

## 풍화계열 사면의 불포화 함수특성곡선 이력이 강우 침투에 미치는 영향 Effect of Hysteresis on Soil-Water Characteristic Curve in Weathered Granite and Gneiss Soil Slopes during Rainfall Infiltration

신길호<sup>1)</sup>, Gil-Ho Shin, 박성완<sup>2)</sup>, Seong-Wan Park

<sup>1)</sup> 단국대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Dankook University

<sup>2)</sup> 단국대학교 토목환경공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Dankook University

**SYNOPSIS** : Shallow failures of slopes in weathered soils are caused by infiltration due to prolonged rainfall. These failures are mainly triggered by the deepening of the wetting band accompanied by a decrease in suction induced by the water infiltration. In this paper, hysteresis on soil-water characteristic curve(SWCC) of granite and gneiss weathered soils are investigated using transient flow analysis respectively. Each case was subjected to artificial rainfall intensities and time duration depending on the laboratory-based drying and wetting processes. The results show that the unsaturated seepage on weathered slopes are very much affected by the initial suction of soils and unsaturated permeability of the soils. In addition, a granite weathered soil has a lower air-entry value, residual matric suction, and wetting front suction and less hysteresis loop than a gneiss weathered soil.

**Key words** : Hysteresis, Soil-water characteristic curve, Rainfall infiltration, Weathered soils

### 1. 서 론

일반적으로 토사 사면은 강우 침투시 지반의 응력이완 효과로 인하여 지표로 부터의 얇은 파괴가 발생하게 된다. 이에 건조시보다 강우 등의 침투효과에 의한 토사 사면의 파괴가 빈번히 발생하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 사면 파괴 과정에서 필연적으로 발생하는 강우 침투가 흡수력이 서로 다른 함수특성곡선에서 보이는 이력에 따라 서로 다른 특성을 나타냄을 확인하기 위하여 풍화 계열 시료인 편마 풍화토와 화강 풍화토를 대상으로 실험을 수행하였으며, 이를 기본으로 각각에 대하여 침투 해석을 실시하여 비교해 보았다. 기존의 건조곡선과 실제 사면에서의 강우 침투 과정과 그 거동이 유사한 습윤 과정의 이력을 고려하였으며 이와 더불어 별도의 투수실험 결과, 화강풍화토가 편마풍화토에 비해 약 10배 정도 큰 수치를 나타냄을 확인하였다. 이는 두 풍화 시료를 기본으로 조성한 사면의 침투 해석시 근본적으로 서로 다른 침투 특성을 나타내는 원인이라 할 수 있다. 건조 과정과 습윤 과정에 대한 함수 특성실험을 순차적으로 실시하여 흡수력에 따라 서로 다른 경로의 함수특성 이력을 확인하였으며, 임의의 서로 다른 강우강도와 침투시간을 적용하게 되었다. 또한, 서로 다른 두 시료를 기본으로 하여 함수 특성곡선의 이력에 따른 침투 해석을 비교하였으며 원지반의 초기 상태에 대한 흡수력을 고려하여 해석을 실시하였다.

## 2. 함수특성곡선의 산정

본 실험에서는 경기도 북부지역의 절토 사면부에서 채취한 화강 풍화토와 편마 풍화토를 사용하였다. 화강 풍화시료와 편마풍화시료는 No. 200체 통과량이 각각 2.1%와 2.6%의 미량으로 나타났으며 통일 분류상 SW시료이다. 또한 투수 실험 결과 일반적인 풍화토에 대한 투수계수의 범위를 초과하지는 않았으나 화강 풍화시료가 편마 풍화시료에 비해 대략 10배 크게 측정되었다. 시료의 건조단위중량을 16.5kN/m<sup>3</sup>로 조성하여 실험한 결과, 편마 풍화토와 화강 풍화토의 강도정수의 차이는 크지 않았으나 편마 풍화토가 화강 풍화토에 비하여 실트질이 섞인 세립분 함유에 의한 점착력을 확인할 수 있었다.

함수특성곡선을 산정하기 위하여 축 변이(axis translation)기술을 기본원리로 하여 Fredlund-type pressure plate 장치를 활용하였으며, 적용 압력에 따른 함수비의 변화를 통해 흡수력에 따라 건조과정 에 이어 습윤 과정에 대하여 측정하였다.

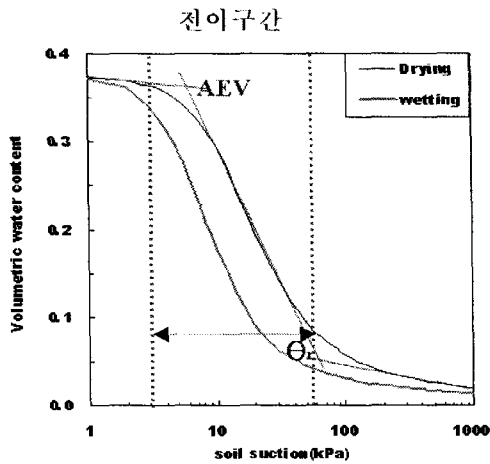
현재까지 여러 함수특성 예측 모델식이 제안되어 있으나 본 논문에서는 3계수 비선형의 Fredlund와 Xing이 1994년 제안한 식을 활용하여 함수특성곡선을 각각 산정하였다. 표 1은 편마 풍화토와 화강 풍화토를 대상으로 건조과정과 습윤 과정에 대하여 각 계수들을 나타낸 것이다.

표 1. Fredlund와 Xing 모델에 의하여 산정된 계수

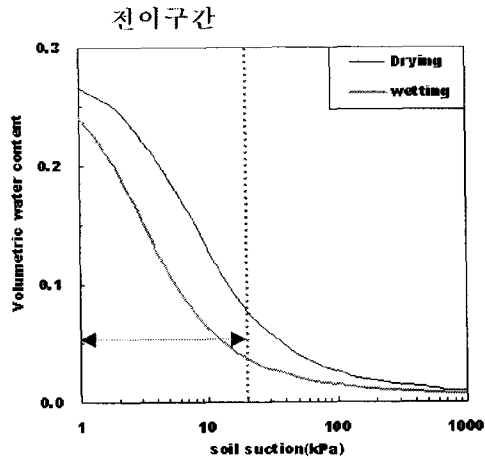
		편마 풍화토	화강 풍화토
건조과정	a	13.255	5.850
	n	1.956	1.456
	m	1.350	1.652
습윤과정	a	6.233	2.350
	n	1.350	1.556
	m	0.322	1.652

흡에서의 물과 공기의 이동 즉, 건조 시와 습윤 시에 따라 흡수력에 따른 함수비는 다르게 나타나는데 이는 흙의 물리적인 특징인 이력(hysteresis)으로 함수특성곡선 상의 건조과정과 습윤 과정 상에서 나타나는 그림 1에서 확인 할 수 있다. 습윤 곡선의 특징으로 편마 풍화시료에 비하여 화강 풍화시료의 포화상태에서의 함수비가 비교적 작게 나타났으며 함수비가 변화하는 전이구간에서의 흡수력이 편마풍화시료에서는 대략 8kPa~30kPa인 것에 비하여 화강 풍화시료에서는 그보다는 작은 범위인 약 10kPa 이하에서 급격히 변화 하였다. 이는 편마풍화시료가 비교적 모래질인 화강 풍화시료에 비해 세립의 실트질을 함유한 결과로 추정된다. 건조와 습윤 과정 모두 뚜렷한 비선형 sigmoidal 형태를 보이는 편마 풍화토와는 달리 습윤 과정의 화강 풍화토에서는 실험기기의 최소 압력제어지점을 지나 포화지점으로 계속 증가하는 것으로 나타나 측정에 한계를 보였다.

실제 현장에서의 지반은 대부분 불포화 상태라 할 수 있으므로 전이구간(transition zone)에서의 흡수력은 매우 중요하다. 이 구간에서 단위 흡수력 당 함수비가 급격하게 증감하기 때문이다. 따라서 흙별로 다른 함수특성곡선에서의 AEV와 잔류흡수력에 대한 산정은 대상 흙에 대한 포화와 불포화에 따른 흡수력을 나타내는 것뿐만 아니라 전이구간의 판정의 기준이 된다. 실제 지반에서의 흡수력의 분포가 이러한 전이구간에 집중되어 있으며 흡수력 값이 잔류쪽에 가까우면 건조한 상태를 보이고 AEV에 가까울수록 포화에 가까워진다. 즉 토사사면에서 이러한 상태는 흙이 내포하고 있는 함수비가 많아짐에 따라서 파괴 가능성이 높아질 수 있다.



(a) 편마풍화토의 함수특성 이력



(b) 화강풍화토의 함수특성 이력

그림 1. FX모델을 이용한 함수특성곡선의 이력

함수특성곡선은 불포화 투수계수를 산정하는 간접적인 방법으로 많이 활용되는데 본 논문에서는 Fredlund와 Xing이 1994에 제안한 식을 이용하였으며 그림 6과 그림 7과 같다. 편마풍화토와 화강풍화토 각각에 대하여 함수특성이력의 결과가 매우 다름을 알 수 있다. 따라서 건조과정과 습윤 과정 상의 흡수력 별 불포화 투수계수의 차이는 포화수를 제외하고 건조과정이 습윤 과정에 비해 작은 투수계수를 나타내었다. 그림 6의 편마 풍화토는 약 2~3kPa의 흡수력을 기준으로 건조와 습윤 과정에 대하여 각각 산정한 투수계수의 값이 서로 상이하게 나타난 반면, 그림 7의 화강 풍화토의 포화투수계수는  $6.46 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 로 편마 풍화토의 포화투수계수인  $5.12 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$  비해 그 크기가 약 10배 정도이다.

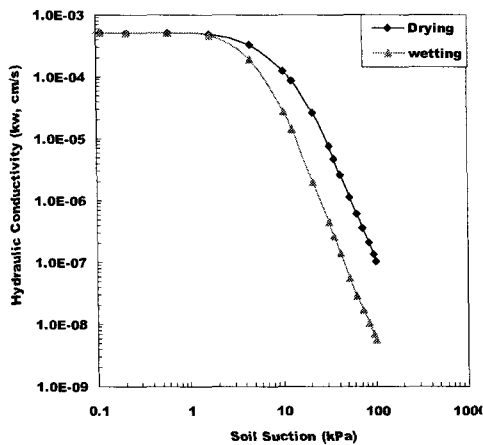


그림 6. 편마 풍화토의 불포화 투수계수

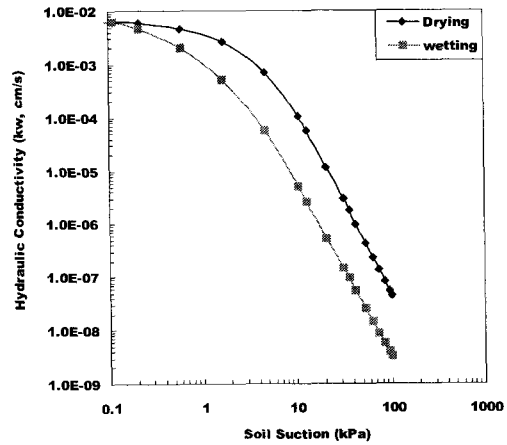


그림 7. 화강 풍화토의 불포화 투수계수

### 3. 풍화사면의 침투 해석

실내 실험으로 구한 함수특성곡선의 건조과정과 습윤 과정에서 보이는 흙의 거동이 서로 전혀 다른 모습을 보임에 따라 동일한 흙에 대하여 건조곡선과 습윤 곡선을 달리 적용할 필요성이 있다. 즉, 시간

에 따른 침투 해석에 있어서 중요한 불포화 지반 정수인 함수특성곡선의 이력에 대한 실험결과를 이용하여 서로 다른 해석결과를 도출해 내었다. 시간을 고려한 불포화 침투해석을 위해 GEO-SLOPE사의 SEEP/w를 이용하였으며, 임의의 무한사면의 유한 요소망을 1:1.5의 경사로 조성하였다. 또한 3m의 사면깊이를 선택하여 적절한 침투 효과를 구현하였다.

편마 풍화사면의 경우 강우 강도 20mm/hr에 따라 1시간, 2시간, 3시간, 6시간, 9시간, 12시간, 15시간(총 7단계)으로, 화강 풍화사면의 경우 강우강도 240mm/hr를 0.25시간, 0.5시간, 0.75시간, 1시간, 1.25시간, 1.5시간, 1.75시간, 2시간(총 8단계)로 선정하여 시간에 따른 침투해석을 실시하였는데 표 2와 같다. 또한, 침투해석에 있어서 초기 지반상태가 습윤에 가까운 흡수력을 보일수록 포화가 비교적 빠른 시간에 진행되고 건조에 가까운 흡수력이면 긴 시간 동안의 침투에 의하여 포화가 발생된다. 이를 고려하기 위하여 지반의 초기 흡수력인 최대 흡수력을 제한하여 다르게 적용하였다.

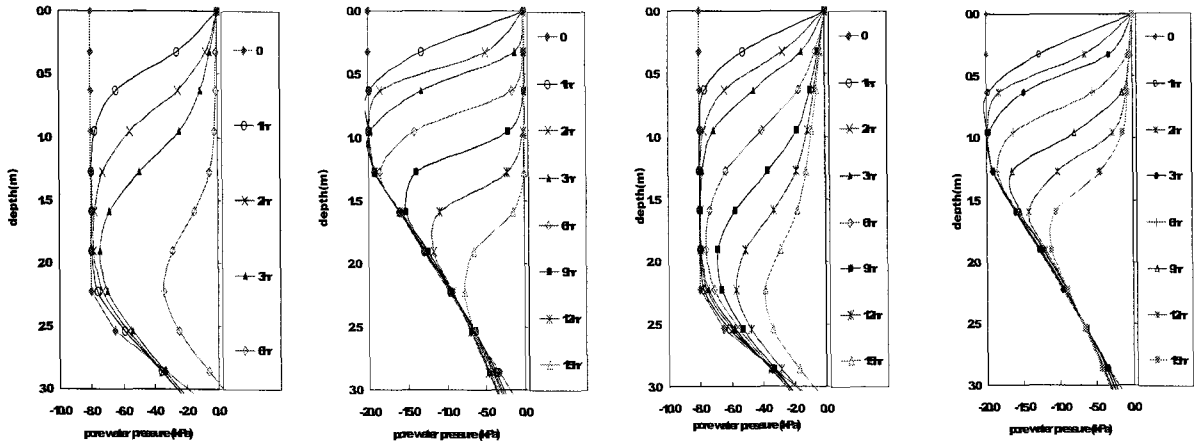
표 2. 해석에 적용된 강우강도와 침투시간

	강우강도 (mm/hr)	침투시간 (hr)
편마풍화사면	20	0, 1, 2, 3, 6, 9, 12, 15
화강풍화사면	240	0, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 1.75, 2

### 3.1 편마 풍화사면의 침투해석

그림 2는 함수특성곡선의 건조곡선을 기본으로 하여 강우강도 20mm/hr를 적용한 결과, 시간별로 나타나는 깊이 별 흡수력의 변화를 나타내었으며 그림 3에서는 동일 조건의 습윤 곡선을 적용하여 건조와 습윤 곡선에 대하여 해석결과를 비교한 것이다. 동일 조건의 초기 흡수력에서 강우 시간이 지속될수록 습윤 곡선을 적용하여 나타난 강우 침투의 영향이 건조곡선을 적용한 경우보다 비교적 작음을 알 수 있다. 오히려 그림 2(a)의 초기 흡수력 조건 8kPa에서는 3시간에서 6시간 사이에 사면의 표면으로부터 침투 효과가 급격히 진행됨을 알 수 있으며 6시간 이후의 조건에서는 이미 포화대가 발생되어 지반이 물을 함유할 수 있는 능력을 초과한 것으로 판단된다. 다만 이와는 대조적으로 그림 3(a)의 습윤 곡선 적용시에는 6시간 이후 15시간까지도 지표로부터 약 2m 부근까지 침투가 진행되는 모습을 보였다. 이는 함수특성곡선의 이력이 동일한 시료의 흡수력에서 서로 다른 습윤 용적(hydraulic capacity)을 나타내어 단위 흡수력 당 물을 함유할 수 있는 능력의 최대치가 서로 상이하기 때문이고 그와 더불어 침투 시 일어나는 확산(hydraulic diffusivity) 또한 건조곡선의 적용 보다는 습윤 곡선의 경우에 비교적 느리게 발생하기 때문이다.

강우강도를 적용하기 직전인 사면지반의 초기 흡수력을 그림2(a)에서는 8kPa로 그림 2(b)에서는 20kPa로 선정하여 비교한 결과, 비교적 습윤 상태에 가까운 초기흡수력 8kPa에서 깊이에 따라 급격한 흡수력의 변화를 확인할 수 있다. 이는 초기 지반 상태의 흡수력이 시간에 따라 침투 효과에 미치는 영향이 매우 큰 것으로 침투해석 적용시 이를 반드시 고려해야 한다.



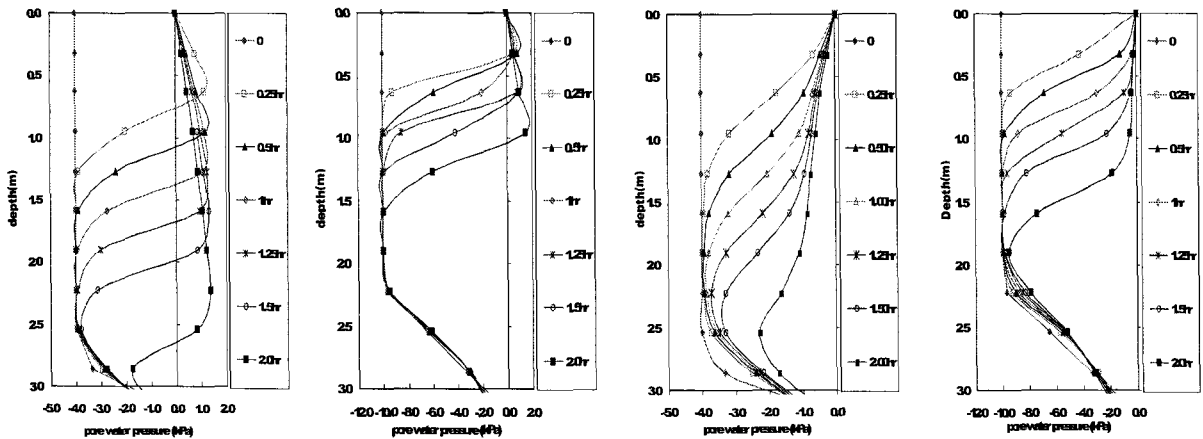
(a) 초기 흡수력 8kPa (b) 초기 흡수력 20kPa (a) 초기 흡수력 8kPa (b) 초기 흡수력 20kPa

그림 2. 건조곡선을 적용한 시간에 따른 깊이별 흡수력의 변화 (편마풍화사면)

그림 3. 습윤 곡선을 적용한 시간에 따른 깊이별 흡수력의 변화 (편마풍화사면)

### 3.2 화강 풍화사면의 침투해석

편마 풍화사면과 동일한 사면조건에서 침투해석 결과는 그림 4와 5와 같다. 기본적으로 화강 풍화사면의 투수계수가 편마 풍화사면에 비해 약 10배 큰 것으로 확인하였기에 적용한 강우강도는 240mm/hr로 적용하였다. 따라서 침투 효과 또한 단시간 내에 급격히 일어났으며 건조곡선과 습윤 곡선을 적용한 결과 그 차이가 편마 풍화사면에 비해 현격함을 알 수 있었다. 그림 4(a)와 그림 5(a)의 지반의 같이 초기 흡수력이 4kPa인 경우 습윤 곡선을 적용한 침투효과에 비하여 건조곡선을 적용한 경우 이미 사면 표면에서부터 포화가 일어나 간극수압이 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 지반의 초기 흡수력의 범위가 비교적 작은 4kPa과 10kPa을 적용했음에도 불구하고 침투 경향이 서로 매우 다르게 나타나 함수특성 곡선상의 비교적 좁은 흡수영역의 전이 구간이 영향을 주었음을 알 수 있다.



(a) 초기 흡수력 4kPa (b) 초기 흡수력 10kPa (a) 초기 흡수력 4kPa (b) 초기 흡수력 10kPa

그림 4. 건조곡선을 적용한 시간에 따른 깊이별 흡수력의 변화 (화강풍화사면)

그림 5. 습윤 곡선을 적용한 시간에 따른 깊이별 흡수력의 변화 (화강풍화사면)

#### 4. 결 론

편마 풍화토와 화강풍화토로 조성한 사면을 대상으로 함수특성곡선의 이력을 고려한 해석 결과는 다음과 같다.

1. 조립질인 화강풍화토의 공기함입치, 잔류흡수력, 포화 흡수력, 그리고 이력의 폭이 세립질인 편마풍화토에 비하여 작게 나타났다.
2. 함수특성곡선의 이력은 함수비 보다는 흡수력의 차이가 침투 해석에 있어 매우 상이한 결과를 나타내고 있다.
3. 강우 시간에 따른 침투 해석 시 습윤 함수특성곡선 적용은 건조곡선을 적용 보다 침투효과는 작으며 지반의 초기 흡수력에 따라 사면의 표면에서부터 침투되어 포화되는 시간이 다름을 확인하였다. 따라서 풍화 토사 사면의 강우 침투 시 함수특성곡선의 건조곡선을 적용하기 보다는 거동이 유사한 습윤 곡선의 적용을 고려함이 보다 합리적이다.
4. 불포화 투수계수의 차이에 의하여 침투효과가 매우 다름을 확인했으며 아울러 사면에 작용하는 침투효과는 내적요인인 불포화 사면지반의 투수계수와 외적요인인 강우강도와 이에 따른 침투시간이 상호작용을 하고 있다.

#### 참 고 문 헌

1. 조성은, 이승래(2000), "강우특성을 고려한 사면의 표면파괴에 대한 안정성 평가", *한국지반공학회지*, 제16권 제5호 pp. 107~116.
2. Fredlund, D. G. and Xing, A.(1994). "Equations for the Soil-Water Characteristic Curve." *Canadian Geotechnical journal*, Vol. 31, No. 4, pp521~532.
3. GCTS testing system(2004), "Fredlund SWCC device SWC-100", *operating instruction*.
4. Gasmol J. M., Rahardjo H., Leong E. C.(2000), "Infiltration effect on stability of a residual soil slope", *Computers and Geotechnics* 26, pp145~165.
5. GEO-SLOPE International Ltd(2004), "Computer program SEEP/W for finite element seepage analysis", *User's guide*.
6. Lu and Likos(2004), *Unsaturated Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, Ins. pp386~395.
7. Tami D., Lahardjo H and Leong E. C.(2004), "Effect of hysteresis on steady-state infiltration in unsturated slopes", *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, ASCE/ september.