

단일 지점 연직 관측 기반 여름철 대기 상태 분류

박성영 · 문우석*

국립부경대학교 지구환경시스템과학부

(접수일: 2026년 4월 7일, 수정일: 2026년 5월 5일, 게재확정일: 2026년 5월 20일)

Classifying Summer Atmospheric States from Single-Site Vertical Profiling

Seongyoung Park and Woosok Moon*

Division of Earth and Environmental System Sciences, Pukyong National University, Busan, Korea

(Manuscript received 7 April 2026; revised 5 May 2026; accepted 20 May 2026)

Abstract This study classifies summer atmospheric states using single-point vertical profiling from the Boseong Meteorological Tower (June–August, 2015–2021) and links the resulting clusters to precipitation characteristics and large-scale circulation patterns. Principal component analysis (PCA) and K-means clustering were applied independently to monthly anomaly profiles of potential temperature (θ), relative humidity (RH), and zonal and meridional wind components (u' , v'), yielding three clusters per month (nine clusters in total). The nine clusters were subsequently categorized into four precipitation regimes — Favorable, Frequency-type, Intensity-type, and Dry — based on precipitation occurrence probability and the 90th-percentile precipitation amount. Composite analysis using ERA5 reanalysis data revealed that the Favorable regime is characterized by negative 500-hPa geopotential height anomalies coupled with southwesterly low-level moisture transport, forming a canonical precipitation-enhancing structure. In contrast, certain Dry-regime clusters exhibited a paradoxical suppression of precipitation despite strong dynamical forcing, attributable to a thermodynamic moisture deficit in the lower troposphere. Some of the Frequency-type clusters showed anomalously high precipitation frequency despite upper-level anticyclonic circulation, underscoring the dominant role of low-level moisture convergence. The Intensity-type regime demonstrated that dynamical forcing can preferentially amplify precipitation intensity rather than frequency, suggesting that these two aspects of precipitation are governed by distinct atmospheric mechanisms. The profiling-based classifications were linked to precipitation characteristics, and ERA5 composites showed distinct large-scale circulation patterns for each regime. The proposed framework holds potential for portability to other observation sites and for integration with numerical prediction systems, offering a cost-effective approach to precipitation diagnosis in observation-limited regions.

Key words: Atmospheric state classification, Single-point vertical profiling, K-means clustering, Precipitation regime

*Corresponding Author: Woosok Moon, Division of Earth and Environmental System Sciences, Pukyong National University, 45 Yongso-ro, Nam-gu, Busan 48513, Korea.
Phone: +82-51-629-6643, Fax: +82-51-629-6638
E-mail: woosok.moon@gmail.com

1. 서 론

동아시아 여름 몬순(East Asian Summer Monsoon, EASM)은 한반도 여름철 강수의 주된 원인이며, 계절 규모·계절 내 규모·일기계 규모의 복합적 메커니즘에 의해 조절된다(Ding and Chan, 2005; Kim et al., 2010). 한반도의 여름철 강수는 편서풍 파동 및 북태평양 아열대 고기압의 위치 변동, 저층 수증기 수송, 상층 발산 구조 등이 복잡하게 상호작용하면서 계절 내에서도 큰 변동성을 나타낸다(Kim et al., 2010). 특히 최근 수십 년간 한반도의 여름철 극한 강수는 유의미하게 증가하고 있으며, 이에 따른 홍수 및 재산 피해가 사회·경제적 문제로 지속적으로 부각되고 있다(Baek et al., 2017).

이러한 여름철 강수의 복잡한 변동성을 이해하기 위해, 선행 연구들은 다양한 관측 자료와 재분석 자료를 활용하여 강수 유형 및 종관 패턴을 분류해 왔다. Song and Sohn (2015)은 열대강우측정위성(The Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM) 강수레이더 반사도 프로파일에 K-means 클러스터링을 적용하여 동아시아 집중호우를 냉형(cold type)과 온형(warm type)의 두 가지 유형으로 객관 분류하고, 각 유형에 대응하는 종관 환경을 분석하였다(Song and Sohn, 2015). Park et al. (2021a)은 자기조직화지도(Self-Organizing Map, SOM) 알고리즘을 이용하여 한반도 비열대성 집중호우 사례를 6개의 종관 패턴으로 분류함으로써, 패턴별 발생 빈도의 시공간적 분포와 강수 위험 지역의 차이를 제시하였다(Park et al., 2021a). 또한 Park et al. (2021b)은 2020년 여름 한반도 기록적 강수를 분석하여, 집중호우 사례의 종관 특성이 발생 시기에 따라 상이하며 열대·외열대 원격상관이 강수 체제 전환에 중요한 역할을 함을 보였다(Park et al., 2021b). 한편 비지도 기계학습 기법은 대기 경계층의 연직 구조 분류에도 성공적으로 활용되었는데, Liao et al. (2018)은 SOM을 이용하여 베이징 상공의 경계층 기상 유형을 분류하고 각 유형이 대기 오염 농도를 상이하게 조절함을 보여주었다(Liao et al., 2018).

그러나 대부분의 선행 연구는 다중 지점 관측망, 레이더·위성 관측, 광역 재분석 격자 자료 등 광범위한 관측 인프라에 의존하고 있어, 단일 지점 연직 관측만으로 주변 대기 상태와 강수 특성을 동시에 진단하는 체계는 상대적으로 연구가 미흡하다. 단일 지점의 고해상도 연직 관측 자료는 고도별 열역학·동역학 정보를 연속적으로 제공하며, 이를 체계적으로 분류하면 관측 인프라가 제한된 지역에서도 대기 상태의 유형화 및 강수와의 연관성 도출이 가능하다. 나아가 단일 지점 기반의 분류 방법론이 다른 관측 지점으로 이식될 수 있다면, 강수 진단·예측 체계의 공간적 확

장성을 높이는 데 기여할 수 있을 것이다.

이에 본 연구는 전남 보성 기상관측타워(Boseong Meteorological Tower)에서 관측된 단일 지점 연직 자료(2015~2021년 6~8월)에 주성분 분석(PCA)과 K-means 군집화를 결합한 비지도 분류 기법을 적용하여, 여름철 대기 상태를 객관적으로 유형화하고 이를 강수 특성 및 대규모 대기 순환 패턴과 연결하는 것을 목적으로 한다. 구체적으로는 강수 발생 확률과 상위 90백분위 강수량을 기준으로 각 클러스터를 강수 레짐으로 분류하고, ERA5 재분석 자료를 이용한 합성 분석을 통해 각 레짐에 대응하는 대규모 순환 특성을 분석한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다: 2절에서 사용 자료 및 분석 방법을, 3절에서 분류 결과 및 강수 레짐별 특성을, 4절에서 결론 및 향후 연구 방향을 기술한다.

2. 자료 및 분석 방법

2.1 자료 및 전처리

본 연구에서는 보성 기상관측타워에서 관측된 연직 기상 자료를 분석에 사용하였다. 관측 변수는 잠재온도(θ), 상대습도(RH), 풍향, 풍속이며, 각 변수는 지상~300 m 범위의 복수 고도에서 측정된 연직 프로파일 형태로 구성된다. 분석에는 일별 평균값을 사용하였으며, 분석 기간은 2015~2021년 여름철(6~8월)이다.

보성 기상관측타워(이하 관측탑)는 전라남도 보성군에 위치하며($34^{\circ}46'N$, $127^{\circ}13'E$), 국립기상과학원이 2013년 12월에 설치·운영 중인 국내 최고 높이(307 m)의 종합 기상관측 시설이다(NIMR, 2014). 관측탑은 해안선에 근접한 간척지 위에 조성된 면적 약 1,700 ha의 논경지 가운데 위치하며, 탑의 남동쪽 약 1.5 km 거리에 득량만(Deukryang Bay) 해안이 접하고 있다(Lim and Lee, 2019). 관측지 북쪽에는 고도 576 m의 산이 위치하여 관측지가 삼면의 산지로 둘러싸인 구조를 형성하고 있으며, 북동쪽으로는 약 7 km에 걸쳐 평지가 이어지고 서쪽에는 좁은 계곡이 위치한다.

이러한 지점 특성은 관측탑에서 측정되는 대기 연직 구조에 복합적인 영향을 미친다. 해안 간척지라는 지형 조건으로 인해 해풍과 육풍의 주기적 순환이 뚜렷하게 나타나며(Lim and Lee, 2019), 야간에는 서쪽 계곡에서 발생하는 계곡풍이 하층 풍향에 영향을 미치는 것으로 보고되어 있다(Lee, 2018). 또한 간척지 특성상 지면의 균질성이 높아 연직 관측 자료의 공간 대표성 확보에 유리한 반면, 해양과 육지의 열용량 차이에서 비롯된 국지적 온도·습도 변동은 저층 열역학 구조에 추가적인 변동성을 부여할 수 있다. 따라서 본 연구에서 도출된 클러스터별 저층 수증기 구조 및 바

람 이상 패턴에는 보성 지점의 해양-지형 환경이 부분적으로 반영되어 있을 가능성이 있으며, 이에 대한 검토는 4절의 한계 논의에서 다루어진다.

계절 배경 효과를 제거하고 일별 변동성을 부각시키기 위해, 각 변수의 편차는 해당 월(6월·7월·8월 각각)에 속하는 2015~2021년 전체 관측일의 고도별 평균을 제거하여 산출하였다. 예컨대 6월 분석에서는 2015~2021년 6월에 해당하는 모든 관측일의 고도별 평균이 기준값으로 사용된다. 이는 월 내 배경 대기 상태를 제거하고 일 단위 변동성만을 부각하기 위함이다. 풍향·풍속 자료는 기상학적 관례($0^\circ = \text{북}$, $90^\circ = \text{동}$)에 따라 먼저 동서 성분(u)과 남북 성분(v)으로 변환한 후, 동일한 방법으로 월 평균을 제거하여 편차(u', v')를 산출하였다. 이로써 클러스터링의 입력 변수는 θ' , RH', u', v'의 네 가지 연직 편차 프로파일로 구성된다.

대기장 분석에는 ERA5 재분석 자료를 사용하였다. ERA5는 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)가 Copernicus Climate Change Service (C3S)를 통해 제공하는 5세대 전지구 대기 재분석 자료로, 과거 대기 상태를 일관된 자료동화 체계로 재구성한 자료이다(Hersbach et al., 2020). 본 연구에서는 수평 해상도 0.25° 의 ERA5 자료 중 500 hPa 지위고도(Z500)와 850 hPa 수평 바람장을 중관 순환 분석에 활용하였다. 강수 특성은 ERA5의 총강수량 변수인 total precipitation (tp)를 일 누적 강수량(mm day^{-1})으로 변환한 자료를 바탕으로, 클러스터별 평균 일강수량, 상위 90백분위 일강수량, 강수 발생 확률로 정량화하였다. 강수 발생 확률은 일 강수량이 0.1 mm day^{-1} 를 초과하는 날의 비율, 즉 $P(tp > 0.1 \text{ mm day}^{-1})$ 로 정의하였다.

2.2 연직 구조 기반 클러스터링 방법

각 날짜별로 θ' , RH', u', v'의 연직 편차 프로파일을 결합하여 단일 입력 벡터를 구성하고, 이를 해당 날짜의 연직 대기 구조를 대표하는 자료로 사용하였다. 변수 간 단위 차이에 따른 스케일 불균형을 제거하기 위해 표준화(zero mean, unit variance)를 적용한 후, PCA를 통해 전체 분산의 약 93% 이상을 설명하는 주성분을 추출하고, 차원 축소된 자료에 K-means 군집화를 적용하였다.

클러스터 수 결정을 위해 Within-Cluster Sum of Squares, WCSS 감소율(elbow method)과 Silhouette score를 $k = 2\sim 7$ 에서 월별로 산출하였다(Fig. 1). Elbow curve에서는 세 월 모두 $k = 2$ 에서 $k = 3$ 구간의 WCSS 감소폭이 가장 컸으며(6월: 1096, 7월: 898, 8월: 1034), 이후 감소율이 완만해졌다. Silhouette score는 6월 $k = 2$ (0.317), 7월 $k = 5$ (0.324)에서 각각 최대였으며, 8월은 $k = 3\sim 7$ 구간에서 0.24~0.27로 평탄하여 통계만으로 단일 최적 k를 확정하기 어려웠다. 이에 표본 수 안정성 기준을 추가로 적용하였다. 통계적 최적 k가 가장 높은 7월의 경우, Silhouette이 $k = 5$ (0.324)에서 최대를 보이나 월 표본 수(~ 184 일)에서 $k = 5$ 는 클러스터당 평균 약 37일에 불과하여 강수 발생 확률 및 강도의 안정적 추정에 불충분하다. $k = 3$ 은 클러스터당 평균 약 61일을 확보하며, 6·8월에서도 세 달에 걸쳐 물리적으로 해석 가능한 연직 구조를 일관되게 산출하였다. 이를 종합하여 $k = 3$ 을 최종 클러스터 수로 결정하였다. 클러스터링은 계절 내 배경 대기 조건의 월별 차이를 반영하기 위해 6월, 7월, 8월에 대해 각각 독립적으로 수행하였다.

또한, 연직 프로파일(10~300 m)의 사용이 지상 단독 관측에 비해 분류에 실질적인 정보 이득을 제공하

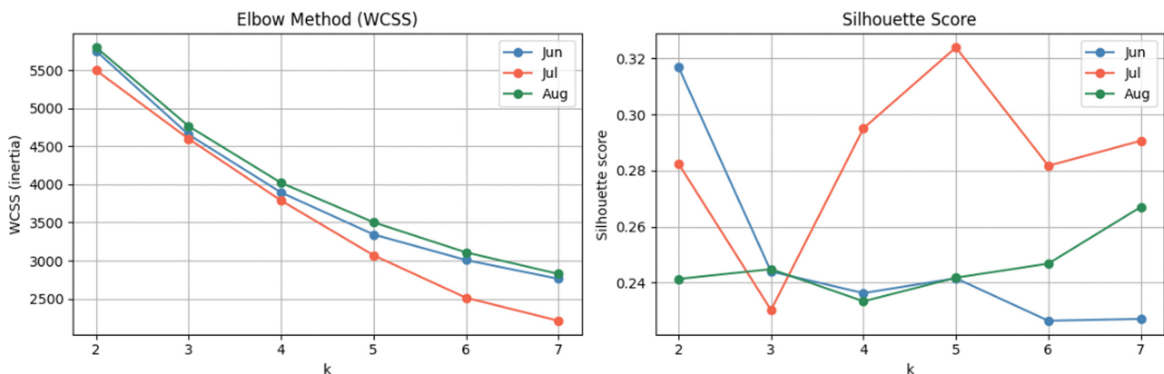


Fig. 1. Results of cluster number selection for June (blue), July (orange), and August (green). The rate of WCSS decrease diminishes substantially beyond $k = 3$ in all three months. Scores vary across months and do not converge on a single statistically optimal k , motivating the additional use of sample-size stability criteria in the final selection of $k = 3$ (see Section 2.2).

는지 정량적으로 평가하기 위해, 동일한 k-means 파이프라인을 지상 최하층(10 m) 단일 고도의 θ , RH', u' , v' 만을 입력 변수로 재실행하고, Hungarian algorithm 기반 레이블 매핑을 통해 원래 연직 프로파일 기반 분류와의 클러스터 일치율 및 Adjusted Rand Index (ARI)를 산출하였다. 이 비교 분석의 결과는 3.1절 말미에서 클러스터별 연직 이상 구조와 함께 기술된다.

2.3 강수 레짐 정의 및 대기장 분석

각 클러스터의 강수 특성은 강수 발생 확률 [P ($tp > 0.1 \text{ mm day}^{-1}$)]과 상위 90백분위 일강수량을 기준으로 평가하였으며, 이를 바탕으로 고빈도-고강도, 고빈도-중강도, 저빈도-고강도, 저빈도-저강도의 네 가지 강수 레짐으로 분류하였다. 강수 발생 시의 평균 강도를 나타내기 위한 강수 효율 지표 [$I = \text{평균 일강수량} / [P (tp > 0.1 \text{ mm day}^{-1})]$]를 보조 지표로 산출하여 강도형·빈도형 레짐의 특성 해석에 활용하였다.

중관 순환과의 연관성 분석을 위해 클러스터별 Z500 편차와 850 hPa 저층 바람에 대한 합성(composite) 분석을 수행하였다. 또한 합성장의 통계적 신뢰도를 평가하기 위해 모든 월별 cluster의 Z500 및 850 hPa 바람 편차에 대해 bootstrap 기반 유의성 검정을 수행하였다. 각 cluster에 속한 날짜를 복원추출하여 composite 평균장을 500회 반복 계산하였으며, 각 격자점에서 95% bootstrap 신뢰구간을 산출하였다. 산출된 신뢰구간이 0을 포함하지 않는 격자점을 통계적으로 유의한 편차 영역으로 정의하였다. 이를 통해 각 강수 레짐에 대응하는 기압 배치 및 수증기 수송 특성을 파악하였다.

또한 보성타워 연직 관측자료의 활용성을 ERA5 하층 재분석 자료와 비교하기 위해 민감도 분석을 수행하였다. 비교 자료로는 보성타워에 가장 가까운 ERA5 단일 격자의 1,000-975 hPa 기압면 자료를 사용하였으며, 변수는 θ , RH', u' , v' 로 구성하였다. 비교의 공정성을 확보하기 위해 보성타워 기반 클러스터링에 실제 사용된 날짜와 동일한 날짜만을 ERA5 분석에 사용하였고, 두 자료에 대해 동일한 표준화, PCA 및 K-means 클러스터링 절차를 적용하였다. 이후 각 자료원별로 강수 발생 확률, 평균 일강수량, 상위 90백분위 일강수량의 클러스터 간 범위(range)를 산출하여 레짐 분리도를 비교하였다.

3. 결 과

3.1 연직 이상 구조의 클러스터별 특성

본 절에서 제시하는 클러스터 번호(0, 1, 2)는 각 월에 대해 독립적으로 부여된 것으로, 동일한 번호가 서로 다른 달에서 물리적으로 동일한 대기 상태를 의미

하지 않는다. 레짐 간 비교는 클러스터 번호 대신 3.2절에서 정의하는 강수 레짐 명칭을 기준으로 수행한다.

도출된 클러스터들은 θ , RH', u' , v' 의 연직 이상 구조에서 뚜렷한 차이를 보였으며, 월별 주요 특성은 Fig. 2에 제시하였다.

6월(Fig. 2a)의 경우, 냉습 구조인 cluster 0은 전 고도에서 음의 θ 와 양의 RH'가 나타나며, 약한 양의 v' 를 동반한다. 온난·건조 구조인 cluster 1은 양의 θ 와 음의 RH'를 보이며, 바람 편차는 전반적으로 약하다. cluster 2는 열역학적으로 cluster 1과 유사하나, 강한 양의 u' 와 음의 v' 가 추가적으로 동반되어 동역학적으로 뚜렷한 수평 흐름이 특징적이다.

7월(Fig. 2b)의 경우, 저층 수증기 유입이 활발한 구조인 cluster 2는 양의 RH'와 강한 양의 v' 가 특징적이다. cluster 1은 전 고도에 걸쳐 양의 θ 와 음의 RH'가 나타나 건조하고 강수 발생에 불리한 열역학적 조건을 형성하며, v' 의 편차는 동일 월 내 다른 클러스터에 비해 다소 제한적이다. cluster 0은 음의 θ 와 함께 음의 u' , v' 편차가 두드러진다.

8월(Fig. 2c)의 경우 cluster 2는 비교적 강한 음의 θ 와 중립에 가까운 RH'를 보이며, 바람 편차의 절대적 크기는 동일 월 내에서 상대적으로 작다. 다만 u' 의 서풍 성분이 유지되며, v' 는 거의 0에 가까운 값을 보인다. 배경 상태에 가까운 구조인 cluster 0은 전 고도에서 양의 θ 가 두드러지며, 수증기 및 바람 편차는 상대적으로 약하다. cluster 1은 음의 RH'와 뚜렷한 u' , v' 편차를 보이나, 수증기가 부족하여 강수로 이어지지 않는 특성을 보인다.

각 월의 클러스터 구조는 세부적인 연직 구조의 특성에는 차이가 나타나며, 이는 각 달의 배경 대기 조건이 클러스터링 결과에 반영된 결과이다. 특히 저층 수증기 분포와 바람 방향의 조합은 이후 강수 특성 및 대규모 순환과의 연결에서 중요한 지시자 역할을 한다.

또한 연직 프로파일 자료가 지상 단일 고도 자료보다 대기 상태의 차이를 더 명확히 구분하는 데 기여하는지 확인하기 위해, 동일한 클러스터링을 지상 10 m 단일 고도 자료만으로 재수행하고 원래 분류와의 클러스터 일치율 및 ARI를 비교하여 추가 민감도 분석을 수행하였다(Fig. 3). 분석 결과, 월별 일치율은 6월 93.5% (ARI = 0.791), 7월 57.0% (ARI = 0.215), 8월 72.2% (ARI = 0.377)로 나타났다. 7월에서 가장 낮은 ARI (0.215)가 관측되었는데, 이는 동아시아 여름 몬순 절정기의 연직 풍 시어 및 수증기 성층화가 지상 단독 자료로는 충분히 분류되지 않음을 정량적으로 나타낸다. 연직 프로파일 기반 C1 (56일) 중 39일(70%)이 지상 단독 분류에서 다른 클러스터로 이탈하였으며, 이는 연직 프로파일이 포착하는 응집된 대기 구조

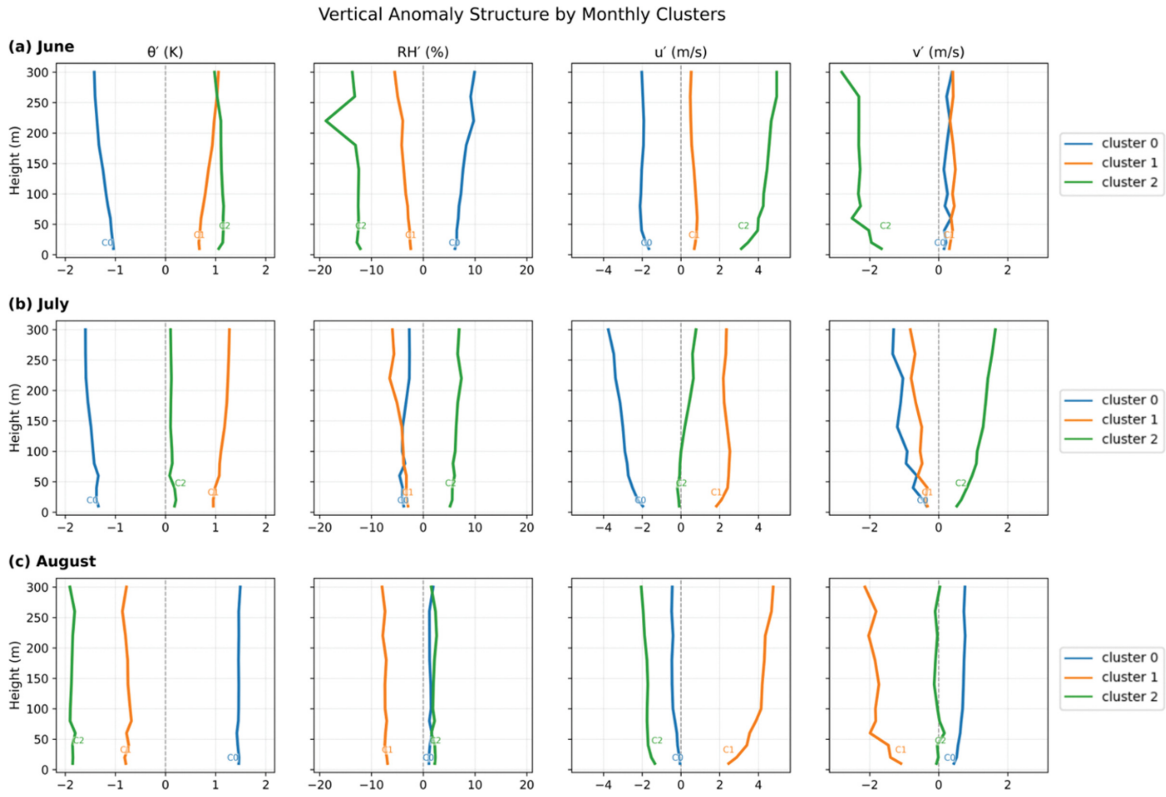


Fig. 2. Vertical anomaly profiles of potential temperature (θ' , K), relative humidity (RH', %), zonal wind (u' , $m s^{-1}$), and meridional wind (v' , $m s^{-1}$) for each cluster derived from K-means clustering applied to (a) June, (b) July, and (c) August. Clusters 0, 1, and 2 are distinguished by different line colors. Each profile represents the composite mean of days assigned to the corresponding cluster.

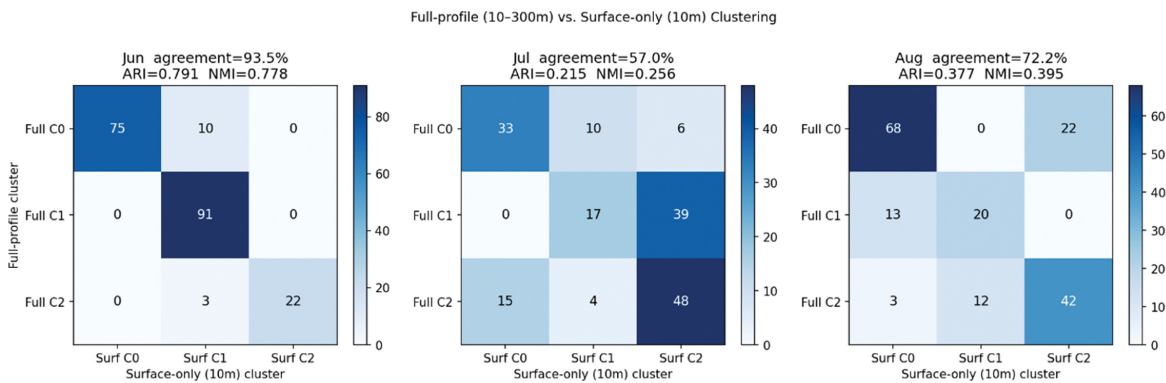


Fig. 3. Contingency matrices comparing k-means cluster assignments based on full vertical profiles (10-300 m) versus surface-only observations (10 m) for (a) June (agreement = 93.5%, ARI = 0.791), (b) July (agreement = 57.0%, ARI = 0.215), and (c) August (agreement = 72.2%, ARI = 0.377). Rows indicate full-profile clusters (C0-C2) and columns indicate surface-only clusters (C0-C2). Numbers in each cell represent the count of days assigned to the corresponding combination.

가 지상 조건만으로는 식별되지 않는 경우가 빈번함을 나타낸다. 6월의 상대적으로 높은 일치율(93.5%)은

해당 시기 경계층이 비교적 잘 혼합되어 지상값이 연직 평균 상태를 어느 정도 대표하기 때문으로 해석된다.

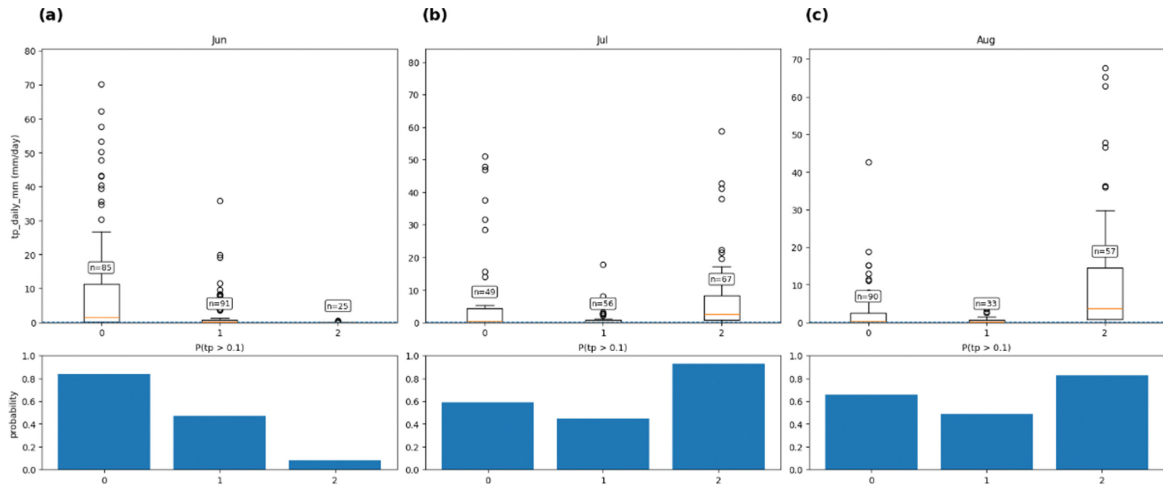


Fig. 4. Precipitation characteristics for each cluster in (a) June, (b) July, and (c) August. Upper panels show box-and-whisker plots of daily total precipitation (mm day^{-1}) for clusters 0, 1, and 2; sample sizes (n) are labeled within each box, and circles denote outliers. Lower panels show the precipitation occurrence probability, defined as $P(\text{tp} > 0.1 \text{ mm day}^{-1})$, for each cluster. The blue dashed line in the upper panels marks the 0.1 mm day^{-1} threshold.

3.2 클러스터별 강수 특성 및 레짐 분류

각 클러스터의 강수 통계는 Fig. 4에 제시하였다. 월별 클러스터는 강수 발생 확률과 상위 90백분위 일강수량의 조합에 따라 네 가지 강수 레짐으로 분류되었으며, 이하에서 각 레짐의 특성을 기술한다.

고빈도-고강도의 강수 유리 레짐(favorable regime)에는 6월 cluster 0과 8월 cluster 2가 해당한다. 6월 cluster 0은 강수 발생 확률 약 0.83, 상위 90백분위 일강수량 약 42 mm day^{-1} 로, 두 지표 모두 6월 내에서 가장 높은 값을 나타냈다. 8월 cluster 2 역시 강수 발생 확률이 약 0.82로 8월 내 최고 수준을 보인다. 두 클러스터 모두 3.1절에서 확인된 냉습한 연직 구조 및 남풍 계열의 저층 수증기 수송과 대응된다.

고빈도-중강도의 빈도형 레짐(frequency-type regime)에는 6월 cluster 1, 7월 cluster 2, 8월 cluster 0이 해당한다. 6월 cluster 1과 8월 cluster 0의 강수 발생 확률은 각각 약 0.47과 0.66으로 중간 수준이며, 강수가 비교적 자주 발생하나 극단적인 강수 강도는 제한적이다. 특히 7월 cluster 2는 강수 발생 확률 약 0.93으로 여름철 전체에서 가장 높은 값을 보이면서도 상위 90백분위 일강수량은 중간 수준에 머무르는데, 이는 수증기 공급이 지속적이지만 강한 동역학적 강제가 부재한 상태를 반영한다. 강수 효율 지표(I) 측면에서 빈도형 레짐은 상대적으로 낮은 값을 보이며, 이는 강수가 자주 발생하지만 개별 강수 사례의 강수량은 크지 않음을 의미한다.

저빈도-고강도의 강도형 레짐(intensity-type regime)은 7월 cluster 0에서만 나타난다. 이 클러스터의 강수

발생 확률은 약 0.59로 중간 수준이나, 상위 90백분위 일강수량이 약 39 mm day^{-1} 에 달하여 7월 내 가장 높은 강수 강도를 보인다. 강수 효율 지표(I) 측면에서 강도형 레짐은 높은 값을 보이는데, 이는 강수 발생 빈도는 중간 수준에 머물지만 강수가 한 번 발생할 때 극단적으로 많은 강수량이 집중됨을 나타낸다. 이와 같이 강수 빈도보다 강도가 두드러지는 특성은, 강수 빈도와 강도가 서로 다른 대기 메커니즘에 의해 독립적으로 조절될 수 있음을 시사한다.

저빈도-저강도의 건조 레짐(dry regime)에는 6월 cluster 2, 7월 cluster 1, 8월 cluster 1이 해당한다. 6월 cluster 2의 강수 발생 확률은 약 0.08로 여름철 전체에서 가장 낮으며, 7월 cluster 1과 8월 cluster 1도 강수 발생 확률과 강수 강도 모두 낮은 수준을 보인다. 이는 3.1절에서 나타난 건조한 열역학 구조 및 수증기 수송 부재와 일관된 결과이다.

이와 같은 결과는 단일 지점의 연직 이상 구조만으로도 강수의 빈도와 강도를 동시에 반영하는 레짐 분류가 가능함을 보여준다. 이러한 강수 레짐 특성의 차이는 대규모 대기 순환 분석에서 물리적 근거로 활용된다.

보성타워 연직 관측 기반 분류의 특성을 보다 명확히 평가하기 위해, 동일한 날짜에 대해 ERA5 최근접 단일 격자의 1,000-975 hPa 하층 자료를 이용한 클러스터링 결과와 비교하였다(Table 1). 분석 결과, ERA5 하층 단일 격자 자료도 강수 발생 확률과 평균 강수량 측면에서 일부 레짐 분리 능력을 보였다. 그러나 강수 강도 지표인 상위 90백분위 일강수량의 클러스

Table 1. Comparison of cluster separation ranges for precipitation occurrence probability, 90th-percentile daily precipitation, and mean daily precipitation between Boseong tower vertical observations and ERA5 single-grid 1,000-975 hPa data. The same analysis dates and clustering procedure were used for both datasets.

Period	Source	rain_prob_range	tp_p90_range	tp_mean_range
Jun	Boseong tower vertical obs.	0.755	41.91	10.98
	ERA5 single grid 1,000-975 hPa	0.578	34.65	9.59
Jul	Boseong tower vertical obs.	0.479	36.46	9.45
	ERA5 single grid 1,000-975 hPa	0.484	32.36	10.54
Aug	Boseong tower vertical obs.	0.340	34.74	11.34
	ERA5 single grid 1,000-975 hPa	0.394	30.46	9.88

터 간 분리도는 모든 월에서 보성타워 연직 관측 기반 분류가 더 크게 나타났다. 구체적으로 90백분위 일강수량 범위는 보성타워 기반 분석에서 6월 41.91, 7월 36.46, 8월 34.74였으며, ERA5 기반 분석에서는 각각 34.65, 32.36, 30.46 mm day⁻¹였다. 반면 강수 발생 확률의 범위는 7월, 8월에서 ERA5가 다소 크게

나타났고, 평균 강수량 범위 역시 7월에는 ERA5가 더 크게 나타났다. 그러나 보성타워 연직 관측자료는 90백분위 일강수량 범위에서 상대적으로 큰 값을 보여, 강한 강수와 관련된 대기 상태 차이를 구분하는데 있어서는 ERA5 단일 격자 자료보다 더 유용할 수 있음을 시사한다.

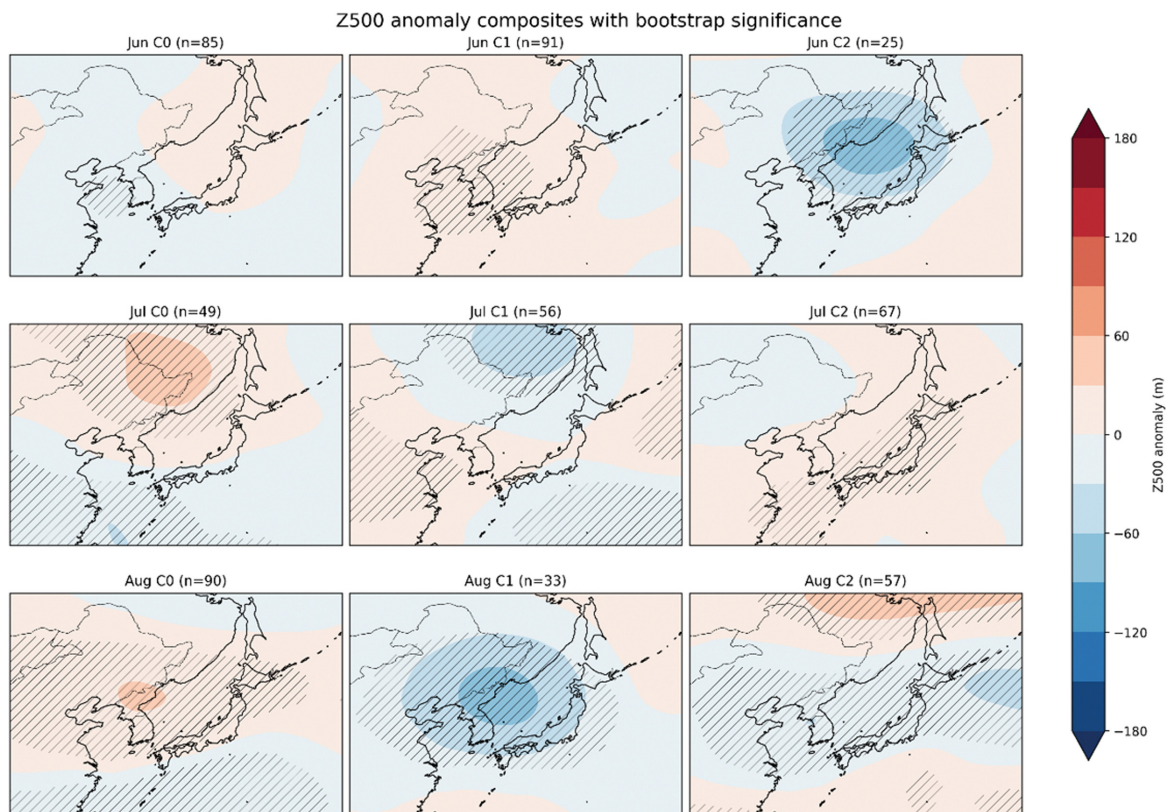


Fig. 5. Composite anomalies of 500-hPa geopotential height (Z500) for each monthly cluster. Panels (a)-(c), (d)-(f), and (g)-(i) indicate clusters 0-2 for June, July, and August, respectively. Hatching indicates grid points where the 95% bootstrap confidence interval of the Z500 anomaly does not include zero.

3.3 대규모 대기 순환과의 연관성

Figure 5와 Fig. 6은 각각 월별 cluster에 따른 500 hPa 지위고도(Z500) 편차와 850 hPa 저층 바람 편차의 composite 분포를 나타낸다. 각 그림은 (a)-(c) 6월, (d)-(f) 7월, (g)-(i) 8월의 cluster 0, 1, 2 순서로 배열하였다. 본 절에서는 이 두 그림을 바탕으로 각 강수 레짐에 동반되는 중층 순환장과 저층 바람장의 특징을 해석하였으며, 해석의 신뢰도를 함께 평가하기 위해 모든 월별 cluster에 대해 bootstrap 기반 유의성 검정을 적용하였다.

유의성 검정 결과, composite 순환장의 통계적으로 유의한 영역은 월별 및 cluster별로 서로 다르게 나타났다. 6월 cluster들은 전반적으로 Z500 편차의 유의 영역이 제한적이었으며, Z500 유의 영역 비율은 cluster 0, 1, 2에서 각각 0.9%, 5.0%, 7.6%로 나타났다. 반면 7월 cluster 0과 1에서는 Z500 유의 영역 비율이 각각 43.5%와 42.7%로 높게 나타났고, 8월 cluster 0과 2에서도 각각 47.8%와 46.2%로 넓은 유의 영역이 확인

되었다. 850 hPa 바람 편차의 경우에도 7월 cluster 0과 1, 8월 cluster 0과 2에서 유의 영역 비율이 상대적으로 높게 나타났다. 이는 각 cluster의 composite 순환장이 월별 배경장과 cluster 내부 순환 구조의 일관성에 따라 유의한 신호의 공간적 범위가 달라짐을 의미한다.

따라서 이하에서는 3.2절에서 정의한 네 가지 강수 레짐을 기준으로 각 레짐에 동반되는 대규모 순환 특성을 해석하되, 유의성 검정 결과를 함께 고려하여 composite 신호의 강도와 신뢰도를 구분하여 논의한다.

강수 유리 레짐(6월 cluster 0, 8월 cluster 2)은 공통적으로 높은 강수 발생 확률과 강수 강도를 보이나, 이를 유발하는 대규모 순환 구조는 월별로 차이를 보인다. 6월 cluster 0의 경우 Z500 편차의 유의 영역은 전체 분석 영역의 약 0.9%로 매우 제한적이었고, 850 hPa 바람 편차의 유의 영역도 약 22.2%에 머물렀다. 따라서 6월 cluster 0은 뚜렷한 중층 순환 강제에 의해 설명되는 레짐이라기보다, 상대적으로 약한 배경

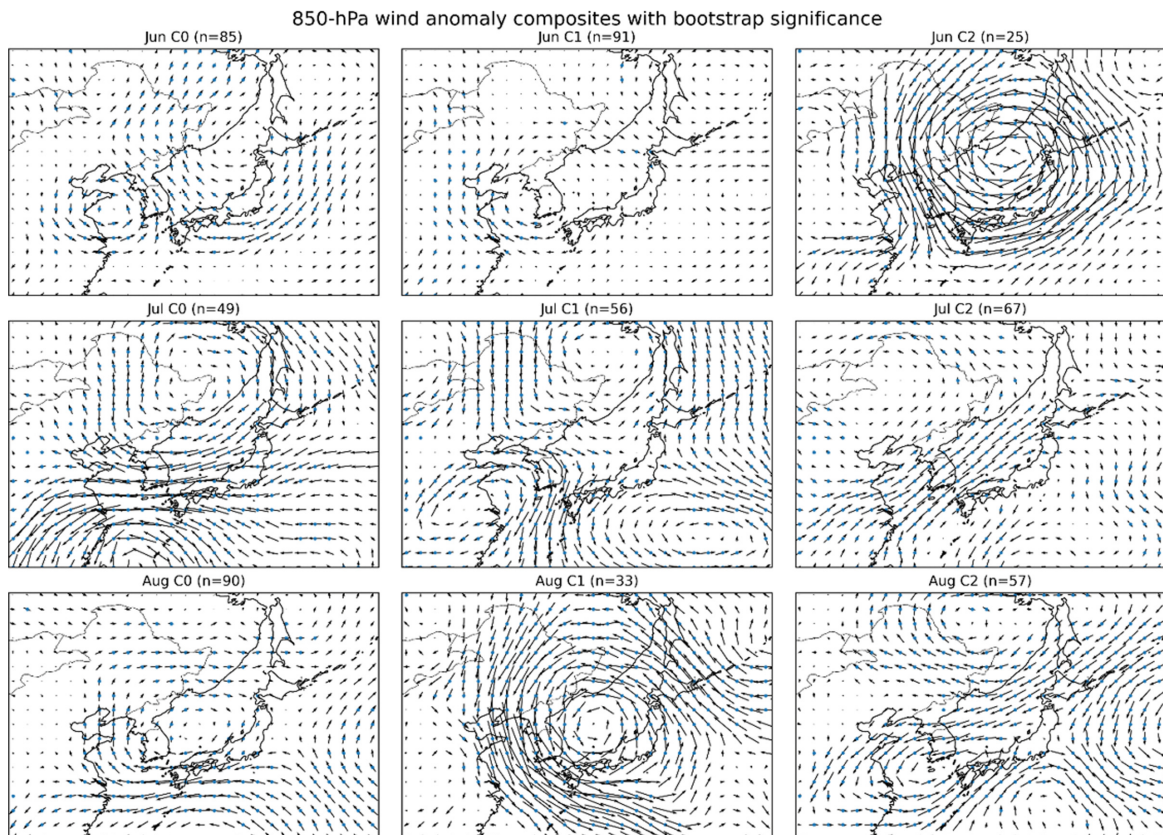


Fig. 6. Composite anomalies of 850-hPa horizontal winds for each monthly cluster. Panels (a)-(c), (d)-(f), and (g)-(i) indicate clusters 0~2 for June, July, and August, respectively. Blue dots indicate grid points where either the zonal or meridional wind anomaly is statistically significant based on the 95% bootstrap confidence interval.

순환장 속에서 하층 바람장 변화와 극지적인 하층 열역학 조건이 결합되어 고빈도-고강도 강수가 나타난 경우로 해석된다.

반면 8월 cluster 2에서는 Z500 편차와 850 hPa 바람 편차의 유의 영역이 각각 약 46.2%와 51.6%로 나타나, 대규모 순환 신호가 상대적으로 뚜렷하였다. 특히 8월 cluster 2에서는 850 hPa에서 한반도 주변 anomalous 동풍 계열 바람이 확인되며, 이는 8월의 습윤한 하층 배경에서 해양성 공기의 유입 경로 또는 하층 수렴 조건을 변화시켜 강수 발생 빈도와 강도를 함께 높였을 가능성이 있다. 따라서 강수 유리 레짐은 하나의 동일한 순환 메커니즘으로 설명되기보다, 6월에는 상대적으로 약한 중층 순환장과 하층 바람 변화의 결합, 8월에는 유의한 중층 순환장과 하층 동풍 계열 편차가 결합된 구조로 구분된다.

빈도형 레짐(6월 cluster 1, 7월 cluster 2, 8월 cluster 0)의 대규모 순환 구조는 월별로 다양하게 나타난다. 6월 cluster 1은 Z500 편차의 유의 영역이 약 5.0%로 제한적이었으며, 850 hPa 바람 편차의 유의 영역도 약 14.4%에 머물러 뚜렷한 대규모 순환 강제는 약하게 나타났다. 반면 8월 cluster 0은 Z500 및 850 hPa 바람 편차의 유의 영역이 각각 약 47.8%와 47.8%로 비교적 넓게 나타나, 고기압성 배경장과 저층 바람장의 변화가 통계적으로도 확인된다. 두 clusters는 모두 강수 발생 확률은 높지만 강수 강도는 제한적이라는 공통점을 보이며, 이는 수증기 공급 또는 하층 습윤 조건이 강수 발생에는 기여하지만 강한 강수로 발달시키는 동역학적 조건은 충분하지 않았기 때문으로 해석된다.

반면 7월 cluster 2는 한반도 부근에서 양의 Z500 편차가 나타남에도 불구하고 여름철 전체에서 가장 높은 강수 발생 확률을 보이는 예외적 사례이다. 유의성 검정 결과, 7월 cluster 2의 Z500 유의 영역은 약 15.8%로 제한적이었으나, 850 hPa 바람 편차의 유의 영역은 약 33.0%로 더 넓게 나타났다. 이는 상층 안정화 효과가 지배적이거나, 저층 바람장과 습윤 조건이 강수 발생 빈도를 높이는 데 상대적으로 더 중요한 역할을 했을 가능성을 시사한다. 따라서 빈도형 레짐은 상층 순환만으로 설명되기 어렵고, 하층 바람장 및 습윤 조건을 함께 고려해야 하는 레짐으로 해석된다.

건조 레짐(6월 cluster 2, 7월 cluster 1, 8월 cluster 1)에서는 세 클러스터 모두 강수 발생이 상대적으로 억제된다. 유의성 검정 결과, 6월 cluster 2는 Z500 편차의 유의 영역이 약 7.6%로 제한적이었고, 850 hPa 바람 편차의 유의 영역은 약 26.9%로 일부 영역에서만 확인되었다. 따라서 기존 composite에서 보이는 저층 순환 신호는 일부 존재하지만, 이를 강한 대규모

강수 유도 구조로 해석하기에는 제한적이다. 특히 6월 cluster 2는 여름철 전체에서 가장 낮은 강수 발생 확률을 보이므로, 동역학적 순환장이 일부 나타나더라도 하층 수분 조건이나 열역학적 불안정이 충분하지 않으면 강수로 이어지지 않을 수 있음을 보여준다.

7월 cluster 1은 Z500 및 850 hPa 바람 편차의 유의 영역이 각각 약 42.7%와 64.1%로 비교적 넓게 나타났다. 강수 발생 확률과 강도는 모두 낮았다. 이는 통계적으로 유의한 순환장이 존재하더라도 그 구조가 강수 유발에 유리한 수분 수송이나 상승 조건으로 연결되지 않을 수 있음을 의미한다. 8월 cluster 1의 경우에도 Z500 유의 영역은 약 16.0%로 제한적이고, 850 hPa 바람 편차의 유의 영역은 약 38.3%로 나타나, 저층 바람장 변화는 일부 확인되지만 강수 강도를 증가시키기에는 불리한 구조였던 것으로 해석된다. 따라서 건조 레짐은 단순히 순환장 편차의 강약보다는, 해당 순환장이 수증기 공급과 상승 운동에 유리한 방향으로 작용하는지 여부가 중요함을 보여준다.

강도형 레짐에 해당하는 7월 cluster 0에서는 한반도 주변의 음의 Z500 편차와 뚜렷한 850 hPa 바람장이 동반된다. Bootstrap 유의성 검정 결과, 7월 cluster 0은 Z500 편차와 850 hPa 바람 편차의 유의 영역이 각각 약 43.5%와 57.9%로 나타나, 강도형 강수 발생 시 비교적 신뢰도 높은 대규모 순환장과 하층 바람장 편차가 동반됨을 보여준다. 그러나 이 클러스터의 강수 발생 확률은 중간 수준에 머무르는 반면, 상위 90백분위 일강수량은 7월 내 가장 높게 나타난다. 이는 동역학적 배경장이 강수 발생 빈도를 지속적으로 증가시키기도는, 특정 열역학적 조건과 결합될 때 강수 강도를 증폭시키는 방향으로 작용할 가능성을 시사한다. 이 저빈도-고강도 특성의 물리적 원인은 3.4 절에서 추가적으로 분석한다.

3.4 7월 강도형 레짐의 강수 강도 증폭 메커니즘

앞 절에서 확인한 바와 같이, 7월 cluster 0은 한반도 주변의 음의 Z500 편차와 뚜렷한 저층 바람장을 동반하며, 이러한 순환장은 대규모 상승과 강수 시스템 발달에 유리한 동역학적 배경을 제공할 수 있다. 그럼에도 이 cluster의 강수 발생 확률은 중간 수준에 머무르는 반면, 상위 90백분위 일강수량은 7월 내 가장 높게 나타나 저빈도-고강도 특성을 보인다. 이러한 특성의 물리적 원인을 보다 구체적으로 파악하기 위해, 7월 cluster 0에 속한 날짜를 비강수일, 강수일, 강한 강수일로 구분하고, 각 하위 집단에 대해 보성타워 연직 관측자료와 ERA5 순환장 자료의 추가 합성 분석을 수행하였다.

분석 결과, 7월 cluster 0 전체의 평균 강수량은 10.6

mm day⁻¹였으나, 강수일 평균 강수량은 17.9 mm day⁻¹, 강한 강수일 평균 강수량은 72.5 mm day⁻¹로 크게 증가하였다. 보성타워 연직 관측자료를 이용한 추가 합성 분석에서는, 강한 강수일에 지상 300 m 평균 RH가 비강수일의 -6.1%에서 +7.5%로 증가하고, θ' 는 -0.9 K에서 -3.4 K로 더 낮아졌다. 이는 강한 강수일에 관측지점 하층 대기가 보다 습윤하고 냉각된 상태였음을 의미한다.

한편 동일한 하위 집단 구분을 ERA5 자료에 적용한 추가 합성 분석에서는, 강한 강수일에 한반도 주변 850 hPa 양의 v 성분이 증가하는 경향이 나타났다. 그러나 보성타워 연직 관측자료에서 7월 cluster 0의 지상 300 m 평균 v' (Fig. 2b)는 음의 값을 보여, 관측지점의 국지 경계층 바람과 850 hPa 중관 규모 바람장이 완전히 동일한 방향성을 보이지는 않았다. 또한 한반도 주변 평균 Z500 편차는 강한 강수일에 가장 큰 음의 값을 보이지 않았다. 이는 7월 cluster 0의 강한 강수가 중층 순환장의 단순한 강화만으로 설명되기보다는, 약한 기압골성 배경장 위에서 하층 습윤화와 광역 저층 수송 조건이 함께 작용할 때 강수 강도가 증폭되는 구조임을 시사한다.

이러한 강도형 레짐이 7월에만 독립적으로 나타나는 것은 7월의 계절적 배경장과 관련될 가능성이 있다. 7월은 한반도 여름 몬순 및 장마의 중심 시기로, 하층 배경 수분 조건이 상대적으로 유리한 시기이다. 따라서 중층 순환장의 음의 편차가 특별히 가장 강하지 않더라도, 특정 사례에서 하층 습윤화와 광역 저층 수송 조건이 결합되면 강수 강도가 크게 증폭될 수 있다. 반면 6월과 8월에는 이러한 조건 조합이 동일한 방식의 독립적인 저빈도-고강도 레짐으로 분리되지 않았으며, 이는 월별 배경장과 강수 형성 메커니즘의 차이를 반영하는 것으로 해석된다. 다만 강한 강수일의 표본 수가 5일로 제한적이므로, 이 해석은 향후 장기 자료와 수분 수송 및 안정도 지표 분석을 통해 추가 검증될 필요가 있다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 보성 기상관측타워에서 관측된 단일 지점 연직 자료를 기반으로 여름철 대기 상태를 분류하고, 이를 강수 특성 및 대규모 대기 순환과 연결하여 분석하였다. PCA와 K-means 클러스터링을 적용한 결과, 여름철 대기 상태는 강수 발생 빈도와 강도의 조합에 따라 강수 유리 레짐, 빈도형 레짐, 강도형 레짐, 건조 레짐의 네 가지로 체계적으로 구분되었다.

강수 유리 레짐(6월 cluster 0, 8월 cluster 2)은 냉습한 연직 구조와 활발한 남서풍 수증기 수송이 결합된 구조를 보이며, 강수 발생에 가장 유리한 열역학-동역

학 조건을 갖춘다. 빈도형 레짐(6월 cluster 1, 7월 cluster 2, 8월 cluster 0)은 강수 빈도는 높으나 강도가 극단적이지 않으며, 지속적인 수증기 공급은 존재하지만 강한 동역학적 강제는 제한적이다. 강도형 레짐(7월 cluster 0)은 7월에만 독립적으로 나타나며, 강한 동역학적 강제가 동반됨에도 강수 발생 확률은 중간 수준에 머문다. 이는 동역학적 강제가 강수 빈도보다 강도를 높이는 방향으로 작용함을 의미하며, 강수 빈도와 강도가 독립적인 대기 메커니즘에 의해 조절될 수 있음을 시사한다. 건조 레짐(6월 cluster 2, 7월 cluster 1, 8월 cluster 1)은 건조한 열역학 구조와 수증기 수송 부재를 특징으로 하며, 강수 발생이 억제된다.

본 연구의 결과는 강수 발생이 단일 대기 조건이 아닌 열역학적 조건과 저층 수증기 수송의 복합적 결합에 의해 결정됨을 보여준다. 특히 6월의 건조 레짐에서는 강한 동역학적 순환에도 불구하고 열역학적 수증기 부족으로 강수가 억제되었으며, 7월의 빈도형 레짐에서는 상층 고기압 구조에도 불구하고 저층 수증기 수송이 지배적 역할을 하는 것이 확인되었다. 이러한 결과는 강수 진단 및 예측 시 상하층 대기 조건을 통합적으로 고려해야 할 필요성을 시사한다. 아울러, 지상 단독 자료와의 민감도 비교에서 확인된 ARI 및 일치율의 월별 차이는, 고도별 열역학-동역학 정보를 입력으로 채택한 본 연구의 방법론적 전체(연직 구조가 지상 단독 관측으로는 구분되기 어려운 대기 상태의 차이를 포착한다는 것)가 정량적으로 성립함을 나타내며, 연직 프로파일 기반 분류 방법론의 타당성을 실증적으로 지지한다. ERA5 최근접 단일 격자의 1,000-975 hPa 하층 자료와의 민감도 비교에서도 보성타워 연직 관측 기반 분류는 모든 월에서 상위 90 백분위 강수량의 클러스터 간 범위를 더 크게 보였다. 이는 단일 지점 연직 관측자료가 강한 강수와 관련된 하층 열역학-동역학 구조를 보다 세밀하게 반영할 수 있음을 시사한다. 다만 강수 발생 확률의 범위는 일부 월에서 ERA5가 더 크게 나타났으므로, 보성타워 자료의 장점은 모든 강수 특성에 대한 일괄적 우수성보다는 강수 강도 레짐 구분에서 더 뚜렷하게 나타나는 것으로 해석된다.

한편, 동일 레짐으로 분류된 클러스터들 사이에서도 세부적인 연직 구조가 월별로 다소 상이하게 나타나는 경우가 있다. 이는 본 연구의 레짐 분류 기준이 물리장 자체의 완전한 일치라 아니라, 강수 발생 확률과 강수 강도의 유사성에 근거하기 때문이다. 강수의 성립에는 충분한 하층 수분, 저층 수송, 수렴-상승 순환 등 여러 조건의 동시 충족이 필요하며, 개별 변수의 부호나 크기가 부분적으로 상이하더라도 이 조건들의 전체적 조합이 유사한 강수 특성으로 귀결될

경우 동일 레짐으로 분류될 수 있다. 나아가 레짐은 강수 유리성 여부뿐 아니라 강수 발생 빈도와 강도의 조합 방식에 따라 기능적으로 구분되며, 이는 각 레짐이 상이한 강수 메커니즘을 대표함을 의미한다.

다만, 본 연구는 단일 지점 관측에 기반한 분석으로, 보성 타워 주변의 국지적 지형 및 해양 효과가 결과에 영향을 미쳤을 가능성을 배제할 수 없다. 특히 빈도형 및 강수 유리 레짐에서 두드러지게 나타난 남동풍 계열의 저층 바람 이상은, 탑의 남동쪽 약 1.5 km에 위치한 득량만으로부터 발달하는 해풍 순환이 부분적으로 반영된 결과일 수 있다(Lim and Lee, 2019). 또한 Dry 레짐에서 관측된 서풍~북서풍 편향은 관측지 서쪽의 좁은 계곡에서 발달하는 야간 계곡풍의 영향을 일부 포함하고 있을 가능성이 있으며(Lee, 2018), 이와 같은 국지 순환의 기여를 정량적으로 분리하는 것은 향후 연구 과제로 남긴다.

또한 7년(2015~2021)의 분석 기간은 계절 간 변동성을 충분히 반영하기에 다소 제한적이므로, 결과의 통계적 대표성은 장기 자료를 통한 검증이 필요하다. 향후 연구에서는 현재의 클러스터링을 보다 세분화하여 각 클러스터에 대응하는 종관 대기 패턴을 정량적으로 특성화하고, 이를 토대로 극한 강수 발생을 유도하는 대기 상태 전이 경로(atmospheric state transition path)를 도출하여 실제 극한 강수 사례와의 대응 관계를 검증할 계획이다. 이렇게 도출된 경로 정보는 단일 지점 연직 관측 자료를 입력으로 하는 강수 예측 모델 개발의 기반으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

결론적으로, 본 연구는 단일 지점 연직 관측만으로도 주변 대기 상태와 강수 특성을 효과적으로 진단할 수 있음을 제시한다. 본 방법론은 예측 모델과의 결합을 통해 성능이 검증될 경우, 관측 지점을 달리하여 동일한 진단 체계를 반복 적용할 수 있는 이식성(portability)을 지닌다. 이는 관측 인프라가 제한된 지역에서도 대기 상태 기반 강수 진단 및 예측을 가능하게 하는 방향으로 발전할 수 있음을 시사한다.

감사의 글

이 논문은 국립부경대학교 자율창의학술연구비(2025년)에 의하여 연구되었습니다.

REFERENCES

Baek, H.-J., M.-K. Kim, and W.-T. Kwon, 2017: Observed

short- and long-term changes in summer precipitation over South Korea and their links to large-scale circulation anomalies. *Int. J. Climatol.*, **37**, 972-986, doi:10.1002/joc.4753.

Ding, Y., and J. C. L. Chan, 2005: The East Asian summer monsoon: An overview. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **89**, 117-142, doi:10.1007/s00703-005-0125-z.

Hersbach, H., and Coauthors, 2020: The ERA5 global reanalysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **146**, 1999-2049, doi:10.1002/qj.3803.

Kim, K.-Y., J.-W. Roh, D.-K. Lee, and J.-G. Jhun, 2010: Physical mechanisms of the seasonal, subseasonal, and high-frequency variability in the seasonal cycle of summer precipitation in Korea. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **115**, D14110, doi:10.1029/2009JD013561.

Lee, Y.-H., 2018: A climatology of nocturnal low-level jets for the topographically complex site at Boseong. *23rd Symp. on Boundary Layer and Turbulence*, Amer. Meteor. Soc., Session 4B.5.

Liao, Z., J. Sun, J. Yao, L. Li, H. Li, J. Liu, J. Xie, D. Wu, and S. Fan, 2018: Self-organized classification of boundary layer meteorology and associated characteristics of air quality in Beijing. *Atmos. Chem. Phys.*, **18**, 6771-6783, doi:10.5194/acp-18-6771-2018.

Lim, H.-J., and Y.-H. Lee, 2019: Characteristics of sea breezes at coastal area in Boseong. *Atmosphere*, **29**, 41-51, doi:10.14191/Atmos.2019.29.1.041.

NIMR, 2014: Application of Boseong global standard observatory. NIMR-2014-B-11, 295 pp.

Park, C., S.-W. Son, J. Kim, E.-C. Chang, J.-H. Kim, E. Jo, D.-H. Cha, and S. Jeong, 2021a: Diverse synoptic weather patterns of warm-season heavy rainfall events in South Korea. *Mon. Wea. Rev.*, **149**, 3875-3893, doi:10.1175/MWR-D-20-0388.1.

_____, and Coauthors, 2021b: Record-breaking summer rainfall in South Korea in 2020: Synoptic characteristics and the role of large-scale circulations. *Mon. Wea. Rev.*, **149**, 3085-3100, doi:10.1175/MWR-D-21-0051.1.

Song, H.-J., and B.-J. Sohn, 2015: Two heavy rainfall types over the Korean peninsula in the humid East Asian summer environment: A satellite observation study. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 363-382, doi:10.1175/MWR-D-14-00184.1.