

ORIGINAL ARTICLE

ENSO에 따른 필리핀 Bicol Region 옥수수 수량의 지역별·재배분기별 상반된 반응과 시차 특성

나하나^{1,2,3)} · Guevarra Kaye Jelyn^{1,2,3)} · 정우식^{1,2,3)*}

¹⁾인제대학교 대기환경정보공학과, ²⁾태풍사전방재선도센터, ³⁾대기환경정보연구센터

Contrasting and Lagged Corn Yield Responses to ENSO across Provinces and Cropping Quarters in the Bicol Region, Philippines

Hana Na^{1,2,3)}, Guevarra Kaye Jelyn^{1,2,3)}, Woo-Sik Jung^{1,2,3)*}

¹⁾Department of Atmospheric Environment and Information Engineering, Inje University, Gimhae 50834, Korea

²⁾Typhoon Ready Center, Inje University, Gimhae 50834, Korea

³⁾Atmospheric Environment Information Research Center, Inje University, Gimhae 50834, Korea

Abstract

This study examined province- and cropping-quarter-specific associations between the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) and corn yield in the Bicol Region, Philippines, from 1991 to 2020. Quarterly production and harvested area data for six provinces were used to calculate the yield and subsequently assess long-term trends for each province-quarter combination. Detrended yield anomalies were compared across El Niño, Neutral, and La Niña conditions, and their continuous and lagged relationships with Niño 3.4 sea surface temperature anomalies were evaluated over 4 quarters (Q1-Q4). Corn production was concentrated in Camarines Sur, Albay, and Masbate, whereas long-term changes in harvested area and yield varied across provinces. ENSO-related yield patterns were not spatially or seasonally uniform. Catanduanes and Sorsogon showed relatively lower yield anomalies under La Niña conditions in Q2-Q4 and Q2-Q3, respectively, whereas Camarines Sur and Albay showed lower yield anomalies under El Niño conditions in Q2 and Q3-Q4, respectively. Lag analysis indicated stronger concurrent or near-term associations in Sorsogon and longer antecedent associations in Catanduanes. However, none of the relationships remained significant after false discovery rate correction. These results suggest that ENSO-corn yield associations in the Bicol Region may vary by province, cropping quarter, and antecedent timing and should be interpreted as exploratory rather than as a uniform regional effect.

Key words : ENSO, Niño 3.4, Corn yield, Bicol Region, Cropping quarter, Lagged response

1. 서 론

El Niño-Southern Oscillation (ENSO)은 열대 태평양의 해양-대기 상호작용에 의해 발생하는 대표적인

경년 기후변동으로, 전 지구 및 지역 규모의 강수량, 기온, 가뭄, 홍수와 열대저기압 활동을 변화시킨다. 이러한 기후변동은 작물의 수분공급, 생육기간, 재배면적 및 단위수량에 영향을 주기 때문에 농업생산 변동의 주

Received 23 July, 2026; Revised 26 August, 2026;

Accepted 31 August, 2026

*Corresponding author : Woo-Sik Jung, Department of Atmospheric Environment and Information Engineering, Inje University, Gimhae 50834, Korea

Phone : +82-55-320-3932

E-mail : wsjung1@inje.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

요 기후요인 중 하나로 인식되어 왔다. Heino et al.(2018)은 ENSO, Indian Ocean Dipole 및 North Atlantic Oscillation과 같은 대규모 기후진동이 전 세계 농경지의 약 3분의 2에서 작물생산성과 통계적으로 관련된다고 보고하였다. 이는 대규모 기후진동이 농업 생산에 광범위하게 작용할 수 있지만, 그 영향은 지역과 작물에 따라 다를 수 있음을 보여준다.

ENSO와 작물수량의 관계는 전 지구적으로도 균일하지 않다. Iizumi et al.(2014)은 옥수수, 벼, 밀 및 대두를 대상으로 ENSO 위상별 수량 변화를 분석한 결과, El Niño와 La Niña의 영향 방향과 크기가 작물 종류와 생산지역에 따라 상반되게 나타날 수 있음을 제시하였다. 특히 옥수수의 경우 전 지구 평균에서는 ENSO 영향이 크지 않거나 감소 방향으로 나타났지만, 지역별 분석에서는 양의 반응과 음의 반응이 함께 확인되었다. 따라서 ENSO가 옥수수 생산에 미치는 영향은 전 지구 평균이나 단일 위상만으로 일반화하기보다, 세부 지역과 재배시기를 구분하여 평가할 필요가 있다.

필리핀 내에서도 ENSO만으로 작물수량 변동을 완전히 설명하기는 어렵다. Lansigan and Salvacion(2007)은 기후변화가 필리핀 주요 벼·옥수수 생산지역의 수량에 미치는 영향을 평가하면서 강수량뿐 아니라 기온과 같은 다른 기후요인의 기여도 함께 고려할 필요가 있음을 보고하였다. Lansigan et al.(2007)은 Isabela 지역 옥수수 생산체계를 대상으로 계절기후전망 정보의 실제 활용 효과를 사후평가하여, 기후정보가 농가의 의사결정과 수량성가에 기여할 수 있음을 제시하였다. 이러한 연구들은 ENSO가 필리핀 작물생산에 관여하는 다양한 기후경로 중 하나이며, 단독 요인으로 다루기보다 다른 기후·정보요인과 함께 검토할 필요가 있음을 시사한다.

필리핀은 ENSO의 영향을 직접적으로 받는 서태평양 지역에 위치하며, El Niño 시기에는 일반적으로 건조한 조건이, La Niña 시기에는 습윤한 조건이 나타날 가능성이 높다. 그러나 필리핀의 ENSO-강수 관계는 계절과 지역에 따라 고정되어 있지 않다. Lyon et al.(2006)은 필리핀 40개 기상관측소의 장기 강수자료를 분석하여, 일부 지역에서 ENSO에 대한 강수반응의 방향이 7-9월과 10-12월 사이에 반전될 수 있음을 밝혔다. 이러한 계절적 반전은 ENSO 생애주기 동안 서태평양 몬순순환과 수분수송이 변화하기 때문인 것으로 해석되었다.

Lyon and Camargo(2009) 역시 필리핀의 강수량과 열대저기압 활동에 대한 ENSO 영향이 계절에 따라 달라진다고 보고하였다. 이는 El Niño를 단순히 가뭄, La Niña를 단순히 과잉강수와 연결하는 접근으로는 필리핀 농업의 ENSO 영향을 충분히 설명하기 어렵다는 것을 의미한다. 특히 작물의 파종, 영양생장, 개화 및 수확시기가 ENSO 관련 강수와 태풍활동의 계절적 변화와 중첩될 경우, 동일한 ENSO 위상에서도 수량반응이 달라질 가능성이 있다.

필리핀 농업생산과 ENSO의 관계는 주로 벼를 중심으로 연구되어 왔다. Roberts et al.(2009)은 Luzon 지역에서 7-9월 Niño 3.4 해수면온도 이상이 다음 해 1-6월 건기 벼 생산 변동의 일부를 설명한다고 보고하였다. 그러나 7-12월 생산에서는 유의한 관계가 나타나지 않았으며, ENSO 영향은 단위수량보다 수확면적 변화에서 더 크게 나타났다. 또한 천수답과 관개답의 반응 크기도 서로 달랐다. 이러한 결과는 ENSO의 농업영향이 작물, 재배환경 및 생산시기에 따라 달라지며, 모든 작기에서 일관된 관계가 나타나는 것은 아님을 보여준다.

옥수수는 강수 및 토양수분 조건에 민감한 작물이므로, ENSO가 유발하는 계절적 건조 또는 습윤조건이 수량 변동에 영향을 미칠 가능성이 있다. 생육 초기의 수분 부족은 영양생장과 엽면적 발달을 제한할 수 있고, 개화기 전후의 수분스트레스는 수분과 수정 및 종실형성을 저해할 수 있다. 반대로 과도한 강수와 토양 포화는 뿌리기능을 저하시키고 작물의 도복 위험을 높일 수 있다. 따라서 ENSO에 따른 강수 및 수분조건의 변화는 Bicol Region 옥수수 수량의 경년변동과 연결될 수 있다는 연구가설을 설정할 수 있다.

다만 옥수수 수량은 ENSO와 계절강수량만으로 결정되는 것은 아니다. 특히 강풍과 많은 강수가 함께 발생하면 토양의 지지력이 약화되고 옥수수의 뿌리도복이 발생할 수 있다. Carter and Hudelson(1988)은 강풍도복을 모의한 포장실험에서 도복 발생시기에 따라 옥수수 수량이 약 2-31% 감소할 수 있음을 보고하였다. Lindsey et al.(2021)은 현대 옥수수 품종을 대상으로 한 연구에서 도복이 V10, V13-14, VT-R1 및 R3 단계에 발생했을 때 수량이 각각 5%, 22%, 43% 및 33% 감소하였으며, 특히 개화기 전후의 도복이 가장 큰 손실을 유발한다고 제시하였다.

이러한 선행연구는 옥수수 수량이 광역적인 ENSO

신호뿐 아니라 개별 강풍사건, 강수에 의한 토양 포화 및 작물 생육단계와의 중첩에도 크게 영향을 받을 수 있음을 보여준다. 특히 Bicol Region은 태평양에 직접 노출되어 있으며 태풍과 열대저기압의 영향을 빈번하게 받는 지역이다. 따라서 ENSO는 계절강수와 태풍활동을 변화시켜 옥수수 생산에 영향을 줄 가능성이 있지만, 실제 수량반응은 주별 지리적 노출, 재배분기, 생산구조 및 태풍성 강풍과 같은 지역적 요인에 의해 달라질 수 있다.

그럼에도 필리핀에서 ENSO와 농업생산의 관계를 다룬 연구는 벼와 국가 또는 대규모 지역 단위에 집중되어 있으며, Bicol Region의 옥수수를 대상으로 주별·재배분기별 반응을 장기간 분석한 연구는 제한적이다. 특히 연간 또는 지역평균 자료를 사용하면 서로 다른 주와 재배분기에서 나타나는 상반된 반응이 상쇄될 수 있다. 또한 ENSO를 El Niño, Neutral 및 La Niña의 범주로만 분석할 경우 ENSO 강도에 대한 연속적인 반응과 수확 이전에 나타난 선행기후 신호를 충분히 확인하기 어렵다.

이에 본 연구는 ENSO에 따른 계절기후 변화가 Bicol Region의 옥수수 수량과 관련될 수 있다는 가설을 검증하고자 하였다. 이를 위해 1991~2020년 Bicol Region 6개 주의 분기별 옥수수 생산량과 수확면적 자료를 이용하여 주·분기별 단위수량을 산정하고 장기추세를 제거하였다. 이후 첫째, El Niño, Neutral 및 La Niña 조건에서의 평균 수량 이상률을 비교하고, 둘째, 연속적인 Niño 3.4 해수면온도 이상에 대한 수량 민감도를 평가하며, 셋째, 동시기부터 최대 4분기 이전까지의 ENSO-수량 시차관계를 분석하였다.

본 연구는 ENSO가 Bicol Region 옥수수 수량에 영향을 미친다는 사실을 전제로 하기보다, 그 관계의 존재 여부와 방향, 지역적·계절적 일관성을 실증적으로 검증하는 데 목적이 있다. 이를 통해 ENSO가 지역 옥수수 생산의 유효한 선행기후지표로 활용될 수 있는지를 평가하고, ENSO만으로 설명되지 않는 경우에는 태풍성 강풍, 국지기상 및 재배환경을 포함한 보다 직접적인 영향요인의 필요성을 제시하고자 한다.

2. 자료 및 방법

본 연구는 1991~2020년 필리핀 Bicol Region 6개 주를 대상으로 분기별 옥수수 생산자료와 Niño 3.4 해

수면온도 이상(sea surface temperature anomaly, SSTA) 자료를 결합하여 ENSO에 따른 옥수수 수량 반응을 분석하였다. 분석단위는 주와 재배분기를 결합한 주-분기(province-quarter) 조합으로 설정하였다. 먼저 옥수수 생산량과 수확면적을 이용하여 단위수량을 산정하고, 기술 발전과 품종 및 재배관리 변화에 따른 장기추세를 제거하였다. 이후 ENSO 위상별 수량 차이, 연속적인 Niño 3.4 SSTA에 대한 수량 민감도 및 동시기부터 최대 4분기 이전까지의 시차관계를 평가하였다.

2.1. 연구지역

Bicol Region은 필리핀 Luzon섬 남동부에 위치한 Region V로, Albay, Camarines Norte, Camarines Sur, Catanduanes, Masbate 및 Sorsogon의 6개 주로 구성된다(Fig. 1). Philippine Statistics Authority (PSA)의 행정구역 분류에서도 Bicol Region은 이들 6개 주로 구분된다.

Bicol Region은 태평양과 필리핀해에 인접한 반도와 도서지역을 포함하며, 주별 지리적 위치와 농업생산 구조가 서로 다르다. Catanduanes와 Bicol 반도의 동부 연안은 태평양에 직접 노출되어 있는 반면, Masbate는 여러 섬으로 구성되어 있다. 이러한 지리적 차이로 인해 ENSO, 계절풍 및 열대저기압과 관련된 기후영향이 지역별로 다르게 나타날 가능성이 있다.

1991~2020년 Bicol Region 전체 옥수수 생산량 가운데 Camarines Sur가 54.66%로 가장 큰 비중을 차지하였으며, Albay와 Masbate가 각각 26.14%와 17.71%를 차지하였다. 이들 세 주의 합계 비중은 약 98.5%였으며, Camarines Norte, Catanduanes 및 Sorsogon의 생산 비중은 각각 1% 미만이었다. 또한 Camarines Sur는 상대적으로 높은 단위수량을 기반으로 가장 많은 생산량을 보인 반면, Masbate는 비교적 낮은 단위수량에도 넓은 수확면적을 바탕으로 주요 생산지역을 형성하였다. 이러한 공간적·생산구조적 차이를 고려하여 모든 통계분석은 Bicol Region 전체를 하나의 단위로 통합하지 않고 주-분기별로 수행하였다.

기후학적으로 Bicol Region에는 Philippine Atmospheric, Geophysical and Astronomical Services Administration (PAGASA)의 modified Coronas climate classification에 따른 Type II, Type III 및 Type IV 기후가 혼재한다(Lantican, 2001). Type II는 뚜렷한 건기가 없고 11월부터 이듬

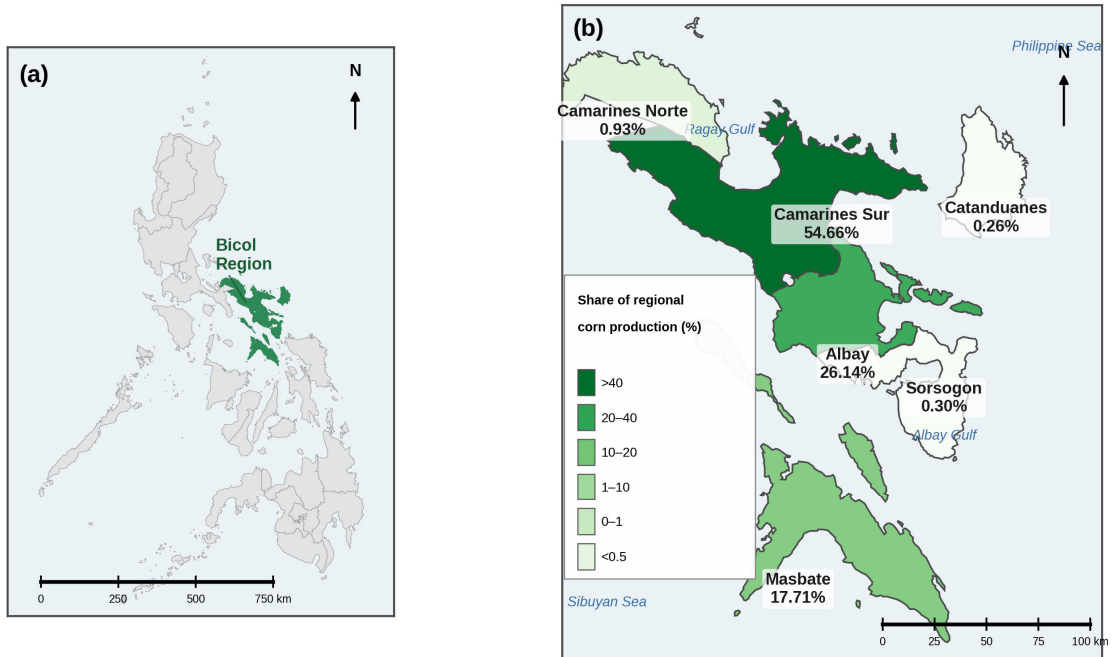


Fig. 1. Location of the Bicol Region and its six provinces in the Philippines, with province-specific shares of regional corn production during 1991–2020.

해 2월 사이에 강수가 집중되는 기후이며, Type III는 일반적으로 2~4월에 짧은 건기가 나타난다. Type IV는 연중 강수량이 비교적 고르게 분포하는 기후형이다. 이러한 강수 계절성의 공간적 차이는 주·재배분기별 ENSO 반응의 이질성을 이해하기 위한 기후학적 배경을 제공한다.

다만 modified Coronas climate classification은 강수의 계절적 유형을 정성적으로 구분하는 범주형 지표이며, 본 연구의 분석단위인 주·분기 수준에서 정량적인 통계변수로 전환하기 위한 표준화된 산정방식이 확립되어 있지 않다. 이에 본 연구에서는 기후형을 통계 모형의 설명변수로 직접 포함하지 않고, 각 주가 속한 기후형을 결과 해석 시 지리적·기후학적 배경으로 참고하는 정성적 틀로 활용하였다.

2.2. 연구자료

본 연구에서는 1991~2020년 필리핀 Bicol Region 6개 주의 분기별 옥수수 생산자료와 Niño 3.4 해수면 온도 이상(sea surface temperature anomaly, SSTA)

자료를 사용하였다. 옥수수 생산자료는 Philippine Statistics Authority (PSA)의 OpenSTAT 데이터베이스에서 제공하는 주별·분기별 생산량과 수확면적 자료를 이용하였다. ENSO 자료는 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)에서 제공하는 Extended Reconstructed Sea Surface Temperature version 5 (ERSSTv5) 기반의 월별 Niño 3.4 SSTA 자료를 이용하였다. 두 자료는 1991~2020년의 공통기간을 대상으로 분기단위로 정리하여 결합하였다.

2.2.1. 옥수수 생산자료

옥수수 생산자료는 PSA OpenSTAT에서 제공하는 주별·분기별 옥수수 생산량과 수확면적 자료를 이용하였다. 분석대상은 Albay, Camarines Norte, Camarines Sur, Catanduanes, Masbate 및 Sorsogon의 6개 주이며, 분석기간은 1991~2020년이다. 각 연도는 Q1~Q4로 구분하였으며, 생산량의 단위는 metric ton, 수확면적의 단위는 hectare이다.

이에 따라 6개 주, 30개 연도 및 4개 분기를 결합한 총 720개의 주-연도-분기 자료를 구축하였다. 각 주-연도-분기의 옥수수 단위수량은 생산량을 수확면적으로 나누어 산정하였다. 수확면적이 0인 경우에는 단위수량을 0으로 간주하지 않고 결측값으로 처리하였다. 또한 생산량과 수확면적에 음수 또는 물리적으로 해석하기 어려운 값이 존재하는지 확인하였다. 자료 품질관리 결과, 전체 720개 조합 가운데 703개의 유효한 단위수량 관측값을 후속 분석에 사용하였다.

생산량, 수확면적 및 단위수량의 장기 변화율은 로그 선형회귀를 이용하여 연평균 변화율로 산정하였다. 생산량은 수확면적과 단위수량의 곱으로 표현되므로, 로그척도에서 생산량 변화율을 수확면적 변화와 단위수량 변화의 기여로 분해하였다.

2.2.2. ENSO 자료

ENSO 조건은 적도 태평양 Niño 3.4 해역의 해수면 온도 이상자료를 이용하여 나타냈다. Niño 3.4 해역은 5°N - 5°S , 170°W - 120°W 범위이며, 본 연구에서는 NOAA에서 제공하는 ERSSTv5 기반 월별 Niño 3.4 SSTA를 사용하였다.

월별 Niño 3.4 SSTA는 옥수수 생산자료와 동일한 시간단위로 비교하기 위해 각 분기를 구성하는 3개월의 산술평균으로 변환하였다. Q1, Q2, Q3 및 Q4는 각각 1-3월, 4-6월, 7-9월 및 10-12월의 평균 SSTA로 구성하였다.

분기별 ENSO 조건은 해당 분기의 평균 Niño 3.4 SSTA가 $+0.5^{\circ}\text{C}$ 이상이면 El Niño, -0.5°C 이하이면 La Niña, 그 사이의 값은 Neutral로 구분하였다. 이 분류는 각 분기의 해양상태를 구분하기 위해 본 연구에서 적용한 분석상 기준이다. 따라서 중첩된 3개월 이동평균과 지속조건을 함께 적용하는 NOAA의 공식 Oceanic Niño Index 기반 ENSO 사건 판정과는 구분된다.

2.3. 연구방법

2.3.1. ENSO 위상별 수량 비교

각 주-분기별 수량 이상률을 El Niño, Neutral 및 La Niña 조건으로 구분하고, 위상별 평균과 표본수를 산정하였다. ENSO의 양 극단 위상 간 수량 반응을 비교하기 위해 El Niño와 La Niña 조건의 평균 수량 이상

률 차이를 계산하였다. 두 집단의 표본수와 분산이 서로 다를 수 있음을 고려하여, 평균 차이의 통계적 유의성은 등분산을 가정하지 않는 Welch's t-test를 이용하여 검정하였다. Neutral 조건은 전체적인 위상별 수량분포를 제시하기 위한 참고범주로 포함하였으나, El Niño와 La Niña 간 직접적인 평균 차이 검정에는 사용하지 않았다.

6개 주와 4개 분기를 결합한 총 24개 주-분기 조합에서 반복검정을 수행함에 따라 발생할 수 있는 제1종 오류를 통제하기 위해 Benjamini and Hochberg (1995)의 방법에 따른 false discovery rate (FDR) 보정을 적용하였다. 각 조합의 원시 p-value를 산정하고, 24개 검정에 대해 FDR 보정을 적용하였다. 주요 원시 p-value와 FDR 보정 후 유의성 여부는 결과에 제시하였다. 기본적인 통계적 유의수준은 0.05로 설정하였으며, 보정 후 유의성이 유지되지 않은 결과는 확정적인 ENSO 효과가 아니라 후속 분석에서 반응 방향과 반복성을 검토하기 위한 탐색적 패턴으로 해석하였다.

2.3.2. 연속적인 ENSO-수량 관계

범주형 ENSO 위상분석을 보완하고 Niño 3.4 SSTA의 연속적인 변화에 대한 수량 반응을 평가하기 위해, 각 주-분기별 Niño 3.4 SSTA와 수량 이상률 간의 관계를 분석하였다. 선형관계의 방향과 강도는 Pearson 상관계수로 평가하였으며, 단순선형회귀를 이용하여 Niño 3.4 SSTA가 1°C 증가할 때 수량 이상률이 변화하는 정도를 회귀기울기로 산정하였다.

일반 최소제곱회귀의 기울기가 일부 극단값에 의해 과도하게 영향을 받을 가능성을 평가하기 위해 Theil (1950)과 Sen(1968)이 제안한 Theil-Sen 추정량을 이용하여 강건 기울기를 추가로 산정하였다. Theil-Sen 추정량은 모든 관측값 쌍에서 계산한 기울기의 중앙값을 이용하므로 이상값과 비정규분포에 상대적으로 덜 민감하다. 본 연구에서는 일반선형회귀와 Theil-Sen 추정기울기의 부호가 일치하는지를 비교하여 ENSO-수량 관계 방향의 안정성을 검토하였다. Theil-Sen 분석은 일반선형회귀의 유의성 검정을 대체하기 위한 것이 아니라, 회귀방향이 일부 극단연도에 의존하는지를 확인하기 위한 민감도 분석으로 사용하였다.

반복검정에 따른 오류를 고려하여 Pearson 상관 및 단순선형회귀의 p-value에도 24개 주-분기 조합을 하나의 검정군으로 설정하여 Benjamini-Hochberg

FDR 보정을 적용하였다.

2.3.3. ENSO-수량 시차관계

ENSO가 수확분기의 동시기 기후뿐 아니라 파종 전 또는 초기 생육기의 환경을 통해 이후 수량에 영향을 줄 가능성을 고려하여, Niño 3.4 SSTA와 수량 이상률 간의 시차상관을 분석하였다. 시차는 수확분기와 동일한 시기의 ENSO 조건을 나타내는 L0부터 1분기, 2분기, 3분기 및 4분기 이전의 ENSO 조건을 각각 나타내는 L1-L4까지 설정하였다.

각 주-분기 조합에 대해 L0-L4의 Pearson 상관계수와 p-value를 산정하였다. 이후 절대상관계수가 가장 큰 시차를 해당 조합의 최대 반응시차로 정의하였다. 양의 상관은 높은 Niño 3.4 SSTA가 높은 수량 이상률과 연결되는 관계를, 음의 상관은 높은 Niño 3.4 SSTA가 낮은 수량 이상률과 연결되는 관계를 의미한다.

다만 서로 다른 수확분기에서 나타난 L2-L4가 달력상 동일하거나 유사한 선행 ENSO 기간을 가리킬 수 있으므로, 최대 시차의 차이를 수량반응이 순차적으로 이동한 결과로 단정하지 않았다. 예를 들어 연속된 수확분기에서 각각 L4, L3 및 L2가 선택되더라도, 실제로는 모두 동일한 이전 연도의 특정 분기를 가리킬 수 있다.

또한 L0-L4 가운데 절대상관이 가장 큰 값을 사후적으로 선택하면 표본 내 최대상관이 과대평가될 수 있다. 따라서 최대 반응시차는 확정적인 예측시차가 아니라 잠재적인 선행 ENSO 신호를 탐색하기 위한 지표로 해석하였다. 시차분석의 통계적 결과는 개별 p-value뿐 아니라 위상별 비교와 동시기 SSTA 분석에서 반응 방향이 일치하는지를 함께 고려하였다.

각 주-분기 조합에서 L0-L4 가운데 절대상관계수가 가장 큰 값을 최대 시차상관으로 정의하였다. Fig. 5에는 24개 주-분기 조합 중 최대 절대상관계수가 가장 큰 상위 6개 조합을 제시하였다.

2.3.4. 통계분석

모든 자료처리와 통계분석은 Python 환경에서 pandas, SciPy 및 statsmodels 라이브러리를 이용하여 수행하였다. 기본적인 통계적 유의수준은 0.05로 설정하였다. $0.05 \leq p < 0.10$ 인 결과는 통계적으로 유의한 관계로 판단하지 않았으며, 다른 분석에서 반응방향이 반복되는지를 검토하기 위한 제한적인 탐색 결과로만

참고하였다.

다수의 주-분기 조합과 시차에 대해 반복검정을 수행함에 따라 발생할 수 있는 제1종 오류를 통제하기 위해 Benjamini and Hochberg(1995)의 절차를 이용하여 false discovery rate (FDR)를 보정하였다. FDR 보정은 분석 목적이 서로 다른 검정군별로 독립적으로 수행하였다. ENSO 위상비교에서는 24개 주-분기 조합의 Welch's t-test를 하나의 검정군으로 설정하였고, 연속적인 Niño 3.4 SSTA-수량 관계에서는 24개 주-분기 조합의 선행관계 검정을 별도의 검정군으로 설정하였다.

시차분석에서는 24개 주-분기 조합에서 L0-L4의 상관관계를 각각 검정하였으므로, 총 120개의 시차상관 검정을 하나의 검정군으로 설정하여 FDR을 보정하였다. 각 주-분기 조합에서 절대상관계수가 가장 큰 시차는 잠재적인 최대 반응시차를 요약하기 위해 제시하였으나, 사후적인 최대값 선택으로 인해 상관강도가 과대평가될 수 있으므로 별도의 확정적 예측시차로 해석하지 않았다.

모든 분석에서는 원시 p-value와 FDR 보정 p-value를 함께 검토하였다. FDR 보정 후 유의성이 유지되지 않은 관계는 확정적인 ENSO 효과로 판단하지 않고 탐색적 신호로 해석하였다. 따라서 결과의 해석에서는 개별 검정의 p-value뿐 아니라 ENSO 위상별 비교, 연속적인 SSTA 분석 및 시차분석에서 반응의 방향과 지역·재배분기별 패턴이 일관되게 나타나는지를 함께 고려하였다.

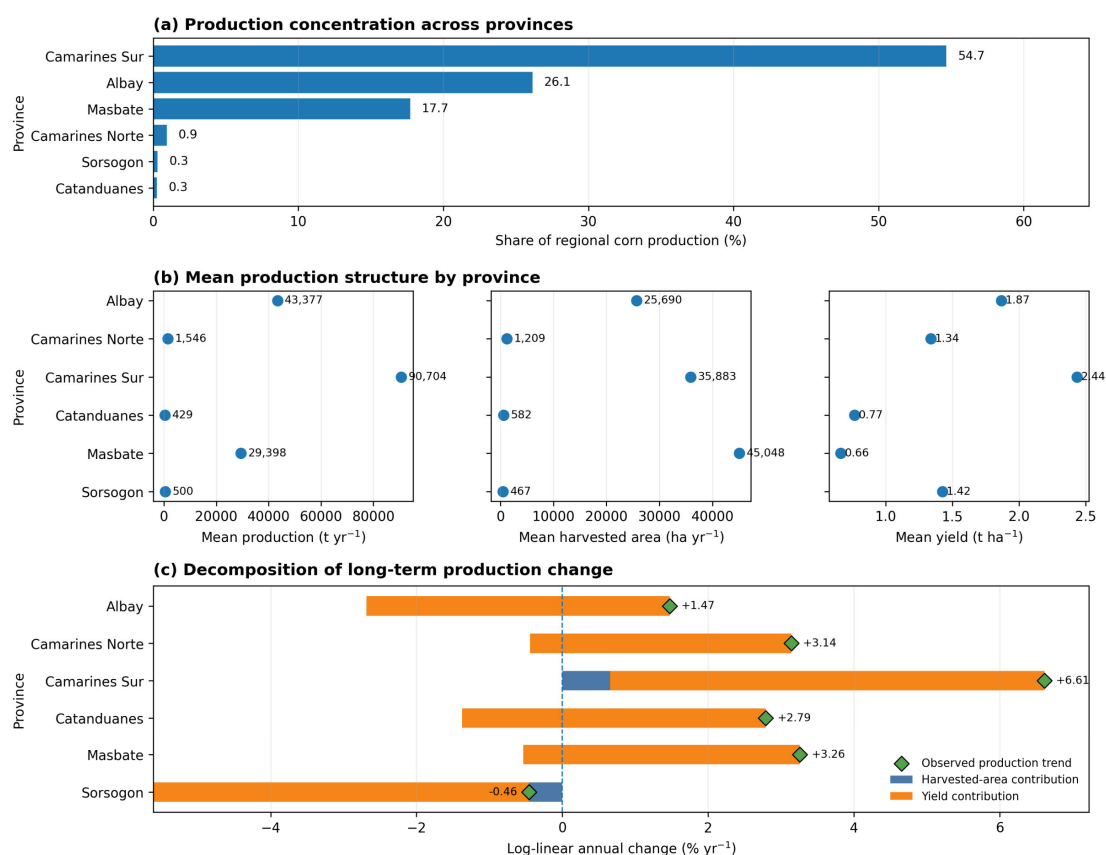
3. 결과

본 연구에서는 먼저 1991~2020년 Bicol Region 6개 주의 옥수수 생산량, 수확면적 및 단위수량을 이용하여 지역별 장기 생산구조와 변화 특성을 분석하였다. 이후 주-분기별 장기추세가 제거된 수량 이상률을 이용하여 ENSO 위상별 수량 차이, 연속적인 Niño 3.4 SSTA에 대한 민감도 및 최대 4분기까지의 시차관계를 평가하였다.

분석 결과는 세 가지 특징으로 요약되었다. 첫째, Bicol Region의 옥수수 생산은 일부 주에 집중되어 있었으며, 생산량을 형성하는 수확면적과 단위수량의 상대적 중요성은 지역별로 달랐다. 둘째, ENSO에 대한 수량 반응은 Bicol Region 전역에서 동일하게 나타나

Table 1. Long-term characteristics and trends in corn production across the six provinces of the Bicol Region, 1991–2020

Province	Albay	Camarines Norte	Camarines Sur	Catanduanes	Masbate	Sorsogon
Production share (%)	26.14	0.93	54.66	0.26	17.71	0.30
Mean production (t yr ⁻¹)	43377.42	1545.85	90703.93	429.46	29398.42	500.43
Mean harvested area (ha yr ⁻¹)	25690.40	1209.33	35882.57	581.55	45047.57	466.77
Mean yield (t ha ⁻¹)	1.87	1.34	2.44	0.77	0.66	1.42
Production trend (% yr ⁻¹)	1.47	3.14	6.61	2.79	3.26	-0.46
Harvested-area trend (% yr ⁻¹)	-2.69	-0.44	0.66	-1.37	-0.54	-5.61
Yield trend (% yr ⁻¹)	4.16	3.58	5.95	4.16	3.79	5.15



Panel (c) decomposes the production trend into harvested-area and yield contributions using log-linear annual changes.

Fig. 2. Long-term production structure and change in corn production across the six provinces of the Bicol Region, 1991–2020. (a) Province-specific shares of total regional corn production. (b) Mean annual production, harvested area, and yield by province. (c) Decomposition of long-term changes in total corn production into harvested-area and yield contributions.

지 않았으며, 주와 재배분기에 따라 방향과 크기가 달랐다. 셋째, 일부 주-분기 조합에서는 동시기보다 이전 분기의 ENSO 상태와 더 큰 상관관계가 나타났다.

3.1. Bicol Region 옥수수 생산구조의 장기 변화

1991~2020년 Bicol Region의 옥수수 생산은 Camarines Sur, Albay 및 Masbate에 집중되어 있었으며, 이들 세 주가 지역 전체 생산량의 약 98.5%를 차지하였다(Table 1; Fig. 2a). Camarines Sur의 생산 비중은 54.66%로 가장 높았고, Albay와 Masbate가 각각 26.14%와 17.71%를 차지하였다. 반면 Camarines Norte, Catanduanes 및 Sorsogon의 생산비중은 각각 0.93%, 0.26% 및 0.30%로 모두 1% 미만이었다.

지역별 평균 생산구조에서도 뚜렷한 차이가 나타났다(Table 1; Fig. 2b). Camarines Sur는 연평균 생산량이 90,703.93 t로 가장 많았으며, 평균 단위수량도 2.44 t ha⁻¹로 6개 주 중 가장 높았다. 이는 Camarines Sur의 높은 생산량이 비교적 넓은 수확면적뿐 아니라 높은 단위면적당 생산성에 의해 뒷받침되었음을 보여준다.

Masbate는 평균 수확면적이 45,047.57 ha로 가장 넓었으나, 평균 단위수량은 0.66 t ha⁻¹로 가장 낮았다. 따라서 Masbate의 높은 지역 생산비중은 생산성보다는 넓은 재배규모에 주로 기반한 것으로 나타났다. Albay는 평균 수확면적 25,690.40 ha와 평균 단위수량 1.87 t ha⁻¹를 바탕으로 두 번째로 높은 생산비중을 보였다. 반면 Catanduanes와 Sorsogon은 수확면적과 생산량 모두 상대적으로 작아 지역 전체 생산에서 차지하는 비중이 제한적이었다.

장기적인 생산량 변화의 구성요인도 주별로 달랐다(Table 1; Fig. 2c). Camarines Sur에서는 수확면적이 연평균 0.66% 증가한 가운데 단위수량이 연평균 5.95% 증가하여, 생산량이 연평균 6.61% 증가하였다. 즉, Camarines Sur의 생산 확대는 수확면적의 소폭 증가보다 단위수량 향상에 의해 주도되었다.

Albay, Camarines Norte 및 Catanduanes에서는 수확면적이 각각 연평균 2.69%, 0.44% 및 1.37% 감소하였으나, 단위수량은 각각 4.16%, 3.58% 및 4.16% 증가하였다. 그 결과 생산량은 각각 연평균 1.47%, 3.14% 및 2.79% 증가하였다. Masbate에서도 수확면적이 연평균 0.54% 감소했지만 단위수량이 3.79% 증가하면서 생산량은 3.26% 증가하였다. 이들 지역에서

는 단위수량의 향상이 수확면적 감소를 상쇄하여 전체 생산량 증가로 이어졌다.

반면 Sorsogon에서는 단위수량이 연평균 5.15% 증가하였음에도 수확면적이 5.61% 감소하였다. 이에 따라 생산량은 연평균 0.46% 감소하여 6개 주 가운데 유일한 감소 추세를 보였다. 이는 단위수량 개선이 반드시 전체 생산 증가로 이어지는 것은 아니며, 수확면적 감소의 크기가 생산량 변화의 방향을 결정할 수 있음을 보여준다.

종합하면, Bicol Region의 장기적인 옥수수 생산 변화는 전반적인 단위수량 향상에 의해 지지되었으나, 그 효과는 수확면적 변화에 따라 지역별로 다르게 나타났다. Camarines Sur에서는 수확면적과 단위수량이 모두 증가하면서 생산이 크게 확대된 반면, 대부분의 다른 주에서는 단위수량 향상이 수확면적 감소를 보완하였다. Sorsogon에서는 수확면적 감소가 단위수량 증가를 초과하여 생산량이 감소하였다. 따라서 지역별 옥수수 생산 변화를 이해하기 위해서는 생산량 자체뿐 아니라 수확면적과 단위수량의 상대적인 기여를 함께 고려할 필요가 있다.

3.2. ENSO 위상에 따른 지역·분기별 수량 반응

장기추세를 제거한 옥수수 수량 이상률을 ENSO 위상별로 비교한 결과, El Niño와 La Niña 간 차이의 방향과 크기는 주와 재배분기에 따라 다르게 나타났다(Table 2; Fig. 3). 이는 Bicol Region 전체에 공통적으로 적용되는 일관된 ENSO 반응이 나타나지 않았음을 보여준다.

Catanduanes에서는 Q2-Q4에서 연속적으로 양의 El Niño-La Niña 차이가 나타났다. 두 위상 간 평균 수량 이상률 차이는 Q2에서 19.00%p, Q3에서 28.02%p, Q4에서 26.18%p였으며, 이는 해당 분기에서 La Niña 조건의 수량 이상률이 El Niño 조건보다 상대적으로 낮았음을 의미한다. 특히 Q3와 Q4에서는 위상 간 차이가 25%p를 초과하여, 다른 주-분기 조합에 비해 비교적 큰 대비가 나타났다.

Sorsogon에서도 Q2와 Q3에서 각각 19.48%p와 29.39%p의 양의 차이가 나타나, La Niña 조건에서 상대적으로 낮은 수량 이상률이 관찰되었다. 반면 Q1과 Q4의 차이는 각각 -6.40%p와 0.30%p로 작아, 이러한 반응이 모든 재배분기에서 일관되게 나타나지는 않았다.

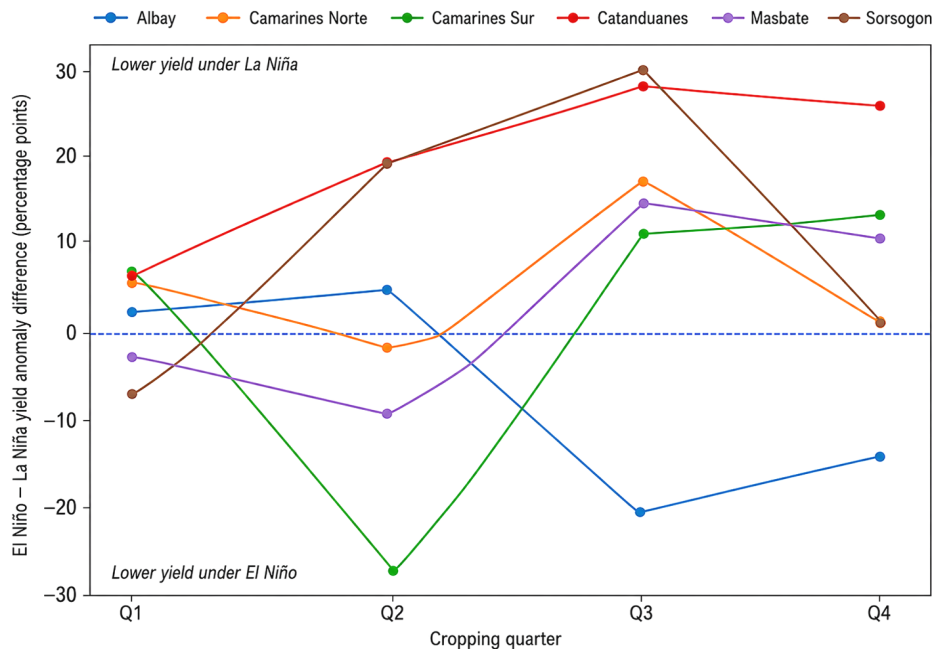


Fig. 3. Province- and quarter-specific contrasts in detrended corn yield anomalies between El Niño and La Niña conditions in the Bicol Region, 1991–2020. Positive values indicate lower yield anomalies under La Niña than under El Niño, whereas negative values indicate lower yield anomalies under El Niño. Lines connect quarterly responses within each province and are intended to illustrate seasonal consistency rather than temporal continuity.

반대로 Camarines Sur Q2에서는 El Niño 조건의 평균 수량 이상률이 -23.27% 인 반면, La Niña 조건에서는 3.17% 로 나타나 -26.44% 의 차이를 보였다. 이는 해당 주-분기 조합에서 El Niño 조건의 수량 이상률이 상대적으로 낮았음을 의미한다. 그러나 Q3와 Q4에서는 각각 11.23% 과 13.21% 의 양의 차이가 나타나, 같은 주에서도 재배분기에 따라 ENSO 반응방향이 달라졌다.

Albay에서도 Q3와 Q4에서 각각 -19.75% 와 -14.79% 의 음의 차이가 나타나 El Niño 조건에서 상대적으로 낮은 수량 이상률이 관찰되었다. 반면 Q1과 Q2의 차이는 각각 1.93% 과 4.33% 로 작았다. Camarines Norte에서는 Q3에서만 16.78% 의 비교적 큰 양의 차이가 나타났으며, 나머지 분기의 차이는 $-0.55\sim 5.05\%$ 범위로 제한적이었다. Masbate에서는 Q3와 Q4에서 각각 14.88% 과 10.78% 의 양의 차이가 나타났으나, Q1과 Q2에서는 차이가 작거나 반대 방향이었다.

Welch's t-test 결과, 24개 주-분기 조합 가운데 Camarines Sur Q2만 명목 유의수준을 충족하였다 ($t = -2.373$, $p = 0.042$). Catanduanes Q2 ($t = 2.237$, $p = 0.071$), Sorsogon Q2 ($t = 1.905$, $p = 0.091$) 및 Catanduanes Q3 ($t = 2.142$, $p = 0.097$)에서는 $0.05 \leq p < 0.10$ 범위의 결과가 나타났으나, 통계적으로 유의한 관계로 판단하지 않았다. 나머지 주-분기 조합은 모두 $p > 0.10$ 이었다.

24개 비교에 대해 Benjamini-Hochberg 절차로 false discovery rate를 보정한 결과, Camarines Sur Q2를 포함하여 보정 후 유의성이 유지된 조합은 없었다. 따라서 Table 2와 Fig. 3에 제시된 ENSO 위상별 차이는 통계적으로 확정된 효과라기보다, 지역과 재배 분기에 따라 나타난 반응의 방향과 크기를 보여주는 탐색적 패턴으로 해석하였다. 특히 일부 조합에서 비교적 큰 위상 차이가 나타났더라도, 이를 ENSO가 해당 지역의 옥수수 수량을 일관되게 결정하는 결과로 해석할 수는 없다. 이후 연속적인 Niño 3.4 SSTA 분석과 시차분석

Table 2. Detrended corn yield anomalies under El Niño, Neutral, and La Niña conditions by province and cropping quarter in the Bicol Region, 1991–2020

Province		El Niño anomaly (%)	n	Neutral anomaly (%)	n	La Niña anomaly (%)	n	El Niño – La Niña difference (‰)
Albay	Q1	-5.32	11	23.37	7	-7.25	12	1.93
	Q2	-1.79	6	2.60	18	-6.13	6	4.33
	Q3	-9.00	4	-1.40	22	10.74	4	-19.75
	Q4	-8.61	5	0.90	18	6.18	7	-14.79
Camarines Norte	Q1	2.88	11	4.29	5	-2.17	11	5.05
	Q2	2.55	6	0.42	18	3.10	6	-0.55
	Q3	-0.89	4	4.89	22	-17.67	4	16.78
	Q4	2.72	4	-0.61	18	1.71	7	1.01
Camarines Sur	Q1	2.65	11	26.15	7	-3.91	12	6.56
	Q2	-23.27	6	6.27	18	3.17	6	-26.44
	Q3	11.10	4	0.40	22	-0.13	4	11.23
	Q4	10.88	5	4.50	18	-2.33	7	13.21
Catanduanes	Q1	3.06	11	3.24	7	-3.14	12	6.20
	Q2	2.89	6	8.61	18	-16.11	6	19.00
	Q3	10.10	4	4.14	22	-17.92	4	28.02
	Q4	17.07	5	2.17	18	-9.10	7	26.18
Masbate	Q1	-0.48	11	-7.45	7	2.45	12	-2.93
	Q2	-10.07	6	4.13	18	-1.84	6	-8.23
	Q3	7.84	4	1.62	22	-7.04	4	14.88
	Q4	4.21	4	1.86	10	-6.58	4	10.78
Sorsogon	Q1	-4.06	11	1.21	7	2.34	11	-6.40
	Q2	10.96	6	0.03	18	-8.52	6	19.48
	Q3	12.06	4	2.43	22	-17.33	4	29.39
	Q4	-0.26	5	1.45	18	-0.56	7	0.30

Note. Values are detrended yield anomalies (%) by ENSO phase; the rightmost column is the El Niño – La Niña difference in percentage points (‰). Significance was assessed using Welch's t-test.

* $p < 0.05$ (nominal, uncorrected); none of the 24 province–quarter comparisons remained significant after Benjamini–Hochberg false discovery rate correction.

에서는 이러한 위상별 반응방향이 다른 분석에서도 반복되는지를 추가로 검토하였다.

3.3. Niño 3.4 해수면온도 이상에 대한 수량 민감도

Niño 3.4 SSTA를 연속변수로 분석한 결과, 옥수수 수량 이상률에 대한 반응의 방향과 크기는 주와 재배분기에 따라 달랐다(Fig. 4). 양의 회귀기울기는 Niño 3.4 SSTA가 증가할수록 수량 이상률이 증가하는 관계를 의미하므로, 상대적으로 La Niña 조건에서 낮은 수량이 나타나는 경향을 나타낸다. 반대로 음의 기울기는

Niño 3.4 SSTA가 증가할수록 수량 이상률이 감소하는 관계로, 상대적으로 El Niño 조건에서 낮은 수량이 나타나는 경향을 의미한다.

Catanduanes Q4에서는 가장 뚜렷한 양의 관계가 나타났다. Niño 3.4 SSTA가 1°C 증가할 때 수량 이상률은 평균 19.60%p 증가하였으며, 상관계수는 $r = 0.444$, 원시 p-value는 0.014였다. Sorsogon Q3에서도 Niño 3.4 SSTA가 1°C 증가할 때 수량 이상률이 평균 12.29%p 증가하는 양의 관계가 나타났다 ($r = 0.411$, $p = 0.024$). 두 조합 모두 La Niña 조건에서 상

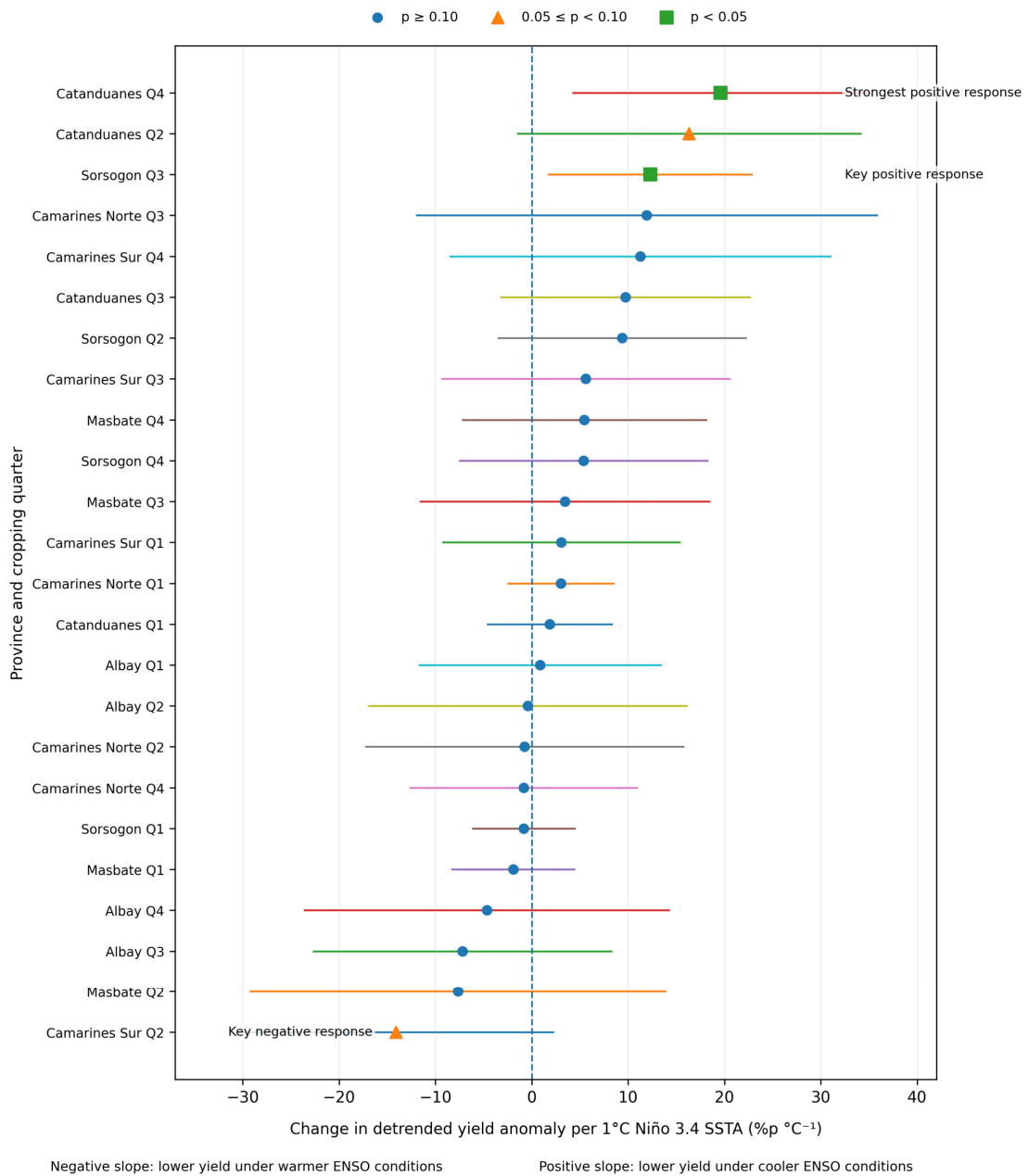


Fig. 4. Province- and quarter-specific sensitivity of detrended corn yield anomalies to Niño 3.4 sea surface temperature anomalies in the Bicol Region, 1991–2020. Points indicate regression slopes and horizontal lines show 95% confidence intervals. Positive and negative slopes denote relatively lower yields toward La Niña and El Niño conditions, respectively.

대적으로 낮은 수량 이상률이 관찰된 3.2절의 위상분석 결과와 반응방향이 일치하였다.

Catanduanes Q2와 Q3에서도 양의 기울기가 나타나 Q2-Q4에 걸쳐 반응방향이 대체로 일관되었다. 다만 Q2와 Q3의 통계적 근거는 Q4보다 제한적이었다. 반면 Camarines Sur Q2에서는 Niño 3.4 SSTA가 1°C 증가할 때 수량 이상률이 평균 14.09%p 감소하는 음의 관계가 나타났다. 이는 El Niño 조건에서 상대적으로 낮은 수량 이상률이 확인된 위상분석 결과와 같은 방향이었다.

일반선형회귀 결과가 일부 극단연도에 의해 크게 좌우되는지를 검토하기 위해 Theil-Sen 추정량을 이용한 강건회귀를 추가로 수행하였다. 총 24개 주-분기 조합 가운데 21개 조합에서 일반선형회귀와 Theil-Sen 기울기의 부호가 일치하였다. 부호가 일치하지 않은 Albay Q1, Masbate Q2 및 Masbate Q3은 일반선형회귀 기울기가 0에 가까운 조합으로, 작은 자료변화에도 기울기 방향이 달라질 수 있는 경우였다.

Catanduanes Q4, Sorsogon Q3 및 Camarines Sur Q2에서는 일반선형회귀와 Theil-Sen 추정기울기의 방향이 일치하였다. 따라서 이들 조합에서 관찰된 반응방향이 소수의 극단값에 의해서만 결정되었다고 보기는 어려웠다. 다만 두 회귀방법 사이에서 기울기의 크기가 크게 달라지는 조합도 있었으므로, 개별 기울기의 절대크기보다는 반응방향과 다른 분석과의 일치성을 중심으로 해석하였다.

총 24개 주-분기 조합에 대해 Benjamini-Hochberg 절차로 false discovery rate를 보정한 결과, 보정 후 통계적으로 유의한 관계는 유지되지 않았다. 따라서 Catanduanes Q4와 Sorsogon Q3 등에서 비교적 큰 양의 기울기가 관찰되었더라도, 이를 Bicol Region에서 일반적으로 성립하는 ENSO 효과로 해석할 수는 없다. 본 절의 결과는 Niño 3.4 SSTA에 대한 지역·재배 분기별 수량 반응의 방향과 상대적 크기를 비교하고, ENSO 위상별 분석에서 나타난 패턴이 연속적인 SSTA 분석에서도 반복되는지를 검토하기 위한 탐색적 결과로 해석하였다.

3.4. ENSO와 옥수수 수량 간 시차 반응

Niño 3.4 SSTA와 수량 이상률 간 시차상관을 L0-L4 범위에서 분석한 결과, 최대 절대상관이 나타난 시차는 주와 재배분기에 따라 달랐다. Fig. 5에는 24개 주

-분기 조합 가운데 최대 절대상관계수가 가장 큰 상위 6개 조합을 제시하였다. Sorsogon Q3에서는 수확분기와 동일한 시기인 L0에서 최대상관이 나타났으며 ($r = 0.411$), Q4에서는 한 분기 이전인 L1에서 가장 큰 상관이 나타났다 ($r = 0.430$). 이는 Sorsogon의 중·후반기 옥수수 수량이 동시기 또는 비교적 가까운 선행 ENSO 조건과 연결되었을 가능성을 보여준다.

Catanduanes에서는 Q2, Q3 및 Q4의 최대상관이 각각 L4, L3 및 L2에서 나타났으며, 모두 양의 관계를 보였다. 최대상관계수는 Q2에서 $r = 0.380$, Q3에서 $r = 0.444$, Q4에서 $r = 0.479$ 였다. 이 가운데 Catanduanes Q4의 L2 관계가 Fig. 5에 제시된 조합 중 가장 크게 나타났다. 양의 상관은 선행 Niño 3.4 SSTA가 낮은 La Niña 방향으로 이동할수록 이후 수량 이상률도 낮아지는 관계를 의미한다.

다만 Catanduanes Q2-Q4에서 선택된 L4, L3 및 L2는 서로 다른 독립적인 영향시기라기보다 달력상 동일하거나 유사한 선행 ENSO 기간을 가리킬 가능성이 있다. 연속된 수확분기에서 최대상관 시차가 한 단계씩 짧아진 것은 수량반응 시점이 순차적으로 이동한 결과라기보다, 하나의 공통된 선행기후 조건이 서로 다른 수확분기의 수량과 연결된 결과일 수 있다. 따라서 해당 패턴은 분기별 반응시차의 체계적인 이동이 아니라, 공통적인 선행 ENSO 신호의 가능성으로 해석하였다.

Camarines Norte Q3에서도 L3에서 $r = 0.378$ 의 양의 최대상관이 나타났다. 그러나 다른 분기에서는 동일한 방향과 시차가 반복되지 않아, 이를 Camarines Norte 전체에 공통적인 반응특성으로 판단하기는 어려웠다. 전체적으로 시차분석에서는 동시반응과 1-4분기 이전의 선행반응이 혼재하였으며, Bicol Region 전역에 공통적으로 적용할 수 있는 단일한 반응시차는 확인되지 않았다.

또한 각 주-분기 조합에서 L0-L4 가운데 최대 절대상관을 사후적으로 선택하였으므로, Fig. 5의 상관계수는 표본 내에서 과대평가되었을 가능성이 있다. 따라서 본 시차분석 결과는 확정적인 예측시차나 ENSO의 인과효과를 의미하지 않으며, 향후 검증이 필요한 잠재적 선행신호로 해석하였다. 특히 본 연구에서 확인된 시차관계의 재현성과 예측 가능성을 평가하기 위해서는 독립적인 검증기간을 적용하고, 실제 파종·생육·수확시기와 지역별 강수, 태풍 및 재배환경 자료를 함께 고려할 필요가 있다.

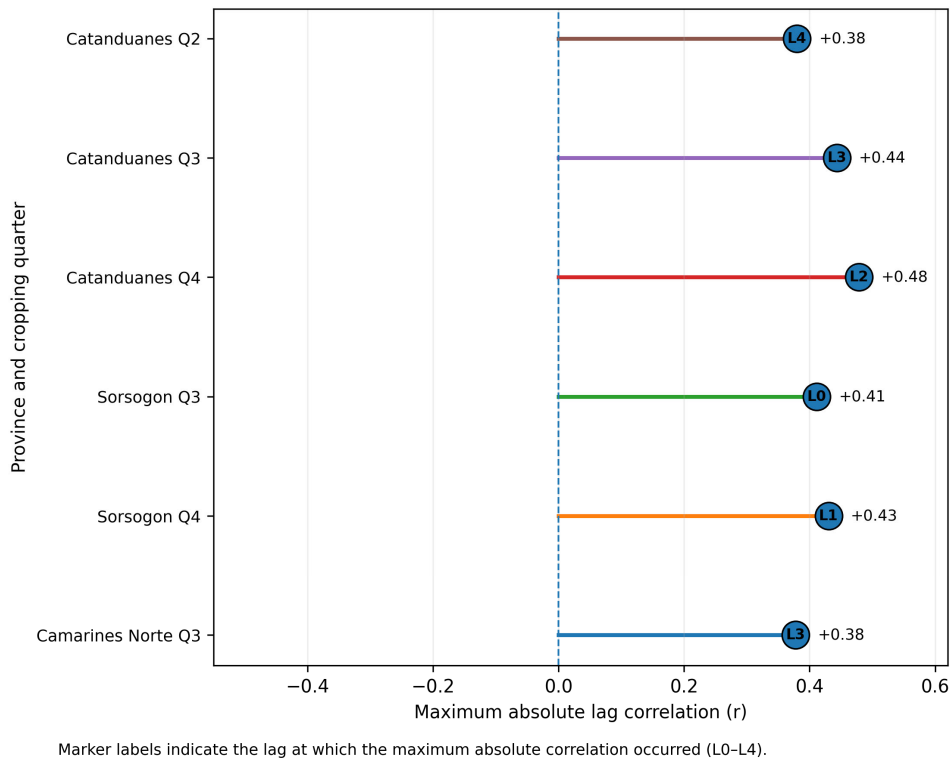


Fig. 5. Peak lagged correlations between Niño 3.4 SSTA and detrended corn yield anomalies for the six province-quarter combinations with the largest maximum absolute correlations in the Bicol Region, 1991–2020. Labels indicate the lag with the maximum absolute correlation across L0–L4.

4. 고찰

본 연구에서 ENSO에 대한 옥수수 수량 반응은 Bicol Region 전체에서 일관되게 나타나지 않았으며, 주와 재배분기에 따라 방향이 달랐다. Catanduanes와 Sorsogon의 일부 분기에서는 La Niña 방향에서 낮은 수량 이상률이 나타난 반면, Camarines Sur와 Albay의 일부 분기에서는 El Niño 방향에서 낮은 수량 이상률이 관찰되었다. 이러한 결과는 ENSO의 농업영향이 지역과 작물, 재배시기에 따라 달라질 수 있다는 선행연구와 부합한다(Iizumi et al., 2014; Heino et al., 2018). 또한 필리핀에서는 ENSO와 강수 및 열대저기압 활동의 관계가 계절에 따라 달라질 수 있어(Lyon et al., 2006; Lyon and Camargo, 2009), 동일한 ENSO 위상에서도 작물의 재배시기와 지역적 기후조건에 따라 수량반응이 달라질 가능성이 있다. 이는 서론에서 언

급한 바와 같이 ENSO가 필리핀 작물생산에 관여하는 여러 기후경로 중 하나이며(Lansigan and Salvacion, 2007), 강수 외의 기후요인 및 계절기후정보의 활용(Lansigan et al., 2007)과 함께 고려되어야 함을 시사한다.

시차분석에서도 단일한 반응시점은 확인되지 않았다. Sorsogon의 일부 분기는 동시기 또는 한 분기 이전의 ENSO 조건과 상대적으로 큰 상관을 보였고, Catanduanes Q2–Q4에서는 2–4분기 이전의 ENSO 조건에서 최대상관이 나타났다. 다만 Catanduanes의 L4, L3 및 L2는 달력상 동일하거나 유사한 선행 ENSO 기간을 가리킬 수 있으므로, 이를 재배분기별 반응시차의 체계적인 이동으로 해석하기는 어렵다. 또한 L0–L4 가운데 최대 절대상관을 사후적으로 선택하였기 때문에, 이 결과는 확정적인 예측시차보다 잠재적인 선행 신호로 해석할 필요가 있다.

ENSO는 광역적인 계절기후 신호이지만, 옥수수 수량은 개별 강풍사건, 강수에 따른 토양 포화, 도복 발생 시점 및 생육단계와 같은 직접적인 기상충격에도 영향을 받을 수 있다. Carter and Hudelson(1988)과 Lindsey et al.(2021)은 옥수수 도복에 따른 수량손실이 발생시기와 생육단계에 따라 크게 달라질 수 있음을 보고하였다. Bicol Region은 태풍과 열대저기압의 영향을 빈번하게 받는 지역이므로, 실제 수량변동에는 ENSO와 관련된 계절강수뿐 아니라 태풍의 최대풍속, 돌풍, 진로, 토양수분 및 작물 생육단계가 복합적으로 작용했을 가능성이 있다. 다만 본 연구에서는 이러한 변수를 직접 분석하지 않았으므로, 이는 후속연구에서 검증해야 할 가설이다.

본 연구의 통계적 검정력에는 뚜렷한 한계가 있다. 일부 주-분기 조합에서는 El Niño 또는 La Niña 표본수가 각각 4-6개에 불과하여, 실제로 존재하는 관계라도 명목 유의수준에서 검출되지 못했을 가능성을 배제할 수 없다. 24개 주-분기 조합에 대한 Benjamin-Hochberg FDR 보정 후 어떠한 관계도 유의성을 유지하지 못한 결과 역시, ENSO-수량 관계가 전혀 존재하지 않는다는 의미로 해석하기보다 현재의 표본크기로는 이를 통계적으로 입증하기 어렵다는 의미로 받아들이는 것이 적절하다. 아울러 비교적 큰 ENSO 관련 차이가 나타난 Catanduanes와 Sorsogon은 Bicol Region 전체 옥수수 생산에서 차지하는 비중이 각각 1% 미만이므로, 이들 주의 결과를 지역 전체 생산의 대표적 반응으로 확대해석해서는 안 된다.

이러한 한계를 고려할 때, 본 연구의 결과는 지역·재배시기별 차이를 보여주는 탐색적 근거로 해석하는 것이 적절하다. 향후에는 보다 긴 관측기간이나 다수 관측지점을 결합하여 표본크기를 확대함으로써 통계적 검정력을 높이는 한편, 독립적인 검증기간과 실제 작물달러, 태풍 및 국지기상 자료를 결합하여 본 연구에서 확인된 패턴의 재현성을 평가할 필요가 있다.

5. 결론

본 연구는 1991~2020년 필리핀 Bicol Region 6개 주를 대상으로 ENSO 위상과 Niño 3.4 해수면온도 이상이 분기별 옥수수 수량에 미치는 영향을 분석하였다. 주-분기별 장기추세를 제거한 수량 이상률을 이용하여 El Niño, Neutral 및 La Niña 조건 간 평균차이를 비교

하고, 연속적인 Niño 3.4 SSTA에 대한 수량 민감도와 최대 4분기까지의 시차관계를 평가하였다.

분석 결과, ENSO에 대한 수량반응의 방향과 크기는 주와 재배분기에 따라 달랐다. Catanduanes와 Sorsogon의 일부 분기에서는 La Niña 방향에서 상대적으로 낮은 수량 이상률이 나타난 반면, Camarines Sur와 Albay의 일부 분기에서는 El Niño 방향에서 낮은 수량 이상률이 관찰되었다. 또한 일부 조합에서는 동시기보다 1-4분기 이전의 ENSO 조건과 더 큰 상관성이 나타났다. 그러나 Bicol Region 전역에 공통적으로 적용할 수 있는 일관된 반응방향이나 단일한 예측시차는 확인되지 않았다.

일부 주-분기 조합에서 비교적 큰 평균차이와 상관관계가 나타났으나, 다중비교에 대한 false discovery rate 보정 후에는 통계적으로 유의한 관계가 유지되지 않았다. 특히 일부 분기의 El Niño와 La Niña 표본수가 제한적이고, 시차분석에서는 L0-L4 가운데 최대 절대상관을 사후적으로 선택하였다는 점을 고려할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서 확인된 결과는 ENSO의 확정적인 수량효과나 예측신호라기보다 지역·재배시기별 차이를 보여주는 탐색적 패턴으로 해석하는 것이 적절하다.

종합하면, ENSO 위상 또는 Niño 3.4 SSTA만으로 Bicol Region의 옥수수 수량 변동을 설명하거나 예측하기에는 한계가 있다. 실제 수량변동에는 ENSO와 관련된 계절기후뿐 아니라 태풍성 강풍과 돌풍, 누적강수량, 토양수분, 도복 발생 및 작물 생육단계와 같은 지역적·사건별 요인이 함께 작용했을 가능성이 있다. 향후 연구에서는 이러한 직접적인 기상·작물피해 변수를 결합하고, 독립적인 검증기간과 실제 작물달러를 이용하여 주별·재배시기별 예측 가능성을 평가할 필요가 있다. 이러한 접근은 광역적인 ENSO 신호와 지역적 기상충격을 구분하고, Bicol Region의 농업기후위험을 보다 구체적으로 평가하는 데 기여할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2023-00212688).

REFERENCES

- Benjamini, Y., Hochberg, Y., 1995, Controlling the false discovery rate: A Practical and powerful approach to multiple testing, *J. R. Stat. Soc. B*, 57(1), 289-300.
- Carter, P. R., Hudelson, K. D., 1988, Influence of simulated wind lodging on corn growth and grain yield, *J. Prod. Agric.*, 1(4), 295-299.
- Heino, M., Puma, M. J., Ward, P. J., Gerten, D., Heck, V., Siebert, S., Kumm, M., 2018, Two-thirds of global cropland area impacted by climate oscillations, *Nat. Commun.*, 9(1), 1257.
- Iizumi, T., Luo, J. J., Challinor, A. J., Sakurai, G., Yokozawa, M., Sakuma, H., Brown, M. E., Yamagata, T., 2014, Impacts of El Niño-Southern Oscillation on the global yields of major crops, *Nat. Commun.*, 5, 3712.
- Lansigan, F. P., de los Santos, W. L., Hansen, J., 2007, Delivering climate forecast products to farmers: Ex post assessment of impacts of climate information on corn production systems in Isabela, Philippines, in: Sivakumar, M. V. K., Hansen, J. (eds.), *Climate Prediction and Agriculture: Advances and Challenges*, Springer, Berlin, 41-48.
- Lansigan, F. P., Salvacion, A. R., 2007, Assessing the effect of climate change on rice and corn yields in selected provinces in the Philippines, *Proceedings of the 10th National Convention on Statistics*, National Statistical Coordination Board, Mandaluyong City, Philippines.
- Lantican, R. M., 2001, *The Science and Practice of Crop Production*, SEAMEO SEARCA and University of the Philippines Los Baños, College, Laguna, Philippines, 330.
- Lindsey, A. J., Carter, P. R., Thomison, P. R., 2021, Impact of imposed root lodging on corn growth and yield, *Agron. J.*, 113(6), 5054-5062.
- Lyon, B., Camargo, S. J., 2009, The seasonally varying influence of ENSO on rainfall and tropical cyclone activity in the Philippines, *Clim. Dyn.*, 32(1), 125-141.
- Lyon, B., Cristi, H., Verceles, E. R., Hilario, F. D., Abastillas, R., 2006, Seasonal reversal of the ENSO rainfall signal in the Philippines, *Geophys. Res. Lett.*, 33(24), L24710.
- Roberts, M. G., Dawe, D., Falcon, W. P., Naylor, R. L., 2009, El Niño-Southern Oscillation impacts on rice production in Luzon, the Philippines, *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 48(8), 1718-1724.
- Sen, P. K., 1968, Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau, *J. Am. Stat. Assoc.*, 63(324), 1379-1389.

-
- Professor. Hana Na
Department of Atmospheric Environment and Information Engineering, Inje University
hanal@inje.ac.kr
 - Master's course. Guevarra Kaye Jelyn
Department of Atmospheric Environment and Information Engineering, Inje University
guevarrakaye03@gmail.com
 - Professor. Woo-Sik Jung
Department of Atmospheric Environment and Information Engineering, Inje University
wsjung1@inje.ac.kr