

적도 태평양 아표층 자료의 시계열 분석 및 표층 수온 예측

장유순* · 이다운 · 윤용훈 · 서장원

기상청 기상연구소 해양기상지진연구소, 156-720, 서울시 동자구 신대방2동 460-18

Time Series Analysis of the Subsurface Oceanic Data and Prediction of the Sea Surface Temperature in the Tropical Pacific

You-Soon Chang*, Da-Un Lee, Yong-Hoon Youn and Jang-Won Seo

Marine Meteorology & Earthquake Research Laboratory, Meteorological Research Institute, Seoul 156-720, Korea

Abstract: Subsurface oceanic data (Z20; Depth of 20°C isotherm and WWV; Warm Water Volume) from the tropical Pacific Ocean from 1980 to 2004 were utilized to examine upper ocean variations in relation to El Niño. Time series analysis using EOF, composite, and cross-correlation methods indicated that there are significant time delays between subsurface oceanic parameters and the Niño3.4 SST. It implied that Z20 and WWV would be more reliable predictors of El Niño events. Based on analyzed results, we also constructed neural network model to predict the Niño3.4 SST from 1996 to 2004. The forecasting skills for the model using WWV were statistically higher than that using the trade wind except for short range forecasting less than 3 months. This model greatly predicted SST than any other previous statistical model, especially at lead times of 5 to 8 months.

Keywords: El Niño, Z20, WWV, neural network model, forecasting skill

요 약: 엘니뇨 현상과 관련된 해양 아표층 변동성을 조사하기 위해 1980년부터 2004년까지의 적도 해역의 20°C 등온선 깊이(Z20)와 난수진량(WWV) 자료를 분석하였다. 주성분 분석, 합성 분석 및 교차상관 분석 결과, 아표층 시계열 자료는 Niño3.4 SST와 유의미한 시간 지연을 가지고 강한 상관성을 보였다. 이 결과는 아표층 해양 변수가 엘니뇨 현상에 유용한 예측 인자임을 시사한다. 분석된 결과를 근거로 1996년부터 2004년까지 Niño3.4 SST를 예측하기 위해 신경망 예측 모델을 구성하였다. 해상풍을 입력 자료로 사용하였을 경우 보다 WWV를 적용하였을 때 3개월 이하의 단기 예측은 제외하고 모든 예측 시간에서 더 우수한 예측력을 보였으며, 5-8개월의 예측에 있어서는 기존의 여러 통계 모델 결과보다 예측 성능이 우수함을 확인하였다.

주요어: 엘니뇨, 등온선 깊이, 난수진량, 신경망 모델, 예측력

서 론

Wyrtki(1975, 1985)에 의해 엘니뇨를 유발하는 요인으로 태평양 열대 해역에 축적된 난수(WWV; Warm Water Volume)의 이동이 제안된 이후로, 많은 학자들에 의해 WWV 변동과 관계된 엘니뇨 역학 및 그의 예측에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

현재까지 제안된 엘니뇨 발생 역학 및 주기를 실

명하고자 하는 이론들(Wang, 2001; Sheinbaum, 2003; 장유순과 안희수, 2004) 중에서, Jin(1997a, 1997b)은 WWV의 변동과 관계된 적도와 아적도의 질량 교환이 엘니뇨와 라니냐의 발달을 결정한다고 강조한다. 엘니뇨 발달기에는 열대 태평양의 서중 아노필리에 의해 유도된 동태평양의 난수 축적에 의해 동-서 방향의 압력 구배가 형성된다(Fig. 1(a)). 이러한 압력 구배는 아적도로의 에크만 수송을 유도하여, 엘니뇨 소빙기를 기점으로 열대 태평양의 질량(또는 WWV)이 전체적으로 감소하게 된다(Fig. 1(b)). 반대로 라니냐 시기(Fig. 1(c)) 이후에는 아적도로부터의 WWV 수렴에 의해 열대 태평양 질량이 증가하게 된다(Fig.

*Corresponding author: you@metri.re.kr
Tel: 82-2-847-2495
Fax: 82-2-847-2496

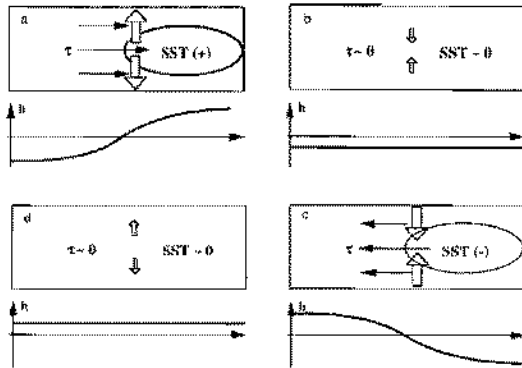


Fig. 1. Schematic panels of the four phases of the recharge oscillation: (a) the warm phase, (b) the warm to cold transition phase, (c) the cold phase, and (d) the cold to warm transition phase. The rectangular box represents the equatorial Pacific basin, the elliptical circle represents the SST anomaly, the thin and filled arrows represent wind stress anomaly associated with the SST anomaly, and the thick unfilled arrows represent the recharge-discharge of equatorial heat content. Each panel also shows the distribution of the thermocline depth anomaly (h) along the equator (After Jin (1997a)).

1(d)), 즉, 엘니뇨의 성장 및 소멸을 위해 WWV의 변동은 필수 조건인 것이다.

최근에 TAO/TRITON, ARGO 관측 망 등 새로운 해양 관측 자료가 지속적으로 생산되고, 고도화된 해양 자료동화 모델의 결과가 공개됨에 따라 이표층 해양 변수에 대한 직접적인 시계열 분석이 가능해졌다(Meinen and McPhaden, 2000; Kessler, 2002; Trenberth et al., 2002). 특히 Meinen and McPhaden (2000)은 위도 5°S-5°N, 경도 120°E-80°W 해역의 표층부터 20°C 등온선 깊이까지 적분된 WWV를 유의미한 엘니뇨 예측 인자로 발표하였으며, 이 자료가 인도양의 여름 몬순과도 밀접히 관계됨을 밝혔다(Rajeevan and McPhaden, 2004).

엘니뇨의 예측을 위해 많은 역학 및 통계 모델이 사용된 이래로(Barnston et al., 1994; Latif et al., 1998) 최근에는 해양의 긴 열적 관성을 포함하고 있는 이표층 자료를 이용하여 엘니뇨 예측 성능을 향상시키는 데 집중하고 있다(Ji and Vecchia, 1997; Clarke and Van Gorder, 2003; McPhaden, 2003).

이에 본 연구에서는 해양 이표층 시계열 자료의 변동 특성을 재분석하고, 분석된 결과를 인공 신경망을 사용한 통계 모델의 학습 과정에 추가함으로써, 적도

태평양 표층 수온 예측력 평가를 실시할 것이다.

자료 및 분석 방법

본 연구에 사용된 해양 이표층 시계열 자료는 호주 기상연구소(ABMRC: Australian Bureau of Meteorology Research Centre)의 Neville Smith 그룹에서 1980년부터 월평균으로 제공하는 위경도 1°×2° 간격의 수온 자료이다. 본 자료는 기존의 XBT, CTD 자료 및 TAO 부이로부터 관측된 결과(McPhaden et al., 1998)로부터 최적 내삽법을 이용하여 재생산되었으며 Meyers et al.(1991), Smith(1991), Smith et al.(1991), Smith(1995a, 1995b) 등에 의해 검증되었다.

본 연구에서는 열대 태평양 해역의 수온 약층의 깊이 산출(Kessler, 1990)을 위해 표준 수심인 총 14개 층(0, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 125, 150, 200, 250, 300, 400, 500 m)으로 구성된 자료를 선형 내삽을 통해 20°C 등온선 깊이(Z20)를 재생산하여 사용하였다. 또한 표층부터 Z20까지 적분된 해수 질량-위도 5°S-5°N, 경도 120°E-80°W 해역에서 공간 평균한 대표 값을 추출하여 WWV로 정의하여 분석하였다. 분석을 위한 모든 자료는 엘니뇨 현상 재현 및 예측에 지역적 어려움 작용할 수 있는 연변동 성분을 제거시킨 후, 5개월 저주파 필터(Hanning 필터)에 통과된 정규화된 결과를 사용하였다(Meinen and McPhaden, 2000).

엘니뇨 예측을 위해 사용된 통계 모델은 최근에 기상 및 해양 기후 분야의 시계열 자료 예측에 있어 그 가능성이 크게 주목받고 있는 인공 신경망(Artificial Neural Network)이다. 일반적으로 신경망 모델은 입력층(input layer)과 출력층(output layer) 사이에 한 개 또는 그 이상의 은닉층(hidden layer)으로 구성된다. 입력층은 입력마디(input units)로 구성되어 있는데 각각의 입력마디는 입력변수에 대응되며 연구 목적에 맞게 전처리 과정을 거쳐 생산된다. 입력마디에 입력된 변수들은 결합함수(combination function)를 통해 선형적으로 결합되어 상위층인 은닉층에 전달된다. 은닉층은 활성화함수(activation function)를 사용하여 입력변수들을 비선형함수로 처리한 후 상위의 은닉층 또는 출력층에 전달한다. 즉, 입력변수는 은닉층을 지나 최종적으로 출력층에까지 전달되어 목표변수의 예측값을 결정하게 된다. 본 연구에서는 Tangang et al.(1997, 1998) 및 장유순 등(2005)이 사용한 1개

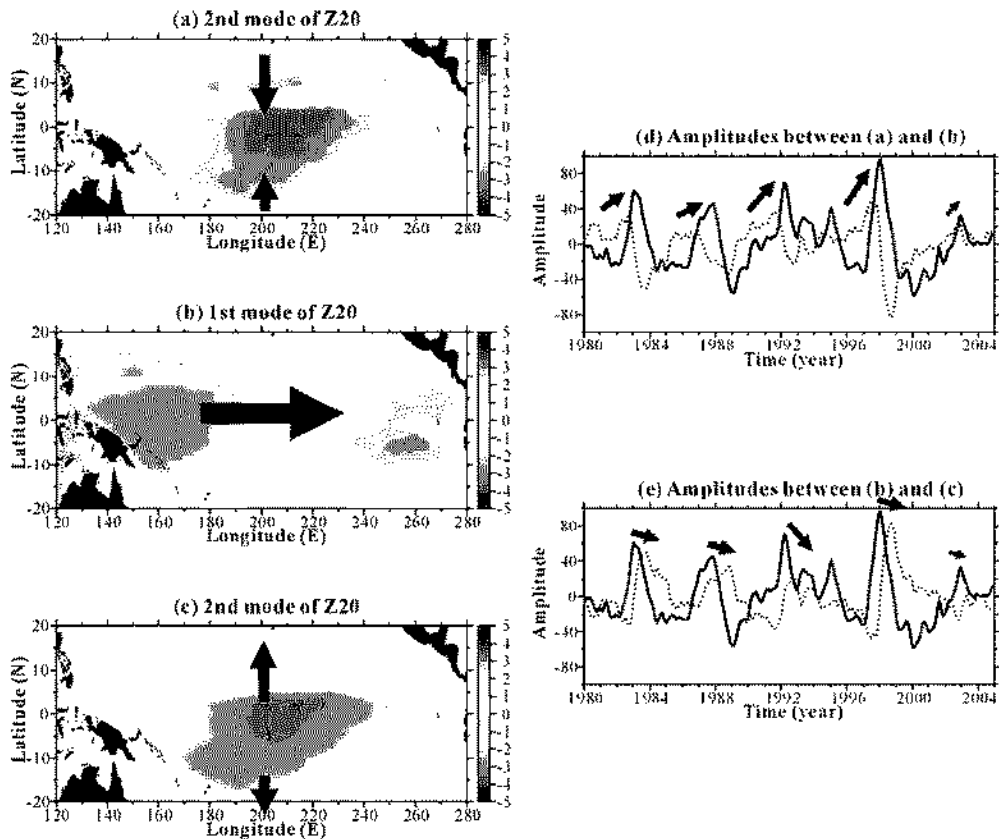


Fig 2. First two empirical orthogonal functions (EOFs) fit to Z20. Left panels are spatial structures and rights are associated time series of each mode. Solid (dotted) lines denote time series of the first (second) mode. Black arrows indicate the movement of water mass in the subsurface ocean.

의 은닉층과 3개의 은닉미디를 지니는 다층 퍼셉트론(MLP: Multi-Layer Perceptron) 전방향 신경망 구조를 동일하게 사용하였다.

해양 아표층 시계열 자료 분석

Z20

Z20의 공간 변동을 살펴보기 위해 1980년 1월부터 2004년 12월까지 25년간 자료를 사용하여 주성분 분석을 실시하였다(Fig. 2). 총분산의 34.6%를 설명하는 제 1모드는 엘니노 시기의 전형적인 동-서 방향 대칭 구조를 잘 묘사하고 있다(Fig 2(b)). 즉 엘니노 절정기에는 무역풍에 의해 서태평양에 축적되어 있던 난수가 동태평양으로 이동하여 서태평양에는 음의, 동태평양에는 양의 아노말리가 형성된다. 이는 Wang et al.(1999)에 의해 제시된 “standing mode”와 Meinen

and Mcphaden(2000)에 의해 제시된 “E-W tilting mode”와 일치하는 결과이다.

총분산의 21.0%를 설명하는 제 2모드는 남북방향으로 대칭적인 공간분포(N-S tilting mode, Meinen and Mcphaden(2000))가 특징적이다(Fig. 2(a,c)). 엘니노 진행과정에 따른 적도해역의 질량 수렴(Fig. 2(a)) 및 발산(Fig. 2(c))을 잘 묘사하고 있으며, 이러한 남북방향의 대칭 구조는 해양 아표층에서의 적도와 아적도 간의 질량교환을 의미한다. 전체적으로 북적도 반류가 존재하는 SN를 따라서 대칭 구조가 뚜렷하며, 남반구 방향으로는 그 경계가 모호함을 알 수 있으며, 이러한 원인은 향후 적도 역학을 다루는 관련 연구에서 심도있게 다루어져야 할 부분이라고 사료된다.

주성분 분석의 시계열 결과는 1모드와 2모드 간에 일정한 시간 지연을 가지며 강한 상관을 가짐을 알

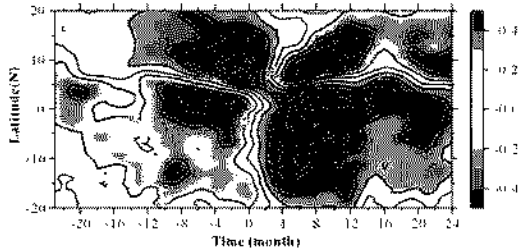


Fig. 3. Time-latitude dependence of zonally-averaged Z20 in the Pacific Ocean throughout the composite cycle.

수 있다. 즉 엘니노 발달 수개월 전(또는 라니냐 소멸기)에는 아직도에서 적도로의 질량 수렴(Fig. 2(a, d))이 존재하고, 엘니노 발달기에 적도 시대평양에서 동태평양으로의 동시 방향의 질량 이동이 있는 후에 엘니노 소멸기에는 다시 아직도로의 해수 질량이 발산(Fig. 2(e, e))하는 과정을 확인할 수 있다. 본 결과는 서론(Fig. 1)에서 언급한 Jin(1997a, 1997b)의 “Recharge-discharge” 이론과도 잘 일치한다.

엘니노 기간의 이러한 유의비한 이표층 해수 물성 교환은 합성분석을 통해 재확인 된다. Fig. 3은 엘니노 시기(1983, 1987, 1992, 1998년)의 1월을 기준으로 전후 2년간 위도에 따른 태평양의 동시방향 수온 약층(Z20) 변동 평균값을 나타낸 것이다. 엘니노 최대 발생시기(0개월)의 약 7-8개월 전후에 적도해역에서 최대의 Z20의 아노발라가 나타난다. 즉, 엘니노 발생 수개월 전(후)에 10°N 이북의 해양 이표층에서는 질량 발산(수렴)이 일어나며 적도해역에서는 질량 수렴(발산)이 발생한다. 이러한 특징적인 현상은 Fig. 2에서 나타난 주성분 분석의 제 2 모드의 공간 분포와 동일한 패턴으로 해석된다.

WWV

1980년부터 2004년까지의 WWV 월평균 시계열 자료를 분석하였다. WWV는 해양 표층부터 Z20까지 적분된 해수 질량을 위도 5°S-5°N, 경도 120°E-80°W 해역에서 공간 평균한 대표 값이다. 대표적인 엘니노

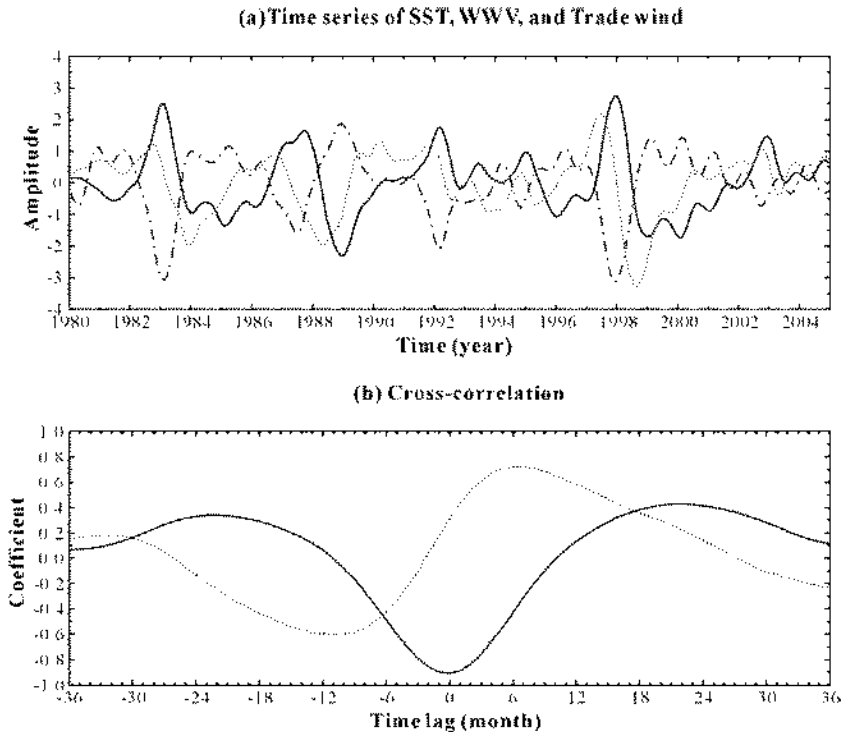


Fig. 4. (a) Monthly anomalies of Niño3.4 SST in unit of °C (solid red), WWV in unit of $10^{21}m^3$ (dotted violet), and trade wind in unit of ms^{-1} (dashed blue). All time series had been smoothed with a 5-month Hanning filter after average annual cycle was removed. (b) Lagged cross-correlation between the Niño3.4 SST anomaly and either the WWV (dotted violet) or trade wind (solid blue), respectively.

지수로 알려진 Niño3.4 해역(5°S-5°N, 120°W-170°W)의 SST 자료 및 중앙 태평양(5°S-5°N, 175°W-140°W) 해상의 850 hPa 동서 방향 무역풍 지수 또한 같이 비교하였다.

Fig. 4는 세 자료(Niño3.4 SST, WWV, 무역풍)간의 시계열 및 지연상관 결과이다, Niño3.4 SST와 무역풍과는 시간 지연 없이 최대 -0.91의 강한 음의 상관 패턴을 보임을 알 수 있다. 즉, 적도 중앙 태평양 상의 무역풍 감소(또는 서풍 증가)와 Niño3.4 해역의 SST 증가는 거의 동시에 일어남을 확인할 수 있다. 그러나 교차 상관계수 분석을 통해 Niño3.4 SST와 WWV의 상관 패턴을 살펴보면 유의미한 시간 지연이 존재한다, WWV의 증가는 약 6개월 후(상관계수: +0.72)의 엘니노 발생(Niño3.4 SST 증가)을 유도하고, 그 후 WWV가 감소한 다음 11개월 후(상관계수: -0.60) 엘니노가 소멸(Niño3.4 SST 감소)하게 되는 것이다.

이상에서 살펴본 것과 같이 Z20과 WWV 등 해양 아표층 시계열 자료와 Niño3.4 SST 사이에 존재하는 시간 지연은 아표층 해양 변동 정보가 엘니노(Niño3.4 SST) 예측을 위한 유용한 도구가 될 수 있음을 시사한다.

태평양 표층 수온 예측

Tangang et al.(1997, 1998), Yuval(2000), 장유순 등(2005)은 비선형 통계모델의 하나인 신경망 모델에 태평양 표층 수온, 해상풍, 해수면 기압 자료의 주성분 모드를 입력 자료로 사용하여 엘니노 지수로 알려진 Niño 해역의 SST 예측 값을 평가하여 그 활용 가능성을 토의하였다. 또한 Clarke and Van Gorder(2003)는 엘니노 예측을 위해 인도양의 해상풍 및 적도 열용량 자료를 새롭게 사용하였다. 이상의 모든 연구 결과에서는 엘니노의 예측 성능 향상을 위해 통계 예측 모델에서의 입력 자료의 중요성을 강조하고 있다.

이에 본 절에서는 앞서 분석된 해양 아표층 자료(WWV)를 적도 태평양(Niño3.4 해역) 표층 수온 예측을 위한 신경망 모델의 입력 자료로 사용하였다. 본 연구에서는 시론에서 언급한 것처럼 Tangang et al.(1997, 1998) 및 장유순 등(2005)이 사용한 1개의 은닉층과 3개의 은닉미디를 지나는 MLP 전방향 신경망 구조를 동일하게 사용하였다. 1980년부터 1995

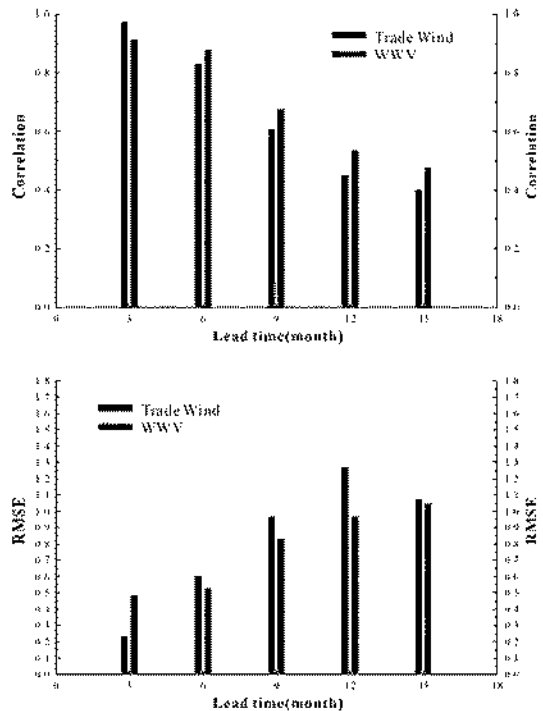


Fig. 5. A comparison of forecast correlation (upper panel) and RMSE (lower panel) by using two kinds of input data, trade wind (blue) and WWV (red), respectively.

년까지 16년간의 월평균 자료 192개를 MLP 구조의 학습 과정 패턴 생성을 위해 사용하였으며, 1996년 1월부터 2004년 12월까지 9년의 예측 결과를 검증하였다. 본 연구의 결과를 3개월 간격의 계절 예보(3, 6, 9, 12, 15개월 예측)에 활용하기 위해 입력 자료는 1개월씩의 시간 지연을 가지는 1년(12개월) 동안의 자료를 반복 입력하여 신경망 모델의 학습 과정에 첨가시켰다. 즉, 3개월 예측을 위해서는 입력 변수로 예측 시간의 3개월 전~14개월 전까지의 자료를 사용하여 모델링 하였으며, 15개월 예측을 위한 모델에서는 15개월 전~26개월 전까지의 자료를 사용하였다(장유순 등, 2005).

Fig. 5와 Table 1은 예측 모델의 입력 변수로 Fig. 4에서 분석된 해상풍 자료 및 WWV 자료를 각각 적용하였을 때 산출된 시간대별 예측 결과 비교이다. 3개월 예측 결과에서는 해상풍을 사용했을 때(CORR = 0.977, RMSE = 0.240)가 WWV(CORR = 0.914, RMSE = 0.486)보다 그 예측 성능이 우수함을 알 수 있다. 이는 Fig. 4의 교차 상관 계수 분석 결과를 통해 설

Table 1. Correlation coefficient(CORR) and root mean square error(RMSE) according to the different input data for the forecasting Niño3.4 SST

Input data		Lead time (month)					
		3	6	9	12	15	
Trade wind	RMSE	0.240	0.607	0.970	1.272	1.075	
	CORR	0.977	0.831	0.609	0.455	0.402	
WWV	RMSE	0.486	0.529	0.834	0.972	1.050	
	CORR	0.914	0.881	0.678	0.537	0.478	

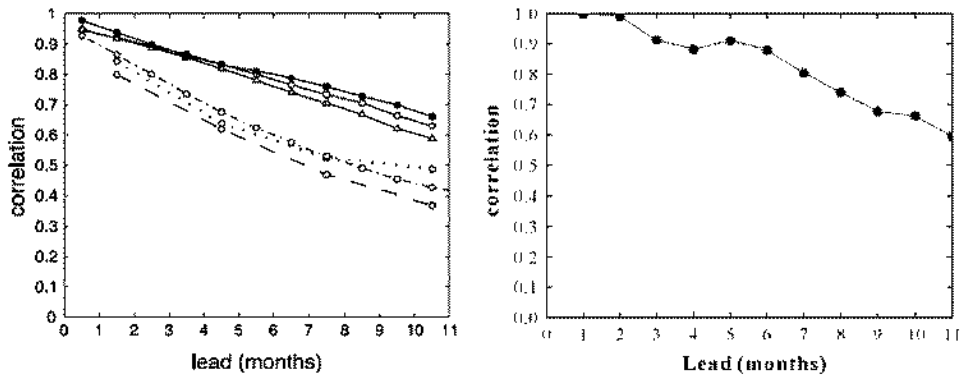


Fig. 6. Correlation skill as a function of forecast lead predicting the El Niño index Niño3.4. Left panel is the previous results organized by Clarke and Van Gorder (2003) (Open circles, dashed line, the Canonical Correlation Analysis model of Barnston and Ropelewski (1992); open circles, dotted line, the Linear Inverse Model of Penland and Magorian (1993) and Penland and Sardeshmukh (1995); open circles, solid line, the Constructed Analogue (CA) model of van den Dool (1994); open triangles, solid line, the CA model; open circles, dash-dotted line, the Markov model of Xue et al. (2000); closed circles, solid line, the upper ocean Heat Anomaly/Indo-Pacific Trigger model by Clarke and Van Gorder (2003)). Rights is the one from the present study.

명될 수 있다. 즉, 3개월 이하의 시간 지연에서는 적도 해상풍 지수가 WWV 보다 Niño3.4 SST와 상관성이 높은 것을 확인할 수 있다. 그러나 6개월 이후로 예측 시간이 증가하면서 WWV를 입력 자료로 사용한 모델의 예측 성능이 해상풍을 사용한 결과보다 좋아짐을 확인할 수 있다. 이는 적도 태평양 표층 수온 변동과 유의미한 시간 지연을 가지는 해양 아 표층 시계열 자료에 포함된 엘니노 신호가 6개월 이상의 엘니노 예측 성능에 크게 관여한다는 고무적인 결과인 것이다.

예측 시간이 증가 할수록 역학 과정을 고려치 않은 통계 모델보다 역학 모델의 성능이 우수하다는 Barnston et al.(1994)의 결과가 발표된 이래로, 통계 예측 모델의 성능 향상을 위해 많은 연구들이 진행되고 있다. Fig. 6은 Clarke and Van Gorder(2003)에 의해 정리된 기존의 통계 모델을 사용한 Niño3.4 SST 예측에 대한 검증 결과를 본 연구 결과와 비교한 것이다. WWV 자료를 적용한 본 연구의 신경망

예측 모델은 특별히 5-8개월까지의 예측 성능에 있어서 다른 모델들보다 우수한 예측력을 보임을 확인할 수 있다. 특히 본 예측 모델은 16년간의 학습 과정을 거쳐 1996년부터 2004년까지 9년의 예측 결과를 검증하였는데, 기존의 연구들(1957-1990년, 34년 예측(Barnston and Ropelewski, 1992); 1970-1993년, 24년 예측(Penland and Magorian, 1993; Penland and Sardeshmukh, 1995); 1981-2001년, 21년 예측(Van den Dool, 1994); 1980-1995년, 16년 예측(Xue et al., 2000); 1981-2001년, 21년 예측(Clarke and Van Gorder, 2003))과 비교해 보았을 때 매우 짧은 학습 및 검증 기간을 가진다. 그럼에도 불구하고 5-8개월까지의 예측 성능이 다른 모델들보다 우수한 이유는 Niño3.4 SST와 6개월의 시간 지연을 두고 상관계수 (+0.72)가 크게 나타나는 WWV의 효과를 예측력이 뛰어난 신경망 모델의 입력 자료로 적절하게 포함시킨 결과라 생각된다.

요약 및 결론

본 연구에서는 엘니뇨 현상과 관련된 해양 아표층 변동성을 조사하였고, 분석된 자료를 신경망 예측 모델의 입력 자료로 적용하였다. 1980년부터 2004년까지의 적도 해역의 Z20과 WWV 자료들 분석한 결과, 아표층 시계열 자료는 Niño3.4 SST와 유의미한 수개월의 시간 지연을 가지고 강한 상관성을 보였다. 즉, 아표층 해양변수가 엘니뇨 예측에 있어 유용한 입력 변수가 될 수 있음을 확인하였다. 신경망 모델에 WWV를 입력 자료로 사용하여 1996년부터 2004년까지 Niño3.4 SST 예측력을 검증한 결과, 해상층을 사용한 결과보다 3개월 이하의 단기 예측을 제외하고 상기 예측에서 좋은 결과를 보였으며, 기존의 여러 통계모델 결과보다 그 성능이 우수함을 알 수 있었다.

본 예측 모델은 16년간의 학습 과정을 거쳐 비교적 짧은 9년의 예측 결과를 검증하였다. 향후 새로운 해양 관측 자료를 지속적으로 축적하고, 고도화된 해양 자료동화 수치 모델의 해양 아표층 시계열 결과들 본 연구를 통해 개발된 통계 모델의 학습 과정에 적용하였을 때, 엘니뇨 분석 및 예측에 관련된 다양한 연구 분야에 크게 기여할 수 있으리라 사료된다.

사 사

본 연구에서 사용된 기초 자료를 제공해 주신 호주 기상연구소의 Neville Smith 박사님께 감사드립니다. 또한 논문을 심사하여 주시고 많은 조언을 해 주신 신홍렬 교수님과 익명의 심사자분들께 감사드립니다. 본 연구는 기상청 기상연구소 주요사업 “전 지구 해양변화 감시 시스템 구축(ARGO)” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

장유순, 안희수, 2004, Development of El Niño: Review, 한국지구과학회 추계학술발표회 추록집, 309-314.
 장유순, 이다은, 서장원, 윤용훈, 2005, 신경망 모델을 이용한 적도 태평양 표층 수온 예측, 한국지구과학회지, 26 (3), 268-275.
 Bamston, A. G., and Coauthors, 1994, Long-lead seasonal forecasts—where do we stand?, Bulletin of the American Meteorological Society, 75, 2097-2114.
 Bamston, A. G., and C. F. Ropelewski, 1992, Prediction of

ENSO episodes using canonical correlation analysis, Journal of Climate, 5, 1316-1345.
 Clark, A. J., and S. Van Gorder, 2003, Improving El Niño prediction using a space-time integration of Indo-Pacific winds and equatorial Pacific upper ocean heat content, Geophysical Research Letter, 30 (7), 1399, doi:10.1029/2002GL016673.
 Ji, M., and A. Leetmaa, 1997, Impact of data assimilation on ocean initialization and El Niño prediction, Monthly Weather Review, 125, 742-753.
 Jin, E.E., 1997a, An equatorial ocean recharge paradigm for ENSO. Part I: Conceptual model, Journal of Atmospheric Science, 54, 811-829.
 Jin, E.E., 1997b, An equatorial ocean recharge paradigm for ENSO. Part II: A stripped-down coupled model, Journal of Atmospheric Science, 54, 830-847.
 Kessler, W.S., 1990, Observations of long Rossby waves in the northern tropical Pacific, Journal of Geophysical Research, 95, 5183-5217.
 Kessler, W.S., 2002, Is ENSO a cycle or a series of events?, Geophysical Research Letter, 29 (23), 2125, doi:10.1029/2002GL015924.
 Latif, M., and Coauthors, 2001, ENSIP: the El Niño simulation intercomparison project, Climate Dynamics, 18, 255-276.
 McPhaden, M.J., and Coauthors, 1998, The Tropical Ocean Global Atmosphere (TOGA) observing system: A decade of progress, Journal of Geophysical Research, 103, 14169-14240.
 McPhaden, M.J., 2003, Tropical Pacific Ocean heat content variations and ENSO persistence barriers, Geophysical Research Letter, 30 (9), 1480, doi:10.1029/2003GL016872.
 Meyers, G., H. Phillips, N.R. Smith, and J. Sprintall, 1991, Space and time scales for optimum interpolation of temperature-tropical Pacific Ocean, Progress in Oceanography, 28, 189-218.
 Meinen, C.S., and M.J. McPhaden, 2000, Observations of warm water volume changes in the equatorial Pacific and their relationship to El Niño and La Niña, Journal of Climate, 13, 3551-3559.
 Penland, C., and P.D. Sardeshmukh, 1995, The optimal growth of tropical sea surface temperature anomalies, Journal of Climate, 8, 1999-2024.
 Rajeevan, M., and M.J. McPhaden, 2004, Tropical Pacific upper ocean heat content variations and Indian summer monsoon rainfall, Geophysical Research Letter, 31, L18203, doi:10.1029/2004GL020631.
 Schemm, J., 2003, Current theories on El Niño-Southern Oscillation: A review, Geofisica Internacional, 42 (3), 291-305.
 Smith, N.R., 1991, Objective quality controls and performance diagnostics of an oceanic subsurface thermal

- analysis scheme. *Journal of Geophysical Research*, 96, 3279-3287.
- Smith, N.R., J.L. Blomley, and G. Meyers, 1991, A univariate statistical interpolation scheme for subsurface thermal analyses in the tropical oceans. *Progress in Oceanography*, 28, 219-256.
- Smith, N.R., 1995a, The BMRC ocean thermal analysis system. *Australian Meteorological Magazine*, 44, 93-110.
- Smith, N.R., 1995b, An improved system for tropical ocean sub-surface temperature analyses. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 12, 850-870.
- Tangang, F.T., W.W. Hsieh, and B. Tang, 1997, Forecasting the equatorial Pacific sea surface temperature by neural network model. *Climate Dynamics*, 13, 135-147.
- Tangang, F.T., W.W. Hsieh, and B. Tang, 1998, Forecasting the regional sea surface temperature of the tropical Pacific by neural network models, with wind stress and sea level pressure as predictors. *Journal of Geophysical Research*, 103, 7511-7522.
- Trenberth, K.E., J.M. Caron, D.P. Stepaniak and S. Worley, 2002, Evolution of El Niño Southern Oscillation and global atmospheric surface temperatures. *Journal of Geophysical Research*, 107 (D8), 4065, 10.1029/2000D000298.
- van den Dool, H.M., 1994, Constructed analogue prediction of the east central tropical Pacific SST through Fall 1995. *Experimental Long-Lead Forecast Bulletin*, 3, 22-23.
- Wang, C., 2001, On ENSO mechanism. *Advanced Atmospheric Sciences*, 18, 674-691.
- Wang, B., R. Wu, and R. Lukas, 1999, Roles of the western north Pacific wind variation in thermocline adjustment and ENSO phase transition. *Journal of Meteorological Society of Japan*, 77, 1-16.
- Wyrtki, K., 1975, El Niño-The dynamic response of the equatorial Pacific Ocean to atmospheric forcing. *Journal of Physical Oceanography*, 5, 572-584.
- Wyrtki, K., 1985, Water displacements in the Pacific and the genesis of El Niño cycle. *Journal of Geophysical Research*, 90, 7129-7137.
- Xue, Y., A. Leetmaa, and M. Ji, 2000, ENSO prediction with Markov models: The impact of sea level. *Journal of Climate*, 13, 849-871.
- Yuval, 2000, Neural network training for prediction of climatological time series, regularized by minimization of the generalized cross-validation function. *Monthly Weather Review*, 128, 1456-1473.

2005년 8월 8일 원고 접수
 2005년 9월 13일 수정원고 접수
 2005년 9월 27일 원고 채택