

현장 계측을 통한 자연사면에서의 강우 침투 특성 분석

An analysis of rainfall infiltration characteristics on a natural slope from in-situ monitoring data

김웅구*·장병욱·차경섭

Kim, Woong Ku-Chang, Pyoung Wuck-Cha, Kyung Seob

Abstract

In Korea, most landslides are occurred during the rainy season from June to September and have a shallow failure plane parallel to the slope. For these types of rainfall-induced failures, the most important factors triggering slope instability is not the increase of pore water pressure but the decrease of the matric suction of unsaturated soils by rainfall infiltration. So it is essential to landslide hazard assessment that defines the characteristics of infiltration in natural slopes. In this study, field measurements have been carried out in order to monitor in-situ volumetric water contents and ground water table, at several depths and locations on a natural slope. The results show that rainfall infiltration is correlated with antecedent water contents, rainfall intensity and total rainfall. The ground water table was varied sensitively by every rainfall event. (수정)

1. 서론

우리나라의 연평균 강수량은 1274mm로 연 평균 강수량의 64.4%가 6~9월에 집중되고 있으며 대부분의 산사태가 이 시기에 발생하며 얇은 사면파괴가 대부분이다. 일반적으로 강우에 의한 사면 파괴는 강우 침투로 인한 지하수위 상승으로 알려졌지만 최근 연구에 의하면 얇은 사면파괴의 경우 불포화영역에서의 모관흡수력의 감소가 주요 원인인 것으로 나타났다. 따라서 강우에 의한 침투 특성을 명확히 규명하는 것은 강우로 인한 산사태 재해 위험성을 평가하기 위해 반드시 선행되어야 한다.

Green-Ampt(1911)은 불포화토의 수리특성을 반영한 침투모델을 제시하였다. 그의 모델에 따르면 지표침투는 piston flow를 형성하며 극명한 습윤전선(wetting front)이 존재한다. 그 후 수많은 학자들에 의해 Green-Ampt 모델의 개념을 이용한 수정된 Green-Ampt 모델이 제안되었다. Bouwer(1969)는 여러 층으로 구성된 지반 조건을, Mein and Larson(1970)은 ponding을 고려하였으며 Chu(1978)은 비정상 강우에서의 침투 모델을 제안하였다. Chu 등(2005)은 깊이별 함수비의 변화, 수리전도도의 변화, 비정상 강우를 고려할 수 있는 수정된 Green-Ampt 모델을 제시하였다.

본 연구에서는 강우에 따른 침투 특성을 분석하기 위해 대상 사면에 깊이별로 함수비 센서를 매설하여 깊이별 체적함수비(Volumetric water content, VWC)를 모니터링하였다. 또한 지반의 조건에 따른 침투 특성을 분석하기 위해 시추조사를 실시하였으며 시추조사 후 지하수위계를 설치하였다. 이러한 현장 모니터링은 실제 자연 사면에서 발생하는 강우 침투 현상을 이해하고 합리적인 침투해석을 하는데 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 재료 및 연구방법

2.1 대상지역

본 연구의 대상 사면은 경기도 양주시 장흥면 돌고개에 위치하며 잣나무 조림지역이다. 사면의 경사는 평균 30° 정도이며 길이는 약 50m이다. 시추조사를 한 결과 사면의 상단과 중간은 심도

1m까지 붕적토층, 1~4.5m까지는 풍화토층 그 아래에는 풍화암이 존재하였으며, 하단이 경우 심도 2.5m까지 붕적토층, 2.5~7.3m까지는 풍화토층 그 아래에는 풍화암이 존재하였다. 하단의 경우 심도 1m를 경계로 상하부의 색깔의 차이가 분명하였다.

2.2 연구방법

자연사면에서의 강우침투 특성을 알아보기 위해 현장계측과 실내시험이 수행되었다. 현장 계측으로는 체적함수비 및 지하수위의 변화를 모니터링하였다. 강우가 지반으로 침투할 경우 침투심도에 따라 함수비가 변하기 때문에 체적함수비를 모니터링하면 강우에 대한 침투심도 및 침투시간을 알 수 있게 된다. 따라서 현장지반을 대상으로 센서 매설지점을 선택하고 소정의 깊이까지 보링한 후 깊이를 확인하면서 30, 60, 90, 120cm에 센서를 매설하였으며, 각 설치 깊이에서의 포화함수비를 구하기 위해 현장밀도 시험을 수행하였다. 또한 2공의 시추조사 후 지하수위 센서를 설치하였다. Fig 1에 대상사면 및 계측기 배치도를 나타내었다.

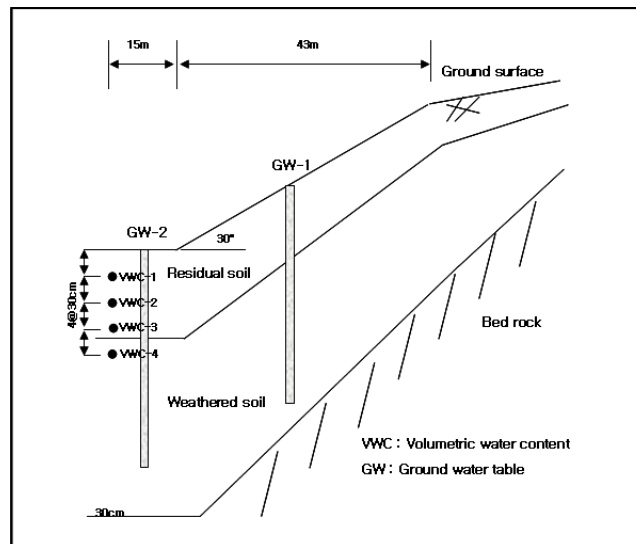


Fig 1. The feature of study slop and field measurements

2.3 계측센서

체적함수비 센서는 Decagon사의 ECH₂O-10을 이용하였다. ECH₂O-10는 매질의 유전상수를 측정하여 볼트로 표시하며 토양의 유전상수는 함수비와 직접적으로 연관되므로 이를 이용하여 토양의 체적함수비를 측정할 수 있다. 센서의 길이는 약 10cm, 0~50℃에서 운용가능하며 오차는 일반적으로 ±3%이내이며 보정 시 ±1%이내이다. 데이터는 Em5 ECH₂O logger를 사용하였으며 30분 간격으로 데이터를 저장하도록 하였으며 Ecolink 프로그램을 이용하여 데이터를 수집하였다. 또한 현장의 토질특성에 맞게 함수비 센서를 보정하였으며 다음 식과 같다.

$$\text{체적함수비 (\%)} = 0.0952 \times \text{계측치 (mV)} - 19.441 \quad R^2 = 0.998 \quad (1)$$

지하수위 센서는 OTT사의 Orpheus Mini를 사용하였다. Orpheus Mini는 압력식 지하수위계로 센서부에서 수압과 온도, 대기압을 측정하여 수위로 환산하게 된다. 오차는 ±0.05%이며 -25℃~+70℃에서 운용가능하다.

3. 결과 및 고찰

3.1 현장 밀도 시험

모래치환법을 이용하여 현장밀도시험을 수행한 결과 심도가 깊어질수록 단위중량은 증가하였고 그와 반대로 공극비와 공극률은 감소하였다. 시험결과를 Table 1에 정리하였다.

Table 1. Material properties with depth

Depth(cm)	Dry unit weight(KN/m^3)	Void ratio	Porosity(%)
30	15.52	0.69	40.98
60	15.77	0.66	40.02
90	16.54	0.60	37.09
120	16.91	0.57	36.20

3.2 현장 계측 결과

3.3.1 함수비의 분포 변화

2005년 9월 13, 17, 21일과 30일에 내린 4개의 강우 사상에 대하여 강우강도, 누적강우량에 따른 심도별 함수비의 변화를 살펴보았다.

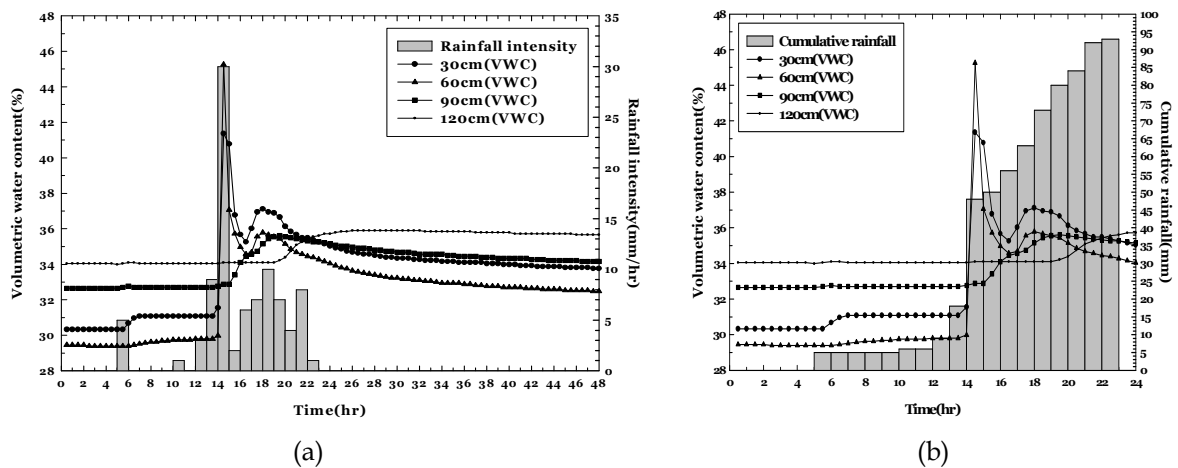


Fig 2. Rainfall event(2005/9/13 ~ 9/14)

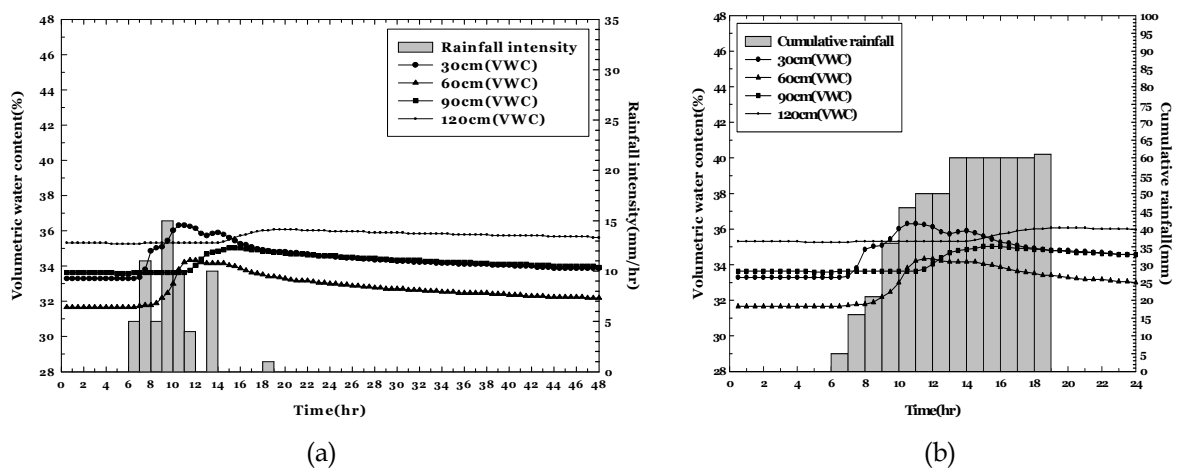


Fig 3. Rainfall event(2005/9/17 ~ 9/18)

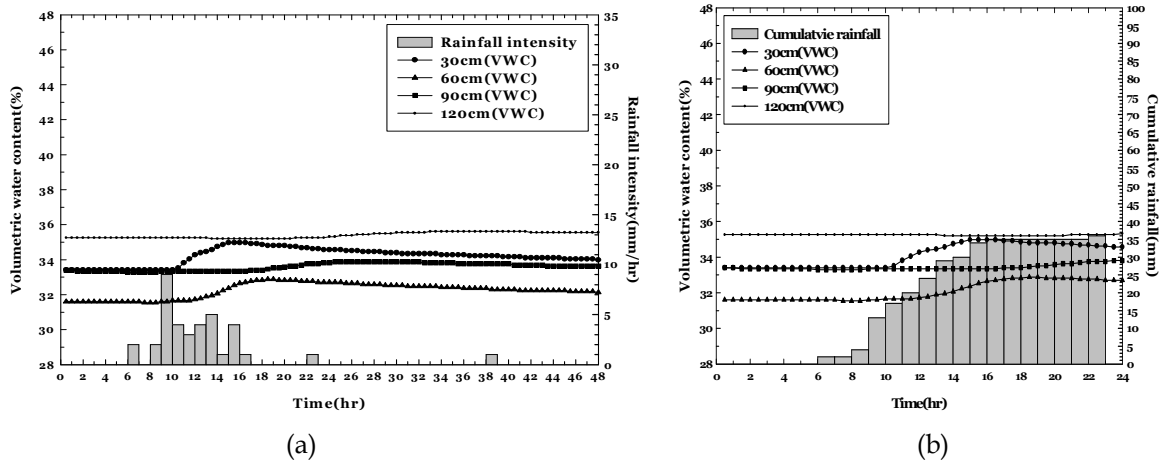


Fig 4. Rainfall event(2005/9/21 ~ 9/22)

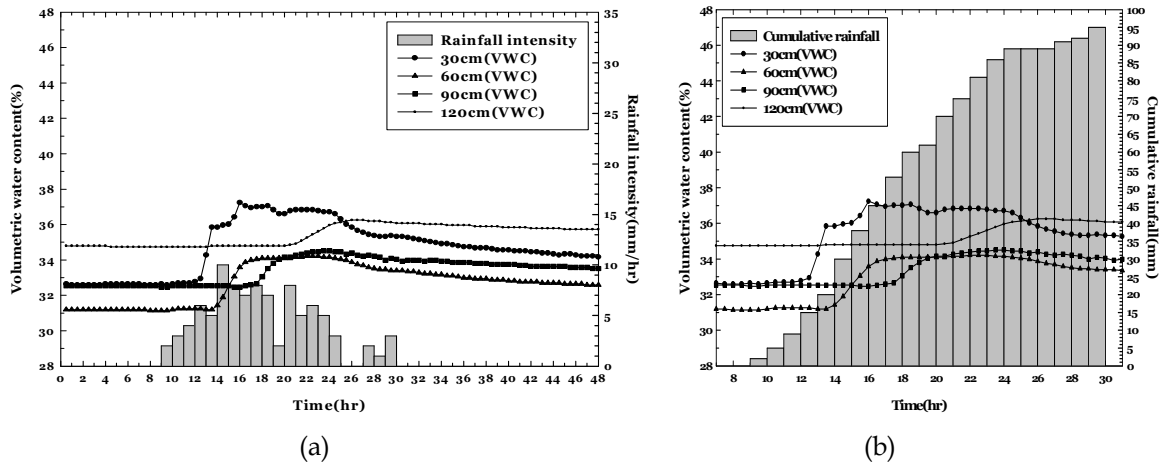


Fig 5. Rainfall(2005/9/30 ~ 10/1)

위의 그림에서 알 수 있듯이 4개의 강우사상에 대하여 침투가 발생할 경우 대부분 포화함수비에 도달하지 못하였다. 포화함수비에 거의 도달한 경우는 Fig 2에서 강우강도 30mm/hr일 때 심도 30, 60cm에서였다. 이는 Green-Ampt가 제안한 piston flow가 형성되기 위해서는 일정강우강도 이상 필요하며 위의 4개의 강우사상에서 보았을 경우 강우강도가 30mm/hr이상 지속될 경우 piston flow가 형성될 것으로 생각된다.

각 심도에서 함수비가 변할 때 즉, 침투수가 도달하였을 경우 시간에 대한 함수비 변화의 기울기를 보면 심도 30, 60cm에서 가장 급하고 유사한 경향을 보이며, 120cm에서의 기울기가 가장 완만하였다. 이는 각 심도에서의 토질특성에 따른 것으로 생각된다. 즉, 30, 60cm에서의 토질특성은 유사하며 단위중량이 작고 공극비가 크기 때문에 반응속도가 빠르며 심도가 깊어질수록 조밀해지기 때문에 반응속도가 느린 것으로 생각된다. (Table 1 참조)

최대 강우 강도에 대한 민감도를 보면 심도 30, 60cm에서 강우 시 최대함수비는 최대강우강도가 클수록 크며 심도가 깊어질수록 최대강우강도와 상관없이 일정한 변화를 보였다. 그 이유는 지표에 가까울수록 증발산과 같은 기후의 영향으로 건조해져 초기함수비가 작고 심도가 깊을수록 초기함수비가 높기 때문에 초기 포화도가 높아 큰 차이를 보이지 않는 것으로 생각된다. 즉, 지표에 가까울수록 함수비의 변화는 최대강우강도에 민감하게 반응하였다.

위의 그림에서 누적강우량과 함수비 변화 그래프들을 살펴보면 각 깊이에서 강우침투에 의해 함

수비가 변화되는 시간 즉, 침투가 각 센서에 도달하는 시간을 살펴보면 강우사상에 따라 다른 값을 갖는다. 그 이유는 강우사상마다 강우강도의 분포가 다르기 때문이며 초기 함수비 상태도 다르기 때문이다. 하지만 비슷한 초기함수비 조건에서 함수비가 상승하는 시간에서의 총강우량을 보면 대체로 일정한 값을 갖는 것을 알 수 있다. 즉, 각 심도까지의 침투 시간은 총강우량과 큰 관련이 있음을 알 수 있다.

또한 초기 함수 조건, 강우사상이 다르더라도 강우 후 함수비는 각 심도에 따라 일정한 값으로 수렴하는 것을 볼 수 있는데 그 이유는 불포화 함수특성이 각 심도에 따라 다르므로 증발산과 같이 기후에 의한 함수비 결손이 생기지 않을 경우 대기압(1bar) 하에서의 수분 보유능에 따라 다른 것으로 판단된다.

3.3.2 지하수위 변화

9월 30일 강우에 의한 지하수위의 변화를 보기 위해 9월 30일~10월 2일까지의 지하수위 변화를 Fig 6에 도시하였다.

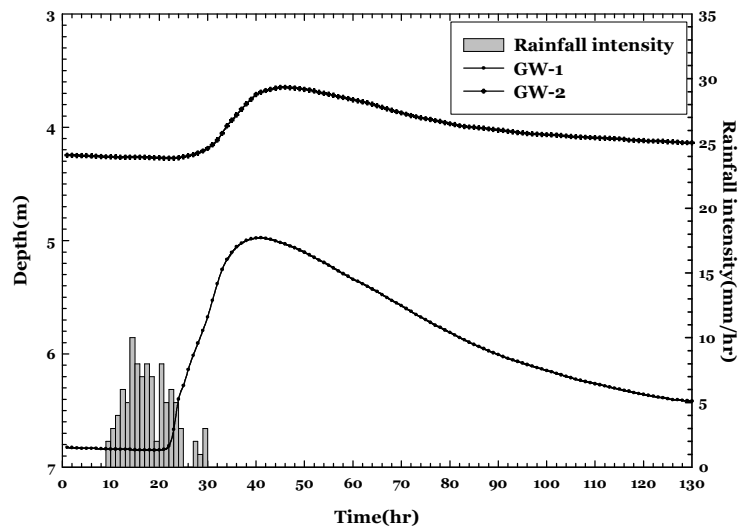


Fig 6. The variation of ground water table(2005/9/31 ~ 10/1)

9월 30일~10월 1일까지의 총강우량은 95mm이다. Fig 6에서 보면 지하수위의 변화는 GW-2보다 GW-1에서 더 빠르게 반응하였으며 변화량도 더 컸다. GW-1에서의 총 변화량은 180cm이며 GW-2에서는 61.4cm였다. 이는 각각 총강우량의 약 18배, 6.5배로 상부유역에서 지하수의 유입에 의한 것으로 판단된다. 주어진 강우사상에 대해 지하수위 변동이 심하였으므로 따라서 강우에 의한 지하수위의 상승 역시 산사태 평가에 있어 중요한 요인으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

산사태를 평가하기 위해서는 자연사면에서 발생하는 강우에 의한 침투 특성을 규명하는 것이 선행되어야 하며 이를 위해 자연사면을 대상으로 현장 계측을 실시하였다. 계측 항목은 지하수위와 심도별 체적함수비이며 계측결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 강우 침투로 인해 piston flow가 형성되기 위해서는 지반에 따라 일정강우강도 이상 되어야 할 것으로 생각된다.

- (2) 침투에 따른 함수비 변화의 기울기를 보면 지표일수록 급하고 심도가 깊을수록 완만하였는데 이는 심도가 클수록 조밀해지기 때문에 반응속도가 느린 것으로 판단된다.
- (3) 주어진 강우사상에 대해 지표에 가까울수록 최대 함수비는 최대강우강도에 따라 변화였다.
- (4) 일정 심도까지 침투하는데 걸리는 시간은 강우강도보다 총침투량과 연관이 있을 것으로 생각된다.
- (5) 선행함수비가 다를지라도 강우 후 함수비는 일정한 값에 수렴하며 그 이유는 강우종료 후 증발산과 같은 기후적 요인에 의한 함수결손이 발생하지 않을 때 대기압(1bar) 하에서의 토양에 따른 수분보유능의 차이에 의한 것으로 판단된다.
- (6) 총강우량 95mm인 강우사상에 대해 지하수위의 변화는 컸으며 따라서 강우 침투에 의한 지하수위의 상승 역시 산사태 평가를 위해 고려되어야 한다.

5. 참고문헌

- 류지협, 2003, 모관흡수력을고려한 사면의 안정성 평가, 한국지반공학회논문집, 제 23권 제 4C호, pp195-201
- 이인모, 조우성, 김영욱, 성상규, 2003, 풍화토 사면에서 강우로 인한 간극수압 변화에 대한 실험연구, 한국지반공학회논문집, 제 19권 1호, pp.41-49
- 정삼성, 김재홍, 박성완, 2004, Influence of Rainfall-induced Wetting on Unsaturated Weathered Slopes, Jour. of the KGS, Vol. 20, No. 7. pp.159-169
- 조성은, 이승래, 2000, 강우특성을 고려한 사면의 표면파괴에 대한 안정성 평가, 한국지반공학회논문집, 제 16권 5호, pp.107-116
- 차경섭, 2004, 다중셀과 지형지수를 이용한 광역 산사태 위험지 예측. 서울대학교 박사학위논문.
- Chu, S. T., 1978. Infiltration during an unsteady rain. Water Resour. Res. 14(3), 461-466
- Fourie, A.B., Rowe, D., Blight, G.E., 1999, The effect of infiltration on the stability of the slopes of a dry ash dump, Geotechnique 49, No.1, pp.1-13
- Fredlund, D.G., Rahardjo, H., 1995, Soil Mechanics for Unsaturated Soils, John Wiley & Sons Inc.
- Green, W. H., and Ampt, C. A., 1911, Studies on soil physics, I. Flow of water and air through soils. J. Agric. Sci. 4, pp.1-24
- Mein, R. G., and Larson, C. L., 1973. Modeling infiltration during a steady rain. Water Resour. Res. 9(2), 384-394
- Ng, C. W., and Shi, Q., 1998, Numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage, Computer and Geotechnics, 22(1), 1-28
- Pradel, D. and Raad, G., 1993, Effect of Premeability on Surficial Stability of Homogeneous Slopes, J. Geotech. Engrg. ASCE, Vol. 119, No.2, pp.315-332
- Rulon, J.J. and Freeze, R.A., 1985, Multiple seepage faces on layered slopes and their implications for slope-stability analysis, Can. Geotech. J., Vol. 22, pp.347-356
- Tsaperas, L., Rahardjo, H., David G.T., Leong, E.C., 2003, Infiltration characteristics of two instrumented residual soil slopes, Can. Geotech. J., 400: 1012-1032