다중선형회귀를 이용한 남한 초봄 강수의 통계적 예측

조세라 · 안중배

부산대학교 지구환경시스템학부

(2016년 12월 6일 접수, 2017년 2월 26일 수정, 2017년 2월 27일 게재 확정)

Statistical Forecast of Early Spring Precipitation over South Korea using Multiple Linear Regression

Sera Jo · Joong-Bae Ahn

Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan, Korea

(Received 25 December 2016, Revised 26 February 2017, Accepted 27 February 2017)

Abstract : A statistical forecast model for early spring (March and April) precipitation over South Korea is developed by using multiple linear regression method. Predictors are selected among the forty five large-scale atmospheric and oceanic indices. Because the model is meant to use for real-time forecast, the predictors are chosen from the indices that have statistically significant lag correlation with observed early spring precipitation. The selected predictors of early spring precipitation are North Pacific Pattern with 6-month lead, Siberian High Index with 5-month lead and Indian Ocean Basin Mode Index with 3-month lead from March, and they are statistically independent. We applied leave-two-out cross validation. According to the regression map between these indices and synoptic circulations around Korean peninsula, these indices represent the induction of early spring rainfall by controlling East Asian jet and low level moisture flux. The regression coefficients for each training period show that three indices affects evenly at every forecast year and they show stable variability, indicating that the influence of each index does not depend on training period. The developed statistical model significantly predicted early spring precipitation over South Korea ($r=0.63$, p -value<0.01). Also it marks 61% of hit rate according to the three-category deterministic forecast.

Key Words : statistical prediction model, spring precipitation, seasonal prediction, climate index, South Korea

주요어 : 통계예측모형, 봄강수, 계절예측, 기후지수, 한국

1. 서론

한반도 및 동아시아 지역은 몬순의 영향으로 연 강수량의 대부분이 여름에 집중되어있으며 다른

계절은 상대적으로 건조한 기간에 해당한다. 그 가운데서도 겨울철은 심한 건기에 속하며, 이후에 따르는 봄철의 강수가 겨울철 동안의 건조한 상태를 해소하는데 매우 큰 역할을 한다. 특히 우리나라

라의 산불은 약 60%가 이른 봄(3, 4월)에 집중되어 있으므로(Lee and Lee, 2006), 이 시기의 강수는 산불을 예방하기 위해 매우 중요하다. 또한 봄철은 농사를 시작하는 계절로 봄 강수를 통한 벼와 봄철 발작물의 농업용수 확보는 농업 생산량 및 경제 사회에 큰 영향을 미친다. 이 같은 봄철 강수의 중요성으로 인해 봄 강수의 장기 변동성 및 가뭄에 대한 선행 연구들이 이루어진 바 있다. Lee and Kim(1997)은 봄철 일기도 유형의 분류를 통해 봄철 가뭄이 일어난 해에는 300hPa 한대 제트의 남하가 뚜렷함을 보였다. Kim *et al.*(2005)에서는 rotated empirical orthogonal function 분석방법을 이용하여 한반도 봄철의 가뭄과 관련된 북반구의 대기대순환 패턴을 선정하였으며 이들의 관계가 1980년대 중반을 기점으로 변화함을 보였다. Choi *et al.*(2009)에서는 가뭄을 정의하는 지수인 Effective Drought Index를 이용하여 5월의 가뭄을 정의하고 이와 NPI(North Pacific oscillation Index) 사이에 높은 음의 관계가 있으며, 베링해 부근 지역의 해면기압이 양의 편차를 가질 때에 가뭄이 강화됨을 설명하였다. 봄철 가뭄 외에 봄철 강수의 장기 변동을 살펴보기 위해 Kim *et al.*(2012)에서는 한반도 봄철 강수에 Lepage test를 이용해 장기변동이 일어난 해를 찾아보았고, 그 결과 1991년에 한반도 봄철 강수의 레짐 이동(Regime shift)이 있었으며 이를 기점으로 봄 강수가 점차 증가하는 방향으로 변화한 것으로 설명하였다. 또한 이 같은 변화는 Coupled Model Inter-comparison Project 3 참여 모형들이 예측한 가까운 미래(2020~2040년)에도 동일하게 나타남을 보였다. Choi *et al.*(2013)은 4월의 양의 서태평양 원격상관 패턴이 한반도를 포함한 동아시아 영역의 4월 강수를 증가시키는 것을 보였다. 그러나 이처럼 봄철 강수의 장기 변동성 및 가뭄에 관한 많은 선행연구에도 불구하고 봄철 강수의 예측에 관한 선행연구는 매우 부족한

실정이다.

봄철의 강수의 예측은 현재 최신기술로 알려져 있는 접합대순환모형(Coupled General Circulation Model, CGCM)을 이용하여서도 힘든 것이 사실이다. Figure 1은 APEC(Asia-Pacific Economic Cooperation) 기후센터의 다중모형앙상블 예측 시스템에 참가하는 CGCM의 이른 봄(3, 4월) 강수와 남한의 이른 봄 강수와의 시간상관계수를 나타낸 그림이다. 자료는 APEC 기후센터 3개월 전망 다중모형앙상블 시스템에 참여중인 모형들 가운데 3, 4월 hindcast자료를 사용하였다(<http://cis.apcc21.org/opendap>). 사용된 모형의 정보는 Table 1에 정리하였다. 남한의 강수는 기상청의 60개 기상관측소의 1일 강수 자료를 이용하여 계절 평균하였다. 점으로 표시된 영역이 남한의 강수와 95% 신뢰수준에서 유의한 시간상관계수가 나타나는 영역이다. 그림에 실선으로 나타낸 값은 각 모형 및 재분석 자료의 봄 강수 기후값이다. 사용된 자료의 기간은 각 모형 간의 동일한 hindcast기간 및 앙상블 개수를 사용하기 위하여 1983~2010년으로 선정하였다. 강수 재분석 자료인 GPCP(Global Precipitation Climatology Project; <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.gpcp.html>) v2.0의 경우 기상청 관측과 남한영역에서 95% 신뢰수준에서 유의한 상관성을 가지는 것으로 나타났다. 즉, GPCP에서의 남한강수가 실제 관측된 남한의 강수와 유사하고, 남한의 강수를 대표할 수 있음을 알 수 있다(Figure 1a). 또한 이른 봄의 황해 및 양쯔강 이북 지역의 강수가 남한의 강수와 통계적으로 유의한 상관이 있음이 나타났다. 하지만 모형의 hindcast자료를 살펴보면 거의 대부분의 모형에서 한반도 주변에 통계적으로 유의한 양의 상관이 나타나지 않을 뿐 아니라 일부 모형에서는 음의 상관이 나타나기도 하여, 모형이 예측한 남한 영역의 강수가 실제로 남한의 강수를 대표하기

힘들을 알 수 있다(Figure 1b~1h).

이처럼 봄 강수에 대한 역학적 예측의 어려움을 극복하기 위하여 본 연구에서는 통계적 방법을 이용한 남한의 봄 강수 예측 통계모형을 구축하였다. 통계적 모형은 역학적 예측의 단점을 보완하거나 또 다른 예측 방안으로 활용되어왔다. Kug *et al.*(2008)에서는 SPPM(Stepwise Pattern Projection Method)를 이용하여, 오직 통계적 관계만을 고려해 선정한 예측인자를 통해 CGCM의 SST(Sea Surface Temperature) 예측 결과를 보정하였다. 타 계절에 비해 비교적 메커니즘이 확실한 여름의 경우 한반도의 여름 강수에 영향을 주는 현상의 지수들을 이용하여 통계적 예측 모형을 개발한 선행연구가 많다. Kwon(2013)은 북서태평양 아열대고기압 지수를 선형회귀의 예측인자로 이용하여 한반도를 포함한 북동아시아의 통계적 여름철 강수 진단의 잠재예측성을 평가하였고 그 결과 여름몬순

지수보다는 북서태평양고기압의 변동성이 북동아시아의 여름철 강수진단에 효과적임을 설명하였다. Kim and Seo(2014)는 Lee and Seo(2013)에서 개발한 장마 통계예측모형을 활용하여 장마강수를 위한 앙상블 통계 예측 모델을 개발하였다. Lee and Seo(2013)은 해수면온도 자료를 시간에 대해 다양한 window로 이동평균하여 이들과 장마지수와의 상관성이 높은 영역의 해수면온도 편차를 예측인자로 삼아 장마예측모형을 개발하였으며, 회귀계수분포분석을 통해 이들의 동아시아 장마에 대한 역학적 영향을 분석하였다. 하지만 Lee and Seo(2013)의 모형이 선정한 예측인자가 설명하지 못하는 장마의 변동성을 예측하기 위하여 Kim and Seo(2014)에서는 예측인자를 변경하여 또 다른 통계적 모형을 개발하고 이를 앙상블 하여 여름철 장마를 통계적으로 예측하였으며, 물리적 해석이나 회귀계수 분포가 통계적으로 유의하지 않아

Table 1. Description of the Coupled General Circulation Models (CGCM) used participates in APCC 3-month MME system.

Institution (name of CGCM)	AGCM (resolution)	OGCM (resolution)	# of ensemble member	References
APCC (APCC_CCSM3)	CAM3 (T86L26)	POP1,3 (gxlv3_L40)	5	Jeong <i>et al.</i> , 2008
BOM (POAMA v2,4)	BAM v3.0d (T47L17)	ACOM2 (0.5°~1.5°lat, ×2°lon, L25)	33	Lim <i>et al.</i> , 2012
MSC (MSC_CANCM3)	AGCM3 (T63L31)	OGCM4 (0.94°lat, ×1.41°lon, L40)	10	Kim <i>et al.</i> , 2003
MSC (MSC_CANCM4)	AGCM4 (T63L35)	OGCM4 (0.94°lat, ×1.41°lon, L40)	10	Simmons <i>et al.</i> , 2004
NASA (GSFC)	GEOS-5 (288x181L72)	MOM4 (720×410 L40)	11	Rienecker <i>et al.</i> , 2008
NCEP (NCEP_CFSv2)	GFS (T126L64)	MOM4 (0.25° at the tropics, 0.5° northwards and southwards of 10°N and 10°S, L40)	20	Saha <i>et al.</i> , 2014
PNU (PNU CGCM)	CCM3 (T42L18)	MOM3 (~0.7° (low lat.), ~1.4° (mid lat.), and ~2.8° (high lat.) L29)	5	Kim and Ahn, 2015

Figure 1. Temporal correlation coefficients of GPCP and APCC 3-month Forecast models with respect to early spring precipitation over South Korea (Shaded). Dotted area shows temporal correlation coefficients significant at 95% confidence. Climatology for MA precipitation of each models are shown in contour.

도 강수와 직접적으로 통계적 상관성을 가지는 지수를 이용해 강수예측이 가능함을 제시하였다.

본 연구에서는 이른 봄(3, 4월, 이하 MA)의 남

한의 강수와 통계적으로 유의한 지연상관을 가지는 대기-해양 현상의 지수들을 다중선형회귀의 예측인자로 사용하여 이른 봄 강수 예측모형을 개

발하고자 하였다. 통상 봄이라 부르는 3, 4, 5월 가운데 5월은 장마 전 건기라고 정의되는 비교적 비가 적은 시기이므로(Byun *et al.*, 1992) 이를 제외한 3, 4월의 남한의 이른 봄 강수를 예측대상으로 선정하였다. 본 연구에서는 선정된 지수와 한반도를 포함한 동아시아 영역의 강수간의 관계를 역학적 메커니즘이나 물리적으로 해석하기 보다는, 봄 강수의 통계적 예측성에 중점을 두어 각종 대규모 기후지수(large-scale climatological indices)들과 남한의 이른 봄철 강수 간의 통계적인 정보 및 분석만으로 의미 있는 예측이 가능한지 살펴보고자 하였다.

2. 자료 및 연구방법

1) 자료

예측 대상인 남한의 이른 봄 강수 자료는 1981년부터 2013년까지 33년간의 기상청 60개 지상 기상관측(Automated Surface Observing System, ASOS) 강수자료를 이용하였다. 이때 각 관측소 별 또는 특정 도시의 강수가 아닌 60개 관측소의 평균을 이용하였는데, 이는 지역별 강수예측 보다는 대규모 대기·해양 현상을 이용하여 전국적인 초봄의 계절강수 경향을 예측하고자 하였기 때문이다. 남한의 강수와 관련이 있는 대규모 순환 지수를 선정하기 위해 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 제공하는 기후 지수 및 여름·겨울철 몬순 지수와 한반도 주변의 대기, 대륙과 해양의 상태를 설명하는 지수를 더해 총 45개의 지수를 수집하였다. 사용된 지수의 출처는 Table 2에 나타내었다. NOAA에서 제공하지 않은 지수에 대하여서는 위도 2.5°, 경도 2.5° 간격의 NCEP(National Centers for Environmental Prediction) 재분석 자료(Kalnay *et al.*, 1996) 및

GPCP v2.0, 위도 1.0°와 경도 1.0° 간격의 Hadley Centre Sea Ice and SST(Rayner *et al.*, 2003) 자료를 이용하여 생산하였다. 지수 간의 상호비교를 위하여 모든 지수는 표준정규화된 자료를 사용하였다. 또한 각 지수들이 대표하는 현상이 남한 및 한반도 주변 지역의 강수 및 대기 패턴에 어떻게 영향을 미치는지 알아보기 위해 기상청 관측자료 외에 재분석 자료를 사용하여 회귀계수패턴 분석을 하였다. 강수 재분석 자료의 경우 GPCP v2.0자료와 위도 1.0°와 경도 0.5° 간격의 CRU(Climatic Research Unit; Harris *et al.*, 2014) v.3.23자료가 사용되었고, 850hPa 지위고도, 850hPa 수분속, 그리고 200hPa 동서 바람성분은 NCEP 재분석 자료가 사용되었다.

2) 예측인자 선정 및 다중선형회귀

본 연구에서는 다중선형회귀를 이용하여 남한의 이른 봄 강수에 대한 통계적 예측 모형을 개발하고자 하였다. 다중선형회귀는 하나의 예측대상에 대해 하나 이상의 예측인자들 사이의 선형적 관계를 이용하여 예측대상을 추정하는 통계적 기법이다(Wilks, 2006). 본 연구에서는 남한의 이른 봄 강수와 상관이 높으면서 상호 독립적인 지수를 예측인자로 선정하기 위해 두 가지 단계를 거쳐 예측에 사용될 지수를 선정하였다. 첫째로, 수집한 45개의 지수 가운데 남한의 이른 봄 강수와 상관성이 높은 지수를 선정하였다. Figure 2는 45개의 지수와 남한의 이른 봄 강수 사이의 시간상관계수를 나타낸 그림이다. 그림의 색칠된 영역은 시간상관계수의 신뢰수준이며 Y축에 사용된 지수의 약어는 Table 2와 같다. 1981년부터 2013년까지 남한의 3, 4월 평균된 강수의 예측을 위해서 3월을 기준으로 90% 신뢰수준에서 1~8개월(같은 해의 1, 2월 및 이전 해의 9~12월, 즉, 직전의 가을과 겨울철) 내의 유의한 지연상관을 보이는 지수가 우선적으로

Table 2. 45 indices collected for statistical model of early spring precipitation over South Korea.

Index	Reference	# of indices
Arctic Oscillation (AOI), Southern Oscillation (SOI), North Pacific Pattern (NPI), Pacific Decadal Oscillation (PDO), North Atlantic Oscillation (NAO), Pacific North American index (PNA), Antarctic Oscillation (AAO), Atlantic multi-decadal oscillation (AMO), Multivariate ENSO Index (MEI), Tropical Northern Atlantic Index (TNAI), Tropical Southern Atlantic Index (TSAI), Western Hemisphere Warm Pool (WHWP), Trans-Nino index (TNI), NINO1.2, NINO3.4, NINO4, NINO3, Oceanic Nino Index (ONI), Atlantic Meridional Mode (AMM), Quasi-Biennial Oscillation (QBO), Tropical Pacific SST EOF (TPSST), Atlantic Tri-pole SST EOF (ATSST)	National Oceanic and Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory, Physical Sciences Division (http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list)	22
Indonesia Sea Level Pressure (ISL), Equatorial Southern Oscillation index (ESO)	National Oceanic and Atmospheric Administration, Climate Prediction Center (http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/)	2
Scandinavia (SCAN), Polar/Eurasia (POL), Western Pacific Index (WP), East Atlantic/Western Russia (EAWR)	National Oceanic and Atmospheric Administration, Climate Prediction Center (http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/)	4
Dipole Mode Index (DMI)	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (http://www.jamstec.go.jp/frcgc/research/d1/iod/)	1
Okhotsk High Index (OHI) Northern Oscillation Index (NOI) Western North Pacific Subtropical High Index (WNPSH) North East Asia Summer Rainfall Anomaly (NEASRA) Regional Monsoon index1 (RM1) Regional Monsoon index2 (RM2) Webster and Yang (WY) Western North Pacific Monsoon Index (WNPMT) East Asia Summer Monsoon Index (NEASMI) East Asia Jet Stream (EAJS) East Asia Winter Monsoon Index (EAWMI) Eurasia pattern Index (EUI) Indo-Pacific Warm Pool (IPWP) Indian Ocean Basin Mode index (IOBM) Siberian High index (SHI) Indian Ocean Dipole Mode Index (IOD)	Tachibana <i>et al.</i> , 2004 Schwing <i>et al.</i> , 2002 Xiang <i>et al.</i> , 2013 Lee <i>et al.</i> , 2005 Lau <i>et al.</i> , 2000 Lau <i>et al.</i> , 2000 Webster and Yang, 1992 Wang and Fan, 1999 Lee <i>et al.</i> , 2005 Yang <i>et al.</i> , 2002 Jhun and Lee, 2004 Wallace and Gutzler, 1981 Wang and Mehta, 2008 Yang <i>et al.</i> , 2007 Gong <i>et al.</i> , 2001 Saji <i>et al.</i> , 1999	16

Figure 2. Time lagged Temporal Correlation Coefficients (TCCs) between early spring precipitation over South Korea (ASOS) and 45 indices (Table 2). Filled colors indicates level of confidence for TCCs. month (0) in X axis indicates month in same year with MA precipitation and month (-1) means month in one year before MA precipitation.

선정되었다. 다음 단계에서는 선형회귀의 경우 예측인자들은 상호 독립적이어야 함으로 앞서 수집한 지수들 가운데 가장 지연상관성이 높은 지수를 기준으로 상호상관성이 낮은 지수를 찾으려 하였다.

첫 번째로 선택된 지수는 NPI(North Pacific Index)로 30~65°N, 160~220°E 영역의 해면기압을 평균한 지수이다(Trenberth and Hurrell, 1994). 이

른 봄 강수와 상관성이 있는 월은 이전 해의 9월이고 강수와의 시간상관계수는 -0.46 으로 99% 신뢰수준에서 통계적으로 유의한 음의 상관성을 나타내었다. 두 번째로 선택된 지수는 이전 해의 10월 SHI(Siberian High Index)로 유라시아 대륙의 시베리아 영역(40~60°N, 70~120°E)의 해면기압을 영역 평균한 지수이다(Gong *et al.*, 2001). 강수와의 시간상관계수는 -0.44 로 역시 99% 신뢰수준에

Table 3. Climate indices selected as predictors and Temporal Correlation Coefficients (TCC) between each indices and MA precipitation over South Korea.

Climate index (Reference)	Definition	Lead month from March	TCC
North Pacific Index (Trenberth and Hurrell, 1994)	Area averaged SLP over North Pacific area (30~65°N / 160~220°E)	6month (September)	-0.46**
Siberian High Index (Gong <i>et al.</i> , 2001)	Area averaged SLP over Siberia (40~60°N / 70~120°E)	5month (October)	-0.44**
Indian Ocean Basin Mode Index (Yang <i>et al.</i> , 2007)	EOF 1st mode PC over Indian Ocean (-20~20°N / 40~110°E)	3month (December)	0.43*

(significant at *: 95%, **: 99% confidence level)

Table 4. Temporal Correlation Coefficients between each predictors.

	North Pacific Index	Siberian High Index	Indian Ocean Basin Mode Index
North Pacific Index	1.0	0.17	-0.03
Siberian High Index	0.17	1.0	-0.1
Indian Ocean Basin Mode Index	-0.03	-0.1	1.0

(significant at *: 95%, **: 99% confidence level)

서 유의한 음의 시간상관성을 보였다. 마지막으로 선택된 지수는 IOBM(Indian Ocean Basin Mode index) 이다(Yang *et al.*, 2007). 이 지수는 인도양 (20°S~20°N, 40~110°E)의 해수면온도에 경험적 직교함수 분석을 적용하여 구해지는 첫 번째 모드의 PC(Principal Component) 시계열로 정의되며, 이진해 12월 지수와 이른 봄 강수와 시간상관계수가 0.43으로 95% 신뢰수준에서 통계적으로 양의 상관관이 있는 것으로 나타났다. 이렇게 선정된 예측인자들 사이의 독립성을 살펴보기 위해 각 지수 간의 시간 상관계수를 Table 4에 나타내었다.

Table 4를 살펴보면 지수들 사이의 시간상관계수가 0.03~0.17로 매우 낮아 선택된 지수들이 상호 독립적이며 이들을 다중선형회귀방정식의 예측인자로 사용하기에 타당함을 알 수 있다. 강수량과 세 지수의 변동을 함께 비교하기 위해 표준 정규화된 각 지수와 남한 강수의 시계열을 Figure 3에 나타내었다. 강수와 음의 상관을 가지는 NPI와 SHI의 경우 해석상의 편의를 위해 -1을 곱하

여 나타났다. 각 지수들은 앞서 상호상관성이 매우 낮았던 것과 같이 각 시계열이 매우 독립적이며 2000~2001년의 극심한 가뭄, 2002, 2003 그리고 2012년의 강한 강수와 같이 눈에 띄는 큰 변동성을 나타내는 지수는 없었다.

이렇게 선정된 지수를 예측인자로 사용하여 다중선형회귀를 통해 남한의 이른 봄 강수의 편차를 예측하였다. Ahn *et al.*(1997)에 따르면 한반도 강수의 변동성이 격년 주기성을 나타내기 때문에, 이를 고려하여 본 연구에서는 leave-two-out 교차검증을 적용하였다(Jo and Ahn, 2015; Ahn and Lee, 2016). Figure 4는 leave-two-out 교차검증의 모식도이다. 총 33년의 자료(N=33)가운데 예측하고자하는 년도(j)와 그다음 해를 제외한 기간을 훈련기간으로 정하고 훈련기간 중 예측인자들(NPI, SHI, IOBM)과 MA 강수 편차(y_{obsi}) 사이의 선형회귀계수를 찾아 이를 예측하고자하는 년도의 봄 강수 편차(y_{pre})를 예측하는데 사용하였다.

Figure 3. Time-series of early spring precipitation over South Korea (OBS) and normalized predictor indices (Contours).

Figure 4. Schematic diagram for leave-two-out cross validation. N is total number of years and i is years for training period. y_{OBSi} is observed early spring precipitation anomaly over South Korea and $NPI_i, SHI_i, IOBM_i$ are predictors during training period. α, β, γ are regression coefficients derived from training period using least squares method. These regression coefficients become $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ to predict early spring precipitation anomaly over South Korea (y_{prej}).

3. 실험결과

1) 예측 인자가 남한의 이른 봄 대기순환 및 강수에 미치는 영향

통계적 관계를 기준으로 선정된 예측인자들이 한반도 강수량에 어떻게 영향을 미치는지 살펴보기 위해 회귀계수분포를 분석해 보았다. 이른 봄 강수와 음의 상관관계를 보인 NPI와 SHI에는 -1을 곱하여 이른 봄 강수의 양의 편차를 유도하는 각 변수의 회귀계수분포를 나타내었다. Figure 5는 NPI, SHI, IOBM 각각의 지수를 GPCP, CRU 그리고 ASOS 강수 자료간의 회귀계수분포 그림이다. GPCP와 예측인자 사이의 회귀계수 분포가 Figure 5a~c이고, 이때 실선은 한반도 주변 동아시아 지역 MA계절 강수의 기후값을 나타낸다. 그림의 점으로 나타난 영역은 지수와 강수의 시간상관관계가 90% 신뢰수준에서 유의한 영역을 의미한다. 먼저 ASOS의 경우(Figure 5g~i) 모든 지수에 대해 남한 전체영역에서 양의 강수 편차가 나타났고, 시간상관계수 역시 통계적으로 유의하였다. 이러한 결과는 각 지수들이 남한 영역 평균된 MA계절 강수뿐 아니라 각각의 60개 관측소의 강수와도 유의한 관계를 가짐을 의미한다. 특히, NPI와 SHI의 경우 특히 남부해안을 따라 강한 양의 회귀계수가 나타났고 IOBM의 경우 중부내륙에 양의 값이 나타난 반면, 동해 산간지역에서는 회귀계수의 패턴뿐 아니라 시간상관계수도 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다. 동아시아 영역에 대해 살펴보면 먼저 NPI의 경우 GPCP와의 회귀계수는 기후값의 중심이 나타나는 일본 동해 해상 및 오호츠크해의 강수가 약해지는 형태로, 남한과 일본 남부 지역을 포함하는 영역의 강수가 강해지는 형태로 나타났다. 이 같은 모습은 CRU 자료에서도 동일하게 나타났다(Figure 5d). Figure 5a와 유사하게 중국, 일본, 한국의 남쪽 일부 영역에 국

한된 양의 회귀계수가 나타났고 오호츠크해 북쪽의 마가단 주 지역에 나타나는 양의 회귀계수 역시 유의하게 나타났다. SHI의 경우 GPCP와 CRU 모두 한반도 및 만주 일부 지역, 그리고 남중국 및 일본 남부에서 강수의 증가와 관련 있는 회귀계수의 분포가 나타났으나 통계적으로 유의하게 나타나지는 않았다. IOBM의 경우 다른 지수들에 비해 한반도를 포함한 중국, 일본 등 넓은 영역에서 유의한 양의 회귀계수가 나타났다. GPCP에 따르면 기후학적으로 한반도 남쪽 해상에 위치한 강수밴드가 강화되는 형태의 회귀계수분포가 나타나 이 밴드의 강화로 남한의 이른 봄 강수뿐 아니라 극동아시아 영역에 강수에 영향을 미치는 것으로 보인다.

Figure 6은 앞서 보인 지수와 강수의 관계를 유도하는 대기 패턴을 살펴보기 위해 850hPa 지위고도장 및 수분속의 회귀계수분포이다. Figure 6a~6c의 실선은 850hPa지위고도의 기후값을 나타내고 색은 회귀계수분포, 점으로 표시한 영역은 시간상관계수가 90% 신뢰수준에서 유의한 영역을 나타낸다. 수분속의 경우 질게 표시된 화살표가 시간상관계수가 유의한 영역을 나타낸다. NPI와 850hPa 지위고도의 회귀계수분포를 살펴보면 오호츠크해 북쪽의 마가단 주 주변에서 유의한 음의 계수가 나타나고 통계적으로 유의하지는 않지만 일본의 동쪽 해상 위도 50°부근을 중심으로 한 양의 계수가 한반도 남쪽 해상까지 뻗어있다(Figure 6d). 이는 양의 지위고도 편차를 유도하고 이를 따라 한반도의 남동쪽으로부터 수분속이 유입되어 한반도에 봄철 강수가 강화되는 것을 알 수 있다. SHI 지수의 경우 지위고도와 수분속 모두 통계적으로 유의한 패턴을 보이지 않았으나, 일본의 동쪽해상 위도 40° 부근에 생긴 양의 편차장을 중심으로 수분속이 고기압성 흐름을 통해 북위 27° 부근에 수분속의 수렴대를 유도하고 이렇게 수렴한

Figure 5. Regression coefficient fields between precipitation data (GPCP (a~c), CRU (d~f) and ASOS (g~i)) and predictor indices. Contours in Figure 5a~c are early spring precipitation climatology. Dotted area denotes where temporal correlation coefficients are significant at 90% confidence level.

Figure 6. Regression coefficient field between 850hPa geopotential height and each predictor (a~c, Shaded). Dotted area denotes where temporal correlation coefficients are significant at 90% confidence level. Contours at upper panels show climatological 850hPa geopotential height during early spring. Lower panels (d~f) are regression coefficient field between 850hPa q-flux and each predictor. Thick arrows are where temporal correlation coefficients are significant at 90% confidence level.

수분속이 고기압성 흐름을 따라 한반도의 남서쪽으로 유입되는 형태를 나타내었다. IOBM 지수는 일본 동쪽 해상에 통계적으로 유의한 양의 지위고도 편차를 유도해 한반도를 포함한 일본, 중국 일부 지역에 통계적으로 유의하게 강한 수분속의 수렴을 유도하여 강수에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

선행연구에 따르면 봄철 상층 제트가 한반도 상공에 위치하면 상층에 발산하는 흐름을 유발하여 하층에 유입되는 수증기의 남북 수송을 강화시켜주는 역할을 한다(Lee and Kim, 1997). 이 같은 형태의 관계가 나타나는지 살펴보기 위해 Figure 7

에서는 각 지수와 상층 200hPa의 동서바람성분(U200)의 회귀계수 분포를 나타내었다. 실선은 이른 봄철의 U200 기후값을 나타내고 색칠된 영역은 회귀계수를 나타내며, 점으로 표시한 영역은 시간상관계수가 90% 신뢰수준에서 유의한 영역을 나타낸다. 먼저, 이른 봄철의 U200의 기후장을 살펴보면 한반도의 남쪽에 상층 제트의 중심이 위치하고 있음을 알 수 있다. 이때 각 지수와 U200편차장의 회귀계수를 살펴보면 세 지수 모두 기후학적 상층 제트의 중심은 약해지고 이보다 북쪽의 지역에서는 U200이 강화되어 제트의 중심이 한반도 위로 북상하는 형태를 나타내었다. 이는 Lee and

Figure 7. Regression coefficient field between 200hPa zonal wind and each predictor (Shaded). Dotted area denotes where temporal correlation coefficients are significant at 90% confidence level. Contours show climatological 200hPa zonal wind during early spring.

Kim(1997)과 일치하는 결과로, 한반도 상층에 발산하는 흐름을 유발하여 하층 수증기 유입을 도와 강수를 증가시키는 것으로 해석된다.

따라서 각 지수와 대기 중관 변수의 회귀계수 분포를 살펴보았을 때, 지수들은 하층(850hPa) 지위고도장 및 바람을 통해 수분속의 수렴 및 발산에 영향을 미치고 상층 제트의 복상에 관여하여 한반도 및 한반도 주변 동아시아 영역에서 이른 봄철 강수량에 영향을 주는 것으로 보인다. 하지만 이러한 관계는 통계적 유의성이 나타나지 않는 경우도 있고, 이전 해의 9월(NPI), 10월(SHI), 12월(IOBM)의 현상들이 어떻게 이 지역의 이른 봄철의 중관장에 영향을 주는 지에 대한 역학적 해석에는 한계가 있다.

2) 다중선형회귀분석을 이용한 통계적 모형의 개발 및 평가

통계적으로 남한의 이른 봄철 강수에 영향을 미치는 지수들을 다중선형회귀분석(Multiple Linear Regression, MLR)의 예측인자로 하여 남한의 이른 봄철의 강수 편차를 예측해 보았다. 앞서 설명

하였듯 한반도의 강수의 변동성이 격년 주기성을 가지는 것을 고려하여(Ahn *et al.*, 1997) 본 연구에서는 leave-two-out 교차검증을 적용하였다. 연구에서는 예측하고자 하는 년도와 그 다음 해, 총 2년을 제외한 기간을 다중선형회귀분석의 훈련기간(training period)으로 사용하고 이를 통해 구해진 회귀계수를 이용하여 해당년도의 강수편차를 예측하는 leave-two-out 교차검증을 사용하였다. 그러므로 예측변수(남한의 이른 봄 강수편차)와 예측인자(NPI, SHI, IOBM) 사이의 회귀계수(α , β , γ)는 매 예측 년도마다 다른 훈련기간을 거쳐 생산되므로 매해의 회귀계수는 모두 다른 값을 가진다(Figure 4). 사용된 회귀계수의 시계열은 Figure 8과 같다.

회귀 계수 자체의 값을 나타내었기 때문에 강수와 음의 상관을 가지는 NPI와 SHI의 경우 음의 회귀계수를 가진다. NPI의 경우 거의 모든 해에 대해서 $-0.6 \sim -0.8$ 범위의 회귀계수를 가지고, SHI의 경우에도 훈련기간에 상관없이 평균 -0.6 정도의 회귀계수를 안정적으로 나타내었다. IOBM의 경우 1990년대 말부터 2000년대 초반에는 평균

약 0.5가량의 회귀계수를 보였으나 전체적으로 0.8가량의 값을 안정적으로 보이는 것으로 나타났다. 즉, 훈련기간이 달라도 세 가지 예측인자의 영향이 예측에 고르게 사용되었음을 알 수 있다. 이 세 가지 지수를 예측인자로 하여 MLR을 통해 예측된 결과를 Figure 9에 나타내었다. Figure 9의 검은 실선은 ASOS 관측 자료의 MA 강수 편차 시계열이고 빨간 실선은 MLR을 이용해 예측한 MA강수 편차 시계열이다. 예측 결과와 관측간의 시간상관계수는 0.63으로 99% 신뢰수준에서 유의하게 남한의 MA 강수 편차가 예측되었음을 알 수 있다. 대체로 통계적 방법으로 예측된 MA 강수 편차의 시계열이 관측 강수의 변동을 잘 따라가나 2000, 2001년의 가뭄이나 2002, 2003년의 변동폭이 큰 해에 대해서는 평년대비 높고 낮음은 모의하였으나 그 변동폭은 다소 차이가 있다. 또한 이 기간은 앞서 Figure 8에서 IOBM의 회귀계수가 낮아진 해와 거의 일치함으로 추후 이 해들의 이른 봄철 강

수의 특징 및 인도양 변동성과의 관계에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

MLR에 의해 예측된 강수 편차의 3분위 예측성을 살펴보기 위해 Table 5에 MLR예측 결과의 3분위 표를 나타내었다. 3분위를 나누는 기준으로는 표준정규분포를 3등분 하는 0.43σ 를 사용하였으며, 여기서 σ 는 표준편차(standard deviation)이다. 표에서 살펴보면 정답률(Hit Rate)이 61%, 오답률(False Alarm Rate)이 20%로 MLR을 이용한 예측이 평년 대비 강수의 높고 낮음 혹은 평년수준을 잘 구분해 내는 것으로 나타났으며, 평년 이하의 강수에 대한 정답률은 64%, 평년 이상의 강수에 대한 정답률은 70% 그리고 평년수준의 강수에 대한 정답률은 50%이다. 즉, MLR을 이용해 예측된 강수가 평년수준보다 높고 낮은 경우, 특히 평년보다 강수가 많을 때에는 정답률이 높으나 평년수준의 강수에 대해서는 3분위 예보 성공률이 낮다. 그러므로 본 연구를 통해 개발된 통계적 예측 모형

Figure 8. Regression Coefficients of each predictor which are produced every year by applying leave-two-out cross validation. NPI and SHI are indices itself without multiplying minus 1.

Figure 9. Time series of early spring precipitation anomaly over South Korea from observation (black, rectangular) and forecast of statistical prediction model (red, circle).

Table 5. 3×3 Contingency table between observation and MLR prediction.

Hit Rate	61%	Forecast		
False alarm Rate	20%	Above	Normal	Below
OBS	Above	1983, 1990, 1991, 1996, 1998, 2002, 2012	1985, 1999, 2003	
	Normal	1992, 2010	1988, 1997, 2004, 2009, 2011, 2013	1982, 1989, 1995, 2005
	Below	2007	1986, 2000, 2001	1981, 1984, 1987, 1993, 1994, 2006, 2008

은 이른 봄철의 남한의 강수에 대해 평년대비 높고 낮음을 예측하는 3분위 계절 전망에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 남한의 이른 봄 강수와 통계적으

로 유의한 지연상관을 가지는 지수들 가운데 상호 독립적인 지수를 선정하여 이를 예측인자로 하는 통계적 MA 강수 예측모형을 개발하였다. 선정된 지수는 MA강수 한해 전의 9월의 NPI, 10월의 SHI 그리고 12월의 IOBM으로 모두 남한 평균 초봄 강수와 95% 이상의 신뢰수준에서 유의한 상관성을 가지며, 상호간의 시간상관계수는 0.1 이하로 매우 낮아 서로 독립적임을 확인하였다. 먼저

선정된 지수들이 한반도 및 한반도 주변 지역의 강수에 미치는 영향을 살펴보기 위해 재분석 강수 자료와의 회귀계수분포를 분석해 보았다(Figure 5). 그 결과 NPI는 남한을 중심으로 좁은 영역의 강수에 대해 영향을 미치는 것으로 나타났고, SHI의 경우 한반도와 만주 일대의 강수에 영향을 미치는 것으로 나타났다. IOBM은 다른 지수들 보다 넓은 극동아시아 영역에 대하여 영향을 미쳐 한반도 뿐 아니라 중국의 양쯔강 일대와 일본 남부 지역의 강수에도 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이러한 강수 패턴이 유도되는 이유는 850hPa에서 한반도로 유입되는 수분속과 한반도 상공으로의 상층 제트복상과 관련이 있으며 IOBM의 영향이 가장 통계적으로 유의하게 나타났다(Figure 6과 Figure 7). 하지만 지수와 강수량과의 시간상관계수는 통계적으로는 유의하나, 한반도 주변 대기 순환장에서는 통계적으로 유의하지 않은 경우도 나타날 뿐 아니라, 사용된 지수들이 대표하는 현상이 한해 전의 가을 북태평양, 시베리아 그리고 겨울철의 인도양 등 한반도 주변과 시·공간적 차이가 있는 현상들이므로 해당 지수들이 어떻게 동아시아의 초봄의 대기 순환장에 영향을 주는 것인지에 대한 역학적 메커니즘을 밝히는 후속 연구가 필요할 것이다.

3.2절에서는 선정된 세 가지 지수를 이용해 남한의 이른 봄 강수에 대한 통계적 예측을 시행하고 이를 평가해 보았다. 검증을 위해 leave-two-out 교차검증이 적용되었고, 이에 따라 매 해 다른 회귀계수가 적용되었다. 회귀계수의 시계열을 살펴보면 세 지수가 골고루 일정한 비율을 가지고 강수 예측에 사용됨을 알 수 있다. 개발된 모형으로부터 예측된 강수는 관측 강수시계열의 변동을 잘 따르는 것으로 나타났고, 시간상관계수는 0.63, 오차제곱근은 1.12로 99% 신뢰구간에서 통계적으로 유의하게 남한의 이른 봄 강수 편차가 예측됨을 알 수 있다. 또한 3분위 예보 예측성은 정답률이

61%로 모형의 3분위 예측성이 높음을 알 수 있었다. 평년과 유사한 경우 예측 성공률이 50%로 비교적 잘 모의하지 못하는 것으로 나타난 반면, 평년대비 높거나 낮은 강수에 대해서는 각각 70%, 64%의 정답률을 보여 남한의 이른 봄철 강수의 3분위 예보, 특히 평년보다 높거나 낮은 강수에 대해 좋은 정보를 제공할 수 있는 예측 모형이라 생각된다. 한편, 강수량은 항상 양의 실수값을 가지는 변수로 다중선형회귀모형을 그대로 적용하는데 제약이 있다. 그러나 본 연구에서는 강수 편차를 다중선형회귀모형의 예측대상으로 사용하였으며 강수의 편차만으로도 3분위 예보와 같이 의미 있는 강수정보를 제공할 수 있음을 보였다. 또한, 예측된 강수 편차를 이용해 재구성한 강수량 역시, 본문에 제시하지는 않았으나, 음의 값은 나타나지 않는 것으로 확인하였다.

현재 최신기술이라 불리는 역학모델에 있어서도 이른 봄철의 강수는 예측이 힘든 실정이다. 또한 비교적 메커니즘이 뚜렷한 여름철의 강수에 비하여 환절기에 해당하는 봄철의 강수의 발생 메커니즘을 발견하고 이해하는 데에 어려움이 있다. 그러므로 본 연구에서 개발한 통계적 모형은 역학적 또는 물리적 관계를 설명하지는 못하지만 통계적 정보만으로 남한의 이른 봄철의 강수량의 3분위 예측정보를 제공할 수 있다는 점에서 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한 추후에 지수들과 남한의 강수 사이의 관계에 대한 물리·역학적 해석연구가 진행된다면 남한의 봄철 강수에 대한 이해가 넓어질 것으로 기대된다.

사사

본 성과물은 농촌진흥청 연구사업(과제번호: PJ 012293)의 지원에 의해 이루어진 것임.

참고문헌

- Ahn, J. B., Ryu, J. H., Cho, E. H., Park, J. Y., and Ryoo, S. B., 1997, A Study of Correlations between Air-Temperature and Precipitation of Korea and SST around Korean Peninsula, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 33(3), 487-495 (in Korean with English abstract).
- Ahn, J. B. and Lee, J., 2016, A new multimodel ensemble method using nonlinear genetic algorithm: An application to boreal winter surface air temperature and precipitation prediction, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, doi:10.1002/2016JD025151.
- Byun, H. -R., Lee, D. K., and Jeong, C. H., 1992, A study on the atmospheric circulation during the dry period before the Changma. Part I: existence and characteristics, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 28, 71-88 (in Korean with English abstract).
- Choi, K. -S., Kim, D. -W., Lee, J. -S., and Byun, H. -R., 2009, Relationship between Korean Drought and North Pacific Oscillation in May, *Atmosphere*, 19(1), 67-78 (in Korean with English abstract).
- Choi, K. -S., Kang, S. D., and Kim, H. D., 2013, Spatiotemporal variability of April rainfall in Korea by western Pacific teleconnection pattern, *International Journal of Climatology*, 33, 1168-1177.
- Gong, D.-Y., Wang, S. -W., and Zhu, J.-H., 2001, East Asian winter monsoon and Arctic Oscillation, *Geophysical Research Letters*, 28(10), 2073-2076.
- Harris, I., Jones, P. D., Osborn, T. J., and Lister, D. H., 2014, Updated high-resolution grids of monthly climatic observations-the CRU TS3.10 Dataset, *International Journal of Climatology*, 34: 623-642.
- Jeong, H. -I., Ashok, K., Song, B. G., and Min, Y. M., 2008, Experimental 6-month hindcast and forecast simulation using CCSM3, *APCC 2008 technical report*, APEC Climate Center.
- Jhun, J. G. and Lee, E. J., 2004, A New East Asian Winter Monsoon Index and Associated Characteristics of the Winter Monsoon, *Journal of Climate*, 17, 711-726.
- Jo, S. and Ahn, J. B., 2015, Improvement of CGCM prediction for wet season precipitation over Maritime Continent using a bias correction method, *Int. J. Climatol.*, 35(13), 3721-3732.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K. C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Roy Jenne, and Dennis Joseph, 1996, The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, 437-471.
- Kim, S. J., Flato, G. M., and Boer, G. J., 2003, A coupled climate model simulation of the last glacial maximum, part 2: approach to equilibrium, *Cimate Dynamics*, 20, 635-661.
- Kim, S., Park, J. K., and Kim, M. K., 2005, The Regime Shift of the Northern Hemispheric Circulation Responsible for the Spring Drought in Korea, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 41 (4), 571-585 (in Korean with English abstract).
- Kim, G. -U., Ok, J., Seo, K. -H., and Han, S. -D., 2012, Interdecadal Variability and Future Change in Spring Precipitation over South Korea, *Atmosphere*, 22(4), 449-454 (in Korean with English abstract).
- Kim, J. -Y. and Seo, K. -H., 2014, The Development of Ensemble Statistical Prediction Model for Changma Precipitation, *Atmosphere*, 24(4), 533-540 (in Korean with English abstract).
- Kim, H. J. and Ahn, J. B., 2015, Improvement in Prediction of the Arctic Oscillation with a Realistic Ocean Initial Condition in a CGCM, *Journal of Climate*, 28, 8951-8967.

- Kug, J. S., Lee J. Y., and Kang I. S., 2008, Systematic error correction of dynamical seasonal prediction of sea surface temperature using a stepwise pattern project method, *Monthly Weather Review*, 136, 3501-3512.
- Kwon, M. H., 2013, Diagnosis of Northeast Asian Summer precipitation using the Western North Pacific Subtropical High Index, *Journal of the Korean Earth Science Society*, 34(1), 102-106 (in Korean with English abstract).
- Lau, K. -M., Kim, K. -M., and Yang, S., 2000, Dynamical and boundary forcing characteristics of regional components of the Asian summer monsoon, *Journal of Climate*, 13, 2461-2482.
- Lee, D. K. and Kim, Y. A., 1997, Springtime Weather Types over Northeast Asia and Relationship with Yellow Sand Events during 1980-1989, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 33 (1), 17-40 (in Korean with English abstract).
- Lee, E. J., Jhun, J. G., and Park, C. K., 2005, Remote Connection of the Northeast Asian Summer Rainfall Variation Revealed by a Newly Defined Monsoon Index, *Journal of Climate*, 18, 4381-4393.
- Lee, S. Y. and Lee, H. P., 2006, Analysis of Forest Fire Occurrence in Korea, *Transactions of Korean institute of fire science and engineering*, 20(2), 54-63 (in Korean with English abstract).
- Lee S. E. and Seo, K. H., 2013, The development of a statistical forecast model for Changma, *Weather Forecasting*, 28, 1304-1321.
- Lim E. P., Hendon, H. H., Langford S., Alves, O., and Day, K. A., 2012, Improvements in POAMA2 for the prediction of major climate drivers and south eastern Australian rainfall, *CAWCR Technical Report*, No.51, <http://www.cawcr.gov.au/publications/technicalreports.php>.
- Rayner, N. A., Parker, D. E., Horton, E. B., Folland, C. K., Alexander, L. V., Rowell, D. P., Kent, E. C., and Kaplan A., 2003, Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century, *Journal of Geophysical Research*, 108(D14), 4407 10.1029/2002JD002670.
- Rienecker, M. M., Suarez, M. J., Todling, R., Bacmeister, J., Takacs L., Liu, H. -C., Gu, W., Sienkiewicz, M., Koster, R. D., Gelaro, R., Stajner, I., and Nielsen, J. E., 2008, The GEOS-5 data assimilation system documentation of versions 5.0.1, 5.1.0, and 5.2.0, *NASA technical report series on global modeling and data assimilation*, 27.
- Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Behringer, D., Hou, Y. T., Chuang, H. Y., Iredell, M., Ek, M., Meng, J., Yang, R., Mendez, M. P., van den Dool, H., Zhang, Q., Wang, W., and Chen, M., 2014, The NCEP climate forecast system version 2, *Journal of Climate*, 27(6), 2185-2208.
- Saji, N. H., Goswami, B. N., Vinayachandran P. N., and Yamagata, T., 1999, A dipole mode in the tropical Indian Ocean, *Nature*, 401(6751), 360-363.
- Schwing, F. B., Murphree, P., and Green, P. M., 2002, The Northern Oscillation Index(NOI): a new climate index for the northeast Pacific, *Progress in Oceanography*, 53(2), 115-139.
- Simmons, H., Jayne, S., St Laurent, L., and Weaver, A., 2004, Tidally driven mixing in a numerical model of the ocean general circulation, *Ocean Modelling*, 6(3), 245-263.
- Tachibana, Y., Iwamoto, T., OGI, M., and Watanabe, Y., 2004, Abnormal Meridional Temperature Gradient and its Relation to the Okhotsk High, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 82 (5), 1399-1415.
- Trenberth, K. E. and Hurrell, J. W., 1994, Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific, *Climate Dynamics*, 9(6), 303-319.

- Wallace, J. M. and Gutzler, D. S., 1981, Teleconnections in the Geopotential Height Field during the Northern Hemisphere Winter, *Monthly Weather Review*, 109(4), 784-812.
- Wang, B. and Fan, Z., 1999, Choice of South Asian summer monsoon indices, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(4), 629-638.
- Wang, H. and Mehta, V. M., 2008, Decadal Variability of the Indo-Pacific Warm Pool and Its Association with Atmospheric and Oceanic Variability in the NCEP-NCAR and SODA Reanalyses, *Journal of Climate*, 21(21), 5545-5565.
- Webster, P. J. and Yang, S., 1992, Monsoon and ENSO: Selectively interactive systems, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 118(507), 877-926.
- Wilks, D. S., 2006, *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. 2nd ed*, Academic Press, 630pp.
- Xiang, B., Wang, B., Yu W., and Xu S., 2013, How can anomalous western North Pacific Subtropical High intensify in late summer?, *Geophysical Research Letters*, 40(10), 2349-2354.
- Yang, S., Lau, K. M., and Kim, K. M., 2002, Variations of the East Asian Jet Stream and Asian-Pacific-American Winter Climate Anomalies, *Journal of Climate*, 15, 306-325.
- Yang, J., Liu, Q., Xie, S.-P., Liu, Z., and Wu, L., 2007, Impact of the Indian Ocean SST basin mode on the Asian summer monsoon, *Geophysical Research Letters*, 34, L02708.
- <http://cis.apcc21.org/opendap/>
- <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.gpcp.html>
- <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list>
- <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices>
- <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc>
- <http://www.jamstec.go.jp/frcgc/research/d1/iod>

책임편집: 이경미

영문교열: 이은걸