



관개취약성 평가모형 및 군집분석을 활용한 용수공급 위험도 평가

Water Supply Risk Assessment of Agricultural Reservoirs using Irrigation Vulnerability Model and Cluster Analysis

남원호* · 김태곤**† · 홍은미*** · Michael J. Hayes**** · Mark D. Svoboda*****
Nam, Won-Ho · Kim, Taegon · Hong, Eun-Mi · Michael J. Hayes · Mark D. Svoboda

Abstract

Because reservoirs that supply irrigation water play an important role in water resource management, it is necessary to evaluate the vulnerability of this particular water supply resource. The purpose of this study is to provide water supply risk maps of agricultural reservoirs in South Korea using irrigation vulnerability model and cluster analysis. To quantify water supply risk, irrigation vulnerability indices are estimated to evaluate the performance of the water supply on the agricultural reservoir system using a probability theory and reliability analysis. First, the irrigation vulnerability probabilities of 1,346 reservoirs managed by Korea Rural Community Corporation (KRC) were analyzed using meteorological data on 54 meteorological stations over the past 30 years (1981-2010). Second, using the K-mean method of non-hierarchical cluster analysis and pre-simulation approach, cluster analysis was applied to classify into three groups for characterizing irrigation vulnerability in reservoirs. The morphology index, watershed area, irrigated area, and ratio between watershed and irrigated area are selected as the clustering analysis parameters. It is suggested that the water supply risk map be utilized as a basis for the establishment of risk management measures, and could provide effective information for a reasonable decision making on drought risk mitigation.

Keywords: Agricultural reservoir; cluster analysis; irrigation vulnerability; morphology index; water supply risk

1. 서론

위험도 (risk)는 사고·재난 또는 재난에 의한 피해와 그 피해의 발생가능성 또는 발생확률을 의미하며, 위험도 분석은 시스템의 기능 또는 재난과 재난을 유발 시키는 요소들에 대한 잠재성을 검증하고 위험도를 감소시키는 수단을 찾기 위한 일환으로 사용되고 있다 (Wilhite et al., 2000; Hayes et al.,

2011). 위험도 기반의 재해관리에 있어서, 재해 발생은 잠재적 위험요인의 작용여부에 따라 변동하는 불확실성을 갖고 있기 때문에, 재해위험도는 확률 (probability)과 피해규모 (magnitude of consequence)가 주요 인자가 된다 (Park, 2009). 최근 이상기후 및 기상변동성 증가에 기인하는 자연재해에 적극적으로 대응하기 위하여 전 세계적으로 지진, 홍수, 가뭄 등의 재해에 대한 모니터링 시스템을 이용하여 위험도 관리를 수행하고 있으며, 자연재해 발생 및 피해와 연관된 불확실성을 고려할 수 있는 해석기법에 대한 연구가 진행되고 있다. 국외의 경우 대표적인 재해관리 기구로써 미국 국립가뭄경감센터 (National Drought Mitigation Center, NDMC)가 있으며, 가뭄심도의 정량적 평가를 위한 모니터링 시스템을 구축하여 가뭄의 진행에 따른 단계별 대응체계를 수립하고 가뭄 대응정책 수립을 위한 주요 의사결정 정보로 활용함으로써 합리적인 위험도 기반의 가뭄관리정책을 수행하고 있다 (Nam et al., 2014a). 또한 가뭄이 발생하는 위치 및 가뭄의 심도 변화 정보를 제공하고 있어 가뭄대응대책을 실행하는 시점을 판단하는 유용한 기준으로 사용되며, 정부기관의 가뭄관련 정책을 수립하는데 중요한 도구로 활용하고 있다 (Svoboda et al., 2002; Hayes et al., 2004; Wilhite et al., 2007).

국내의 경우 도시 재해위험도 평가 (Hwang et al., 2001; Koh et al., 2010) 및 농업생산기반의 재해 취약성 평가에 관

* National Drought Mitigation Center (NDMC), School of Natural Resources, University of Nebraska-Lincoln, Lincoln, NE, USA
** Institute on the Environment, University of Minnesota, Minneapolis, MN, USA
*** Research Institute for Agriculture & Life Sciences, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea
**** Professor/Director, National Drought Mitigation Center (NDMC) and School of Natural Resources, University of Nebraska-Lincoln, Lincoln, NE, USA
***** Climatologist/NDMC Program Area Leader, National Drought Mitigation Center (NDMC), University of Nebraska-Lincoln, Lincoln, NE, USA
† Corresponding author
Tel.: +1-425-219-8377 Fax: +1-612-626-5555
E-mail: taegon@snu.ac.kr

Received: October 28, 2014
Revised: December 4, 2014
Accepted: December 5, 2014

한 연구(Kim et al., 2013b), 홍수(Kim et al., 2013a; Jang et al., 2014; Lee et al., 2014), 지진(Jeong et al., 2010), 산사태(Yun et al., 2009)와 같은 자연재해에 대비하기 위한 재해위험지도 작성에 관한 연구가 진행되고 있다. 가뭄 위험도 평가 및 가뭄우심도 작성에 관련된 연구는 주로 기상학적 또는 수문학적 가뭄지수를 이용하여 가뭄의 진행상황을 평가하고 군집분석(clustering analysis)을 활용하여 가뭄특성의 공간적 분석을 위한 기법들이 제시되었다(Kyoung et al., 2007; Yoo et al., 2010a; Park et al., 2012; Park et al., 2013). 하지만 가뭄에 대한 이수 기능을 목적으로 하는 주요한 농업기반시설인 농업용 저수지에 대한 기능적 위험도, 즉 용수공급 상황을 판단할 수 있는 객관적 지표가 부재한 상황이다(Yoo and Park, 2007; Yoon et al., 2007; Nam et al., 2011; Sohn et al., 2014). 저수지 운영에 있어서, 저수지별로 규모 및 유역면적, 관개면적, 저수용량 등 용수공급 상태에 연관된 다양한 요소들을 반영하지 못하고, 현재 수위를 기준으로 경험적인 방법론에 입각한 판단에 의존하고 있다(Nam et al., 2013).

가뭄에 대한 잠재위험의 사전과악 및 지역별 가뭄 위험도 분석 정보는 효율적인 가뭄대응대책을 위한 중요한 의사결정 정보로 활용되며(Nam et al., 2012b; 2012c; Wilhite et al., 2014), 가뭄에 대비하기 위해서는 가뭄의 위험도를 기반으로 지역적으로 적절한 가뭄대책수립이 요구된다. 또한 최근에는 기후변화에 따른 가뭄, 이상 기후 등의 재해 위험 증가로 인하여 농업용수 부족 현상이 빈번하게 발생하고 있고, 농업용수의 안정적 공급과 관리의 어려움을 겪고 있다. 이처럼 농업용 저수지의 용수공급 기능에 대한 취약성이 증대되고 있는 상황에서 가뭄관리자들의 효과적인 가뭄재해정책 수립을 위해서는 비교가능한 저수지의 용수공급 위험도 정보가 필요하다.

본 연구에서는 비교적 규모가 큰 한국농어촌공사관할 1,346개의 농업용 저수지를 대상으로 현재 용수공급 상황을 비교 가능한 수치로 정량화할 수 있는 관개취약성 평가모형을 적용하고, 군집분석을 활용하여 용수공급 위험지도를 작성하였다. 용수공급 위험지도는 저수지의 용수공급능력을 고려하여 용수공급실패, 즉 용수부족상황이 발생할 수 있는 잠재 위험도를 평가한 것으로, 용수부족을 유발할 가능성이 있는 잠재 피해가능 지역을 도시하여 가뭄대응대책의 기초자료로 활용될 수 있도록 작성하였다.

II. 재료 및 방법

1. 용수공급 위험도 평가방법

용수공급 위험지도는 용수공급의 실패가 발생할 수 있는

잠재위험도를 평가함에 있어 물공급 능력 및 수자원공급시설을 고려하여 관개지역의 물 부족이 유발할 가능성이 있는 잠재 피해가능 지역을 추정한다. 본 연구에서는 용수공급 위험도를 평가하기 위하여 관개취약성 모형과 군집분석을 활용하였다. 저수지 크기에 따른 농업가뭄의 민감도를 고려하기 위하여 형상지수 및 유역면적, 관개면적, 유역면적과 관개면적의 비를 군집분석의 기저항목으로 선정하여, 군집을 분류하였다. 분류된 군집을 기준으로 각 군집별 저수지에 대한 관개취약성 모형을 적용하고, 관개취약성 확률을 기준으로 용수공급 위험도를 평가하였다.

2. 관개취약성 평가모형

본 연구에서 관개취약성을 평가하기 위하여 이수 측면에서 공급계획량, 수요예측량을 활용하여 용수공급능력을 판단할 수 있는 신뢰도(reliability) 기반의 관개취약성 평가모형(Nam et al., 2012a)을 이용하였다. 관개취약성 평가모형의 입력자료, 물수지 및 분석 모형, 결과 자료를 Table 1과 같이 정리하였다. (a) 입력자료는 기상자료, 저수지 특성자료, 영농자료를 사용하였으며, (b) 물수지 분석은 관개지역 논벼의 증발산량, 침투량, 배수량의 대수적 관계로부터 필요수량 및 담수심을 모의하였다. 관개지구의 필요수량은 FAO(Food and Agricultural Organization)의 Penman-Monteith 식(Allen et al., 1998)과 증발/남부 작물계수를 적용하여 소비수량을 산정하고, 수로 손실 및 관리 손실을 반영하여 수요량을 산정하였다. (c) 저수지 물수지 모형은 TANK 모형(Sugawara, 1972)을 사용하여 유입량을 계산하였으며, 관개지구의 필요수량에 따른 논에서의 물수지 모의를 통하여 용수공급량을 분석하였다. (d) 저수지로부터 공급 가능한 가용용수량과 관개지역의 필요수량으로부터 유역의 관개취약성 평가요소를 산정하고, (e) 신뢰성 해석기법을 활용하여 상태방정식은 관개지역의 수요예측량이 저수지의 공급계획량을 초과하는 경우를 용수공급의 실패(failure)로 정의하였다. (f) 수요예측량과 필요수량의 확률분포로부터 용수공급의 실패 기준을 적용하여 관개취약성 확률을 산정하였다.

설계한발빈도는 과거 저수지 설계 당시 사용된 지표로써, 저수지 축조 후 현재 저수지의 용수공급 상황을 판단할 수 있는 지표는 부재한 상황이다(Nam et al., 2012a). 따라서 관개취약성을 확률론적 모델을 바탕으로 0%부터 100%까지의 정량화된 수치를 제시함으로써 설계한발빈도와 객관적인 비교가 용이하도록 정의하였다. 평년(normal) 설계한발빈도의 경우 관개취약성 확률 50%를 의미하며, 3년, 5년, 7년, 10년, 20년 설계한발빈도의 경우 각각 관개취약성 확률 33.3%, 20%, 14.3%, 10%, 5%을 의미한다. 관개취약성 확률은 설계

Table 1 Data and model description of irrigation vulnerability assessment model (Nam and Choi, 2014)

Categories	Data and model description
a. Input data	
Farming practice data	Date of pre-planting and transplanting, reference ponding depth by growth stages
Meteorological data	Observation station data, temperature, rainfall, relative humidity, wind speed, sunshine hours
Reservoir specification data	Watershed area, benefited paddy area, effective storage capacity, area ratio by land use
b. Paddy water balance model	
Crop evapotranspiration	Penman-Monteith equation, 10-days crop coefficients of paddy rice
Net irrigation water requirements	Computational ponding depth
c. Reservoir operation model	
Reservoir inflow and runoff	TANK model
Reservoir release operation model	Reservoir available storage, surface precipitation, intake water supply
d. Water supply capacity analysis	
Potential water supply capacity	Daily water supply analysis in agricultural reservoir
Irrigation water requirement	Daily water balance analysis in irrigation region
e. Reliability analysis	
Definition of resistance capacity and load	Comparison of probability distribution function between water supply capacity and irrigation water requirement
f. Vulnerability assessment	
Definition of water supply failure standard	Convolution of probability distribution
Irrigation vulnerability index	Probability of water supply failure

시점의 자료만을 이용하는 것이 아니라 축적되는 자료를 활용함으로써 기후변화에 따른 공급량과 수요량의 변화를 반영한 결과를 도출할 수 있다는 점에서 설계빈도와는 차별화된 지표로 활용가능하다.

3. 형태지수 (Morphology Index)

다수의 저수지를 분석하고, 결과를 정리하기 위하여 저수지의 특성을 수치화한 다양한 연구를 검토하였다. 저수지의 형태학적 특성에 관한 연구로, 저수량, 만수면적, 제당높이 등 저수지 제원간의 관계 정량화 연구 (Takeuchi, 1997; Lehner and Doll, 2004) 및 저수지의 형태학적 특성화 연구 (Leonard and Crouzet, 1999), 저수지 제원간의 상관관계 분석을 활용한 저수지 분류에 관한 연구 (Graf, 1999; McDonald et al., 2012) 등이 수행되었다. 본 연구에서는 용수공급 위험도 분석 및 군집분석을 위한 요소로서 형태학적 특성화 연구의 대표적 지표인 형태지수 (morphology index)를 사용하였으며, 이 지표는 식 (1)과 같이 저수지의 평균수심과 만수면적을 이용하여 정량화한다 (Leonard and Crouzet, 1999).

$$MI = 1000 \times D \times \sqrt{S} \quad (1)$$

여기서, MI 는 형태지수, D 는 평균수심 (average depth, m), S 는 만수면적 (surface area, m^2)이며, 평균수심은 저수량을 만수면적으로 나누어 산정한다. Leonard and Crouzet (1999)는 유럽지역 내 면적 100 km^2 규모 이상의 저수지와 호수를 대상으로 분석을 수행하였으며, 형태지수가 10.5 이상인 경우 깊은 호수 (deep lake), 형태지수가 0.6~10.4인 경우 보통 호수 (normal lake), 형태지수가 0.6 이하인 경우 얇은 호수 (shallow lake)로 분류한 바 있다 (Yoo and Park, 2007).

4. 군집분석 (Clustering Analysis)

군집 분석은 다수의 대상들이 소유하는 특성을 토대로 유사한 대상들의 군집을 작성하는 통계 기법으로 계층적 (hierarchical) 군집화 방법과 비 계층적 (non-hierarchical) 군집화 방법으로 구분된다 (Kyoung et al., 2007; Han et al., 2014). 계층적 군집화 방법은 유사성이 큰 대상끼리 순차적으로 다수의 군집을 만들고, 점차 군집을 합치는 방법으로 목표 군집을 도출하는 방법이다. 반면 비계층적 군집화 방법은 군집의 중심 (cluster center)을 기준으로 군집의 수 (cubic clustering criterion)와 최초의 시작점을 지정하여 전체를 한 번에 군집화하고, 그 결과를 수정해 나가는 방법이다. K-means 기법은

Table 2 Number of agricultural reservoirs of the eight provinces-level in the study

Administrative district	Design frequency of drought						
	Normal years	Three years	Five years	Seven years	Ten years	Twenty years	Total
Gyeonggi-do	-	4	5	2	54	-	65 (4.8%)
Gangwon-do	-	-	-	-	63	-	63 (4.7%)
North Chungcheong-do	-	6	4	1	95	1	107 (7.9%)
South Chungcheong-do	-	7	6	3	151	-	167 (12.4%)
North Jeolla-do	1	2	3	-	110	6	122 (9.1%)
South Jeolla-do	-	45	14	11	313	-	383 (28.5%)
North Gyeongsang-do	-	12	15	10	172	-	209 (15.5%)
South Gyeongsang-do	1	18	3	4	204	-	230 (17.1%)
Total reservoirs	2 (0.1%)	94 (7.0%)	50 (3.7%)	31 (2.3%)	1,162 (86.3%)	7 (0.5%)	1,346 (100%)

극단치의 영향이 적은 비계층적 군집방법 중 하나으로써, K는 미리 정하는 군집의 수를 의미한다 (Yoo et al., 2010b). 군집 분석을 수행하기 위하여 주로 사용되는 척도는 간격척도 혹은 비율척도로 측정된 거리 값으로, 군집이 결합될 때마다 각 군집별로 그 군집의 평균을 중심으로 군집 내 관측대상들 간의 군집 간의 거리를 최소화하여 최적의 군집을 결정한다. 요소 간의 거리를 측정하기 위하여 Euclidean 거리, 제곱 Euclidean 거리, 도시 블록 거리, Minkowski 거리 등이 이용되며, 본 연구에서는 정규화한 공간좌표를 이용하므로 Euclidean 거리를 사용하여 거리를 계측하였다. 임의로 정의된 군집의 중심점은 오차를 최소화하는 방향으로 이동하며, 더 이상 오차가 감소하지 않는 단계에서 군집분석과정은 종료한다 (Yoo et al., 2010a).

본 연구에서는 K-means 방법 및 사전적 접근(pre-simulation approach) 방식을 활용하였으며 (Cho, 2013), 요소들 간의 거리를 정의하기 위하여 저수지의 크기에 따른 농업기물의 민감도를 고려하기 위하여 형상지수를 하나의 요소로 선정하였고, 유입량 및 필요수량, 저수지의 물수지 (water balance)에 영향을 미칠 수 있는 유역면적 (watershed area), 관개면적 (irrigated area), 유역면적과 관개면적의 비 (ratio between watershed area and irrigated area)를 기저항목으로 선정하였다. 각 항목은 척도가 다르기 때문에 정규화를 통하여 동일한 거리공간상에 위치하도록 정의하였다. 유역면적 및 관개면적, 유역면적과 관개면적의 비, 형상지수는 로그 스케일 (log scale)로 변환하고 집단 값 범위를 기준으로 선형 정규화 (linear normalization)를 실시하여 공간 좌표를 정의하였다.

5. 대상 저수지 선정 및 분석자료

본 연구에서는 한국농어촌공사 (Korea Rural Community

Corporation, KRC)에서 관리하고 있는 저수지 3,356개소 중 자동수위계측기가 설치된 1,587개소를 대상지역으로 검토하였다 (KRC, 2012). 이 중 도서지역 및 농업용 저수지가 운영되지 않는 광역시에 위치한 저수지를 제외한 1,346개소를 연구 대상으로 선정하였으며, 선정된 저수지의 도별 설계빈도 분포 및 개수를 Table 2에 도시하였다. 한국농어촌공사 관할 저수지의 약 78 %는 10년 빈도 가뭄에도 안정적으로 농업용수를 공급할 수 있도록 설계되었으며 (Nam et al., 2014b), 본 연구에서 선정한 농업용 저수지의 경우 약 87 %가 10년 이상 설계한발빈도 (design frequency of drought)로 설계되었다. 기상자료는 전국 54개 기상관측소의 1981년부터 2010년까지 30년간 일별 기상자료를 사용하였으며, 각 저수지별로 인접한 기상관측소의 기상자료를 활용하였다.

III. 적용 및 고찰

1. 관개취약성 평가모형의 적용

전국 1,346개의 농업용 저수지를 대상으로 1981년부터 2010년까지 30년간의 기상자료를 활용하여 관개취약성 평가모형을 적용하였다. 계산된 관개취약성 확률을 과거 설계한발빈도와 비교하여 설계시점부터 현재 (2010년)까지의 이수측면에서 용수공급상황의 변화를 분석하였다. 도별 저수지의 관개취약성 확률 결과를 Table 3과 같이 정리하였다. 과거 설계한발빈도는 약 86.8 %가 10년 이상 설계한발빈도를 나타낸 반면, 현재 관개취약성 평가 결과의 경우 가뭄대응능력이 10년 이상 한발빈도에 해당되는 저수지는 약 75.3 %로 분석되었다. 약 11.5 %의 저수지는 설계시 한발대응 능력보다 과거기간 운영된 한발대응 능력이 감소한 것으로 평가할

Table 3 Number of agricultural reservoirs for irrigation vulnerability probability according to eight provinces-level

Administrative district	Irrigation vulnerability probability (%)						
	below 5.0	~10.0	~14.3	~20.0	~33.3	~50.0	over 50.0
Gyeonggi-do	51	3	4	2	2	1	2
Gangwon-do	61	-	-	-	-	-	2
North Chungcheong-do	89	7	3	1	-	2	5
South Chungcheong-do	124	13	6	9	5	2	8
North Jeolla-do	71	19	5	9	5	4	9
South Jeolla-do	206	39	31	25	30	18	34
North Gyeongsang-do	147	22	7	6	12	4	11
South Gyeongsang-do	127	34	14	9	16	12	18
Total reservoirs	876 (65.1%)	137 (10.2%)	70 (5.2%)	61 (4.5%)	70 (5.2%)	43 (3.2%)	89 (6.6%)

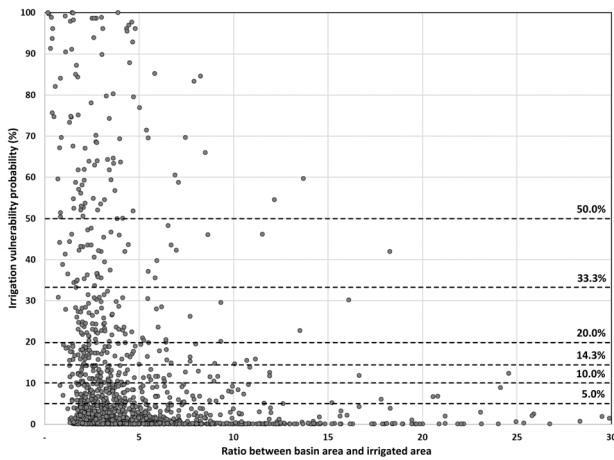


Fig. 1 Distribution of irrigation vulnerability index according to ratio between basin area and irrigated area

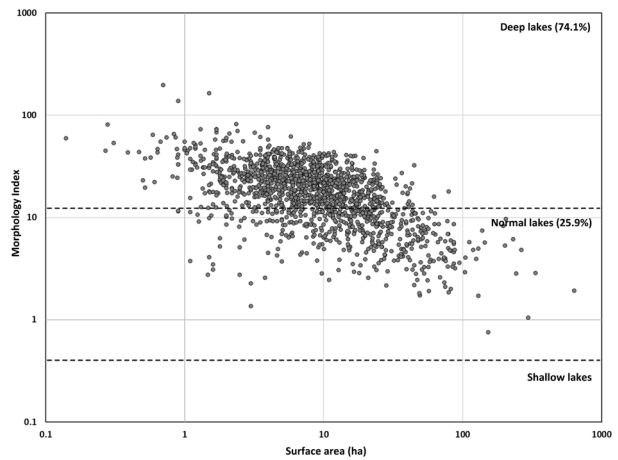


Fig. 2 Results of morphology index for agricultural reservoirs

수 있다. 가뭄대응능력이 3년 한발빈도에 해당되는 관개취약성 확률 33.3% 이상인 저수지가 약 132개 (9.8%)로 나타났으며, 이러한 관개취약성이 높은 저수지의 경우 가뭄대응을 위한 대응책 마련이 요구된다. Fig. 1은 유역면적 대비 관개면적 비율에 따른 관개취약성 확률분포를 도시한 것이다. 유역면적 대비 관개면적이 작을수록 높은 관개취약성을 나타냈으며, 관개취약성 확률 50% 이상인 저수지를 용수공급 위험 저수지로 분류할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 형태지수 분석 결과

저수지 만수면적에 따른 형태지수 결과를 Fig. 2에 도시하였다. 약 74.1%의 저수지는 깊은 호수, 약 25.9% 저수지는 보통 호수로 분류되었으며, 전체 형태지수의 평균값은 20.19로 본 연구의 대상저수지는 평균적으로 깊은 호수에 해당된다. Table 4는 8개 도별 저수지의 형태지수 결과를 도시한 것

으로, 경상남도, 전라남도, 충청북도 순으로 높은 형태지수 값을 나타냈으며, 경기도와 충청남도, 강원도의 경우 상대적으로 낮은 형태지수 값을 나타냈다. Leonard and Crouzet (1999)의 경우 유럽의 인공저수지 결과 대부분 보통 또는 깊은 저수지로 구분되었으며, Yoo and Park (2007)의 경우 우리나라 약 18,000개 저수지의 평균 형태지수를 분석한 결과 24.6 값으로 본 연구와 유사한 결과를 도출하였다.

3. 군집분석 결과

사전적 접근 방식의 기저항목으로 선정된 유역면적 및 관개면적, 유역면적과 관개면적의 비, 형상지수의 4가지 인자를 활용하여 군집 분석을 실시하였다. 군집의 수를 결정하기 위하여 군집 개수별 집단 내 평방합 (within groups sum of squares) 값을 이용하여 기울기가 변하는 지점을 기점으로 최적 군집 개수를 3개로 결정하였다. Table 5는 군집별로 기저

Table 4 Number of agricultural reservoirs for morphology index according to eight provinces-level

Administrative district	Morphology index			
	Deep lakes	Normal lakes	Shallow lakes	Average
Gyeonggi-do	32	33	-	12,90
Gangwon-do	44	19	-	16,34
North Chungcheong-do	90	17	-	20,32
South Chungcheong-do	79	88	-	13,03
North Jeolla-do	92	30	-	18,32
South Jeolla-do	291	92	-	20,14
North Gyeongsang-do	156	53	-	19,08
South Gyeongsang-do	214	16	-	28,52
Total reservoirs	998 (74,1%)	348 (25,9%)	-	20,19

Table 5 Results of cluster mean based on clustering analysis

Categories	Cluster mean (log-scale)		
	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3
(a) Watershed area	0,3056333	(+) 0,5418005	(-) 0,1560242
(b) Ratio between watershed area and irrigated area	(-) 0,4464292	(+) 0,5254474	0,5189958
(c) Irrigated area	0,4072901	(+) 0,5435674	(-) 0,2060172
(d) Morphology index	0,6952661	(-) 0,6167890	(+) 0,7027047
Total reservoirs (count)	593	340	413

항목의 로그 스케일의 평균값을 도시한 것으로, (+) 기호는 군집 중 가장 큰 평균값, (-) 기호는 가장 작은 평균값을 갖는 군집을 나타낸 것이다. 각 군집별로 1 군집의 경우 593개, 2 군집의 경우 340개, 3 군집의 경우 413개의 저수지가 분류되었다. 1 군집의 경우 유역면적과 관개면적은 3개의 군집 중 중간값에 해당되며, 유역면적과 관개면적의 비율이 가장 작은 군집 특성을 나타낸다. 2 군집의 경우 유역면적과 관개면적, 유역면적과 관개면적의 비율이 상대적으로 가장 큰 규모의 군집으로, 3 군집의 경우 유역면적과 관개면적이 가장 작은 군집으로 분류되었다. 형상지수의 경우 1 군집과 3 군집은 2 군집과 비교하여 상대적으로 큰 값을 갖는 군집으로 분류되었다. Fig. 3은 유역면적과 관개면적의 비, 형상지수 인자를 Y 축으로 정의하고, 관개취약성 확률을 X 축으로 정의하여 각 군집별 저수지의 분포를 도시한 것으로, (a) 유역면적과 관개면적의 비율과 (b) 형태지수의 경우 군집에 의한 관개취약성 확률의 상관성이 없는 것으로 분석되었다.

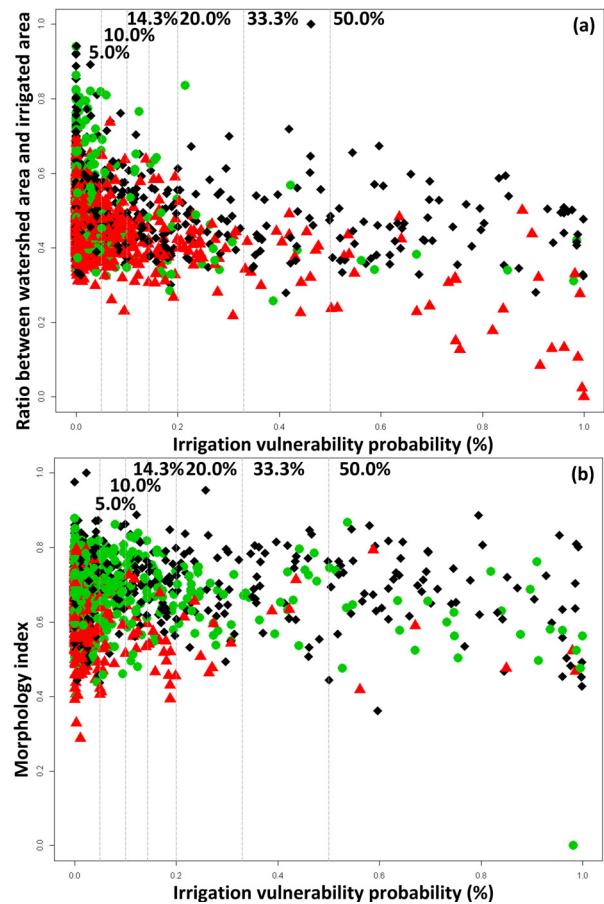


Fig. 3 Results of clustering analysis (a) ratio between watershed area and irrigated area, (b) morphology index

4. 용수공급 위험도 작성

용수공급에 관한 잠재적 위험지역의 공간분포를 추정하기 위해 관개취약성 모형을 적용한 후 관개취약성 확률의 분류를 기준으로 도형표현도 (proportional symbol maps) 형태의 용수공급 위험지도를 Fig. 4와 같이 작성하였다. Fig. 4는 관개취약성 확률을 기준으로 도시한 용수공급 위험지도로서 중서부 지역 및 남부 지역에 관개취약성 확률이 높은 저수지들이 분류되었다. Fig. 5는 가뭄대응능력이 3년 한발빈도에 해당되는 관개취약성 확률이 33.3% 이상인 저수지, 132개 (9.8%)를 각 군집별로 분류한 결과이다. 1 군집에 분류된 용수공급위험 저수지는 43개이며, 전체 1 군집으로 분류된 593개 저수지의 7.2%에 해당된다. 2 군집의 경우 용수공급위험 저수지는 7개로 2 군집으로 분류된 340개 저수지의 1.8%, 3 군집은 82개로 3 군집으로 분류된 413개 저수지의 20.2%에 해당된다. 본 연구의 결과는 용수부족을 유발할 가능성이 있는 잠재 피해가능 지역을 도시함으로써 군집별로 가뭄피해를 경감

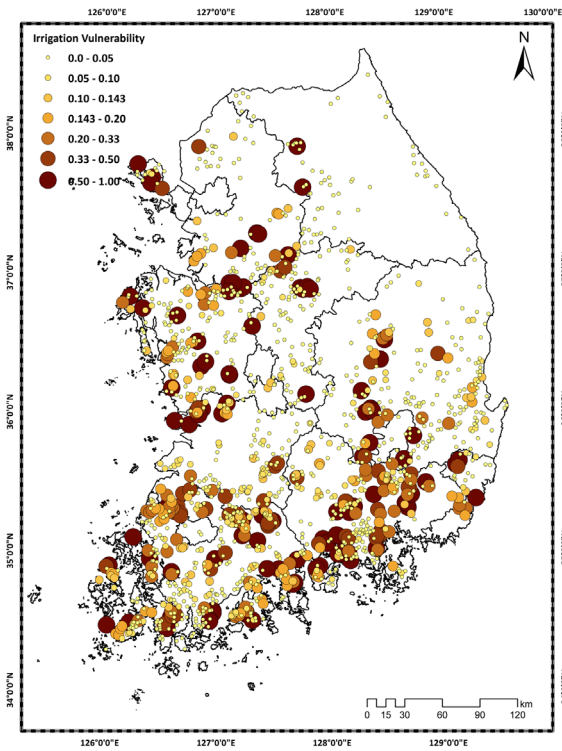


Fig. 4 Spatial distribution of reservoirs for irrigation vulnerability probability

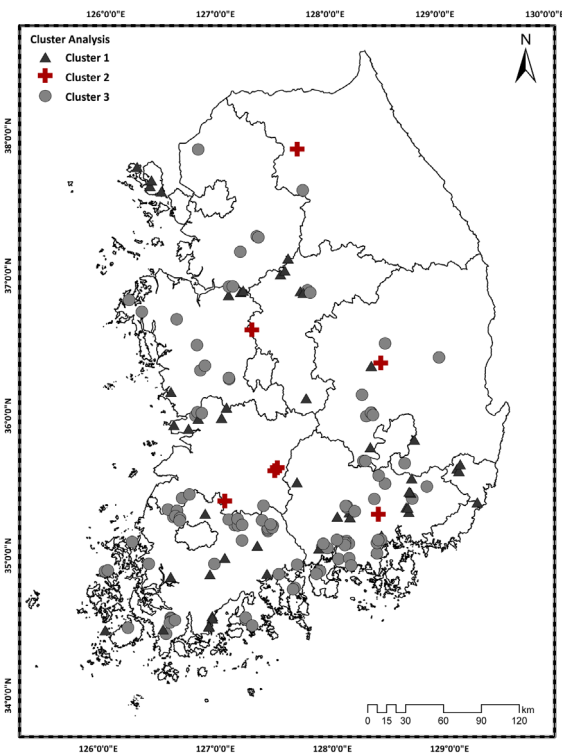


Fig. 5 Spatial distribution of reservoirs for irrigation vulnerability probability above 33% in each cluster group

시키기 위한 유형별 가뭄대응대책의 기초자료로 활용될 수 있다. 또한 유역면적과 관개면적, 유역면적과 관개면적의 비율이 상대적으로 가장 큰 규모의 특성을 갖는 2 군집의 경우, 향후 가뭄재해 대응대책을 위한 우선순위를 반영함으로써 선별적이고 효과적인 대응대책을 수립할 수 있을 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 전국의 농업용 저수지 중 중점적으로 관리할 것으로 기대되는 자동 수위계가 설치된 저수지 1,346 개소를 대상으로 관개취약성 평가모형을 적용하고, 군집분석을 활용하여 용수공급 위험지도를 작성하였다. 과거 설계한발빈도와 현재 관개취약성 확률 결과를 비교한 결과 약 11.5%의 저수지는 설계시 한발대응 능력보다 과거기간 운영된 한발대응 능력이 감소한 것으로 평가되었다. 군집 분석을 수행하기 위하여 저수지의 형태적 특징을 나타내는 형상지수 및 저수지의 물수지에 영향을 미칠 수 있는 유역면적, 유역면적과 관개면적의 비, 가뭄피해 규모를 기능하기 위한 관개면적을 기정항목으로 선정하였으며, 정의된 공간좌표를 이용하여 군집분석을 실시하여 3 개의 유형으로 저수지 군집을 분류하였다. 군집별 용수공급 위험지도의 경우 중서부 지역 및 남부 지역에 관개취약성 확률이 높은 저수지들이 분류되었으며, 가뭄대응능력이 3년 한발빈도에 해당되는 관개취약성 확률이 33.3% 이상인 저수지는 1, 2, 3 군집별로 각각 43개, 7개, 82개로 분류되었다.

본 연구에서 제시한 용수공급 위험도는 용수부족을 유발할 가능성이 있는 잠재 피해가능 지역을 도시함으로써 용수부족의 가뭄재해 대책수립의 기초자료로 활용가능하며, 군집별로 대응대책의 우선순위를 반영함으로써 선별적이고 효과적인 대응대책을 수립할 수 있을 것으로 판단된다. 향후 용수공급 부족에 대한 고효율적인 관리가 이루어지기 위해서는 지역별 가뭄특성 파악과 동시에 군집별/저수지별 가뭄취약지역에 대한 지속적인 모니터링이 요구되며, 가뭄피해를 경감시키기 위한 유형별 대응대책을 수립을 위한 표준화된 관리기준으로서 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (2013R1A6A3 A03019009).

REFERENCES

1. Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, 1998. *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. Irrigation and Drainage Paper 56. United Nations Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.
2. Cho, J.P., 2013. *Impact assessment of climate change for agricultural reservoirs considering uncertainty*. Research Report, APEC climate Center, Busan, Republic of Korea (in Korean).
3. Graf, W.L., 1999. Dam nation: a geographic census of American dams and their large-scale hydrologic impacts. *Water Resources Research* 35(4): 1305-1311.
4. Han, S.M., G.S. Hwang, S.Y. Choe, and J.W. Park, 2014. A study on classifying algorithm of disaster recovery resources using statistical method. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation* 14(1): 49-58 (in Korean).
5. Hayes, M.J., O.V. Wilhelmi, and C.L. Knutson, 2004. Reducing drought risk: bridging theory and practice. *Natural Hazards Review* 5(2): 106-113.
6. Hayes, M., M. Svoboda, N. Wall, and M. Widhalm, 2011. The Lincoln declaration on drought indices: universal meteorological drought index recommended. *Bulletin of the American Meteorological Society* 92: 485-488.
7. Hwang, H.Y., K.Y. Baek, B.H. Park, M.H. Lee, J.H. Hwang, E.L. Ryu, and T. Kim, 2001. Empirical application for the urban disaster risk assessment: fire, facility and escape cases in Cheongju city. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation* 1(2): 123-137 (in Korean).
8. Jang, I.G., J.Y. Lee, J.B. Lee, and J.S. Kim, 2014. Evaluation of flood control capacity of agricultural reservoirs during flood season. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(4): 69-75 (in Korean).
9. Jeong, E.D., C.H. Shin, and H.Y. Hwang, 2010. A study on the evaluation model of disaster risk for earthquake: centering on the cases of Cheongju city. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation* 10(5): 67-73 (in Korean).
10. Kim, E.S., J.Y. Yoo, G.H. Chung, M.J. Park, and H.I. Choi, 2013a. Analysis of the disaster environmental change considering climate change: 2. flood risk area assessment. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation* 13(4): 219-226 (in Korean).
11. Kim, S.J., S.M. Kim, and S.M. Kim, 2013b. A study on the vulnerability assessment for agricultural infrastructure using principal component analysis. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(1): 31-38 (in Korean).
12. Koh, J.K., C.I. Choi, and H.S. Kim, 2010. A study on adapting to climate change in local governments –focusing on natural disasters-. *Journal of the Korean Regional Development Association* 22(1): 67-86 (in Korean).
13. 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).
14. Kyoung, M.S., S.D. Kim, B.K. Kim, and H.S. Kim, 2007. Construction of hydrological drought severity-area-duration curves using cluster analysis. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 27(3B): 267-276 (in Korean).
15. Lee, M.S., D.H. Jang, and S.H. Lee, 2014. An analysis of flooded areas by flood frequency for drawing a flood risk map: focusing on Nonsancheon and Noseongcheon basin. *JJournal of Climate Research* 9(2): 153-166 (in Korean).
16. Lehner, B., and P. Döll, 2004. Development and validation of a global database of lakes, reservoir and wetlands. *Journal of Hydrology* 296: 1-22.
17. Leonard, J., and P. Crouzet, 1999. *Lakes and reservoirs in the EEA area*. Topic Report No. 1/1999, European Environment Agency (EEA), Copenhagen, Denmark.
18. McDonald, C.P., J.A. Rover, E.G. Stets, and R.G. Striegl, 2012. The regional abundance and size distribution of lakes and reservoirs in the United States and implications for estimates of global lake extent. *Limnology and Oceanography* 57(2): 597-606.
19. 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).
20. 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).
21. Nam, W.H., J.Y. Choi, S.H. Yoo, and B.A. Engel, 2012b. A real-time online drought broadcast system for monitoring soil moisture index. *KSCE Journal of Civil Engineering* 16(3): 357-365.
22. Nam, W.H., J.Y. Choi, S.H. Yoo, and M.W. Jang, 2012c. A decision support system for agricultural drought management using risk assessment. *Paddy Water Environment* 10(3): 197-207.
23. 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).
24. 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.
25. Nam, W.H., M.J. Hayes, D.A. Wilhite, T. Tadesse, M.D. Svoboda, and C.L. Knutson, 2014a. Drought management and policy based on risk assessment in the context of climate change. *Magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(2): 2-15 (in Korean).
 26. Nam, W.H., E.M. Hong, T.G. Kim, and J.Y. Choi, 2014b. Projection of future water supply sustainability in agricultural reservoirs under RCP climate change scenarios. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(4): 59-68 (in Korean).
 27. Park, B.S., J.H. Jee, 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).
 28. Park, J.Y., J.Y. Yoo, M.W. Lee, and T.W. Kim, 2012. Assessment of drought risk in Korea: focused on data-based drought risk map. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 32(4B): 203-211 (in Korean).
 29. 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).
 30. 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 Korea Water Resources Association* 47(1): 71-82 (in Korean).
 31. Sugawara, M., 1972. *Method of rainfall-runoff analysis*. Kyoritsu Shuppan Press, Tokyo, Japan (in Japanese).
 32. Svoboda, M., D. LeComte, M. Hayes, R. Heim, K. Gleason, J. Angel, B. Rippey, R. Tinker, M. Palecki, D. Stooksbury, D. Miskus, and S. Stephens, 2002. The drought monitor. *Bulletin of the American Meteorological Society* 83(8): 1181-1190.
 33. Takeuchi, K., 1997. Least marginal environmental impact rule for reservoir development. *Hydrological Science Journal* 42(4): 583-597.
 34. Yoo, C.S., and H.K. Park, 2007. Analysis of morphological characteristics of farm dams in Korea. *The Korean Geographic Society* 42(6): 940-954 (in Korean).
 35. Yoo, J.Y., M.H. Choi, and T.W. Kim, 2010a. Spatial analysis of drought characteristics in Korea using cluster analysis. *Journal of the Korean Water Resources Association* 43(1): 15-24 (in Korean).
 36. Yoo, J.Y., T.W. Kim, and S.D. Kim, 2010b. Drought frequency analysis using cluster analysis and bivariate probability distribution. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 30(6B): 599-606 (in Korean).
 37. Yoon, S.S., H.J. Kim, and J.S. Park, 2007. Investigation of small reservoir in rural area. *Journal of the Korea National Committee on Irrigation and Drainage* 14(2): 34-46 (in Korean).
 38. Yun, H.S., D.H. Lee, and Y.C. Suh, 2009. Preparation of landslide hazard map using the analysis of historical data and GIS method. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 12(4): 59-73 (in Korean).
 39. Wilhite, D.A., M.J. Hayes, C. Knutson, and K.H. Smith, 2000. Planning for drought: moving from crisis to risk management. *Journal of the American Water Resources Association* 36(4): 697-710.
 40. Wilhite, D.A., M.D. Svoboda, and M.J. Hayes, 2007. Understanding the complex impacts of drought: a key to enhancing drought mitigation and preparedness. *Water Resources Management* 21: 763-774.
 41. Wilhite, D.A., M.V.K. Sivakumar, and R. Pulwarty, 2014. Managing drought risk in a changing climate: the role of national drought policy. *Weather and Climate Extremes* 3: 4-13.