



기상 및 영농방식 변화에 따른 농업용 저수지의 설계한발빈도 및 이수안전도 재평가 Reevaluation of Design Frequency of Drought and Water Supply Safety for Agricultural Reservoirs under Changing Climate and Farming Methods in Paddy Field

남원호* · 권형중** · 최경숙***,†

Nam, Won-Ho · Kwon, Hyung Joong · Choi, Kyung-Sook

Abstract

Past climate change influences multiple environmental aspects, certain of which are specifically related to agricultural water resources such as water supply and demand. Changes on rainfall and hydrologic patterns can increase 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 changing climate and farming methods in paddy field. The purpose of this study is an evaluation method of design frequency of drought and water supply safety for agricultural reservoirs to investigate evidence of climate change occurrences at a local scale. Thus, it is a recommended practice in the development of water supply management strategies on reservoir operation under changing climate and farming methods in paddy field.

Keywords: Agricultural reservoir; design frequency of drought; farming methods; past climate change; water supply safety

1. 서 론

농업생산기반정비사업계획설계기준(1982)에 따르면 농업용 저수지의 이수목적의 필요저수량은 일반적으로 10년 빈도 한발 시의 공급량을 기준으로 설계되었다(KRC, 2012). 농업용 저수지 관리기관별 설계한발빈도의 경우 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(약 2.3년) 한발빈도로 설계되었다(MIFAFF, 1998; 2012). 10년 미만의 설계한발빈도로 축조된 소규모 저수지는 약한 가뭄에도 안전한 용수공급이 어려울 뿐만 아니라, 최근 기후변화로 인한 가을부터 이듬해 봄까지 정례적인 이상가뭄 발생 및 극한강우사상의 증가로 인한 동일강우 대비 유효강우량이 감소됨으로써 가뭄에 대한

재해위험도가 상대적으로 가중되고 있다(Nam, 2013; Nam and Choi, 2014).

실제 과거의 10년 한발빈도로 설계된 저수지들은 최근의 연속적인 가뭄사상에 낮은 저수율을 나타냈으며, 농업수자원 시스템의 운영 방안 수립에 필수적인 용수공급 능력의 평가 척도로서 보편적으로 사용되는 설계빈도에 대한 기후변화로 인한 수문사상의 변화 및 수요의 다변화에 따른 이수안전도의 평가가 요구된다(Kim and Lee, 2002; Ahn et al., 2009; Kim et al., 2016). 즉 저수지 운영은 건설 당시와 상이한 환경을 반영하여 관리해야하며, 시간이 경과함에 따라 기상, 수문 현상 및 하류의 용수수요, 유역 환경의 변화로 인한 농업용수 공급체계의 상황변화에 따른 용수공급능력 및 이수안전도의 재평가가 필요하다(Nam et al., 2017). 농업용 저수지의 이수안전도는 수자원의 확보와 저수지 규모의 결정 등을 포함하는 수자원공급 계획의 수립에 필수적인 요소로서, 기후변화에 따른 피해를 최소화하기 위해서 현재의 이수안전도를 계량하고, 이를 바탕으로 대응 전략을 세울 필요가 있다.

국내의 대다수 농업용 저수지들은 다목적댐과 비교하여 저수량이 작기 때문에 가뭄과 같은 극심한 기상이변에 민감할 수 있다(Brekke, et al., 2009; Lee and Noh, 2015; Lee et al., 2015; Heo, 2016). 또한, 농업 가뭄과 관련하여서는 상당부분의 농경지가 수리시설을 통한 관개에 의존하고 있는 국내 상황의 특수성을 고려할 때 수문학적 및 기상학적 가뭄의 접근방식과는 달리 농업용수의 주요 공급원인 저수지의 기후

* Department of Bioresources and Rural Systems Engineering, Hankyong National University

** Technical Research Center, Yooil Engineering

*** Department of Agricultural Civil Engineering, Institute of Agricultural Science & Technology, Kyungpook National University

† Corresponding author

Tel.: +82-53-950-5731 Fax: +82-53-950-6752

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

Received: October 29, 2017

Revised: January 29, 2018

Accepted: January 29, 2018

변화에 따른 거동을 예측하는 접근방법의 적용이 필요하다. 농업용 저수지 거동을 분석하기 위해서는 기후변화에 따른 상류 유역으로부터 저수지로 유입되는 공급 가능량의 변화와 관개구역 내에서의 온도를 포함한 기후 특성의 변화에 따른 작물의 필요수량 변화에 대한 영향 평가가 이루어져야 한다 (Cho et al., 2015; Nam et al., 2015b; Hong et al., 2016).

현재 다목적댐의 용수공급능력을 평가하는데 적용되는 이수안전도는 최악의 갈수기 동안에도 용수공급을 보장할 수 있는 최대 공급량을 의미하는 보장공급량 기준과 일정비율로 물 부족을 허용하는 방법을 의미하는 신뢰도, 통계적 지표인 회복도, 취약도 등의 기준을 사용하고 있다 (Lee et al., 2012; Moon et al., 2012; Choi et al., 2014; Lee, 2014; Lee and Yi, 2014). 따라서, 통계상 수리안전답이 과거와 현재의 기후조건에서도 동일한 이수안전도를 나타내는지에 대한 정량적 평가의 필요성이 제기되었으며 (Nam et al., 2014; Nam et al., 2015a), 빈번히 발생하는 가뭄 등 이상 기후변화에 적응하고 안정적인 식량 수급을 위해서는 현재 농업용 저수지의 한발빈도에 대한 분석을 통해 이수안전도를 평가를 토대로 저수

지 기능개선이 필수적이다.

본 연구에서는 농업용 저수지의 설계한발빈도 및 설계기준과 연계하여 용수공급 부족기간, 내한능력, 부족기간, 회복도, 취약도 등의 내용을 포함한 이수안전도 개념을 정립하고, 기후변화에 따른 현장여건 변화(논면적 변화, 영농패턴 변화, 작부시기 변화 등)를 반영한 이수안전도를 재평가하고자 한다. 공사관리 저수지 중 주수원공 저수지 대상으로 최근 영농대비 용수확보 추진지구(가뭄대책지구, 2017) 중 13개 대상지구 선정하였다. 최근 30년 자료 기준으로 저수지 모의운영을 통한 물수지분석 결과를 바탕으로 신뢰도 기준의 용수공급능력을 평가하여 이수안전도를 재현기간으로 환산하였다.

II. 재료 및 방법

1. 연구대상지역 및 분석자료

본 연구에서는 한국농어촌공사에서 관리하는 3,372 개 저수지 중에서 농업용수 공급을 목적으로 준공된 주수원공 저

Table 1 Characteristics of the agricultural reservoirs used in this study

Region	Reservoir name (symbol)	Watershed area (ha)	Irrigated area (ha)	Effective storage capacity ($10^3 m^3$)	Design frequency of drought (years)	Construction year (year)	Meteorological station
Central region	Geumgwang (Res. GGW)	4,830	1,906	12,047	10	1961	ICHEON
	Deoku (Res. DU)	2,270	573	3,547	5	1949	SUWON
	Hak (Res. HK)	2,600	378	1,426	10	1923	CHUNCHEON
	Songgang (Res. SG)	440	235	1,077	10	2005	CHUNGJU
	Hakjeong (Res. HJ)	706	214	775	10	1929	CHEONAN
	Naengjeong (Res. NJ)	535	326	940	10	1941	CHEONAN
	Pungjeon (Res. PJ)	1,110	655	2,621	10	1944	SEOSAN
	Gaeun (Res. GU)	650	202	1,180	10	1948	MUNGYEONG
Southern region	Geumma (Res. GM)	452	229	818	10	1941	GUNSAN
	Wanggung (Res. WG)	866	540	1,941	10	1931	GUNSAN
	Gwangi (Res. GGi)	365	239	783	10	1932	YEOSU
	Jesan (Res. JS)	476	203	511	10	1946	JANGHEUNG
	Deokgok (Res. DG)	686	312	695	10	1958	JINJU

수지를 대상으로 저수지용량증대계획지구(2014), 최근 영농 대비 용수 확보 추진지구(가뭄대책지구, 2017)를 고려하되 저수지 유역배율(관개면적 대비 유역면적의 비율) 기준으로 대상지구를 선정하였다. 전국적인 분포를 고려하여 중부/남부지역에 따른 도별 2 개 내외의 총 13 개 대상지구를 선정하였으며, 분석에 사용한 농업용 저수지 위치 및 기상관측소 지점의 위치를 Fig. 1과 같이 도시하였다. Table 1은 대상 저수지 재원(유역면적, 관개면적, 유효저수량, 설계한발빈도, 축조연도) 및 저수지별 지배 기상관측소 정보를 도시하였다. 설

계한발빈도의 경우 경기 덕우저수지를 제외한 12 개 저수지는 10 년 한발빈도로 설계되었으며, 저수지 준공연도는 2005 년에 준공된 충북 송강저수지를 포함하여 평균 1947 년도로 약 70 년 전에 설계되었다. Fig. 2는 유효저수량을 기준으로 해당 저수지별 유역면적, 관개면적, 유역배율을 도시한 것이다. 유역배율은 최소 1.5 배(전남 관기저수지)부터 최대 6.9 배(강원 학저수지)까지 다양한 유역배율을 갖는 저수지를 선정하였으며, 평균 2.7 배의 유역배율을 나타내었다.

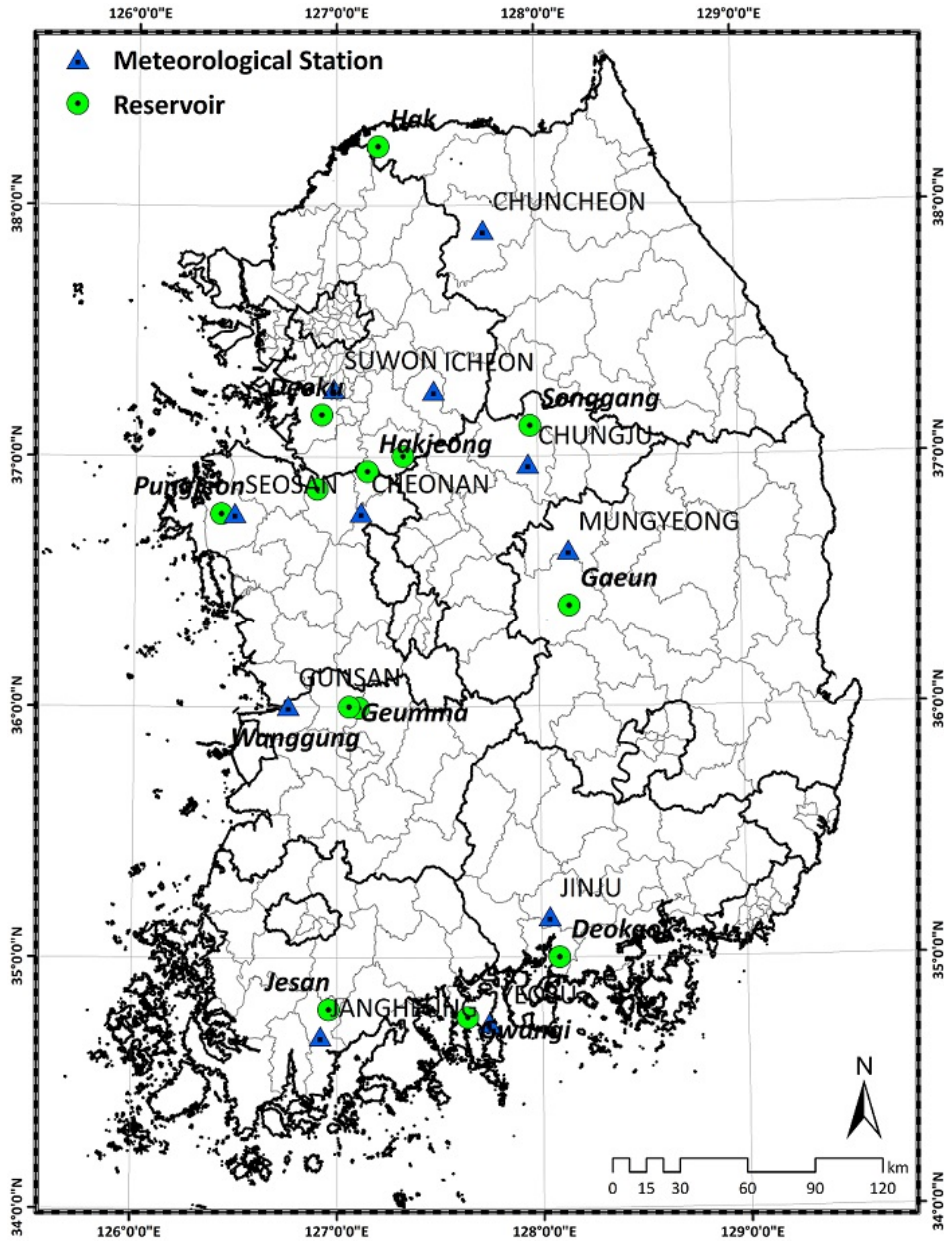


Fig. 1 Locations of the agricultural reservoirs and meteorological stations used in this study

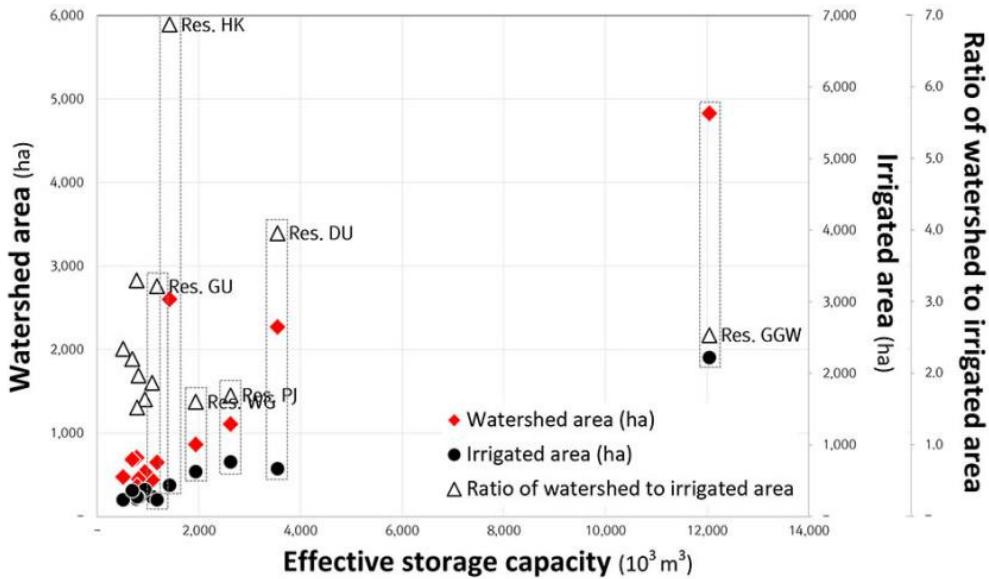


Fig. 2 Relationship between characteristics of the agricultural reservoirs used in this study

2. 최근 영농방식변화 적응을 위한 현장조사

농업용 저수지의 용수공급계획량은 과거 저수지 설계당시 관개지구의 관행 물관리 및 강우량, 증발산량 등 기후상황을 고려하여 설계되었다. 1970 년 이후 급격한 도시화, 산업화로 인한 농업인구의 감소에 따른 노동력 부족 및 농업인구의 고령화, 농업용 기계의 보급에 따른 영농방식의 변화 (Ju et al., 2006), 수리시설물의 노후화로 인한 누수 발생 및 배분관리 상태의 불량으로 인한 관리손실량의 증가 (Nam et al., 2011), 사회-경제적 선호도에 따른 용수이용 형태의 변화 (Kang et al., 2014) 등으로 과거 저수지 설계당시의 용수공급계획량의 변화가 발생하였다. 현재 논용수 수요량은 수리시설물 모의 조작시스템인 HOMWRS (Hydrological Operation Model for Water Resource System)을 이용하여 산정하고 있으며, HOMWRS는 최적의 유지관리 및 관행적인 물관리를 가정하고 있기 때문에 현장의 실제 여건과는 상이한 산정기준을 적용하고 있다 (Lee et al., 2006). 따라서, 선정된 대상 저수지의 설계한발빈도 변화를 판단할 수 있도록 과거 설계당시의 상황과 비교하여 변화된 현재 농업용수의 이용형태 및 영농상황을 조사할 필요가 있다.

본 연구에서는 한국농어촌공사의 본부 및 12 개 지사 (안성 지사, 화성·수원 지사, 철원 지사, 충주·제천·단양 지사, 진천·음성 지사, 아산·천안 지사, 서산·태안 지사, 익산 지사, 순천·광양·여수 지사, 장흥 지사, 상주 지사, 사천 지사)의 수자원 관리부 물 관리 전담자들을 대상으로 농업용수 현행 농업용수의 관리 및 이용체계, 영농방식의 대한 현장 인터뷰 및 온

라인 매체를 이용한 설문 조사를 실시하였다. 설문 조사내용은 대상 지구별로 못자리정지용수기, 묘대기, 이앙기, 본답기로 구분하여 작부시기 변화에 따른 저수지 용수공급의 시작과 종료 시기, 못자리 정지용수량 및 이앙용수량, 못자리 면적 등을 조사하였으며, 대상 저수지별 설문 조사 결과를 Table 2에 도시하였다.

묘대기, 이앙기, 본답기 기간은 HOMWRS 기준 값과 비교하여 상대적으로 7 일에서 20 일 앞당겨졌다. 이앙시기의 경우 중부지역은 이앙기간이 평균 18 일로 기준 값 (20 일)과 비교하여 짧아진 반면, 남부지역의 경우 이모작, 직파재배 등 중부지역과 비교하여 영농형태가 다양하기 때문에 (Ju et al., 2006), 이앙기간이 평균 35 일로 조사되었다.

Fig. 3은 대상지구별 조사된 이앙용수량 (씨레질 용수량)을 도시하였으며, 현재 논용수 수요량 산정시 140 mm를 사용하고 있다. 중부지역의 경우 학, 송강, 학정, 냉정, 개운 저수지에서 93~160 mm로 조사되어 기준 값 (140 mm)과 유사한 결과를 나타냈지만, 남부지역의 경우 상대적으로 장기간의 이앙/본답기로 인해 금마, 왕궁, 덕곡 저수지에서 290~320 mm로 조사되었다. 금마, 왕궁, 덕곡 저수지의 경우 이앙시기의 용수공급량을 단위면적으로 환산하였으며, 금광, 덕우, 풍전, 관기, 제산 저수지의 경우 정확한 조사가 불가능하였다.

Fig. 4는 대상지구별 못자리 면적을 도시한 것으로, 현재 농업용수 수요량 산정시 전체 본답면적의 1/20로 설정하고 있다. 학정 저수지와 개운 저수지의 경우 못자리 면적이 각각 본답면적의 17%, 10%로 조사되었다. 송강, 제산, 덕곡 저수

Table 2 Characteristics of the current farming method in paddy field for each agricultural reservoir used in this study

Region	Reservoir name (symbol)	Cropping periods				Nursery area (%)	Rice nursery water (mm)	Transplanting water (mm)
		Seedling bed preparation	Nursery	Transplanting	Growing			
Central region	Res. GGW	8 Apr. to 14 Apr.	15 Apr. to 9 May	10 May to 19 May	20 May to 10 Sep.	5	140	140
	Res. DU	1 Apr. to 9 Apr.	10 Apr. to 14 Apr.	15 Apr. to 30 Apr.	1 May to 11 Sep.	5	140	140
	Res. HK	1 Apr. to 9 Apr.	10 Apr. to 30 Apr.	1 May to 10 June	11 June to 21 Sep.	1.1	77	105
	Res. SG	–	11 Apr. to 12 May	13 May to 7 June	8 June to 25 Sep.	–	–	93
	Res. HJ	1 Apr. to 10 Apr.	11 Apr. to 30 Apr.	1 May to 10 June	11 June to 15 Sep.	17	140	59
	Res. NJ	1 Apr. to 9 Apr.	10 Apr. to 4 May	5 May to 12 May	13 May to 20 Sep.	5	140	130
	Res. PJ	8 Apr. to 19 Apr.	20 Apr. to 21 May	22 May to 9 June	10 June to 15 Sep.	5	140	140
	Res. GU	10 Apr. to 20 Apr.	21 Apr. to 20 May	21 May to 10 June	11 June to 11 Sep.	10	140	100
Southern region	Res. GM	8 Apr. to 19 Apr.	20 Apr. to 10 May	11 May to 10 June	11 June to 11 Sep.	4	140	320
	Res. WG	8 Apr. to 19 Apr.	20 Apr. to 10 May	11 May to 10 June	11 June to 11 Sep.	4.7	140	320
	Res. GGI	8 Apr. to 17 Apr.	18 Apr. to 10 May	11 May to 9 June	10 June to 15 Sep.	5	140	140
	Res. JS	–	1 May to 9 May	10 May to 29 June	30 June to 11 Sep.	–	–	140
	Res. DG	–	25 Apr. to 19 May	20 May to 24 June	25 June to 30 Sep.	–	–	290
Central region	HOMWRS*	17 Apr. to 20 Apr.	17 Apr. to 31 May	21 May to 10 June	11 June to 11 Sep.	5	140	140
Southern region		27 Apr. to 30 Apr.	27 Apr. to 10 June	1 June to 20 June	21 June to 21 Sep.			

* HOMWRS: Hydrological Operation Model for Water Resource System

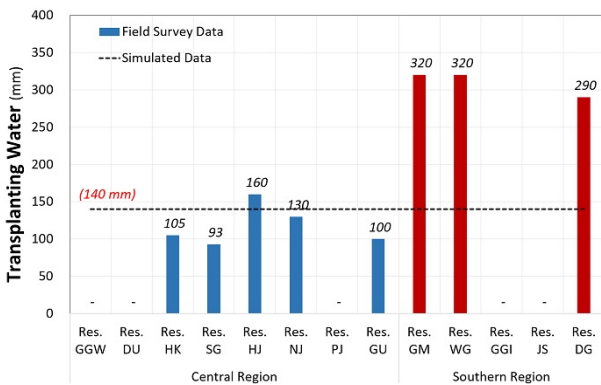


Fig. 3 Comparison of transplanting water at each agricultural reservoir between the simulated data and field survey data

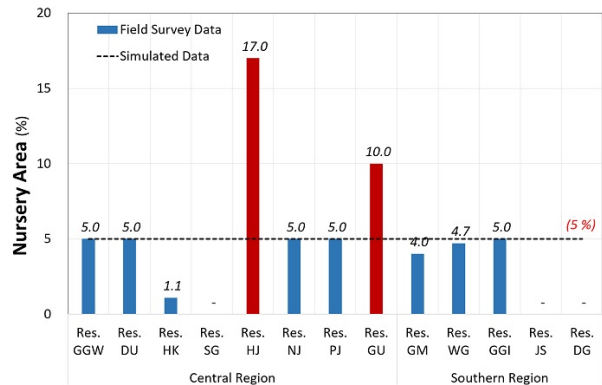


Fig. 4 Comparison of nursery area at each agricultural reservoir between the simulated data and field survey data

지는 못자리정지용수 기간 및 못자리 면적이 없는 것으로 조사되었으며, 이 지역들은 못자리용수량을 농민 자체적으로 해결하는 것으로 나타났다.

3. 농업용 저수지의 설계한발빈도

물공급 안정성의 척도로 나타내는 이수안전도란 수자원 공급시설이 용수수요를 충족시킬 수 있는 물 공급의 안정성 정도이며, 설정된 수요량을 공급할 수 있는 확실성을 말하며 확실성은 확률 또는 빈도개념으로 표현하고 있다 (Lee and Kang, 2006; Lee et al., 2014). 우리나라 다목적댐의 경우 보 장공급량 기준에서 신뢰도 기준을 권장하고 있는 추세이다. 그러나 농업용 저수지의 경우에는 한발빈도개념을 이수안전도의 척도로 적용하고 있으며, 본 연구에서는 농업분야 이수 안전도로 적용하고 있는 한발빈도개념, 10년 한발빈도 (10년 1회 갈수기준)를 기준으로 하여 이수안전도를 평가하였다. 과거 강우자료 등 기상자료가 충분하지 않았던 시기에 설계된 저수지의 경우 수리시설 내한능력의 평가기준으로 단위저수량을 활용하여 한발빈도를 유추하는 방법을 활용한 경우가 있다. 농업용 저수지에서 단위저수량은 1960년대 까지 300~450 mm이었으나, 1970년대부터 600~800 mm로 증가하였다 (KRC, 2007; Kim et al., 2016). 수리시설내한능력조사 종합보고서 (1984)에 따르면, 과거 수리안전담의 단위저수량을 활용하여 한발빈도 개념을 적용하고 있는데, 단위저수량이 520 mm 이상은 한발빈도가 10년, 440 mm 정도는 5년 빈도 등으로 적용하고 있다 (Table 3). 본 연구에서는 농업용 저수지의 이수안전도 개념을 한발빈도 개념으로 적용

Table 3 Definition of design frequency of drought based on unit storage capacity

Design frequency of drought (years)	Unit storage capacity (mm)
10	520
7	480
5	440
3	380
2,33	330

Table 4 Definition of three scenarios based on climate data and farming methods

Classification	Climate data	Farming methods
Scenario 1	1973 to 2002 (Past 30 years)	Reference data of design standard based on HOMWRS
Scenario 2	1987 to 2016 (Recent 30 years)	Reference data of design standard based on HOMWRS
Scenario 3	1987 to 2016 (Recent 30 years)	Current investigation on-off survey to consider the changes of paddy field environments

하여 과거 및 최근 30년 기상 자료를 기준으로 10년 1회 물 부족 허용으로 개념을 정립하고, 시험지구에 대한 이수안전도를 분석하였다.

4. 농업용 저수지의 이수안전도 정의

한발빈도의 개념을 이용한 농업용 저수지의 이수안전도의 검증 및 분석을 위하여 과거 및 최근 기상자료를 활용하여 Table 4와 같이 세 가지 시나리오에 대한 연 최대 필요저수량을 산정하였다. 첫째 시나리오의 경우, 설계당시 과거 기상자료 및 기존의 설계기준에 이용된 기초자료 활용 (재배방식, 작부시기, 침투량 등)함으로써, 저수지별 설계한발빈도와 이수 안전도를 비교하였다. 두 번째 시나리오의 경우, 최근 30년 (1973년~2016년) 기상자료 및 기존의 설계기준에 적용된 기초자료를 활용하여, 과거 설계당시의 기상자료 및 최근 기상의 변화가 농업용 저수지의 이수안전도의 미치는 영향을 분석하였다. 세 번째 시나리오의 경우, 최근 기상자료 및 영농방식 변화 적용을 위한 현장조사를 사용하여, 기상 및 현장여건의 변화를 고려한 시나리오로써 연최대필요저수량 자료의 시계열 자료를 빈도 분석하여 유효저수량과 비교하여 분석하여 유효저수량이 연최대필요저수량의 어느 빈도에 해당하는지를 판단하였다.

III. 적용 및 고찰

1. 과거 및 최근 강수량 분석

30년 단위 연평균 강수량을 비교했을 때, 모든 대상지역에서 과거 30년간 강수량에 비해 최근 30년간 강수량이 증가하는 추세를 보였으며, 서산 지역의 증가율이 13.4%로 가장 크게 증가하였다. 반면 5년 단위 연평균 강수량을 비교했을 때, 2013년에서 2016년 강수량이 모든 대상지에서 감소하는 추세를 보였으며, 수원 지역의 감소율이 -37.4%로 가장 크게 나타났다. 10년 단위 월별 강수량 패턴을 비교했을 때 모든 대상 지역에서 최근 2013년에서 2016년 여름 강수량이 2003년에서 2012년 여름 강수량보다 감소하였다 (Table 4). 10년간 연평균 강수량과 최근 10년간 월별 연평균 강수량의 봄, 가을,

겨울철을 살펴보면 10년간 연평균 강수량은 큰 차이가 없으며, 10년간 월별 연평균 강수량에서도 시기별 차이가 없었다.

1973년부터 10년간 연평균 강수량과 최근 10년간 월별 연평균 강수량 중 여름강우에 해당하는 7월을 비교하면 (Table 5), 연평균 강수량은 모든 지역에서 과거에 비해 증가하는 추세를 보였으며, 춘천 지역의 증가율이 74.2%로 가장 크게 나타났다. 반면 10년 단위 월별 연평균 강수량을 비교했을 때, 최근 4년 (2013년~2016년)간 모든 대상지에서 감소하는 추세를 보였으며, 여수 지역의 감소율이 -52.6%로 가장 크게 나타났다.

2. 현장조사에 따른 관개용수량 변화 분석

이수안전도 분석 시나리오에 따른 저수지별 30년 단위 유효우량을 Table 6과 같이 비교하였다. 과거 (시나리오 1)에 비

해 최근 30년간 (시나리오 2) 유효우량의 변화는 변화폭이 작게 나타났다. 최근 기상자료 및 현장 여건을 적용하였을 경우 (시나리오 3), 풍전 저수지의 경우 유효우량이 과거 30년에 비해 17.8% 증가하였고, 금마, 왕궁 저수지의 경우 감소하는 경향을 보였다. 시나리오 3의 경우 대부분의 지역에서 유효우량이 증가하는 경향이 나타났으며, 변화폭 또한 크게 나타났다. 이는 기상자료의 변화 보다 현장여건의 변화가 유효우량 및 관개용수량 변화에 민감하게 작용하는 것을 판단할 수 있다.

5년 단위 연평균 비교의 경우, 조용수량은 최근 3~4년간 모든 지역에서 증가하는 경향을 보였다. 과거 및 현재 기상 자료를 근거로 한 시나리오 (시나리오 1, 2)보다 현장 여건을 적용한 경우 (시나리오 3)가 더 적게 나타난 지역은 풍전, 제산, 개운 저수지로 나타났다. 유효우량은 덕곡 저수지를 제외한 나머지 저수지 지역에서 최근 3~4년간 감소하는 경향을 보였다.

Table 5 Comparison of annual precipitation during 1973~2002 and 1987~2016

Region	Meteorological station	Reservoir symbol	1973~2002 (mm)	1987~2016 (mm)	Rate of change (%)
Central region	ICHEON	Res. GGW	1,317	1,367	3.8
	SUWON	Res. DU	1,241	1,333	7.4
	CHUNCHEON	Res. HK	1,249	1,367	9.4
	CHUNGJU	Res. SG	1,184	1,247	5.3
	CHEONAN	Res. HJ	1,219	1,235	1.3
	SEOSAN	Res. NJ	1,128	1,279	13.4
	MUNGYEONG	Res. PJ	1,270	1,293	1.8
Southern region	GUNSAN	Res. GU	1,404	1,443	2.8
	YEOSU	Res. GM	1,457	1,483	1.8
	JANGHEUNG	Res. WG	1,200	1,293	7.8
	JINJU	Res. GGI	1,486	1,533	3.2

Table 6 Comparison of precipitation in July during 1973~1982 and 2007~2016

Region	Meteorological station	Reservoir symbol	1973~1982 (mm)	2007~2016 (mm)	Rate of change (%)
Central region	ICHEON	Res. GGW	291	403	38.2
	SUWON	Res. DU	279	436	56.4
	CHUNCHEON	Res. HK	271	472	74.2
	CHUNGJU	Res. SG	223	279	24.9
	CHEONAN	Res. HJ	263	296	12.5
	SEOSAN	Res. NJ	266	315	18.2
	MUNGYEONG	Res. PJ	240	284	18.4
Southern region	GUNSAN	Res. GU	240	263	9.5
	YEOSU	Res. GM	263	277	5.4
	JANGHEUNG	Res. WG	227	266	16.9
	JINJU	Res. GGI	270	324	19.9

과거 및 현재 기상 자료를 근거로 한 시나리오보다 현장 여건을 적용한 경우가 더 적게 나타난 지역은 금마, 왕궁 저수지로 나타났으며, 유출량은 모든 저수지에서 최근 3~4년간 감소하는 경향을 보였다.

3. 기상 및 최근 영농자료를 고려한 설계한발빈도 재산정

최근 기상자료를 활용하여 연 최대 필요저수량을 산정하

였으며, 연 최대 필요저수량 자료의 시계열 자료를 빈도분석을 실시하여 유효저수량과 비교하여 분석하였다. 과거 및 현재 기상자료를 이용한 경우 연 최대 필요저수량 평균은 금광저수지, 풍전저수지, 왕궁저수지 순서로 크게 나타났으며, 반면 현재 기상자료와 현장여건 변화를 반영한 경우, 연 최대 필요저수량 평균은 금광저수지, 왕궁저수지, 풍전저수지 순서로 크게 나타났다.

Table 7 Comparison of effective rainfall based on three scenarios

Region	Reservoir symbol	Scenario 1	Scenario 2		Scenario 3	
		1973~2002 (mm)	1987~2016 (mm)	Rate of change (%)	1987~2016 field survey data (mm)	Rate of change (%)
Central region	Res. GGW	643	636	-1.2	718	10.4
	Res. DU	643	622	-3.5	715	10.0
	Res. HK	646	631	-2.3	690	6.5
	Res. SG	598	595	-0.5	656	8.9
	Res. HJ	599	598	-0.1	640	6.5
	Res. NJ	599	598	-0.1	660	9.3
	Res. PJ	584	587	0.6	710	17.8
	Res. GU	588	590	0.4	576	-2.0
Southern region	Res. GM	588	590	0.4	576	-2.0
	Res. WG	672	683	1.6	698	3.8
	Res. GGI	673	672	-0.2	789	14.7
	Res. JS	632	634	0.4	651	2.9
	Res. DG	700	695	-0.8	741	5.5

Table 8 Comparison of maximum annual storage capacity based on three scenarios

Region	Reservoir symbol	Scenario 1		Scenario 2		Scenario 3	
		1973~2002 (1000 m ³)	Standard deviation	1987~2016 (1000 m ³)	Standard deviation	1987~2016 field survey data (1000 m ³)	Standard deviation
Central region	Res. GGW	6,418	2,041	6,338	2,197	8,844	2,809
	Res. DU	1,784	692	1,768	697	1,877	739
	Res. HK	838	336	850	388	825	384
	Res. SG	1,008	322	1,037	381	1,487	605
	Res. HJ	745	244	739	256	872	307
	Res. NJ	1,546	511	1,475	553	1,875	648
	Res. PJ	2,980	1,027	2,866	1,080	2,043	809
	Res. GU	931	421	864	347	1,459	630
Southern region	Res. GM	2,584	1,283	2,272	1,019	4,585	1,863
	Res. WG	958	472	882	351	939	398
	Res. GGI	578	277	627	244	276	174
	Res. JS	656	235	643	241	582	225
	Res. DG	974	570	1,010	539	1,217	551

Table 9 Comparison of maximum annual storage capacity based on three scenarios

Region	Reservoir symbol	Construction year (year)	Design frequency of drought (years)	Scenario 1 (years)	Scenario 2 (years)	Scenario 3 (years)
Central region	Res. GGW	1961	10	over 10	over 10	5~7
	Res. DU	1949	5	over 10	over 10	over 10
	Res. HK	1923	10	over 10	10	7~10
	Res. SG	2005	10	3	3	3
	Res. HJ	1929	10	3	3	3
	Res. NJ	1941	10	2	2	2
	Res. PJ	1944	10	10	2	3~5
Southern region	Res. GU	1948	10	2	3	2
	Res. GM	1941	10	2	2	2
	Res. WG	1931	10	2	2	2
	Res. GGI	1932	10	2	2	2
	Res. JS	1946	10	10	10	over 10
Res. DG	1958	10	2	2	2~3	

통계연보자료의 경우 대부분의 농업용 저수지는 10년 한발빈도를 갖고 있으며, 이는 설계당시의 계획한발빈도로서, 과거 설계빈도 재현 시나리오와는 상이한 차이를 보였다. 이는 대부분의 농업용 저수지의 준공연도가 1940년대로 당시 기상자료의 부족으로 설계당시의 상황을 재현할 수 없었다. 과거 설계빈도 재현 시나리오 (1961년~1990년, 1973년~2002년) 및 현재 시나리오 1 (1987~2016년)의 경우, 동일한 기초자료 (재배방식, 작부시기, 침투량 등)를 활용하였으며, 결과의 차이는 미비하였으며, 이는 두 시나리오의 경우 사용된 기상자료의 기간이 유사하여 30년간의 이수안전도 산정시 차이가 발생하지 않았다.

최근 기상자료 (1987~2016년) 및 현장여건 변화 조사 자료를 활용한 현재 시나리오 2의 경우, 대부분의 저수지에서 조용수량이 증가하는 경향을 보였으며, 조용수량이 증가함에 따라, 금광, 학, 개운, 덕곡 저수지에서 이수안전도가 감소하는 경향을 보였다. 상대적으로 풍전, 제산, 개운 저수지의 경우 현장여건 변화 조사자료를 활용한 현재 시나리오 2에서 조용수량이 감소하는 경향이 나타나, 이수안전도가 동일하거나 증가하는 것으로 나타났다.

IV. 결 론

본 연구에서는 농업용 저수지의 합리적인 운용 및 관리, 용수공급능력에 대한 정량적인 평가를 위하여 기상·수문 현상 및 하류의 용수 수요, 유역 환경의 변화에 따른 과거 설계기준

의 재평가 및 이수안전도의 개념을 정립하고자 하였다. 공사 관리 저수지 중 주수원공 저수지 대상으로 하여, 최근 가뭄대책 지구를 고려하되 저수지 유역배율을 기준으로 전국적으로 13개 시험지구를 선정하여 과거의 설계한발빈도 재현 시나리오, 현재의 설계한발빈도 산정을 위한 현재 기상자료만 적용한 시나리오, 현재 기상자료 및 현장여건 변화 자료를 조합한 경우의 시나리오를 각각 적용하여 과거대비 현재 이수안전도를 비교 분석하였다.

시험지구의 강우인자의 변화는 30년 단위 연평균 강수량을 비교했을 때, 모든 대상지에서 과거 30년간 강수량에 비해 최근 30년간 강수량이 증가하는 추세를 보였으나, 5년 단위 연평균 강수량을 비교했을 때, 2013년에서 2016년 강수량이 모든 대상지에서 감소하는 추세를 보였다. 10년 단위 월별 강수량 패턴을 비교했을 때 모든 대상지에서 최근 여름 강수량이 감소하는 것으로 나타났다.

이수안전도 분석 시나리오에 따른 저수지별 단위 필요수량은 5년단위 연평균 조용수량을 비교하였을 때 대부분의 저수지에서 증가하는 것으로 나타났으나, 일부 저수지에서는 현장여건 변화 등으로 조용수량이 감소하는 것으로 나타났다. 통계연보 상의 설계당시 계획한발빈도와 과거 설계빈도 재현 시나리오 (1961년~1990년, 1973년~2002년)를 비교한 결과 과거 설계빈도 재현 시나리오에서 금광, 덕우저수지 및 개운저수지를 제외한 모든 저수지에서 2~3년 한발빈도의 결과를 나타내 통계연보상의 계획한발빈도와 상당한 차이를 나타냈다. 대부분의 시험지구 저수지의 준공연도가 1940년대로 당시 기상자료 부족에 따른 설계상황의 재현이 어려워 두

한발빈도 차이의 원인 파악이 불가능하였다. 과거 설계빈도 재현시나리오 및 현재 시나리오 1 (1987~2016년)의 경우, 동일한 기초자료 (재배방식, 작부시기, 침투량 등)를 활용하여 이수안전도를 산정한 결과의 차이는 미비했으며, 이는 두 시나리오의 경우 사용된 기상자료의 기간이 20년 정도 중첩되는 것이 주요 요인으로 사료된다.

최근 기상자료 (1987~2016년) 및 현장여건 변화 조사 자료를 활용한 현재 시나리오 2의 경우에도 일부 저수지를 제외하고는 과거 및 현재 시나리오 1의 경우와 비슷한 결과를 나타내었다. 대부분의 저수지에서 조용수량이 증가함에 따라 일부 저수지의 경우에는 이수안전도가 감소하는 경향을 보이거나, 현장여건 변화 조사자료를 활용한 현재 시나리오 2에서는 조용수량이 감소하는 경향이 나타나, 이수안전도가 동일하거나 증가하는 것으로 나타났다.

본 연구에서 제시한 이수안전도 재평가에 따른 농업용 저수지의 용수공급에 대한 정량적 분석은 효율적인 기후변화 적응 대책 수립을 위한 의사결정지원 도구로서 활용가능 할 것으로 판단된다. 저수지별로 기후변화 및 현장여건 변화에 따른 영향이 다르므로, 향후 저수지 특성을 분석하여 비슷한 패턴을 갖는 저수지로 유형화할 수 있기를 기대한다.

감사의 글

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

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).
- Brekke, L.D., E.P. Maurer, J.D. Anderson, M.D. Dettinger, E.S. Townsley, A. Harrison, and T. Pruitt, 2009. Assessing reservoir operations risk under climate change. *Water Resources Research* 45: W04411. doi:10.1029/2008WR006941.
- Cho, J., S. Hwang, G. Go, K.Y. Kim, and J. Kim, 2015. Assessing the climate change impacts on agricultural reservoirs using the SWAT model and CMIP5 GCMs. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 57(5): 1-12 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2015.57.5.001.
- 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.
- Heo, G., 2016. Schematic development of risk analysis for dam safety. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 58(2): 11-20 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2016.58.2.011.
- Hong, E.M., W.H. Nam, J.Y. Choi, and Y.A. Pachepsky, 2016. Projected irrigation requirements for upland crops using soil moisture model under climate change in South Korea. *Agricultural Water Management* 165: 163-180. doi:10.1016/j.agwat.2015.12.003.
- Ju, W.J., J.T. Kim, K.W. Park, and Y.J. Lee, 2006. Development of system for estimating water demand considering variation of farming conditions in paddy field. *Journal of the Korea National Committee on Irrigation and Drainage* 13(1): 82-90 (in Korean).
- Kang, M.G., S.T. Oh, and J.T. Kim, 2014. Estimation of amounts of water release from reservoirs considering customary irrigation water management practices in paddy-field districts. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(5): 1-9 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2014.56.5.001.
- 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). doi:10.5389/KSAE.2016.58.2.065.
- 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).
- Korea Rural Community Cooperation (KRC), 2007. *Manual on repair and renovation of irrigation facilities: Reservoir*. Republic of Korea (in Korean).
- 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).
- Lee, C.B., N.S. Jung, S.K. Park, and S.O. Jeon, 2015. A study on the typology of agricultural reservoir for effective safety inspection systems. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 57(5): 89-99 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2015.57.5.089.
- Lee, D.H., C.W. Choi, M.S. Yu, and J.E. Yi, 2012. Reevaluation of multi-purpose reservoir yield. *Journal of Korea Water Resources Association* 45(4): 361-371 (in Korean). doi:10.3741/JKWRA.2012.45.4.361.
- 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.
16. 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.
 17. 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.
 18. Lee, J. and J. Noh, 2015. Evaluating water supply capacity of embankment raised reservoir on climate change. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 57(4): 73-84 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2015.57.4.073.
 19. 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.
 20. 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.
 21. Ministry of Agriculture and Forestry (MAF), 1998. *Design criteria of land and water development plan for agriculture: Irrigation*. Ministry of Agriculture and Forestry, Republic of Korea (in Korean).
 22. Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries (MFAFF), 2012. *Statistical yearbook of land and water development for agriculture*. Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries, Republic of Korea (in Korean).
 23. 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.
 24. Nam, W.H., J.Y. Choi, S.G. Choi, M.W. Jang, N.H. Lee, and K.D. Ko, 2011. A survey on irrigation timing and water saving strategies of agricultural reservoirs. *Journal of the Korea National Committee on Irrigation and Drainage* 18(1): 81-93 (in Korean).
 25. 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).
 26. 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.
 27. 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). doi:10.5389/KSAE.2014.56.2.011.
 28. Nam, W.H., J.Y. Choi, and E.M. Hong, 2015a. Irrigation vulnerability assessment on agricultural water supply risk for adaptive management of climate change in South Korea. *Agricultural Water Management* 152: 173-187. doi:10.1016/j.agwat.2015.01.012.
 29. Nam, W.H., T.G. Kim, E.M. Hong, M.J. Hayes, and M.D. Svoboda, 2015b. Water supply risk assessment of agricultural reservoirs using irrigation vulnerability model and cluster analysis. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 57(1): 59-67 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2015.57.1.059.
 30. Nam, W.H., T. Kim, E.M. Hong, and J.Y. Choi, 2017. Regional climate change impacts on irrigation vulnerable season shifts in agricultural water availability for South Korea. *Water* 9(10): 735. doi:10.3390/w9100735.