



저수지 관개지구의 농업용수 회귀 특성 분석

Characteristics of Irrigation Return Flow in a Reservoir Irrigated District

송정현* · 송인홍** · 김진택*** · 강문성****,†

Song, Jung Hun · Song, Inhong · Kim, Jin-Taek · Kang, Moon Seong

Abstract

The objective of this study was to investigate characteristics of irrigation return flow from paddy block in a reservoir irrigated district during growing seasons. The irrigation return flow was divided into three parts, quick return flow from irrigation canal (*RFI*), quick return flow from drainage canal (*RFD*), and delayed return flow (*DRF*). The *RFI* was calculated from water level and stage-discharge relationships at the ends of the irrigation canals. The *DRF* was estimated using measured infiltration amount from paddy fields of the irrigated district. A combined monitoring and modeling method was used to estimate the *RFD* by subtracting surface runoff from surface drainage. The paddy block irrigated from the Idong reservoir was selected to study the irrigation return flow components. The results showed that daily agricultural water supply (*AWS*), the *RFI*, and the *RFD* were 27.4 mm day⁻¹, 4.9 mm day⁻¹, and 19.8 mm day⁻¹, respectively in May, which were greater than other months ($p < 0.05$). The return flow ratio of the *RFI* and the *RFD* were the greatest in July (34.6%) and May (72.3%), respectively. The daily *AWS* was closely correlated with the *RFD* (correlation coefficients of 0.76~0.86) in except for July with, while correlation coefficient with the *RFI* were 0.56 and 0.42 in June and July, respectively ($p < 0.01$). The total irrigation return flow was 1,965 mm in 2011, and 1,588 mm in 2012, resulting in total return flow ratio of 84.6% and 79.1%, respectively. This results indicate that substantial amounts of agricultural water were returned to streams as irrigation return flow. Thus, irrigation return flow should be fully considered into the agricultural water resources planning in Korea.

Keywords: Irrigation return flow; return flow ratio; water balance; drainage; paddy

1. 서론

수리시설물에서 공급된 농업용수는 전량 작물에 의해 소비되는 것이 아니며, 포장으로 공급되지 않고 용수로로 통해 배수되기도 한다. 포장으로 공급된 수량은 물꼬를 넘어 배수되기도 하고, 일부는 침투되어 지하수를 통해 흘러나가기도 한다. 이와 같이, 농업용수 공급량 중 소모되지 않고 하천으로 유입되는 수량을 관개회귀수량 (irrigation return flow)이라 한다 (Im and Park, 2006; Dawandel et al., 2008; Song et al., 2013a).

관개회귀수량은 농업구역의 하천 유량을 구성하는 중요한

성분으로 취수시설의 설계와 관개조직의 운영, 용수수급계획, 하천 유량의 예측, 환경용수 방류량의 결정, 그리고 농업비점오염원 관리 등 유역 수자원관리에 있어 중요한 요소로 작용한다 (Im, 2000; Causape et al., 2006; Lin and Garcia, 2012; Poch-massegu et al., 2014). 하지만, 관개회귀수량은 기상, 작물, 토양 등의 물리적 요소와 농업용수 공급량, 물꼬 높이, 담수심 관리 방식 등 인위적 요소의 영향을 동시에 받기 때문에 그 기작이 복잡한 특징을 가진다 (Gosain et al., 2005; Song, 2013; Masashi et al., 2014).

우리나라의 수자원장기종합계획에서는 농업용수 공급량의 약 35%가 하천으로 회귀되는 것으로 예상하고 있다 (MOLTM, 2011). 하지만, 선행연구의 조사 결과에 의하면 농업용수 회귀율은 용수 공급 현황과 물관리 방식에 따라 약 32~86%의 범위로 지역별로 다양하게 나타나는 것으로 보고되고 있다 (Im, 2000; Choo, 2004a; Chung and Park, 2004; Kim et al., 2010). 따라서, 합리적인 수자원 이용 및 관리를 위해서는 지역별 농업용수 공급 현황과 물관리 방식이 반영된 농업용수 회귀율이 물이용 계획에 이용될 필요가 있다.

관개회귀수량 조사에 관한 연구는 효율적인 수자원 이용의 측면에서 국내외에서 이루어져왔다. 국내에서는 관개량, 침투량, 그리고 배수량 성분의 관측 자료를 이용하여 관개회

* Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

** Research Institute for Agriculture & Life Sciences, Seoul National University

*** Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

**** Department of Rural Systems Engineering, Research Institute for Agriculture & Life Sciences, Seoul National University

† Corresponding author

Tel.: +82-2-880-4582 Fax: +82-2-873-2087

E-mail: mskang@snu.ac.kr

Received: November 19, 2014

Revised: December 16, 2014

Accepted: December 22, 2014

귀수량 및 회귀율을 산정하는 연구가 Choo (2004a), Chung and Park (2004), 그리고 Kim et al. (2010)에 의해 수행된 바 있다. 하지만, 이들 연구는 무강우시 물수지 분석을 통한 연구로 강우시 관개회귀수량에 대해서는 고려하지 않았다. 강우시 관개회귀수량 성분을 산정하기 위해서는 배수량 성분 중에서 강우에 의한 유출량 성분을 제외해야하기 때문에 배수량의 단순한 측정을 통해서 분석이 어려운 점이 있다. 그러므로 관개회귀수량 구성요소를 추정하기 위해서는 모니터링을 통한 물수지 요소의 관측과 배수량 모형을 이용한 수학적인 모델링을 병행하여야 한다 (Im, 2000; Kim et al., 2009; Chien and Fang, 2012; Song et al., 2013a). 특히, 수량이 풍부하여 용수 공급이 용이한 지역의 경우 영농기 농업용수 공급량이 2,000~3,700 mm으로 크게 관측되고 있으며 (Oh et al., 2002; Song et al., 2013b), 이들 지역에서의 관개회귀수량은 다른 지역에 비해 그 수량이 더 클 것으로 사료된다. 또한, 저수지 관개지구 중 넓은 면적에 대해 관개가 이루어지는 지역의 경우 관개회귀수량은 유역 말단의 하천 유량 성분의 큰 비중을 차지할 것으로 사료되며, 이에 관한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 용수 공급이 용이한 이동저수지 관개지구를 대상으로 모니터링과 모델링 기법을 병행하여 관개회귀수량 구성 성분을 산정하고, 산정한 관개회귀수량에 대해 통계적인 방법을 이용하여 시기별 특성을 분석하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 관개회귀수량 조사 방법

가. 관개회귀수량 구성요소 및 정의

관개회귀수량은 농업용수 공급량 중 작물에 의해 소모되지 않고 하천으로 유입되는 수량을 의미하며, 식 (1)과 같이 신속회귀수량 (quick return flow)과 지연회귀수량 (delayed return flow)으로 구분된다. 신속회귀수량은 용수로의 말단부에서 배수되거나 물꼬를 월류하여 짧은 지체시간에 신속히 배제되는 회귀수량을 의미하고, 지연회귀수량은 토양 층으로 침투되어 지하수로부터 유출되는 수량을 의미한다 (Im, 2000).

$$RF = QRF + DRF \quad (1)$$

여기서, RF 는 총 회귀수량 (mm), QRF 는 신속회귀수량 (mm), 그리고 DRF 는 지연회귀수량 (mm)을 의미한다.

신속회귀수량은 식 (2)와 같이 용수로 회귀수량 (quick return flow from irrigation canal)과 배수로 회귀수량 (quick

return flow from drainage canal)으로 구분된다 (Im, 2000; Song, 2013; Song et al., 2013a). 용수로 회귀수량과 배수로 회귀수량은 각각 공급량 중 관개되지 않고 용수로 말단부에서 회귀되는 수량과 관개된 공급량 중 물꼬를 넘어 배수로로 통해 하천으로 회귀되는 수량을 의미한다 (Song et al., 2013a).

$$QRF = RFI + RFD \quad (2)$$

여기서, RFI 는 용수로 회귀수량 (mm), 그리고 RFD 는 배수로 회귀수량 (mm)을 의미한다.

농업용수 회귀율 (return flow ratio)은 농업용수 공급량에 대한 회귀수량의 비율을 의미한다 (Kim et al., 2010; Jafari et al., 2012). 용수로 회귀율, 배수로 회귀율, 그리고 지연회귀율은 각각 농업용수 공급량 중 용수로 회귀수량, 배수로 회귀수량, 그리고 지연회귀수량의 비율이다. 농업용수 회귀율은 식 (3)과 같이 용수로 회귀율, 배수로 회귀율, 그리고 지연회귀율을 합하여 산정할 수 있다.

$$R_F = R_1 + R_2 + R_3 = \frac{RFI}{AWS} + \frac{RFD}{AWS} + \frac{DRF}{AWS} \quad (3)$$

여기서, R_F 는 농업용수 회귀율, R_1 는 용수로 회귀율, R_2 는 배수로 회귀율, R_3 는 지연회귀율, 그리고 AWS 는 농업용수 공급량 (mm)이다. 신속회귀율은 R_1 과 R_2 를 합하여 산정할 수 있다.

나. 관개회귀수량 산정 방법

신속회귀수량 중 용수로 회귀수량은 모니터링을 통하여 쉽게 추정할 수 있다. 그러나 배수로 회귀수량의 경우 배수량 성분 중 강우에 의한 유출 성분을 제외하여 그 성분을 산정해야하기 때문에 단순한 측정을 통해서 정량적인 분석이 어려운 점이 있으며, 수학적 모델링을 병행하여 해석해야 한다 (Im, 2000; Kim et al., 2009).

본 연구에서는 Song et al. (2013a)이 개발한 광역 논 배수량 모형을 기반으로 Im (2000)이 제시한 관개회귀수량 산정을 위한 가정을 적용하여 배수로 회귀수량 성분을 추정하였다. 배수량 모형에 대한 자세한 내용은 Song et al. (2013a)에 상세히 기술되어 있으며, Im (2000)이 제시한 관개회귀수량 산정을 위한 가정은 다음과 같다.

1. 관개는 일차적으로 강우에 의해 이루어지며, 부족한 수량을 인위적인 수단으로 공급하는 것이다. 그러므로 강우시에는 강우량이 먼저 공급되고, 그 이후에 관개량이 공급

되는 것으로 계산한다.

2. 무강우시에는 물꼬를 넘어 배수되는 수량이 전량 배수로 회귀수량이다.
3. 강우량에 의하여 증가된 담수심이 물꼬보다 높을 경우에는 유입되는 관개량이 전량 배수로 회귀수량이다.
4. 강우에 의한 담수심이 물꼬보다 낮을 경우에는 공급된 관개량으로부터 담수심을 계산하여 물꼬를 통해 배수되는 수량이 배수로 회귀수량이다.

본 연구에서는 농업용수 공급량과 용수로 회귀수량의 산정은 현장 계측된 자료를 이용하였다. Choo (2004a), Chung and Park (2004), 그리고 Kim et al. (2010)는 침투량이 궁극적으로 하천으로 회귀한다고 가정하여 침투량 관측 성분을 지연회귀수량으로 간주하고 있으며, 본 연구에서도 동일한 방법을 이용하였다.

2. 대상지구 및 자료구축

본 연구에서는 경기도 용인에 이동저수지로부터 농업용수를 공급받는 10.3 ha 크기의 광역 논을 대상지구로 선정하여 모니터링을 수행하였으며, 모니터링 계측망 및 수위-유량 관계식은 Fig. 1과 같다. 대상지구는 용-배수로가 분리되어 있으며, 용수로는 폭 60 cm의 콘크리트 수로이고 배수로는 2011년까지 흙수로였으나 2012년부터 폭 90 cm의 콘크리트 수로로 라이닝이 되어있다. 농업용수 공급량은 용수간선에서 분지되어 2개의 분수문으로부터 시험지구로 유입되어 용수로

를 따라 포장으로 관개되거나 말단부에서 하천으로 회귀되고 있다. 시험지구의 배수로 회귀수량은 포장에서 물꼬를 월류하여 1개의 배수로를 통해 하천으로 유입된다 (Song, 2013; Song et al. 2013a; Song et al., 2013b).

본 연구에서는 대상지구에 대한 Song et al. (2013b)의 물수지 요소 관측결과와 Song et al. (2013a)의 모델링 결과를 이용하여 관개회귀수량을 추정하였다. 본 연구 대상지에 대한 수로 수위, 농업용수 공급량, 침투량, 그리고 용수로 회귀수량 관측 결과는 Song et al. (2013b)에 상세히 기술되어 있으며, Song et al. (2013a)에서는 배수량 관측 및 모의 결과, 그리고 보정 및 검정 결과의 평가 등이 상세히 기술되어 있다.

3. 통계분석 방법

본 연구에서는 농업용수 공급량과 관개회귀수량 구성성분의 시기별 특성을 분석하기 위하여 통계적 방법을 이용하였다. 농업용수 공급량, 용수로 회귀수량, 그리고 배수로 회귀수량의 일 평균값이 월별로 유의한 차이가 있는지를 분석하기 위하여 분산분석 (Analysis of variance, ANOVA)를 수행하였다. 사후검정 방법으로는 Duncan의 다중범위검정 (Duncan's Multiple Range Test, DMRT)을 이용하였으며, 통계적 유의수준은 p 값 0.05이하로 정하여 일 평균값이 월별로 차이가 없다는 귀무가설에 대한 기각여부를 판단하였다. 또한, 본 연구에서는 농업용수 공급량과 신속회귀수량의 상관관계를 Pearson 상관분석을 통해 분석하였다. 모든 통계분석은 IBSS SPSS Statistics 21 (SPSS, Inc., 2012)를 이용하였다.

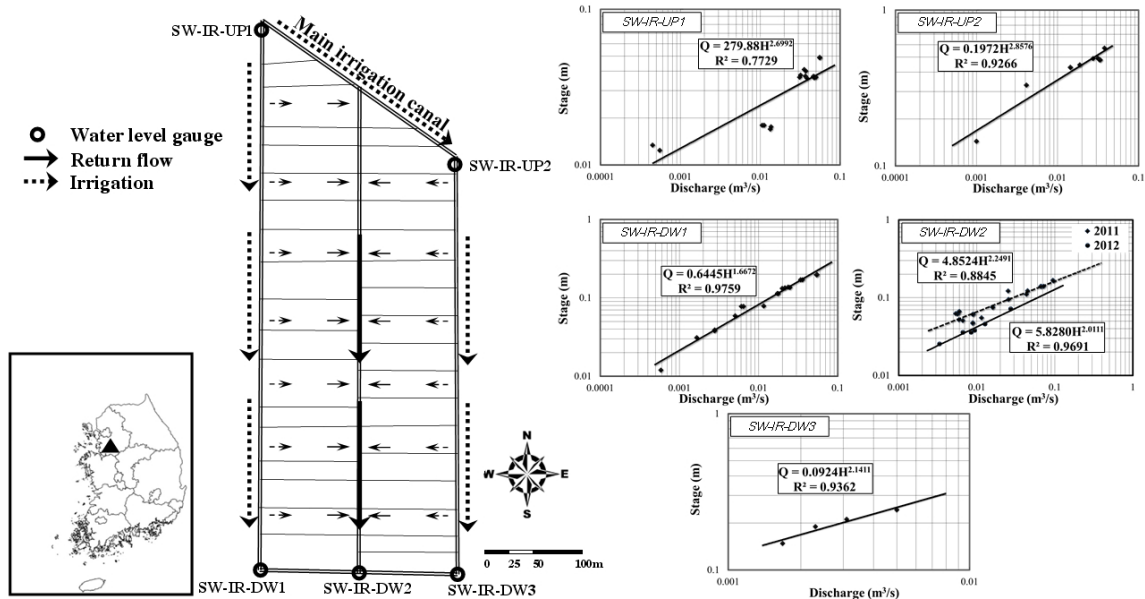


Fig. 1 Schematics of the monitoring systems and stage-discharge relationships for the study area

III. 결과 및 고찰

1. 관개회귀수량 산정 결과

본 연구에서는 Fig. 2와 같이 관개회귀수량의 구성요소인 신속회귀수량과 지연회귀수량을 2011~2012년 영농기간에 대해 일별로 산정하였다. 신속회귀수량은 용수로 회귀수량과 배수로 회귀수량으로 구분하여 산정하였다. 대상지구의 지연회귀수량, 용수로 회귀수량, 그리고 배수로 회귀수량은 각각 0.4~1.8 mm day⁻¹, 0.0~14.9 mm day⁻¹, 그리고 0.0~42.3 mm day⁻¹의 범위로 나타났으며, 총 회귀수량은 0.6~48.6 mm day⁻¹의 범위로 나타났다.

Table 1은 대상지구의 2011~2012년 영농기에 대한 월 단

위 강우량, 농업용수 공급량, 관개회귀수량, 그리고 회귀율을 정리하여 보여주고 있다. 농업용수 공급량은 149.4~967.0 mm month⁻¹의 범위로 5~6월에 비교적 높게 나타났다. 다만, 2012년 8월의 경우 527.9 mm month⁻¹로 높게 나타나기도 하였다. 용수로 회귀수량은 2011년 5월에 245.4 mm month⁻¹로 가장 높았으며, 용수로 회귀율은 2011년 7월에 가장 높게 나타났다. 배수로 회귀수량과 배수로 회귀율은 각각 77.5~637.4 mm month⁻¹과 28.3~80.7%의 범위로 나타났다. 지연회귀수량은 2.1~50.1 mm month⁻¹로 나타났고, 신속회귀수량 구성 성분과 비교하여 그 양이 미비하였다. 이상과 같이, 농업용수 공급량과 관개회귀수량, 그리고 농업용수 회귀율은 시기별로 편차가 큰 편이며, 회귀수량이 가장 높게 나타난 시기와 회

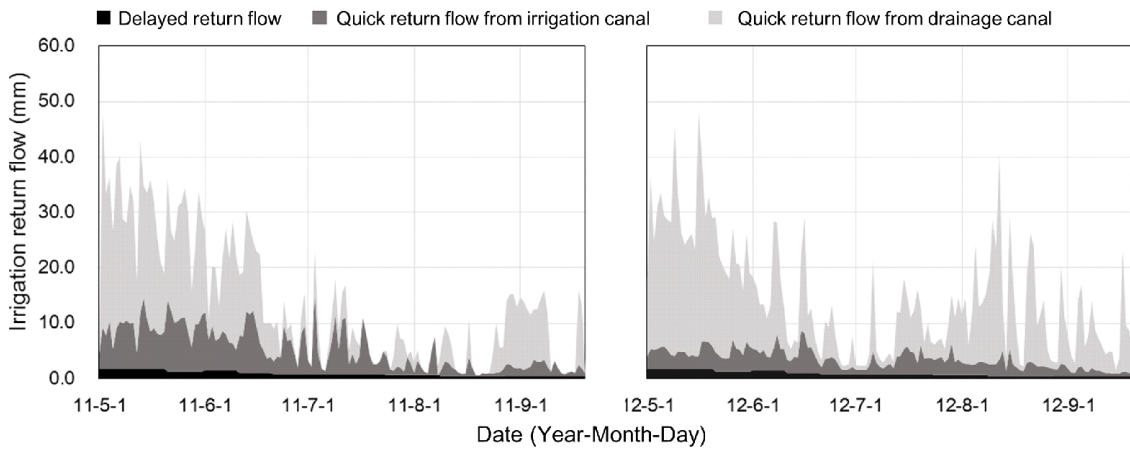


Fig. 2 Temporal variation of return flow components from the study district

Table 1 Results of irrigation return flow calculation in the study area during the growing season from 2011 to 2012

Period	Rainfall (mm)	Agricultural water supply ^a (mm)	Quick return flow from irrigation canal ^a		Quick return flow from drainage canal ^b		Delayed return flow ^c		Total return flow		
			Amount (mm)	Ratio (%)	Amount (mm)	Ratio (%)	Amount (mm)	Ratio (%)	Amount (mm)	Ratio (%)	
2011	May	74.2	967.0	245.4	25.4	637.4	65.9	50.1	5.2	933.0	96.5
	Jun	391.5	609.0	183.3	30.1	283.4	46.5	32.7	5.4	499.4	82.0
	Jul	794.3	277.6	125.5	45.2	78.6	28.3	17.6	6.3	221.7	79.9
	Aug	315.1	250.0	44.4	17.8	101.8	40.7	8.9	3.6	155.2	62.1
	Sep	16.3	220.5	31.2	14.2	122.6	55.6	2.1	1.0	155.9	70.7
2012	May	16.5	734.7	56.0	7.6	592.7	80.7	50.1	6.8	698.9	95.1
	Jun	100.8	333.7	62.4	18.7	128.0	38.4	32.7	9.8	223.1	66.8
	Jul	572.3	262.2	61.3	23.4	77.5	29.6	22.5	8.6	161.3	61.5
	Aug	426.2	527.9	50.1	9.5	304.8	57.7	15.1	2.9	370.0	70.1
	Sep	239.0	149.4	9.8	6.6	117.2	78.5	8.0	5.4	135.1	90.4

^a was calculated by the measured water levels and the stage-discharge relationships

^b was estimated by the validated model from Song et al. (2013a)

^c was regarded as the infiltration of the study paddy fields

Table 2 Monthly variation of daily agricultural water supply and quick return flow in the reservoir irrigated district

Month	No. ^a	Rainfall (mm month ⁻¹)	Agricultural water supply ^b (mm day ⁻¹)	Quick return flow from irrigation canal		Quick return flow from drainage canal	
				Amount ^b (mm day ⁻¹)	Ratio (%)	Amount ^b (mm day ⁻¹)	Ratio (%)
May	62	45.4	27.4±1.1a*	4.9±0.5a	17.7	19.8±1.0a	72.3
Jun	60	246.2	15.7±1.2b	4.1±0.4a	26.1	6.9±0.8b	43.6
Jul	62	683.3	8.7±0.8c	3.0±0.4b	34.6	2.5±0.4c	28.9
Aug	62	370.7	12.5±1.2d	1.5±0.2c	12.1	6.6±0.9b	52.3
Sep	40	127.7	9.2±1.1c	1.0±0.1c	11.2	6.0±0.8b	64.9

^a represents number of samples

^b represents means ± standard error

* Means with the same letter within same column are not significantly different at the $p < 0.05$ level by Duncan's multiple range test (DMRT)

귀율이 높게 나타난 시기가 다르기도 하였다. Kim et al. (2009)에 의하면 농업용수 회귀율은 강우량, 농업용수 공급량, 그리고 시기별 변동성 등에 의해 복합적으로 영향을 받는 것으로 보고되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 대상 지구의 농업용수 공급량과 관개회귀수량 구성성분의 시기별 차이를 통계적인 방법 등을 이용하여 고찰 분석하였으며, 이는 다음 장에 상세히 서술하였다.

2. 농업용수 공급량과 관개회귀수량의 시기별 특성 분석

가. 월별 일평균 비교

Table 2는 2011~2012년의 농업용수 공급량, 용수로 회귀수량, 그리고 배수로 회귀수량의 일 단위 값 대해 ANOVA를 통해 월별로 비교한 결과를 보여주고 있다. 농업용수 공급량은 5월에 27.4 mm day⁻¹으로 가장 높게 나타났으며, 그 이후로 6월 > 8월 > 7월 ≈ 9월의 순으로 나타났다 ($p < 0.05$).

용수로 회귀수량은 5월과 6월에 각각 4.9 mm day⁻¹, 4.1 mm day⁻¹으로 가장 높게 나타났으며, 그 이후로 7월 > 8월 ≈ 9월 순으로 나타났다 ($p < 0.05$). 용수로 회귀수량이 5월과 6월에 높게 나타난 이유는 농업용수 공급량 또한 해당 기간에 높게 나타났기 때문으로 사료된다. 하지만, 용수로 회귀율은 영농 초기가 아닌 7월에 34.6%로 가장 높게 나타났다. 용수로 회귀율이 7월에 가장 높게 나타난 원인은 7월의 강우량이 가장 높았기 때문에 (683.3 mm month⁻¹) 유효우량을 통한 관개가 충분히 이루어져 농민이 인위적인 관개를 수행할 필요성이 낮아졌으며, 관개되지 않은 수량이 하천으로 회귀되었기 때문이다. 또한, 대상 지구에서 7월 초순과 중순에 중간낙수 활동이 이루어진 점도 영향을 미쳤을 것으로 사료된다 (KARICO, 2005). Kim et al. (2005)은 본 연구와 같이 용수로 회귀수량과 용수로 회귀율을 5년 동안 조사하였으며, 그 결과 용수로 회귀수량과 용수로 회귀율은 모두 6월에 각각 12.4~17.1 mm

day⁻¹, 55~71%로 가장 높게 나타나며, 이는 해당지구의 6월 말에 중간낙수가 실시되었기 때문으로 보고하고 있다. 중간낙수 시기에는 토양을 건조시키기 위하여 관개를 하지 않는 것이 일반적이다 (Chung et al., 2006). Lee et al. (2008)의 용수로 회귀율 관측 결과에 따르면 양수장 지구는 37.1%, 저수지 지구는 36.2%, 지선 지구는 30.9%인 것으로 보고하고 있으며, 본 연구의 저수지 관개지구는 7월 용수로 회귀율이 Lee et al. (2008)의 저수지 지구와 비슷하게 나타났다.

배수로 회귀수량은 5월에 19.8 mm day⁻¹로 가장 높게 나타났고, 그 이후로 6월 ≈ 8월 ≈ 9월 > 7월 순으로 나타났다 ($p < 0.05$). 대상지구의 배수로 회귀율은 5월에 72.3%로 가장 높게 나타나며, 이는 5월의 공급량이 가장 높은 점과 연관이 있을 것이다. 하지만, Chung and Park (2004)에 의하면 공급량이 6월에 가장 높았으나 배수로 회귀율은 7월에 가장 높게 나타나기도 하며 Choo (2004a)에 의해서도 공급량이 6월에 가장 높았으나 배수로 회귀율은 9월에 가장 높게 나타나기도 하는 등, 공급량이 가장 높게 나타나는 시기에 회귀율이 가장 높게 나타나는 것은 아니다. 이는 선행연구에서는 공급량이 가장 높았던 시기에 관개량 중 많은 양이 논에서 소비되어 회귀수량이 낮게 나타난 것으로 사료된다. 수원지방의 영농비 필요수량이 638~740 mm의 범위로 보고되는 점을 고려하면 (Yoo et al., 2008), 본 연구에서의 5월 평균 공급량 849.4 mm month⁻¹는 필요수량을 크게 초과하는 수치였을 것으로 사료되며 이로 인해 5월의 회귀율이 가장 높게 나타났을 것이다. 7월에 배수로 회귀율이 가장 낮게 나타나는 원인은 중간낙수 시기의 영농 활동에 따라 관개가 중단되어 비교적 적은 양이 배수되었기 때문으로 사료된다.

나. 상관분석

본 연구에서는 농업용수 공급량과 신속회귀수량 구성성분

에 대해 상관분석을 수행하였으며, 그 결과는 Fig. 3과 같다. 농업용수 공급량과 배수로 회귀수량의 상관관계가 높은 것은 충분한 관개가 이루어져 많은 수량이 물꼬를 넘어 하천으로 회귀되는 것을 의미한다. 또한, 농업용수 공급량과 용수로 회귀수량 사이의 상관식의 기울기가 낮으면 공급량 중 포장으

로 흘러들어가는 비율이 높은 것을 의미하고, 기울기가 높으면 상대적으로 많은 공급량이 포장으로 유입되지 않고 하천으로 회귀되는 것을 의미한다.

배수로 회귀수량은 7월을 제외하면 농업용수 공급량과 0.76~0.86의 높은 상관관계가 나타났다 ($p < 0.01$). 용수로 회

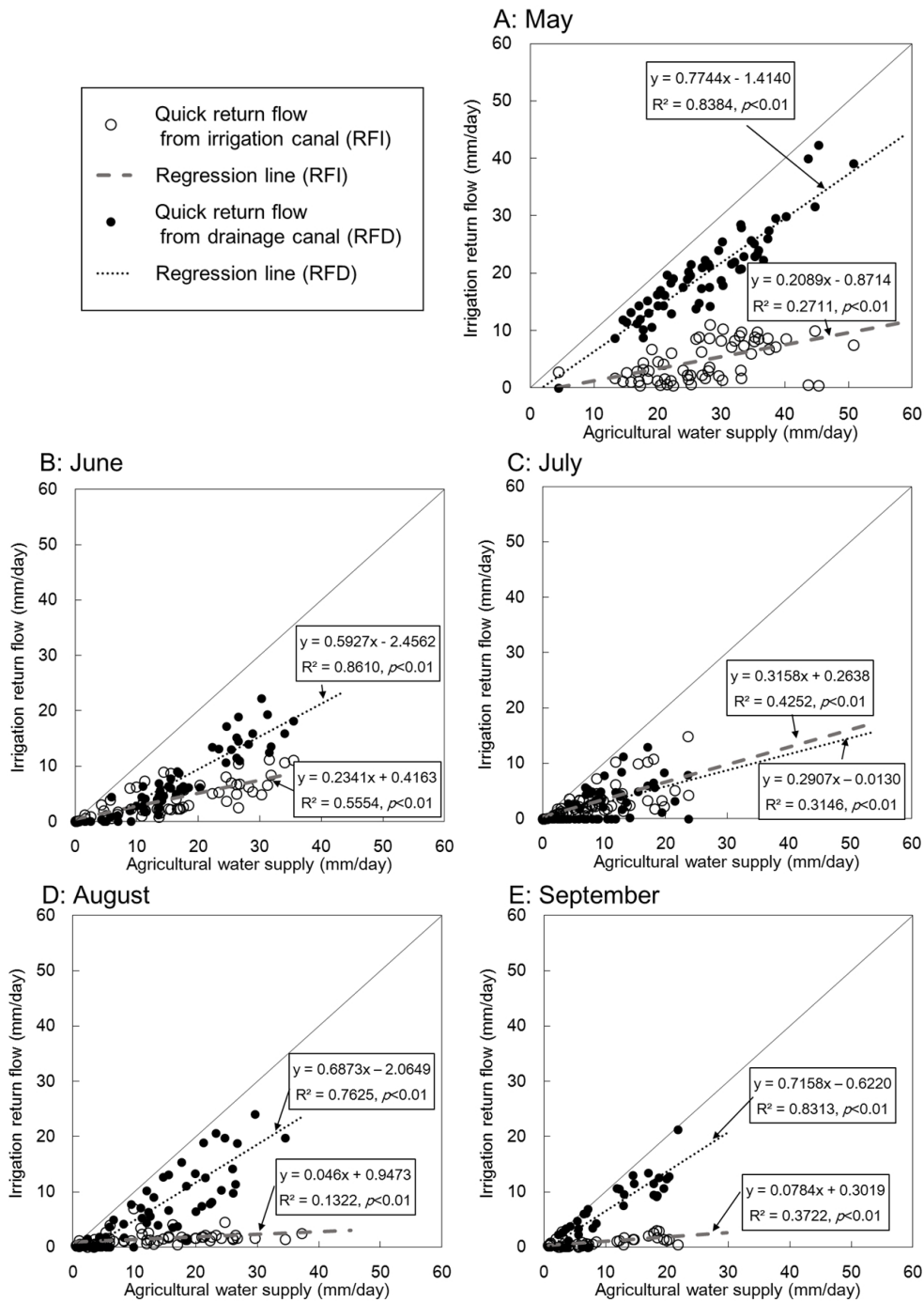


Fig. 3 Monthly relationships between agricultural water supply and irrigation return flow components during the growing season

귀수량은 농업용수 공급량과 6월과 7월에 각각 0.56과 0.42로 비교적 높은 상관관계를 보였다. Kim et al. (2005)은 하천 수 관개지역에 대해 농업용수 공급량과 용수로 회귀수량과의 상관분석을 수행하였으며, 그 결과 5~6월에 유의수준 1% 이내의 상관관계가 나타나는 것으로 보고하고 있다.

3. 본 연구 및 선행 연구 결과 비교를 통한 고찰

Table 3은 강우량, 농업용수 공급량, 관개회귀수량, 그리고 회귀율에 대한 본 연구 결과와 선행 연구 결과를 연 단위로 비교하여 보여주고 있다

본 연구에서 농업용수 공급량은 2011년 2,324 mm, 그리고 2012년 2,008 mm로 나타났으며, 총 회귀수량은 2011년 1,965 mm, 그리고 2012년 1,588 mm로 나타났다. 선행 연구에서의 관개회귀수량 산정 결과를 살펴보면 317~1,548 mm의 범위로 본 연구결과와 비교하면 낮은 수치인 것으로 나타났다(Im, 2000; Chung and Son, 2001; Choi and Choi, 2002; Choo, 2004a; Choo, 2004b; Kim et al. 2010). 이는 선행 연구 중 Choi and Choi (2002)의 연구를 제외하면 농업용수 공급량이 445~1143 mm로 본 연구 결과와 비교하면 크게 낮아 배수되는 수량 또한 낮아졌기 때문에 사료된다. Choi and

Choi (2002)의 연구는 신속회귀수량만을 고려한 결과로 지연회귀수량이 고려되면 총 회귀수량 결과가 더 커질 것으로 사료된다. 우리나라의 평균 공급량이 약 1,250 mm으로 보고되고 있는 점을 고려하면(Yoon et al., 2003), 본 연구 대상지 이외에 Oh et al. (2002)의 연구대상지에서 1999년의 경우 3,690 mm, 2000년의 경우 3,160 mm으로, 그리고 Lee et al. (2014)에서도 2,056 mm으로 농업용수 공급량이 상당히 높게 관측되고 있어, 이들 지역 또한 관개회귀수량이 높게 나타날 것으로 사료된다.

선행 연구에서의 총 회귀율은 32.2~86.0%의 범위로 Kim et al. (2010)의 결과인 대평양수장 지구의 2003년에 가장 높았으며, Im (2000)의 결과인 기천저수지 지구에서 가장 낮게 나타났다. 본 연구의 이동저수지 지구는 2011년의 경우 84.6%, 2012년의 경우 79.1%로 상당히 높게 나타났으나, 선행 연구 결과의 범위에는 포함되는 것이 확인되었다. 신속회귀수량의 회귀율은 본 연구에서 72.7~79.8%로 나타났으며, 선행연구결과에서의 3.7~52.4%와 비교하면 상당히 큰 수치로 나타났다. 이는 본 연구의 농업용수 공급량은 선행 연구 결과의 공급량에 비해 높게 나타났으나, 논에서의 소비수량은 비교적 일정하기 때문에 회귀율이 상대적으로 본 연구에서 크게 나타난 것으로 사료된다.

Table 3 Comparison of irrigation return flow components

References	Year	Rainfall (mm)	Agricultural water supply (mm)	Quick return flow		Delayed return flow		Total return flow	
				Amount (mm)	Ratio (%)	Amount (mm)	Ratio (%)	Amount (mm)	Ratio (%)
This study	2011	1,591	2,324	1,854	79.8	111	4.8	1,965	84.6
	2012	1,355	2,008	1,460	72.7	128	6.4	1,588	79.1
Kim et al. (2010) ^a	2003	1,336	445	234	52.4	150	33.6	383	86.0
	2004	1,003	1,053	478	45.4	170	16.1	648	61.5
Chung and Park (2004) ^a	2003	-	600	182	30.2	141	23.5	323	53.7
Choo (2004a) ^a	2003	-	655	281	43.0	36	5.5	317	48.5
Choo (2004b) ^a	2003	-	662	267	40.3	61	9.2	328	49.5
Choi and Choi (2002) ^a	2002 ^c	-	839	171	20.4	362	43.2	533	63.5
	2002 ^d	-	710	26	3.7	381	53.7	408	57.4
Chung and Son (2001) ^b	1999	1,333	3,608	1,170	32.4	-	-	1,170	32.4
	2000	982	3,971	1,548	39.0	-	-	1,548	39.0
Im (2000)	1998 ^e	1,237	1,004	105	10.5	230	22.9	335	33.3
	1999 ^e	921	1,143	110	9.6	258	22.6	368	32.2
	1998 ^f	1,237	918	197	21.5	240	26.1	437	47.6
	1999 ^f	921	1,085	165	15.2	253	23.4	419	38.6

^a calculated irrigation return flow only during non-rainy season

^b calculated only quick return flow

^c and ^d were measured at the same time in different regions

^e and ^f were measured at the same time in different regions

한편, Song et al. (2013a)에 따르면 이동저수지 관개지구의 전체 면적 (1,788.7 ha)에 대한 2001~2009년 연별 공급량은 1,311.8~1,848.6 mm로 관측되고 있으며, 본 연구 결과에서의 10.3 ha 광역 논에 대한 공급량에 비해 더 낮게 관측되고 있다. 실제 관개지구에서는 모든 면적에 대해 용수가 균등하게 관개되지 않을 수 있으며 (Park, 2007), 위와 같은 차이는 본 연구의 10.3 ha 광역 논에 대해 관개가 집중되는 물관리가 이루어졌기 때문으로 사료된다. 따라서 이동저수지 관개지구 전체에 대한 농업용수 회귀율은 본 연구 결과에 비해 낮아질 가능성이 있을 것으로 사료된다.

본 연구와 선행 연구결과를 포함한 농업용수 회귀율 분석 결과는 Im (2000)와 Choi and Choi (2002)의 결과를 제외하고는 모두 우리나라 수자원장기종합계획 (MOLTM, 2011)에서 제시하는 35%를 벗어나고 있다. Choi and Choi (2002)의 결과는 지연회귀수량에 따른 회귀율이 고려되면 35%보다 높아질 것으로 사료된다. 따라서, 향후 합리적이며 경제적인 수자원 이용 및 관리를 위해서는 축적된 조사 결과를 바탕으로 한 회귀율 자료가 물이용 계획에 반영되어야 할 것으로 사료된다 (Kim et al., 2010).

Noh (2003)에 의하면, 회귀수량을 고려하여 유출량을 모의한 경우가 고려하지 않은 경우에 비해 실측치에 더 유사하게 나타나는 것으로 보고하고 있다. 본 연구에서와 같이 용수 공급이 용이한 지역은 관개회귀수량을 고려하지 않고 하천 유출량을 모의하는 경우는 오차가 더 커질 것으로 예상되며, 향후 이와 같은 지역에 대한 수문-수질 모델링 수행 시 관개회귀수량은 고려되어야 할 중요한 성분이라 사료된다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 용수 공급이 용이한 관개지구에서의 농업용수 회귀특성을 분석하기 위하여 이동저수지 관개지구를 대상으로 2011~2012년 기간의 관개회귀수량을 산정하였다. 관개회귀수량은 용수로 회귀수량, 배수로 회귀수량, 그리고 지연회귀수량으로 구분하여 모니터링과 모델링 기법을 병행하여 산정하였으며, 산정한 관개회귀수량 구성성분의 시기별 특성을 통계적인 방법을 이용하여 분석하였다.

본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 대상지구의 일별 용수로 회귀수량, 배수로 회귀수량, 지연회귀수량, 그리고 총 회귀수량은 각각 0.0~14.9 mm day⁻¹, 0.0~42.3 mm day⁻¹, 0.4~1.8 mm day⁻¹, 그리고 0.6~48.6 mm day⁻¹의 범위로 나타났으며, 그 양의 시기적 편차가 큰

것으로 분석되었다.

2. ANOVA를 통한 월별 일 평균 비교 결과, 농업용수 공급량은 5월에 27.4 mm day⁻¹로, 용수로 회귀수량은 5월과 6월에 각각 4.9 mm day⁻¹과 4.1 mm day⁻¹로, 그리고 배수로 회귀수량은 5월에 19.8 mm day⁻¹로 다른 기간에 비해 유의수준 5% 이내에서 높게 나타났으며, 해당시기의 관개회귀수량이 가장 높게 나타난 원인은 농업용수 공급량이 해당시기에 높았기 때문으로 사료된다.
3. 배수로 회귀율은 5월에 72.3%로 용수로 회귀율은 7월에 34.6%로 가장 높게 나타났다. 용수로 회귀율과 용수로 회귀수량이 높게 나타난 시기가 서로 달랐는데, 이는 7월의 공급량이 낮아 용수로 회귀수량이 낮았으나, 강우량이 높았고 중간낙수가 실시되어 공급량 중 용수로를 통해 회귀되는 비율이 높아진 것으로 분석되었다.
4. 농업용수 공급량과 배수로 회귀수량 및 용수로 회귀수량의 상관분석 결과, 배수로 회귀수량은 7월을 제외하면 공급량과 0.76~0.86의 높은 상관관계가 나타났고, 용수로 회귀수량은 6월과 7월에 각각 0.56과 0.42로 높은 상관관계를 보였다.
5. 본 연구 대상지의 총 회귀수량은 2011년 1,965 mm, 2012년 1,588 mm으로 나타났고, 농업용수 회귀율은 2011년 84.6%, 2012년 79.1%로 선행연구결과와 비교하여 비교적 높게 나타났다.

본 연구에서와 같이 농업용수 공급량이 높게 나타나는 지역은 관개회귀수량과 농업용수 회귀율이 높게 나타나며 이는 하천 유량을 구성하는 주요한 성분으로 사료된다. 또한, 관개회귀수량은 수문-수질 모델링 시에 고려되어야 할 주요 요인으로 사료된다. 본 연구 결과는 관개회귀수량에 대한 전반적인 이해를 넓히며, 물이용 계획 수립을 위한 기초자료로 이용될 수 있을 것이라 기대한다.

사 사

본 연구는 농림수산식품기술기획평가원의 “농촌용수 물순환 종합해석 모형 기술 개발”과제 (과제번호: 112041-3)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Causape, J., D. Quilez, and R. Aragues, 2006. Irrigation efficiency and quality of irrigation return flows in the Ebro

- river basin: an overview. *Environmental monitoring and assessment* 117: 451-461.
2. Chien, C. P., and W. T. Fang, 2012. Modeling irrigation return flow for the return flow reuse system in paddy fields. *Paddy Water. Paddy and Water Environment* 10: 187-196.
 3. Choi, J. D., and Y. H. Choi, 2002. Return flow rate estimation of irrigation for paddy culture in Chuncheon region of the North Han river basin. *KCID Journal* 9(2): 68-77 (in Korean).
 4. Choo, T. H., 2004a. A study on return flow ratio of irrigation for a paddy field in pumping station by water balance model. *Journal of Korea Water Resources Association* 37(2): 249-255 (in Korean).
 5. Choo, T. H., 2004b. Return flow analysis of irrigation for a paddy field neighboring the downstream of Weolgok reservoir in the Nakdong river basin. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 24:(2B) 123-129 (in Korean).
 6. Chung, H. W., S. J. Kim, J. S. Kim, J. K. Noh, K. W. Park, J. G. Son, K. H. Lee, N. H. Lee, S. O. Chung, J. D. Choi, and J. Y. Choi, 2006. *Irrigation and drainage engineering*. Paju, Dongmyungsa (in Korean).
 7. Chung, S. O., and K. J. Park, 2004. Irrigation return flow measurements and analysis in a small size paddy area. *Journal of Korea Water Resources Association* 37(7): 517-526 (in Korean).
 8. Chung, S. O., and S. H. Son, 2001. Return flow analysis of paddy field by water balance model. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 43(2): 59-68 (in Korean).
 9. Dewandel, B., J. M. Gandolfi, de Condappa, and S. Ahmed, 2008. An efficient methodology for estimating irrigation return flow coefficients of irrigated crops at watershed and seasonal scale. *Hydrological Processes* 22(11): 1700-1712.
 10. Gosain, A. K., S. Rao, R. Srinivasan, and N. Gopal Reddy, 2005. Return-flow assessment for irrigation command in the Palleru river basin using SWAT model. *Hydrological Processes* 19: 673-682.
 11. Im, S. J., 2000. Modeling irrigation return flow from paddy fields on agricultural watersheds. Ph.D. diss., Seoul, Seoul National University (in Korean).
 12. Im, S. J., and S. W. Park, 2006. Prediction of daily streamflow on agricultural watershed. *KCID Journal* 13(2): 86-94 (in Korean).
 13. Jafari, H., E. Raeisi, M. Zare, and A. A. K. Haghighi, 2012. Time series analysis of irrigation return flow in a semi-arid agriculture region, Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science* 58(6): 673-689.
 14. Kim, H. K., T. I. Jang, S. J. Im, and S. W. Park, 2009. Estimation of irrigation return flow from paddy fields considering the soil moisture. *Agricultural Water Mangement* 96: 875-882.
 15. Kim, J. S., S. Y. Oh, K. Y. Oh, and J. W. Cho, 2005. Delivery management water requirement for irrigation ditches associated with large-sized paddy plots in Korea. *Paddy and Water Environment* 3: 57-62.
 16. Kim, T. C., H. C. Lee, and J. P. Moon, 2010. Estimation of return flow rate of irrigation water in Daepyeong pumping district. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 52(1): 41-49 (in Korean).
 17. Korea Agricultural and Rural Infrastructure Corporation (KARICO), 2005. A study on water supply methods considering variation of farming conditions in paddy field, 160-163. Uiwang, Gyeonggi: Korea Agricultural and Rural Infrastructure Corporation (in Korean).
 18. Lee, J. B., J. Y. Lee, S. H. Li, J. R. Jang, I. G. Jang, and J. S. Kim, 2014. Nutrient balance in the paddy fields watershed with a source of river water. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(5): 11-19 (in Korean).
 19. Lee, Y. J., P. S. Kim, S. J. Kim, Y. K. Jee and W. J. Joo, 2008. Estimation of water loss in irrigation canals through field measurement. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 50(1): 13-21 (in Korean).
 20. Lin, Y., and L. A. Garcia, 2012. Assessing the impact of irrigation return flow on river salinity for Colorado's Arkansas river valley. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 138: 406-415.
 21. Masashi, Y., M. Toshisuke, T. Keiji, N. Fumikazu, and T. Hiroshi, 2014. Proposal of new return flow analysis by replacement-in-order method for paddy irrigation water. *Paddy and Water Environment* 10: 425-438.
 22. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MOLTM), 2011. Long-term Korea National Water Resources Plan, Gwacheon, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (in Korean).
 23. Noh, J., 2003. Applicability of the DAWAST model considered return flows. *Journal of Korea Water Resources Association* 36(6): 1097-1107 (in Korean).
 24. Oh, S. Y., J. S. Kim, K. S. Kim, S. J. Kim, and C. G. Yoon, 2002. Unit loads of pollutants in a paddy fields area with large-scaled plots during irrigation seasons. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 44(2): 136-147 (in Korean).
 25. Park, K. U., 1997. Optimizing water distribution at irrigation units from a canal system. M.S. diss., Seoul, Seoul National University (in Korean).
 26. Poch-Massegu, R., J. Jimenez-Martinez, K. J. Wallis, and F. Ramirez de Cartagena, 2014. Irrigation return flow and nitrate leaching under different crops and irrigation methods in Western Mediterranean weather conditions. *Agricultural Water Manage-*

- ment 134: 1-13.
27. Song, J. H., 2013. A daily surface drainage simulation model for irrigation districts consisting of paddy and protected cultivation. M.S. diss., Seoul, Seoul National University (in Korean).
 28. Song, J. H., M. S. Kang, I. H. Song, S. H. Hwang, J. H. Park, and J. H. Ahn, 2013a. Surface drainage simulation model for irrigation districts composed of paddy and protected cultivation. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(3): 63-73 (in Korean).
 29. Song, J. H., M. S. Kang, I. H. Song, S. H. Hwang, J. H. Park, S. M. Jun, K. U. Kim, and J. R. Jang, 2013b. Analysis of nutrient load balance in the reservoir irrigated paddy block. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(6): 167-175 (in Korean).
 30. Yoo, S. H., J. Y. Choi, and M. W. Jang, 2008. Estimation of design water requirement using FAO Penman-Monteith and optimal probability distribution function in South Korea. *Agricultural Water Mangement* 95: 845-853.
 31. Yoon, C. G., J. H. Ham, and J. H. Jeon, 2003. Mass balance analysis in Korean paddy rice culture. *Paddy and Water Environment* 1: 99-106.