

# 'U자형 골' 곡두사면의 토양수분 분포와 유출특성\*

박종관\*\* · 양해근\*\*\*

## Runoff Characteristics and Soil Moisture Distribution of 'U-shaped Golf' Valley Head Slope\*

Jong-Kwan Park\*\* and Heakun Yang\*\*\*

요약 : 본 논문은 물순환 기구와 지형 발달에 대한 상호작용을 정량적으로 평가하기 위한 일환으로 조사한 내용 중 'U자형 골' 곡두사면의 강우-유출특성과 수분분포 그리고 지중수이동에 관하여 기술하였다. 그 내용은 다음과 같이 요약할 수 있다.

'U자형 골' 전면에 나타난 fissure와 파이프 입구는 직접유출 성분을 토양 파이프 혹은 토양층에 많은 수량을 유입시킴으로서 토양층의 침식을 가속화시켜 토양 파이프의 확대와 발달에 기여할 것으로 간주된다. 그리고 토양에 침투한 대부분의 강우가 파이프류로 유출되고, 나머지 일부가 지하수에 공급됨으로서 강우강도가 작은 강우 이벤트에도 선행강우의 효과에 의해서 지하수위와 파이프류가 민감하게 반응한 것으로 판단된다. 따라서 토양 파이프는 'U자형 골' 곡두사면의 물질수지를 좌우하는 중요한 요인이라 할 수 있다. 그리고 지중수의 비유속은 곡두사면 하단부보다 상단부에서 큰 변화를 나타내고, 강수량에 따라 곡두사면 상단부에 상대적으로 큰 비유속이 부가됨에 따라 'U자형 골' 곡두사면이 상부로 후퇴하는 조건을 제공한다고 생각할 수 있다.

주요어 : 토양수분, 파이프류, 지하수위, 유출, U자형골

**Abstract** : The paper describes the rainfall-runoff, soil moisture distribution and subsurface flow of 'U-shaped Golf' valley head slope to evaluate quantitatively the interaction between the water circulation system and geomorphic development. The findings are as follows:

The fissure and the pipe entrance in front of 'U-shaped Golf' introduce a lot of direct runoff into either the soil pipe or the soil layer to accelerate the erosion of the soil layer, so that they are likely to contribute to the expansion and development of the soil pipe. Most of soil water is to be drained in pipe flow, while some of remaining soil water is to be fed into groundwater. Therefore, low rainfall intensity is thought to let both the groundwater level and the pipe flow react sensitively by the effects of the precedent rainfall even at events: As a result, the soil pipe is said to be an important factor having influence upon the material balance of 'U-shaped Golf' valley head slope. On the other hand, the groundwater shows greater specific flux at the top than at the bottom, and relatively larger specific flux is applied to the top to make 'U-shaped Golf' valley head slope go back to the top.

Key Words : soil moisture, pipe flow, groundwater level, runoff, U-shaped Golf

### 1. 서론

지형은 지표물질의 변위 혹은 변형, 물질의 화학

적 구조가 변함에 따라 변화한다(佐藤久·町田洋, 1990). 이러한 지형 프로세스(geomorphological processes)는 물순환계와 밀접한 관계가 있으며, 지

\* 이 논문은 2003년도 건국대학교 학술진흥연구비의 지원을 받았음.

\*\* 건국대학교 이과대학 지리학과 교수(Professor, Department of Geography, Konkuk University) jkpark@konkuk.ac.kr.

\*\*\* 전남대학교 호남문화연구소 전임연구원(Researcher, Honam Culture Research Center, Chonnam National Univ.) yanghk@chonnam.ac.kr.

표 공간을 이루는 대부분의 지형은 지상에 공급된 강우의 유출과정에 기인하여 형성된다고 말할 수 있다. 특히 곡두사면(谷頭斜面)은 유수의 배출통로인 동시에 유출특성에 기인한 각종 지형 프로세스에 의해서 형성된다(恩田裕一 등, 1996). 따라서 곡두사면의 지형 프로세스를 이해하기 위해서는 사면유수(斜面流水)의 유출과정에 대한 명확한 규명이 전제가 되어야 한다(Scoging, 1982; 寺嶋智巳 2002). 이러한 연구는 Jones(1981; 1997)와 Bryan and Yair(1982), Jones *et al.*(1997), Onda and Itakura(1997), 塚本良則 등(1988), Uchida *et al.*(1999), Carey and Woo(2000), Sasaki *et al.*(2000), Holden and Burt(2002), Zhu *et al.*(2002) 등의 사면수문현상 특히 파이프플류(pipe flow)와 토양침식 간의 상호작용에 대한 연구를 중심으로 괄목할 만한 연구 성과를 이루어왔다.

그러나 그동안 국내 지형연구는 정성적인 연구 방법에 의한 지형분류와 지형 발달사 등에 대한 연구가 그 중심을 이루어 왔으며, 일부 하천수계의 수리기하학적인 연구가 행해졌으나, 이 또한 지형형성 기구를 기술하고 있지는 않다(김중욱, 1996). 최근 田中幸哉 등(2000)에 의해 화강암과 편마암 지역의 지형적 특성과 유출특성에 관한 비교연구가 시도되고 있으나, 사면발달에 대한 정량적인 평가는 아직 얻지 못하고 있다. 그리고 가시적 지형변화가 활발하게 일어나고 있는 토사유출에 의한 지형변이나 사면의 미지형발달에 대해서도 거의 간과되어 왔다.

최근 빈번하게 발생하는 대규모 토사유출과 산사태는 지형변화에 대한 사회적 관심을 불러일으키는 계기가 되고 있으며, 이러한 현상을 규명하기 위해서는 물순환과 지형변화에 대한 상호작용의 이해가 필요하다(恩田裕一 등, 1996). 그리고 21세기 환경과학으로서 지리학이 거듭나기 위해서는 인접 학문 간의 긴밀한 협동연구가 필요하고, 이를 충족시키기 위해서는 지리학의 과학화와 이론적인 배경이 그 전제가 되어야 한다. 이런 관점에서 볼 때 지형발달에 관한 프로세스 연구는 이론과학으로서 토대를 마련하는데 큰 전환점이 될 수 있다고 사료된다.

이러한 점을 고려하여 2001년 2월부터 물순환 기구와 지형 형성에 관한 상호작용을 정량적으로

평가하기 위한 일환으로 전라북도 고창군 무장면 일대를 대상으로 조사지역(St. 1~6)을 설치하였다. 그리고 연구대상 지역으로 선정한 이유는 다음과 같다.

첫째, 현재 가시적인 지형변화를 겪고 있는 완사면이 존재하고, 둘째 완사면 곡저부 사면에서 관찰되는 미지형은 지중수의 유출과 깊은 관계가 있는 것으로 사료된다. 셋째 논으로 이용되고 있는 곡저부는 항시 물로 포화되어있으며, 넷째 대부분의 완사면은 비교적 투수성이 좋은 화강암풍화토로 이루어졌다는 점에서 물순환과 지형형성간의 상호관계를 이해하는데 최적의 장소라 할 수 있다.

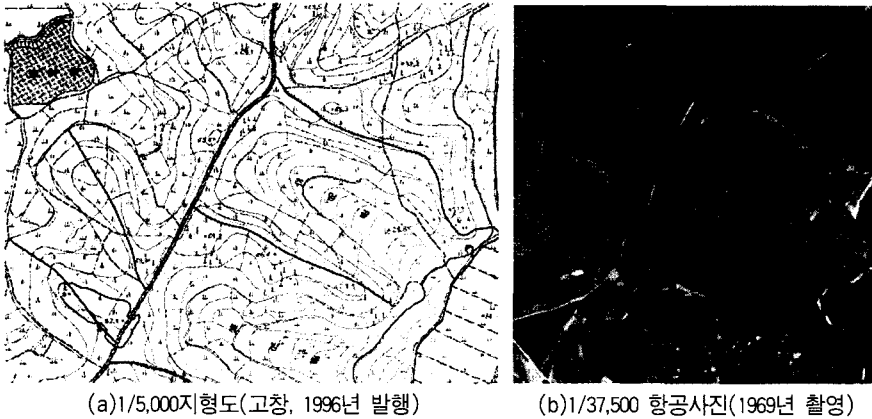
본 고에서는 전라북도 고창군 무장면 일원의 'U자형 골' 지형 중에 보존상태가 양호한 St.2지점을 대상으로 곡두사면의 강우-유출특성, 수분분포와 이동을 중심으로 'U자형 골' 지형의 사면유수에 관하여 기술하고자 한다.

## 2. 연구지역의 개요

본 연구지역은 우리나라 서남부에 위치한 전라북도 고창군 무장면 일대이다. 이 지역은 그림 1에서 보는 바와 같이 전형적인 노년기 구릉지역으로서 중생대 쥐라기에 형성된 흑운모 화강암이 넓게 분포하고 있다(이병주 · 이승렬, 2001). 흑운모 화강암은 대체로 풍화에 약해, 낮은 잔구를 이루어(오경섭, 1989; 이병주 · 이승렬, 2001) 주변지역에서 기반암의 노두를 볼 수 없으나, 깊은 풍화층의 노두는 공사장 어디에서나 손쉽게 볼 수 있다(그림 2).

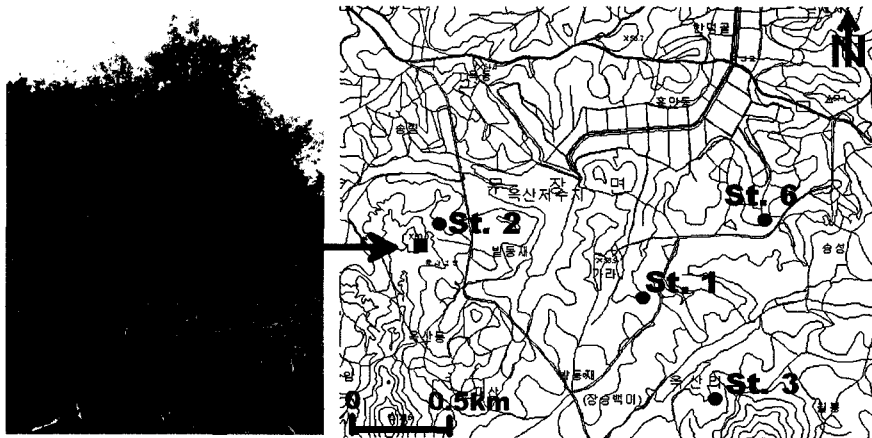
이 지역은 1/5,000 지형도(그림 1(a))에서 보는 바와 같이 완만한 구릉지 사이에 '주영골', '팽방골', '가라골', '옥산골' 등과 같은 '골' 지명을 흔히 볼 수 있다. 이처럼 곡저부가 평탄한 소규모 골짜기는 개간이전에 촬영된 항공사진(그림 1(b))에서 더욱 뚜렷하게 확인할 수 있다. 이들 '골' 지형은 하천 수계의 발달이 미약하지만, 곡저부 혹은 곡두사면에서 용출되는 지하수를 이용하여 일정한 크기의 계단식 논으로 이용되고 있다. 실제 논은 계절에 관계없이 물로 포화되어 있는 이른바 '수렁'을 이루고 있다.

'골' 지형은 대체로 완만한 사면의 말단부에서



(a) 1/5,000 지형도(고창, 1996년 발행) (b) 1/37,500 항공사진(1969년 촬영)

그림 1. 'U자형 골' 지형



(a) 흑운모 화강암 풍화층(2003. 05. 05 촬영) (b) 조사지역(1/25,000 수치지도에서 발취)

그림 2. 조사지역(st. 2)과 흑운모화강암 풍화층 노두

구릉지의 정상부를 향해 발달해 있으며, 곡두부에서 하류 쪽을 조망할 때 마치 U자형의 평탄한 작은 골짜기를 이루고 있어 본고에서는 'U자형 골(U-shaped Goll)' 지형이라고 부르려고 한다. 골 지형은 다음과 같은 지형적 특징이 관찰된다.

먼저 'U자형 골' 곡저부의 평탄면은 지하수면과 거의 일치하여 물로 포화되어 있다. 그리고 곡두부는 흔히 풍부한 지하수의 용출량을 이용하여 농업용수를 위한 작은 못으로 이용되고 있다. 곡두사면에는 많은 토양 파이프(soil pipe)가 관찰된다. 자연형태의 'U자형 골' 곡두사면에서는 몇 개의 평탄한 단(stage)으로 이루어져 있으며, 사면하류의 단일수록 대부분 물로 포화되어 있어, 그 하

부에 환원층이 발달해 있다. 곡두사면의 그 전면에는 파이프의 입구(pipe entrance)와 fissure가 발달해 있다.

이러한 지형적 특성에 비추어 볼 때 고창군 지역에서 볼 수 있는 '골' 지형은 풍부한 지중수의 순환 즉 지중수의 유출기구와 밀접한 관계가 있음을 가정할 수 있다. 또한 본 연구의 출발점은 지표수와는 달리 지중수의 침식과정에서 형성된 지형의 대부분은 둥근모양의 평평한 곡저부의 발달이 현저하다는 물리적 현상에 두고 있다(De Vries, 1976; 角田清美, 1980; 寺嶋智巳·佐倉正池, 1993).

### 3. 연구방법

강우-유출특성과 곡두사면의 수분분포와 이동을 조사하기 위하여, 조사지점 St. 2에 그림 3과 같이 지하수 관측용 관정(Well 1~5)을 설치하였다. 먼저 Well 1~4는 사면에 형성된 평탄면 즉, 1 stage에 Well 1과 Well 2, 2 stage에 Well 3, 3 stage에 Well 4를 2003년 6월 7일에 각각 설치하였으며, 금년 여름철에 긴 장마로 인해 곡두사면 상부에 새롭게 형성된 단(4 stage)에는 2003년 10월 10일에 Well 5를 설치하였다. 이들 관측정의 케이싱(casing)<sup>1)</sup> 심도는 1.5~2.5m이며, 스크린(screen)<sup>2)</sup>은 케이싱 최하부로부터 지표부근까지 5cm 간격으로 설치했다. 지하수위 측정은 접촉식 수면계를 이용하여 거의 매주 1회씩 계측을 하고 있다.

곡두사면의 수분분포에 관한 조사는 2003년 5월 5일 2:00p.m.~4:30p.m. 시 사이에 St. 2지점의 'U자형 골' 지형의 곡두사면을 따라 50cm 간격으로 구분하고, 토양수분계를 이용하여 지표로부터 10cm 깊이의 지점의 수분포화도를 각각 측정하였다. 그리고 지중수의 교류 혹은 흐름을 추정하는 간접적인 조사수단으로 각 구간마다 깊이 10cm와

50cm 지점에 대해 총 42지점의 지온을 측정하였다. 지온조사는 일(日) 중에 지온변화가 가장 적고, 시간변화로 인한 측정편차를 최소화할 수 있도록 사전에 측정지점간의 위치를 설정해두었으며, 지온계 센서부분의 민감도를 고려하여 측정시간은 지점 당 2분 이상으로 설정하였다.

St. 2지점의 곡두사면에 대한 강우-유출관계는

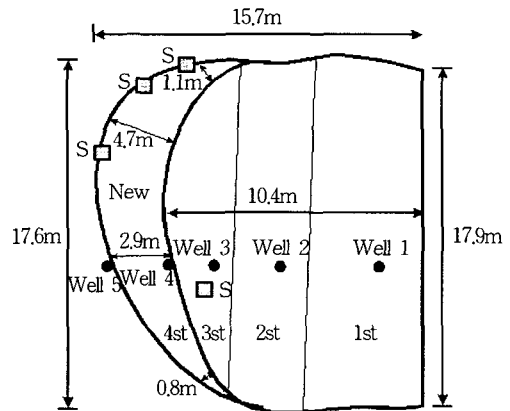


그림 3. St.2 지점에 설치된 지하수 관측정(Well 1~5)과 지형변이(New Stage: 4st)

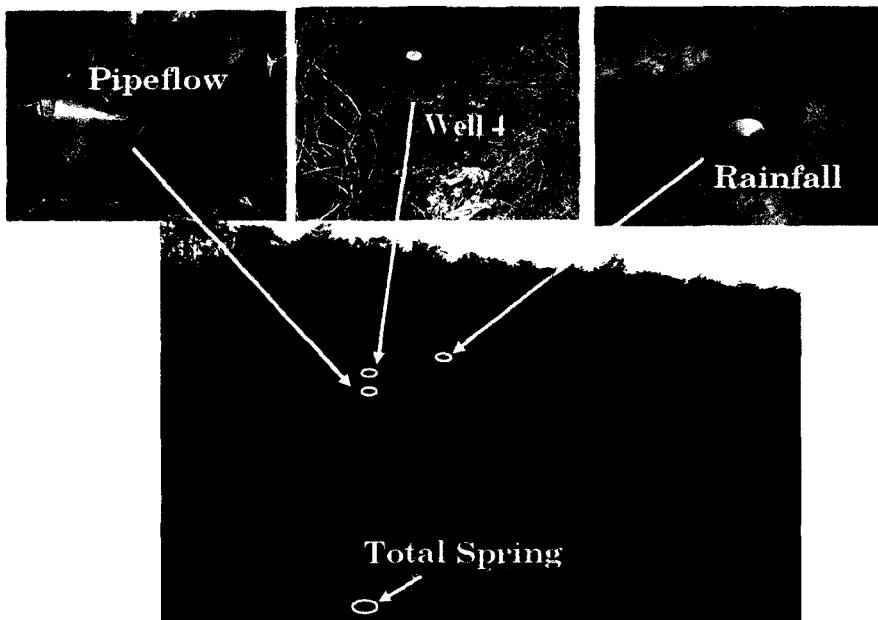


그림 4. St. 2지점의 강우-유출 조사지점

2003년 8월 24일부터 25일 사이에 내린 강우를 대상으로 사면의 총 용출량(total spring)과 지하수위 변화, 토양 파이프의 유출자료를 이용하여 분석하였다. 여기서 사면의 총 용출량은 곡두사면 전체에서 용출하는 지중수(일부 강우시 발생하는 직접유출량을 포함)의 유출량으로 간주하였으며, 총 용출량과 함께 EC, pH, 수온의 변화를 동시에 측정했다. 그리고 Well 4에서는 지하수위의 변동과 지하수의 EC, pH, 수온변동을 측정하였으며, Well 4하단부에 위치한 토양 파이프에서는 파이프류의 유출량과 수온, 수질(pH, EC,  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $NO_2^-$ ,  $NH_4^+$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ , SS)의 변화를 관측하였다. 이 기간 동안 강수량은 사면 상단부에 간이 관측지점을 설치하여 시간당 강수량을 직접 계측하였다(그림 4). 용출량은 투명한 비닐봉투와 메스실린더(2L)를 이용한 용적법과 유속계를 이용한 단면적법으로 측정하였으며, 수온과 EC, pH는 현장에서 EC Meter와 pH Meter를 이용하여 직접 측정하였다. 이온성분과 SS(Suspended Solids)의 분석시료는 현장에서 샘플을 채수병에 취수하여 항온상자에 보관한 후 실험실에서 IC(Ion Chromatography) 분석법과 환경부의 수질오염 공정실험방법에 기초하여 분석하였다. 단 실험실 사정으로 일부 양이온에 대한 분석결과가 결여되어, 유출성분의 변화와 함께 지화학적 조성비의 변동은 해석할 수 없었다. 따라서 본고에서는 지화학적 이온조성에 대한 언급을 피하고자 한다.

상기의 곡두사면의 지하수위 관측결과를 이용하여 지중수의 흐름을 추정하기 위한 방안으로 Well 4부근에서 0~20cm와 30~50cm 깊이의 토양시료를 각각 채취하였다. 샘플토양은 직접 제작한 투수계를 이용하여 정수위법으로 각각의 투수계수(permeability coefficient)를 측정하였다.

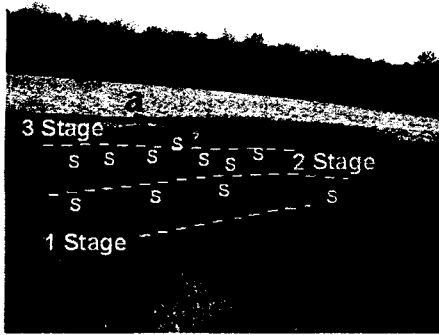
#### 4. 지온 분포와 토양수분

依田和四郎(1937)과 野滿隆治·山下馨(1938) 등이 온천수원을 탐사하는데 지온을 이용한 이후, 湯原浩三(1955)은 지하 1m 깊이의 지온 측정값을 이용하여 온천맥의 심도와 규모간의 관계에 대한 이론적 추정방법을 제안하였다. 이를 기초로

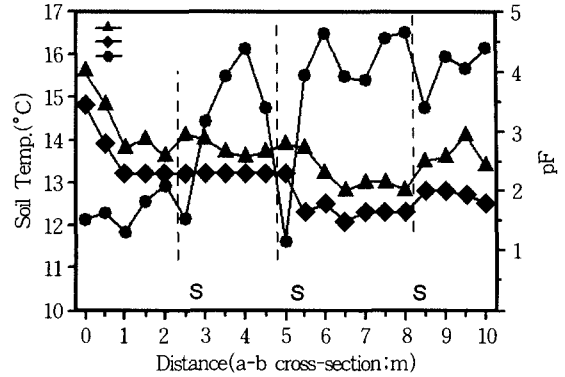
Kappelmeyer(1957)는 천층 지하수의 흐름에 의한 지온의 교란을 실험적으로 검토하였으며, 新井正·横田道彦(1990)은 지하수온과 지하수면 간의 공간적 분포가 거의 일치한다는 점에 착안하여 일본 도쿠시마(徳島)현 에카와(江川) 부근의 지하수 유동기구를 규명하였다.

본 연구에서는 지표부근의 지온과 천층부의 지중수 유동간의 상관성을 인정하여, 'U자형 골' 곡두사면 a-b에 대하여 50cm 간격으로 지표로부터 깊이 10cm 지점과 50cm 지점의 지온을 각각 측정하였다(그림 5). 그 결과, 10cm 깊이의 지온은 12.8~15.6°C로서 평균 13.7°C이었다. 50cm 깊이의 지온변화는 지표면에 비해 상대적으로 태양복사의 영향이 적고, 포화대 혹은 그 경계면에 위치하여 10cm 지점의 지온 변화폭보다 낮은 12.1~13.9°C로서 평균 12.9°C를 나타냈다. 그리고 지표면의 미지형의 기복에 따라 10cm 지점과 50cm 지점간의 온도차는 비교적 상이하게 나타났다. 특히 3 stage와 2 stage 그리고 2 stage와 1 stage 간의 단애의 전면 부근에서 두 지점간의 지온도차는 각각 0.4°C로서 전체 지점간의 지온차의 평균 보다 -0.4°C 낮은 값을 나타낸다. 1 stage상에 존재하는 작은 단애부근(8m부근)에서도 두 지점간의 온도차는 0.5°C로서 인접한 다른 장소의 지온차보다도 적게 나타난다(그림 5(a)와 5(b)).

지표면 온도는 일사량과 기온, 수증기, 바람 등의 기상요소에 의해서 좌우되지만, 토양수분의 함양정도나 지중수의 존재여부에 따라 크게 영향을 받는다(新井正·西澤利榮, 1974). 조사지역은 식생 분포가 거의 균일하고 작은 미지형이므로 기상학적 요소는 거의 무시가 된다고 가정할 때, 두 지점간의 지온차는 토양수분의 함양정도나 지중수간의 교류에 기인한 것으로 판단된다. 특히 지표로부터 깊이 10cm 지점의 수분함량(pF 값)<sup>3)</sup>은 그림 5(b)에서 보는 바와 같이 각 stage 간의 경계면에서 pF 2.54 이하의 증력수 또는 자유수 즉 토양의 대공극에서 증력작용에 의해 흘러내리는 수분의 존재를 나타내고 있다(조백현 외, 1986). 그리고 그 주변에서 토양 파이프(S)가 집중되어 나타난다. 또한 서로 다른 수괴의 교류와 혼합의 영향으로 타 지점에 비해 상하 지온차(10cm와 50cm간의 지온차)가 비교적 작은 지점의 부근에서 토양파이프(S)와 단



(a) soil pipe(S)의 분도포와 a-b 종단면



(b) 심도(10cm, 50cm)별 지온 변화와 pF의 변화

그림 5. 곡두사면(St. 2)의 토양습윤과 지온 변화

애가 나타난다는 점도 흥미로운 현상이다(그림 5(a)와 5(b)). 이것은 곡두사면의 미지형 기복이 토양수 혹은 지중수의 흐름을 제어하고, 지중수의 흐름은 토양 파이프 형성에 영향을 미치고 있는 것으로 생각할 수 있다.

## 5. 강우-유출 특성

### 1) 수문그래프의 특성

‘U자형 골’ 지형의 곡두사면에 대한 강우-유출 관계는 2003년 8월 24일부터 25일 사이에 내린 총 강수량 38.3mm를 대상으로 분석을 하였다(그림 4, 그림 6). 이 기간 동안 5mm/h 이상의 시간강우량은 25일 02:00 a.m.~03:00 a.m. 사이의 11.3mm/h와 05:00 a.m.~06:00 a.m. 사이의 9.1mm/h 그리고 08:00 a.m.~09:00 a.m. 사이의 6.3mm/h이었다. 그림 6에서 보는 바와 같이 곡두사면의 총 용출량에 대한 수문그래프(hydrograph)의 첨두는 이들 강우 이벤트에 대해 민감한 대응관계를 보이고 있으므로 강우 이벤트를 각각 제 1 이벤트, 제 2 이벤트, 제 3 이벤트로 구분하고자 한다.

총 용출량의 수문그래프는 제 2, 제 3 이벤트 때보다 제 1 이벤트 때 용출량의 첨두가 크게 나타나는 반면, 토양 파이프와 지하수위(Well 4)는 제 1 이벤트보다 제 2, 제 3 이벤트에서 첨두가 크게 나타난다. 그리고 제 1 이벤트에서는 지하수위보다

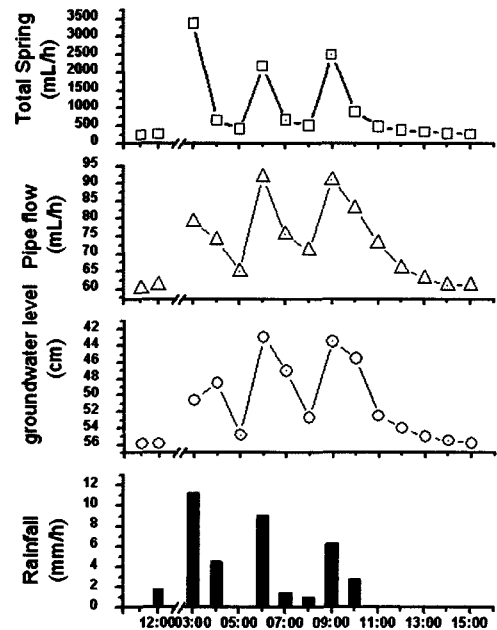


그림 6. 곡두사면(St. 2)의 강우-유출 특성

파이프류와 총 용출량의 반응이 신속하게 나타난다. 이것은 유효강우의 강도가 큰 초기 이벤트의 영향으로 총 용출량 중의 상당부분의 직접 유출성분이 개입되어 총 용출량>파이프류>지하수위 순으로 반응을 나타낸 것으로 보인다. 그리고 토양에 침투한 대부분의 수분이 파이프류를 이루고, 나머지 일부가 지속적으로 지하수에 공급되어 상대적으로 강우강도가 적은 이벤트에도 선행강우의 효

과에 의해서 지하수위와 파이프류가 민감하게 반응한 것으로 판단할 수 있다.

2) EC의 농도변화

그림 6에 나타난 유출성분의 특성을 살펴보기 위해 수질성분 중 총 고용물질의 함량 변화 즉, 전기전도율(EC: Electric Conductivity)의 농도변화를 분석하였다(그림 7). 조사기간 중 강우의 EC농도는 76~229 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이었다. 각 유출 요소들의 EC농도 변화는 대체로 그림 6에 제시된 수문그래프의 변화 경향을 잘 반영하고 있다. 그러나 제 1 이벤트 이전의 EC농도 분포를 보면, 지하수가 175.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ , 파이프류가 164 $\mu\text{S}/\text{cm}$ , 용출량이 168.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ , 즉 지하수>용출량>파이프류의 순으로 높은 EC농도를 나타냈으나, 제 1 이벤트 후 용출량>지하수>파이프류의 순으로 높은 EC농도를 보이던 것이 이벤트 후에는 파이프류(16.6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ )>용출량(160.8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ )>지하수(159.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ )의 순으로 EC농도가 변화하였음을 확인할 수 있다(그림 7). 이는 토양층에 용존되어 있는 전해물질들이 강우시 토양수의 이동과 함께 그 대부분이 토양 파이프를 통해 유출되고, 그 일부가 포화대에 도달한 결과로 생각할 수 있다. 따라서 토양 파이프가 'U자형 골' 곡두사면의 물질수지를 좌우하는 중요한 요인으로 간주할 수 있다.

3) 파이프류의 특성

그림 8은 파이프류의 수문그래프와 EC 그리고 부유물질(SS)의 변화를 나타낸 것이다. 앞서 설명한 바와 같이 EC농도는 유출되는 물속에 용해되어 있는 고용물질 중 전해물질의 양을 나타내는 반면 부유물질은 유출되는 물속에 1.2 $\mu\text{m}$  pore size(Millipore GF/C)이상의 물질을 나타내는 것으로 파이프류에 위해서 침식·제거되는 토사량을 의미한다고 할 수 있다.

여기서 EC와 SS농도 변화에 대한 상호관계를 보면, 표본수가 적은 관계로 제 1 이벤트 때에 나타나는 이례의 경우가 크게 영향을 미쳐 서로 상관( $r^2=0.26$ )이 없는 것으로 보인다. 그러나 강우강도가 제 1 이벤트에 비해 상대적으로 작은 제 2, 3 이벤트에서는 EC와 SS 농도변화가 서로 유사한 경향을 보인다. 특히 제 1 이벤트에서의 양자의 농도변

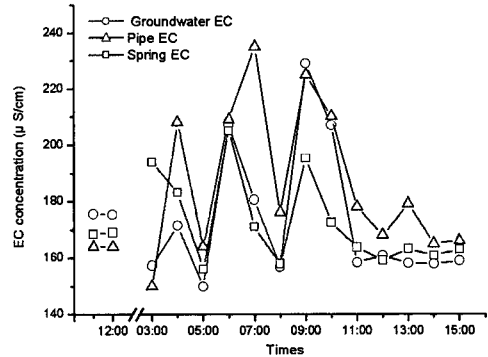


그림 7. 유출변화에 따른 EC농도의 변화

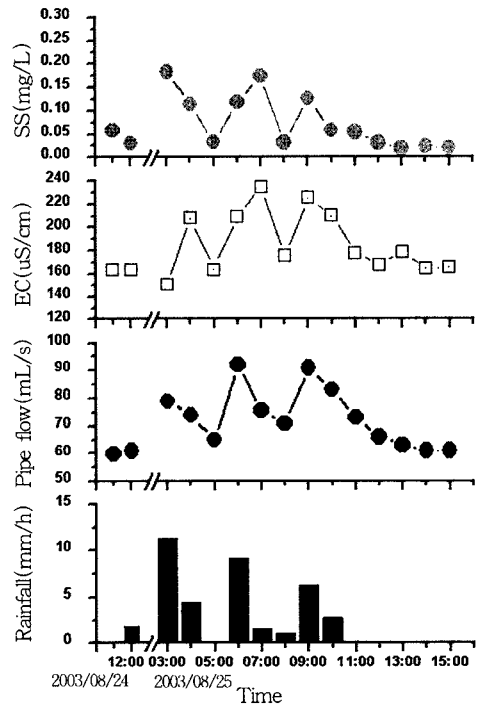


그림 8. 토양 파이프의 유출과 수질농도 변화

화 차이는 서로 다른 유출기구가 관여하고 있음을 암시한 결과로 간주된다(그림 8). 즉 유효강우 강도가 가장 컸던 제 1 이벤트에는 지표면의 직접 유출성분의 일부가 곡두사면의 전면에서 관찰되는 fissure 혹은 파이프의 입구를 통하여 유입되어 파이프류의 침식작용이 커짐에 따라 상대적으로 많은 미립물질을 침식·제거시켰으나, 직접유출량의 개입이 약해지는 제 2 이벤트부터는 선행 강우시 침투한 토양수의 이동에 따라 토양 중에 용존된 전해

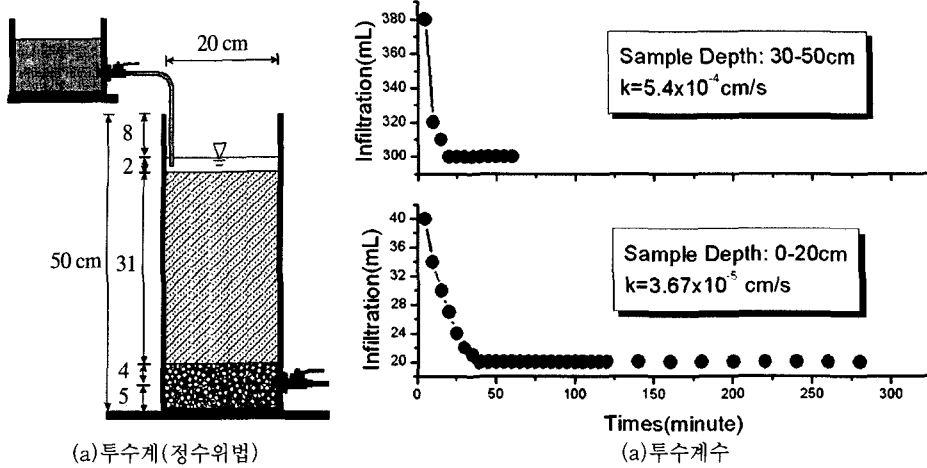


그림 9. 투수성 실험(St. 2 지점 Well 4 부근의 토양시료)

물질과 함께 일부 미립물질들이 제거되는 결과로 현시점에서는 가정해 볼 수 있다. 그러나 사면에 분포한 여러 토양 파이프를 대상으로 강우강도와 지중수의 동수구배에 따라 생산되는 파이핑(piping)에 의한 토사량을 측정한다면 보다 자세한 언급을 할 수 있을 것으로 사료되므로 다음 연구과제로 삼고 싶다(寺嶋智巳·佐倉正池, 1993).

## 6. 곡두사면의 투수계수와 지중수의 분포

사면의 수분이동을 추정하기 위해서는 지중수가 통과하는 매질(媒質)의 수리전도율 즉 투수계수(permeability coefficient)와 수리수두(hydraulic head)<sup>4)</sup>에 대한 정보를 토대로 비유속(specific flux)<sup>5)</sup>을 산정해야 한다.

곡두부 사면의 투수계수는 투수계를 이용한 실험방법으로 산정을 하였으며, 실험방법과 실험기기는 다음과 같다. Well 4 인근의 깊이 0~20cm의 토양과 포화대 경계면에 해당하는 30~50cm 깊이에서 토양을 샘플링한 후, 그림 9(a)와 같은 투명 아크릴통으로 제작한 투수계에 각각 시료를 채운 다음 한 차례 물로 포화시킨 후 배출시킴으로서 토층의 안정화를 피하였다. 그리고 1주일 후 정위수법(2cm)으로 투수능을 측정하여 투수계수를 계산하였다. 그 결과, 표층부(0~20cm)의 투수계수는  $3.67 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 이었으나, 30~50cm 부근의 투수계

수는  $5.4 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 로 더 크게 나타났다(그림 9(b)). 이는 표층부보다 30~50cm 부근에서 토양입자간의 공극이 크고, 지중수를 투과시킬 수 있는 능력이 좋다는 것을 의미한다(山本莊毅, 1983). 한편, 'U자형 골' 곡두사면의 지중수 분포와 수리수두를 측정하기 위하여 월 3회 이상 Well 1, 2, 3, 4의 수위를 측정하였으며, 2003년 여름철에 새롭게 형성된 사면에 2003년 10월1일에 Well 5를 추가 설치하였다.

그림 10은 2003년 6월 7일과 2003년 8월 23일 그리고 2003년 10월 10일에 조사된 지하수위를 이용하여 지하수 수두(groundwater head)의 분포와 토양 파이프의 파이프류의 유무를 도식적으로 나타낸 것이다. 대체로 Well 1~Well 3 사이의 수두는 계절적으로 큰 변화가 보이지 않으며, 그 영향으로 1 stage와 2 stage사면에 위치한 토양 파이프는 거의 마르지 않고 항상 극소량의 파이프류가 존재한다. 그러나 Well 4 은 계절에 따라 강수량의 변화에 크게 영향을 받아 수위변동이 크게 나타나며, 수리수두가 적이지는 갈수기에는 stage 3에 분포한 일부 파이프류가 마르는 경우도 발생한다.

여기서 지중수의 흐름을 추정하기 위하여 지하수위자료로 부터 계산된 동수구배 값과 Well 4 포화대 부근의 투수계수  $5.4 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 를 적용하여 비유속을 구하였다. 2003년 6월 7일에 있어서는 비유속(v)은 0.0002~0.007cm/s이며, Well 1과 Well 4 간의 비유속은 0.0061cm/s이었다. 2003년 8월 23일



## 7. 요약 및 결론

우리나라 전국토의 약 70%가 산지 또는 구릉지로 이루어졌으며, 잔구성 구릉지는 대부분 화강암과 화강편마암지역이다. 이들 지역은 모암의 풍화토 즉, 투수성이 좋은 사질토양으로 강우에 민감한 반응과 함께 사면붕괴가 쉽게 일어나는 것으로 알려져 있다(飯田智之·奥西一夫, 1979).

본고에서는 물순환 기구와 지형 형성에 대한 상호작용을 정량적으로 평가하기 위한 일환으로 조사한 내용 중에 ‘U자형 골’ 곡두사면의 강우-유출특성과 수분분포 그리고 지중수이동에 관하여 기술하였다. 그 내용은 다음과 같이 정리할 수 있다.

먼저 ‘U자형 골’ 전면에 나타난 fissure와 파이프 입구는 직접유출 성분을 토양 파이프 혹은 토양층에 많은 수량을 유입시킴으로서 토양층의 침식을 가속화시켜 토양 파이프의 확대와 발달에 기여하는 것으로 간주된다. 토양에 침투한 강우성분의 대부분은 파이프류로 나타나고, 나머지 일부가 지하수에 공급되어 상대적으로 강우강도가 적은 이벤트에도 선행강우의 효과에 의해서 지하수위와 파이프류가 민감하게 반응한 것으로 판단된다. 따라서 토양 파이프는 ‘U자형 골’ 곡두부 사면의 물 질수지를 좌우하는 중요한 요인으로 볼 수 있다. 한편 곡두 사면 하류부(1 stage~2 stage)에서는 계절에 관계없이 지중수의 비유속이 비교적 안정되어 있는데 반해, 사면 상부(3 stage~4 stage)에서는 계절에 따라 비유속이 큰 폭으로 변화하는 경향을 볼 수 있다. 만약 강렬한 강우강도 혹은 장기간 걸친 긴 장마가 지속될 경우, 곡두사면 상부에 상대적으로 큰 비유속이 부가될 것으로 판단되고, 이러한 작용의 반복으로 ‘U자형 골’ 곡두사면이 후퇴하는 것으로 생각할 수 있다.

이러한 지형적 특성과 조사 결과를 고려할 경우, 현시점에서 다음과 같이 ‘U자형 골’ 지형발달에 대해 가정해 볼 수 있다. 즉 투수성이 좋은 화강암 풍화토로 구성된 완사면은 강우시 대부분의 강우가 지하로 침투하고, 투수능이 좋은 토양은 손쉽게 토양수의 이동과 함께 미립물질들이 제거됨으로서 차별적인 토양조건에 따라 지표면에 와지가 형성될 것으로 생각할 수 있다. 그리고 와지는 주변지역으로부터 물의 흐름이 집중되어 토양입자간의

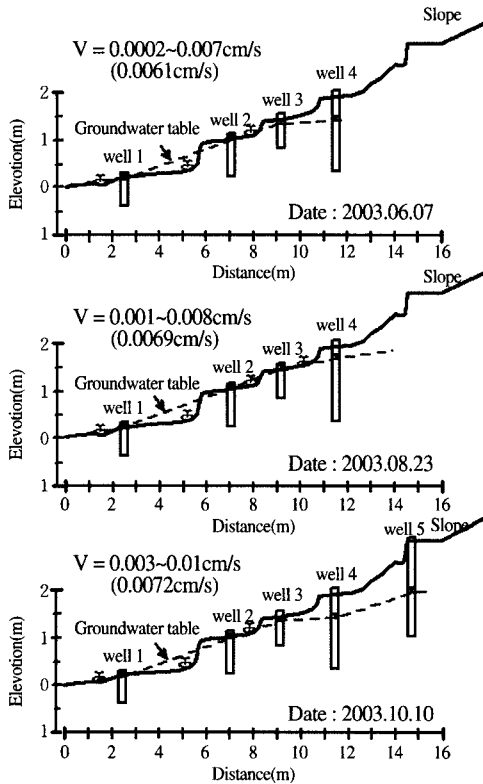


그림 10. 곡두사면(St.2)의 지하수두 분포와 지중수의 비유속

에는 지점간의 비유속과 Well 1과 Well 4간의 비유속은 각각 0.001~0.008cm/s, 0.0069cm/s이었다. 한편 새로 설치된 Well 5를 반영하여 계산된 지점간의 비유속은 0.003~0.01cm/s 그리고 Well1과 Well5간의 비유속은 0.0072cm/s 로서 상대적으로 고도효과에 따라 위치수두(elevation head)<sup>4)</sup>가 크게 반영된 것으로 볼 수 있다(그림 10). 만일 2003년 10월10일 자료에서 Well 5를 제외할 경우 Well1과 Well4간의 비유속은 0.0063cm/s가 된다.

비유속은 동수구배 즉 수리수두의 영향을 크게 받는 것으로서 사면 하류부(1 stage~2 stage)보다 상부(3 stage~4 stage)에서 비유속의 변화가 크게 나타난다. 그리고 소우기보다 다우기 때 사면전체의 비유속이 커지고, 특히 사면 정상부에서 상대적으로 큰 비유속이 부가됨에 따라 ‘U자형 골’ 곡두사면이 상부로 후퇴하는 조건을 제공한다고 할 수 있다.

공극이 확대되어 토양 파이프가 형성되고, 토양 파이프는 지중수 특히 토양수의 배출경로로서 역할을 하게 된다. 이처럼 극단적인 물의 집중은 사면을 쉽게 포화시켜 파이프의 확대와 밀도를 높이고, 파이프류에 의한 사면의 sapping현상으로 소규모 slump현상이 일어나고, 이러한 현상이 반복됨으로써 소규모의 단애와 평탄한 'U 자형'의 곡저부가 형성된다고 추정할 수 있다.

앞으로 물순환과 지형과의 상호관계를 이해하는 실마리를 찾기 위해 항공사진과 지형도에 의한 지형분류, 토양 및 지질조사, 토층의 구조와 토양의 물리적 성질, 토양 파이프의 분포와 유출특성, 지표유출에 의한 침식작용, 사면의 수분분포와 이동 등에 대한 현장조사를 면밀하게 지속한다면 'U자형 골' 지형발달에 대한 프로세스 규명은 물론이고, 지형변이에 대한 수치모델을 구축할 수 있을 것으로 생각한다.

## 사 사

현지조사에 있어서 전남대학교 지리학과 조경민, 박명원 학생들의 도움이 있었으며, 현장조사에 필요한 각종 기자재를 사용할 수 있도록 배려해주신 광주과학기술원 환경공학과 최희철 교수님, 논문심사에 있어 세심한 지적과 명쾌한 견해를 제시 해주신 익명의 심사위원님에게 이 자리를 빌어 깊이 감사드립니다.

## 註

- 1) 지하수 관측정 혹은 관정의 붕괴를 방지하기 위하여 투입된 관을 말한다. 관정의 구조에 따라 내부케이싱과 외부 케이싱을 각각 설치하는 경우도 있다.
- 2) 토양수 혹은 지하수가 관측정으로 유입할 수 일종의 통로 역할을 하는 부분을 칭한다.
- 3) 토양수는 토양에 의한 물의 흡착력으로 표시하는데, 이는 토양 중에 간직된 물을 토양 입자로부터 떼어내는 데 필요한 힘을 의미한다. 그리고 토양에 의한 물의 흡착력은 bar(mbar)나 기압과 같은 압력(atm)으로 나타내며, 수주(水柱)높이의 대수를 취한 pF(장력)로도 나타낸다(1atm = 1.0133bar = 1.033kg/cm<sup>2</sup> = 1.033cm水柱 = 760mmHg柱 = pF), 따라서 pF값이 1에 가까워질수록 토양의 대공극에서 중력에 의하여 흘러내리는 수분의

양이 많아지는 것을 의미한다.

- 4) 어떤 지점에 있어서 정수압 상태의 수주(水柱)의 높이는 위치수두(elevation head)와 압력수두(pressure head), 속도수두(velocity head)에 의해서 결정된다. 그러나 지하수는 속도가 매우 느리기 때문에 대개 속도수두는 무시되므로, 그 지점에서의 수리수두는 위치수두와 압력수두의 2가지로 구성된다. 따라서 수리수두의 계산식은  $h_t = z + h_p$ 로 나타낼 수 있다. 여기서, 여기서  $z$ 는 위치수두로서 기준면으로부터 압력수두  $h_p$ 가 결정되어지는 지점까지의 거리이다. 수리경사는 주어진 방향에서 단위거리당 수두의 변화로 정의되며, 지하수는 수리수두의 감소하는 방향으로 흐른다.
- 5) 지하수류의 방향과 직교하는 단위면적의 단면을 단위시간에 통과하는 지하수량을 의미하는 것으로 일반적으로 Darcian velocity라고도 한다. 따라서 비유속을  $v$ , 투수계수(K)와 (등수구배  $dh/dl$ )의 관계, 즉  $v = -Kdh/dl$ 의 식으로 나타낼 수 있다.

## 文 獻

- 오경섭, 1989, "화강암 풍화층의 점토조성과 풍화환경," 지리학, 40, 31-42.
- , 1996, "한국 지형학회의 50년 회고와 전망, 심포지움 제3부: 한국지리학의 반세기 -회고와 전망-" 대한지리학회지, 31, 121-123.
- 이병주 · 이승렬, 2001, 고창도폭 지질설명서 (1/50,000), 한국지질자원연구원.
- 田中幸哉 · 김태호 · 松倉公憲, 2000, "화강암 및 편마암 산지 소유역의 강우유출 특성," 대한지리학회지, 35, 641-647.
- 조백현 · 김문규 · 양창기 · 김성조 · 염대익 · 김재정 · 육창주 · 김현구 · 임수길 · 김영옥 · 조성진 · 박찬서, 1986, 토양학, 향문사, 서울.
- 角田清美, 1980, "武蔵野台地西端部の地形と自由地下水," 駒沢地理, 16, 9-12.
- 飯田智之 · 奥西一夫, 1979, "風化表層土の發達による斜面發達について," 地理学評論, 52, 462-483.
- 寺嶋智巳 · 佐倉正池, 1993, "花崗巖山地谷頭部の地形變化に及ぼす斜面浸透水流の作用," 地形, 14, 365-384.
- 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.

- 山本莊毅, 1983, 新版 地下水調査法, 古今書院, 東京.
- 新井正・西澤利榮, 1974, 水文學講座, 10 水溫論, 共立出版, 東京.
- 新井正・横島道彦, 1990, “德島縣江川附近の地下水の溫度と流動.” 地理學評論, 63, 343-355.
- 野滿隆治・山下馨, 1938, “別府市市内の地中溫度分布と溫泉脈.” 地球物理, 2, 233-259.
- 恩田裕一・奥西一夫・飯田智之・辻村真貴, 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.
- 依田和四郎, 1937, “由布院溫泉地帯の地溫分布.” 地球物理, 1, 285-304.
- 佐藤久・町田洋, 1990, 總觀地理學講座 6 地形學, 朝倉書店.
- 湯原浩三, 1955, “地下1m深の地溫分布から地下熱源を理論的に推定する一方法.” 物理探鑛, 8, 27-33.
- 塚本良則・峰松浩彦・丹下勲, 1988, “斜面の表層に發達する地中パイプ.” 波丘研究, 6, 268-280.
- Bryan, R. and Yair, A., 1982, *Badland, Geo Morphology and Piping*, Geo Books, Cambridge Univ. Press.
- Carey, S. K. and Woo, M. K. 2000, The role soil pipes as a slope runoff mechanism, Subarctic Yukon, Canada, *Journal of Hydrology*, 233, 206-222.
- De Vries, J. J., 1976, The groundwater outcrop model: evolution of the stream network in the Netherlands, *Journal of Hydrology*, 29, 43-50.
- Holden, J. and Burt, T. P. 2002, Piping and pipeflow in a deep peat catchment, *CATENA*, 48, 163-199.
- Jones, J. A. A., 1981, *The nature of soil piping: a review of research*, Geo Books, Cambridge Univ. Press.
- , 1997, The role of natural pipeflow in hillslope drainage and erosion: extrapolating from the Maesnant data, *Phys. Chem. Earth.*, 22, 303-308.
- Jones, J. A. A., Richardson, J. M., and Jacob, H. J., 1997, Factors controlling the distribution of piping in Britain: a reconnaissance, *Geomorphology*, 20, 289-306.
- Kappelmeyer, O., 1957, The use of near surface temperature measurements for discovering anomalies due to causes at depth, *Geophysical Prospecting*, 5, 239-258.
- Onda, Y. and Itakura, N. 1997, An experimental study on the burrowing activity of river crabs on subsurface water movement and piping erosion, *Geomorphology*, 20, 279-288.
- Sasaki, Y., Fujii, A., and Asai, K. 2000, Soil creep process and its role in debris slide generation-field measurements on the north side of Tsukuba Mountain in Japan, *Engineering Geology*, 56, 163-183.
- Scoging, H., 1982, Spatial vaiations in infiltration, runoff and erosion on hillslopes in semi-arid Spain, edited by Rorke Bryan and Aaron Tair, *Badland: Geomorphology and Piping*, Geo Books, Cambridge Univ. Press.
- Uchida, T., Kosugi, K., and Mizuyama, T., 1999, Runoff characteristics of pipeflow and effects of pipeflow on rainfall-runoff phenomena in a mountainous watershed, *Journal of Hydrology*, 222, 18-36.
- Zhu, T. X., Luk, S. H., and Cai, Q. G., 2002, Tunnel erosion and sediment production in the hilly loess region, North China, *Journal of Hydrology*, 257, 78-90.

최초투고일 03. 12. 29

최종접수일 04. 03. 11