

## 제주도 스킨콘의 유출 특성\*

### - 어승생오름 소유역을 사례로 -

김태호\*\* · 안중기\*\*\*

## Runoff Characteristics of a Small Catchment in Eoseungsaeng-oreum, Jeju Island\*

KIM, Taeho\*\* · AN, Junggi\*\*\*

**요약** : 한라산 어승생오름에서 수문 관측을 실시하여 제주도 스킨콘 소유역의 유출 특성을 규명하였다. 실험 유역은 면적이 5.1ha이며, 식생은 서어나무와 졸참나무가 우점하고 있다. 실험 유역에서는 전 기간에 걸쳐 유출이 발생하였으며, 기저 유출은 4월부터 점진적으로 증가하다가 10월 이후에 다시 감소하였다. 강우량이 현저하게 작거나 선행 강우가 없는 일부 강우 이벤트를 제외하면 강우 발생시에는 대부분 유출의 피크가 출현하였다. 또한 하이드로그래프의 상승 곡선과 하강 곡선이 급격하게 변화하는 섬광적인 유출 특성을 보이며, 지체 시간도 매우 짧아 평균 35.8분에 불과하다. 연속 강우량이 증가하면 빠른 유출 성분의 유출률도 증가하나, 그 증가율은 크지 않고 최대 유출률도 24.7%에 불과하다. 또한 68.3%의 강우 이벤트에서 빠른 유출 성분의 유출률은 1%를 넘지 못할 만큼 총강우량에 대하여 빠른 유출 성분이 차지하는 비율은 높지 않다. 비교적 지속 시간이 긴 강우 이벤트에서는 측방침투류에 기인하는 것으로 보이는 완만한 2차 피크도 출현하였다. 이런 유출 특성에는 실험 유역의 국지적인 불투수층이 관여하는 것으로 보인다.

**주요어** : 유출 특성, 스킨콘, 어승생오름, 제주도

**Abstract** : In order to examine the runoff characteristics of scoria cones in Jeju Island, hydrological observations were conducted in the experimental basin (5.1 ha) of Eoseungsaeng-oreum which has been predominantly covered with *Carpinus laxiflora* and *Quercus serrata*. Although runoff has continuously occurred during the observed period, the baseflow gradually increased from April and decreased from October. The peak flow approximately corresponded to every rainfall events except for the rainfall events which has slight total precipitation and no previous precipitation. The experimental basin shows flash runoff response and short lag time; the mean lag time is 35.8 minutes. Although the runoff ratio of quick flow is proportional to total precipitation, the increasing rate is low and the maximum runoff ratio is 24.7%. In addition, the runoff ratio is less than 1% in 68.3% of the rainfall events, suggesting that the portion of quick flow to total precipitation is low. The rainfall events with relatively long event time demonstrated a secondary peak generated by translatory flow. The runoff characteristics seem to be related to local impermeable beds in the experimental basin.

**Key Words** : runoff characteristics, scoria cone, Eoseungsaeng-oreum, Jeju Island

\*본 논문은 2007년도 제주지역환경기술개발센터 연구개발사업(과제번호: 07-2-70-74) 지원으로 연구되었으며, 논문의 요지는 2008년도 한국지형학회 동계학술대회에서 발표하였다.

\*\* 교신저자, 제주대학교 지리교육과 부교수(Associate Professor, Department of Geography Education, Cheju National University), kimtaeho@cheju.ac.kr

\*\*\* 한국농촌공사 제주지역본부 환경지질팀 차장(Section Chief, Team of Environmental Geology, KRC Jeju Province Office), angr040@hanmail.net

## I. 서론

제주도에는 섬 전역에 걸쳐 오름으로 불리는 다수의 단성화산(monogenetic volcano)이 분포하고 있다. 오름의 수는 334개(長谷中 외, 1998), 357개(박승필, 1985), 368개(제주도, 1997) 등 다양하게 알려져 있으나, 제주도를 흔히 오름의 왕국이라고 부르는 것처럼 적어도 300개는 넘고 있으며, 특히 구좌읍 송당 일대는 분포 밀도가 0.38개/km<sup>2</sup>(윤정수, 1995)에 이를 정도로 집중적으로 분포하고 있다.

제주도의 오름은 화산 분출물의 성질에 의해 다양하게 분류되나(김태호, 2001), 그 대부분은 현무암질 마그마 기원의 다공질 쇄설물로 이루어진 스킨콘(scoria cone)이다. 즉 스트롬볼리식 분화에 의해 지상으로 방출된 스킨콘이 화구 주위에 원형이나 타원형으로 쌓여 만들어진 화산체이다. 스킨콘은 중산간 지대와 한라산 산록과 같이 수성 화산활동(hydrovolcanism)보다는 현무암질 마그마 고유의 스트롬볼리식 분화가 일어나기 쉬운 내륙 지역에 주로 분포하고 있다(제주도, 1997).

스트롬볼리식 분화로 간헐적으로 방출된 스킨콘이 쌓여 화산체가 성장하고 더불어 사면 경사각이 커지면 사면에 떨어진 스킨콘은 그 자리에 멈추지 못하고 아래로 굴러 떨어지면서 화산체를 더욱 성장시킨다. 이탈리아의 에트나산(Mt. Etna) 산록에 형성된 스킨콘의 발달 과정을 토대로 제시된 모델(McGetchin *et al.*, 1974)에 의하면, 제1단계는 낮은 환상의 화산체이며, 제2단계에 들어가 사면 경사각이 안식각에 도달하면 사면에 떨어진 스킨콘이 흘러내리면서 애추를 만든다. 위쪽으로 확대된 애추사면이 화산체 최상부에 도달하여 화구륜(crater rim)이 각진 모습을 보이게 되면 제3단계, 아래쪽으로도 애추사면이 확대되어 날아간 쇄설물의 최대 낙하 지점에 도달하면 제4단계가 된다. 보통의 스킨콘은 제3단계나 제4단계에 해당하는 것이 많으므로 화산체 체적의 과반은 쇄설물의 재동으로 만들어진 애추가 차지하고 있다.

스킨콘은 화산 쇄설물의 강하와 재동을 통하여 형성되므로 화산체 단면에 쇄설물을 방출한 분화에 대응하여 성층 구조가 나타나기도 한다. 또 쇄설물에는

미립질 화산회가 적고 화산체 형성에 쇄설물의 재동이 중요하므로 화산체 구성 물질의 분급이 양호하다. 따라서 우수가 쉽게 침투할 수 있으므로 화산체 사면에는 지표류가 발생하기 어려우며, 비교적 장기간에 걸쳐 원형을 유지할 수 있다(Wood, 1980; 横山 외, 1992).

이와 같은 스킨콘의 특징 때문에 오름은 투수성 지질로 분류되고 있으며, 용암동굴, 습굴<sup>1)</sup> 및 곳자왈<sup>2)</sup> 등과 함께 제주도의 주요 지하수 함양원으로 알려져 있다(제주도, 2000). 그러나 스킨콘 중에는 물영아리, 물장울, 물чат오름과 같이 산정 분화구에 습지를 지닌 오름뿐 아니라 화산체 사면에 지표류의 침식 작용으로 개석곡이 발달한 오름 등 불투수성 지질 특성을 보이는 스킨콘이 적지 않다(그림 1). 따라서 오름의 지하수 함양량을 정확하게 평가하기 위해서는 오름 사면에서 실제로 발생하고 있는 유출 현상을 파악하고, 유출 프로세스에 어떤 요인이 관여하고 있는지를 규명할 필요가 있다. 또한 <그림 1>의 안돌오름과 같이 유출로 인한 지표류의 침식 작용은 지형 변화를 초래하며



<그림 1> 불투수성 지질 특성을 보이는 오름  
 상: 사라오름의 산정 화구호  
 하: 안돌오름에 발달한 개석곡

로 오름의 보전과 관리를 위해서도 오름에서 발생하는 유출 현상에 대한 규명이 필요하다. 본 논문에서는 한라산 어리목의 어승생오름에 실험 유역을 설정하고 수문 관측을 실시하여 오름 사면에서 일어나는 강우 유출 특성을 밝히고자 한다.

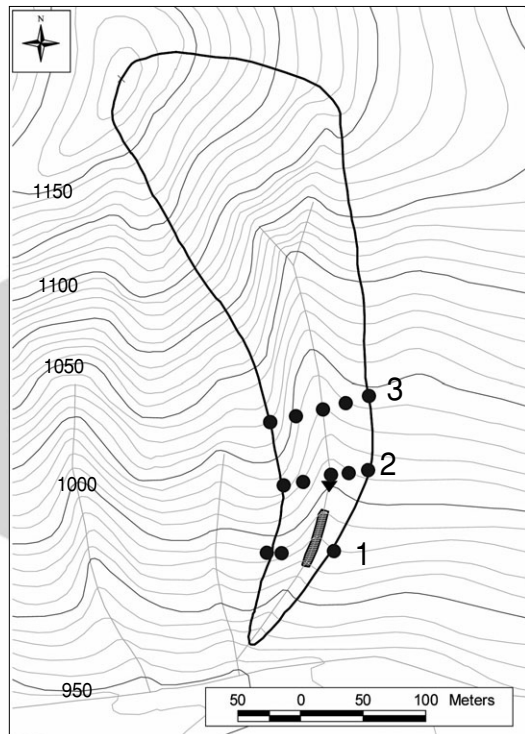
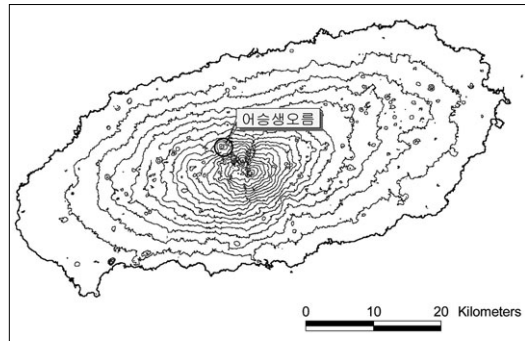
## II. 연구 지역 및 방법

### 1. 연구 지역

표고 1,169m의 어승생오름은 한라산 국립공원 어리목 등산로 입구에 위치하고 있으며, 비고 350m, 둘레 5,842m, 면적 2,54km<sup>2</sup>, 저경 1,968m의 대형 단성화산으로 서귀포의 군산 다음으로 큰 규모를 지닌 오름이다(제주도, 1997). 원추형 스킨아콘으로 정상에는 둘레 250m의 산정 화구호가 출현한다. 항공사진에는 동사면을 제외한 전 사면에 걸쳐 15개의 개석곡이 발달하고 있으며, 소규모의 개석곡을 현지에서 더 확인할 수 있다. 개석곡 가운데 규모가 가장 큰 남사면의 개석곡 일대가 실험 유역으로 면적은 5.1ha이다. 유역 최고점과 최저점의 표고는 각각 1,169m 및 965m이며, 유역의 기복비는 0.41이다(그림 2).

식생은 낙엽활엽수와 침엽수가 혼재하는 삼림 지대이나, 서어나무와 졸참나무로 대표되는 낙엽활엽수가 탁월하다. 하층은 최근 한라산 전역에서 빠르게 확산하고 있는 제주조릿대가 우점하고 있다. 제주도 정밀토양도에 의하면 실험유역에는 갈색산림토에 속하는 적악통이 분포하고 있다(농촌진흥청, 1976). 화산회토로 분류되는 적악통의 대표 토양은 100cm 정도의 토심을 보인다. 또한 표토는 암적갈색의 잔자갈이 있는 양토이며, 기층은 적갈색의 자갈이 많은 양질 조사토이다(제주도민속자연사박물관, 2000).

실험 유역 인근에 소재하는 어리목 자동기상관측소의 연평균 기온은 9.7°C이며, 최한월 1월과 최난월 8월의 월평균 기온은 각각 -2.4°C 및 20.6°C로 연교차는 23°C에 이른다. 연평균 강수량은 3,356.5mm이며, 월별로는 태풍이 북상하는 8월과 9월은 631.0mm와 443.5mm, 장마철인 7월은 575.5mm를 기록하고 있다.



〈그림 2〉 실험유역

●는 관입 시험 지점, ▼는 최상류 발원 지점, ▨는 토양 파이프 분포 지대이다.

따라서 강수량의 하계 집중도가 높으나, 전년에 걸쳐 강수가 발생하는 해양성 기후의 특징도 보인다.

### 2. 연구 방법

실험 유역의 출구에 길이 50cm의 수위계(Unidata U6521J)를 부착한 6인치 파샬 플룸(parshall flume)과 보를 설치하여 수위를 관측하였다(그림 3). 관측 기



〈그림 3〉 관측용 파살 플름과 수위계

간 동안 반복해서 수위와 유량을 측정하여 수위-유량 관계 곡선을 구하였으며, 그 결과 유량은 수로에서 관측된 수위와 다음과 같은 관계를 지니고 있다.

$$Q = 0.0049 \times H^{3.1684}$$

여기에서 Q는 유량(L/s), H는 관측 수위(cm)를 가리킨다.

산림 지대에 놓여 있는 실험 유역은 수목에 의한 차단 효과가 커서 강수량 관측은 이루어지지 않았다. 따라서 실험 유역에서 동쪽으로 300m 떨어진 한라산 국립공원 관리사무소에 설치되어 있는 어리목 자동기상 관측소의 강수량 자료를 대안으로 이용하였다. 수위 자료는 4월부터 9월까지의 15분 간격으로, 10월 이후에는 30분 간격으로 데이터 로거(EME System OWL2pe)를 이용하여 자동으로 기록하였다. 관측은 2007년 4월 11일부터 11월 26일까지 총 230일간에 걸쳐 이루어졌다. 그러나 제11호 태풍 나리에 동반된 집중호우로 인하여 관측용 수로가 토사와 잡목으로 매몰되면서 9월 16일 12:15부터 관측이 일시 중단되었다. 매몰된 수로는 9월 19일 17:00에 복구되었으며, 전부 77시간의 결측이 발생하였다.

수문 관측과 함께 실험 유역의 측량 및 지형 조사를 실시하였다. 유수 발원지를 비롯한 용출 지점, 강우시 출현하는 지표류의 위치와 토사의 이동 상태 등을 확인하였다. 실험 유역의 형태를 파악하기 위하여 유수 발원 지점과 그 상·하류로 60m 떨어진 지점에 유역을 횡단하는 3개의 측선을 설정하고 사면 측량을 실시하

였다. 또한 측선을 따라 13개 지점에서 간이식 관입 시험기(筑波丸東 S06-M)를 사용하여 관입 시험을 실시하였다(그림 2). 관입 시험기의 선단부에 달려 있는 직경 2.5cm의 콘을 10cm 관입시키기 위하여 사용한 추의 낙하 회수(N10값)를 근거로 토층 구조를 파악할 수 있다(逢坂, 1996).

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 지형 및 토층 구조

실험 유역의 하류는 폭이 좁고 얇은 하곡을 이루고 있으나, 상류로 올라가면서 폭과 깊이가 증가하여 실험 유역 중간 지점에서의 사면 길이는 좌안과 우안이 각각 42m, 61m이며, 산릉과 곡저의 낙차도 27m에 달할 정도로 규모가 커지고 있다(그림 4).

유수의 최상류 발원 지점은 자갈이 퇴적되어 있는 곡저로서 수위 관측 지점으로부터 135m 떨어져 있으며, 이곳에서는 관측이 이루어진 전 기간에 걸쳐 물이 용출하였다. 실험 유역에는 곡저와 하곡 사면의 연결부를 따라서 토양 파이프(soil pipe)가 선상으로 분포하고 있으며, 이 파이프에서도 관측 기간 동안 지속적으로 물이 용출하였다(그림 5). 파이프는 하곡의 양안에 모두 출현하나 우안이 더 탁월하며, 특히 수위 관측 지점으로부터 75~95m 상류 구간에서는 우안 하곡 사면 기저부에 다수의 파이프가 집중적으로 분포하고 있다(그림 2). 이 구간에서는 급경사의 우안 사면과 완만한 좌안 사면이 발달하여 하곡의 단면은 비대칭을 이루고 있다. 이는 우안 사면의 기저부에 발달한 파이프를 중심으로 굴식이 일어나고 그 후 상부의 하곡 사면이 슬럼프로 무너져 내린 결과로서, 하곡 사면의 후퇴에 따른 개석곡의 발달에 이들 파이프가 중요한 역할을 하는 것으로 보인다.

곡저의 유로에는 장경 50~60cm의 암괴가 퇴적하고 있으며, 직경 1m를 넘는 거력도 산재하고 있다. 이들 암괴는 대부분 지의류로 덮여 있어 최근에는 이동하고 있지 않은 것으로 판단된다. 강우 직후에는 유수 발원 지점의 상류에도 우곡과 같은 유수의 흔적이 나타나



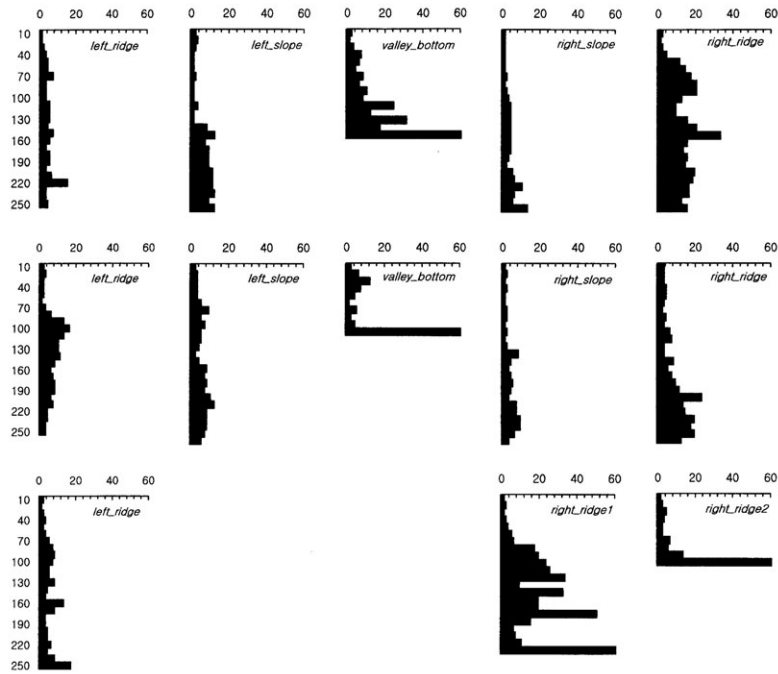
〈그림 4〉 실험 구역 종류의 하곡 지형



〈그림 5〉 하곡 사면 기저부에 발생한 파이프류

고 있어 강우시 유로가 연장되는 것으로 보인다. 그러나 발원 지점의 상류 100m 지점부터는 유수의 흔적이 나타나지 않아 소위 곡두 사면을 이루고 있다. 실험 구역에 용암류는 출현하지 않지만, 서쪽으로 인접한 구역에는 용암류가 분포하고 있어 실험 구역에도 용암류가 단편적으로 분포할 가능성은 있다.

한편, 깊이 250cm까지 이루어진 관입 시험에 의하면 사면과 산릉의 토층 구조는 유사하다(그림 6). 특히 측선 2와 3에서는  $N_{10}$  값이 대부분 20을 넘지 못하고 있으며, 깊이 1m까지는 5 이하를 기록하는 지점이 많아 연약층이 상당한 깊이까지 분포하고 있다. 이런 경향은 산릉보다는 사면에서 더 뚜렷하게 나타난다. 측선



〈그림 6〉 측선별 관입 시험 결과

상, 중, 하단은 각각 〈그림 2〉의 측선 3, 2, 1에 해당하며, 그래프의 세로축은 토층의 깊이(cm), 가로축은  $N_{10}$  값을 가리킨다.



1에서도 좌안 산릉의 토층 구조는 이와 유사하나, 우안 산릉은 다소 다르게 나타난다. 즉 깊이 1m에서  $N_{10}$ 값이 60에 달하고 있으며, 3m 정도 떨어진 지점에서도  $N_{10}$ 값은 전반적으로 높고 깊이 220cm에서 60에 달하고 있다. 따라서 우안 산릉에는 용암류와 같은 암괴의 존재가 예상되며, 이런 결과는 인접 유역에 출현하는 용암류에 의해서도 일부 확인할 수 있다. 그러나 전체적으로 보아 산릉과 사면의 깊이 250cm 이내에서는 기반암으로 해석할 수 있는 토층 구조는 대부분 분포하지 않는다.

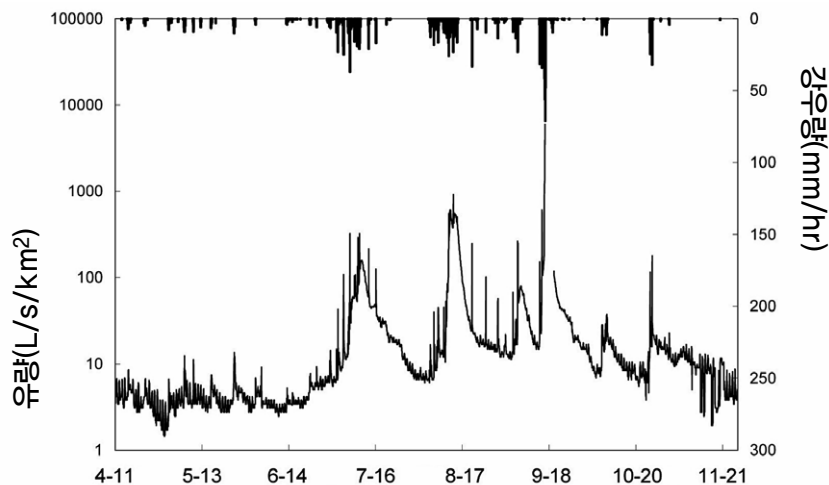
반면에 자갈과 암괴가 퇴적되어 있는 곡저는  $N_{10}$ 값이 대체로 높게 나타나며, 측선 2의 곡저에서는 깊이 1m에서 그 값이 60에 달하고 있다. 상류의 측선 3에서도 토층의 깊이와 함께  $N_{10}$ 값이 서서히 증가하다가 깊이 160cm에서 60에 달하고 있으며, 측선 2보다 하류의 곡저에는 표층 가까이 자갈과 암괴가 밀집하고 있어 곡저에서는 발원 지점으로부터 상류로 올라갈수록 토층의 깊이가 증가하는 것으로 보인다.

## 2. 유출 특성

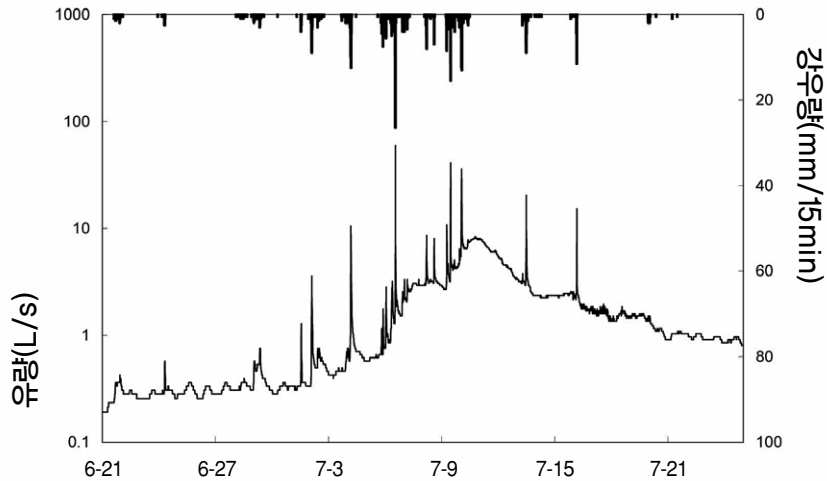
어리목 관측소에서 2007년 4월부터 11월까지 관측된 총강우량은 3128.5mm이며, 월별로는 8월이 941mm로 가장 많고 11월은 10mm에 불과하다. 6월

21일부터 7월 24일까지 장마 기간에 발생한 강우량은 666mm로 평년보다 다소 많았으나, 강우 이벤트가 7월 초순에 집중함으로써 6월 강우량은 평년보다 작았다(그림 7). 8월과 9월의 강우량은 900mm를 넘어 평년보다 1.5배 이상 많았는데, 8월에는 북태평양 고기압의 발달이 미약하여 월 전반에 호우가 자주 발생하였다. 9월 강우량은 제11호 태풍 나리에 동반한 호우에 크게 기인하며, 특히 9월 16일의 일일 강우량은 454.5mm로 제주도 관측사상 최고치를 기록하였다.

실험 유역의 기저 유출은 4월부터 점진적으로 증가하다가 10월 이후에는 다시 감소하는 경향을 보인다(그림 7). 수위 관측 지점에서는 전 기간에 걸쳐 유출이 있었으며, 예상과 달리 유수가 고갈된 상태는 한번도 나타나지 않았다. 관측 기간에 연속 강우량이 5mm를 넘는 강우 이벤트는 전부 48회 발생하였으나, 강우 이벤트마다 유출 피크가 출현하지는 않았으며 유출양상도 같지 않았다. 이런 경향은 계절에 따라 달라져 4월에는 3회의 강우이벤트가 발생하였으나 현저한 유출은 출현하지 않은 반면에 8월과 9월에는 대부분의 강우이벤트에 민감하게 유출 반응을 보이고 있다(그림 7). 최저 유량은 4월의 0.09L/s이며, 최고 유량은 9월의 태풍 나리로 인하여 관측용 수로가 매몰되기 직전에 관측된 340.98L/s로 최저 유량에 비하여 3,919배 많았다.



〈그림 7〉 유량 및 강우량의 변화



〈그림 8〉 2007년도 장마 기간(6월 21일~7월 24일)의 하이드로그래프

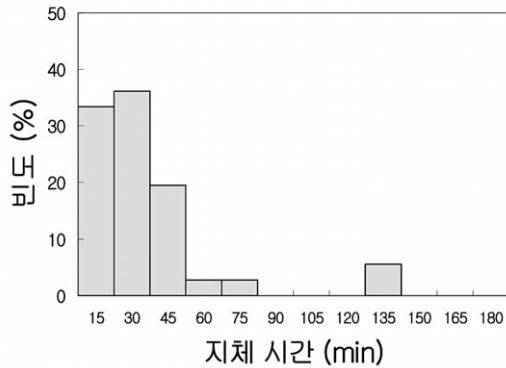
〈그림 8〉은 장마 기간에 해당하는 6월 21일부터 7월 24일까지 34일간의 하이드로그래프이다. 연속 강우량 5mm 이상의 강우 이벤트는 전부 13회 발생하였으며, 이 가운데 7회는 연속 강우량 30mm 이상을, 4회는 50mm 이상을 기록하였다. 특히 7월 5일 18:45부터 8일 15:00까지 지속된 강우 이벤트는 204.5mm의 연속 강우량과 함께 6일 13:00에 장마 기간에 관측된 15분 단위 강우량의 최고치 26.5mm를 기록하였다.

장마 기간의 유출은 6월 21일 22:30의 0.6L/s를 시작으로 전부 20회의 명료한 유출 피크가 출현하였다. 이 가운데 첨두 유량이 10L/s를 넘은 경우는 장마 기간 관측 최고치인 7월 6일 13:00의 59.6L/s를 포함하여 전부 7회 출현하였으며, 1L/s 이하의 소규모 피크는 장마 전반부에 4회 관측되었다. 장마 기간에 연속 강우량 5mm 이상을 기록한 13회 이벤트 가운데 11회에서 유출 피크가 발생하였으며, 연속 강우량이 8mm와 15.5mm로 규모가 가장 작은 이벤트에서만 유출 피크가 발생하지 않았다. 따라서 강우량이 현저하게 작거나 선행 강우가 없는 일부 이벤트를 제외하면 실험 구역에서는 강우에 동반하여 거의 예외 없이 유출 피크가 출현하는 경향을 보이고 있다.

〈그림 8〉에서 초기 유량으로부터 첨두 유량에 이르는 상승 곡선뿐 아니라 첨두 유량 이후의 하강 곡선도

매우 급격하게 변화하고 있어 실험 구역에서는 설팅적인 유출이 발생하고 있음을 알 수 있다. 또한 강우 피크 이후 첨두 유량이 출현할 때까지 걸리는 지체 시간도 매우 짧다. 장마 기간에 관측된 상위 5개 첨두 유량과 이들의 출현 시각은 7월 6일 13:00의 59.6L/s를 비롯하여 9일 11:15의 41.4L/s, 10일 01:30의 36.3L/s, 13일 11:30의 20.7L/s 및 16일 03:45의 15.6L/s이다. 이들 유출 피크를 발생시킨 첨두 강우량과 그 발생 시각은 6일 13:00의 26.5mm를 비롯하여 9일 11:15의 15.5mm, 10일 01:30의 13mm, 13일 11:30의 9mm 및 16일 03:45의 11.5mm로서 첨두 강우량과 첨두 유량의 발생 시각이 전부 동일하다. 여기에서 강우량은 15분 누적치이므로 유출 피크는 강우 피크가 발생한 후 15분 이내에 출현한 셈이다.

짧은 지체 시간은 빈번한 강우로 토층이 지속적으로 젖어 있는 장마 기간에만 국한된 현상은 아니다. 선행 강우가 상대적으로 적은 8월 하순에도 20일 13:45의 35.7L/s와 25일 15:15의 13.7L/s의 첨두 유량에 대응하여 17.5mm와 8.5mm의 첨두 강우량이 각각 20일 13:30과 25일 15:00에 관측됨으로써 지체 시간은 여전히 30분 이내를 기록하고 있다. 따라서 실험 구역의 지체 시간은 대부분 30분 이내로서 강우 피크와 거의 동시에 유출 피크가 발생하는 것으로 보인다. 수문 관측

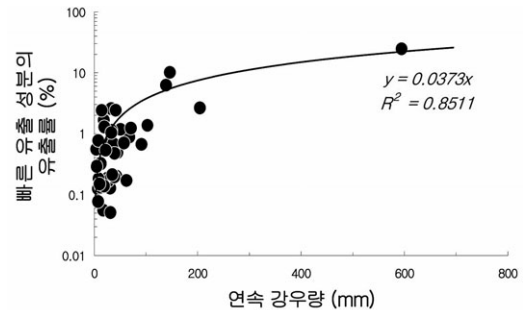


〈그림 9〉 지체 시간의 발생 빈도

이 15분 단위로 이루어진 9월까지 발생한 36회의 강우 이벤트 가운데 강우 피크와 동시에 유출 피크가 발생한 경우가 12회, 15분 후에 발생한 경우가 13회, 30분 후에 발생한 경우가 7회로서 전체 이벤트의 88.9%가 45분 이내의 지체 시간을 보이며, 평균 지체시간은 35.8분으로 줄어든다(그림 9).

예외적으로 2시간의 지체 시간을 기록한 이벤트는 각각 4월 15일과 4월 21일에 발생한 연속 강우량 31mm와 17.5mm의 강우이며, 1시간의 지체 시간을 기록한 이벤트도 4월 30일에 발생한 연속 강우량 26mm의 강우이다. 이들 강우 이벤트는 모두 기저 유출이 가장 작은 봄철의 건조기에 출현하고 있어 유역에 도달한 우수가 부족한 토양 수분을 채우는 과정에서 유출의 지체가 일어나는 것으로 생각된다.

일반적으로 유출 성분은 강우에 동반하여 유역에 새롭게 추가된 성분과 강우 이전부터 유역에 저류되어 있는 성분으로 구분된다. 이들 성분이 총유출량에서 차지하는 비율을 정량적으로 산정하는 방법은 다양하나, 여기에서는 Hewlett and Hibbert(1967)의 경험적인 방법을 사용하여 빠른 유출(quick flow) 성분을 구하였다<sup>3)</sup>. 강우 이벤트별로 연속 강우량과 빠른 유출 성분의 유출률(총강우량에 대한 빠른 유출량의 비율)의 관계를 보면 연속 강우량이 증가함에 따라 유출률도 증가하고 있으나, 그 증가율은 크지 않을 뿐 아니라 최대 유출률도 25%를 넘지 못한다(그림 10). 즉 8월 10일부터 15일까지 연속 강우량 594.5mm를 기록한 강우 이벤트의



〈그림 10〉 연속 강우량과 빠른 유출 성분의 유출률과의 관계

경우에도 빠른 유출 성분의 유출률은 24.7%에 불과하다. 또한 분석한 41회의 강우 이벤트 가운데 68.3%를 차지하는 28회의 이벤트는 유출률이 1%를 넘지 못한다. 따라서 강우 이벤트에 반응하여 대부분 신속한 유출이 발생하고 있으나, 총강우량에 대하여 빠른 유출 성분이 차지하는 비율은 높지 않은 편이다.

지질을 달리하는 유역을 대상으로 연속 강우량과 빠른 유출 성분의 유출률의 관계를 비교한 岩下 외(1994)에 의하면, 강우량의 증가에 따른 유출률의 증가는 변성암, 화강암, 퇴적암의 순으로 높아진다. 빠른 유출률이 최대 30%를 넘지 못하는 변성암 유역은 실험 유역과 비슷한 양상을 보이나, 실험 유역에서는 연속 강우량이 100mm를 넘어야 유출률이 실질적으로 증가하는데 비하여 변성암 유역에서는 그 경계가 50mm이므로 실험 유역의 유출률이 더 작다고 할 수 있다.

장마 기간에 발생한 11회의 강우 이벤트를 대상으로 빠른 유출 성분의 유출률을 시계열적으로 열거하면 0.05%, 0.18%, 0.20%, 0.32%, 0.70%, 0.14%, 0.87%, 2.63%, 10.15%, 1.17%, 1.66%로 나타난다. 즉 6월 15일부터 6월 20일까지 6일간의 무강우기가 이어지다가 21일 발생한 연속 강우량 31.5mm의 이벤트에는 0.05%에 불과한 유출률을 보였다. 이후 강우 이벤트가 지속적으로 발생하면서 유출률도 완만하게 상승하여 7월 5일부터 9일까지 연속 강우량 204.5mm의 이벤트에는 2.63%, 9일부터 10일까지 연속 강우량 146.5mm의 이벤트에는 장마 기간 최대의 유출률 10.15%를 보였다. 이후 다시 유출률은 감소하여 연속 강우량 18.6mm의 장마 기간 마지막 이벤트에는 1.66%를 기



록함으로써 빠른 유출 성분의 유출률이 연속 강우량뿐 아니라 선행 강우의 영향도 받고 있음을 알 수 있다.

기반암에 절리가 조밀하게 발달하여 투수성이 높은 유역에서는 우수가 절리를 통하여 지하 깊숙이 침투하므로 강우 강도가 작거나 연속 강우량이 작은 강우 이벤트에는 유출 반응이 완만하고 침투 유량도 크지 않은 반면에 강우 강도가 일정 수준에 도달하여 우수의 침투 속도를 초과하게 되면 명료한 유출 피크가 발생한다(田中 외, 2000). 그러나 실험 유역에서는 규모가 작은 강우 이벤트에도 비교적 명료한 유출 피크가 출현하고 있어 지하 심부로의 침투 속도 자체가 높지 않은 것으로 보인다. 실험 유역이 스킨리아콘의 사면에 위치하므로 기반암의 불투수층을 생각하기는 어렵다. 그러나 스킨리아콘에도 단편적으로 용암류가 분포할 수 있으며, 특히 <그림 5>와 같이 하곡 사면 기저부에서 세립질 입자를 매트릭스로 하는 세력의 고결층 위에 다수의 토양 파이프가 발달하고 있는 사실로부터 국지적인 불투수층의 존재를 충분히 생각할 수 있다.

스킨리아콘이 형성된 직후부터 화산체 사면은 풍화 작용과 매스무브먼트에 의한 환경사화 과정을 겪게 된다(Wood, 1980; Hooper and Sheridan, 1998). 그리고 환경사화 과정에서 생긴 세립질 물질이 입자 간격을 채우거나 또는 토층이 형성되어 스킨리아콘의 투수성은 점차 낮아지고, 사면을 따라 지표류가 발생하면서 우곡이 나타나게 된다. 따라서 스킨리아콘의 형성 시기를 추정하는 지표로서 스킨리아콘의 최대 사면각(Scotter and Trask, 1971), 기저 직경에 대한 높이의 비율(Wood, 1980; 현경희 · 김태호, 2001) 등 화산체 외형의 변화나 스킨리아콘 형성시 흘러나온 용암류 표면의 지형 변화(Bloomfield, 1975) 이외에 스킨리아콘 사면에 발달한 우곡의 분포 밀도(Hasenaka and Carmichael, 1985)가 사용되고 있다.

한편, 7월 9일 11:15에 41.4L/s와 10일 01:30에 36.3L/s의 유출 피크를 일으킨 강우 이벤트는 9일 05:15부터 시작하여 총강우량 146.5mm를 기록하며 10일 11:15에 종료하였으나, 유량은 이후에도 지속적으로 상승하여 10일 19:30에 8.5L/s의 피크를 다시 기록하고 있다(그림 8). 이 피크는 지체 시간이 매우 짧은

침예한 모양의 1차 피크(initial peak)와는 출현 양상이 매우 달라 강우 피크의 발생 시각으로부터 상당한 시간차를 두고 나타날 뿐 아니라 피크의 모양도 완만한 소위 2차 피크(secondary peak)에 해당한다. 강우 피크와 거의 동시에 발생하는 1차 피크는 일반적으로 호튼형 지표류나 포화면의 확대와 관련된 포화 지표류에 기인하는데 비하여 2차 피크는 토양층의 공극을 채우고 있는 토양 수분과 관련된 측방 침투류의 가능성이 높다(田中, 1996). 이런 2차 피크는 7월 7일, 9월 7일 및 9월 15일 등 비교적 지속 시간이 긴 강우 이벤트에서 발생하는 경향을 보이고 있어 예외적인 일회성 현상으로 보기 어렵다.

#### IV. 결론

제주도 오름의 대부분을 차지하고 있는 스킨리아콘의 유출 특성을 밝히기 위하여 한라산 어리목에 위치하는 표고 1,169m의 어승생오름 남사면에 면적 5.1ha의 실험 유역을 설정하였다. 그리고 2007년 4월 11일부터 11월 26일까지 230일에 걸쳐 유량과 강우량의 수문 관측을 실시하고 실험 유역의 지형 및 토층 구조를 조사하였다.

실험 유역의 기저 유출은 4월부터 점진적으로 증가하다가 10월 이후에는 다시 감소하는 경향을 보인다. 수위 관측 지점에서는 전 기간에 걸쳐 유출이 발생함으로써 유수가 고갈된 상태는 한번도 나타나지 않았다. 관측 기간에 연속 강우량이 5mm를 넘은 강우 이벤트는 전부 48회 발생하였으며, 총강우량이 작거나 선행 강우가 없는 일부 이벤트를 제외하면 실험 유역에서는 강우 발생시 거의 예외 없이 유출의 피크가 출현하였다.

강우에 반응하여 초기 유량으로부터 침투 유량에 이르는 상승 곡선과 침투유량 이후의 하강 곡선이 매우 급격하게 변화하는 섬광적인 유출이 발생하며, 침투 유량이 발생할 때까지의 지체 시간이 매우 짧다. 이런 특성은 토양 수분량이 많은 장마 기간뿐 아니라 전 기간에 걸쳐 확인되는데, 강우 이벤트의 88.9%에서 지체 시간은 45분 이내이며, 평균 지체 시간은 35.8분으로 줄

어든다.

연속 강우량이 증가하면 빠른 유출 성분의 유출률도 증가하나, 그 증가율은 높지 않으며 최대 유출률도 24.7%에 불과하다. 또한 68.3%의 강우 이벤트에서 빠른 유출 성분의 유출률은 1%를 넘지 못하고 있어 총강우량에 대하여 빠른 유출 성분이 차지하는 비율은 높지 않은 편이다. 장마 기간의 빠른 유출률 변화를 보면 연속 강우량뿐 아니라 선행 강우도 빠른 유출 성분의 유출률에 영향을 미치고 있다.

비교적 지속 시간이 긴 강우 이벤트에서는 침투 강우에 기인하는 1차 피크 이외에 강우가 종료한 뒤에 완만한 2차 피크도 출현한다. 1차 피크는 호튼형 지표류나 포화 지표류에 기인하는데 비하여 2차 피크는 측방 침투류에 기인하는 것으로 보인다.

세립질 입자를 매트릭스로 하는 세력의 고결층 위에 토양 파이프가 잘 발달하고 있는 사실로부터 국지적인 불투수층을 생각할 수 있으며, 이 불투수층이 실험 유역의 지속적이고 때로는 선풍적인 유출에 관여하는 것으로 판단된다.

본 연구 결과는 어승생오름의 한 유역을 대상으로 얻어진 것이므로 관측된 유출 특성을 일반화하기 위해서는 무엇보다도 먼저 다른 오름에서의 추가 관측을 통한 수문 자료의 축적이 필요하다. 그리고 이런 자료를 토대로 오름의 유형과 특성을 고려한 유출 모델을 개발함으로써 오름 지대의 지하수 함양량 산정의 정확도를 제고할 수 있을 뿐 아니라 오름 지대 수자원의 관리 및 이용 계획의 수립에도 활용할 수 있을 것이다. 또한 오름 사면에서의 물의 거동과 관련된 유출 현상은 화산체 사면 지형의 발달에 중요한 역할을 하고 있으므로 유출 프로세스의 규명은 제주도의 중요한 자연 자원인 오름의 보전과 관리에도 필요한 이론적 토대가 될 수 있을 것이다.

### 註

1) 습골은 지표면에 노출되어 있는 공동이나 갈라진 틈으로 용암동굴과 같이 습골을 통하여 우수가 지하로 무한정 유입될

수 있다.

- 2) 꽃자왈은 용암 전체가 부수어져 교결되지 않은 각상 또는 아각상 암괴의 형태로 유동하는 아아 용암, 즉 암괴상 아아 용암류(aa rubble flow)로 덮여 있는 지대이다(송시태, 2000). 교결되지 않은 암괴로 이루어져 있으므로 공극률과 투수성이 매우 높아 우수의 유입량과 일시적인 저류 능력이 매우 높은 제주도의 대표적인 투수성 지질이다.
- 3) Hewlett and Hibbert(1967)는 1시간 단위의 자료를 토대로 작성한 하이드로그래프에서 상승 곡선이 시작되는 지점부터 0.55L/s/km<sup>2</sup>/hr, 즉 시간당 유량 0.55L/s/km<sup>2</sup>의 기울기를 갖는 직선을 긋고, 직선의 상부를 빠른 유출(quick flow)로 하부를 지체 유출(delayed flow)로 나누었다. 이렇게 분할된 유출 성분이 실제 유출 성분에 엄밀하게 대응하는 것은 아니지만, 다수의 연구 사례에서 이 방법이 사용되고 있으므로 상이한 지역에서 다양한 면적을 지닌 유역의 유출량 크기를 비교하는 데에는 매우 유용하다(Mosley, 1979; Pearce et al., 1986; 岩下 외, 1994).

### 참고문헌

김태호, 2001, “제주도의 화산지형과 보전”, 자연보존, 114, 1-7.

농촌진흥청, 1976, 정밀토양도(제주도).

박승필, 1985, “제주도 측화산에 관한 연구”, 전남대학교 논문집, 30, 159-166.

송시태, 2000, 제주도 암괴상 아아용암류의 분포 및 암질에 관한 연구, 부산대학교 박사학위논문.

윤정수, 1995, “제주도 북사면의 기생화산체에 관한 연구”, 제주대학교 해양연구소연구보고, 19, 25~38.

田中幸哉·金泰鎬·松倉公憲, 2000, “화강암 및 편마암 산지유역의 유출특성”, 대한지리학회지, 35, 641-647.

제주도, 1997, 제주의 오름.

제주도, 2000, 제주도 지하수 보전·관리계획 보고서.

제주도민속자연사박물관, 2000, 제주도토양도감.

현경희·김태호, 2001, “제주도 스크리아론의 사면발달”, 한국제4기학회지, 15, 37-46.

逢坂興宏, 1996, “斜面土層構造の測定”, 恩田裕一·奥西一夫·飯田智之·辻村貞貴(編), 水文地形學, 古今書院, 15-23.

- 岩下廣和 · 恩田裕一 · 一柳錦平, 1994, “天龍川上流域における急峻な3つの小流域の流出特性の違い”, 名古屋大學農學部演習林報告, 13, 85-108.
- 長谷中利昭 · 李文遠 · 谷口宏充 · 北風嵐 · 宮本毅 · 藤卷宏和, 1998, “韓國濟州單性火山群の火山カタログ”, 東北アジア研究, 2, 41-74.
- 田中正, 1996, “降雨流出過程”, 恩田裕一 · 奥西一夫 · 飯田智之 · 辻村眞貴(編), 水文地形學, 古今書院, 56-66.
- 横山泉 · 荒木重雄 · 中村一明, 1992, 火山, 岩波書店.
- Bloomfield, K., 1975, A late-Quaternary monogenetic volcano field in central Mexico, *Geol. Rundsch.*, 64, 476-497.
- Hasenaka, T. and Carmichael, I. S. E., 1985, The cinder cones of Michoacan- Guanajuato, central Mexico: their age, volume and distribution, and magma discharge rate, *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, 25, 105-124.
- Hewlett, J. D. and Hibbert, A. R., 1967, Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas, Sopper, W. E. and Lull, H. W. (eds), *International Symposium on Forest Hydrology*, 275-290, Pergamon.
- Hooper, D. M. and Sheridan, M. F., 1998, Computer-simulation models of scoria cone degradation, *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, 83, 241-267.
- McGetchin, T. R., Settle, M. and Chouet, B. A., 1974, Cinder cone growth modeled after northeast crater, Mount Etna, Sicily, *Jour. Geophys. Res.*, 79, 3257-3272.
- Mosley, M. P., 1979, Streamflow generation in a forested watershed, New Zealand, *Water Resour. Res.*, 15, 795-806.
- Pearce, A. J., Stewart, M. K. and Sklash, M. G., 1986, Storm runoff generation in humid headwater catchments, I. Where does the water come from?, *Water Resour. Res.*, 22, 1263-1272.
- Scott, D. H. and Trask, N. J., 1971, Geology of the Lunar Crater Volcanic Field, Nye County, Nevada, U.S. Geol. Surv. Prof. Paper, 599-1.
- Wood, C. A., 1980, Morphometrical analysis of cinder cone degradation, *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, 8, 137-160.

최초투고일 08. 04. 20

최종접수일 08. 06. 07