



RCP 8.5 기후변화 시나리오를 고려한 농업용 저수지군 운영에 따른 미래 하천유량 평가

Evaluating Future Stream Flow by Operation of Agricultural Reservoir Group considering the RCP 8.5 Climate Change Scenario

이재남* · 노재경**,[†]

Lee, Jaenam · Noh, Jaekyoung

Abstract

This study aims to evaluate future stream flow by the operation of agricultural reservoir group at the upper stream of the Miho River. Four agricultural reservoirs with storage capacities greater than one million cubic meters within the watershed were selected, and the RCP 8.5 climate change scenario was applied to simulate reservoir water storage and stream flow assuming that there are no changes in greenhouse gas reduction. Reservoir operation scenarios were classified into four types depending on the supply of instream flow, and the water supply reliability of each reservoir in terms of water supply under different reservoir operation scenarios was analyzed. In addition, flow duration at the watershed outlet was evaluated. The results showed that the overall run-off ratio of the upper stream watershed of the Miho River will decrease in the future. The future water supply reliability of the reservoirs decreased even when they did not supply instream flow during their operation. It would also be difficult to supply instream flow during non-irrigation periods or throughout the year (January-December); however, operating the reservoir based on the operating rule curve should improve the water supply reliability. In particular, when instream flow was not supplied, high flow increased, and when it was supplied, abundant flow, ordinary flow, and low flow increased. Drought flow increased when instream flow was supplied throughout the year. Therefore, the operation of the agricultural reservoirs in accordance with the operating rule curve is expected to increase stream flow by controlling the water supply to cope with climate change.

Keywords: Reservoir group; Agricultural reservoir operation; Climate change; Flow duration analysis; Instream flow

1. 서론

이상기후로 인한 강수량과 증발산량의 변화는 수자원 환경을 변화시키며, 빈번한 마른장마로 하천유량이 감소되어 수자원 확보에 많은 어려움을 주고 있다. 최근 하천과 물 문화에 대한 국민의 인식이 높아져 하천 유행개선을 위한 하천유지용수의 공급을 요구하고 있으며, 그 방안으로 농업용 저수지의 활용성이 검토된 바 있다(MLIT and HRFCO, 2009). 대부분 지류하천의 상류유역에 위치한 농업용 저수지는 전국적으로 17,611개소(MFAFF and KRCC, 2009)가 운영되고 있다. 농업용 저수지의 대부분이 관개용수 공급에 초점을 맞춰 운영되므로 갈수기에는 저수지 저류수를 하류로 흘려보내지

않아 지류하천의 유량은 크고 작게 감소된다.

저수지 운영률에 대한 연구는 다목적댐을 대상으로 운영률을 적용한 연구가 대부분이다(Kim, 2012; Kang, 2011; Yoon, 2011). 국내 농업용 저수지의 운영률은 일본의 방법(Senga, 1991)을 기본으로 하고 있으며, 일본의 방법은 관개기 관개용수 공급만을 고려한 것이기 때문에 하천유지용수를 공급하는 경우에는 적용할 수 없다. 독 높이기 사업이 추진되면서 추가 확보된 저수량을 관개용수 외 하천유지용수로 활용하기 위한 독 높이기 농업용 저수지의 운영률에 대한 연구가 전개되었지만(Lee et al, 2013; Park et al, 2013, Yoo et al, 2012), 기존 농업용 저수지의 운영률에 대한 연구는 여전히 부족한 수준이다.

113개 농업용 저수지를 증고하는 국책사업의 진행으로 독 높이기 농업용 저수지의 이수 및 치수에 대한 연구가 수행되었다. Hwang et al. (2012)은 황령강 유역 내 독 높이기 저수지군에 의한 홍수기 하류하천의 영향을 평가하였고, Lee and Noh (2010)는 단일 독 높이기 저수지를 대상으로 용수공급량의 변화를 분석하였다. 기후변화로 저수지 유역에서의 다양한 수자원 변동이 예상되고 있으나(Shin, 2000; Ahn et al., 2014; Choi, 2010), 독 높이기 저수지를 포함한 농업용 저수

* Institute of Agricultural Science, Chungnam National University

** Department of Agricultural and Rural Engineering, Chungnam National University

[†] Corresponding author

Tel.: +82-42-821-5796 Fax: +82-42-821-8877

E-mail: jknoh@cnu.ac.kr

Received: August 17, 2015

Revised: September 9, 2015

Accepted: September 18, 2015

지군 유역을 대상으로 한 기후변화의 영향평가에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

독 높이기 저수지는 하천 생태계 보전을 위해 추가로 확보된 저수량을 갈수기에 하천으로 흘려보내고 있고, 최근 농업용 저수지의 저수용량을 결정하기 위한 설계에는 연중 하천으로 공급할 수 있는 환경용수량을 포함하도록 하고 있다 (MAF, 2002). 기후변화에 대비한 하천의 건전성 향상을 위해 농업용 저수지의 활용성이 기대되고 있으나, 과거 건설된 대부분의 농업용 저수지는 관개용수 확보차원에서 하천유지용수를 방류하지 않고 있는 실정이다. 정부는 기후변화에 대응하기 위해 온실가스 감축방안을 마련하고 있다. 그러나 온실가스 감축정책의 소극적 실행으로 발생될 수 있는 수환경의 변화에 대비하여 하천유지용수 공급에 따른 농업용 저수지군의 운영이 미래 하류하천의 유량에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 농업용 저수지군의 운영에 따른 미래 하천유량의 변화를 분석하였다. 온실가스 감축정책의 소극적인 대응으로 발생될 수 있는 미래 상황을 가정하기 위해 국가 기후변화 표준시나리오인 RCP 8.5 기후변화 시나리오를 적용하였고, 저수지 운영은 하천유지용수 공급에 따라 4가지 시나리오로 구분하였다. 저수지 운영시나리오별 각 저수지의 저수량과 이에 따른 하천유량을 모의하였고, 유역출구에서 유황분석을 수행하여 온실가스가 현재 추세로 배출되는 조건 하에 농업용 저수지군의 운영이 미래 하천유량에 미치는 영향을 평가하였다.

II. 재료 및 방법

1. 대상 유역 및 농업용 저수지

본 연구는 금강 제 1지류인 미호천 상류를 대상으로 하였다. 대상유역은 표준유역 단위로는 한천 유역 (301101)과 미호천 상류 (301102)가 포함되고 (Fig. 1), 한천은 미호천의 지류로 대상유역의 최종 유출구로부터 약 2.7 km의 상류에서 합류된다. 대상유역의 면적은 288.8 km²로 유역 내에는 다수의 농업용 저수지가 운영되고 있다. 본 연구를 위해서는 Table 1과 같이 저수량 규모가 100만 m³ 이상인 농업용 저수지 4개소 (양덕, 광덕, 무수, 화산)를 선정하였으며, 이 중 광덕 저수지는 독 높이기 사업으로 제당이 2m가 증고되어 유효저수량이 2,958.1천 m³에서 4,025.0천 m³으로 증가되었다.

Table 1 Characteristics of agricultural reservoirs within the study area

Reservoir	Watersehd area (km ²)	Irrigation area (km ²)	Effective water storage (10 ³ m ³)
Yangdeok	7.54	2.92	1,119.1
Musu	8.57	2.39	1,320.0
Hwasan	9.80	5.20	1,744.4
Gwanghye*	10.40	4.46	2,958.1
			4,025.0

* Embankment raising agricultural reservoir

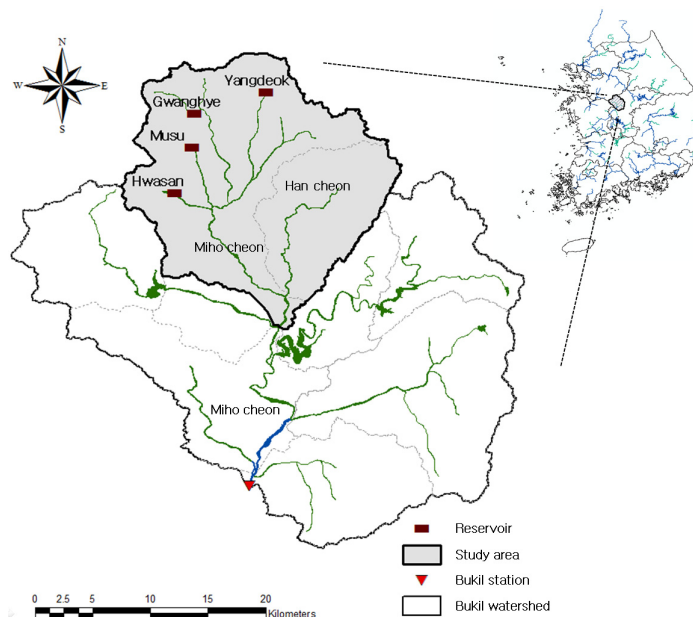


Fig. 1 Location of the study area and agricultural reservoirs

2. 기상 및 수문자료

저수지 유입량과 하천 유량을 모의하기 위해 대상유역에 포함된 오류, 진천 관측소의 강우자료를, 잠재증발산량을 산정하기 위해 청주 관측소의 기상자료를 이용하였고, 1981년부터 2010년까지 30년간의 강우 및 기상자료를 수집하였다. 대상유역 내 신뢰성 높은 관측 유출량 부재로 인해 미호천 중류부에 위치한 북일 관측소의 2002년부터 2008년까지 유량 자료를 국가수자원관리종합정보시스템(www.wamis.go.kr)에서 수집하였고, 유출모형의 매개변수 결정을 위한 자료로 활용하였다. 또한 물수지 분석에 필요한 각 저수지의 내용적 자료를 수집하였고, 저수지 모의모형을 검보정하기 위해 1991년부터 독 높이기 사업의 착공 전년도인 2011년까지 저수율 자료(http://rims.ekr.or.kr)를 수집하였다. 기후변화 시나리오는 국가 기후변화 표준시나리오로 인증된 기상청의 한반도 영역에 해당하는 RCP (Representative Concentration Pathways) 시나리오의 자료를 이용하였다. 이 자료는 지역기후모델인 HadGEM3-RA를 사용하여 예측된 결과로 공간분해능은 12.5 km, 시간분해능은 일단위이다.

3. 기후변화 시나리오 편의보정

RCP 시나리오는 IPCC 5차 보고서에 채택된 시나리오로, RCP 시나리오의 종류는 온실가스 농도에 따라 RCP 2.6, 4.5, 6.5, 8.5와 같이 4가지로 구분된다. RCP 시나리오의 숫자는 온실가스로 인해 추가적으로 지구에 흡수되는 에너지의 양으로 숫자가 작을수록 온실가스가 감소하는 경우이고, 반대로 숫자가 증가할수록 온실가스가 증가하는 경우이다. 본 연구에서는 소극적인 온실가스 감축정책을 선택하여 온실가스가 감소 없이 현재 추세대로 배출되는 상황을 가정한 RCP 8.5 기후변화 시나리오를 선정하였다. 기후변화 시나리오의 강우와 기온자료는 우량 및 기상 관측소에 해당하는 격자의 자료를 추출하여 이용하였다. 또한 한반도 기후변화 시나리오의 직접 이용에 따른 편의의 문제점이 제시된 바 있어 (So et al, 2012), 연구지역의 기후특성에 적합하도록 편의를 보정하였다. 강우자료는 강우량과 강우일수의 월 평균값을 보정하기 위해 Schmidli et al. (2006)이 사용한 Local intensity scaling 기법을 적용하였고, 기온자료는 Lenderink et al. (2007)의 기법을 적용하여 보정하였다. RCP 시나리오의 과거 모의기간에 대한 편의는 1979년부터 2005년에 대해 보정 및 검정을 실시하였고, 보정된 RCP 시나리오의 최고 및 최저기온은 미래 잠재증발산량 산정을 위한 자료로 활용하였다.

4. 유출량 및 저수량 변화 모의

가. 유출량 모의

저수지 모의운영의 필수적인 자료인 유입량은 일단위 연속유출모형인 ONE 모형을 이용하여 산정하였다. ONE 모형은 하나의 매개변수를 이용해 토양수분이 저류량에 따라 비선형으로 변화하는 관계를 구현한 연속유출모형으로 모형의 유출량 산정은 식(1)와 같고, 미세측 유역의 유출량을 산정하기 위한 매개변수 α 는 식(2)를 이용하여 결정할 수 있도록 제시하고 있다 (Noh, 2013). 대상유역 내 농업용 저수지의 유입량과 신뢰성 높은 하천 유량자료가 부재하여 본 연구에서는 미호천 중류에 위치한 북일 관측소 지점의 2002년부터 2008년까지 유량자료를 이용해 모형의 매개변수를 결정하였고, 이를 적용하여 저수지 유입량과 지류 유출량을 산정하였다.

$$Q(i) = (1 - e^{-0.003 \times S(i)})^{(0.2 + e^{-0.001 \times S(i) \times \alpha})} \times S(i) \quad (1)$$

$$Q_r = 25.22 + 0.0245 \times Pa \quad (2)$$

여기서 Q 는 유출량, S 는 유역의 토양수분 저류량, α 는 매개변수, Q_r 은 연유출률, Pa 는 연강수량, i 는 일단위 첨자이다.

나. 저수지 모의운영

단위논의 필요수량을 산정하기 위해 유효우량은 논 물수지에 의하여 담수심 60 mm 기반으로 결정하였고, 침투량은 Lee (2000)가 제시한 충북지역의 평균 침투량 5.41 mm을 적용하였다. 과거기간인 1981~2010년에 대해 Penman-Monteith 방법 (Allen et al., 1998)과 Hargreave 방법 (Hargreaves and Samani, 1985)으로 잠재증발산량을 산정해 회귀식을 도출하고, 편의보정된 최대 및 최소기온을 이용해 Hargreave 방법으로 계산된 미래 잠재증발산량을 도출된 회귀식에 의해 변환하였다. 잠재증발산량에 영농방식 변화에 따른 필요수량 변화 연구 (MIFAFF, 1997)에서 제시된 작물계수를 반영해 작물 증발산량을 계산하였다. 논 관개를 위한 필요수량은 논 물수지에 의해 계산 후 수혜면적을 곱하였으며, 여기에 수로 손실량 15%, 배분관리용수량 20%를 반영 (Oh, 2014)하여 저수지로부터 공급해야 할 관개용수량을 산정하였다. 저수량의 변화는 저수지 유입량에 의해 증가하고, 저수면 증발량과 방류량(관개용수량 및 하천유지유량)에 의해 감소되며, 월류량은 만수위를 초과하면 발생하도록 계산하였다. 과거(1981~2010년) 및 미래(2011~2100년)기간에 대하여 각 저수지별 모의운영을 수행하였고, 독 높이기 사업이 완료된 광혜 저수지는 사업 이전과 이후로 구분하여 모의하였다.

다. 모의 결과의 적합성 평가

모의된 유출량과 저수량의 적합성은 각각의 관측값과 모의값을 이용하여 평가하였고, 식 (3)에 의해 각각 결정계수 (R^2)를 산정하였다. 유출량에 대한 검정기간과 보정기간은 각각 2002~2003년, 2005~2008년을, 저수량은 각각 1994~2000년, 2001~2007년의 기간을 대상으로 평가하였다.

$$R^2 = \left(\frac{\sum (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum (S_i - \bar{S})^2}} \right)^2 \quad (3)$$

여기서, O 와 S 는 각각 관측값과 모의값, \bar{O} 와 \bar{S} 는 각각 평균 관측값과 평균 모의값, i 는 일단위 첨자이다.

5. 저수지 운영에 의한 용수공급능력 평가

가. 저수지 운영시나리오

저수지 운영시나리오는 농업용 저수지의 하천유지유량 공급에 따라 Table 2와 같이 4가지로 구성하였다. Case 1은 과거 건설된 농업용 저수지의 운영과 같이 하천유지용수를 공급하지 않는 경우이고, Case 2와 Case 3은 농업용 저수지의 설계에 포함된 하천유지용수를 공급하는 경우로 저수지의 유역면적에 해당하는 갈수량 ($0.1804 \text{ m}^3/\text{s}/100\text{km}^2$)을 각각 비관개기와 연중 공급하는 경우이다. Case 4는 운영률에 의해 하천유지용수를 공급하는 경우로 하천유지용수는 관개용수 공급에 영향을 주지 않는 비관개기에만 공급하는 것으로 하였다.

나. 운영률 도출

본 연구의 운영률은 농업용 저수지 운영률인 Senga 운영률을 기반으로 하였고 하천유지용수를 비관개기에 공급할 수 있도록 개선하였다. Senga 운영률은 저수지의 방류량을 제한하는 점에서 Hedging Rule (Lund, 1996)과 유사하나, 설계빈도가 고려된 기준곡선(TL)과 방류제한곡선(RRL)으로 구분

된다. 기준곡선은 수해면적의 관개용수공급에 차질이 없도록 확보해야 할 기준 저수량이고 방류제한곡선은 각각의 제한율에 따라 확보해야 할 저수량으로 저수량이 기준곡선보다 높으면 설계빈도의 용수공급능력을 만족 할 수 있음을 의미한다. 운영률 도출은 식 (4)와 같이 물 부족량을 산정하고, 식 (5)에 의해 관개기 말부터 물 부족량을 거꾸로 누가해 농업용 저수지의 설계빈도 10년을 고려하여 일별 필요저수량을 작성하게 된다. 작성된 운영률은 관개기에 관개용수를 공급하고 비관개기인 1~3월과 10~12월에는 하천유지용수를 공급할 수 있도록 적용하였고, 방류제한곡선의 제한율은 0~50%의 범위로 제한율의 간격은 10%로 하였다. 운영률 도출을 위한 자료는 1981~2010년까지 모의된 유입량과 관개용수량을 이용하였으며, 하천유지용수 공급량은 각 저수지의 저수용량을 고려해 결정하였다.

$$DEF(i) = INF(i) - (IGW(i) + ISW(i)) \quad (4)$$

$$STV(i) = STV(i+1) - DEF(i) \quad (5)$$

$$STV(i) < 0, STV(i) = 0$$

여기서, DEF 는 물 부족량, INF 는 저수지 유입량, IGW 는 관개용수량, ISW 는 하천유지용수량, STV 는 필요 저수량, i 는 일단위 첨자이다.

다. 저수지 용수공급능력 평가

농업용 저수지 용수공급능력의 평가를 위해 과거 및 미래 기간에 대한 모의저수량 자료를 이용하였다. 모의저수량 자료를 Baseline (1981~2010년), 2025s (2011~2040년), 2055s (2041~2070년), 2085s (2071~2100년) 기간으로 구분해 이수안전도를 산정하였다. 이수안전도는 저수지가 용수수요를 충족시키고 안정적인 용수공급의 여부를 평가할 수 있는 지표로 식 (6)과 같이 산정하며, 분석기간 중에 물 부족이 발생하지 않는 기간의 비율로 신뢰도 기준에 의한 저수지의 용수공급능력을 평가하는 방법이다. 분석기간의 설정은 연단위로 하였고, 분석연도에 유효저수량이 0 이하면 그 해에 전체가 물이 부족한 것으로 한다. 저수지의 용수공급능력은 농업용 저수지의 설계빈도 10년 (MAF, 2002)을 고려하여 이수안전도 90%의 만족여부로 평가하였다.

$$Re = \left(1 - \frac{Td}{Tn} \right) \times 100 \quad (6)$$

여기서 Re 는 이수안전도 (%)이며, Tn 은 전체 분석기간 (년), Td 은 용수부족 기간 (년)이다.

Table 2 Reservoir operation scenarios of supplying instream flow

Operation scenario	Supply of instream flow
Case 1	No supply of instream flow
Case 2	Instream flow supply during the non-irrigation period (Apr. to Sep.)
Case 3	Instream flow supply throughout the period (Jan. to Dec.)
Case 4	Instream flow supply in accordance with the operation rule curve during the non-irrigation period (Apr. to Sep.)

6. 저수지 운영에 의한 미래 하천유량 산정 및 평가

가. 저수지 운영을 고려한 미래 하천유량 산정

저수지 운영을 고려한 하천유량을 산정하기 위해 Fig. 2와 같이 소유역인 저수지 유역과 지류유역을 각각 4개로 구분하여 하천 네트워크를 구성하였다. 저수지 운영은 저수량의 상태에 따라 관개용수, 하천유지용수를 공급하게 되고 하천유지용수와 월류량은 하천유량에 직접 반영되도록 하였다. 또한 공급된 관개용수는 활용 후에 하천으로 회귀되도록 설정하였고 지류유역의 유출량을 반영해 하천유량을 산정하였다. 이와 같은 하천유량의 산정은 상류부인 소유역 B1부터 하류부인 소유역 B8의 순으로 수행하였다. 소유역 B8은 저수지 영향이 없이 지류 유출만 반영되는 표준유역 301101으로 소유역 B8의 유출량은 표준유역 301102의 하천으로 합류된다. 표준유역 (301102) 출구의 하천유량은 저수지 운영시나리오 별로 모의하였고 모의된 하천유량의 결과는 과거 및 미래기간의 하천유량 평가를 위한 자료로 활용하였다.

나. 하천유량의 평가

저수지 운영시나리오별 대상유역 출구에서 모의된 하천유량을 이용해 유황분석을 수행하였다. 유황은 하천의 한 지점에서의 유량의 변동 상황을 의미하는 것으로, 시간적 순서와 상관없이 큰 유량부터 작은 유량으로 차례로 배열하여 연도 별로 유황곡선을 작성하였다. 유황곡선의 특정 순위의 유량에 해당하는 고수량 (Q1), 풍수량 (Q95), 평수량 (Q185), 저수량 (Q275), 갈수량 (Q355)을 평균하여, 과거 및 미래기간의 각 유량을 산정하였다. 미래기간의 하천유량은 저수지 용수공급능력의 평가기간과 동일하게 Baseline (1981~2010

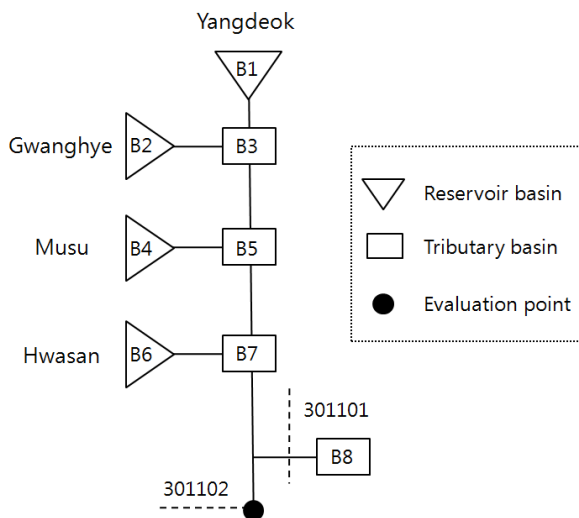


Fig. 2 Stream network of the upper Miho river watershed

년), 2025s (2011~2040년), 2055s (2041~2070년), 2085s (2071~2100년)로 구분하여 평가하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 유출모형의 매개변수 결정

대상유역은 신뢰성 높은 유량자료가 없어 하류부에 위치한 북일 지점을 대상으로 유출모형의 매개변수를 결정하였다. 매개변수를 결정하기 위해 2002년부터 2008년까지 관측 유량자료를 이용하였고, 보정기간은 2002~2003년, 검정기간은 2005~2008년으로 구분해 이분법 최적화 기법에 의해 매개변수를 결정하였다. 매개변수 α 는 4.5로 결정되었고, 보정기간과 검정기간에 대해 관측 및 모의 유출량을 일별로 비교하면 각각 Fig. 3과 Fig. 4와 같다.

모의 유출량의 적합성을 평가하기 위해 일단위 관측 및 모의 유량자료를 이용하여 결정계수 (R^2)를 산정하였다. Table 3과 같이 보정기간에 대해 관측 및 모의 유출량은 연 평균하여 각각 827.0 mm와 917.7 mm로 분석되었고 결정계수는

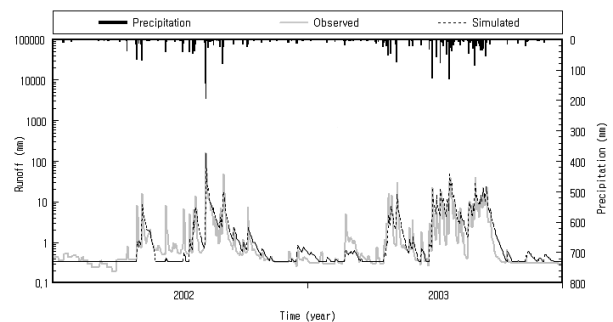


Fig. 3 A comparison of observed and simulated daily streamflow at the Buckil water level station during the calibration period (2002 to 2003)

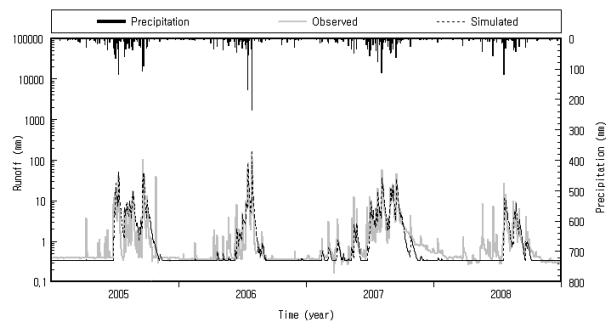


Fig. 4 A comparison of observed and simulated daily streamflow at the Buckil water level station during the validation period (2005 to 2008)

Table 3 Results of runoff analysis at the Buckil water level station during the calibration and validation periods

	Period	Precipitation (mm)	Runoff (mm)		Runoff ratio (%)		Statistics
			Observed	Simulated	Observed	Simulated	R ²
Calibration	2002~2003	1473.4	827.0	917.7	56.3	61.5	0.86
Validation	2005~2008	1295.7	772.0	782.9	58.5	58.2	0.85

Table 4 Coefficients of determination(R²) between observed and simulated daily water storage of reservoirs during the calibration and validation periods

	Period	Reservoir			
		Yangdeok	Gwanghye	Musu	Hwasan
Calibration	1994~2000	0.73	0.74	0.74	0.80
Validation	2001~2007	0.73	0.81	0.78	0.74

0.86로 나타났다. 검정기간에 대해 관측 및 모의 유출량은 연 평균하여 각각 772.0 mm와 782.9 mm로 분석되었고 결정계수는 0.85로 나타났다. 이 결과로 유출모형의 매개변수 결정에 대한 적합성을 확인하였고, 결정된 매개변수를 적용해 저수지 유입량과 지류 유출량을 산정하였다.

2. 저수량 모의모형의 검보정

미래기간의 저수지 저수량을 모의하기 위해 각 저수지별로 과거 저수율자료를 이용하여 모형을 보정 및 검정하였다. 유출모형에 의해 추정된 유입량과 산정된 관개용수량을 이용하여 보정기간(1994~2000)과 검정기간(2001~2007)에 대해 저수량 변화를 모의하였다. 이때 독 높이기 저수지인 광혜 저수지는 독 높이기 사업 이전 상태를 반영하였다. 모의 및 관측 저수량 자료를 이용하여 보정 및 검정기간에 대해 각 저수지별로 결정계수(R²)를 산정한 결과는 Table 4와 같다. Fig. 5는 각 저수지의 저수량 변화를 비교한 결과로 모의 저수량은 관측값과 유사한 경향을 보였고, 이를 기반으로 RCP 8.5 기후변화 시나리오를 적용해 미래기간의 저수지 모의운영을 수행하였다.

3. 기후변화에 따른 유역의 수자원 변화

기후변화에 따른 대상유역의 미래 수문변화를 살펴보기 위해, 편의보정된 RCP 8.5 시나리오의 기상자료를 이용하여 2011~2100년의 기간에 대해 유출분석을 수행하였다. 미래기간의 유출분석 결과를 2025s(2011~2040년), 2055s(2041~2070년), 2085s(2071~2100년)으로 구분하고, 과거 30년(1981~2010년)간의 유출분석 결과와 비교하였다. RCP 8.5 기후변화 시나리오에 의해 전망된 대상유역의 수문성분 변화는 Table 5와 같다.

기후변화에 따른 강수량의 변화는 2025s, 2055s, 2085s기

간에 대해 연 평균하여 각각 -24.7 mm, 32.9 mm, 174.2 mm로 2025s기간을 제외한 강수량은 증가하는 경향을 보였다. 기온은 각각 1.2 °C, 2.8 °C, 4.7 °C가 증가하는 것으로 분석되었고, 증발산량은 각각 9.8 mm, 57.0 mm, 84.8 mm가 증가해 미래에 지속적인 증가 추세를 보였다. 유출량은 -40.5 mm, -30.3 mm, 82.2 mm, 유출율은 -3.1 %, -4.4 %, -2.5 %의 변동을 보였고, 유출량 변화의 경향은 일정하지 않았으나 유출율은 과거보다 감소하는 것으로 분석되었다. 유출량에 큰 영향을 미치는 강수량은 2025s기간에 감소한 후 2085s 기간에 증가되는 것으로 예상되었다. 2025s기간의 유출량이 다른 미래기간보다 가장 적은 것으로 나타났으며, 이는 증발산량의 증가와 더불어 과거보다 부족한 강수량이 원인인 것으로 판단된다. 온실가스가 감소 없이 현재 추세로 배출될 경우에는 미호천 상류유역의 유출율이 과거보다 전체적으로 감소되어 가용 수자원이 줄어드는 것으로 분석되었고, 유입량의 감소로 농업용 저수지의 용수공급이 어려워질 것으로 예상되었다.

4. 저수지 운영에 따른 미래 용수공급능력 평가

농업용 저수지의 용수공급 능력을 평가하기 위해 과거기간(1981~2010년)과 미래기간(2011~2100년)의 저수지 운영시나리오별 모의 저수량 자료를 이용하여 이수안전도를 산정하였고, 미래기간을 2025s, 2055s, 2085s로 구분하여 각 저수지별 이수안전도를 정리한 결과는 Table 6과 같다.

하천유지용수를 공급하지 않는 저수지 운영시나리오(Case 1)의 미래 이수안전도를 분석한 결과, 양덕 저수지는 76.7~83.3 %, 무수 저수지는 66.6~73.3 %, 화산 저수지는 76.7~86.7 %로 분석되었다. 분석결과에 의하면 이수안전도가 모두 평가기준인 90 % 이하의 값으로 기후변화로 인해 농업용수 공급능력이 설계기준을 모두 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 독 높이기 사업이 완료된 광혜 저수지의 사업 이전의

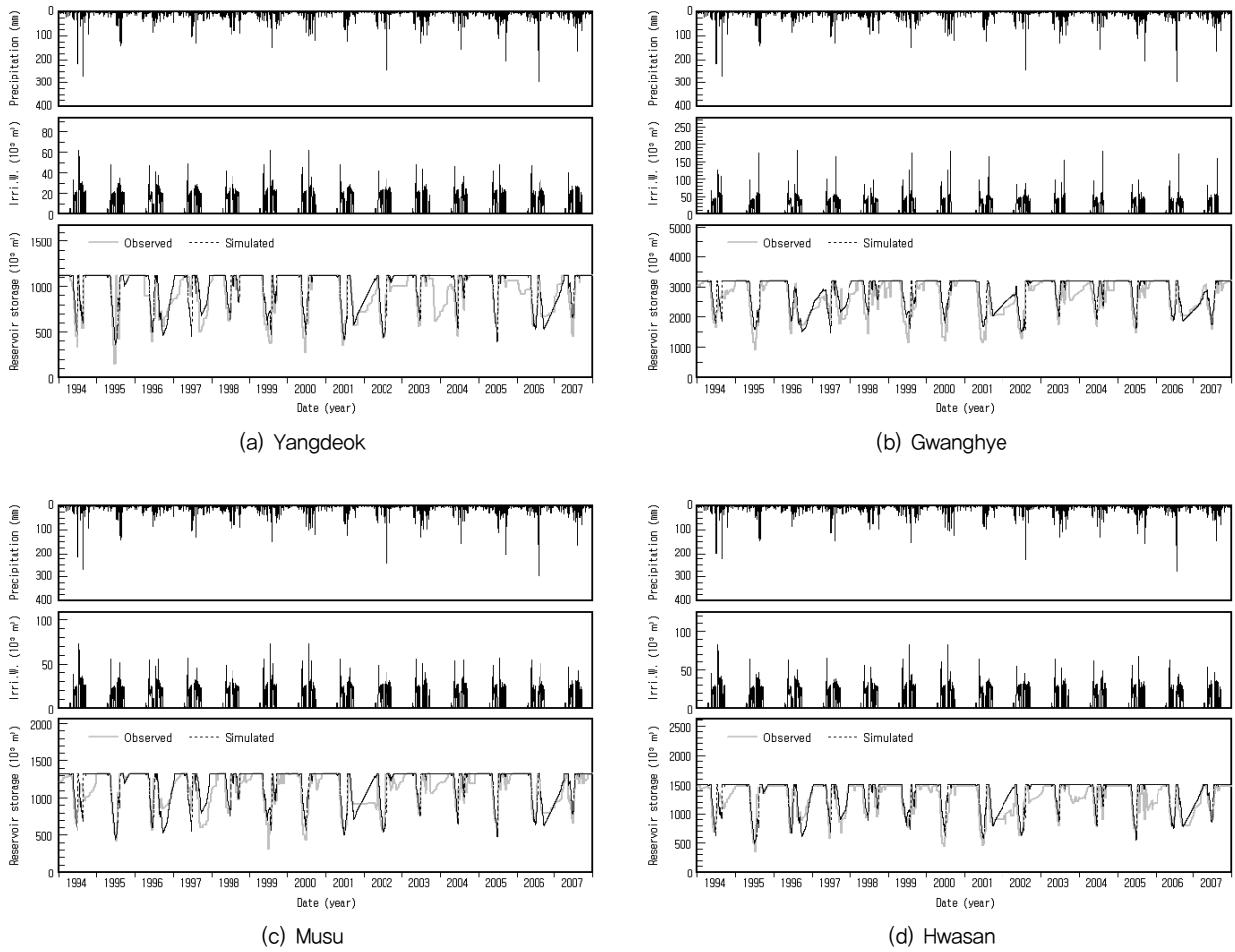


Fig. 5 A comparison of observed and simulated daily water storage of (a) Yangdeok, (b) Gwanghye, (c) Musu, and (d) Hwasan reservoirs from 1993 to 2007

Table 5 Change in hydrologic components of the upper Miho river watershed based on the RCP 8.5 climate change scenario

	Precipitation (mm)	Temperature (°C)	Evaporation (mm)	Runoff (mm)	Runoff ratio (%)
Baseline (1981~2010)	1185.6	14.5	492.3	694.2	56.7
2025s (2011~2040)	-24.7	1.2	9.8	-40.5	-3.1
2055s (2041~2070)	32.9	2.8	57.0	-30.3	-4.4
2085s (2071~2100)	174.2	4.7	84.8	82.2	-2.5

이수안전도는 76.7~86.7%로 분석되었다. 사업 이후에는 이수안전도가 83.3~93.3%로 향상되었고, 과거보다 강수량이 감소한 미래 2025s기간의 이수안전도는 가장 낮은 값을 나타냈다. 뚝 높이기 농업용 저수지도 기후변화로 인해 관개용수의 공급능력이 설계기준보다 부족할 수 있는 것으로 분석되어, 기존 농업용 저수지는 뚝 높이기 저수지보다 상대적으로 용수공급능력이 취약한 것으로 볼 수 있다.

저수지 유역에 해당하는 기준갈수량을 하천유지용수로 공

급하는 저수지 운영시나리오 (Case 2, 3)의 이수안전도는 하천유지용수를 공급하지 않는 시나리오 (Case 1)보다 동일하거나 낮은 것으로 분석되었으며, 미래에는 기준갈수량을 비관개, 또는 연중 공급하는 것이 어려울 것으로 예측되었다. 뚝 높이기 사업 이후 광혜 저수지의 미래 이수안전도는 뚝 높이기 사업 이전보다 향상되었으나, 미래 일부기간을 제외하면 하천유지용수로 기준갈수량을 일정하게 공급하는 것은 효율적이지 못한 것으로 분석되었다.

Table 6 A comparison of future water supply reliability by reservoir operation scenario based on the RCP 8.5 climate change scenario

Reservoir	Operation scenario	Baseline (1981~2010)	2025s (2011~2040)	2055s (2041~2070)	2085s (2071~2100)
Yangdeok	Case 1	93.3	83.3	76.7	83.3
	Case 2	93.3	70.0	70.0	83.3
	Case 3	83.3	56.7	70.0	63.3
	Case 4	93.3	86.7	86.7	83.3
Musu	Case 1	93.3	73.3	66.6	73.3
	Case 2	90.0	60.0	66.7	63.3
	Case 3	80.0	53.3	60.0	53.7
	Case 4	93.3	86.7	76.7	80.0
Hwasan	Case 1	96.7	86.7	76.7	83.3
	Case 2	90.0	76.7	73.3	83.3
	Case 3	86.7	63.3	73.3	73.3
	Case 4	96.7	90.0	80.0	90.0
Gwanghye before ARERP*	Case 1	90.0	80.0	76.7	86.7
	Case 2	83.3	70.0	70.0	80.0
	Case 3	83.3	70.0	60.0	73.3
	Case 4	90.0	83.3	83.3	93.3
Gwanghye after ARERP*	Case 1	96.7	83.3	93.3	93.3
	Case 2	90.0	73.3	83.3	90.0
	Case 3	86.7	70.0	73.3	83.3
	Case 4	100.0	90.0	93.3	93.3

*Agricultural Reservoir Embankment Raising Project (ARERP)

운영률을 적용한 저수지 운영시나리오 (Case 4)의 이수안전도는 모든 저수지에서 운영률을 적용하지 않은 저수지 운영시나리오 (Case 1, 2, 3)보다 향상된 경향을 보였지만, 독 높이기 사업이 완료된 광혜 저수지를 제외한 나머지 저수지의 이수안전도는 평가기준을 만족하지 못하는 것으로 분석되었다. 운영률에 의한 저수지 운영은 이수안전도 측면에서 효율적인 것으로 나타났고, 미래 저수량의 상태에 따라 용수공급의 조절이 필요할 것으로 판단된다.

5. 저수지군 운영에 따른 미래 하천의 유황평가

저수지군 운영에 따른 미래 하천유량의 변화를 평가하기 위해 저수지 운영시나리오별로 모의된 하천유량을 이용하여 유황분석을 수행하고, 유황분석 결과를 과거 및 미래기간으로 구분하여 정리하면 Table 7과 같다.

하천유지용수를 공급하지 않고 저수지를 운영하는 시나리오 (Case 1)의 과거 및 미래기간의 유황분석 결과를 비교하면, 고수량 (Q1)은 미래로 갈수록 과거에 비해 증가하였고 유량 값은 2075s기간에 가장 크게 나타났다. 풍수량 (Q95), 평수량 (Q185), 저수량 (Q275)은 모두 과거보다 감소하였으며, 갈수

량 (Q355)은 변화가 없는 것으로 분석되었다.

미래기간의 유황분석 결과를 저수지 운영시나리오별로 구분하여 비교하면 고수량은 하천유지용수 공급을 하지 않는 운영시나리오 (Case 1)가 다른 운영시나리오 (Case 2, 3, 4)보다 크게 나타났고, 하천유지용수로 기준갈수량을 비관개기에 공급하는 운영시나리오 (Case 2)가 연중 공급하는 운영시나리오 (Case 3)보다 큰 값을 보였다. 이는 하천유지용수를 공급하지 않으면 저수지의 저수위가 높아져 홍수 발생으로 인해 월류량과 하천 방류량이 증가되면서 발생된 현상으로 볼 수 있다. 풍수량, 평수량, 저수량은 하천유지용수를 공급하는 모든 운영시나리오 (Case 2, 3, 4)가 하천유지용수를 공급하지 않는 운영시나리오 (Case 1)보다 모두 높은 값으로 나타났고, 저수지로부터 하천유지용수의 공급이 없으면 미래 하류 하천유량은 증가하지 않는 것으로 분석되었다. 갈수량은 하천유지용수를 연중 공급해야만 증가하는 것으로 나타나, 하천유지용수를 비관개기만 공급하는 미래의 저수지 운영은 갈수량을 증가시키지 못하는 것으로 나타났다.

기후변화에 대비하여 하천유량 관리의 지표로 활용되는 저수량과 갈수량을 증가시키기 위해서는 농업용 저수지의 저류수를 하천유지용수로 공급해야하나, 농업용 저수지의 우

Table 7 Results of flow duration analysis by reservoir operation scenario at the upper Miho river watershed outlet based on the RCP 8.5 climate change scenario

	Operation scenario	High flow (Q1, m ³ /s)	Abundant flow (Q95, m ³ /s)	Ordinary flow (Q185, m ³ /s)	Low flow (Q275, m ³ /s)	Drought flow (Q355, m ³ /s)
Baseline (1981–2010)	Case 1	190,724	3,909	1,441	1,082	1,000
2025s (2011–2040)	Case 1	243,354	2,402	1,159	1,017	1,000
	Case 2	242,666	2,406	1,186	1,046	1,000
	Case 3	241,515	2,429	1,190	1,065	1,046
	Case 4	242,898	2,414	1,193	1,042	1,000
2055s (2041–2070)	Case 1	241,070	3,009	1,148	1,020	1,000
	Case 2	240,235	3,015	1,169	1,056	1,000
	Case 3	239,356	3,042	1,172	1,068	1,047
	Case 4	240,754	3,015	1,176	1,053	1,000
2085s (2071–2100)	Case 1	391,304	3,460	1,310	1,039	1,000
	Case 2	390,362	3,463	1,328	1,064	1,000
	Case 3	389,474	3,490	1,334	1,075	1,052
	Case 4	390,760	3,464	1,333	1,065	1,000

선 목표인 관개용수 공급도 충분하지 않은 것으로 분석되었다. 하천유지용수를 운영률에 의해 비관개기 공급하는 저수지 운영은 하천의 저수량을 증가시키는 효과를 보였지만 갈수량을 증가시키지 못하는 것으로 분석되었다.

IV. 결 론

본 연구에서는 미호천 상류유역의 농업용 저수지군 운영에 따른 미래 하천유량의 변화를 평가하였다. 농업용 저수지군은 저수량 규모가 100만 m³ 이상인 저수지를 대상으로 하였고, 기후변화 시나리오는 온실가스가 감소 없이 현재 추세로 진행되는 RCP 8.5 기후변화 시나리오를 적용하였다. 저수지 운영시나리오는 하천유지용수 공급에 따라 ‘하천유지용수를 공급하지 않는 경우’, ‘하천유지용수를 연중 공급하는 경우’, ‘하천유지용수를 비관개기에 공급하는 경우’, ‘하천유지용수를 운영률에 의해 비관개기에 공급하는 경우’의 4가지로 구성하였다. 저수지 운영시나리오별로 각 저수지의 용수공급능력의 분석과 유역출구 지점에서 유황분석을 수행하였다. 이 결과로부터 기후변화로 인한 농업용 저수지군 운영에 따른 미래 하천유량의 변화를 평가하면 다음과 같다.

온실가스가 현재 추세로 배출되는 기후변화 시나리오에서 미호천 상류유역의 유출률은 과거에 비해 전체적으로 감소되었고, 이로 인해 저수지 유입량이 감소하여 미호천 상류 농업용 저수지군의 관개용수 공급능력이 설계기준보다 저하되는 것으로 분석되었다. 이는 두 높이기 저수지도 예외가 아니었

으며, 기후변화로 인한 수자원 환경은 농업용 저수지의 운영을 어렵게 할 것으로 예상되므로 관개용수 부족에 대비한 농업용 저수지의 운영방안의 마련이 필요하다.

기후변화로 인해 예상되는 가용 수자원의 변화에 대비하여 농업용 저수지 운영 시 하천유지용수를 공급하지 않을 경우는 하류하천의 고수량이 증가하였고, 하천유지용수를 비관개기에 공급하는 경우는 풍수량, 평수량, 저수량이 증가하였다. 또한 갈수량은 하천유지용수를 연중 공급해야만 증가하는 것으로 분석되어, 갈수량의 증가를 위해서 하천유지용수를 관개기에도 공급해야 하는 것으로 나타났다. 운영률에 기반한 저수지 운영은 미래 용수공급능력을 향상시킬 뿐만 아니라 하류하천의 저수량을 증가시키는 것으로 나타났고, 운영률을 적용한 저수지 운영은 운영률을 적용하지 않은 저수지 운영보다 농업용 저수지의 저수량을 더욱 효율적으로 관리할 수 있을 것이라 기대된다. 향후 하천유지용수를 연중 공급할 수 있도록 농업용 저수지의 운영률을 보완해 저수지 운영에 활용한다면 하천의 갈수량 증가에 도움이 될 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(11 기술혁신C06)에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Ahn, J. M., T. H. Im, I. J. Lee, and S. U. Cheon, 2014. Assessment of future river environment considering climate change and basin runoff characteristics. *Journal of the Korean Water Resources Association* 47(3): 269-283 (in Korean).
2. Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements, FAO irrigation and drainage paper 56, Rome, Italy: FAO.
3. Choi, K. S., 2010. Sensitivity analysis of water resources caused by climate change -focused on the basin of the Daecheong dam-. Ph. D. dissertation, Mokpo, Korea: Mokpo National University (in Korean).
4. Hargreaves, G. H., and Z. A. Samani, 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture* 1(2): 96-99.
5. Hwang, S. H., M. S. Kang, J. H. Kim, J. H. Song, S. M. Jun, S. H. Lee, and J. Y. Choi, 2012. Assessment of flood impact on downstream of reservoir group at Hwangryong River watershed. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(3): 103-111 (in Korean).
6. Kang, S. U., 2011. Development and application of water level zone decision method for long-term reservoir operation using dynamically dimensioned search algorithm. Ph. D. dissertation, Busan, Korea: Pukyong National University (in Korean).
7. Kim, J. Y., 2012. Application of hedging rule to Han river reservoir system against severe drought. Ph. D. dissertation, Daejeon, Korea: Chungnam National University (in Korean).
8. Lee, G. Y., 2000. Development of estimation system for agricultural water demand. Ph. D. dissertation, Seoul, Korea: Konkuk University (in Korean).
9. Lund, J. R., 1996. Developing seasonal and long-term reservoir system operation plans using HEC-PRM, 11-17. Davis, CA.: U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
10. Lee, J. N., and J. K. Noh, 2010. Evaluation of supplying instream flow by operation rule curve for heightening irrigation reservoir. *Journal of Agricultural Science* 37(3): 481-490 (in Korean).
11. Lenderink, G., A. Buishand, and W. V. Deursen, 2007. Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach. *Hydrology and Earth System Sciences* 11(3): 1145-1159.
12. Lee, S. H., S. H. Yoo, N. Y. Park, and J. Y. Choi, 2013. An analysis of environmental water release patterns considering operation rules in enlarged agricultural reservoirs. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(3): 51-62 (in Korean).
13. Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries (MFAFF), 1997. A study on the water requirement variation with the farming conditions in the paddy field, Seoul : MFAFF (in Korean).
14. Ministry of Agriculture and Forestry (MAF), 2002. The design standard for agricultural production infra improvement project plan (Fill dam), 156-161. Seoul : MAF and KARICO (in Korean).
15. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MLIT), and Han River Flood Control Office (HRFCO), 2009. Estimation, assessment, and securing regional instream flow considering natural & social environment (Han river basin), 733. Seoul : MLIT and HRFCO (in Korean).
16. Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries (MFAFF), and Korea Rural Community Corporation (KRCC), 2009. Statistical year book of land and water development for agriculture, 292. Gyeonggi-do, Korea (in Korean).
17. Noh, J. K., 2013. Securing stream water by considering water uses with software technology (Ⅱ), Daejeon, Korea: K-water Institute (in Korean).
18. Oh, S. T., 2014. Smart water management technology for optimal estimation of water supply. *KCID magazine* 53: 60-66 (in Korean).
19. Park, J. Y., I. K. Jung, K. Y. Lee, and S. J. Kim, 2013. Development of operating rule curve for multipurpose water supply in heightened agricultural reservoir. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 33(4): 1389-1400 (in Korean).
20. Senga, Y., 1991. A reservoir operational rule for irrigation in Japan, *Irrigation and Drainage Systems* 5(2): 129-140.
21. Shin, S. C., 2000. Analysis of river flow change based on some scenarios of global warming. *Journal of the Korean Water Resources Association* 33(5): 623-634 (in Korean).
22. Schmidli, J., C. Frei, and P. L. Vidale, 2006. Downscaling from GCM precipitation: a benchmark for dynamical and statistical downscaling methods. *International journal of climatology* 26(5): 679-689.
23. So, B. J., M. J. Kim, and H. H. Gwon, 2012. Projection and assessment of next generation climate change scenario of Korea Meteorological Administration: focused on RCP Scenario of KMA. *Water for Future* 45(8): 56-70 (in Korean).
24. Yoon, K. H., 2011. Development of downstream control function rule for parallel reservoirs with HEC-ResSIM, Master's thesis, Daegu, Korea: Kyungpook National University (in Korean).
25. Yoo, S. H., S. H. Lee, J. Y. Choi, and T. S. Park, 2012. Optimizing rules for releasing environmental water in enlarged agricultural reservoirs. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(5): 17-24 (in Korean).