

땅밀림 비탈면내 집수정 설치 효과 연구

전병추^{1*} · 이수곤²

¹서울시립대학교 토목공학과, 박사수료

²서울시립대학교 토목공학과, 교수

A Study on the Effect of Collector Well on the Landcreep Slope

Byeong Chu Jeon^{1*} · Su Gon Lee²

¹Department of Civil Engineering, University of Seoul, Graduate Student

²Department of Civil Engineering, University of Seoul, Professor

Abstract

This study examines the effect of collector well installed to reduce groundwater level in the regions with the occurrence of landcreep, a soil mass movement triggered by instability on slopes. Slopes are prone to failure as a result of instability caused by its internal, topographic and geological properties as well as due to external factors such as rainfall and earthquake. In Korea during the rain season, rainfall infiltration affects the groundwater level in soil, building up porewater pressure and load, and finally drives slopes to collapse. Slope failure caused by rainfall infiltration has been leading to a drastic forest degradation. The studied slope is located adjacent to a valley, its terrain corresponds to piedmont gentle slope, while the upper part of the failure surface is steep. After reinforcing the terrain where landcreep had occurred and installing collector well on the slope, we measured the changes in the groundwater level. In order to analyze the relationship between the well and the slope, we calculated the ratio of groundwater level to rainfall before and after the installation of the collector well. As a result, it is confirmed that the ratio increases after the installation of the well, which in turn reduces the groundwater level. Analysis of the change in groundwater level after 3, 7, 15 days antecedent rainfall showed that the higher the overall groundwater level, the less the value (r_p) of groundwater level-rainfall ratio is, while the value becomes relatively greater when the groundwater level is low. In particular, if a slope has a large catchment basin as is in the case of the studied site, antecedent rainfall affects groundwater level in the order of $3 < 7 < 15$ days.

Keywords: collector well, groundwater level-rainfall ratio, landcreep, slope stability, antecedent rainfall

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Byeong Chu Jeon
E-mail: bjeons@naver.com

Received: 23 May, 2019

Revised: 11 June, 2019

Accepted: 12 June, 2019

© 2019 The Korean Society of Engineering Geology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

초 록

본 연구는 비탈면의 불안정으로 인한 붕괴현상인 땅밀림 붕괴가 발생하는 지역에 지하수위 하강을 위한 집수정의 설치 효과를 평가하기 위해서 수행되었다. 비탈면은 지형, 지질적인 내적 특성과 강우와 지진 등 외적 요인의 불안정성이 증가하는 경우 붕괴현상이 유발된다. 우리나라는 우기의 강우 침투에 의하여 토층 내 지하수위가 증가하고, 이로 인한 간극수압의 형성 및 하중 증가로 인하여 붕괴현상이 발생된다. 토양 내 강우침투로 인한 비탈면의 붕괴로 산림훼손이 급증하고 있는 현실이다. 연구대상 비탈면은 계곡과 인접하여 위치하고 지형 형태상으로는 완경사지의 산록완경사면에 해당하고, 붕괴면 상부는 급경사지를 이루고 있다. 땅밀림이 발생하는 지형에 보강공사와 더불어 비탈면에 집수정 설치로 인한 지하

수위 변화를 계측하였다. 계측자료를 통하여 집수정이 비탈면에 미치는 연관성을 분석하고자 집수정 설치 전·후의 지하수위-강우량 비를 산출하였으며, 분석 결과 집수정 설치로 지하수위-강우량 비가 증가하여 지하수위를 저하시키는 영향이 있음을 확인하였다. 선행강우량을 3일, 7일, 15일 기준으로 강우량에 따른 지하수위 변화를 분석한 결과, 전체적으로 지하수위가 높으면 지하수위-강우량 비 r_p 가 작게 나타났으며 지하수위가 낮아지면 상대적으로 큰 값을 보였다. 또한 본 연구지역과 같이 집수유역이 큰 비탈면의 경우는 선행강우량이 지하수에 미치는 영향이 3일 < 7일 < 15일 선행강우량 순으로 나타났다.

주요어: 집수정, 지하수위-강우량 비, 땅밀림, 비탈면 안정성, 선행 강우량

서론

산사태는 호우 시 강우침투로 포화된 토양이 균형을 잃고 중력에 의하여 순간적으로 이동되는 붕괴현상이다. 땅밀림(Landcreep)은 토양균열의 깊이가 10~15 m, 폭이 30 m 이상으로 토괴의 유동이 서서히 진행 중인 것으로 정리하였다(Jau et al., 2000). Olivier et al.(1994)에 의하면 땅밀림, 토석류는 자연사면이 강우의 직접적인 영향으로 인하여 붕괴가 발생되고, 건설공사에 의한 비탈면 붕괴는 일반적으로 하단부 절취시 압성토로서의 응력해방에 의한 지지력 약화로 붕괴가 발생된다고 하였다. 그리고 평균 강우량보다 20% 이상의 집중강우가 발생한 경우 강우의 직접적인 영향으로 인하여 자연비탈면에서 산사태, 땅밀림 및 토석류로 인한 붕괴가 발생된다고 보고 하였다.

Ikeya(1989)는 토성과 지형조건에 대한 연구를 통해 강우로 인해 발생하는 비탈면 토층 거동을 평가하였으며, 누적 강우량이 150 mm 이상이고, 35 mm/hr 이상의 강우량이 발생하면 토석류의 거동에 의한 산사태의 위험이 높은 것으로 보고 하였다. 우리나라 비탈면의 경우 Kim et al.(1996, 2000)는 연속강우량이 100 mm 이상일 때 산사태 발생가능성이 있고, 200 mm 이상에서는 대규모(1 ha 이상)의 산사태가 발생할 위험성이 높다고 보고하였으며, 강우가 3일 이상 연속되는 장기 강우와 1일 이상의 선행 강우가 시간당 30 mm 이상의 집중강우 일 때 산사태가 집중적으로 발생하는 것으로 보고하였다.

Park et al.(2015)는 강우 환경인자 중에서 선행 강우량은 301~400 mm/15 day, 발생당일 강우량은 100 mm 이하, 강우 강도는 6~10 mm/hr에서 landcreep이 많이 발생함을 분석하였다. Park(2015)은 국내 땅밀림 산사태지 29개소를 조사한 결과 지반 특성별로 붕괴토 22개소(75.9%), 점질토 3개소(10.3%), 풍화암과 암반이 2개소씩(각 6.9%) 분포하고 있었으며, 지질상으로 화성암 4개소(13.8%), 퇴적암 12개소(41.4%), 변성암 13개소(44.8%)이었다. 그리고 개발 및 저수지 등 구조물 설치로 인한 인위적 요인이 약 71%, 하천과 계곡 등 침식에 의한 지형적인 요인 약 7%, 지질학적인 자연적인 현상이 약 22%로 분석하였다.

일본에서 가장 큰 규모로 땅밀림 붕괴가 발생된 카메노세 지역의 개황과 대책공을 보고한 바에 의하면 1931년 32 ha의 면적이 53 m 수평이동하고, 1967년에 활동영역이 50 ha로 확대되어 땅밀림 현상이 발생하였다. 안정화 대책공으로 억지공으로 강관말뚝을 시공하였고 동시에 억제공으로 지표수 침투방지공, 지하수 배수공을 시공하였다. 지하수 배수공으로 집수정을 설치하고 터널배수공 및 지하수 차단공을 복합적으로 적용하여 안정화를 기하였다(Youn, 2002).

Nakaya et al.(2016)이 수직 취수정 $\varnothing = 400$ mm, H = 52 m 규격으로 3공을 군집으로 시공하여 펌프를 이용한 지하수 저하공법으로 3.26 m의 수위를 강하시킨 결과 반경 50 m까지 0.5 m의 수위저하가 발생되었으며, 시공비 및 운영비가 동일한 능력의 집수정 1공 대비 91.5%로서 경제성이 우수함을 확인하였다. 국내에서 Kim et al.(2017)는 땅밀림 산사태 발생과 지하수위 변동과의 연관성 분석에서 저수지 하부 붕괴층 분포지역의 산지 비탈면은 저수지의 수위에 따라 지하수 침투에 의한 수위변화를 발생시키며, 이는 비탈면 안정성에 밀접한 영향이 있음을 분석한 바 있다.

본 연구는 계곡과 인접하여 자연적인 땅밀림 현상이 발생하는 산록환경사면에서 집수정 설치로 인한 지하수위 변화를 관측하고, 강우와 지하수위의 연관성과 지하수위가 비탈면에 미치는 영향을 평가하기 위하여 수행하였다.

연구지역

지형 조건

연구 비탈면의 지형은 Fig. 1과 같이 국도와 접하고 하부는 20~25°의 완만한 경사를 가지는 비탈면을 형성하고, 지형적인 변이점인 상부는 40° 이상의 급경사를 보이는 복합지형이다. 계곡부에 절, 성토를 한 후 건설된 학교 건축물이 위치하고 도로변은 절취 비탈면과 평탄지의 자연 비탈면으로 구성되어 있다. 지형적인 변이점인 지역은 암반이 노출되어 있으며 과거에 붕락현상으로 형성된 단애가 관찰되고 주변에 성장하는 수목에서도 땅밀림 현상으로 인한 수직도의 변위가 확인된다.

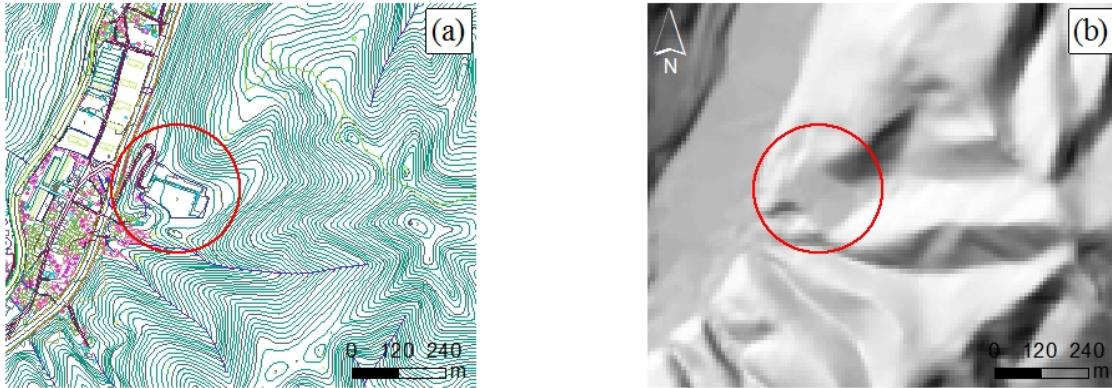


Fig. 1. Topographic analysis. (a) Topographical map, (b) Shaded relief map.

지질 조건

연구 대상 비탈면은 우리나라의 대표적인 고생대 퇴적암이 분포하는 지역으로 석탄층과 사암, 셰일층으로 구성된다. 태백지역의 석탄층이 분포하는 고생대 퇴적암은 여러 암석이 분포하는 지반으로 강도가 매우 강한 사암, 역암과 보통 강도의 셰일층, 강도가 약한 석탄층이 분포한다. 또한 연구지역은 오랜기간에 걸쳐 화성활동 등의 지구조적 영향으로 변형이 발생하여 단층 및 습곡이 많이 발달되어 있다.

산능선부의 중산간 지역에 단층으로 인한 단애 및 단층경면이 관찰되고 이를 기점으로 상부는 급경사의 퇴적암 지층이 관찰되고, 하부는 토사층으로 피복된 붕적층이 완만한 경사로 이루어져 있다. 계곡부와 나란하게 발달하고 있는 단층 및 습곡이 관찰되고 단층대를 기점으로 땅밀림이 관찰되는 것으로 보아 단층대가 땅밀림을 촉진시켰을 개연성이 큰 것으로 판단된다.

붕괴 현황

연구 대상 비탈면의 활동면 거동상태를 파악하기 위한 정밀지표조사를 시행한 결과 지형적인 경사 변환점에 단층이 발달하고 과거에 땅밀림으로 인한 붕괴활동의 이력이 있는 비탈면이다. 암반상부의 땅밀림이 발생된 붕적층은 두께 약 20 m, 폭 180 m, 고저차 약 40 m 및 연장 약 120 m 규모이다. 비탈면의 구배는 20~25°의 경사이고, 붕락 변곡점 상부의 지형 100 m는 약 40°의 급경사로 강우침투 및 배출이 용이한 조건을 가지고 있다. Fig. 2에서 표현한 바와 같이 수차례에 걸쳐 붕괴현상이 발생되어 억지말뚝 보강공을 시공하였다. 1차 거동으로 억지말뚝(C.T.C = 1.5 m, ϕ 0.5 m)을 시공하여 안정화를 기하고 있다.

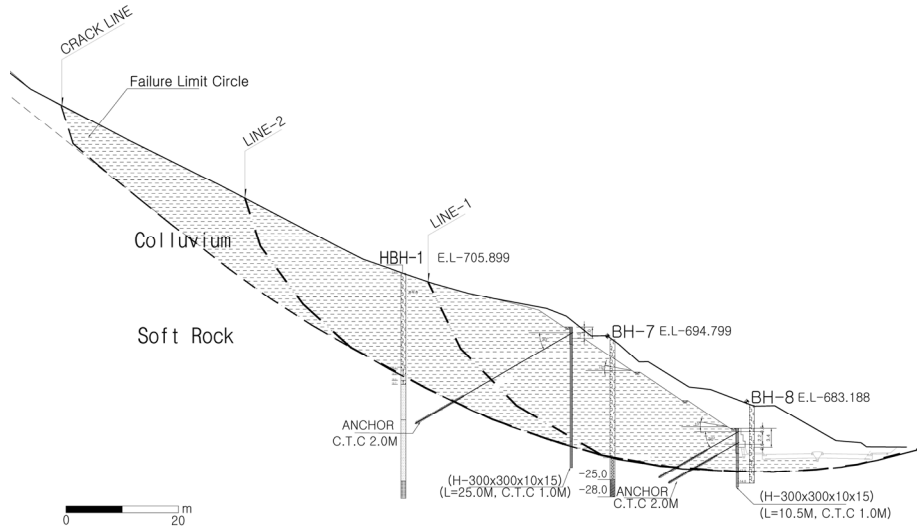


Fig. 2. Section of landcreep.

연구방법

현장 개요

붕적층은 다른 지반과 달리 강우 침투로 인한 지하수위의 상승이 용이하고, 또한 지하수 배출도 빨리 일어난다. 붕적층 내의 강우에 따른 지하수위의 변화와 이로 인한 간극수압이 비탈면에 미치는 영향을 분석하고자 지하수위를 계측하였다. 강우에 따른 지하수위 변동을 파악하기 위한 지하수위 계측은 3월부터 11월까지 실시하였다. 그리고 비탈면 안정화의 일환으로 집수정이 시공된 후 지하수위의 변화를 관측하기 위하여 집수정 설치가 완료된 8월에서 익년 9월까지 1년간 계측이 실시되었다. 계측 위치는 Fig. 3과 같이 붕괴 비탈면 중심부를 기준으로 수위계를 설치하였다.

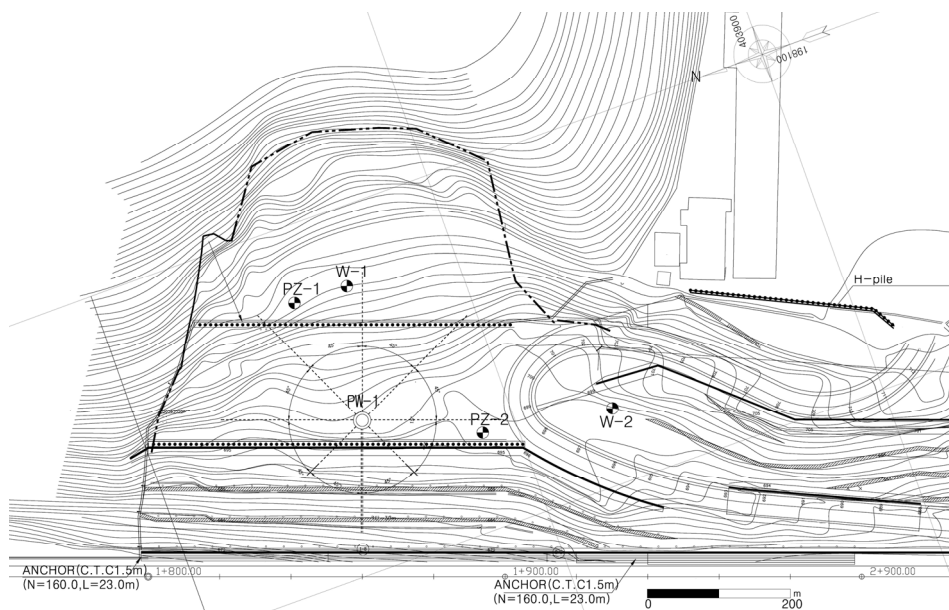


Fig. 3. Collector well and water-level measurement location.

Fig. 3에서 W-1, W-2는 비탈면 안정화를 위한 말뚝보강공과 집수정 시공 전에 관측한 계측공이며, 비탈면 안정화 보강 공사시 훼손되어 측정이 중단되었다. PZ-1, PZ-2는 말뚝보강공과 집수정 시설이 완료된 후 설치된 계측공으로 상단 억지 말뚝과 하단 억지말뚝 전방에 설치하여 집수정으로 인한 지하수위 변화를 측정하였다.

집수정 설치 전 계측

본 연구에서는 집수정 설치 전 계측자료로 Table 1을 활용하였다. Table 1에 의하면 비탈면 거동을 인지한 후 비탈면내 지하수위를 계측하기 시작하였으며, 계측결과 건기시인 3월부터 6월까지의 지하수위는 점점 하강하는 현상이 관측되었다. 6월 11일 계측자료에서 지하수위가 최저점을 나타내었으며, 그 때의 지하수위는 W-1: G.L. -18.5 m, W-2: G.L. -7.12 m 위치에 분포하고 있다.

강우량이 6월 17일부터 23일까지 7일간 285.5 mm의 강우 발생 후 지하수위는 급상승하여 W-1: G.L. -7.15 m, W-2: G.L. -4.02 m에 분포하는 것으로 Table 1과 같이 계측되었다. 이는 계곡의 완경사지 비탈면인 봉적층으로 우수가 집중적으로 유입됨으로 인해 급격한 지하수위 상승효과를 나타내는 것으로 판단된다.

Table 1. Measurement result of groundwater level (Taebaek-si, 2004)

Date	W-1 (713.5 mL)		W-2 (695.0 mL)		7 days rainfall before continuous measurement (mm)	Remarks
	G.L. (-m)	E.L. (m)	G.L. (-m)	E.L. (m)		
03.25	10.62	702.88	-	-	2.00	
04.01	10.73	702.77	7.24	687.76	-	
04.16	11.08	702.42	7.20	687.80	-	
04.29	10.85	702.65	7.15	687.85	82.50	Dry season
05.11	17.05	696.45	7.28	687.72	42.00	
06.10	18.05	695.45	7.12	687.88	7.50	
06.24	7.15	703.35	4.02	690.98	204.00	
07.10	10.52	702.98	3.35	691.65	18.50	
07.22	9.88	703.62	3.25	692.65	68.00	
08.06	7.00	706.50	5.78	689.22	52.00	Rainy season
08.20	7.35	706.15	6.04	688.96	161.50	
09.02	9.79	703.71	5.68	689.32	11.00	
09.16	9.62	703.88	5.49	689.51	47.00	
10.07	9.82	703.68	6.25	688.75	0.50	
11.12	17.80	695.70	7.05	687.95	5.50	Dry season

집수정 설치 후 계측

비탈면 안정화 방안으로 억지말뚝(Ø508 mm, 강관)을 설치하여 안정화를 기하고, 거동중인 봉적층 내 형성된 지하수 배 제공법으로 집수정을 설치하여 일정 심도 이상 지하수위가 상승되지 않도록 배수하여 비탈면의 안정을 확보하고자 하였다.

Fig. 4는 집수정 및 보강 단면도이며, 붕괴 비탈면내 억지말뚝(Ø508 mm, C.T.C = 1.5 m) 2열을 추가 시공함과 더불어 억지말뚝사이에 방사형 집수정(Ø = 3.0 m, H = 21.5 m)과 수평배수관(Ø = 50 mm, L = 15~40 m/24공)을 설치하여 최대 유량 9,000 m³/d를 배수시킴으로서 지하수위 하강을 유도하여 비탈면 안정성을 기하였다.

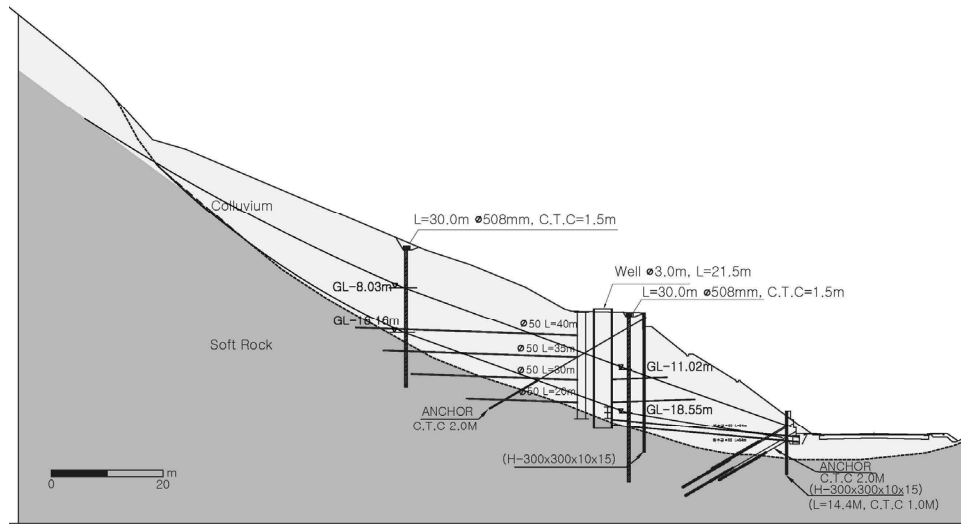


Fig. 4. Groundwater level after of collector well construction.

집수정을 설치한 후 지하수위를 계측한 Table 2 및 Fig. 4의 자료에 의하면 상단부 억지말뚝과 접하여 설치한 PZ-1 위치의 지하수위는 최고수위를 기준으로 1.03 m 하강하였다. 집수정과 인접한 하단부 억지말뚝부인 PZ-2의 위치의 수위변화는 건기 시 7.28 m에서 18.55 m로 11.28 m 하강하고, 우기시는 최고수위 3.25 m에서 11.02 m로 7.77 m 하강한 것으로 측정되었다.

Table 2. Measurement result of groundwater level (Taebaek-si, 2007)

Date	PZ-1 (715.0 mL)		PZ-2 (695.0 mL)		7 days rainfall before continuous measurement (mm)	Remarks
	G.L. (-m)	E.L. (m)	G.L. (-m)	E.L. (m)		
08.09	9.60	705.40	-	-	57.50	Rainy season
09.20	9.04	705.96	11.60	683.40	19.00	
10.25	8.92	706.08	12.05	682.95	72.00	
11.15	15.52	699.48	17.27	677.73	10.00	Dry season
12.15	16.10	698.90	18.05	676.95	8.50	
01.12	16.05	698.95	18.52	676.48	0.00	
02.15	16.15	698.85	18.55	676.45	34.50	
03.20	16.20	698.80	18.22	676.78	6.40	
04.22	16.16	698.84	18.02	676.98	15.50	
05.25	8.90	706.10	12.00	683.00	29.00	Rainy season
06.25	8.50	706.50	12.02	682.98	67.50	
07.25	8.13	706.87	11.05	683.95	63.50	
08.12	8.03	706.97	11.02	683.98	135.00	
09.20	8.10	706.90	11.05	683.95	191.50	

결과 및 분석

집수정 설치에 의한 지하수위 변화

Table 3에 정리한 바와 같이 집수정 설치 후 최고 지하수위는 PZ-1(W-1) 관측공은 G.L. -8.03 m로 집수정 설치 전에 비하여 약 1.03 m 하강하였고, PZ-2(W-2)은 G.L. -11.02 m로 약 7.77 m 하강된 것으로 관측되었다. 최저 지하수위는 PZ-1(W-1) 관측공은 G.L. -16.16 m로 집수정 설치 전에 비하여 약 1.89 m 상승하였고, PZ-2(W-2)은 G.L. -18.55 m로 설치하기 전에 비하여 약 11.27 m 하강하였다(Fig. 4).

Table 3. Groundwater level measurement data of slope

Division		W-1 (PZ-1)	W-2 (PZ-2)	W-1 (PZ-1)	W-2 (PZ-2)
		Lowest water level (G.L.: -m)		Highest water level (G.L.: -m)	
Well	Before	18.05	7.28	7.00	3.25
	After	16.16	18.55	8.03	11.02

집수정 효과

Kim(2000) 등 여러 연구자들에 의하여 3일 선행강우와 7일 선행강우를 기준으로 비탈면 안정성에 대한 상관성 관계를 분석한 바 있다. Park(2015)은 선행 강우량 15일, 당일 강우량을 기준으로 땅밀림의 발생을 분석하였으며, Lumb(1975)는 홍콩지역의 붕괴 비탈면을 조사하여 선행강우가 불포화토에 침투하여 붕괴의 주요 원인으로 15일 누적강우량 200 mm를 위험도로 제시하였다. 이와 같이 선행강우량은 불포화토내 침투 영향으로 기존의 지하수위가 상승하고, 간극수압의 증가로 인하여 비탈면 안정에 영향을 미친다.

계측 주기는 15~30일 주기로 실시하였으며 계측은 강우가 발생한 수일 이후에 측정되었다. 측정 시 계절별 조건, 강우량의 조건이 서로 상이하고 연구지역 비탈면의 집수유역을 산정하면 붕적층이 분포하는 비탈면의 면적이 전체 집수유역의 1/10에 해당하여 지중으로 침투 유입되는 유량을 산정하기 어렵다. 특히 집수정 설치 효과에 대한 분석을 위해서는 동일 또는 유사한 강우가 발생하는 경우의 계측 자료가 필요한데 현실적으로 이러한 자료를 구하기는 어려운 일이다.

지하수위는 강우작용으로 강우가 지중으로 침투하여 토양 및 암반 매질내의 공극을 채우면서 지하수위를 형성하게 된다. 이때 강우량 대비 수위 상승량을 비산출율을 의미한다. 강우 이벤트(수일의 연속 강우량 포함) 동안의 지하수위 상승 자료를 이용하여 비산출율을 아래 식 (1)과 같이 산정 할 수 있다(Kim, 2010).

$$S_y = \frac{P}{W_r} \tag{1}$$

여기서, S_y : 비산출율

P : 강우 이벤트의 강우량(mm)

W_r : 지하수위 상승량(m)

지하수위는 비탈면 내에 강우 발생 외에도 주변으로부터의 집수의 영향으로 상승하게 된다. 지하수위는 강우조건에 따라 건기와 우기로 나누어지며, 동일한 강우 시 건기에 미치는 지하수위의 변화량에 비하여 우기시의 지하수위의 변화량이

크게 나타난다(Kim, 2010). 이는 우기 시 연속강우로 인한 토양의 포화현상으로 강수가 지중침투가 건기에 비하여 우기에 용이하다. 비탈면에서의 함양량은 강우량과 더불어 지형적인 집수유역에 따라 서로 다르나, 강우 발생 후 침투수가 지형 경사를 따라 지중에서 지하수와 합류하여 이동하므로 하류지역에서 더 많은 수위변화가 발생된다.

본 연구에서는 강우량과 지하수위의 상관관계를 효과적으로 평가하고 크기가 다른 강우의 영향을 최소화 하는 방안으로 계측된 지하수위를 n일 선행 강우 즉, n일 누적 강우량으로 나누어 지하수위-강우량 비를 구하였다. 이때 n일 선행강우를 이용한 것은 유역면적내의 침투수 영향을 고려한 것이다. 여기서 지하수위-강우량 비는 다음 식 (2)와 같다.

$$r_p = \frac{h_g}{p_n} \quad (2)$$

여기서, r_p : 지하수위-강우량 비

h_g : 지하수위(m)

p_n : n일 선행 강우량(mm)

집수정 설치 전 비탈면의 지하수위는 Table 1에서와 같이 W-1은 건기 시 G.L. -18.05 m, W-2는 7.28 m의 최저수위를 보이고, 최고수위는 강우발생 후 W-1은 G.L. -7.0 m, W-2는 3.25 m를 보이고 있다.

계측과 관련하여 선행강우량을 3일, 7일, 15일 기준으로 강우량에 따른 지하수위 변화를 분석하여 연관성 여부를 파악하고자 계측자료를 이용하여 강우량 대비 지하수위 비 r_p 를 구하였으며, 집수정 설치 전에 대한 산정 결과를 정리하면 Tables 4 및 5와 같다. 산정 결과에 대한 구체적인 분석은 다음과 같다.

Table 4. Analysis of groundwater level/rainfall at W-1 before installation of collector well

Date	W-1 (713.5 mL)	Groundwater-rainfall ratio (m/mm)			Rainfall before continuous measurement (mm)		
	G.L. (-m)	3 day	7 day	15 day	3 day	7 day	15 day
3.25	10.62	0.00	0.00	5.31	0.00	0.00	2.00
4.01	10.73	0.00	0.00	5.37	0.00	0.00	2.00
4.16	11.08	0.00	0.00	1.01	0.00	0.00	11.00
4.29	10.85	0.14	0.13	0.12	77.00	82.50	88.50
5.11	17.05	0.47	0.41	0.14	36.00	42.00	121.50
6.10	18.05	7.22	7.22	0.86	2.50	2.50	21.00
6.24	7.15	0.10	0.03	0.03	72.00	285.50	285.50
7.10	10.52	0.34	0.09	0.08	30.5	112.00	130.50
7.22	9.88	0.00	0.15	0.05	0.00	68.00	214.50
8.06	7.00	0.35	0.13	0.11	20.00	52.00	66.00
8.20	7.35	0.05	0.04	0.04	161.50	189.00	189.00
9.02	9.79	6.53	0.89	0.05	1.50	11.00	205.50
9.16	9.62	1.13	0.20	0.09	8.50	47.00	108.50
10.07	9.82	19.64	19.64	6.55	0.50	0.50	1.50
11.12	17.80	3.24	3.24	2.74	5.50	5.50	6.50

Table 5. Analysis of groundwater level/rainfall at W-2 before installation of collector well

Date	W-2 (695.0 mL)	Groundwater-rainfall ratio (m/mm)			Rainfall before continuous measurement (mm)		
	G.L. (-m)	3 day	7 day	15 day	3 day	7 day	15 day
3.25	-	-	-	-	0.00	0.00	2.00
4.01	7.24	0.00	0.00	3.62	0.00	0.00	2.00
4.16	7.20	0.00	0.00	0.65	0.00	0.00	11.00
4.29	7.15	0.09	0.09	0.08	77.00	82.50	88.50
5.11	7.28	0.20	0.17	0.06	36.00	42.00	121.50
6.10	7.12	2.85	2.85	0.34	2.50	2.50	21.00
6.24	4.02	0.06	0.01	0.01	72.00	285.50	285.50
7.10	3.35	0.11	0.03	0.03	30.50	112.00	130.50
7.22	3.25	0.00	0.05	0.02	0.00	68.00	214.50
8.06	5.78	0.29	0.11	0.09	20.00	52.00	66.00
8.20	6.04	0.04	0.03	0.03	161.50	189.00	189.00
9.02	5.68	3.79	0.52	0.03	1.50	11.00	205.50
9.16	5.49	0.65	0.12	0.05	8.50	47.00	108.50
10.07	6.25	12.50	12.50	4.17	0.50	0.50	1.50
11.12	7.05	1.28	1.28	1.08	5.50	5.50	6.50

3일 선행강우량 분석

집수정 설치 전

산림청(<http://sansatai.forest.go.kr>)에서는 비탈면의 재해 위험성을 규정하기 위하여 선행 연속 강우량 200 mm 이상, 당일 강우량 150 mm 이상 일 때 경보를 적용하고 있으나, 실제 계측은 강우 발생 이후에 측정하였으므로 당일 강우량은 제외하고 3일 선행강우량 기준으로 강우량에 따른 지하수위의 변화 관계를 분석하였다. 비탈면의 상부 자연경사지에 위치하는 계측공 W-1에서 강우시의 최대 높이의 지하수위가 형성되었을 때 3일 기준 지하수위-강우량 비 r_p 는 을 분석한 결과, 우기의 높은 지하수위인 G.L. -7.00~7.35 m 일 때는 지하수위-강우량 비 r_p 가 0.1~0.35 m/mm이었으며, 건기시의 최대심도의 지하수위가 형성(G.L. -17.05~18.05 m) 되었을 때의 지하수위-강우량 비 r_p 는 3.24~7.22 m/mm로 우기와 건기는 확연한 차이를 보여주고 있다. 다만, 건기 시 수위가 17.05 m 일 때 r_p 가 0.47로 작게 나타난 경우가 있었으며, 이는 3일 선행 강우가 36 mm가 발생하여 수위가 낮음에도 불구하고 선행 강우 영향을 받아 그 수치가 작게 나타난 것으로 판단된다.

절취면의 상단에 위치하는 W-2는 건기 시 최대심도(G.L. -6.25 m 이하) 일 때의 지하수위-강우량 비 r_p 는 1.28~12.50 m/mm, 최저심도(G.L. -3.35 m) 일 때의 r_p 는 0.41 m/mm, G.L. -5.0~6.0 m 일 때의 r_p 는 0.04~3.79 m/mm로서 편차는 심하나 전반적으로 건기 시 r_p 값이 크게 나타났으며, 우기 시에는 작게 나타났다. 3일 선행강우량 20 mm 이상 일 때는 r_p 가 0.3 m/mm 이하로 산정되었다.

집수정 설치 후

집수정 시공 전의 계측지점과 인접한 지점에 계측공을 신설하여 지하수위 계측을 실시하였다. 집수정 설치 전과 후의 비탈면의 조건변화(보강공 시공 + 집수정 설치), 강우조건의 변화, 토공량의 변화가 있으나 강우량에 따른 지하수위의 증감하는 양상은 유사하게 발생하였다. 집수정은 매일 일정량의 비탈면내 강우 침투수를 배출하기 위하여 설치되었으며,

최대 배출량은 9,000 m³/day로 설계되었다(Taebaek-si, 2007).

집수정 설치 전과 동일하게 지하수위-강우량 비 r_p 를 산정하여 분석한 결과를 Tables 6과 7에서 정리하였다. 지하수위의 분포가 11월부터 익년 4월까지의 건기 시의 최대심도의 지하수위와 5월부터 10월까지의 우기 시의 최저심도의 지하수위로 구분된다. 건기 시 지하수위가 하강하면 3일 선행강우량 기준 PZ-1의 지하수위-강우량 비 r_p 는 0.48~15.52 m/mm의 값을 갖고, 우기 시 지하수위가 상승하면 r_p 는 0.09~0.75 m/mm의 범위를 갖는 것으로 분석되었다.

Table 6. Analysis of groundwater level/rainfall at PZ-1 after collector installation of well

Date	PZ-1 (715.0 mL)	Groundwater-rainfall ratio (m/mm)			Rainfall before continuous measurement (mm)		
	G.L. (-m)	3 day	7 day	15 day	3 day	7 day	15 day
8.09	9.60	0.23	0.17	0.05	41.50	57.50	184.00
9.02	9.04	0.75	0.48	0.05	12.00	19.00	194.50
10.25	8.92	0.12	0.12	0.12	71.50	72.00	72.00
11.15	15.52	15.52	1.55	0.56	1.00	10.00	27.50
12.15	16.10	0.00	1.89	1.81	0.00	8.50	8.90
1.12	16.05	0.00	2.97	2.97	0.00	5.40	5.40
2.15	16.15	0.48	0.43	0.43	33.50	34.50	37.50
3.02	16.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.22	16.16	10.77	1.04	0.77	1.50	15.50	21.00
5.25	8.90	0.40	0.31	0.27	22.00	29.00	32.50
6.25	8.50	0.22	0.13	0.11	38.50	67.50	77.0
7.25	8.13	0.19	0.13	0.05	43.50	63.50	175.00
8.12	8.03	0.49	0.06	0.04	16.50	135.00	189.50
9.02	8.10	0.09	0.04	0.04	87.50	191.50	194.00

Table 7. Analysis of groundwater level/rainfall at PZ-1 after collector installation of well

Date	PZ-2 (695.0 mL)	Groundwater-rainfall ratio (m/mm)			Rainfall before continuous measurement (mm)		
	G.L. (-m)	3 day	7 day	15 day	3 day	7 day	15 day
8.09	-	-	-	-	41.50	57.50	184.00
9.02	11.60	0.97	0.61	0.06	12.00	19.00	194.50
10.25	12.05	0.17	0.17	0.17	71.50	72.00	72.00
11.15	17.27	17.27	1.73	0.63	1.00	10.00	27.50
12.15	18.05	0.00	2.12	2.03	0.00	8.50	8.90
1.12	18.52	0.00	3.43	3.43	0.00	5.40	5.40
2.15	18.55	0.55	0.49	0.49	33.50	34.50	37.50
3.02	18.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.22	18.02	12.01	1.16	0.86	1.50	15.50	21.00
5.25	12.00	0.55	0.41	0.37	22.00	29.00	32.50
6.25	12.02	0.31	0.18	0.16	38.50	67.50	77.0
7.25	11.05	0.25	0.17	0.06	43.50	63.50	175.00
8.12	11.02	0.67	0.08	0.06	16.50	135.00	189.50
9.02	11.05	0.13	0.06	0.06	87.50	191.50	194.00

집수정 인근의 PZ-2의 경우 3일 선행강우량이 20 mm 이상인 경우 r_p 는 0.55 m/mm 이하를 보이고 있어 집수정 설치 전의 유사한 위치인 W-2의 0.3 m/mm와 비교해 보면 r_p 가 증가되었음을 알 수 있다.

전반적으로 집수정 설치 전의 결과와 유사하게 건기와 우기 시의 r_p 의 산정 결과의 편차가 크게 나타나고 있는 것은 넓은 유역면적에 비해 선행강우의 산정이 3일로서 선행강우의 산정기간이 짧기 때문으로 판단된다.

7일 선행강우량 분석

집수정 설치 전

3일 연속 강우량과 더불어 선행강우량을 평가할 때 7일 강우량도 많이 적용한다. 본 연구에서도 봉적층 내 강우량이 지하수위 상승에 미치는 영향을 분석하기 위하여 7일 강우량을 적용하여 분석하였다. 그 결과 계측공 W-1은 우기 시 최저심도 일 때의 지하수위-강우량비 r_p 는 0.03~0.13 m/mm, 건기 시 최대심도 일 때는 r_p 가 3.24~7.22 m/mm로 높은 수치를 보이고 있다. W-2는 건기 시 최대심도 r_p 는 1.28~2.85 m/mm, 우기 시 최저심도 r_p 는 0.01~0.11 m/mm로서 우기와 건기의 r_p 수치는 차별이 확연하게 구분된다. 우기의 r_p 는 0.11 m/mm 미만의 낮은 수치를 보이고, 건기의 r_p 는 1.28 m/mm 이상의 높은 수치를 보여 강우량이 지하수위 변화에 직접적으로 영향을 미침을 알 수 있다.

집수정 설치 후

7일 연속 계측 전 선행강우량은 3일 강우량과 비교하여 건기 시는 차이가 10% 이내 증가하나, 우기시는 2.5배에서 5.0배까지 강우량이 증가한다. 계측공 PZ-1의 건기 시 최대심도의 지하수가 분포할 때의 지하수위-강우량비 r_p 는 0.43~1.89 m/mm, 우기 시 최저심도일 때의 r_p 는 0.04~0.48 m/mm이다. 계측공 PZ-2의 건기 시 최대심도의 지하수가 분포할 때의 지하수위-강우량비 r_p 는 1.54~2.12 m/mm, 우기 시 최저심도일 때의 r_p 는 0.06~0.61 m/mm로 나타났다.

15일 선행강우량 분석

집수정 설치 전

불포화토 내의 강우침투로 인한 포화현상으로 인한 지하수위의 증가는 선행강우가 매우중요하다. 지중의 토양은 습윤, 포화현상으로 점차 전이되면서 지하로 강우가 이동하여 지하수와 접하여 지하수위의 상승현상을 발생시킨다. 본 연구 지역은 봉적토가 약 20 m 두께로 분포하며, 주변으로부터 집중적으로 집수되는 지형적인 특징을 고려할 때 3일 및 7일 강우와 병행하여 15일 연속 강우량을 산정하여 지하수위-강우량 비를 비교 및 평가하였다.

계측공 W-1의 건기 시 최대심도의 지하수가 분포할 때의 지하수위-강우량비 r_p 는 0.86~2.74 m/mm, 우기 시 최저심도일 때의 r_p 는 0.03~0.11 m/mm이다. 계측공 W-2의 건기 시 최대심도의 지하수가 분포할 때의 지하수위-강우량비 r_p 는 0.34~1.08 m/mm, 우기 시 최저심도일 때의 r_p 는 0.01~0.09 m/mm이다.

집수정 설치 후

PZ-1의 건기 시 지하수위-강우량비 r_p 는 0.43~2.97 m/mm과 우기 시 r_p 는 0.04~0.12 m/mm의 범위를 갖는 것으로 분석되었다. PZ-2의 15일 선행강우량은 건기 시 r_p 는 0.49~3.43 m/mm과 우기 시 r_p 는 0.06~0.17 m/mm의 범위를 갖는 것으로 분석되었다.

종합 분석

집수정 설치 전과 동일하게 지하수위-강우량 비 r_p 를 산정하여 분석한 값을 Tables 6과 7에 같이 정리하였다. 지하수위의 분포가 11월부터 익년 4월까지의 건기시의 저수위와 5월부터 10월까지의 우기 시의 고수위로 구분된다.

3일, 7일, 15일 연속 선행강우량을 기준으로 지하수위의 변화를 보면 W-1의 경우 건기 시 기준으로 최대심도 일 때의 r_p 는 3일: 0.1~0.35 m/mm, 7일: 0.04~0.13 m/mm, 15일: 0.04~0.11 m/mm로 기간을 확대할수록 수치의 범위가 축소되는 것으로 분석되었다. 이는 본 연구지역과 같이 집수유역이 큰 비탈면의 경우는 선행강우량이 지하수 상승에 미치는 영향이 3일 선행강우량 < 7일 선행강우량 < 15일 선행강우량 순으로 판단된다.

Fig. 5에 의하면 건기 시와 우기 시의 선행강우량이 많으면 지하수위가 상승하여 지하수위-강우량 비 r_p 값이 낮아져야 하나, 지하수위가 상승하지 않고 r_p 값이 높은 3일 및 7일의 이상치는 수일간의 연속강우량보다는 1일 강우량이 많은 경우로 지중의 강우침투 현상에 비하여 지표유실이 많은 경우다. 계측자료에 의하면 건기와 평수기에 많이 관찰되고 이때는 지표의 표토유실도 다량 발생될 것으로 판단된다.

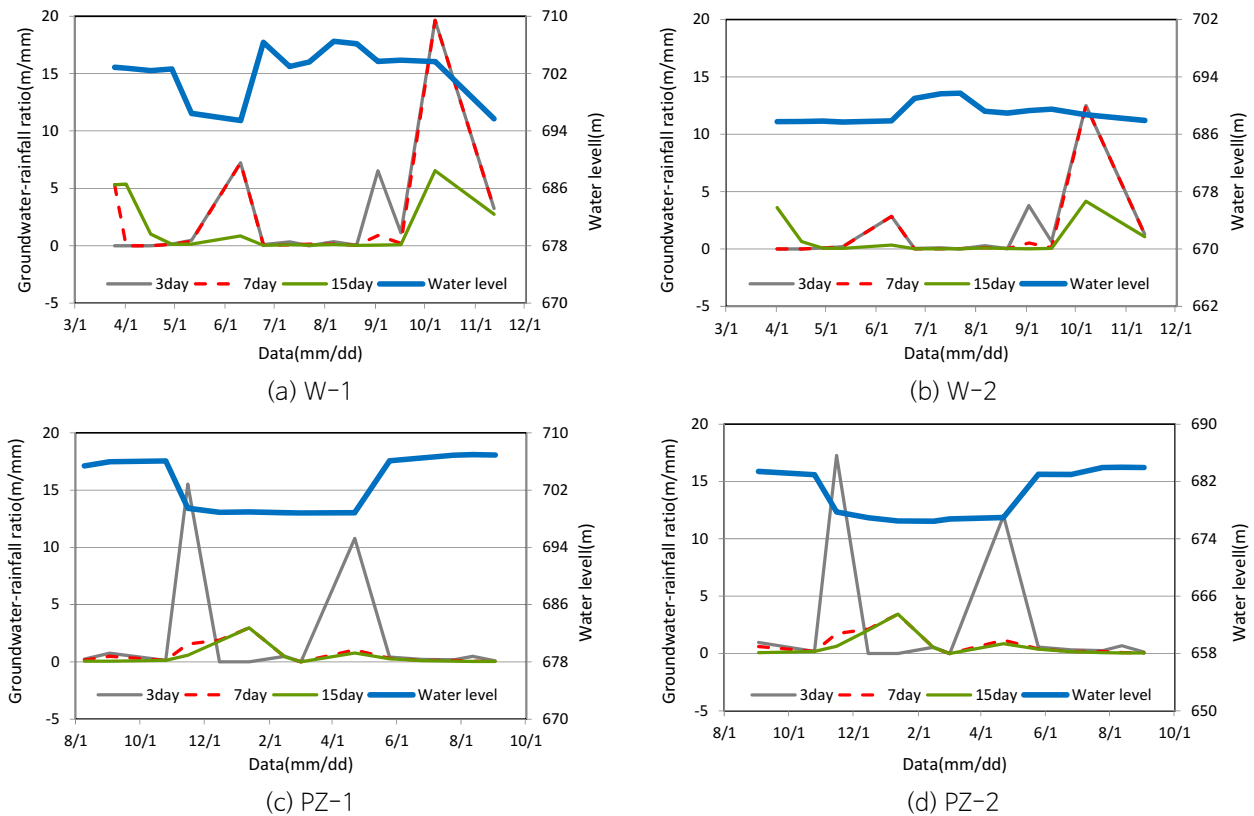


Fig. 5. Groundwater level and groundwater level-rainfall ratio.

유사한 위치의 집수정 설치 전후의 수위 관측 결과를 비교해보면 Table 5의 집수정 설치 전 6월 24일 W-2의 경우 $r_p = 0.02\sim 0.06$ 이었으나, 집수정 설치 후 Table 7에 의하면 6월 25일 PZ-2의 경우 $r_p = 0.12\sim 0.31$ 로서 대략 6배 정도 증가된 것으로 그만큼 집수정이 지하수위 하강에 기여한 것으로 판단된다. Table 8은 최저 지하수위와 최고 지하수위를 분석한 수치로 집수정에서 약 60 m 이격된 W-1(PZ-1) 계측자료에 의하면 집수정 설치로 인한 수위의 변화가 크지 않으나, 집수

정과 인접한 W-2(PZ-2)는 집수정 설치 후 지하수위의 하강이 지하수위와 r_p 수치에서도 우기시는 3배, 건기 시는 8배의 차이로 수위저감 효과가 확인이 된다.

Table 8. Analysis of groundwater level and groundwater level-rainfall ratio (15 days)

Division		W-1 (PZ-1)		W-2 (PZ-2)		W-1 (PZ-1)		W-2 (PZ-2)	
		Lowest water level				Highest water level			
		G.L. (-m)	r_p	G.L. (-m)	r_p	G.L. (-m)	r_p	G.L. (-m)	r_p
Well	Before	18.05	0.77	7.28	0.06	7.35	0.04	3.25	0.02
	After	16.16	0.77	18.55	0.49	8.03	0.04	11.02	0.06

집수정 설치 전, 후의 지하수위 대비 강우량 비를 동일시하여 평가하기는 여러 요인으로 상이하나, 지하수위-강우량 비 r_p 를 분석한 결과는 수치가 낮으면 지하수위가 상승하고, 수치가 높으면 지하수위가 하강하여 비탈면의 안정성이 높아질 것으로 판단된다. 즉, 지하수위-강우량 비 r_p 가 작은 값을 보이게 되면 상대적으로 선행 강우량이 크고 지하수위가 높아 사면의 안정성은 불리하게 될 것이다. 다만, 이러한 결과가 정확한 수치로 판별하고 공학적으로 구분하기에는 무리가 있어 보인다. 이는 침투 및 지하수 흐름에 영향을 주는 인자는 대단히 다양하며, 또한 상부 유역면적의 크기도 다양하므로 7일 선행강우로 유역면적내의 침투수 영향을 고려하기에는 한계가 있기 때문에 15일 선행강우로 확대하여 평가함이 지하수 위 평가 시 보다 합리적이라 판단된다.

결론

본 연구는 거동 이력이 있는 산지 비탈면의 붕적층 지반에 강우 시 급격한 지하수위 상승으로 인한 비탈면의 안정화 방안으로서 지하수위 저하방안을 분석하였다. 산지 비탈면의 특성상 집중호우 시 강우침투에 의한 지하수위 상승으로 인한 간극수압증가로 땅밀림 현상이 가중되므로 대용량 배수공법으로 집수정을 설치하여 지하수위를 저하시키는 효과를 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 비탈면에 대한 지하수위 계측자료를 분석한 결과 비탈면 중심부의 지하수위가 건기 시 G.L. -7.28 m 위치하고, 우기시는 3.25 m로 우기 시 급격히 상승함을 확인하였다. 집수정 설치 후의 지하수위는 건기 시 G.L. -18.55 m로 수위강하 11.27 m 발생하고, 우기시는 최고수위 G.L. -11.02 m로 집수정 설치 전에 비하여 7.77 m 하강하는 것을 확인하였다.
- (2) 우기 시 집수정 설치 전 지하수위가 최고점일 때 지하수위-강우량 비가 0.02~0.06 m/mm의 범위를 보였으나, 집수정 설치 후에는 0.12~0.31 m/mm의 범위를 갖는 것으로 분석되었다. 즉, 집수정 설치 후 상대적으로 높은 값을 보였으며, 집수정이 지하수를 배수시켜 비탈면내 지하수위를 하강시키는 역할을 하고 있음을 반증하는 것으로 판단된다.
- (3) 계측과 관련하여 선행강우량을 3일, 7일, 15일 기준으로 강우량에 따른 지하수위 변화를 분석하여 연관성 여부를 파악하고자 계측자료를 이용하여 강우량 대비 지하수위의 비를 구한 결과, 전체적으로 지하수위가 높으면 지하수위-강우량 비 r_p 가 작게 나타났으며 지하수위가 낮아지면 상대적으로 큰 값을 보였다.
- (4) 집수정 설치 전, 후의 지하수위-강우량 비를 분석한 결과 집수정 설치 전은 강우량에 따라 수치가 불규칙 하였으나,

설치 후에는 건기 시와 우기 시로 수치가 일정한 값을 나타내어 집수정에 의한 배수효과로 비탈면내의 지하수위를 일정심도로 유지함을 간접적으로 판단이 가능하다.

상기의 결과로 강우로 지하수위가 상승하고 이로 인한 비탈면이 불안정한 땅밀림(landcreep) 붕괴지역은 지하수위 배제공법으로 집수정 및 수직정 적용을 고려할 필요가 있다. 땅밀림 활동이 많은 일본의 경우 대규모 비탈면은 배수터널과 군집의 집수정을 설치하고, 소규모의 비탈면은 집수정, 수직 취수정 및 군집의 수직정을 설치하여 지하수위를 저하시킨다. 연구 비탈면과 같이 강우침투가 용이한 지반의 경우는 지하수 지하공법으로 수직 취수정 또는 집수정 설치 시 지하수위가 강하되는 것을 지하수위-강수량 비 분석으로 확인되었다. 지하수 함량은 강우로부터 발생되므로 기간별 강수량을 기준으로 지하수위의 변화를 평가하였다. 강우강도 또한 지하수위 함양에 중요한 요인이나, 본 연구에서는 지하수위 측측이 월간 측측으로 강우강도와 지하수위의 변화 분석을 수행하지 못하여 이에 대한 계속적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

References

- Ikeya, H., 1989, Debris flow and its countermeasures in Japan, *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 40(1), 15-33.
- Jau, J.G., Park, S.J., Son, D.S., Joo, S.H., 2000, The effects of geological and topographical features on landslide and land-creep, *Journal of the Korea Society of Forest Engineering and Technology*, 89(3), 323-334.
- Kim, G.B., 2010, Estimation of specific yield using rainfall and groundwater levels at shallow groundwater monitoring sites, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 11(6), 57-67.
- Kim, H.G., Kim, M.I., Lee, M.S., Park, Y.S., Kwak, J.K., 2017, Correlation of deep landslide occurrence and variation of groundwater level, *Journal of the Korea Society of Forest Engineering and Technology*, 15(1), 1-12.
- Kim, K.W., Kim, S.G., Woo, B.M., 1996, Creeping landsliding of colluvial soil slope, '96 Academic Conference on Slope Stability, 33-52.
- Kim, Y.M., Jung, S.W., 2000, A study on the rainfall-triggered landslides in Taijon-Chungnam area, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(4-C), 341-355.
- Landslide Information Systems, Korea Forest Service (<http://sansatai.forest.go.kr>).
- Lumb, P., 1975, Slope failure in Hong Kong, *Journal of Engineering Geology*, 8(1), 31-65.
- Nakaya, H., Goto, A., Imamura, T., Mukai, K., Tsunaki, R., 2016, Case study of applicability of active drainage work from slope, *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*, 69(4), 21-24.
- Olivier, M., Bell, F.G., Jemy, C.A., 1994, The effect of rainfall on slope failure, with examples from the Greater Durban area, *Proceedings 7th Congress International Association Engineering Geology*, 3, 1629-1636.
- Park, J.H., 2015, Analysis on the characteristics of the landslide (with a special reference on geo-topographical characteristics), *Journal of the Korea Society of Forest Engineering and Technology*, 104(4), 588-597.
- Park, J.H., Lee, C.W., Kang, M.J., Kim, K.D., 2015, Analysis of characteristics of forest environmental factors on land creeping occurrence, *Journal of Agriculture & Life Science*, 49(5), 133-144.
- Taebaek-si, 2004, Sangjang-sodo slope stability review and reinforcement design report of road expansion construction.
- Taebaek-si, 2007, Sangjang-sodo measuring management report of cutting slope during road extension construction.
- Youn, H.J., 2002, Japan Kamenose landslide of monitoring and reinforcement KISTI (Korea Science Collection), 130, 10-15.