

상당온위를 사용한 동아시아 여름철 몬순의 6월 및 7월 주 변동 모드 분석

손준혁 · 서경환*

부산대학교 지구환경시스템학부 대기환경과학과

(접수: 2012년 10월 21일, 수정: 2012년 11월 14일, 게재확정일: 2012년 12월 19일)

Dominant Modes of the East Asian Summer Monsoon Using Equivalent Potential Temperature

Jun-Hyeok Son and Kyong-Hwan Seo*

Division of Earth Environmental System, Department of Atmospheric Sciences,
Pusan National University, Busan 609-735, Korea

(Received: 21 October 2012, Revised: 14 November 2012, Accepted: 19 December 2012)

Abstract The monsoon front lies on East Asian region, but it gradually propagates to the north during the boreal summer. The equivalent potential temperature (EPT) reveals the thermodynamical features of air masses and monsoon front. Therefore, this study considered the thermodynamical EPT and dynamical wind fields to clarify the peculiarity of East Asian summer monsoon (EASM) variations in June and July, respectively. Western North Pacific subtropical high (WNPSH) and Okhotsk sea high (OSH) both play the crucial role to interannual variations of EASM frontal activity and amount of rainfall. The OSH is important in June, but the WNPSH is key factor in July. Furthermore, the OSH (June) is affected by North Atlantic tripolar sea surface temperature (SST) pattern and WNPSH (July) is influenced by North Indian Ocean SST warming.

Key words East Asian summer monsoon, monsoon front, equivalent potential temperature, SST anomalies, Western North Pacific subtropical high

1. 서 론

동아시아 여름철 몬순은 한반도와 중국, 일본을 포함하는 넓은 지역에 동서방향으로 길게 형성되는 전선을 동반하여 연 총 강수량의 40~60%를 기록한다. 동아시아 몬순의 지역별 강수량은 매년 큰 폭으로 변화한다. 많은 선행연구에서 여름철의 동아시아 몬순의 경년 변동성은, 엘니뇨, 북대서양 진동, 유라시아 봄철 snow cover와 밀접한 연관이 있다는 것을 밝혔다 (e.g., Wang *et al.*, 2008; Wu *et al.*, 2009; Yim *et al.*, 2010). 또한 몬순 강수의 변동성은 전선을 형성하는

기단들의 움직임과도 밀접한 관련이 있다는 것이 최근 상당온위를 사용한 연구에 의해 제시 되었다 (서경환 등, 2011). 여기서 상당온위는 공기의 온도와 습도를 동시에 표현하는 열역학 변수로 동아시아 몬순 전선을 형성하는 기단들의 열역학 특징을 보여준다. 따라서 열역학적 성질이 다른 두 기단이 만나는 지점인 남북방향 경도의 최대값 지역을 이용하여 동아시아 여름철 몬순 전선의 위치 및 강도를 유추할 수 있다.

동아시아 몬순 전선은 북반구 여름철 동안 시간의 경과에 따라 서서히 북진하는 특징을 가지며, 전선의 위치에 따라서 몬순의 시작과 종결 시기가 변화하고, 주요 강수지역이 달라지게 된다 (Wang and LinHo, 2002). 따라서 강수의 변동성을 파악하기 위해 전선이 시간에 따라 북진하는 특징을 고려하여 몬순의 특징을 분석해야 할 필요가 있다. 8월의 강수는 전선의 영

*Corresponding Author: Kyong-Hwan Seo, Department of Atmospheric Sciences Pusan National University, Busan 609-735, Korea.

Phone : +82-51-510-2181, Fax: +82-51-515-1689
E-mail : khseo@pusan.ac.kr

향이 아닌 태풍과 극지 대류 현상에 의한 강수가 많기 때문에, 전선에 의한 몬순 개념과 다른 방식으로 분석되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 6월과 7월 몬순에 대해 대기 순환장과 기단을 동시에 고려하여 주 모드를 분석하고, 월 별 몬순 특징을 분석하여 이러한 몬순 경년 변동 모드에 영향을 주는 주요 물리과정 및 인자를 밝히도록 하겠다.

2. 자료와 분석방법

본 연구에서는 NOAA Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST, v3b), Global Precipitation Climatology Project (GPCP) precipitation, National Centers for Environmental Prediction-Department of Energy (NCEP-DOE) Reanalysis 2의 월 평균 자료를 사용하였다. 동아시아 지역에 분포하는 기단들의 서로 다른 열역학적 성질을 표현하기 위해 850 hPa 대기의 수분과 기온을 같이 고려한 상당온위를 사용하였고, 이의 남북방향 경도의 음의 최대 값 지역을 몬

순 전선 지역으로 선정하였다 (서경환 등, 2011). 통계적 분석을 위해 회귀분석, 상관관계 분석, Combined EOF 분석을 사용하였다. Combined EOF 분석을 위해 상당온위, U, V-wind를 각각 동아시아 도메인 평균된 standard deviation으로 나눠서 각 변수의 상대적인 중요도를 동등하게 만든 후 자료를 붙여서 계산한 covariance matrix가 사용되었다 (Wang *et al.*, 2008; Wheeler and Hendon, 2004).

3. 결 과

3.1. 6월 및 7월 동아시아 몬순의 일반적 특징

본 연구에서는 동아시아 몬순의 경년 변동성과 관련된 특징을 분석하기 위해서 6월과 7월을 각각 월 평균한 후 분석하였다. Fig. 1은 6월과 7월 강수량의 기후평균 (1979~2010)과 표준 편차를 나타낸 것으로, 6월 강수밴드는 30°N 부근에 위치하며, 중국 동부 지역과 일본 남서 지역에 강한 강수가 나타난다. 반면 7월은 35°N 부근에 강수밴드가 위치하며, 한반도와 일

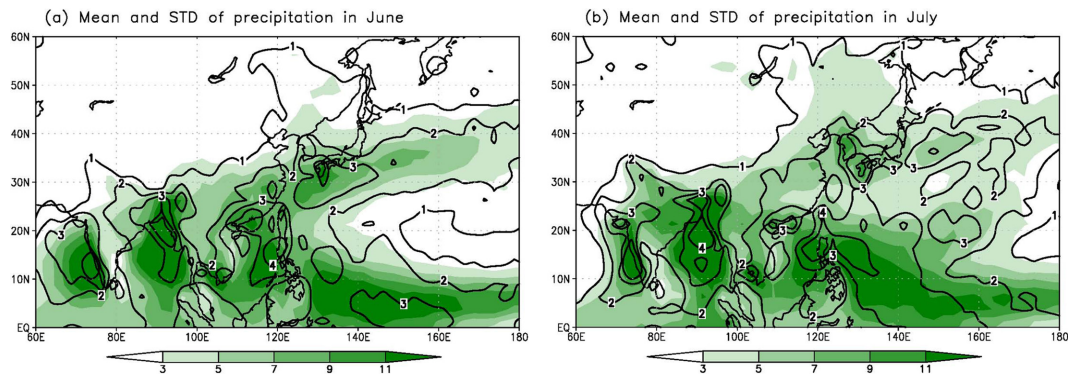


Fig. 1. Climatological mean (color) precipitation (mm day^{-1}) and standard deviation (contour) on (a) June and (b) July.

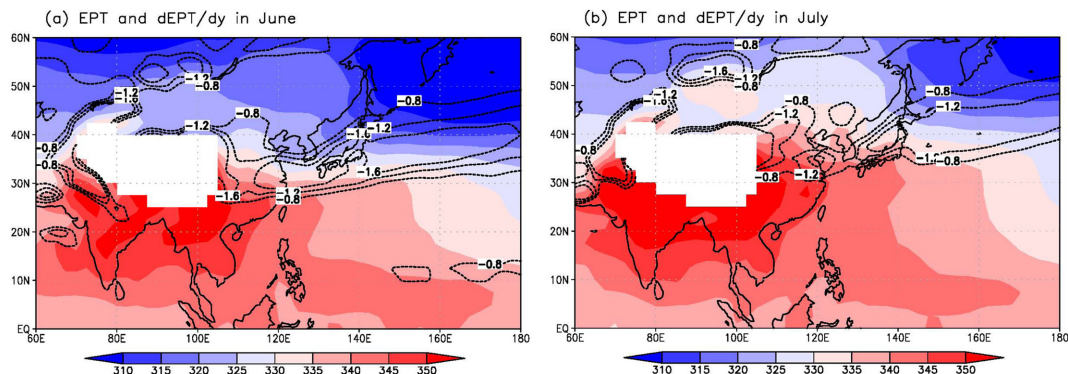


Fig. 2. Climatological mean 850 hPa equivalent potential temperature (color, K) and meridional gradient of equivalent potential temperature (dashed line, $\text{K m}^{-1} \times 10^5$) on (a) June and (b) July.

본 남부지역에 많은 강수를 내린다. 이는 우리나라의 주 장마기간이 7월인 것을 반영한다. 그리고 강수량이 많은 지역은 표준편차 역시 높은 값을 보이는데, 이는 강수량이 많은 지역이 강수의 경년 변동성 역시 크다는 것을 의미한다. 이러한 강수밴드의 위치 및 강도 변화는 몬순 전선의 움직임 및 동아시아 기단의 움직임과도 밀접한 연관이 있다. 이는 상당온위를 사용한 월별 기후 평균 그림에서 잘 나타난다 (Fig. 2).

상당온위의 남북 경도의 최소값 지역은 전선의 위치를 의미하며, 7월의 전선의 위치가 6월 보다 북쪽에 위치한다 (서경환 등, 2011). 이러한 원인은 6월에 북쪽의 대륙성 한대 기단과 오흐츠크해 기단의 세력이 강하고, 상대적으로 남쪽의 온난한 열대 기단의 세력이 약하기 때문에 전선이 북상하지 못하고 남쪽에 형성된다. 반면 7월은 북쪽의 한대 기단의 세력이 약화되며, 남쪽의 온대기단의 세력이 강화되어 전선이 북상하게 된다.

남쪽의 온난 기단과 관련된 북서태평양 고기압의 움직임은 대기 순환장 분석에서도 나타나지만 (보이지 않음), 그 외 몬순 전선과 관련된 동아시아 기단들의 특징도 잘 보여주는 열역학적 변수인 850-hPa 상당온위를 역학 변수인 하층 바람을 함께 고려하면, 강수와의 연관성을 더 잘 표현할 수 있는 장점이 있다.

3.2. 월별 경년 변동 메커니즘 분석

상당온위와 하층 바람장을 동시에 고려하기 위해서 combined EOF를 6월과 7월에 대해서 각각 수행하였다 (Fig. 3). 상당온위와 바람장을 동시에 사용하여 EOF를 수행하게 되면, 기존의 역학 변수만 사용하는 것보다 동아시아 여름철 몬순 강수의 변동성에 기인하는 역학적-열역학적 메커니즘을 잘 파악할 수 있다. 두 EOF 결과에서 각각 첫 번째 모드가 북서태평양 고기압 (Western North Pacific subtropical high)과 오흐츠크해 고기압 (Okhotsk Sea high)의 대치를 보여준다. 6월은 오흐츠크해 고기압의 세기가 강하며 일본 남부지역까지 확장되어 있고, 오흐츠크해 기단의 차고 건조한 공기가 고기압성 흐름을 타고 한반도 쪽으로 유입하는 것을 볼 수 있다. 열대 지역에는 필리핀 동쪽에 북서태평양 고기압이 위치하는 것을 볼 수 있고 145°E, 15°N 지역을 중심으로 상대적으로 건조한 공기가 위치하게 된다. 반면 7월은 오흐츠크해 고기압의 세기가 6월보다 줄어들어 일본 중부 지역까지 차고 건조한 공기가 유입된다. 또한 7월의 북서태평양 고기압은 필리핀 서쪽과 북쪽으로 확장하며 강화하는 모습을 보이며 상당온위에서도 건조한 기단이 서쪽으로 확장하여 음의 아노말리가 나타나게 된다. 6월에 북서태평양 고기압 북쪽에 나타나는 상당온위

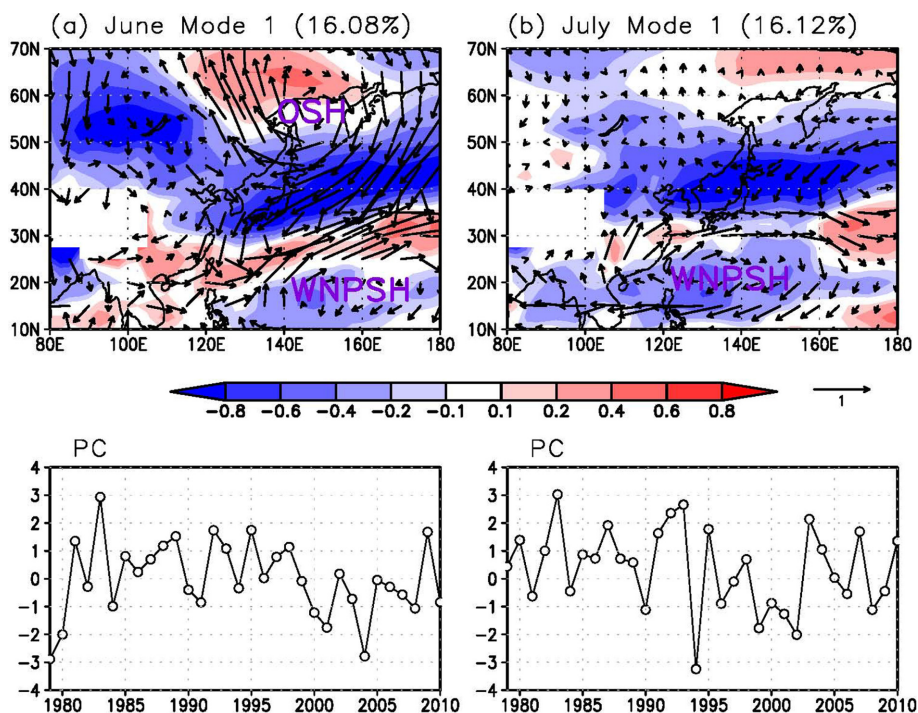


Fig. 3. First combined EOF patterns for (a) June and (b) July equivalent potential temperature (color), U and V-wind (vector). Lower panels show corresponding PC time series.

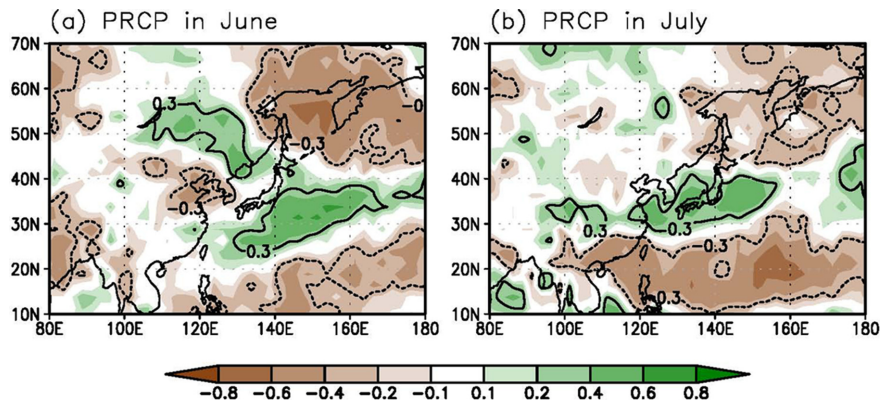


Fig. 4. Map of correlation between precipitation on (a) June and (b) July, and corresponding PC time series (contour denotes 90% confidence level).

양의 아노말리는 고기압성 흐름에 의해 서쪽의 열대 저압부에서 유입되는 고온 다습한 공기를 보여준다. 7월의 경우 고기압 북쪽의 양의 값이 6월보다 약하게 나타나지만, 여전히 남북방향의 상당온위 경도를 음의 값으로 강하게 하여 전선을 강화시키는 역할을 한다. 이러한 공간 패턴과 관련된 PC time series는 두 경우 모두 강한 경년 변동성을 보이지만, 상관관계는 0.25로 6월과 7월 몬순은 전선의 주 위치가 달라져서 서로 연관성이 떨어진다는 것을 알 수 있다.

각각의 PC를 이용하여 강수와의 상관관계 map을 그린 결과 6월은 일본 남쪽의 약 30°N 부근의 강수와 유의한 상관성을 보이며, 7월은 약 35°N 부근의 강수변동과 관련성을 보였다 (Fig. 4). 이는 6월과 7월의 기후학적 동아시아 몬순 강수밴드의 위치를 EOF의 첫 번째 모드가 잘 설명해 준다는 것을 의미한다.

강수와 연관된 순환 패턴을 파악하기 위해 지위고도의 regression map을 그려보면, 6월은 유라시아 대륙을 동서로 관통하는 전 지구 원격 상관 (Circumglobal teleconnection)에 의해 오호츠크해 고기압이 강화되고, 고기압 남쪽에 생성되는 저기압성 아노말리에 의해 동아시아 몬순 강수가 강화되는 것을 알 수 있다 (Fig. 5). 7월의 순환 패턴은 6월과 유사하게 wave train을 형성하지만 오호츠크해보다 북동쪽에 고기압 아노말리를 형성하여 동아시아 지역 강수에 직접적인 영향을 미치지 못한다. 하지만 이 시기에 북서태평양 고기압이 강화되어 남서쪽에서 불어오는 탁월풍에 의해 동아시아 지역의 수증기 공급이 원활하게 되어 몬순 강수가 강화된다. 이러한 순환 패턴의 원인을 찾기 위해 각 PC를 사용하여 SST와의 correlation map을 그려보았다. 그 결과 6월의 몬순은 북대서양 지역의 봄철 tripolar SST 패턴 (Wu *et al.*, 2009)과 연관되는 것을 볼 수 있다 (Fig. 6). 이러한 SST 패턴은 북대서양 진동 (North

Atlantic Oscillation)과 관련되며, 이러한 해수면 온도 아노말리는 여름철에 유라시아 대륙을 동서로 관통하는 로스비 파동을 형성한다 (Wu *et al.*, 2009; Seo *et al.*, 2012). 한편 열대 서태평양의 음의 상관관계는 Fig. 5(a)에서 보이는 전 지구 원격 상관과 무관한 것으로 동아시아 몬순에 영향을 주는 대기의 파동을 형성하지 못한다. 반면 7월의 북서태평양 고기압 강화는, 엘니뇨가 쇠퇴하는 여름철의 인도양 SST warming과 대류권 하층 수렴에 의한 대기 Kelvin 파동을 통해 야

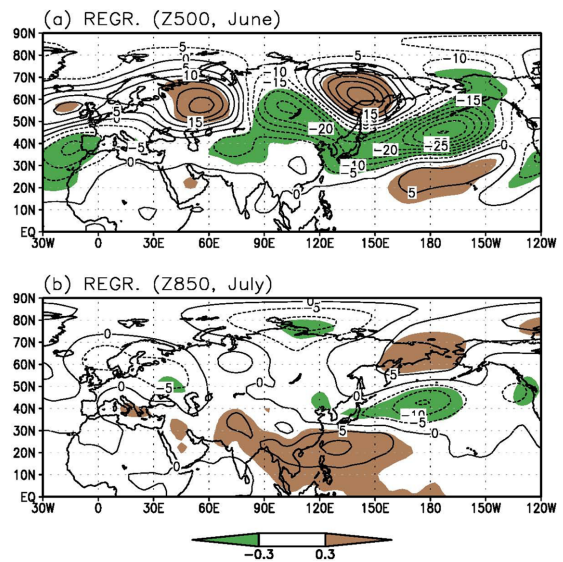


Fig. 5. Regression maps of geopotential height in (a) June (500 hPa) and (b) July (850 hPa), with respect to the corresponding PC time series (shading denotes a 90% confidence level).

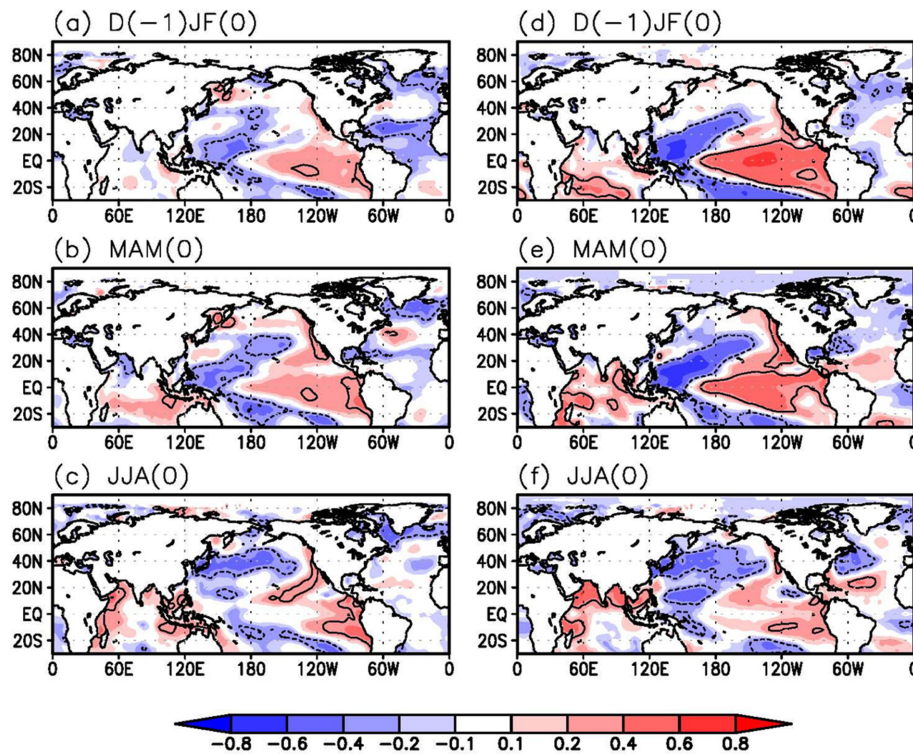


Fig. 6. Map of correlation between SST from the preceding winter to following summer with respect to PC time series in June (left) and July (right; contour denotes a 90% confidence level).

기된 해양성 대륙 지역의 동풍 강화에 의한 결과다 (Yang *et al.*, 2007; Xie *et al.*, 2009). 또한 북서태평양의 cold SST와 대기의 local air-sea interaction에 의한 양의 되먹임 현상으로 인해 자체적으로 고기압을 강화시키게 된다 (Wang *et al.*, 2000). 이러한 인도양 SST warming과 북서태평양 cooling은 동서로 SST의 dipole 구조를 보이는데 이는 최근의 Wang *et al.* (2012)의 분석과 유사한 결과이다.

4. 요약 및 결론

동아시아 몬순의 강수 밴드는 여름철 동안 열적도 (thermal equator)가 북진하는 것과 더불어 시간의 경과에 따라 서서히 북진하는 특징을 가진다. 6월과 7월 강수 밴드의 위치 차이를 만드는 원인은 동아시아 몬순 전선의 위치가 다르기 때문이며, 이러한 전선의 위치 변화를 만드는 원인은 동아시아 지역의 기단들의 열역학적 특성 및 세력이 변화하기 때문이다. 또한 동아시아 지역의 강수는 강한 경년 변동을 하는데, 이러한 원인 역시 대기 순환장과 연관된 기단의 변화에 따른 결과이다. 따라서 본 연구에서는 대기 순환

장을 보여주는 하층 바람장과, 기단의 성질을 보여주는 대기 하층 상당온위를 이용하여 combined EOF 분석을 수행하였다. 그 결과 EOF의 첫 번째 모드에서 6월과 7월 모두 오토츠크해 고기압 및 북서태평양 고기압의 순환 패턴을 보였고, 지위고도를 이용한 regression map에서도 유사한 패턴을 볼 수 있었다. 하지만 6월 몬순에서는 오토츠크해 고기압의 세력이 더 중요한 인자로 작용하였고, 7월 몬순에서는 북서태평양 고기압이 더 중요한 인자로 작용하는 차이를 보였다. 이러한 결과와 관련하여 6월은 북대서양 진동과 관련된 tripolar SST 패턴과 높은 상관성을 보였고, 7월은 열대 서태평양의 SST cooling과 북인도양 SST warming의 dipole 패턴과 높은 상관성을 보였다.

본 연구에서 상당온위와 하층 순환장을 동시에 고려한 분석 방법을 통해 동아시아 몬순의 변동 특성이 6월과 7월이 다르다는 것을 파악하였고, 영향을 주는 주요 해양 현상에도 차이가 있음을 보였다. 하지만 본 연구에서 EOF 분석 결과의 첫 번째 모드를 기반으로 수행되었기 때문에, 가장 큰 변동성을 설명하는 첫 번째 모드를 사용하였음에도 불구하고, 약 10~20%의 변동성만을 포함한다는 부분은 본 연구의 한계점으로

사료된다. 따라서 향후 연구에서는 두 번째 및 세 번째 모드까지 분석하여 물리적 의미를 밝히고, 이를 이용한 물리-통계 예측 모형 개발을 시도할 것이다. 또한 추후 연구에서 동아시아 몬순뿐만 아니라 다른 몬순 지역에도 열역학 변수인 상당온위를 사용하여 몬순 전선의 관점으로 분석을 수행할 것이다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상기술개발관리단의 기후변화 감시 예측 및 국가정책지원 강화사업 (CATER 2012-3071)의 지원으로 수행되었습니다. 더 좋은 논문이 될 수 있도록 세심한 조언을 해주신 두 심사위원님께 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

- 서경환, 손준혁, 이준이, 2011: 장마의 재조명. *한국기상학회지*, **21**, 109-121.
- Seo, K.-H., J.-H. Son, S.-E. Lee, T. Tomita, and H.-S. Park, 2012: Mechanisms of an extraordinary East Asian summer monsoon event in July 2011. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L05704, doi:10.1029/2011GL050378.
- Wang, B. and H. Lin, 2002: Rainy seasons of the AsianPacific monsoon. *J. Climate*, **15**, 386-398.
- _____, J. Liu, J. Yang, T.-J. Zhou, and Z. Wu, 2009: Distinct principal modes of early and late summer rainfall anomalies in East Asia. *J. Climate*, **22**, 3864-3875.
- _____, R. Wu, and X. Fu, 2000: Pacific-East Asia teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate?. *J. Climate*, **13**, 1517-1536.
- _____, Z. Wu, J. Li, J. Liu, C.-P. Chang, Y. Ding, and G.-X. Wu, 2008: How to Measure the Strength of the East Asian Summer Monsoon?. *J. Climate*, **21**, 4449-4463.
- _____, B. Xiang, and J.-Y. Lee, 2012: Subtropical High predictability establishes a promising way for monsoon and tropical storm predictions. Submitted to *Proceedings of the National Academy of Sciences*.
- Wheeler, M. C. and H. H. Hendon, 2004: An All-Season Real-Time Multivariate MJO Index: Development of an Index for Monitoring and Prediction. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 1917-1932.
- Wu, Z., B. Wang, J. Li, and F.F. Jin, 2009: An empirical seasonal prediction model of the East Asian summer monsoon using ENSO and NAO. *J. Geophys. Res.*, **114**, doi:10.1029/2009JD011733.
- Xie, S.-P., K. Hu, J. Hafner, H. Tokinaga, Y. Du, G. Huang, and T. Sampe, 2009: Indian Ocean capacitor effect on Indowestern Pacific climate during the summer following El Nio. *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, doi: 10.1029/2006GL028571.
- Yim, S.-Y., J.-G. Jhun, R. Lu, and B. Wang, 2010: Two Distinct Patterns of Spring Eurasian Snow Cover Anomaly and Their Impacts on the East Asian Summer Monsoon. *J. Geophys. Res.*, **115**, D22113, 10 PP., doi:10.1029/2010JD013996.