



이 학 석 사 학 위 논 문

누적 열 스트레스 지수를 이용한 한반도 폭염의 발생특성 분석



부경대학교대학원

환경대기과학과

강지 인

이 학 석 사 학 위 논 문

누적 열 스트레스 지수를 이용한 한반도 폭염의 발생특성 분석



부경대학교대학원

환경대기과학과

강지 인

강지인의 이학석사 학위논문을 인준함.

2014년 2월 21일



CONTENTS

Contentsi
List of Figures
List of Tablesv
Abstract
1. Introduction
2. Data and Method 4
2.1 Temperature and Dew point temperature
2.2 AH and AHI 5
3. Definition of Heat wave and its Spatio-temporal Characteristics7
3.1 Definition of Heat wave7
3.2 Spatial Distribution of Heat wave
3.3 Annual Variation of Heat wave
4. Synoptic Characteristics of Heat wave23
4.1 Case of 2010 Heat wave
4.2 Synoptic Characteristics of Heat wave25
5. Summary and Discussion 30
REFERENCES

List of Figures

Fig. 1. 69 stations used in this study. Shaded contours denote topography (m). 4

Fig. 2. The highest values of (a) AH and (b) maximum temperature in South Korea from 1999 to 2012.

Fig. 4. The spatial distribution of total summer AHIs per station during the 14 years (1999-2012) in South Korea. 12

 Fig. 5. The time series of total summer AHIs during the 14 years (1999-2012)

 in South Korea.

Fig. 7. Histogram on the annual frequency of heat wave calculated from the

date of 69 stations for 14 years (JJAS).17

Fig. 10. The time series of the annual maximum AHI (curve) from 1999 to 2012 in South Korea. The gray bars mean the annual maximum temperatures. 18

Fig. 13. The number of station in accordance with the range of the longest duration. Longest duration mean the duration that have AHI above 0.85 continuously.
Fig. 14. The variation of the station numbers with AHI above 1.94 in 2010 at

Fig. 15. Geopotential height contours of 5820 and 5880 gpm at 500hPa for summer (JJAS) in 2010 (solid line) and in mean of 1981-2010 (dotted line). 27

Fig. 17. Temperature deviation (contour, unit: °C) of 2010 from normal year at (a) 1000hPa and (b) 500hPa in summer (JJAS).



List of Tables

Table 1. The extreme values of the parameters related to heat wave.
 14

Table 2. The rank of the annual maximum AHI and the annual maximumtemperature from 1999 to 2012.22



The occurrence characteristics of Heat wave in Korea based on Accumulated Heat stress Index

Ji-In Kang

Department of Environmental Atmospheric Sciences, Graduate School,

Pukyong National University

Abstract

This study examined occurrence characteristics and variation of heat waves in South Korea and analyzed synoptic characteristics of the heat wave that occurred for 14 years (1999-2012) using AH(Accumulated Heat stress Index) and AHI(Accumulated Heat stress Index). AH is an index digitized using the heat stresses accumulated for 72 hours with the time-weighted function, and AHI is the standardized value of AH using the standard deviation of normal values.

Through the period, Miryang has shown the largest AHI and Jinju has the smallest one. It means that these are the places where accumulation of heat stress is the strongest (weakest). Heat wave was defined from standard of danger for AHI (0.85). The heat wave in South Korea as a whole begins on the 12th July, ends on the 31st August. The frequency of heat wave was the biggest in Miryang (36.4 days), but the duration of heat wave was the longest in Goheung (24.5 days). The frequency and longest duration show similar spatial distribution, it means that the heat wave is continuously longer in the place where heat wave occurs frequently. The longest duration of heat wave has the value of 5~25 days averagely, but in 2010, the heat wave occurred which has the duration of 50~60days. The onset date of heat wave of whole South Korea is getting earlier with the trend of -7.3 days/decade, the end date is becoming later with the trend 4.3 days/decade and the frequency is increasing with the trend of 15.8 /decade. The annual maximum AHI is also increasing with the trend 0.28 /decade. So, the heat wave duration is predicted to be longer, and the intensity and frequency also will be stronger than now. From the annual maximum value of AHI and maximum temperature, it was confirmed that the severe heat wave year was 2010 and weak year was 2003.

The synoptic characteristics of 2010, the selected heat wave year, show the powerful expansion of North Pacific High compare with normal year (1981-2010). As a result, the high temperature and humid air which follow at the edge of anticyclone in the months of July and August made the heat wave severe and longer.

Key words: Heat wave, Accumulated Heat stress Index, Maximum temperature, Hot day

1. Introduction

2003년에 발생한 유럽 폭염, 2010년의 러시아 폭염 등 전 세계를 비롯하여 최근 한반도에서도 폭염과 열대야 등 극한 고온 현상이 빈번하게 발생하고 있다. 2013년 8월 9일 강릉에서는 아침 최저기온이 31℃로 사상 처음 초열대야 현상이 나타났다. 초열대야는 야간 최저기온이 30℃를 넘어서는 현상을 칭하는 신용어로서, 한반도에서는 처음 나타난 사례이다. 이는 곧 한반도의 날씨가 점차 뜨거워지며, 기후 또한 변화하고 있다는 것을 의미하는 사례이기도 하다.

국한 고온현상이 수 일 이상 지속되는 현상을 뜻하는 폭염은 홍수, 뇌우, 토네이도, 허리케인과 같은 극한 기상현상들 중 가장 많은 사망자수를 발생시킨 재해이다 (Thornburgh, 2001). 폭염은 장시간 노출되면 열 스트레스가 인체에 누적되어 인명피해 (열사병, 고온질환 등)를 유발함으로써, 인간의 유병률 및 사망률 증가와 직접적인 관련성을 가진다. 또한, 동·석물 등 생태계에도 열 스트레스를 가중시켜 작물들의 재배피해와 가축들의 성장장애를 야기한다 (Kim et al., 2007). 실제로 1994년 여름의 경우, 유례없는 이상 고온현상이 길게 지속되면서 3,384명의 사망자가 발생해 기상재해로 인한 인명피해 중 역대 최다 사망자수를 기록한 바 있었고 (ME, 2003), 2006년에는 전국적으로 33℃가 과일 및 채소가격의 폭등 등의 피해가 나타났다. 또한, 2013년에는 사망자 14명, 고온 질환자 1190명이 발생하면서 폭염의 피해가 최근까지도 계속 증가하였으며, 이에 대한 경각심도 증가하고 있는 추세이다.

이처럼 폭염 피해의 심각성이 제기되면서 최근 자연재해로 분류되어 연구 및 예보를 서두르는 나라가 많아지고 있다. 그러나 현재 한반도에는 이러한 고온현상에 대한 정확한 용어의 정의가 없을 뿐 아니라, 그 기준 값 또한 뚜렷하지 않은 상태이다 (Park et al., 2008). 이에 대한 외국의 정의를 살펴보면, 절대적인 것과 상대적인 것으로 나눠진다. 먼저, 폭염을 온도 또는 열적 스트레스 지수가 기준치를 초과하는 경우나 초과하는 날의 수로 정의한 절대적 정의가 있다. 이를 적용한 사례로 미국 기상청에서는 3일 연속으로 기온이 32.2℃를 초과하는 날을 폭염일로 지정하였다. 반면, 상대적 정의의 폭염은 지역별 기후상태에 따라 다르게 나타나는 열적 스트레스를 반영하여 결정된다. 예를 들어, 캐나다 기상청에서는 지속되는 더운 날씨로 사망률이 높아질 확률이 90%에 이르는 경우를 폭염으로 보았다 (Karen et al., 2003). 이처럼 한반도에서도 폭염과 관련된 연구를 진행하기에 앞서, 무엇보다 폭염에 대한 정확한 정의와 기준 마련이 이루어져야 한다.

폭염에 대한 선행연구로는 다음과 같이 네 가지로 분류된다. 첫째, 폭염과 사망자수의 연관성에 대한 연구로써, 폭염의 열 스트레스와 일 사망률과의 연관성 연구 (Kim et al., 2006; Lee et al., 2010)와 기온과 사망자수와의 관계를 분석한 연구 (Kim et al., 2004; ME, 2005)가 있다. 둘째, 폭염을 발생시키는 원인에 대해 대기순환적으로 분석한 것으로, 북태평양 고기압의 이상적인 북상으로 인한 고온현상 (Kim et al., 1998)과 2004년 밀양 이상더위의 원인에 대해 밝혀낸 연구 (Byun et al., 2006)가 있다. 셋째, 푄 현상으로 인한 태백산맥 서쪽지방의 고온현상과 같은 국지적인 고온 현상에 관한 연구 (Lee et al., 1994)도 존재한다. 넷째, 열지수 및 HWDI (Heat Wave Duration Index)를 도입하여 한반도에 적용한 연구 (Choi et al., 2002; Choi et al., 2004)와 같이 지수 (Index)를 이용하여 폭염을 조사한 연구가 진행된 바 있다. 위와 같은 연구에서는 폭염을 분석하는데 있어, 대부분 기존의 폭염 지수나 기온 자료를 이용하였다. 하지만 폭염으로 인한 인명피해는 당시의 열보다 이것이 누적되었을 때 발생할 가능성이 높은데 선행연구에서는 이 점을 고려하지 못하였다. 그래서 단순히 순간적으로 발생하는 최고 기온의 변화에만 관심을 둘 것이 아니라 체내에 축적되는 열로 인해 발생하는 인명피해까지 고려한다면, 열의 누적효과에 초점을 둔 폭염 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 열의 누적효과를 고려한 누적 열 스트레스 지수 (Accumulated Heat stress Index, AHI)를 이용하여 한반도 폭염의 발생 특성을 조사하고 이들의 변화 경향을 살펴본 뒤, 그 변화의 원인을 대기순환적으로 분석하고자 한다.

2. Data and Method

2.1 Temperature and Dew point temperature

1999~2012년 (14년) 여름기간 동안 한국 기상청에서 제공하는 69개 지점의 시간별 기온과 이슬점 자료를 이용하였다 (Fig. 1). 이로부터 Humidex와 AH를 계산하고, 이를 표준화한 누적 열 스트레스 지수 (Accumulated Heat stress Index, AHI)를 산출하였다.



Fig. 1. 69 stations used in this study. Shaded contours denote topography (m).

2.2 AH and AHI

AH (Accumulated Heat Stress)는 기온과 습도의 함수인 Humidex (J. M. Masterton and F. A. Richardson, 1979) 에 시간경과에 따른 가중치를 적용하여 72시간 동안 누적한 값이다. 이는 지난 72시간 동안 누적된 열 스트레스의 양을 의미하며, 계산하는 과정은 아래와 같다.

Humidex = $T + 0.5555 \times (e - 10)$ (1)

$$e = 6.11 \times \exp\left[5417.7530 \times \left(\frac{1}{273.16} - \frac{1}{T_d}\right)\right]$$

Eq. (1) 은 Humidex의 계산식으로 T는 기온, T_d는 이슬점 온도를 나타낸다.

$$AH = \sum_{i=1}^{72} \left[\left(\sum_{m=1}^{i} Humidex_m \right) / i \right]$$

Eq. (2) 는 과거 72시간 동안의 Humidex를 누적하여 산출된 AH를 나타낸다.

(2)

Fig. 2는 AH와 최고기온의 공간 분포를 나타낸 것이다. 이들은 서로 비슷하나 조금은 다른 분포를 보인다. 최고기온에 비해 AH가 한반도의 두 산맥 (태백산맥과 소백산맥)의 영향으로 인한 지역별 차이를 더 뚜렷하게 나타내는 특징을 보였다. 최고기온은 경남 및 전남 내륙지역에서 높은 데 비해, AH는 제주도와 남해 및 서해안 등 해안 지역을 중심으로 높게 나타났다. 이는 AH에 포함된 습도 변수의 영향으로, 습도가 높은 지역과 낮은 지역도 고려하여 지역별 누적된 열 스트레스의 양을 보여준다. 대관령은 AH와 최고기온 모두 낮은 지역으로 열의 누적이 상대적으로 적은 지역임을 알 수 있다.

AHI (Accumulated Heat stress Index)는 Lee et al. (2011)에서 개발된 시간경과에 지수로써 따른 열 스트레스의 변화와 누적영향을 시간가중함수로 합산한 AH를 각 지점별로 표준화한 것이다. 표준화 방법으로는 등가확률 변환 (Equiprobability transformation)을 사용하였다. AH는 누적된 열 스트레스의 양을 그대로 나타내며, 이를 지수화한 AHI는 표준화 과정을 거침으로써 누적된 열에 대한 기후학적 평균과의 차이를 보여준다. 열의 누적이 평균보다 높은 상태가 길게 지속되는 경우, 인체에 영향을 미쳐 사망자 및 고온 질환자 발생으로 이어질 가능성이 높아지기 때문에 AHI의 증가 또는 최대가 나타나는 것에 주목할 필요가 있다.



Fig. 2. The highest values of (a) AH and (b) maximum temperature in South Korea from 1999 to 2012.

3. Definition of Heat wave and its Spatio-temporal characteristics

3.1 Definition of Heat wave

폭염의 간접적 영향에 대한 AHI의 위험기준은 AHI가 증가함에 따라 초과 사망자수가 2명 이상인 날이 50th percentile에 달하는 시점인 0.83이다. 또한, 폭염의 직접적 영향에 대한 위험기준은 0.86이다 (Lee et al., 2011). 본 연구에서는 이들을 종합하고 단순화하여 정의된 0.85를 AHI의 위험 기준 값으로 설정하여 분석하였다. 즉, AHI가 위험 기준 값 이상인 날을 폭염발생일로 정의하였다. Fig. 3은 폭염의 시작과 종료를 정의하는 과정을 나타낸 것이다. 연 중, 가장 처음으로 0.85 이상의 AHI가 나타나는 날을 폭염의 시작날짜로, 가장 마지막으로 0.85 이하로 떨어지는 날을 종료날짜로 지정하였다. AHI가 위험 기준 값 이상을 보이는 모든 날의 수를 발생일수로 정의하였다. 또한, 높은 AHI가 지속되면서 발생하는 위험도를 살펴보기 위해, 기준 값 이상의 AHI가 연속되는 기간을 연속기간이라 두고 그 중 가장 길게 지속되는 기간을 최장 연속기간으로 정의하였다.



Fig. 3. The daily AHI at 2012 summer in Seoul. The dashed line and arrows denote the standard of heat wave (0.85), the onset and the end date of heat wave, respectively.



3.2 Spatial Distribution of Heat wave

AHI는 기후학적 평균을 기준으로 하여 열 누적의 높낮이를 보여주므로, 적산된 AHI는 지역별로 열의 누적 강도를 뚜렷하게 보여줄 수 있다. Fig. 4는 양의 AHI값만을 누적시킨 적산 AHI의 공간 분포를 나타낸다. 적산 AHI가 가장 높은 지역으로써, 열의 누적이 강하게 발생하는 곳은 밀양이고, 장흥, 천안, 영덕, 수원 등이 높게 나타났다. 밀양은 2012년 폭염 지속일수 전국 2위를 기록한 사례뿐만 아니라, 밀양의 고온 현상에 관한 사례연구 (Byun et al., 2006)도 진행된 바 있어 한반도 내에서 열이 많은 지역으로 이미 알려져 있다. 적산 AHI가 가장 낮은 지역은 진주를 포함해 문경, 부여, 인제, 서울로 나타났다. 분석기간 동안 평균 적산 AHI는 약 56.0이며, 점차 증가하는 추세 (2.47 /year) 를 보였다. 전 지점 평균하여 적산 AHI가 가장 높은 해는 2010년 (약 95.7)으로 평균보다 약 2배 정도 높았으며, 가장 낮은 해는 2003년 (약 26.0)으로 평균의 절반으로 나타났다 (Fig. 5).

정의에 따른 폭염의 평균 시작일과 종료일은 각각 7월 12일, 8월 13일로 약 50일 정도 차이를 가진다. 이를 각 지점별로 나누어 살펴보면, 폭염의 시작일 (Fig. 6a)은 경북 내륙 지역 (영덕, 포항)에서 빨리 더위가 시작되고 가장 이른 지역은 영덕으로 평균 7월 5일로 나타났다. 주로 해안 지역 (부산, 인천, 서귀포)에서 늦게 시작되며 가장 늦은 지역은 통영 (평균 7월 19일)이다. 지점별 폭염 종료일 (Fig. 6b)이 가장 빠른 지역은 홍천으로 평균 8월 24일이고, 속초, 철원 순으로 강원 및 중부지역에서부터 먼저 종료되는 특징을 보였다. 이후 남부지역으로 이어지면서 여수에서 평균 9월 6일로 가장 늦은 종료일이 나타났고. 부산, 완도 등 남해안 지역에서는 9월 초순까지 더위가 이어지는 특징도 보였다. 폭염의 평균 발생일수 (Fig. 6c)는 32.1일이며 밀양에서 평균 36.4일로 가장 많이 발생했고, 속초 (평균 27.2일)에서 가장 적었다. 최장 연속기간은 발생일이 연속되는 기간으로 길어질수록 열이 누적되는 일수 또한 길어짐을 의미한다. 따라서 빈도를 나타내는 발생일수와 달리 강도를 나타내는 척도가 될 수 있어, 따로 살펴볼 필요가 있다. 평균 최장 연속기간을 20일로 가장 길게 나타난 지역은 고흥 (평균 24. 5일)이고, 문경 (평균 15.1일)에서 가장 짧았다 (Fig. 6d). 분포를 살펴보면, 발생일수와 최장 연속기간의 높고 낮은 분포가 비슷하게 나타나는데, 공통적으로 전남 남서해안과 경상도 및 경기 수도권 지역에서 높다. 이는 북태평양 고기압의 남서기류가 유입되는 길목에 위치한 지리적 특성 (전남 남서해안)과 태백산맥과 소백산맥에 의해 여름철이면 자주 발생하는 푄 현상 (경상도와 경기 수도권 지역)으로 인한 것으로 판단된다. 강원 및 영동 지역에서는 상대적으로 낮은 값을 보였다. 이로부터, 발생빈도가 높은 지역에서 폭염이 발생하면 그 지속기간 또한 길게 나타나는 특징을 확인할 수 있다.

Table 1은 폭염의 시·종일, 발생일수와 최장 연속기간이 극치를

가지는 지점을 요약하였다. 발생일수와 최장 연속기간이 1일로 최소치가 나타난 지점은 서귀포, 순천, 고흥, 남해 (1999년)와 안동 (2003년)이다. 이는 연 중 AHI가 크게 높지 않았던 해를 의미하며, 4개의 지점이 모두 남해안 지역에 위치한 것을 보아, 1999년은 해안 지역을 중심으로 폭염의 영향이 크지 않았던 해로 추측할 수 있다. 이와 반대로, 전북 정읍에서는 2010년에 발생일수가 66일 최대치를 보였고, 같은 해 수원에서 최장 연속기간이 56일까지 이어지는 장기 폭염이 나타났다. 따라서, 2010년은 폭염의 영향이 강하고 길게 지속되었던 해로 판단된다.





Fig. 4. The spatial distribution of total summer AHIs per station during the 14 years



Fig. 5. The time series of total summer AHIs during the 14 years (1999-2012) in South Korea.



Fig. 6. The spatial distribution of (a) the onset date, (b) the end date, (c) the frequency and (d) the longest duration of heat wave averaged during 14 years (1999-2012) in South Korea.

	Onset date		End date		Frequency		Longest duration	
	The earliest	The latest	The earliest	The latest	The smallest	The biggest	The shortest	The longest
Station	Gosan	Goheung	Hongcheon	Deahwallyeong	Goheung, Namhae	Jeongeup	Seogwipo etc.	Suwon
Year	2004	1999	2002	2007	1999	2010	1999,2003	2010
Value	Jun 20 th	August 19 th	August 3 rd	September 22 nd	1 day	66 days	1 day	56 days
			11 2	यम	ot il	5		

 Table 1. The extreme values of the parameters related to heat wave.

3.3 Annual Variation of Heat wave

여름기간 (6~9월, 122일) 동안, 69개 지점에서 발생한 폭염의 발생일수와 최장 연속기간별 빈도를 살펴보았다. 발생일수는 평균적으로 25~40일 (전체의 58.2%)이 우세하게 나타난다 (Fig. 7). 50일 이상의 발생일수는 나타나는 비율이 작으며 (8.0%), 70일 이상의 발생일수는 거의 보이지 않는다. 최장 연속기간은 5~25일이 전체의 66.4%로 가장 뚜렷하게 보였고, 작은 비율 (3.5%)로 50~60일까지 길게 이어지는 장기폭염도 존재했음을 확인했다 (Fig. 8). 이를 더 자세히 살펴본 결과, 최장 연속기간이 50~60일로 나타난 총 34개의 사례 중 32개가 모두 2010년에 발생했고, 나머지 2개의 사례는 2012년이다. 이는 즉 2010년에 한반도 대부분의 지역에서 강한 폭염으로 인해 높은 AHI가 나타났음을 의미하며, 길게 지속되었던 것으로 추측된다.

폭염의 시·종일과 발생일수의 연 변화 (Fig. 9)를 보면, 시작일은 -7.3 days/decade의 추세로 점차 빨라지고, 종료일은 늦어지고 있다 (4.3 days/decade). 또한, 발생일수는 15.8 /decade로 증가하는 추세를 보였다. AHI의 최대가 나타나는 것은 곧 열의 누적량이 많음을 의미하기 때문에, 폭염의 강도를 추측할 수 있고 최대값의 변동으로부터 폭염의 강도 변화도 파악이 가능하다 (Fig. 10). 분석기간 동안 AHI 연 최대값은 0.28 /decade의 추세로 상승하고 있으며, 함께 살펴본 최고 기온 역시 0.62 ℃/decade로 상승하는 추세를 보였다. AHI는 과거 시간으로부터의 열이 누적이 되어 나타나는 값이기 때문에, 폭염이 발생했을 때는 많이 누적되어 크게 증가하므로 변동폭이 최고 기온의 변동폭에 비해 크다. 즉, 그 해에 축적된 열의 양이 얼마나 많고 적었는지를 뚜렷하게 보여주는 장점을 가진다. 이러한 변동성으로부터 앞으로의 폭염 기간은 점차 길어질 것이며 강도와 빈도 또한 증가할 것으로 추측할 수 있다.

Fig. 11은 AHI 연 최대값의 변화를 지점별로 나타낸 것이다. Fig. 10에서 전체적으로는 AHI의 최대값이 증가하는 추세를 보였지만, 이를 지점별로 살펴보면 감소하는 지역이 존재함을 알 수 있다. 12개의 지점 (문경, 춘천, 추풍령, 인제, 강릉 대관령, 서울, 동두천, 전주, 부여, 부산, 진주)에서 음의 변동성이 보였으며, 이는 예외적으로 열의 누적 강도가 점차 약해지는 곳임을 의미한다. 이와 반대로, 고흥, 순천, 장흥 등 전남 해안지역에서는 강한 양의 변동성이 나타났다. AHI 최대값의 가장 큰 증가 경향을 보인 곳은 고흥 (0.77 /year)이고, 가장 큰 감소 경향을 보인 곳은 문경 (-0.47 /year)이다. 문경은 앞선 분석 (Fig. 5,6) 에서 적산 AHI와 평균 최장 연속일수가 낮은 지역으로 나타난 것으로 보아, 한반도에서 열 스트레스의 누적이 가장 작은 지역이며 또한 더위가 잘 나타나지 않는 곳으로 판단된다.



Fig. 7. Histogram on the frequency of heat wave calculated from the date of 69 stations



Fig. 8. Same as fig.7, but for the longest duration of heat wave. Longest duration mean the duration that have AHI above 0.85 continuously.



Fig. 9. The annual trend of heat wave event from 1999 to 2012 in South Korea. The dashed, dash-dot-dotted and solid lines denote onset date, end date and frequency of heat wave, respectively.



Fig. 10. The time series of the annual maximum AHI (curve) from 1999 to 2012 in South Korea. The gray bars mean the annual maximum temperatures.



Fig. 11. The spatial distribution of the annual maximum AHI values averaged from 1999 to 2012 in South Korea.

Ot N

한반도에서 발생한 폭염의 공통적인 변화 특징을 살펴보기 위해 주요 도시지역의 연별 총 폭염 발생일수의 시계열을 나타내었다 (Fig. 12). 주요 도시는 서울, 대전, 광주, 제주, 강릉, 대구, 부산으로 총 7개의 지점으로 지정하였다. 2003년과 2009년은 공통적으로 제주를 제외한 대부분의 지역에서 폭염 발생일수가 가장 작은 해이다. 특히, 2009년의 대전에서는 총 4회로 최소 발생일수가 나타났다. 반면, 2010년에는 7개 도시 모두의 발생일수가 급격히 증가하였으며, 광주는 총 62회로 최다 발생일수를 보였다. 2011년에는 일시적으로 감소했다가 2012년에 다시 증가하는 추세가 보였으나, 대부분 2010년에 미치지는 못하였다. 제주 지역은 다른 지역에 비해 변동폭이 작게 나타나는 특징을 보였는데, 이는 제주 지역의 독특한 지리적 특성에 의해 조금 다른 기후를 보이는 것으로 사료된다.

AHI 연 최대값은 그 해에 누적된 열의 크기를 평균과 비교하여 나타낼 수 있기 때문에, 이를 이용하여 14년 동안 폭염 발생해의 순위를 살펴보고, 최고기온과의 차이를 비교하였다 (Table 2). AHI의 연 최대값이 가장 큰 해는 2010년 (2.26)이고 2012년 (2.19), 2001년 (2.02) 순으로 나타났으며, 가장 작은 해는 2003년 (1.52)이다. 그러나 최고기온의 연 최대값 순위는 이와 조금 다르다. AHI 최대값이 가장 컸던 2010년이 최고기온 순위에서는 7위로 나타났고, 2012년이 가장 높았으며 2004년, 2005년이 뒤를 이었다. 2003년에는 최고기온과 AHI 모두 가장 낮게 나타났다. 이와 같이 AHI와 최고기온이 서로 다른 순위를 나타내는 것은 AHI가 습도까지 포함된 누적지수이기 때문이다. 즉, 순간적으로 발생한 고온현상으로 인해 나타난 최고기온 1순위와 다르게, AHI의 1순위는 열 스트레스 누적으로 인한 피해를 야기시키는 잠재적 영향을 판단할 수 있다는 것으로부터 의미가 있다.



Fig. 12. The time series of heat wave frequencies (the days with AHI above 0.85) of the main cities in Korea from 1999 to 2012.

Rank	Year	Maximum AHI	Maximum Temperature (Rank)
1	2010	2.26	34.13 (7)
2	2012	2.19	35.51 (1)
3	2001	2.02	34.37 (5)
4	2005	IONA/	34.7 (3)
5	2006	1.98	34.55 (4)
6	2004	1.95	35.13 (2)
10	2008	1.9	34.32 (6)
8	2007	1.82	33.85 (9)
9	2011	1.77	33.84 (10)
10	2002	1.64	34.02 (8)
11	2000	1.61	33.77 (11)
12	1999	1.58	33.24 (12)
13	2009	1.58	33.2 (13)
14	2003	1.52	32.33 (14)

Table 2. The rank of the annual maximum AHI and the annual maximumtemperature from 1999 to 2012.

4. Synoptic Characteristics of Heat wave

4.1 Case of 2010 Heat wave

Fig. 13은 최장 연속기간별로 해당되는 지점 수를 나타낸 그림이다. 2010년에는 30일 이상의 최장 연속기간이 나타난 지점이 59개 (총 69개)로 최다지점을 기록해 한반도 대부분 지역에서 더위가 발생한 해로 추측할 수 있으며, 이로부터 2010년을 분석해로 선정하였다. 실제로 이 해에는 사망자 8명, 고온 질환자 455명 등의 인명피해가 발생했으며, 여름 평균기온이 1994년 폭염 이후 2위를 기록할 만큼 무더웠던 해이다 (KMA, 2010). 분석일을 결정하기 위해 선정된 분석해 (2010년) 중 1.94 이상의 AHI를 보이는 지점 수의 변화를 살펴보았다 (Fig. 14). 그 결과, 8월 2~6일 (Julian day: 214~218)을 중심으로 지점수가 급증한 것을 알 수 있다(23~54개 지점). 따라서 2010년 8월 2~6일을 폭염 사례로 선정하여 대기순환 특징 분석을 살펴보았다.



Fig. 13. The number of station in accordance with the range of the longest duration.



Fig. 14. The variation of the station numbers with AHI above 1.94 in 2010 at South Korea.

4.2 Synoptic Characteristics of Heat wave

한반도의 여름철 날씨에 지배적인 영향을 미치는 북태평양 고기압의 영향을 보기 위해, 500hPa의 지위고도를 이용하여 월별로 상층 공기흐름을 평년 (1981~2010년)과 비교하였다. 6,7월에는 북태평양 고기압의 위치가 태평양 부근이었던 평년에 비해 서쪽으로 넓게 뻗어 중국 남부지방까지 확장하면서 한반도에 점차 가까워지는 분포를 보였다 (Fig. 15a,b). 평년의 북태평양 고기압은 8월에 비교적 수축했던 것에 비해, 2010년에는 한반도의 대부분 영역을 덮었고, 중국 중부지역과 일본까지 눈에 띄게 확장하였다 (Fig. 15c). 이는 9월까지 계속해서 평년보다 더 넓은 분포를 유지했다.

850hPa 수분속과 200hPa 제트류를 통해 유입되는 수분을 살펴보았다 (Fig. 16). 6월에 한반도 상층에는 제트류가 걸쳐있지만, 많은 양의 수분은 동반하지 못한 채 일본을 거쳐 한반도로 약하게 유입되었다. 7월부터 점차 한반도에 남서류의 유입이 뚜렷해지면서 6월에 비해 많은 양의 수분이 태평양으로부터 직접적으로 유입되었다. 일본 부근에 위치한 강해진 고기압의 흐름에 따라 8월에는 남해 부근으로부터 다량의 수분이 유입되었고, 한반도를 관통하여 지나감을 확인할 수 있다. 이후 상층의 제트류를 통해 일본의 북부 지역으로 빠져나갔다. 결국 7,8월에 남서류를 따라 다량의 수분이 한반도로 직접 유입이 되었고, 이로 인해 고습의 환경이 조성되었음을 알 수 있다.

Fig. 17은 상·하층 (500, 1000hPa) 에서 폭염 당시 평년과의 기온 편차를 나타낸 것이다. AHI는 72시간 (3일) 누적이 적용된 지수이기 때문에, 지점 수 최대값 또한 고온현상 발생의 3일 전후로 나타난다 (Fig. 14). 가장 많은 지점 수 (54개) 를 보인 8월 6일로부터 3일 전인 8월 3일의 기온 편차를 보면, 중국 북부지역에 큰 양의 편차가 위치하고 있다 (Fig. 17a). 이는 하층뿐만 아니라 상층에서도 8월 3일을 전후로 하여 평년보다 높은 온도의 공기가 한반도를 지나가는 것을 확인할 수 있다 (Fig. 17b). 결과적으로 2010년에 발생한 폭염의 일차적 원인은 평년에 비해 매우 크게 확장한 북태평양 고기압의 영향에 있으며, 이 확장한 고기압의 가장자리를 따라 중국 남부로부터 고온다습한 남서기류가 한반도로 유입되면서 발달하여 지속된 것으로 사료된다.

श्रेत्र सथ म



Fig. 15. Geopotential height contours of 5820 and 5880 gpm at 500hPa for summer (JJAS) in 2010 (solid line) and in mean of 1981-2010 (dotted line).

101



Fig. 16. Moisture flux at 850hPa (vector, unit: m s⁻¹) and jet stream at 200hPa (contour,

CH OL II

unit: m s⁻¹) for summer (JJAS).



Fig. 17. Temperature deviation (contour, unit: °C) of 2010 from normal year at (a) 1000hPa and (b) 500hPa in summer (JJAS).

5. Summary and Discussion

본 연구에서는 열 스트레스의 누적영향에 초점을 두어, AHI가 0.85 이상일 때를 폭염 발생일로 지정하였고, 이를 기준으로 시·종일과 발생일수, 최장 연속기간을 각각 정의하였다. 양의 AHI값만을 누적시킨 적산 AHI의 공간분포를 살펴봄으로써, 한반도에서 밀양이 가장 높은 열 누적 강도를 보였고, 진주가 가장 낮은 지역임을 확인했다. 또한 적산 AHI는 2010년에 가장 높았고, 2003년에 가장 낮았으며 그 추세는 약 2.47 /year로 점차 증가하는 추세를 보였다. 폭염은 경북 내륙지역에서 빨리 시작되고 남해안 지역에서 가장 늦게 종료되었으며, 지점에 따라 9월 초까지도 더위가 이어지는 경우도 발견되었다. 폭염의 발생일수가 가장 많은 지역은 밀양이지만, 이것이 가장 길게 지속되는 지역은 고흥으로 나타났다. 그리고 발생일수와 최장 연속기간의 공간 분포가 비슷하게 나타난 것으로 보아, 폭염의 발생빈도가 높은 지역에서는 한번 발생했을 때의 그 지속기간 또한 길게 나타나는 특징이 있음을 확인했다. 여름기간 동안 나타나는 폭염의 발생일수는 25~40일, 최장 연속기간은 5~25일의 기간이 뚜렷하게 보였다. 작은 비율이지만 50~60일의 최장 연속기간이 나타난 사례도 있었는데, 이 중 약 94%가 2010년에 발생한 사례이다. 연별 변동성을 살펴본 결과, 폭염의 시작일은 빨라지고, 종료일은 늦어지며, 발생일수는 증가는 추세를 보였다. 그리고 열 누적

강도를 의미하는 AHI 연 최대값도 상승하는 추세를 가져, 앞으로의 폭염 기간은 점차 길어질 것이며 그 강도와 빈도도 증가할 것임을 예측할 수 있다. AHI 연 최대값의 순위를 통해 2010년이 가장 폭염의 강도가 강했고, 2003년이 약했음을 확인했다. 이를 비롯하여 30일 이상의 연속기간이 다수의 지점에서 발생한 2010년을 폭염해로 선정하여 대기순환 특징을 분석한 결과, 이 해에는 북태평양 고기압의 위치가 한반도와 중국, 일본을 덮으며 평년에 비해 매우 강하게 확장한 것을 확인하였다. 뿐만 아니라, 7,8월에 태평양으로부터 직접적으로 유입된 수분과 한반도 상공에 나타난 강한 양의 기온 편차로부터, 고온다습한 공기가 납서기류를 통해 한반도에 강하게 유입되면서 폭염 발생의 조건을 형성한 것으로 분석된다.

폭염에 의한 인명피해는 단순히 순간적으로 발생한 고온으로 인한 것보다, 이 고온현상으로 인한 열이 장시간 지속되었을 경우 발생할 확률이 높다. 이러한 점에 있어서 인명피해에 초점을 맞춘 폭염지수로써 AHI가 유용할 것이라 판단된다. 추후에는 AHI를 이용하여 한반도에서 비슷한 특성을 보이는 군집들로 나누어 살펴볼 필요가 있으며, 또한 AHI를 이용한 예·경보 시스템을 구축한다면 폭염으로 인해 발생하는 인명 및 재산피해를 경감시킬 수 있을 것이라 사료된다.

REFERENCES

Byun, H.R., H.S. Hwang, and H.Y. Go, 2006: Characteristics and Synoptic Causes on

the Abnormal Heat Occurred at Miryang in 2004. Atmosphere, 16, 187-201.

Choi, G.Y., 2002: The Geography of bioclimatic heat stress in South Korea: 1973-1998.

Graduate school of Seoul National University, Seoul.

Choi, Y.E., 2004: Trends on Temperature and Precipitation Extreme Events in Korea.

J. Korean Geographical Soc., 39, 5, 711-721.

Kim, J.Y., D.G. Lee, I.S. Park, B.C. Choi, and J.S. Kim, 2006: Influences of Heat

Waves on Daily Mortality in South Korea. Atmosphere, 16, 269-278.

Kim, J.Y., D.G. Lee, and J. Kysely, 2009: Characteristics of Heat Acclimatization for

Major Korean Cities. Atmosphere, 19, 309-318.

Kim, S.Y., 2004: The Impact of Summer Heat wave on Mortality. Unpublished Ph. D.

Dissertation, Ajou University, Suwon.

Kim, J.Y. and S.H. Lee, 2007: The Distribution of Heat Waves and Its Cause in South

Korea. J. Korean Geographical Soc., 42, 3, 332-343.

Kim, Y.S., and S.G. Hong, 1996: A Study of quasi-Foehn in the Youngdong-district in

Late Spring or Early Summer. J. of Korean Met. Society, 32, 4.

Lee, H.Y., 1994: The Nopsae, a Foehn Type Wind over the Young Suh Region of

Central Korea. J. Korean Geographical Soc., 29, 3, 266-280.

Lee, J.S., 2011: The development of Accumulated Heat stress Index based on time-

weighted function. Unpublished Master Dissertation, Pukyong National

University, Busan.

Lee, S.H., 2003: Difference of Air Temperature between the West and East Coast

Regions of Korea. J. of Korean Met. Society, 39, 1, 43-57.

Park, J.K., W.S. Jung, and E.B. Kim, 2008: A study on development of the extreme

heat standard in Korea. Journal of the Environmental Sciences, 17, 657-669.

Smoyer-Tomic, K. E., R. Kuhn, and A. Hudson, 2003: Heat wave hazards: an overview

of heat wave impacts in Canada. Natural hazards, 28, 465-486.

Thornburgh, C., 2001: Are America's cities ready for the hot times ahead. SOARS

summer, 1-14.