

낙동강 유역 강우 시계열의 군집 및 경향성 분석

Cluster and Trend Analysis of Rainfall Time Series in the Nakdong River Basin

왕원준* · 김삼은** · 송재현*** · 이준형**** · 김경탁***** · 김형수*****

Wang, Won-joon*, Kim, Sam Eun**, Song, Jae Hyun***, Lee, Junhyeong****, Kim, Kyung Tak*****,
and Kim, Hung Soo*****

Abstract

In Korea, it is difficult to efficiently manage water resources, due to the variability of rainfall in addition to the increasing outflow due to climate change in recent years. Therefore, if the trends and characteristics of rainfall at each station can be identified in advance, the problems caused by the variability of rainfall can be effectively dealt with. In this study, the data on rainfall characteristics of 64 rainfall stations in the Nakdong river basin were collected for the period 2000 to 2019. The data were analyzed according to the elevation of each station using K-means cluster analysis, and the rainfall trends at each station were identified by homogeneity test and modified Mann-Kendall test. The analysis showed an increasing trend in March, April, November, December, spring and autumn, and a decreasing trend in January, May, September, summer and year. Also, based on the cluster analysis, it was confirmed that when the number of clusters was set to three, the rainfall characteristics were different depending on the elevation of each station. It is believed that linking the characteristics of rainfall by cluster and the results of trend analysis by station derived from the study can be used to come up with a water resource management plan that takes into account the variability of rainfall.

Key words : Rainfall, K-means Cluster Analysis, Modified Mann-Kendall Test, Homogeneity Test

요 지

국내에서는 근래 기후변화의 영향으로 강우량과 유출량의 변동성이 커짐에 따라 수자원을 효율적으로 관리하는 데 어려움을 겪고 있다. 따라서 사전에 관측소별 강우량의 경향성과 특성을 파악할 수 있다면 강우량의 변동성으로 인해 발생하는 문제들을 효과적으로 대처할 수 있다. 본 연구에서는 2000~2019년 낙동강 유역의 64개 강우관측소를 대상으로 K-means 군집 분석을 통해 관측소별 표고에 따른 강우 특성을 파악하고, 동질성 검정과 수정 Mann-Kendall 검정으로 강우량의 경향성을 파악하고자 하였다. 분석 결과 경향성 분석에선 3월, 4월, 11월, 12월, 봄 및 가을에는 증가 추세를 보였고 1월, 5-9월, 여름 및 연도별로는 감소 추세가 나타났다. 또한 군집 분석에서는 군집의 개수를 3개로 설정했을 때 관측소별 표고에 따라 강우 특성이 다르게 나타남을 확인하였다. 연구를 통해 도출된 군집별 강우 특성과 관측소별 경향성 분석 결과를 연계하면 강우량의 변동성을 고려한 수자원 관리 방안을 마련하는 데 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 강우량, 수정 Mann-Kendall 검정, K-means 군집 분석, 동질성 검정

*정회원, 인하대학교 스마트시티공학과 박사수료(E-mail: makelest@naver.com)
Member, Ph.D. Candidate, Department of Smart City Engineering, Inha University

**인하대학교 토목공학과 박사
Ph.D., Department of Civil Engineering, Inha University

***인하대학교 토목공학과 박사수료
Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Inha University

****정회원, 인하대학교 스마트시티공학과 박사수료
Member, Ph.D. Candidate, Department of Smart City Engineering, Inha University

*****정회원, 한국건설기술연구원 선임연구위원, 공학박사
Member, Senior Research Fellow, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

*****교신저자, 정회원, 인하대학교 사회인프라공학과 교수(Tel: +82-32-860-7572, Fax: +82-32-876-9787, E-mail: sookim@inha.ac.kr)
Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil Engineering, Inha University

1. 서론

한국은 지리적으로 산악지역이 많아 하천의 경사가 급하고, 우기에 강우가 집중되어 있어 강우량의 계절 변동성이 매우 크기 때문에 효율적인 수자원 관리가 무척 중요하다 (Park and Yoo, 2018). 따라서 정부에서는 댐, 보 등의 수공 구조물을 건설하여 생·공용수 공급에 필요한 수자원을 확보하고 수력발전과 홍수피해 저감 등에 활용하고 있다. 하지만 국내에서는 근래 기후변화의 영향으로 강우량과 유출량의 변동성이 심화되어 월별, 계절별, 연도별로 수자원의 증감을 고려한 관리 계획 수립에 어려움을 겪고 있다(Bae et al., 2008; Jung et al., 2013). 따라서 수자원 관리 측면에서 강우관측소를 대상으로 군집 분석과 경향성 분석을 수행하여 강우 시계열 자료의 추세와 특징을 사전에 파악하면 용수 공급과 가뭄 및 홍수피해 저감 등에 효과적으로 대처할 수 있다. 본 연구에서는 2000년부터 2019년까지 낙동강 유역의 64개 강우관측소를 대상으로 동질성 검정과 수정 Mann-Kendall (MK) 검정을 적용하여 강우 시계열 자료의 월별, 계절별, 연도별 경향성 분석을 수행하였다. 또한, 경향성이 나타나는 관측소별 강우 특성 및 표고를 기준으로 K-means 군집 분석을 수행하여 경향성이 나타나는 관측소별 특징을 수자원 관리에 활용할 수 있도록 하였다.

경향성 분석과 군집 분석에 관한 연구 사례를 살펴보면 국내의 경우 Oh et al. (2004)은 국내 30개 관측소의 연강우량 자료를 대상으로 경향성 분석을 수행하여 수정 MK 검정이 MK 검정의 대안이 될 수 있음을 보여주었다. Kim et al. (2008)은 기상청 산하 66개 관측소의 강우 및 기온자료를 대상으로 선형회귀 및 Kendall-Tau 방법을 적용하여 경향성 분석을 수행하였다. 분석 결과 여름철에는 강우 발생률과 집중호우의 한계 기준이 증가하였고, 겨울철에는 온도상승이 큰 것으로 나타났다. Park et al. (2012)에서는 금강 유역의 과거 30년치 기상·수문 시계열 자료를 사용하여 단순 선형 회귀분석과 MK 검정을 수행하였다. 경향성 분석 결과 기온은 계절 및 연도별로 모두 증가 추세를 보였고 강수량은 여름철에만 증가 추세가 나타났지만 상대습도는 뚜렷한 감소 추세를 보여주었다. Kim and Heo (2005)에서는 다목적 유전자알고리즘을 이용해서 군집의 개수와 군집 간의 상호관계를 검토하였고, 강우자료에 대해서 지역빈도해석을 적용하여 군집 분석의 효율성과 적용성을 높이고자 하였다.

해외 연구 사례의 경우 Abghari et al. (2013)은 1969-70년부터 2008-09년까지 40년 동안 이란 서부 산악 지역에 위치한 12개 관측소의 강우량과 유출량에 대해서 Kendall-Tau 방법, MK 검정 등을 사용하여 경향성 분석을 수행하였다. 분석 결과 연도별 하천의 유출량은 감소 추세를 보였으며, 월별 유출량의 경향성에서도 10월과 11월에 각각 6개, 7개의 수위관측소에서 감소 추세가 나타났다. McCabe and Wolock (2014)은 1951년부터 2009년까지 미국 전역에 분포하고

있는 516개의 수위관측소의 최소, 최대 및 평균 일유량자료를 사용하여 경향성 분석과 군집 분석을 수행하였다. 14개의 군집으로 분류된 수위관측소를 대상으로 계절별, 연도별 경향성을 비교해본 결과 일부 군집 간 약한 상관성이 나타났고, 기후 지수와는 연관성이 없었다. Rodgers et al. (2020)에서는 미국 남부와 남동부의 139개 수위관측소를 대상으로 군집 분석과 경향성 분석을 수행하였다. 경향성 분석을 수행할 때는 4가지의 동질성 검정을 수행하여 시계열 자료의 품질을 점검하였으며, 분석 결과 모든 기간 동안 유출량의 감소 추세가 크게 나타났다. 그 밖의 연구에서도 단기 및 장기 수문 시계열 자료를 대상으로 동질성 검정과 경향성 분석, 군집 분석을 수행했을 때 관측소별 유의미한 경향성과 특징을 발견하였다(Ramos, 2001; Dorjsuren et al., 2018; Hu et al., 2019; Martel et al., 2018; Asakereh, 2020).

선행 연구 사례를 검토한 결과 국내 연구의 경우 단기 및 장기 수문 시계열 자료에 대한 경향성 분석을 수행할 때 다양한 유형별 동질성 검정을 수행하지 않아 경향성 분석 결과의 신뢰도가 높지 않았다. 따라서 군집 분석과 연계했을 때도 경향성이 나타나는 관측소에서 군집별 특징이 제대로 드러나지 않았다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 개선하고자 2000-2019년의 기간 동안 낙동강 유역의 64개 강우관측소를 대상으로 월별, 계절별, 연도별 강우 시계열 자료에 3가지 동질성 검정과 수정 MK 검정을 적용하여 자료의 경향성을 올바르게 파악하고자 하였다. 또한, K-means 군집 분석으로 도출된 관측소별 위치 및 표고에 따른 강우 특성과 기간별 경향성 분석 결과를 연계하여 건기 및 우기 때 변화하는 강우량의 경향성을 고려한 효율적인 수자원 관리 계획을 마련할 수 있도록 하였다.

2. 강우 시계열 자료의 군집 및 경향성 분석 방법론

2.1 K-means 군집 분석

군집 분석이란 객체들이 가지고 있는 속성정보를 기반으로 유사성을 가지고 있는 객체들끼리 군집화를 수행하는 방법이다(Lee and Chung, 2018). 본 연구에서는 낙동강 유역의 64개 강우관측소를 대상으로 비계층적 군집 분석인 K-means 군집 분석을 수행하였다. 일반적으로 K-means 군집 분석은 여러 유형의 데이터에 적용할 수 있고, 다른 방법과 비교해서 군집화에 필요한 절차가 간단하다는 장점이 있다. Eq. (1)은 종속변수가 최소화될 때까지 알고리즘이 진행되는 K-means 군집 분석의 목적함수를 나타낸 것이다.

$$J = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n |x_i^j - c_j|^2 \quad (1)$$

다만, K-means 군집 분석에서 올바른 군집화 결과를 얻기 위해선 사전에 최적의 군집 개수(k)를 파악해야 한다. 본 연구에서는 최적의 군집 개수를 산정하기 위해 Within cluster sum of squares by cluster (WSS)와 F-test, Silhouette 방법을 사용하였다. WSS는 팔꿈치 방법(The Elbow Method)이 적용된 분석으로 군집 내 총 제곱합에 대해서 음의 기울기를 가진 그래프가 팔꿈치 모양으로 꺾이는 지점을 최적의 군집 개수(k)로 보는 방법이다. 마찬가지로 F-test는 전체 자료의 분산과 그룹 간 분산의 비율로 그려지는 그래프에서 팔꿈치 방법으로 최적의 군집 개수(k)를 찾는다. 하지만 두 방법은 팔꿈치 모양으로 꺾이는 지점을 선정하는 기준이 연구자의 주관적인 판단에 의지한다는 한계를 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 평균 Silhouette 폭이라는 정량화된 기준으로 최적의 군집 개수(k)를 찾는 Silhouette 방법을 추가 적용하였다.

2.2 동질성 검정

일반적으로 동질성 검정은 Eq. (2)와 같이 시계열 자료에서 특정 지점을 기준으로 이전과 이후 사이에 급격한 변동이 발생하여 경향성과 같은 모집단의 특성에 영향을 주는지를 탐지하는 방법이다. 강우 시계열 자료에 대한 경향성 분석에서 신뢰도 높은 분석 결과를 얻기 위해선 양질의 데이터를 선별해 사용하는 것이 무엇보다 중요하다. 동질성 검정을 통과하지 못한 시계열 자료는 자료의 경향성을 잘못 판단할 수 있으므로 경향성 분석을 수행하기 전에 동질성 검정으로 시계열 자료의 품질을 점검해야 한다.

$$x_i = \begin{cases} \mu + \epsilon_i & i = 1, 2, \dots, m \\ \mu + \Delta + \epsilon_i & i = m+1, m+2, \dots, n \end{cases} \quad (2)$$

본 연구에서는 강우 시계열 자료에 대해서 동질성 검정인 Standard Normal Homogeneity Test (SNHT)와 Pettitt's Test, Buishand Range Test (BRT)를 각각 적용하였다. SNHT는 모수적 가설검정 방법으로 시계열 자료를 정규분포라고 가정하고 평균값을 기준으로 구조적인 변화의 발생 여부를 검정통계량 T_k 을 통해 판단한다. Eq. (3)은 SNHT에서의 검정통계량 T_k 의 산정식을 나타낸 것이다.

$$T_k = kz_1^2 + (n-k)z_2^2 \quad (1 \leq k < n) \quad (3)$$

$$z_1 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \quad z_2 = \frac{1}{n-k} \sum_{i=k+1}^n \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma}$$

그밖에 Pettitt's Test는 비모수적 가설검정 방법으로 SNHT와 달리 특별한 가정 없이 자료를 순위로 대체하여 검정하는 방법이다. 또한 BRT는 SNHT와 동일한 모수적 가설검정이기 때문에 검정 절차는 SNHT와 동일하지만 구조적인 변화의 발생 여부를 판단하는 검정통계량에 차이가

있다. Eq. (4)는 Pettitt's test의 검정통계량인 K_T 의 산정식이며, Eq. (5)는 BRT의 검정통계량 Rb 의 산정식을 나타낸 것이다.

$$U_k = 2 \sum_{i=1}^k r_i - k(n+1) \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$K_T = \max | U_k |$$

$$S_k = \sum_{i=1}^k (x_i - \hat{x}) \quad (1 \leq i \leq n) \quad (5)$$

$$Rb = \frac{(\max S_k - \min S_k)}{\sigma}$$

2.3 수정 Mann-Kendall 검정

Mann-Kendall (MK) 검정은 시계열 자료의 경향성을 파악하는 데 사용되는 대표적인 비모수적 가설검정 방법이다. MK 검정에서 귀무가설은 시계열 자료에 경향성이 없고 통계적으로 독립임을 가정하며, 대립가설은 시계열 자료에 증가 혹은 감소 경향이 있다고 가정한다. 일반적으로 시계열 자료를 X_1, X_{i+1}, \dots, X_n 이라고 할 때 검정통계량 S 와 분산 $V(S)$ 을 기준으로 귀무가설이 기각되면 자료에 경향성이 있다고 판단한다. 최종적으로 MK 검정은 유의수준을 0.05로 설정했을 때 p 가 $p < 0.05$ 이고 검정통계량 S 가 Eq. (6)의 조건을 만족하여 귀무가설을 기각할 경우 시계열 자료에 경향성이 존재한다고 판정한다. 또한, 경향성의 증가 혹은 감소 특성을 파악하고, 다른 시계열 자료와 경향성의 정도를 비교할 때는 Eq. (7)과 같이 통계량 Z 를 기준으로 판단한다.

$$| S | > z_{1-2/\alpha} \sqrt{V(S)} \quad (6)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (7)$$

하지만, MK 검정은 분석에 사용한 시계열 자료가 자기상관성을 가지고 있을 경우 비경향성인 자료를 경향성이 있다고 판정할 위험이 있다. 따라서 본 연구에서는 수정 MK 검정을 사용하여 강우 시계열 자료의 경향성 분석을 수행하였다. 수정 MK 검정은 시계열 자료가 가지고 있는 자기상관성을 제거하기 위해 $V(S)$ 에 보정계수(n/n^*)를 적용한 수정된 분산 $V^*(S)$ 을 사용하는 방법이다. Eq. (8)은 보정계수를 적용한 $V^*(S)$ 의 산정식이며, Eq. (9)는 lag-1의 수정 MK 검정을 수행할 때 사용되는 효과적인 자료의 크기(Effective

Sample Size, ESS)인 n^* 의 산정식을 나타낸 것이다(ρ_1 는 lag-1의 계열 상관관계수).

$$V^*(S) = V(S) \frac{n}{n^*} \quad (8)$$

$$n^* = \frac{n}{1 + 2 \frac{\rho_1^{n+1} - n\rho_1^2 + (n-1)\rho_1}{n(\rho_1 - 1)^2}} \quad (9)$$



Fig. 1. Topographic Characteristics of the Nakdong River Basin and the Distribution of National Rivers

3. 낙동강 유역 강우 시계열 자료의 군집 및 경향성 분석

3.1 낙동강 유역의 수문·기상학적 특성

낙동강 유역은 6개의 대권역과 33개의 중권역으로 구성되어 있으며, 전체 면적은 31,785 km²로 4대강 유역 중 두 번째로 큰 유역이다(Park and Lee, 2021). 지형학적으로 낙동강 유역 내에는 태백산맥과 소백산맥이 위치하고 있기 때문에 국가하천인 낙동강의 본류는 출구점인 남해안까지 최단 거리가 아닌 4번 우회하여 유출된다. 낙동강은 다른 국가하천과 비교해서 하천의 경사도가 매우 완만할 뿐만 아니라 하폭이 넓고 침식이 심하기 때문에 과거부터 홍수피해가 자주 발생하였다. 또한 홍수피해를 저감하기 위해 댐, 보 등 수공 구조물이 건설된 이후에도 2016년 태풍 차바, 2018년 콩레이, 2019년 미탁 등과 같이 태풍으로 인한 홍수피해를 자주 겪고 있다. 따라서 최근 정부에서는 낙동강 유역에 대해 구조적 대책뿐만 아니라 물관리 종합계획과 하천유역 수자원관리계획 등과 같은 비구조적 대책도 함께 수립하고 있다. Fig. 1은 낙동강 유역의 지형학적 수치 표고와 국가하천인 낙동강 본류의 분포를 나타낸 것이다.

3.2 강우관측소의 특성 요소를 이용한 군집 분석

본 연구에서는 2000년부터 2019년까지 한국수문조사연보에 기재된 낙동강 유역에 위치한 환경부와 기상청의 64개 강우관측소를 대상으로 관측소별 속성정보를 세부지표로 설정하여 K-means 군집 분석을 수행하였다. 관측소별 세부지표는 총 4개로 각각 ① 표고, ② 연평균 강우량, ③ 우기(6-9월) 평균 강우량, ④ 연도별 월 최대강우량의 평균이다. 4개의 세부지표 외에도 위도, 경도와 같은 관측소별 위치정보는 선행 군집 분석을 수행했을 때 반영 여부에 상관없이 강우 관련 세부지표에 이미 영향을 주고 있어서 제외하였다. 그리고 K-means 군집 분석을 수행하기에 앞서 WSS, F-test, Silhouette 방법을 적용하여 4개의 세부지표를 사용했을 때 최적의 군집 개수를 탐색하였다. Fig. 2는 WSS와 F-test, 그리고 군집의 개수(k)가 3개일 때의 평균 Silhouette 폭을

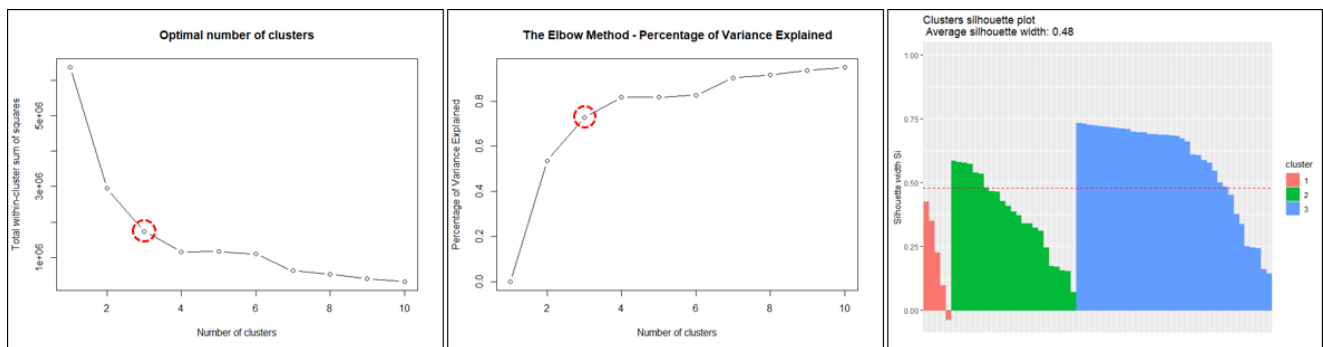


Fig. 2. Selection of the Optimal Cluster for the Rainfall Stations (Left : WSS, Center : F-test, Right : Average Silhouette Width)

나타낸 것이며, Fig. 3은 k = 3일 때 강우관측소별 군집의 분포를 나타낸 것이다.

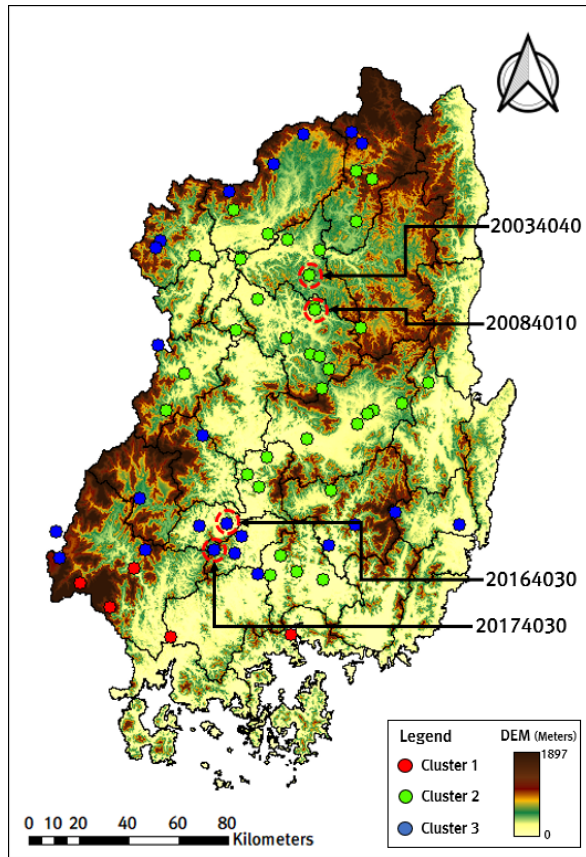


Fig. 3. Selected 3 Clusters for the Rainfall Stations

3가지 방법을 사용하여 최적의 군집 개수를 탐색한 결과 k = 3일 때가 가장 적합한 것으로 판정되었다. 특히 Silhouette 방법에서는 k = 3일 때 평균 Silhouette 폭이 0.48로 산정되어 다른 군집 개수로 설정했을 때와 비교해서 최적의 결과로 확인되었다. 또한 Fig. 3에서 군집별 강우관측소의 위치 및 표고를 살펴보면 군집 1의 5개의 관측소는 남부 해안지역에 인접해 있으며, 군집 2는 대부분의 관측소가 저지대 평야 지역에 있다. 또한, 군집 3의 관측소는 군집 2와는 반대로 대다수가 산악지역과 같은 고지대에 있다. 각각의 강우관측소들은 군집에 따라 강우 특성도 다르게 나타나는데, 실제로 Table 1과 같이 군집별 세부지표 통계값을 살펴보면 군집에 따른 차이가 명확히 나타난다.

세부지표를 구성하는 연평균 강우량, 우기 평균 강우량, 연도별 월 최대강우량의 평균 및 표고에 대해서 평균, 표준편차, 변동계수 등을 군집별로 산정하여 비교해보면 군집 1, 군집 3, 군집 2 순으로 크게 산정되었다. 세부지표의 통계값이 가장 큰 군집 1의 경우 남부 해안지역에 인접해 있다는 위치 특성이 강우 세부지표에 반영되어 3개의 군집 중 강우 세부지표의 통계값이 가장 크게 산정되었다. 또한 대부분의 관측소가 고지대에 위치한 군집 3은 저지대에 위치한 군집 2의 관측소와 비교했을 때 모든 강우 세부지표의 통계값이 크게 산정되었다. 실제로 군집 1에서도 관측소별 평균 표고가 다른 군집들보다 크게 산정되었는데, 이를 통해 낙동강 유역에서는 표고에 따라 강우 특성이 다르게 나타남을 확인할 수 있다.

Table 1. Basic Statistics for Selected Clusters and Rainfall Amount of Each Time Scale

		Average annual rainfall (mm)	Average rainfall during the rainy season (mm)	Average monthly maximum rainfall (mm)	Elevation (m)
Cluster 1 (n = 5)	Average	1,687.05	1,662.00	500.75	210.62
	Max	1,980.52	1,949.17	593.65	567.80
	Min	1,511.78	1,485.65	421.83	30.20
	Standard deviation	184.61	181.96	68.45	200.04
	Coefficient of variation	10.94	10.94	13.66	94.97
Cluster 2 (n = 35)	Average	1,041.37	1,021.37	321.22	108.14
	Max	1,159.22	1,139.30	359.30	329.40
	Min	912.64	890.93	283.90	15.90
	Standard deviation	62.76	62.57	22.54	76.51
	Coefficient of variation	6.02	6.12	7.01	70.75
Cluster 3 (n = 24)	Average	1,275.28	1,253.55	391.21	190.36
	Max	1,443.91	1,409.27	439.40	452.00
	Min	1,174.11	1,154.04	334.61	11.20
	Standard deviation	71.75	70.53	28.18	133.59
	Coefficient of variation	5.62	5.62	7.20	70.17

3.3 강우 시계열 자료의 동질성 검정

경향성 분석을 수행하기에 앞서 관측소별 강우 시계열 자료에 3가지 동질성 검정(SNHT, Petti's Test, BRT)을 적용하여 경향성 분석에서 유의미한 결과를 얻을 수 있는 관측소별 강우자료를 선별하였다. 월별, 계절별, 연도별 강우자료에 대해서 3개의 동질성 검정을 모두 통과하면 'useful', 2개는 'doubtful', 1개 이하는 'suspect'로 분류하여 강우자료의 신뢰도를 평가하였다. Table 2는 64개 강우관측소의 월별, 계절별, 연도별 강우자료에 대한 동질성 검정 결과를 정리한 것이다.

64개 강우관측소를 대상으로 동질성 검정을 시행한 결과 기간별로 대다수의 관측소에서 동질성 검정을 통과하였다. 다만, 1월, 5월, 10월과 여름의 경우 동질성 검정을 통과하지 못한 관측소가 다수 발생하였는데, 그중에서 10월의 경우 'useful'로 평가된 관측소가 존재하지 않았다. 동질성 검정을 통과하지 못한 이유를 종합적으로 검토해본 결과 10월에 발생한 가을 태풍이 낙동강 유역의 강우량에 급격한 변동을 준 것으로 확인되었다. 실제로 20년 동안 낙동강 유역에 영향을 준 10월 태풍의 연도별 발생 횟수를 살펴보면 4회 이상인 경우가 7번 있었다. 따라서 본 연구에서는 경향성 분석에서 유의미한 결과를 얻고자 3개의 동질성 검정을 모두 통과하여 'useful'로 분류된 관측소별 강우 시계열 자료에 대해서만 경향성 분석을 수행하였다.

Table 2. Results of Homogeneity Test for Monthly and Seasonal Rainfall Time Series in 64 Stations

Month & Season	Useful	Doubtful	Suspect
January	47	16	1
February	64	0	0
March	59	4	1
April	62	2	0
May	42	21	1
June	61	2	1
July	61	3	0
August	64	0	0
September	64	0	0
October	0	4	60
November	61	3	0
December	64	0	0
Spring	64	0	0
Summer	30	15	19
Fall	62	2	0
Winter	64	0	0
Year	59	4	1

3.4 강우 시계열 자료의 경향성 및 군집별 특성 분석

3.4.1 강우 시계열 자료의 경향성 분석

Table 3은 낙동강 유역의 64개 강우관측소 중 3가지 동질성 검정을 모두 통과한 시계열 자료를 대상으로 수정 MK 검정을 적용한 결과이다.

2000년부터 2019년까지 월별, 계절별, 연도별 경향성 분석을 수행한 결과 기간별로 경향성이 발견된 모든 관측소에서 경향성의 증감이 동일하게 나타났다. 월별 경향성의 증감을 살펴보면 3월, 4월, 11월, 12월은 증가, 1월, 5월, 6월, 7월, 8월, 9월은 감소 경향을 보인다. 그리고 월별 경향성이 나타난 시점 중에선 3월과 6월일 때 가장 많은 관측소에서 경향성이 발견되었다. 또한 5월부터 9월까지 5개월 연속으로 감소 경향이 나타난 점이 눈에 띄는데, 이러한 특징은 계절별 경향성 중에서 6-8월에 해당하는 여름의 경향성에서도 나타난다. 최종적으로 연도별 경향성에서도 6개월 동안 발생한 강우량의 감소 추세에 영향을 받아 연도별로 강우량이 감소하는 것으로 나타났다. 다음 Table 4는 기간별로 경향성이 가장 많이 나타난 대표 강우관측소에 대해서 수정 MK 검정으로 산정한 통계량 Z를 정리한 것이다.

4개의 강우관측소별로 산정된 통계량 Z값을 살펴보면 동일 기간일 때 Z값의 부호는 일치하며, 3월과 6월에는 4개 관측소에서 모두 경향성이 나타났다. 특히 20034040 관측소와 20174030 관측소의 경우 5월부터 9월 사이에 나타난 감소 추세가 여름과 연도별 경향성에도 영향을 주었음을

Table 3. The Number of Stations with Trends for Monthly and Seasonal Rainfall Time Series

Month & Season	The number of rainfall stations	Trend
January	4	Decrease (↓)
February	0	-
March	45	Increase (↑)
April	6	Increase (↑)
May	15	Decrease (↓)
June	27	Decrease (↓)
July	9	Decrease (↓)
August	17	Decrease (↓)
September	3	Decrease (↓)
October	0	-
November	2	Increase (↑)
December	9	Increase (↑)
Spring	2	Increase (↑)
Summer	17	Decrease (↓)
Fall	3	Increase (↑)
Winter	0	-
Year	6	Decrease (↓)

Table 4. Mann-Kendall Z Statistics for Representative Rainfall Stations on Monthly and Seasonal Rainfall Time Series

Month & Season	20034040	20084010	20164030	20174030
January	-	-	-	-
February	-	-	-	-
March	2.276	2.129	3.963	4.374
April	-	-	2.741	2.277
May	-2.039	-2.604	-2.039	-
June	-2.400	-2.330	-2.165	-2.290
July	-	-	-	-1.968
August	-	-2.396	-	-1.998
September	-2.403	-	-	-
October	-	-	-	-
November	-	-	-	-
December	-	2.301	2.941	-
Spring	-	-	-	-
Summer	-	-	-	-2.780
Fall	-	-	-	-
Winter	-	-	-	-
Year	-2.063	-	-	-

확인할 수 있다.

3.4.2 군집별 강우 시계열 자료의 특성 분석

강우관측소별로 산정한 월별, 계절별, 연도별 경향성 분석 결과 중에서 관측소별 추세가 가장 많이 나타난 3월과 6월을 대상으로 군집 분석 결과를 적용해 보았다. Figs. 4와 5는 3월과 6월에 추세가 나타난 관측소를 군집별로 나타낸 것이다.

3월의 경우 총 45개의 관측소에서 강우량이 증가 경향을 보이는데, 그중에서 주로 저지대에 위치한 군집 2의 관측소에서 경향성이 나타났다. 군집 3에서는 낙동강 유역 상류의 고지대에 위치한 관측소에선 경향성이 나타나지 않았으며, 주로 하류의 저지대에 위치한 관측소에서 경향성이 발견되었다. 군집 1의 관측소들도 2개의 관측소를 제외하면 모두 저지대에서 경향성이 나타났다.

반대로 6월의 경우 총 27개의 관측소에서 감소 경향이 나타났는데, 그중에서 대부분의 관측소가 저지대에 위치한 군집 2의 경우 낙동강 유역 상류에 있는 관측소에만 경향성이 나타났다. 또한, 군집 3의 경우 3월에는 경향성이 나타나지 않았던 상류 고지대의 관측소에서 감소 추세가 나타났다는 특징이 있다.

최종적으로 본 연구에서는 64개 강우관측소에 대한 군집

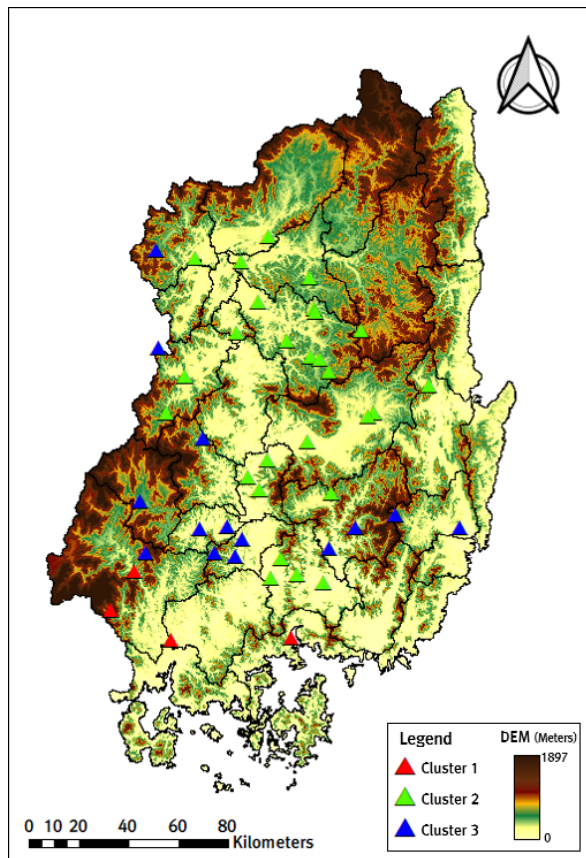


Fig. 4. Distribution of Rainfall Stations with Increasing Trend for Each Cluster (March)

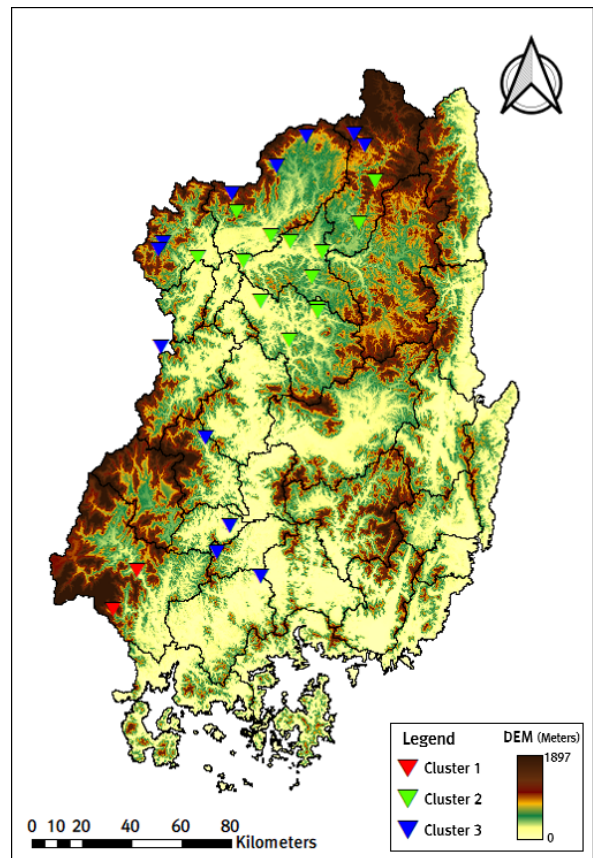


Fig. 5. Distribution of Rainfall Stations with Decreasing Trend for Each Cluster (June)

분석 결과와 관측소별 강우량의 경향성 분석 결과를 연계하면 관측소별 위치 및 표고에 따른 강우 특성과 경향성을 쉽게 파악할 수 있음을 확인하였다. 해당 분석 결과는 낙동강 유역의 효율적인 수자원 관리와 치수 및 이수 대책 마련에 활용할 수 있다. 예를 들어 낙동강 유역 하류에 위치한 다목적댐인 남강댐과 합천댐은 3월에 고지대 위치한 관측소에서 강우량이 증가 추세를 보이므로 홍수기 전까지 물 수급에 지장이 없도록 저수를 관리에 대한 운영계획을 새로 갱신할 수 있다. 또한, 낙동강 유역은 극한 강우사상의 발생을 고려하여 경향성 분석을 수행해도 5월부터 9월까지의 강우량은 감소 추세를 보인다. 따라서 낙동강 유역 상류의 내성천 유역과 같이 농작물의 재배면적이 넓은 유역들은 강우량의 경향성을 반영한 효율적인 수자원 관리 계획을 마련할 필요가 있다.

4. 결론

본 연구에서는 2000년부터 2019년까지 20년의 기간 동안 낙동강 유역의 64개 강우관측소를 대상으로 K-means 군집 분석과 수정 MK 검정을 적용하여 군집별 관측소들의 강우량 추세와 특징을 파악해 보고자 하였다. K-means 군집 분석은 표고, 연평균 강우량, 우기 평균 강우량, 연도별 월 최대강우량의 평균을 세부지표로 설정하였고, 군집의 개수를 3개로 설정했을 때 최적의 결과를 얻을 수 있었다. 수정 MK 검정을 활용한 경향성 분석에서는 3가지 동질성 검정을 모두 통과한 강우 시계열 자료만 사용했을 때 월별, 계절별, 연도별로 강우량의 경향성에 대해서 유의미한 결과를 얻을 수 있었다. 최종적으로 본 연구에서는 다음과 같은 시사점을 도출하였다.

첫 번째는 낙동강 유역의 64개 강우관측소를 대상으로 K-means 군집 분석을 통해 도출된 관측소별 표고와 강우 특성의 상관성이다. 세부지표를 구성하는 표고, 연평균 강우량, 우기 평균 강우량, 연도별 월 최대강우량의 평균에 대한 통계값은 군집 1, 군집 3, 군집 2의 순서로 크게 산정되었다. 각각의 군집별로 나타나는 공통된 특징은 관측소별 표고 및 위치에 따라 강우 특성이 다르게 나타난다는 점이다. 실제로 대부분의 관측소가 저지대 평야에 위치한 군집 2보다 고지대에 위치한 군집 3의 강우 세부지표의 통계값이 크게 산정되었다. 또한, 해안지역에 인접해 있는 군집 1의 관측소들은 평균 표고와 강우 세부지표의 크기가 3개의 군집 중에서 가장 크다는 점도 이러한 주장을 뒷받침해준다.

두 번째는 월별, 연도별, 계절별로 나타나는 관측소별 강우량의 경향성 차이이다. 20년 치 강우 시계열 자료를 사용하여 관측소별 경향성 분석을 수행한 결과 기간별로 다른 경향성이 도출되었다. 월별 경향성에서는 3월, 4월, 11월, 12월에는 증가 추세를 보이고, 1월과 5월부터 9월까지는 감소 추세가 나타났다. 이러한 추세는 계절별, 연도별

경향성 분석에서도 나타나는데, 봄과 가을은 강우량이 증가 추세를 보이며, 여름과 연도별로는 감소 추세가 나타난다. 특히 낙동강 유역 전역에서 발생한 3월과 6월의 강우량의 증가 및 감소 추세는 계절별, 연도별 강우량의 경향성에도 큰 영향을 주었다. 본 연구에서 도출한 강우관측소의 월별, 계절별, 연도별 경향성 분석 결과는 향후 강우량의 경향성을 고려한 효율적인 수자원 관리에 활용할 수 있다.

세 번째는 강우관측소별 군집 분석과 경향성 분석 결과를 연계한 활용방안 마련이다. 관측소별 표고와 강우 특성을 기준으로 군집을 구성했을 때 월별, 계절별, 연도별로 경향성이 나타나는 관측소마다 다른 특징을 보였다. 예를 들어 3월의 경우 저지대에 위치한 관측소 위주로 강우량이 증가하고 있으므로 영향을 받는 유역에선 분석 결과를 반영하여 치수 및 이수 대책을 갱신해야 한다. 마찬가지로 낙동강 유역에서는 5월부터 9월까지 강우량이 지속적으로 감소 추세를 보이므로, 농작물의 재배면적이 넓은 유역과 공업단지 조성으로 공업 용수가 많이 필요한 유역 등에서는 강우사상이 발생하지 않는 기간 동안 효율적인 수자원 관리에 주의를 기울여야 할 것이다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 물관리연구사업의 지원을 받아 연구되었습니다(21AWMP-B121100-06).

References

Abghari, H., Tabari, H., and Talaei, P.H. (2013). River flow trends in the west of Iran during the past 40 years: Impact of precipitation variability. *Global and Planetary Change*, Vol. 101, pp. 52-60.

Asakereh, H. (2020). Decadal variation in precipitation regime in northwest of Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 139, No. 1, pp. 461-471.

Bae, D.H., Jung, I.W., and Chang, H. (2008). Potential changes in Korean water resources estimated by high-resolution climate simulation. *Climate Research*, Vol. 35, pp. 213-226.

Dorjsuren, B., Yan, D., Wang, H., Chonokhuu, S., Enkhbold, A., Yiran, X., et al. (2018). Observed trends of climate and river discharge in Mongolia's Selenga sub-basin of the lake Baikal basin. *Water*, Vol. 10, No. 10, 1436.

Hu, M., Sayama, T., Try, S., Takara, K., and Tanaka, K. (2019). Trend analysis of hydroclimatic variables in the kamo river basin, Japan. *Water*, Vol. 11, No. 9, 1782.

- Jung, I.W., Bae, D.H., and Lee, B.J. (2013). Possible change in Korean streamflow seasonality multi-model climate projections. *Hydrological Processes*, Vol. 27, pp. 1033-1045.
- Kim, B.K., Kim, B.S., and Kim, H.S. (2008). On the change of extreme weather event using extreme indices. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers B*, Vol. 28, No. 1B, pp. 41-53.
- Kim, T., and Heo, J.H. (2005). Cluster analysis of precipitation data using multi-objective genetic algorithms. *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference* (pp. 558-561). Korea Water Resources Association.
- Lee, M., and Chung, G. (2018). Cluster analysis of snowfall observatory using K-means algorithm. *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference* (pp. 412-412). Korea Water Resources Association.
- Martel, J.L., Mailhot, A., Brissette, F., and Caya, D. (2018). Role of natural climate variability in the detection of anthropogenic climate change signal for mean and extreme precipitation at local and regional scales. *Journal of Climate*, Vol. 31, No. 11, pp. 4241-4263.
- McCabe, G.J., and Wolock, D.M. (2014). Spatial and temporal patterns in conterminous United States streamflow characteristics. *Geophysical Research Letters*, Vol. 41, No. 19, pp. 6889-6897.
- Oh, J.S., Kim, B.S., Kim, H.S., and Seoh, B.H. (2004). Trend detection of serially correlated hydrologic series. *Journal of Korean Wetlands Society*, Vol. 6, No. 4, pp. 35-43.
- Park, G.B., and Lee, Y.H. (2021). Current status of water management in the nakdong river basin. *Water for Future*, Vol. 54, No. 9, pp. 10-17.
- Park, J.H., Lee, G.S., Yang, J.S., and Kim, S.W. (2012). A hydrometeorological time series analysis of geum river watershed with GIS data considering climate change. *Journal of Korea Spatial Information Society*, Vol. 20, No. 3, pp. 39-50.
- Park, S.Y., and Yoo, S.H. (2018). Necessity of change in dam management policy against climate change. *Journal of Water Policy & Economy*, Vol. 30, pp. 67-78.
- Ramos, M.C. (2001). Divisive and hierarchical clustering techniques to analyse variability of rainfall distribution patterns in a mediterranean region. *Atmospheric Research*, Vol. 57, No. 2, pp. 123-138.
- Rodgers, K., Roland, V., Hoos, A., Crowley-Ornelas, E., and Knight, R. (2020). An analysis of streamflow trends in the southern and southeastern US from 1950-2015. *Water*, Vol. 12, No. 12, 3345.

Received	March 18, 2022
Revised	March 18, 2022
Accepted	March 29, 2022