

APEC기후센터

한반도 여름철 기온 예측을 위한 경험적 모델 연구

김형진 기후예측팀

APEC기후센터
연구보고서

한반도 여름철 기온 예측을 위한 경험적 모델 연구

An Empirical Model Approach for Summertime Temperature Prediction in
South Korea

김형진 기후예측팀

연구보고서 2015-02

발간사

우리나라는 여름철에 집중호우를 동반한 장마의 영향으로 연강수량의 60% 이상이 집중되어 종종 심각한 자연재해가 발생합니다. 또한, 장마가 물러간 후 한여름에 발생하는 폭염도 상당한 사회·경제적 손실을 초래합니다. 따라서 여름철 강수량과 기온의 계절전망에 대한 예측성을 높여 사회·경제적 활용을 제고하는 것은 기후정보의 부가가치 창출과 직결됩니다.

계절전망은 통계적 연관성을 이용한 경험적 기법이나 전지구 기후모델을 활용하는 역학적 기법을 통해 생산됩니다. 역학적 기법은 자연에서 발생하는 기후 현상을 재현할 목적으로 제작된 수치모델을 이용하므로 일반적으로 경험적 기법에 비해 예측성이 우수합니다. 그러나 경험적 기법 역시 역학적 기법의 보완으로 널리 사용되는데, 이는 원격상관에 의한 기후 현상이나 혹은 수치모델로 재현하기 쉽지 않은 기후 현상 등에 대한 예측에 경험적 기법이 여전히 효과적이기 때문입니다.

본 연구에서는 우리나라 여름철 기온의 예측성을 높이기 위해 원격상관을 이용한 통계적 계절예측 시스템을 개발하였고, 이를 APEC 기후센터 다중모델앙상블 계절예측 자료에 적용하여 최대 6개월의 예보 선행시간에서 우리나라 여름철 기온의 예측 가능성을 조사하였습니다. 수치모델의 계절전망 적중률이 특히 우리나라를 포함한 동아시아 지역에서 상대적으로 낮은 실정을 감안할 때, 본 연구에서 개발된 통계-역학 계절예측 시스템은 역학적 계절예측의 단점을 보완할 수 있을 것으로 기대됩니다.

본 연구의 수행을 위해 애쓰신 김형진 박사와 오상명 연구원에게 감사드립니다. 아울러 귀중한 조언을 주신 유진호 박사와 조재필 박사께도 고마움을 전합니다.

2015. 3월
APEC 기후센터 소장
정진승

ABSTRACT

This study investigated the predictability of summertime (June through August, JJA) temperature in South Korea. On interannual time scale, the JJA temperature variations in South Korea were, to a large extent, associated with the large-scale, low-level circulation variability in East Asia. The yearly variability of large-scale JJA circulation was then quantified by area averaged 850hPa geopotential height, termed as Korea-Japan index (KJI, 30~45N, 120~150E) and western North Pacific subtropical high index (WNPSHI, 15~25N, 110~140E). These indices were linked with remote forcing of tropical origin. The KJI was coupled with a decaying El Niño a month in advance, while the WNPSHI was influenced by sea surface temperature (SST) anomaly in the western North Pacific and a developing El Niño one to three months ahead. In addition, the JJA temperature over South Korea affected directly by tropical SST anomaly in the western North Pacific in May. Based on these teleconnection patterns, a multivariate regression model using the SST surrogates for the KJI and WNPSH as explanatory variables and a simple empirical model with an area averaged May SST were established to reconstruct the JJA temperature in South Korea. Both of the empirical models predicted reasonably well the JJA temperature with correlation coefficients of 0.57 for the multivariate regression model and 0.53 for the simple empirical model. These statistical models were also used to predict monthly temperature and, likewise, the predictability differed little. In contrast, however, if these models were applied to a suit of multi-model ensemble (MME) seasonal forecasts, the multivariate regression model outperformed the simple empirical model at all lead times ranging from one to six months. The notably different predictability arguably arose from the higher fidelity of the simulated tropical SST in the Central and Eastern Pacific than in the Western Pacific. In addition, the multivariate model outstripped the one-month lead MME prediction for summertime temperature, suggesting that the reproducibility of tropical SST, despite the regional dependency, can pave a promising way for a statistical model to predict JJA temperature in South Korea.

목차

한반도 여름철 기온 예측을 위한 경험적 모델 연구

발간사	i
ABSTRACT	iii
1. 서론	1
2. 자료	5
2.1 관측 자료	5
2.1.1 한반도 기온 자료	5
2.1.2 전지구 자료	8
2.2 전지구 기후모델 계절예측 자료	8
3. 결과	9
3.1 우리나라의 하계 기온	9
3.1.1 우리나라 하계 기온의 기후학적 특성	9
3.1.2 우리나라 하계 기온의 경년 변동성	11
3.2 우리나라 하계 기온과 동아시아 대규모 순환	16
3.3 열대-아열대 원격상관을 이용한 우리나라 하계 기온 예측	19
3.4 APCC MME 예측 자료를 이용한 우리나라 하계 기온 예측	28
4. 요약 및 결론	30
REFERENCES	32

1. 서론

아시아 하계 몬순(Asian Summer Monsoon, 이하 ASM)은 크게 인도 하계 몬순(Indian Summer Monsoon, 이하 ISM), 동아시아 하계 몬순(East Asian summer monsoon, 이하 EASM), 그리고 북서태평양 하계 몬순(Western North Pacific Summer Monsoon, 이하 WNPSM)으로 구성된다(Wang and LinHo, 2002). 이 가운데 EASM은 우기의 시작 시기 및 전선의 위치에 따라 지역적으로 메이유(Mei-yu, 중국), 장마(Changma, 우리나라), 그리고 바이우(Baiu, 일본)라 불리는데, 우리나라의 경우 장마 기간을 포함한 여름철(6월~8월, 이하 JJA와 혼용)에 연강수량의 60% 이상이 집중되어 종종 심각한 자연재해가 발생하기도 한다. 한편 장마에 동반된 강수량 변동과 함께 여름철 기온 변동 역시 적지 않은 피해를 초래할 수 있는데, 장마 종료 이후 한여름에 자주 발생하는 폭염(heat wave)은 여름철 기온 변동이 유발하는 대표적 자연 재해이다. 따라서 EASM 및 이와 동반된 강수와 기온에 대한 예측성을 높일 수 있다면 예측정보의 사회경제적 활용 측면에서 큰 도움이 될 수 있다. 실제로 다양한 분야의 정책 입안자들은 장기 기후예측(long-range forecast: 1개월보다 긴 시간규모에서의 기후예측) 정보를 중장기계획 수립에 활용하여 위기 관리 및 피해 경감을 시도하는 바(Lloyd-Hughes and Saunders, 2002), 장기 기후예측의 역량 강화는 기후예측 정보의 부가 가치 창출과 직결된다.

장기예측을 수행하기 위해서는 대기-해양 상호 작용에 관해 포괄적이며 심도 있는 지식이 필수적인데, 최근 이루어진 장족의 과학적 진보는 과거에 비해 예측성이 뛰어난 장기예측 정보의 생산을 가능케 하였다(Krishnamurti et al., 1999; Palmer *et al.*, 2000; Shukla *et al.*, 2000; Doblas-Reyes *et al.*, 2000). 대기-해양 상호 작용에 관한 과학적 이해를 바탕으로 현재 널리 통용되고 있는 장기예측 기법은 크게 두 가지로 구별된다(Lim and Kim, 2006). 첫 번째 기법은 대규모(대양규모 혹은 대륙규모)로 천천히 변하는 장기 변동과 원거리 지역의 장기 변동에 관한 통계적 연관성을 분석·추출하고 이를 토대로 경험 모델(empirical model)을 구축하여 장기예측을 수행하는 것이다. 이 방법은 장기예측의 경우 대양이나 대륙에서 천천히 변하는 경계조건에 의한 강제력-예를 들어 대양에서 천천히 변하는 해수면 온도(sea surface temperature, SST)-에 의해 예측 가능한 성분이 만들어 진다는 연결과에 기초한다(Palmer and Anderson, 1994; Goddard *et al.*, 2001). 경험 모델 방법으

로 생산한 계절예측 정보의 예측성은 도입 초기에는 상대적으로 낮은 수준에 머물렀으나 경험 모델 방법의 주요 예측인자(predictor)인 엘니뇨-남방진동(El Niño-Southern Oscillation, ENSO) 및 기타 대규모 지표 강제력에 대한 과학적 이해가 진전되면서 급격히 향상되었다. 두 번째 장기예측 기법은 전산기에서 구동되는 전지구 기후모델(global climate model, GCM)을 활용하는 역학적 계절 예측(dynamical seasonal forecast)이다. 역학적 계절 예측은 미리 산출한 SST(prescribed SST)¹⁾를 경계조건으로 활용하여 대기 상태를 예측하는 대기 GCM (atmospheric GCM, AGCM)이나 혹은 대기와 해양의 상태가 모두 예측되는 접합 GCM (coupled GCM, CGCM)을 이용하여 수개월 후의 기후정보를 생산한다. 역학적 계절 예측 기법은 자연에서 발생하는 기상 현상들을 모의(simulation)할 목적으로 제작된 수치 모델(numerical model)을 이용하므로 일반적으로 경험 모델 기법에 비해 계절예측 정보의 예측성이 우수하다. 그러나 경험 모델 기법은 여전히 역학적 계절 예측 기법의 보완으로 폭넓게 활용되고 있는데, 이는 역학적 계절 예측을 수행하기 위해서는 상당한 계산 및 저장 용량을 갖춘 전산 장비가 확보되어야 하는 등의 부담이 있으며, 다른 한편으로는 그 기작이 잘 알려진 기후 현상이나 혹은 수치모델의 해상도가 낮아 명시적으로 모의할 수 없는 기후 현상 등에 대한 예측에는 경험 모델 기법이 효과적이기 때문이다(Anderson *et al.*, 1999).

한 지역의 기후 편차(climate anomaly)가 다른 지역의 기후 편차에 영향을 주거나 받게 되어, 지리적으로 멀리 떨어진 지역 간에 뚜렷한 연관성(상관관계)이 나타나는 현상을 “원격상관(teleconnection)”이라 한다. 일반적으로 원격상관은 강수, 기온, 기압, 그리고 순환장의 기후 편차에 지속적으로, 반복해서, 그리고 대규모로 나타나 열대와 아열대 지역 사이의 장주기(low-frequency) 변동성을 분석하는데 매우 유용하다. 많은 선행 연구에 의하면 ASM과 연관된 여러 가지 원격상관이 존재하는데, 예를 들어 계절내(intraseasonal) 혹은 경년(interannual) 시간규모에서 평년보다 강한(약한) 서태평양 대류는 극동 아시아(Far East Asia) 지역에 고기압(저기압)성 편차를 유도하여 중위도 동아시아 여름 철 기온이 평년보다 높아(낮아)지는 경향을 초래한다(Nitta, 1987; Kawamura *et al.*, 1996; Fukutomi and Yasunari, 2002; Lu, 2004). Nitta (1987)는 이 원격상관 패턴이 열대 태평양의 대류성 가열(convective heating)로 유도되는 국지적 경압 구조(local baroclinic structure)에 대한 중

1) Prescribed SST: 기후 평균된 SST에 특정 시기의 관측 SST 편차(observed SST anomaly) 또는 예측 SST 편차(forecast SST anomaly)를 더하여 산출한 SST를 의미.

위도(일본 남부) 순압 와도 편차(barotropic vorticity anomaly) 반응임을 보이고 “Pacific-Japan (PJ)” 패턴이라 명명하였다. Tsuyuki and Kurihara (1989)는 계절내 PJ 패턴이 초여름보다 한여름에 더 뚜렷함을 밝혔는데, 이는 열대 서태평양에서 기후평균 동서류의 동풍 시어(easterly shear)가 초여름보다 한여름에 더 강해서 중위도와 열대 사이의 순압-경압 접합 모드(barotropic-baroclinic coupling mode) 또한 한여름에 더 강해지기 때문이다(Lu, 2004). 그러나 최근 Xie *et al.* (2009)은 PJ 패턴이 엘니뇨가 발달한 다음 해 여름 철에 나타나는 인도양 승온에 의해 필리핀 지역의 대류가 약화되고 동아시아 몬순이 강화되는 경년 시간규모의 원격상관임을 주장하였다.

한편 중국 북부 지역의 하계 강수량은 인도 대륙의 하계 강수량과 매우 높은 양의 상관성을 갖는 반면(Guo and Wang, 1988; Kripalani and Singh, 1993; Zhang, 1999; Kripalani and Kulkarni, 2001), 일본 남부의 하계 강수량은 특히 초여름에 인도 대륙의 하계 강수량과 음의 상관성을 보인다(Kripalani and Kulkarni 2001; Krishnan and Sugi 2001). 최근에는 적도 동태평양 냉수대(cold-tongue)에서 주로 발생하는 것으로 여겨지던 통상적인 엘니뇨(cold-tongue El Niño, 이하 CT 엘니뇨)에 비교하여, 적도 중태평양 지역에서 발생하는 새로운 형태의 엘니뇨(warm-pool El Niño, 이하 WP 엘니뇨)가 보고되었는데(Yeh *et al.*, 2009), 엘니뇨 발생지역의 차이로 인한 원격상관 패턴의 차이 역시 무시할 수 없는 것으로 밝혀졌다. 일례로 우리나라에서는 CT 엘니뇨가 발달하는 여름철 기온은 평년에 비해 낮은 경향을, 그리고 WP 엘니뇨가 발달하는 여름철 기온은 평년에 비해 높은 경향을 보인다(Kug *et al.*, 2010).

위에서 언급한 원격상관은 열대에서 SST 및 적운 대류 변동에 기인한 잠열 방출 편차가 아열대 지역의 기온과 강수 그리고 대규모 순환장 변동에 상당한 영향을 미칠 수 있음을 의미한다. 그런데 현재 활용되고 있는 대부분의 역학적 계절 예측 모델은 열대 지역의 ENSO 등은 비교적 합리적인 수준으로 예측하는 반면, 특히 동아시아의 여름철 평균 상태는 상대적으로 매우 낮은 수준으로 예측하고 있다(Wang *et al.*, 2008). 따라서 열대 SST 변동과 결부된 열대-아열대 원격상관에 관한 이해를 증진하고 이를 토대로 경험 모델을 개발하여 계절 예측에 활용한다면, 북반구 중위도 여름철 기후 변동에 대해 역학적 계절 예측의 예측성을 높일 수도 있다.

북태평양에 위치하며 북반구 중위도의 광활한 영역을 차지하는 북태평양 고기압(North

Pacific subtropical high, NPSH)과 NPSH의 서쪽 경계에서 북반구 여름철에 형성되는 북서태평양 고기압(western NPSH, WNPSH)은 EASM과 열대성 저기압(tropical storm, TS)의 변동성을 조절하는 주요 인자이다(Liu and Wu 2004). 선행 연구에 의하면 WNPSH의 변동은 주로 아열대 인도양(Schott *et al.*, 2009), 아열대 북서태평양(Sui *et al.*, 2007), 그리고 열대 태평양(Wang *et al.*, 2013)의 SST 변동에 기인하는데, 이러한 열대-아열대 SST 변동을 WNPSH의 예측 인자로 사용하면 WNPSH 경년 변동 예측성이 현저하게 향상되고 더 나아가 WNPSH의 변동에 영향을 받는 EASM과 TS의 경년 변동 예측성이 뚜렷하게 개선될 수 있다(Wang *et al.*, 2013).

WNPSH 경년 변동성과 연관된 동아시아 지역의 하계 기후 경년 변동성에 관한 연구는 대부분 광역 규모에서 수행되었다. 그러나 서두에 언급한 바와 같이 EASM은 지역적으로 구별되는데, 이는 EASM의 강수 전선을 형성하는 기단의 성질이 비록 동일한 동아시아 지역이라 하더라도 국지적으로 서로 다르기 때문이다(Tomita *et al.*, 2011). 이에 본 연구에서는 열대 SST 혹은 이를 통해 상당한 수준으로 예측 가능하다고 밝혀진 WNPSH와 한반도 하계 기온 사이의 원격상관 모드를 추출하여 그 기작을 규명하고, 열대 SST 혹은 WNPSH를 예측인자로 활용하여 한반도 하계 기온을 예측하는 경험적 모델을 개발한 후, 이를 일련의 역학적 계절 예측 모델의 예측 자료에 적용하여 그 활용 가능성을 평가하고자 하였다. 이를 위해 1) 우리나라 여름철 기온의 경년 변동성을 분석하고, 2) 이와 연관된 대규모 순환장의 경년 변동성을 파악하였으며, 3) 우리나라 주변의 대규모 순환장 경년 변동과 결합된 열대 SST 변동의 주요 원격상관 모드를 탐지하고, 4) 이를 이용하여 우리나라의 하계 기온 경년 변동을 예측하는 경험 모델을 구축한 후, 5) 이 경험 모델을 APEC 기후센터(APCC)의 다중모델 앙상블(multi-model ensemble, MME) 예측 결과에 적용하여 3~6개월의 선행 시간을 갖는 한반도 여름철 기온의 경년 변동 예측을 시도하였다.

2. 자료

2.1 관측 자료

2.1.1 한반도 기온 자료

본 연구에서 사용한 한반도 기온 자료는 0.1° (약 10 km) 해상도의 격자 자료로 남한지역 중관기상관측시스템(Automated Synoptic Observing System, ASOS)에 의해 획득된 관측소 자료를 격자화한 것이다. 현재 총 81개 관측소에서 ASOS 자료가 수집되고 있지만, 이 연구의 목적상 1979년부터 2012년까지 장기간 안정적으로 자료가 축적되어 있는 59개 관측소를 선택하여 공간 내삽 방법을 통해 격자화하였다. 본 연구에서 선택한 관측소들의 지도상의 위치를 Figure 1에 표시하였고, 각 관측소의 위·경도 및 해발고도 정보를 Table 1에 제시하였다.

공간 내삽 방법에는 Kriging 기법, 역거리 가중치(inverse distance weighting, 이하 IDW) 기법, 다각형(polygon) 기법, 삼각형(triangulation) 기법, 박막 스플라인(thin-plate spline) 기법 등이 있으며, 여러 방법을 단계별로 조합하여 공간 내삽을 수행하기도 한다(Haylock *et al.*, 2008). 이러한 공간 내삽 방법들 중 Kriging 기법이 가장 대표적이며 정교한 방법으로 알려져 있으나(정재준과 최영은, 2011; Herrera *et al.*, 2012), 베리오그램을 얻기 위해 상당한 계산 부담을 감수해야 하는 단점이 있다. 이에, 본 연구에서는 비교적 간단하지만 동시에 합리적인 내삽 결과를 제공하는 IDW 기법을 선택하였다. 이 기법은 격자점 값을 얻기 위해 그 주변 관측소 값들의 가중 평균을 사용하는데, 가중치가 거리의 α 승에 반비례한다고 가정하여 α 가 0에 가까우면 산술 평균이 되고 α 가 커질수록 가까운 관측소의 영향이 더 커지게 된다. 즉

$$z_0^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i \quad (1)$$

여기서 λ_i 는 가중치로서

$$\lambda_i = \frac{\left(\frac{1}{d_i}\right)^\alpha}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i}\right)^\alpha} \quad (2)$$

이며, d_i 는 격자점 x_0 와 관측소 x_i 사이의 거리로서

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} \quad (3)$$

와 같다. IDW 기법을 사용하면 가까운 관측소의 영향이 지나치게 크게 나타나는 현상이 발생할 수 있는데, 이를 방지하기 위해 식(3)에서 얻는 계산 거리에 일정한 완화거리를 더하여 사용하기도 한다. 본 연구에서는 $\alpha=1$ 을 사용하였고, 완화거리는 적용하지 않았다.

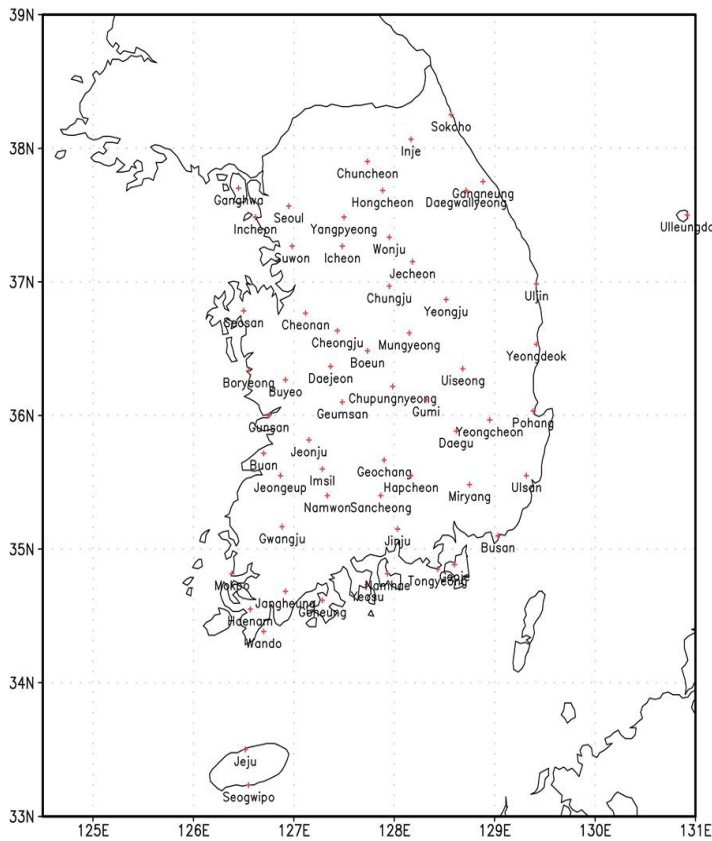


Figure 1. Map of the 59 ASOS stations used in this study.

Table 1. List of the 59 ASOS stations along with their location and height above sea level.

Satation Name	Station No.	Latitude(°N)	Longitude(°E)	Elevation(m)
Sokcho	90	38.25	128.57	18.1
Daegwallyeong	100	37.68	128.72	772.6
Chuncheon	101	37.9	127.73	77.7
Gangneung	105	37.75	128.88	26.0
Seoul	108	37.57	126.95	85.8
Incheon	112	37.48	126.62	68.2
Wonju	114	37.33	127.95	148.6
Ulleungdo	115	37.5	130.92	222.8
Suwon	119	37.27	126.98	34.1
Chungju	127	36.97	127.95	115.1
Seosan	129	36.78	126.5	28.9
Uljin	130	36.98	129.42	50.0
Cheongju	131	36.63	127.43	57.2
Daejeon	133	36.37	127.37	68.9
Chupungnyeong	135	36.22	127.98	224.7
Pohang	138	36.03	129.38	2.3
Gunsan	140	36	126.75	23.2
Daegu	143	35.88	128.62	64.1
Jeonju	146	35.82	127.15	53.4
Ulsan	152	35.55	129.32	34.6
Gwangju	156	35.17	126.88	72.4
Busan	159	35.1	129.03	69.6
Tongyeong	162	34.85	128.43	32.7
Mokpo	165	34.82	126.38	38.0
Yeosu	168	34.73	127.73	64.6
Wando	170	34.38	126.7	35.2
Jeju	184	33.5	126.32	20.4
Seogwipo	189	33.23	126.55	49.0
Jinju	192	35.15	128.03	30.2
Ganghwa	201	37.7	126.45	47.0
Yangpyeong	202	37.48	127.5	48.0
Icheon	203	37.27	127.48	78.0
Inje	211	38.07	128.17	200.2
Hongcheon	212	37.68	127.88	140.9
Jecheon	221	37.15	128.18	263.6
Boeun	226	36.48	127.73	175.0
Cheonan	232	36.77	127.12	21.3
Boryeong	235	36.33	126.55	15.5
Buyeo	236	36.27	126.92	11.3
Geumsan	238	36.1	127.48	170.4
Buan	243	35.72	126.7	12.0
Imsil	244	35.6	127.28	247.9
Jeongeup	245	35.55	126.87	44.6
Namwon	247	35.4	127.33	90.3
Jangheung	260	34.68	126.92	45.0
Haenam	261	34.55	126.57	13.0
Goheung	262	34.62	127.28	53.1
Yeongju	272	36.87	128.52	210.8
Mungyeong	273	36.62	128.15	170.6
Yeongdeok	277	36.53	129.42	42.1
Uiseong	278	36.35	128.68	81.8
Gumi	279	36.12	128.32	48.9
Yeongcheon	281	35.97	128.95	93.6
Geochang	284	35.67	127.9	226.0
Hapcheon	285	35.55	128.17	33.1
Miryang	288	35.48	128.75	11.2
Sancheong	289	35.4	127.87	138.1
Geoje	294	34.88	128.6	46.3
Namhae	295	34.82	127.93	45.0

2.1.2 전지구 자료

여름철 동아시아 지역의 대규모 순환장을 분석하기 위해 위도-경도 2.5° 간격의 월 평균 NCEP/DOE 재분석 자료(Kanamitsu *et al.*, 2002)를 사용하였으며, SST의 분석을 위해서는 위도-경도 1.0° 간격의 Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST) version 3b (Smith *et al.*, 2008) 자료를 사용하였다. 이 자료들의 기간은 모두 34년(1979~2012년)으로 한반도 기온 자료와 동일하다.

2.2 전지구 기후모델 계절예측 자료

전지구 기후모델의 한반도 하계 기온 경년 변동에 관한 예측성을 평가하기 위해 APCC MME 계절예측 자료를 사용하였다. APCC MME 계절예측 시스템은 설립 초기 APEC 9개 회원국, 18개 기관으로부터 기후모델 예측자료를 제공받았으나, 참여 기관의 인적·물적 자원의 변화로 최근에는 10개국, 16개 기관이 참여하고 있다. 또한 2007년 하반기부터 매달 제공하던 3개월 계절예측자료의 선행시간을 2013년 9월부터 6개월로 확대 운영함으로써 자연재해 저감대책 수립, 농산물 생산량 조절, 수자원 확보 및 관리 등 각 분야의 중·장기계획 수립을 위한 활용성을 제고하였고, 이를 통해 APEC 회원국의 기후예측자료 활용도를 높이고, 아·태 지역에서 APCC의 선도적·차별적 역할을 강화하였다. APCC MME 계절예측 시스템에 참여하는 기후모델은 주로 미국형 모델이거나 혹은 미국형 모델에서 개선·개발된 것인 바, 다양한 전지구모델을 활용한 APCC MME 계절예측 시스템 멤버의 다변화를 위해 2014년 하반기부터 이탈리아 Euro-Mediterranean Centre on Climate Change의 전지구 기후모델이 추가적으로 활용되고 있다.

APCC MME 계절예측 시스템에서 사용 중인 MME 기법에는 다수의 전지구모델 자료를 단순 평균하는 Simple Composite Method, 다중 회귀분석으로 도출한 계수에 경험치를 반영한 Multiple Regression Method (Yun *et al.*, 2003), 잔차오류를 최소화하기 위해 경험직교 함수로 걸러진 데이터에 회귀분석을 적용한 Synthetic Super Ensemble Method (Yun *et al.*, 2005), 순차적 패턴 투영 기법에 근거하여 개별 모델 결과를 보정하는 Step-wise Projection Method (Kug *et al.*, 2008), 그리고 기후값들의 확률밀도함수에 대한 예측 확률밀도함수의 위치에 근거하여 수행하는 MME 확률 계절예측(Min *et al.*, 2009) 등이 있다. 본 연구에서는 대기과 해양 사이의 상호 작용이 모델 안에서 제약 없이 구현되는 6개 CGCM(Table 2)의

26년(1983~2008년) 계절예측 자료를 위도-경도 2.5° 간격으로 재격자화 한 후, 이해하기 쉽고 개별모델에 비해 예측성이 뛰어난 Simple Composite Method를 적용하여 얻은 MME 결과를 사용하였다.

Table 2. Brief description of model configuration for 6 CGCMs used in this study.

Institute	Model	AGCM	Resolution	OGCM	Resolution	Ens. Member
MSC	CANCM3	AGCM3	T63L31	OGCM4	0.94°x1.41°, L40	10
MSC	CANCM4	AGCM4	T63L31	OGCM4	0.94°x1.41°, L40	10
NCEP	CFSv2	GFS	T126L64	MOM4	0.25~0.5, L40	20
NASA	GMAO	GEOS-5	288x181L72	MOM4	720x410 L40	9
PNU	PNU	CCM3	T42L18	MOM3	0.7~2.8, L29	10
BoM	POAMA	BAM3.0	T47L17	ACON2	0.5°~2°, L25	22

3. 결과

3.1 우리나라의 하계 기온

3.1.1 우리나라 하계 기온의 기후학적 특성

장기간에 걸쳐 평균된 기후학적 기온은 위도가 증가할수록 감소하나 국지적으로는 지형적 영향(대륙과 해양의 분포 및 산악 분포의 영향)을 받는다. 따라서 바다로 둘러싸인 반도이자 비교적 높은 산맥이 발달한 우리나라 하계 기온의 기후학적 분포에는 이 두 가지 요소가 복합적으로 반영된다. Figure 2는 ASOS 관측자료로부터 얻은 기후 평균된 여름철(Figure 2a), 6월(Figure 2b), 7월(Figure 2c), 그리고 8월(Figure 2d) 기온 분포이다. 먼저 여름철 평균 기온을 살펴보면 전국적으로 18~25°C의 분포를 보이는 가운데 전반적으로 제주도 및 남부 지방의 기온이 높고 중부지방으로 갈수록 기온이 낮아지며 태백산맥과 소백산맥을 따라 상대적으로 기온이 낮은 지역이 위치한다. 국지적으로는 소백산맥 남쪽에 위치한 대구의 기온이 25.0°C로 가장 높고, 소백산맥 서쪽의 전주와 광주 등이 그 뒤를 따르며, 기온이 가장 낮은 곳은 강원도의 대관령으로 17.9°C이다. 바다에 인접한 남부 해안 지방의 기온이 해륙풍의 영향으로 그 보다 북쪽에 위치한 남부 내륙에 비해 높지 않으며, 서울은 그 주변보다 기온

이 높아 선행 연구(허인혜와 권원태, 2007)에서 지적한 것처럼 대도시의 열섬 (heat island) 효과가 적지 않은 것으로 분석되었다.

여름철 평균 기온의 공간 분포 특성은 여름철 월별 평균 기온의 공간 분포에서도 거의 유사하게 나타난다. 다만 6월 평균기온은 15.7~22.8°C 범위에서 대구의 기온이 22.8°C로 가장 높고 강원도 대관령의 기온이 15.7°C로 가장 낮으며, 7월 평균기온은 19.1~25.8°C 범위에서 대구, 전라북도 전주, 제주특별자치도 제주의 기온이 25.8°C로 가장 높고 강원도 대관령의 기온이 19.1°C로 가장 낮다. 한편 8월 평균기온은 19.1~27.1°C의 분포를 보이며, 기온이 가장 높은 곳은 제주특별자치도의 서귀포로 27.1°C이며, 기온이 가장 낮은 곳은 강원도의 대관령으로 19.1°C이다.

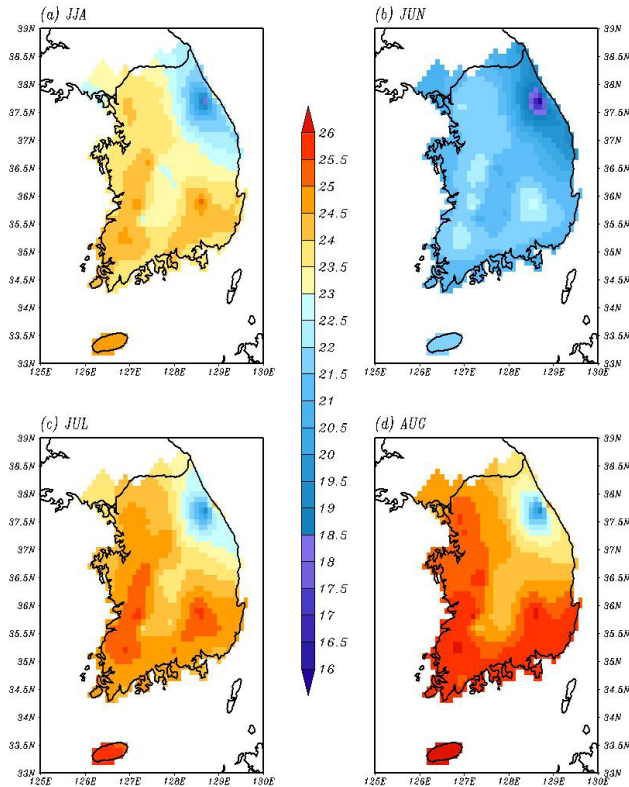


Figure 2. Climatological mean temperature in South Korea for (a) JJA, (b) June, (c) July, and (d) August.

3.1.2 우리나라 하계 기온의 경년 변동성

우리나라 전역에 걸쳐 평균된 하계 기온은 기후 평균 값인 23.5°C 을 기준으로 뚜렷한 경년 변동성(interannual variability)을 보인다(Figure 3). 예를 들어 1980, 1993, 그리고 2003년 등은 평년과 비교하여 기온이 1°C 이상 낮았으며, 특히 1994년은 전년도인 1993년의 평균 기온이 평년에 비해 2°C 정도 현저하게 낮았음에도 불구하고 오히려 2°C 정도의 기록적인 기온 상승이 관측되었다. 이러한 하계 평균 기온의 경년 변화는 연평균 기온의 경년 변화에 일률적으로 반영되지는 않아 관측 이래 연평균 기온이 가장 높았던 1998년은 여름철 평균 기온이 평년에 비해 하강하였고, 연평균 기온이 낮았던 2005년에는 오히려 상승하였다. 이와 유사하게 하계 기온의 경년 변화에 미치는 월별 기온 경년 변화의 영향도, 비록 월별 경년 변화가 서로 간에 대체로 비슷할지라도, 일률적으로 나타나지 않았다.

Figure 3에 도시한 하계 기온의 시계열(검은 실선)은 90%의 유의수준을 통과하는 기온 상승 추세($0.77^{\circ}\text{C}/34\text{-year}$)를 보였다. 여기서 기온의 추세는 비모수 Mann-Kendal 방법(Kendall, 1955)과 선형추세검증(linear trend test)을 이용하여 추정하였다. 이에 비교하여 Figure 3에 함께 도시한 월별 기온의 시계열은 하계 기온 시계열과 비슷한 추세(6월, 7월, 8월에 각각 $0.68^{\circ}\text{C}/34\text{-year}$, $0.73^{\circ}\text{C}/34\text{-year}$, $0.88^{\circ}\text{C}/34\text{-year}$)를 보였으나, 90%의 유의수준을 통과하는 통계적으로 유의한 추세는 오직 6월 기온의 시계열에서만 나타났다. 최근 정일웅 등(2012)은 1973~2007년 기간 동안 남한 60개 지점에서 관측된 기온 자료를 분석하여 7월의 온난화 추세가 크게 약화되는 모습을 보고하였다. 특히 이 기간 동안 7월의 일최고기온은 약한 하강 추세를 나타내어 상승 추세를 갖는 다른 달들과 차별된 변화의 특징을 보였는데, 그 원인으로 온량의 증가를 제시하였다. 다만 북반구 중위도의 다른 지역과 비교한 결과, 7월 온난화 경향의 약화는 광역적 현상이 아니라 우리나라 지역만의 독특한 변화인바, 우리나라의 7월과 8월 기온 추세에 관한 보다 다각적인 연구가 필요하다.

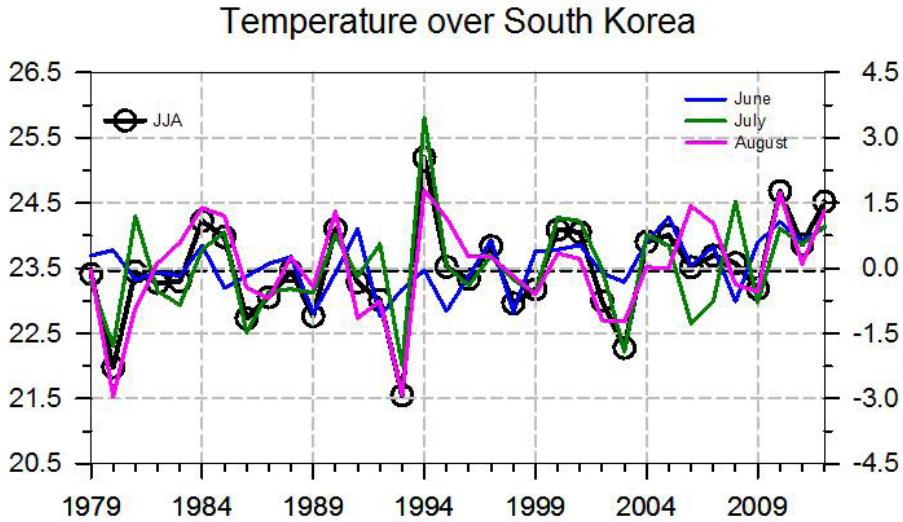


Figure 3. Interannual temperature variability in South Korea for JJA (black curve with hollow circle), June (blue), July (green), and August (pink). Time series of monthly mean temperatures are plotted using climatological anomaly with scales on the right. Units are °C.

우리나라 하계 기온의 경년 변동을 대표하는 시공간 구조를 추출하기 위해 ASOS 기온 자료에 경험직교함수(Empirical Orthogonal Function, EOF) 분석을 적용하고 얻은 첫째 모드와 둘째 모드를 Figure 4와 Figure 5에 각각 도시하였다. 첫 번째 모드의 공간분포(Figure 4a)는 태백산맥과 소백산맥을 경계로 동쪽에 변동성의 극대값을 그리고 서쪽에 변동성의 극소값을 보이는데, 이는 하계 기온의 기후학적 분포가 전반적으로 남북으로 배치되는 Figure 2와 사뭇 다른 형태이다. 그러나 첫째 모드가 하계 기온 경년 변동성의 거의 대부분(약 89%)를 설명하는 가운데 우리나라 전역에서 공간 변동이 모두 같은 부호로 나타나고(Figure 4a), 그 시계열(Figure 4b의 검은 실선)이 우리나라 하계 기온 편차의 시계열(Figure 4b의 붉은 실선)과 거의 완전히 일치하고 있는 점 등으로 미루어 볼 때, 우리나라 하계 기온의 경년 변동에 관한 연구를 위해서라면 굳이 EOF의 첫째 모드를 사용할 필요는 없으며, 한반도에서 영역 평균된 하계 기온의 시계열(Figure 3의 검은 실선)을 직접 사용해도 무방한 것으로 판단할 수 있다.

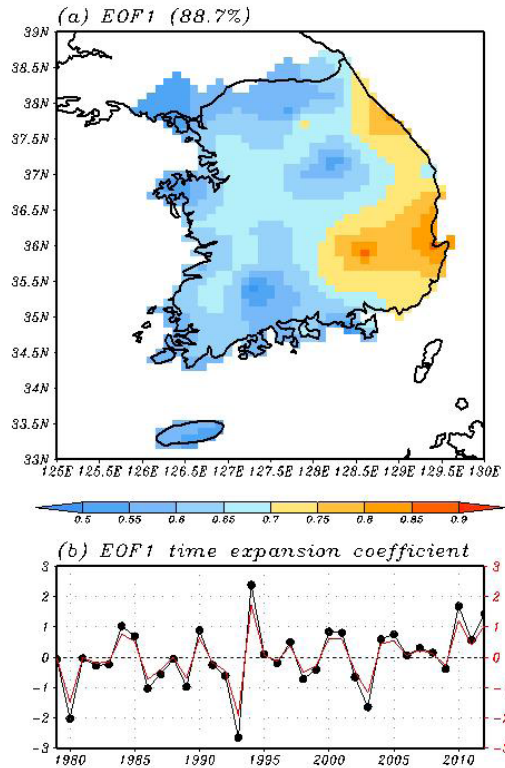


Figure 4. The first leading EOF mode of summertime temperature variability in South Korea. (a) spatial pattern and (b) corresponding time series of principal component. The number in parentheses refers to the fractional variability explained by the 1st EOF mode. Note that sign of spatial variability is uniform over the entire domain. Time series of summertime temperature anomaly in South Korea are also shown in (b) with scales on the right (red curve).

EOF 분석에서 얻은 두 번째 모드를 Figure 4와 동일한 형식으로 Figure 5에 도시하였다. 이 모드가 설명하는 하계 기온 변동성은 매우 미미하며(약 3%) 첫 번째 모드와 구별되어 남쪽과 북쪽에서 서로 다른 부호를 갖는 양극 패턴(Figure 5a)이, 비록 관측기간이 충분히 길지 않아 단정지을 수는 없지만, 십년에서 수십년에 걸쳐 반복되는 형태로 나타났다(Figure 5b). 따라서 EOF의 두 번째 모드는 동아시아 하계 몬순의 장주기(low-frequency) 변동성과 연관된 것으로 추정할 수 있다(Kwon *et al.*, 2005).

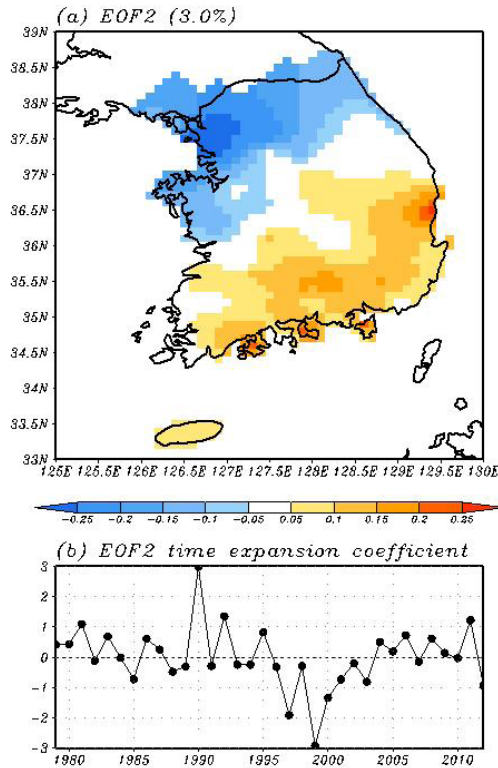


Figure 5. Same as Figure 4 except for the second leading EOF mode.

이와 같은 하계 기온 경년 변동의 특성은 월별 기온의 경년 변동에서도 거의 유사하게 나타난다(Figure 6). 즉, EOF의 첫째 모드가 월별 기온 경년 변동성의 거의 대부분(6월, 7월, 8월에 각각 약 73%, 90%, 그리고 93%)을 설명하며, 그 공간 변동은 우리나라 전역에서 모두 같은 부호로 보이는 가운데 주요 산맥을 경계로 극대값과 극소값이 위치하고, 그 시계열(Figure 6의 검은 실선)은 월별 기온 편차의 시계열과 거의 완전히 일치하고 있다(Figure 6의 붉은 실선). 본 연구에서는 이러한 공통점을 근거로, 비록 월별 평균 기온의 경년 변화(즉 시계열)가 서로 간에 그리고 여름철 평균 기온의 경년 변화와 완전히 일치하지는 않지만, 우리나라에서 여름철에 평균된 하계 기온의 경년 변동성을 중심으로 연구를 수행하였다.

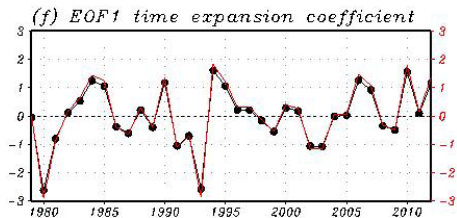
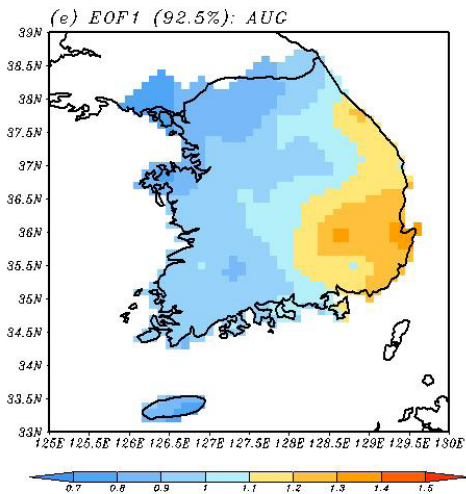
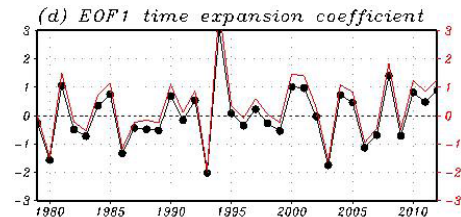
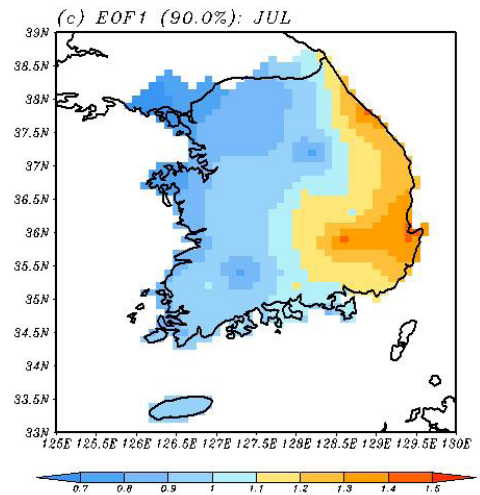
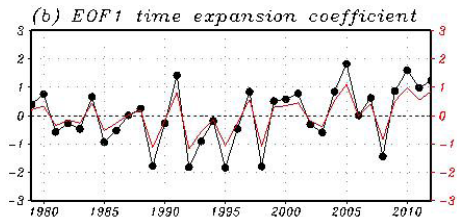
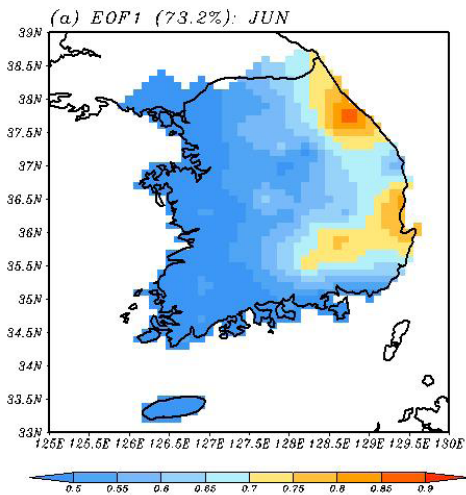


Figure 6. The first leading EOF mode of monthly temperature variability in South Korea. (a) spatial pattern and (b) corresponding time series of principal component for June, (c)-(d) July, and (e)-(f) August. The number in parentheses refers to the fractional variability explained by the 1st mode. Note that sign of spatial variability is uniform over the entire domain. Time series of monthly temperature anomaly in South Korea are also shown in red curve with scales on the right.

3.2 우리나라 하계 기온과 동아시아 대규모 순환

여름철 동아시아 지역의 대규모 순환은 열대 몬순 기류에 연계되어 남중국해에서 불어 오는 대기 하층의 남서풍, 대기 상층의 아열대 제트 기류, 그리고 NPSH로 대표되는데, 이 현상들은 동아시아 하계 강수의 경년 변동성을 결정하는 중요한 인자이기도 하다. 예를 들어 대기 하층의 남서풍에 동반된 대규모 수증기 수송은 동아시아 몬순 강수의 주요 수증기 공급원이며, 대기 상층의 아열대 제트 축 부근에서 발생하는 발산은 간접 순환을 유발하여 제트의 출구(입구) 우측(좌측)에서 전선의 불안정성을 증가시킨다. 또한 NPSH의 위치와 강도 및 그 서쪽 경계에서 형성되는 WNPSH의 변동성은 동아시아 하계 몬순 강수대의 북향 이동을 조절한다. 그런데 최근 연구(Wang *et al.*, 2013)에 의하면 여름철 동아시아 지역의 대규모 순환 가운데 WNPSH의 경년 변동성이 동아시아 하계 강수 경년 변동성의 60% 이상을 설명할 수 있는 것으로 밝혀졌다.

이와 같은 선행 연구는 강수와 통계적으로 음의 상관을 갖는 기온의 경년 변동성(예를 들어 정일웅 등, 2012) 역시 필연적으로 대규모 순환장의 경년 변동성과 결부되며, 특히 WNPSH 경년 변동성이 매우 중요한 역할을 할 것임을 시사한다. 이러한 추론에 따라 우리나라 하계 기온과 여름철 동아시아 지역 순환장의 연관성을 조사하기 위해 하계 기온의 시계열과 850hPa 지위 고도의 상관 계수를 동아시아 영역에 대해 계산하고 Figure 7에 도시하였다(채색 음영). 그 결과 대규모 순환장의 경년 변화는 한반도 하계 기온의 경년 변화와 두 개의 지역에서 뚜렷한 상관을 보였는데, 한 지역은 양의 상관을 보이며 우리나라, 동해, 그리고 일본을 포함하는 중위도에 위치하였으며(Figure 7의 녹색 사각형), 다른 한 지역은 음의 상관을 보이며 북서태평양에 위치하였다(Figure 7의 푸른색 사각형). 이 두 지역은 공통적으로 대규모 순환장의 경년 변동성의 공간변화가 매우 크며(검은 등치선), 특히 북서태평양에 나타난 음의 상관 영역은 기후학적 NPSH의 서쪽 경계(붉은 등치선)에 위치하여 WNPSH 경년 변화의 영향을 반영하는 것으로 분석되었다.

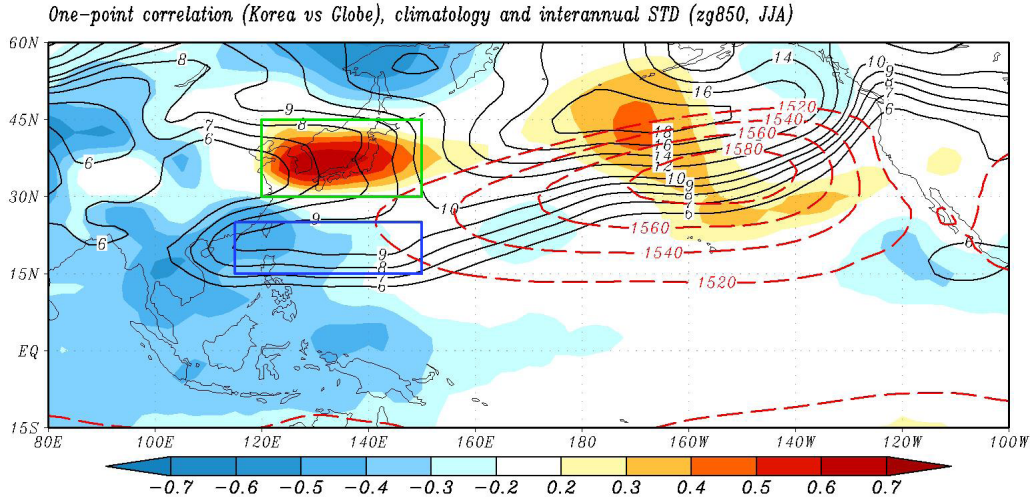


Figure 7. Climatological mean (red contour) and interannual standard deviation (black contour) of JJA geopotential height (unit: m) at 850hPa in East Asia. Color shadings depict correlation coefficient between area averaged JJA temperature in South Korea and JJA geopotential height at 850hPa. Green (30~45°N, 120~150°E) and blue (15~25°N, 110~140°E) boxes indicate the respective regions to define the Korea-Japan index (KJI) and the western North Pacific subtropical high index (WNPSHI). Note that the region defined for WNPSHI is slightly different from that used in Wang et al. (2013), which is (15~25°N, 115~150°E).

한반도 하계 기온과 대규모 순환장 경년 변화 사이의 연관성을 보다 정량적으로 파악하기 위해 상관계수가 상대적으로 뚜렷한 두 지역에서 850hPa 지위고도의 영역 평균 시계열을 구하여 한반도 하계 기온의 시계열과 비교하였다(Figure 8). 편의상 푸른색 사각형 (15~25°N, 110~140°E)과 녹색 사각형 (30~45°N, 120~150°E) 영역에서 면적 평균된 850hPa 지위고도를 각각 WNPSH Index (WNPSHI)와 Korea-Japan Index (KJI)로 지칭한다. 그 결과 WNPSHI는 한반도 하계 기온과 대략 -0.4의 음의 상관을 보였으며 KJI는 대략 0.5의 양의 상관을 보여 두 지수가 독립적으로 설명하는 한반도 하계 기온의 변동성은 25%를 넘지 않는 것으로 나타났다. 이와 대조적으로 두 지수를 함께 설명 변수(explanatory variable)로 삼아 식 (4)와 같은 다변수 회귀식(multivariate regression)을 통해 시계열을 재구성 할 경우 한반도 하계 기온의 경년 변동성이 약 44%까지 설명될 수 있었다(Figure 9).

$$\text{재구성된 한반도 하계 기온} = 0.058383 \cdot \text{KJI} - 0.03393 \cdot \text{WNPSHI} - 12.1894 \quad (4)$$

이 때 다변수 회귀식을 구성하는 두 설명 변수인 WNPSHI와 KJI 사이의 상관 계수가 0.1에 불과해 설명 변수들 간에 상관성이 높을 경우 발생하는 공선성(collinearity)이 다변수 회귀식의 활용성을 저해하지는 않았다.

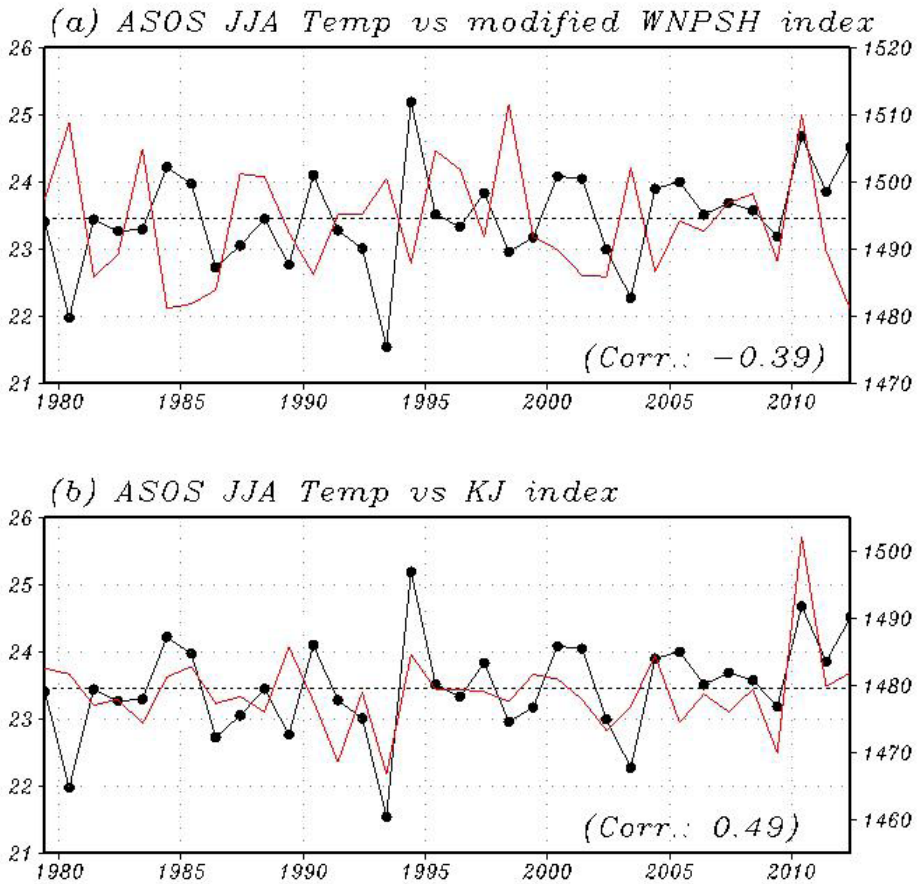


Figure 8. Time series of summertime temperature in South Korea (black curve with solid circle with scales on the left) together with the time series of (a) WNPSHI and (b) KJI with scales on the right (unit: m). The number in parentheses refers to the correlation coefficient between the two time series.

ASOS JJA Temp vs reconstructed JJA Temp

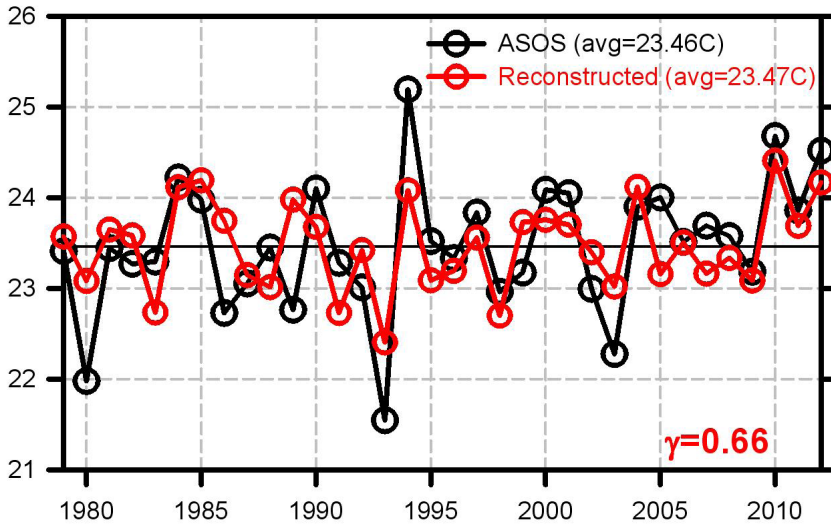


Figure 9. Time series of summertime temperature in South Korea (black curve with hollow circle) together with its reconstructed time series derived from a multivariate regression using WNPSHI and KJI (red curve with hollow circle). The number in bottom-right corner refers to the correlation coefficient between the two time series.

3.3 열대-아열대 원격상관을 이용한 우리나라 하계 기온 예측

한반도 하계 기온의 경년 변화가 WNPSHI와 KJI의 복합적 활용을 통해 합리적으로 재구성 될 수 있으므로, 만약 이 두 지수가 적절한 예측 인자를 통해 적절한 선행 시간에서 적절한 수준으로 예측 가능하다면, WNPSHI와 KJI의 예측 인자를 이용하여 한반도 하계 기온의 예측을 시도할 수 있을 것이다. 특히 열대와 아열대 사이의 원격상관을 반영하는 대기-해양 상호 작용 패턴(즉 대기 순환장 변동과 SST 변동이 결합된 패턴)이 존재한다면, 열대 지역의 SST를 예측인자로 선정할 수 있으며 동시에 대기-해양 상호 작용 패턴을 토대로 그 선정 이유에 대한 물리적 설명이 가능하게 된다. 예측인자로서 SST가 갖는 또 다른 실용적 장점은 GCM을 이용한 계절예측의 예측성을 제고할 수 있다는 것인데, 이는 GCM의 지속적인 개선에도 불구하고 동아시아 하계 몬순의 평균 기후 및 아노말리의 예측성이 여전히 매우 낮은 반면(Kang and Shukla, 2006; Wang *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2010), 열대 및 아열대 태평

양 SST의 모사는 상대적으로 매우 높은 예측성을 보이고 있기 때문이다(Lee *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2011).

KJI와 WNPSHI가 원격상관을 통해 저위도 SST 및 대기 순환장과 연계 되어 있는지, 그리고 물리적으로 설명 가능한 대기-해양 상호 작용 패턴이 존재하는지 조사하기 위해 두 지수를 기준으로 1~3개월의 선행 시간을 갖는 SST(채색 음영)와 850hPa 바람(벡터)의 회귀 패턴(regressed pattern)을 계산하고 그 결과를 Figure 10에 도시하였다. 선행 연구에 의하면 대기-해양 상호 작용이 뚜렷하게 감지되는 여름철 열대-아열대 원격 상관은 크게 열대 인도-북서태평양에서 WNPSH 편차에 의해 촉발되는 바람-증발-SST 되먹임(wind-evaporation-SST feedback, 이하 WES 되먹임으로 표기)과 적도 태평양에서 라니냐 발달기(혹은 엘니뇨 쇠퇴기)의 SST-바람 결합 모드이다(Wang *et al.*, 2013). 먼저 WES 되먹임을 간단히 요약하면 WNPSH 편차가 발생하는 경우(즉, WNPSH가 강화되는 경우) 그 남동쪽의 동풍 편차는 무역풍을 강화시켜 증발을 촉진함으로써 SST를 감소시키는데, SST가 하강하면 강수가 감소하면서 하강류가 동반된 로스비 파동이 생성되어 결국 WNPSH 편차가 더욱 강화된다. 다른 한편 WNPSH 편차 남서쪽의 동풍 편차는 몬순 기류(남서풍)를 약화시켜 증발을 저해함으로써 양의 SST 아노말리를 유도하고 이는 다시 WNPSH 편차를 지속시킨다(Yang *et al.*, 2007; Wu *et al.*, 2009; Xie *et al.*, 2009; Chowdary *et al.*, 2010). 라니냐 발달기의 SST-바람 결합 모드는 라니냐가 발달하면서 강화되는 음의 SST 아노말리 및 이와 동반된 동풍 아노말리를 말한다.

이와 같은 선행 연구를 참조하여 KJI에 회귀된 SST와 하층 바람 분포를 살펴보면 5월에 적도 서태평양(동태평양)에 뚜렷한 양(음)의 SST 아노말리와 함께 적도 태평양에 걸쳐 동풍 아노말리가 나타나는데 이는 라니냐 발달기 혹은 엘니뇨 쇠퇴기의 전형적 형태이다(Figure 10c). 한편 WNPSHI에 회귀된 SST와 하층 바람 분포는 3월에서 5월에 걸쳐 적도 서태평양(동태평양)에 음(양)의 아노말리와 적도 태평양에 걸쳐 서풍 아노말리를 보여 엘니뇨 발달기와 유사한 특징이 확인되었으며(Figures 10d-10f), 추가적으로 4월에 북서태평양에서 고기압성 순환이 형성되어 그 남쪽에서는 동풍 아노말리가 주풍(prevaling wind)인 무역풍을 강화시켜 증발을 촉진함으로써 SST의 하강을, 그 북쪽에서는 서풍 아노말리가 쿠로시오 난류의 수송을 강화함으로써 SST의 상승을 초래하는 WES 패턴의 대기-해양 결합 모드가 발견되었다(Figure 10e).

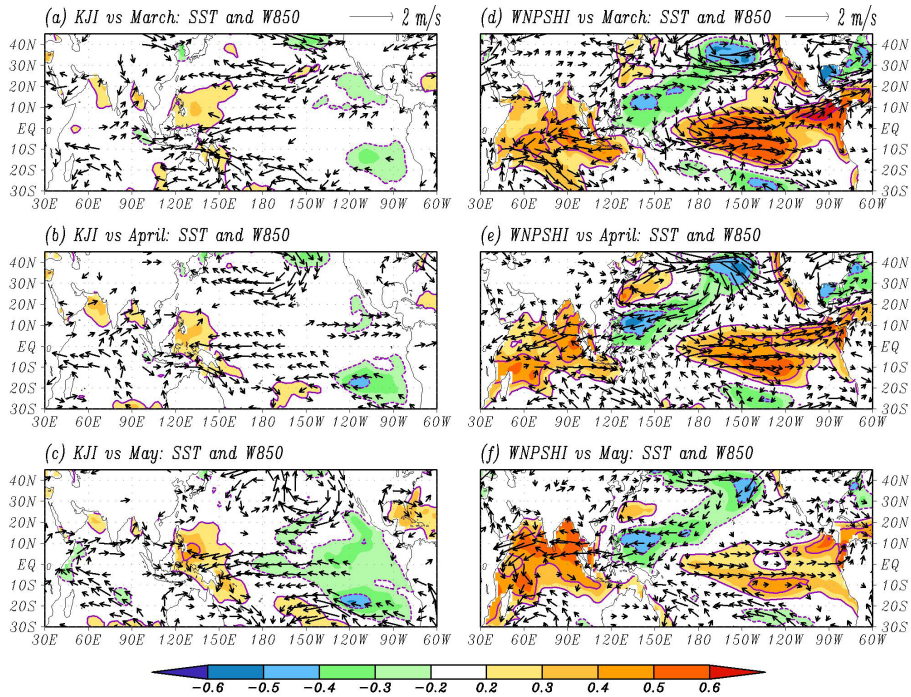


Figure 10. Regressed patterns of SST (shading) and 850hPa winds (vector) with reference to KJI (left) and WNPSHI (right) during March (top), April (middle), and May (bottom). Wind vectors with wind speed less than 0.3 and 0.2 m/s are omitted in the left and right panels, respectively.

이 결과는 중위도 및 아열대 대규모 순환장의 경년 변화가 대기-해양 상호 작용을 통해 역학적으로 결부된 열대 태평양의 SST 및 하층 바람의 경년 변화와 밀접하게 연결되어 있으며, 따라서 적절한 SST 예측 인자를 선택한다면 KJI와 WNPSHI의 경년 변화, 그리고 더 나아가 한반도 하계 기온의 경년 변화를 합리적인 수준에서 예측할 가능성이 있음을 의미한다. Figure 10에서 드러난 대기-해양 상호 작용과 원격상관을 고려하여 WNPSHI의 예측 인자를(15S~5N, 190~230E; Figure 11a)에서 영역 평균된 SST의 5월과 3월의 차이 및 4월에 북서태평양(Western North Pacific, WNP)의 (20~30N, 120~140E; Figure 11b)와 (10~20N, 120~140E; Figure 11b)에서 영역 평균된 SST의 차이로 선정하고 전자를 ENSO_{dev}로 그리고 후자를 WNP_{APR}로 지칭하였는데, 이는 전자가 엘니뇨 발달기의 해양-

대기 결합 모드를 그리고 후자가 WES 모드를 각각 나타내기 때문이다. 다음 KJI의 예측 인자는 라니냐 발달기 혹은 엘니뇨 쇠퇴기의 전형적 형태를 보인 5월의 영역 평균(0~10N, 120~140E; Figure 12) SST로 선택하고 ENSO_{dec_MAY}라고 지칭하였다. 다만 KJI의 경우 5월에 동태평양 냉수 구역에 뚜렷한 음의 SST 아노말리가 존재하는데, 비록 이와 동반된 하층 바람 아노말리의 물리적 해석이 명확하지 않더라도, 이를 반영하기 위해 (25S~10S, 240~280E; Figure 12)에서 영역 평균된 SST를 예측 인자로 추가하고 CT_{MAY}라 명명하였다.

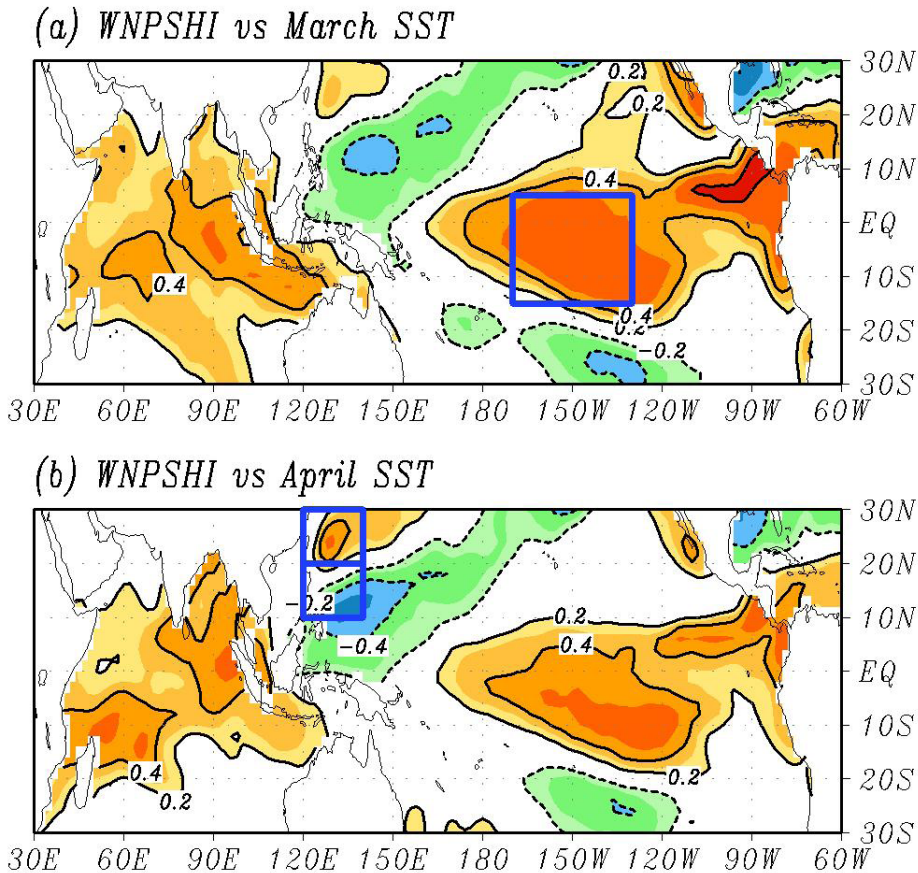


Figure 11. Regions of SST predictors for WNPSHI. (a) ENSO_{dev}, (b) WNP_{APR}.

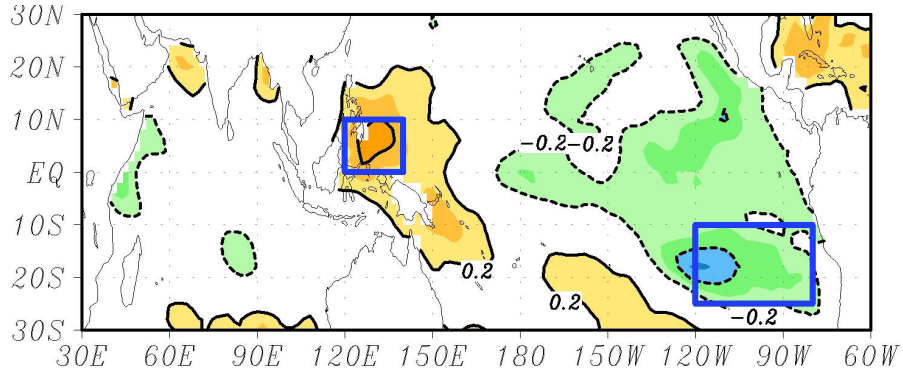


Figure 12. Regions of SST predictors (ENSO_{dec_MAY} and CT_{MAY}) for KJI.

본 연구에서 SST 예측 인자를 정의하기 위해 선택한 영역은 ENSO_{dev}을 제외하고는 이와 비슷한 연구를 수행한 Wang *et al.* (2013)과 매우 상이한데, 이는 다음 두 가지 이유에 기인한다. 첫째, Wang *et al.* (2013)은 여름철(6월~8월) 평균 지위고도에 EOF를 적용하여 얻은 첫째 모드와 둘째 모드의 시계열과 여름철 평균 하층 바람 및 SST 사이의 동시 상관(simultaneous correlation)을 분석하여 인도-북서태평양에서 WES 되먹임을 그리고 적도 태평양에서 엘니뇨와 연관된 해양-대기 결합 모드를 확인한 후, 1~3개월의 선행 시간을 갖는 SST 패턴이 인도-북서태평양에서 동시 상관 SST 패턴과 유사하게 나타난 점을 근거로 이 지역의 SST를 예측 인자로 사용하였다. 그러나 이러한 논의는 1~3개월의 선행 시간을 갖는 하층 바람 패턴이 인도-북서태평양에서 동시 상관 하층 바람 패턴과 매우 다르며, 따라서 1~3개월의 선행 시간에서 대기-해양 상호 작용 역시 동시 상관에서 얻은 그것과 매우 다르다는 점을 간과한 것이다. 본 연구에서는 이러한 오류를 피하기 위해 대기-해양 상호 작용을(즉, 하층 바람과 SST 모두) 1~3개월의 선행 시간에서 분석한 후, WES 되먹임이 뚜렷한 북서태평양 지역에서 영역 평균된 SST를 예측 인자로 정의하였다. 둘째, 인도-북서태평양 지역에서 영역 평균된 SST는 관측의 경우 적도 태평양 SST와 상관성이 그리 높지 않아(Figure 13a) 두 지역에서 영역 평균된 SST를 모두 예측 인자로 사용해도 무방하나, 계절 예측 모델의 경우 상관성이 지나치게 높아 공선성 문제가 발생할 소지가 있다(Figure 13b). 이에 비교하여 본 연구에서 정의한 WNP_{APR}는 관측(그림을 보이진 않았음)과 계절예측 모델

(Figure 13c)을 막론하고 적도 태평양 SST와의 상관성이 비교적 낮아 적용성이 뛰어난 것으로 판명되었다.

지금까지 우리나라 하계 기온의 경년 변동을 예측하기 위해 1) 기온 경년 변화와 동아시아 대규모 순환장과의 연관성을 조사하고, 2) 대규모 순환장의 변동을 지수화한 후, 3) 이 지수들과 역학적으로 결합된 열대 지역의 예측 인자를 탐색하는 간접적인 방법을 사용하였다. 그러나 만약 우리나라 하계 기온의 경년 변화를 직접 설명할 수 있는 예측 인자가 열대 지역에 존재한다면, GCM을 이용한 계절예측의 예측성을 제고하는 동시에 보다 간편하게 한반도 하계 기온을 예측할 수 있을 것이다. 열대 SST를 이용하여 우리나라 하계 기온의 직접 예측이 가능한지 조사하기 위해 한반도 하계 기온의 시계열을 기준으로 SST(채색 음영)와 850hPa 바람(벡터)의 회귀 패턴을 구해 Figure 14에 도시하였다. 이를 살펴보면 5월에 적도 서태평양에 강한 양의 SST 아노말리가 나타난다. 그러나 적도 동태평양의 SST 아노말리는 찾을 수 없었으며, 적도 지역의 동풍 아노말리 역시 날짜 변경선의 서쪽에 제한되어 하층 바람과 SST 편차 사이에서 뚜렷한 결합 모드(혹은 대기-해양 상호 작용 모드)가 나타나지 않았다. 그럼에도 불구하고 적도 서태평양의 SST 아노말리 패턴이 KJI를 기준으로 얻은 회귀 패턴과 유사하므로, 우리나라 하계 기온의 직접 예측 인자로 KJI의 예측에 사용된 ENSO_{dec_MAY}을 선택하였다.

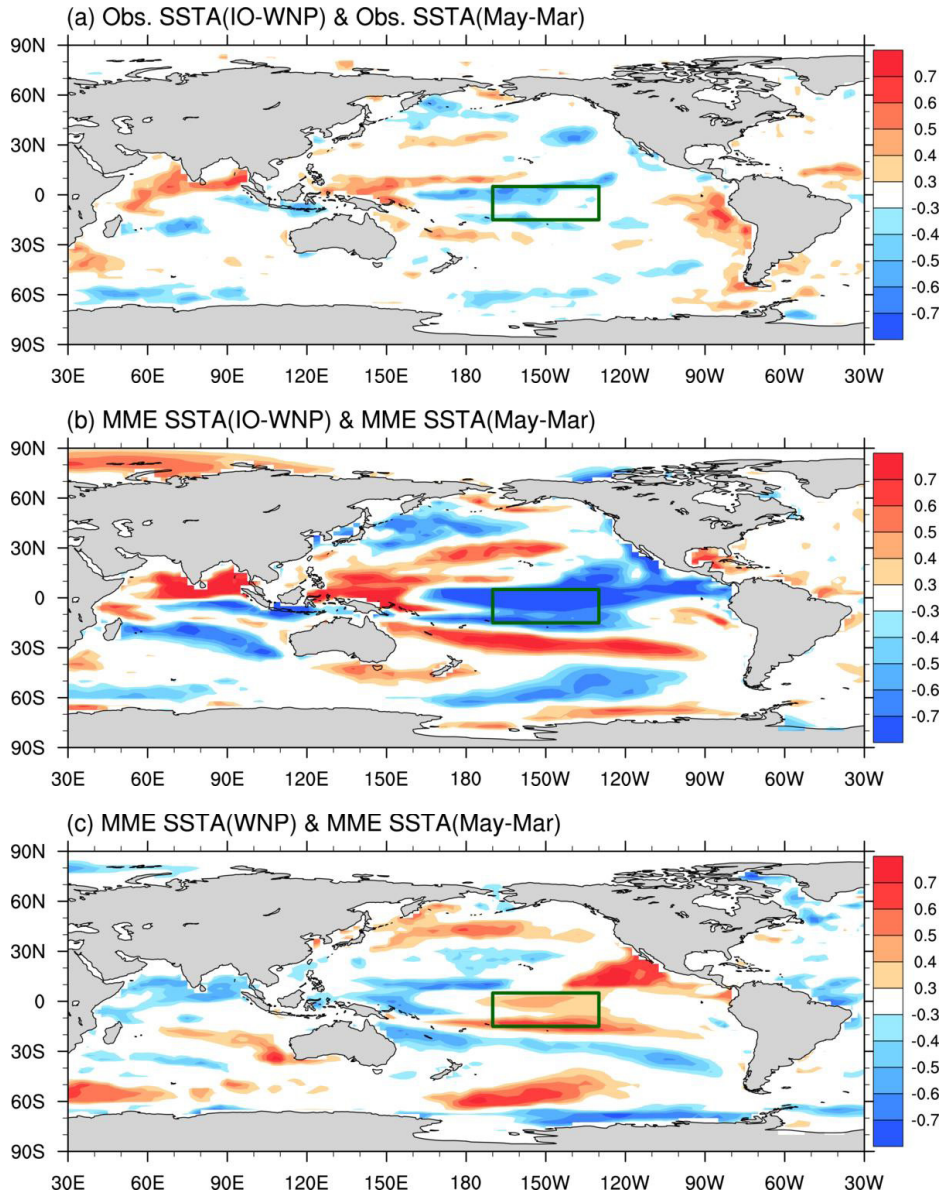


Figure 13. Correlation map between global SSTA with (a)-(b) IO-WNP index as defined in Wang et al. (2013) and (c) WNP_{APR} as defined in this study. The results shown in (a) are obtained using observations, while those in (b) and (c) are derived using APCC MME.

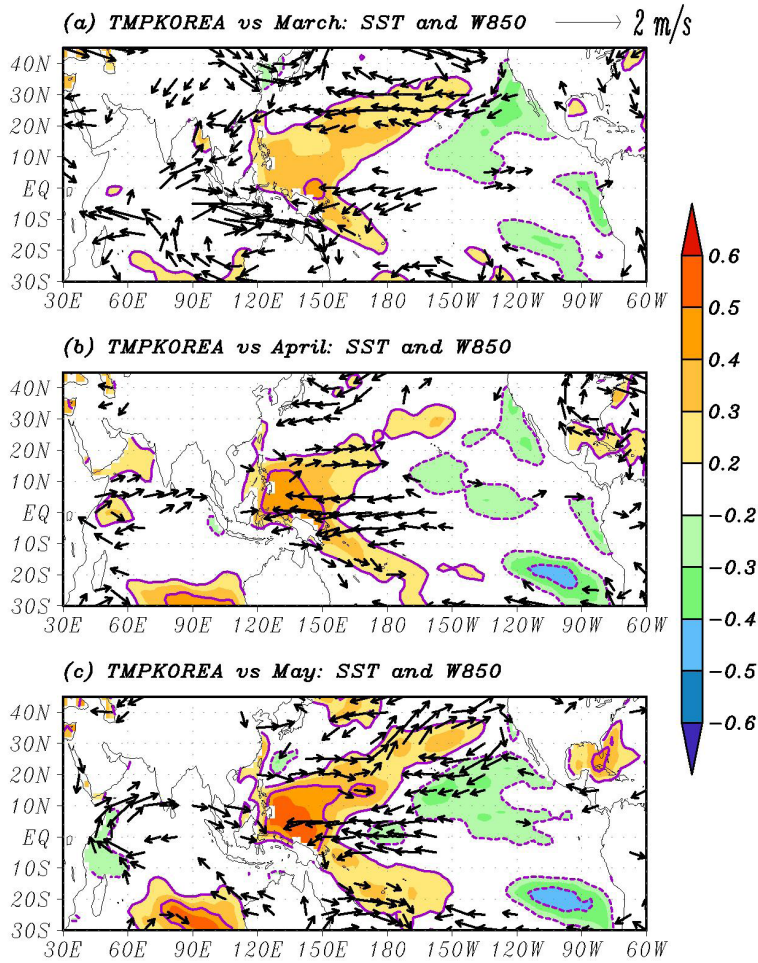


Figure 14. Regressed patterns of SST (shading) and 850hPa winds (vector) with reference to summertime temperature in South Korea during (a) March, (b) April, and (c) May. Wind vectors with wind speed less than 0.4 m/s are omitted.

한반도 하계 기온의 경년 변화가 WNPSHI의 예측 인자인 ENSO_{dev}와 WNP_{APR}, 그리고 KJI의 예측인자인 ENSO_{dec_MAY}와 CT_{MAY}를 이용하여 어느 정도 예측 가능한지 조사하기 위해 이 네 가지 SST 지수를 설명 변수로 활용하여 식 (5)와 같이 다변수 회귀식을 유도하고, 이 회귀식을 통해 재구성된 시계열(Figure 15의 붉은 실선)과 한반도 하계 기온(Figure 15의 검은 실선)의 상관성을 산정한 결과 0.57의 상관 계수를 얻었다.

$$\begin{aligned} \text{재구성된 한반도 하계 기온} = & 0.355266 * \text{ENSO}_{\text{dec_MAY}} - 0.12752 * \text{CT}_{\text{MAY}} \\ & + 0.038702 * \text{WNP}_{\text{APR}}, \quad + 0.116079 * \text{ENSO}_{\text{dev}} \quad (5) \end{aligned}$$

그런데 이 상관 계수는 직접 예측 인자로 선택된 $\text{ENSO}_{\text{dec_MAY}}$ 만의 시계열 (Figure 15의 푸른 실선)과 한반도 하계 기온 시계열 사이의 상관 계수인 0.53에 비해 그리 크지 않았다. 이러한 현상은 월별 기온 예측에서도 비슷하게 나타났는데, 다변수 회귀식으로 예측한 한반도 기온과 실제 관측된 한반도 기온 사이의 상관 계수는 6월, 7월 그리고 8월에 각각 0.37, 0.49, 0.50로 계산되었으며, $\text{ENSO}_{\text{dec_MAY}}$ 와 실제 관측된 한반도 기온의 월별 상관 계수는 이보다 조금씩 낮은 0.31, 0.43, 그리고 0.42를 보였다.

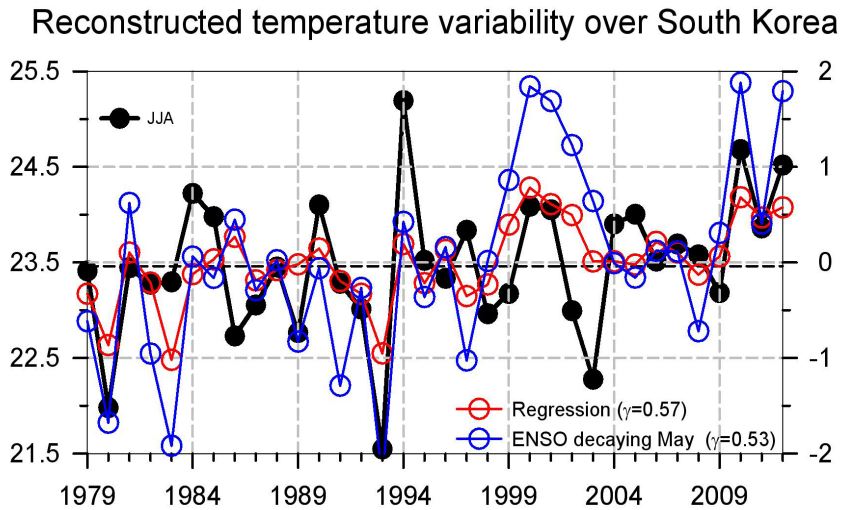


Figure 15. Time series of summertime temperature in South Korea (black curve with solid circle) along with its reconstructed time series (red curve with hollow circle) derived from a multivariate regression using the four SST predictors for WNPSHI and KJI. Also shown are the time series of $\text{ENSO}_{\text{dec_MAY}}$ (blue curve with hollow circle) with scales on the right. The numbers in bottom-right corner refer to the correlation coefficients between summertime temperature in South Korea and the other two time series.

3.4 APCC MME 예측 자료를 이용한 우리나라 하계 기온 예측

우리나라 하계 기온의 경년 변화를 예측함에 있어 ENSO_{dec_MAY}만을 사용한다 하더라도 네 가지 SST 지수를 이용한 다변수 회귀식과 비슷한 예측성을 얻는다면 구태여 복잡한 회귀식을 사용할 이유가 없다. 그러나 이 두 가지 경험 모델을 6개의 CGCM 계절예측 자료로 이루어진 MME에 적용할 경우 월별 예측성에서 상대적으로 뚜렷한 차이가 확인되었다. 먼저 다변수 회귀식을 적용하여 얻은 시계열과 관측된 기온 사이의 월별 상관 계수를 예보 선행 시간에 따라 살펴보면 특히 6월의 상관 계수는 전년도 11월에 예측된 경우를 제외하고는 0.5보다 크거나 비슷한 값을 보였다(Figure 16a). 이와 비교할 때 ENSO_{dec_MAY}만을 이용한 상관 계수는 같은 해 3월에 예측된 경우를 제외하면 대부분 0.4보다 크지 않았다(Figure 16b). 전반적으로 다변수 회귀식의 예측성이 ENSO_{dec_MAY}에 비해 현저하게 향상되지는 않았으나 대부분의 경우에서 ENSO_{dec_MAY}만을 이용한 예측보다 더 좋은 예측성을 보였다.

CGCM MME 계절예측에서 네 가지 SST 지수를 이용한 다변수 회귀식의 예측성이 ENSO_{dec_MAY}만을 이용한 예측성에 비해 개선된 이유를 파악하기 위해 CGCM MME와 관측에서 얻은 네 가지 SST 지수의 시계열 사이의 상관 계수를 예보 선행 시간에 따라 계산하여 Table 3에 제시하였다. 이에 따르면 ENSO_{dec_MAY}의 상관 계수는 선행 시간이 길어질수록 급격히 감소하나(같은 해 4월의 0.52에서 전해 11월의 0.06), ENSO_{dec_MAY}를 제외한 나머지 SST 지수들의 상관 계수는 예보 선행 시간에 무관하게 대체로 0.5보다 큰 값을 보여 선행 시간의 증가에 따른 예측성의 감소 경향이 두드러지지 않았다. 이 결과는 CGCM이 동태평양에 비해 서태평양에서 SST의 경년 변화를 현실적으로 재현하지 못한다는 것을 의미하는데, 그 원인은 서태평양 온수대(warm pool)에서 발생하는 적운 대류 및 이와 동반된 강수 과정이 충실히 모의되지 않아 대기-해양 상호작용의 현실성이 제한적으로 재현되기 때문인 것으로 추측된다.

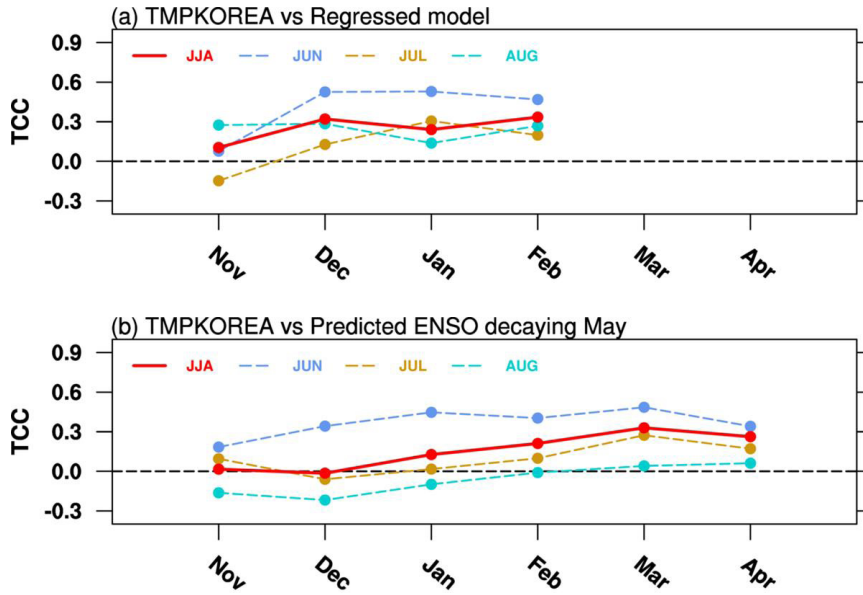


Figure 16. Correlation coefficient between summertime temperature in South Korea and (a) MME prediction reconstructed with a multivariate regression using the four SST predictors, (b) MME prediction of ENSO_{dec_MAY}. Abscissa denotes lead time with respect to May SST prediction.

Table 3. Correlation coefficient of the four SST predictors between MME and observation. Boldface indicates the correlation coefficients greater than 0.5.

			ENSO _{dec_MAY}	CT _{May}	WNP _{APR}	ENSO _{dev}
Issued month	Year (-1)	NOV	0.06	0.45	0.33	0.69
		DEC	0.18	0.59	0.53	0.77
	Year (0)	JAN	0.34	0.59	0.55	0.83
		FEB	0.42	0.67	0.62	0.85
		MAR	0.45			
		APR	0.52			

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 관측 자료를 토대로 우리나라 하계 기온의 경년 변화를 예측하는 경험적 모델을 개발하고 이를 CGCM MME 계절예측 자료에 적용하여 최대 6개월의 예보 선행 시간에서 한반도 하계 기온의 예측 가능성을 조사하였다. 이를 위해 먼저 우리나라 하계 기온과 여름철 동아시아 지역 순환장의 연관성을 분석하고 한반도 하계 기온의 경년 변화가 우리나라와 동해, 그리고 일본을 포함하는 중위도 지역 및 북서태평양에서 850hPa 지위 고도의 경년 변화와 매우 밀접하게 연관되어 있음을 밝혔다. 이를 토대로 한반도 하계 기온과 대규모 순환장 경년 변화 사이의 연관성을 정량적으로 파악하고자 두 지역에서 영역 평균된 850hPa 지위고도를 각각 Korea-Japan index (KJI)와 western North Pacific subtropical high index (WNPSHI)로 정의하고 KJI와 WNPSHI를 설명 변수로 이용한 회귀식을 통해 시계열을 재구성한 바, 한반도 하계 기온의 경년 변동성이 약 44%까지 설명되었다.

한반도 하계 기온의 경년 변화가 WNPSHI와 KJI의 복합적 활용을 통해 상당 부분 재구성될 수 있음에 착안하여 이 지수들과 역학적으로 결합된 열대 지역의 SST 예측 인자를 탐색하였다. 이는 열대와 아열대 사이의 원격상관을 반영하는 대기 순환장-SST 결합 패턴이 존재한다면 SST 예측 인자 선정에 관한 물리적 해석이 가능하기 때문이다. 이에 따라 두 지수를 기준으로 1~3개월의 선행 시간을 갖는 SST와 850hPa 바람의 회귀 패턴을 추출하고 WNPSHI의 예측 인자로 엘니뇨 발달기의 SST (ENSO_{dev})와 북서 태평양 SST (WNP_{APR}), 그리고 KJI의 예측 인자로 엘니뇨 쇠퇴기의 SST (ENSO_{dec_MAY})와 냉수대 SST (CT_{MAY})를 선택하였는데, 전자는 엘니뇨 발달기의 SST-바람 결합 모드를 후자는 바람-증발-SST 되먹임 모드를 각각 의미한다. 다른 한편 우리나라 하계 기온의 경년 변화를 직접 설명할 수 있는 예측 인자로는 비록 적절한 물리적 해석을 제시할 수 없지만 ENSO_{dec_MAY}가 적합한 것으로 조사되었다. 4가지 SST 예측 인자를 설명 변수로 활용하여 다변수 회귀식을 얻은 후 이를 통해 재구성한 시계열은 한반도 하계 기온과 0.57의 상관 계수를 보였는데, 이는 직접 예측 인자로 선택된 ENSO_{dec_MAY}의 시계열과 한반도 하계 기온 시계열 사이의 상관 계수인 0.53에 비해 그리 크지 않은 값이었다. 이러한 현상은 월별 기온 예측에서도 비슷하게 나타나 다변수 회귀식으로 예측한 한반도 기온의 월별 예측성은 ENSO_{dec_MAY}에 의한 월별 예측성에 비해 근소하게 높았다.

그러나 두 가지 통계 모델을 CGCM MME 계절예측 자료에 적용할 경우 월별 기온의 상관성에서 상대적으로 큰 차이가 확인되었는데, 특히 6월 기온의 경년 변동성은 ENSO_dec_MAY만을 이용할 경우 불과 16%만 설명될 수 있으나 다변수 회귀식을 활용하면 설명 가능한 변동성이 25%로 증가하였다. CGCM MME 계절예측에서 다변수 회귀식의 예측성이 ENSO_dec_MAY만을 이용한 예측성에 비해 우수한 것은 대부분의 CGCM이 서태평양에 비해 동태평양에서 SST의 경년 변화를 보다 현실적으로 모의한다는 것을 의미한다. CGCM에서 서태평양 SST의 현실성이 제한적인 원인으로 이 지역에 위치한 온수대(warm pool)에서 발생하는 적운 대류 및 이와 동반된 강수 과정 모의의 현실성이 충분하지 않아 대기와 해양 사이의 피드백이 충실히 재현되지 못하기 때문으로 추정된다.

4가지 SST 예측 인자를 이용하여 얻은 다변수 회귀식으로부터 재구성된 시계열과 한반도 하계 기온과의 상관 계수는 2월에 예측된 SST를 이용할 경우 JJA 평균 기온은 0.3을 상회하였으며, 월별 기온은 0.3~0.5의 값을 보였다(Figure 16a). 이에 비교하여 5월에 예측된 CGCM MME의 한반도(34-38N, 126-130E) 평균 하계 기온 시계열과 관측된 하계 기온 시계열 사이의 상관 계수는 JJA 및 월별 기온을 막론하고 0.15보다 크지 않았다. 이 결과는 동아시아 하계 기온의 예측을 위해서는 예측성이 상대적으로 높은 열대 및 아열대 태평양 SST를 이용한 경험적 모델의 활용이 역학적 계절예측의 한계를 보완할 수 있음을 의미하는 것으로, 중위도 하계 몬순 지역의 계절 예측성 제고를 위해서는 계절예측 모델 및 MME 기법의 개선·개발과 함께 원격상관에 바탕을 둔 통계-역학 예측 시스템의 개발 및 활용이 병행되어야 할 것이다.

REFERENCES

- 정일웅, 김유준, 신상희, 이상현, 2012: 남한 지역에서의 7월 온난화 경향의 약화와 그 요인에 관한 연구. *기후연구*, 7, 1-16.
- 정재준, 최영은, 2011: GIS기반 기후지도 제작을 위한 내삽방법에 관한 연구. *기후연구*, 6, 159-170.
- 허인혜, 권원태, 2007: 우리나라의 최근 10년간 기온 변화. *기후연구*, 2, 79-93.
- Anderson J, H. van den Dool, A. G. Barnston, W. Chen, W. Stern, and J. Ploshay, 1999: Present-day capabilities of numerical and statistical models for atmospheric extratropical seasonal simulation and prediction. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 80, 1349-1361.
- Chowdary, J. S., et al., 2010: Predictability of summer Northwest Pacific climate in 11 coupled model hindcasts: Local and remote forcing. *J. Geophys. Res.*, 115, D22121.
- Doblas-Reyes, F. J., R. Hagedorn, and T. N. Palmer, 2005: The rationale behind the success of multi-model ensembles in seasonal forecasting: II. Calibration and combination. *Tellus*, 57A, 234-252.
- Fukutomi, Y., and T. Yasunari, 2002: Tropical-extratropical interaction associated with the 10-25-day oscillation over the western Pacific during the northern summer. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 80, 311-331.
- Goddard S, S. J. Mason, S. E. Zebiak, C. F. Ropelewski, R. Basher, and M. A. Cane, 2001: Current approaches to seasonal-to-interannual climate predictions. *Int. J. Climatol.*, 21, 1111-1152.
- Guo, Q.-Y., and J.-Q. Wang, 1988: A comparative study on summer monsoon in China and India (in Chinese). *J. Trop. Meteor.*, 4, 53-60.
- Haylock, M. R., N. Hofstra, A. M. G. Klein Tank, E. J. Klok, P. D. Jones, and M. New, 2008: A

- European daily high resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950-2006. *J. Geophys. Res.*, 113, D20119, doi:10.1029/2008JD010201.
- Herrera S., J. M. Gutiérrez, R. Ancell, M. R. Pons, M. D. Frías, and J. Fernández, 2012: Development and analysis of a 50-year high-resolution daily gridded precipitation dataset over Spain (Spain02). *Int. J. Climatol.*, 32, 74-85.
- Kanamitsu, M., et al., 2002: NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 83, 1631-1643.
- Kang, I. S., and J. Shukla, 2006: Dynamic seasonal prediction and predictability (Chap. 15). *The Asian Monsoon*, Springer Praxis, Chichester, pp 585-612.
- Kawamura, R., T. Murakami, and B. Wang, 1996: Tropical and mid-latitude 45-day perturbations over the western Pacific during the northern summer. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 74, 867-890.
- Kendall, M. G., 1955: Rank Correlation Methods. 2nd ed. Oxford University Press, 196 pp.
- Kripalani, R. H., and A. Kulkarni, 2001: Monsoon rainfall variations and teleconnections over south and east Asia. *Int. J. Climatol.*, 21, 603-616.
- Kripalani, R. H., and S. V. Singh, 1993: Large-scale aspects of India-China summer monsoon rainfall. *Adv. Atmos. Sci.*, 10, 72-84.
- Krishnan, R., and M. Sugi, 2001: Baiu rainfall variability and associated monsoon teleconnection. *J. Meteor. Soc. Japan*, 79, 851-860.
- Krishnamurti, T. N., et al., 1999: Improved weather and seasonal climate forecasts from multi-model superensemble. *Science*, 285, 1548-1550.
- Kug, J. S., et al., 2010: Statistical relationship between two types of El Niño events and climate variation over the Korean Peninsula. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, 46, 467-474.
- Kug, J. S., J. Y. Lee, I. S. Kang, B. Wang, and C. K. Park, 2008: Optimal multi-model ensemble method in seasonal climate prediction. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 44, 259-267.

- Kwon, M. H., J.-G. Jhun, B. Wang, S.-I. An, and J.-S. Kug, 2005: Decadal change in relationship between east Asian and WNP summer monsoons. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L16709, doi:10.1029/2005GL012026.
- Lee, D. Y., K. Ashok, and J.-B. Ahn, 2011: Toward enhancement of prediction skills of multimodel ensemble seasonal prediction: A climate filter concept. *J. Geophys. Res.*, 116, D06116, doi:10.1029/2010JD014610.
- Lee, J. Y., et al., 2010: How are seasonal prediction skills related to models' performance on mean state and annual cycle? *Clim. Dyn.*, 35, 267-283.
- Li, C., R. Lu, and B. Dong, 2011: Predictability of the western North Pacific summer climate demonstrated by the coupled models of ENSEMBLES, *Clim. Dyn.*, 39, 329-346.
- Lim, Y.-K., and K.-Y. Kim, 2006: A new perspective on the climate prediction of Asian summer monsoon precipitation. *J. Climate*, 19, 4840-4853
- Liu, Y., and G. Wu, 2004: Progress in the study on the formation of the summertime subtropical anticyclone. *Adv. Atmos. Sci.*, 21, 322-342.
- Lloyd-Hughes B, and M. A. Saunders. 2002: Seasonal prediction of European spring precipitation from El Niño-southern oscillation and local sea-surface temperatures. *Int. J. Climatol.*, 22, 1-14.
- Lu, R., 2004: Associations among the components of the East Asian summer monsoon system in the meridional direction. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 82, 155-165.
- Min, Y. M., V. N. Kryjov, and C. K. Park, 2009: A probabilistic multimodel ensemble approach to seasonal prediction. *Weather Forecast.*, 24, 812-828.
- Nitta, T., 1987: Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the northern hemisphere summer circulation. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 65, 373-390.
- Palmer, T. N., C. Brankovic, and D. S. Richardson, 2000: A probability and decision model analysis of PROBOST seasonal multi-model ensemble integrations. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 126, 2013-2033.

- Palmer, T. N., and D. L. T. Anderson, 1994: The prospects for seasonal forecasting-A review paper. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 120, 755-793.
- Schott, F. A., S.-P. Xie, and J. P. McCreary Jr., 2009: Indian Ocean circulation and climate variability. *Rev. Geophys.*, 47, RG1002, doi:10.1029/2007RG000245.
- Shukla, J., et al., 2000: Dynamical seasonal prediction. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 81, 2593-2606.
- Smith, T. M., R. W. Reynolds, T. C. Peterson, and J. Lawrimore, 2008: Improvements to NOAA's historical merged land-ocean surface temperature analysis (1880-2006). *J. Climate*, 21, 2283-2293.
- Sui, C.-H., P.-H. Chung, and T. Li, 2007: Interannual and interdecadal variability of the summertime western North Pacific subtropical high. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L11701, doi:10.1029/2006GL029204.
- Tomita, T., T. Yasunari, and T. Hashimoto, 2011: Interannual variability of the baiu season near Japan evaluated from the equivalent potential Temperature. *J. Meteorol. Sci. Jpn.*, 89, 517-537.
- Tsuyuki, T. and Kurihara, K. 1989 Impact of convective activity in the western tropical Pacific on the East Asian summer circulation. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 67, 231-247.
- Wang, B., B. Xiang, and J.-Y. Lee, 2013: Subtropical high predictability establishes a promising way for monsoon and tropical storm predictions, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 110, 2718-2722.
- Wang, B, et al., 2009: Advance and prospectus of seasonal prediction: assessment of the APCC/CliPAS 14-model ensemble retrospective seasonal prediction (1980-2004). *Clim. Dyn.*, 33, 93-117.
- Wang, B, J.-Y Lee, I.-S. Kang, J. Shukla, J.-S. Kug, A. Kumar, J. Schemm, J.-J. Luo, T. Yamagata, and C.-K. Park, 2008: How accurately do coupled climate models predict the leading modes of Asian-Australian monsoon interannual variability? *Clim. Dyn.*, 30, 605-619.
- Wang, B. and LinHo, 2002: Rainy season of the Asian-pacific summer monsoon. *J. Climate*, 15,

386-398.

- Wu, B., T. Zhou, and T. Li, 2009: Seasonally evolving dominant interannual variability modes of East Asian climate. *J. Climate*, 22, 2992-3005.
- Xie, S.-P., K. Hu, J. Hafner, H. Tokinaga, Y. Du, G. Huang, and T. Sampe, 2009: Indian Ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Niño. *J. Climate*, 22, 730-747.
- Yang, J., Q. Liu, S.-P. Xie, Z. Liu, and L. Wu, 2007: Impact of the Indian Ocean SST basin mode on the Asian summer monsoon. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L02708.
- Yeh, S.-W., J.-S. Kug, B. Dewitte, M.-H. Kwon, B. Kirtman, and F.-F. Jin, 2009: El Niño in a changing climate. *Nature*, 461, 511-514.
- Yun, W. T., L. Stefanova, A. K. Mitra, T. S. V. Vijaya Kumar, W. Dewar, and T. N. Krishnamurti, 2005: A multi-model superensemble algorithm for seasonal climate prediction using DEMETER forecast. *Tellus*, 57A, 280-289.
- Yun, W. T., L. Stefanova, and T. N. Krishnamurti, 2003: Improvement of the superensemble technique for seasonal forecasts. *J. Climate*, 16, 3834-3840.
- Zhou, T., et al., 2009: Why the western Pacific subtropical high has extended westward since the late 1970s. *J. Climate*, 22, 2199-2215.

연구보고서 2015-02

한반도 여름철 기온 예측을 위한 경험적 모델 연구

An Empirical Model Approach for Summertime Temperature Prediction in South Korea

김형진 기후예측팀



APEC 기후센터

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