

# VHI의 모니터링 성능 개선 및 기상학적 요인 변화에 따른 식생 반응의 정량적 평가

정하은\* · 최시중\*\* · 김상단\*\*

\*국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공

\*\*한국건설기술연구원 수자원하천연구본부

## Improving Monitoring Performance of VHI and Quantitative Assessment of Vegetation Response to Meteorological Drought

Jung, Haeun\* · Choi, Sijung\*\* · Kim, Sangdan\*\*

\*Division of Earth Environmental System Science (Major of Environmental Engineering), Pukyong National University, Busan, Korea

\*\*Department of Hydro Science and Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT), Goyang, Korea

(Received : 07 October 2024, Revised : 01 November 2024, Accepted : 01 November 2024)

### 요약

식생 가뭄을 평가하기 위해서는 기상학적 요인과 식생 사이의 관계를 이해하고, 기상 변화에 따른 식생 반응을 정확히 측정하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 상관성 분석을 기반으로 식생상태지수(VCI, Vegetation Condition Index)(즉, 식생의 수분 스트레스)와 열상태지수(TCI, Temperature Condition Index)(즉, 식생의 온도 스트레스)의 상대적 기여도를 평가하기 위해 다양한 가중치를 적용하여 계산된 식생건강지수들(VHIs, Vegetation Health Indices)을 도입하였다. 이를 통해 낙동강 유역 식생의 활동에 대한 기상학적 가뭄의 영향을 가장 잘 설명하는 최적 VHI(VHI<sub>opt</sub>, optimal VHI)가 제시되었다. VHI<sub>opt</sub>를 이용하여 기상학적 가뭄이 식생에 미치는 영향을 모니터링하는 생태가뭄상태지수(EDCI, Ecological Drought Condition Index)-VHI<sub>opt</sub>가 제안되었다. EDCI-VHI<sub>opt</sub>는 표준강수지수(SPI, Standardized Precipitation Index)와 VHI<sub>opt</sub> 사이의 copula 기반 결합 확률 모델을 기반으로 계산되었으며, 이는 기상학적 가뭄에 따른 식생 반응을 정량적으로 평가한다. 그 결과, 낙동강 유역에서의 VCI와 TCI의 상대적 기여도는 월별 및 픽셀별로 다르게 나타났다. 본 연구에서 제안한 EDCI-VHI<sub>opt</sub>는 시공간적으로 다르게 나타나는 기상학적 가뭄에 따른 식생 반응에 대해 유용한 정보를 제공할 수 있음을 보여주었다. 본 연구는 기상학적 가뭄에 따른 식생 반응에 대해 이해하고, 기상학적 가뭄으로 인한 식생 건강성 악화에 대처할 수 있는 근거를 제공하는 도구로 활용될 수 있을 것이다.

핵심어 : Copula, 가뭄, 생태 가뭄 상태 지수, 최적 식생 건강 지수, 식생

### Abstract

To assess vegetation drought, it is important to understand the relationship between meteorological factors and vegetation, and to accurately measure vegetation response to meteorological changes. This study introduced VHIs(Vegetation Health Indices) calculated by applying various weights to assess the relative contribution of VCI(Vegetation Condition Index(i.e. water stress of vegetation) and TCI(Temperature Condition Index)(i.e. temperature stress of vegetation) based on correlation analysis. Through this, the VHI<sub>opt</sub>(optimal VHI) that best explains the effects of meteorological drought on vegetation activity in the Nakdong River basin has been presented. The EDCI(Ecological Drought Condition Index)-VHI<sub>opt</sub> was proposed, which uses VHI<sub>opt</sub> to monitor the effects of meteorological drought on vegetation. EDCI-VHI<sub>opt</sub> is calculated based on a copula-based joint

\*To whom correspondence should be addressed.

Department of Biological Sciences, Kongju National University, Korea

E-mail : skim@pknu.ac.kr

- Jung, Haeun Division of Earth Environmental System Science (Major of Environmental Engineering), Pukyong National University, Busan, Korea / q0881@naver.com
- Choi, Sijung Department of Hydro Science and Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT), Goyang, Korea / sjchoi@kict.re.kr
- Kim, Sangdan Division of Earth Environmental System Science (Major of Environmental Engineering), Pukyong National University, Busan, Korea / skim@pknu.ac.kr

probability model between SPI(Standardized Precipitation Index) and  $VHI_{opt}$ , which quantitatively assesses vegetation response to meteorological drought. As a result, the relative contribution of VCI and TCI in the Nakdong River basin varied from month to month and pixel to pixel. The proposed EDCI- $VHI_{opt}$  in this study showed that it can provide useful information on vegetation response to spatiotemporally varying meteorological drought. This study can be used as a tool to understand vegetation responses to meteorological drought and provide a basis for addressing the deterioration of vegetation health due to meteorological drought.

Key words : Copula, Drought, Ecological Drought Condition Index, Optimal Vegetation Health Index, Vegetation

## 1. 서론

기상학적 가뭄은 수개월에서 수년에 걸쳐 평년보다 낮은 강수량을 특징으로 하는 극심한 기후 현상이며, 이는 수문학적 가뭄(Wang et al., 2024a), 농업 가뭄(Zhang et al., 2024), 식생 가뭄(Jung et al., 2024), 사회경제적 가뭄(Cai et al., 2024) 등에도 직간접적으로 치명적인 영향을 미칠 수 있는 자연재해이다. 가뭄 전파는 한 유형의 가뭄에서 다른 유형의 가뭄으로 전파되는 현상을 의미하며(Wang et al., 2024b), 본 연구에서는 기상학적 가뭄으로부터 직접적으로 유발되는 식생 가뭄에 초점을 맞추었다. 식생은 기상학적 가뭄과 밀접한 관계가 있으며, 이는 생태계의 균형 유지 및 생물 다양성 보존 등의 측면에서 중요한 역할을 수행한다. 따라서, 기상학적 가뭄으로부터 유발되는 식생 가뭄에 대한 감시는 중요하다.

많은 연구에서는 다양한 변수 사이에 존재하는 종속성을 모형화하기 위해 다음과 같이 copula 기반 결합 확률 모델을 사용하였다. Won et al. (2022)과 Jung et al. (2024)은 기상학적 가뭄지수와 식생지수 사이의 의존 구조를 식별하기 위해 copula를 도입하였다. Xu et al. (2023)은 특정 기상 가뭄 조건에서 농업 가뭄의 발생 확률을 추정하기 위해 copula를 사용하였다. Seo et al. (2024)은 기상학적 가뭄이 하천 수질에 미치는 영향을 분석하기 위해 copula를 사용하였다. Wang et al. (2024b)은 기상학적 가뭄으로부터 유발되는 수문학적 가뭄의 조건부 확률을 추정하기 위해 copula를 도입하였다.

많은 연구에서는 기상학적 가뭄과 식생 사이의 관계를 살펴 보기 위해 기상학적 가뭄지수와 식생건강지수(VHI, Vegetation Health Index, Kogan, 1997)를 도입하였다. VHI는 식생의 건강성에 대한 식생상태지수(VCI, Vegetation Condition Index) 및 열상태지수(TCI, Temperature Condition Index)의 상대적인 기여도에 대한 사전 지식이 없으면, 두 인자에 대한 기여도는 같다고 간주된다(Bento et al., 2018). 따라서 다음과 같이 VCI와 TCI의 평균값인 기존 VHI( $VHI_{ori}$ , original VHI)가 활용된 연구들이 수행되었다. Bento et al. (2018)은 기상학적 가뭄이 식생 건강성에 미치는 영향에 대한 기후학적 평가를 위해 표준강수증발산지수(SPEI, Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, Vicente-Serrano et al., 2010)와  $VHI_{ori}$ 를 사용하였다. Won et al. (2021)은 표준강수지수(SPI, Standardized Precipitation Index, McKee et al., 1993) 및 증발수요가뭄지수(EDDI, Evaporative Demand Drought Index, Hobbins et al., 2016)와  $VHI_{ori}$ 를 사용하여 대기로부터의 수분 공급 부족에 의한 기상학적 가뭄과 대기의 과도한 수분 수요에 의한 기상학적 가뭄의 영향을 구분하여 식생 가

뭄 취약성을 평가하였다. Won and Kim (2023)은 SPI와  $VHI_{ori}$ 를 사용하여 기상학적 가뭄이 식생에 미치는 영향을 모니터링하는 지수를 개발하였다. 하지만 식생 건강성에 대한 VCI와 TCI의 기여도는 시공간적으로 다양하게 나타난다(Jung et al., 2023). 따라서, 일부 연구에서는 다음과 같이 다양한 가중치가 반영되어 산출된 VHI들(VHIs)을 도입하였다. Bento et al. (2020)은 VHI의 최적 가중치 추정을 통해 VHI 기반 모니터링을 개선하고자 하였다. Zeng et al. (2022)은 두 개의 가뭄지수(파머강우지수(PDSI, Palmer Drought Severity Index, Palmer, 1965)와 SPED)를 사용하여 VHI에 대한 VCI와 TCI의 기여도를 살펴봄으로써, VHI를 이용한 식생 가뭄의 모니터링 기능을 개선하고자 하였다. Jung et al. (2023)은 다양한 가중치가 적용된 VHIs을 이용하여 한반도의 기상학적 가뭄과 식생 사이의 관계를 살펴보았다. Osmani et al. (2024)은 상관관계 강도를 기반으로 VHI를 결정하는데 있어 VCI와 TCI의 기여도를 살펴보았다.

이러한 연구 추세에 발맞추어, 유역 식생에 적합한 VHI의 최적 가중치를 이용하여 식생 가뭄을 모니터링하는 연구가 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 VHI의 최적 가중치를 적용하여 강수량 부족으로부터 유발된 기상학적 가뭄에 대한 식생 반응을 모니터링하는 지수를 이변량 결합 확률 모델을 통해 제시하고자 하였다. 이 과정에서 VHI의 다양한 가중치 도입을 통해 기상학적 가뭄에 영향을 받는 식생의 상태를 가장 잘 감시하는 VHI의 가중치가 월별 및 픽셀별로 제시된다. 즉, 본 연구에서는 VHI의 최적 가중치 적용함으로써 VCI와 TCI의 단순 평균값인  $VHI_{ori}$ 의 반영에 의한 식생 가뭄 모니터링의 왜곡을 방지하여 VHI를 이용한 식생 가뭄 감지의 효과를 개선하고자 하였다. 이를 위해 다음과 같은 해답을 찾고자 하였다: (1) 기상학적 가뭄과 식생 상태 사이의 관계를 가장 잘 설명하는 time-lag와 time-scale은 무엇인가? (2) 기상학적 가뭄에 의해 겪게 되는 식생 스트레스를 정량화할 때, VCI와 TCI의 상대적인 기여도는 어떻게 되는가? 즉, 다양한 SPI와 다양한 VHIs 사이의 상관분석 수행을 통해 가장 높은 상관관계에 대응하는 time-lag 및 time-scale과 VHI의 가중치를 결정하고자 한다.

## 2. 자료 및 방법

### 2.1 대상 유역 및 자료

본 연구에 사용된 정규식생지수(NDVI, Normalized Difference Vegetation Index), 지표면온도(LST, Land Surface Temperature),

토지피복도는 Land Processes Distributed Active Archive Center에서 제공하는 MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 제품군에서 획득하였다(<https://lpdaac.usgs.gov>). MODIS의 여러 제품군 중에 MOD13C2(NDVI)와 MOD11C3(LST), MCD12C1(토지피복도)가 사용되었다. 강수량 자료는 Climate Hazards Center에서 제공하는 Climate Hazards group InfraRed Precipitation with Station data를 사용하였다(<https://chc.ucsb.edu>). NDVI와 LST, 강수량 자료의 공간 해상도는 모두 0.05°이며, 시간 해상도는 monthly이다. 강수량 자료의 기간은 1981년 1월부터 2023년 12월까지이며, NDVI 및 LST 자료의 기간은 2001년 1월부터 2023년 12월까지이다. 토지피복도의 공간 해상도는 0.05°이다. Fig. 1은 본 연구의 연구 지역인 낙동강 유역의 위치 및 토지피복도를 보여주고 있다. 한반도의 남동부에 위치한 낙동강 유역은 4개의 계절이 뚜렷하게 나타나는 지역으로, 다른 계절에 비해 여름에는 덥고 습하며, 겨울에는 건조하고 추운 특징을 갖고 있다. 낙동강 유역 면적은 23,384.21 km<sup>2</sup>이며, 여름에 강수량이 집중되는 특징이 있다. 낙동강 유역에 위치한 낙동강은 남동부 지역의 물 공급에 중요한 역할을 하고 있다. Fig. 1에서 살펴볼 수 있듯이, 낙동강 유역은 한반도의 남동부에 위치하며, 부산광역시와 대구광역시가 유역 내에 위치한 주요 도시이다. 따라서, 시가화건조지역은 주로 2개의 광역시를 중심으로 밀집되어 있는 특징을 갖고 있다. 낙동강 유역 산림지역의 우점종은 대체로 낙엽수림이며, 일부 지역에서는 혼합림도 분포하고 있다.

## 2.2. 기상학적 가뭄지수와 식생지수

Won et al (2020)과 Won et al (2022) 등을 비롯한 한국 지역의 연구 결과를 살펴보면, SPEI는 SPI와 유사한 움직임(or 영향)을 보였으며, 현재 한국 기상청에서는 가뭄 현황 판단을 위해 SPI를 사용하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 기상학적 가뭄을 정량적으로 나타내기 위해 기상학적 가뭄 모니

터링 및 분석을 위한 지표로 널리 사용되고 있는 SPI를 도입하였다. SPI는 강수량 자료를 이용하여 산정되는 기상학적 가뭄지수로, 대기의 과도한 수분 공급 측면을 설명하는 지수이다(McKee et al., 1993). 본 연구에서는 SPI를 산정하기 위해 time-scale별 이동 평균 월 강수량 시계열이 먼저 구축되었다. 그리고 시계열에 적합한 확률 분포를 기반으로 이동 평균 월 강수량 시계열의 누적 확률값이 계산되었다. 마지막으로 계산된 누적 확률값에 대한 표준정규분포의  $Z(SPI)$  값이 추정되었다. 한반도의 SPI를 산정하기 위한 최적의 확률 분포는 2-변수 감마분포로 알려져 있다(Won et al., 2020). 따라서, 본 연구에서 사용된 확률 분포형은 2-변수 감마분포이다. 사용된 확률 밀도 함수식은 다음과 같다:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha\Gamma(\beta)} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\frac{x}{\alpha}} \quad (1)$$

여기서  $x$ 는 time-scale별 이동 평균 월 강수량이며,  $\alpha$ 는 scale 매개변수이며,  $\beta$ 는 shape 매개변수이다. 기상학적 가뭄의 심각도는 아래와 같이 분류할 수 있다(Ionita et al., 2016): (1) Normal drought:  $-1.5 < SPI \leq -1.0$ ; (2) Severe drought:  $-2.0 < SPI \leq -1.5$ ; (3) Extremely severe drought:  $SPI \leq -2.0$ .

VHI는 식생에 가해지는 물 스트레스와 온도 스트레스의 영향을 종합적으로 감지하기 위해 널리 사용되고 있는 식생 지수이며, 이는 NDVI가 낮고 LST가 높을수록 식생의 건강 상태가 열악한 것으로 규정된다(Bento et al., 2018). VHI는 VCI와 TCI를 이용하여 산정되며, 아래의 식을 이용하여 VCI와 TCI가 산정된다:

$$VCI = \frac{(NDVI - NDVI_{\min}) \times 100}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad (2)$$

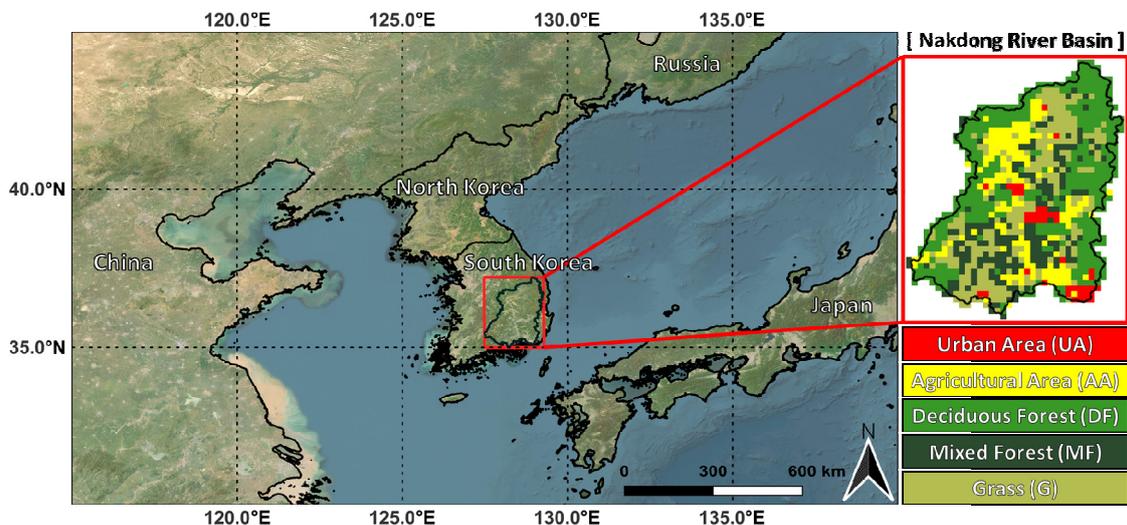


Fig. 1. Study area and land cover map.

$$TCI = \frac{100(LST_{max} - LST)}{LST_{max} - LST_{min}} \quad (3)$$

여기서  $NDVI$ 와  $LST$ 는  $NDVI$ 값과  $LST$ 값이다.  $NDVI_{max}$ 와  $NDVI_{min}$ 은 해당 월의  $NDVI$  시계열 중 최댓값과 최솟값이며,  $LST_{max}$ 와  $LST_{min}$ 은 해당 월의  $LST$  시계열 중 최댓값과 최솟값이다.  $VHI$ 는  $VCI$ 와  $TCI$ 의 기여도에 대한 사전 지식이 없는 경우에는 두 인자의 평균값이 사용되며, 이는 아래의 식을 이용하여 산정된다:

$$VHI = \alpha \times VCI + (1 - \alpha) \times TCI \quad (4)$$

여기서  $\alpha$ 는 일반적으로 0.5로 설정되는 가중치이다(Kogan, 1997). 하지만, 본 연구에서는 21개의  $\alpha$ 들(0부터 1까지 0.05 간격)을 적용하였으며, 픽셀별 최적의  $\alpha$ 를 이용하여 산정된 최적  $VHI(VHI_{opt}, \text{optimal } VHI)$ 를 사용하였다.  $VHI$ 는 40 이하의 값을 가질 때 식생 가뭄으로 분류된다(Won et al., 2021).

본 연구에서는 기상학적 가뭄 발생과 식생 가뭄 발생 사이의 시간 차이인 지연시간을 살펴보기 위해  $SPI$ 와  $VHI$  사이의 가장 적합한 time-lag를 선정하고자 하였다. 그리고 기상학적 가뭄과 식생 가뭄 사이의 관계를 가장 잘 설명하는 기상학적 가뭄의 누적 기간을 살펴보기 위해  $SPI$ 와  $VHI$  사이의 가장 적합한 time-scale을 선정하고자 하였다. 이를 위해 스피어만 순위상관분석(SRCA, Spearman rank correlation analysis, Spearman, 1961)를 이용하여 가장 높은 상관관계에 대응하는 time-lag 및 time-scale을 결정하고자 하였다. 그리고 21개의  $VHI$  가중치 중 최적 가중치  $\alpha$ 도 SRCA를 통해 선정하고자 하였다. 가장 높은 상관관계에 대응하는

time-lag와 time-scale,  $VHI$ 의 최적 가중치  $\alpha$ 는 아래와 같은 절차에 따라 시공간적으로 다르게 결정되었다:

- (1) Time-scale  $m$ -month에 대한  $SPI-m$  계산. 여기서  $m$ 은 1, 2, ..., 12.
- (2) SRCA를 이용하여  $n$ -month 선행하는(즉, time-lag)  $SPI-m$ 과  $VHI_j$  사이의 교차 상관관계수 계산. 여기서  $j$ 는 0, 0.05, 0.1, ..., 0.95, 1이며,  $n$ 은 0, 1, 2, 3, 4.
- (3) 가장 높은 상관관계를 갖는  $SPI$ 의 time-lag 및 time-scale과  $VHI$ 의  $j$ 결정.

### 2.3. Copula 기반 확률 모델

Copula는 모든 유형의 한계 확률 분포를 포괄할 수 있는 장점이 있으며, 이는 다양한 변수 사이에 존재하는 종속성을 모형화하는데 유용한 방법이다(Won et al., 2022). 기상학적 가뭄과 식생 사이의 의존 구조는 시공간적으로 다양하게 나타난다(Won et al., 2021). 이에 따라, 많은 연구에서는 다양한 변수들을 포괄하는 지수를 개발하기 위해 copula를 도입하였다(Seo et al., 2024; Suo et al., 2024; Zhao et al., 2024).

본 연구에서는  $SPI$ 와  $VHI_{opt}$ 를 이용하여 기상학적 가뭄에 대한 식생 반응을 모니터링하는 지수를 개발하기 위해 copula를 도입하였다.  $VHI_{opt}(X_1)$ 와  $SPI(X_2)$  사이의 이변량 결합 누적 확률 분포는 아래와 같이 표현될 수 있으며(Sklar, 1959), 이는 시공간별로 구성되었다:

$$F(x_1, x_2) = C(F_{X_1}(x_1), F_{X_2}(x_2)) = C(u_1, u_2) \quad (5)$$

여기서  $F_{X_1}(x_1)$ 과  $F_{X_2}(x_2)$ 는 각각  $VHI_{opt}$ 와  $SPI$ 의 한계 누적 확률 분포 함수이며, 이는 각각  $u_1$ 와  $u_2$ 로 표현될 수

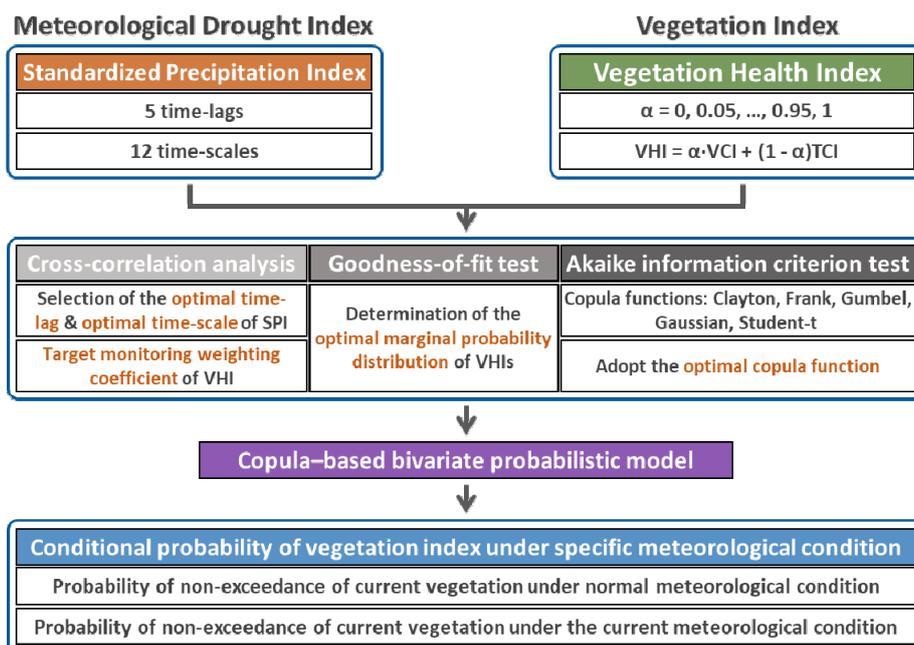


Fig. 2. Procedure for calculating conditional probability of vegetation index for specific meteorological condition.

있다.  $C$ 는 copula 함수이며, 본 연구에서는 수문기상학 응용 분야에서 널리 사용되고 있는 5개의 copula 함수를 이용하였다: (1) Clayton; (2) Frank; (3) Gumbel; (4) Gaussian; (5) Student-t. 이때, 최적의 copula 함수는 아카이케 정보 기준(AIC, Akaike Information Criterion, Akaike, 1998)을 이용하여 SPI와  $VHI_{opt}$  사이의 종속 구조를 가장 잘 포착하는 copula 함수를 채택하였다.

$VHI_{opt}$ 와 SPI 사이의 결합 확률 분포가 주어지면 특정 기상학적 가뭄 심각도에 대한 식생지수의 조건부 확률 분포가 도출된다.  $X_2 \leq x_2$  (SPI가 특정 값 이하가 되는 조건)가 주어졌을 때,  $X_1 \leq x_1$  ( $VHI_{opt}$ 가 특정 값 이하가 될 확률)의 조건부 확률은 아래와 같이 표현할 수 있다:

$$F_{X_1 \leq x_1 | X_2 \leq x_2}(x_1, x_2) = \frac{C(F_{X_1}(x_1), F_{X_2}(x_2))}{F_{X_2}(x_2)} \quad (6)$$

$$= \frac{C(u_1, u_2)}{u_2}$$

위의 수식은 SPI의 다양한 심각도 조건에서  $VHI_{opt}$ 의 조건부 확률 분포를 산정할 때 적용된다. 이때, event  $u_1$ 은  $u_1$ 이 특정 임계값을 초과하지 않는 경우, 위험으로 정의될 수 있다(Salvadori and De Michele, 2004). Fig. 2는 특정 기상 조건에서 식생지수의 조건부 확률을 산정하는 과정을 보여주고 있다.

### 2.4. 생태 가뭄 상태 지수

본 연구에서는 SPI와  $VHI_{opt}$  사이의 이변량 결합 확률 분포를 기반으로 기상학적 가뭄에 대한 식생 반응을 정량적으로 모니터링하기 위해 생태가뭄상태지수(EDCI, Ecological Drought Condition Index)- $VHI_{opt}$ 를 개발하고자 하였다. Fig. 3은 EDCI- $VHI_{opt}$ 의 산정 방법을 보여주고 있다. Fig. 3에서 파란색 선은 평상시 기상 조건에서 식생의 조건부 확률 분포이고, 주황색 선은 현재 기상 조건에서 식생의 조건부 확률 분포이다. 이때, 평상시 기상 조건은  $SPI \leq 0$ 으로 설정하

였다. EDCI- $VHI_{opt}$ 는 현재 기상 조건에서 현재 식생의 비초과확률(주황색으로 칠해진 영역)을 평상시 기상 조건에서 현재 식생의 비초과확률(파란색으로 칠해진 영역)로 나눈 값으로 정의되며, 이는 Fig. 3에서의 EDCI- $VHI_{opt}$  산정 식과 같이 표현된다. 현재 기상 조건에서 현재 식생의 비초과확률이 평상시 기상 조건에서 현재 식생의 비초과확률보다 큰 경우, 현재 기상 조건이 식생에 영향을 미쳤다는 것을 의미한다. 즉, 이론적으로 EDCI- $VHI_{opt}$ 가 1을 초과하면 식생이 기상학적 가뭄의 영향을 받고 있음을 의미한다. 그리고 EDCI- $VHI_{opt}$ 는 큰 값을 가질수록 현재 기상 조건이 식생에 더 큰 영향을 미친다는 것을 의미한다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 기상학적 가뭄지수와 식생지수 사이의 상관성 분석

여러 연구에서는 기상학적 가뭄지수와 식생지수 사이의 상관성 분석을 위해 피어슨 상관계수(PCC, Pearson Correlation Coefficient, Pearson, 1895)를 사용하였다(Weng et al., 2023; Wu et al., 2024). PCC는 두 변수 사이의 선형 관계를 측정하는 것이므로, 기상학적 가뭄지수와 식생지수가 정규 분포라고 가정한다. 하지만, 식생지수는 정규 분포를 따르는지에 대한 여부는 분명하지 않기 때문에, 본 연구에서는 정규 분포를 가정하지 않는 SRCA를 사용하여 SPI와 VHIs 사이의 상관관계를 분석하였다. 그리고 이를 통해 다음과 같은 사항들을 결정하였다: (1) 기상학적 가뭄지수와 식생지수 사이의 관계를 가장 잘 설명하는 time-lag 및 time-scale; (2) 기상학적 가뭄과의 관계를 가장 잘 설명하는 VCI와 TCI의 상대적 기여도. 즉, 하나의 픽셀에서 720개(5개의 time-lag × 12개의 time-scale × 12개의 month = 720)의 상관관계가 조사되었다.

SPI와 VHIs 사이의 가장 높은 상관관계의 공간 분포는 Fig. 4 (a)에서 확인할 수 있으며, 이때 가장 높은 상관관계에 대응하는 time-lag와 time-scale이 반영되었다. Fig. 4 (b)는 Fig. 4 (a)의 자세한 분석에 참고하기 위한 토지피복도

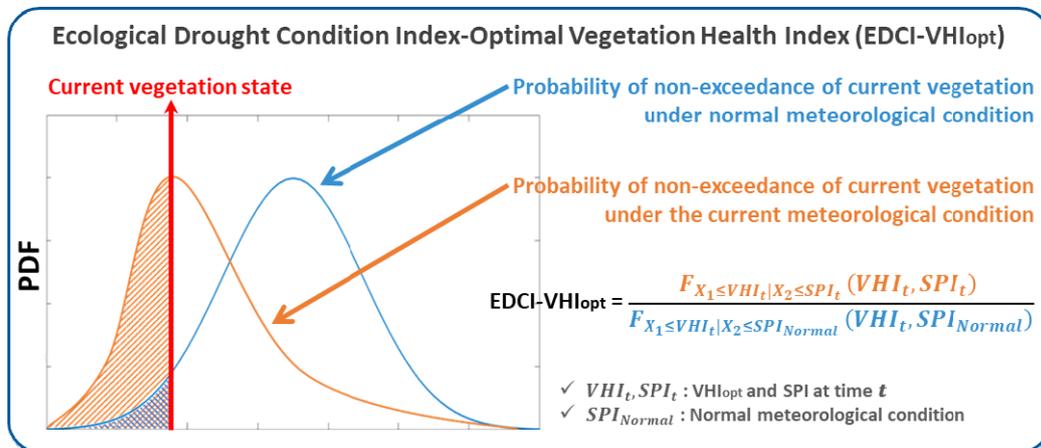


Fig. 3. EDCI- $VHI_{opt}$  calculation method.

이다. 낙동강 유역 전체적으로 양의 상관관계가 일관되게 나타났다. 즉, 기상학적 가뭄이 발생하면 식생 상태가 나빠지는 것을 의미한다. Fig. 4를 월별로 살펴보면, 2월과 6월, 10월의 상관성이 상대적으로 높은 특징을 보였다. 이를 시공간적으로 살펴보면, Fig. 4에서의 A 지역은 다른 지역에 비해 상관성이 지속적으로 높은 특징이 나타났다. 4~5월 및 10월을 제외한 나머지 월에서는 B 지역의 상관성이 다른 지역에 비해 상대적으로 높았다. 반면에, 1월 및 12월에는 C 및 D 지역의 상관성이 낮은 특징을 보였다. 9~12월에는 E 지역의 상관성이 낮은 특징이 나타났다. 상관관계가 높은 지역의 식생일수록 강수 부족으로부터 유발되는 기상학적 가뭄에 민감하게 반응함을 의미하기 때문에, 이러한 점을 고려하여 주의할 필요가 있다.

### 3.2 기상학적 가뭄에 따른 식생 가뭄의 지연시간 및 전파시간

여러 연구에서는 기상학적 가뭄과 식생 반응 사이의 지연 시간 및 전파시간을 확인하기 위해 상관분석을 도입하였다

(Won et al., 2021; Weng et al., 2023). 본 연구에서는 기상학적 가뭄에 대한 식생 반응의 시간 차이를 확인하기 위해 0-month부터 4-month까지의 time-lag를 도입하여, 기상학적 가뭄지수와 식생지수 사이의 가장 적합한 time-lag를 선정하였다. 그리고 기상학적 가뭄과 식생 가뭄 사이의 관계를 가장 잘 설명하는 기상학적 가뭄의 누적 기간을 확인하기 위해 1-month부터 12-month까지의 time-scale이 도입되었으며, 기상학적 가뭄과 식생 반응 사이의 가장 적합한 time-scale이 조사되었다.

Fig. 5는 SPI와 VHIs 사이의 가장 높은 상관관계에 대응하는 time-lag를 보여주고 있다. 대체로 단기적인 time-lag가 주로 선정되었는데, 특정 월에서는 장기적인 time-lag가 나타나는 지역도 일부 존재하였다. 이를 시공간적으로 살펴보면, 1월과 6월, 8~12월의 경우에는 대체로 단기적인 (1-month 이하) time-lag가 주로 분포하는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 11월의 경우에는 대부분의 픽셀에서 0-month time-lag가 나타났다. 즉, 11월의 낙동강 유역 식생은 기상

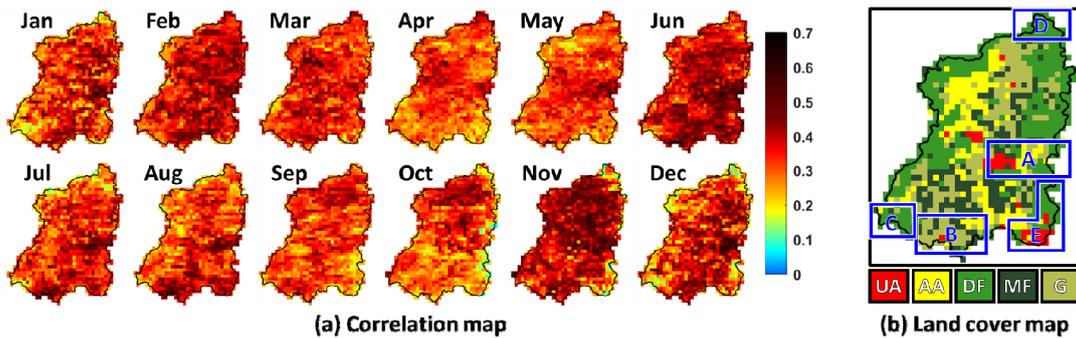


Fig. 4. Spatial distribution of the strongest correlation.

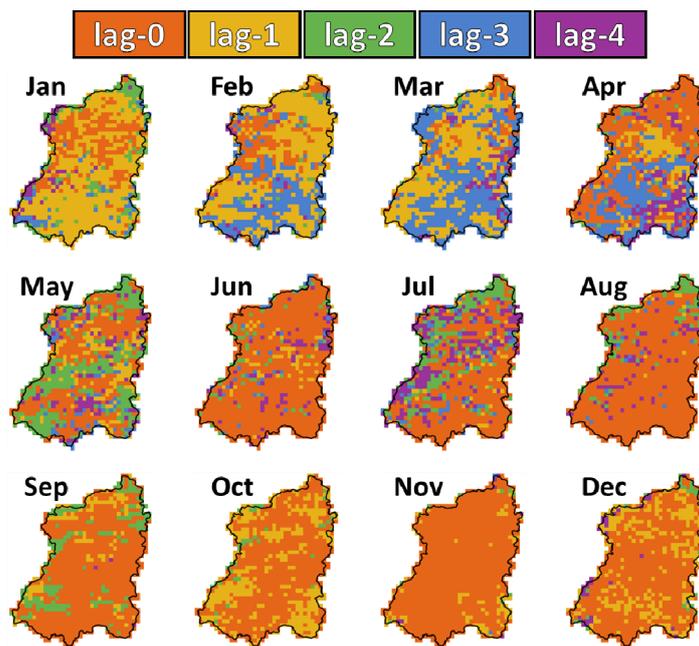


Fig. 5. Spatial distribution of time-lag with the strongest correlation.

학적 외력에 지연 없이 즉각적으로 반응함을 의미한다. 반면에, 2~5월과 7월의 경우에는 단기적인 time-lag뿐만 아니라, 장기적인(2-month 이상) time-lag의 분포도 존재하였다. 특히, 2~4월에는 낙동강 하류 유역에서 지속적으로 장기적인 time-lag의 분포를 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 낙동강 유역의 식생은 대체로 기상학적 외력에 빠르게 반응하지만, 특정 월에서의 일부 식생은 기상학적 외력에 대해 늦게 반응하는 경향이 있음을 의미한다.

Fig. 5(가장 높은 상관관계에 대응하는 time-lag의 공간 분포)와 Fig. 4(Fig. 5의 time-lag가 반영된 상관관계의 공간 분포)를 함께 살펴보면, 단기간의 time-lag를 보임과 동시에 상관관계가 높은 지역을 식별할 수 있다. 즉, 기상학적 가뭄 발생과 식생 가뭄 발생 사이의 시간 차이가 짧아 대비할 시간이 상대적으로 부족할 뿐만 아니라, 기상학적 가뭄에 상대적으로 더 민감하게 반응하는 식생들이 분포하는 지역을 식별할 수 있음을 의미한다. 단기간의 time-lag를 보이면서 동시에 상관관계도 높은 지역은 특히 6월과 11~12월에 많이 나타났으며, 이러한 점에 주목할 필요가 있다.

Fig. 6은 SPI와 VHIs 사이의 가장 높은 상관관계에 대응하는 time-scale을 보여주고 있다. 모든 월에서 전체 픽셀의 58% 이상에서 4-month 이하의 time-scale이 선정되었다. 특히, 1~2월 및 9~12월의 경우에는 4-month 이하의 time-scale이 92% 이상 차지하고 있었다. 즉, 가을 및 겨울철에는 단기간 누적된 기상학적 가뭄에 의한 영향이 높은 편인 것을 알 수 있다. 반면에, 3~8월의 경우에는 중·장기간의 time-scale의 빈도가 다른 월에 비해 높은 것으로 확인되었다. 특히, 4월 및 7월의 경우에는 8-month 이상의 time-scale의 빈도가 20% 이상인 것으로 나타났다. 즉, 봄 및 여름철의 경우에는 지역에 따라 차이가 다소 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 낙동강 유역의 식생은 대체로 모든 월에서 단기간 누적된 대기의 수분 공급 부족에 의한 영향이 크다는 것을 의미한다. 하지만 3~8월의 경우에는 중·장기간 누적된 대기의 수분 공급 부족에 의한 영향이 다소 증가하는 것에도 주목할 필요가 있다.

### 3.3. VCI와 TCI의 기여도 추정

여러 연구에서는 기상학적 가뭄지수와 VHIs 사이의 가장 높은 상관관계를 기반으로 최적 가중치  $\alpha$ 를 식별하였다(Bento et al., 2020; Zeng et al., 2022). Zeng et al. (2022)와 Jung et al. (2023)은  $VHI_{ori}$ 와  $VHI_{opt}$ 의 비교 분석을 통해  $VHI_{opt}$ 가 식생 가뭄 감지 효과를 개선하였음을 보여주었다. 본 연구에서는 다양한 time-lag 및 time-scale이 반영된 SPI와 21개의 가중치  $\alpha$ 가 반영된 VHIs 사이의 SRCA를 기반으로 VHI에 대한 VCI와 TCI의 상대적 중요도를 월별 및 픽셀별로 결정하였다.

Fig. 7은 SPI와 VHIs 사이의 가장 높은 상관관계를 기반으로 선정된 가중치  $\alpha$ 의 분포를 보여주고 있다. 월별로 살펴보면, 1월과 11~12월의 경우에는 VCI의 기여도가 높은 픽셀 수가 많은 것을 확인할 수 있었다. 2~3월에는 VCI와 TCI의 기여도가 비슷한 픽셀 수의 분포가 높은 것을 알 수 있었다. 반면에, 4~10월의 경우에는 TCI의 기여도가 높은 픽셀 수가 많았으나, 4~8월의 경우에는 VCI의 기여도가 높은 픽셀들이 다소 존재하는 것을 알 수 있었다. 10월의 경우에는 VCI와 TCI의 기여도가 비슷한 픽셀 수의 분포도 다소 존재하였다. 이러한 결과는 1월 및 11~12월의 경우에는 식생에 가해지는 식생 수분 스트레스의 영향이 상대적으로 높은 것을 의미한다. 반면에, 기온이 증가하는 4월부터 감소하는 10월까지의 기간 동안, 온도 스트레스의 영향이 낙동강 유역의 식생 건강에 더 큰 기여를 하는 것으로 나타났다. VCI는 습한 지역의 가뭄 모니터링에 적합하지 않다고 알려져 있으며(Zhang et al., 2017), 본 연구에서도 겨울철보다 상대적으로 습한 시기에 TCI의 영향이 두드러진 픽셀이 많음을 확인할 수 있었다. 이는 습한 지역에서 식생이 수분 스트레스에 상대적으로 덜 민감하게 반응함을 의미한다. 즉, 여름철 식생은 기온 상승으로 인한 증발산 증가 등의 고온 스트레스를 경험할 수 있으며, 이로 인해 TCI가 여름철 식생의 스트레스 상황을 더 잘 설명할 수 있음을 시사한다. 2~3월의 경우에는 식생에 가해지는 수분 및 온도 스트레스가 비슷한 수준의 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

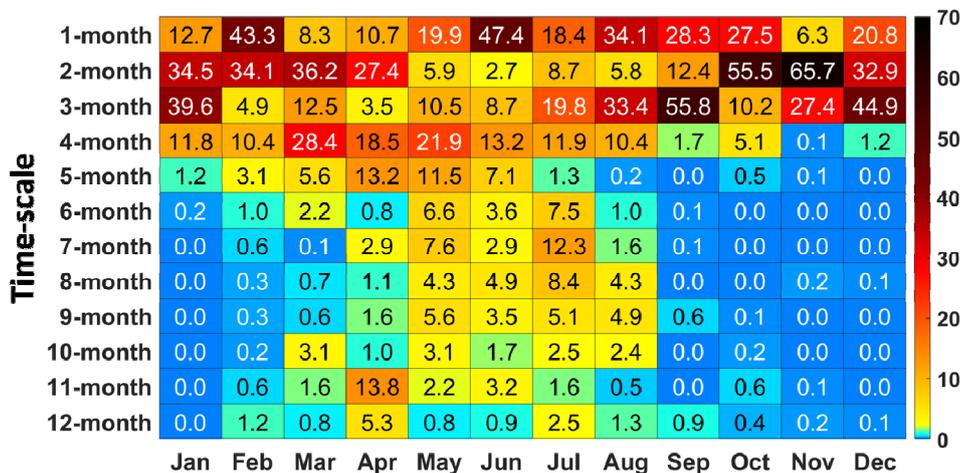


Fig. 6. Frequency of time-scale with the strongest correlation(%).

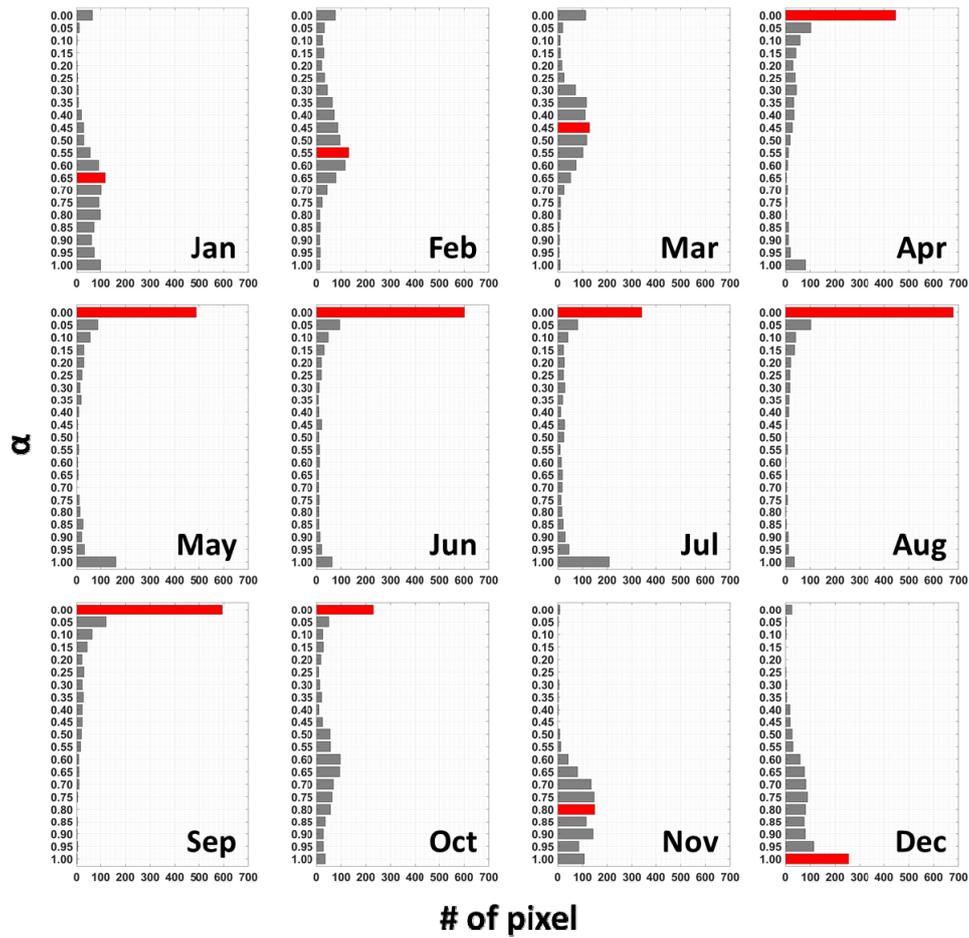


Fig. 7. Number of pixels for weight  $\alpha$  with the strongest correlation.

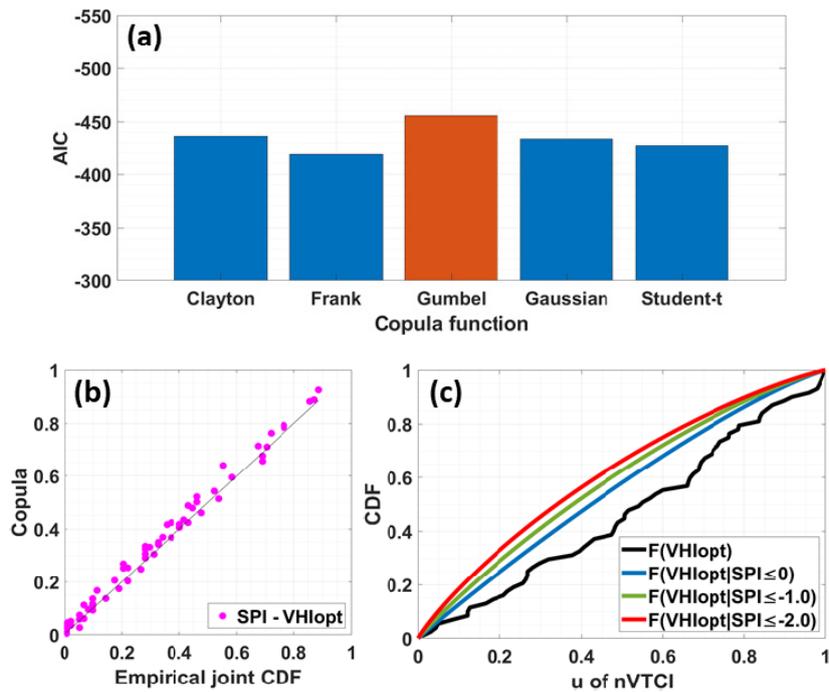


Fig. 8. AIC values for selecting the best copula function between SPI and  $VH_{lopt}$ (Fig. (a)), Q-Q plot of the optimal copula function(Fig. (b)), and conditional CDF of  $VH_{lopt}$  under specific meteorological drought severity conditions(Fig. (c)).

### 3.4 가뭄 심각도의 전파

본 연구에서는 기상학적 가뭄에 대한 식생 반응을 정량적으로 모니터링하기 위해 copula 기반의 확률 모델이 사용되었다. 가장 높은 상관관계를 기반으로 SPI의 time-lag 및 time-scale과 VHI의 최적 가중치  $\alpha$ 가 결정되면, SPI와 VHI<sub>opt</sub> 사이의 이변량 결합 확률 분포를 이용하여 특정 기상 조건에서 식생지수의 조건부 확률 분포를 획득할 수 있다. 이러한 과정을 수행하기 위해 VHI의 한계 확률 분포가 구해지며, AIC를 이용하여 최적 copula 함수가 채택되었다. 기상학적 가뭄에 대한 식생 반응은 시공간적으로 다르게 나타나기 때문에, 본 연구에서는 픽셀별 및 월별로 최적 copula 함수를 결정하여 기상학적 가뭄에 대한 식생 반응의 다양성을 반영하였다. 이러한 절차를 설명하기 위해 특정 월의 임의 픽셀 1개가 선택되었으며, Fig. 8은 임의 픽셀에 대해 5개 copula의 AIC 값과 최적 copula 함수의 Q-Q plot, 특정 기상학적 가뭄 조건에서 VHI<sub>opt</sub>의 조건부 누적분포함수(CDF, Cumulative Distribution Function)를 보여주고 있다. 최적 copula 함수는 월별 및 픽셀별로 다양하게 선정되었으며, 특정 월의 임의 픽셀에서의 최적 copula 함수는 Gumbel로 채택되었다(See Fig. 8(a)). 그리고 Fig. 8(b)는 선택된 최적 copula 함수가 SPI와 VHI<sub>opt</sub> 사이의 종속 관계를 비교적 잘 재현하고 있음을 보여준다. Fig. 8(c)는 특정 기상 조건에서 식생지수의 조건부 확률을 보여준다. Fig. 8(c)에서의 검은색 선은 VHI<sub>opt</sub> 시계열에 대한 경험적 CDF이며, 파란색(or 초록색 or 빨간색) 선은 SPI가 0(or -1 or -2) 이하인 조건에서 VHI<sub>opt</sub>의 조건부 CDF이다. 기상 조건이 심화할수록 VHI<sub>opt</sub>의 조건부 CDF가 왼쪽 상단으로 이동한다는 것은 기상 조건이 심각해질수록 식생 가뭄으로 전파될 가능성이 크다는 사실을 말해주며, 이로부터 다양한 기상 조건이 주어졌을 때 식생 가뭄으로 전파될 가능성이 어느 정도 되는지를 살펴볼 수 있다.

### 3.5 EDCI-VHI<sub>opt</sub>의 식생 가뭄 모니터링 능력 평가

강수량 부족으로부터 유발된 기상학적 가뭄에 대한 식생 반응을 모니터링하는 EDCI-VHI<sub>opt</sub>는 픽셀마다 구성된 SPI-VHI<sub>opt</sub>의 이변량 결합 확률 분포로부터 계산되었다. Fig. 9는 임의 픽셀에서 2002년 4월부터 2023년 12월까지의 SPI와 VHI<sub>opt</sub>, EDCI-VHI<sub>opt</sub>의 시계열을 보여주고 있다. 이때 SPI는 월별로 다르게 선정된 time-lag 및 time-scale이 반영되어 표시되었다. VHI<sub>opt</sub>는 월별로 다르게 선정된 가중치  $\alpha$ 가 반영되어 표시되었다. 각 그림에서 회색 부분은 SPI가 -1 이하(기상학적 가뭄 상태)이며, EDCI-VHI<sub>opt</sub>가 1 이상일 때의 기간을 의미한다. 한국 산림청(<https://www.forest.go.kr>)의 보도자료에 따르면 2008년 후반~2009년 초반과 2014년의 경우에는 가뭄 등으로 인한 산림 피해사례가 보고되고 있으며, EDCI-VHI<sub>opt</sub>는 이를 적절하게 모니터링하는 것을 보여주고 있다. 그리고 농업 가뭄 평가 종합 분석(한국농어촌공사, 2020) 보고서에 따르면 2013년 및 2015~2017년 중반기의 경우에는 농업 가뭄의 사례가 보고되고 있으며, EDCI-VHI<sub>opt</sub>는 이를 적절하게 모니터링하는 것을 보여주고 있다.

EDCI-VHI<sub>opt</sub>는 강수 부족으로 발생하는 기상학적 가뭄이 식생 상태에 미치는 영향을 모니터링한다. 그러나 식생 건강성은 강수 부족이 아닌 다른 원인으로도 악화될 수 있다. 즉, SPI가 증가함에도 불구하고, VHI<sub>opt</sub>가 낮은 경우는 강수 부족으로 인한 식생 건강성 악화가 아닌 다른 원인으로 인한 악화를 의미하며, 이러한 경우는 Fig. 9에서도 구분할 수 있었다.

### 3.6 토지피복 유형에 따른 식생 가뭄 모니터링

기상학적 가뭄에 대한 식생 반응은 토지피복 유형에 따라 다르게 나타나므로(Jung et al., 2024), 토지피복 유형에 따른

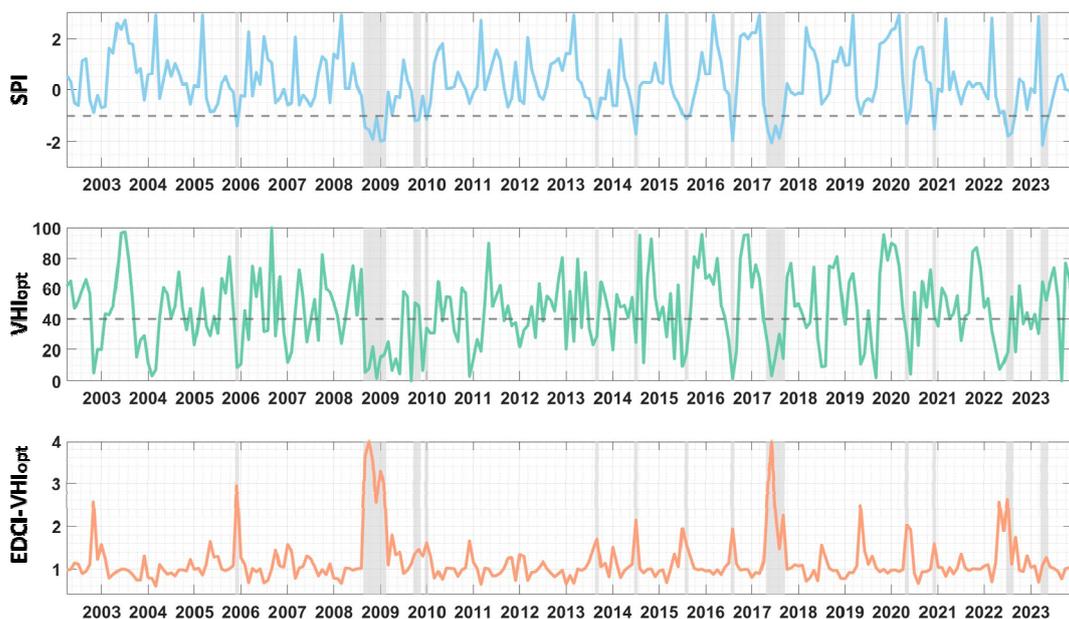


Fig. 9. SPI, VHI<sub>opt</sub>, and EDCI-VHI<sub>opt</sub> time series.

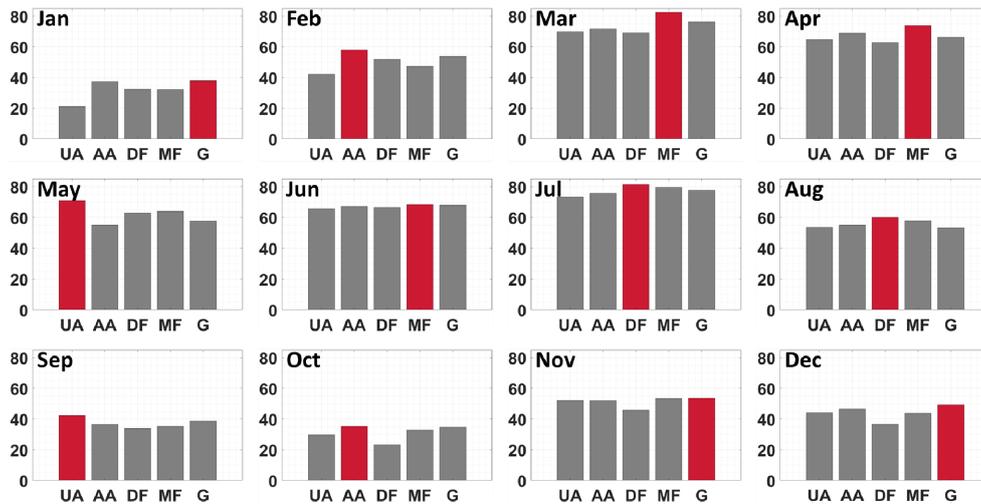


Fig. 10. Frequency of EDCI-VHI<sub>opt</sub> for each land cover type(%).

식생 가뭄을 모니터링할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 EDCI-VHI<sub>opt</sub>에 토지피복도를 중첩하여 토지피복 유형에 따른 EDCI-VHI<sub>opt</sub>를 추가로 살펴보았다. 본 연구에서는 시가지-건조지역(UA, Urban Area)과 농업지역(AA, Agricultural Area), 낙엽수림 우점 지역(DF, Deciduous Forest), 혼합림 지역(MF, Mixed Forest), 초지(G, Grass)로 분류하여 분석을 수행하였다. Fig. 10은 EDCI-VHI<sub>opt</sub>가 1보다 큰 값을 가지는 픽셀에 대한 상대 비율을 토지피복 유형별로 보여주고 있으며, 빨간색으로 칠해진 것은 해당 월에서 가장 높은 상대 빈도를 의미한다. Fig. 10을 월별로 살펴보면, 3~8월의 경우에는 모든 토지피복 유형에서 53% 이상의 픽셀이 1보다 큰 값을 갖고 있음을 알 수 있었다. 1~2월과 9~10월, 12월의 경우에는 AA 및 G가 산림지역(DF 및 MF)보다 기상학적 가뭄의 영향을 받는 식생 분포의 상대 빈도가 높은 것으로 나타났다. 5월 및 7~8월에는 산림지역이 AA 및 G보다 상대적으로 높은 상대 빈도를 보였다. MF와 DF를 비교해 보면, 대체로 MF가 높은 시기가 많으나, 1~2월과 7~8월에는 DF가 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. 반면에, 6월의 경우에는 토지피복 유형과 상관없이 비슷한 상대 빈도를 나타내었다. 이러한 결과는 대체로 토지피복 유형에 따라 기상학적 가뭄에 대한 식생 반응의 차이가 존재함을 의미한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 상관분석을 이용한 VCI와 TCI의 상대적 기여도 분석을 통해 식생에 가해지는 수분 스트레스와 온도 스트레스가 식생 건강성 악화에 어떻게 작용하는지 조사하였다. 이를 통해 월별 및 픽셀별로 가장 적절한 VHI<sub>opt</sub>가 제안되었다. 그리고 SPI와 VHI<sub>opt</sub> 사이의 지체시간 및 전파시간의 확인을 통해 대기로부터의 수분 공급 부족 영향이 낙동강 유역 식생에 어떻게 작용하는지 조사하였다. 그리고 본 연구에서 제안된 VHI<sub>opt</sub>를 이용하여, 기상학적 가뭄이 식생에 미치는 영향을 모니터링하는 지수인 EDCI-VHI<sub>opt</sub>를 제시하였

다. SPI와 VHI<sub>opt</sub>의 이변량 결합 확률 분포로부터 도출된 EDCI-VHI<sub>opt</sub>는 낙동강 유역의 기상 및 식생 상태를 반영하여 기상학적 가뭄에 대한 식생 반응을 정량적으로 제시할 수 있었다. 또한, 토지피복 유형별 EDCI-VHI<sub>opt</sub>의 분석을 통해 토지피복 유형에 따라 기상학적 가뭄으로부터 식생이 받는 영향이 다르게 나타날 수 있음을 보여주었다. 즉, 기상학적 가뭄에 대한 식생 반응은 토지피복 유형에 따라 조사할 필요가 있음을 의미한다. 본 연구에서 제안된 EDCI-VHI<sub>opt</sub>는 기상학적 가뭄과 식생 사이의 반응에 대해 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 강수량 부족으로 인한 기상학적 가뭄으로부터 직접적으로 유발되는 식생 가뭄에 대한 연구를 수행하였다. 하지만 식생 가뭄은 다른 유형의 가뭄(토양수분 가뭄 등)을 거친 후 식생 가뭄으로 전파될 수도 있다. 그리고 기상학적 가뭄은 대기로부터 수분 공급 부족뿐만 아니라 수분 수요 증가 등 다양한 요인으로부터 발생할 수 있다. 식생지수는 어떤 부분을 설명하는 식생지수를 사용하느냐에 따라 또 다른 결과가 도출될 수 있다. 즉, 다양한 기상학적 가뭄지수 및 식생지수와 다른 유형 가뭄의 반응을 통한 추가적인 연구는 식생 가뭄에 대한 이해의 폭을 보다 더 넓힐 수 있을 것이며, 이는 추후 연구로 남겨둔다.

#### 사 사

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 미래변화 대응 수자원 안정성 확보 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2024-00332300).

#### References

Akaike, H. (1998). Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. In selected papers of hirotugu akaike. New York, NY: Springer

- New York, 199–213.
- Bento, V., Gouveia, C., DaCamara, C., and Trigo, I. (2018). A climatological assessment of drought impact on vegetation health index. *Agricultural and forest meteorology*, 259, 286–295.
- Bento, V., Gouveia, C., DaCamara, C., Libonati, R., and Trigo, I. (2020). The roles of NDVI and Land Surface Temperature when using the Vegetation Health Index over dry regions. *Global and planetary change*, 190, 103198.
- Cai, C., Wu, C., Wang, J., Wang, H., Wang, R., Fu, L., and Wen, J. (2024). The main impact factors for the propagation from meteorological drought to socio-economic drought from the perspective of a small area, based on a practical survey. *Water*, 16, 1426.
- Hobbins, M., Wood, A., McEvoy, D., Huntington, J., Morton, C., Anderson, M., and Hain, C. (2016). The evaporative demand drought index. Part I: Linking drought evolution to variations in evaporative demand. *Journal of hydrometeorology*, 17, 1745–1761.
- Ionita, M., Scholz, P., and Chelcea, S. (2016). Assessment of droughts in Romania using the Standardized Precipitation Index. *Natural hazards*, 81, 1483–1498.
- Jung, H., Won, J., Kang, S., and Kim, S. (2023). Spatiotemporal variability of vegetation response to meteorological drought on the Korean Peninsula. *Hydrology research*, 54, 1625–1640.
- Jung, H., Won, J., Lee, J. H., and Kim, S. (2024). Quantitative assessment of vegetation drought vulnerability based on multi-weighted averaging of multiple meteorological drought indices and vegetation indices. *Natural hazards*, 1–20.
- Kogan, F. (1997). Global drought watch from space. *Bulletin of the American meteorological society*, 78, 621–636.
- Korea Rural Community Corporation. (2020). Comprehensive Analysis of the 2020 Agricultural Drought Assessment.
- McKee, T., Doesken, N., and Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *proceedings of the 8th conference on applied climatology*, 17, 179–183.
- Osmani, S., Baik, J., Narimani, R., Kim, J., and Jun, C. (2024). Quantification of interactions among agricultural drought indices within Köppen–Geiger climate zones in Bangladesh. *Agricultural water management*, 302, 108952.
- Palmer, W. (1965). Meteorological drought, Research paper no. 45. US weather bureau, Washington, DC, 58.
- Pearson, K. (1895). VII. Note on regression and inheritance in the case of two parents. *proceedings of the royal society of London*, 58, 240–242.
- Salvadori, G., and De Michele, C. (2004). Frequency analysis via copulas: Theoretical aspects and applications to hydrological events. *Water resources research*, 40.
- Seo, J., Won, J., Lee, H., and Kim, S. (2024). Probabilistic monitoring of meteorological drought impacts on water quality of major rivers in South Korea using copula models. *Water research*, 251, 121175.
- Sklar, M. (1959). Fonctions de répartition à n dimensions et leurs marges. In *Annales de l'ISUP*, 8, 229–231.
- Spearman, C. (1961). The proof and measurement of association between two things. In J. J. Jenkins and D. G. Paterson (Eds.), 45–58.
- Suo, N., Xu, C., Cao, L., Song, L., and Lei, X. (2024). A copula-based parametric composite drought index for drought monitoring and applicability in arid Central Asia. *Catena*, 235, 107624.
- Vicente-Serrano, S., Beguería, S., and López-Moreno, J. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23, 1696–1718.
- Wang, H., Wang, Z., Bai, Y., and Wang, W. (2024a). Propagation characteristics of meteorological drought to hydrological drought considering nonlinear correlations—A case study of the Hanjiang River Basin, China. *Ecological informatics*, 80, 102512.
- Wang, Z., Chang, J., Wang, Y., Yang, Y., Guo, Y., Yang, G., and He, B. (2024b). Temporal and spatial propagation characteristics of meteorological drought to hydrological drought and influencing factors. *Atmospheric research*, 299, 107212.
- Weng, Z., Niu, J., Guan, H., and Kang, S. (2023). Three-dimensional linkage between meteorological drought and vegetation drought across China. *Science of the total environment*, 859, 160300.
- Won, J., and Kim, S. (2023). Ecological drought condition index to monitor vegetation response to meteorological drought in Korean Peninsula. *Remote Sensing*, 15, 337.
- Won, J., Choi, J., Lee, O., and Kim, S. (2020). Copula-based Joint Drought Index using SPI and EDDI and its application to climate change. *Science of the total environment*, 744, 140701.
- Won, J., Seo, J., and Kim, S. (2022). A copula model integrating atmospheric moisture demand and supply for vegetation vulnerability mapping. *Science of the total environment*, 812, 151464.
- Won, J., Seo, J., Lee, J., Lee, O., and Kim, S. (2021). Vegetation drought vulnerability mapping using a copula

- model of vegetation index and meteorological drought index. *Remote sensing*, 13, 5103.
- Wu, C., Zhong, L., Yeh, P., Gong, Z., Lv, W., Chen, B., Zhou, J., Li, J. and Wang, S. (2024). An evaluation framework for quantifying vegetation loss and recovery in response to meteorological drought based on SPEI and NDVI. *Science of the total environment*, 906, 167632.
- Xu, Z., Wu, Z., Shao, Q., He, H., and Guo, X. (2023). From meteorological to agricultural drought: Propagation time and probabilistic linkages. *Journal of hydrology: Regional studies*, 46, 101329.
- Zeng, J., Zhang, R., Qu, Y., Bento, V., Zhou, T., Lin, Y., Wu, X., Qi, J., Shui, W., and Wang, Q. (2022). Improving the drought monitoring capability of VHI at the global scale via ensemble indices for various vegetation types from 2001 to 2018. *Weather and climate extremes*, 35, 100412.
- Zhang, L., Jiao, W., Zhang, H., Huang, C., & Tong, Q. (2017). Studying drought phenomena in the Continental United States in 2011 and 2012 using various drought indices. *Remote sensing of environment*, 190, 96–106.
- Zhang, R., Shangguan, W., Liu, J., Dong, W., and Wu, D. (2024). Assessing meteorological and agricultural drought characteristics and drought propagation in Guangdong, China. *Journal of hydrology: Regional studies*, 51, 101611.
- Zhao, Q., Zhang, X., Li, C., Xu, Y., and Fei, J. (2024). Compound ecological drought assessment of China using a copula-based drought index. *Ecological indicators*, 164, 112141.