

한라산 아고산 초지대 소유역의 물수지

안중기* · 김태호**

Water Balance of a Small Catchment in the Subalpine Grassland of Mt. Halla, Southern Korea

Junggi An*, Taeho Kim**

요약 : 한라산 만세동산의 표고 1,595~1,645m에 위치한 1차수 실험유역에서 관측한 수문자료와 인근 관측소의 기상자료를 토대로 물수지를 분석하여 한라산 아고산대의 수문순환 특성을 규명하였다. 실험유역은 주로 조면현무암으로 이루어진 면적 1.34ha의 소유역이며, 지표식생은 제주조릿대와 초본 군락이 우점하고 있다. 물수지 분석에는 2004년 4월 15일부터 9월 19일까지 157일에 걸쳐 20분 간격으로 관측한 강수량과 유량을 이용하였다. 실험유역은 해안 및 중산간지대의 저지보다 1.6~3배 많은 3,074mm의 강수량을 기록하였으며, 강수량의 27.6%에 해당하는 850mm가 유역 하류로 흘러나갔다. 증발산량은 강수량의 14.2%를 차지하는 437mm에 지나지 않으며, 나머지 58.2%에 해당하는 1,790mm는 기반암을 통과하여 지하로 이동하였다. 실험유역은 지형성 강수가 자주 발생하는 아고산대에 위치하므로 강수량이 많고 강수강도가 크나 유출량은 강수량의 30%를 넘지 못한다. 반면에 침투량은 유출량의 2배에 달하는 강수량의 60% 정도를 차지하고 있다. 따라서 한반도의 화강암이나 편마암 유역과는 달리 물수지 요소 가운데 침투 비율이 높게 나타나는데, 이것은 토양 공극율이 높고 토층 하부에 투수성이 큰 현무암질 용암이 분포하는 제주도의 지질 특성과 관계가 있는 것으로 생각된다.

주요어 : 유출, 침투, 물수지, 조면현무암, 아고산 초지대, 한라산

Abstract : In order to clarify some characteristics of hydrological cycle in the subalpine zone of Mt. Halla, water balance has been analysed using hydrological data of a first-order drainage basin around Mansedongsan and meteorological data of Odeung AWS. The experimental basin extends from 1,595 m to 1,645 m in altitude and has a catchment area of 1.34 ha. It is largely underlain by trachybasalt and covered with sasa bamboo and sedges. Hydrological observations were carried out every 20 minutes from April 15 to September 19, 2004. The basin shows the total precipitation of 3,074 mm that is 1.6 to 3 times of those in coastal and intermontane regions. Surface runoff amounts to 850 mm that is equivalent to 27.6% of the precipitation. By contrast, evapotranspiration only accounts for 14.2% of the precipitation, and the remnant of 1,790 mm penetrates underground through a basement. The basin is located in the subalpine zone, and then it has a high rainfall intensity as well as a large rainfall due to frequent orographic precipitation. But surface runoff usually dose not exceed 30% of the rainfall while percolation demonstrates about 2 times of the runoff. Compared with granite or gneiss basins in Korea Peninsula, the experimental basin is characterized by a higher portion of percolation in water balance. And it is probably related to the highly permeable basaltic lavas in Jeju Island which are also overlain by porous volcanic soils.

Key Words : runoff, percolation, water balance, trachybasalt, subalpine grassland, Mt. Halla

* 한국농촌공사 제주도본부 환경지질팀 과장(Section Chief, Team of Environmental Geology, KRC Jeju Province Office), angro40@hanmail.net

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

1. 서론

제주도는 연평균 강수량이 1,975mm에 달하는 국내 최다우지이다(제주도·한국수자원공사, 2003). 그러나 제4기의 화산 활동으로 분출된 투수성이 큰 현무암질 용암으로 유역이 이루어진 탓에 강수 직후에만 일시적으로 지표수가 나타나고 지표 유출도 오래 지속되지 못한다(제주도, 2004). 따라서 제주도는 수자원의 대부분을 지하수에 의존하고 있으며, 이러한 지역 특성은 해안 용천대를 따라 발달한 취락 분포에도 잘 반영되고 있다(오홍석, 1969).

제주도의 수자원에 관한 연구는 지하수가 본격적으로 개발된 1960년대부터 시작되었으며, 특히 유역 단위의 물수지에 대한 관심은 1980년대에 들어오면서 지하수 함양량을 산정하는 과정에서 대두되었다(산업기지개발공사, 1981; 한국수자원공사·건설교통부, 1993; 제주도, 2000a; 제주도·한국수자원공사, 2003; 원종호, 2004; 안중기 등, 2006). 그러나 이들 물수지 연구에서는 대상 유역에서 실시된 강수량 및 지표 유출량에 관한 관측자료가 없는 관계로 제주나 서귀포에 소재하는 기상관측소의 강수량을 원용하고 있고 유출량도 SCS 모델에 의해 추정하는 등 분석 결과의 신뢰도에 문제점을 보이고 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결할 목적으로 최근 해안지대에 위치한 일부 하천의 하류역에서는 수위 관측을 통하여 유량자료를 축적하고 있다(제주도, 2001, 2002; 문덕철, 2004). 그러나 지하수의 주요 함양역인 표고 200m 이상 중산간 및 산악 지대에서는 아직 본격적인 수문 관측이 이루어지고 있지 않다.

한편 소규모 유역을 대상으로 실시되는 수문 관측은 강우유출 프로세스의 규명을 통하여 지역 특성에 맞는 유출 모델의 개발과 적용으로 이어질 수 있을 뿐 아니라 사면지형의 형성과 발달을 밝히기 위해서도 필요한 작업이다(Anderson and Burt, 1990; Anderson and Brooks, 1996; 恩田 등, 1996). 따라서 최근 국내에서도 산지 유역을 대상으로 유출 특성을 밝히기 위한 실험적 연구가 활발하게 진행되고 있다(김경하 등, 1996; 田中 등, 2000; 박재철·이현호, 2000; 전재범, 2003; 김태호·다나카, 2004). 이 가운데 제주도 외도천의 최

상류 유역에서 이루어진 연구(김태호·다나카, 2004)는 한라산 아고산대에서 연속적으로 지표 유출을 관측한 최초의 사례로서 본 연구에서는 이 수문자료를 토대로 소유역의 물수지를 분석하여 한라산 아고산대의 수문순환 특성을 밝히고자 한다.

2. 연구지역

한라산은 완사면이 특징인 하와이식 순산화산으로 표고 700m 이상 한라산 국립공원 구역의 경우 70.5%가 15°이하의 경사를 보이고 있다. 국립공원 구역의 9.2%를 차지하고 있는 아고산대도 오름이나 하곡 사면을 제외하면 대부분 완사면으로 이루어져 있으며, 특히 실험 유역이 위치하고 있는 만세동산이나 선작지왓의 경사는 5°이하에 불과하다(제주도, 2000b).

실험유역은 뒷세오름 중봉에서 만세동산으로 이어지는 아고산대의 서쪽 완사면 표고 1,595~1,645m에 위치하는 1차수 유역으로 1:5,000 지형도에 유로는 표기되어 있지 않다. 완사면에 위치하는 관계로 분수계가 명료하지는 않으나 항공사진을 이용하여 설정한 집수역은 1.34ha의 면적을 보인다(그림 1).

한라산 아고산대에는 조면현무암과 조면암이 넓게 분포하고 있으며, 실험유역도 최하류부를 제외하면 법정동 조면현무암으로 이루어져 있다. 회색이나 암회색을 띠는 법정동 조면현무암은 1mm 크기의 기공을 40% 정도 함유하고 있으며, SiO₂의 함량은 49.1~53.3%의 범위를 보인다(제주도, 2000c).

농촌진흥청(1976)의 정밀 토양도에 의하면 실험유역은 갈색 산림토에 속하는 흑악통과 노로통으로 이루어져 있다. 그러나 흑악통은 유역 하류부에만 일부 분포하며 유역 면적의 91%는 노로통이 차지하고 있다. 이들 토양통의 대표 토양은 100cm 정도의 토심을 보이며 주로 미사질 양토나 양토로 구성되어 있다(표 1).

실험유역 인근의 표고 975m에 위치하는 어리목에서 관측한 2002년부터 2004년까지 3년간의 연평균 강수량은 3,356.5mm로서 국내 최다우지에 해당한다. 월별 강수량을 비교하면 태풍에 동반된 호우가 발생하는 8월이 631.0mm로 가장 많고 장마기인 7월이

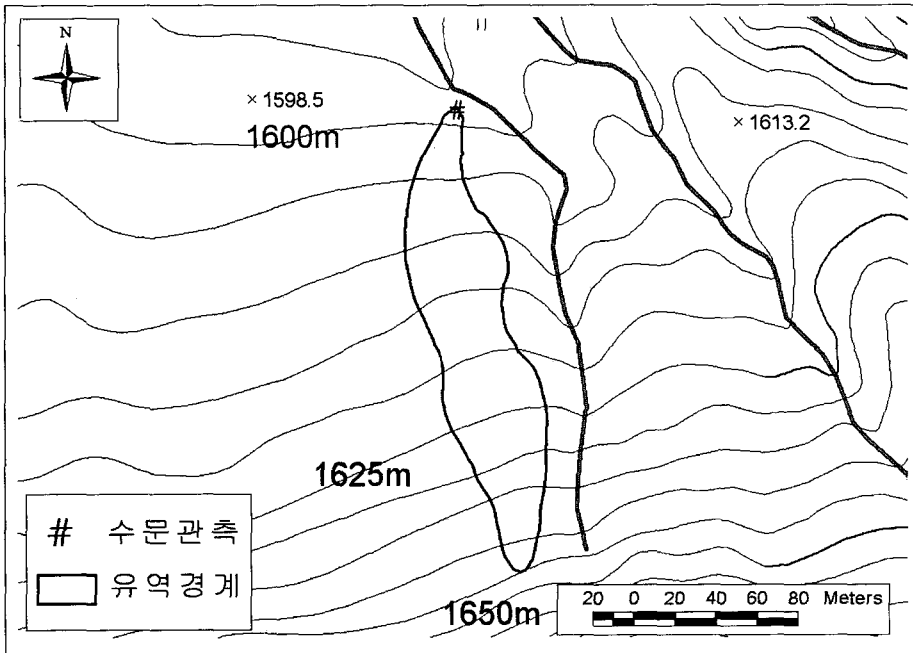
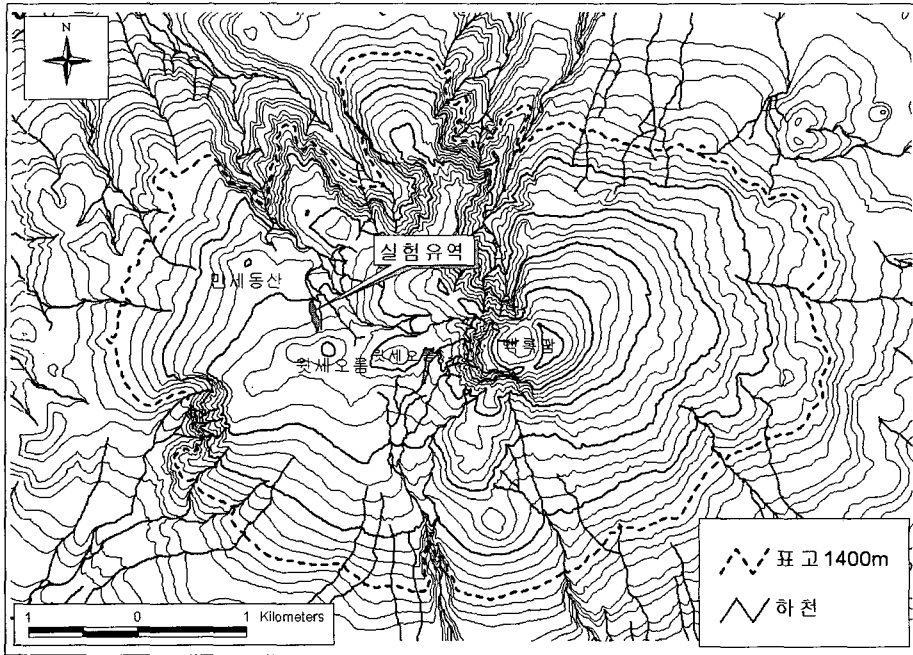


그림 1. 표고 1,400m 이상 한라산 아고산대와 실험유역

575.5mm로 뒤를 잇는다.

표고 1,400m 이상의 한라산 아고산대에는 구상나무로 대표되는 침엽수림을 비롯하여 관목림과 초본 군락

이 넓게 분포하고 있다(임양재 등, 1991). 이 가운데 관목림과 초본 군락은 한라산 정상부를 중심으로 주로 서쪽과 남쪽의 평탄지와 완사면에 분포하고 있으나,

표 1. 실험유역의 토양 특성(농촌진흥청 제주농업시험장, 2003)

토양	분포면적	층 위	깊이(cm)	자갈함량(%)	토성	가비중	고상(%)
흑악토	1,209m ²	A	0~10	-	미사질 양토	0.41	15.5
		B	10~35	-	미사질 양토	0.4	15.1
		C	35~100	-	양토	-	-
노로토	12,228m ²	A	0~15	39.7	양토	0.43	16.0
		B	15~40	0.2	미사질 양토	0.54	20.4
		C	40~100	0.2	미사질 양토	-	-

일사로 인한 수분의 증발현상과 바람의 영향으로 동일한 지역에서도 북향 사면이나 하곡 사면에는 구상나무로 이루어진 교목림이 출현한다(김찬수·김문홍, 1985). 실험유역에는 산겨이삭, 김의털 등의 초본 군락과 최근 아고산대에서 빠르게 확산되고 있는 제주조릿대가 우점하고 있다. 또한 유역 중앙에 발달한 우곡을 중심으로 나지도 일부 분포하고 있다(그림 2).

3. 연구방법

1) 수문 관측

수문 관측을 위하여 반원형 우곡의 형태를 띠고 있는 실험유역의 출구에 철제 6인치 파살플룸(Parshall flume)을 설치하였다. 수로 좌측의 박스 안에 50cm 길이의 수위계(Unidata U6521J)를 부착하여 수위 변동

을 감시하였다. 수로 양옆에는 50cm 높이로 모래주머니를 쌓아올려 소규모의 보를 만들어 유역으로부터 흘러나오는 모든 지표수가 수로를 통과하도록 하였다(그림 3). 수로를 통과하는 유수는 수로 벽면의 구멍을 통하여 수위 관측용 박스로 들어갈 수 있으므로 박스 안의 수위를 이용하여 유량을 구할 수 있다. 유량은 수로에서 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 강수량을 관측하기 위하여 수로 옆에 티핑 버킷형 자기 우량계(Davis 7852M)를 설치하였다. 수위와 강수량 데이터는 20분 간격으로 데이터 로거(EME System OWL2pe)를 이용하여 자동으로 기록하였으며, 태양열판(Siemens ST10)을 설치하여 데이터 로거에 지속적으로 전력을 공급하였다. 수문 관측은 2004년 4월 15일부터 9월 19일까지 157일에 걸쳐 실시되었다.

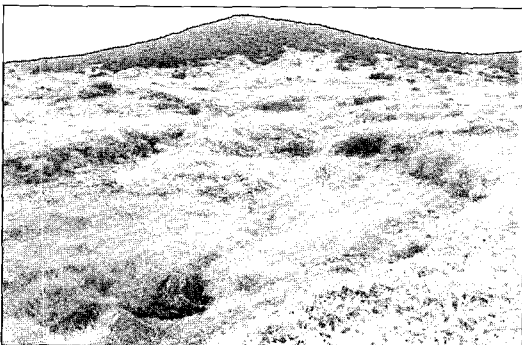


그림 2. 실험유역의 지형 및 식생 경관



그림 3. 수문 관측용 파살플룸과 보

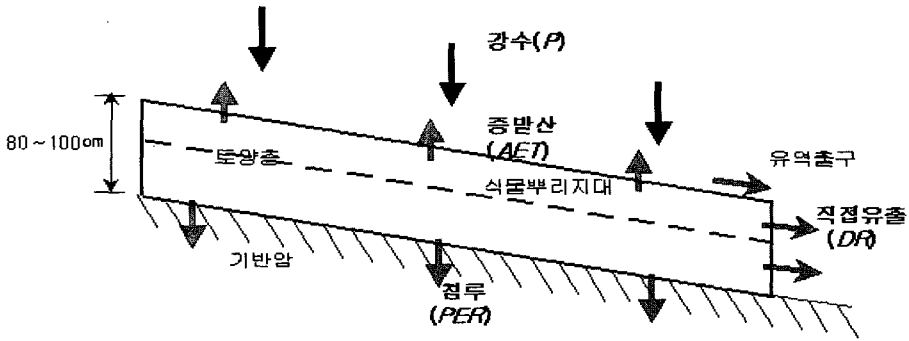


그림 4. 실험유역의 물수지 분석 개념도

2) 물수지 분석법

본 연구에서는 <그림 4>와 같이 기반암 상부 토양층을 대상으로 물수지를 분석하였다. 분석에는 다음과 같은 식을 사용하였으며, 이 때 토양층에서의 증발산은 식물 뿌리지대에서만 발생하는 것으로 그리고 토양층 하부 기반암을 통과하여 이동하는 물은 침루로 간주하였다.

$$P_i - DR_i - AET_i - PER_i + \Delta S = 0 \quad (1)$$

여기에서 P_i 는 i 일의 강수량(mm), DR_i 은 i 일의 직접 유출량(mm), AET_i 는 i 일의 실제 증발산량(mm), PER_i 는 i 일의 침루량(mm)이다. ΔS 는 식물 뿌리지대의 토양수분 변화량(mm)으로서 i 일과 $i-1$ 일의 최종 토양수분 함량의 차이이며, 본 연구에서 토양수분 함량은 영구위조점으로부터 포장용수량 사이의 수분 함량을 의미한다. 분석 기간은 2004년 4월 15일부터 9월 19일까지로 P_i 와 DR_i 은 관측한 자료를 이용하였으며, 식물의 뿌리지대에서 발생하는 실제 증발산량은 다음과 같이 토양수분 평형법으로 산정하였다.

$$AET_i = K_s \cdot PET_i \quad (2)$$

여기에서 K_s 는 작물의 수분스트레스계수, PET_i 는 i 일의 잠재 증발산량(mm)이다. 잠재 증발산량은 FAO-56 Penman-Monteith 식(Allen et al., 1998)으로부터 기준작물의 i 일 잠재 증발산량($RPET_i$)을 계산한 후에

작물계수(K_c)를 적용하여 구한다.

$$PET_i = K_c \cdot RPET_i \quad (3)$$

또한 작물의 수분스트레스계수는 Allen et al.(1998)에 제시된 작물별 신속 토양수분 이용량(RAW)과 토양수분 보유능($SWRC$)과의 관계로부터 산정한다.

$$RAW = p \cdot SWRC \quad (4)$$

$$SWRC = Z_r \cdot (\Theta_{FC} - \Theta_{WP}) \quad (5)$$

이 때 작물별 신속 토양수분 이용량과 식물 뿌리지대의 임시 토양수분 함량(SW_{im})과의 관계는 다음과 같다.

$$SW_{im} \geq RAW \text{ 이면}$$

$$K_s = 1 \quad (6a)$$

$$SW_{im} < RAW \text{ 이면}$$

$$K_s = SW_{im} / (SWRC - RAW) \quad (6b)$$

여기에서 p 는 토양수분 감소율, Z_r 은 식물의 뿌리 깊이(mm), Θ_{FC} 는 포장용수량에서의 수분 함량(mm^3/mm^3), Θ_{WP} 는 영구위조점에서의 수분 함량(mm^3/mm^3), SW_{im} 은 SW_{i-1} , P_i , DR_i 로부터 산정하는 임시 토양수분 함량(mm)으로 $Z_r \cdot \Theta_{WP}$ 을 제외한 값이다.

강수량으로부터 직접 유출량과 증발산량을 제외한 나머지는 식물 뿌리지대에서 토양수분으로 저류되거나 식물 뿌리지대 하부로 이동한 후 기반암 밑으로 침

된다. 식물 뿌리지대의 토양은 영구위조점으로부터 포장용수량까지의 수분을 보유하며, 그 이상의 수분은 식물 뿌리지대 하부로 배수되는 것으로 계산하였다. 식물 뿌리지대 하부의 토양은 증발산의 영향을 크게 받지 않으므로 수분 함량의 최소치를 포장용수량으로 가정하였다. 따라서 i 일의 최종 토양수분 함량(SW_i)과 침투량(PER_i)은 다음과 같다.

$$SW_{i-1} + P_i - DR_i - AET_i > SWRC \text{이면}$$

$$SW_i = SWRC \tag{7a}$$

$$PER_i = SW_{i-1} + P_i - DR_i - AET_i - SWRC \tag{7b}$$

$$SW_{i-1} + P_i - DR_i - AET_i \leq SWRC \text{이면}$$

$$SW_i = SW_{i-1} + P_i - DR_i - AET_i \tag{8a}$$

$$PER_i = 0 \tag{8b}$$

침투(percolation)는 지표 아래로 침투한 강수 가운데 식물 뿌리지대를 통과하여 지하수체까지 하부로 이동하는 과정이다(자연지리화사전편찬위원회, 2004). 실험유역에서는 강수가 종료한 후에도 유출이 장기간 지속된 경우가 있었으며, 포화대의 수위가 관찰된 점으로부터 강수에 의해 기반암 상부의 토양층에서 토양 공극이 일시적으로 포화되는 것으로 판단된다. 따라서 강수 개시일로부터 그 강수로 인한 직접 유출의 종료 일까지의 기간을 하나의 강수 사상으로 보았다. 또한 강수 사상중의 i 일에 식물 뿌리지대 하부로 이동한 수분은 $i+1$ 일로부터 유출 종료일까지 유출에 이용되거나 모세관 현상을 통하여 토양수분으로 공급됨으로써 증발산에 이용되며, 유출 종료일에 최종적으로 지하의 기반암 하부로 이동하는 것으로 간주하였다.

3) 잠재 증발산량의 계산자료 및 방법

잠재 증발산량 산정에는 실험유역에서 북동쪽으로 7km 거리에 위치한 제주기상청의 오등관측소 자료를 이용하였다. 실험유역에서 3.4km 떨어진 어리목에도 관측소가 있으나 분지 안쪽에 위치하고 있어 북쪽으로 개방된 사면에 위치한 실험유역과는 바람 조건이 크게 다를 것으로 판단된다. 따라서 더 먼 거리에 위치하고

있지만 같은 북쪽으로 열린 사면에 위치한 오등관측소 자료를 선택하였다.

오등관측소에서는 기온, 풍속, 강수량만을 측정하므로 기준작물 잠재 증발산량 산정에는 일별 최고기온, 최저기온 및 평균풍속을 이용하였다. FAO-56 Penman-Monteith 식으로부터 잠재 증발산량을 산정하는 경우에 이들 자료 이외에 일별 일사량, 수증기압 또는 평균습도도 필요하므로 일사량과 수증기압은 Allen *et al.*(1998)이 제시한 방식에 근거하여 최고 및 최저기온으로부터 다음과 같이 추정하였다.

$$R_s = K_{Rs} \sqrt{(T_{max} - T_{min})} R_a \tag{9}$$

$$e_a = 0.611 \exp \left[\frac{17.27 T_{min}}{T_{min} + 2137.3} \right] \tag{10}$$

여기에서 R_s 는 일사량, K_{Rs} 는 계수로 0.16을 적용하였으며, T_{max} 는 일 최고기온, T_{min} 는 일 최저기온, R_a 는 지구 대기권에 도달한 복사량, e_a 는 수증기압이다.

제주관측소에서는 잠재 증발산량 산정에 필요한 상기 5개 항목을 모두 관측하고 있다. 일사량과 상대습도의 실측치를 이용하여 산정한 제주관측소의 잠재 증발산량은 식 (9)와 식 (10)에서 구한 일사량과 상대습도의 추정치를 이용하여 산정한 잠재 증발산량보다 1.18배 높게 나타난다. 따라서 오등관측소에서 산정한 잠재 증발산량에 1.18배를 적용하여 보정하였다.

실험유역의 표고는 1,595~1,645m(평균 1,620m)인데 비하여 오등관측소의 표고는 513m로 두 지점은 1,107m의 고도차를 보이므로 오등관측소의 일 최고기온과 최저기온에 기온 체감율을 적용하여 보정하였다. 기온 체감율은 어리목과 오등관측소 두 지점의 일 최고기온 및 최저기온의 차이와 457m의 고도차로부터 구하였다. 2004년 1월 1일부터 2004년 9월 30일까지의 자료를 일별로 계산한 결과 기온 체감율은 평균 0.68℃/100m로 나타났다. <그림 5>는 오등관측소와 기온 체감율을 적용하여 보정한 실험유역 두 지점의 기준작물 잠재 증발산량을 비교한 그림이다.

한편 실험유역에는 제주조릿대와 사초과 식물이 우점하고 있으며, 이들의 생육 기간은 6월부터 9월까지이고 10월부터 5월까지는 비생육 기간에 해당한다. 작

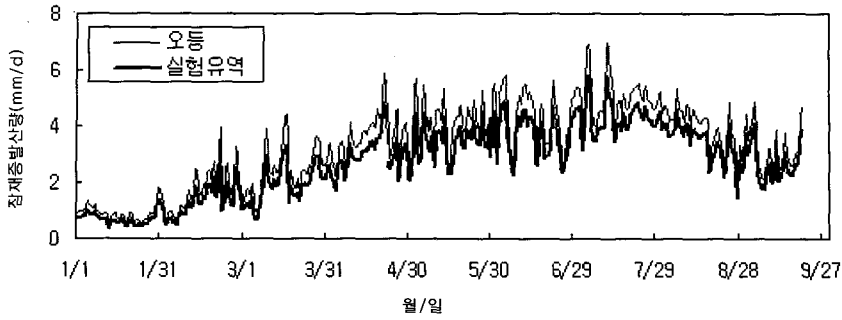


그림 5. 실험유역과 오동 관측소의 기준작물 잠재 증발산량의 변화

물계수는 Allen *et al.*(1998)이 제시한 값과 계산법을 적용하였다. 즉 실험유역의 식생과 최대 높이가 30cm로 유사한 독보리(rye grass) 값을 이용하여 생육 중기인 7월과 8월에는 1.05를, 생육 말기에는 1.0을 각각 적용하였다. 또한 생육 초기인 6월 1일부터 6월 15일까지는 강수량과 강수빈도 자료로부터 생육 초기의 작물계수 계산법으로 구한 0.7을 적용하고 6월 16일부터 7월 1일까지는 0.7에서 1.05로 증가하도록 적용하였다. 비생육 기간인 4월과 5월에는 지표면이 대부분 말라죽은 잎들로 덮여 있으므로 생육 초기의 작물계수를 적용하였다(그림 6).

식 (4)의 토양수분 감소율(ρ)은 작물 종류나 잠재 증발산량에 따라 달라지나 제주조릿대와 사초과 식물에 대한 자료가 없으므로 많은 작물에 일반적으로 적용하고 있는 0.5(Allen *et al.*, 1998)를 사용하였다. 식 (4)와 식 (6)으로부터 산정한 작물 수분스트레스계수(K_s)는 토양수분 함량이 토양수분 보유능($SWRC$)의 50~100%인 경우에는 1이다. 그러나 토양수분 함량이 토양수분 보유능의 50%로부터 0%까지 감소함에 따라 작물 수

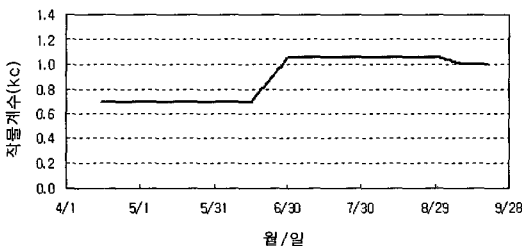


그림 6. 생육 기간별 작물계수의 변동

분스트레스계수도 1에서 0으로 감소한다.

식 (5)의 토양수분 보유능은 실험유역 식생의 뿌리 깊이와 토양 특성으로부터 구하였다. 실험유역에 생육하는 사초과 식물의 뿌리 깊이는 30cm 이하이며, 제주조릿대의 경우도 30~40cm 정도로서 특히 뿌리가 밀생하는 부분은 30cm 이하이므로 작물의 뿌리 깊이(Z_r)는 30cm를 적용하였다. θ_{FC} 와 θ_{WP} 는 실험유역에 분포하는 토양통의 대표 토양을 대상으로 실시한 실험결과(농촌진흥청 제주농업시험장, 2003)를 이용하였으며, 포장용수량은 0.5bar, 위조점은 100bar에서의 수분량으로 산정하였다. 그 결과 실험유역의 토양수분 보유능은 33mm이다.

실제 증발산량을 산정하면서 초기 토양수분량의 영향을 줄이기 위하여 2004년 1월 1일부터 4월 14일까지의 물수지를 계산하여 4월 14일의 토양수분을 추정하였다. 이 기간 오동관측소의 자료에 기온 체감율을 적용하여 추정된 실험유역에서의 평균기온은 대부분 0°C 미만으로 강설이 누적되어 적설의 형태로 존재하는 시기이며, 3월 하순과 4월 초순에 평균기온이 0°C 이상으로 높아져 융설수의 형태로 토양수분이 공급된다. 따라서 평균기온이 영상일 때는 융설에 의해 토양수분이 공급되는 것으로 가정하였으며, 이 기간의 증발산량으로는 미국 아이다호주에서 관측된 적설 피복율 50% 이상 시기의 평균 증발산량 0.4mm/일(Allen *et al.*, 1998)을 적용하였다. 그 결과 4월 14일의 최종 토양수분은 29.3mm이다.

4. 결과 및 고찰

관측 기간에 발생한 강수량, 유출량, 실제 증발산량, 식물 뿌리지대의 토양수분량 및 침투량의 변화는 <그림 7>과 같다. 또한 강수가 발생한 시점부터 그 강수로 인한 직접 유출이 종료된 시점까지의 기간을 하나의 강수 사상으로 간주하고 총강수량이 71.8~386.8mm 인 사상을 대상으로 물수지 요소별로 산정한 결과는 <표 2>와 같다. 유출량은 총유량을 유역면적으로 나눈 유출고의 형태로 표시하였다.

토양수분 저장량의 변화는 강수 사상 전일과 종료일의 토양수분 차이이며, 괄호 안의 수치는 요소별 강수량에 대한 백분율을 가리킨다.

강수는 157일간 총 3,074mm가 발생하였으며, 96일에 걸쳐 최소 0.2mm부터 최대 282mm까지 일일 강수량을 기록하였다. 이 가운데 일일 강수량이 10mm 이상을 기록한 일수는 45일이며, 50mm 이상의 강수는 19일, 100mm 이상의 강수도 10일 나타났다. 한라산 북사면에 위치한 제주 및 오등관측소에서 같은 기간에 관측된 강수량은 각각 1,035mm와 1,911mm이므로 실험유역에서는 해안지대의 3배, 중산간지대의 1.6배에 해당하는 강수가 발생하였다(표 3).

또한 강수강도를 비교하기 위하여 7월부터 9월 사이에 4개 관측지점에 모두 강수가 발생한 6개 사상을 선정하고 강수 사상별로 시간당 최대 강수강도부터 5번째 강수강도까지를 대상으로 평균 강수강도를 구하였

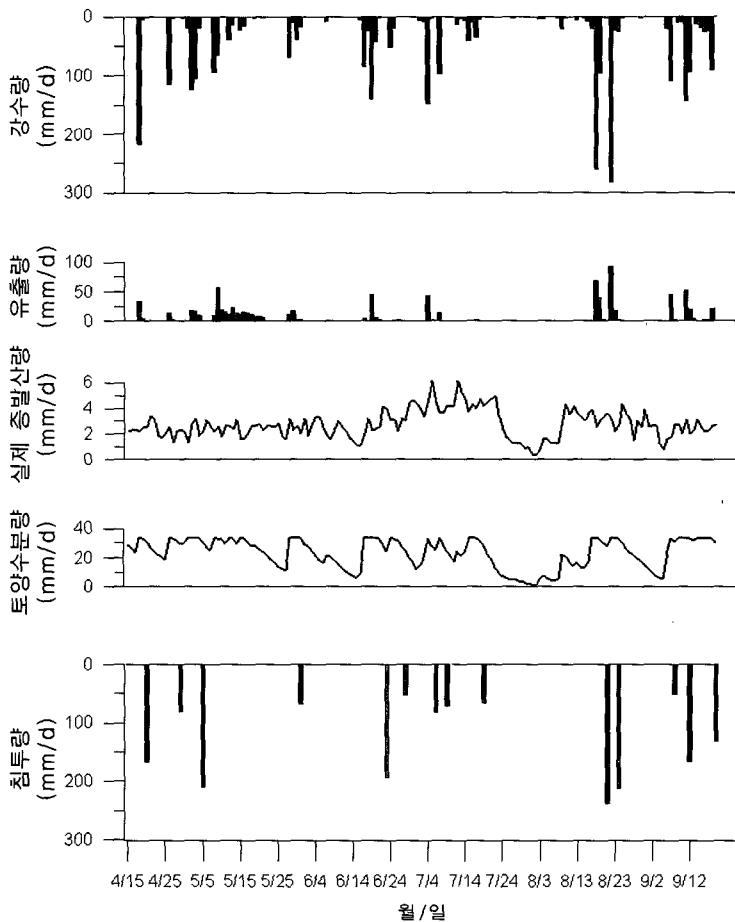


그림 7. 강수량, 유출량, 실제 증발산량, 토양수분량 및 침투량의 변화

표 2. 주요 강수 사상의 물수지 산정 결과

강수 사상	강수 개시일	유출 종료일	선행토양 수분량 (mm)	물수지 요소(mm)				
				강수	유출	토양수분 저장량 변화	증발산	침투
E1	4/18	4/20	23.9	221.4	38.2(17.2)	9.0(4.1)	7.2(3.3)	167.0(75.4)
E2	4/26	4/29	20.9	116.6	16.1(13.8)	12.1(10.4)	8.5(7.3)	79.9(68.5)
E3	5/1	5/5	33.0	265.0	42.9(16.2)	0.0(0.0)	11.6(4.4)	210.5(79.4)
E4	5/8	5/22	27.4	251.0	223.9(89.2)	-8.6(-3.4)	35.7(14.2)	0.0(0.0)
E5	5/28	5/31	9.4	134.6	32.9(24.4)	23.6(17.5)	10.1(7.5)	68.0(50.5)
E6	6/16	6/23	6.5	298.0	56.6(19.0)	26.5(8.9)	21.6(7.2)	193.3(64.9)
E7	6/24	6/28	33.0	71.8	4.8(6.7)	0.0(0.0)	14.6(20.3)	52.4(73.0)
E8	7/2	7/6	19.1	165.6	46.5(28.1)	13.9(8.4)	23.3(14.1)	81.9(49.5)
E9	7/7	7/9	33.0	96.8	14.4(14.9)	0.0(0.0)	11.4(11.8)	71.0(73.3)
E10	7/12	7/19	29.1	111.8	4.5(4.0)	3.9(3.5)	36.9(33.0)	66.5(59.5)
E11	8/16	8/21	12.6	386.8	109.2(28.2)	20.4(5.3)	20.0(5.2)	237.2(61.3)
E12	8/22	8/24	33.0	331.0	111.8(33.8)	0.0(0.0)	7.9(2.4)	211.3(63.8)
E13	9/6	9/8	5.5	130.0	45.5(35.0)	27.5(21.2)	6.1(4.7)	50.9(39.2)
E14	9/9	9/12	33.0	256.4	77.2(30.1)	0.0(0.0)	12.1(4.7)	167.1(65.2)
E15	9/13	9/19	33.0	172.2	25.1(14.6)	0.0(0.0)	15.4(8.9)	131.7(76.5)
최소			5.5	71.8	4.5(4.0)	-8.6(-3.4)	6.1(2.4)	0.0(0.0)
최대			33.0	386.8	223.9(89.2)	27.5(21.2)	36.9(33.0)	237.2(79.4)
평균			23.5	200.6	56.6(25.0)	8.6(5.0)	16.2(9.9)	119.2(60.0)

표 3. 실험유역과 인근 관측소의 강수량, 강수일수 및 강수강도

관측지점	표고 (m)	강수량 (mm)	강수일수				강수강도 (mm/hr)
			1~5mm	5~10mm	10~50mm	50mm <	
제주	22	1,034.6	50	32	21	3	13.9
오등	513	1,911.0	64	44	36	12	19.3
어리목	970	2,696.5	76	57	46	15	19.1
실험유역	1,620	3,073.9	76	52	45	19	22.7

다. 그 결과 실험유역의 강수강도는 22.7mm/hr로서 중산간지대보다 1.17배, 해안지대보다 1.63배 높게 나타났다(표 3).

실험유역에서 유출은 74일에 걸쳐 발생하였으며, 일일 유출량은 0.02~92.4mm의 범위를 보이고 있다. 일일 유출량으로 5~10mm를 기록한 유출은 33일,

10~20mm는 28일, 20~50mm는 10일, 50mm 이상은 4일 출현하였다. 관측 기간에 발생한 15개 강수 사상 가운데 유출량이 강수량의 89.2%를 차지하고 있는 5월 8일부터 22일까지의 사상(E4)을 제외하면 유출량과 강수량은 결정계수(R²)가 0.81에 이르는 높은 상관관계에 있으며, 총강수량이 70mm를 초과하는 경우에만

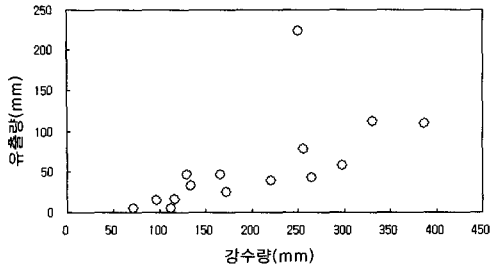


그림 8. 사상별 강수량과 유출량의 관계

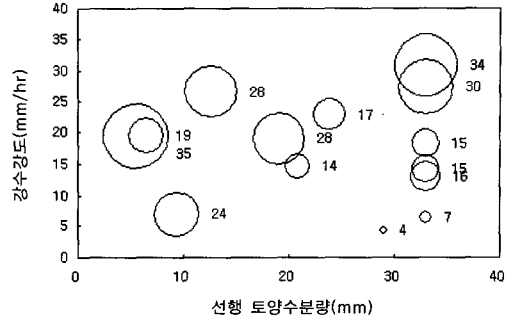


그림 9. 사상별 유출율과 강수 발생전 토양수분량 및 강수 강도와의 관계

유출이 발생하였다(그림 8).

유출율은 4.0~89.2%로서 강수 사상에 따라 크게 달라지고 있다. 예를 들면 71.8mm와 111.8mm의 강수량을 기록한 E7과 E10 사상은 강수 발생전 토양수분량이 29.1mm와 33mm로 습윤한 반면 최대 강수강도는 12.8mm/hr로 비교적 낮았고 유출율은 강수량의 4.0%와 6.7%에 불과하였다. 그러나 130mm의 강수량을 기록한 E13 사상은 강수 발생전 토양수분량이 5.5mm로 건조한 반면 최대 강수강도는 22.4mm/hr로 높았고 E4 사상을 제외하면 가장 높은 35%의 유출율을 기록하였다.

따라서 사상별로 강수강도를 시간당 최대 강수강도부터 5번째 강수강도까지의 평균치로 구한 후에 유출율과 강수 발생전 토양수분량, 강수강도의 관계를 살펴보았다(그림 9). 강수 발생전 토양수분량이 29.1~33mm로 습윤한 경우에 일어난 7개 강수 사상에서는 강수강도가 증가할수록 유출율도 증가하고 있다.

주 : 원의 지름과 옆의 숫자는 유출율을 가리킨다.

그러나 강수 발생전 토양수분량이 이보다 작은 나머지 7개 사상에서는 특별한 경향을 보이지 않는다. 따라서 유출율은 강수강도와 강수 발생전 토양수분 이외의 다른 요인들의 영향도 받는 것으로 생각된다.

실험유역에서는 상당량의 선행 강수가 있을 경우에 침투유출이 크게 발생하고 있으며, 우안 사면의 한 지점에서 지하 1m 깊이에 형성된 포화대의 수위가 관찰된 점으로부터 강수와 더불어 지중으로 우수가 활발하게 침투하면서 포화대의 수위가 상승하게 되고, 그 결과 우곡 주변에 포화면이 확대됨으로써 직접 유출이 일어나는 것으로 보인다. 또한 침투율을 초과하는 강수강도의 강수에 의해 출현하는 지표류도 직접 유출에 기여하는 것으로 보이므로 실험 유역의 강수에 대한

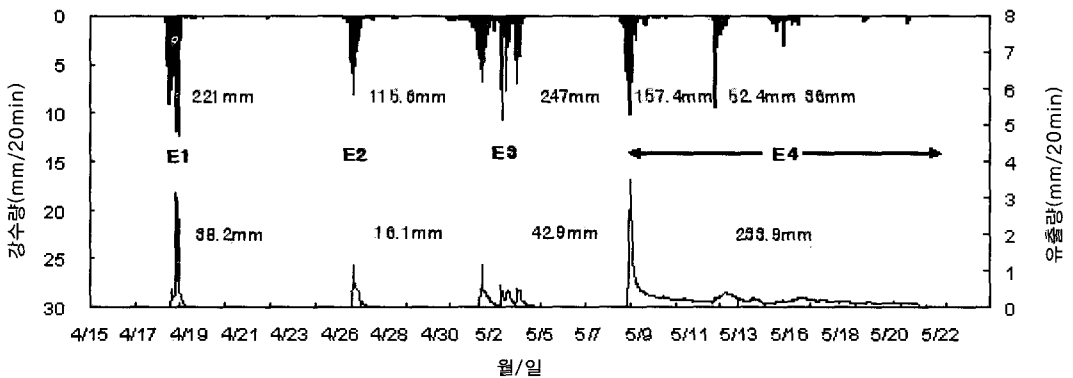


그림 10. 2004년 4월 15일부터 5월 22일까지의 강수량 및 유출량

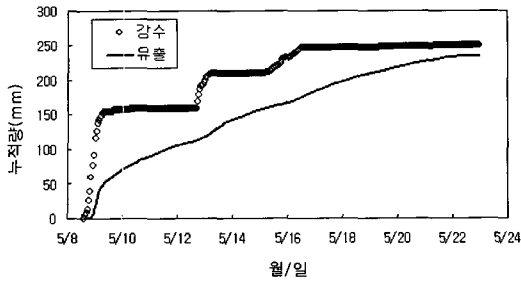


그림 11. 사상 E4의 강수량 및 유출량 누적 곡선

표 4. 실험유역과 인근 관측소의 기준작물 잠재 증발산량

관측지점	표고 (m)	잠재 증발산량 (mm)	일일 잠재 증발산량 (mm)
제주	22	589.9	1.14~7.52
오등	513	658.2	1.71~6.95
실험유역	1,620	558.7	1.46~5.79

유출 반응에는 Horton형 지표류나 포화 지표류와 같은 빠른 유출의 기여가 큰 것으로 생각된다(김태호 · 다나카, 2004).

강수량과 유출량을 비교한 <그림 10>에서 E1, E2 및 E3 사상은 강수 종료일로부터 2일 이내에 유출도 종료하고 있다. 그러나 89.2%의 유출율을 기록한 E4 사상은 36mm의 마지막 강수가 발생한 5월 15일, 16일로부터 1주일이 지난 22일까지 유출이 지속되어 포화 중간류의 특징을 보이고 있다(그림 11). 지하 1m 깊이에 위치한 포화대의 수위로부터 실험유역의 식생 뿌리지대 하부에는 강수 발생시 지하로 이동한 우수로 이루어진 일시적인 포화대가 형성되어 있음을 알 수 있다. 따라서 E4 사상 이전에 115~247mm의 강수량을 기록한 E1, E2 및 E3 사상이 5일 간격으로 3회 발생하였는데(그림 10), 이들 강수로 형성된 포화대의 수위가 E4에 의해 상승하여 토층까지 포화됨으로써 유출이 장기간 발생한 것으로 생각된다.

한편 기준작물 잠재 증발산량은 일일 1.46~5.79mm로서 전부 558.7mm를 기록하여 저지대에 위치한 제주관측소의 589.9mm와 오등관측소의 658.2mm에 비

하여 작게 나타났다(표 4). 실제 증발산량은 4월부터 6월 중순까지 1~3mm를 보이거나 6월 29일부터 7월 24일까지 3~5mm로 증가하여 관측 기간 동안에 가장 높게 나타났다. 그러나 7월 24일부터 다시 감소하기 시작하는데 최소 0.7mm/일까지 떨어져 8월 8일까지 2mm 이하로 낮게 나타났다. 이 기간에 잠재 증발산량은 3.3~4.2mm로 비교적 큰 시기이나 토양수분량이 포장용수량의 1/2 미만으로 감소하므로 실제 증발산량은 작게 나타났다.

토양수분량은 관측 기간 대부분 포장용수량의 1/2 이상을 보이고 있으나 6월 중순(6/12~16), 7월 하순과 8월 초순(7/23~8/8) 그리고 9월 초순(9/1~5)에는 포장용수량의 1/2 아래로 떨어지고 있다. 강수 사상별로 산정한 침투량은 E4 사상을 제외하면 50.9~237.2mm로서 강수량의 39.2~79.4%를 차지하고 있다.

관측 기간에 일어난 실험유역의 물수지를 정리하면 우선 총강수량 3,074mm 가운데 27.6%에 해당하는 850mm가 직접 유출량으로 나타났다. 반면에 실제 증발산량은 강수량의 14.2%를 차지하는 437mm로 유출량이나 침투량에 비하여 작았으며, 침투량은 강수량의 58.2%인 1,790mm를 기록하여 관측 기간에 발생한 강수의 60% 정도가 기반암을 통과하여 지하로 이동하는 것으로 보인다. 따라서 실험유역에서는 침투가 강수를 배분하는 주요 성분임을 알 수 있으며, 강수 - 유출 모형을 구축할 때에는 침투 성분을 고려한 모델 개발이 필요한 것으로 판단된다. <그림 12>는 강수 사상별로 물수지 요소의 구성 비율을 보여주고 있다.

실험유역은 지형성 강수가 자주 발생하는 아고산대에 위치하고 있으므로 강수량이 많고 강수강도가 크나 한반도의 화강암이나 편마암 지역과는 달리 유출량이 강수량의 30%를 넘지 못하며 유출량의 2배에 달하는 60% 정도가 침투하고 있다. 이와 같은 낮은 유출율과 높은 침투율은 실험 유역의 토양과 토층 하부 기반암의 특성과 관계가 있는 것으로 보인다. 실험유역에 분포하는 흑악통과 노로통의 토양은 토양용적밀도가 낮아 다공질이 특징인 화산회토로 분류되고 있다(농촌진흥청, 1976). 흑악통과 노로통의 대표 토양을 대상으로 실시한 삼상분포 실험에서 고상을 제외한 액상과 기상의 합계가 79.6~84.9%로 높게 나타나는 점(표 1)

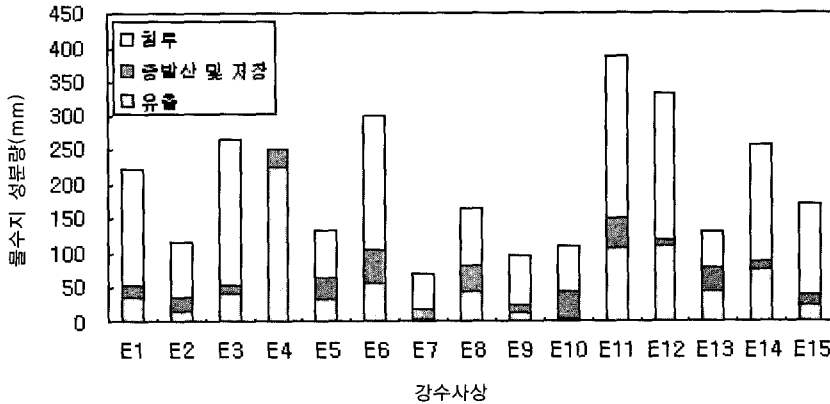


그림 12. 강수 사상별 물수지 요소의 구성 비율

으로부터 실험구역의 토양 공극율도 70% 이상으로 판단된다.

실험구역에서의 관입시험에 의하면 장소에 따라 차이가 있으나 대체로 80~100cm 두께의 토층 아래에 조면현무암의 기반이 분포하는 것으로 보이며, 일부 장소에서는 깊이와 함께 증가하던 N_{10} 값이 갑자기 감소하다가 다시 증가하고 있어 기반암에 절리가 형성되어 있음을 시사하고 있다(김태호·다나카, 2004). 일반적으로 지표로 분출된 현무암질 용암류는 급격하게 냉각되면서 굳게 되는데, 이 과정에서 발생하는 수축작용으로 인하여 많은 절리가 발달하게 된다. 실험구역 주변에는 조면현무암이 튜물러스(tumulus)의 형태로 여러 곳에 노출하고 있으며, 노암 표면에는 현무암질 용암 특유의 조밀한 절리와 층리가 발달하고 있다. 그리고 이들 절리와 층리를 따라 분리된 암괴가 실험구역 일대에 산재할 뿐 아니라 밀집하여 암괴원을 형성하는 장소도 보인다. 따라서 실험구역에는 공극율이 높은 화산회토가 80~100cm 깊이로 분포하므로 상당량의 강수가 토양 속에 저류될 수 있다. 그리고 저류된 물의 일부는 횡방향으로 유동하여 우곡을 통하여 하류로 유출하고 있으나, 토층 하부에 절리와 층리가 잘 발달한 조면현무암질 용암이 분포하므로 저류된 물의 대부분은 지하로 침투하는 것으로 생각된다.

5. 요약 및 결론

제주도 한라산 아고산대에 위치하고 있는 면적 1.34ha의 1차수 구역에서 관측한 수문자료와 인근 관측소의 기상자료를 이용하여 물수지를 분석하고 아고산대 지표에서의 수문순환 특성을 규명하였다. 그 결과는 다음과 같다.

① 실험구역에서는 157일의 관측 기간 동안 한라산의 지형성 강수의 영향으로 해안지대의 3배, 중산간지대의 1.6배에 달하는 3,074mm의 강수가 발생하였으며, 강수일수와 강수강도도 저지대에 비하여 높게 나타났다.

② 강수량의 27.6%에 해당하는 850mm가 우곡을 통하여 유출되었으며, 일 유출량은 0.02~92.4mm로서 전부 74일에 걸쳐 유출이 발생하였다. 유출은 Horton형 지표류나 포화 지표류와 같은 빠른 유출뿐 아니라 포화 중간류의 형태로도 나타나는 것으로 보인다.

③ 제주조릿대와 사초과 식물이 밀생하는 실험구역의 실제 증발산량은 강수량의 14.2%를 차지하는 437mm에 불과하여 물수지 요소 가운데 가장 낮은 비율을 보였다. 이것은 실험구역에 강수일이 많아 증발산량의 비율이 상대적으로 낮았을 뿐 아니라 잠재 증발산량이 커지는 7월 하순과 8월 초순에는 토양이 건조하여 실제 증발산량이 작았기 때문이다.

④ 강수량의 58.2%를 차지하는 1,790mm가 기반암을 통과하여 지하 하부로 침투하는 것으로 나타났다.

강수가 종료한 후에도 유출이 장기간 지속된 경우가 있고 지하 1m 깊이에 포화대의 수위가 관찰된 점으로부터 식물 뿌리지대를 통과한 우수의 일부가 뿌리지대 하부에 일시적인 포화대를 형성할 수 있으며, 이 포화대는 포화 중간류 또는 침루에 의해 소멸되는 것으로 보인다.

⑤ 실험유역은 저지대보다 강수량이 많고 강수강도가 크나 화강암이나 편마암 유역과는 달리 유출량은 강수량의 30% 이하로 비교적 작고 유출량의 2배인 약 60%가 침루하고 있다. 이것은 실험유역에 공극율이 높은 토층 하부에 투수성이 큰 현무암질 용암이 분포하는 제주도의 지질 특성과 관계가 있다. 따라서 제주도에서는 물수지 요소 가운데 침루가 가장 큰 비율을 차지하므로 강수 - 유출을 모의할 때 침루를 고려한 모델의 개발 및 적용이 요구된다.

註

- 1) 파살플룸은 미국 콜로라도 농업시험소에서 1915년에 고안, 제작된 유량 관측용 수로로서 그 후 파살(Parshall, R.L.)에 의해 각종 개수로에서 실험이 행해지면서 알려지게 되었다. 파살플룸은 보를 사용하는 경우에 발생하는 토사유출의 문제를 피할 수 있을 뿐 아니라 낙차를 확보할 수 없는 경우에도 유용한 방법이다(新井, 1944). 파살플룸의 종류는 수로 중앙에 위치한 협착부의 폭에 따라 3인치부터 8파트까지 다양하다. 이 가운데 실험유역에서는 6인치가 사용되었는데, 6인치 플룸은 길이 136cm, 최대 높이 72cm이다(土木學會, 1985). 수로 벽면에는 직경 2cm의 원형 구멍이 세로 방향 1cm 간격으로 5개 뚫려 있으며, 이 구멍을 통하여 측면에 부착된 수위 관측용 박스로 유수가 자유롭게 흘러 들어감으로써 수위 변동을 감시할 수 있다.
- 2) 실험유역에서는 사면조사용 간이관입시험기(筑波丸東製 S06-M)에 의한 관입시험이 이루어졌다(김태호 · 다나가, 2004). 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 낙하 회수를 N10값이라고 하며, 이 값을 근거로 토층의 두께를 비롯하여 토질 강도나 토층 구조를 파악할 수 있다(逢坂, 1996). 예를 들면, 화강암 지역에서 N10값 5 이하는 표층 토층, 5~10은 하층 토층, 10~28은 풍화층, 28 이상은 기반암

로 분류한다(逢坂 · 塚本, 1988).

文獻

김경하 · 원형규 · 이천룡 · 정용호, 1996, "산림 소유역의 수문특성(I) 임상별 저류계수의 경시적 변화," 산림과학논문집, 54, 71-80.

김찬수 · 김문홍, 1985, 한라산 아고산대 초원 및 관목림의 식물사회학적 연구, 제주도(편) 한라산 천연보호구역 학술조사보고서, 311-330.

김태호 · 다나카유키야, 2004, "한라산 아고산대 조면현무암 유역의 유출 특성," 한국지형학회지, 11, 1-10.

농촌진흥청, 1976, 정밀토양도(제주도).

농촌진흥청 제주농업시험장, 2003, 제주도 발작물 작물계수측정: 제주도 발작관 용수량 산정법 정립에 관한 연구 부분과제.

문덕철, 2004, 제주도 주요하천의 기저유출량 산정에 관한 연구, 제주대학교 석사학위논문.

박재철 · 이현호, 2000, "물순환 모델에 의한 산지소유역의 유출특성 분석 - 팔공산유역을 대상으로-", 한국임학회지, 89, 564-575.

산업기지가발공사, 1981, 제주도 수자원개발종합조사 보고서.

안중기 · 이용두 · 황종환, 2006, "적자기반의 토양물수지 방법에 의한 지하수함양의 공간분포 추정," 지하수토양환경, 11, 65-76.

오홍석, 1969, "제주도의 취락입지에 관한 연구: 변천과정과 입지요인을 중심으로," 지리학, 4, 41-54.

원종호, 2004, 제주도 지하수자원에 대한 수리지질학적 평가 및 물수지분석 연구, 서울대학교 박사학위논문.

임양재 · 백광수 · 이남주, 1991, 한라산의 식생, 중앙대학교출판부, 서울.

자연지리학회사전편찬위원회, 2004, 자연지리학사전, 한울, 서울.

전재범, 2003, 경기도 남부 편마암 산지의 강우유출 특성, 경희대학교대학원 석사학위논문.

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

제주도, 2000a, 제주도 지하수 보전 · 관리계획 보고서.

제주도, 2000b, 한라산 기초조사 및 보호관리계획수립.

제주도, 2000c, 서귀포 · 하효리도폭 지질보고서.

- 제주도, 2001, 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사 (I).
- 제주도, 2002, 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사 (II).
- 제주도·한국수자원공사, 2003, 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사(III).
- 제주도, 2004, 환경백서.
- 한국수자원공사·건설교통부, 1993, 제주도 수자원 종합개발계획 수립보고서, VIII3-24.
- 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·辻村真貴(編), 水文地形學, 古今書院, 15-23.
- 逢坂興宏·塚本良則, 1988, “花崗岩斜面における風化土層の特性,” 日本林學會大會論文集, 99, 599-600.
- 新井正, 1994, 水環境調査の基礎, 古今書院, 東京.
- 恩田裕一·奥西一夫·飯田智之·辻村真貴, 1996, 水文地形學, 古今書院, 東京.
- 土木學會, 1985, 水理公式集, 日本土木學會, 東京.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., and Smith, M., 1998, *Crop Evapotranspiration*, FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56.
- Anderson, M. G. and Brooks, S. M., 1996, *Advances in Hillslope Processes*, John Wiley, New York.
- Anderson, M. G. and Burt, T. P., 1990, *Process Studies in Hillslope Hydrology*, John Wiley, New York.
- 교신 : 김태호, 690-756 제주특별자치도 제주시 제주대학교 로 66, 제주대학교 사범대학 지리교육과 (이메일 : kimtaeho@cheju.ac.kr, 전화 : 064-754-3235)
- Correspondence : Taeho Kim, Department of Geography Education, Cheju National University, 66 Jejudaehak-Road, Jeju 690-756, Korea (e-mail : kimtaeho@cheju.ac.kr, phone : +82-64-754-3235)
- 최초투고일 06. 6. 26.
최종접수일 06. 9. 11.