韓國水資源學會論文集
第39卷 第4號 · 2006年 4月
pp. 299~311

지하수위를 이용한 물수지분석법의 매개변수추정과 함양량산정

Parameter Estimation of Water Balance Analysis Method and Recharge Calculation Using Groundwater Levels

안 중 기* / 최 무 웅**
An, Jung-Gi / Choi, Mu-Woong

Abstract

In this paper it is outlined the methodology of estimating the parameters of water balance analysis method for calculating recharge, using ground water level rises in monitoring well when values of specific yield of aquifer are not available. This methodology is applied for two monitoring wells of the case study area in northern area of the Jeju Island. A water balance of soil layer of plant rooting zone is computed on a daily basis in the following manner. Diect runoff is estimated by using SCS method. Potential evapotranspiration calculated with Penman-Monteith equation is multiplied by crop coefficients(K_c) and water stress coefficient to compute actual evapotranspiration(AET). Daily runoff and AET is subtracted from the rainfall plus the soil water storage of the previous day. Soil water remaining above soil water retention capacity($SWRC$) is assumed to be recharge. Parameters such as the SCS curve number, $SWRC$ and K_c are estimated from a linear relationship between water level rise and recharge for rainfall events. The upper threshold value of specific yield(n_m) at the monitoring well location is derived from the relationship between rainfall and the resulting water level rise. The specific yield(n_c) and the coefficient of determination (R^2) are calculated from a linear relationship between observed water level rise and calculated recharge for the different simulations. A set of parameter values with maximum value of R^2 is selected among parameter values with calculated specific yield(n_c) less than the upper threshold value of specific yield(n_m). Results applied for two monitoring wells show that the 81% of variance of the observed water level rises are explained by calculated recharge with the estimated parameters. It is shown that the data of groundwater level is useful in estimating the parameter of water balance analysis method for calculating recharge.

keywords : Water Balance Analysis Method, Parameter Estimation, Groundwater Recharge, Groundwater Level Rise

요 지

본 논문은 비산출률을 모르는 관측정에서 지하수함양량을 산정하기 위해 물수지분석법의 매개변수를 지하수위상승량으로 추정하는 방법을 제시하고, 제주도 북부지역의 2개 관측정에 적용하였다. 식생근계의 토양에 대한 물수지가 일단위로 분석되었다. 직접유출량은 SCS방법으로 계산하고, 실제증발산량은 Penman-Monteith식으로 산정한 잠

* 한국농촌공사 제주도본부 환경지질팀 과장
Section Chief, Environmental Geology Team, KRC Jeju Province Office, 2127-1, Samyang-dong, Jeju-city, Jeju-do, Korea (e-mail: angroya@yahoo.co.kr)
** 건국대학교 이과대학 지리학과 교수
Professors, Department of Geography, College of Science, Konkuk University, 1 Hwayang-dong, Gwangjin-Gu, Seoul, Korea. (mwchoi@konkuk.ac.kr)

재증발산량에 작물계수와 수분스트레스계수를 곱하여 산정하였다. 강수량과 이전 토양수분량에서 직접유출량과 잠재증발산량을 제하였으며 토양수분보유능을 초과하는 수량을 지하수함양으로 보았다. SCS 유출곡선지수, 토양수분보유능, 작물계수 등의 매개변수는 강우사상 동안의 함양량과 지하수위상승량의 선형관계를 이용하여 추정하였다. 관측정이 위치한 지점에서 출현가능한 비산출률의 최대한계값(n_m)을 강수량과 지하수위상승량 관계로부터 유도하였다. 관측된 지하수위상승량과 함양량 계산값의 선형관계로부터 비산출률과 결정계수(R^2)를 산정하고, 계산된 비산출률이 최대한계값(n_m)이내에 위치하며 R^2이 가장 큰 매개변수값을 모의를 통하여 선정하였다. 사례지역에 적용한 결과 추정된 매개변수로 산정한 함양량이 지하수위상승량의 변동을 81%이상 설명하는 것으로 나타나 지하수위 자료는 지하수함양량 산정을 위한 물수지분석법의 매개변수 추정에 유용한 것으로 판단된다.

핵심용어 : 물수지분석법, 매개변수추정, 지하수함양량, 지하수위상승량

1. 서 론

지하수함양량의 시·공간적 분포에 대한 규명은 지하수 개발가능량을 산정하여 수자원개발계획이나 지하수보전관리계획을 수립하기 위해 필수적인 과정이다. 함양량 산정 방법에는 물수지분석이나 지하수위해석법 등과 같은 물리적인 방법, 동위원소나 염소이온 등을 이용한 화학적인 방법, 물수지모델이나 지하수유동모델 등을 이용한 수학적 방법 등이 있으며(Stephens et al., 1996), 토양수에 대한 물수지분석은 지하로 침투한 강수중에서 증발산의 영향을 받지 않는 식생의 근계 하부까지 이동한 물의 양을 함양량으로 산정하는 방법이다. 이 방법은 습윤기후 또는 온대기후지역에 적용할 때 비교적 정확하며 실용적인 방법으로 알려져 왔으며(Sophocleous, 1991; Hansen, 1991), 대부분의 수자원을 지하수에 의존하는 제주도의 경우 1980년대 이후부터 현재까지 이 방법에 의해 함양량을 산정하고 있다(산업기지개발공사, 1981; 한국수자원공사, 1993; 2003, 농업기반공사; 2000). 지표유출이나 증발산에 대한 장기 관측치를 이용할 수 없을 때에는 이 성분들을 모델에 의해 추정하게 되는데 이 경우에도 매개변수를 단기간의 관측치를 이용하여 보정하는 작업이 필요하다. 그러나 하천유출이 1년중에 2~3일 동안 간헐적으로 발생하는 제주도와 같은 지역에서는 지표유출의 관측자료를 획득하기 어려운 경우가 많으며, 실제증발산량의 측정에는 많은 시설과 노력이 필요하므로 자료수집이 용이한 다른 수문자료를 이용한 물수지분석의 매개변수 보정이 필요하다고 할 수 있다.

지하수위자료는 관측정에 자동수위측정기를 설치하여 다른 수문자료에 비해 비교적 쉽게 자료를 취득할 수 있는 장점이 있다. 관측정의 비산출률을 아는 경우 지하수위해석법으로 함양량을 산정하여 매개변수 보정이 가능하지만 비산출률은 대수성시험을 실시할 때 주위에 수위 관측정으로 이용할 관정이 위치하지 않거나, 대수층의 비산출률이 이질적인 특성을 보이면 비산출률을 구할 수 없는 경우가 많이 있다. 따라서 이런 관측정에서 지하수위자료로 물수지분석의 매개변수를 보정하는 방법에 대한 연구가 필요하다.

현재까지 EARTH, PRMS 등과 같은 수문모델을 지하수위변동자료로 보정하고 함양량을 산정한 연구들이 발표되고 있는데(Lee and Gehrels, 1997; Mazi et al., 2004) 이런 모델들은 불포화대의 수분이동이나 포화대의 지하수유출과 관련된 매개변수나 시스템 반응함수들을 포함하므로 많은 매개변수를 보정해야 하는 어려움이 있다. 이런 복잡한 수문모델보다는 적은 수의 매개변수를 가지는 토양수분 물수지분석을 지하수위 관측자료로 보정하고 함양량을 산정하는 것이 수자원관련계획 수립에 실용적이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 비산출률을 모르는 관정에서 관측된 지하수위자료를 이용하여 토양수분 물수지분석의 매개변수를 추정하는 방법을 제시하고, 이를 제주도 북부지역의 관측자료에 적용하여 이 방법의 적용가능성을 평가하고 함양량을 산정하였다.

2. 물수지분석과 매개변수 추정

물수지분석은 제주도지역을 대상으로 한 기존 조사에서 이용된 방식을 기초로 하였으며, SCS의 유출곡선지수, 토양수분보유능, 작물계수 등 3개 매개변수를 지하수위상승량 자료로 보정하였다.

2.1 물수지분석

식생의 근계가 분포하는 토양층에서 토양수분의 물수지식은 Eq. (1)과 같다.

$$\Delta S = P_i + I_i - DR_i - AET_i - REC_i \quad (1)$$

여기서, ΔS는 토양수분변화량(mm)으로 i일과 i-1일의

최종토양수분함량의 차이, P_i는 i일의 강수량(mm), I_i은 i일의 관개량(mm), DR_i은 i일의 직접유출량(mm), AET_i는 i일의 실제증발산량(mm), REC_i는 i일의 지하수함양량(mm)이다.

직접유출은 다음과 같은 미국토양보전국의 강우-유출모형인 SCS모형으로 산정한다.

$$DR_i = \frac{(P_i - Ia)^2}{(P_i - Ia) + S} \quad (2)$$

여기서, Ia는 초기강우손실(mm), S는 최대잠재보유수량(mm)이다.

초기강우손실은 $Ia = 0.2S$ 관계를 이용하고 S는 SWRRB모델(Williams et al., 1985)과 SWAT모델(Arnold et al., 1993)에서 이용된 Eq. (3)으로 계산하며 자세한 내용은 Neitsch et. al(2002)에 제시되어 있다.

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

여기서, S_{max}는 AMC I 조건의 S, SW는 토양층의 토양수분함량(mm)으로 본 연구에서는 i-1일의 최종토양수분함량(SW_{i-1})을 적용하였다. w_1, w_2는 형상계수로 다음과 같이 산정된다.

$$w_1 = \ln\left[\frac{FC}{1 - S_3 \cdot S_{\max}^{-1}} - FC\right] - w_2 \cdot FC \quad (4)$$

$$w_2 = \frac{\ln\left[\frac{FC}{1 - S_3 \cdot S_{\max}^{-1}} - FC\right] - \ln\left[\frac{SAT}{1 - 2.54 \cdot S_{\max}^{-1}} - SAT\right]}{(SAT - FC)} \quad (5)$$

여기서, S_3는 AMCIII 조건의 S, SAT는 완전 포화된 때의 토양층의 수분량(mm), FC는 포장용수량에서의 토양층의 수분함량(mm)으로 Eq. (9)의 $SWRC$와 같다.

실제증발산량은 Eq. (6)과 같이 산정한다.

$$AET_i = Ks \cdot PET_i \quad (6)$$

여기서, K_s는 작물의 수분스트레스계수, PET_i는 i일의 잠재증발산량이다.

잠재증발산량(PET_i)은 FAO-56 Penman-Monteith식(Allen et al., 1998)으로 i일의 기준작물의 잠재증발산량($RPET_i$)을 계산한 후 작물계수(K_c)를 적용하여 구한다.

$$PET_i = K_c \cdot RPET_i \quad (7)$$

K_s는 Allen et al.(1998)에 제시된 작물별 신속토양수분이용량(RAW)과 토양수분보유능($SWRC$)과의 관계로 산정한다.

$$RAW = p \cdot SWRC \quad (8)$$

$$SWRC = Z_r \cdot (\Theta_{FC} - \Theta_{WP}) \quad (9)$$

여기서, p는 토양수분감소율이다. Z_r은 작물의 뿌리깊이(mm), Θ_{FC}는 포장용수량에서의 수분함량(mm^3/mm^3), Θ_{WP}는 영구위조점에서의 수분함량(mm^3/mm^3)이다.

$$K_s = 1 \qquad (SW_{im} \geq \text{RAW}) \quad (10a)$$

$$K_s = \frac{SW_{im}}{SWRC - RAW} \qquad (SW_{im} < \text{RAW}) \quad (10b)$$

여기서, SW_{im}은 SW_{i-1}, P_i, DR_i로 산정하는 임시 토양수분함량이다.

i일의 지하수함양량과 최종 토양수분함량(SW_i)은 다음과 같다.

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

$$REC_i = SW_{i-1} + P_i + I_i - DR_i - AET_i - SWRC \quad (11a)$$

$$SW_i = SWRC \quad (11b)$$

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

$$REC_i = 0 \quad (12a)$$

$$SW_i = SW_{i-1} + P_i + I_i - DR_i - AET_i \quad (12b)$$

2.2 매개변수 추정

물수지의 매개변수들은 직접유출량, 토양수분, 증발산등을 일정기간 관측한 자료가 있는 경우 이를 이용하여 직접적으로 추정이 가능하지만 이를 관측하기 어렵거나 실측된 기존 자료를 이용하기 어려운 경우가 많이 있다. 이런 경우 토양도, 작물계수 추천값 같은 기존 자료와 토지이용 조사결과 등으로 매개변수를 추정하려고 시도하지만 연구지역의 매개변수의 값보다는 매개변수 범위밖에 추정할 수 없는 경우가 많이 있다. CN을 추정하는 경우 정밀토양도의 토양통을 SCS 수문학적 토양군으로 분류하는 방법이나 지표피복상태의 적용방법에 따라 CN이 크게 변화하여 단일 값보다는 가능한 범위만을 추정하게 된다. 본 연구에서는 직접유출, 실제증

발산과 관계된 매개변수의 직접적인 추정이 불가능할 때 물수지의 또 다른 성분인 함양량에 의해 변화하는 지하수위 관측자료를 이용하여 Fig. 1의 절차로 매개변수를 추정하였다.

2.1절의 물수지분석에 필요한 매개변수는 *CN, SAT, K_c, K_s, SWRC*이다. 이 변수중에서 *CN*과 *SWRC*는 지하수위상승량으로 직접 보정하고 K_c는 사례지역의 식생생육단계에 따라 Allen et al.(1998)에 제시된 추천값을 기본적으로 적용한 후, 보정은 이 계수의 0.8~1.2배 범위에서 지하수위상승량으로 보정하였다. *SAT*는 제주도 토양의 공극율과 수분함량에 대한 연구결과(김영화 등, 2002)를 이용하고, K_s는 Allen et al.(1998)의 자료로 추정하였다. 매개변수는 다음과 같이 지하수위상승량 자료로 추정하였다.

강수사상에 의해 직접함양이 발생하는 자유면 대수층에서 지하수위가 변화하는 대수층부분의 비산출률(n)이 동일하며, 함양기간에 지하수유출의 증가량이 무시할 정도로 작다고 가정하면 강수사상 e에 의한 함양량과 지하수위상승량은 Eqs. (13) and (14)에서와 같은 관계를 보인다.

$$REC_e = n \cdot GWTR_e \quad (13)$$

$$GWTR_e = 1/n \cdot REC_e \quad (14)$$

여기서, REC_e 와 $GWTR_e$는 어떤 강수사상에 의한 함양량과 지하수위 상승량이다.

관측지점의 물수지 매개변수가 정확히 추정되면 지하수위상승량은 산정된 함양량과 선형관계를 나타내며, 기울기는 비산출률의 역수와 같게 된다. 본 논문에서는 물수지분석을 대상지역에서 출현할 수 있는 매개변수 범위 내에서 반복시행하고 산정된 함양량과 관측된 상승량의 선형관계 정도와 기울기를 검토하여 매개변수를 추정하였다. 선형관계 정도는 절편이 0인 회귀식을 최소자승법으로 구하고 결정계수(R^2)에 의해 판단하였다. 지하수위가 상승한 대수층부분의 비산출률을 알 수 없으므로 회귀선은 강수사상 e에 의한 지하수위상승량($GWTR_e$)과 강수량(P_e)의 관측자료로 다음과 같이 관측지점의 대수층에서 나타날 수 있는 비산출률의 최대한계값(n_m)을 구하여 검토하였다.

Eq. (1)을 강수사상에 대해 적용하면 강수기간중에 관개가 없는 경우 Eq. (13)에 의해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$n \cdot GWTR_e = P_e - DR_e - AET_e - \Delta S \quad (15)$$

여기서, DR_e, AET_e는 각각 어떤 강수사상 동안의 총강수량과 총직접유출량이다.

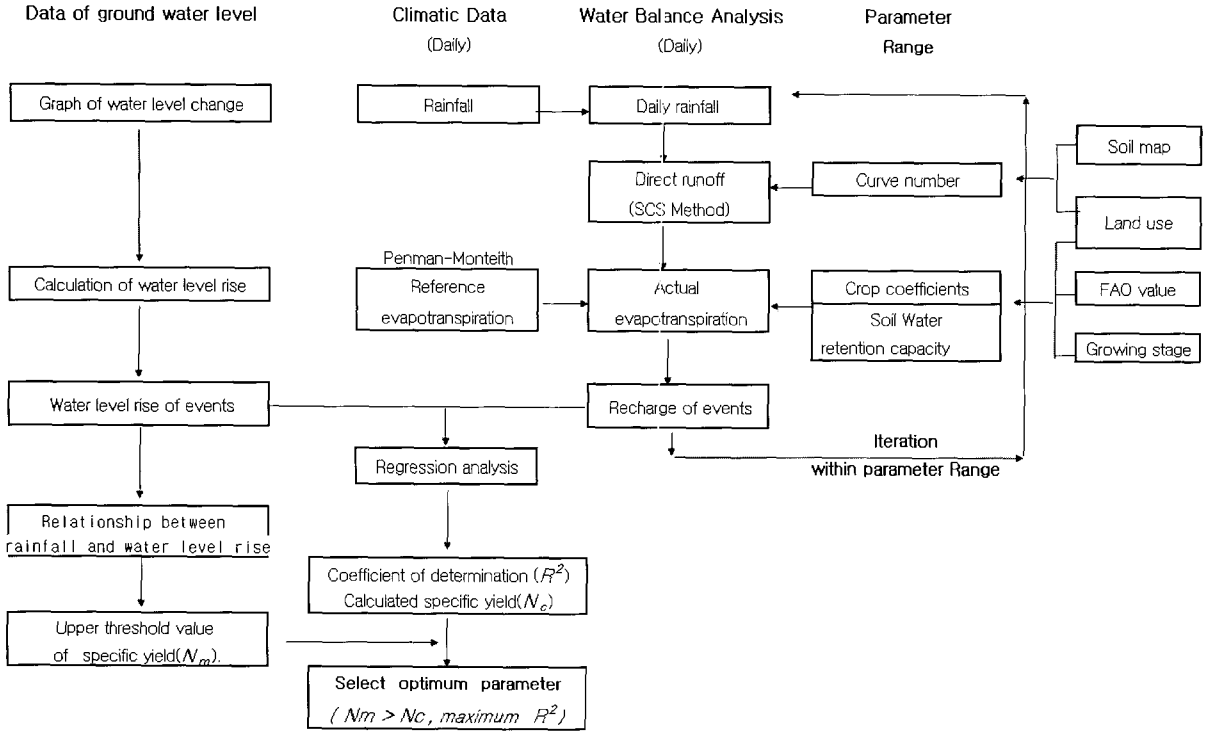


Fig. 1. Procedure of estimating the parameters of water balance analysis using ground water level

Eq. (15)에서 어떤 강수사상 동안에 모든 강수가 지하수로 함양된다면 강수량은 $n \cdot GWTR_e$와 같고, 강수의 일부가 직접유출되거나 토양수분으로 저류되면 $n \cdot GWTR_e$는 강수량보다 작게 되므로 비산출률은 아래와 같은 관계를 보인다.

$$n \leq P_e/GWTR_e \quad (16)$$

강수중에서 함양되는 양이 많아질수록 $P_e/GWTR_e$는 대수층의 비산출율에 더 근접하게 되며, $GWTR_e$는 크게 되어 $P_e/GWTR_e$은 작은 값을 갖게 된다. 따라서 관측자료로 부터 $P_e/GWTR_e$을 구하고 가장 작은 값을 비산출률의 최대한계값(n_m)으로 선정하였다. 실제 모든 강수가 지하수로 함양되지 않고 일부분이 증발되거나 토양수분으로 저류된다. 사례지역의 10년간(1994~2003년)의 기상자료로 계산한 기준작물의 일평균 잠재증발산량은 2.6mm/일로 강수전날 1일간의 증발산에 의한 토양수분결핍량과 강수가 내린 날의 증발산량을 일평균 잠재증발산으로 계산하면 약 5.2mm이므로 강수중에서 지하수로 함양되지 않는 양을 5mm로 가정하고 n_m를 구하였다. 매개변수를 추정할 때 지하수위 상승량 관측값에 대한 함양량 산정값의 회귀식 기울기에서 산정한 비산출률(n_c)이 n_m이하인 매개변수값 중에서 R^2이 최대인 매개변수 값을 선정하였다.

강수량과 지하수위상승량 자료로부터 관측지점에서 출현가능한 CN의 최소한계값을 다음과 같이 구하여 모의범위 산정에 이용할 수 있다. $SWRC$를 초과할 정도의 강수가 내린 1~2일후에 다시 강수가 연속하여 발생할 경우 강수중에서 실제증발산(AET_e)과 토양수분저장에 의한 손실(ΔS)은 작다고 할 수 있다. 사례지역에서 강수 전날 1일간의 증발산에 의한 토양수분결핍량과 강수가 내린 날의 증발산량을 일평균잠재증발산으로 계산하면 약 5mm이므로 AET_e와 ΔS를 5mm로 가정하고, 이 기간중에 관개가 없으면 직접유출은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$DR_e = P_e - n \cdot GWTR_e - 5 \quad (17)$$

Eq. (17)의 n에 비산출률 최대한계값(n_m), 강수량(P_e)과 지하수위상승량($GWTR_e$)을 적용하여 구한 유출량은 SCS방법의 AMC Ⅲ조건의 직접유출량에 해당되므로 P_e와 계산한 DR_e의 관계로부터 연구지역에서 나타날 수 있는 CN의 최소한계값을 구할 수 있다.

Eqs. (16) and (17)은 강수기간이 1~2일 정도로 짧은 사상에 적용이 가능하다. Eq. (16)은 비산출률의 최대한계값을 구하기 위한 식으로 $P_e/GWTR_e$가 n과 유사하게 되기 위해서는 강수사상의 함양률이 높아야 하는데 강수기간이 짧을수록 그 기간중의 실제증발산이 작게되어 함양률이 높게 된다. 또한 Eq. (12)에서 AET_e와 ΔS가 5mm로 작기 위해서는 강수기간이 짧아야 실제증발산량이 작게 된다.

3. 사례지역의 수문지질과 적용방법

사례지역은 제주도 북부 해안지역으로 물수지분석의 매개변수를 제주도광역수자원관리본부에서 운영하는 이호와 하귀1 관측정의 지하수위 관측자료로 추정하였다(Fig. 2).

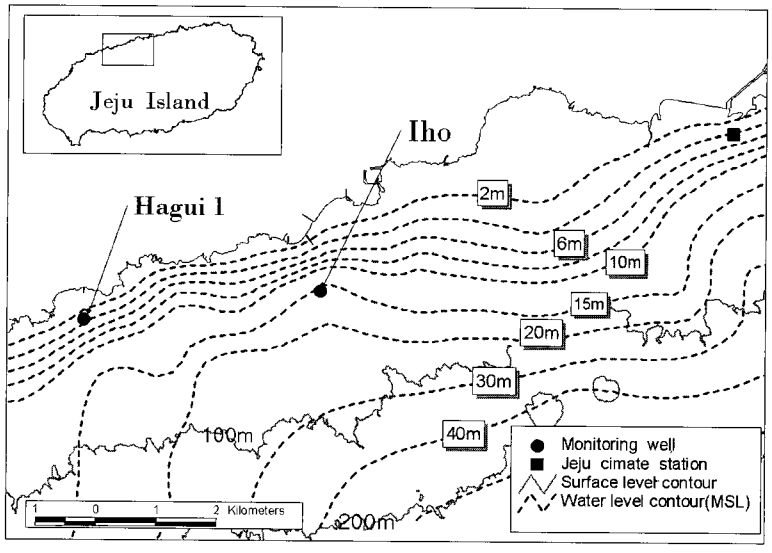


Fig. 2. Distribution of Groundwater Levels(Above Mean Sea Level) and Monitoring Wells at the Case Study Area

3.1 수문지질

이호와 하귀1 관측정은 경사가 약 4°정도로 완만한 현무암 용암대지에 위치한다. 관측정을 중심으로 반경 4km이내 지역에는 주로 암갈색비화산회토가 분포하며 토지는 밭과 감귤과수원으로 이용되고 있다. 토심은 대부분 40~120cm이며, 자갈이 있는 미사질양토가 면적의 66%, 미사질양토가 25%를 차지하고 있다.

관측정 인근에 위치한 제주기상관측소의 30년간(1973~2002년)의 년평균강수량은 1,468mm, 평균기온 12.6 ℃, 평균습도는 72.6% 이다(한국수자원공사, 2003).

지하수는 해안방향인 북쪽 방향으로 유동하며 관측정이 위치한 부근의 수리경사는 약 0.011~0.013이다(Fig. 2). 분석에 이용한 관측정과 주변 공공관정의 지질주상도를 보면 지하지질은 주로 현무암과 화성쇄설층이 분포한다(Fig. 3). 이호와 하귀1 관측정의 지하수위는 강수개시 1~3일 이내에 최대수위까지 상승하는 경향을 보여 이 지역의 대수층은 강수에 의한 직접함양이 발생하는 자유면 대수층으로 판단된다(Fig. 4).

3.2 자료 및 적용방법

3.2.1 지하수위상승량

사례지역의 지하수위는 강수개시 후 1~3일 이내에 최대수위까지 상승한 후 빠른 하강이 나타나므로 지하수위상승을 발생시킨 강수사상과 관련시키는 것이 가능하였다(Fig. 4). 지하수위상승량은 강수전의 지하수위

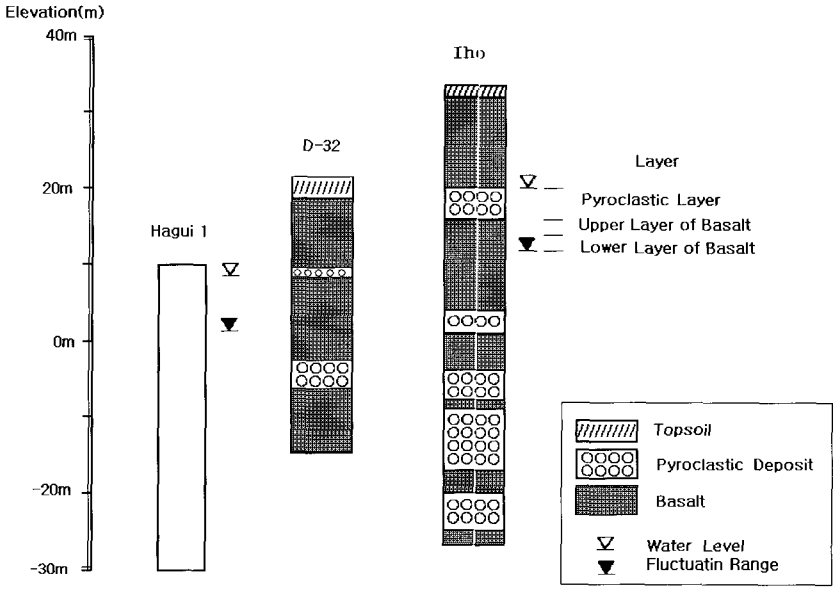


Fig. 3. Geological Cross Sections of Monitoring Well and Near Well

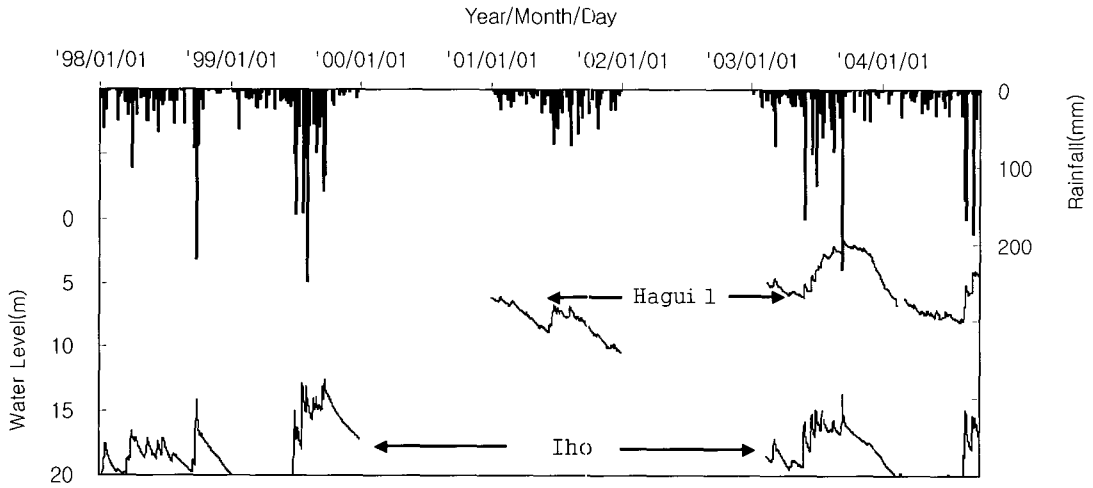


Fig. 4. Groundwater Level Fluctuations of Monitoring Wells and Rainfall Rate of Jeju Climate Station

Table 1. Property and Groundwater Levels of Monitoring Wells during Calibration and Verification Period

Wells	Elevation at Well Location(m)	Well Depth(m)	Period	Groundwater Levels(m)
Iho	33.14	89	Calibration Period : '98.1.~'99.12 Verification Period : '03.3~'04.9	13~21
Hagui 1	10	120	Calibration Period : '01.1~'01.9, '03.04~6 Verification Period : '03.7~'04.9	1.63~8.74

하강선을 강수에 의해 최대수위가 나타난 시점까지 연결하여 구한 수위와 최대수위의 차로부터 구하였다.

이호관측정은 '98~'99년의 관측자료를 보정에 이용하고 '03~'04년의 자료는 검정에 이용하였다(Table 1). 지하수위가 지표하 13~21m사이에서 변화하는 자료를 이용하였으며, 비산출률의 크기 측면에서 화성쇄설층(지표하 13~17m), 상부현무암층(지표하 17.01~19m), 하부현무암층(지표하 19.01~21m)으로 구분하였다. Fig. 3의 지질주상도와 같이 지표하 13~21m사이에 화성쇄설층과 현무암층이 분포하는데 화성쇄설층은 퇴적층으로 다공질매체이며, 현무암은 용암의 냉각중에 형성된 파쇄대가 대수층이므로 비산출률이 서로 다르다고 판단되어 구분하였다. 현무암층은 다시 Eq. (16)의 $P_e/GWTR_e$의 크기에 의해 분류하였다. 강수중에서 함양되는 양이 많아질수록 $GWTRe$는 크게 되므로 $P_e/GWTR_e$은 작은 값을 갖게 되고 대수층의 비산출율에 더 근접하게 된다. 관측된 강수사상들로 산정한 $P_e/GWTR_e$ 값들 중에서 작은 값일수록 비산출율에 근접한 값이라고 할 수 있다. 강수에 의해 상승이 발생하기 전의 수위와 $P_e/GWTR_e$의 분포를 비교하면 지표하 19~21m사이에서 작은 값으로 0.028~0.029인 값들이 나타나고, 지표하 17~19m에서는 작은 값으로 0.043~0.045가 나타나므로 현무암내의 비산출률이 심도 19m를 기준으로 다르다고 판단되어 다시 2개층으로 구분하였다. 매개변수 추정에는 강수에 의해 지하수위가 각 층내에서 변화한 자료만을 선정하여 이용하였다. 매개변수 추정과 검증을 위해 토양층에 대한 물수지분석으로 1997년 ~ 2004년의 일별 지하수함양량을 산정하고, 각 층의 지하수위상승량에 해당하는 함양량을 그 강수기간의 일별 지하수함양량을 합하여 구하였다.

하귀1 관측정은 '01년~'03년 6월의 자료를 보정에 이용하고, 그 이후의 자료는 검정에 이용하였으며 이 기간에 지하수위는 1.63~8.74m사이에서 변화하였다. 하귀1 관측정은 지질주상도자료가 없고 $P_e/GWTR_e$가 심도에 따른 변화경향을 보이지 않으므로 층을 구분하지 않고 분석하였다.

3.2.2 물수지분석 자료

물수지는 일 단위로 분석하였는데 강수량은 이호 관측정에서 7.3km, 하귀1 관측정에서 11.2km 거리에 위치한 제주기상관측소의 자료를 이용하고, 잠재증발산량 산정에는 이 관측소의 일별 최고기온, 최저기온, 평균풍속, 평균습도, 일사량 자료를 이용하였다.

작물계수는 관측정에서 반경 300m이내 지역에 대한 토지이용과 작물종류를 조사하고 FAO 추천값(Allen et al., 1998)을 적용하였다. 작물의 생육단계는 인근 지역에 대한 조사결과(농업기반공사, 2003)를 이용하였다. 밭의 경우 이호관측정은 보리를 11~5월에, 다른 기간에는 콩을 연작으로 재배하며, 하귀1 관측정는 10월~2월에는 마늘을 재배하고 다른 기간에는 파, 부르커리 등 채소류를 재배하여 이 기간은 소채류(small vegetables)의 작물계수를 적용하였다. 감귤과수원의 경우 생육기간인 4월~10월은 감귤류 식피가 50%이며 지표면에 초본류가 무성한 경우의 작물계수를 적용하고 비생육기간은 지표면에 초본류가 없는 경우의 작물계수를 적용하였다. Eq. (8)의 토양수분감소율(p)은 작물종류나 잠재증발산량에 따라 변하지만 단순화하기 위해 하귀 1에서 재배하는 부르커리와 이호에서 재배하는 보리의 중간값인 0.5를 적용하여 K_s는 $SWRC$의 50~100%까지 1, 50%부터 0%까지 직선으로 감소한다. 형상계수와 관련된 SAT는 제주도의 흑색화산회토, 농암갈색화산회토, 암갈색화산회토의 공극율이 유효수분함량($\Theta_{FC}-\Theta_{WP}$)의 1.7배~ 4.4배이며 (김영화 등, 2002), 평균 3.2배이므로 SWRC의 3배를 적용하였다.

농업용수가 공급되어 관개가 되는 지역에 위치한 하귀1 관측정은 토양수분량이 SWRC의 0.5배 이하가 되면 농경지에 관개가 이루어지는 것으로 가정하고 1회 관개량은 이 지역에 공급되는 농업용수 월이용량의 최소치와 유사한 10mm를 적용하였다.

3.3.3 모의범위

CN은 기존자료와 Eq. (17)에 의해 모의범위를 구하였다(Table 2). 관측정에서 반경 300m이내 지역의 CN

Table 2. Simulated Range and Estimated Values of Parameters

Wells	Parameters	Simulated Range	Estimated Values
Iho	CNⅡ	35~75	55
	$SWRC$	60~135	75
	K_c	FAO × 0.8~1.2	FAO × 1
Hagui 1	CNⅡ	50~83	65
	$SWRC$	50~120	60
	K_c	FAO × 0.8~1.2	FAO × 1

Note : CNⅡ : SCS Curve Number at the Average Antecedent Condition(CNⅡ)
$SWRC$: Soil Water Retention Capacity, K_c : Crop Coefficients,
FAO × 0.8~1.2 : 0.8~1.2 Times of Value Listed at Allen et al(1988)

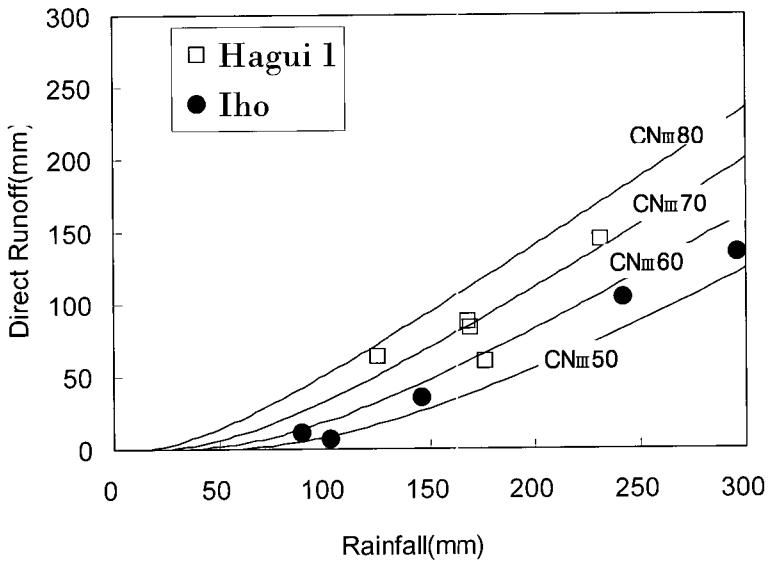


Fig. 5. Lower Threshold Values of SCS Curve Number at the Wet Antecedent Condition(CNIII) Derived from Relationship between Rainfall and Groundwater Level Rises for Rainfall Events

값을 정밀토양도(농촌진흥청 농업과학기술원, 1976)와 토지이용현황도(국토개발연구원, 1997)로부터 구하였으며 정밀토양도의 토양통은 허기술·정정화(1987)의 방법으로 SCS의 수문학적 토양군으로 재분류하였다. CN의 최소한계값은 40~200mm 이상의 강수직후 연속강수가 1~3일후에 발생한 사상의 자료를 선정하여 구하였다(Fig. 5).

작물계수는 적용한 값의 0.8~1.2배 범위이내에서 모의를 하였다. $SWRC$는 농촌진흥청의 대표토양통에 대한 보수력 및 가비중 자료로 Θ_{FC}와 Θ_{WP}을 산정하고, 작물의 최대뿌리깊이는 Allen et al.(1998)에 제시된 작물별 최대유효뿌리깊이를 이용하고, 최소뿌리깊이는 30cm로 가정하여 모의범위를 구하였다.

4. 적용결과 및 고찰

4.1 매개변수 추정 및 검정결과

매개변수 추정 및 검증을 위해 Eqs. (11) and (12)에 의해 1997년 ~2004년 기간의 일별 지하수함양량을 산정하고, 강수기간이 2~3일인 사상의 지하수함양량은 강수기간중의 일별 지하수함양량을 합하여 구하였다. 본 분석에서는 지하로 침투한 강수중에서 증발산의 영향을 받지 않는 식생의 근계 하부까지 이동한 물의 양을 함양량으로 보고, Eqs. (11) and (12)에서와 같이 일강수량에서 DR과 AET을 제외한 수분량과 전날 토양수분량의 합이 $SWRC$를 초과하면 토양수분저장량은 $SWRC$와 같고, 그 초과분을 지하수함양으로 간주하였다. 매개변수를 추정하기 위해 Table 2에 제시된 모의

범위내에서 *CN*은 5, *SWRC*는 5mm간격, 작물계수는 0.1배 간격으로 모의를 실시하여 결정계수 R^2의 반응표면을 작성하고, 비산출률이 적정성기준($n_c \leq n'$)을 충족시키는 매개변수값 중에서 R^2이 가장 높은 매개변수 값을 선정하였다(Fig. 1).

비산출률의 최대한계값을 산정한 결과 이호 관측정은 화성쇄설층이 0.055이며, 상부현무암층은 0.043, 하부 현무암층은 0.028이며, 하귀1 관측정은 0.07이다(Table 3).

매개변수의 추정결과 이호관측정은 *CN* II이 55, *SWRC*가 75mm, 작물계수는 FAO 추천값의 1배(작물계수 최대값이 1.06)일 때 R^2은 화산쇄설층이 0.90, 상부현무암층이 0.81, 하부현무암층이 0.85로 나타나 모든 층에서 R^2이 가장 크게 나타난다(Table 4). Fig. 6의 (a)~(c)와 같이 각 층별로 2~4개의 사상을 제외하고 관측된 상승량이 산정한 함양량과 선형관계를 보이고 있다. 하귀1 관측정의 경우 *CN* II이 65, *SWRC*가 60mm, 작물계수는 FAO 추천값의 1배일 때(작물계수 최대값이 1.0)일 때 R^2은 0.87로 가장 크게 나타나고 있다(Table 4). Fig. 6의 (d)는 추정된 매개변수에 의해 산정된 함양량과 지하수위상승량의 관계를 나타낸 것이다.

산정된 비산출률(n_c)은 이호관측정의 경우 화성쇄설층이 0.042, 상부현무암층이 0.038, 하부현무암층은 0.028로 심부로 갈수록 작아지는 경향을 보이며, 하귀1 관측정은 산정된 비산출률은 0.065로 이호관측정보다 크게 나타나고 있다(Table 3).

추정된 매개변수에 의해 검정기간의 기상자료로 함양량을 산정하고, 산정된 함양량을 비산출률(n_c)로 나누어 지하수위상승량을 모의하고 관측값과 비교하여 보정단계에서 추정한 매개변수를 검정하였다(Table 4, Fig. 7). 이호관측정은 검정단계의 Nash-Sutcliffe 모형효율이 0.86으로 높은 편이며, 보정단계의 Nash-Sutcliffe 모형효율 0.91보다 0.05정도 약간 작게 나타났다(Table 4). 하귀1 관측정은 검정단계의 Nash-Sutcliffe 모형효율이 0.82로 높은 편이며, 보정단계의 Nash-Sutcliffe 모형효율 0.87보다 0.05정도 작은 것으로 나타났다.

이호관측정에서 사상별 오차((관측값-모의값)/관측값 × 100)를 보면 지하수위상승량 관측값이 클수록 오차가 작아지는 경향을 보인다. Fig. 8(a)에서와 같이 지하수위상승량 관측값이 70cm 이하인 사상의 오차는 대부분 30% 이상이지만 관측값이 그 이상일 때 오차는 4~25%로 작아지고 있다. Fig. 8에서 오차가 165.9%인 21mm 강수사상은 작은 오차들을 자세히 표현하기 위해 표시하지 않았다. 강수량과 오차의 관계를 보면 45mm 미만의 강수는 절대오차가 28.5~165.9%이며, 절대오차의 평균이 71.3%이지만 45mm이상의 강수의 경우 오차가 60.5%이상인 50mm 강수사상을 제외하고 2.9~27%이며, 절대오차의 평균이 20%로 지하수위자료를 이용하여 추정한 매개변수는 강수량이 많은 사상에 대한 모의능력은 크지만 강수량이 적은 사상에 대한 모의능력은 작은 것으로 나타나고 있다(Fig. 8(b)).

Table 3. Upper Threshold Values and Estimated Values of Specific Yield

Well	Layers	Depth (m)	Upper Threshold Value	Estimated values
Iho	Pyroclastic Layer (Phy. L.)	13~17	0.055	0.042
	Upper Layer of Basalt (Upp. L.)	17.01~19	0.043	0.038
	Lower Layer of Basalt (Low. L.)	19.01~21	0.028	0.028
Hagui 1		1.63~8.74	0.07	0.065

Table 4. Statistics of Fit for Calibration and Validation Periods

Well	Parameter			Calibration Period		Validation Period
	CN	*SWRC*	K_c	Coefficient of Determination(R^2)	Nash and Sutcliffe Efficiency Criterion	Nash and Sutcliffe Efficiency Criterion
Iho	55	75	FAO×1	Phy. L. : 0.90 Upp. L. : 0.81 Low. L. : 0.85	0.91	0.86
Hagui1	65	60	FAO×1	0.87	0.87	0.82

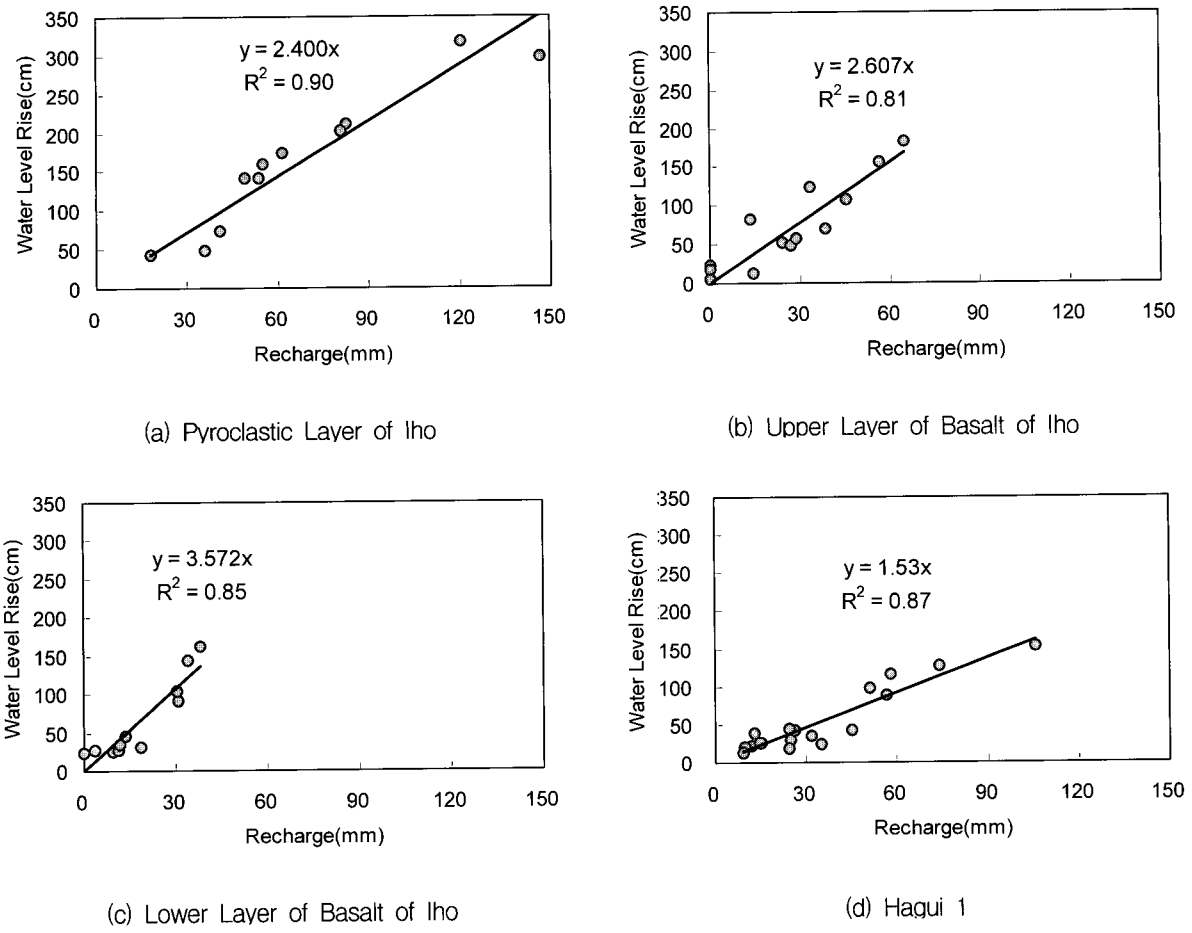


Fig. 6. Relation of Calculated Recharge to Observed Groundwater Rise for rainall events

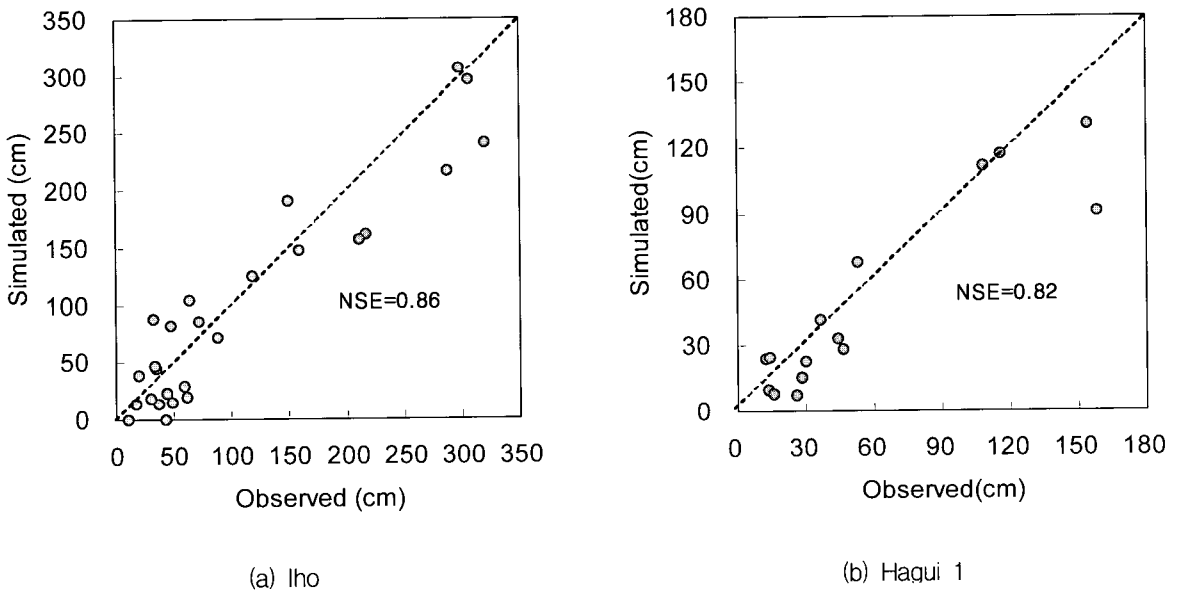
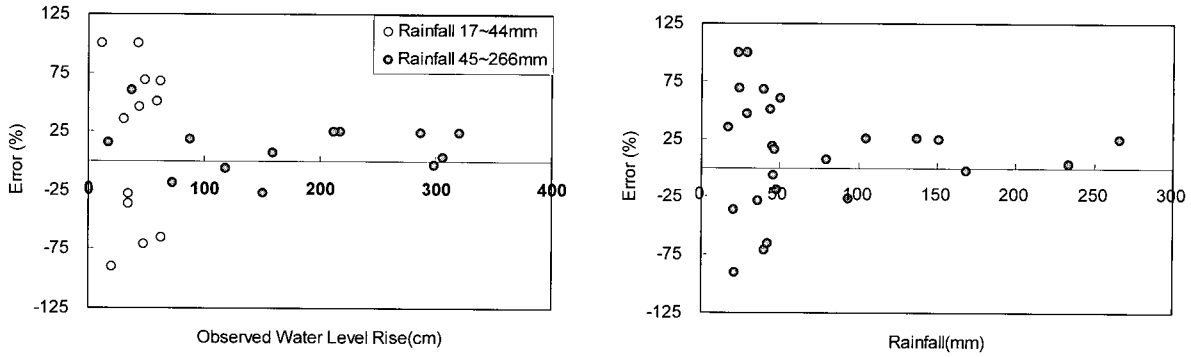


Fig. 7. Relationship between Observed and Simulated Water Level Rises for Rainfall Events during Validation Period (NSE : Nash and Sutcliffe Efficiency Criterion)



(a) (b)

Fig. 8. Plot of Error of Iho against Observed Water Level Rises and Rainfall for Rainfall Events during Validation Period

2개 관측정의 지하수위상승량 자료를 이용하여 물수지분석의 매개변수를 보정한 결과 비산출률의 적정성 조건을 만족하는 매개변수값 중에서 산정된 함양량이 상승량 관측값의 변동을 81~90%를 설명하는 매개변수값을 추정할 수 있는 것으로 나타났다. 검정 결과에서도 Nash-Sutcliffe 모형효율이 보정단계와 비교적 유사하고 0.82이상으로 높으므로 지하수위 관측자료로 물수지분석의 매개변수를 적절하게 추정할 수 있는 것으로 판단된다.

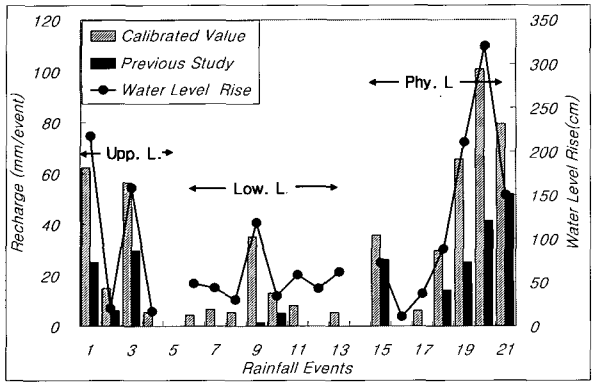
4.2 기존 연구결과에 의한 추정된 매개변수 검토

관측정이 위치한 지역에서 지표유출량, *SWRC*, 작물계수를 실측한 자료가 없기 때문에 추정된 매개변수가 사례지역의 실제 매개변수와 일치여부를 직접적으로 검증할 수 없으므로 인근 유역의 유출특성과 제주도에서 감자의 작물계수 실측결과 등으로 매개변수를 검토하였다.

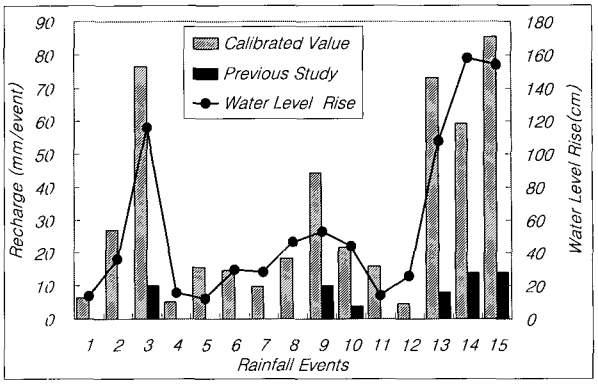
직접유출의 경우 이호와 하귀1 관측정의 *CN*은 토양도와 토지이용도등 기존 자료로 유도한 값보다 작은 경향을 보인다. 이호관측정의 경우 토양통을 허기술·정정화(1987)의 방법으로 SCS의 수문학적 토양군을 재분류하고, 농경지 피복처리유형은 등고선과 테라스경작인 경우, 피복유형별 수문조건은 불량에서 양호상태인 경우의 *CN*을 각각 구하면 67~75로 추정된 *CN*값(55)이 기존자료에 의한 값보다 12~20정도 작게 나타난다. 2개 관측정에서 7km정도 거리에 위치한 소유역(면적 약 9km^2)에서 152mm 강수에 의해 발생한 유출량을 관측한 자료로 산정한 *CN*은 기존자료로 본 논문과 같은 방식으로 산정한 것보다 30 정도 적게 나타나고 있어(서정진, 2005) 사례지역과 유사한 경향을 보인다.

제주도에서 감자의 증발산을 실측하여 작물계수를 산정한 연구에 의하면 생육중기의 작물계수 최대값은 FAO 추천값의 97%로 큰 차이가 없으나, 생육말기는 FAO값의 77%정도로 작게 나타나고 있다(이영일 등, 2004). 이 결과로 보면 추정된 작물계수가 FAO 추천값의 1배로 생육중기에는 적절하게 추정되었지만 말기에는 과다하게 추정된 것으로 판단된다.

본 연구에서 추정한 매개변수로 산정한 함양량과 기존조사(한국수자원공사, 2003)에서 사용한 매개변수를 사례지역에 적용하여 산정한 함양량을 검증기간의 지하수위상승량자료와 비교하였다. 한국수자원공사(2003)는 제주도의 함양량 산정을 위해 토양을 정밀토양도와 투수성지질구조를 토대로 SCS 수문학적 토양군으로 분류하고 식생피복과 토지이용상태를 고려하여 *CN*을 결정하였으며 산림, 과수원, 경작지 등에 대한 월별작물계수를 FAO추천값을 이용하여 결정하였다. 관측정에서 반경 300m지역에 한국수자원공사(2003)에 제시된 토양과 토지이용별 *CN*과 토지이용별 작물계수를 적용하였는데 *SWRC*는 보고서에 제시되지 않아 지하수위로 추정한 값을 적용하였다. Fig. 9는 검증기간의 지하수위상승량과 산정된 함양량을 비교한 것이다. 기존조사의 매개변수는 지하수위상승량이 50cm 미만으로 작은 경우 대부분 함양이 발생하지 않는 것으로 산정하며, 본 연구에서 지하수위로 추정한 매개변수로 산정한 함양량 이 기존조사의 것보다 지하수위상승량의 변화와 유사하게 나타난다. 관측정에서 반경 200~1,000m까지 100m간격으로 기존조사의 매개변수를 적용하여 *CN*과 작물계수를 산출하면 이호관측정은 반경이 증가함에 따라 *CN*이 78에서 88까지 증가하고, 하귀1관측정은 89에서 84로 약간 작아지며, 작물계수는 반경증가에 따라 0.1이내에서 작아지는 경향이 있다. 이 매개변수들로 산정한 함양량도 Fig. 9처럼 강수량이 작은 사상은 함양이 발생하지 않는 것으로 산정하고 있다. 지하수위로 매개변



(a) Iho



(b) Hagui 1

Fig. 9. Comparison of Observed Water Level Rises and Calculated Recharge using Calibrated or Previous study's Parameter Value for Events during Validation Period

Table 5. Average Water Balance Calculated by Estimated Paramerters for the period 1994-2003

(unit : mm/year)

Well	Rainfall	Irrigation	Recharge(%)	Direct Runoff (%)	Evaportranspiration (%)
Iho	1,519	0	670(44.2)	215(14.2)	632(41.6)
Hagui 1	1,519	203	631(41.5)	368(24.2)	723(47.6)

Note (%) : % of Mean Annual Rainfall

수를 추정한 방법이 토양도, FAO추천값 등 기존자료와 토지이용으로 매개변수를 추정한 방법보다 지하수함양을 정확하게 예측하는 것으로 판단된다.

4.3 지하수함양량 산정

추정된 매개변수로 10년간 (1994~2003년)의 물수지를 계산한 결과 년평균강수량 1,519mm중에서 직접유출이 강수량의 14.2~24.2%를 차지하며, 증발산량은 41.6~47.6%를 차지한다. 지하수함양량은 강수량의 41.5~44.2%인 631~670mm이다(Table 5). 물수지성분중에서 지하수함양과 증발산이 강수량의 86~89%정도를 차지하여 지표에 내린 강수는 주로 두 성분으로 분리된다.

물수지분석으로 수역의 평균함양량을 산정한 기존결과를 보면 이호관측정 이 위치한 서제주수역의 함양율은 강수량의 39% 또는 50.8%이며, 하귀1이 속한 애월수역의 함양율은 31% 또는 36.6%이다(농업기반공사, 2000; 한국수자원공사, 2003). 이 결과는 수역의 평균함양율로 수역내 일부지점의 함양율을 산정한 본 연구결과와 직접적으로 비교하기 곤란하지만 제주도에서 이호와 하귀1 관측정이 위치한 지역과 같은 해안지역의 함양율은 표고가 높은 지역보다 함양율이 작은 경향을 보이므로 본 연구에서 산정한 함양율이 기존 결과보다 크다고 할 수 있다. 한국수자원공사(2003)가 지하수위 하강곡선을 이용한 지하수위 해석법으로 함양율을 산정한 결과를 보면 이호관측정의 2002년의 함양율은 강수량의 39.7%로 산정되었는데 본 연구에서 같은 기간의 함양율은 41%로 유사하게 나타나고 있다.

5.결 론

물수지분석의 유출곡선지수, 토양수분보유능, 작물계수 등과 같은 3개 매개변수를 비산출률의 자료가 없는 제주도 북부지역에 위치한 2개 관측정의 지하수위 관측자료로 보정하였다. 보정에는 물수지분석으로 산정한 함양량과 지하수위상승량과의 선형관계를 이용하였다.

(1) 매개변수 보정결과 물수지분석에 의해 산정한 함양량이 관측된 지하수위상승량의 변동을 81~90% 설명하는 매개변수값을 추정할 수 있었으며, 검정결과 Nash-Sutcliffe 모형효율이 82~86%로 나타나 매개변수들은 적합하게 추정된 것으로 판단된다.

(2) 추정된 매개변수로 검정기간의 지하수위상승량을 모의한 결과 강수량이 많은 사상에 대한 모의능력은 크지만 강수량이 적은 사상에 대한 모의능

력은 작은 것으로 나타나고 있다.

(3) 추정된 매개변수로 10년간의 물수지를 분석한 결과 년평균 지하수함양량은 강수량의 41.5~44.2%인 631~664mm로 높게 나타났고, 이호관측정의 2002년 지하수함양율은 지하수위 하강곡선으로 함양율을 해석한 다른 기존 조사결과와 유사하게 나타나고 있다.

(4) 본 연구에서 지하수위로 추정한 매개변수와 토양도, 토지이용으로 추정한 매개변수로 검증기간의 지하수함양량을 산정하고 지하수위상승량을 비교한 결과 지하수위를 이용한 방법이 지하수함양을 정확하게 예측하는 것으로 나타났다. 물수지분석의 매개변수를 보정할 지표유출, 증발산 등과 같은 관측자료가 없는 경우 지하수위상승량자료는 매개변수를 추정하는 자료로 사용이 가능한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

구민호, 이대하 (2002). "지하수위 변동법에 의한 지하수 함양량 산정의 수치해석적 분석." **지질학회지**. 제38권, 제 3호, pp. 407-420.

국토개발연구원 (1997). **중산간지역 보전 및 이용계획 수립 종합조사**. 제주도, pp. 164-167.

김영화, 서인국, 박지성, 임한철, 문경환, 송창길, 강봉균, 박정식 (2002). **제주도 밭관개 용수량 산정법 정립 에 관한 연구(I)**. 농업기반공사 농어촌연구원, pp. 128-130.

농업기반공사 (2000). **제주도 지하수보전관리계획 보고서**. 제주도・한국수자원공사, pp. 167-186.

농업기반공사 (2003). **옹포지구 농촌용수개발사업 기본계획**. 농림부・농업기반공사, pp. 477-479.

농촌진흥청 농업과학기술연구원 (1976). **정밀토양도**. 제주도 농촌진흥청・농업과학기술연구원.

산업기지개발공사 (1981). **제주도 수자원개발종합조사 보고서**, pp. 140-150.

서정진 (2005). 제주도 소유역 지하수함양량산정 모델연구, 석사학위논문, 제주대학교, p. 58.

이영일, 김현수, 김영하, 송창길, 강봉균, 박정식, 임한철, 문경환 (2004). **제주도 밭관개 용수량 산정법 정립에 관한 연구(III)**. 농업기반공사 농어촌연구원, pp. 68-72.

한국수자원공사 (1993). **제주도 수자원 종합개발계획 수립보고서**. 한국수자원공사 ・건교부, pp. Ⅷ3-24.

한국수자원공사 (2003). **제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사(III)**. 제주도 한국수자원공사, pp. 65-140.

허기술, 정정화 (1987). "한국토양의 수문학적 분류 및 그 응용." **농공기술**. 제4권, 제4호, pp. 47-61.

Allen, R.G, Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration*. FAO Irrigation and Drainage Paper NO. 56, pp. 313-314.

Arnold, J.G., Allen, P.M., and Bernhardt, G. (1993). "A comprehensive surface- groundwater flow model." *Journal of Hydrology*, Vol. 142, pp. 47-69.

Hansen, C.V. (1991). *Estimates of freshwater storage and potential recharge for principal aquifers in Kansas*. Water Resources Investigations Report 87-4230, U.S. Geological survey, p.100.

Lee, V.D, and Gehrels, J.C. (1997)."Modelling of groundwater recharge for a fractured dolomite aquifer under semi-arid conditions." *Recharge of phreatic aquifers in(semi-)arid areas*, Edited by Simmers, I., and Balkemama, A.A., International Association of Hydrogeologists, Rotterdam, Nertherland, pp. 129-144.

Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R., Kiniry, J.R., Williams, J.R, King, K.W., 2002, Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2000, Texas Water Resources Institute. Report TR-191, pp. 98-99.

Mazi, K., Koussis, A.D., Restrepo, P. J., and Koutsoyiannis, D. (2004). "A groundwater- based, objective-heuristic parameter optimisation method for a precipitation- runoff model and its application to a semi-arid basin." *Journal of Hydrology*, Vol. 290, pp. 243-258.

Sophocleous, M.A. (1991). "Combing the soilwater balance and water-level fluctuation mathods to estimate natural groundater recharge : practical aspects." *Journal of hydrology*, Vol. 124, pp. 229-241.

Stephens, D.B., Johnson, P., and Havlena, J. (1996). *Esimation of infiltration and recharge for environmental site assessment*. American Petroleum Institute publication NO. 4643, pp. 3-5.

Williams, J.R., Nicks, A.D., and Arnold, J.G. (1985). "Simulator for water resources in rural resources in rural basins." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 111, No. 6, pp. 970-986.

(논문번호:05-140/접수:2005.10.28/심사완료:2006.02.14)