

## 격자기반의 토양물수지방법에 의한 지하수함양의 공간분포 추정

안중기<sup>1\*</sup> · 이용두<sup>2</sup> · 황종환<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국농촌공사 제주도본부, <sup>2</sup>제주대학교 해양과학대학 해양과학부

### Estimation of the Spatial Distribution of Groundwater Recharge by Grid-based Soil Water Balance Method

Jung-Gi, An<sup>1\*</sup> · Yong-Doo, Lee<sup>2</sup> · Jong-Hwan, Hwang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Team of Environmental Geology, KRC Jeju Province Office

<sup>2</sup>Division of Ocean Science, Jeju University

#### ABSTRACT

This paper outlines the methodology of grid-based water balance for estimating the spatial distribution of recharge, which is applied to Woedo catchment in the northern area of the Jeju Island. The catchment is divided into grids and a daily water balance in each grid is computed for the period of 5 years. Daily rainfall data in each grid is interpolated from the data of 10 rainfall gauging stations. The spatial distributions of parameters such as SCS curve number, soil water retention capacity and crop coefficients are derived from GIS analyses of soil and land use characteristics. The SCS curve number is obtained by calibrating simulated runoffs with respect to the observed runoffs. The results show that the average annual rainfall increases from 1,665 mm/year to 3,382 mm/year in accordance with the topographic elevation, and the average annual recharge varies from 372 mm/year to 2,576 mm/year according to the average annual rainfall increases. Spatial variability of recharge is the highest among the water balance components such as rainfall, direct runoff, evapotranspiration and recharge because the rate of runoff and evapotranspiration in the area with relatively low rainfall is higher than the other area.

**Key words :** Water Balance Method, Grid, Groundwater Recharge, Spatial Distribution

#### 요 약 문

본 논문은 지하수함양의 공간분포를 분석할 수 있는 격자기반의 토양물수지방법을 제시하고, 제주도의 외도천유역에 적용하였다. 유역을 격자로 분할하고, 각 격자의 5년 동안의 물수지를 일단위로 계산하였으며, 격자의 일별 강수량은 10개 지점의 강수량자료로 보간법에 의해 산정하였다. SCS유출곡선지수, 토양수분보유능, 작물계수 등 매개변수의 분포는 토양과 토지이용특성에 대한 GIS분석으로 부터 구하였다. 유출곡선지수는 하천유출량 관측자료로 보정하였다. 사례유역에 대한 분석결과 강수량은 표고가 증가함에 따라 1,665 mm/년부터 3,382 mm/년까지 증가하며 지하수함양량은 강수량이 증가함에 따라 372 mm/년부터 2,576 mm/년까지 증가한다. 강수량이 상대적으로 적은 지역에서 유출율과 증발산율이 다른 지역보다 더 크기 때문에 지하수함양이 강수, 직접유출, 증발산, 지하수함양과 같은 물수지 성분 중에서 공간적인 변이가 가장 큰 것으로 나타나고 있다.

**주제어 :** 물수지방법, 격자, 지하수함양, 공간분포

\*Corresponding author : angro40@hanmail.net

원고접수일 : 2005. 12. 16 게재승인일 : 2006. 1. 10

질의 및 토의 : 2006. 4. 30 까지

## 1. 서 론

지하수함양은 토양으로 침투한 강수 중에서 일부가 대수층으로 유입되는 과정으로 기후, 토양과 토지이용, 지형, 지하지질 등의 영향을 받아 국지적으로 큰 차이를 보이기 때문에 어떤 지역의 지하수함양에 대한 산정과 공간적 분포에 대한 규명은 그 지역의 지하수유동특성을 이해하고, 지하수 개발가능량을 산정하여 수자원개발계획을 수립하거나 토지이용의 변경이 발생하는 지역개발계획을 수립하기 위해 필수적인 과정이다. 수자원의 대부분을 지하수에 의존하는 제주도는 지하수함양량에 대한 중요성을 일찍부터 가지게 되어 1980년대 이후부터 토양물수지방법에 의해 유역의 평균 함양량을 산정하고(산업기지개발공사, 1981; 한국수자원공사, 1993·2003, 농업기반공사; 2000), 최근에는 동위원소분석에 의해 함양량을 산정한 연구들이 진행되었으며(박원배 외, 2001) 이 결과를 이용하여 지하수개발이용계획 및 관리계획을 수립하거나 최근에는 지하수개발이용허가의 제한이나 지하수자원특별관리구역의 설정에 이용하고 있다. 제주도는 지하수함양에 영향을 주는 강수, 토양, 토지이용이 표고에 따라 공간적으로 변화하는 분포특성을 보여 지역적 변이가 크며, 제주국제자유도시로 지정됨에 따라 많은 지역개발계획이 수립되어 개발될 예정이므로 지하수함양의 공간분포에 대한 규명은 제주도 수자원의 보전을 위해 반드시 필요하다고 할 수 있다.

지하수 함양량을 산정하는 방법에는 물수지방법이나 지하수위해석법 등과 같은 물리적인 방법, 동위원소나 염소이온 등을 이용한 화학적인 방법, 물수지모델이나 지하수유동모델 등을 이용한 수학적 방법 등이 있다(Stephens et al., 1996). 이 중에서 토양층에 대한 물수지방법은 지하로 침투한 강수중에서 증발산의 영향을 받지 않는 식생의 근계 하부까지 이동한 물의 양을 함양량으로 산정하는 방법이다. Lerner et al.(1990)은 지하수 함양을 식생의 근계 하부까지 침투(percolation)한 토양수를 잠재함양, 대수층까지 도달한 토양수를 실제함양으로 구분하였는데 토양수에 대한 물수지분석은 잠재지하수함양량을 산정하는 방법이라고 할 수 있다. 토양으로 침투한 강수 중에서 증발산 또는 지표하유출(subsurface flow)이 되지 않고 대수층으로 이동되는 과정에 영향을 주는 불포화대의 인자가 많은 관계로 실제함양량을 산정하기는 어려워 잠재함양량의 공간적 분포를 수자원 및 지역개발계획에 사용하는 것이 더 실용적이라고 할 수 있다.

현재까지는 토양물수지분석법이나 INFILv3, SWAT 등과 같은 수문모델을 이용하여 소유역별 또는 격자별로 함

양량을 산정한 연구들이 발표되고 있는데(Khan and Liang, 1989; 김성준·채효석, 2000; Oki, 2002; Hevesi et al., 2003; 김남원 외, 2005) 본 연구는 토양도와 토지이용자료로부터 매개변수 값의 분포를 구할 수 있는 토양물수지방법을 이용하여 격자별로 잠재지하수함양량을 산정하였다.

본 연구에서는 표고증가에 따라 강수, 토양, 토지이용 등이 공간적으로 함께 변화하는 제주도의 유역을 사례지역으로 선정하여 유역을 격자로 구분하고 각 격자에 대한 물수지분석으로 지하수함양량을 산정하는 격자기반의 물수지분석을 실시하여 강수량, 토양, 토지이용 등의 공간적 차이에 따른 잠재 지하수 함양량의 분포특성을 규명코자 하였다.

## 2. 지하수함양량 산정방법

### 2.1. 물수지분석

지하수함양량은 제주도지역을 대상으로 한 기존조사에서 이용된 물수지방법을 기초로 하여 다음과 같이 산정하였으며, 주요 매개변수는 SCS의 유출곡선지수, 토양수분보유능, 작물계수 등 3개이다.

토양수분에 대한 물수지식은 식 (1)과 같다.

$$\Delta S = P - DR - AET - REC \quad (1)$$

여기서  $\Delta S$ 는 토양수분변화량(mm),  $P$ 는 강수량(mm),  $DR$ 은 직접유출량(mm),  $AET$ 는 실제증발산량(mm),  $REC$ 는 지하수함양량(mm)이다.

직접유출은 다음과 같은 미국토양보전국의 강우-유출모형인 SCS모형으로 산정한다.

$$DR = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (2)$$

여기서  $I_a$ 는 초기강우손실(mm),  $S$ 는 최대잠재보유수량(mm)이다.

초기강우손실은  $I_a = 0.2S$  관계를 이용하고  $S$ 는 SWRRB 모델(Williams et al., 1985)과 SWAT모델(Arnold et al., 1993)에서 이용된 식 (3)으로 계산한다.

$$S = S_{\max} \cdot \left( 1 - \frac{SW}{[SW + \exp(w_1 - w_2 \cdot SW)]} \right) \quad (3)$$

여기서  $S_{\max}$ 는 AMC조건인  $S$ ,  $SW$ 는 토양수분함량(mm),  $w_1$ ,  $w_2$ 는 형상계수로  $CN$ 과 토양이 완전포화된 때의 수분함량( $SW_c$ )으로 산정한다.  $SW$ 는 제주도 토양인 흑색화산회

토, 농암갈색화산회토, 암갈색화산회토의 공극율이 유효수분함량의 1.7배~4.4배이며 평균 3.2배이므로(김영화 외, 2002) 토양수분보유능(SWRC)의 3배를 적용하였다.

실제증발산량은 식 (4)와 (5)와 같이 산정한다.

$$SW_i = SW_{i-1} + P_i - DR_i - AET_i \quad (4)$$

$$AET_i = K_s \cdot PET_i \quad (5)$$

여기서  $SW_i$ 는  $i$ 일의 최종 토양수분량(mm),  $SW_{i-1}$ 는  $i-1$ 일의 최종 토양수분량(mm),  $K_s$ 는 작물의 수분스트레스계수,  $PET$ 는 잠재증발산량이다.

잠재증발산량( $PET$ )은 FAO-56 Penman-Monteith식(Allen et al., 1998)으로 기준작물의 잠재증발산량( $ET_{0i}$ )을 계산한 후 작물계수( $K_c$ )를 적용하여 구한다.

$$PET_i = K_c \cdot ET_{0i} \quad (6)$$

$K_s$ 는 Allen et al.,(1998)이 제시한 작물별 신속토양수분이용량(RAW)과 토양수분보유능(SWRC)과의 관계로 산정하는데  $K_s$ 는 SWRC의 50~100%까지 1, 50% 이하부터 0까지는 직선으로 감소하는 것으로 보았다.

토양수분이 아래와 같은 토양수분보유능(SWRC)을 초과하면 지하수로 함양되는 것으로 간주한다(Lerner et al., 1990; Allen et al., 1998).

$$SWRC = Z_r \cdot (\Theta_{FC} - \Theta_{WP}) \quad (7)$$

여기서  $Z_r$ 는 작물의 뿌리깊이(mm),  $\Theta_{FC}$ 는 포장용수량에서의 수분함량( $mm^3/mm^3$ ),  $\Theta_{WP}$ 는 영구위조점에서의 수분함량( $mm^3/mm^3$ )이다.

### 2.2. 함양량 산정절차

지하수함양량은 Fig. 1과 같은 절차로 입력자료 및 매개변수분포를 구하여 산정하였다. 사례지역은 제주도 서북부에 위치한 외도천유역으로 수치지형도를 이용하여 유역의 경계를 구분하고 유역을 길이 500m의 격자로 분할하였다(Fig. 2, Fig. 3(a)). 격자별 일강수량은 유역과 그 인근의 기상관측소자료로 산정하고, 잠재증발산량의 분포를 검토한 결과 공간적인 변이가 크지 않는 것으로 나타나 제주기상관측소의 자료로 계산하였다. 물수지분석의 매개변수는 정밀토양도와 토지이용현황도를 이용한 GIS작업과 기존 문헌의 자료로부터 추정하였다(정정화 외, 1995; USDA, 1986; 국토개발연구원, 1997b; Allen et al., 1998; 임한철 외, 2003; 이영일 외, 2004). 물수지는 Excel과 Visual Basic으로 작성한프로그램을 이용하여 계

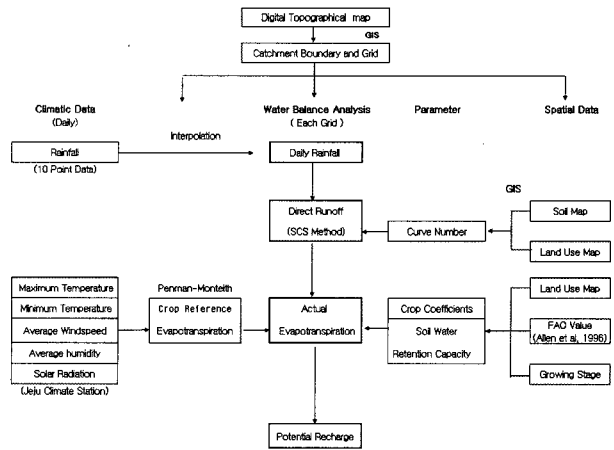


Fig. 1. Procedure computing ground water recharge.

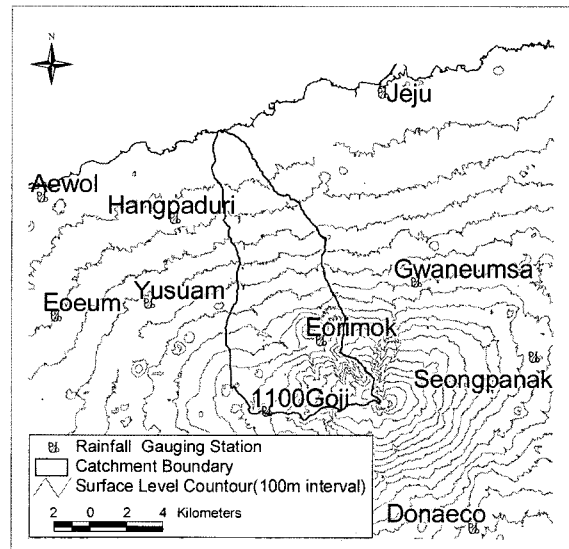


Fig. 2. Location of study catchment and rain gauging stations.

산하였다. 지표유출과 관련된  $CM$ 은 외도천유역 하류에서 관측된 3개 강수사상에 의한 유출자료로 검증하였다

## 3. 사례지역과 적용방법

### 3.1. 외도천유역의 개관

외도천유역은 제주시의 서쪽에 위치한 면적  $75.2 \text{ km}^2$ 의 유역으로 유역의 길이는 약  $16.3 \text{ km}$ 이며 표고는  $0 \sim 1,940 \text{ m}$ 로 유역길이가 짧지만 표고차가 크게 나타나고 있다. 지형경사는 표고  $100 \text{ m}$ 지역까지 3%이하, 표고  $100 \sim 650 \text{ m}$ 까지 3~6%로 해안에서 표고  $650 \text{ m}$ 지점까지 완경사를 이루며 그 이후부터 경사가 증가하여 6~18.5%이다.

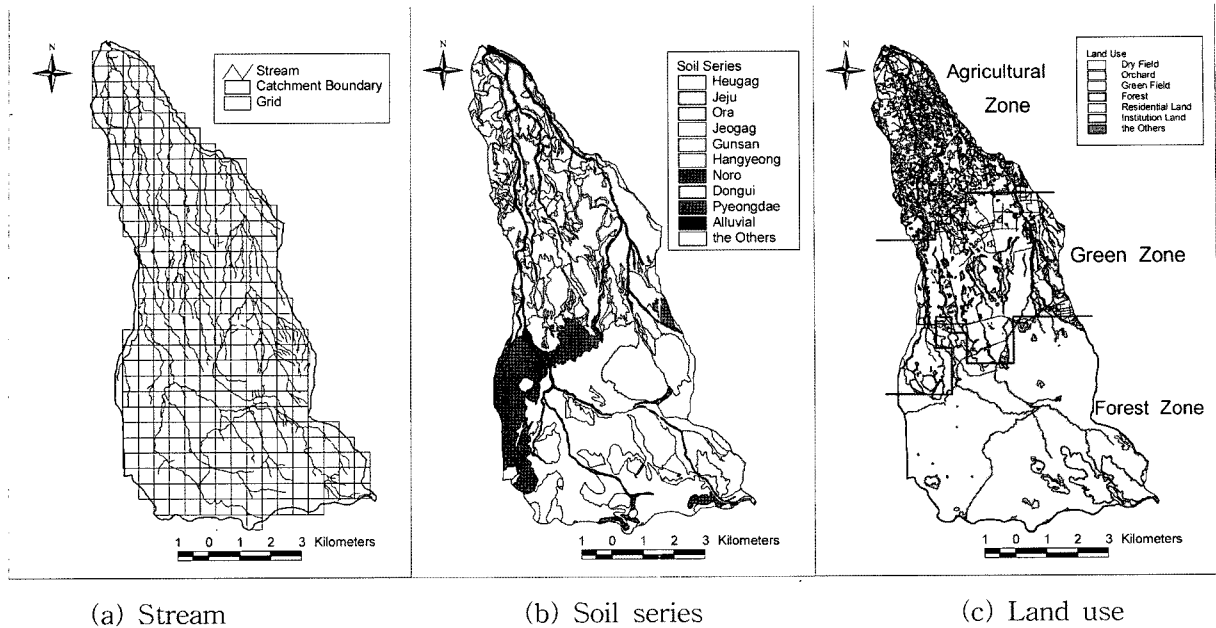


Fig. 3. Spatial distribution of stream, soil series and land use.

유역에는 반상회석현무암이 하류부터 유역중간까지 넓게 분포하고 장석현무암은 유역 중간부터상류부까지 넓게 분포한다. 조면질안산암과 분석구가 국지적으로 분포하고 있다.

강수량, 토양, 토지이용은 표고 증가와 함께 변화하는 경향을 보이고 있다. 제주도에서 강수는 지형성강수패턴을 보여 표고가 높아질수록 증가하는 경향을 보인다(한국수자원공사, 1993·2003; 농업기반공사, 2000). 유역의 토양을 토색으로 분류하면 하류부에는 암갈색토가 주로 분포하고, 중류부에는 주로-농암갈색토가 분포하며 상류부에는 갈색산림토가 넓게 분포하고 있다. 유역에는 총 37개의 토양통이 분포하는데 유역면적의 2% 이상 분포하는 토양통은 흑악, 제주, 오라, 적악통 등 14개 토양통으로 유역 면적의 89%를 차지한다(Fig. 3(b)). 토성측면에서 보면 '자갈이나 바위가 있는 미사질양토'가 유역면적의 77%, 미사질양토가 18.2%를 차지하여 이 토성들이 유역면적의 95.2%에 를 차지한다. 토양의 심도는 9~130 cm로 경사가 급한 지역은 대부분 11~40 cm로 토심이 얇고, 경사가 완만한 지역은 40~130 cm로 토심이 깊은 경향을 보인다.

유역의 하류부는 밭과 과수원으로 주로 이용되며 중류부는 초지, 상류부는 산림으로 주로 이용되고 있다(Fig. 3(c)). 유역내 토지이용별 비율을 보면 밭이 6.4%, 과수원이 7%, 초지가 27.6%, 산림이 57.1%를 차지하고 있다.

유역 인근에 위치한 제주기상관측소의 30년간(1973~2002년)의 년평균강수량은 1,468 mm, 평균기온은 12.6°C,

평균습도는 72.6%이다(한국수자원공사, 2003). 기존 조사에 의하면 의도천유역이 포함된 서제주수역의 합양량은 1969~1998년의 자료로 분석한 경우 수역 평균강수량의 50.8%이며(농업기반공사, 2000) 1993~2002년의 자료로 분석한 결과는 39%이다(한국수자원공사, 2003).

### 3.2. 자료 및 적용방법

#### 3.2.1 강수량과 잠재증발산량

유역의 물수지는 길이 500 m의 격자로 총 298개의 격자를 작성하여 1999년부터 2003년까지 일단위로 분석하였으며, 초기토양수분량의 영향을 줄이기 위해 위밍업기간을 1998년 8월부터 12월31일까지 두었다.

강수량은 유역내의 2개 관측소와 주변 8개 관측소 등 총 10개 지점의 자료를 이용하여 각 격자의 일별 강수량을 Surfer(Golden Software사)프로그램을 이용하여 Kriging 기법으로 산정하였다. 자료를 사용한 관측소는 기상청의 제주기상관측소와 무인자동기상관측소(유수암, 어리목, 성판악), 제주도재해대책본부의 관음사, 천백고지, 어음, 애월, 향파두리, 돈네코관측소의 자료를 사용하였다(Fig. 2). 제주기상관측소를 제외한 9개 관측소 자료는 각각 인근 2~3개 관측소의 자료와 비교하여 결측치 및 이상치를 보정하였다.

기준작물 잠재증발산을 FAO-56 Penman-Monteith 식으로 산정할 때 필요한 기상자료는 일별 최고기온, 최저기온, 평균풍속, 일사량, 수증기압 또는 평균습도 등으로 제

주기상관측소를 제외한 기상청의 무인자동기상관측소는 최고기온, 최저기온, 평균풍속만을 측정하고 있어 FAO-56 Penman-Monteith식으로 일별 증발산을 산정하기 어려운 문제가 있다. 유역내의 기준작물 잠재발산의 분포를 검토하기 위해 Fig. 4에 제시된 기상청의 6개 지점(제주, 유수암, 어리목, 성판악, 서광, 한림)의 일별 최고기온, 최저기온, 평균풍속자료로 10일 평균 증발산량을 추정하였다. FAO-56 Penman-Monteith식에 의해 증발산량을 산정하기 위해 일사량과 수증기압은 Allen et al.(1998)에 제시한

방식에 의해 최고기온과 최저기온으로 부터 다음과 같이 추정하였다.

$$R_s = K_{R_s} \sqrt{T_{\max} - T_{\min}} R_a \tag{8}$$

$$e_a = 0.611 \exp \left[ \frac{17.27 T_{\min}}{T_{\min} + 2137.3} \right] \tag{9}$$

여기서  $R_s$ 는 일사량,  $K_{R_s}$ 는 계수로 0.16을 적용,  $T_{\max}$ 는 일최고기온,  $T_{\min}$ 는 일최저기온,  $R_a$ 는 지구대기권에 도달한 복사량,  $e_a$ 는 수증기압이다.

1999년에서 2003년까지 5년간 계산한 증발산량으로 년 평균 증발산량을 산정하여 등치선을 작성한 결과 유역내의 증발산은 960 mm/년에서 1,020 mm/년으로 차이가 연간 60 mm로 적으므로(Fig. 4), 유역내의 증발산은 동일한 것으로 가정하고 제주기상관측소의 기상자료로 1일 단위 잠재증발산량을 계산하였다.

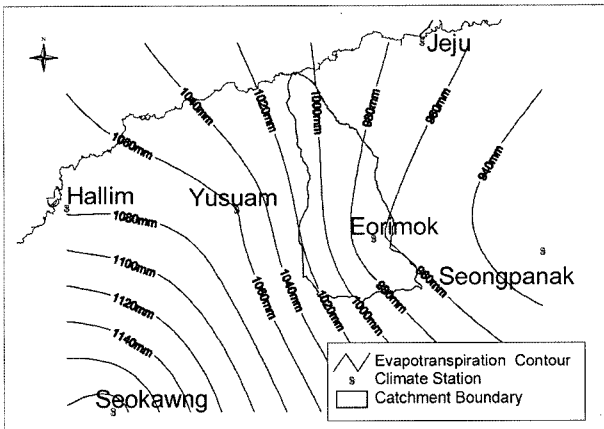
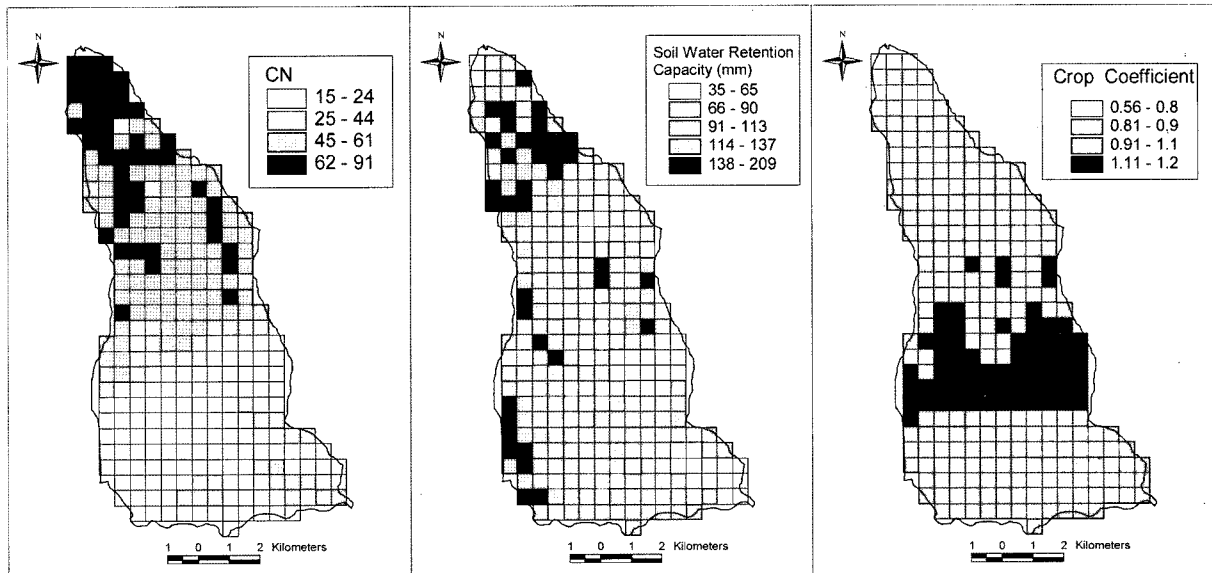


Fig. 4. Contour map of annual average reference crop evapotranspiration (unit: mm/year).

3.2.2 매개변수의 공간분포

유역내 격자별 유출곡선지수(CN), 토양수분보유능(SWRC), 작물계수( $K_c$ ) 등과 같은 매개변수에 대한 공간적 분포는 ArcView(ESRI사) 프로그램을 이용한 GIS작업으로 구하였다(Fig. 5).

CN은 정밀토양도(농촌진흥청, 1976)와 토지이용현황도로부터 구하였는데 정밀토양도의 토양통을 SCS 수문학적



(a) CN for case 8 of table 2

(b) Soil water retention capacity

(c): Crop coefficient for the period of Aug. 10~20

Fig. 5. Spatial distribution of parameters of water balance.

**Table 1.** SCS curve number (condition II) used for this study

Land use of catchment	Area (%)	SCS Cover type	Treatment or practice	Hydrological condition	Hydrological soil group.			
					A	B	C	D
Dry field	4.79Km <sup>2</sup> (6.4)	Rotation	Contoured & terraced	Poor	63	73	80	83
				Good	51	67	76	80
Orchard	5.28Km <sup>2</sup> (7.0)	Woods-grass combination		Poor	57	73	82	86
				Good	32	58	72	79
Green field	20.75Km <sup>2</sup> (27.6)	Pasture		Good	39	61	74	80
		Meadow		-	30	58	71	78
Forest	42.89Km <sup>2</sup> (57.1)	Woods		Good	30	55	70	77
		Forest		Good	26	52	62	69
				Best	15	44	54	61
Residential district	0.40Km <sup>2</sup> (0.5)	Farm steads			59	74	82	86
Road	0.33Km <sup>2</sup> (0.4)	Paved streets and roads			83	89	92	93
Institution land	0.31Km <sup>2</sup> (0.4)	Residential Districts	Impervious area 65%		77	86	91	94

토양군으로 분류하는 방법과 토지의 수문학적 조건의 적용을 달리하여 유역에서 출현할 수 있는 8가지 유형의 CN분포를 구하고 이 중에서 관측된 유출량을 가장 잘 설명하는 CN을 선정하였다. 토지이용현황도는 국토개발연구원(1997a)의 도면을 이용하여 신규로 변경된 토지이용현황을 조사하여 수정하였다. 정밀토양도의 토양통은 정정화 외(1995)의 분류방법과 이 방법 중에서 투수성 등급을 수정한 방법으로 수문학적 토양군으로 재분류하였다. 정정화 외(1995)의 분류방법은 정밀토양도상의 토양통을 토성, 배수등급, 투수성, 투수저해도층의 유무 및 출현깊이로 수문학적 토양군으로 재분류하였다. 정정화 외(1995)는 투수성을 0.5, 6, 12 cm/hour를 기준으로 4등급으로 구분하였는데, SCS 수문학적 토양군에 대한 설명(USDA, 1986)에서는 투수성을 0.13, 0.38, 0.76 cm/hour를 기준으로 구분하므로 이 기준에 의해 투수성 등급을 수정하여 토양통을 수문학적 토양군으로 재분류하였다. 토양의 투수성에 대한 자료는 국토개발연구원(1997b)에 제시된 자료를 사용하였다.

토지이용은 밭, 과수원, 초지, 산림, 주거지, 시설용지, 도로 등으로 구분하였다. 연구지역에서 밭은 년중 2~3회에 걸쳐 작물을 달리하여 윤작하고 대부분 밭의 경사가 완만하고 밭 경계의 돌담 때문에 지표유출수의 유동이 방해를 받으므로 토지이용은 윤작, 피복관리상대는 등고선과 테라스경작인 경우를 적용하였다(Table 1). 감귤이 식재된 과수원은 초본류가 자라는 산림을 적용하고 밭과 과

수원은 수문조건이 불량과 양호인 경우를 각각 적용하였다. 연구지역에서 초지는 방목되는 가축의 밀도가 낮으므로 초지에 방목하는 경우와 방목하지 않는 경우를 각각 적용하였다. 방목하는 경우는 초지에 식피가 75% 이상 덮여 있으므로 수문학적조건은 양호를 적용하였다. 농경지와 초지대에 분포하는 관목숲은 Woods를 적용하였는데, 목축에 이용되지 않고 잎과 가지 등이 토양을 덮고 있으므로 수문조건은 양호를 적용하였다. 주거지는 농가를 적용하고, 시설용지는 개발 중인 도시지역의 값을 적용하였다. 표고 530 m 이상의 한라산 국립공원의 산림은 Forest를 적용하였다. Forest의 수문학적 조건은 토양깊이와 유기물함량에 의해 결정되는데 정밀토양도의 토양통에 대한 조사결과를 보면 토양심도가 20cm 이상이고, 유기물함량이 5% 이상이므로 양호(good)와 매우양호(Best)인 경우를 각각 적용하였다. CN의 유역 평균값과 Fig 3(c)에 제시된 지역별 평균값은 Table 2와 같다. 유역평균은 39~57로 나타났다. CN은 상류로 갈수록 감소하는 경향을 보이고 있다.

토양의 수분보유능을 구하기 위해  $\theta_{FC}$ 와  $\theta_{WP}$ 는 농촌진흥청의 대표토양통에 대한 실험결과(임한철 외, 2003)를 이용하였는데 포장용수량은 0.5 bar, 위조점은 100 bar에서의 수분량으로 산정하였다. 작물의 뿌리깊이는 Allen et al.(1998)에 제시된 최대유효뿌리깊이와 대표토양의 토양깊이(C층 하한 깊이)를 비교하여 작은 값을 사용하였다. 유역의 평균 토양수분보유능은 99.1로 나타났으며, 유역 내 분포는 Fig. 5(b)와 같다.

**Table 2.** SCS curve number (condition II) for the study catchment

Case	Criteria of the hydrological soil groups	Hydrological condition				Average of CN			
		Dry field	Orchard	Green field	Forest	Catch ment	Agri. zone	Gre. zone	Fore. zone
Case 1	Jung et al. (1995)	Poor	Poor	Pasture	Good	57.1	78.2	70.4	40.1
Case 2		Good	Good	Meadow	Good	54.7	72.0	67.7	39.5
Case 3		Poor	Poor	Meadow	Best	51.2	77.8	66.9	30.6
Case 4		Good	Good	Meadow	Best	50.0	72.0	66.6	30.6
Case 5	Criteria modified	Poor	Poor	Pasture	Good	46.8	70.9	58.0	29.9
Case 6		Good	Good	Meadow	Good	43.8	62.5	54.9	29.2
Case 7		Poor	Poor	Meadow	Best	40.2	70.4	54.1	19.2
Case 8		Good	Good	Meadow	Best	38.5	62.5	53.8	19.2

where Agri. zone = Agricultural zone of Fig. 3(c), Gre. zone = Green zone of Fig. 3(c), Fore. zone = Forest zone of Fig. 3(c)

**Table 3.** Crop coefficient used for this study

Land use		Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
Dry field		1.00	1.00	0.55	0.80	0.77	0.61	0.75	0.77	0.64	0.55	0.95	1.00
Orchard		0.65	0.65	0.67	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.77	0.65	0.65	0.65
Green field	E.L. < 400 m	0.60	0.60	0.72	0.98	1.05	1.05	1.05	1.05	1.03	0.87	0.60	0.60
	E.L. ≥ 400 m	0.30	0.30	0.52	0.98	1.05	1.05	1.05	1.05	1.03	0.77	0.30	0.30
Forest	E.L. < 400 m	0.60	0.60	0.63	0.97	1.20	1.20	1.20	1.20	1.12	0.83	0.60	0.60
	E.L. ≥ 400 m	0.30	0.30	0.37	0.73	1.20	1.20	1.20	1.20	1.12	0.73	0.30	0.30
Others		0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20

작물계수는 토지이용별로 식생유형이나 지표피복상태를 고려하여 구하였으며 FAO 추천값(Allen et al., 1998)을 생육단계에 따라 10일 단위로 적용하였다. 제주도에서 9월에서 2월에 재배되는 감자, 양배추의 증발산을 라이다미터법과 토양수분추적법으로 측정하여 작물계수를 산정한 결과에 의하면 면 생육중기의 최대값은 FAO 추천값과 큰 차이가 없으나, 생육초기와 생육말기는 FAO 값보다 작아 생육말기의 경우 가을감자인 경우 FAO 값의 약 77%, 양배추는 12~1월에 48%로 나타나고 있다(이영일 외, 2004). 작물계수가 가장 큰 시기인 생육중기의 값이 FAO 추천값과 유사하고, 초기와 말기의 정확한 계수에 대한 판단이 어렵기 때문에 본 연구에서는 FAO의 값을 그대로 적용하였다. Table 3은 적용한 작물계수의 월평균을 나타낸 것이다. 밭은 년중 2~3회에 걸쳐 작물을 윤작재배하는데 10월~2월에는 마늘을 재배하고 3월~9월에는 파, 부르커리 등 채소류를 최대 2회 연속 재배한다. 3월~9월에는 소채류(small vegetables)의 작물계수를 적용하였으며, 이 기간에 1회만 작물을 재배하는 경작지가 있으므로 이 시기에는 80%의 밭이 재배되는 것으로 적용하였다.

감귤과수원의 경우 생육기간인 4월~10월은 감귤류 식

피가 50%이며 지표면에 초본류가 무성한 경우의 작물계수를 적용하고 비생육기간은 지표면에 초본류가 없는 경우의 작물계수를 적용하였다. 초지와 산림은 4월~10월을 생육기간으로 정하였다. 초지는 독보리(rye grass)를 적용하고 산림은 낙엽성 활엽수림이 주종을 이루므로 사과, 배 등 낙엽성과수의 작물계수를 적용하였다. 초지와 산림은 표고 400 m를 기준으로 비생육기간의 경우 하류부는 0.6, 상류부는 0.3의 작물계수를 적용하였고, 기타 취락지역, 도로, 하천 등은 0.2를 적용하였다.

#### 4. 적용결과 및 고찰

##### 4.1. 유출곡선지수 추정결과

외도천유역의 하천유출량자료는 한국수자원공사(2003)과 문덕철(2004)에 제시된 3회의 강수사상에 의해 발생한 유출량 자료를 이용하였다(Table 4). 관측자료를 이용하여 CN을 추정된 결과 투수성등급을 수정한 방법으로 토양통을 수문학적 토양군으로 분류하고 토지이용별 수문조건을 가장 양호하게 적용한 Case 8이 관측값에 가장 근접하게 유출량을 모의하고 있다(Table 4). Case 8의 CN 분포는

**Table 4.** Comparisons between observed runoff and calculated runoff using CN of Case 8

Period	Rainfall (mm)	Observed runoff (mm)	Calculated runoff of case 8 (mm)	Relative error (%)
'02/8/6~7	319	62.4 <sup>1)</sup>	63.4	-1.5
'02/8/30~31	617.6	226.4 <sup>1)</sup>	265.8	-17.4
'03/7/17~18	109.5	39.0 <sup>2)</sup>	11.7	70.0

1) from KOWCO (2003) 2) from Moon (2004)

**Table 5.** Results calculated by grid- based and lumped water balance method for the period 1999~2003

(unit : mm/year)

Method	Rainfall	Direct Runoff (%)	Evapotran-spiration (%)	Recharge (%)	Change in storage
Grid Based (A)	2,722	352 (12.9%)	776 (28.4%)	1,582 (57.8%)	12
Lumped (B)	2,722	340 (12.4%)	770 (28.1%)	1,604 (58.6%)	8
Difference (A-B)	-	12	6	-22	-4

Note (%) : % of Average Annual Rainfall

**Table 6.** Water balance calculated from this study and Previous study (KOWCO, 2003)

(unit : mm/year)

Study	Method	Basin (Area)	Calculation Period	Rainfall	Direct Runoff (%)	Evapotran-spiration (%)	Recharge (%)
This study (A)	Grid Based	Wedo (75.2km <sup>2</sup> )	1999~2003	2,722	352 (12.9%)	776 (28.4%)	1,582 (57.8%)
KOWCO (B)	Lumped	Seojeju (89.5km <sup>2</sup> )	1993~2002	2,153	583.1 (27.1%)	728.9 (33.9%)	841 (39.0%)
Difference (A-B)				569	-231	47	741

강수량이 319 mm와 617 mm인 2개 사상에 대해서는 유출량 관측값의 각각 1.5~17.4% 정도 크게 모의하며, 강수량이 109 mm로 작은 사상에 대해서는 유출량 관측값의 70.0% 정도 작게 모의하고 있다. 추정된 CN은 유역평균이 38.5이며, 하류 농경지 지역은 평균 62.5, 초지 지역은 평균 53.8, 산림지역은 19.2로 나타나 상류부로 갈수록 작아지는 경향을 보인다(Table 2).

#### 4.2. 지하수 함양량 산정결과

추정된 CN과 FAO의  $K_c$  추천값, SWRC 계산값으로 5년간(1999년~2003년)의 물수지를 격자별로 계산하여 유역 평균을 계산한 결과 년평균강수량 2,722 mm 중에서 직접유출이 강수량의 12.9%를 차지하며, 증발산량은 28.4%를 차지하고 지하수함양량은 강수량의 57.8%인 1,582 mm이다(Table 5). 유역의 평균 매개변수를 적용하고, 유역의 평균 일강수량과 잠재증발산량을 이용하여 집중형(lumped) 물수지분석을 실시한 결과 유출량과 증발산량에서 각각 12, 6 mm 정도 차이가 나타나 함양량에서 22 mm 정도의 차이가 발생할 뿐 거의 동일하게 나타나고 있다.

집중형 물수지분석으로 매개변수의 민감도를 검토한 결

과 지하수함양량은 CN과  $K_c$ 에 민감하게 반응하지만 SWRC에는 민감하지 않은 것으로 나타났다. 민감도분석은 추정된 CN값의 0.7~1.3배에 해당하는 30~50,  $K_c$ 는 FAO 추천값의 0.7배에서 1.3배, SWRC는 70 mm~130 mm까지 실시하였는데 CN과  $K_c$ 가 이 범위에서 변화함에 따라 지하수함양율은 각각 13.4%, 13% 범위에서 변화하였으며, SWRC의 경우 1.9% 범위에서 변화하였다.

한국수자원공사(2003)에서 제주도를 16개 유역으로 구분하고 1993~2002년의 물수지를 계산한 결과를 보면 유역의 년평균 함양량은 443~1,280 mm이며 함양율은 강수량의 31.1~57.5%로 유역별 함양량과 함양율이 제주도내에서 큰 차이를 보인다. 외도천유역을 포함하는 서제주유역의 년평균함양량은 강수량의 39.0%인 841 mm인데 서제주유역은 면적이 89.5 km<sup>2</sup>로 외도천유역(면적 75.2 km<sup>2</sup>) 외에 하류부 지역을 많이 포함하며 물수지분석기간이 달라 두 결과를 직접적으로 비교하기는 어려운 점이 있다. 본 연구에 의한 외도천유역의 함양량은 1,582 mm로 서제주유역보다 741 mm가 많고, 함양율은 57.8%로 18.8%의 차이를 보이고 있다(Table. 6). 함양량에서 741 mm의 차이가 나는 것은 강수량에서 569 mm, 직접유출에서



Table 7. Average annual water balance for the period 1999~2003

(unit : mm/year)

Water balance component	of catchment				Average of Zone		
	Aver.	Min.	Max.	Range	Agri. zone	Gre. zone	Fore. zone
Rainfall	2,722	1,665	3,382	1,717	1,950	2,584	3,125
Direct Runoff (%)	352 (12.9)	54	973	919	506 (26.0)	578 (22.4)	149 (4.8)
Evapotranspiration (%)	776 (28.4)	503	867	364	726 (37.2)	777 (30.1)	795 (25.4)
Recharge (%)	1,582 (57.8)	372 (22)	2,536 (76)	2,165 (54)	711 (36.5)	1,217 (47.1)	2,166 (69.3)

Note (%) : % of Mean Annual Rainfall

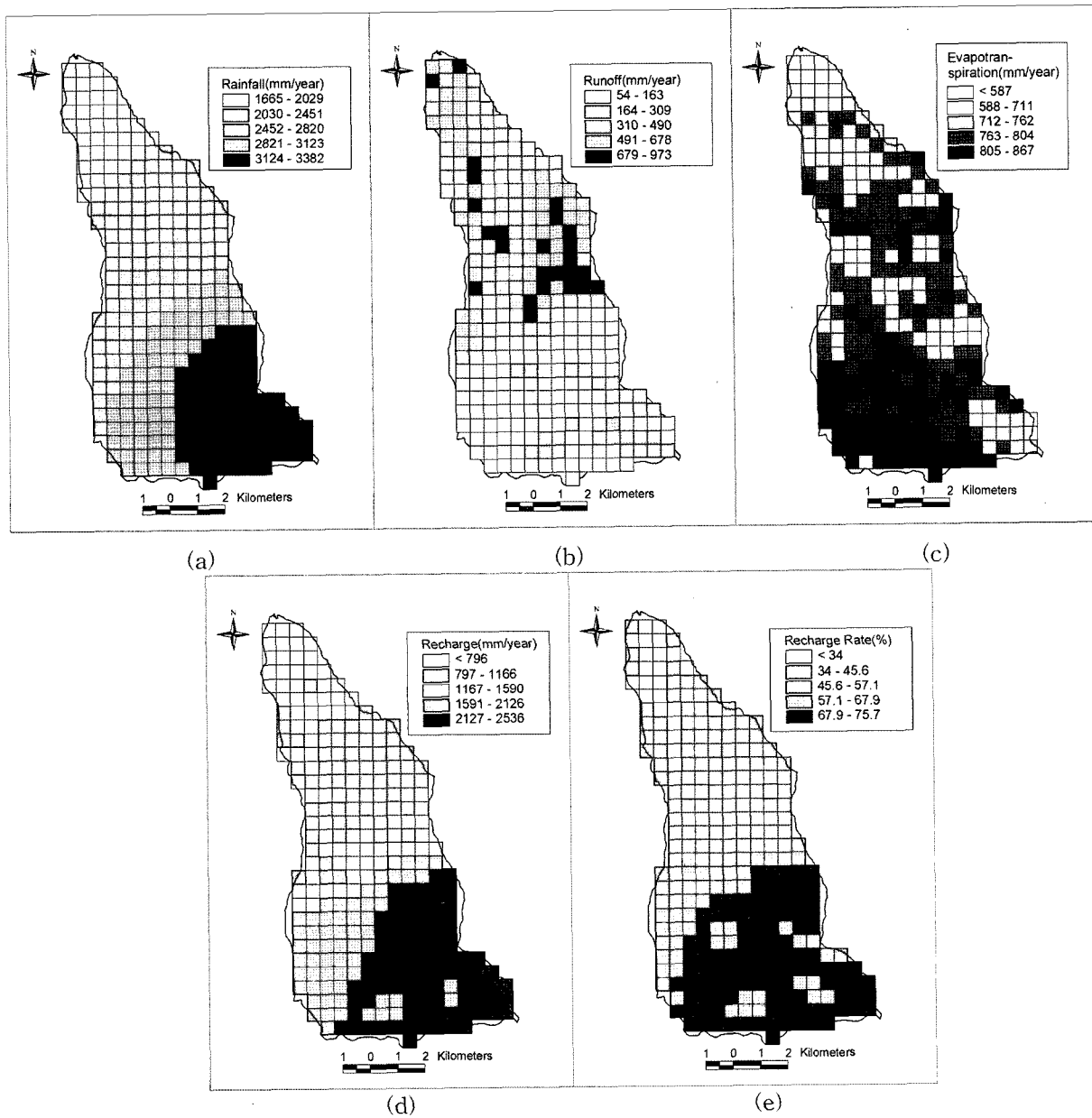


Fig. 6. Spatial distribution of average annual rainfall, direct runoff, evapotranspiration and recharge for the period 1999~2003.

231 mm 차이에 의해 주로 발생하고 있다. 강수량의 차이는 본 연구가 강수량이 많은 5년간을 대상으로 물수지를 분석하였고, 일단위로 등우선을 작성한 것과 관계가 있다. 두 연구의 물수지분석기간중에 제주기상관측소의 강수량자료를 비교하면 한국수자원공사의 물수지분석기간인 1993~2002년의 년평균강수량은 1,471 mm이며, 본 연구의 분석기간인 1999~2003년의 년평균강수량은 1,761 mm로 년평균강수량에서 290 mm의 차이를 보이고 있다. 또한 본 연구는 일강수량자료로 일별 등우선을 작성하였지만 한국수자원공사는 연간 강수량으로 등우선도를 작성하여 유역평균강수량에서 차이가 있는 것으로 판단된다. 직접유출에서 유출율은 본 연구가 12.9%, 한국수자원공사가 27.1%로 약 2배의 차이를 보이며, 유출량은 각각 352 mm, 583.1 mm로 231 mm의 차이를 보이고 있는데, 이것은 직접유출율을 산정한 방식의 차이와 관계가 있다. 본 연구는 SCS모형을 하천유출량 관측자료로 보정하여 5년간의 유출율을 산정하였지만 한국수자원공사는 유량측정 결과 산정된 유출율과 SCS모형분석결과를 토대로 하여 하천유출에 영향을 미치는 강수량, 하천밀도, 토지이용현황을 감안하여 유역별 유출율을 설정하여 서제주유역의 유출율은 10년간의 평균은 27%, 다우년인 1999년은 36%, 과우년인 1996년은 15%로 설정하였다. 한국수자원공사는 유량측정 결과 산정된 유출율과 SCS모형분석결과 외에 하천유출에 영향을 미치는 요인을 감안하여 유출율을 조정하였고 본 연구에서는 적은 수의 관측자료로 SCS모형을 검증하여 어떤 분석결과가 실제 유출율에 근접하였는지 판단하기 어려운 상태로 향후 외도천의 하천 유출 관측자료가 축적되면 직접유출율에 대한 정확한 판단이 가

능할 것으로 생각된다. 증발산량은 두 연구 모두 FAO-56 Penman-Monteith 식을 이용하였는데 본 연구가 776 mm, 한국수자원공사가 729 mm로 유사하게 나타났다.

4.3. 물수지 성분의 공간적특성

5년간(1999년~2003년)의 물수지분석 결과로 산정한 지표유출, 실제증발산, 지하수함양의 공간적 특성을 보면 Table 7, Fig. 6과 같다. 유역하류의 아파트단지 포함된 1개 격자는 다른 격자들과 유출, 함양특성이 크게 다르기 때문에 표의 통계나 서술에서 제외시켰다.

유역내에서 격자별 년평균 강수량은 1,665~3,382 mm/년의 범위에 있어 유역내에서 강수량이 1,717 mm 정도 차이를 보이며, 강수량은 표고가 높아질수록 증가하며 유역내에서 동남쪽 방향으로 증가하는 경향을 보인다(Fig. 6(a)).

지표유출량은 54-973 mm/년의 범위에 있으며, 유역내에서 919 mm의 차이를 보이고 있다(Fig. 6(b)). 유역의 중류부에 위치한 초지지역의 평균 지표유출량은 578 mm/년으로 유역에서 가장 크게 나타났으며, 농경지지역에서는 평균 506 mm/년, 상류부의 산림지역에서는 평균 149 mm/년의 유출이 발생하는 것으로 나타난다.

실제증발산량은 503~867 mm/년의 범위에 있어 유역내의 변이가 364 mm로 물수지성분중에서 유역내에서 공간적인 변이가 가장 적은 것으로 나타난다(Fig. 6(c)). 실제증발산량은 유역상류부에서 Fig 5(b)의 토양수분보유능의 분포와 유사한 경향을 보여 서남쪽이 많은 경향을 보인다.

지하수함양량은 강수량의 분포경향과 같이 상류부로 갈수록 증가하는 경향을 보이며, 유역내에서 372~2,536 mm/년의 범위에 있어 2,165 mm의 차이가 나타난다(Fig.

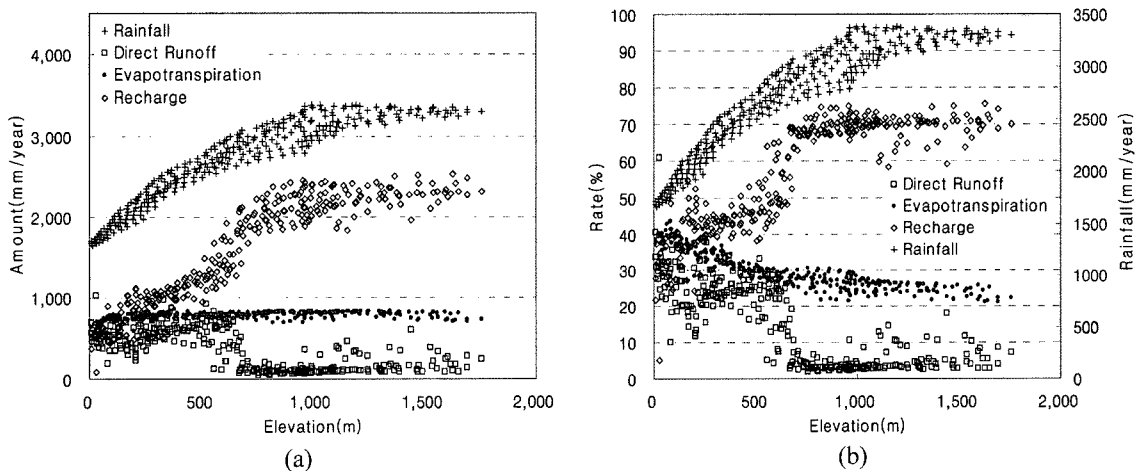


Fig. 7. Change of average annual amounts and rate of water balance in accordance with elevation.

6(d)). Fig. 7과 같이 강수량이 작은 하류부에서 지표유출량이 강수량이 최대인 상류부보다 크며, 증발산량이 차지하는 비율이 상류부보다 크게 되어 결과적으로 지하수함양량의 변이가 강수량의 변이 1,717 mm보다 커지게 되었다. 토지이용에 따른 함양량의 분포를 보면 하류부의 농경지가 평균 711 mm, 유역중류부의 초지지역은 평균 1,217 mm, 유역상류부 산림지역은 평균 2,166 mm로 하류부의 함양량은 상류부의 1/3 정도로 나타나고 있다. 함양율은 하류부의 농경지가 평균 36.5%, 초지가 47.1%, 산림지역이 69.3%이다.

유역내에서 지하수함양량은 Fig. 7과 같이 표고가 증가할수록 증가하는 경향을 보이는데 함양량이 큰 지역에서 토지이용의 변화는 지하수함양량의 큰 변화를 발생시킬 수 있으므로 지하수자원의 관리를 위하여 토지이용의 관리가 필요하다고 할 수 있다. 상류부의 산림지역은 대부분 한라산국립공원으로 지정되어 토지이용의 변화가 발생하지 않았지만 지표유출이 가장 많이 발생하는 초지지역이 농경지, 시설용지로 변경될 경우 지표유출량의 증가로 인하여 함양량의 감소가 예상된다.

## 5. 결 론

본 연구는 제주도의 외도천유역을 사례지역으로 선정하여 유역을 격자로 구분하고 각 격자에 대한 지하수함양량을 산정하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 연구지역 하류부에서 측정된 기존 하천유출량자료로 CN을 보정한 결과 정밀토양도의 토양통을 수문학적 토양군으로 분류하는 정정화 외(1995)의 방법에서 투수성등급을 변경한 방법이 연구지역에서 적절한 것으로 나타났다. 그러나 보정에 사용한 관측자료가 적은 관계로 향후 더 많은 관측자료에 의한 보정 및 검증작업이 요구된다.

2) 지표유출량이 가장 큰 지역은 유역의 중류부에 위치한 초지지역으로 이 지역의 CN이 농경지보다 작지만 강수량이 농경지역보다 많은 관계로 유출량이 가장 크게 나타나고 있다. 강수량이 가장 많은 상류지역은 CN이 작은 관계로 유역내에서 유출량이 가장 적게 나타난다.

3) 지하수함양량은 강수량의 분포경향과 같이 상류부로 갈수록 증가하는 경향을 보이며 유역내에서 2,165 mm의 차이가 나타나 물수지성분중에서 공간적인 변이가 가장 크게 나타나고 있다. 이것은 강수량이 적은 지역에서 지표유출량이 크게 나타나며 증발산이 차지하는 비율이 다른 지역보다 큰 관계로 지하수함양량의 공간적인 변이가 물수지성분 중에서 가장 크게 나타났다.

## 참 고 문 헌

- 국토개발연구원, 1997a, 중산간지역 보전 및 이용계획수립 종합조사, 제주도, p. 164-167.
- 국토개발연구원, 1997b, 중산간지역 보전 및 이용계획수립 종합조사 자료집, 제주도, p. 434-437.
- 김남원, 정일권, 원유승, 2005, 시공간적 변동성을 고려한 지하수함양량의 추정 방안, 한국수자원학회논문집, **38**(7), 517-526.
- 김성준, 채효석, 2000, 격자기반의 토양수분추적에 의한 지하수함양량 추정기법 개발, 한국수자원학회논문집, **33**(1), 61-72.
- 김영화, 서인국, 박지성, 임한철, 문경환, 송창길, 강봉균, 박정식, 2002, 제주도 발관개 용수량 산정법 정립에 관한 연구(I), 농업기반공사 농이촌연구원, p. 128-130.
- 농업기반공사, 2000, 제주도 지하수보전관리계획 보고서, 제주도 · 한국수자원공사, p. 167-186.
- 농업기반공사, 2003, 옹포지구 농촌용수개발사업 기본계획, 농림부 · 농업기반공사, p. 477-479.
- 농촌진흥청 농업과학기술연구원, 1976, 정밀토양도, 제주도 농촌진흥청 · 농업과학기술연구원.
- 문덕철, 2004, 제주도 주요하천의 기저 유출량 산정에 관한 연구, 제주대학교 석사학위논문.
- 박원배, 김태운, 이대하, 이승구, 김용제, 고동찬, 2001, 지하수 순환시스템 조사, 제주도 수문지질 및 지하수자원종합조사(I), 제주도, p. 4-74.
- 산업기반개발공사, 1981, 제주도 수자원개발종합조사 보고서, p. 140-150.
- 이영일, 김현수, 김영하, 송창길, 강봉균, 박정식, 임한철, 문경환, 2004, 제주도 발관개 용수량 산정법정립에 관한 연구(III), 농업기반공사 농이촌연구원, p. 68-72.
- 임한철, 문경환, 좌재호, 한승갑, 2003, 제주도 발작물 작물계수 측정 : 제주도 발관개 용수량 산정법정립에 관한 연구의 부분과제, 농촌진흥청 제주농업시험장, p. 53.
- 정정화, 장승표, 김호일, 정연태, 허기술, 박호, 1995, 유출량을 추정을 위한 토양수문군의 분류, 한국농공학회지, **37**(6), 12-33.
- 한국수자원공사, 1993, 제주도 수자원 종합개발계획 수립보고서. 한국수자원공사 건교부, p. VIII 3-24.
- 한국수자원공사, 2003, 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사(III), 제주도 한국수자원공사, p. 65-140.
- Allen, R.G, Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M., 1998. Crop Evapotranspiration, FAO Irrigation and Drainage Paper **56**, p. 58-60.
- Allen, R.G, Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M., 1998. Crop Evapotranspiration, FAO Irrigation and Drainage Paper **56**, p. 171.
- Allen, R.G, Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M., 1998. Crop

- Evapotranspiration, FAO Irrigation and Drainage Paper **56**, p. 313-314.
- Arnold, J.G., Allen, P.M., and Bernhardt, G., 1993, A comprehensive surface-groundwater flow model, *J. of Hydrology*, **142**, 47-69.
- Hevesi, J.A., Flint, A.L., and Flint, L.E., 2003, Simulation of Net Infiltration and Potential Recharge Using a Distributed-Parameter Watershed Model of the Death Valley Region, Nevada and California, U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 03-4090, Sacramento, California, p. 161.
- Khan, M.A. and Liang, T., 1989, An information system for implementing groundwater recharge model, In: M.L. Sharma (ed), *Groundwater recharge*, A.A. Balkema, Rotterdam/Brookfield, p. 155-170.
- Lerner, D.N, Issar, A.S., and Simmers, I., 1990, *Groundwater Recharge : A guide to understanding and Estimating of Natural Recharge*, Verlag Heinz Heise Hannover, p. 112, p. 119-120.
- Oki, D.S., 2002, Reassessment of Ground-Water Recharge and Simulated Ground-Water Availability for the Hawi Area of North Kohala, Hawaii, U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 02-4006, Honolulu, Hawaii, p. 62.
- Stephens, D.B., Johnson, P., and Havlena, J., 1996, *Estimation of infiltration and recharge for environmental site assessment*. American Petroleum Institute publication **4643**, p. 3-5.
- USDA, Natural Resource Conservation Service, 1986, Urban Hydrology for Small Watersheds, Technical Release 55.
- Williams, J.R., Nicks, A.D., and Arnold, J.G., 1985, Simulator for water resources in rural basins, *J. of Hydraulic Engineering*, 111(6), 970-986.