

## 농업유역의 일별 하천유출량 추정

### Prediction of Daily Streamflow on Agricultural Watersheds

임 상 준\*      박 승 우\*\*

Im, Sang Jun · Park, Seung Woo

#### Abstract

The objective of this study was to develop a hydrologic simulation model to predict daily streamflow from a small agricultural watershed considering irrigation return flow. The proposed IREFLOW(Irrigation REturn FLOW) model consists of hillslope runoff model, irrigation scheme drainage model, and irrigation return flow model, and simulates daily streamflow from an irrigated watershed. Two small watersheds were selected for monitoring of hydrological components and evaluating the model application. The relative error (RE) between observed and simulated daily streamflow were 2.9% and 6.4%, respectively, on two small agricultural watersheds (Baran and Gicheon) for the calibration period. The values of RE in daily streamflow for the validation period were 6.0% for the Baran watershed, and 2.8% for the Gicheon watershed.

#### I. 서 론

농업유역은 농작물의 재배활동이 이루어지는 생산공간으로서 논, 밭 등의 경작지와 산림지 및 주거지 등으로 구성되어 있으며, 작물의 생육에 필요한 물을 인위적으로 공급하기 위한 수원공 시설이 위치하고 있다. 이들 수원공은 하천수나 지하수를 취수하여 관개지구에 공급한다. 농업유역에는 작물의 재배를 위한 관개용수의

영향으로 상·하류의 하천 유황이 증가하거나 감소하게 된다. 특히, 관개용수 중의 일부는 작물에 의해서 소비되지 않고 하천으로 다시 흘러나오게 되는 데, 이를 관개회귀수량(irrigation return flow)이라 한다(Akira 등, 1995; Chung 1998; Ito 등, 1980).

논벼를 주로 재배하는 우리나라에서는 1월부터 9월까지 벼의 생육을 위하여 관개용수를 공급하고 있으며, 이로 인하여 농업유역에서는

\* 서울대학교 농업생명과학대학 조교수 (junie@snu.ac.kr)

\*\* 서울대학교 농업생명과학대학 교수 (swpark@snu.ac.kr)

키워드 : 하천유출량, 관개회귀수량, 농업유역

관개지구의 수문순환과 비관개지구의 수문순환이 연계되어 복합적으로 발생하고 있다. 한편, 관개지구의 배후에는 산림유역이 위치하고 있으며, 대부분 산림유역에서 발생한 유출량이 다시 하류의 관개지구로 흘러들게 된다.

우리나라의 경우 관개지구에서 관개량, 침투량 또는 배수량 등을 측정하여 관개지구의 효율적인 물관리 방안을 제시하기 위한 연구는 많이 수행되었으나 (김태철 등, 1992; 김현영, 1988; 안세영과 이근후, 1990), 관개지구와 배후에 위치한 산림유역을 구분하여 수문순환을 해석하고, 농업용수를 고려하여 유출해석을 시도한 예는 많지 않다.

농업유역은 작물의 재배를 위한 관개지구와 산림지 등의 비관개지구로 구성되어 있기 때문에

농업유역에 대한 지표수 수문성분의 정확한 해석을 위해서는 관개지구의 수문순환과 산림유역의 수문순환을 연계하여 해석할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 유역 유출량 모형, 관개지구 배수량 모형 및 관개회귀수량 모형 등으로 이루어진 관개지구의 일별 유출량 추정 모형인 IREFLOW (Irrigation REturn FLOW model) 을 개발하였으며, 발안지구 및 기천지구에 적용하여 농업유역의 일별 하천 유출량을 추정하였다.

## II. IREFLOW 모형의 개발

농업유역의 수문순환은 강수, 침투, 증발산, 눈에서의 저류, 관개수량, 지표유출과 지하수

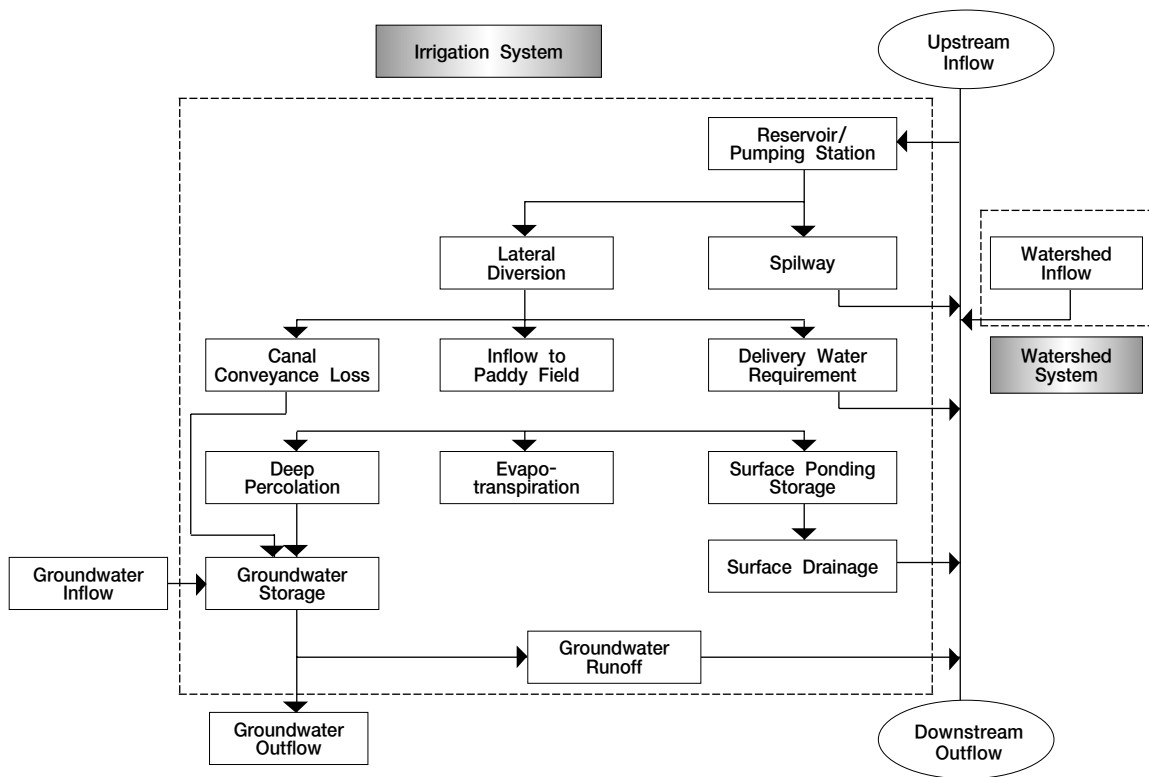


Fig. 1. Flow chart of IREFLOW model

유출 등으로 구성된다. 관개지구에서는 수원공으로부터 취수하여 관개가 이루어지며, 이로 인해 상·하류의 유황의 변화를 초래하고, 침투와 증발산 등 수문기작에 영향을 미치게 된다.

이와 같이 농업유역의 수문순환은 관개용수의 공급으로 인한 수문순환과 산림유역의 수문순환으로 구분할 수 있다. IREFLOW 모형은 산림유역으로부터 지구 유입량을 추정하는 유역 유출량 모형과 관개지구의 지표배수량을 모의하는 관개지구 배수량 모형으로 구성되어 있으며, 관개량 중에서 하천으로 흘러나오는 회귀수량을 고려하여 하천 유출량을 추정한다. Fig 1은 IREFLOW 모형의 계산흐름도를 보여주고 있다.

### 가. 유역 유출량 모형

농업유역에서는 산림지와 같이 관개를 실시하지 않는 비관개지구가 배후에 위치하고 있다. 산림유역에서는 수목이나 식생의 발달이 왕성하기 때문에 강우시에 수목의 줄기나 잎에 의한 차단 손실량이 많이 발생한다. 또한, 산림유역은 토양의 침투능이 매우 크고 경사가 급하기 때문에 Horton의 침투이론에 의해 발생하는 지표유출량은 전체 유출의 일부분만을 차지하고 있으며, 토양면의 포화로 인한 포화지표월류나 지표하 유출이 대부분을 차지하게 된다 (Anderson과 Burt, 1990).

유역 유출량 모형은 산림유역으로부터 유입되는 지구 유입량을 추정하기 위한 것으로, Fig. 2와 같이 3개의 저류 Tank를 이용하여 하천 유출량을 일별로 모의한다. 1단 저류 Tank는 지표 유출성분을 모의하며, 2단 및 3단 저류 Tank는 지표하 유출 및 지하수 유출 성분을 모의한다. 또한, 산림유역에서 수목에 의한 강우 차단량과 유역 증발산량을 고려하여 유출 과정을

모의한다. 유역 유출량 모형의 주요 계산과정은 다음과 같다.

강우 차단량을 추정하기 위하여 수목의 종류에 따라 식 (1)을 이용하여 수관통과량 (throughfall)을 계산하였다.

$$ThruFl = a \times RN + b \quad (1)$$

여기서,  $ThruFl$ 는 수관통과량(mm/day)으로 강우량중에서 식목의 줄기나 잎을 통과하여 지면에 도달하는 양이며,  $RN$ 는 일 강우량(mm/day)이며,  $a$ 와  $b$ 는 수목의 종류에 따라 결정되는 매개변수이다.

산림지에서는 난류확산에 의하여 표면 저항 (surface resistance)이 증가할수록 증산량을 줄어든다. 일반적으로 산림지의 증산량은 잠재 증발산량의 약 80% 정도로 알려져 있다. 또한, 수목의 잎이나 줄기에 차단된 수분이 공기중으로

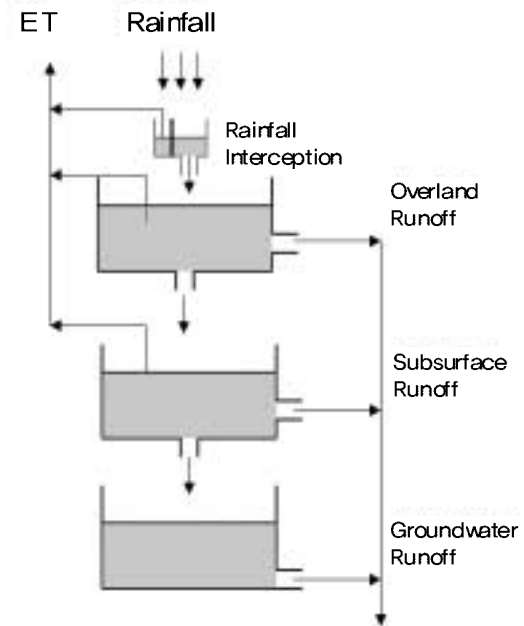


Fig. 2. Conceptual framework of hillslope runoff model

증발되는 데, 그량은 차단량에 따라 결정된다.

산림지의 증발산량은 수목에 의한 증산량과 차단 증발량을 분리하여 식 (2)로부터 계산하였다.

$$E^{forest} = 0.8 E_{rc}^{forest} + \alpha 1 RN \quad (2)$$

여기서,  $E^{forest}$ 는 유역의 평균 증발산량(mm/day)으로 첫 번째항은 증산에 의한 양이며 두 번째항은 강우에 의한 차단 증발량을 의미한다.  $E_{rc}^{forest}$ 는 산림지의 잠재증발산량으로 Penman식으로부터 산정하며,  $\alpha 1$ 는 강우량과 차단 증발량의 비를 나타내는 매개변수이다.

강우시에는 지표면의 침투로 인하여 산지 경사면은 급격하게 포화되고, 포화된 수분은 경사면을 따라 지표면으로 다시 유출하게 된다. 이때, 산지 경사면 중에서 포화되는 토층의 비율은 1단 저류 Tank로부터 계산되어 진다. 1단 저류 Tank는 비선형으로 구성되어 강우에 의해 저류수심이 증가하면 포화토층의 비율이 상대적으로 증가하여 지표유출이 증가하게 된다.

포화토층의 비율,  $SatuArea$ 는 강우량 중에서 지표 유출로 유출되는 비율을 나타내는 매개변수로서 아래의 식 (3)과 같이 1단 Tank의 저류수심에 따라 계산되어 진다.

$$SatuArea = \begin{cases} 1 - \left( \frac{2(SATUMX - SWI)}{SATUMX} \right), & SWI \geq 0.5 \cdot SATUMX \\ 0, & SWI < 0.5 \cdot SATUMX \end{cases} \quad (3)$$

여기서,  $SATUMX$ 는 최대 포화토층(mm)을 나타내는 매개변수이며,  $SWI$ 는 1단 Tank의 저류수심(mm)을 의미한다.

산림유역으로부터의 지표 유출량은 식(3)에 의해 구해진 포화토층의 비율,  $SatuArea$ 로부터 계산되어 진다. 즉, 강우량 중에서 포화토층의 비율에 해당하는 량이 지표 유출의 형태로 유출된다.

이를 식으로 나타내면 아래 식 (4)와 같다.

$$SurFlow_t = SatuArea \times ThruFl_t \quad (4)$$

여기서,  $SurFlow$ 는 지표 유출량(mm/day)이다.

1단 저류 Tank로부터 2단 저류 Tank로 침투가 발생하는 데, 이때 침투량은 최대 침투가능량 및 저류수심으로부터 구한다.

$$Perc_t = \begin{cases} 0, & SWI_t \leq 0 \\ PERCMX \times \sqrt{\frac{2SWI_t}{SATUMX}}, & SWI_t \leq 0.5 \cdot SATUMX \\ PERCMX, & SWI_t \geq 0.5 \cdot SATUMX \end{cases} \quad (5)$$

여기서,  $Perc_t$ 는 t일의 침투량(mm/day)이며,  $PERCMX$ 는 최대 일 침투량(mm/day)을 나타낸다.

한편, 1단 Tank의 저류수심  $SWI$ 는 전날의 저류수심과 강우량으로부터 물수지 방정식을 이용하여 구하여진다.

$$SWI_t = SWI_{t-1} + ThruFl_t - SurFlow_t - Perc_t \quad (6)$$

산림유역의 지표하 유출은 2단 저류 Tank의 저류수심으로부터 계산되어 진다.

$$UnSatuFlow_t = CR \cdot (UWT_t - H_u) \quad (7)$$

$$DnFlow_t = CP \cdot UWT_t \quad (8)$$

여기서,  $UnSatuFlow$ 는 지표하 유출량(mm/day),  $DnFlow$ 는 지하수 침투량(mm/day),  $UWT$ 는 2단 저류 Tank의 저류 수심(mm)이며,  $CR$ ,  $CP$  및  $H_u$ 는 모형의 매개변수이다.

지하수 유출량은 3단 저류 Tank의 저류수심으로부터 아래 식을 이용하여 구한다.

$$GWFlow_t = CF (GWT_t)^{Ex} \quad (9)$$

여기서,  $GWFlow$ 는 지하수 유출량(mm/day)이며,  $CF$ ,  $Ex$ 는 유역에 따른 매개변수로 유역면적이 나 경사 등의 지형적인 인자에 의해 영향을 받는다.  $GWT$ 는 지하수위(mm)를 나타내며, 아래의 식에 의해 계산된다.

$$GWT_t = GWT_{t-1} + DnFlow_t - GnFlow_t \quad (10)$$

**나. 관개지구 배수량 모형**

관개지구에 공급된 수량은 담수심을 보충하며, 초과된 수량은 물꼬를 월류하여 배수로를 통하여 하천으로 배수된다. 배수량은 관개지구에 공급된 수량이 물꼬를 넘어 하천으로 흘러나오는 양으로, 당일의 담수심과 물꼬높이로부터 아래의 식으로부터 계산된다.

$$\begin{aligned} DR_t &= ST_t - CH & ST_t > CH \\ DR_t &= 0, & ST_t \leq CH \end{aligned} \quad (11)$$

여기에서,  $DR_t$ 는 t일의 지표배수량(mm)이며,  $ST_t$ 는 t일의 담수심(mm),  $CH$ 는 물꼬높이(mm)이다. 담수심은 논에서의 물수지 식으로부터 계산된다. 논에서의 물수지는 관개량, 강우량, 증발산량 및 침투량 등으로부터 담수심을 계산하여 얻을 수 있다.

$$ST_t = ST_{t-1} + IR_t + RN_t - INF_t - ET_t \quad (12)$$

여기서,  $IR$ 은 관개량(mm),  $INF$ 는 침투량(mm),  $ET$ 는 논벼의 증발산량(mm)이다.

**다. 관개 회귀수량 모형**

관개 회귀수량은 신속 관개회귀수량과 지연 관개 회귀수량으로 구분하여 계산한다. 신속회귀수량,  $QRF$ 는 아래 식과 같이 배분관리용수량,  $DWR$

과 지표배수 관개량,  $OF$ 로부터 구한다.

$$QRF_t = OF_t + DWR_t \quad (13)$$

여기서,  $DWR$ 는 배분관리용수량이며,  $OF$ 는 지표배수량 중에서 관개용수의 공급으로 인하여 발생하는 양으로 관개량, 담수심, 물꼬높이에 따라 결정된다. 관개용수 중에서 지표배수되는 양,  $OF$ 는 다음과 같이 구한다.

- ① 무강우시에는 물꼬를 넘어 월류하는 수량으로 한다.
- ② 강우량에 의하여 증가된 담수심이 물꼬보다 높을 경우에는 관개량을 모두 지표배수 관개량으로 한다.
- ③ 강우에 의한 담수심이 물꼬보다 낮으면, 공급된 관개량으로부터 담수심을 계산하여 물꼬 월류량을 지표배수 관개량으로 한다.

지연 회귀수량은 토양층으로 침투한 수량이 포화된 토양층으로부터 유출되는 것으로, 지하수 유출에 대한 모델링을 통하여 관개와 비관개 조건에 대한 지하수 유출성분의 변화를 추정하고, 이로부터 관개용수로 인한 지연회귀수량을 계산한다. 이를 위하여 본 모형에서는 비관개 조건의 관개지구를 구성하였다.

$$DRF_t = GWFIR_t - GWFNO_t \quad (14)$$

여기서,  $DRF$ 는 일별 지연회귀수량(mm)이며,  $GWFIR$ 는 관개지구로부터 유출되는 일별 지하수 유출량(mm)이고,  $GWFNO$ 는 동일한 관개지구에서 관개량이 공급되지 않는 조건에서 유출되는 일별 지하수 유출량(mm)을 의미한다.

관개회귀수량은 식 (15)와 같이 신속 회귀수량과 지연 회귀수량을 모두 합하여 일별로 추정한다.

$$RETFLO_t = QRF_t + DRF_t \quad (15)$$

### III. IREFLOW모형의 적용

#### 가. 대상지구 개요

농업유역의 관개회귀수량 수문모니터링을 위한 시험지구는 경기도 화성군 팔탄면과 봉담읍 일대의 발안지구와 기천지구를 선정하였다. 선정된 시험지구는 단일 용수원인 저수지로부터 관개용수를 공급받고 있으며, 용수계통이 단순하여 물 이용 현황의 파악이 용이하고, 지구내에 시설원예단지나 집단시설 등이 존재하지 않는 중소규모의 농업유역이다.

발안지구는 Fig. 3과 같이 발안저수지를 주수원공으로 하여 관개지구에 관개용수를 공급하고 있다. 발안지구의 전체 면적은 816.8ha이며, 관개지구는 221.3ha로 27.1%를 차지하고 있으며, 산림지는 453.0ha로 전체 면적의 55.4%에 해당한다. 발안지구는 제1용수간선을 통하여 발안저수지로부터 관개용수를 공급하고 있으며, 관개지구로부터 유출되는 배수량과 배후유역으로부터 유입되는 횡 유입량이 발안천으로 유출되는 단순한 물 이용 체계를 보여주고 있다.

발안지구에는 산림유역의 유출량을 조사하기 위한 수위계측점 (HP#3)과 저수지 관개량 조사를 위한 수위계측점 (HP#4), 하천 유출량 조사를

위한 수위계측점(HP#1, HP#2)으로 구성되어 있으며, 본 연구에서 사용된 HP#1은 발안지구의 하천 최하류에 설치되어 있는 수위계측점이다.

기천지구는 Fig. 4와 같이 발안지구 상류에 위치하고 있으며, 기천저수지로부터 2조의 용수간선을 통하여 관개용수를 공급받고 있다. 기천지구의 전체 면적은 313.2ha이며, 관개면적은 61.5ha로 19.6%를 차지하고 있으며, 산림지는 209.1ha로 전체 면적의 66.8%에 해당한다.

기천지구의 하천 말단부에 하천 유출량을 조사하기 위한 수위계측점(HP#7)이 있으며, 저수지 방류량 조사(HP#11), 산림유역 유출량 조사(HP#8), 관개블럭의 관개량 조사(HP#9)와 배수량 조사(HP#10)를 위한 수위계측점을 설치하였다.

#### 나. 관개 회귀수량 추정

관개지구 배수량 모형과 관개회귀수량 모형을 이용하여 관개회귀수량을 추정하였다. 관개회귀수량 추정을 위한 순별 물꼬높이와 담수심 자료는 현장 조사자료를 이용하였으며, 강우량과 관개량으로부터 배수량을 추정하고, 관개회귀수량을 산정하였다.

IREFLOW모형을 적용하여 구한 시험지구의 신속 관개회귀수량 및 지연 관개회귀수량은

Table 1. Geomorphological characteristics and landuse of project areas and data used

Watershed		Baran (HP#1)		Gicheon (HP#7)	
Watershed Area		816.8 ha	100 %	313.2 ha	100 %
Landuse	Paddy	221.3	27.1	61.5	19.6
	Forest	453.0	55.4	209.1	66.8
	Upland	81.7	10.0	26.3	8.4
	Other	60.8	7.5	16.3	5.2
Shape factor		0.1280		2.2743	
Relief (m/m)		0.0220		00354	
Channel slope (m/m)		0.0076		0.0127	
Period of data used		1998~1999		1998~1999	

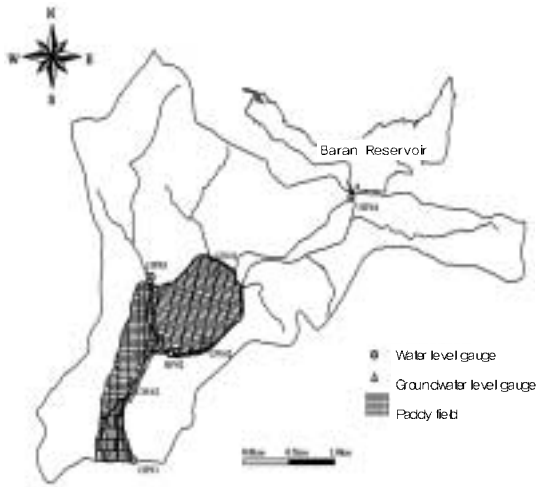


Fig. 3. Monitoring networks at the Baran watershed

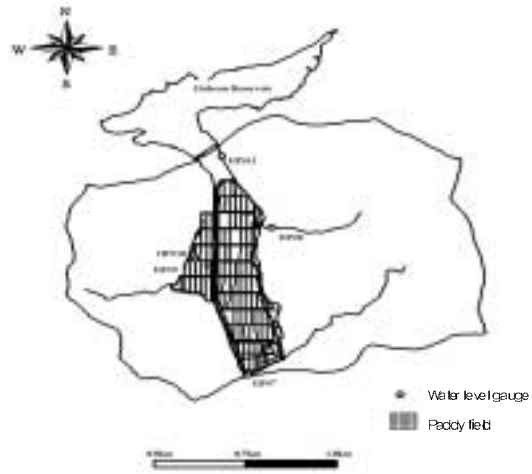


Fig. 4. Monitoring networks at the Gicheon watershed

Table 2와 같다. 발안지구의 관개회귀수량은 1998년에 335.9mm이었으며, 신속 관개회귀수량이 105.4mm, 지연 관개회귀수량이 229.6mm로 나타났으며, 관개회귀율은 33.3%이었다. 1999년의 발안지구 관개량은 1,143mm, 관개회귀수량은 368.1mm이었으며, 관개회귀율은 32.2%이었다.

기천지구의 1998년의 관개량은 918mm, 관개회귀수량은 437.1mm이었으며, 신속 관개회귀수량이 197.2mm, 지연 관개회귀수량이 239.9mm로 관개회귀율은 47.6%이었다. 또한, 1999년의 기천지구 관개회귀수량은 418.6mm로 관개량 1,085mm에 대한 관개회귀율은 38.5%로 나타났다.

Table 2에 의하면 기천지구의 관개회귀수량이 발안지구보다 많은 것으로 나타나는 데,

이는 기천지구가 발안지구의 상류에 위치하여, 기천지구의 하천 유출량이 다시 발안지구의 발안저수지로 유입되어 저수량을 확보하는 등 연계운영에 따른 현상으로, 상대적으로 기천지구의 관개용수 이용률이 낮은 것으로 보인다.

#### 다. 하천 유출량 추정

농업구역의 하천 유출량은 상류 하천의 유입량, 지구 유입량, 관개회귀수량 등으로 구성되어 있다. 모형의 보정을 위하여 대상지구에 대하여 IREFLOW모형을 적용하고, 관개지구 하류의 하천 유출량을 추정하여 실측 유출량과 비교한 결과는 Table 3과 같다. 모형의 보정을 위하여 산림구역의 유역 유출량 모형의 매개변수를

Table 2. Estimation of irrigation return flow

Watershed		Irrigation water (mm)	Irrigation return flow (mm)			Return flow rate (%)
			Quick	Delayed	Total	
Baran (HP #1)	1998	1,004	105.4	229.6	335.0	33.3
	1999	1,143	109.7	258.4	368.1	32.2
Gicheon (HP #7)	1998	918	197.2	239.9	437.1	47.6
	1999	1,085	165.2	253.4	418.6	38.5

먼저 보정하였으며, 관개지구 배수량 모형과 관개회귀수량 모형을 연계하여 하천 유출량을 모의하였다.

모형의 보정을 위한 조사기간 동안의 HP#1의 강우량은 1,189.9mm이었으며, 실측 유출량은 1,057.5mm이고 추정된 유출량은 1,088.1mm이었다. HP#7의 1998년 강우량은 1,110.5mm이었으며, 추정 유출량이 1,180.3mm로 나타났으며, 실측된 유출량은 1,261.3mm이었다. 모형의 보정 결과 실측 유출량과 추정 유출량의 상대오차는 HP#1는 2.9%, HP#7은 6.4%이었다.

모형의 검증기간에 대한 적용 결과는 Table 4와 같다. HP#1의 1999년의 조사기간 동안의 강우량은 917.0mm이었으며, 실측된 유출량은 889.3mm이고 추정된 유출량은 836.2mm이었으며, HP#7의 경우 실측 유출량과 추정 유출량이 각각 1,396.8mm, 1,356.9mm로 나타났다. HP#1과 HP#7의 일별 유출량의 R2는 0.934, 0.810으로 나타났다.

Table 3과 4의 결과에 의하면 유출율이 89%~114%로 매우 크게 나타나는 데, 이는 상류에 위치한 저수지로부터 홍수조절을 위하여 방류된 상류 유입량과 관개용수의 회귀수량이 하천으로 유출되었기 때문이다. Fig. 5는 HP#7

유역의 실측 및 모의 유출량을 나타낸 것이다.

#### IV. 결론

농업유역에서 관개용수의 공급으로 인한 하천 유출량의 변화를 추정하기 위하여 일별 하천유출량 추정모형인 IREFLOW를 개발하였으며, 발안 및 기천유역에서 현장계측된 수문자료를 활용하여 모형의 적용성을 평가하였다.

IREFLOW모형은 유역 유출량 모형과 배수량 모형, 관개 회귀수량 모형으로 구성되어 있으며, 신속회귀수량과 지연회귀수량을 일별로 추정한다. 유역 유출량 모형은 3단의 저류 Tank로 구성되어 있으며, 발안유역(HP#1)과 기천유역(HP#7)에 대한 적용 결과, 보정기간에 대한 실측 유출량과 추정 유출량의 상대오차는 각각 2.9%, 6.4%로 나타났으며, 검증기간에 대해서는 그 값이 각각 6.0%, 2.8%로 추정치와 실측치가 잘 일치하였다.

발안지구의 관개 회귀율은 1998년에 33.3%, 1999년에 32.2%를 보였으며, 발안지구의 상류에 위치하여 발안저수지로 유입되는 기천지구는 1998년에 관개 회귀율이 47.6%이었으며, 1999년에는 38.5%의 관개 회귀율을 보였다.

Table 3. Results of daily streamflow simulation for the calibration period

Watershed	Simulation period	Rainfall (mm)	Streamflow (mm)		Relative error(%)
			Observed	Simulated	
HP # 1	'98. 4~'98. 9	1,189.9	1,057.5	1,088.1	2.9
HP # 7	'98. 4~'98. 12	1,110.5	1,261.3	1,180.3	6.4

Table 4. Results of daily streamflow simulation for the validation period

Watershed	Simulation period	Rainfall (mm)	Streamflow (mm)		Relative error(%)
			Observed	Simulated	
HP # 1	'99. 3~'99. 7	917.0	889.3	836.2	6.0
HP # 7	'99. 1~'99. 10	1,460.0	1,396.8	1,356.9	2.8



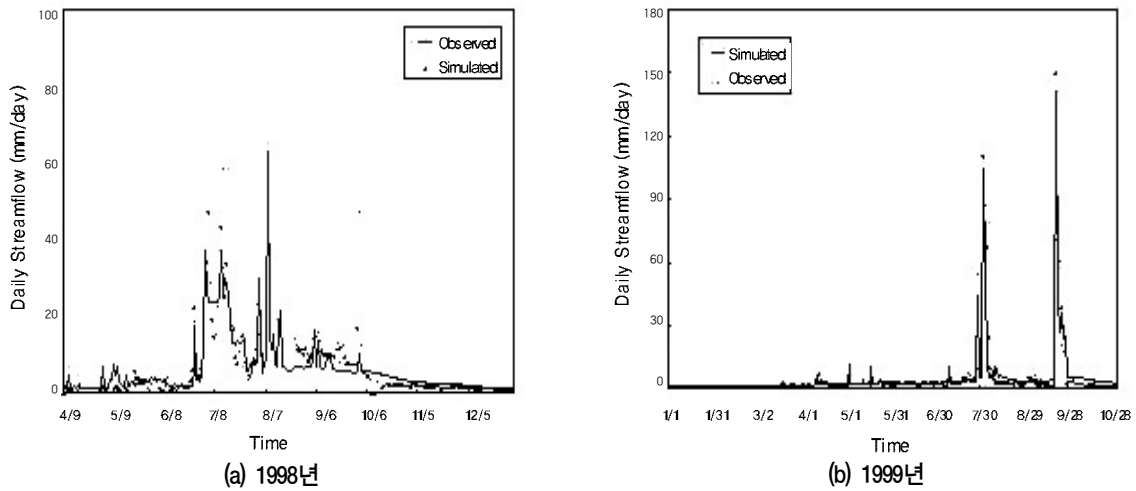


Fig. 5. Observed and simulated streamflows on a small watershed, HP#7

## 참고문헌

1. 김태철, 노재경, 박승기, 1992, 관개저수지의 이수 관리 방법, 한국농공학회지 34(1), pp.34-40.
2. 김현영, 1988, 관개용 저수지의 일별 유입량과 방류량의 모의발생, 서울대학교 박사학위논문.
3. 안세영, 이근후, 1990, 제대천 유역 답지대의 물수지, 한국농공학회지 32(3), pp.56-66.
4. Anderson, M. G. and Burt, T. P., 1990, Process studies in hillslope hydrology, John Wiley & Sons, p.539.
5. Akira, K., Kawagoshi, N., and Sasanabe, S., 1995, Characteristics of water management and outflow load from a paddy field in a return flow irrigation area, Journal of JSIDRE, 63(2), pp.179-184.
6. Chung, S. O., 1998, A study on the return flow of irrigation water in paddy fields, Journal of KSAE, 40, pp.1-6.
7. Ito, Y., Shiraishi, H., and Oonishi, R., 1980, Numerical estimation of return flow in river basin, JARQ, 14(1), pp.24-30.