

## 풍화잔적토의 투수 및 입자유동 특성에 관한 실험적 고찰 An Experimental Study on Particle Transport of Weathered Residual Soil

이인모<sup>1)</sup>, In-Mo Lee, 김상균<sup>2)</sup>, Sang-Gyun Kim, 김형섭<sup>3)</sup>, Hyung-Seop Kim

<sup>1)</sup> 고려대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engrg., Korea Univ.

<sup>2)</sup> 고려대학교 대학원 토목환경공학과 박사과정, Ph. D Student, Dept. of Civil Engrg., Korea Univ.

<sup>3)</sup> 고려대학교 대학원 토목환경공학과 석사과정, Master Student, Dept. of Civil Engrg., Korea Univ.

**SYNOPSIS** : The characteristics of weathered residual soil is influenced by the geological and mineralogical characters of the parent rock as well as the degree of weathering. The grain-size distribution of the soil varies significantly according to those factors mentioned above. In recent days, there have been studies on the strength characteristics of the weathered residual soil, but researches on the permeability characteristics of the soil are yet insufficient. So, in this paper, experimental study was made to figure out the permeability and particle transport characteristics of the weathered residual soil. Factors that affect the permeability and particle transport mechanism are porosity, amount of fine particles, and grain-size distribution. Peak effluent concentration and cumulative particle effluent of Shinnae-dong specimen are larger than that of Poi-dong mainly because the Shinnae-dong specimen has poorly-graded grain size distribution. When the degree of compaction and the amount of colloidal particles are larger, the critical hydraulic gradient goes up higher also.

**Key words** : particle transport, weathered residual soil, permeability

### 1. 서론

풍화잔적토(weathered residual soil)는 암석이 지표면에서 풍화되어 흙으로 변하여 그 장소에 잔류해 있는 것으로 그 공학적 성질에 있어 모래 또는 점토와 달리 모암의 지질·광물학적 특성이나 풍화의 정도에 큰 영향을 받는다. 입도분포에 있어서도 풍화의 정도에 따라 연암에 가까운 것으로부터 점토크기까지 다양한 입자가 복합되어 있어 강도 및 투수특성이 다른 흙에 비해 매우 복잡한 양상을 보인다. 국내의 경우 많은 지반구조물이 풍화잔적토 지반에 설치되어 있어 풍화잔적토의 공학적 거동을 파악하는 것은 매우 중요한 과제이며 최근에 풍화잔적토의 강도특성에 관한 연구실적은 어느 정도 발표되고 있지만 풍화잔적토의 투수특성에 관한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 그러나 풍화잔적토의 생성원인과 입도분포특성을 고려할 때, 풍화잔적토의 강도특성과 마찬가지로 투수특성은 매우 중요하며 이들은 분리되어 연구되기 보다는 복합적으로 파악되어야 하며 특히 지반구조물의 안정문제에 있어서 투수에 의한 세굴, 파이핑, 토사유실 등의 용어로 표현되는 입자유동(particle transport)현상이 풍화잔적토 지반에

서 상대적으로 많이 발생한다. 예를 들면, 강우나 지하수의 흐름과 같은 수리동역학적 요인에 의한 흠입자유동 때문에 옹벽 배면의 세립토사가 강우에 의해 이동하여 옹벽의 배수파이프를 막아 수압을 증가시키고 배수터널에서는 이동된 세립분이 필터재를 막는 현상이 발생하여 라이닝에 과도한 침투수압을 발생시키게 되는 원인이 된다. 또한 흠땀 또는 사력땀의 경우는 입자유동에 의해 체체에 점차적인 침식유로를 형성하거나 이동된 세립토사가 저부 필터층에 퇴적되어 과도한 동수경사로 인한 파이핑 현상을 유발하는 등의 문제들이 지반에서의 물의 흐름에 기인한다.

외국의 경우에는 오히려 입자유동이론을 오염된 지반을 정화하는데 이용하기도 하는데 이는 오염된 지층에 물을 공급하여 흐름을 유발하고 큰 비표면적을 갖고 있는 점토 입자에 흡착된 오염물을 이동시켜 처리하는 방법으로 이루어지고 있다. 이와 같이 풍화잔적토에 설치된 많은 지반구조물에 있어서 투수 및 입자유동현상이 지반구조물의 공학적 거동에 미치는 영향은 상당히 크며 체계적인 연구가 필요하다.

그러므로 본 논문에서는 국내의 대표적인 풍화잔적토 시료에 대한 실험적 고찰을 통해 동수경사와 투수계수의 관계, 입자유동이 발생하기 시작하는 한계동수경사, 시간에 따른 입자유동특성 그리고 동수경사가 일정한 경우와 동수경사가 주기적으로 변화하는 경우의 입자유출량을 파악하여 풍화잔적토의 투수 및 입자유동특성 연구의 기틀을 마련하고자 한다.

## 2. 풍화잔적토의 투수 및 입자유동 이론

### 2.1 풍화잔적토의 투수

풍화잔적토는 연암에서 점토 크기까지 다양한 입자가 복합되어 있고 입도분포가 같아도 모암의 지질·광물학적 특성이나 풍화의 정도에 따라 공학적 특성이 다르기 때문에 그 투수특성을 통일적으로 설명하기는 곤란하다. 그러므로 일반적인 모래 또는 점토와 달리 풍화잔적토의 유속은 동수경사와 밀접한 관계를 가지며 다음과 같이 표시되어진다.

$$v = k i^n \quad (0 < i < i_0) \quad v = k (i - i_0) \quad (i > i_0) \quad (1)$$

여기서  $v$ 는 유속,  $i$ 는 동수경사,  $n$ 은 모암의 종류와 풍화도에 따른 상수,  $i_0$ 는 초기동수경사,  $i_e$ 는 특정의 동수경사이다.

이와 같이 풍화잔적토에서 동수경사는 투수특성에 영향을 미치며 동수경사의 크기가 클수록 시료의 압축현상에 의해 간극비가 감소되거나 토양생성과정에서 나타나는 물의 통로를 막는 현상이 발생하여 투수성이 감소하는 것으로 알려져 있다. 또한 풍화잔적토의 중요한 특성 중의 하나가 투수성의 경시변화(經時變化)인데 이는 동수경사  $i$ 를 일정하게 유지하고 유량을 장시간에 걸쳐 측정하는 경우 시간과 유량은 Darcy법칙에 따르지 않고 시간이 경과함에 따라 투수성이 감소한다는 것이다. 이와 같이 투수계수가 시간적으로 감소하는 현상에 대한 이유는 충전현상으로 설명되는데, 즉 투수시험시 시료 바닥에 설치되는 여과재(filter)와 액체사이의 현상으로 물이 시료를 통과하면서 시료 내의 세립분을 포함하는 현탁액(suspension) 상태가 되어 여과재에 도달하고, 이 때 세립분은 여과재의 간극에 포착되어 간극을 충전시키기 때문에 투수성이 감소하게 된다는 것이다.

### 2.2 풍화잔적토의 입자유동

풍화잔적토의 입도분포 특성으로 인해 풍화잔적토지반에 설치된 지반구조물에 흐름이 발생하는 경우, 흐름에 의한 점토크기 입자의 유동이 발생하며 동수경사가 큰 경우는 실트크기의 입자도 물과 함께 이동한다. 이와 같은 흠 모체로부터의 세립자의 이탈과 이동에 대한 물리적 현상을 알아보면 다음

과 같다. (Reddi와 Govindaraju, 1995)

○ 흙 모체로부터의 점토입자 이탈

점토입자가 가지고 있는 전기화학적 힘 그리고 흙 모체와의 상호표면력 때문에 흙모체에 붙어 있는 입자와 간극 속에 부유되어 있는 입자는 움직이지 않고 평형을 이루고 있다. 그러므로 강우 또는 지하수위변동으로 인해 간극 크기에서의 콜로이드 입자가 움직일 수 있는 힘이 가해져야 입자가 움직이게 된다. 이와 같이 입자이탈을 일으키는 주 요인을 간극 벽에 작용하는 흐름의 속도에 의한 전단력과 흙에 작용하는 동수경사에 의한 압축력으로 표현할 수 있다.

○ 간극수에서의 입자의 유동

수두차로 인해 발생된 전단력과 압축력에 의해 흙 모체에서 이탈한 콜로이드 입자와 부유상태의 입자는 물과 함께 간극수의 경로를 따라 부유형태를 띄며 이동하게 된다. 이때 흐르는 물에 대한 세립자의 함량을 입자유출농도(C)로 볼 수 있다.

○ 점토입자의 퇴적

점토입자가 흙 모체에서 이탈하여 부유형태의 액체로서 흐름의 속도에 의해 매체 내의 간극 사이로 움직이며 간극수의 흐름속도가 변화되거나 간극의 크기의 변화에 의한 기하학적 조건에 의해 어떤 간극에서는 입자가 퇴적되거나 흙 모체에 부착되게 된다. 퇴적된 입자들은 간극수의 속도나 간극의 크기 조건이 바뀌면 다시 움직이기도 한다. 이와 같은 세 가지 메카니즘은 입자의 이동 과정에서 동시에 발생하는 것으로 볼 수 있다.

### 3. 투수 및 입자유동 실험

#### 3.1 실험 시료

본 실험에 사용한 시료는 국내의 대표적인 풍화잔적토 지반으로 알려진 서울 신내동과 포이동 지역의 흙을 이용하였다. 실험조건으로 주어진 건조단위중량과 함수비로부터 정적다짐을 통해 일정한 크기를 갖는 공시체를 제작하였다. 시료의 입도분포 형태는 그림 1과 같으며, 시료의 역학적 특성들은 표 1에 나타난 바와 같다. 또한 시료의 구성성분을 알기 위하여 X-ray 회절분석을 실시하였으며, 그 결과는 표 2와 같다. 시료의 직경은 10 cm, 높이는 4 cm이다.

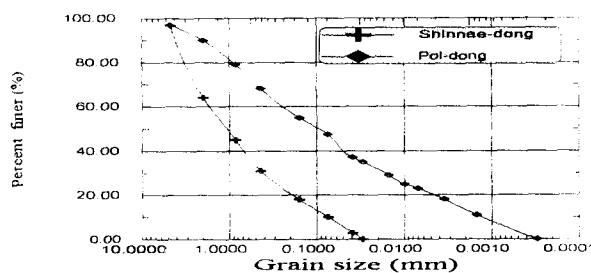


그림 1. 시료의 입도분포곡선

표 1. 시료(풍화잔적토)의 특성

시 료	공극률	건조밀도 (t/m <sup>3</sup> )	#200체 통과량 (%)	액 소 성 (%)			G <sub>s</sub>	통일 분류
				액성 한계	소성 한계	소성 지수		
포이동	0.409	1.6	47.36	34.0	19.84	14.16	2.74	SC
신내동	0.358	1.7	10.05	NP			2.63	SW-SM

표 2. 시료의 X-ray 회절시험 분석 결과 (단위 : %)

시 료	1차광물			2차광물					참고 문헌
	Quartz	Feldspar	Mica	Kaolinite	Illite	Vermi- culite	Chlorite	Montmor- ilonite	
포이동	17.7	15.0	9.8	23.5	20.7	8.4	4.5	-	이 (1994)
신내동	33.3	50.0	9.0	6.0	-	2.0	-	-	

### 3.2 실험 장치

본 실험에 쓰이는 실험 장치로는 다짐몰드, 탁도계(turbidimeter), 수조, 압력계, 압력재하장치(pressure control device) 등이 있다. 이 장치들의 개략적인 구성 상태는 그림 2와 같다. 다짐몰드(penetrometer)는 시료를 성형시키는 장치이고, 탁도계는 유출농도를 측정하는데 쓰인다. 압력재하장치는 C.K.C type autotriaxial tester에 부착된 back pressure saturation apparatus를 이용하였다.

### 3.3 실험 방법

본 논문에서의 실험은 크게 5가지로 나누어 수행하였고, 각 실험의 조건은 표 3과 같다. 특히, 여과재(filter)에 의한 충전현상을 방지하기 위해 시료 하부에 여과재를 설치하지 않고 유량판과 표준망 40번체를 설치하였다.

표 3. 각 실험의 다짐조건과 압력재하조건

	실험 종류	건조단위중량 (t/m <sup>3</sup> )	재하압력 (kg/cm <sup>2</sup> )
투수계수 실험	동수경사에 따른 투수계수 파악	1.3, 1.5, 1.7	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5
	투수계수의 시간 변화율	1.5	0.4
입자유동 실험	간극비, 입도분포에 따른, 입자유동 특성 파악	1.3, 1.5, 1.7	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5
	한계동수경사의 결정	1.3, 1.5, 1.7	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5
	동수경사증감에 따른 입자이탈량의 변화 파악	1.5, 1.7	0.3, 0.4, 0.5

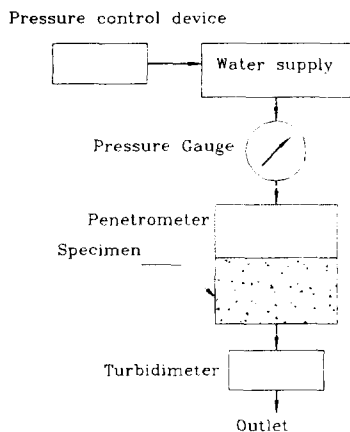


그림 2. 실험장치의 구성도

## 4. 실험 결과

### 4.1 동수경사에 따른 투수계수의 변화

본 실험은 재하압력을  $0.1 \sim 0.5 \text{ kg/cm}^2$ 로 변화시키면서 그에 따른 투수계수의 변화 양상을 파악하고자 실시하였다. 건조단위중량이  $1.3 \text{ t/m}^3$ 인 경우는 신내동시료와 포이동시료가 모두 불규칙한 변화 형태를 보였다. 그러나 신내동시료의 경우  $1.7 \text{ t/m}^3$ , 포이동시료의 경우  $1.5, 1.7 \text{ t/m}^3$ 의 경우는 투수계수에 미치는 동수경사의 영향이 그리 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 풍화산적토가 느슨하게 다져진 경우 시료 내부의 간극분포와 물의 이동경로가 상대적으로 불규칙한 분포를 보이기 때문인 것으로 생각된다. 따라서, 다짐 정도가 큰 경우는 비교적 균일한 투수특성을 보인 것으로 생각된다.

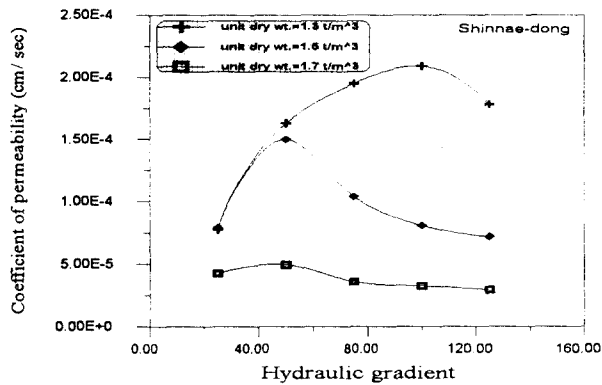


그림 3. 동수경사에 따른 투수계수의 변화  
( 신내동시료 )

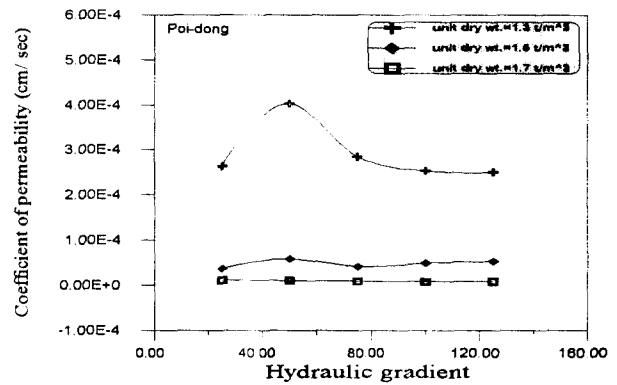


그림 4. 동수경사에 따른 투수계수의 변화  
( 포이동시료 )

### 4.2 일정동수경사에서의 시간에 따른 투수계수의 변화

본 실험은 투수계수의 시간변화율을 파악하기 위하여 일정압력 ( $0.4 \text{ kg/cm}^2$ ) 하에서 총 1000분 동안 투수실험을 실시하였다. 그 결과는 그림 5와 같다. 두 시료 모두 거의 일정한 투수계수 값을 나타냈는데, 이는 시료하부에 여과재를 설치하지 않아 충전현상이 발생하지 않았기 때문인 것으로 생각된다. 신내동시료의 경우 투수계수는 약  $7.5 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$  였고, 포이동시료의 경우  $5 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$  로 나타났다.

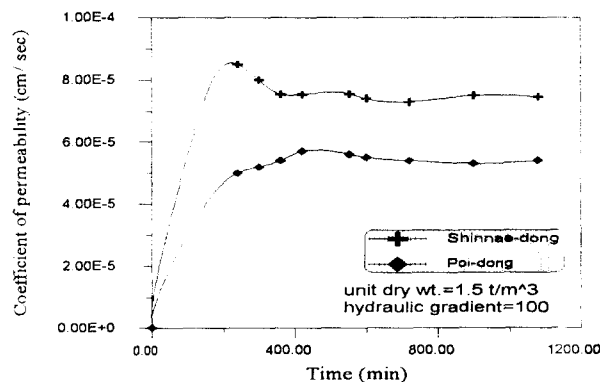


그림 90. 일정동수경사에서의 시간에 따른 투수계수의 변화

### 4.3 입자유동 특성 고찰

본 실험은 간극비와 입도분포에 따른 입자의 유동 특성을 파악하고자 실시하였다. 실험조건은 표 3과 같다. 실험 결과, 신내동시료의 경우 포이동시료에 비해 침투유출농도와 정상상태의 농도가 모두 크게 나타났는데 이는 상대적으로 입도분포가 불량하여 간극내 이동경로의 너비가 크기 때문인 것으로 판단된다.

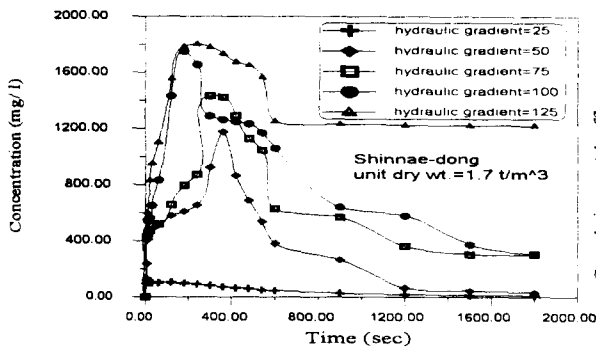


그림 6. 시간에 따른 유출농도의 변화  
( 신내동시료,  $\gamma_d = 1.7 \text{ t/m}^3$  )

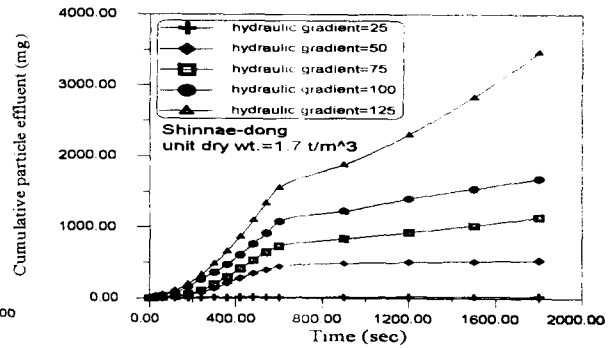


그림 7. 시간에 따른 가적입자유출량의 변화  
( 신내동시료,  $\gamma_d = 1.7 \text{ t/m}^3$  )

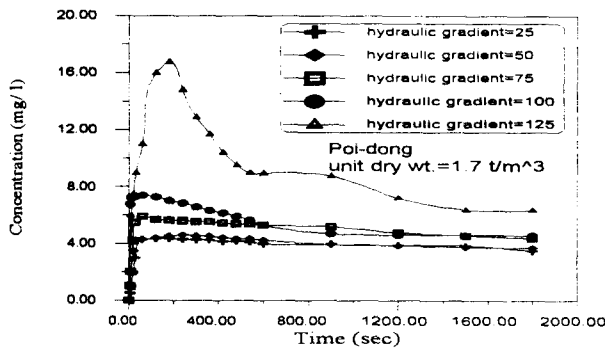


그림 8. 시간에 따른 유출농도의 변화  
( 포이동시료,  $\gamma_d = 1.7 \text{ t/m}^3$  )

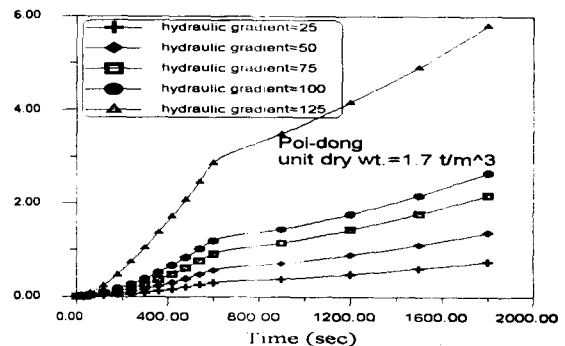


그림 9. 시간에 따른 가적입자유출량의 변화  
( 포이동시료,  $\gamma_d = 1.7 \text{ t/m}^3$  )

### 4.4 입자유동을 유발하는 한계동수경사의 결정

본 실험에서는 압력조건을 변화시키면서 그 때의 정상상태농도(steady concentration)를 구하여 그로부터 입자의 유동이 비로소 시작될 때의 동수경사, 즉 한계동수경사를 구하였다. 실험 결과, 다짐정도가 클수록 한계동수경사도 증가하였으며 다짐정도가 같을 경우 포이동시료가 신내동시료보다 대체적으로 큰 한계동수경사를 나타내었다. 이는 포이동시료가 신내동시료에 비해 집착력도 강하고 입도분포도 양호하기 때문인 것으로 생각된다. 그리고 건조단위중량이  $1.7 \text{ t/m}^3$  인 포이동시료의 경우 다짐정도가 거의 최대값에 가깝기 때문에 한계동수경사도 매우 클 것으로 보이며, 본 실험의 조건보다 더 큰 압력을 재하할 경우 그 값을 구할 수 있을 것으로 판단된다.

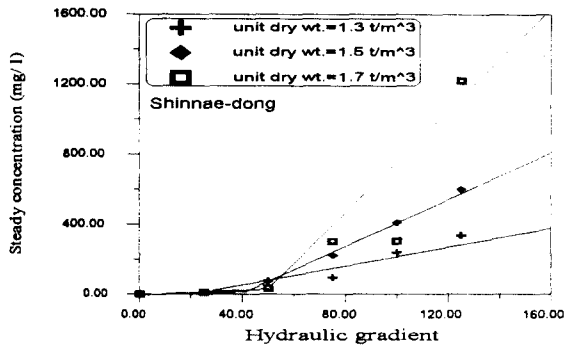


그림 95. 한계동수경사의 결정 ( 신내동시료 )

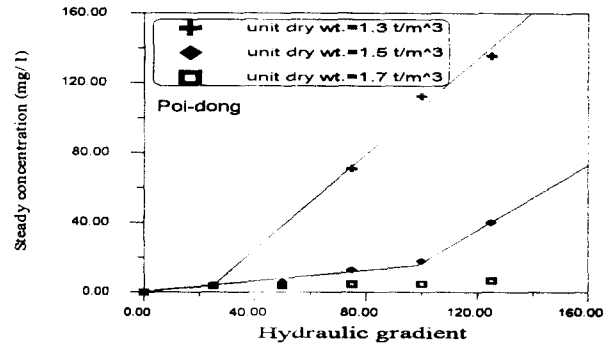


그림 96. 한계동수경사의 결정 ( 포이동시료 )

#### 4.5 동수경사증감에 따른 세립분 이동량의 변화

본 실험은 일정한 동수경사를 지속시키는 대신 75, 100, 125, 100, 75의 순서로 동수경사를 증감시키면서, 그에 따른 유출농도와 가적입자유출량의 변화 양상을 파악하였다. 각 동수경사단계는 6분 동안 지속시켰으며, 총 30분 동안 실험을 실시하였다. 실험결과를 보면, 동수경사를 증가시키기에 따라 유출농도가 정상상태에서 새로이 계속 침투치까지 증가하며 새로이 정상상태로 가는 양상을 보여주었다.

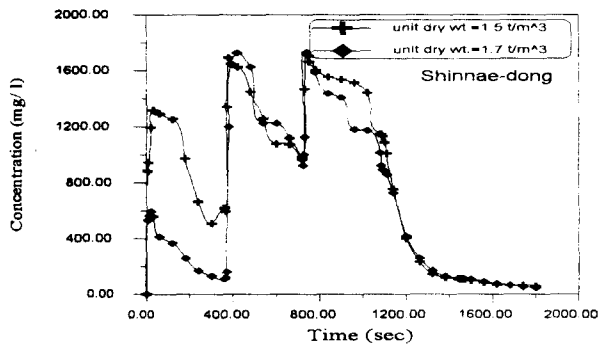


그림 97. 동수경사증감에 따른 유출농도의 변화 (신내동시료)

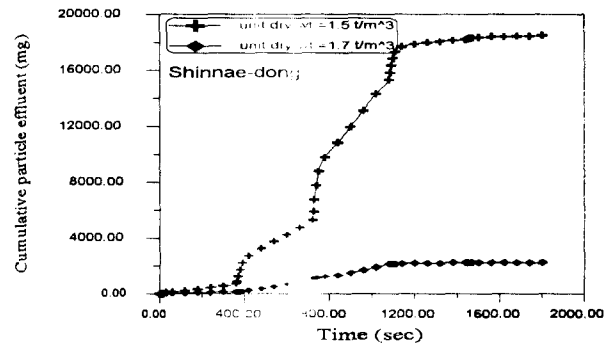


그림 99. 동수경사증감에 따른 가적입자유출량의 변화 (신내동시료)

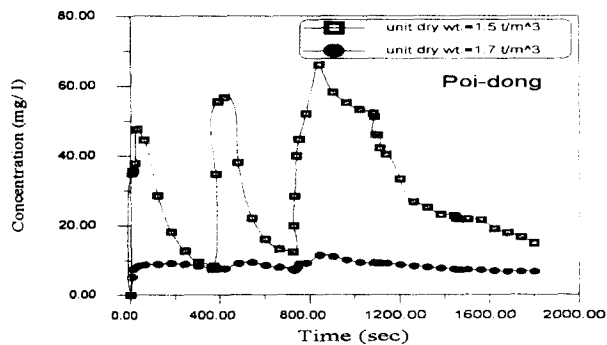


그림 14. 동수경사증감에 따른 유출농도의 변화 (포이동시료)

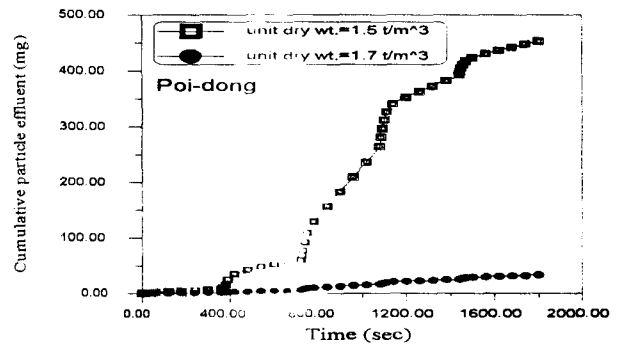


그림 15. 동수경사증감에 따른 가적입자유출량의 변화 (포이동시료)

## 5. 결론

본 연구에서는 우리나라의 대표적인 잔류토지반인 서울의 포이동과 신내동에서 채취한 풍화잔류토의 투수 및 입자유동 특성을 실내시험을 통해 파악하였으며 도출된 결과는 다음과 같다.

- 1) 풍화잔적토의 투수 및 입자유동현상에 영향을 미치는 인자는 모암의 성질과 관계가 있는 간극률과 풍화의 정도를 나타내는 세립분 함량 그리고 입도분포로 나타났다.
- 2) 풍화잔적토의 투수특성에 있어 여과재에 의한 충전효과를 배제한 경우 동수경사의 크기 및 경시효과에 의한 영향은 나타나지 않았다. 이는 시료전체에 대한 평균적인 투수특성을 나타내며 시료내에서의 세립분 이동현상을 보다 장기적으로 관찰함으로써 풍화잔적토에서의 경시효과를 파악하는 연구는 계속 수행되어야 할 것으로 판단된다.
- 3) 입자유동특성에 있어서는 입도분포가 불량한 신내동시료가 침투유출농도 및 가적유출량이 더 크게 나타났고 유출농도가 급속히 일정농도로 수렴하였다. 한계동수경사는 세립분이 상대적으로 많이 포함된 포이동시료가 크게 나타났고 두 시료 모두 건조단위중량이 클수록 한계동수경사가 적게 나타났다.
- 4) 동수경사의 크기가 주기적으로 반복되는 경우가 일정 동수경사인 경우에 비해 입자이탈량이 상당히 크게 발생하는 것으로 나타나 실제 거의 모든 지반구조물에 있어서 동수경사는 수시로 변화되므로 풍화잔적토지반에 설치된 지반구조물에 흐름이 발생하는 경우, 입자유동에 의한 영향을 고려하는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

상기의 결과는 지반구조물의 안정에 매우 중요한 영향을 미치는 풍화잔적토의 투수 및 입자유동특성에 대해 실내시험을 통해 파악한 것으로서 전술한 바와 같이 풍화잔적토의 투수 및 입자유동특성에 대한 기본적인 사항을 기술한 것이다. 그러므로 풍화잔적토의 공학적 특성 및 실제 현장에서의 거동 등에 대한 심도있고 체계적인 연구가 계속되어야 할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 고재신(1997), "용액의 성질에 따른 풍화잔적토의 유동특성에 대한 실험적 연구", **고려대학교 대학원 석사학위 논문**, pp. 35 ~ 43
2. 김병민(1996), "풍화잔적토의 입자유동에 관한 실험적 연구", **고려대학교 대학원 석사학위 논문**, pp. 19 ~ 29
3. 이승철(1994), "다짐잔적토의 거동 특성 연구 - 서울 포이동 지역 중심", **고려대학교 대학원 석사학위 논문**, pp. 27 ~ 29
4. 이인모 외(1997), "풍화잔적토의 유동특성에 관한 연구", **한국지반공학회지** 제3권 제5호, pp. 155 ~ 165
5. Govindaraju, R. S.(1996), "A stochastic analysis for movement of fine particles in porous media", *ASCE Journal of Hydrologic Engineering*, 1(4) : pp. 161 ~ 168
6. Reddi, L. N. and Govindaraju, R. S.(1995), "Particle mobilization in sand-clay mixtures and facilitation of contaminant removal - critical shear stress concept", *ASCE Special Technical Publication* No. 46, Vol. 2, pp. 1222 ~ 1236