



Spatial analysis of water shortage areas in South Korea considering spatial clustering characteristics

Lee, Dong Jin^a · Kim, Tae-Woong^{b*}

^aPh.D. Student, Department of Civil and Environmental System Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

^bProfessor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Ansan, Korea

Paper number: 23-078

Received: 14 October 2023; Revised: 25 December 2023; Accepted: 23 January 2024

Abstract

This study analyzed the water shortage hotspot areas in South Korea using spatial clustering analysis for water shortage estimates in 2030 of the Master Plans for National Water Management. To identify the water shortage cluster areas, we used water shortage data from the past maximum drought (about 50-year return period) and performed spatial clustering analysis using Local Moran's I and Getis-Ord G_i^* . The areas subject to spatial clusters of water shortage were selected using the cluster map, and the spatial characteristics of water shortage areas were verified based on the p-value and the Moran scatter plot. The results indicated that one cluster (lower Imjin River (#1023) and neighbor) in the Han River basin and two clusters (Daejeongcheon (#2403) and neighbor, Gahwacheon (#2501) and neighbor) in the Nakdong River basin were found to be the hotspot for water shortage, whereas one cluster (lower Namhan River (#1007) and neighbor) in the Han River Basin and one cluster (Byeongseongcheon (#2006) and neighbor) in the Nakdong River basin were found to be the HL area, which means the specific area have high water shortage and neighbor have low water shortage. When analyzing spatial clustering by standard watershed unit, the entire spatial clustering area satisfied 100% of the statistical criteria leading to statistically significant results. The overall results indicated that spatial clustering analysis performed using standard watersheds can resolve the variable spatial unit problem to some extent, which results in the relatively increased accuracy of spatial analysis.

Keywords: Local Moran's I, Spatial clustering analysis, Water shortage, Hotspot

공간군집특성을 고려한 우리나라 물부족 핫스팟 지역 분석

이동진^a · 김태웅^{b*}

^a한양대학교 대학원 건설환경시스템공학과 박사과정, ^b한양대학교(ERICA) 건설환경공학과 교수

요지

본 연구에서는 국가물관리기본계획의 2030년 물부족량 전망자료를 이용하여 공간군집특성을 고려한 우리나라 물부족 핫스팟 지역을 분석하였다. 물부족 최심 군집지역 도출을 위하여 표준유역 기준의 과거 최대 가뭄(약 50년 빈도)에 대한 물부족량 자료를 이용하여, Local Moran's I와 Getis-Ord G_i^* 통계량으로 공간군집분석을 수행하였다. 클러스터맵(Cluster Map)을 통해 물부족 공간군집 대상지역을 선정하고, 공간적 군집 특성은 p-값 및 모란 산점도를 통해 적정성을 검증하였다. 분석 결과, 한강권역 내 1개 군집[임진강하류(#1023) 및 주변]과 낙동강권역 내 2개 군집[대중천(#2403) 및 주변, 가화천(#2501) 및 주변] 지역이 물부족이 심각한 핫스팟 지역으로 나타났으며, 한강권역 내 1개 군집[남한강하류(#1007) 및 주변]과 낙동강권역 내 1개 군집[병성천(#2006) 및 주변] 지역이 물부족 HL (해당지역은 물부족량이 많고 주변지역은 물부족량이 적은) 지역으로 나타났다. 표준유역단위 공간군집분석을 수행할 경우 물부족 공간군집지역 전체가 통계량 기준을 100% 만족하여 통계적으로 유의미한 결과가 도출되었다. 이는 표준유역 단위로 공간군집분석을 할 경우 가변적 공간단위 문제를 일정 부분 해결한 것으로 공간군집분석의 정확성이 상대적으로 높아졌다.

핵심용어: 국지적 모란지수, 공간군집분석, 물부족, 핫스팟

*Corresponding Author. Tel: +82-31-400-5184

E-mail: twkim72@hanyang.ac.kr (Kim, Tae-Woong)

1. 서론

최근 기후변화로 인한 기온 증가 및 극한 현상의 발생 빈도가 잦아지고, 이로 인한 강수 패턴 변화로 가뭄의 변동성이 증가하고 있다(Kim *et al.*, 2011).

예를 들어, 2022년 8월 서울 및 수도권 지역은 기상관측이 시작된 이후 115년 만에 가장 많이 내린 비(인천 옹진 144 mm/h, 서울 동작 141.5 mm/h)로 인해 총 19명의 인명피해와 3,154억 원의 재산피해가 발생한 반면, 남부지방에는 6월부터 12월까지 기상 가뭄이 계속되면서 1974년 이후 가장 많은 227.3일의 가뭄 일수를 기록하였고 전남지역에는 1,442 ha에 달하는 농작물 피해가 발생하였다(Joint Ministries, 2023).

2021 상수도통계에 따르면 최근 대한민국은 전반적인 인구 정체 추세(급수인구의 경우, 2012년 51백만명, 2021년 52백만명)에도 불구하고 1인 가구의 증가 등으로 인해 1인 1일 물사용량(2012년 278 L/인/일, 2021년 302 L/인/일)은 늘어나고 있다(ME, 2022). 또한, 수도권으로의 인구 집중 현상은 더욱 가속화되어 생활용수는 수도권 및 주요 대도시로 집중되고 있다. 공업 측면에서는 1970년대부터 주요 해양도시의 무역항 배후에 석유화학·자동차중공업 단지를 조성 운영하고 있으며, 최근에는 4차 산업혁명에 따른 첨단산업의 발달로 인해 공업용수 수요 또한 수도권 등 특정 지역으로 집중되고 있다. 농업 측면에서는 과거 대비 경지면적이 감소하였으나 개수로 방식의 공급체계 한계 등으로 인해 공급필요량 감소로 연결되지 않고 있다.

국가물관리기본계획에 따르면 우리나라의 연간 용수이용량은 2018년 현재 총 366억 m³으로 추정되며 생활·공업·농업 등 용수이용은 244억 m³(67%), 하천유지유량은 122억 m³(33%)이며, 수원별 구성은 댐용수 53.5%, 하천수 35.0%, 지하수 7.6%, 하수재이용 2.9%이다(Joint Ministries, 2021). 소양강댐(1973년 준공), 대청댐(1980년 준공), 충주댐(1985년 준공) 등 주요 다목적댐의 경우 준공 후 약 40년 이상 경과되었으나, 댐 퇴사량 준설은 시행되지 못하고 있기 때문에 댐 저수용량은 점차 감소하고 있다. 또한, 주요 댐인 소양강댐, 충주댐 등은 배분계획량(실시계획 고시) 대비 계약량은 90%를 상회하여 여유량이 없는 실정(10% 비상용량)이며, 정부 정책 기조(개발에서 보존으로 전환)에 따라 2010년 이후 다목적·용수댐의 신규 건설은 이루어지지 않고 있다. 이러한 복합적 측면으로 인해 물공급에 대한 지역적 편중이 심화되고, 특정 지역으로 물수요의 집중화를 유발하고, 이상기후로 인해 강우 등 지역적 차별성이 증가하면서 물부족 증가 및 지역적 차별화를 초래하게 된다.

가뭄은 반드시 물부족을 발생시키는 건 아니다. 가뭄의 발생은 기상학적 요인인 강수의 부족으로 나타나지만, 실질적으로는 인간이 생활하는데 필요로 하는 물의 양보다 적은 물이 공급될 경우에 체감하게 된다(Lee *et al.*, 2023). 물부족 지역 분석에 대해서는 국내외 연구가 일부 수행되고 있다. Kim *et al.* (2010)은 2008~2009년 강원도 태백지역의 가뭄재해 및 물부족 사태에 대한 원인을 댐의 가뭄설계빈도(갈수시 10년)를 초과한 가뭄 발생(20년), 과거 대비 낮은 댐운영(운영규정 준수) 및 높은 누수율(전국 14%, 태백시 46%)과 전년 대비 수요량 증가(28%) 등으로 분석하였다. Farmer *et al.* (2003)은 온대 및 건조 유역 간 물부족 차이를 분석한 결과 건조 유역이 물균형(부족)에 대한 교란에 민감한 것으로 나타났다. 최근에는 기후변화로 인한 가뭄의 지역적 집중 현상을 분석하는 공간군집 연구가 수행되고 있다. Liu *et al.* (2021)은 가뭄 발생과 전파가 가장 활동적인 지역(군집)을 핫스팟으로 정의하고, 토양수분량을 바탕으로 동남아시아 지역의 농업적 가뭄 핫스팟을 분석하였다. Son *et al.* (2023)은 수정표준강수지수를 이용하여 기후변화 시나리오에 따른 낙동강 유역의 가뭄 핫스팟 분석을 수행한 결과, 장기가뭄이 단기가뭄보다 명확히 큰 가뭄 핫스팟 지역을 발생시키면, 이러한 가뭄 핫스팟 지역은 시간이 지남에 따라 낙동강 유역 중심에서 섬진강 유역 방향으로 이동하는 것으로 나타났다. 이처럼 기상학적 가뭄 발생에 대한 공간군집 연구는 최근 국내외에서 수행되고 있지만, 물부족량에 대한 지역적 패턴 등 공간군집을 파악하는 사례는 거의 없는 실정이다. Lee *et al.* (2023)은 공간군집특성을 고려한 한강 유역 물부족 지역을 분석한 결과, 임진강하류(#1023)가 물부족 핫스팟 지역으로 나타났고 양양남대천(#1301)이 물부족 HL(해당지역은 물부족량이 많고 주변지역은 물부족량이 적은) 지역으로 나타났다.

국가물관리기본계획에서는 표준유역 단위로 물수급 분석을 수행한 후 해당 결과를 합산하여 2030년 우리나라 물부족량을 전망하였다. 이처럼 연속적인 지리적 현상을 행정구역별로 집계하는 방식과 같이 인공적인 공간 단위로 조사하면 가변적 공간단위 문제가 발생한다(Chae *et al.*, 2014). 본 연구의 목적은 우리나라 물부족량 전망자료를 토대로 Tobler의 지리학 제1법칙(공간적 자기상관성은 가깝게 있는 것들일수록 멀리 떨어져 있는 것들보다 더욱 연관성이 크다)에 따른 분석단위(중권역, 표준유역) 간 상관성을 고려한 공간군집분석을 통해 가변적 공간단위 문제를 일정 부분 해결하고 동시에 지역적 군집(핫스팟) 및 이례 지역을 찾아 물부족 취약지역 등을 합리적으로 예측하는 것이다. 또한 선행연구(Lee *et al.*, 2023)에서 수행한 중권역 기준의 한강 유역 물부족 핫스팟 지역 분

석을 우리나라 전체 지역으로 확대하여 분석을 수행하였다. 이를 통해 우선 물부족의 지역적 집중화 및 차별화 현상을 합리적으로 예측함과 동시에 물부족 공간군집분석의 신뢰성을 향상시키며, 표준유역 단위의 분석을 통해 공간단위별(중권역, 표준유역) 분석 결과의 차이점을 확인하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 연구지역 및 자료

2021년에 수립된 국가물관리기본계획에서는 우리나라 표준유역 833개와 주요지점 960개를 기반으로 MODSIM 분석모델을 구축하여 목표연도 2030년 수요량 대비 공급량을 감안한 권역별 물부족량을 산정하였다(Joint Ministries, 2021). 1967~2018년(52개년) 과거기간의 하천유량 시계열이 장래에 반복된다는 가정을 기반으로 2030년에 과거 최대 가뭃(약 50년 빈도)이 재현될 경우 권역별로는 한강 유역은 82.9백만 m^3 /년, 낙동강 유역은 67.9백만 m^3 /년, 금강 유역은 27.7백만 m^3 /년, 영산강-섬진강 유역은 78.4백만 m^3 /년의 물부족을 전망하였으며, 우리나라 전체에 대해서는 256.9백만 m^3 /년의 물부족을 전망하였다(Joint Ministries, 2021).

본 연구는 우리나라 전체 유역을 대상으로 물부족량에 대한 공간군집 특성을 분석하기 위해서 국가물관리기본계획수립연구 물수급 전망 분석보고서에서 제시한 2030년 권역별 물수급 전망 기초자료를 사용하였다(Joint Ministries, 2020b). 우리나라 전체 유역에 대한 중권역 단위지도는 Fig. 1과 같다. 제주도의 경우 국가물관리기본계획에서도 분석대상에 제외되어 본 연구지역에서도 제외하였다. 1967~2018년(52개년) 과거기간의 하천유량 시계열이 장래에 반복된다는 가정을 기반으로 권역별로 산정한 52개년 물부족량 자료를 활용하여, 우리나라 전체 기준으로 합산·재산정하였다. 국가물관리기본계획에서는 권역별로 10년과 25년 빈도 그리고 과거 최대 가뭃(약 50년 빈도)에 대한 물부족량을 산출하였다면, 본 연구에서는 우리나라 전체 기준으로 재산정한 10년과 25년 빈도 그리고 과거 최대 가뭃(약 50년 빈도)에 대한 물부족량을 사용하였다.

국가물관리기본계획에서의 가뭃기준연도는 한강권역은 10년 빈도 2014년, 25년 빈도 2017년, 과거 최대 가뭃은 2015년이며, 낙동강권역은 10년 빈도 1992년, 25년 빈도 2017년, 과거 최대 가뭃은 1995년, 금강권역은 10년 빈도 2017년, 25년 빈도 1978년, 과거 최대 가뭃은 2015년, 영섬권역은 10년 빈도 2017년, 25년 빈도 1994년, 과거 최대 가뭃은 1968년이

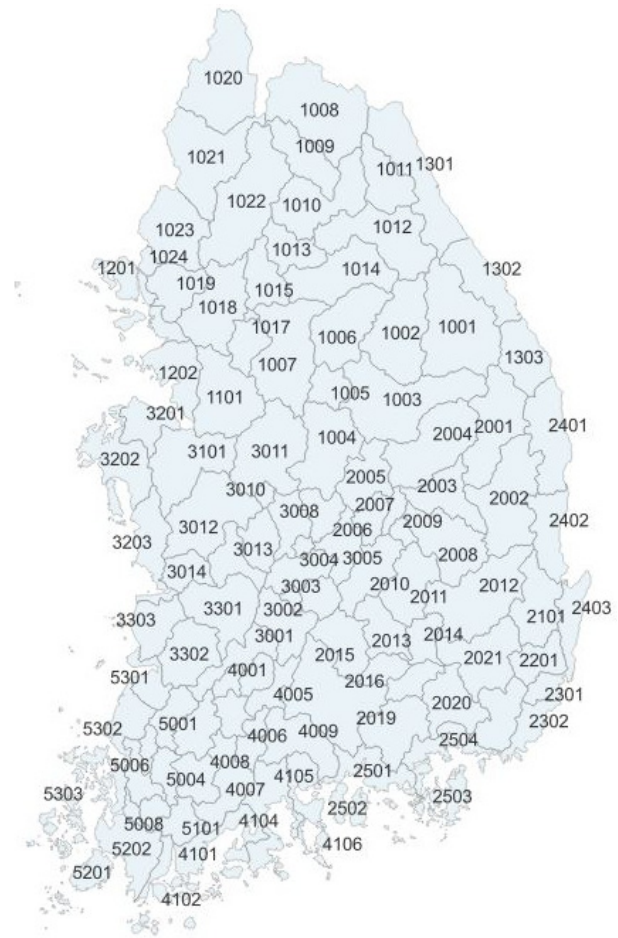


Fig. 1. Map of South Korea with middle-sized watershed code

다. 이에 반해 본 연구에서의 가뭃기준연도는 우리나라 전체 유역에 대해 10년 빈도 1982년, 25년 빈도 1968년, 과거 최대 가뭃은 2017년이다.

아울러, 공간군집 특성을 고려한 우리나라 물부족 핫스팟 지역을 분석하기 위하여 본 연구에서 수행한 절차는 Fig. 2와 같다.

2.2 공간군집분석

공간자료는 위치가 속성에 영향을 미치게 되는데, 이로 인한 자료의 특수한 성질이 바로 공간적 자기상관성(spatial autocorrelation)이다(Jang, 2016). 즉 공간상의 실체들은 공간에 무작위적으로 분포하지 않고 서로 영향을 주고받고 있으며 그 영향은 공간 실체 거리나 인접성이 높을수록 더 커진다(Kim, 2003). 공간자료는 공간적 군집(cluster) 혹은 핫스팟(hotspot)과 분산이라는 분포 형태로 존재한다(Kang, 2008; Son et al., 2023). 따라서, 본 연구에서 우리나라 전체 유역에

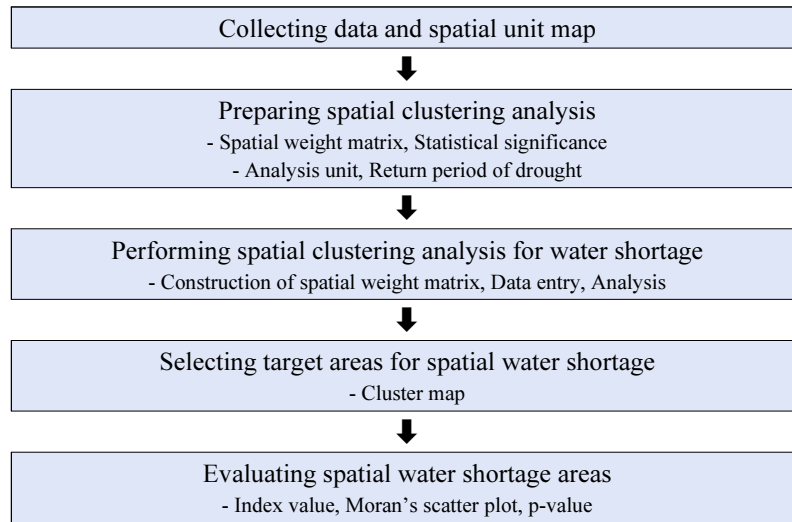


Fig. 2. Flow chart of study procedure

대한 물부족 지역을 공간군집분석을 통해 정량적으로 판단하기 때문에, 특정지역과 주변지역 모두 물부족이 많이 발생하는 군집지역을 핫스팟(hotspot), 특정지역과 주변지역 모두 물부족이 없거나 적게 발생하는 군집지역을 콜드스팟(cold-spot), 특정지역에는 물부족이 발생하고 주변지역에는 물부족이 발생하지 않는 지역을 HL (High-Low), 반대의 경우에는 LH (Low-High)로 정의하였다.

본 연구에서 우리나라 전체 유역의 물부족에 대한 공간군집분석을 위해 GedDa (Anselin (2005)가 개발한 공간데이터 분석 프로그램)를 활용하였다. 공간군집분석 방법으로는 전역적 및 국지적 자기상관성 분석이 있으며, 본 연구는 우리나라 전체 유역을 대상으로 한 물부족량에 대한 공간군집분석으로 연구대상 지역이 넓고 그 지역들 내부 위치에서도 공간적 자기상관이 발생할 수도 있어 국지적 자기상관성 분석방법을 적용하였다(Lee *et al.*, 2023). 대표적으로 적용되는 국지적 자기상관성 분석방법인 국지적 모란지수(Local Moran's I)와 Getis-Ord G_i^* 통계량 방법을 사용하였다.

2.2.1 국지적 모란지수

국지적 모란지수(Local Moran's I)는 전체 공간 중에서 특정지역(구역)과 그 주변을 둘러싼 지역들을 각각 비교하여 주변지역과 차이가 현저하게 나타나는 지역을 찾아내는 방법으로(Kang, 2008), Eq. (1)과 같이 계산된다(Jang, 2016).

$$I_i = Z_i \sum_{j=1} w_{ij} Z_j \quad (1)$$

여기서 w 는 가중치, Z 는 표준화 점수, i 와 j 는 각각 특정지역과 주변지역을 나타내는 첨자이다(Lee *et al.*, 2023). 값의 크기가 높은 정(+)의 값이 나올 경우에는 지역간 유사성이 있는 핫스팟을 의미하지만, 높은 음(-)의 값이 나올 경우에는 지역간 유사성이 없다는 것을 의미한다(Kang, 2008).

모란 산점도(Moran scatter plot)를 통해 공간적 연관성 유형을 네 가지로 판단한다. Fig. 3는 Local Moran's I와 Getis-Ord G_i^* 개념을 비교한 것으로 Local Moran's I는 특정지역과 주변지역을 각각 분리 분석하므로 특정지역과 주변지역은 같은 값뿐 아니라 다른 값도 가지게 된다. 따라서, 높은 값 주변에 높은 값이 존재하는 HH (high-high), 낮은 값 주변에 낮은 값이 존재하는 LL (low-low), 낮은 값 주변에 높은 값이 존재하는 LH (low-high), 높은 값 주변에 낮은 값이 존재하는 HL (high-low)로 구분한다(Chae *et al.*, 2014). 그 외 특정지역과 주변지역 간 공간적 자기상관성(연관성)이 없는 지역은 'Not Significant'로 나타난다. 또한, 클러스터맵(Cluster Map)을 통해 공간군집분석 결과에 대한 시각화 해석을 할 수 있다.

2.2.2 Getis-Ord G_i^*

Getis-Ord G_i^* 분석은 일정 범위 내의 중심 지역과 인접한 주변지역들의 개별적 군집경향을 통계적으로 검정하는 방법으로, 특정지역과 주변지역들 간 변수들의 유사성을 측정하는 Local Moran's I와 다르게 집중도를 측정하는 방법이다(Cho, 2013). Getis-Ord G_i^* 통계량은 Eq. (2)와 같이 계산된다(Jang, 2016; Son *et al.*, 2023).

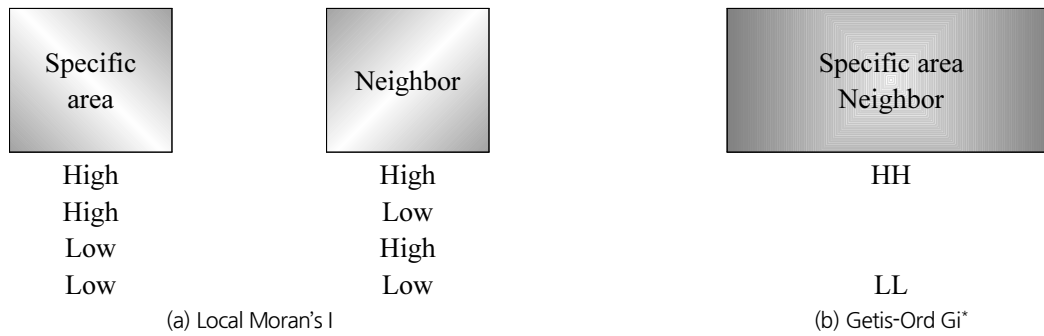


Fig. 3. Comparison of the concepts of Local Moran's I and Getis-Ord Gi*

$$Gi^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij}x_j - \bar{x} \sum_{j=1}^n w_{ij}}{s \times \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n w_{ij}^2 x_j^2 - (\sum_{j=1}^n w_{ij})^2}{n-1}}} \quad (2)$$

여기서 x_j 는 j 지역의 속성 자료이며, \bar{x} 와 s 는 각각 속성 자료의 평균과 표준편차이다. w_{ij} 는 특정지역(i)과 주변지역(j) 간 공간가중치, n 은 분석한 공간단위의 개수이다. 값의 크기가 정(+)의 값이 나올 경우에는 높은 속성 자료끼리 공간적으로 군집되어 있고, 음(-)의 값이 나올 경우에는 낮은 속성 자료끼리 공간적으로 군집되어 있다고 판단한다.

클러스터맵을 통해 공간적 연관성 유형을 두 가지로 판단한다. Getis-Ord Gi^* 는 특정지역과 주변지역을 분리해서 분석하지 않으므로 특정지역과 주변지역은 항상 같은 값을 가지게 된다(Fig. 3). 따라서, 높은 값 주변에 높은 값이 존재하는 High, 낮은 값 주변에 낮은 값이 존재하는 Low 만으로 구분한다. 그 외 2.2.1절에서 언급한 'Not Significant' 및 특정지역에 주변지역이 존재하지 않는 도서지역은 'Neighborless'로 나타난다.

3. 연구 적용 및 결과

3.1 물부족 공간군집 분석 기준 및 방법

3.1.1 물부족 공간군집 분석 기준

공간적 자기상관성을 정량적으로 분석하기 위해서는 우선 분석단위들 사이의 공간적 관계를 정의하고 이를 정량화하는 공간가중치 행렬을 구축해야 한다(Lee et al., 2011). 공간가중치 행렬을 구축하는 방법은 공간 인접성 기준과 거리 기준이 있으며, 공간 인접성 기준을 일반적으로 적용한다(Park, 2018). Fig. 4와 같이, 공간 인접성 기준으로 공간행렬을 구축하는 세 가지 방법으로 Rook, Bishop, Queen 방법이 있다. 본 연구에서

는 우리나라 전체 유역 내 각기 다른 형태로 존재하는 중권역 및 표준유역의 형태를 고려하여 두 구역이 한 변 또는 한 정점을 공유한 경우에 사용하는 Queen 방식을 적용하였다.

산출된 통계량은 유의성 검정을 위해 표준정규분포로 변환하여 사용하고 각 통계량들은 정규분포를 이룬다는 가정하에 각각의 기댓값과 분산을 정의하고 Z-검정을 통해 통계적 유의성을 판정하였다(Park, 2018). 본 연구에서는 GeoDa 프로그램 가이드 북과 같이 0.05 이하의 지역을 통계적으로 유의성 있는 지역으로 설정하였다.

3.1.2 물부족 공간군집 분석 방법

Lee et al. (2023)의 공간군집특성을 고려한 한강 유역 물부족 지역 분석에서는 10년 빈도, 25년 빈도 및 과거 최대 가뭄(약 50년 빈도)에 대한 중권역 기준 물부족 공간군집 대상지역을 선정한 후 중권역 안에서도 공간군집이 발생할 수 있어 표준유역단위로 상세화 분석을 추가로 수행하였다. Lee et al. (2023)에서는 3가지 빈도에 대하여 중권역 기준으로 우선 분석한 후 표준유역 기준으로 공간을 좁혀 추가 해석을 하였다면, 본 연구에서는 우리나라 전체 기준 과거 최대 가뭄(약 50년 빈도)에 대해 표준유역을 기준으로 분석하였다. 이는 연속적인 지리적 현상에 대한 가변적 공간단위 문제를 최소화하면서 물부족 최심 군집지역을 도출하기 위한 것이다.

물부족 공간군집 대상지역을 선정하기 위하여 Geoda를 통해 공간군집분석을 실시한 후 도출된 결과물인 클러스터맵(시각화 자료)으로 분석결과를 우선 해석하되, Getis-Ord Gi^* 를 기준으로 Local Moran's I와 비교한 후 공통지역을 물부족 공간군집 대상지역으로 선정하였다. 이후 대상지역 기준으로 통계량(Local Moran's I, Getis-Ord Gi^* , p-값) 및 모란 산점도로 공간군집 대상지역의 적정성 여부를 확인하여 대상지역 내 핫스팟과 콜드스팟인 군집지역과 HL 및 LH인 이례지역을 최종 도출하였다. 수자원 단위지도에서 표준유역이 최소 공간단위이기 때문에 공간군집 상세화 분석 및 시기별 이동패

턴 분석은 추가로 수행하지 않았다.

Lee et al. (2023)은 중권역 기준 한강 유역 물부족 공간군집 지역을 분석하였는데, 중권역 단위의 경우 군집지역(핫스팟, 콜드스팟) 및 이례지역(HL, LH) 도출을 위해 클러스터맵을 통한 시각화해석 단계에서 Local Moran's I를 기준으로 하나의 특정지역과 접하는 주변지역을 분리하여 군집특성을 분석할 수 있었으나, 표준유역 단위의 경우 최소 공간 단위이다 보니 하나의 특정지역에 대한 다수의 주변지역 간의 관계에서 그 주변지역들이 다시 특정지역의 역할까지 하게 된다. 중권역에서도 이러한 관계는 발생하나 표준유역에서 더욱 심하게 나타나게 된다. 이에 표준유역 단위로 분석할 경우에는 특정지역이 주변지역도 포함하므로 중권역 단위로 분석하는 경우와 달리 Getis-Ord Gi* 기준으로 Local Moran's I와 공통지역을 물부족 공간군집 대상지역으로 선정하였다.

3.2 물부족 공간군집 대상지역 선정

2020년 국가물관리기본계획수립연구 물수급 전망 분석 보고서에서 제시한 2030년 권역별 물수급 전망 기초자료를 이용하여 재산정한 우리나라 전체유역에 대한 표준유역 단위

과거 최대 가뭄(약 50년 빈도) 물부족량으로 공간군집분석(GeoDa)을 수행하였다. Fig. 5는 Local Moran's I 및 Getis-Ord Gi* 방식을 통해 표준유역 단위 공간군집분석 결과 도출된 클러스터맵이다.

Figs. 5(a) and 4(b)는 과거 최대 가뭄(약 50년 빈도)에 대한 물부족 지역으로 한강권역 내 1개 군집(A)과 낙동강권역 내 2개 군집(B, C) 지역이 Getis-Ord Gi*를 통한 핫스팟 지역과 Local Moran's I를 통한 HH 지역으로 나타났고, 한강권역 내 1개 군집(D)과 낙동강권역 내 1개 군집(E) 및 주변지역이 Getis-Ord Gi*와 Local Moran's I를 통한 HL 지역으로 나타났다. 따라서 한강권역 내 군집(A)과 낙동강권역 내 군집(B, C) 지역을 핫스팟 대상지역으로 한강권역 내 군집(D)과 낙동강권역 내 군집(E) 및 주변지역을 HL 대상지역으로 선정하였다.

한강권역 내 군집(D)과 낙동강권역 내 군집(E)의 경우 Getis-Ord Gi*와 Local Moran's I의 공통지역은 HH로 나타났으나, 군집(D, E)의 주변지역은 Getis-Ord Gi*는 High로 Local Moran's I는 LH로 나타났다. 2.2.2절에서 언급한 바와 같이 Getis-Ord Gi*는 특정지역과 주변지역을 분리 분석하지 않으므로 특정지역과 주변지역은 항상 같은 값을 가지게 된다. 따

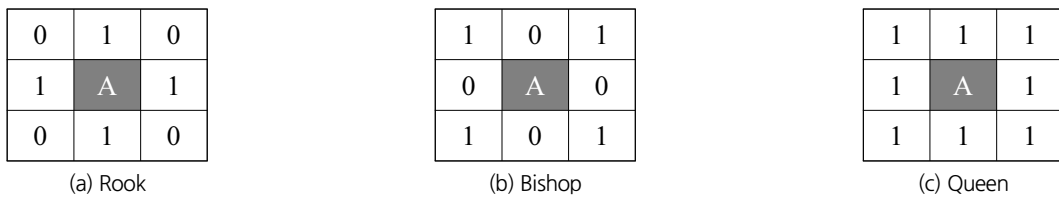


Fig. 4. Conceptual diagram of spatial matrix based on adjacency (Chung, 2012)

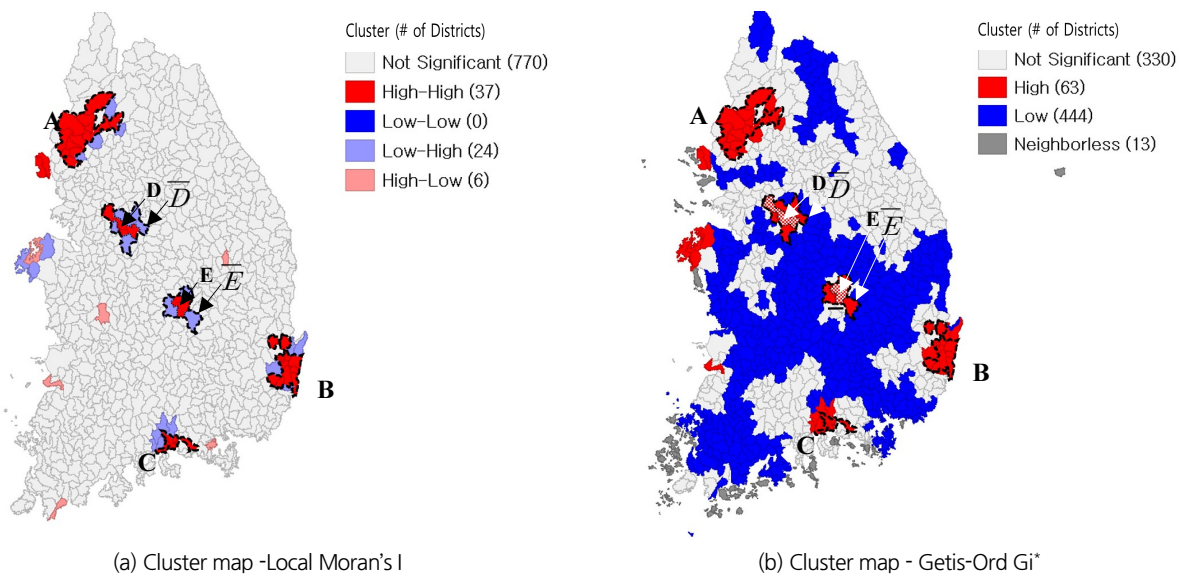


Fig. 5. Evaluation of spatial water shortage in South Korea (50-year return period of drought)

라서 클러스터맵을 통한 시각화 해석에는 한계가 있어, 주변 지역의 경우 Local Moran's I만으로 시각화 해석이 필요하다. Local Moran's I에서 군집(D, E)의 주변지역이 LH 군집특성이 나타났다는 것은 군집(D, E)의 주변지역 기준에서 특정지역이 Low이고 주변지역이 High라는 것이다. 결국 군집(D, E) 주변지역 기준의 주변지역은 군집(D, E)이 되는 것이다. 따라서, 군집(D, E)만의 기준으로는 핫스팟(HH)이지만 군집(D, E)의 주변지역을 포함하여 시각화 해석을 할 경우 HL 군집특성이 나타난 것이다. 표준유역 단위 군집분석 결과의 시각화 해석으로 물부족 공간군집 대상지역을 선정할 경우 Getis-Ord Gi* 기준으로 Local Moran's I와 공통지역을 우선 선정하는데, 다만 공통지역 주변지역이 이레지역(HL, LH)으로 나타난 경우 주변지역은 Local Moran's I 기준으로 추가분석하게 된다. Fig. 5와 같이 나머지 군집(A, B, C)의 경우 군집(D, E) 대비 군집 주변을 둘러싼 범위가 상대적으로 작아 주변지역은 제외하고 물부족 공간군집 대상지역을 선정하였다.

3.3 공간적 물부족 지역 평가

3.3.1 핫스팟 대상지역(군집 A) 공간적 물부족 평가

핫스팟 대상지역인 한강권역 내 군집(A)에 대한 적정성을 확인하기 위하여 Table 1의 Local Moran's I 및 Getis-Ord Gi* 통계량 분석 결과를 살펴보면, 군집(A) 내 표준유역 14곳 모두 정(+)의 지수값으로 핫스팟(HH) 군집특성이 나타났다. 또한, p-값은 군집(A) 내 표준유역 14곳 모두 0.05 이내로 통계적으로 유의미한 결과를 도출하였다. 모란 산점도를 확인한 결과,

군집(A) 내 표준유역 14곳 모두 1분위면에 속하는 HH로 확인되었다.

표준유역 단위로 통계량을 분석한 결과, 군집(A) 내 표준유역 14곳 모두 통계적 유의성이 입증되면서 핫스팟 지역의 특성을 나타내어, 군집[A, 임진강하류(#1023) 및 주변]을 핫스팟 지역으로 최종 선정하였다.

이러한 연구 결과가 도출된 근거를 확인하기 위해 52개년 물부족량 전망치를 기준으로 118개 중권역별 물부족량(합계) 및 발생횟수를 분석한 결과, 한강권역 내 군집[A, 임진강하류(#1023) 및 주변]은 물부족량 및 물부족 횟수 모두 제일 많은 것으로 나타났다.

장래 농업용수 부족이 예상되는 한강권역 내 군집(A, 파주사연천군 등)은 광역상수도 급수구역(교하면 등)을 제외하고 하천수를 수원으로 공급하는 지역이다. 이 지역은 북한의 황강댐 건설 이후 예상장으로 유역변경 물량(8억 m³/년)이 발생하면서 임진강 평균유입량 감소(약 19%)가 농업용수 부족을 발생시키는 주요 원인으로 분석되었다(Lee et al., 2023). 이로 인해 2014년에는 임진강 수계관계면적(5.2 ha) 모내기 곤란 피해를 겪었다(WAMIS, 2023; Joint Ministries, 2020a).

3.3.2 핫스팟 대상지역(군집 B) 공간적 물부족 평가

핫스팟 대상지역인 낙동강권역 내 군집(B) 지역에 대한 적정성을 확인하기 위하여 3.3.1절의 군집(A)과 동일한 방법으로 Table 2의 표준유역 단위로 통계량(Local Moran's I, Getis-Ord Gi*, p-값)을 분석한 결과, 군집(B) 내 표준유역 9곳 모두

Table 1. Statistic of local Moran's I and Getis-Ord Gi* in cluster A

Cluster	Standard Watershed	Index Value		p-value
		Local Moran's I	Getis-Ord Gi*	
Specific area	Munsancheon Junction (#102304)	12.818	0.015	0.006
	Nulnocheon Junction (#102303)	4.896	0.010	0.003
Neighbor	Jeokseong Watermark (#102301)	1.222	0.006	0.037
	Samicheon (#102302)	0.392	0.006	0.017
	Lower Munsancheon (#102306)	5.750	0.013	0.001
	Sacheon (#102308)	1.888	0.010	0.005
	Lower Imjin River (#102309)	6.027	0.010	0.013
	Lower Gongneungcheon (#101905)	1.242	0.005	0.047
	Yeokgokcheon (#102107)	0.034	0.005	0.036
	Gunnam flood control reservoir (#102108)	2.901	0.008	0.024
	Hantan River Junction (#102109)	0.014	0.000	0.453
	Hantan River watermark (#102204)	0.818	0.005	0.034
	Hantan River Dam (#102205)	0.646	0.007	0.031
	Lower Hantan River (#102215)	1.647	0.007	0.026

통계적 유의성이 입증되면서 핫스팟 지역의 특성을 나타내어, 군집[B 대종천(#2403) 및 주변]을 핫스팟 지역으로 최종 선정하였다.

이러한 연구 결과가 도출된 근거를 확인하기 위해 52개년 물부족량 전망치를 기준으로 118개 중권역별 물부족량(합계) 및 발생횟수를 분석한 결과, 낙동강권역 내 군집[B 대종천(#2403) 및 주변]은 물부족량은 네 번째로 많은 것으로 나타났고, 물부족 발생횟수는 두 번째로 많은 것으로 나타났다.

장래 농업용수 부족이 예상되는 낙동강권역 내 군집(B, 포항시·경주시·울산 등)은 2021년에 수립된 국가물관리기본계획 하천유지유량 고시지점(서천교, 삼호교) 기준 물부족량 발생이 예상되는 지점이며, 아울러 대종천은 태백산맥에서 발원하여 동쪽으로 흘러 동해로 유입하기 때문에 유량변동계수가 매우 커서 수자원의 이용·관리 등이 어려운 유역특성이 농업용수 부족을 발생시키는 주요 원인으로 분석되었다. 이로 인해 2000~2001년에는 극심한 가뭄으로 경주시에 농작물 미이양 피해를 겪었으며 2018년에는 울산북구에 운반급수(2회, 10톤)를 시행하였다(WAMIS, 2023).

3.3.3 핫스팟 대상지역(군집 C) 공간적 물부족 평가

핫스팟 대상지역인 낙동강권역 내 군집(C) 지역에 대한 적정성을 확인하기 위하여 3.3.1 절의 군집(A)과 동일한 방법으로

로 Table 3의 표준유역 단위로 통계량(Local Moran's I, Getis-Ord Gi*, p-값)을 분석한 결과, 군집(C) 내 표준유역 3곳 모두 통계적 유의성이 입증되면서 핫스팟 지역의 특성을 나타내어, 군집[C 가화천(#2501) 및 주변]을 핫스팟 지역으로 최종 선정하였다.

이러한 연구 결과가 도출된 근거를 확인하기 위해 52개년 물부족량 전망치를 기준으로 118개 중권역별 물부족량(합계) 및 발생횟수를 분석한 결과, 낙동강권역 내 군집[C 가화천(#2501) 및 주변]은 물부족량은 9번째이고, 물부족횟수는 19번째로 많고 군집(C)에 접하고 있는 남해도(#2502)는 물부족 발생횟수가 3번째로 많은 것으로 나타났다.

장래 농업용수 부족이 예상되는 낙동강권역 내 군집(C, 사천시·고성군 등)은 2021년에 수립된 국가물관리기본계획 하천유지유량 고시지점(화촌리, 용평리, 하정리) 기준 물부족이 예상되는 지점이다.

3.3.4 HL 대상지역(군집 D 및 주변지역) 공간적 물부족 평가

HL 대상지역인 한강권역 내 군집(D) 및 주변지역에 대한 적정성을 확인하기 위하여 3.3.1 절의 군집(A)과 동일한 방법으로 Table 4의 Local Moran's I 및 Getis-Ord Gi* 통계량을 분석한 결과, 군집(D) 내 표준유역 4곳 모두 정(+)의 지수값이 나타났고 주변지역(표준유역 5곳) 모두 음(-)의 지수값이 나

Table 2. Statistic of local Moran's I and Getis-Ord Gi* in cluster B

Cluster	Standard Watershed	Index Value		p-value
		Local Moran's I	Getis-Ord Gi*	
Specific area	Haseocheon (#240305)	7.202	0.024	0.001
	Namcheon (#210103)	14.020	0.020	0.001
Neighbor	Haejongcheon (#240304)	11.660	0.016	0.001
	Suyecheon (#240306)	8.322	0.019	0.001
	Deokdong Dam (#210104)	4.318	0.011	0.006
	Bukchoen (#210105)	3.933	0.015	0.005
	Saryeon Dam (#220103)	5.381	0.013	0.003
	Samho Watermark (#220104)	0.928	0.011	0.001
	Dongcheon (#220105)	3.933	0.015	0.005

Table 3. Statistic of Local Moran's I and Getis-Ord Gi* in Cluster C

Cluster	Standard Watershed	Index Value		p-value
		Local Moran's I	Getis-Ord Gi*	
Specific area	Gonyangcheon (#250102)	10.994	0.012	0.018
	Gwangokcheon (#250101)	21.929	0.020	0.014
Neighbor	Mokgokcheon (#250103)	1.559	0.012	0.007
	Sacheon River (#250106)	1.232	0.006	0.048

타났다. 또한, p-값은 군집(D) 내 표준유역 4곳 및 주변지역(표준유역 5곳) 모두 0.05 이내로 통계적으로 유의미한 결과를 도출하였다. 모란 산점도를 확인한 결과, 군집(D) 내 표준유역 3곳 모두 1분위면에 속하는 HH로, 주변지역(표준유역 5곳) 모두 2분위면에 속하는 LH로 확인되었다.

표준유역 단위로 통계량을 분석한 결과, 군집(D) 내 표준유역 3곳 및 주변지역(표준유역 5곳) 모두 통계적 유의성이 입증되면서 HL 지역의 특성을 나타내어, Fig. 5와 같이 군집(D) 및 주변지역을 군집(\bar{D})로 정의하며 군집[\bar{D} , 남한강하류(#1007) 및 주변]을 HL 지역으로 최종 선정하였다.

이러한 연구 결과가 도출된 근거를 확인하기 위해 52개년 물부족량 전망치를 기준으로 118개 중권역별 물부족량(합계) 및 발생횟수를 분석한 결과, 한강권역 내 1개 군집[\bar{D} , 남한강하류(#1007) 및 주변]은 물부족량은 3번째로 많은 것으로 나타났고, 물부족횟수는 10번째로 많은 것으로 나타났다.

장래 농업용수 부족이 예상되는 한강권역 내 1개 군집(\bar{D} , 양평군·여주시 등)은 대부분 하천수를 수원으로 농업용수를 공급하는 지역으로 하천유지유량 고시지점(원부교, 복하교) 기준 물부족량 발생이 예상되는 지점이다. 이는 주 수원인 충주댐 용수는 남한강을 통해 한강하류로 흘러가지만, 충주댐 인근 충주권광역상수도와 한강하류 팔당댐 인근 수도권광역

상수도를 통해 대규모 생공용수를 공급하므로 해당지역의 하천수 가용수량이 부족한 것으로 판단된다. 이로 인해 1994년에는 여주시에 간이상수도 제한급수를 시행하였으며 2000~2001년에는 양평군·여주시·이천시·음성군에 농작물피해(미이양, 물마른논)를 겪었다(WAMIS, 2023).

3.3.5 HL 대상지역(군집 E 및 주변지역) 공간적 물부족 평가

HL 대상지역인 낙동강권역 내 군집(E) 및 주변지역에 대한 적정성을 확인하기 위하여 3.3.1 절의 군집(A)과 동일한 방법으로 Table 5의 표준유역 단위로 통계량(Local Moran's I, Getis-Ord G_i^* , p-값)을 분석한 결과, 군집(E) 내 표준유역 2곳 및 주변지역(표준유역 3곳) 모두 통계적 유의성이 입증되면서 HL 지역의 특성을 나타내어, Fig. 5와 같이 군집(E) 및 주변지역을 군집(\bar{E})로 정의하며 군집[\bar{E} , 병성천(#2006) 및 주변]을 HL 지역으로 최종 선정하였다.

이러한 연구 결과가 도출된 근거를 확인하기 위해 52개년 물부족량 전망치를 기준으로 118개 중권역별 물부족량(합계) 및 발생횟수를 분석한 결과, 낙동강권역 내 군집[\bar{E} , 병성천(#2006) 및 주변]은 물부족량은 5번째로 많고, 물부족 발생횟수는 11번째로 많은 것으로 나타났다.

장래 농업용수 부족이 예상되는 낙동강권역 내 군집(\bar{E} , 상

Table 4. Statistic of local Moran's I and Getis-Ord G_i^* in cluster \bar{D}

Cluster	Standard Watershed	Index Value		p-value
		Local Moran's I	Getis-Ord G_i^*	
Specific area	Juksancheon (#100702)	6.315	0.013	0.003
	Upper Cheongmicheon (#100701)	10.667	0.012	0.016
	Middle Cheongmicheon (#100703)	9.771	0.011	0.014
	Upper Gyeongancheon (#101601)	0.098	0.004	0.046
Neighbor	Upper Bokhacheon (#100712)	-0.370	0.006	0.019
	Ipobo (#100711)	-0.306	0.006	0.011
	Cheongmi Watermark (#100705)	-0.207	0.004	0.047
	Upper Mihochoen (#301102)	-0.189	0.004	0.046
	Gosam Dam (#101102)	-0.405	0.007	0.008

Table 5. Statistic of local Moran's I and Getis-Ord G_i^* in cluster \bar{E}

Cluster	Standard Watershed	Index Value		p-value
		Local Moran's I	Getis-Ord G_i^*	
Specific area	Upper Byeongseongcheon (#200601)	4.900	0.008	0.034
	Bukchoen (#200602)	5.027	0.009	0.047
Neighbor	Lower Byeongseongcheon (#200603)	-0.304	0.006	0.017
	Gamcheon (#201008)	-0.199	0.004	0.045
	Seokcheon (#300502)	-0.330	0.006	0.015

주시 등)은 지방상수도(다목적댐) 급수구역(사별국면 등)을 제외하고 하천수를 수원으로 공급하는 지역이다.

4. 결론

2021년에 수립된 국가물관리기본계획 물수급 전망 결과, 대부분 농업용수가 부족하였으며 물부족이 가장 심한 지역은 위천(#2008), 한강서해(#1201), 와탄천(#5302), 가화천(#2501), 진도(#5201), 임진강하류(#1023), 삽교천(#3101), 형산강(#2101) 순으로 나타났고 부남방조제(#3202)는 생공용수가 부족하고 위천(#2008)은 농업용수가 부족한 지역으로 나타났다. 우리나라 전체 유역에는 총 118개 중권역이 존재하며 10년 빈도 가뭄시 39개, 25년 빈도 가뭄시 49개, 과거 최대 가뭄시(약 50년 빈도) 44개 중권역에 물부족 발생하는 것으로 나타났다.

본 연구는 국가물관리기본계획 물수급 전망 분석보고서에서 제시한 2030년 물수급 전망 기초자료를 이용하여 Local Moran's I와 Getis-Ord G_i^* 을 통한 물부족의 공간군집분석을 수행하였다. 그 결과, 한강권역 내 1개 군집(A)과 낙동강권역 내 2개 군집(B, C) 지역이 물부족 핫스팟 지역으로 나타났다. 또한, 한강권역 내 1개 군집(\bar{D})과 낙동강권역 내 1개 군집(\bar{E}) 지역이 물부족 HL 지역으로 나타났다. 물부족 공간군집분석 결과 물부족 콜드스팟 및 LH 지역은 나타나지 않았다.

가뭄은 수자원의 계절별 평균치에 대한 부족을 나타내는 반면, 물 부족은 수요 대비 공급 부족을 나타내기 때문에, 가뭄 발생지역과 물부족 피해지역이 일치하는 것은 아니다. 또한, MODSIM의 물수급 분석 방법은 부족분 공급방식으로 용수 수요량에 대해 하천수로 우선 공급하고 이후 물 공급시설(다목적 댐 등) 운영을 통한 공급을 수행한다. 물부족 공간군집분석 결과, 하천수만을 수원으로 공급하는 지역은 대규모 댐을 수원으로 광역상수도가 공급되는 지역 대비 물부족 취약지역으로 분석되었다. 국가물관리기본계획에서는 공간적 자기상관성은 고려하지 않고 미래 물부족을 전망하였으며, 표준유역 단위로 다소 많은 물부족 지역들이 개별적으로 나타났다. 그러나, 본 연구에서는 공간군집특성에 따라 군집형태로 주요 몇몇 위치(A~E)에서 물부족 군집지역(HH, LL) 및 이례지역(HL, LH)이 나타났기 때문에 국가계획과는 차별성이 있다.

아울러, 표준유역 단위 공간군집 분석시 물부족 공간군집 지역 전체가 통계량(Local Moran's I, Getis-Ord G_i^* , p-값) 기준을 만족하여 통계적으로 유의미한 결과가 도출되었다. 이는 중권역 대비 표준유역 단위로 공간군집분석을 할 경우가

변적 공간단위 문제를 일정 부분 해결하면서 공간군집분석의 정확성이 상대적으로 높아진 것을 알 수 있다. Lee et al. (2023)은 중권역 기준 임진강하류가 물부족 핫스팟 지역으로 양양남대천은 물부족 HL 지역으로 분석되었는데, 본 연구에서는 임진강하류가 물부족 핫스팟 지역으로 나타났으나 군집공간이 다소 넓게 나타났으며 양양남대천은 군집지역으로 나타나지 않았다.

본 연구의 공간군집분석 결과는 단순 물부족지역 범위 확대를 의미 하는 것뿐 아니라, 군집지역 내 표준유역 간 영향력 작용으로 물부족 발생 확률 및 강도가 증가되는 것을 보여주었다. 다만, 물부족 공간군집분석 관련 선행연구 부족으로 이러한 해석에 대한 검증에는 한계가 있으며, 향후 심층적인 연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 행정안전부 재난안전공동연구기술개발사업(2022-MOIS63-001)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Anselin, L. (2005). *Exploring spatial data with GeodaTM: A workbook, spatial analysis laboratory*. Department of Geography, University of Illinois, Urbana-Campaign, Champaign, IL, U.S.
- Chae, J., Park, S., and Byun, B. (2014). "An analysis of spatial concentrated areas of single person households and concentrating factors in Seoul." *Seoul Studies*, Vol. 15, No. 2, pp. 1-16 (in Korean).
- Cho, D. (2013). "Trends and methodological issues in spatial cluster analysis for count data." *Journal of the Korean Geographical Society*, Vol. 48, No. 5, pp. 768-785 (in Korean).
- Chung, K.S. (2012) "Busan housing market dynamics analysis with ESDA using MATLAB application." *Journal of Korea Contents Association*, Vol. 12, pp. 461-471 (in Korean).
- Farmer, D., Sivapalan, M., and Jothityangkoon, C. (2003). "Climate, soil and vegetation controls upon the variability of water balance in temperate and semiarid landscapes: Downward approach to water balance analysis." *Water Resources Research*,

- Vol. 39, No. 2, pp. 1-21.
- Jang, M. (2016). "Analysis on the characteristics of urban decline using GIS and spatial statistical method: The case of Gwangju Metropolitan City." *Journal of The Korean Association of Regional Geographers*, Vol. 22, No. 2, pp. 424-438 (in Korean).
- Joint Ministries (2020a). *National drought information statistics for 2018*. Publication No. 11-1741000-000244-10, p. 332 (in Korean).
- Joint Ministries (2020b). *The 1st master plans for national water management establishment research*. Publication No. 11-1480000-001831-01, pp. 624-653 (in Korean).
- Joint Ministries (2021). *The 1st master plans for national water management*. Publication No. 11-1480000-001756-14, Vol. 22, No. 2, pp. 49-53 (in Korean).
- Joint Ministries (2023). *Abnormal climate report for 2022*. Publication No. 11-1360000-001109-10, pp. 26-31, 70-74 (in Korean).
- Kang, H.J. (2008). "Hot spot analysis: Basis of spatial analysis, utilization and understanding of local Moran's I and nearest neighbor analysis." *Planning and Policy*, Vol. 324, pp. 116-121 (in Korean).
- Kim, B.S., Kwon, H.H., and Kim, H.S. (2011). "Impact assessment of climate change on drought risk." *Journal of Wetlands Research*, Vol. 13, No. 1, pp. 1-11 (in Korean).
- Kim, G.G. (2003). "Exploration of spatial autocorrelation and utilization of spatial regression analysis." *Journal of Korean Association for Policy Analysis and Evaluation*, Vol. 13, pp. 273-294 (in Korean).
- Kim, J.H., Choi, G.W., and Park, S.W. (2010). "A root cause analysis for drought in Taebak City, Kang won-do in 2008." *Journal of Korean Society for Water and Wastewater*, Vol. 24, No. 3, pp. 351-359 (in Korean).
- Lee, D.J., Son, H.J., Yoo, J.Y., and Kim, T.W. (2023). "Spatial analysis of water shortage areas considering spatial clustering characteristics in the Han River Basin." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 56, No. 5, pp. 325-336 (in Korean).
- Lee, S.H., Chang, H., and Rho, J.A. (2011). "The changes in the quality of life measure of the Seoul Metropolitan Area." *Journal of Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography*, Vol. 29, pp. 29-37 (in Korean).
- Liu, Y., Liu, Y., Wang, W., and Zhou, H. (2021). "Propagation of soil moisture droughts in a hotspot region: Spatial pattern and temporal trajectory." *Journal of Hydrology*, Vol. 593, 125906.
- Ministry of Environment (ME) (2022). *2021 statistics of water-works*. Publication No. 11-1480000-001181-10, pp. 1-32 (in Korean).
- Park, H.B. (2018). *A study on the overcrowding distribution and location influence factors of elderly care facilities in Seoul Metropolitan Area*. Ph. D. Dissertation. Gachon University, pp. 38-45.
- Son, H.J., Byun, S.H., Park, J.W., and Kim, T.W. (2023). "Analysis of drought hotspot areas using local indicators of spatial association in the Nakdong River basin." *Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, Vol. 43, No. 2, pp. 175-185 (in Korean).
- Water Resources Management Information System (WAMIS) (2023). Korea, accessed 8 September 2023, <<http://www.wamis.go.kr>>.