

제주도 단성화산 소유역에서의 강우의 분배

— 한라산 어승생오름을 사례로 —

안중기* · 김태호**

Rainfall Partitioning in a Small Catchment of a Monogenetic Volcano in Jeju Island : Case Study on Eoseungsaeng-oreum of Mount Halla

Junggi An* · Taeho Kim**

요약 : 한라산 어리목의 어승생오름 표고 965~1,169m에 위치하는 실험 유역의 수문 자료와 인근 어리목 관측소의 기상 자료를 이용하여 제주도 단성화산에서 일어나는 강우의 분배 특성을 검토하였다. 어승생오름은 스킨리아콘으로 실험 유역의 면적은 51,000m²이며, 식생은 낙엽활엽수인 서어나무와 졸참나무가 우점하고 있다. 수문 자료의 일부 결측으로 인하여 전반기(2007년 4월 30일~9월 12일)와 후반기(10월 7일~11월 19일)로 관측 기간을 구분하여 분석하였다. 실험 유역에서는 총강우량 2,296.5mm 가운데 20.2%에 해당하는 465mm가 유역 유출량으로 분배되며, 실제 증발산량은 강우량의 25.9%를 차지하는 595mm이다. 깊은 침투량은 1,236.5mm로서 총강우량의 53.8%가 실험 유역 하부의 지하로 이동하며, 특히 우기인 여름철에는 깊은 침투율이 62.2%로 높아진다. 한반도 편마암 유역에 비하여 적어도 2배 이상 높은 실험 유역의 지하수 함양률은 투수성이 높은 제주도의 화산 지질 특성을 잘 반영하고 있다.

주요어 : 강우 분배, 실험 유역, 단성화산, 어승생오름, 제주도

Abstract : The rainfall partitioning in a monogenetic volcano has been analysed using the hydrological data of a small catchment on Eoseungsaeng-oreum of Mount Halla and the meteorological data of Eorimok Automated Weather System. The experimental catchment extends from 965 m to 1,169 m in altitude, and has an catchment area of 51,000 m². Eoseungsaeng-oreum is the scoria cone predominantly covered with *Carpinus laxiflora* and *Quercus serrata*. The analyzed periods are April 30 to September 12 and October 7 to November 19, 2007. The experimental catchment exhibits the total precipitation of 2,296.5 mm. Surface runoff amounts to 465 mm that is equivalent to 20.2% of the precipitation. By contrast, evapotranspiration accounts for 25.9% of the precipitation, and the remnant of 1,236.5 mm deeply percolates underground through a basement. The rainy summer season, in particular, shows the highest deep percolation ratio of 62.2%. The deep percolation ratio of the experimental catchment is at least more two times than the ratio of a gneiss basin in Korea Peninsular. It has suggested that the experimental catchment is characterized by the higher portion of deep percolation in rainfall partitioning which reflects the highly permeable lithology in Jeju Island.

Key Words : rainfall partitioning, experimental catchment, monogenetic volcano, Eoseungsaeng-oreum, Jeju Island

1. 서론

제주도의 연 강우량은 1,872mm로 한반도의 평균 강우량 1,274mm를 598mm나 상회하고 있다. 연 강우량을 근거로 일년 동안 제주도에 유입되는 우수 총량을 계산하면 33억 9천만 톤이며, 이 가운데 44%인 14억 9천만 톤이 지하수를 함양하고 있다. 따라서 한반도의 평균 지하수 함양률인 18%를 2.5배나 상회할 뿐 아니라 제주도와 자주 대비되는 하와이 오후우(Ohau) 섬의 함양률보다도 높은 값

을 보이고 있다(제주도, 1997a).

제주도의 높은 지하수 함양률에는 화산 활동에 기인하는 투수성 지질 구조가 중요한 역할을 하고 있다. 제주도에는 현무암질 용암류와 이들 용암류가 유동할 때 형성된 화산쇄설성 퇴적물이 넓게 분포하고 있다(원종관, 1975). 현무암질 용암류는 수 미터 이하의 암층으로 이루어져 있으며, 암층 사이에는 화산쇄설층이 협재되어 있다. 용암류가 유동하는 과정에서 발달하는 용암동굴과 냉각될 때의 수축 작용으로 형성되는 수직 방향의 절리는

* 한국농촌공사 제주지역본부 환경지질팀 차장(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)

용암류 사이에 협재되어 있는 화산쇄설층과 함께 우수 및 지하수의 주요 이동 통로 역할을 하고 있다. 지표면에 노출되어 있는 공동이나 틈을 가리키는 습골을 통해서도 우수는 지하로 쉽게 유입될 수 있다.

제주도에는 섬 전역에 걸쳐 꽃자왈로 불리는 암괴 지대가 분포하고 있다. 꽃자왈은 용암 전체가 부서어져 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 이루어진 꽃자왈 지대는 공극률과 투수성이 매우 높아 우수의 유입량이 크고 일시적인 저류 능력도 매우 높으므로 제주도의 대표적인 지하수 함양 지대로 알려져 있다(제주도, 2000).

한편, 스트롬볼리식 분화로 방출된 화산쇄설물은 화구 주변에 원형 또는 타원형으로 쌓여 스크리아콘으로 불리는 단성화산(monogenetic volcano)을 만들게 된다. 제주도에서는 화산쇄설물이나 용암으로 이루어진 소형 화산체를 모두 오름이라고 부르는데, 흔히 제주도를 오름의 왕국으로 부르고 있듯이 섬 전역에 350개 가량의 단성화산이 분포하고 있다(박승필, 1985; 제주도, 1997b; 長谷中 외, 1998). 단성화산은 화산체의 구성 물질이나 형성 과정 등에 의하여 다시 분류할 수 있으나(김태호, 2001), 그 대부분은 스크리아콘에 해당한다(박승필, 1985; 윤정수, 1995). 스크리아콘은 주로 교결되지 않은 다공질 스크리아로 이루어져 있으므로 투수성이 높아 이들 화산체가 밀집되어 있는 중산간의 오름 지대도 지하수 함양 지대로 분류되고 있다(제주도, 2000).

그러나 스크리아콘 중에는 물영아리, 물장울, 물찾오름과 같이 산정 분화구에 습지를 지닌 경우뿐 아니라 오름 사면에 지표류의 침식 작용으로 개석곡이 형성된 경우 등 불투수성 지질 특성을 보이는 오름이 적지 않다(그림 1). 따라서 오름 지대의 지하수 함양량이나 물수지를 정확하게 평가하기 위해서는 실제로 오름에서 일어나고 있는 유출 현상을 고려할 필요가 있음에도 불구하고 아직까지 오름에서 수문 관측이 이루어진 사례는 전무하다. 본 논문에서는 한라산에 소재하는 어승생오름의 실험 유역에서 관측한 수문 자료와 어리목 관측소

의 기상 자료를 이용하여 강우 이벤트별로 어승생오름 사면에서 발생하는 강우의 수문 요소별 분배를 밝히고자 한다.

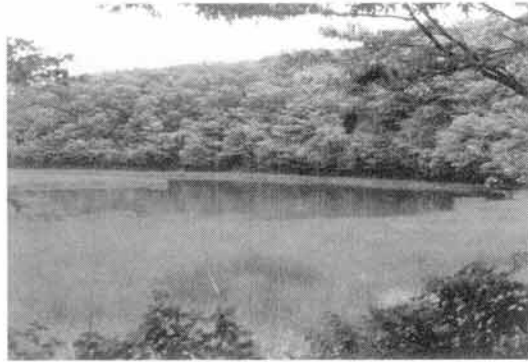


그림 1. 물장울의 산정 화구호

2. 연구 지역

제주시 해안동의 한라산 국립공원 어리목에 소재하는 어승생오름은 비고 350m, 둘레 5,842m, 면적 2.54km², 저경 1,968m의 대형 단성화산이며, 제주도 오름 가운데 서귀포시에 소재하는 근산 다음으로 큰 화산체이다(제주도, 1997b). 오름의 동사면을 제외한 전 사면에 걸쳐 15개의 개석곡이 출현하고 있으며, 이 가운데 남사면에 발달한 규모가 가장 큰 개석곡 일대가 실험 유역¹⁾으로 면적은 51,000m²이다(그림 2). 어승생오름 정상에 해당하는 유역 최고점의 표고는 1,169m이며, 유역의 출구에 해당하는 최저점의 표고는 965m로 유역의 기복비는 0.41이다. 동사면을 따라 어리목 광장에서 오름 정상까지 길이 1.3km의 등산로가 개설되어 있으며, 정상까지는 30분 정도가 소요된다.

실험 유역의 식생은 서어나무와 졸참나무 등의 낙엽 활엽수가 우점하고 있으며, 하층에는 최근 한라산 전역으로 빠르게 확산하고 있는 제주조릿대가 출현하고 있다(그림 3). 제주도 정밀토양도에 의하면 실험 유역에는 갈색 산림토에 속하는 적악통²⁾이 분포하고 있다(농촌진흥청, 1976). 적악통의 대표 토양은 100cm 정도의 토심을 보이며, 표토는 암적갈색의 잔자갈이 있는 양토, 기층은 적갈색의 자갈이 많은 양질 조사토로 이루어져 있다(농촌진흥청 제주농업시험장, 2003; 표 1).

제주도 단성화산 소유역에서의 강우의 분배

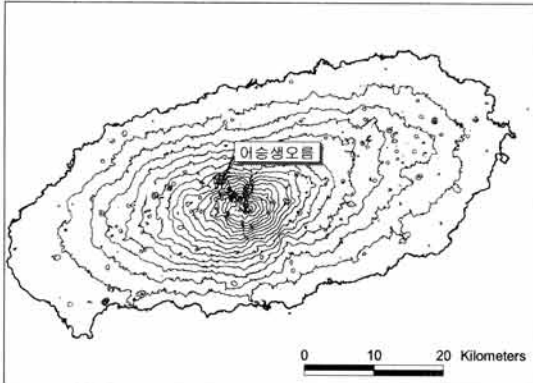


그림 3. 실험 지역의 식생 경관

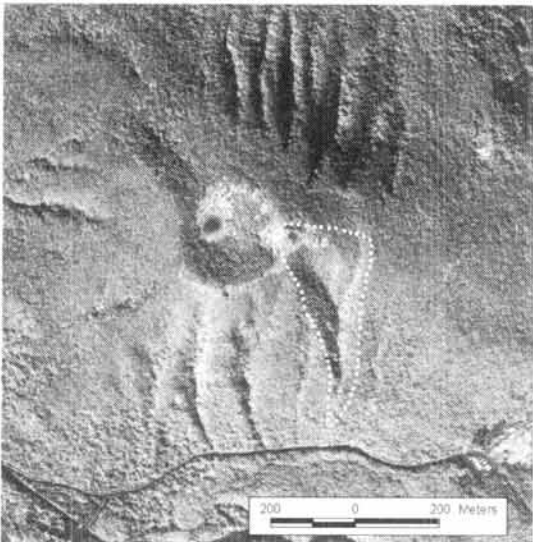


그림 2. 어승생오름의 실험 구역 (점선으로 둘러싸인 구역)

실험 구역 인근에 소재하는 어리목 자동기상관측소(2000~2006년)의 연평균 기온은 9.6°C이며, 최한월 1월과 최난월 7월의 월평균 기온은 각각 -2.3°C 및 20.9°C로 연교차는 23.2°C이다. 연평균 강우량은 3,010.9mm이며, 월별로는 태풍이 북상하는 8월과 9월이 643.7mm와 352.8mm, 장마철인 7월이 516.4

mm를 기록하고 있다. 강우량의 하계 집중도가 높은 편이나 전년에 걸쳐 강우가 발생하는 해양성 기후의 특징도 보인다(제주지방기상청, 2007).

3. 수문 요소의 관측 및 산정

1) 강우 분배에 관한 분석식

실험 구역의 사면은 상당한 두께의 토양과 화산쇄설층으로 이루어져 있으므로 구역 유출에는 지표 유출을 비롯하여 토양과 화산쇄설층에 일시적으로 형성된 포화대에서의 중간 유출, 지하수체로부터의 기저 유출이 포함되어 있다. 식생은 교목인 서어나무와 졸참나무가 우점하고 있으므로 증발산은 교목 수관부와 두께 1m의 토양층에서 주로 발생하는 것으로 생각된다. 따라서 구역 내부로 우수의 유입, 구역 내부에서 물의 이동과 저장, 구역 외부로 물의 유출 등 수문 순환 과정은 <그림 4>와 같이 개념화할 수 있다.

분석 영역 밖으로의 유출은 구역 유출과 증발산 이외에 구역 출구 지점의 지하를 통한 지하수 유

표 1. 적악통의 이화학적 특성

토층	토심 (cm)	입경 분포(%)			수분 장력(%)			유기물(%)	염기 포화도(%)
		모래	실트	점토	1/10기압	1/3기압	15기압		
표토(A)	0~7	50.0	31.6	18.4	64.7	52.3	34.6	15.26	15.3
기층1(C1)	7~15	61.1	28.0	10.9	52.1	40.6	25.3	6.78	11.0
기층2(C2)	15~100	81.2	9.5	9.3	40.1	27.3	18.5	4.24	17.0

자료: 농촌진흥청 한국토양정보시스템

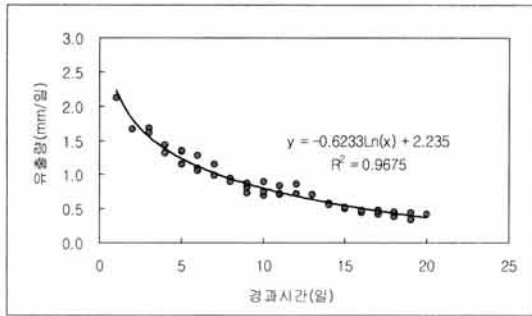


그림 6. 하이드로그래프의 유출량 하강 곡선을 이용하여 작성한 표준 유출 감수 곡선

루어졌으나, 태풍 나리 북상시 수로가 매몰되면서 9월 16일 12:15부터 9월 19일 17:00까지 77시간의 결측이 발생하였다.

<그림 3>과 같이 낙엽활엽수로 덮여 있는 실험 유역에서는 수목의 차단으로 인하여 정확한 강우량을 관측할 수 없었다. 따라서 강우량은 실험 유역에서 동쪽으로 300m 떨어져 있는 어리목 자동기상관측소의 자료를 이용하였다.

한편, 실험 유역에서는 유출이 한번도 중단되는 일 없이 연속적으로 일어났다. 그 결과 분석 기간의 유출량에는 그 이전에 발생한 강우 이벤트에 기인하는 유출량이 포함될 수 있으므로 강우 이벤트별로 수문 요소별 분배 비율을 평가하기 어렵다. 따라서 분석 기간의 총유출량에서 기간 이전에 발생한 강우에 기인하는 유출량과 그 기간에 발생한 강우에서 유래하는 유출량을 분리하기 위하여 표준 유출 감수 곡선을 사용하였다. 즉 관측된 유출량의 하강 곡선에서 일일 유출량이 2.5mm 이하로 감소하는 기간 가운데 무강우 기간만의 자료를 선정하여 <그림 6>과 같은 표준 유출 감수 곡선을 작성하였다. 그리고 분석 기간 이전에 발생한 유출량의 관측치를 토대로 분석 기간의 유출량에 포함되어 있는 이전 강우 기원의 유출량을 산정하였으며, 같은 방법으로 분석 기간 이후에 발생한 유출량도 구하였다.

3) 증발산 산정

강우는 <그림 4>와 같이 먼저 식생 수관부와 토양에 저류되며, 강우량이 저장능을 초과하면 식물 뿌리 지대 하부로 침투한다. 식생 수관부에서

차단되는 강우는 잠재 증발산량과 동일한 양이 증발하는 것으로 산정하였다. 실험 유역에서 무강우가 3일 이상 지속된 후에 발생한 강우 이벤트들을 보면 일강우량 10mm 이상의 강우가 발생한 경우에 유출량이 증가하는 경향을 보인다. 증발산에 의하여 토양 수분보다는 수관부에 저장된 수분이 먼저 고갈되므로 유역 유출이 발생하기 전에 저장된 강우량 10mm를 식생 수관부의 저장능으로 가정하였다. 그리고 식물 뿌리 지대에서 발생하는 실제 증발산량은 다음과 같이 토양 수분 평형법으로 산정하였다.

$$AET_i = K_s \cdot PET_i \quad (3.3)$$

여기에서 K_s 는 식생의 수분 스트레스 계수, PET_i 는 i 일의 잠재 증발산량(mm)이다.

작물의 수분 스트레스 계수는 Allen *et al.*(1998)에 제시된 신속 토양 수분 이용량(RAW)과 토양 수분 보유능($SWRC$)의 관계로부터 구하였다.

$$RAW = p \cdot SWRC \quad (3.4)$$

$$SWRC = Z_r \cdot (\theta_{FC} - \theta_{WP}) \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} SW_{im} \geq RAW \text{ 이면} \\ K_s = 1 \end{aligned} \quad (3.6a)$$

$$\begin{aligned} SW_{im} < RAW \text{ 이면} \\ K_s = SW_{im} / (SWRC - RAW) \end{aligned} \quad (3.6b)$$

여기에서 p 는 토양 수분 감소율, Z_r 는 식물의 뿌리 깊이(mm), θ_{FC} 는 포장 용수량에서의 수분 함량(mm^3/mm^3), θ_{WP} 는 영구 위조점에서의 수분 함량(mm^3/mm^3), SW_{im} 은 $i-1$ 일의 토양 수분 함량(SW_{i-1}) $\cdot P_i$ 로부터 구한 임시 토양 수분 함량(mm)으로 $Z_r \cdot \theta_{WP}$ 를 제외한 값이다.

식 (3.4)의 토양 수분 감소율(p)로는 많은 작물에 보편적으로 적용되고 있는 0.5(Allen *et al.*, 1998)를 사용하였다. 따라서 수분 스트레스 계수(K_s)는 토양 수분 함량이 토양 수분 보유능($SWRC$)의 50~100%인 경우에는 1이 된다. 그러나 토양 수분 함량이 토양 수분 보유능의 50%에서 0%까지 감소함에 따라 수분 스트레스 계수도 1에서 0으로 감소한다.

지표면에 도달한 강우는 토양 수분 결핍치($SWRC - SW_i$)를 채운 후에 식물 뿌리 지대의 하부

로 이동하는 것으로 간주하였다. 또한 식 (3.5)의 토양 수분 보유능(SWRC)은 실험 구역의 토양 깊이와 토양 특성을 토대로 산정하였다. 실험 구역에는 수고 7~8m의 서어나무와 졸참나무가 분포하고 있으며, 토양 깊이는 100cm(농촌진흥청 제주농업시험장, 2003)이므로 이 깊이까지 근계가 발달하는 것으로 판단하여 식물 뿌리 깊이(Z_r)는 100cm를 적용하였다. θ_{FC} 와 θ_{WP} 는 실험 구역에 분포하는 적악통의 대표 토양에 대한 0.5bar와 100bar에서의 수분량으로 산정하였다. 중량 단위 수분량을 체적 단위 수분량으로 환산할 때 필요한 가비중 값은 적악통의 대표 토양에 대한 실험치가 없는 관계로 적악통이 속해 있는 산간지 토양의 토양통에서 구한 가비중 값의 중간치 0.47을 적용하였다(농촌진흥청 제주농업시험장, 2003). 그 결과 실험 구역의 토양 수분 보유능은 46mm이다.

실제 증발산량을 산정할 때 필요한 초기 토양 수분 함량을 결정하기 위하여 분석 기간 이전인 2007년 3월 4일부터 4월 29일까지 토양 수분 평형 법으로 토양 수분을 계산하여 최종 토양 수분 함량을 분석 기간 시작일인 4월 30일의 토양 수분으로 이용하였다. 2007년 3월 4일에는 구역의 토양 수분 보유능과 차단 보유능의 합산치(56mm)보다 큰 223.5mm의 강우가 발생하였기 때문에 이 날의 토양 수분은 토양 수분 보유능 상태로 가정하여 계산하였다. 그 결과 4월 29일의 최종 토양 수분은 23mm이다.

한편, Penman-Monteith 법에 의한 증발산량 산정식은 다음과 같다(Monteith, 1965).

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a C_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_a}{r_s})} \quad (3.7)$$

여기에서 λET 는 잠열 유동(MJ/m²/day), R_n 는 순일사량(MJ/m²/day), G 는 토양열 유동 밀도(MJ/m²/day), ρ_a 는 일정한 대기압 하의 평균 대기 밀도(kg/m³), C_p 는 대기의 비열(MJ/kg/°C), e_s 는 포화 증기압(kPa), e_a 는 실제 증기압(kPa), Δ 는 증기압 곡선 기울기(kPa/°C), γ 은 건습구(습도계) 상수(kPa/°C), r_s 는 표면 저항(sec/m), r_a 는 공기 동력학적 저항(sec/m)이다.

순일사량 R_n 은 다음과 같다.

$$R_n = R_{n,s} - R_{n,l} \quad (3.8)$$

$$R_{n,s} = (1 - \alpha) R_s \quad (3.9)$$

여기에서 $R_{n,s}$ 은 입사하는 순일사량, $R_{n,l}$ 은 방출하는 순장과 일사량, R_s 는 일사량, α 는 알베도이다. 토양열 유동 밀도(G)는 증발산을 일단위로 산정하기 때문에 0으로 가정하였다.

동력학적 저항은 다음과 같다.

$$r_a = \frac{\ln\left(\frac{z_m - d}{z_{om}}\right) \ln\left(\frac{z_h - d}{z_{oh}}\right)}{k^2 u_z} \quad (3.10)$$

여기에서 Z_m 는 풍속 측정 높이(m), Z_h 는 상대습도 측정 높이(m), d 는 제로면 변위(m), Z_{om} 는 운동량 전달과 관련된 조도 길이(m), Z_{oh} 는 열과 수증기 전달과 관련된 조도 길이(m), k 는 카르만(von Karman) 상수(≈ 0.41), U_z 는 높이 z 에서의 풍속(m/sec)이다.

제로면 변위와 조도 길이는 각각 다음과 같은 Monteith(1981), Brutsaert(1975) 및 Stricker and Brutsaert(1978)의 관계식을 이용하여 식생 수관부의 평균 높이(h_c)로부터 구하였다.

$$d = 2/3 \cdot h_c \quad (3.11)$$

$$Z_{om} = 0.058h_c^{1.19} \quad h_c > 2m \quad (3.12)$$

$$Z_{om} = 0.123h_c \quad h_c \leq 2m \quad (3.13)$$

$$Z_{oh} = 0.1Z_{om} \quad (3.14)$$

본 논문에서 알베도는 실험 구역과 비슷한 낙엽 활엽수가 우점하고 있는 경기도 광릉 지역의 관측치(최태진 외, 2005)를 토대로 2007년 5월은 0.15, 6월은 0.13~0.14, 7월은 0.1~0.13, 8월부터는 0.1을 적용하였다. 공기 동력학적 저항은 수고 8m를 적용하여 산정하였으며, 표면 저항은 산림의 표면 저항이 80~150sec/m(Oke, 1987)이므로 그 중간값 115sec/m를 적용하였다. 그 밖에 다른 변수는 일 최고기온, 일 최저기온, 풍속 등의 기상 자료로부터 Allen *et al.*(1998)에 제시된 절차에 따라 구하였다.

잠재 증발산량 산정에는 어리목 자동기상관측소

의 자료를 이용하였다. Penman-Monteith 법으로 일별 증발산량을 산정하기 위해서는 일별 최고기온, 최저기온, 수증기압, 풍속 및 일사량이 필요하다, 어리목 관측소에서는 기온, 풍속 및 강우량만 측정하고 있으므로 일사량과 수증기압은 Allen *et al.*(1998)에 제시된 방식에 근거하여 최고기온과 최저기온으로부터 다음과 같이 추정하였다.

$$R_s = K_{Rs} \sqrt{(T_{max} - T_{min})} R_a \quad (3.15)$$

$$e_a = 0.611 \exp \left[\frac{17.27 T_{min}}{T_{min} + 2137.3} \right] \quad (3.16)$$

여기에서 R_s 는 일사량, K_{Rs} 는 계수로 $0.16^\circ\text{C}^{-0.5}$ 을 적용하였으며, T_{max} 는 일 최고기온($^\circ\text{C}$), T_{min} 는 일 최저기온($^\circ\text{C}$), R_a 는 지구 대기권에 도달한 복사량, e_a 는 수증기압이다.

한편, 제주시 건입동에 소재하는 제주 기상관측소에서는 잠재 증발산량 산정에 필요한 상기 5개 항목을 모두 관측하고 있다. 제주 관측소의 잠재 증발산량을 일사량과 상대습도의 실측치로부터 산정한 경우와 식 (3.15), (3.16)에서 구한 일사량과 상대습도의 추정치로부터 산정한 경우를 비교하면 전자가 후자보다 1.34배 높게 나타난다. 따라서 추정치를 이용하여 산정한 어리목 관측소의 잠재 증발산량에도 1.34배를 적용하여 값을 보정하였다.

4. 결과 및 고찰

1) 수문 요소별 관측 및 계산 결과

강우량은 2007년 4월 30일부터 11월 21일까지 총 3,060mm가 관측되었다. 2007년 4월 30일부터 6월 27일까지 일일 52mm 이하의 강우가 5~10일 간격으로 발생하였다. 이후 장마 기간인 6월 28일부터 7월 13일까지는 강우가 지속적으로 발생하였으며, 장마 기간 최고치인 121mm의 일일 강우량이 7월 6일 관측되었다. 7월 하순을 포함하여 20일간 무강우가 이어지다가 8월 4일부터 9월 18일까지 수차례의 호우가 발생하였다. 즉 8월의 경우 11일 189.5mm, 12일 126mm, 13일 136mm 등 사흘 동안 451.5mm의 강우량이 관측되었으며, 9월에도 100mm 이상의 일일 강우량을 기록한 일수가 3일에 이른다. 특히 태풍 나리에 동반된 호우로 9월 16일에는 제주도 기상 관측 사상 최고치인 454.5mm의 기록적인 강우량이 관측되었다. 이후 11월까지 2회의 강우를 제외하면 모두 일일 5mm 이하의 강우가 발생하였다(그림 7).

분석 기간별로 구분하면 전반기인 2007년 4월 30일부터 9월 13일까지 137일간 총 2,053mm의 강우량이 관측되었으며, 후반기인 10월 7일부터 11월 19일까지 44일간 총 243.5mm가 발생하였다. 분석 기간 총 181일 가운데 78일에 걸쳐 최소 0.5mm부터 최대 189.5mm까지의 일일 강우량을 기록하였다(표 2).

한편, 유출량은 전반기 분석 기간인 4월 30일부터 9월 13일까지 137일간 총 410.3mm가 발생하여 유출률은 20%를 기록하였으며, 후반기 분석 기간

표 2. 강우량과 강우 일수

강우 이벤트	기 간	일수	강우량 (mm)	강우 일수						일일 최대 강우량(mm)	
				10.1~25mm	25.1~50mm	50.1~75mm	75.1~100mm	100.1~150mm	150mm 이상		
전반기	봄 강우(P0430)	4/30~6/20	52	273.5	4	5	1				52
	장마(P0621)	6/21~8/03	44	666.0	6	3	4	1	1		121
	여름 호우(P0804)	8/04~9/03	31	954.0	3	6	2	1	2	1	189
	가을 호우(P0904)	9/04~9/13	10	159.5	2	1		1			86
	기간 전체	4/30~9/13	137	2053.0	15	15	7	3	3	1	189
후반기	가을 강우1(P1007)	10/07~10/24	18	115.0	1	1	1				57.5
	가을 강우2(P1025)	10/25~11/19	26	128.5	1				1		105
	기간 전체	10/07~11/19	44	243.5	2	1	1		1		105

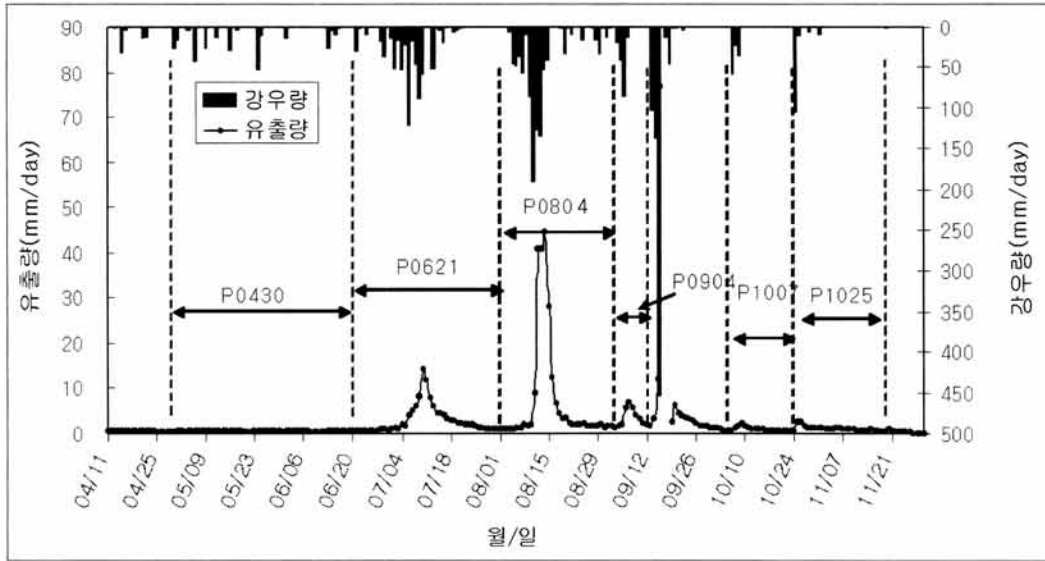


그림 7. 일별 강우량과 유출량(화살표는 이벤트별 분석 기간을 가리킴)

인 10월 7일부터 11월 19일까지 44일간 총 45.3mm가 발생하여 유출률은 18.7%로 나타났다. 강우 이벤트별 유출량은 18~227.4mm로서 강우량의 10.1~23.8%의 범위를 보이고 있다(표 3).

하이드로그래프를 이용하여 표준 유출 감소 곡선을 작성하고 분석 기간 이전에 발생한 강우에 기인하여 분석 기간 중에 일어난 유출량을 산정한 결과, 그 값은 2.1~13.9mm로서 분석 기간에 관측된

표 3. 유출량과 유출률

강우 이벤트	분석 기간 (일수)	강우량 (mm, A)	유출량 (mm)							
			기간 중 발생한 총유출		기간 전 강우에 기인한 유출		기간 중 발생한 순유출		기간 후 발생한 유출	
			유출량 (B)	유출률 (B/A,%)	유출량 (C)	비율 (C/B,%)	유출량 (B-C)	유출률 ((B-C)/A,%)	유출량 (D)	비율 (D/A,%)
전반기	봄 강우 (P0430)	273.5 (52)	27.5	10.1	2.1	7.8	25.4	9.3	4.7	1.7
	장마 (P0621)	666.0 (44)	120.2	18.1	4.7	3.9	115.6	17.4	8.7	1.3
	여름 호우 (P0804)	954.0 (31)	227.4	23.8	8.7	3.8	218.7	22.9	13.9	1.5
	가을 호우 (P0904)	159.5 (10)	35.2	22.1	13.9	39.4	21.3	13.4	16.7	10.5
	기간 전체	2053.0 (137)	410.3	20.0	2.1	0.5	408.2	19.9	16.7	0.8
후반기	가을 강우1 (P1007)	115.0 (18)	18.0	15.6	7.1	39.7	10.8	9.4	7.2	6.2
	가을 강우2 (P1025)	128.5 (26)	27.5	21.4	7.2	26.1	20.3	15.8	1.8	1.4
	기간 전체	243.5 (44)	45.4	18.7	7.1	15.7	38.3	15.7	1.8	0.8

제주도 단성화산 소유역에서의 강우의 분배

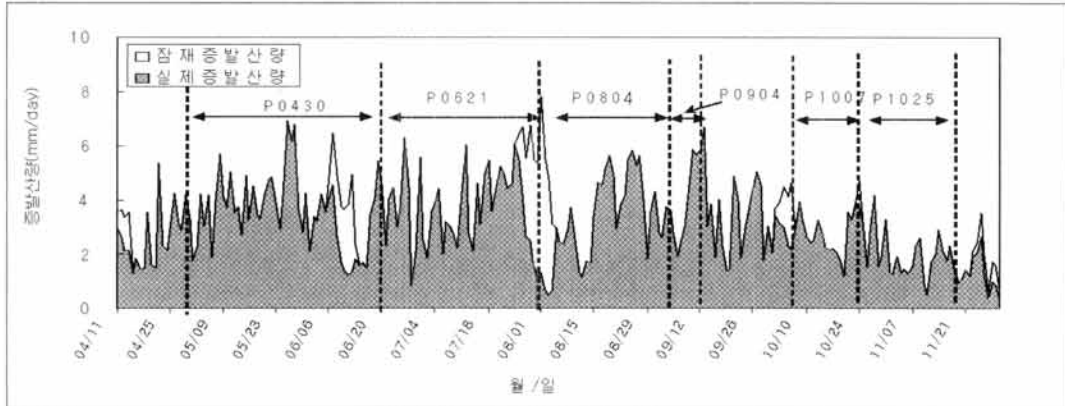


그림 8. 일별 잠재 증발산량과 실제 증발산량

유출량의 3.8~39.7%를 차지하고 있다. 따라서 분석 기간 이전의 강우에 기인하는 유출량을 제외하면, 강우 이벤트별 유출량은 10.8~218.7mm로서 동일 기간 강우량의 9.3~22.9%를 차지하고 있다. 또 계절별로 비교하면 여름철 이벤트의 유출률이 17.4~22.9%로 높고, 봄철과 가을철 이벤트의 유출률이 9.3~15.8%로 낮게 나타난다(표 3).

2007년 4월 30일부터 11월 21일까지의 잠재 증발산량은 일일 0.49~7.82mm(평균 3.51mm)이며, 4월에서 7월로 갈수록 증가하다가 8월 이후부터 11월 까지 감소하는 경향을 보인다. 또한 이 기간의 실제 증발산량은 일일 0.48~6.94mm(평균 3.21mm)이며, 실제 증발산량도 4월에서 7월로 갈수록 증가하다가 8월 이후부터 11월까지 감소하고 있다(그림 8; 표 4).

토양 수분량은 분석 기간 대부분 포장용수량의

1/2 이상을 보이고 있으나, 6월 초순(6월 5일~12일), 7월 하순부터 8월 초순(7월 25~8월 4일), 10월 초순(10월 2일~6일) 및 10월 하순(10월 23일~24일)에는 포장용수량의 1/2 아래로 떨어지고 있다. 실제 증발산량이 6월 7일부터 6월 12일까지, 7월 25일부터 8월 3일까지는 2mm 이하로 낮게 나타나고 있는데, 이 기간은 잠재 증발산량이 4~7.8mm로서 비교적 큰 시기이나 토양 수분량은 포장용수량의 1/2 이하로 감소한 시기이다(그림 9).

2) 수문 요소별 분배

실험 유역에서의 강우의 분배를 정리하면 봄철과 여름철에 해당하는 전반기에 발생한 총강우량 2,053mm 가운데 20.7%에 해당하는 424.9mm가 유역 유출량으로 나타났다. 실제 증발산량은 강우량의

표 4. 분석 기간 중의 잠재 증발산량과 실제 증발산량

강우 이벤트	기 간	일수	강우량(mm)	증발산량(mm)			
				기간 중의 잠재증발산(A)	기간 중 발생한 실제증발산(B)	비율 (B/A,%)	
전반기	봄 강우(P0430)	4/30~6/20	52	273.5	201.6	185.8	92.1
	장마(P0621)	6/21~8/03	44	666.0	187.2	152.9	81.7
	여름 호우(P0804)	8/04~8/03	31	954.0	110.4	107.9	97.8
	가을 호우(P0904)	9/04~9/13	10	159.5	42.5	42.5	100.0
	기간 전체	4/30~9/13	137	2053.0	541.7	489.1	90.3
후반기	가을 강우1(P1007)	10/07~10/24	18	115.0	50.9	49.8	97.8
	가을 강우2(P1025)	10/25~11/19	26	128.5	50.1	50.1	100.0
	기간 전체	10/07~11/19	44	243.5	100.9	99.8	98.9

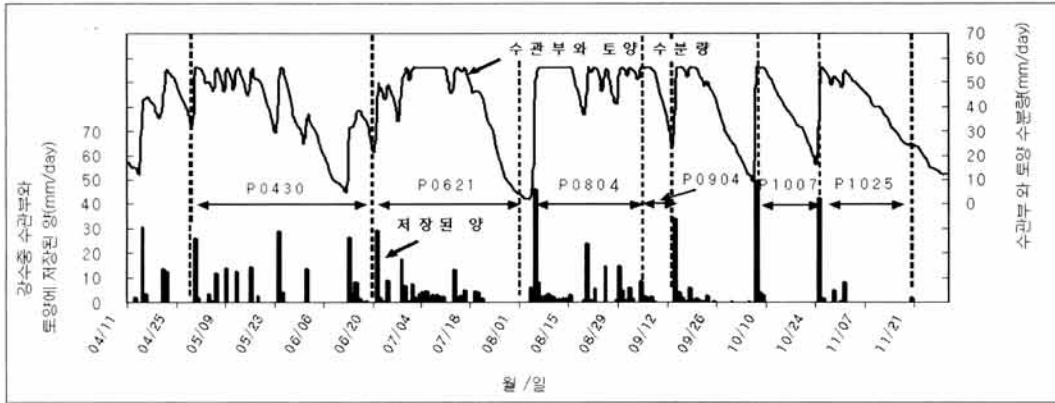


그림 9. 수관부와 토양의 수분량 및 강우 중 저장량의 변화

23.4%를 차지하는 480mm로 유출량과 비슷하며, 깊은 침투량은 강우량의 55.9%를 차지하는 1,147.3mm로 이 기간에 발생한 강우량의 55%가 실험 유역 하부의 지하로 이동하는 것으로 보인다. 가을철에 해당하는 후반기에는 총강우량 243.5mm 가운데 16.5%에 해당하는 40.2mm가 유출량으로 나타났다. 반면에 실제 증발산량은 강우량의 46.9%를 차지하는 114.2mm로 가장 크며, 지하 심부로의 침투량은 강우량의 36.6%인 89.1mm로서 봄철과 여름철에 비하여 작게 나타났다(표 5).

강우 이벤트별로 비교하면 유출량은 강우량의 11.0~24.4%를 차지하고 있으며, 증발산량은 10.2~63.8%, 깊은 침투량은 25.3~66.0%의 범위를 보이고 있다. 봄철과 가을철 이벤트의 경우는 증발산율

이 강우량의 44.9~63.8%를 차지함으로써 수문 요소 가운데 가장 높고, 유출률은 11.0~17.2%, 깊은 침투율은 25.3~37.8%로 작게 나타난다. 반면에 여름철 이벤트의 경우는 깊은 침투율이 59.2~66.0%로 가장 높고, 유출률도 18.7~23.8%로 봄철과 가을철에 비하여 크나 증발산율은 10.2~20.0%로 작은 특징을 보이고 있다(표 5).

전체 기간의 평균을 보면 총강우량 2,296.5mm 가운데 20.2%에 해당하는 465mm가 유역 유출량으로 분배되며, 실제 증발산량은 강우량의 25.9%를 차지하는 595mm로 유출량과 유사하다. 또한 깊은 침투량은 강우량의 53.8%를 차지하는 1,236.5mm이므로 이 기간에 발생한 강우량의 53.8%가 실험 유역 하부의 지하로 이동하는 것으로 보인다.

표 5. 강우 이벤트의 수문 요소별 분배

강우 이벤트		기간	일수	강우(P_e)	증발산(AET_e)	유출(R_e)	깊은 침투(PER_e)
전반기	봄 강우(P0430)	4/30~6/20	52	273.5	174.4(63.8)	30.0(11.0)	69.1(25.3)
	장마(P0621)	6/21~8/03	44	666.0	133.2(20.0)	124.3(18.7)	408.6(61.3)
	여름 호우(P0804)	8/04~9/03	31	954.0	157.0(16.5)	232.6(24.4)	564.5(59.2)
	가을 호우(P0904)	9/04~9/13	10	159.5	16.2(10.2)	38.0(23.8)	105.3(66.0)
	기간 전체	4/30~9/13	137	2,053.0	480.8(23.4)	424.9(20.7)	1,147.3(55.9)
후반기	가을 강우1(P1007)	10/07~10/24	18	115.0	56.5(49.1)	18.0(15.6)	40.5(35.3)
	가을 강우2(P1025)	10/25~11/19	26	128.5	57.8(44.9)	22.2(17.2)	48.6(37.8)
	기간 전체	10/07~11/19	44	243.5	114.2(46.9)	40.2(16.5)	89.1(36.6)
전 기간			181	2,296.5	595.0(25.9)	465.1(20.2)	1,236.4(53.8)

* 단위는 mm이며, 괄호 안의 수치는 수문 요소별 강우량에 대한 백분율을 가리킨다.

* 증발산(AET_e)은 강우 이벤트 e에 의하여 식생 수관부와 토양에 저류된 후 기간 중 또는 기간 후에 증발산된 양으로 표 4의 기간 중 발생한 실제 증발산량과는 다르다.

한편, 화강암과 더불어 한반도를 대표하는 지질로 꼽히는 편마암 유역에서 실시된 물수지 분석에서 2005년 6월부터 9월까지의 강우 이벤트별 유역 유출률은 16.2~59.2%로서 평균 30.6%를 기록하고 있다. 지하수 함양률의 경우는 지하수 관측정 자료를 토대로 지하수위 변동법으로 구하면 23.6~25.9%를 보이나, 염소를 이용한 이온 수지법과 기저 유출 분리법으로 구하면 각각 13.4%와 14.0%로서 유출률을 크게 밀고고 있다(최인혁 외, 2007). 또한 금강 상류 유역에서 토양 수분 추적법을 사용한 모델링 결과에서도 49.1%의 유역 유출률에 비하여 지하수 함양율은 7.53%에 불과하다(김성준·채효석, 2000).

반면에 이와 비슷한 시기에 해당하는 실험 유역 전반기의 강우 이벤트별 유역 유출율은 11.0~24.4%로서 평균 18.5%를 기록하고 있다. 제주도의 단성화산으로는 이례적으로 어승생오름의 실험 유역에서는 관측이 이루어진 전 기간에 걸쳐 항상 유출이 발생하였으며, 예상과 달리 유수가 고갈된 상태는 한 번도 나타나지 않았다. 그럼에도 불구하고 물수지에서 유출이 차지하는 비율은 한반도 유역에 비하여 훨씬 낮은 편으로서, 그 결과 깊은 침투율은 평균 53.8% 특히 강우량이 많은 여름철에는 62.2%까지 올라가는 높은 비율을 보이고 있다. 비교 사례가 많지 않으므로 일반화하기는 어려우나, 본 결과에 의하면 단성화산의 깊은 침투율, 즉 지하수 함양률은 한반도 산지에 비하여 적어도 2배 이상은 큰 것으로 나타남으로써 투수성이 높은 제주 지역의 화산 지질 특성을 잘 반영하고 있다.

5. 결론

제주도의 대표적인 지형 경관인 오름 즉 단성화산에서 일어나는 강우의 분배 특성을 밝히기 위하여 한라산 어리목 표고 1,169m의 어승생오름 남사면에 면적 51,000m²의 실험 유역을 설정하고, 2007년 4월 11일부터 11월 26일까지 수문 관측을 실시하였다. 이와 동시에 실험 유역 인근에 위치하는 어리목 자동기상관측소의 자료를 이용하여 실제 증발산량과 수분 변화량을 수분 평형법으로 구하였다.

태풍에 동반된 집중 호우에 따른 결측 때문에

전반기와 후반기로 나누어 분석한 실험 유역의 물수지는 총강우량 2,296.5mm 가운데 20.2%에 해당하는 465mm가 유역 유출량으로 분배되며, 실제 증발산량은 강우량의 25.9%를 차지하는 595mm로 유출량과 비슷하다. 깊은 침투량은 1,236.5mm이므로 분석 기간에 발생한 강우량의 53.8%가 실험 유역 하부의 지하로 이동하는 것으로 보인다. 특히 우기인 여름철의 깊은 침투율은 평균 62.2%에 달하고 있다. 이는 한반도 편마암 유역에 비하여 적어도 2배 이상 큰 지하수 함양률로서 투수성이 높은 제주도의 화산 지질 특성을 잘 반영하고 있다.

본 결과는 어승생오름 남사면의 한 유역을 대상으로 얻어진 것이므로 단성화산에서의 강우의 분배 특성을 일반화하기 위해서는 대상 오름의 유형과 수를 늘리고 또 유역의 크기도 달리하는 관측을 통하여 관련 자료를 축적할 필요가 있다. 제주도 단성화산의 대다수를 차지하고 있는 스키리아콘은 본질적으로 투수성이 높은 화산체이므로 어승생오름과 같이 지속적인 유출이 일어나는 오름은 예외적이라고 할 수 있다. 그러나 오름이 형성된 이후 시간이 경과하면서 풍화와 침식을 받아 오름의 투수성은 저하되고 결과적으로 지표류를 동반한 유출이 발생할 수 있으며, 이런 사례는 어승생오름뿐 아니라 여러 오름에서 확인할 수 있다. 따라서 지하수 함양률과 관련된 오름의 투수성 평가는 오름의 사례별 및 유형별로 구분하여 접근할 필요가 있으며, 본 결과는 그런 제안의 타당성을 뒷받침하는 자료가 될 수 있을 것이다.

주

- 1) 실험 유역은 지형학적 분수계를 토대로 설정되었다. 그러나 유역 지하에는 화산쇄설물과 용암류로 이루어진 복잡한 암층이 분포하고 있으므로 지형학적 분수계와 수문학적 분수계가 일치하지 않을 수 있다. 또한 유역 최상류 분수계로부터 서쪽으로 150m 떨어진 지점에 화구호가 위치하고 있으므로 화구호의 물이 실험 유역으로 유입될 가능성도 존재한다. 그러나 지하수의 분포와 유동은 일반적으로 지표면의 기복을 반영하므로 이런 유출입량은 크지 않을 것으로 판단되며, 향후 지구물리 탐사, 시추 조사 또는 물 시료의 동위원소 분석을 통하여 지형학적 분수계와 수문학적 분수계의 차이를 밝힐 필요가 있다.
- 2) 적악통은 미국 농무성의 토양 분류법을 적용하면 ashly over cindery, nonacid, mesic family of Typic

Hapludands에 해당하는 화산회토이다(제주도민속자연사박물관, 2000).

문헌

- 김성준·채효석, 2000, 격자기반의 토양분추적에 의한 지하수함양량 추정기법개발, 한국수자원학회논문집, 33, 61-72.
- 김태호, 2001, 제주도의 화산지형과 보전, 자연보존, 114, 1-7.
- 농촌진흥청, 1976, 정밀토양도(제주도).
- 농촌진흥청 제주농업시험장, 2003, 제주도 발작물 작물계수측정: 제주도 발관개 용수량 산정법 정립에 관한 연구 부분과제.
- 박승필, 1985, 제주도 측화산에 관한 연구, 전남대학교 논문집, 30, 159-166.
- 송시태, 2000, 제주도 암괴상 아아용암류의 분포 및 암질에 관한 연구, 부산대학교 박사학위논문.
- 원종관, 1975, 제주도의 형성과정과 화산활동에 관한 연구, 건국대학교 이학논집, 1, 7-48.
- 윤정수, 1995, 제주도 북사면의 기생화산체에 관한 연구, 제주대학교 해양연구소 연구보고, 19, 25-38.
- 자연지리정보연구회, 2004, 자연지리학사전, 한울.
- 제주도, 2000, 제주도 지하수 보전·관리계획 보고서.
- 제주도, 1997a, 제주의 지하수 이렇게 보호합시다.
- 제주도, 1997b, 제주의 오름.
- 제주도민속자연사박물관, 2000, 제주토양원색도감.
- 제주지방기상청, 2007, 제주도 AWS 상세기후 특성집.
- 최인혁·우남철·김수진·문상기·김준, 2007, 광릉 원두부 소유역에서의 우기 중 지하수 함양량 평가, 한국농림기상학회지, 9, 75-87.
- 최태진·임종환·천정화·이동호·김준, 2005, 플릭스타워에서 관측된 광릉 산림 소유역의 미기후학적 특징, 한국농림기상학회지, 7, 35-44.
- 長谷中利昭·李文遠·谷口宏充·北風嵐·宮本毅·藤卷宏和, 1998, 韓國濟州單成火山群の火山カタログ, 東北アジア研究, 2, 41-74.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., and Smith, M., 1998, Crop Evapotranspiration, FAO Irrigation and Drainage Paper 56.
- Brutsaert, W., 1975, Comments on surface roughness parameters and the height of dense vegetation, Jour. Meterol. Soc. Japan, 53, 96-97.
- Monteith, J. L., 1965, Evaporation and environment, Symposia of the Society for Experimental Biology, 19, 205-234.
- Monteith, J. L., 1981, Evaporation and surface temperature, Quart. Jour. Roy. Meteorol. Soc., 107, 1-27.
- Oke, T. R., 1987, *Boundary Layer Climates*, Methuen.
- Stricker, H. and Brutsaert, W., 1978, Actual evapotranspiration over summer period in the 'Hupsel Catchment', Jour. Hydrol, 39, 139-157.
- Ward, R. C., 1975, *Principles of Hydrology*, McGraw Hill.
- 교신 : 김태호(제주대학교 지리교육과, kimtaeho@cheju.ac.kr)
Correspondence: Taeho Kim(Department of Geography Education, Cheju National University, kimtaeho@cheju.ac.kr)

(접수 : 2008. 3. 11, 채택 : 2008. 6. 12)