

## 레윈존데 자료를 이용한 남한의 우기 불안정지수와 환경변수의 특성과 변화 경향 분석

김민수 · 서명석\*

국립공주대학교 대기과학과

(접수일: 2024년 8월 16일, 수정일: 2024년 9월 12일, 게재확정일: 2024년 10월 6일)

### Climatological Characteristics and Trends of Instability Indices and Environmental Parameters for Rainy Season over South Korea Using Rawinsonde Data

Min-Su Kim and Myoung-Seok Suh\*

*Department of Atmospheric Science, Kongju National University, Kongju, Korea*

(Manuscript received 16 August 2024; revised 12 September 2024; accepted 6 October 2024)

**Abstract** The frequency and intensity of extreme weather events are increasing due to climate change, causing significant social and economic damage. Consequently, understanding the climatological atmospheric environment and trends in Korea is becoming important. This study analyzes diurnal and intra-seasonal variations of instability indices and environmental parameters (Inst\_Inds) using rainy season (May to September) upper-air data from seven stations in Korea. We also analyzed trends in the mean of the Inst\_Inds and the counts over the moderately unstable threshold (MUT). CAPE, LI, and TPW exhibit diurnal variation more unstable at 1200 UTC, while KI, SWEAT, and SSI show the most stable at 0600 UTC. Most Inst\_Inds show stronger instability in July and August compared to May, June and September, indicating significant intra-seasonal variations. SWEAT and TPW generally show destabilizing trends regardless of station and month, whereas other indices do not exhibit consistent trends. CAPE and LI show destabilizing trends at Baengnyeongdo and Bukgangneung, but stabilizing trends at Osan, Gwangju, and National Typhoon Center. These trends are particularly strong in July and August, and at Baengnyeongdo and Bukgangneung stations, indicating increased instability in northern Korea. The tendency of MUT excess frequency varies from station to station in most instability indices, but TPW shows an increasing trend regardless of the station. The inconsistent trend of counts over MUT in Inst\_Inds with the recent increase in frequency and intensity of heavy rain in Korea suggests the need to adjust thresholds that currently do not reflect changes in extreme precipitation characteristics.

**Key words:** Climate change, Global warming, Instability index, Rawinsonde, Trend

\*Corresponding Author: Myoung-Seok Suh, Department of Atmospheric Science, Kongju National University, 56, Kongjudae-ro, Kongju-si 32588, Korea.  
Phone: [REDACTED] Fax: +82-41-850-8533  
E-mail: sms416@kongju.ac.kr

## 1. 서 론

최근 온실가스 증가로 인한 지구온난화와 도시열섬 현상 등의 복합적 영향으로 전 세계적으로 기온 및 강수 특성의 변화가 보고되고 있다(Venkataramanan, 2011; Papalexiou et al., 2019). Venkataramanan (2011)은 최근 100년간 지구 평균 기온이 1.0~1.3°C 상승했음을 제시했고, Papalexiou et al. (2019)은 1964~2013년의 일 강수량 자료를 분석하여 유럽, 아시아, 그리고 미국 중서부 지역에서 극한 강수가 증가하고 있음을 제시하였다. 아시아 대륙 동안에 위치한 한반도 또한 대부분의 지역에서 기온이 상승하고 있고, 집중호우와 같은 극한 기상의 강도와 빈도가 모두 증가했음이 다수의 선행 연구에서 제시되었다. Jung et al. (2002)은 1954년부터의 장기간 관측데이터를 이용하여 극한 현상의 변화 경향을 분석한 결과 한반도에서 극단적 최고기온 사건의 빈도가 증가하고 있음을 제시하였다. Chung et al. (2004)은 29년간의 관측데이터를 이용해 한반도의 대도시 및 산업지역에서 연평균 기온이 0.8~2.4°C 상승했음을 제시하였다. Park and Suh (2022)은 30년간의 국내 지상관측 강수량 자료를 분석하여 누적 시간 및 극한 강수수준과 관계없이 극한 강수의 강도 및 빈도에 증가경향이 나타남을 제시하였다. Kim et al. (2023)은 장기간(1973~2022년)의 지상관측 강수량과 ERA-5 재분석자료를 분석해 시간당 최고 강수량에서 확연한 증가 경향이 나타남을 제시했고, 앞으로 극한 강수 사건이 빈번해지고 강도가 더 강해질 수 있음을 제시하였다.

2012년부터 2021년까지 호우, 태풍 등 자연재해에 의한 연간 직접 피해액은 약 3,700억 원에 달하며, 연평균 25명의 인명피해가 발생한 것으로 보고되었다(NDMI, 2023). 특히 2023년 7월에 전국에서 발생한 기록적인 집중호우로 85명의 인명피해와 약 15,000건의 시설 피해가 발생하였는데, 이러한 극한 강수 사례 또한 지구온난화와 관련이 있는 것으로 보고되고 있다(KIPA, 2023). 집중호우의 특성 변화는 대기 상태의 변화와 밀접하게 관련이 있기 때문에 한반도 대기 상태 및 그 변화 경향을 정확히 파악하여 기후 변화에 따른 극한 기상 현상의 변화 가능성을 알아볼 필요가 있다. 이러한 기후학적 접근은 대기 상태와 그 변화를 장기적으로 분석할 수 있게 해주며, 이는 기후 변화에 따른 극한 기상 특성 변화를 예측하고 대비하여 사회적, 경제적 영향을 최소화하는 데 도움을 줄 수 있다.

불안정지수는 대기의 온도, 노점온도, 풍속 등 다양한 변수를 종합적으로 고려하여 산출되며, 이를 위해 레원존데, 재분석자료, 수치모델 등의 자료를 이용한다. 이러한 불안정지수들은 대기의 불안정성을 판단

하여 강한 대류현상이나 집중호우, 뇌우 등의 발생 가능성을 나타내며 대표적으로 Convective Available Potential Energy (CAPE), Showalter Stability Index (SSI), K-Index (KI) 등이 있다. Davis et al. (1997)은 집중호우와 같은 극한 현상의 발생 가능성을 평가할 때 이러한 불안정지수들이 주로 사용되며, 대기 상태 및 변화를 대표할 수 있음을 제시하였다. Peppler (1988)은 미국 지역의 집중호우를 탐지하기 위해 KI, SSI 등의 불안정지수를 분석하였고 해당 불안정지수들이 집중호우 탐지에 효과적임을 제시하였다. Jung et al. (2002)은 계절별 대기 불안정도를 분석하여 불안정지수를 이용한 대기 불안정도의 정량적 표현이 가능함을 제시하였다.

Dalezios and Papamanolis (1991)은 그리스 지역에서 우박이 발생하는 대기 구조를 4개의 유형으로 나누어 분석하였으며, 각각의 대기 구조는 불안정지수들의 조합으로 탐지할 수 있음을 제시하였다. Craven et al. (2004)는 미국 48개 주의 레원존데 관측자료로부터 산출된 불안정지수를 이용해 뇌우 현상 탐지 가능성에 대해 연구한 결과, CAPE와 바람 시어를 같이 사용하는 것이 뇌우 탐지에 효과적임을 제시하였다. Marinaki et al. (2006)은 1981~2003년의 레원존데 관측자료로부터 산출된 7개의 불안정지수를 이용해 그리스 지역에서의 뇌우 탐지 성능을 분석하였고 JI (Jefferson Index)가 가장 높은 탐지 성능을 보임을 제시하였다.

불안정지수를 이용한 연구는 국내에서도 활발히 이루어졌는데, Park and Lee (2008)은 Mesoscale Convective System (MCS)의 발달 메커니즘과 집중호우의 연관성을 연구하고, KI와 SSI 등의 불안정지수가 집중호우를 유발하는 강한 대류 탐지에 유용함을 제시하였다. Kim and Ham (2009)은 CAPE, Bulk Richardson Number (BRN), Storm Relative Helicity (SRH) 등의 불안정지수를 이용하여 지리산 집중호우 사례에 대한 불안정지수별 특성을 연구하였으며, Hong et al. (2015)은 연직 바람관측 장비와 불안정지수를 이용해 2009~2013년에 대한 집중호우 발생 시의 정량적 대기환경을 분석하였다. Eom et al. (2008)은 한반도의 5개 레원존데 관측 지점의 데이터로부터 불안정지수와 환경변수를 산출하고, 지역 및 관측 시간별 기후학적 특성을 분석하였다.

지구온난화와 관련된 대기의 변화 경향을 파악하는 것이 중요해짐에 따라 많은 연구들이 수행되었다. Ferreira et al. (2016)에서는 레원존데 관측 자료에서 산출된 KI와 Total Totals Index (TTI)를 이용해 남미 지역의 계절별 변화 경향을 연구했고 아마존 북부에서는 대기가 불안정해지는 경향이 나타나지만, 아르헨티나와 볼리비아의 일부 지역에서는 안정해지는 경

향이 나타남을 제시하였다. Chakraborty et al. (2018) 은 2006년부터 인도의 Gadanki 지역에서 관측된 레 윈존데 자료를 이용해 불안정지수의 일변동과 계절변 동 및 변화 경향을 연구하여 최근 10년간 대기가 안 정해지는 경향이 나타남을 제시하였다. Eom and Suh (2011)는 기상청에서 제공하는 10년(1997~2006)간의 레 윈존데 자료를 이용하여 불안정지수의 변화 경향을 연구했고 한반도에서 대기 불안정이 증가하고 있음을 제시하였다.

한반도에서 기후변화의 영향으로 극한 강수 현상의 강도가 강해지고 빈도가 증가하고 있는 점(Park and Suh, 2022)을 고려할 때 대기환경의 기후학적 특성과 변화 경향에 대한 정량적인 분석이 필요하다. 한반도 의 경우 Eom and Suh (2011) 이후 최근 레윈존데 관 측지점의 수가 8개로 증가했고, 관측 횟수는 일부 지 점에서 2회에서 4회로 증가하여 대기 상태 및 변화 경 향을 더욱 정밀하게 분석할 수 있지만 추가된 관측지 점의 자료를 통합적으로 활용한 연구가 부족한 실정 이다. 또한 국내에서 진행된 연구는 대부분 현장 관측 자료가 아닌 재분석자료나 모델 결과를 이용한 사례 연구가 주를 이루고 있다. 또한 대기의 상태를 정량적 으로 나타낼 수 있는 다양한 유형의 불안정지수를 사 용한 변화 경향 연구가 거의 이루어지지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 기상청에서 운영 중인 8개 레 윈존데 관측지점의 자료를 바탕으로 산출한 불안정 지수를 활용하여 불안정지수의 기후학적 특성 및 그 변화 경향에 대해 상세히 분석하고자 한다. 2절에서 는 사용한 자료와 연구 방법을, 3절에서는 불안정지 수의 일변동 특성과 지점 및 월별 통계적 특성에 관 해 설명하고 월평균과 임계값 초과 횟수에 대한 변화 경향을 설명하였다. 4절에서는 본 연구에서 도출된 한 반도에서의 불안정지수의 기후학적 특성과 변화 경향

에 대해 토의 및 요약하였다.

## 2. 자료 및 연구방법

### 2.1 자료

본 연구에서는 한반도의 대기환경 특성과 변화 경 향을 분석하기 위해 기상청이 기상정보개방포털(<https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do>)을 통해 제공하는 레 윈존데 관측자료를 사용하였다. 기상청은 1957년부터 레 윈존데 관측을 시작하였으며, 점차 관측지점 수를 늘 려 현재 8개의 레 윈존데 관측지점을 운영 중이다. 분 석에 사용한 관측지점의 정보와 분석 기간은 Table 1 에 제시하였으며, 관측지점들의 공간 분포는 Fig. 1에 제시하였다.

관측지점별로 관측 시작 시기가 상이하어 분석 기

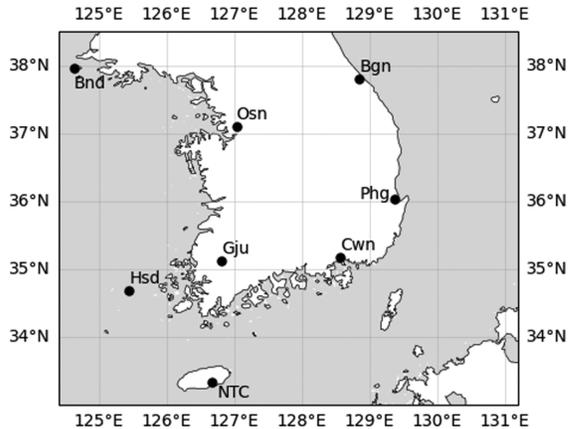


Fig. 1. Spatial distribution of rawinsonde observation stations used in this study.

Table 1. Summary and analysis period of rawinsonde observation stations used in this study.

STN No.	STN name	Abbr.	Begin date	Lat. (°N)	Lon. (°E)	MSL (m)	Used period (yr)
47090	Sokcho	Sco	2001.06.01	38.25	128.57	23	
47104	Bukgangneung	Bgn	2015.12.24	37.81	128.86	79	23
47102	Baengnyeongdo	Bnd	2000.04.01	37.97	124.63	146	24
47122	Osan*	Osn	1957.04.01	37.10	127.03	52	30
47138	Pohang	Phg	1966.11.12	36.03	129.38	1	30
47155	Changwon	Cwn	2014.06.16	35.17	128.57	37	10**
47158	Gwangju*	Gju	1978.01.06	35.12	126.82	13	30
47169	Heuksando	Hsd	2003.05.07	34.69	125.45	69	21
47185	Gosan	Gsn	1989.01.01	33.29	126.16	71	30
47186	National Typhoon Center	NTC	2016.05.23	33.33	126.68	246	

\*Stations with 4 daily observations

\*\*Not used in trend analysis

간은 8개 지점의 최대 30년(1994~2023)의 자료를 사용하였으며, 연중 대기가 가장 불안정한 우기(5~9월)의 자료만 사용하였다. 창원 지점의 경우 관측 기간이 10년으로 다른 지점들에 비해 짧아 변화 경향 분석에서는 제외하였다. 일변동 특성 분석에서는 전체 분석 기간동안 일일 4회의 정기 관측 자료가 존재하는 오산과 광주 지점만 사용하였다. 오산과 광주 지점의 경우 일일 정기 관측 횟수가 4회이지만 불안정지수별 임계값 초과 횟수에 대한 변화 경향 분석에서는 다른 지점과의 일관성을 위해 0000, 1200 UTC 관측 자료만 사용하였다. 추가로 관측지점별 정기 관측 외에 특별 관측 자료가 존재하지만, 지점별 특별 관측 기간이 상이하야 본 연구에서는 특별 관측을 제외한 정기 관측 자료만 분석하였다.

관측지점 중 속초 지점은 2016년 1월에 북강릉 지점으로, 고산 지점은 2016년 6월에 국가태풍센터 지점으로 관측지점이 이동하였으나 지점 간 이동 거리가 짧고, 지역적 특성이 비슷하기 때문에 연구에 큰 영향을 주지 않을 것으로 판단하여 본 연구에서는 속초와 북강릉, 고산과 국가태풍센터 지점의 자료를 통합하여 사용하였다. 기상청은 레윈존데 자료에 대해 물리관계검사, 태양광선에 의한 온도 변화, 기압계의 저온 효과, 지구 곡률에 따른 상층풍 오차 등 다양한 품질검사를 적용 후 자료를 제공하고 있기 때문에 본 연구에서는 불안정지수와 환경 변수 산출 과정에서 비정상치가 산출되는 사례에 대해서만 간단히 물리관계 검사를 적용하여 이상치를 제거하였다.

## 2.2 불안정지수

본 연구는 레윈존데 관측자료로부터 산출되는 많은 불안정지수 중 기상청 및 국내 연구에서 주로 사용되는 8개의 불안정지수와 1개의 환경변수(이하 불안정지수)를 사용하였으며 다음과 같다.

### 2.2.1 CAPE

Emanuel (1994)이 제안한 CAPE는 공기덩이가 수직으로 상승할 때 사용할 수 있는 부력 에너지의 양을 나타내며, 단열선도상에서 자유대류고도(LFC)부터 평형고도(EL)까지의 환경온도와 공기덩이 온도 사이의 면적을 적분한 것으로 산출된다. CAPE는 다음과 같이 나타낸다.

$$CAPE = -R_d \int_{LFC}^{EL} (T_{V_{parcel}} - T_{v_{env}}) d\ln p \quad (1)$$

여기서  $T_{V_{parcel}}$ 은 상승시킬 공기덩이의 가운데이며,  $T_{v_{env}}$ 는 환경 가운데,  $R_d$ 는 기체상수를 나타낸다. CAPE 값이 클수록 대기가 불안정하여 강한 대류 활동이 일어날 가능성이 높음을 의미한다.

### 2.2.2 Convective Inhibition (CIN)

Williams and Renno (1993)에서 제안한 CIN은 공기덩이의 수직 상승을 억제하는 음의 부력 에너지의 양을 나타낸다. CIN은 기본적으로 CAPE와 반대되는 개념으로, 공기덩이가 LFC에 도달하기 위한 부력이 많이 필요할수록 CIN의 크기가 커진다. CIN은 다음과 같이 나타낸다.

$$CIN = -R_d \int_{SFC}^{LFC} (T_{V_{parcel}} - T_{v_{env}}) d\ln p \quad (2)$$

SFC는 지표면을 의미한다. CIN의 크기가 클수록 대기가 더 안정적이며, 강한 대류 활동이 억제된다.

### 2.2.3 KI

George (1960)에 의해 개발된 KI는 뇌우의 발생 가능성을 판단하기 위해 개발된 불안정지수이다. KI는 대기하층(850-700 hPa) 수분의 양과 수직 온도차를 이용해 산출하며 다음과 같이 나타낸다.

$$KI = (T_{850} - T_{500}) + T_{d850} - (T_{700} - T_{d700}) \quad (3)$$

$T_n$ 과  $T_{d_n}$ 은 각각 n hPa 고도에서의 온도와 노점온도를 의미한다. KI 값이 높을수록 대기의 불안정성이 크고, 뇌우 발생 가능성이 높음을 나타낸다.

### 2.2.4 Lifted Index (LI)

Galway (1956)가 제안한 불안정지수인 LI는 대기의 열적 불안정성을 평가하기 위해 사용되는 보편적인 불안정지수로, 500 hPa 고도까지 상승시킨 공기덩이의 온도와 500 hPa의 환경온도 간 차이를 이용해 산출한다. LI는 다음과 같이 나타낸다.

$$LI = T_{500} - T_{500_{parcel}} \quad (4)$$

$T_{500_{parcel}}$ 은 공기덩이를 500 hPa 고도까지 상승시켰을 때의 온도를 의미한다. LI 값이 낮을수록 대기가 불안정하고, 뇌우 발생 가능성이 높음을 나타낸다.

### 2.2.5 SRH

SRH는 뇌우가 발달할 수 있는 환경에서 수직 바람 구조를 기반으로 뇌우가 회전 상승기류를 얻을 가능성을 추정하는 불안정지수이다. SRH는 다음과 같이 나타낸다.

$$SRH = - \int_0^h \vec{k} \cdot (\vec{V} - \vec{C}) \times \frac{d\vec{V}}{dz} dz \quad (5)$$

$\vec{V}$ 는 주변환경의 바람 벡터를 의미하며,  $\vec{C}$ 는 폭풍의 이동속도,  $h = 6 \text{ km}$ ,  $\frac{d\vec{V}}{dz}$ 는 수직 와도를 의미한다.

SRH 값이 클수록 뇌우가 발달했을 때 강력한 회전 상승기류를 형성할 가능성이 높다.

### 2.2.6 SSI

SSI는 Showalter (1953)가 제안한 불안정지수이다. 850 hPa와 500 hPa 고도의 특성을 기반으로 850 hPa에서 상승시킨 공기덩이가 500 hPa에 도달했을 때의 온도와 500 hPa의 환경온도 간 차이를 이용해 산출하는 불안정지수이며, SSI는 다음과 같이 나타낸다.

$$SSI = (T_{500} - T_{850_{parcel}}) \quad (6)$$

$T_{850_{parcel}}$ 은 850 hPa에서 상승시킨 공기덩이가 500 hPa 고도에서 나타내는 온도를 의미한다. SSI 값이 작을수록 대기가 불안정하고, 뇌우 발생 가능성이 높음을 나타낸다.

### 2.2.7 TTI

TTI는 대기의 정적 안정성과 하층(850 hPa)의 수분을 고려하여 산출된다. TTI는 VT와 CT로 이루어져 있으며, 다음과 같이 나타낸다.

$$TTI = VT + CT \quad (7)$$

여기서  $VT = T_{850} - T_{500}$ 이며,  $CT = T_{d850} - T_{500}$ 을 나타낸다. TTI 값이 높을수록 대기의 불안정성이 크다는 것을 나타낸다.

### 2.2.8 Severe Weather Threat Index (SWEAT)

Miller (1972)가 제안한 SWEAT은 뇌우나 토네이도와 같은 악천후의 발생 가능성을 정량적으로 예측하는데 사용된다. SWEAT은 대기 하층(850 hPa)의 수분과 중하층(850~500 hPa)의 풍속, 대류 등 여러 변수를 결합하여 산출하며, 이는 운동학적 및 열역학적 불안정을 모두 고려함을 의미한다. SWEAT은 다음과 같이 나타낸다.

$$SWEAT = 12(T_{d850}) + 20(TTI - 49) + 2(WS_{850}) + WS_{500} + 125(S + 0.2) \quad (8)$$

$WS_n$ 은 n hPa에서의 풍속,  $S = \sin(WD_{500} - WD_{850})$ ; Wind Direction, WD)을 의미한다. SWEAT 값이 클수록 불안정성이 크다는 것을 나타낸다.

SWEAT의 계산과정 중 다음 기준 중 하나라도 충족하지 않을 시 마지막 항은 0으로 설정된다.

- 1) 850 hPa 고도의 풍향이 130~250° 이내.
- 2) 500 hPa 고도의 풍향이 210~310° 이내.
- 3) 500 hPa 고도의 풍향에서 850 hPa 고도의 풍향을 뺀 값이 양수
- 4) 850 hPa 고도와 500 hPa 고도의 풍속이 모두 15 knot 이상
- 5) 계산식의 모든 항이 양수

### 2.2.9 Total Precipitable Water (TPW)

TPW는 대기중에 포함된 수증기가 모두 강수로 내렸을 때의 강수량을 뜻한다. TPW는 대기중 수증기의 총량을 계산하여 나타내며 다음과 같이 정의된다.

$$TPW = - \frac{1}{\rho g} \int_{P_{bottom}}^{P_{top}} r dp \quad (9)$$

여기서  $\rho$ 는 물의 밀도,  $g$ 는 중력가속도,  $r$ 은 혼합비를 나타낸다. 대기중의 수증기 양이 많을수록 TPW 값이 커진다.

Doswell and Rasmussen (1994)은 공기덩이의 부력에 관련된 불안정지수를 산출할 때 가온도 보정이 필요함을 제시하였으며, 특히 CAPE의 값이 작을수록 가온도 보정에 따른 차이가 상대적으로 커질 수 있다고 제시하였다. 이에 따라 본 연구는 대기 중 수증기의 영향을 제거하기 위해 공기덩이의 프로파일을 이용해 산출하는 불안정지수의 경우 온도 대신 가온도를 이용해 산출하였다.

불안정지수를 계산할 때 어떤 공기덩이를 상승시켜 사용할지에 따라 불안정지수의 값에 큰 차이가 발생할 수 있는데, 이는 국제적으로 정해진 바가 없으며, 지표면의 공기덩이, 하층 1 km 중 가장 불안정한 공기덩이, 하층 500 m를 섞은 공기덩이 등 여러 기준을 이용해 연구가 진행되어왔다. 따라서 본 연구에서는 Eom et al. (2008)과 같이 하위 500 m의 공기를 섞은 공기덩이를 이용해 불안정지수를 산출하였다.

## 2.3 연구 방법

불안정지수의 일변동 특성을 분석하기 위하여 Box and Whisker plot을 이용하였으며, 동일한 방법으로 지점별, 월별 통계적 특성을 분석하였다. 추가적으로 변동계수와 임계값 초과 빈도를 분석하여 정량적인 해석을 제시하였다. 변동계수 계산 시에 LI의 경우와 같이 작은 평균값으로 인해 변동계수가 불안정하게 산출되는 문제를 해결하기 위해 불안정지수 값에 절댓값을 적용하여 산출하였다. 불안정지수의 지점별, 월별 변화 경향과 임계값 초과 횟수에 대한 변화 경향을 분석하기 위해 선형 회귀 방법을 사용하였으며, 1, 5, 10% 수준에서 유의성을 검증하였다.

임계값 초과 횟수의 변화 경향 분석에는 Table 2에 나와있는 보통 불안정에 해당하는 임계값을 사용하였다. 임계값은 대부분 기상청에서 제공하는 값을 따랐으나, KI의 경우 극한 불안정에 해당하는 임계값이 존재하지 않는다. 하지만 다른 불안정지수들과의 일관성을 유지하기 위해 본 연구에서의 통계분석 결과를 기반으로 KI를 매우 불안정(40~45)과 극한 불안정( $\geq 45$ )으로 구분해 사용하였다. SRH의 경우 국내에서 해당 기준이 제공되지 않아 미국 해양대기청(NOAA)

**Table 2.** Instability levels of instability indices and environmental parameters used in this study.

Instability indices	Units	Instability levels			
		Marginally unstable	Moderately unstable	Very unstable	Extremely unstable
CAPE	J kg <sup>-1</sup>	300~500	500~900	900~1,800	≥ 1,800
KI	*	25~30	30~40	40~45	≥ 45
LI	°C	0~3	-3~-6	-6~-9	≤ -9
SRH	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>	≤ 150	150~300	300~450	≥ 450
SSI	°C	6~3	3~-3	-3~-6	≤ -6
SWEAT	*	≤ 275	275~300	300~400	≥ 400
TPW	mm	40~50	50~60	60~70	≥ 70
TTI	*	42~48	48~54	54~60	≥ 60
CIN	J kg <sup>-1</sup>				

\*Dimensionless unit

에서 제공하는 임계값을 사용하였다. 환경변수인 TPW의 경우 불안정 단계별 임계값이 존재하지 않아 Jung et al. (2015)과 Kim et al. (2019)에서 수행한 집중호우의 유형에 따른 TPW의 특성 분석 결과를 토대로 임계값을 설정하여 분석하였다.

### 3. 결 과

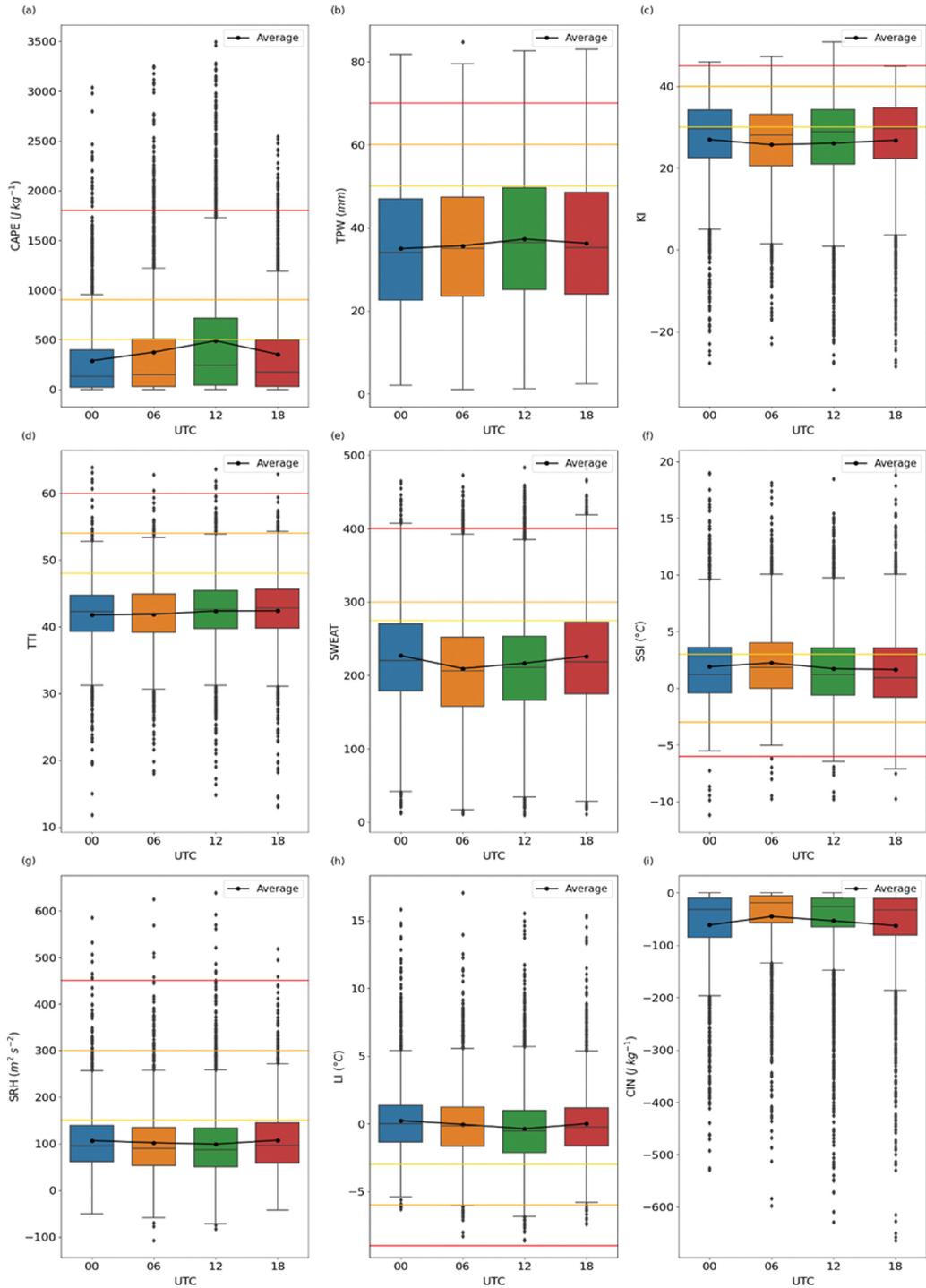
#### 3.1 불안정지수의 일변동 특성

Figure 2는 국내 8개 관측지점의 자료를 기반으로 산출된 CAPE, TPW, KI, TTI, SWEAT, SSI, SRH, LI, CIN의 일변동을 나타낸 것이다. CAPE의 경우 모든 관측 시간에서 평균에 비해 중앙값이 낮게 나타나 데이터의 분포가 정규 분포가 아닌 작은 값에 빈도가 높고 꼬리가 긴 분포를 띠고 있다. CAPE는 0000 UTC에서 가장 낮고, 0600 UTC를 거쳐 점차 높아지며 1200 UTC에 가장 높아진 후 1800 UTC에 다시 낮아지는 일변동을 보인다. 1200 UTC의 경우 중앙값과 평균 또한 다른 관측 시간에 비해 높으며, 사분위수 범위의 일부가 보통 불안정 임계값보다 높게 나타난다. TPW의 경우 모든 관측 시간에서 정규분포 형태를 띠고 있으며 다른 시간에 비해 1200 UTC에 조금 더 높은 평균과 중앙값을 갖는다. 매우 불안정 및 극한 불안정 임계값을 초과하는 비율은 일변동 없이 매우 유사하게 나타나고 있다. KI의 경우 0600 UTC에 다른 시간보다 상대적으로 안정한 모습을 보이며 평균과 중앙값은 큰 일변동을 보이지 않으나 극한 불안정 임계값을 초과하는 비율은 1200 UTC에서 가장 높게 발생하고 있다. TTI는 관측 시간과 관계없이 평균, 중앙값 그리고 임계값 초과 빈도 모두가 유사하게 나타나 일변동이 거의 나타나지 않는다. 하지만 SWEAT은 평균, 중앙값 그리고 이상치 모두에서 0600/1200 UTC에 상대적으로 더 안정한 분포를, 0000/1800 UTC

에는 약간 더 불안정한 분포를 보인다. SSI는 SWEAT와 같이 0600 UTC에 다른 관측 시간보다 안정한 분포를 보이고 1800 UTC에 약간 더 불안정한 분포를 보이지만 전체적으로 일변동은 매우 미미하다. SRH의 경우 모든 관측 시간에서 중앙값과 평균값이 약 100 m<sup>2</sup> s<sup>-2</sup>로 유사하게 나타나고 불안정 임계값을 초과하는 빈도도 일변동이 거의 나타나지 않는다. LI도 일변동이 크지 않지만 1200 UTC에서 다른 시간에 비해 상대적으로 불안정한 분포를 보인다. 다른 불안정 지수와 달리 LI에서는 극한 불안정 임계값을 초과하는 사례가 모든 시간에서 한 번도 발생하지 않는 특성을 보인다. CIN의 경우 모든 시간에서 평균에 비해 중앙값이 작게 나타나 작은 값이 주로 발생하는 분포를 보이며 0600/1200 UTC에 비해 0000/1800 UTC에 -150 J kg<sup>-1</sup> 이하의 CIN이 더 많이 분포하여 해당 시간에 대류가 발생하기 어려울 수도 있음을 보인다.

Table 3은 각 불안정지수들의 평균적인 변동 특성을 알아보기 위하여 각 관측 시간대별로 8개 지점의 평균 변동계수를 나타낸 것이다. CAPE의 경우 변동계수가 0000 UTC에 135.42%로 가장 크고, 1800 UTC에 125.45%로 가장 작지만, 그 차이는 약 8% 이내로 크지 않다. 또한 TPW, KI, TTI, SWEAT, SRH의 변동계수도 관측 시간에 따라 차이가 10% 이내로 크지 않다. 하지만 SSI, LI 및 CIN의 경우 관측 시간에 따른 변동성이 10.14%에서 17.75%까지 나타난다. SSI와 LI의 경우 0000 UTC와 0600 UTC에 각각 변동성이 가장 크고 작은 반면, CIN은 반대로 0600 UTC와 0000 UTC에 각각 변동성이 가장 크고 작은 특성을 보인다. 관측 시간별 변동계수의 평균은 TTI, TPW, KI, SWEAT에서 11.75~36.17%로 비교적 낮지만, CAPE와 CIN의 경우 각각 130.18, 128.92%로 불안정 지수에 따라 매우 상이한 모습을 보인다.

Table 4는 각 불안정지수들의 매우 불안정과 극한



**Fig. 2.** Box and Whisker plot by observation time of (a) CAPE, (b) TPW, (c) KI, (d) TTI, (e) SWEAT, (f) SSI, (g) SRH, (h) LI, and (i) CIN calculated from rawinsonde data for the last 30 years (1994–2023). The three horizontal color lines represent the stability level, moderately, very, and extremely unstable. The black lines and dots in the box represent the median and mean values, respectively.

**Table 3.** Station averaged coefficient of variation (%) of instability indices by observation time.

Obs. time (UTC)	Instability indices								
	CAPE	TPW	KI	TTI	SWEAT	SSI	SRH	LI	CIN
0000	135.42	25.85	32.23	11.82	34.41	103.98	70.47	107.19	121.00
0600	129.90	28.02	34.68	11.43	37.57	94.41	68.73	93.83	142.48
1200	130.05	27.93	34.49	11.91	37.03	99.01	69.15	97.05	122.87
1800	125.35	25.61	33.07	11.85	35.67	100.54	65.03	99.52	129.31
Ave.	130.18	26.85	33.62	11.75	36.17	99.49	68.35	99.40	128.92

**Table 4.** Percentage (%) of instability indices exceeding very unstable threshold (VUT) and extremely unstable threshold (EUT) by observation time.

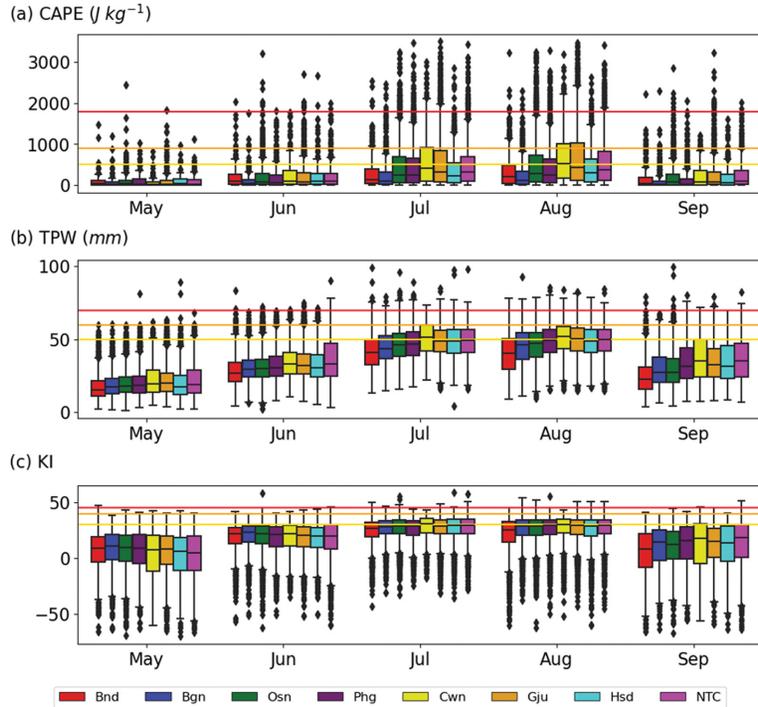
Obs. time (UTC)		Instability indices								
		CAPE	TPW	KI	TTI	SWEAT	SSI	SRH	LI	Ave.
0000	VUT	2.64	5.14	0.66	0.47	8.88	1.10	2.40	0.09	2.67
	EUT	0.33	0.43	0.07	0.10	0.92	0.16	0.57	0.00	0.32
0600	VUT	7.55	5.27	0.69	0.43	9.70	1.46	2.49	0.70	3.54
	EUT	2.37	0.52	0.04	0.08	1.19	0.15	0.47	0.00	0.60
1200	VUT	9.49	8.00	1.38	0.69	11.20	2.32	2.46	0.63	4.52
	EUT	2.65	0.86	0.07	0.15	1.93	0.25	0.49	0.00	0.80
1800	VUT	4.99	6.27	1.15	0.58	11.85	2.00	2.88	0.20	3.74
	EUT	0.82	0.58	0.01	0.08	1.59	0.16	0.44	0.00	0.46
Ave.	VUT	7.34	6.51	1.07	0.57	10.92	1.93	2.61	0.51	3.93
	EUT	1.54	0.60	0.05	0.10	1.41	0.18	0.49	0.00	0.55

불안정 임계값 초과 비율을 관측시간대별로 나타낸 것이다. 불안정지수들에 따라 차이는 있지만 전체적으로 매우 불안정과 극한 불안정 임계값 초과 비율의 평균은 각각 3.93%와 0.55%로 우리나라에서 대기환경이 중규모 대류계 발생에 매우 적합하거나 최적인 날이 각각 14일( $365 \times 0.0393 = 14.34$ )과 2일 정도임을 나타낸다. 불안정 지수들의 평균 측면에서 관측시간대별 매우 불안정과 극한 불안정 임계값 초과 비율은 0000 UTC에 각각 2.67, 0.32%로 가장 낮고, 1200 UTC에 각각 4.52, 0.80%로 가장 높게 나타난다. 즉, 우리나라에서 대기환경이 상대적으로 가장 안정한 시간대는 0000 UTC이며, 가장 불안정한 시간대는 1200 UTC임을 알 수 있다. 우리나라 대기환경의 이러한 일변동 패턴은 극한 강수가 주로 심야에서 새벽에 최대치가 발생하고 오전에 최소치가 발생하는 일변동 특성과 일치한다(Park et al., 2021). 대부분의 불안정지수에서 0000 UTC에 상대적으로 가장 안정하고 1200 UTC에 불안정한 일변동 패턴을 보인다. CAPE, TPW, KI, SSI의 경우 0000 (1200) UTC에 매우 불안정 임계값 초과 비율은 각각 2.64 (9.49), 5.14 (8.00), 0.66 (1.38), 1.10 (2.32)%이고, CAPE, TPW, SWEAT의 경우 극한 불안정 임계값 초과 비율은 0000 (1200) UTC

에 각각 0.33 (2.65), 0.43 (0.86), 0.92 (1.93)%이다. 그 외 지수들에서는 일변동이 약하거나 최대/최소 발생 시간대가 상이하다. 시간대별 임계값 초과 비율의 평균은 불안정지수들에 따라 매우 상이하며 특히 매우 불안정 초과 비율의 경우 0.51~10.92%로 약 21.4배 차이를 보인다. 극한 불안정 초과 비율도 0.00~1.54%로 나타나고 있다. 매우 불안정 및 극한 불안정 임계값 초과 비율이 불안정지수들에 따라 매우 상이하게 나타나고 있는 점은 각 불안정지수들의 산출 특성 및 임계값이 우리나라 대기환경에 최적화되지 않은 점에 기인한 것으로 보인다. 따라서 해당 불안정지수들을 활용하여 우리나라에서 대기안정도를 분석하기 위해서는 우리나라 대기 특성에 맞는 최적의 지수 선정 및 임계값 조정이 필요하다.

### 3.2 불안정지수의 지점 및 계절 내 변동 특성

Figure 3은 국내 8개 관측지점의 자료를 기반으로 산출된 CAPE, TPW, KI의 월별, 지점별 분포를 나타낸 것이다. 관측지점에 따라 차이는 있지만 전체적으로 동아시아 여름 몬순의 남북 진동에 따라 5월과 6월에는 안정하다가 7월과 8월에 가장 불안정한 후 9월에 다시 안정해지는 계절 내 변동을 보인다. 이는



**Fig. 3.** Box and Whisker plot by month and station of (a) CAPE, (b) TPW and (c) KI calculated from Rawinsonde data for the last 30 years (1994~2023). The three horizontal color lines represent the stability level, moderately, very, and extremely unstable, respectively. The black lines in the box represent the median values.

한반도 우기의 극한 강수가 7월과 8월에 집중되는 것과 일치한다. CAPE의 경우 대부분의 월과 지점에서 작은 값으로 치우친 분포를 띠고 있음을 중앙값을 통해 알 수 있다. 지점별 정도에 차이는 있지만 대부분 5월과 6월 그리고 9월에 상대적으로 안정하며 7월과 8월에 불안정한 계절 내 변동을 보인다. 북강릉 지점은 모든 월에서 가장 안정하며, 창원과 광주 지점은 상대적으로 불안정하다. TPW의 경우 7월과 8월에는 백령도 지점에서 가장 작고, 창원 지점에서 가장 크게 나타나며 전반적으로 한반도 북부에 위치한 지점에서 TPW가 작고, 한반도 남부에 위치한 지점에서 크게 나타남을 알 수 있다. 9월은 TPW의 중앙값이 백령도 지점에서 약 20 mm, 창원과 국가태풍센터 지점에서 약 30 mm로 다른 월에 비해 지점별 차이가 크다. 중층 이하에서의 불안정을 나타내는 KI도 다른 지수들과 같이 모든 지점에서 5월과 9월에 상대적으로 안정하고 7월과 8월에 가장 불안정한 계절 내 변동을 보인다. 7월과 8월에는 중앙값이 25 이상으로 가장 크지만, 5월과 9월에는 대부분 지점에서 KI 중앙값이 15 이하이며 변동성이 큰 분포를 보인다.

Figure 4는 Fig. 3과 같이 TTI, SWEAT, SSI의 월별,

지점별 분포를 나타낸 것이다. 10월에서 5월 사이 대류권 중상층의 한기핵을 가진 저기압의 영향을 받을 때 사용하기 적합한 TTI의 특성상 분석 기간 전체에 걸쳐 중앙값과 사분위수 범위가 매우 유사하며 다른 지수들과 다르게 7월과 8월에도 매우(극한) 불안정 임계값을 초과하는 사례가 매우 적다. SWEAT는 평범한 뇌우 보다는 격렬한 폭풍과 토네이도를 탐지하기 위해 TTI를 개선한 불안정지수로 850 hPa과 500 hPa 대기 중하층의 풍속 차이와 바람 시어를 고려함에 따라 뇌우와 함께 돌풍 예측에도 적용할 수 있다. SWEAT도 TPW와 유사하게 관측지점과 관계없이 5월과 9월에 안정하고 7월과 8월에 가장 불안정한 계절 내 변동을 보인다. SWEAT의 경우 임계값 초과 비율이 월별 차이도 있지만 지점 간 차이도 적지 않게 나타나고 있다. SSI도 다른 불안정지수와 같이 평균적으로는 5월과 9월에 안정하고 7월과 8월에 불안정해지는 계절 내 변동을 보인다. 매우(극한) 불안정 임계값을 초과하는 비율 또한 지점과 월에 따라 다르며 7월과 8월에 다른 월보다 높게 나타난다.

Figure 5는 Fig. 3과 같이 SRH, LI, CIN의 월별, 지점별 분포를 나타낸 것이다. SRH의 경우 모든 지점

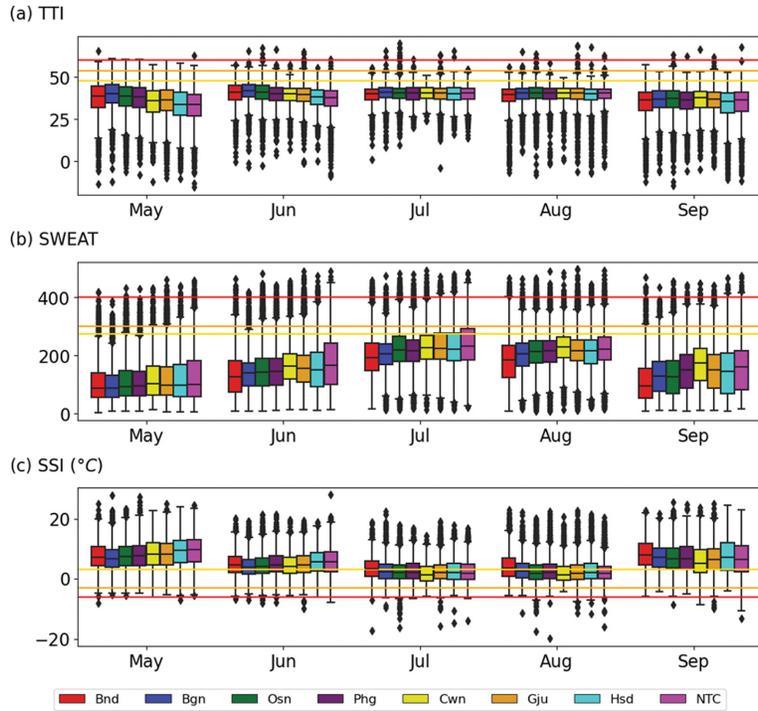


Fig. 4. Same as in Fig. 3 except for TTI, SWEAT and SSI.

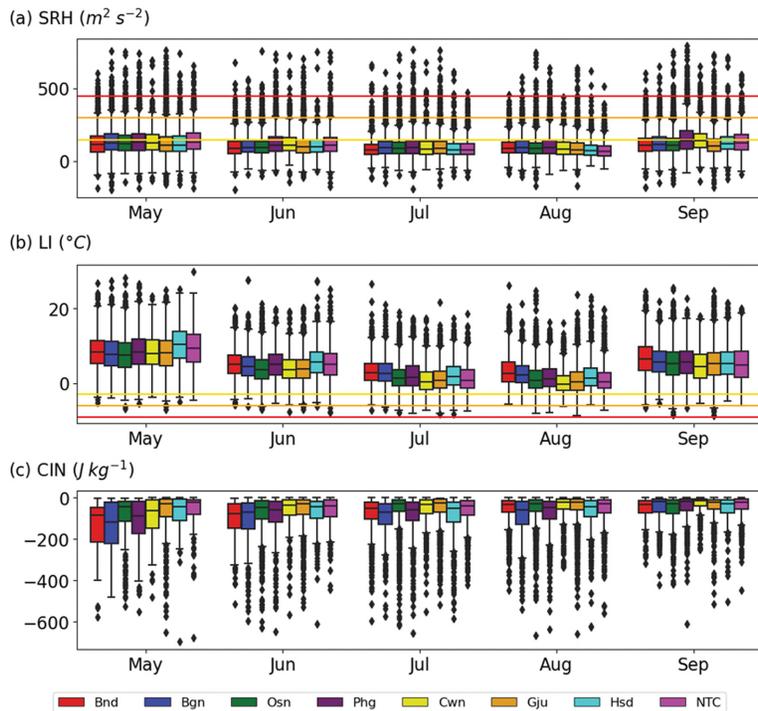


Fig. 5. Same as in Fig. 3 except for SRH, LI and CIN.

과 월에서 중앙값이 100~200 m<sup>2</sup> s<sup>-2</sup> 사이로 나타나며, 본 연구에서 사용한 불안정지수 중 계절 내 변동과 지점별 차이가 가장 작다. 또한 극한 불안정 임계값을 초과하는 비율은 대부분의 지점에서 5, 9월에 상대적으로 높고 7, 8월에 낮은 분포를 보인다. LI도 모든 지점에서 평균적으로는 5월과 9월에 안정하고 7월과 8월에 불안정한 계절 내 변동을 보인다. 하지만 다른 지수들과 다르게 극한 불안정 임계값을 초과하는 사례가 모든 월 및 지점에서 발생하지 않는다. 대류 억제를 의미하는 CIN의 경우 대부분의 월과 지점에서 중앙값이 작게 나타나 작은 값에서 많이 분포하고

큰 값으로 꼬리가 매우 긴 분포를 띠고 있음을 알 수 있다. CIN은 다른 불안정지수들에 비해 5월에 지점 간 차이가 가장 크고 9월에 가장 작은 계절 내 변동을 보인다.

### 3.3 불안정지수의 지점별, 월별 변화 경향

Table 5는 월평균 불안정지수의 지점별, 월별 변화 경향을 나타낸 것이며, 유의수준을 제시하기 위해 P-value를 사용하였다. Table 5를 통해 월평균 불안정지수의 지점별, 월별 변화 경향이 관측지점, 월 그리고 지수에 따라 차이가 크을 볼 수 있다. TPW의 변화

**Table 5.** Trends of monthly average instability indices by station and month. Red color indicates unstable trend, while blue color indicates stable trend. The darker color indicates the stronger trend.

Station	Month	CAPE J kg <sup>-1</sup> y <sup>-1</sup>	CIN J kg <sup>-1</sup> y <sup>-1</sup>	KI y <sup>-1</sup>	SSI °C y <sup>-1</sup>	SWEAT y <sup>-1</sup>	LI °C y <sup>-1</sup>	TTI y <sup>-1</sup>	SRH m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> y <sup>-1</sup>	TPW mm y <sup>-1</sup>	LPW mm y <sup>-1</sup>	MPW mm y <sup>-1</sup>	UPW mm y <sup>-1</sup>
Bnd (24year)	May	2.47	1.71	0.15	-0.02	1.30***	0.03	0.06	0.87	0.15**	0.13**	0.03	0.01**
	Jun	-2.05	-2.38	0.21	-0.06	1.68**	-0.04	0.08	0.81**	0.21*	0.20**	0.03	0.01
	Jul	8.64***	-0.61	0.16*	-0.08**	1.42*	-0.09**	0.05	-0.48	0.39**	0.31***	0.06	0.01*
	Aug	14.90***	-0.71	0.22	-0.04	1.73*	-0.11**	0.00	0.14	0.42**	0.32***	0.10*	0.02**
	Sep	6.96**	0.18	0.46**	-0.10**	1.45*	-0.17***	0.17	-0.63	0.33**	0.26***	0.07*	0.01*
Bgn (23year)	May	0.21	-0.58	-0.19	-0.02	0.93*	-0.08	-0.02	0.12	0.00	0.00	0.02	-0.01*
	Jun	3.70	1.44	0.17	-0.09**	1.31**	-0.11**	0.12	0.00	0.16**	0.14***	0.02	0.01**
	Jul	10.50***	2.85**	0.07	-0.04	0.14	-0.08	0.02	-1.38***	0.13	0.11	0.03	0.01
	Aug	6.74**	2.17**	0.21*	-0.07*	1.72**	-0.06	0.04	0.01	0.30**	0.18*	0.13**	0.02**
	Sep	0.53	-0.20	0.22	-0.09**	1.26	-0.08**	0.12	-0.34	0.14	0.11	0.03	0.01
Osn (30year)	May	2.50	-1.60	-0.13	0.02	-0.09	0.05*	-0.05	0.05	-0.03	-0.03	0.00	0.00
	Jun	0.28	0.03	0.02	-0.01	0.49	0.03	0.00	0.22	-0.01	0.00	-0.01	0.00
	Jul	-7.04	-1.15**	0.10*	-0.02	-0.12	0.03	0.01	-0.25	0.10	0.02	0.07**	0.01**
	Aug	-8.77**	-1.86***	0.01	0.01	-0.02	0.07**	-0.04	0.17	0.08	-0.02	0.09**	0.02**
	Sep	-4.20*	-0.38	-0.02	0.00	0.46	0.05*	-0.02	0.48	0.08	0.01	0.03	0.01**
Phg (30year)	May	-0.13	-2.43*	-0.07	-0.01	0.11	0.00	-0.01	-0.01	0.02	0.03	0.00	0.01*
	Jun	2.50	-0.18	0.14*	-0.06***	0.59*	-0.08**	0.07	-0.61*	0.11**	0.11**	0.01	0.01*
	Jul	-1.59	0.26	0.09*	-0.03	0.37	-0.02	0.01	-0.16	0.18***	0.11**	0.07***	0.02***
	Aug	-0.27	-0.72	0.06	-0.02	0.53	-0.01	0.00	-0.11	0.16*	0.07	0.09***	0.02***
	Sep	-0.14	0.74	0.08	-0.03	1.17**	-0.03	0.00	0.36	0.22*	0.14*	0.07*	0.02***
Gju (30year)	May	-2.20	-1.33	-0.12	0.02	-0.06	0.03	-0.07	0.04	0.00	-0.01	0.01	0.00*
	Jun	2.18	-0.70	-0.03	0.00	0.48	0.00	-0.03	-0.06	0.01	0.00	0.00	0.01**
	Jul	-12.31**	-1.45**	0.08	-0.01	-0.29	0.06**	0.00	0.07	0.09	-0.02	0.09***	0.02***
	Aug	-6.38	-1.98***	0.01	0.02	0.03	0.06*	-0.04	0.30	0.05	-0.05	0.08**	0.02***
	Sep	-8.17***	-0.65**	0.02	-0.01	0.90	0.03	-0.02	0.71**	0.11	0.04	0.06*	0.01***
Hsd (21year)	May	-0.53	-1.94	0.07	0.00	0.36	-0.02	0.00	0.16	0.02	0.03	0.02	0.00
	Jun	3.24	-0.34	0.02	0.00	0.00	-0.01	-0.02	-0.13	0.04	0.03	0.01	0.01
	Jul	7.43	1.11	0.05	-0.05	0.34	-0.05	0.04	-1.23*	0.21*	0.12	0.07*	0.03***
	Aug	-4.44	-0.89	-0.06	0.02	0.41	0.00	-0.07	-0.14	0.11	0.02	0.07	0.02**
	Sep	1.46	0.33	-0.10	-0.01	0.10	-0.04	0.00	-0.30	0.00	-0.03	0.02	0.02**
NTC (30year)	May	-0.94	0.80	-0.04	0.00	0.32	0.03	-0.04	-0.10	0.02	-0.01	0.03	0.01**
	Jun	1.09	0.30	-0.03	-0.01	-0.06	0.01	-0.01	0.03	-0.04	-0.06	0.01	0.01**
	Jul	-9.89**	-0.22	0.09*	-0.04*	0.64	0.01	0.03	-0.53	0.13**	0.00	0.11***	0.02***
	Aug	-11.89**	-0.83*	0.02	-0.01	0.58	0.05	-0.03	-0.50	0.00	-0.07	0.06**	0.02***
	Sep	-5.82*	0.90	0.16	-0.05	1.79***	0.04	0.02	1.56***	0.21*	0.08	0.11***	0.02***

\*: 0.05 < p ≤ 0.1, \*\*: 0.01 < p ≤ 0.05, \*\*\*: p ≤ 0.01

경향 원인을 상세히 알아보기 위해 하층(1000~700 hPa: LPW), 중층(700~400 hPa: MPW), 상층(400~100 hPa: UPW)으로 나누어 변화 경향을 분석하였다. 백령도의 경우 월 및 지수에 따라 차이는 있으나 CIN과 SRH를 제외한 대부분의 불안정지수들이 불안정해지는 경향을 보인다. CAPE, TPW, LPW의 경우 7, 8, 9월에 유의성 높은 불안정화가 나타나지만, SWEAT은 5, 6월에 불안정화의 유의성이 높다. 북강릉에서도 백령도와 같이 SRH를 제외한 대부분 불안정지수들이 불안정해지는 경향을 보이는데 불안정화의 강도 및 유의수준은 월 및 지수에 따라 매우 상이하게 나타나고 있다. 오산과 광주, 국가태풍센터 지점에서는 대부분 불안정지수에서 유의미한 변화 경향이 나타나지 않는데, CAPE, CIN, LI 등 일부 지수에서는 7, 8월에 안정해지는 경향이 나타나며 그중 일부는 통계적으로도 유의한 수준이다. 포항 지점의 경우 TPW, MPW(7~9월)와 SWEAT(9월)을 제외한 대부분의 지수 및 모든 월에서 변화 경향이 거의 나타나지 않고 있다. 흑산도 지점에서는 7월에 SRH를 제외한 지수들이 불안정해지는 경향이 나타나지만, 8월에는 안정해지는 경향이 나타나며 모두 통계적으로 유의하지 않다. 광주와 흑산도 지점은 지리적으로 가까이 위치하지만 월 및 지수에 따라 변화 경향에서 차이가 크다. 최근 우리나라에서 집중호우의 강도가 강해지고 있는 현상과 상반되게 집중호우가 가장 많이 발생하는 7월과 8월에 오산, 광주, 태풍센터 등에서 CAPE의 강한 안정화가 나타나고 있다. 이러한 상반된 현상은 우리나라에서 집중호우가 CAPE보다는 하층 제트에 의한 온난 다습한 공기의 이류와 관련된 온난성 호우가 주로 발생한다는 Sohn et al. (2013)과 Song and Sohn (2015)의 연구 결과로 설명할 수 있다. TPW의 경우 오산과 국가태풍센터 지점에서, LPW는 오산과 광주, 그리고 국가태풍센터 지점에서 일부 월에 감소하는 경향이 나타나지만 그 경향이 모두  $0.10 \text{ mm y}^{-1}$  미만으로 작고 유의하지 않다. 그 외 지점에서는 TPW와 LPW가 모두 증가하는 경향을 나타내며, MPW와 UPW의 경우 대부분의 지점과 월에서 증가하는 경향이 우세하게 나타나고 있다. 한반도에서 지점, 월 및 고도에 따라 차이는 있지만, 대체로 TPW, LPW, MPW, UPW의 증가하는 경향이 우세하게 나타나는 것은 Jung et al. (2002)과 Chung et al. (2004)의 연구에서 밝힌 바와 같이 최근 지구온난화의 영향으로 한반도 주변 지역의 기온이 크게 상승한 것과 관련이 있는 것으로 보인다.

### 3.4 불안정지수의 지점별, 월별 임계값 초과 횟수 변화 경향

평균적인 대기환경의 변화도 중요하지만, 집중호우 등 위험 기상을 유발할 수 있는 대기환경 발생 횟수

의 변화 경향도 알아볼 필요가 있다. Table 6은 본 연구에서 분석한 8개 불안정지수에 대해 기상청에서 사용 중인 불안정지수의 임계값 초과 횟수에 대한 지점별, 월별 변화 경향을 나타낸 것이다. 또한 유의수준을 제시하기 위해 P-value를 사용하였다. 월과 지수에 따라 차이는 있으나 백령도에서는 SRH를 제외한 대부분의 불안정지수들의 보통 불안정 임계값 초과 횟수가 월과 관계없이 증가 경향을 보인다. 특히, CAPE(7, 8, 9월), KI(5월), SWEAT(6월), LI(7, 8, 9월), SRH(5, 6월), TPW(5, 7, 8월)에서 보통 불안정 임계값 초과 횟수의 증가 경향이 유의하게 나타난다. 북강릉의 경우 대부분의 지수 및 월에서 유의한 변화 경향이 보이지 않는데, CAPE(7월), KI와 TPW(8월)에서만 매우 불안정한 대기 연직 구조 발생 건수의 증가경향이 유의하게 나타나고 있다. 오산에서는 CAPE와 LI(8월)을 제외한 대부분의 지수 및 월에서 보통 불안정 임계값 초과 횟수의 변화 경향이 유의하게 나타나지 않는다. 포항에서도 6월(KI, TTI) 그리고 9월(KI, TPW)을 제외한 대부분의 월 및 지수에서 보통 불안정 임계값 초과 횟수의 변화 경향이 유의하지 않다. 광주에서도 대부분의 지수 및 월에서 보통 불안정 임계값 초과 횟수의 변화 경향이 유의하지 않지만, CAPE에서는 7월과 9월에 유의미한 감소 경향이 나타나고 있다. 흑산도 지점에서도 월 및 지수에 따라 보통 불안정 임계값 초과 횟수의 변화 경향이 다양하게 나타나고 있으나 대부분 유의수준이 낮다. 국가태풍센터 지점에서는 다른 지점들에 비해 월 및 지수에 따라 보통 불안정 임계값 초과 횟수의 변화 경향이 상이하게 나타나고 있으며 특히 9월에 KI, SWEAT, SRH, TPW에서 증가 경향이 유의하게 나타나고 있다. CAPE와 LI는 모두 열적 불안정을 나타내는 지수이며 지점과 월에 관계없이 임계값 초과 횟수의 변화 경향이 대부분 유사하게 나타난다.

지수 차원에서 보통 불안정 임계값 초과 횟수의 변화 경향은 CAPE에서는 대부분 지점 및 월에서 감소 경향이 우세하지만, KI와 TPW의 경우 대부분 지점 및 월에서 유의미한 증가경향이 우세하게 나타나고 있다. 반면에 SSL, SWEAT, TTI에서는 지점 및 월과 관계없이 변화 경향이 나타나지 않고 있다. SRH의 경우 대부분 월 및 지점에서 변화 경향이 유의하지 않으며, 일부 지점 및 월에서는 변화 경향이 상반되게 나타나고 있다.

최근 우리나라에서는 집중호우, 특히 단시간에 내리는 집중호우의 빈도 및 극한값이 매년 빈번해지고 강해지는 것으로 보고되고 있다(Park and Suh, 2022; Kim et al., 2023). 하지만 대부분의 불안정지수에서 보통 불안정 임계값 초과 횟수의 변화 경향이 지점 및 월에 따라 다양할 뿐만 아니라 일부 지점 및 지수

**Table 6.** Trends of counts over threshold by station and month. Red color indicates increasing trend, while blue color indicates decreasing trend. The darker color indicates the stronger trend.

Station	Month	CAPE # y <sup>-1</sup>	KI # y <sup>-1</sup>	SSI # y <sup>-1</sup>	SWEAT # y <sup>-1</sup>	LI # y <sup>-1</sup>	TTI # y <sup>-1</sup>	SRH # y <sup>-1</sup>	TPW # y <sup>-1</sup>
Bnd (24year)	May	0.01	0.20***	0.00	0.07	0.00	0.21	0.42**	0.14**
	Jun	0.02	0.29	0.06	0.18**	0.05	0.19	0.28**	0.10
	Jul	0.13**	0.33	0.04	-0.01	0.09*	-0.01	-0.08	0.68**
	Aug	0.27***	0.35	0.05	0.16	0.17***	0.01	-0.03	0.62*
	Sep	0.05***	0.21	0.00	0.08	0.08***	0.05	-0.19	0.28
Bgn (23year)	May	0.00	0.09	-0.01	0.06	-0.01	0.05	0.15	0.09
	Jun	0.02	0.21	0.00	0.05	0.03	0.06	0.10	0.04
	Jul	0.21***	0.28	0.05	-0.02	0.16**	0.06	-0.38***	0.25
	Aug	0.09	0.57**	0.06	0.16	0.05	0.02	0.06	0.66**
	Sep	-0.01	0.26	0.00	0.00	0.00	-0.02	-0.09	0.18
Osn (30year)	May	0.00	0.00	0.01	0.09**	0.00	-0.07	0.03	0.07
	Jun	0.01	0.10	0.00	0.08	-0.03	-0.05	-0.03	-0.03
	Jul	-0.18	0.18	0.00	-0.11	-0.15	-0.01	-0.07	0.09
	Aug	-0.27***	0.09	0.03	-0.02	-0.20***	-0.02	0.12	0.08
	Sep	-0.04	0.14	0.00	0.01	-0.06	-0.08	0.12	0.16
Phg (30year)	May	0.01*	0.06	0.01	0.03	0.01	0.02	0.04	0.01
	Jun	0.04*	0.20**	0.01	0.00	0.02	0.11**	-0.05	0.10
	Jul	0.02	0.23	-0.04	0.01	-0.08	-0.01	-0.03	0.24
	Aug	0.00	0.26*	0.03	0.02	-0.07	0.00	0.08	0.25
	Sep	-0.01	0.34**	0.00	0.07*	-0.01	-0.03	0.20	0.45**
Gju (30year)	May	-0.01	0.00	0.00	0.03	-0.01	-0.11	-0.03	0.05
	Jun	0.02	0.02	-0.01	0.03	0.03	-0.08*	0.03	0.01
	Jul	-0.38**	0.16	-0.03	-0.08	-0.29**	-0.05	0.03	0.09
	Aug	-0.26	0.10	0.02	0.05	-0.20	0.00	0.16*	-0.02
	Sep	-0.11***	0.20	0.01	0.08	-0.06	-0.02	0.20*	0.18
Hsd (21year)	May	-0.01	0.22*	0.00	0.11	0.01	0.05	0.32	0.19
	Jun	0.06**	0.24	0.03	-0.01	0.03	0.09	-0.02	0.02
	Jul	0.24	0.08	0.11	-0.21	0.25*	-0.01	-0.10	0.12
	Aug	-0.17	-0.02	-0.01	0.09	-0.11	0.02	0.02	-0.17
	Sep	-0.03	0.02	0.00	0.05	-0.01	0.03	-0.11	-0.03
NTC (30year)	May	-0.01	0.03	0.00	0.03	0.00	-0.01	0.10	0.08
	Jun	0.01	0.04	0.03	-0.01	0.06**	0.04	0.11	0.03
	Jul	-0.25*	0.41***	0.06	0.10	-0.18	0.00	-0.03	0.17
	Aug	-0.47**	0.23	0.02	0.09	-0.36**	0.00	-0.10	-0.06
	Sep	-0.06	0.30*	0.02	0.15***	-0.04	0.01	0.50***	0.43*

\*: 0.05 < p ≤ 0.1, \*\*: 0.01 < p ≤ 0.05, \*\*\*: p ≤ 0.01

들에서 오히려 감소 경향이 나타나고 있다. 따라서 현재 기상청 등에서 운용되고 있는 불안정지수들과 이들 임계값의 한계를 포함하여 현재 진행되고 있는 집중호우 발생 패턴 변화를 유발하는 대기환경 변화 원인에 대해서는 추후 심도 있는 분석이 필요하다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 최근 30년(1994~2023년)간의 레윈존

데 관측자료를 이용하여 국내외에서 보편적으로 사용되는 불안정지수를 산출하고 해당 지수들의 기후학적 특성에 대해 분석하였다. 추가로 각 불안정지수의 변화 경향 및 임계값 초과 횟수의 변화 경향에 대해서도 알아보았다. 우리나라에서 불안정지수의 기후학적 특성과 변화 경향은 다음과 같다.

불안정지수의 일변동 특성을 분석한 결과 불안정지수에 따라 상이한 변동 패턴을 보인다. CAPE와 LI는 1200 UTC에 불안정성이 강하고 극한 불안정 사례가

집중되며, TPW 또한 1200 UTC에 가장 높으나, 극한 불안정 사례는 모든 관측 시간에 고르게 분포한다. CAPE와 LI가 대기 중층의 불안정성을 고려하는 불안정지수임을 고려할 때 1200 UTC에 대기 중층이 불안정해짐을 제시한다. KI와 SSI에서는 일변동이 거의 나타나지 않지만 0600 UTC에 상대적으로 가장 안정하며 TTI와 SRH에서는 일변동이 나타나지 않는다. SWEAT은 0000 UTC와 1800 UTC에 불안정하고 0600 UTC에 가장 안정한 일변동 패턴을 보인다. 불안정지수들의 이러한 일변동 특성을 종합할 때 우리나라에서는 대기의 불안정성이 1200 UTC에 상대적으로 높아짐을 제시하며 이는 Eom and Suh (2011)의 연구 결과와 일치한다. 하지만 0600 UTC에 대기가 가장 안정하게 나타나는 점은 해당 선행 연구에서 0000 UTC의 대기가 가장 안정적임을 제시한 것과 차이가 있다.

불안정지수의 일변동과 다르게 계절 내 변동은 대부분 불안정지수에서 유사하게 나타난다. CAPE, KI, TPW, SWEAT, SSI 등 대부분의 불안정지수들은 6월과 9월보다는 7월과 8월에 불안정성이 매우 강한 계절 내 변동을 보인다. 또한 불안정지수에 따라 계절 내 및 지점 간 변동성이 상이할 뿐만 아니라 극한 불안정 사례가 주로 발생하는 시기도 상이하다. 이러한 불안정지수들의 계절 내 변동 특성들은 우리나라에서 여름철 동아시아 몬순의 남북진동 그리고 중규모 대기환경의 강한 시공간 변동성과의 관련성을 보여준다. 대부분 불안정지수에서 백령도 지점은 안정하고, 광주, 국가태풍센터 지점 등은 비교적 불안정한 모습을 보이는 등 지점에 따른 차이가 크게 나타나는 것은 Eom et al. (2008)의 연구 결과와 일치한다.

불안정지수의 변화 경향을 분석한 결과, 불안정지수의 변화 경향은 지점과 월에 따라 상이한 모습을 보인다. 하층의 수증기와 바람 시어, 하층과 상층의 온도 차이 등을 종합적으로 고려하여 산출하는 SWEAT과 대기 중 수증기의 총량을 정량화하여 나타내는 TPW는 지점과 월에 따라 정도에 차이가 있지만 대부분 불안정해지는 경향을 보이며, 각각 최대  $1.79 \text{ y}^{-1}$ 와  $0.42 \text{ mm y}^{-1}$ 로 그 경향이 강하게 나타난다. 반면, CAPE, KI, SSI, LI 등 열적 요소를 고려하는 불안정지수 및 SRH와 같은 바람 시어를 고려하는 불안정지수에서는 지점과 월별로 일관된 변화 경향이 나타나지 않는다. TPW를 하층, 중층, 상층으로 나누어 변화 경향을 분석한 결과 MPW와 UPW가 거의 모든 지점 및 월에서 증가하는 경향을 나타낸다. TPW와 LPW는 일부 월 및 지점에서 감소하는 경향이 나타나지만 그 경향이 작고, 대부분 지점에서 증가하는 경향이 더 우세하게 나타난다. 또한 TPW가 증가하는 경향을 나타내는 대부분 지점 및 월에서 그 경향의 대부분이

LPW에 의한 것임을 보여 우리나라에서 하층 수증기 양이 증가하고 있음을 뒷받침한다. 이러한 연구 결과는 대기 중층 및 하층의 온난화에 따른 대기 전체 수분 함량 증가를 제시한 Eom and Suh (2011)의 연구 결과와 일치한다. 불안정지수의 변화 경향은 지점별로 상이하나, 백령도와 북강릉 지점에서는 불안정지수들이 대부분 불안정해지는 경향을 나타낸다. 해당 두 지점은 다른 지점에 비해 불안정성이 비교적 낮게 나타난 지점들로, 불안정성이 최근 빠른 속도로 증가하고 있음을 시사한다. 이러한 변화 경향은 포항, 광주, 흑산도 등 다른 지점에서는 일관되게 나타나지 않아 한반도 남부에 비해서 북부의 불안정성이 크게 증가하고 있음을 제시한다. 이러한 변화 경향은 대체로 7월과 8월에 강하게 나타나 불안정성이 높은 월에 변화 경향도 크게 나타남을 제시한다.

불안정지수의 보통 불안정 임계값 초과 횟수에 대한 변화 경향을 분석한 결과 KI와 TPW는 대부분 지점과 월에서 증가 경향을 나타내며 그중 일부는 통계적으로 유의하게 나타난다. KI는 하층의 온도차와 수증기를 고려하는 불안정지수로 TPW와 같이 대기 하층 수증기의 양이 많아지는 횟수가 증가하고 있음을 제시한다. 백령도와 북강릉 지점에서는 최대  $0.27 \text{ y}^{-1}$ 까지 CAPE와 LI의 임계값을 초과하는 횟수가 증가하는 경향이 나타난다. 하지만 오산, 광주, 국가태풍센터 지점에서는 반대로 최대  $-0.38 \text{ y}^{-1}$ 까지 감소하는 경향이 나타나 우리나라 북부에서는 열적 불안정성이 강한 횟수가 증가하지만 남부에서는 감소하고 있음을 시사한다. 즉, 불안정지수들의 평균 및 극한 조건 발생 비율 변화 경향이 최근 국내에서 전국적으로 진행되고 있는 국지적 집중호우 발생빈도와 강도의 증가 경향과 일치하지 않음을 알 수 있다. 이는 현재 사용 중인 불안정지수의 임계값들이 극한 강수 특성 변화를 적절히 반영하지 못하고 있음을 시사하며, 우리나라의 기후 특성에 맞게 불안정지수 임계값을 조정할 필요가 있음을 의미한다. 또한 현재 우리나라에서 진행되고 있는 국지적 집중호우의 빈도와 강도 증가의 원인에 대해서는 추후 하층 제트 특성 변화와 함께 레이더 및 위성 등 중소규모 대기환경 특성을 잘 나타내는 자료들을 활용한 심도 있는 분석이 필요하다(Hwang and Lee, 1993; Song et al., 2019).

## 감사의 글

본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 심사위원분들께 감사를 드립니다. 이 연구는 기상청 <「위험기상 선제대응 기술개발사업」> (RS-2023-00239653)과 2024년 국립공주대학교 학술연구지원사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Chakraborty, R., G. Basha, and M. V. Ratnam, 2018: Diurnal and long-term variation of instability indices over a tropical region in India. *Atmos. Res.*, **207**, 145-154, doi:10.1016/j.atmosres.2018.03.012.
- Chung, Y.-S., M.-B. Yoon, and H.-S. Kim, 2004: On climate variations and changes observed in South Korea. *Clim. Change*, **66**, 151-161, doi:10.1023/B:CLIM.0000043141.54763.f8.
- Craven, J. P., H. E. Brooks, and J. A. Hart, 2004: Baseline climatology of sounding derived parameters associated with deep, moist convection. *Natl. Wea. Dig.*, **28**, 13-24.
- Dalezios, N. R., and N. K. Papamanolis, 1991: Objective assessment of instability indices for operational hail forecasting in Greece. *Meteor. Atmos. Phys.*, **45**, 87-100, doi:10.1007/BF01027477.
- Davis, R. E., T. M. Stanmeyer, and G. V. Jones, 1997: A synoptic climatology of tornadoes in Virginia. *Phys. Geogr.*, **18**, 383-407, doi:10.1080/02723646.1997.10642626.
- Doswell III, C. A., and E. N. Rasmussen, 1994: The effect of neglecting the virtual temperature correction on CAPE calculations. *Wea. Forecasting*, **9**, 625-629, doi:10.1175/1520-0434(1994)009<0625:TEONTV>2.0.CO;2.
- Emanuel, K. A., 1994: Atmospheric convection. *Oxford University Press*, 569 pp.
- Eom, H.-S., M.-S. Suh, J.-C. Ha, Y. H. Lee, and H.-S. Lee, 2008: Climatology of stability indices and environmental parameters derived from rawinsonde data over South Korea. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **44**, 269-286.
- \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 2011: Trends of stability indices and environmental parameters derived from the rawinsonde data over South Korea. *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **32**, 461-473, doi:10.5467/JKESS.2011.32.5.461.
- Ferreira, R., M. Reboita, D. Herdies, and C. Beneti, 2016: Trend of the instability indices in South America. *Cienc. Nat.*, **38**, 164-169, doi:10.5902/2179460X19839.
- Galway, J. G., 1956: The lifted index as a predictor of latent instability. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **37**, 528-529, doi:10.1175/1520-0477-37.10.528.
- George, J. J., 1960: Weather and Forecasting for Aeronautics. *Academic Press*, 673 pp.
- Hong, J., J. Jeon, and C. Ryu, 2015: A case study on heavy rainfall using a wind profiler and the stability index. *J. Chosun Natl. Sci.*, **8**, 221-232, doi:10.13160/rincs.2015.8.3.221.
- Hwang, S.-O., and D.-K. Lee, 1993: A study on the relationship between heavy rainfall and associated low-level jets in the Korean peninsula. *J. Kor. Meteor. Soc.*, **29**, 133-146.
- Jung, H.-S., Y. Choi, J.-H. Oh, and G.-H. Lim, 2002: Recent trends in temperature and precipitation over South Korea. *Int. J. Climatol.*, **22**, 1327-1337, doi:10.1002/joc.797.
- Jung, J.-I., J.-Y. Kim, and J.-C. Nam, 2002: Seasonal atmospheric stability analysis for artificial precipitation experiments. *Atmosphere*, **12**, 568-573.
- Jung, S.-P., S.-R. In, H.-W. Kim, J.-K. Sim, S.-O. Han, and B.-C. Choi, 2015: Classification of atmospheric vertical environment associated with heavy rainfall using Long-Term radiosonde observational data, 1997~2013. *Atmosphere*, **25** 611-622, doi:10.14191/ATMOS.2015.25.4.611.
- Kim, H. R., M. Moon, J. Yun, and K.-J. Ha, 2023: Trends and spatio-temporal variability of summer mean and extreme precipitation across South Korea for 1973~2022. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **59**, 385-398, doi:10.1007/s13143-023-00323-7.
- Kim, S.-Y., H.-J. Song, and H. Lee, 2019: Mesoscale features and forecasting guidance of heavy rain types over the Korean peninsula. *Atmosphere*, **29**, 463-480, doi:10.14191/Atmos.2019.29.4.463.
- Kim, Y.-C., and S.-J. Ham, 2009: Heavy rainfall prediction using convective instability index. *J. Kor. Soc. Avi. Aero.*, **17**, 17-23.
- KIPA, 2023: *Issue Paper*, Korea Institute of Public Administration, 14 pp (in Korean).
- Marinaki, A., M. Spiliotopoulos, and H. Michalopoulou, 2006: Evaluation of atmospheric instability indices in Greece. *Adv. Geosci.*, **7**, 131-135, doi:10.5194/adgeo-7-131-2006.
- Miller, R. C., 1972: *Notes on analysis and severe-storm forecasting procedures of the Military Warning Center. Air Weather Service (MAC)*. Technical Report 200, Scott Air Force Base, IL, 43 pp.
- NDMI, 2023: *Disaster & Safety*, National Disaster Management Research Institute, 17-26.
- Papalexioiu, S. M., and A. Montanari, 2019: Global and regional increase of precipitation extremes under global warming. *Water Resour. Res.*, **55**, 4901-4914, doi:10.1029/2018WR024067.
- Park, C.-G., and T.-Y. Lee, 2008: Structure of mesoscale heavy precipitation systems originated from the Changma front. *Atmosphere*, **18**, 317-338.
- Park, C.-K., M. Chang, C.-H. Ho, K.-J. Ha, J. Kim, and

- B.-J. Sohn, 2021: Two types of diurnal variations in heavy rainfall during July over Korea. *Adv. Atmos. Sci.*, **38**, 2201-2211, doi:10.1007/s00376-021-1178-8.
- Park, I.-K., and M.-S. Suh, 2022: Current status and trends of extreme precipitation characteristics during the last 30 Years (1991~2020) over Korea. *J. Climate Res.*, **17**, 69-87, doi:10.14383/cri.2022.17.2.69.
- Peppler, R. A., 1988: A review of static stability indices and related thermodynamic parameters. *ISWS Miscellaneous Publication MP-104*. 94 pp.
- Showalter, A. K., 1953: A stability index for thunderstorm forecasting. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **34** 250-252.
- Sohn, B. J., G.-H. Ryu, H.-J. Song, and M.-L. Ou, 2013: Characteristic features of warm-type rain producing heavy rainfall over the Korean peninsula inferred from TRMM measurements. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 3873-3888, doi:10.1175/MWR-D-13-00075.1.
- 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-D14-00184.1.
- \_\_\_\_\_, B. Lim, and S. Joo, 2019: Evaluation of rainfall forecasts with heavy rain types in the high-resolution Unified Model over South Korea. *Wea. Forecasting*, **34**, 1277-1293, doi:10.1175/WAF-D-18-0140.1.
- Venkataramanan, M., 2011: Causes and effects of global warming. *Indian J. Sci. Technol.*, **4**, 226-229, doi:10.17485/ijst/2011/v4i3.17.
- Williams, E., and N. Renno, 1993: An analysis of the conditional instability of the tropical atmosphere. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 21-36, doi:10.1175/1520-0493(1993)121<0021:AAOTCI>2.0.CO;2.