

사면내 균열의 산사태 활동에 미치는 영향에 관한 연구  
(The Influence of Internal Fissures on the Slide of Hillside Slopes)

김상규\*<sup>1</sup>      장연수\*<sup>2</sup>  
Kim, Sang-kyu   Jang, Yeon-soo  
서홍석\*<sup>3</sup>      류지협\*<sup>3</sup>  
Seo, Heung-seok   Ryu, Chi-hyob

---

Abstract

The topography of our country shows the characteristics that the slope is steep and the soil layer over the base rock is shallow. According to the field reconnaissance of the areas in which landslides occur, the tension cracks over the scarp area and the macro pores within the slope are found. The cracks in the scarp area cause high uplift pressure within the soil pipes of the slopes when the downpours come around these areas. In this paper, the infiltration capacity and the high uplift pressure within the soil pipes are verified through the laboratory model test, and the results of infiltration and the slope stability analyses using the real site called Chang Ri, in Yong In county. The cause of slope failure in this area is presumed to be the accumulation of high pore pressure within the internal fissures.

요 지

우리나라의 지형은 지반의 경사가 가파르고 기반암을 덮고 있는 표층의 두께가 얇은 특성을 가지고 있다. 우리나라의 산사태 발생지역을 현지 답사해 보면 산사태지 상단부에 인장균열이, 사면내부에는 흠파이프가 존재하는 흔적을 흔히 발견하는데 이와 같은 사면 상단부의 균열의 존재는

- 
- \*1 정희원, 동국대학교 토목공학과 교수
  - \*2 정희원, 동국대학교 토목공학과 조교수
  - \*3 정희원, 동국대학교 토목공학과 박사과정

- 집중강우가 발생시 이 균열을 따라 지층내에서 발생하는 양압력으로 인하여 산사태 발생에 주요 원인인 것으로 사료된다. 본 논문에서는 무한사면의 상부 및 사면내에 균열이 존재할 경우 발생할 수 있는 침투능과 양압력 발생현상을 모형실험을 통하여 보인 후 이와 같은 원인으로 인하여 산사태가 발생하였을 것으로 추정되는 용인군 창리 산사태지역을 모델로 하여 실제 당시 강우량을 입력시킨 침투해석과 사면안정해석을 수행한 결과를 소개하고자 한다.
- 

## 1. 서론

우리나라 뿐만 아니라 세계 도처에서 많은 인명과 재산상의 피해를 주고 있는 산사태는 지질, 지형, 식생 그리고 기후등 여러 요인이 복합적으로 작용하여 발생한다.

산사태의 발생원인은 사면을 구성하고 있는 흙과 암석등의 풍화로 인한 강도감소, 강우로 인한 침투에서 발생하는 토피중량 증가 및 간극수압의 증가, 사면선단부이 지속적인 침식으로 인한 지지력 상실등 여러가지로 생각하여 볼 수 있는데 이들 중 특히 균열이 있는 사면내로 침투되는 강우는 균열내에 자유수면 대수층 형성시 보다 큰 양압력을 형성함으로써 산사태 발생의 주된 원인이 되고 있는 것으로 알려져 있다.

우리나라 산지의 특성은 지반의 경사가 가파르고 기반암을 덮고 있는 토층의 두께가 얇으며 산사태 발생지역을 조사하여 보면 산사태지 상부의 인장균열과 사면내부에 흙파이프가 많이 발견된다. 사면내의 흙파이프의 형태를 보면 흙사면내의 투수성이 큰 사질토층이나 흙뿌리 침식으로 형성된 구멍, 흙과 암반사이에 형성된 풍화대의 균열등으로 나타나며 이들이 사면의 중간 또는 선단부에서 막히게 되었을때 높은 간극수압을 형성하게 된다.

본 논문에서는 이러한 현상을 강우강도를 재현할 수 있는 사면모형장치 및 간극수압측정장치를 이용하여 실험실에서 재현한 후, 실제 산사태지역을 답사한 결과 사면 상부층의 균열과 흙파이프가 발견되고 있는 용인군 창리지역의 산사태지역을 대상으로 침투해석과 사면안정해석을 실시하여 균열내 강우침투시의 높은 양압력이 사면불안정의 주된 원인이 될 수 있음을 보였다.

## 2. 강우모형실험을 통한 사면내 간극수의 거동분석

본 절에서는 사면으로 강우침투시의 침윤전선의 진행, 간극수압과 사면 선단으로의 유출량의 변화를 사면이 균질한 경우와 얇은 모래층이 있는 경우로 대별하여 강우모형시험장치를 이용 실내에서 재현하였다.

### 2.1 실험장치 및 모형사면 제작

본 실험을 위한 실험장치는 다양한 강우강도를 재현시킬 수 있는 강우 장치와 길이 2000mm, 높이 1000mm, 폭 200mm, 두께 8mm의 투명 아크릴 판으로 이루어진 사면모형장치, 강우가 침투할 때 사면내 간극수압 변화를 측정할 수 있는 간극수압 측정장치로 이루어져 있다(그림 2.1 참조).

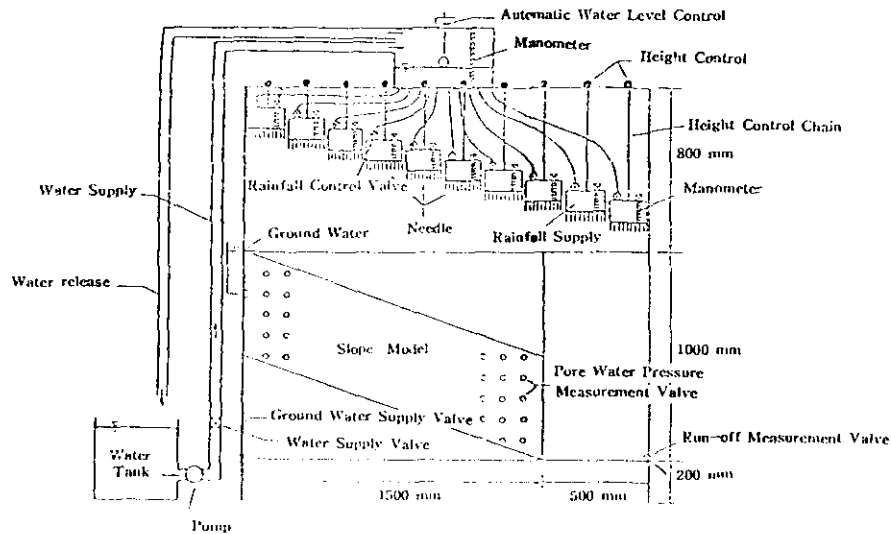


그림 2.1 모형실험장치의 단면도

실험을 위해 만들어진 모형사면은 풍화토를 이용 길이 1600mm, 높이 300mm, 폭 200mm의 크기이며 경사각은 20°로 제작하였으며 모형사면 제작 시 흙의 다짐은 사면의 하단부터 흙을 수평으로 50mm의 두께로 편후 무게 3019g의 해머를 이용하여 200mm높이에서 수평면에 표준다짐을 기준하여 10%의 다짐에너지에 해당하는 단위면적당 2.36Kg/cm<sup>3</sup>로 동적다짐을 하였다. 간극수압은 강우를 재현시킨 후 10분 간격으로 측정하였다.

모형사면은 풍화토로 이루어진 균질사면과 연직인 방향으로 100mm 폭, 경사방향으로 50mm 두께의 얇은 모래층을 갖는 불균질사면으로 만들어 졌으며 표 2.1과 같이 다양한 강우강도시 시간에 따른 침윤전선 진행과 유출량 변화, 간극수압 변화를 측정하였다.

표 2.1 실험 계획

	기호	강우강도 r	건조밀도 (t/m <sup>3</sup> )	함수비 w(%)	간극률 n	실험에서 구하는 관계 곡선(단위시간)
균질한 경우	W-2.5K	2.5	1.47	9.32	0.44	1. 침윤전선의 진행 2. 유출량의 변화 3. 간극수압의 변화
	W-5K	5.0	1.46	9.19	0.44	
	W-8K	8.0	1.49	10.15	0.43	
	W-13K	13.0	1.47	9.96	0.44	
	W-20K	20.0	1.45	8.48	0.44	
얇은 모래층 있는 경우	W-5K	5.0	1.46	9.22	0.44	1. 침윤전선의 진행 2. 유출량의 변화 3. 간극수압의 변화
	W-8K	8.0	1.48	9.48	0.44	
	W-13K	13.0	1.50	10.73	0.43	
	W-20K	20.0	1.45	9.00	0.44	

## 2.2 실험결과

### 2.2.1 침윤전선의 진행

풍화토의 포화투수계수를 기준하여 그 배수로 규정되는 강우강도를 각각 모형사면에 재현하면 사면표면으로부터 포화대가 형성된 후 침윤전선(wetting front)이 아래로 진행된다. 그림 2.2는 균질한 사면에 대해 강우강도를 여러가지로 바꾸었을 때의 침윤전선의 진행상태를 보여준다. 이 그림을 보면 강우강도가 작은 경우(W-2.5K)에는 침윤전선의 진행속도가 대단히 느리나 강우강도가 지반의 포화투수계수의 8배 이상이 되면 침윤전선의 진행속도가 일정해진다는 것을 알 수 있다. 이것은 침윤전선 진행에 영향을 줄 수 있는 강우강도는 한계값이 있음을 의미하며, 이때 한계값은 절대 크기의 강우가 아니라 사면을 이루는 흙의 투수계수에 영향을 받음을 보여주고 있다. 본 실험에서 한계가 되는 강우강도는 약 8k<sub>s</sub>로 밝혀졌다. 모래층이 끼인 불균질사면에서는 침윤전선이 모래층을 통해 불투수층에 먼저 도

달되어 여기로부터 상향으로 침투가 발생하였다. 따라서 지표면부터 침투되는 하향의 침윤선과 하향으로부터 상향으로 발전되는 침윤선이 마주치면서 지반은 포화가 되었다.

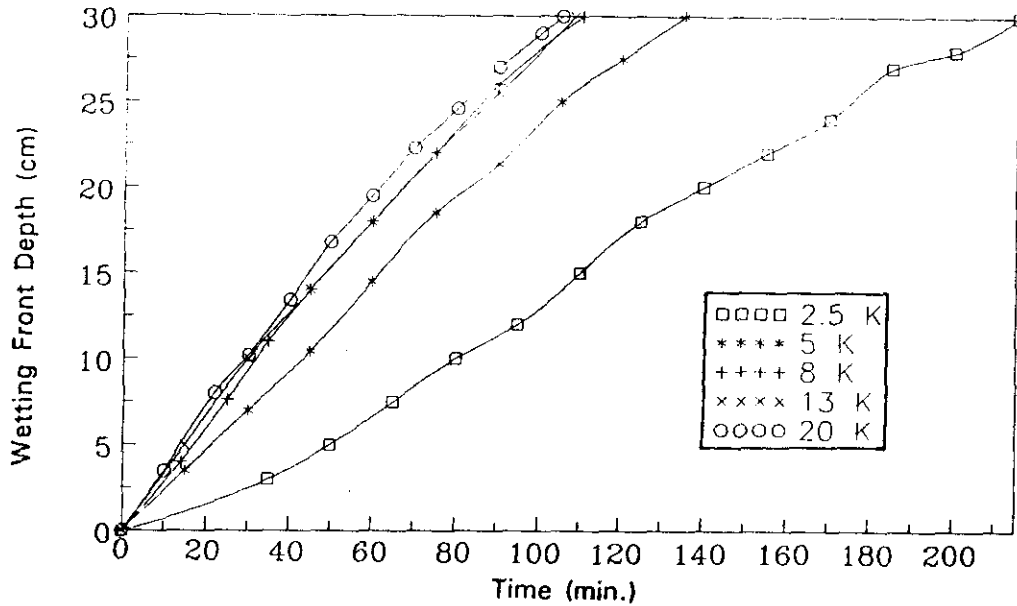


그림 2.2 강우강도 변화에 따른 침윤전선의 진행

### 2.2.2 유출량의 변화

침윤선이 진행되어 불투수경계면에 도달하면 사면하단의 불투수경계면부터 시작하여 점차 경계면에 평행하게 자유수면대가 형성되고 사면내에서 유출이 시작된다. 그림 2.3은 균질사면의 강우강도 변화에 따른 유출량 곡선인데 8K<sub>s</sub> 이상의 강우강도에서는 강우강도가 증가할수록 유출량이 증가한다. 지반내로 침투능은 일정한 값을 갖기 때문에 한계 침투값 이상의 강우는 표면에서 직접 유출되며 강우강도가 클수록 유출량도 커진다. 따라서 이 유출량은 지반의 침식과 밀접한 관련이 있다. 얇은 모래층이 있는 사면에 강우를 재현했을때에도 유출량 곡선을 얻을 수 있었는데 정상침투가 발생한 이후의 유출량은 균질사면의 경우와 비슷한 경향을 나타내었다.

### 2.2.3 간극수압의 변화

그림 2.4는 균질한 사면의 강우강도 변화에 따른 간극수압의 발달과정을 나타낸다. 이 그림을 보면 침투능 이상의 강우강도에서 간극수압은 거의

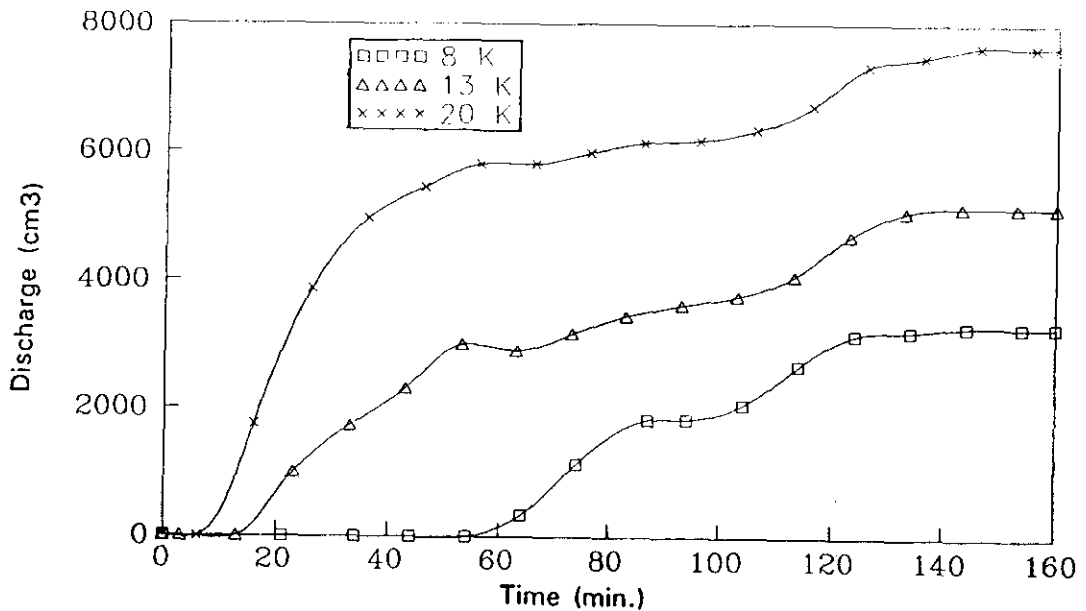


그림 2.3 균질한 사면에서 강우강도에 대한 유출량의 변화

일정한 형태로 발전하며, 강우강도에 관계없이 간극수압은 일정한 시간(여기서는 약 110분)이 경과한 후 급격히 증가하여 일정한 수두(17-18cm)를 유지한다. 특기할 것은 팁의 위치로부터 지표면까지의 높이는 30cm인데 비하여 최대수두는 17~18cm에 지나지 않아 약 60%의 반응밖에 나타나지 않았다는 것이며 이것은 충분한 강우로 인해 정상침투에 이르렀다 하더라도 지반이 완전히 포화되지 않으며 정상침투로 인해 수두가 손실되기 때문이다. 얇은 모래층이 끼어 있는 경우는 모래층을 따라 침투가 빠르게 진행되어 불투수경계면에서 자유수면의 발달을 촉진시키는 역할을 한다. 모래의 투수계수는 전체사면을 이루는 풍화토에 비해 약 200배정도 크기 때문에 모래층을 따라 침윤전선이 먼저 하강하고 여기로부터 침윤전선이 발전하기 때문에 그림 2.5에 보인 바와 같이 일정한 간극수압에 도달하는 시간이 전자의 경우보다 훨씬 빠르다. 특기할 할 사항은  $r = 13, 20k_s$ 에서는 간극수두가 약 45cm까지 상승하여 지표면의 두께보다 15cm나 더 높게 발전하였다. 그림 2.6은 정상침투가 발생하였을 때 모래층이 있는 모형사면내 간극수압의 발전과 전수두의 분포를 보인 것인데 팁1이 놓이는 모래층에서 전수두가 최대가 되고 중간부분에서 감소되어 침투수가 모래층에서 사면의 표면으로 흐를 수 있으며, 이때의 침투수압은 토층의 유효응력을 감소시켜 전단강도를 현저히 떨어뜨린다. 따라서 사면내 얇은 모래층의 존재는 사면내 침투에 크게 영향을 주며, 이때 상향의 침투수압은 사면을 불안정 상태로 만드는 요인이 될 수 있음을 알 수 있다.

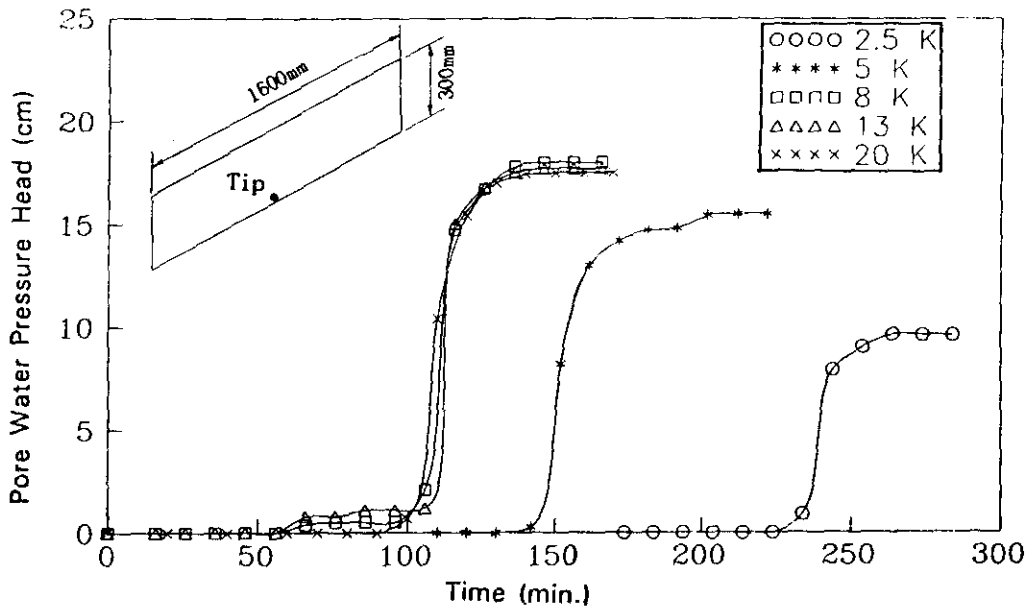


그림 2.4 균질한 사면에서 경과시간과 간극수압의 발전과의 관계

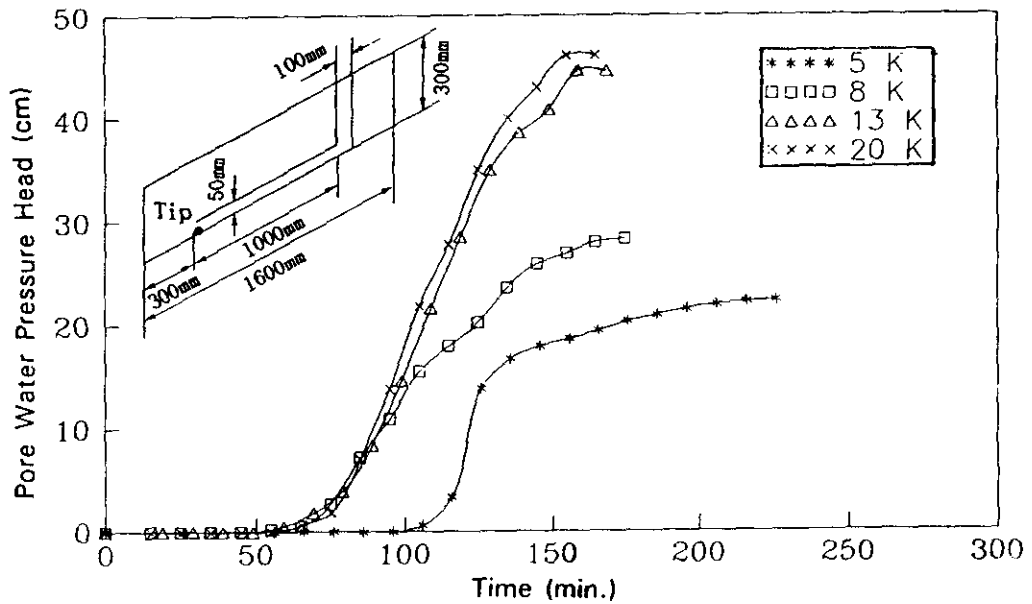


그림 2.5 불균질한 사면에서 경과시간과 간극수압의 발전과의 관계

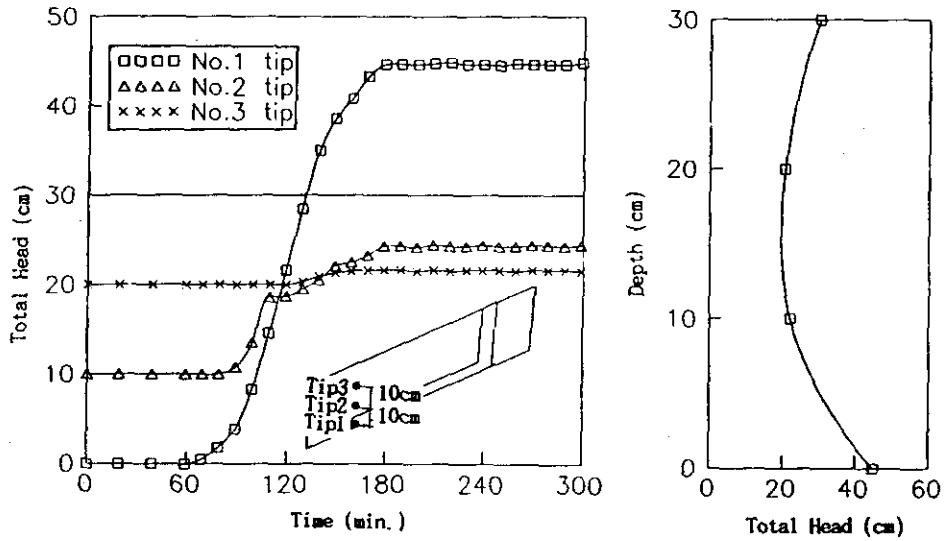


그림 2.6 불균질한 사면에서 (a)경과시간에 따른 전수두의 변화와 (b) 깊이에 따른 전수두의 분포

### 3. 산사태 발생지구(용인군 남사면 창리)에 대한 해석

본 절에서는 1991년 7월의 집중호우로 인하여 1152개소의 산사태가 발생한 용인군내 산사태 지역을 답사하여 균열을 내포한 사면인 남사면 창리의 산사태지를 선택하여 현장의 시료를 채취 물성실험을 수행하고 현장지질조건을 이용 침투 및 안정해석을 한 결과를 보였다.

현장답사시 창리 산사태 지역은 기반암이 노출된 부분을 제외하고는 아카시아로 복구되어 있었으며(그림 3.1) 사면하부는 얇은 개울로 형성되었고 철망으로 엮은 돌망태로서 계단식으로 복구가 이루어져 있는 상태였다. 본 산사태지역은 노출된 주변지층과의 관계를 고려하여 추정된 산사태 이전과 이후의 단면도는 그림 3.2와 같다.

이 지역의 원 표층두께는 약 40cm정도로 매우 얇게 기반암을 덮고 있었으나 산사태 발생 후 상부의 38° 경사부분부터 활동이 시작되어 사면 중간부분의 풍화된 편마암이 완전 노출되었다. 지표면에 가까운 곳은 엽리를 따라 풍화가 진행되고 붉은색으로 착색되어 우기시나 파파 전 토피가 있었을 당시에는 철성분이 포함된 지하수가 풍화된 엽리균열을 통하여 흘렀을 것으로 추정된다. 풍화된 기저암의 절리는 주향경사가 100/40, 20/75, 290/48의 세 방향으로 발달되어 있다.





그림 3.1 창리지역 산사태 사면의 전경

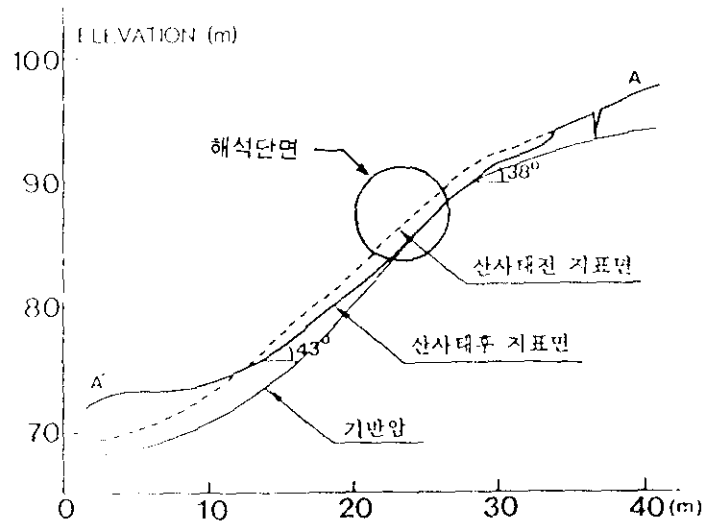


그림 3.2 창리지역의 단면도



그림 3.3 사면 중앙부분에 노출된 기반암

### 3.1 현장시험

본 해석대상지역의 지질에 대한 기본특성을 파악하기 위해 산사태발생 측면부 0.2m와 0.4m 깊이에서 시추시험과 들밀도시험을 수행하여 표 3.1, 그림 3.4와 같은 결과를 얻었다.

표 3.1 시추시험과 들밀도시험 결과

깊이(m)	비 중	함수비(%)	간극율	전체단위중량( $t/m^3$ )	분 류
0.2	2.65	14.7	0.53	1.42	SW-SM
0.4	2.67	12.9	0.53	1.42	SP-SM

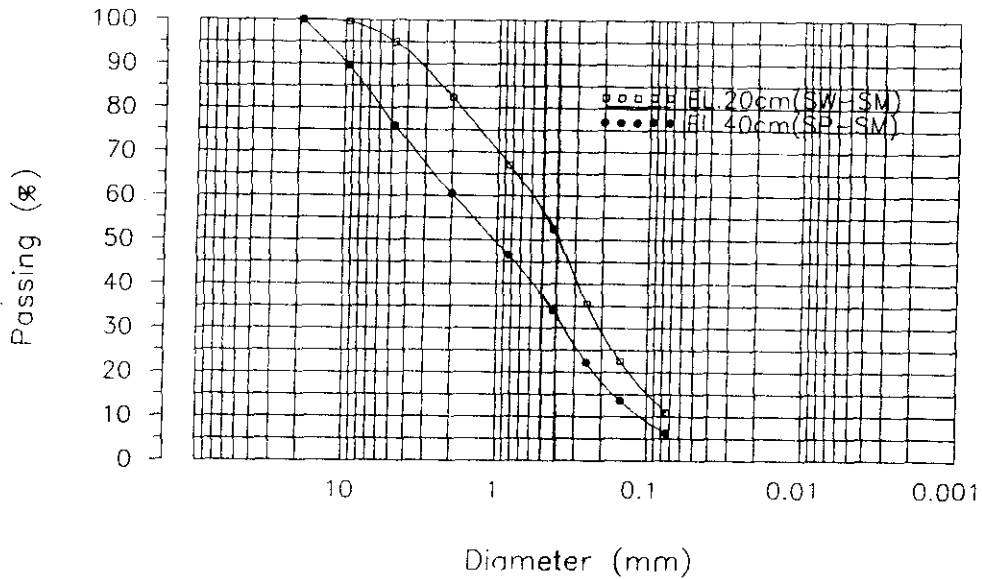


그림 3.4 현장시료의 입도분포곡선

본 현장시험결과에 의하면 사면의 토질분류는 실트가 섞인 모래층으로 분류되는 화강토와 비슷한 입도를 보이고 있으며 상부보다 하부층의 입도가 조금 더 균질한 것으로 나타나고 있다. 단위중량은 상하부 모두 1.42로서 비교적 밀도가 적은 지층임을 알 수 있다.

지층내에 존재하는 macro pore등을 포함한 현장투수시험을 직경 76.2mm의 thin wall tube를 투수계수를 구하고자 하는 층까지 관입시켜 구한 결과 투수계수가  $2 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-4} \text{m/sec}$ 로 나타났다.

### 3.2 침투해석

창리지역에 대한 단면은 깊이 40cm의 모래질 흙 아래 실제 폭 5mm 정도의 균열을 포함한 사면 중앙부분의 경사가  $43^\circ$ 인 지역 4m의 단면을 설정하여 그림 3.5와 같이 252개의 절점과 205의 요소로 구성된 유한요소망을 형성하였다.

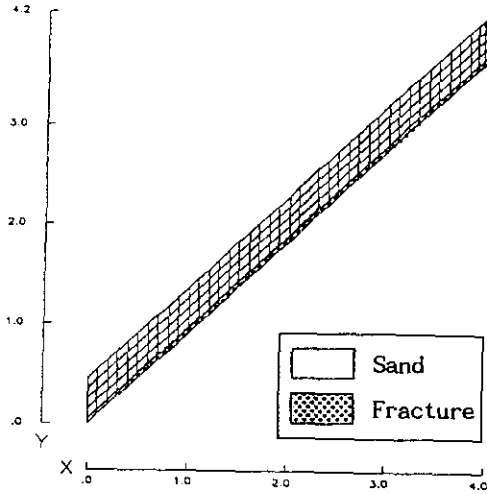


그림 3.5 유한요소망

### 3.2.1 입력자료

침투해석시 사용된 투수계수는 현장투수시험으로부터 구한 값으로부터  $2 \times 10^{-4} \text{m/sec}$ , 균열부의 투수계수는 균열의 폭으로부터 균열이 존재시의 투수계수 산정식<sup>(1)</sup>을 이용하여  $1 \times 10^{-2} \text{m/sec}$ 로서 입력하였다.

포화 - 비포화흐름에 의한 침투해석을 위해 부간극수압 - 투수계수, 부간극수압 - 체적함수비의 관계는 현장에서 측정된 현장포화투수계수 값과 간극율을 토대로 Green and Corey<sup>(3)</sup>(1971)가 여러 흙에 대해 측정한 곡선을 이용하여 그림 3.6, 3.7과 같은 특성곡선을 얻었다.

침투해석시 입력된 강우량은 이 지역에 산사태가 발생한 1991년 7월 21일 오전 4시부터 오후 10시까지의 인근 수원관측소에서의 관측된 자료를 이용하였다. 그림 3.8은 이때의 관측강우량과 식생등에 의해 차단되었을시의 지반에 침투되는 순강우량을 보인다.

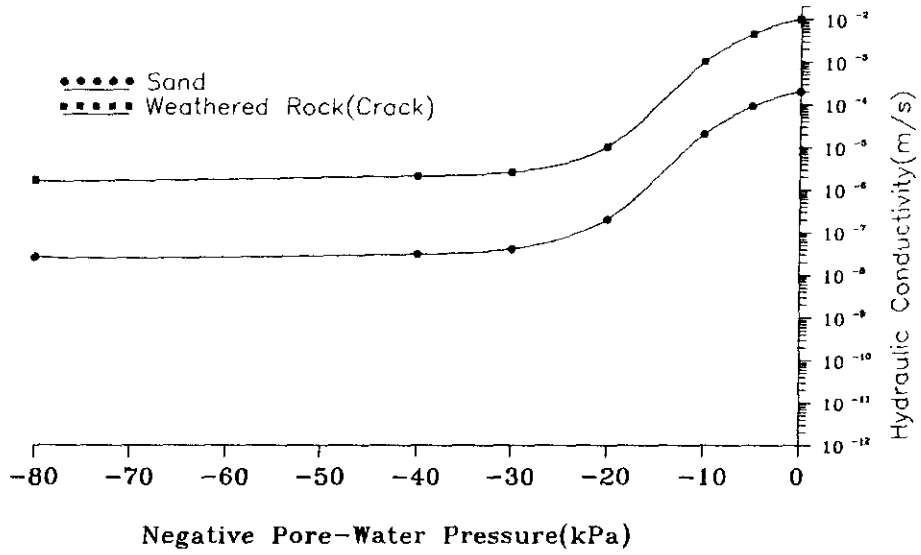


그림 3.6 부간극수압 - 투수계수

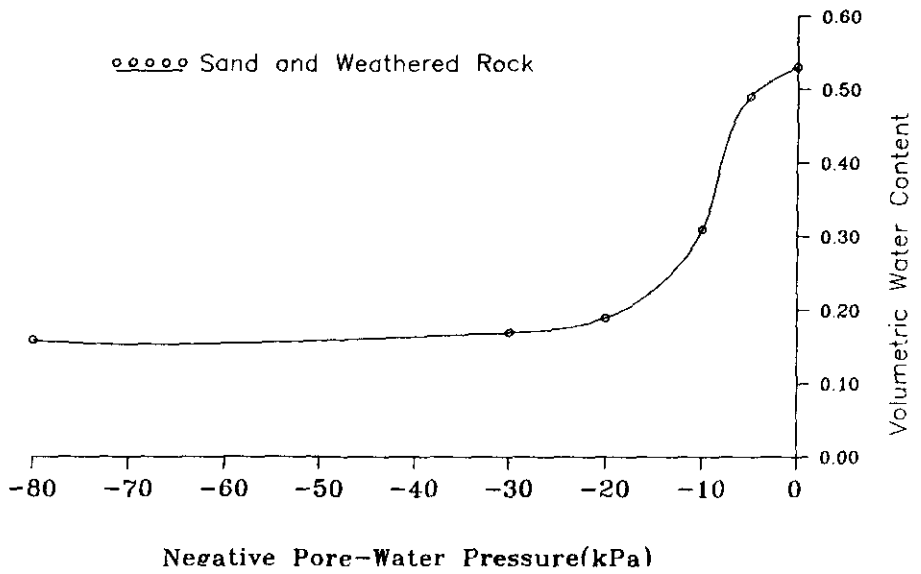


그림 3.7 부간극수압 - 체적함수비

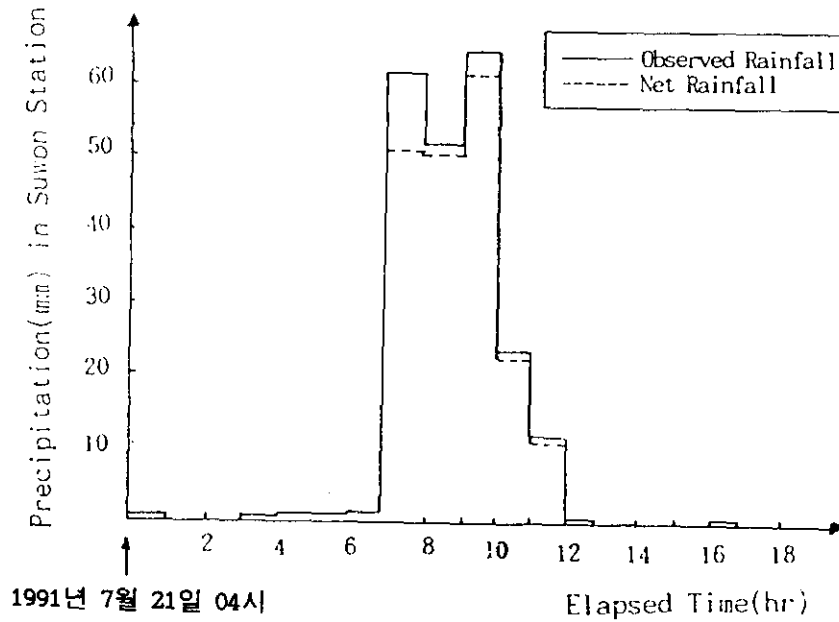


그림 3.8 관측강우량과 순강우량

### 3.2.2 초기 및 경계조건

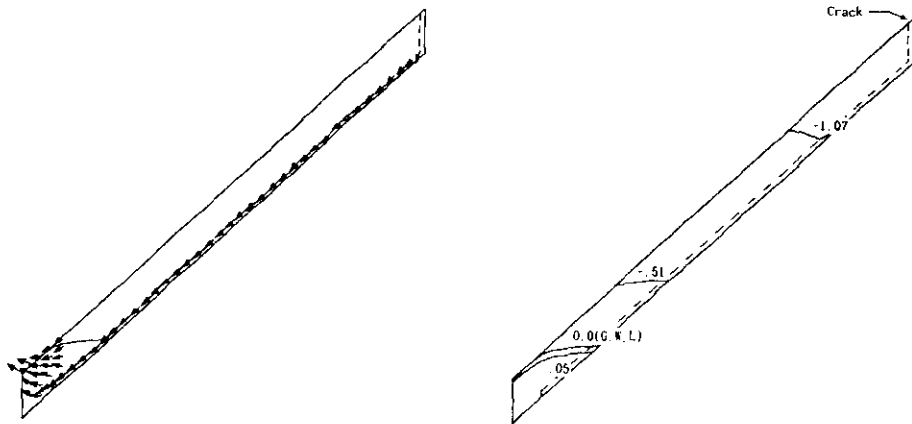
강우로 인하여 침투가 발생하기 전, 사면에서는 부간극수압을 보이게 된다. 포화시의 체적함수비는 간극율과 같으므로 실제 지반의 포화도에 대한 체적함수비를 구하여 이에 상응하는 부간극수압을 부간극수압 - 체적함수비 곡선으로부터  $-2.0t/m^2$ 을 구하여 강우직전 지반조건으로 입력시켰다. 경계조건으로는 사면바닥과 양안은 불투수층이고 지표면은 관측강우조건을 입력시켰다.

창리지역과 같은 경우에 있어서는 산사태 급경사면 상부에 형성된 틈 (crack)이 포화된 경우와 불포화된 경우의 침투거동이 매우 다르게 해석될 수 있다. 상부면의 crack이 포화된 경우는 canopy현상이라 부르는 2차차단으로 인하여 지표면에 흐르는 지표수가 파괴면 상부의 균열에 채워짐으로서 이루어 지는데 이때 집중호우 발생 직후 1시간이 지체하여 집중호우기간(5시간)동안 균열이 포화되도록 가정한 후 본 지역에 대한 침투해석은 crack이 포화되지 아니하고 사면표층으로부터 정상침투만이 이루어질 경우와 crack이 포화되어 사면전체의 포화에 이르게 되는 두가지의 경우를 비교하였다.

본 해석을 위해 Fredlund and Morgenstern<sup>(2)</sup>(1977)의 침투이론에 FEM 기법을 적용한 Geoslope사의 프로그램 PC-SEEP<sup>(4)</sup>을 이용하였다.

### 3.2.3 침투해석 결과

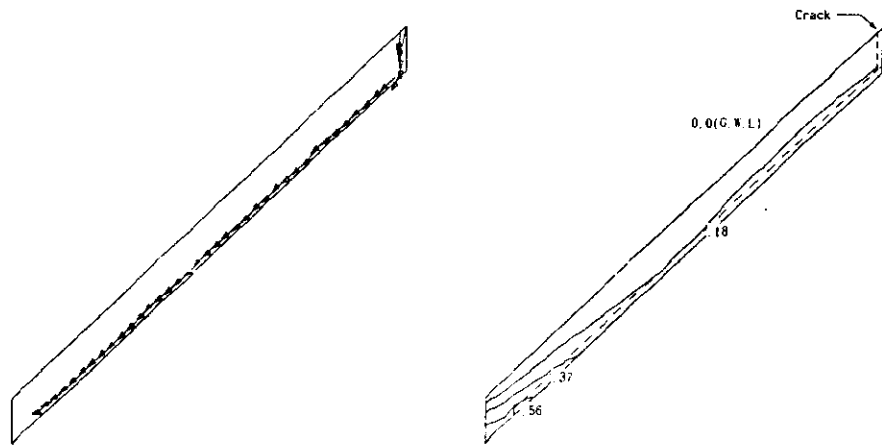
상부 crack에 물이 포화되지 않았을 경우(이하 Case 1) 최고수위에 도달되는 9.5hr경의 속도벡터는 그림 3.9(a)와 같이 좌안 상단부에서 커다란 유출벡터를 보이며, 포화되었을 경우(Case 2)는 3.10(a)와 같이 8hr부터 균열상단에 발생한 수위로 인하여 지하수위의 상승과 함께 균열부분에서 커다란 유출벡터를 보인다. 두 경우 모두 흙속으로의 침투는 지반내의 토층과 기반암 경계의 투수성이 큰 층을 통하여 이루어지지만 지표에 흐르는 물의 과다로 인하여 Case 2의 경우에는 사면의 기울기와 동일한 방향으로 등수두선이 형성되어 지표면까지 높아진 반면 Case 1의 경우는 사면의 형성각도와 상관없이 중력작용 방향에 수직한 방향으로 지하수면이 형성된다.



(a) 속도벡터도

(b) 압력수두도

그림 3.9 9.5시간 경과시(Case 1; No Water in Crack)



(a) 속도벡터도

(b) 압력수두도

그림 3.10 8.5시간 경과시(Case 2; Water in Crack)

시간의 경과에 따른 수위의 변화는 그림 3.11과 같다. crack이 불포화 되었을 경우는 7.6hr경 최초로 수위가 형성되며 9.5hr경에 최고로 수위가 상승한다. 그러나 상부 crack이 포화되었을 경우는 강우의 지표면 저유로 인하여 이들이 균열상단까지 채워지도록 설정된 조건으로 인하여 8.5hr부터 13hr까지 최고의 수위가 형성된 후 그 이후는 하강하는 양상을 보이다가 두 경우 모두 22hr이 되어 일정하게 유지된다. 본 그림으로부터 crack이 물로 인하여 포화가 되어지지 않을 경우는 사면을 불안정하게 되는 요인이 발생하지 않는 반면 지표수의 crack에 과다 침입현상이 발생하는 경우는 하부 투수성이 큰 층부터 전 경사면에 걸쳐 지하수위의 급격한 상승을 가져와 사면을 불안정하게 하는 요인으로 작용함을 알 수 있다.

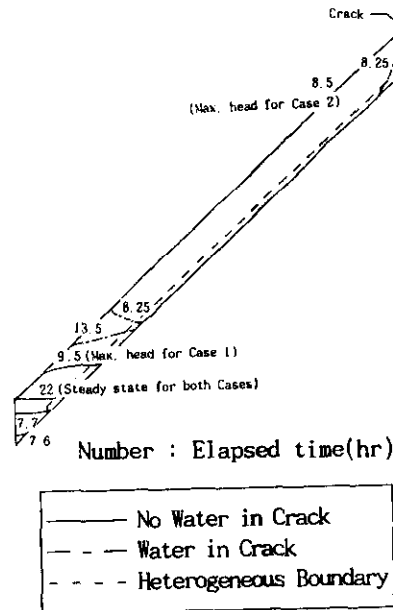


그림 3.11 수위변화도

시간에 따른 압력수두 크기의 변화를 알아보기 위하여 그림 3.12와 같이 사면의 최하부(EL.0.09m)와 균열끝단(EL.0.27m)에서의 압력수두를 계산하였다. 그 결과 Case 1의 경우 강우량의 크기에 따라 압력수두가 변하여 9.5hr경에 사면의 최하부와 균열끝단에서 각각 0.53m, 0.45m로 최대치가 계산되었다. 그러나 Case 2의 경우 균열에 설정된 경계조건으로 인하여 8.75hr ~ 13hr까지 사면의 최하부와 균열끝단에서 각각 0.67m, 0.7m로 최대치가 계산되었다. 이때의 수두는 모두 지표면 표고(0.45m) 보다 각각 높이가 올라가게 되는 것으로서 사면상단에 균열 존재시 지표저유수의 균열로의 유입으로 인하여 발생된 간극수압이 사면의 안정에 미치는 영향이 큼을 알 수 있다.



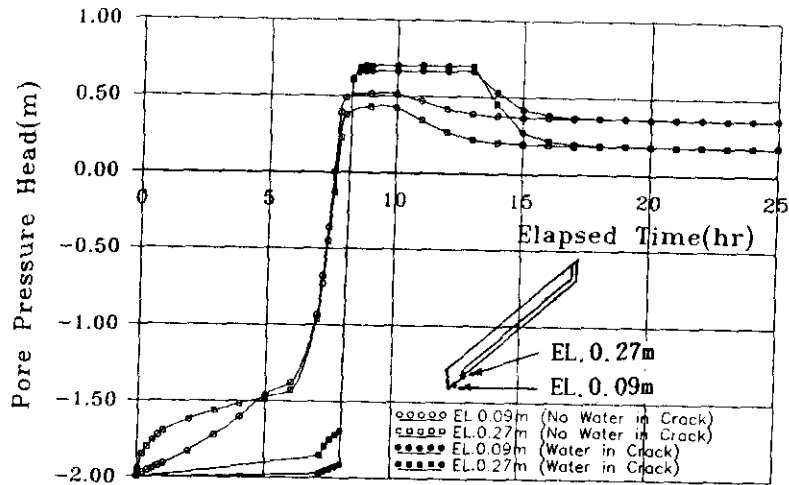


그림 3.12 시간 - 압력수두도

### 3.3 사면안정해석

역해석을 위한 창리 산사태지역의 대상 활동면은 전형적인 수평이동 파괴형태로서 길이가 약 46m, 폭이 23m, 사면의 경사는  $38^{\circ} \sim 43^{\circ}$ 이며 이중 중앙부분으로부터 경사가  $43^{\circ}$ 로 바뀌는 부분의 깊이 0.4m, 길이 4m를 해석 단면으로 선택하였다(그림 3.2 참조). 그리고 안정해석 수행시 필요한 자료를 얻기 위해 실내직접전단시험을 수행하여 그 결과를 표 3.3과 같이 얻었으며 안정해석시 입력되는 간극수압은 침투해석 결과로부터 얻은 값을 이용하였다.

표 3.3 해석단면의 강도점수

불포화시			포화시		
$\gamma_s(t/m^3)$	$c(t/m^2)$	$\phi(^{\circ})$	$\gamma_{sat}(t/m^3)$	$c(t/m^2)$	$\phi(^{\circ})$
1.42	0.5	38	1.77	0.33	37

사면안정해석에 사용된 프로그램은 SLOPE8R<sup>(5)</sup>로서 Spencer방법으로 지정된 비선형활동면에 대한 안정해석을 할 수 있다. 이 프로그램을 이용하여 최소안전율을 Case 1과 Case 2에 대해 구한 결과, 각각 3.059, 0.998을 얻었다. 침투해석으로부터 구한 시간에 따라 변하는 간극수압치를 이용하여 안전율을 계산한 결과 그림 3.13과 같은 변화를 보였다.

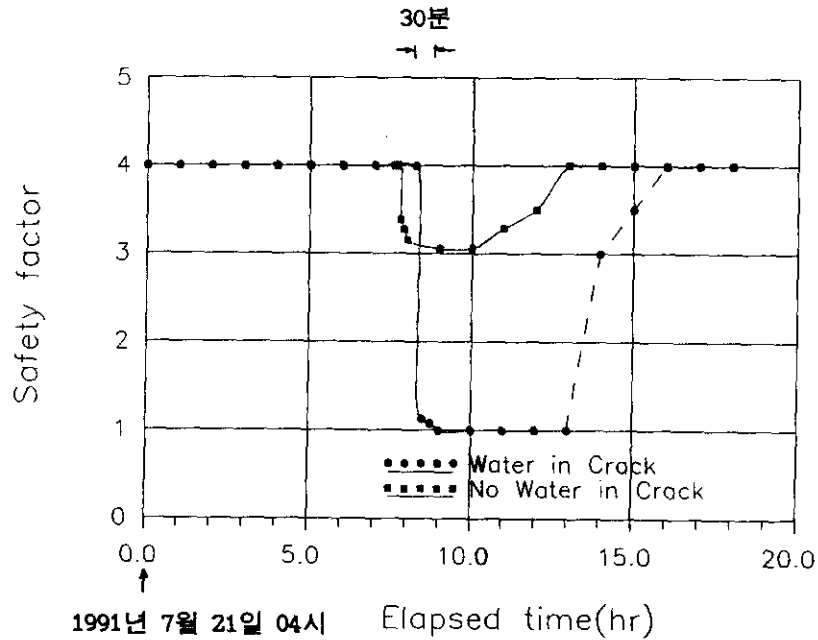


그림 3.13 시간 - 안전율

해석결과 본 사면은 균열에 물이 차지 않은 상태의 순수한 침투유량으로 파괴상태에 이르지 아니하고 매우 높은 안정계수를 보여주는 반면 균열이 포화되면 파괴상태에 도달됨을 알 수 있다. 그림 3.13에 의하면 균열에 물이 채워진 후 사면파괴에 이르는 데는 약 30분 정도가 소요됨을 알 수 있다. 그림에 점선으로 표시된 부분은 사면파괴에 이르지 않았다고 가정하였을 때의 가상 안전율 변화를 보인 것이다.

본 창리지역 사면은 과거에도 강우에 의한 균열의 채워짐이 있었을 것으로 사료되나 강우강도나 지속시간면에서 전사면이 포화되는 단계에는 이르지 않았다가 1991년의 집중호우시 한계안정상태에 도달된 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 사면내에 균열이 존재할 경우 이러한 요소가 산사태 발생에 미치는 영향을 연구하기 위하여 강우모형사면을 이용하여 실험을 하였으며 산사태 발생지역을 현장답사하여 얻은 자료를 근거로 침투해석과 안정해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 균열이 있는 강우모형사면에서 다양한 강우강도에 대해 실험을 수행한 결과 균열이 없을 때 보다 침투수는 균열의 영향으로 보다 빨리 사면바닥에 도달되어 침투가 상향으로 발생하며 높은 간극수압이 발생되었다. 이때 일정침투능에 도달되는 한계강우량은 실험결과 8K<sub>s</sub>로 밝혀졌다.
2. 사면의 내부에 균열과 같은 투수성이 높은 지층이 존재할 경우 균열의 포화요인이 없을 때에는 포화대는 사면하단부에만 일부 형성되지만 사면상단부의 균열이 포화될 경우에는 사면전체가 높은 간극수압이 형성되어 산사태 발생 위험이 커지는 것을 알 수 있다.
3. 창리지역에 대해 침투해석을 근거로 안정해석을 수행한 결과 균열에 물이 채워짐으로서 안전율이 급격히 낮아져 사면의 붕괴로 이르렀을 것으로 사료되며 균열에 물이 채워진 후 사면파괴에 이르는 데는 약 30분 정도가 소요된 것으로 나타났다.

#### 5. 참고문헌

1. Brady B. H. and Brown E. T.(1985), "Rock Mechanics for Underground mining", George Allen and Union(Publications) LTD, U.K.
2. Fredlund D. G. and Morgenstern N. R.(1977), "Stress State Variable for Unsaturated Soils", J. of Geotech. Eng. Div., ASCE, 112(8), pp.804-820.
3. Green R. E. and Corey J. C.(1971), "Calculation of Hydraulic Conductivity: A Further Evaluation of Some Predictive Methods" Soil Science Society of American Proceedings, Vol. 35,pp.3-8.
4. PC-SEEP(1988) A Finite Element Program for Seepage Analysis, Users Manual, Geoslope Programming Ltd, Calgary, Alberta, Canada.
5. SLOPE8R(1985), A Computer Program for Slope Stability Analysis with Non-Circular Slip Surface, 104 Patton Hall, U. S. Department of Civil, Blacksburg, Virginia.