

# 강우 시 지오셀 보강 사면의 안정성 평가에 관한 연구

## Stability Analysis of Geocell Reinforced Slope During Rainfall

신은철<sup>1\*</sup>, 김장일<sup>2</sup>  
Eun-Chul Shin<sup>1\*</sup>, Jang-Ill Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Member, Professor, Dept. of Civil and Environ. Engrg., Incheon National Univ., 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon, 22012, Republic of Korea

<sup>2</sup>Nonmember, Ph. D. Student, Dept. of Civil and Environ. Engrg., Incheon National Univ., 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon, 22012, Republic of Korea

### ABSTRACT

In this study, the increment effect of safety factor according to increasing of horizontal permeability coefficient is analyzed when geocell is installed on the slope for protection. To evaluate the horizontal permeability and reinforcement effect, the laboratory tests such horizontal permeability test were conducted. According to the laboratory test results, as the porosity rate of geocell increases, the coefficient of horizontal permeability is also increased. And also, regardless of the different types of filled materials, the coefficient of horizontal permeability is improved in a geocell reinforced ground compare with the non-reinforced ground. Laboratory test results and the rainfall intensity were applied to the numerical modeling of slope for seepage analysis and stability analysis of slope by using Soilworks, numerical analysis program. As a result of the slope stability analysis, it is confirmed that the installed geocell on the slope facilitates the drainage of water on the surface of slope. Hence, the ground water elevation is suppressed. Therefore, the safety factor of the slope is increased by the increasing of the internal friction angle, apparent cohesion, and coefficient of horizontal permeability by reinforcing the slope with geocell.

### 요 지

본 연구에서는 3차원 구조의 토목섬유인 지오셀을 사면 법면 보호공으로 설치 시 사면 지표면의 수평투수계수 증가에 따른 안전율 증가 효과에 대하여 분석하였다. 지오셀의 수평투수능력과 보강효과를 평가하기 위해 실내실험으로 각각 수평투수실험을 수행하였다. 지오셀을 설치한 지반이 무보강지반보다 수평투수계수가 증가되었으며, 다공율이 6.43%인 기존 지오셀(지오셀 B)보다 38.18%인 격자구조의 지오셀 A를 지반에 설치했을 때, 수평투수계수가 더 증가하는 것으로 나타났다. 사면안정 해석 컴퓨터 프로그램인 Soilworks를 사용하여 실내실험 결과와 강우강도를 모델링한 성토사면에 적용 후 침투해석과 사면안정 해석을 수행하였다. 사면안정해석 결과 강우시 지오셀 보강사면의 지하수위 상승 억제 및 지표의 강우 유출효과를 확인하였으며, 내부마찰각과 겹보기 점착력의 증가와 더불어 수평투수계수의 증가로 인하여 사면의 안전율이 증가하는 것으로 나타났다.

**Keywords** : Geocell, Seepage analysis, Reinforced slope, Stability analysis, Horizontal permeability

## 1. 서 론

전 세계적으로 지구온난화현상으로 인한 기후변화로 인해 자연재해의 증가로 사회 경제적으로 많은 피해를 입고 있다. 국내에서도 기후변화로 인해 특정 지역에만 국한

되어 집중적으로 비가 내리는 국지성호우에 의한 피해 사례가 지속적으로 증가하고 있으며, 이러한 집중호우로 인해 산사태 및 비탈면 붕괴 등의 사면파괴가 매년 발생하여 막대한 재산피해 및 인명피해가 발생하고 있다. 따라서, 사면안정 해석 시 강우강도의 영향을 적절하게 평가하는 것이 중요하며, 강우강도에 의한 사면 침식을 방지하고 안정성을 확보할 수 있는 보강재 설치가 필요하다.

최근까지 지오셀로 보강된 지반의 지지력에 중점을 둔 연구가 많이 수행되었지만(Shin et al., 2017), 제방 및 사

Received 13 Oct. 2017, Revised 30 Oct. 2017, Accepted 24 Nov. 2017

\*Corresponding author

Tel: +82-32-835-8466; Fax: +82-32-835-0775

E-mail address: ecshin@inu.ac.kr (E. C. Shin)

면의 법면 보호와 직접적으로 연관이 있는 보강재의 수평 투수에 관한 연구는 많지 않고, 최근 점차 시도되고 있다. Shin et al.(2010)은 다짐도와 동수경사를 일정하게 유지시킨 상태에서 지오셀을 보강하지 않은 원지반 상태에서와 지오셀을 설치한 지반에서의 수평투수시험을 수행하여 지오셀 설치여부와 지오셀의 형상 및 채움재에 따른 수평투수계수의 변화를 분석하였다. Lee(2004)은 강우시 무한사면의 침투거동에 대한 연구를 수행하였으며 불포화 사면 해석을 위한 간단한 부 간극수압계 개발을 시도하였다. Kim(1988)은 강우로 인한 산사태 발생 메커니즘에 관해 침투해석을 수행하는 단계적 침투-응력 해석을 수행하였으나, 이러한 방법들은 모두 실제현장에서 동시에 발생하는 지하수 흐름과 연계된 지반의 거동 및 강도 특성 변화를 모델링하지는 못하였다. 그 후에도 사면내의 증력효과로 인해 불포화 지반의 연직 흐름과 간극수압의 상승의 원인에 대한 연구를 수행하였다(Lee, 2004).

본 논문에서는 지오셀 보강 성토사면과 무보강 성토사면에 각각 강우강도를 적용하여 침투해석과 사면안정해석을 연계 수행하고 안전율을 비교하였다. 지오셀 설치 시 수평투수계수 증가 효과에 따른 성토사면의 안전율 증가를 확인하고, 강우로 인한 원지반의 지하수위 상승 억제 및 지표의 강우 유출 효과에 대해 확인하였다. 즉, 토목섬유재인 지오셀의 수평투수능력 및 강우 유출특성을 분석하고자 현장 지반조건을 고려한 모델링 사면의 보강재로 적용하여, 강우강도에 따른 사면안정성 해석을 위한 수치해석을 수행하였다. 수치해석에 사용한 수평투수계수 및 지반 물성은 실내실험을 통하여 얻어진 결과를 적용하였다.

## 2. 실내 실험

### 2.1 실험개요

본 연구에서는 지오셀의 수평투수계수를 산정하기 위해 모형 토조를 ASTM-D4716(ASTM, 2014)에 의거하여 제작하였다. 이는 토목섬유를 설치한 내부에 수직압축응력을 가한 상태에서 시험편의 길이 방향과 평행하게 흐르도록 유로를 형성하고 이에 대해 채움재에 따른 정수위 및 변수위 실험을 수행하여 수평투수계수를 산정하는 방법이다. 모형 토조 내에 화강풍화토, 모래, 자갈을 각각 채움재로 설치한 뒤 지오셀 보강지반 및 무보강지반의 수평투수 실험을 수행하였으며, 지오셀 면에 수직으로 작용하는 투수계수인 수평투수계수를 산정하고 이를 무보강지반의 수평투수계수와 비교하였다.

모형 토조의 규격은 70cm×140cm×110cm(B×L×H)이며, 견고성을 가지는 강철프레임으로 구성하였다. 물의 흐름을 관찰하기 위해 전면을 투명한 아크릴판으로 제작하였으며, 토조의 양 끝단의 물의 유입부분과 유출부분에는 토사의 유출을 최소화하기 위해 철망을 설치하고, 각 접합부는 물의 유입 방지를 위해 방수처리를 하였다. Fig. 1(a)는 ASTM D4716(ASTM, 2014)의 실험방법을 나타낸 것이며, Fig. 1(b)는 ASTM D4716 수평투수실험에 의거하여 제작한 모형 토조의 측면 모형도를 나타낸 것이다.

지오셀은 HDPE 시트로 만든 별집구조 모양의 3차원 형태의 토목섬유이며, 본 연구에서는 가운데 구멍이 뚫린 펀칭타입의 기존 지오셀(지오셀 A)와 기존 지오셀의 투수성을 보완하여 제작된 격자무늬의 지오셀 B가 사용되었다. 지오셀 B는 매우 유연한 구조체로 하부층의 굴곡면에

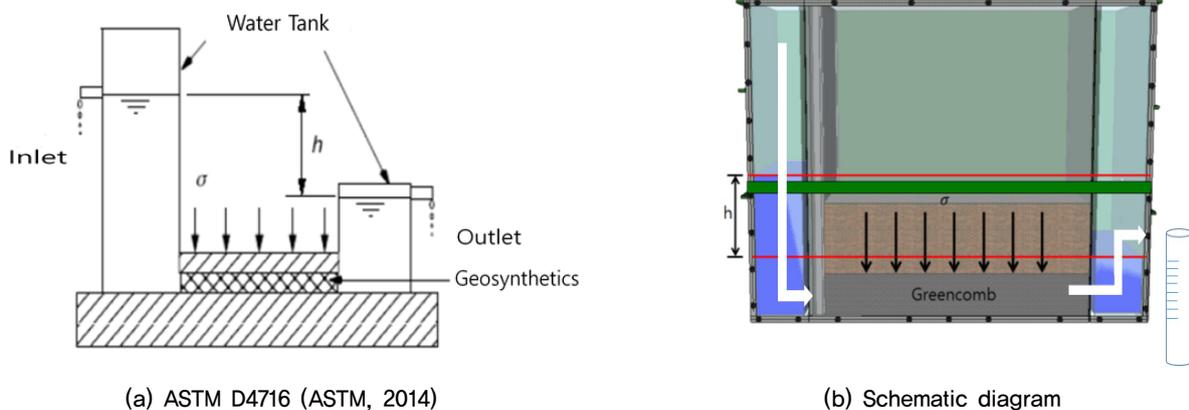
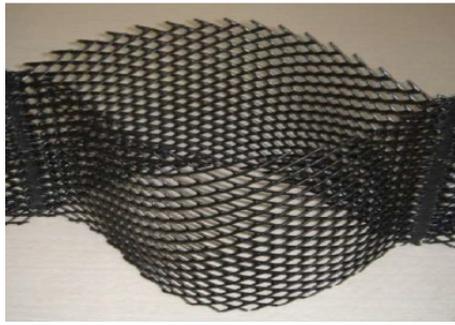
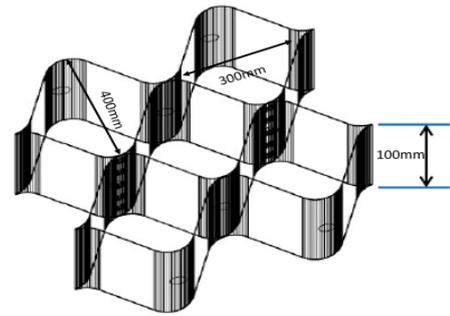


Fig. 1. Schematic diagram of model box for hydraulic transmissivity test



(a) Shape



(b) Dimension

Fig. 2. Geocell type B

밀착성이 우수하여 다양한 단면 조성이 가능하다. 또한, 다공성 망상 스트립을 용착하여 벌집구조를 형성하였기에 셀벽을 구성하는 스트립의 전체 면적에서 차지하는 공극률이 35%로 높은 다공율을 가진다. 이로 인해 높은 투수계수를 보유하여 통수성이 우수하여 배수층에 설치가 적합하다.

또한, 망상구조로 인한 속채움 토사와 셀벽 사이의 마찰 거동이 우수하여 보강효과가 높으며, 속채움재 구속보유 효과로 차수시트 등의 하부층 보호가 유리하다. 따라서 속채움재와 효율적인 상호작용으로 하중분산효과가 우수하다. 또한, 망상구조 사이로 식물 뿌리 발달에 의해 상호결속력이 우수하여 침식, 세굴 등에 안정한 구조체를 형성하여 식물고정효과가 우수하다. 지오셀 B의 형상은 Fig. 2에 나타낸 바와 같으며, 지오셀 A와 B 타입 모두 셀 높이는 100mm이며, 펼쳤을 때 각각의 셀의 가로 및 세로의 크기는 300mm × 400mm이다. 또한, 지오셀 A와 B 타입의 다공율은 각각 42%, 6.43%이다.

## 2.2 수평투수실험

수평투수계수 실험은 채움재를 모래, 자갈, 화강풍화토로 나누어 진행되었다. 모래는 주문진 표준사를 사용했으며, 자갈은 최대 입경의 크기가 25mm인 쇄석골재를 사용하였다.

지오셀의 큰 장점인 높은 수평투수계수를 입증하기 위하여 전면이 아크릴로 특수 제작된 강철프레임의 토조에 지오셀을 포설하고 내부 채움 재료를 표준사, 자갈, 풍화토로 달리하여 수평투수실험을 진행하였다. 지오셀 설치 시 수평투수실험과 함께 지오셀을 설치하지 않은 무보강 지반일 경우의 수평투수실험도 함께 수행되었다. 각각의 수평투수실험은 5회 이상 반복 실시하였으며, 평균값을

Table 1. Conditions of hydraulic transmissivity test

Filling material	Geocell type
Sand (Jumunjin sand)	Non-reinforced
	Geocell A reinforced
	General geocell B reinforced
Gravel (Maximum diameter 25 mm)	Non-reinforced
	Geocell A reinforced
	General geocell B reinforced
Weathered granite soils	Non-reinforced
	Geocell A reinforced
	General geocell reinforced

산정하여 평균 수평투수계수 값을 도출하였다. 수평투수계수 실험 구성은 Table 1과 같고 실험과정은 Fig. 3과 같다.

## 2.3 실험 결과

Fig. 4(a)는 표준사를 채움재로 사용하였을 때의 수평투수계수 결과를 나타낸 것이다. 단위중량이 1240.08kg/m<sup>3</sup>로 동일한 조건에서 기존 지오셀로 보강했을 때, 지오셀 B로 보강했을 때, 무보강일 경우의 순으로 실험하였다. 수평투수실험의 결과, 다공율이 42%인 지오셀 A 보강 지반이 다공율 6.43%인 기존 지오셀 B 보강 지반보다 수평투수계수 값이 더 큰 것으로 나타났다. 무보강지반 대비 지오셀 B 보강층의 투수계수는 85.71% 향상 되었고, 기존 지오셀 B 보강층의 투수계수는 42.86% 향상되었음을 확인하였다. 이는 지오셀의 형상 및 다공율로 인한 수평투수계수의 변화가 유로형성에 있어서 더 유리하게 작용하도록 영향을 주는 것으로 판단된다.

채움재가 자갈일 경우 단위중량이 1240.08kN/m<sup>3</sup>로 동일한 조건에서 기존 지오셀로 보강했을 때, 지오셀 A로 보강했을 때, 무보강일 경우의 순으로 실험하였다. 채움재를 최대입경 25mm인 쇄석골재인 자갈로 했을 경우, 다공

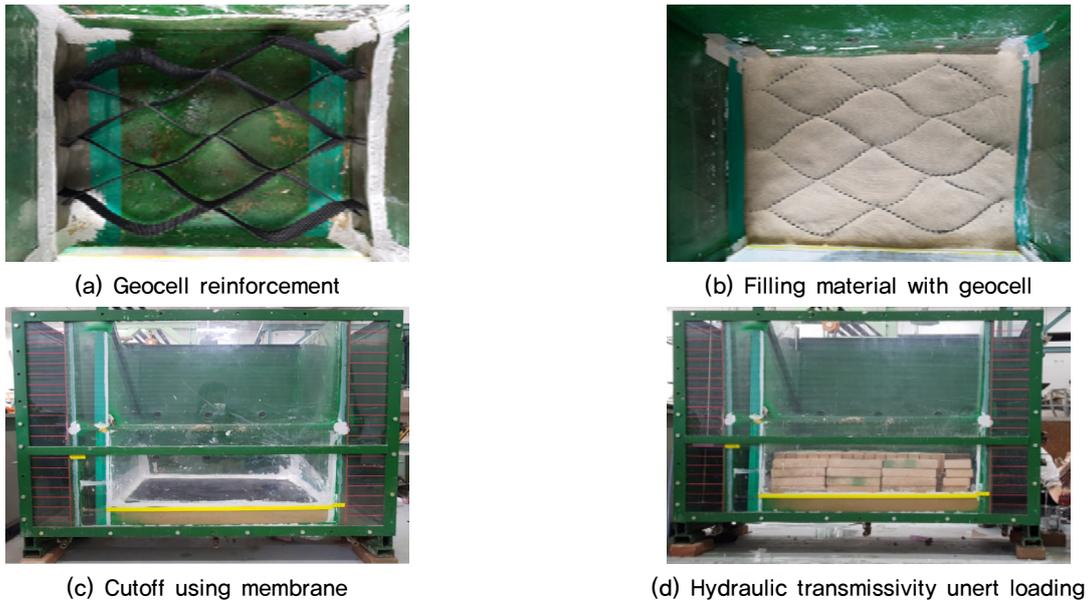


Fig. 3. Test procedure of hydraulic transmissivity

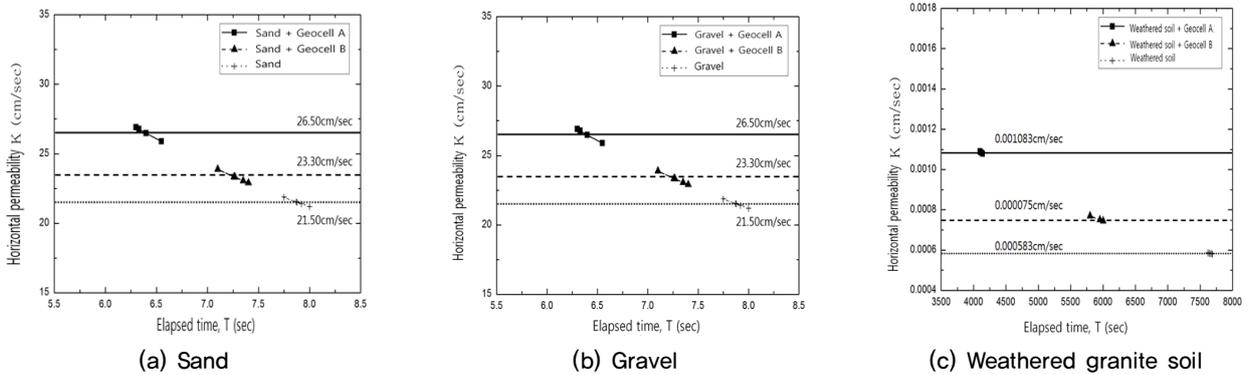


Fig. 4. Result of coefficient of horizontal permeability coefficient with filling materials

율이 42%인 지오셀 A로 보강한 지반이 다공율 6.43%인 기존 지오셀 B로 보강한 지반보다 투수성이 큰 것으로 나타났다. 무보강지반 대비 지오셀 A 보강층의 투수계수가 23.26% 향상 되었고, 기존 지오셀 B 보강층은 8.37% 향상되었음을 확인하였다(Fig. 4(b)) 채움재가 화강풍화토일 경우 수두차를 일정하게 하여 수평투수실험을 진행하였다. 앞에서 수행된 자갈과 표준사를 채움재로 이용한 수평투수실험 결과와 마찬가지로 42%의 다공율을 가진 지오셀 A로 보강한 지반이 6.43%의 다공율을 가진 기존 지오셀 B로 보강한 지반보다 투수성이 더 큰 것으로 나타났다. 지오셀을 설치하지 않고 화강풍화토로만 구성된 무보강지반의 수평투수계수와 비교했을 때, 지오셀 A 보강층의 투수계수가 85.71% 향상 되었고, 기존 지오셀 B 보강층은 28.57% 향상되었음을 확인하였다(Fig. 4(c)).

### 3. 강우강도를 고려한 사면안정해석

#### 3.1 침투해석단면 모델링

Fig. 5에 나타난 바와 같이 지반물성 및 불포화 특성함수를 고려하여 모델링을 구성하였으며, 성토사면의 높이는 10m로 가정하고 사면의 경사는 KISTEC(2011)에 따른 쌓기비탈면의 표준경사에 따라 1:1.5의 경사에 1.5m의 소단을 둔 형태로 모델링하였다. 지오셀 B 보강층은 화강풍화토를 채움재로 가정하였으며, 수치해석에 필요한 지반정수 값은 실내실험 결과를 적용하였다. 우기 시 모델링 해석이므로, 강우에 따른 성토사면의 침투 거동을 확인하기 위해 초기 지하수위가 풍화암에 존재할 때, 선형강우로 인해 성토체 절반에 존재할 때, 만수위일 때 등 세 가지 경우로 분류하였다.

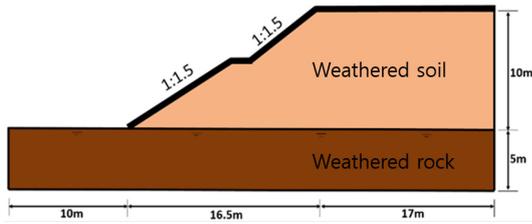


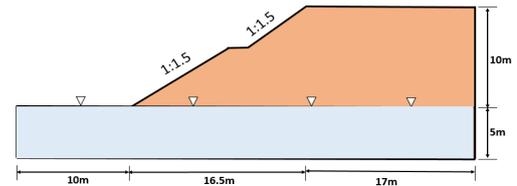
Fig. 5. Modeling of seepage analysis for slope

침투해석 시 고려해야 할 강우조건은 강우강도, 강우지속시간, 강우패턴, 선행강우 등이 있다. 설계 시 강우조건에 관한 설정은 기관마다 상이하므로 현장여건 및 환경조건이 고려된 값을 설계에 적용하여야 한다.

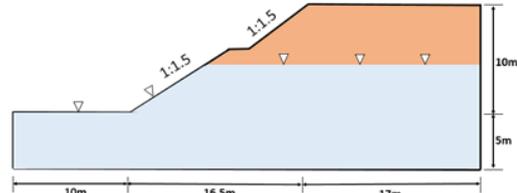
서울, 대구, 부산, 광주 등 우리나라의 대도시 대부분은 100년에서 최대 200년 수준으로 설계되고 있어 국내실정에 맞는 100년 빈도의 강우강도를 사면에 적용하였으며, 국토교통부에서 제공하는 인천 지역의 확률강우강도를 적용하였다. I-D-F 곡선을 이용하여 강우지속시간이 5분에서 24시간으로 사면에 내릴 때, 강우 지속시간에 따른 사면의 안정성을 고려하였다.

기존의 강우강도를 고려한 비탈면의 해석방법의 경우, 강우시 지하수위면이 지표에 위치한다고 가정하거나, GL-3m로 가정하여 수행하였다. 이러한 가정으로 비탈면 설계를 하게 되는 경우, 수압 작용 시 최소 활동파괴선이 깊게 예측되기 때문에 파괴선 이하까지 깊게 보강하게 되며, 이는 비경제적인 과다설계로 예상된다. 실질적인 거동은 지표면까지 지하수위가 위치하는 것이 아니라, 기존 지하수위에서 비가 오는 경우 지하수위가 상승하고, 지표면의 일부 분 습윤대에서 강우 침투에 의해 얇은 파괴가 일어나, 습윤대와 지하수위 사이에는 불포화 지반상태가 그대로 유지되는 것이 일반적이다. 즉, 강우시 비탈면 파괴는 포화 습윤대에서 발생하는 얇은 파괴라고 볼 수 있다.

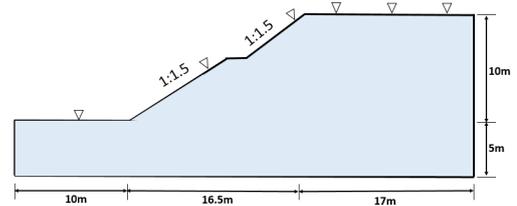
따라서, 강우강도를 적용하기 위해 고려한 초기 수위는 세 가지 경우로 분류하였다. 첫 번째로, 초기 지하수위가 풍화암층에 분포한다고 가정하였으며, 두 번째는 선행강우에 의해 지하수위가 성토사면 중간에 위치한다고 가정하였다. 세 번째는 사면파괴가 일어날 최악의 경우로 지표면까지 수위가 차올라 만수위라고 가정한 뒤 수행하였으며, 세 가지 경우에 대하여 무보강사면과 지오셀 보강사면에 각각 적용하여 침투해석 및 사면안정해석을 수행하였으며, 초기 지하수위 설정은 Fig. 6과 같다.



(a) On top weathered granite rock



(b) In the middle of embankment



(c) On the ground

Fig. 6. Located of initial groundwater level

### 3.2 입력된 지반 조건

SoilWorks의 침투모듈 및 사면모듈에 필요한 지반물성은 사면 및 지오셀 보강 지반의 투수계수, 함수비, 단위중량, 겔보기 점착력 및 내부마찰각 등이 있다. 침투해석에 필요한 투수계수는 실내 수평투수계수 실험을 통해 얻은 값을 적용하였으며, 사면안정해석에 필요한 습윤단위중량과 포화단위중량은 문헌값을 참고하였다. 풍화토, 풍화암, 기존지오셀 B보강층, 그리고 지오셀 A보강층의 겔보기 점착력과 내부마찰각은 모두 실내실험에서 얻은 값을 적용하였다. 풍화토 및 풍화암층으로 모델링한 사면에 입력한 지반 물성 데이터는 Table 2와 같다.

### 3.3 사면의 침투해석과정

침투해석의 모델링 및 해석과정은 Fig. 7과 같다. 모델링한 사면에 지반물성을 입력하고 모델 전체에 균질한 요소망을 생성하기 위해 0.5m 분할간격으로 시드정보를 입력하여 매우 조밀한 요소로 메쉬를 생성하였다. 절점수두 경계조건을 이용하여 압력수두의 형태로 지하수위 조건을 모사하였다.

또한, 모델링 사면에 강우에 의해 발생한 유입은 면유량

Table 2. Material properties using slope analysis

Characteristics		Weathered granite soil	Weathered rock	General-geocell B reinforced layer	Geocell B reinforced layer
Seepage module	Horizontal permeability coefficient (m/hour)	0.021	$1.0583 \times 10^{-4}$	0.027	0.039
	Vertical permeability coefficient (m/hour)	0.021	$1.0583 \times 10^{-4}$	0.027	0.039
	Water content ( $w_c$ )	0.347	0.347	0.347	0.347
Slope module	$\gamma_t$ ( $kN/m^3$ )	18.5	21	18.5	18.5
	$\gamma_{sat}$ ( $kN/m^3$ )	19.5	22	19.5	19.5
	$c$ ( $kN/m^2$ )	5	50	15	15
	$\phi$ ( $^\circ$ )	30	32	40	40

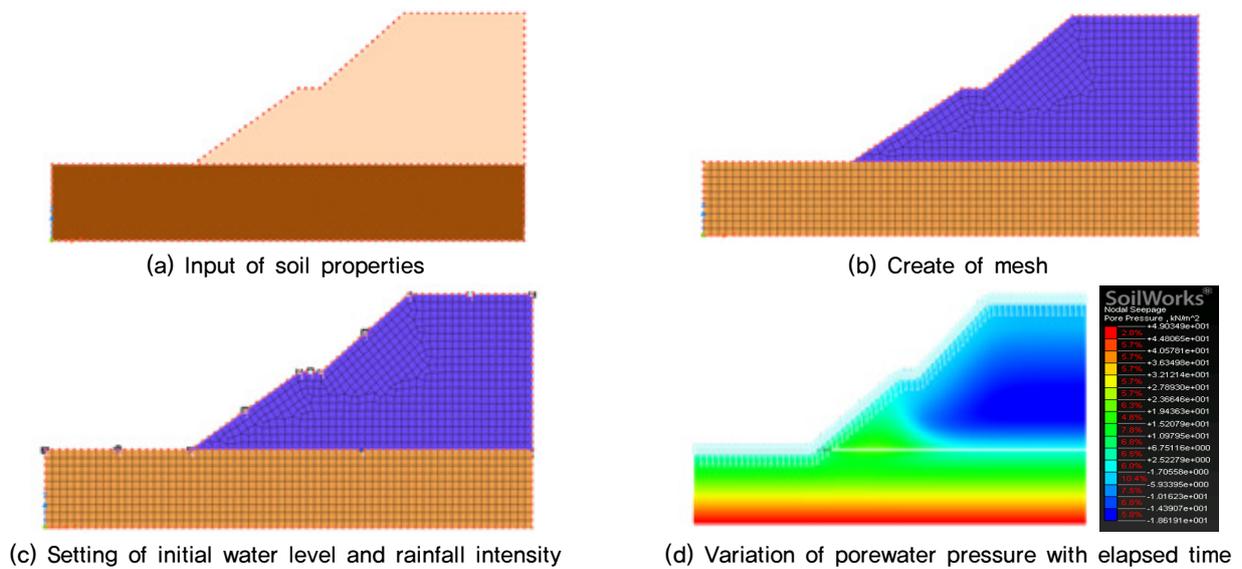


Fig. 7. Modeling of slope and seepage analysis

을 통하여 시간당 발생하는 유출입 유량을 요소면적으로 나누어 입력하였다. 강우강도와 지반 내 투수계수의 차이로 인하여 침투되지 못하고 지표면을 따라 흐르는 물의 흐름이 발생할 경우 혹은 강우강도 지속시간에 따라 지표면에 강우가 침투되지 못하고 누적되어 쌓이는 정체 현상이 발생하는 경우를 조절하기 위하여 침투조건에 경계 조건을 추가하여 해석하였다.

초기 원지반 상태에서 간극수압 분포결과를 바탕으로 강우강도에 따른 간극수압 변화를 해석하기 위해서 시공 단계를 정상류해석과 비정상류해석으로 나누었다. 강우강도를 적용하는 비정상류 해석에서는 시간간격은 6시간, 12시간, 18시간, 24시간 4단계로 분류하여 24시간동안 집중적으로 강우지속 시 시간에 따른 사면 내 간극수압의 분포 및 침윤선 변화를 확인할 수 있었다.

사면안정해석에서는 침투해석을 통해 얻어진 간극수압

을 추출하여 결과를 연동하여 이어서 수행했으며, 모델종류를 Mohr-Coulomb(LEM)으로 하여 한계평형해석법으로 수행하였다. 강우지속에 따른 비탈면 안전성 검토를 위해 원호활동면을 가정하였다. 가정된 원호활동면 중 불필요한 반복계산을 막기 위해 파괴가 예상되는 구간을 설정하여 원호접선 및 예상 활동면 범위를 작도하였으며, 각각의 강우 지속시간에 따른 해석케이스를 설정하고 Bishop의 절편법을 이용하여 해석을 수행하였다.

### 3.4 지오셀 보강이 사면안정에 미치는 효과 분석

침투해석 및 사면안정 해석 결과, 법면 보호공으로써 지오셀 B를 사면 상부에 설치할 경우, 강우 시 지표유출을 유도하고 사면의 지하수위 상승을 억제하는 것을 확인할 수 있었다.

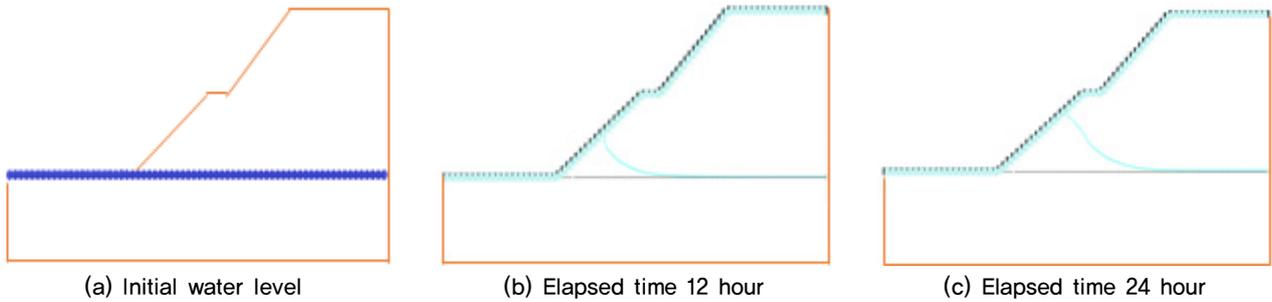


Fig. 8. Variation of seepage line with elapsed time on non-reinforced slope (Initial water level-Weathered rock layer)

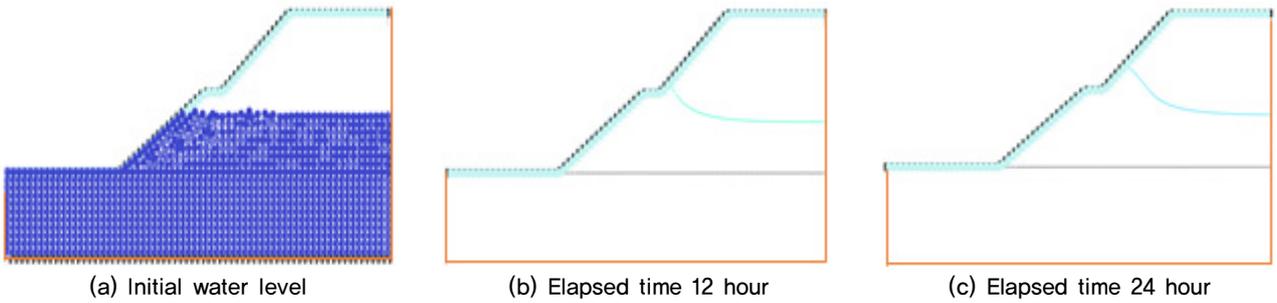


Fig. 9. Variation of seepage line with elapsed time on non-reinforced slope (Initial water level-middle of embankment)

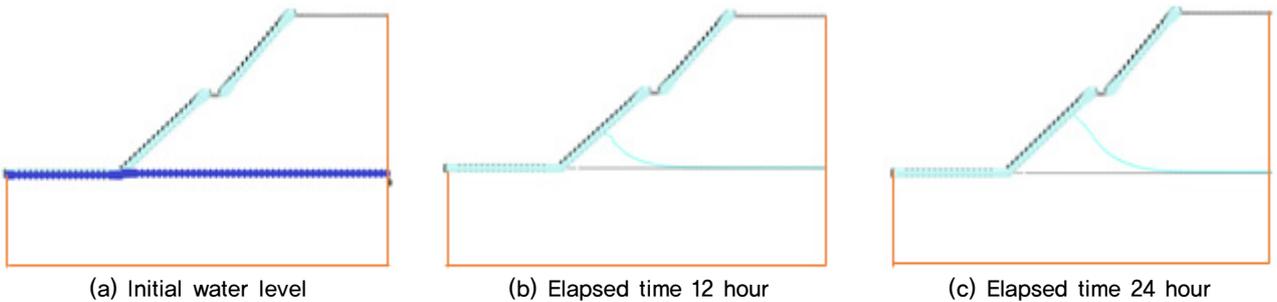


Fig. 10. Variation of seepage line with elapsed time on geocell-reinforced slope (Initial water level-Weathered rock layer)

SoilWorks 침투모듈을 이용하여 인천지역의 IDF 곡선에 따른 100년 빈도의 24시간 지속 강우강도를 사면에 적용했을 때 지오셀 B를 보강재로써 설치하였을 경우와 무보강 사면일 경우의 지하수위 상승 변화를 비교하였다. 강우 지속시간이 6시간, 12시간, 18시간, 24시간일 때에 따른 각각의 침윤선 변화를 비교하였다. Fig. 8은 무보강사면의 초기수위가 풍화암에 위치해있을 때이며, 강우지속시간이 길어질수록 사면의 침투된 물로 인하여 지하수위가 상승하는 현상을 볼 수 있다.

따라서, 사면의 지하수위 상승이 안전율과 밀접한 관계를 갖고 있다고 판단된다. Fig. 9는 무보강사면의 초기수위가 성토 중간에 위치해 있을 때를 나타낸다. 유사하게, Fig. 10은 지오셀 B 보강사면의 초기수위가 풍화암에 위치해있을 때, Fig 11은 지오셀 B 보강사면의 초기수위가 성토 중간에 위치해있을 때를 나타낸다.

지속시간에 따른 안전율은 무보강 지반과 비교하였을 때 전체적으로 증가하였으며, 이는 사면에 지오셀 보강재 설치 시, 내부마찰각 및 겹보기 점착력의 증가와 더불어 지표면의 투수계수 증가에 의한 효과라고 판단한다. 이를 입증하기 위하여, 무보강지반과 기존 지오셀 B, 지오셀 A 이외에도 동일한 겹보기 점착력과 내부마찰각 조건에서 수평투수계수 값을 증가시켜 총 6가지 경우의 시간에 따른 안전율 변화를 비교하였다. 수평투수계수변화에 따른 지속시간별 사면의 안전율 값은 Table 3과 같다.

무보강사면과 기존 지오셀 B, 지오셀 A로 보강한 사면의 안전율을 비교하였을 때 강우강도를 적용하기 전 초기수위의 안전율은 각각 1.38, 1.4, 1.4로 나타났다. 이러한 결과는 수평투수계수와는 별개로 지오셀 설치로 인한 내부마찰각, 겹보기 점착력의 증가로 인한 보강효과로 인해 안전율이 증가한 것으로 판단된다. 그러나, 기존 지오셀

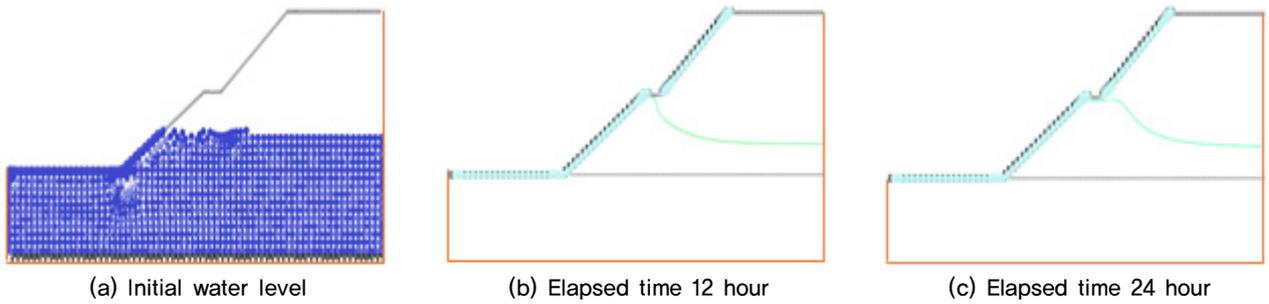


Fig. 11. Variation of seepage line with elapsed time on geocell-reinforced slope (Initial water level-middle of embankment)

Table 3. Safety factor with elapsed time as variation of permeability coefficient

Item		Non-reinforced	General-geocell B reinforced	Geocell A reinforced
Horizontal permeability coefficient (cm/sec)		0.021	0.027	0.039
Safety factor	Initial water level	1,3789	1,405	1,405
	6 hour	1,357	1,382	1,381
	12 hour	1,321	1,345	1,344
	18 hour	1,284	1,313	1,312
	24 hour	1,241	1,287	1,301
	Ground surface	0.667	0.700	0.700

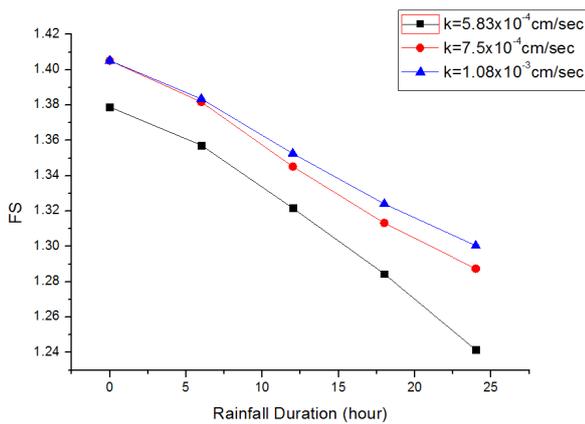


Fig. 12. Factor of safety for rainfall duration and horizontal permeability

B와 지오셀 A는 같은 조건에서 투수계수만 다른 형태인데 강우 지속시간이 증가할수록, 안전율이 현저하게 감소되는 현상을 확인할 수 있었다. 강우 지속시간에 따른 수평투수계수 증가에 대한 안전율의 비교는 Fig. 12와 같다.

#### 4. 결론

지오셀의 수평투수 효과 및 강우강도를 고려한 지오셀 보강사면의 안전성 연구를 위해 수평투수계수 실내시험, 침투해석 및 사면안정해석을 수행하였으며, 이에 대한 결

론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 실내 수평투수시험 시 무보강지반과 비교했을 때 기존지오셀 B 및 지오셀 A 보강지반의 수평투수계수가 더 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 지오셀의 다공율이 수평투수계수에 영향을 미친 것으로서 지반보강 이외에도 수평배수재로서의 활용이 가능할 것으로 판단된다.
- (2) 지오셀 보강 사면이 무보강사면에 비해 지속시간에 따른 침윤선이 더 낮게 형성되는 것으로 나타나, 지오셀의 높은 투수계수가 강우침투 시 지표유출을 유도하고, 원지반의 지하수위 상승을 억제하는 것으로 판단된다.
- (3) 본 연구에서는 실내시험을 통하여 사면보강재로 사용되는 3차원의 토목섬유 지오셀의 수평투수능력, 전단강도 증가를 확인하였다. 또한, 침투해석 및 사면안정해석을 통해 강우침투의 지표유출 효과를 분석하였으나, 실내 강우유출시험을 수행하여 수치해석 값과 비교분석이 필요할 것으로 판단된다. 또한, 모델링한 사면 이외에도 다양한 지반조건 및 다양한 강우강도에서의 해석이 진행되어야 하며, 사면에 지오셀 설치 시 지지력 증가에 대한 실내시험 및 수치해석이 추가적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

## References

1. ASTM D4716 (2014), "Standard Test Method for Determining the (In-plane) Flow Rate per Unit Width and Hydraulic Transmissivity of a Geosynthetic Using a Constant Head", *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
2. Kim, S. K. (1988), "Stability Analysis for a Dyke Subjected to Tidal Fluctuations", *Journal of Korean Society Civil Engineers*, Vol. 8, No. 3, pp. 91-100 (in Korean).
3. Korea Infrastructure Safety Corporation (2011), *Design Standard of Slope for Construction* (in Korean).
4. Lee, S. J. (2004), *Estimation of Unsaturated Shear Strength and Soil Water Characteristic Curve for Weathered Granite Soil*, Ph. D. Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology.
5. Shin, E. C., Kang, H. H., and Park, J. J. (2017), "Reinforcement Efficiency of Bearing Capacity with Geocell Shape and Filling Materials", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.21, No.5, pp.1648-1656.
6. Shin, E. C., Lee, W. H., Kang, H. H., and Oh, Y. I. (2010), "Experimental Study for Determination of Horizontal Permeability with considering various Geocell Shapes", *2010 Korean Geotechnical Society Conference*. (in Korean).