

호우시 구릉지 완사면에 발달된 'U자골' 꼭두부에서의 지중수 거동

박종관** · 조경민*** · 양해근**** · 마루이 아츠나오*****

Behaviour of Subsurface Water Flow on the 'U-shaped Gol' Head Hollow of Hillslope*

Jong-Kwan Park**, Kyong-Min Cho***, Heakun Yang****, Marui Astunao*****

요약 : 본 연구는 산림이 잘 보존되고 있는 경기도 구리시 동구릉 지역 내의 완사면 꼭두부 지점에서의 호우시 지중수 유출과 지형형성 프로세스를 규명하고자 실시되었다. 본 연구 결과 'U자골' 꼭두부의 경우 20mm 이하의 강우시에는 지하수위 변화가 거의 없었으나 꼭두사면과 그 상부 지점에서는 총강우량과 강우강도에 의해서 지하수위가 크게 변화하고 있는 것으로 나타났으며, 그 변동 폭은 선행강우량과 그 경과시간, 그리고 강우지속시간과 밀접한 관계가 있는 것으로 확인되었다. 이러한 현상에 영향을 미치는 요인으로는 강우시 형성된 사면의 유출특성, 즉 지하수위 상승에 기인한 복귀류 발생과 'U자골' 꼭두사면을 따라 빠르게 흐르는 측방류를 들 수 있으며 이러한 지중수의 흐름은 'U자골' 지형발달에 중대한 영향을 미친다. 사면 꼭두부 지형은 지중수에 의해 변형되고 있음을 알 수 있다.

주요어 : 지중수, 복귀류, 측방류, 미지형 변화, 'U자골' 지형

Abstract : The purpose of this study is to clarify the behavior of subsurface water flow during rainfall on the hillslope in the Dongguneung experimental basin. As a result of the study, the following conclusions were obtained. Under the total rainfall of 20mm, there were no groundwater level changes. However, it was found that total rainfall amount and rainfall intensity were important factors to change groundwater level in hilly slope. Also the rainfall duration and pre-existed rainfall amount were important factors to change it on the head hollow. To analyze the modification of 'U-shaped Gol' landform, the pattern of return flow and through flow have to check during storm events. The microgeomorphic change of head hollow is based on the pattern of subsurface water flow.

Key Words : subsurface water, return flow, through flow, micro-landform change, 'U-shaped Gol' landform

* 이 논문은 2005년도 건국대학교 학술진흥연구비 지원에 의한 것임.

** 건국대학교 지리학과 교수(Professor, Dept. of Geography, Konkuk Univ.), jkpark@konkuk.ac.kr

*** 건국대학교 지리학과 대학원생(Graduate Student, Dept. of Geography, Konkuk Univ.), 3am3am@naver.com

**** 건국대학교 지리학과 강의교수(Lecturer, Dept. of Geography, Konkuk Univ.), hydroyang@hotmail.com

***** 日本 独立行政法人 産業技術総合研究所 研究員(Researcher, AIST, Japan), marui.01@aist.go.jp

1. 머리말

지형형성 프로세스는 사면의 물순환과 밀접한 관계가 있으며 지표 공간을 이루는 대부분의 지형은 강우의 유출과정에 따라 변형된다(Okunishi, 1994). 구릉지 완사면에 발달한 곡두사면은 물의 배출통로인 동시에 유출특성에 기인한 각종 지형 프로세스가 작용하는 곳이다. 곡두사면의 지형형성 과정을 이해하기 위해서는 사면으로부터의 지중수 유출과정에 대한 명확한 규명이 전제되어야 한다(恩田裕一 등, 1996; 양해근·박종관, 2004).

Jones *et al.*(1997), Onda and Itakura(1997), 寺嶋智巳(2002) 등은 사면수문 현상 중 pipe flow와 같은 중간유출 성분에 의한 토양침식 중요성을 연구한 바 있으며, 양해근·박종관(2004)은 화강암 완사면에 발달한 'U자골(U-shaped Gol) 지형'의 수문지형학적인 의미를 분석, 지하수 이동이 완사면의 지형변화에 중요한 역할을 하고 있는 것으로 간주하고 'U자골' 지형의 곡두사면에 발달한 fissure와 pipe entrance가 토양층에 많은 수분을 공급하는 동시에 pipeflow를 통해

배출된 지중수가 토층 침식을 가속화시키는 중요한 요인을 규명하였다. 곡두사면의 강우-유출 프로세스에 대한 규명은 그동안 수문지형 연구분야의 중심과제로 인식되어 1960년대 이후 많은 연구가 이루어져 왔다(Kirkby, 1978; Maui, 1986; 丸井敦尚 1991; Anderson and Burt, 1991; 恩田裕一 등, 1996, 宮崎毅, 2000). 그러나 국내 지역에서는 이러한 연구가 아직 전무한 실정에 있다.

본 연구는 산림이 잘 보존되고 있는 경기도 구리시 동구릉 지역 내의 완사면에 발달한 0차곡 곡두사면을 대상으로 물순환과 지형형성 프로세스를 규명하기 위해 실시된 것이다. 본 연구를 위해 면적이 매우 작은 실험유역을 설정, 강우강도와 그 규모에 따른 곡두사면의 유출특성과 유출기구에 대한 메커니즘을 규명하고자 하였다. 본 실험유역은 무강수 시에도 지중수 유출이 항상 존재하는 곳으로 유역 내의 평탄한 곡두부 지역에는 평상시에도 지중수로 포화되어 있어 박종관·양해근(2004)에서 밝힌 이른바 'U자골' 지형과 매우 유사한 수문특성을 보이고 있는 곳으로 판단된다.

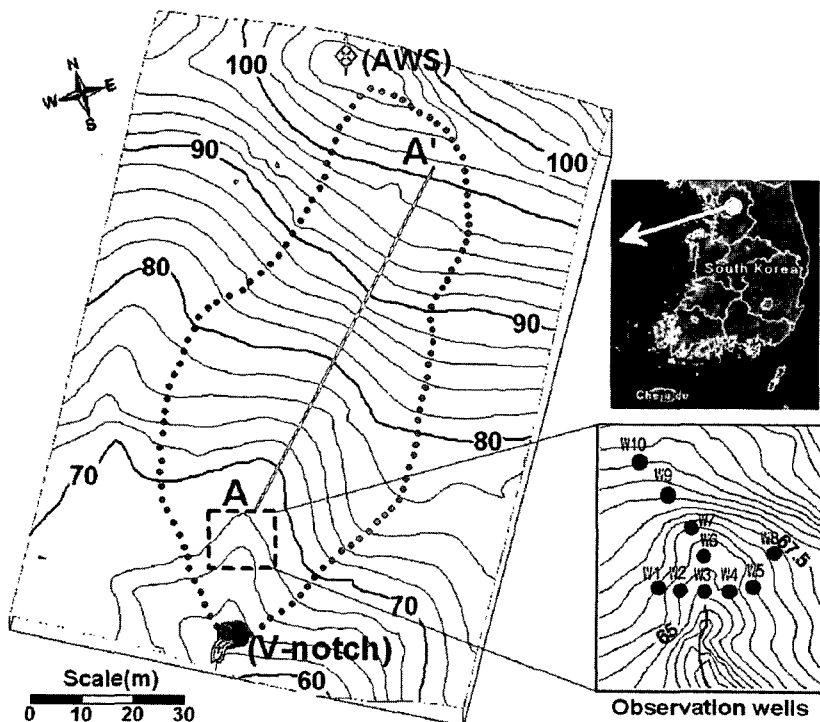
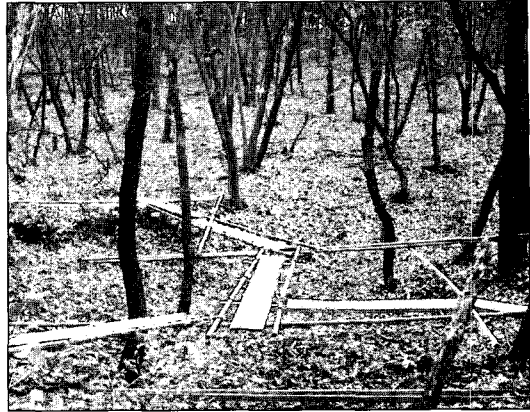


그림 1. 실험유역 개요(A-A': 관입시험 지점, 양해근 작성)



(a) 관찰로 설치 이전의 'U자골' (2004. 10. 22)



(b) 관찰로 설치 후 'U자골' (2005. 05. 28)

그림 2. 동구릉 실험유역 내 곡두부의 전경(조경민 촬영)

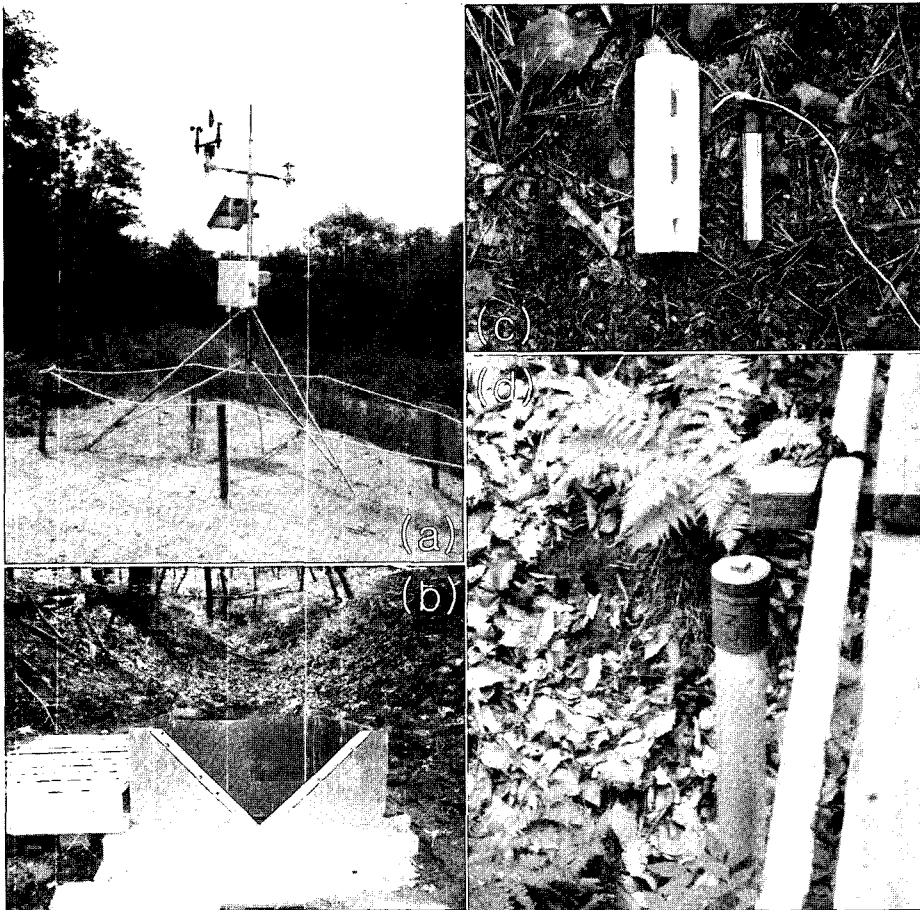


그림 3. 실험유역에 설치된 관측장비 사진(2005. 06. 11 조경민 촬영): (a) 자동기상관측시스템(AWS), (b) V-notch, (c) 압력식 수위계, (d) 관측정

2. 실험구역의 개요

실험구역이 위치한 동구릉 지역은 조선시대의 대표적인 왕릉²⁾으로서 경기도 구리시 인창동에 위치하고 있다(그림 1, 2). 실험구역은 동구릉 내 목릉의 북동사면에 위치한 소유역으로 구역면적은 0.0071km², 구역 내 해발고도는 61~106m이다(조경민, 2006). 실험구역은 인간의 간섭을 거의 받지 않는 산림지역으로서 실험구역 하류부에 'U자골' 지형이 발달하고 있어 물순환과 지형형성의 상호작용을 관측하는데 최적의 장소이다(양해근·박종관, 2004).

구리시를 포함한 경기 북동부지역은 대개 선캄브리아기의 변성암복합체로 구성되어 있으며, 특히 경기편암 지역은 풍화층이 잘 발달하여 토층의 심도가 깊다. 사면에는 유기물층이 잘 발달된 갈색산림토가 분포하고 있다(한국동력자원연구소, 1984). 동구릉 지역은 편마암류인 호상편마암이 주로 분포하고 있으며, 오랜 풍화작용과 식박작용을 받아 고도 200m 내외의 완만한 구릉성 산지를 이루어 약 5m 정도의 두꺼운 적갈색

토양층이 형성된 토산이다(이선·신상철, 2002).

기상청 자료(19712000년³⁾)에 의하면 인근지역의 연평균 기온은 12.2℃이고 연평균 강우량은 약 1,344mm이며 그 가운데 약 60%가 7~9월 사이에 내리고 있다. 토양 동결기간은 12~3월이며, 토양 동결 깊이는 45.7cm로 알려져 있다(민경현 등, 1974).

실험구역에는 그림 2와 같이 곡두사면의 지하수위와 수질을 측정하기 위한 10개의 관정과 구역 최하류 지점에 V-notch, 그리고 상류부에 AWS가 설치되어 있다(그림 1, 3).

3. 관측 및 자료분석

본 연구에서는 2005년 6월 11일부터 2006년 1월 17일까지 각 관측관정의 수위 변화 그리고 AWS의 강우량, 기온 자료를 대상으로 0차곡 곡저부와 곡두부 사면의 지중수위 변화 및 지중수 이동을 분석하였다. 각 관정에는 Diver사의 압력식 수위계(DIK-610A-

표 1. 20mm 이상의 강우사상(2005년 6월 11일 ~ 2006년 1월 17일)

강우사상	강우발생기간	지속시간(hr)	평균강우강도(mm/hr)	총강우량(mm)
1	2005.06.26 19:00 - 06.27 18:00	24	5.6	133.8
2	2005.07.01 01:00 - 07.01 11:00	10	9.8	107.4
3	2005.07.03 06:00 - 07.03 16:00	10	2.5	27.4
4	2005.07.08 22:00 - 07.09 12:00	14	3.1	46.2
5	2005.07.28 02:00 - 07.28 17:00	15	6.6	105.9
6	2005.08.01 00:00 - 08.01 14:00	13	2.8	41.6
7	2005.08.02 22:00 - 08.03 19:00	21	1.8	38.1
8	2005.08.10 14:00 - 08.11 12:00	22	5.9	137.4
9	2005.08.24 20:00 - 08.26 00:00	26	4.8	77.0
10	2005.09.13 06:00 - 09.13 23:00	17	5.2	93.9
11	2005.09.17 07:00 - 09.18 06:00	23	7.1	56.9
12	2005.09.21 09:00 - 09.22 00:00	15	2.4	38.3
13	2005.09.30 09:00 - 10.01 07:00	22	4.7	105.4
14	2005.10.06 02:00 - 10.06 06:00	4	5.3	26.6
15	2005.11.12 20:00 - 11.13 14:00	18	2.5	37.5

(출처; 조경민, 2006)

A2)가 각각 설치되어 있으며, 1시간 단위로 지하수와 강수량이 계측되도록 설정하였다(그림 3)⁴⁾. 한편 압력식 수위계는 실험구역 내 설치한 기압 측정용 Baro(Diver사 DiK-610A-A3)를 이용하여 기압보정을 실시하였다.

관측기간 동안의 총강수량은 1,453mm로서 평년값보다 109mm가 많았으며, 20mm 이상의 강우사상은 총 15회였다. 특히 100mm/일 이상의 집중호우는 6월과 8월, 9월에 각각 133mm와 144mm, 107mm 그리고 7월에 발생한 105mm와 107mm를 포함하여 총 5회였다. 50~100mm의 강우는 3회, 20~50mm의 강우는 7회 관측되었다(표 1). 본고에서는 상기 강우사상 중 7일 이내의 20mm이상의 선형강우가 존재하는 100mm 이상의 강우사상, 즉 2번(2005. 07. 01. 01 : 00 ~ 07. 01. 11 : 00)과 8번(2005. 08. 10. 14 : 00 ~ 08. 11. 12 : 00)을 대상으로 곡두사면의 지중수의 수리특성과 유출형태를 고찰함으로써 양해근·박종관(2004)에서 제기했던 호우시 지중수에 의한 곡두사면의 슬럼프 현상에 대한 평가를 뒷받침할 수 있으리라 사료된다.

그리고 곡두사면에 대한 토양층의 연직분포와 물리성을 파악하기 위해 실험구역의 종단(A-A') 즉 관정 W10 부근의 P1지점으로부터 사면 정상부를 연결하는 직선상의 기복 급변점을 대상으로 총 25개 지점에서 관입시험을 실시하였다⁵⁾. 한편 100cc 샘플캔을 이용하여 심도 20~30cm 사이의 토양을 채취하여 밀봉한 후 실험실에서 변수위법⁶⁾에 의한 수리전도율을 측정하였다.

4. 관측결과 및 고찰

1) 곡두사면의 토양층의 분포와 물리성

관정 설치시 수집된 boring 자료에 의하면 곡두사면은 유기물을 다량 포함하여 느슨한 표층부가 존재하고(O층), 그 하부에는 나무뿌리와 함께 비교적 함수율이 낮은 갈색산림토 그리고 함수율이 높고 조립질 담황색 토층이 나타나고 그 아래에는 포화된 세립

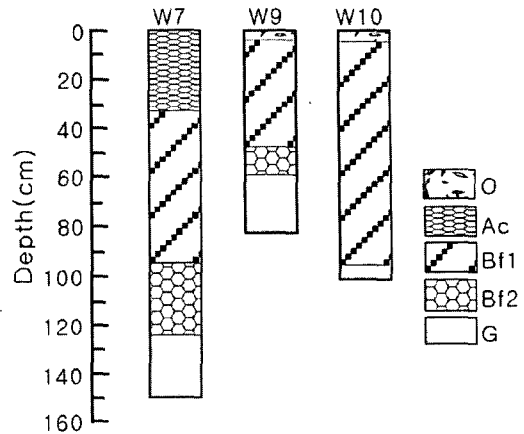


그림 4. 관측정의 지질주상도(양해근 작성); O는 유기물층, Ac는 분적토, Bf1은 함수율이 비교적 낮은 갈색산림토층, Bf2는 함수율이 높은 조립질 담황색층, G는 포화 세립질 회색층이다.

질 회색층이 관찰되었다(그림 4). 여기서 세립질 회색층의 분포는 박종관·양해근(2004)에서 지적한 바와 같이 사면에 침투한 지중수의 유동에 크게 관여하고 있을 것으로 판단되며, 특히 ‘U자골’ 지형형성을 좌우하는 중요한 요인 중의 하나로 판단된다. 따라서 관측정의 심도는 세립질 회색층을 관통하지 않도록 고려하였다.

한편, 곡두사면의 토양층의 분포와 토성의 물리적 특성을 파악하기 위하여 실시한 관입시험의 결과는 그림 5와 같다. 먼저 기반암 경계면으로 추정되는 토양 심도는 P3과 P4, P14, P18, P20, P22, P23, P24, P25지점에서 각각 81.7cm, 81.8cm, 92cm, 99.5cm, 85cm, 90.5cm, 60.5cm, 82.5cm, 86.3cm이었으며, 곡두사면을 따라 60.5~99.5cm로서 비교적 두껍지 않은 것으로 파악되었다. 그리고 상대적 고밀도 층은 주로 20~30cm과 40~80cm에서 나타났으며, 전자보다 후자의 평균 N값은 더 높았다. N값의 편차를 고려할 때 전자는 10cm부근에서 그리고 후자는 40cm 부근에서 토층의 상대적 밀도가 높은 것으로 나타났다. 이들 지점에 대한 boring자료가 없어 N값에 대한 수리특성을 파악할 수 없으나 측방류에 의해 형성된 조립질 토양이 존재할 경우 느슨한 표면상층부 보다 N값이 크게 나타나기도 한다(Bano *et al.*, 2000).

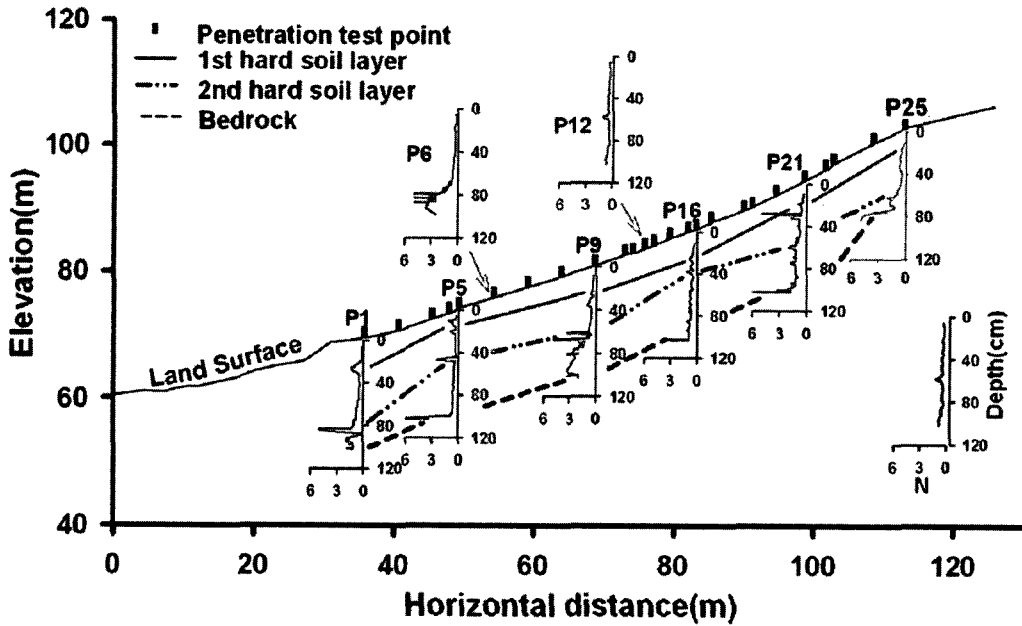


그림 5. 관입시험에 의한 토양층의 분포(조경민(2006)을 양해근 수정)

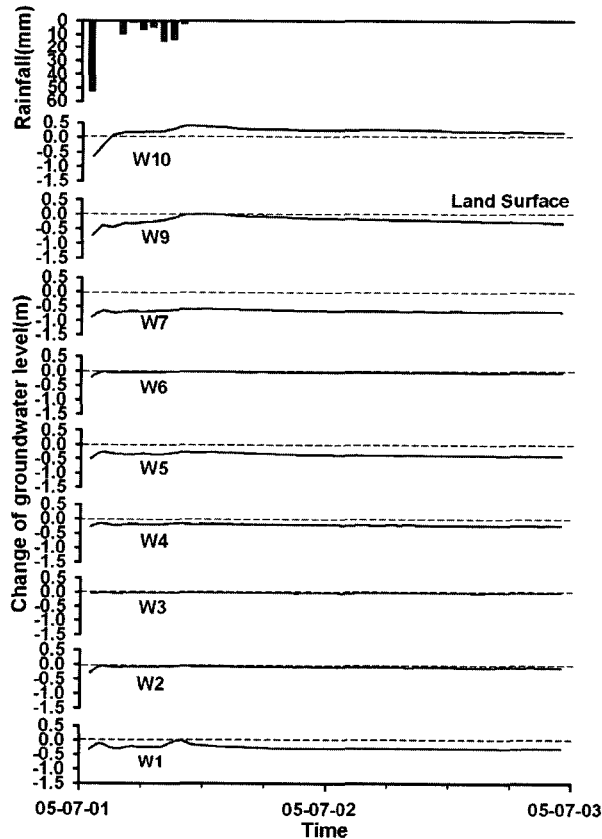


그림 6. 2005년 7월 1일 강우에 대한 지중수위 변화(조경민(2006)을 양해근 수정)

이선 · 신상철(2002)에 의하면 동구릉의 토성은 사양토가 주를 이루고 있어 모래함량이 매우 풍부하고 점토함량은 20% 이하이며 토양경도는 표토(0.9kg/cm²)가 심토(1.4kg/cm²)보다 양호하며 통기성은 표토(900ml/10sec)보다 심토(260ml/10sec)가 높은 것으로 보고되고 있다. 이는 투수성, 공극, 토양공기 등이 심토보다 표토가 양호한 것으로 임지 내 유기물 등 낙엽층에 의해 토양이 잘 보전된 것으로 생각된다.

2) 지중수위의 변화

그림 6은 강우사상 2번에 대한 곡두사면에 위치한 지중수위 변화를 나타낸 것이다. 강우는 2005년 7월 1

일 01시에 52mm의 강우를 시작으로 동일 11시까지 10시간 동안 107.4mm를 기록하였으며, 강우강도는 시간당 평균 9.8mm/hr로서 관측된 강우사상 중 가장 큰 강우강도를 기록하였다. 선행강우는 2005년 6월 26일부터 27일 사이에 133.8mm의 강우가 있었으며, 최대 강우강도는 시간당 5.6mm였다.

초기 강우 52mm가 내린 후 각 관측정의 지하수위 반응을 보면 W1, W2, W4, W5, W6, W7에서는 강우 전보다 각각 22cm, 24cm, 10cm, 24cm, 17cm, 21cm씩 수위가 급증한 반면, W3과 W9에서는 약 2cm, 그리고 W10은 6cm로 소폭 상승하는데 그쳤다. 특히, W3번의 경우 지중수가 집중되는 곡저부에 위치하여 항상 포화상태를 유지함으로써 측방류에 의한

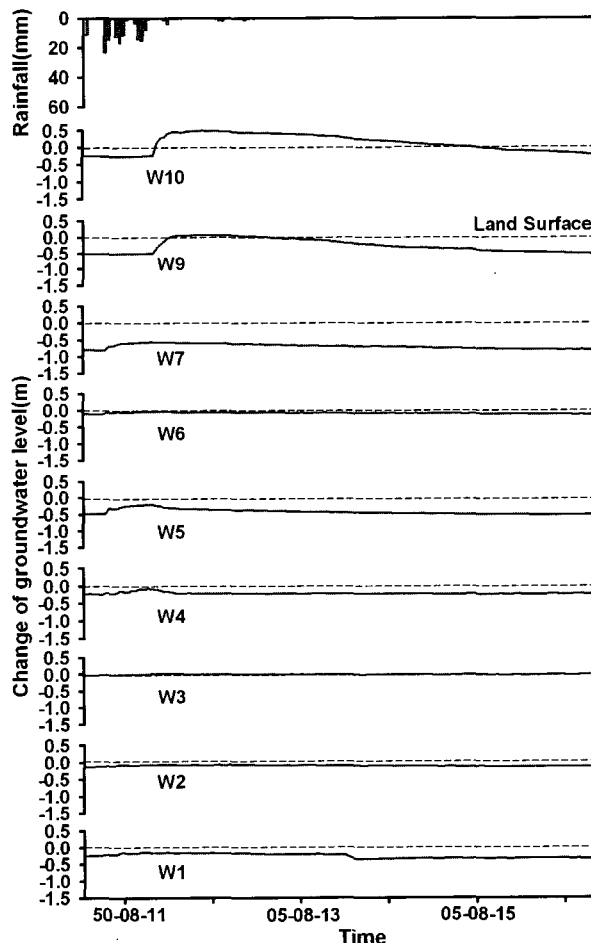


그림 7. 2005년 8월 10일 강우에 대한 지중수위 변화(조경민(2006)을 양해근 수정)

표면유출이 현저한 곳이기도 하다. 한편, 곡두사면 전면에 위치한 W9와 W10의 경우 배후사면에 침투한 성분이 토양층의 기저기복을 따라 흐르는 지중수 흐름이 집중되는 수문지형적 특성에 따라 초기 강우시 지중수위가 민감하게 반응한 것으로 판단된다. 그 정도는 상부에 위치한 W10에서 더 현저했으며 W9의 경우 누적강우량이 최대인 시점을 전후로 일시적으로 최고수위를 보였으나, 강우효과가 저감됨에 따라 수위가 하강하는 경향을 보였다. 그러나 상대적 수위 상승폭이 큰 W10에서는 강우효과가 유지되는 동안에는 지하수위 상승으로 인한 지표면 포화대의 확대에 기인하여 복귀류의 출현이 있었을 것으로 판단되는 장소이다.

그림 7은 강우사상 8번에 대한 지중수위의 변화를 나타낸 것이다. 총강우량은 137.4mm로서 강우사상 2번보다 약 30mm가 많으나, 평균 강우강도는 강우사상 2번보다 작은 5.9mm/hr를 기록했다. 선행강우는 2005년 8월 2일부터 3일 사이에 39.1mm의 강우가 있었으며 최대강우강도는 1.8mm/hr이었다.

강우형태는 강우사상 2번과는 달리 비교적 균일하게 내렸으며, 초기강우 10.9mm/hr 이후 10일 15시부

터 18시까지 소강상태를 유지하다가 10일 19시 23.6mm/hr를 시작으로 5시간 동안 67.7mm의 강우가 내렸다.

그 영향으로 W1에서 7cm, W2에서 5cm, W3에서 1cm, W4에서 10cm, W5에서 19cm, W6에서 8cm, W7에서 19cm, W9에서 18cm 그리고 최상부인 W10에서 38cm로 가장 높은 수위 상승을 나타냈다. 대체로 지중수의 변동추이는 강우사상 2번과 유사한 변동을 보였으나, W9와 W10에서는 누적 총강우량이 최대인 시점부터 수위가 급상승하여 강우사상 2번보다 상승폭이 크게 나타났으며 강우효과가 감소함에 따라 지중수위의 감소곡선의 기울기 역시 크게 나타났다. 특히, 지하수위 상승에 의한 지표면 포화대의 확대에 기인하여 복귀류의 출현범위가 W9까지 미치고 있으며 그 지속시간 역시 오래 유지되었던 것으로 사료된다.

현 시점에서는 강우시 곡두사면 상부에서 나타나는 지하수위 상승에 기인한 복귀류에 관한 현상이 경기편암지역 혹은 동구릉 완사면에서만 나타나는 특이한 현상인지 아니면 화강암지역을 포함한 다른 지역에서도 일어나는 일반적인 현상인지는 알 수 없으나 향후 U

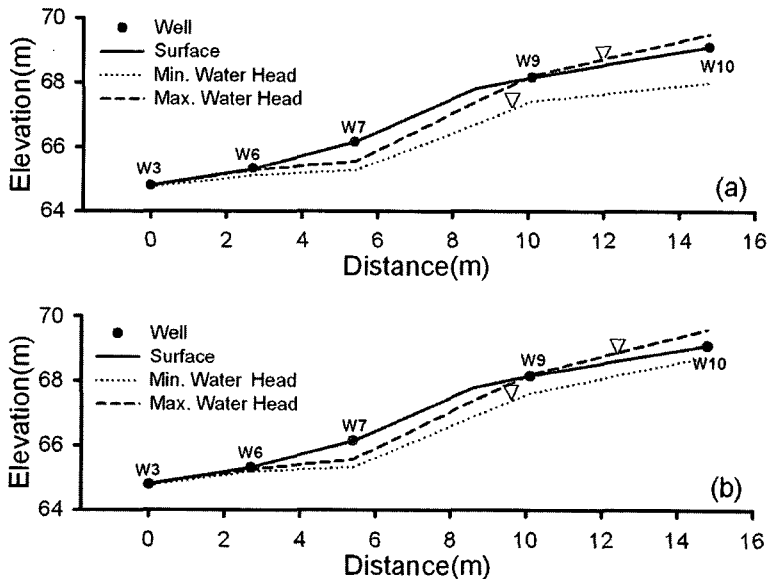


그림 8. 강우시 'U자골' 지형의 곡두사면의 지하수위 변화(조경민(2006)을 양해근 수정); (a) 2005. 07. 01, (b) 2005. 08. 10-11

자갈' 지형의 지형형성을 밝히는 중요한 요소 중의 하나임에 틀림이 없을 것으로 생각된다.

이상과 같은 내용을 정리하자면, 곡두사면의 지중수위 변동은 강우강도에 민감하게 반응하지만 총강우량과 선행강우 효과에 의해서도 크게 좌우되고 있다. 그 효과는 곡두사면 상부에서 가장 현저하게 나타난다. 특히, 곡두사면 상부에서 나타나는 지중수위 상승에 의한 복귀류 출현은 총강우량과 선행강우 효과에 의해서 규모와 지속시간이 결정되는 것으로 사료된다. 한편, 강우시 지중수의 유출특성 특히 곡두사면에서 나타난 수리경사(potential gradient)의 변동은 곡두부의 지형발달과 변형을 일으키는 요인으로 고려해 볼 수 있다(양해근 · 박종관, 2004).

3) 곡두사면의 수두변동과 비유속 분포

그림 8은 2005년 7월 1일 그리고 2005년 8월 10일-11일에 있었던 강우사상 중 곡두사면의 지중수의 최대 수두(water head)와 최저 수두를 각각 나타낸 것이다. 두 강우사상에 있어 곡저부 즉 W3과 W6의 경우 그 변동 폭은 크지 않으나 곡두사면으로 갈수록 수두변화량이 커진다. 이러한 현상은 곡저부에서도 유사하게 나타난다. 즉 곡저 중앙지점인 W3을 중심으로 W2에서 W1 쪽으로, 그리고 W4에서 W5로 향할수록 그 변동 폭은 점차 커진다. 그리고 지중수의 흐름을 추적하기 위하여

그림 6과 7의 결과에 사면 토양층의 투수계수를 적용하여 강우사상에 대한 구간별 비유속(specific velocity; cm/sec)을 계산하였다. 그 결과는 표 2와 같다.

즉 곡저부의 지중수 흐름보다 곡저부로 향하는 사면의 흐름이 상대적으로 빨라 곡저 중앙을 중심으로 항상 포화대를 유지할 수 있는 조건을 제공하고 있다. 비유속이 가장 큰 구간은 곡두사면에 해당하는 W7-W9이다. W7-W9구간에서는 두 강우사상 모두 최고 수위시 동일하게 2.01×10^{-6} cm/sec의 비유속을 나타내고 있다. 아직 많은 강우사상에 대한 자료가 축적되지 않아 단정하기 어렵지만, 동구릉 실험유역에 형성된 곡두사면의 전단응력(shear stress)의 변화를 초래할 수 있는 지중수의 유출 임계값일 가능성을 조심스럽게 제기 해본다. 대체로 구간별 비유속은 강우효과가 나타나기 이전의 최저수위보다 강우효과가 개입한 이후 최고수위에서 비유속이 크게 나타나고 있으며, 곡저부보다 사면방향 특히 곡두사면에서 곡저부로 향하는 W7-W9, W9-W10구간에서 비유속의 변동이 크게 나타난다. 이는 양해근 · 박종관(2004)에서도 지적된 바가 있다. W9-W10에서는 일부 측방류에 기인하는 지표유출이 발생하는 곳으로 'U자골' 사면부보다 다소 작은 비유속을 나타낸다. 두 강우사상에 대한 최저 수위시 비유속을 비교하면 선행강우 효과에 의해서 지하수면이 높은 8월이 7월보다 대체로 크게 나타났다.

표 2. 강우시 구간별 지중수의 비유속(단위: cm/sec)

관정구간	2005년 7월 1일		2005년 8월 10일 11일	
	최저수위 시	최고수위 시	최저수위 시	최고수위 시
W1-W2	1.34×10^{-6}	1.16×10^{-6}	1.21×10^{-6}	1.24×10^{-6}
W2-W3	0.08×10^{-6}	0.36×10^{-6}	0.30×10^{-6}	0.33×10^{-6}
W3-W4	0.22×10^{-6}	0.29×10^{-6}	0.27×10^{-6}	0.26×10^{-6}
W4-W5	0.77×10^{-6}	1.03×10^{-6}	0.74×10^{-6}	0.96×10^{-6}
W3-W6	0.48×10^{-6}	0.67×10^{-6}	0.57×10^{-6}	0.61×10^{-6}
W6-W7	0.21×10^{-6}	0.35×10^{-6}	0.19×10^{-6}	0.41×10^{-6}
W7-W9	1.65×10^{-6}	2.01×10^{-6}	1.75×10^{-6}	2.01×10^{-6}
W9-W10	0.44×10^{-6}	0.67×10^{-6}	0.84×10^{-6}	0.70×10^{-6}

(출처; 조경민, 2006)

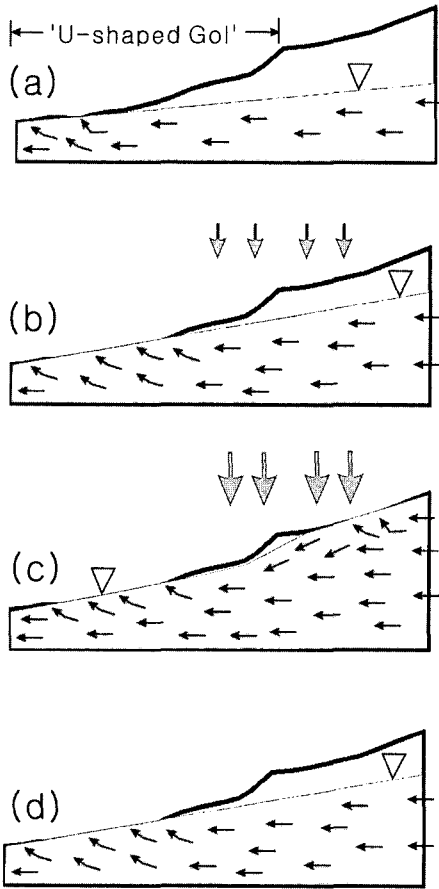


그림 9. 동구릉 실험유역 내 'U자골' 곡두사면의 지중수의 흐름에 대한 모식도(양해근 작성); (a) 강우이전의 지중수의 흐름, (b) 강우 초기 곡저부의 지하수위 상승, (c) 강우효과에 의한 지중수의 저류량 변화와 곡두사면 상부의 지중수에 기인한 표면유출, (d) 강우 후 강우효과 감소로 인한 지하수위 감소

4) 곡두사면의 지중수의 이동

본 실험유역 내 곡부(谷部) 중 항상 포화대를 이루고 있는 곡저부 지점은 환원작용에 의해서 형성된 회색 세립질 불투수층이 발달하고 있으며(박종관·양해근, 2004; 양해근·박종관, 2004), 곡두부 지점에서도 지표로부터 약 60~130cm 사이에 회색 불투수층이 관찰된다(그림 3, 4). 이러한 불투수층은 지중수의 흐름에 큰 영향을 미치고 있는 것으로 판단되며, 곡두부의 지형발달에도 크게 관여하고 있다고 사료되는 바 모든 관측정의 케이싱(casing) 심도는 불투수층에 접하도록

고려하였으며, 스크린(screen)은 그 상부까지 위치하도록 설치하였다. 따라서 본고에서 기술하고 있는 지중수위는 회색 불투수층 상부에 존재하는 불포화대의 지중수를 의미하고 있다. 그림 6과 7, 그리고 그림 8의 결과를 통해 강우시 'U자골' 곡두사면의 지중수 흐름은 그림 9와 같은 모식도로 설명할 수 있다.

곡두부 지중수의 흐름은 유역사면에 함양한 지중수에 의해 유지되며 곡저부에 집중된 지중수에 의해 곡저 말단부에 포화대가 형성되고 있다. 그러나 강우시 지표면에 침투한 강우에 의해 토양 간극수압의 증가와 초기 강우효과로 인한 수위상승은 곡저부의 포화대를 확대시키고 누적 강우량이 커지거나 강우강도가 클 경우 사면 하부에 발달한 불투수층에 의해서 사면이 쉽게 포화되어 부분적으로 복귀류에 의한 Horton류가 발생한다. 특히, 곡두사면의 상부가 포화되면 수두차가 더욱 커지는 곡두사면에서 빠른 측방류가 발생할 것으로 생각된다. 강우효과가 약화되어 점진적으로 지하수위가 저하되면 사면에 발달한 일시적인 Horton류가 소멸됨과 동시에 곡두사면을 따라 흐르던 측방류도 점차 약해질 것이다.

다시 말하여, 곡저부는 상시 포화되어 있기 때문에 강우가 발생하더라도 지하수위 변동이 거의 일어나지 않아 비유속이 비교적 안정되어 있는 반면 지중수위 변동이 큰 곡두사면에서 비유속이 큰 폭으로 변화한다. 즉, 사면 저류량의 증가와 함께 비유속의 증가는 지중수의 출구 역할을 담당하는 'U자골' 곡두부 지형에 큰 압력을 증대시킬 것으로 보인다. 이는 지중수의 운동에너지를 증대시키고 곡두사면 내 토층의 미립물질을 이동을 용이하게 하여 토층 내의 기존 공극을 확대시키거나 새로운 공극을 형성하는 주요 요인으로 작용할 것으로 생각된다. 이처럼 곡두사면의 비유속 증가나 저류량 변동은 사면안정성에 영향을 주는 요인으로 작용하며 곡두사면 미지형을 변화시키는 중요한 요소이다.

6. 결론

본고에서는 20mm 이상의 선행강우가 존재하는 100mm 이상의 강우사상에 대한 0차곡 곡두사면의 지

지중수의 변동과 수리전도율의 변화를 통하여 지중수의 흐름을 추정하였다. 아직 본고에서 얻었던 결과가 완사면 곡두부 지형변화를 설명할 수 있는 일반적인 현상으로 간주할 수 없으나 경기편암지역 또는 동구릉 완사면 실험유역에서 관측된 강우시 지중수의 흐름에 대해 다음과 같이 기술할 수 있다.

- 1) 곡저부의 경우 강우시 지하수위 변화가 거의 없으나 곡두사면과 그 상부에서는 총강우량과 강우강도에 의해서 크게 변화하고 있다. 또한 지하수위 변동 폭은 선행강우에 의한 지중수위, 총강수량 그리고 강우지속시간과 밀접한 관계가 있는 것으로 생각된다.
- 2) 강우시 형성된 사면의 유출특성, 즉 지하수위 상승과 함께 출현하는 복귀류에 의한 포화지표류의 발생과 곡두사면을 따라 빠르게 흐르는 측방류는 곡두부의 'U자골'의 지형발달에 중대한 영향을 미치고 있을 것으로 판단된다.

향후 본고에서 다루지 못했던 강우강도별, 강우사상별, 선행강우 규모별 지중수의 변동에 관한 연구는 좀 더 충분한 통계자료를 확보해 구체적인 논의를 진행할 예정이다.

謝辭

본 논문은 건국대학교 대학원 지리학과 조경민의 석사학위 논문을 재구성한 것이다. 본 연구를 위해 재정 지원을 해 준 건국대학교와 일본지질조사소를 비롯해 실험유역 설치에 도움을 준 문화재청 동구릉관리사무소 관계자 여러분께 깊은 감사를 드린다. 또한, 현장조사에 함께 참여한 건국대학교 이과대학 지리학과 대학원생과 학부생들에게도 고마움을 전하는 바이다.

註

- 1) '골' 지형은 대체로 완만하고 사면발단부에서 구릉지 완사면을 향해 발달해 있으며 곡두부에서 하류쪽으로 조망할 때 U자형의 평탄한 작은 골짜기를 이루고 있다는 점에서 박종관·양해근(2004)에서 'U자형 골' 지형, 양해근·박종관

(2004)에서 'U자골' 지형으로 부르고 있으나 본고에서는 'U자골' 지형으로 통일하여 부르려 한다. 박종관·양해근(2004)에 의하면 'U자골' 곡저부는 지하수면과 거의 일치하여 포화대를 유지하고 있으며, 곡두사면에는 soil pipe군이 관찰되어 강우시 pipeflow와 같은 중간유출 성분에 의해서 'U자골' 지형이 발달된다고 보고하고 있다.

- 2) 동구릉은 조선 태조의 건원릉과 14대 선조와 비 의인왕후, 계비인 인목왕후의 목릉, 21대 영조와 계비 정순왕후의 원릉 등 9개의 능에 17위의 왕과 왕비의 묘가 분포하고 있다. 문화재관리국은 1970년 5월 26일 능 9기와 함께 동구릉 주변지역(1,960,491m²)을 사적 제193호로 지정하였다.
- 3) 지난 30년간 서울기상청자료에 이용하여 산출한 것이다.
- 4) AWS의 강우량은 시간 강우량이지만, 기온과 지온, 풍향과 풍속, 일사량은 시간 평균값이다.
- 5) 관입시험계로 측정된 자료는 다음과 같은 식을 이용해 보정하였다.

$$N = \frac{\text{타격 횟수(회)}}{\text{후과입 깊이} - \text{선관입 깊이(cm)}}$$

여기서 N값은 토층을 1cm 관입하는데 필요한 타격횟수이다.

- 6) 변수위법을 이용한 수리전도도(K, cm/s)의 산정식은 다음과 같다.

$$K = \frac{d_i^2}{d_c^2} \cdot \frac{L}{t} \ln \frac{h_0}{h}$$

여기서 L은 샘플시료 길이(cm), h₀는 튜브의 초기수두(cm), h는 튜브의 최종수두(cm), t는 h₀로부터 h까지 변하는데 걸린 시간(sec), d_i는 튜브의 내경(cm), d_c는 시료 용기의 내경(cm)이다.

文獻

민경현·고성하·박태영, 1974, "산림기상에 관한 연구," 임업연구, 21, 231-242.

박종관·양해근, 2004, "U자형 골' 곡두사면의 토양수분 분포와 유출특성," 대한지리학회지, 39(1), 45-55.

양해근·박종관, 2004, "화강암 지대 완사면에 발달된 'U자형 골' 지형의 수문지형학적 의의 -전라북도 고창군 지역을 사례로-," 한국지형학회지, 11(3), 63-74.

이선·신상철, 2002, "전통 사적공간의 경관관리를 위한 생태환경 분석," 한국환경생물학회, 20(4), 366-377.

조경민, 2006, 구릉지 사면에서 지중수 거동이 지형변화에 미치는 영향, 건국대학교 대학원 석사학위 청구논문.

- 한국동력자원연구소, 1984, 전국사면 불안정 지역분포도 (서울편).
- 宮崎毅, 2000, 環境地水學, 東京大學出版會.
- 寺嶋智巳, 2002, "0次谷谷頭凹地におけるパイプ流に影響された水および土砂の流出," 地形, 23, 511-535.
- 恩田裕一・奥西一夫・飯田智之・辻村眞貴 1996, 水文地形學—山地の水循環と地形變化の相互作用—, 古今書院(東京).
- 丸井敦尚, 1991, " 帶狀に堆積した斜面における降雨浸透プロセスと地中水の貯留機能," 地理評論, 64(3), 145-166.
- Anderson, M.G. and T.P. Burt, 1991, *Process Studies in Hillslope Hydrology*, John Wiley and Sons.
- Bano, M., G. Marguis, B. Niviere, J.C. Maurin and M. Cushing, 2000, Investigating alluvial and tectonic features with ground-penetration radar and analyzing diffractions pattern, *Journal of Applied Geophysics*, 43, 33-41.
- Horton, R. E., 1940, An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity, *Soil Science Society of America, Proceedings*, 4, 399-417.
- Jones, J.A., J.M. Richardson and H.J. Jacob, 1997, Factors controlling the distribution of piping in Britain: a reconnaissance, *Geomorphology*, 20, 289-306.
- Kirkby, M.J.(ed.), 1978, *Hillslope Hydrology*, John Wiley and Sons.
- Maui, A., 1986, Subsurface water storage and runoff processes in a layered hillslope, University of Tsukuba, Unpublished doctorate thesis.
- Okunishi, K., 1994, Concept and methodology of hydrogeomorphology, *Transactions*, 15(A), 5-18.
- Onda, Y. and N. Itakura, 1997, An experimental study on the burrowing activity of river crabs on subsurface water movement and piping erosion, *Geomorphology*, 20, 279-288.
- 교신: 박종관, 143-701, 서울 광진구 화양동 1, 건국대학교 이과대학 지리학과(이메일 : jkpark@konkuk.ac.kr, 전화 : 02-450-3431)
- Correspondence : Jong-Kwan Park, Dept. of Geography, College of Science, Konkuk University, 1 Hwayang-dong, Gwangjin-Gu, Seoul, 143-701 Korea(email : jkpark@konkuk.ac.kr, phone : +82-2-450-3431)

최초투고일 06. 11. 17.

최종접수일 06. 12. 18.