

## 산사태 발생기구 파악을 위한 현장 계측 결과 분석(I)

### Analysis of Field Measuring Data for Investigating Landslide Failure Mechanism(I)

이 만수<sup>1)</sup>, Lee Man-Soo, 박 영호<sup>2)</sup>, Park Young-ho, 김 준수<sup>3)</sup>, Kim Joon-Soo,  
심 해식<sup>4)</sup>, Shim Hai-Shik, 류 지협<sup>5)</sup>, Ryu Chi-Hyob

- 1) 대리, 현대건설기술연구소, Researcher, Hyundai Institute of Construction Technology
- 2) 차장, 현대건설기술연구소, Senior Researcher, Hyundai Institute of Construction Technology
- 3) 사원, 현대건설기술연구소, Researcher, Hyundai Institute of Construction Technology
- 4) 육군중령, 국방부 시설국, Installation Bureau, Ministry of National defence
- 5) 전임강사, 한려산업대, Senior Lecturer, Civil Eng. dept., Hanlyo Sanup University

**SYNOPSIS :** As landslide takes place abruptly during rainy days, it can induce a lot of property losses and many casualties. In order to reduce these catastrophes, study on landslide failure mechanism is needed. But in Korea few papers which contain field measuring data for investigating landslides have been published.

The purpose of this study is to examine landslide failure mechanism by means of field measurements and laboratory tests. Field measurements were executed in Cheolwon-kun, Gangwon-do from mid-June to mid-September in 1997. Total of 27 field measurement instruments were used. Matric suction changes in process of infiltration into unsaturated soil can be predicted from the results of field measurements. Soil-water characteristic curve can be obtained by pressure plate extractor test in laboratory. Field measurements and more laboratory tests will be carried out for one more year to make a clear landslide failure mechanism.

**Key words :** Landslide, Matric Suction, Infiltration, Soil-Water Characteristic Curve

## 1. 서론

우리나라는 지리적인 영향으로 연강우량 중 많은 부분이 장마 또는 태풍과 동반되어 집중된다. 또한 매년 집중 강우시에는 홍수나 산사태에 의한 피해를 입고 있는 실정이다. 1996년 7월 중부지방에 집중된 호우시 많은 인적·물적 피해가 있었고, 피해를 유발하였던 주요 원인은 홍수와 산사태였다.

본 연구에서는 많은 인적·물적 피해를 발생시키는 산사태 파괴메카니즘을 파악하기 위하여 강원도 철원군과 경기도 용인시 사면에서 현장 계측을 실시하였다. 본 논문에서는 강원도 철원군에서 1997년 6월부터~1997년 9월까지 실시한 현장계측 결과에 한정하여 분석을 실시하였다. 현장 계측기는 1996년 7월 집중호우시에 산사태가 발생한 사면의 근접 측면과 인근 사면에서 설치되었는데, 강우계, 텐시오미터 등 총 5종 27개의 계측기가 사용되었다. 계측기들을 현장에 설치하기 전 실내에서 각각 보정하였다.

현장 계측기가 설치될 지반의 특성을 파악하고자 표토층과 풍화토층에서 각각 시료를 채취하여 기본 물성시험과 포화 투수시험, 함수특성시험을 실시하였다.

본 연구의 궁극적 목적은 향후에도 지속적으로 현장계측을 실시하여 현장 계측 결과와 실내시험 결과를 종합적으로 분석하고 침투해석 및 사면안정 해석을 실시하여 산사태 발생 기구를 정립하는 것이다.

## 2. 현장 계측기 설치 사면선정 및 지반조사

### 2.1 현장 계측기 설치 사면선정

강원도 철원군 지역 사면 중, 96년 집중 강우시 산사태가 발생하였고, 향후에도 발생할 가능성이 상당히 높은 것으로 판단되며, 계측기 설치가 용이하고 계측기 및 Data Logger를 장기간 안전하게 보호할 수 있는 사면을 선정하였다.

### 2.2 현장 지반 조사

현장 계측기가 설치될 사면의 형상과 지층 구조, 지반의 공학적 특성을 파악하기 위하여, 지표 조사와 풍화암층 상층부까지 굴착하여 충분한 양의 교란시료를 채취하였다. 사면의 지층구조는 지표로부터 50 cm~70 cm까지 표토층, 70~110 cm의 풍화토층, 풍화토층 하부는 풍화암층으로 단순한 층상을 이루고 있었다.

선정한 사면 지표조사에서 사면의 높이, 횡단면형, 종단면형, 사면 경사각, 임분 등급, 사면 표면, 사면 상부의 집수 여부 및 사면 배수조건, 사면의 용수 상태를 파악하였고, 현장밀도 시험을 실시하였다.

## 3. 실내 시험

### 3.1 개요

실내시험은 기본물성시험과 사면지반의 투수특성을 파악하기 위한 포화 투수시험 및 함수특성시험, 그리고 계측값의 신뢰도를 확보하기 위한 계측기 보정으로 분류하여 실시하였다. 실내 토질시험은 표토층과 풍화토층으로 나누어 실시하였다.

### 3.2 기본 물성시험

입도시험 결과 200번체 통과율은 표토층이 19.37%, 풍화토층이 13.04%였으나, 전체적인 입도분포곡선의 경향은 서로 유사하였다. 표토층, 풍화토층 모두 통일분류로는 SM, SC로 분류되어진다.

자연함수비는 표토층이 19%, 풍화토층이 18%이며, 비중( $G_s$ )은 각각 2.697과 2.722였다. 액성한계는 표토층의 경우 31.6%, 풍화토층의 경우 19.5%였으며, 두 층 모두 NP임을 알 수 있었다. 건조단위 체적중량이 표토층은  $1.30 \text{ g/cm}^3$ , 풍화토층은  $1.21 \text{ g/cm}^3$ 였다.

다짐시험은 KS F 2312 규정 중 A-1 방법으로 실시하였으며, 다짐시험 결과, 최대건조밀도는 표토층  $1.727 \text{ g/cm}^3$ , 풍화토층  $1.710 \text{ g/cm}^3$ 였고, 최적함수비는 표토층 15%, 풍화토층 15%였다.

### 3.3 포화투수시험 및 함수특성곡선

포화투수시험은 최적함수비 다짐과 dry pouring 두가지 방법으로 실시하였는데, 풍화토층의 dry

pouring 투수계수는  $1.26 \times 10^{-2}$  cm/sec이었고, 다짐방법 표토층의 투수계수는  $1.299 \times 10^{-5}$  cm/sec, 풍화토층 투수계수는  $1.161 \times 10^{-5}$  cm/sec이었다.

함수특성곡선(Soil-Water Characteristic Curve)을구하기 위하여 P.P.E.T(Pressure Plate Extractor Test)를 하였는데, P.P.E.T는 템페셀(Tempe Cell)과 원리와 시험방법에 있어서는 거의 유사하나, 셀 대신 압력통을 사용하는 점과 한번에 링으로 시료를 나누어 많은 시료들을 설치할 수 있으므로, 각 압력 단계에 따른 함수비를 여러번 측정할 수 있는 장점이 있다. 함수특성 곡선은 그림 1과 같다.

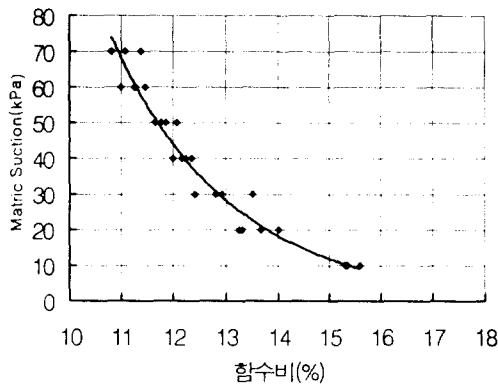


그림 1. 함수특성곡선



그림 2. 텐시오미터 보정

### 3.4 계측기 보정

텐시오미터(Tensiometer)는 트랜스듀서와 제트필(Jet-fill), 파이프, 그리고 high-air entry 세라믹 선단 팁으로 나눌 수 있으며, 그림 2에서와 같이 보정을 실시하였다.

피에조미터(Piezometer)는 filter cap을 열어 포화시킨 후, 약 1 m 깊이의 수조에 단계별로 침수시키면서, 이때 얻어진 값들을 이용하여 보정을 실시하였다.

워터마크(Watermark)은 각 함수비에서 보정하였고, 침투과정을 모사하기 위하여 한 시료 통속에 일정한 함수비로 시료를 준비한 후, 네 개를 설치하고 시료 상부 표면에 일정량의 물을 가수하며 시험하였다.

본 계측에서 사용된 강우계(Rain gauge)는 집수통과 집수통의 무게를 측정하는 로드셀로 구성되어 있는데, 로드셀을 보정하기 위하여 물을 단계별로 집수통에 가수하면서 보정하였다.

Data Logger는 계측기를 연결하는 Multiplexer부분, 데이터를 수집하는 Logger부분, 데이터 송수신 장치, 태양전지 및 충전기 등으로 구분할 수 있는데, 계측값을 현장에서 측정한 값과 Logger에 PC를 직렬 연결하여 측정한 값, 모뎀 전송결과들은 비교하여 모두 일치함을 확인하였다.

## 4. 현장계측

### 4.1 현장 계측기 설치 개요

강원도 철원군 2개 사면 3위치(A위치, B 위치, C위치)에 자동 강우계, 피에조미터, 텐시오미터와 워터마크, 경사계 등 5종 27개의 계측기를 하절기 강우가 시작되기 전인 97년 6월 중순 설치 완료하였다(그림 3, 그림 4). 강우계는 수풀 혹은 지형, 지물에 영향을 받지 않도록 사면부근 평지에 설치하였고, 데이터 획득과 송수신을 하는 Data Logger는 일사량을 고려하여 강우계 부근 평지에 안전하게 설치하였다. 데이터의 습득 및 전송은 유선모뎀을 이용하여 원격 지동 제어 시스템으로 운영되었다.

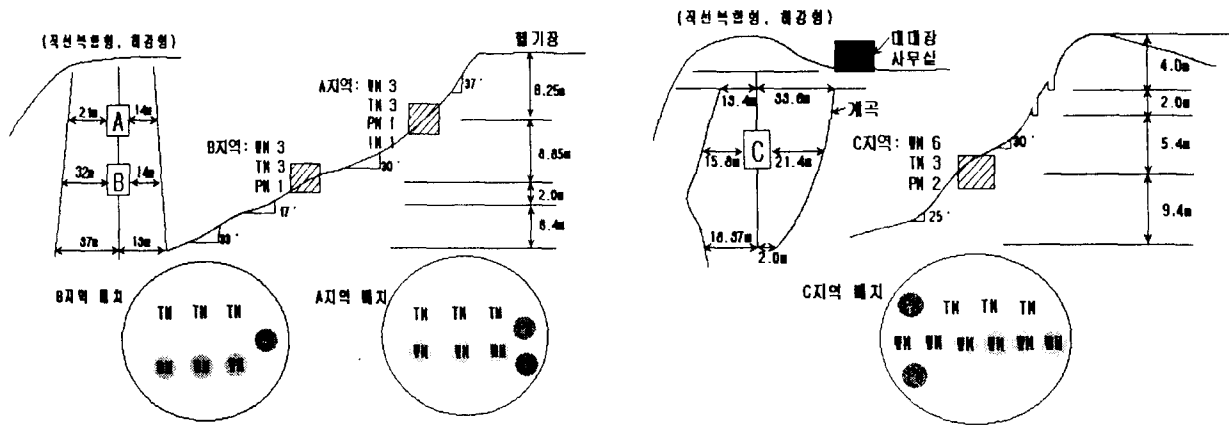


그림 3. 계측기 설치 개요

텐시오미터와 워터막을 표토층에 설치할 때는 직접 관입, 풍화토층에 설치할 때는 선보링(preboring) 후 관입하여 설치하였다. 피조미터는 지하수위 상부인 풍화토층과 풍화암층 경계에 설치하였는데, 선보링을 한 후, 바닥과 트랜스듀서 주변에 표준사를 포설하고, 보링구멍을 벤토나이트로 밀봉하였다.

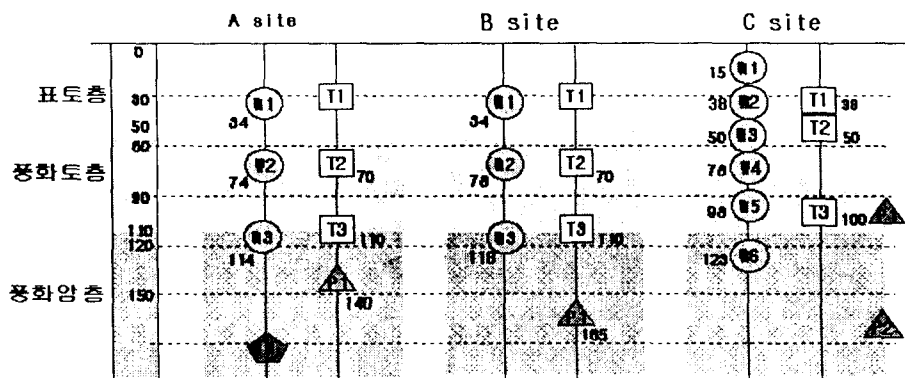


그림 4. 계측기 설치도 및 지층구조

#### 4.2 현장 계측 결과

본 논문에서는 강원도 철원군 2개 사면 3위치에서 1997년 6월 21일부터 1997년 9월 18일까지 현장계측한 결과만을 다루기로 한다. 현장 계측은 강우시 평균 2분 주기로, 건기에는 평균 30분 주기로 실시되었는데, 계측기간 동안의 강우량 측정 결과, 누적강우량은 평년보다 작은 368 mm였다. 일 강우량이 최대인 날은 8월 3일로 56 mm였으며, 일 강우량이 30 mm 이상인 강우가 7 차례 있었다. 시우량이 최대인 날은 8월 3일로 약 29 mm였다.

표 1에 97년 6월 21일부터 97년 9월 18일까지 대표적인 강우를 요약, 정리하였다.

표 1. 대표적인 일강우량 및 강우형태

날 짜	일 강우량	강우 지속시간	강우형태
1997. 6. 25	33 mm	12시간	2~3 시간에 집중된 강우
1997. 7. 1	50 mm	6시간	지속성 강우
1997. 7. 15	50 mm	8시간	지속성 강우
1997. 8. 3	50 mm	6시간	3 시간에 집중된 강우
1997. 9. 1	45 mm	2시간	지속성 강우

경사계 계측결과 모든 강우에 대하여 사면의 변위는 거의 발생하지 않았음을 알 수 있었다. 또한 피에조미터 계측결과도 변화가 없었는데, 피에조미터 측정 결과를 볼 때 97년 강우시 침투로 인한 임시지하수위(perched water table)는 형성되지 않은 것으로 판단된다.

강우에 따른 각 층에서의 Matric Suction( $U_a - U_w$ )의 변화는 텐시오미터와 워터막으로 측정하였으며, 그림 5는 A 지역에 설치된 3개의 텐시오미터와 워터막 측정 결과이다.

텐시오미터와 워터막으로 측정한 강우시와 건조기의 Matric Suction의 변화양상은 거의 일치하였으며, 절대값은 텐시오미터의 측정값이 큰 경향을 보였다. 텐시오미터는 Suction을 트랜스듀서에서 직접 측정하는 것임을 고려할 때 워터막보다 더 신뢰할 수 있을 것으로 판단된다.

얕은 깊이에 설치된 텐시오미터와 워터막일수록 강우시 반응이 빠르며, 초기 반응 후 Matric Suction이 최소로 떨어지는데 걸리는 시간이 짧았다. 본 계측지역에서 표토층의 Matric Suction은 텐시오미터 측정값으로 볼 때, 건조기간에는 최대 80 kPa까지 증가하고, 강우기간에는 최소 5 kPa까지 감소하였다.

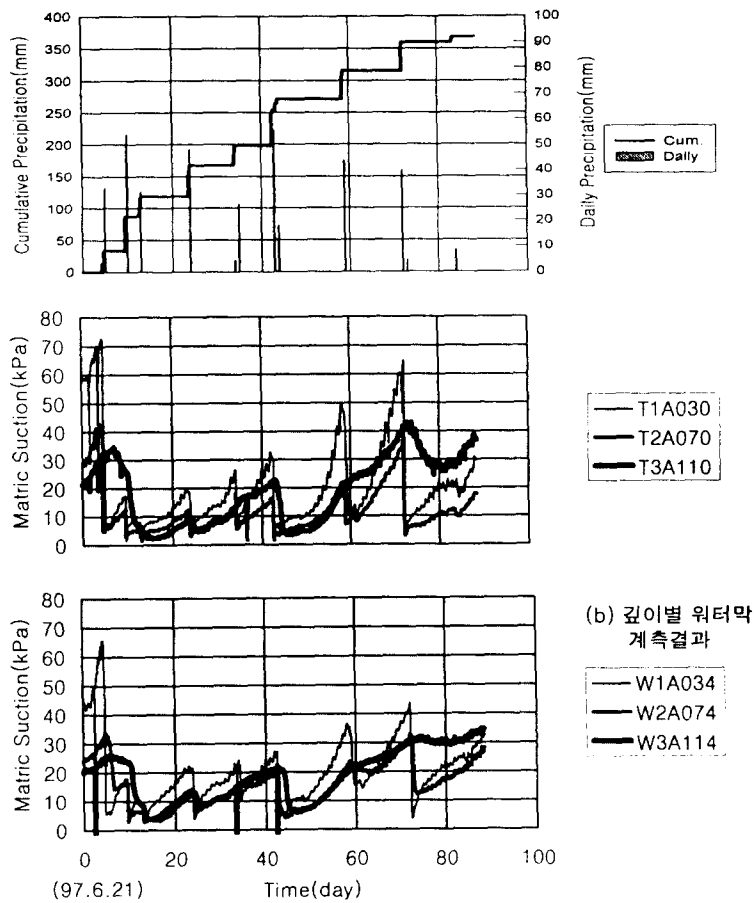


그림 5. A 위치 강우계측 결과 및 텐시오미터, 워터막 계측 결과

강우기간에도 Matric Suction이 5 kPa정도는 유지되었다. 풍화토층의 Matric Suction의 변화는 최대 40 kPa에서 최소 5 kPa 범위 이내이었다. 동일 강우시 A, B, C 위치중 Matric Suction이 최소로 떨어지는데 걸린 시간은 A 위치에서 가장 빨랐다. A 위치에서 대표적인 5번의 강우에 대해 강우의 반응시간을 비교하면, 대체적으로 7월 1일, 8월 3일, 7월 15일, 9월 1일, 6월 25일 순임을 알 수 있다.

### 4.3 계측 결과 분석

#### 4.3.1 불포화토 침투이론

지표면(Soil Surface)에 도달한 강우는 지표면으로부터 흙 함수저장량(Soil Moisture Storage)을 제외하고는 하부로 배출(Percolation)되면서 침윤영역(Wetting Zone)이 하부로 연속적으로 이동하는 침투(infiltration)를 하는데, 침투가 진행되면 각 깊이 지반의 체적함수비( $\theta$ )는 시간이 지남에 따라 잔류체적 함수비( $\theta_n$ )로부터 지표면의 체적함수비( $\theta_o$ )까지 변화한다. 그러나 침투만으로는 지표면 아래 지반은 100% 포화될 수 없으므로 지표면의 함수비( $\theta_o$ )는 완전포화 체적함수비( $\theta_s$ )보다 작거나 같다. 침투로 인한 함수비의 증가는 Matric Suction을 감소시킨다.

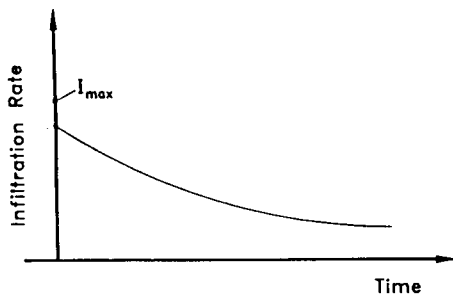


그림 6. 시간에 따른 침투 속도

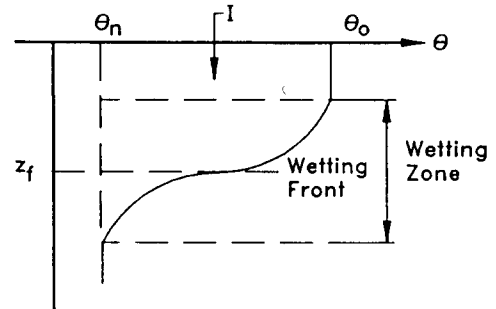


그림 7. 습윤전선

침투속도(infiltration Rate)는 Darcy의 공식을 응용한 식 1과 같이 표현할 수 있는데(The Green and Ampt Model), 침투속도는 투수계수( $K(\theta_o)$ )와 침윤영역의 중앙부분 깊이로 정의되는 침윤전선(Wetting Front)의 깊이( $Z_f$ ), 압력수두( $\psi_f$ )의 함수임을 알 수 있다. 불포화층에서 압력수두는 음의 값을 가진다.

침윤전선이 일정깊이에 도달하는데 소요되는 시간( $\Delta t$ )을 식 2로부터 계산할 수 있다.

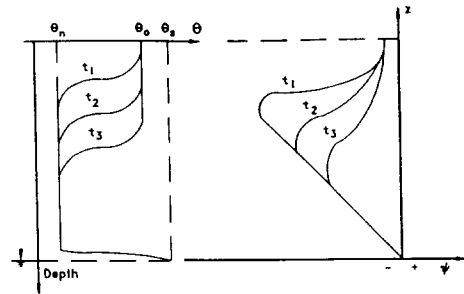


그림 8. 습윤과정 지반의 함수비 변화 양상

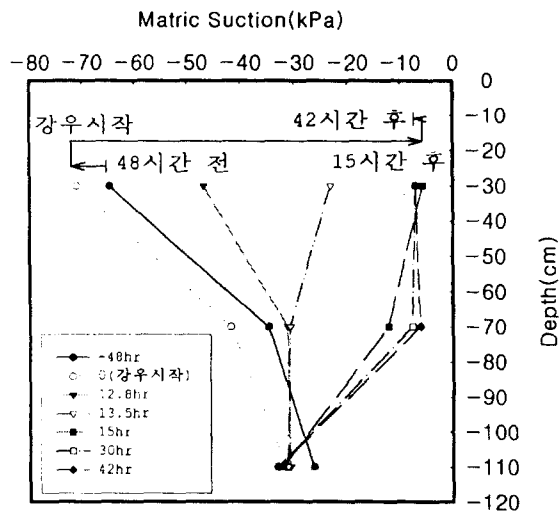
$$I = v = -K(\psi) \frac{\partial \phi}{\partial z} = K(\theta_o) \left(1 - \frac{\psi_f}{z_f}\right) \quad (1)$$

$$z_f = \frac{I \Delta t}{\theta_o - \theta_n} \quad (2)$$

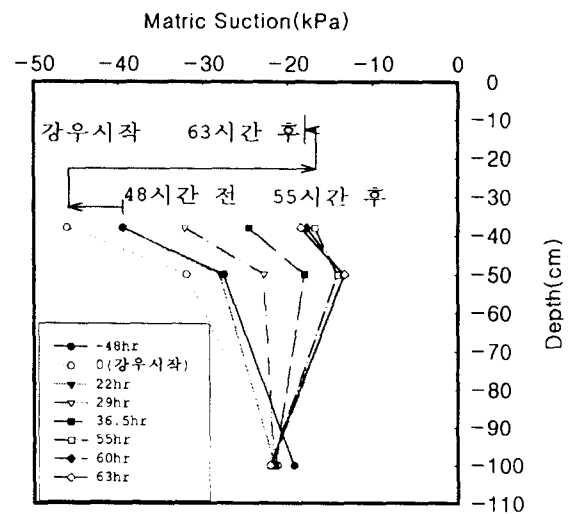
#### 4.3.2 현장 계측 결과 분석

본 논문의 분석 대상지역인 강원도 철원군 A, B, C 위치의 현장 계측 결과 중 대표적인 경우 6월 25일 강우와 7월 15일 강우시 A, C 위치의 텐시오미터 측정 깊이별 Matric Suction 변화는 그림 9와 같다. 그림 9에서는 침투로 인한 깊이별 침윤영역이 시간에 따라 변화하는 과정을 볼 수 있는데, 6월 25일 강우보다 7월 15일 강우에 대한 침투속도가 빠르며, A 위치의 반응이 C 위치의 침투속도보다 빠름

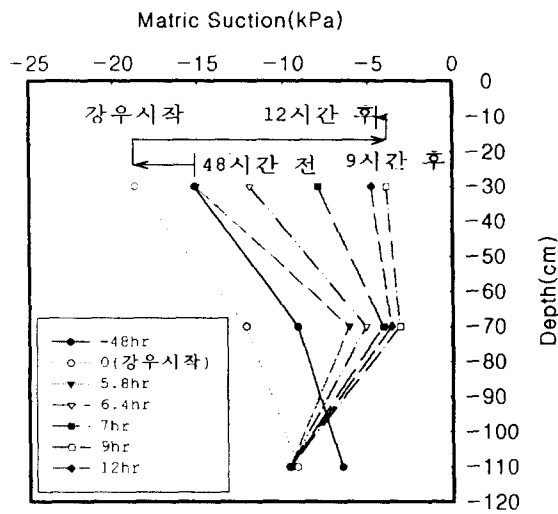
을 보여준다. Matric Suction은 6월 25일 A위치에서 가장 크고, 7월 15일 A위치에서 가장 작았다.



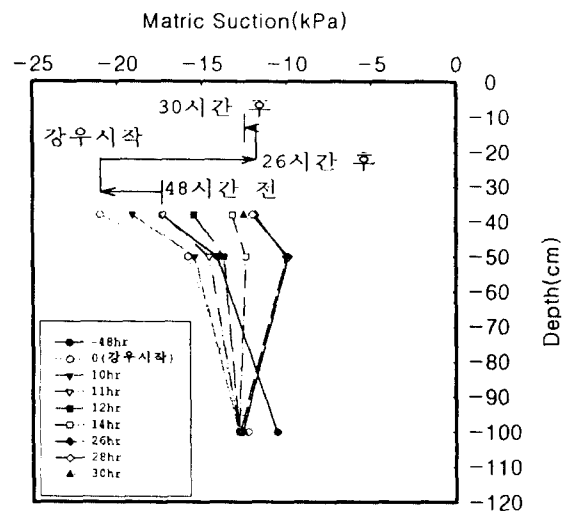
(a) A위치 깊이별 Suction 분포(6월 25일 강우)



(b) C위치 깊이별 Suction 분포(6월 25일 강우)



(c) A위치 깊이별 Suction 분포(7월 15일 강우)



(d) C위치 깊이별 Suction 분포(7월 15일 강우)

그림 9. 강우시 깊이별 Matric Suction 분포

표 2 에 A, C 위치에서 6월 25일 강우와 7월 15일 강우시 깊이별 침투반응 종료 시간을 정리하였다.

표 2. 텐시오미터로 측정된 깊이별 침투 소요시간 (단위 : 시간)

깊이(cm)	6월 25일 강우		7월 15일 강우	
	A 사면	C 사면	A 사면	C 사면
30	15	-	9	-
38	-	55	-	26
50	-	63	-	30
70	42	-	12	-

7월 15일 강우시 A 위치에서는 비교적 적은 일강우량인 50 mm 정도에서도 70 cm 깊이까지 Matric

Suction이 5 kPa정도까지 변화하지만, 30 cm 깊이에서 그 이하로 작아지지 않는 이유는 지표면 부근에서도 침투수로는 지반을 완전히 포화시킬 수 없음을 보여 준다.

강우에 대한 침투속도가 동일한 지역에서도 크게 차이나는 것은 수풀에 의한 차단효과, 지표면 상태, 흙의 비균질성, 지형 형상의 차이등이 복합적으로 작용한 것으로 판단된다.

본 계측기간 중에는 강우량이 충분하지 않아 침투수가 투수도가 작은 풍화층에 적체되어 임시지하수(perched water table)가 형성되지 않았다. 그러나 본 계측이 실시된 지역은 96년 산사태가 발생한 지역이므로 임시 지하 수위가 형성된다면 간극수압이 비로소 양의 값으로 변하면서 사면 안정율이 급속히 저하되어 산사태의 발생 기구를 설명할 수 있는 자료를 얻을 수 있을 것이라 기대된다. 그러므로 98년에는 계측기 설치 사면에 대한 체계적인 조사와 불포화토의 투수시험 및 강도특성 시험을 실시하고 현장 계측도 계속 실시하고자 한다.

## 5. 결론

본 논문에서는 원격 자동 계측를 통하여 강우로 인한 지반내의 거동을 면밀하게 측정하였으며 그 신뢰성이 입증되었다. 강우시와 건기에 지표면 아래 깊이별 Matric Suction 변화를 텐시오미터와 워터막으로 정확하게 측정하였고, 강우시 깊이별, 위치별 침투 속도를 관찰할 수 있었으며, 침투 속도는 초기 함수비와 강우형태에 영향을 받음을 확인할 수 있었다. 그러나 급변 계측 기간 동안의 일 강우량은 최대 50mm 내외로 매우 작아서 산사태가 일어날 때의 침투거동 및 지반의 간극수압의 변화를 규명하기에는 미흡하였다. 그러므로 향후, 장시간의 계측을 통하여 충분한 자료를 수집하고, 계측기 설치 사면에 대한 자세한 조사를 실시하며 계측기 설치 지반의 투수특성 및 강도특성 시험을 실시하여, 산사태의 직접적인 원인이 되는 강우의 지반내 침투거동을 명확히 규명하여 산사태 메커니즘 분석 및 대책 수립에 지반공학적인 접근을 용이하게 할 수 있도록 할 것이다.

**감사의 글 :** 본 논문에 많은 지도편달 하여 주신 이 영남이사님과 현장 계측결과 처리에 도움주신 장수영씨, 그리고 계측기 관리를 하여주신 0사단 00연대 0대대 부대장 이하 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 구호본, 배규진(1996), "철원, 연천지역 산사태 피해현황 및 분석", 대한토목공학회지, 제44권, 9호, pp 22-26.
2. 김상규, 김영목(1990), "강우로 인한 사면 불안정", 한국지반공학회지, 제7권, 1호, pp. 53-64.
3. 류지협(1997), 불포화 화강풍화토의 투수 및 강도특성, 박사학위논문, 동국대학교.
4. 이인모, 박경호, 임충모(1992), "산사태 위험도 추정을 위한 간극수압 예측에 관한 연구(II)", 한국지반공학회지, 제8권, 2호, pp. 5-20.
5. 최경(1986), 한국의 산사태 발생요인과 예지에 관한 연구, 농학박사 학위 논문, 강원대학교 대학원.
6. Brand, E. W.(1984), "Relationship between Rainfall and Landslides in Hong Kong", *Proc. 4th Int.Symposium on Landslides*, Vol. 1, Toronto, pp. 337-384.
7. Gary L. Guymon(1994), *Unsaturated zone Hydrology*, PTR Prentice Hall. U.S.
8. Harry R. Cedergren(1977), *Seepage, Drainage & Flownets*, 2nd. ed. John Wiley & Sons.
9. Head K. H.(1994) *Manual of Soil Laboratory testing*, Vol. 1, 2. Pentech press. London.
10. Morin J. and Benyamini Y.(1976), "Rainfall Infiltration into Bare Soils", *Water Resources Research*, Vol. 12, No. 3, pp. 813-817.
11. Weyman D. R.(1973), "Measurements of the Downslope Flow of Water in a Soil", *Journal of Hydrology*, Vol. 20, pp. 267-288.