미래 기후변화에 따른 농업용 저수지 용수공급의 불확실성

Uncertainty of Water Supply in Agricultural Reservoirs Considering the Climate Change

남원호* · 홍은미** · 최진용***†

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

ABSTRACT

The impact and adaption on agricultural water resources considering climate change is significant for reservoirs. The change in rainfall patterns and hydrologic factors due to climate change increases the uncertainty of agricultural water supply and demand. The quantitative evaluation method of uncertainty based on agricultural water resource management under future climate conditions is a major concern. Therefore, it is necessary to improve the vulnerability management technique for agricultural water supply based on a probabilistic and stochastic risk evaluation theory. The objective of this study was to analyse the uncertainty of water resources under future climate change using probability distribution function of water supply in agricultural reservoir and demand in irrigation district. The uncertainty of future water resources in agricultural reservoirs was estimated using the time-specific analysis of histograms and probability distributions parameter, for example the location and the scale parameter. According to the uncertainty analysis, the future agricultural water supply and demand in reservoir tends to increase the uncertainty by the low consistency of the results. Thus, it is recommended to prepare a reasonable decision making on water supply strategies in terms of using climate change scenarios that reflect different future development conditions.

Keywords: Agricultural reservoir; climate change; probability distribution; uncertainty; water supply and demand

I. 서 론

전 세계적으로 기후변화로 인한 기온, 강수, 증발산 등 수문순환 요소들이 급변하고 있으며 기후 시스템의 변화는 과거에 발생하지 않았던 기상이변 현상, 즉 비정상적인 기후로 설명되는 극한기상사상의 출현을 유발한다 (Kim et al., 2011). 농업은 기후적 조건과 변화에 크게 좌우되는 분야로써 미래 기후변화로 인한 극한 수문사상의 규모, 빈도의 증가 및 기상, 수문사상의 불확실성은 용수공급 체계의 취약성을 증대시키고 농업수자원 관리 및 계획수립에 어려움을 야기한다. 특히 전국적으로 분포하면서 농업 생산력과 직접 관련이 있는 농업수자원 및 농업용 저수지 용수공급의 기후변화 영향에 대한 기후변화 취약성 및 적

응능력의 정량적 분석은 기후변화 적응 대책의 우선순위 수립을 위한 필수적 요소이다.

과거 수문사상의 불확실성 분석은 정상성 (stationarity) 이라는 가정 하에 빈도개념의 재현기간을 적용하여 수문현상이 갖는 추계학적 특성보다 확정론적인 근거로부터 산정하였다 (Lee et al., 2011; Nam, 2013). 이러한 접근법은 어떤 수문 현상이 특정한 확률분포를 따른다는 가정 하에 수문 사상의 발생 빈도나 혹은 특정 빈도에 관하여 수문 사상의 크기에 대한 분석이 주를 이루고 있다 (Kim et al., 2010). 하지만 최근 발생하는 홍수 및 가뭄과 같은 주요 이상기후 사상은 과거에 비해 경향성 및 변동성이 변화하고 기후변화로 인해 극한 사상의 특성이 변화함으로써 통계적 특성 분포를 고려할 때 거의 발생하지 않았던 사상이 발생한다. 따라서 현재와 대별되는 극한 사상의 크기와 발생 빈도의 변화로 인한 정상성의 가정을 벗어난 수문사상의 불확실성 해석을 위한 확률통계학적 방법론의 필요성이 요구되었으며 (Klein Tank and Konnen, 2003; Griffiths et al., 2005; Park, 2009; Kim et al., 2011; Kim and Lee, 2012; Hwang et al., 2013), 수자원 계획시 고려되는 부하와 저항은 확정론적 고정값이 아닌 시간에 따라 동적인 확률변수로서 고려되어야 한다.

과거 자연 사상에 대한 적정 확률분포 선정에 관한 연구는 강

* School of Natural Resources, University of Nebraska-Lincoln, Visiting Scholar

** 서울대학교 농업생명과학연구원 선임연구원

*** 서울대학교 조경·지역시스템공학부 부교수, 농업생명과학연구원

† Corresponding author Tel.: +82-2-880-4583

Fax: +82-2-873-2087

E-mail: iamchoi@snu.ac.kr

2013년 8월 8일 투고

2014년 2월 3일 심사완료

2014년 2월 6일 게재확정

우 요소를 중심으로 진행되었고 (Oh and Moon, 2009; Kim et al., 2010; Kwon and Lee, 2010), 이는 수문 순환 과정의 기본적인 요소로서 수공학적인 구조물 건설에 기준으로 사용되는 확률 강수량 또는 설계홍수량을 결정하는 기초자료로 활용되었다. 수자원의 공급은 대부분 강우량에 의존하므로 강수의 변동성이나 불확실성을 고려해야 하며 (Shim, 2003), 수문자료의 합리적 해석 방법 및 안정적인 수공구조물의 설계를 위하여 강수자료를 이용한 빈도해석기법을 수행함으로써 최적의 확률 분포형을 규명하는 연구들이 진행되었다. 또한 자연 현상에 대한 경향성과 변동성 변화를 중심으로 연 최대계열 혹은 극치계열을 이용하여 적정 확률분포형을 선정함으로써 홍수 및 가뭄 등의 극치사상의 자료로부터 적정 확률분포 모형 선정에 대한 연구가 수행되었다 (Lee et al., 1999; Maeng et al., 2009b; Yoon et al., 2012). New 등 (2007)은 확률론적 기후변화정보 (probabilistic climate change information)를 생산하고 유출모형에 적용하여 수자원 측면에서 확률영향정보를 제공하였으며, Bae 등 (2011)은 기후변화에 대한 계절별 유출량 변화를 커널밀도함수 (Kernel density function)로 분석한 결과 미래 후기로 갈수록 확률밀도함수가 평활해짐을 도시적으로 분석하였다.

농업수자원의 합리적 이용을 위한 농업용 저수지의 효율적인 운영은 우선적으로 저수지의 수요량과 공급량의 양상 및 경향성을 파악하는 방법이 필수적으로 선행되어야 한다 (Nam et al., 2012a; 2012c). 농업용 저수지의 저수량에 의한 관개용수 공급 가능 여부는 기본적으로 가변적이고 불확실성을 포함하고 가용한 수자원의 원천인 기상 및 수문 현상의 특성에 따라 지배적인 영향을 받는다. 농업수자원은 지형 및 수문조건 등의 자연조건에 의한 기상학적, 지형학적 특성에 따라 단일 저수지별로 공급량 및 수요량의 값이 상이하며, 기상, 수문현상의 이상기후로 인해 축적된 기상자료의 변화로 인한 공급량과 수요량의 변화는 장기간의 농업용수의 수요량과 공급량의 경향성 분석, 예측은 물공급과 같은 이수 측면에서 주요한 의미를 갖는다. 농업용수의 공급체계를 구성하고 있는 수요량 및 공급량에 관한 변수들은 불확실성을 내재하고 있으며, 이를 정량적으로 산정하고 분석하기 위한 다양한 방법들이 제안되었다 (Chung, 2009; Maeng et al., 2009a; Jee et al., 2012). 본 연구에서는 이상기후에 대응하고 농업수자원의 안정적인 용수공급을 목표로 저수지 운영에 필요한 수문자료의 확률분포 적용에 대한 이론적 근거를 정립하고자 한다. 또한 기존의 확정론적 방법이 아닌 확률통계학적 방법을 활용하여 농업용수 공급량 및 수요량 모형으로부터 미래 기후변화에 의한 기상 및 수문현상 변화에 따른 농업수자원 이수 측면에서 용수공급 상황의 변화를 전망하고 그 결과에서 발생하는 농업용 저수지의 용수공급에 대한 불확실성을 평가하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 기후변화와 불확실성

국제사회는 기후변화에 효과적으로 대응하기 위하여 1988년 기후변화에 관한 정부간협의체 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)를 설립하고, 미래 기후변화를 예측하기 위하여 기후변화 시나리오를 발표하고 있다. IPCC 제 4차 평가 보고서 (4th Assessment Report, AR4)에 사용된 온실가스 배출시나리오 (Special Report on Emissions Scenarios, SRES) 자료의 노후화 및 해상도 문제를 보완하기 위하여, 2007년 9월에 개최된 세계표준 온실가스 농도 시나리오 전문가 회의에서 새로운 온실가스 배출 시나리오로 대표농도경로 (Representative Concentration Pathways, RCP) 시나리오가 선정되었다. RCP 시나리오는 온실가스 배출시나리오로서 인간 활동이 대기에 미치는 복사량으로 온실가스 농도를 정하였고, 대표 농도 4개를 선정하여 농도에 따른 시나리오를 산출하였다. RCP 시나리오의 종류는 복사강제력을 기준으로 RCP 2.6, 4.5, 6.0 및 8.5으로 구분된다. RCP 시나리오는 온실가스 농도 산출과정에서 기후변화 대응정책 수행여부에 따른 온실가스 변화를 감안하여 미래사회 구조 기반의 사회경제적 가치치를 산정한 것이 특징이며, RCP 2.6은 인간 활동에 의한 영향을 지구 스스로가 회복 가능한 경우, RCP 4.5는 온실가스 저감 정책이 상당히 실현되는 경우, RCP 6.0은 온실가스 저감 정책이 일부분 실현되는 경우, RCP 8.5는 현재 추세로 저감 없이 온실가스가 배출되는 경우를 의미한다.

불확실성 (uncertainty)이란 통상적으로 시스템이 감당할 수 없는 범위를 벗어난 사건 (event)의 발생가능성을 의미한다 (Mays and Tung, 1992). 과거 수자원 시스템의 의사결정 과정은 하나의 발생 가능성 (확률)이 높은 미래 시나리오가 선택되고 그 미래를 대비한 계획을 수립한다. 이러한 접근방법은 목적과 범위가 정의된 상황에서 불확실성이 상대적으로 낮은 경우 수행된다. 하지만 시스템의 구성요소들이 불확실성에 취약한 경우 발생 가능한 미래의 현상, 범위를 규정하고, 예측된 범위를 벗어난 상황이 발생하였을 때 다양한 조건에 대한 시스템의 반응을 포괄함으로써 보다 유연한 시스템을 구축해야한다 (Kang et al., 2013). 기후변화에 따른 이상 기후 현상과 같은 자연적 불확실성은 기후변화 영향 평가의 주요 요소로써 이를 설명하기 위해서는 추계학적 또는 확률론적 분석방법이 요구된다 (Raisanen, 2007; Lee and Kim, 2012). 일반적인 기후변화 시나리오에 따른 영향 평가의 경우 온실가스 배출 시나리오를 선정하고 기후모형을 이용하여 기후를 전망하며, GCM (Global Circulation Model), RCM (Regional Circulation Model), 상세화 기법 (downscaling technique) 등의 단계를 통해 수행된다. 이 과정에서 미래 온실

가스 배출시나리오 예측의 부정확성, 기후변화 시나리오의 한계, 저해상도 (coarse scale) 기후모델 결과의 시공간적인 편이 (bias) 를 보정하는 방법에 따른 오차, 적용 모형의 선정과 매개변수 보정에 따른 오차 등의 불확실성이 발생한다 (Maurer, 2007; Bae et al., 2011).

과거 수문통계분석에서는 정상성 (stationarity)이라는 기본 가정을 전제로 하고 있기 때문에 기후변화 및 변동에 의한 외부변화로 인해 극한 사상의 특성 변화를 반영하기에는 한계가 있다 (Griffiths et al., 2005; Kim et al., 2011). 통계학적 의미에서 정상성이란 평균과 분산과 같은 매개변수가 시간에 따라 불변하며, 극한사상을 표현하는 확률분포형의 매개변수가 시간의 변화에 상관없는 상수로써 표현된다 (Kim et al., 2011; Trambly et al., 2012). 기후변화에 의한 극한 사상의 불확실성 해석을 위하여 발생 기간과 양적인 측면에서 분석할 수 있으며, Fig. 1과 같이 현재와 미래의 확률분포형으로 도시하였을 경우 과거 극한 사상과 비교하여 현재와 대별되는 극한 사상의 크기 (평균)와 빈

도 (분산)가 변화하게 된다 (Klein Tank and Konnen, 2003; New et al., 2007; Goodess, 2013).

2. 공급량 및 수요량의 산정

일반적인 농업용 저수지의 용수공급능력 평가는 공간적으로 소규모 유역단위의 가용수량과 수요량의 비교에 의해 수행되기 때문에 기본적으로 유역의 유출량 및 관개지구의 용수수요량 파악이 중요하다. 농업용 저수지의 공급량을 대표하는 유입량은 일반적으로 유역 수문 모형에 의한 모의 값을 사용하고 있다 (Noh, 2000). 일반적으로 강우-유출모형은 강우인자가 지배적인 데 반하여 저수지 물수지 모형이나 논 물수지 모형은 강우 인자 외에 기온, 풍속, 습도, 일사량을 바탕으로 한 증발산량 등의 추가 인자가 고려되어야 하고 유역 면적, 관개 면적, 토지이용 등 지형적인 인자의 영향을 받는다. 따라서 저수지의 공급량 및 관개지구의 수요량의 경우 기상학적 특성 및 지형학적 특성 여러 요인에 의해 변동되므로 확률론적 개념으로 평가되어야 한다.

관개 지구의 농업용수 수요예측량과 저수지의 공급계획량을 상호 비교하여 농업용 저수지 공급가능량의 부족여부를 판단할 수 있다. 농업용 저수지 물 공급 시스템을 구성하는 주요 요소로써 유역에서 저수지로부터 공급 가능한 가용용수량 (potential water supply capacity, PWS)과 저수지 물수지로부터 계산된 관개지역의 필요수량 (irrigation water requirement, IWR)을 식 (1), 식 (2)와 같이 공급계획량과 수요예측량으로 정의하였다 (Nam et al., 2012b; 2012c).

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

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

PWS 는 공급 가능 가용 용수량, RC (reservoir capacity)는 저수지의 저수량, RWI (reservoir watershed inflow)는 유역의 유입량, RO (reservoir overflow)는 월류량, t 는 시간 단위, n 은 관개 종료시점이다. 수요예측량 (IWR)은 논 필요수량, PWR (paddy water requirement)로 정의하였다.

저수지의 유입량과 관개지구의 필요수량, 저수지 물수지 모의에 의한 월류량을 산정하기 위하여, 저수지의 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

(a) The location parameter (in this case, the mean) of the distribution increases

(b) The scale parameter (in this case, the variance) of the distribution decreases

Fig. 1 Two hypothetical forms of climate change (Griffiths et al., 2005; Kim et al., 2011)

Table 1 Characteristics for agricultural reservoir in the study area

Symbol	Reservoir name	Effective storage capacity (10^3 m^3)	Watershed area (ha)	Irrigated area (ha)	Frequency of drought (year)	Administrative district
Res. A	Asan	369.0	270.0	114.5	10	Gyeongsangnam-do
Res. B	Dodeok	316.0	256.0	94.1	10	Jeollanam-do
Res. C	Hyocheon	615.0	230.0	106.7	10	Gyeongsangbuk-do
Res. D	Gwangi	783.3	365.0	239.4	10	Jeollanam-do
Res. E	Shinpyeong	635.1	310.0	152.5	3	Jeollanam-do
Res. F	Songak	463.0	254.0	161.0	3	Chungcheongnam-do
Res. G	Topgok	451.8	378.0	133.7	3	Gyeongsangnam-do
Res. H	Yoogok	687.0	320.0	130.9	10	Jeollabuk-do

수요량을 산정하였다. 저수지의 월류량은 저수지 물수지 모의를 통하여 저수지 유입량으로부터 수위가 만수위 시 자연 월류하는 양으로 산정하였다. 공급 가능량은 관개기간 (4월 1일~9월 30일) 유입량의 합과 저수지 월류량의 차이로 정의하였고, 수요량의 경우 관개기간 논벼 필요수량의 합을 사용하였다.

3. 적정 확률분포 선정

농업용 저수지의 공급량 및 수요량의 시계열 자료를 구성하여 적정 확률분포를 산정하였으며, 확률분포에 의한 빈도분석 시 일반적으로 사용되는 Normal (NOR), Gamma (GAM), Generalized extreme value (GEV), Gumbel (GUM), Log-Normal (LN), Weibull (WBU)를 대상으로 하였다 (Meang et al., 2009a). 적합도 검정은 χ^2 (Chi-square), Kolmogorov-Smirnov 검정, 확률도시 상관관계수 검정 (Probability Plot Correlation Coefficient, PPCC)을 통한 적정 확률분포형 선정하고, 통계학적 특성을 분석하였다.

III. 적용 및 고찰

1. 대상지구 선정 및 분석자료

본 연구에서는 농업용수 공급을 목적으로 준공된 유역면적 500 ha 미만의 소규모 농업용 저수지를 대상으로 하였으며, Table 1에 도시한 바와 같이 유역면적, 관개면적, 유효저수량이 유사한 저수지를 선정하였다. 또한 저수지 물수지 모의 및 공급량 모형의 검증에 위하여 한국농어촌공사의 농촌용수종합정보시스템 (Rural Agricultural Water Resource Information System, RAWRIS)에서 제공하는 저수위, 저수량, 저수율 등의 자료를 사용하였다. Fig. 2와 Fig. 3은 Res. A와 Res. G의 2011년, 2012년 실측 저수위 (Nam et al., 2013)와 저수지 물수지 모의 값을 비교한 그 래프이다.

Fig. 2 Comparison of the observed water level and the simulated data in Res. A

미래 기후변화 시나리오의 수문학적 활용을 위하여 지역규모의 고해상도의 시나리오 자료를 생산하기 위한 역학적 (dynamic) 혹은 통계적 상세화 (statistical downscaling)과정이 필요하다 (Giorgi and Mearns, 2002; Wood et al., 2004). 통계적 상세화는 시공간적 계통적 편의 (systematic bias)를 보정하는 방법으

로 저해상도 자료와 그 격자에 포함되는 관측지점의 관측 자료와 일대일 관계 분석을 통하여 주요한 시공간적 상관성을 정량화 하는 방법이다 (Bae et al., 2011; Sung et al., 2012). 기상청 (Korea Meteorological Administration, KMA)에서는 기후변화 적응 대책 수립을 위한 기후변화 시나리오 생산의 일환으로 RCP

시나리오에 대하여 전지구 및 지역기후모델의 기후변화 시나리오를 제공하고 있으며, 본 연구에서는 영국 기상청 해들리센터 지역 기후모델인 HadGEM3-RA로부터 통계학적 상세화 과정을 수행한 기상청 기후변화 시나리오 자료를 사용하여 기후변화에 따른 공급량 및 수요량의 불확실성을 평가하였다. 온실가스 배출시나리오의 불확실성을 고려하기 위하여 RCP 4.5, RCP 8.5 시나리오를 이용하였으며, 기후변화 시나리오의 분석기간을 단기 (2025s), 중기 (2055s), 장기 (2085s)로 분류하였다. 기후변화 시나리오 선정 요소로서 용수공급능력의 관한 요소인 수요량과 공급량을 산정하여 초기, 중기, 후기로 구분한 분석기간에 따라 시계열 변화를 분석하였다.

2. 공급량 및 수요량의 기초통계량 및 적정 확률분포 선정

본 연구의 대상지구로 선정된 농업용 저수지의 공급가능량 및 수요예측량 자료에 대한 기본 통계치인 평균 (mean), 표준편차 (standard deviation), 변동계수 (coefficient of variation) 및 왜곡도 (skewness)는 Table 2에 도시한 바와 같다. 평균값을 비교

Fig. 3 Comparison of the observed water level and the simulated data in Res. G

Table 2 Basic statistics of PWS and IWR based on baseline

Symbol	PWS ¹⁾				IWR ²⁾			
	M ³⁾	SD ⁴⁾	CV ⁵⁾	CS ⁶⁾	M	SD	CV	CS
Res. A	1,121	132	0.149	0.187	970	238	0.238	-0.253
Res. B	923	111	0.127	-0.116	748	115	0.233	0.102
Res. C	1,339	126	0.090	-0.088	815	169	0.216	0.181
Res. D	2,163	334	0.167	0.320	2,028	499	0.238	-0.253
Res. E	1,594	210	0.128	0.097	1,294	256	0.185	0.065
Res. F	1,383	182	0.127	0.357	1,270	241	0.192	-0.603
Res. G	1,352	148	0.135	0.022	1,120	234	0.206	-0.186
Res. H	1,502	180	0.121	0.589	940	225	0.236	0.026

1) PWS: potential water supply, 2) IWR: irrigation water requirement, 3) M: mean (10^3 m^3), 4) SD: standard deviation, 5) CV: coefficient of variation, 6) CS: coefficient of skewness

Table 3 Test of goodness of fit for PWS and IWR based on baseline

Symbol	PWS ¹⁾									IWR ²⁾								
	NOR	GAM2	GAM3	GEV	GUM	LN2	LN3	WBU2	WBU3	NOR	GAM2	GAM3	GEV	GUM	LN2	LN3	WBU2	WBU3
Res. C	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
Res. E	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	X	X	O	O	X	O	X
Res. F	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	X	O	O	O	O	O	O
Res. G	O	O	X	O	O	O	O	O	O	O	O	X	O	X	X	O	O	O
Res. H	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	X	O	O	O	O	O	O

1) PWS: potential water supply, 2) IWR: irrigation water requirement, 3) NOR: normal distribution, 4) GAM2: two-parameter gamma distribution, 5) GAM3: three-parameter gamma distribution, 6) GEV: general extreme value distribution, 7) GUM: gumbel distribution, 8) LN2: two-parameter log-normal distribution, 9) LN3: three-parameter log-normal distribution, 10) WBU2: two-parameter weibull distribution, 11) WBU3: three-parameter weibull distribution

(a) Histogram of IWR in Res. A

(b) Histogram of PWS in Res. A

(c) Histogram of IWR in Res. B

(d) Histogram of PWS in Res. B

(e) Histogram of IWR in Res. C

(f) Histogram of PWS in Res. C

(g) Histogram of IWR in Res. D

(h) Histogram of PWS in Res. D

Fig. 4 Histogram of IWR and PWS based on baseline (continued)

Fig. 4 Histogram of IWR and PWS based on baseline

해 본 결과, Res. D에서 공급과 수요량의 최대치가 산정되었으며, 공급량과 수요량의 차이는 저수지마다 상이한 결과를 보였다. 변동계수의 경우 상대적으로 수요량에서 큰 값이 도출되었으며, 이는 표준편차와 평균의 차이가 크다는 것을 의미한다. 왜곡도 지수는 저수지별로 변동이 크며, 각 저수지별 공급량 및 수요량의 평균에 대한 대칭 정도가 지역의 특성에 따라 상이한 것으로 판단된다.

적정 확률분포 선정을 위한 적합도 검정은 χ^2 , K-S 검정, 확률도시 상관계수 검정을 활용하였다. 요소별로 선정한 확률분포형을 따른다는 귀무가설 (null hypothesis)을 유의수준 5 %에서 적합도 검정을 수행하였다. Table 3에 도시한 바와 같이, 'X' 표시는 적합도 검정방법을 통과하지 못한 경우이며, 'O' 표시는 모든 검정 방법을 통과한 경우이다. 공급량의 경우, GAM3 분포형을 제외한 나머지 분포형의 적합도 검정을 통과하였지만, 수요량의 경우 NOR, GAM2, WBU2 분포형의 검정값이 한계값보다 작게 산출되어 적합도 검정을 통과하였다. 확률분포가 정확하게 알려지지 않은 자연적인 변량들의 확률변수에 대해서는 일반적으로 정규분포를 가정하게 되며, 본 연구에서는 Normal (Gaussian) 분포형을 채택하였다.

3. 과거 공급량과 수요량의 확률분포 분석

본 연구의 대상지구인 소규모 농업용 저수지의 공급량, 수요량의 과거 기초통계량을 활용하여 Gaussian 확률분포가 자료를 표현 (fitting)하기에 적합성을 평가하기 위하여 시각적인 검토를 우선적으로 수행하였다. Fig. 4는 과거 30년간의 공급량과 수요량의 히스토그램 (histogram)과 평균과 분산을 이용한 Gaussian 확률분포를 도시한 것이다. 수요량은 공급량보다 평균값은 작지만 분산은 크게 산정되어 기후조건에 따른 수요량의 변화폭이 크다고 판단된다. 또한 Res. D의 경우 공급량, 수요량의 분산이 다른 저수지보다 크기 때문에 확률분포함수의 좌, 우 꼬리 (tail)가 평활하게 나타났으며, 이는 기후변화에 의한 불확실성이 높다고 판단된다.

4. 미래 기후변화를 고려한 공급량과 수요량의 확률분포 분석

Res. A 저수지를 대상으로 RCP 4.5, 8.5 시나리오에 따른 공급량과 수요량의 변화를 산정하였다. RCP 4.5와 8.5 시나리오의 2011년부터 2100년까지 기상자료를 활용하여 공급량 및 수요량

(a) Histogram of IWR during 2011 ~ 2100 based on RCP 4.5 scenarios

(b) Histogram of PWS during 2011 ~ 2100 based on RCP 4.5 scenarios

Fig. 5 Histogram of IWR and PWS based on RCP 4.5 scenarios in Res. A

(a) Histogram of IWR during 2011 ~ 2100 based on RCP 8.5 scenarios

(b) Histogram of PWS during 2011 ~ 2100 based on RCP 8.5 scenarios

Fig. 6 Histogram of IWR and PWS based on RCP 8.5 scenarios in Res. A

을 산정하였으며, 미래 결과에 대한 히스토그램 및 확률분포는 Fig. 5와 Fig. 6에 도시한 바와 같다. 수요량과 공급량의 경우 RCP 시나리오별로 상이한 차이를 나타냈으며, RCP 8.5에서 평균과 분산이 크게 산정되었다. Table 4는 미래 기후변화에 따른 분석기간별 공급량과 수요량의 변화를 나타낸 것이고 Fig. 7과 Fig. 8은 단기, 중기, 장기별 히스토그램 및 확률분포를 도시한 것이다. 미래 기후변화 시나리오를 적용한 경우에도 수요량의 분산이 크게 산정되어 기후변화에 따른 수요량의 변화폭이 크다고 판단되며, 2025s의 수요량을 제외하고 RCP 8.5에서 분산이 크게 나타났다.

Table 4 Comparison of PWS and IWR based on RCP 4.5 and RCP 8.5 in Res. A

Period	RCP 4.5				RCP 8.5			
	PWS ¹⁾		IWR ²⁾		PWS		IWR	
	M ³⁾	SD ⁴⁾	M	SD	M	SD	M	SD
2025s	1,157	129	905	201	1,200	133	966	196
2055s	1,161	124	866	174	1,172	152	902	200
2085s	1,208	121	965	161	1,232	139	960	207

1) PWS: potential water supply, 2) IWR: irrigation water requirement, 3) M: mean (10^3 m^3), 4) SD: standard deviation

Fig. 7 Histogram of IWR and PWS based on RCP 4.5 scenarios in Res. A

5. 미래 기후변화를 고려한 공급량과 수요량 불확실성 분석

미래 기후변화에 의한 기상 및 수문현상의 변동성은 불확실성을 내포하고 있으므로 기후변화 영향 평가 및 대응정책 수립 과정의 혼란을 야기한다. 또한 다양한 기후모델 및 기후변화 시나리오에 따른 기후 전망 및 결과는 상이한 차이를 보이기 때문에 수자원 관리자에게 불확실성을 갖는 정보를 효과적으로 전달하는 것은 주요한 과제이다. Fig. 9와 Fig. 10은 미래 기후변화에 따른 공급량과 수요량의 분석시기별 확률분포를 도시한 것이다. 대체

적으로 미래 후기로 갈수록 공급량, 수요량은 증가하는 경향이 나타났다지만 2055s에는 RCP 4.5 시나리오의 수요량, RCP 8.5 시나리오의 공급량 및 수요량이 2025s에 비하여 감소하는 경향이 나타났다. 또한 RCP 8.5의 2055s에는 공급량과 수요량의 분산이 증가하였으며, 시기별로 상이한 차이를 보였다. RCP 시나리오별로 분산이 큰 기간을 분석한 경우, RCP 4.5의 공급량 및 수요량의 경우 2025s 시기에 가장 큰 값이 나타났고, 미래로 갈수록 분산이 감소하는 경향이 나타났다. 하지만 RCP 8.5의 경우 공급량의 경우 2055s 시기에, 수요량의 경우 2085s 시기에 최대치가 나타났으며, 미래로 갈수록 결과의 일관성이 낮아짐으로써 불확

Fig. 8 Histogram of IWR and PWS based on RCP 8.5 scenarios in Res. A

(a) Probability distribution of IWR based on RCP 4.5 scenarios

(a) Probability distribution of IWR based on RCP 8.5 scenarios

(b) Probability distribution of PWS based on RCP 4.5 scenarios

(b) Probability distribution of PWS based on RCP 8.5 scenarios

Fig. 9 Comparison of IWR and PWS based on RCP 4.5 scenarios in Res. A

Fig. 10 Comparison of IWR and PWS based on RCP 8.5 scenarios in Res. A

실성이 증가하는 경향을 보였다. 미래 기후변화 시나리오의 경우 미래 후기로 갈수록 온도, 강수량이 증가하는 경향을 나타내지만, 기후변화는 비선형적인 현상으로 온실가스 감축 대책을 적용한 RCP 8.5 시나리오임에도 불구하고 저수지 용수공급의 주요 요소인 공급량과 수요량은 시기별로 다른 양상이 나타났다.

저수지의 저수용량, 즉 용수공급능력은 한정되어 있으며, 강수의 절대적 양이 아닌 시기적인 편차에 의해 용수공급능력이 산정되기 때문에 기후 모델 및 RCP 시나리오별 상이한 결과가 도출되었다. 기후변화 대응을 위해서는 미래 용수공급 요소인 공급량과 수요량 변화로부터 기후변화 적응 정책들이 미래 기후변화 영향평가 결과의 불확실성 범위 내의 적합성을 평가하고 대비할 수 있는 항구적 관리방안이 수립되어야 한다.

IV. 결 론

기후변화에 능동적으로 대응하기 위하여 기후변화 영향에 대한

불확실성을 평가하고 효율적인 적응 대책 수립을 위한 정성적, 정량적 평가방법이 요구된다. 본 연구에서는 미래 기후변화에 의한 기상 및 수문현상 변화에 따른 농업수자원 이수 측면에서의 농업용 저수지의 공급량 및 수요량의 변화를 분석하고, 기존의 확정론적 방법이 아닌 확률통계학적 방법을 활용하여 농업용 저수지 용수공급의 기후변화에 대한 불확실성을 평가하였다. RCP 시나리오를 활용하여 미래 기후변화에 따른 공급량과 수요량의 분석시기별 히스토그램 및 확률분포를 분석한 결과, 대체적으로 미래 후기로 갈수록 공급량, 수요량의 평균은 증가하는 경향이 나타났다. RCP 시나리오별로 분산이 큰 기간을 분석한 경우, RCP 4.5의 공급량 및 수요량의 경우 2025s 시기에 가장 큰 값이 나타났고, 미래로 갈수록 분산이 감소하는 경향이 나타났다. 하지만 RCP 8.5의 경우 공급량의 경우 2055s 시기에, 수요량의 경우 2085s 시기에 최대치가 나타났으며, 미래로 갈수록 결과의 일관성이 낮아짐으로써 불확실성이 증가하는 경향을 보였다. 미래 기후변화 영향 평가에 따른 농업용 저수지의 용수공급에 대한 불확

실성 분석은 효율적인 적응 대책 수립을 위한 의사결정지원 및 농업수자원의 기후변화 적응대책 수립 방안의 기초자료 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

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

REFERENCES

1. 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).
2. Chung, S. O., 2009. Prediction of paddy irrigation demand in Nakdong river basin using regional climate model outputs. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 51(4): 7-13 (in Korean).
3. Doorenbos, J., and W. O. Pruitt, 1977. *Guidelines for Predicting Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 24, FAO, Rome.
4. Giorgi, F., and L. O. Mearns, 2002. Calculation of average, uncertainty range, and reliability of regional climate changes from AOGCM simulations via the "Reliability Ensemble Averaging (REA) method". *Journal of Climate* 15(10): 1141-1158.
5. Goodess, C. M., 2013. How is the frequency, location and severity of extreme events likely to change up to 2060?. *Environmental Science and Policy* 27: 4-15.
6. Griffiths, G. M., L. E. Chambers, M. R. Haylock, M. J. Manton, N. Nicholls, H. J. Baek, Y. Choi, P. M. Della-Marta, A. Gosai, N. Iga, R. Lata, V. Laurent, L. Maitrepierre, H. Nakamigawa, N. Ouprasitwong, D. Solofa, L. Tahani, D. T. Thuy, L. Tibig, B. Trewin, K. VEDIAPAN, and P. Zhai, 2005. Change in mean temperature as a predictor of extreme temperature change in the Asia-Pacific region. *International Journal of Climatology* 25: 1301-1330.
7. Hwang, S., Y. G. Her, and S. 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).
8. 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).
9. Kang, D. S., T. W. Kim, and J. H. Ahn, 2013. Water resources infrastructure: sustainability and resilience. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation* 13(1): 309-315 (in Korean).
10. Kim, B. S., J. K. Lee, H. S. Kim, and J. W. Lee, 2011. Non-stationary frequency analysis with climate variability using conditional generalized extreme value distribution. *Journal of Wetlands Research* 13(3): 499-514 (in Korean).
11. Kim, D. Y., S. H. Lee, Y. J. Hong, E. J. Lee, and S. J. Im, 2010. The determination of probability distributions of annual, seasonal and monthly precipitation in Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 12(2): 83-94 (in Korean).
12. Kim, G. S. and G. C. Lee, 2012. Application of a non-stationary frequency analysis method for estimating probable precipitation in Korea. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(5): 141-153 (in Korean).
13. Klein Tank, A. M. G., and G. P. Konnen, 2003. Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946-99. *Journal of Climate* 16: 3665-3680.
14. Kwon, H. J., and C. E. Lee, 2010. Safety analysis of storm sewer using probability of failure and multiple failure mode. *Journal of the Korean Water Resources Association* 43(11): 967-976 (in Korean).
15. Lee, J. K., and Y. O. Kim, 2012. Selecting climate change scenarios reflecting uncertainties. *Atmosphere. Korean Meteorological Society* 22(2): 149-161 (in Korean).
16. Lee, K. H., J. K. Lee, S. J. Kim, and H. S. Kim, 2011. Uncertainty analysis of flood damage estimation using Bootstrap method and SIR algorithm. *Journal of Wetlands Research* 13(1): 53-66 (in Korean).
17. Lee, S. H., K. H. Song, S. J. Maeng, K. S. Ryoo, D. J. Kim, and H. K. Jee, 1999. Comparative analysis of flood frequency by L-moment in Weibull-3 and GEV distributions. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 41(4): 25-36 (in Korean).

18. Maeng, S. J., J. H. Hwang, and Q. Shi, 2009a. Estimation of reservoir inflow using frequency analysis. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 51(3): 53-62 (in Korean).
19. Maeng, S. J., B. J. Kim, and H. S. Kim, 2009b. Estimation of design floods using 3 and 4 parameter kappa distributions. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 51(4): 49-55 (in Korean).
20. Maurer, E. P., 2007. Uncertainty in hydrologic impacts of climate change in the Sierra Nevada, California, under two emissions scenarios. *Climatic Change* 82: 309-325.
21. Mays, L. W., and Y. K. Tung, 1992. *Hydrosystems engineering and management*. McGraw-Hill, New York.
22. Nam, W. H., T. G. Kim, J. Y. Choi, and J. J. Lee, 2012a. 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).
23. Nam, W. H., T. G. Kim, J. Y. Choi, and J. J. Lee, 2012b. Estimating vulnerable duration for irrigation with agricultural water supply and demand during residual periods. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(5): 123-128 (in Korean).
24. Nam, W. H., T. G. Kim, J. Y. Choi, and H. J. Kim, 2012c. Evaluation of irrigation vulnerability characteristic curves in agricultural reservoir. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(6): 39-44 (in Korean).
25. Nam, W. H., 2013. Sustainability and operations evaluation of agricultural reservoirs based on probability theory. Ph.D. diss., Seoul National University.
26. Nam, W. H., J. Y. Choi, M. W. Jang, and E. M. Hong, 2013. Agricultural drought risk assessment using reservoir drought index. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(3): 41-49 (in Korean).
27. New, M., A. Lopez, S. Dessai, and R. Wilby, 2007. Challenges in using probabilistic climate change information for impact assessments: an example from the water sector. *Philosophical Transactions of The Royal Society* 365: 2117-2131.
28. Noh, J. K., 2000. Simulation of daily reservoir inflow using objective function based on storage error. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 42(4): 76-86 (in Korean).
29. Oh, T. S., and Y. I. Moon, 2009. Evaluation of probability precipitation using climatic indices in Korea. *Journal of the Korean Water Resources Association* 42(9): 681-690 (in Korean).
30. Park, S. S., 2009. Probabilistic risk evaluation method for human-induced disaster by risk curve analysis. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation* 9(6): 57-68 (in Korean).
31. Raisanen, J., 2007. How reliable are climate models. *Tellus* 52A: 2-29.
32. Shim, M. P., 2003. Economic analysis of water resources. *Magazine of Korea Water Resources Association* 36(3): 74-85 (in Korean).
33. 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).
34. Trambalay, Y., W. Badi, F. Driouech, S. E. Adlouni, L. Neppel, and E. Servat, 2012. Climate change impacts on extreme precipitation in Morocco. *Global and Planetary Change* 82-83: 104-114.
35. Wood, A. W., L. R. Leung, V. Sridhar, and D. P. Lettenmarier, 2004. Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs. *Climatic Change* 62: 189-216.
36. Yoon, P. Y., T. W. Kim, J. S. Yang, and S. O. Lee, 2012. Estimating quantiles of extreme rainfall using a mixed Gumbel distribution model. *Journal of the Korean Water Resources Association* 45(3): 263-274 (in Korean).