

시간적 특성을 고려한 영향 인자와 가뭄지수 간 상관관계 분석

김진서* · 김창주** · 박순찬** · 한희찬***†

*조선대학교 토목공학과 학부과정

**조선대학교 토목공학과 석사과정

***교신저자, 정회원, 조선대학교 토목공학과 조교수

Correlation Analysis Between Drought Index and Influencing Factors Considering Temporal Characteristics

Kim, Jinseo* · Kim, Changju** · Park, Soonchan** · Han, Heechan***†

*Bachelor' Course, Department of Civil Engineering, Chosun University

**Master' Course, Department of Civil Engineering, Chosun University

***Member, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Chosun University

(Received : 13 July 2025, Revised : 13 July 2025, Accepted : 29 July 2025)

요약

기후변화로 인해 전 지구적으로 자연 재난의 문제가 대두되고 있으며, 최근 국내는 가뭄 피해가 증가함에 따라 가뭄 예측을 위한 영향 인자 분석 연구의 필요성이 커지고 있다. 따라서 본 연구에서는 NDVI, 지하 수위 등의 수문학적 인자들과 가뭄지수 간의 관계를 시간적 특성을 고려하여 여러 상관분석 방법을 활용해 분석하였으며, 이를 통해 특정 기간 가뭄지수와 높은 상관성을 보이는 주요 인자들을 확인하였다. 시간적 특성을 고려하지 않았을 경우에는 가뭄지수와 지하 수위만 높은 상관성을 보였으나, 시간적 특성을 고려하였을 때는 다른 수문학적 인자와의 상관성이 증가하는 모습을 보였으며, 특히 동해시의 NDVI가 높은 상관성을 보였다. 또한 도출된 상관계수를 기반으로 구축한 가뭄 상관성 지도에서 동해시 해안 지역은 NDVI와의 상관성이 높게 나타났으며, 강릉시와 삼척시의 지하 수위는 해안 지역에서 낮은 상관성을 보였다. 이는 지역별 지형, 기후, 지하수 시설 등의 차이에 따른 것으로 확인된다. 본 연구를 통해 가뭄지수와 영향 인자 선정 시 시간적 특성을 고려하는 방법이 중요함을 의미하며, 지하 수위와 NDVI를 우선적으로 반영한다면 가뭄을 효과적으로 파악할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 상관 분석 기법, 상관성 지도, 가뭄지수, NDVI, 시간적 특성

Abstract

Due to climate change, natural disasters are emerging globally, and in Korea, increasing drought damage has raised the need for research on influencing factors for drought prediction. This study analyzed the relationships between hydrological factors such as NDVI and groundwater level and the drought index using various correlation analysis methods, considering temporal characteristics. As a result, key factors with high correlation to the drought index during specific periods were identified. When temporal characteristics were not considered, only the drought index and groundwater level showed high correlation. However, when considered, correlations with other hydrological factors increased, with NDVI in Donghae City showing particularly high correlation. Additionally, in the drought correlation map based on the derived coefficients, Donghae's coastal area showed high correlation with NDVI, while the coastal areas of Gangneung and Samcheok showed low correlation with groundwater levels. These regional differences appear to stem from variations in topography, climate, and groundwater use. This study emphasizes the importance of considering temporal characteristics when selecting drought indices and influencing factors. It also suggests that prioritizing groundwater level and NDVI can improve the effectiveness of drought monitoring.

Key words : Correlation analysis, Correlation map, Drought index, NDVI, Temporal Characteristics

*To whom correspondence should be addressed.

Chosun University, Korea

E-mail : heechan@chosun.ac.kr

• Jin Seo Kim Bachelor' Course, Department of Civil Engineering, Chosun University(kwlstj12@chosun.kr)

• Chang Ju Kim Master' Course, Department of Civil Engineering, Chosun University(cjk4257@chosun.ac.kr)

• Soon Chan Park Master' Course, Department of Civil Engineering, Chosun University(soonchan4523@naver.com)

• Hee Chan Han Member, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Chosun University(heechan@chosun.ac.kr)

 This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

IPCC 제6차 평가보고서 및 제3차 국가 기후변화 적응 대책에 따르면(IPCC, 2023), 전 지구 평균기온은 산업화 이전 대비 1.1도 상승하였으며, 이와 같은 현상은 지속될 것으로 전망된다(IPCC, 2023). 대한민국의 경우, 2024년 기후과학 합동 보고서에 따르면 2020년~2024년까지의 전 세계 평균 온도는 1850~1900년 평균보다 $1.31 \pm 1.12^{\circ}\text{C}$ 높을 것으로 추정되며, 향후 5년(2024~2028)의 평균 온도는 산업화 이전 수준(1850~1900)보다 $1.1^{\circ}\text{C} \sim 1.9^{\circ}\text{C}$ 더 높을 것으로 예측된다(WMO, 2024).

Wilhite and Glantz (1985)는 가뭄을 기상학적 가뭄, 농업적 가뭄, 수문학적 가뭄, 사회경제적 가뭄의 네 가지 유형으로 구분하여 정의하였다. 기상학적 가뭄은 특정 기간 강수량이 평균보다 낮은 상태, 농업적 가뭄은 작물 성장에 필요한 수분이 부족한 상태, 수문학적 가뭄은 하천 유량이나 지하수량의 부족한 상태를 나타내고 사회경제적 가뭄은 물의 수요 대비 공급이 부족하여 경제적 손실이 발생하는 상태를 의미한다, 이러한 가뭄은 개별적으로 발생하는 것이 아니라, 기온, 강수량, 토양 수분, 하천 유량 등 다양한 기후 및 수문 인자들과 상호 밀접한 연관성을 갖는다(Ryu et al., 2002).

Wilhite and Glantz (1985)는 가뭄은 점진적으로 발생하고 시작 및 종료 시기를 예측하는 데 어려움이 있다고 정의한다. 또한 가뭄의 심각성은 그 기간, 강도, 공간적 범위뿐 아니라, 인간 활동과 식생이 물 자원에 얼마나 의존하는지에 따라 달라지며, 단순히 기상현상으로 국한되지 않으며, 사회적 맥락 속에서도 큰 의미를 갖는 복합적인 현상이라 말하였다. 가뭄을 효과적으로 대응하기 위해서는 가뭄 현상을 모니터링하고, 그 심각도를 정량적으로 표현할 수 있는 지표가 필요하다. 이를 위해 다양한 가뭄지수가 개발되어 현재 활용되고 있다(Choi, 1995).

가뭄지수는 가뭄의 발생과 강도를 진단하고 비교하는 데 사용된다. 기후학적으로 필요한 수분량을 기준으로 실제 강수량과 비교하여 가뭄을 판단하는 Palmer Drought Severity Index (PDSI) (Palmer, 1965), 일정 기간 누적 강수량이 해당 지역의 통계적 평균에서 얼마나 벗어났는지를 표준 정규분포로 변환하여 가뭄을 판단하는 Standardized Precipitation Index (SPI) (McKee, 1993), 눈, 저수지, 하천 유량 등을 포함하여 수문학적 가뭄을 판단하는 Surface Water Supply Index (SWSI) (Palmer, 1965), SPI의 구조에 기온 기반의 증발산 개념을 추가해, 기후변화의 영향을 반영하여 기상 및 농업 가뭄을 판단하는 Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) (Vicente-Serrano et al., 2010) 등이 있다.

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)는 위성 센서가 측정한 지표면의 반사율 차이를 수학적으로 조합하여, 식생의 존재 여부, 양, 활성도 등을 정량화한 지표이다. 이러한 계산으로 얻은 NDVI는 식생 활동의 강도를 나타내는 경험적 지수와 전 지구 식생의 시공간적 변화를 모니터링하기 위한 지표로 활용되고 있다(Huete et al., 1999). 또한 가뭄을 모니터링하고 예측하는 방법으로 가뭄지수와 NDVI를 활용

하고 있으며, 가뭄뿐만 아니라 농업, 산림, 환경 관리, 식생변화 탐지 등 다양한 분야에서 활용되고 있다(Yeom et al., 2008, Hong et al., 2015). Park and Kim (2009)은 NDVI의 변화를 통해 가뭄을 예측하기 위해서 NDVI와 가뭄지수 간의 상관성을 분석하였다. 그 결과 가뭄이 가장 빈번하게 일어나는 4월의 NDVI와 SPI6이 가장 높은 상관성을 나타냈다.

Kim et al., (2017)는 남한 전체를 연구 대상 지역으로 선정하고 가뭄지수와 NDVI 간의 상관분석을 진행하였다. 연구 결과 두 지수의 상관관계가 나타난 지점은 전체 지점의 약 12% 미만으로 대부분 산악 지역의 식생이 가뭄과의 상관성을 보이는 걸로 나타났다. 식생은 강수량뿐만 아니라 다양한 인자들(지형 고도, 토지피복 등)의 영향을 받아 활성도가 변화함으로 추후 연구에는 다양한 인자들 간의 상관성을 살펴볼 필요가 있다고 서술하였다. Gu et al., (2022)의 연구에 따르면 가뭄의 누적 및 지연 효과를 고려하여 NDVI와 상관성을 분석하였을 때 가뭄과 NDVI의 상관성이 유의미한 증가를 했다고 언급하였다. Kim et al., (2019)은 기상청에서 제공하는 9개의 기상인자(강수량, 평균기온, 평균풍속, 상대습도, 평균기압, 일조율 등), 수문학적 인자(저수위, 댐방류량), 사회·경제적 인자(생활용수사용량)와 SPI 지수 간의 주성분분석(Principal Component Analysis, PCA)과 선형판별분석(Linear Discriminant Analysis, LDA)을 통해 상관관계를 정량화하여, 보령댐 유역 극한 가뭄의 영향 인자를 도출하는 연구를 진행하였다. 연구를 통해 보령댐의 수문학적 인자인 저수위가 가장 큰 영향 인자인 것을 확인하였다. 하지만 기존 연구들에는 몇 가지 한계점이 존재한다. 대부분의 선행연구는 NDVI와 가뭄지수 간의 단순 상관분석에 초점을 두고 있으며, 가뭄의 점진적 특성과 시간적 특성을 반영하지 못하는 경우가 많다. 그리고 NDVI 외 기상 및 수문학적 인자들에 대해서는 지역별 특성을 반영한 비교 분석이 미흡하다.

본 연구에서는 2000년대 이후 빈번하게 발생하는 가뭄을 예측하기 위해서 가뭄지수와 NDVI, 기상 인자 및 수문학적 인자들(지하 수위, 온도, 습도 등) 간 시간적 특성의 고려 여부에 따른 상관성을 Pearson, Spearman, Kendall's Tau, Mutual Information 상관분석을 사용해 연구를 진행하고, 이를 통해 연구대상지별 입력 인자 (NDVI, 기상 및 수문학적 인자)와 가뭄지수 간 특정 기간에 가장 높은 상관관계를 나타내는 입력 인자를 도출한다. 이후 도출된 상관계수를 통해 연구 대상지 내 가뭄 상관성 지도를 구축하는 것을 목표로 한다.

2. 방법론

2.1 통계 분석

기후 인자와 NDVI, 지하 수위 등 다양한 인자들이 가뭄지수에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위해서 Python의 SciPy 라이브러리를 사용하여 통계분석을 진행하였다. 다양한 인자들이 가뭄지수에 미치는 영향을 알아보기 위해 Pearson, Spearman, Kendall's Tau, Mutual Information 등 상관분석 방법을 사용하여 분석을 진행하였다.

2.1.1 Pearson 상관분석

Pearson 상관분석은 두 변수의 선형 관계를 측정하는 통계 분석 방법이다. 상관계수의 값은 -1에서 +1 사이로 나타내고 상관계수가 양수인 경우는 한 변수의 값이 증가하거나 감소할 때 다른 변수도 함께 증가하거나 감소하는 양의 선형 상관 관계를 가진다. 반대로 상관계수가 음수인 경우는 한 변수의 값이 증가할 때 다른 변수의 값은 감소하는 음의 선형 상관 관계를 가진다. 상관계수가 0에 가까울수록 두 변수 간의 상관 관계가 없음을 의미하고 -1과 +1에 가까울수록 두 변수 간의 상관 관계가 높음을 의미한다. Pearson 상관분석을 하기 위해서는 몇 가지 가정이 필요하며, 가정은 다음과 같다. 두 변수는 연속형 변수이어야 하며 정규분포를 따라야 한다. 그리고 두 변수는 선형 관계를 가진다는 가정이 존재한다(Sedgwick, 2012).

$$r = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

식 (1)에서 r 은 Pearson 상관계수이며, X_i 와 Y_i 는 각각 두 변수의 관측값, \bar{X} 와 \bar{Y} 는 각각 두 변수의 평균값을 의미한다(Sedgwick, 2012).

2.1.2 Spearman 상관분석

Spearman 상관분석은 두 변수의 단조 관계의 강도를 측정하는 통계 분석 방법이다. Spearman 상관분석은 순위를 기준으로 두 변수 간의 관계를 분석하며 한 변수의 값이 증가하거나 감소할 때 다른 변수도 일관되게 증가하거나 감소하는지를 확인하는 분석 방법이다. Spearman 상관계수는 두 변수의 각각의 값을 순위로 변환한 다음, 이 순위들 간의 Pearson 상관계수를 계산하여 얻는 방식이다. Spearman 상관계수는 -1과 +1 사이에 존재하며 +1에 가까울수록 양의 단조 관계를, -1에 가까울수록 음의 단조 관계를 나타낸다. Spearman 상관분석을 하기 위해서 필요한 가정은 다음과 같다. 두 변수는 순서형 변수여야 한다. Spearman 상관계수를 구할 때는 값을 순위로 바꿔서 계산하기 때문에 두 변수의 관계가 선형적일 필요는 없다. 그리고 두 변수는 단조 관계를 가져야 한다는 가정이 필요하다(Spearman, 1904).

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (2)$$

식 (2)에서 ρ 는 Spearman 상관계수, n 은 데이터 쌍의 개수, d_i^2 는 순위 차이를 의미한다 (Spearman, 1904).

2.1.3 Kendall's Tau 상관분석

Kendall's Tau 상관분석은 Spearman 상관분석과 비슷한 형식으로 각 변수의 관측값에 대해 순위를 할당한 후, 순위를 기준으로 두 변수 간의 관계를 측정하는 통계 방법이다. 어떤 변수 X와 Y가 있을 때, 이들 간의 순서를 기반으로 일치 쌍과 불일치 쌍을 만든다. 예를 들어, 두 관측값의 순서가 각각의

변수에서 동일한 방향으로 증가하거나 감소하면 이를 일치 쌍이라 하고, 서로 반대 방향일 경우 불일치 쌍이라 정의한다. Kendall's Tau 상관계수는 -1과 1 사이의 값을 가진다. 양수 값은 양의 상관관계를 의미하고 음수 값은 음의 상관관계를 나타낸다. 이 값들이 0에 가까울수록 두 변수 간의 상관관계가 낮음을 의미한다. Kendall's Tau 상관분석은 Spearman 상관분석과 방식은 비슷하되, Spearman 상관분석은 순위 간 거리 차이를 이용해서 계산하지만, Kendall's Tau 상관분석은 쌍 비교 결과를 이용해서 계산한다는 점에서 차이점이 존재한다. Kendall's Tau 상관분석을 하기 위해서 필요한 가정은 다음과 같다. 두 변수는 순서형 변수여야 한다. 이는 변수 간 단조 관계를 평가하는 데 적합하며, 선형성 가정을 전제로 하는 Pearson 상관계수와는 구별된다. 또한 Kendall's Tau 상관분석은 두 변수의 단조 관계를 가정한다(Kendall, 1938).

$$\tau = \frac{P - Q}{\sqrt{(P+Q+X_0)(P+Q+Y_0)}} \quad (3)$$

식 (3)에서 τ 는 Kendall's Tau 상관계수, P 는 일치 쌍의 개수, Q 는 불일치 쌍의 개수를 의미하며, X_0 는 X에만 동점이 있는 쌍의 수, Y_0 는 Y에만 동점이 있는 쌍의 수를 의미한다 (Kendall, 1938).

2.1.4 Mutual Information 상관분석

Mutual Information 상관분석은 정보이론에 기반한 통계량으로, 두 변수 간의 공동정보량을 수치화하여, 한 변수의 값을 알았을 때 다른 변수에 대한 예측 가능성 또는 정보 획득 정도를 나타낸다. Mutual Information (MI) 값은 일반적으로 0 이상이며, 값이 0에 가까울수록 두 변수 간의 정보 공유가 거의 없고, 값이 클수록 강한 의존 관계를 의미한다. Mutual Information 상관분석의 경우 두 변수 간의 비선형적 상호 의존성까지 포착할 수 있는 정보이론 기반의 지표로, Pearson 상관분석이나, Spearman 상관분석 등 여러 상관분석으로 설명되지 않는 복잡하고 비선형적인 관계 구조를 탐지할 수 있다(Kraskov, 2004).

$$I(x,y) = H(y) - H(\eta) \quad (4)$$

식 (4)에서 $I(x,y)$ 는 x 가 y 에 대해 제공하는 정보량을 의미하고, $H(y)$ 는 y 의 전체 불확실성, 즉 y 가 얼마나 예측이 어려운지, $H(\eta)$ 은 조건부 엔트로피를 의미한다(Kraskov, 2004).

2.2 연구 대상 지역 및 데이터

2.2.1 연구 대상 지역

본 연구에서는 대한민국 강원도 내 강릉시, 삼척시, 동해시 지역을 대상으로 SPI6 가뭄지수를 활용하여 위성 데이터 기반 NDVI 자료 및 지상 기상 관측소 자료와 Pearson, Spearman, Kendall's Tau, Mutual Information 상관분석을 통해 가뭄 발생에 영향을 미치는 주요 요인을 분석하고자 하였다.

연구 대상지는 총 3개의 지역으로, 강릉시 $1,040\text{km}^2$, 삼척시 $1,185\text{km}^2$, 동해시 180km^2 로 총 $2,405\text{km}^2$ 의 면적이다. 연구 지역 내에는 기상 관측소 2개소가 설치되어 있고, 각 지역에 1개의 지하 수위 관측소가 운영되고 있다. 연구 대상 지역의 기상 특성은 강릉시의 연평균 강수량은 약 $1,444\text{mm}$, 동해시 약 $1,264\text{mm}$, 삼척시 약 $1,258\text{mm}$ 로, 세 지역 모두 7월에서 9월 사이에 강수가 집중되는 경향을 보인다(Kim et al., 2022). 고도의 경우 동해안에 접한 해발 0m의 저지대부터 내륙 산악 지역의 해발 1,400m까지 다양하게 분포하고 있다.

2.2.2 가뭄 및 기상 데이터

본 연구에서는 기상청에서 제공하는 종관 기상 관측(Automated Synoptic Observing System, ASOS)의 기상 자료를 공공 데이터포털(<https://www.data.go.kr/index.do>)을 통해 수집하여 분석에 활용하였다. 연구에 사용된 자료는 2004년부터 2023년까지의 일 단위 기상 관측자료를 활용하였으며, 연구 기간에 자료를 제공하는 기상 관측소 75개소 자료를 대상으로 하였다. 가뭄지수 데이터는 SPI의 6개월(SPI6) 시계열을 기반으로 구축하였다. 주요 가뭄지수는 2004년부터 일일 SPI 값을 지속적으로 제공한 기상 관측소 60개소에서 수집하였으며, 추가로 2018년부터 SPI 자료를 제공하는 6개소를 활용하여 가뭄 데이터 세트를 구성하였다.

지하 수위 데이터는 국가지하수정보센터(<https://www.gims.go.kr>)에서 제공하는 지하 수위 관측 자료를 활용하였다. 분석에 사용된 지하 수위 자료는 2004년부터 2023까지의 일

단위 자료이며, 연구 기간의 자료를 제공하는 강릉 홍제, 동해 귀운, 삼척 신기 총 3개소의 국가 측정망의 자료를 대상으로 수행하였다(Fig 1). 연구에 활용된 NDVI 데이터는 Google Earth Engine (<https://earthengine.google.com>)을 통해 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)의 자료를 활용하였다. MODIS에서 제공하는 식생 지표인 NDVI를 250m , 500m , 1km 의 공간 해상도로 16일 간격으로 제공하고 있으며, 본 연구에서는 1km 해상도의 NDVI 자료를 활용하여 연구에 적용하였다. NDVI는 아래 식 (5)을 통해 계산된다. 여기서 NRED는 극적외선 밴드의 분광반사도를 나타내고, RED는 적외선 밴드의 분광반사도를 의미한다.

$$NDVI = \frac{NRED - RED}{NRED + RED} \quad (5)$$

2.2.3 공간 데이터 보간

연구 대상 지역은 1km 공간 해상도의 격자망으로 구성하였으며, 각 격자 셀에 대해 공간적으로 연속적인 기상 데이터를 생성하기 위해 역 거리 가중 보간법(Inverse Distance Weighting, IDW)을 적용하였다. IDW 보간은 특정 위치의 값을 주변 관측소 자료를 기반으로 거리의 역수에 비례하여 가중 평균하는 방식으로, 관측소로부터의 거리가 가까울수록 더 큰 영향을 부여하는 특징을 갖는다. 이를 통해 점 자료 형태의 기상 관측값을 전역적인 격자 형태의 공간 데이터로 변환함으로써, 기상 요소의 공간적 분포 특성을 반영한 입력 데이터를 구축하였다(Kim et al., 2025).

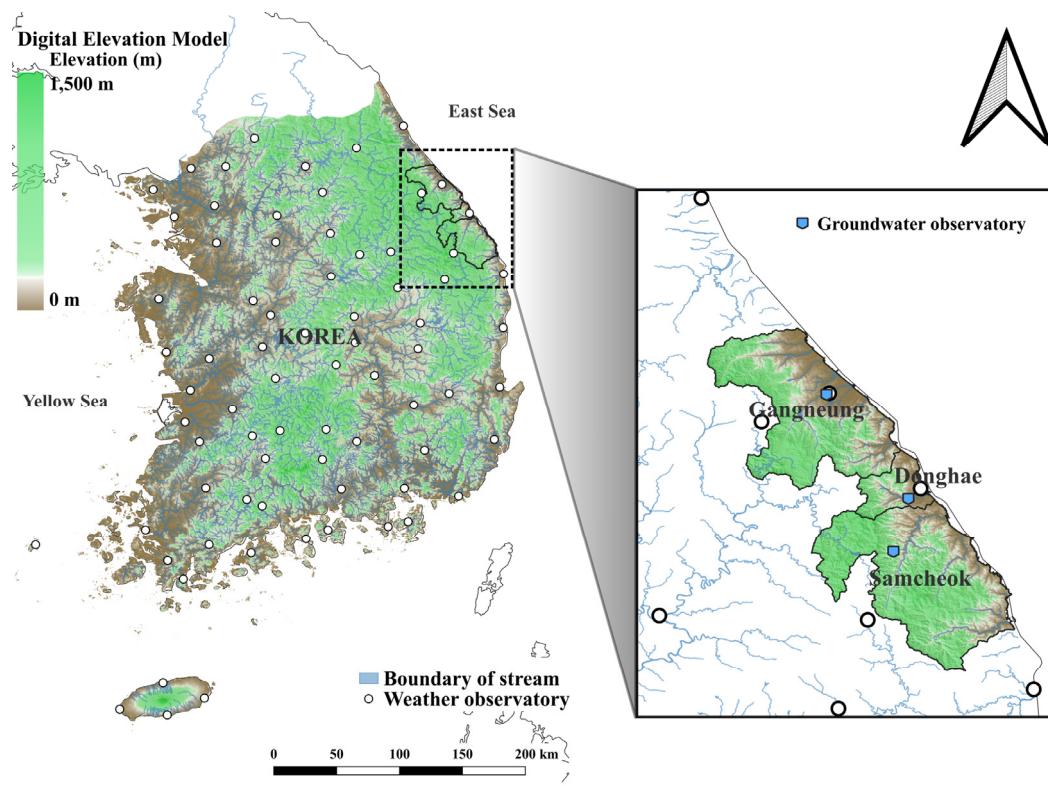


Fig 1. Study Area of This Study

3. 연구 결과

3.1 가뭄지수와 입력 인자들 간의 상관분석

본 연구에서는 가뭄지수와 입력 인자(NDVI, 기상 및 수문학적 인자)들 간 특정 기간에 가장 높은 상관성을 가진 입력 인자를 선택하기 위해 2004~2023년까지의 입력 데이터를 1km의 해상도의 격자망으로 구성하여 각 지역에 대해서 격자별로 상관분석을 한 후, 높은 상관성을 가진 입력 인자들의 상관계수를 산정하고 공간분포화 하여 상관계수 지도를 작성하였다.

분석 방법으로는 총 4가지의 상관 분석 기법을 사용하였으며, 각 지역의 특정 기간에 따른 가장 높은 상관성을 나타낸 입력 인자는 지하 수위로 나타났으며, 모든 방법과 특정 기간에 가뭄과 가장 높은 상관성을 나타내었다. 5월과 7월에 높은 상관성이 보였고, Spearman 상관분석 결과 강릉시의 일부 지점에서는 7월에 0.766으로 가장 높은 상관계수를 확인하였다.

동해시의 경우 Pearson 상관분석 결과 5월에 0.644의 상관계수를 기록한 지점이 가장 상관성이 높은 지점으로 확인되었고, 삼척시 또한 Spearman 상관분석 결과 5월에 0.590로 가장 높은 상관계수를 나타내는 지점을 확인하였다(Table 1). 이는 해당 시기의 가뭄지수와 지하 수위 간의 양의 상관관계가 비교적 뚜렷하게 나타났음을 의미하며, 특히 5월에는 가뭄이 지하 수위에 미치는 영향이 다른 시기에 비해 민감하게 반영되었을 가능성을 시사한다. 다른 입력 인자들의 경우에는

격자별 상관성을 확인할 수 없었다(Fig 2). 이는 가뭄지수는 과거의 강수량을 통해 산정을 하지만 입력 인자들의 경우 특정 기간을 나타내는 값이기 때문에 확인된다.

3.2 시간적 특성을 고려한 가뭄지수와 입력 인자들 간의 상관분석

본 연구에서는 입력 변수 간 상관성을 분석하기 위해 시간적 특성을 고려하여 분석을 수행하였다. 그 결과 모든 입력 인자들과 가뭄과의 상관성이 증가한 모습을 확인할 수 있었고, 5월의 입력 인자들과 가뭄의 상관성이 다른 기간에 비해 높은 상관성을 보였다(Fig 3-5). 입력 인자 중에서 시간적 특성을 고려하지 않았을 때는 NDVI와의 상관성을 확인할 수 없었지만, 시간적 특성을 고려했을 때는 NDVI와 유의미한 상관성을 확인할 수 있는 지점들이 존재했다. 가뭄과 NDVI 간의 상관성은 Pearson, Spearman, Kendall's Tau 분석 방법을 사용하여 분석한 결과, 모든 분석 방법에서 7월에 가장 높은 상관성을 보였다. 동해시의 일부 지점에서는 분석 방법별로 각각 -0.756, -0.697, -0.530의 상관계수를 확인하였다. 이는 가뭄과 NDVI 간의 관계가 특정 시기인 7월에 높음을 보여주는 부분이다 (Table 2).

지역별로 상관성이 가장 높게 나타난 주요 인자는 다음과 같다. 동해시에서는 일부 지점에서 7월의 가뭄지수와 NDVI가 가장 높은 상관성을 보였고, 강릉시에서는 7월의 가뭄지수와 지하 수위의 상관계수가 0.777로 높게 나타난 지점을 확인할

Table 1. Comparison of Correlation Coefficients Between SPI6 and Groundwater Level by Region in May and July (2004–2023)

Regions and Month	Pearson Correlation						Spearman Correlation						Kendall's Tau Correlation		
	Groundwater Level & SPI6						Groundwater Level & SPI6						Groundwater Level & SPI6		
Donghae	5월						0.644						0.607		0.428
	7월						0.450						0.548		0.385
Gangneung	5월						0.599						0.684		0.490
	7월						0.728						0.766		0.572
Samchoeck	5월						0.590						0.590		0.421
	7월						0.417						0.417		0.307

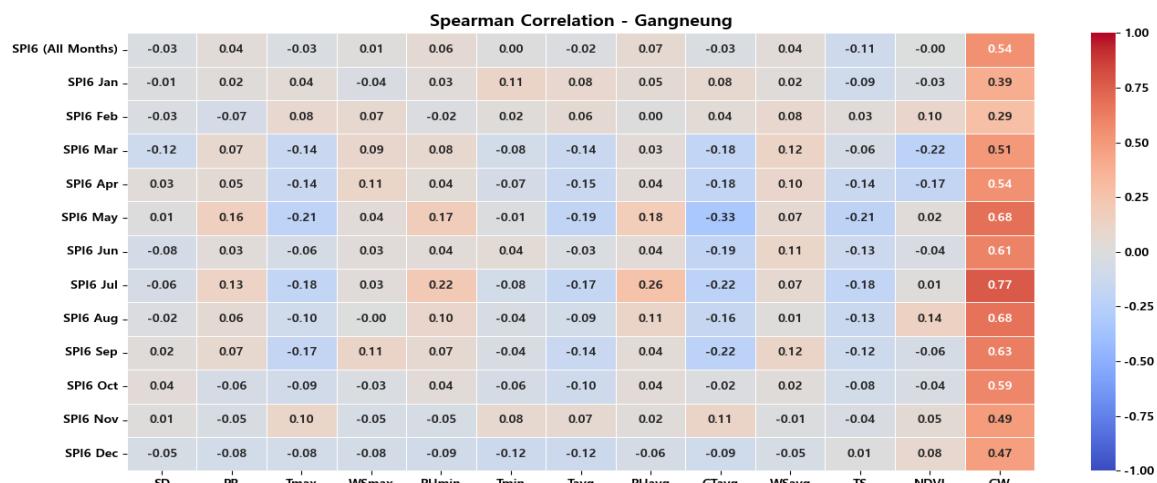


Fig 2. Spearman Correlation Heatmap for Gangneung

Table 2. Correlation Between SPI6 and NDVI / Groundwater Level Considering Temporal Lag (2004–2023)

Regions and Month	Pearson Correlation		Spearman Correlation		Kendall's Tau Correlation		
	Groundwater Level & SPI6	NDVI & SPI6	Groundwater Level & SPI6	NDVI & SPI6	Groundwater Level & SPI6	NDVI & SPI6	
Donghae	5월	0.543	-0.511	0.565	-0.491	0.393	-0.339
	7월	0.378	-0.756	0.474	-0.697	0.324	-0.503
Gangneung	5월	0.643	-0.068	0.699	-0.014	0.584	-0.002
	7월	0.75	-0.219	0.777	-0.034	0.522	-0.025
Samchoeck	5월	0.412	-0.305	0.587	-0.104	0.418	-0.072
	7월	0.267	-0.58	0.414	-0.012	0.298	-0.074

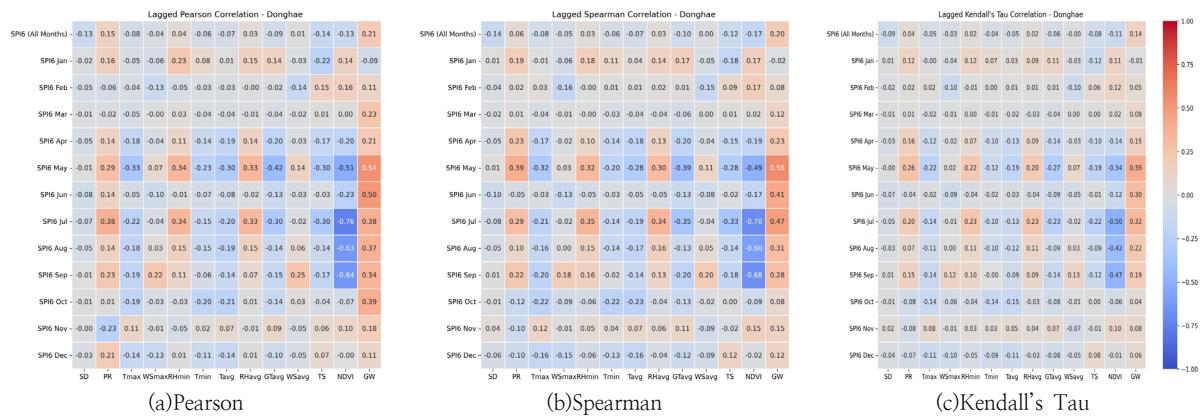


Fig 3. Time–Lagged Correlation Heatmaps by Method for Donghae (2004–2023)

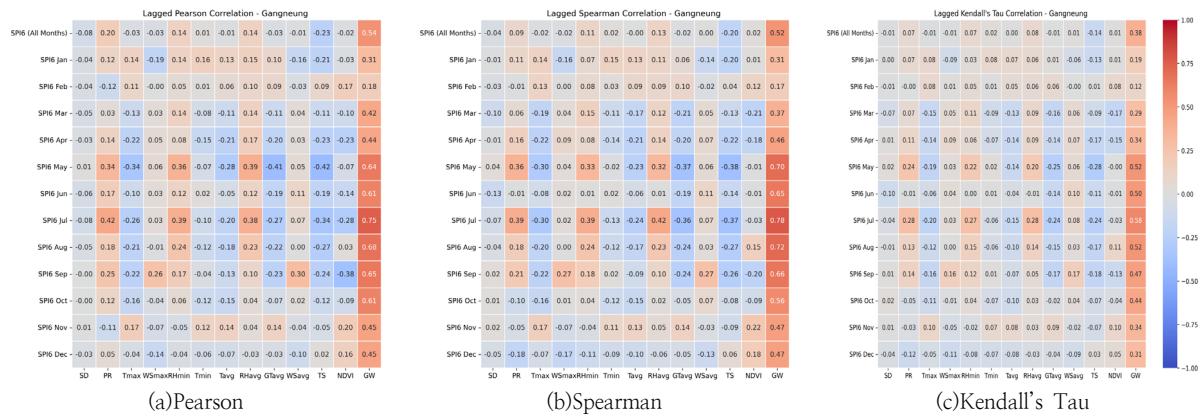


Fig 4. Time–Lagged Correlation Heatmaps by Method for Gangneung (2004–2023)

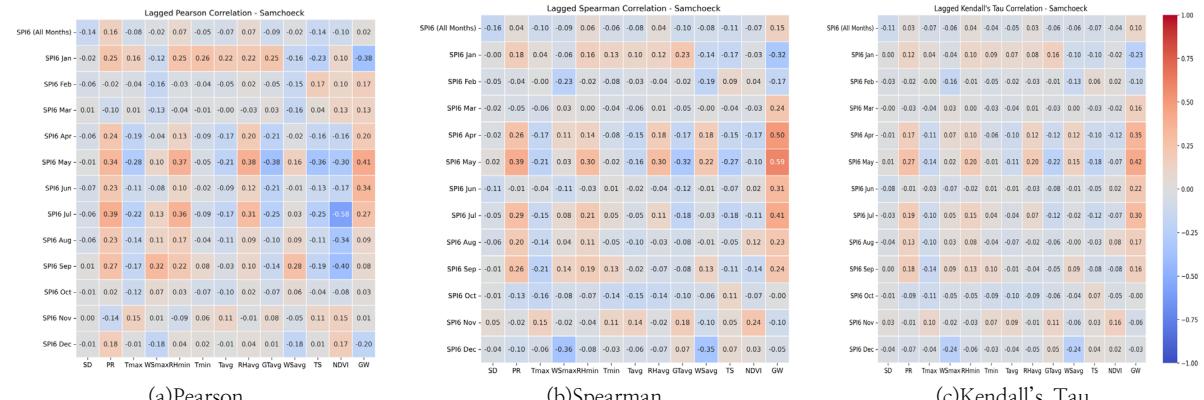


Fig 5. Time–Lagged Correlation Heatmaps by Method for Samchoeck (2004–2023)

수 있었다. 삼척시에서도 일부 지점에서 7월에 가뭄지수와 NDVI의 상관계수가 -0.58 로 전반적으로 세 지역 모두 7월에 높은 상관성을 보였다(Table 2).

본 연구에서 가뭄지수와 NDVI의 상관계수가 주로 음의 상관계수로 나온 이유는 여름철의 기상 조건이 식생 성장에 반대로 작용하였기 때문에 음의 상관 관계로 나타난 것으로 확인된다. 6개월간 강수량이 많을수록 SPI6의 수치는 증가하게 되는데 SPI6의 수치가 증가하게 되면 여름철은 습윤 상태를 나타낸다. 하지만 과도한 강수로 인해서 일사량이 감소하고, 침수 등 여러 피해가 일어날 경우 NDVI를 억제하는 효과를 보이게 된다. 따라서 자체적인 계절 효과로 인해 가뭄지수가 증가하게 되어도 NDVI는 감소하는 음의 상관 관계를 나타낸 것으로 보인다.

3.3 Mutual Information

본 연구에서는 앞에서 수행한 세 가지 상관분석 외에도 가뭄과 입력 인자들 간의 의존성을 확인하고자 Mutual Information 상관분석을 추가 수행하였다. 기상 인자, 수문학적 인자 및

NDVI와 가뭄지수 사이의 관계는 시공간적으로 복잡하기 때문에 Mutual Information 상관분석을 통해 변수 간의 정보적 연관성의 정도를 정량화함으로써 보다 정밀하고 신뢰성 있는 상관성 평가가 가능하다.

상관분석의 결과 동해시, 강릉시, 삼척시 세 지역에서 1월부터 12월까지 전반적으로 가뭄지수와 지하 수위 간의 MI 값은 계절에 따라 차이를 보였으며, 봄과 여름에는 의존성이

Table 3. Mutual Information Between SPI6 and Groundwater Level in November and December (2004–2023)

Regions and Month	Mutual Information	
	Groundwater Level & SPI6	
Donghae	11월	0.771
	12월	1.095
Gangneung	11월	1.172
	12월	0.976
Samchoeck	11월	0.297
	12월	0.728

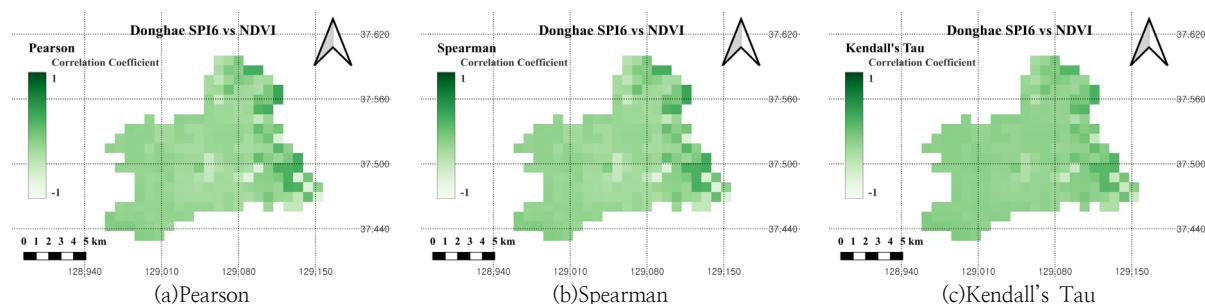


Fig 6. Correlation Map by Correlation Method Between SPI6 and NDVI in July for Donghae

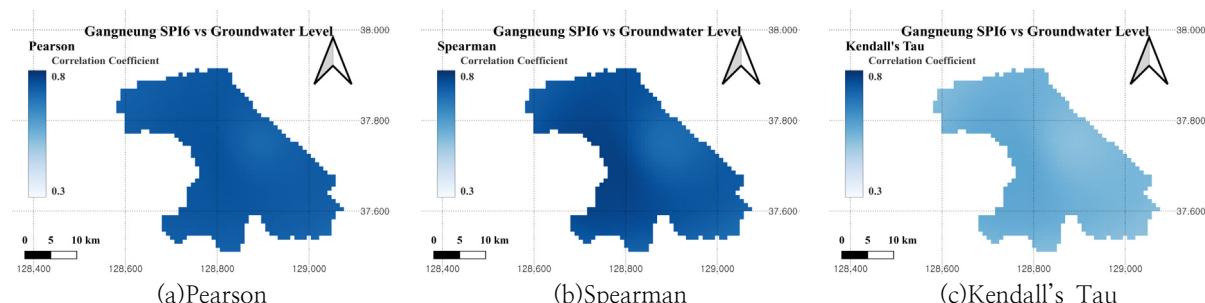


Fig 7. Correlation Map by Correlation Method SPI6 and Groundwater Level in July for Gangneung

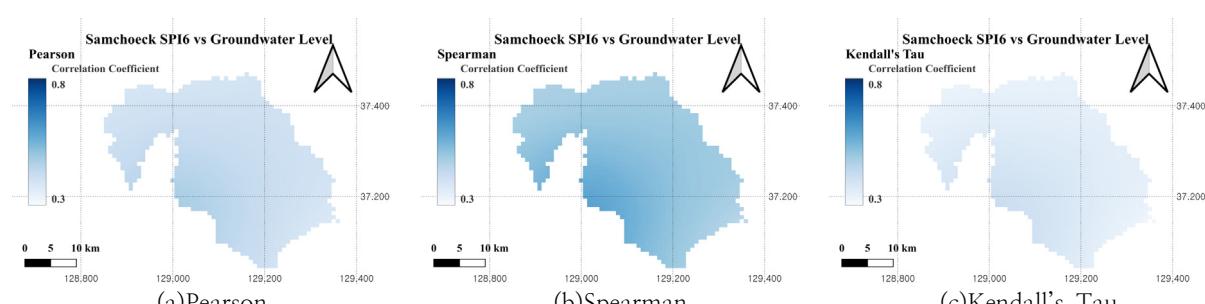


Fig 8. Correlation Map by Correlation Method SPI6 and Groundwater Level in May for Samchoeck

상대적으로 낮은 반면, 겨울에 의존성이 가장 높은 경향을 보였다. 특히 11월과 12월의 MI 값이 세 지역 모두에서 가장 높게 나타났으며, 이는 해당 시기가 겨울로 접어들며 기상 인자의 변동성이 작게 나타나기 때문에 해당 시기의 가뭄지수와 지하 수위의 의존성이 높게 나온 것으로 확인된다.

3.4 가뭄-NDVI, 가뭄-지하 수위 간의 상관성 지도

본 연구에서는 앞서 진행한 상관분석으로 도출한 상관계수를 활용하여 특정 기간에 가장 높은 상관성을 보인 입력 인자들을 활용하여 상관성 지도를 구축하였다. 그중 시간적 특성을 고려하지 않았을 때의 상관계수는 상관성 지도를 구축하는데 있어서 제외하였다. 이는 시간적 특성을 고려하지 않은 상태에서의 상관계수는 대부분 낮거나 유의미하지 않은 값을 보여 주었으며, 인자 간 시간적 특성으로 인해 해석상의 문제를 일으킬 수 있다고 판단하였다.

그 결과 시간적 특성을 고려하였을 때의 상관분석 결과 가장 높은 상관성을 보인 인자들은 다음과 같다. 동해시의 경우 모든 상관분석 방법에서 7월의 가뭄지수와 NDVI가 높은 상관성을 보였다(Fig 6). 특히 해안 지역에서의 가뭄지수와 NDVI의 상관성이 높게 나타났다. 이는 동해시 해안 지역의 경우 지하 수위가 안정적으로 유지되며, 해양성 기후의 영향을 받아 강수량의 변동성이 적기 때문에 가뭄 발생 시 식생이 민감하게 반응하는 특성이 반영된 결과로 해석된다. 즉, 수문학적 요인의 변화보다는 식생 상태가 가뭄지수에 더 큰 영향을 미치는 지역적 특성이 반영된 것이다. 강릉시와 삼척시 두 지역에서는 내륙 지역에서 지하 수위가 가뭄지수와 높은 상관성을 보였으며, 특히 강릉시에서 더 높은 상관성이 나타났다(Fig 7-8). 이러한 차이는 지하수의 수질 및 수량 관리 체계의 정비 수준, 지하수 이용 형태 등 다양한 요인에 기인할 수 있다. 반면 삼척시는 해발고도가 높은 산지 지형이 내륙에 넓게 분포하고, 국지적인 기후 특성으로 인해 지하 수위의 변동성이 상대적으로 작게 나타나 상관성이 낮은 것으로 해석된다.

4. 결 론

본 연구에서는 가뭄과 가장 밀접한 관계가 있는 인자를 찾기 위해 가뭄지수와 NDVI, 기상 인자 및 수문학적 인자들(지하 수위, 온도, 습도 등) 간 여러 상관분석 방법을 이용하여 각 지역을 1km의 해상도로 나눈 후 상관분석을 진행하였다. 상관분석을 진행할 때 시간적 특성의 고려 여부에 따른 상관분석을 진행하였고, 그 결과 시간적 특성을 고려하지 않았을 경우 모든 기간에서 지하 수위가 가장 높은 상관성을 보였다. 5월과 7월에 높은 상관성을 보였으며, Spearman 상관분석의 결과 강릉시의 일부 지점에서 7월에 가장 높은 상관계수인 0.766을 확인할 수 있었다. 다른 입력 인자들의 경우 상관성을 발견할 수 없었는데 이는 가뭄지수의 경우 과거의 강수량을 통해 산정을 하지만 입력 인자들의 경우 특정

기간의 값을 나타내기 때문으로 확인된다.

시간적 특성을 고려하였을 경우 다수의 인자에서 시간적 특성을 고려하지 않았을 경우보다 상관성이 증가하는 모습을 볼 수 있었고, 그중에서 가뭄지수와 NDVI의 상관성 증가가 가장 두드러지게 나타났다. 연구 대상지 중 Pearson 상관분석을 하였을 때 동해시에서 7월에 가뭄지수와 NDVI의 상관계수가 -0.756으로 가장 높은 상관성을 보였다.

추가적으로 Mutual Information 상관분석을 통해 두 변수 간의 의존도를 분석한 결과, 세 지역에서 11월과 12월의 가뭄지수와 지하 수위 간의 의존성이 가장 높게 나타났다. 이는 Mutual Information 상관분석이 비선형적 상호작용 및 누적 반응 구조까지 포착할 수 있는 정보 이론 기반 지표이기 때문에 판단된다.

이후 여러 상관분석 방법으로 도출한 특정 기간의 가장 높은 상관성을 보였던 인자들을 시각화 한 결과 동해시의 경우 가뭄지수와 NDVI의 상관성이 높게 나타났고, 그중 해안 지역에서 가뭄지수와 NDVI의 상관성이 높은 것을 확인할 수 있었다. 이는 동해시의 해안 지역의 경우 지하 수위가 상대적으로 안정적으로 유지되고, 해양성 기후의 영향으로 강수량 변동성이 적기 때문에 가뭄 발생 시 식생이 민감하게 반응하는 특성이 반영된 결과로 해석된다. 강릉시와 삼척시 모두 가뭄지수와 지하 수위 간의 전반적인 상관성이 높게 나타났으며, 이 중 강릉시가 삼척시보다 더 높은 상관성을 보였다. 그러나 두 지역 모두 해안 지역에서는 지하 수위와 가뭄지수 간의 상관성이 낮게 나타났는데, 이는 해안 지역의 지하 수위 변화가 내륙에 비해 상대적으로 뚜렷하지 않기 때문으로 해석된다. 특히 강릉시에서는 삼척시에 비해 지하 수위가 가뭄 상황에 더 민감하게 반응하는 경향이 나타났으며, 이는 지역별 지하수 이용 행태나 관측망의 밀도, 수문 환경 등의 차이에 기인한 것으로 보인다. 반면, 삼척시는 해발고도가 높은 내륙 산지가 넓게 분포하고, 국지적인 기후 특성으로 인해 지하 수위의 계절 간 변동성이 상대적으로 작아, 가뭄지수와의 상관성이 낮게 나타난 것으로 판단된다.

본 연구는 주요 인자들의 시간적 특성을 고려하여 상관성 분석을 수행하고, 가뭄지수와 관련된 영향 인자 간의 관계를 파악하였다. 그러나 분석에 사용된 공간자료의 해상도에 제한이 있어 국지적인 특성을 반영한 정밀한 분석에는 한계가 존재하였다. 향후 연구에서는 고해상도의 공간 자료를 활용함으로써 정밀한 분석을 할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 다양한 인자를 활용한 정량적 가뭄 분석을 위해서는 각 인자의 시간적 특성을 반영하는 분석 기법이 필요하며, 특히 지하 수위와 NDVI는 가뭄 감지에 효과적인 주요 지표로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2025학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

References

- Choi, Y. J. (1995). "Causes and Prediction of Drought." *Water for future*, Vol. 28, No.1, pp. 16–20.
- Google Earth Engine (2005). United States of America, access ed 6 June 2025, <<https://earthengine.google.com>>
- Gu, X., Guo, E., Yin, S., Wang, Y., Mandula, N., Wan, Z., Yun, x., Li, H., Bao, Y. (2022). Differentiating cumulative and lagged effects of drought on vegetation growth over the Mongolian Plateau. *Ecosphere*, 13(12), e4289.
- Hong, S. Y., Na, S. I., Lee, K. D., Kim, Y. S., Baek, S. C. (2015). "A Study on Estimating Rice Yield in DPRK Using MODIS NDVI and Rainfall Data." *Korean Journal of Remote Sensing*, 31(5), 441–448.
- Huete, A., Justice, C., Van Leeuwen, W. (1999). "MODIS vegetation index (MOD13)." Algorithm theoretical basis document, 3(213), 295–309.
- Integrated Ground Water Information Service (2004). Republic of Korea, accessed 5 June 2025, <<https://www.gims.go.kr>>
- IPCC (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.), IPCC Publication No. AR6-9789291691647, Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland, pp. 1–184.
- Kendall, M. G. (1938). "A new measure of rank correlation." *Biometrika*, 30(1–2), 81–93.
- Kim, C. J., Park, S. C., Han, H. C. (2025). "Multi-Hazard Susceptibility Mapping Using Machine Learning Approaches: A Case Study of South Korea." *Remote Sensing*, 17(10), 1660.
- Kim, D. W., Park, J. C., Jang, D. H. (2017). "Analysis of the Possibility for Drought Detection of Spring Season Using SPI and NDVI." *Journal of the Association of Korean Geographers*, Vol. 6, No. 2, pp. 165–174.
- Kim, H. H., and Kong, W. S. (2022). "Climate Characteristics of South Korean Island Region Analyzed with AWS Observation Data." *Journal of Climate Change Research*, 13(4), 399–408.
- Kim, S. W., Kim, M. K., Jung, D. H., Yoo, D. G. (2019). "Identifying the Critical Drought Impact Factor with Feature Selection Approaches." *Journal of KOSHAM*, 19(7), 511–518
- Kraskov, A., Stögbauer, H., Grassberger, P. (2004). "Estimating mutual information." *Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 69(6), 066138.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., Kleist, J. (1993). "The relations hip of drought frequency and duration to time scales." In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, Vol. 17, No. 22, pp. 179–183.
- Open Government Data Portal (2013). Republic of Korea, accessed 1 June 2025, <<https://www.data.go.kr/index.do>>
- Palmer, W. C. (1965) "Meteorological Drought". U. S. Department of Commerce, Weather Bureau, Vol. 30.
- Park, J. S., Kim, K. T. (2009). "Evaluation of MODIS NDVI for Drought Monitoring : Focused on Comparison of Drought Index". *Spatial Information Research*, Vol. 17, No. 1, pp. 117–129.
- Ryu, J. H., Lee, D. R., Ahn, J. H., Yoon, Y. N. (2002). "A comparative study on the drought indices for drought evaluation." *Journal of Korea Water Resources Association*, 35(4), 397–410.
- Sedgwick, P. (2012). "Pearson's correlation coefficient." *Bmj*, 345.
- Spearman, C. (1904). "General Intelligence, Objectively Determined and Measured." *The American Journal of Psychology*, 15, 201–292.
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., López-Moreno, J. I. (2010). "A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index." *Journal of climate*, 23(7), 1696–1718.
- Wilhite, D. A., and Glantz, M. H. (1985). "Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions." *Water international*, 10(3), 111–120.
- World Meteorological Organization: United in Science 2024: A multi-organization high-level compilation of the latest weather, climate, water and related environmental and social sciences for the future. Geneva: World Meteorological Organization; 2024.
- Yeom, J. M., Han, K. Y., LEE, C. S., Park, Y. Y., Kim, Y. S. (2008). "A Detection of Vegetation Variation Over North Korea using SPOT/VEGETATION NDVI." *Journal of the Korean association of geographic information studies*, Vol. 11, No. 2, pp. 28–37.