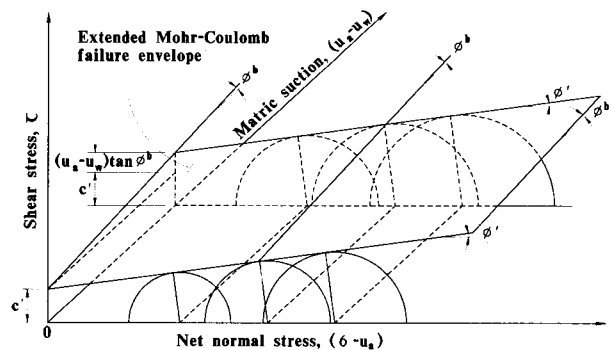


그림 1. 확장된 Mohr-Coulomb 파괴포락선

장의 응력상태에 맞게 시료를 선행압밀시킨 이후에 압력판 시험을 수행하는 것이 타당함을 지적하고 있다. 하지만, 이렇게 할 경우, 임의의 순연직응력 하에서 각각의 SWCC를 얻기 위해서 과도한 시간과 난해한 시험이 요구되므로 불포화토 전단강도를 비교적 구하기 쉬운 포화토의 강도정수와 SWCC만을 이용하여 간단히 구해 보고자 하는 예측 모델의 기본 취지에 근본적으로 위배된다. 뿐만 아니라, 이러한 방법으로 전단강도-흡인력 평면상에 순연직응력을 달리하는 다수의 FEMS를 구한다고 하더라도 특정한 순연직응력하에서의 흡인력에 따른 전단강도 일뿐, 3차원 공간상의 임의의 흡인력과 순연직응력하에서의 전단강도를 예측할 수는 없다. 그러므로, 본 연구에서는 Vanapalli 등(1996)의 제안식 내의 정규화된 체적함수비(θ)가 순연직응력의 변화에 종속될 수 있도록 관계식을 추가하여 순연직응력의 변화에 따라 각각의 SWCC를 따로 적용하지 않아도 순연직응력이 흙-수분 특성과 불포화토의 전단강도에 미치는 영향을 고려할 수 있도록 수정하였다. 즉, 기존의 모델에서는 순연직응력과 흡인력이 독립적인 응력상태변수로 서로 간에 영향을 주고받을 수 없었지만, 본 연구에서는 순연직응력이 흡인력에 영향을 미칠 수 있도록 수정하였다.

3. 실내 시험

3.1 개요

본 연구에서는 전단강도를 구하기 위한 불포화토 압밀-배수 삼축압축시험(unsaturated consolidation drained triaxial compression test)과 SWCC를 구하기 위한 3가지 시험(압력판 시험, 텀피셀 시험, CPCE 시험(confining pressure controlled extractor test))을 합해 모두 4가지의 주요 시험을 수행하였고, 이와 더불어 시료의 기본특성을 파악하기 위한 토성시험이 병행되었다. SWCC를 구하기 위한 시험은 요구되는 흡인력의 범위에 따라 각기 다른 시험이 수행된다. 낮은 흡인력의 범위(즉, 5 kg/cm^2 이하)에서는 텀피셀 시험이 수행되고, 다소 높은 흡인

력의 범위($5 \sim 15 \text{ kg/cm}^2$)에서는 압력판 시험을 ASTM D2325-68 또는 ASTM D3152에 의거하여 수행하였다. 한편, CPCE 시험은 기존의 압력판 시험이나 텀피셀 시험과는 달리 임의의 구속압을 가한 상태에서 SWCC를 구할 수 있게끔 개량된 시험으로 $0 \sim 5 \text{ kg/cm}^2$ 의 흡인력 범위에서 시험이 수행되었다. 본 연구에서는 모든 SWCC를 건조과정의 시험을 통해 구하였다. 삼축압축시험은 Fredlund and Rahardjo(1993)가 제안한 방법을 기본으로 하여 $0.0001 \text{ \%}/\text{sec}$ 의 속도로 수행하였다.

3.2 시료

시험에 사용된 시료는 국내에서 쉽게 접할 수 있는 화강풍화잔적토(residual granite soil)로서 서울의 신내동에서 채취하였다. 본 연구에 사용된 시료는 현장에서 채취된 자연시료를 48시간 노건조시킨 후 고무망치로 잘게 부순 것을 10번 체(2mm sieve)를 통과시킨 것으로서 조립토의 성질이 매우 강하다. 문헌조사에 의하면, 화강풍화잔적토와 같은 조립토로 형성된 다짐시료는 전단도중에 구속압을 충분히 적용하는 경우에 간극비와 흙의 구조 그리고 이에 영향을 받는 흡인력이 시험에 영향을 미칠 정도로 크게 변화하지 않는 것으로 나타났다(Fredlund and Rahardjo, 1993). 또한, 상대적으로 단단하기 때문에 흡인력의 변화에 따른 체적변화가 적은 것으로 나타나(Vanapalli 등, 1996) 전단시험중의 흙 구조의 변화는 구속압의 영향만 받는 것으로 가정할 수 있다. 시료의 기본 성질은 다음의 표 1과 같고, 시료의 다짐곡선 및 입도분포는 각각 그림 2와 3에 나타나 있다. 본 연구의 시험에 사용된 다짐시료들은 상대다짐도가 90%가 되게 준비하였다. 다지기 전에 우선, 무게를 잰 일정량의 시료를 팬에 담아 초기함수비가 10%가 되도록 증류수를 스프레이로 분사한 후 잘 섞은 다음 시료가 서로 뭉치지 않게 10번 체로 다시 한번 통과시킨다. 그 다음 습도를 일정하게 유지할 수 있는 항습용기에 넣어 적어도 24시간 동안 함수비를 균등화 시켰다. 항습용기에서 꺼집어 낸 시료는 시료성형용 몰드에 넣어 정다짐을 한다. 시험의 종류에 따른 시료의 크기는 표 2와 같다.

표 1. 시료로 사용된 흙의 기본 물성

Soil	Porosity	O.M.C (%)	$\gamma_{d(max)}$ (t/m^3)	Percentage passing No. 200 sieve (%)	Plasticity(%)			G_s	USCS
					LI	PL	PI		
Shinnae-dong	0.358	10	1.9	12.4	NP			2.65	SM

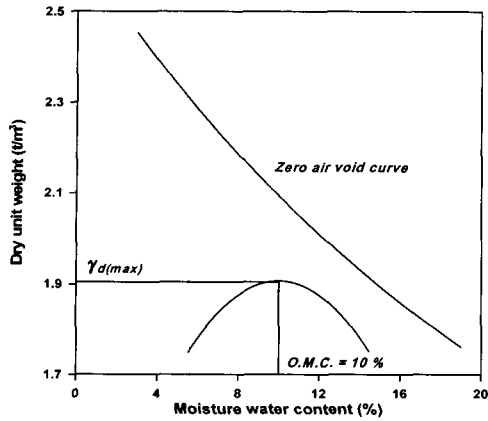


그림 2. 시료로 사용된 흙의 다짐곡선

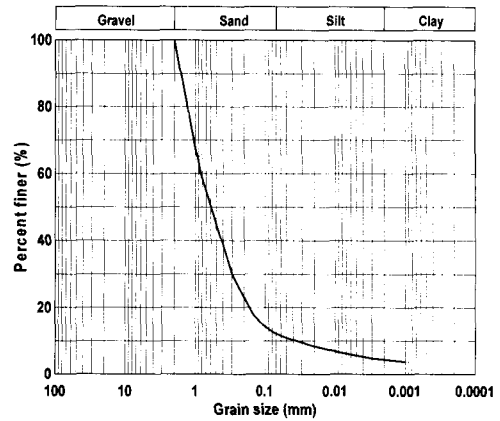


그림 3. 흙의 입도분포 곡선

표 2. 시험의 종류에 따른 시료의 크기

Specimen size	Tests for SWCC			Triaxial shear test
	Conventional pressure plate extractor test	Tempe cell test	Pressure controlled extractor test	
diameter(mm)	50.2	63.8	70	50
height(mm)	10	25.5	30	120

3.3 시험 장비

본 연구에서 사용된 시험장비는 앞 절에서도 이미 언급한 바와 같이 4가지로 크게 나눌 수 있다. 이중에서 SWCC를 구하기 위해서 적용된 압력판 시험기기(Soil-moisture Equipment Corp., USA)나 템피셀(University of Saskatchewan, Canada)은 불포화토 시험을 위해 일반적으로 사용되고 있는 장비들이므로 자세한 설명은 생략한다. 또한, 불포화 삼축압축시험 장비는 기존의 삼축압

축시험 장비를 불포화토 시험에 맞게 개량 또는 추가 제작한 것으로서 Fredlund and Rahardjo(1993)가 정리한 방법들을 기본으로 하였다. 한편, CPCE는 Ng and Pang (2000)이 기존의 압력판 시험기기를 개량하여 K_0 상태의 SDSWCC(stress dependent SWCC)를 구한 것과는 구별되게 등방구속압을 일정하게 유지한 상태에서 SWCC를 구할 수 있게끔 개량된 장치이다. 등방구속압을 시료에 가하기 위해서 기 언급한 불포화 삼축압축시험 장치와 유사하게 기존의 삼축장비조합을 개량해야만 했다.

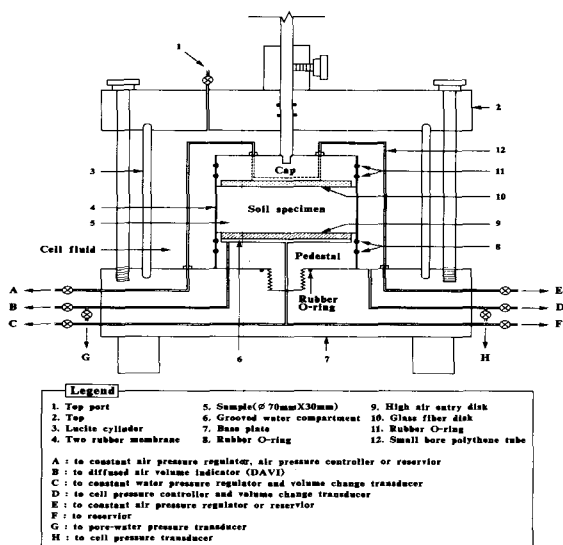


그림 4. CPCE 모식도

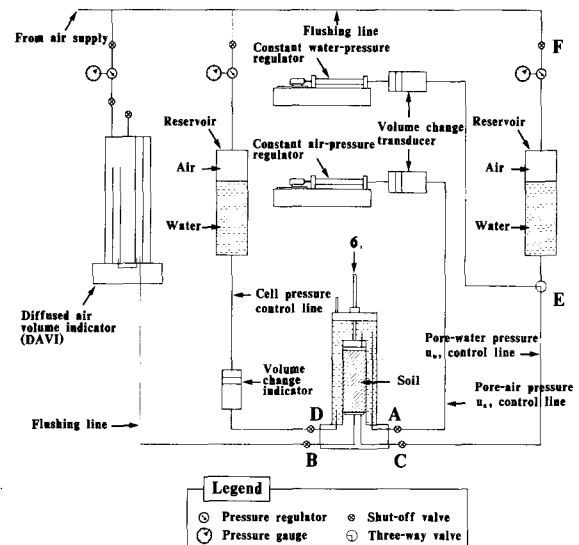


그림 5. 삼축시험 장비 조합도

기존의 삼축압축시험용 셀보다 체적을 줄였으며, 표 2에서 보는 바와 같은 시료의 크기에 맞추어 하부 페데스탈을 제작하고 공기유입값이 5.5 kg/cm^2 인 HAED를 장착하였으며, 시료의 전체 체적변화를 측정하기 위해 구속압 조절라인에 트랜스듀서를 연결하였다. CPCE의 자세한 모식도는 그림 4와 같으며, 시험의 장비조합은 그림 5와 같다.

3.4 시험방법 및 과정

기존의 압력판 시험이나 텀피셀 시험의 경우에는 흡인력에 따른 함수비의 변화를 시료나 시료를 포함한 셀의 무게를 직접 측정함으로써 오류의 요인이 적었다. 하지만, CPCE 시험과 같이 시료의 체적변화와 함수비 변화를 셀 유체의 체적변화와 시료로부터 추출되는 물의 양을 통해 간접적으로 측정해야 하는 경우에는 시험의 정확성이 다소 저하될 수 있다. 대표적인 문제점으로는 누수, 확산, 온도와 압력에 따라 변화하는 유체의 체적 변화 그리고 각종 유체의 경로와 셀 내부에 잔존하는 공기방울을 들 수 있다. 본 연구의 시험에서는 이러한 각종 문제점들을 최소화하기 위하여 각별히 세심한 주의를 기울였다. 누수는 완벽한 씰링과 이중 오링 설치 등으로 완전히 제어할 수 있었으며, 공기의 확산은 DAVI (diffused air volume indicator)를 사용하여 해결하였고, 시험에서 사용되는 유체는 용존공기 제거장치와 진공 펌프로 공기를 제거한 증류수를 사용하였으며, 시험실의 온도는 항상 20°C 를 유지시키고, 물의 표면장력에 의해 유체의 경로와 셀 내부에 잔존할 수 있는 공기방울을 제거하기 위하여 상업용 액체 세정제를 사용하여 시험 전에 세척을 하였다. 특히, DAVI의 내부 뷰렛에는 동일한 이유로 확산된 공기방울이 잘 모이지 않는 것을 방지하기 위하여 상업용 세정제와 물을 적당히 섞어서 채워 두었다. 또한, 시료의 체적 및 함수비 변화와 무관하게 발생할 수 있는 물의 이동량을 파악하기 위하여 아크릴로 시료와 체적이 동일한 모형 시료를 제작하여, 실제 시험시와 동일한 상태와 절차로 시험을 수행한 후

이를 보정해 주었다. 시료의 포화는 하부의 HAED를 통해 물을 공급하여 기포가 포함된 물을 1mm 두께의 유리섬유 디스크가 내재된 상부의 캡을 통해 뽑아 내는 방식을 취하였다. 포화시에는 시료내의 순연직응력의 변화가 발생하지 않도록 각별히 주의하였으며, 그림 4의 밸브 A와 E를 통해 배출되는 물 속에 기포가 보이지 않을 때까지 1차 포화시킨 후, 간극속에 남아 있는 잔여 기포를 녹여서 배출하기 위하여 배압을 고압으로 가하여 24 시간동안 포화를 시켰다. 포화가 완료되고 나면 소정의 순연직응력과 동일한 유효응력이 시료 내에 형성되게끔 압밀을 시킨다. 표 3은 해당 시험에서 구현한 3가지 응력 상태를 정리한 것이다. 압밀이 완료되면, HAED 하부와 연결된 밸브(B, C, F)를 잠근 상태에서 시료 상부의 캡 내부와 밸브(A, E)와 캡을 연결하는 튜브내의 물이 수조 쪽으로 배출시킨 이후에, 캡과 연결된 밸브(A, E)에 일정공기압 조절장치에 연결하고, HAED 하부와 연결된 밸브(C)에 그림 4에서 보는 바와 같이 일정수압 조절장치와 체적변화를 측정하는 트랜스듀서를 연결한다. 연결 후에는 압력조절장치를 조작하여 표 3에 기재된 것과 동일하게 공기압을 맞춘 이후에 구속압과 공기압은 일정하게 유지한 상태에서 수압을 여러 단계에 낮춤으로서 흡인력을 유발하고 단계별로 물의 유출량을 측정함으로써 SWCC를 구하게 된다. 단계별로 완전히 평형 상태에 도달하는데는 24시간에서 48시간 이상이 걸려, 시료 하나 당 20일 이상의 장시간이 소요되었다.

4. 시험결과 및 분석

4.1 순구속압이 흙-수분 특성에 미치는 영향

흙은 크게 거시구조(macro-structure)와 미세구조(micro-structure)의 두 가지 수준의 구조를 가지고 있다. 여기서 미세구조는 흔히 조직으로 표현되는 것으로 흙내의 기본적인 입자의 결합으로 설명될 수 있으며, 반면에 거시구조는 흙 배열의 집합이라 말할 수 있다. 여러 지반공학자들에 의해 기 수행된 연구결과에 의하면 대체적으

표 3. CPCE 시험시의 응력상태

Sample No.	Confining stress (kg/cm ²)	Air pressure (kg/cm ²)	Water pressure range (kg/cm ²)	Net normal stress (kg/cm ²)	Matric suction range (kg/cm ²)
SW100(10)	6	5	5 ~ 0	1	0 ~ 5
SW200(10)	7	5	5 ~ 0	2	0 ~ 5
SW300(10)	8	5	5 ~ 0	3	0 ~ 5

로 구속압의 증감에 따라 거시간극은 상당히 민감하게 그 크기가 변화하는 반면에 미세간극은 그렇지 않은 것으로 나타났다(Gens and Alonso, 1992; Delage and Graham, 1996). 이러한 현상은 거시간극의 경우에는 주로 열려 있고, 간극간에 서로 연결이 되어 있어 구속압에 의한 간극 감소가 용이한 반면에 미세간극의 경우에는 간극이 대부분 흙덩어리 안에 갇혀 있는 상태에 놓여 있어 간극공기나 간극수가 잘 빠져 나올 수 없으므로 잘 줄어들지 않기 때문에 나타난다. 특히, 본 연구의 시험에서와 같이 사질토를 초기 함수비가 다소 낮은 상태에서 다짐한 경우에는 미세간극의 형성비율이 상대적으로 낮은 반면에 거시간극의 형성비율이 높아서 이러한 경향이 더욱 뚜렷하게 나타날 것으로 예상할 수 있다. 또한, 동일한 조건에서 다짐된 흙이라 하더라도 응력이거나 구속압의 변화에 따라 함수분 특성과 강도 특성이 달라지는 것으로 나타났다(Vanapalli et al. 1996; Rassam and Williams 1999; Ng and Pang 2000). 이들의 연구결과에 따르면, 높은 응력이력을 겪거나, 구속압이 크거나 또는 순연직응력이 클수록 동일한 흡인력에서의 포화도는 증가하고, 공기유입값도 커지며, 함수분 특성곡선의 기울기도 완만해지는 것으로 나타났으며, 더불어 흡인력에 따른 파괴포락선의 기울기도 증가하는 것으로 나타났다.

그림 6과 7은 다짐시료에 대해 SWCC를 구하는 3가지 시험을 수행한 결과와 이를 Fredlund and Xing(1994)이 제안한 SWCC 곡선식에 의해 분석한 것을 동시에 나타낸 것이다. 이들 그림에서 순구속압이 0일때의 시험결과는 압력판 시험과 텀피셜 시험을 병행하여 구한 것이고, 순구속압을 일정하게 유지한 상태에서 구한 결과는 CPCE 시험을 통해 얻었다. 이들 그림을 보면, 시험결과와 프로그램 SoilVision(SoilVision Systems Ltd.,

Saskatoon, Saskatchewan, Canada)을 사용하여 구한 곡선이 상당히 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 이들 그림을 보면, 순구속압이 증가할수록 공기유입값 이후에 동일한 흡인력에서의 체적함수비 또는 포화도가 증가하는 것과 곡선의 기울기가 상대적으로 완만해지는 것을 알 수 있다. 또한, 기 언급한 바와 같이 해당시료가 조립토의 특성이 강하므로 거시간극에 지배되는 낮은 흡인력 범위에서는 구속압의 크기에 따라 함수분 특성곡선이 상당히 달라지나 높은 흡인력의 범위에서는 거의 변화하지 않는 것을 볼 수 있다.

Rassam and Williams(1999)는 최근의 자료조사를 통해 공기유입값과 연직응력간에는 선형적인 관계가 있음을 그림으로 보였다. 그림 8은 Rassam and Williams(1999)의 논문에 기재된 그림에 금번 시험을 통해 구한 순연직응력- 공기유입값 관계 곡선을 함께 나타낸 것이다. 이 그림을 보면 본 연구의 시험결과에서도 순연직응력과 공기유입값 간에는 선형적인 관계를 보임을 알 수 있다. 위의 그림들을 보면 순연직응력의 증가에 의해 흙이 보다 치밀해짐에 따라 함수분 특성도 상당히 달라짐을 볼 수 있다. 대체적으로 구속압의 증가에 따라 거시간극의 크기가 줄어들어 낮은 흡인력 범위에서의 물의 보유능력이 증가하는 것을 볼 수 있다. 그림 6에서 보면 흡인력 15 kg/cm² 부근에서는 4개의 곡선이 거의 일치하여 당 시료와 같이 조립토의 성향이 강한 시료의 경우에는 미세간극의 형성비율도 낮아 높은 흡인력범위에서 구속압이나 응력이력의 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타났다. 또한, 그림 7에서 보면 4개의 곡선이 모두 공기유입값을 초과한 0.2 kg/cm² 이상의 흡인력의 범위에서는 대체적으로 동일한 흡인력에서의 포화도가 순연직응력이 증가함에 따라 선형적으로 증가함을 볼 수 있다. 이는 앞의 순연직응력과 공기유입값 간에 선형적

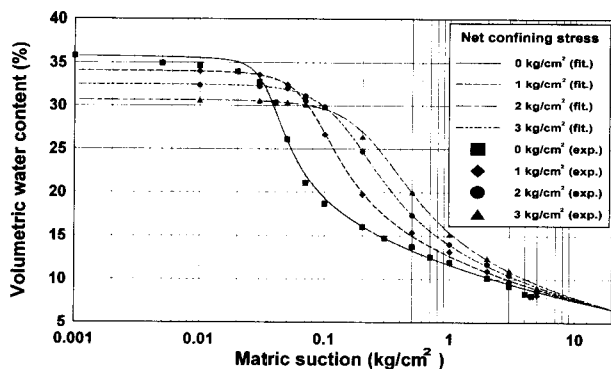


그림 6. 순구속압의 변화에 따른 SWCC 비교 (체적함수비)

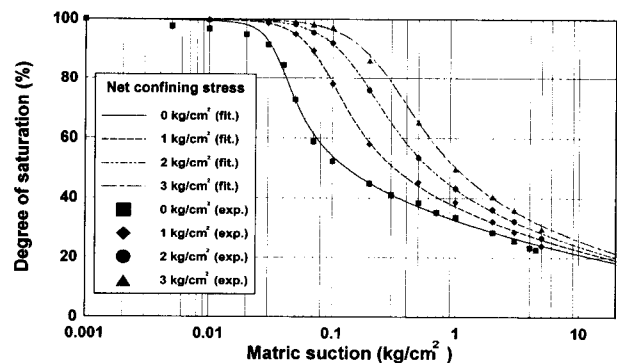


그림 7. 순구속압의 변화에 따른 SWCC 비교 (포화도)

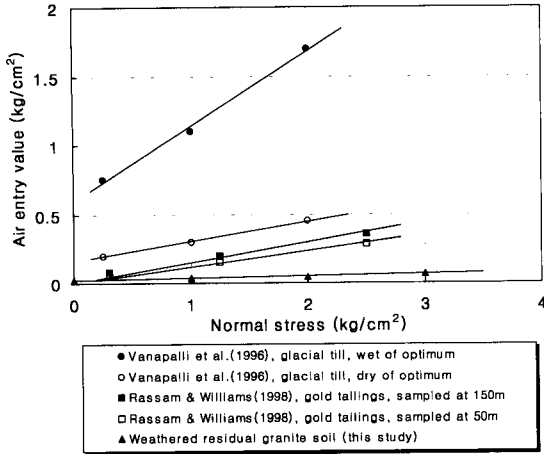


그림 8. 순연직응력-공기유입값의 관계곡선

인 관계가 성립되는 것과 무관하지 않으며 공기유입값의 변화량과 포화도의 변화량 간에는 밀접한 관계가 있음을 말해 준다. 해당시료의 SWCC는 전형적인 실트질 흙과 모래질 흙의 SWCC의 중간적인 형태를 보인다.

4.2 순구속압이 불포화토의 전단강도에 미치는 영향

앞의 절에서 기 언급한 바와 같이 순구속압이 증가하면 동일한 흡인력에서의 포화도가 증가하므로 물과 흙의 접촉면적이 증가하여 전단강도가 증가하게 된다. Gan and Fredlund(1996)는 조립토보다 세립토가 흡인력이 전단강도에 미치는 영향이 크다고 말했다. 따라서, 해당 시료의 경우에는 흡인력에 따른 전단강도의 증가가 점성토와 같은 세립질의 흙에 비해 상대적으로 적게 나타날 수 있음을 짐작할 수 있다. 앞 절에서도 언급한 바와 같이, 사질토의 특성상, 거시간극의 형성비율이 커서 구속압의 변화에 의해, 앞의 그림 6, 7에서 보는 바와 같이, 낮은 흡인력의 범위에서 SWCC가 상당히 민감하게 변화하지만 흡인력에 의한 전단강도의 증가는 크지 않았다.

Vanapalli 등(1996)의 모델에서는 순연직응력의 변화에 관계없이 FEMS의 기울기를 동일하게 적용하였다. 이와 같이 순연직응력에 무관하게 흡인력에 따른 파괴포락선을 동일하게 유지하기 위해서는 모든 흡인력에서 FENS의 기울기(ϕ)가 동일해야 한다. 하지만, 금번의 불포화토에 대한 전단강도 시험 결과(그림 9)에 의하면, 흡인력이 증가할수록 점착력이 증가하고, 작은 양이긴 하지만 FENS의 기울기(ϕ)가 증가하는 경향을 보였다.

Vanapalli 등(1996)의 논문에서도 이러한 경향에 대해

언급한 바가 있다. 그는 이 논문에서 이러한 현상의 원인을 강도시험에 사용한 다짐시료들의 형성 과정에서 발생할 수 있는 시험 오차 때문이라고 하였고, 이들 파괴포락선의 기울기는 내부마찰각(ϕ')과 거의 동일하게 볼 수 있으며, 모든 실무적인 목적에서는 내부마찰각을 흡인력에 독립적인 것으로 추론할 수 있다고 하였다. 하지만 그렇게 보기에는 흡인력에 따른 FENS의 기울기의 변화 양상이 매우 일정한 경향을 보이고 있다. 한편, Escario and Saez(1986)는 그들의 시험에 의해 ϕ' 이 흡인력에 따라 약간씩 증가한다고 하였고, Drumright(1989)는 ϕ' 이 흡인력에 의해 약간 영향을 받는다고 하였다. 본 연구와 지금까지의 많은 지반공학자들의 연구 결과에 의하면, 순구속압이 증가하게 되면 동일한 흡인력에서의 포화도가 증가하므로 흡인력에 의해 유발되는 전단강도의 증가정도도 커진다는 것도 시험을 통해 확인할 수 있었다. 비록, 흙의 종류에 따라 그 정도의 차는 있으나 순연직응력의 변화와 흡인력에 의해 유발되는 전단강도의 증가량 간에는 밀접한 관계가 있으며, 확장된 Mohr-Coulomb 파괴포락선 이론상, FENS와 FEMS가 3차원 공간상에서 연계되어 하나의 평면(shear strength envelope plane)을 형성하고 있으므로, 순연직응력의 증가에 의해 FEMS의 기울기가 커지기 위해서는 필히, 흡인력이 증가함에 따라 FENS의 기울기(ϕ)도 증가하여야 한다. 따라서, 그림 9에서 보는 바와 같이 FENS가 모두 선형이므로, 순연직응력의 변화에 따른 FEMS 기울기의 변화정도도 거의 선형적임을 알 수 있다. 비록, 순연직응력의 증가

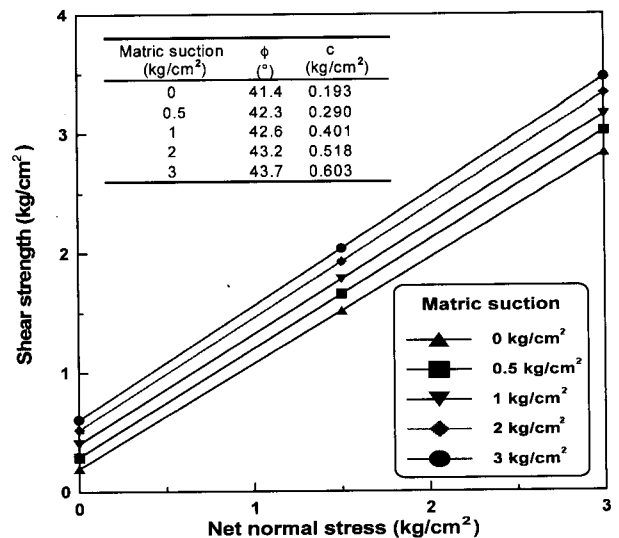


그림 9. 흡인력에 따른 순연직응력-전단강도 평면상의 파괴포락선의 변화 및 강도정수

에 기인한 흡-수분 특성의 변화에 의해 유발되는 전단강도 증가량이 미소하여, 실무에서는 ϕ' 을 흡인력에 대해 독립적으로 간주할 수도 있겠지만, 학술적인 목적에서는 불포화토의 전단강도 예측시 이를 고려해야 할 것으로 판단된다.

그림 10은 불포화토 삼축압축시험으로 구한 흡인력에 따른 전단강도를 전단응력-흡인력 평면에 투영하여 나타낸 것이다. 이 그림에서는 Vanapalli 등(1996)의 전단강도 예측모델에 의해서 구한 파괴포락선과 근구속압을 달리해서 구한 3개의 SWCC를 각각의 순연직응력에 따라 동일 모델에 각기 적용하여 구한 파괴포락선을 함께 나타내어 시험치와 두 예측치를 비교해 보았다. 순연직응력이 0일 때의 흡인력에 따른 전단강도 시험결과를 식 (4)에 의해 분석한 결과, κ 는 1.34가 가장 적절한 값으로 나타났다(프로그램 "SoilVision" 사용). Vanapalli and Fredlund(2000)는 소성지수가 각기 다른 5가지 종류의 흙에 대한 불포화토 강도시험을 통해, κ 와 소성지수 간에는 따라 비선형적인 비례 관계가 있음을 보였다. 또한, 본 연구에서 사용한 시료와 같이 비 소성의 조립토 성질이 강한 흙인 경우에는 $\kappa=1$ 을 적용시, 시험치와 예측치 간에 좋은 상관관계가 있음을 보여주었으며, 본 연구에서 구한 $\kappa=1.34$ 도 이와 유사한 값을 보였다. 한편, Vanapalli 등(1996)이 빙하토(glacial till)를 사용하여 수행한 연구결과에 의하면, κ 는 선형압밀하중이 증가할수록 다소 증가하는 것으로 나타나, 본 연구에서와 같이 순연직응력이 달라지는 경우에도 κ 가 변화할 수 있음을

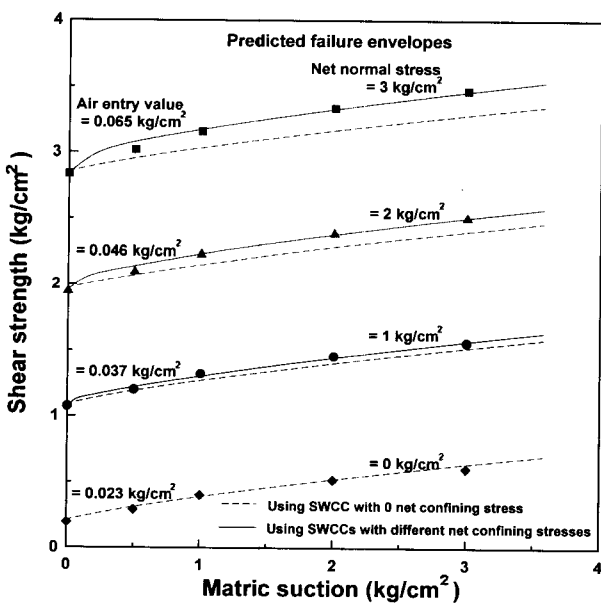


그림 10. 순연직응력의 변화에 따른 전단강도-흡인력 관계 곡선

표 4. 전단강도 예측을 위해 적용된 계수들

Net confining stress (kg/cm ²)	a	n	m	Ψ_r (kg/cm ²)	κ
0	3.2935	5.5878	0.3087	0.129	1.34
1	7.1951	3.3159	0.3967	0.402	1.36
2	13.2882	2.4237	0.4797	0.927	1.38
3	22.4849	2.2241	0.5165	1.613	1.40

짐작할 수 있다. 다음의 표 4는 시험결과와 분석 작업을 통하여 구한 SWCC와 불포화토 전단강도 포락선의 계수를 구속압의 크기에 따라 정리한 것이다. 이 표를 보면, κ 가 구속압이 커짐에 따라 증가함을 볼 수 있다. 그림 10을 보면, 순연직응력이 0인 상태에서 구한 SWCC를 일률적으로 모델에 적용하는 구한 파괴포락선 보다는 순연직응력의 변화에 맞추어 각각의 응력상태에서 구한 SWCC를 구별 적용하여 구한 파괴포락선이 전단강도 시험결과와 근사하게 잘 맞는 것으로 나타났다. 따라서, 보다 정확한 불포화토의 전단강도를 예측하기 위해서는 기존의 모델을 흡인력에 미치는 순연직응력의 영향을 고려할 수 있게끔 수정하여야 할 것으로 판단된다. 또한, 그림 10을 보면 동일한 흡인력에서 순연직응력의 증가에 따른 전단강도의 증가정도가 거의 선형적임을 볼 수 있는데, 이는 그림 7에서 동일한 흡인력에서의 포화도가 순연직응력이 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 것과 직접적으로 관련이 있다. 즉, 순연직응력의 증가에 따라 흙 입자와 물의 유효접촉면적이 선형적으로 증가하기 때문에 이를 통해 유발되는 전단강도의 증가가 선형적인 것이다.

4.3 수정된 불포화토 전단강도 예측모델

앞 절에서의 비교 분석에 의하면, 흡인력에 따른 전단강도 시험결과가 순연직응력이 0일 때의 SWCC를 일률적으로 사용하는 Vanapalli 등(1996)의 모델에 의한 예측치 보다는 순연직응력의 증가에 따라 각기 다른 SWCC를 동일 모델에 적용하여 구한 예측치와 근사하게 잘 맞는 것을 볼 수 있었다. 이는 예측에 사용된 Vanapalli 등(1996)의 제안 모델이 순연직응력의 변화에 따라 변화하는 유효접촉면적의 변화를 추가적으로 고려할 수만 있다면 상당히 정확하게 불포화토의 전단강도를 예측할 수 있음을 반증하는 것이다. 본 연구에서는 식 (4)의 마지막 부분에 순연직응력을 독립변수로 하는 수치식을 추가하여 순연직응력 0일때의 SWCC 만을

사용하면, 순연직응력의 변화에 따른 흡수분 특성의 변화와 이에 기인한 전단강도의 변화를 적절히 예측할 수 있는 방법을 모색하였다. 이를 위해, 기존의 모델식에 여러 가지 수치식을 바꾸어 대입하고, 계수를 변환하는 반복적인 분석 작업을 통해 시험결과를 가장 적절히 표현할 수 있는 수치식을 구하였다. 그림 6에서, 공기유입값 이후의 SWCC에서 볼 수 있듯이 순구속압에 따른 포화도의 변화정도가 거의 선형적이므로 선형 수치식이 가장 적절할 것임을 미루어 짐작할 수 있다. Fredlund and Rahardjo(1993)나 Rassam and Williams(1999)는 그들의 제안 모델에서 매우 낮은 흡인력 범위 즉, 공기유입값(AEV)까지의 흡인력 범위에서는 ϕ^b 를 ϕ' 과 동일하게 적용하였다. 이는, 공기유입값 이전의 흡인력 범위에서는 시료에서 물이 거의 빠져나가지 않아 포화 상태로 간주할 수 있으므로 흡입자간의 접촉을 유발하는 흡인력이 전량 유효응력으로 발휘될 수 있다는 사실에 근거한 것인데, 본 연구에서 제안한 수정모델에서도 공기유입값까지의 흡인력 범위에서는 ϕ^b 를 ϕ' 과 동일하게 적용하였다. 이때, 순연직응력과 공기유입값간의 관계를 선형적으로 고려하여 Rassam and Williams(1999)의 제안한 식(식 (7))을 그대로 적용하였다.

$$AEV = AEV_I + AEV_S(\sigma_3 - u_a) \quad (7)$$

여기서, AEV_I 는 직선의 절편, AEV_S 는 직선의 기울기이며, 각각의 상수는 전단강도 시험결과나 SWCC 시험결과로부터 구한 각각의 연직응력에 따른 AEV를 회귀 분석하여 구할 수 있다. 본 연구에서 제안하는 수정모델 식은 다음과 같다.

$$\text{if } (u_a - u_w) \leq AEV, \text{ then} \\ \tau = c' + [(\sigma - u_a) + (u_a - u_w)] \tan \phi' \quad (8)$$

$$\text{if } (u_a - u_w) > AEV, \text{ then} \\ \tau = c' + [(\sigma - u_a) + AEV] \tan \phi' \\ + \{[(u_a - u_w) - AEV](\theta^*) \tan \phi'\} [1 + \lambda(\sigma - u_a)] \quad (9)$$

여기서, κ 와 λ 는 계수이며, κ 는 순연직응력이 0일 때 기존 모델로 구한 값을 적용한다. 단, 위의 모델 식은 전체 흡인력의 범위에서 유효한 것은 아니며, 그림 7에서 보는 바와 같이 순연직응력에 의해 시료내의 포화도가 변화하는 낮은 흡인력의 범위, 즉, 현장에서 관심 있는 흡인력의 범위에서만 적용이 가능하다. 이 모델 식을 통

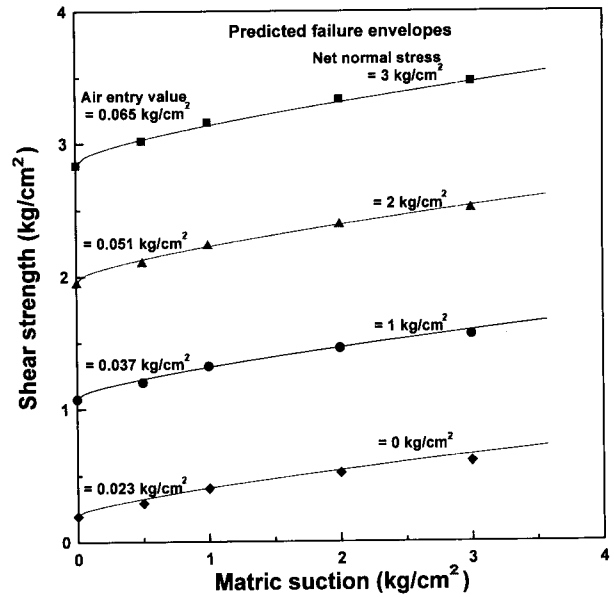


그림 11. 전단강도 시험결과와 수정 모델에 의한 예측결과 간의 비교

표 5. 수정모델식에 의한 전단강도 예측시 적용한 계수

AEV _I (kg/cm ²)	AEV _S	κ	λ
0.023	0.014	1.34	0.001

해, 본 연구의 시험에서 사용한, 시료의 전단강도를 예측해 본 결과, 그림 11과 같이 시험결과와 매우 잘 일치하는 것으로 나타났다. 이때, 적용한 계수들은 표 5와 같다.

5. 결론

본 연구의 내용을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 순구속압이 증가할수록 공기유입값이 거의 선형적으로 증가하였으며 동일한 흡인력에서의 포화도가 증가하고 공기유입값 이후의 곡선의 기울기가 완만해지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 순연직응력의 증가에 따라 흙의 구조가 보다 치밀해 짐으로 인해, 동일한 흡인력에서 상대적으로 물을 보유할 수 있는 능력이 커짐을 의미하는 것으로 이에 기인한 전단강도의 증가가 타당함을 보여준다.
- (2) 시험에 사용된 화강풍화토는 조립토의 성질이 강하므로 미세간극의 형성비율이 매우 낮아 구속압에 대해 민감하게 간극의 크기가 변화하는 것으로 나타났다. 따라서, SWCC를 보면 거시간극에 지배되는 낮은 흡인력 범위에서는 구속압의 크기에 따라 흡수

본 특성곡선이 상당히 달라지나 높은 흡인력의 범위 (15 kg/cm² 이상)에서는 거의 변화하지 않는 것을 볼 수 있다.

- (3) 순구속압이 증가할수록 동일한 흡인력에서의 포화도가 거의 선형적으로 증가하였는데, 이는 순연직응력의 증가에 따라 흙 입자와 물의 유효접촉면적이 선형적으로 증가하기 때문이다. 따라서, 이를 통해 유발되는 전단강도의 증가도 선형적으로 변화하게 된다.
- (4) 전단강도 시험결과와 Vanapalii 등(1996)의 제안 모델에 의한 예측결과를 비교 분석한 결과, 기존 모델이 순연직응력의 변화에 따라 변화하는 유효접촉면적의 변화를 추가적으로 고려할 수만 있다면 상당히 정확하게 불포화토의 전단강도를 예측할 수 있음을 확인할 수 있었다. 따라서, 본 연구에서는 순연직응력에 따른 유효접촉면적의 변화를 선형적으로 고려하고, 흡인력이 순연직응력에 종속되도록 수식식을 추가하여 수정된 모델 식을 제안하였다.

감사의 글

본 연구는 교육부의 BK21 사업에 의해 이루어진 결과로써 당 기관에 감사를 드린다.

참 고 문 헌

1. Bolzon, G., Schrefler, A. and Zienkiewicz, O. C. (1996), "Elasto-plastic soil constitutive laws generalized to partially saturated state", *Géotechnique*, Vol.48, No.2, pp.279-289.
2. Delage, P. and Graham, J. (1996), "Understanding the behavior of unsaturated soils requires reliable conceptual models", *In Proceedings of the First International Conference on Unsaturated Soil*, Paris, France, September 1995. Edited by E.E. Alonso and P. Delage. A.A., Balkema, Rotterdam, The Netherlands, Vol.3, pp.1223-1256.
3. Drumright, E. E. (1989), The contribution of matric suction to shear strength of un saturated soils, Ph. D. thesis, Colorado State University, Fort Collins.
4. Escario, V. and Saez, J. (1986), "The shear Strength of partly

- saturated soils", *Géotechnique*, Vol.36, No.3, pp.453-456.
5. Fleureau, J. M., Kheirbek-Saoud, S. and Taibi, S. (1995), "Experimental aspects and modeling the behavior of soils with negative pressure", *Proc. 1st Int. Conf. Unsaturated Soils*, Paris, pp.57-62.
6. Fredlund, D. G. and Morgenstern, N. R. (1977), "Stress state variables for unsaturated soils", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 103(GT5), pp.447-466.
7. Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1993), *Soil mechanics for unsaturated soil*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
8. Fredlund D. G. and Xing, A. (1994), "Equations for the soil-water characteristic curve", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.31, pp.521-532.
9. Gan, J. K.-M. and Fredlund, D. G. (1996), "Shear strength characteristic of two saprolitic soils", *Canadian Geotechnical Journal*, In press.
10. Gens, A. and Alonso, E. E. (1992), "A framework for the behavior of unsaturated expansive clays", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.29, pp.1013-1032.
11. Khalili, N. and Khabbaz, M. H. (1998), "A unique relationship for x for the determination of the shear strength of unsaturated soils", *Géotechnique*, Vol.48, No.5, pp.681-687.
12. Leong, E. C. and Rahardjo, H. (1997), "Review of soil-water characteristic curve equation", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.123, pp.1106-1117.
13. Ng, C. W. W. and Pang, Y. W. (2000), "Influence of stress state on soil-water characteristics and slope stability", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.126, No.2, pp. 157-166.
14. Oberg, A. L. and Sallfors, G. (1995), "A rational approach to the determine of the shear strength parameters of unsaturated soils", *Proc. 1st Int. Conf. Unsaturated Soils*, Paris, pp.151-158.
15. Rassam, D. W. and Williams, D. J. (1999), "A relationship describing the shear strength of unsaturated soils", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.36, pp.363-368.
16. Sillers, W. S. and Fredlund D. G. (2001), "Statistical assessment of soil-water characteristic curve models for geotechnical engineering", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.38, pp.1297-1313.
17. Vanapalli S. K., Fredlund D. G., Pufahl D. E., and Clifton A.W. (1996), "Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.33, pp.379-392.
18. Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G. and Pufahl, D. E. (1999), "The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristic of a compacted till", *Géotechnique*, Vol.49, No.2, pp.143-159.
19. Vanapalli, S. K. and Fredlund, D. G. (2000), "Comparison of different procedures to predict unsaturated soil shear strength", *Proc. of sessions of Geo-Denver 2000* sponsored by the Geotechnical Institute of ASCE, Geotechnical Spacial Pub. No.99, pp.195-209.

(접수일자 2002. 5. 31, 심사완료일 2003. 2. 22)