

## 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

신 길 호<sup>1</sup> Shin, Gil-Ho

박 성 완<sup>2</sup> Park, Seong-Wan

#### Abstract

Shallow failures of slopes in weathered soils are caused by infiltration caused by 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 is 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.

#### 요 지

풍화 사면은 지속적인 강우로 인하여 얇은층에서 파괴가 일어나고 있다. 이러한 파괴들은 주로 강우 침투로 지표면에서의 습윤대의 형성과 이로 인한 흡수력의 감소에 기인한다. 본 연구에서는 대표적인 풍화사면인 화강 풍화토 및 편마풍화토에 대한 함수특성곡선의 건조-습윤 이력과 선행강우 조건을 활용하여 시간에 따른 불포화 침투 해석을 인공적인 강우 강도와 지속시간을 설정하여 실시하였다. 그 결과 풍화 사면의 불포화 침투는 깊이별로 선행 강우에 의한 초기 흡수력과 이력에 따른 불포화 투수계수에 많은 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한 화강풍화토가 편마풍화토 보다 상대적으로 작은 공기 함입값, 잔류 흡수력, 그리고 습윤 전면 흡수력을 가지고 있으며 이력 loop가 작아서 침투에 대한 흡수력의 변화 반응이 매우 빠름을 확인할 수 있었다.

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

#### 1. 서 론

일반적으로 토사 사면은 강우 침투시 풍화지반의 응력이완 현상으로 인하여 지표면으로 부터 얇은 파괴가

발생하게 된다. 그림 1에서와 같이 우리나라에서는 강우에 의한 침투로 크고 작은 사면 파괴가 빈번히 발생하고 있다. 높은 강우 강도와 지속시간이 길어질수록 규모가 큰 파괴가 일어나며 지속시간이 상대적으로 짧고

<sup>1</sup> 정희원, 단국대학교 토목환경공학과 석사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil & Env. Engrg., Dankook Univ.)

<sup>2</sup> 정희원, 단국대학교 토목환경공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil & Env. Engrg., Dankook Univ., spark@dankook.ac.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

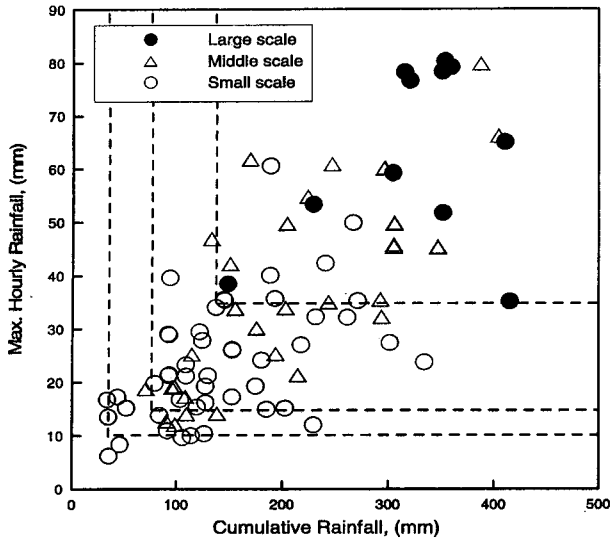


그림 1. 국내 사면파괴와 강우와의 관계(Kim et al. 1992)

강우 강도가 큰 경우 작은 규모의 파괴가 많이 발생하고 있다. 이는 일반적으로 알려진 풍화계열사면에서 얇은 사면파괴의 경우 강우강도가 강한 경우 발생하며, 반면 깊은 사면파괴는 강우지속시간이 길어짐에 따른 침투로 많이 발생하는 것과는 유사한 경향을 보여주고 있다 (김재홍 등 2002).

한편 그림 2는 국내에서 tensiometer를 활용하여 관측한 현장 풍화사면 지반의 함수특성 변화를 나타내고 있는데 여러 오차 요인을 고려하여도 건조 측 경로 보다는 습윤 경로에 집중되는 것을 알 수 있다. 강우가 집중되는 기간 동안에도 현장 지반의 흡수력이 습윤 경로에 집중되고 있으며 흡수력 전이구간의 폭이 약 15kPa 정도로 매우 좁은 범위에서 흡수력의 변화가 일어나고 있음을 알 수 있다. 이러한 관측 결과는 매우 제한적이기는 하나 최근 국외의 사례연구와도 유사한 경향을 보여주고 있어 불포화 사면의 침투해석 조건이 강우의 진행에 따른 현상학적 변화를 고려함이 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 사면 파괴 과정에서 필연적으로 발생하는 강우 침투가 흡수력이 서로 다른 함수특성 곡선에서 보이는 이력에 따른 특성을 살펴보기 위하여 대표적인 풍화계 지반인 편마 풍화토와 화강 풍화토를 대상으로 흡수력 및 이력 실험을 수행하였다. 또한 이를 바탕으로 불포화 침투 해석을 실시하여 이를 분석·비교하였다. 기존의 건조곡선과 실제 사면에서의 강우 침투 과정 그리고 그 현상학적인 거동이 유사한 습윤 과정의 이력을 고려하였다. 이와 더불어 별도의 투수실험 결과, 시료로 사용된 화강 풍화토가 편마 풍화토에 비해 약

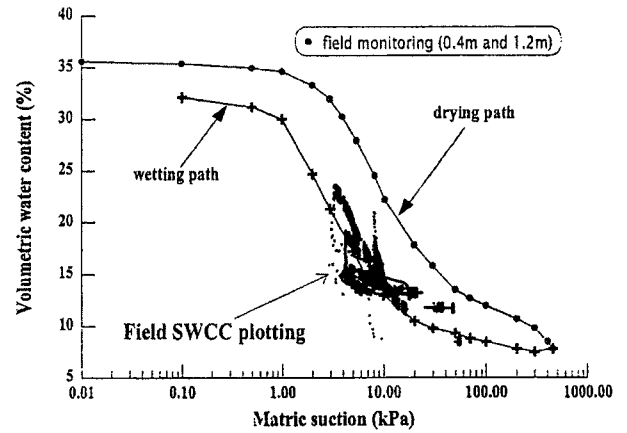


그림 2. 관측된 화강 풍화사면의 흡수력 변화(이인모 등 2003)

10배 정도 큰 수치를 나타냄을 확인하였다. 이는 두 풍화 시료를 기본으로 조성한 사면의 침투 해석 시 근본적으로 서로 다른 불포화 투수 및 침투 특성을 나타내는 원인이라 할 수 있다.

또한 건조 과정과 습윤 과정에 대한 함수특성실험을 순차적으로 실시하여 흡수력에 따라 서로 다른 경로의 함수특성 이력을 확인하였으며, 임의의 서로 다른 강우 강도와 침투시간을 적용하였다. 아울러 서로 다른 두 시료를 기본으로 하여 불포화 함수특성곡선의 이력에 따른 침투 해석을 비교하여 원지반의 선행 강우 조건을 고려하여 상이한 초기상태 흡수력을 적용하여 해석을 실시하였다.

## 2. 강우에 의한 사면 흡수력의 변화

국내에서는 현장 사면에서 직접 측정한 불포화 흡수력의 변동 자료가 그리 많지 않은 실정이다. 국내에서 유일하게 활용 가능한 현장 관측 결과로 2001년 Cho의 연구 결과를 참고 할 수 있는데 화강 풍화사면을 대상으로 제한적인 범위에서 50일 정도 측정된 결과이다. 따라서 본 연구에서는 이를 다시 면밀하게 분석하여 강우시 현장 풍화 사면에서 발생하는 흡수력의 변화 경향을 간접적으로 활용하고자 하였다.

그림 3에서 화강 풍화토 사면에서 관측된 흡수력은 0.4m의 얇은 깊이에서는 강우의 영향을 잘 반영하고 있어 흡수력의 변화폭이 큰 것을 확인할 수 있다. 반면 사면 깊이가 상대적으로 깊어질수록 선행 강우의 영향이 반영된 일정한 흡수력을 보여주고 있다. 또한 얇은 깊이에서 강우에 의한 흡수력 변화 반응은 침투 및 증발산, 그리고 유출로 인하여 매우 빨리 일어나며 그 폭도 큼을

알 수 있으나 상대적으로 깊은 위치에서는 흡수력 변화 지연이 일어남에 따라 침투가 느리게 진행되거나 그 흡수력의 감소폭이 매우 작음을 보여주고 있다.

한편 특이한 점은 화강 풍화사면 1.0m 이상의 깊이에서 강우의 영향이 미미하다는 것이다. 강우 강도가 관측된 기간 중에 어느 정도 지속되었음에도 일정하게 유지되고 있다. 이것은 습윤 전면이 이 기간 동안 그 깊이까지 영향을 미치지 않는 것으로 선행강우에 의한 낮은 흡수력대가 형성되어 낮은 불포화 투수계수를 유지함에 침투가 발생하여도 그 흐름이 지연된 것으로 추정된다. 또한 높은 흡수력으로의 복원도 상대적으로 빨라지는 것으로 관측되었다. 다만 강우지속기간이 길어지면 사면 상부의 모든 측정 깊이에서 동일한 흡수력대로 수렴함을 보여주고 있는 반면 사면 하부에서는 그렇지 않음을 보여주고 있어 강우 유출의 효과가 있음을 반증하고 있다.

### 3. 함수특성곡선

본 연구에서는 경기도 의정부 지역의 사면부에서 채취한 화강 풍화토와 편마 풍화토를 각각 사용하였다. 그림 4와 표 1은 화강 풍화시료와 편마풍화시료의 기본 물성과 입도를 나타내는데 No. 200체 통과량이 각각 2.1%와 2.6%의 미량이며 통일 분류상 SW와 SP-SM이다. 또한 투수 실험 결과 일반적인 풍화토에 대한 투수계수의 범위를 초과하지는 않았으나 화강 풍화시료가 편마 풍화시료에 비해 대략 10배 크게 측정되었다. 시료의 건조단위중량을  $16.5\text{kN/m}^3$ 로 조성하여 실험한 결과, 편마 풍화토와 화강 풍화토의 강도정수의 차이는 크지 않았으며 편마 풍화토가 화강 풍화토에 비하여 실트질이 섞인 세립분 함유에 의한 점착력을 확인할 수 있었다.

불포화 함수특성 및 흡수력을 산정하기 위하여 축변이(axis translation)기술을 기본원리로 Fredlund(2005)에

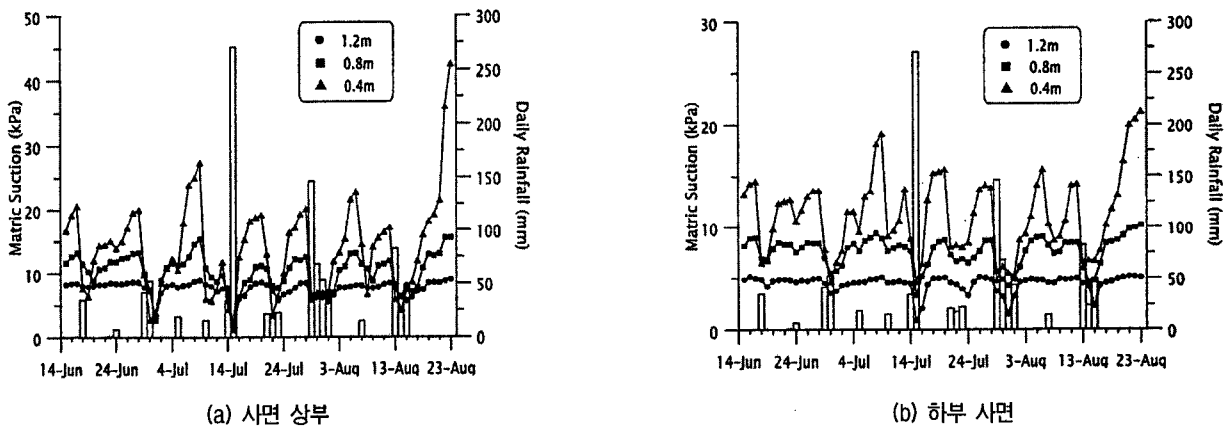


그림 3. 관측된 화강 풍화사면의 흡수력 변화(Cho 2001)

표 1. 편마 풍화시료의 기본 물성

기본물성	USCS	SP-SM (편마풍화시료)	SW (화강풍화토)
통과 중량 백분율 10% 입경(mm)	D <sub>10</sub>	0.18	0.21
통과 중량 백분율 30% 입경(mm)	D <sub>30</sub>	0.33	0.64
통과 중량 백분율 60% 입경(mm)	D <sub>60</sub>	0.64	1.9
균등계수	C <sub>u</sub>	3.56	9.05
곡률계수	C <sub>c</sub>	0.94	1.02
비중	G <sub>s</sub>	2.676	2.657
No.200체 통과량(%)		2.1	2.6
액성한계(LL, %)		29.55	N.P
소성한계(PL, %)		9.99	N.P
포화투수계수 (K <sub>s</sub> , cm/sec)		$5.12 \times 10^{-4}$	$6.46 \times 10^{-3}$
점착력 (C)		0.98	0
내부마찰각( $\phi$ , °)		32.97	37.12

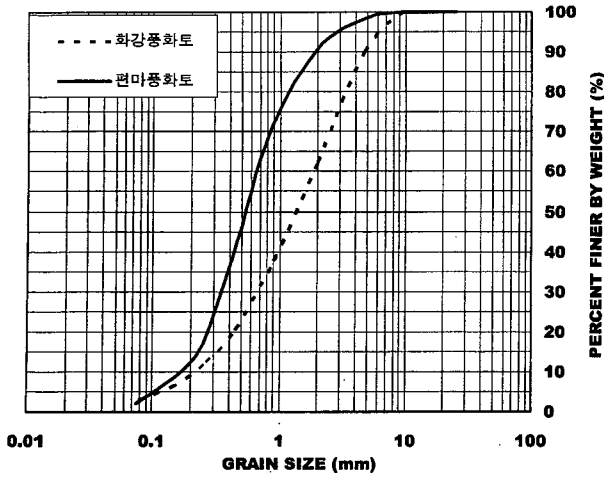


그림 4. 두 풍화시료의 입도분포

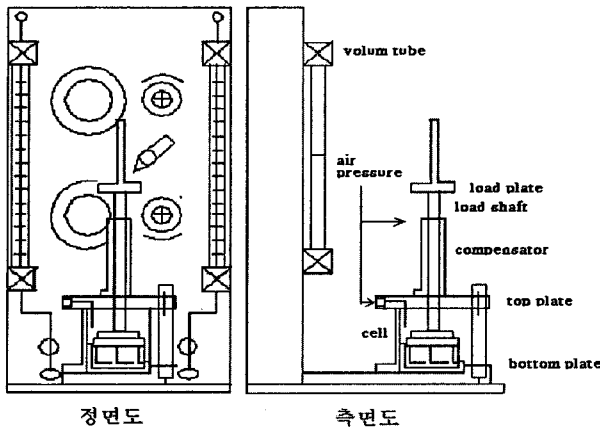


그림 5. 불포화 흡수력 제어 장치

의하여 고안된 null-type pressure plate 장치를 활용하여 흡수력에 따른 함수량의 변화를 건조과정과 습윤과정에 대하여 측정하였다. 그림 5에서와 같이 기존의 압력 판 시험과는 달리 한 시료만으로도 함수특성곡선을 구할 수 있는 장점을 가지고 있기 때문에 각 흙에 대한 함수특성곡선의 산정에 있어 번거로움을 크게 개선한 실험 장치이다. 여기서 셀 내부로 주입되는 압력을 제어하여 에너지의 평형에 의해 각 흡수력 당 변화되는 함수량을 구할 수 있다.

현재까지 여러 함수특성 예측모델식이 제안되어 있으나 본 논문에서는 식 (1)과 같이 Fredlund와 Xing이 1994년에 제안한 3계수 비선형 모형을 활용하여 함수특성곡선을 맞춤 곡선화 한 후 계수를 각각 산정하였다.

$$\theta = \left\{ \frac{1}{\ln[e + (S/a)^n]} \right\}^m \quad (1)$$

여기서,  $\theta$  = 체적당 함수량,

$S$  = 불포화 흡수력, 그리고

$a, n, m$  = 모델 계수

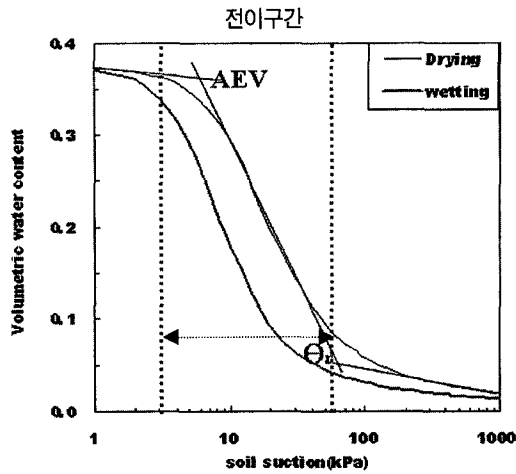
표 2. Fredlund와 Xing 모델에 의하여 산정된 계수

		편마 풍화토	화강 풍화토
건조 과정	a	13.255	5.850
	n	1.956	1.456
	m	1.350	1.652
습윤 과정	a	6.233	2.350
	n	1.350	1.556
	m	0.322	1.652

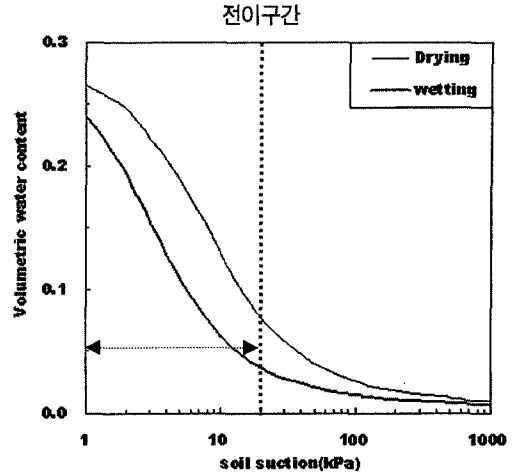
표 2는 편마 풍화토와 화강 풍화토를 대상으로 건조 과정과 습윤 과정에 대하여 각 계수들을 나타낸 것이다.

흙에서의 물과 공기의 이동 즉, 건조와 습윤에 따라 흡수력에 따른 함수량은 다르게 나타나는데 이는 흙의 물리적인 특징인 이력(hysteresis)이 나타남을 보이고 있다. 함수특성곡선 상의 건조과정과 습윤과정 상에서 나타나는 이력은 그림 6과 같다. 습윤 곡선의 특징으로 편마 풍화시료에 비하여 화강 풍화시료의 포화상태에서의 함수량이 비교적 작게 나타났으며 함수비가 변화하는 전이구간에서의 흡수력이 편마풍화시료에서는 대략 8kPa~30kPa인 것에 비하여 화강 풍화시료에서는 그보다 작은 범위인 약 10kPa이하에서 급격히 변화하였다. 이는 편마풍화시료가 비교적 모래질인 화강 풍화시료에 비해 세립의 실트질을 함유한 결과로 추정된다. 건조와 습윤 과정 모두 뚜렷한 비선형 sigmoidal 형태를 보이는 편마풍화토와는 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 공기함입값(AEV)과 잔류흡수력에 대한 산정은 대상 흙에 대한 포화와 불포화에 따른 흡수력을 나타내는 것뿐만 아니라 전이구간의 판정 기준이 된다. 실제 지반에서의 흡수력 분포가 이러한 전이구간에 집중되어 있으며 흡수력 값이 잔류쪽에 가까우면 건조한 상태를 보이고 AEV에 가까울수록 포화에 가까워진다. 즉 토사사면에서 이러한 상태는 흙이 내포하고 있는 함수비가 높아짐에 따라서 파괴 가능성이 증가 한다.



(a) 편마풍화토의 함수특성 이력



(b) 화강풍화토의 함수특성 이력

그림 6. 곡선 맞춤화된 함수특성곡선의 이력

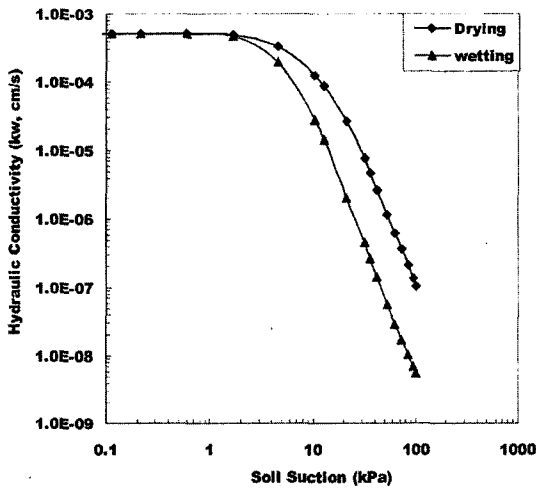


그림 7. 편마 풍화토의 불포화 투수계수

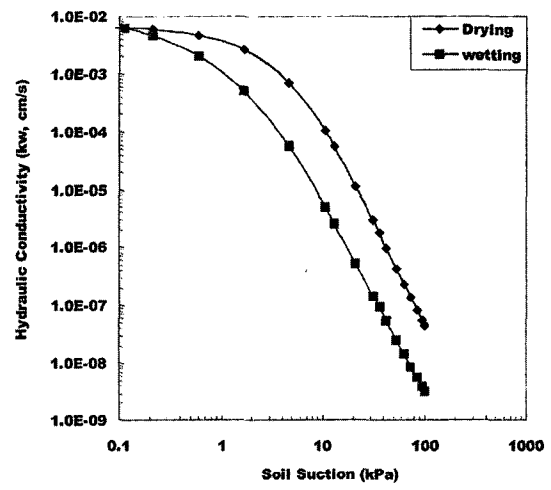


그림 8. 화강 풍화토의 불포화 투수계수

함수특성곡선은 불포화 투수계수를 산정하는 간접적인 방법으로 많이 활용되는데 본 논문에서는 Fredlund 등(1994)이 제안한 식 (2)를 활용하여 수치적분으로 각각의 값들을 추정하였다.

$$K_w = K_s \frac{\sum_{i=j}^N \frac{\theta(e^{y_i}) - \theta(\Psi)}{e^{y_i}} \theta'(e^{y_i})}{\sum_{i=1}^N \frac{\theta(e^{y_i}) - \theta_s}{e^{y_i}} \theta'(e^{y_i})} \quad (2)$$

여기서,  $K_w$  = 불포화 투수계수, 그리고

$K_s$  = 실험에 의한 포화 투수계수.

그림 7과 8은 함수량 보다 흡수력과 불포화 투수계수로 나타내었는데 이는 흡수력이 투수계수와 흐름을 지배하는 중요한 인자이며 함수특성 이력을 명확하게 나

타내는 장점이 있기 때문이다. 그림에서 편마풍화토와 화강풍화토 각각에 대하여 함수특성이력의 결과가 매우 다름을 알 수 있는데 건조과정과 습윤 과정상의 흡수력 별 불포화 투수계수의 차이는 포화시를 제외하고 건조 과정이 습윤 과정에 비해 작은 투수계수를 나타내었다.

그림 7의 편마 풍화토는 약 2~3kPa의 흡수력을 기준으로 건조와 습윤 과정에 대하여 각각 산정한 투수계수의 값이 서로 상이하게 나타났으며, 그림 8의 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 10 배 정도였다.

#### 4. 풍화사면의 침투 해석

실내 실험으로 구한 함수특성곡선의 건조과정과 습

운 과정에서 보이는 흙의 거동이 서로 전혀 다른 모습을 보임에 따라 동일한 흙에 대하여 건조곡선과 습윤 곡선을 달리 적용할 필요성이 있다. 따라서 시간에 따른 침투 해석에 있어서 중요한 불포화 지반 정수인 함수특성곡선의 이력에 대한 실험결과를 이용하여 서로 다른 해석결과를 도출해 내었다. 이를 위하여 본 연구에서는 시간을 고려한 침투해석이 가능한 유한요소해석 프로그램 SEEP/W(GEO-SLOPE 2005)를 활용하였으며, 그림 9와 같이 이상화된 무한사면의 유한요소망을 일반적인

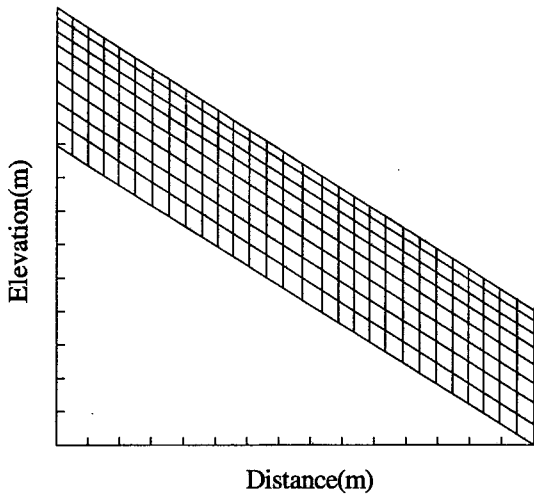


그림 9. 이상화된 무한 사면의 모형

1:1.5의 경사로 조성하고 3m의 사면깊이를 선택하여 적절한 불포화 침투효과를 구현하였다.

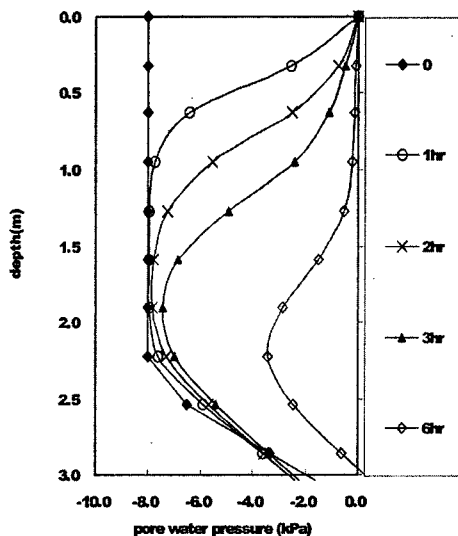
지반의 투수계수를 고려하여 임계 강우강도를 선정하였는데 편마 풍화사면의 경우 20mm/hr에 따라 7단계로, 화강 풍화사면의 경우 240mm/hr를 8단계로 선정하여 시간에 따른 침투해석을 실시하였다. 설정된 강우지속시간은 표 3과 같다. 또한, 기존 연구에서 침투해석이 있어서 선행강우에 의한 초기 지반상태가 습윤에 가까운 흡수력을 보일수록 포화가 비교적 빠른 시간에 진행되고 건조에 가까운 흡수력이면 침투의 지연으로 긴 시간 동안의 침투에 의하여 포화가 발생된다. 이를 고려하기 위하여 풍화사면의 현장흡수력 조건과 함수특성을 적절하게 반영한 선행강우에 의한 지반의 초기 흡수력을 적용하였다.

#### 4.1 편마 풍화사면의 침투해석

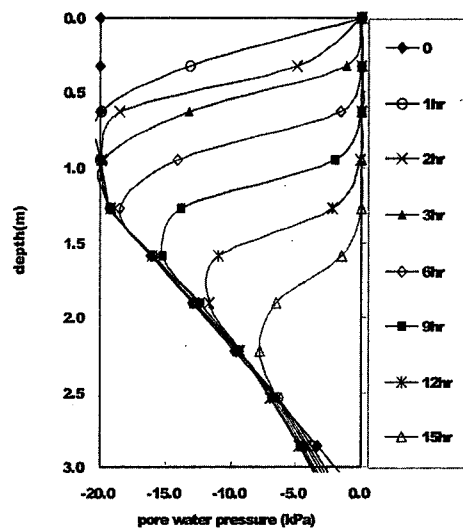
그림 10은 함수특성곡선의 건조곡선을 기본으로 하여 임계 강우강도 20mm/hr를 적용한 결과, 시간별로 나타나는 깊이 별 흡수력의 변화를 나타내었으며 그림 11에서는 동일 조건의 습윤 곡선을 적용하여 건조와 습윤 곡선에 대하여 해석결과를 비교한 것이다. 동일 조건의

표 3. 해석에 적용된 임계 강우강도와 침투시간

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

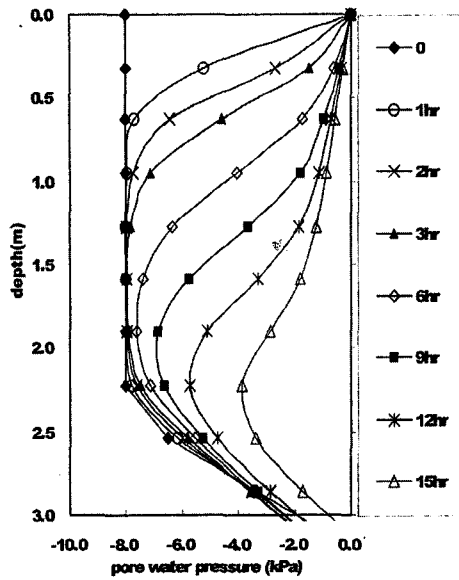


(a) 초기 흡수력 8kPa

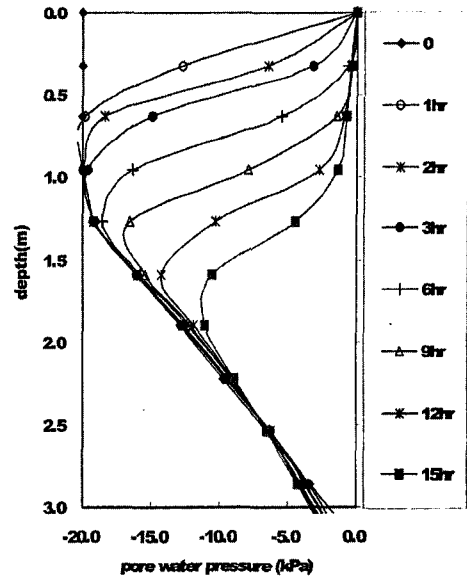


(b) 초기 흡수력 20kPa

그림 10. 편마풍화토 건조 함수특성곡선을 적용한 시간에 따른 깊이별 흡수력의 변화



(a) 초기 흡수력 8kPa



(b) 초기 흡수력 20kPa

그림 11. 편마풍화토 습윤 함수특성곡선을 적용한 시간에 따른 깊이별 흡수력의 변화

초기 흡수력에서 강우 시간이 지속될수록 습윤 곡선을 적용하여 나타난 강우 침투의 영향이 건조곡선을 적용한 경우보다 비교적 작음을 알 수 있다. 그림 10(a)의 초기 흡수력 조건 8kPa에서는 3시간에서 6시간 사이에 사면의 표면으로부터 침투 효과가 급격히 진행됨을 알 수 있으며 6시간 이후의 조건에서는 이미 포화대가 발현되어 지반이 물을 함유할 수 있는 능력을 초과한 것으로 판단된다. 다만 이와는 대조적으로 그림 11(a)의 습윤 곡선 적용시 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 침투시 일어나는 확산(hydraulic diffusivity) 또한 건조곡선의 적용 보다는 습윤 곡선의 경우에 비교적 느리게 발생하기 때문이다.

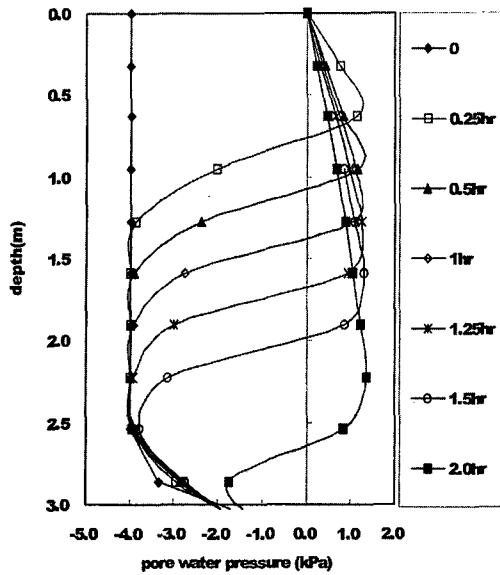
강우강도를 적용하기 직전인 사면지반의 초기 흡수력을 그림 10(a)에서는 8kPa로 그림 10(b)에서는 20kPa로 선정하여 비교한 결과, 비교적 습윤 상태에 가까운 초기흡수력 8kPa에서 깊이에 따라 급격한 흡수력의 변화를 확인할 수 있다. 이는 초기 지반 상태의 흡수력이 시간에 따라 침투 효과에 미치는 영향이 매우 큰 것으로 침투해석 적용시 이를 반드시 고려해야 한다.

#### 4.2 화강 풍화사면의 침투해석

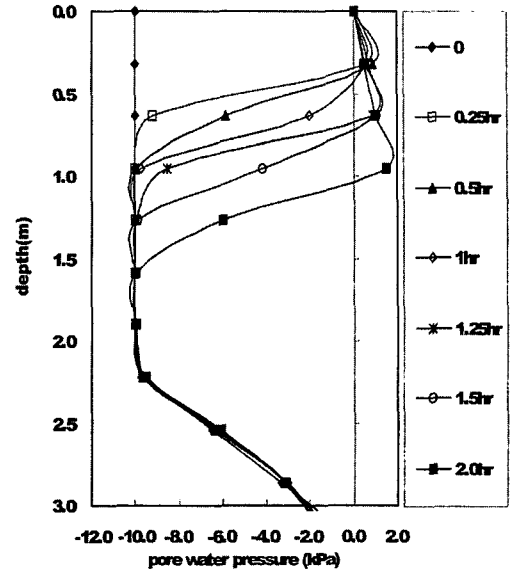
편마 풍화사면과 동일한 사면조건에서 실시한 화강 풍화사면에 대한 침투해석 결과는 그림 12, 13과 같다. 기본적으로 화강 풍화사면의 투수계수가 편마 풍화사면에 비해 약 10배 큰 것으로 확인하였기에 적용한 임계 강우강도는 240mm/hr로 적용하였다. 따라서 침투 효과 또한 단시간 내에 급격히 일어났으며 건조곡선과 습윤 곡선을 적용한 결과 그 차이가 편마 풍화사면에 비해 현격함을 알 수 있었다. 그림 12(a)와 그림 13(a)의 지반과 같이 초기 흡수력이 4kPa인 경우 습윤 곡선을 적용한 침투효과에 비하여 건조곡선을 적용한 경우 이미 사면 표면에서부터 포화가 일어나 양의 간극수압이 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 지반의 초기 흡수력의 범위가 비교적 작은 4kPa과 10kPa을 적용했음에도 불구하고 침투 경향이 서로 매우 다르게 나타나 함수특성곡선 상의 비교적 좁은 흡수영역의 전이 구간이 영향을 주었음을 알 수 있다.

#### 5. 선행 강우에 대한 흡수력 변화

깊이별 흡수력의 변화를 선행강우조건을 고려한 초기 흡수력의 차이로 살펴보면 그림 14, 15와 같다. 습윤 곡선을 적용한 경우 강우지속시간에 따른 흡수력의 변화를 얕은 지점과 깊은 지점으로 살펴보았다. 0.5m의

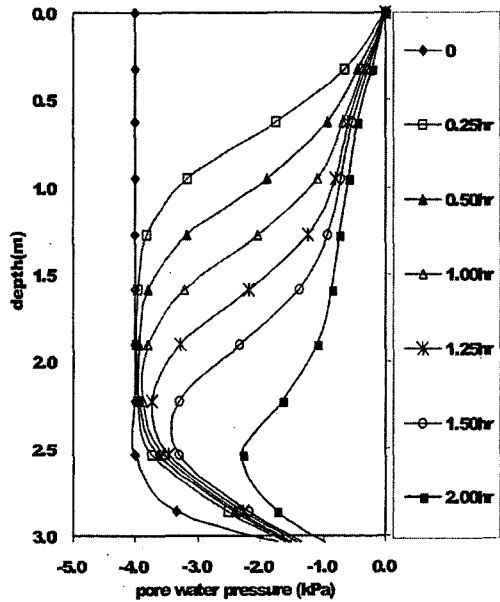


(a) 초기 흡수력 4kPa

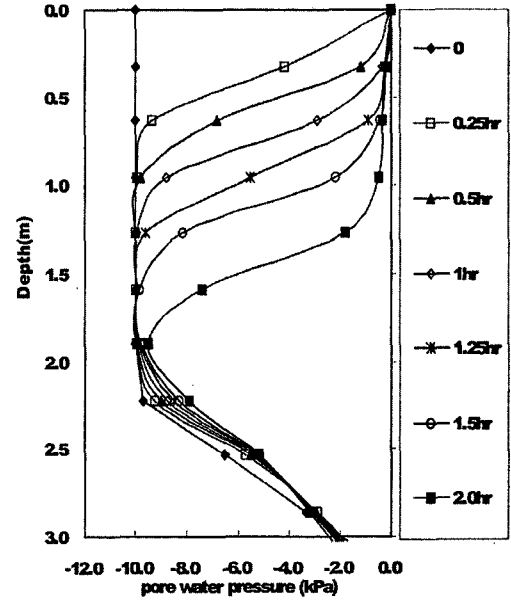


(b) 초기 흡수력 10kPa

그림 12. 화강풍화토 건조 함수특성곡선을 적용한 시간에 따른 깊이별 흡수력의 변화



(a) 초기 흡수력 4kPa



(b) 초기 흡수력 10kPa

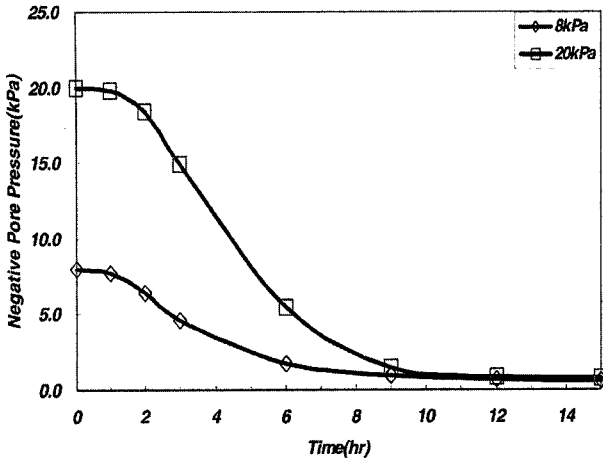
그림 13. 화강풍화토의 습윤 함수특성곡선을 적용한 시간에 따른 깊이별 흡수력의 변화

경우 선행강우의 효과와는 관계없이 어느 정도 강우강도 및 강우지속기간이 지속되면 흡수력 변화가 수렴하는 것을 알 수 있으며 반면에 깊은 층에서는 선행강우효과가 고려된 초기 지반의 흡수력이 영향을 미치고 있다. 이는 습윤 전면이 높은 흡수력대로 이동함과 동시에 낮은 불포화 투수 능력으로 인하여 지연됨을 의미하여 건조측 함수특성보다는 습윤측 함수특성의 경우 그 흡수력의 반응이 매우 느려지고 있기 때문이다.

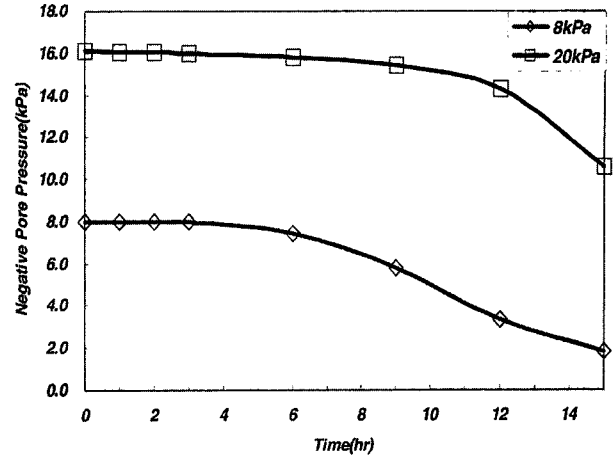
따라서 선행강우 효과는 상대적으로 사면이 깊고 지

반의 밀도가 높은 위치일수록 강우강도에 영향을 주어 일정 시간 동안 불포화 침투에 대한 흡수력의 감소를 지연시키는 역할을 하며 임계시간 이후에는 수렴하는 경향을 보인다. 따라서 선행강우에 의한 시간에 따른 흡수력의 변화는 사면의 깊이와 불포화 투수 능력에 따라 크게 좌우되며 이러한 흡수력의 감소폭과 변화 반응시간들이 적절하게 고려된다면 향후 사면의 위험도 평가에 활용이 가능할 것으로 판단된다.



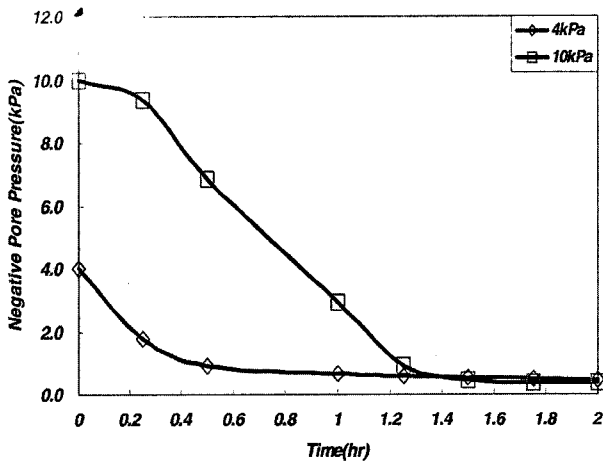


(a) 깊이 0.5m

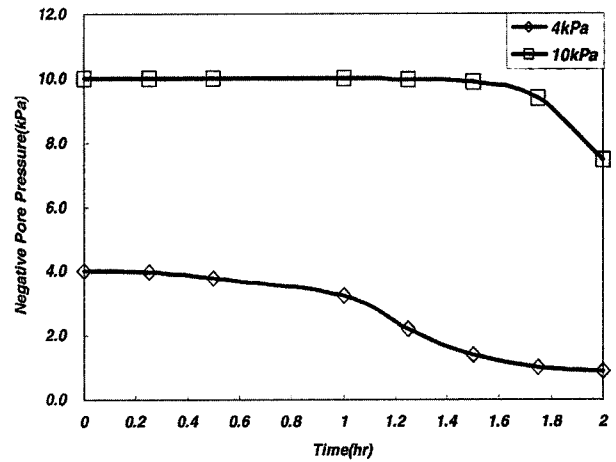


(b) 깊이 1.5m

그림 14. 편마풍화토 습윤 함수특성곡선을 적용한 시간에 따른 깊이별 흡수력의 변화



(a) 깊이 0.5m



(b) 깊이 1.5m

그림 15. 화강풍화토 습윤 함수특성곡선을 적용한 시간에 따른 깊이별 흡수력의 변화

## 6. 결론

풍화 사면에 대한 불포화 침투 메커니즘은 여러 인자들에 의하여 지배 받고 있으나 특히 강우시에는 선행 강우조건과 강우량에 지배받는 Macro 공극에 따른 흐름이 매우 중요하다. 따라서 대표적인 국내 풍화계열 지반인 편마 풍화토와 화강 풍화토로 조성한 이상적인 사면을 대상으로 함수특성곡선의 이력과 선행강우를 고려한 부정류 불포화 침투 해석을 실시한 결과는 다음과 같다.

- (1) 조립질인 화강풍화토의 공기함입값, 잔류흡수력, 포화 흡수력, 그리고 이력의 폭이 세립질인 편마풍화토에 비하여 작게 나타났다.
- (2) 함수특성곡선의 이력은 함수비 보다는 흡수력의 차

이가 침투 해석에 있어 매우 상이한 결과를 나타내고 있다. 특히 함수특성 곡선의 전이구간 선정은 침투 해석에 매우 중요하며 불포화 투수 능력을 결정하는 중요한 요인이 된다.

- (3) 강우 시간에 따른 침투 해석 시 습윤 함수특성곡선의 적용은 건조곡선을 적용하는 경우 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 다르며 사면에 작용하는 침투 효과는 내적요인인 불포화 사면지반의 투수능력과 선행 강우에 의한 흡수력 그리고 사면의 깊이가, 외적요인인 강우강

도와 이에 따른 침투시간과 상호작용을 하고 있다.  
 (5) 언급된 강우에 의한 흡수력의 반응 시간 등을 고려하면 추가적으로 강우로 인한 불포화 풍화 사면의 위험도 평가가 가능하리라 판단된다.

### 참 고 문 헌

1. 김재홍, 박성완, 정상섭, 유지형 (2002), “강우시 습윤에 의한 불포화 풍화토의 사면안정 해석 연구”, *한국지반공학회 논문집*, 제18권 2호 pp.128-136.
2. 이인모, 조우성, 김영욱, 성상규 (2003), “풍화토 사면에서 강우로 인한 간극수압 변화에 대한 실험연구”, *한국지반공학회 논문집*, 제19권, pp.41-49.
3. Cho, W. (2001), “In-situ Monitoring of Matric Suctions in a Weathered Granite Soil Slope”, Master’s Thesis, *Korea University*, Seoul, Korea.
4. Kim, S., Hong, W. and Kim, Y. (1992), “Prediction of Rainfall-triggered Landslides in Korea”, Proc. of 6th Int. Symp. on Landslides, *Christchurch, New Zealand*, Vol.2, pp.989-999.
5. Fredlund, D. and Xing, A. (1994), “Equations for the Soil-Water Characteristic Curve”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.31, No.4, pp.521-532.
6. Fredlund, D. (2005), “Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.132, No.3, pp.286-321.
7. Fredlund, D., Xing, A. and Huang, S. (1994), “Predicting the Permeability Function for Unsaturated Soils Using the Soil-water Characteristic Curve”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.31, pp.533-546.
8. GEO-SLOPE International Ltd (2005), “Computer program SEEP/W for finite element seepage analysis”, User’s guide.

(접수일자 2006. 4. 25, 심사완료일 2006. 7. 19)