



기후변화에 따른 독높임 저수지의 용수공급능력 평가

Evaluating Water Supply Capacity of Embankment Raised Reservoir on Climate Change

이재남* · 노재경**,†

Lee, Jaenam · Noh, Jaekyoung

Abstract

An embankment raising project on 113 agricultural reservoirs in Korea was implemented in 2009 to increase water supply capacity for agricultural water and instream uses. This study evaluated the future water supply capacity of the Imgo reservoir at which the agricultural reservoir embankment raising project was completed, considering climate change scenarios. The height of the embankment of the reservoir was increased by 4.5 m, thereby increasing its total storage from 1,657.0 thousand to 3,179.5 thousand cubic meters. To simulate the reservoir water storage with respect to climate changes, two climate change scenarios, namely, RCP 4.5 and RCP 8.5 (in which greenhouse gas reduction policy was executed and not executed, respectively) were applied with bias correction for reflecting the climate characteristics of the target basin. The analysis result of the agricultural water supply capacity in the future, after the agricultural reservoir embankment raising project is implemented, revealed that the water supply reliability and the agricultural water supply increased, regardless of the climate change scenarios. By simulating the reservoir water storage considering the instream flow post completion of the embankment raising project, it was found that water shortage in the reservoir in the future is not likely to occur when it is supplied with an appropriate instream flow. The range of instream flow tends to decrease over time under RCP 8.5, in which the greenhouse gas reduction policy was not executed, and the restoration of reservoir storage was lower in this scenario than in RCP 4.5, in which greenhouse gas reduction policy was executed.

Keywords: Climate change; Agricultural reservoir embankment raising project, Reservoir water balance, Water supply capacity, Instream flow

1. 서론

전 세계적으로 기후변화로 인한 물 부족 문제가 심각해지고 있으며 최근 우리나라도 이에 따른 피해가 해마다 발생하고 있다. 이상기후보고서(KIC, 2011, 2012, 2013)에 의하면 2011년은 북한강 수계에서 동절기에 조류(藻類)가 발생하는 이상 현상이 나타났다. 2012년 6월 말에는 강수량이 부족하여 농업용 저수지의 저수율이 40%로 평년(53%)보다 13% 낮아져 경기, 충남, 전남, 전북지역에서 농업용수가 부족하였고, 2013년은 장마전선이 중북부 내륙에 정체하여 7월 강수량이 평년 강수량의 6%로 제주도, 전남, 경북, 동해안 지역에 가뭄이 발생하였다. 특히 제주지역은 59일간 가뭄이 지속되어 농작물에 큰 피해를 입혔고, 2015년은 소양강댐의 저수위가 역대 네 번째로 낮은 수위를 기록하며 극심한 봄 가뭄을 예고한 바 있다(Lee et al., 2015).

이상기후에 따른 물 부족 피해가 발생하면서, 여름에 집중되는 홍수량까지 이수관리를 위해 확보할 필요성이 대두되고 있는 실정이다. 여름에 집중되는 강수량의 계절적 편차를 해결하기 위해 저수지와 댐 등 수리시설을 이용할 수밖에 없으며, 이로부터 공급하는 용수는 전체 수자원 이용량(333억 m³)의 56%에 이르고 있다. 이 중 농업용수량은 수자원 이용량(하천유지용수 제외)의 62%로 큰 비중을 차지하고 있다(MOLIT, 2011). 농업용 저수지는 비관개기에 상류로부터 유입되는 물을 최대한 확보하여 관개기에 농업용수를 공급하는데 지장이 없도록 운영하고 있다. 지금까지 비관개기에는 하천유지용수를 공급하지 않는 것이 관행이었으며, 이로부터 하루 하천의 수생태계에 다소 영향을 끼쳤다. 기후변화로 인한 물 부족은 이와 같은 수생태계에 미치는 영향을 더욱 증가시킬 것으로 예상되고 있다. 2009년에 농업용 저수지 독높이기 사업(이하 독높임 사업)이 시작되었고, 전국의 기존 113개 농업용 저수지를 증고하여 2.4억 m³의 저수공간을 추가로 확보하였다. 확보된 저수공간은 미래 기후변화에 대비하여 홍수를 조절하고, 수자원 확보를 통한 안정적인 농업용수 공급과 갈수기 하천유지용수로 활용하고 있다.

2010년부터 독높임 저수지를 대상으로 연구가 시작되었고, 이는 독높임 사업 이전과 이후의 이·치수 효과 분석, 그리고 사업 이후의 저수지 운영방안에 대한 연구로 구분할 수 있

* 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: April 3, 2015

Revised: June 24, 2015

Accepted: July 13, 2015

다. 독높임 사업 전·후의 하루 홍수조절 효과를 분석하기 위해 Lee et al. (2013)은 봉학 저수지를 대상으로, Hwang et al. (2012)은 황룡강 유역의 장성, 수양, 유탕, 왕동 저수지를 대상으로 연구를 수행하였다. 홍수조절을 고려한 저수지 운영에 관한 연구로 Lee (2012)는 계룡, 구성, 옥계, 옥성, 추평 저수지를 대상으로 홍수기 관리수위를 설정하고 저수량을 모의하여 이수안전도 변화를 검토하였고, 각각의 저수지 특성에 적합한 홍수기 관리수위가 필요하다고 제안하였다. Noh (2010)는 백곡 저수지를 대상으로 홍수기 제한수위 시나리오에 따른 용수공급량 변화와 연말 저수량 확보에 미치는 영향을 분석하였으며, 홍수제한수위를 설정할 때 용수공급량의 감소는 적었고, 단계별 홍수제한수위를 설정해도 연말 저수량 확보에 지장이 없는 것으로 분석하였다. 독높임 저수지의 운영방안에 관한 연구로 Lee and Noh (2010)는 백곡저수지를 대상으로 이수관리곡선을 적용하여 하천유지유량의 공급가능성을 평가하였고, 용수를 제한 공급하여 하천유지유량을 탄력적으로 공급할 수 있는 것으로 나타났다. Kim et al. (2012)은 과거 운영 자료를 이용한 저수지 운영곡선을 도출해 금사 저수지에 적용하였고, Park et al. (2013)은 20개 독높임 저수지의 특성을 분석하여 4개의 대표 저수지(옹양, 궁촌, 용암, 운암)를 선정하고, 관개용수 및 하천유지용수 공급을 고려한 물수지 결과를 기반으로 이수운영을 위한 기준곡선을 도출하였다.

기후변화가 저수지의 물수지에 미치는 영향에 대한 연구로 국내는 Park (2008)이 기후변화가 농업용 저수지의 저수량 변화에 미치는 영향을 분석하였고, Kim (2012)은 기후변화에 따른 용담댐과 대청댐의 용수공급능력을 평가하였다. Chung et al. (2011)은 한강수계 5개 댐을 대상으로 미래 유입량 변화에 따른 저수량 및 방류량 변화를 분석하였고, Lee

(2012)는 기후변화에 따른 충남지역의 6개소 관개 저수지를 대상으로 물수지 분석을 수행한 바 있다. 국외는 Payne et al. (2004)이 Columbia 강 유역의 저수지군을 대상으로 기후변화에 따른 저수지 운영에 관한 연구를 수행하였고, Gohari et al. (2014)이 기후변화로 이란 Zayandeh-Rud 강 유역에 위치한 Chadegan 저수지에서 농업용수의 부족 가능성을 예상하였다. Fujihara et al. (2008)은 기후변화로 인해 터키 Seyhan 강 유역의 Seyhan댐과 Catalan댐은 용수 부족이 발생하지 않으나, 농지가 증가한다면 유입량 감소와 용수 사용량의 증가로 물 부족이 발생할 수 있다는 결과를 도출하였다.

아직 독높임 저수지를 대상으로 기후변화가 저수량 변화에 미치는 영향에 대한 연구는 없는 것으로 조사되었으며, 설계에서도 기후변화를 고려하지 않고 과거 기상자료만을 사용하였다. 운영에 관한 연구에서도 과거자료를 기반으로 수행하였으며, 향후 효율적 운영 방안을 마련하기 위해 기후변화의 고려가 절실히 요구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 국가 표준 기후변화 시나리오인 RCP 시나리오를 적용하여, 독높임 사업이 완료된 임고저수지를 대상으로 관개용수와 하천유지용수를 포함한 용수공급능력을 평가하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 대상 저수지 및 자료수집

임고 저수지는 경상북도 영천시 임고면 사리의 동경 129° 03', 북위 36° 02' 인 임고천 상류에 위치한다. 임고 저수지에서 방류된 물은 낙동강 제 1지류인 금호강을 통해 낙동강으로 합류된다 (Fig. 1). 저수지 유역의 토지이용 현황은 전체의 87.9%가 산지이며, 논이 5.4%, 밭이 5.3%, 수면이 1.1%, 주

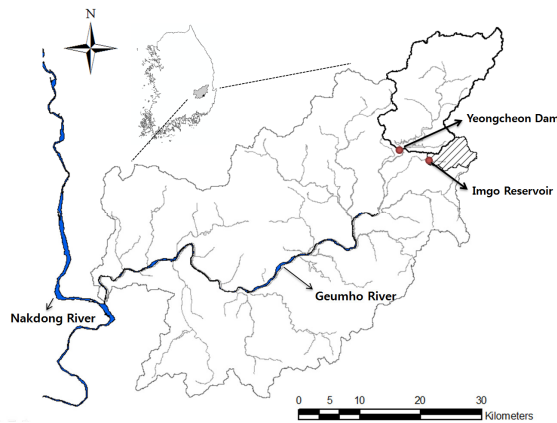


Fig. 1 The location of study area (Imgo reservoir watershed)

Table 1 Characteristics of Imgo agricultural reservoir

| | Embankment raising agricultural reservoir project | |
|---|---|---------|
| | Before | After |
| Watershed area (ha) | 2,684 | |
| Irrigation area (ha) | 232.7 | |
| Full water level (EL.m) | 164.5 | 168.3 |
| Water storage (10 ³ m ³) | 1,521 | 3,179.5 |

거지가 0.3 %를 차지한다. 저수지 제원은 Table 1과 같이 유역면적 2,684 ha, 수혜면적 232.7 ha, 증고전 유효저수량은 1,521천 m³이다. 2011년에 독높임 사업이 착공되어 제체가 4.5 m 높아져 만수위는 EL.164.5 m에서 EL.168.3 m로 3.8 m 증가하였고, 1,657천 m³의 저수량을 추가로 확보하여 독높임 사업 이후 저수량은 3,179.5천 m³에 이른다.

미래 용수공급능력 평가를 위한 기후변화 시나리오는 기후변화정보센터(www.climate.go.kr)에서 제공하는 RCP 한반도 시나리오 (12.5 km)의 일 자료를 이용하였다. 기후변화 시나리오의 편의보정과 저수지 유역의 수문변화를 분석하기 위해 영천 관측소의 1981-2010년까지 기상자료를 수집하였으며, 임고 저수지 유입량을 검증하기 위해 동일 기간의 영천 댐 운영 자료를 사용하였다. 또한 저수지의 물수지 분석을 위해 내용적 자료를 수집하였고, 2000년부터 독높임 사업 착공 전년도인 2011년까지의 저수율 자료(http://rims.ekr.or.kr)는 모의 저수량의 검·보정에 사용되었다.

2. 미래 기후자료 구축

미래 기후자료 구축을 위해 대표농도경로 (Representative Concentration Pathways, 이하 RCP)의 온실가스 시나리오를 선정하였다. RCP 시나리오는 2014년 발간된 기후변화에 관한 정부간 협의체 (IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)의 제5차 평가보고서에 도입된 시나리오이다. 기상청에서는 RCP 시나리오를 기반으로 한 국가 표준 기후변화 시나리오를 개발하였고, 이는 국가차원에서 체계적이고 일관성 있는 기후변화 적응 대책을 수립하기 위한 기초자료로 기후변화정보센터 (CCIC, Climate Change Information Center)를 통해 제공하고 있다. RCP 시나리오는 복사강제력에 따라 RCP 2.5 (인간 활동에 의한 영향을 지구 스스로가 회복 가능한 경우), RCP 4.5 (온실가스 저감 정책이 상당히 실현되는 경우), RCP 6.5 (온실가스 저감정책이 약간 실현되는 경우), RCP 8.5 (온실가스 저감없이 현재 추세로 배출되는 경우)로 구분된다.

본 연구에서는 RCP 시나리오 중 온실가스 저감 정책이 상

이한 RCP 4.5와 8.5 시나리오를 선정하였고, 공간해상도가 12.5 km 인 한반도 전망자료를 이용하였다. 이 자료는 전지구 기후모델 (HadGEM2-AO)로 생성된 135 km 해상도 자료를 지역 기후모델 (HadGEM3-RA)을 이용하여 역학적으로 상세화한 격자자료 형태로, 연구지역에 해당하는 격자에 대해 강우와 기온자료를 추출하여 사용하였다. 일별 저수지 운영을 모의하기 위한 기후변화 시나리오의 시간해상도가 월 단위 자료만 제공될 경우에는 시간 상세화하여 일 단위 자료로 재생산을 해야 하지만, 본 연구에서 선정한 RCP 한반도 시나리오는 일 단위 자료가 제공되고 있다. 또한 한반도 기후변화 시나리오를 직접 이용하는 것은 편의 문제점이 제시되고 있어 (So et al., 2012), 연구지역의 기후특성에 적합하도록 편의를 보정하는 작업을 수행하였다. 강우자료는 평균 강우량 뿐만 아니라 강우일수도 보정하였으며, Schmidli et al. (2006)이 사용한 Local intensity scaling 기법을 적용하였다. 이는 RCP 시나리오의 과거 모의기간 (1979년-2005년)에 강수량과 동일기간 관측 강수량을 월별로 내림차순으로 정렬하고, 관측 강수량이 0에 해당하는 배열과 동일한 배열의 RCP 시나리오 강수량을 월별 임계값 ($P_{th,m}$)으로 설정한다. 식 (1)에 의해 월별 보정계수 (Scaling factor)를 산정하고, 식 (2)와 같이 RCP 시나리오의 강우자료에서 월별 임계값을 감하여 강우일수를 보정한 후 보정계수 (S_m)를 적용해 미래 강우자료를 구축하였다.

$$S_m = \frac{\overline{P_{obs,m}}}{P_{rcp,m}(P_{rcp,m} \geq P_{th,m}) - P_{th,m}} \quad (1)$$

$$P_{fut} = S_m (P_{rcp} - P_{th,m})$$

$$P_{fut} = 0 \text{ if } P_{fut} < 0 \quad (2)$$

여기서, P_{fut} 는 편의보정 후 미래 강수량, P_{rcp} 는 RCP 시나리오의 일 단위 강수량, $\overline{P_{rcp,his}}$ 는 RCP 시나리오의 과거 모의기간 (1979-2005년) 동안 연평균 강수량, $\overline{P_{obs}}$ 는 1979-2005년 동안의 연평균 관측강수량, m은 월 단위 첨자이다.

기온자료는 RCP 시나리오의 과거 모의기간에 대한 평균값과 동일기간에 대한 관측자료 평균값의 편차만큼 보정하였고, 이에 대한 산정식은 식 (3)과 같다 (Lenderink et al., 2007). 보정된 RCP 시나리오의 최고 및 최저기온은 미래 농업용수 공급량 추정을 위한 잠재증발산량 산정에 이용하였다.

$$T_{fut} = T_{rcp} + (\overline{T_{obs}} - \overline{T_{rcp,his}}) \quad (3)$$

여기서, T_{fut} 는 편의보정 후 미래 기온, T_{rcp} 는 RCP 시나리오의 일 단위 기온, $\bar{T}_{rcp,his}$ 는 RCP 시나리오의 과거 모의기간 (1979-2005년) 동안 연평균 기온, \bar{T}_{obs} 는 1979-2005년 동안 연평균 관측기온이다.

3. 농업용수량 산정

논에서의 농업용수는 증발산량, 침투량, 그리고 유효우량을 고려하게 된다. 단위논의 필요수량은 식 (4), 식 (5)와 같이 논 물수지에 의하고 수혜면적을 곱하여 산정한다. 여기에 수로손실량 15%, 배분관리용수량 20%를 반영해 저수지로부터 공급해야 할 농업용수량을 산정하였다 (Oh, 2014).

$$D(i) = D(i-1) + Re(i) - ET(i) - Inf(i) \quad (4)$$

$$Req(i) = RD(i) - D(i) \quad (5)$$

여기서 D 는 담수심, Re 는 유효우량, ET 는 증발산량, Inf 는 침투량, Req 는 단위논의 관개용수량, RD 는 논 생육시기에 따른 물관리 높이, i 는 일 단위 첨자이다.

단위논 필요수량을 계산하기 위해 유효우량 계산은 담수심 60 mm 기반으로 결정하였고, 침투량은 Lee (2000)가 제시한 경북지역의 평균 침투량 5.45 mm를 적용하였다. 기준 증발산량은 식 (6)와 같이 Penman-Monteith 방법 (Allen et al., 1998)에 의해 산정하고, 영농방식 변화에 따른 필요수량 변화 연구 (MIFAFF, 1997)에서 제시된 작물계수를 반영해 작물 증발산량을 계산하였다.

$$ET_{o_{PM}} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2(e_a + e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (6)$$

여기서, $ET_{o_{PM}}$ 는 Penman-Monteith 방법에 의해 산정된 잠재증발산량 (mm/day), R_n 은 순일사량 (mm/day), $e_a - e_d$ 은 포화수증기압과 공기의 평균 실제 수증기압과의 차 (kPa), T 는 평균온도 (°C), U_2 는 지상으로부터 높이 2 m에서 측정된 풍속 (m/s), Δ 는 포화수증기압과 온도곡선의 기울기 (kPa/°C), γ 는 습도상수 (kPa/°C)이다.

Penman-Monteith 방법에서 잠재증발산량 산정을 위해 일사량, 기온, 풍속, 습도 등 기상자료가 필요하나, Hargreave 방법 (Hargreaves and Samani, 1985)은 식 (7)과 같이 최저기온과 최대기온만을 필요로 한다.

$$ET_{o_{Harg}} = 0.0023(T_{mean} + 17.8) \sqrt{(T_{max} - T_{min})} \times R_a \quad (7)$$

여기서, $ET_{o_{Harg}}$ 는 Hargreaves 방법에 의해 산정된 잠재증발산량 (mm/day), T_{max} 는 일 최대기온 (°C), T_{min} 는 일 최저기온 (°C), T_{mean} 는 일 평균기온 (°C), R_a 는 대기권 밖 복사열 (MJ/m²/day)이다.

본 연구에서 선정된 한반도 지역의 RCP 시나리오에 일사량이 제공되지 않아 관측자료를 이용하여 Penman-Monteith 방법 ($ET_{o_{PM}}$)과 Hargreaves 방법 ($ET_{o_{Harg}}$)으로 잠재증발산량을 계산하고, 식 (8)의 관계식을 유도하였다. 편의보정된 미래의 최소, 최대 기온자료를 이용해 Hargreaves 방법 ($ET_{o_{Harg}}$)으로 잠재증발산량을 구하고, 식 (8)을 이용하여 미래 증발산량을 구축하였다 (Allen et al., 1998).

$$ET_{o_{PM}} = a \times ET_{o_{Harg}} + b \quad (8)$$

4. 저수량 모의 운영

저수지 유입량은 일 단위 연속유출모형인 ONE 모형을 이용하여 모의하였다. 유출량은 식 (9)와 같이 산정되며, 미계측 유역에서 매개변수 α 는 식 (10)에 의해 결정할 수 있도록 제시하고 있다. 본 모형은 Noh and Lee (2011)가 개념적 유출모형인 DAWAST 모형과 TPHM 모형을 이용한 저수지 유입량 산정에 대한 개선점을 분석하였다. 이를 바탕으로 오직 하나의 매개변수가 토양수분 저류량에 따라 비선형으로 변화하는 관계를 구현하였고, 사용하기 쉽고 유출반응도 잘 나타내는 ONE 모형을 개발해 대청댐과 용담댐에 적용하여 매우 양호한 모의 결과를 제시하였다 (Noh, 2013).

$$Q(i) = (1 - e^{-0.003 \times S(i)})^{(0.2 + e^{-0.001 \times S(i) \times \alpha})} \times S(i) \quad (9)$$

$$Qr = 25.22 + 0.0245 \times Pa \quad (10)$$

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

다목적댐의 유입량은 저수량 변화와 방류량을 더해 계산하고 있으나, 관개용 저수지는 계측 방류량 자료가 없어 저수지 운영자료로부터 유입량을 산정할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 농업용수 공급량을 산정해 이를 기반으로 저수량 변화를 모의하고, 관측 저수량과 비교하여 유출모형의 매개변수를 결정하였다. 저수량 변화는 식 (11)과 같이 유입량에 의해 증가하고, 저수면 증발량과 방류량 (농업용수량 및 하천유지유량)에 의해 감소된다. 월류량은 식 (12)와 같이 만수위를

초과하면 발생하는 것으로 하였다.

$$S(i) = S(i-1) + IQ(i) - SE(i) - SQ(i) \quad (11)$$

$$OV(i) = S(i) - FS \quad (12)$$

여기서, S 는 저수량, IQ 은 유입량, SE 는 수면 증발량, SQ 은 방류량, OV 은 월류량, FS 는 만수위 저수량, i 는 일단위 첨자이다.

과거 농업용 저수지의 운영자료는 다목적 댐과 달리 신뢰도가 다소 미흡한 실정이다. 임고 저수지의 저수율 자료를 전 기간에 대해 분석하였으며, 자료의 품질이 비교적 양호한 연도를 선별해 유출모형의 매개변수 결정을 위한 자료로 활용하였다. 농업용수의 공급기간인 관개기(4-9월)에 대해 저수량을 모의하여, 유출모형의 매개변수를 결정하였다. 보정기간은 2000년과 2001년, 검정기간은 2004년과 2005년도를 대상으로 하였고, 저수지 모의운영에 대한 적합성을 평가하기 위해 관측 및 모의 저수량의 결정계수 (R^2)와 상대오차 (RE)를 각각 식 (13), 식 (14)에 의해 산정하였다.

$$R^2 = \left(\frac{\sum (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum (S_i - \bar{S})^2}} \right)^2 \quad (13)$$

$$RE = \frac{|\bar{O} - \bar{S}|}{\bar{O}} \times 100 \quad (14)$$

여기서, O 와 S 는 각각 관측, 모의저수량, \bar{O} 와 \bar{S} 는 각각 평균 관측, 모의저수량, i 는 순별 단위 첨자이다.

5. 저수지의 미래 용수공급능력 및 적정 하천유지유량 산정

RCP 4.5와 8.5 시나리오를 적용하여 독높임 저수지의 물 수지를 분석하였다. 독높임 사업으로 인한 미래 농업용수 공급능력을 평가하기 위해 농업용수만을 공급할 때 저수량을 모의하였고, 독높임 사업 이전과 이후의 만수위는 각각 El. 164.5 m, El. 168.3 m를 적용하였다. 미래 2025s (2011-2040년), 2055s (2041-2070년), 2085s (2071-2100년) 기간으로 구분하여 저수지의 이수안전도를 평가하였다. 이수안전도는 수리시설물이 용수 수요량을 충족할 수 있는 물 공급능력의 안정성을 평가하는 지표로 식 (15)와 같이 산정하며, 분석단위는 연 단위로 계산하였다. 이는 분석연도에 모의 유효저수량이 0 이하이면 그 해에 전체가 물이 부족한 것으로 한다. 본

연구에서 농업용 저수지는 한발빈도가 10년인 이수안전도 90 %를 기준으로 평가하였다.

$$Re = \left(1 - \frac{Td}{Tn}\right) \times 100 \quad (15)$$

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

또한 독높임 사업 이후 저수지의 용수공급능력을 평가하기 위해 농업용수와 하천유지용수를 공급할 때, 저수량 변화를 분석하였다. 이때 하천유지용수는 비관개기에 일별로 일정하게 공급하도록 설정하고, 이수안전도 90 %, 100 %으로 구분하여 용수공급량의 범위를 제시하였다. 이 때 최소 공급량은 저수량이 한 번도 고갈되지 않는 범위에서 최대값, 최대 공급량은 이수안전도 90 %를 만족할 때의 값을 결정하는 것으로 하였다.

III. 결과 및 고찰

1. RCP 시나리오 편의보정 결과

강우일수 및 강우량, 최소 및 최대기온에 대해 편의를 보정하였다. Fig. 2는 RCP 시나리오의 모의기간 (1979-2005년)에 대해 강우일수와 강우량을 편의보정 이전과 이후로 비교한 결과이다. Fig. 2(a)는 편의보정 이전의 강우일수를 월별로 나타낸 것이며, Fig. 2(b)는 편의보정 이후의 강우일수를 비교한 것이다. 편의보정 이후의 강수량은 2.0~3.3배 적게 보정되었으며, 월평균 강우일수의 오차는 1일 이내로 매우 안정되게 보정되었다. Fig. 3은 강우량 보정의 결과이며, Fig. 3(a)는 편의보정 이전의 RCP 시나리오의 강우량을 월별로 나타낸 것이고 Fig. 3(b)는 편의보정 이후의 결과를 나타낸 것이다. 8월과 9월 강우량이 보정전에 비해 각각 45 %와 54 %로 오차가 크게 나타났으며, 보정 후에는 모든 월에서 오차가 -5 %~6 %로 크게 개선돼 나타났다. 위의 결과는 RCP 시나리오의 강우 자료는 강우일수와 강우량에 대해 반드시 편의보정을 실시해야 하는 당위성을 나타낸 것이다.

Fig. 4와 Fig. 5는 최소기온과 최대기온에 대해 편의보정한 결과이다. RCP 시나리오의 기온자료는 강우자료와 다르게 일정한 편차를 보였고, 최대기온의 편차는 3.1 °C 적게, 최소기온의 편차는 0.3 °C 높게 나타났다. 따라서 RCP 시나리오의 최대기온에 3.1 °C 더하고, 최소기온에 0.3 °C 감하여 보정하였으며, Fig. 4(b), Fig. 5(b)에서와 같이 관측치과 유사한 경향을 보였다.

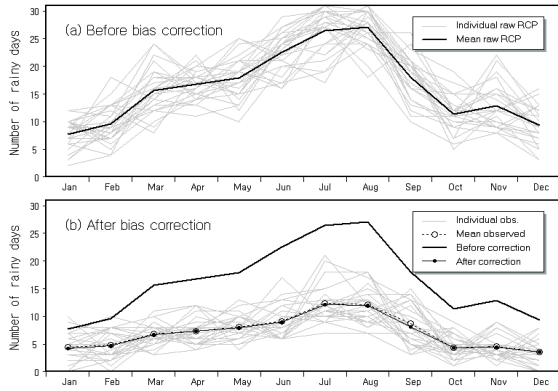


Fig. 2 The comparison of monthly averaged rainy days (a) before and (b) after bias correction

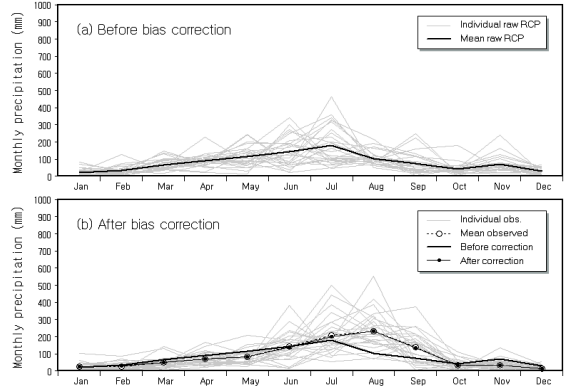


Fig. 3 The comparison of monthly averaged precipitation amounts (a) before and (b) after bias correction

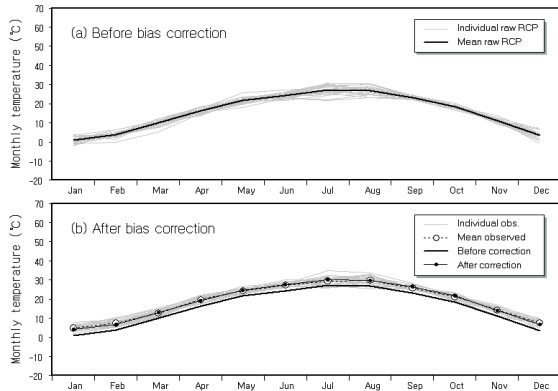


Fig. 4 The comparison of monthly averaged maximum temperatures (a) before and (b) after bias correction

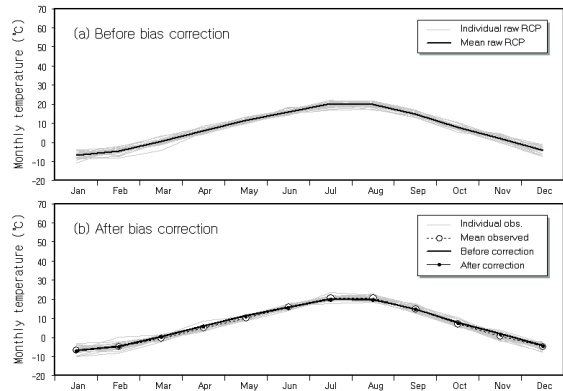


Fig. 5 The comparison of monthly averaged minimum temperatures (a) before and (b) after bias correction

2. 저수지 유입량 보정

저수지 유입량을 모의하기 위해 관측 및 모의 저수량을 비교하였고, 이분법 최적화 기법에 의해 매개변수 α 는 2.29로 결정되었다. Fig. 6과 Fig. 7은 각각 보정기간과 검정기간 관개기의 관측 및 모의 저수량을 비교한 것이다. 1981-2010년의 영천 기상관측소 자료를 이용하여 결정된 매개변수를 적용해 임고 저수지의 유입량을 모의한 결과, 연 평균하여 강수량은 1,046.8 mm, 모의 유출량은 552.1 mm로 분석되었다. 동일기간에 대해 운영자료의 신뢰도가 양호한 영천댐 유입량 자료와 비교한 결과는 Table 2와 같으며, 임고 저수지의 유입량의 유출률은 50.9 %로 영천댐 유입량의 유출률 47.4 %와 거의 유사한 결과를 보였다.

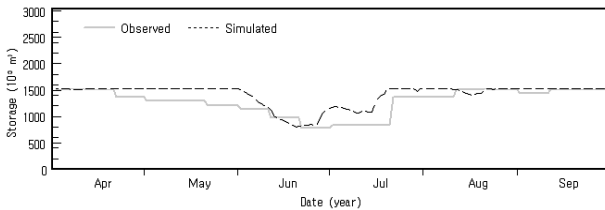
독높임 사업 이전의 일별 모의 저수량의 적정성을 평가하기 위해, 관측 및 모의 순별 저수량의 결정계수 (R^2)와 상대오차 (RE)를 산정한 결과는 Table 3과 같으며, 저수량 분포도는 Fig. 8과 같다. 보정 및 검정기간의 저수량에 대한 결정계수는

각각 0.79와 0.70, 상대오차는 0.25 %, 0.36 %로 모의 저수량의 적합성을 인정하였고, 이를 이용해 독높임 사업 이후에 기후변화 시나리오를 적용하는 것으로 하였다.

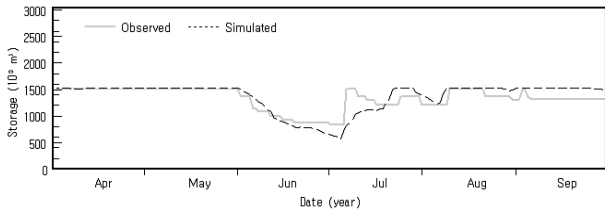
3. 기후변화에 따른 미래 수문변화

기후변화에 따른 임고 저수지 유역의 미래 수문변화를 살펴보기 위해, 편의보정된 RCP 4.5와 8.5 시나리오의 기상자료를 이용하여 2011-2100년까지 유입량을 각각 모의하였다. 2025s (2011-2040년), 2055s (2041-2070년), 2085s (2071-2100년) 기간의 미래 모의결과를 과거 30년 (1981-2010년)간의 모의결과와 비교하였다. Table 4는 임고 저수지 유역에 대해 RCP 시나리오에 따른 수문성분 변화를 정리한 결과이다.

기후변화에 따른 강수량의 변화율은 2025s, 2055s, 2085s 기간에 대해 RCP 4.5 시나리오에서 각 기간별로 10.6 %, 21.4 %, 20.4 %, RCP 8.5 시나리오에서 14.6 %, 15.0 %, 23.0 %로 모두 증가하는 것으로 나타났으며 경향은 일정하지 않았다.

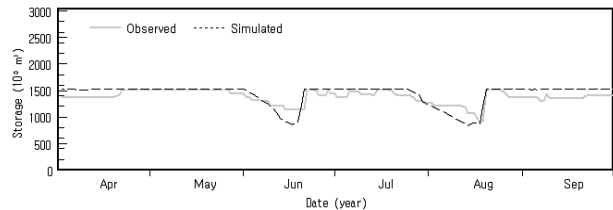


(a) 2000

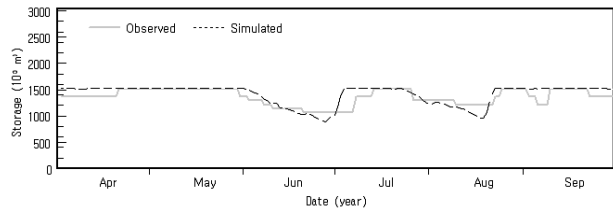


(b) 2001

Fig. 6 Comparison of daily observed and simulated water storages of Imgo reservoir in irrigation season on calibration period



(a) 2004



(b) 2005

Fig. 7 Comparison of daily observed and simulated water storages of Imgo reservoir in irrigation season on validation period

Table 2 The comparison of daily simulated inflow to the Imgo reservoir by ONE model and observed inflow to the Yeongcheon Dam during 1981–2010

| | Precipitation (mm) | Inflow (mm) | Inflow ratio (%) |
|----------------|--------------------|-------------|------------------|
| Imgo Reservoir | 1046,8 | 552,1 | 50,9 |
| Yeongcheon Dam | 1083,9 | 541,9 | 47,4 |

Table 3 Statistics of observed and simulated reservoir water storages in irrigation season on the calibration and validation period

| | Calibration (2000, 2001) | Validation (2004, 2005) |
|----------------|--------------------------|-------------------------|
| R ² | 0,79 | 0,70 |
| RE (%) | 0,25 | 0,36 |

평균기온은 RCP 4.5 시나리오에서 각 기간별로 1.5 °C, 2.6 °C, 3.1 °C, RCP 8.5 시나리오에서 1.3 °C, 2.9 °C, 4.8 °C로 모두 지속적인 증가 추세를 보였고, 기온 상승폭은 RCP 8.5 시나리오가 RCP 4.5 시나리오보다 큰 것으로 분석되었다. 증발산량은 RCP 4.5 시나리오에서 각 기간별로 4.9 %, 6.5 %, 8.1 %, RCP 8.5 시나리오에서 4.1 %, 8.6 %, 16.1 %로 모두 증가하였고, 변화는 기온과 유사하였다. 유출량은 RCP 4.5 시나리오에서 각 기간별로 15.4 %, 34.2 %, 30.3 %, RCP 8.5 시나리오에서 23.6 %, 20.5 %, 28.8 %로 모두 증가하였고, 유출율은 RCP 4.5 시나리오에서 각 기간별 1.5 %, 5.7 %, 3.9 %, RCP 8.5 시나리오에서 3.2 %, 2.6 %, 1.5 %로 증가하였다. 한편, RCP 8.5 시나리오에서는 유출율이 미래에 점점 감소하는 것으로 나타났으며, 이 원인은 기온 상승에 의한 유역 증발산량 증가로 판

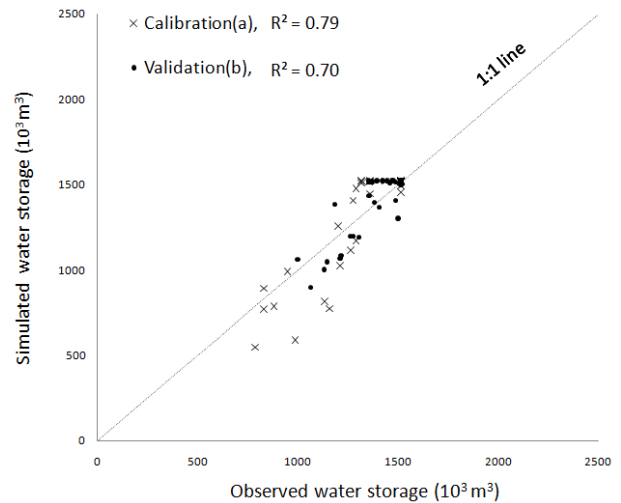


Fig. 8 Comparison of ten-day observed and simulated water storages on (a) calibration and (b) validation periods

단된다. 이 현상은 유출율이 1.5 %로 동일하게 증가한 RCP 4.5 시나리오의 2025s 기간과 RCP 8.5 시나리오의 2085s 기간에 대한 강수량과 증발산량의 관계로부터 확인할 수 있다. 미래기간의 강수량과 유역 증발산량은 RCP 8.5 시나리오

Table 4 Change of hydrologic components in Imgo reservoir watershed on RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios

| Period | Precipitation | | Temperature | | Evapotranspiration | | Runoff | | Runoff ratio | |
|----------------------|---------------|---------|-------------|---------|--------------------|---------|------------|---------|--------------|---------|
| | RCP 4.5 | RCP 8.5 | RCP 4.5 | RCP 8.5 | RCP 4.5 | RCP 8.5 | RCP 4.5 | RCP 8.5 | RCP 4.5 | RCP 8.5 |
| Baseline (1981–2010) | 1,046.8 (mm) | | 12.4 (°C) | | 480.8 (mm) | | 566.0 (mm) | | 52.5 (%) | |
| 2025s (2011–2040) | +10.6 % | +14.6 % | +1.5 °C | +1.3 °C | +4.9 % | +4.1 % | +15.4 % | +23.6 % | +1.5 % | +3.2 % |
| 2055s (2041–2070) | +21.4 % | +15.0 % | +2.6 °C | +2.9 °C | +6.5 % | +8.6 % | +34.2 % | +20.5 % | +5.7 % | +2.6 % |
| 2085s (2071–2100) | +20.4 % | +23.0 % | +3.1 °C | +4.8 °C | +8.1 % | +16.1 % | +30.8 % | +28.8 % | +3.9 % | +1.5 % |

Table 5 Summary of water balance analysis in supplying only agricultural water before and after embankment raised Imgo reservoir on RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios

| Embankment raising reservoir project | Scenario | Period | Inflow (10 ³ m ³ /yr) | Agricultural Water (10 ³ m ³ /yr) | Overflow (10 ³ m ³ /yr) | Avg. water storage (10 ³ m ³ /yr) | Instream flow (10 ³ m ³) | Water supply reliability (%) |
|--------------------------------------|----------|--------|---|---|---|---|---|------------------------------|
| Before | RCP 4.5 | 2025s | 17,329.2 | 3,326.8 | 14,075.0 | 1,405.4 | – | 96.7 |
| | | 2055s | 20,142.6 | 3,270.6 | 16,954.0 | 1,437.1 | – | 96.7 |
| | | 2085s | 19,640.3 | 3,318.2 | 16,410.6 | 1,422.6 | – | 90.0 |
| | RCP 8.5 | 2025s | 18,547.0 | 3,196.9 | 15,424.6 | 1,431.3 | – | 93.3 |
| | | 2055s | 18,089.3 | 3,356.2 | 14,796.9 | 1,385.8 | – | 90.0 |
| | | 2085s | 19,340.8 | 3,362.7 | 16,045.8 | 1,420.4 | – | 93.3 |
| After | RCP 4.5 | 2025s | 17,214.5 | 3,328.7 | 14,000.6 | 2,948.0 | – | 100.0 |
| | | 2055s | 20,009.3 | 3,291.7 | 16,862.6 | 2,979.9 | – | 100.0 |
| | | 2085s | 19,510.4 | 3,346.7 | 16,312.6 | 2,964.1 | – | 100.0 |
| | RCP 8.5 | 2025s | 18,424.5 | 3,245.4 | 15,312.1 | 2,970.8 | – | 100.0 |
| | | 2055s | 17,972.0 | 3,409.7 | 14,679.4 | 2,910.5 | – | 100.0 |
| | | 2085s | 19,213.1 | 3,407.1 | 15,931.4 | 2,959.9 | – | 100.0 |

(2085s)가 RCP 4.5 시나리오 (2025s)보다 각각 2.2배, 3.3배 증가되어, 증발산량 증가율이 강수량 증가율에 비해 높았다.

임고 저수지 유역은 온실가스 감축 정책에 상관없이 미래 강수량이 증가할 것으로 예상되며, 온실가스 감축 정책이 시행되지 않은 시나리오 (RCP 8.5)에서는 지속적인 기온 상승에 의해 유출율이 감소되어 유역 내 가용 수자원이 감소될 것으로 전망된다.

4. 독높임 사업 전·후 미래 농업용수 공급능력 평가

독높임 사업으로 인한 미래 농업용수 공급능력을 평가하기 위해 기후변화 시나리오를 적용하고, 독높임 사업 이전과 이후의 임고 저수지로부터 농업용수만을 공급하는 조건으로 저수량을 모의한 결과는 Table 5와 같다.

RCP 시나리오별 이수안전도는 2025s, 2055s, 2085s 기간

으로 구분하여 평가하였으며, 독높임 사업 이전은 RCP 4.5 시나리오에서 각 기간별로 96.7 %, 96.7 %, 90.0 %, RCP 8.5 시나리오에서는 93.3 %, 90.0 %, 93.3 %로 분석되었다. 이수 안전도의 범위는 90.0~96.7 %로 나타났으며, 기후변화 시나리오에 상관없이 미래 30년마다 1~3회 농업용수 공급이 부족한 것으로 분석되었다. 이 결과는 농업용 저수지 설계의 한발 빈도 10년 기준 (이수안전도 90 %)을 만족하는 것으로, 미래 기간에 대해 독높임 사업 이전에 임고 저수지의 농업용수 공급능력은 충분한 것으로 분석되었다.

독높임 사업 이후의 임고 저수지에 대해 RCP 시나리오를 적용하여 분석한 결과, 이수안전도는 RCP 4.5와 8.5 시나리오의 미래기간에서 모두 100 %로 나타났다. 또한 Fig. 9에서 볼 수 있듯이 독높임 사업 이후의 농업용수 공급량이 RCP 4.5와 8.5 시나리오에서 독높임 사업 이전의 농업용수 공급량보다 크게 나타났다. 독높임 사업으로 미래의 이수안전도는 기

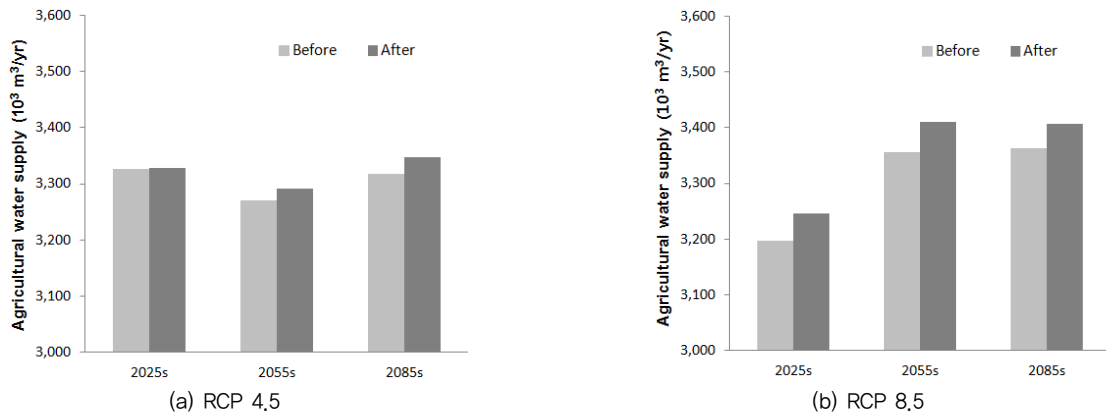


Fig. 9 Comparison of agricultural water supplies before and after embankment raised Imgo reservoir on (a) RCP 4.5 and (b) RCP 8.5

Table 6 Summary of water balance analysis in supplying agricultural and instream flow waters after embankment raised Imgo reservoir on RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios

| Scenario | Period | Inflow (10 ³ m ³ /yr) | Agricultural Water (10 ³ m ³ /yr) | Overflow (10 ³ m ³ /yr) | Avg. storage (10 ³ m ³ /yr) | Instream flow | | Water supply reliability (%) |
|----------|--------|---|---|---|---|--------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|
| | | | | | | (10 ³ m ³ /yr) | (10 ³ m ³ /day) | |
| RCP 4.5 | 2025s | 17,305.3 | 3,319.0 | 10,042.7 | 2,035.6 | 4,021.5 | 22.5 | 90 |
| | | 17,279.4 | 3,328.7 | 10,777.2 | 2,377.4 | 3,280.8 | 18.0 | 100 |
| | 2055s | 20,115.1 | 3,275.4 | 12,705.5 | 2,049.0 | 4,242.4 | 23.4 | 90 |
| | | 20,088.9 | 3,291.7 | 13,279.5 | 2,296.8 | 3,644.7 | 20.0 | 100 |
| | 2085s | 19,589.7 | 3,328.7 | 12,254.6 | 2,206.6 | 4,191.4 | 23.0 | 90 |
| | | 19,574.6 | 3,346.7 | 12,681.4 | 2,384.0 | 3,735.8 | 20.5 | 100 |
| RCP 8.5 | 2025s | 18,506.2 | 3,220.8 | 11,370.4 | 2,146.5 | 4,009.9 | 22.0 | 90 |
| | | 18,483.6 | 3,245.4 | 12,068.0 | 2,431.5 | 3,280.8 | 18.0 | 100 |
| | 2055s | 18,040.5 | 3,395.7 | 11,261.2 | 2,319.1 | 3,512.6 | 19.5 | 90 |
| | | 18,011.1 | 3,409.7 | 12,014.4 | 2,578.5 | 2,733.5 | 15.0 | 100 |
| | 2085s | 19,281.8 | 3,315.6 | 11,914.8 | 2,297.8 | 4,169.9 | 23.0 | 90 |
| | | 19,227.4 | 3,407.1 | 13,767.4 | 2,825.0 | 2,186.8 | 12.0 | 100 |

후변화 시나리오에 관계없이 독높임 사업 전보다 향상되었으며, 미래 농업용수를 매우 안정적으로 공급할 수 있는 것으로 분석되었다.

5. 독높임 사업 후 미래 하천유지용수 공급량 평가

농업용수 공급 후에 남은 여유 저수량을 하천유지용수로 활용할 수 있으며, 미래 기후변화 시나리오에 대해 하천유지용수로 활용할 수 있는 적정 공급량을 분석하기 위해 농업용수와 하천유지용수를 공급하는 조건으로 저수량을 모의하였다. 하천유지용량은 비관개기에 일정량 공급하고, 이수안전도 90%와 100% 수준으로 구분해 공급량의 범위를 제시하였다. 미래기간의 물수지 분석 결과는 Table 6와 같다.

이수안전도 90%의 경우, RCP 4.5 시나리오에서 2025s,

2055s, 2085s 기간에서 일별 하천유지용수는 각각 22.5천 m³ 23.4천 m³ 23.0천 m³, RCP 8.5 시나리오에서 22.0천 m³ 19.5천 m³ 23.0천 m³을 공급할 수 있는 것으로 분석되었다. 이수안전도 100%의 경우, RCP 4.5 시나리오에서 각 기간별로 18.0천 m³ 20.0천 m³ 20.5천 m³, RCP 8.5 시나리오에서 18.0천 m³ 15.0천 m³ 12.0천 m³을 공급할 수 있는 것으로 분석되었다. 하천유지용량의 공급 범위는 RCP 4.5 시나리오에서 각 기간별로 18.0~22.5천 m³/일, 18.0~22.0천 m³/일, 20.0~23.4천 m³/일, RCP 8.5 시나리오에서 18.0~19.5천 m³/일, 20.5~23.0천 m³/일, 12.0~23.0천 m³/일로 분석되었다.

Fig. 10은 RCP 시나리오별 이수안전도 90%와 100% 일 때, 공급 가능한 하천유지용수량을 비교한 것이다. 하천유지용수 공급량은 이수안전도에 따라 차이를 보였다. RCP 4.5

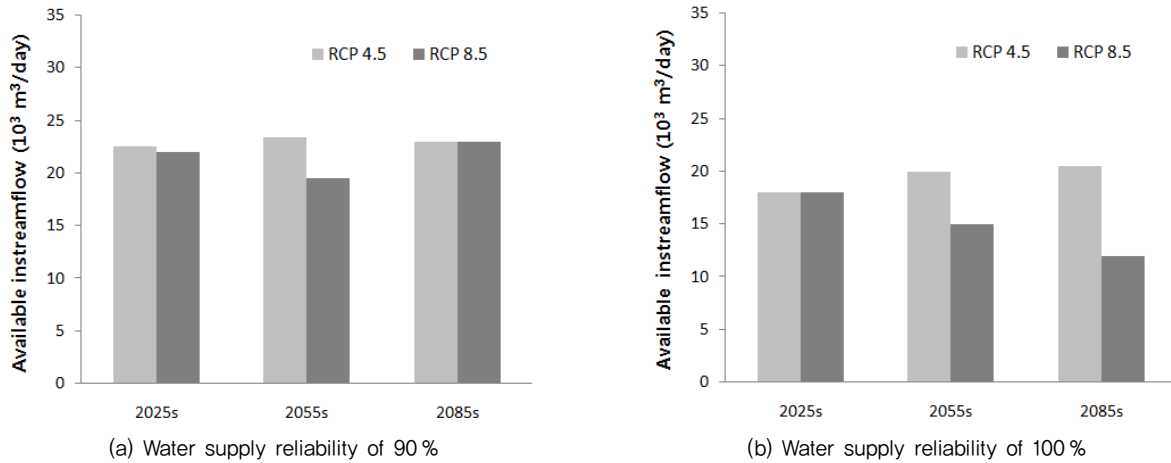


Fig. 10 Comparison of instream flow waters to be able to supply by RCP 4,5 and RCP 8,5

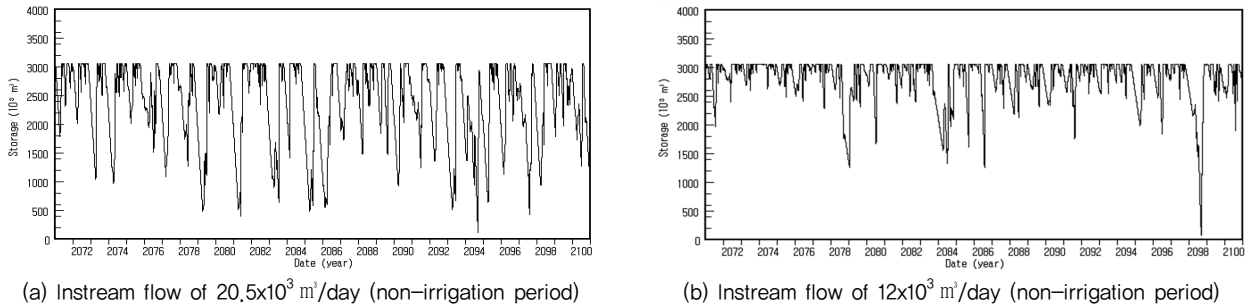


Fig. 11 Daily simulated water storages of embankment raised Imgo reservoir with 100% water supply reliability during 2085s on (a) RCP 4,5 and (b) RCP 8,5 scenarios

시나리오의 하천유지용수 공급량이 RCP 8.5 시나리오보다 동일하거나 감소하였다. 하천유지용수로 공급 가능한 양은 이수안전도가 90% 일 때는 RCP 4.5와 8.5 시나리오에서 모두 뚜렷한 변화 경향이 없었으나 (Fig. 10(a)), 이수안전도가 100% 일 때는 RCP 8.5 시나리오에서 미래로 갈수록 감소하였다 (Fig. 10(b)).

Fig. 11는 2085s 기간에 대해 RCP 시나리오에 따라 이수 안전도가 100%인 경우의 모의 저수량을 나타낸 것이다. 미래 2071-2100년 기간에 대해 저수량 부족이 발생하지 않는 한도에서 공급할 수 있는 하천유지용수량은 RCP 시나리오에 따라 차이를 보였다. Fig. 11(a)는 RCP 4.5 시나리오에서 비관개기에 $20.5 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{day}$, Fig. 11(b)는 RCP 8.5 시나리오에서 $12.0 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{day}$ 의 하천유지용수를 공급한 경우이다. RCP 8.5 시나리오의 하천유지용수 공급량이 상대적으로 적은 것은 Fig. 11(b)에서 볼 수 있듯이 2098년도의 최저 저수량이 다른 연도의 최저 저수량보다 크게 낮아졌기 때문이다. RCP 4.5 시나리오와 비교해보면 적은 양의 하천유지용수를 공급하였기 때문

에 저수량이 전체적으로 높게 나타났으며, 특정 연도(2098년)의 최저 저수량이 분석기간 동안에 두 번째, 세 번째의 최저 저수량과 2배 차이가 나타난 것으로 분석되었다. 임고 저수지는 미래에 물 부족 현상이 발생하지 않았지만 RCP 8.5 시나리오에서 극심한 가뭄이 발생할 수 있는 것으로 분석되었다.

결과적으로 온실가스의 저감없이 현재 추세로 진행 (RCP 8.5)되면 온실가스 저감 정책이 시행 (RCP 4.5)될 때보다 미래에 독높임 저수지에서 공급할 수 있는 하천유지용수량은 더욱 감소될 수 있는 것으로 분석되었다.

IV. 결론

미래 기후변화에 따른 독높임 저수지의 용수공급 능력을 평가하기 위해 RCP 4.5와 8.5 시나리오를 이용하였다. 금호강 유역에 위치한 독높임 사업이 완료된 임고 저수지를 대상으로 편의보정된 RCP 시나리오를 적용하여, 독높임 사업 이전과 이후의 저수지 물수지 분석을 수행하였다. 독높임 사업

으로 인한 미래 농업용수 공급능력을 분석하기 위해 하천유지용량의 공급은 없는 것으로 설정하였다. 또한 독높임 사업 이후 하천유지용수 공급량을 분석하기 위해 저수량 변화는 이수안전도 90 %와 100 % 수준으로 각각 모의하였으며, 결과는 다음과 같이 요약된다.

첫째, 독높임 사업이 완료된 임고 저수지 유역에 대해 미래 수문변화를 분석한 결과, 연평균 기온은 기준기간(1981-2010년)에 비해 1.3 °C~4.8 °C로 지속적으로 증가하였고, 연평균 증발산량도 4.1 %~16.1 %가 증가한 것으로 나타났다. 또한 연평균 강수량은 10.6 %~23.0 %로 증가, 유출량도 15.4 %~34.2 %로 증가하였으며, 유출율은 54.8 %~59.0 %로 나타났다. RCP 8.5 시나리오에서 강수량 증가율보다 증발산량 증가율이 크게 나타나 유출율이 점점 감소하는 경향을 보여 주었으며, 임고 저수지 유역의 가용 수자원량은 감소될 것으로 전망되었다.

둘째, 독높임 사업 이전과 이후의 임고 저수지에 대해 미래 농업용수 공급능력을 분석한 결과, 독높임 사업 이전의 미래 이수안전도는 90.0~96.7 %로 분석돼 설계기준을 만족시켰고, 미래 용수공급 능력은 충분한 것으로 나타났다. 독높임 사업 이후에는 기후변화 시나리오에 관계없이 미래의 이수안전도는 모두 100 %로 나타났으며, 독높임 사업 이전보다 크게 향상돼 미래 농업용수 공급은 안정적인 것으로 분석되었다.

셋째, 독높임 사업 이후 임고 저수지에서 공급 가능한 하천유지용수의 범위는 RCP 4.5 시나리오에서 18.0-23.4천 m³/일, RCP 8.5 시나리오에서 12.0-23.0천 m³/일로 분석되었다. 온실가스 저감없이 현재 추세로 유지될 경우(RCP 8.5) 공급할 수 있는 하천유지용수량은 점점 감소하는 것으로 나타났다.

사 사

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

REFERENCES

- 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.
- Chung, G. H., M. H. Jeon, H. S. Kim, and T. W. Kim, 2011. Adaptation capability of reservoirs considering climate change in the Han River basin, South Korea. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 31(5B): 439-447 (in Korean).
- Fujihara, Y., K. Tanaka, T. Watanabe, T. Nagano, and T. Kojiri, 2008. Assessing the impacts of climate change on the water resources of the Seyhan River basin in Turkey: use of dynamically downscaled data for hydrologic simulations. *Journal of Hydrology* 353(1): 33-48.
- Gohari, A., A. Bozorgi, K. Madani, J. Elledge, and R. Berndtsson, 2014. Adaptation of surface water supply to climate change in Central Iran. *Journal of Water and Climate Change* 5(3): 391-407.
- Hargreaves, G. H., and Z. A. Samani, 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 1(2) : 96-99.
- 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).
- Kim, J. W., 2012. Assessment of water supply capacity of Yongdam and Daecheong dam by climate change scenarios. Master's thesis, Daegu, Korea : Kyungbook National University (in Korean).
- Kim, H. D., K. Y. Lee, J. Y. Park, G. H. Han, and H. C. Lim, 2012. Analysis of operation plan by multipurpose supply for heightened agricultural reservoir. *KCID Journal* 19(1): 77-86 (in Korean).
- Korea Interagency Cooperation(KIC), 2011. Abnormal climate report in 2011, 90-91. Seoul, Korea: Korea Meteorological Administration (in Korea).
- Korea Interagency Cooperation(KIC), 2012. Abnormal climate report in 2012, 55-56. Seoul, Korea: Korea Meteorological Administration (in Korea).
- Korea Interagency Cooperation(KIC), 2013. Abnormal climate report in 2013, 47-48. Seoul, Korea: Korea Meteorological Administration (in Korea).
- Lee, G. Y., 2000. Development of estimation system for agricultural water demand. Ph. D. dissertation, Seoul, Korea: Konkuk University (in Korean).
- 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).
- Lee, J. Y., 2012. Water balance forecast of irrigation reservoir to future climate change. Ph. D. dissertation, Seoul, Korea: Seoul National University (in Korean).
- Lee, C. H., M. R. Choi, and J. T. Oh, Thirsty Soyanggang dam: Two thirds of the water has dried up. http://article.joins.com/news/article/article.asp?total_id=17420445&clac=olink|articl

- e/default. Accessed 24 Mar. 2015 (in Korean).
16. Lee, T. H., 2012. The study of water supply reliability considering the management for restricted water level of agricultural reservoirs during flood period. Master's thesis, Seoul, Korea: Kookmin University (in Korean).
 17. Lee, G. J., K. W. Park, Y. H. Jung, I. K. Jung, K. W. Jung, J. H. Jeon, J. M. Lee, and K. J. Lim, 2013. Analysis of flood control effects of heightening of agricultural reservoir dam. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(4): 83-93 (in Korea).
 18. 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.
 19. Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries (MIFAFF), 1997. A study on the water requirement variation with the farming conditions in the paddy field (in Korean).
 20. Ministry of Land, Infrastructure and Transport(MOLIT), 2011. Long-term water resources comprehensive plan(2011-2020). Seoul, Korea : MOLIT (in Korean).
 21. Noh, J. K., 2010. Affecting water supply capacity followed by allocating flood control volume in heightening reservoir. *KCID journal* 17(2): 57-70 (in Korean).
 22. Noh, J. K., 2013. Securing stream water by considering water uses with software technology (Ⅱ), Deajeon, Korea : K-water Institute (in Korean).
 23. Noh, J. K., and J. N. Lee, 2011. Comparison of streamflow runoff model in Korea for applying to reservoir operation. *Journal of Agricultural Science* 38(3): 513-524 (in Korean).
 24. Oh, S. T., 2014. Smart water management technology for optimal estimation of water supply. *KCID magazine* 53: 60-66 (in Korean).
 25. Park, G. A., 2008. A study of future climate change impacts on agricultural water resources. Ph. D. dissertation, Seoul, Korea: Konkuk University (in Korean).
 26. 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).
 27. Payne, J. T., A. W. Wood, A. F. Hamlet, R. N. Palmer, and D. P. Lettenmaier, 2004. Mitigating the effects of climate change on the water resources of the Columbia River basin. *Climatic Change* 62(1-3): 233-256.
 28. 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.
 29. 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).