

원격상관을 이용한 북동아시아 여름철 강수량 예측

이강진* · 권민호

한국해양과학기술원 물리연구본부

(접수일: 2014년 12월 3일, 수정일: 2014년 12월 19일, 게재확정일: 2014년 12월 26일)

A Prediction of Northeast Asian Summer Precipitation Using Teleconnection

Kang-Jin Lee* and MinHo Kwon

Physical Oceanography Division, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Ansan, Korea

(Manuscript received 3 December 2014; revised 19 December 2014; accepted 26 December 2014)

Abstract Even though state-of-the-art general circulation models is improved step by step, the seasonal predictability of the East Asian summer monsoon still remains poor. In contrast, the seasonal predictability of western North Pacific and Indian monsoon region using dynamic models is relatively high. This study builds canonical correlation analysis model for seasonal prediction using wind fields over western North Pacific and Indian Ocean from the Global Seasonal Forecasting System version 5 (GloSea5), and then assesses the predictability of so-called hybrid model. In addition, we suggest improvement method for forecast skill by introducing the lagged ensemble technique.

Key words: Monsoon, seasonal prediction, canonical correlation analysis, lagged ensemble technique

1. 서 론

동아시아 몬순은 유라시아 대륙과 태평양 간의 거대한 열적 차이로 인한 독특한 지형적 강제력에 의해 나타나는데, 이는 아시아 지역 기후 시스템의 특징적인 요소 중 하나이다(Wang et al., 2008). 또한 열대 지역에서부터 중위도 지역에 이르는 복잡한 시공간적 구조를 가진다. 동아시아 여름 몬순의 예측은 엄청난 사회 경제적 가치를 가지는 가장 중요한 과제임에도 불구하고, 최근 발표된 모형 성능 평가 보고서는 성능이 우수한 역학 모형들의 몬순 강수 예측 성능이 좋지 못하다는 것을 보여준다(Wang et al., 2012).

역학 모형의 한계를 극복하기 위한 대안 중 하나로 통계적 기법을 활용하여 예측 성능을 개선하는 방안이 많은 선행 연구들을 통해 제시되어 왔다(Barnett

and Preisendorfer, 1987; Bretherton et al., 1992; Landman and Mason, 1999). Barnett and Preisendorfer (1987)는 예측변수(predictand)의 분산을 가장 많이 설명하는 예측인자(predictor)의 최적 선행 조합을 찾는 정준상관분석(Canonical Correlation Analysis, CCA)을 제안하였다. 정준상관분석은 예측인자가 특정한 분포를 가질 때 이와 관련된 예측인자의 기후 편차 분포를 산출하며, 예측인자와 예측변수는 다차원 벡터 정보를 가진다.

Kwon and Lee (2014)에서는 북서태평양 지역과 동아시아 지역 간의 원격 상관관계(Lau et al., 2000)를 바탕으로 정준상관분석 모형을 구성하고, 역학 모형으로부터 예보된 북서태평양 지역의 바람장을 투입하여 산출되는 동아시아 강수 패턴의 예측 성능을 평가하였다. 본 연구에서는 Kwon and Lee (2014)에서 구성된 역학-통계 모형에 선행 연구들을 통해 알려진 잠재 예측인자를 추가하여 예측 성능을 평가하고, 서로 다른 초기 조건을 가지는 예측장을 조합하여 앙상블 크기를 증가시키는 지연 앙상블 기법(Lagged Ensemble Technique, LET)을 통해 예측 성능을 개선하고자 한다.

*Corresponding Author: Kang-Jin Lee, Physical Oceanography Division, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Ansan 426-744, Korea
Phone : +82-31-400-7761, Fax : +82-31-408-5829
E-mail : kjlee@kiost.ac

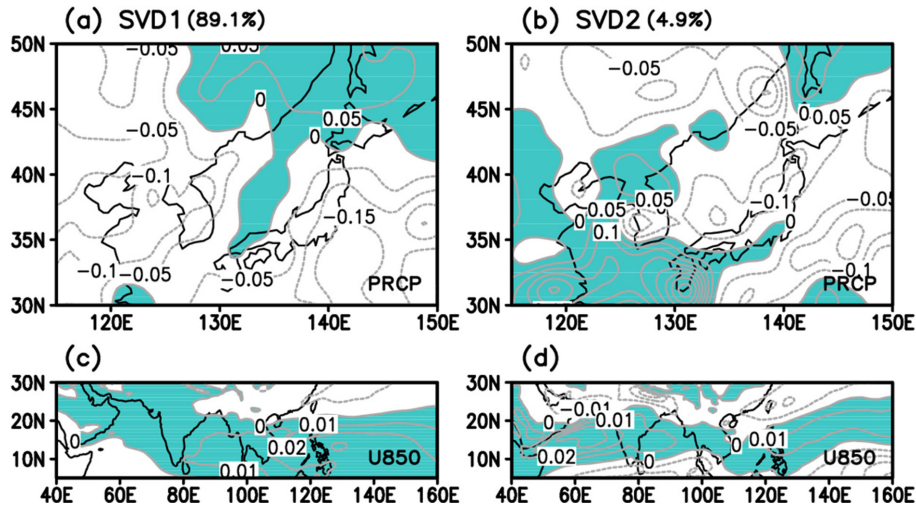


Fig. 1. The first two singular vectors for anomalies of (a), (b) precipitation rates and (c), (d) zonal wind at 850 hPa for 14 summer seasons (1996~2009).

2. 자 료

역학-통계 모형 구성에는 예측인자로 GloSea5 (Global Seasonal Forecasting System version 5) 6개월 적분된 hindcast 자료를 사용하였으며, 예측변수로 CMAP (CPC Merged Analysis of Precipitation) 월별 자료를 사용하였다. GloSea5 자료의 공간 해상도는 경도 0.83도, 위도 0.56도 간격이고, CMAP 자료의 경우 경도 2.5도, 위도 2.5도 간격이다.

GloSea5는 영국 기상청이 개발한 전구 계절예측 시스템으로 2013년 7월부터 GloSea4를 대체하여 현업에 운용되고 있다. GloSea5는 앙상블 예측 시스템으로 대기, 해양, 해빙, 지면 과정이 포함된 대기-해양 결합 모형 HadGEM3의 고해상도 버전이다(MacLachlan et al., 2014). CMAP은 전구 강수를 우량계 관측값과 위성 기반 알고리즘으로부터의 추정값을 병합하는 기법으로 분석 자료는 경도 2.5도, 위도 2.5 간격이다(Xie and Arkin, 1997).

분석 기간은 GloSea5 hindcast 자료가 가용한 1996년부터 2009년까지의 14년이다. 본 연구의 목적은 여름철 평균 강수량의 예측에 있으므로 모든 자료는 기후 평균값이 제거된 편차의 6~8월 평균값을 사용한다.

3. 예측인자 추가에 따른 예측 성능 개선

북서태평양 몬순뿐만 아니라 인도 몬순 또한 전지구 원격 상관(Circumglobal Teleconnection, CGT) 패턴에 의해 동아시아 몬순과 음의 상관관계를 가지는 것으로 알려져 있다(Ding and Wang, 2005). 인도 몬

순 지역에서 평년보다 활발한 대류 활동이 있을 경우 티벳 고원 서쪽에 강한 상층 고기압성 흐름이 만들어진다. 이에 따라 동아시아 지역 상층에 강한 고기압성 흐름이 유도되고 상대적으로 강수량이 감소한다.

Kwon and Lee (2014)와 동일한 방법으로 서로 다른 지역의 변수간의 결합 모드를 조합하여 정준상관 분석 모형을 구성하되, 예측인자의 영역을 인도양까지 확장하여 인도 몬순의 영향을 포함하고자 하였다. 예측인자는 북서태평양과 인도양 지역(40°~160°E, 5°~30°N)의 동서방향 바람 편차를 사용하고, 예측변수는 동아시아 지역(115°~150°E, 30°~50°N) 강수 편차를 사용하였다. 예측변수(A_{ik})와 예측인자(B_{jk})는 특이 값 분해(Singular Value Decomposition, SVD)에 의해 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$A_{ik} = \sum_n U_{in} p_{nk} \quad B_{jk} = \sum_n V_{jn} q_{nk}$$

U_m 와 V_m 은 정규화된 특이 벡터(singular vector)이고 p_{nk} 와 q_{nk} 는 특이 값(singular value)의 시계열이다. i, j 는 북서태평양 지역과 동아시아 지역의 격자 공간, k 는 시간, m 은 특이 값 분해 모드의 인덱스를 나타낸다.

Figure 1은 특이 값 분해 결과 가장 높은 공분산을 가지는 두개의 결합 모드를 보여준다. 첫 번째 결합 모드의 공분산의 비율은 89.08%이고 동서방향 바람 모드의 시계열과 북서태평양 몬순지수(Wang et al., 2001)와의 상관계수는 0.74로, 이는 북서태평양 몬순의 변동성을 나타낸다. 두 번째 결합 모드의 공분산의 비율은 4.94%이고 동서방향 바람 모드의 시계열과 인도 몬순지수(Wang et al., 2001)와의 상관계수는

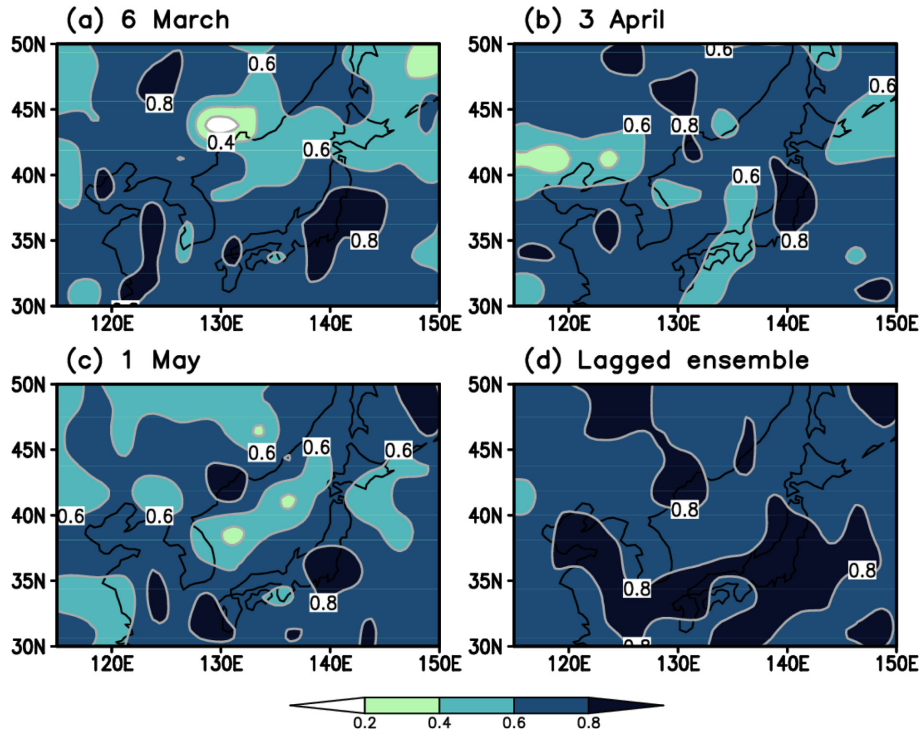


Fig. 2. (a)~(c) Maps of correlation coefficient between the summer precipitation from hybrid (dynamic-statistical) model forecasts with different initial conditions and CMAP precipitation for 1996~2009. (d) Forecast skill of Northeast Asian summer precipitation using lagged ensemble technique (LET).

0.50으로, 이는 인도 몬순의 변동성을 나타낸다. 강수 모드는 동아시아 강수의 경년 변동성을 나타낸다. 결합 모드들을 조합하면 특정 해의 여름철 동아시아 지역 강수량 편차를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$A_{ik_1} = \sum_n U_{in} \frac{\sum_k p_{nk} q_{nk} \sum_j V_{jn} B_{jk_1}}{\sum_k q_{nk}^2 \sum_j V_{jn}^2},$$

B_{jk_1} 는 GloSea5로부터 예측된 특정 해의 북서태평양 지역 850hPa 동서방향 바람 편차이고, A_{ik_1} 는 역학-통계 모형으로부터 계산되는 같은 해의 동아시아 지역 강수량 편차이다. 역학-통계 모형에서 결합 모드는 5개까지 조합하였으며, 예측 성능 검증을 위해 1996년부터 2009년까지 개별 해의 강수 편차를 예측하였다.

역학-통계 모형을 이용하여 동아시아 지역 강수 편차를 예측한 결과 공간 패턴의 예측 성능이 대부분의 영역에서 향상되었으며, 동아시아 지역(115°~150°E, 30°~50°N)을 공간 평균한 강수 지수 또한 CMAP 자료와 잘 일치하는 것으로 나타난다. 분석 기간 동안 역학-통계 모형이 예측한 동아시아 지역 강수 지수와 CMAP 강수 지수 간의 상관계수는 약 0.81이다.

4. 지연 앙상블 기법을 활용한 예측 성능 개선

현재 현업에서의 계절예측은 기관에 따라 극명한 차이를 보이는데, 유럽 중기예보센터(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)나 호주 기상청(Australian Bureau of Meteorology, BoM)과 같이 매월 특정일에 많은 수의 앙상블이 초기화되는 버스트(burst) 모드와 미국 국립환경예측센터(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)와 같이 일 단위로 적은 수의 앙상블이 적분되는 연속(continuous) 모드로 구분할 수 있다. 연속 모드는 대기와 해양의 초기 상태를 보다 잘 반영하고 다음 달 기후 변동성에 영향을 미칠 수 있는 모드의 빠른 변화를 잘 캡처할 수 있는 장점이 있지만, 앙상블 멤버 수가 적기 때문에 서로 다른 초기 조건의 예보들을 다수 활용하는 지연 앙상블 기법을 필요로 한다(Chen et al., 2013).

지연 앙상블 기법은 계절 평균의 예측 성능에 영향을 미칠 수 있으며, 선행 시간(lead time)이 긴 예측자료를 활용하면 앙상블 사이즈를 증가시키고 예측 성능과 신뢰도를 향상시킬 수 있다. 본 연구에서 예측 인자로 사용하는 GloSea5 예측장의 경우 연속 모드에

해당하는데, 지연 앙상블 기법을 사용함으로써 계절 평균과 관련된 불확실성을 적절히 제거할 수 있다.

Figures 2a, b, c는 서로 다른 초기 조건의 역학 모형 예측장에 따른 역학-통계 모형의 예측 성능을 보여준다. 그림에서 예측 성능은 역학-통계 모형이 예측한 강수 편차와 CMAP 강수 편차의 지점 간 상관계수를 등치선으로 표현하였다. 국지적으로 선행 시간 증가에 따라 예측 성능이 향상되는 지역과 저하되는 지역이 공존하지만, 지연 앙상블 기법을 사용하면 거의 모든 영역에서 개별 초기 조건의 역학-통계 모형보다 예측 성능이 개선된다(Fig. 2d). 역학-통계 모형으로 예측된 공간 평균된 강수 지수와 CMAP 강수 지수 간의 상관계수 또한 0.89로 개별 초기 조건의 역학-통계 모형보다 높다.

본 연구에서 사용된 역학-통계 모형은 항상성(stationarity)을 만족하는 통계적 성질을 가정하지만, 실질적인 예측성을 파악하기 위해 교차검증(cross validation)이 요구된다. GloSea5 hindcast 자료의 가용 기간이 14년으로 짧기 때문에 적은 수의 표본을 대상으로 통계적 유의성을 충분히 검증하기 위해 Leave-one-out 교차검증(Michaelson, 1987)을 수행하였다. Leave-one-out 교차검증은 특정 해의 예측 성능을 검증하기 위해서 특정 해를 제외한 나머지 13개 해의 자료로 통계 모형을 적합하고 그 예측성을 평가한다. 이와 같은 방식으로 적합된 서로 다른 14개 해의 예측 모형을 통해 예측성 평가를 반복 수행하며, 이를 통해 훈련기간(training period)에 포함되지 않은 자료가 투입되었을 때의 예측 모형 성능을 추정할 수 있다. 교차검증을 통한 두 지수의 상관계수는 0.70이다.

지연 앙상블이 많은 이점을 가지지만 변수, 지리적 위치, 앙상블 시간 규모에 따라 결과가 다르게 나타나며, 선행 시간이 긴 예측장을 지연 앙상블에 포함하게 되면 예측 성능의 저하를 가져올 수 있으므로 주의해야 한다.

5. 결론 및 토의

단일 역학 모형의 동아시아 몬순 모의 성능은 적도나 아열대 지역에 비해 매우 낮은 수준이며, 초기 조건이 정확한 AMIP (Atmospheric Model Intercomparison Project) 유형 실험에서도 동아시아 몬순의 예측 성능은 크게 떨어진다. 본 연구에서는 예측변수인 동아시아 몬순과 원격 상관관계를 가지는 인도양과 북서태평양 지역을 예측인자로 정준상관분석 모형을 구성하고, 고해상도 계절예측 시스템인 GloSea5의 예측장을 투입하여 동아시아 여름철 강수 편차의 예측 성능을 진단하였다. 기존 Kwon and Lee (2014)에서 북서태평양 지역 바람 장만을 예측인자로 사용한 것에서 확

장하여 인도양이 포함된 영역을 예측인자로 활용하였으며 이를 통해 예측 성능을 개선하였다. 또한 기존 연구에서 1개월의 선행 시간을 가지는 역학 모형 예측장만을 사용한 것과 달리 1~3개월 이전의 초기 조건으로 생산된 역학 모형 예측장을 이용하여 적합된 역학-통계 모형의 예측 성능을 분석하고, 이를 모두 활용하는 지연 앙상블 기법을 사용하여 예측 대상 지역 전반에 걸쳐 예측 성능을 향상시켰다.

본 연구에서는 GloSea5 hindcast 자료가 가용한 14년만을 대상으로 역학-통계 모형을 적합하였기 때문에 보다 장기간의 자료를 사용하였을 때에 비해 상대적으로 안정성이 떨어지는 것으로 생각된다. 적도 및 아열대 지역만이 아닌 중위도 파열(wave train)과 관련된 잠재 예측인자를 추가하거나 다른 현업 기관의 역학 모형 예측장을 이용하는 모델 간 앙상블 기법 등을 통해 안정성과 신뢰성을 모두 높일 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 기상기술개발원의 기후변화 감시·예측 및 국가정책지원 강화사업(CATER2012-3072)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Barnett, T. P., and R. Preisendorfer, 1987: Origins and levels of monthly and seasonal forecast skill for United States surface air temperatures determined by canonical correlation analysis. *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 1825-1850.
- Bretherton C. S., C. Smith, and J. M. Wallace, 1992: An intercomparison of methods for finding coupled patterns in climate data. *J. Climate*, **5**, 541-560.
- Chen, M., W. Wang, and A. Kumar, 2013: Lagged ensembles, forecast configuration, and seasonal predictions. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 3477-3497.
- Ding, Q., and B. Wang, 2005: Circumglobal teleconnection in the Northern Hemisphere summer. *J. Climate*, **18**, 3483-3505.
- Kalnay, E., 1996: The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 437-471.
- Kwon, M., 2013: Diagnosis of Northeast Asian summer precipitation using the western North Pacific subtropical high index. *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **34**, 102-106.
- Kwon, M., and K.-J. Lee, 2014: A prediction of Northeast Asian summer precipitation using the NCEP Climate Forecast System and canonical correlation analysis. *J.*

- Korean Earth Sci. Soc.*, **35**, 88-94.
- Landman, W. A., and S. J. Mason, 1999: Operational long-lead prediction of South African rainfall using canonical correlation analysis. *Int. J. Climatol.*, **19**, 1079-1090.
- Lau, K. M., M. K. Kim, and K. M. Kim, 2006: Asian summer monsoon anomalies induced by aerosol direct forcing: the role of the Tibetan Plateau. *Clim. Dynam.*, **26**, 855-864.
- MacLachlan, C., and Coauthors, 2014: Global Seasonal forecast system version 5 (GloSea5): a high-resolution seasonal forecast system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, (in press).
- Michaelson, J., 1987: Cross-validation in statistical climate forecast models. *J. Climate Appl. Meteor.*, **26**, 1589-1600.
- Saha, S., and Coauthors, 2013: The NCEP climate forecast system version 2. *J. Climate*, **27**, 2185-2208.
- Wang, B., R. Wu, and K.-M. Lau, 2001: Interannual variability of the Asian summer monsoon: Contrasts between the Indian and the western North Pacific-East Asian monsoons. *J. Climate*, **14**, 4073-4090.
- _____, B. Xiang, and J.-Y. Lee, 2012: Subtropical high predictability establishes a promising way for monsoon and tropical storm predictions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **110**, 2718-2722.
- _____, Z. Wu, J. Li, J. Liu, C.-P. Chang, Y. Ding, and G. Wu, 2008: How to measure the strength of the East Asian summer monsoon. *J. Climate*, **21**, 4449-4463.
- Xie, P., and A. Arkin, 1997: Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 2539-2558.