Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers
Vol. 56, No. 4, pp. 59~68, July 2014
DOI:http://dx.doi.org/10.5389/KSAE.2014.56.4.059

ISSN 1738-3692
eISSN 2093-7709

기후변화 시나리오를 고려한 농업용 저수지의 미래 용수공급 지속가능성 전망

Projection of Future Water Supply Sustainability in Agricultural Reservoirs under RCP Climate Change Scenarios

남원호* · 홍은미** · 김태곤*** · 최진용****,†

Nam, Won-Ho · Hong, Eun-Mi · Kim, Taegon · Choi, Jin-Yong

ABSTRACT

Climate change influences multiple environmental aspects, certain of which are specifically related to agricultural water resources such as water supply, water management, droughts and floods. Understanding the impact of climate change on reservoirs in relation to the passage of time is an important component of water resource management for stable water supply maintenance. Changes on rainfall and hydrologic patterns due to climate change can increases the occurrence of reservoir water shortage and affect the future availability of agricultural water resources. It is a main concern for sustainable development in agricultural water resources management to evaluate adaptation capability of water supply under the future climate conditions. The purpose of this study is to predict the sustainability of agricultural water demand and supply under future climate change by applying an irrigation vulnerability assessment model to investigate evidence of climate change occurrences at a local scale with respect to potential water supply capacity and irrigation water requirement. Thus, it is a recommended practice in the development of water supply management strategies on reservoir operation under climate change.

Keywords: Agricultural reservoir; climate change, irrigation vulnerability assessment model, RCP scenarios, sustainability

I. 서 론

기후변화는 극한 수문사상의 규모, 빈도의 증가, 기온 및 강수량 패턴의 변화, 증발산량 및 유출의 시공간적 변동을 초래함으로써 미래의 기상, 수문사상의 불확실성을 증가시킨다 (Sung et al., 2012; Hwang et al., 2013; Jun et al., 2013). 이러한 불확실성은 기상학적, 수문학적 가뭄의 발생 빈도 및 심도를 증가시키고 (Sohn et al., 2014; Yoo et al., 2014), 수자원 관리 및 계획수립에 어려움을 야기한다.

미래 기후변화에 대한 농업분야의 연구는 초기에는 논벼의 미래 기준증발산량 산정에 관한 연구 (Hong et al., 2009; Chung, 2010) 및 농업용수 수요량 추정 (Chung, 2009; Yun et al., 2011; Jee et al., 2012)에 대한 연구들이 진행되어 왔으며, 이후 기후변화에 따른 유역의 유출량 추정 및 수문평가 연구 (Kim et al., 2013b; Kim et al., 2013c; Ahn et al., 2014), 유입량의 변화에 따른 저수지 적응능력 평가 (Chung et al., 2011)에 관한 연구들이 진행되었다. 미래 기후변화에 따른 이상기후 현상에 대비하기 위한 수자원의 전망에 관한 연구는 수자원 관리 및 계획의 수립에 필요한 수문자료의 경향성 분석에 대한 연구 (Shin et al., 2010; Hwang, 2012; Lee et al., 2012; Jeung et al., 2013; Kim et al., 2014), 및 가뭄의 주기성 및 경향성, 발생빈도 등의 통계학적 특성을 분석하는 연구 (Lee et al., 2013; Park et al., 2013)가 진행되었지만, 정책결정자와 이해당사자들을 위한 기후변화 적응능력 및 대응 대책의 정성적, 정량적 평가 지표가 부재한 상황이다.

미래 기후변화로 인한 기상, 수문사상의 불확실성 (Nkomozepi and Chung, 2014) 및 기후변화에 따른 영향평가의 불확실성 (Hwang et al, 2013; Nam et al., 2014)은 농업용 저수지 운영 및 관리 측면에서 용수공급 체계의 취약성이 증가할 가능성이 있다. 기후변화 전망에 따르면 강수량 증가가 예상되는 동시에 강수강도의 증가 및 연 강수일수의 감소, 기온 상승으로 인한 대기 중 수분 요구량 증가와 이에 따른 증발산량 증가 등이 전

* School of Natural Resources, University of Nebraska-Lincoln
** 서울대학교 농업생명과학연구원 선임연구원
*** 서울대학교 조경·지역시스템공학부
**** 서울대학교 조경·지역시스템공학부 교수, 농업생명과학연구원
† Corresponding author Tel.: +82-2-880-4583
Fax: +82-2-873-2087
E-mail: iamchoi@snu.ac.kr
2014년 1월 21일 투고
2014년 7월 22일 심사완료
2014년 7월 22일 게재확정

망되므로 (Chung, 2009; Kim et al., 2013a), 강수량, 유역유입량, 증발산량 등이 주요 변인으로 작용하는 농업수자원 및 농업용 저수지 용수공급능력의 안정성 평가 및 취약성 기준이 요구된다. 기후변화 영향에 대한 농업용 저수지의 취약성 및 적응능력의 정량적 분석은 기후변화 적응 대책의 우선순위 수립을 위한 필수적인 요소로써 기후변화에 능동적으로 대응하기 위하여 효율적인 적응 대책 수립을 위한 과학적, 정책적 도구가 필요하다.

본 연구에서는 미래 기후변화에 의한 기상 및 수문현상 변화에 따른 농업수자원 이수 측면에서의 용수공급능력을 분석하고, 농업용 저수지의 용수공급에 대한 기후변화 대응 능력을 평가하고자 한다. 이를 위해 농업용 저수지 공급계획량과 수요예측량의 확률론 및 신뢰성 해석 기법을 이용하여 농업용수 공급 취약성을 평가한 선행 연구 (Nam et al., 2012; Nam and Choi, 2014)를 기초로 미래 기후변화 대응을 위한 용수공급 취약성 및 지속가능성의 개념을 정의하고, 기후변화 영향 및 취약성 평가 방법론의 적용 가능성을 검토하였다. 용수공급 취약성 평가 모형을 미래 기후변화 시나리오에 적용하여 공급량과 수요량의 변화를 분석하고 용수공급 취약성 확률의 변화를 산정함으로써 미래 기후변화 대응을 위한 용수공급 지속가능성을 평가하였다.

II. 재료 및 방법

1. 농업용 저수지의 설계한발빈도

농업생산기반정비통계연보 (KRC, 2012)에 의하면 농업용 저수지는 총 17,531개소이며, 한국농어촌공사 (Korea Rural Community Corporation, KRC) 관리 저수지는 3,356개소 (19 %), 시·군 관리 저수지는 14,175개소 (81 %)로 구분된다. 농업용 저수지 중 수리답면적 100 ha 미만의 저수지는 약 94 %를 차지하고 있으며, 한국농어촌공사 관리 저수지 62 %, 시·군 관리 저수지 64 %는 설치 경과년수가 50년 이상으로 노후화가 심화되어 저수지 본연의 용수공급 기능을 상실하거나 농업용수 공급 및 유지관리 측면에서 비효율성이 지속되고 있다.

농업용 저수지의 관리기관별 설계한발빈도 (design frequency of drought) 현황을 살펴보면, 한국농어촌공사 관리 저수지의 약 78 %는 10년 빈도 가뭄에도 안정적으로 농업용수를 공급할 수 있도록 설계된 반면, 시·군 관리 저수지의 경우 약 63 %는 평년 한발빈도로 설계되어 관리기관별 상이한 특징을 보였다. 10년 미만의 설계한발빈도로 축조된 소규모 저수지는 약한 가뭄에도 안전한 용수공급이 어려울 뿐만 아니라, 최근 기후변화로 인한 가을부터 이듬해 봄까지 정례적인 이상가뭄 발생 및 극한강우의 증가로 인한 동일강우 대비 유효강우량이 감소됨으로써 가뭄에 대한 재해위험도가 상대적으로 가중되고 있다. 이러한 상황에서 농업수자원 시스템의 운영 방안 수립에 필수적인 용수공급능력의 평가 척도로서 보편적으로 사용되는 설계빈도는 기후변화로 인한 수문사상의 변화 및 수요의 다변화에 대응하지 못하는 단점이 있다 (Nam et al., 2012). 따라서 이수 측면에서 안정적이고 지속가능한 농업용수 공급에 관한 재평가 및 전망이 요구된다.

2. 용수공급 취약성의 정의

본 연구에서는 기후변화에 따른 미래 용수공급의 지속가능성을 평가하기 위하여 신뢰도 (reliability) 기반의 관개 취약성 평가 모델 (Nam et al., 2012; Nam, 2013)을 활용하였다. 관개 취약성 평가 모델은 이수 측면에서 관개시작 시점의 저수량 및 관개 기간의 누적 공급계획량, 누적 수요예측량을 활용하여 용수공급 가능 여부를 판단할 수 있는 모형 (Nam and Choi, 2014)으로 본 연구에서는 기후변화 시나리오를 사용하여 용수공급 능력을 재평가하고 취약성 지표의 변화를 분석하였다.

농업용 저수지 용수공급 시스템을 구성하는 주요 요소로써 유역에서 저수지로부터 공급 가능한 가용 용수량 (potential water supply capacity, PWS)과 관개지역의 필요수량(irrigation water requirement, IWR)을 식 (1), 식 (2)와 같이 공급계획량과 수요예측량으로 정의한다 (Nam et al., 2012).

$$PWS_t = RC_t + \sum_{j=1}^{n} RWI_{t+j} - \sum_{j=1}^{n} RO_{t+j} \quad (1)$$

$$IWR_t = \sum_{j=1}^{n} PWR_{t+j} \quad (2)$$

PWS는 공급 가능 용수량, RC (reservoir capacity)는 저수지의 유효저수량, RWI (reservoir watershed inflow)는 유역의 유입량, RO (reservoir overflow)는 월류량, t는 관개 시작 시점, n은 관개 종료시점이다. 수요예측량 (IWR)은 논의 필요수량, PWR (paddy water requirement)로 정의하였다. 저수지 유역의 유입량은 강우-유출 모형인 Tank 모형을 사용하였고, 관개지구의 필요수량은 FAO (Food and Agricultural Organization)의 Modified-Penman (Doorenbos and Pruitt, 1977)식과 작물계수를 적용하여 작물의 소비수량을 산정하고 침투량, 수로손실 및 관리손실을 반영하여 수요량을 산정하였다. 저수지의 월류량은 저수지 물수지 모의를 통하여 저수지 유입량으로부터 수위가 만수위 시 자연 월류하는 양으로 산정하였다 (Nam et al., 2014).

관개지역의 잔여 수요예측량이 유역으로부터 저수지의 공급계획량을 초과하는 경우를 용수공급의 실패 상태 (failure)로 정의하였으며, 관개 취약성 지표 (irrigation vulnerability probability,

IVP)는 용수공급의 실패 상태를 식 (3)과 같이 확률로서 표현된다. 즉 관개 취약성 모형은 관개 시작시점에서 관개 종료시점까지의 유입량과 필요수량의 누적 값을 활용하여 용수공급 실패 여부를 판단할 수 있다.

$$IVP = P_{Failure}\,(PWS - IWR < 0) \quad (3)$$

3. 연구대상지역 및 기후변화 시나리오

본 연구에서는 Table 1에 도시한 바와 같이 중부 지역과 남부 지역으로 구분하여 다양한 유역면적, 관개면적, 유효저수량 특성을 갖는 8개의 소규모 농업용 저수지를 선정하였다. 용수공급 취약성 및 지속가능성 평가의 기준이 되는 저수지 설계 한발빈도는 Res. B와 Res. C를 제외하고 10년 설계 한발빈도를 가지며, 지배 측후소의 경우 중부지방의 수원 측후소와 남부지방의 남원 측후소의 기후자료를 활용하였다. Fig. 1은 대상 저수지 및 기상관측소 위치를 도시한 것이다.

기상청 (Korea Meteorological Administration, KMA)에서는 적응 대책 수립을 위한 기후변화 시나리오 생산의 일환으로 기후변화에 관한 정부간 협의체 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 5차 평가보고서 (Fifth Assessment Report, AR5)에 적합한 주요 대표경로농도 (Representative Concentration Pathways, RCP)에 대하여 전지구 및 지역기후모델을 이용하여 기후변화 시나리오를 생산, 제공하고 있다. 현재 기상청에서 제공하고 있는 지역기후모델의 해상도는 한반도 (12.5 km), 남한 상세 (1 km)의 두가지 종류의 기후변화 시나리오를 제공하고 있다. 남한 상세 기후변화 시나리오는 지역기후모델 (HadGEM3-RA)을 통해 생산된 한반도 기후변화 시나리오를 바탕으로 통계학적 상세화 과정 (Kim, 2005; Kim et al., 2012)을 통해 생산되며, PRIDE 모델 (PRISM based Downscaling Estimation Model)에 적용하여 1 km 해상도의 관측격자 자료를 생산한다 (Kim et al., 2013d).

본 연구에서는 남원, 수원 기상관측지점의 위경도에 근접한 격자점을 기준으로 남한 상세 시나리오의 기온, 강수량과 한반도 시나리오의 상대습도, 평균풍속, 일사량 자료를 사용하였다. Table 2와 같이 기후변화 시나리오의 분석기간을 과거 (observed) 기준기간 30년 (1981～2010년)과 미래의 경우 단기 (2025s, 2011～2030년), 중기 (2055s, 2031～2070년), 장기 (2085s, 2071～2100년)로 분류하였다. 과거 기준기간 대비 미래기간의 기후 인자 및 유역유입량, 용수공급 취약성의 변화 분석을 통해 각 농업용 저수지에 대한 용수공급의 지속가능성을 전망하고자 한다.

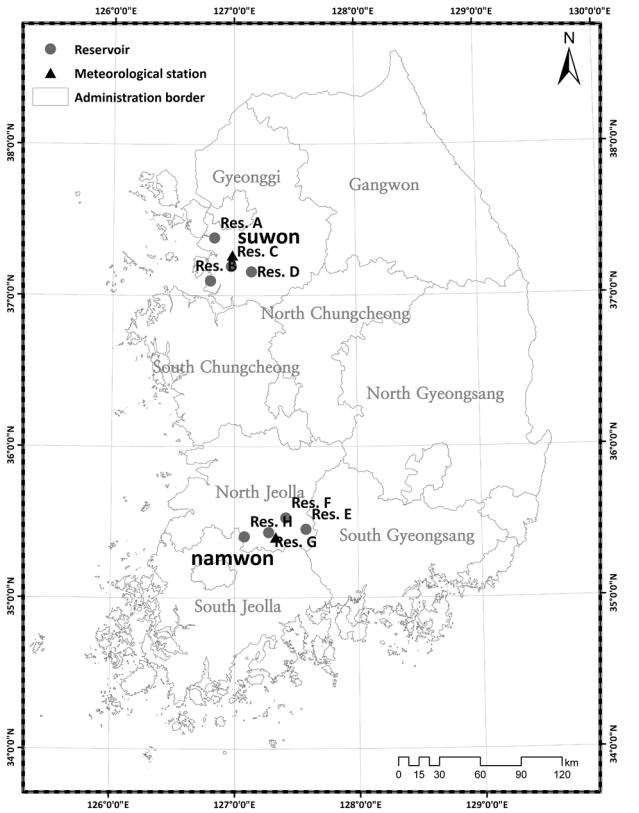


Fig. 1 Locations of the agricultural reservoirs and the meteorological stations used in this study

Table 1 Characteristics for agricultural reservoir in the study area

Region	Meteorological station	Reservoir name	Symbol	Effective storage capacity ($10^3 m^3$)	Watershed area (ha)	Irrigated area (ha)	Frequency of drought (year)
Central region	Suwon	Heungbu	Res. A	1,840	1,320	652	10
		Myeoku	Res. B	600	830	246	5
		Botong	Res. C	1,071	716	364	3
		Samindong	Res. D	302	328	121	10
Southern region	Namwon	Dongma	Res. E	99	127	45	10
		Dochon	Res. F	365	500	134	10
		Nangye	Res. G	177	118	58	10
		Paldeok	Res. H	1,034	1,172	510	10

Table 2 Classification of climate change data based on period

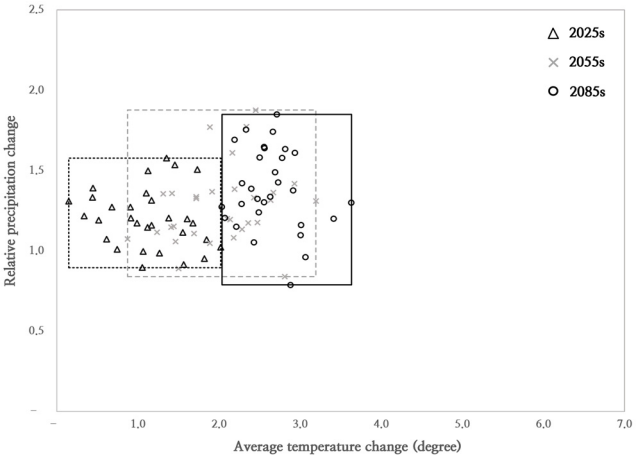
Classification	Period	Source	Climate model
CASE 1 (Baseline)	1981-2010	KMA (Korea Meteorological Administration)	Observed data
CASE 2 (2025s)	2011-2040	RCP scenarios (RCP 4.5, 8.5, source of KMA)	HadGEM3-RA
CASE 3 (2055s)	2041-2070		
CASE 4 (2085s)	2071-2100		

Ⅲ. 적용 및 고찰

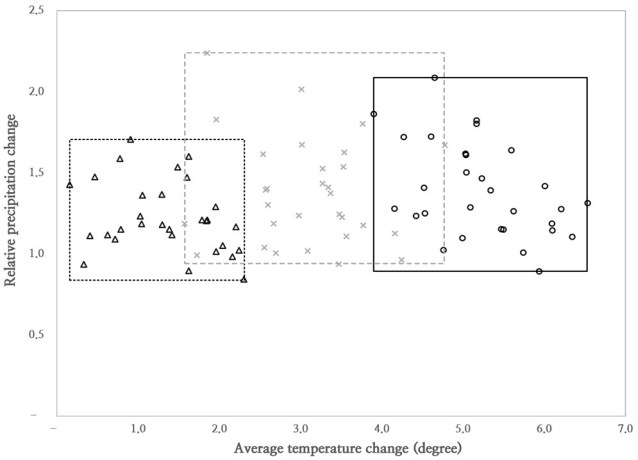
1. 기후요소 인자의 변화 분석

본 연구에서는 RCP 기후변화 시나리오에 따른 기후요소 (평균기온, 총강수량) 및 기준증발산량 대한 과거 (Observed) 대비 미래 3기간 (2025s, 2055s, 2085s)의 변화율을 산정하였다. Table 3에 도시한 바와 같이 평균기온의 경우 미래 3기간 모두 상승하였으며, RCP 8.5 시나리오의 2085s 기간 상승폭이 수원과 남원 측후소 모두 2.1 ℃로 상승폭이 가장 크게 나타났다. 강수량의 변화는 남원 측후소의 2085s 기간을 제외하고 미래 3기간 모두 상승하였으며, RCP 8.5 시나리오의 2055s 기간의 상승폭이 측후소별로 각각 11.2 %, 14.1 %로 분석되었다. 기준 증발산량은 RCP 4.5 시나리오의 경우 0.7～3.2 %, RCP 8.5 시나리오의 경우 3.3～6.9 %의 증가율을 보였으며, RCP 8.5 시나리오의 2085s 기간의 증가율이 측후소별로 각각 6.7 %, 6.9 %로 전망되었다.

Fig. 2와 Fig. 3은 측후소별 RCP 시나리오에 대한 미래 단기, 중기, 장기 기간의 연평균기온과 연 총강수량을 변화를 비교한 것이다. X축은 과거 기준기간 대비 미래기간의 평균기온에 대한 증감량 (degree)이고, Y축은 과거 기준기간 대비 미래기간별 연 총강수량에 대한 변화 비율 (change ratio)이다 (Nkomozepi and Chung, 2014). 미래 2025s에 해당되는 년도의 각 년도별 평균기온 증감량과 총강수량의 변화율을 삼각형 기호로 표시하였으며, 2055s의 경우 원 기호, 2085s의 경우 X 기호로 표시하였다. 과거 기준기간 대비 미래기간 (2011년～2100년)의 연별 기후요소의 분포를 도시하였으며, 미래 3기간에 대한 최소/최대 평균기온 증감량 및 최소/최대 총강수량 변화율에 해당되는



(a) RCP 4.5



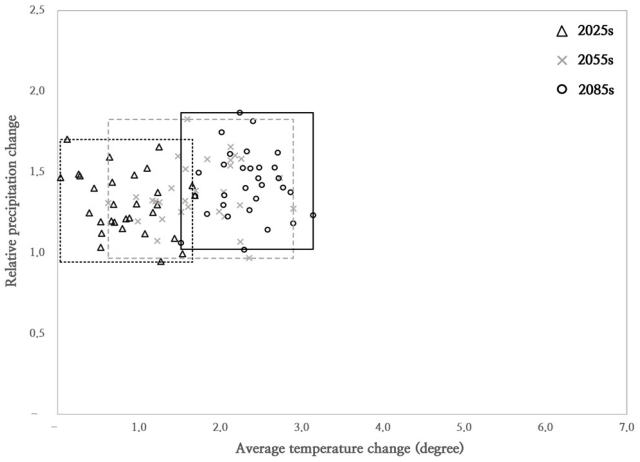
(b) RCP 8.5

Fig. 2 Projected yearly relative annual precipitation change and absolute temperature change in Suwon

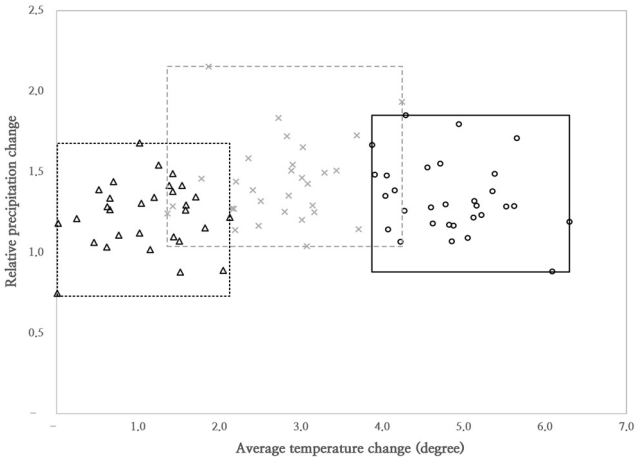
Table 3 Comparisons of meteorological factors between the baseline period (KMA) and climate change period (RCP scenarios)

Meteorological station	Factors	Observed	RCP 4.5			RCP 8.5		
			2025s	2055s	2085s	2025s	2055s	2085s
Suwon	PREC[1)]	1,312	1,610	1,673	1,819	1,604	1,806	1,823
	TEMP[2)]	12.1	13.2	14.1	14.7	13.4	15.2	17.3
	RE[3)]	856	911	941	948	931	964	1,035
Namwon	PREC	1,360	1,778	1,864	1,932	1,677	1,952	1,916
	TEMP	12.3	13.1	14.1	14.7	13.4	15.1	17.2
	RE	913	942	972	980	968	1,001	1,073

※ 1) PREC: annual precipitation (mm), 2) TEMP: average temperature (degree), 3) RE: reference evapotranspiration (mm)



(a) RCP 4.5



(b) RCP 8.5

Fig. 3 Projected yearly relative annual precipitation change and absolute temperature change in Namwon

지점을 연결하여, 미래기간별 변화 범위를 표시하였다. RCP 4.5 시나리오에 대비하여 RCP 8.5 시나리오에 대한 기후요소인 평균기온 및 연강수량의 평균 및 분산이 크게 산정됨에 따라 변화율 폭이 크게 산정되었으며, 평균기온의 경우 6.0 ℃ 이상, 총강수량의 경우 2배 이상의 변화율을 갖는 기간이 분석되었다.

2. 용수공급 인자의 변화 분석

기후변화에 따른 용수공급 요소 중 저수지별 유역유입량의 분석기간별 평균과 분산을 Table 4와 같이 정리하였다. 과거 기준기간의 유역유입량을 기준으로 미래 90년간 유역유입량의 변화율이 RCP 4.5 시나리오의 경우 평균 20.5 (Res. B-2025s)～55.1 % (Res. H-2085s), RCP 8.5 시나리오의 경우 22.2 (Res. G-2025s)～50.5 % (Res. H-2085s)로 증가할 것으로 전망되었다. 유역유입량의 증가율은 강수량의 변화율과 유사하며, 미래

Table 4 Comparisons of runoff in each reservoirs between the baseline period (KMA) and climate change period (RCP scenarios)

Symbol	Observed	RCP 4.5			RCP 8.5		
		2025s	2055s	2085s	2025s	2055s	2085s
Res. A	10,772 (2,490)	13,167 (2,563)	14,116 (3,299)	16,135 (4,274)	13,375 (2,933)	15,443 (4,435)	15,658 (4,169)
Res. B	6,627 (1,535)	7,985 (1,454)	8,665 (2,044)	9,786 (2,355)	8,204 (1,817)	9,482 (2,743)	9,617 (2,576)
Res. C	5,681 (1,318)	6,932 (1,386)	7,424 (1,756)	8,339 (1,963)	7,028 (1,561)	8,125 (2,355)	8,241 (2,210)
Res. D	2,536 (589)	3,089 (644)	3,302 (790)	3,760 (962)	3,121 (702)	3,614 (1,057)	3,667 (990)
Res. E	995 (327)	1,317 (243)	1,399 (242)	1,459 (265)	1,216 (257)	1,479 (330)	1,346 (287)
Res. F	4,037 (1,324)	5,392 (978)	5,720 (973)	5,903 (1,131)	4,985 (1,029)	6,050 (1,336)	5,510 (1,159)
Res. G	924 (304)	1,223 (225)	1,299 (225)	1,350 (249)	1,129 (239)	1,373 (307)	1,250 (266)
Res. H	9,806 (3,196)	13,170 (2,353)	13,962 (2,345)	15,210 (3,276)	12,194 (2,471)	14,762 (3,222)	13,460 (2,802)

※ Units: average ($10^3 m^3$), standard deviation in parentheses

Table 5 Comparisons of paddy water requirement in each reservoirs between the baseline period (KMA) and climate change period (RCP scenarios)

Symbol	Observed	RCP 4.5			RCP 8.5		
		2025s	2055s	2085s	2025s	2055s	2085s
Res. A	4,830 (727)	3,994 (724)	4,074 (823)	3,994 (818)	4,168 (814)	3,832 (895)	4,456 (1,034)
Res. B	1,822 (274)	1,506 (273)	1,537 (311)	1,506 (308)	1,572 (307)	1,445 (338)	1,681 (390)
Res. C	2,697 (406)	2,230 (404)	2,275 (460)	2,230 (457)	2,327 (455)	2,140 (500)	2,488 (577)
Res. D	898 (135)	743 (135)	758 (153)	743 (152)	775 (151)	713 (167)	829 (192)
Res. E	316 (71)	216 (52)	230 (54)	217 (53)	258 (61)	241 (52)	293 (74)
Res. F	940 (212)	643 (154)	686 (161)	646 (158)	767 (182)	719 (155)	874 (219)
Res. G	410 (92)	280 (67)	299 (70)	282 (69)	334 (80)	313 (68)	381 (96)
Res. H	3,580 (806)	2,447 (586)	2,612 (614)	2,460 (603)	2,920 (694)	2,735 (590)	3,327 (835)

※ Units: average ($10^3 m^3$), standard deviation in parentheses

평가기간에 따라 유역유입량의 평균 및 분산이 증가함으로써 장기 미래로 갈수록 불확실성이 증가하고, 전망 결과의 일관성이 낮아지는 현상을 보인다 (Bae et al., 2011; No et al., 2013). Table 5는 저수지별 관개지역의 필요수량의 분석기간별 평균

과 분산을 나타낸 것이다. 기온의 증가로 인해 기준증발산량은 증가하였지만, 강우량의 증가로 인한 유효우량의 증가로 관개지역의 필요수량은 감소하였으며, 특히 RCP 8.5 시나리오의 2085s기간에 가장 높은 평균값과 분산을 나타내었다.

유역유입량의 분포 변화를 살펴보기 위하여, Fig. 4와 Fig. 5와 같이 중부 지역의 Res. D와 남부 지역의 Res. F의 대표저수지를 선정하여 유역유입량 변화를 상자그림 (box plot)으로 도시하였다. 전체적으로 기후변화에 따라 미래 유역유입량의 일분위 값은 현재의 삼분위 수준까지 상승하는 경향을 보이며, 현재의 평균 유역유입량 수준에서 미래 최저 유역유입량이 나타났다. 최대 유역유입량은 크게 증가하는데, 특히 RCP 8.5 시나리오에서 중기구간 (2055s)에서는 현재 평균 대비 2.5배 수준의 유역유입량이 예상된다.

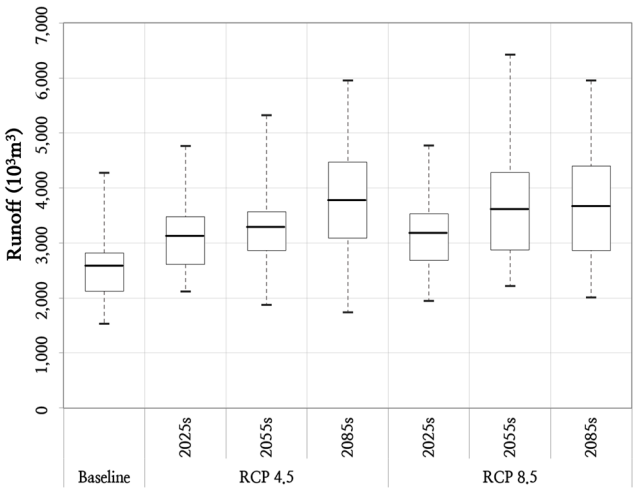


Fig. 4 Comparison of runoff based on RCP scenarios in Res. D

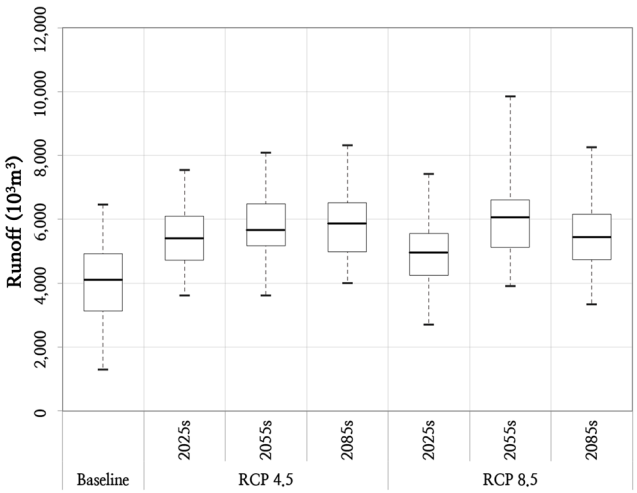


Fig. 5 Comparison of runoff based on RCP scenarios in Res. F

3. 미래 기후변화를 고려한 용수공급 취약성 평가

Table 6과 Table 7은 Res. D와 Res. F 대상 저수지의 기후변화에 따른 용수공급 취약성 평가의 분석결과를 나타낸 것이다. Res. D와 Res. F 저수지는 10년 설계 한발빈도를 갖는 유효저수량, 유역면적, 관개면적이 유사한 저수지로서, 관개 취약성 평가 모델의 공급계획량, 수요예측량, 관개 취약성 지표 결과를 정리하였다. 미래 공급계획량 및 수요예측량은 과거 기준기간보다 평균값은 낮게 산정이 되었지만, 장기 미래로 갈수록

Table 6 Water supply vulnerability assessment based on RCP scenarios in Res. D

Factors	Observed	RCP 4.5			RCP 8.5		
		2025s	2055s	2085s	2025s	2055s	2085s
A. PWS[1]	1,030 (108)	915 (65)	922 (98)	928 (144)	936 (107)	925 (118)	982 (144)
Runoff	2,202 (591)	2,760 (898)	2,845 (787)	3,404 (1,272)	2,710 (727)	3,101 (1,047)	3,003 (1,075)
Overflow	1,473 (615)	2,147 (919)	2,225 (821)	2,779 (1,354)	2,077 (773)	2,478 (1,106)	2,323 (1,147)
B. IWR[2]	898 (135)	743 (135)	758 (153)	743 (152)	775 (151)	713 (167)	829 (192)
C. WSF[3]	131 (173)	172 (150)	164 (182)	185 (209)	161 (186)	212 (204)	153 (240)
D. Z-index	0.758	1.151	0.904	0.884	0.866	1.041	0.637
E. IVP[4]	0.224	0.125	0.183	0.188	0.193	0.149	0.262

※ 1) PWS: potential water supply, 2) IWR: irrigation water requirement, 3) WSF: water supply failure, 4) IVP: irrigation vulnerability probability
※ Units: average (10^3m^3), standard deviation in parentheses

Table 7 Water supply vulnerability assessment based on RCP scenarios in Res. F

Factors	Observed	RCP 4.5			RCP 8.5		
		2025s	2055s	2085s	2025s	2055s	2085s
A. PWS[1]	1,176 (118)	990 (141)	1,033 (147)	994 (150)	1,123 (180)	1,073 (140)	1,207 (197)
Runoff	3,430 (1,191)	4,451 (941)	4,660 (820)	5,133 (1,231)	3,975 (940)	4,877 (1,396)	4,097 (1,047)
Overflow	2,614 (1,227)	3,827 (1,022)	3,992 (872)	4,504 (1,308)	3,217 (1,064)	4,169 (1,481)	3,256 (1,174)
B. IWR[2]	940 (212)	643 (154)	686 (161)	646 (158)	767 (182)	719 (155)	874 (219)
C. WSF[3]	236 (243)	347 (209)	347 (218)	348 (218)	356 (256)	354 (209)	333 (295)
D. Z-index	0.973	1.663	1.590	1.592	1.390	1.696	1.131
E. IVP[4]	0.165	0.048	0.056	0.056	0.082	0.045	0.129

※ 1) PWS: potential water supply, 2) IWR: irrigation water requirement, 3) WSF: water supply failure, 4) IVP: irrigation vulnerability probability
※ Units: average (10^3m^3), standard deviation in parentheses

분산은 증가하였으며, RCP 8.5 시나리오의 2085s 기간에서 최댓값이 나타났다. 공급계획량이 줄어드는 결과는 앞서 유역유입량이 증가하는 현상과 배치되어 보이지만, 저수지가 만수일 경우에는 유역유입량이 모두 방류되어 공급계획량에 포함되지 않기 때문에 실제 가용할 수 있는 용수량은 감소하는 것으로 분석되었다.

과거 기준기간의 용수공급 취약성 확률의 경우 Res. D는 0.224, Res. F는 0.165로 나타났으며, 이는 설계 한발빈도의 10년 빈도(1/10 = 0.100)보다 관개 취약성이 높은 것으로 산정된 결과로 해당 저수지의 설계시 한발대응 능력보다 과거기간 운영된 한발대응 능력이 감소한 것으로 평가할 수 있다. 미래 시나리오 중 단기 기간 (2025s)의 경우, 관개 취약성 확률은 Res. D의 경우 RCP 4.5, RCP 8.5 시나리오에 따라 각각 0.125, 0.193, Res. F의 경우 0.048, 0.082으로 산정되어 과거 기준기간에 비하여 취약성이 낮아지는 결과가 나타났다. 이는 과거 기준기간 대비 미래 공급계획량의 감소량보다 수요예측량의 감소량이 크게 산정되었기 때문이다. 두 요소의 차이로 산정되는 용수공급 실패 기준값 (z-index)이 증가하여, Res. D의 미래 시나리오 RCP 8.5의 장기 (2085s)를 제외하고는 Res. D와 Res. F에 대한 모든 구간에서 관개 취약성 확률이 감소하는 경향을 확인하였다.

공급계획량과 수요예측량의 변화에 따라 관개 취약성이 변화하므로, 저수지의 특징에 따라 공급계획량과 수요예측량을 분석해야만 관개 취약성을 구할 수 있다. 따라서 일반화된 결론을 내리기에는 한계가 있지만, RCP 4.5 시나리오는 단기 구간 (2025s)에서는 관개 취약성이 크게 개선되는 반면, 중기, 장기 구간에서는 개선 효과가 적은 경향은 확인할 수 있었다. 또한, RCP 8.5 시나리오는 중기 구간 (2055s)에서 관개 취약성 개선효과가 가장 컸으며, 단기, 장기 순으로 개선 효과가 차등적으로 발생하였다.

4. 미래 용수공급 지속가능성 평가

미래 기후변화에 의한 기상 및 수문현상의 변동성은 불확실성을 내포하고 있기 때문에 기후변화 영향 평가 및 대응정책 수립 과정의 혼란을 야기한다. 따라서 수자원 관리자에게 불확실성을 갖는 정보를 효과적으로 전달하는 것은 주요한 과정이다. 수자원 시스템의 지속가능성은 생태 환경 및 수문 현상의 변화에 대한 현재의 목표를 미래에도 유지하는 것으로 정의되며 (Kay, 2000; Loucks, 2000; Fry et al., 2012), 본 연구에서는 용수공급 취약성 확률의 과거, 현재, 미래의 변화를 분석함으로써 미래 용수공급의 지속가능성을 정량적으로 평가하였다.

Fig. 6～Fig. 9는 과거 기상자료 및 RCP 시나리오에 따른 용수공급 계획 시점의 취약성 확률 변화를 도시한 것으로, 저수지별, 미래기간별로 상이한 결과를 보여주었다. 중부지역의 Res. A와 Res. B, 남부지역의 Res. F, Res. G의 경우 과거 기준기간의 용수공급 취약성 확률은 설계 한발빈도와 유사하게 산정되었다. 하지만 중부지역의 Res. D, 남부지역의 Res. E, Res. H의 경우 설계 한발빈도보다 높게 산정되었으며, Res. C의 경우 과거 설계 한발빈도는 3년 빈도였지만 과거 기준기간의 취약성 확률은 10년 빈도로 산정되었다. 저수지별, RCP 시나리오별로 다양한 결과를 보였으며, 전반적으로 미래로 갈수록 용수공급 취약성 확률은 증가하였으며, 특히 RCP 8.5 시나리오의 2085s 기간의 취약성 확률이 가장 높은 값을 나타냈다. 용수공급 취약성 확률 변화로부터 전망된 용수공급 실패 확률은 단기적 (2025s)으로는 관개 취약성이 개선되나, 미래로 갈수록 관개수 부족 현상의 발생 빈도가 잦아질 것으로 전망되었다.

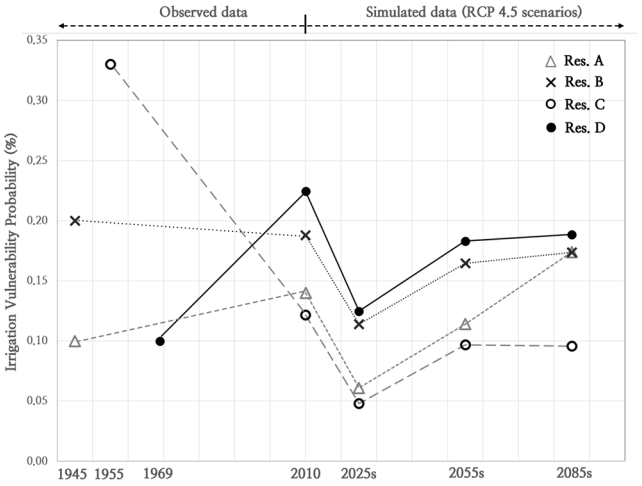


Fig. 6 Assessment of water supply sustainability based on RCP 4.5 scenarios in the central region

Fig. 7 Assessment of water supply sustainability based on RCP 8.5 scenarios in the central region

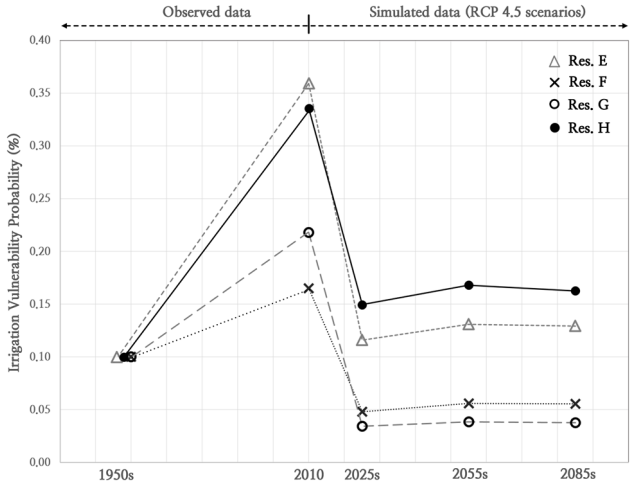


Fig. 8 Assessment of water supply sustainability based on RCP 4.5 scenarios in the southern region

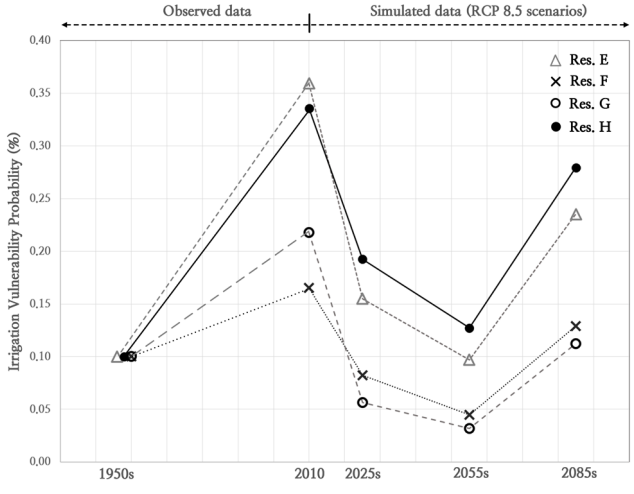


Fig. 9 Assessment of water supply sustainability based on RCP 8.5 scenarios in the southern region

미래 기후변화 시나리오의 경우 미래 후기로 갈수록 온도, 강수량이 증가하였지만, 기후변화는 비선형적인 현상으로 온실가스 감축 대책을 적용한 RCP 4.5 시나리오임에도 불구하고 저수지의 용수공급 취약성은 증가하는 경향을 보였다. 저수지의 저수용량, 즉 용수공급능력은 한정되어 있으며, 강수의 절대적 양이 아닌 시기적인 편차에 의해 용수공급능력이 산정되기 때문에 (Nam et al., 2014), RCP 시나리오별/저수지별로 용수공급 취약성 확률은 상이한 결과가 도출되었다. 기후변화 대응을 위해서는 미래 용수공급 취약성의 변화를 평가 기준으로서 활용하여 지속적인 모니터링이 가능하고 기후변화에 대응할 수 있는 맞춤형 관리 전략을 구분할 수 있을 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 미래 기후변화에 의한 기상 및 수문현상 변화에 따른 농업수자원 이수 측면에서의 용수공급 취약성을 분석하고, 농업용 저수지 용수공급의 기후변화 대응 능력을 평가하였다. 신뢰성 해석기법을 바탕으로 개발된 용수공급 취약성 평가 모형을 미래 기후변화 시나리오에 적용하여 공급량과 수요량의 변화를 분석하고 용수공급 취약성 확률의 변화를 산정하였고, 미래 기후변화 대응을 위한 용수공급 취약성 및 지속가능성의 개념을 정의하였다.

RCP 시나리오를 활용하여 미래 기후변화에 따른 연별 기후요소의 변화분석 결과, 1) RCP 4.5 시나리오에 대비하여 RCP 8.5 시나리오에 대한 기후요소인 평균기온 및 연강수량의 평균 및 분산이 크게 산정됨에 따라 변화율 폭이 크게 산정되었다. 2) 유역유입량의 증가율은 강수량의 변화율과 유사하며, 미래 평가기간에 따라 유역유입량의 평균 및 분산이 증가함으로써 장기 미래로 갈수록 전망 결과의 일관성이 낮아짐으로써 불확실성이 증가하는 경향을 보였다. 3) 저수지별 관개지역의 필요수량의 분석 결과 기온의 증가로 인해 기준증발산량은 증가하였지만, 강우량의 증가로 인한 유효우량의 증가로 관개지역의 필요수량은 감소하였다. 4) 용수공급 취약성 평가는 저수지별, RCP 시나리오별로 상이하였으며, 특징적으로 유역유입량과는 달리 공급계획량이 줄어드는 것으로 분석되었다. 5) 용수공급 취약성 확률 변화로부터 전망된 용수공급 실패 확률은 단기적으로 취약성 확률이 감소하는 반면, 미래로 갈수록 용수공급 취약성 확률은 증가하였으며, 특히 RCP 8.5 시나리오의 2085s 기간의 취약성 확률이 가장 높은 값을 나타냈다.

본 연구에서 제시한 영향 평가에 따른 농업용 저수지의 용수공급에 대한 취약성 및 지속가능성의 정량적 분석은 효율적인 적응 대책 수립을 위한 의사결정지원 도구로써 활용가능 할 것으로 판단된다. 저수지별로 미래 기후변화에 따른 영향이 다르므로, 향후 저수지 특성을 분석하여 비슷한 패턴을 갖는 저수지로 유형화할 수 있기를 기대한다.

이 논문은 2013년도 정부 (교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (2013R1A6A3A03019009).

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. Bae, D.H., I.W. Jung, B.J. Lee, and M.H. Lee, 2011. Future Korean water resources projection considering uncertainty of GCMs and hydrological models. *Journal of the Korean Water Resources Association* 44(5): 389-406 (in Korean).
3. 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).
4. Chung, S.O., 2009. Climate change impacts on paddy irrigation requirement in the Nakdong river basin. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 51(2): 35-41 (in Korean).
5. Chung, S.O., 2010. Simulating evapotranspiration and yield response of rice to climate change using FAO-AquaCrop. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 52(3): 57-64 (in Korean).
6. Doorenbos, J., and W.O. Pruitt, 1977. *Guidelines for Predicting Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 24, FAO, Rome.
7. Fry, L.M., D.W. Watkins, N. Reents, M.D. Rowe, and J.R. Mihelcic, 2012. Climate change and development impacts on the sustainability of spring-fed water supply systems in the Alto Beni region of Bolivia. *Journal of Hydrology* 468-469: 120-129.
8. Hong, E.M., J.Y. Choi, S.H. Lee, S.H. Yoo, and M.S. Kang, 2009. Estimation of paddy rice evapotranspiration considering climate change using LARS-WG. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 51(3): 25-35 (in Korean).
9. Hwang, S.W., 2012. Utility of gridded observations for statistical bias-correction of climate model outputs and its hydrologic implication over west central Florida. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(5): 91-102.
10. Hwang, S.W., Y.G. Her, and S.W. Chang, 2013. Uncertainty in regional climate change impact assessment using bias-correction technique for future climate scenarios. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(4): 95-106 (in Korean).
11. Jee, Y.K., J.H. Lee, and S.D. Kim, 2012. Climate change impacts on agricultural water in Nakdong-river watershed. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(3): 149-157 (in Korean).
12. Jeung, S.J., J.H. Sung, and B.S. Kim, 2013. Change projection of extreme indices using RCP climate change scenario. *Journal of the Korean Water Resources Association* 46(11): 1089-1101 (in Korean).
13. Jun, S.M., E.S. Chung, S.H. Lee, and Y. Kim, 2013. Development and application of robust decision making technique considering uncertainty of climatic change scenarios. *Journal of the Korean Water Resources Association* 46(9): 897-907 (in Korean).
14. Kay, P.A., 2000. Measuring sustainability in Israel's water system. *International Water Resources Association* 25(4): 617-623.
15. Kim, B.S., J.H. Sung, B.H. Lee, and D.J. Kim, 2013a. Evaluation on the impact of extreme droughts in South Korea using the SPEI and RCP 8.5 climate change scenario. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 13(2): 97-109 (in Korean).
16. Kim, C.R., Y.O. Kim, S.B. Seo, and S.W. Choi, 2013b. Water balance projection using climate change scenarios in the Korean Peninsula. *Journal of the Korean Water Resources Association* 46(8): 807-819 (in Korean).
17. Kim, M.H., H.S. Kang, J.H. Lee, H.J. Baek, and C.H. Cho, 2013c. Estimates of the water cycle and river discharge change over the global land at the end of 21st century based on RCP scenarios of HadGEM2-AO climate model. *Atmosphere. Korean Meteorological* Society 23(4): 425-441 (in Korean).
18. Kim, M.K., 2005. The applicability of the statistical downscaling method for climate change scenario in Korea. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* 41: 217-227 (in Korean).
19. Kim, M.K., M.S. Han, D.H. Jang, S.G. Baek, W.S. Lee, Y.H. Kim, and S. Kim, 2012. Production technique of observation grid data of 1km resolution. *Journal of Climate Research* 7(1): 55-68 (in Korean).
20. Kim, M.K., D.H. Lee, and J. Kim, 2013d. Production and validation of daily grid data with 1km resolution

in South Korea. *Journal of Climate Research* 8(1): 13-25 (in Korean).

21. Kim, S.U., Y.S. Lee, and C.E. Lee, 2014. The application of various non-parametric trend tests to observed and future rainfall data in the Nakdong River basin. *Journal of the Korean Water Resources Association* 47(3): 223-235 (in Korean).
22. Korean Rural Community and Agriculture Corporation (KRC), 2012. *Statistical yearbook of land and water development for agriculture*. Ministry for food, Agriculture, Forestry and Fisheries, Republic of South Korea (in Korean).
23. Lee, K., H.J. Baek, S. Park, H.S. Kang, and C.H. Cho, 2012. Future projection of changes in extreme temperatures using high resolution regional climate change scenario in the Republic of Korea. *Journal of the Korean Geographical Society* 47(2): 208-225 (in Korean).
24. Lee, Y.H., Y.J. Oh, C.S. Na, M.H. Kim, K.K. Kang, and S.T. Yoon, 2013. Vulnerability assessment on spring drought in the field of agriculture. *Climate Change Research* 4(4): 397-407 (in Korean).
25. Loucks, D.P., 2000. Sustainable water resources management. *International Water Resources Association* 25(1): 3-10.
26. Nam, W.H., T.G. Kim, J.Y. Choi, and J.J. Lee, 2012. Vulnerability assessment of water supply in agricultural reservoir utilizing probability distribution and reliability analysis methods. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(2): 37-46 (in Korean).
27. Nam, W.H., 2013. Sustainability and operations evaluation of agricultural reservoirs based on probability theory. Ph.D. diss., Seoul National University.
28. Nam, W.H., E.M. Hong, and J.Y. Choi, 2014. Uncertainty of water supply in agricultural reservoirs considering the climate change. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(2): 11-23 (in Korean).
29. Nam, W.H., and J.Y. Choi, 2014. Development of an irrigation vulnerability assessment model in agricultural reservoirs utilizing probability theory and reliability analysis. *Agricultural Water Management* 142: 115-126.
30. Nkomozepi, T., and S.O. Chung, 2014. Uncertainty of hydro-meteorological predictions due to climate change in the Republic of Korea. *Journal of the Korean Water Resources Association* 47(3): 257-267.
31. No, S.H., K.S. Jung, J.H. Park, and K.S. Ryoo, 2013. Water supply change outlook for Geum River basin considering RCP climate change scenario. *Journal of the Korean Water Resources Association* 46(5): 505-517 (in Korean).
32. Park, B.S., J.H. Lee, C.J. Kim, and H.W. Jang, 2013. Projection of future drought of Korea based on probabilistic approach using multi-model and multi climate change scenarios. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 33(5): 1871-1885 (in Korean).
33. Shin, H.J., M.J. Park, H.K. Joh, G.A. Park, and S.J. Kim, 2010. Projection and analysis of future temperature and precipitation using LARS-WG downscaling technique – for 8 meteorological stations of South Korea. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 52(4): 83-91 (in Korean).
34. Sohn, K.H., D.H. Bae, and J.H. Ahn, 2014. Projection and analysis of drought according to future climate and hydrological information in Korea. *Journal of the Korean Water Resources Association* 47(1): 71-82 (in Korean).
35. Sung, J.H., H.S. Kang, S.H. Park, C.H. Cho, D.H. Bae, and Y.O. Kim, 2012. Projection of extreme precipitation at the end of 21st century over South Korea based Representative Concentration Pathways (RCP). *Atmosphere. Korean Meteorological Society* 22(2): 221-231 (in Korean).
36. Yoo, J.Y., H.H. Kwon, T.W. Kim, and S.O. Lee, 2014. Probabilistic assessment of drought characteristics based on homogeneous hidden markov model. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 34(1): 145-153 (in Korean).
37. Yun, D.K., S.O. Chung, and S.J. Kim, 2011. Climate change impacts on paddy water requirement. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 53(4): 39-47 (in Korean).