

## 강우침투를 고려한 철도 연변사면의 안정성 해석

### Numerical Analysis Considering Rainfall Infiltration For the Railroad adjacent Slopes

김민석<sup>1)</sup>, Min-Seok Kim, 사공명<sup>2)</sup>, Myung Sagong, 김수삼<sup>3)</sup>, Soo-Sam Kim

<sup>1)</sup> (주)동일기술공사 철도부 사원, Engineer, Dong-il engineering consultants Co., Ltd

<sup>2)</sup> 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 선임연구원, Senior Researcher, Dept. Track. Civil. KRRI

<sup>3)</sup> 한양대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of civil and Environmental Engineering, Univ. of Hanyang

**SYNOPSIS** : Slope failure triggered by rainfall produces severe effects on the serviceability and stability of railway, Therefore slope stability problem is one of the major concerns on the operation of railway. In this study we collected rainfall data when and where slope failures were observed. The collected data show that the range of cumulative rainfall is from 150 to 500mm and the rainfall duration is about 3 to 24 hours. By using the collected rainfall information, slope stability analysis considering infiltration was carried. The analyses employs multiple sliding surfaces to find the minimal factor of safety in the infinite slope condition. This approach show more reasonable results than the results from analysis following the design code which assumes that groundwater level and the slope surface are equal.

**Key words** : Slope stability, Rainfall infiltration, Railroad

## 1. 서 론

본 연구는 수치해석 기법을 활용하여 강우시 사면의 불안정 요인을 고려한 철도 연변사면의 안정성 검토기법을 제안하고 기존 설계기준과의 비교를 통해 그 타당성을 검증하고자 한다. 현재 사면의 안정성을 검토하거나 사면을 설계할 때 대부분 건설교통부나 한국도로공사의 설계기준을 사용하고 있다(표 1). 건설교통부와 한국도로공사에서 제시한 설계기준은 건기시와 우기시에 적용해야 할 지하수위를 별도로 적용하는 것으로 제안함으로써 실무자와 설계자에게 간단한 설계기준을 제시하는 한다는 측면에서는 의미가 있으나 실제 강우로 인한 사면의 거동특성이 반영되지 않고 사면의 거동에 영향을 미치는 요소가 고려되지 않아 한계성이 있다.

표 1. 각 기관별 사면 안정성 평가시 지하수위 적용기준

구 분	지하수위 적용기준	
	건기시	우기시
도로설계실무편람 (한국도로공사, 1996)	고려하지 않음	GL -3.0m 위치
도로설계편람 (건설교통부, 1999)	고려하지 않음	지하수위 고려
도로설계요령 (한국도로공사, 2001)	고려하지 않음	지표면에 위치
국도건설공사설계실무요령 (건설교통부, 2004)	고려하지 않음	지표면에 위치

따라서 본 연구에서는 강우강도, 강우지속기간, 흙의 투수성, 지하수위의 변동 등 사면의 거동에 영향을 미치는 요소가 고려되고 실제 강우로 인한 사면의 거동특성이 반영된 사면 안정성 평가기법을 제시하고자 한다. 해석의 방법은 첫째, 실제 강우자료를 바탕으로 생성한 다양한 강우상황을 토대로 무한사면을 해석단면으로 가정하였다. 둘째, SEEP/W를 이용한 침투해석을 실시하여 사면 내에서 시간에 따른 간극수압분포의 변화를 분석하였다. 셋째, 침투해석결과를 바탕으로 여러 층의 무한사면파괴를 가정하여 최소 안전율이 발생하는 파괴면을 추적하였다.

## 2. 강우자료 분석 및 생성

강우로 인한 철도 연변사면의 안정성을 평가하기 위한 첫 번째 단계는 강우자료를 분석하는 것이다. 본 연구에서는 철도청에서 제공한 자료 중 이미 사면파괴가 발생한 지역과 사면파괴 가능성이 높은 지역을 대상으로 하여 대상지역에서 가장 가까운 기상대와 관측소에서 강우자료를 입수하였고 입수한 강우자료를 분석하였다. 기상청에서 입수한 강우자료는 총 161곳에 대한 시간당 강우량 자료이고 분석기간은 사면파괴 발생 24시간 전부터 사면파괴 발생시점까지로 하였다. 시간당 강우자료를 분석한 결과 24시간 동안의 누적강우량은 150~500mm사이 분포하고 있었고 강우지속시간은 3~24시간으로 나타났다. 그리고 대부분의 경우 사면파괴시점에서 강우량이 많은 것으로 나타났으나 일부 구간에서는 강우 종료 10시간 후에 사면파괴가 발생한 경우도 있었다. 그리고 24시간 동안 대체로 균등한 강우분포를 나타내는 경우도 있었다.

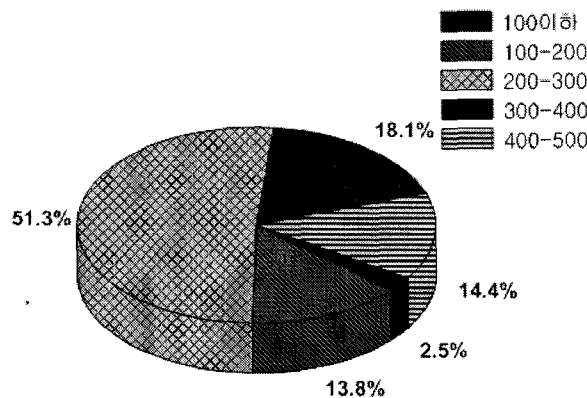


그림 1. 누적강우량 분포

그림 1은 사면파괴를 유발할 수 있는 누적강우량의 분포를 도시한 그래프인데 누적강우량의 분포는 200~300mm일 때가 가장 높은 것으로 나타났다. 하지만 낮은 빈도지만 누적강우량이 많을 때가 사면 파괴의 가능성이 높으므로 누적강우량이 500mm이상 일경우도 해석에 포함하였으며 해석기간은 48시간으로 하였다. 최근(2005년 9월)에 발생한 태풍 나비에 의해 동해남부선 일부구간에서 선로매몰, 선로유실의 피해가 발생하였으며 이 때 울산지역에서는 600mm이상의 누적강우량을 기록하였으며 일본에서는 1000mm이상의 누적강우량을 기록한 경우도 있다. 따라서 본 연구에서는 다양한 강우상황을 생성하여 수치해석에 적용하였다. 생성한 강우상황은 누적강우량이 200~800mm이고 누적강우량을 재현하기 위한 강우지속시간은 12, 24, 36, 48시간으로 하였다. 생성한 강우상황은 총 16가지 경우이며 그림 2에 나타내었다.

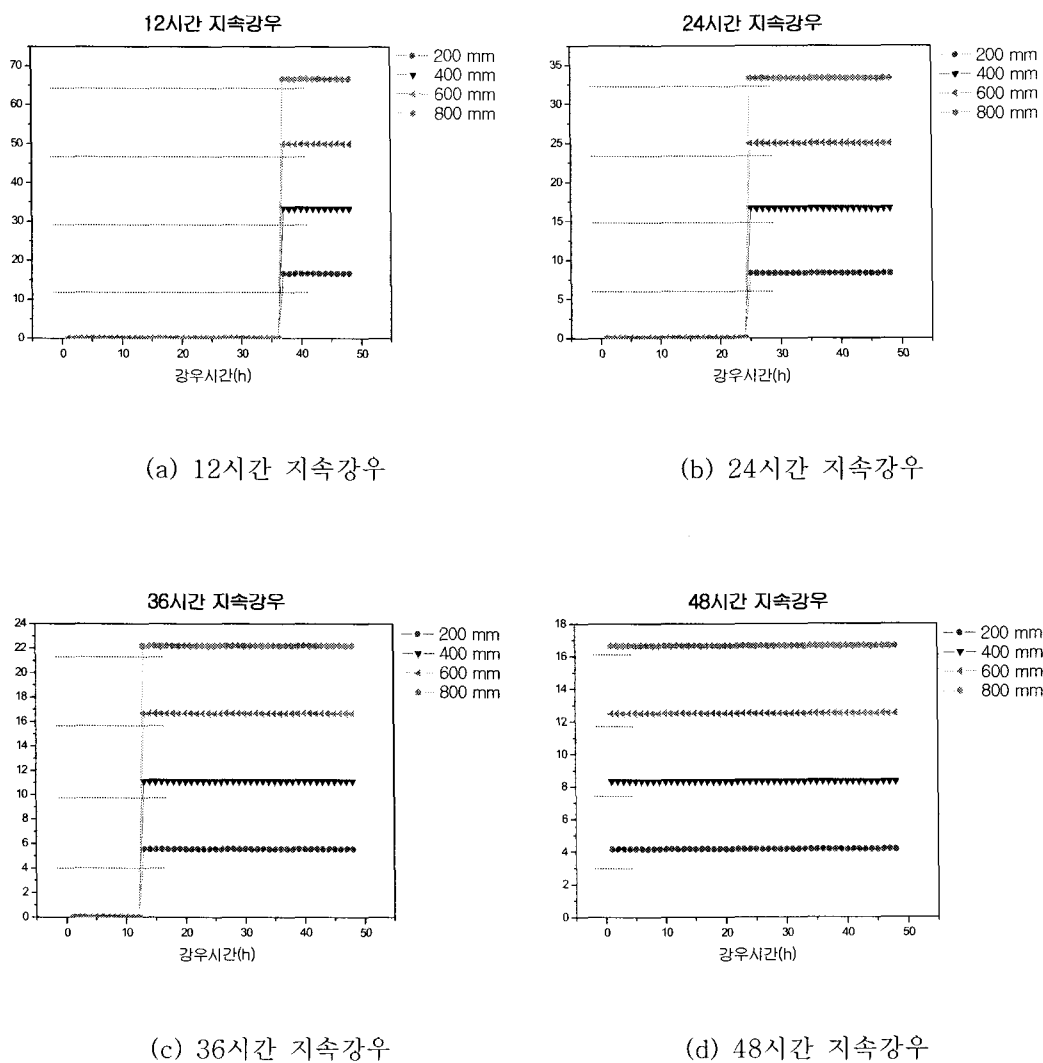


그림 2. 생성한 강우상황

### 3. SEEP/W를 이용한 침투해석

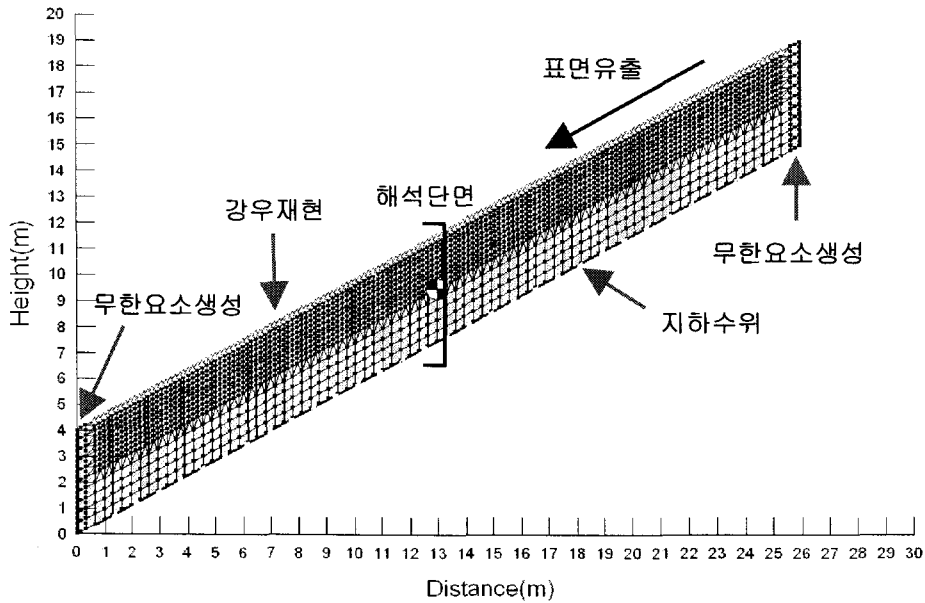


그림 3. 침투해석을 위한 유한요소망의 생성 (경사각 30°)

그림 3은 SEEP/W를 사용하여 침투해석을 수행하기 위해 생성한 무한사면조건인 유한요소망을 나타내고 있다. Rahardjo 등(1995)은 강우로 인한 사면파괴는 파괴면이 사면의 표면과 평행하고 상대적으로 얇은 층에서 발생한다고 주장하였다. 이러한 현상은 철도 연변사면에서도 관측되었다(사공 등, 2005). 따라서 본 연구에서는 강우시 사면의 안정성을 평가하기 위해서는 무한사면을 해석 단면으로 하는 것이 적합하다고 판단하여 무한사면을 해석단면으로 하였다. 해석에 적용한 사면은 높이가 4m, 경사각이 30°이고 2174개의 Node와 2112개의 Element로 구성되어 있다. Element는 정사각형을 주로 쓰되 필요에 따라 삼각형을 사용하였으며 강우의 영향이 가장 많은 상부면의 Mesh는 조밀하게 설정하였다.

본 연구에서는 사면의 높이를 4m로 가정하고 초기 간극수압분포는 사면의 깊이에 따라 선형적으로 감소하게 가정하여 해석을 수행하였다. 그 이유는 첫째, 사면의 높이가 4m이상인 경우 초기 선형적으로 감소하는 간극수압의 가정으로 인해 지표면에서의 부의 간극수압이 과도하게 평가되어 과도한 안전율이 도출되기 때문이다. 둘째, 초기 간극수압분포를 깊이에 따라 일정하게 가정할 경우 표면에 재현한 경계 조건과 관계없이 사면 내에서 위치수두와 압력수두의 차가 발생(전수두 발생)되어 침투가 발생하기 때문이다.

해석을 수행하기 위해 다양한 경계조건을 설정하였는데 앞서 생성한 강우상황을 표면에 설정하여 강우를 재현하였으며 좌, 우측은 무한요소를 생성하여 무한사면을 재현하였다. 그리고 지하수위는 사면의 하부에 위치하는 것으로 설정하였으며 흙의 포화투수계수 보다 큰 강우량은 표면에 유출하도록 설정하였다. 앞서 생성한 강우정보를 바탕으로 시간에 따른 간극수압의 변화를 살펴보고자 Transient해석을 수행하였다.

해석에 사용된 시료는 국내에 분포된 사면을 구성하고 있는 재료 중 그 비율이 가장 큰 화강풍화토를 대상으로 하였다. 강우로 인한 사면의 침투특성을 규명하기 위해서는 흙의 불포화 특성인 압력에 따른 체적함수비의 변화와 압력에 따른 투수계수의 변화를 규명해야 한다. 따라서 본 연구에서는 김(2003)의 실험결과를 토대로 화강풍화토의 불포화 특성을 규명하여 그림 4와 그림 5에 나타난 함수특성곡선과 투수계수함수곡선을 사용하였다.

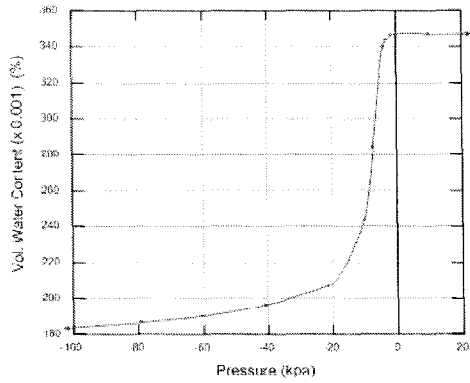


그림 4. 함수특성곡선 (화강풍화토)

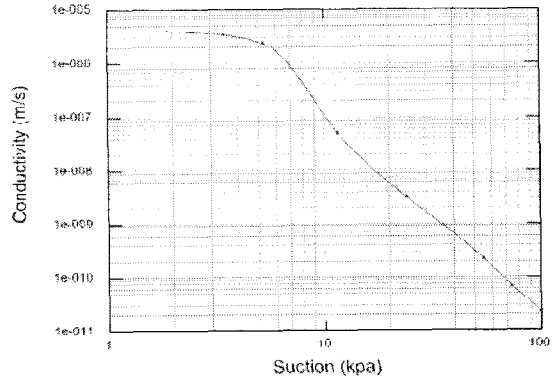
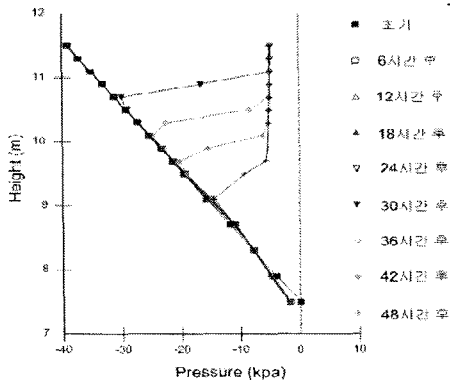
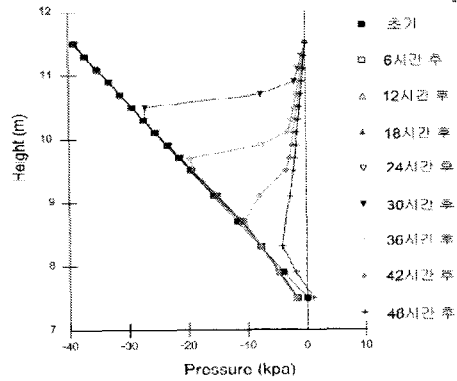


그림 5. 투수계수함수 곡선 (화강풍화토)

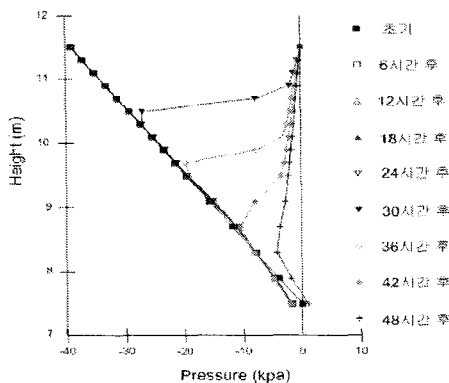
앞서 언급한 바와 같이 강우침투로 인한 간극수압의 변화 양상은 사면의 안정성과 밀접한 관계가 있다. 즉 간극수압의 증가는 전단강도의 감소를 의미하는 것이다. 따라서 실제 강우데이터를 바탕으로 생성한 다양한 강우상황을 입력치로 하여 Transient방법에 의해 투수해석을 실시하여 시간에 따른 간극수압의 변화를 구하였다. 초기 간극수압분포는 높이에 따라 선형적으로 감소하는 것으로 가정하였으며 해석의 결과는 그림 6과 그림 7에 나타내었다.



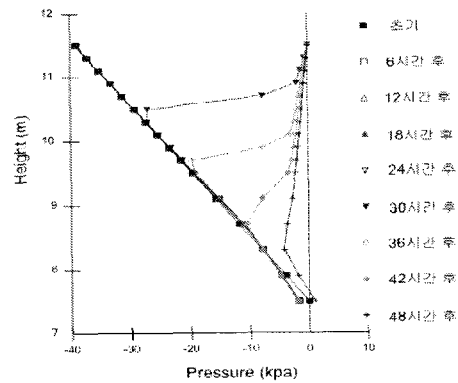
(a) 누적강우량: 200mm  
강우강도: 8.33mm/h



(b) 누적강우량: 400mm  
강우강도: 16.67mm/h

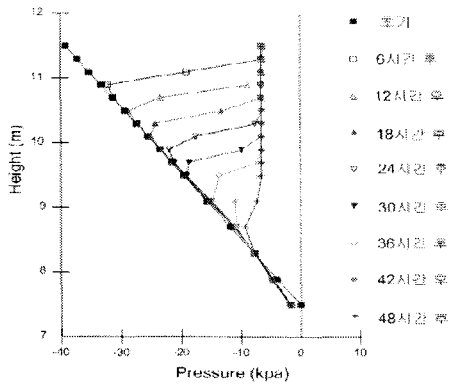


(c) 누적강우량: 600mm  
강우강도: 25mm/h

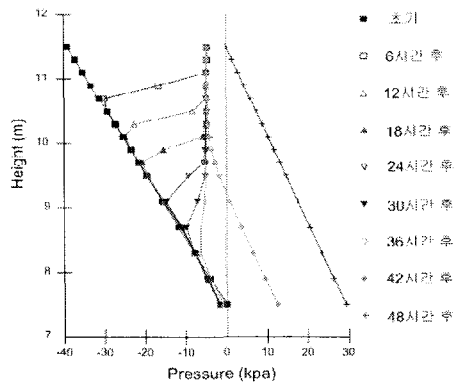


(d) 누적강우량: 800mm  
강우강도: 33.33mm/h

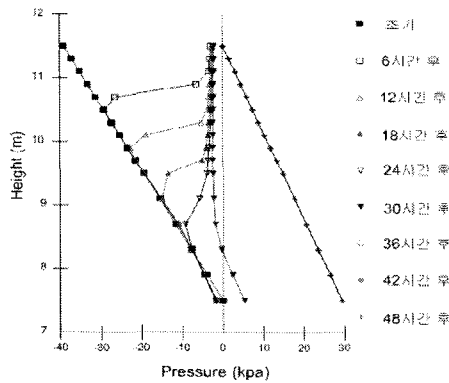
그림 6. 시간에 따른 간극수압 변화 (24시간 지속강우)



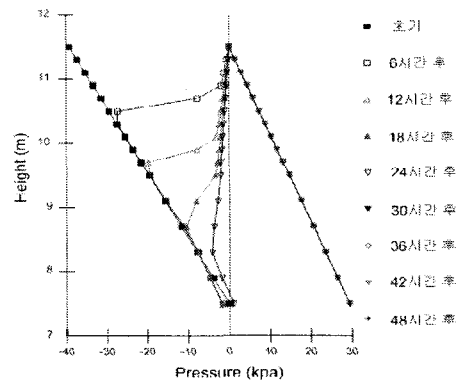
(a) 누적강우량: 200mm  
강우강도: 4.16mm/h



(b) 누적강우량: 400mm  
강우강도: 8.33mm/h



(c) 누적강우량: 600mm  
강우강도: 12.5mm/h



(d) 누적강우량: 800mm  
강우강도: 16.67mm/h

그림 7. 시간에 따른 간극수압 변화 (48시간 지속강우)

실제 강우자료를 바탕으로 생성한 강우상황을 적용하여 침투해석을 실시하여 도출된 시간에 따른 간극수압분포의 변화를 통해 첫째, 강우강도가 포화투수계수보다 작을 경우 사면의 표면이 완전포화되지 않음을 알 수 있었다. 둘째, 강우강도가 포화투수계수보다 클 경우 사면의 표면이 완전포화되고 그 이상의 유량은 유출됨을 확인하였다. 셋째, 충분한 강우지속기간, 강우강도, 누적강우량 조건에서 사면이 완전포화됨을 알 수 있었다.

#### 4. SLOPE/W를 이용한 사면안정해석

본 연구에서는 무한사면을 해석단면으로 무한사면파괴를 재현하여 사면의 안정성을 평가하고자 하였다. Collins 등(2004)은 1차원 침투해석결과와 무한사면에서의 한계평형방정식을 사용하여 강우시 사면의 파괴심도를 예측하였다. 하지만 Collins가 예측한 한계깊이의 개념은 시간에 따라 변하는 지반의 물성치를 고려할 수 없고 시간에 따른 파괴깊이를 예측하기에 복잡한 방법이다. 결국 강우시 사면의 파괴깊이를 정확히 예측하기는 어려운 실정이다. 따라서 본 연구에서는 사면의 깊이가 4m임을 고려하여 표면에서 2m깊이까지 16.7cm 간격으로 11개의 파괴심도를 가정하여 안전율을 도출한 후 그 최소값을 안전율로 사용하였다.

표 2 화강풍화토의 강도정수

구분	단위중량 (tonf/m <sup>3</sup> )	점착력 (tonf/m <sup>2</sup> )	내부마찰각 (°)
화강풍화토	1.9	1.0	33

해석에 사용된 시료는 국내에 분포된 사면을 구성하고 있는 재료 중 그 비율이 가장 큰 화강풍화토를 대상으로 하였다. 국내 사면 설계에 적용하고 있는 화강풍화토지반의 강도정수를 토대로 결정된 화강풍화토의 강도정수를 표 2에 나타내었다.

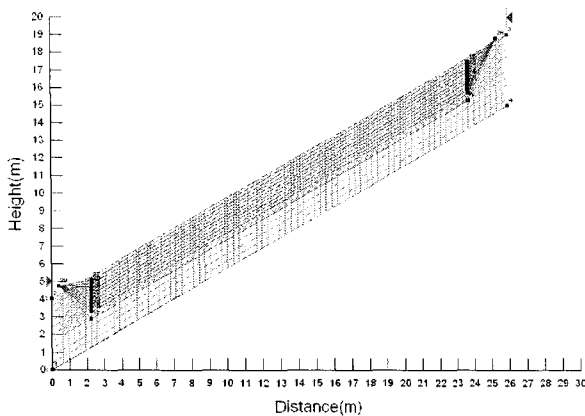


그림 8. 사면안정해석을 위한 해석단면

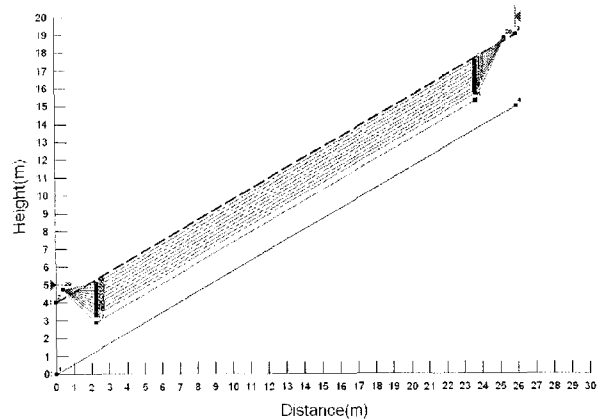


그림 9. 지표면에 지하수위를 가정한 해석단면

그림 8은 SLOPE/W를 이용하여 사면의 안정성을 평가하기 위해 구성한 해석단면을 나타내고 있다. 사면의 경사각은 30°이고 안전율 계산방법은 OMS(Ordinary Method of Slice), Bishop, Janbu의 방법을 적용하였으며 SEEP/W에서 계산한 침투결과와 연계해석을 실시하였다. 침투해석과 사면안정해석의 연계해석방법은 SEEP/W를 이용한 침투해석결과로 도출된 각 절점의 전수두를 SLOPE/W에 적용하는 것이다. 결국 강우특성을 고려한 침투해석 결과가 사면안정해석시 반영되기 때문에 지하수위의 위치나 변화를 가정하지 않고 침투를 고려한 사면안정해석이 가능하게 되는 것이다.

## 5. 기존설계기법과의 비교 검토

그림 9는 지표면에 지하수위를 가정하여 우기시 사면의 안정성을 평가하는 기존 설계기준을 재현한 단면을 나타내고 있는데 본 연구에서 수행한 안정해석기법에 적용한 조건 중 침투해석결과를 제외한 모든 조건은 동일하게 설정하였으며 지하수위만 표면에 위치한 것으로 하였다. 경사각이 45°, 60°인 경우도 해석을 실시하여 해석의 결과인 시간에 따른 안전율(24시간 지속강우, 48시간 지속강우)을 본 연구에서 제시한 평가기법과 동시에 나타내었다(그림 10~그림 15).

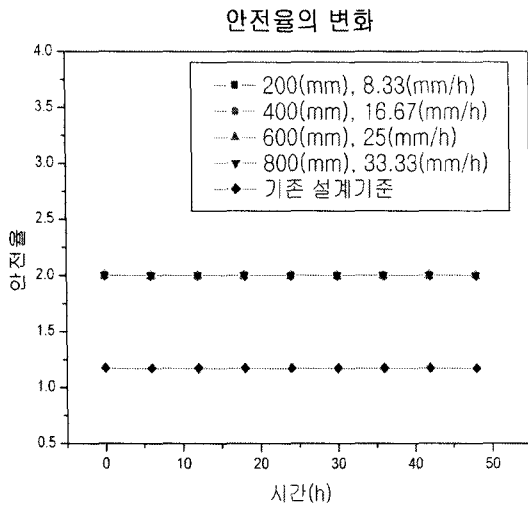


그림 10. 시간에 따른 안전율의 변화  
(24시간 지속강우, 경사각 30°)

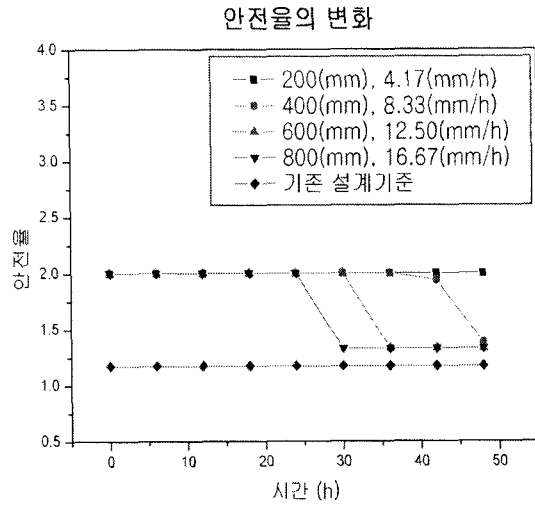


그림 11. 시간에 따른 안전율의 변화  
(48시간 지속강우, 경사각 30°)

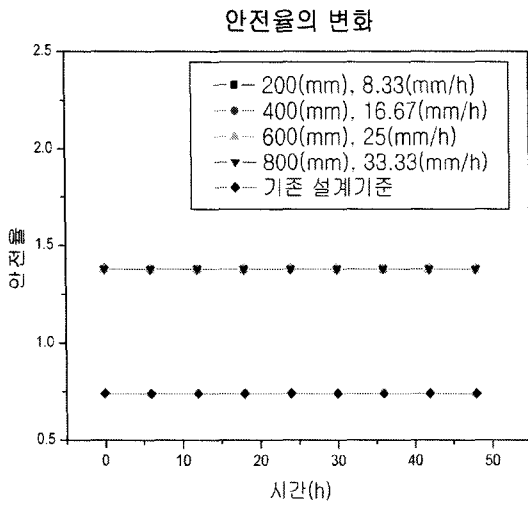


그림 12. 시간에 따른 안전율의 변화  
(24시간 지속강우, 경사각 45°)

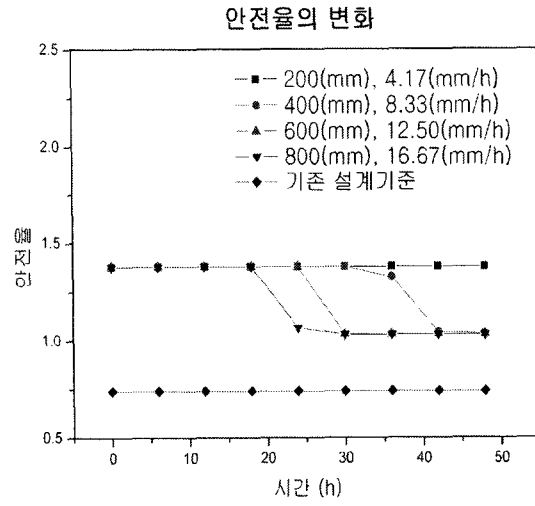


그림 13. 시간에 따른 안전율의 변화  
(48시간 지속강우, 경사각 45°)



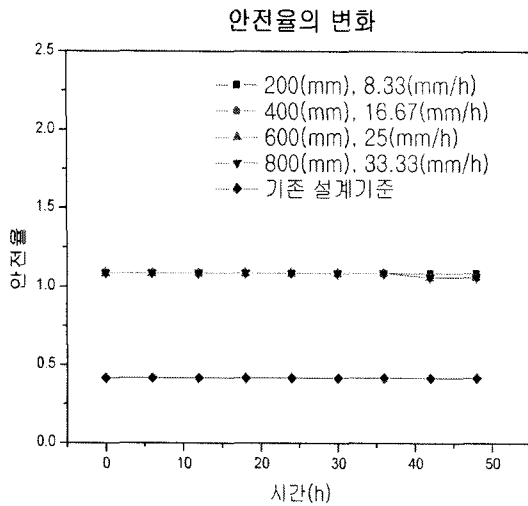


그림 14. 시간에 따른 안전율의 변화  
(24시간 지속강우, 경사각 60°)

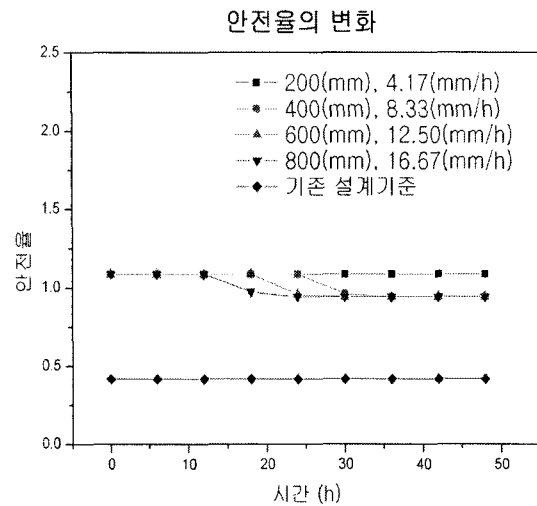


그림 15. 시간에 따른 안전율의 변화  
(48시간 지속강우, 경사각 60°)

시간에 따른 안전율 변화를 통해 첫째, 기존 우기시 사면의 설계기준은 강우로 인한 사면 불안정 유발 요인을 반영하지 못해 시간에 관계없이 일정한 안전율을 산정하고 있음을 알 수 있다. 반면 본 연구에서 제시한 사면의 안정성 검토기법은 강우시 사면의 불안정 유발 요인인 강우강도, 강우지속시간, 누적강우량 등을 반영하여 시간에 따른 안전율 변화 추이를 알 수 있다. 둘째, 사면의 경사각이 급할수록 짧은 시간에 안전율이 변하고 있음을 알 수 있고 48시간 동안 변화하는 안전율의 폭은 작음을 알 수 있다. 셋째, 강우시간이 짧을수록, 누적강우량이 작을수록 두 방법에 의해 계산된 안전율의 차이가 크음을 알 수 있고 사면의 경사각이 클수록 48시간 경과 후 두 방법에 의해 계산된 안전율의 차이가 크음을 알 수 있다.

## 6. 결론

본 연구에서 수행한 강우시 사면의 침투해석과 안정성 해석의 결과와 기존 설계기준과의 비교 결과를 통해 다음의 결론을 도출하였다.

- 1) 실제 강우자료를 바탕으로 생성한 다양한 강우상황을 적용하여 침투해석을 실시한 결과 시간에 따른 사면 내의 간극수압분포 변화를 알 수 있었다. 또한 충분한 강우지속시간, 강우강도, 누적강우량 조건에서 사면이 완전포화됨을 간극수압분포를 통해 알 수 있었다.
- 2) 본 연구에서 수행한 강우시 사면의 안정성 해석은 강우시 사면 불안정을 유발하는 요인인 강우강도, 강우지속시간, 누적강우량, 지반의 강도정수, 지반의 투수성, 지반의 불포화특성을 적절히 고려하였으며 시간에 따른 안전율 변화를 구할 수 있었다. 반면 기존의 설계기준은 강우강도, 강우지속시간, 누적강우량 등 강우시 사면 불안정 요인을 반영하지 못하였으며 시간에 관계없이 일정한 안전율을 산정하였다.
- 3) 또 본 연구에서 수행한 강우시 사면의 안정성 해석의 결과로 도출된 안전율의 범위는 경사각이 30°일 때 2.00~1.33, 경사각이 45°일 때 1.38~1.03, 경사각이 60°일 때 1.09~0.95이었다. 하지만 기존 설계기준에 의해 계산된 안전율은 경사각이 30°일 때 1.18, 경사각이 45°일 때 0.74, 경사각이 60°일 때 0.42로 계산되어 과다설계의 우려가 있음을 알 수 있었다. 특히 강우시간이 짧을수록, 누적강우량이 작을수록 두 방법에 의해 계산된 안전율의 차이가 크음을 알 수 있었다.

- 4) 본 연구에서는 강우로 인한 사면의 안정성을 평가하기 위해 사면의 높이를 4m로 가정하고 초기 간극수압분포를 사면의 깊이에 따라 선형적으로 감소하게 가정하여 해석하였다. 따라서 실제 현장에서 관측된 사면의 재원을 이용한 해석결과와의 비교를 통해 강우시 사면의 안정성을 적절히 평가할 수 있는 해석단면의 개발이 필요하다고 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. 김윤기(2003), “투수시험결과 해석에 의한 불포화 풍화토의 투수성에 관한 연구”, 한국과학기술원 석사학위논문
2. 사공명, 황선근, 이수형, 김현기, 김민석 (2005), “강우로 인한 철도 연변사면의 활동특성: 현장사례 중심”, 한국지반공학회 논문집, 제 21권 제 5호, pp. 7~13.
3. 한국철도기술연구원 (2004), “철도절개면 안정성 평가 및 대책방안 연구”, 최종보고서
4. Brian D. Collins, Doroslav Znidarcic (2004), "Stability Analysis of Rainfall Induced Landslides", *Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering*, Vol. 130, No. 4, pp. 362-372.
5. Geo-slope office (2002), SEEP/W User's Guide ver.5
6. Geo-slope office (2002), SLOPE/W User's Guide ver.5
7. Rahardjo, H., Lim, T. T., Chang, M. F., Fredlund, D. G (1995), "Shear strength characteristics of a residual soil." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 32, pp. 60-77.