

다중 시간 규모 자료를 이용한 한반도 폭염 예측성 평가

Assessing the predictability of heat wave occurrence on multiple timescales

이우섭

다중 시간 규모 자료를 이용한 한반도 폭염 예측성 평가

Assessing the predictability of heat wave occurrence on multiple timescales

이우섭

발간사

2015년 인도와 파키스탄에 폭염으로 1천명 이상의 사망자가 발생하면서, 세계기상기구와(WMO)와 세계보건기구(WHO)는 폭염발생가능성이 있는 주요 국가들에게 폭염 조기경보시스템을 개발할 것을 권고하였습니다.

우리나라에서도 폭염에 의한 피해가 증가 추세를 보이고 있어 국가적 차원에서 폭염에 효율적으로 대비하기 위한 폭염 예보 단계 설정과 구체적인 대비 방안 마련이 시급한 시점입니다.

본 연구에서는 다양한 시간규모 자료를 이용하여 한반도 폭염 예측과 실시간 모니터링기술을 개발하였으며, 다양한 시간규모의 예측정보를 활용하여 국가 차원의 폭염 대비 단계를 설정하고 폭염 피해 최소화를 위한 대비 방안을 마련 하였습니다.

본 연구의 결과가 우리나라 폭염의 예측성 향상과 더불어 우리나라 현실에 적합한 폭염조기경보시스템을 개발함에 있어 중요한 자료를 제공할 수 있을 것이라 판단됩니다.

끝으로 본 연구를 수행해주신 APCC의 이우섭 박사, 이현주 연구원에게 감사를 표합니다. 또한 바쁘신 와중에도 훌륭한 자문과 조언을 주신 UNIST 이명인 교수, 부산대학교 안중배 교수께 감사드립니다. 그리고 연구논의를 위해 소중한 시간을 할애해 주신 유진호 박사에게도 감사드립니다.

2016년 1월
APEC 기후센터
소장 정진승

ABSTRACT

As the global climate changes, heat waves are likely to become more common, further increasing the need for preparedness and early warning systems. In order to provide early information about the probability of the heat wave occurrence from short-term to seasonal time scale, we evaluated the probability of heat waves using multi-time scale data.

First, this study investigated the interannual variation of heat wave frequency (HWF) in South Korea during the past 42 years(1973-2014) and examined its connection with large-scale atmospheric circulation changes. The regression of the leading principal component(PC) time series of HWF with large-scale atmospheric circulation identified a north-south dipole pattern between the South China Sea and Northeast Asia. When this large-scale circulation mode facilitates deep convection in South China Sea, it tends to weaken moisture transport from the South China Sea to Northeast Asia. Enhanced deep convection in the South China Sea triggers a source of Rossby wave train along southerly wind that generates positive geopotential height anomalies around Korea.

Regarding the occurrence of Korean heat waves, two major centers of interannual variability were identified in the regression pattern of the upper-level vorticity. We designate the vorticity difference at 150 hPa level between the average over 25~30 °N, 110~130 °E and the average over 35~45 °N, 120~140 °E as a favorable condition of Korean heat waves. The correlation between PC1 and the time series of vorticity difference reached up to 0.81 with significance at the 95 % confidence level by

the Student's t-test. As a result, we have made an effort to define new indices to assist in real-time monitoring, medium-range forecasting of the heat waves in Korean.

Second, we also assessed the predictability and probability of heat wave occurrence over Korea by applying the Observing System Research and Predictability Experiment Interactive Grand Global Ensemble(TIGGE) data for the Korean Heat wave Index (KHI) associated with large scale circulation. Based on the TIGGE datasets, KHI showed higher predictability of heat waves than those of maximum temperature (TMAX) and Bias corrected TMAX. The verification of Percent Correct and Threat Score and Equitable Threat Score(ETS) showed that the heat wave forecast using KHI compared to others regardless of forecast lead time was successfully carried out. KHI is able to provide an early warning forecast for heatwaves with 5 days up to 9 days forecast lead time(Figure 1). It can be reliable information for decision makers to provide efficacious and timely actions to prepare for imminent heatwaves. The timing and duration of heatwaves are important factors in terms of forecasting heatwaves because they have been shown to have an impact on health and well-being. It is appropriate to determine the starting time and ending time of a heatwave in Korea using KHI. Therefore, KHI will aid in monitoring and making reasonable determinations about heatwave occurrence in routine operations.

Third, we assessed prediction skill for forecasting heat wave in association with large scale patterns(GPH, OLR, T2M) out to 2-3 weeks lead time using pattern correlation skill score. Overall, the 500hPa GPH anomalies is well forecasted in GloSea5 at lead times of 2-3 weeks. GloSea5 was able to predict GPH and OLR anomalies similar to those observed over East Asia at lead time of 2-3 weeks for 2014 heat waves. Heat waves forecasts over longer lead times can become highly valuable resources for disaster risk reduction and adaptation planning.

Finally, we proposed a heat wave early warning system with response plan in order to reduce the damage caused by heat wave. Heat wave early warning systems involve forecasting of the heat wave occurrence, timely responses plans that target vulnerable populations, and evaluation of systems. Heat wave early warning systems will help improve public-health reponses to severe heat waves.

목 차

1. 서론	1
1.1 폭염의 특성	1
1.2 폭염이 사회에 미치는 영향	3
1.3 연구 절차	4
2. 폭염의 정의 및 폭염 지수	6
2.1 폭염의 정의	6
2.2 폭염지수	9
3. 폭염시중 예측성 검증(TIGGE)	12
3.1 자료 및 연구방법	14
3.1.1 관측자료	14
3.1.2 TIGGE 모델 자료	15
3.2 검증방법	18
3.2.1 결정론적 검증 기법	19
3.2.2 확률론적 예측 검증	21

3.3 한반도 폭염 시종 예측성 검증-----	24
3.3.1 2013년 폭염-----	24
3.3.2 2014년 폭염-----	36
3.3.3 한반도 폭염지수를 적용한 예측 검증(2011-2014) ---	42
3.3.4 요약-----	48
4. GloSea5 모형의 폭염 예측성 검증-----	50
4.1 서론-----	50
4.2 자료-----	51
4.3 GloSea5 폭염 예측성 검증-----	55
4.3.1 TIGGE자료와 GloSea5 비교 -----	55
4.3.2 폭염과 연관된 대기패턴의 예측성 평가-----	58
4.4 요약-----	67
5. APCC MME자료를 이용한 한반도 폭염 빈도수 예측----	69
6. 폭염 조기경보 시스템-----	75
6.1 한반도 폭염 경보체계-----	76
6.2 질병관리본부 온열감시 체계-----	80
6.3 폭염 조기경보 시스템 개발-----	85
6.4 폭염조기경보체계 개발 시 고려사항-----	87
7. 요약 및 결론-----	91
Ⅱ 참고 문헌-----	94

1. 서론

1.1 폭염의 특성

극한기상과 기후(weather and climate extreme events)는 기후분야 연구에 필연적인 것이다. 극한기상과 극한기후의 변화(이후 극한현상으로 명함)는 엄청난 파급효과를 가져온다. 최근 십년동안, 수많은 극한 현상들은 전 세계에 걸쳐 발생하였으며, 이로 인해 사회, 경제적으로 많은 피해를 가져왔으며(IPCC 2012, 2013), 특히 폭염(Heat wave)은 경제와 인간의 안전에 커다란 영향을 미친다.

기후변동성(climate variability)은 잘 알려진 기후의 특성이며, 폭염은 기후 변동성 중 하나의 측면을 나타낸다. 기후변화로 기후변동성이 커짐에 따라 폭염의 발생빈도수는 증가하게 된다. 이러한 증거는 장기간의 기후자료를 이용하여 분석한 결과에서 잘 나타난다(Fischer and Schar, 2010). 또한 2003년 유럽폭염과 2010년 러시아 폭염은 인간 활동에 의한 것으로 밝혀졌다(Otto et al., 2012; Stott et al., 2004). 많은 기후모델 결과들이 미래에는 폭염의 빈도수, 강도와 지속기간이 증가할 것이라고 전망하지만, 이러한 변화는 전지구가 똑같이 발생하는 것이 아니라 대기 대순환의 변화와 연관된 특별한 패턴에 의해 특정지어진다(Meehl and Tebaldi, 2004). 극한기상과 기후(weather and climate extreme events)는 기후분야 연구에 필연적인 것이다. 극한기상과 극한기후의 변화(이후 극한현상으로 명함)는 엄청난 파급효과를 가져온다. 최근 십년동안, 수많은 극한 현상들은 전 세계에 걸쳐 발생하였으며, 이로 인해 사회, 경제적으로 많은 피해를 가져왔으며(IPCC 2012, 2013), 특히 폭염(Heat wave)은 경제와 인간의 안전에 커다란 영향을 미친다.

기후변동성(climate variability)은 잘 알려진 기후의 특성이며, 폭염은 기후 변동성 중 하나의 측면을 나타낸다. 기후변화로 기후변동성이 커짐에 따라 폭염의 발생빈도수는 증가하게 된다. 이러한 증거는 장기간의 기후자료를 이용하여 분석한 결과에서 잘 나타난다(Fischer and Schar, 2010). 또한 2003년 유럽폭염과 2010년 러시아 폭염은 인간 활동에 의한 것으로 밝혀졌다(Otto et al., 2012; Stott et al., 2004). 많은 기후모델 결과들이 미래에는 폭염의 빈도수, 강도와 지속기간이 증가할 것이라고 전망하지만, 이러한 변화는 전지구가 똑같이 발생하는 것이 아니라 대기 대순환의

변화와 연관된 특별한 패턴에 의해 특정지어진다(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 경년변동성에 대한 연구는 매우 미흡하다. Nakamura와 Fukamachi(2004)는 동아시아 여름철의 극한 기온은 오흐츠크(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 있다. 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.

IPCC 제 5차 평가보고서에 따르면, 1950년 이후에 다양한 극한현상의 변화가 관측되고 있으며, 그 중에서 전 지구적으로 낮과 밤이 추운 날의 발생 빈도수는 감소하지만, 더운 낮과 밤의 발생 빈도수는 증가하였다(가능성이 매우 높음, 90~100%). 또한 유럽, 아시아, 오스트레일리아의 대부분 육지 지역에서 열파의 발생빈도가 증가했을 가능성이 높다(66~100%). 극한 강수의 발생빈도는 증가한 지역이 감소한 지역보다 늘어났지만 낮은 신뢰도를 가지고 있다. 그러므로 극한현상들은 매우 드물게 발생하며, 지역적으로 짧은 시간 규모에서 발생하기 때문에 예측성과 신뢰도는 매우 낮다(Peterson et al., 2012).

그럼에도 불구하고, 극한 현상은 우리 사회의 모든 분야에 영향을 미치기 때문에, 정책결정자나 이해관계자(stakeholders)들은 단기예보부터 계절예측의 시간규모에서 극한기상의 신뢰할 수 있는 예측정보를 요구한다. 또한 극한 기상과 기후에 의한 피해가 커짐에 따라 경제적 손실과 인명피해를 줄이기 위해 단기, 중기 예측성을 향상시켜야만 한다. Lee and Lee(2015)는 한반도 폭염과 연관된 대기 패턴 및 발생 원인을 조사하였으며, 그 결과 한반도 폭염 발생은 동중국해의 깊은 대류활동과 관련이 큰 것으로 나타났다. 따라서 동중국해와 한반도 지역의 상층풍 와도를 이용하여 한반도 폭염을 예측할 수 있는 지수를 개발하였다. 따라서 이 연구에서는 기존에 개발된 한반도 폭염지수를 다양한 시간규모의 예측자료에 적용하여, 한반도 폭염을 예측성을 평가하였다.

1.2 폭염이 사회에 미치는 영향

기후변화로 인해 폭염발생 빈도수와 강도는 점차 증가될 것으로 예상되며, 사회구조 및 인구구성 변화에 따라 노인등 취약한 인구도 급속히 증가하고 있다(김도우, 2014). 폭염은 사회 및 개인의 취약 분야에 직접적인 영향을 주며, 개인의 사회적 수준에 따라 건강에 미치는 영향은 상대적이다. 폭염의 취약성에 영향을 미치는 주요 요소는 사회, 경제 그리고 정책에 의존하기 때문에 지역에 따라 매우 다양하지만, 열-위험(Heat-risk) 관점에서 취약성 요소는 공통적으로 심혈관 질환 또는 호흡

기질환을 가지고 있는 노인층, 독거노인, 공업단지 주변에 사는 노동자들이다.

폭염이 사회에 직접적으로 미치는 영향은 질병과 사망이다. 전 세계적인 폭염피해 경향을 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 기상관측사상 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°C이상의 불볕더위가 32일 동안 지속되었다. 극한기온은 평균기온보다 인류 및 지구환경시스템에 미치는 영향이 크기 때문에 기후변화의 영향 및 예방대책을 수립함에 있어 필수적인 정보이다.

최근 인도와 파키스탄에 폭염으로 천명 이상이 숨지는 등 폭염에 의한 인명피해가 증가함에 따라, 세계기상기구(World Meteorological Organization: WMO)와 세계보건기구(World Health Organization: WHO)는 폭염 조기경보시스템을 개발하여 폭염이 건강에 미치는 영향을 최소화할 것을 권고했다. 우리나라에서도 폭염에 의한 피해를 인식하고 국가적 차원에서 폭염에 효율적으로 대비하기 위한 폭염 예보 단계 설정과 구체적인 대비방안을 마련해야만 한다. 따라서 본 연구에서는 다양한 시간규모의 예측정보를 활용하여 국가차원의 폭염 대비 단계를 설정하고 폭염 피해 최소화를 위한 대비 방안을 마련하고자 한다.

1.3 연구 절차

이 보고서는 1) 한반도 폭염의 정의 및 폭염지수 2) 폭염의 시·종 예측을 위한 예측성 평가 3) 중기예측 모형을 이용한 폭염 예측 4) 계절 전망 그리고 5) 한반도 폭염 대비방안에 대하여 기술하였다. 2장에는 한반도 폭염의 정의와 폭염지수를 간략히

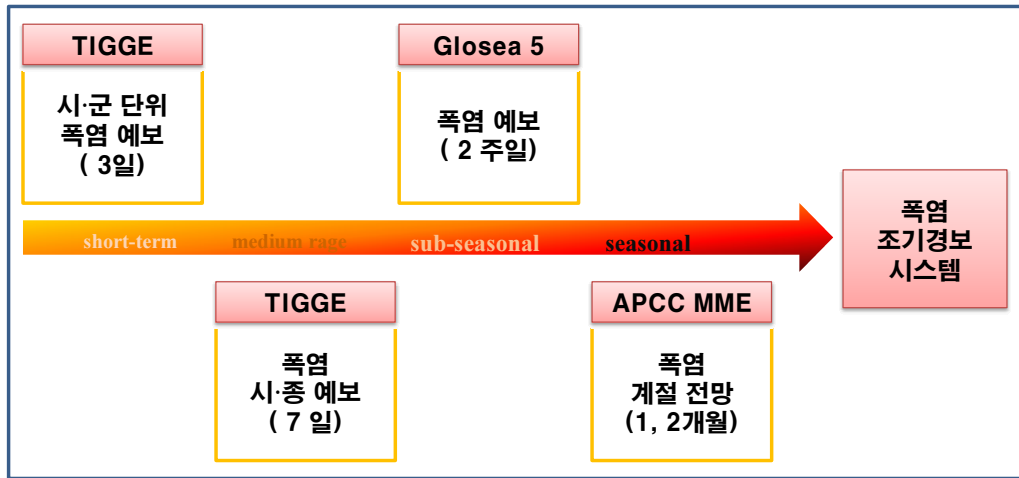


그림 1-1 주요 연구 내용 및 절차

소개하고, 3장에서는 개발된 폭염지수를 THORPEX Interactive Grand Global Ensemble (TIGGE)자료에 적용하여, 3일전, 7일전 폭염의 예측성능(결정론적, 확률론적)을 평가하였다. 4장에서는 기상청 현업모델인 GloSea5 자료를 이용하여 2-3주전 폭염예측가능성을 평가하였다. 5장에는 APEC 기후센터(Asia Pacific Economic Cooperation Climate Center: 이하 APCC)에서 현업 기후 예측에 사용되는 24년(1982년~2005년)간의 과거 기후자료와 예측자료를 이용하여 폭염의 계절예측을 보였다. 그리고 폭염 피해 최소화를 위한 조기경보시스템의 방안을 6장에 서술하였다(그림 1-1).

2. 폭염의 정의 및 폭염 지수

2.1 폭염의 정의

폭염은 매우 더운 날씨가 지속되는 것을 말한다. 폭염(heat wave)의 정의는 매우 다양하지만, 일반적으로 극한고온은 여름철 기후평균 기온과 비교하여 상대적으로 높은 기온을 같은 날씨를 의미한다(Diaz and Murnane, 2008).

최근 들어 극한현상의 빈도수, 지속기간과 강도의 변화에 대한 관심이 늘어나면서, 보다 정확한 정보 생산을 위해 극한현상을 정의하기 위해 많은 노력을 해왔다(Katz and Brown, 1992; Easterling et al., 2000; Meehl et al., 2000). 많은 연구자들은 극한기후 현상을 표준편차 또는 percentile 기준을 이용하여 정의하였다. Jones et al.(1999)은 $\pm 2\sigma$ 를 벗어나거나 10% 미만 또는 90%을 초과하는 현상을 극한 기후 현상으로 정의하였다.

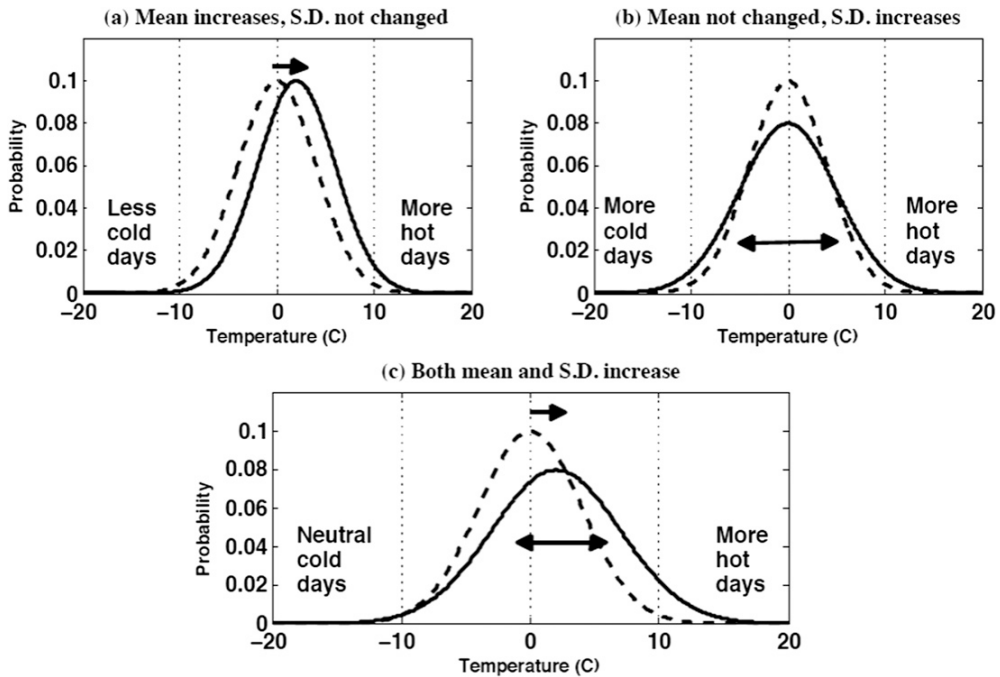


그림 2-1 극한 기온 발생에 대한 모식도 (a)평균기온 증가, (b) 표준편차 증가, (c) 평균과 표준편차 모두 증가. 파선은 평균 기후분포이고, 실선은 평균과 표준편차의 변화에 따른 분포이다(Hansen et al., 2013).

폭염은 특정 임계값 이상을 가지는 현상을 말하며, 지구온난화와 더불어 빈도수와 강도가 증가하는 것으로 나타났다. 만약에 일평균 기온이 고정된 모양의 가우시안 분포를 따른다고 가정한다면, 극한고온의 증가는 극한 저온의 감소를 동반하게 된다(그림 2-1a). 그러나 표준편차가 변화하게 되면, 극한고온의 발생빈도수를 변화시킨다(그림 2-1b). 실제로 평균과 표준편차가 이동하면, 극한고온 현상은 더욱더 빈번하게 나타난다(그림 2-1c). 이전 연구들은 계절 평균기온이 증가하는 방향으로 이동하는 것을 보였고, 평균기온의 변동성은 최근 몇 십년동안 증가하는 것으로 나타났다(Hansen et al., 2013).

폭염은 쉽게 인식되지만 정의는 매우 다양하고 어렵다. 폭염을 정의하기 위해 사용된 임계값은 매우 다양한 방법들 중에 선택할 수가 있다. WMO는 5일 연속으로 최고기온이 평년값보다 5°C 이상 초과하는 경우를 폭염으로 정의하고 있다. 미국 기상청은 3일 연속으로 기온이 32.2°C 를 초과하는 경우를 폭염으로 정의하였으며, 캐나다 환경부는 일 최고기온이 32°C 를 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.

Identification of a Heat Wave Event

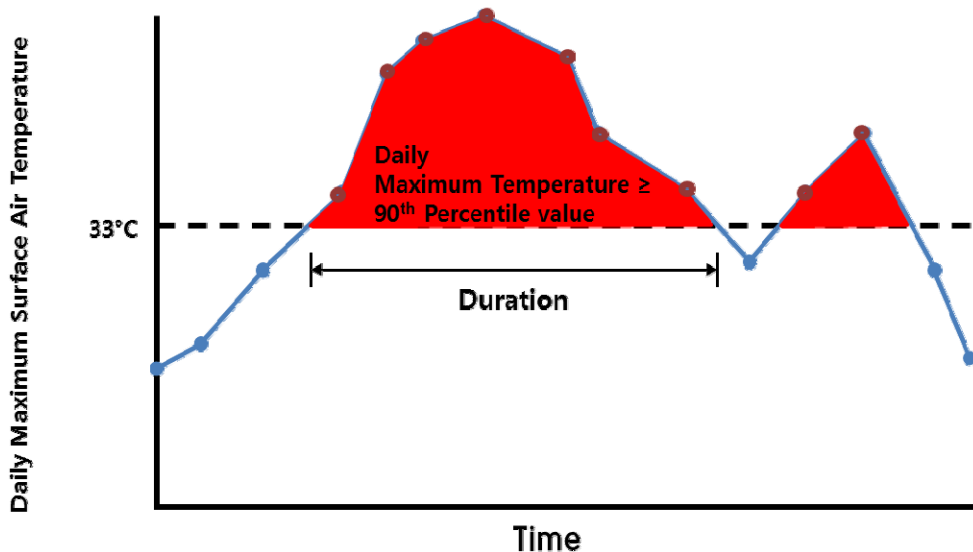


그림 2-2 한반도 폭염의 정의

표 2-1 60년 관측 자료를 이용한 한반도 최고기온의 상위(90th percentile)/하위(10th percentile) 기준 값

분위수 (percentile)	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
90	9.1	11.9	16.5	22.6	26.7	28.9	32.3	32.9	28.9	24.6	19.1	12.7
10	-0.6	1.2	6.4	13.1	18.8	22.4	24.7	26.1	22.5	16.7	8.2	1.5

우리나라 월별 최고기온의 극값특성을 알아보기 위해, 60년(1954년~2013년) 동안의 12개 관측소(강릉, 서울, 인천, 추풍령, 포항, 대전, 전주, 울산, 광주, 부산, 여수, 목포)의 일 최고기온 자료를 이용하여, 90th percentile 값의 월별 값을 조사해 보았다(표 2-1).

극한 기온은 계절변동성이 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있으며, 7월과 8월의 최고기온의 90th percentile 값은 약 32.3도 이상으로, 기상청 폭염 주의보 기준(33°C)과 매우 근접한 값이다. 한반도 폭염 주의보 기준은 “6월~9월 사이에 일 최고 기온이 33°C이상인 상태가 2일 이상 지속될 때”로 정의 하였으나, 최근 들어 폭염이 5월에도 빈번히 일어나고 있기 때문에, 기상청은 2015년 폭염특보 기준을 “일 최고 기온이 33°C이상인 상태가 2일 이상 지속될 때”로 개정하였다(표 2-2). 폭염특보 기준인 최고기온 33°C는 여름철(June-July-August: JJA) 최고기온의 90th percentile 값이다. 한반도 폭염 주의보의 기준을 적용하여 선정된 사례를 이용하여, 한반도 폭염의 빈도수(Korean heat wave frequency, 이하 HWF), 지속일수와 강도를 계산하였다. 폭염의 빈도수는 33°C이상인 상태가 2일 이상 지속되는 현상이 있는 경우를 하나의 폭염으로 정의하였으며, 폭염의 지속일수는 하나의 폭염 이벤트가 지속된 날짜를 의미한다. 또한 폭염의 강도는 지속일수 동안의 평균 최고기온으로 정의하였다. 그림 2-2에서 폭염의 발생 빈도수는 2개 이며, 그중 앞서 발생한 폭염의 지속기간은 7일, 뒤에 발생한 폭염의 지속 기간은 2일이다. 또한 폭염의 강도는 7일동안의 평균 최고기온 값으로 정의 된다(그림 2-2).

표 2-2 한반도 폭염의 정의(기상청)

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

2.2 폭염지수

폭염은 대부분 여름철에 발생하기 때문에 여름철 동아시아의 대기순환과 밀접하게 연관되어있다. 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 보건분야의 대응전략을 마련하는데 도움이 될 것이다.

Kim et al.(2008)과 Alexandre et al.(2012)은 이상 기상 현상의 발생에 대한 기상학적인 원인을 찾고 폭염 예측 기술의 향상을 위해서는 보다 큰 규모에서 일어나는 대기 순환 과정에 대한 이해가 선행되어야 한다고 언급한 바 있다. Lee(2014)는 지난 40년(1973년~2012년)동안 한반도 폭염의 경년변동성에 대해 조사하였다. 폭염의 기준은 기상청 폭염주의보 기준인 일 최고기온 33°C 보다 높을 경우가 2일 이상 지속될 때 로 정의하였으며, 각 지역별로 일 최고기온이 33°C 가 넘는 수와 일 수를 종합하여 한반도 폭염발생 변동성을 조사하였다. 다음으로 60개 지점 자료를 이용하여, EOF 분석을 통하여 한반도 폭염발생의 경년 변동성과 연관된 시간계수(PC1)을 이용하여 연간 한반도 폭염 발생을 정의하였다. 첫 번째 EOF는 한반도 폭염 경년변동의 약 50% 이상을 설명하였으며, 남한 전체에 같은 부호를 나타냈다. 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.

Lee(2014)는 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. PC1과의 상관패턴을 보면, 남중국해와 동중국해에서 200hPa 와도는 더욱더 강한 대류활동과 비단열 가열에 의해 양의 상관을 보였으며, 이것은 로스비 파열(Rossby wave-train)의 근원이 되어, 한반도와 일본주변에 강한 양의 지위고도(Geopotential Height) 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).

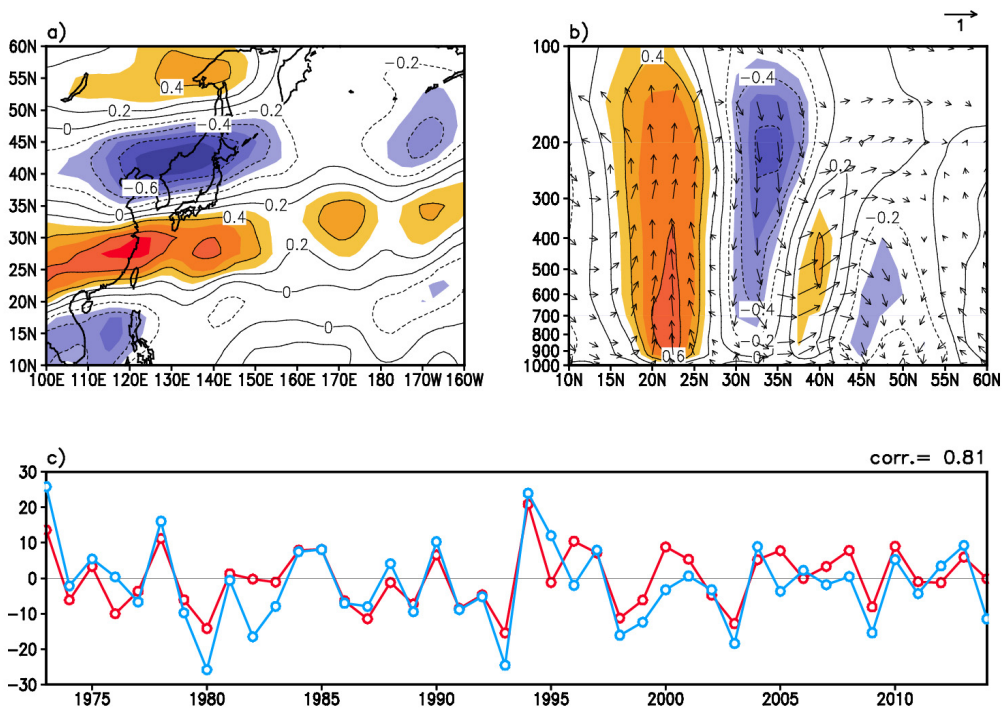


그림 2-3 한반도 폭염발생 빈도의 PC1과 상관 맵 (a) 150hPa 와도, (b) 110-135 °E를 평균한 자오선 순환(meridional-vertical circulation, vector)과 연직속도(vertical velocity), 그림은 95%이상 유의미한 지역임, (c)PC1(붉은색)과 KHI(파랑색)의 시계열을 나타냄.

동중국해의 저기압성 순환과 한반도 주변의 고기압성 순환은 원격상관패턴으로 정의되었다. 이러한 원격상관패턴은 동중국해의 대류활동을 촉진시키지만, 동중국해와 북서 태평양의 습기(moisture)를 동아시아로 수송하는 것을 약화시키게 된다. 또한 폭염과 연관된 자오선 순환은 열대해양에서의 하강운동과 20°N 주변에서 상승운동과 연관되어있다. 이 연직운동은 30~35°N 주변 한반도와 일본지역에서 하강운동을 유도하여, 단열 가열, 구름 총량의 감소, 그리고 강수량의 감소하게 된다. 그러므로 지표에서의 최고 기온은 증가하게 되고, 한반도에서 폭염을 야기 시키게 된다(그림 2-3). 따라서, 한반도 폭염 발생은 동중국해의 대류활동과 한반도의 하강운동 사이의 상층와도에서 나타나는 쌍극자 패턴으로 대표될 수 있다는 것을 발견하였다. 한반도 폭염 발생과 연관된 상층와도의 상관패턴을 이용하여 한반도 폭염 지수(Korean Heat wave Index: KHI)를 정의하였다. (식 1-1).

$$KHI = Vorticity_{200hPa}(25 \sim 30^{\circ} N, 110 \sim 130^{\circ} E) \quad (1-1)$$

$$- Vorticity_{200hPa}(35 \sim 45^{\circ} N, 120 \sim 140^{\circ} E)$$

상층와도 차를 이용한 지수는 한반도 폭염발생과 높은 상관관계(0.8)를 가지며, 통계적으로 유의미하다. 폭염과 관련된 역학적, 물리적 과정을 이해하는 것은 폭염에 대한 예측능력을 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라 농업, 수자원 및 보건분야의 대응전략을 마련하는데 도움이 될 것이다.

따라서 3장과 4장에서는 한반도 폭염 예측을 위해, 역학적 방법을 통해서 KHI지수의 예측성을 검토할 것이다.

3. 폭염시종 예측성 검증(TIGGE)

폭염, 가뭄, 집중호우, 홍수 등과 같은 극한 기상 현상들은 발생빈도수는 더욱더 증가하고 강도는 더욱 강해졌다. 동아시아 지역의 일 평균 기온은 2013년 동안 평균 값보다 상당히 높았다. 2013년 한반도의 기온은 1973년 이래로 2번째로 높은 관측값을 기록하였다. 수 일간 지속된 폭염으로 인해 전력소비량이 급격히 증가하면서, 한국 정부는 전력수급 경보를 발령하였다(Min et al., 2014). 일본의 경우, Kochi 지역에서는 일 최고기온 41°C를 기록하였으며, 143개 관측 지점에서는 폭염 임계값을 넘은 것으로 기록되었다. 중국 또한 1995년 이래로 가장 강한 폭염을 경험하였다. 이 기간 동안 중국 동부 대부분 지역에서는 기후값 보다 약 3°C 높은 값을 기록하였다. 이러한 폭염은 건강, 농업 그리고 사회경제에 악영향을 미칠 수 있다.

최근 들어 수치예보(Numerical weather prediction: NWP)모델은 최근에 급증하고 있는 악 기상(severe weather) 또는 위험 기상의 예측성을 향상시키는데 많은 노력을 해왔다. 악 기상은 대기의 매우 작은 규모들의 비선형적 상호작용을 포함한다. 이러한 상호작용은 작은 오차로 인해 예측과정에서 큰 차이를 만들 수 있기 때문에 예측하는 것은 매우 어렵다. 이러한 과정은 중기예측(medium-range prediction)에서 종관규모 불확실성을 생산하는 것과 매우 유사하지만, 악기상은 우리가 생각했던 것 보다 더 짧은 선행시간(Lead time)에서 커다란 불확실성을 가지고 있다(Lorenz 1969). 앙상블 예측시스템(Ensemble prediction systems: EPSs)은 중간규모의 경압 불안정성으로 인한 중기예측의 불확실성을 정량화하기 위해서 1990년대에 소개되었다(Mureau et al., 1993; Molteni et al., 1996; Toth and Kalnay, 1997).

수치모델의 오차는 시공간적으로 차이가 있지만 일반적으로 예보기간이 길어지면 그 불확실성의 정도가 현저하게 커진다. 전 지구 예측모델의 경우 단일 모델의 예측 신뢰도는 1일 예보후 예측성이 떨어지는데, 앙상블예측은 보다 긴 선행시간에서의 예측성을 향상시켜 중기예보에 활용도가 높다. 앙상블예측은 긴 선행시간에 대한 예측성의 향상뿐만 아니라 예측의 불확실성 또는 신뢰도에 대한 정보도 같이 제공한다. 따라서 예측정보의 사용자는 불확실성에 대한 정보를 가지고, 상황에 맞는 정보생산과 예보결정을 내릴 수 있다. 앙상블 예측은 앙상블이 표현해 내는 범위에서 가능한 모든 예측시나리오를 제공하므로 예측기간 동안에 재해기상을 유발할 수 있는 기상

현상의 발생가능성과 어느 정도의 강도를 가지는 재해기상의 발생이 가능한지에 대한 정보도 얻을 수 있다. 그렇지만 전지구 모델 하나를 계산하는데도 엄청난 계산량이 요구되기 때문에 동시에 수 십 개의 모델을 수행해야하는 앙상블예측시스템은 독자적인 슈퍼컴퓨터를 보유하고 있지 않는 기관에서는 운영하기 힘들다. 이런 이유로 전 세계에서 10개 기관만 전지구 앙상블 모델을 현업으로 운영하고 있다(기상청, 2012).

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. Matsueda(2011)은 TIGGE 자료를 이용하여, 여러 기관의 기상청 자료를 이용한 앙상블 예측이 하나의 기상청 자료를 이용한 예측보다 극한 기상현상의 발생을 잘 예측하는 것을 보였다. Boer(1984)는 소규모 패턴의 예측 오차가 대규모 패턴의 예측 오차보다 더 빨리 증가한다는 것을 밝혔다.

따라서 이 연구에서는 한반도 폭염이 발생하였을 때 동아시아 지역에서 나타나는 대기 순환 패턴을 분석하고, 대규모 순환과 연관된 한반도 폭염지수를 이용하여 한반도 폭염발생의 예측성을 평가하였다. 또한, TIGGE 앙상블 자료를 이용하여 한반도 폭염발생 패턴을 검증하고 2장에서 소개된 KHI를 통해 폭염 시종 예측성을 평가하고자 한다.

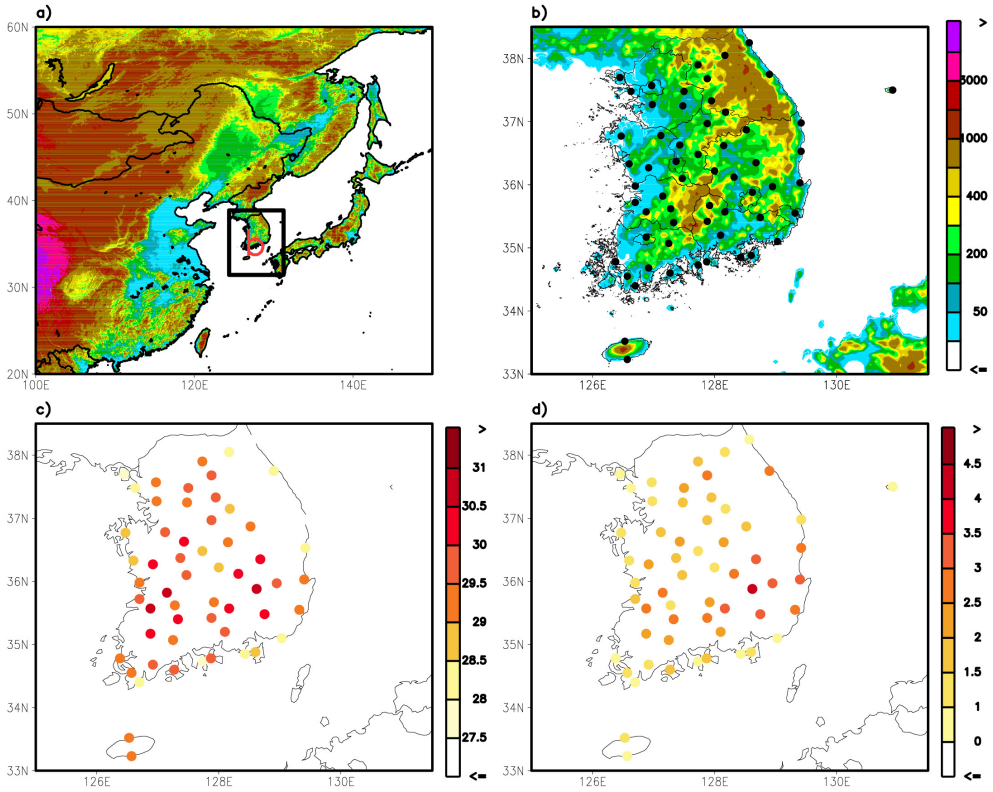


그림 3-1 (a) 동아시아에서 한반도의 위치, (b) 폭염 분석을 위해 사용된 60개 기상관서 위치(검정색 점), (c) 7월, 8월 기후평균된 일최고기온(°C), 그리고 (d) 폭염 발생 빈도수(unit: day)의 분포. 그림 (a), (b)에서 색깔은 해면고도를 나타낸다(unit: m).

3.1 자료 및 연구방법

3.1.1 관측자료

본 연구에서는 2011년부터 2015년까지의 관측자료 중 결측이 없는 기상청 60개 기상관서(Automated Synoptic Observation System: ASOS)의 일 최고 기온, 일 최저 기온, 일평균 기온, 강수량 자료를 사용하여 한반도 폭염의 발생 특성을 분석하고 폭염 예측성을 평가하였다.

최근 한반도 폭염이 발생 하였을 때, 종관 패턴 분석은 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 사용하였다. OLR 자료는 NCEP CPC 자료를 사용하였다. 분석영역은 여름철 한반도 기온분포와 대기 순환 패턴을 효율적으로 보여주기 위해서 한반도를 중심으로 아시아 지역을 선정하였다. 기후값은 1981년부터 2000년까지의 평균하여 산출하였다.

그림 3-1(a)은 동아시아의 지형과 한반도의 위치를 나타낸 것이며, 한반도 폭염 발생 특성을 분석하기 위해서 사용된 60개 관측 지점이다(그림 3-1 b). 한반도 여름철 일최고 기온의 기후값 분포를 보면 대구가 30.7도, 정읍이 30.6도, 밀양 30.5도, 남원이 30.4도, 합천 30.3도, 그리고 광주가 30.2도로 높은 값을 보인다. 폭염의 평균 발생 빈도수는 일 최고기온 평균이 높은 지역에서 많이 발생하였다(그림 3-1 c, d).

3.1.2 TIGGE 모델 자료

본 연구에서 사용된 모델자료는 WMO 산하의 WWRP 중 하나인 THORPEX에서 운영 중인 TIGGE 자료를 이용하였다. TIGGE는 전 세계 현업 기관에서 사용하는 앙상블 모델들을 이용하여 1일에서 2주 규모의 위험 기상에 대한 예측성을 향상시키기 위하여 2005년부터 수행 중에 있다. ECMWF(European Center for Medium-Range Weather Forecast), UKMO(United Kingdom Meteorological Office), JMA(Korea 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. 본 연구에서는 TIGGE에서 제공하는 전 세계 현업기관들의 자료중에서 NCEP, CMC, KMA, UK, 그리고 ECMWF의 앙상블 모델 자료를 이용하였다. 각 모형의 앙상블 멤버 수, 모델 해상도와 초기 섭동장 및 예측 기간은 표 3-1과 같다.

표 3-1 TIGGE 모형 설명(NCEP, CMC, KMA, UKMO, ECMWF)

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	Ensemble Kalman 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 폭염 예측 성능을 비교하기 위해 7월과 8월의 TIGGE 앙상블 모델 자료를 이용하였다. 본 연구에서는 9일 전까지 예측자료까지 사용하여 폭염 시종 예측성을 검증하였다. 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 일 최고 기온이 33°C 이상 인 상태가 2일 이상 지속되는 지상기상관측지점이 한 지점 이상 존재 할 때로 정의하였다. 여기서 최고기온 33°C는 여름철(7,8월) 일 최고기온의 90th percentile 값이다. 따라서 모형별 폭염 예측성 검증을 위해서 관측의 일 최고기온의

90th percentile 값을 임계 온도로 정의하여, 이 임계값이 2일 이상 지속될 때를 폭염이 발생한 것으로 판단하였다.

그러나 각각의 모형들은 systematic error를 가지고 있기 때문에 편의 보정이 필요하다. 우리는 편의 보정하기 위해 모형별 climatological PDF(Probability Density Function)를 구성하여 90th percentile 값을 적용하였다(Dee et al., 2011). 각 모형별 PDF의 기후값은 2011년부터 2013년 동안 TIGGE 자료를 사용하였다.

모형별 일 최고기온의 90th percentile 값은 각 모형별 3년 동안 7, 8월 자료를 이용하여 기후값을 생성하기에는 표본이 너무 적기 때문에, 31일 window내에서 각각의 선행 예보시간 자료를 이용하였다. 예를 들어 ECMWF에 대한 7월 1일의 표본 수는 4743개(31일 × 3년 × 51양상블 멤버)이다. 이 방법을 이용하여 모형별 90th percentile 값을 계산하였다(표 3-2). 모형별 한반도 평균 최고기온 값에서, KMA는 28.0°C로 다른 모형에 비해 높게 모의되었으며, NCEP은 약 25.7°C로 가장 낮게 모의하였다. 90th percentile 값은 KMA와 UKMO가 30°C 이상이며, 다음으로 ECMWF가 29.9°C를 나타낸다. KMA 모형은 일 최고기온의 평균, 90th percentile, 95th percentile에서 다른 모형에 비해 높게 모의 하지만, 관측과는 가장 근접하게 모의하고 있다.

폭염 시종의 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.

표 3-2 각 모형별 평균 최고기온, 90th percentile, 95th percentile의 값

Institute	Mean[°C]	90 th Percentile[°C]	95 th Percentile[°C]
NCEP	25.6	28.8	29.7
CMC	25.7	28.8	29.8
KMA	28.0	31.8	33.6
UKMO	26.7	30.2	31.2
ECMWF	26.7	29.9	31.0

3.2 검증방법

수치모형은 운동방정식, 연속방정식 등을 포함한 수많은 방정식들로 이루어져 있기 때문에, 자연 현상을 완벽하게 재현하지는 못한다. 또한 관측 자료의 부족이나 관측의 에러 등으로 모델의 초기 장애는 이미 오차를 내포하고 있다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여, 관측 자료의 품질을 개선하고, 모형내의 역학 및 물리과정을 개선하여 모형의 오차를 줄일 수는 있지만, 수치모델의 초기 조건의 불확실성으로 인한 한계는 극복하기 어렵다. 최근 들어, 단일 수치 모델의 초기조건, 경계조건과 모델에 내재되어 있는 불확실성으로 인한 오차를 줄이고, 예측 수준을 향상시키기 위한 방안 중의 하나로 많이 활용되고 있는 것이 앙상블 방법이다. 앙상블 예보란 앙상블 예측이란 단일 수치예보가 가지는 결정론적인 예측의 한계를 보완한 것으로서 초기조건 물리과정 경계조건 등이 다른 여러 개의 모델을 수행하여 확률적으로 미래를 예측하는 시스템이다 앙상블 예측에는 기존 수치모델의 정보와 예보 불확실성에 대한 정보를 동시에 제공한다.

단일 예보는 결정론적 예측만 할 수 있는데 반해 앙상블 예보는 확률밀도 함수(Probability Density Function, PDF)를 이용한 확률 예보가 가능하기 때문에 주로 중기 예측에 이용되며, 특히 폭염, 집중호우, 태풍등의 극한 기상 현상을 예측하는데 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 성능은 일반적으로 앙상블 멤버의 수가 증가할수록 그 성능이 향상되는 것으로 알려져 있으나, 앙상블 멤버 수를 늘릴수록 컴퓨팅 시간과 비용의 증가 문제를 유발하게 된다. 따라서 예보의 불확실성을 고려해 볼 때, 서로 다른 자료 동화방법, 모델 물리과정, 계통오차를 가지고 운영하고 있는 각 현업기관의 앙상블 자료를 효과적으로 사용하는 것이 적은 비용으로도 더 좋은 성능 향상을 기대할 수 있다(황윤정 등, 2012). 즉 각각 시스템으로부터의 단일 모델을 조합한 앙상블 또는 각기 다른 시스템으로부터의 앙상블 모델들을 조합하는 슈퍼 앙상블 등의 다중모델 앙상블을 이용하는 것이 효율적이다.

본 연구에서는 4년 간(2011년~ 2014년) TIGGE 자료를 이용하여 폭염 발생을 예측하고 검증하였다. 모형을 검증하기 위해서 아래 3가지 방법을 이용하였다.

- **TMAX(Daily maximum temperature)**: 각 기관에서 예측된 일 최고기온 자료를 이용하여 33°C 이상 인 상태가 2일 이상 지속될 때 폭염으로 정의
- **BCT(Bias Corrected TMAX)**: 각각 기관별로 climatological PDF를 이용하여 예측된 일최고 기온의 90th percentile 값(표 3-2)이 2일 이상 지속될 때 폭염으로 정의
- **KHI(Korean Heat wave Index)**: 한반도 폭염지수가 0 보다 크거나 같을 때 폭염으로 정의. 여기서 한반도 폭염지수는 대기 대규모 순환에 기초하여 개발되었다.

각 기관의 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 예측 자료의 PCC가 높고 RMSE가 작다면, 그 모형은 예측성이 좋다고 말할 수 있다.

3.2.1 결정론적 검증 기법

어떤 날씨 요소에 대한 수치 예보 모델이 예측하였는지 혹은 예측하지 못하였는지와 같이 특정 임계값(Threshold Value)을 기준으로 양분예보(Dichotomous Forecast)를 내리는 경우가 많다. 어떤지역에 폭염이 있었는지 유무 예보가 이런 예에 해당된다. 이런 형태의 날씨 예보를 검증하기 위해 수치예측값과 관측값을 각각 이진변수로 나타낸 분할표(Contingency Table)를 이용하며, 이 분할표를 기준으로 다양한 예보평가지수를 개발하여 활용한다.

표 3-3 이진 변수 검증 분할표. H (hit: 맞힘): 현상이 발생할 것으로 예보하고 실제현상이 발생한 경우, M (miss: 미 예보): 현상이 발생하지 않을 것으로 예보하고 실제 현상이 발생한 경우, F (false: 미 발생: 현상이 발생할 것으로 예보하고 실제 현상이 발생하지 않은 경우, N (correct negative: 미 발생 맞힘): 현상이 발생하지 않을 것으로 예보하고 실제 현상이 발생하지 않은 경우

		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)

폭염 발생에 대한 결정론적 검증은 표 3-3와 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. 표 3-3의 정의를 이용해서, Percent Correct, Equitable Threat Score, Threat Score(TS)는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

- Percent Correct(PC)

$$PC = \frac{H + N}{H + F + M + N} \tag{3-1}$$

PC는 식 (3-1)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.

- Threat Score(TS)

TS는 관측이나 예보가 임계값을 초과한 이벤트와 예보가 적중한 이벤트 사이의 비를 나타내며, 판정 분할표를 이용하여 식 (3-2)와 같이 계산된다. TS는 0부터 1까지

의 범위를 가지고, 1일 때 완벽한 예보를 의미한다.

$$TS = \frac{H}{H+F+M} \quad (3-2)$$

- 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.

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

3.2.2 확률론적 예측 검증

기상예보에서 특정 기상상태의 발생유무를 예보하는 경우가 많다. ‘발생함’과 ‘발생하지 않음’으로 구분되는 범주 기상예보에 대하여 일반적으로 ‘내일 폭염발생 확률이 70%이다’ 형태인 확률예보를 선호하고 있다. Murphy(1993)에 의하면 확률론적 예측을 하는 이유는 예측을 각 범주가 일어날 확률로 나타냄으로써 예측의 불확실성을 한 눈에 나타낼 수 있다는 이점을 가지고 있기 때문이다. 폭염의 예측값을 전달할 때, 폭염 예측에 대한 불확실성(uncertainty)의 정도에 따라 예측값에 대한 신뢰도가 결정된다. 따라서 예측값과 함께 불확실성에 대한 정보까지 제공한다면 예측정보를 사용하는 사용자에게 더욱더 유용한 정보를 전달할 수 있을 것이다. 이러한 불확실성을 고려하기 위해서, 앙상블 예측은 일반화 되어있다.

확률론적 예측은 모델 앙상블 멤버들의 기후 평균적 분포와 예측 확률 분포를 바

탕으로 일정한 기준값으로 구분된 상태에 확률을 부여하는 것이다. 이 때 모델 앙상블 멤버들의 확률 분포를 적절히 사용하는 것이 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 확률론적 예측 검증을 위해 Brier skill score(BSS)와 Ranked Probability Skill Score(RPSS) 방법을 이용하였다.

- 폭염 발생 확률(P)

폭염발생 확률은 앙상블 멤버들의 예측정보가 폭염을 정의하는 3가지 방법을 만족하였을 때의 확률을 정력적으로 계산하여 확률 분포를 나타낸 분포도이다. 확률(P)의 계산은 예측한 앙상블 멤버수를 M_f 이라고 할 때, 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$P = \left(\frac{M_f}{M_t} \right) \times 100 \quad (3-4)$$

여기서 M_t 는 전체 앙상블 개수를 의미한다.

- Brier skill score(BSS)

먼저 Brier score(BS)는 아래의 식으로 구해진다.

$$BS = \sum_{k=1}^T \frac{n_k}{N} (p_k - o_k)^2 + \sum_{k=1}^{n_k} (o_k - \bar{o})^2 + \bar{o}(1 - \bar{o}) \quad (3-5)$$

위의 식에서 우변 첫 번째 항은 reliability, 두 번째 항은 resolution, 세 번째 항은 uncertainty를 각각 나타낸다. 여기서 N개의 예보자료들은 T개의 카테고리로 구분되고 각 카테고리별 예보 자료의 수는 n_k 이다. p_k 는 각 카테고리별 예보 확률이고 o_k 는 각 카테고리에서의 관측빈도를 나타낸다. \bar{o} 는 전체 표본공간에서의 관측빈도를 의미한다. BS는 0일 경우 perfect forecast이고 예보의 정확성이 낮을수록 BS는 커진다.

BSS는 perfect reliable probability forecast로 climatology를 가정하였을 때 앙상블 확률 예보의 스킬을 나타내는 값이다. 따라서 BSS는 1일 때 perfect forecast이고 0 보다 작을 경우 앙상블 확률 예보가 climatology보다 예측성이 없음을 의미한다. 다시 말해서, BSS는 일종의 확률에 대한 RMS로써, 기후 평균적인 예측을 하는

경우와 비교하여 이보다 높은 예측성을 가질 경우 최대 1의 값을 가지며, 같은 경우 0, 이보다 더 낮은 예측성을 가질 경우 음의 값을 가진다.

$$BSS = 1 - \frac{BS_{fct}}{BS_{cli}} \quad (3-6)$$

- Ranked Probability Skill Score(RPSS)

우리는 폭염 발생에 대한 확률 예측결과의 정확도를 평가하기 위해 RPSS 기법을 이용하였다(Epstein, 1969; Murphy 1969, 1971; Hersbach, 2000). RPSS는 확률예보 결과를 검증하기 위해 사용되는 방법으로 식 (3-7)와 같은 연속형 RPS(Ranked Probability Score)를 기반으로 계산된다.

$$RPS = \frac{1}{ncat - 1} \sum_{icat = 1}^{ncat} (Pcumfct_{icat} - Pcumobs_{icat})^2 \quad (3-7)$$

여기서 icat은 각각의 카테고리를 나타내며(1 for 0.1, 2 for 0.2, ..., 10 for 1.0), ncat은 전체 카테고리의 수(10)이다. Pcumfct는 예측의 누적 확률(Cumulative forecast probability)이며, Pcumobs는 관측의 누적확률(Cumulative observation probability)을 나타낸다. 관측된 폭염은 특정일에 발생하며, 폭염의 유무를 판단하기 때문에 관측확률은 0이거나 1이 된다. RPS는 폭염예측확률과 폭염관측확률의 차이가 클수록 예측오차가 증가하게 된다.

RPS를 기반으로 RPSS는 식 3-8과 같이 주어진다. RPSS는 기준이 되는 예보 방법에 대한 관측의 카테고리 확률과 예측의 확률 사이 누적 제곱 오차(Cumulative squared error)를 측정하는 것이다. 여기서 RPS_{fct} 와 RPS_{cli} 는 앙상블 예측과 climatology 예측결과를 나타낸다. RPS_{fct} 와 RPS_{cli} 이 같으면, RPSS는 0이고, RPS_{fct} 가 0일 때 RPSS는 1이 된다.

$$RPSS = 1 - \frac{RPS_{fct}}{RPS_{cli}} \quad (3-8)$$

3.3 한반도 폭염 시종 예측성 검증

3.3.1 2013년 폭염

2013년 여름철 한반도 기온 특성을 알아보기 위해, 60개 지점 평균된 일 최고기온과 일 최저 기온의 anomaly 시계열과 공간분포를 계산하였다(그림 3-2). 기후값은 1981년부터 2010년의 최고 기온과 최저기온의 평균이다. 2013년 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. 또한 폭염기간(8월 6일~8월 23일)동안 한반도 최고기온은 지역별로 편차가 있지만, 30년 기후평균보다 약 0.5°C~5°C까지 높았다(그림 3-2b). 2013년 여름철 최고기온은 1973년 이래로 1위를 기록하였다. 2013년 8월 8일에는 울산 38.8°C, 울진 37.8°C, 남해 37.7°C, 해남 36.9°C를 기록하며 각 지역의 최고기온을 모두 경신하였다. 또한 밀양은 8월 19일 일 최고 기온이 약 38.4로 40년 만에 8월 최고 기온을 기록하였다. 부산의 2013년 8월 평균 최고 기온 및 평균 최저 기온은 32.1°C와 25.0°C로 평년(29.4°C와 23.4°C)보다 각각 2.7°C, 1.6°C 높았다.

2013년 여름철 전국 강수량은 평년(723.2mm)에 비해 약 78%(567.5mm)의 강수량만 기록되었다. 7월에는 장마전선이 주로 중부지방과 북한에 위치하여, 강수일수가 서울 25일, 수원 25일, 강화 24일, 인제 23일 등 최고 극값 기록한 반면, 제주도의 서귀포는 강수일수가 4일로 강수일수 최저 극값을 기록하였고, 밀양, 대구, 울산,

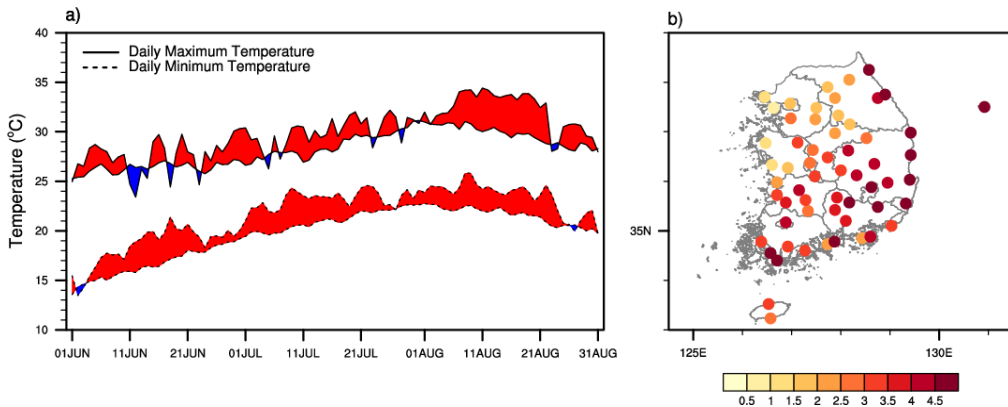


그림 3-2 (a) 일 최고기온(실선), 일 최저기온(파선)의 기후평균(1981~2010년)과 2013년 7월1일부터 8월 31일까지 일 최고기온과 일 최저기온의 anomalies(붉은 색은 양의 편차를 의미함), b) 60개 관측소의 일 최고기온의 2013 폭염 사례(8월 6일~8월 23일)에 대한 편차

완도의 강수일수는 11일, 10일, 8일, 6일로 강수일수 최저 극값 4위 안에 드는 극한 가뭄을 경험하였다. 따라서 남부지방은 2013년 매우 뜨거운 여름을 경험했다.

7월 전국 강수량은 302.0mm로 평년(289.7mm)에 비해 약 10mm 많이 내렸지만, 지역적으로 편차가 매우 컸다. 7월 중부지방의 강수일수는 21.2일로 1973년 이후 3번째로 많았으나, 제주도의 경우 강수일수는 약 4일로 1973년 이후 가장 적게 나타났다. 특히 장마전선이 중부지방에 위치 하였던, 7월 8일부터 27일까지 중부지방, 남부지방, 제주도에서 강수량은 평년대비 각각 126%, 15%, 4%로 강수량의 남북편차가 매우 크게 나타났다(그림 3-3).

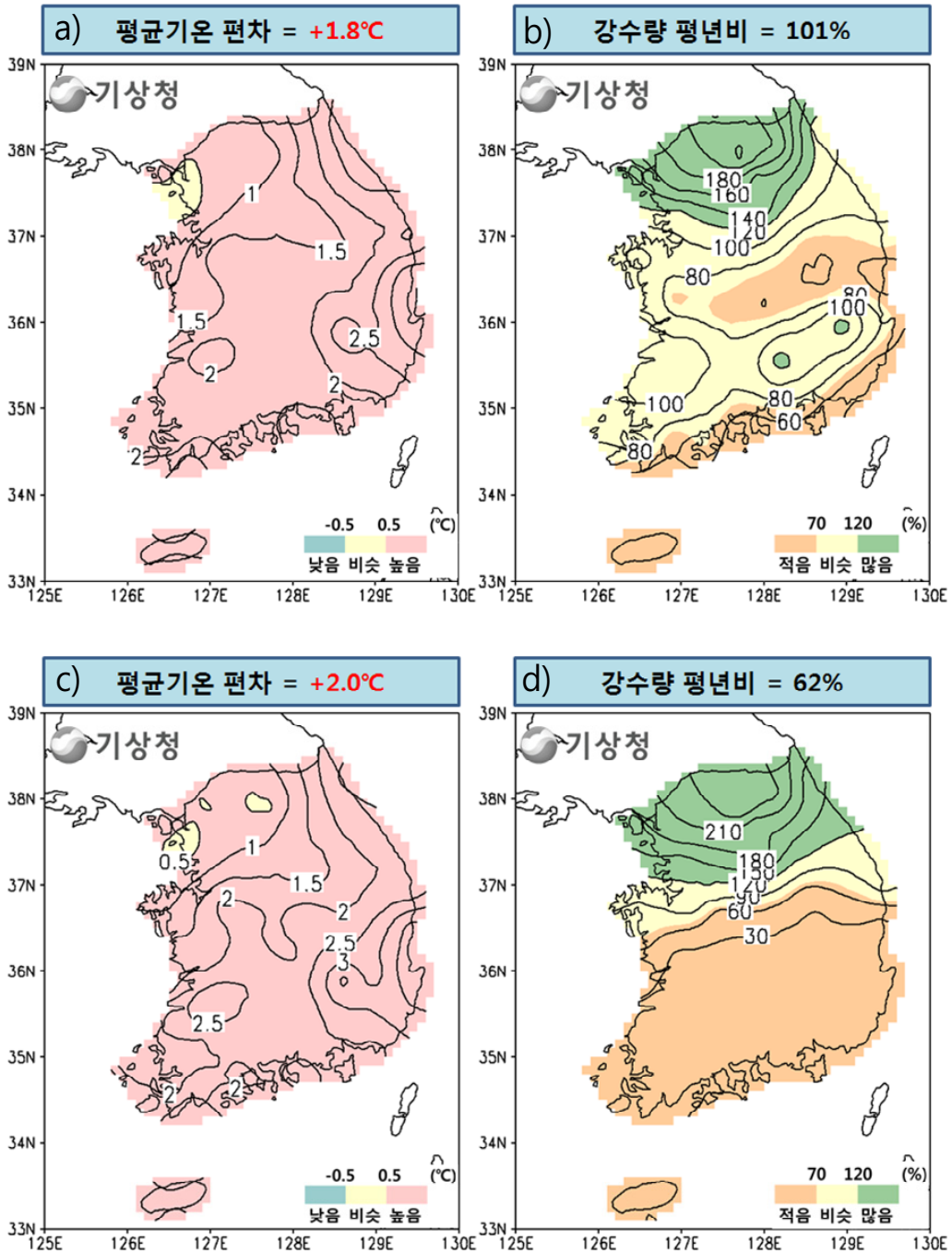


그림 3-3 2013년 7월 a) 평균기온 편차, b) 강수량 평년 비, 장마전선이 중부지방에 위치 하였던 기간 (8일부터 27일)의 c) 평균기온 편차, d) 강수량 평년비(기상청 2013년 7월 기상특성 보도 자료를 이용하여 재구성 함)

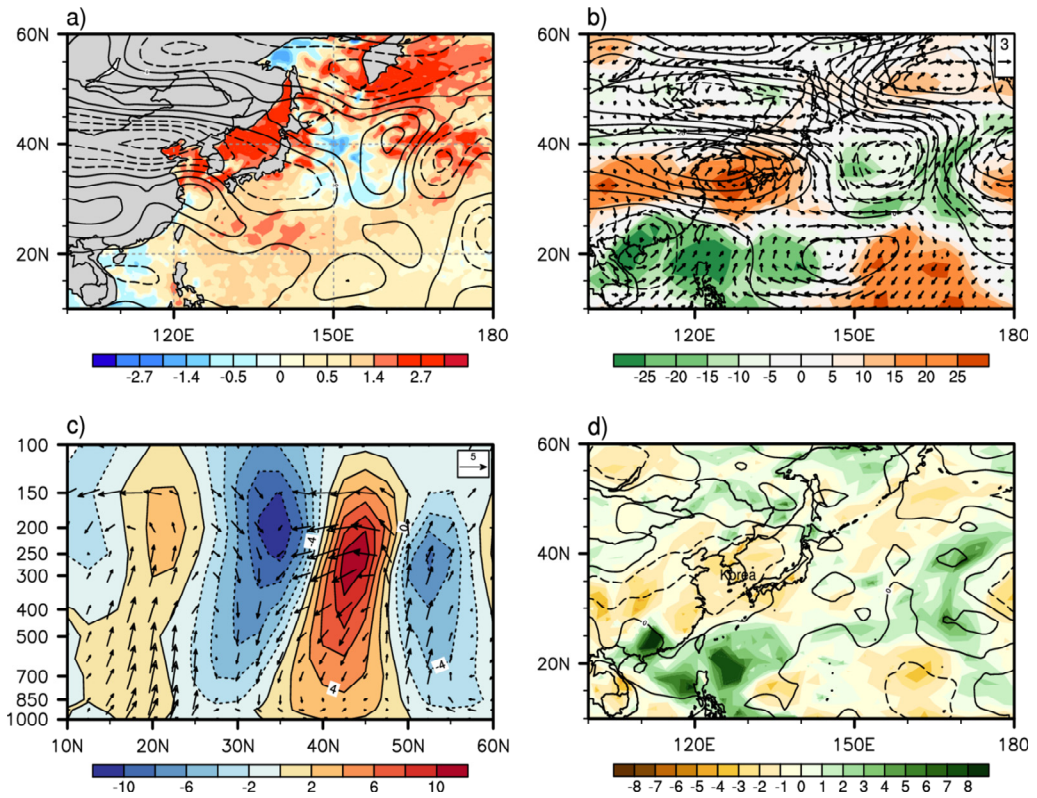


그림 3-4 2013년 폭염 패턴(2013년 8월 6일 ~8월 23일): (a) 해수면 온도 SST (shading, °C), 200 hPa 와도 (contours, 10-6 sec⁻¹ interval), (b) 장파 복사 (shading, Wm⁻²), 500 hPa 지위고도 (contours, 10m interval), 850 hPa 바람 (ms⁻¹, arrows), (c) 110~130°E 평균한 자오선 순환 (vector), 동서바람 (shading, ms⁻¹), (d) 강수량 (shading, mm/day), 구름 변화율 (contours, 10% interval)

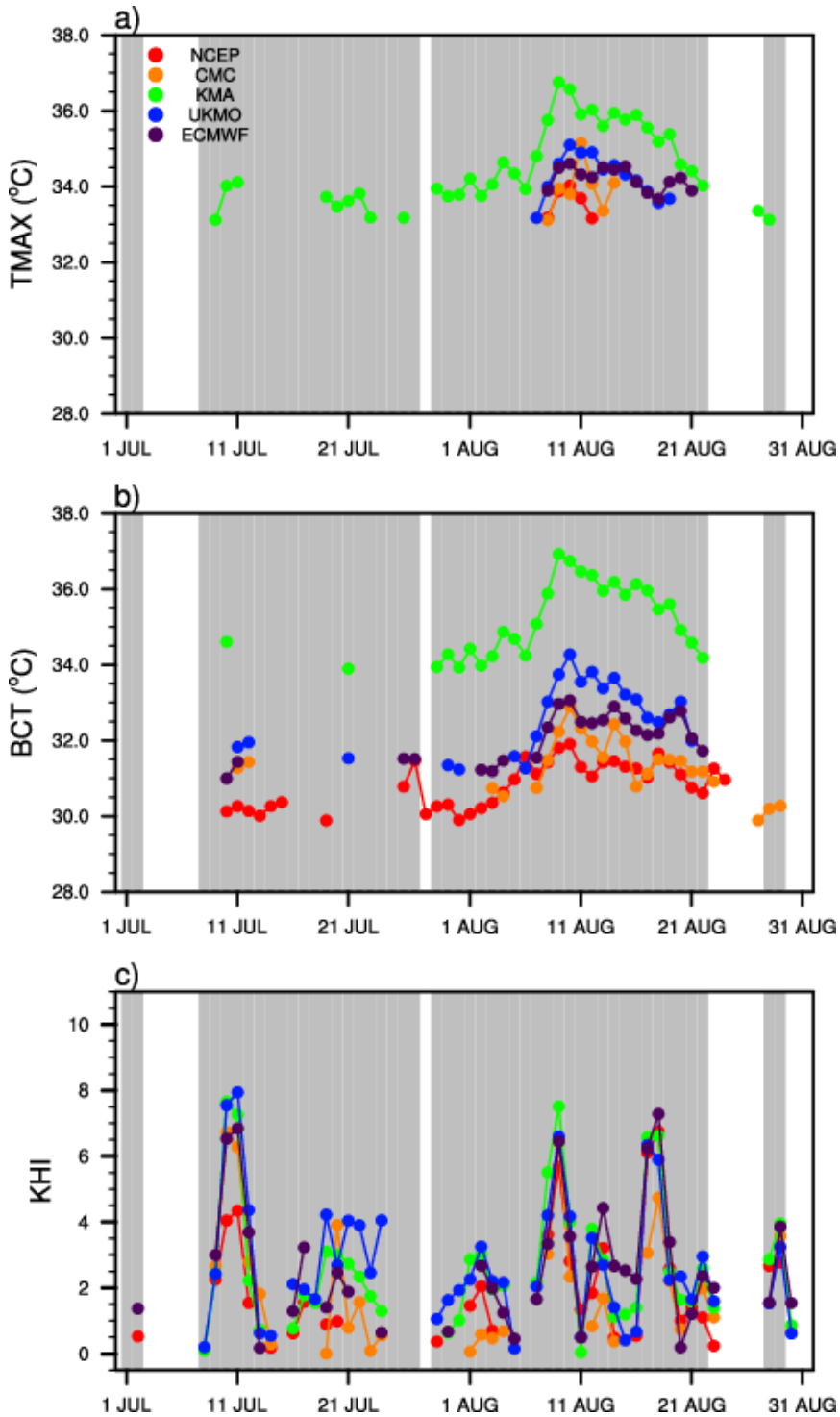


그림 3-5 2013년 폭염발생 예측성: a) TMAX, (b) BCT, (c) KHI. 회색은 폭염이 관측된 날짜를 의미함.

한반도 폭염과 연관된 대기패턴을 조사하기 위해서, 우리는 한반도 폭염이 발생하였을 때(2013년 8월 6일 ~8월 23일)의 Sea Surface Temperature(SST), 500 hPa Geopotential Height(GPH), 850hPa 바람장, 총 운량, 그리고 강수량의 아노말리를 분석하였다(그림 3-4). 한반도에 폭염이 발생하면, 북서태평양 고기압과 남중국해의 대류활동이 강화되는 모습이 뚜렷하게 나타난다(그림 3-4a). 이러한 패턴은 한반도 폭염을 유발할 수 있는 중요한 요소이다(Tao and Zhu, 1964; Lau and Li, 1984; Yanai et al., 1992; Park and Schubert, 1997). SST의 증가와 더불어 남중국해의 대류활동은 강화되고, 수증기 수렴이 더욱더 우세하게 된다. 그 결과 한반도에는 하강기류가 발생하게 된다(그림 3-4c). 따라서 한반도는 폭염이 발생하기 유리한 조건이 형성되며, 따뜻하고 건조한 공기로 인해 강수량과 구름운량은 감소하게 된다. 따라서 한반도의 지표기온이 상승하게 된다(그림 3-4d). 따라서 북서태평양 고기압은 서쪽으로 확장되게 되며, SST 또한 증가하게 된다(그림 3-4b). 그러므로 2013년에 한반도에는 강한 폭염이 발생하였다. 여기서 주목할만한 것은 상층와도(200hPa)의 남-북 양극자 모드이다. 이러한 모습은 그림 2-2a와 일치하는 모습으로써, 남중국해의 강한 대류활동에 의한 비단열 가열은 양의 200hPa 상층와도 아노말리를 유도하여, Rossby wave-train의 근원이 된다. 따라서 한반도 주변에 양의 지위고도가 발생하게 되는 것이다. 이러한 남-북 양극자 모드를 기반으로 개발된 KHI를 이용하여 2013년 한반도 폭염의 예측성을 검증하였다. 폭염발생에 대한 결정론적 예측 검증은 위에서 제시한 3가지 방법(TMAX, BCT, 그리고 KHI)을 이용하였다. 그림 3-5는 폭염관측 일(회색), 기관별 5일전 예측된 TMAX(3-5a), BCT(3-5b), KHI(3-5c)를 나타낸 것이다.

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 잘 모의하는 경향이 있다(그림 3-5a). 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(그림 3-6).

BCT 방법을 사용했을 경우 KMA를 제외한 NCEP, CMC, UKMO, ECMWF가 폭염 일을 TMAX 방법을 사용했을 때보다 예측성이 높다. NCEP은 TMAX방법을 사용했을 경우 2013년 폭염 일중 3일을 예측했지만, BCT방법을 사용했을 경우에는 34일을 예측하였다. 따라서 PC는 0.3에서 0.7로 향상되었으며, TS는 0.1에서 0.65까지, 그리고 ETS는 0.02에서 0.2로 약 10배의 예측성이 향상되었다(그림 3-6).

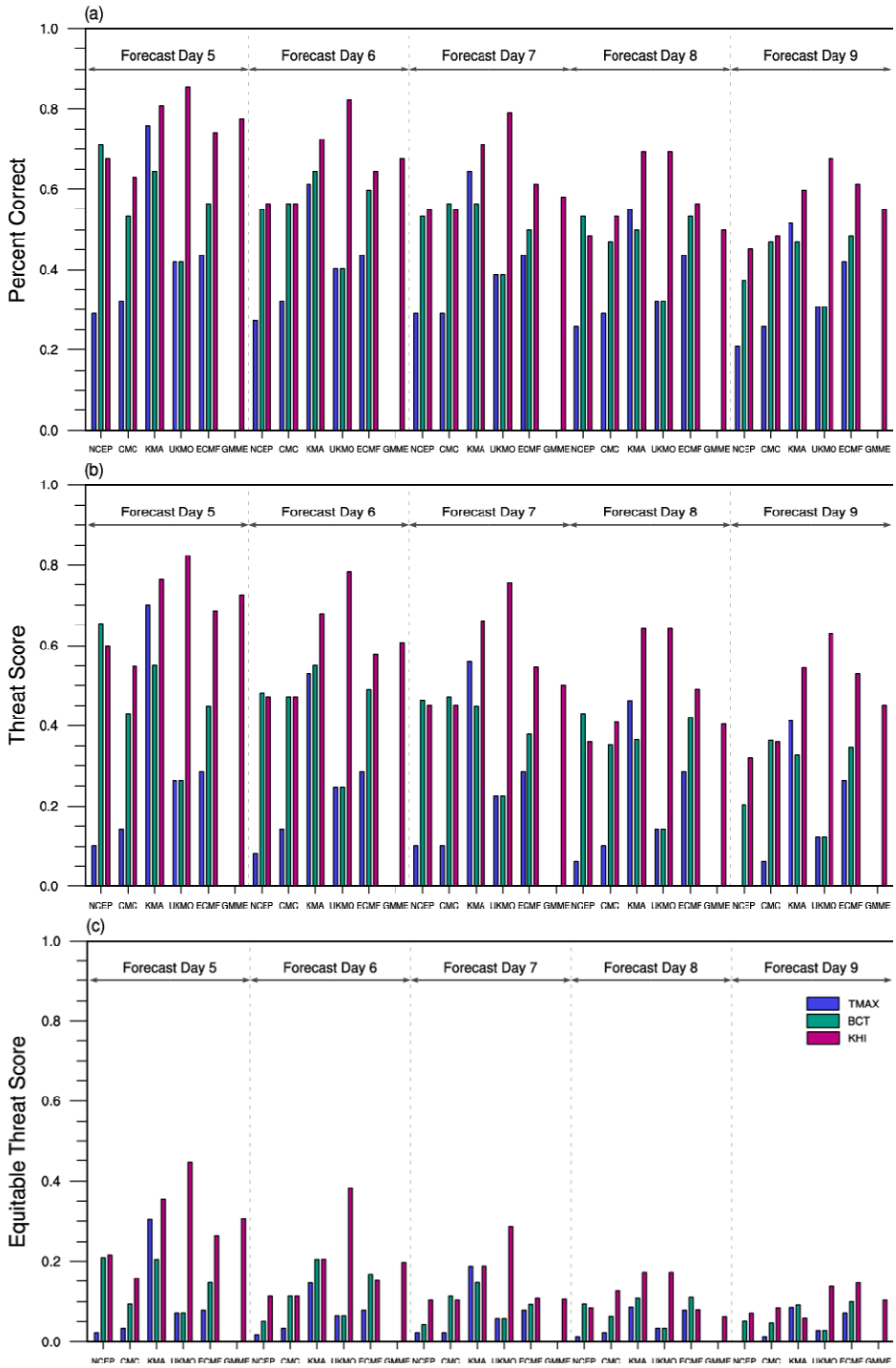


그림 3-6 TMAX, BCT, KHI 방법을 이용한 2013년 폭염 발생 예측 검증 : (a) Perfect Correct, (b) Threat Score, (c) Equitable Threat Score

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 가지고 있다. 또한 5일 선행기간 일 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 예보 7일 이상의 앙상블 결과는 KHI를 이용하는 것이 가장 적합하다.

본 연구에서는 200hPa vorticity, 2m temperature 자료를 활용하여 앞서 제시한 3가지 방법(TMAX, BCT, KHI)을 이용하여 한반도 폭염 발생에 대한 확률론적 예측 검증을 실시하였다. 여기서 확률 예보는 각각 모델 별 총 앙상블 멤버에 대해 폭염 발생을 예측한 멤버수의 비를 이용하여 예측지연 시간 별로 나타내었다. 예를 들어 KMA의 경우 총 앙상블 멤버 23개 중 KHI를 만족하는 모형이 20개라고 하면, 폭염 발생확률은 $87\%(20/23 \times 100)$ 이다.

그림 3-7은 중기 앙상블 예보시스템의 폭염 예측 성능 평가를 위해, 2013년 7월~8월까지 관측과 예측(KHI 방법)을 비교한 것이다. 가로축은 예보 시간을 나타내고, 세로축은 날짜를 나타낸다. 각 기관별 폭염 발생 확률이 50% 이상일 경우는 붉은색 계열로 채색되었고, 50%미만일 경우에는 푸른색 계열로 채색되었으며, 관측은 회색으로 채색하였다. 2013년 발생한 한반도 평균 폭염은 약 6회 발생하였으며, 7월 초에 발생한 폭염의 지속기간은 19일이며, 7월 말에 발생한 폭염의 지속기간은 무려 25일이다. 대부분 기관들의 예측결과는 전반적으로 유사하게 나타났다. 7월 11일 폭염의 경우, 짧게는 7일, 길게는 10일 이전의 예보에서 폭염이 100% 발생할 것으로 예측하였다. 그러나 모든 모형들이 6월 26일과 8월 6일 폭염은 예측하지 못하였다.

2013년 폭염 발생에 대한 앙상블 확률 예보의 검증을 위해 BSS와 RPSS를 사용하였다. BSS의 범위는 0~1이며, perfect forecast는 1의 값을 가진다. BSS는 폭염이

발생한 사례만을 이용하여 검증을 한다. RPSS는 3.2.2절에 설명한 바와 같이 1과 같거나 작은 값을 가지면서, 0보다 큰 RPSS는 기후값의 예측성보다 좋다는 것을 의미한다. 즉, 폭염이 발생하지 않았을 때 폭염을 예측하게 되면 예측오차가 커지게 되므로, RPSS값은 0보다 작아지게 된다. 그림 3-8은 lead-time에 따른 BSS와 RPSS 값을 나타낸 것이다.

TMAX 방법을 이용하였을 때, BSS는 폭염 발생에 대해서 모든 lead-time에 대해서 0보다 큰 값을 보여, 앙상블 확률예보가 기후 평균적 확률예보보다 좋은 예측성을 보인다. 각 기관들 중 KMA가 가장 우수한 성능을 보이지만, KMA를 제외한 모델들의 BSS 값은 0.4를 넘지 못하는 것을 알 수 있다. NCEP 모형의 경우, BCC는 모든 선행시간에서 가장 작은 값을 가졌다. RPSS 또한 KMA가 가장 좋은 예측성을 보이고 있다. KMA를 제외한 다른 기관은 0보다 작은 값을 보인다. 즉 기후값 보다 예측성이 떨어지는 것을 의미한다.

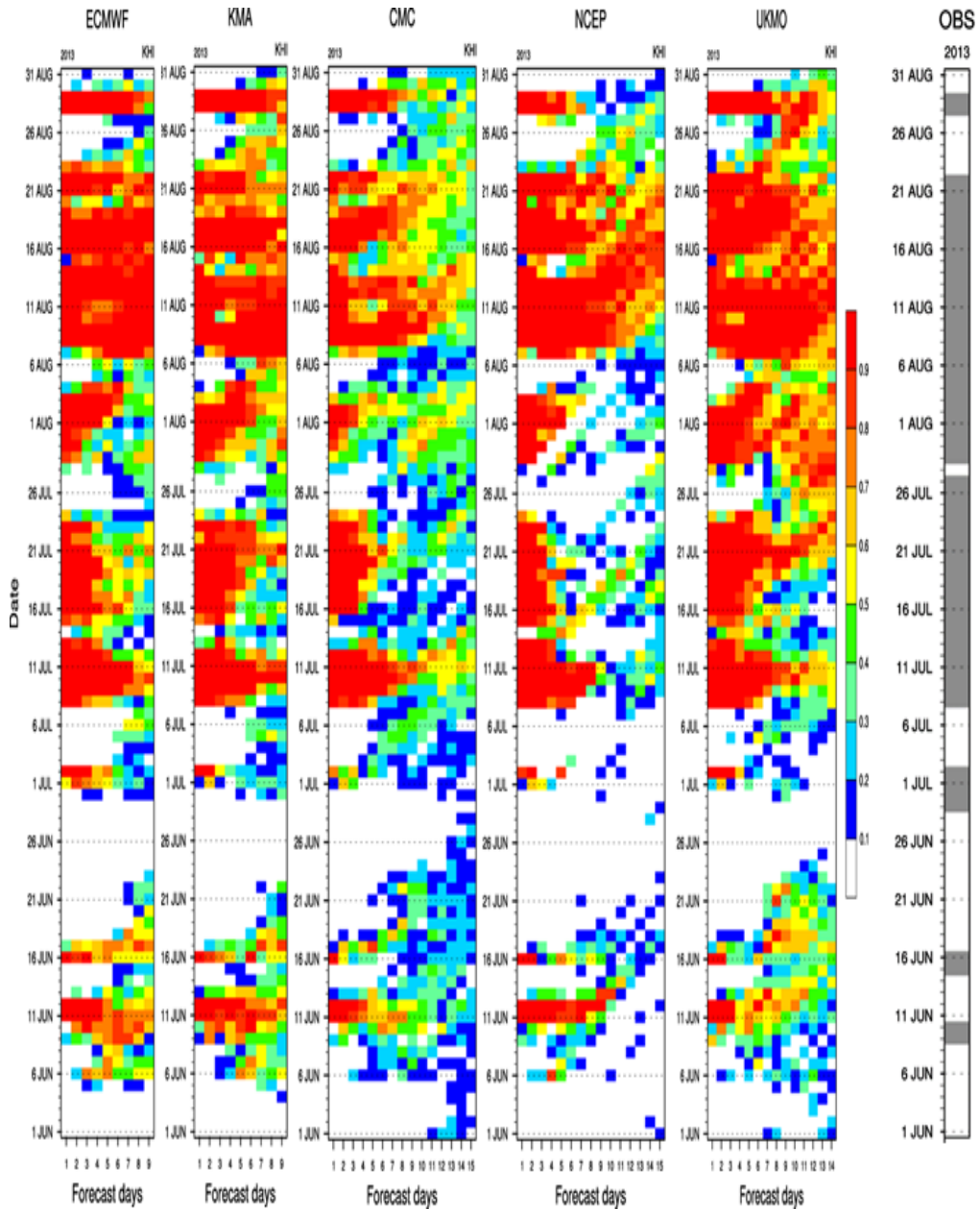


그림 3-7 2013년 폭염 발생에 대한 확률예측

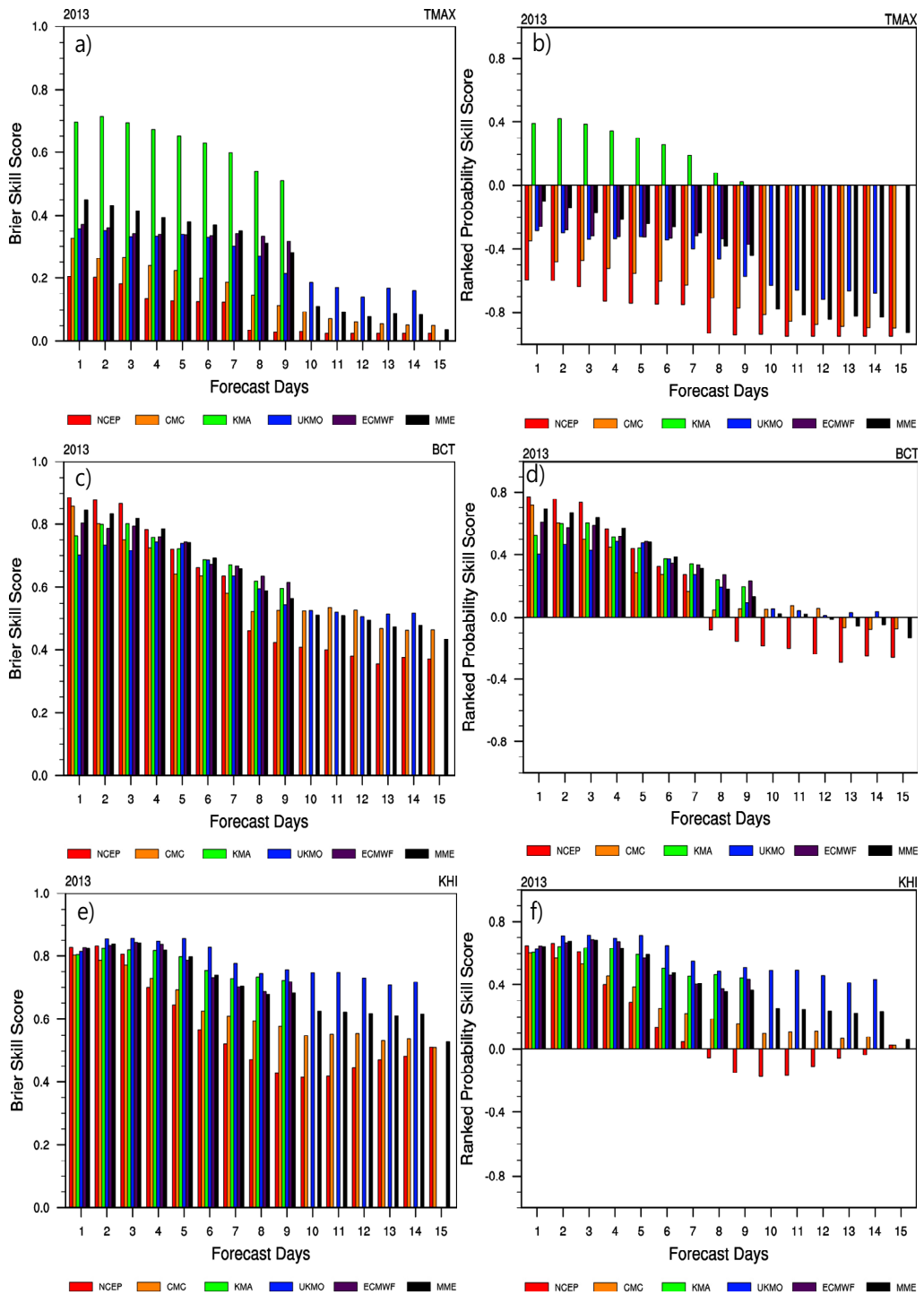


그림 3-8 3가지 방법(TMAX, BCT, KHI)을 이용한 2013년 폭염 검증: Brier Skill Score(a, c, e), Ranked Probability Skill Score(b, d, f)

BCT 방법을 이용하였을 때, 모든 모델의 BCC값이 TMAX에 비교하여 향상 되는 것을 알 수 있다. BCC 값은 선행시간이 길어질수록 값은 예측성이 떨어지는 것을 알 수 있다. 이는 앙상블 스프레드의 증가와 예측 오차에 의한 것이다. 모든 모델의 3일 전 BCC값은 0.7 이상의 값을 유지하고 있다. NCEP 모형은 3일전 예보까지 예측성이 제일 우수하지만, 그 후로 예측성이 급격히 떨어지는 것을 알 수 있다. KMA의 경우, 3일전 예보에서 가장 좋은 예측성을 보이며, 선행시간이 길어질수록 예측성이 감소하는 것을 알 수 있다.

KHI 방법에서, BCC는 기관마다 차이를 보이지만, 3일 선행시간이후에도 예측성은 10일 까지 유지되는 것을 알 수 있다. 특히 KMA, UKMO, ECMWF는 9일 선행시간까지 0.7이상의 값을 유지한다. 이러한 모습은 RPSS에서도 나타난다. 선행시간에 관계없이 UKMO가 가장 뛰어난 예측성을 보이며, KMA는 5일 선행시간에서 최고의 예측성을 보였다.

결과를 요약해 보면, 4일 이상의 폭염 예측을 위해서는 KHI방법을 사용하고, 4일 보다 짧은 선행시간에 대해서는 BCT 방법을 이용하는 것이 바람직하다.

3.3.2 2014년 폭염

2014년 여름철 기상 특성을 살펴보면, 7월에 중부지방에서는 고기압의 영향을 주로 받았으며, 대기 불안정으로 인해 소나기가 자주 내렸다. 장마전선은 주로 제주도에 영향을 주었기 때문에, 강수량은 제주도를 제외하고 전 지역에서 평년보다 적게 내렸으며, 7월 전국 평균기온은 25.1°C로 평년보다 약 0.6°C 높았다. 7월 31일에는 정읍이 약 37.3°C를 기록하며, 1970년 관측 이래 최고 순위를 갱신하였다(그림 3-9a). 제 10호 태풍 마트모(MATMO)가 중국 남동부 지역에 상륙한 후 소멸되면서 다량의 수증기가 중부지방으로 유입되어 7월 25일~26일에 많은 비가 내렸으나, 남부지방에서는 북태평양 고기압의 확장으로 인해 폭염이 나타났다(그림 3-10). 한반도 폭염은 강원도, 경상도 지역을 중심으로 발생하였다. 8월에는 전반기에 2차례 태풍(나크리, 할롱)의 직접적인 영향을 받아 전국에 많은 비가 내리면서, 8월 5일 이후에는 폭염이 발생하지 않았다.

폭염 발생 시 북태평양고기압이 중국 남동부까지 확장함에 따라, 남쪽으로부터 한반도로 수증기 유입이 어려운 기압계가 형성되어, 남부와 중부지방에서는 폭염이 발생하였다(그림 3-10b). 폭염 발생시 상층 와도 패턴은 남중국해에서 양의 와도, 한반도 주변에서는 음의 와도를 가지는 남-북 양극자 모드를 보인다. 이러한 특징은 앞서 제시한 한반도 폭염 패턴과 매우 유사하여, KHI의 예측성이 상당히 높을 것으로 예상된다.

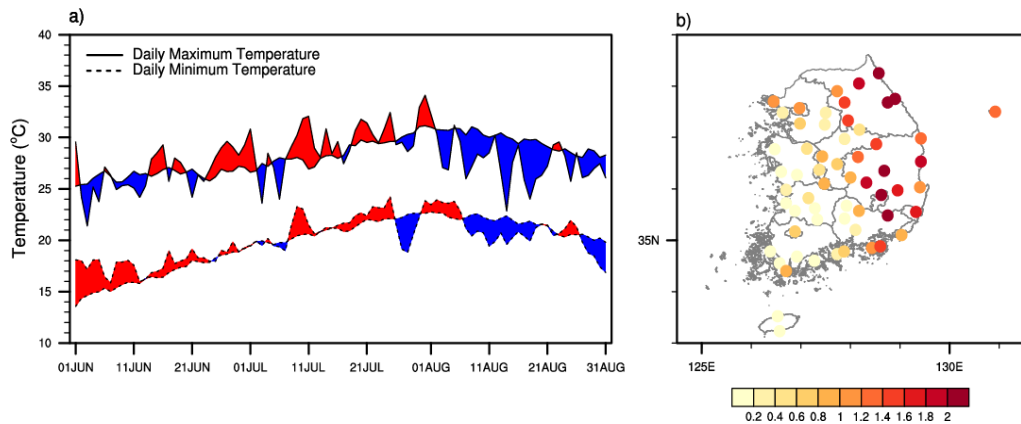


그림 3-9 (a) 일 최고기온(실선), 일 최저기온(파선)의 기후평균(1981~2010)과 일 최고기온과 일 최저기온의 평년 편차(붉은 색은 양의 편차를 의미함), b) 60개 관측소의 일 최고기온의 평년편차(2014년 7월18일-8월1일)

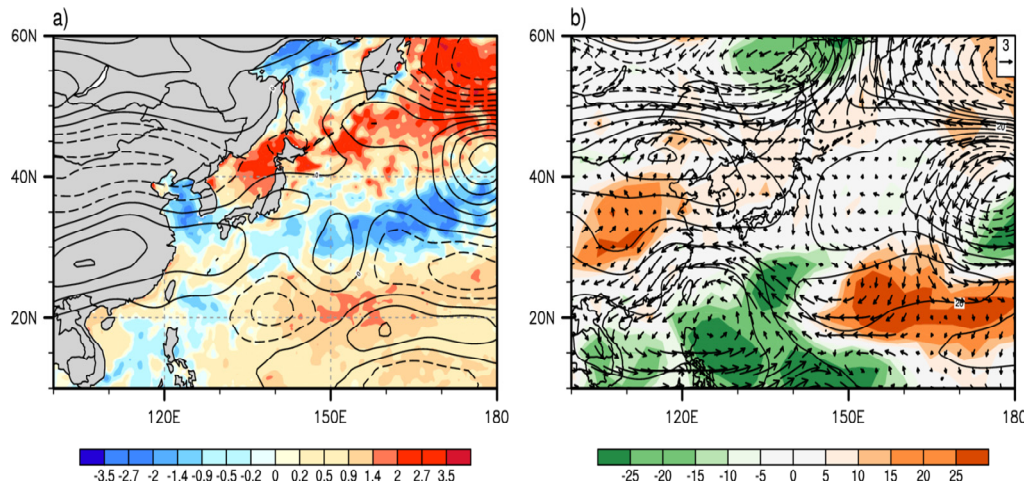


그림 3-10 2014년 폭염 패턴(2014년 7월 18일 ~ 8월 1일) : (a) 해수면 온도 Shading, (°C) 와 200hPa 와도 (contours, 10-6 sec-1 interval), (b) 장파복사(shading, Wm-2), 500hPa 지위고도 (contours, 10m interval) 그리고 850hPa 바람장 (ms-1, arrows).

그림 3-11은 TMAX, BCT, 그리고 KHI방법을 이용하여 선행 시간별(5일~9일) 폭염 발생 예측을 나타낸 것이다. 2014년 한반도의 발생한 평균 폭염은 4회이며, 잦은 태풍의 내습으로 인해 지속기간은 2013년에 비해 길지 않다.

TMAX의 경우, 선행시간에 상관없이 KMA, ECMWF를 제외한 NCEP, CMC에서는 한반도 폭염을 예측하지 못하였다. 따라서 PS값은 예측을 못한 경우도 포함되기 때문에 모든 모형에서 높은 값을 보이지만, 폭염 예보 적중률을 평가하는 TS와 ETS는 NCEP과 CMC에서 0이다. 그러나 KMA는 5일 선행시간에서 폭염을 예측하지만 5일 보다 긴 선행시간에서 지속기간이 긴 폭염을 정확히 예측하지 못하였다. 따라서 KMA의 TS와 ETS값은 5일 선행시간에서 가장 크고, 선행시간이 길어질수록 값이 작아진다(그림 3-12).

BCT 방법을 사용하면, KMA를 제외한 모든 모형에서 폭염의 예측성이 증가하는 것을 알 수 있다. KMA는 선행시간에 관계없이 TMAX의 예측성이 BCT보다 높았지만, TMAX방법을 이용할 경우, 전혀 폭염을 예측하지 못한 NCEP과 CMC는 TS와 ETS값이 0 보다 큰 값을 갖는다(그림 3-12). ECMWF의 PC는 선행시간 5일 일 경우 0.7에서 0.8로 향상되었으며, TS는 0.02에서 0.38까지, 그리고 ETS는 0.02에서 0.28로 10배 이상의 예측성이 향상되었다(그림 3-12). KHI의 경우, 폭염의 예측성은 TMAX와 BCT에 비해 월등한 것을 알 수 있다. 6일 선행시간에서 KMA의 TS와 ETS는 TMAX와 비교하여 2배의 예측성을 보이며, BCT와 비교하면 3배의 예측성을 보인다. 또한 9일 이상의 선행시간에서 KHI의 TS와 ETS는 각각 0.38과 0.2 이상의 값을 갖는다. 또한 KHI를 이용한 확률론적 예측성 또한 9일 예보까지 BSS는 약 0.8 이상의 예측성을 보인다(그림 3-13).

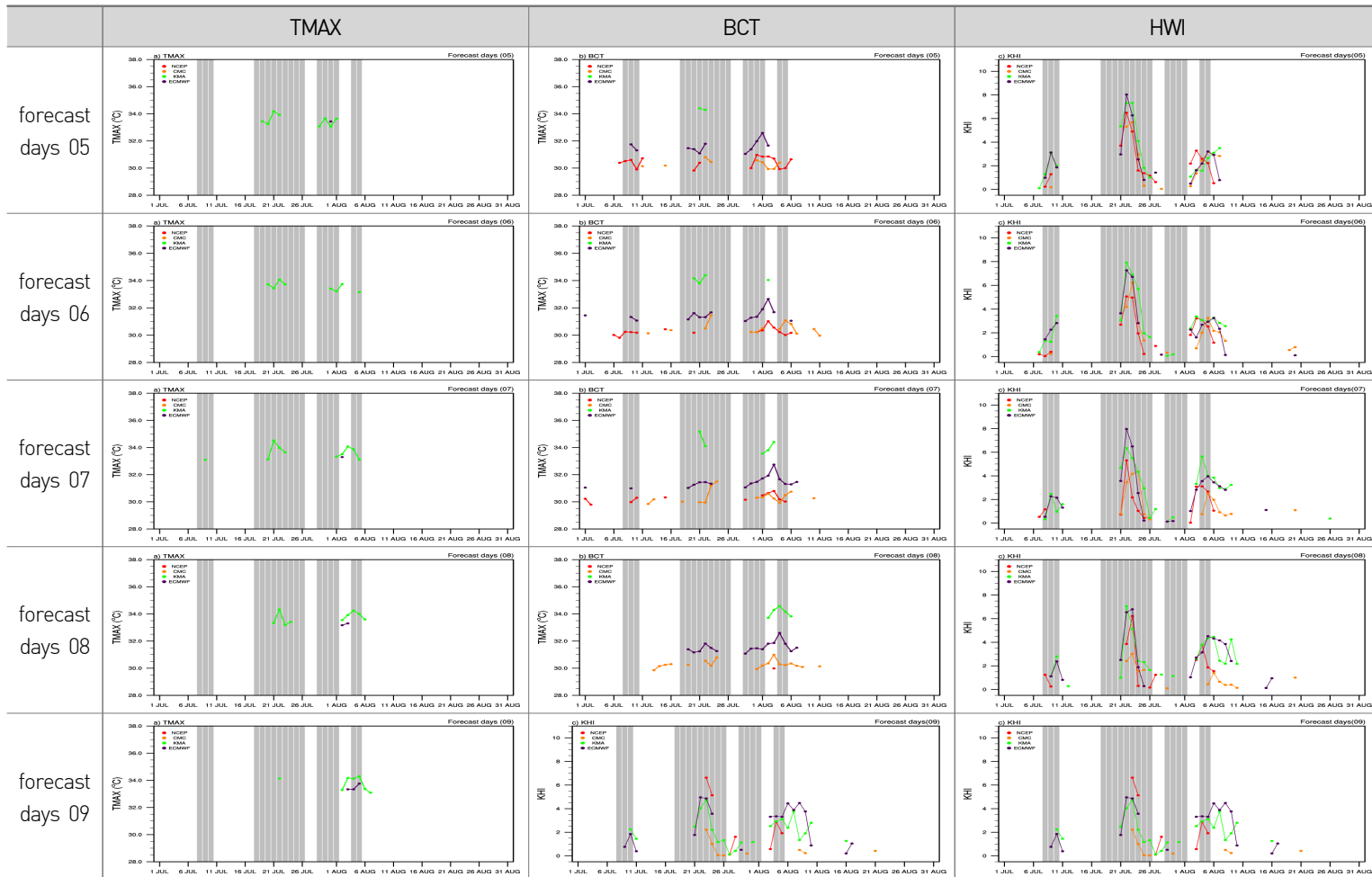


그림 3-11 2014년 여름철 한반도 폭염 발생 예측성: (a) TMAX, (b) BCT, (c) KHI. 회색은 폭염이 관측된 날짜를 의미함.

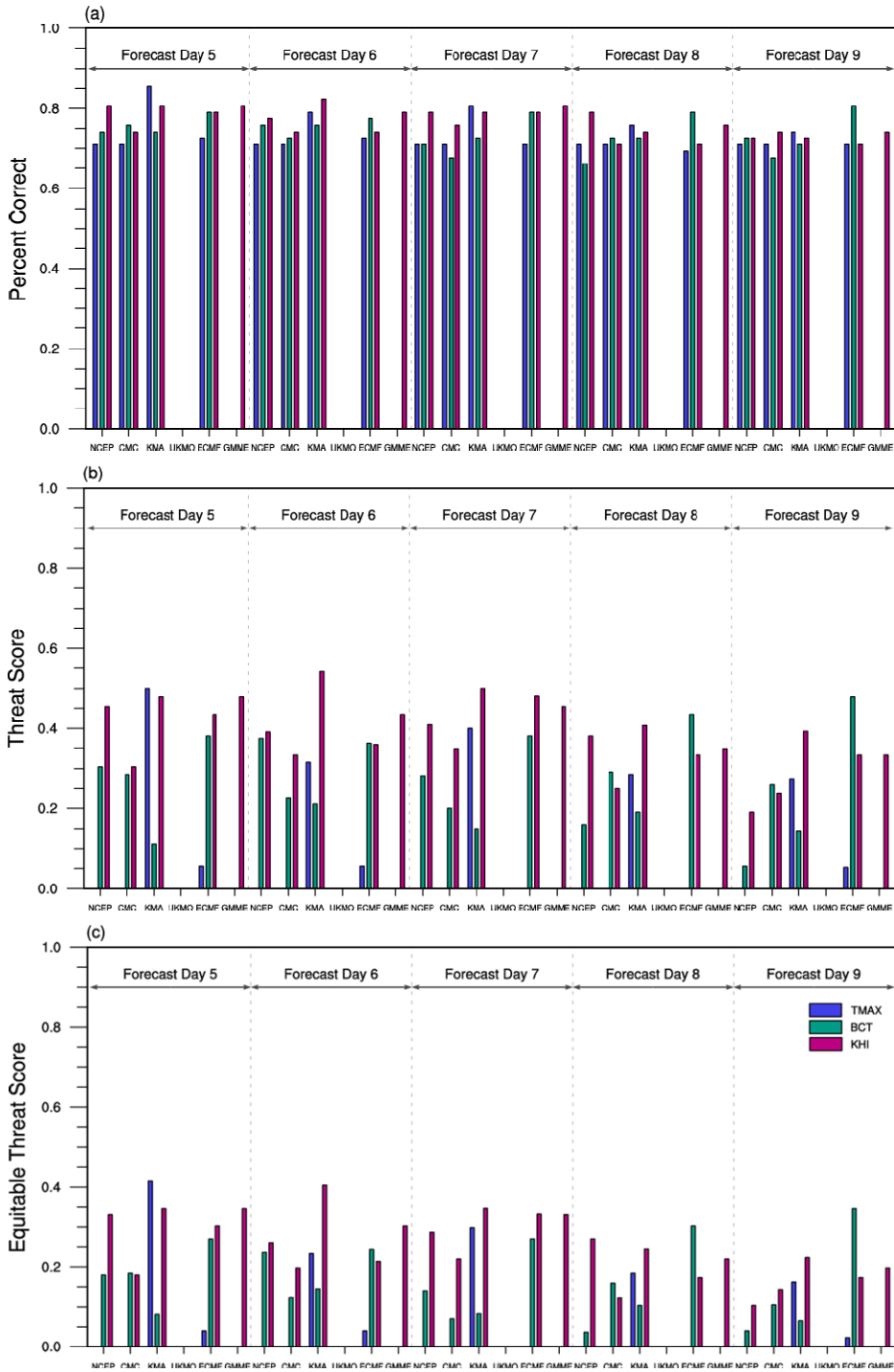


그림 3-12 2014 폭염 예측에 대한 검증: (a) Perfect Correct, (b) Threat Score, (c) Equitable Threat Score

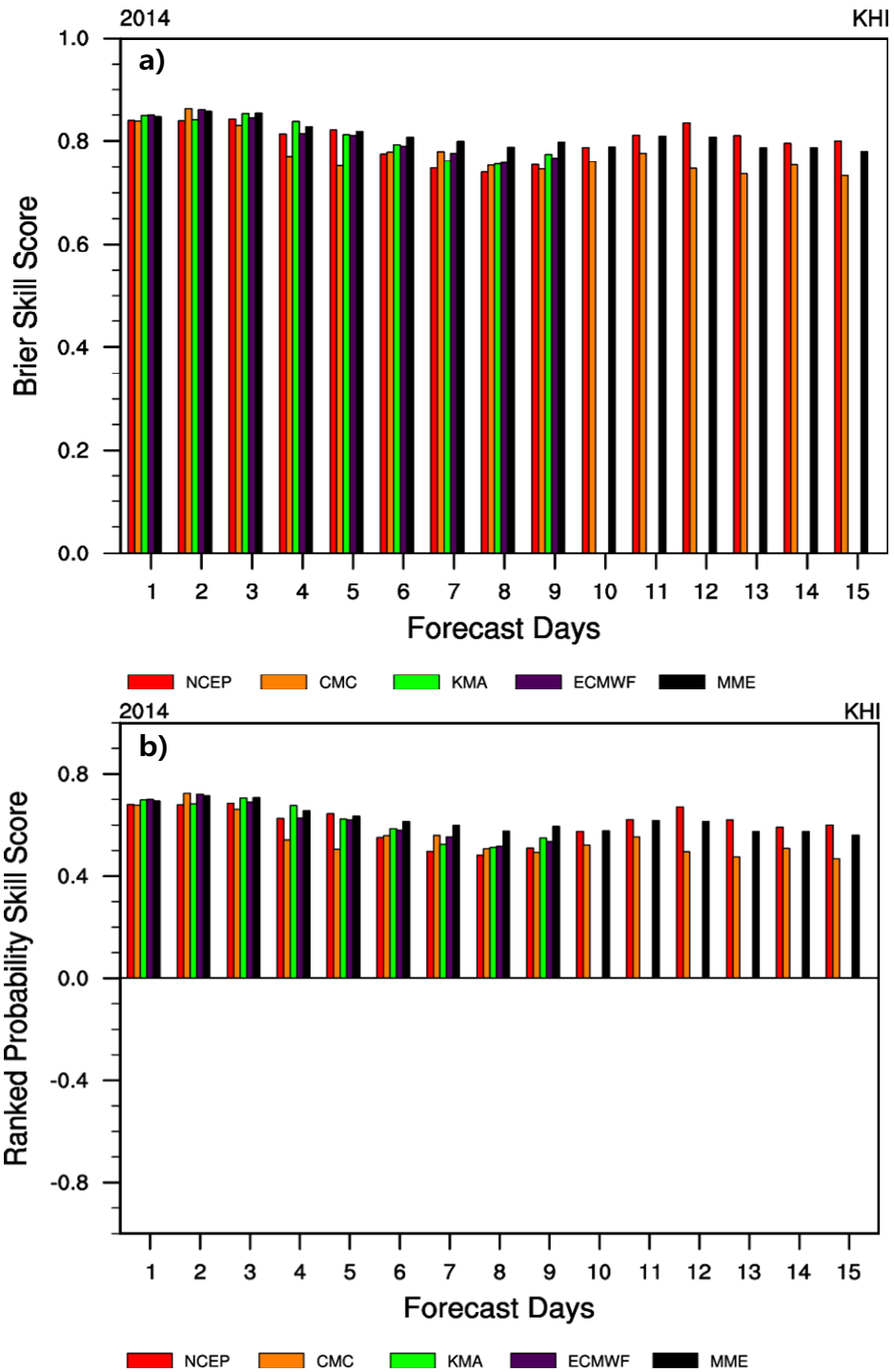


그림 3-13 KHI방법을 이용한 2014년 폭염 예측성 검증: (a) Brier Skill Score, (b) Ranked Probability Skill Score

3.3.3 한반도 폭염지수를 적용한 예측 검증(2011-2014)

3.3.1과 3.3.2절에서는 2013년과 2014년 폭염에 대한 결정론적 예측과 확률론적 예측에 대한 검증을 실시하였다. KHI는 선행시간이 5일 보다 클 경우 TMAX와 BCT 방법보다 뛰어난 예측성을 보였다. 따라서 이 절에서는 2011년부터 2014년까지 4년 자료를 이용하여 KHI의 예측성을 검증하였다.

먼저 KHI검증에 앞서 2011년부터 2014년 폭염이 발생하였을 때, 대기순환 패턴을 분석하였다. 그림 3-14은 2011년부터 2014년까지 년별로 폭염이 발생한 날짜를 추출하여 합성장을 구한 것이다. 한반도 폭염의 주요 패턴인 남중국해의 저기압과 한반도 주변의 고기압을 잘 모의 하고 있다(그림 3-14). 이러한 대기순환 패턴은 남중국해의 대류활동을 촉진시키고, 남중국해와 북서 태평양의 습기를 동아시아로 수송되는 것을 약화 시킨다(그림 3-14b). 4년간 폭염발생시 평균 연직운동은 30~35°N 주변 한반도와 일본지역에서 하강운동을 유발하여, 단열 가열로 인한 강수량이 감소하고, 또한 총 운량을 감소시켜 지표기온은 증가하게 된다(그림 3-14d).

그림 3-15는 4년 동안 폭염발생에 대한 결정론적 예측성에 대한 검증 결과이다. 파란색은 TMAX방법을, 초록은 BCT방법, 그리고 자주색은 KHI방법을 나타낸다. TMAX의 경우, 선행시간에 상관없이 KMA를 제외한 ECMWF, NCEP, CMC에서는 한반도 폭염의 예측성이 현저히 떨어지는 것을 알 수 있다. TMAX에 대한 TS와 ETS 값을 보면 예측성이 KMA의 1/10 수준이다. BCT는 TMAX에 비해 예측성이 향상되는 모습을 볼 수 있다. 예를 들어, NCEP의 5일 선행시간에 대한 TS 값은 0.42로 TMAX의 0.2보다 20배 큰 값이다. TMAX에 비해 향상된 BCT의 예측성은 선행시간에 관계 없이 TS와 ETS값에서 확인 할 수 있다. 분석기간 전체에 대해 KHI방법은 선행시간, 모델에 상관없이 다른 두 가지 방법보다 예측성이 우수한 것을 알 수 있다. 5일 선행시간에서, UKMO는 PC와 TS 값이 제일 크며, 다음으로 KMA가 좋은 예측성을 보인다. 그러나 선행시간이 6일 이상일 때에는 KMA가 KHI방법을 사용하였을 때 가장 우수한 예측성을 보인다.

우리는 4년 동안의 각 기관의 중기 앙상블 예보시스템의 확률 예보에 대한 예보 기술을 평가하였다(그림 3-16). 폭염에 대한 확률 예보를 검증하기 위해서, BSS와 RPSS가 사용되었다. KHI 방법은 검증기간 전체에 걸쳐 모든 모델이 우수한 예측성

을 보였으며, 이러한 예측성은 9일 선행시간까지 유지되었다. 모형들 중 BSS는 9일 선행시간까지 ECMWF와 KMA가 가장 높았으며, NCEP과 CMC는 선행시간이 길어짐에 따라 예측성이 낮아지는 것으로 나타났다. RPSS에서도 값의 차이는 매우 작지만, ECMWF와 KMA의 예측성이 가장 높았으며, 3일 선행시간 이후부터 NCEP이 3번째로 예측성이 높았다.

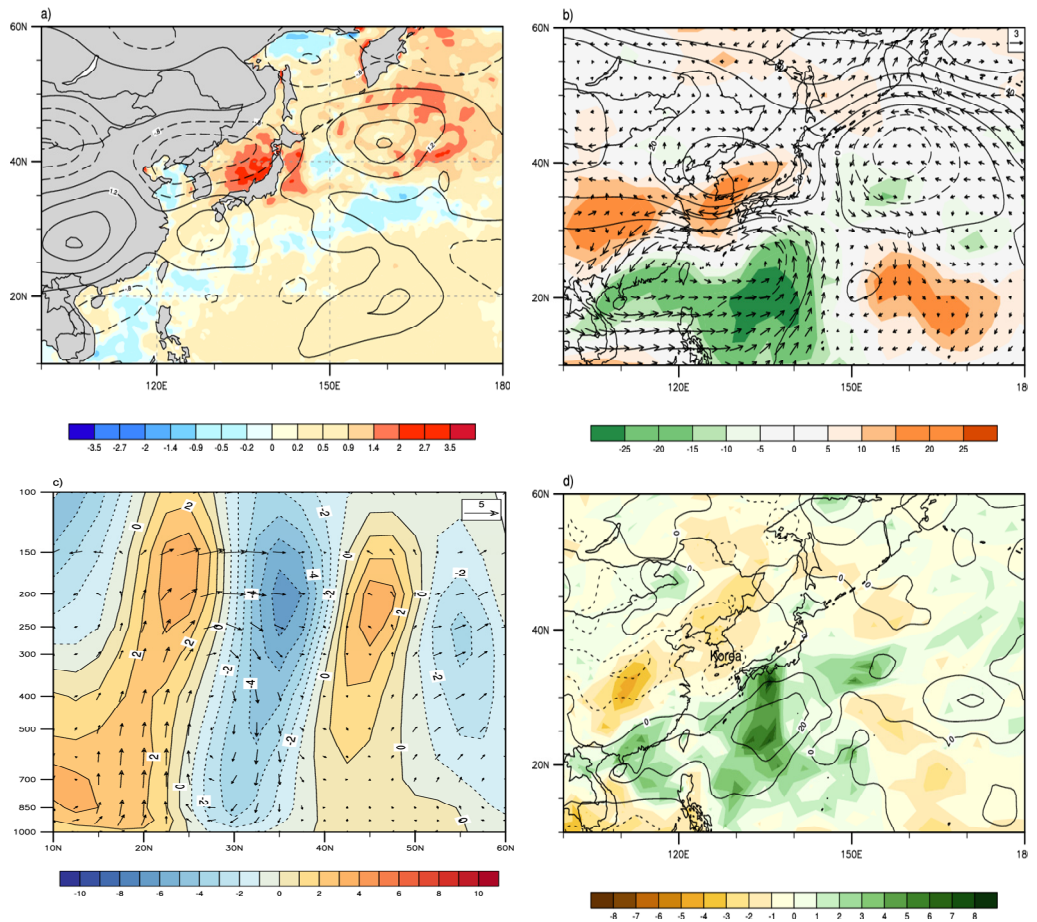


그림 3-14 4년 평균(2011~2014년) 폭염 패턴: (a) 해수면 온도 SST (shading, °C), 200 hPa 와도 (contours, 10-6 sec⁻¹ interval), b) 장파 복사 (shading, Wm⁻²), 500 hPa 지위고도 (contours, 10m interval), 850 hPa 바람 (ms⁻¹, arrows), (c) 110~130°E 평균한 자오선 순환 (vector), 동서바람 (shading, ms⁻¹), (d) 강수량 (shading, mm/day), 구름 변화율 (contours, 10% interval)

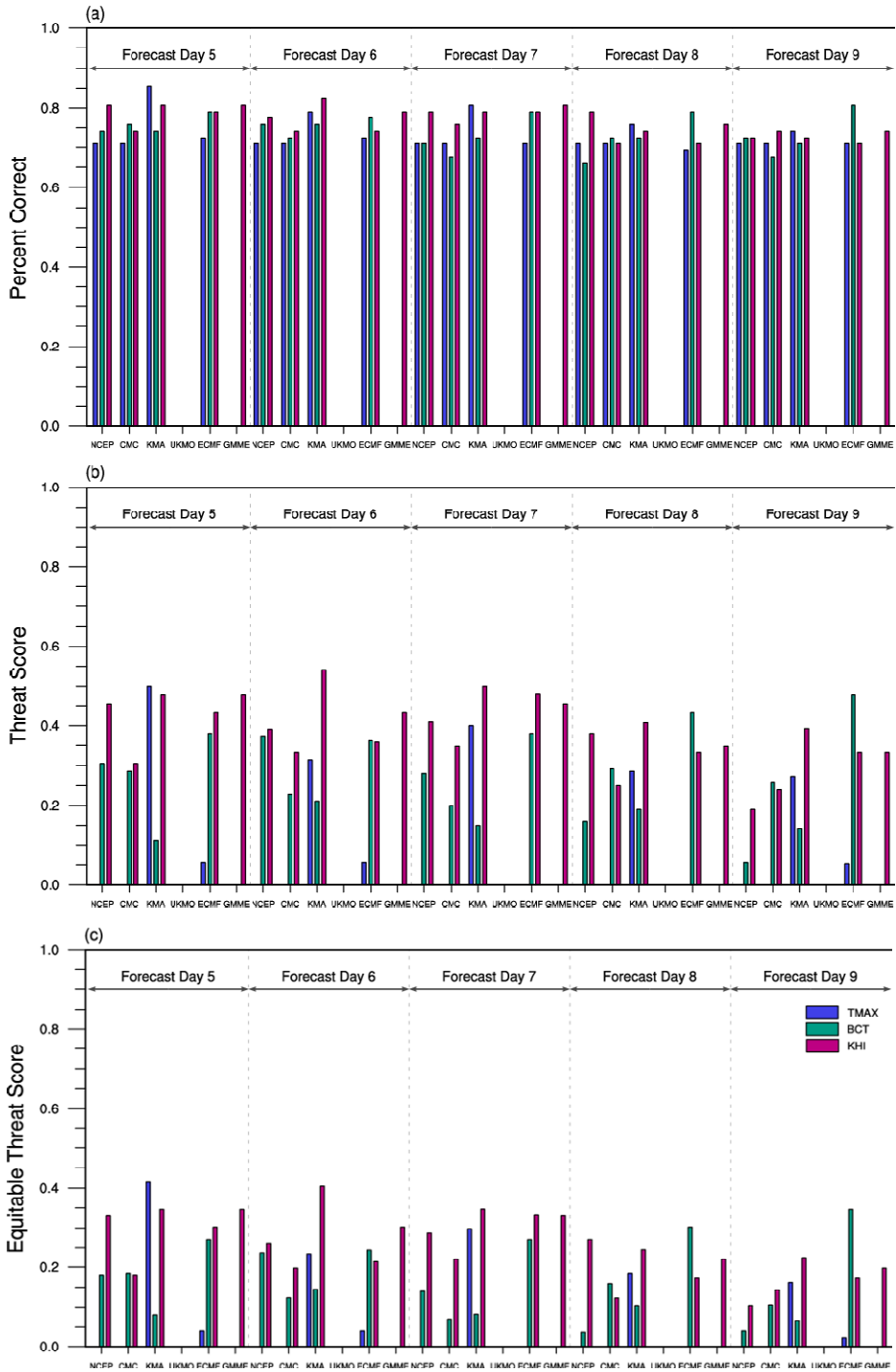


그림 3-15 2011~2014년 폭염 예측에 대한 검증: (a) Perfect Correct, (b) Threat Score, (c) Equitable Threat Score

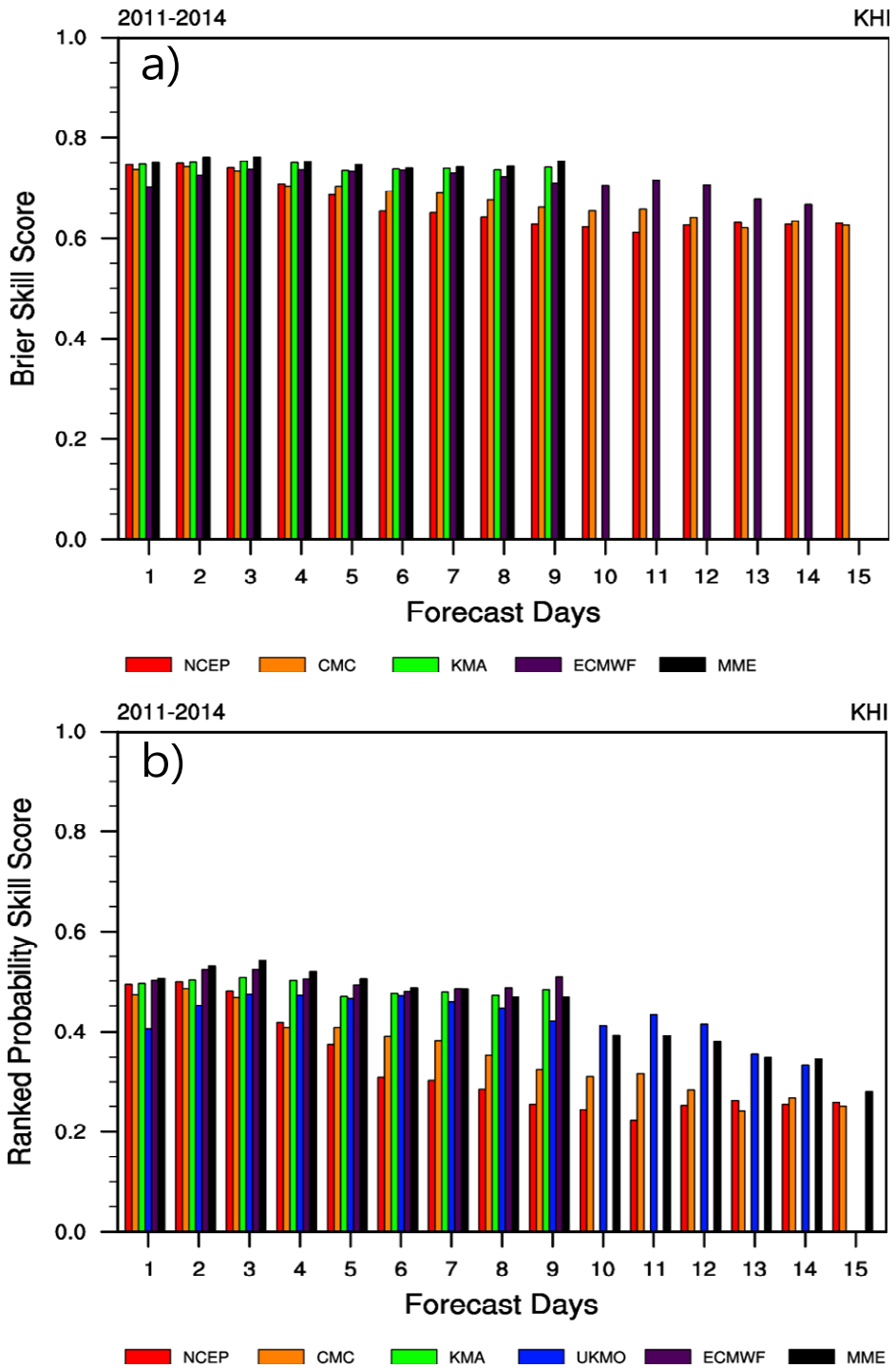


그림 3-16 KHI방법을 이용한 2011~2014년 폭염 예측성 검증: (a) Brier Skill Score, (b) Ranked Probability Skill Score

표 3-4 TIGGE 자료를 이용한 한반도 폭염예보 시스템

예보 선행시간	사용방법	규모
7일전	KHI (결정론적 방법, 확률론적 방법)	한반도
3일전	BCT (확률론적 방법)	지역(시, 군)

4년 동안 폭염예보에 대한 검증 결과를 바탕으로, TIGGE 자료를 이용한 한반도 폭염 예측 시스템을 개발하였다. 일주일 전에 KHI를 이용하여 한반도 폭염 발생 유무에 대한 결정론적, 확률론적 정보를 제공할 수 있으며, 3일 이전에는 BCT 방법을 이용하여 한반도 폭염 발생에 대한 확률예보를 지역별로 제공할 수 있을 것이다.

3.3.3.1 2015년 실시간 예보 및 검증

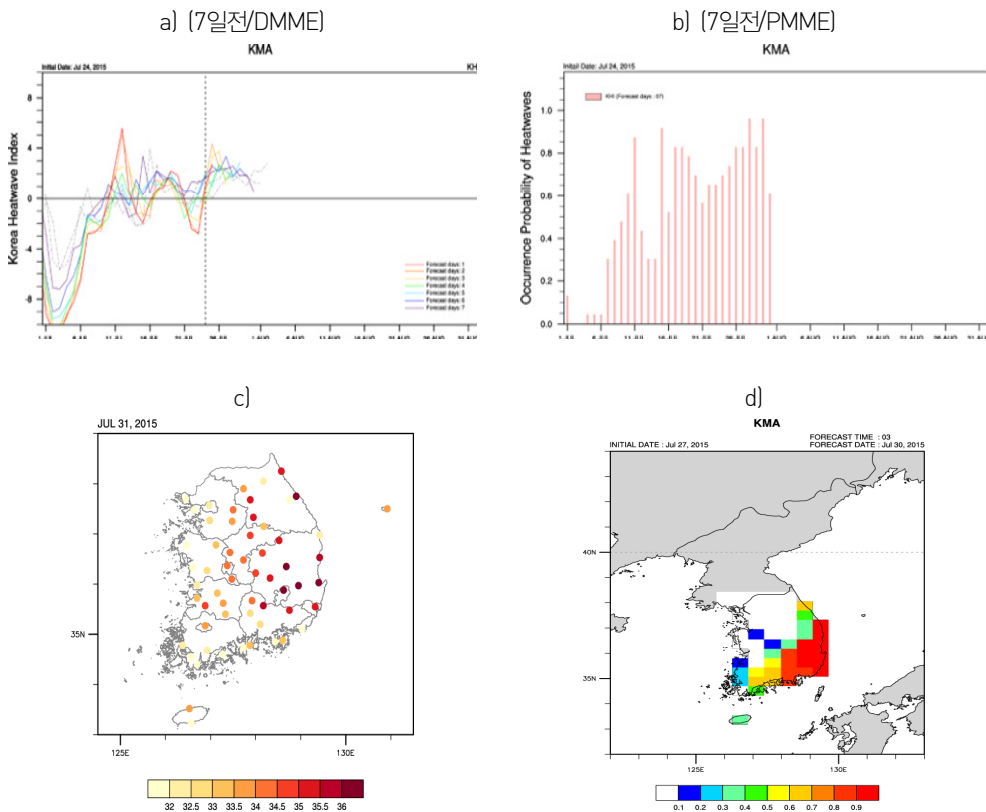


그림 3-17 준-실시간 예보사례. a) 결정론적 예측(7일전), b) 확률론적 예측(7일전), c) 일 최고기온분포 (7월 31일), d) 지역별 확률론적 예측(3일전)

APCC는 내부적으로 개발된 폭염 예측된 시스템을 이용하여 6월부터 8월까지 우리나라 폭염예보를 실시한다. 2015년에는 표 3-4에서 제시된 방법을 이용하여 폭염에 대한 준-실시간 예측을 실시하였다.

그림 3-17은 BCT방법과 KHI방법을 적용하여 2015년 폭염에 대해 실시간 예측정보를 제공한 결과이다. 이 시스템은 APCC 내부 검증을 위한 폭염 시·종 예측의 시범 운영 결과이다. 그림 3-17a는 KHI방법을 이용한 결정론적 예보 결과이다. 보라색 실선은 7일전 한반도 폭염의 발생 유무를 예측한 것이다. 7일 예보 결과 한반도에는 7월 31일에 폭염이 발생할 것으로 예측이 되었으며, 한반도에 폭염이 발생할 확률은 90%로 나타났다. 그림 4-16은 BCT방법을 이용해서 한반도 시·군단위에 폭염이 발생할 확률을 나타낸 것이다. 붉은색은 폭염발생 확률이 50%이상 지역을 나타낸다. 예측된 폭염 발생확률은 주로 경상북도, 경상남도, 전라남도, 그리고 강원도에서 50%이상 확률을 보이고 있으며, 이러한 폭염 발생확률은 관측된 폭염지역과 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있다(그림 3-17c).

우리는 지역별 확률 검증을 위해 2015년 폭염에 대해(BCT방법 이용) 예보결과의 검증을 실시하였다(3-18). 2015년 지역별 폭염의 예측성을 보면, BSS는 전 지역에서 약 0.5이상의 예측성을 보였으며, 특히 폭염이 자주 발생하는 대구, 울산, 포항을 포함한 경상남북도 지역과 전라남도 지역에서 높은 예측성을 보였다(그림 3-18a). RPSS는 서울지역을 중심으로 높은 예측성을 보이는 것으로 나타났다(그림 3-18b). 비록 1년에 대한 예측결과이기는 하지만, 충분히 현업에 적용할 수 있을 것으로 보인다.

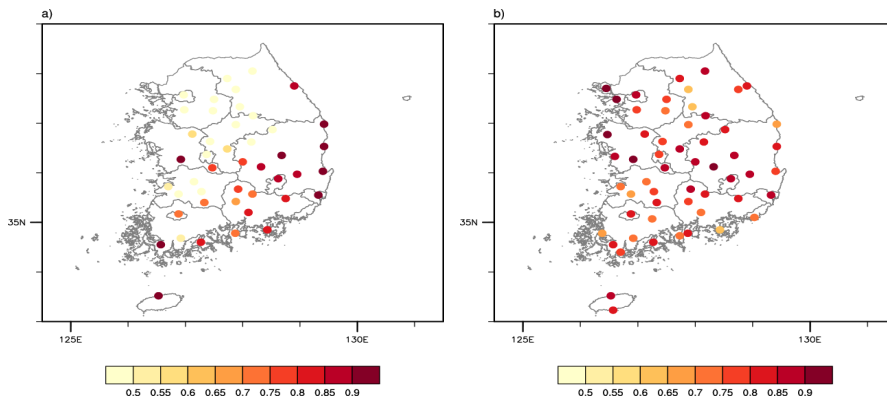


그림 3-18 BCT 방법을 이용한 2015년 지역별 확률 예보 검증: a) Brier Skill Score, (b) Ranked Probability Skill Score

3.3.4 요약

본 연구에서는 2011년부터 2014년까지 한반도 폭염이 발생하였을 때 동아시아 지역에서 나타나는 대기 순환 패턴을 분석하고, TIGGE 앙상블 예측 시스템 자료를 이용하여 한반도 폭염의 시중 예측성을 평가하였다.

한반도 여름철 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.

한반도 폭염은 주로 북태평양 고기압의 강화와 대류활동에 의해 영향을 받았다. 7, 8월에 북태평양 고기압과 대류활동은 평년에 비해 매우 강화되어 중국까지 확장된다. 특히 북태평양 고기압은 오키나와에 중심을 두고 계속 강화되었고 점점 서쪽으로 확장함에 따라, 한반도 전역은 매우 더웠다. 한반도 폭염이 가장 강했던 7월 말부터 8월초에 한반도 주변 해수면 온도는 북태평양 고기압으로 인한 맑은 날씨가 지속되면서, 평년(1981~2010년)에 비해 2~3°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 2일정도 지연된다. 본연구에서는 TIGGE의 예측정

보를 사용하여 선행시간별, 모형별 예측성능을 분석을 하였다.

TMAX방법은 한반도 최고기온을 잘 모의하는 KMA가 예측성이 가장 뛰어났지만, BCT를 이용할 경우에는 KMA의 예측성은 다른 모형과 달리 감소하였다.

BCT방법을 이용하면, KMA의 경우, 3일 선행시간에서 가장 좋은 예측성을 보이며, 선행시간이 길어질수록 예측성이 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 앙상블 스프레드의 증가와 예측오차에 의한 것이다.

KHI방법을 이용하여 2011년부터 2014년까지의 폭염 예측성을 평가한 결과, 5일 선행기간이 일 때 NCEP, CMC와 같이 타 모형에 비해 공간해상도가 낮은 앙상블 예측 시스템을 제외하고는 TS가 0.7이상의 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 TMAX와 BCT 방법에 비해 우수한 예측성을 보였다. 따라서 한반도 폭염발생 예측성은 대기 순환 패턴을 이용한 KHI방법이 가장 우수 하였다. 또한 KHI방법은 확률예측에서도 우수한 예측성을 보였다. KHI방법은 검증기간 전체에 걸쳐 모든 모델이 우수한 예측성을 보였으며, 이러한 예측성은 9일 선행시간까지 유지되었다.

따라서 KHI방법과 BCT방법을 이용하여, 7일전 한반도 폭염 발생을 예측할 수 있으며, 3일전 지역별 폭염을 예측할 수 있는 폭염 예측 시스템이 개발되었다. 이 시스템을 이용하여 우리는 2015년 실시간 예보와 검증을 하였다. BCT 검증결과 폭염이 자주 발생하는 남부지역을 중심으로 우수한 예측성을 보였다.

따라서 본 연구에서는 KMA 현업 모델을 이용하여 7일전에 한반도 폭염의 발생 여부를 판단하고, 3일전 지자체 단위의 폭염 예측정보를 제공할 수 있는 가능성을 제시 하였다.

4. GloSea5 모형의 폭염 예측성 검증

4.1 서론

중관규모의 시간 규모(1주 이상)를 넘어선 폭염 예보는 매우 중요하다. 계절 전망보다 짧고 1주일 이상의 시간규모에서 정확한 폭염예보가 가능하다면, 기존의 기후정보에 새로운 예측정보를 추가할 수 있으며, 좀 더 구체적인 폭염 위험관리 전략을 개발하는데 도움이 될 것이다.

Miyakoda et al.(1983)은 GCM 모형의 한 달 앙상블 예측 결과를 이용해서, 1977년 블로킹을 얼마나 잘 모의하는지를 조사하였다. 이러한 시도로 인해 한달 예측에 대한 관심이 시작되었다. Miyakoda et al.(1986)은 10일 이상의 예보에서 블로킹을 성공적으로 예측했다고 보고하였다. 따라서, 수많은 현업기관들은 예보 범위를 확장하여 많은 실험을 하였다(Molteni et al., 1986; Owen and Palmer, 1987; Tracton et al., 1989; Deque and Royer, 1992).

최근 들어 일기예보, 중기 예측, 그리고 계절 예측까지의 모든 시간 규모에 대한 이음새 없는 예측(seamless prediction)이 제안되었다. 단기 예측시스템에서 대기 초기조건에의 영향은 최소 1주일이면 대부분 사라진다. 또한 해수면 온도와 같은 지표 경계조건에의 영향은 1개월은 지나야 뚜렷해지기 때문에, 계절내 예측은 예측성이 상대적으로 매우 낮다(Vitart, 2004). 그러나 최근 들어 수치모형의 예측성, 앙상블 예측과 초기화 기술, 그리고 계절내 예측성의 향상으로 인해 계절내 예측은 현재 현업 운용되고 있다.

Bureau of Meteorology(BoM)에서는 해양대기 결합모형인 Predictive Ocean Atmosphere Model for Australia(POAMA)를 이용해서 정규적으로 예측자료를 생산하고 있다. 최근에는 POAMA를 이용하여 계절 내, 수주 예보를 생산하고 있으며(Marshall et al., 2011; Rashid et al., 2011), 이를 이용하여 2009년 여름 호주 폭염의 2주전 예측성을 평가하였다(Hudson et al., 2011). 이러한 연구는 기상예보와 계절전망 사이의 예측 역량을 채워주는 것이다.

또한 한국 기상청은 영국 기상청(U. K. Met Office)과 공동으로 개발한 장기예측

모델인 Global Seasonal Forecast System Version 5(GloSea5)를 기반으로 매월 향후 3개월, 그리고 매주 향후 4주에 대한 예측정보를 생산하고 있다. 이 연구에서 우리는 GloSea5의 2주 예측자료를 이용하여, 지위고도와 일 최고기온의 2014년 폭염 발생시 평균 장(1주 평균)의 예측성을 평가할 것이다.

본 연구에서는 GloSea5의 폭염 예측성 평가를 위해 1년 동안의 예보자료를 활용하여 lead-time에 따른 폭염의 예측성을 평가하였다. 만약 종관규모보다 긴 선행시간에 대한 폭염의 예측성을 확보할 수 있다면, 폭염 취약분야에서는 적절한 폭염 예방 조치를 실행할 수 있을 것이다.

4.2 자료

기상청은 2010년 6월 영국 기상청과 계절예측시스템의 공동구축 및 운영에 관한 협정을 체결하였으며, 현업 예보를 위해 기후예측 모델인 GloSea5를 도입하여 현재 운영 중에 있다. 이 모델은 영국 기상청의 최신 계절예측시스템에 사용되고 있으며, 영국 기상청 기후 모델인 HadGEM3(Hadley Centre GlobalEnvironment Model version 3)에 기초해서 구축되었다.

HadGEM3는 대기, 해양, 해빙, 지표면 모델들이 하나로 합쳐진 전지구 결합 모델(Coupled GeneralCirculation Model, CGCM)로써 UM을 대기 모델로 사용하고, MOSES(Met Office Surface ExchangeScheme)가 지표 모델로 결합되어 있다(Essery et al., 2003).

표 4-1 GloSea5 모델 특성

-		Major characteristics and informations (Forecast)
Composition of model	Atmosphere	UM(v8.0)
	Ocean	NEMO(v3.2)-CICE(v4.1)
	Coupler	OASIS3
Spatial resolution	Atmosphere	N216(0.83°×0.56°)
	Ocean	ORCA tri-polar grid at 0.25°
Initial input data	Atmosphere	KMA numerical analysis field
	Ocean	NEMO VAR
Production period of data and ensemble member		2 members run each day

표 4-2 Glosea5 앙상블 자료(2014년), 회색은 각각 앙상블 자료이며, 흰색은 자료가 없는 경우 빗금 친 부분은 기후값이 생성되는 날짜이다.

DATE	ENSEMBLE		DATE	ENSEMBLE		DATE	ENSEMBLE		DATE	ENSEMBLE		DATE	ENSEMBLE	
	00	01		00	01		00	01		00	01		00	01
20140501			20140601			20140701			20140801			20140901	█	█
20140502			20140602	█	█	20140702			20140802			20140902		
20140503			20140603			20140703			20140803			20140903		
20140504			20140604			20140704			20140804	█	█	20140904		
20140505	█	█	20140605			20140705			20140805			20140905		
20140506			20140606			20140706			20140806			20140906		
20140507			20140607			20140707	█	█	20140807			20140907		
20140508			20140608			20140708			20140808			20140908	█	█
20140509			20140609			20140709			20140809			20140909		
20140510			20140610			20140710			20140810			20140910		
20140511			20140611			20140711			20140811	█	█	20140911		
20140512	█	█	20140612			20140712			20140812			20140912		
20140513			20140613			20140713			20140813			20140913		
20140514			20140614			20140714	█	█	20140814			20140914		
20140515			20140615			20140715			20140815			20140915	█	█
20140516			20140616	█	█	20140716			20140816			20140916		
20140517			20140617			20140717			20140817			20140917		
20140518			20140618			20140718			20140818	█	█	20140918		
20140519	█	█	20140619			20140719			20140819			20140919		
20140520			20140620			20140720			20140820			20140920		
20140521			20140621			20140721	█	█	20140821			20140921		
20140522			20140622			20140722			20140822			20140922	█	█
20140523			20140623	█	█	20140723			20140823			20140923		
20140524			20140624			20140724			20140824			20140924		
20140525			20140625			20140725			20140825	█	█	20140925		
20140526	█	█	20140626			20140726			20140826			20140926		
20140527			20140627			20140727			20140827			20140927		
20140528			20140628			20140728	█	█	20140828			20140928		
20140529			20140629			20140729			20140829			20140929	█	█
20140530			20140630	█	█	20140730			20140830			20140930		
20140531						20140731			20140831					

해양과 해빙 모델은 각각 NEMO(Nucleus for European Modelling of the Ocean)와 CICE(Los Alamos sea ice model) 모델이 사용된다(Madec, 2008; Hunke and Lipscomb, 2008). 그리고 각 모델들은 대기-해양플럭스 교환을 위해 Valcke(2011)이 개발한 OASIS커플러에 의해 결합되어 있다. 대기 모델의 수평해상도는 $0.83^\circ \times 0.56^\circ$, 해양 모델의 수평 해상도는 tripolar 격자에서 0.25° (약 25 km)이고, 연직으로는 L75의 해상도를 가진다.

표 4-1은 GloSea5에 대한 주요특징을 나타낸 것이다. GloSea5의 Hindcast(HCST)자료는 매달 1일, 9일, 17일, 25일마다 초기장을 입력하여 생산되며, 각 출발일에는 모델의 물리과정을 달리하는 방법으로 확률적 운동에너지 후방 산란법(Stochastic Kinetic Energy Backscatter 2, SKEB 2)(Bowler et al., 2009)을 이용하여 대기 분석장과 해양 및 해빙 초기장으로부터 3개의 앙상블 멤버를 생산한다. 자료생산 기간은 1996년부터 2009년(총 14년)이며, 각 앙상블 멤버당 7개월간 모델적분이 진행된다. Forecast(FCST)는 HCST와 동일한 방식으로 매일 적분이 진행되며 매 초기장마다 2개의 앙상블 멤버가 생산된다.

본 연구에서는 GloSea5의 폭염 예측성 평가를 위해 여름철 동안의 FCST 자료만을 이용하였다. 표 4-2는 사용된 자료의 기간과 앙상블 멤버를 나타낸 것이다. 표 4-2에서 빈공간은 자료가 없는 것을 나타내며, 앙상블평균을 할 경우 앙상블 멤버가 하나인 경우는 하나의 자료만을 사용하였다.

본 연구에서는 GloSea5 시스템의 여름철 일변동성을 검증하였다. GloSea5의 계절내 변동성을 검증하기 위하여, NOAA interpolated OLR 일별자료, NCEP-NCAR의 지위고도(500hPa GPH), 200hPa 동서바람, 그리고 지표온도 자료를 사용하였다. 또한 HadISST의 해수면 온도 자료를 사용하였다.

한반도 폭염패턴 분석에 사용된 상관 방정식은 다음과 같다.

$$r = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx}} \times \sqrt{S_{yy}}} \quad (4-1)$$

$$\text{여기서, } S_{xy} = \sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)}{n} \quad (4-2),$$

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}{n} \quad (4-2-1),$$

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

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

4.3 GloSea5 폭염 예측성 검증

본절의 주요 목적은 GloSea5 예측자료를 사용하여, 폭염지수(KHI)와 한반도 폭염과 연관된 주요 변수(200hPa 와도, 500hPa 지위고도, 2m 지표기온)의 선행시간별 예측성을 검증하고, 2-3주전의 폭염예측성을 확인 하는 것이다.

4.3.1 TIGGE자료와 GloSea5 비교

한국 기상청 계절예측시스템 GloSea5는 2014년 1월부터 현업 계절예측에 활용중에 있다. GloSea5는 대기-해양-해빙 결합모델로, 대기모델은 Unified Model(UM)을 사용하고 있으며, 해상도는 N216 이며, 해양과 해빙 모델은 ORCA 0.25간격으로 3D-Var로 자료를 동화한다. 이에 비해 한국기상청 단·중기 예측시스템 UM의 해상도는 25km로 GloSea5 보다 고해상도이지만, 대기모델로 해양과 해빙상태가 반영되지 않는다. 따라서 대기모델과 대기-해양-해빙모델에서 폭염 예측성능을 KHI를 통해 검증하고 비교함으로써 해양과 해빙의 상태가 폭염을 예측하는데 미치는 영향을 알아보고자 한다.

앞장에서 KMA의 폭염 예측성 검증은 예측된 KHI와 관측된 폭염발생 일 자료를 이용하였다. KMA의 예측성은 9일 예보까지 BSS값은 0.8이상을 유지하며, 좋은 예측성을 보였다. 두 시스템간의 단·중기 폭염 예측성능은 KHI를 이용하여 검증하였다. KHI검증은 correlation skill과 자기상관계수를 사용하였다. 상관 계수 산출을 위해 사용된 관측장은 NCEP-NCAR의 상층 바람장을 이용하였다.

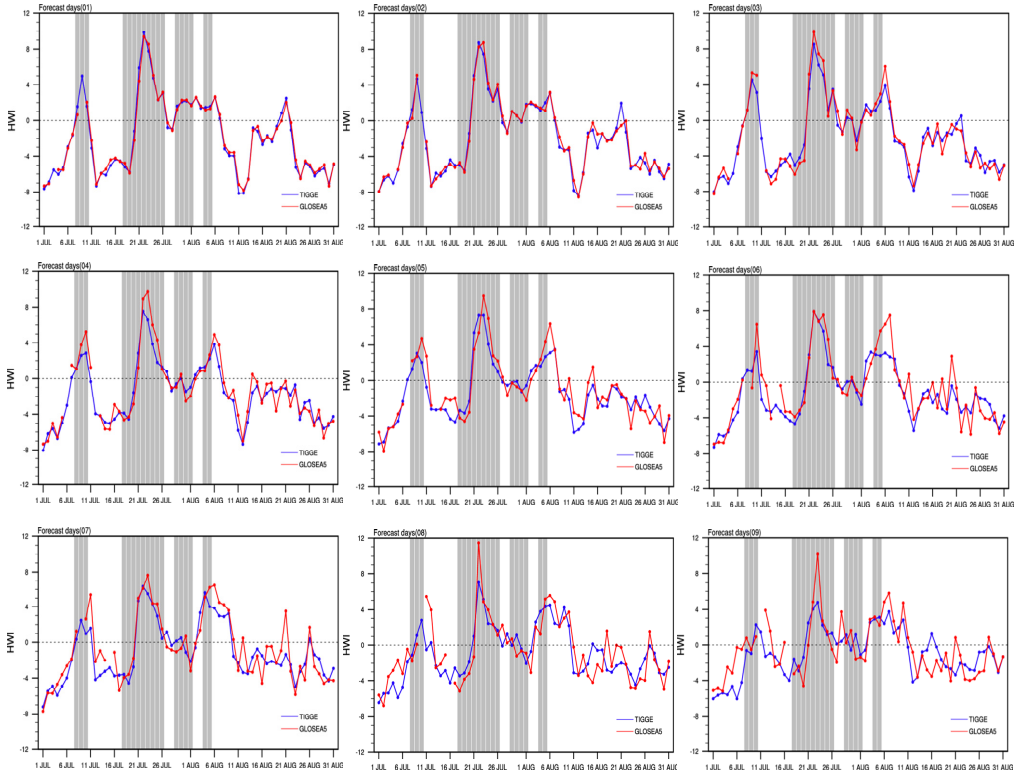


그림 4-1 2014년 여름철 TIGGE(푸른 실선)와 GloSea5(붉은 실선)의 폭염 예측성

그림 4-1은 두 시스템의 10일 예측자료를 이용하여, 선행시간에 따른 KHI의 예측성을 나타낸 것이다. 파란색 선은 TIGGE의 KHI이고, 붉은색 선은 GloSea5의 KHI를 나타내며, 회색은 실제 폭염이 발생한 날짜를 의미한다. 전반적으로 한반도 폭염을 잘 예측하는 것으로 나타났다.

3일 선행시간이 지나면서 두 시스템간의 KHI의 예측이 점점 차이가 생기지만, 폭염 발생일수에 영향을 미칠 정도는 아니다. 우리는 두 시스템의 KHI의 모의 성능을 검증하기 위해서 GloSea5와 TIGGE(KMA)의 10일 예측값을 이용하여 산출된 KHI와 관측 KHI의 상관계수를 구하였다. KHI에 대한 상관계수는 두 시스템 모두 유사한 분포를 보였으나, TIGGE가 모든 선행시간에 대해 높게 나타났다. 9일 선행시간에 대한 상관계수는 GloSea5가 0.4이며, TIGGE의 경우 0.6이다(그림 4-2). GloSea5는 예측장에서 계통 오차를 발생시킬 수 있는 지표, 해양, 대기의 초기치 설정과 같은 많은 요소들과 모델에서의 수치적, 물리적모수화에 의한 오차로 인해 예측성이 대기

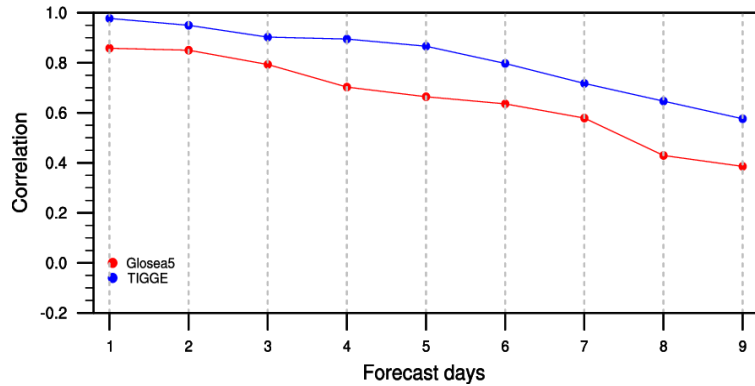


그림 4-2 KHI 예측성 비교(파랑:TIGGE, 빨강:GloSea5)

모형인 TIGGE 보다 예측성이 떨어질 수 있다. 따라서 KHI를 이용한 10일 이전의 폭염예측에는 TIGGE 자료를 이용하는 것이 적합하다.

자기상관계수(Autocorrelation)는 시계열 자료의 시간차가 변함에 따라 상관계수가 어떻게 변하는가를 나타내는 통계값이다. 따라서 자기상관계수는 예측인자의 지속성(persistence)을 직접 평가 할 수 있는 방법이다. KHI의 지속성을 평가하기 위해서, 관측과 GloSea5의 자기상관계수를 구하였다(그림 4-3). 관측의 KHI는 3일이 지나면서 상관계수가 0.5 미만으로 작아지고, 7일에는 첫날의 KHI와 연관성이 없게 된다. GloSea5의 경우, 자기상관계수는 7일까지 약 0.5의 값을 유지하지만 10일에 0.3 미만으로 떨어진다. 따라서 GloSea5의 2-3주 예측자료를 이용하여, KHI의 예측성을 확보하는 것은 매우 어려울 것이다. 2-3주전에 폭염을 예측하기 위해서는 KHI방법이 아닌 다른 방법을 모색해야만 한다.

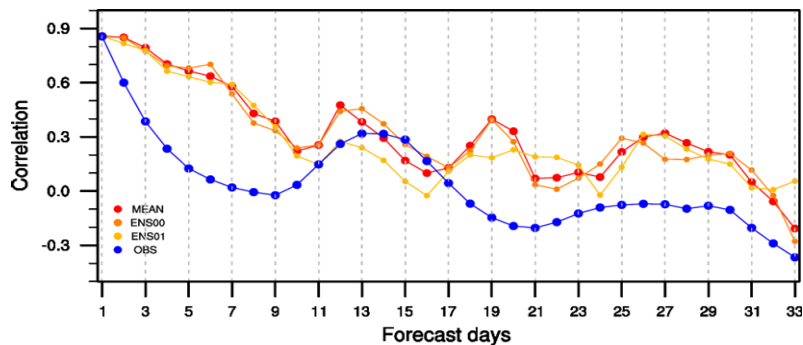


그림 4-3 선형시간에 따른 자기상관계수

4.3.2 폭염과 연관된 대기패턴의 예측성 평가

GloSea5의 2014년 여름철 폭염 예측성 평가를 위해 매일 생산되는 2개의 앙상블 멤버자료를 이용하였다. 표 4-2는 5월 1일부터 9월 30일 까지 매일 생산되는 앙상블 멤버의 수와 7일마다 생성되는 기후값(빗금)을 나타낸 것이다. 선행시간(0~32)은 예측시점과 초기화 시점의 시간상 차이(일 단위)로서, 선행시간 0은 해당일의 초기장을 이용해 같은 일의 일평균값을 예측한 것이며, Lead time 5는 5일전 초기장을 이용하여 적분된 결과를 나타낸다. 2014년 자료를 보면 앙상블멤버 개수가 날짜별로 불규칙하여, 본 연구에서는 앙상블 평균 자료를 이용하여 폭염과 연관된 대기패턴을 검증하였다. 즉 선행시간이 10인 날짜의 예측에서는 10일전 초기장으로 적분을 시작한 앙상블 평균자료(32개)를 이용하였다. 또한 모델의 일별 기후값은 기후값을 구할 날짜를 기준으로 15일 전후 자료에 있는 기후값을 평균하여 사용하였다.

GloSea5자료를 이용하여 한반도 폭염 예측성 평가를 위해 200hPa 상층와도(VORT200), 500hPa 지위고도(Z500), 그리고 지표 기온자료(T2M)의 시·공간 패턴 분석을 하였다(그림 4-4). GloSea5에서 재현되는 폭염의 주요 패턴을 찾기 위해, 관측의 EOF 패턴과 GloSea5의 EOF 패턴의 공간 상관성을 분석하여 상관성이 높은 모드를 선택하였다.

그림 4-4는 공간 패턴과 주성분(Principal component: PC)시계열을 나타내며, Z500은 3번째 모드의 공간분포와 PC3를 나타낸 것이고(그림 4-4a,b), VORT200은 첫 번째 모드(그림 4-4c,d), T2M은 2번째 모드에 대한 분포와 PC를 나타내고 있다(4-4e,f). Z500은 한반도 북부와 남중국해에 중심을 갖는 남북모드를 보이며, 전체 변동의 약 11.7%를 설명한다. Z500 패턴은 한반도 폭염 패턴과 매우 유사한 모습을 보인다. VORT200은 Z500과 유사하게 한반도 북쪽에서 음의 와도가 존재하고, 남중국해지역은 양의 와도를 보인다. 한반도 북쪽에 고기압의 중심이 위치하기 때문에, 남서 기류에 의한 수증기 수송이 어려워져 한반도는 건조하고 덥게 된다(그림 4-1e,f).

그림 4-5는 선행시간(1일~32일)에 따른 관측 EOF와 예측 EOF(VORT200, H500, 그리고 T2M)의 공간 상관관계(Pattern Correlation Coefficient; PCC)와 시간 상관관계의 분포를 한눈에 살펴보기 위해 산포도(scatter diagram)를 나타낸 것이다.

VORT200의 시·공간 상관계수 값은 선행시간이 길어질수록 감소하는 것을 알 수 있다. 10일 선행시간 까지 TCC와 PCC모두 예측성이 뛰어 났지만, 10일 이후, 선행시간이 증가함에 따라 상관계수는 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 PCC 보다는 TCC의 예측성이 현저히 떨어지는 것을 알 수 있다(그림 4-5a). 이러한 특징은 H500에서도 유사하게 나타난다. 10일 선행시간 까지는 TCC와 PCC는 약 0.5 이상의 값을 가진다. 특히 15, 16, 17일 선행시간에 대한 TCC와 PCC수는 0.5보다 큰 값을 갖는다. 즉 H500은 2주 이상의 선행시간에서도 예측성을 확보할 수 있는 가능성을 보여 준다. T2M의 경우, 동일한 선행시간에 대해 TCC는 PCC보다 현저히 낮은 값을 갖으며, PCC는 모든 선행시간에서 0.4보다 큰 값을 갖는다. 따라서 2주보다 긴 선행시간을 가지고 폭염을 예측하기 위해서는 KHI같은 지수를 이용하는 것보다는 H500 또는 T2M의 공간분포를 이용하는 것이 유의할 것이다. 결론적으로 GloSea5는 폭염기간 동안의 시간 평균에 대한 공간적인 분포와 패턴의 변화를 잘 모의하고 있으며, 또한 OLR에서도 타당한 예측 성능을 보이고 있다. 따라서 우리는 2014년 폭염이 발생했을 때(7월 18일 ~8월 1일)까지의 평균장의 예측성을 평가해 보았다. 그림 4-6은 폭염 발생 시의 관측 H500과 1일 선행 시간에 예측한 H500의 평균, 기후값, anomaly를 나타낸 것이다. 관측의 기후값은 30년 평균 값(1981~2010년)을 이용하였고(그림 4-6a), 모형의 기후값은 대상 날짜 기후값을 중심으로 전후 15일에 해당하는 기후자료를 이용하였다(그림 4-6d).

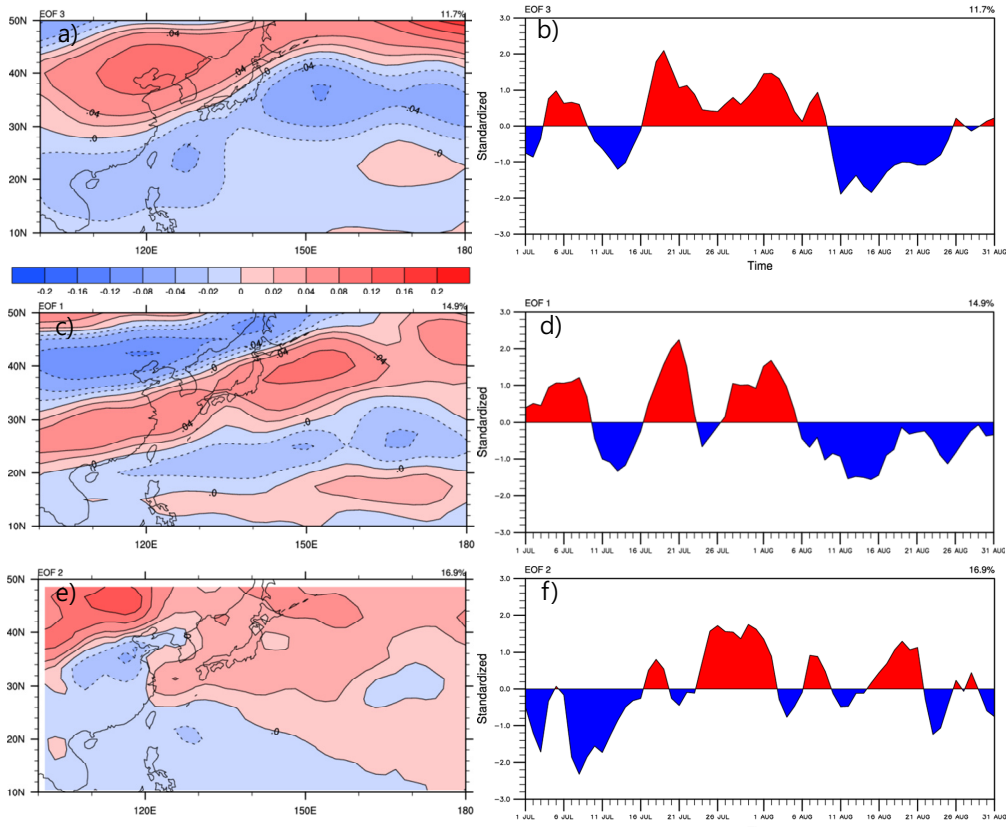


그림 4-4 2014년 여름철에 대한 EOF 패턴 (왼쪽), PC (오른쪽): a), b) 500hPa 지위고도, c), d) 200 hPa 와도, e), f) 2m 기온

예를 들어, 7월 18일의 기후값은 7월 3일부터 8월 2일 사이에 기후값인 7월7일, 7월14일, 7월 21일, 7월 28일 자료를 평균하였다(표 4-2의 빗금친 날짜). 1일전 예측된 H500의 기후평균 패턴은 관측에 비해 중심이 남쪽으로 약 2°N 치우친 모습을 볼 수 있다. 2014년 폭염 패턴은 관측과 매우 유사하다. 2014년 폭염 발생시, 북태평양 고기압이 한반도 중부까지 확장한 모습을 보인다. 아노말리 패턴은 한반도에 강한 고기압성 회전이, 남중국해에는 약한 저기압성 아노말리가 형성된다. 그러나 GloSea5의 기후값이 관측 기후값에 비해 패턴의 중심이 남쪽으로 치우쳐 있기 때문에, 아노말리 패턴도 또한 전체적 패턴이 약 2°N 남쪽으로 치우친 모습을 보인다.

T2M의 기후평균 패턴은 한반도 지역에서 과소모의를 하고, 중국남부지역에서 과대 모의를 한다. 기후평균의 27°C선을 보면, 예측장이 관측장에 비해 남쪽으로 치우

쳐 있다. 관측의 기후평균과 모델의 기후평균의 차이로 인해 아노말리 패턴도 관측에 비해 한반도의 기온을 과대모의 하였다(그림 4-7f). 따라서 본 연구에서는 2014년 정확한 폭염 예측성 평가를 위해, 모델 기후평균값 대신에 관측의 기후평균값을 이용하여, 폭염 발생시 한반도 500hPa 지위고도(그림 4-8), 일 최고기온(그림 4-9) 그리고 OLR값을 분석하였다.

그림 4-8은 2014년 폭염발생 시(7월 18일부터 8월1일) 관측의 기후값(1981~2010년)을 이용하여, 1일 선행시간부터 1주, 2주, 3주, 4주 선행시간까지의 H500 아노말리 패턴을 구한 것이다. 예측된 H500의 폭염패턴은 3주 선행시간까지 관측과 매우 유사한 패턴을 보이고 있다. 그러나 한반도 고기압의 강도는 일주일 선행시간까지는 유지 되지만, 2주부터는 강도가 약해지는 모습을 보인다.

선행 시간에 따른 공간 패턴 상관계수는 11~15일에 약 0.6이며, 16~20일까지도 0.5 이상을 유지한다(그림 4-10a). 그러나 T2M은 H500보다 예측성이 높지 않다(4-10b).

그림 4-11은 GloSea5와 ECMWF의 OLR 평균장의 패턴상관계수를 나타낸 것이다. 약 2주까지는 GloSea5가 ECMWF보다 예측성이 우수하지만 2주후부터는 ECMWF의 예측성이 높은 것으로 나타났다. 두 모형 모두 OLR 평균장의 예측성은 4주까지 상관계수가 0.7로 H500보다 좋은 예측성을 보였다. 따라서 Boreal Summer Intraseasonal Oscillation(BSISO)과 한반도 폭염의 연관성을 분석하는 것도 매우 중요한 과제라고 생각한다.

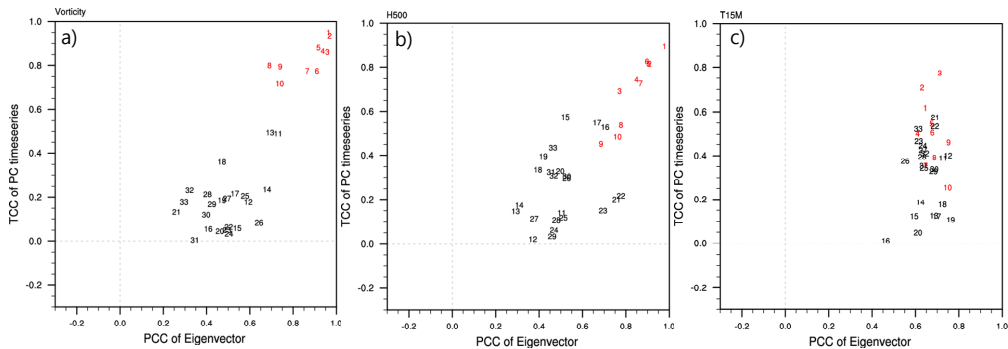


그림 4-5 선행시간에 따른 시·공간 상관계수의 산포도: a) 200hPa 와도, b) 500hPa 지위고도, c) 2m 지표 기온. 각각의 숫자는 선행시간을 나타냄(붉은 색은 1~10일 선행시간).

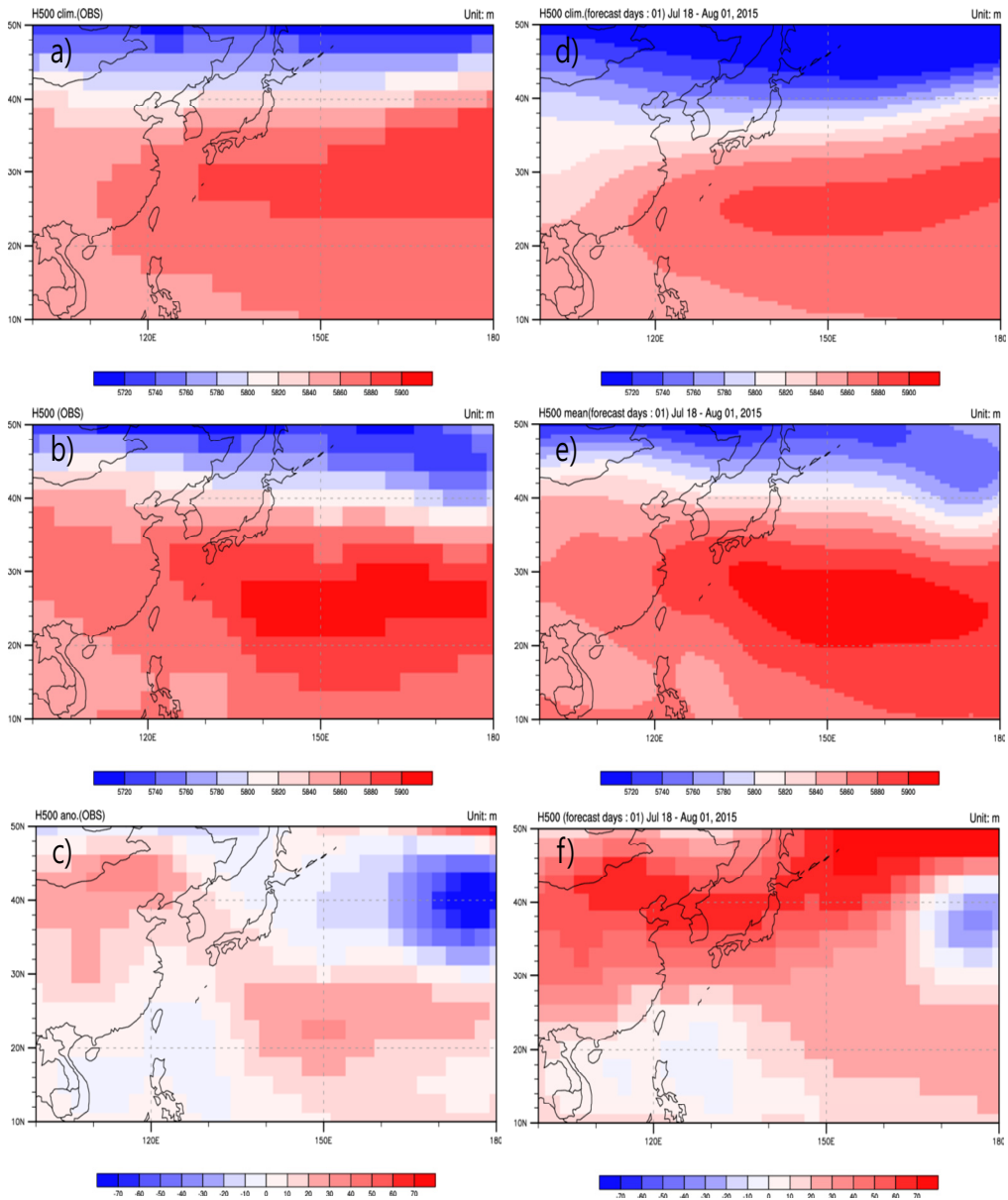


그림 4-6 폭염 발생 시(7월 18일~8월 1일)의 NCEP 500hPa 지위고도와 1일 선행 시간에 예측한 H500의 평균, 기후값과 anomaly 비교

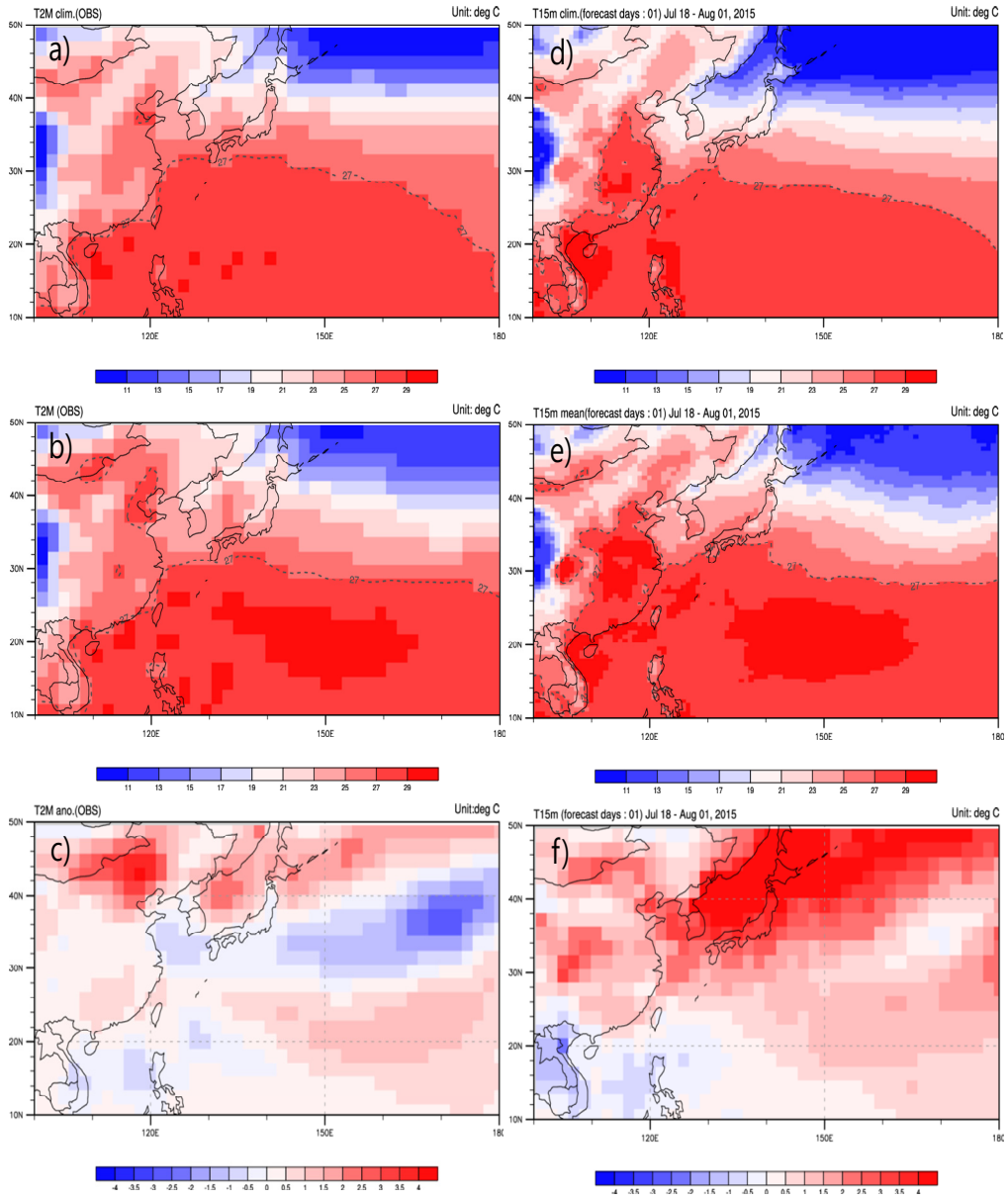


그림 4-7 폭염 발생 시(7월 18일~8월 1일)의 NCEP 2m 최고기온과 1일 선행 시간에 예측한 최고기온의 평균, 기후값과 anomaly 비교

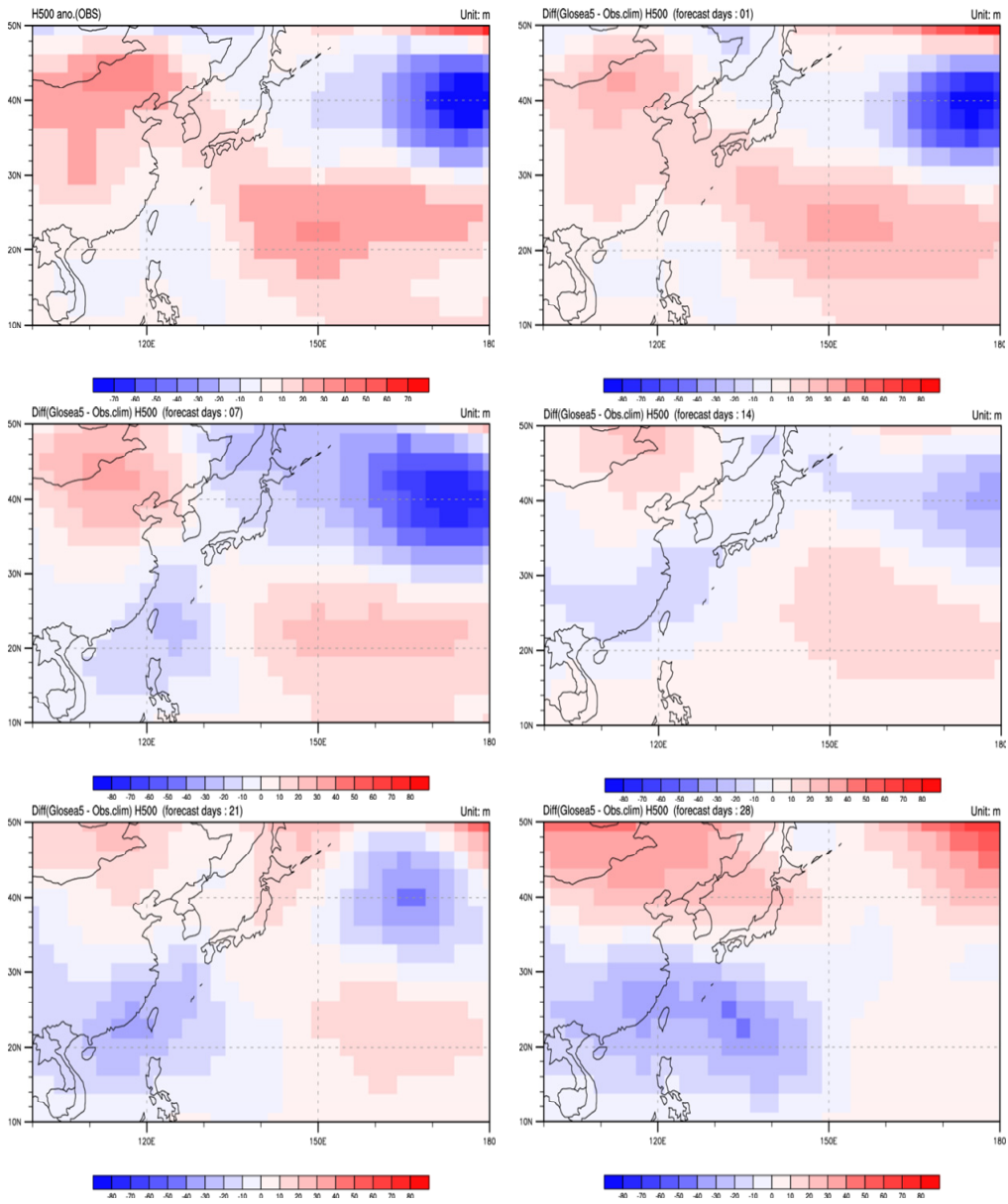


그림 4-8 선행시간(1일, 7일, 14일, 21일, 28일)에 따른 500hPa 지위고도 예측장

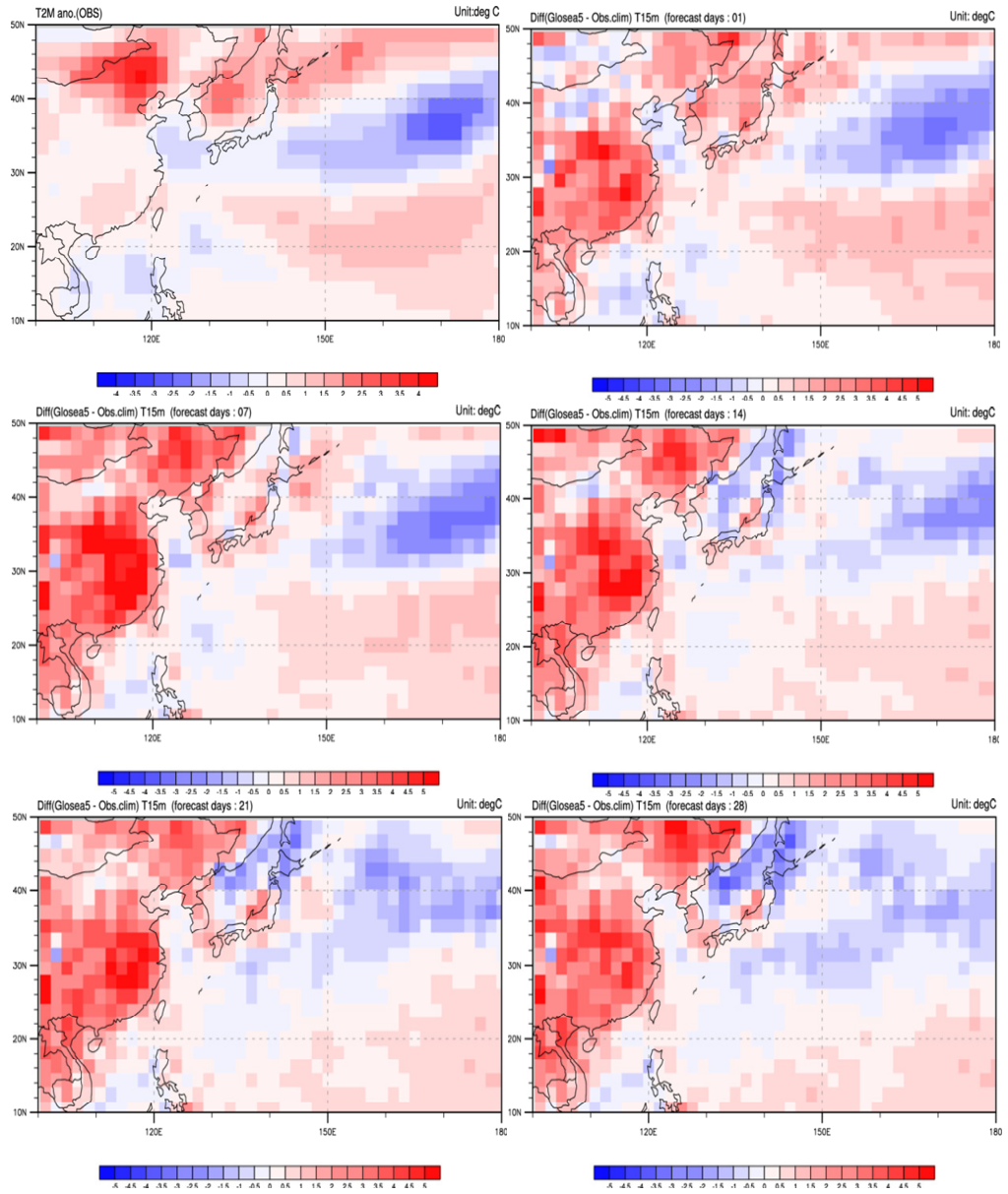


그림 4-9 선형시간(1일, 7일, 14일, 21일, 28일)에 따른 2m지표기온 예측장

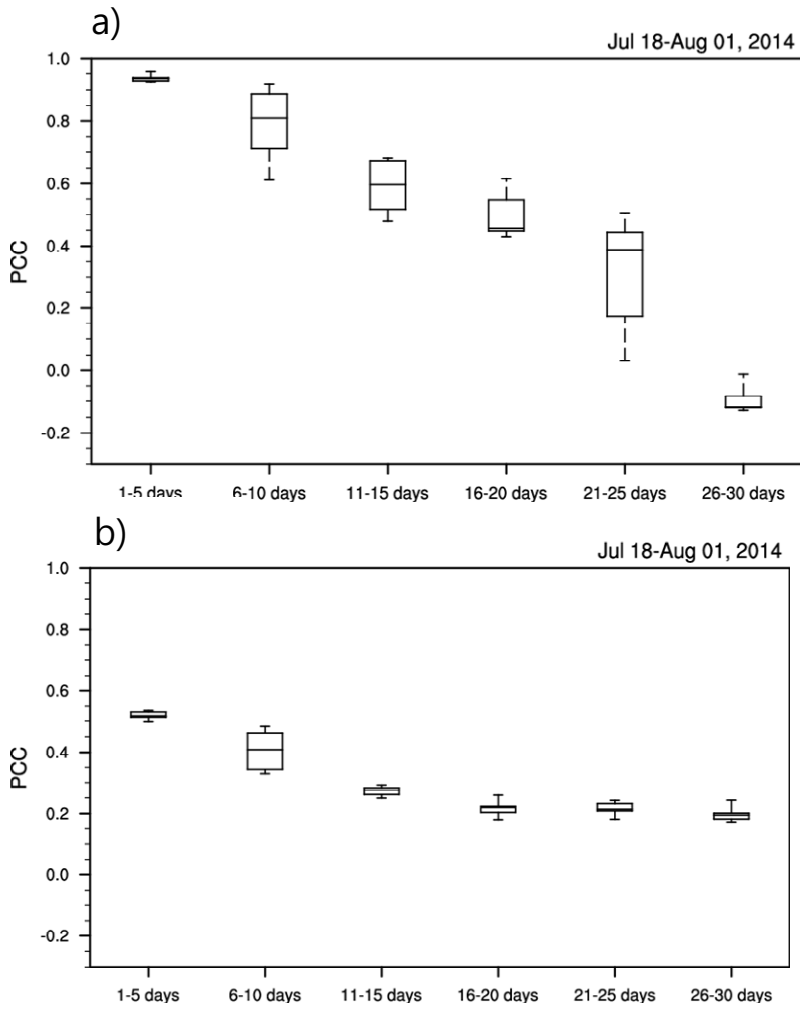


그림 4-10 선행시간에 따른 폭염패턴 예측성 : a) 500hPa 지위고도, b) 2m 지표기온

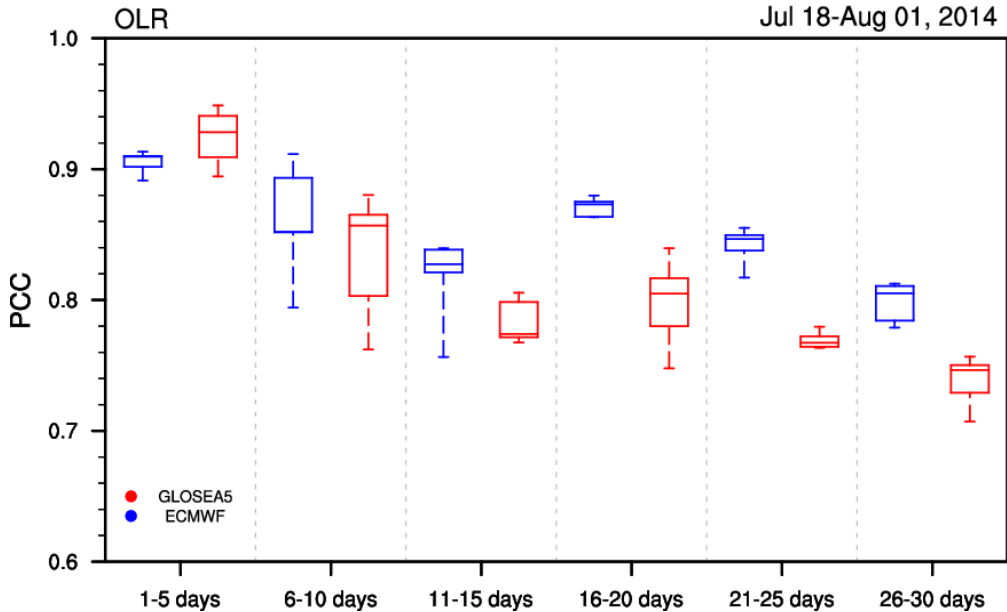


그림 4-11 선행시간에 따른 2014년(7월18일~8월1일) 폭염 패턴(OLR)의 예측성

4.4 요약

이 장에서는 2014년 폭염(7월 18일~8월1일)기간동안 GloSea5 계절예측시스템의 일최고기온과 500hPa 지위고도의 예측성을 평가하였다. 2014년 7월 18일부터 8월 1일 까지 북태평양고기압은 중국 남동부까지 확장함에 따라, 남중국해로부터 한반도로 수증기 유입이 억제되며, 한반도는 맑은 날씨를 보였다. 따라서 남부와 중부지방에서는 폭염이 발생하였다. 폭염 발생시 상층 와도 패턴은 남중국해에서 양의 와도, 한반도 주변에서는 음의 와도를 가지는 남-북 양극자 모드를 보인다.

2014년 폭염을 예측하기 위해서 KHI의 예측성을 평가하였다. 200hPa의 EOF패턴에서 나타났듯이 KHI 지수는 10일 선행시간 이전에는 예측성이 뛰어났지만, 그 후로는 예측성이 상당히 떨어지는 것으로 나타났다. GloSea5에서도 0-9일 선행시간의 앙상블은 KHI의 예측성이 높았지만(0.6 이상), 10일이 지나면서 상관계수는 매우 낮게 나타났다. 그러나 GloSea5는 단기예측에 최적화 되지는 않았기 때문에, 예측성은 기상예보(TIGGE)보다는 떨어졌다.

폭염이 발생하였을 때, 관측된 최고기온 아노말리는 한반도 동남쪽에서 약 3°C 이상이었다. GloSea5는 비록 기온 아노말리의 강도와 폭염패턴은 정확히 예측하지는 못했지만, 4주전의 예측자료를 이용하여 한반도 전체에 양의 아노말리를 예측하는데 성공하였다. 또한 한반도 전체에서 관측된 양의 500hPa 아노말리는 앙상블 평균된 GloSea 5에서 상대적으로 약하게 모의되었다. 그러나 500hPa 아노말리의 패턴 상관계수는 약 20일까지 0.5 이상으로 유지되었다. 따라서 기온자체를 예측하기 보다는 폭염을 유발하는 대규모 순환장을 이용하는 것이 더 나은 예측성을 확보할 수 있는 방법이다.

비록 이 연구는 예측자료의 제한으로 인해 2014년 폭염사례에 국한되었지만, 2-3주전 폭염의 예측성을 확보하였다. 또한 OLR변수의 예측성은 4주까지 매우 뛰어난 것으로 나타났다. 향후 GloSea5의 추가적인 예측자료를 이용하여 예측성을 검증하고, 또한 BSISO와의 연관성을 분석한다면 2-3주전 폭염을 대비하기 위한 예측정보로 활용할 수 있을 것이다.

5. APCC MME자료를 이용한 한반도 폭염 빈도수 예측

현재 수준의 대기대순환모형을 이용한 동아시아 지역의 극한 기온에 대한 예측성은 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 폭염 빈도수 예측성 평가를 위해 사용된 자료는 APEC 기후센터 현업 시스템에서 제공하는 계절 예측 과거 재현자료(hindcast)를 이용하였다. 사용된 자료의 기간은 24년 자료(1982~2005년)이며, 계절은 여름철 중 폭염이 빈번히 발생하는 7월과 8월 자료를 이용하였다. 사용된 모델들은 7개의 해양-대기 결합 모델들과 2개의 대기모델들이며, 상세한 정보는 표 5-1에 서술하였다.

한반도 폭염의 기작(mechanism)은 남중국해-한반도 결합 모드로 설명할 수 있다(제 2장). 또한 대기대순환 모형은 물론 대기-해양 결합 대순환모형에서도 상층 와도의 변동성은 잘 모의 된다. 한반도 폭염 지수 즉, KHI는 관측자료에서 한반도 폭염 발생 빈도(Heat Wave Frequency: HWF)와 0.83의 상관성을 가지고 있다. 그러나 KHI지수는 모형들이 남중국해와 한반도 지역을 잘 모의해야만 예측성이 높은 예측성을 가질 수 있다. 대부분의 모형들이 한반도 폭염과 연관된 패턴을 정확히 모의하지는 못하였다(이우섭, 2014). 그러나 동아시아 지역에서 중심 위치는 다르지만 VORT200의 변동성은 잘 모의 하였다(그림 5-1). APCC 모형에 적합한 폭염 지수를 개발하기 위해서, MME에서 제공되는 변수들에 대한 EOF 분석을 실시하였다. 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. 이 연구에서 우리는 6월에 초기조건(Initial Conditions: ICs)을 이용하여 7월과 8월을 예측한 자료(1 month lead seasonal prediction: Lead 1)와 5월의 초기조건을 이용하여 7월과 8월을 예측한 자료(2 month lead seasonal prediction: Lead 2)를 사용하였다. EOF의 모드는 관측된 폭염 패턴과 EOF의 공간패턴을 비교하여 상관성이 높은 패턴을 선택하였다.

그림 5-1의 a~h는 관측된 VORT200, Z500, SLP, PREC에 대한 EOF 첫 번째 모드의 공간 패턴과 주성분(Principal component: PC)시계열을 나타내며, 그림 5-1의 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°-15°N, 100°-130°N)과 남중국해(양의 모드) 그리고 한반도(음의 모드)에 자리 잡고 있다. 이러한 삼극모드는 한반도 폭염 패턴과 매우 유사하며(그림 5-1b), HWF와 PC1 상관계수는 VORT200에서 약 0.85으로 매우 높다(표 5-1).

표 5-1 APCC 개별모형

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	
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)

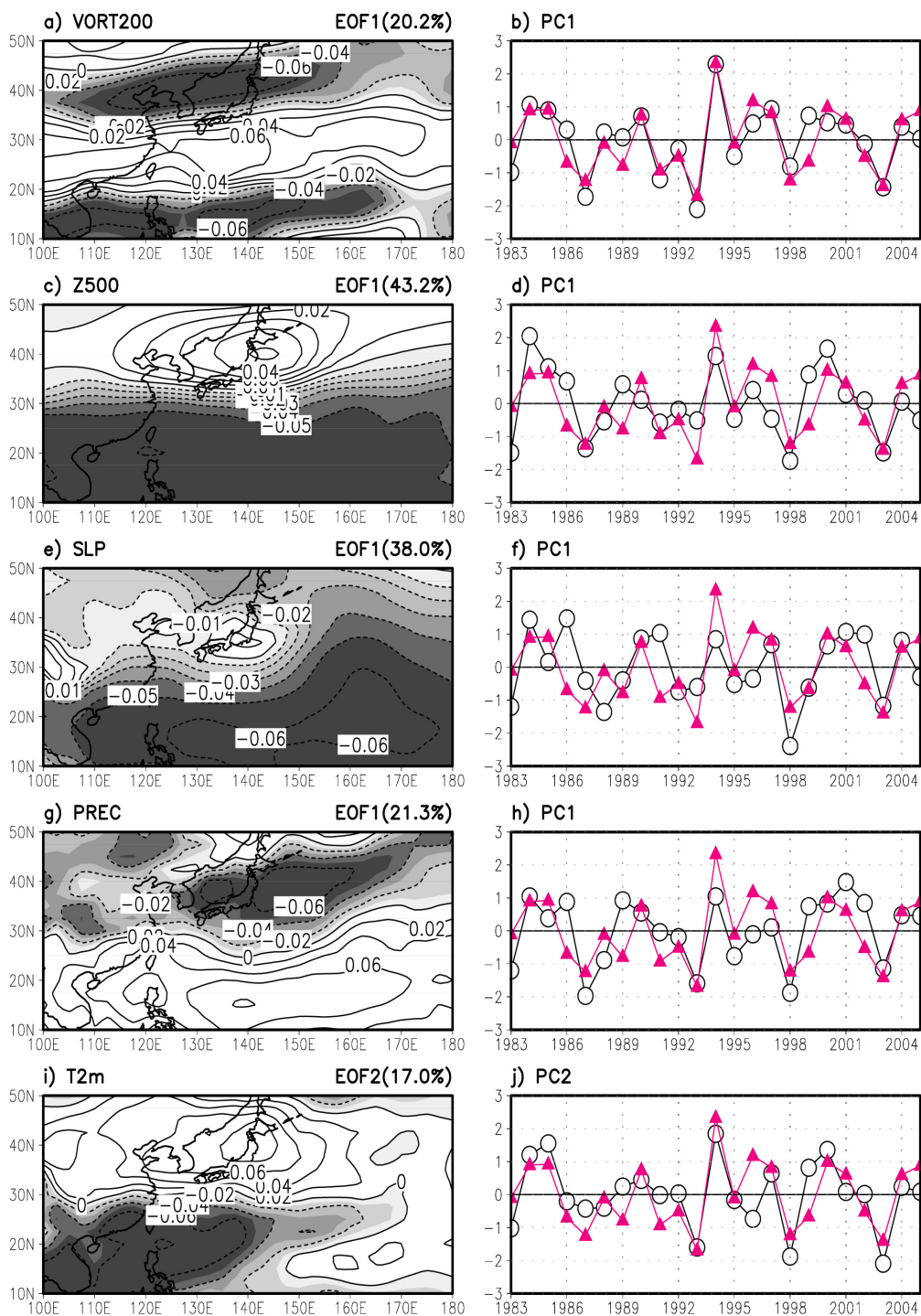


그림 5-1 EOF 제1모드의 공간분포(좌)와 PC1(우). VORT200, Z500, SLP, PREC, T2m. 붉은색 선은 관측 폭염 빈도수를 나타냄.

Z500은 일본과 서태평양에 중심을 갖는 남북모드를 보이며, 전체 변동의 약 43%를 설명한다. HWI와의 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 0.47로 5개 변수 중 가장 낮다. 강수 패턴은 30°N을 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 5-1g, i). 강수량의 PC1과 HWF의 상관계수는 0.6이며, 2m 기온은 0.72로 VORT200 다음으로 높다. 모든 변수의 PC는 준 4-5년 주기의 변동성을 보이는 것을 발견 할 수 있었다. 이러한 주기성은 동아시아 몬순지수에서도 나타나고 있다(Lee et al., 2013).

MME변수의 EOF분석 결과를 보면 VORT200과 PREC의 EOF1 공간 패턴이 한반도 폭염패턴을 가장 잘 모의 하였다(이우섭, 2014). Lead 1의 PREC PC1은 HWF와의 상관 계수가 0.52로 한반도 폭염을 전망하는 예측인자로서의 가능성을 보였다. HWF와 PC2의 상관성도 약 0.38로 Lead 1의 SLP보다는 높지만 다른 변수에 비해 낮은 편이다(표 4-1). 그러나 T2m PC1의 상관계수는 0.32로 변수 중 가장 낮은 예측성을 보였다.

Z500은 관측과 MME의 EOF1에서도 한반도 폭염 패턴의 중심지역을 잘 모의 하지 못하였지만(이우섭 2014), Z500의 MME를 사용할 경우 예측성은 1982~2005년까지의 상관 계수 0.52로 VORT200의 MME(0.43)보다 높다.

표 5-2 관측 HWF와 관측 PC의 상관계수. 굵은 글씨는 통계적으로 90%이상 유의미한 값을 의미함.

	VORT200	Z500	SLP	PREC	T2m
OBS PC1 vs HWF	0.85	0.61	0.47	0.60	0.72
MME PC1 vs HWF	0.43	0.51	0.35	0.52	0.32
MME PC2 vs HWF	0.37	0.43	0.37	0.38	0.08

상관계수 0.51은 통계적으로 98%에서 유의한 값이다. 따라서 9개 모형의 H500과 VORT200 자료를 이용한 PC1이 한반도 폭염을 예측하는 데 효율적으로 이용될 수 있으며, 극한 기온에 대해 비교적 높은 예측성을 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 대기대순환모형/해양대기 결합모형에서 예측된 KHI를 사용하기에는 예측성이 너무 낮아, 동아시아 전체의 변동성을 고려한 H500과 VORT200의 시·공간 패턴을 이용하여 2015년 한반도 폭염빈도수의 예측성을 평가하였다(이우섭, 2014). 먼저, 우리는 9개의 개별 모형을 이용하여, 개별모델과 MME에 대한 H500과 VORT200을 이용하여 EOF분석을 하였고, PC1을 이용하여 예측성을 평가하였다(그림 5-2). 노란색 막대그래프는 관측 HWF를 나타내며, 열린 동그라미는 9개의 모형 예측결과이고 주황색은 MME 결과이다.

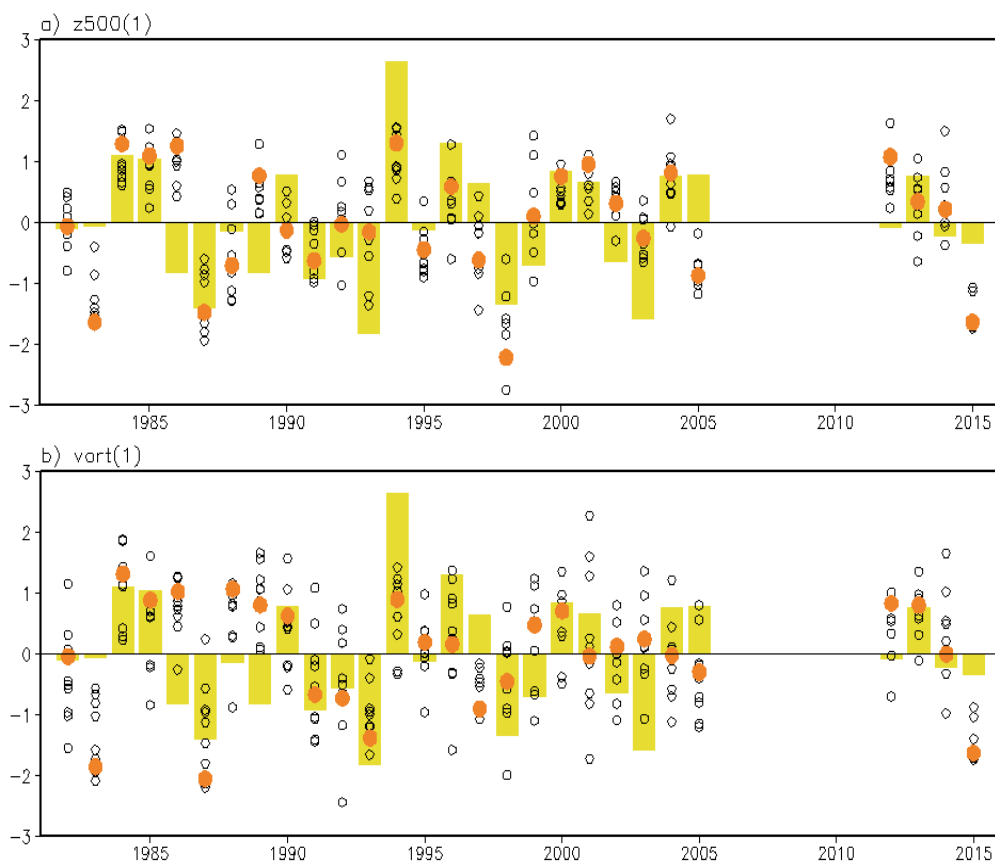


그림 5-2 EOF PC1의 시계열: a) 500hPa 지위고도, b) 200hPa 와도. 단일 모델 앙상블(Model; open circle), SCM방법을 이용한 다중모형 앙상블(SCM; orange circle), 관측된 폭염빈도수(yellow bar)

H500 PC1과 VORT200 PC1은 매우 유사한 변동성을 보이고 있으며, 폭염의 경년 변동성을 잘 예측하고 있다. 특히 폭염이 가장 적었던 1993년과 가장 많았던 1994년에 대해서는 두 변수 모두 정확하게 예측을 하였다. 또한 최근 폭염의 강도가 강했던 2013년 폭염에 대해서도 정확히 예측을 하였다. 2015년은 평년보다 폭염이 적게 발생할 것으로 예측을 하였는데, 관측 결과도 평년보다 적게 발생하였다. 계절 시간 규모에서 우리나라의 여름철 폭염을 정확하게 예측하기 위해서는 동아시아 여름몬순변동성의 지배역학을 이해하기 위하여 더 많은 연구가 이루어져야 될 것이다.

6. 폭염 조기경보 시스템

폭염이 건강에 미치는 영향은 점점 증가하고 있다. 따라서 폭염은 인명과 재산상의 피해를 초래할 수 있으며, 기후변화와 더불어 발생빈도수가 증가하므로 사전에 인명피해를 줄이기 위해 폭염의 발생, 지속기간 및 강도에 대한 예측정보를 합리적으로 생산해 내야 한다.

선진국의 경우 재난 및 재해발생 이후 사후처리보다는 사전 예·경보 체계 및 예방 활동을 강화하기 위한 효율적인 기상정보를 활용을 통해 피해를 최소화하는 방향으로 정책이 추진되고 있다. 공중보건 및 비상관리 당국은 폭염에 의한 건강위험을 줄이고, 기후변화로 인한 폭염의 빈도, 지속기간 강도의 증가에 대비하기 위한 대비책을 개발해야만 한다. 폭염에 의한 생명을 보호하기 위해 보건당국은 공중 보건의 가장 효과적인 개입 시간에 대한 정보를 찾아야만 한다. 건강을 지키기 위한 행동 범위에 대한 조사는 되고 있지만 대부분은 시행되고 있지 않다. 이러한 노력을 지원하기 위해 보건복지부는 생명을 구하기 위한 행동 지침을 발표하면, 지역사회의 기후변화에 대한 회복력은 더욱 강화될 것이다. 따라서 폭염으로 인한 건강 위험을 줄이기 위해 조기경보 시스템을 개발하고, 건강을 보호하기 위한 효과전인 전략이 필요하다. 폭염 조기경보시스템을 근거로 적극적인 예방활동을 실시하는 것은 폭염으로 인한 피해저감 측면에서 다른 어떠한 조치보다도 큰 효과를 거둘 수 있다.

폭염에 의한 생명을 보호하기 위한 중요한 단계는 폭염 조기경보 시스템의 개발이다. 폭염의 발생기작에 대한 원인을 파악하는 것은 조기 탐지 및 경보시스템 개발의 기본 연구이며, 폭염 예측의 과학적인 근거로서 반드시 필요한 연구이다. 우리는 과학적 근거에 의해 개발된 한반도 폭염지수를 이용하여, 한반도 폭염예측에 활용이라는 관점에서 중기모델, 계절예측모형을 평가를 하였다.

2일 예측정보를 이용한 폭염경보시스템은 지난 10년간 여러 국가에서 개발되어왔다. 이밖에도, 10일 이전 예보자료를 이용하여 폭염 경보시스템을 수행하는 것은 상당히 유용해 보인다. 조기 폭염 정보는 사전대비 목적으로 보건분야에 상당히 유의하다. 그러나 선행시간이 증가할수록 예측의 불확실성은 증가하게 된다. 그러므로 앞장에서 제시된 폭염의 단기, 중기, 계절예측결과를 활용하여, 국가 단위 및 지역단위의 폭염 예비 대책 수립 및 폭염 피해 저감을 위한 가이드라인을 제시하고자 한다.

6.1 한반도 폭염 경보체계

우리나라 기상청은 일 최고기온이 33°C이상인 상태가 2일 이상 지속될 것으로 예상되면 폭염 경보를 발표한다. 기상청 폭염 특보는 관할관서에서 시·군단위로 주위보(33°C)와 경보(35°C)로 구분하여 발표된다(그림 6-1). 이 절에서는 2012년부터 2015년의 폭염특보 자료를 이용하여 한반도 폭염특보체계를 평가하였다. 표 6-1은 2015년 서울청 관할지역에 폭염 특보 발생현황을 나타낸 것이다. 여기서 발표관서는 폭염 특보를 발표하는 지역 기상청을 의미하며, 발표구역은 시·군단위로 발표된다. 강도는 주의보와 경보로 나뉘며, 주의보 단계에서 최고기온이 35°C이상으로 예상될 경우에는 경보단계로 대체된다. 폭염경보의 발표시간은 폭염이 예측된다고 발표한 시각이며, 발효시간은 실제로 일 최고기온이 33°C이상 관측된 시각이다. 해제시간은 폭염경보를 해제한 시각을 의미한다.

한반도 폭염특보의 4년간 지역별 총 발표횟수를 보면, 대구, 서울, 부산, 광주, 전주, 대전 순으로 많이 발표하였다(그림 6-2). 대구는 2012년부터 2014년까지 매년 100회 이상의 폭염특보가 발생하였으며, 특히 2013년에는 171회로 가장 많이 발생하였다. 부산기상청이 3번째로 많은 이유는 관할지역에 밀양시, 함양군, 합천군등 폭염이 많은 지역이 포함되기 때문이다. 폭염특보가 가장 적게 발생한 지역은 인천이며, 4년간 총 5회 발생하였다. 인천의 폭염 특보 횟수가 적은 이유는 인천기상대의 관할지역이 강화

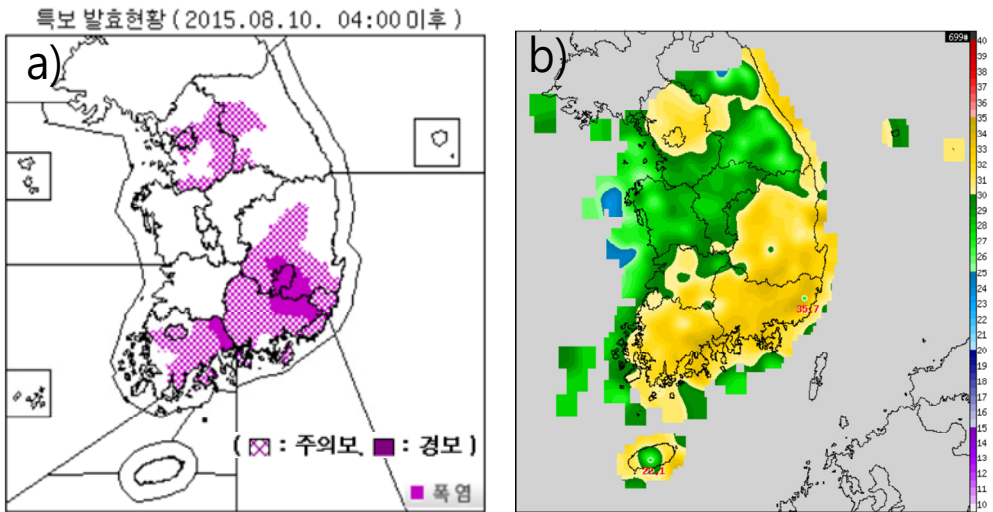


그림 6-1 8월 10일 14시 a) 폭염특보 발표현황과 b) AWS 최고기온 분포도(출처:www.kma.go.kr)

군과 인천광역시 2곳이며, 2011년 전반기 이후 서울청 관할지역으로 포함되었기 때문이다. 두 번째로 폭염특보 발생회수가 적은 지역은 제주이며, 4년간 총 28회 발생하였다. 그중 2014년에는 태풍과 연관되어 2회로 가장 적었다. 폭염특보 발생 수는 지역별 폭염 발생빈도수와 매우 유사한 것을 알 수 있다. 한반도 전체 년별 발생횟수는 폭염의 강도가 가장 강했던 2013년에 724회, 2015년에 634회 발생하였다(표 6-2).

표 6-1 기상청 폭염 특보 예시(2015년)

	발표 관서	발표구역	강도	발표시각	발효시각	해제(대체시각)	해제/대치
1	서울	가평군	주의보	2015-05-27 10:00	2015-05-27 11:00	2015-05-28 16:00	해제
2	서울	가평군	주의보	2015-07-10 4:00	2015-07-10 11:00	2015-07-11 18:00	해제
3	서울	가평군	주의보	2015-07-14 4:00	2015-07-14 11:00	2015-07-15 16:00	해제
4	서울	가평군	주의보	2015-08-05 17:00	2015-08-06 11:00	2015-08-07 11:00	대치
5	서울	가평군	경보	2015-08-07 10:00	2015-08-07 11:00	2015-08-08 16:00	대치
6	서울	가평군	주의보	2015-08-08 16:00	2015-08-08 16:00	2015-08-10 18:00	해제
7	서울	고양시	주의보	2015-07-10 4:00	2015-07-10 11:00	2015-07-11 18:00	해제
8	서울	고양시	주의보	2015-08-05 17:00	2015-08-06 11:00	2015-08-07 11:00	대치
9	서울	고양시	경보	2015-08-07 10:00	2015-08-07 11:00	2015-08-08 16:00	대치
10	서울	고양시	주의보	2015-08-08 16:00	2015-08-08 16:00	2015-08-10 18:00	해제
11	서울	과천시	주의보	2015-05-27 10:00	2015-05-27 11:00	2015-05-28 16:00	해제
12	서울	과천시	주의보	2015-07-10 4:00	2015-07-10 11:00	2015-07-11 18:00	해제
13	서울	과천시	주의보	2015-07-14 4:00	2015-07-14 11:00	2015-07-15 16:00	해제
14	서울	과천시	주의보	2015-07-30 13:00	2015-07-30 13:00	2015-07-31 16:00	해제
15	서울	과천시	주의보	2015-08-05 11:00	2015-08-05 11:00	2015-08-06 11:00	대치
16	서울	과천시	경보	2015-08-06 4:00	2015-08-06 11:00	2015-08-08 16:00	대치
17	서울	과천시	주의보	2015-08-08 16:00	2015-08-08 16:00	2015-08-10 18:00	해제
18	서울	과천시	주의보	2015-08-17 15:30	2015-08-17 15:30	2015-08-18 18:00	해제
19	서울	광명시	주의보	2015-07-10 4:00	2015-07-10 11:00	2015-07-11 18:00	해제
20	서울	광명시	주의보	2015-08-05 17:00	2015-08-06 11:00	2015-08-07 11:00	대치
21	서울	광명시	경보	2015-08-07 10:00	2015-08-07 11:00	2015-08-08 16:00	대치
22	서울	광명시	주의보	2015-08-08 16:00	2015-08-08 16:00	2015-08-10 18:00	해제
23	서울	광명시	주의보	2015-08-17 15:30	2015-08-17 15:30	2015-08-18 18:00	해제
24	서울	광주시	주의보	2015-05-27 10:00	2015-05-27 11:00	2015-05-29 5:00	해제
25	서울	광주시	주의보	2015-07-10 4:00	2015-07-10 11:00	2015-07-11 18:00	해제



그림 6-2 지역별 특보발생 현황(2012~2015)

태풍의 내습이 잦았던 2014년에는 449회로 4년 중 가장 적게 발생하였다. 극한기상현상에 의한 피해를 피할 수 없다면 예보 정확도를 높여 피해를 줄여야만 한다. 기상청의 예보 정확도는 지속적으로 높아지고 있으며, 단기예보(1,2일)의 정확도는 2013년에 92.1%이며, 중기예보(10일)는 81%로 향상되었다. 그러나 폭염의 피해를 줄이기 위한 가장 큰 문제는 예보의 선행시간이다. 즉 폭염예측을 얼마나 미리 할 수 있는지를 의미한다. 선행시간이 길어지면 폭염예방을 위해 충분한 시간을 확보할 수 있기 때문이다. 2012년부터 2015년까지 기상청 폭염특보에 대한 선행시간을 조사하였다. 이 분석은 폭염 발표구역에 폭염 특보가 발생했을 경우를 모두 포함하였다. 폭염의 발표시각과 발효시각이 같은 경우(선행시간이 0hr 인 경우)는 총 2386번의 폭염특보 중 약 35.7%인 846번이었으며, 년별로 보면 2014년이 약 47%(211회)이며, 2012년은 43.3%(243회), 2015년은 634회중 244회로 약 39%이다.

표 6-2 기상특보 발표관서별 년별 폭염 특보 발표횟수

발표관서	부산	서울	강원	광주	대구	대전	인천	전주	제주	청주	춘천	합계
2012년	93	114	17	65	100	51	3	56	5	36	21	561
2013년	124	91	35	99	171	48	-	79	14	48	15	724
2014년	78	85	19	26	150	23	2	16	2	19	29	449
2015년	78	138	74	67	136	40	-	52	7	42	-	634
합계	373	428	145	257	557	162	5	203	28	145	65	2368

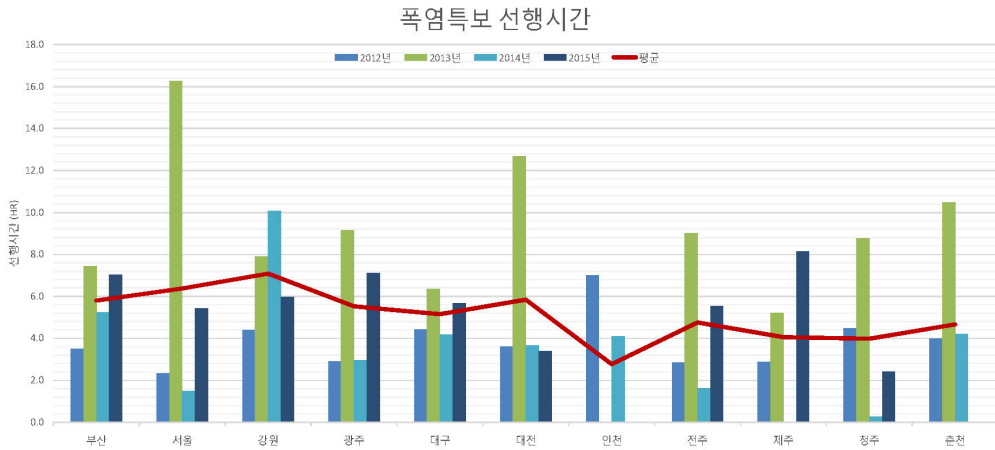


그림 6-3 지역별 폭염 특보 발표시각과 발효시각의 차(선행시간, hr)

폭염특보의 년별 평균 선행시간은 2012년에 3.8시간, 2013년에 9.3시간, 2014년 3.8시간, 그리고 2015년에 5.1시간이며, 평균 선행시간이 가장 길었던 해는 2013년(9.3시간)이다. 4년 평균 선행시간은 약 5.5시간이다. 선행시간이 가장 길었던 발표 관서는 강원도(7.1시간)이며, 가장 짧은 관서는 청주이다. 그러나 대부분의 관서들이 5시간의 선행시간을 보인다. 4년동안 선행시간이 가장 길었던 사례는 2013년 서울이며, 약 16.3시간이다. 그러나 2014년에는 평균 1.5시간으로 청주 다음으로 짧은 선행시간을 보였다.

표 6-3 지역별 폭염특보의 평균 선행시간(hr)

발표관서	부산	서울	강원	광주	대구	대전	인천	전주	제주	청주	춘천	평균
2012년	3.5	2.3	4.4	2.9	4.4	3.6	7.0	2.9	2.9	4.5	4.0	3.8
2013년	7.4	16.3	7.9	9.1	6.4	12.7	-	9.0	5.2	8.8	10.5	9.3
2014년	5.2	1.5	10.1	3.0	4.2	3.7	4.1	1.6	-	0.3	4.2	3.8
2015년	7.0	5.4	6.0	7.1	5.7	3.4	-	5.5	8.1	2.4	-	5.1
평균	5.8	6.4	7.1	5.5	5.2	5.8	5.5	4.8	5.4	4.0	6.2	5.5

6.2 질병관리본부 온열감시 체계

폭염의 위험성을 보다 정확히 인지하고 그에 대한 경각심을 높이기 위해서는 폭염 피해 수치에 대한 정확한 이해가 선행될 필요가 있다. 그림 6-4는 최근 5년간 여름철 폭염에 의한 진료인원과 총 진료비용을 나타낸 것이다. 폭염관련 진료인원은 2010년 1만 4887명에서 2014년 약 1만 6487명으로 1600명(10.7%) 증가하였으며, 총 진료비 또한 10억 9000만원에서 11억 4000만원으로 약 5000만원(4.6%) 증가하였다. 진료환자가 가장 많았던 2012년(18,182명)의 진료비는 약 10억 4000만원이었으나 두 번째로 진료환자가 많았던 2013년(17,660명)의 진료비는 약 10억 5000만원이었다. 이것은 2013년 폭염의 강도와 관련이 있을 것으로 보인다.

폭염에 의한 인명피해는 온열질환자 수로 집계되고 질병관리본부 홈페이지를 통해 발표된다. 우리나라는 폭염피해 예방 및 신속한 대응을 위하여 중앙 재난 안전 대책 본부를 중심으로 매년 6월부터 9월까지 「폭염대응 종합대책」을 수립해 오고 있다. 이에 질병관리본부는 2011년부터 폭염에 따른 건강피해를 실시간 모니터링하기 위해 온열질환 감시체계를 운영하고 있다. 질병관리본부는 폭염으로 인한 건강피해 현황을 신속히 파악하고자 2011년부터 6-9월에 운영하던 “폭염으로 인한 온열질환 감시 체계”를 2015년부터는 5월까지 확대하여 1개월 빨리 시작하였다. 질병관리본부는 온열질환 감시 체계 결과를 관계부처와 국민들에게 제공함으로써 폭염에 대한 경각심

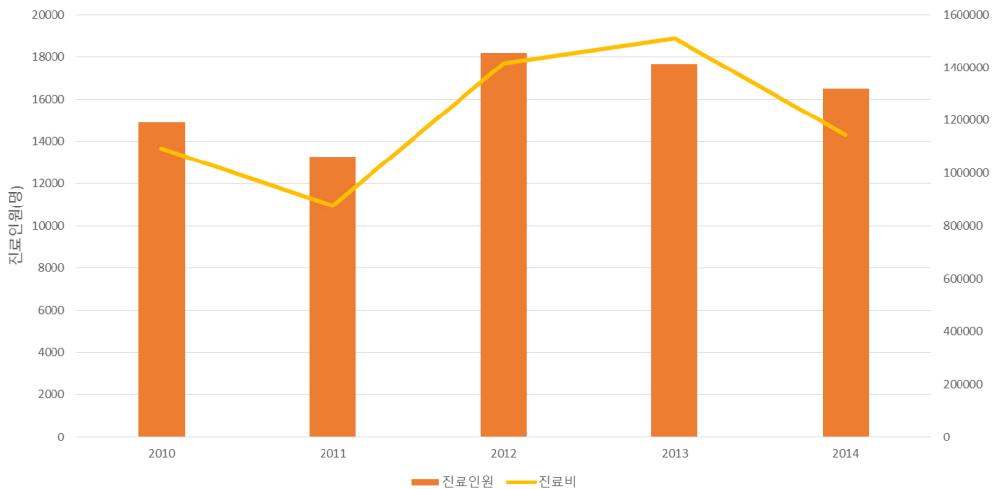


그림 6-4 폭염으로 인한 진료인원 및 진료비(건강보험심사평가원: 2011~2014)

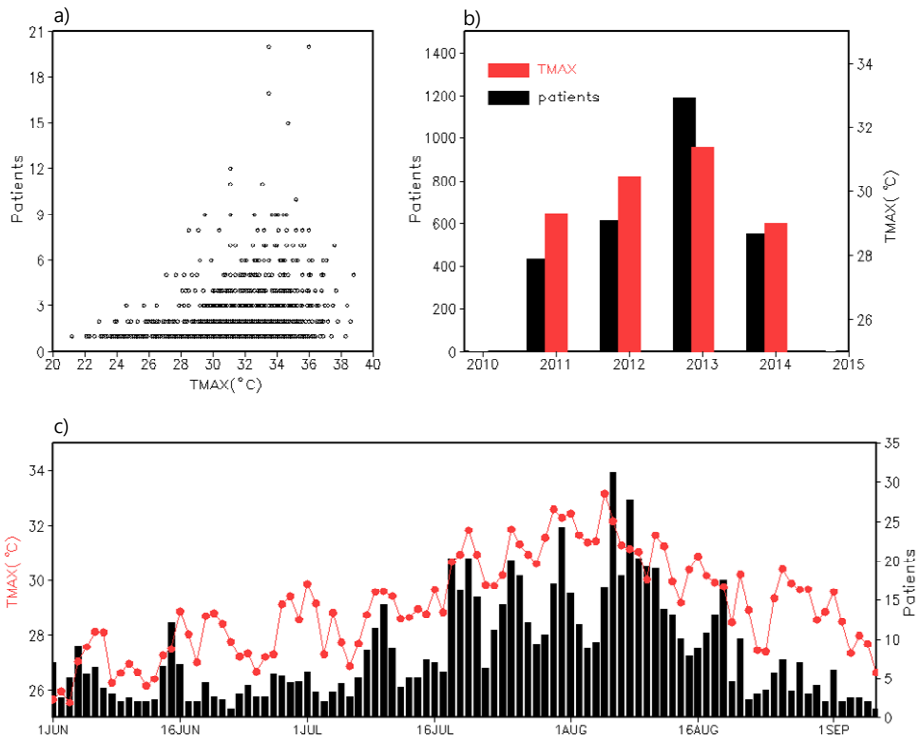


그림 6-5 일 최고기온과 온열질환자의 연관성: a) 산포도, b) 년 변동성, c) 일 변동성

을 와 건강피해 최소화를 위해 힘쓰고 있다(질병관리본부, 2015).

온열질환 감시체계는 응급실이 마련된 전국 540개소의 의료기관에서 폭염으로 인한 온열질환(열사병, 열탈진, 열실신, 열경련, 열부종) 발생현황을 보고받고 있다. 이를 바탕으로 지역별, 일별 온열질환자의 실태를 파악할 수 있다.

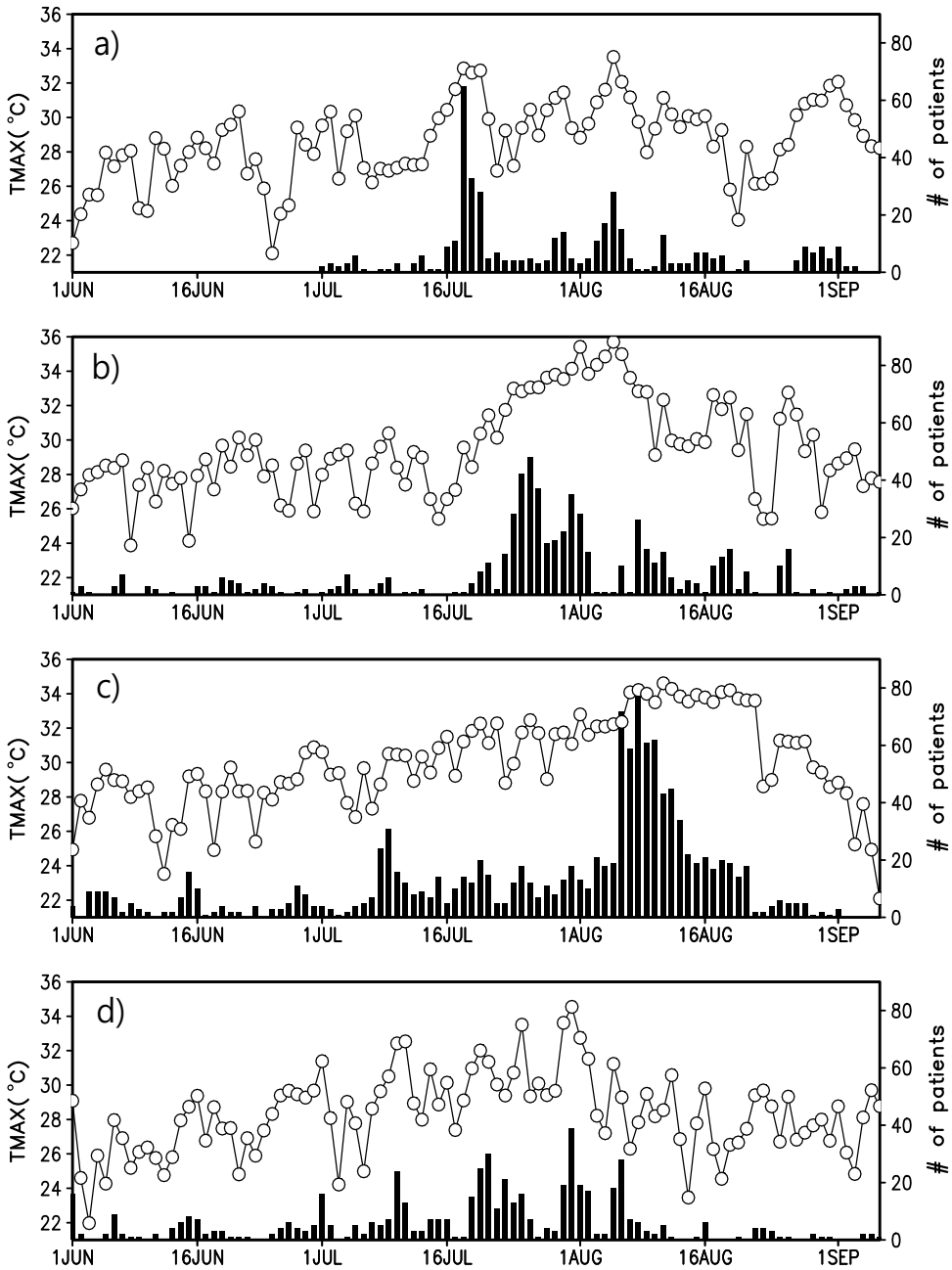


그림 6-6 년별 일최고기온과 온열질환 발생자수: a) 2011년, b) 2012년, c) 2013년, d) 2014년

그림 6-5a는 최근 4년 여름철(6,7,8월)동안 온열질환자수와 일 최고기온의 산포도를 나타낸 것이다. 온열질환자수와 일 최고기온은 상관성이 매우 큰 것으로 나타났으며, 특히 일최고기온이 30°C 이상일 때 온열질환자는 급격히 증가하였다. 최근 4년간(2011-2014년) 온열질환 감시체계를 통해 신고된 온열질환자는 2011년 443명, 2012년 984명, 2013년 1,189명, 2014년 556명이었으며, 평균 최고기온은 2011년 29.3°C, 2012년 30.5°C, 2013년 31.4°C, 2014년 29.0°C를 보인다. 년별 온열질환자는 최고기온과 비례하여 발생하는 것을 알 수 있다. 온열환자수는 폭염 발생빈도수와 매우 유사하다(그림 2-3). 즉 7월 20일경 장마가 끝난 시기부터 8월 중순에 가장 많은 환자가 발생한다(그림 6-6).

2015년 온열질환 감시체계는 5월 24일부터 9월 5일까지 전국 533개 응급실 운영 의료기관에서 폭염으로 인한 온열질환(열사병, 열탈진, 열실신, 열경련, 열부종 등) 발생현황을 신고 받았으며, 그 결과 총 1,056명(사망 11명)의 온열질환자가 신고되었다. 특히 10-11주차(7.25-8.9)에 전체 온열질환자의 59.6%가 발생하였으며, 이 시기(10주차, 7.26-8.1) 일평균 최고기온이 32.3°C로 올해 처음 30°C를 초과하면서 온열질환자가 급증한 것으로 나타났다(질병관리본부, 2015).

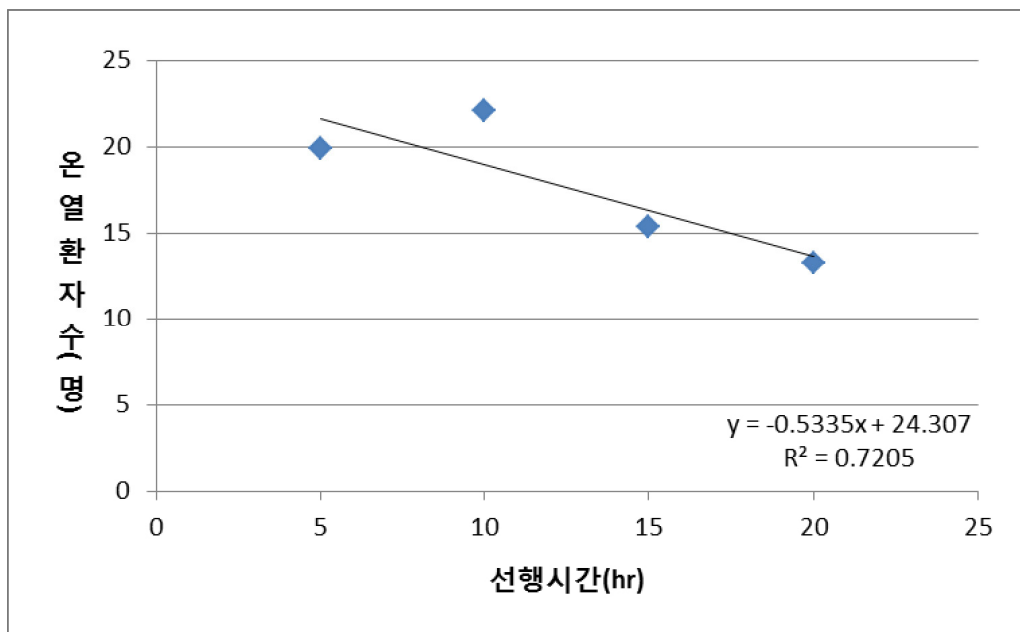


그림 6-7 폭염특보선행시간과 온열환자수(2012-2014년)

기후변화 영향으로 열사병, 일사병 등의 온열질환이 발생하고 있지만, 기상청의 폭염특보가 발효되지 않은 시기에 온열질환자가 발생하는 경우가 많았다. 2015년 기상청 및 질병관리본부에서 받은 국정감사 자료에 따르면 2011년부터 2015년 8월 5일 까지 발생한 온열질환자 3877명 가운데 폭염특보 발효가 되지 않은 평상시의 온열질환자는 1820명(46.9%)에 달했다. 폭염주의보일 때 발생한 온열질환자 수는 1662명으로 42.9%의 비중을 차지했다. 폭염경보일 때에는 395명으로 10.2%에 불과했다. 지역별로는 인천시가 최근 5년간 전체 온열질환자 109명 중 77명(70.6%)이 폭염특보 발령시가 아닌 평상시에 발생해 전국 1위를 기록했다.

폭염특보와 온열환자 발생사이의 연관성을 분석하기 위해서, 폭염특보 발령시가 아닌 평상시에 발생한 온열환자는 제외하였다. 또한 폭염특보는 기상청 폭염 특보문을 이용하여 16개 시·도 중 해당 시·군·구 지역에 1개라도 폭염특보가 발효된 지역이 있을 경우, 그 시·도에 폭염특보가 발효된 것으로 계산하여 산출하였다.

그림 6-7은 폭염특보 선행시간(폭염특보발표시간과 발효시간의 차)과 온열질환자수의 연관성을 나타내는 것이다. 분석결과, 폭염특보 발표와 온열환자 발생 사이에 상관관계가 있음이 나타났다. 폭염특보의 선행시간이 10시간 이하일 경우는 온열환자수는 증가하지만, 점차 선행시간이 길어질수록 온열질환자수는 감소하는 것으로 나타났다. 폭염 특보 선행시간에 따른 온열질환자수의 감소율은 시간당 약 0.5명이며, R^2 는 0.72로 유의한 결과를 나타낸다. 따라서 폭염에 대한 예방체계를 마련하여 폭염에 의한 인명피해를 줄이기 위해서는 폭염에 시기별 적절한 경보체계가 필요하다.

6.3 폭염 조기경보 시스템 개발

폭염 정보시스템은 기상재해의 범위에서 사망률(mortality)과 이환률(morbidity)을 감소시키기 위한 효과적인 방법이다. 또한 폭염예측정보는 폭염에 의한 공중보건과 비상관리기관 뿐만 아니라 건강, 사회전반에 걸쳐 폭염위험을 대비할 수 있게 도와준다.

폭염 예측정보를 이용하여, 주관 기관의 정책결정자는 대국민 경보를 위한 빠른 의사결정 시스템을 사용하여 국민 건강을 보호할 수 있다. 국민들이 지역의 폭염 사망자와 온열질환자가 증가하는 이유를 기상예보와 연관이 있다는 인식을 가지고 있다면, 국민건강을 더욱더 보호할 수 있을 것이다. 폭염 정보 시스템은 한반도 폭염의 정의에 기초하여 개발되어야 하며, 건강과 연관된 지속기간과 강도의 정보도 포함하는 것이 좋다.

본 연구에서는 폭염정보체계를 극대화하기 위해 사용될 시기적절한 예측정보의 고려사항에 대해서 조사하였다. 기존의 폭염정보체계에 대한 정보는 2014년 보고서에 제시하였다(이우섭, 2014). 계절 예측 자료와 중기 예측자료의 사용에 대해 논의할 것이다. 폭염을 예측하는 것은 2일에서 3일의 전형적인 기상예보의 시간 규모와 더불어

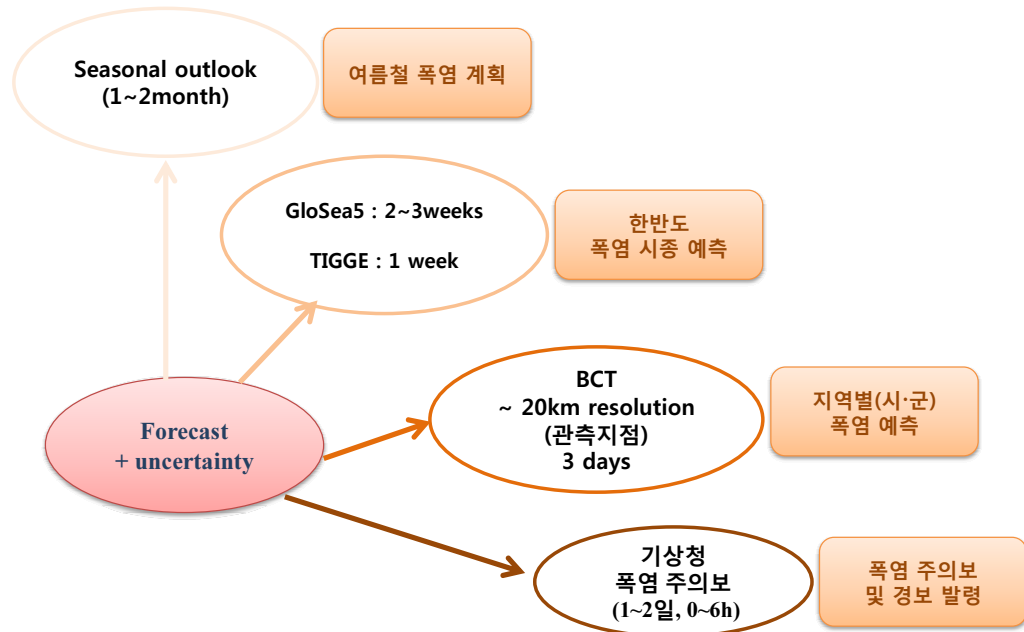


그림 6-8 다중시간규모 폭염 예측정보를 이용한 폭염조기경보 모식도

어 그 이상의 시간규모에서 폭염의 정보를 건강관련 부서와 관련부서에 함께 제공하는 것이다. 예를 들어 7일 이상의 시간 규모에서는 언제 폭염이 한반도에 발생할지 또는 폭염의 가능성이 있는지를 예측하고, 상순, 중순, 하순에 최고기온을 예측하며, 또한 이번 시즌에 폭염은 몇 번 발생할 것인지에 대한 정보를 건강관련부서와 함께 제공하는 것이다. 폭염의 계절 예측은 재난관리부를 위한 태풍 예측과 유사한 것이다. 즉 한반도에 폭염이 “평년보다 많이 발생한다” 또는 “평년보다 적게 발생한다”의 정보를 제공하는 것이다.

한반도 폭염 특보 체제는 12시간~48시간 이전에서 운영을 하지만, 더 긴 선행시간을 이용하여 경보체계를 운영해야만 한다. 따라서 국가차원의 폭염 단계별 대응 방안을 마련하기 위해서도 현재의 2단계를 세분화시켜 5단계로 설정해야 할 것으로 판단된다. 폭염의 단기, 중기, 계절예측 결과를 활용하기 위한 모식도를 작성하였다. 그림 6-8은 한반도 폭염 조기경보시스템을 5단계로 분류한 예시이다. 1단계는 6월1일부터 9월 30일까지 폭염전망을 이용하여 평년대비 폭염의 발생빈도가 어떤지 예의 주시하는 기간으로써, 국가 규모의 폭염대책을 위해 지속적인 준비를 하는 기간이다.

표 6-4 다중시간규모 예보자료를 이용한 폭염조기 경보체계

폭염예보	조기경보	행동요령
계절 예측	계절예측결과 폭염이 평년보다 많이 발생	<ul style="list-style-type: none"> • 폭염관리계획을 재점검 • 복지시설 및 민간기관의 지원 강화 • 구호물품 재정부
2-3주 예보	2-3 주 후 폭염 발생이 예측될 때	<ul style="list-style-type: none"> • 홍보용 동영상 배포 • 폭염대비 일반적 준비요령과 단계별, 분야별 준비요령을 담은 홍보용 동영상을 다중이용시설, 학교등에 배부
7일 예보	다음 주에 한반도 폭염이 발생할 확률이 높을 때	<ul style="list-style-type: none"> • 합동 지침 추진 • 폭염예보 모니터링 • 자원봉사자와 지역사회에 경고메세지
3일 예보	지역별 한반도에 폭염이 예측될 때	<ul style="list-style-type: none"> • 폭염 예견시 도우미를 활용 외출자제 등 행동요령 설명 및 건강 상태 점검 • “무더위 쉼터” 운영 • 폭염 주의보·경보 발령시 문자 서비스 제공
당일	폭염 특보 발령	<ul style="list-style-type: none"> • 대피준비 • 자원봉사자 동원 • 폭염행동요령에 따라 행동

폭염 예방·대비 대책 부분에서는 크게 폭염의 취약 계층설정, 대국민 폭염 준비요령 홍보체계를 마련하는 것이다. 2단계는 2-3주일 예보에서 주별 기온이 평년보다 높게 예상될 때이며, 폭염 계획을 점검하고 홍보동영상을 통해 폭염에 대한 위험성을 경고해야만 한다. 즉 폭염 정보 전달, 담당자를 위한 점검표 제공, 외부활동자를 위한 정보 제공등 예방계획을 사전 확인하는 기간이다. 3단계는 일주일전 KHI값이 0이상인 날이 3일 이상 지속될 것으로 예상될 때이며, 지역단위에서부터 국가 규모의 대국민 서비스 체계를 가동한다. 4단계는 3일전 시·군지역에 폭염 발생확률이 예보되며, 폭염이 곧 발생할 것이 확실시 되어 의학적, 사회적인 조치를 실시하여야 한다. 5단계는 기존의 폭염 특보와 동일하게 분류하였다. 폭염이 연장되거나 지속될 것이 확실시 되는 경우에는 특별한 조치가 수행되어야만 한다(표 6-4).

폭염특보 발표기준에 대한 세분화로 폭염에 대한 사전 대비와 취약계층이 폭염피해에 노출을 줄이는 것에 기여할 것이다.

6.4 폭염조기경보체계 개발 시 고려사항

IPCC 5차보고서의 건강관련한 평가의 핵심개념은 기후와 관련된 위해의 발생 가능성은 기후-관련한 위험과 인간과 자연계의 취약성과 노출의 상호작용의 결과라는 것이다. 기후시스템과 적응, 완화를 포함하는 사회경제적 과정이 위험, 노출, 취약성에 영향을 주는 것으로 평가하고 있다.

IPCC 위험평가와 대응조치에서 주요한 개념이자 중재지점인 취약성(vulnerability)은 불리한 영향을 받는 경향을 말하며, 취약성의 원인으로 개인적, 인구집단의 속성과 물리적 요인을 평가하고 있다. 5차 보고서에서도 1) 지리적 원인, 2) 현재 건강 수준, 3) 연령과 성, 4) 사회경제적 수준, 5) 공중보건 및 다른 기반체제로 개별적으로 기술되고 있지만, 실제로는 복잡하고 장소별로 다른 양상으로 작용한다. 교육수준, 소득수준, 건강상태, 특정 정책이 결정되어 시행할 수 있는 역량을 의미하는 거버넌스와 관련된 정부의 반응성과 같은 요인은 취약성을 가져오는 근본적인 원인으로 작용한다. 평상시의 인구집단의 기후관련 질병의 발생 정도는 기후 변화에 대한 취약성을 나타내는 가장 중요한 단일 지표로 활용될 수 있으나, 지역마다 취약성의 정확한 원인과 필요한 적응 역량이 다를 수 있다. 폭염과 관련된 취약성 요인에 대한 설명을 요약하면 다음과 같다.

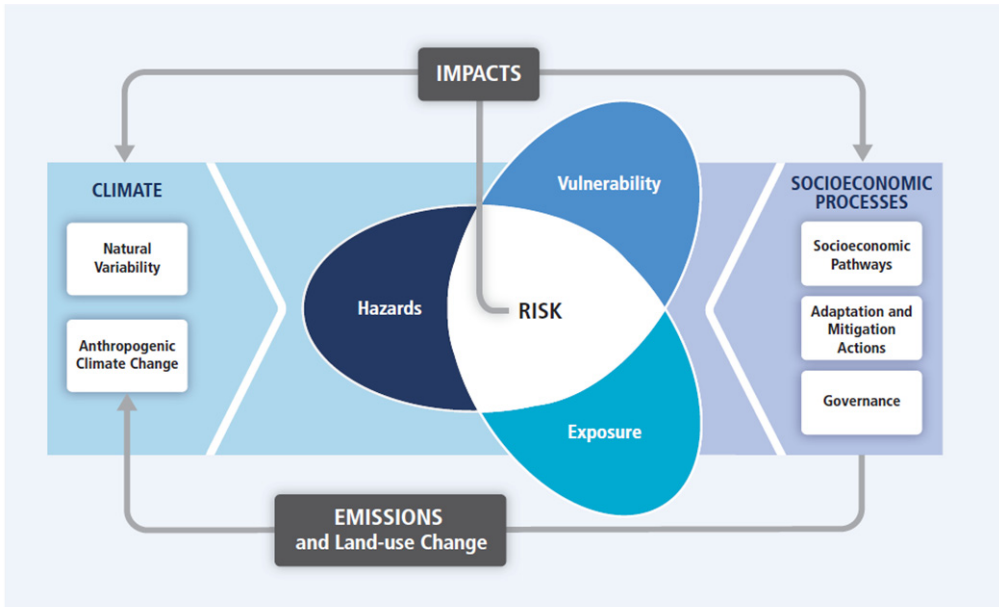


그림 6-9 IPCC AR5 WG II의 핵심개념(위험, 노출, 취약성의 관련성)

• 취약성의 지리적 원인

도시의 열섬(Heat island)에 거주하는 경우에 극단적인 폭염에 취약할 수 있다.

• 현재 건강 수준

당뇨병과 허혈성 심장질환을 가진 사람은 기온이 높아질 경우 사망이나 중증질환의 위험을 크게 증가시킬 수 있다.

• 연령과 성

어린이는 체표면적에 대한 체질량 비가 낮기 때문에 고온과 관련된 질환에 취약할 수 있으며, 노인의 경우 폭염과 같은 극단적인 사건에 위해의 가능성이 증가한다. 2003년 파리에서의 폭염에서는 성별로는 전체적으로 여성에서 초과사망이 확인되지만, 경제활동연령에서는 남성에서의 사망이 높은 것으로 알려져 직업적 특성과의 관련성을 시사한다. 여성은 임신시기에 다양한 환경적 위험에 취약한 것으로 알려져 있다.

- **사회경제적 수준**

일반적으로 가난한 국가와 지역이 극단적 기후상황과 기후 변동성에 의한 피해를 받기 쉬운 것으로 알려져 있으나, 부유한 국가라고 해서 이들 위험의 안전지대는 아니다. 기후관련 재난으로 인한 사망에 대한 국가 간 비교에서 극단적인 기후조건의 강도, 거버넌스의 질적 수준, 빈곤수준이 관련성이 있었고, 기후 위험에 취약한 개인과 가구는 모두 사회경제적 수준이 낮은 이들이었음이 확인되고 있다. 미국 흑인에서 재난시 높은 사망률이 발생하는 것은 낮은 사회경제적 수준과 관련되어 있음도 확인되었다.

- **공중보건 및 다른 기반체계**

양질의 보건의료와 필수 공중보건서비스에 대한 접근성이 보장되지 않는 사람들은 극단적 기후상황과 기후 변동성에 대한 피해를 받기 쉽다. 이와 함께 사회기반시설의 중요성도 높게 평가되고 있는데, 2003년 8월 뉴욕의 대규모 정전시에 냉방기가 적절하게 작동하지 못하여 더위로 인한 사망이 급증한 사례를 제시하고 있다.

- **취약성에 대한 전망**

인구의 증가는 기후변화의 취약성과 관련되어 있다. 현재의 상황이 지속된다면, 이미 자원이 부족한 지역에 거주하여 기후위험에 영향을 받을 가능성이 높은 인구 규모가 증가할 것으로 예상되는데, 이는 기후로 인한 위대한 영향을 증폭시킬 것이다. 특히, 인구증가의 대부분은 도시에 집중되어, 자원부족과 열섬효과와 같은 취약성이 증가할 것이며, 고온에 대한 방호대책이 없이 야외 환경 일하게 될 인구집단 또한 증가할 것이다. 취약성 요인을 감소시킨다고 알려지고 있는 한 국가 또는 사회경제적 개발 또한 최근 전 세계적 경기 후퇴와 관련하여 긍정적이지 못한 영향이 예상되어, 기후변화의 경향과의 상승작용이 우려되고 있다.

- 폭염에 대한 계획은 일년 동안 언제나 발생할 수 있기 때문에 여름철로 제한되어서는 안 된다.
- 폭염의 건강 위험을 관리하기 위한 모든 요소를 포함한 광범위한 계획은 폭염-건강 행동계획을 참조한다.
- 건강을 위협하는 폭염의 관리는 매우 중요하기 때문에 주관기관은 폭염에 대한

계획을 확인해야만 된다.

- 날씨예보와 기후예측 기술이 발전함에 따라, 폭염시즌에 대한 계획은 긴 지속 기간, 확률예보 등을 이용해서 만들어 져야한다.

7. 요약 및 결론

이 연구는 폭염조기 경보 시스템 개발을 위해 다양한 시간자료를 이용하여, 한반도 폭염 발생과 연관된 예측성을 평가하였으며, 폭염 예측정보를 이용한 폭염조기경보 시스템을 제안하였다.

먼저, 한반도 폭염 발생과 연관된 원격상관 패턴을 조사하였다. 이 결과에서 주목할 만한 패턴은 남중국해와 북서 태평양, 그리고 한반도 지역에 다른 부호의 중심을 가지고 자오선 방향으로 전파되는 패턴이다. 즉 한반도 폭염 발생시, 남중국해의 200hPa 와도는 강한 대류활동과 비단열 가열에 의해 폭염 발생과 양의 상관성을 보이며, 이것은 로스비 파열(Rossby-wave-train)의 근원이 되어, 한반도와 일본 주변에 강한 양의 지위고도 아노말리를 발생시킨다. 이것은 로스비 파가 7월과 8월에 남중국해에서 열대지역의 열원에 의해 발생된다는 것을 의미한다. 한반도 지역의 하강운동에 의한 단열 대기 가열은, 한반도에 폭염을 유발하게 된다. 따라서 한반도 폭염 발생은 남중국해의 대류활동과 한반도의 하강운동 사이의 상층와도에서 나타나는 쌍극자 패턴으로 대표될 수 있다는 것을 발견하였다. 따라서 상층와도 차를 이용하여 한반도 폭염지수(KHI)는 한반도 폭염발생과 높은 상관관계(0.8)를 가지며, 통계적으로 유의미하다.

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. 본 연구에서는 TIGGE의 예측정보를 사용하여 선행시간별, 모형별 예측성능을 분석을 하였다. TMAX 방법은 한반도 최고기온을 잘 모의하는 KMA가 예측성이 가장 뛰어났지만, BCT를 이용할 경우에는 KMA의 예측성은 다른 모형과 달리 감소하였다. BCT방법을 이용하면, KMA의 경우, 3일 선행시간에서 가장 좋은 예측성을 보이며, 선행시간이 길어질수록 예측성이 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 앙상블 스프레드의 증가와 예측오차에 의한 것이다.

KHI 방법을 이용하여 2011년부터 2014년까지의 폭염 예측성을 평가한 결과, 5일 선행기간이 일 때 NCEP, CMC와 같이 타 모형에 비해 공간해상도가 낮은 앙상블 예측 시스템을 제외하고는 TS가 0.7 이상의 높은 값을 나타내었으며, 그랜드 앙상블 예

측시스템도 0.73의 높은 TS 값을 나타내었다. 또한 KHI는 TS 중 유연히 맞힐 수 있는 경우를 제외한 ETS 검증 결과도 TMAX와 BCT 방법에 비해 우수한 예측성을 보였다. 따라서 한반도 폭염발생 예측성은 대기 순환 패턴을 이용한 KHI방법이 가장 우수 하였다. 또한 KHI방법은 확률예측에서도 우수한 예측성을 보였다. KHI 방법은 검증기간 전체에 걸쳐 모든 모델이 우수한 예측성을 보였으며, 이러한 예측성은 9일 선행시간까지 유지되었다.

따라서 KHI방법과 BCT 방법을 이용하여, 7일전 한반도 폭염 발생을 예측할 수 있으며, 3일전 지역별 폭염을 예측할 수 있는 폭염 예측 시스템이 개발되었다. 이 시스템을 이용하여 우리는 2015년 실시간 예보와 검증을 하였다. BCT 검증결과 폭염이 자주 발생하는 남부지역을 중심으로 우수한 예측성을 보였다.

기상청 중장기 모형인 GloSea 5의 2014년 예측장을 이용하여 3~4주전 한반도 폭염기간동안 평균패턴에 대한 예측성을 평가하였다. 3~4주전의 기온 예측장에서는 폭염의 강도와 지역별 기온 분포는 정확히 예측하지는 못했지만, 한반도 전체에 양의 아노말리를 예측하는 데 성공하였다. 또한 폭염 발생시 관측된 500hPa 지위고도의 아노말리 패턴은 20일 이전의 예측장과 약 0.5의 상관계수를 가졌으며, OLR의 예측성은 4주까지 매우 뛰어난 것으로 나타났다. 따라서 향후 APCC에서 수집하고 있는 S2S자료를 이용하여 폭염의 예측성을 연구한다면, 2-3주전 폭염을 대비하기 위한 예측정보로 활용할 수 있을 것이다.

APCC MME 자료를 이용하여, 2014년 개발된 폭염 계절예측 시스템을 이용하여, 2015년 폭염 발생 빈도수에 대한 예측을 실시하였다. H500 PC1과 VORT200 PC1은 매우 유사한 변동성을 보이고 있으며, 폭염의 경년변동성을 잘 예측하고 있다. 특히 폭염이 가장 적었던 1993년과 가장 많았던 1994년에 대해서는 두 변수 모두 정확하게 예측을 하였다. 또한 최근 폭염의 강도가 강했던 2013년 폭염에 대해서도 정확히 예측을 하였다. 2015년은 평년보다 폭염이 적게 발생할 것으로 예측을 하였는데, 관측 결과도 평년보다 적게 발생하였다.

한반도 폭염 특보 체계는 12시간~48시간 이전에서 운영을 하지만, 더 긴 선행시간을 이용하여 경보체계를 운영해야만 한다. 따라서 국가차원의 폭염 단계별 대응 방안을 마련하기 위해서도 현재의 2단계를 세분화시켜 5단계로 설정해야 할 것으로 판

단된다. 폭염의 단기, 중기, 계절예측 결과를 활용하여 5단계의 대응방안을 제시하였다. 1단계는 6월1일부터 9월 30일까지 폭염전망을 이용하여 평년대비 폭염의 발생빈도가 어떤지 예의주시하는 기간으로써, 국가 규모의 폭염대책을 위해 지속적인 준비를 하는 기간이다. 폭염 예방·대비 대책 부분에서는 크게 폭염의 취약 계층설정, 대국민 폭염 준비요령 홍보체계를 마련하는 것이다. 2단계는 2-3주일 예보에서 주별 기온이 평년보다 높게 예상될 때이며, 폭염 계획을 점검하고 홍보동영상을 통해 폭염에 대한 위험성을 경고해야만 한다. 즉 폭염 정보 전달, 담당자를 위한 점검표 제공, 외부활동자를 위한 정보 제공등 예방계획을 사전 확인하는 기간이다. 3단계는 일주일전 KHI값이 0이상인 날이 3일 이상 지속될 것으로 예상될 때이며, 지역단위에서부터 국가 규모의 대국민 서비스 체계를 가동한다. 4단계는 3일전 시·군지역에 폭염 발생확률이 예보되며, 폭염이 곧 발생할 것이 확실시 되어 의학적, 사회적 조치를 실시하여야 한다. 5단계는 기존의 폭염 특보와 동일하게 분류하였다. 폭염이 연장되거나 지속될 것이 확실시되는 경우에는 특별한 조치가 수행되어야만 한다.

폭염조기 경보시스템을 이용한다면, 효과적인 폭염에 대한 사전 대비와 취약계층의 피해를 줄이는 것에 기여할 것이다.

참고 문헌

- 기상청, 2011: 기상업무 대국민 만족도 조사
- 기상청, 2012: 손에 잡히는 예보기술, 제 17호.
- 이우섭, 2014: 다중모델 앙상블 자료를 이용한 한반도 폭염 예측성 평가, APEC 기후센터 연구 보고서
- 질병관리본부, 2015: 2015년 온열질환 감시체계 운영결과, 주간 건강과 질병, 제 8권 제38호.
- 허보영, 심재현, 최우정, 2009 : “세계의 주요 폭염 피해”, 한국수자원학회논문집,42(5), p114-118.
- Bowler, N., A. Arribas, S. Beare, K. E. Mylne, and G. Shutts, 2009: The local ETKF and SKEB: Upgrades to the MOGREPS short-range ensemble prediction system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 135, 767-776.
- Christidis N, Stott P, Brown S, Hegerl G, Caesar J. 2005. Detection of changes in temperature extremes during the second half of the 20th century. *Geophysical Research Letters* 32: L20716, doi:10.1029/2005GL023885.
- Deque M, Royer JF. 1992. The skill of extended-range extratropical winter dynamical forecasts. *J. Clim.* 5: 346-1356.
- Ding Q, Wang B, Wallace JM, Branstator G, 2011. Tropical-extratropical teleconnections in boreal summer: observed interannual variability. *Journal of Climate* 24: 1878-1896.
- Essery, R. L. H., M. J. Best, R. A. Betts, P. M. Cox, and C. M. Taylor, 2003: Explicit representation of subgrid heterogeneity in a GCM land surface scheme. *J. Hydrometeor.*, 4, 530-543.
- Hansen J, Sato M, Ruedy R. 2012. Perception of climate change *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109: E2415-23
- Hudson D, Marshall AG, Alves O, 2011: Intraseasonal forecasting of the 2009 summer and winter Australian heat waves using POAMA. *Weather Forecast* 26:257-279
- IPCC, 2012: Summary for Policymakers. In: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*, Field, C. B., et al. eds., A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 1-19 pp.
- 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 [Stocker, T.F., D. Qin, G.K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp
- Kenyon J, Hegerl GC. 2008. Influence of modes of climate variability on global temperature extremes. *Journal of Climate* 21: 3872-3889.
- 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.
- Lalauette, F., 2003: The exceptional warm anomalies of summer 2003. ECMWF Newsletter No. 99 – Autumn / Winter 2003, 2-8.
- Lee W-S, M-I Lee, 2015: Interannual Variability of Heat Wave in South Korea and its Connection with Large-Scale Atmospheric Circulation Pattern, reviewed.
- Lorenz, E. N., 1969: The predictability of a flow which possesses many scales of motion. *Tellus*, 21, 289-307.
- Marshall, A. G., D. Hudson, M. C. Wheeler, H. H. Hendon, and O. Alves, 2011: Assessing the simulation and prediction of rainfall associated with the MJO in the POAMA seasonal forecast system. *Climate Dyn.*, doi:10.1007/s00382-010-0948-2.
- Meehl GA, Tebaldi C. 2004. More intense, more frequent and longer heat waves in the 21st century. *Science* 305: 994-997.
- Min S-K, Son S-W, Seo K-H et al (2015) Changes in weather and climate extremes over Korea and possible causes: a review. *Asia Pac J Atmos Sci* 52:103-121
- Miyakoda K, Gordon T, Caverly R, Stern W, Sirutis J, Bourke W. 1983. Simulation of a blocking event in January 1977. *Mon. Weather Rev.* 111:846869.
- MiyakodaK, Sirutis J, Ploshay J. 1986. Onemonth forecast experiments without anomaly boundary forcings. *Mon. Weather Rev.* 114: 2363-2401.
- Molteni, F., and T. N. Palmer, 1993: Predictability and finite-time instability of the northern winter circulation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 119, 269-298.
- Moon JY, Wang B, Ha KJ, Lee JY. 2013. Teleconnections associated with Northern Hemisphere summer monsoon intraseasonal oscillation. *Climate Dynamics* 40: 2761-2774.
- Mureau, R., F. Molteni, and T. N. Palmer, 1993: Ensemble prediction using dynamically conditioned perturbations. *Quart. J. Roy. Meteor.Soc.*, 119, 299-323
- Nakamura H, Fukamachi T. 2004. Evolution and dynamics of summertime blocking over the Far East and the associated surface Okhotsk high. *Quarterly Journal of the*

Royal Meteorological Society 130: 1213-1234.

Nitta T, 1987. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation, *Journal of the Meteorological Society of Japan* 64: 373 - 390.

Owen JA, Palmer TN. 1987. The impact of El Niño on an ensemble of extended-range forecasts. *Mon. Weather Rev.* 115: 2103-2117

Park CK, Schubert SD. 1997. On the nature of the 1994 East Asian drought. *Journal of Climate* 10: 1056-1070.

Peterson, T. C., P. A. Stott, and S. Herring, 2012: Explaining extreme events of 2011 from a climate perspective. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93, 1041-1067.

Rashid H, Hendon HH, Wheeler MC, Alves O. 2009. Prediction of the Madden-Julian Oscillation with the POAMA dynamical prediction system. *Clim. Dyn.* 36: 649-661.

Scaife AA, Folland CK, Alexander LV, Moberg A, Knight JR. 2008. European climate extremes and the North Atlantic Oscillation. *Journal of Climate* 21: 72-83.

Toth, Z., and E. Kalnay, 1997: Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method. *Mon. Wea. Rev.*, 125, 3297-3319.

Tracton MS, Mo K, Chen W, Kalnay E, Kistler R, White G. 1989. Dynamical Extended Range Forecast (DERF) at the National Meteorological Center. *Mon. Weather Rev.* 117: 1604-1635.

Valcke, S., 2011: OASIS3 user guide (prism 2-5), Tech. Rep. 3 Programme for integrated earth system modelling (PRISM) support initiative.

Wang B, Wu R, Lau KM. 2001. Interannual Variability of the Asian Summer Monsoon: Contrasts between the Indian and the Western North Pacific-East Asian Monsoons. *Journal of Climate* 14: 4073-4090.

Wen QH, Zhang X, Xu Y, Wang B, 2013. Detecting human influence on extreme temperatures in China. *Geophysics Research Letters* 40: 1171-1176.

연구보고서 2015-15

다중 시간 규모 자료를 이용한 한반도 폭염 예측성 평가

Assessing the predictability of heat wave occurrence on
multiple timescales

이우섭



APEC 기후센터
48058 부산광역시 해운대구 센텀7로12
Tel: 051-745-3900 Fax: 051-745-3949
www.apcc21.org



ISBN 979-11-5698-112-1