



기후변화 대응방안 수립을 위한 농업용 저수지 이수안전도 평가

An Irrigation Reliability Assessment of Agricultural Reservoir to Establish Response Plan of Future Climate Change Adaptation

권형중^a · 남원호^b · 최경숙^{c,†}

Kwon, Hyung-Joong · Nam, Won-Ho · Choi, Gyeong-Suk

ABSTRACT

This study assessed the reliability of the agricultural water supply based on future climate change scenarios, and suggested plans to improve the reliability in order to promote the adaptability of irrigation water in agricultural reservoirs to climate change. The assessment of agricultural water supply reliability was performed on reservoirs which had a lower water quantity than their design basis and which had recently been subject to drought. In other words, from the irrigation districts of main intake works among the reservoirs managed by the Korea Rural Community Corporation, 1~2 districts in each province—that is, a total of 13 districts—that were recently designated as a district for securing agricultural water (drought prevention district) were selected. Climate change scenarios were applied to the selected districts to analyze their future water supply reliability compared to the current level. All districts selected showed a drought frequency of 4 years or shorter, which demonstrated the need to establish climate change response plans. As plans for responding to climate change, a plan that utilizes supplemental intake works to reduce the area of the irrigation districts of main intake works, and another one that increases the capacity of main intake works were adopted to reanalyze their water supply reliability. When the area of the irrigation districts of main intake works was reduced by about 30~40%, the drought frequency dropped to more than 10 years, securing the reliability of water supply. To secure the reliability by increasing the capacity of main intake works, it was calculated that about 19,000~2,400,000 tons need to be added to each reservoir. In addition, climate change response plans were suggested to improve the reliability of the water supply in each district based on the results of economic analysis.

Keywords: Agricultural reservoir; irrigation reliability; climate change; response plan

1. 서론

최근 기후변화로 인하여 전세계적으로 홍수 및 가뭄피해가 빈번히 발생하고 있으며, 우리나라 역시 강수일수는 감소하고 강수량은 시간적·지역적으로 편중되는 경향으로 변화하고 있다 (MAFRA, 2018). 우리나라의 가뭄 발생빈도는 1904년에서 2000년까지 35회 (0.36회/년)가 발생되었으나 2000년에서 2019년까지는 11회 (0.64회/년)로 발생 빈도가 점차 높게 나타나고 있다. 1990년 이후 2년에서 3년 주기로 발생하던

가뭄은 향후 가뭄발생기간이 3.4배 증가될 것으로 전망되고 있는데 즉, 1977년부터 2006년 동안 0.5개월/년에서 2090년까지 1.7개월/년으로 가뭄 발생기간이 증가하여 이에 대한 선제적인 가뭄 대응방안이 절실한 실정이다 (MAFRA, 2018).

가뭄은 바라보는 관점에 따라 기상학적, 수문학적, 농업적, 사회경제적 가뭄으로 분류되고 있으나 일반적으로는 평년보다 적은 양의 강수량 또는 하천유량이 발생하는 것으로 정의된다. 가뭄과 물 부족은 동일한 개념으로 인식되지만 가뭄은 기상 변동에 의해 발생하는 자연재해이며 물 부족은 용수공급 시스템 운영의 실패로 인해 야기된다 (Van Loon and Van Lanen, 2012). 용수 부족은 주로 용수 공급 및 수요의 변화에 의한 것이며 수자원 시스템 내의 유입량과 유출량의 균형이 무너질 때 발생하고 이러한 용수 부족은 심각한 가뭄사상으로 인해 촉발된다. 이수안전도는 용수공급을 위한 시설이 용수수요에 대하여 실패하지 않고 용수를 안정적으로 공급할 수 있는 정도를 의미하며, 용수공급 시설의 설계 및 운영의 기준으로 사용되고 있다 (Yu et al., 2017). 그러나 우리나라의 경우 치수와 관련된 수자원시설의 운영 및 설계 기준은 명확하게 제시되어 있는 반면, 이수에 대한 안전도를 평가하기 위한 표

^a Chief Researcher, Research Center, Lido Engineering Co., Ltd

^b Assistant Professor, Department of Bioresources and Rural Systems Engineering, Institute of Agricultural Environmental Science, National Agricultural Water Research Center, Hankyong National University, Anseong, Republic of Korea

^c Professor, Department of Agricultural Civil Engineering, Institute of Agricultural Science & Technology, Kyungpook National University

[†] Corresponding author

Tel.: +81-53-950-5731, Fax: +81-53-950-6752

E-mail: ks.choi@knu.ac.kr

Received: 12 March, 2020

Revised: 23 March, 2020

Accepted: 23 March, 2020

준화된 방법은 정립되지 않은 실정이다 (Nam et al., 2018).

현재 다목적댐의 용수공급능력을 평가하는데 적용되는 이수안전도는 최악의 갈수기 동안에도 용수공급을 보장할 수 있는 최대 공급량을 의미하는 보장공급량 기준과 일정비율로 물 부족을 허용하는 방법을 의미하는 안전도 (Reliability), 통계적 지표인 회복도 (Resilience), 취약도 (Vulnerability) 등의 기준을 사용하고 있다 (Moon et al., 2012; Choi et al., 2014; Lee, 2014; Lee and Yi, 2014). Lee et al. (2014)는 기존의 이수안전도를 판단하는 지표인 보장공급량, 신뢰도, 회복도, 취약도 지표가 내포하고 있는 문제점을 분석하여 우리나라에서 적용할 수 있는 이수안전도 평가방법의 개선방향을 제시하였는데, 적용의 편리성에 근거한 기존 평가지표에서 벗어나 물이용의 안전도 수준을 실질적으로 제고할 수 있도록 갈수기년 적용 방법을 갈수빈도로 표준화하는 방안과 통계적 지표와 경험적 지표를 결합하는 방안, 다기준 또는 다변량 평가 방안을 제시하였다. 이러한 이수안전도 평가 방법을 적용하여 Yu et al. (2017)는 이변량 가뭄빈도해석을 통한 다목적댐의 용수공급능력을 평가하였는데, 용수공급능력을 일관성 있게 평가하기 위하여 가뭄의 심도와 지속기간을 동시에 고려할 수 있는 이변량 가뭄빈도해석을 수행하여 확률론적 개념을 바탕으로 가뭄사상을 평가하여 댐유역의 가뭄특성을 분석하였다.

농업분야에서의 이수안전도는 일반적으로 수원공의 한발빈도를 적용하고 있는데, 농업생산기반정비사업 계획설계기준에 따르면 농업용 저수지의 이수목적의 필요저수량은 일반적으로 10년 빈도 한발 시의 공급량을 기준으로 설계되고 있다 (KRC, 2012). 하지만 최근 기후변화로 인하여 관개기가 종료되는 가을부터 이듬해 봄까지 이상가뭄의 발생 및 극한

강우사상의 증가로 동일한 강우 대비 유효강우량이 감소됨으로서 가뭄에 대한 재해 위험도가 상대적으로 증가되고 있는 실정이다 (Nam, 2013; Nam and Choi, 2014). 과거 10년 한발빈도로 설계된 농업용 저수지들은 최근의 연속적인 가뭄사상에 낮은 저수율을 기록하였으며, 기후변화로 인한 수문사상의 변화 및 수요의 다변화에 따른 이수안전도의 평가가 요구되고 있다 (Kim and Lee, 2002; Ahn et al., 2009; Kim et al., 2016). 이에 Nam et al. (2018)는 기상 및 영농방식 변화에 따른 농업용 저수지의 설계 한발빈도 및 이수안전도를 재평가하였는데, 최근 30년간 강수량은 증가추세에 있으나 여름철 강수량이 감소하여 과거 10년 한발빈도로 설계된 저수지들이 최근 기상 상황에서는 약 3년 이하의 한발빈도로 저하되고 있어 기후변화에 따른 이수안전도 제고를 위한 적응 대책이 필요한 것으로 제안하고 있다.

따라서, 본 연구는 Nam et al. (2018)의 연구 대상지와 동일한 12개 농업용 저수지를 대상으로 기후변화 시나리오를 적용하여 미래 이수안전도를 평가하고 현실적인 기후변화 적응 대책인 보조수원공을 활용한 주수원공의 수혜구역 감소와 주수원공의 저수량 증가 대책에 대한 경제성 분석을 통하여 대상지구별로 농업용 저수지의 이수안전도 (이하 이수안전도, irrigation reliability) 증진을 위한 대응방안을 제시하였다.

II. 재료 및 방법

1. 대상지구 및 분석자료

본 연구의 대상지구는 Nam et al. (2018) 연구와 동일한 지

Table 1 Study sites of 12 agricultural reservoirs (Nam et al. (2018))

No.	Reservoir	Watershed area (ha)	Irrigation area (ha)	Effective storage capacity (10 ³ m ³)	Design frequency of drought (years)	Construction year	Meteorological station	Region
1	GeumGwang	4,830	1,906	12,047	10	1961	Icheon	Central region
2	DeokWoo	2,270	573	3,547	5	1949	Suwon	
3	SongGang	440	235	1,077	10	2005	Chungju	
4	HakJeong	706	214	775	10	1929	Cheonan	
5	NaengJeong	535	326	940	10	1941	Cheonan	
6	PungJeon	1,110	655	2,621	10	1944	Swosan	
7	GaeWoon	650	202	1,180	10	1948	Mungyeong	
8	GeumMa	452	229	818	10	1941	Gunsan	Southern region
9	WangGung	866	540	1,941	10	1931	Gunsan	
10	GwanGi	365	239	783	10	1932	Yeosu	
11	JaeSan	476	203	511	10	1946	Jangheung	
12	DeokGok	686	312	695	10	1958	Jinju	

구를 대상으로 하였으며, 한국농어촌공사에서 관리하는 약 3,300개소 저수지 중 농업용수 공급을 목적으로 준공된 주수원공 저수지에서 저수지 용량증대 계획지구 (2014)와 최근 영농대비 용수확보 추진지구 (가뭄대책지구, 2017)를 고려하고, 연구의 범용화 및 객관성 확보를 위하여 중부 및 남부지역에 걸쳐 도별 2개소 혹은 3개소를 선정하여 총 12개 지구를 선정하였다.

설계 한발빈도의 경우 경기지역의 덕우저수지를 제외한 11개 저수지 모두 10년 한발빈도로 설계되었으며, 저수지 준공연도는 2005년에 준공된 충북지역의 송강저수지를 제외한 모든 저수지는 50년 이전에 설치되었다 (Table 1). 유역면적은 관기저수지가 365 ha로 가장 작았으며 금광저수지가 4,830 ha로 가장 큰 유역을 가지고 있고, 관개면적은 개운저수지가 202 ha로 가장 작으며 금광저수지가 1,906 ha로 가장 큰 수혜구역을 가지고 있다.

미래의 이수안전도 평가를 위한 기상자료는 APEC 기후변화센터에서 제공하는 2020년부터 2100년까지의 RCP (Representative Concentration Pathway) 4.5 및 8.5 자료를 사용하였고, 저수지 물수지 분석에 사용되는 강우량, 평균기온, 평균풍속, 상대습도, 일조시간 인자를 일별, 월별, 연별 시계열 자료로 생성하였다. IPCC 5차 평가보고서 (IPCC, 2014)에 의하면 온실가스 농도가 현재 수준으로 유지되는 RCP 8.5 시나리오와 온실가스 배출 저감정책에 따라 농도가 감소되는 RCP 4.5 시나리오에 의하여 2100년까지의 기상인자를 예측한 결과, 강수 인자의 경우 RCP 4.5 및 8.5 모두 평균 약 1,300 mm로서 완만한 증가 추세를 보이고 있으며, 평균기온 인자는 평균 약 13.5°C로서 2050년 중반을 기점으로 평균값을 상회하면서 RCP 4.5는 약 2°C, RCP 8.5는 약 4°C 증가하는 추세를 나타내고 있다. 상대습도 인자는 미세하게 증가하는 추세를 나타내고 있으며, 일조시간과 평균풍속 인자는 미세하게 감소하는 추세를 보이고 있다.

2. 농업용 저수지의 이수안전도 평가

물공급 안정성의 척도를 의미하는 이수안전도는 수자원 공급시설이 용수수요를 충족시킬 수 있는 용수공급의 안정성 정도로서, 설정된 수요량을 공급할 수 있는 확실성이며 이는 확률 또는 빈도개념으로 표현되고 있다 (Lee and Kang, 2006; Lee et al., 2014). 서론에서 언급한 바와 같이 우리나라 다목적댐의 경우에는 보장공급량 기준으로 신뢰도를 권장하고 있는 추세이다 (MAFRA, 2018). 하지만 농업 관개지구에서의 이수안전도는 농업용 저수지의 한발빈도 개념을 적용하고 있는데, 10년에 1회 갈수기준인 10년 한발빈도로서 이수안전도를 평가하고 있다 (MAFRA, 2018). 과거 기상자료가 충분하지

않았던 1970년대 이전에 설치된 농업용 저수지의 경우에는 내한능력 평가의 기준으로 단위저수량을 활용하여 한발빈도를 유추하는 방법을 활용한 경우가 있다. 농업용 저수지에서 단위저수량은 1960년대까지 300~450 mm이었으나, 1970년대부터 600~800 mm로 증가하였는데 (KRC, 2007; Kim et al., 2016), 수리시설내한능력조사 종합보고서 (1984)에 따르면, 단위저수량이 520 mm 이상은 한발빈도가 10년, 440 mm 정도는 5년 빈도 등으로 적용하고 있다.

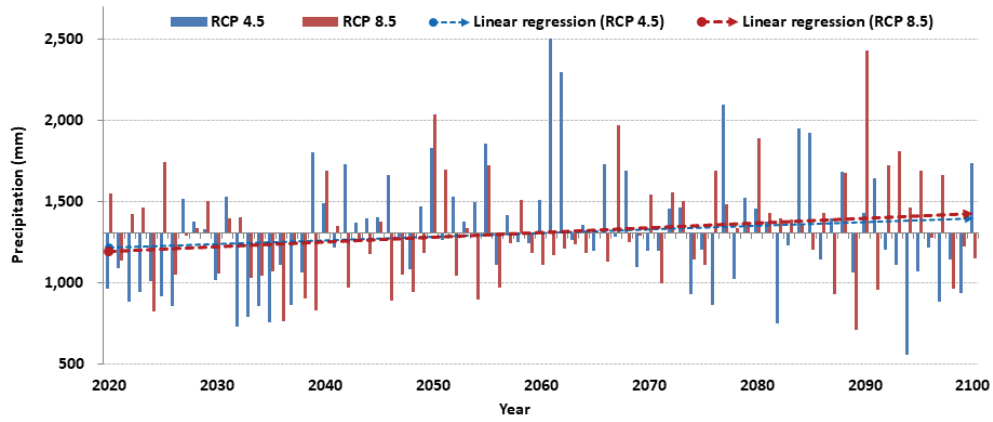
본 연구에서는 농업용 저수지의 이수안전도를 한발빈도 개념으로 적용하여 시험지구의 설계 당시 저수지 한발빈도 및 현재로부터 과거 30년 기상자료를 기준으로 분석한 한발빈도 (Nam et al., 2018), 기후변화 시나리오를 적용하여 분석된 한발빈도를 비교하였다. 이를 통하여 과거로부터 미래까지 이수안전도 변화에 따른 대응방안을 적용하여 한발빈도를 재분석하고 경제성 분석을 통하여 기후변화에 따른 이수안전도 상향 조정을 위한 대응방안을 제시하고자 한다.

3. 기후변화 대응방안 및 경제성 분석

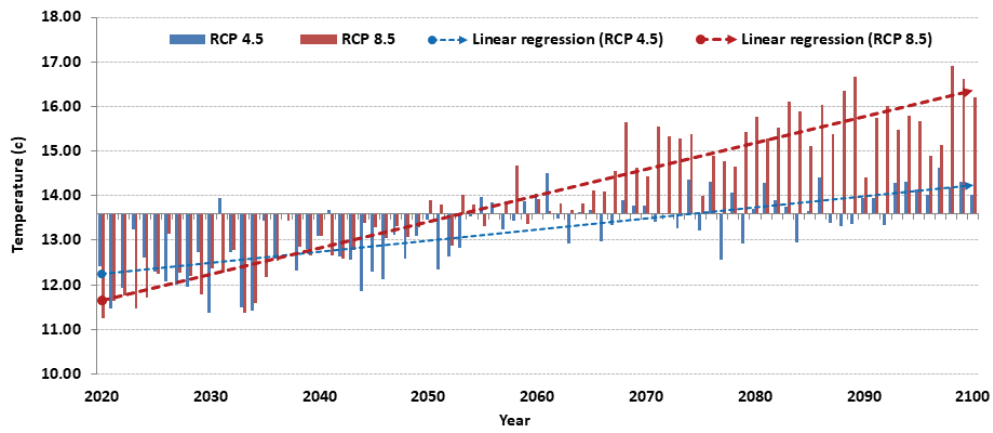
Nam et al. (2018)에 의하면, 시험지구의 설계 당시 한발빈도는 덕우저수지의 5년 한발빈도를 제외하고 모든 저수지에서 10년 한발빈도로 설계되었는데, 최근 30년의 기상자료를 이용하여 분석한 결과 대부분 3년 한발빈도 이하를 나타내고 있다. 이는 강수 패턴의 변화 및 기온의 상승으로 인한 필요수량의 증가 등 기후변화에 의한 영향으로 분석되고 있는 바, 기온이 점진적으로 상승할 것으로 예측되는 미래 기후변화에 따른 대응방안의 마련이 필수적이다. 기후변화에 따른 물부족 현상을 대비하는 장기적인 대책으로서 농업용 수자원의 추가적인 확보, 수로시설의 정비, 물관리자동화시스템 구축 등이 제시되고 있는데, 농업용 수자원의 확보를 위해서는 지속적인 준설, 저수지 증고를 통한 유효저수량의 증대, 지표수 및 지하수를 활용한 보조수원공 개발, 발기반정비사업의 확대 등이 있다 (Lee, 2005; Lee et al., 2006; Han, 2016; MAFRA, 2018).

본 연구에서는 미래 기후변화에 의한 이수안전도 저하를 예방하는 현실적인 구조적 대응방안으로서 보조수원공을 활용하여 주수원공인 농업용 저수지가 공급하는 수혜구역을 감소시키는 방안 (이하 보조수원공 활용방안)과 주수원공의 증고를 통하여 유효저수량을 추가적으로 확보하여 이수안전도를 상향시키는 방안 (이하 주수원공 증고방안)을 제시하고자 한다. 시험지구별로 두가지 방안에 대한 경제성 분석을 수행하여 시험지구별 이수안전도 상향조정을 위한 적절한 기후변화 대응방안을 제시하고자 한다.

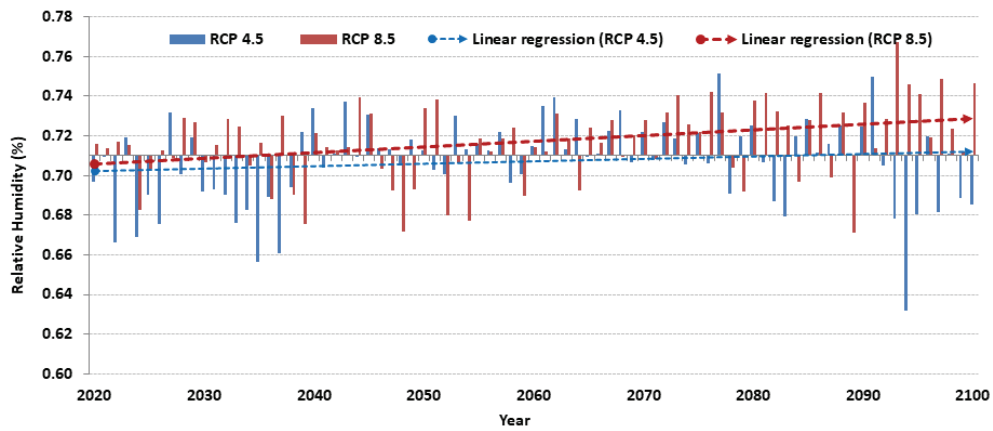
이때, 경제성 분석은 농업 수리시설물에서 범용적으로 적



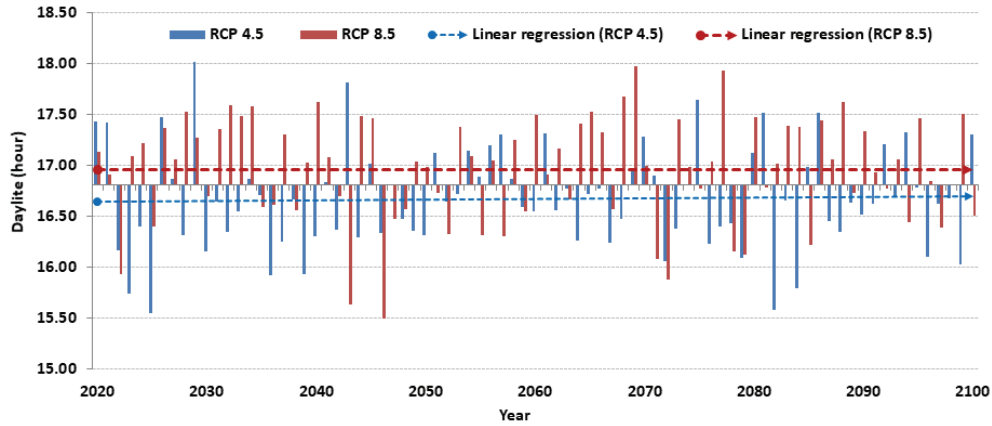
(a) Precipitation factor



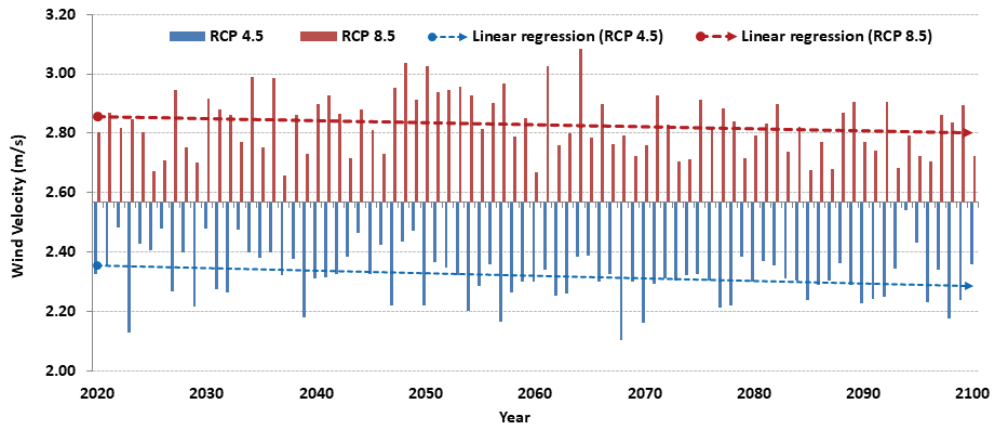
(b) Temperature factor



(c) Relative humidity factor



(d) Daylite factor



(e) Wind velocity factor

Fig. 1 Climate change scenario (2020 ~ 2100 year)

용되는 B-C 방법을 적용하였고, 보수수원공 활용을 위한 양수장 건설 비용은 전국의 최근 양수장 설치 사업비를 조사하고 농업용수를 공급하는 수혜면적별 사업비를 분석하여 단위면적당 양수장 건설비용으로 환산하여 산정하였고, 주수원공의 유효저수량 증가를 위한 증고 비용은 한국농어촌공사에서 실시한 기존 뚝높이기 사업지구 110개소의 사업비를 조사하여 추가저수량 대비 사업비의 선형회귀분석 결과를 바탕으로 산정하였다. 또한, 경제성 분석을 위한 편익은 농업 기반시설의 재해대비능력에 대한 경제성 평가 기법 연구(MAFRA, 2013)에서 제시하고 있는 직접편익으로서 생산성 향상 효과, 작목전환 효과, 지가상승 효과와 간접편익으로서 변동성완화 효과, 노동력절감 효과를 적용하여 편익을 산정하였다.

직접편익인 생산성향상 효과는 한발 피해가 경감될 때 작물 생산량의 변화를 경제적으로 평가한 편익으로서 $A \times (y_1 - y_0) \times \alpha \times P$ 로 표현되고 여기서, A는 수혜면적, y_1 은 재해가 없을

때의 단위면적당 평균 생산량, y_0 : 일정 기간 동안 재해가 발생할 때의 평균 생산량, α 는 단위 조정계수로 톤당 12.5가마(80 kg 기준), P는 80 kg당 시장 가격으로 정부 조사가격이다. 작목전환 효과는 한발 재해 발생지역에서는 고소득 작목으로의 전환이 늦어지는 경향이 있으며, 이수 안전도가 상승으로 인한 작목 전환을 경제적으로 평가한 편익으로서 $A \times [\sum \beta_i \times (M_i - M_0)]$ 로 표현되고 여기서, β_i 는 수혜면적 가운데 고소득 작목 i로 전환된 비율, M_i 는 새롭게 도입된 작목 i로부터 얻는 소득, M_0 는 기존 작목으로부터 얻는 소득이다. 지가상승 효과는 재해 발생 가능성이 저하됨에 따라 농지의 생산성이 증가되고 이에 따른 농지의 지가 상승 효과를 경제적으로 평가한 편익으로서 $A \times (P_1 - P_0)$ 로 표현되고 P_1 은 사업 시행 이전의 공시지가, P_0 은 사업 시행 이후의 공시지가이다.

간접편익인 변동성완화 효과는 재해 등으로 생산이 불안정했던 것이 사업으로 생산이 안정됨으로써 얻는 효과로 사업은 일종의 보험에 해당되는데, 농업기반시설 개보수 사업

Table 2 The results of drought frequency analysis according to the scenarios in this study Future

No.	Reservoir	Design frequency of drought (years)	Current frequency of drought (years) (Nam et al., 2018)	Future frequency of drought (years)			
				Before 2050		After 2050	
				RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
1	GeumGwang	10	7	3	4	4	4
2	DeokWoo	5	10	1	1	1	1
3	SongGang	10	3	1	1	1	1
4	HakJeong	10	3	2	1	2	1
5	NaengJeong	10	2	1	1	1	1
6	PungJeon	10	5	1	1	1	1
7	GaeWoon	10	2	3	4	3	4
8	GeumMa	10	2	1	1	1	1
9	WangGung	10	2	2	1	2	1
10	GwanGi	10	2	1	1	1	1
11	JaeSan	10	10	2	3	2	2
12	DeokGok	10	3	1	1	1	1

도 보험과 유사한 성격을 가지고 있으며 사업을 시행함으로써 농가는 큰 피해가 발생할 수도 있다는 걱정에서 벗어나게 되고, 보험료에 해당되는 비용을 공사의 사업 효과에 산정할 필요가 있다. 변동성완화 효과는 $A \times (\text{premium})$ 으로 표현되고 여기서, premium은 위험을 피하기 위해 지불하고자 하는 금액으로, 위험이 있을 때의 평균값과 위험이 전혀 없을 때의 값의 차이로 계산한다. 노동력절감 효과는 재해 발생이 저하됨에 따라 관리 인원의 절감 효과를 경제적으로 평가한 편익으로서 $N \times w \times (L_0 - L_1)$ 로 표현되고 여기서, N은 관리인원, w은 농촌지역 평균 노임 단가, L_0 은 사업 이전의 노동력 투입 시간, L_1 은 사업 이후의 노동력 투입 시간이다 (MAFRA, 2013).

III. 결과 및 고찰

1. 기후변화 시나리오를 적용한 미래 이수안전도 평가

기후변화 시나리오를 적용하여 농업용 저수지의 한발빈도를 산정함으로써 시험지구의 이수안전도를 분석하였다. 한발빈도 산정을 위한 물수지 분석에 사용되는 매개변수는 Nam et. al. (2018) 연구에서 최근 영농방식에 대한 현장조사 자료를 바탕으로 적용된 변수를 동일하게 사용하여 연최대필요저수량을 산정하고 빈도분석을 통하여 미래 한발빈도를 산정하였다. 2050년을 기준으로 2020년부터 2050년까지 30년간의 기후변화 시나리오를 적용한 한발빈도와 2050년부터 2100년까지 50년간의 기후변화 시나리오를 적용한 한발빈도를 산정하였으며, 이를 저수지 설계 당시의 한발빈도 및 현재 시점에서 한발빈도와 비교함으로써 시험지구에 대한 이수안전도

의 변화를 분석하였다.

시험지구 농업용 저수지의 설계 한발빈도는 덕우저수지의 5년을 제외하고 모든 저수지는 10년 한발빈도로 설계되었으나, 현재 시점에서는 금광, 덕우, 학, 제산저수지를 제외하고 모두 3년 이하의 한발빈도를 나타내었으며, 기후변화 시나리오를 적용한 미래에는 금광저수지 4년, 학정 및 제산저수지 2년, 개운저수지 4년을 제외하고 모두 1년 한발빈도를 나타내어 미래 이수안전도가 매우 취약한 것으로 분석되었다 (Table 2).

2. 기후변화 대응방안 적용에 따른 이수안전도 재평가

기후변화 대응방안으로서 보조수원공을 활용하여 주수원공의 수혜구역을 감소시켜 주수원공의 이수안전도를 상향 조정하는 방안을 적용하여 시험지구의 이수안전도를 재분석하였다. 즉, 주수원공인 농업용 저수지가 공급하는 수혜구역을 보조수원공에서 일부 부담하는 것으로 가정하여 주수원공의 수혜면적을 감소시키면서 물수지 분석을 수행하고 이수안전도를 재분석하여 한발빈도가 10년을 초과하는 시나리오를 확인하였다. 시험지구별로 미래 이수안전도가 가장 취약한 2050년 이전의 RCP 4.5 시나리오를 대상으로 보조수원공을 활용하여 주수원공의 수혜구역을 10%부터 50%까지 감소시키는 시나리오를 적용하였다. 주수원공의 이수안전도 변화를 분석한 결과, 금광, 덕우, 송강, 학정, 개운저수지를 제외하고 대부분의 저수지에서 수혜구역을 50%까지 감소시킴에도 불구하고 10년 한발빈도를 만족하지 못하는 것으로 나타났다 (Table 3).

Table 3 Future frequency of drought applied by sub-intake facility

No.	Reservoir	Design frequency of drought (years)	Current frequency of drought (years)	Future frequency of drought (years)					
				Irrigation area by agricultural reservoir					
				Original	Reduce 10%	Reduce 20%	Reduce 30%	Reduce 40%	Reduce 50%
1	GeumGwang	10	7	3	5	7	Over 10	-	-
2	DeokWoo	5	10	1	2	3	5	Over 10	-
3	SongGang	10	3	1	2	3	4	5	Over 10
4	HakJeong	10	3	2	2	3	4	6	Over 10
5	NaengJeong	10	2	1	1	1	1	1	2.5
6	PungJeon	10	5	1	1	2	3	4	5
7	GaeWoon	10	2	3	4	5	7	Over 10	-
8	GeumMa	10	2	1	1	2	3	4	7
9	WangGung	10	2	2	2	3	3	4	6
10	GwanGi	10	2	1	1	1	2	3	4
11	JaeSan	10	10	2	3	3	4	5	6
12	DeokGok	10	3	1	1	2	3	4	6

금광저수지는 3년 한발빈도에서 수혜구역을 10% 감소하였을 경우 5년, 20% 감소하였을 경우 7년, 30% 감소하였을 경우 10년 한발빈도를 만족하였고, 덕우 및 개운저수지는 40% 감소, 송강 및 학정 저수지는 50% 감소하였을 경우 10년 한발빈도를 만족하는 것으로 나타났다. 냉정저수지는 수혜구역을 50%까지 감소시켜도 2.5년의 한발빈도를 나타내었고, 풍전저수지는 5년, 관기저수지는 4년, 왕궁, 제산, 덕곡저수지는 6년, 금마저수지는 7년 한발빈도를 나타내어 보조수원공을 활용한 기후변화 대응방안의 적용이 불가능한 것으로 분석되었다. 따라서, 10년 한발빈도를 만족하지 못하는 7개 저수지에 대해서는 주수원공의 증고를 통한 유효저수량을 증가 시킴으로서 이수안전도를 상향 조정하는 대응방안의 검토가 필요한 것으로 판단된다.

또한, 기후변화 대응방안으로 시험지구별로 10년 한발빈도를 만족하기 위하여 주수원공이 추가적으로 확보해야 하는 유효저수량을 추정하였고 그에 따른 사업비를 산정하였다. 추가 유효저수량은 한발빈도 분석으로부터 10년을 만족하는 저수량에서 현재 유효저수량을 감하여 추정하였고, 그에 따른 사업비는 한국농어촌공사에서 시행한 110개 둑높이기 지구의 추가 저수량 대비 소요 사업비에 대한 선형상관분석을 통하여 산정하였다.

금광 및 개운저수지의 경우 미래 한발빈도가 3년으로 산정되어 10년 한발빈도를 만족하기 위한 추가 저수량은 약 2,100천톤과 246천톤으로 산정되었고 그에 따른 제체 증고 사업비는 약 240억원과 152억원으로 추정되었다. 학정, 왕궁, 제산저수지는 미래 한발빈도가 2년으로 산정되어 10년 한발빈도로

상향조정을 위해서 각각 141천톤, 418천톤, 19천톤의 추가 저수량이 필요하고 약 147억원, 160억원, 141억원의 사업비가 소요되는 것으로 추정되었다. 그 외 덕우저수지를 포함한 7개 저수지는 모두 1년의 한발빈도를 나타내고 있고 추가 저수량은 약 160천톤에서 2,420천톤의 범위로 산정되었고 그에 따른 사업비는 약 148억원에서 256억원의 범위로 추정되었다.

3. 경제성 분석을 통한 기후변화 대응방안 제시

미래 이수안전도 상향조정을 위한 기후변화 대응방안으로 보조수원공을 활용하여 주수원공의 수혜구역을 감소시키는 방안과 주수원공의 증고를 통해 유효저수량을 증가시키는 방안을 적용하였고, 두가지 방안에 대한 경제성 분석을 통하여 시험지구의 기후변화 대응방안을 제시하였다. 경제성 분석을 위한 비용은 두가지 방안을 적용하기 위한 사업비를 사용하였는데, 보조수원공을 활용한 방안의 경우에는 양수장 건설비용을 적용하였고 주수원공 증고 방안은 Table 4에서 추정한 사업비를 적용하였다.

양수장 건설비용의 추정은 전국 양수장 건설 사업을 바탕으로 산정하였는데, 한국농어촌공사 평택지사의 자오 양수장의 경우 약 11억원의 사업비로서 양수장을 건설하여 145 ha의 농경지에 용수를 공급하고 있으며, 천안시 동면 지역의 농업용수 공급을 위해서 약 10억원을 투입하여 63 ha에 용수를 공급하고 있다. 이러한 전국적인 양수장 건설 사업비와 해당되는 수혜구역을 조사한 결과, 단위면적당 평균 약 9백7십만원/ha의 양수장 건설비용이 소요되었으며, 이를 대상지구의 감소 수혜면적에 적용하여 비용을 산출하였다.

Table 4 Estimate of required storage capacity and construction cost to satisfy design frequency of drought

No.	Reservoir	Current		Future		
		Design frequency of drought (years)	Effective storage capacity (10 ³ m ³)	frequency of drought (years)	Required storage capacity (10 ³ m ³)	Construction cost (million won)
1	GeumGwang	10	12,047	3	2,103	24,055
2	DeokWoo	5	3,547	1	2,421	25,572
3	SongGang	10	1,077	1	393	15,894
4	HakJeong	10	775	2	141	14,691
5	NaengJeong	10	940	1	296	15,431
6	PungJeon	10	2,621	1	320	15,545
7	GaeWoon	10	1,180	3	246	15,192
8	GeumMa	10	818	1	312	15,507
9	WangGung	10	1,941	2	418	16,013
10	GwanGi	10	783	1	165	14,805
11	JaeSan	10	511	2	19	14,109
12	DeokGok	10	695	1	173	14,844

Table 5 Results of economic analysis for climate change adaptations

No.	Reservoir	Utilization of sub-intake facility		Increasing of effective storage capacity	
		B/C ratio	Break-even year	B/C ratio	Break-even year
1	GeumGwang	3.84	3	2.94	4
2	DeokWoo	3.84	3	0.83	-
3	SongGang	3.81	3	0.55	-
4	HakJeong	3.85	3	0.54	-
5	NaengJeong	-	-	0.79	-
6	PungJeon	-	-	1.57	9
7	GaeWoon	3.75	3	0.49	-
8	GeumMa	-	-	0.55	-
9	WangGung	-	-	1.26	16
10	GwanGi	-	-	0.60	-
11	JaeSan	-	-	0.54	-
12	DeokGok	-	-	0.68	-

경제성 분석을 위한 편익은 앞서 기술한 바와 같이 MAFRA (2013)에서 제시한 직접편익 및 간접편익 5가지의 경제적인 효과를 적용하였다. 직접편익인 생산성향상 효과를 산정하기 위하여 시험지구의 평년 쌀 생산량과 한발년도의 생산량을 비교하여 한발년도 대비 평년의 생산량이 평균 0.36 ton/ha의 증가하는 것을 확인하였고 이때 80 kg당 쌀 수급 가격으로서 2018년도 단가 133천원을 적용하였다. 작목전환 효과를 산정하기 위하여 시험지구에 대한 최근 10년간의 논·밭 비율을 분석하여 평균 고소득 작목전환 면적 비율로서 5%를 적용하였고 이때 쌀 수급 단가 대비 고소득 작물 평균 수급 단가를 비교하여 편익단가를 산정하였다 (KOSIS, 2018). 지가상승

효과를 산정하기 위하여 최근 10년간의 농지 공시지가를 수집하여 평균 500원/m²을 적용하였다 (MOLIT, 2018). 간접편익으로서 변동성완화 효과를 산정하기 위한 프리미엄은 1,212,459원/ha를 적용하였고, 노동력절감 효과를 산정하기 위한 농촌노임 단가로서 8시간 기준 11,370원/hr를 적용하였다 (MAFRA, 2013).

이상과 같이 산정된 비용 및 편익을 적용하여 시험지구별로 경제성 분석을 수행한 결과, 50년 운영기준으로 금광, 덕우, 송강, 학정, 개운저수지는 보조수원공을 활용하는 대응방안을 적용하였을 경우 B/C 값이 3.7 이상, 손익분기점은 3년으로 산정되어 경제성을 확보한 것으로 판단된다. 풍전 및 왕

궁저수지는 주수원공 증고 방안을 적용하였을 경우 B/C 값이 각각 1.57과 1.26, 손익분기점은 9년과 16년으로 산정되어 경제성이 확보된 것으로 분석되었다 (Table 5). 보조수원공을 활용하여 주수원공의 수혜면적을 감소시키는 방안은 10년 한발빈도를 만족하고 경제성이 확보된 5개 지구 즉, 금광, 덕우, 송강, 학정, 개운저수지에 적용이 가능하고, 주수원공의 증고를 통한 유효저수량 증가 방안은 경제성이 확보된 2개 지구 즉, 풍전 및 왕궁저수지에 적용이 가능할 것으로 분석되었다. 12개 시험지구 중 두가지 기후변화 대응방안에 대한 경제성이 확보되지 못한 나머지 5개 지구에 대해서는 구조적인 대책이 아닌 저수지 운영 기준의 개선이나 물절약에 대한 농민의 인식변화 등과 같은 비구조적인 대책 수립이 필요한 것으로 사료된다.

IV. 요약 및 결론

기후변화에 대비한 농업수자원의 관리는 기본적으로 국가의 안정적인 식량 공급과 직접적인 관련이 있음을 고려할 때, 매우 중요한 사안임을 인식해야 한다. 따라서, 농업생산기반 시설이나 관련 수리 시설물의 안정적인 운영을 유지하고 관리하는데 있어 많은 연구와 영향평가가 이루어져야 하며, 대응 대책 수립에 지속적으로 노력이 절실한 상황이다. 본 연구에서는 이수안전도 상향조정을 위해서 보조수원공을 활용하여 주수원공의 이수안전도를 상향시키는 방법과 주수원공의 증고를 통하여 이수안전도를 상향시키는 방법을 적용하였다. 두가지 방법에 대하여 경제성 분석을 수행하였고, 경제성 분석 결과를 바탕으로 이수안전도 상향조정을 위한 대안을 제시하였다. 보조수원공을 활용한 이수안전도 상향조정 방안은 금광, 덕우, 송강, 학정, 개운저수지에서 경제성이 확보된 것으로 분석되었으며, 모두 주수원공 증고 방안보다 B/C 값이 높게 산정되고 손익분기점이 빨라져서 보조수원공을 활용한 방안이 경제적인 대응방안으로 판단된다. 하지만, 보조수원공을 활용하는 방법은 보조수원공 활용에 따른 주수원공의 수혜구역이 50% 감소되어도 10년 한발빈도의 이수안전도가 확보되지 못하는 지구가 있으므로 대상지구의 특성을 반영한 대응방안 수립이 필요할 것으로 사료된다. 주수원공 증고에 따른 경제성 분석 결과, 금광, 풍전, 왕궁저수지에서 B/C 값이 1을 상회하여 경제성이 확보된 것으로 판단되나, 이는 득높이 기와 같은 저수지 증고를 위한 초기 투자비용이 막대하게 소요되어 기타 지역에서는 경제성이 확보되지 못하는 실정이다. 따라서, 냉정, 금마, 관기, 제산, 덕곡저수지의 경우에는 보조수원공 활용 방안이나 주수원공 증고 방안 모두 경제성이 확보되지 못하므로 구조적인 대책보다는 비구조적인 대책 즉,

저수지 운영 및 관리 방안 등을 재검토하는 것이 필요하다. 본 연구에서 제시한 미래 이수안전도 평가에 따른 실질적인 기후변화 대응방안은 효율적인 기후변화 적응 대책 수립을 위한 의사결정지원 도구로서 활용 가능할 것으로 판단된다. 저수지별로 기후변화 및 현장여건 변화에 따른 영향이 다르므로, 향후 전국적으로 분포되어 있는 저수지들의 특성을 분석하여 비슷한 패턴을 갖는 저수지로 유형화하여 기후변화 대응방안의 수립이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 농림축산식품부의 재원으로 한국농어촌공사 농어촌연구원의 2017년 농촌개발시험연구의 지원을 받아 수행되었음.

REFERENCES

- Ahn, B. I., Y. D. Jo, T. H. Kim, and Y. D. Kwon, 2009. Analysis on the shortage of agricultural water supply under climate change: Application to Daega reservoir in Goseong Gun. *Korean Journal of Agricultural Economics* 50(2): 45-67 (in Korean).
- Choi, S. J., D. R. Lee, and J. W. Moon, 2014. Comparison of water supply reliability by dem operation methods. *Journal of Korea Water Resources Association* 47(6): 523-536 (in Korean). doi:10.3741/JKWRA.2014.47.6.523.
- Han, O. H., 2016. Water use efficiency and facility enhancement for drought mitigation. *Rural Community and Environment* 130: 27-34 (in Korean).
- IPCC, 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Kim, T. C., and S. H. Lee, 2002. Evaluation method of drought for irrigation reservoir. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 44(2): 75-80 (in Korean).
- Kim, J. S., J. Y. Lee, J. B. Lee, C. M. Song, and J. S. Park, 2016. Evaluation of agricultural water supply potential in agricultural reservoirs. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 58(2): 65-71 (in Korean).
- Korea Rural Community Cooperation (KRC), 2007. Manual on repair and renovation of irrigation facilities: Reservoir.

- Republic of Korea (in Korean).
8. Korea Rural Community 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).
 9. Korean Statistical Information Service (KOSIS), 2018. <http://kosis.kr/>.
 10. Lee, S. H., and T. U. Kang, 2006. An evaluation method of water supply reliability for a dam by firm yield analysis. *Journal of Korea Water Resources Association* 39(5): 467-478 (in Korean). doi:10.3741/JKWRA.2006.39.5.467.
 11. Lee, G. M., 2014. Water supply performance assessment of multipurpose dams using sustainability index. *Journal of Korea Water Resources Association* 47(5): 411-420 (in Korean). doi:10.3741/JKWRA.2014.47.5.411.
 12. Lee, G. M., and J. Yi, 2014. Analysis of problems of water supply capacity determination in water resources systems. *Journal of Korea Water Resources Association* 47(4): 331-342 (in Korean). doi:10.3741/JKWRA.2014.47.4.331.
 13. Lee, D. R., J. W. Moon, and S. J. Choi, 2014. Performance evaluation of water supply for a multi-purpose dam by deficit supply operation. *Journal of Korea Water Resources Association* 47(2): 195-206 (in Korean). doi:10.3741/JKWRA.2014.47.2.195.
 14. Lee, Y. J., 2005. An investigative study for the estimation of irrigation water requirement in paddy land. Ph.D. diss., Konkuk University, Seoul, South Korea (in Korean).
 15. Lee, Y. J., S. J. Kim, P. S. Kim, U. J. Joo, and Y. S. Yang, 2006. Study on the effective calculation method of irrigation water in a paddy fields area. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 48(3): 11-20 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2006.48.3.011.
 16. MAFRA (Ministry of Agricultural, Food and Rural Affairs), 2018. A study on water conservation design standard for adaptation to climate change (in Korean).
 17. MAFRA (Ministry of Agricultural, Food and Rural Affairs), 2013. A study on the method of economic evaluation for the agricultural infrastructure (in Korean).
 18. MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport), 2018. <https://www.realtyprice.kr>.
 19. Moon, J. W., S. J. Choi, S. K. Kang, and J. J. Lee, 2012. An evaluation of water supply reliability using AWS data in Korea. *Journal of Korea Water Resources Association* 45(8): 743-753 (in Korean). doi:10.3741/JKWRA.2012.45.8.743.
 20. Nam, W. H., 2013. Sustainability and operations evaluation of agricultural reservoirs based on probability theory. Ph.D. diss., Seoul National University, Seoul, South Korea (in Korean, with English abstract).
 21. 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. doi:10.1016/j.agwat.2014.05.009.
 22. Nam, W. H., H. J. Kwon, and K. S. Choi, 2018. Reevaluation of design frequency of drought and water supply safety for agricultural reservoirs under changing climate and farming methods in paddy field. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 60(1): 121-131 (in Korean).
 23. Van Loon, A. F., and A. J. Van Lanen, 2012. A process-based typology of hydrological drought. *Hydrology and Earth System Sciences* 16: 1915-1946.
 24. Yu, J. S., J. Y. Shin, M. S. Kwon, and T. W. Kim, 2017. Bivariate drought frequency analysis to evaluate water supply capacity of multi-purpose dams. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 37(1): 231-238 (in Korean).