

# 주문진 표준사의 불포화 침투특성 측정에 관한 실험적 연구

## An Experimental Study of Measuring Unsaturated Hydraulic Parameters on Joomoonjin Sand

정두영\* · 송경수\*\*

Jeong, Doo Young · Song, Kyung Soo

### Abstract

In order to study hydraulic properties and mechanical properties on unsaturated region, soil-water retention curve was obtained for suction plate method and pressure plate method, respectively. To investigate permeability of unsaturated soil and soil-water retention curve at the same time, unsaturated permeability tests using an improved Richard's method were performed on Joomoonjin Sand. These experimental results were compared with those by empirical equations. The relationship between air entry value and saturated permeability of filter was obtained for selecting a proper filter in unsaturated soil tests.

### 요 지

불포화 영역에서의 침투현상이나 역학적 특성을 파악하기 위해서는 불포화투수계수와 함수특성곡선의 측정이 필요하다. 주문진 표준사를 대상으로 pF시험의 흡인법(수두법)과 가압판법을 이용해 함수특성곡선을 구하고 Richard형 불포화투수시험 장치를 개선한 장치에서 glass필터 P<sub>3</sub>와 P<sub>4</sub>를 이용하여 불포화투수계수와 함수특성곡선을 구하였다. 또한 대표적인 추정식을 사용하여 표준사에 대한 불포화투수계수와 함수특성곡선을 유도하고 각각의 실험치와 비교 검토하였다. 불포화시험 계측에 없어서는 안될 필터의 선택기준을 제시하고자 필터의 공기침입압(AEV)과 포화투수계수를 측정하여 양자 사이의 상관성을 나타내었다.

### 1. 서 론

집중호우로 인한 사면붕괴나 수위 상승으로 인한 제체의 파괴현상 등이 자주 발생하면서 불포화토의 역학적 특성과 포화·불포화 영역을 대상으로한 침투해석 등에 관심이 높아지고 있다. 불포화 영역의 물의 흐름을 지배하는 요소로는 불포화토의 침투특

성인 불포화투수계수와 負의 간극수압이 있으며 이들은 통상 함수율에 따라 변화한다.

이러한 불포화영역에서의 침투현상이나 역학적 특성을 보다 정확히 파악하기 위해서는 불포화투수계수와 負의 간극수압의 측정이 필연적이다. 負의 간극수압은 통상 체적함수율과의 관계로 나타내며 이 관계곡선을 함수특성곡線(soil-water retention curve)이라고 한다. 함수특성곡선을 측정하는 방법에 있어서는 많은 진전을 보여 여러 분야에서 이

\* 정희원 · 전북대학교 공과대학 토목공학과 교수  
\*\* 정희원 · 전북대학교 대학원 토목공학과 박사과정

용되고 있다. 불포화투수계수를 측정하는 방법에 대해서도 Richrd(1931)의 불포화투수 시험 이후 Gardner(1958),<sup>(1)</sup> Brooks & Corey(1966),<sup>(2)</sup> Mualem(1978)<sup>(3,4)</sup> 등 많은 학자들의 노력으로 큰 진전을 보여 왔지만 여전히 그 측정방법이 복잡하고 보급에 어려움이 있어 이론적 해석이나 경험적으로 추정하는 간접적인 방법에 의존하는 실정이며 불포화투수계수와 함수특성곡선은 각각의 시험에서 따로 구하는 경우가 대부분이다.

본 연구에서는 주문진 표준사에 대한 불포화투수계수와 함수특성곡선의 실험적 측정방법에 대한 연구의 일환으로 불포화시료의 시험계측에 없어서는 안될 필터의 공기침입압(AEV: air entry value)을 측정하여 필터의 선택기준의 하나를 제시하며 pF 시험방법의 흡인법(suction plate method)과 가압판법(pressure plate method)을 이용해 함수특성곡선을 구하고 Richard형 불포화투수시험 장치를 개선한 장치에서 불포화투수계수와 suction을 동시에 구하여 각각의 추정식과 비교검토하였다.

## 2. 불포화토의 기본적 개념

토중수의 침투특성을 지배하는 기본 방정식으로는 Darcy의 법칙을 불포화 영역까지 확대한 운동방정식과 연속방정식을 종합한 Richard 방정식이 이용된다.

$$\frac{\partial}{\partial X_i} \left[ k_{ij}(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial X_j} + k_{ij}(\psi) \delta_{ij} \right] = C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (2.1)$$

여기서  $k_{ij}$  : 불포화투수계수의 텐서

$C(\psi)$  : 비수분용량( $\partial\theta/\partial\psi$ )

이 식에서 주어진 경계조건과 초기조건에 대한 압력수두의 변화를 구하기 위해서는 불포화투수계수  $k(\psi)$ 와 비수분용량  $C(\psi)$ 의 값을 알아야 한다.

### 2.1 불포화토의 함수특성곡선

식 (2.1)의 비수분용량  $C(\psi)$ 는 그 정의에서  $C = \partial\theta/\partial\psi$ , 즉 체적함수율( $\theta = V_w/V$ )과 負의 압력수두( $\psi$ )와의 관계인 함수특성곡선의 경사에서 구하는 값이다. 이 함수특성곡선은 그림 2.1에서 보는 바와 같이 배수과정과 흡수과정 사이에 履歷現象(hyste-

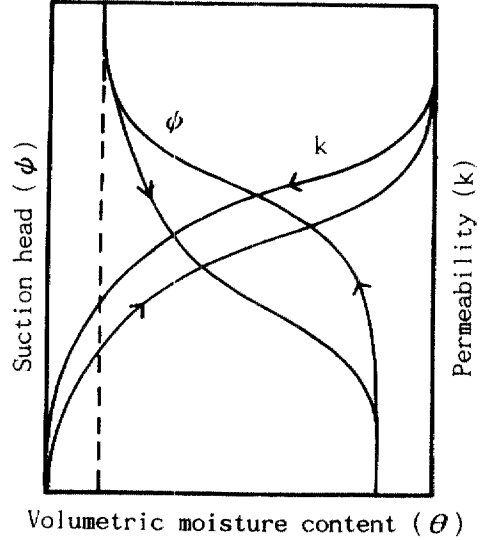


그림 2.1 Hydraulic properties of unsaturated soil

resis)이 나타나고 특별한 단서가 없는 한 배수과정 시험을 대상으로 한다.<sup>(5)</sup>

본 연구에서도 배수과정으로 시험하였다.

함수특성곡선 측정법은 suction 시험법 또는 pF 시험법 등으로 불려지기도 한다. 여기서 suction( $\psi$ )이란 통상 모관현상에 의한 matric suction을 말하는 것으로 간극공기압( $U_a$ )과 간극수압( $U_w$ )의 차( $U_a - U_w$ )로 표시된다. 간극공기압이 0이라고 생각하면 suction은 負의 간극수압의 크기를 표시하는 것이 되며 통상 압력(Kg/cm<sup>2</sup>) 또는 압력수두(U/r<sub>w</sub>, cmH<sub>2</sub>O)의 단위로 표시된다. Schofield(1935)는 suction의 산술적 표기가 불편하다하여 압력수두(cmH<sub>2</sub>O)로 측정된 suction head( $\psi$ )의 대수형태를 취해  $pF = \log\psi$ 로 표시하는 것을 제안하여 널리 이용되고 있다. 여기서 p는 대수를 의미하며 F는 간극수의 자유에너지를 뜻한다. 따라서 suction시험법은 pF시험법이라고 불려진다(이하 pF시험법). suction을 직접측정하는 방법으로는 실내시험과 원위치시험으로 구별되며 대표적인 시험법과 측정범위를 소개하면 표 1과 같다.<sup>(5)</sup>

표에서와 같이 각 시험법에는 측정한계가 있으며 pF 모든 범위를 측정할 수 있는 시험법은 아직 개발되어 있지 않다. 따라서 시료가 지닌 suction의 범위에 따라 시험법을 선택해야 한다.

표 1. pF시험법과 측정범위

분류	시험법	측정범위(pF)
실 직	흡인법(수두법)	0-2.2
	흡인법(감압법)	0-2.5
내 접	가압판법	2.0-4.2
	가압막법	2.0-4.2
시 법	원심력법	2.0-4.2
	간접법	
원위치시험	증기압법	4.5-6.5
	Cyclometer법	3.5-6.2
원위치시험	Tensiometer법	0-3
	Cyclometer법	3.5-6.2

2.2 불포화도의 투수계수

불포화영역의 물의 흐름에 있어 흙의 특성을 나타내는 중요한 인자로는 불포화투수계수가 있다. 이는 유속이 동수경사에 비례한다고 하는 Darcy법칙을 불포화영역까지 확대하여 정의하는 것으로 연직1차원 흐름에 있어서 다음 식으로 표시된다.

$$V_z = -k \left( \frac{\partial h_0}{\partial Z} + 1 \right) \quad (2.2)$$

여기서 확대되어 정의된다는 의미는 식 (2.2)의  $h(=U/r_w)$ 가 負의 값을 취해도 성립한다는 의미이다. 불포화투수계수는 포화영역에서와는 다르게, 흙의 함수율과 밀접한 관계가 있으므로 체적함수율 ( $\theta$ )과의 관계로 표시되며 체적함수율과 suction의 관계를 도입해 suction head( $\psi$ )의 함수로도 사용된다.

Buckingham(1907) 이후 많은 학자들이 불포화영역에서의 투수계수를 실내시험, 원위치시험 및 경험적 추정법 등으로 구하기 위해 많은 노력을 기울여 왔다.<sup>(8,9)</sup> 그 결과 실내에서 측정하는 방법으로는 크게 定常流 상태에서 측정하는 방법(定常法)과 非定常流 상태에서 측정하는 방법(非定常法)으로 구별되어 몇가지 방법들이 제안되어 있다. 그러나 이러한 불포화투수시험법은 구체적인 시험방법이 확립되어 있지 않을 뿐만 아니라 시험장치가 고가이고 시간과 노력이 많이 필요한 시험으로서 정확한 측정치를 얻는 것이 쉽지 않아 간접적인 추정법에 의존하는 경우가 많다.

3. 재료 및 시험 방법

3.1 재료

3.1.1 시료의 물리화학적 성질

본 연구에 사용된 시료는 주문진표준사(이하 표준사)로 노건조한 것을 사용하였으며 표준사의 입도분포도는 그림 3.1과 같고 물리화학적 성질은 표 2와 같다.

또한 표준사의 광물조성을 X선 회절에 의해 분석한 결과 그림 3.2와 같고 분석결과 1차광물은 석영(3.34 Å), 운모(흑운모 10.1 Å, 백운모 3.20 Å), 장석(정장석 3.24 Å) 등이며 2차광물은 kaolinite(4.26 Å), chlorite(16.06 Å) 등의 조성이다.

3.1.2 필터의 제원

본 시험에 사용한 필터는 glass 필터와 ceramic 필터로 그 제원은 표 3과 같다.

3.2 시험 장치 및 시험 방법

3.2.1 필터의 AEV(공기침입압) 시험

불포화도의 투수시험과 pF시험에 이용되는 필터는 부압의 측정을 위해 습윤상태에서 물은 통과하고 공기는 통과하지 않는 不透氣性의 성질을 만족해야 하며 사용목적에 알맞은 선택이 필요하다. 필터의

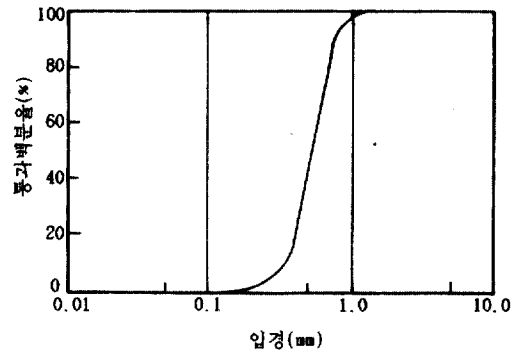


그림 3.1 Grain size distribution curve

표 2. 표준사의 물리화학적 성질

시료	비중 (Gs)	건조단위 중량 $\gamma_d(g/cm^3)$	간극비 e	포화투수 계수 $k_s(cm/sec)$	pH	유기물 함유율
표준사	2.62	1.644	0.594	$1.459 \times 10^{-3}$	6.08	0(%)

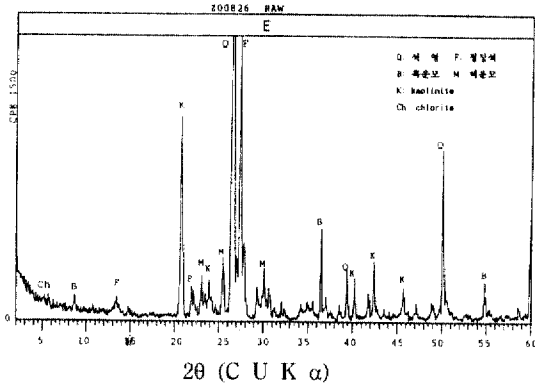


그림 3.2 X-ray diffraction analysis of Joomoonjin sand

표 3. 필터의 제원

종류	성질	간극 경 (μm)	두께 (mm)	직경 (mm)	비고
Glass 필터	p <sub>31</sub>	16~40	4.8	60	독일 Witeg사
	p <sub>32</sub>	16~40	4.7	60	
	p <sub>41</sub>	10~16	4.1	60	
	p <sub>42</sub>	10~16	4.1	60	
	p <sub>51</sub>	1.0~1.6	4.6	60	
Ceramic 필터	CP-2	1~10	5.5	60	일본化學 陶業社
	F	0.1~1	4.5	60	

선택은 필터의 AEV와 투수성에 의해 결정된다. 여기서 AEV란 불투기성의 필터에 작용하는 공기압이 어느 한계를 초과하여 투기성이 발생할 때의 압력을 통상 말한다.

AEV의 측정원리는 그림 3.3과 같고 그 模式圖는 그림 3.4와 같다.

그림 3.3에서와 같이 모관포화된 필터 위에 물을 채우고 공기압을 작용시키면 필터의 판상에 작용하는 공기압은 초기상태의 표면수량을 배출시키지만 표면수량이 배출되고 나면 필터內的 간극에 있는 물의 表面張力 때문에 어느 압력까지는 공기가 간극을 통과하지 못한다. 그림 3.4의 模式圖에서와 같이 초기의 표면수량은 필터를 통해 배출되지만(1단계), 그 후에는 공기압이 증가하여도 물은 배출되지

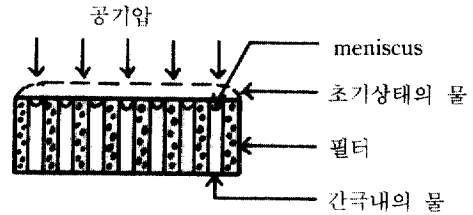


그림 3.3 Mechanism of measuring AEV of filters

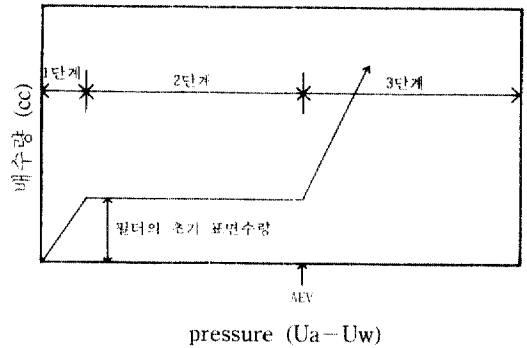


그림 3.4 Schematic diagram of measuring AEV of filters

않는다(2단계), 그러나 공기압이 어느 한계를 초과하면 간극수가 배출되면서 공기는 필터를 통과하게 되는데(3단계), 이 때의 압력을 AEV라 한다.

본 연구의 시험장치는 그림 3.5와 같이 내경 6cm, 외경 7.5cm인 아크릴 관과 뚜껑, 뷰렛, compressor, regulator, 압력 gauge 등을 이용하였다.

### 3.2.2 pF시험

표준사의 함수특성곡선( $\theta-\psi$ 관계)을 구하기 위하여 본 연구에서는 JSF T 151-1990의 흙의 pF시험 방법에 준해 측정범위가 비교적 넓고 표준사의 suction 범위에도 알맞다고 생각된 가압판법과 포화도가 높은 영역에서의 suction 측정에 주로 이용되는 흡인법(수두법)을 사용하였다(이하 흡인법). 두 시험법 모두 배수과정의 시험이며 사용된 필터는 AEV 측정결과 표준사의 suction 범위를 충분히 포함하는 ceramic 필터 CP-2(AEV=0.502 kg/cm<sup>2</sup>)를 이용하였다. 공시체는 노건조하여 1층으로 다진 후 사용하였으며 직경 6cm, 높이 2cm, 건조단위중량 1.644 g/cm<sup>3</sup>이다.

흡인법은 필터와 공시체를 모관포화시키고 Ua=0

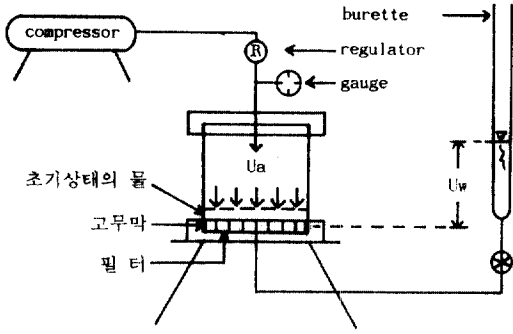


그림 3.5 Measuring apparatus for AEV of filters

(대기압),  $U_w < 0$  즉, 소정의 suction head가 되도록 공시체 중앙보다 배출구의 높이를 낮게 하여 배수시킨 뒤 수분평행에 달해 배수가 정지할 때의 체적함수율과 suction head를 여러단계에서 측정해 함수특성곡선을 구한다. 가압판법은 공시체 상단에 공기압( $U_a$ )을 가하고 배수가 정지할 때의 체적함수율과 간극수압( $U_w$ )에서 suction head( $(U_a - U_w) / \gamma_w$ )를 구해 함수특성곡선을 구한다. 흡인법과 가압판법의 시험과정에 대해선 지면관계상 생략하기로 한다.

### 3.2.3 불포화 투수시험

#### 1) 시험장치

본 시험장치는 定常法의 하나인 Richard형의 불포화투수시험 장치를 개선한 것으로 그 개요도와 몰드의 상세도는 그림 3.6과 같다.

이 시험장치는 크게 가압실, 압력조절부분, 유량 및 수두측정부분의 3부분으로 되어 있다. 압력조절부분은 공기압을 내보내는 compressor, 압력을 조절하기 위한 regulator, 압력을 계측하기 위한 브루튼관식 gauge로 되어 있다. compressor에서 나온 공기는 regulator를 통해 가압실의 측방공기압  $U_a$ 로 가해진다. 가압실은 직경 20 cm, 높이 30 cm, 두께 1 cm의 아크릴판과 상하뚜껑으로 이루어져 있으며 유량측정의 급·배수 뷰렛은 0.1(m<sup>3</sup>)단위로 눈금이 새겨진 50 ml 계측용 뷰렛을 사용했고 수두차는 뒷판에 부착된 자를 사용하여 읽는다. 시료의 몰드는 외경 7.5 cm, 내경 6 cm, 높이 5 cm인 아크릴 관을 이용하였으며 그림 3.6의 평면도에 표시한 것처럼 원주방향으로 12개의 구멍을, 단면도의 표시처럼 상하 1 cm 간격으로 3단의 구멍을 뚫어 총 36개의

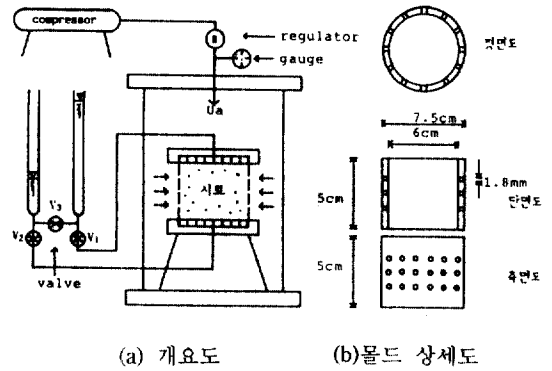


그림 3.6 Unsaturated permeability test apparatus

작은 구멍이 뚫어져 있다. 작은 구멍의 직경은 1.8 mm 정도이고 이는 시료 내부와 가압실과의 공기의 연속을 유지하고 시료에 공기압을 가할 수 있도록 되어 있는 것이다.

#### 2) 시험 방법

본 불포화 투수시험은 배수과정의 시험으로 시험 방법은 다음과 같다.

(1) 공시체 제작전 시료가 포화될 때 물이 측면으로 흘러나오지 않도록 몰드 측면에 비닐 tape을 붙인다.

(2) 고무막을 씌운 필터를 몰드의 하단에 놓고 그 위에 시료를 3층으로 균등하게 다짐하여 공시체를 조심스럽게 제작하고 상단필터도 고무막을 씌워 공시체 상단에 끼운다(시료의 건조단위중량 1.644 g/cm<sup>3</sup>). 필터와 시료 사이엔 필터의 구멍이 막히지 않게 하고 투수성에 영향을 끼치지 않을 얇은 종이타울을 한장 끼운다. 공시체 상하단의 누수를 방지하기 위해 상하단의 뚜껑에 고무판을 끼우고 공시체와 필터를 밀착시켜 기포가 남지 않도록 주의하여 뚜껑을 조인다.

(3) 공시체 하단에 압력수두를 걸어 필터와 공시체가 완전 포화되고 상단으로 물이 배출되어 상하단의 수위가 같아질 때까지 충분히 방치한다(밸브  $V_3$ 는 잠긴 상태).

(4) 공시체를 충분히 모관포화시킨 후 상하단의 밸브  $V_1$ ,  $V_2$ 를 잠그고 몰드 측면의 비닐 tape을 떼어낸 후 가압실에 넣고 가압실의 상하판을 조인다. 이때도 공기의 누출을 방지하기 위하여 상하판에 고무판을 끼워 조인다.

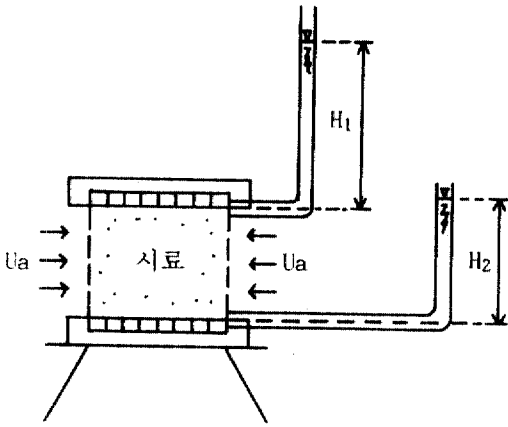


그림 3.7 Hydraulic head in upper and lower part of specimen

(5) 시료실 내에 측정하려고 하는 suction과 같은 크기의 측압  $U_a$ 를 가하고 밸브  $V_1, V_2$ 를 연다. 이때 그림 3.7과 같이 시료의 압력수두를 표시한다면 시료상단의 suction head,  $\psi_1$ 과 하단의 suction head,  $\psi_2$ 는 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \psi_1 &= U_a - H_1 \\ \psi_2 &= U_a - H_2 \end{aligned} \quad (3.1)$$

여기서  $U_a$  및  $H_1, H_2$ 의 모든 단위는 cm수두로 사용하였으며 시료의 suction은 상하단의 평균치 즉, 시료중앙에서의 suction을 이용하였다.

(6) 공시체가 수분평행에 달해 상하단에 배수가 멈추고 시료의 포화도와 suction이 평형상태를 이룰 때 밸브  $V_1, V_2$ 를 잠그고  $V_3$ 를 열어 뷰렛의 수위를 소정의 수두차로 조정후 밸브  $V_3$ 를 다시 잠근다.

(7) 밸브  $V_1, V_2$ 를 열어 투수를 시작한다.

(8) 급수량, 배수량, 수위의 읽음을 일정 시간마다 측정해 시료내 물의 흐름이 정상상태가 될 때까지 투수시험을 계속하고 급·배수량으로 시료의 함수량을 측정한다.

(9) 투수시험이 끝나고 급·배수 뷰렛의 수위가 같아질 때를 기다려 다음 단계의 suction이 되는 공기압  $U_a$ 를 가해 6-8의 조작을 반복한다.

(10) 최종 단계의 투수시험이 종료된 후 가압실과 물드를 해체하여 시료의 함수비를 측정한다.

(11) 최종단계의 함수비와 각 단계에서의 급·배수량, 수위읽음, 측정시간 등을 이용해 함수비, 체

적함수율( $\theta$ ), 불포화 투수계수, suction head( $\psi$ ) 등을 구한다.

본 시험에서는 t시간중의 수두차 h를 투수전 급·배수 側の 수위  $H_1, H_2$ 와 투수 후의 수위  $H_1', H_2'$ 를 이용하여 다음과 같이 표시했다.

$$h = \frac{(H_1 - H_2) + (H_1' - H_2')}{2} \quad (3.2)$$

즉, 투수 전의 수두차와 투수 후 수두차의 평균을 t시간중의 수두차로 정의한 것으로 준정수위형 투수시험법이라 할 수 있다. 이러한 식을 이용함으로써 t시간중의 수위변동에 의한 투수계수의 추정오차를 방지할 수 있다. 또 t시간중의 급수량과 배수량이 같아질 때 물의 흐름은 정상상태로 되었다고 생각해 이때의 유량과 동수경사에서 불포화투수계수를 계산한다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 필터의 AEV 특성

본 연구에서는 표준사의 pF시험과 불포화투수시험의 측정 범위에 알맞은 필터를 선택하기 위해 그림 3.5의 장치를 이용하여 필터의 AEV를 측정하였으며 정수위투수시험법을 이용해 필터의 포화투수계수를 측정하였다. 이 측정에 이용된 필터는 glass 필터  $P_3, P_4, P_5$ 의 3종 각각 2개씩과 ceramic 필터 CP-2형, F형 각각 1개씩으로 모두 5종 8개이며 AEV와 포화투수계수의 측정결과는 그림 4.1 및 표 4와 같다.

그림 4.1에서와 같이 필터의 AEV는 공기압의 증가에 따라 그림 3.4의 모식도와 같은 1, 2, 3단계의 변화가 나타남을 알 수 있으며 glass 필터  $P_{31}, P_{32}, P_{41}, P_{42}, P_{51}, P_{52}$ 의 경우 2단계 구간이 비교적 짧았으나 ceramic 필터 CP-2, F형의 경우 길게 나타나 간극경(pore size)이 작은 필터일 수록 AEV는 커지는 결과를 보였다. 또한 glass 필터의 경우 간극경의 범위가 같은 필터에서도 큰 차이는 없으나 AEV가 일치하지 않았다. 이는 AEV 측정시 공기압을 최초로 견디지 못하는 부분은 최대 간극경을 갖는 부분이고 그 최대 간극경은 여러개가 존재한다고 생각할 수 없다. 그러므로 AEV 상태에서는 하나의 최대 간극에 공기가 침투하게 되는 것으로 볼 수

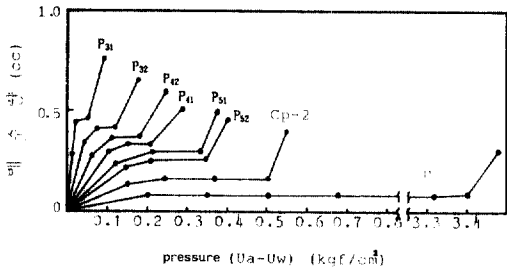


그림 4.1 Results of measurement in AEV of filters

표 4. 필터의 AEV와 포화투수계수 측정결과

종류	성질	간극 경 ( $\mu\text{m}$ )	AEV ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	포화투수계수 $k_s(\text{cm}/\text{sec})$
Glass 필터	P31	16~40	0.051	$6.723 \times 10^{-4}$
	P32	16~40	0.121	$3.227 \times 10^{-4}$
	P41	10~16	0.209	$1.475 \times 10^{-4}$
	P42	10~16	0.183	$1.352 \times 10^{-4}$
	P51	1.0~1.6	0.335	$3.95 \times 10^{-5}$
	P52	1.0~1.6	0.349	$6.86 \times 10^{-5}$
Ceramic 필터	CP-2	1~10	0.502	$4.843 \times 10^{-6}$
	F	0.1~1	3.4	$6.89 \times 10^{-7}$

있으며 따라서 같은 범위의 간극경을 갖는 필터에서도 최대 간극경이 일정하지 않아 AEV가 일치하지 않는 것이라 생각된다.

필터의 간극경은 투수성과 밀접한 관계가 있으므로 필터의 포화투수계수와 측정된 AEV 관계를 나타내면 그림 4.2와 같다.

그림에서와 같이 AEV가 클수록 투수계수가 작아지는 경향을 나타내고 있으며 ceramic 필터 F형의 결과를 제외하면 AEV가 약  $0.5(\text{kg}/\text{cm}^2)$  이하에서  $\log k_s = -4.3344 \text{ AEV} - 2.951 (r = -0.83)$  정도의 관계를 나타냈다. 그러나 앞에서도 언급한 바와 같이 AEV상태는 한개의 최대 간극에 공기가 침투하게 될 때인 반면에 투수계수는 간극 전체에서 통과되는 것이므로 필터가 비교적 균등한 간극경을 갖는다고 했을 때의 투수계수와 AEV의 상관성을 나타내는 것이라 하겠다. 따라서 필터의 투수계수를 이용해 AEV를 추정하려 할 때는 이러한 점을 주의해야 할 것으로 생각된다.

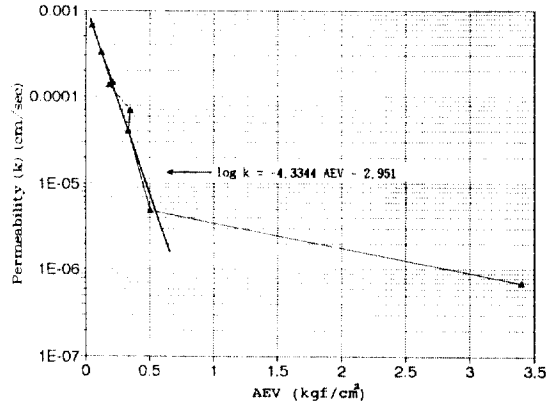


그림 4.2 Relationship between AEV and saturated permeability coefficient of filters

불투기성의 필터에 측정하려고 하는 suction이 필터의 AEV를 초과하면 측정되는 간극수압은 차츰 간극공기압에 접근하게 된다. 따라서 넓은 범위의 suction을 측정하기 위해서는 보다 작은 간극경을 갖는 즉, AEV가 큰 필터를 선택해야 함은 당연하다. 그러나 필터의 투수성 또한 간극경에 좌우됨으로 AEV가 큰 필터는 일반적으로 투수성이 낮아 시험 시간이 오래 걸리며 투수시험의 정도를 악화시킨다. 그리고 사질토와 모래의 suction은 대체로 낮은 범위이므로 그 범위에 알맞은 필터의 선택이 필요하다 하겠다. 河野, 阿部 등도 사질토에 대하여 필터의 AEV를 고려한 suction의 측정에 대하여 앞서 언급한 사항을 지적한 바 있다.<sup>(10,11)</sup>

## 4.2 표준사의 함수특성

### 4.2.1 pF 특성

함수특성곡선을 구하기 위한 흡인법(suction plate method)과 가압판법(pressure plate method)의 pF 시험 결과는 그림 4.3과 같다. 그림에서와 같이 체적함수율의 증가와 더불어 suction head가 감소하는 경향을 보였으며 포화도가 급변하는 중포화도 영역에선 미소한 suction head의 증가에도 체적함수율의 변화가 크게 나타나 이 영역에서의 수분상태는 불안정함을 나타냈다. 두 시험법은 중포화도 부근에서 서로 일치된 결과를 나타내지만 고포화도와 저포화도 영역에서는 약간의 차이를 보이고 있다. 이 차이는 다음의 함수특성곡선 추정식의 결과와 함께

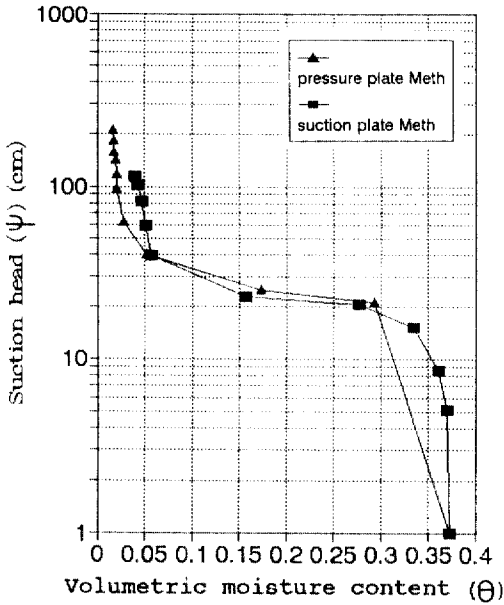


그림 4.3 Soil-water retention curve by suction and pressure plate method

고찰하기로 한다.

#### 4.2.2 함수특성곡선 추정식의 정수결정

함수특성곡선을 정량적으로 표현하기 위한 꾸준한 연구가 진행되어 여러가지 추정식이 제안되어 왔다. 본 연구에서는 Brooks & Corey와 Van Genuchten이 제안한 추정식을 이용하여 표준사에 대한 추정식의 정수를 결정하고 함수특성곡선을 유도하여 pF시험결과와 비교해 본다.

##### 1) Brooks & Corey 추정식

Brooks & Corey는 함수특성곡선의 많은 실험자료들로부터 유효포화도( $S_e$ )와 suction head( $\psi$ ) 사이에 다음과 같은 식이 성립함을 제안하였다.

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left( \frac{\psi_{cr}}{\psi} \right)^\lambda \quad (\text{단, } \psi > \psi_{cr}) \quad (4.1)$$

여기서

$S_e$  = 유효포화도(effective saturation)

$\theta$  = 체적 함수율

(volumetric moisture content,  $V_w/V$ )

$\theta_s$  = 포화 체적함수율

(saturated volumetric moisture content)

$\theta_r$  = 잔류 체적함수율

(residual volumetric moisture content)

$\psi_{cr}$  = 한계모관수두(critical capillary head)(cm)

$\psi$  = suction head(cm)

$\lambda$  = parameter

포화체적함수율( $\theta_s$ )은 흡시료가 포화될 때의 체적함수율로 간극율( $n = V_v/V \times 100$ )과 같은 값을 나타낸다.

본 연구에선  $\theta_s = \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \cdot \frac{e S_r}{G_s}$  에서  $S_r = 1$ 을 이용하여 구하였다.

잔류체적함수율( $\theta_r$ )은 suction의 증대에 따라 접근해 가는 최소체적함수율로 Bresler는 기건상태에서의 체적함수율이라 규정하였고<sup>(12)</sup> Brooks 등은 함수특성곡선에서  $\theta_r$ 을 가정해  $\log S_e - \log \psi$  관계를 그려서 그 직선성을 조사하고 시행오차를 통해  $\theta_r$ 을 구하는 방법을 제안하였다.<sup>(2)</sup> 또한 河西 등은 실험을 통하여 glass bead의 경우  $\theta_r = -0.0027 D_{50}(\text{mm}) + 0.037$ 의 관계식이 성립하지만 사질시료는  $D_{50}$ 으로 표현할 수 없다고 한 바 있다.<sup>(13)</sup> 본 연구에서는 그림 4.4에서와 같이  $\log S_e - \log \psi$ 의 직선성을 조사하여  $\theta_r = 0.017$ 을 얻었다.

한계모관수두  $\psi_{cr}$ 은 토주내에서의 압력수두가 평형상태에 달할 때의 자유수면에서 포화영역까지의 한계높이로 정의된다. Brooks 등은 함수특성곡선의  $\log S_e - \log \psi$  관계에서  $S_e = 1$  즉, 포화상태에서의  $S_e$ 와 실험결과와의 직선과의 교점에서  $\psi_{cr}$ 을 얻었다.<sup>(2)</sup> 본 연구에서도 그림 4.4의 직선부와  $S_e = 1$ 의 교점에서  $\psi_{cr} = 17.36(\text{cm})$ 을 얻었다. Bouwer는 粗-中砂에서  $\psi_{cr} = 5 - 30(\text{cm})$ , 細砂에서  $\psi_{cr} = 30 - 70(\text{cm})$ 라 하였으며<sup>(14)</sup> 河西 등은  $\psi_{cr} = 72/D_{50}(\text{mm})$ 의 관계가 성립한다고 제안한 바 있다.<sup>(13)</sup>

$\lambda$ 는 흙의 특성에 따라 결정되는 parameter로 그림 4.4의 직선부의 경사  $\tan \beta$ 이며 본 연구에선  $\lambda = 2.603$ 을 얻었다.

##### 2) Van Genuchten 추정식

Van Genuchten은 Mualem의 모델을 기본으로 하여 유효포화도( $S_e$ )와 suction head( $\psi$ ) 사이에 다음식이 성립함을 제안하였다.<sup>(15)</sup>

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left( \frac{1}{1 + (\alpha \psi)^n} \right)^m \quad (4.2)$$

여기서  $\theta_s$ ,  $\theta_r$ 은 식 (4.1)에서와 같고  $\alpha$ ,  $n$ 은 흙의



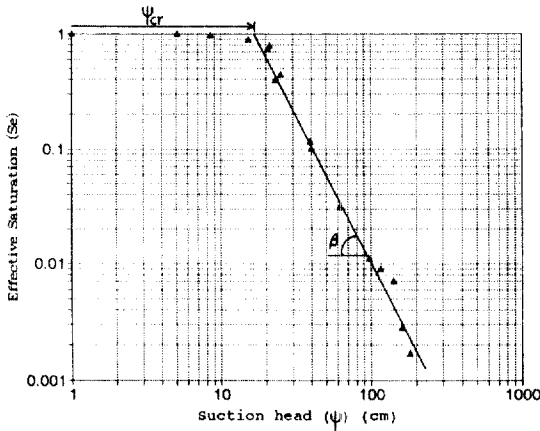


그림 4.4 Relationship between effective saturation and suction head by pF test

성질에 따른 parameter이며  $m=(n-1)/n$ 이다. 식 (4.2)는 S형의 함수특성곡선을 표현하는 유효한 경험식으로  $\theta_s$ ,  $\theta_r$ 의 결정은 Brooks & Corey의 식에서와 같다.  $\alpha$ 와  $n$ 은 흙의 특성에 따른 인자이며 그 결정방법은 다음과 같다.

$\theta_s$ 와  $\theta_r$ 의 값에서 다음을 만족하는 p점을 구한다.

$$\theta_p = \frac{\theta_s + \theta_r}{2} \quad (4.3)$$

p점의 함수특성곡선 경사는  $d(S_e)/d(\log \psi)$ 임을 이용해  $S_p$ 를 다음과 같이 구한다.

$$S_p = \frac{1}{\theta_s - \theta_r} \left| \frac{d\theta}{d(\log \psi)} \right| \quad (4.4)$$

$S_p$ 에서  $m$ 을 다음과 같이 실험 자료에 기초해 정식화한다.

$$m = \begin{cases} 1 - \exp(-0.8 S_p) & (0 < S_p \leq 1) \\ 1 - \frac{0.5755}{S_p} + \frac{0.1}{S_p^2} + \frac{0.025}{S_p^3} & (S_p > 1) \end{cases} \quad (4.5)$$

$$n = 1/(1 - m) \quad (4.6)$$

$$\alpha = \frac{1}{\psi_p} (2^{1/m} - 1)^{1-m} \quad (4.7)$$

여기서,  $\psi_p = p$ 점의 suction head 이상과 같이 표준사 시험 결과를 이용하여  $\theta_s =$

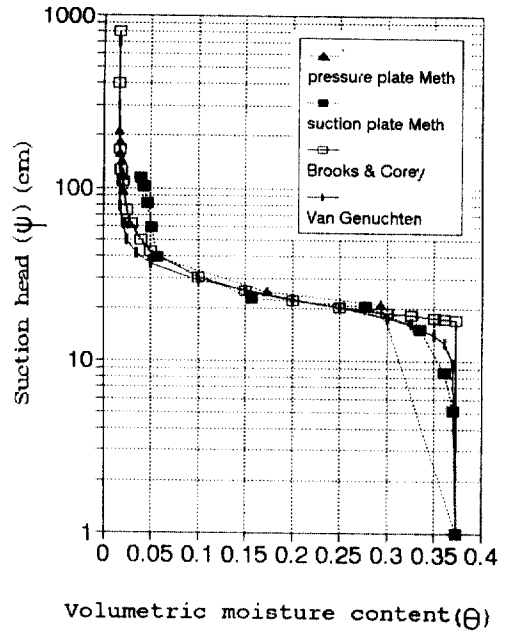


그림 4.5 Soil-water retention curve by pF test and empirical equations

0.373,  $\theta_r = 0.017$ ,  $\alpha = 0.0457$ ,  $n = 5.568$ ,  $m = 0.8204$ 의 parameter를 결정하였으며 식 (4.2)를 이용해 함수 특성곡선을 유도하였다.

### 3) 실험치와 계산치의 비교

Brooks & Corey의 추정식과 Van Genuchten의 추정식에서 유도된 함수특성곡선을 pF시험의 흡인법과 가압판법의 실험 결과와 비교하면 그림 4.5와 같다.

그림에서와 같이 중포화도 영역에서는 실험치와 추정식의 결과가 서로 잘 일치하였으나 저포화도 영역에서 흡인법의 실험결과는 약간의 차이가 나타났다. 이는 흡인법의 경우 높은 suction 측정에 부적합함을 나타내는 것으로 판단되었다. Van Genuchten 추정식의 결과는 전 영역에서 실험치와 잘 일치하여 실용성이 크다는 것이 확인되었으나 Brooks & Corey 추정식의 결과는 고포화도영역에서 차이가 약간 있는 경향을 보였다. 이는 Brooks & Corey 법이  $\psi - S_e$  관계가 양대수지에 그려질 때 직선으로 된다고 근사화하여 그 직선에서 함수특성곡선을 그리게 됨으로써 생기는 영향이라고 한宇野 등의 발표와 일치한 결과였다.<sup>(16)</sup> 가압판법의 경우

비교적 모든 범위에서 추정치와 잘 일치하여 표준사의 pF시험법으로 적합하다고 생각된다. 표 1에 제시한 바와 같이 가압판법의 측정 범위는 pF 2.0-4.2로 나타나 있지만 阿部 등은 공기압축용 조절밸브가 발달한 요즈음에는 가압판법의 측정범위가 pF 0-4.2 정도로 측정범위도 넓고 역학시험사 suction 측정에도 적합하다고 한 바 있다.<sup>(11)</sup>

### 4.3 표준사의 불포화투수시험 결과

그림 3.6의 불포화투수시험 장치를 이용한 본 시험에서는 glass필터 P<sub>31</sub>, P<sub>32</sub>를 1조 P<sub>41</sub>, P<sub>42</sub>를 1조로 사용하여 불포화투수계수와 suction을 동시에 측정하고 각각의 측정치와 이미 제안된 추정식들과의 비교를 통해 불포화투수시험 장치에서 측정된 표준사의 불포화투수계수와 suction의 결과를 검토한다.

#### 4.3.1 필터의 손실수두 보정

불포화투수시험에서 투수계수와 suction을 구하기 위해서는 그림 4.6과 같이 시료상하면에서의 압력수두(H<sub>s1</sub>, H<sub>s2</sub>)를 알아야 할 필요가 있지만 본 시험에서는 상하단에 필터를 끼운 상태에서의 압력수두(H<sub>w1</sub>, H<sub>w2</sub>) 밖에 측정되지 않는다.

따라서 필터에 의해서 손실된 압력수두를 구해야 하며 이를 추정하는 방법은 몇몇 학자들에 의해 발표된 바 있다.<sup>(17-19)</sup> 이는 기본적으로 시료 상하단에 필터를 끼워 투수시험을 한 경우, 정상상태에서는 연속방정식에 의해 다음 식이 성립한다고 하는 것이다.

$$q = k \frac{h_s}{L} A = k_{f1} \frac{h_{f1}}{d_1} A = k_{f2} \frac{h_{f2}}{d_2} A \quad (4.8)$$

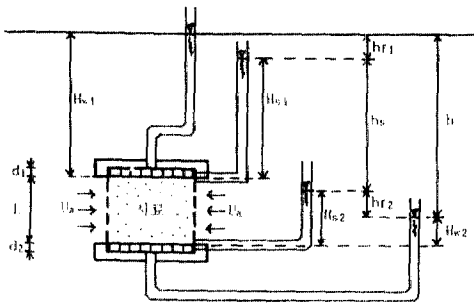


그림 4.6 Head loss due to filter and specimen

여기서

- q = 단위 시간당 침투유량(cm<sup>3</sup>/sec)
- k = 시료의 투수 계수(cm/sec)
- k<sub>f1</sub>, k<sub>f2</sub> = 상·하단 필터의 투수계수(cm/sec)
- h<sub>s</sub> = 시료의 손실수두(유효손실수두, cm)
- h<sub>f1</sub>, h<sub>f2</sub> = 상·하단 필터의 손실수두(cm)
- L = 시료의 길이(cm)
- d<sub>1</sub>, d<sub>2</sub> = 상·하단 필터의 두께(cm)
- A = 시료의 단면적(cm<sup>2</sup>)

실험에서 측정된 수두차를 h(겉보기 수두차, 투수전 수두차와 투수후 수두차의 평균치)라 한다면 물이 시료만을 통과할 때의 유효손실수두(h<sub>s</sub>)는 다음과 같다.

$$h_s = h - (h_{f1} + h_{f2}) \quad (4.9)$$

식 (4.8)과 식 (4.9)에 의해

$$h_s = h - \frac{q}{A} \left( \frac{d_1}{k_{f1}} + \frac{d_2}{k_{f2}} \right) \quad (4.10)$$

본 시험에서도 식 (4.10)을 이용하여 불포화투수계수와 suction head의 실험치가 다음 식으로 구해진다.

$$k = \frac{qL}{A h_s} = \frac{qL}{A \left[ h - \frac{q}{A} \left( \frac{d_1}{k_{f1}} + \frac{d_2}{k_{f2}} \right) \right]} \quad (4.11)$$

$$\psi = \frac{\psi_1 + \psi_2}{2} = Ua - \left[ \frac{(H_{w1} + H_{w2}) - \frac{q}{A} \left( \frac{d_1}{k_{f1}} + \frac{d_2}{k_{f2}} \right)}{2} \right] \quad (4.12)$$

4.3.2 불포화 투수시험 실험치와 계산치의 비교  
 불포화토의 투수계수를 예측하기 위한 여러가지 추정식이 제안되어 있지만 본 연구에서는 비교적 잘 알려진 Van Genuchten식과 Brooks & Corey 및 Irmay형의 식에 대하여 살펴보고 본불포화 투수시험에서 유효손실수두를 고려하여 동시에 측정된 투수계수와 suction을 각각의 추정식과 비교해 본다.  
 불포화토의 유효포화도(Se)와 suction head(ψ) 사이에 식 (4.2)가 성립함을 입증한 Van Genuchten은 Mualem이 제안한 식 (4.13)에 자신의 근사

식을 도입해 상대투수계수( $k_r$ )를 구하는 식 (4.14)를 유도했다.<sup>(15)</sup>

$$k_r = Se^{1/2} \left[ \int_0^{Se} \frac{1}{\psi(x)} dx / \int_0^1 \frac{1}{\psi(x)} dx \right]^2 \quad (4.13)$$

$$k_r = \frac{k}{k_s} = Se^{1/2} \left[ 1 - (1 - Se^{1/m})^m \right]^2 \quad (4.14)$$

여기서  $k_r$  = 상대투수계수  
 $k_s$  = 포화 투수계수  
 $k$  = 불포화 투수계수  
 $m = 1 - 1/n$ , ( $0 < m < 1$ )

또한 Brooks & Corey는 앞에서 언급한 식 (4.1)의 수분특성곡선식이 성립함을 제안하고 Mualem의 이론에 적용하여 다음 식을 유도했다.<sup>(15)</sup>

$$k_r(Se) = Se^{(5/2) + (2/\lambda)} \quad (4.15)$$

여기서  $\lambda$  = 식 (4.1)의 parameter

Irmay형의 투수계수추정식은 kozeny-유형의 골격 구조모델에서 이론적으로 도입한 식으로 유효포화도 (Se)와 상대투수계수( $k_r$ ) 사이에 다음과 같은 지수 함수형으로 나타난다.<sup>(20,21)</sup>

$$k_r = Se^a = \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^a \quad (4.16)$$

Irmay는 glass bead에서  $a=3.0$ 이 되는 것을 입증하였으며 Averjanov는 평행하고 균일한 단면에서 생기는 모관 모델을 이용해 sand에서  $a=3.5$ 가 되는 것을 발견하였고 Corey는 sand에서  $a=4$ 를 제안하였다.<sup>(23)</sup>

Van Genuchten과 Brooks & Corey의 투수계수 추정식에서 유도된 결과와 본 불포화투수시험에서 측정된 실험치를 체적함수율( $\theta$ )과 투수계수( $k$ )의 관계로 나타내면 그림 4.7과 같다.

그림에서와 같이 Van Genuchten과 Brooks & Corey의 추정식에 의해 유도된 투수계수는 서로 좋은 일치를 보였으나 실험치의 회귀곡선( $\log k = 238.658\theta^3 - 184.626\theta^2 + 51.05\theta - 8.664$ ,  $r=0.992$ )은 이들 추정식보다 약간 작은 값을 나타냈으며 특히 고포화도 영역에서 추정치와 차이를 보였다. 이러한 결과는 표준사와 같은 모래지반의 경우 Van Genuchten과 Brooks & Corey의 추정식을 이용해 불포

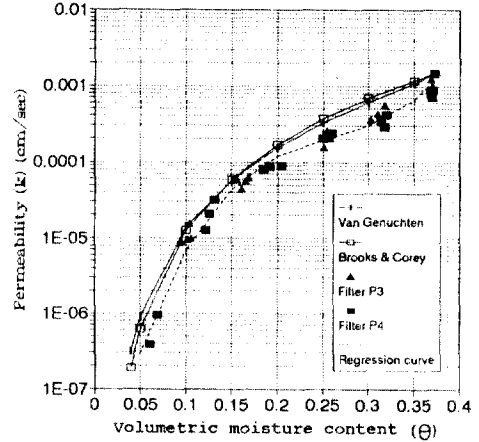


그림 4.7 Comparison of experimental data and empirical equations on unsaturated permeability coefficient

화투수계수를 추정할 때 고포화도영역에서 주의할 필요가 있음을 나타내는 것이며 覆本 등도 가압형 투수·투기 시험장치를 이용해 이와 유사한 결과를 보고한 바 있다.<sup>(25)</sup>

그림 4.8은 Irmay와 Averjanov, Corey의 추정식을 유도하여 체적함수율과 투수계수와의 관계로 실험치와 비교한 것이다.

그림에서와 같이 실험치는 중·저포화도 영역에서 Irmay추정식의 결과보다는 Averjanov와 Corey의 결과에 더욱 근접하고 있으나 고포화도 영역에선 역시 추정식의 결과보다 낮은 경향을 보였다. 이상에서 살펴본 바와 같이 본불포화투수시험에서 측정된 표준사의 투수계수는 고포화도 부근에서 추정식들과 다소 차이를 보여 고포화도 영역에서의 추정식 이용에 더욱 신중한 검토가 필요함을 확인할 수 있었다. 한편 glass필터 P<sub>3</sub>와 P<sub>4</sub>를 이용했을 때의 실험치는 각각 저·중포화도 영역에서 서로 차이가 없었으나 고포화도 영역에서 P<sub>4</sub>를 이용한 실험치는 P<sub>3</sub>의 결과보다 조금 낮은 값을 나타내 유효손실수두를 고려한 식 (4.11)의  $k_f$ 가 작아짐으로서 정도가 떨어짐을 나타냈다. 또한 P<sub>3</sub>를 이용한 경우 약  $\theta < 0.1$ 의 범위에서 필터에 공기가 침투함으로서 투수계수와 suction의 측정이 불가능했으며 P<sub>4</sub>를 이용한 경우,  $\theta > 0.018$ 의 범위까지 측정할 수 있었다. 불포화 투수시험에서 glass필터 P<sub>3</sub>와 P<sub>4</sub>를 이용했을 때의

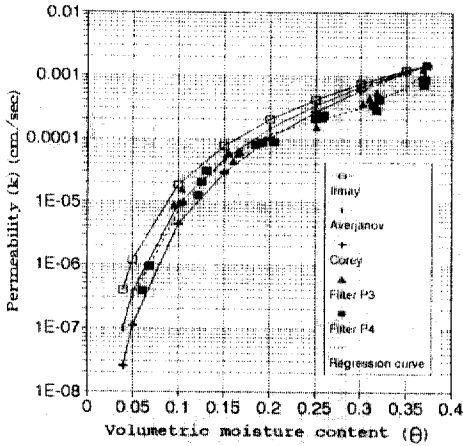


그림 4.8 Comparison of experimental data and empirical equations on unsaturated permeability coefficient

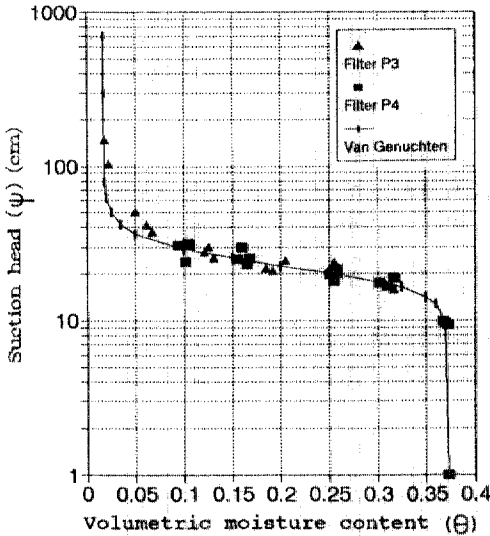


그림 4.9 Soil-water retention curve by unsaturated permeability test and empirical equation

suction 측정 결과와 식 (4.2)에서 유도한 Van Genuchten의 함수특성곡선 추정식 결과를 비교하면 그림 4.9와 같다.

그림에서와 같이 P<sub>3</sub>와 P<sub>4</sub>를 이용한 suction 측정 결과는 각각 Van Genuchten의 추정식 결과와 잘 일치하는 경향을 보였으며 P<sub>4</sub>를 이용한 경우 비교적 낮은 포화도영역의 suction도 계측할 수 있었지만

P<sub>3</sub>를 이용한 경우 체적함수율 약 0.1 이하의 저포화도 영역에서는 suction이 필터의 AEV를 초과하여 공기가 통과함으로써 측정이 불가능했다.

이상에서 살펴본 바와 같이 불포화투수시험에서의 필터는 넓은 범위의 suction 측정을 위해 높은 AEV를 지녀야 함과 동시에 투수계수의 측정정도를 높이기 위하여 투수성이 높은 성질을 지녀야 함을 알 수 있다. 따라서 필터의 투수성과 AEV를 동시에 고려한 필터의 선택이 필요하며 이를 위한 필터의 AEV와 투수계수의 측정은 필연적이다.

川上 등도 함수특성곡선시험 결과에서 직접 투수계수를 구하는 것은 불가능하여 中川 등이 제안한 불포화투수계수 추정법을 사용해 투수계수의 추정을 시도하였으나 豊浦표준사의 함수비가 2% 이상에서는 필터의 투수성( $k_s = 2 \times 10^{-6}$  cm/sec)이 공시체의 투수성보다 낮아 투수계수를 추정할 수 없다고 한 바 있다.<sup>(6)</sup>

## 5. 결 론

주문진 표준사의 함수특성곡선과 불포화투수계수 측정에 대한 실험적 연구의 일환으로 필터의 AEV 시험과 표준사의 pF시험(흡인법, 가압법) 및 불포화투수시험을 하고 이들 실험치와 추정식의 비교 검토를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 필터의 AEV 측정결과 같은 범위의 간극경을 지닌 필터에서도 최대간극경이 일정하지 않아 AEV가 일치하지 않았다. 또한 필터의 투수계수와 AEV는 직접 비교될 성질의 것이 아니지만 양자 사이엔  $AEV < 0.5(\text{kg/cm}^2)$ 에서  $\log k_s = -4.3344 AEV - 2.951$ 의 관계를 나타냈다.

2. 흡인법(수두법)으로 측정된 표준사의 함수특성곡선은 저포화도영역에서 Brooks & Corey와 Van Genuchten 추정식의 결과와 차이를 보여 높은 값의 suction 측정에 불리한 것으로 나타났으며 가압법의 결과는 비교적 모든 범위에서 추정식과 잘 일치하였다.

3. Van Genuchten 추정식에서 유도된 함수특성곡선은 표준사의 pF실험치와 비교적 잘 일치 하였으나 Brooks & Corey 추정식에서 유도된 함수특성곡선은 고포화도 영역에서 약간의 차이를 보였다.

4. 불포화투수시험에서 측정된 표준사의 불포화 투수계수는 저포화도 영역에서 추정식의 결과와 차이가 없으나 고포화도 영역에서는 추정식 결과와 다소 차이를 보여 고포화도 영역에서의 추정식 이용에 신중한 검토가 필요함이 확인되었다.

5. Glass 필터 P<sub>4</sub>를 이용하여 측정된 불포화투수 계수는 고포화도 영역에서 필터 P<sub>3</sub>를 이용한 결과 보다 낮은 경향을 보여 투수계수의 측정정도가 조금 약화됨을 보였으나 suction의 측정에서는 오히려 필터 P<sub>4</sub>의 이용이 P<sub>3</sub>의 이용보다 유리하게 나타나 필터의 AEV와 투수성을 동시에 고려한 필터의 선택이 필요함을 보여 주었다.

### 참 고 문 헌

- Gardner, W.R., "Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table", *Soil Sci. Vol. 85*, 1958, pp. 228-232.
- Brooks, R.H. and Corey, A.T., "Properties of porous media affecting fluid flow", *ASCE, IR(92)*, 1966, pp. 61-88.
- Mualem, Y., "A new model predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media", *Water Reso. Res. Vol. 112 No. 3*, 1976, pp. 513-522.
- Mualem, Y., "Hydraulic conductivity of unsaturated porous media: generalized macroscopic approach", *Water Reso. Res. Vol. 114 No. 2*, 1978, pp. 325-334.
- 足立, 筋内, "土質工學會基準「土의 pF 試驗方法」의改正についての お知らせ", *土と基礎* 38-2, 1990, pp. 106-113.
- 川上, 榎本, 阿部, "不飽和土의 水分保持特性 と 槌透特性", 第24回 土質工學研究發表會, 1989, pp. 311-314.
- 阿部, 榎本, 岩崎, 川上, "不飽和土 せん斷 時の有交應力 パラメータ의 推定方法", 第26回 土質工學研究發表會, 1991, pp. 681-684.
- Klute, A., "The determination of the hydraulic conductivity and diffusivity of unsaturated soil", *Soil Sci. Vol. 114*, 1972, pp. 264-276.
- 西垣 誠, "不飽和 槌透解析 現象と その解析", 土質工學會, 不飽和土의 工學的測定に 關する 信州 セミナ-テキスト, 1989, pp. 11-33.
- 河野, 西垣, 竹下, 田村, 平松, "pF試驗における 加壓板法に 關する一考察", 第25回 土質工學研究發表會, 1990, pp. 1647-1648.
- 阿部, 田邊, "加壓板法および"加壓膜法によるサクシジョンの測定, 制御", 土質工學會, 不飽和土의 工學的測定に關する 信州セミナ-テキスト, 1989, pp. 71-76.
- Bresler, E., Russo, D. and Miller, R.D., "Rapid estimate of unsaturated hydraulic conductivity function", *Soil Sci. Soc. Am. J. Vol. 42*, 1978, pp. 170-172.
- 河西, 田中, 駒田, 閻崎, "不飽和 槌透特性に 關する 基礎的檢討", 土質工學會, 不飽和土의 工學的性質 研究の現狀 シンポジウム 發表論文集, 1987, pp. 245-252.
- Bouwer, H., *Groundwater Hydrology*, McGraw-Hill, New York, 1978, pp. 243.
- Van Genuchten, M.Th., "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils", *Soil Sci. Soc. Am. J. Vol. 44*, 1980, pp. 892-898.
- 宇野, 佐藤, 柘植, "2.3의 砂質土의 水分保持特性", 土質工學會, 不飽和土의 工學的性質 研究の現狀 シンポジウム 發表論文集, 1987, pp. 187-192.
- 河野, 西垣, "室内透水試驗法に關する 2,3의 考察", 土質工學會論文報告集 Vol. 22, No. 4, 1982, pp. 181-190.
- 鹽澤 昌, "定常法による 不飽和透水係數の 測定方法 と 精度について", 農業土木學會論文集 第106號, 1983, pp. 73-79.
- 宇野, 佐藤, 杉井, 柘植, "加壓型の 不飽和透水試驗法の 考察", 第24回 土質工學研究發表會, 1989, pp. 1653-1654.
- 西垣 誠, "飽和. 不飽和領域内の 土中水の 浸透特性に 關する 2,3의 考察", 土質工學會 論文 報告集 Vol. 23, No. 3, 1983, pp. 165-177.
- 金英默, "降雨時 無限斜面的 浸透 舉動", 대한토목 학회, 토질공학 세미나 강연집, 1991, pp. 27-105.
- 李重宰, "非飽和地盤의 間隙水壓分布", 동국대학교 대학원, 석사학위논문. 1988, pp. 3-10.
- Corey, A.T., "Measurement of water and air permeability in unsaturated soil", *Soil Sci. Soc. Pro.*, 1957, pp. 7-10.
- Fredlund, D.G. Lam, L. and Barbour, S.L., "Transient seepage model for saturated-unsaturated soil systems: a geotechnical engineering approach", *Can. Geotech. J.* 24, 1987, pp. 566-580.
- 榎本, 阿部, 川上, "砂質土における 不飽和浸透特性", 第26回 土質工學研究發表會, 1991, pp. 1685-1688.

(接受: 1993. 8. 30)