

## MJO의 다중스케일 분석을 통한 수십년 변동성

이상현 · 서경환\*

부산대학교 지구환경시스템학부 대기환경과학과

(접수일 : 2010년 12월 20일, 수정일 : 2011년 4월 3일, 게재확정일 : 2011년 4월 14일)

### A multi-scale analysis of the interdecadal change in the Madden-Julian Oscillation

Sang-Heon Lee and Kyong-Hwan Seo\*

*Division of Earth Environmental System, Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University*

(Received : 20 December 2010, Revised : 3 April 2010, Accepted : 14 April 2010)

---

**Abstract :** A new multi-timescale analysis method, Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD), is used to diagnose the variation of the MJO activity determined by 850hPa and 200hPa zonal winds from the National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) Reanalysis data for the 56-yr period from 1950 to 2005. The results show that MJO activity can be decomposed into 9 quasi-periodic oscillations and a trend. With each level of contribution of the quasi-periodic oscillation discussed, the bi-seasonal oscillation, the interannual oscillation and the trend of the MJO activity are the most prominent features. The trend increases almost linearly, so that prior to around 1978 the activity of the MJO is lower than that during the latter part. This may be related to the tropical sea surface temperature(SST). It is speculated that the interdecadal change in the MJO activity appeared in around 1978 is related to the warmer SST in the equatorial warm pool, especially over the Indian Ocean.

**Keywords :** MJO (Madden-Julian Oscillation), EEMD (Ensemble Empirical Mode Decomposition), Combined Empirical Orthogonal Function (CEOF), Interdecadal variation

---

## 1. 서 론

계절 내 진동 또는 매든-줄리안 진동(Madden-Julian Oscillation, MJO; Madden and Julian, 1994; Zhang, 2005)은 강한 대류성 구름을 동반하여 적도에서 발생하고 계절 내 시간규모를 가지는 변동 중에서 가장 지배적인 진동이다. 30~90일 정도의 주기로 진동하며 해면 수온이 따뜻한 인도양에서 생성되어 발달하고, 서태평양으로 동진하며 상대적으로 수온이 낮은 날짜 변경선 근처에 가면 그 세기가 약화되어 소멸하는 특징을 보인다.

MJO는 강한 계절적 변동을 가지고 있어(Salby and Hendon, 1994; Zhang and Dong, 2004) 남반구 여름의 적도 남쪽에 가장 강한 강도를 가지고 있으며 북반구 여름의 아열대에 두 번째로 강한 강도를 가지고 있다. 남반구 여름철 MJO는 오스트레일리아의 몬순(Hendon and Liebmann, 1990)에, 북반구 여름철 MJO는 아시아 몬순(Lawrence and Webster, 2002; Seo et al., 2007)에 영향을 미친다. 계절적 변동(seasonal variation) 뿐만 아니라 MJO는 강한 경년 변동(interannual variation)을 보이며 El Nio-Southern Oscillation(ENSO)와 관련성이 있다(Zhang and Gottschalk, 2002; Hendon et al., 1999; Slingo et al., 1999; Bergman et al., 2001; Seo and Xue 2005). Slingo et al. (1999)은 MJO 강도가 십년 이상의 장기적 변동(decadal variation)을 하고 있으며 과거에 비해 MJO의 강도가 증가하고 있음을 보였다.

---

\*Corresponding Author: Kyong-Hwan Seo  
Department of Atmospheric Sciences Pusan National University  
Busan, Korea  
Phone : +82 51 510-2181, Fax : +82 51 515-1689  
Email : khseo@pusan.ac.kr

데이터를 분석하기 위해서 그 데이터가 정기적이고 정상적이라면 푸리에 분석법은 상당히 좋은 도구가 될 수 있다. Vautard and Ghil (1989)은 EOF(Empirical Orthogonal Function)의 푸리에 변환을 이용한 고유 스펙트럼 분석 방법(Singular Spectrum Analysis, SSA)을 개발하였다. 하지만, 비선형적이고 비정상적인 데이터에서 나온 EOF성분들이 모두 선형적이고 정상적이기를 기대하기 어렵기 때문에, SSA는 결함이 발생하게 된다. 이에 비정상적인 데이터를 자료적응적인 방법으로 시그널에 포함되어 있는 파동을 용이하게 추출하기 위해 Huang et al. (1998)는 경험적 모드 분해법(Empirical Mode Decomposition, EMD)을 개발하였다. Lin and Xian (2007)은 전세계 기온변화를 경험적 모드 분해법을 통해 분석하여 향후 20년 동안 지구 기온이 감소할 것을 예측하였고, Love et al. (2008)은 MJO를 경험적 모드 분해법으로 분석한 결과를 통계적 모델에 적용하여 새로운 통계적 모델을 개발하였다. 하지만 기후 데이터들은 잡음에 오염되어 있어 분석하는데 어려움이 있다. 그러므로 오염요소를 제거하고 통계적 분석 방법을 적용시킬 필요가 있다. Wu and Huang (2009)는 앙상블 경험적 모드 분해법(Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD)이라는 새로운 통계적 분석방법을 개발하여 데이터에 포함된 잡음을 제거하여 물리적으로 의미 있는 해석이 가능하게 하였다. 이에 우리는 MJO 강도의 변동성에 대하여 EEMD라는 새로운 통계적 방법을 통해 각각의 고유한 진동을 가지는 다양한 시그널을 찾아내고 이를 분석하고자 한다.

## 2. 분석방법

Huang et al. (1998)이 고안한 EMD는 비선형적이고 비정상적인 시계열 자료를 다양한 내재모드함수(Intrinsic Mode Function, IMF)로 분해하는 방법이다. 이 방법은 시그널에 내재되어 있는 파동을 자료 적용적으로 용이하게 추출하는 장점을 가지고 있다.

EMD는 국소 최대/최소값과 막(envelope)을 이용하여 각각의 IMF로 분해할 수 있다. 어느 한 시계열의 국소 최대/최소값을 찾아내어 삼차 스플라인 보간법(cubic spline interpolation)을 이용하여 상위 막(upper envelope)와 하위 막(lower envelope)을 추출한다. 이 2개의 함수의 평균값을  $m$ 이라하고 시계열과 평균값의 차이를  $e$ 이라 하면,

$$e_1(t) = x(t) - m_1(t)$$

이 되고  $e_1$ 이 첫 번째 IMF가 된다. 이렇게 본래의 시그널에서 평균 막을 빼주어 나오게 하는 과정을 체거름과정(sifting)이라 한다. 첫 번째 IMF는 본래의 시계

열에 비해 저주파를 형성하게 되지만 여전히 비정상 상태에 있기 때문에 위 방법을 계속 실행한다. 여기서 본래의 시그널인  $x(t)$ 는  $e_1(t)$ 로 치환하면,

$$e_2(t) = x(t) - m_1(t)$$

이 된다. 이 방법을 계속 실행하여 평균 막이 0에 가깝게 되면 체거름과정이 멈추게 되고

$$r(t) = e_i(t) - m_{i-1}(t)$$

이 되어 마지막으로 트렌드인  $r$ 를 분리하게 되고  $i$ 개의 IMF를 생성하게 된다.

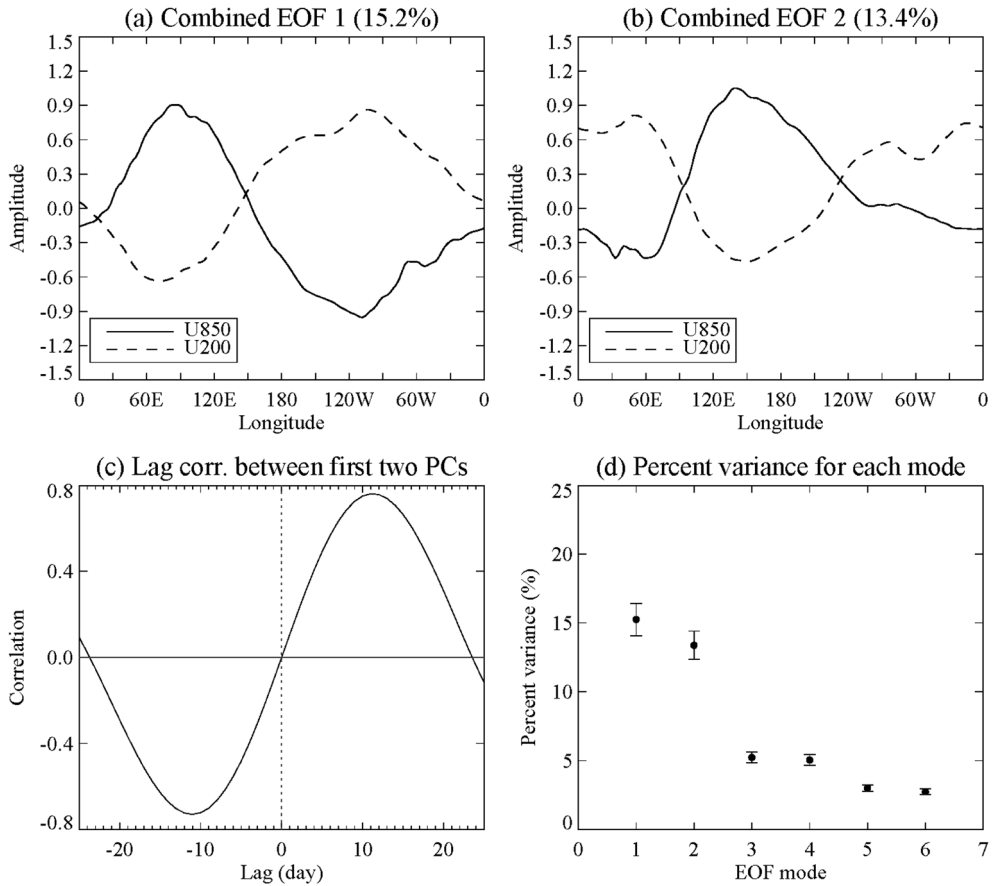
하지만 EMD 방법에는 모드 믹싱이라는 중요한 결점이 발생하게 된다. 모드 믹싱 문제는 초기의 데이터에 포함된 잡음 때문에 각각의 IMF에 그 IMF에 맞지 않는 시간 규모가 포함되어 있어 IMF의 물리적 해석을 흐리게 만든다. 여기에 Wu and Huang (2009)는 모드 믹싱 문제를 해결하기 위해 잡음 추가 데이터 분석(Noise-Assisted Data Analysis) 방법을 도입하여 EEMD 분석 방법을 개발하였다. EEMD는 데이터에 내재된 잡음에 새로운 잡음을 포함시켜 상쇄됨으로 인해 원래의 시그널을 더 잘 나타낼 수 있는 방식을 이용하였다. 이 방식은 1. 백색 잡음을 데이터에 첨가시키고 2. EMD분석을 하여 다양한 IMF를 생성한다. 3. 다른 백색 잡음을 첨가시켜 1번과 2번을 반복적으로 실행한다. 4. 각각의 IMF들을 앙상블 평균을 취하여 각각의 주기에 해당하는 하나의 IMF를 얻는다. 첨가된 백색 잡음은 앙상블 평균을 취함으로써 사라지게 된다. 여기에 사용된 백색 잡음은 원래의 데이터의 0.1 표준편차 값의 크기를 이용하였고, 1000번의 앙상블 평균 값을 취하였다. 실제로 다른 표준편차 값인 0.2를 사용하였을 때에도 같은 결론을 얻었다.

## 3. 결합 EOF분석을 통한 MJO강도

MJO는 상층대류권과 하층대류권의 동서 바람장과 Outgoing Longwave Radiation(OLR) 자료를 이용하여 EOF분석을 통해 정의 할 수 있다(Wheeler and Hendon, 2004; Seo and Wang, 2010). 수십년 변동성에 대한 MJO의 강도를 분석하기 위해서 1950년부터 2005년까지의 850 hPa 및 200 hPa의 동서 바람장을 이용하여 결합 EOF분석을 실시하였다. 여기에서 이용한 바람장들은 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)/NCAR(National Center for Atmospheric Research)에서 제공하는 재분석 자료이다. 각각의 데이터들은 기후 값을 제거하여 아노말리를 구한 후 계절내의 시간규모 진동만을 고려하기 위해 30-90일을 밴드패스필터링을

실시하고 15°N-15°S 위도 평균된 자료를 결합 EOF 분석을 실시하였다. 각 변수는 동등한 가중치를 부여하기 위해 전 지구에 대한 평균 분산을 나누어 표준화시킨 후 EOF 분석을 하였다. EOF 분석의 주 모드들을 Fig. 1a와 1b에 나타내었다. 첫 번째 모드(Fig. 1a)는 하층대류권의 인도양에서 서풍이 불고 태평양에서 동풍이 불어 서태평양(150°E) 근처에 수렴하게 되고 상층대류권에서는 반대방향의 동서 바람장이 형성되어 서태평양에서 발산하는 것을 보여준다. 하층에서 수렴하는 흐름과 상층에서 발산하는 흐름은 서태평양에 강한 심층 구름대를 형성하게 된다. 두 번째 모드(Fig. 1b)는 첫 번째 모드와 90도 직각인 관계에 있으며 인도양지역에 하층에서는 발산이, 상층에서는 수렴이 발생하여 하강기류가 발생한다. 첫 번째 두 개 모드의 PC는 대략 10일 정도의 지연을 두고 높은 상관관계를 가지고 있으며 PC1이 앞서고 있다(Fig. 1c), EOF1과 EOF2는 각각 15.2%, 13.4%

의 분산 값을 나타냈으며, 이는 North et al. (1982)의 기준에 의해 나머지 EOF와 통계학적으로 독립적이며 의미있는 역학적 시그널을 가진다(Fig. 1d). 따라서 이 두 가지 모드를 계절 내 진동의 시그널로 간주할 수 있으며 MJO 강도를 나타내기 위하여 PC1과 PC2를 제공한 후 더하여 91일 이동평균을 취한 다음에 월별 자료로 나타내어 MJO 강도로 사용하였다(Fig. 2). 웹상에서 제공하는 MJO 지수(Wheeler and Hendon, 2004)를 이용 (<http://cawcr.gov.au/staff/mwheeler/maproom/RMM/RMM1RMM2.74toRealtime.txt>)하여 나타낸 MJO 강도와 본 연구에서 수행한 MJO 강도의 상관관계가 0.83으로 나와 본 연구에서 수행한 분석이 잘 이루어졌다고 판단할 수 있다. 이렇게 나온 MJO 강도는 대체로 경년 변동성이 크게 보이고 있으며 장기적으로는 크기가 증가하고 있는 양상을 보인다.



**Fig. 1.** Spatial structures of (a) EOF1 and (b) EOF2 of the combined analysis of U850 and U200. (c) The lead-lag correlation coefficient between the first two PCs. PC1 leads PC2. (d) Percent variance(%) explained by the first six EOF modes and their standard errors.

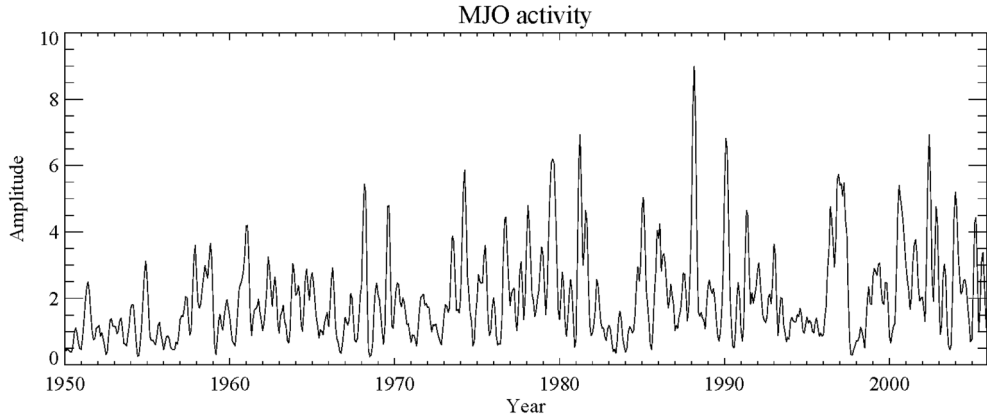


Fig. 2. MJO activity computed by mean square and 91-day smoothing and then sampled monthly.

#### 4. MJO 강도의 다중스케일 분석

위에서 나타낸 MJO 강도는 EEMD 분석 방법을 적용하여 다양한 시간 규모를 가지는 모드, 즉, 9개의 IMFs와 마지막 경향모드로 분해하였다(Fig. 3). 이는 다양한 시간 규모에서의 9개의 준 주기적인 진동과 약 50년의 경향성을 포함하고 있다. 각각의 IMF 성분들은 서로 다른 주기를 가지고 있다. 첫 번째 모드는 약 4개월 주기, 두 번째 모드는 약 8개월 주기, 세 번째 모드는 약 1년 주기, 네 번째 모드는 약 2년 주기, 다섯

번째 모드는 3년 주기, 여섯 번째 모드는 약 5년 주기, 일곱 번째 모드는 약 8년 주기, 여덟 번째 모드는 약 14년 주기, 아홉 번째 모드는 약 28년 주기성을 가지고 있고, 마지막 열 번째 모드는 전체 기간에 대한 경향성을 나타내고 있다. 위에서 정의된 MJO강도가 가장 지배적인 주기를 살펴보기 위해 각각의 IMF들의 전체 분산에 대한 상대적 비율을 계산하였다(Table 1). 그 결과, 경년 변동의 주기를 가지는 모드(IMF3)가 가장 큰 기여(19.12%)를 하고 있다. 그 다음으로 계절적 주기(IMF2, 17.42%)와 계절 내 주기(IMF1, 16.55%)를 가

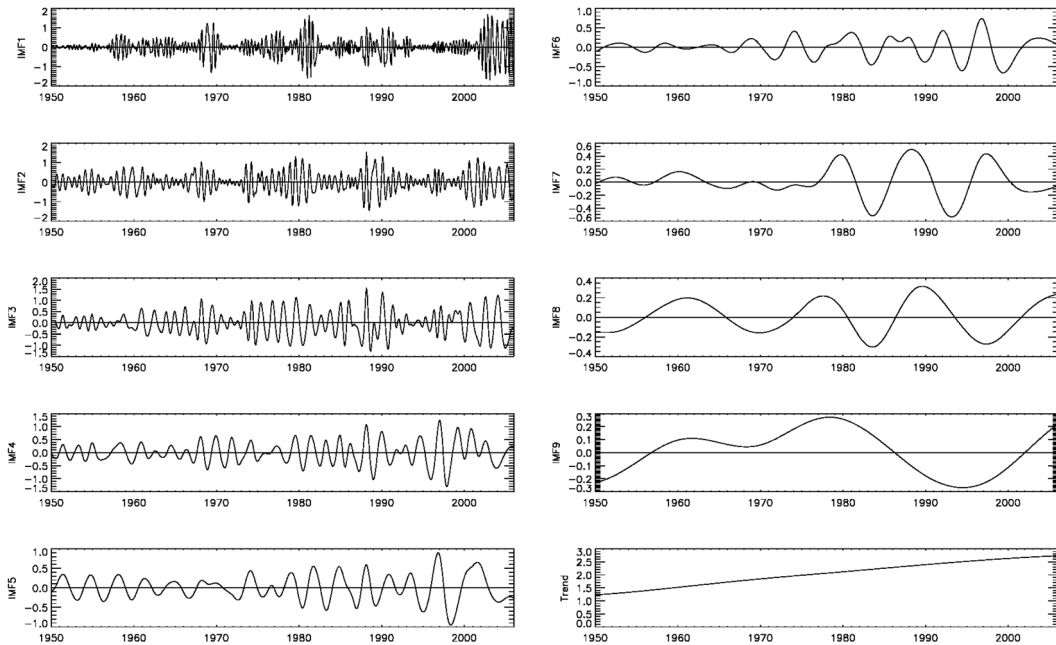


Fig. 3. Nine intrinsic mode functions (IMFs) and a trend from EEMD analysis.

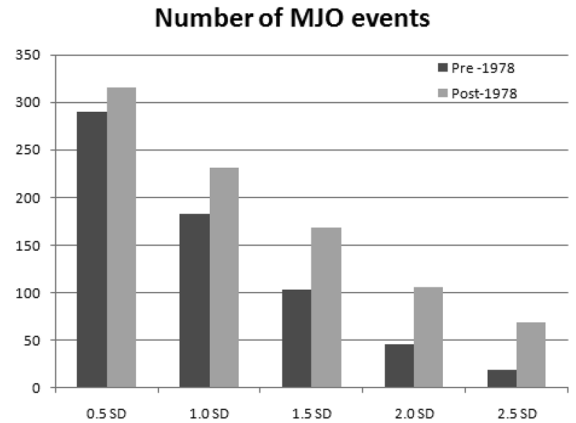
**Table 1.** Percentage variance(%) explained by IMF1-IMF9 and trend components of the MJO activity.

IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6	IMF7	IMF8	IMF9	Trend
16.55	17.42	19.12	12.24	7.41	4.72	3.78	2.02	1.90	14.86

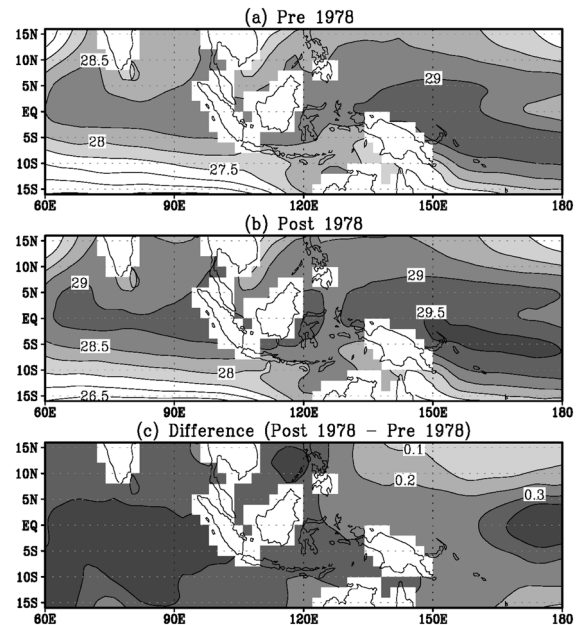
지는 모드가 그리고 마지막으로 경향모드(trend, 14.86%)가 MJO 강도에 영향을 미치고 있다. 따라서 MJO 강도를 분석한 결과, 경년 변동성 진동과 계절성 진동뿐만 아니라 전체적인 경향성 진동에 따라 주로 MJO가 진동하고 있음을 알 수 있다.

특히, 마지막 경향모드를 살펴보면 MJO 강도가 거의 선형적으로 증가하고 있음을 보여주어 장기 추세가 나타난다. 또한 나머지 9개의 IMF들은 과거의 MJO강도의 진폭이 작은 것에 비해 현재의 MJO 강도의 진폭이 더 강해지고 있음을 보여주고 있다. 이는 과거의 MJO에 비해 현재의 MJO 크기가 더 강화되고 있음을 보여주고 있으며 각각의 IMF들이 MJO 강도에 관여를 하고 있음을 보여주고 있다. MJO크기가 1970년대 후반을 중심으로 하여 강도에 변화가 생겼음을 밝히는 이전 연구(Slingo et al., 1999)를 바탕으로 하여 1978년을 기점으로 하여 전반부와 후반부로 나누어 MJO크기의 변화를 살펴보았다. 1978년을 기점으로 두 기간의 다른 평균에 대한 Student's t test(Press et al., 1992)를 이용한 신뢰도 검사를 수행하였으며, 그 결과 1978년을 기점으로 한 두 분포는 95%수준에서 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. MJO강도의 변화는 전반부는 1.66 이고 후반부의 크기는 2.34로 약 40%정도 증가하였다. 각 기준 강도에 대해 이것을 상회하는 MJO 강도의 일수를 전반부와 후반부에 대해 조사하였다. Fig. 4는 전반부(1950-1977)와 후반부(1978-2005)의 각각의 표준편차를 넘어서는 MJO 강도의 일수를 계산하였다. 0.5 이상의 표준편차에서는 전반부에 비해 후반부에 1.1배 더 많이 발생하고 있고, 1.0이상의 표준편차에서는 1.3배의 비율차이가 나고, 1.5이상의 표준편차에서는 1.6배 더 많이 후반부에 발생하고 있다. 2.0이상과 2.5이상의 표준편차에서 각각 2.3배, 3.6배의 차이가 나서 후반부에 더 강한 MJO가 더 자주 발생하고 있음을 보여주고 있다. 즉, 최근에 들어서 강한 MJO가 더 자주 일어나고 있음을 알 수 있다.

Zhang (1993)은 SST가 증가할수록 더 강한 심층 대류가 더 빈번히 발생한다고 하였다. 즉, 높은 SST가 존재하게 되면 더 강한 MJO가 발생할 것이다. 이 연구를 바탕으로 하여 MJO의 크기가 1970년대 후반에 증가하는 원인을 SST에서 찾아보기로 하였다. Fig. 5는 MJO가 주로 활동하는 지역인 적도 인도양과 서태평양(60°E-180°E)을 중심으로 해수면 온도를 나타내었다. 여기서 사용된 해수면 온도는 미국 국립기후 데이터 센터(National Climate Data Center, NCDC)에서 제공



**Fig. 4.** MJO event days for each standard deviation of the MJO activity. The black bar is the pre-1978 and the gray bar is the post-1978. MJO activity is based on the first two EOFs of the combined fields of 850 hPa and 200 hPa zonal winds. (See text for further information.)



**Fig. 5.** The spatial distributions of total sea surface temperature for (a) Pre 1978, (b) Post 1978, and (c) their difference (Post 1978-Pre 1978).

하는 Extended Reconstructed Sea Surface Temperature

version 2(ERSST v2)이다. 전반부와 후반부 모두 인도양과 서태평양을 중심으로 높은 SST가 있음을 나타내고 있으며 전형적인 warm pool의 형태를 보여주고 있다. 전반부와 후반부의 SST 차이는 적도 중심의 SST가 전체적으로 증가 하였음을 알 수 있다. 특히, 적도 인도양에서 전반부에 비해 후반부에서 약 0.4°C 더 증가 하여 다른 지역보다 더 높은 SST 상승을 보여준다. Slingo et al. (1999)은 1970년대 후반에 나타난 SST의 장주기 변화에 의해서 MJO강도가 변하게 되었음을 관측값과 모델 실험을 통해서 밝히며 있다. 즉, 후반부의 인도양에서 SST의 증가는 MJO 강도의 수십년 주기 변동을 유도하고 있고 최근 더욱 강한 MJO를 만들 수 있는 열역학적 기본장을 제공하고 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 Wu and Huang (2009)이 개발한 EEMD를 통해 MJO 강도를 다양한 시간규모를 가지는 시그널로 분해하고 분석해 보았다. 이 기법은 기존의 EMD 방법에서 발생하는 모드 믹싱을 백색 잡음을 첨가시킨 후 앙상블 평균을 통해 모드 믹싱 문제를 해결한 방법이다. MJO 강도는 상층 대류권과 하층 대류권의 동서 바람장을 결합 EOF분석을 통해 나온 첫 번째 두 개의 PC의 제곱 합으로 나타내었다. 통계적 분석 결과는 9개의 IMF와 추세선으로 분해 하였으며 경년 변동, 계절적 변동과 트렌드가 MJO 강도에 가장 큰 변동성을 차지하고 있었다. 마지막 추세선을 분석하여 과거에 비해 현재의 MJO 강도가 강해지고 있음을 보이고 있어 장기추세를 보이고 있다. 과거의 MJO에 비해 현재의 MJO가 약 40% 정도 강해졌으며 그 발생빈도 또한 증가하였음을 알 수 있었다. MJO 강도가 과거에 비해 현재에 강해진 이유로 MJO가 활발히 활동하고 있는 적도 인도양과 서태평양의 SST를 분석함으로써 알 수 있었다. MJO가 생성되어 발달하는 인도양 지역에서 전반부에 비해 후반부에 더 많은 SST 증가율을 보여 주고 있어 MJO의 강도에 영향을 미치고 있음을 보였다.

EEMD를 통해서 분해된 다양한 시간규모를 가지는 시그널들은 각각 준 주기적인 진동을 하기 때문에 미래의 값을 예측하는데 활용할 수 있다. 하지만, 작은 규모의 진동을 가지는 시그널들은 다양하고 일정치 않은 요소 때문에 미래 값을 예측하기가 어려울 수 있다. 반면에 큰 규모의 진동을 가지는 시그널들은 상대적으로 안정적인 요소들을 가지고 있기 때문에 미래 예측에 좀 더 유연할 수 있다. MJO강도 중에서 가장 큰 변동성을 차지하는 것 중에서 경년 변동이나 계절 변동과 관련된 시그널은 불안정한 요소들 때문에 미래를 예측하기 어렵지만, 경향선을 나타내는 장기 모드는 상대적으로 안정적인 요소들 때문에 미래를 예측하는데

충분히 활용할 수 있을 것이다. 마지막 모드의 전반부 28년간 증가폭은 0.83이지만, 후반부의 28년간 증가폭은 0.67로서 MJO강도가 증가하였지만 그 증가폭은 줄어들고 있다. 이런 형태로 향후 MJO 강도의 증가 폭이 감소하지만 여전히 증가할 것으로 예측 할 수 있다.

최근의 지구온난화에 따라 적도의 해수면 온도도 증가 하였다. 이에 따라 수증기의 가용량이 증가하여 적도 서인도양, 중인도양에서 생성되어 발달하는 MJO의 강도 또한 증가되었다. 하지만 MJO의 수십년 변동성이 자연적인 변동성인지 인위적인 영향 때문인지에 대한 과학적 입증은 부족하다. 이에 대기 및 접합 기후 모델을 사용한 민감도 실험이 필요할 것으로 생각된다.

## 감사의 글

이 논문은 2007년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 연구임 (KRF-2007-313-C00783).

## 참고문헌

- Bergman, J. W., H. H. Hendon, and L. M. Weickmann, 2001: Intraseasonal air-sea interactions at the onset of El Nino. *J. Climate*, **14**, 1702-1719.
- Lawrence, D. M., and P. J. Webster, 2002: The boreal summer intraseasonal oscillation: Relationship between northward and eastward movement of convection, *J. Atmos. Sci.*, **59**, 1593-1606.
- Lin, Z.-S. and S. Xian, 2007: Multi-scale analysis of global temperature changes and trend of a drop in temperature in the next 20 years. *Meteorol Atmos Phys*, **95**, 115-121.
- Love, B. S. and A. J. Matthews, and G. J. Janacek, 2008: Real-time extraction of the Madden-Julian Oscillation using empirical mode decomposition and statistical forecasting with a VARMA model. *J. Climate*, **21**, 5318-5335.
- Hendon, H. H., and B. Liebmann, 1990: A composite study of onset of the Australian summer monsoon. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 2227-2239
- \_\_\_\_\_, C. Zhang, and J. D. Glick, 1999: Interannual variation of the Madden-Julian oscillation during austral summer. *J. Climate*, **12**, 2538-2550.
- Huang, N. E., Shen Z., Long S. R. et al, 1998: The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and non-stationary time series analysis. *Proc R Soc Land A*, **454**, 899-955.
- Madden, R. A. and P. R. Julian, 1994: Observations of the

- 40-50 day tropical oscillation : A Review. *Mon. Weather Rev.*, **122**, 814-837.
- North, G. R., T. L. Bell, F. J. Moeng, and R. F. Cahalan, 1982: Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions, *Mon. Weather Rev.*, **110**, 699-706, doi:10.1175/1520-0493(1982)110<0699:SEITEO>2.0.CO;2.
- Press, W. H., S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery, 1992: Numerical Recipes in Fortran 77, Cambridge University Press, Cambridge, 610-613.
- Salby, M. L., and H. H. Hendon, 1994: Intraseasonal behavior of clouds, temperature, and motion in the Tropics. *J. Atmos. Sci.*, **51**, 2207-2224.
- Seo, K.-H., and Y. Xue, 2005: MJO-related oceanic Kelvin waves and the ENSO cycle: A study with the NCEP Global Ocean Data Assimilation, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L07712, doi:10.1029/2005GL022511.
- \_\_\_\_\_, J.-K. E. Schemm, W. Wang, and A. Kumar, 2007: The boreal summer intraseasonal oscillation simulated in the NCEP Climate Forecast System (CFS): The effect of sea surface temperature, *Mon. Weather Rev.*, **135**, 1807-1827.
- \_\_\_\_\_, and W. Wang, 2010: The Madden-Julian Oscillation Simulated in the NCEP Climate Forecast System Model: The Importance of Stratiform Heating, *J. Climate*, **23**, 4770-4793.
- Slingo, J. M., D. P. Rowell, K. R. Sperber, and F. Nortley, 1999: On the predictability of the interannual behavior of the Madden-Julian Oscillation and its relationship with El Nino, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **125**, 583-609.
- Vautard, R., and M. Ghil, 1989: Singular spectrum analysis in nonlinear dynamics, with applications to paleoclimatic time series, *Physica D***35**, 395-424.
- 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. Weather Rev.*, **132**, 1917-1932
- Wu, Z. and Huang, N. E, 2009: Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method, *Advances in Adaptive Data Analysis*, **1**, 1-41
- Zhang, C., 1993: Large-scale variability of atmospheric deep convection in relation to sea surface temperature in the tropics. *J. Climate*, **6**, 1898-1913.
- \_\_\_\_\_, 2005: Madden-Julian Oscillation. *Rev. Geophys.*, **43**, RG2003, doi:10.1029/2004RG000158
- \_\_\_\_\_, and J. Gottschalck, 2002: SST anomalies of ENSO and the Madden-Julian oscillation in the equatorial Pacific. *J. Climate*, **15**, 2429-2445.
- \_\_\_\_\_, and M. Dong, 2004: Seasonality in the Madden-Julian oscillation. *J. Climate*, **17**, 3169-3180.