

## 엘니뇨-남방진동과 한반도 겨울철 기후변동성의 그랜저 인과관계 검정

박창현<sup>\*,\*\*</sup> · 손석우<sup>\*,\*\*†</sup> · 최정<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>서울대학교 지구환경과학부, <sup>\*\*</sup>서울대학교 협동과정 계산과학전공

### Granger Causality Test between ENSO and Winter Climate Variability over the Korean Peninsula

Park, Chang-Hyun<sup>\*,\*\*</sup>, Son, Seok-Woo<sup>\*,\*\*†</sup> and Choi, Jung<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

<sup>\*\*</sup>Interdisciplinary Graduate Program in Computational Science and Technology, Seoul National University, Seoul, Korea

#### ABSTRACT

The causal relationship between El Nino-Southern Oscillation (ENSO) and winter climate variability in Korea is tested by analyzing Korea Meteorological Administration Automatic Synoptic Observing System datasets for the past 59 years. Consistent with previous studies, positive phase of ENSO (El Nino) tends to cause warmer temperature and heavier precipitation in Korea in early winter with three-week lead time. This causality is quantified by performing Granger causality test. It turns out that ENSO explains an additional 9.25% of the variance of early-winter temperature anomalies in Korea, beyond that already provided by temperature itself. Likewise, 22.18% additional information is gained to explain early-winter precipitation variance by considering ENSO. This result, which differs from simple lead-lag correlation analysis, suggests that ENSO needs to be considered in predicting early-winter surface climate variability in Korea.

**Key words:** Granger Causality, Linear Correlation, El Nino-Southern Oscillation, Climate variability in Korea

#### 1. 서 론

열대 태평양 해수면 온도의 주기적 변동으로 대표되는 엘니뇨-남방진동 (El Nino-Southern Oscillation; 이하 ENSO)은 대기-해양 상호작용으로 인해 발생하는 주요한 기후 경년 변동 모드다 (Horel and Wallace, 1981). 열대 태평양 해수면 온도의 상승 (엘니뇨)과 하강 (라니냐)이 3~7년 주기로 나타나는 이 현상은 주로 북반구 겨울철에 최대 아노말리 (anomaly) 값을 보이며, 이는 Pacific-North American (PNA) 패턴으로 잘 알려진 원격상관 (teleconnection)을 통해서 열대 태평양을 벗어나 북반구 중위도에도 영향을 미치게 된다 (Wallace and Gutzler, 1981; Wang *et al.*, 2000). 동아시아 기후를 비롯한 한반도의 기온과 강수량 변동 또한 ENSO에 영향을 받는 것으로 알려져 있으며, 특히 엘니뇨 해의 한반도 겨울철은 평년

에 비해 상대적으로 따뜻하고 강수량이 증가하는 경향이 있다 (Kang, 1998; Son *et al.*, 2014).

그러나 ENSO-한반도 기후변동성간의 관계는 분석 방법에 따라 달라질 수 있다. 예를 들어 강수량의 경우, 5일 평균 규모에서는 초겨울에 높은 상관관계가 나타나지만 계절 평균 규모에서는 겨울철보다는 오히려 여름철이 유의미하게 나타난다. Son *et al.* (2014)은 한반도 초겨울 강수량과 ENSO의 상관관계가 과거에 비해 최근 들어 높아지는 장주기 변동을 보인바 있다. 또한 한반도가 포함되어 있는 동아시아 지역의 겨울 문순과 ENSO와의 관계가 Pacific Decadal Oscillation, Atlantic Multi-decadal Oscillation과 같은 장주기 기후 변동성의 위상에 따라 변조되고 있는 것으로 나타났다 (Chen *et al.* 2013; Geng *et al.* 2017). 이는 ENSO와 한반도 기후변동성간의 관계가 시간 규모에 매우 민감함을 의미한다. 이뿐만 아니

<sup>†</sup> Corresponding author: [seokwooson@snu.ac.kr](mailto:seokwooson@snu.ac.kr)

Received March 02, 2018 / Revised April 23, 2018 / Accepted May 04, 2018

라 엘니뇨의 발생 타입이나 계절에 따라 한반도의 기온 및 강수 변동에 미치는 영향 또한 다르게 나타난다 (Kug *et al.*, 2010; Kim JS *et al.*, 2014; Ho *et al.*, 2016).

또한 기존 연구들은 주로 ENSO와 한반도 기후 변동성 사이의 관계를 동시 상관이나 지연 상관관계를 사용하여 설명하는 데에 한정되어 있다. 여기에 사용된 피어슨 상관계수 (Pearson correlation coefficient)는 두 변수간의 상관관계를 정량화하는데 유용하지만 인과관계를 나타내지는 않는다. 인과 관계를 추정하기 위해 보통 지연 상관성을 분석한다. 이 방법은 매우 직관적이고 간단하며 합리적인 결과를 제공하지만, 메모리가 큰 변수가 있으면 실제와 다른 결과를 나타낼 수 있다 (McGraw and Barnes, 2018). 아래 기술된 바와 같이 그랜저 인과관계는 기존의 지연 상관 분석과 유사하지만 변수 자체의 메모리를 고려한다는 점에서 차이가 있다.

본 연구는 ENSO가 한반도 겨울철 기후 변동성에 얼마나 큰 영향을 미치는지를 그랜저 인과관계 검정을 통해 살펴보고자 한다. 이를 위해 기상청에서 제공하는 한반도 장기간 일평균 기온 및 강수량을 분석하고 적도 태평양 해수면 온도로 대표되는 ENSO 지수와의 상관관계 및 인과관계를 비교 분석한다.

## 2. 자료 및 분석방법

### 2.1 자료

본 연구에서는 기상청 종관기상관측시스템 (Automatic Synoptic Observing System; ASOS)의 21일 이동 평균된 일평균 기온과 강수량 관측 자료를 사용하였으며, 9개 관측 지점에 대해 평균하여 한반도를 대표하는 값으로 정하였다. 사용된 9개 관측 지점은 강릉 (105), 서울 (108), 추풍령 (135), 광주 (156), 부산 (159), 인천 (112), 포항 (138), 대구 (143), 전주 (146)이며 여기서 괄호 안의 숫자는 해당 관측소 번호를 의미한다.

또한 다양한 시간 규모의 ENSO를 정의하기 위해서 월평균으로 제공하는 Extended Reconstructed Sea Surface Temperature version 5 (ERSSTv5; Huang *et al.*, 2017) 해수면 온도 (Sea Surface Temperature; SST)와 일평균으로 제공하는 NCEP-NCAR Reanalysis 1 (NNR1; Kalnay *et al.*, 1996) 지상 기온 아노말리를 Nino 3.4지역인 5°S-5°N, 120°-170°W에 대해 지역 평균하여 사용하였다. 모든 자료들은 지구온난화의 영향을 제거하기 위해서 장기간의 트렌드를 제거하여 사용하였다. 분석 기간은 1958년 11월부터 다음 해인 1959년

2월까지를 1958년으로 정의하였고, 1958년부터 2016년까지 총 59년의 자료를 사용하였다.

## 2.2 분석방법

### 2.2.1 상관관계

두 변수의 선형 상관 정도를 나타내기 위해서 피어슨 상관계수를 사용하였다. 피어슨 상관계수는 기후 연구에서 상관관계를 보기 위해 널리 사용되는 방법으로 그 식은 아래와 같다.

$$R_t = \frac{\sum_{yr=1958}^{2016} (X_{t,yr} \times Y_{yr})}{\sqrt{\sum_{yr=1958}^{2016} X_{t,yr}^2} \times \sqrt{\sum_{yr=1958}^{2016} Y_{yr}^2}} \quad (1)$$

여기서  $t$ 은 매년 11월 1일부터 다음해의 2월 28일까지의 한 시점을 의미하고  $yr$ 은 각 년도를 의미한다. 만약  $t$ 가 11월 1일이고  $yr = 1958$ 이라면  $X_{t=11월 1일, yr=1958}$ 는 1958년 11월 1일에 한반도 기온 아노말리나 강수량 아노말리를 의미한다.  $\bar{Y}_{yr}$ 는 해당 년도인  $yr$ 에서 11월 1일부터 1월 31일까지 (November-December-January; 이하 NDJ) 평균된 Nino 3.4 인덱스를 의미한다. 만약  $yr = 1958$ 이라면  $\bar{Y}_{yr=1958}$ 는 1958년 11월 1일부터 1959년 1월 31일까지 평균된 Nino 3.4 인덱스를 의미한다. 식 (1)에  $X_{t,yr}$ 값에 각각 한반도 기온 아노말리와 강수량 아노말리를 넣게 된다면 위 식은 한반도 기후 변동성 아노말리와 Nino 3.4 인덱스 간의 59년의 경년 상관관계를 나타내는 식이 된다.

### 2.2.2 그랜저 인과관계 검정

그랜저 (Granger) 인과관계는 경제학자 Clive E. Granger가 1969년에 제안한 인과관계의 접근법이다 (Granger, 1969). 이전에는 주로 경제학 분야에서 많이 쓰여 왔다가 비교적 최근에 기후 연구에도 응용되기 시작하였다. Wang *et al.* (2004)는 북대서양지역의 North Atlantic Oscillation (NAO)와 SST의 관계를, 또한 Mosedale *et al.* (2006)는 NAO에 대한 해양의 되먹임작용을, Strong *et al.* (2009)에서는 겨울철 해빙과 NAO 되먹임 작용을 보기 위해서 그랜저 인과관계를 사용하였다. 또한 Barnes and Simpson (2017)에서는 북극 기온에 대한 북반구 제트기류의 민감도를 조사하기 위해서 그랜저 인과관계를 사용하였다.

그랜저 인과관계 검정을 이용하여 얻고자 하는 핵심목표

는 한 변수가 다른 변수를 예측하는 데에 유용한지를 통계적으로 판별하는 것이다. 이를 위해선 아래와 같이 2개의 다중 선형 회귀 방정식을 구성해야 한다.

$$X_t = a_0 + a_1X_{t-1} + a_2X_{t-2} + \dots + a_kX_{t-k} + d_t \quad (2)$$

$$X_t = c_0 + c_1X_{t-1} + c_2X_{t-2} + \dots + c_kX_{t-k} + (b_1Y_{t-1} + b_2Y_{t-2} + \dots + b_kY_{t-k}) + d_t \quad (3)$$

식 (2)는 예측시점  $t$ 에 변수  $X_t$ 를  $k$ 만큼 이전 시점의  $X_{t-k}$ 들로 설명하려는 것을 의미한다. 즉 변수 자체의 메모리를 고려한다.  $k$ 가 1인 경우인  $t-1$ 은  $t$ 시점으로부터 첫 번째 시간지연, 즉 바로 전 시점을 의미한다. 본 연구에서는 이 시간지연 간격을 21일 이동 평균된 자료의 선/후행 관계를 유지하기 위해 21일로 잡았다. 즉  $t$ 가 11월 1일인 경우  $t-1$ 은 10월 11일을 의미한다. 결과를 보이진 않았지만 21일 대신 11일이나 31일을 사용했을 때에도 정성적으로 동일한 결과를 얻을 수 있었다.

식 (3)은 같은 예측시점  $t$ 에 변수  $X_t$ 를 이전 시점의 자기 자신인  $X_{t-k}$ 들 뿐만 아니라  $Y_{t-k}$ 라는 또 다른 변수를 사용하여 설명한다. 여기서  $a_k, b_k, c_k$ 들은  $k$ 번째만큼 시간지연을 가진 변수  $X_{t-k}$ 와 또 다른 변수  $Y_{t-k}$ 에 해당하는 선형회귀 계수 (regression coefficient)를 의미한다. 그리고  $d_t$ 는 각 회귀 식의 오차를 의미한다. 결국 위 식들은  $k$ 번째만큼의 시간지연을 포함한 인과관계식이라고 볼 수 있다. 만약 회귀계수  $b_k$ 가 모두 0이라면 식 (3)은 식 (2)와 동일하다. 반면 계수  $c_k$ 가 모두 0이라면 식 (3)은 단순한 지연상관성을 나타낸다.

본 연구에서는 X에 21일 이동 평균한 한반도 기온 아노말리 (anomaly, 기후 평균이 제거된 값) 혹은 강수량 아노말리를, Y에 Nino 3.4 인덱스를 사용했다. 보통 시간지연  $k$ 를 결정하는데 아카이케 정보기준 (Akaike Information Criterion; AIC)이나 베이저안 정보기준 (Bayesian Information Criterion; BIC)을 사용한다. 먼저 AIC는  $AIC = -2 \ln(L) + 2k$ 을 기준으로 최소의 정보 손실을 가지는 최적의 모델을 찾는 것이다. 여기서  $L$  은 우도함수 (likelihood function)이고,  $k$ 은 회귀식을 구성하는 독립변수의 수이다. 보통의 경우 독립변수의 수가 늘어날수록 더 적합한 모델이 되기 때문에 오차는 줄지만 그만큼 패널티를 주기 때문에 무조건적으로 자유도가 높은 모델 선택을 피하고 최적의 시간지연을 선택하도록 돕는다 (Akaike, 1974). BIC는  $BIC = -2 \ln(L) + k \ln(n)$ 로 AIC와 비슷하며 자료의 수인  $n$ 을 포함하여 최적의 시간지연을 선택하도록 돕는다 (Burnham and Anderson, 2004). 본 연구에서는

Fig. 1 (c)와 Fig. 1 (d)에서처럼 주요 변수들의 메모리가 짧고, 또한 통계적으로 유의미한 회귀계수가 주로 첫 시간지연에서 나타나므로, 시간지연  $k = 1$ 으로 회귀식을 구성하였다. 즉 아래와 같은 회귀 식을 분석하였다.

$$X_t = a_0 + a_1X_{t-1} + d_t \quad (4)$$

$$X_t = c_0 + c_1X_{t-1} + (b_1Y_{t-1}) + d_t \quad (5)$$

ENSO가 한반도 기후변동성에 영향을 미친다면 아래와 같은 조건을 만족해야 한다.

조건1:  $b_1$ 이  $t$ -test의 결과 통계적으로 유의해야 한다.

조건2:  $F$ -test를 수행해서 식 (4)와 (5)의 오차 ( $d_t$ )제공 합이 통계적으로 유의미하게 달라야 한다.

만약 두 조건이 만족한다면 ENSO가 한반도 기후 변동성에 영향을 미친다고 결론을 내릴 수 있다.

### 3. 결과 및 분석

#### 3.1 ENSO와 한반도 기후 변동성의 상관관계

겨울철 (NDJ) ENSO 지수와 한반도 기후 변동성 사이의 59년의 상관관계가 일별로 Fig. 1에 나타나있다. 기온과 강수량 두 기후 인자 모두 12월중후반에 엘니뇨와 상대적으로 높은 상관관계를 가지는 것이 보인다 (Fig. 1a and 1b). 그리고 기온과 다르게 강수량의 경우는 11월과 2월 초에도 통계적으로 유의미한 상관관계가 나타난다 (Fig. 1b). 이 결과는 선행연구들과 일치하며 ENSO를 정의하는 Nino 3.4 인덱스의 지역 변화나 트렌드 제거 여부에 상관없이 모두 비슷했다.

결과를 보이지는 않았지만 21일 이동평균된 일평균 Nino 3.4 인덱스를 사용하여도 Fig. 1과 매우 유사한 결과를 얻었다. 또한 그랜저 인과관계 검증 (식 (5) 참고)과의 직접 비교를 위해 21일 이전의 Nino 3.4 인덱스와 한반도 기온/강수량과의 상관계수를 계산하였으나, 이 또한 Fig. 1과 거의 동일한 결과를 보였다. Nino 3.4 인덱스의 21일 시간 지연에 따른 결과의 차이가 미미한 것은 Nino 3.4 인덱스는 21일 간격에서 자기상관계수 (auto-correlation)가 0.9 이상으로 매우 높고, 여름-가을철에 발달하기 시작한 엘니뇨/라니냐가 주로 겨울철 동안 최대 위상 (peak phase)을 유지하기 때문이다.

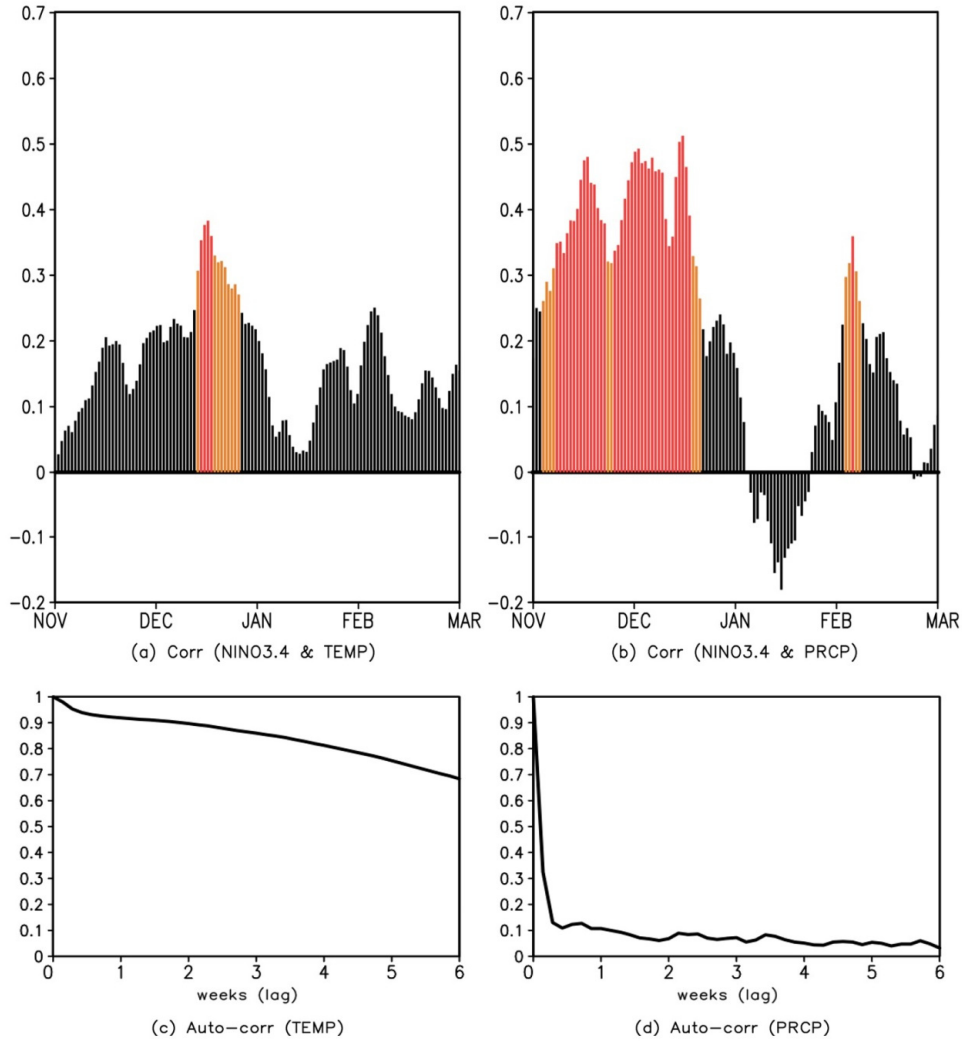


Fig. 1. (a) Correlation coefficients of NDJ mean Nino 3.4 index and 21-day running mean temperature. (c) Auto-correlation coefficients of daily mean temperature. (b,d) same as (a,c) but for precipitation. Orange lines and Red lines indicate the statistically significant values at the 95% and 99% confidence level by a *t*-test, respectively.

3.2 그랜저 인과관계 검정

겨울철 ENSO와 한반도 기후 변동성 사이의 59년의 그랜저 인과관계 검정 결과가 Fig. 2에 나타나있다. 현재 시점의 기온이나 강수량의 아노말리를 자신의 21일전 정보로만 설명하는 식 (4)에 해당하는 회귀계수  $a_1$ 을 옥색선 (cyan line)으로 나타내었다 (Fig. 2a and 2b). 추가적으로 자신뿐 아니라 21일전 ENSO의 정보까지 포함한 식 (5)에 해당하는 회귀계수  $c_1$ 을 파란색선 (blue line)로  $b_1$ 은 빨간색선 (red line)으로 각각 나타내었다 (Fig. 2c and 2d). 각 회귀계수 중 95% 신뢰

수준의 *t*-test를 통과한 계수들은 원 (open circle)으로 99%을 통과한 계수들은 닫힌 원 (closed circle)으로 표시하였다. 95%의 *t*-test를 통과한 거의 대부분의 회귀계수들이 *F*-test도 통과하였기 때문에 원으로 표시된 부분은 그랜저 인과관계가 있다고 해석해도 된다.

Fig. 2 (a)에서 원으로 표시된 회귀계수가 양 (+)의 값이면 해당 날짜의 평년보다 높은 기온을 그 보다 21일전의 기온의 메모리로 설명할 수 있다. 원으로 표시된 날짜들을 살펴보면 11월 중순부터 말까지, 그리고 12월 중순부터 1월 중순까지를 제외하면 겨울철 한반도 기온은 자신의 메모리로 설명이

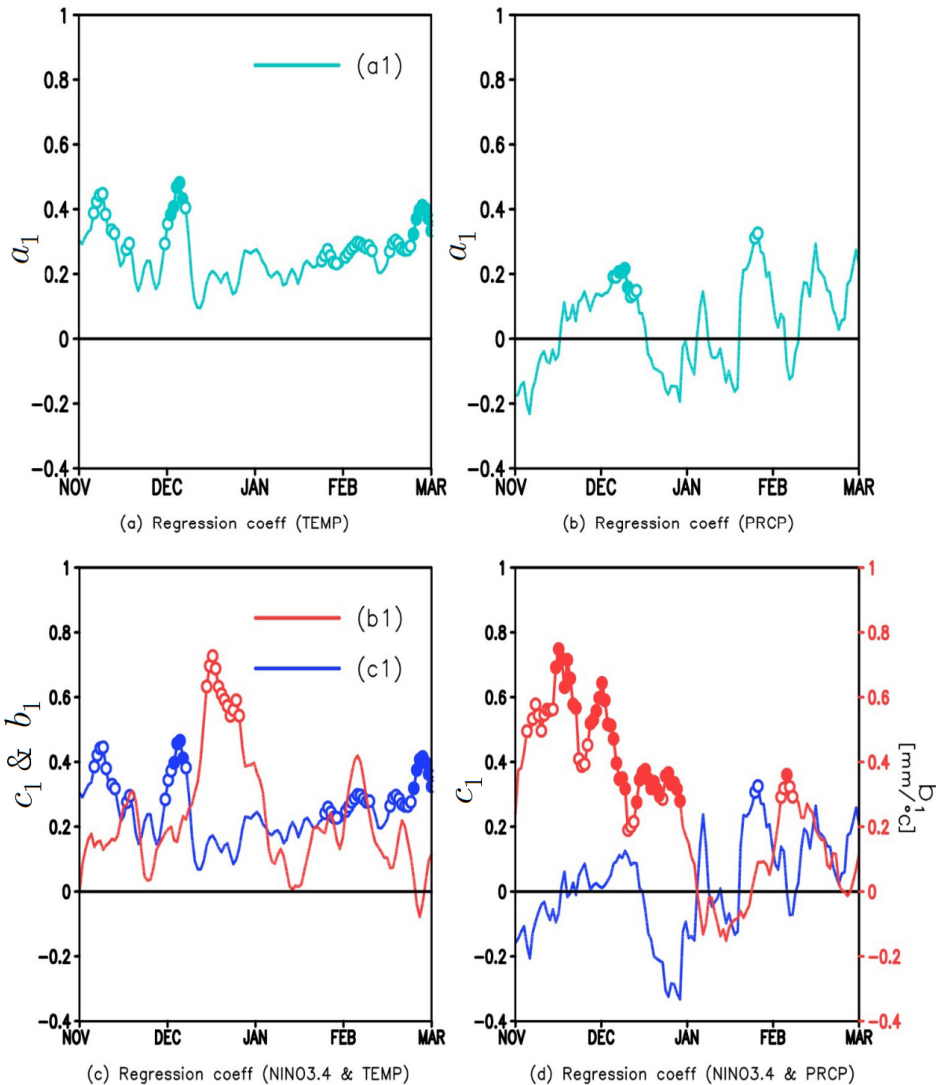


Fig. 2. (a) Regression coefficients of temperature in Eq. (4) ( $a_1$ ; cyan line), (c) Those in Eq. (5) ( $c_1$ ; blue line), and regression coefficient of Nino 3.4 index in Eq. (5) ( $b_1$ ; red line) as a function of calendar day. (b,d) Same as (a,c) but for precipitation. Values that are statistically significant at the 95% and 99% confidence level by a  $t$ -test, are denoted with open and closed circles, respectively.

된다. 달힌 원만을 고려한다면 12월 초와 2월 말의 기온만이 자신의 메모리로 설명 가능하다 (Fig. 2a).

자신의 메모리로 설명할 수 없는 12월 중순의 한반도 기온은 95%의 신뢰수준에서 유의한 (open circle) Nino 3.4 지수와의 선형회귀계수 (Fig. 2c의 빨간색선)로 설명할 수 있다. 이는 Fig. 1 (a)에서 본 상관관계와 비슷한 결과를 보여준다. 통계적으로 유의미한 그랜저 인과관계는 12월 13일부터 12

월 25일까지 나타났다. 이러한 ENSO의 영향을 정량화 하기 위해 그랜저 인과관계 검정을 통해 구한 식 (5)와 (4)의 선형 회귀계수를 결정 계수 ( $R^2$ , coefficient of determination)로 환산하여 그 차이를 구한 결과, 이 기간 동안 Nino 3.4 지수로 설명되는 한반도 기온의 분산 비율은 최소 5.14%에서 최대 9.25%까지인 것으로 나타났다. 그리고 이 정보는 95%의 신뢰수준에서  $F$ -test를 통과한다.

같은 방법으로 강수량 아노말리를 살펴보면 12월 초/중순과 1월 말 정도만 강수량 자신의 메모리로 설명이 가능하다. 이는 99%의 신뢰수준을 고려하게 되면 (달한 원) 12월 중순을 제외하고는 거의 없다고 나타난다 (Fig. 2b). 하지만 Fig. 2 (d)에서 보듯이 강수량 아노말리를 Nino 3.4 지수와 함께 고려한다면 강수량 아노말리 자신의 메모리로 설명할 수 없었던 11월 초부터 12월 말까지 그리고 2월 초/중순도 설명 가능해진다. 1월과 2월 중 후반을 제외한 겨울철에 평년대비 증가 (감소)한 한반도 강수량은 이보다 21일 전의 엘니뇨 (라니냐)로 설명하면 더 유용하며, 이는 앞서 본 기온과는 다르게 99%의 신뢰 수준인 달한 원을 고려하더라도 유용하다고 나타난다. 한반도 기후 변동성 중 기온보다 강수량 아노말리가 자신의 메모리는 작고 ENSO로 많은 부분이 설명된다는 것을 의미한다. 이 기간 동안 Nino 3.4 지수로 설명되는 한반도 강수량의 분산 비율은 최소 5.04%에서 최대 22.18%까지인 것으로 나타났다.

결과를 보이진 않았지만 한반도 기온 또는 강수량 아노말리의 이동평균 기간을 11일이나 31일로 하거나, 일 자료의 Nino3.4 지수를 월 자료로 사용해서 반복 수행했을 때도 정성적으로 동일한 결과를 보였다. 한반도 기온의 경우 이동평

균 기간에 상관없이 12월 중순에 Nino3.4 지수와 그랜저 인과관계를 보였으며, 강수량의 경우 11-12월, 2월 초/중순의 값이 통계적으로 유의미한 값을 보였다. 이는 ENSO의 영향을 받는 한반도 겨울철 기후변동성이 수 일 단위의 짧은 주기를 갖는 변동이 아니라, 수 주 이상의 주기를 갖는 계절내 변동임을 암시한다.

Fig. 3에서는 그랜저 인과관계의 지역적 분포를 살펴보았다. 앞서 Fig. 2에서 11월부터 2월까지 각 월에 대표 날짜를 임의로 뽑아서 관측소 별로 Nino 3.4 지수의 선형회귀계수를 보았다. 이를 본 이유는 한반도 평균 된 결과 (Fig. 2)와 다른 경향을 보이는 특정 지역이 나타나는지, 만약 나타난다면 어느 지역에서 발생하는 지를 보기 위함이다.

한반도 기온과 ENSO간 인과관계의 지역적 분포가 Fig. 3 (a-d)에 나타났다. Fig. 2c에서 통계적으로 유의미한 선형회귀계수가 나타난 12월 15일의 경우, 다른 날짜에 비해 상대적으로 더 높은 선형회귀계수가 나타나며 이때의 Nino 3.4 지수는 선택된 9개의 관측지점에서 모두 통계적으로 유의하게 기온 아노말리를 설명한다 (Fig. 3b). 그러나 1월 15일에 ENSO의 설명력이 약해지고 반응의 지역적 차이도 나타난다. 엘니뇨 겨울일 경우, 서울을 제외한 북서지역들은 평년보다

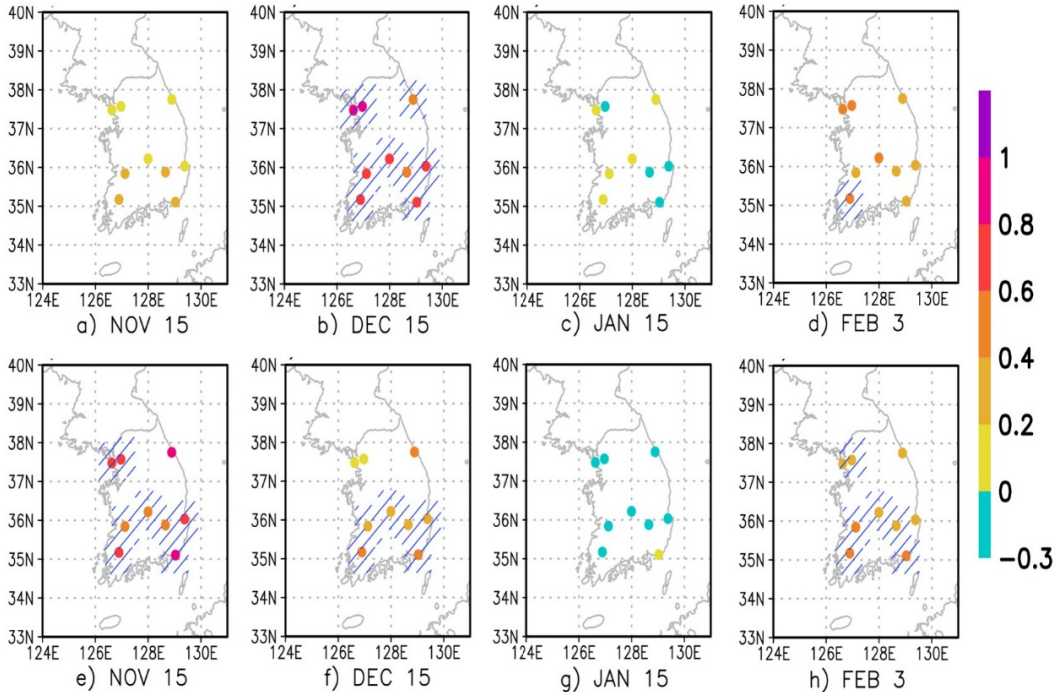


Fig. 3. (a-d) Nino 3.4 regression coefficient of temperature ( $b_1$ ) in Eq. (5). (e-h) Same as (a-d) but for precipitation. A blue hatching denotes that station has Granger causality at the 95% confidence level according to  $t$ -test and  $F$ -test.

높은 기온을 보이지만 부산을 포함한 동남지역들은 평년보다 낮은 기온을 보인다 (Fig. 3c). 2월 3일의 경우 다시 평년보다 높은 기온이 전국적으로 나타나고 한 지점에서만 Nino 3.4 지수와 인과관계가 나타난다 (Fig. 3d).

한반도 강수량과 Nino 3.4 지수 간 인과관계의 지역분포가 Fig. 3 (e-h)에 나타나있다. 11월 15일의 경우 (Fig. 3e), 평년 대비 강수량 증가가 나타나며 이때 엘니뇨 (라니냐)는 강릉 지역을 제외하고 전 지역의 강수량 증가 (감소)를 설명한다. 12월 15일의 경우 (Fig. 3f), 인천과 서울과 강릉 3곳을 제외한 지역에서 인과관계가 나타나지만 그 뒤로 1월 15일 (Fig. 3g)의 경우 기온의 경우와 비슷하게 ENSO와의 인과관계가 없는 것으로 나타난다. 또한 2월 3일 (Fig. 3h)은 기온과 비슷하게 양 (+)의 선형회귀계수가 나타나지만 한 지점에서만 ENSO가 설명 가능한 기온의 경우와는 다르게 거의 전 지역의 강수량 아노말리를 Nino 3.4 지수가 설명한다.

따라서 엘니뇨 (라니냐)는 12월 중순의 평년보다 높은 (낮은) 한반도 기온을 설명하고 양 (음)의 강수량 아노말리에는 더 밀접한 인과관계가 있다. 하지만 1월 중순의 경우에는 다른 경우들과 반대로 평년보다 낮은 기온과 강수량이 나타나며 이는 엘니뇨로 설명할 수 없다. 동시에 기온이나 강수량 자신의 인과관계 또한 나타나지 않은 것으로 봐서 1월 중순의 경우는 ENSO가 아닌 다른 요소가 한반도 기후 변동성에 영향을 끼칠 수도 있다는 것을 암시한다. 이와 관련하여 동아시아 겨울철 기후변동성과 해빙의 관계에 대한 연구가 많이 알려져 있으며 (Honda *et al.*, 2009; Kim BM *et al.*, 2014), 또한 동아시아를 포함한 유라시아 대륙의 기후변동성에 대한 성층권 돌연승온 (Sudden Stratospheric Warming; SSW)과 준 2년주기진동 (Quasi Biennial Oscillation; QBO)영향을 언급한 연구들이 존재한다 (Thompson *et al.*, 2002; Ineson and Scaife, 2009; Calvo *et al.*, 2009; Butler *et al.*, 2014; Richter *et al.*, 2015). 이들 연구에 의하면 유라시아 대륙의 지표 반응에 관여하는 SSW의 영향이 낮은 겨울철 지표 기압을 상대적으로 상승시키고, 상대적으로 차가운 북극 쪽의 공기가 낮은 위도대로 남하하는 것을 야기한다고 알려져 있다. 따라서 낮은 겨울철인 1월과 2월에 ENSO와의 연결이 보다 약하게 되는 것일 수도 있다.

Fig. 3에서 살펴본 바로 ENSO가 한반도 기후 변동성을 설명할 수 있는 정도가 지역마다 다를 수 있지만 그 차이는 미미하다. 기온과 강수량 모두에서 1월 중순에 지역적으로 나타난 음의 선형회귀계수는 자신들의 메모리나 ENSO가 아닌 본 연구에서 고려되지 않은 다른 기후 강제력 또는 변동성에 의한 것으로 생각된다.

#### 4. 결론 및 토의

본 연구에서는 ENSO와 겨울철 한반도 기후 변동성에 대한 인과관계를 그랜저 인과관계 검정을 통해 정량적으로 확인했다. ENSO는 수 주 정도의 시간간격 (본 연구에서는 21일 시간지연 된 자료를 이용)을 가지고 초겨울 한반도 기후 변동성에 인과관계를 보였다.

한반도 겨울철 기온의 경우, 초겨울 평년보다 높은 (낮은) 기온은 엘니뇨 (라니냐)에 의해 일부 초래되는 것으로 파악되었다. 그러나 늦겨울 기온은 엘니뇨/라니냐의 영향을 크게 받지 않음을 확인하였다. 정량적으로 ENSO는 초겨울 한반도 기온의 변동성을 설명하는 데에 있어 최대 9.25%의 추가적인 분산 비율을 설명하는 것으로 나타났다.

한반도 강수량은 기온보다도 더 밀접하게 엘니뇨/라니냐의 영향을 받는다. 특히 1월 중순을 제외한 겨울철 대부분의 기간에서 통계적으로 유의한 인과관계가 나타났다. 엘니뇨 해에 한반도 강수량은 평년보다 많은데, 엘니뇨는 한반도 겨울철 강수량의 변동성을 이해하는데 있어 최대 22.18%의 분산 비율을 추가적으로 설명하는 것으로 나타났다. 이와 같은 인과관계는 지역적 편차가 미미했다. 이는 국지적인 강수량이 아니라 한반도 전반의 겨울철 강수량의 경년변동성이 95%의 통계적 신뢰수준에서 ENSO의 변동성과 관련이 있음을 의미한다.

엘니뇨/라니냐는 한반도 겨울철 기온 및 강수량에 무시하지 못할 영향을 끼치지만 1월 중순은 예외이다. 즉 12월과 2월 한반도 기후 변동성은 엘니뇨/라니냐의 영향을 받지만 1월 중순 기후 변동성은 엘니뇨/라니냐가 아닌 다른 요소들에 의해 영향을 받는 것으로 추정된다. 본 연구에서는 한반도 겨울철 기후 변동성에 영향을 끼치는 다른 인자들은 고려하지 않았다. 향후 선행연구들에서 알려져 있는 북극 해빙 및 성층권 변동성 등을 고려한 복합적인 연구가 필요할 것으로 생각된다. 이는 1월 한반도 기후변동성을 이해하는데 필수적인 과정이 될 것이다.

서론에서 언급한 바와 같이 ENSO와 한반도 기후변동성 관계의 장기 변동에 대한 고려도 필요해 보인다. 이를 위해 분석 기간을 앞 30년 (1958년부터 1987년까지)와 뒤 30년 (1987년부터 2016년까지)으로 나눠 그랜저 인과관계 검정을 했을 때, 앞 기간 동안은 ENSO가 한반도 강수량에 미치는 영향이 주로 12월 동안에 강하게 나타나는 반면, 1990년대 후반을 포함한 뒤 기간 동안은 보다 이른 겨울철과 2월 중순에서 나타났다. 이는 선행연구 (Son *et al.*, 2014)와 유사한 결과로써, 이러한 차이를 만들어 내는 기후학적 요인에

대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

본 연구에서 사용한 그랜저 인과관계 검정은 인과관계를 추정하는 방법 중 하나이므로, 이 결과가 실제 인과관계를 직접적으로 의미하는 것은 아니다. 그러나 기후변동성 자신의 메모리를 제거하더라도 ENSO가 줄 수 있는 추가적인 정보를 정량화할 수 있다는 점에서 메모리를 고려하지 않은 기존 분석 방법의 제한점을 보완할 수 있다.

## 사 사

본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 김혜진, 정명일 두 분과 심사위원분들께 감사를 드립니다. 본 연구는 한국연구재단 “이공분야기초연구사업 (NRF-2016R1C1B1006827)”과 기상청 “기상지진See-At기술개발연구사업(KMI2018-01011)”의 일환으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Akaike H. 1974. A new look at the statistical model identification. *IEEE Trans Automat Control* 19: 716-723.
- Barnes EA, Simpson IR. 2017. Seasonal sensitivity of the Northern Hemisphere jet streams to arctic temperatures on subseasonal time scales. *J Climate* 30: 10117-10137.
- Burnham KP, Anderson DR. 2004. Multimodel inference: understanding AIC and BIC in model selection. *Soc Methods & Research* 33: 261-304.
- Butler AH, Polvani LM, Deser C. 2014. Separating the stratospheric and tropospheric pathways of El Niño - Southern Oscillation teleconnections. *Environ Res Lett* 9: 024014.
- Calvo N, Giorgetta MA, Garcia-Herrera R, Manzini E. 2009. Nonlinearity of the combined warm ENSO and QBO effects on the Northern Hemisphere polar vortex in MAECHAM5 simulations. *J Geophys Res: Atm* 144.
- Chen W, Feng J, Wu R. 2013. Roles of ENSO and PDO in the link of the east Asian winter monsoon to the following summer monsoon. *J Climate* 26:622-635.
- Geng X, Zhang W, Stuecker MF, Liu P, Jin FF, Tan G. 2017. Decadal modulation of the ENSO - East Asian winter monsoon relationship by the Atlantic Multidecadal Oscillation. *Climate Dynamics* 49:2531-2544.
- Ho CH, Choi W, Kim J, Kim MK, Yoo HD. 2016. Does El Niño-Southern Oscillation affect the precipitation in Korea on seasonal time scales? *Asia-Pac J Atmos Sci* 52: 395-403.
- Horel JD, Wallace JM. 1981. Planetary-scale atmospheric phenomena associated with the Southern Oscillation. *Mon Wea Rev* 109: 813-829.
- Honda M, Inoue J, Yamane S. 2009. Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters. *Geophys Res Lett* 36.
- Huang B, Thorne PW, Banzon VF, Boyer T, Chepurin G, Lawrimore JH, Menne MJ, Smith TM, Vose RS, Zhang HM. 2017. Extended reconstructed sea surface temperature version 5 (ERSST. v5): Upgrades, validations, and intercomparisons. *J Climate* 30: 8179-8205.
- Ineson S, Scaife AA. 2009. The role of the stratosphere in the European climate response to El Niño. *Nat Geosci* 2: 32-36.
- 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 KC, Ropelewski C, Wang J, Leetmaa A, Reynolds R, Jenne R, Joseph D. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull Amer Meteor Soc* 77: 437-471.
- Kang IS. 1998. Relationship between El Niño and climate variation over Korea peninsula. *J Korean Meteor Soc* 34: 390-396 (in Korean with English abstract).
- Kim BM, Son SW, Min SK, Jeong JH, Kim SJ, Zhang X, Shim T, Yoon JH. 2014. Weakening of the stratospheric polar vortex by Arctic sea-ice loss. *Nat Commun* 5: 4646.
- Kim JS, Kug JS, Yeh SW, Kim HY, Park EH. 2014. Relation between Climate Variability in Korea and Two Types of El Niño, and Their Sensitivity to Definition of Two Types of El Niño. *Atmosphere* 24: 89-99 (in Korean with English abstract).
- Kug JS, Ahn MS, Sung MK, Yeh SW, Min HS, Kim YH. 2010. Statistical relationship between two types of El Niño events and climate variation over the Korean Peninsula. *Asia-Pac J Atmos Sci* 46: 467-474.
- McGraw MC, Barnes EA. 2018. Memory matters: A case for Granger causality in climate variability studies. *J Climate* 31: 3289-3300.



- Mosedale TJ, Stephenson DB, Collins M, Mills TC. 2006. Granger causality of coupled climate processes: Ocean feedback on the North Atlantic Oscillation. *J Climate* 19: 1182-1194.
- Richter JH, Deser C, Sun L. 2015. Effects of stratospheric variability on El Nino teleconnections. *Environ Res Lett* 10: 124021.
- Son HY, Park JY, Kug JS, Yoo J, Kim CH. 2014. Winter precipitation variability over Korean peninsula associated with ENSO. *Clim Dynam* 42: 3171-3186.
- Strong C, Magnusdottir G, Stern H. 2009. Observed Feedback between Winter Sea Ice and the North Atlantic Oscillation. *J Climate* 22: 6021-6032.
- Thompson DW, Baldwin MP, Wallace JM. 2002. Stratospheric connection to Northern Hemisphere wintertime weather: Implications for prediction. *J Climate* 15: 1421-1428.
- Wallace JM, Gutzler DS. 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. *Mon Wea Rev* 109: 784-812.
- Wang B, Wu R, Fu X. 2000. Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? *J Climate* 13: 1517-1536.
- Wang W, Anderson BT, Kaufmann RK, Myneni RB. 2004. The relation between the North Atlantic Oscillation and SSTs in the North Atlantic basin. *J Climate* 17: 4752-4759.