

한라산 아고산대 조면현무암 소유역의 유출 특성*

김태호** · 다나카유키야***

Runoff Characteristics of a Small Trachybasaltic Basin in the Subalpine Zone of Mt. Halla*

KIM, Tae-Ho** · TANAKA, Yukiya***

요약 : 제주도의 하천 특성을 밝히기 위한 일환으로 한라산 아고산대에서 발원하는 외도천 최상류의 1차수 유역에서 수문관측을 실시하여 강우유출 특성을 조사하였다. 조면현무암으로 이루어진 실험유역은 관목과 초본군락이 탁월한 표고 1,600m의 만세동산 초지대에 위치하고 있으며 유역면적은 3.5ha이다. 일정 규모 이상의 강우강도와 연속 강우량이 발생한 강우 이벤트에 대해서는 침투유량의 출현이 급격하고 오래 지속되지 못하는 플래쉬형 유출반응을 보이는 반면에 강우강도와 연속 강우량이 적으면 유출이 전혀 발생하지 않거나 또는 반응이 완만하여 침투유량이 명료하지 않은 소규모 유출로 이어진다. 강우유출에는 Horton형 지표류나 포화 지표류와 같은 빠른 유출의 기여가 큰 것으로 보인다.

주요어 : 유출 특성, 조면현무암, 아고산대, 한라산

Abstract : Hydrological observations were carried out in a first order drainage basin of Oedo River to examine stream characteristics in Jeju Island. The experimental basin is underlain by trachybasalt, and is located in the subalpine grassland(1,600m asl) around Mansedongsan of Mt. Halla. The rainfall event over a specific intensity and accumulated amount of precipitation shows a typical flash runoff which is characterized by a rapid occurrence and decrease of a peak discharge. By contrast, the rainfall event with a low intensity and accumulated amount of precipitation shows no runoff or a slow runoff that has a unclear peak discharge. The quick flow such as Hortonian overland flow and saturation overland flow is responsible for the runoff response in the experimental basin.

Key Words : runoff characteristics, trachybasalt, subalpine zone, Mt. Halla

I. 서론

제 4 기의 분화활동으로 형성된 제주도는 화산 지질의 특성으로 지표류의 형성에 불리하다. 하천 유역은 대부분 투수성이 매우 높은 현무암질이나 조면현무암질 용암으로 구성되어 있으므로 강수가 발생하여도 지표유출이 오래 지속되지 못한다. 더욱이 지하수면이 해수면 부근의 낮은 고도에 위

치하고 있으므로 기저유출에 의한 유수도 해안지대의 일부 하류구간에서만 볼 수 있다. 따라서 제주도의 하천은 국내 최다우지에 소재하고 있음에도 불구하고 강수 직후에만 일시적으로 유수가 형성되는 전형적인 건천을 이루며 하계망의 발달도 미약한 편이다(제주도, 2003).

건천과 낮은 하계밀도와 같은 특성 때문에 제주도의 하천은 한반도의 상류하천(perennial

* 이 논문은 2002년도 제주대학교 발전기금 청봉학술연구기금 지원에 의해서 연구된 논문임.

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

*** 경희대학교 지리학과 부교수(Associate Professor, Dept. of Geography, Kyunghee University), ytanaka@khu.ac.kr

stream)에 비하여 상대적으로 주목을 받지 못하였다. 그러나 장마전선과 태풍으로 인한 호우는 홍수를 일으킴으로써 하류의 해안지대에서는 매년 수해가 반복적으로 발생하고 있다. 이와 같은 상황을 개선할 목적으로 제주도는 최근 지방2급 하천은 물론 소하천을 대상으로 하도 개·보수공사를 활발하게 실시하고 있다(제주도, 2003). 그러나 이들 하천 정비사업은 유출 특성이나 하도 특성이 고려되지 않은 채 이루어지는 하폭 확장과 하상 준설 등 단순한 하도단면적의 확장공사에 불과하며, 그 결과 지속적인 하천 공사에도 불구하고 실질적인 수해의 위험성으로부터 완전히 벗어났다고 보기는 어렵다. 방재 측면의 효율적인 하천 관리를 위해서는 무엇보다도 대상 하천의 유출 및 하도 특성의 규명이 필요함에도 아직까지 제주도 하천의 유출 특성이나 하도 특성에 관한 조사는 거의 이루어지고 있지 않은 실정이다.

한편, 사면지형의 형성과 발달을 규명하기 위한 연구로서 수문지형학적 방법이 주목을 받고 있다(Anderson and Burt, 1990; Onda, 1994; Anderson and Brooks, 1996; Hirose et al., 1996; Tanaka and Agata, 1997). 예를 들면 산지에서의 급격한 지형 변화를 일으키는 사면붕괴나 토석류는 우수가 사면의 토층과 풍화층으로 침투하여 공극을 포화시키고 전단강도를 낮춤으로써 발생한다(Sidle and Swanston, 1982). 공극수의 포화는 사면에서 일어나는 물의 동태와 관련된 현상이므로 매스무브먼트의 발생기구를 설명하기 위해서도 강우유출 특성의 규명은 필수적이다. 이와 같은 동향을 반영하여 국내에서도 최근 산지 소유역을 대상으로 유출 특성을 밝히기 위한 실험적 연구가 활발하게 진행되고 있다(김경하 외, 1996; 田中 외, 2000; 박재철·이현호, 2000; 전재범, 2003; Tanaka et al., 2003). 그러나 이들은 화강암과 편마암으로 구성된 유역에서 이루어진 연구로서 제주도와 같이 제4기의 화산암이 분포하는 유역에서의 연구사례는 아직까지 보고되고 있지 않다.

이 논문에서는 제주도 하천의 특성을 밝히고

관리를 위한 기초자료를 제공할 목적으로 한라산 아고산대에서 발원하는 외도천 최상류의 1차수 유역에서 수문관측을 실시하여 강우유출 특성을 조사하였다.

II. 연구지역 및 방법

1. 연구지역 개관

제주도의 하천은 섬 중앙의 한라산을 중심으로 발산하는 방사상 하계모양을 이루고 있다. 그러나 제주도의 동·서부지역은 한라산 능선의 말단에 위치하므로 사면의 경사가 비교적 완만하고 해안지대도 매우 평탄한 용암대지로 이루어져 있으므로 남·북부지역에 비하여 하천 발달은 상대적으로 미약하다. 제주도에 국가하천은 출현하지 않으며, 총길이 771.1km에 이르는 60개의 지방2급 하천과 66개의 소하천이 분포하고 있다(제주도, 2003).

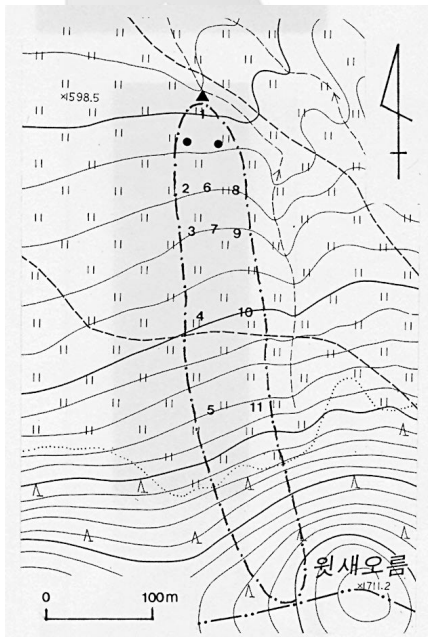
외도천은 지방2급 하천으로 백록담 서벽을 비롯하여 장구목, 윗세오름 등 표고 1,700m 이상 산악지역에서 발원하고 있다. 한라산 서쪽 산록에서 어리목계곡과 천아계곡을 만들어 제주시 해안동과 북제주군 애월읍의 행정계를 이룬 후에 제주시 내도동 해안에서 남해로 유입하고 있다. 축척 1:5,000 지형도에서 외도천은 50개의 1차수 하천을 지닌 4차수 하천으로 평균 분기율은 3.94로 나타나며, 최장 구간의 하천 길이는 18.3km이다(김미령, 2003).

실험유역은 윗세오름 중봉(1,711m)에서 만세동산(1,606m)으로 이어지는 아고산대의 서쪽 완사면에 위치하는 1차수 유역으로 1:5,000 지형도에 유로는 표기되어 있지 않다. 중봉 북서사면에서 어리목 등산로 쪽으로 뺀 세장형 유역이며, 완사면에 위치하는 관계로 분수계가 명료하지는 않아 정확하게 계산하기는 어려우나 약 3.5ha의 유역면적을 지니고 있다(그림 1). 스킨아콘으로 이루어진 유역 상류는 비교적 급경사를 보이거나 하류의



<그림 1> 한라산 만세등산 일대의 항공사진

사각형 부분은 그림 2로 나타낸 범위에 해당하며, ●표시는 수문관측지점을 가리킨.



<그림 2> 실험유역 및 조사지점

▲ 수문관측; ● 투수시험; 1~11 관입시험

경사는 8.5° 정도로서 비교적 완만하며 유역 전체의 기복비는 0.22이다(그림 2).

한라산 아고산대에는 조면현무암과 조면암이 넓게 분포하고 있는데, 실험유역은 주로 범정동 조면현무암으로 이루어져 있다. 회색 또는 암회색을 띠는 범정동 조면현무암은 1mm 크기의 기공을 40% 정도 함유하고 있으며, 반정은 장석이 우세하고 소량의 휘석과 감람석을 포함하고 있다. SiO₂의 함량은 49.1~53.29%의 범위를 보인다(제주도, 2000).

표고 1,400m 이상의 한라산 아고산대에는 구상나무로 대표되는 침엽수림을 비롯하여 관목림과 초본군락이 넓게 분포하고 있다(임양재 외, 1991). 이 가운데 관목림과 초본군락은 한라산 정상부를 중심으로 주로 서쪽과 남쪽의 평탄지와 완사면에 분포하고 있으나, 일사로 인한 수분의 증발현상과 바람의 영향으로 동일한 지역에서도 북향 사면이나 하곡 사면에는 구상나무로 이루어진 교목림이



<그림 3> 실험유역의 지형 및 식생경관



<그림 4> 관수형 침투계를 이용한 투수시험

출현한다(김문홍·김찬수, 1985). 실험유역에서도 시로미, 철쭉 등의 관목림과 산겨이삭, 김의털 등의 초본군락이 탁월하나, 스코리아콘의 북향사면에 해당하는 유역의 최상류 일대는 구상나무와 주목 등으로 이루어진 침엽수림이 차지하고 있다(그림 3). 또한 유역 중앙에 발달한 우곡을 중심으로 훼손지도 넓게 분포하고 있다.

실험유역 인근에는 최근 잇세오름 대피소에 자동기상관측소(AWS)가 설치되어 관측이 이루어지고 있으나 아직 관측 자료는 공개되고 있지 않다. 따라서 가장 가까이에 소재하고 있는 어리목관측소의 자료를 참고하면, 표고 970m에서의 연평균기온은 9.5°C 이므로 한라산의 기온체감률 -0.58°C(공우석, 1999)를 적용하면 실험유역의 연평균기온은 4.5°C로 추정된다. 어리목에서의 연강수량은 3,539mm로서 국내 최다우지의 특징을 잘 보여준다(표 1).

2. 연구방법

실험유역의 토층구조를 파악하기 위하여 11개

지점에서 사면조사용 간이관입시험기(筑波丸東製 S06-M)를 사용하여 관입시험을 실시하였다(그림 2). 이 관입시험기의 선단부에는 직경 2.5cm의 콘이 달려 있으며, 손잡이 부분 50cm 위쪽으로부터 5kg 무게의 추를 반복적으로 떨어뜨리면 시험기 선단부가 지중으로 관입하게 된다. 콘을 10cm 관입시키기 위하여 사용된 추의 낙하회수(N_{10} 값)를 근거로 토층의 두께를 비롯하여 토질강도나 토층구조를 파악할 수 있다(逢坂, 1996).

또한 2개 지점에서는 관수형 침투계(flood-type infiltrometer)를 사용하여 토양의 투수시험을 실시하였다(그림 2). 이 침투계는 직경이 10cm인 원통모양의 관을 지표면에 5~10cm 삽입하여 고정시킨 뒤에 관 안에 수위가 일정하게 유지되도록 관 위에 물통을 놓아 물을 지속적으로 공급하면서 일정한 시간 간격으로 물통에서 감소되는 물의 양을 기록함으로써 토양의 침투율을 구하는 방식이다(그림 4). 관수형 침투계는 가볍고 운반에 용이하며 적은 물로도 시험이 가능하므로 간편하게 사용할 수 있으나 지중에 침투한 물이 수평방향으로도 퍼져갈 수 있기 때문에 실제보다 높은 침투율이

<표 1> 어리목 자동기상관측소의 기온(°C) 및 강수량(mm)

요소	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	전년
기온	-3.4	-0.2	2.4	10.0	13.3	16.6	20.1	20.7	17.7	9.9	7.8	-0.7	9.5
강수량	163.5	154.0	120.5	368.5	569.5	451.5	451.0	532.0	496.5	49.0	132.5	50.5	3539.0



〈그림 5〉 수문관측용 수로

기록될 수 있는 단점을 갖고 있다(辻村·恩田, 1996).

수문관측을 위하여 우선 폭 1.2m, 깊이 1m의 반원형 우곡의 형태를 띠고 있는 실험유역의 출구에 길이 136cm, 높이 72cm의 철제 관측용 수로를 설치하였다. 수로는 규격화된 6인치 파살플룸(parshall flume)으로서 수로 좌측의 박스 안에 50cm 길이의 수위계(Unidata U6521J)를 부착하여 수위의 변동 상황을 감시하였다. 수로 양옆에는 50cm 높이로 모래주머니를 쌓아올려 소규모의 보(weir)를 만들어 유역으로부터 흘러나오는 모든 지표수가 수로를 통과하도록 하였다(그림 5). 수로를 통과하는 유수는 수로 벽면의 구멍을 통하여 자유롭게 수위 관측용 박스로 들어갈 수 있으므로 박스 안의 수위를 이용하여 유량을 구할 수 있다. 하천 유량은 파살플룸에서 관측된 수위와 $q = 0.264H_a^{1.58}$ 의 관계식을 지니고 있으며, 여기에서 q 는 유량(l/s), H_a 는 관측 수위(cm)를 가리킨다(土木學會, 1985).

또한 강우량을 관측하기 위하여 수로 인근에 우량계(Davis 7852M)를 설치하였다. 우량계는 티핑버킷(tipping bucket)을 이용한 자기우량계로서 버킷의 용량은 0.2mm이다. 수위와 강우량 데이터는 20분 간격으로 데이터로거(EME System OWL2pe)를 이용하여 자동으로 기록하였다. 또한 태양열판(Siemens ST10)을 설치하여 데이터로거

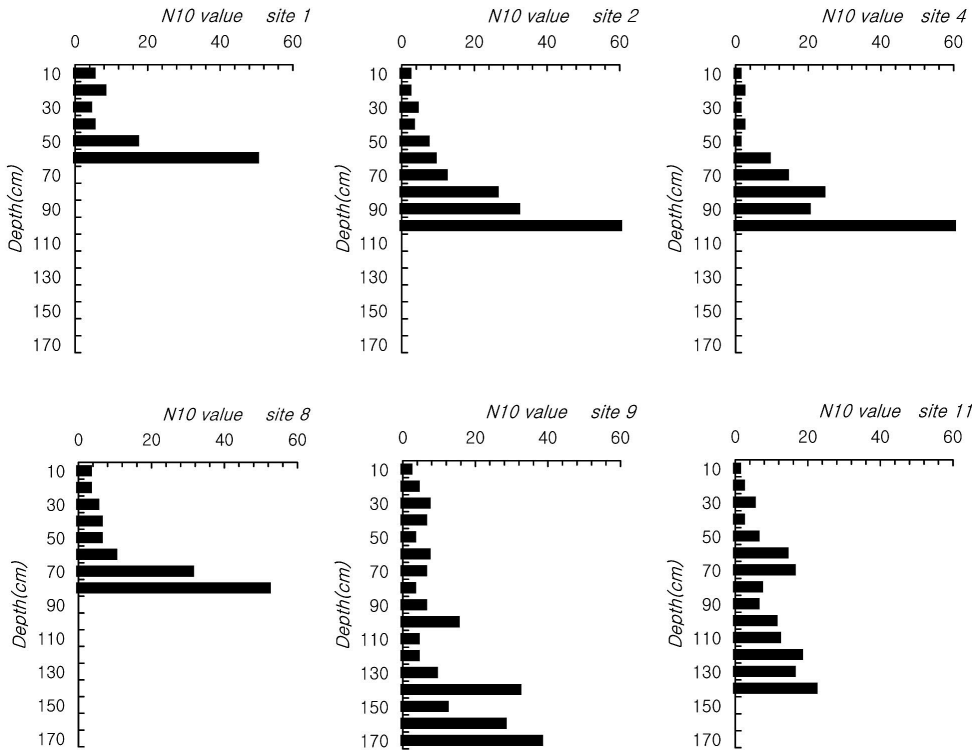
에 지속적으로 전력을 공급하였다. 수위와 강우량의 관측 데이터는 메모리 용량 관계로 매달 1회 휴대용 컴퓨터를 이용하여 회수하였다. 2004년도의 관측은 4월 10일부터 9월 18일까지 162일간에 걸쳐 실시되었다.

III. 결과 및 고찰

1. 토양 특성

관입시험에 의한 실험유역의 토층구조는 장소에 따라 다소 차이를 보인다(그림 6). 좌안 사면에서는 대체로 40cm 깊이까지 연약층이 분포하고 80cm 깊이에서 기반암이 나타나며, 관측수로가 설치되어 있는 우곡 하상면에서는 50cm 깊이에서 기반암이 나타난다. 반면에 우안 사면에서는 좌안 사면과 같은 양상을 보이는 지점이 있는가 하면 100cm 깊이까지 연약층이 분포하는 지점도 있다. 그러나 100cm를 넘으면 N_{10} 값은 점진적으로 증가하고 있어 연약층 하부에 기반암의 풍화층이 분포하는 것으로 생각된다. 일부 조사지점에서는 깊이와 함께 증가하던 N_{10} 값이 갑자기 감소하다가 다시 증가하고 있어 기반암에 절리가 형성되어 있음을 시사하고 있다. 한라산 아고산 초지대에는 도처에 튜물러스(tumulus)의 형태로 현무암이 노출하고 있으며, 노암 표면에는 현무암 특유의 절리가 잘 발달하고 있다. 또한 이들 절리를 따라 분리된 암괴가 암괴원을 형성하기도 하는데, 조사지일대에도 암괴가 산재하고 있다. 따라서 실험유역은 절리가 잘 발달한 현무암의 기반 위에 80~100cm 두께의 토층이 분포하는 것으로 생각된다.

우곡 주변에 노출된 토양단면에 의하면 표층 10~15cm는 흑색토(10Y 2/1)가 분포하며, 흑색토 아래로 20cm 깊이의 암갈색토(7.5YR 3/4)와 암갈색토 아래로 자갈이 섞인 갈색토(10YR 4/6)가 나타난다. 다른 단면에서는 표층 25cm까지 흑색토가



<그림 6> 관입시험에 의한 토층구조

분포하며, 그 아래로 자갈이 섞인 갈색토가 이어지고 있다. 관측수위가 설치되어 있는 우곡 하상은 갈색토로 이루어져 있으며, 갈색토의 토양경도는 $10.0 \sim 16.7 \text{kgf/cm}^2$ 로서 흑색토의 $1.4 \sim 3.0 \text{kgf/cm}^2$ 에 비하여 5배 이상의 경도를 보인다.

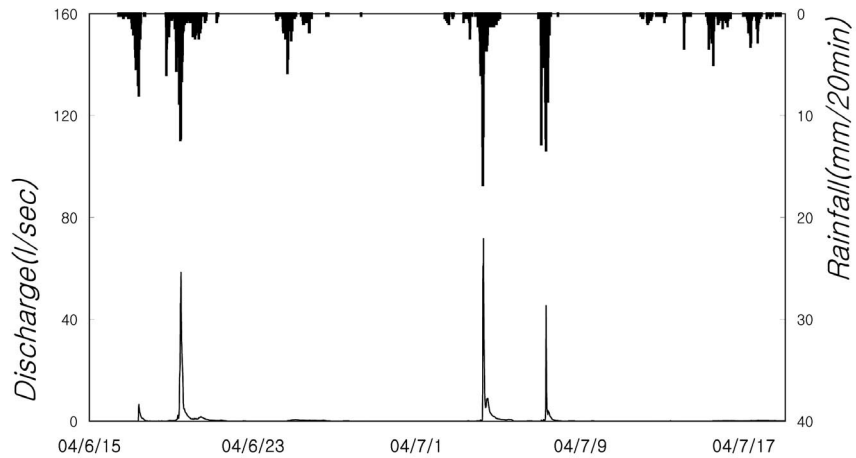
한편, 관수형 침투계를 이용한 투수시험은 초지와 나지의 2개 지점에서 이루어졌는데, 주로 세력으로 덮여 있는 나지에서의 침투율은 $2.03 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ 이다. 반면에 김의털과 조릿대로 덮여 있는 초지에서의 침투율은 $8.34 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 로서 나지에 비하여 1/2.5 수준으로 차이를 보인다.

2. 강우유출 특성

그림 7에 장마기간을 중심으로 6월 15일부터 7월 19일까지 34일간의 강우량과 유량의 변동을 20

분 간격의 하이드로그래프(hydrograph)로 나타냈다. 제주지역의 2004년도 장마는 전형적인 마른장마로서 6월 24일부터 7월 19일까지 26일간의 강우량은 예년의 30% 수준을 기록하였다. 즉 서귀포와 고산에서 관측된 강우량은 각각 116.5mm와 92mm에 불과하여 전년도의 385.3mm와 299.3mm에 비하여 현저하게 감소하였다(제주일보, 2004). 한라산 아고산대에서도 비슷한 양상이 나타나는데, 실험유역에서 이 기간에 관측된 강우량은 총 529.9mm로서 어리목에서 관측된 전년도의 강우량과 차이를 보인다(표 1).

실험유역에서 장마기간에 연속 강우량이 10mm를 넘는 강우 이벤트는 전부 9회 발생하였다. 이 가운데 50mm 이상의 강우량을 기록한 이벤트는 6월 17일 0:40부터 12:20까지의 84.4mm, 18일 17:40부터 20일 17:40까지의 206.8mm, 24일 9:40부



<그림 7> 2004년도 장마기간의 하이드로그래프

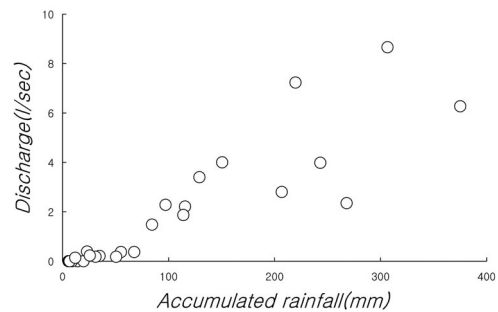
터 25일 20:40까지의 67.6mm, 7월 3일 20:40부터 5일 1:40까지의 150.6mm, 6일 22:40부터 7일 13:20까지의 97.2mm 및 15일 3:40부터 16일 8:20까지의 50.6mm로서 전부 6회이다. 특히 7월 3일부터 2일간 지속된 강우 이벤트는 제7호 태풍 민들레에 동반된 강우로서 총강우량은 6월18일부터 시작된 강우 이벤트에 미치지 못하나, 7월 4일 5:40에 장마기간에 관측된 20분간 강우량의 최대치 16.8mm를 기록하여 집중호우의 특징을 잘 보여주고 있다.

한편, 34일간의 하이드로그래프에서 첨두유량(peak discharge)은 6월 17일 10:00의 6.5 l/s를 시작으로 19일 11:20의 58.5 l/s, 7월 4일 6:20의 71.7 l/s 및 7일 7:40의 45.4 l/s로 전부 4회 관측되었으며, 유량의 감수기인 6월 20일 10:40과 7월 4일 11:00에는 각각 1.7 l/s와 8.9 l/s의 2차 피크도 출현하였다. 또한 피크가 명료하지는 않으나 6월 25일 1:40에 0.6 l/s, 7월 17일 16:40에 0.4 l/s로 유량이 다소 증가하였다.

따라서 장마기간에 10mm이상의 연속 강우량을 기록한 9회의 강우 이벤트에 대하여 실질적으로 유출의 피크가 출현한 것은 4회에 불과하여 강우가 발생한다고 하더라도 반드시 유출로 이어지지 않음을 알 수 있다. 이러한 현상은 전 관측기간을 통하여 일어나고 있는데, 예를 들면 5월 30일 5:30

부터 31일 8:20까지 55.2mm, 9월 14일 15:20부터 15일 15:40까지 31.2mm의 강우량이 기록되었으나 관측된 유량은 0.7 l/s 및 0.2 l/s에 불과하며 피크도 명료하지 않은 편이다. 또한 8월 9일 13:00부터 14:20까지 집중적인 19.8mm의 강우량이 기록되었으나 유출은 전혀 발생하지 않았다. 연속 강우량이 5mm를 넘는 28개 강우 이벤트를 대상으로 총강우량 및 시간당 강우량에 대한 평균유량의 관계를 살펴보면, 모두 정의 관계를 보이고 있으나 총강우량이 30mm를 넘지 않거나 시간당 강우량이 2mm 이하인 경우에는 대부분 유출이 일어나지 않는다(그림 8).

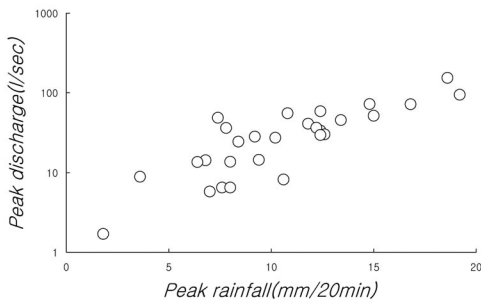
그림 7의 하이드로그래프에 의하면 강우에 반응하여 초기유량으로부터 첨두유량에 이르는 상



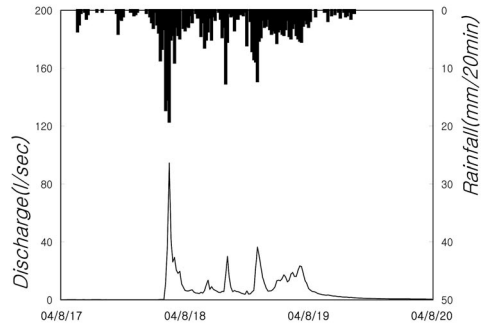
<그림 8> 연속 강우량과 유출량과의 관계

승곡선(rising limb)뿐 아니라 침두유량 이후의 하강곡선(falling limb)도 매우 급격하게 나타나 실험 유역에서는 전형적인 플래쉬성 유출이 발생하고 있음을 알 수 있다. 그러나 신속한 유출반응은 총 강우량이 80mm 이상이거나 시간당 강우량이 3mm를 넘는 비교적 규모가 큰 강우에만 국한되며, 소규모의 강우에 대해서는 완만한 상승과 하강곡선을 보임으로써 피크의 형태가 명료하지 않거나 또는 반응을 전혀 보이지 않는다.

유출의 피크가 명료하게 나타나는 29회의 강우 이벤트를 대상으로 20분간 침두강우량과 침두유량의 관계를 살펴보면 두 요소 사이에는 비례관계가 확인된다. 결정계수는 0.69로 높은 편은 아니나 전반적으로 침두강우량이 증가하면 침두유량도 증가하고 있다(그림 9). 실험유역에서는 강우의 피크와 유출의 피크가 발생하는 시간차, 즉 지체시간(lag time)이 매우 짧은 특징을 보인다. 그림 10은 8월 18일부터 20일까지의 하이드로그래프로서 18일 0:00부터 19일 15:20까지 355.8mm의 연속 강우량이 관측되었다. 18일 4:20에 기록된 19.2mm의 최대강우량을 비롯하여 18일 11:00에 6.4mm, 15:00에 12.6mm, 21:00에 12.2mm, 19일 5:20에 5.4mm의 강우 피크가 출현하였다. 강우에 반응하여 유출은 18일 2:40부터 발생하고 있는데, 각각의 강우 피크에 대응하여 18일 4:20에 94.3 l/s, 11:40에 13.6 l/s, 15:20에 30.0 l/s, 21:00에 36.4 l/s, 19일 5:20에 23.0 l/s의 침두유량이 관측되었다. 따라서 지체시간이 40분을 보이는 경우도 있으나 대부분



<그림 9> 강우 피크와 침두유량과의 관계



<그림 10> 8월 18일~8월 20일의 하이드로그래프

은 20분 이내로서 강우의 피크와 거의 동시에 침두유량이 발생하는 것으로 보인다. 이러한 경향은 전 관측기간에 걸쳐 확인되는데, 29회의 강우 이벤트 가운데 강우 피크가 발생한 후 20분 이내에 침두유량이 관측된 이벤트가 21회로서 전체의 72%를 차지하고 있다.

이상과 같은 관측결과를 정리하면 실험유역에서는 일정 규모 이상의 강우강도와 연속 강우량이 발생한 강우 이벤트에 대해서는 플래쉬성 유출이 나타나는데 비하여 강우강도와 연속 강우량이 작은 경우에는 유출이 발생하지 않거나 침두유량이 명료하지 않은 소규모의 유출이 발생할 뿐이다. 이러한 결과는 기반암에 절리가 조밀하게 발달한 화강암 유역에서의 유출특성과 매우 유사하다(田中 외, 2000). 즉 우수가 절리를 통하여 지하 깊숙이 침투하기 때문에 강우강도가 크지 않거나 연속 강우량이 작은 강우 이벤트의 경우에는 유출반응이 완만하고 침두유량도 크지 않은 반면 강우강도가 일정 수준에 도달하여 침투율을 초과하게 되면 명료한 유출의 피크가 발생한다.

그러나 8월 9일에 시간당 강우량 11.9mm의 호우성 강우가 발생했으나 유출로 이어지지 않은 사례에서 볼 수 있듯이 침두유출이 발생하기 위해서는 선행강우가 필요한 것으로 보인다. 실험유역에서의 평균 지체시간은 22.1분에 불과하므로 강우의 피크와 침두유출이 거의 동시에 발생한다고 할 수 있으나 강우의 시작과 침두유출의 발생 사이에

는 어느 정도 시간적 차이가 나타난다.

그림 10의 하이드로그래프에 의하면 8월 18일 2:40에 초기유량 0.1 l/s의 유출이 시작되었으며, 4:20에 19.2mm의 강우 피크와 동시에 94.4 l/s의 침투유량이 관측되었다. 그러나 강우 이벤트는 전날인 17일 11:00에 3.6mm를 시작으로 18일 4:00까지 83.2mm의 연속 강우량을 기록하고 있어 침투 유출이 일어나기 이전에 이미 상당한 선행강우가 있었음을 알 수 있다. 따라서 강우와 더불어 지중으로 우수가 활발하게 침투하면서 지하수위가 상승하고 그 결과 우곡 주변에 포화면이 확대됨으로써 직접유출이 일어나며, 강우의 피크가 발생하면서 침투율을 초과한 강우로 인한 지표류도 직접유출에 기여하는 것으로 생각된다.

6월 30일 우곡에서 8m 떨어진 우안 사면에서 토층을 파본 결과에 의하면 지하수위는 약 1m 깊이에 위치하고 있었다. 이 시기에 발생한 강우로는 6월 24일 9:40부터 25일 20:40까지 연속 강우량 67.6mm를 기록한 이벤트가 있었으며 이후에는 0.2mm 규모의 강우가 수회 발생했을 뿐이다. 따라서 6월 25일부터 6월 30일까지 5일간 실질적인 강우는 발생하지 않았음에도 지하수위가 깊지 않은 심도에 위치하고 있다는 사실로부터 강우로 인한 지하수위의 상승과 포화면의 출현을 통하여 직접유출이 발생하는 것으로 생각할 수 있다. 이러한 점에서 강우에 대한 실험유역의 유출반응에는 Horton형 지표류나 포화 지표류와 같은 빠른 유출(quick flow)의 기여가 큰 것으로 보인다.

IV. 결론

제주도의 하천 특성을 밝히기 위한 일환으로 한라산 아고산대에서 발원하는 외도천 최상류의 조면현무암으로 이루어진 1차수 유역에서 수문관측을 실시하여 강우유출 특성을 조사하였다. 관측 결과에 의하면 실험유역에서는 일정 규모 이상의 강우강도와 연속 강우량이 발생한 강우 이벤트에

대해서는 초기유량으로부터 침투유량으로의 상승이 급격하고 이후의 유량 감소도 급격한 플래쉬형 유출이 나타난다. 반면에 강우강도와 연속 강우량이 적은 경우에는 유출이 발생하지 않거나 반응이 완만하여 침투유량이 명료하지 않은 소규모의 유출이 발생한다. 또한 강우유출에 Horton형 지표류나 포화 지표류와 같은 빠른 유출의 기여가 큰 것으로 보인다.

금번 결과는 한라산 아고산 초지대의 한 유역을 대상으로 얻어진 것이므로 관측된 강우유출 특성을 일반화하기 위해서는 대상 유역의 수를 늘리고 유역의 규모도 달리하는 등 데이터의 축적이 필요하다. 실제로 실험유역의 동쪽으로 인접한 유역에서는 현재 유출이 거의 발생하고 있지 않아 좁은 범위에서도 유출반응이 달라질 수 있음을 확인할 수 있기 때문이다.

제주도는 1999년부터 2004년까지 6개년에 걸쳐 총 71.7km의 구간을 대상으로 하천 개선사업을 실시하고 있다. 지난 1999년과 2000년에는 182억을 사용하여 15개 구간 12.9km를 정비하였으며, 2002년부터 2004년까지는 1,110억을 투입할 예정으로 매년 막대한 예산을 하천관리에 사용하고 있다. 그러나 하천 정비사업은 대부분 홍수를 유역 밖으로 신속하게 배수하기 위한 하도의 개변작업에 불과하다. 이러한 상황은 제주도 하천에 대한 유출 및 하도 특성에 관한 기초자료의 부족에서 기인하고 있다. 따라서 강우유출 특성에 관한 수문지형학적 연구는 금후 제주도 하천의 치수계획과 하도관리에 유용한 기초자료로 활용될 수 있을 뿐 아니라 물이 자원으로 인식되고 있는 최근의 현실을 고려할 때 제주도의 효율적인 물관리에도 기여할 수 있을 것이다.

사 사

관측장비의 구입, 설치 및 운용에 도움을 주신 한라산국립공원관리사무소 소장님과 직원 여러분 그

리고 한라산연구소의 고정근박사님께 감사드립니다.

참고문헌

공우석, 1999, “한라산의 수직적 기온 분포와 고산 식물의 온도적 범위”, 대한지리학회지, 34, 385-393.

김경하·원형규·이천룡·정용호, 1996, “산림 소 유역의 수문특성(I) 임상별 저류계수의 경 시적 변화”, 산림과학논문집, 54, 71-80.

김미령, 2003, 제주도 하천의 하계망분석, 제주대학교교육대학원 석사학위논문.

김찬수·김문홍, 1885, “한라산 아고산대 초원 및 관목림의 식물사회학적 연구”, 제주도(편) 한라산 천연보호구역 학술조사보고서, 311-330.

박재철·이헌호, 2000, “물순환모델에 의한 산지소 유역의 유출특성 분석 -팔공산유역을 대상으로-”, 한국임학회지, 89, 564-575.

임양재·백광수·이남주, 1991, 한라산의 식생, 중앙대학교출판부.

전재범, 2003, 경기도 남부 편마암 산지의 강우유 출 특성, 경희대학교대학원 석사학위논문.

田中幸哉·金泰鎬·松倉公憲, 2000, “화강암 및 편 마암 산지유역의 유출특성”, 대한지리학회 지, 35, 641-647.

제주도, 2000, 서귀포·하효리도폭 지질보고서.

제주도, 2003, 환경백서.

제주일보, 2004. 7. 19.

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·辻村眞貴(編), 水文地形學, 古今書院, 15-23.

辻村眞貴·恩田裕一, 1996, “浸透能と降下浸透の測定”, 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, 24-33.

恩田裕一, 1989, “土層の水貯留機能の水文特性および崩壊發生に及ぼす影響”, 地形, 10, 13-26.

土木學會, 1985, 水理公式集, 日本土木學會, 東京.

Anderson, M.G. and Burt, T.P., 1990, Process Studies in Hillslope Hydrology, John Wiley, New York.

Anderson, M.G. and Brooks, S.M., 1996, Advances in Hillslope Processes, John Wiley, New York.

Hirose, T., Onda, Y. and Matsukura, Y., 1994, “Runoff and solute characteristics in four small catchments with different bedrocks in the Abukuma mountains, Japan”, Transactions Japanese Geomorphological Union, 15A, 31-48.

Onda, Y., 1994, “Contrasting hydrological characteristics, slope processes and topography underlain by Paleozoic sedimentary rocks and granite”, Transactions Japanese Geomorphological Union, 15A, 49-66.

Pilgrim, D. H., Huff, D. D. and Steele, T. D., 1979, “Use of specific conductance and contact time relations for separating flow components in storm runoff”, Water Resources Research, 15, 329-339.

Sidle, R. C. and Swanston, D. N., 1982, “Analysis of small debris slide in coastal Alaska”, Canadian Geotechnical Journal, 19, 167-174.

Tanaka, Y. and Agata, Y., 1997, “Effects of runoff characteristics on the difference of drainage density in Soya hill, northern Japan”, Environmental Geology, 24, 74-85.

Tanaka, Y., Matsukura, Y and Kim, T., 2002, “Differences in runoff characteristics between granite and gneiss mountainous basins, Korea”, Transactions Japanese Geomorphological Union, 23, 349-356.

최초투고일 04. 10. 08
 최종접수일 04. 10. 20