

## 붕괴가 발생한 급경사지의 현장 투수계수

### Permeability Coefficient of Unsaturated Soil in Steep Slope Failure Area

최은경<sup>1)</sup>, Eun-Kyeong Choi, 김성욱<sup>2)</sup>, Sung-Wook Kim, 박덕근<sup>3)</sup>, Dug-Keun Park, 오정림<sup>4)</sup>, Jeong-Rim Oh

<sup>1)</sup> (주)지아이, 지반정보연구소, Geo-Information Research Group Co., Ltd.

<sup>2)</sup> 지아이, 지반정보연구소 부장, General Manager, Geo-Information Research Group Co., Ltd.

<sup>3)</sup> 소방방재청 방재연구소, 시설연구관, Senior Analyst, National Emergency Management Agency

<sup>4)</sup> 소방방재청 방재연구소, 시설연구사, Analyst, National Emergency Management Agency

**SYNOPSIS** : To examine saturation characteristics of an unsaturated soil in the steep slope area with collapse, it separated dry season from rainy season and measured water content and permeability, and measured permeability by using a tension infiltrometer in the site. In addition, it conducted electrical resistivity survey to look into thickness of ground and geological structure of underground. The collapsed slope increased depth of weathered zone compared to upper slope, and there electrical resistivity anomalous zone caused by the filtrated underground water was observed. The permeability of the collapsed area was observed high compared to upper and lower slopes of retarding basin without collapse, and the permeability measured by dividing the dry season and rainy season was measured high in case of dry season.

**Keywords** : steep slope area, infiltrometer, permeability

## 1. 서론

토양공극은 토양수분이 차지하는 공간이며 흐름이 발생하는 통로에 해당한다. 토양공극의 크기와 체적은 수분의 보유 정도와 투수성에 영향을 미치며 토양의 수분상태와 포화 또는 불포화 투수계수와의 관련성이 있다. 투수계수(포화수리전도도,  $K_{sat}$ )는 토질 및 기초, 임업 및 농업, 수리학적 과정에서 매우 중요한 변수로서 포화수리전도도의 중요성 때문에 현장이나 실험실에서 포화수리전도도를 구하기 위해 많은 방법들이 제안되고 있다. 그러나 샘플크기, 흐름의 기하학적 차이(flow geometry), 샘플 채취 절차 그리고 여러 토양의 수리물리학적 특성에 따라 달라지며, 대부분 포화수리전도도를 구하는 방법들은 토양 상태와 종류 등에 대해 부정확하게 나타난다.

본 연구에서는 물리탐사법을 이용하여 붕괴가 발생한 지반의 지하수 흐름을 파악하고, 피스톤 샘플러를 이용하여 현장에서 채취한 토양시료와 장력침투계를 이용하여 현장 투수계수를 측정하여 붕괴 이력이 있는 급경사지의 침투 특성을 분석하였다.

## 2. 불포화토의 포화특성

2005년 집중호우에 의해 붕괴가 발생한 무주군 공진소류의 급경사지를 대상으로 시료를 채취하여 정수위 투수시험을 실시하였으며, 현장에서 장력침투계를 이용한 투수시험을 실시하였고, 동일지점에서 전기비저항탐사를 실시하였다.

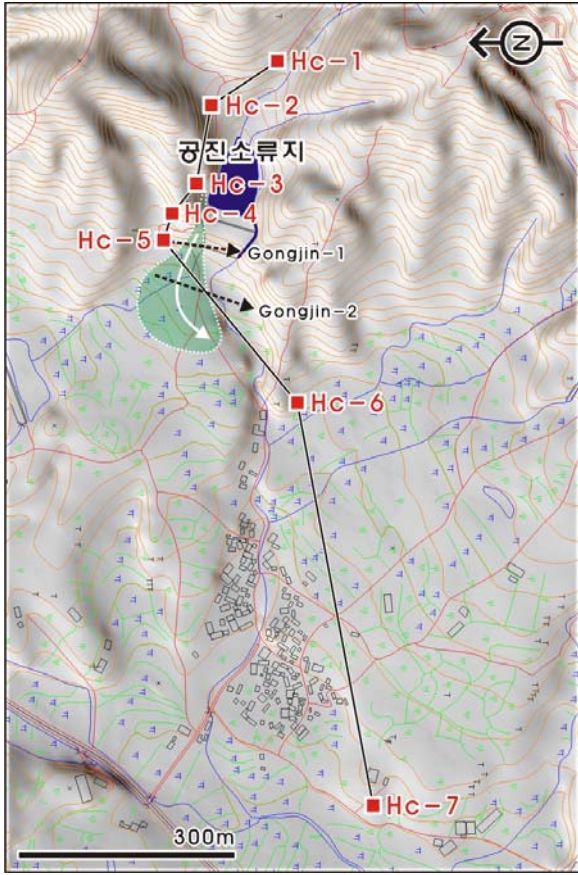


그림 1 시료 채취 및 현장 시험 위치(좌), 급경사지 전경(우)

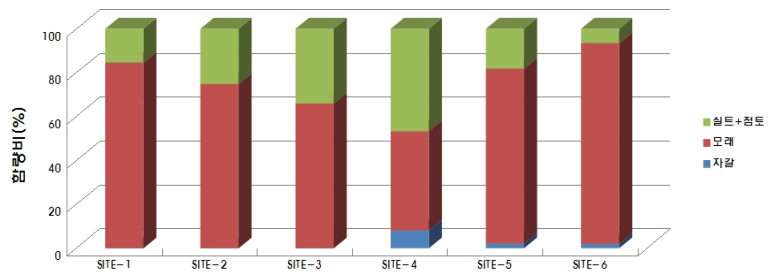
## 2.1 피수층 코어의 정수위 투수시험

공진소류지 일원의 토양층은 모래의 함량이 우세하며, 급경사지의 하부 평탄지(SITE-3, SITE-4)는 실트와 점토의 함량이 증가한다. 붕괴가 발생한 부분(SITE-6)은 대부분 사질토로 구성되어 있다.

정수위 투수시험은 비교적 투수계수가 큰 사질토에 적합한 시험으로 일정한 수위차(h)에서 지름과 길이가 일정한 시료내부를 일정한 시간에 침투하는 물의 양을 측정하여 투수계수를 결정하는 방법으로 소류지의 상부에서 하부 평탄지까지 5개의 시료에 대하여 투수계수를 산정하였다(표 1). 시료 채취 지점 중 Hc-4, Hc-5지점에서 붕괴가 발생하였다.



조사위치도



지점별 입도분포

그림 2. 공진소류지 일원 토양의 입도 구성

표 1. 피스톤 코어의 투수계수

위치	Q(cm <sup>3</sup> )	Time(sec)	L(cm)	A(cm <sup>2</sup> )	h(cm)	K (cm/sec)	K (cm/hr)
Hc-1	14.1	1,800	5.5	28.26	13.7	1.11E-04	0.401
Hc-2	21.0	1,800	5.1			1.54E-04	0.553
Hc-3	44.0	510	5.5			1.23E-03	4.412
Hc-5	94.3	330	5.6			4.13E-03	14.880
Hc-6	36.0	1,800	5.5			2.84E-04	1.023

실내시험결과 공진소류지 일대의 투수계수의 분포는  $1.113 \times 10^{-4} \sim 4.13 \times 10^{-3}$  cm/sec의 범위로 나타났다. 공진소류지의 상류 및 하류에서는 낮은 값의 투수계수 분포를 보이며, 산사태 붕괴발생지역에서는 높은 투수계수의 분포를 보인다.

## 2.2 장력침투계를 이용한 투수계수 산정

### 2.2.1 산정원리

수리전도도의 3차원비로부터 불포화침투에서 투수계수와 물의 함량에 대한 관계를 계산하기 위해 사용되어지고, 반경(cm)으로부터 토양 내 정상상태에서의 피압되지 않은 침투율에 대해서 대수학적 근사치로 표현된다(식 1).

$$Q_s = \pi r^2 K + \frac{4rK}{\alpha} \quad (1)$$

$Q_s$ : 단위시간(cm<sup>3</sup>hr<sup>-1</sup>)당 들어가는 유량,  $K$ (cmhr<sup>-1</sup>): 투수계수

$r$ : 장력침투계의 디스크 지름,  $\alpha$ :  $\lambda^{-1}$ ,  $\lambda^{-1}$ : 미세공극에서 모관력 범위(L)

식에서 우변의 첫째항은 중력과 관계되며, 두 번째 항은 토양 내 입자의 기하학적 힘과 모관력의 분포를 나타낸다. Gardner(1958)에 의해 제안된 토양의 불포화투수계수는 토양수분흐름흡입력 $\psi$ (cm)에 의해 변화되어진다고 가정했다(식 2).

$$K = K_s \exp(\alpha\psi) \quad (2)$$

$\psi$ : 장력(cm),  $\alpha$ : 지수곡선의 기울기,  $K_s$ (cmhr<sup>-1</sup>): 포화투수계수,  $K$ (cmhr<sup>-1</sup>): 불포화투수계수

식 1은 불포화 침투와 물이 고여 있는 상태에서의 침투해석을 위해 적용되어질 수 있는 반면, 식 2는  $\psi \leq 0$ 인 경우에만 적용된다. 디스크-장력 침투계를 가지고 최소한 두 장력조건(예를 들면,  $\psi_1$ ,  $\psi_2$ )에서 디스크의 바닥에 위치한 다공질막을 통해서 단위시간당 토양내로 들어가는 물의 양(Q)을 측정한다. 동일한 장소에서 최소 두 번 이상의 장력조건에서 한 번의 장력을 줄 때마다. 정상류에 이룬 후에 흐름을 측정한다. 불포화된 토양의 경우, 두 번의 실험을 통해 식(1)의  $K$ 값을 식(2)의  $K$ 에 대입하고 양변에 로그를 취하면 식 (3), 식(4)와 같으며, 여기서 우리는  $\alpha$ 값을 얻기 위해 식(5)와 같이 표현하였다.

$$\ln Q_s(\psi_1) = \alpha\psi_1 + \ln\left[\left(\frac{4a}{\alpha} + \pi r^2\right)K_s\right] \quad (3)$$

$$\ln Q_s(\psi_2) = \alpha\psi_2 + \ln\left[\left(\frac{4a}{\alpha} + \pi r^2\right)K_s\right] \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{\ln(Q(\psi_2)/Q(\psi_1))}{\psi_2 - \psi_1} \quad (5)$$

$Q(\psi_1)$ 과  $Q(\psi_2)$ 는 압력수두(pressure head)  $\psi_1$ 과  $\psi_2$ 에서 정상류를 이룰 때의 측정된 침투율이다. 식 (5)는 두 개의 장력을 가지고  $\alpha$ 값을 얻는 식이다. 만약 세 개 이상의 장력을 사용한다면 장력과 유량의 그래프로 도시한 후 비선형관계의 최적화된 수리상수( $\alpha$ )을 구한다. 이런  $\alpha$ 값을 알아냄으로써 식(2) 또는 식(3)으로부터  $K_{sat}$ 을 계산할 수 있다.  $K_{sat}$ 과  $\alpha$ 값을 알면 불포화투수계수와 장력사이의 관계를 얻을 수 있다.

### 2.2.2 측정결과

조사지역의 불포화 및 포화투수계수를 측정하기 위하여 각 장력에서 시간에 따른 단계적인 침투량을 기록하여 직선회귀식을 구한 후 그 식의 기울기를 산정하였다(그림 3). 이 값을 이용하여 수위강하율을 산정하고, 각 장력에서  $Q(h)$  값을 구하는데 infiltrometer의 reservoir의 지름이 4.45cm이므로 단위를  $cm^3/hr$ 로 단위면적을 곱하여 계산한다. 각 장력에 대한  $Q$  값을 구한 후 식 (5)를 이용하여 계산하고,  $K(h)$ 값과 장력에 대한 측정값을 보정하고, 지수식으로 회귀분석을 한다. 여기서 36.914는  $K_s$  값이다. 장력(x)이 0일 때 36.914가 되며, 0.4911은  $\alpha$ 값이다. 수식의 계산에서  $\alpha$ 값은  $1/\lambda$ 로 표현했다(그림 3).

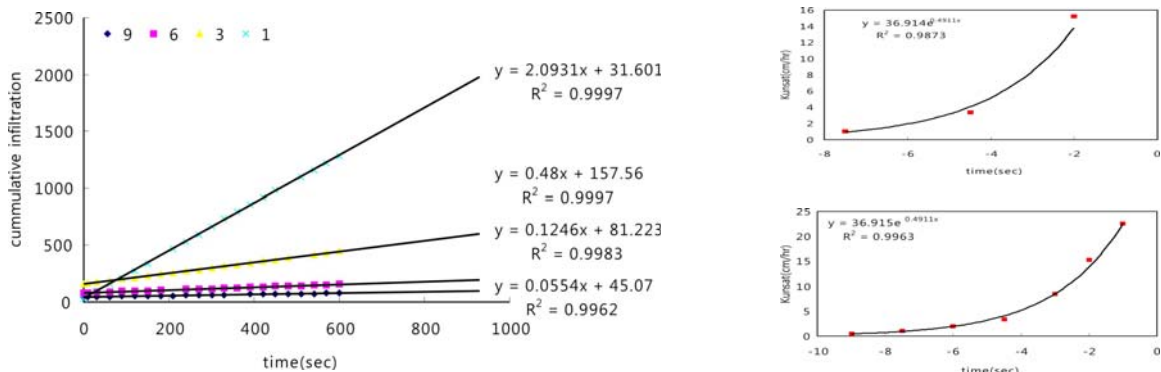


그림 3. 장력에서 시간에 따른 침투량(좌)과 불포화·포화 투수계수산정(우)

붕괴가 발생한 공진소류지 급경사지의 토양을 대상으로 측정한 현장 투수시험의 결과는 표 2와 그림 4와 같다. 붕괴가 발생한 소류지와 소류지 중단의 투수계수는 동일 지점에서 측정된 토양의 포화·불포화 수리전도도(투수계수)는 붕괴가 발생되지 않은 소류지의 상단과 소류지 하류의 공진마을에서 비해 매우 높게 측정되며, 동일지점 시기를 달리하여 측정된 투수계수는 우기 시에 비해 건기가 높게 측정되었다.

표 2. 현장의 포화-불포화 투수계수

	불포화투수계수 $K_{usat}(cm/hr)$				포화투수계수 $K_{sat}(cm/hr)$
	-9(cm)	-6(cm)	-3(cm)	-1(cm)	
HC-2(3차) 소류지 상단	0.043	0.155	0.556	1.307	2.003
HC-3(3차) 소류지 중상단	1.265	2.229	3.927	5.728	6.919
HC-4(2차) 소류지중단	0.579	1.772	5.425	11.437	16.606
HC-5(1차) 소류지	0.444	1.939	8.460	22.590	36.914
HC-5(2차) 소류지 중앙부	0.860	1.661	3.208	4.975	6.196
HC-5-1(2차) 소류지 상단	0.694	0.733	0.774	0.803	0.818
HC-5(3차) 소류지	1.500	2.757	5.065	7.599	9.308
HC-6(3차) 소류지 아래 고속도로	1.538	5.117	17.020	37.925	56.611
HC-7(2차) 공진마을	0.017	0.051	0.156	0.329	0.478

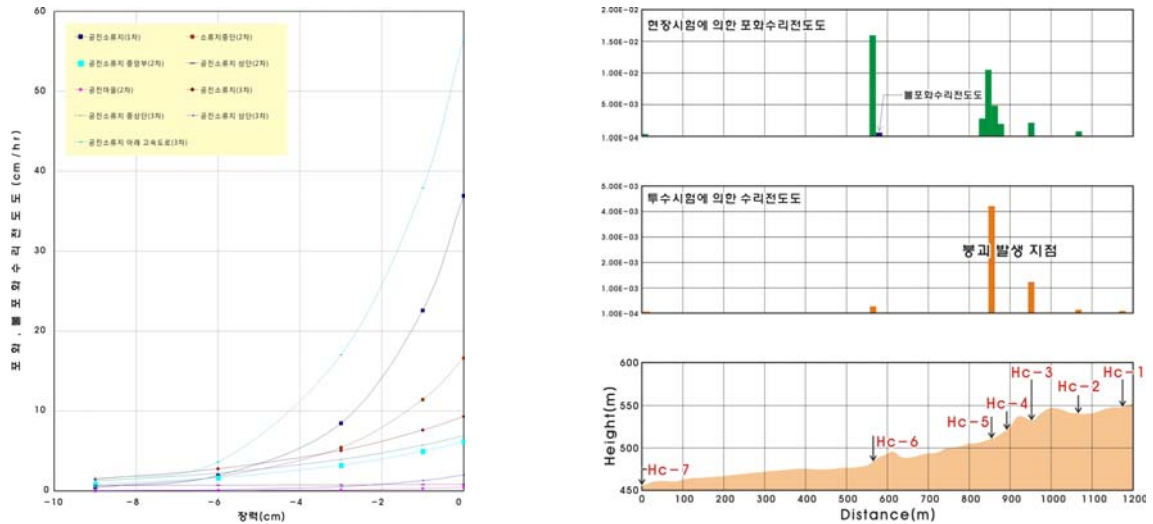


그림 4. 현장실험결과

### 2.3 붕괴지역의 전기비저항 단면

탐사위치는 공진소류지 제방 하단부에서 고도에 따라 상, 하 측선을 선정하여 평행하게 두개의 측선을 배열하였다. 전극배열은 쌍극자배열(dipole-dipole array)법으로 전극간격은 5m로 하였다. 조사지역에서 실시된 탐사위치는 그림 1과 같다. 탐사결과 Gongjin-1 단면의 A는 공진소류지에 해당하는 부분으로 지표수가 직접적으로 하부로 유출되지 않고 있으며, 소류지의 좌측부를 통해 지표수가 유출되고 있다. 급경사지의 붕괴는 지표수 유출지점이 발생하는 지점에서 발생하였다. 소류지 하부의 Gongjin-2 단면에서는 토양층의 포화로 인한 3개의 저비저항 이상대가 관찰된다. 이는 토양내부로 침투한 지하수의 흐름이 하부로 갈수록 여러 경로를 따라 확산되는 것을 의미하며, 저비저항대의 규모로 볼 때 붕괴는 소류지에서 하부로 갈수록 규모가 증가하였고, 최대 붕괴는 점이적으로 좌측부로 이격되어 발생하였다. 붕괴 지역 하부의 비저항분포에 의한 붕괴의 현황은 강우 시 소류지 좌측부에서 붕괴가 발생하였고, 부채꼴의 모양으로 확산된 후 하부 계곡부와 접하는 부분에서 수렴된 형태가 예상된다. 붕괴 이후 지하수의 흐름은 이완된 부분을 따라 북서 방향으로 유선을 그리며 하부로 연장되는 흐름을 보인다(그림 5).

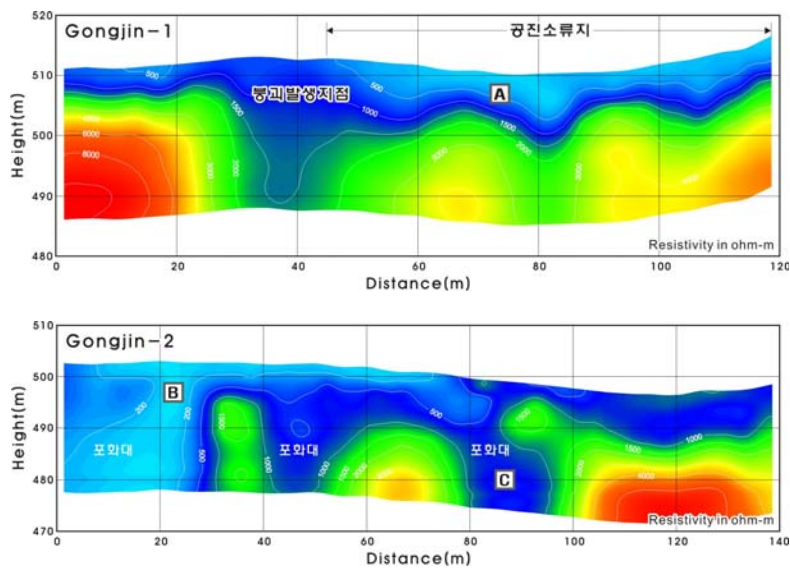


그림 5. 공진소류지의 비저항 단면

### 3. 결 론

붕괴가 발생한 급경사지의 불포화토의 포화특성을 파악하기 위하여 붕괴지역과 상부 및 하부 지역 경사면을 대상으로 건기와 우기를 구분하여 함수비와 투수계수를 측정하고, 현장에서 장력침투계를 이용하여 투수계수를 측정하였다. 전기비저항탐사결과 붕괴 발생 경사면은 상부사면에 비해 풍화대의 심도가 증가하며, 침투된 지하수가 수렴되어 형성된 저비저항 이상대가 관찰된다. 붕괴 지점의 투수계수는 붕괴가 발생되지 않은 소류지의 상부와 하부 경사면에 비해 매우 높게 관찰되며, 건기와 우기를 구분하여 측정한 투수계수는 건기시의 경우가 높게 측정되었다. 이러한 실험 결과는 유사한 강도를 가진 강우 사상이 발생할 경우 건기시의 수분 침투가 빨라지며, 입자의 이동 정도가 심화될 것으로 해석된다.

1. 광용석(2008), "광릉 산림 소유역에서의 대공극흐름분율과 유료대공극부피분율의 공간적 분포", 부산대학교 공과대학 석사논문
2. Gardner, W. R.,(1958), "Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table", **Soil Science**, p. 85, pp.228-232