

- 가

## Estimation of Generalized Soil-Water Characteristic Curves Using Liquid Limit State

<sup>1)</sup>, Sang-Gyu Sung, <sup>2)</sup>, In-Mo Lee

<sup>1)</sup> ( ) , Manager, Lotte Eng. & Construction Co., Ltd

<sup>2)</sup> , Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea Univ.

**SYNOPSIS** : The goals of this study are to investigate the feasibility of the reference state approach in determining the generalized soil-water characteristic curve that is essential for characterization of unsaturated soil behavior. The soil-water characteristic curves are obtained from a number of specimens of fine-grained residual soils compacted with different void ratios. Based on the experimental test results, the feasibility of using the liquid limit state as the reference state for predicting the soil-water characteristic curve are verified. Finally, through the regression analysis of experimental data using the equation of Fredlund and Xing (1994), a reliable method is proposed to predict the generalized soil-water characteristic curve of fine-grained residual soils using the liquid limit state as the reference.

**Key words** : Soil-water characteristic curve, Matric suction, Liquid limit, Reference state approach, Prediction model

### 1. 서론

불포화토내에 유발되는 흡인력(matric suction)은 흙 입자의 입도분포, 입자의 정렬상태(구조), 함수비, 그리고 건조 및 습윤 과정의 진행에 의해 영향을 받는다. 또한, 입도 분포와 흙의 다짐상태는 간극 크기의 분포(pore-size distribution)와 매우 밀접한 관계를 가지고 있다. 따라서 흡인력의 변화는 흙-수분 특성곡선과 같은 포화도와의 관계로 나타낼 수 있다. 이 곡선은 간극 크기의 분포(Simms and Yanful, 2002), 투수특성, 그리고 전단강도 등과 같은 불포화토의 기본적인 거동을 연구하는데 있어서 실질적인 매개체 역할을 하고 있다.

흙-수분 특성곡선을 설명하기 위하여 여러 가지 경험 및 이론식이 제안되었다.(Brooks and Corey, 1964; McKee and Bumb, 1987; Fredlund and Xing, 1994) 실험결과를 이들 식에 의해 적합(fitting)시키면 해당 시료의 흙-수분 특성곡선식을 구할 수 있게 된다. 하지만, 이것은 단순히 시험결과를 적합 시키는 수준이므로 흙-수분 특성곡선을 구하기 위해서는 동일한 흙일지라도 시료의 초기상태에 따라 시간소모가 큰 다수의 시험이 불가피한 실정이다. 이러한 제약을 극복하기 위해서 Reddi and Poduri(1997)는 액성한계를 이용하여 세립토의 물 보유특성(water retention characteristics)을 일반화 할 수 방법을 제안하였다.

본 연구에서는 세립잔적토의 흙-수분 특성곡선 예측에 있어서, 액성한계를 비교상태로 사용함에 문제가 없는지 검증하였다. 또한, Fredlund and Xing(1994)의 제안식을 이용하여 액성한계를 비교상태로 하는 세립잔적토의 흙-수분 특성곡선 예측방법을 제안하였다.

## 2. 문헌연구

### 2.1 액성한계를 이용한 비교상태접근법

Nagaraj 등(1991)은 점토의 종류에 따라 액성한계(62~330%)와 그 때의 간극비는 매우 큰 폭으로 분포해도 투수계수는 약  $2.6 \times 10^{-7}$  cm/sec로 거의 일정함을 보였다. 이러한 현상은 물의 흐름을 지배하는 집합체 간의 간극(inter-cluster pore), 즉 거시간극(macro-pore)의 크기가 액성한계에서 거의 일정하기 때문인 것으로 알려져 있다.(Mitchell, 1993) 또한, Nagaraj 등(1994)은 4가지 자연점토의 투수계수를 액성한계상태의 값으로 정규화한 후 역시 액성한계상태의 값으로 정규화한 간극비와 함께 도시하여 유일한 선형관계가 성립함을 보였다. 이를 통해, 세립토의 경우는 액성한계를 비교상태(reference state)로 활용하면 종류에 관계없이 여타 간극비로 형성된 토체의 공학적 특성 예측이 가능함을 짐작할 수 있다.

Reddi and Poduri(1997)는 모래와 몬모릴로나이트 또는 카올리나이트와의 혼합체를 사용하여 흙-수분 특성시험을 실시하였다. 액성한계상태로 형성된 각기 다른 혼합체에 행해진 시험결과에 의하면, 공기유입값(air-entry value)은 0.5 kPa로 혼합비율에 관계없이 거의 일정한 값을 보였다. 이를 통해서 액성한계상태에서는 간극비에 관계없이 공기유입값을 결정하는 간극의 크기가 상대적으로 일정함을 보여 주었다. 또한, 액성한계상태를 비교상태로 적용하는 것에 대한 타당성을 검증하기 위하여 해당 시료를 액성한계시 간극비( $e_{LL}$ )의 임의 비율이 되게 압밀을 시키고, 흙-수분 특성시험을 실시하여 시험결과를 Campbell(1974)이 제안한 경험식(식(1))에 의해 적합하였다.

$$\left(\frac{\theta}{\theta_s}\right) = \left(\frac{\Psi_a}{\Psi}\right)^\lambda \quad (1)$$

여기서,  $\theta_s$ 는 포화시의 체적함수비,  $\Psi_a$ 는 공기유입값, 그리고  $\lambda$ 는 경험상수로서 간극크기분포지수(pore-size distribution index)라고도 한다. 이 후에 적합매개변수(fitting parameter,  $\lambda$ )를 액성한계시의 값으로 정규화하고 이를 정규화한 간극비와의 관계로 도시하였다. 그 결과, 명백한 선형관계가 성립함을 보여 주었다. 이와 같은 선형 연구결과를 통해 세립토의 흙-수분 특성곡선 예측에 액성한계를 이용한 비교상태접근법(reference state approach)의 적용이 가능함을 확인할 수 있었다.

### 2.2 흙-수분 특성곡선 경험식

기존의 연구에서 적용하였던 식(1)은 넓은 흡인력의 범위에 걸친 S 자 모양의 흙-수분 특성곡선을 제대로 묘사하지 못하였다. 따라서 본 연구에서는 문헌연구결과 시험결과를 가장 적절히 묘사할 수 있는 Fredlund and Xing(1994)의 곡선식(식(2))을 적용하여 흙-수분 특성곡선의 예측방법을 모색하였다.

$$\theta = \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[ e + \left( \frac{\Psi}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \quad (2)$$

여기서,  $\theta$ 는 체적함수비,  $\theta_s$ 는 포화시의 체적함수비,  $a$ ,  $n$ ,  $m$ 은 적합매개변수, 그리고  $\Psi$ 는 흡인력을 의미한다. 3개의 매개변수는 시험결과를 식(2)를 이용하여 적합하거나 그림 1에서 나타낸 것 같이 4개의 구성매개변수(constituent parameter,  $\Psi_i$ ,  $\Psi_p$ ,  $\theta_s$ ,  $\theta_i$ )를 사용하는 도식적인 해법으로 구할 수 있다.(Fredlund and Xing, 1994) 식(3)은 구성매개변수와 적합매개변수와의 관계식이다.

$$a = \Psi_i \quad (3a)$$

$$m = 3.67 \ln \left( \frac{\theta_s}{\theta_i} \right) \quad (3b)$$

$$n = \frac{1.31^{m+1}}{m\theta_s} 3.72s\psi_i \quad (3c)$$

$$s = \frac{\theta_i}{\psi_p - \psi_i} \quad (3d)$$

여기서,  $\psi_p$ 는 점선이 흡인력 축과 만나는 점에서의 흡인력이고,  $\psi_i$  와  $\theta_i$ 는 곡선 상의 변곡점에서의 흡인력과 체적함수비이고,  $\theta_s$ 는 포화시 체적함수비를 나타낸다.

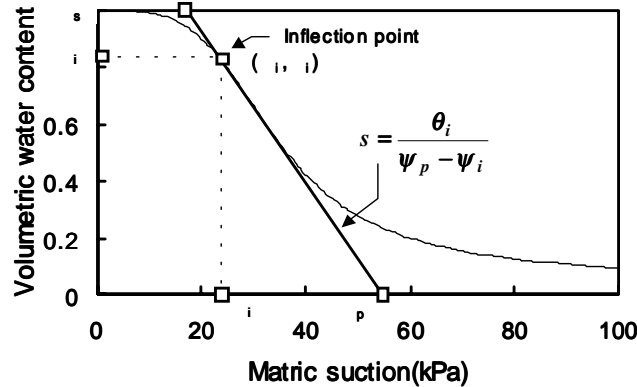


그림 1. 적합매개변수의 도식적 설명(Fredlund and Xing, 1994)

### 3. 실내 실험

본 연구에서는 3가지의 자연시료를 슬러리 상태로 만들고 액성한계상태의 간극비에 대해 임의의 비율이 되게 압밀시킨 후 흡-수분 특성시험을 실시하였다. 또한, 슬러리상태로 준비된 시료에 대한 시험이 용이하고 시험 중에 발생하는 시료의 체적감소를 측정할 수 있게끔 시험 기구를 개량하였다.

#### 3.1 시료

본 연구에서 시료로 사용한 화강풍화잔적토(Granite-weathered residual soils)는 부산의 수정동에서 채취하였으며, 체가름을 통해 직경 2 mm 이상되는 것은 제거하였다. 해당시료의 기본성질은 표 1과 같다.

표 1. 시료의 기본 물성

Soil	O.M.C (%)	$v_{d(max)}$ (kN/m <sup>3</sup> )	200번 체 통과량 (%)	Plasticity (%)			$G_s$	USCS
				LL	PL	PI		
A	17	15.79	56.0	51.5	27.0	24.5	2.70	CH
B	13	17.56	31.6	40.0	21.4	18.6	2.63	SC
C	11	18.74	17.5	27.7	23.1	4.6	2.62	SM

#### 3.2 시험장치

압력셀 추출기(pressure cell extractor)는 기존의 압력판 추출기(pressure plate extractor)를 개량한 것으로 슬

러리 상태와 같이 매우 느슨한 시료의 시험이 용이하게끔 고안되었다.(그림 2) 시료용기(specimen container)에 느슨한 상태의 시료를 채운 후에는 캡을 씌우고 천천히 하중을 가하여 일정한 부피( $\phi 50\text{mm} \times 10\text{mm}$ )가 되게 시료를 압축시키고, 나사산이 새겨진 3가지 부품(screw bar, screw locks, screw nut)을 사용하여 시험기구를 조립한다. 바닥판 상부에는 1500 kPa의 공기유입값을 가지는 HAED(high air-entry disk)를 삽입 후 가장자리를 접착제(epoxy)로 고정하여 완전 밀폐시켜서 일정한 흡인력이 형성될 수 있도록 하였으며, 디스크 하부에는 달팽이 모양의 홈(grooved water compartment)을 파서 시료내의 물을 효과적으로 배출시킬 수 있게 하였다. 조립된 압력셀 추출기는 그림 3에서 보는 바와 같이 압력실(pressure chamber)내에 거치하고 단계별로 공기압을 가하여 시험을 수행하게 된다. 따라서 시료의 압축과 불포화(unsaturation)과정이 동일한 셀에서 연속적으로 이루어짐으로서 시료의 교란을 방지하였다.

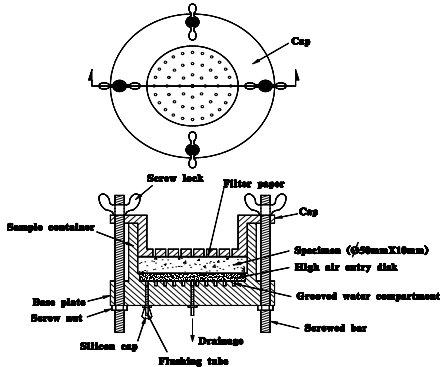


그림 2. 압력셀 추출기 모식도

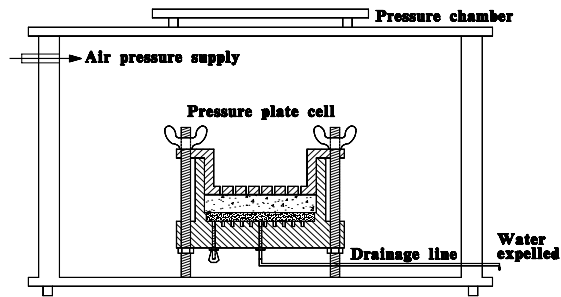


그림 3. 압력셀 거치 모식도

### 3.3 시료준비 및 시험과정

준비된 흙은 액성한계보다 큰 함수비가 되게 물과 잘 섞은 후 압축하여 액성한계 간극비( $e_{LL}$ )의 100%, 80%, 60%, 그리고 50%가 되게 형성하였다. 셀의 무게를 잰 후 압력실에 셀을 거치시키고 셀 바닥의 배수구(drainage)를 압력실 외부로 연결되는 튜브와 연결한다.(HAED 하부의 수압은 대기압과 동일한 값을 유지) 압력실을 밀폐시킨 후 입의의 공기압을 가하면, 시료 내에는 공기압과 대기압의 차이만큼 흡인력(matric suction)이 유발되고 이에 상응하는 함수비가 될 때까지 물이 배출되게 된다. 평형상태에 도달해서 물의 배출이 멈추면 시험을 종료하고 셀을 분리하여 무게를 잰다. 시험도중의 시료의 체적변화량은 일반적으로 점토의 수축실험에서 널리 사용되는 수은 대체법을 적용하여 측정하였다.

## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 건조수축이 큰 흙의 흙-수분 특성곡선

일반적으로 모래질 같은 소성이 적은 흙은 흙-수분 특성곡선을 결정시 체적변화를 고려치 않는다. 하지만 점토와 같은 소성이 큰 흙이나 슬러리형태의 흙은 건조과정중에 상당한 양의 체적변화가 발생할 뿐 아니라 간극 크기의 분포(pore-size distribution)도 변화하는 것으로 알려져 있다.(Simms and Yanful, 2002) 따라서, 보다 실질적인 흙-수분 특성곡선을 구하기 위해서는 체적변화의 영향을 고려하여야 한다.

본 연구에서 사용한 흙도 시험 중에 상당량의 체적변형이 발생하였다. 그림 4는 흡인력에 따른 중량함수비와 간극비의 변화를 비교하여 도시한 것이다. 이 그림을 보면, 초기간극비가  $e_{LL}$  인 경우가 여타의 경우에 비해 흡인력이 30 kPa 이하의 범위에서 상당한 체적감소가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 작용하는 흡인력이 마치 구속압을 증가시키는 것과 동일한 효과를 나타내고 액성한계의 높은 함수비 때문에 시료가 슬러리 같이 거동하기 때문이다. 이에 반해 선 압밀된 상대적으로 단단한 시료는 뚜렷한 체적변형을 보이지 않는다.

그림 5는 각각의 시료에 대한 흙-수분 특성곡선을 체적변화를 고려한 것과 그렇지 않은 것을 비교하여 나타낸 것이다. 체적변화를 고려한 곡선이 보다 높은 공기유입값과 완만한 모양을 보인다. 더욱이 체적변화를 고려하지 않은 곡선들은 그들 간의 간격이 넓은 반면 고려한 경우에는 상당히 간격이 줄어드는 것을 볼 수 있으며, 이러한 경향은 점토성분이 상대적으로 많은 A 시료의 경우 더욱 뚜렷하게 나타난다. 이러한 결과들은 건조수축이 큰 흙에 대한 흙-수분 특성곡선을 결정할 시에는 체적변화를 보정하는 것이 중요함을 부각시킨다.

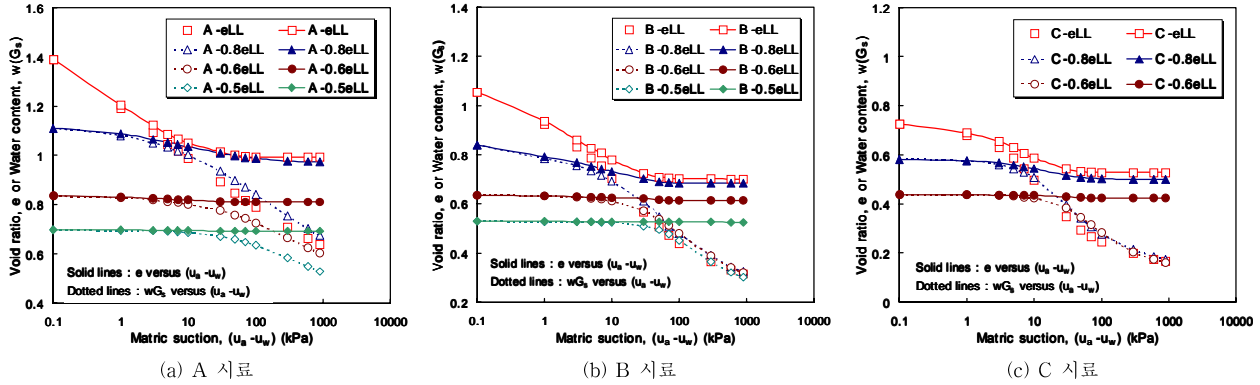


그림 4. 간극비 또는 함수비와 흡인력과의 관계

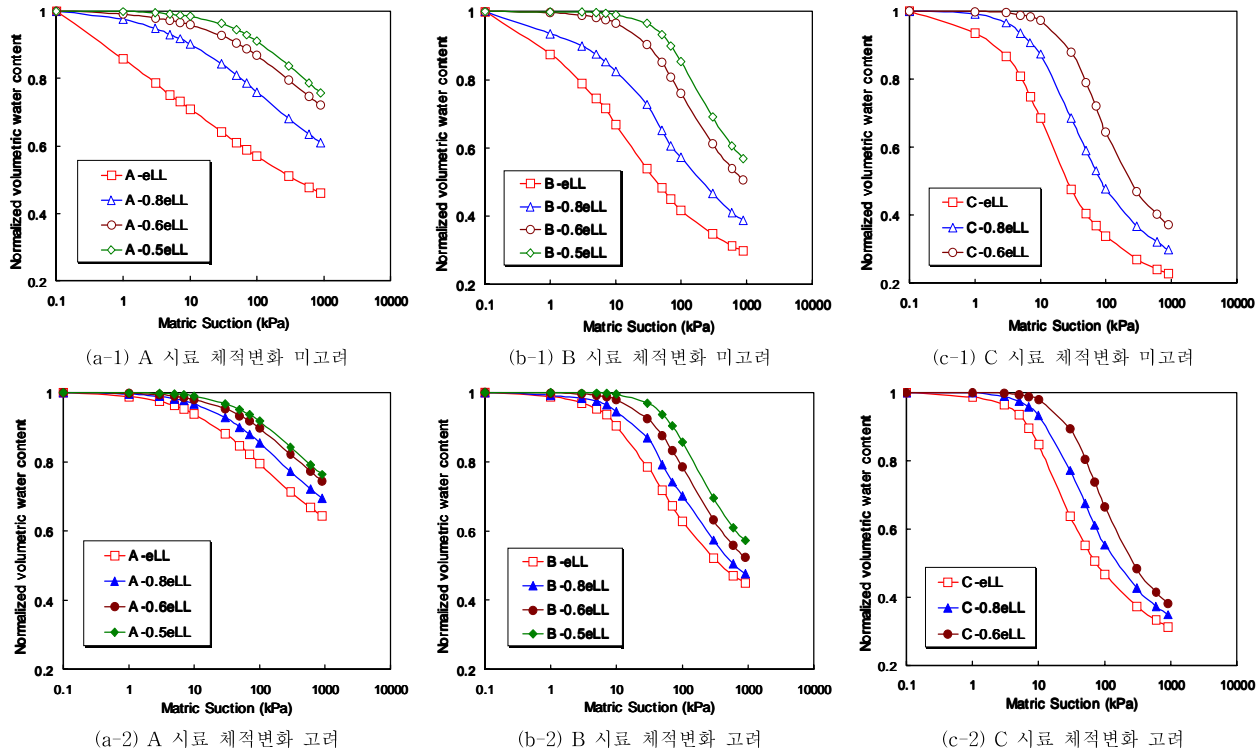


그림 5. 체적변화를 고려한 흙-수분 특성곡선 비교

## 4.2 건조수축이 큰 흙의 비교상태 접근법

액성한계상태의 값으로 정규화한 공기유입값( $\psi_a/\psi_{aLL}$ )과 역시 액성한계상태의 값으로 정규화한 간극비( $e/e_{LL}$ ) 간의 관계를 그림 6에 나타내었다. 이 그림에는 Reddi and Poduri(1997)에 의한 시험결과도 비교하였다. 이 그림을 보면, 정규화한 공기유입값과 정규화한 간극비간에는 뚜렷한 역의 선형관계가 성립하는 것을 볼 수 있다.

간극크기분포지수(pore-size distribution index,  $\lambda$ )를 결정하기 위하여 그림 5의 (a-2), (b-2), 그리고 (c-2) 상

에 표시한 시험결과들을 Campbell(1974)이 제안한 식(식(1))에 의해 적합하였다. 정규화한 지수( $\lambda/\lambda_{LL}$ )를 정규화한 간극비에 대해 그림 7에 나타내었다. 이 그림에는 Griffiths and Joshi(1989) 와 Reddi and Poduri(1997)에 의한 연구결과들도 함께 도시하였다. 낮은  $e/e_{LL}$ 에서 이전의 연구결과에 비해 본 연구의 결과가 낮은 분산정도를 보였다. 이것은 체적변화를 보정하였기 때문이다. 이 그림을 보면, 정규화된 지수와 정규화된 간극비간에는 흙의 종류에 관계없이 유일한 선형관계가 성립함을 알 수 있다.

위의 결과를 통해 자연상태의 세립잔적도에 대한 흙-수분 특성곡선 평가시 비교상태접근법의 사용이 가능함을 확인할 수 있었다. 하지만, Campbell(1974)에 의해 제안된 식은 흙-수분 특성곡선을 정확하게 묘사하지 못하기 때문에 보다 정확한 흙-수분 특성곡선의 평가를 위해서는 발전된 형태의 경험식을 필요로 한다.

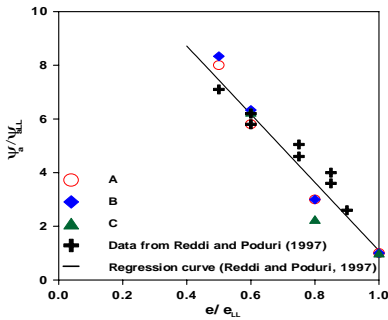


그림 6.  $\psi_d/\psi_{dLL} - e/e_{LL}$  관계

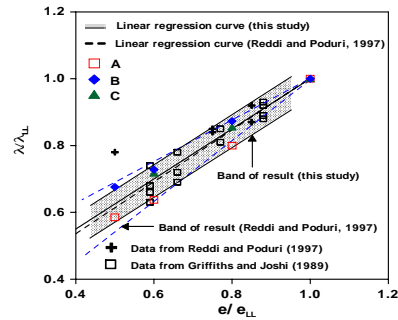


그림 7.  $\lambda/\lambda_{LL} - e/e_{LL}$  관계

### 4.3 세립토의 흙-수분 특성곡선 평가

본 연구에서는 Fredlund and Xing (1994)에 의해 제안된 식(2)가 비교상태접근법에 의한 흙-수분 특성곡선의 평가를 위해 적용되었다. 첫 번째 단계로, 시험결과를 식(2)로 적합하여 적합매개변수( $a, n, m$ )을 구한 후 이를 액성한계시의 값으로 정규화하고 정규화한 간극비와의 수식적인 관계를 정립하기 위해 다수의 회귀분석 작업을 수행하였으나 만족할 만한 결과를 얻지 못하였다. 이는 식(1)의 적합매개변수의 수가 많고 이들 값이 매우 민감하게 변화하기 때문이다. 따라서 이들과 식(3)의 관계를 가지는 구성매개변수(constituent parameter,  $\psi_i, \psi_p, \theta_s, \theta_i$ )들을 도입하게 되었다. 식(3)를 이용하여 구한 시료들 각각의 흙-수분 특성곡선의 구성매개변수들을 정리하면 표 2와 같다. 또한, 액성한계상태의 값( $\psi_{iLL}, \psi_{pLL}, \theta_{sLL}, \theta_{iLL}$ )으로 정규화한 구성매개변수와 정규화한 간극비와의 관계는 그림 8에 나타내었다. 이 그림을 보면 정규화한 구성매개변수들과 정규화한 간극비 간에는 명백한 선형관계가 성립하는 것을 알 수 있으며, 회귀곡선식은 같은 그림에 나타내었다. 따라서 액성한계상태에서의 구성매개변수( $\psi_{iLL}, \psi_{pLL}, \theta_{sLL}, \theta_{iLL}$ )를 알 수 있다면 해당 시료의 흙-수분 특성곡선의 예측이 가능하게 된다.

액성한계상태의 구성매개변수는 두 가지 방법에 의해서 구할 수 있다. 첫 번째 방법은 액성한계상태의 시료에 대해 직접적으로 흙-수분 특성시험을 수행하는 방법이고, 두 번째 방법은 액성한계상태의 구성매개변수와 흙의 특성치(soil index property)간의 경험적인 상관관계로부터 간접적으로 도출하는 방법이다. 본 연구에서는 후자의 방법을 모색해 본 결과, 그림 9에서 보는 바와 같이 200번째 통과율(P200)과  $\theta_{iLL}/\theta_{sLL}, \psi_{pLL}/\psi_{iLL}$ , 그리고  $\psi_{iLL}$  간에 상관성이 우수한 선형관계를 발견할 수 있었다.  $\theta_{sLL}$  은 해당 흙의 체적-질량(volume-mass)관계에 의해 어려움 없이 구할 수 있기 때문에 나머지 구성매개변수도 그림 9의 관계식에 의해 쉽게 구할 수 있다. 다만, 이와 같은 경험적인 접근법은 다량의 시험자료들을 그 바탕으로 하기 때문에 끊임없는 자료의 축적과 입증을 필요로 한다.

앞에서 언급한 바와 같이 액성한계상태의 구성매개변수가 일단 구해지면, 그림 8의 선형관계식으로부터 특정한 간극비를 가지는 흙의 구성매개변수를 구할 수 있다. 이어서, 식(3)에 의해 흙-수분 특성곡선의 적합매개변수들을 구하고, 마지막으로 적합매개변수와 식(2)에 의해 해당 시료의 흙-수분 특성곡선을 획득할 수 있다.

표 2. 흙-수분 특성곡선의 구성매개변수

Soil	$e/e_{LL}$	$\psi_i$ (kPa)	$\psi_p$ (kPa)	$\theta_s$ (%)	$\theta_i$ (%)
A	1.0	21.9125	363.90	58.14	52.31
	0.8	46.0754	770.88	52.58	47.59
	0.6	76.2318	1352.21	45.53	41.54
	0.5	88.7243	1583.52	41.08	37.81
B	1.0	14.7864	136.51	51.32	44.59
	0.8	27.6611	247.65	45.62	39.53
	0.6	49.0261	430.30	38.78	33.99
	0.5	58.3427	529.17	34.60	30.28
C	1.0	9.7782	62.06	42.05	35.68
	0.8	19.3711	122.85	36.73	31.23
	0.6	38.4079	231.83	30.33	25.90

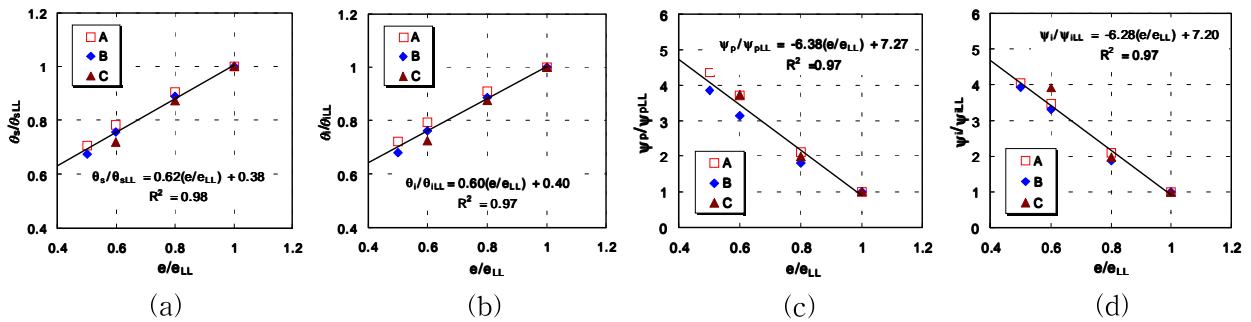


그림 8. 정규화한 구성매개변수들과 정규화한 간극비와의 관계

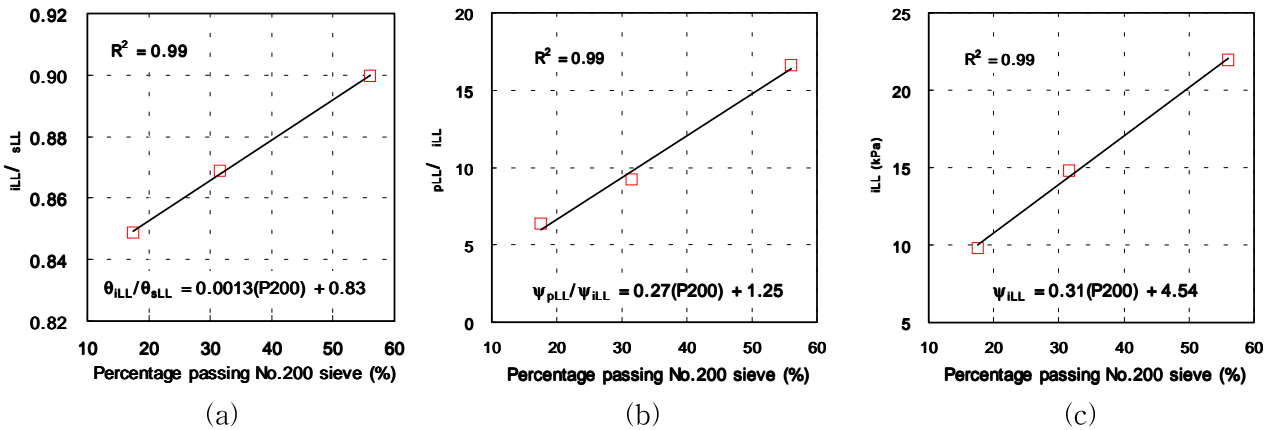


그림 9. (a)  $\theta_{iLL}/\theta_{sLL}$ , (b)  $\psi_{pLL}/\psi_{iLL}$ , (c)  $\psi_{iLL}$  과 P200와의 관계

## 5. 결론

본 연구의 내용을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 개량된 압력셀 추출기를 통해서 건조수축이 큰 흙의 흙-수분 특성곡선을 구하였다. 시료압축과 불포화시험과정이 하나의 셀속에서 연속적으로 이루어지기 때문에 시료의 교란을 없앨 수 있었고 시험 중의 시료의 체적 변화도 직접적으로 측정할 수 있었다. 본 연구에서 사용한 잔적토는 흡인력에 의해 상당한 체적감소가 발생

하였고 이를 보정한 흡-수분 특성곡선이 그렇지 아니한 곡선에 비해 높은 공기유입값과 가지고 기울기가 완만해지며, 초기간극비가 다른 여타곡선간의 간격이 줄어들고 상관성이 좋아지는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 건조수축이 큰 흡의 흡-수분 특성곡선을 구할 때에는 체적변화를 보정해 주는 것이 중요함을 단적으로 보여준다.

- 2) 모래, 실트, 점토의 구성비율이 각기 다른 세립잔적토의 액성한계상태에서의 공기유입값은 문헌(Reddi and Poduri, 1997)에 나타난 점토광물-모래 혼합체의 것과 매우 유사하게 평가되었다. 이는 액성한계상태에서는 각각의 미세구조는 다르다 하더라도 공기유입값을 결정하는 간극의 크기는 거의 일정하다는 것을 증명하는 것으로 액성한계상태에서는 세립토들 간의 물 보유특성이 매우 유사함을 입증하는 것이다.
- 3) 본 연구의 시험결과에 의하며, 액성한계상태의 값으로 정규화한 간극크기분포지수( $\lambda/\lambda_{LL}$ )와 간극비( $e/e_{LL}$ ) 간에는 흡의 종류(인위적인 혼합체와 자연 상태의 흡)에 관계없이 선형적인 관계가 성립됨을 볼 수 있었다. 이를 통해서, 세립토의 경우에는 액성한계를 비교상태로 하여 다른 간극비에서의 흡-수분 특성곡선의 예측하는 비교상태접근법의 타당성이 입증되었다.
- 4) 본 연구에서는 비교상태접근법을 적용시 보다 정확한 흡-수분 특성곡선의 예측을 위해 기존의 경험식(Campbell, 1974)보다 곡선을 보다 적절히 묘사할 수 있는 Fredlund and Xing (1994)의 경험식을 사용하였으며, 이 경험식의 적합매개변수( $a, n, m$ )들과 수식적인 관계가 있는 구성매개변수(constituent parameter,  $\psi_i, \psi_p, \theta, \theta_i$ )들을 도입하였다. 연구결과, 액성한계상태의 값( $\psi_{iLL}, \psi_{pLL}, \theta_{sLL}, \theta_{iLL}$ )으로 정규화한 구성매개변수들과 정규화한 간극비 간에 우수한 선형관계가 성립하는 것을 발견할 수 있었고, 마지막으로 액성한계를 비교상태로 하여 일반화된 흡-수분 특성곡선을 예측할 수 있는 경험적인 방법을 제안하였다.

## 6. 감사의 글

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

## 7. 참고 문헌

1. Brooks, R.H., and Corey, A.T. (1964). "Hydraulic properties of porous medium." *Hydrology paper No. 3*, Civil Engrg. Dept., Colorado State Univ., Fort Collins, p. 24.
2. Campbell, G. S. (1974). "A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data." *Soil Science*, Vol. 117, pp. 311~314.
3. Fredlund D.G. and Xing, A. (1994), "Equations for the soil-water characteristic curve", *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 31, pp. 521~532.
4. Griffiths, F.J., and Joshi, R.C. (1989). "Change in pore size distribution due to consolidation of clays" *Gotechnique*, Vol. 43, No. 2, pp. 333~336.
5. McKee, C.R., and Bumb, A.C. (1987). "Flow-testing coalbed methane production wells in presence of water and gas." *SPE Formation Evaluation*, (Dec.), 599~608
6. Nagaraj, T.S., Pandian, N.S., and Narasimharaju, P.S.R. (1991). "An approach for prediction of compressibility and permeability behavior of sand-bentonite mixtures." *Indian geotechnical Journal*, Vol. 21, No. 3, pp. 271~281.
7. Nagaraj, T.S., Pandian, N.S., and Narasimharaju, P.S.R. (1994a). "Stress state-permeability relations for overconsolidated clays." *Gotechnique*, Vol. 44, No. 2, pp. 349~352.
8. Reddi, L.N., and Poduri, R. (1997). "Use of liquid limit state to generalize water retention properties of fine-grained soils." *Gotechnique*, Vol. 47, No. 5, pp. 1043~1049.
9. Simms, P.H., and Yanful, E.K. (2002). "Prediction soil-water characteristic curves of compacted plastic soils from measured pore-size distributions." *Gotechnique*, Vol. 52, No. 4, pp. 269~278.