

APEC기후센터

다중모델 앙상블 자료를 이용한 한반도 폭염 예측성 평가

이우섭 기후변화연구팀

APEC기후센터
연구보고서

다중모델 앙상블 자료를 이용한 한반도 폭염 예측성 평가

Assessing the Probability of Occurrence of Heat Waves
in Korea using a Multi-Model Ensemble

이우섭 기후변화연구팀

연구보고서 2015-10

발간사

최근 들어 기후변화의 영향으로 지구상의 여러 지역에서 극심한 기상현상에 따른 폭염, 가뭄과 홍수의 발생이 증가하고 있으며, 이에 따른 자연재해와 인명피해는 더욱 대형화되고 있는 추세입니다. 특히 폭염의 경우 최근 30년(1979~2010년) 평균 발생빈도수에 비해 2005년 이후 두 배 이상 증가하였습니다.

동아시아 폭염은 고기압의 영향을 포함한 몇몇 인자에 대한 연구는 있었지만, 한반도 폭염의 원인과 예측성에 대한 연구는 많이 부족한 실정입니다. 특히 기후변화, 해수면온도, 대규모 과정에 대한 이해는 매우 부족합니다.

본 연구에서는 한반도 폭염 발생과 연관된 원격상관 패턴과 물리적 과정을 규명하였고, 이를 기반으로 한반도 폭염의 계절 예측과 실시간 모니터링기술을 개발하고, 폭염관리체계 검토 및 개선방향을 제시하는 데 초점을 맞추고 있습니다.

본 연구의 결과가 우리나라 폭염의 예측성 향상과 더불어 우리나라 현실에 적합한 폭염특보제를 설계함에 있어 중요한 참고자료를 제공할 수 있을 것이라 판단됩니다.

끝으로 본 연구를 수행한 이우섭 박사, 이현주 연구원에게 감사를 표합니다. 또한 외부자문위원으로 참여해주신 부산대학교의 김창훈 교수께 깊은 감사를 드리고, 바쁘신 와중에도 자문과 조언을 주신 UNIST 이명인 교수, 공주대학교 김맹기 교수께 감사드립니다. 아울러 유진호 박사의 제안 및 자문에도 감사드립니다.

2015. 3월
APEC 기후센터 소장
정진승

ABSTRACT

Extreme weather events, such as heat waves are receiving more attention in the scientific community in recent years, due to their severe impacts on society and terrestrial ecosystems. The frequency of occurrence of temperature extremes has changed dramatically in the past few decades, for which we cannot exclude the global warming and associated large-scale pattern changes as one of the possible causes. Although the relationship between extreme temperature occurrence and large-scale atmospheric circulation patterns has been extensively studied in the global and regional scales, only a few studies have examined the interannual variability in extreme temperature events in East Asia. The large-scale atmospheric circulation patterns that drive heat waves Korean need to be analyzed in more detail using multi-year observations. As a result, we have made an effort to define new indices to assist in seasonal forecasting and real-time monitoring of the heat waves in Korean.

This report consists of four studies on the following topics: variability and mechanism of heat waves in Korea, its seasonal prediction, predictability of the 2013 heat wave, and domestic policies on health sector adaptation to heat waves.

Variability and mechanism of Korean heat wave

This study investigates the interannual variation of the heat wave frequency (HWF) in Korea during the past 40 years (1973-2012) and explores its connection with large-scale atmospheric circulation patterns. Heat waves in Korea tend to develop most frequently in late summer during July and August. The leading empirical orthogonal function (EOF) that accounts for 50% of the total HWF variance shows a mono-sign pattern over South Korea. This suggests that heat waves have mostly occurred in a national scale. It also exhibits a regional variation with more chance of heat waves in the southeastern inland area. The regression of the leading principal component (PC) time series of HWF with the atmospheric circulation pattern identifies a

north-south dipole mode between the South China Sea and East Asia. When this large-scale circulation mode facilitates deep convection in the South China Sea, it tends to weaken moisture transport from the South China Sea to East Asia. Enhanced deep convection in the South China Sea triggers a source of Rossby wave-train along southerly winds that generates positive geopotential height anomalies around Korea. The anomalous high pressure pattern is accompanied by large-scale subsidence in Korea, therefore providing a favorable condition for extreme hot and dry days in Korea.

The dipole pattern appearing in upper-level vorticity between the active (inactive) convection area over the East China Sea and the inactive (active) convection area over East Asia in the case of more (less) frequent heat waves in Korea is explored to find large-scale conditions favorable to heat wave occurrence. The vorticity difference index (or KHI) shows a significantly high correlation ($r=0.81$).

Seasonal prediction of Korean heat wave

The prediction of summer heat wave in Korea remains a significant scientific challenge. In this study we examine the predictability of summer (July-August) Korean heat wave using seasonal prediction models from APEC Climate Center (APCC). The model data used in this study consists of hindcast data for the 23-year period (1983-2005) from 10 operational forecast models.

For the boreal summer, the upper-level vorticity pattern identifies a north-south dipole mode between the South China Sea and East Asia. Observation and individual models represent the dipole mode as the first of EOF of 200hPa vorticity over East Asia.

The temporal correlation between observed heat wave frequency and the first principal component (PC1) at 200hPa vorticity is 0.87. Thus we selected the PC1 of EOF1 for 200hPa vorticity over East Asia as a predictor.

The observed 200hPa vorticity explains 20.2% of the total variance; however the models have much larger variances than the observations.

For the multi-model ensemble (MME) with 10 models, the forecast skill for HWF is 0.43 at one month lead time. However, only four models have significant temporal correlation coefficients (TCC) between the observed and simulated PC1 at 200hPa vorticity. The other models cannot predict the variability of HWI well. Thus, the 4 best models were selected based on the TCCs for heat wave frequency prediction. The TCC of HWF between those observed and simulated by best model MME reaches 0.51, which exceeds a 95% confidence level.

Predictability of the 2013 heat wave

We analyzed the atmospheric circulation features associated with the heat wave of the summer of 2013. We found that the strengthening of the Northwestern Pacific High resulting from anomalous convergence over South China contributed to the intensification of the heat wave in 2013. We have used the Korean heat wave Index (KHI) proposed by Lee and Lee (2014). The difference at 200hPa vorticity between the average over 25~30N, 110~130E and the average over 35~40N, 120~140E. KHIs greater than 0 indicate a probability of heat wave occurrence over Korea.

We also investigated the predictability of heat wave occurrence over Korea applying THORPEX Interactive Grand Global Ensemble (TIGGE) data for KHI associated with large scale circulation. The percent correct (PC), threat score (TS), and equitable threat score (ETS) were employed to evaluate the performance of the heat wave forecast. The verifications of PC and TS showed that the highest scores were clearly carried by the heat wave forecast using Heat Wave Index compared to other cases for day 5 through day 7 forecasts. Based on the TIGGE datasets, KHI showed higher predictability of the heat wave than those of Tmax and Bias corrected Tmax (BCT). The values of PC, TS, and ETS for the Korean Heat wave Index (KHI)

suggest that the indices could be used for the 7-day forecast. It is concluded that the proposed Heat Wave Index can be useful for forecasting that in turn can reduce the health impacts of heat waves through appropriate and timely actions.

Policy Recommendation

The purpose of this topic is to examine domestic policies on health sector in adaptation to climate change, in particular heat wave. It further aims to recommend future research directions for enhanced response to climate change in public health sector, by taking into account the general features of health adaptation policies.

In this regard, this study first evaluated the current adaptation policies in public health sector examining IPCC WG II AR5, the National Climate Change Adaptation Master Plan (2011-2015) and research papers from the academic community. Second, the early warning system, disaster management, public health, and health care systems were investigated in terms of capacity to adapt to heat wave. The barriers or constraints in establishing and implementing health adaptation policies are analyzed qualitatively, considering the general characteristics of adaptation in the health sector to heat wave.

This study provides four major recommendations: to enhance vulnerability assessment on health-related impacts of heat waves; to improve early warning system; to reinforce the disaster management system; and to strengthen local health institutions for improving public health and emergency management systems.

목차

다중모델 앙상블 자료를 이용한 한반도 폭염 예측성 평가

발간사	i
ABSTRACT	iii
1. 서론	1
2. 폭염의 정의 및 피해현황	4
2.1 폭염의 정의	4
2.2 폭염의 피해 사례	5
3. 한반도 폭염 빈도수의 경년변동성 및 이와 관련된 대기순환 패턴	8
3.1 자료 및 연구방법	9
3.2 한반도 폭염의 발생 특성	12
3.3 대규모 대기순환 패턴과의 연관성	18
3.4 요약 및 결론	24
4. 계절예측 정보를 이용한 한반도 폭염 예측성 평가	26
4.1 관측 자료 및 APCC MME 자료	27
4.2 한반도 폭염지수(KHI)의 예측성 평가	29
4.3 APCC MME에 적합한 폭염 지수 개발 및 평가	34
4.3.1 APCC MME의 예측 성능	34
4.3.2 폭염지수의 개발과 예측성 평가	41
4.4 요약	49

5. 한반도 폭염의 시종 예측성 연구: 2013년 사례	50
5.1 모형 자료 및 검증방법	51
5.1.1 TIGGE 모형 및 분석방법	52
5.1.2 검증 방법	54
5.2 2013년 여름 기상 특성	55
5.2.1 기온 및 강수 현황	55
5.3 2013년 폭염 예측	59
5.3.1 관측된 폭염과 대기순환 패턴	59
5.3.2 기관별 앙상블 평균 예측장 분포	62
5.3.3 2013년 폭염 예측성 평가	69
5.4 요약	73
6. 폭염관리체계 검토 및 개선 방향	75
6.1 한반도 폭염의 피해현황	76
6.1.1 폭염과 연관된 환자수	76
6.2 폭염관리체계에 대한 검토	79
6.2.1 자연재해대책법에서의 폭염	79
6.2.2 폭염특보제 및 폭염대응대책	80
6.2.3 폭염대응대책 현황과 문제점	83
6.2.4 공중보건위기 대응능력	87
6.3 폭염경보 및 대응체계 개선방향	89
6.3.1 취약성 평가 체계 구축	89
6.3.2 폭염특보의 개선	91
6.3.3 폭염 위기관리 매뉴얼 작성 및 재난 유형 명시	92
6.3.4 지역 건강정책기능 강화	94
REFERENCES	97

표목차

표 2-1	Absolute definition of heat wave	4
표 2-2	Definition of Korean Heat wave (기상청)	5
표 2-3	Mortality from heat waves	7
표 3-1	Mortality from Meteorological disasters (자료 : 기상청 보도자료 2012)	8
표 3-2	List in twenty major warm events occurred in Korea during 1973-2012.	12
표 3-3	Temporal correlation across the various heat wave indices defined over Korea. Each correlation coefficient was calculated based on yearly values for 40 years (1973-2012). * is denoted by 99% confidence level.	15
표 3-4	Correlation coefficients between the Korean HWF and the various monsoon indices defined by Wang and Fan (1999) , Zhang et al. (2003), and Wang et al. (2001), respectively. Also presented is the correlation coefficient between the HWI and the SST index averaged over the Niño 3.4 region (5°N~5°S, 120°~170°W).	21
표 4-1	Descriptions of the individual models in APCC.	28
표 4-2	Correlations between the time series (1983-2005) of the observations and individual model and MME hindcasts for each lead time. * is denoted by 95% confidence level.	34
표 4-3	Area averaged Anomaly Correlation Coefficient between the observed and predicted surface 2m temperature (T2m), Temperature at 850hPa(T850), sea level pressure (SLP), Geopotential Height at 500 hPa (Z500), and vorticity at 200hPa (Vort200) over East Asia and Korea from individual model and MME.	38
표 4-4	Correlation coefficients between PC time series and HWF	42
표 4-5	Correlation coefficient between the observation and MME for VORT200, Z500, SLP, PREC and T2m.	44

표 4-6 Temporal correlation between the principal component time series of the EOF for the MME VORT200, Z500, SLP, PREC and T2m.	47
표 5-1. Configurations of TIGGE models for ECMWF, UKMO, NCEP, KMA and CMC.	52
표 5-2 Relationship between counts of forecast/event pairs for the dichotomous categorical verification situation as displayed in a 2×2 contingency table.	54
표 5-3 Meteorological characteristics in 2013 summer.	56
표 5-4 8월 지점별 최고 기온 극값 경신 현황 (단위 : °C)	57
표 5-5 최근 10년간의 지역별 폭염(최고기온 33°C 이상) 일수	58
표 6-1 국가위기관리기본지침(대통령 훈령 제 29호) 및『풍수해 재난』 위기관리 표준매뉴얼	79
표 6-2 국가별 폭염경보 발령 기준 및 경고단계 비교	82
표 6-3 크로샷 활용 폭염 정보 전달체계도(부산발전연구원)	83
표 6-4 국가별 폭염대응정책 비교 (소방방재청, 2009)	84
표 6-5 기관별 폭염대응 주요역할 (소방방재청, 2014)	86
표 6-6 공중 보건 위기 대응을 위한 역량	89
표 6-7 KHI를 이용한 폭염특보발령 기준(예시)	91

그림목차

그림 1-1	Schematic diagram for research plan	3
그림 3-1	The KMA observational stations in Korea used for this study.	9
그림 3-2	Frequency of heat waves (bar graph) in South Korea from May to September for the past 40 years (1973-2012). The value is the sum of the cases when the daily maximum temperature exceeded 33°C heat wave days and the sum of stations which met the criterion among the 60 weather stations in South Korea. Also presented are the daily-mean precipitation (the green line with open circle) and 2-m air temperature (the blue line) averaged over the 40 years.	13
그림 3-3	Yearly variations of the heat wave frequency (HWF, top), duration (HWF, middle), and intensity (HWI, low). See the text for the definitions.	14
그림 3-4	(a) Spatial pattern of the first empirical orthogonal function (EOF1) of the heat wave frequency and (b) the associated principal component time series (PC1). (c) and (d) are the spatial pattern of the second mode (EOF2) and the associated time series (PC2), respectively. These two leading modes explain 50.8% and 9.0% of the total variance, respectively.	16
그림 3-5	Regression pattern of the sea surface temperature (SST) anomalies (unit: K) related to (a) EOF1 and (b) EOF2.	18
그림 3-6	Regression patterns between PC1 of the Korean HWF and (a) 500hPa geopotential height (hPa), (b) 2-meter surface temperature, (c) sea level pressure (hPa, contour), vertically integrated moisture flux (vector), and moisture convergence (shading), and (d) outgoing longwave radiation. The shaded regions represent the area of exceeding the 95% confidence level from the Student's t test. For the vertically-integrated moisture flux vector in (c), only those areas of exceeding the 95% confidence level are indicated.	22

그림 3-7	Correlation maps between the PC1 associated with HWF over Korea and a) high-level thickness(500-200hPa), b) low-level thickness(1000-500hPa).	22
그림 3-8	Correlation patterns between PC1 of the Korean HWF and (a) 150hPa vorticity and (b) meridional-vertical circulation (vector) and vertical velocity (ω , shading, positive values indicate upward motion) over 110 – 135°E. (c) The time series of the PC1 (red) from 1973 to 2012 and the vorticity difference at 150hPa between the area of 25 – 30°N and 110 – 130°E and the area of 35 – 45°N and 120 – 140°E (blue). Shading in (a) and (b) indicates the areas of exceeding the 95% confidence level.	23
그림 3-9	Anomaly patterns in July-August 1994 for (a) 500 hPa geopotential height, (b) 2 m air temperature, (c) sea level pressure (contoured), vertically integrated moisture flux (vector : $g\ kg\ ms^{-1}$), moisture convergence (shading), and(d) outgoing longwave radiation ($W\ m^{-2}$), and (e) sea surface temperature.	24
그림 4-1	Time series of the normalized HWF and KHI from 1983 to 2005.	29
그림 4-2	The spatial distribution of regressed JA 200hPa relative vorticity on the KHI for (a)-(j)individual model and (k) APCC MME hindcasts at 1-month lead (IC06) and l) observation.	31
그림 4-3	The spatial distribution of regressed JA 200hPa relative vorticity on the KHI for (a)-(j)individual model and (k) APCC MME hindcasts at 2-month lead (IC05) and l) observation.	32
그림 4-4	Time series of the normalized KHI from observation (black line), a)~j) individual models and k) APCC MME hindcast with May(1-month lead, blue line) and June(2-month lead, purple line) Initial Conditions.	33
그림 4-5	Anomaly correlation coefficients between the observed 2m surface temperature(T_{2m} , °C) and (a)-(j)individual model and (k) APCC MME hindcasts of JA T_{2m} at 1-month lead(IC06)	36

over the period 1983-2005(23years). The green line depicts the region of significant correlation (0.352) at the 90% confidence level from a two-tailed Student's t test.

- 그림 4-6** Anomaly correlation coefficients between the observed 2m surface temperature(T2m, °C) and (a)-(j)individual model and (k) APCC MME hindcasts of JA T2m at 2-month lead (IC05) over the period 1983-2005 (23 years). The green line depicts the region of significant correlation (0.352) at the 90% confidence level from a two-tailed Student's t test. **37**
- 그림 4-7** Area averaged Anomaly Correlation Coefficient between the observed and predicted surface 2m temperature (T2m) over East Asia(blue color) and Korea (red color) from individual model and MME. **38**
- 그림 4-8** Anomaly correlation coefficients between the observed and APCC MME hindcast JA (a) T2m, (b) prec, (c) T850, (d) SLP, (e) Z500, and (f) vort200 at 1-month lead time(IC06) over the 23 years period 1983-2005. The green line depicts the region of significant correlation (0.352) at the 90% confidence level from a two-tailed Student's t test. **39**
- 그림 4-9** Anomaly correlation coefficients between the observed and APCC MME hindcast JA (a) T2m, (b) prec, (c) T850, (d) SLP, (e) Z500, and (f) vort200 at 2-month lead time(IC05) over the 23 years period 1983-2005. The green line depicts the region of significant correlation (0.352) at the 90% confidence level from a two-tailed Student's t test. **40**
- 그림 4-10** Spatial pattern of the first empirical orthogonal function (EOF1) for observed a) VORT200, c)Z500, e) SLP, and g) PREC, l) T2m, respectively. The PC time series of b)VORT200, d)Z500, f) SLP, and h) PREC, j) T2m, respectively. The red line indicates observed HWF. **42**
- 그림 4-11** Spatial pattern of the empirical orthogonal function(EOF)for APCC MME a) VORT200, c)Z500, e) SLP, and g) PREC, l) T2m, respectively. The PC time series of b) VORT200, d) Z500, f) SLP, and h) PREC. j) T2m, respectively. **43**

그림 4-12	Scatter diagram between the spatial correlation skills and temporal correlation skills for VORT200 derived from the individual model(open mark) and MME(closed mark) predictions with IC5(black circle) and IC6(red square).	44
그림 4-13	Time series of the VORT200 PC1 from observation (black line), a)~j) individual models and k) APCC MME hindcast with May(1-month lead, blue line) and June(2-month lead, purple line) Initial Conditions. The number in the right corners indicate correlation skill for Lead1 (Lead2).	45
그림 4-14	Time series of the normalized HWF and PC1 from 1983 to 2005.	48
그림 5-1	The method to how climatology are estimated from TIGGE (출처: http://gpvjma.ccs.hpcc.jp/TIGGE/). Total numbers of samples(☆) for ECMWF : 31days × 3 years × 51members = 4743)	53
그림 5-2	Time series of daily maximum temperature(pink line, °C), KHI(orange color), and station number(bar, %) over Korea during 2013 heat wave	59
그림 5-3	Mean JA anomalies of 500hPa geopotential height (upper panel) and SST (lower panel) for 2013 relative to 1981-2010.	60
그림 5-4	Mean August anomalies of 500hPa geopotential height (upper panel) and SST (lower panel)for August 2013 relative to 1981-2010.	61
그림 5-5	Spatial distribution of maximum temperature from July 29 to August 22 2013 for (a) Observation, (b)NCEP, (c)CMC, (d) KMA, (e)UKMO and (f)ECMWF for forecast day 5.	64
그림 5-6	Difference between observation and (a) NCEP, (b) CMC, (c) KMA, (d) UKMO and (e) ECMWF for daily maximum temperature from July 29 to August 22 2014 for forecast day 5.	65

그림 5-7	Spatial distribution of vorticity at 200hPa from July 29 to August 22 2014 for (a) observation, (b) NCEP, (c) CMC, (d) KMA, (e) UKMO and (f) ECMWF for forecast day 5.	66
그림 5-8	(a) Pattern Correlation Coefficient and (b)Root Mean Square Error for maximum temperature for TIGGE models from NCEP, CMC, KMA, UKMO and ECMWF according to forecast days.	67
그림 5-9	(a) Pattern Correlation and (b)Root Mean Square Error for vorticity at 200hPa for TIGGE models from NCEP, CMC, KMA, UKMO and ECMWF according to forecast days.	68
그림 5-10	Occurrence probability of heat wave in summer 2013 (a) applying for Tmax has to exceed to upper 95th percentile of observation climatological distribution, (b) applying for BCT has to exceed to upper 95th percentile of each model climatological distribution, (c) applying for KHI associated with large scale circulation. Shading indicates occurrence of heat wave in observation.	70
그림 5-11	(a) Perfect Correct, (b) Threat Score and (c) Equitable Threat Score for heat wave forecast methods.	71
그림 5-12.	Real-time forecast for Korean heat wave in 2014. (a) NCEP, (b) CMC, (c) KMA, (d) ECMWF and (e) Grand Ensemble.	72
그림 6-1	Interannual distribution of the heat-related illness (2011~2014).	77
그림 6-2	Intra-seasonal distribution of the heat-related illness for 4 summers(2011~2014).	78
그림 6-3	Scatter plot of summer maximum temperature and heat related illness in the a) urban and b) rural.	78
그림 6-4	폭염상황관리 및 대응체계 (출처 : 2012년 폭염 종합대책 백서)	85

1. 서론

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change, 정부간기후변화패널) 5차 보고서에 따르면 지난 133년간 지구 평균기온은 0.85℃ 상승해 4차 보고서(0.76℃) 때 보다 높은 상승폭을 보였다. 이 보고서에 따르면 현재와 같은 추세(저감 없이)로 온실가스가 배출되는 경우(Representative Concentration Pathways 8.5 : RCP 8.5 시나리오) 2100년에는 1986~2005년에 비해 평균기온이 약 3.7℃ 상승하는 것으로 나타났다. 이는 산업혁명 이후인 1880년부터 최근 2012년까지의 온도상승이 약 0.85℃라는 것을 감안한다면 엄청난 증가라고 할 수 있다.

기후변화는 평균기후의 변동성뿐만 아니라 극한 현상에도 영향을 미치는 것으로 나타났다(Martine et al., 2011). 최근 기후변화의 영향으로 지구상의 여러 지역에서 극심한 기상현상에 따른 폭염, 가뭄과 홍수의 발생이 증가하고 있으며, 이와 관련된 자연재해와 인명피해는 더욱더 대형화되고 있는 추세이다. 폭염의 경우, 최근 30년(1979-2010년) 평균 발생빈도수에 비해 2005년 이후 두 배 이상 증가하였다(Seneviratne et al., 2014).

World Health Organization(WHO)는 기후변화로 인해 20년 빈도의 폭염이 21세기 중반에는 2-5년마다 발생할 것으로 전망했다. 전 세계적인 폭염피해경향을 살펴보면, 미국의 경우 80년대 후반부터 2003년까지 기상재해 중 폭염과 가뭄으로 인한 피해가 기상재해 중 91.6%를 차지하였고, 2003년 유럽에서 발생한 폭염으로 인해 프랑스, 영국, 스위스 등에서 35,000여명이 사망하고 130억 달러 이상의 피해를 초래한 것으로 알려져 있다(허보영 등, 2009). 2010년 러시아 폭염은 산불을 유발하였고, 이로 인하여 넓은 면적의 산림이 파괴되었다. 2013년에도 일본에서는 기상관측 사상 가장 높은 일 최고기온을 기록하였고, 우리나라의 2013년 여름도 1973년 이래 가장 높은 평균기온을 기록하여 전력공급 비상사태를 야기하는 등 국민들의 생활에 큰 불편을 끼쳤다. 1994년에는 폭염으로 인해 3384명의 사망자가 발생하였으며, 이는 108년간 우리나라에서 일어난 기상재해 중 가장 많은 사망자를 발생시켰다(Kysely and Kim, 2009). 1994년의 폭염은 기상관측 이래 처음으로 일 최고기온이 33℃이상의 불볕더위가 32일 동안 지속되었다(표 3-1). 극한기온은 평균기온보다 인류 및 지구환경시스템에 미치는 영향이 크기 때문에 기후변화의 영향 및 적응대책을 수립함에 있어 필수적인 정보이다. 따라서 한반도 폭염과 연관된 역학 및 물리과정을 이해하는 것은 폭

염의 예측성을 향상시킬 수 있을 것이다.

비록 기후모델 결과들이 미래에는 폭염의 빈도수, 강도와 지속기간이 증가할 것이라고 전망하지만, 이러한 변화는 전지구가 똑같이 발생하는 것이 아니라 대기 대순환의 변화와 연관된 특별한 패턴에 의해 특징지어진다(Meehl and Tebaldi, 2004).

극한 기온의 발생빈도수는 과거 10년 동안 급격히 변화하였다. 이러한 변화는 지구온난화와 더불어 대기대순환 패턴 변화와 관련되었다(Christidis et al. 2005; Hansen et al. 2013; Wen et al. 2013). 비록 극한기온의 발생과 대기 대순환 패턴과의 연관성에 관한 많은 연구들이 있었지만(Scaife et al., 2008; Kenyon and Hegerl, 2008), 동아시아의 극한기온의 경년 변동성에 대한 연구는 매우 미흡하다. Nakamura와 Fukamachi(2004)는 동아시아 여름철의 극한 기온은 Okhotsk 고기압의 변동성과 연관된 블러킹의 영향이라고 제안하였다. Park and Schubert(1997)은 1994년 한반도의 이상고온 현상은 티벳고원의 지형과 동서바람의 상호작용에 의해 유도된 대기대순환 패턴이 매우 중요한 역할을 하였다고 제안하였다. 동아시아 폭염은 고기압의 영향을 포함해서, 몇몇 인자에 대한 연구가 있었지만, 폭염의 원인과 예측성에 대해서는 많이 부족한 실정이다. 특히 기후변화, 해수면온도(Sea Surface Temperature : SST), 몬순과 같은 대규모 과정(large scale process)에 대한 이해는 부족하다.

아시아 여름몬순(summer monsoon)은 지역적 특성에 따라 동아시아 여름몬순, 인도 여름몬순, 그리고 북서태평양 여름몬순으로 나누어 질 수 있다(Wang and LinHio, 2002). 우리나라는 연 강수량의 약 70%이상이 여름철에 집중되는 동아시아 몬순 지역에 속한다. 동아시아 여름 몬순의 경년 변동성은 자체의 내적 역학뿐만 아니라 티벳고원의 열적 강제력, 서태평양의 대류활동, 엘니뇨, 인도 몬순 등에 의해서 영향을 받는다(e.g., Huang, 1985; Nitta, 1987; Wang et al., 2000). 특히 북서태평양의 대류활동은 동아시아 여름 몬순과 밀접하게 연관되어있다. Wang 등 (2001)은 북서태평양 여름몬순이 강해지면, 아시아 지역과 미국의 Great Plains 지역에 가뭄을 유발한다는 것을 발견하였다. 반면 북서태평양 몬순이 약화되면 북서 태평양 지역에 대류 활동이 감소하여 강수량이 줄어들고, 동아시아 지역에는 저기압성 순환이 발달하여, 수증기 수송이 원활하게 된다. 따라서 쌍극자 강수 패턴을 형성하게 된다. 이 쌍극자 패턴은 35°N을 따라서 길게 고기압이 위치하고, 아열대 북서태평양에서 20°N을 중심으로 저기압이 위치하게 된다. 이러한 패턴은 또한 인도양의 해수면 온도와 연관되어 있

다. 따라서 이 지역의 원격상관패턴은 동아시아의 극한 기후의 변동성 및 예측성에 중요한 역할을 한다(Ding and Wang 2007; Lee et al. 2013; Moon et al. 2013; Wang et al. 2009). 다시 말해서, 북서태평양의 대기순환 패턴의 변화는 동아시아에 폭염 또는 집중호우의 원인이 될 수 있을 것이다.

따라서 한반도 폭염이 어떤 대기 대순환 패턴에 의해 유발되는 지에 대한 연구가 필요하며, 이것은 장기간의 관측 자료를 이용하여 상세하게 분석할 필요가 있다. 또한 한반도 폭염 발생과 관련된 원격상관 패턴과 물리적 과정을 충분히 이해한다면, 이를 바탕으로 폭염의 예측가능성에 관한 연구도 할 수 있을 것이다.

이 보고서는 1) 한반도 폭염의 정의 및 피해 현황; 2) 폭염과 연관된 대기순환 패턴; 3) 폭염의 여름철 전망을 위한 예측성 분석; 4) 폭염의 시·중 예측을 위한 예측성 분석; 5) 폭염과 관련된 보건정책에 대하여 기술하였다. 2장에는 폭염의 정의와 피해현황을 간략히 소개하고, 3장에는 폭염의 경년변동성과 이와 연관된 대기 순환 패턴을 보였다. 4장에서는 APEC 기후센터 (Asia Pacific Economic Cooperation Climate Center: 이하 APCC)에서 현업 기후 예측에 사용되는 23년(1983년~2005년)간의 과거 기후자료를 이용하여, 폭염의 발생 빈도 수 예측성을 평가하였다. 5장은 폭염의 조기 경보 시스템 구축을 위해 THORPEX Interactive Grand Global Ensemble (TIGGE)자료를 이용한 폭염 시·중의 예측가능성에 대하여 기술하였다. 그리고 보건 분야 정책제언을 6장에 서술하였다(그림 1-1).

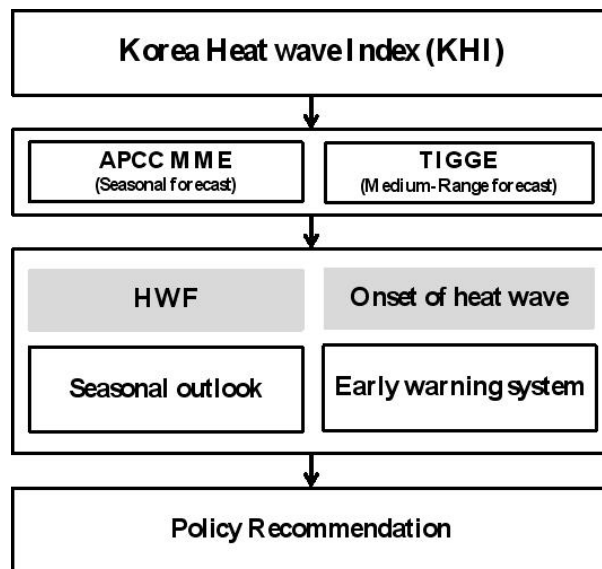


Figure 1-1. Schematic diagram for research plan

2. 폭염의 정의 및 피해현황

2.1. 폭염의 정의

폭염에 대한 표준화된 정의는 아직 정해진바 없으며 일반적으로 임계온도 이상의 기온이 수일 동안 지속되는 것으로 정의된다. 현재 사용 중인 폭염과 관련된 사전적 의미를 찾아 보면 폭염(暴炎)은 매우 심한 더위를 뜻하는 한자어이다. 이와 유사하게 보통 정도를 훨씬 넘는 심한 더위라는 의미를 지닌 폭서라는 용어가 있다. 혹서는 더할 수 없이 심한 더위를 의미하며, 혹열 또는 혹염으로도 사용된다. 또한 무더위를 나타내는 용어는 순수 한글 용어로서 습도와 온도가 매우 높아 찌는 듯 견디기 어려운 더위라는 의미를 가져, 앞서의 용어들 외에 습도의 개념이 포함된 용어이다.

Table 2-1. Absolute definition of heat wave

국가(관리기관)	정의
WMO (World Meteorological Organization)	최고기온이 평년값(1961~1990)보다 5°C이상, 연속 5일 이상의 기간
미국 (기상청 : National Weather Service)	90.0°F(32.3°C)이상 연속 3일 또는 이상의 기간
캐나다	32°C이상 연속 3일 이상의 기간
프랑스	최고기온 36°C이상을 가진 30°C이상의 기온이 4일 이상의 기간
남 스페인	최고 기온 41°C이상
네덜란드 (왕립기상대 : Royal Meteorological Institute)	적어도 3일 이상 최고기온 30°C이상을 가지고 최소한 최고 기온 25°C 이상이 5일간 지속되는 기간

주 : 자료는 소방방재청 보고서(2009)와 인터넷 검색에 의한 것임.

현재 기상청에서는 무더위를 표현하는 지표로서 열대야라는 용어가 있다. 열대야는 야간의 최저 기온이 25°C 이상일 때로 정의된다. 열파(Heat wave)는 무더위의 의미와 더불어 지속 기간의 의미까지 내포하고 있다. 이러한 용어들 중에서 2006년 기상청 홈페이지를 통해서

이루어진 설문조사 결과를 보면, 열파나 무더위보다 여름철 고온 현상을 잘 표현하면서 대중에게 잘 알려져 있는 폭염(extreme heat)을 가장 적합한 용어로 선택하였다.

폭염의 절대적인 정의는 최고기온, 또는 최고 기온과 상대습도를 이용한 열지수가 임계치를 초과하는 경우와 연속초과 일수로 정의된다. 이러한 정의는 대부분이 국가를 대상으로 하여 임계온도/임계값을 설정하고, 그 임계값 이상의 값을 가지며, 지속기간을 만족 할 경우 폭염이 발생하였다고 정의한다. 따라서 모든 인구가 동일 수준의 계속되는 열적 스트레스에 동일하게 반응한다는 것을 가정한 것이다(소방방재청, 2009). WMO는 5일 연속으로 최고기온이 평년값보다 5°C 이상 초과하는 경우를 폭염으로 정의하고 있다. 미국 기상청은 3일 연속으로 기온이 32.2°C를 초과하는 날을 폭염으로 정의하고, 캐나다 환경부는 일 최고기온이 32°C를 초과하는 날이 3일 이상 지속되는 경우로 정의하고 있다. 또한 프랑스는 최고기온과 일 평균기온을 이용하여 폭염을 정의하였다. 폭염의 절대적인 정의는 한 국가를 대상으로 같은 기준을 적용하기 때문에 기준설정과 적용이 쉽지만, 폭염이 각각의 지역의 기후적, 지리학적 특성을 잘 반영하지 못하고 있다(표 2-1).

우리나라의 폭염은 기상청에서 운영하는 폭염 특보제의 기준을 따른다. 폭염 주의보는 일 최고 기온이 33°C 이상인 상태가 2일 이상 지속될 경우이며, 폭염경보는 일 최고기온이 35°C 이상인 상태가 2일 이상 지속될 경우로 정의된다(표 2-2). 폭염 특보제는 2007년 7월 1일에 시험운영을 시작으로 2008년 6월에 본격 시행하였다.

Table 2-2. Definition of Korean Heat wave (기상청)

특보현황	폭염 주의보	폭염경보
폭염	6월~9월에 일 최고 기온이 33°C 이상인 상태가 2일 이상 지속될 것으로 예상 될 때	6월~9월에 일 최고 기온이 35°C 이상인 상태가 2일 이상 지속될 것으로 예상될 때

2.2. 폭염의 피해 사례

지구 온난화에 따른 영향의 가장 큰 현상 가운데 하나는 최근의 폭염과 같은 극단 기상현상의 발생이다. 폭염은 농업, 수자원, 산업등 사회전반 걸쳐 영향을 줄 수 있으며, 고온과 관

런된 질병으로 인한 입원자 뿐만 아니라 사망률에도 큰 영향을 미친다. 표 2-3은 전 세계 폭염의 피해 현황을 나타낸 것이다. 폭염은 홍수와 침수등과 같이 매년의 주기적인 피해를 발생시키지는 않지만 폭염에 의한 인명피해는 지속적으로 증가하고 있다. 예를 들어, 미국의 경우 1908년대 후반부터 2003년까지 기상재해 중 폭염과 가뭄으로 인한 인명피해가 무려 91.6%를 차지하고 있다(허보영 등, 2009). 미국은 1995년 시카고에서 발생한 폭염으로 인해 약 738명의 사망자가 발생하였으며, 3일 동안 38℃이상의 기온이 지속되었으며, 일 최고 기온은 7월 13일 41℃로 1928년 관측 이래로 최고의 기온을 기록하였다. 이 당시 폭염은 높은 기온과 함께 높은 습도를 동반하여 더 많은 인명 피해를 가져왔다.

2003년 여름에 발생한 유럽의 폭염은 프랑스에서 1만 5000명, 독일에서 7,000명, 유럽 전체로는 약 3만 5000명의 인명피해를 가져왔다. 2003년의 여름철 기온은 평년보다 약 20~30% 상승하였으며, 35~45℃의 최고기온은 대부분 유럽의 남쪽지역에서 기록되었다. 영국에서는 8월 10일 38.1℃의 최고기록을 경신했으며, 프랑스에서는 40℃까지 기온이 상승하였다. 스위스에서는 2003년 6월이 250년 만에 가장 더운 달로 기록되었고, 8월 11일은 41.5℃의 최고기온을 기록하였다. 이러한 고온 현상으로, 거의 모든 유럽지역에서 농작물, 경작지, 가축, 삼림지 피해를 입었으며, 감자와 포도주 생산에도 심각한 영향을 미쳤다. 또한 농작물의 수확량 감소로 인한 사료부족은 독일, 오스트리아, 스페인에서 30%, 이탈리아에서 40%, 프랑스에서 60%를 차지하였다. 폭염에 따른 농작물 수확량 감소 등 피해액은 약 100억 유로로 추정되었다.

2010년 유럽과 러시아 전역의 폭염은 화재까지 일으킬 정도로 강력하였다. 모스크바는 최고기온이 38.2도를 기록하였으며, 이러한 기온은 러시아의 1000년 역사상 최악의 기후였다. 러시아는 덥고 건조한 날씨 때문에 화재가 발생하였고, 이로 인해 농작물 재배에 큰 피해를 가져왔다. 500여 곳에서 산불까지 일어났으며, 이 폭염으로 인해 약 5만 6000명의 사망자가 발생하였다.

일본의 경우 2010년 여름은 기상관측이 이루어진 1988년 이래 100년 만에 최고기온(40℃)을 경신했다. 이로 인해 열사병으로 약 503명의 사망자가 발생하였으며, 전국의 응급 이송환자 수가 5만 5000명에 달했다. 우리나라에서도 1994년 7월과 8월에 33일 동안 폭염으로 약 3,027명의 사망자가 발생하였으며, 2010년의 폭염이 발생하였을 때 약 8명의 사망자가 발생하였다고 보건복지부에서 공식적으로 보고되었다.

Table 2-3. Mortality from heat waves

발생연도	발생지역	기온특성(℃)	사망자
1972	미국 뉴욕	38	891명
1980	미국 중남부	-	10,000명
1987	그리스	45	1,000명
1988	미국 중동부	-	5천 ~ 1만 여명
1994	일본 오사카	39.1	1,400명
	네덜란드	-	1,057명
	한국	38.4	3,027명
1995	미국 시카고	41	738명
1998	인도	-	3,000명
	미국 남부	-	200명
1999	미국 동부	-	502명
2000	미국 남부	-	200명
2002	인도	-	430명
2003	프랑스	40	15,000명
	독일		7,000명
	영국		2,045명
	스페인		4,200명
	네덜란드		1,400명
	이탈리아		1,094명
	포르투갈		1,316명
	벨기에		150명
2006	프랑스	39	1,388명
	미국 캘리포니아	36.1	140명
2010	러시아	40	55,336명 (산불에 의한 피해가 많음)
	인도	42~45	150명 이상
	일본	40	503명
2011	미국	-	206명

자료 : 허보영, 심재현, 최우성 (2009), 부산발전연구원 (2013)

3. 한반도 폭염 빈도수의 경년변동성 및 이와 관련된 대기순환 패턴

폭염과 같은 극한 기상 사상들은 지역사회와 생태계에 심각한 피해를 주기 때문에, 최근 들어 많은 관심을 받고 있다(Coumou and Rahmstofr 2012, WMO 2011). Kysely and Kim. (2009)의 조사결과에 따르면, 1901년부터 2008년까지 108년 동안 한반도의 태풍, 대설, 폭염 등 모든 기상재해에 기인한 연간 사망자수의 순위는 폭염이 가장 높은 것으로 나타났으며, 특히 1994년에는 무려 3384명이 폭염으로 사망한 것으로 조사되었다(표 3-1). 1994년 폭염에 의한 사망자수는 최근에 발생한 태풍 루사에 의한 사망자가 246명인 것에 비해 약 13배 많은 수치이다. 1994년에 발생한 폭염은 일 최고 기온이 33도 이상인 날이 32일 동안 지속되었다.

Table 3-1. Mortality from Meteorological disasters (자료:기상청 보도자료 2012)

연도	기상재해	사망자수(명)	지역
1994	폭염	3,384	한국
1936	태풍	1,104	한국, 북한
2006	홍수	844	북한
1959	태풍 '사라'	768	한국, 일본
1972	홍수 (서울, 경기)	672	한국
2007	홍수	610	북한
1969	홍수, 산사태 (강원, 영남)	408	한국
1987	홍수, 산사태 (충남, 전남, 강원)	345	한국
1998	호우, 홍수, 산사태	324	한국
2002	태풍 '루사'	246	한국

폭염은 대부분 여름철에 발생하기 때문에 여름철 동아시아의 대기순환과 밀접하게 연관되어 있다. 동아시아의 대표적인 대기순환은 대륙과 해양지역의 비열차 때문에 발생하는 몬순활동이다. 특히, 여름철에 발생하는 장마는 우리나라 연 강수량의 약 60%를 공급하여 우리나라 수자원 공급원 중 가장 중요한 기상현상이다. 따라서 동아시아 몬순의 변동성은 한반도에서 자연재해를 유발하는 장마와 집중호우 또는 폭염과 가뭄 등 극한기상과 직접적인 연관이 있다. 예를 들어, 1994년에 동아시아 지역은 과거에 경험하지 못했던 극심한 폭염과 가뭄으로 인해 많은 피해를 입었다. Park and Schubert (1997)는 티벳고원 동쪽의 상층 고기압의 조기 발달과 남중국해 지역에 저기압 발달이 1994년 심한 폭염의 원인임을 밝혔다. 박종길 등(2009)은 1994년 폭염발생시의 중관기상학적 특성을 분석하였으나, 한반도 폭염의 원인 및 폭염 강도에 대한 메커니즘 규명에 대한 연구는 매우 미흡하였다. 따라서 폭염과 관련된 역학적, 물리적 과정을 이해하는 것은 폭염에 대한 예측능력을 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라 농업, 수자원 및 보건 분야의 대응전략을 마련하는데 도움이 될 것이다.

3.1. 자료 및 연구방법

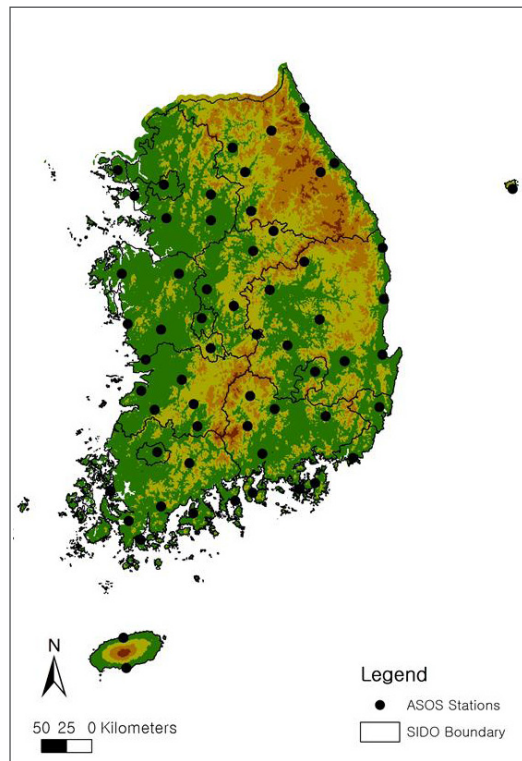


Figure 3-1. The KMA observational stations in Korea used for this study.

본 연구에서는 1973년부터 2012년까지의 관측자료 중 결측이 없는 기상청 60개 기상기상 관측소(Automated Synoptic Observation System :ASOS)의 일 최고 기온, 일 최저 기온, 일평균 기온, 강수량 자료를 사용하여 한반도 폭염의 변동 특성을 분석하였다(그림 3-1). 한반도 폭염의 발생 시 기상패턴 분석에는 미국 해양 대기청(National Ocean and Atmosphere Administration, NOAA)에서 제공하는 NCEP/NCAR 재분석 자료를 사용하였다. 격자간격은 위도와 경도 모두 2.5°이며, 연직 17층이다. 바람, 연직속도, 그리고 온도 자료는 각각 12개 층(1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 150, 100hPa)을 이용하였고, 비습은 1000~300hPa의 8층 자료를 이용하였다. SST자료는 NOAA Optimum Interpolation (OI) SST V2를 사용하였고, 기간은 1973년부터 2012년 자료이다. OLR 자료는 NCEP CPC 자료를 사용하였다. 분석영역은 여름철 한반도 기온분포와 대기 순환 패턴을 효율적으로 보여주기 위해서 한반도를 중심으로 아시아 지역을 선정하였다.

한반도 폭염의 발생과 연관된 대기순환패턴 분석에 사용된 상관 방정식은 다음과 같다.

$$r = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx}} \times \sqrt{S_{yy}}} \quad (3-1)$$

여기서,

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)}{n} \quad (3-2)$$

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}{n} \quad (3-3)$$

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)^2}{n} \quad (3-4)$$

이다. 다시 말해 S_{xy} 는 두 변수 사이의 공분산을 나타내며, S_{xx} , S_{yy} 는 각각의 분산을 나타낸다.

폭염에 대한 표준화된 정의는 아직 없지만, 일반적으로는 기온이 어느 임계기온(threshold temperature)을 넘는 한정된 기간을 말한다(Robinson, 2000). 한반도 폭염의 연별 변동성을 조사하기 위해서 한반도 폭염의 정의는 표 2-2와 같이 기상청의 폭염 주의보 기준을 사용하였다. 한반도 폭염 주의보 기준은 6월~9월 사이에 일 최고기온이 33°C이상인 상태가 2일 이상 지속될 때이다. 여기서, 최고기온 33°C는 여름철(June-July-August: JJA)

최고기온의 90th percentile 값이다. 이와 같은 방법으로 선정된 사례를 이용하여, 한반도 폭염의 빈도수 (Korean heat wave frequency, 이하 HWF), 지속일수와 강도를 계산하였다. 여기서 폭염의 강도는 지속일수 동안의 평균 최고기온으로 정의하였다.

본 연구에 사용된 HWF는 60개의 기상관측소에서 매년 33°C를 초과하는 상태가 2일 이상 지속되는 경우를 합산하여 60개 지점 평균한 것이다. 따라서 HWF, HWD, 그리고 HWI 는 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$HWF = \frac{\sum_{i=1}^s hw}{s} \quad (3-5)$$

$$HWD = \frac{\sum_{i=1}^s hwl}{s} \quad (3-6)$$

$$HWI = \frac{\sum_{i=1}^s hwt}{s} \quad (3-7)$$

여기서, hw 는 폭염 발생 수이며, S 는 60개 관측지점을 의미하고, hwl 은 각 지점에 폭염이 발생하였을 경우에 총 지속기간을 의미한다. 또한 hwt 는 폭염 발생 일에 대한 관측지점별 평균 최고기온이다. 3-2장에서 우리는 EOF분석을 이용하여 한반도 HWF 의 주요 공간 패턴을 분석하였고, 3-3장에서는 HWF 와 연관된 대기순환 패턴을 조사하였다. 한반도 HWF 의 경년변동성과 연관된 역학적, 물리적 메커니즘을 조사하기 위해서, 우리는 PC1 과 대기 변수와의 회귀분석을 실행하였다. 상관계수는 이전의 극한현상 연구와 같이 95% 유의수준을 검사하였다(e.g. Cassou et al. 2005; Haylock and Goodess 2004).

3.2. 한반도 폭염의 발생 특성

Table 3-2. List in twenty major warm events occurred in Korea during 1973-2012.

폭염	년	폭염 시작일		폭염 종료일		지속기간	평균 최고기온	평균 관측지점 수
		월	일	월	일			
1	1994	6	30	7	31	32	35.1	31.4
2	2013	7	29	8	22	25	34.6	27.4
3	1983	7	25	8	8	15	34.6	28.2
4	1994	8	2	8	9	8	34.6	36.8
5	2012	7	17	8	13	28	34.5	22.6
6	1977	7	20	8	4	16	34.4	30.6
7	1995	7	24	8	19	27	34.3	19
8	2006	7	28	8	17	21	34.3	33.1
9	1996	7	18	8	24	38	34.2	21.7
10	2004	7	19	8	15	28	34.2	28.1
11	1984	7	26	8	15	21	34.2	23
12	1990	7	21	8	26	37	34.1	20.9
13	1988	8	1	8	21	21	34.1	19.7
14	1981	7	14	8	3	21	34.1	16.2
15	1997	7	18	8	3	17	34.1	18.9
16	1985	7	19	8	1	14	34.1	24.2
17	1973	8	4	8	16	13	34.1	22.8
18	1978	7	20	8	12	24	34	20.8
19	2001	7	21	8	9	20	34	18.5
20	2008	7	28	8	16	20	33.9	15.6
평균						22.3	34.2	24.0

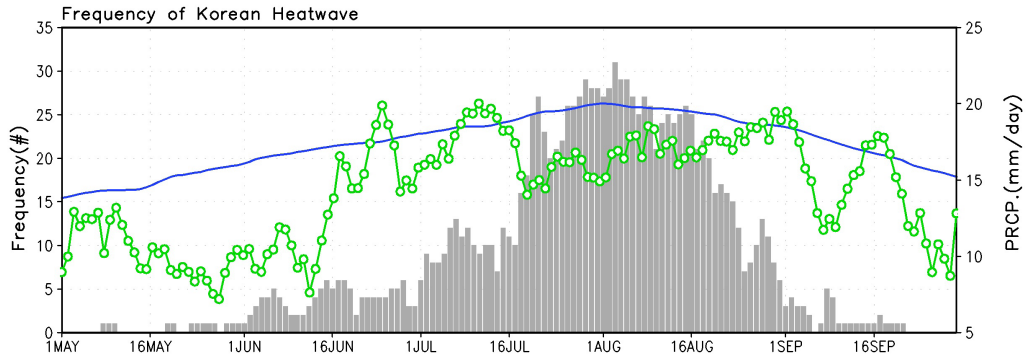


Figure 3-2. Frequency of heat waves (bar graph) in South Korea from May to September for the past 40 years (1973-2012). The value is the sum of the cases when the daily maximum temperature exceeded 33°C heat wave days and the sum of stations which met the criterion among the 60 weather stations in South Korea. Also presented are the daily-mean precipitation (the green line with open circle) and 2-m air temperature (the blue line) averaged over the 40 years.

표 3-2는 최근 40년 동안 한반도에 발생한 폭염 사례 중 폭염 강도와 지속기간을 기준으로 20개의 폭염 사례를 선정한 것이다. 20개의 폭염 사례 중 1994년을 6월 30일을 제외하고 모든 폭염은 7월과 8월에 발생하였으며, 평균 지속기간은 22.3일 이고, 폭염 발생 시 평균 최고기온은 34.2°C이다. 그리고 한반도 폭염이 발생하였을 때 평균 24개 지점이 동시에 발생하는 것으로 나타났다. 한반도 폭염의 빈도수는 1994년에 약 4.5회로 가장 많았다. 이 당시 폭염의 평균 지속기간은 약 27일이며, 강도는 약 35.2°C이다. 1994년의 폭염발생 기간 중에 7월 21일은 한반도 54개 관측 지점에서 폭염이 발생하였으며, 평균 최고기온은 약 35.8°C 이며, 지역 최고 기온은 39.4°C로 대구에서 발생하였다. 최근 발생한 2013년의 폭염은 1994년에 7월에 발생한 폭염 다음으로 강도가 강하며, 지속기간은 약 25일 이다.

그림 3-2는 1973년부터 2012까지 40년 동안의 5월부터 9월까지 발생한 폭염의 한반도 평균 발생빈도수, 일 평균기온 및 일평균 강수량을 나타낸 것이다. 폭염의 빈도수는 60개 기상관측소 중에서 일 최고기온이 33°C를 넘는 지역의 합을 나타낸 것이다. HWF는 7월 중순부터 8월초에 최고점을 보이며, 뚜렷하게 계절변동을 한다. HWF의 일 변동은 일평균기온의 최고점과 일치하고 있지만, 평균기온의 증가와 완전히 일치하지 않는다. 기후학적인 측면에서 보면, 폭염의 발생확률은 전형적으로 장마시즌(6월 중순부터 7월 중순)이 끝난 후에 급격히 증가한다. 비록 폭염은 5월부터 9월까지 발생하지만, 이 연구에서는 발생 기간 중 발생빈도수가 가장 많은 7월과 8월(약 87%)에 대해서만 분석하였다(그림 3-2).

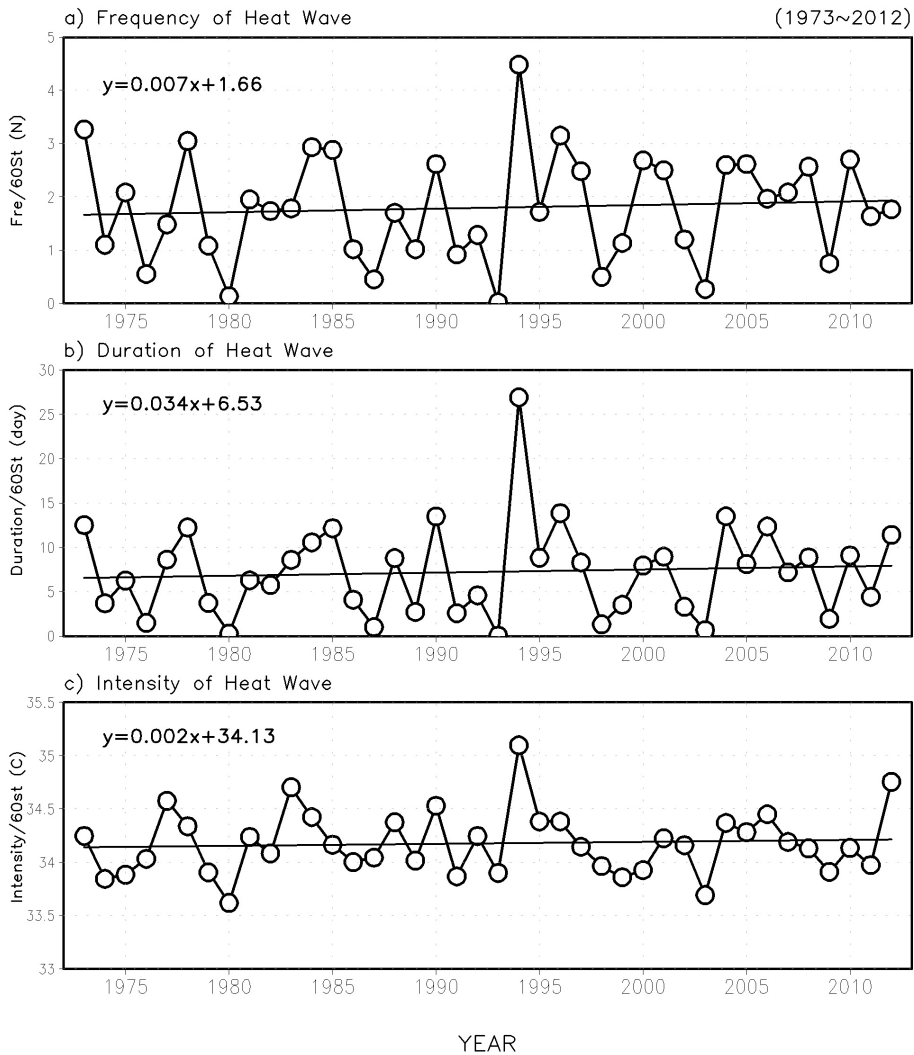


Figure 3-3. Yearly variations of the heat wave frequency (HWF, top), duration (HWF, middle), and intensity (HWI, low). See the text for the definitions.

그림 3-3은 과거 40년 동안 한반도 폭염 관련 지수들(HWF, HWD, HWI)의 경년 변동성을 나타낸 것이다. 한반도 평균 폭염 지수들은 60개의 기상관측소들의 값을 평균한 것이다. 모든 지수들은 매년 유의한 변동을 하고 있다. 주목할 만한 폭염 사례는 1994년이며, 이 시기에 폭염 빈도수, 지속기간, 그리고 강도는 40년 동안 가장 강하게 나타나고 있다. 1994년 폭염 사례에 대한 연구로, Park and Schubert(1997)는 상층 대기 흐름과 연관된 역학적 메커니즘을 보였다. 경년 변동성이 매우 크기 때문에, 비록 추세는 통계적으로 유의하지

않지만, 3개의 지수에 대한 40년간의 추세는 약간 증가하는 것으로 나타난다. 이 연구에서 우리는 한반도 폭염의 경년 발생 특성을 대표하기 위해서 HWF 지수를 사용하였다. 다른 지수들(HWD, HWI)을 사용하여 분석을 했을 경우에도 다른 결과를 초래하지는 않는다. 표 3-3는 HWF, HWD, HWI 지수에 대한 각각의 상관계수를 나타낸 것이다. 각각의 지수는 독립적인 것이 아니라 서로 높은 상관성을 보이고 있다. 특히 HWF와 HWD의 상관성이 가장 높으며, 이것은 한반도에 폭염이 발생하였을 때 지속시간이 높다는 것을 의미한다.

Table 3-3. Temporal correlation across the various heat wave indices defined over Korea. Each correlation coefficient was calculated based on yearly values for 40 years (1973-2012). * is denoted by 99% confidence level.

CC	Frequency	Intensity	Duration
Frequency	1	0.65*	0.91*
Intensity		1	0.83*
Duration			1

다음으로 한반도 HWF의 시·공간 변동성을 조사하기 위해서, 60개 기상관서의 일 최고기온 자료를 이용하여 경험적 직교 함수(Empirical Orthogonal Function: EOF) 분석을 하였다. 이 분석은 HWF의 경년변동성과 한반도의 지역 분포에 초점을 맞추었다. 그림 3-4는 EOF의 첫 번째와 두 번째 모드와 이에 상응하는 PC(principal components)를 나타낸 것이다. 주요모드는 전체 변동성의 약 51%와 9%를 설명하며, 한반도 폭염과의 관련성을 위해 폭염빈도수가 양의 아노말리를 가질 때를 기준위상으로 설정하였다. 나머지 모드들은 작은 변동성을 설명하기 때문에 유의하지 않으며, 대부분 매우 지역적인 모습을 나타내고 있다. 따라서 이 연구에서는 첫 번째와 두 번째 모드를 중심으로 분석을 하였다.

EOF 1의 공간패턴은 한반도의 전 지역에 동일한 부호를 보이고 있으며, 한반도의 남동지역(대구, 밀양 등)에서 가장 큰 값을 보인다. 이 지역은 다른 지역에 비해 여름철 강수량이 적으며, 상당히 건조한 지역이다. 따라서 HWF의 변동성은 강수량과는 음의 상관을 보인다. 강수량의 감소는 토양수분의 감소를 가져오고, 이로 인해 한반도의 폭염과 가뭄은 더욱더 심해질 수 있다. 실제로, 많은 연구자들은 관측자료 분석과 모형실험을 통해서,

토양수분이 폭염의 빈도수와 강도를 결정하는 중요한 요소라는 것을 밝혔다(e.g., Dai et al., 1998; Alexander, 2010; Hirschi et al., 2010).

PC1은 시간에 따른 추세를 가지고 있지 않지만, 유의한 경년변동을 하고 있다. 예를 들어 1994년 여름에 발생한 폭염 일수는 극단의 이상 현상이다(그림 3-4b).

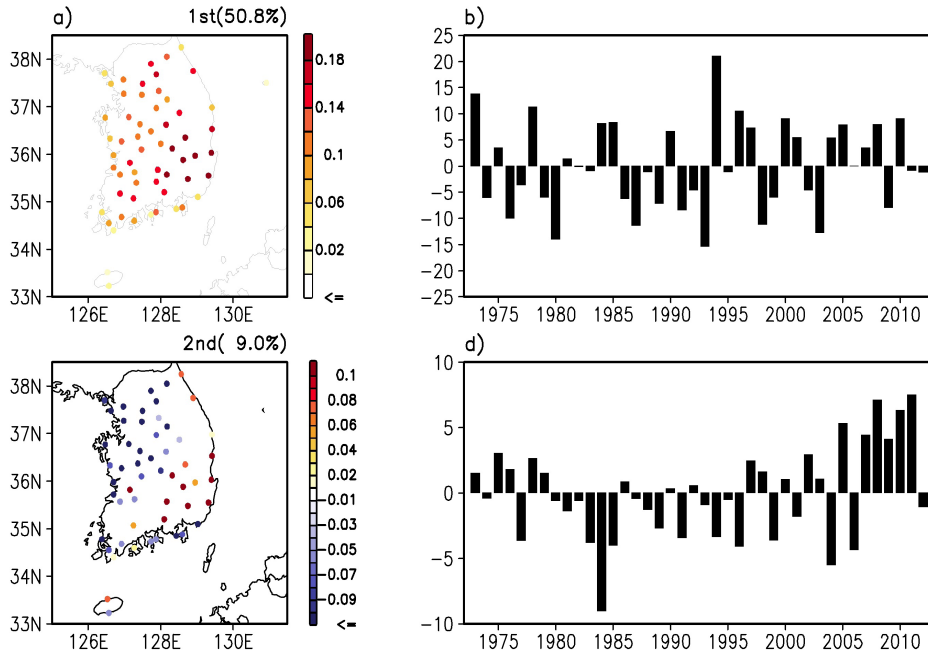


Figure 3-4. (a) Spatial pattern of the first empirical orthogonal function (EOF1) of the heat wave frequency and (b) the associated principal component time series (PC1). (c) and (d) are the spatial pattern of the second mode (EOF2) and the associated time series (PC2), respectively. These two leading modes explain 50.8% and 9.0% of the total variance, respectively.

EOF 2의 공간패턴은 남동쪽과 북서쪽에 중심을 갖는 시소(see-saw) 패턴을 보인다. 이 공간 패턴에 상응하는 PC 시계열은 상당히 유의한 추세를 가지며, 장시간 규모를 보인다. 이 패턴은 2000년대 초반부터 한반도의 남동지역은 다른 지역에 비해 HWF가 빠르게 증가하는 것을 의미한다.

경년변동 시간 규모에서 수많은 기후변동성은 원격 또는 지역의 SST 강제력과 연관되어있다는 것은 잘 알려진 사실이다. 우리는 SST 강제력의 가능한 영향을 실험하기 위해서, 먼저 PC1, PC2와 전 지구 SST에 대한 회귀분석을 하였다(그림 3-5).

EOF 1은 열대 지역과 중위도 해양지역에 강한 시그널을 가지는 여름철 대규모 SST 변동성과 연관이 있다(그림 3-5a). 한반도 폭염 발생일은 북태평양, 특히 한반도와 일본에 인접한 해양에서 SST의 증가와 연관이 크다. 지역 SST의 증가는 비록 해양에서 대기로의 열 속(heat flux) 증가를 초래하지만, 지표의 폭염 일수의 증가에 기여할 수 있다. 반면 중위도에서 SST의 증가는 대규모 대기 순환의 변화에 의해 지표면이 가열 될 수 있다. 여름철 한반도 폭염은 대기대순환에 의한 하강운동과 동반된 고기압성 아노말리에 의해 야기된다. 이 과정에서 구름양과 강수량은 감소하고, 건조하고 뜨거운 날이 지속되는 경향이 있으며, 또한 해수면 기온의 증가에 기여하게 된다(Lee, 2013).

대규모 대기 순환은 열대지역에서 비단열 가열에 의해 유발된 원격상관을 통하여 변화될 수 있다(다음절에 자세히 설명되어 있음). 따라서 북서태평양의 SST 아노말리는 대기 원격상관의 힌트가 된다. 열대지역에서 중위도지역까지 교차되는 사인을 갖는 삼극(tripolar) 패턴을 만들게 된다. 즉, 적도 서태평양에서는 양의 SST, 남중국해에서는 음의 SST, 그리고 한반도 주변에서는 양의 SST 아노말리를 생성한다. 또한, 한반도 HWF와 연관된 SST패턴은 ENSO 변동 지역인, 적도 태평양에서 강한 신호를 보인다. 따라서 한반도 폭염발생의 경년변동성은 열대해양에서의 ENSO와 대규모 대기 원격상관 패턴으로 대부분 설명할 수 있다.

EOF 2와 연관된 SST 아노말리는 장기간 시간규모의 한반도 폭염 빈도수에 SST의 영향을 반영한다(그림 3-5b). 이 패턴은 Pacific Decadal Oscillation(PDO) 또는 La Nina-like 패턴을 가지는 전지구 SST 장기 trend 패턴(England et al., 2014)과 매우 유사하다. 이 시점에서, 장기간 SST 변화가 한반도 폭염 발생 변동성과 연관된 북서-남동쪽 시소 패턴을 유도할 수 있는지 또는 장기 trend를 가지고 수십 년 변동을 하는 PC2가 통계적으로 단지 시간 규모와 유사한 것인지 명확하지 않다.

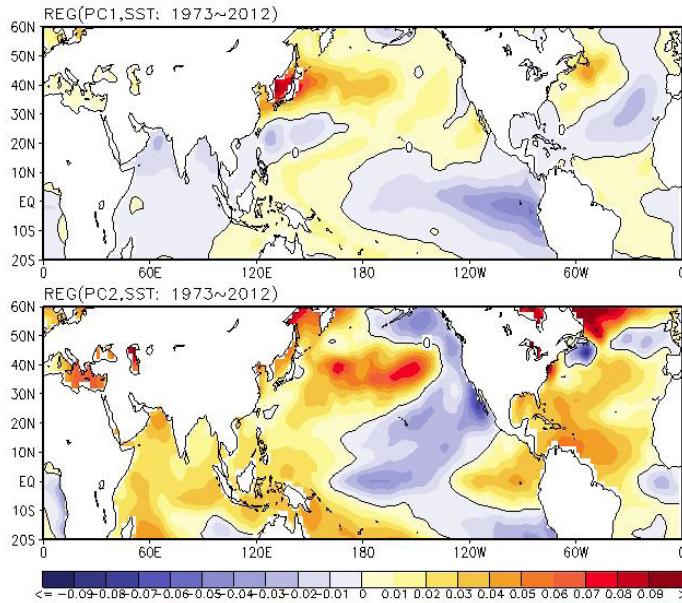


Figure 3-5. Regression pattern of the sea surface temperature (SST) anomalies (unit: K) related to (a) EOF1 and (b) EOF2.

3.3. 대규모 대기순환 패턴과의 연관성

3.3 절에서 우리는 한반도 폭염발생빈도수의 전체 50% 이상의 변동성을 설명할 수 있는 주요 모드로써, EOF 1과 연관된 경년변동성에 초점을 맞춰 분석하였다. 한반도 HWF와 연관된 역학적, 물리적 메커니즘을 조사하기 위해서, 우리는 PC1과 대규모 대기 변수사이의 회귀분석을 실행하였다. 회귀계수는 극한 기상연구에서 사용하였던 (e.g. Cassou et al. 2005; Haylock and Goodess 2004) 95% 유의수준 ($P < 0.05$)에서 평가되었다(식 1).

그림 3-6은 PC1과 500hPa 지위고도(Geopotential Height : GPH), 2m 지표기온, 해면기압(Sea Level Pressure : SLP), 수증기 수렴(moisture convergence), 지표부터 300hPa까지 연직 적분된 습윤 속(moisture flux)과 지구 장파복사(outgoing longwave radiation : OLR)와의 상계 맵을 나타낸 것이다. 색칠한 곳은 95%이상 유의한 지역이며, 붉은색 계통은 양의 상관계수를 갖고, 푸른색 계통은 음의 상관계수를 갖는 지역이다. 500hPa GPH 아노말리는 한반도와 일본에서 강한 양의 상관관계를 가지며, 이 패턴은 동서쪽으로 확장된 모습을 보인다. 한반도 북쪽과 남쪽지역에 띠 모양으로 확장된 GPH 아노말리의 음의 상관지역들은 북서태평양 지역의 비단열 가열에 의한 열원이 원격상관을 통해 북쪽으로

전파되는 것을 암시하고 있다. 선행연구들은 열대지역의 열원이 원격상관을 통해 동아시아 여름 몬순에 영향을 미친다고 하였다(e.g., Huang and Sun, 1992; Wang et al., 2001).

2m 지표기온의 상관 패턴은 500hPa의 공간 패턴과 매우 유사하다. 즉, 양의 GPH 아노말리 지역에서는 지표가 가열되고, 음의 아노말리 지역에서는 지표가 냉각되는 것을 알 수 있다. 한반도에서 강한 지표 가열은 대기의 하층(1000hPa~500hPa)과 상층(500hPa~200hPa)의 층후(thickness)에서도 잘 나타난다(그림 3-7). 한반도 지역에서, 상층 층후의 상관계수 패턴은 하층 패턴과 비교해서 약간 북동쪽으로 이동된 모습을 보이지만, 한반도 지역에서 상·하층 기온의 증가에 따른 층후의 증가를 보인다. 따라서 한반도 폭염의 발생 과정에서 기온의 증가는 하층에서만 일어나는 것이 아니라 하층에서 상층까지 기온이 증가하는 순압대기와 연관되었다.

이러한 패턴은 지속적인 하강기류를 동반하고 대기의 안정도를 증가시키며, 이에 따른 단열 가열을 초래한다. 따라서 한반도와 일본지역에 강한 폭염을 유발하는 것이다.

한반도 주변의 양의 SLP 패턴은 건조한 조건(수증기 발산)을 만들며, 이로 인해 한반도에는 음의 강수 아노말리가 관측된다. 한반도 주변에서는 습기 수렴이 뚜렷하게 감소하지만, 아열대 서태평양, 남중국해 그리고 동아시아에서 멀리 떨어진 사할린 지역에서는 음의 SLP 패턴이 위치해있고, 양의 수증기 수렴패턴을 보인다. 양의 SLP 패턴과 연관된 고기압 패턴은 열대해양으로부터 충분한 수증기 수송을 가로막고 있다(Wu and Chen, 2012). 따라서 동아시아로 수송되지 못한 수증기는 남중국해에서 140°E 동쪽까지 넓은 지역에 걸쳐 강한 수렴을 한다. 남중국해 주변(20°N)에서 증가된 수증기 수렴은 강한 대류가 유발하게 되고, 한반도와 일본지역은 수증기 수렴이 감소하면서 대류활동은 약화된다(그림 3-6d).

그림 3-8a는 PC1과 150hPa 상대 와도(식 3-4)의 상관맵을 나타낸 것이고, 그림 3-8b는 PC1과 대기 바람장의 110-130°E 지역을 평균한 연직 단면도의 상관 맵을 나타낸 것이다. 20°N 부근에서 강화된 습기 수렴과 깊은 대류는 상층에 양의 와도를 유발한다. 동아시아와 남중국해 지역의 상층 양의 와도 아노말리는 더욱 강한 대류와 비단열 가열을 유도하게 되며, 이 지역은 로스비 파동의 근원이 되며, 한반도 주변에서 상층 음의 와도 아노말리를 유도하게 되고, 오츠크해와 북동 아시아 지역에 양의 와도 아노말리를 유도하게 된다.

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (3-8)$$

한반도 폭염발생 시 가장 주목할 패턴은 북서 태평양에서의 수증기수렴과 상승운동, 동아시아 지역에서의 수증기 발산과 하강운동이다. 이러한 연직운동은 명백한 순압대기 구조이다. 순압대기의 반응은 원격상관패턴에서 전형적인 로스비 파동이다(Wang et al., 2001). 따라서, 하강운동에 의해 유도된 단열 대기 가열은 7월과 8월동안 한반도에 폭염발생을 책임지는 가장 뚜렷한 메커니즘이다.

한반도 폭염 발생과 연관된, 두 지역의 경년변동 중심은 상층와도의 상관패턴에 의해 정의하였다(그림 3-8a). 한반도 폭염의 호조건으로서, 한반도 폭염 지수(Korean Heat wave Index (KHI))를 아래와 같이 정의하였다(식 3-5).

$$\begin{aligned} KHI = & \text{Vorticity}_{150hPa} (25 \sim 30^\circ N, 110 \sim 130^\circ E) \\ & - \text{Vorticity}_{150hPa} (35 \sim 45^\circ N, 120 \sim 140^\circ E) \end{aligned} \quad (3-9)$$

PC1과 KHI의 상관계수는 약 0.81이며, 통계적으로 유의한 값이다.

우리는 한반도 폭염 발생빈도수와 연관된 대기 순환과 대류활동 등의 대규모 패턴의 변화들은 동아시아 여름철 몬순의 경년변동성에 주로 영향을 미치는 것을 발견하였다. 먼저 이전 연구에서 제안된 몬순 지수들은 아래와 같다.

- Wang and Fan Index (Wang and Fang, 1999)

$$WF = U850(5^\circ \sim 15^\circ N, 90^\circ \sim 130^\circ E) - U850(22.5^\circ \sim 32.5^\circ N, 110^\circ \sim 140^\circ E)$$

where, U850 and V850 denote the zonal and the meridional winds at 850 hPa, respectively.

- Zonal wind difference index (Zhang et al. 2003)

$$Zh = U850(10^\circ \sim 20^\circ N, 100^\circ \sim 150^\circ E) - U850(25^\circ \sim 35^\circ N, 100^\circ \sim 150^\circ E)$$

- East Asian monsoon index (Wang et al. 2001)

$$EAM = V850(30^\circ \sim 30^\circ N, 110^\circ \sim 140^\circ E) - V850(30^\circ \sim 40^\circ N, 110^\circ \sim 140^\circ E)$$

PC1과 Wang and Fan (1999), Wang et al(2001), and Zang et al.(2003) 등 의해 고안된 다양한 몬순 지수들의 상관계수들은 통계적으로 유의한 값을 갖는다(표 3-4). 그러나 비슷한 몬순정의에도 불구하고, 북서태평양 지역에서 강한 몬순은 한반도 여름철 폭염 발생과 연관성이 더 큰 경향을 보인다. 특히 그림 3-5, 그림 3-6, 그리고 그림 3-8은 Wang et al(2001)에 제시된 그림과 매우 유사하다. 북서태평양에서 대류활동은 하층 저기압 순환을 유도하며, 북서태평양과 남중국해에 상승 운동을 유발한다. 이러한 상승운동은 한반도와 일본지역에 고기압성 순환과 하강운동을 유도한다. 또한 한반도 북쪽에 저기압성 순환을 생성된다. 이러한 삼극(tripolar pattern) 패턴은 북서태평양에서 열대 몬순 강수와 비단열 가열에 반응한 원격상관 패턴이다(cf Fig. 12 in Wang et al., 2001). 반면 PC1 과 Nino 3.4 SST Index (5°N~5°S, 120°~170°W)와의 상관계수는 매우 작다. 이것은 한반도 폭염이 ENSO와 직접적으로 연관되지는 않다는 것을 의미한다.

Table 3-4. Correlation coefficients between the Korean HWF and the various monsoon indices defined by Wang and Fan (1999), Zhang et al. (2003), and Wang et al. (2001), respectively. Also presented is the correlation coefficient between the HWI and the SST index averaged over the Niño 3.4 region (5°N~5°S, 120°~170°W).

	WF(JA)	Zh(JA)	EAM(JA)	Nino3.4(JA)
HWI (PC1)	0.52	0.57	0.62	-0.20

앞에서 언급했던 것처럼, 1994년 여름은 지난 40년동안 한반도 폭염의 발생빈도수, 지속기간과 강도가 가장 컸던 해이다(그림 3-3). 그림 3-9는 1994년 7월, 8월 평균된 대규모 순환장(그림 3-9a-d)와 SST 아노말리를 나타낸 것이다. 대기순환 아노말리들은 그림 3-6과 매우 잘 일치한다. 그러나 아노말리의 진폭은 더욱 강하다. 따라서 1994년에는 대규모 대기 원격상관이 더욱더 뚜렷한 메커니즘으로 작용한 것을 알 수 있다.

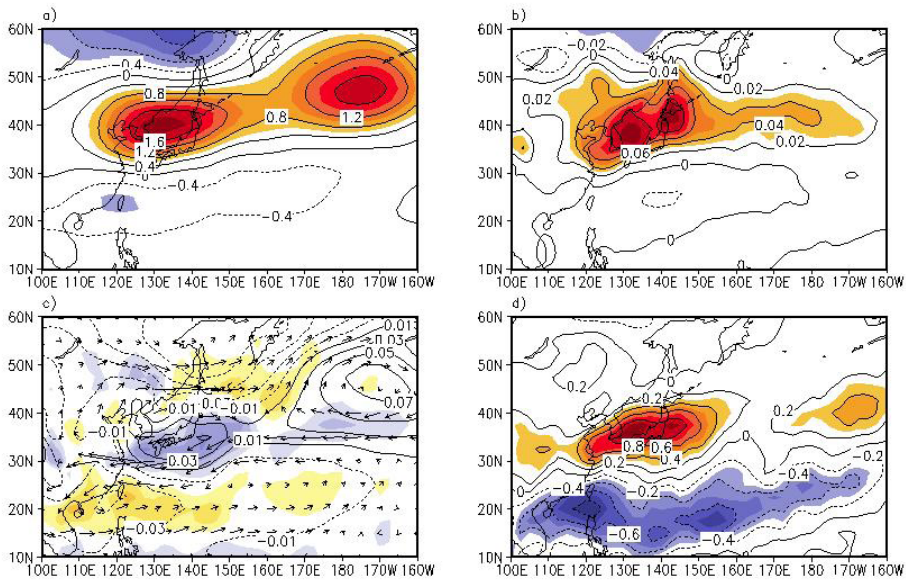


Figure 3-6. Regression patterns between PC1 of the Korean HWF and (a) 500hPa geopotential height (hPa), (b) 2-meter surface temperature, (c) sea level pressure (hPa, contour), vertically integrated moisture flux (vector), and moisture convergence (shading), and (d) outgoing longwave radiation. The shaded regions represent the area of exceeding the 95% confidence level from the Student's t test. For the vertically-integrated moisture flux vector in (c), only those areas of exceeding the 95% confidence level are indicated.

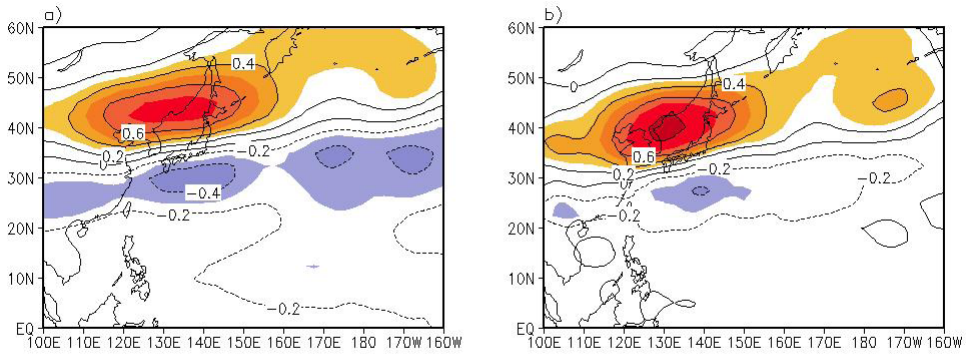


Figure 3-7. Correlation maps between the PC1 associated with HWF over Korea and a) high-level thickness(500-200hPa), b) low-level thickness(1000-500hPa).

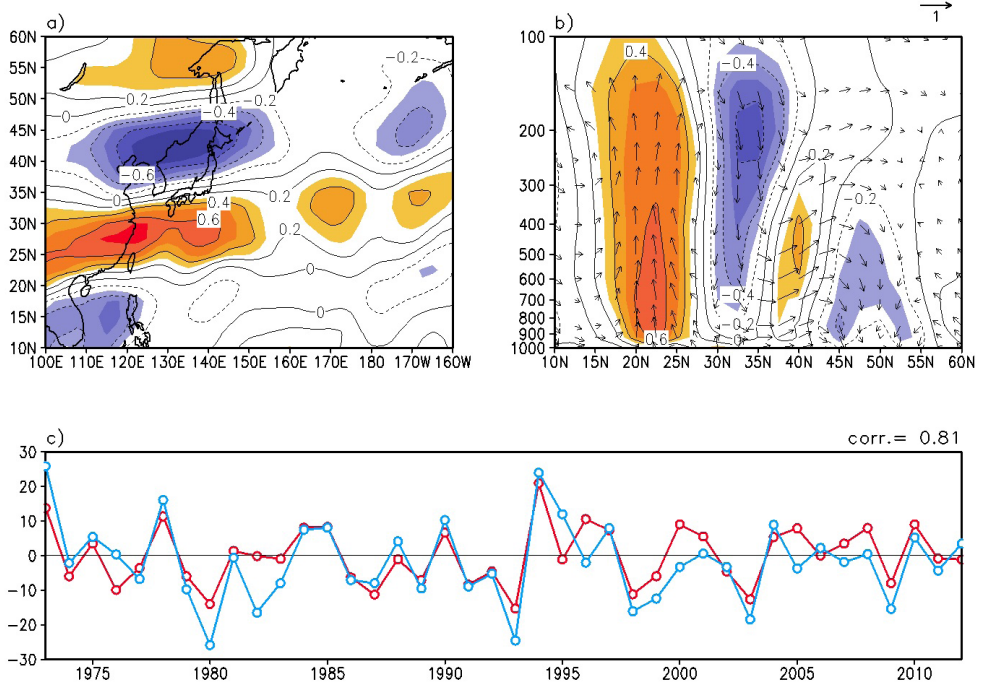


Figure 3-8. Correlation patterns between PC1 of the Korean HWF and (a) 150hPa vorticity and (b) meridional-vertical circulation (vector) and vertical velocity (ω , shading, positive values indicate upward motion) over 110 – 135°E. (c) The time series of the PC1 (red) from 1973 to 2012 and the vorticity difference at 150hPa between the area of 25 – 30°N and 110 – 130°E and the area of 35 – 45°N and 120 – 140°E (blue). Shading in (a) and (b) indicates the areas of exceeding the 95% confidence level.

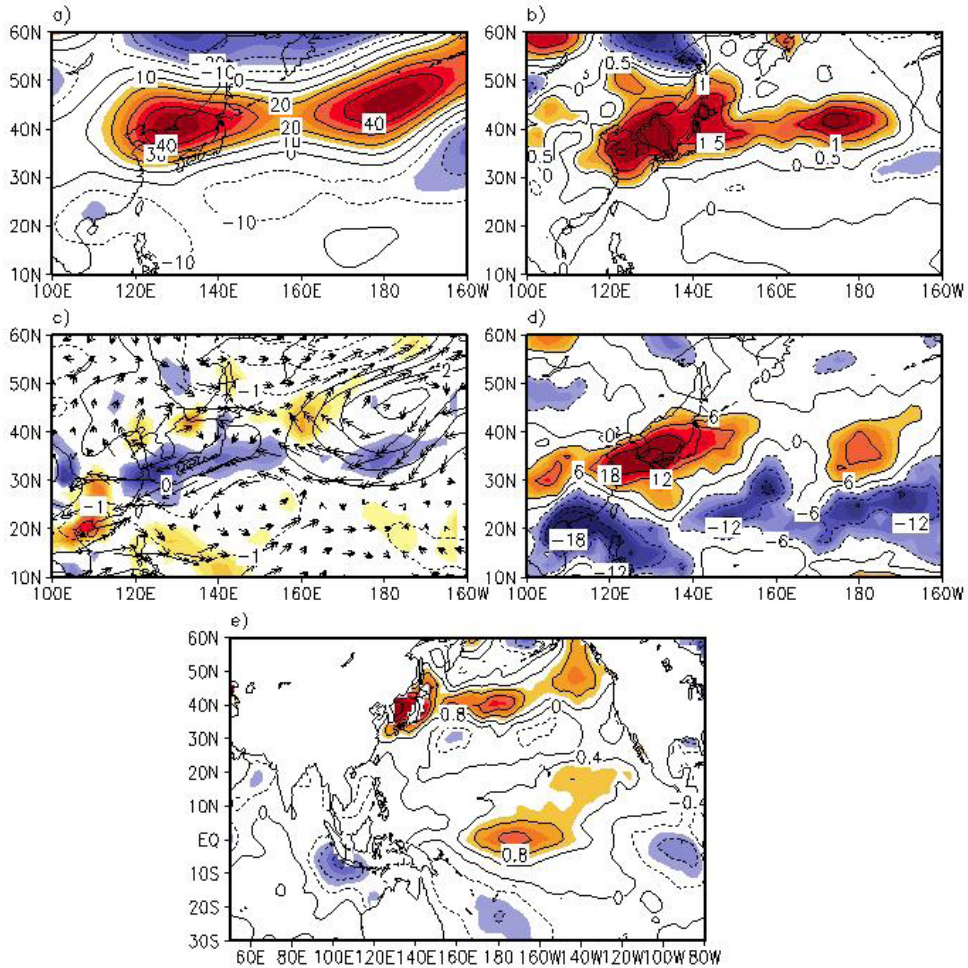


Figure 3-9. Anomaly patterns in July-August 1994 for (a) 500 hPa geopotential height, (b) 2 m air temperature, (c) sea level pressure (contoured), vertically integrated moisture flux (vector : $\text{g kg}^{-1}\text{ms}^{-1}$), moisture convergence (shading), and (d) outgoing longwave radiation (W m^{-2}), and (e) sea surface temperature.

3.4. 요약 및 결론

이 연구에서는 지난 40년(1973년~2012년)동안 한반도 폭염의 경년변동성에 대해 조사하였다. 폭염의 기준은 기상청 폭염주의보 기준인 일 최고기온 33°C 보다 높을 경우로 정의하였으며, 각 지역별로 일 최고기온이 33°C 가 넘는 수와 일 수를 종합하여 한반도 HWF를 정의하였다. 다음으로 EOF분석을 통하여 한반도 폭염발생의 경년 변동성과 연관된 공간분포(EOF1)과 시간계수(PC1)을 이용하여 연간 한반도 폭염 발생을 정의하였다. EOF1은 HWF

경년변동의 약 50% 이상을 설명하였으며, 남한 전체에 같은 부호를 가지고 있다. 이것은 한반도 폭염은 전형적으로 한반도 보다는 더 큰 공간 규모에서 발생한다는 것을 의미하며, 또한 지역의 변화 보다는 대규모 대기 순환 패턴의 변화에 의해 더욱더 영향을 받는 것을 말한다. PC1의 trend는 유의하지 않지만, 2000년대 초반부터 최근까지 약간 더 많은 폭염발생빈도를 보인다.

우리는 PC1과 대규모 대기 순환 변수와의 회귀분석을 통해 한반도 폭염 발생을 유도하는 역학적 메커니즘을 분석하였다. 이 결과에서 주목할 만한 패턴은 남중국해와 북서 태평양, 그리고 한반도 지역에 다른 부호의 중심을 가지고 자오선 방향으로 전파되는 패턴이다.

상관패턴을 보면, 남중국해와 동중국해에서 150hPa 와도의 양의 상관은 더욱더 강한 대류활동과 비단열 가열을 의미하며, 이것은 로스비 파열(Rossby wave-train)의 근원이 되어, 한반도와 일본주변에 강한 양의 GPH 아노말리를 발생시킨다. 이것은 로스비 파가 7월과 8월에 남중국해에서 열대지역의 열원에 의해 발생된다는 것을 의미한다. 동아시아로 전파되는 로스비 파의 일부분으로써, 한반도 지역의 하강운동에 의한 단열 대기 가열은, 한반도에 심한 폭염을 유발 할 수 있다. 이러한 원격상관 패턴은 전형적으로 연직운동에 순압대기 구조에서 일어나며, 열대지역의 강제력에 의해 생성된 로스비 파이다(Wang et al., 2001).

동중국해의 저기압성 순환과 한반도 폭염의 양의 상관은 원격상관패턴으로 정의되었다. 이러한 대기순환의 변화는 동중국해에 대류활동을 촉진시키지만, 남중국해와 북서 태평양의 습기(moisture)를 동아시아로 수송되는 것을 약화시키는 조건을 제공한다. 폭염과 연관된 자오선 순환은 열대해양에서의 하강운동과 20°N 주변에서 상승운동과 연관되어있다. 이 연직운동은 30~35°N 주변 한반도와 일본지역에서 하강운동을 리드하며, 단열 가열, 강수량의 감소에 따른 건조, 그리고 구름 운량을 감소시키는 경향이 있다. 그러므로 지표에서의 최고 기온은 증가하게 되고, 한반도에서 폭염을 야기 시키게 된다.

한반도 폭염 발생은 동중국해의 대류활동과 한반도의 하강운동 사이의 상층와도에서 나타나는 쌍극자 패턴으로 대표될 수 있다는 것을 발견하였다. 따라서 상층와도 차를 이용한 지수 (KHI)는 한반도 폭염발생과 높은 상관관계(0.8)를 가지며, 통계적으로 유의하다. 따라서 4장과 5장에서는 한반도 폭염 예측을 위해, KHI지수의 예측성을 검토할 것이다.

4. 계절예측 정보를 이용한 한반도 폭염 예측성 평가

동아시아 여름몬순은 경년변동성(interannual variability) 뿐만 아니라 십년변동성(decadal variability) 그리고 수 십년변동성(inter-decadal variability)을 가지고 있다(e.g. Wu and Wang, 2002). 그 중 동아시아 여름몬순의 경년 변동성은 자체의 내적 역학뿐만 아니라 티벳고원의 열적 강제력, 서태평양의 대류활동, 인도몬순, 엘니노 의해서 영향을 받을 수 있다. 특히 서태평양의 대류 활동은 동아시아 여름몬순 강수에 많은 영향을 준다(Lee et al., 2005). 통계모형 및 역학모형을 이용한 동아시아 여름몬순 강수의 예측성을 높이기 위한 많은 연구들이 있었다(e.g., Yun et al., 2005; Lee et al., 2013; Kwon, 2013). 그러나 동아시아 몬순 강수의 예측성은 적도 태평양 지역에 비해 현저히 떨어진다. 따라서 폭염 예측을 위해 동아시아 지역의 여름철 기온을 직접 예측하는 것 보다는 상대적으로 예측성이 좋은 원격상관(KHI)을 이용한다면, 여름철 폭염의 예측성을 크게 향상시킬 수 있을 것이다.

APCC는 유럽 중기기후 예측센터(ECMWF), 국제기후예측연구소(IRI), NCEP 등과 더불어 전구규모의 기후예측정보를 생산 및 제공하고 있다. APCC의 기후예측정보는 매월 9개국 17개 우수 기관의 기후예측 모델 자료를 기반으로 다중모델앙상블 기법(multi-model ensemble, MME)을 이용하여, 최대 6개월까지의 기후예측 정보를 APEC 회원국에 제공하고 있다.

MME는 개별기후모델의 계통적 오차와 기후모델간의 불확실성을 최소화하여 모델 각각의 예측성에 비해 향상된 예측성을 보여준다(Krishnamurti et al., 1999; Shukla et al., 2000; Wang et al., 2004).

APCC MME 계절예측의 예측성을 평가하고 개선하기 위해 다양한 연구들이 수행되어 왔다(e.g., Bundel et al., 2011; Lee et al., 2011, 2013; Min et al., 2011; Sohn et al., 2013). Bundel et al.(2011)은 APCC MME 결과를 분석하여 개별모델의 예측성보다 MME의 예측성이 뛰어나다는 것을 보여 주었으며, 또한 중위도와 고위도 지역에 비해 열대지방에 대한 예측성이 우수하다는 것을 보여주었다. Lee et al.(2013)은 동아시아 여름철 강수량의 예측을 위해 서태평양의 대류활동과 동아시아 몬순 강수의 연관성을 조사하고, 동아시아 몬순 강수 지수를 개발하였다. 또한 동아시아 강수 지수를 이용하여 강수를 재생산하고 이를 평가하였다.

Min et al.(2011)은 APCC MME의 광역변수를 통계적 규모축소법을 이용하여 한반도 겨울철 강수량과 기온에 대한 예측성을 검증하였다. Sohn et al.(2013)은 Standardized Precipitation Index(SPI)와 Standardized precipitation evapotranspiration index(SPEI)를 한반도 관측지점에 대해 규모축소(downscaling)하여, 한반도 가뭄 예측에 활용될 수 있는 가능성을 제시하였다. 지금까지 연구들은 MME의 예측성 향상에 대해 수행되어왔다.

따라서 본 장의 주요 목적은 APCC MME 자료를 사용하여 여름철 폭염과 연관된 대기 패턴들에 대하여 평가하고, 폭염의 발생 빈도에 대한 예측성을 평가하는 것이다. 특히 한반도 폭염발생 빈도수를 고려하여, 3장에서 개발된 한반도 폭염지수의 평가에 중점을 두고 분석하고 진단하였다.

4.1. 관측 자료 및 APCC MME 자료

본 연구에서 이용한 APCC MME 자료는 hindcast 자료이다. 이 계절예측정보는 APEC 9개 회원국(한국, 미국, 일본, 중국, 러시아, 페루, 호주, 캐나다, 대만) 17개 기관의 기후예측 모델 자료를 수집하여, 자료 검증(quality control)을 하고 전처리(표준화)과정을 거쳐, 다중모델앙상블 기법을 이용하여 계통오차를 보정하여 생산된다. 본 연구에서는 개별 모형간의 앙상블 평균 예측에 동일한 가중치(weight)를 부여하는 것으로 잘 알려진 SCM(simple composite method; Peng et al. 2002; Kang et al. 2009; Lee et al. 2011, 2013) 기법을 채택하였다. SCM 방법의 예측성능은 현업에서 사용 중인 다른 방법들 중에서 가장 우수한 MME 방법 중의 하나이다. 따라서 이 연구에 사용된 MME는 SCM 방법을 의미한다.

본 연구에서는 모델의 예측성 검증을 위해 관측 자료로 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)–NCAR(National Center for Atmospheric Research)에서 제공하는 위·경도 2.5°간격의 재분석 자료를 사용하였다(Kanamitsu et al., 2002). 강수량 자료는 월평균 CAMS(Climate Anomaly Monitoring System) OPI(OLR Precipitation Index)를 이용하였다. 한반도 폭염 빈도수 예측성 평가를 위해 사용된 자료는 APEC 기후센터(APCC) 현업 시스템에서 제공하는 계절 예측 과거 재현자료(hindcast)를 이용하였다. 사용된 자료의 기간은 23년 자료(1983~2005년)이며, 계절은 여름철 중 폭염이 빈번히 발생하는 7월과 8월 자료를 이용하였다. 사용된 모델들은 7개의 해양-대기 접합 모델들과 3개의 대기모델들이며, 상세한 정보는 표 4-1에 서술하였다. 이 연구에서 우리는 6월에 초기조건(Initial

Conditions : ICs)을 가지고 7월과 8월을 예측한 자료 (1 month lead seasonal prediction: Lead 1)와 5월의 초기조건을 가지고 7월과 8월을 예측한 자료 (2 month lead seasonal prediction : Lead 2)를 사용하였다.

모델의 예측능력은 Anomaly Correlation Coefficients(ACC)를 사용하여 검증하였다. ACC는 결정론적 예측 검증에 널리 쓰이는 방법 중에 하나이다(Wiks, 2011).

ACC는 아래와 같이 정의된다.

$$ACC = \frac{\sum_i (f_i - c_i)(a_i - c_i)}{\sqrt{\sum_i (f_i - c_i)^2} \sqrt{\sum_i (a_i - c_i)^2}} \quad (4-1)$$

여기서 f_i , a_i , 그리고 c_i 는 예측값, 관측값, 기후값을 의미한다. ACC는 예측 아노말리와 관측 아노말리 사이의 패턴 상관관계를 나타낸다. ACC가 1일 경우에는 완벽한 예보를 한 것이다.

Table 4-1. Descriptions of the individual models in APCC.

Model	Initialization	Ens. Size	SST Specification	Reference
CWB (Chinese Taipei)	Last 10 days(12Z) of previous month from NCEP Reanalysis version2	10	OPGSST 1.1 from CWB	
GDAPS_F (Korea)	NCEP RA2 (Time lagged initial condition – 3-7th 00Z, 06Z, 12Z, 18Z)	20	Forecasted SST	Park et al. (2002)
HMC (Russia)	From 00hr 26 Mar. to 12hr 30Mar with 12-hour step	10	Persisted anomalies	
JMA (Japan)	BGM method (9 members) and 5-day LAF	51	Predicted (One-tier method)	
MSC_CANCM3 (Canada)	The CMC Global 4D-var analysis	10	Predicted (OGCM4)	
MSC_CANCM4 (Canada)	The CMC Global 4D-var analysis	10	Predicted (OGCM4)	
NASA (USA)	MERRA reanalysis	9	Predicted (MOM4)	Vintzileos et al. (2003)
NCEP (USA)	CFS data assimilation system each day at 00Z, 06Z, 12Z and 18Z	20	Predicted (GDFL MOM4 global ocean model)	Saha et al. (2006)
PNU (Korea)	NCEP/NCAR Reanalysis 2 in AGCM, OISST data in OGCM	5	Predicted	Park et al. (2004)
POAMA (Australia)	Nudging to the analyses from the Australian Community Climate and Earth System Simulator	30	Predicted (ACOM2 Ocean model based on GFDL Mon2)	Zhong et al. (2005)

4.2. 한반도 폭염지수(KHI)의 예측성 평가

200hPa 상대와도는 한반도 폭염의 발생을 예측할 수 있는 대규모 변수로 증명이 되었다. 따라서 우리는 앞서 제시된 KHI를 이용하여 한반도 폭염의 예측성을 평가하였다. KHI는 열원의 중심지역인 남중국해(25°N-30°N, 110°E-130°E)와 한반도 지역(35°N-45°N, 120°E-140°E)의 평균 200hPa Vorticity(VORT200)의 차이를 이용하여 정의하였다(식 3-5).

그림 4-1은 1983년부터 2005년까지 한반도 폭염의 발생빈도수(HWI)와 상층와도를 이용해 개발된 한반도 폭염지수(KHI)를 나타낸 것이다. KHI는 한반도 폭염의 경년 변동성을 매우 잘 표현하고 있으며, 상관계수는 0.83으로 매우 높다. 따라서 한반도 폭염발생의 경년 변동은 대부분 상층와도로 설명할 수 있다(그림 3-8).

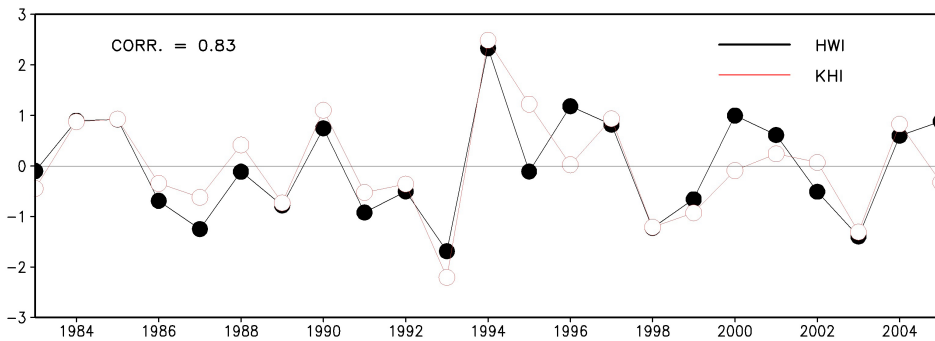


Figure 4-1. Time series of the normalized HWF and KHI from 1983 to 2005.

앞서 개발된 KHI를 이용하여, 한반도 폭염발생과 연관성이 큰 상층와도의 모의성능을 조사하였다(그림 4-2, 3). 그림 4-2는 한 달 선행시간에 대한 VORT200과 KHI의 공간상관 패턴을 나타낸 것이다. 관측에서 보면(그림 4-2 1) 한반도의 폭염발생은 동중국해에서 강한 양의 상층와도와 한반도 지역에서 음의 상층와도와 상관성이 크다. 폭염이 발생했을 경우 남북방향의 tripolar 구조를 보이고 있다. 이러한 패턴은 Nitta (1987)에 의해 제안된 Pacific-Japan(PJ) 패턴과 유사하다. 그러나 한반도 폭염패턴은 PJ 패턴에 비해 열원의 중심 지역(25N, 120E)이 약간 서쪽으로 치우쳐 있다. 40년 동안 한반도 폭염지수(KHI)와 PJ 지수와의 상관계수는 약 0.31로 유의하지 않다.

개별 모형의 예측 성능을 보면 선행시간에 관계없이 HMC와 JMA모형이 관측과 매우 유사한 삼극(tripolar) 구조를 모의하고 있다. HMC 모형에서 관측 KHI와 VORT200의 상관패턴은 남중국해에서 높은 양의 상관(약 0.45)을 가지며, 한반도 지역에서 강한 음의 상관패턴을 보인다. 그러나 전반적으로 대부분의 모형들이 한반도의 폭염 패턴을 모의하지 못하고 있다. 또한 APCC MME의 모의 성능은 개별 모형의 결과보다 예측성이 향상된 것을 볼 수 있다(그림 4-2 k). 그러나 열원의 중심이 관측에 비해 서쪽으로 많이 치우쳐 있으며, 강도 또한 약하다.

그림 4-3은 2달 선행 시간에 대한 KHI와 VORT200의 상관패턴을 나타낸 것이다. 한반도 폭염 패턴에 대한 예측성은 1달 선행시간의 패턴과 다르게, 거의 모든 모형에서 폭염패턴을 잘 모의하지 못하였지만, MME가 개별모형에 비해 한반도 폭염지수에 의한 원격상관 패턴을 잘 모의하였다.

한반도와 남중국해의 상층와도의 쌍극자 모드는 한반도 폭염을 예측하기 위한 중요한 패턴이다. 따라서 APCC MME와 개별 모형을 이용하여 한반도 폭염의 경년변동성의 예측 성능을 조사하기 위해서 KHI를 계산하였다. 그림 4-4는 관측 자료를 이용해서 계산된 KHI(검정)와 한 달 선행시간 자료를 이용해서 계산된 KHI(청색) 그리고 두 달 선행시간 자료를 이용해서 계산된 KHI(보라색)의 경년변동성을 나타낸 것이다. KHI의 경년변동성은 VORT200에서와 마찬가지로 HMC 모형이 가장 잘 모의하고 있으며, 상관계수는 약 0.49이다. 다음으로 JMA 모형이 상관계수 약 0.42로 우수한 예측성을 갖는다. 상관계수 0.4는 통계적으로 95% 유의한 수준이다. 그러나 POAMA의 경우는 예측성이 없었으며, NASA 모형의 경우에는 낮은 음의 상관성(-0.14)을 갖는다. 대부분의 개별 모형이 상관계수 0.3보다 작게 나타났다. MME의 예측성은 HMC와 JMA 모형을 제외한 다른 개별 모형보다는 예측성이 향상되었지만, 상관계수가 0.34로 통계적으로 유의하지 않다(표 4-2). Lead 2일 경우에도 HMC의 예측성이 가장 좋으며, 다음으로 MME가 좋은 예측성을 보였다. 그러나 모든 모형이 통계적으로 유의하지 않다.

현재 수준의 대기대순환 모형을 이용한 한반도 폭염의 예측성은 물리모수화과정 등의 이유로 충분히 높지 않다(권민호, 2013). 따라서 동아시아 여름철 폭염을 예측하기 위해서 KHI 지수를 직접 이용하는 방법은 모델 간의 bias와 지역성이 크기 때문에 예측성이 현저히

떨어진다. 그러므로 APCC MME를 이용하여 KHI 지수를 예측하는 것은 적합한 방법이 아니다. 따라서 우리는 APCC MME에 적합한 지수를 개발하여 한반도 폭염을 예측성을 평가할 것이다.

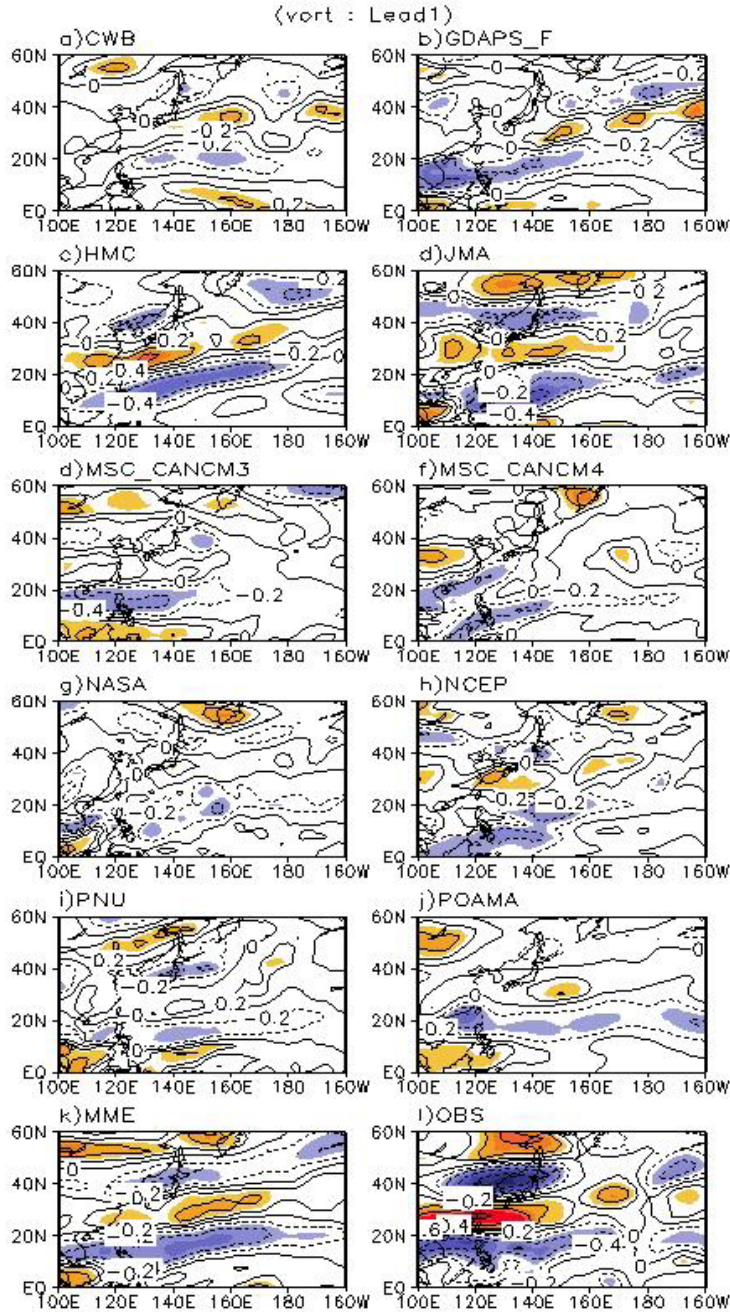


Figure 4-2. The spatial distribution of regressed JA 200hPa relative vorticity on the KHI for (a)-(j) individual model and (k) APCC MME hindcasts at 1-month lead (IC06) and (l) observation.

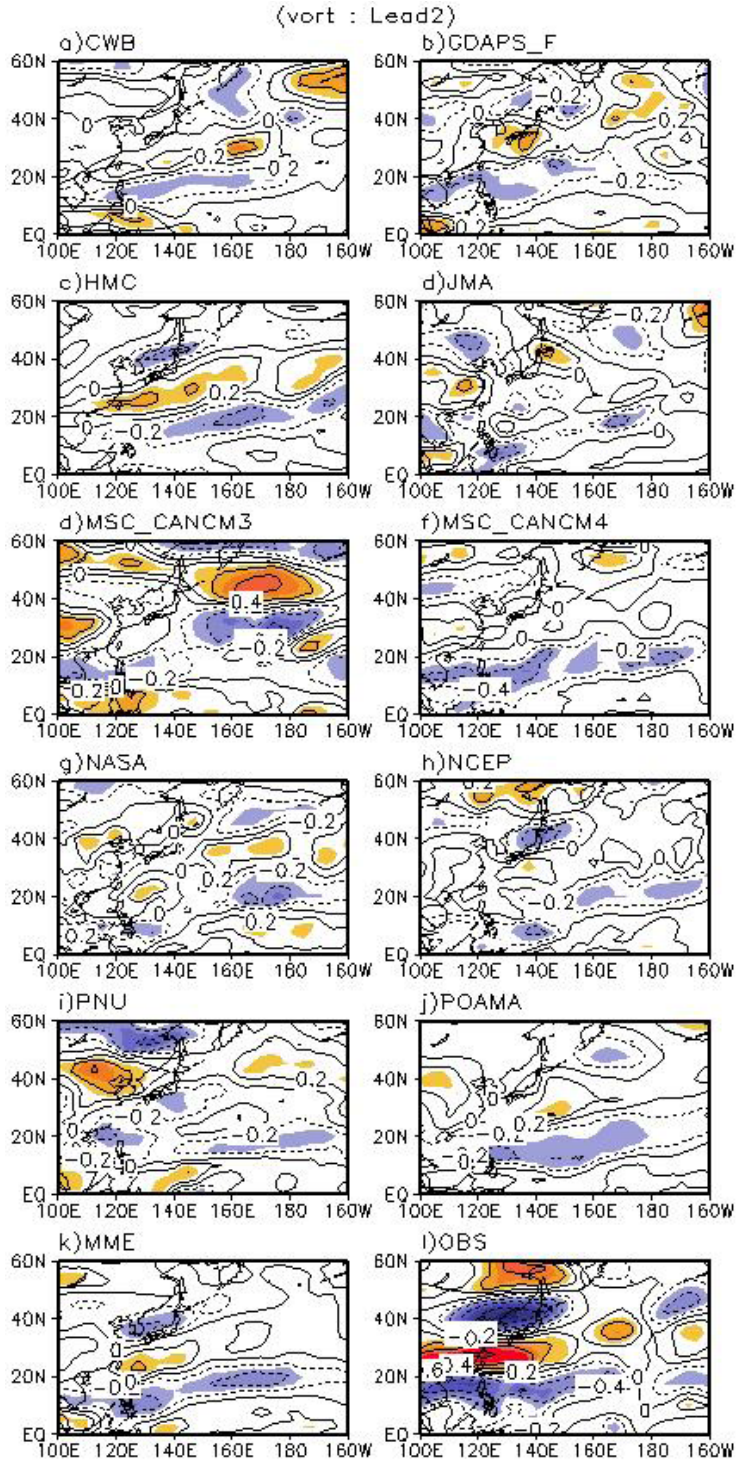


Figure 4-3. The spatial distribution of regressed JA 200hPa relative vorticity on the KHI for (a)-(j) individual model and (k) APCC MME hindcasts at 2-month lead (IC05) and (l) observation.

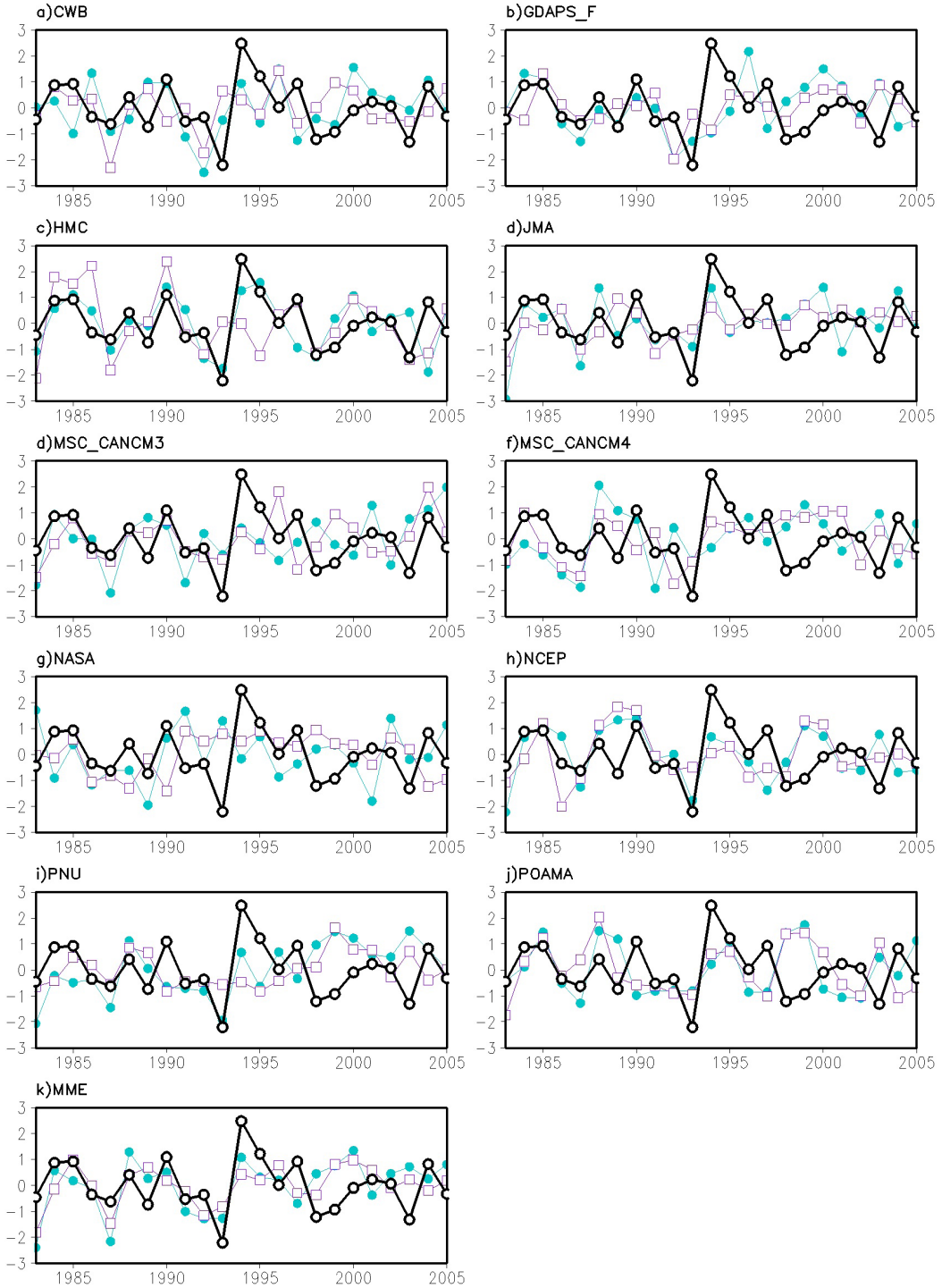


Figure 4-4. Time series of the normalized KHI from observation (black line), a) ~ j) individual models and k) APCC MME hindcast with May (1-month lead, blue line) and June (2-month lead, purple line) Initial Conditions.

Table 4-2. Correlations between the time series (1983-2005) of the observations and individual model and MME hindcasts for each lead time. * is denoted by 95% confidence level.

Model	Lead 1	Lead 2
CWB	0.21	-0.01
GDAPS_F	0.08	0.01
HMC	0.49*	0.32
JMA	0.42*	0.15
MSC_CANCM3	0.21	0.25
MSC_CANCM4	0.02	0.23
NASA	-0.14	-0.17
NCEP	0.29	0.22
PNU	0.12	-0.25
POAMA	0.00	0.06
MME	0.34	0.30

4.3. APCC MME에 적합한 폭염 지수 개발 및 평가

4.3.1. APCC MME의 예측 성능

한반도 폭염의 발생은 남중국해의 대류활동과 상층 순환장이 중요한 영향을 미친다는 사실은 3장에서 보고되었다. 따라서 이 연구에서는 MME자료를 이용하여 남중국해의 대류 활동과 한반도 폭염발생과의 연관성을 분석하고, 상층 순환장의 경년변동성을 조사할 것이다. 한반도 폭염의 빈도수 예측을 위해 우리는 먼저 대규모 대기변수(T2m, Vorticity at 200hPa, Z500, SLP)에 대한 APCC MME hindcast 자료의 예측 능력을 분석하였다.

MME hindcast 자료와 관측 자료와의 상관계수에 대한 통계적 유의성을 계산하기 위하여 스튜던트 t 검증법(Two-tailed Student's t test)을 사용하였다(Wiiks 1995; Spiegel and Stephens 2008). 사용된 자료가 25년이므로, 자유도(degree of freedom)는 N-2로 23이며, 90%이상 유의한 상관계수는 약 0.35이다.

한반도 폭염과 직접적으로 연관된 기온에 대한 예측성을 보기위해서, 1983년부터 2005년까지 동아시아지역(100°E~160°E, 10°N~60°N)에 대한 10개의 개별모델과 MME 결과에 대한 T2m의 아노말리 상관계수(Anomaly Correlation Coefficient : ACC)를 분석하였다(그림 4-5, 그림 4-6).

전반적으로 대부분의 모형들이 선행시간에 관계없이 육지의 예측성이 해양에 비해 비교적 낮은 결과를 보이고 있으나, MME의 결과에서 예측성이 향상된 것을 볼 수 있다. 동아시아 전체에 대한 T2m의 예측성은 다른 모델에 비해 NCEP과 JMA가 우수하며, MME는 Lead 1과 Lead 2의 상관계수는 모두 0.5 이상이다(그림 4-7).

한반도는 다른 지역에 비해 예측성이 상당히 낮으며, CWB 모형의 상관계수는 비록 0.22로 작지만 다른 모형들에 비해 예측성은 가장 높다. 그러나 MME는 한반도에서 0의 값을 갖는다. 따라서 한반도 지역의 기온은 예측성이 거의 없는 것으로 나타났으며, 기온자료를 직접 한반도 폭염 예측에 사용하는 것은 불가능하다는 것을 발견하였다.

그림 4-8c는 관측과 Lead 1 APCC MME hindcast 850hPa 기온의 ACC 공간분포를 나타낸 것이다. MME 850hPa 기온은 중국 내륙지역에서 가장 높은 예측성을 보이며, 한반도에서는 T2m과 같이 예측성이 거의 없다. SLP와 500hPa 지위고도의 상관 맵은 매우 유사한 분포를 보이며, 위도 20°N 이남 지역에서 높은 예측성을 보인다(그림 4-8 d,e). 특히 500hPa 지위고도 MME의 경우 한반도 주변을 제외한 해양지역에서 신뢰수준 90%에서 통계적으로 의미 있는 0.4 이상을 상회하고 있다. 하지만, 다른 변수들과 달리 200hPa 상대와도의 경우 다소 성능이 떨어지는 경향을 보인다(그림 4-8f).

이러한 특성은 두 달 선행시간을 갖는 변수에서도 유사하게 나타난다(표 4-3). MME에 대한 지역 평균된 ACC값을 보면 동아시아지역과 한반도 모두 선행시간에 관계없이 거의 유사하며, 동아시아지역은 강수량과 상층와도를 제외한 모든 변수에서 신뢰수준 95%에서 통계적으로 유의한 0.4이상의 값을 갖는다. 동아시아지역에서 MME의 평균 ACC값은 500hPa 지위고도가 약 0.6으로 가장 우수한 예측성을 보이며, T2m, SLP, T850, PREC 순으로 예측성이 좋다. 한반도 지역에서 MME 평균 ACC값은 200hPa 와도가 가장 우수하며, 다음으로 500hPa 지위고도, 강수량이다. 그러나 한반도에 대한 ACC 값은 통계적으로 유의하지 않다.

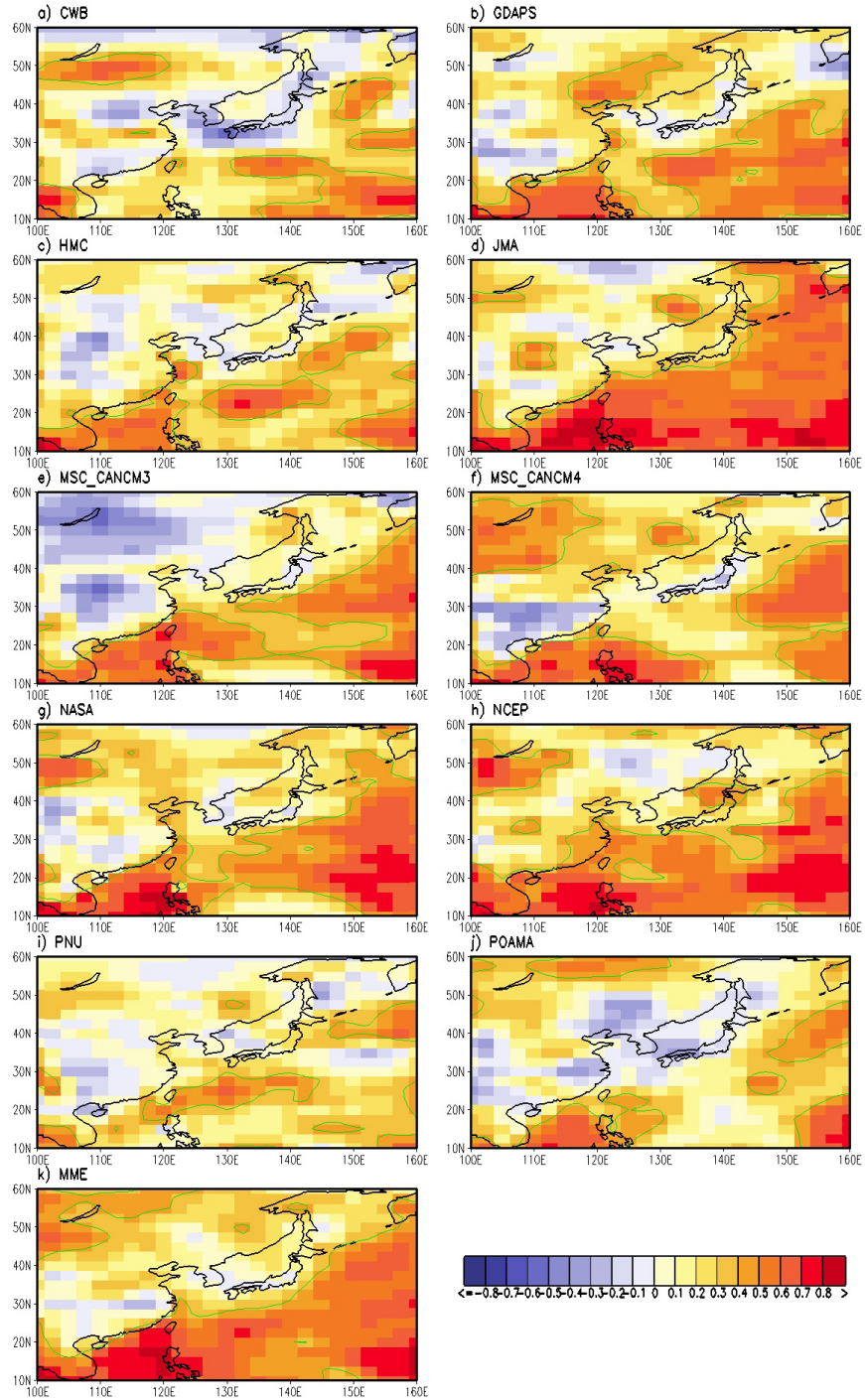


Figure 4-5. Anomaly correlation coefficients between the observed 2m surface temperature (T2m, °C) and (a)-(j) individual model and (k) APCC MME hindcasts of JA T2m at 1-month lead(IC06) over the period 1983-2005(23years). The green line depicts the region of significant correlation (0.352) at the 90% confidence level from a two-tailed Student's t test.

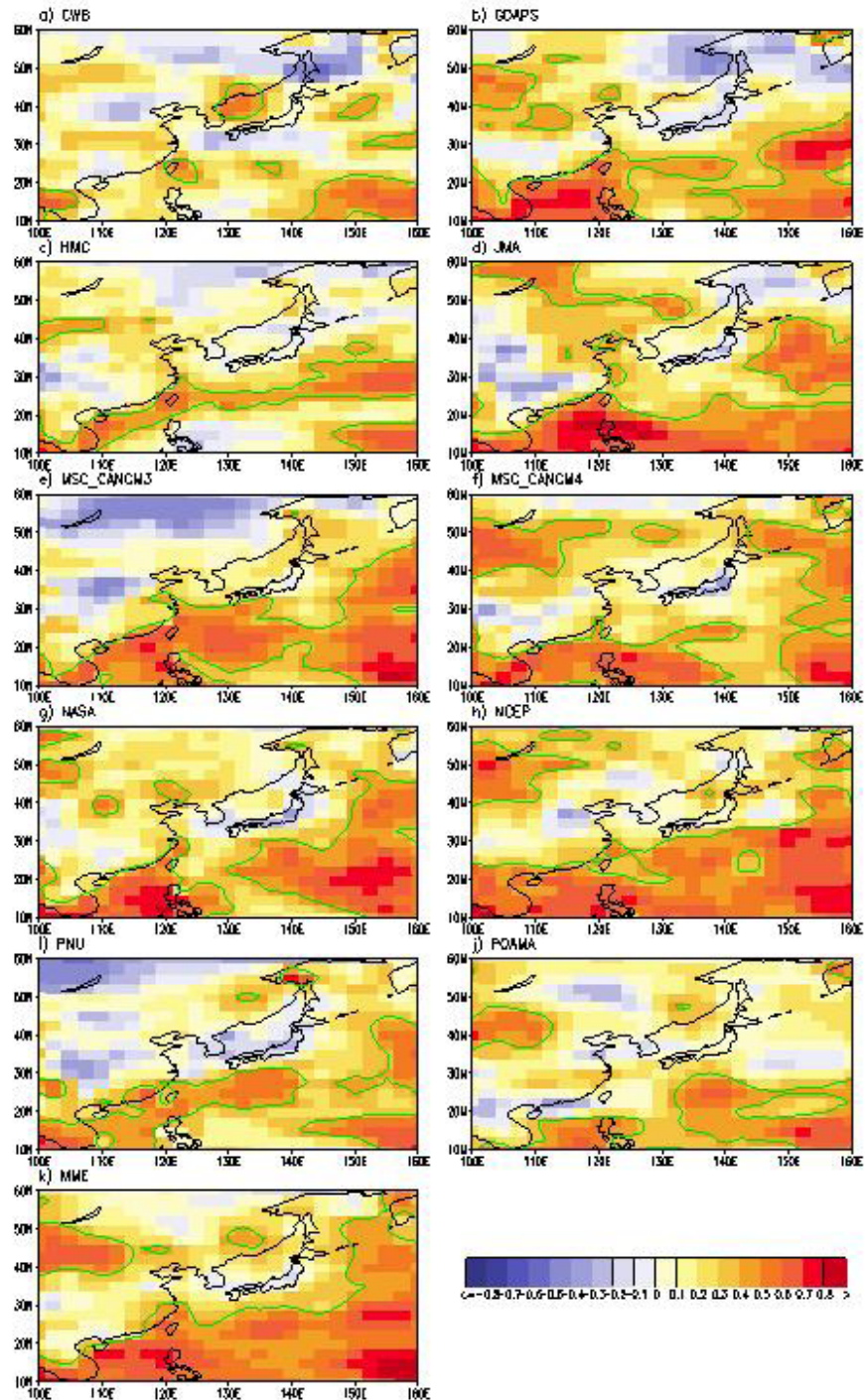


Figure 4-6. Anomaly correlation coefficients between the observed 2m surface temperature (T2m, °C) and (a)-(j) individual model and (k) APCC MME hindcasts of JA T2m at 2-month lead (IC05) over the period 1983-2005 (23 years). The green line depicts the region of significant correlation (0.352) at the 90% confidence level from a two-tailed Student's t test.

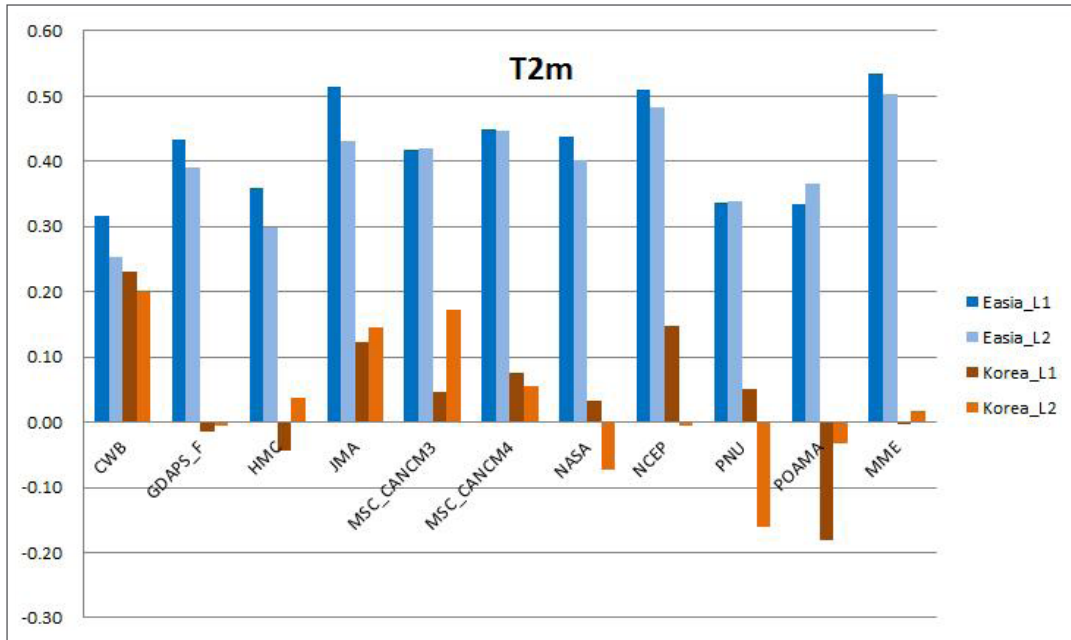


Figure 4-7. Area averaged Anomaly Correlation Coefficient between the observed and predicted surface 2m temperature (T2m) over East Asia(blue color) and Korea (red color) from individual model and MME.

Table 4-3. Area averaged Anomaly Correlation Coefficient between the observed and predicted surface 2m temperature (T2m), Temperature at 850hPa(T850), sea level pressure (SLP), Geopotential Height at 500 hPa (Z500), and vorticity at 200hPa (Vort200) over East Asia and Korea from individual model and MME.

ACC	Easia		Korea	
	Lead 1	Lead 2	Lead 1	Lead 2
T2m	0.54	0.50	0.00	0.02
PRCP	0.32	0.30	0.20	0.15
T850	0.39	0.38	0.09	0.17
SLP	0.51	0.46	0.06	-0.06
Z500	0.62	0.59	0.21	0.22
Vort200	0.26	0.22	0.26	0.20

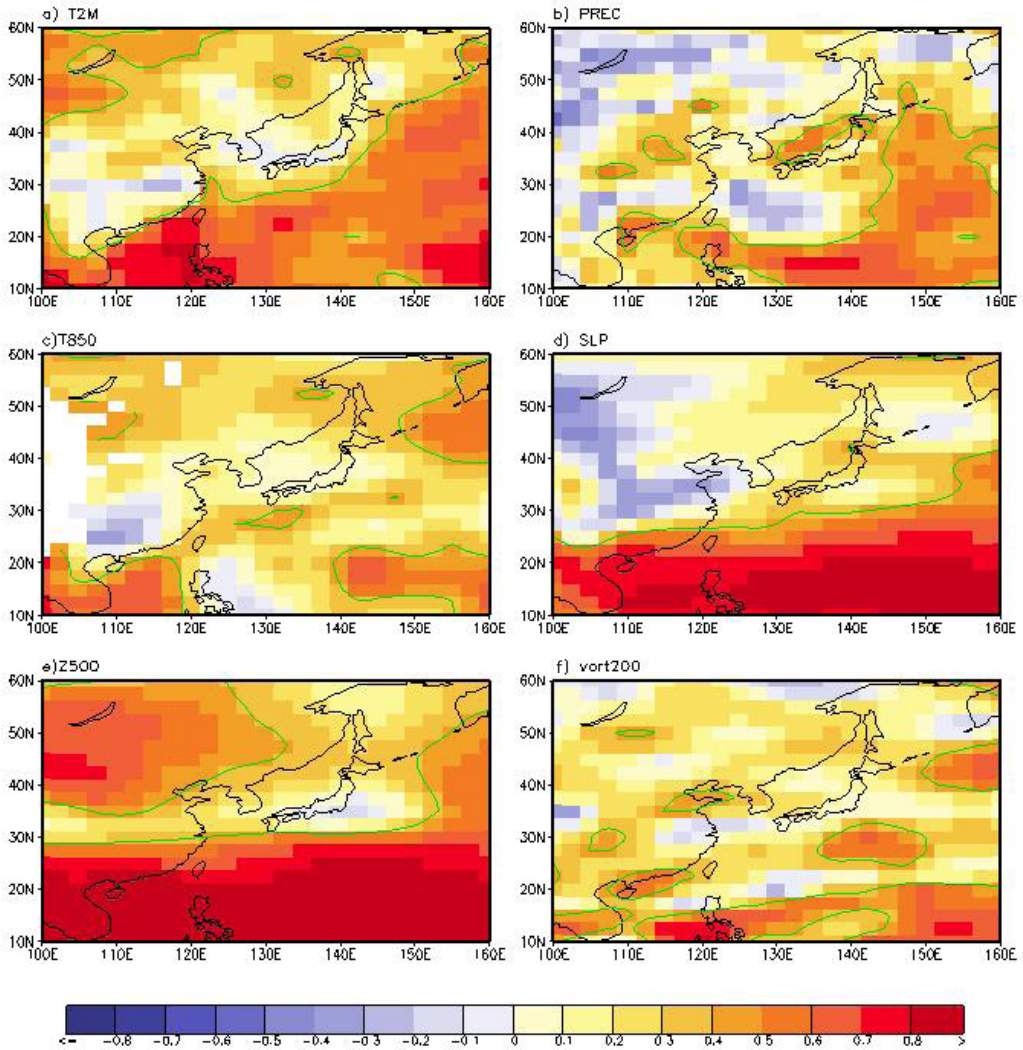


Figure 4-8. Anomaly correlation coefficients between the observed and APCC MME hindcast JA (a) T2m, (b) prec, (c) T850, (d) SLP, (e) Z500, and (f) vort200 at 1-month lead time(IC06) over the 23 years period 1983-2005. The green line depicts the region of significant correlation (0.352) at the 90% confidence level from a two-tailed Student's t test.

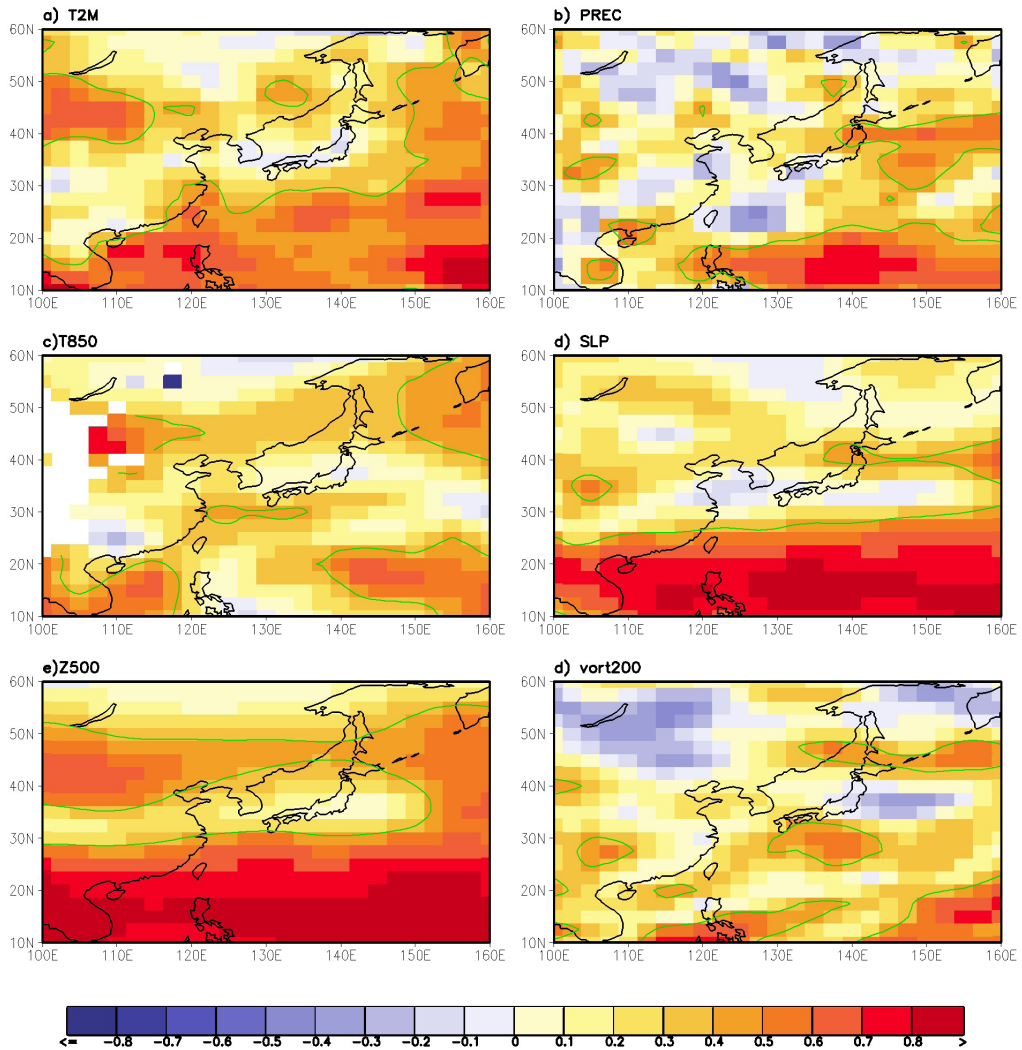


Figure 4-9. Anomaly correlation coefficients between the observed and APCC MME hindcast JA (a) T2m, (b) prec, (c) T850, (d) SLP, (e) Z500, and (f) vort200 at 2-month lead time(IC05) over the 23 years period 1983-2005. The green line depicts the region of significant correlation (0.352) at the 90% confidence level from a two-tailed Student's t test.

4.3.2. 폭염지수의 개발과 예측성 평가

APCC 모형에 적합한 폭염 지수를 개발하기 위해서, MME에서 제공되는 변수들에 대한 EOF 분석을 실시하였다. 동아시아 지역의 변동성을 이용하여, 한반도 폭염의 예측성을 조사하였다. 동아시아 대기 장의 시·공간적 분포의 모의 성능을 평가하기 위해서, 먼저 관측 변수의 경험적 직교함수(Empirical Orthogonal Function: EOF)분석을 하였다. EOF 분석을 통해 동아시아 지역에서 발생하는 7,8월의 주요 변동 특성을 조사하고, 한반도 폭염 발생과의 연관성을 분석하였다.

그림 4-10의 a~h는 관측된 VORT200, Z500, SLP, PREC에 대한 EOF 첫 번째 모드의 공간 패턴과 주성분(Principal component: PC)시계열을 나타내며, 그림 4-10의 i와 j는 T2m에 대한 EOF 두 번째 모드의 공간 분포와 PC2를 나타내고 있다. VORT200의 첫 번째 모드의 변동성은 전체 변동성에 약 20.2%를 설명하고 있으며, 남북방향의 삼극 모드(tripolar mode) 구조를 보이고 있다. 이 삼극모드의 중심은 필리핀 해 부근($10^{\circ}-15^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}-130^{\circ}\text{N}$)과 남중국해(양의 모드) 그리고 한반도(음의모드)에 자리 잡고 있다. 이러한 삼극모드는 한반도 폭염 패턴과 매우 유사하며(그림 4-10b), HWF와 PC1 상관계수는 약 0.83으로 매우 높다(표 4-4).

Z500은 일본과 서태평양에 중심을 갖는 남북모드를 보이며, 전체 변동의 약 43%를 설명한다. 한반도 폭염지수와 상관계수는 약 0.6이다. 그러나 Z500 패턴은 한반도 폭염 패턴보다 동쪽으로 치우친 모습을 보인다. SLP는 Z500과 유사하게 일본에 고기압이 존재하고, 그 외 지역은 저기압의 분포를 보인다. 일본에 고기압의 중심이 위치하기 때문에, 남서 기류에 의한 수증기 수송이 어려워져 한반도는 건조하고 덥게 된다. 관측의 HWF와 SLP PC1의 상관계수는 0.47으로 5개 변수 중 가장 낮다. 강수 패턴은 30°N 을 중심으로 남쪽은 양의 모드를 북쪽은 음의 모드를 나타내고 있으며, 이에 상응하여 2m 기온은 한반도에서 양의 모드를 보인다. 이러한 상태로 인해 한반도는 건조하고, 기온이 높게 나타난다(그림 4-10g, i). 강수량의 PC1과 KHI의 상관계수는 0.6이며, 2m 기온은 0.72로 VORT200 다음으로 높다. 모든 변수의 PC는 준 4-5년 주기의 변동성을 보이는 것을 발견할 수 있었다. 이러한 주기성은 동아시아 몬순지수에서도 나타나고 있다(Lee et al., 2013).

Table 4-4. Correlation coefficients between PC time series and HWF

	VORT200	Z500	SLP	PREC	T2m
CORR	0.85	0.61	0.47	0.60	0.72

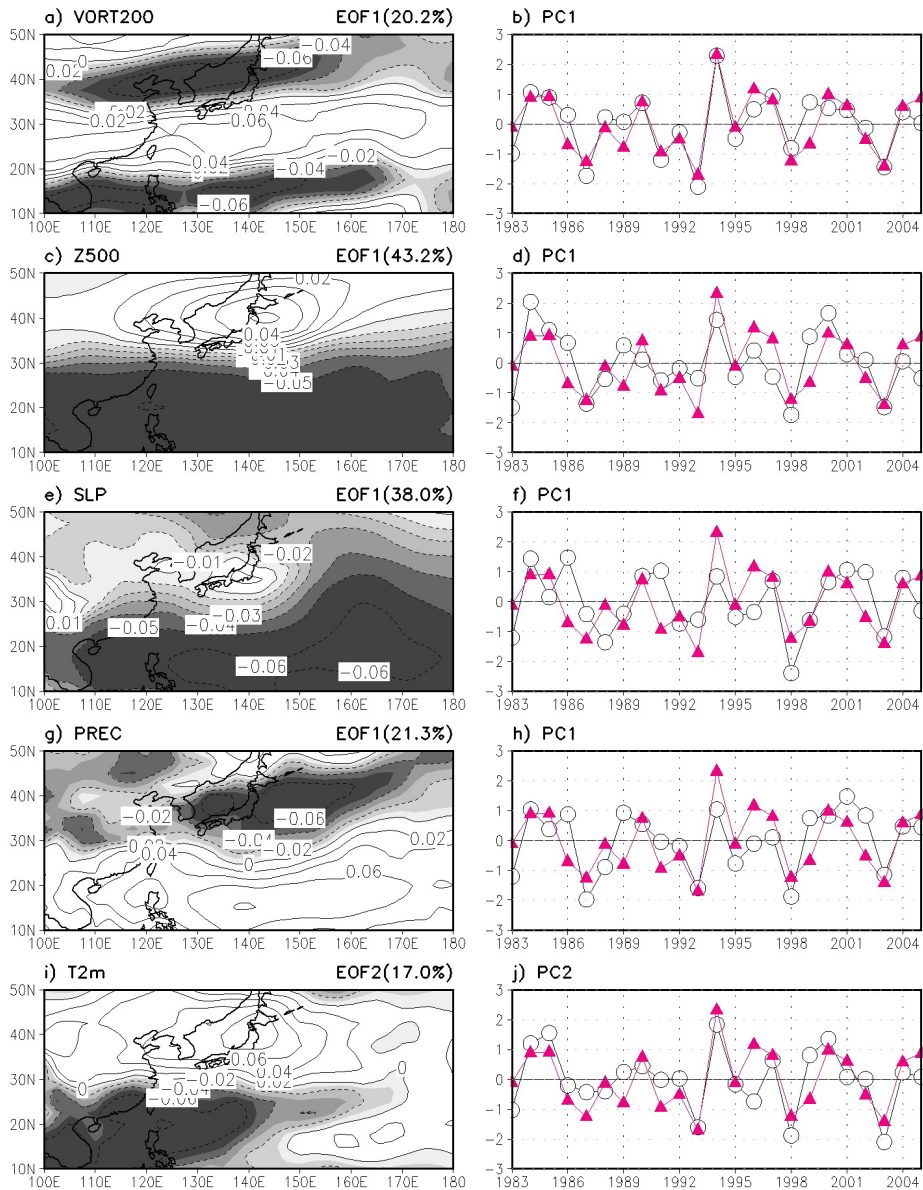


Figure 4-10. Spatial pattern of the first empirical orthogonal function (EOF1) for observed a) VORT200, c) Z500, e) SLP, and g) PREC, i) T2m, respectively. The PC time series of b) VORT200, d) Z500, f) SLP, and h) PREC, j) T2m, respectively. The red line indicates observed HWF.

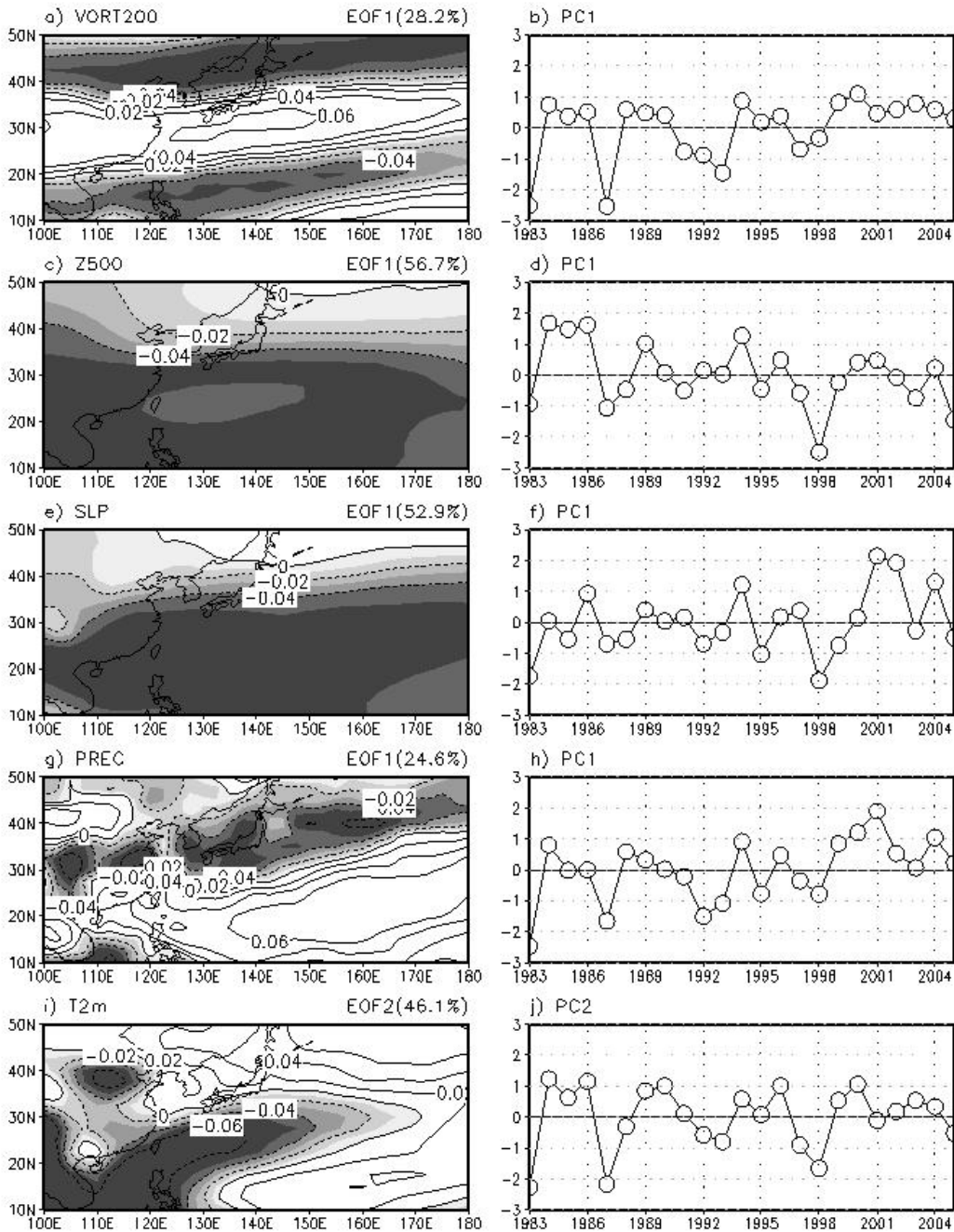


Figure 4-11. Spatial pattern of the empirical orthogonal function (EOF) for APCC MME a) VORT200, c)Z500, e) SLP, and g) PREC, i) T2m, respectively. The PC time series of b) VORT200, d)Z500, f) SLP, and h) PREC. j) T2m, respectively.

동아시아 여름철(7,8월) 평균 분포는 한반도 폭염의 패턴과 매우 유사하지만, VORT200을 제외한 다른 변수들은 중심 위치가 동쪽으로 이동된 모습을 보인다. 따라서 한반도 폭염을 제일 잘 모의하는 VORT200의 PC1을 이용하여 폭염의 예측성을 살펴보았다.

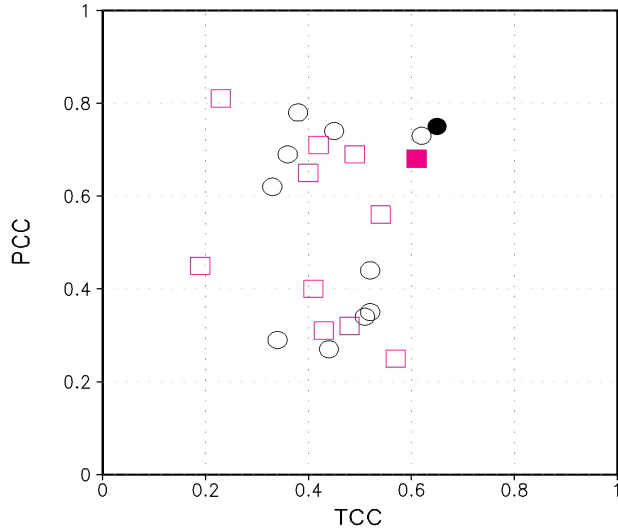


Figure 4-12. Scatter diagram between the spatial correlation skills and temporal correlation skills for VORT200 derived from the individual model(open mark) and MME(closed mark) predictions with IC5(black circle) and IC6(red square).

Table 4-5. Correlation coefficient between the observation and MME for VORT200, Z500, SLP, PREC and T2m.

	Lead 1		Lead 2	
	PCORR	TCORR	PCORR	TCORR
VORT200	0.75	0.65	0.68	0.61
Z500	0.86	0.84	0.68	0.78
SLP	0.61	0.77	0.66	0.71
PREC	0.80	0.75	0.81	0.76
T2m	0.58	0.48	0.51	0.44

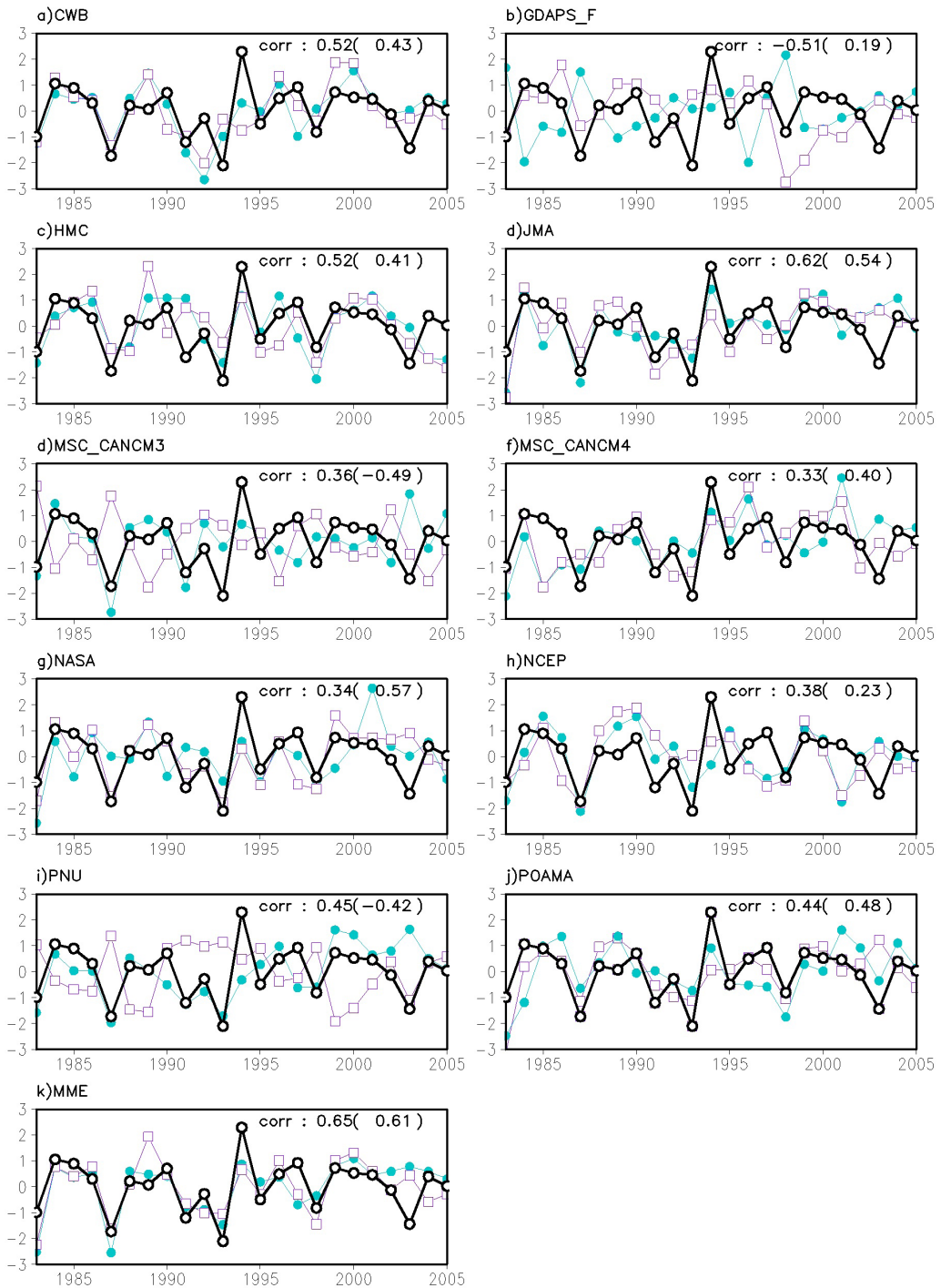


Figure 4-13. Time series of the VORT200 PC1 from observation (black line), a)~j) individual models and k) APCC MME hindcast with May(1-month lead, blue line) and June(2-month lead, purple line) Initial Conditions. The number in the right corners indicate correlation skill for Lead1 (Lead2).

동아시아 지역의 7,8월 대기변수에 대한 APCC MME의 예측성능을 평가하기 위해서, 동아시아지역에 대한 EOF분석을 실행하였다. EOF 분석을 통해 MME가 관측의 주요 변동성을 얼마나 잘 모의하는 지 조사하였다.

그림 4-11의 a~h는 VORT200, Z500, SLP, PREC의 MME 대한 EOF 첫 번째 모드의 공간 패턴과 PC1의 시계열을 나타내며, 그림 4-11의 i와 j는 T2m의 MME에 대한 EOF 두 번째 모드의 공간 분포와 PC2를 나타내고 있다. VORT200의 첫 번째 모드의 변동성은 전체 변동성에 약 28.2%를 설명하고 있으며, 관측과 유사하게 동서방향의 삼극 모드(tripolar mode)구조를 보이고 있다. 그러나 삼극 모드의 중심 위치는 관측과 비교해서 북쪽으로 치우친 모습을 보인다. VORT200에 대한 관측 PC1과 MME PC1의 상관계수는 Lead 1일 때 약 0.65이고 Lead 2일 때는 약 0.62이다(표 4-5). 그러나 관측 HWF와 PC1의 상관계수는 약 0.43으로 상대적으로 낮은 편이다(표 4-6).

Z500의 EOF1의 공간분포는 동아시아 전 지역의 같은 부호를 가지고 있으며, 전체 변동의 약 56.7%를 보인다. MME Z500의 EOF1은 관측의 EOF1 높은 상관성을 보인다. 패턴 상관계수는 약 0.86이고 시간 상관계수는 약 0.84로서 모든 변수 중 가장 높게 나타난다. 그러나 Z500 EOF1에서는 한반도 폭염과 연관된 남북 쌍극자 모드가 나타나지 않으며, PC1은 시간에 따라 감소하는 경향을 보인다. 또한 PC1과 관측 HWF의 상관성은 약 0.43이다.

SLP EOF1은 Z500의 EOF1의 패턴과 매우 유사하며, 전체변동성의 약 52.9%를 설명하고 있다. 그러나 SLP PC1은 1998년 이후 변동성이 커지는 모습을 보인다. SLP PC1과 HWI의 상관성은 0.34로 변수들 중에 가장 낮다. 강수량(PREC)의 경우는 폭염과 연관해서 한반도에 건조한 패턴을 보이며, 관측의 EOF1 공간패턴과 같이 남북의 쌍극자 패턴을 잘 모의한다. 쌍극 모드중 북쪽의 중심이 한반도에 위치하는 것을 알 수 있다.

Lead 1의 경우, 관측 EOF1과의 공간상관성은 약 0.80으로 매우 높으며, PC1의 상관계수도 0.77이다. 또한 HWF와 MME PREC PC1의 상관계수는 0.48이며, 모든 변수 중 가장 높다. T2m EOF1의 공간분포의 상관성은 약 0.58이며, PC1의 상관계수는 0.48로 변수 중 가장 낮다. HWF와의 상관성도 약 0.38로 SLP보다는 높지만 다른 변수에 비해 낮은 편이다.

Table 4-6. Temporal correlation between the principal component time series of the EOF for the MME VORT200, Z500, SLP, PREC and T2m.

	VORT200	Z500	SLP	PREC	T2m
Lead 1	0.43	0.43	0.34	0.48	0.38
Lead 2	0.37	0.33	0.38	0.38	0.39

MME변수의 EOF분석 결과를 보면 VORT200과 PREC의 EOF1 공간 패턴이 한반도 폭염패턴을 가장 잘 모의 하였다. 비록 관측의 EOF패턴과의 공간 상관성은 Z500보다 낮지만, 0.75와 0.80으로 높은 상관성을 보였다. Lead 1의 PREC PC1은 HWI와의 상관 계수가 0.48로 한반도 폭염을 전망하는 예측인자로서의 가능성을 보였다. 그러나 Z500은 관측과 MME의 EOF1에서도 한반도 폭염 패턴의 중심지역을 잘 모의 하지 못하였지만, VORT200은 관측과 MME에서 한반도와 남중국해에 중심을 갖는 쌍극자 모드를 잘 모의하였다. 따라서 우리는 MME의 예측성을 향상시키기 위해 VORT200의 개별 모델의 모의성능에 대해 자세히 살펴보았다.

그림 4-12는 관측과 예측의 VORT200의 공간 상관관계 (Pattern Correlation Coefficient; PCC)와 시간상관관계의 분포를 한눈에 살펴보기 위해 산포도 (scatter diagram)를 나타낸 것이다. 또한 Lead 1과 Lead2의 VORT200을 같이 분석하였으며, 그 결과 개별 모델 및 MME 예측에 있어 성능의 확연한 차이가 나타남을 알 수 있었다. 그리고 MME 결과의 비교를 보면, Lead 1과 Lead 2의 차이는 거의 없지만, Lead 1에서 더 나은 예측성능을 보였다.

개별 모델에 대한 예측성을 상세히 알아보기 위해, 관측과 모델의 PC 시간계수를 그려보았다. 그림 4-13은 개별모델의 VORT200에 대한 Lead1(청색실선) 과 Lead2(보라색 실선)의 PC1과 관측 VORT200 PC1(검정색 실선)을 나타낸 것이다. 전반적인 PC의 경년변동성은 관측과 개별 모델들 그리고 MME 예측결과가 유사하게 분포하고 있으며, TCC 결과를 보면 MME 예측결과가 개별 모델들이 에 비해 다소 높은 경향을 보이고 있다. TCC의 결과를 보면, 대부분의 모델들 및 MME 예측결과들에서 Lead 1이 Lead 2에 비해 다소

높은 경향을 보이고 있다. Lead 1의 경우 개별모델의 상관계수는 JMA가 0.62로 가장 높은 성능을 보였고 CWB, GDAPS_F, 그리고 HMC는 0.5 이상이며, PNU와 POAMA는 약 0.45이다. Lead 2의 경우에는 Lead 1과 다르게 NASA의 예측성이 가장 높고, 다음으로 JMA, POAMA 순이다. MSC_CANCM3의 경우 Lead 1에서 0.36정도이며, Lead2에서 -0.49였으며, MSC_CANCM4의 경우 Lead 1의 경우 0.33정도로 관측과 상관성이 매우 낮게 나타났다.

한반도 폭염 빈도수의 예측성을 향상시키기 위해서, 우리는 TCC 0.5이상의 4개 모델을 선택하여 EOF 분석을 하였다. 상관계수 0.5는 2% 유의수준에서 통계적으로 유의성이 인정되었다. 선택된 4개의 모형은 JMA(0.62), HMC(0.52), CWB(0.52), GDAPS(0.51)이다. 그림 4-14는 선택된 4개 모형의 MME EOF PC1(붉은실선)과 HWF의 경년변동성을 나타낸 것이다. 예측된 폭염 발생빈도수(PC1)는 관측의 준 4-5년 변동주기를 잘 모의하였으며, 상관계수는 약 0.5로 모델을 선택하지 않은 경우($r=0.43$)보다 0.7 이상의 성능 향상을 보이고 있다. 따라서 한반도 폭염의 빈도수를 예측하는데, 4개 모형 MME의 PC1이 효율적으로 이용될 수 있다.

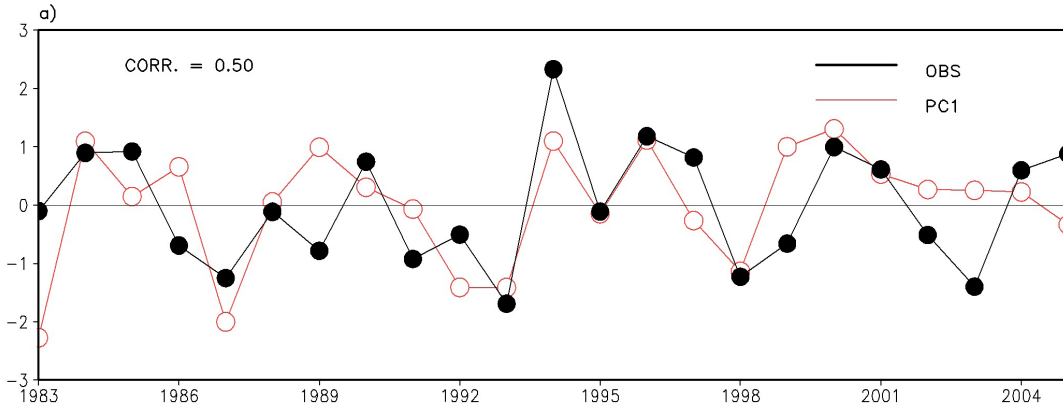


Figure 4-14. Time series of the normalized HWF and PC1 from 1983 to 2005.

4.4. 요약

현재 수준의 대기대순환모형을 이용한 동아시아 지역의 극한 기온에 대한 예측률은 물리모수화과정 등의 이유로 충분히 높지 않기 때문에, 한반도 여름철 폭염빈도수 예측하는데 한반도 지역의 기온보다는 폭염을 설명할 수 있는 대기순환 패턴이 이용될 수 있다. 특히, 대기대순환모형에서 예측된 상층 와도장의 변동성을 이용한다면, 한반도 여름철 폭염 발생을 더 정확히 예측할 수 있다. 한반도 폭염의 기작(mechanism)은 남중국해-한반도 결합 모드로 설명할 수 있다(제 3장). 또한 대기대순환 모형은 물론 대기-해양 결합 대순환모형에서도 상층 와도의 변동성은 잘 모의된다. 한반도 폭염 지수 즉, KHI는 한반도 폭염 발생 빈도(HWF)와 0.83의 상관성을 가지고 있다. 그러나 KHI지수는 모형들이 남중국해와 한반도 지역을 잘 모의해야만 예측성이 높게 나오지만, 대부분의 모형들이 한반도 폭염과 연관된 패턴을 정확히 모의하지는 못하였다. 그러나 동아시아 지역에서 중심 위치는 다르지만 VORT200의 변동성은 잘 모의하였다.

따라서 본 연구에서는 대기대순환모형/해양대기 결합모형에서 예측된 KHI를 사용하기에는 예측성이 너무 낮아, 동아시아 전체의 변동성을 고려한 VORT200의 시·공간 패턴을 이용하여 한반도 폭염의 예측성을 평가하였다. 먼저, 우리는 10개의 개별 모형 중 관측의 VORT200을 잘 모의하는 4개 모형을 선택하였다. 다음으로, 선택된 4개 모형의 MME VORT200을 이용하여 EOF분석을 하였고, PC1을 이용하여 예측성을 평가하였다. 선택된 4개 모형의 MME를 사용할 경우 예측성은 상관 계수 0.5로서, 10개 모형 MME를 이용하였을 때보다 향상되었다. 상관계수 0.5는 통계적으로 98%에서 유의한 값이다. 따라서 선택된 모형의 PC1이 한반도 폭염을 예측하는 데 효율적으로 이용될 수 있으며, 극한 기온에 대해 비교적 높은 예측성을 가지고 있다.

향후 KHI와 더불어 한반도 폭염에 영향을 주는 요인을 추가적으로 조사한다면 한반도 폭염을 더욱 정확히 예측할 수 있다. 계절 시간 규모에서 우리나라의 여름철 폭염을 정확하게 예측하기 위해서는 동아시아 여름몬순변동성의 지배역학을 이해하기 위하여 더 많은 연구가 이루어져야 될 것이다.

5. 한반도 폭염의 시중 예측성 연구: 2013년 사례

기후변화로 인해 세계 곳곳에서 이상 기상 현상이 빈번히 발생하고 있으며, 전 지구적 기온 상승에 따라 여름철 폭염의 발생빈도가 높아지고, 강도는 커지며, 지속시간이 길어지고 있으며, 이러한 경향은 21세기에 대부분의 지역에서 지속될 것으로 예측되고 있다(Meehl and Tebaldi, 2004).

2013년 유럽에서 발생한 폭염으로 인해 프랑스·영국·스위스 등에서 35,000여 명의 사망자가 발생하였으며, 130억 달러 이상의 피해를 초래한 것으로 알려져 있다. 2010년 러시아에서는 일 최고 기온이 30°C가 넘는 날이 33일 동안 지속되는 극심한 폭염으로 산불과 가뭄을 유발하는 등 경제적으로 약 150억 달러의 피해가 발생하였다(Alexander, 2011).

Kim et al.(2008)과 Alexandre et al.(2012)은 이상 기상 현상의 발생에 대한 기상학적 원인을 찾고 폭염 예측 기술의 향상을 위해서는 보다 큰 규모에서 일어나는 대기 순환 과정에 대한 이해가 선행되어야 한다고 언급한 바 있다. Lee (2013)는 1973~2012년까지의 40년 동안의 한반도 폭염의 변동성과 관련 메커니즘 분석을 통해 한반도 폭염 역시 여름철 동아시아 지역의 대기 순환과 밀접한 연관이 있음을 밝혔다.

최근 World Meteorological Organization (WMO)에서는 The Observing system Research and Predictability EXperiment (THORPEX) 사업을 통해 1일에서 2주 규모로 발생하는 위험기상의 예측정확도 향상을 위한 다중모델 앙상블 예측시스템을 개발하고 수행하는 THORPEX Interactive Grand Global Ensemble (TIGGE)연구를 진행 중에 있다. 그러나 아직까지 국내 폭염 사례에 대해 수치모델을 이용하여 폭염 발생 예측성을 다룬 연구는 매우 부족한 실정이며, 더욱이 앙상블 예측 시스템을 이용한 폭염 예측성을 비교하고 분석한 연구는 찾아보기 어렵다.

따라서 본 연구에서는 2013년 한반도 폭염이 발생하였을 때 동아시아지역에서 나타나는 대기 순환 패턴을 분석하고자 한다. 또한, TIGGE(THORPEX Interactive Grand Global Ensemble) 앙상블 자료를 이용하여 한반도 폭염의 시중 예측 가능성을 동아시아 지역의 대기 순환 패턴을 적용하여 3장에서 개발된 Korea Heatwave Index (KHI)를 통해 평가하고자 한다.

5.1. 모형 자료 및 검증방법

수치예보는 바람, 기온 등과 같은 기상요소의 시간변화를 나타내는 물리방정식을 컴퓨터로 풀어 미래의 대기 상태를 예측하는 방법이다. 그러나 수치모형은 운동방정식, 정역학 방정식, 연속방정식 등을 포함한 많은 방정식들로 이루어져 있기 때문에, 자연 현상을 완벽하게 재현하지는 못한다. 또한 관측 자료의 부족이나 관측의 에러 등으로 모형의 초기 장에는 이미 오차를 내포하고 있다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여, 관측 자료의 품질을 개선하고, 모형내의 역학 및 물리과정을 개선하여 모형의 오차를 줄일 수는 있지만, 수치모형의 초기 조건의 불확실성으로 인한 한계는 극복하기 어렵다. 최근 들어, 단일 수치 모형의 초기조건, 경계조건과 모형에 내재되어 있는 불확실성으로 인한 오차를 줄이고, 예측 수준을 향상시키기 위한 방안중의 하나로 많이 활용되고 있는 것이 앙상블 방법이다. 앙상블 예보란 서로 다른 초기장을 사용하여 다수의 수치예보 모형의 적분결과를 분석 및 통합하여 예보하는 방식을 말한다(황윤정 등 2012).

단일 예보는 결정론적 예측만 할 수 있지만, 앙상블 예보는 확률밀도 함수(Probability Density Function, PDF)를 이용하여 확률 예보가 가능하다. 따라서 주로 중기 예측에 활용되며, 특히 폭염, 집중호우, 태풍등의 극한 기상 현상을 예측하는 데 유용하다. 또한, 단일 예보에 비해 앙상블 평균의 예보가 더 일관된 예측성을 보이는 특징이 있어, 현재 많은 현업기관에서 앙상블 예보를 수행하고 있다(Buizza, 2008). 앙상블 예보의 예측정확도는 앙상블 멤버의 수가 많을수록 예측성이 좋은 것으로 알려져 있지만, 앙상블 멤버 수를 늘리면 컴퓨팅 시간과 비용이 증가하게 된다. 따라서 예보의 불확실성을 고려해 볼 때, 각 현업기관의 앙상블 자료사용하는 것은 저 비용으로도 예측성능을 향상시킬 수 있는 효과적인 방법이다(황윤정 등, 2012). 다시말해서, 각각의 단일 모형을 조합한 앙상블 또는 다른 예측 시스템 간의 모델들을 조합하는 다중모형 앙상블을 이용하는 것이 효율적이다. MSC(Meteorological Service of Canada)와 NWS(U.S National Weather Service)의 협력을 통해 이러한 다중 모형 앙상블 예측시스템이 구축되었다. NAEFS (North American Ensemble Forecast System) 사업을 통해서 NCEP (National Centers of Environmental Prediction)과 CMC (Canadian Meteorological Centre) 앙상블 모델을 이용하여 북미 지역을 대상으로 그랜드 앙상블 예보 자료를 생산하고 있다 (Zhu et al., 2008).

최근 WMO(World Meteorological Organization) 산하의 WWRF(World Weather Re-search Programme) 중 하나인 THORPEX (The Observation, Research and Preditability Experiment)에서는 전 세계 현업 기관에서 사용하는 앙상블 모델들을 이용하여 1일에서 2 주 규모의 위험 기상에 대한 예측성을 향상시키기 위하여 2005년부터 TIGGE(THORPEX Interactive Grand Global Ensemble) 사업을 수행 중에 있다. ECMWF(European Center for Medium-Range Weather Forecast), UKMO(United Kingdom Meteorological Office), JMA(Japan Meteorological Administration), NCEP, CMA(China Meteorological Administration), MSC, BoM(Bureau of Meteorology), CPTEC(Centro de Previsao Tempo e Estudos Climaticos), MF(Meteo-France)의 전 세계 10여개 현업기관들이 앙상블 모델 자료를 ECMWF, NCAR, CMA 아카이브 센터를 통해서 grib2 포맷으로 제공한다.

5.1.1. TIGGE 모형 및 분석방법

본 연구에서는 TIGGE에서 제공하는 앙상블 모델 중 ECMWF, CMC, UKMO, KMA, NCEP의 5개 모형의 U200, V200, 6시간 간격의 TMAX자료를 이용하였다. 각 모형의 앙상블 멤버 수, 모델 해상도와 초기 섭동장 및 예측 기간은 표 5-1과 같다. 한반도 폭염 예측 성능을 비교하기 위해 7월과 8월의 TIGGE 앙상블 모델 자료를 이용하였다. TIGGE 자료는 예측된 자료를 각 기관에서 수집하여 제공하는 데 약 2일이 지연되기 때문에 우리는 5일 전 예측자료를 사용하여 폭염 예측성을 검증하였다.

Table 5-1. Configurations of TIGGE models for ECMWF, UKMO, NCEP, KMA and CMC.

Country/Region	Center	Ensemble Members	Forecast length	Initial Perturbation	Model Resolution
USA	National Centres for Environmental Prediction(NCEP)	20	15day	Ensemble Transform with Rescaling	T126
Canada	Canadian Meteorological Centre(CMC)	20	15day	EnsembleKalman Filter	TL213
Korea	Korea Meteorological Administration (KMA)	23	10day	Ensemble Transform Kalman Filter	N320
UK	Meteorological office (UKMO)	23	15day	Ensemble Transform Kalman Filter	N214
Europe	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts(ECMWF)	50	10day	Singular Vectors	TL399

한반도 폭염은 2011년에서 2013년까지의 지난 4년 동안의 한반도 60개 지상기상관측소의 기온자료를 사용하여 계산하였고, 폭염과 연관된 기상패턴에 TIGGE 자료의 예측성 평가는 NCEP-DOE(National Centers for Environmental Prediction-Department of Energy) R2 재분석 자료(Kanamitsu et al., 2002)의 일 최고기온 자료와 200hPa에서의 U, V wind 자료를 이용하였다.

먼저 TIGGE 모형의 폭염 발생 여부를 판단하기 위해서는 폭염의 기준을 명확히 할 필요가 있다. 폭염에 대한 표준화된 정의는 아직 없지만, 일반적으로 기온이 어느 임계기온(Threshold temperature)을 넘는 한정된 기간을 말한다(Robinson, 2000). 한반도 폭염의 정의는 기상청의 폭염 주의보 기준인 6~8월 사이에 일최고기온이 33°C이상인 상태가 2일 이상 지속되는 지상 기상관측지점이 한 지점 이상 존재할 때로 정의하였다. 여기서 최고기온 33°C는 일 최고기온의 95th percentile 값이다. 따라서 모형별 폭염 예측성 검증을 위해서 관측의 일 최고기온의 95th percentile 값을 임계 온도로 정의하여, 이 임계값이 2일 이상 지속될 때를 폭염이 발생한 것으로 판단하였다. 그러나 각 모형이 가지는 systematic error를 보정하기 위해 임계값으로 모형별 climatological PDF(Probability Density Function)를 구성하여 95th percentile 값을 적용하였다(Dee et al. 2011). 각 모형별 PDF의 기후값은 2011년부터 2013년 동안 TIGGE 자료를 사용하여 계산하였다. 모형별 일 최고기온의 95th percentile을 산정하는 방법은 그림 5-1과 같다. 각 모형별 3년의 7, 8월 자료를 이용하여 기후값을 생성하기에는 표본이 너무 적어 우리는 31일 window내에서 각각의 선행 예보시간 자료를 이용하였다. 예를 들어 ECMWF에 대한 7월 1일(☆: 그림 5-1)의 표본 수는 4743개(31일 × 3년 × 51앙상블 멤버)이다.

폭염 시중의 예측은 최고 기온 자료(TMAX), 편의 보정된 최고기온자료(Bias Corrected TMAX : BCT), 그리고 대기 순환 패턴을 이용하여 개발된 폭염지수(KHI)를 이용하였고, 또한 3가지 경우에 대하여 예측성을 검증하였다.

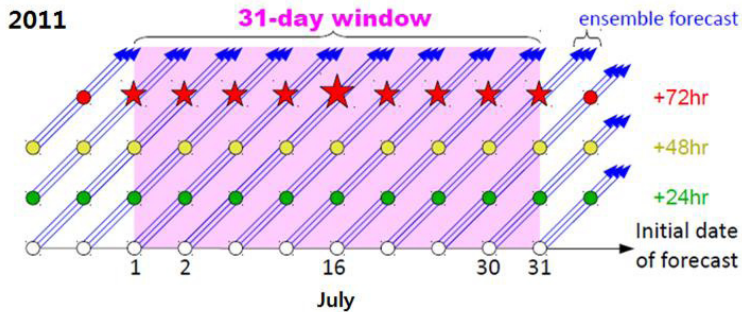


Figure 5-1. The method to how climatology are estimated from TIGGE (출처: <http://gpvjma.ccs.hpcc.jp/TIGGE/>). Total numbers of samples(☆) for ECMWF : 31days × 3 years × 51members = 4743)

5.1.2. 검증 방법

TIGGE의 개별 모형이 TMAX, BCT, KHI의 예측성능을 성능을 비교하기 위해서 공간 상관 계수(Pattern Correlation Coefficient, PCC) (Wilks, 1995)와 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error, RMSE)를 계산하였다. PCC는 관측과 모의 공간이 공간적으로 비슷한 정도를 나타내는 패턴 상관 분석법으로 -1부터 1사이의 값을 나타낸다. 예측 결과가 정확할 경우 PCC 값은 +1을 나타낸다. 또한 RMSE는 관측 자료와 모형의 예측 자료가 갖는 오차를 곱하여 평균한 평균제곱오차를 제곱근으로 표현한 것으로 예보의 정확성을 살펴보는 척도이다. 이 값이 크다는 것은 관측과 모형의 예측자료의 차이가 크다는 것을 뜻하며, 예측 결과가 정확할 경우 RMSE는 0이다. 즉, 모형 예측자료의 PCC가 높고 RMSE가 작다면, 그 모형은 예측성이 좋다고 말할 수 있다.

폭염 발생에 대한 검증은 표 5-2와 같이 예측값과 관측값의 비교를 통해 카테고리 예측 정확도 측정 방법인 Percent Correct, Equitable Threat Score, Critical Success Index (Threat Score라고도 함) 사용하였다. 위 방법들은 TMAX, BCT, KHI가 폭염을 예측하였을 때, 관측에서 폭염이 발생하였을 경우는 Hit(H), 관측되지 않았을 경우는 False(F)에 대한 빈도수가 각각 하나씩 증가하는 것이다. 반대로 TMAX, BCT, KHI가 폭염을 예보하지 않았을 때, 폭염이 관측되면 Miss(M), 관측되지 않으며 Correct Negative (N)의 경우의 수가 증가한다.

Table 5-2. Relationship between counts of forecast/event pairs for the dichotomous categorical verification situation as displayed in a 2×2 contingency table.

		Event observed		
		Yes	No	
Event forecast	Yes	Hit (H)	False (F)	Yes fcsts (H+F)
	No	Miss (M)	Correct Negative (N)	No fcsts (M+N)
		Yes obs (H+M)	No obs (F+N)	Total (H+F+M+N)

표 5-2의 정의에 따라 Percent Correct, Equitable Threat Score, Critical Success Index 는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

• Percent Correct(PC)

$$PC = \frac{H + N}{H + F + M + N} \quad (5-1)$$

PC는 식 (1)과 같이, 어떠한 사건이 발생할 것으로 예측하여 맞춘 이벤트 수와 발생하지 않을 것을 예측하여 맞춘 이벤트 수의 합을 전체 이벤트수로 나누어 예보의 정확도를 나타내는 것으로, 값의 범위는 0부터 1까지의 범위를 가지고, 1일 때 완벽한 예보를 의미한다.

• Critical Success Index (CSI) 혹은 Threat Score (TS)

CSI는 관측이나 예보가 임계값을 초과한 이벤트와 예보가 적중한 이벤트 사이의 비를 나타내며, 판정 분할표를 이용하여 식 (2)와 같이 계산된다. CSI는 0부터 1까지의 범위를 가지고, 1일 때 완벽한 예보를 의미한다.

$$CSI(TS) = \frac{H}{H + F + M} \quad (5-2)$$

• Equitable Threat Score (ETS)

ETS는 보통 보기 드문 사건들에 대한 결정론적 예보의 검증에 주로 사용된다. Gilbert Skill Score가 TS에서 우연히 맞힐 수 있는 경우를 고려하여 수정한 것으로 Gilbert Skill Score라고도 불린다. 우연히 맞출 수 있는 것을 배제한 상태로 예측한 사건에 대한 관측과 예측의 비이다. ETS값은 -1/3에서 1 사이의 값을 가지며, 0 이하이면 예보기술이 없음을, 1이면 완벽한 예보를 나타낸다.

ETS는 TS에서 예보가 우연히 적중할 확률을 제외한 예보기술을 나타낸다. 우연에 의한 적중확률(H_{ref})은 (예보된 이벤트) × (관측된 이벤트) / (전체 이벤트) = $\frac{(H+M)(H+F)}{Total}$ 이므로 ETS는 다음 식으로 계산된다.

$$ETS = \frac{H}{H + F + M} - H_{ref} = \frac{H - H_{ref}}{H + F + M - H_{ref}} \quad (5-3)$$

5.2. 2013년 여름 기상 특성

5.2.1. 기온 및 강수 현황

Table 5-3. Meteorological characteristics in 2013 summer.

	Mean Temperature(°C)		Maximum Temperature(°C)		Minimum Temperature(°C)	
	Year	Value	Year	Value	Year	Value
1	2013	25.4	1994	30.7	2013	21.7
2	1994	25.3	2013	30.1	2010	21.2
3	2010	24.9	2010	29.6	2012	21
4	2012	24.7	1973	29.5	1978	20.9
5	1978	24.7	1978	29.5	1994	20.7
30years Mean		23.6		28.4		19.7

2013년 여름철 한반도의 기상 특성을 살펴보기 위해 지상 기상 관측 자료의 일 최고기온, 일 최저기온, 일평균기온 자료를 이용하여 최근 30년 동안의 기온 자료와 비교 분석하였다(표 5-3). 2013년 한반도는 남부지방을 중심으로 전국이 매우 뜨거운 여름을 경험했다.

표 5-3은 최근 30년 동안 여름철 일최고·일최저·일평균 기온에 대한 순위를 분석한 표이다. 일 평균 기온의 경우, 2013년은 여름철 평균기온이 25.4°C로 30년 평균기온인 23.6°C 보다 1.8°C 높았으며, 1973년 이후 평균기온이 가장 높았던 해이다. 2013년 월별 평균기온의 편차를 살펴보면, 6월에는 30년 평균기온(22.6°C) 보다 약 1.4°C 높았고, 7월은 평균기온 26.3°C보다 약 1.8°C 높았으며, 8월에는 평균기온(27.3°C)보다 무려 2.2°C나 높았다. 한반도 연평균 기온이 지난 96년(1912-2008년)간 1.7°C 상승한 것을 감안하면 2013년 여름철 평균 기온 증가는 매우 큰 수치이다.

또한 여름철 최고기온 및 최저기온은 30.1°C와 21.7°C로 평년(28.4°C와 19.7°C)보다 각각 1.7°C와 2.0°C 높았다. 1973년 이래로 여름철 최고 기온은 2위를 기록하였고, 최저기온은 1위를 기록하였다. 2013년 8월 8일에는 울산 38.8°C, 울진 37.8°C, 남해 37.7°C, 해남 36.9°C를 기록하며 최고기온을 모두 경신하였다. 또한 밀양은 8월 19일 일 최고 기온이 약 38.4로 40년 만에 8월 최고 기온을 기록하였다. APCC가 위치하고 있는 부산의 2013년 8월 평균기온, 평균 최고 기온 및 평균 최저 기온은 28.0°C, 32.1°C와 25.0°C로 평년(25.9°C, 29.4°C와 23.4°C)보다 각각 2.1°C, 2.7°C, 1.6°C 높았으며, 1973년 이래 각각 역대 3위, 1위 5위를 기록하였다. 2013년 최고기온에 대한 상세한 정보는 표 5-4를 참조하기 바란다.

2013년 여름철 전국 강수량은 평년(723.2mm) 대비 약 78%인 567.5mm이다. 7월에는 장마전선이 주로 중부지방과 북한에 위치하여, 강수일수가 서울 25일, 수원 25일, 강화 24

일, 인제 23일 등 최고 극값 기록한 반면, 제주도의 서귀포는 강수일수가 4일로 강수일수 최저 극값을 기록하였고, 밀양, 대구, 울산, 완도의 강수일수는 11일, 10일, 8일, 6일로 강수일수 최저 극값 4위 안에 드는 극한 가뭄을 경험하였다.

Table 5-4. 8월 지점별 최고 기온 극값 경신 현황 (단위 : °C)

지 점			1위		2위		3위		4위		5위	
번호	명	관측개시	날짜	값	날짜	값	날짜	값	날짜	값	날짜	값
90	속초	1968.01.01.	2005.08.14	36.0	1997.08.23	35.9	2013.08.09	35.8	2013.08.08	35.8	1997.08.31	35.8
106	동해	1992.05.01.	2010.08.05	37.0	2013.08.09	36.1	2005.08.14	35.9	2013.08.03	35.8	1995.08.14	35.7
115	울릉도	1938.08.10.	2013.08.08	35.4	2013.08.10	35.0	1994.08.04	34.6	1994.08.07	34.5	1951.08.13	34.5
130	울진	1971.01.12.	2013.08.08	37.8	2013.08.16	37.2	2013.08.09	37.2	1995.08.14	37.0	1995.08.07	36.6
137	상주	2002.01.01.	2006.08.08	36.6	2006.08.15	35.7	2013.08.19	35.6	2013.08.12	35.6	2006.08.10	35.6
138	포항	1943.01.01.	1994.08.06	38.2	1984.08.11	37.9	1977.08.02	37.9	1983.08.03	37.8	2013.08.10	37.6
146	전주	1918.06.23.	2012.08.06	38.3	2012.08.05	38.1	2013.08.21	37.8	2013.08.11	37.7	2013.08.07	37.6
152	울산	1932.01.06.	2013.08.08	38.8	2013.08.10	38.6	1983.08.03	38.6	2013.08.09	38.4	1983.08.02	38.1
155	창원	1985.07.01.	2013.08.11	37.1	1990.08.01	37.1	2013.08.19	36.5	1990.08.06	36.3	2002.08.02	36.2
165	목포	1904.04.08.	1924.08.18	37.0	2013.08.21	36.9	1951.08.19	36.7	1942.08.07	36.7	1994.08.13	36.3
169	흑산도	1997.01.01.	2013.08.18	33.9	2012.08.06	33.8	2013.08.17	33.3	2012.08.18	33.3	2013.08.16	33.2
170	완도	1971.01.31.	2013.08.20	36.9	2013.08.10	36.9	2004.08.14	36.3	2013.08.11	35.7	2013.08.09	35.6
175	진도	2001.11.03.	2013.08.08	33.6	2012.08.05	33.6	2004.08.14	33.6	2013.08.18	33.5	2013.08.20	33.3
185	고산	1988.01.01.	2001.08.03	34.3	2012.08.06	34.2	2011.08.05	33.9	2013.08.21	33.8	2012.08.01	33.8
192	진주	1969.03.01.	2006.08.09	37.5	2006.08.08	37.0	1983.08.04	37.0	2013.08.11	36.7	2013.08.10	36.7
216	태백	1985.08.01.	2013.08.14	35.6	2013.08.12	34.2	2013.08.13	33.7	2010.08.09	33.7	2013.08.11	33.6
243	부안	1972.03.01.	1994.08.13	36.6	2013.08.08	36.2	2012.08.06	36.1	2012.08.01	36.1	2012.08.05	36.0
245	정읍	1970.01.05.	2012.08.01	37.8	1990.08.07	37.5	2013.08.21	37.1	2012.08.06	37.0	1994.08.13	37.0
261	해남	1971.02.03.	2013.08.10	36.9	2013.08.18	36.7	2013.08.20	36.4	2012.08.01	36.0	1983.08.04	36.0
277	영덕	1972.01.03.	1983.08.06	38.0	1984.08.11	37.7	2013.08.15	37.6	1995.08.14	37.6	1983.08.07	37.4
279	구미	1973.01.01.	1995.08.14	37.3	1984.08.10	37.2	1995.08.13	37.1	2006.08.15	37.0	2013.08.10	36.7
288	밀양	1973.01.01.	2013.08.19	38.4	2009.08.15	38.3	2013.08.12	38.1	1983.08.05	38.1	2013.08.10	38.0
294	거제	1972.01.24.	1990.08.06	37.4	1983.08.04	37.4	2013.08.11	36.7	2013.08.19	36.3	1990.08.01	36.2
295	남해	1972.01.24.	2013.08.10	37.7	1983.08.04	37.6	2013.08.11	37.3	1983.08.05	37.1	1983.08.03	37.1

출처: 기상청 130902보도자료(www.kma.go.kr)

여름철 부산의 강수량은 434.5mm로 평년(778.6mm)보다 약 56% 적었던 것으로 관측되었다.

2013년 전국 폭염일수는 18.5일로 1994년(31.2일) 이후로 최다 일수를 기록하였다. 월별 평균 폭염일수는 8월에 13.0일, 7월에 4.9일로 8월에 집중되었으며, 6월과 9월에는 약 0.4일과 0.1일이 나타났다. 최근 10년간 폭염(33°C이상 발생회수) 지역별 폭염 발생일수를 보면 대구, 광주, 전주, 청주 지역에서 폭염의 발생 빈도수가 높으며, 2013년 대구는 54일로 전국 최다이며, 일 최고기온은 8월 10일 김해에서 39.2°C를 기록하였다. 2013년 폭염 일수는 남부지역에서 최근 10년간 최대치를 기록하였다. 특히 2013년 부산의 폭염 일수는 13일로 1973년 이래로 가장 많은 일수를 기록하였다(표 5-5).

따라서 2013년 한반도에는 극한 기상현상에 의한 사회·경제적 피해를 초래하였다. 2013년 7월과 8월 폭염으로 인해 제주도 및 전남·경북 중해안 지역을 중심으로 52개 마을 3,638세대 11,434명이 운반급수, 51개 마을 9,145세대에서 26,337명이 제한급수를 실시하였다. 또한 강수량의 부족으로 인해 제주지역 밭작물 1,240ha (1,227 농가) 피해가 발생하여, 복구비 3,155백만원이 지원되었다. 또한 경기, 인천, 충남, 전북, 경북 등 705 농가의 가축 1,985천수가 폐사하였으며, 낙동강 하천 구간에는 녹조가 발생하였다(관계부처합동, 2013).

폭염으로 인해 응급의료기관에서 진료를 받은 온열질환자는 전국 약 1195명이 신고되었으며, 그 중 14명은 사망하였다(질병관리본부, 2013). 따라서 폭염으로 인한 국민건강 및 사회경제적 피해를 줄이기 위해, 폭염의 예측정보는 반드시 필요하다.

Table 5-5. 최근 10년간의 지역별 폭염(최고기온 33°C이상)일수

지역	서울	부산	대구	광주	대전	전주	청주	강릉	춘천	제주
2004	10	2	28	21	19	28	16	6	18	9
2005	6	0	26	18	6	17	6	17	12	10
2006	7	10	27	16	11	28	11	11	12	7
2007	4	0	23	12	5	16	5	13	5	6
2008	3	0	36	18	3	19	17	13	6	4
2009	4	0	18	6	0	9	3	4	3	6
2010	2	3	41	20	10	26	21	19	12	13
2011	3	1	29	13	1	16	6	8	6	8
2012	14	7	30	25	17	28	20	10	10	5
2013	2	13	54	22	16	39	24	26	7	23

5.3. 2013년 폭염 예측

5.3.1. 관측된 폭염과 대기순환 패턴

한반도 폭염의 정의는 일 최고기온이 33°C 이상인 날씨가 2일 이상 지속될 때 이다. 폭염의 기준을 이용하여 일 최고기온과 폭염 발생한 지점의 수(n) 그리고 KHI를 계산하였다(그림 5-2). 7월의 폭염은 장마전선의 영향으로 인해 한반도의 약 10%지역, 주로 남부지역에서 발생하다가, 8월초 북태평양 고기압이 확장되면서 한반도 전역(약 50개 지점)에서 폭염이 발생하였다.

KHI는 양의 값을 갖게 되면 한반도에 폭염이 발생하는 것을 의미한다. KHI는 2013년 7월 1일에 발생한 폭염을 제외하고 2013년 폭염의 시·종을 매우 잘 설명하고 있다.

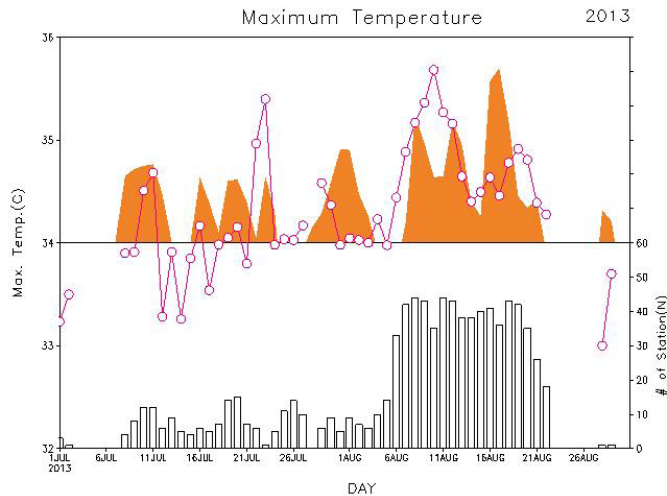


Figure 5-2. Time series of daily maximum temperature(pink line, °C), KHI(orange color), and station number(bar, %) over Korea during 2013 heat wave

북태평양 고기압과 남중국해의 깊은 대류활동은 여름철 한반도의 폭염 발생에 중요한 영향을 미치는 요인이며(Tao and Zhu, 1964; Lau and Li, 1984; Yanai et al., 1992; 김해구 등, 1997a; Park and Schubert, 1997), 2013년 여름(7, 8월)동안 북태평양 고기압과 대류활동은 매우 강화되었다. 특히 북태평양 고기압은 오키나와에 중심을 두고 계속 강화되고, 점점 서쪽으로 확장함에 따라, 한반도 전역은 매우 더웠다(그림 5-3). 2013년 한반도 폭염이 가장 강했던 8월 6일부터 8월 22일 동안 한반도 주변 해수면 온도는 북태평양 고기압으로 인한 맑은 날씨가 지속되면서, 평년에 비해 2°C 높았다(그림 5-4).

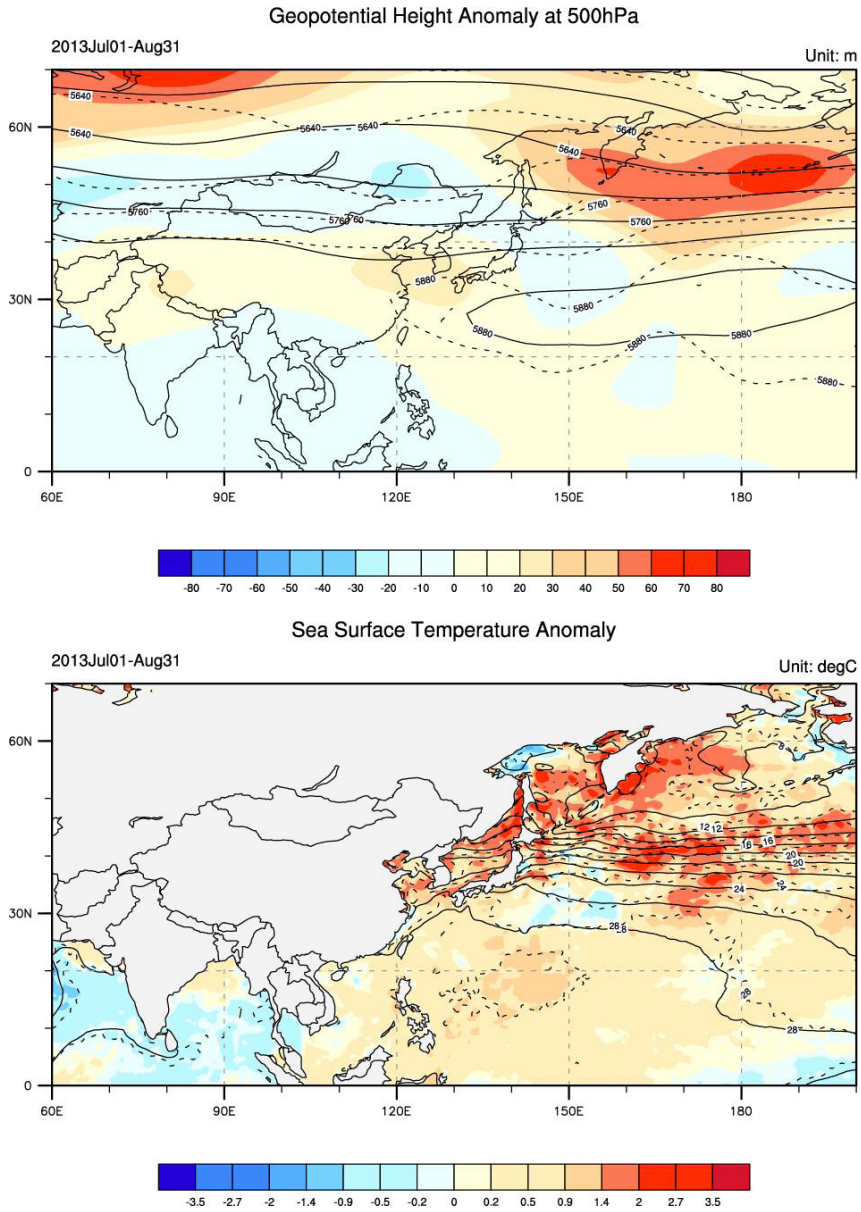


Figure 5-3. Mean JA anomalies of 500hPa geopotential height (upper panel) and SST (lower panel) for 2013 relative to 1981-2010.

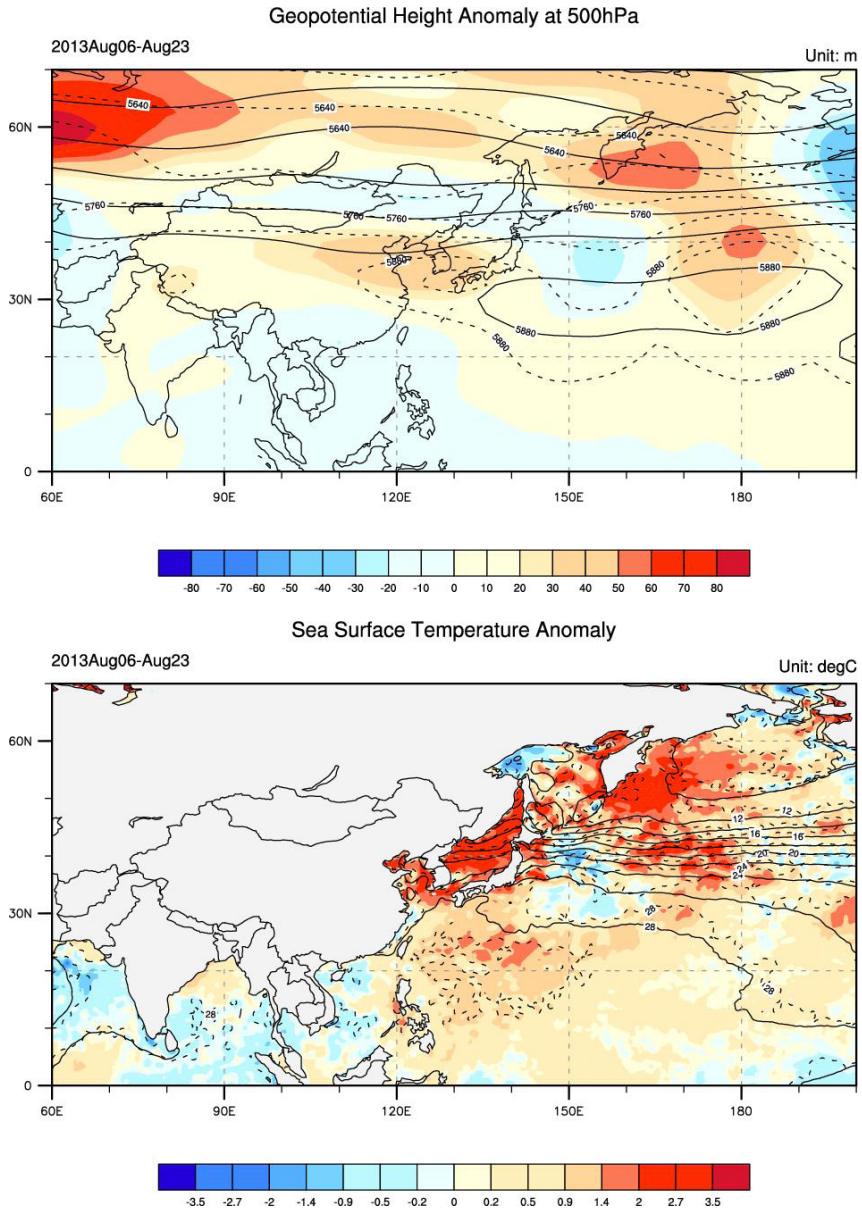


Figure 5-4. Mean August anomalies of 500hPa geopotential height (upper panel) and SST (lower panel) for August 2013 relative to 1981-2010.

태평양의 SST 아노말리와 연관된 대류활동은 아시아 여름 몬순지역에서 매우 강화되었다. 남중국해에서 강화된 대류활동은 한반도 주변의 고기압을 더욱더 강화시키게 된다. 2013년 6월에는 고기압의 영향으로 맑은 날씨가 지속되었으며, 강한 일사량과 남서기류의 유입으로 고온현상이 뚜렷하게 나타났다. 그러나 6월 중순에는 비가 오는 날이 많지만, 구름 양 또한 많아서 남쪽으로부터 따뜻한 공기가 유입되면서 밤 동안 최저기온이 떨어지지 않았다. 따라서 일 평균기온도 상승하게 되었다.

7월에는 북태평양고기압이 우리나라 남부지방까지 확장하여 장마전선이 주로 중부지방과 북한에 위치하게 되었다. 습한 공기는 북태평양 고기압의 가장자리인 서해를 통해 지속적으로 유입되었다. 또한 서풍(아열대 jet)의 사행(meandering) 과 연관된 상층의 차가운 공기가 한반도 북쪽에 유입되면서 불안정한 대기상태를 만들기 때문에 집중호우가 발생하게 되었다. 따라서 북한과 중부지방에는 많은 비를 내렸으나, 남부지방과 제주도에서는 열대야와 극심한 폭염이 나타났다. 8월에는 북태평양고기압이 서태평양까지 크게 확장하여 한반도에 고온 현상이 지속되면서, 낮에는 폭염이 발생하였고, 밤에는 열대야가 빈번히 발생하였다.

5.3.2. 기관별 앙상블 평균 예측장 분포

관측 자료에서 KHI는 한반도 폭염의 시종을 매우 잘 모의하였다. 따라서 기관별 앙상블 예측장이 KHI를 잘 모의한다면 한반도 폭염의 시종을 예측할 수 있을 것이다. 우리는 KHI의 예측성을 검증하기 전에 TIGGE 자료의 일 최고기온과 상층 대기 순환장의 모의 성능을 분석하였다.

그림 5-5는 한반도 폭염 사례(2013년 7월 29일~8월 22일)에 대한 5일전에 예측된 TIGGE 자료의 일 최고 기온과 관측의 공간분포를 나타낸 것이다. 기관별 예측된 일 최고 기온은 동아시아 지역 전체의 공간분포를 잘 모의하고 있으나, 각 모형의 공간 해상도 및 초기 조건에 따라 약간의 차이를 보인다. 모든 기관의 모형들이 중국 남부지역의 최고기온을 과대 모의 하고 있으며, 중국 북부 지역은 NCEP을 제외한 모든 모형이 과소 모의하고 있다. KMA 모형은 한반도와 일본 남부지역에서 warm bias를 가지고 있다. CMC는 다른 예측자료에 비해, 중국 북부 내륙지역과 몽골지역에서 최고기온을 과소 모의한다. ECMWF의 경우에는 한반도 지역의 일 최고기온 모의 능력이 다른 기관의 앙상블 예측 시스템 보다 뛰어난 것을 알 수 있다(그림 5-6). 한반도 폭염과 연관된 상층 와도 패턴은 한반도 상층에서 음의 와

도가 존재하며, 남중국해에 양의 와도가 나타난다. 그림 5-7은 한반도에서 발생한 폭염 사례(2013년 7월 29일~8월 22일)에 대하여 관측과 5일전에 예측된 TIGGE 자료의 VORT200 공간분포를 나타낸 것이다. 모든 모형이 한반도 상공에서의 음의 와도를 관측과 유사하게 모의하고 있으며, 중국남부 지역에서 약한 양의 와도를 잘 모의한다.

TIGGE자료의 예측 선행 시간에 따른 예보 정확도를 보다 정량적으로 비교하기 위해 일 최고 기온, VORT200의 PCC, RMSE를 계산하였다(그림 5-8, 그림 5-9). 일 최고 기온의 경우, PCC는 선행기간에 관계없이 0.7이상의 높은 값을 보인다. 반면 RMSE는 예측 시간이 길어질수록 앙상블 스프레드의 증가에 의해 RMSE가 증가하는 일반적인 특성이 나타났다. 또한 각 기관에 따라 RMSE 편차가 크게 나타난다. 그 이유는 다른 초기조건과 다른 해상도의 앙상블 시스템이 가지는 계통오차(systematic error) 때문이다. RMSE는 KMA, UKMO가 0.2보다 낮은 값을 가지며, ECMWF는 약 0.2의 값을 갖는다.

그림 5-9는 200hPa 상대와도의 선행기간에 따른 PCC와 RMSE 결과이다. 각 기관별 앙상블 예측시스템의 예측 결과는 선행기간이 길어질수록 PCC의 값이 감소하는 분포를 보이는 하나, 5일의 선행기간까지는 평균 0.6의 비교적 안정적인 PCC 값을 유지하고 있다. 5일 이후 NCEP, CMC의 PCC 값이 크게 감소하는 특징을 보이지만, ECMWF는 10일까지 0.5이상의 PCC값을 가지고 있으며, 다른 모형들에 비해 비교적 안정적인 예측 성능을 보였다. 선행기간에 따른 앙상블 예측 시스템의 RMSE는 예측시간이 길어질수록 다중 모델 앙상블 멤버간의 편차가 증가하였으나, 7일의 예측시간까지는 모델간의 편차가 그리 크게 나타나지 않았다. RMSE는 UKMO와 KMA가 낮은 값을 보였다.

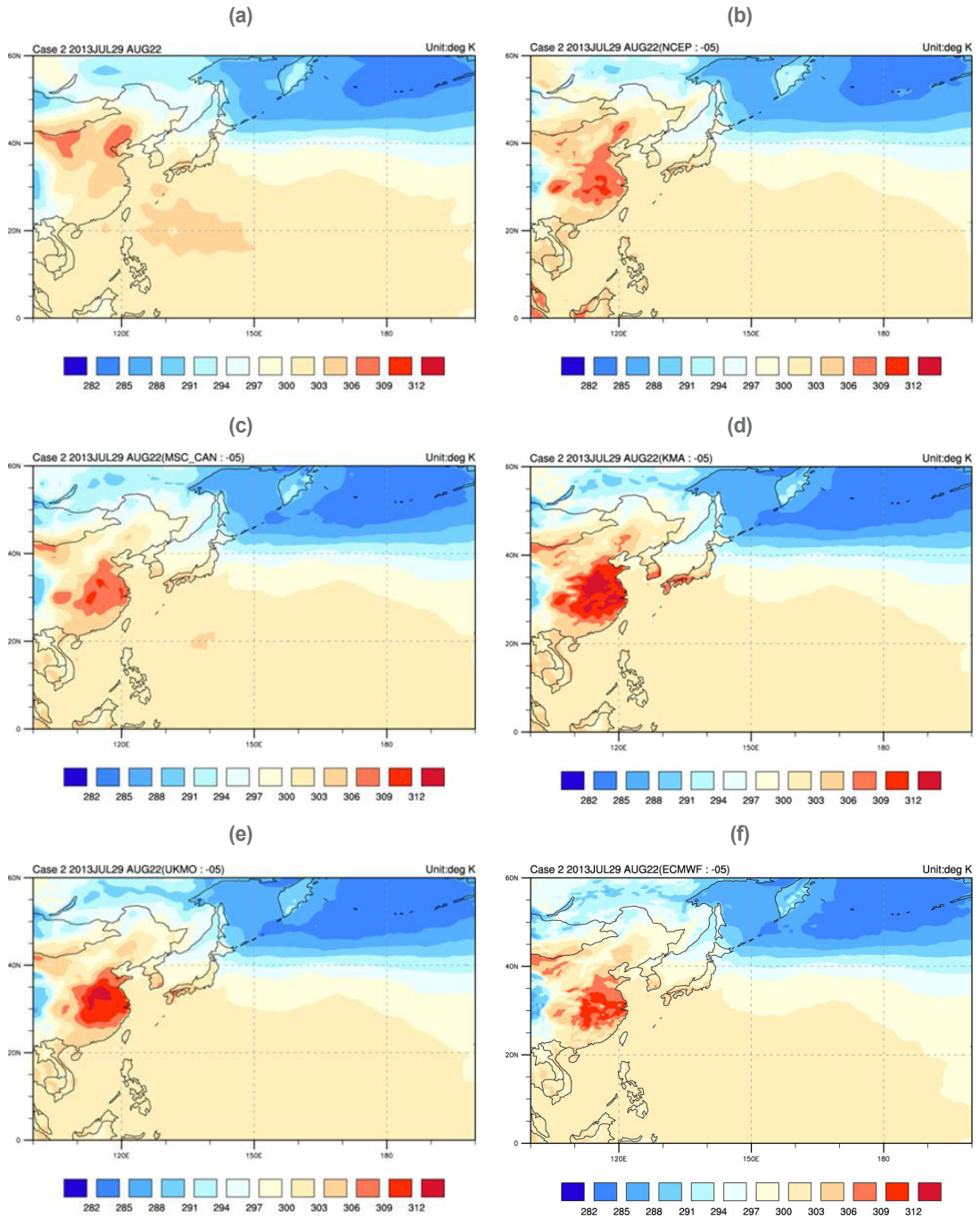


Figure 5-5. Spatial distribution of maximum temperature from July 29 to August 22 2013 for (a) Observation, (b) NCEP, (c) CMC, (d) KMA, (e) UKMO and (f) ECMWF for forecast day 5.

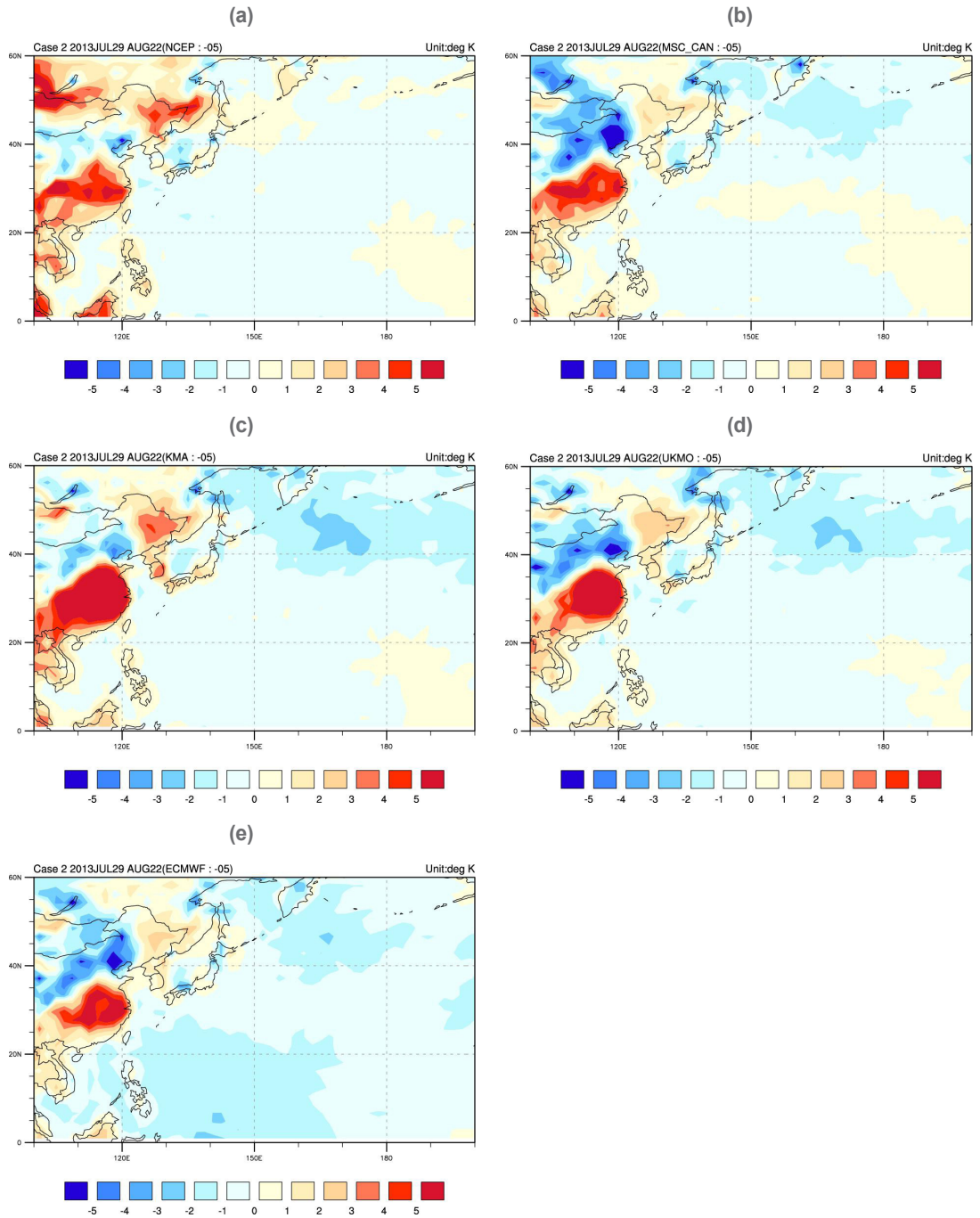


Figure 5-6. Difference between observation and (a) NCEP, (b) CMC, (c) KMA, (d) UKMO and (e) ECMWF for daily maximum temperature from July 29 to August 22 2014 for forecast day 5.

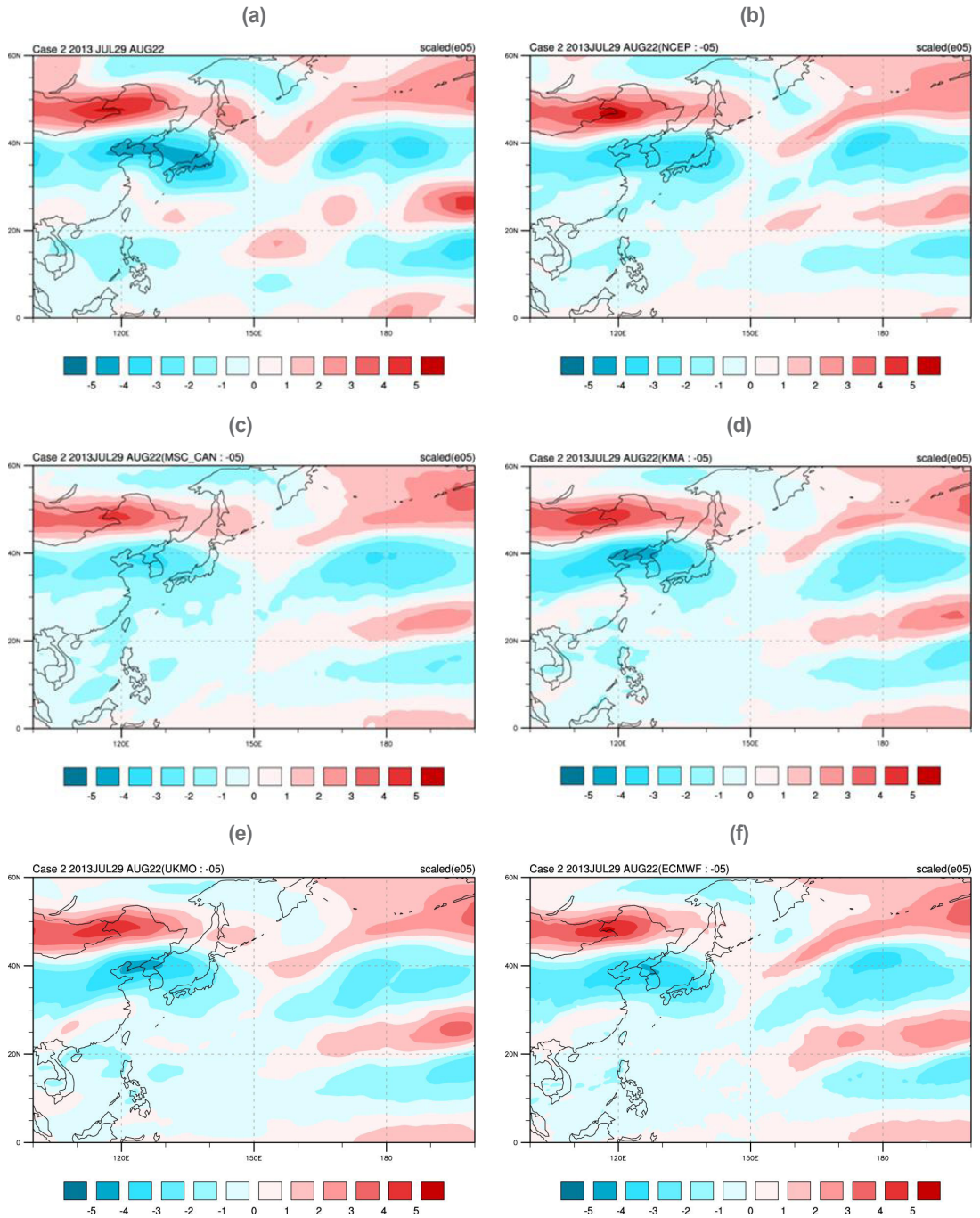


Figure 5-7. Spatial distribution of vorticity at 200hPa from July 29 to August 22 2014 for (a) observation, (b) NCEP, (c) CMC, (d) KMA, (e) UKMO and (f) ECMWF for forecast day 5.

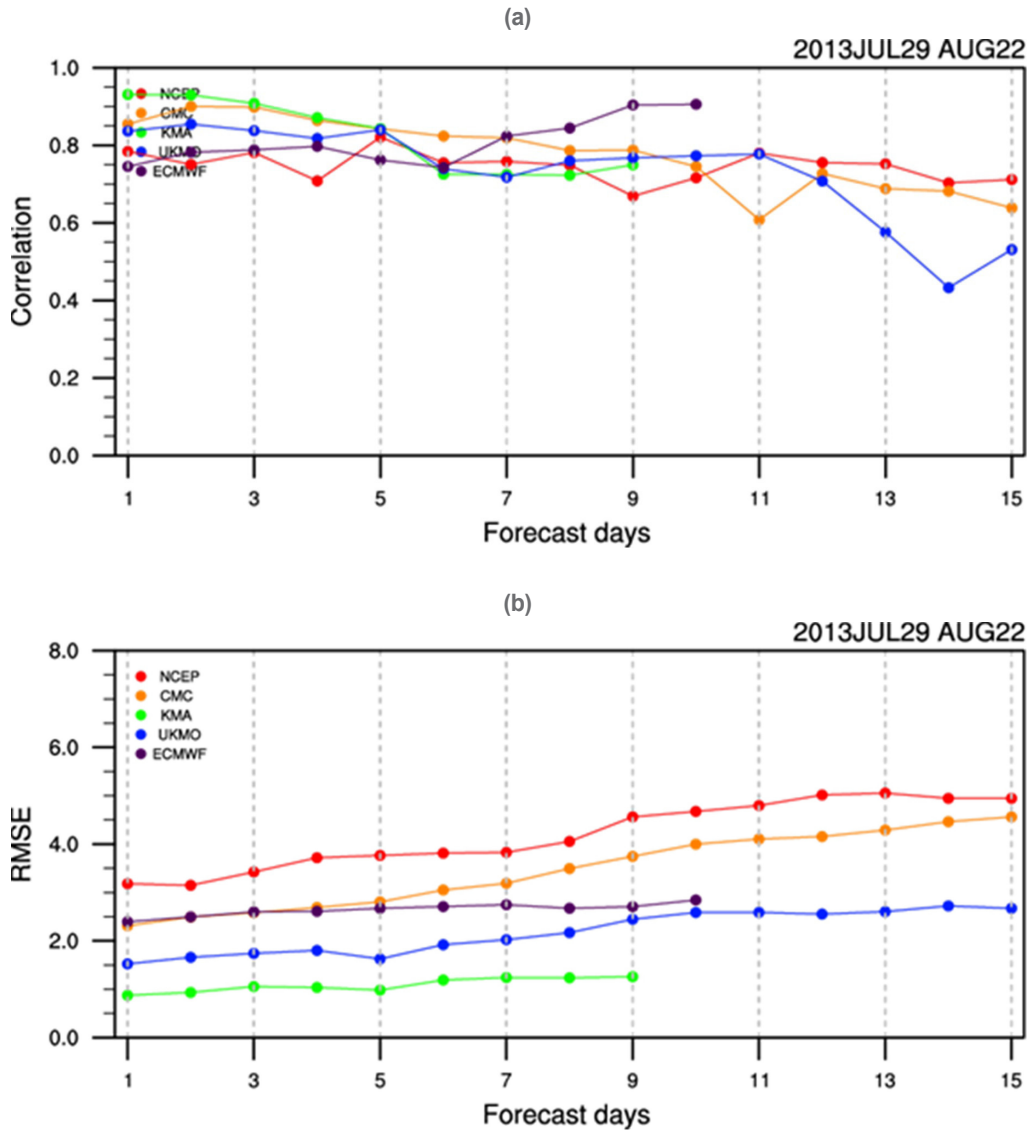


Figure 5-8. (a) Pattern Correlation Coefficient and (b) Root Mean Square Error for maximum temperature for TIGGE models from NCEP, CMC, KMA, UKMO and ECMWF according to forecast days.

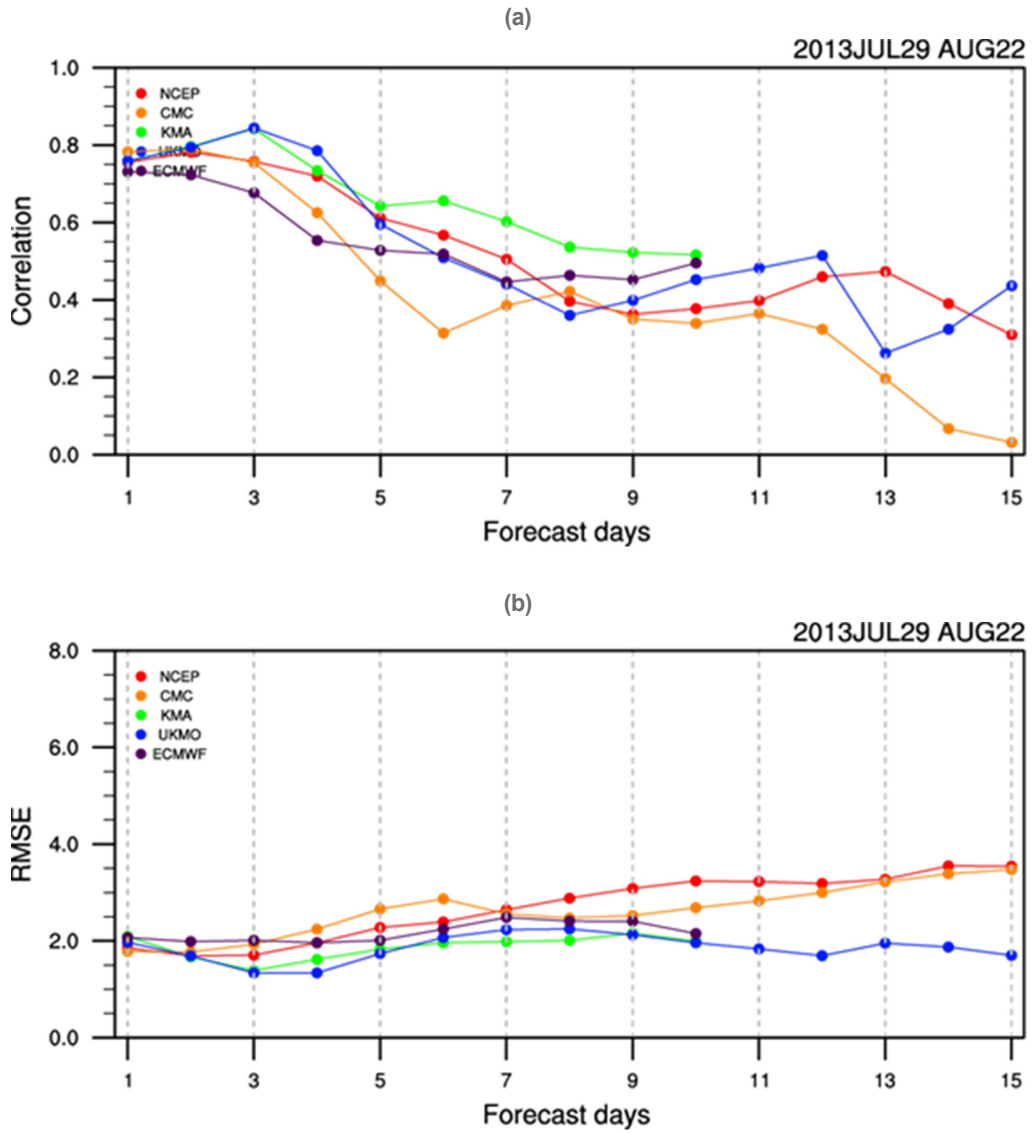


Figure 5-9. (a) Pattern Correlation and (b) Root Mean Square Error for vorticity at 200hPa for TIGGE models from NCEP, CMC, KMA, UKMO and ECMWF according to forecast days.

5.3.3. 2013년 폭염 예측성 평가

한반도 폭염의 예측성을 평가하기 위해서 우리는 아래와 같은 3가지 방법을 이용하였다.

- TMAX : 예측된 일 최고기온 자료를 이용하여 33°C 이상 인 상태가 2일 이상 지속될 때
- BCT(Bias Corrected TMAX) : 각각 기관별로 climatological PDF를 이용하여 예측된 일 최고 기온의 95th percentile 값이 2일 이상 지속될 때
- KHI : 한반도 폭염지수(KHI)가 0 보다 크거나 같을 때

그림 5-10은 관측자료를 이용한 폭염 일과 기관별로 5일전 예측된 TMAX(5-10a), BCT(5-10b), KHI(5-10c)를 이용한 폭염 일을 나타낸 것이다. 회색은 2013년 관측된 폭염 일을 나타낸다.

TMAX 방법을 이용한 경우, 모든 모형이 5일전 예측된 7, 8월의 폭염 일을 제대로 예측하지 못하고 있지만, 그 중 KMA의 예측성이 가장 좋았다. KMA는 다른 모형에 비해 한반도의 최고 기온을 높게 모의하는 경향이 있다(그림 5-5c). 따라서 60개의 기상관측지점 중 80%이상에서 폭염이 발생했던 8월(7월29일-8월22일) 폭염일은 다른 모형에 비해 잘 모의하고 있지만, 최고 기온이 낮았던 7월의 폭염일은 제대로 예측하지 못하였다. 따라서 KMA의 PC는 약 0.7이상으로 가장 높았지만, 나머지 4개 모형의 PC는 약 0.4 미만이다. TS와 ETS 또한 KMA가 가장 높고 나머지는 낮은 값을 갖는다. 이러한 통계 값들은 선행시간이 길어질수록 작아진다.

BCT 방법을 사용했을 경우 KMA를 제외한 NCEP, CMC, UKMO, ECMWF가 폭염 일을 TMAX 방법을 사용했을 때보다 예측성이 높다. NCEP은 TMAX방법을 사용했을 경우 3일의 폭염 일을 예측했지만, BCT방법을 사용했을 경우에는 34일을 정확히 예측하였다. 따라서 PC는 0.3에서 0.7로 향상되었으며, TS는 0.1에서 0.65까지, 그리고 ETS는 0.02에서 0.2로 약 10배의 예측성이 향상되었다(그림 5-11).

KHI를 사용하여 한반도 폭염을 예측했을 경우에는 앞선 2가지 방법(TMAX, BCT)에서 예측성이 낮았던 7월의 폭염(7월 8일-7월 27일)에 대해 매우 잘 예측 하고 있다. 특히 KHI방법은 폭염의 시작 시점과 종료시점을 보다 정확히 예측을 하였다. KMA는 일 최고기온에 대한 warm bias를 가지고 있는데도 불구하고 KHI방법이 TMAX방법보다 우수한 예측성을 가

지고 있다. 또한 선행기간이 5일일 때, 다른 모형들에 비해 공간해상도가 낮은 NCEP, CMC를 이외의 KMA, UKMO, ECMWF의 TS가 0.7이상의 높은 값을 나타내었으며, 그랜드 앙상블의 경우에는 0.73의 높은 TS 값을 나타내었다. ETS는 TS에서 우연히 맞힐 수 있는 경우를 제외하여 예측성을 검토하는 방법이다. ETS는 TS와 유사한 결과를 보였다. KHI방법은 선행시간에 상관없이 TMAX과 BCT 방법보다 PC, TS, ETS값이 우수하다. 따라서 한반도 폭염 시·종을 예측할 경우에는 KHI를 이용하는 것이 가장 적합하다.

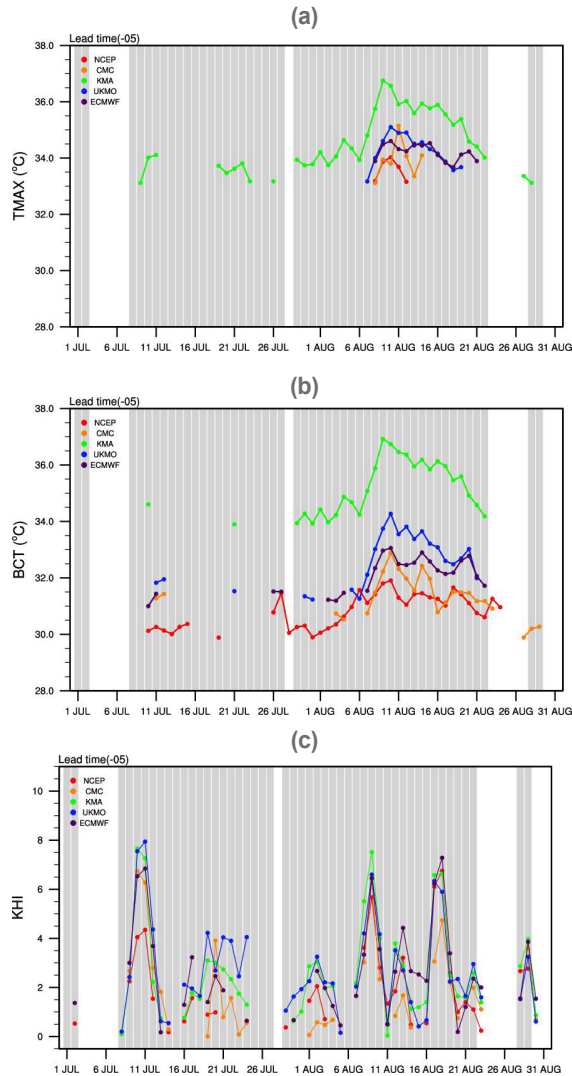


Figure 5-10. Occurrence probability of heat wave in summer 2013 (a) applying for Tmax has to exceed to upper 95th percentile of observation climatological distribution, (b) applying for BCT has to exceed to upper 95th percentile of each model climatological distribution, (c) applying for KHI associated with large scale circulation. Shading indicates occurrence of heat wave in observation.

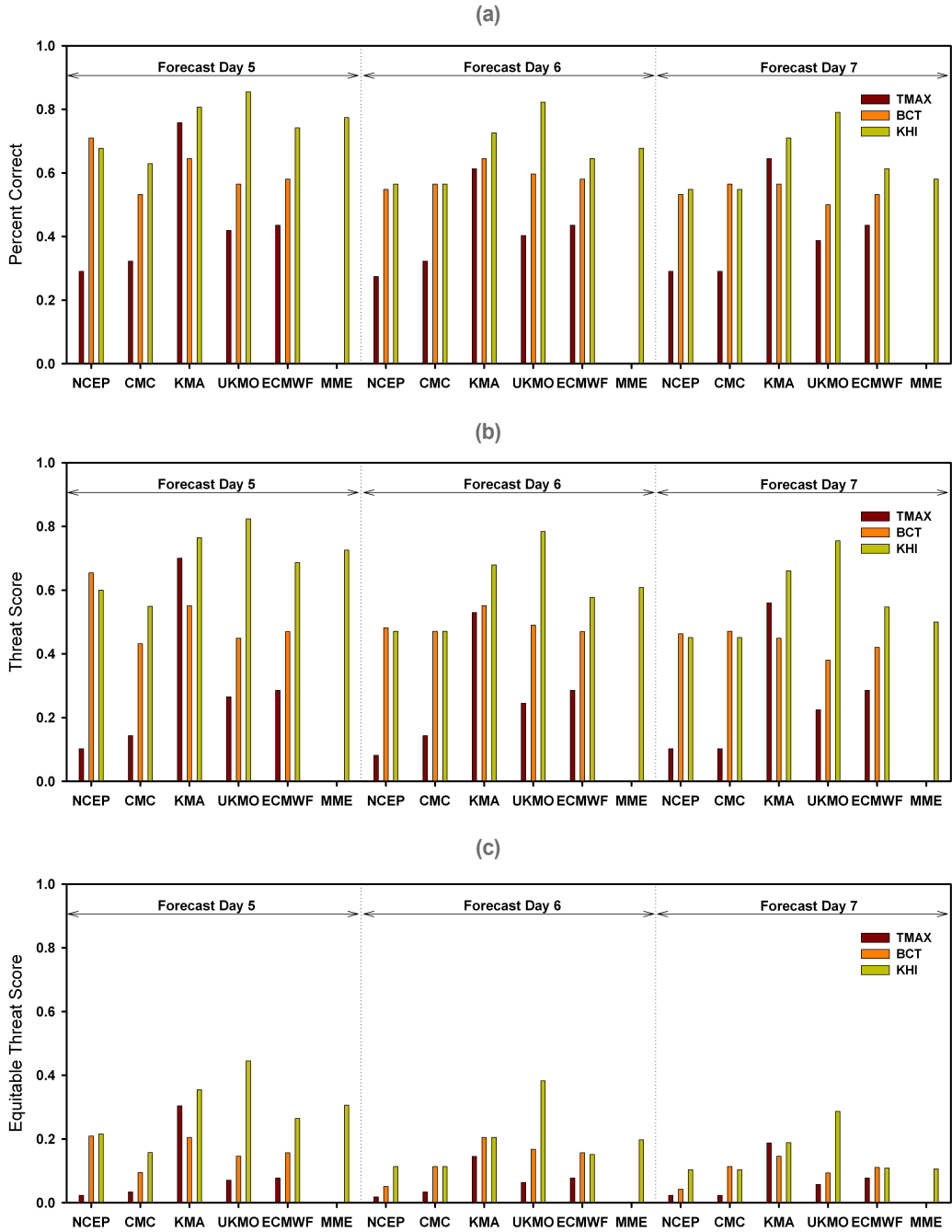


Figure 5-11. (a) Perfect Correct, (b) Threat Score and (c) Equitable Threat Score for heat wave forecast methods.

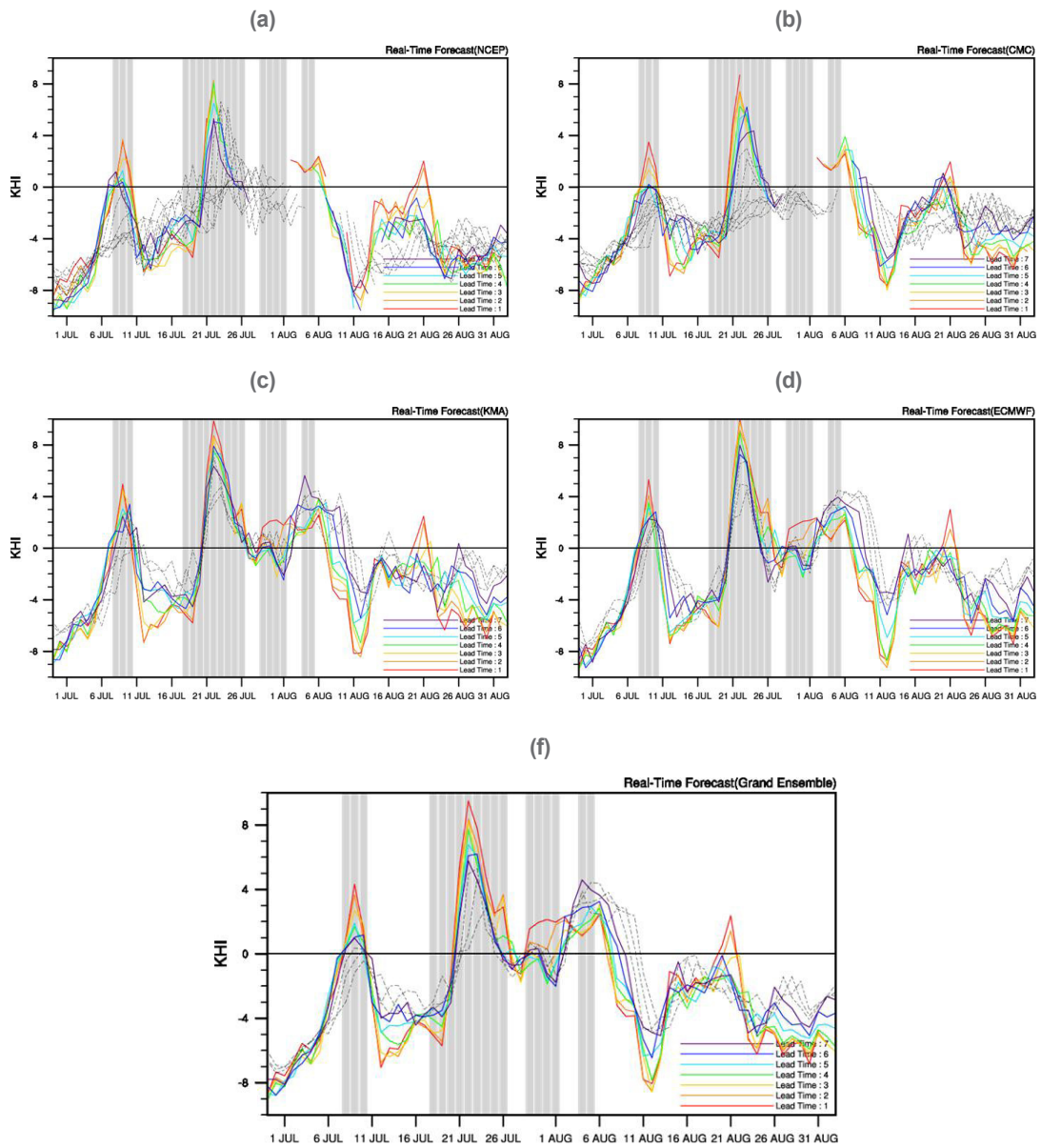


Figure 5-12. Real-time forecast for Korean heat wave in 2014. (a) NCEP, (b) CMC, (c) KMA, (d) ECMWF and (e) Grand Ensemble.

2011년부터 2013년까지의 TIGGE자료를 이용하여 2013년도 한반도 폭염의 예측성을 검증하였다. 그 결과 KHI를 이용한 한반도 폭염의 시중 예측은 가장 높은 예측적중률을 보였다. 그림 5-12는 KHI방법을 적용하여 2014년 폭염에 대해 준-실시간 예측정보를 제공한 결과이다. 이 시스템은 APCC 내부 검증을 위한 폭염 시·중 예측에 대한 시범운영 결과이다.

2014년에는 잦은 태풍의 내습으로 인해 7월과 8월 폭염일수는 전국평균 약 18일로 2013년(49일)에 비해 현저히 작은 값이다. 2014년 7월과 8월에는 총 4개의 폭염이 발생하였는데, 이 중 3번째 발생한 폭염(7월 30일 ~ 8월 1일)은 자료의 다운로드가 원활하지 않아 KMA와 ECMWF의 예측자료만 사용하였다. 선행시간 5일 일 때 KMA와 ECMWF는 폭염을 예측하지 못하였다. 이 당시에는 제 11호 태풍 할롱의 북상으로 인해 예측성이 떨어진 듯하다. 왜냐하면 한반도 폭염은 태풍의 진로에 따른 남중국해의 대류활동에 영향을 받기 때문이다. 한반도 폭염은 각 기관별 폭염 예측보다는 그랜드 앙상블의 예측성이 높게 나왔다. 현재 기상청에서는 하루 전에 폭염 특보를 발령하지만, APCC에서 개발된 폭염 예측정보를 참고 자료로 이용한다면 좀 더 긴 선행시간을 가지고 특보를 발령할 수 있을 것이다.

5.4. 요약

본 연구에서는 2013년 한반도 폭염이 발생하였을 때 동아시아지역에서 나타나는 대기 순환 패턴을 분석하고, TIGGE (THORPEX Interactive Grand Global Ensemble) 앙상블 예측 시스템 자료를 이용하여 한반도 폭염의 시중 예측성을 평가하였다.

2013년 한반도 기상 특성을 살펴보면, 6월에는 고기압의 영향으로 맑은 날씨가 지속되었으며, 강한 일사량과 남서기류의 유입으로 고온현상이 뚜렷하게 나타났다. 그러나 6월 중순에는 비가 오는 날이 많지만, 구름양 또한 많아서 남쪽으로부터 따뜻한 공기가 유입되면서 밤 동안 최저기온이 떨어지지 않았다. 따라서 일 평균기온도 상승하게 되었다.

7월에는 북태평양고기압이 우리나라 남부지방까지 확장하여 장마전선이 주로 중부지방과 북한에 위치하게 되었다. 습한 공기는 북태평양 고기압의 가장자리인 서해를 통해 지속적으로 유입되었다. 또한 서풍(아열대 jet)의 사행 (meandering) 과 연관된 상층의 차가운 공기가 한반도 북쪽에 유입되면서 불안정한 대기상태를 만들기 때문에 집중호우가 발생하게 되었다. 따라서 북한과 중부지방에는 많은 비를 내렸으나, 남부지방과 제주도에서는 열대야와 극심한 폭염이 나타났다. 8월에는 북태평양고기압이 서태평양까지 크게 확장하여 한반도에

고온 현상이 지속되면서, 낮에는 폭염이 발생하였고, 밤에는 열대야가 빈번히 발생하였다.

2013년 한반도 폭염은 주로 북태평양 고기압의 강화와 대류활동에 의해 영향을 받았다. 2013년 여름(7, 8월)동안 북태평양 고기압과 대류활동은 평년에 비해 매우 강화되었다. 특히 북태평양 고기압은 오키나와에 중심을 두고 계속 강화되었고 점점 서쪽으로 확장함에 따라, 한반도 전역은 매우 더웠다. 2013년 한반도 폭염이 가장 강했던 8월6일부터 8월 22일 동안 한반도 주변 해수면 온도는 북태평양 고기압으로 인한 맑은 날씨가 지속되면서, 평년에 비해 2°C 높았다.

한반도 폭염의 시중 예측성을 조사하기 위해서 TIGGE(THORPEX Interactive Grand Global Ensemble)에서 예측된 일 최고기온(TMAX), 편의 보정된(Bias corrected) 일 최고기온(BCT) 그리고 KHI를 이용하였다. TIGGE자료는 각 기관으로 수집되고 다시 다운받는 과정에서 2일이 지연되기 때문에 예측정보를 사용할 수 있는 5일전의 선행시간에 대해 집중적으로 분석을 하였다.

TMAX 방법은 한반도 최고기온을 과대모의 하는 KMA가 예측성이 가장 뛰어났지만, BCT를 이용할 경우에는 KMA의 예측성은 다른 모형과 달리 감소하였다.

KHI 방법을 이용하여 2013년 폭염 예측성을 평가한 결과, 선행시간이 5일일 때 NCEP, CMC와 같이 타 모형에 비해 공간해상도가 낮은 앙상블 예측 시스템을 제외하고는 TS가 0.7 이상의 높은 값을 나타내었으며, 그랜드 앙상블 예측시스템도 0.73의 높은 TS 값을 나타내었다. 또한 KHI는 TS 중 우연히 맞힐 수 있는 경우를 제외한 ETS 검증 결과도 다른 방법에 비해 좋은 예측성을 보였다.

따라서 한반도 폭염발생 예측성은 대기 순환 패턴을 이용한 KHI방법이 가장 우수하였으며, KHI방법은 2014년 실시간 예측에서 폭염의 예측가능성을 보였다. 최근 가장 폭염이 강했던 2013년 폭염 사례에 대해서만 분석을 하였지만, 적어도 5일 전에 폭염 발생을 예측할 수 있는 한반도 폭염 예측 시스템이 개발 된다면 이와 연관된 부처에 중요한 정보를 전달할 수 있을 것이다. 또한 폭염 시중 예측을 통해 사회·경제적 피해를 줄이는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서 제시된 KHI는 지자체별 상세한 폭염 예측 정보를 제공하는 것에는 한계가 있다. 따라서 앞으로 지자체 단위의 폭염 예측정보를 제공하기 위해서 지속적인 연구가 필요하다.

6. 폭염관리체계 검토 및 개선 방향

기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 온실가스 감축을 실행하지 않았을 경우 21세기기 후반까지 4~7°C의 기온상승을 예상하고 있다. 이런 상황이 실제로 발생할 경우 폭염의 빈도수, 강도 및 지속기간은 현재 수준보다 더욱더 빈번하고 강하게 나타날 수 있다. 이는 1년 중 신체활동을 할 수 없는 날이 증가할 수 있음을 의미한다. 산업적 측면에서는 작업능력, 노동생산성에 큰 영향을 가져올 수 있고, 기후 변화로 인한 잠재적 건강영향의 결과가 사회경제적 변화를 초래할 수 있음을 경고하고 있다. 이 수준은 사회개발로 인해 얻어진 건강에의 긍정적 영향이 기후 변화로 인해 사라질 수 있는 수준이다. IPCC는 실현가능한 가장 효과적인 적응조치는 필수 공중보건학적 조치를 실행하고 향상시키는 것과 조기 경보 시스템 도입하는 것이라고 보고하였으며, 개발도상국에 국한되는 것이 아니라, 선진국에서도 필요함을 강조하였다(Woodward et al. 2014).

재해보험사인 뮌헨Re에 따르면, 2013년 전반기에 전 세계에 발생한 자연재해들(폭염, 지진, 토네이도등)은 총 450억 달러의 손실을 입혔으며, 뮌헨Re의 보험 손실은 총 130억 달러라고 밝혔다. 또한 2003년 여름에 서유럽을 강타한 예외적인 폭염으로 인해 20,000명 이상의 인명피해가 발생하였고, 그로인한 경제적 피해는 약 80억 달러에 달했다. 우리나라의 경우 1994년 여름철 폭염현상으로 많은 초과사망자가 발생한 바 있으며, 그 이후 폭염·열대성 질환에 의한 인명피해가 증가하고 있다. 폭염은 다른 재난과 마찬가지로 적절한 대응이 이루어지지 않을 경우 천문학적 비용이 소요되며, 사전대비와 시행착오를 최소화할 경우 획기적인 비용절감이 가능하다는 많은 연구가 진행되었다.

유럽에서는 2003년 폭염 발생 후, 폭염에 대한 조기 경보시스템과 함께 대응 대책을 수립하여 시행한 결과 40~60%의 사망자가 감소한 효과를 가져왔다. 따라서 폭염은 조기경보와 적절한 조치를 시행할 경우 충분히 대처 가능하다는 가능성을 보여준다. 유럽의 위험기상에 대한 조기경보는 위험기상발생 전 최대 2주 전까지 기상예보를 생성하고 있다.

따라서 폭염의 예보는 국가기관과 지자체에 매우 가치 있는 경보 역할을 할 수 있으며, 폭염발생 일을 수일 전에 예측하여 제공할 수 있는 조기경보는 비상사태 대책을 수립할 수 있는 추가적인 시간을 확보할 수 있도록 해주기 때문에 매우 중요한 가치가 있다. 한국 기상청

도 2007년 여름 특보제 시범운영을 거쳐 2008년 여름부터 폭염 특보제를 본격적으로 운영하였지만, 개인적으로 주의를 강조하는 것 이외의 그 어떤 구체적이고 체계적 대책을 찾아보기는 쉽지 않다.

본 연구는 국내 폭염 조기경보 시스템, 폭염 적응정책의 연구 현황과 대책을 조사하고, 이들이 시행될 정책 틀인 국내 공중보건 및 보건의료체계, 재난관리체계에 대한 현황조사와 평가를 통해 폭염 적응정책의 한계점을 근거로 국내 폭염 특보제와 관련하여 폭염 조기경보 시스템과 폭염적응 관련 정책의 방향을 제시하였다.

6.1. 한반도 폭염의 피해현황

6.1.1. 폭염과 연관된 환자수

질병관리본부에서는 2011년부터 온열질환 감시체계를 운영하고 있다. 온열질환 감시체계는 응급실이 마련된 전국 540개소의 의료기관으로부터 폭염으로 인한 온열질환(열탈진, 열사병, 열실신, 열경련, 열부종)의 발생현황을 보고 받고 있다.

그림 6-1은 2011년부터 2013년 온열 감시체계를 통해 보고된 온열질환 환자수를 광역시(서울, 부산, 대구, 인천, 광주, 대전, 울산)와 비 광역시(경기, 강원, 충북, 충남, 전북, 전남, 경북, 경남, 제주, 세종)로 구분하여 나타낸 것이다. 2011년에는 전국 온열질환 환자 수만을 조사하여, 광역시와 비 광역시를 구분할 수 없었다. 온열 감시체계를 통해서 보고된 온열질환 환자수는 2011년 443명(7월1일-9월3일), 2012년 984명(6월 1일-9월 6일), 2013년 1,195명(6월 2일-9월 7일)으로 지속적으로 증가하였다. 이러한 증가는 광역시 보다는 비 광역시의 환자수 증가의 영향으로 나타난다. 즉 도시지역에서는 여름 기간 내내 폭염의 피해가 꾸준히 있긴 하지만 농촌지역에서는 여름 중에서도 폭염 특보가 발효되는 등 실제 폭염이 발생하였을 때 피해가 급증하는 것을 의미한다(김도우 등, 2014). 또한 2014년 560명(6월 1일-9월 3일)의 온열 환자가 발생하였으며, 2011년도의 온열환자수와 비슷한 수준이다. 전국평균 폭염일수(33°C가 넘는 일)는 2011년 7.5일, 2012년 15일, 2013년 18.5일, 2014년 7.5일로 평년 10.1일 보다 많았던 2012년과 2013년에는 약 1000명 이상의 온열환자가 발생하였다.

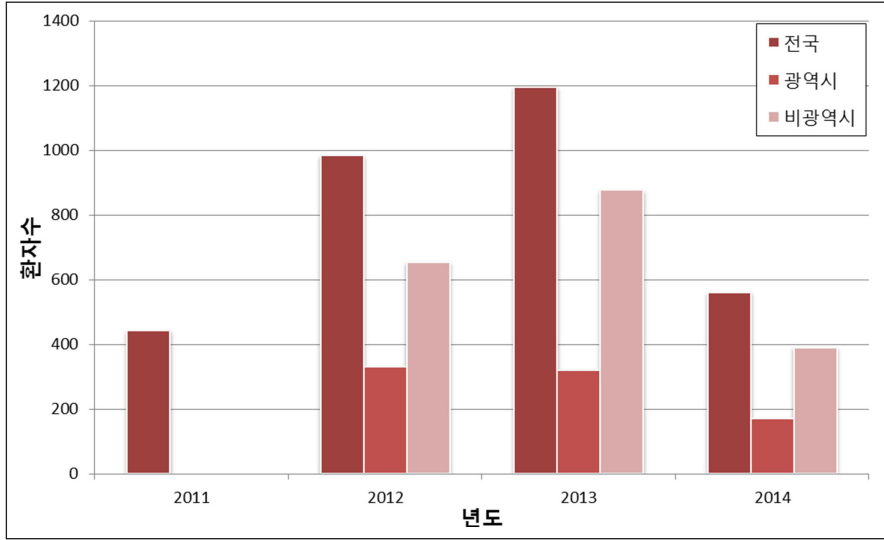


Figure 6-1. Interannual distribution of the heat-related illness(2011~2014).

여름 내 주별 광역시와 비 광역시의 온열 환자수 발생 분포를 보면, 폭염빈도가 가장 많은 8월초에 사망자가 가장 많이 발생하며, 그 다음으로 7월 말에 많이 발생을 한다. 7월 말은 기후학적으로 장마가 종료되는 시점으로써, 농촌지역에서는 병충해 방제를 위한 농약살포 등 야외노동활동이 급격히 증가하는 시기이다. 이 시기에 폭염경보를 인지하지 못하거나, 인지하고도 논, 비닐하우스, 밭 등 고온의 작업현장에서 노동을 해야만 하는 취약계층 때문에 환자가 많이 발생하는 것으로 사료된다. 또한 광역시의 경우에도 무더위에 건강피해를 입을 수 있는 냉방시설이 갖춰지지 않은 곳에 거주하는 독거노인 및 만성질환으로 인해 건강이 좋지 않은 노숙인들이 주요 취약 계층이다. 따라서 장마 후 기온 상승과 더불어 농촌지역의 폭염 취약성이 증가하는 것이다. 또한 도시와 농촌 모두 일 최고기온이 33℃를 초과하게 되면 환자발생률이 급증하지만, 그 증가율은 농촌지역에서 더 크게 나타난다(그림 6-3).

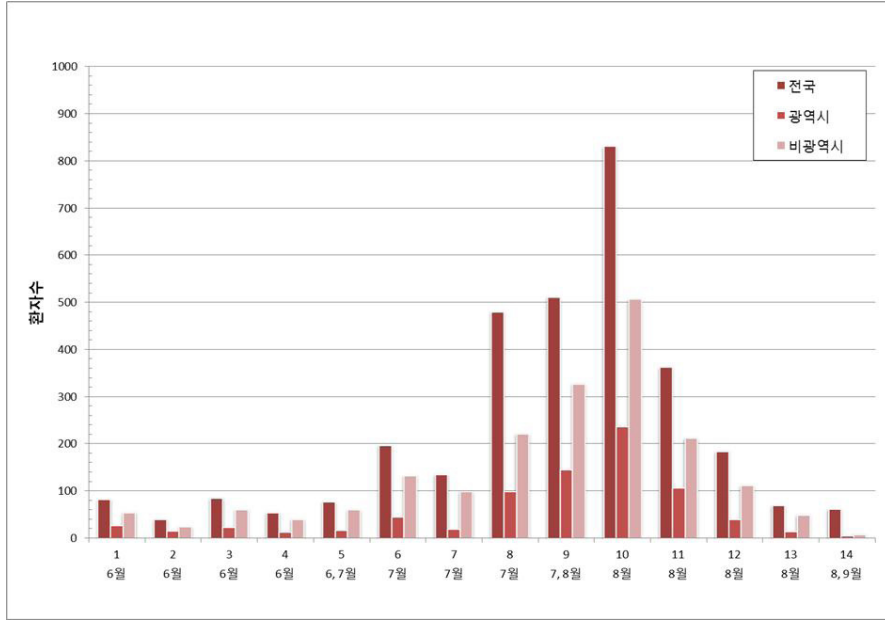


Figure 6-2. Intra-seasonal distribution of the heat-related illness for 4 summers(2011~2014).

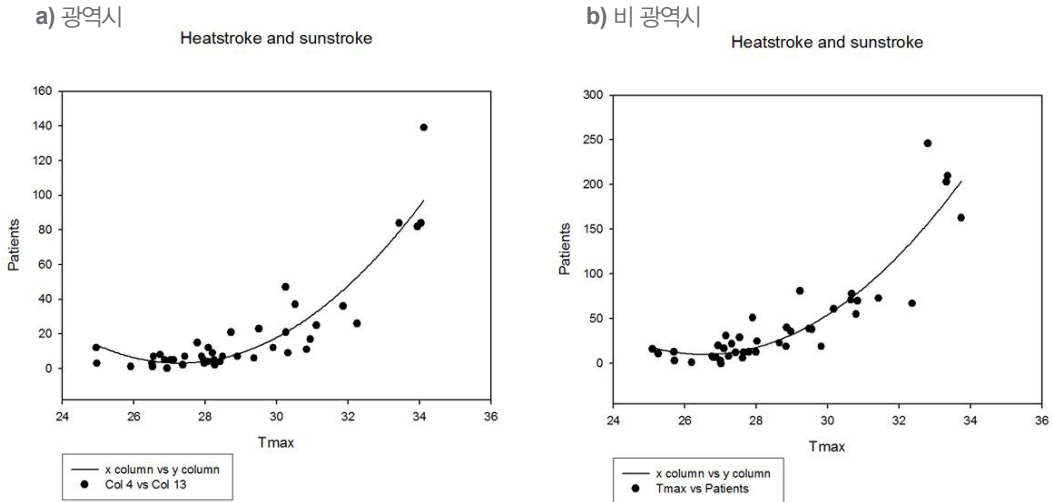


Figure 6-3. Scatter plot of summer maximum temperature and heat related illness in the a) urban and b) rural.

우리나라의 폭염 피해는 시기별, 지역별로 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 현재 우리나라 폭염관리체계에는 여름 전체기간(6월 1일 ~ 9월 30일)동안 폭염특보, 무더위 쉼터 운영, 재난 도우미 활동 등 전국적으로 거의 공통된 대책이 수립·운영되고 있다.

6.2. 폭염관리체계에 대한 검토

6.2.1. 자연재해대책법에서의 폭염

자연재해대책법 제1조(목적)는 태풍·홍수 등 자연현상으로 인한 재난으로부터 국토를 보존하고 국민의 생명·신체 및 재산과 주요기간시설을 보호하기 위하여 자연재해의 예방·복구 그 밖의 대책에 관한 규정함을 목적으로 한다. 또한 「자연재해대책법」 제2조 제2항에 “자연재해”란 태풍, 홍수, 호우(豪雨), 강풍, 풍랑, 해일(海溢), 대설, 낙뢰, 가뭄, 지진, 황사(黃砂), 조류(藻類) 대발생, 조수(潮水), 화산활동, 그 밖에 이에 준하는 자연현상으로 인하여 발생하는 재해를 말한다.

폭염은 자연재해대책법상 자연재해 유형으로 구체적으로 명시되어 있지는 않지만 그 밖에 이에 준하는 자연재해로 정의 할 수 있다. 다시 말해 일정 기온 이상이 수일 동안 지속될 때 인체에 치명적인 영향을 주고, 국가기반체계에 피해를 가져올 경우 “폭염재난”으로 정의 할 수 있으며, ‘재난 및 안전관리 기본법’ 과 이에 준하는 법으로부터 국가재난으로 관리의 필요가 있을 시 적용될 가능성은 있다.

현재까지 폭염의 예방, 대비, 대응, 복구에 대한 구체적인 내용은 언급되어 있지 않다. 따라서 폭염이 발생하였을 시, 범정부적 폭염 대책을 강구하기 위한 국가위기관리 기본 지침 및 위기관리 표준 매뉴얼(표 6-1)이 존재하지 않는다.

Table 6-1. 국가위기관리기본지침(대통령 훈령 제 29호) 및 『풍수해 재난』 위기관리 표준매뉴얼

구분	판단기준	비고
관심 (blue)	<ul style="list-style-type: none"> • 태풍빈발시기 • 우리나라에 영향을 끼칠 가능성이 있는 태풍의 발생 • 호우 빈발시기 • 중앙대책본부 : 24시간 상황근무 체계 가동(6개 기관 7명) - 여름철 자연재난 대책기간(5.15~10.15)운영 	<ul style="list-style-type: none"> • 징후 감시활동
주의 (Yellow)	<ul style="list-style-type: none"> • 태풍 예비특보 또는 태풍주의보가 발령되고 태풍에 의한 대규모 재난이 발생할 가능성이 나타날 때 • 호우 예비특보 또는 호우주의보가 발령되고 호우에 의한 대규모 재난이 발생할 가능성이 나타날 때 • 중앙대책본부 비상 I 단계 가동 근무인원 : 호우 18명, 태풍 19명 	<ul style="list-style-type: none"> • 기상관측 및 예보 모니터링 • 협조체제 가동

구분	판단기준	비고
경계 (Orange)	<ul style="list-style-type: none"> 태풍경보가 발령되고 태풍에 의한 대규모 재난이 발생할 가능성이 농후할 때 호우경보가 발령되고 호우에 의한 대규모 재난이 발생할 가능성이 농후할 때 중앙대책본부 비상 II 단계 가동 -근무인원: 29명 + 필요 유관기관(16명 중 추가) 	<ul style="list-style-type: none"> 대비계획 점검
심각 (Red)	<ul style="list-style-type: none"> 태풍경보가 발령되고 태풍에 의한 대규모 재난이 발생할 가능성이 확실 할 때 호우경보가 발령되고 호우에 의한 대규모 재난이 발생할 가능성이 확실 할 때 중앙대책본부 비상 III 단계 가동 - 근무인원 : 30명+16명(전체유관기관)=> 46명 ※전 부처 및 유관기관 비상근무 	<ul style="list-style-type: none"> 재난 사태 선포 즉각 대응태세 돌입

6.2.2. 폭염특보제 및 폭염대응대책

• 우리나라 폭염특보제 운영 현황

기상청은 여름철 무더위로부터 국민의 건강을 보호하고, 각종 야외활동과 산업현장등을 지원하기 위하여 2006년 9월 폭염특보제 도입을 위한 계획을 수립하였으며, 2007년 7월 1일부터 9월 30일까지 3개월간 시험운영을 실시한 후, 2008년 6월 1일부터 폭염특보제를 시행하였다. 폭염특보제는 2단계인 폭염주의보와 폭염 경보로 나뉘며(표 2-2), 6월에서 9월 까지 운영되고, 폭염특보에 포함된 내용은 대상구역(시·군별), 발표시각, 발효시각이다. 그러나 최고기온을 기준으로 폭염 특보를 발령하고 있어, 기온 특보 외 폭염관련 다양한 정보 제공이 부족한 실정이다.

지구온난화로 인하여 폭염의 발생빈도수의 증가, 강도의 심화, 그리고 지속기간의 증가에 따른 인명피해는 증가될 것으로 보이며, 이에 대한 사전예방이 절실히 필요한 상태이다.

- 국가별 폭염특보제 운영 현황

우리나라의 폭염 특보기준과 해외 폭염과 연관된 특보발령기준을 비교하기 위해 미국은 폭염특보 발령 시 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)의 연방 기상청 열지수를 이용하여 4단계 특보발령기준을 구분하였다(표 6-2). 폭염 특보가 발령되면 해당지역의 기상예보와 열지수를 발표한다. 그러나 미국의 경우에도 단계별 대응방안에 대해서는 명시하고 있지 않다.

영국의 경우는 지역에 따라 임계온도의 값이 약간의 차이가 있으나 지역 평균 낮 30℃, 밤 15℃를 기준으로 폭염특보제를 6월 1일부터 9월 15일까지 실시하며, 폭염경고단계에 따라 국가 대응체계를 마련하여 단계별로 폭염 대응정책을 실시하고 있다(표 6-2).

프랑스는 4단계 경보시스템으로 이루어진 국가폭염 대책을 실시하며, 보건부, 의료진, 소방관, 경찰등은 경보단계별로 규정된 의료 및 행정서비스, 대국민 경보 및 통보활동을 실시한다.

일본은 90년대 초반부터 폭염 대비 방안을 마련하여, 폭염정보를 정확하게 제공할 수 있는 지수(Wet bulb globe Temperature: WBGT)를 선정하여 특보단계를 5단계로 지정하여 실행하고 있다.

그러나 우리나라는 최고기온과 지속기간을 이용하여 기준값(33℃이상이 2일 이상 지속된 경우)을 정하고 있지만, 외국의 사례를 보면 열지수, 최고기온, 최저기온, 습구온도등을 사용하고 있어 개선의 여지가 있다. 또한 폭염 특보의 단계 역시 대부분의 국가에서 4단계 이상으로 구분되어 있지만 우리나라는 2단계로 개선이 필요하다.

Table 6-2. 국가별 폭염경보 발령 기준 및 경고단계 비교

구분	미국	영국	프랑스	일본
폭염경보 운영기간	5.1~9.30	6.1~9.15	6.1~8.31	6.1~10.31
폭염경보 운영기관	기상청(NOAA)	기상청(Metoffice)		환경성(NIES)
폭염경보 발령기준	열지수	최고/ 최저기온 낮: 최고기온 30℃ 밤: 최저기온 15℃	최고/ 최저기온	습구흑구온도
	전국적으로 동일	지역에 따라 약간 다름		지역에 따라 약간 다름
폭염경보 단계	Excessive Heat Outlook - 3~5일 동안 100°F 이상인 날이 지속(5월 1일 ~ 6월 30일) - 3~5일 동안 100°F 이상인 날이 지속(7월 1일 ~ 9월 30일)	Awareness 폭염대책을 계획하기 위해 지속적인 준비	Vigilance 6월 1일부터 8월 31일까지 기상학적 모니터링	1단계 21℃ 미만
	Excessive Heat Watch - 24~28시간 예보체계로 최대 열파지수가 106°F를 넘고, 밤에는 최소 열파지수가 80°F이상 3시간이나 연속 2일 이상 지속, 또는 야간 최소 온도가 115°F인 경우	Alert 최소한 3일 예보에서, 한 지역이 임계온도와 같거나 높은 경우	Alert 3일 예보에서 임계온도를 1곳의 지자체에서 3일 연속 초과	2단계 21~25℃ 미만
	Heat Advisory 24시간 예보체계로 - 1일 이상의 열파지수가 98~105°F정도(5월 1일 ~ 6월 30일) - 1일 이상의 열파지수가 100~105°F정도(7월 1일 ~ 9월 30일)	Heatwave 임계온도 이상인 지역이 여러 지역에서 관측	Intervention Alert 단계가 다음 2일 동안 지속	3단계 25~28℃ 미만
	Excessive Heat Warning 24시간 이내 예보체계로 최대 열파지수가 106°F가 넘고 밤 최소 열파지수가 80°F가 넘는 경우가 3시간이나 연속 2일 이상 지속, 또는 야간최소 온도가 115°F 이상	Emergency Heatwave가 지속 되거나 심해져 폭염의 영향으로 전력이 나 식수 등의 공급이 부족	Requisition 24시간 예보에서 임계온도 초과가 여러 지역에서 지속되는 경우	4단계 28~31℃ 미만
				5단계 31℃ 이상

※소방방재청(2009)내용을 재구성 함

6.2.3. 폭염대응대책 현황과 문제점

현재 폭염 대책 현황은 폭염 발생 시 인명피해 예방을 위해 폭염에 취약한 사람을 보호하고 관리할 수 있도록, 지자체 단위의 재난대책안전본부 차원의 T/F팀을 구성하여 폭염 상황 관리시스템을 운영하고 있다. T/F팀은 폭염주의보 또는 경보 발생 시 문자서비스를 제공하고, 무더위쉼터 운영, 취약계층 방문 건강관리 프로그램등을 실시하고 있다(표 6-3).

재난도우미서비스는 사전에 취약계층을 파악하고 건강상태를 점검관리하며, 응급상황을 대비하여 크로샷을 활용한 재난도우미 비상연락망을 구축하였다. 또한 평소 노인들이 자주 이용하고 쉽게 접근할 수 있는 생활공간 주변 시설(경로당, 주민센터, 마을회관, 주민회관 등)을 무더위 쉼터로 운영하고 있으며, 폭염피해 발생에 대비해 응급의료기관에 비상 진료 명령 및 유관기관 협조 요청을 한다. 그러나 현행 폭염대책은 대부분 소방방재청 “폭염대비 종합대책” 지침을 위임받아 구·군에 전달하는 수준이며, 여름철 한시적인 단기 대책이 대부분으로 폭염 특보발령에 대비한 사후관리에 불과한 수준이다. 무더위 쉼터의 경우도 냉방기 보유, 수용인원, 접근정도 등에 대한 분석과 평가 없이 운영되고 있어, 에어컨이 없거나 설치되어 있어도 전력비 지원이 미비하여 가동이 중단된 곳이 대부분이다. 폭염 경보 발령 시 노인돌봄서비스와 방문건강관리를 받지 못하는 취약계층 관리가 부족하며, 무더위 쉼터가 멀리 있는 곳, 냉방시설이 부족한 노후주거지, 녹지 공간이 없는 곳 등 폭염에 취약한 환경에 노출된 계층이 대부분이다. 따라서 취약계층 관리 및 취약환경 개선이 필요하다.

기상청에서 발효되는 폭염특보는 폭염발생 전 길게는 하루 전, 짧게는 5 시간 전에 발효되기 때문에, 사전 대비기간이 매우 짧다. 따라서 효과적인 폭염적응대책 수립을 위해서는 앞서 개발된 7일전 폭염을 예측정보를 이용하여 폭염 발생 전 응급대책팀을 구성하고 폭염에 대한 위험성을 인식시키는 것이 중요하다.

Table 6-3. 크로샷 활용 폭염 정보 전달체계도(부산발전연구원)

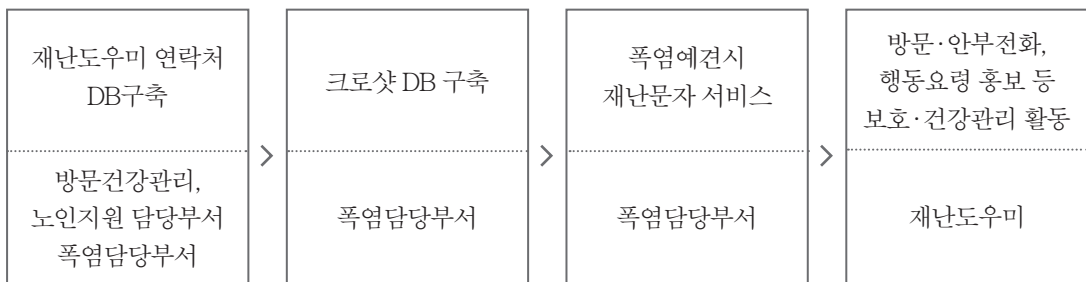


Table 6-4. 국가별 폭염대응정책 비교(소방방재청, 2009)

구분	미국	영국	프랑스	일본
폭염 대응 시스템	열지수, HHWS	HHWS	HHWS	WBGT
대응 단계	EHE Program	단계별대응방안		
		4단계	4단계	5단계
폭염 대책	① EHE예측 - 1~5일 전에 예측가능한 기상정보 입수 ② EHE 위험평가 - 폭염과 사망자수 추정 모델 개발 - 폭염취약계층에 대한 정보 확보 - 폭염취약계층의 대피장소에 대한 정보확보 ③ EHE 대응 - 쿨링센터 이용에 대한 정보 방송의 유무 - 폭염에 대한 정보를 국민에게 전달했는가의 유무 ④ EHE 완화 - 도시열섬현상을 저감시키기 위한 노력의 유무	① 여름을 대비한 준비와 장기대책을 수립 ② 피해를 줄이기 위해서 신속하게 행동을 취하고 대비 ③ 폭염취약계층에 대한 특별한 대비 ④ 전 국민을 위한 대비	① 여름동안 예방을 위한 대중 홍보 및 일반적인 계절적 조사를 수행 ② 지역단위에서부터 국가 규모의 대국민 서비스체계를 가동 ③ 의학적이고 사회적인 조치를 실시 ④ 폭염이 연장되거나 지속되는 경우 특별한 조치 수행	① 수분의 보충이 필요 ② 열사병에 의한 사고가 발생할 가능성 있음, 충분한 수분섭취 ③ 열사병 위험증가 수분 보충, 심한 운동은 30분 간격으로 휴식 ④ 열사병 위험높은 심한 운동이나 오래 걷는 것은 피함, 운동시 적절한 휴식을 취하고 수분을 보충 ⑤ 피부온도보다 기온이 높아짐, 운동중지
폭염 취약계층	- 65세 이상의 고령자 - 4세 이하의 영아 - 비만, 고혈압, 심장관계 질환을 앓고 있는자 - 우울증, 수면장애, 순환기장애 등으로 약물을 복용하는 자 - 저소득층이나 노숙자	- 양로원이나 자택에 거주하는 75세 이상의 고령자 - 정신질환자, 치매 및 다른 사람의 도움으로 거동 가능한 자 - 거동불편자 - 특별한 약을 복용하고 있는자 - 4세 이하의 영아	- 65세 이하의 고령자 - 5세 이하의 어린이 - 파킨슨, 심장질환, 비만 등의 만성질환자 - 약물 치료중인 환자 (우울증 치료제, 신경이완제 등)	- 고령자 - 탈수증상이 있는 사람 - 비만한 사람 - 병이 있는 사람
기타 폭염 대책	- Cool roof 정책 실시 - 'buddy' 시스템 운영	- 전문가와 일반 국민을 위한 보고서 작성 - 개개인의 폭염위험인식 확인 및 교육	- 자치단체는 매년 6월 폭염위원회를 설치 폭염대책을 직접 지휘 - 무더위시 행동요령에 관한 브로셔 배포	- 인공배열(背熱) 대책의 검토 - 폭염가이드라인의 작성과 보급 - 도시열섬현상의 관리
관련 보고서	EHE program NOAA, CDC, FEMA	Heat wave plan for England 영국보건안전성		열사병 매뉴얼 환경성

• 폭염 상황관리 및 대응체계

폭염 대책기간은 매년 6월 1일부터 9월 30일까지이며, 소방방재청, 보건복지부, 고용노동부 등 14개 부처·자치단체가 참여하고 있다. 폭염상황관리 및 대응체계는 관계부처 및 지자체(시·도, 시·군·구) 별 각 T/F팀을 중심으로 폭염대응 종합대책을 추진하고 있다(그림 6-4). 폭염대응 기관별 주요역할은 표 6-5에 나타내었다.

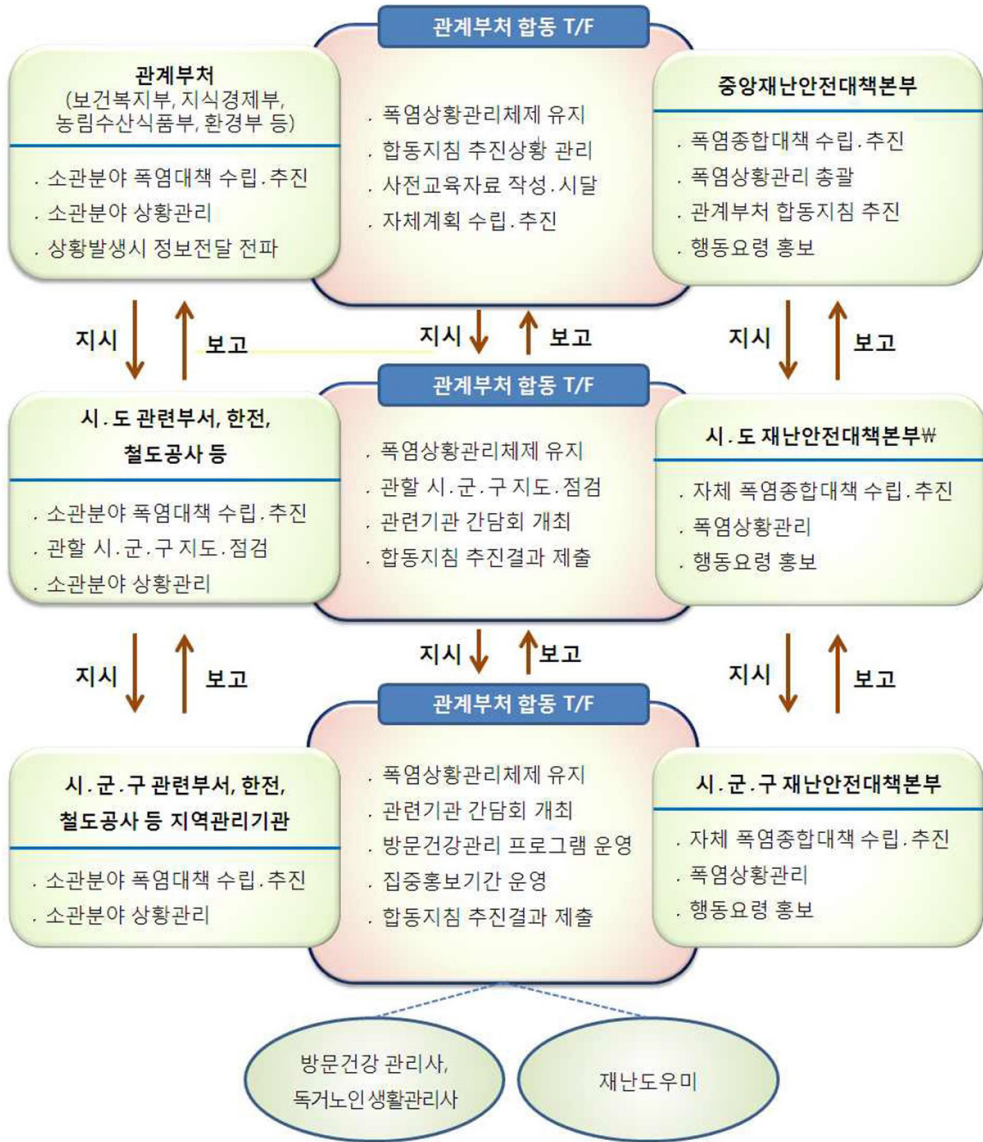


Figure 6-4. 폭염상황관리 및 대응체계 (출처 : 2012년 폭염 종합대책 백서)

Table 6-5. 기관별 폭염대응 주요역할 (소방방재청, 2014)

구분	주요역할
소방방재청	<ul style="list-style-type: none"> • 폭염 종합대책 수립 총괄 및 상황관리체계 운영 • 폭염특보 대국민 전파 및 행동요령 홍보(CBS, 재난문자방송) • 폭염 대비 현장밀착형 응급구급체계 운영(119 구급)
보건복지부	<ul style="list-style-type: none"> • 거동불편자, 독거노인, 노숙인 등 취약계층 보호대책 추진 • 방문건강관리 전문인력 활용 폭염대비 건강관리 사전 교육·홍보 • 전국 응급실이 마련된 의료기관 기반 폭염 건강피해 감시체계 운영
고용노동부	<ul style="list-style-type: none"> • 조선·항만, 건설현장 등 폭염 취약사업장 근로자 안전관리, 교육·홍보 • 무더위 휴식시간제(Heat Break, 14~17시) 운영 지도
교육부	<ul style="list-style-type: none"> • 유치원, 초·중·고등학교 학생 폭염 피해 예방, 교육·홍보
농림축산식품부 해양수산부	<ul style="list-style-type: none"> • 농·축·수산 분야 피해 예방 및 관리대책 추진 • 농축·수산 폭염 피해 복구지 지원
국토교통부	<ul style="list-style-type: none"> • 기차·지하철·고속철 등 시설물 안전 대책 마련
산업통상자원부	<ul style="list-style-type: none"> • 하계 전력수급 안정대책 수립 • 공공기관 하절기 에너지절전 규제 추진시 무더위쉼터 제외 • 가스·정유시설 등 폭발 가능성 주요시설 특별 점검
방송통신위원회 미래창조과학부 문화체육관광부	<ul style="list-style-type: none"> • 폭염대응 대국민 행동요령 홍보 ✓ 지상파·종합편성채널·케이블 방송사, 전광판 등을 통한 대국민 폭염 행동요령 홍보
국방부	<ul style="list-style-type: none"> • 폭염시 군사 교육·훈련·작업 통제 등 군장병 안전대책 추진
기상청	<ul style="list-style-type: none"> • 폭염특보 발표 및 기상감시·분석·상황 등 정보 전파 • 폭염 관련 생활기상지수 등 대국민 기상정보 서비스
경찰청	<ul style="list-style-type: none"> • 지역경찰 활용 농어촌 영농작업장 순찰활동 전개
지자체	<ul style="list-style-type: none"> • 폭염특보시 마을앰프·가두방송 등 대국민 홍보 • 무더위 휴식시간제(Heat Break, 14~17시) 운영 • 재난도우미 활용 폭염 취약계층 보호활동

6.2.4. 공중보건위기 대응능력

공중보건 위협은 항상 존재하고 있으며, 자연재해, 사고와 의도적인 수단 등 발생 원인에 따라 큰 차이 없이 공공의 건강문제에 위협으로 나타날 수 있다. 따라서 공중 보건에 위협을 예방, 대응, 빠른 복구를 하는 것이 각 국가의 국민의 건강을 보호하는데 무엇보다 중요하다.

우리나라의 경우 자연재난, 방사능, 화학물질, 전염병 등 관련 영역별로 관할 기관이 다르게 규정되어 있고, 재난 전체를 총괄하는 “재난 및 안전관리 기본법” 등 관련 법령에는 필요한 절차만을 규정하고 있어 현실적으로 요구되는 능력에 대한 규정이 없어, 문서작업 위주, 사후 수습 위주의 조치만이 가능한 실정이다. 따라서 9.11 테러 이후 국가적으로 위기 대응 체계를 강화하고 있는 미국의 사례를 참고하고자 한다. 이는 폭염과 연관된 대응체계 구성 시에도 근간으로 작동하기 때문에 향후 기후관련 재난 대응 체계의 실질적인 발전을 위한 참고자료로 활용할 수 있을 것이다.

폭염과 관련한 해외의 사례도 공중보건위기 대응 역량의 일부를 활용한 사례들로 분류할 수 있어, 향후 한국사회에서 기후관련 재난 관리 프로그램을 개발할 경우 활용할 여지가 크다.

- 국내 재난대응 의료 지원체계의 문제

국내에서는 자연 재난 발생시 의료지원과 관련하여 또는 재난 및 안전관리 기본법에 의거하여 현장에서의 긴급구조를 수행하도록 되어 있으며 이러한 기능을 담당하는 기관은 소방조직으로 일원화되어 있다. 아울러 현장에서 발생한 사상자를 현장에서부터 신속한 응급 처치, 중증도의 분류, 적절한 병원으로의 이송 등 현장 응급의료소 운영과 관련하여 응급의료에 관한 법률에서 규정되어 있는데, 권역응급의료센터, 해당지역의 보건소장이 이에 대한 책임을 맡는 것으로 규정되어 있다. 그러나 재난대응에 대한 의료지원을 체계적으로 정의하고 이를 위한 법적 제도적 규정이 결핍되어 있고, 재난별로 사전에 충분한 대응/대비 훈련, 필요 물품 구비 등 실질적 대비태세는 충분히 운영되고 있지 못하여 구체적인 재난 발생시에는 효율적인 대응을 할 수 없는 형편이다. 기후 변화와 관련하여 대규모의 환자가 발생할 경우, 의료수요 급증에 대하여 고려하고 있지 못하여 그 피해가 더 커질 가능성이 있다.

미국 의학회가 지원하고 질병통제본부가 개발한 국가재난의료지원프로그램 (National Disaster Life Support)에 의하면 재난의료의 기본 내용으로는 다음의 일곱 가지가 포함되어야 한다. 재난에 대한 의료지원은 재난 상황의 인지 (Detection), 재난 통제본부의 설치 및 운영 (Incident Commander), 재난 현장에서의 안전의 확보 (Safety), 재난 위험 물질의 평가 (Assessment), 중증도 분류 및 응급처치 (Triage and Treatment), 환자의 이송 (Evacuation and Transport), 회복지원 활동 (Recovery) 등으로, 재난의 인지에서 회복에 이르는 일련의 과정을 포함함으로써 재난 대응 의료지원이 포괄적인 수준에서 제공될 수 있도록 하였다 (NDLSF, 2004)

그러나 국내 재난 대응 의료지원체계는 현재 1) 개념, 2) 지원이 필요한 재난의 정의, 3) 재난 대응 의료지원의 내용, 4) 재난 대응 의료지원의 책임기관, 5) 재난대응 의료지원의 예산, 6) 재난 대응 의료지원을 위한 대비인력의 배치 및 운영, 7) 재난 대응을 위한 구체적인 의료지원 프로그램, 8) 재난 대응 의료인력 양성 계획 등 모든 부문에서 그 내용이 부족한 상태이며, 재난은 한 가지 동일한 유형으로 나타나는 것이 아니라 여러 가지 복잡한 유형별 특성을 가지면서도, 이로 인하여 발생하는 환자 특성 역시 매우 다양하므로 의료지원프로그램 역시 그 다양성에 근거하여 구체적으로 개발할 필요가 있다고 하겠다.

- 현 재난의료체계 내용의 수정보완 필요성

현재 재난의료체계의 근간을 이루고 있는 주요 내용은 대량환자 발생시 현장응급의료소의 설치 및 운영 지침 및 대량환자 발생시 응급실 운영 지침 등이다. 그러나 종합적인 재난보건의료지침이나 병원 내 재난 및 특수 재난과 같은 재난의료의 체계 정립측면에서 필요 분야에 대해 정리된 내용이나 지침의 미비 혹은 부재로 인하여, 이들에 대한 보완의 필요성을 지적하고 있다. 또한 광역 및 기초 자치단체의 보건기관이 기후변화와 관련된 재난이 발생할 경우 이에 대한 대비가 거의 전무하기 때문에 건강상의 위해에 적절히 대응하기 어렵다. 따라서 미국의 질병관리본부 등 재난 대응 기관의 주요 연구결과를 중심으로 요구되는 핵심활동과 필요능력을 바탕으로 향후 대책 수립 시 판단 근거로 사용하고자 한다(표 6-6).

Table 6-6. 공중 보건 위기 대응을 위한 역량

생물학적 감시체계 - 공중보건 실험실 검사 - 공중보건 감시체계와 역학조사 지역사회 회복력 - 지역사회 대비 - 지역사회 복구 보호조치와 완화/경감조치 - 의료적 대응조치의 시행 - 의료 물품의 관리와 분배 - 비약물적 중재방법 - 대응 요원의 안전과 건강	사건 관리 - 위기 활동 조정 정보 관리 - 위기 경보 체계 - 정보 공유 Surge Management - 사망자 관리 - 대량 처치 - 의료 수요 급증 관리 - 자원봉사자 관리
---	---

6.3. 폭염경보 및 대응체계 개선방향

위의 연구결과와 IPCC 5차 보고서의 4가지 적응대책을 고려하여 폭염 대응과 관련한 정책을 제안하고자 한다. 지금까지 조기경보체계를 제외하고는 구체적인 프로그램의 예시가 부족하고, 폭염과 다른 전반적인 기후변화의 건강 영향이 큰 틀에서 다르지 않으며, 공통의 역량과 체계 그 성공과 실패가 영향을 받게 되는 점을 고려하여, 폭염의 예측과 관련한 전체적인 시스템과 관련하여 주요 고려 사항을 중심으로 기술한다.

6.3.1 취약성 평가 체계 구축

• 취약성 평가 지표에 대한 연구

기후변화 건강 취약성 평가지표 개발 연구(신호성, 2014)와 저소득계층의 기후 변화 적응 역량 강화를 위한 정책 방안 연구(추장민, 2010, 2011)가 시행되어 평가와 적응방안을 위한 모색을 하고 있으나, 이해관계 당사자, 정책담당자, 일반 시민 모두에서 합의를 이루기 위해서는 후속 연구의 활성화가 필요하다.

기후변화 건강 취약성 평가지표 연구에서는 사용한 지표의 측정값들에 대한 추가 연구가 필요하다. 현재 가용한 지표들 중 선택할 수밖에 없는 한계점이 있지만, 지속적인 연구를 통해 타당한 측정값을 발견하기 위한 노력이 필요하다. 특히, 기후환경 관련한 지표의 경우

IPCC 5차 보고서에서 제안하듯이 다운스케일링, 다수준분석 등 새로운 방법을 적용한 연구를 통해 타당성이 높은 지표를 개발하기 위한 연구가 필요하다. 지역박탈지수 등 최근 연구에 활용되고 있는 취약성 지표에 대한 검증을 통해 타당성과 신뢰성이 있는 폭염 취약성 지표의 개발이 필요하다.

주요 질환을 활용한 건강수준 지표도 건강보험청구자료를 활용하였는데, 지역별 해당질환의 청구 분율이 실제 유병율을 반영하는지에 대한 연구도 필요하다. 특히, 한국사회의 건강보험 청구 자료에서는 건강보험수가제도와 관련되어 천식, 만성폐쇄성 폐질환 등 호흡기 질환은 청구 자료가 질병 유병율을 잘 반영하지 못할 가능성이 높다고 알려져 있다. 미국의 CMS(Centers for Medicare & Medicaid Services)의 경우 청구 자료를 활용하기 위한 변환 알고리즘을 사용을 권고하고 있는데, 이들은 청구시 코드와 실제 치료 유병율간에 신뢰성 있는 상관성이 있다고 알려져 있다. 해당 알고리즘을 한국 건강보험 청구자료에 적용하여 타당성과 신뢰성에 대한 연구가 필요하다.

- 보건의료의 성과지표를 포함한 취약성 평가 도입

보건의료체계의 평가는 주로 구조적 측면의 지표인 인구 천명당 의료인력수, 보건소 직원 1인당 관할 인구수, 지역내 응급의료기관 수 등을 활용하였다. 이들은 보건의료체계의 역량을 반영하는 대리지표로 사용할 수는 있으나, 해당 지역의 보건의료체계의 사회적 수준의 성과를 나타내는 데에는 제한이 있다. 최근 피할 수 있는 사망과 같은 결과 지표, 고위험 인구의 질환 관리율, 검진율, 예방접종율 등 보건의료체계의 지역 건강문제 해결에 기여한 정도를 직접적으로 활용하는 사례가 증가하고 있다(Desai et al. 2011; Schoen et al. 2006).

한국사회에서도 이러한 지표를 활용한 연구가 증가하고 있는 만큼, 이들 지표들을 활용한다면 구조적 취약성뿐만 아니라, 기능적 취약성도 평가할 수 있는 만큼 좀 더 정확하게 기후변화와 관련한 취약성을 평가할 수 있을 것으로 생각한다. 이를 통해 확인된 구조적, 기능적 취약지는 폭염과 관련된 적응 대책 수립시 우선순위 설정에 도움을 줄 수 있을 것이다.

- 폭염 취약성/위험성 지도 개발

폭염 취약성 평가를 통해 지자체 폭염 적응 세부시행계획 수립시 객관적인 기준 제시가 가능하며, 특히 폭염 취약성에 미치는 요소를 파악하여 위험 노출을 저감시키고 적응 능력

향상에 기여할 것이다. 또한 폭염으로 인한 영향은 지자체별로 다르게 나타나기 때문에 지역의 기후 및 지리적 특성을 파악하고 있는 지자체 차원의 적응 대책이 매우 중요하지만 지자체의 경우 자체적으로 세부적응계획을 수립하기에는 예산 및 인력의 부족 등 대응 역량에 있어 한계가 있으므로 중앙정부 차원에서의 지원이 필요한 실정이다(환경부, 국립환경과학원, 2012).

6.3.2. 폭염특보의 개선

현재 운영되고 있는 2단계 폭염특보제(주의보/경보)는 하루 전, 짧게는 5시간 전에 발효되기 때문에, 사전 대비기간이 매우 짧아서, 취약계층이 폭염피해에 노출되기 쉽다. 따라서 현재의 폭염특보 발표 수준을 유지하고 효과적인 폭염적응대책 수립을 위해서는 앞서 개발된 7일전 폭염을 예측정보를 이용하여 폭염 발생 전 응급대책팀을 구성하고 폭염에 대한 위험성을 인식시키는 것이 중요하다. 또한 기상 예측의 정확도 향상과 더불어 세분화된 경보시스템의 구축이 필요하며 이에 상응하는 폭염 대응 대책이 요구된다.

Table 6-7. KHI를 이용한 폭염특보발령 기준 (예시)

단계	경보발령 기준
1단계	6월 1일부터 9월 30일까지 예방을 위하여 기상학적 모니터링
2단계	7일 예보에서 KHI값이 0 이상인 상태가 3일 연속 지속되는 경우
3단계	6월~9월에 일최고기온이 33℃ 이상인 상태가 2일 이상 지속될 것으로 예상될 경우
4단계	6월~9월에 일최고기온 35℃ 이상인 상태가 2일 이상 지속될 것으로 예상될 경우

표 6-7은 해외의 사례와 KHI를 이용하여 한반도 폭염 특보기준을 4단계로 분류한 예시이다. 1단계는 6월1일부터 9월 30일까지 폭염을 예의주시하는 기간으로써, 폭염대책을 위해 지속적인 준비를 하는 기간이다. 2단계는 7일 예보에서 KHI값이 0이상인 날이 3일 이상 지속될 것으로 예상될 때이며, 지역단위에서부터 국가 규모의 대국민 서비스 체계를 가동한다. 3단계와 4단계는 기존의 폭염 특보와 동일하게 분류하였다. 폭염특보 발표기준에 대한 세분화로 폭염에 대한 사전 대비와 취약계층이 폭염피해에 노출을 줄이는 것에 기여할 것이다.

6.3.3. 폭염 위기관리 매뉴얼 작성 및 재난 유형 명시

- 폭염 위기관리 표준 매뉴얼 작성

현재의 폭염 적응대책은 기상청 폭염 특보 발령 시에 맞추어 매뉴얼이 작성되어 있다. 기상청의 폭염 특보는 폭염 주의보와 폭염 경보 단계로 나누어진다. 이 두 단계와 더불어 7일 예보에 맞추어 한반도 폭염 경보 단계를 구분(표 6-7)하고, 이에 맞는 폭염 재난 위기관리 표준 매뉴얼을 작성한다면 폭염에 대한 인명피해를 현저히 줄일 수 있다. 예를 들어 2012년 폭염사례를 보면, 7월 21일에 폭염이 발생하여 8월 7일까지 약 1000명에 가까운 온열질환 환자가 발생하였다(질병관리본부, 2012). 이 당시 중앙 정부는 8월 7일에 국무회의를 소집하였고, 8월 10일에 폭염개선 관계기관 회의(중앙재난안전대책본부)를 개최하였다. 만약에 5일~7일 전의 폭염 예보자료를 이용한다면 좀 더 선제적으로 관계부처의 합동 대책이 가능했을 것으로 보인다. 따라서 일주일 예보에 맞춘 체계적인 폭염 위기관리 표준 매뉴얼 작성에 관한 연구가 필요하다. 즉 국가적 차원의 대응능력 강화를 위한 폭염 위험 경보 단계의 수정 등 정부의 위기 상황 매뉴얼을 재정비할 수 있는 기회를 마련하게 될 것이다.

- 폭염의 재난법상 재난 유형으로 명시

한국사회의 재난관리체계는 재난 전담 관리에 대한 효과적인 재난방제체계를 갖추고 있지 못하다. 다양한 형태의 재난 상황에서 피할 수 있는 손상과 사망이 발생하는 것을 자주 확인하게 되는 것도 이와 관련성이 매우 높다. 폭염이 발생하여 다수의 사상자가 발생하여 의료수요의 급증(medical surge)이 발생할 경우 피할 수 있는 손상을 막지 못할 뿐만 아니라, 이들로 인해 의료기관의 기능이 마비될 경우 2차적인 피해가 발생할 수 있다.

이를 막기 위해서는 재난관리체계가 효과적으로 정비되어야 하는 것과 동시에 지역사회의 보건의료자원의 역량이 일정수준의 의료수요 급증에 대응할 수 있도록 평상시에 계획하고, 지원하고, 역량을 높일 수 있는 투자가 필요하다. 현재의 재난관리체계의 경우 다양한 형태의 재난이 발생하여 건강문제가 발생할 경우 컨트롤 타워 역할은 광역지방자치단체와 보건소, 지역 소방방재본부가 담당하게 되는데, 충분한 가용한 역량을 갖추지 못하고 있어, 대부분의 재난시에 제대로 된 역량을 발휘하지 못하고 있다.

기후변화와 관련한 건강문제 발생이 주요한 자연재난의 목록에 포함될 수 있도록 “재난 안전관리 기본법”을 개정하고, 필요한 체계를 갖추기 위한 노력이 필요하며, 국가 기후변화

적응대책에 이를 반영할 수 있도록 보건복지부, 환경부, 기상청의 공동의 노력이 필요하다. 보건복지부는 지역의 보건의료기관이 재난시 대응할 수 있도록 평상시의 건강수준과 의료이용양상을 분석하고, 지역의 질병부담, 재난시 예측되는 의료수요의 급증에 대응할 수 있도록 의료자원의 배치와 지원할 수 있는 역량을 갖추는 것이 무엇보다 중요할 것으로 생각된다. 현재의 시장으로 표현되는 보건의료체계로는 시장실패, 외부효과가 매우 큰 정책수요를 해결할 수 없을 것이다. 보건의료기본법, 공공보건의료에 관한 법률, 국민건강보험법, 지역보건법 등 보건의료관련 법령을 잘 정비하여 재난에 대응할 수 있는 사회적 역량을 갖추어야, 미래의 기후변화와 관련한 문제에 대응할 것이다.

현재 재난법상에 폭염은 재난에 포함되지 않는다. 만약 재난 법상에 폭염이 재난유형으로 명시 될 경우,

- ☑ 중앙 재난 안전대책본부 차원의 범정부적 폭염 대책을 강구할 수 있으며, 지방자치단체도 지역 재난 안전대책 본부를 가동하여 중앙과 지방, 관계부처간의 협력적 대응시스템을 갖출 수 있다.
- ☑ 국가안전관리 기본계획 및 집행계획에 폭염예방대책을 보다 체계적으로 수립하여, 폭염에 의한 인명피해를 예방하고, 대응, 복구등 단계별 대책을 설립하도록 유도할 수 있다.
- ☑ 지방자치단체의 재난 기금을 폭염 피해대책에 사용할 수 있도록 허용함으로써, 폭염 발생시 기금확보가 가능하기 때문에 신속한 응급대처를 할 수 있다.

• 수평적 연계 · 협조 중요

업무특성상 다수의 부처와 관련되어 있어 개별적으로 추진되고 있는 폭염관련 정책의 시너지 효과 극대화 방안이 필요하다. 따라서 보건복지가족부 등 폭염관련 핵심부처간 명확한 역할분담 및 폭염관련 업무의 연계 · 협조 체제 강화방안 마련이 필요하다.

• 지역적 특성을 고려한 맞춤형 폭염대책 필요

폭염은 장마직후 짧은 기간 동안 발생하는 반면, 집중호우 또는 태풍발생으로 쉽게 상황 종료 됨에 따라 단기간 내 잊혀지는 경향이 있다. 다만, 폭염발생기간 동안 사회적 관심이 집중되면서 자치단체의 불균형한 정책 추진과정이 쉽게 노출된다. 따라서 폭염대책의 내실화 유도 및 지역별 맞춤형 대책으로 차별화 · 집중화 전략이 요구된다.

6.3.4. 지역 건강정책기능 강화

- 건강의 사회적 결정요인을 고려

건강에 영향을 미치는 요인들은 보건의료서비스에만 국한되지 않는다. 개인 또는 인구 집단의 건강 상태를 결정하는 개인적, 사회적, 경제적, 환경적 요인들을 건강의 결정요인이라 하는데, 이러한 건강의 결정요인들은 서로 상호적이며, 건강행태 및 생활습관과 같은 개인의 행동에 관련된 요인들 뿐 아니라, 소득, 사회적 지위, 교육, 고용, 근로 상태, 적절한 보건의료서비스에 대한 접근성, 물리적 환경을 포괄한다.

최근 건강증진사업의 핵심적 요소인 흡연, 음주 등과 같은 개인의 생활습관은 독립적으로 건강에 영향을 미치기 보다는 생활조건이나 노동조건과 같은 건강의 사회적 결정요인들에 크게 영향을 받고 있다. 지역 공동체의 네트워크는 사회적 결정요인이 생활습관에 미치는 영향을 완화시키기도, 악화시키기도 하는 것으로 알려져 있는데, 지역공동체의 특성 그 자체가 그곳에 살고 있는 주민들의 건강에 중요한 중재적 역할을 하고 있다는 것이다. 이들 지역공동체 네트워크는 자료 분석과 중재방안 개발시, 환경적, 사회적 요인의 노출도가 건강수준에 미치는 영향을 고려하고, 건강마을 등 지역 공동체 네트워크, 만성질환관리모형 등 보건의료체계와 사회적 네트워크가 함께 적극적으로 참여하는 체계를 통해 취약계층의 중재방안을 마련하는데 필수적이다. 최근 지역마다 지역공동체 복원을 통한 건강향상 및 질병관리체계 마련에 활용하고 있는데, 폭염 등 기후변화 관련 적응정책에서도 이를 고려한 정책수립이 필요하다. 하향식 정책수립과 집행으로는 파악할 수 없는 필수적인 정책요소를 위해관리 체계에 통합할 수 있는 필수적인 과정이다.

- 공중보건정책과 의료정책의 보완적 활용

보건의료 정책은 크게 의료정책과 공중보건정책으로 분류할 있는데, 정책 목표는 건강을 보호·증진하고 수명을 연장한다는 점에서 동일하지만, 그 접근 방법, 즉 정책수단은 서로 차이가 있다. 의료정책은 질병의 진단과 치료를 통해서 그 정책 목표를 달성하고자 하며, 따라서 개인 중심적 접근이며, 의료전문가의 역할과 병원의 역할이 강조되는 특징이 있다. 여기에는 만성질환관리 모형 등과 같이 전통적 의료전문가의 역할과 함께 환자, 보호자, 지역사회체계가 함께 참여하는 모형의 모색하는 것이 해당된다.

공중보건정책은 사회의 조직적 노력을 통해 그 정책 목표를 달성하고자 하며, 집단적 책임성을 강조하고, 인구집단 중심이며 건강의 결정요인에 대한 사회의 역할을 강조하는 특징이 있다. 건강도시사업, 건강 마을 만들기 등 주민 참여형 건강증진모형을 주요한 중재 기전으로 활용하는 것이 이에 해당한다.

IPCC 5차보고서의 취약성을 감소시키는 전략 중 필수 공중보건 및 보건의료체계의 기능을 향상시키는데 활용 가능한 핵심기전이자, 다른 부문의 역할을 통합하는 중요한 기전이다.

- 지역의 건강컨트롤 타워의 강화

건강의 사회적결정요인, 건강행태요인, 만성질환의 유병율, 사망률 등에 지역간, 계층간 격차가 존재하는 것은 이미 알려진 사실이고 지역간 격차는 계층간 격차와 맞물릴 경우 부정적인 방향으로 그 크기와 영향이 커지게 된다.

현재의 중앙정부의 정책만으로는 건강 및 보건의료 영역 전반에 걸쳐 나타나는 이러한 양상을 실질적으로 줄여가기에는 한계가 있다. 중앙정부의 보건의료체계, 건강보험 등 재원 조달체계, 진료전달체계 등 전 영역에 걸친 노력과 함께, 지역별로 건강과 보건의료 영역의 컨트롤 타워 역할을 할 광역정부 보건관련부서, 기초정부의 보건소 등이 강화되어야 정상시의 건강수준이 높아지고, 기후 변화와 관련한 취약성을 감소시킬 수 있다. 기후와 관련한 재난적 상황에서도 실제적인 예방/구난/구호/의료서비스를 제공을 하는 기관역시 광역정부/기초정부 등 지역의 기관이며, 자원봉사 등을 통해 이를 지원하는 사람들 역시 지역주민이므로, 기후변화 적응정책의 성과 향상을 위해서는 반드시 필요한 영역이다.

- 만성질환관리 역량 향상을 위한 공중보건 및 보건의료체계의 개선

만성질환에 대한 효과적인 대응체계는 의료진과 환자간의 생산적 상호작용을 기반으로 한다. 상호작용이 효과적으로 작용하기 위해서는 지역사회 공중보건 및 복지체계와 보건의료체계 모두가 만성질환의 치료와 관리에 참여하는 것을 의미한다. 이러한 관계는 일상적인 질환관리의 프로그램 속에 기후변화와 관련된 폭염시기의 관리대책 등이 쉽게 동화되어 시행하는 것이 가능함을 의미한다. 방글라데시의 싸이클론 경보 메시지 전달 체계와 같은 적절한 의사소통 방안이 자연스럽게 질환관리와 상승작용이 가능하다. 폭염 경보가 제시되어 대중매체와 보건의료체계 모두에게 알려졌을 때, 지역사회의 공중보건 프로그램, 병의원의 진료팀 모두가 심혈관질환, 호흡기질환, 당뇨병 등을 앓고 있는 환자들에게 필요한 중재정보를

전달하여 피할 수 있는 입원, 사망 등을 막을 수 있게 한다.

현재와 같은 의료체계에서는 병원에서 환자들에게 필요한 정보를 제공하는 것은 외래와 같은 의료시설에 방문할 경우에만 가능하다. 폭염과 같은 재난 상황에서 이들에게 정보를 제공할 수 있는 방법은 대중매체를 통해 일반적인 메시지를 전하고, 환자들이 알아서 이를 시행할 수 있도록 바라는 것 이외의 대책은 없다. 확장된 만성질환 관리모형과 같이 공중보건체계와 보건의료체계, 지역사회가 참여한 프로그램에서는 만성질환을 평상시에 효과적으로 관리하는 것을 통해 이상기후 조건에 대한 적응력을 높일 수 있으며, 이에 더해서 필요한 정보를 효과적이고 신속하게 전할 수 있어, 실제적인 문제의 해결을 지원할 수 있다.

REFERENCES

- 관계부처합동, 2014: 2013년 이상기후 보고서.
- 관계부처합동, 2010: 저탄소 녹색성장 기본법 시행에 따른 국가 기후변화 적응대책 (2011-2015).
- 권민호, 2013 : 북서태평양 아열대고기압 지수를 이용한 북동아시아 여름철 강수의 진단, 한국지구과학학회지, 34(1), p.102-106.
- 기상청, 2012: 인명피해가 가장 많은 기상재해는 ‘폭염’ , 배포일시 2012.7.31.
- 김지영, 이대근, Jan Kysely, 2008: 한반도와 유럽에서 발생한 폭염의 종관기후학적 특성 비교, 대기, 18(4) 355-365.
- 김해구, 민경덕, 김경익, 이광목, 1997a: 한반도 하계 이상 저온과 북반구 대기순환의 특성. 제 1부: 이상저온의 출현과 종관 개요. 한국기상학회지, 33, 137-154.
- 박종길, 정우식, 김은별, 2009 : 1994년 폭염사례에 관한 종관기상학적 연구, 2009년도 한국기상학회 봄 학술대회 논문집 2009.4, P 312-313.
- 부산발전연구원, 2013: 이상고온현상 적응을 위한 부산시 폭염 대책.
- 서울특별시, 2012: 2012년 폭염 종합대책 백서.
- 소방방재청, 2009: 피해액 산정기준 마련 등 제도화 방안 연구 (폭염분야)
- 소방방재청, 2014: 여름철 폭염대비, 취약계층 보호를 위한 2014 폭염대응 조합대책 (보도자료).
- 신호성, 이수형, 2014: 기후변화 건강 취약성 평가지표 개발. 환경정책연구, 13, 69~93.
- 신호성, 이수형., 2009: 기후변화 대응 보건사회 분야 정책 개발 방향. 보건복지포럼, 154.
- 이우섭, 2013: 한반도 폭염의 변동성 및 관련 메카니즘 분석 , APCC Research Report.
- 장재연, 김소연., 2008: 세계화와 국민보건: 기후변화와 건강 대한보건연구, 34, 38-54.
- 질병관리본부, 2013 : 폭염으로 인한 온열질환 신고현황 연보.

- 최은진, 2006: 기후변화로 인한 보건부문 영향의 근거와 과제. 보건복지포럼, 120.
- 최은진, 2008: 기후변화에 대한 보건부문의 적응대책 보건복지포럼, 135.
- 추장님, 2011: 저소득계층의 기후변화 적응역량 강화를 위한 정책방안 연구 II. 한국환경정책 평가연구원.
- 추장민, 공성용, 백승아, 2010: 저소득계층의 기후변화 적응역량 강화를 위한 정책방안 연구 I. 한국환경정책 평가연구원.
- 하종식, 2014: 한국의 건강 분야 기후변화적응 연구동향 분석. Journal of Climate Change Research, 5, 139-151.
- 한화진, 등 2005: 기후변화 영향평가 및 적응시스템 구축.
- 허보영, 심재현, 최우정, 2009 : “세계의 주요 폭염 피해” , 한국수자원학회논문집,42(5), p114-118.
- 환경부, 국립환경과학원, 2012 : 지자체 기후변화 적응 세부시행계획 수립 지원을 위한 기후변화 부문별 취약성 지도.
- 홍윤철, 2008: 기후 변화와 건강. J Korean Med Assoc 51, 764-769.
- 황윤정 , 김연희, 정관영, 장동연, 2012: TIGGE 모델을 이용한 한반도 여름철 집중호우 예측 활용에 관한 연구, 대기, 22(3), p. 287-298.
- 황윤정, 김연희, 정관영, 장동연, 2012: TIGGE 모델을 이용한 한반도 여름철 집중호우 예측 활용에 관한 연구, 대기, 22(3) 287-298.
- Alexander L., 2011: Extreme heat rooted in dry soils, Nat. Geosci. 4, 12-13.
- Alexandre Bernardes Pezza, Peter van Rensch, Wenju Cai, 2012: Severe heat waves in Southern Australia: synoptic climatolgy and large scale connections, Clim. Dyn. 38:209-224.
- Anderson, G. B., and M. L. Bell, 2011: Heat waves in the United States: mortality risk during heat waves and effect modification by heat wave characteristics in 43 U.S. communities. Environmental health perspectives, 119, 210-218.

- Barr, V. J., S. Robinson, B. Marin-Link, L. Underhill, A. Dotts, D. Ravensdale, and S. Salivaras, 2003: The expanded Chronic Care Model: an integration of concepts and strategies from population health promotion and the Chronic Care Model. *Hospital quarterly*, 7, 73-82.
- Bennett, C. M., K. B. Dear, and A. J. McMichael, 2014: Shifts in the seasonal distribution of deaths in Australia, 1968-2007. *International journal of biometeorology*, 58, 835-842.
- Bodenheimer, T., E. H. Wagner, and K. Grumbach, 2002: Improving primary care for patients with chronic illness: the chronic care model, Part 2. *JAMA : the journal of the American Medical Association*, 288, 1909-1914.
- Buizza, R., 2008: The Value of probabilistic Prediction. *Atmos. Sci. Lett.*, 9, 36-42.
- Cassou C., Terray L, Phillips AS(2005) Tropical Atlantic forcing and predictability of extreme warm events in Europe. *J Clim Lett* 18: 2805-2811
- CDC, 2011: Public Health Preparedness Capabilities : National Standards for State and Local Planning.
- Charney, J.G., and A. Eliassen, 1964: On the growth of the hurricane depression. *Journal of Atmospheric Sciences*, 21(3), 68-75.
- Coumou D and Rahmstorf S 2012 A decade of weather extremes *Nature Clim. Change* 2 491–6
- Dai, A. G., K. E. Trenberth, and T. R. Karl (1998), Global variations in droughts and wet spells: 1900–1995, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 3367–3370, doi:10.1029/98GL52511.
- Dee, D. P., and co-authors, 2011: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 137 553–597.
- Desai, M., E. Nolte, M. Karanikolos, B. Khoshaba, and M. McKee, 2011: Measuring NHS performance 1990-2009 using amenable mortality: interpret with care. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 104, 370-379.
- D'Ippoliti, D., and Coauthors, 2010: The impact of heat waves on mortality in 9 European cities: results from the EuroHEAT project. *Environmental health : a global access science source*, 9, 37.

- Glasgow, R. E., C. T. Orleans, and E. H. Wagner, 2001: Does the chronic care model serve also as a template for improving prevention? *The Milbank quarterly*, 79, 579-612, iv-v.
- Ha, J., H. Kim, and S. Hajat, 2011: Effect of previous-winter mortality on the association between summer temperature and mortality in South Korea. *Environmental health perspectives*, 119, 542-546.
- Haylock MR, Goodess CM(2004) Interannual variability of European winter rainfall and links with mean large-scale circulation. *Int J Climatol*24:759–77
- Hirschi, M., S. I. Seneviratne, V. Alexandrov, F. Boberg, C. Boroneant, O. B. Christensen, H. Formayer, B. Orłowski, and P. Stepanek (2010), Observational evidence for soil-moisture impact on hot extremes in southeastern Europe, *Nat. Geosci.*, 3, 17–21, doi:10.1038/ngeo1032.
- Huang, R., and S. Fengying, 1992: Impacts of the tropical western pacific on the east Asian summer monsoon. *J.Meteor. Soc. Japan*, 70, 243-256.
- IPCC, 2007: *Climate change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate change*.
- IPCC, 2012: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*(Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds).
- IPCC, 2013 *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* ed T F Stocker et al (Cambridge: Cambridge University Press)
- Ito, Hiroyuki, Nathaniel C. Johnson, Shang-Ping Xie, 2013: Subseasonal and Interannual Temperature Variability in Relation to Extreme Temperature Occurrence over East Asia*. *J. Climate*, 26, 9026–9042. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00676.1>

- Kanamitsu, M., and co-authors, 2002: NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis(R-2), *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 83, 1631-1643.
- Kenyon, J., and G. C. Hegerl, 2008: Influence of modes of climate variability on global temperature extremes. *J. Climate*, 21,3872–3889.
- Kosaka, Y., and H. Nakamura, 2006: Structure and dynamics of the summertime Pacific–Japan teleconnection pattern. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 132, 2009–2030
- Kysely, J. and Kim, J., 2009, Mortality during heat waves in South Korea, 1991-2005: How exceptional was the 1994 heat wave? *Climate Research*, 38,105-116.
- Lau, K.-M. and M-T. Li, 1984: The monsoon of East Asia and its global associations-A survey. *Bull. Amer. meteor. Soc.*, 65, 114-125.
- Lee DY, Ahn JB, Ashok K. 2013. Improvement of multimodel ensemble seasonal prediction skills over East Asian Summer Monsoon region using a climate filter concept, *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 52, 1127-1138.
- Lee DY, Ashok K, Ahn JB. 2011. Toward enhancement of prediction skills of multimodel ensemble seasonal prediction: a climate filter concept, *Journal of Geophysical Research* 116(D06116), DOI:10.1029/2010JD14610.
- Lee, E.J., Jhun, J.G., and Park, C.K, 2005, Remote connection of the eastAsian summer rainfall variation revealed by a newly defined monsoon index. *Journal of Climate*, 17, 43814393.
- McGregor GR, Besssemoulin P, Dbi K, Menne B(eds), 2010: Heat waves and health: Guidance on warning system development. Report to the World Meteorological Organization and World Health Organization189-221.
- Meehl G.A., Tebaldi C., 2004: More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science* 303, 1499-1503.
- Meehl, G. A., and C. Tebaldi, 2004: More intense, more frequent and longer heat waves in the 21stcentury.*Science*,305,994-997.
- OECD, 2011: Health Reform: Meeting the Challenge of Ageing and Multiple Morbidities.

- Park, C. K., and S. D. Schubert, 1997: On the nature of the 1994 East Asian summer drought. *J. Climate*, 10, 1056-1070.
- Robinson, P.J., 2000: On the definition of a heat wave. *J. Appl. Meteor.*, 40, 762-775.
- Rocklov, J., B. Forsberg, and K. Meister, 2009: Winter mortality modifies the heat-mortality association the following summer. *The European respiratory journal*, 33, 245-251.
- Rocklov, J., K. Ebi, and B. Forsberg, 2011: Mortality related to temperature and persistent extreme temperatures: a study of cause-specific and age-stratified mortality. *Occupational and environmental medicine*, 68, 531-536.
- Scaife, A. A., C. K. Folland, L. V. Alexander, A. Moberg, and J. R. Knight, 2008: European climate extremes and the North Atlantic Oscillation. *J. Climate*, 21, 72-83.
- Schoen, C., K. Davis, S. K. How, and S. C. Schoenbaum, 2006: U.S. health system performance: a national scorecard. *Health Aff (Millwood)*, 25, w457-475.
- Seneviratne S, Donat M G, Mueller B and Alexander L V 2014 No pause in the increase of hot temperature extremes *Nat. Clim. Change* 4 161-3
- Sohn SJ, Tam CY, Ahn JB. 2013. Development of a multimodel-based seasonal prediction system for extreme droughts and floods: a case study for South Korea, *International Journal of Climatology* 33(4), 793-805.
- Tao, S. Y., and F. K. Zhu, 1964: The 100-mb flow patterns in southern Asia in summer and their relation to the advance and retreat of the West-Pacific Subtropical Anticyclone over the Far East. *Acta Meteorologica Sinica*, 34, 385-395.
- Trenberth, K.E., P.D. Jones, P. Ambenje, R. Bojariu, D. Easterling, A. KleinTank, D. Parker, F. Rahimzadeh, J. A. Renwick, M. Rusticucci, B. Soden and P. Zhai.(2007). *Observations: Surface and Atmospheric Climate Change in Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller(eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.*
- Wagner, E. H., B. T. Austin, and M. Von Korff, 1996: Organizing care for patients with

- chronic illness. *The Milbank quarterly*, 74, 511-544.
- Wang, B., R.-G. Wu, and K.-M. Lau, 2001: Interannual variability of the Asian summer monsoon: Contrasts between the Indian and western North Pacific-east Asian monsoons. *J. Climate*, 14, 4073-4090.
- WHO, W., UN, 2003: *Climate Change and Human Health - Risks and Responses*.
- Wilks DS. 2011. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Elsevier: Amsterdam.
- Wilks, D.S., 1995: *Statistical method in Atmospheric Sciences*, International geophysics Series, Vol 59. Academic Press, London.
- WMO 2011 *Weather Extremes in a Changing Climate: Hindsight on Foresight* (Geneva: World Meteorological Organization)
- Woodward, A., and Coauthors, 2014: Climate change and health: on the latest IPCC report. *Lancet*, 383, 1185-1189.
- WU Wei, CHEN Ji-Long, 2012: Sensitivity of Tropical Cyclone Precipitation to Atmospheric Moisture Content: Case Study of Bilis (2006) . *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 5(5), 420-425
- Yanai, M., C. Li, and Z. Song, 1992: Seasonal heating of the Tibetan Plateau and its effects of the evolution of the Asian summer monsoon. *J. Meteor. Soc. Japan*, 70,
- Zhu, Y., Z. Toth, and G. K. Rutledge, 2008: TIGGE and NAEFS: Research and operational developments in multi-center ensemble forecasting. American Geophysical Union, Spring Meeting 2008.Z

연구보고서 2015-10

다중모델 앙상블 자료를 이용한 한반도 폭염 예측성 평가

Assessing the Predictability of Occurrence of Heat Waves in Korea using a Multi-Model Ensemble

이우섭 기후변화연구팀



APEC Climate Center

612-020 부산광역시 해운대구 센텀7로 12

Tel: 051-745-3900 Fax: 051-745-3949

www.apcc21.org

 www.facebook.com/apcc21

 www.youtube.com/APECClimateCenter21

 www.twitter.com/apcc21

 www.plus.google.com/+APECClimateCenter21

 www.flickr.com/apcc21