



A study on estimation of agricultural water usage in river consider hydrological condition

Kwak, Jaewon^{a*}

^aResearcher, Han River Flood Control Office, Ministry of Environment, Seoul, Korea

Paper number: 21-017

Received: 10 March 2021; Revised: 25 March 2021; Accepted: 25 March 2021

Abstract

The agricultural water, which occupy about 61% of total water usage in the South Korea, is significantly objective to achieve effective water resources management. The objective of the study is to suggest a simple method in actual practice that could be used to estimate agricultural water usage in river considering hydrological condition. Historical record of agricultural water usage and runoff, which take account for hydrological condition of the basin, were obtained for totally 27 river basins. As the result, the high threshold value of the agricultural water usage rates compared to maximum usage amount has a particular correlations to the percent of normal year runoff for last 2 month, and threshold line of agricultural water usage rates was derived using the quantile regressions. Finally, two dimensionless threshold line and empirical formulas that described the correlation between the percent of normal year runoff for last 2 month and the agricultural water usage rate compared to maximum usage amount were derived. Also, the simple criteria to select which line and formula based on the characteristics of the basins was suggested but it need further studies. The result of the study could be used as an elementary data in actual practice for water resources management.

Keywords: Estimation of agricultural water use, Quantile regression

수문상황을 고려한 하천에서의 농업용수 사용량추정 연구

곽재원^{a*}

^a환경부 한강홍수통제소 시설연구소

요 지

농업용수는 우리나라의 용수사용량 중에 61%를 차지하고 있으며, 효율적인 수자원관리를 달성하기 위한 핵심적인 관리목표 중 하나이다. 본 연구에서는 댐과 저수지 등을 관리하는 실무자가 수문상황에 따른 하천에서의 농업용수 임계사용량을 간편하게 추정하기 위한 방법론을 제안하고자 하였다. 이를 위하여, 4대강 권역의 주요 27개 하천유역을 대상으로 하역 유역의 유출량과 하천수 사용실적을 수집하였다. 하천에서의 농업용수 사용과 예년대비 유출율이 유의미한 상관관계가 있음을 나타내었으며, 분위회귀를 이용하여 농업용수 최대사용을 대표하는 임계곡선으로 제시하고 27개 하천유역에 적용하였다. 최종적으로 예년대비 2개월 유출율에 따른 농업용수 최대사용량대비 사용률로 표현되는 두 가지 임계곡선과 식을 제시하였다. 또한, 유역특성을 비교하여 삼림면적 대비 농지면적의 비를 기준으로 임계곡선 유형을 결정할 수 있도록 하였으나, 추가적인 자료 수집과 분석이 필요할 것으로 판단된다. 본 연구에서 제시한 방법은 하천 농업용수 임계사용량을 간편하게 추정하고 활용할 수 있으므로 수자원관리 실무에서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

핵심용어: 농업용수 사용량 추정, 분위회귀법

*Corresponding Author. Tel: +82-2-590-9938
E-mail: firstsword@naver.com (J. Kwak)

1. 서론

우리나라의 수자원부존량은 1,323억 m^3 이며, 이중에서 약 28%인 372억 m^3 의 수자원을 각종 용수로 활용하고 있다. 이러한 용수 중에서도 가장 큰 용수사용량은 농업용수로서 전체 용수량의 61%에 달하는 152억 m^3 에 달한다(ME and K-water, 2020). 2000년대 후반부터 작부여건의 변화로 인하여 농지면적은 점차 감소 추세를 보이고 있으나(Seung *et al.*, 2017), 아직까지도 농업용수는 모든 용수 중에서 가장 큰 부분을 차지하고 있다(MOLIT, 2016). 따라서, 원활한 수자원의 관리를 위해서는 농업용수에 대한 면밀한 관리가 이루어져야 하나, 아직까지도 농업용수 사용량에 대한 연구는 여러가지 요인으로 인하여 미흡한 실정이다.

일반적으로 생활 및 공업용수는 과거의 사용패턴과 사용량을 분석하여 원단위 기반의 역학적 모델을 통하여 산정되며, 급수보급률, 유수율 등의 외부인자도 향후 계획이나 과거 자료를 근거로 적용하고 있기 때문에 실제 사용량과 큰 차이를 나타내지 않는다(Lim *et al.*, 2017). 이에 반하여 농업용수는 인위적인 요소뿐만 아니라 기후나 토양 등의 자연적인 영향에 크게 좌우되므로 지역별·계절별 편차가 심하게 나타나며, 물관리 관행 등 여러 가지 인위적인 간섭요인에 따라서 실제 사용량 또는 필요량과 큰 차이를 보일 수가 있다(Lee *et al.*, 2016; Kim and Kim, 2017). 때문에 농업용수 사용량을 추정하는 방법은 크게 필요수량과 순물소모량 기반의 방법으로 구분된다(Kim *et al.*, 1994). 필요수량의 개념은 대상 작물의 생산성을 극대화하기 위하여 필요한 수량을 산정하는 방법으로서, 경작지에 필요한 순용수량을 산정하고 여기에 도수·관리손실을 고려한 조용수량 기반의 농업용수 수요량을 결정하는 방법이다(Lee, 1988). 이에 반하여 순물소모량은 경작지에서의 물 사용으로 인하여 유역에서 소모된 수자원을 산정하고 이를 농업용수 수요량으로 간주하는 방법이다(Kim *et al.*, 1994). 수자원장기종합계획(MOLIT, 2016)에서 산정한 바를 보면, 수리안전담의 필요수량은 1,200 mm, 순물소모량은 750 mm으로 둘 사이에 약 450 mm의 차이를 보인다. 따라서, 농업용수 수요량은 필요수량과 물수지 분석 기반의 순물소모량을 동시에 고려하여 산정되는 경우가 많았으나, 필요수량과 물수지 분석만으로 용수공급량을 판단하기에는 물관리 관행 등 여러 가지 인위적인 간섭요인이 많아 역학적 모델의 적용이 쉽지 않다(Lee *et al.*, 2016; Boutraa, 2010; Shankar *et al.*, 2013; Putra and Yuliando, 2015).

또한, 하천에서의 농업용수의 사용량은 수문기상조건이나 가뭄이 악화됨에 따라서 오히려 증가하게 된다. 이는 토양수분

의 부족으로 인하여 필요수량이 증가함과 더불어 관정이나 저수지 등의 수위저하로 인하여 부족한 용수를 하천수로 대체하기 때문이다(Lim *et al.*, 2017). 따라서, 시기별 공급 패턴 및 사용량 등을 기반으로 추계학적 전망과 향후 농업용수 사용량도 예측하는 새로운 접근방식의 필요성도 논의되고 있다(Lee *et al.*, 2016). 그에 따라서, 저수지의 수위계측자료를 통하여 하천 또는 농수로에서의 농업용수 공급량을 추정하거나(Bang *et al.*, 2019), 기존의 역학적 모델에 따른 필요수량과 실제 공급량 간의 차이(Song *et al.*, 2015) 등과 같이 실제 농업용수 사용량에 대한 고찰(Basche *et al.*, 2016; Park and Noh, 2017; No *et al.*, 2018)도 이루어졌다. 또한, 기후변화에 따른 향후 농업용수 수요량의 변화(Chung, 2009), 선행강수에 따른 하천에서의 농업용수 사용량(Moon *et al.*, 2009), 강수량과 농업용수 사용량의 상관관계(Choi and Park, 2019) 등과 같이 수문기상조건에 따른 농업용수 사용량도 고찰되어 왔다. 그러나, 자료 수집 등의 여건이 불리하여 관련 연구가 부족하며 특히 현장 실무에서 강수량 등을 복합적으로 고려한 운영이 어렵다는 점을 감안하면 수위 등 직관적인 기준을 이용하여 현장에서 적용할 수 있는 방법론이 필요한 실정이라 할 수 있다.

이에 본 연구에서는 댐과 저수지 등을 관리하는 실무자가 수문상황에 따른 하천에서의 농업용수의 사용량을 간편하게 추정하기 위한 방법론을 제안하고자 한다. 4대강 권역의 주요 27개 하천유역을 대상으로 하여 수문상황을 대표하기 위한 하천 유출량과 하천수 사용실적을 2001년부터 2020년까지 수집하였으며, 두 자료 사이의 특성을 분석하였다. 2개월 지속기간의 예년대비 유출율이 하천에서의 농업용수 최대사용량과 연관성이 있음을 확인하고, 분위회귀법을 이용하여 하천내 농업용수사용량 임계곡선을 유도하고 그 적용방법을 고찰하였다.

2. 이론적 배경

2.1 대상유역 및 자료

현재, 하천법에서는 취수량이 공업용수 1,000 m^3 /일, 생활용수 5,000 m^3 /일, 농업용수 8,000 m^3 /일을 초과하는 모든 하천수 사용자에게 대하여 사용량을 확인할 수 있는 계측시설을 설치하고 계획 및 사용실적을 환경부장관에게 통보하도록 규정하고 있다(No *et al.*, 2018). 따라서, 2000년대부터 우리나라 전역에 대한 하천수 사용기록이 존재한다고 할 수 있다. 다만, 하천수 사용시설의 개수, 계측시설 미설치 및 미등록시설, 2008년 하천법 개정에 따른 지방하천의 사용기록 이관 문제 등으로 인하여 전역의 자료를 활용할 수는 없다.

본 연구에서는 하천수 사용량 기록에 대한 검토를 통하여 분석 가능한 27개 유역과 선정된 유역의 수문상황을 대표할 수 있는 유량관측지점을 선정하였다(Fig. 1 및 Table 1). 낙동강 동해권 수계나 영산강 서해권 수계와 같이 해양과 인접한

단독수계의 경우에는 농업용수 사용량 및 경향이 여타의 유역과 달라 제외하였으며, 북한강 유역의 경우에는 대부분의 농업용수를 관로를 통하여 공급받고 있으므로 하천수 취수시설과 다른 경향을 보여 제외하였다. 하천수 사용량 기록은 환경부

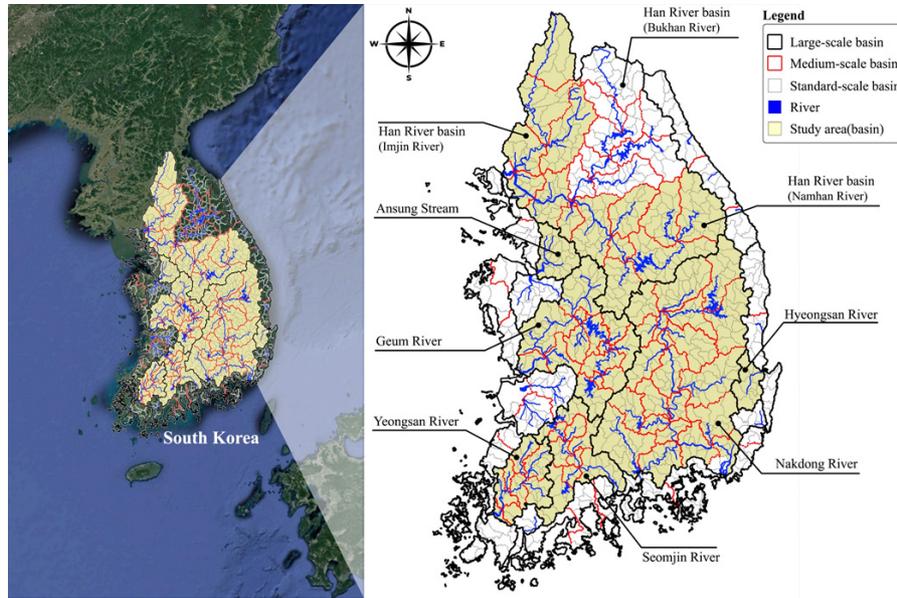


Fig. 1. Study area and basin

Table 1. Selected basin and its hydrological (hydr.) station

River	Content	Basin and its hydr. station				
Han River	Basin Name	Han River	Seom River	Imjin River	Chongmi Stream	Bokha Stream
	Hydr. station	Yeojusi (Yeojudae-gyo)	Wonjusi (Jijungdae-gyo)	Pajusi (Biryongdae-gyo)	Yeojusi (Wonbugyo)	Yeojusi (Heungcheondaegyo)
	Basin Name	Kyoungan Stream	Dal Stream	Ansung Stream		
	Hydr. station	Gwangjusi (Gyeongang-gyo)	Goesangun (Mokdogyo)	Anseongsi (Guncheonri)		
Geum River	Basin Name	Geum River	Miho Stream	Nonsan Stream		
	Hydr. station	Gongju-SI (Geumgang-gyo)	Cheongju-si (Mihocheong-gyo)	Nonsan-si (Nonsandaegyo)		
Nakdong River	Basin Name	Nakdong River	Naesung Stream	Gam Stream	Kumho River	Hwang River
	Hydr. station	Hamangun (Gyenaeri)	Yecheongun (Gopyeong-gyo)	Gumisi (Seonjugyo)	Yeongcheonsi (Geumchang-gyo)	Hapcheongun (Hwanggang-gyo)
	Basin Name	Nam River	Milyang River	Yangsang Stream	Hyeongsan River	
	Hydr. station	Uiryeongun (Jeongam-gyo)	Miryangsi (Yongpyeongdong)	Yangsansi (Yangsang-gyo)	Gyeongjusi (Gangdongdaegyo)	
Yeongsan River	Basin Name	Yeongsan River	Hwangryoung River	Jisuk Stream	Gomakwon Stream	Hanpyoung Stream
	Hydr. station	Gwangju (Geukrak-gyo)	Gwangju (Pyungrim-gyo)	Najusi (Nampyeong-gyo)	Hampyeonggun (Wongomak-gyo)	Hampyeonggun (Hakyagyo)
Seomjin River	Basin Name	Seomjin River	Yo Stream			
	Hydr. station	Namwonsi (Geumgok-gyo)	Namwonsi (Dongrim-gyo)			

하천수 사용 관리시스템(HRFCO, 2021a)에서 습득하였으며, 유역 대표 유출량자료는 2000~2019년은 수문조사연보의 공인된 유출량자료(ME, 2019), 2020년은 수자원종합정보시스템(HRFCO, 2021b)에서 수집하였다. 그 외에 분석에 필요한 각종 유역 특성은 수자원종합정보시스템(HRFCO, 2021b) 및 한국수자원공사 정보페이지(K-water, 2021)를 통하여 수집하였다. 또한, 수집한 유출량 자료는 유향곡선 등을 이용하여 이상치를 제거하였다.

2.2 분위회귀

분위회귀는 조건부의 분위함수를 추정하는 방법으로서 조건부 평균함수를 추정하는 일반적인 회귀모형과 차이가 있다 (Koenker and Bassett, 1978; Cade and Noon, 2003). 일반적인 회귀분석은 잔차의 제곱합을 최소화하기 위해서 표본의 평균이나 중간값을 적용하나, 분위회귀방법은 특정 분위수에 대한 가중된 절대잔차의 합을 최소화하는 모수를 추정하게 된다. 회귀모형은 회귀추정에 위해 다음과 같은 선형회귀모형을 가정한다.

$$y_i = \alpha x_i + \epsilon_i \tag{1}$$

여기서, x_i 는 i 번째 독립변수, ϵ_i 은 오차로서 0에 대해서 대칭인 독립항등분포(i.i.d) 확률변수이다. α 는 모수로서 최소제곱 또는 여타의 최적화 기법을 통하여 추정되며, 일반적으로 다음과 같은 최소화 문제를 만족하는 모수 $\hat{\alpha}$ 를 구함으로써 얻어진다.

$$\hat{\alpha} = \min \sum_{i=1}^n (y_i - x_i \alpha)^2 \tag{2}$$

또한, 각각의 독립변수 x_i 에 대해서 종속변수 y_i 의 k 번째 분위수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k = \int_{-\infty}^{x_i \alpha_k} f_y(y_i | x_i) dz \tag{3}$$

여기에서 f_y 는 x_i 에 대한 y_i 의 확률밀도함수이므로 분위회귀에 대한 모수 $\hat{\alpha}$ 는 다음과 같은 최소화 문제를 만족하는 해를 구함으로써 얻어진다.

$$\hat{\alpha} = \min \sum_{i=1}^n \theta(y_i - x_i \alpha) \tag{4}$$

$$\theta(x) = kx I(x > 0) + (k-1)x I(x < 0)$$

분위회귀분석은 이상치의 영향을 덜 받으면서 효율적인 추정이 가능한 장점이 있으며, 회귀오차의 모수적 분포에 대한 가정들에서 자유로울 수 있어 이분산 자료의 분석에도 유용하게 활용될 수 있다(Koenker, 2005).

3. 적용 및 결과

3.1 수문상황에 따른 농업용수 사용경향

농업용수의 사용량은 수문상황 또는 가뭄이 악화됨에 따라서 오히려 증가하게 된다(Lim *et al.*, 2017). 따라서, 농업용수의 사용량은 수문상황과 밀접하게 관련될 것으로 추정할 수 있으며, 수문상황을 대표하는 유출량을 통하여 연관지을 수 있을 것이다. 이를 분석하기 위하여 본 연구의 대상인 27개 유역에 대하여 일 평균 유출량자료와 농업용수 취수량자료를 수집하였다. 일반적인 댐·보·저수지의 운영계획은 월 단위로 관리되고 있으므로(Oh *et al.*, 2019) 수집된 일 자료를 이용하여 월 단위의 사용량 자료로 산정하였다(Fig. 2(a)). 농업용수 취수량자료의 경우에는 매년 신규 허가 및 허가변경·취소로 인하여 하천수 사용허가의 절대량이 변동되어 일관성 있는 분석이나 비교가 어렵다. 또한, 이상적인 농업용수 사용에서는 하천수사용 허가량과 최대사용량이 동일하여야 하나, 현실적인 제약으로 인하여 허가량 대비 적게 사용하거나 더 많은 양을 사용하는 등 허가량을 기준으로 분석하기에도 다소의 어려움이 있다. 예를 들어서, 영산강유역의 고막원천의 경우 농업용수 최대사용량이 허가량대비 160%에 달하였으며, 반대로 밀양강의 경우에는 60% 수준에 그쳤다. 따라서, 농업용수 사용량 실적자료를 무차원화 시킨 농업용수 최대사용량대비 사용율(Water usage rate compared to maximum usage amount; 이하 'WUM'로 표기, %)로 변환하여 사용하였으며, 비관개기에는 농업용수 사용이 없거나 극히 적으므로 비관개기의 농업용수 실적은 분석에서 제외하였다. 수집한 자료를 시계열로 도시한 Fig. 2(a)의 결과를 보면 유출량이 예년(2001~2020) 대비 적을 경우 전체적인 사용률이 증가하는 경향을 보이거나, 명확한 경향성을 보이지는 않는다.

이를 정량적으로 나타내기 위해서 예년대비 유출율과 농업용수 최대사용량대비 사용율 산포도로 나타내었으며, 그 결과는 Fig. 2(b)와 같다. 산포도 상에서도 수문상황에 따른 사용율의 뚜렷한 경향성은 나타나지 않으며, 특정한 관계를 찾기

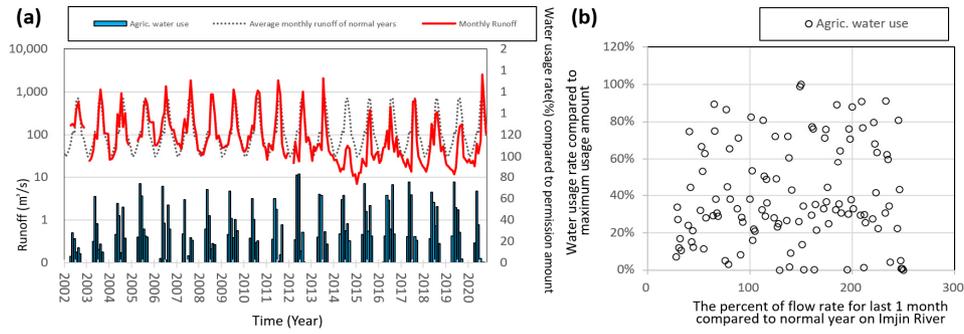


Fig. 2. Obtained record of Imjin river; (a) time-series of data; (b) scatter plot of flow rate compared to normal year and water usage rate compared to maximum usage amount

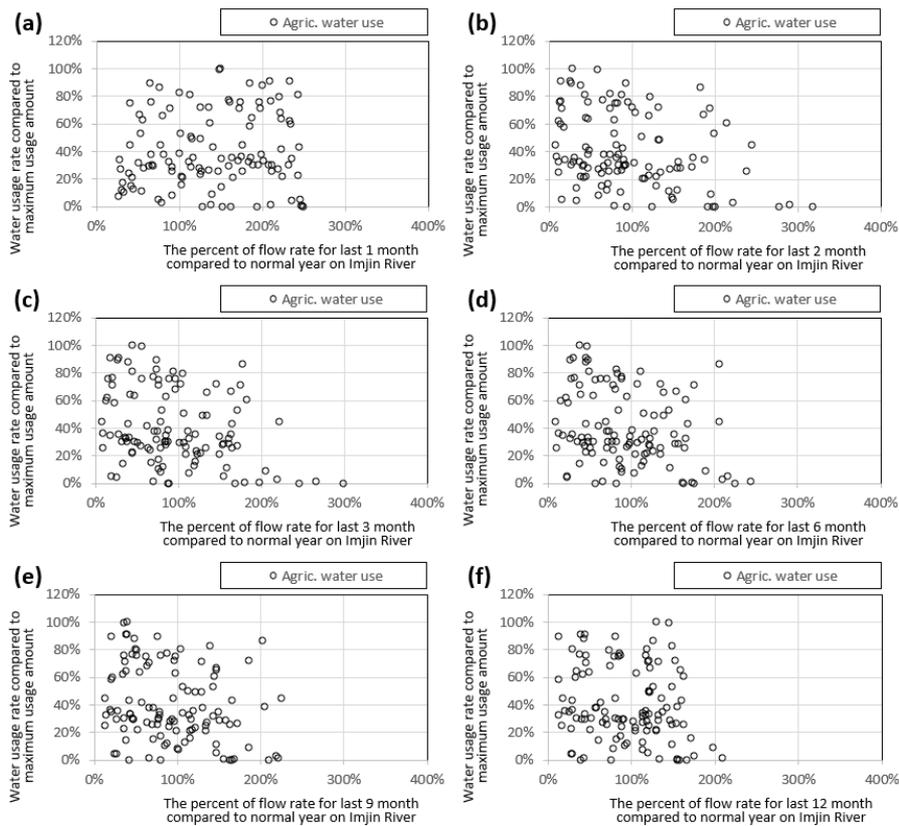


Fig. 3. Scatter diagram for the percent of normal year for last several months versus water usage rate compared to permission amount in the Imjin River; (a) 1-month; (b) 2-month; (c) 3-month; (d) 6-month; (e) 9-month; (f) 12-month

어려운 것으로 보인다. 이는 해당 월(1개월 지속기간)의 예년 대비 유출율만을 사용하기 때문인 것으로 판단된다. 일반적인 농업용저수지 및 양수장을 관리하는 관리자는 기존의 강수량과 저수지 수위 등을 종합적으로 판단하여 양수량을 결정하는 경우가 대부분이다. 따라서, 당월보다는 좀 더 장기간의 유출상황을 고려하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

장기간의 유출상황을 고려하기 위한 방법으로는 표준유출

량지수(Standardized Runoff Index; Shukla and Wood, 2008)와 같은 지수가 일반적으로 사용된다. 그러나 본 연구의 목적 중에 하나는 실무에서 활용할 수 있는 방법을 제시하는 것이므로 SRI와 같은 지수는 현장에서 산정하고 적용하기 어렵다. 따라서, 유사한 개념을 이용한 예년대비 비율(the percent of normal year, Svoboda and Fuchs, 2016)을 활용하였다. 표준지수도 동일한 기간 내에서 과거의 중앙값에 대한 현재 누적

값의 비율을 의미하므로 유사한 의미를 가진다고 할 수 있다 (Kwak *et al.*, 2020). 수문상황을 고려하는 적절한 기간을 선택하기 위하여 표준지수에서 활용하는 1, 2, 3, 6, 9, 12개월 지속기간의 예년대비 유출량 비율과 농업용수 최대사용량대비 사용율(*WUM*)을 Fig. 3과 같이 나타내었다. Fig. 3의 결과를 보면, 1개월 지속기간(해당월)의 수문상황만 고려할 경우에는 뚜렷한 경향이나 상관관계를 찾기 어려우나, 지속기간이 2개월부터 12개월까지 증가함에 따라서 *WUM*의 최대값에 변화가 나타난다. 해당월의 수문상황만을 고려 하였을 경우에는 수문상황에 따라서 농업용수의 사용율은 큰 변화를 보이지 않고 약 95 ~ 100% 정도의 사용율(*WUM*)을 보인다. 그러나 2개월 이상의 지속기간에서는 수문(유출)상황이 호전됨에 따라서 사용율(*WUM*) 최대값이 전반적으로 감소하는 경향을 보인다. 예를 들어 2개월 지속기간의 수문상황을 고려할 경우, 100%의 수문상황에서는 최대사용량대비 90%의 사용율을 보이나, 200%의 수문상황에서는 최대 70%, 200%를 넘는 수문상황에서는 최대 5 ~ 60% 이내의 사용율(*WUM*) 최대값을 보인다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 농업용수 관련시설의 관리자가 기존의 강수량과 토양수분 등 여러 요인을 고려하여 양수량을 결정(Lee *et al.*, 2016)하는 것이 원인으로 보인다. 또한, 이러한 경향성이 2개월 지속기간에서 잘 나타나는 이유도 동일한 원인으로 판단되며, 실제로 댐과 보 등을 운영하기 위한 기준인 댐·보 등의 연계운영계획도 월·분기·월별 계획을 수립하며 실질적인 운영은 지난월의 수문상황을 고려한 월별 연계운영계획을 기준으로 이루어지고 있다(K-water, 2018). 따라서, 수문상황에 따른 농업용수 최대사용대비 사용율(*WUM*)은 명확한 관계를 나타내지는 않으나 *WUM*의 최대값은 임계치를 보이는 것으로 판단되며, 2개월 지속기간이 분석에 적합할 것으로 보인다.

3.2 수문상황에 따른 농업용수 사용율 분석

이전 절에서 수문상황에 따른 농업용수 최대사용량대비 사용율(*WUM*)의 경향을 고찰하였다. 농업용수 사용은 여러 요인으로 인하여 일률적인 관계로 나타낼 수 없으나 *WUM*의 최대값은 수문상황 호전에 따라서 감소하는 것을 확인하였다. 따라서, 본 연구의 주요한 목적 중 하나인 댐이나 저수지 운영실무에서 용수공급량 결정에 활용할 수 있을 것으로 보인다. 일반적으로 댐 용수공급 시에는 안전율을 적용하며 용수수요량의 110%를 공급하고 있으며(K-water, 2017), 이는 여러 가지 요인으로 인하여 사용량보다 적게 공급되어 용수사용에 문제가 생기는 것을 방지하기 위함이다. 같은 맥락으로 농업용수의 최대사용율을 공급하면 대부분의 경우에서 농업용수

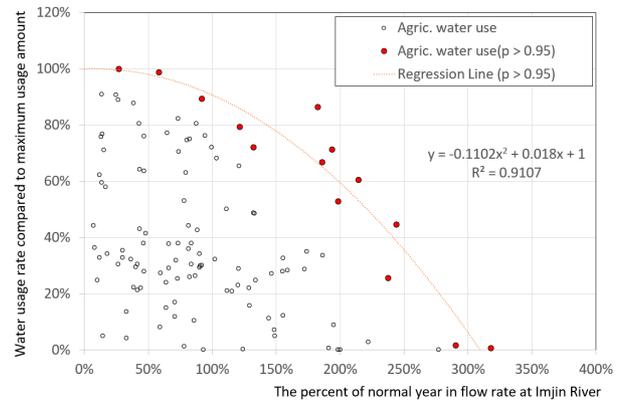


Fig. 4. Scatter diagram of the percent of normal year runoff and the water usage rate compared to maximum usage amount in the Imjin River; red point indicated that it has 0.95 or more value in CDF, and red dot line is threshold line of agricultural water usage

사용에 문제가 발생하지 않을 것이다. 따라서, 이전 절에서 논의한 *WUM*의 최대값은 댐이나 농업용저수지에서 용수공급을 위한 임계값으로 적용할 수 있으며 분위회귀법을 통하여 산정할 수 있다. 다목적댐의 경우에는 20년 빈도의 가뭄에 대해서 대응 가능하도록 규정하고 있으며(MOLIT, 2011), 이는 95% 분위(비초과확률 $p = 0.95$)에 해당한다(MOLIT, 2016). 임진강의 예년대비 2개월 유출율(the percent of normal year runoff for last 2 month; 이하 PNR_2 로 표기, %)과 농업용수 허가량대비 사용율(Fig. 3(b)) 자료에 대하여 95% 분위회귀($p = 0.95$)를 적용한 결과는 Fig. 4와 같다.

따라서, Fig. 4의 분위회귀 곡선은 20년 빈도 가뭄에도 농업용수 사용에 문제가 없는 임진강의 농업용수 사용량 임계곡선이 된다. 예를 들어서 $PNR_2 = 50\%$ 일 경우 농업용수 사용율(*WUM*)은 97%, $PNR_2 = 150\%$ 일 경우 사용율(*WUM*)은 78% 수준을 공급해도 임진강의 농업용수 사용에는 문제가 발생하지 않는다.

3.3 수문상황을 고려한 무차원 농업용수 사용량임계곡선

이전 절에서 수문상황에 따른 농업용수 경향을 분위회귀법을 이용해서 하천 농업용수 사용량 임계곡선으로 유도하였다. 동일한 방법으로 연구대상인 27개 유역에 적용하였으며, 각 유역별 임계곡선을 Fig. 5에 도시하였다.

27개 유역의 농업용수 사용량 임계곡선을 비교하면 유사한 경향성을 띠고 있는 것을 알 수 있으며, 모두 수문상황(PNR_{2m})이 호전됨에 따라서 농업용수 최대사용량대비 사용율(*WUM*)도 100%에서 10%까지 일관적인 감소경향을 보

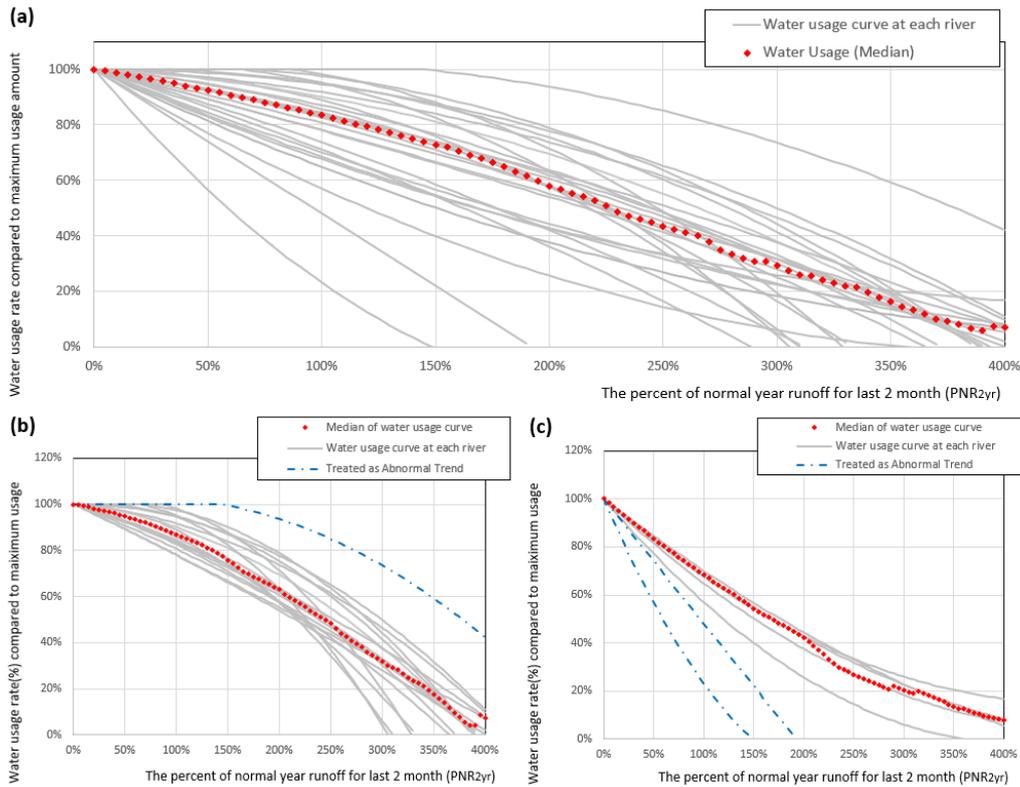


Fig. 5. Threshold line of each study basins; (a) 27 threshold lines for all basins; (b) 17 threshold lines with concave trend; (c) 10 threshold with convex trend; grey line indicated each threshold line and red dot line indicated median of each lines; and blue dot-dashed line treated as abnormal trend

이다. 따라서, 임계곡선의 공통적인 경향성을 이용하여 무차원 농업용수사용량 임계곡선으로 활용할 수 있을 것이다. 다만, Fig. 5(a)의 유역별 임계곡선을 보면 각각의 임계곡선의 감소 경향에 따라서 x축 기준으로 오목(Concave)하거나 볼록(Convex)한 두 가지 형상 중에 하나를 나타낼 수 있으며, 이를 각각 Figs. 5(b) and 5(c)으로 분리하여 나타내었다. 각각의 경향을 분리한 결과, 모든 임계곡선을 도시한 Fig. 5(a)에 비하여 명확한 경향성을 보였으며, 무차원곡선화가 가능할 것으로 판단된다. 또한, Fig. 5(b)의 섬진강 요천, Fig. 5(c)의 한강 경안천과 낙동강 내성천은 상이한 경향을 보여, 해당 3개 하천의 임계곡선은 분석에서 제외하였다. 임계곡선이 명확하게 두 경향성으로 분리된다는 것은 농업용수의 사용특성에도 공통된 특성이 있을 것으로 짐작할 수 있다. 그러나, 농업용수 사용에는 물관리 관행 등 여러 가지 인위적인 간섭요인 (Lee *et al.*, 2016)이 많으므로 명확한 분석은 쉽지 않다. 다만, 전체적인 경향성이 유사하므로 유역의 전체적인 유출특성에 연관되었으리라는 가정 하에 대상 유역의 토지피복 및 이용, 경사, 토양분포 등에 대하여 비교분석을 수행한 결과, 유역의 토지피복이 두 유형 사이에 가장 큰 차이를 보이는 것으로 나

타났다.

임계곡선이 오목한 16개 유역과 볼록한 8개 유역에 대해서 삼림면적 대비 농지면적비의 박스그림을 Fig. 6에 나타내었다. 특징적으로 오목한 임계곡선을 나타내는 유역은 삼림면적 대비 농지면적비가 0.2에서 1.2 사이의 값을 나타내었으나, 볼록한 임계곡선을 나타내는 유역은 0.2 ~ 0.3 사이의 한정적인 면적비를 보여주었다. 삼림지역은 잠재보유수량이 높아 홍수기에는 유출량을 저감시키고 갈수기에는 기저유출량을 증가시키는 기능을 하므로 (Park *et al.*, 2005), 볼록한 형태의 임계곡선을 보이는(농지면적에 비하여 삼림지역이 많은) 유역은 높은 기저유출량으로 인하여 농업용수의 필요량이 더 크게 감소하는 것으로 판단되며, 오목한 형태의 임계곡선을 보이는 유역은 반대의 경향을 보이는 것으로 추정할 수 있다. 그러나, 하천의 농업용수 사용량 자체가 여러 가지 요인으로 인하여 불확실성이 높으므로 (Lee *et al.*, 2016) 명확한 분석을 위해서는 좀 더 세밀한 자료수집과 분석이 필요할 것으로 판단된다. 다만, 본 연구의 목적은 실무에서 활용할 수 있는 경험곡선을 제시하는 것이므로 차후의 연구로 규명하고자 한다. 실무에서는 Fig. 6과 같이 삼림면적 대비 농업면적비가 0.3 이

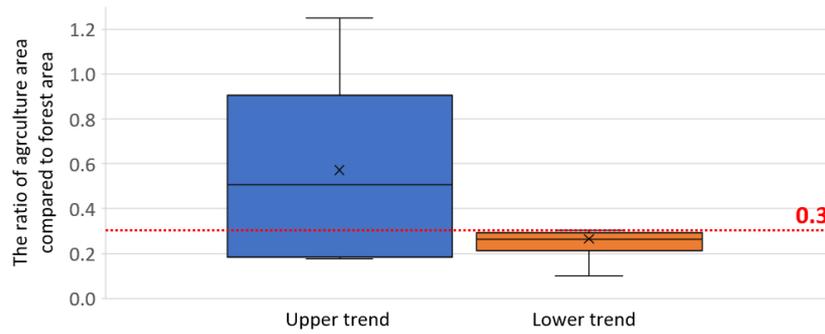


Fig. 6. The boxplot of the ratio of agricultural area compared to forest area for each trend

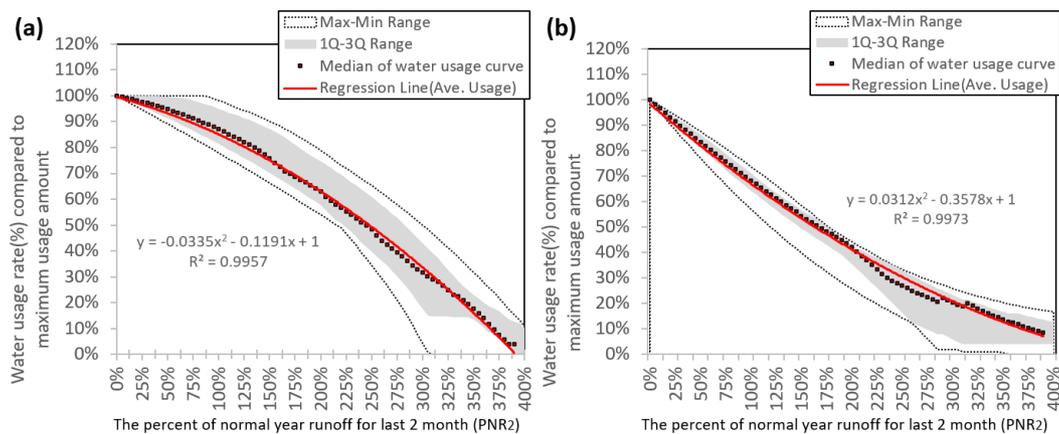


Fig. 7. Threshold line for each trend basin: (a) concave trend and (b) convex trend and its dimensionless equation, and red point indicate median value of each threshold line, grey band indicated the band of first quartile to third quartile ($Q_1 \sim Q_3$), dotted line indicated max ~ min range

상일 경우에는 오목한 유형이라고 간주할 수 있을 것으로 보이며, 그 이하일 경우 추가적인 분석을 통하여 경향성을 파악하여야 할 것으로 보인다.

Figs. 5(b) and 5(c)의 자료를 이용하여 유도한 하천 농업용수 사용 무차원곡선은 Fig. 7과 같다. 각 유형에 대하여 농업용수 최대사용량 - 또는 최대사용량이 없을 경우 농업용수 사용허가량 - 을 기준으로 수문상황에 따른 농업용수의 사용량을 도출할 수 있으며, 유역의 농업용수 공급필요량을 산정할 수 있다. 따라서 댐 또는 저수지 가뭄으로 인하여 농업용수 공급을 감축하여야 할 경우 적절한 감축량을 산정하는데 사용할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 농업용수 사용량을 분석할 수 있을 정도의 신뢰성 있는 자료가 존재하지 않는 유역이나, 특정한 유역의 사용량을 조사하기 어려운 상황에서 농업용수의 사용량을 추정하기 위한 경험식으로 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 해당 무차원곡선은 95% 신뢰도 곡선의 증폭이므로 약 90% 신뢰도를 가지며 이는 10년 빈도 가뭄에 대응하는 수준이므로 실제 적용 시에 가뭄빈도 등을 충분히 고려하여 적용하여야 할 것으로 판단된다.

예를 들기 위하여 연구대상 유역에서 제외된 삽교천 유역에 하천수 사용실적 등의 자료가 없다고 가정한다. 대상유역의 면적은 1,649.4 km^2 이며 농업용수 허가량 - 실적자료가 없으므로 최대사용량이 허가량과 같은 것으로 가정 - 은 596만 $\text{m}^3/\text{일}$ 이다. 유역의 토지피복은 삼림면적이 691 km^2 로 약 41.9%이며, 농업면적은 702.6 km^2 로 약 42.6% 이므로(MOLIT, 2016) 삼림면적 대비 농업면적비가 약 1.0으로 오목한 임계곡선 유형일 것으로 추정된다. 따라서, 오목한 형태에 해당하는 임계곡선을 적용할 수 있다. 만약, 삽교천 유역의 농업용 저수지의 저수량이 부족하여 농업용수 공급을 감축하여야 하며, 예년 대비 2개월 유출율(PNR_2)이 75%일 경우, 농업용수 최대사용량 대비 사용율(WUM)은 약 89%이므로 공급 목표량은 536만 $\text{m}^3/\text{일}$ 이 되며 농업용수 사용에 문제가 없는 감축량은 약 60만 $\text{m}^3/\text{일}$ (11% 감축)이 된다. 또한, 댐 - 저수지의 저수량이 지속적으로 감소하여 「댐 용수공급 조정기준」 상의 “경계” 단계 이하로 떨어질 경우 농업용수 실사용량의 20 ~ 30%를 감축하도록 규정하고 있으므로, 농업용수 실사용량 조사가 어려울 경우 공급 목표량인 536만 $\text{m}^3/\text{일}$ 을 실사용량으로 간주하여

Table 2. Agricultural WUM equation for each trend

Type	Ratio of agricultural area compared to forest area	The water usage rate compared to maximum usage amount (WUM)
Concave	0.2 ~ 1.3 (Median = 0.52)	$WUM = -0.0335 PNR_{2m}^2 - 0.1191 PNR_{2m} + 1$
Convex	0.2 ~ 0.3 (Median = 0.25)	$WUM = 0.0312 PNR_{2m}^2 - 0.3578 PNR_{2m} + 1$

최대 30%인 160만 m³/일을 설득력있는 감축량으로 제시할 수 있을 것이다.

본 연구의 주요한 보완점으로는 크게 두가지를 들 수 있으며, 첫 번째로 농업용수 최대사용량대비 사용율(WUM)을 들 수 있다. 이상적인 농업용수 사용이 이루어질 경우, 농업용수 최대사용량과 허가량은 동일하여야 한다. 그러나, 여러 현실적인 제약으로 인하여 실제 허가량과 최대사용량의 괴리가 발생하는 문제가 존재하며 지속적인 제도개선과 행정력 확충을 통하여 해결하여야 할 것이다. 해당 조건을 만족할 경우에는 최대사용량대비 사용율(WUM)과 허가량대비 사용율이 동일해지므로 본 논문에서 사용된 농업용수 최대사용량대비 사용율은 “허가량대비 사용율(Usage Rate compared to Permission amount, URP)”로 대체가 가능하며 좀 더 직관적인 현장기법으로 활용이 가능할 것이다. 다른 보완점으로는 각각의 임계곡선 유형 구분을 위한 명확한 기준이 존재하지 않는다는 점이다. 삼림면적 대비 농지면적의 비율로 구분할 수 있으나, 오목(Concave)한 유형과 볼록(Convex)유형의 비율이 0.2 ~ 0.3 사이에서 겹치고 있다. 일반적으로 0.3이 넘어갈 경우 오목한 유형으로 간주할 수 있으나, 농지면적비가 0.2 ~ 0.3일 경우 어떠한 유형인지 구분하기 위해서 본 연구와 유사한 분석을 추가적으로 수행하여야 한다. 따라서, 실무에서 편리하게 활용하기 위해서는 좀 더 자세한 자료수집을 통하여 간편하고 명확한 구분기준을 제시하여야 할 것으로 판단된다. 그러나, 본 연구에서 제시한 방법이 하천 농업용수 임계사용량을 간편하게 추정하고 활용할 수 있다는 점은 변함이 없으며, 수자원 관리 실무에서 유용하게 활용될 수 있을 것이다. 최종적으로 각각의 유형에 따른 하천 농업용수사용 무차원 임계곡선식은 Table 2와 같이 정리하였다.

4. 결론

본 연구에서는 댐과 저수지 등을 관리하는 실무자가 수문 상황에 따른 하천에서의 농업용수의 임계사용량을 간편하게 추정하기 위한 방법론을 제안하고자 하였다. 이를 위하여 4대강 권역의 주요 27개 하천유역을 대상으로 하여 수문상황을 대표하기 위한 유출량과 하천수 사용실적을 2001년부터 2020

년까지 수집하였으며, 그 관계를 분석하였다. 농업용수의 허가총량은 매년 신규허가 및 취소 등으로 인하여 변하므로 이를 무차원화시킨 농업용수 최대사용량대비 사용율(WUM, %)을 사용하였으며 그 최대값이 2개월 지속기간의 예년대비 유출율(PNR₂)과 유의미한 상관관계가 있음을 나타내었다. 분위회귀를 이용하여 농업용수 사용을 대표하는 임계곡선으로 나타낼 수 있음을 보이고 이를 대상유역인 4대강권역의 주요 27개 하천유역에 대하여 적용하였다. 27개의 임계곡선에 대한 분석을 통하여 볼록, 오목한 두 가지 형태의 임계곡선식으로 유도하였다. 여러 가지 유역특성을 비교한 결과, 삼림면적 대비 농지면적의 비가 0.3 이상일 경우 오목한 유형의 임계곡선을 사용할 수 있으며, 그 이하일 경우 추가적인 분석을 통하여 임계곡선 유형을 결정하여야 할 것으로 판단된다. 하천 농업용수사용 무차원 임계곡선식을 이용하여 현장에서 농업용수를 관리하는 실무자가 농업용수 최대사용량 - 또는 최대사용량이 없을 경우 농업용수 사용허가량 - 을 기준으로 수문상황에 따른 하천 농업용수 임계사용량(공급필요량)을 추정할 수 있다. 또한, 댐 또는 저수지 가뭄으로 인하여 농업용수 공급을 감축하여야 할 경우 적절한 감축량을 산정하거나 신뢰성 있는 자료가 존재하지 않는 유역에 대해서 농업용수의 임계사용량을 추정하기 위한 경험식으로 사용할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 향후 본 논문에서 제시한 임계곡선의 유형을 구분하기 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

References

Bang, J.H., Choi, J.Y., and Kim, K. (2019). “Study of calculation and estimation of agricultural water supply amount using automatic level data.” *Proceedings of the Korean Society of Agricultural Engineers Conference*, KSAE, p. 81.

Basche, A.D., Kaspar, T.C., Archontoulis, S.V., Jaynes, D.B., Sauer, T.J., Parkin, T.B., and Miguez, F.E. (2016). “Soil water improvements with the long-term use of a winter rye cover crop.” *Agricultural Water Management*, Vol. 172, pp. 40-50.

Boutraa, T. (2010). “Improvement of water use efficiency in irrigated agriculture: A review.” *Journal of Agronomy*, Vol. 9, No. 1, pp. 1-8.

Cade, B.S., and Noon, B.R. (2003). “A gentle introduction to quantile regression for ecologists.” *Frontiers in Ecology and the*

- Environment*, Vol. 1, No. 8, pp. 412-420.
- Choi, S.H., and Park, M.H. (2019). "Investigation on the properties of the amount of river intake for irrigation." *Proceedings of the Korean Society of Civil Engineers Conference*, KSCE, pp. 166-167.
- Chung, S.O. (2009). "Climate change impacts on paddy irrigation requirement in the Nakdong river basin." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 51, No. 2, pp. 35-41.
- Han Flood Control Office (HRFCO) (2021a). Ministry of Environment, accessed 14 February 2021, <<https://ras.hrfco.go.kr/>>.
- Han Flood Control Office (HRFCO) (2021b). Ministry of Environment, accessed 17 February 2021, <<http://www.wamis.go.kr/>>.
- Kim, C.G. and Kim, N.W. (2017). "Estimation and evaluation of irrigation water need using net water consumption concept in Jeju Island." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 50, No. 7, pp. 503-511.
- Kim, N.W., Lee, D.R., and Hong, I.P. (1994). "Re-examination on estimation method of agricultural water need." *Proceedings of Water Engineering Research Presentation*, KWRA, pp. 343-352.
- Koenker, R. (2005). *Quantile Regression*. Cambridge University Press. Cambridge, UK, pp. 146-149.
- Koenker, R., and Bassett G. (1978). "Regression quantiles." *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, Vol. 46, No. 1, pp. 33-50.
- Kwak, J., Joo, H., Jung, J., Lee, J., Kim, S., and Kim, H.S. (2020). "A case study: Bivariate drought identification on the Andong dam, South Korea." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 35, pp. 549-560.
- K-water (2017). *A study on medium- and long-term of multi-regional water supply development plan considering the market environmental change*, Publication No. KIWE-WPERC-17-0, K-Water, pp. 48-50.
- K-water (2018). *A study on standard of reservoir water allocation*, Publication No. KIWE-WPERC-18-04, K-Water, pp. 197-204.
- K-water (2021). K-water corporation, accessed 20 February 2021, <<https://www.water.or.kr/>>.
- Lee, G.Y., Lee, S.I., Do, J.W., and Ha, T.H. (2016). "An assessment and early warning of agricultural drought on agriculture and rural community." *Disaster Prevention Review*, Vol. 18, No. 2, pp. 47-60. (in Korean)
- Lee, N.H. (1988). *Simulating daily operation of water management systems of irrigation districts*. Ph. D. dissertation, Seoul National University, pp. 45-123.
- Lim, Y.A., Sung, J.H., and Kim, H.S. (2017). *Agricultural water demand characteristics and water shortage measures*. Report 816, Korea Rural Economic Institute, pp. 118-125.
- Ministry of Environment (ME) (2019). *Hydrological annual report in Korea*.
- Ministry of Environment and K-water (ME and K-water) (2020). *Water and future: Proceedings on 2020 World Water Day*, pp. 7-131.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2011). *The standard for dam design; Ministry of Land*, Public notification number MOLIT 2011-1043, pp. 37-55.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2016) *Water Vision 2020: 2011-2020*, pp. 37-245.
- Moon, J.W., Yang, S.H., and Lee, D.R. (2009). "Analysis of the relation between weather conditions and agricultural water use." *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, KWRA, pp. 1688-1692.
- No, Y.S., Song, J.H., and Cha, J.H. (2018). "An operation of test basins for real-time observations of river water use." *Water for Future*, Vol. 51, No. 2, pp. 24-31. (in Korean)
- Oh, S.R., Son, G.H., Lee, J.H., and Oh, C.Y. (2019). "An irrigation management and improvement in the Youngsan river basin." *Water for Future*, Vol. 52, No. 2, pp. 64-69. (in Korean)
- Park, M.J., Kwon, H.J., and Kim, S.J. (2005). "Analysis of impact of land cover change on runoff using HSPF model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 38, No. 6, pp. 495-504.
- Park, S., and Noh, J. (2017). "Appraising daily paddy irrigation water requirements by comparing pumping water records." *Proceedings of the Korean Society of Agricultural Engineers Conference*, KSAE, p. 128.
- Putra, P.A., and Yuliando, H. (2015). "Soilless culture system to support water use efficiency and product quality: A review." *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, Vol. 3, pp. 283-288.
- Seung, J., Park, S., Jung, M., and Min, K. (2017). *The current status of changes in Korean rural villages and direction for mid- and long-term development (Year 3 of 5)*. Report 865, Korea Rural Economic Institute, pp. 218-225.
- Shankar, V., Prasad, K.H., Ojha, C.S.P., and Govindaraju, R.S. (2013). "Optimizing water use in irrigation-a review." *Journal of the Indian Institute of Science*, Vol. 93, No. 2, pp. 209-226.
- Shukla, S., and Wood, A.W. (2008) "Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought." *Geophysical Research Letters*, Vol. 35, No. 2. doi: 10.1029/2007GL032487
- Song, J.H., Song, I., Kim, J.T., and Kang, M.S. (2015). "Simulation of agricultural water supply considering yearly variation of irrigation efficiency." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 48, No. 6, pp. 425-438.
- Svoboda, M., and Fuchs, B. (2016). "Handbook of drought indicators and indices." *Drought and Water Crises: Integrating Science, Management, and Policy (2nd edition)*, Edited by Wilhite, D., and Pulwarty, R.S., Vol. 1. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 155-208.