K-평균 군집분석을 활용한 여름철 남한지역 폭염 날씨유형 분류 및 사상자와의 관련성 연구

Study on the Association of Casualties and Classification of Heat Wave Weather Patterns in South Korea Using *K*-Means Clustering Analysis

이현철* · 조영준** · 임병환*** · 김승범****

Lee, Hyeon-Cheol*, Cho, Young-Jun**, Lim, Byunghwan***, and Kim, Seung-Bum****

Abstract

In this study, weather patterns (WPs) associated with the heat wave in South Korea are objectively classified by applying *K*-means clustering analysis. The representative weather patterns that caused the heat wave were divided into three WPs, namely WP 1, WP 2, and WP 3. The heat wave over the Korean Peninsula was mainly related to the expansion of the North Pacific High (NPH). Moreover, we analyzed the relationship between casualties and WPs of the heat wave. In WP 1, the isobar of NPH was located in the southern part of South Korea. Most casualties (18 people) occurred in this region. In WP 2, NPH was distributed throughout South Korea, with nationwide casualties of 44 people. Moreover, the duration of the heat wave for WP 2 was the longest, at 4.5 days. WP 3 occurred mainly in June, when the NPH was not yet developed, presenting the smallest number of casualties.

Key words : Heat Wave, Weather Pattern, *K*-means Clustering Analysis, Casualty

요 지

본 연구에서는 *K*-평균 군집분석을 사용하여 남한지역에서 발생한 폭염 날씨유형을 객관적으로 분류하였고, 폭염 사상자와 날씨유형과의 관련성을 분석하였다. 여름철 남한 지역에 폭염을 유발하는 대표 날씨유형은 3가지로 구분되었고, 주로 북태평양 고기압의 확장과의 관련이 있었다. 날씨유형 1번은 북태평양 고기압이 한반도 남부지역에 영향을 주는 것으로 나타났다. 폭염 사상자 또한 전라도와 경상도 지역에서 각각 9명으로 분석되었다. 날씨유형 2번은 북태평양 고기압이 한반도 전체에 영향을 주었고, 전국 대부분 지역에서 고온현상이 발생하였다. 지속 일수 또한 4.5일로 가장 길게 나타났다. 폭염 사상자 수는 44명으로 가장 높은 수치를 보였고, 피해 발생지역도 전국적으로 분포했다. 날씨유형 3번의 경우 주로 6월에 발생하였다. 북태평양 고기압이 아직 발달하지 못한 상태로, 폭염 사상자도 가장 작은 수치를 보였다.

핵심용어 : 폭염, 날씨유형, *K*-평균 군집분석, 사상자

*정회원, 국립기상과학원 융합기술연구부 연구원(E-mail: lhc1124@korea.kr)

Member, Researcher, Convergence Meteorological Research Department, National Institute of Meteorological Sciences

**교신저자, 정회원, 국립기상과학원 융합기술연구부 기상연구관(Tel: +82-64-780-6689, Fax: +82-64-738-6515, E-mail: genesis19y@korea.kr)

Corresponding Author, Member, Research Scientist, Convergence Meteorological Research Department, National Institute of Meteorological Sciences

***국립기상과학원 융합기술연구부 기상연구관(E-mail: weatherman@korea.kr)

Senior Researcher, Convergence Meteorological Research Department, National Institute of Meteorological Sciences

****국립기상과학원 재해기상연구부 부장(E-mail: kmaskim@korea.kr)

Director, High Impact Weather Research Department, National Institute of Meteorological Sciences

1. 서 론

폭염은 극심한 더위를 뜻하며, 많은 인명 피해를 발생시키는 현상으로 위험기상으로 분류되고 있다. 특히, 기상청(Korea Meteorological Administration, KMA)에서 보고한 Representative Concentration Pathways 8.5 (RCP 8.5)에 따른 결과에 의하면 21세기 후반 폭염 일수는 현재의 약 3.5배, 열대야 일수는 10배 이상 증가할 것으로 전망하고 있다(KMA, 2014, 2018a). 지구 평균 기온상승에 의한 한반도 폭염은 지구온난화와 연관되어 확실하게 증가할 것으로 예상되고 있다. 2018년 여름철(6~8월) 전국 평균기온은 25.4 °C로 평년(23.6 °C)보다 높았으며, 1973년 통계작성 개시 이후 가장 높았다(KMA, 2018b).

한국질병관리본부(Korea Center for Disease Control and prevention, KCDC)에서는 폭염으로 인한 온열질환자는 2018년에 4,526명이 발생했으며, 이 중 48명이 사망했다. 이러한 온열질환자와 사망자는 2017년 1,574명과 11명에 비해 188% (2,952명)과 336% (37명) 증가한 수치이다(KCDC, 2018). 이는 전국 폭염 일수가 증가하면서 나타난 것으로 폭염 일수와 열대야는 각각 31.4일과 17.7일로 평년(9.8일과 5.1일)보다 많아 모두 1973년 이후 1위를 기록했다(KMA, 2018b). 폭염으로 인한 피해가 점차 심각해짐에 따라 피해를 예방하기 위해서 한반도에서 발생하는 폭염 예측 정확도를 향상과 폭염의 발생 원인에 대한 명확한 분석이 필요하다.

한반도에 발생하는 폭염에 대한 연구는 주로 사례를 분석하는 경우가 주를 이루고 있다(Back et al., 2018; Yoon et al., 2018). 폭염을 유발하는 원인은 발생지역에 따라 다르지만 주로 북태평양 고기압의 발달과 연관성이 높다. Yoon et al. (2018)은 종관기상관측장비(Automated Synoptic Observing System, ASOS) 지상 기온 자료를 격자화한 후 K-평균 군집분석(K-means clustering analysis)을 수행하였고, 지상 기온의 공간적 분포를 3가지로 분류하여 500 hPa 지위고도, 850 hPa 바람장 등 종관적인 특징을 조사하였다. Choi et al. (2016)은 제주 지역에서 1993년 이후 25 °C 이상인 날수가 급격히 증가하는 원인을 북태평양 고기압의 강화로 설명하고 있다.

일부 초여름(6월)의 경우, 북태평양 고기압의 발달과는 별개로 바람과 지형의 영향으로 고온현상이 나타나는 경우가 있는데 이를 편 현상이라고 부른다. 지역에 따라 늦새바람(영서), 양간지풍(영동)으로 불리고 있다. 늦새바람은 늦봄에서 초여름 사이에 오호츠크해 고기압으로 인한 동풍이 태백산맥을 넘으면서 영서 지역에 고온현상을 발생시키며(Kim and Kim, 2013), 양간지풍은 한반도를 중심으로 기압이 남고북저의 형태로 배치되었을 때 서풍이 태백산맥을 넘으면서 고온건조한 대기가 영동지역으로 형성된다(Jang and Chun, 2008; Cho et al., 2015).

이처럼 한반도에서 발생하는 폭염은 발생 지역에 따라 메커니즘이 다르기 때문에 폭염 발생 원인에 대한 요인을

객관적으로 분석하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 여러 가지 군집분석 중 하나인 비지도 학습 방법(Unsupervised Learning)인 K-평균 군집분석을 사용해 한반도에 폭염을 발생시키는 폭염 날씨유형을 구분하였다. K-평균 군집분석을 이용한 연구는 폭염, 가뭄, 호우, 풍력, 해빙, 기압분석 등 다양한 분야에서 연구가 수행되어 왔다(C.H. Kim et al., 2007; Jung et al., 2009; Kim et al., 2010; Jeong, 2012; Kim et al., 2012; H.G. Kim et al., 2016; J.K. Park et al., 2016; H.A. Kim et al., 2017; H.U. Kim et al., 2017; Yoon et al., 2018; Cho et al., 2019).

또한 전 지구적 기온 상승으로 인한 폭염 피해 역시 증가할 것으로 예상됨에 따라 이에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있다(Kim et al., 2006; Choi et al., 2007; J.Y. Kim et al., 2007; Park et al., 2008; Kim et al., 2009; Lee et al., 2010; Kim et al., 2014; J.A. Kim et al., 2016; J.E. Park et al., 2016). J.Y. Kim et al. (2007)은 군집분석을 통해 종관 기상을 분류하고 서울에서 발생한 사망률에 대한 연관성을 분석했고, Kim et al. (2014)은 부산지역에서 고온현상으로 사망자가 발생한 2013년 8월 9~13일 폭염사례 기간을 대상으로 여러 지수를 활용하여 열쾌적성을 평가하였다.

과거 폭염 연구는 특정 지역에 국한되거나 사상자에 대한 연구가 대부분이고, 기압, 바람 등 폭염 날씨유형에 따른 폭염의 지역적 특성과 이와 관련된 사상자 연구는 아직까지 부족한 실정이다. 또한 대한민국 기상청 일기예보는 종관일기도를 기본으로 수행되기 때문에 객관적 분류기법을 적용한 날씨유형 연구가 선행적으로 이루어져야 한다. 본 연구에서는 장기간 모델 재분석 자료와 K-평균 군집분석을 사용하여 폭염을 유발하는 날씨유형을 객관적으로 분류하였다. 그리고 폭염 날씨유형에 따라 합성장(Composite Map) 분석을 통해 종관적인 기상영향을 분석하여 폭염의 발생 원인과 지역적 특성을 분석하였다. 최종적으로 기상청 기상영향 Data Base (DB)를 활용하여 폭염 사상자 발생 시 해당되는 폭염 날씨유형을 분석하여 날씨유형과 사상자와의 관련성을 분석하였다. 이 연구 결과는 향후 폭염 예보 시 기상환경과 사상자와의 관련 정보를 제공하는 기상 영향예보에 활용될 것으로 기대된다.

2. 자료 및 방법

본 연구는 크게 폭염 날씨유형 분류 그리고 유형에 따른 사상자와의 관련성 연구로 구분된다. 폭염 날씨유형 분류는 과거 30년(1981~2010년) 동안의 6~8월(여름철) 기간을 설정하였고, 폭염 사상자와 날씨유형과의 관련성 분석은 최근 9년간(2011~2019년) 구축된 폭염 사상자 자료를 활용하여 분석하였다.

폭염 사례 선정과 군집별 기온 특성 분석을 위하여 총 95개 관측지점 종관기상관측장비(Automated Synoptic Observing

System, ASOS) 일 최고기온 관측자료를 사용했다(Fig. 1). 자료 기간은 30년간(1981~2010년) 여름철(6~8월)이다. 폭염 사례일을 선정하기 위해 기상청에서 발표하는 폭염주의보 기준인 33 °C 이상이 2일 이상 지속되는 조건을 적용하였다. 본 연구에서 조사된 폭염일수는 총 1,102일로 나타났다.

Fig. 1. Locations of 95 ASOS Stations

군집분석에 사용된 입력 자료는 유럽중기예보센터(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)에서 제공하는 ECMWF ReAnalysis-Interim (ERA-Interim) 재분석자료 중 500 hPa 등압면 고도의 지위고도(Geopotential Height, gpm) 자료를 사용하였다. 시공간 분해능은 각각 일 간격 그리고 1.5° × 1.5° 격자 해상도이다. 또한 한반도에 폭염이 발생할 때, 중관규모의 기상장 분석을 위해 ERA-I 500 hPa 지위고도, 평균해면기압(Mean Sea Level Pressure, MSLP) 아노말리(Anomaly, hPa), 그리고 850 hPa 바람(m s⁻¹) 합성장을 분석하였다. 또한 2 m 기온(°C) 자료를 사용해 유형별 기온의 공간적 분포를 조사하였다. 연구 영역은 여름철 한반도 기온에 영향을 주는 북태평양 기단의 특징을 반영하기 위해 동아시아 지역 20°~50°N, 110°~150°E로 설정했다(Fig. 2).

Fig. 2. Research Domain

본 연구에서는 폭염과 관련된 날씨유형을 분류하기 위해 비계층적(Non-hierarchical) 군집분석 기법 중 하나인 K-평균 군집분석을 활용하였다. K-평균 군집분석은 대량의 자료에서 군집을 발견하기 쉽고 계산 속도가 빠르다는 장점이 있으며, 데이터의 유사성을 재배치하는 방식으로 연속적인 자료 처리에 적합한 것으로 알려져 있다. K-평균 군집분석의 순서는 다음과 같다. 무작위로 초기 중심 값을 선택한다. k개의 중심 값과 각 개별 데이터를 유클리디안(Euclidean) 거리를 이용하여 계산, 가장 가까운 군집에 해당 데이터를 할당하고, 군집마다 새로운 중심 값을 계산한다. 선택된 중심 값에 변화가 어느 정도 없다면 멈추고, 계속 변화가 있다면 중심 값을 다시 설정하고 위 방법을 반복한다(MacQueen, 1967; Everitt, 1993; Um et al., 2009; Lee and Chung, 2018).

객관적 군집분석으로 분류된 폭염 날씨유형과 폭염사상자와의 관련성을 분석을 위해 기상청 기상영향 DB에서 폭염으로 인한 사상자 정보를 사용하였다. 이 자료는 기상청의 효율적인 영향예보 운영을 위해 기상정보와 영향 정보가 융합된 기상영향 DB를 선진예보시스템에 구축하여 시행하고 있다. 기상영향 DB에 입력되는 기상영향 정보는 주로 언론기사, 유관기관(일일재난상황, 재해대처상황보고 등), 현장 조사 자료 등의 비정형 데이터를 기반으로 하고 있고, 호우, 대설, 강풍, 폭염, 한파 등 기상현상을 15가지로 구분하여 기상영향 정보를 구축하고 있다. 세부적으로 2009년 이후 피해사례를 수집하여 보건, 병충해, 농축수산, 환경, 교통, 전력 분야 등 피해 정보를 제공하고 있다.

본 연구에서는 기상영향 DB를 활용하여 2011~2019년까지 폭염 사상자 발생일을 조사하여 해당일의 폭염 날씨유형을 분류하였다. 해당일의 유형은 군집분석으로 분류된 폭염 날씨유형을 기준으로 500 hPa 지위고도장을 분석하여 분류하였다. 이렇게 분류된 폭염 날씨유형별로 기상영향 DB에서 제공하는 발생 기간, 장소, 인명피해, 최고기온에 대한 정보를 사용하여 폭염 사상자를 분석하였다.

3. 결 과

3.1 폭염 날씨유형 군집수 설정

K-평균 군집분석은 사용자가 분석 초기에 군집 개수를 지정해 주어야 한다. 본 연구에서는 선정된 폭염 사례의 군집수를 결정하기 위해 Explained Cluster Variance (ECV)를 계산하였다(Philipp et al., 2007; Beck and Philipp, 2010; Hoffmann and Schlünzen, 2013).

$$WSS = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{n_k} (x_{ki} - c_k)^2 \quad (1)$$

$$ECV = 1 - \frac{WSS}{TSS} \quad (2)$$

Within cluster Sum of Squares (WSS)는 군집수에 따른 500 hPa 지위고도 차이의 합으로, 군집별 대표 500 hPa 지위고도는 각 군집에 해당하는 일별 500 hPa 지위고도를 의미한다. Total Sum of Squares (TSS)는 군집수가 1일 경우, 500 hPa 지위고도 차이의 합을 나타낸다. ECV는 1에서 WSS와 TSS의 비를 뺀 값으로 WSS의 군집수를 증가시키면서 계산된다. 본 연구에서는 ECV 값의 기울기가 급격하게 감소하는 군집수 3 ($k = 3$)을 최적 군집수로 정의하였다(Fig. 3). Yoon et al. (2018) 한반도 폭염 연구에서 군집수를 3개로 정의된 바 있다.

Fig. 3. ECV ($E_i - E_{i-1}$) Values on the Number of Clusters

3.2 폭염 날씨유형 및 특징

ASOS 자료를 사용해 30년간 한반도에 발생한 폭염 사례 일은 1,102일로 나타났다(Table 1). ERA-I 500 hPa 지위고도 자료를 이용하여 군집분석을 통해 우리나라에 폭염을 유발하는 폭염 날씨유형이 3가지로 구분되었다(Fig. 4). 폭염 날씨유형 3가지는 주로 고온다습한 북태평양 고기압의 한반도 확장 정도와 관련이 있었다. 일반적으로 기상학에서는 북태평양 고기압을 분석할 때, 500 hPa 등압면 고도에서 5,880 gpm선을 활용한다(Choi et al., 2016; J.A. Kim et al., 2016; Back et al., 2018; Yoon et al., 2018). 7월은 북태평양 고기압의 세력이 8월에 비해 상대적으로 약한 가운데 확장 수축을 반복하고, 8월은 북태평양 고기압 세력이 강한 가운데 수축과 확장을 반복한다. Fig. 4는 각 유형별 MSLP 아노말리장, 500 hPa 지위고도장, 850 hPa 바람장을 보여준다.

날씨유형 1번의 경우, 북태평양 고기압의 중심이 일본 남쪽에 위치하면서 한반도 남부 지역에 폭염을 일으키는 형태로 주로 7-8월에 많이 나타나는 것으로 분석되었고, 발생일수가 446일로 2번 날씨유형보다 14일 높은 수치를 기록하였다(Fig. 4(a), Table 1). 북태평양 고기압의 특징을 분석한 결과, 북태평양 고기압 중심은 일본 남부 해상에 위치해 있고, 북태평양 고기압의 가장자리에 한반도 남부지역이 영향을 받고 있다. 850 hPa의 바람은 남서계열의 바람이 한반도에

영향을 주는 것으로 나타났다. MSLP 아노말리의 경우, 한반도 남부지역에 양의 아노말리가 영향을 주는 것으로 분석되었다. 한반도는 남서계열의 바람과 양의 아노말리의 영향으로 남부지역에 폭염 현상이 나타난 것으로 분석된다.

Fig. 4. Composite Synoptic Conditions of Weather Patterns Associated with Heat Wave (Shaded: MSLP anomaly, contour: 500 hPa geopotential height, arrow: 850 hPa wind vector)

Table 1. Monthly Frequency of the Heat Wave Weather Patterns

Cluster	Days (33 °C)			Total days
	Jun.	Jul.	Aug.	
1	15	221	210	446
2	2	153	277	432
3	122	62	40	224
Total days	139	436	527	1,102

날씨유형 2번은 북태평양 고기압(5,880 gpm)이 한반도 중부까지 확장한 것으로 나타났다(Fig. 4(b)). 폭염 총 발생일수는 432일로 조사되었고, 주로 8월에 277일 발생하였다(Table 1). MSLP 아노말리의 경우, 양의 아노말리가 한반도에서 강하게 나타나고 있고, 이러한 패턴은 한 여름철 한반도에 나타나는 대표적인 기압패턴이다. 한반도는 고기압의 영향권에서 약한 바람과 강한 일사의 영향으로 폭염 현상이 발생한 것으로 판단된다.

날씨유형 3번은 주로 6월에 나타나며 북태평양 고기압이 아직 발달하지 못한 형태이다. 850 hPa 바람은 남서풍이 나타나지만 1번 유형에 비해 약한 것으로 나타났다. 발생 빈도도 3가지 중 가장 적게 나타났다(Fig. 4(c), Table 1). 위 내용을 요약하면 한반도에 폭염을 유발하는 주요 원인은 북태평양 고기압의 발달과 연관이 있으며, 유형별 월별분포에서 폭염이 발생하는 날씨유형을 6, 7, 8월 순서대로 나열하면 날씨유형 3, 1, 2번 순으로 나타난다는 것을 알 수 있었다.

폭염 날씨유형에 따른 기온의 공간적 분포를 알아보기 위해 ERA-I 2 m 기온 재분석 자료와 ASOS 기온 관측자료를 분석하였다(Fig. 5, Table 2). 날씨유형 1번의 경우, 한반도 남부지역에서 고온현상이 나타나고 있는데, 이는 북태평양 고기압의 위치가 일본 남쪽 해상에 위치하여 우리나라 동남부 지역에 고온 다습한 공기가 유입되면서 발생한 것으로 분석된다(Fig. 5(a)). 날씨유형 2번은 재분석 자료에서 전국적으로 고온현상이 나타났다. 이는 고기압의 영향권에 있으면서 안정된 대기와 강한 일사의 영향으로 발생한 것으로 분석된다(Fig. 5(b)). 날씨유형 3번의 경우는 1번과 2번 날씨유형보다 온도가 상대적으로 낮게 나타났다. 이것은 $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$ 격자 해상도 자료의 한계와 고온현상이 편현상 등 주로 국지적으로 발생하였기 때문인 것으로 판단된다(Fig. 5(c)).

ASOS 기온 자료에서도 재분석 자료와 유사하게 날씨유형 1번은 충청, 전라, 경상, 그리고 제주도 지역에서 30℃ 이상의 기온이 나타났고, 폭염주의보 수준에 해당하는 평균 지속 일수는 3.1일로 나타났다. 날씨유형 2번의 경우, 전국적으로 기온이 30℃ 이상으로 나타났으며, 폭염 지속 일수는 4.5일로 날씨유형 중 가장 길게 나타났다. 날씨유형 3번은 평균기온이 전국적으로 30℃ 이하의 기온을 보였으며 평균 지속 일수도 다른 날씨유형에 비해 상대적으로 2.5일로 짧게 분석되었다(Table 2).

Fig. 5. Air Temperature Field from ERA-I for the Three Clusters

3.3 폭염 사상자와 날씨유형과의 관련성

여름철 한반도에서 발생하는 폭염의 주 원인은 북태평양 고기압의 한반도 확장 정도와 관련이 깊었다. 폭염 날씨유형과 폭염으로 인한 사상자와의 관련성을 분석하기 위해 기상청 기상영향 DB를 사용하였다. 기상영향 DB는 2011년부터 폭염, 호우, 대설, 강풍, 한파 등 기상현상을 15가지로 구분하여 기상영향 정보를 구축하고 있으며 본 연구에서는 폭염으로 인한 피해 데이터를 사용하였다. 세부적으로 폭염 사상자 발생일의 500 hPa 지위고도장을 분석하여 3개 폭염 날씨유형에 해당하는 유형을 분류하였고, 날씨유형에 따라 월별,

Table 2. Distribution of Regional Mean Air Temperature and Heat Wave Duration from ASOS

	Cluster 1				Cluster 2				Cluster 3			
	Gyeonggi	29.6	Gangwon	29.1	Gyeonggi	31.8	Gangwon	30.7	Gyeonggi	29.2	Gangwon	28.7
Regional mean temp. (°C)	Chungcheong	30.8	Gyeongsang	31.3	Chungcheong	32.4	Gyeongsang	31.9	Chungcheong	29.9	Gyeongsang	29.9
	Jeolla	31.1	Jeju	30.4	Jeolla	32.1	Jeju	30.6	Jeolla	29.4	Jeju	27.6
Average day to duration	3.1 day				4.5 day				2.5 day			

Table 3. Features of Casualties Related to Heat Wave Weather Patterns during the Period of June 2011~July 2019

	Cluster 1		Cluster 2		Cluster 3		Total	
Occurrence of casualties	32		127		7		166	
Monthly occurrence of casualties	May	0	May	0	May	5	May	5
	June	3	June	0	June	2	June	5
	July	23	July	57	July	0	July	80
	August	4	August	70	August	0	August	74
	September	2	September	0	September	0	September	2
Regional occurrence of casualties	Gyeonggi 0	Gangwon 2	Gyeonggi 15	Gangwon 2	Gyeonggi 3	Gangwon 2	Gyeonggi 18	Gangwon 6
	Chungcheong 5	Gyeongsang 9	Chungcheong 18	Gyeongsang 39	Chungcheong 0	Gyeongsang 1	Chungcheong 23	Gyeongsang 49
	Jeolla 9	Jeju 7	Jeolla 44	Jeju 9	Jeolla 0	Jeju 1	Jeolla 53	Jeju 17
Averaged Max. Temp. (°C)	32.2 °C		34.7 °C		29.7 °C		32.2 °C	
Days of tropical night	5		51		1		57	

지역별 폭염 사상자의 분포와 발생지역 평균 최고기온 그리고 열대야 등을 분석하였다(Table 3).

폭염으로 인한 사상자는 총 166명으로 조사되었다. 폭염 날씨유형별로 사상자를 분석한 결과, 1번 날씨유형의 경우, 총 32명의 사상자를 기록하였고, 7월에 23명으로 가장 많은 사상자가 발생하였다. 지역별로는 전라도와 경상도 지역에 사상자가 각각 9명이 발생하였다. 날씨유형 1번은 북태평양 고기압이 일본 남부에 위치하면서 한반도에 남서풍의 유입으로 인해 폭염 현상이 나타났다. 7월은 계절상 북태평양 고기압의 세력이 강화되는 시기이고, 9월은 북태평양 고기압이 약화되는 시기이다. 계절적인 특징은 7월과 9월이 다르지만 북태평양 고기압의 세력으로 인해 9월에도 폭염으로 인한 사상자가 발생한 것으로 분석된다.

날씨유형 2번은 다른 날씨유형에 비해 127명으로 가장 많은 사상자가 발생하였다. 사상자는 주로 7월과 8월에 발생하였고, 피해 발생지역은 전국적으로 분포하는 특징을 보였다. 2번 날씨유형의 경우, 북태평양 고기압이 한반도 전역에 영향을 주고 있으며 사상자 분포 역시 전국적으로 나타나고 있다.

날씨유형 3번의 경우, 5월과 6월에 사상자가 발생했지만 7-9월에는 사상자가 발생하지 않은 특징을 보였다. 총 7명으로 다른 날씨유형과 비교해 가장 작은 사상자 수를 보였다. 3번 날씨유형은 북태평양 고기압의 영향보다는 산맥 등 지형적 영향으로 인해 폭염 사상자가 발생한 것으로 판단된다. 향후 폭염 날씨유형 연구에서 편향상 등 국지적인 영향에 의해 발생하는 폭염 현상에 대한 연구가 더욱 수행되어야 할 것이다.

폭염 사상자 발생지역의 평균 일 최고기온을 분석한 결과, 폭염 사상자가 가장 많았던 2번 유형에서 34.7 °C로 가장 높은 수치를 보였고, 1번과 3번 유형에서 각각 32.2 °C 그리고 29.7 °C를 기록하였다. 열대야 일수 또한 폭염 사상자, 평균 일 최고기온이 높았던 2번 유형에서 51일로 가장 높은 수치를 보였고, 1번과 3번 유형에서 각각 5일과 1일로 나타났다.

이러한 결과를 통해 폭염 날씨유형에 따라 폭염 발생지역, 평균 일 최고기온, 열대야 일수 등의 특징을 확인할 수 있었고, 특히 폭염 날씨유형에 따라 폭염 사상자 특징 또한 구분되어 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 1981~2010년(30년) 동안의 ERA-I 자료와 K-평균 군집분석을 활용하여 한반도에 폭염을 유발하는 폭염 날씨유형을 분류하였다. 군집분석을 통해 한반도에 폭염을 유발하는 폭염 날씨유형이 3가지로 구분되었다. 날씨유형 1번의 경우 폭염 일수는 3가지 날씨유형 중 446일로 가장 많았으며 북태평양 고기압의 가장자리에 한반도 남부지역이 위치하면서 남서계열의 바람의 영향을 받고 있었다. 이로 인해 한반도 남부지역에 폭염 현상이 나타나는 것으로 분석되었다. 날씨유형 2번은 총 432일로 나타났으며, 주로 8월에 발생하였다. 북태평양 고기압이 한반도 중부까지 영향을 주며 고기압의 영향권에서 약한 바람과 강한 일사의 영향으로 폭염 현상이 발생한 것으로 분석되었다. 날씨유형 3번의 경우, 주로 6월에 나타나며 3가지 날씨유형 중 224일로 가장 낮은 발생일수를 보였다. 북태평양 고기압은 발달하지 못한 형태를 보였다. 한반도에 폭염을 유발하는 주요 원인은 북태평양 고기압의 발달과 관련이 있었다. 폭염 날씨유형에 따른 기온의 공간적 특징은 1번 유형의 경우, 한반도 남부지역, 2번 유형은 전국적으로 고온현상이 나타났다. 3번 유형의 경우는 1번과 2번보다는 온도가 낮게 나타났다. ASOS 기온 자료에서도 모델 재분석 자료와 유사한 특징을 보였다.

폭염 날씨유형과 폭염 사상자와의 관련성을 조사하기 위해 기상청 기상영향 DB를 사용하여 폭염 사상자 발생일을 분석하였다. 날씨유형 1번은 총 32명의 사상자를 기록하였고, 7월에 23명으로 가장 많은 사상자가 발생하였다. 날씨유

형 2번은 다른 날씨유형에 비해 127명으로 가장 많은 사상자가 발생하였다. 폭염 사상자는 주로 7월과 8월에 했으며, 사상자가 전국적으로 분포하는 특징을 보였다. 반면 날씨유형 3번은 5월과 6월에만 사상자가 발생했다. 폭염 사상자 발생지역의 평균 일 최고기온을 분석한 결과, 폭염 사상자가 가장 많았던 날씨유형 2번에서 34.7 °C로 가장 높게 나타났고, 1번 유형은 32.2 °C, 3번 유형은 29.7 °C로 분석되었다. 열대야 일수 또한 폭염 사상자, 평균 일 최고기온이 높았던 날씨유형 2번에서 51일로 가장 높은 수치를 보였고, 1번 유형은 5일, 3번 유형은 1일로 나타났다.

이를 종합하여 볼 때, 한반도 여름철 폭염 날씨유형은 크게 3가지 날씨유형으로 구분되었다. 각 폭염 날씨유형에 따라 기압, 지위고도, 그리고 바람 등 종관 기상상태의 특징이 구분되어 나타났고, 특히 북태평양 고기압의 확장과 관련이 있었다. 또한 폭염 사상자와 날씨유형 관련성 분석에서도 이러한 날씨유형에 따라 사상자의 공간적 발생 분포 특징이 나타났다. 대한민국 기상청은 폭염 영향예보 정규 서비스를 2019년 6월부터 시행하고 있으며 폭염 특보와 함께 지역별 위험 수준을 고려한 폭염 영향 전망 및 폭염 피해 현황 정보, 분야별 폭염 대응요령을 제공하고 있다. 향후 폭염 예보 정확도 향상과 기상환경에 따른 폭염 사상자 관련성 연구를 위해 지형적 영향 등 상세화된 폭염 날씨유형 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

이 연구는 기상청 국립기상과학원 「위험기상에 대한 분석·예보의 융합기술 고도화」(KMA2018-00121)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Back, S.Y., Kim, S.W., Jung, M.I., Roh, J.W., and Son, S.W. (2018). Classification of heat wave events in Seoul using self-organizing map. *Journal of Climate Change Research* 2018, Vol. 9, No. 3, pp. 209-221.
- Beck, C., and Philipp, A. (2010). Evaluation and comparison of circulation type classifications for the European domain. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, Vol. 35, No. 9-12, pp. 374-387.
- Cho, Y.-J., Kwon, T.-Y., and Choi, B.-C. (2015). Characteristics of meteorological variables in the leeward side associated with the downslope windstorm over the Yeongdong Region. *Journal of the Korean Earth Science Society*, Vol. 36, No. 4, pp. 315-329.
- Cho, Y.-J., Lee, H.-C., Lim, B., and Kim, S.-B. (2019). Classification of weather patterns in the East Asia Region using the K-means clustering analysis. *Atmosphere*, Korean Meteorological Society, Vol. 29, No. 4, pp. 451-461.
- Choi, B.C., Kim, J.Y., Lee, D.G., and Kysely, J. (2007). Long-term trends of daily maximum and minimum temperatures for the major cities of South Korea and their implications on human health. *Atmosphere*, Korean Meteorological Society, Vol. 17, No. 2, pp. 171-183.
- Choi, J.W., Cha, Y.M., Kim, J.Y., and Park, C.H. (2016). Analysis of long-term changes of days with 25°C or higher air temperatures in Jeju. *Journal of Climate Change Research* 2016, Vol. 7, No. 1, pp. 31-39.
- Everitt, B.S. (1993). *Cluster analysis* (3rd ed.). Academic Press.
- Hoffmann, P., and Schlünzen, K.H. (2013). Weather pattern classification to represent the urban heat island in present and future climate. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 52, No. 12, pp. 2699-2714.
- Jang, W., and Chun, H.Y. (2008). Severe downslope windstorms of Gangneung in the springtime. *Atmosphere*, Korean Meteorological Society, Vol. 18, No. 3, pp. 207-224.
- Jeong, Y.K. (2012). Cluster analysis of the 1000-hPa height field around the Korean Peninsula. *Journal of the Korean Earth Science Society*, Vol. 33, No. 4, pp. 337-349.
- Jung, W.S., Lee, H.W., Park, J.K., Kim, H.G., Kim, E.B., Choi, H.J., et al. (2009). Classification of wind sector for assessment of wind resource and establishment of a wind map in South Korea. *Journal of the Environmental Sciences*, Vol. 18, No. 8, pp. 899-910.
- Korea Centers for Disease Control and Prevention (KCDC). (2018). *2018 Annual report in the notified patients with heat-related illness in Korea*.
- Kim, C.H., Son, H.Y., Kim, J.A., and Ahn, T.K. (2007). Classification of synoptic meteorological patterns for the environmental assessment of regional-scale long range transboundary air pollutants. *Journal of Environmental Impact Assessment*, Vol. 16, No. 1, pp. 89-98.
- Kim, H.A., Park, J.K., Kim, H.C., and Son, Y.B. (2017). Climatological variability of multisatellite-derived sea surface temperature, sea ice concentration, chlorophyll-a in the Arctic Ocean. *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 33, No. 6-1, pp. 901-915.

- Kim, H.G., Kim, J.S., Kang, Y.H., and Park, H.D. (2016). Classification of wind sector in Pohang Region using similarity of time-series wind vectors. *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 36, No. 1, pp. 11-18.
- Kim, H.G., Lee, Y.S., and Jang, M.S. (2010). Cluster analysis and meteor-statistical model test to develop a daily forecasting model for Jeju wind power generation. *Journal of the Environmental Sciences*, Vol. 19, No. 10, pp. 1229-1235.
- Kim, H.U., Shim, J.K., and Choi, B.C. (2017). Analysis on rainfall pattern during typhoons using self-organizing map. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 17, No. 4, pp. 55-64.
- Kim, H.U., Sohn, C., and Han, S.O. (2012). Identifying the optimal number of homogeneous regions for regional frequency analysis using self-organizing map. *Journal of Korea Spatial Information Society*, Vol. 20, No. 6, pp. 13-21.
- Kim, J.Y., Lee, D.G., and Kysely, J. (2009). Characteristics of heat acclimatization for major Korean cities. *Atmosphere*, Korean Meteorological Society, Vol. 19, No. 4, pp. 309-318.
- Kim, J.A., Kim, K.R., Lee, C.C., Sheridan, S.C., Kalkstein, L.S., and Kim B.J. (2016). Analysis of occurrence distribution and synoptic pattern of future heat waves in Korea. *Journal of Climate Research*, KU Climate Research Institute, Vol. 11, No. 1, pp. 15-27.
- Kim, J.Y., Choi, B.C., Park, I.S., Kim, K.R., and Lee, D.G. (2006). Heat wave as a major meteorological disaster in summer. *Proceedings of 2006 Autumn Meeting*, Korean Meteorological Society, pp. 346-347.
- Kim, J.Y., Lee, D.G., Choi, B.C., and Park, I.S. (2007). Synoptic air mass classification using cluster analysis and relation to daily mortality in Seoul, South Korea. *Atmosphere*, Korean Meteorological Society, Vol. 17, No. 1, pp. 45-53.
- Kim, Y.J., Kim, H.S., Kim, Y.K., Kim, J.K., and Kim, Y.M. (2014). Evaluation of thermal environments during the heat waves of summer 2013 in Busan Metropolitan Area. *Journal of Environmental Science International*, Vol. 23, No. 11, pp. 1929-1941.
- Kim, Y.M., and Kim, M.K. (2013). A study on foehn over HongCheon area of Gangwon Province in South Korea. *Journal of the Korean Geographical Society*, Vol. 48, No. 1, pp. 37-55.
- Korea Meteorological Administration (KMA). (2014). *Korean climate change assessment report 2014*.
- Korea Meteorological Administration (KMA). (2018a). *2018 Heat-wave report*.
- Korea Meteorological Administration (KMA). (2018b). *Weather characteristics in August* (September 3, 2018, Press release).
- Lee, M.S., and Chung, G.H. (2018). Cluster analysis of snowfall observatory using K-means algorithm. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 2, pp. 55-62.
- Lee, S.R., Kim, H., and Yi, S.M. (2010). The relationships between temperature changes and mortality in Seoul, Korea. *Journal of Environmental Health Science*, Vol. 36, No. 1, pp. 20-26.
- MacQueen, J. (1967). Some methods for classification and analysis of multivariate observations. *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, Vol. 1, No. 14, pp. 281-297.
- Park, J.E., Heo, B.Y., and Sunwoo, Y. (2016). A study on human damage due to heat wave by region. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 16, No. 1, pp. 103-109.
- Park, J.K., Jung, W.S., and Kim, E.B. (2008). A study on the influence of extreme heat on daily mortality. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol. 24, No. 5, pp. 523-537.
- Park, J.K., Lee, J.H., Yang, S.K., Kim, M.C., and Yang, S.C. (2016). Drought classification method for Jeju Island using standard precipitation index. *Journal of Environmental Science International*, Vol. 25, No. 11, pp. 1511-1519.
- Philipp, A., Della-Marta, P.M., Jacobeit, J., Fereday, D.R., Jones, P.D., Moberg, A., et al. (2007). Long-term variability of daily North Atlantic-European pressure patterns Since 1850 classified by simulated annealing clustering. *Journal of Climate*, Vol. 20, No. 16, pp. 4065-4095.
- Um, M.J., Jeong, C.S., and Cho, W.C. (2009). Analysis of precipitation distribution in the region of Gangwon with spatial analysis (I): Classification of precipitation zones and analysis for seasonal and annual precipitation. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 9, No. 5, pp. 103-113.
- Yoon, D., Cha, D.H., Lee, G., Park, C., Lee, M.I., and Min, K.H. (2018). Impacts of synoptic and local factors on heat wave events over southeastern region of Korea in 2015. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 123, No. 21, pp. 12081-12096.

Received	December 26, 2019
Revised	January 8, 2020
Accepted	May 6, 2020